



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

지구 생물군에 대한 생태경제적 가치 평가



2010년 2월

부경대학교 대학원

환경 공 학 과

최 문 보

공학박사 학위논문

지구 생물군에 대한 생태경제적 가치 평가

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함



2010년 2월

부경대학교 대학원

환 경 공 학 과

최 문 보

崔文輔의 工學博士 學位論文을 認准함

2010년 2월 25일



주	심	공 학 박 사	김 상 단	인
위	원	공 학 박 사	강 대 석	인
위	원	공 학 박 사	성 기 준	인
위	원	이학/의학박사	문 태 영	인
위	원	공 학 박 사	이 석 모	인

목 차

목 차	i
List of Tables	vi
List of Figures	ix
List of Appendices	xii
Abstract	xiv
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	5
1. 가치의 개념과 종류	5
가. 가치의 개념	5
나. 생태경제적 관점에서의 가치	6
다. 경제학적 관점에서의 환경재 가치	8
2. 지구 생물군의 특성	15
가. 지구 생물군의 다양성	15
나. 지구 생물군의 생태적 특성 및 역할	20
3. 에머지 평가법	28
가. 에너지시스템언어	28
나. 시스템생태학	28

다. 에머지 정의	31
라. 에너지변환도(Transformity)	34
마. 에머지-화폐비율(Emergy/Money Ratio, EMR)	34
바. 최대 일률의 원리(Maximum Power Principle)	37
사. 가치평가로서의 에머지	38
4. 연구 사례	40
가. 경제학적 가치 산정법에 의한 자연환경 가치 평가 사례	40
나. 에머지 평가법에 의한 자연환경 가치 평가 사례	47
 III. 연구방법	 50
1. 에머지 분석	50
가. 에너지 시스템 다이어그램 작성	50
나. 에머지 분석표 작성	51
다. 시스템 경계의 설정	52
2. 생물군의 생산성에 대한 에너지 산정	54
가. 육상 및 해양 식물군	54
나. 육상 및 해양 동물군	60
 IV. 결과	 62
1. 지구 육상 식물군의 에머지 평가	62
가. 에너지시스템 다이어그램	62
나. 순일차생산성	62

다. 에머지 분석	66
라. 에너지변환도 산정	70
마. 에머지 보유량 분석	71
2. 지구 육상 동물군의 에머지 평가	73
가. 에너지시스템 다이어그램	73
나. 이차생산성	73
다. 에머지 분석	78
라. 에너지변환도 산정	81
마. 에머지 보유량 분석	82
3. 지구 해양 식물군의 에머지 평가	83
가. 에너지시스템 다이어그램	83
나. 생체량과 순일차생산성	83
다. 에머지 분석	85
라. 에너지변환도 산정	89
마. 에머지 보유량 분석	90
4. 지구 해양 동물군의 에머지 평가	91
가. 에너지시스템 다이어그램	91
나. 이차생산성	91
다. 에머지 분석	94
라. 에너지변환도 산정	95
마. 에머지 보유량 분석	95
5. 지구 생물군의 생태경제학적 가치 평가	97
가. 전세계 에머지 화폐비율 산정을 위한 전세계 에머지 평가	97
나. 육상 식물군의 생산성과 보유량에 대한 생태경제적 가치 평가	99
다. 육상 동물군의 생산성과 보유량에 대한 생태경제적 가치 평가	100

라. 해양 식물군의 생산성과 보유량에 대한 생태경제적 가치 평가	101
마. 해양 동물군의 생산성과 보유량에 대한 생태경제적 가치 평가	102

V. 고 찰. 103

1. 지구 생물권의 생산성에 대한 에너지, 에머지 그리고 에너지변환도	103
2. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에너지	107
3. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에머지	109
4. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에너지 변환도	112
5. 지구 각 생물군의 에너지변환도 비교 및 타당성 검토	116
가. 육상 식물	116
나. 육상 동물	119
다. 해양 식물	122
라. 해양 동물	123
6. 지구 생물군의 에너지변환도에 대한 종합적 검토	126
7. 지구 생물군의 생태경제적 가치	130
8. 지구 현존 보유량 비교	139
9. 자료 선정의 한계점	141

VI. 결 론 143

VII. Appendix 148

VIII. 참 고 문 헌	188
감사의 글	211



List of Tables

Table 1. The classification of global plants	18
Table 2. The classification of global animals	19
Table 3. Summary of economic analysis of ecosystem and ecological services	43
Table 4. Summary of economic analysis of organism value	46
Table 5. General format of the emergy evaluation table	51
Table 6. The area of biome in global area	53
Table 7. Net primary production of biomes of the earth	65
Table 8. Comparison of the net primary production of each biome type	66
Table 9. Energy inputs to each biome type	67
Table 10. Emergy evaluation for the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms and angiosperms	69
Table 11. Transformities of the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms, and angiosperms	70
Table 12. Phytomass estimation of the global plant groups for the terrestrial plants emergy evaluation	72
Table 13. Emergy evaluation for storages of the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms, and angiosperms	72
Table 14. Biomass and Secondary production of terrestrial animal group	75
Table 15. Secondary production of herbivores, carnivores and	

detritivores	77
Table 16. Transformities of the global terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores	81
Table 17. Emergy evaluation for storage of the global terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores	82
Table 18. Biomass and net primary production of the global ocean ecosystem	85
Table 19. Energy inputs to ocean ecosystem	87
Table 20. Emergy evaluation for the global marine plants, phytoplankton and seaweeds	88
Table 21. Transformities of the global marine plants, phytoplankton and seaweeds	89
Table 22. Emergy evaluation for storages of the global marine, phytoplankton and seaweeds	90
Table 23. Biomass and secondary production of marine animal group	93
Table 24. Transformities of the global marine animals, zooplankton, nekton and benthos	96
Table 25. Emergy evaluation for storage of the global marine animals, zooplankton, nekton and benthos	96
Table 26. Flux of renewable and nonrenewable energies driving global processes	98
Table 27. Ecological economic value of terrestrial plants, bryophytes, gymnosperm and angiosperms	99
Table 28. Ecological economic value of terrestrial animals, herbivores,	

carnivores and detritivores	100
Table 29. Ecological economic value of marine plants, phytoplankton and seaweeds	101
Table 30. Ecological economic value of marine animals, zooplankton, nekton and benthos	102
Table 31. Summary of ecological economic value of global organisms	137
Table 32. Summary of average global value of annual ecosystem services	138



List of Figures

Fig. 1. The classification of environmental values	9
Fig. 2. Five kingdoms of global organisms	16
Fig. 3. Symbols of the energy systems language	29
Fig. 4. The methodological roots of systems ecology	32
Fig. 5. Emergy quality chain used to calculate solar transformity	33
Fig. 6. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity	35
Fig. 7. Emergy inputs used to evaluate the emergy/money ratio of the national economy	36
Fig. 8. Systems diagram of the autocatalytic storage to energy transformation process	38
Fig. 9. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right	51
Fig. 10. The calculation process of net primary production(NPP) of terrestrial plants per each taxon	57
Fig. 11. Assumption of net primary production and biomass of each biome type	58
Fig. 12. Measurement method of input energy required emergy analysis	59
Fig. 13. The calculation process of secondary production of terrestrial animals	61

Fig. 14. Energy systems diagram for the global terrestrial ecosystem ·	63
Fig. 15. Energy systems diagram for the global terrestrial animals ·····	74
Fig. 16. Energy, emergy and transformity of terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores ·····	80
Fig. 17. Energy systems diagram for the global marine ecosystem ·····	84
Fig. 18. Energy systems diagram for the global marine animals ·····	92
Fig. 19. Energy flows of products in geobiosphere ·····	104
Fig. 20. Emergy flows of products in geobiosphere ·····	105
Fig. 21. Transformities of products in geobiosphere ·····	106
Fig. 22. Energy flows of terrestrial and marine organism in global ecosystem ·····	108
Fig. 23. Emergy flows of terrestrial and marine organisms in global ecosystem ·····	111
Fig. 24. Transformities flows of terrestrial and marine organisms in global ecosystem ·····	113
Fig. 25. Energy transformation hierarchy of terrestrial plant and animal ·····	114
Fig. 26. Energy transformation hierarchy of marine plant and animal ·····	115
Fig. 27. Comparison of reference and this study transformities of the terrestrial plants ·····	118
Fig. 28. Comparison of reference and this study transformities of the herbivores, carnivores and detritivores ·····	121
Fig. 29. Comparison of reference and this study transformities of the zooplankton, benthos and nekton ·····	125

Fig. 30. Transformities of the global organism	126
Fig. 31. Comparison of reference and this study transformities of the terrestrial plants, terrestrial animals, marine plants and marine animals	129
Fig. 32. Comparison of storage value of renewable resources, national economic wealth and global organisms	140



List of Appendices

Appendix 1. Emergy analysis of arctic tundra ecosystem	148
Appendix 2. Emergy analysis of boreal forest ecosystem	149
Appendix 3. Emergy analysis of temperate (deciduous) forest ecosystem	150
Appendix 4. Emergy analysis of temperate (coniferous) forest ecosystem	151
Appendix 5. Emergy analysis of temperate grassland ecosystem	152
Appendix 6. Emergy analysis of mediterranean shrubland ecosystem	153
Appendix 7. Emergy analysis of crops ecosystem	154
Appendix 8. Emergy analysis of tropical savanna and grassland ecosystem	155
Appendix 9. Emergy analysis of desert ecosystem	156
Appendix 10. Emergy analysis of tropical rain forest ecosystem	157
Appendix 11. Emergy analysis of bryophytes	158
Appendix 12. Emergy analysis of gymnosperms	159
Appendix 13. Emergy analysis of angiosperms	160
Appendix 14. Emergy analysis of terrestrial plants	161
Appendix 15. Insolation of each biome	162
Appendix 16. Albedo of each biome	164
Appendix 17. Wind velocity of each biome	167
Appendix 18. Emergy analysis of phytoplankton	169

Appendix 19. Emergy analysis of seaweeds	170
Appendix 20. Albedo of ocean surface	171
Appendix 21. Comparison of transformites of terrestrial plants and ecosystems	172
Appendix 22. Comparison of transformites of terrestrial animals	175
Appendix 23. Comparison of transformites of marine plants	180
Appendix 24. Comparison of transformites of marine animals	181
Appendix 25. Emergy analysis of global processes	183



Ecological Economic Value of Global Organisms

Mun Bo Choi

Department of Environmental Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In this study, we have classified plants and animals of terrestrial ecosystem and marine ecosystem by taxon, trophic level and habitation characteristic in order to conduct an evaluation on the emergy, storage emergy, transformity and the ecological economic value.

Total annual emergy of the terrestrial plants was $1.58\text{E}+25$ sej/yr which consists of $1.28\text{E}+24$ sej/yr to be used by bryophyte, and $1.95\text{E}+24$ sej/yr by gymnosperm, and $1.15\text{E}+25$ sej/yr by angiosperms. The emergy stored in the terrestrial plants was $1.76\text{E}+26$ sej, out of which $1.28\text{E}+25$ sej stored in bryophyte, $4.13\text{E}+25$ sej in gymnosperm, and $1.14\text{E}+26$ sej in angiosperms.

Total annual emergy of the terrestrial animals was $6.99\text{E}+24$ sej/yr which consists of $4.76\text{E}+24$ sej/yr to be used by herbivores, $4.98\text{E}+24$ sej/yr by carnivores, and $2.23\text{E}+24$ sej/yr by detritivore. The emergy stored in the terrestrial animals was $2.75\text{E}+24$ sej, out of which $1.62\text{E}+24$ sej stored in herbivores, $1.70\text{E}+24$ sej in carnivores, and $1.07\text{E}+24$ sej in detritivore.

Total annual emergy of the marine plants was $1.58\text{E}+25$ sej/yr which consists of $1.55\text{E}+25$ sej/yr to be used by phytoplankton, $3.46\text{E}+23$ sej/yr by seaweeds. The emergy stored in the marine plants was $2.27\text{E}+23$ sej, out of which $1.19\text{E}+23$ sej stored in phytoplankton, $2.76\text{E}+23$ sej in seaweeds.

Total annual emergy of the marine animals was $8.36\text{E}+24$ sej/yr which

consists of $5.34\text{E}+24$ sej/yr to be used by zooplankton, $2.33\text{E}+24$ sej/yr by nekton, and $1.22\text{E}+24$ sej/yr by benthos. The emergy stored in the marine animals was $1.92\text{E}+24$ sej, out of which $2.67\text{E}+23$ sej stored in zooplankton, $1.40\text{E}+24$ sej in nekton, and $6.38\text{E}+23$ sej in benthos.

The solar transformity for the terrestrial plants was calculated as $7.43\text{E}+03$ sej/J. For each plant group, transformity was $1.78\text{E}+04$ sej/J for bryophyte, $8.55\text{E}+03$ sej/J for gymnosperm, and $6.28\text{E}+03$ sej/J for angiosperms. Terrestrial animals was calculated as $7.50\text{E}+04$ sej/J. For each animal group, transformity was $9.02\text{E}+04$ sej/J for herbivores, $8.50\text{E}+05$ sej/J for carnivores, and $6.46\text{E}+03$ sej/J for detritivore. Marine plants was calculated as $5.43\text{E}+03$ sej/J. For each plant group, transformity was $5.27\text{E}+03$ sej/J for phytoplankton, $1.38\text{E}+04$ sej/J for seaweeds. Marine animals was calculated as $9.35\text{E}+04$ sej/J. For each animal group, transformity was $9.13\text{E}+04$ sej/J for zooplankton, $1.19\text{E}+05$ sej/J for nekton, and $1.09\text{E}+05$ sej/J for benthos.

Values indicated in this paper are average values estimated based on conditions of each or all global organism ranged in each region. These values may not be utilized direct in species whose hierarchy are clear but may present a standard of transformity of each organisms.

The total production emergy of the earth system is $15.83\text{E}+24$ sej/yr. As main streams of energy in the earth such as wind, rain, rivers and current are networked and functioning each other, each emergy amounting $15.83\text{E}+24$ sej/yr is being transferred to the ocean and crust respectively, and the plant community which are using this emergy is again splitted by taxon and converted to terrestrial animals which are consumers, and it is again divided to the part which terrestrial animals are consuming directly and the remainder, thus finally the sum of the total emergy per each trophic level and the remained detritus equals the first input value of $15.83\text{E}+24$ sej/yr. So, when we collectively estimate values of the energy, the emergy and the transformity computed by each organism and see its stream, the amount of energy is decreasing gradually as it moves from the plant to the animal but the quality of energy increased so that we could understand at a glance the earth energy,

energy and transformity. Thus, the result of this study that analyzed ecological economic value of all organisms of the earth, and also analyzed collectively the value of plants and animals of the terrestrial and marine ecosystem by classifying by taxon, trophic level and habitation characteristic is believed to be the first valuable case in not only for the energy field but also for the ecological economic value evaluation of all organism of the earth.

The emdollar values were calculated to determine approximate monetary values for production and storage of the global organisms. The ecological economic value of the annual terrestrial plants production was 11.25 trillion Em\$/yr for all the plants, 0.91 trillion Em\$/yr for bryophyte, 1.39 trillion Em\$/yr for gymnosperm, and 8.15 trillion Em\$/yr for angiosperms. The ecological economic value stored in the terrestrial plant biomass was 125.35 trillion Em\$ for all the terrestrial plants, 9.06 trillion Em\$ for bryophyte, 29.30 trillion Em\$ for gymnosperm, and 81.10 trillion Em\$ for angiosperms.

The ecological economic value of the annual terrestrial animals production was 4.96 trillion Em\$/yr for all the plants, 3.38 trillion Em\$/yr for herbivores, 3.53 trillion Em\$/yr for carnivores, and 1.58 trillion Em\$/yr for detritivore. The ecological economic value stored in the terrestrial animals biomass was 1.95 trillion Em\$ for all the terrestrial animals, 1.15 trillion Em\$ for herbivores, 1.21 trillion Em\$ for carnivores, and 0.76 trillion Em\$ for detritivore. The ecological economic value of the annual marine plants production was 11.25 trillion Em\$/yr for the all the plants, 11.00 trillion Em\$/yr for phytoplankton, 0.25 trillion Em\$/yr for seaweeds. The ecological economic value stored in the marine plant biomass was 0.28 trillion Em\$ for all the marine plants, 0.08 trillion Em\$ for phytoplankton, 0.20 trillion Em\$ for seaweeds. The ecological economic value of the annual marine animals production was 5.93 trillion Em\$/yr for all the plants, 3.79 trillion Em\$/yr for zooplankton, 1.65 trillion Em\$/yr for nekton, and 0.87 trillion Em\$/yr for benthos. The ecological economic value stored in the marine animals biomass was 1.36 trillion Em\$ for all the marine animals, 0.19 trillion Em\$ for zooplankton, 0.99 trillion Em\$ for nekton, and 0.45 trillion Em\$ for benthos.

In order to compare storage value of the global organism estimated by

energy analysis, we have estimated the nonrenewable resource of the earth and the storage of economic value by each country. In the consequence, the nonrenewable resource was the highest, amounting to 1,927 trillion Em\$ by 78.67%, the storage of economic value was 458 trillion Em\$ by 18.23%, and the global organism which is also the result of this study was 126 trillion Em\$ by 5.09%, which, even though taking a less portion than other resources, was known to be very big and important comparing to the amount of economic wealth of the earth taking by 28%. Also since the value of productivity which global organism has is high, its role for the earth environment seems to be great.

The result of this value evaluation would be enough to recognize the importance of values of the global organism which we can easily overlook. Also it may provoke the sense of crisis for decreasing global organism and a consciousness of its proper preservation. Further, it will remind normal persons of the importance and roles of organism, and will be used as a important data with which decision makers of environment policies can judge problems more objectively. For specialists, as it presents the importance of organisms by an economic validity, it might be utilized as an important mean to judge collectively including what they may easily overlook for providing environment policies.

I. 서론

과거로부터 인류는 자연의 한 구성원이라는 의식 속에서 자연적으로 인간과 자연의 공존을 모색해 왔다. 그러나 산업혁명 이후 인류는 산업화 및 도시화가 진행됨에 따라 지구의 다양한 생태계 및 서식지가 파괴되면서 그로 인해 다양한 환경 문제가 대두되기 시작했다. 결국 이런 개발을 통해 무분별하게 환경을 이용한 인간이 직접적으로 이를 관리하지 않으면 삶의 근간이 되는 환경에 돌이킬 수 없는 변화를 맞이하게 될지도 모를 일이다. 그러나 지금의 사회 구조상 자연환경의 개발은 피할 수 없는 것이고 또한 맹목적으로 환경을 보존해야 된다는 생각은 분명 우리가 감당해야 될 불편이 있다는 것을 인식해야 된다. 따라서 이런 개발과 보전의 적절한 소통을 위하여 2002년 남아프리카공화국의 요하네스버그에서 지속가능발전 세계정상회의(World Summit on Sustainable Development)가 개최되면서 지속가능한 발전(sustainable development)이라는 화두를 통해 인간이 얼마나 자연과 공존할 수 있는가에 대한 세계 각지의 공통된 의지를 보여주게 되었다.

이렇듯, 전 지구적으로 나타나는 환경파괴를 필두로 하여 다양한 환경변화가 감지되고 있는데, 그 중 가장 직접적으로 영향을 받는 대상중의 하나가 바로 지구 생물군일 것이다. 생물들은 주변 환경의 변화가 경미하게 일어날지라도 그에 따른 반응은 매우 심각하게 받아들일 수 있어 전 지구적인 환경변화는 대상 생물군의 멸종 또는 집단 감소를 시키는 주요인이 된다.

지구 생물군은 지구 생태계의 순환과 유지에 매우 많은 역할을 하고 있는데, 식물은 일차생산자(primary producer)로서 태양 에너지를 유기물로 전환시켜 생태계의 에너지 및 물질 흐름의 출발점으로 기능하고 지구상의 대부분을 차지하는 호기성 생물들의 호흡에 필요한 산소를 광합성 부산물

로 방출함에 따라 지구 생태계를 유지하는 근원생물체의 역할을 하고 있다. 동물은 소비자의 형태로 있기 때문에 태양 에너지를 통해 생산된 식물체(탄소화합물)를 이용하여 이를 2차생산과 생체량으로 그 양을 저장하고 이들이 다시 토양의 영양원으로 되돌아가는 피드백 작용을 통해 영양물질 및 에너지 순환의 큰 축을 담당하고 있다. 또한 식물의 수분작용이나 종자 확산, 밀도 조절, 생물학적 방제, 각종 오염물의 정화 등 생태계의 균형을 유지하기 위해 많은 역할을 하고 있다. 이런 생물군의 존재와 그 역할에 의해 인류는 많은 식량을 제공받게 되고 또한 자연에서 얻을 수 있는 다양한 생산품들 즉, 의약품, 목재, 원료 등을 이용할 수 있게 된다. 또한 우리가 직접적으로 느끼지는 못하지만 다양한 생물적 작용으로 인해 홍수방지나 대기, 물의 정화와 같은 쾌적한 환경적 서비스를 제공받게 된다.

그러나 이러한 생물들은 주변에서 매우 흔하게 접할 수 있는 특성상 무한자원으로 인식하는 경향이 많아 일부 보호종을 제외하고는 대부분의 생물자체의 본질적 가치에 대해서는 크게 의미를 두지 않는다. 따라서 생물자원과 자연 자원의 중요성에 대한 가치를 증명해 보인다는 것은 이러한 생물들의 중요성을 인식하는데 결정적 역할을 할 수 있다.

일반적으로 목재는 자연재의 한부분이지만 시장에서 거래가 가능한 재화와 용역의 형태로 전환된 경우에는 화폐단위를 이용하여 경제적 가치를 평가할 수 있다(Chopra, 1993). 그러나 일반적인 생물군의 경우 직접적으로 우리가 이용을 하기 보다는 간접적 이용이 많기 때문에 그에 대한 직접적인 가치를 평가하기란 매우 힘든 일이다. 이러한 배경에 의해 다양한 경제학적 가치평가 방법이 제시되면서 다양한 생물종이나 환경재에 대한 가치가 여러 가지 각도에서 평가되어져 왔다(Garrod & Willis, 1999; Nunes et al., 2003). 그러나 기존의 전통적인 경제학적 가치 평가법은 자연환경이 우리 경제에 직접적으로 기여하는 가치만을 다루어 왔다. 그러나 다양한 연

구들을 통해 자연환경이 우리 경제에 기여하는 기능들 중에는 시장 경제의 가치로 변환하기 힘든 일부 항목들도 있음을 밝혀냈다. 즉 생태계나 생물이 주는 서비스의 경우 우리의 삶을 유지하는데 반드시 필요하지만 이러한 서비스가 갖는 가치를 수요자의 지불의사(willingness-to-pay)에 기초를 둔 시장가격만으로 평가해서는 안 된다는 것이다.

또한 경제학적 방법은 매우 다양한 각도에서 분석방법과 평가기준이 제시되고 있기 때문에 분석 대상에 따라 각각의 결과가 다르게 도출되는 경우가 많이 나타나고 있다. 따라서 자연 및 생물자원이 가지고 있는 여러 가지 기능들을 더 정확하고 객관적으로 평가하기 위해서는 지금까지의 경제학적 방법보다는 동일 기준에서 객관적으로 평가할 새로운 가치평가법의 필요가 요구되어졌고, 여러 생태학자들 또한 기존의 경제학적 방법이 인간 중심의 관점에서 자연생태계가 우리 경제에 기여하는 진정한 가치를 제대로 평가하지 못한다함에 따라 다른 시각에서 자연생태계의 기여가치를 평가하여 생태계 관리에 새로운 안목을 제시할 수 있는 평가방법의 도입이 필요하다고 하였다.

결국 이런 문제점들을 해결하기 위해서는 인간 중심의 관점이 아닌 자연환경의 일까지 포함될 수 있는 진정한 가치평가가 이뤄져야 하는데 미국의 생태학자 H.T. Odum은 기존의 경제학적인 방법들이 가지는 관점이나 방법론을 좀 더 객관적이고 과학적으로 분석할 수 있고 단일 기준의 평가 방법론인 에머지 평가법을 제시하면서 대상에 대한 직·간접적 에너지와 물질을 종합적으로 평가할 수 있도록 하였다.

따라서 본 연구는 그동안 기존의 경제학적 가치평가 방법에서 제시한 인간 중심의 관점에서 벗어나 자연이 기여하는 가치까지 종합적으로 평가할 수 있는 에머지 개념과 방법론을 이용하여 지구 생물군의 생태경제적 가치평가를 실시할 것이다. 그 첫 번째 단계로 각 생물군의 생산성 자료를 통

해 에너지값을 산정하고 외부 유입 에너지를 통해 각각의 생산 에머지 값을 산정할 것이다. 두 번째로 대상의 에너지 계층구조에 따른 에너지 흐름이나 보유량에 대한 질(quality)의 척도로 나타낼 수 있는 에너지변환도를 산정할 것이다. 에너지변환도는 에머지 분석에서 필수적인 요소로 앞서 산정된 각각의 에너지값과 에머지값을 통해 계산되어진다. 또한 각 지구 생물군의 에너지변환도값 뿐만 아니라 각 분류군별, 영양 상태별, 서식 기능별로 산정하여 각각의 생물군에 직접적으로 적용할 수 있는 값을 제시할 것이다. 세 번째로 앞서 제시된 에너지변환도와 기존의 생체량 자료를 통해 지구 생물군의 각 보유량을 에머지로 산정할 것이다. 따라서 마지막으로 각각의 생물군에 제시된 생산 에머지, 보유량 에머지와 2008년 에머지 화폐비율을 통해 지구 생물군의 생태경제적 가치평가를 실시하는데, 이 역시 각 생물군 뿐만 아니라 분류군, 영양상태, 서식 기능별로 구분하여 그 가치를 분석할 것이다.

이는 결국 지구 생물군에 대한 가치를 화폐단위로 전환시켜 가시적으로 그 중요성을 증명해 보일 수 있기 때문에 일반인들에게 지구 생물의 중요성에 대한 인식의 전환을 시킬 수 있을 뿐만 아니라 정책 결정자들에게도 생물에 대한 중요성과 정당성을 인식시키는데 결정적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

II. 이론적 배경

1. 가치의 개념과 종류

가. 가치의 개념

가치의 사전적 의미를 보면 “사물이 지니고 있는 쓸모성“, “대상이 인간과의 관계에 의하여 지니게 되는 중요성“, “인간의 욕구나 관심의 대상 또는 목표가 되는 진, 선, 미 등을 통틀어 쓰는 말“이라고 정의되어 있다.

가치란 우리가 추구하는 대상이고 좋아하고 싫어하는 것을 구분하는 기준이며, 어떤 문제에 있어 그것을 판단하는 척도로 작용되기도 한다. 가치 윤리학에서는 쾌적가치, 생명가치, 정신가치, 종교적 가치와 같이 가치를 4가지 서열로 나누어 그 중요성을 나타내기도 하였다.

한편, 현 시장경제 시스템에서 ‘가치 있는 것’ 이라고 여기는 대상은 어떠한 공정을 통하여 생산된 재화들이 시장에 공급되고, 이를 소비하는 여러 사람들과의 협의에 의해 ‘가격’이라는 가치가 결정된다. 이렇게 결정된 가격은 시장에서 다양한 경로를 통해 재화가 매매되고 유통되게 하는 기능을 하게 된다.

그러나 우리 주변에서 쉽게 접할 수 있는 맑은 물, 공기, 숲과 같은 자연 환경이나 생물다양성과 같이 어떠한 가격을 지불하지 않고 누구나 느낄 수 있는 공유자원(common property resources)들은 매매나 유통이 불가능한 비사용 대상들이기 때문에 막연히 그 중요성과 가치는 인식하지만 현 시장경제의 기준인 가격으로는 그 가치를 잘 언급하지 않는다. 또한 이런 공유 자원들은 누구나 쉽게 무상으로 느낄 수 있는 무한자원이라는 사고가 깊게 자리 잡고 있어 이를 매우 낮게 평가하거나 쉽게 소비해 버리는 대상으로

생각하기 쉽다. 따라서 이러한 자연자원에 대한 가치를 인식하기 위해서는
정당한 경제적 분석이 동반된다면 그 가치에 대한 인식이 분명해질 것으로
보인다.

나. 생태경제적 관점에서의 가치

생태경제학(Ecological economics)은 기존의 환경경제학으로부터 분리되
어 진 것으로 단순히 환경에 대한 경제적 가치만을 논하는 것이 아니라 경
제, 생태계, 열역학, 윤리와 같이 자연과학과 사회과학을 융합시켜 환경과
경제의 상호적 관계(interaction), 보전(conservation), 지속성(sustainability)
을 생물리학적 관점에서 다양한 지표를 통해 포괄적으로 대상을 분석하는
방식이다(Jeroen & van den Bergh, 2008).

주로 Kenneth E. Boulding, Nicholas Georgescu Roegen, Herman Daly,
Robert Costanza 등과 같은 생태경제학자들에 의해 그 이론과 정책제시가
이뤄지고 있는데, 생태경제학의 정의에 대해서는 아직 이론적 근거와 틀,
구조가 명확하지 않아 정확한 정의를 내리지 못하고 있는 실정이다. 그러
나 Faber(2008)는 자연(nature), 정당성(justice), 그리고 시간(time)을 중심
으로 세대간의 공정성(intergenerational equity), 환경변화의 비가역성
(irreversibility of environmental change), 지속가능개발(sustainable
development) 등의 논쟁에 대해 생태경제적 분석 및 가치평가가 그 답을
줄 수 있을 것으로 평가하였다. 이렇듯 아직 생태경제학이라는 학문 자체
가 이론적인 확립이 불명확하다보니 이를 통한 가치에 대한 정의도 명확하
게 제시되지는 못하고 있다.

그러나 기존의 경제학적 관점에서 이루어진 가치평가 방법의 문제점을
통해 생태경제적 가치에 대한 기본적 의의를 찾아볼 수 있을 것으로 보인다.

기존의 자연 환경의 가치에 대한 평가는 사람들이 해당 재화와 용역에 대해 지불하고자 하는 지불의사(willingness-to-pay)를 기반으로 하여 시장 경제의 단위인 화폐 가격을 통해 그 대상의 가치를 인식하여 왔다. 이런 경제학적 방식은 자연환경이 우리 경제에 직접적으로 기여하는 가치만 다루고 있다. 즉, 자연자원의 획득과 처리에 들어간 인간의 용역에 대해서만 그 가치를 인정할 뿐 자연환경이 한 일에 대한 부분은 전혀 고려하지 못하고 있으며 이를 평가할 수 있는 방법 또한 부족하다고 많은 생태경제학자들이 비판하였다. 따라서 대상의 직접적인 가치뿐만 아니라 간접적인 가치 역시 평가되어 대상의 본질적인 가치를 파악해야 된다고 주장하였다 (Odum, 1996).

이런 가치는 H.T. Odum에 의해 제시된 에머지 분석법에 의해 그 가치 평가가 가능한데, 강(2003)은 Odum(1999)을 인용하여 언급하여 듯이 “시장 가치와 에머지가치(생태경제적 가치)는 각각 receiver value와 donor value로 나눌 수 있는데 시장가치는 경제활동을 통해 생산된 재화와 용역의 가치를 소비자의 지불의사에 기초하여 평가하지만 에머지 가치(생태경제적 가치)는 생산과정에 소요된 모든 에너지량에 의해 결정된다” 라고 하였다. 즉, 기존의 경제학적 관점에서 구분된 환경재의 가치의 개념은 그 대상의 보이는 일부분만의 가치 또는 인간 중심에서 직접적으로 이용하는 가치의 개념이기 때문에 그 대상의 모든 부분을 포함한 진정한 가치라고 할 수 없다. 그러나 에머지 방법을 통한 가치평가는 대상에 대한 직-간접적인 모든 부분을 포함하여 그 대상의 진정한 가치를 대변하고 있는 것이다.

결국 앞서 언급된 생태경제학적 가치의 의미는 환경, 생태계, 생물군과 같은 비시장재에 대한 가치를 논의할 때 단순히 인간 중심에서 그 대상의 직접적인 가치뿐만 아니라 잠재적으로 내재된 간접적 가치를 모두 포함한 본질적 가치 (intrinsic value)가 우리에게 필요한 생태경제적 가치의 의미라고 볼 수 있다.

다. 경제학적 관점에서의 환경재 가치

경제학적 관점에서의 환경재에 대한 가치 구분은 여러 학자들에 의해 정리되어졌는데, Fig. 1에서 보듯이 가장 일반적으로 A형(Krutilla, 1967; Pearce, 1993)과 B형(McNeely, 1988)의 형태로 나뉜다. A형을 보면 크게 사용가치와 비사용가치로 나뉘지는데, 사용가치는 직접사용가치와 간접사용가치 그리고 선택가치로 나뉘었으며, 비사용가치에는 존재가치와 유산가치로 구분되어졌다. B형에서 환경가치는 직접가치와 간접가치로 나뉘지는데, 직접가치는 소비적 사용가치, 생산적 사용가치로 구분되며 간접가치에서는 비소비적 사용가치와 선택가치, 존재가치로 구분되어졌다. 의미상으로 일부 항목들이 중첩되기도 하나 각 가치에 따른 특성을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 사용가치(use value)

사람들이 환경재를 지속 가능한 상태로 보전하면서 직-간접적으로 이용함으로써 인해 발생하는 가치를 말한다(Krutilla, 1967; McNeely, 1988). B형에서 나타난 직접가치와 같은 의미를 나타낸다. 예를 들어 환경을 보호함으로써 강 어획량의 생산이 증가하고 산림에서 사냥감이 늘어나 이로 인해 발생하는 편익을 말한다. Pearce(1990)는 사용가치의 범주에 선택가치를 포함시키기도 했다.

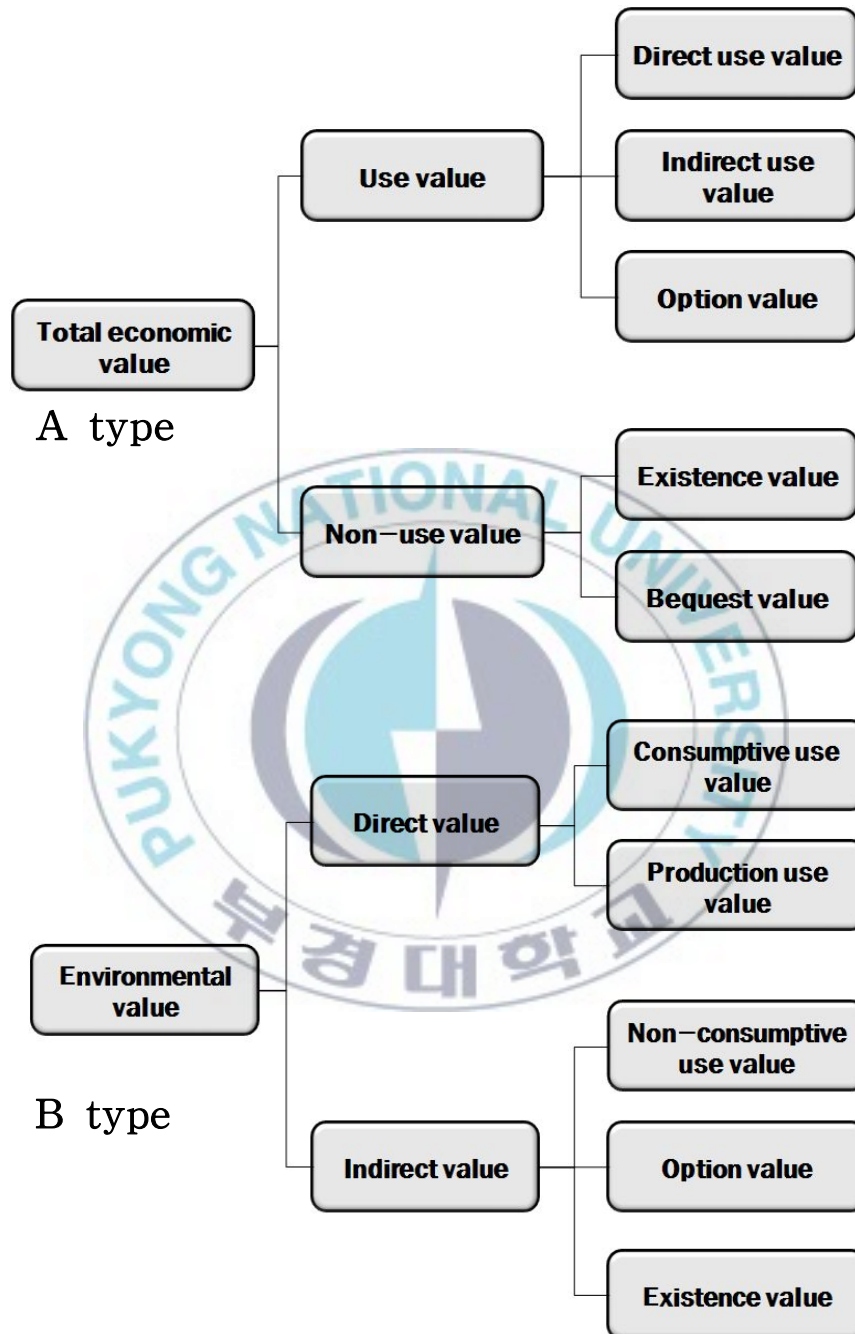


Fig. 1. The classification of environmental values.

A: Krutilla, 1967; Pearce, 1993, B: McNeely, 1998

(2) 비사용가치(non-use value)

실질적으로 현재 또는 미래에 환경재를 직접적으로 사용하는 것과 상관 없이 지니는 가치를 말하는 것으로 사용가치 이외의 가치를 통틀어서 지칭한다(Krutilla, 1967). B형에 나타난 간접가치와 같은 의미를 나타낸다. 비사용가치에는 선택가치, 존재가치, 유산가치 등으로 구분한다.

(3) 직접 사용가치(direct use value)

사용가치 범주에 포함되는 가치로 환경재를 직접적으로 이용해 그것을 소비하면서 얻어지는 가치를 말한다(Krutilla, 1967). 예를 들어 인간은 생명유지를 위해 많은 생물자원들을 직접적으로 소비하게 되는데 이로 인해 발생하는 편익을 말한다.

(4) 간접 사용가치(indirect use value)

자연환경으로부터 직접 이용하거나 파괴하지 않으면서 경제적 이익을 제공하는 환경 서비스와 같은 것이다(UNEP, 1995). 이는 경제적 범주에서 이용되는 상품화나 서비스가 아니기 때문에 GDP에 계산되지는 않는다. 그러나 이런 생태계의 서비스가 제공되지 않는다면 이를 대체하기 위해서는 더 많은 자본과 노력이 들어가기 때문에 매우 중요하다고 볼 수 있다.

예를 들어 카메론에서 산림에 의해 홍수조절 기능과 토양 양분의 유지를 시킬 수 있는 서비스는 \$31/ha로 나타났고(Ruitenbeek, 1989), 필리핀에서 해양 관광 및 수산업을 위한 해양의 서비스는 약 3,000만 \$가 제공되는 것으로 나타났다(Hodgson & Dixon, 1988). 또한 브라질에서 숲에 의해 저장되는 탄소의 양이 \$1,300/ha/yr로 나타났다(Pearce, 1990).

(5) 소비적 사용가치(consumptive use value)

일반 시장에서 매매되지 않고 국지적으로 소비되는 환경재를 말하는 것으로 주변에서 자급 자족식으로 얻는 편익을 말한다(Repetto et al., 1989). 예를 들어 뒷산에서 땀감용으로 나무를 직접 가져와 사용하거나 강가에서 직접 낚시를 해 고기를 잡거나 약초를 캐어 먹는 등 시장에서 매매를 통해서 얻는 편익이 아니라 자력으로 취득하여 소비하는 것을 의미한다. 이는 매우 전통적인 방식으로 시장에서 매매가 이뤄지지 않기 때문에 국가의 GDP에는 반영이 되질 않는다. 이런 특성은 개발도상국이나 후진국과 같이 아직 과거의 전통이 살아 있는 마을이나 일부 미개지역에서 많이 나타난다(Krishnamurthy, 2003). 또한 미국이나 캐나다와 같은 선진국에서도 시골 외곽지역에서 수많은 주민들이 땀감이나 사냥감을 자급하는 것을 볼 수 있다.

(6) 생산적 사용가치(production use value)

이는 자연환경에서 상업적으로 채배되거나 상업적 생산품이 시장을 통해 유통되는 생산물에 주어지는 가치를 말한다(UNEP, 1995). 주로 목재, 수산물, 약용식물, 과일, 채소, 고기, 가죽, 섬유 등 그 범위는 매우 크다고 볼 수 있다. 이들은 실질적으로 시장에서 매매에 의해서 이루어지기 때문에 GDP에 포함된다.

예를 들어 목재는 자연환경에서 얻는 생산물 중 가장 중요한 품목 중의 하나로 이는 각 국가별로 매년 수백억 달러치의 가치를 얻게 한다(Reid & Miller, 1989). 이는 특히 열대 우림이 포함된 인도네시아, 말레이시아, 브라질 등과 같은 열대지역 국가들에 집중되어 있다.

(7) 비소비적 사용가치(non-consumptive use value)

환경에 의해 제공 되어지는 다양한 환경 서비스를 의미한다. 큰 의미에서 간접 사용가치와도 그 의미가 비슷한데 생태계나 생물군들을 우리가 직접적으로 소비하지는 않지만 이들이 무상으로 제공해 주는 여러 가지 기능이나 서비스 등을 통하여 얻는 편익을 말한다(McNeely, 1988).

그 예로 먼저 지구 생태계의 물질순환 기능은 탄소, 수소, 질소, 산소, 황과 같은 필수원소들을 생산자, 소비자, 분해자를 통해 순환되며 이러한 과정은 생태계의 구조를 유지하는데 필수적인 단계이다. 따라서 인간들은 생태계의 물질순환을 통하여 우리가 살 수 있는 건강한 환경을 제공받을 수 있는 것이다.

광합성 작용은 육상식물과 해조류가 태양에너지를 생물 조직에 유입시켜 저장함으로서 소비자들이 이용할 수 있는 일차 생산을 만드는데, 이는 인간에게 음식이나 약품, 목재와 같은 다양한 서비스를 제공한다. 따라서 우리가 광합성을 직접적으로 이용하지는 않지만 그 기능의 결과를 통해 많은 편익을 제공하고 있다.

마지막으로 생태계의 기후조절 기능은 열대지역에서 많은 식물들이 증산 작용을 통해 지면의 열을 기화시켜 낮추는 역할을 하고 추운 지역에서는 방풍림 역할을 통해 그 주변의 온도를 유지시킴에 따라 전 지구적으로 인위적인 에너지 손실 없이 온도조절이 가능하게 된다.

(8) 선택가치(option value)

현재는 사용하지 않지만 미래의 인간 사회에 경제적 이익을 제공할 수 있는 잠재적 이용 가능성이 있어 이를 선택할 수 있는 기회를 제공하는 가치를 말한다(Pearce, 1993; UNEP, 1995; Hussen, 2000). 예를 들면 우리가 지구의 생물다양성을 보전하는 것은 지금의 일부 편익도 물론 포함되어 있

지만, 아직 발견하지 못한 다양한 기능들이 내포되어 있을 가능성이 높기 때문이다. 산림의 많은 식물들이 현재는 그 기능이 밝혀지지 않아 그 유익성을 모르고 있으나 그 종들 중에서는 우리가 미래에 매우 중요한 의약품의 원료물질을 내포하고 있을 가능성이 있기 때문에 지금은 그 가치가 적게 평가되나 나중에는 매우 중요한 가치를 가질 수 있기 때문이다.

(9) 존재가치(existence value)

다양한 매체를 통해 전 세계적으로 사자, 코뿔소, 코끼리, 고래와 같은 대형 야생 동물이 멸종되어져 가는 것을 들으면서 그것을 안타까워하고 보호해야 한다는 생각을 할 것이다. 따라서 희귀종, 주요 서식처, 생태계와 같은 자연 자원을 현재는 전혀 이용하지 않고 있으며 앞으로도 전혀 이용할 가능성이 없지만 그것이 존재한다는 것 자체만으로도 만족스럽게 느끼는 가치를 말한다(Pearce, 1993; UNEP, 1995; Hussen, 2000).

미국에서는 1990년대 Nature Conservancy와 World Wildlife Fund 등을 비롯한 여러 야생생물 보호단체들에게 수십억 달러가 기부되었다(Groombridge, 1992). 이런 단체들은 계속해서 정부에게 주요 야생 동물의 보전에 대한 예산 증감을 요구하고 있다. 또한 열대우림과 산호초와 같은 생물 군집과 경치가 아름다운 곳에도 다양한 사람들과 단체들이 많은 기금을 기부하면서 그 서식처 보호를 위해 지불한다.

국내에서도 각 종 주요 동식물에 대한 천연기념물 지정이나 백령도의 물범 서식지 보호구역 설정, 지리산 반달곰 복원 사업과 같이 국내 주요 생물군에 대한 보전과 그 예산을 설정하여 보호하고 있다. 이런 주요 서식처나 생물군이 위협을 받는다는 소식이 전해지면 많은 사람들이 이를 안타까워 하며 이를 보전하는데 크고 작은 기여를 하는 것들이 이런 존재가치에 대한 하나의 현상이라고 볼 수 있다.

(10) 유산가치(bequest value)

자연환경을 지금은 전혀 이용하지 않고 있으며 가까운 미래에도 이용할 가능성이 없으나 먼 미래 또는 후손들이 그 자연환경을 이용하고 즐길 수 있도록 자연환경을 보전하고 이를 지키기 위해 지불할 용의가 있는 가치를 말한다(Pearce, 1993; UNEP, 1995; Hussen, 2000). 이는 우리가 일반적으로 미래를 위해 환경을 보호하자는 개념이 여기에 속한다. 예를 들어 최근 문제가 되고 있는 지구 온난화 문제는 지금은 우리가 지구 온난화에 따른 큰 피해를 받지 않고 있지만 미래 우리 후손들은 지금 이 상태로는 매우 큰 피해를 받을 수 있기 때문에 지금부터 각 국가별, 개인별로 온실가스를 줄이거나 이를 위한 기금 조성을 내는 것에 동참하는 것을 말한다.



2. 지구 생물군의 특성

가. 지구 생물군의 다양성

아리스토텔레스 시대 이후 생물은 크게 식물류와 동물류로 크게 구분되어졌는데, 식물은 운동성은 없으며 광합성을 통해 스스로 유기물을 합성할 수 있는 독립영양(autotrophs)을 할 수 있는 생물을 총칭했고, 동물은 운동성은 있지만 다른 생물을 섭취해야 하는 종속영양생물(heterotrophs)로 일컬어졌다. 이후 분류학(taxonomy)의 발달로 인하여 생물계는 수많은 종류로 구분되어졌고 지금의 생물 분류 체계는 Whittaker(1969)에 의해 5계 분류 체계를 기준으로 구분 하고 있다(Fig. 2). 이 분류체계를 바탕으로 각 생물계의 기원을 따져보면 원핵생물계(monera)의 시원세균(archaea), 진정세균(eubacteria)에서 원생생물계(protista)가 분화되어졌는데 편모류(flagellated protozoa), 위족류(sarcodine), 섬모류(ciliophora)등은 동물계로 분화되었고 각종 조류(algae)는 식물계로 그리고 점균류(myxomycota), 포자류(sporozoa)는 균계로 분화되어졌다. 각 생물계의 특성을 보면 다음과 같다.

(1) 원핵생물계, 모네라계(Monera)

원핵세포로 된 단세포 생물로 주로 세균(박테리아)을 말한다. DNA는 막으로 싸인 핵 안에 있지 않고 환상으로 되어 있다. 또한 세포 소기관이 없고 세포골격이 없어 체세포성 핵분열을 하지 않는다. 종속영양체(heterotrophs), 광독립영양체(photoautotrophs = 광합성세균), 화학독립영양체(chemoautotrophs) 등으로 구분되는데 그 예로 간균, 구균, 쌍구균, 포도상구균 등이 있다. 전 세계적으로 밝혀진 종수는 약 17,000여종 정도이지만

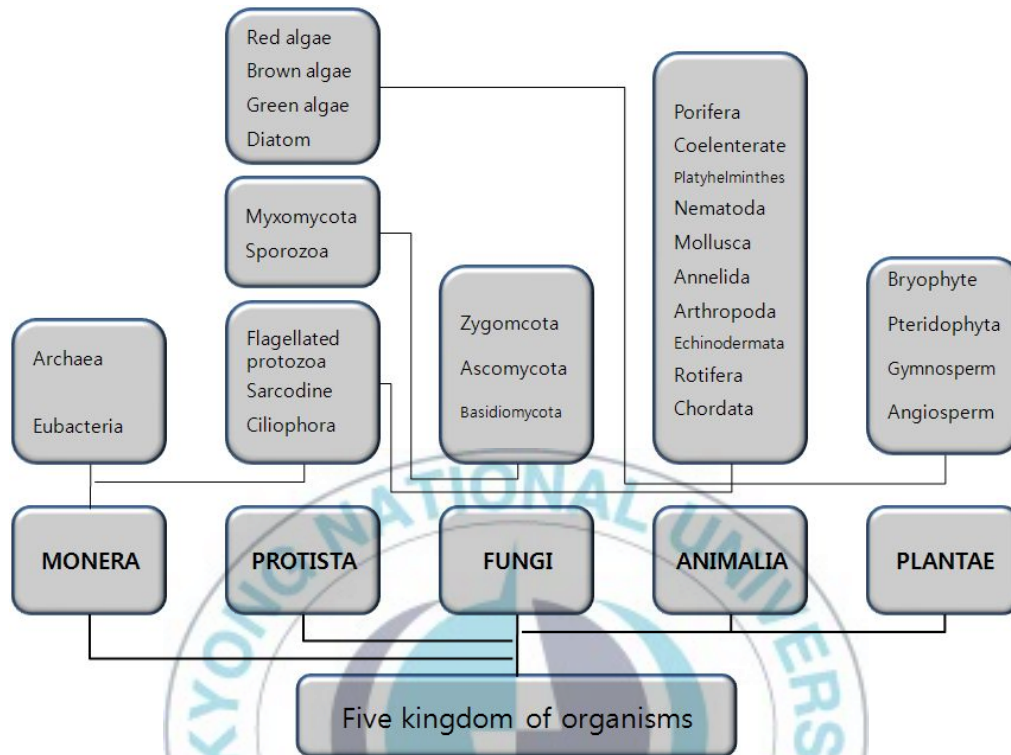


Fig. 2. Five kingdoms of global organisms(Whittaker, 1969)

이는 극히 일부이고 아직 밝혀지지 않은 종의 수가 더 많을 것으로 보고 있다(이 등, 2003).

(2) 원생생물계(Protista)

식물계, 균계, 동물계인 3개의 진보된 계 중에서 어느 하나에 정확히 소속하지 못하는 생물들로 비광합성 원생생물(원생동물류)과 광합성 원생생물(원생생물류: 조류)를 포함하며, 대부분이 단세포 진핵생물이다. 조직 분화가 덜 된 다세포 진핵생물이나 단세포군을 이루는 진핵생물도 속한다. 원생동물, 섬모충, 편모충, 포자충, 조류(algae) 등이 포함된다. 전 세계적으

로 밝혀진 종수는 약 250,000여종 정도이지만, 이는 극히 일부이고 아직 밝혀야 될 종의 수가 더 많을 것으로 보고 있다(이 등, 2003).

(3) 균계(Fungi)

대부분이 다세포성이며, 엽록체가 없어 광합성을 하지 않으며 운동성도 없거나 매우 떨어진다. 자기 스스로 영양물질을 합성하지 않고 외부에서 영양물질인 유기물질을 섭취하는 종속영양체(heterotrophs)이다. 곰팡이, 버섯, 효모(yeast) 등이 포함된다. 전 세계적으로 약 100,000여종이 밝혀져 있으나 이 또한 극히 일부만이 밝혀진 것이다(이 등, 2003).

(4) 식물계(Plantae)

광합성을 하는 고등 생물군으로 보통 엽록소를 통해 광합성을 하며 진핵성세포 중 다세포성 또는 다핵성 생물체이다. 지구 식물군의 분류법은 여러 학자들에 의해 다양하게 제시되었는데, 여기서는 Raven et al.(1992)의 분류법에 따라 총 14문 35만여 종으로 구분하였다. 이들은 대략 조류(algae) 36,300여종, 선태식물 25,000여종, 양치식물 12,000여 종, 겉씨식물과 속씨식물을 합한 종자식물이 285,700여 종, 기타 1,000여 종으로 구분되었다(Table 1).

Table 1. The classification of global plants

Division of plants	Korea name	Number of species
Cyanophyta	남조식물門	2,000
Rhodophyta	홍조식물門	4,000
Chlorophyta	녹조식물門	14,700
Chrysophyta	황갈조식물門	1,000
Pyrrhophyta	황적조식물門	2,000
Cryptophyta	은편모조식물門	200
Phaeophyta	갈조식물門	1,500
Euglenophyta	녹충식물(유글레나)門	900
Bryophyta	선태식물門	25,000
Psilophyta	송엽란門	3
Lycopodiophyta	석송식물門	1,000
Equisetophyta	속새식물門	15
Pteridophyta	양치식물門	12,000
Spermatophyta	종자식물門	285,700
Raven et al., 1992, <i>Biology of plants</i> .		

(5) 동물계(Animalia)

소화에 의해 영양을 이용하는 고등 생물군으로 유기물을 직접 합성할 수 없고 식물이나 다른 동물을 통해서만 유기물을 합성하여 생존할 수 있다. 지금의 동물계의 분류체계는 Hickman et al.(1984)에 의해 총 34문으로 구분되어졌는데, 이는 육상과 해양을 합한 것으로 그 종수는 약 200만 여종 정도 된다(Table 2). 그러나 이는 선형동물이나 절지동물과 같이 아직 밝혀지지 않은 미소 동물군들이 많아 그 수는 훨씬 더 많을 것으로 예측된다(이 등, 2000b).

Table 2. The classification of global animals

Phylum of animalia	Korea name	Number of Species
Porifera	해면동물門	10,000
Cnidaria	자포동물門	10,000
Ctenophora	유즐동물門	100
Rhombzoa	능형동물門	75
Platyhelminthes	편형동물門	25,000
Mesozoa	중생동물門	85
Orthonecta	직유동물門	10
Gnathostomula	악구동물門	100
Gastrotricha	복모동물門	450
Nematoda	선형동물門	1,000,000
Kinorhyncha	동문동물門	150
Loricifera	동갑동물門	100
Priapula	새예동물門	17
Rotifera	윤형동물門	1,800
Acanthocephala	구두동물門	1,000
Onychophora	유조동물門	70
Arthropoda	절지동물門	825,000
Pentastoma	오구동물門	100
Tardigrada	완보동물門	600
Mollusca	연체동물門	100,000
Sipuncula	성구동물門	350
Echiura	의충동물門	150
Annelida	환형동물門	15,000
Pogonophora	유수동물門	150
Nematomorpha	유선형동물門	325
Entoprocta	내항동물門	150
Cycliophora	구륜동물門	1
Phoronida	추형동물門	20
Brachiopoda	완족동물門	350
Bryozoa	태형동물門	4,300
Chaetognatha	모악동물門	90
Echinodermata	극피동물門	7,000
Hemichordata	반색동물門	90
Chordata	척색동물門	43,000

Hickman et al., 1984, *Integrated principles of zoology*.

이 등, 2000b, 동물계통학.

나. 지구 생물군의 생태적 특성 및 역할

(1) 지구 생물군의 생태적 특성 및 역할

지구의 수많은 생물들은 각각의 주변 환경의 특성에 맞게 진화되어왔다.

지구 생물군을 구분하는 기준은 여러 가지이다. 분류학적으로 그 종류를 형질에 따라 구분할 수도 있고 기능에 따라 생산자, 소비자, 분해자로 구분하기도 하고 또는 서식 장소나 특성에 따라 부유생물, 저서생물, 유영생물로 구분하기도 한다.

따라서 지구 생물군의 생태적 특성은 먼저 생산자로서 지구 육상 식물군의 특성과 역할을 보고, 해양의 생산자는 식물플랑크톤, 해조류를 중심으로 그 특성을 알아본다. 동물군들은 소비자로서 육상 동물군은 초식, 육식, 부식과 같은 먹이 습성에 따라 그 특징을 알아보고, 해양 동물군에서는 먹이 습성보다는 서식 환경에 따라 동물 플랑크톤, 저서성 동물군, 유영생물군으로 구분하였다.

(가) 지구 식물군의 생태적 특성 및 역할

지구 생태계에서 식물은 일반적으로 육상과 해양이라는 서식환경에 따라 육상 식물군과 해양 식물군으로 크게 구분되는데, 분류학적으로는 앞서 설명되었듯이 14문 35만여 종으로 나뉜다. 일반적으로 육상식물은 비관속 식물(non-tracheophytes)과 관속식물(tracheophytes)로 나누는데 비관속식물에는 선태식물(bryophyte)이 포함된다. 선태식물은 일반적으로 태류, 각태류, 선류로 구분되어지는데 열대지방에서 극지방, 고산지대까지 매우 광범위하게 분포를 하고 있으나 정자가 담수에서만 수정할 수 있는 특성상 사막이나 바닷물에는 서식하지 않는다. 이들은 생태적으로 토양의 영양순환에 중요한 역할을 하고 산림의 수분흡수를 조절하여 숲의 식생조성을 간접

적으로 조절하고 토양 형성을 조절하여 식생의 천이를 유도하기도 한다 (오, 2006).

관속식물에는 비종자식물과 종자식물로 나뉘는데 비종자식물은 양치식물(pteridophyte)이 대표적이다. 주로 꽃을 피우지 않고 포자를 통해서 번식하는 종류로 석송, 쇄뜨기, 고사리류가 포함이 되는데, 주로 열대와 아열대 지역을 중심으로 서식한다. 과거 고생대 시기에 전 지구적으로 왕성하게 번식하여 화석으로 많이 남아 있으나 현재에는 그 규모가 현저히 줄어들었다. 종자식물은 겉씨식물인 나자식물(gymnosperm)과 속씨식물인 피자식물(angiosperm)로 나누어지는데, 나자식물은 밑씨가 씨방에 싸여져 있지 않고 겉으로 들어난 식물로 주로 침엽수림의 소나무류가 이에 속한다. 북방 아한대 산림과 온대 침엽수림에서 우점적으로 서식한다. 피자식물은 꽃이 피는 현화식물로 밑씨가 씨방에 싸여져 있는 속씨식물인데 현 지구 식물의 80%를 차지하고 있으며 지구 대부분의 지역에서 서식하고 있다(이 등, 2005).

이와 같이 육상 식물들은 지구 생태계에서 가장 근원이 되는 생산자(producer)의 역할을 하는 독립영양생물체(autotroph)로 광합성 작용에 의해 대부분의 생물들이 이용 할 수 없는 이산화탄소를 흡수하여 포도당(glucose)으로 전환시킴과 동시에 태양의 광에너지를 화학에너지로 전환시키는 역할을 한다. 이는 종속영양생물체(heterotroph)인 소비자(consumer)들에게 요구되어지는 유기화합물(탄소화합물)을 식물이 대기 중의 이산화탄소를 고정하여 소비자가 사용할 수 있는 형태로 변환시킨다는 것에서 큰 의미를 나타낼 수 있다. 또한 광합성의 결과로 지구상의 대부분을 차지하는 호기성 생물들이 섭취할 수 있는 산소를 방출하는 등의 다양한 생태적 서비스를 제공한다(이 등, 2005).

해양 식물군은 분류학적인 구분보다는 일반적으로 식물플랑크톤, 해조류,

맹그로브, 해조류 등과 같이 기능적으로 구분하여 많이 사용한다.

식물플랑크톤은 물의 흐름에 따라 수동적으로 떠 있으면서 운동성이 거의 없는 부유생물로 그 중 광합성 색소를 가지고 광합성을 하는 종류를 지칭한다. 분류학적으로 해양에 서식하는 식물군 중 홍조, 갈조 식물문을 제외한 모든 문이 포함된다. 주로 돌말류(diatomes), 와편모류(dinoflagellates), 규질편모류(silicoflagellates), 은편모류(cryptomonads), 석회비늘편모류(coccolithophorids) 남조류(bluegreen algae) 등이 대부분인데 크기는 0.2 μ m의 미소부유생물에서부터 2cm의 대형부유식물까지 그 크기가 다양하지만 주로 미소, 소형부유생물의 비중이 크다(고 등, 1997). 해양생태계에서 식물플랑크톤은 해양 일차 생산의 절반 이상을 차지할 만큼 그 양은 막대하여 가장 큰 생산자로서의 역할을 하고(Sieburth et al., 1978) 해양의 모든 소비자의 기초 먹이원이 된다.

해조류는 포자로 번식을 하면서 뿌리, 줄기, 잎이 구별되지 않는 단순한 생식 구조를 가진 비관속식물을 말한다(Trainor, 1978). 확실하게 정의된 분류군은 아니지만 물속에 사는 엽록소를 가진 엽상식물을 관습적으로 부르고 있다. 이들은 흡수한 물이나 영양을 잎으로 보내는 물관조직이나, 광합성으로 생성된 녹말을 저장 장소로 옮기는 체관 같은 조직이 없다. 일부 단세포인 경우도 있으나 미역이나 김과 같이 다세포 생물인 경우가 많은데 일반적으로 육안으로 식별이 가능한 정도의 식물만을 지칭하는 경우가 많다. 바다의 깊이와 색깔에 따라 녹조류(green algae), 갈조류(brown algae), 홍조류(red algae)로 나뉘는데 주로 바닥에 부착하여 서식하는 저서성 식물군으로 물속으로 투과되는 빛이 광합성을 하기에 적합한 진광대(euphotic zone)에 한하여 분포한다(고 등, 1997).

해조류는 해양 연안생태계의 주요 일차 생산자로 해양 초식 동물들의 주요한 먹이원이 되며 광합성을 통해 공급되어지는 산소는 연안의 산소 순환

에 기여를 한다. 또한 해양 동물의 주요한 서식처 역할을 하는데 천적으로부터 몸을 보호할 수 있는 장소를 제공해 주고 산란지의 역할도 한다(오, 2006).

그 외 맹그로브 숲은 열대와 아열대의 내만성 해안이나 환초에 형성된 독특한 조간대 군집으로 다양한 종류의 교목과 관목으로 이루어져있다(MacNae, 1968). 맹그로브 숲은 서식 특성에 따라 해변, 물에 잠기는 섬, 강변, 내만, 둔덕 등에 발달되는데(Lugo & Snedaker, 1974; Cintron et al., 1985), 이 숲에 있는 식물들은 서식 특성상 해수에 노출되고 물을 보유하는데 많은 에너지를 소비해야 하기 때문에 건생 또는 염생에 적응을 한 상태이다.

이들은 염습지와 비슷하게 지면의 빗물을 걸러주거나 퇴적층을 안정시키고 기질의 유출을 막고 다양한 동물의 서식처로 사용되는데 육상동물과, 동물플랑크톤, 절지동물, 유영동물, 곤충, 새와 같은 다양한 동물의 서식처로 사용되는 등 (MacNea, 1968; Odum et al., 1982; Robertson & Alongi, 1992) 다양한 생태학적 역할을 가지고 있다.

해초류는 바다에서 서식하는 피자식물로 종자식물의 0.01%(58종) 정도 밖에 되지 않는다(Kuo & McComb, 1989). 주로 열대와 온대 해역에서 대규모로 집단을 이루면서 서식하는데, 침수된 해양환경에 적응함에 따라 각종마다 공통적으로 포복성 지하경이나 각 마디마다 한 개 이상의 뿌리와 직립하는 짧은 줄기를 가지고 있다(Dawes, 1965). 이들은 해안에서 바닥 침전토양이 외해로 유출되지 않도록 차단 장치 역할을 하여 안정화시키고 연안의 수질을 개선하는 역할도 한다(den Hartog, 1967). 또한 기본적으로 $0.2-18.7 \text{ gCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 정도의 일차 생산성을 담당하고 있으며(Hillman et al., 1989), 어류, 무척추동물, 거북, 해우와 같은 해양 동물군의 서식처로 사용된다(Kuo et al., 1996).

(나) 지구 동물군의 생태적 특성 및 역할

동물이라 함은 식물에 대응하는 생물체로 지구상에는 약 34문 200만여 종 정도가 육상과 해양으로 나누어져 서식하고 있는 것으로 추정된다(Mayr, 1969). 분류학적으로 육상 생태계에서는 대략 원생동물문(protozoa), 선형동물문(nematoda), 연체동물문(mollusca), 환형동물문(annelida), 절지동물문(arthropoda) 그리고 척삭동물문(chordata) 등이 대부분을 이루고 있다. 먹이습성에 의해 1차 생산자를 섭식하는 초식동물(herbivore) 그리고 이를 섭식하는 육식동물(carnivore), 초식과 육식을 모두 하는 잡식동물(omnivore)등으로 크게 나뉘고, 그 외 기생습성을 가진 기생동물(parasite)과 부식물을 섭식하는 부식동물(detritivore) 등으로도 구분 되어 진다. 동물의 생태적 기능에서는 모든 동물군들이 소비자의 형태로 있기 때문에 태양 에너지를 통해 생산된 식물체(탄소화합물)를 이용하여 이를 2차생산과 생체량으로 그 양을 저장하고 이들이 다시 토양의 영양원으로 되돌아가는 피드백 작용을 통해 영양물질 및 에너지 순환의 큰 축을 담당하고 있다. 그 외 식물의 수분작용이나 종자확산, 밀도 조절, 생물학적 방제, 각종 오염물의 정화 등과 같은 생태계의 균형을 유지하는 역할과 함께 식물과 동물과의 상호작용을 통한 성장, 공생, 공진화와 같은 기능들을 수행하고 있다. 이는 자연생태계에서 그 동물군들의 다양성이 유지되어야 만이 그 기능이 원활하게 수행되고 건강한 생태계를 유지될 수 있는 것이다(이 등, 2003).

해양 동물군에는 일부 문(phylum)을 제외하고는 대부분의 문이 해양 동물군에 포함되어 있어 육상 동물군 보다는 더 많은 종들이 포함되어 있다. 해양 동물군은 바다라는 서식 특성상 동물플랑크톤, 저서동물, 유영동물과 같이 서식 유형에 따라 3가지로 구분된다.

먼저 동물플랑크톤은 물 위나 물속에서 물의 흐름에 따라 떠다니는 부유

동물로 방산충, 태양충, 화살벌레, 해파리 따위와 게나 조개의 유생 따위를 통틀어 말한다. 이들은 크기에 따라 소형, 미소부유동물과 중형부유동물로 구분되는데 소형, 미소부유동물은 편모충(flagellates), 유공충(foraminifera), 방사족충(actinopodea), 섬모충(ciliates)등으로 구분되며 중형부유동물은 자포동물에 속하는 히드라, 해파리, 산호충 등이 있고 유절동물, 환형동물의 유생, 연체동물의 일부 종, 모악동물, 절지동물 중 요각류, 곤쟁이류, 단각류, 패충류 등 그리고 척색동물 중에는 미색(urochordata)이나 피낭동물아문(tunicata)이 속한다. 이들은 주로 식물플랑크톤을 섭식하는 1차 소비자로서 이들은 또한 다른 중, 대형 해양 동물군들의 중요한 먹이원이 된다(고 등, 1997).

저서동물은 해양 바닥에 딱딱한 바위나 켄 같은 곳에서 서식하는 동물을 총칭하는데, 크기에 따라 구분하여 보면 0.1m 이하의 유공충류나 섬모충류와 같은 소형저서동물에서부터 유각류, 성충류와 같은 중형저서생물, 복족류, 이매패류, 갯지렁이, 갑각류와 같은 대형저서생물을 거쳐 저어류나 불가사리와 같은 초대형저서생물로 구분되어진다(고 등, 1997).

서식위치에 따라서는 굴이나 따개비와 같이 이동성이 없거나 게, 불가사리와 같이 자유롭게 움직이는 등 기질의 표면에 부착하거나 이용하는 표서동물(epibenthos)과 갯지렁이나 조개류와 같이 해저의 모래나 켄 속에 파고 들어가 생활하는 내서동물(endobenthos)로 구분한다(고 등, 1997).

먹이 습성에 따라서는 성게, 전복, 총알고둥 등과 같이 해조류나 미세조류를 섭식하는 초식성 저서동물과 불가사리, 대수리와 같이 조개를 잡아먹는 육식 저서동물, 그리고 켄 속에 다모류, 복족류, 갑각류와 같이 해저 퇴적물을 직접적으로 섭취 하거나 부유물질을 걸러 먹는 퇴적물식자로 구분되기도 한다(고 등, 1997).

저서동물들은 생태학적으로 퇴적물 환경에서 여러 행동을 통해 퇴적물의

물질교환을 일으키는데, 저서 표층생물들은 표층퇴적물에 몸을 숨기거나 움직이면서 표층을 파 뒤집어 섞고 빨 속에 수직으로 굴을 파고 들어가 해서 토양을 섞는다. 이로 인해 빨 내부의 퇴적물 속에 산소 수송을 시켜 저서동물이 빨 속에서도 서식할 수 있도록 해준다(고 등, 1997).

또한 일부 종들은 퇴적물을 먹은 후 그것을 다시 배설함으로서 퇴적물의 재순환을 일으키기도 한다 (Rhoads, 1973; 1974). 또한 일부 갯지렁이의 경우는 모래나 빨을 모아서 집을 만드는데, 이때 점액을 분비하여 부유입자들을 결속시켜 퇴적물이 물의 흐름에도 견딜 수 있게 만들어 퇴적물의 안정화를 시키기도 한다.

유영동물(nekton)은 물의 흐름에 능동적으로 거슬러 움직일 수 있는 동물을 지칭하면서 수동적으로 물에 떠다니는 부유생물과 구분되어 지는데, 실제로는 유영동물과 부유동물을 정확하게 구분하는 것이 매우 불명확하고 주관적일 때가 많다. 이는 부유동물과 유영동물의 특성이 혼합되어 있는 종들이 많기 때문인데, 따라서 일반적으로 유영동물은 크기가 크거나 물을 거슬러 갈수 있는 힘과 헤엄에 필요한 근육이 발달한 척추동물을 일컫는다. 대부분 어류가 이에 속하고 그 외 연체동물의 두족류나 고래나 물개류와 같은 포유류 등이 속한다(고 등, 1997).

유영동물을 서식 장소에 따라 구분하여 보면 표영성(pelagic)과 저서성(benthic)으로 구분되는데, 표영성 동물은 수중에서 헤엄치며 사는 청어, 정어리, 멸치 등이고 저서성 동물은 가오리, 가자미, 망둥어와 같이 해저면에서 약하게 유영하면서 서식하는 종류들이다.

또한 상어, 날치, 다랑어와 같이 대양에서 주로 서식하는 종류를 대양어류라고 하고 송어, 돔, 농어와 같이 주로 연안에서만 서식하는 종류를 연안어류라고 한다(고 등, 1997).

분류학적으로는 대부분 척색동물문에 속하는 종들이 대부분이며 일부 게

나 새우와 같은 대형 갑각류(crustaceans)와 오징어, 낙지와 같은 두족류(cephalopods) 등이 유영동물에 포함된다.

이들은 생태학적으로 해양에서 소비자의 역할을 하기 때문에 미세 플랑크톤 등을 섭식하여 2차 생산을 하고 다시 해양 퇴적물로 되돌아가 해양 물질순환의 큰 축을 담당하고 있다. 또한 다양한 생산물을 통하여 인간에게 많은 음식과 자원을 제공하여 준다.



3. 에머지 평가법

가. 에너지시스템언어

에너지시스템언어는 H.T. Odum에 의해 제안된 것으로 대상 시스템에 대한 다양한 구성원들과 여러 가지 관계를 특정 기호를 통하여 그 관계를 설명하고 종합적으로 그 시스템을 파악할 수 있도록 해준다. Fig. 3과 같이 기본적으로 사용되는 기호들이 10개 정도 사용되는데 에너지 흐름, 에너지 원, 저장고, 열손실, 상호작용, 생산자, 소비자, 스위치, 상자, 거래 등으로 나뉜다. 에너지시스템언어는 이 기호를 통해 시스템을 설명할 때 각 기호들이 에너지 법칙들을 충분히 대변할 수 있고 에너지의 흐름이나 상태를 적절히 표현할 수 있다(Odum, 1996). 또한 이 기호들 사이에는 수학적 관계가 내포되어 있기 때문에 에너지 모델링을 통하여 그 변화를 예측하는데 쉽게 사용될 수 있다(강과 남, 2003).

나. 시스템생태학

지구의 생물과 생태계 다양성은 생명체 출현과 더불어 46억년이라는 오랜 기간 동안 다양하게 변화되어져 왔는데, 생물 종들은 화산 폭발이나 운석의 충돌과 같이 지구 환경의 급격한 변화로 인해 종의 대절멸과 같은 현상을 겪기도 하였다. 종의 절멸은 이런 재앙적인 환경변화에 기인하기도 하지만, 오랜 기간 환경 변화에 적응하지 못한 종들이 그 세력을 점점 잃어가면서 멸종되기도 한다. 이는 지구의 오랜 역사 기간 동안 종의 분화와 더불어 생태계의 균형을 맞추기 위해 지속적으로 일어난 자연적인 한 과정이다. 그러나 이러한 균형은 최근 수백년 동안 인간 활동의 급속한 증가로 인해 자원의 남용과 오염 그리고 무절제한 환경파괴와 같이 여러 가지 환

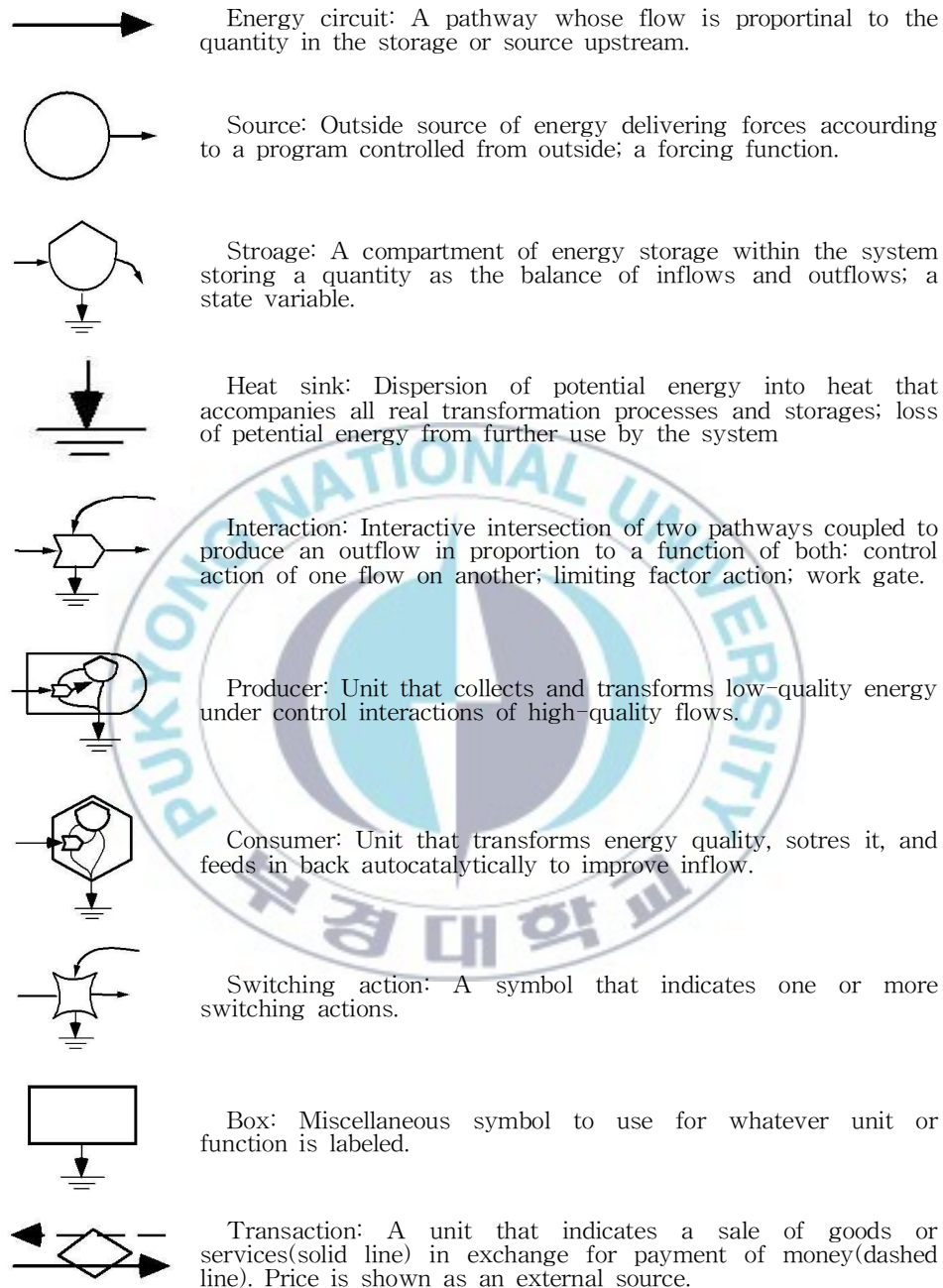


Fig. 3. Symbols of the energy systems language (Odum, 1971; 1983).

경문제가 나타나면서 흔들리고 있는데, 기존의 종의 분화 속도와 균형을 이루며 나아가던 멸종 속도가 인간에 의해 기존과는 차원이 다르게 매우 짧은 시간동안 많은 종이 멸종되어져 가고 있다.

이런 종의 멸종과 더불어 광범위한 환경 문제가 전 지구적으로 대두되면서 이를 대처하기 위해 각 국가별, 지역별로 다양한 방안이 모색되었는데, 1992년 리우협약의 ‘의제21’과 더불어 1997년 국제기후변화협약인 ‘교토의 정서’ 채택, 2002년 요하네스버그 지속가능개발 정상회의 등 다양한 국제협약이 채택되면서 지구 환경에 대한 각국의 노력을 보여주었다.

학계에서는 오래전부터 생물학, 생태학, 환경학, 지구과학 등 여러 학문들을 통해 환경문제에 대처하여 왔는데, 기존의 학문들은 각각의 세부 연구를 통하여 이를 종합하는 bottom-up systems approach의 연구를 통해 공통의 목표를 지향하여 왔다. 그러나 이러한 방식은 각 학문의 효율적인 교류가 이뤄지지 않으면 상반된 입장으로 나타나기도 하였다. 이런 배경에 따라 환경, 생태계, 생물 등 다양한 구성요소들을 통합하여 Top-down systems approach의 종합적인 연구의 필요성이 제시되었는데, 미국의 생태학자 H.T. Odum은 시스템 생태학(system ecology)을 제안하면서 지구의 생태계를 보다 통합적으로 연구하고자 하였다.

시스템 생태학은 지구의 다양한 환경문제를 국지적, 지역적, 개별적인 문제로만 보는 것이 아니라 하나의 통합된 시스템으로 파악하고 시스템 내의 유기적인 관계와 상호 작용을 체계적이고 정량적으로 파악하는 학문이다. 시스템 생태학은 자연환경과 경제활동이 상호 작용하는 국가, 지역, 도시, 생태계, 농업 등의 시스템에 자연과학, 공학, 사회과학, 경제학 등의 다양한 학문의 기술과 방법론을 접목시킨 것으로 이들을 연계시킬 수 있는 공통의 척도를 태양 에너지로 삼고 각 시스템을 하나의 다이어그램으로 표현한 후 이들 구성원의 부분적 기능을 통합하여 하나의 시스템으로 연구하는 시스

템 분석과 컴퓨터를 이용한 에너지 시스템 모델을 통하여 대상 시스템에 대한 종합적이고 포괄적인 평가를 실시하고 있다(Fig. 4).

또한 시스템 언어를 통하여 자연 생태계에서 발생하는 에너지 및 물질의 흐름과 변환과정을 분석하여 인간과 자연 그리고 경제의 유기적 관계를 정량적으로 규명할 수 있는 방법을 제시해 주고 있어 기존의 시각과 다른 새로운 개념으로 자연을 바라보는 안목을 제시해주고 있다. 또한 최근의 다양한 환경문제를 해결하고 자연을 합리적으로 관리하는데 활용될 수 있으며 지역이나 국가 그리고 세계를 하나의 통합된 시스템으로 보고 재화의 이동이나 인간의 역할에 이 이론을 접목시켜 사회 과학 분야의 연구에 새로운 접근방식을 제시해 주고 있다.

다. 에머지 정의

기존의 여러 방식의 환경재 가치평가 방법은 환경에 대한 진정한 가치 평가를 하지 못한다는 의견이 많았다. 생물이나 생태계, 환경 자원들이 지금의 형태와 기능을 유지하기 위해 직-간접적으로 받은 에너지와 물질은 시장경제의 화폐로는 평가하기 힘들기 때문에 경제적 가치 산정에서 대부분 무시되거나 과소평가되었다. 따라서 이들이 인간사회에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위해서는 화폐로 나타낼 수 있는 인간의 노력 이외에 자연환경의 일까지 포함할 수 있는 방법이 필요한 실정이다.

에머지는 “한 가지 서비스나 생산물을 만들기 위해 직-간접적으로 이미 사용된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의되어졌고 emjoule의 단위를 사용하였다(Odum, 1983; 1996). 또한 에너지라는 대상을 가지고 여러 자원이나 생물을 동일한 기준에서 비교하기 위해 지구 에너지의 기원이 되는 태양 에너지를 기준으로 삼았고, 단위는 solar emjoules(sej)로 사용한다.

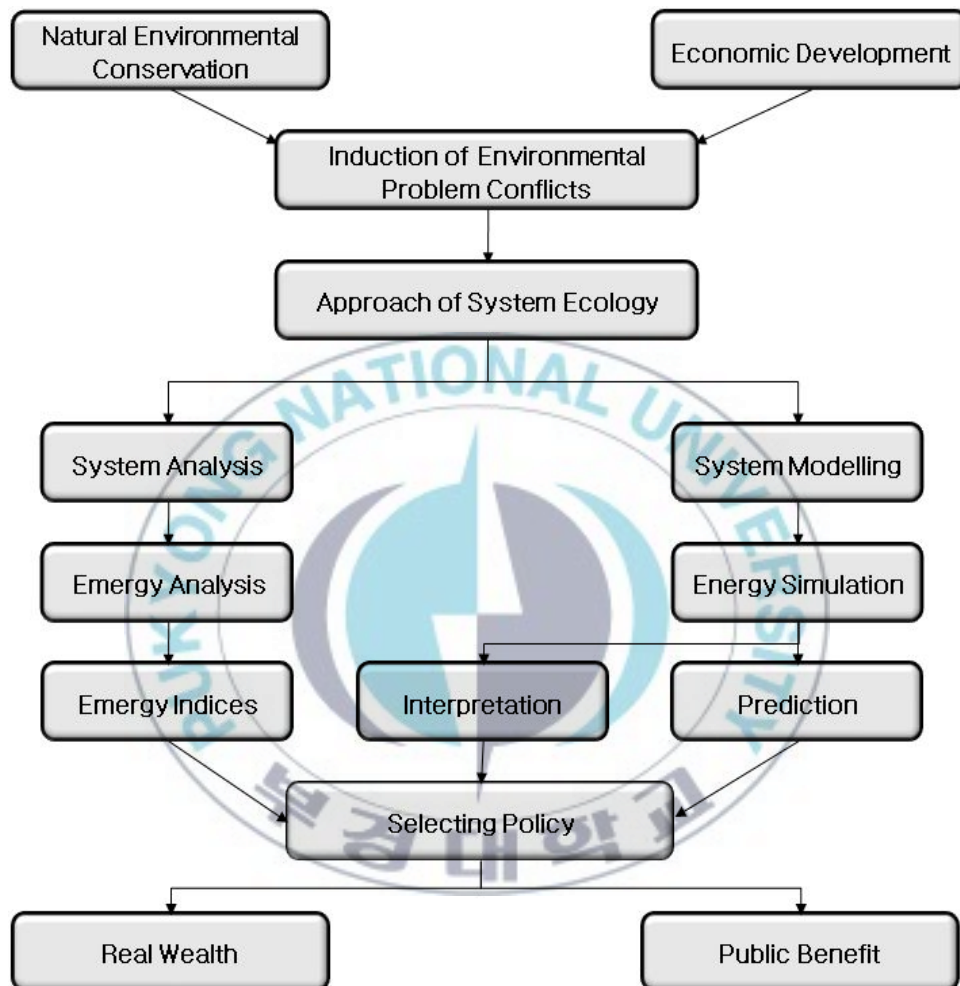


Fig. 4. The methodological roots of systems ecology(Lee, 1996 unpublished).

에머지(Emergy)는 “Energy Memory”를 줄여서 나타낸 것으로(Odum, 1996), 하나의 자원이 지금의 상태를 유지하기 위해서는 열역학 제 2법칙에 따라 여러 단계를 거쳐 오면서 각 단계별로 소모되었던 모든 에너지가 포함해야 된다는 것이다. 즉 현재의 자원이 지금의 에너지와 과거에서부터 사용되어졌던 모든 과정의 에너지가 합쳐져야 한다는 것이다(강과 남, 2003).

한 예로 Fig. 5를 보면, 태양에서 들어오는 40,000J의 태양에너지량은 동일하게 유입되는데 이 에너지를 이용하여 성장한 나무는 2J을 가지고 있고 이 나무가 오랜 시간 지질학적 작용에 의해 석탄이 되면 이 석탄은 1J을 가지고 있게 되며 마지막으로 이 석탄을 통해 발전소에서 전기를 생산하게 되면 그 전기는 0.25J을 가지고 있게 된다. 따라서 우리가 흔히 사용하는 전기 에너지의 가치는 단순히 발전소에서 전기가 만들어져 사용하는 실제 에너지량뿐만 아니라 태양에서부터 나무, 지질작용, 석탄, 발전소를 거치면서 각 단계별로 사라졌던 모든 에너지까지 포함되어야 한다는 것이다. 즉, 열역학 제2법칙에 의해 소실되어진 에너지가 없었다면 태양에너지가 전기로 만들어 지지 않았다는 것이다.

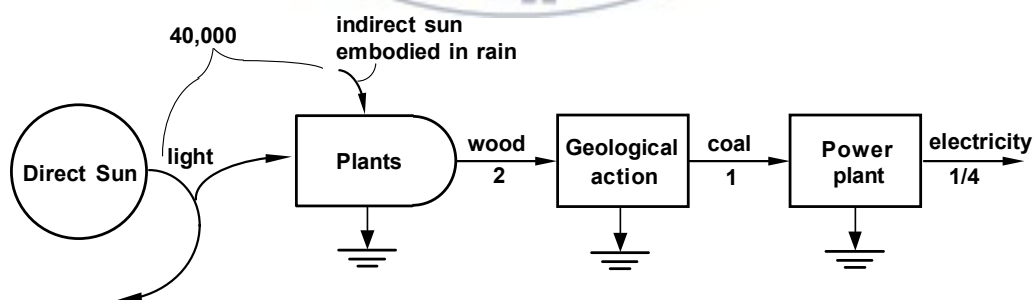


Fig. 5. Emergy quality chain used to calculate solar transformity(Odum, 1988).

라. 에너지변환도(Transformity)

에너지의 흐름은 에너지 변환, 되먹임, 상호작용 그리고 재순환으로 구성된 연결망 구조를 가지고 있다. 이러한 흐름의 연결망 구조는 에너지 변환이 수렴하는 계층구조(hierarchy)를 형성한다. 에너지의 형태가 다른 에너지의 질이 다르기 때문에, 한 생산물의 에너지 질은 이 에너지가 에너지 변환과정을 통해 형성되기 위해 직간접적으로 사용된 모든 에너지의 합, 즉 내재된 에너지(embodied energy)로 환산하여 측정하게 된다(Fig. 6).

에머지는 각 에너지원에 내재된 태양에너지에 대한 척도이며, 이를 계산하기 위해 지구 시스템 내에서 태양에너지로부터의 전환정도를 나타내는 solar transformity가 사용된다. Transformity는 생산물의 에너지질의 척도로 어떤 형태의 에너지 1J을 만들기 위해서 직·간접적으로 소모된 태양에너지의 양으로 정의되며, 단위는 solar emjoules per joule(sej/J)로 표현된다. Transformity는 에너지 계층구조를 따라 진행하면서 점차적으로 증가되며, 에너지 계층구조 내의 에너지 흐름이나 보유량에 대한 질의 척도로 이용된다(Odum, 1988).

한편, 기존의 지구에너지원의 합이 9.44×10^{24} sej/yr에서 15.83×10^{24} sej/yr로 증가되면서(Odum et al., 2000), transformity의 총체적인 수정이 불가피하게 되었으며 이로 인하여 연구자들 간의 혼란이 야기된 적도 있다.

마. 에머지-화폐비율(Emergy/Money Ratio, EMR)

EMR은 에머지를 화폐단위로 환산한 것으로 경제적 생산을 위하여 소모된 총 에머지와 생산된 화폐가치와의 비를 이용하여 계산한다(Fig. 7). 예를 들면 평가하고자 하는 경제시스템이 1년 동안 사용한 총에머지량을

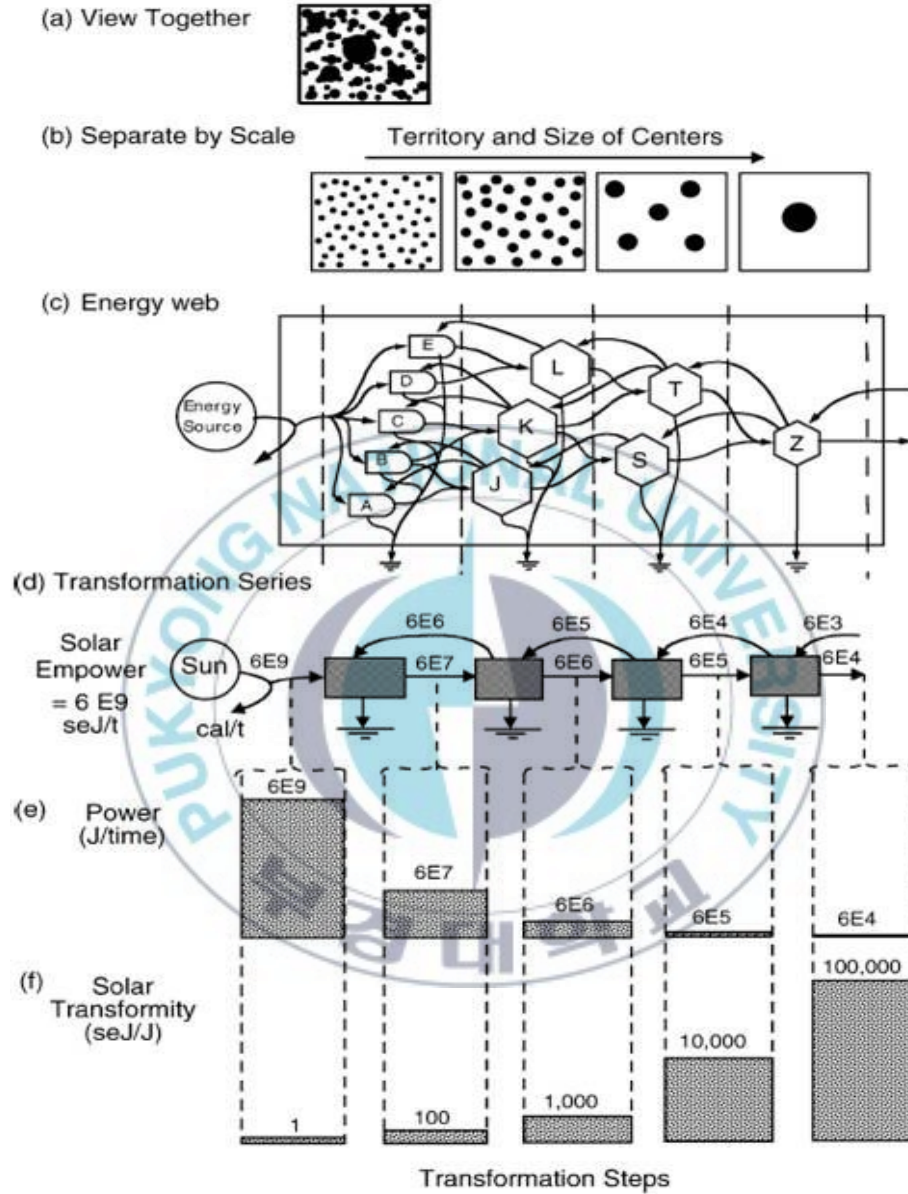


Fig. 6. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity, (a) All units view together; (b) Units separated by scale; (c) Units as a web of energy flows; (d) Processes shown as an ordered series; (e) Flows of energy per unit time; (f) Transformities (Brown et al., 2004).

그 해의 총생산(GDP)으로 나눈 값이다. 에머지 개념은 에머지 흐름이 경제시스템의 순환의 원동력이라고 설명하므로 EMR은 경제의 화폐흐름을 에머지흐름과 연결하는 역할을 한다. EMR은 평가대상 경제의 화폐구매력을 나타내는데 이 비율이 감소한다면 단위화폐로 살 수 있는 에머지, 즉, 실질적인 부가 감소하는 것을 의미한다(강과 남, 2003). 이 가치는 단순화폐가치가 아니라 과학적 척도로서 실질적인 부를 평가하는 에머지에 기초한 거시경제적 가치이다.

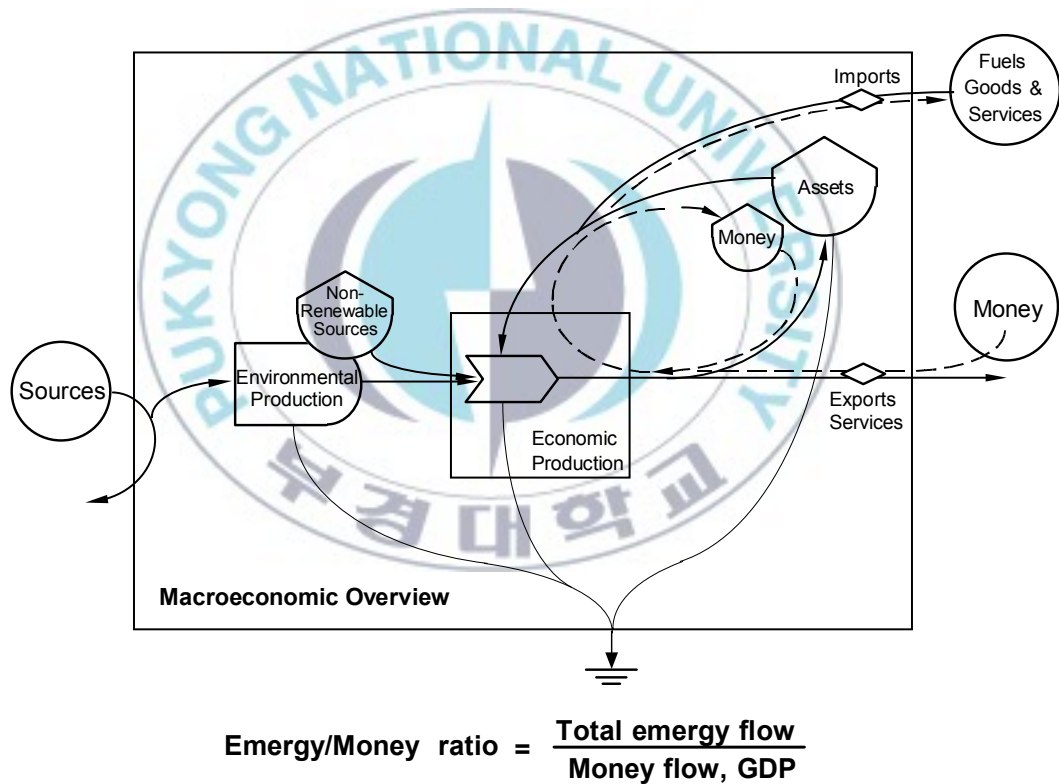


Fig. 7. Emergy inputs used to evaluate the emergy/money ratio of the national economy(Odum, 1996).

바. 최대 일률의 원리(Maximum Power Principle)

한 시스템이 다른 시스템과 경쟁을 통해 살아남기 위해서는 스스로 그 구조와 기능을 조직화함으로써 효율을 최대한으로 높이려 한다. 이를 자기 조직화(self-organization)라고 하는데(Odum, 1994), 이는 maximum power principle의 주요 원리이다.

Maximum power principle이란 각 시스템이 단위시간당 에너지 흐름을 최대화하기 위하여 자원의 유입을 최대화할 뿐만 아니라 최적의 효율로 운전되어야 함을 의미한다.

에너지 연결망의 관점에서 보면 최상의 이용은 증식자로서 피드백 시키는 것이다. 달리 말하면 자원의 유입과 최적이용 모두를 최대화하는 것이다. 어떠한 에너지 변환과정도 최종산물에는 보다 적은 에너지가 포함되기 때문에 이것이 지속되기 위해서는 생산되어 저장된 에너지는 처음의 생산 과정에 피드백 되어 생산을 재 촉진 시켜야 한다(Fig. 8). Maximum power principle을 따르는 시스템은 그렇지 못한 시스템과의 경쟁에서 이길 수 있기 때문에 지속성이 큰 시스템이다(최, 2003).

그러나 Odum(1996)은 기존의 이 이론은 각각의 에너지는 그 특성에 따라 에너지의 질이 다르다는 점을 반영하지 못한다고 비판하면서 이 원리에 에머지 개념을 접목시켜 최대 에머지 원리(maximum empower principle)을 제안하였다. 최대에머지 원리는 다른 시스템과 경쟁에서 우세하게 되는 시스템은 최적의 효율로 자원 유입을 강화함으로써 empower를 최대로 하는 디자인을 가지고 있는 시스템“이라고 정의하였다(Odum, 1996; 강과남, 2003)

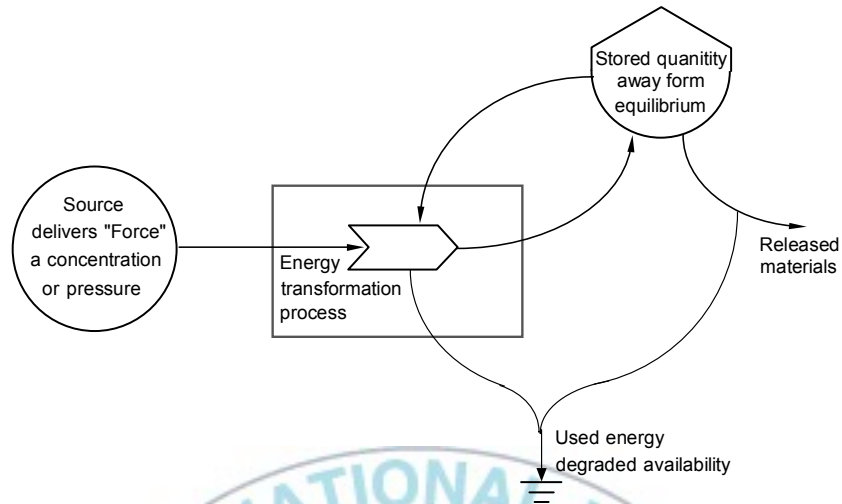


Fig. 8. Systems diagram of the autocatalytic storage to energy transformation process(Odum, 1996).

사. 가치평가로서의 에머지

맑은 공기, 깨끗한 물, 희귀종과 같은 많은 환경재들은 우리가 특정 가격을 지불하고 이용하는 것이 아니라 무한정으로 사용할 수 있는 것으로 인식을 하고 있어 이를 쉽게 생각하여 남용하거나 파괴할 때가 많다. 그러나 이러한 자원은 현 시장경제 체제에서 화폐 가치로 통용되는 것이 아니기 때문에 그 가치를 산정하기란 매우 어렵다. 그러나 만약 이런 활동에 대해 비용을 지출해야 한다면 환경을 손상시키는 일을 줄이거나 보다 신중한 자세를 취할 것이다.

기존의 여러 환경재에 대한 가치 평가 기법은 자연환경을 다시 경제적 기준에 따라 가치를 주는 형식으로 대상에 대한 진정한 가치 평가가 이뤄지지 않을 뿐만 아니라 매우 주관적인 평가가 될 수 있다는 것에 대해 비판적 의견이 끊이지 않고 있다. 기존의 방법들이 자연환경이나 종의 가치

를 평가하는 기초를 제공할 수는 있지만 자칫하면 가치의 크기에 따라 어떤 종은 보전해야 되지만 어떤 종은 그런 가치가 없다는 식의 잘못된 결정이 내려질 가망성이 높다. 즉, 크기나 개체수가 작거나 제한된 지리적 분포로 인해 제대로 인식이 안 되거나 또한 매력적이지 못한 외견과 즉각적인 이용가치가 없고 경제적으로 중요한 종들과 아무런 관련이 없는 종에게는 낮은 가치가 주어질 수 있다. 이는 대부분 곤충이나 선형동물과 같은 무척추동물이나 박테리아나 원생동물과 같은 미소 생물들일 것이다. 따라서 이런 종의 보전을 위한 값비싼 시도들은 경제적인 관점에서 환영받지 못할 것이다. 지구상의 모든 종은 존재할 권리와 나름대로 독특한 생물학적 생존 전략을 가지고 있는데 이런 점에서 각 종의 생존은 그 수나 크기, 인간과의 중요도와 상관없이 보장되어야만 한다.

에머지 개념을 이용한 가치평가 방법은 이러한 문제들을 해결하기 위한 대안으로 제시되고 있는데, 에너지 계층구조의 각 단계에서 실질적인 가치를 평가하는 에머지는 어느 한 대상이 생산을 하기 위하여 직·간접적으로 이용된 모든 에너지를 나타낸 것으로 자연활동에 대한 비용을 인간활동과 동일한 척도로 분석할 수 있기 때문에 가장 생태경제학적 가치평가 기능을 가진 분석법이라고 할 수 있겠다. 또한 에머지 분석법은 시스템 생태학을 기초로 지구의 환경문제를 국지적인 문제로 인식하지 않고 하나의 통합된 시스템으로 인식하여 각 구성원의 유기적인 관계와 상호작용을 체계적이고 정량적으로 파악하는 분석방법이다.

따라서 생태계, 생물 종과 같이 무시될 수 있는 다양한 환경재가 지금의 상태를 유지하기 위하여 과거에 사용된 모든 에너지에 대해 평가하기 때문에 기존의 방법에 따른 가치는 낮을 수 있지만 에머지 가치산정 방법에 따르면 그 대상에 대한 진정한 가치의 평가가 가능할 것이다.

4. 연구 사례

가. 경제학적 가치 산정법에 의한 자연환경 가치 평가 사례

시장에서 거래되지 못하는 환경 및 생물과 같은 여러 환경재에 대한 가치 산정법은 기존의 경제학자들에 의해 다양한 방법들이 연구되어져 왔다. 대표적으로 헤도닉 가격기법(HPM: Hedonic price method), 여행비용접근법(TCM: Travel cost model), 회피지출분석법(AEM: Avertive expenditure method), 조건부가치측정법(CVM: Contingent valuation method) 등이 가장 많이 사용되는 방법들인데 그 중 생물 종이나 생태계의 경우 여행비용접근법과 조건부가치측정법 등이 가장 보편적으로 이용된다. Table 3, 4에 각 방법들에 대한 그 결과를 정리하여 보았는데 대체적으로 생태계나 생태계 서비스 또는 종(species)에 대한 가치를 분석하고 있었다.

생태계 또는 생태계 서비스에 대한 분석에서는 Costanza et al.(1997)이 시도한 지구 생태계의 각 서비스와 각 생물군계에 대한 결과가 가장 대표적으로 비교되어지고 있는데, 지구 전 생태계의 서비스 중 영양염 순환이 약 17조 US\$로 가장 높은 서비스를 나타내었고 생물군계별로는 해양 생태계에서 약 21조 US\$, 육상 생태계는 약 12조 US\$로 나타내고 있다.

그 외 각 지역별 사막, 국립공원, 습지, 야생 서식지, 호수, 강, 숲 등에 대해 단위면적당 4-16, 750\$정도의 가치를 각각 나타내고 있다. 특히 아마존의 산림파괴, Donau-Auen 국립공원, 중국의 Xingshan Count 지역에서는 직접, 간접, 존재, 선택, 유산 가치와 같은 항목별로 구분하여 그 가치를 나타내었다.

또한 곤충에 의해 제공되는 생태계 서비스에 대한 생태적 가치는 분뇨를

토양으로 환원시키는 역할로 약 4억 \$, 화분수분 작용에 약 31억 \$, 해충 관리에 약 4억 5천만 \$, 레크레이션 및 상업적 어업 영향에 약 500억 \$ 등의 가치가 있는 것으로 나타났다.

종에 대한 분석으로는 커피의 유전적 자원이 14억 \$로 가장 높게 나타났고 코끼리가 1억 \$이상의 가치가 있는 것으로 나타났다. 그 외 어류들이 약 2-21 \$, 늑대, 고래, 곰, 바다표범이 10-239 \$, 조류 50-95 \$, 국제적으로 보호종이거나 멸종위기종과 같은 위협종들은 최고 17만 \$의 가치를 나타내었다.

이렇게 각각의 생태계 및 생물군을 대상으로 평가되어진 가치 중 주로 국립공원, 열대우림 생태계, 해안가, 생태관광 등과 같이 직접적으로 여행을 통해 관람하거나 체험할 수 있는 경우 여행비용접근법을 사용하였고 그 외 생물종과 그 기능, 생태계 및 보전 가치 등은 대부분 조건부 가치측정법을 통해 분석하고 있었다.

이들의 특징을 각각 살펴보면 여행비용접근법은 특정 환경재를 이용하기 위해 사람들이 그 지역까지 도달하는데 소요된 시간과 비용을 통해 가치를 측정하는 방법이다. 그러나 여행목적에 따라 그 시간과 비용이 매우 차의 적이고 환경재의 비사용가치에 대한 편익은 완전히 배제되어 평가된다. 또한 여행의 범주에 포함된 시간의 경계가 명확하지 못해 매우 주관적으로 평가될 수 있다.

조건부 가치측정법은 가치 평가 방법 중 가장 많이 사용하는 방법으로 특별히 고안된 설문지를 통해 가상의 상황을 만들어 각 항목에 따른 설문을 통해 지불의사(WTP)를 추정해 내는 방법이다. 매우 다양하게 쓰이고는 있지만 응답자의 의사와 능력에 따라 그 결과값이 매우 차이가 난다. 또한 가상 상태로 하기 때문에 주관의 개입이 쉬울 수 있고 설문지 오류 시 그 가치의 과소, 과대평가가 일어날 수 있다. 또한 표본의 수가 일정 수

이상이 되어야만 신뢰할 수 있게 되고 대상에 대해 ‘도덕적 사고’를 통해 편향된 평가가 나타날 수 있다.

따라서 기존의 가치평가방법은 비시장재인 환경에 대해 소비자가 느끼는 효용간의 관계에 의해 평가 되고 또한 당사자의 교육 수준, 소득 수준에 따라 그 결과값이 매우 큰 차이를 보이는 등 주관적 개입이 매우 강하게 나타나는 특징을 가지고 있다. 이런 각 단점들에 대한 적절한 대응방안이 각 기법마다 보완이 되고 있으나 본질적인 구조상 주관적 개입이 없이지 않기 때문에 객관적인 가치평가는 힘든 상황이다.

따라서 본 연구에서는 대상에 대한 공통된 기준을 제시하여 객관적으로 대상을 평가 할 수 있는 에머지 분석법을 이용하여 기존의 경제학적 가치 평가에서 제시하지 못한 객관성을 증명해 보이려 한다.



Table 3. Summary of economic analysis of ecosystem and ecological services

Item	Value	Reference
Ecosystem services	($\times 10^9$ US\$)	
Gas regulation	1,341	
Climate regulation	684	
Disturbance regulation	1,779	
Water regulation	1,115	
Water supply	1,692	
Erosion control	576	
Soil formation	53	
Nutrient cycling	17,075	
Waste treatment	2,277	
Pollination	117	
Biological control	417	
Habitat / refugia	124	
Food production	1,386	
Raw materials	721	
Genetic resources	79	
Recreation	815	
Cultural	3,015	
Biome		Costanza et al., 1997.
Marine	20,949	
Open ocean	8,381	
Coastal	12,568	
Estuaries	4,110	
Seagrass/algae beds	3,801	
Coral reefs	375	
Shelf	4,283	
Terrestrial	12,319	
Forest	4,706	
Tropical	3,813	
Temperate/boreal	894	
Grass/rangelands	906	
Wetlands	4,879	
Tidal marsh/mangroves	1,648	
Swamps/Floodplains	3,231	
Lakes/rivers	1,700	
Cropland	128	
Total	33,268	

Callifornia desert	\$101	Richer, 1995
Kakadu conservation zone and national park	\$52-80	Carson et al., 1994
Aquatic system, Adirondack region	\$12-18	Kealy & Turner, 1993
Wetland and habitat	\$96-184	Hoehn & Loomis, 1993
Wilderness area, Colorado	\$29-66	Diamond et al., 1993
Beach ecosystem, New Jersey	\$9.26-15.1	Silberman et al., 1992
Beach State Nature Reserve, Illinois	\$37-41	Boyle, 1990
Mono lake, California	\$4-11	Loomis, 1989
Nadgee Nature Reserve, Australia	\$27	Bennett, 1984
Water quality in rivers and lakes	\$242	Mitchell & Carson, 1984
Wilderness area, Colorado	\$32	Walsh et al., 1984
Water supply, Pennsylvania	\$14-36/household	Laughl& et al., 1996
Groundwater ecosystem, Pennsylvania	\$61, \$313	Abdalla et al., 1992
Ecotour, Mexico	\$60-100/day	Pina, 1994
Soil conservation, Australia	\$2.28/ha	King & Sinden, 1988
Soil erosion on agricultural	\$4-6/acre	Walker & Young, 1986
Forest services	22.5€	Brey et al., 2007
Cedar forest	\$20/household	Sattout et al., 2007
Seafood production, mangrove	\$750-16,750/ha	Rönnbäck, 1999
Amazonian deforestation	\$1175/ha/yr	
Direct use	\$549/ha/yr	
Indirect use	\$414/ha/yr	Torras, 2000
Option	\$981/ha/yr	
Existence benefits	\$194/ha/yr	
Existence value of forest	\$30.12/household/yr	Amirnejad et al., 2006
Donau-Auen national park	329.25 ATS/yr	
Existence values	167.39 ATS/yr	
Bequest values	122.61 ATS/yr	Kosz, 1996
Option values	39.25 ATS/yr	
Native temperate forest	\$355.3-937.9/ha/yr	Figueroa & Pasten, 2008

Ecosystem services of watershed	\$5-15.5 billion/resident	Seidl & Moraes, 2000
Ecosystem services of Texas	\$23.22/ha/yr	Kreuter et al., 2001
Ecosystem services of Xingshan Count of China	582.96million RMB	
Direct value	54.23million RMB	
Timber & forest porducts	48.43million RMB	
Others	5.8million RMB	Guo et al., 2001
Indirect value	528.73million RMB	
Protection of soil fertility	241.3million RMB	
Others	307.43million RMB	
The ecological value of ecological services provided by insect		
Dung burial		
Forage fouling	0.12 billion \$	
Nitrogen volatilization	0.06 billion \$	
Parasitism	0.07 billion \$	
Pest flies	0.13 billion \$	
Subtotal	0.38 billion \$	
Pollination by native insects		
Fruits and nuts	1.00 billion \$	
Vegetables	0.60 billion \$	
Field crops	1.47 billion \$	Losey & Vaughan, 2006
Subtotal	3.07 billion \$	
Pest control		
Native and exotic pests	4.49 billion \$	
Recreation and commercial fisheries		
Small game hunting	1.48 billion \$	
Migratory bird hunting	0.56 billion \$	
Sport and commercial fishing	28.13 billion \$	
Wildlife observation(bird watching)	19.76 billion \$	
Subtotal	49.93 billion \$	
Total	57.87 billion \$	

RMB-the unit of money used in the China

Table 4. Summary of economic analysis of organism value

Item	Value	Reference
Coffee genetic resources	\$ 4 2 0 - 1 , 4 5 8 million	Hein & Gatzweiler, 2006
Elephant	\$117 million	Barnes, 1996
Atlantic salmon	\$14.4-21.4	Stevens et al., 1997
Leadbeater's possum	\$29 (Aus.\$)	Jakobsson & Dragun, 1996b
Wolf	700-900 SEK	Boman & Bostedt, 1995
Gray whale	\$23-43	Loomis & Larson, 1994
Sea turtle & Bald eagle	\$13, \$25	Loomis & Helfand, 1993
Waterfowl	\$50-60/acre	van Kooten, 1993
Whooping Crane	\$44-69	Bowker & Stoll, 1988
Bald eagle & striped shiner	\$28, \$5	Boyle & Bishop, 1987
Grizzly bear & Bighorn sheep	\$10, \$16	Brookshire et al., 1983
Endangered species	\$118 (Aus.\$)	Jakobsson & Dragun, 1996a
Migratory waterfowl	\$59-71	Desvousges et al., 1993
Fish	\$2-4	Duffield & Patterson 1992
Coyote, Wild turkey	\$15	Halstead et al., 1992
Endangered species	140-250 DM	Hampicke et al., 1991
Endangered species	1,275 SEK	Johansson, 1989
Monk seal, humpback whale	\$165, \$239	Samples & Hollyer, 1989
Endangered species	\$18-24	Hageman, 1985
Silvery minnow	\$37.77	Berrens et al., 1996
Gray wolf	\$22.64	Chambers & Whitehead, 2003
Spotted owl	\$68.84	Giraud et al., 1999
Steller sea lion	\$70.90	Giraud et al., 2002
Peregrine falcon	\$32.27	Kotchen & Reiling, 2000
Mexican spotted owl	\$51.52	Loomis & Ekstrand, 1997
Riverside fairy shrimp	\$28.38	Stanley, 2005
Sea turtle	\$19.01	Whitehead, 1992
Endangered species(fine)	\$173,209	Eagle & Betters, 1998.
Northern spotted owl, Striped shiner, Bald eagles, Humpback whale	\$95, \$6, \$216, \$173	Loomis & White, 1996
Endangered species (Didelphidae, Cebidae)	\$204, \$105, \$41	de Mendonça et al., 2003

SEK-Swedish Krona, the unit of money used in the Sweden
DM-Deutschmark, the unit of money used in the Germany

나. 에머지 평가법에 의한 자연환경 가치 평가 사례

(1) 국내사례

에머지 평가법은 기본적으로 에너지 자료를 통해 환경재에 대한 가치를 평가하는 방법이지만 여러 가지 지수(index)를 이용하여 환경 지속성(sustainability), 효율성(efficiency) 등에 대한 연구도 많이 이뤄지고 있다. 따라서 대부분의 에머지 연구들은 단순히 대상에 대한 가치평가 뿐만 아니라 다양한 기능에 대한 복합적이고 종합적인 연구를 실시하고 있다.

에머지 분석을 위한 분석표에서는 기본적으로 각 항목에 대한 가치평가를 실시하고 있는데, 이는 최종 도출된 Solar emergy 값을 Emergy/money ratio을 통해 Emvalue를 계산하게 되고 이 값이 생태경제적 가치를 나타내게 된다. 국내에서 연구되어진 많은 에머지 논문에서 환경재를 대상으로 제시되어진 생태경제적 가치 및 효율성을 알아보면 다음과 같다. 먼저 하천, 호소 및 유역의 가치 및 지속성 평가에 대한 연구는 김영진(2000)의 하천유역 분석에서 수질개선을 위한 댐이나 수 처리장 등의 건설이 낙동강 유역에 약 2조 5천억원의 손실을 나타내는 것으로 나타났다. 김진이(2007)의 낙동강 유역의 오염총량관리에서는 총량관리계획 수립 후 수질개선 저감 시설에서 약 5억원 정도의 생태 경제적인 가치의 편익이 발생한 것으로 나타났고, 낙동강 수자원에서부터 생산된 수돗물 1m³의 실질적인 가치는 487.97원으로 제시하였다. 이영애(2007)의 낙동강 하구둑의 기능에서 하구둑의 건설을 통한 경제 생산은 연간 120억원의 편익이 발생하였으나 자원감소에서는 1,020억원의 비용이 발생하였다. 생태계 및 자연환경에 대한 평가에서 김남국 등(2008)의 산지가치의 계량화 연구에서 국내 산림의 1차 생산 및 생체량은 2조 6,000억원의 가치를 나타내고 있었다. 이석

모 등(2000a)의 한국의 자연환경 분석에 대한 연구에서 한국의 재생가능한 에너지는 비의 화학적 가치가 연간 18억 \$로 가장 높은 기여를 하고 있었다. 갯벌 및 해양 생산에 대한 연구는 Lee et al.(2003)의 새만금 갯벌 분석에서 갯벌의 개발 전과 후의 비교에서 개발 후 경제적 생산은 10배정도 증가하였지만 갯벌 및 조하대의 현존 자원은 20배 정도 가치가 감소한 것으로 나타났다. 강대석 등(2006)의 갯벌 생태계가치에서 영산강의 갯벌이 연간 770억원의 생태경제적 가치를 나타내는 것으로 나타났다. 김남국 등(2001), 김남국 등(2002)의 국내 넙치 생산의 지속성에서 자연산 넙치는 연간 11억 \$, 양식 넙치는 2억 \$의 생태경제적 가치를 나타내었다. 이 연구 되어졌고 조석에 대한 연구는 주용수(2006)의 시화호 조력발전의 영향에 대한 연구에서 조력발전을 통해 얻는 전력생산의 실질적 가치는 연간 1,690억원의 편익이 발생하는 것으로 나타났다.

(2)국외사례

국외의 경우 환경재 및 생물의 생태경제적 가치평가 자체를 목적으로 한 연구는 거의 없으나 앞서 밝혔듯이 각 항목별로 산정된 에머지값에 에머지/화폐비율을 적용해 생태경제적 가치를 나타낸 부분을 선정하여 보면 Cohen et al.(2007)의 지구 전체의 토양, 수자원, 어류, 산림 등의 자연자산 평가에서 토양소실은 연간 6,000억 US\$, 물과 어류가 각각 약 3,000억 US\$, 산림 약 4,000억 US\$의 생태경제적 가치 손실이 나타난다고 하였다. 또한 Brown & Ulgiati(1999)의 지구 생물권과 자연자산 평가에서 식물 보유량의 생태경제적 가치는 약 335조 US\$, 동물은 약 37조 US\$로 평가하였다. Zuo et al.(2004)의 중국 양천 보전지구 인공, 자연습지 비교 분석에서 자연 습지에서 서식하는 생물군의 가치는 연간 890만 US\$로 나타났고

물새서식지(인공서식지)에서는 각종 생물이 연간 84만 6천 US\$의 생산적 가치를 나타낸다고 평가하였다. Qin et al.(2000)의 마이 포 맹그로브 습지 분석에서 염습지(marsh)의 연간 생산 가치는 259만 HK\$라고 하였다.

이렇듯 다양한 대상에 대하여 에머지 분석을 실시하여 그 생태경제적 가치를 측정하였는데, 이러한 시도들은 기존의 경제학적 방법을 통해 평가된 가치가 인간 중심에서 개인의 지불의사를 통해 주관적인 분석을 한 반면, 대상에 대하여 객관적이면서도 과학적인 에머지 분석법을 통하여 환경재에 대한 본질적인 의미를 내포한 가치 평가가 가능함 따라 추 후 생태경제적 가치에 대한 중요성 인식과 이를 통한 활용이 더욱 높아질 것으로 보인다.



III. 연구방법

1. 에머지 분석

가. 에너지 시스템 다이어그램 작성

에머지 분석을 하기 위해서는 우선 Odum(1996)이 제안한 에너지 시스템 언어를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동의 생산, 소비, 재순환 등의 변화를 전체적으로 파악(top-down)하기 위해 에너지 시스템 다이어그램을 작성한다(Fig. 9).

다이어그램의 작성 절차는 첫째, 분석대상 시스템의 경계를 설정한다. 시스템 분석을 위해서 각 시스템의 육지면적과 해양면적(대륙붕)을 시스템의 공간적인 경계로 설정한다. 둘째, 시스템 경계 외부에서 대상 시스템에 영향을 미치는 주요 에너지원을 파악한 후, 대상시스템 내의 생산, 소비, 재순환 과정을 파악한다. 셋째, 외부 에너지원을 transformity 순으로 왼쪽에서 오른쪽으로 시스템의 경계외부에 차례로 배열하고, 시스템 경계 밖의 외부 에너지원으로부터 시작하여 내부의 생산자, 소비자에 대한 에너지, 물질 그리고 화폐의 흐름에 따라 선을 연결하여 다이어그램을 완성한다.

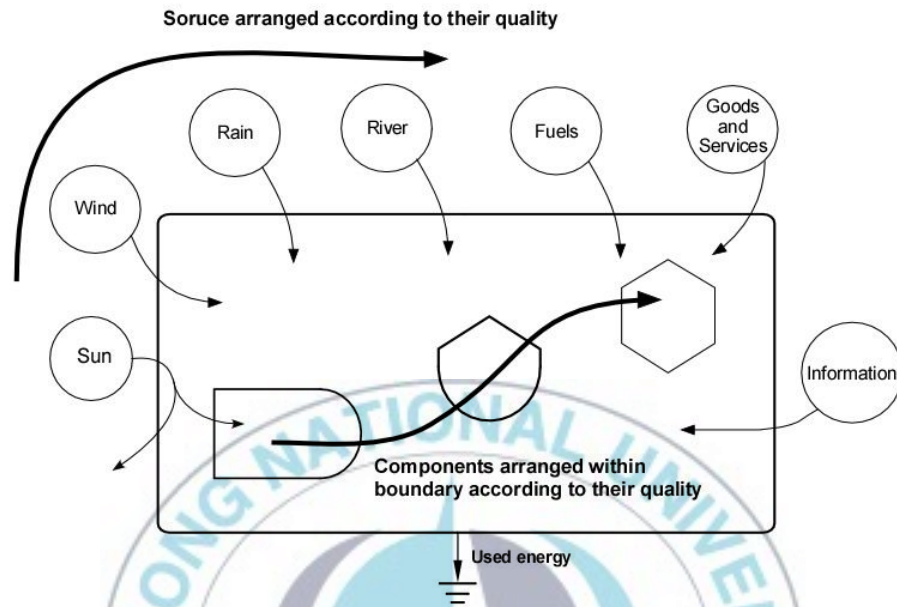


Fig. 9. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

나. 에머지 분석표 작성

분석대상 시스템의 자연환경과 경제활동에 있어 외부 에너지원의 역할과 가치를 평가하기 위해서 Table 5와 같은 형식의 에머지 분석표를 작성한다.

Table 5. General format of the energy evaluation table

No.	Item	Raw data (J/yr, g.yr, or \$/yr)	Solar transformity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (Em\$/yr)
1	Sun	xx	xx	xx	xx

첫 번째 열에는 각 항목의 순서를 기입한다.

두 번째 열에는 분석대상 시스템의 자연환경과 인간의 경제활동을 가능케 하는 외부의 주요 에너지원과 내부 구성요소의 목록을 기입한다. 각 분석대상 시스템에 있어 자연환경과 경제활동을 가능케 하는 외부의 주요 에너지원을 태양, 바람, 비, 파도, 조석과 하천 유입량, 석탄소비량, 가스사용량, 석유 사용량, 그리고 각종 교역과 교환에 의해 유입되는 재화 및 용역으로 파악한다. 내부 구성요소에는 식물, 어류, 조류, 저서생물, 연안사주 등의 생산자, 소비자, 내부 물질보유량 등이 포함된다.

세 번째 열에는 주요 에너지원의 실제 에너지, 물질 또는 화폐 단위의 값을 기입한다. 본 연구에서는 태양, 바람, 비, 파도, 조석, 하천, 석탄, 천연가스, 석유, 전기는 에너지 단위로, 교역과 교환을 통한 재화와 용역은 화폐단위로 계산한다.

네 번째 열에는 주요 에너지원에 대한 Solar Transformity, 재화 및 용역에 대한 Emergy/Money Ratio를 기입한다.

다섯 번째 열에는 두 번째 열의 주요 에너지원이 가지는 값에 세 번째 열의 Solar Transformity 또는 Emergy/Money Ratio를 곱하여 에머지 값을 산출한다.

여섯 번째 열에는 주요 에너지원의 에머지 값을 Emergy/Money Ratio로 나누어 계산한 거시 경제적 가치(Macroeconomic Value)를 산출한다.

다. 시스템 경계의 설정

본 연구에서 분석하게 될 지구 생물군은 크게 육상 생물과 해양 생물군으로 나누었고 이 후 육상 식물군, 육상 동물군, 해양 식물군, 해양 동물군 등 총 4가지 생물군으로 구분하였다. 이들의 서식면적은 먼저 육상과 해양으로 나누어지기 때문에 지구 총 면적 $511 \times 10^6 \text{ km}^2$ 에서 육상 총 면적

149×10⁶ km²와 해양 총 면적 362×10⁶ km²로 나누었다. 그러나 실제로 남극의 빙하지역은 식물의 서식이 희박하기 때문에 빙하지역 14.3×10⁶ km²을 제외한 135×10⁶ km² 지역을 육상 생물군의 시스템 경계로 설정하였다. 또한 육상의 식물은 에너지량의 산출을 위하여 각 생물권(biome)의 면적을 알아야 하기 때문에 Table 6과 같이 구분하였다. 해양에서는 일부 저서동물과 해조류, 연안성 어류 등이 대부분 외해보다는 연안 지역에 서식하기 때문에 이들의 서식 면적은 27×10⁶ km²를 따로 구분하여 사용하였다.

Table 6. The area of biome in global area

Biome	Area(10 ⁶ km ²)	Reference
Arctic Tundra	5.6	Bliss & Matveyeva, 1992
Boreal forest	13.7	Kurz & Apps, 1993 Bonan & Shugart, 1989
Temperate forest	11.6	
(coniferous forest)	(5.5)	Heimann, 1993
(deciduous forest)	(6.1)	
Temperate grassland	15.0	Singh, 1983
Mediterranean shrublands	2.8	Roy et al., 2001
Crops ecosystem	13.5	FAO, 1997
Tropical Savanna & Grassland	27.6	Roy et al., 2001
Desert	27.7	Roy et al., 2001 Noble & Gitay, 1996
Tropical forest	17.5	Roy et al., 2001
Ice and other	14.3	Roy et al., 2001
Total terrestrial area	149.3	
Ocean	362	Whittaker & Likens, 1975
(coast)	(27)	Whittaker & Likens, 1975
Total global area	511	

2. 생물군의 생산성에 대한 에너지 산정

지구 생물군의 에머지 분석을 실시하기 위해서는 각 생물군의 에너지량이 먼저 계산되어야 한다. 이를 위해서는 각 생물군의 생물량과 일차(이차) 생산성 자료가 필요하다. 따라서 각 생물군의 에너지 자료는 기존의 여러 연구자들에 의해 발표되어진 자료를 통해 연구의 목적에 맞게 선별하였다. 또한 에머지 분석에 필요한 물리 화학적 에너지량은 다양한 방법으로 추적하였다.

가. 육상 및 해양 식물군

육상 식물군의 에머지 분석을 하기 위해서는 식물의 1차순생산성(net primary production, NPP)과 생체량(biomass)이 필요하다. 기존의 1차순생산성과 생체량의 연구는 1950년대 이후 생태계의 기초 에너지 및 자원에 대한 연구로 많이 실시되었으나, 대부분 각 생물군계(biome)별 또는 특정종을 중심으로 연구되어졌다. 그러나 본 연구에서는 전 지구 육상식물을 대상으로 분석하지만 기존의 생물군계에 따른 식생분포가 아닌 선태식물, 양치식물, 나자식물, 피자식물 등과 같이 분류군에 따른 1차순생산성과 생체량이 필요하다. 그러나 각각의 생물군계에는 매우 다양한 식물군들이 혼합되어 서식하고 있기 때문에 기존의 자료는 본 연구의 목적에 부합되지 않는다.

따라서 본 연구에 필요한 자료를 얻기 위해서는 많은 한계점이 따르는데 먼저 선태식물은 나자식물이나 피자식물과는 서식장소나 특성에서 차이가 나기 때문에 툰드라, 북방 아한대 산림, 열대우림 지역에서 1차순생산성 및 생체량의 자료는 많은 연구를 통해 이미 제시되어 있다. 그러나 그 외 식

물군은 각 생물군계에서 가장 우점적으로 서식하는 식물군을 선택하여 사용하였다(Fig. 10, 11). 즉, 나자식물은 침엽수림으로 대부분 북방아한대 산림과 온대산림의 침엽수림 지역에서 가장 우점적인 세력을 나타내고 있기 때문에 이 지역의 1차순생산성과 생체량으로 나자식물을 대신하였다. 그리고 그 외 온대초지, 사막, 열대우림, 사바나, 온대활엽수림 등의 지역은 피자식물이 우점적으로 나타나기 때문에 이 지역들의 1차순생산성과 생체량은 피자식물로 대체하였다. 물론 나자식물이 온대활엽수림, 열대우림에서도 일부 분포를 하지만 이는 지구 전체의 에너지량으로 보았을 때는 본 연구 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 무시하였다. 또한 양치식물은 그 분포가 특정지역에 집중되어 있기 보다는 전 지역에 걸쳐 분포하고 그 양이 적어 이번 연구에서는 제외하였다.

해양 식물군은 편의상 식물플랑크톤과 해조류로 크게 구분되어 있는데 이와 관련된 에너지 자료는 이미 많은 연구가 진행되어졌기 때문에 기존 자료를 참고하였다.

여기서 본 연구에서 식물의 에너지값을 제시하기 위해 인용한 NPP 값에 대한 모델 및 수식은 다음과 같다.

1) Miami model(Leith, 1973)

$$NPP = \min \left[\frac{3000}{1 + e^{(1.315 - 0.1197T)}}, 3000 \times (1 - e^{-0.000664P}) \right]$$

NPP: 순일차생산력 ($\text{gm}^{-2} \text{ year}^{-1}$)

T: 연평균기온($^{\circ}\text{C}$)

P: 연강수량(mm)

2) C.W Thornthwaite memorial model (Leith and Box, 1972)

$$NPP = 3000 \times (1 - e^{0.0009695(AET-20)})$$

NPP: 순일차생산력 ($\text{gm}^{-2} \text{ year}^{-1}$)

AET: 연실증발산량(mm)

3) Tsukuba model (Uchijima and Seino, 1985)

$$NPP = Rn \times 0.29 \times e^{(-0.216(Rn/IP)^2)}$$

NPP: ton dry matter/(ha · year)

I: 물의 증발잠열 (Kcal/g)

p: 연간강수량(cm)

4) Whittaker formula

$$W = Bw/A$$

W: 생지의 1년간 생장량

w:가지의 목질부와 수피의 건중량(kg)

A: 가지연령

B: 가지연령에 대한 가지 건중량의 대수 회귀방정식에서 얻은 상수

추정방정식

$Wt: aD^bH^c$

Wt: 건중량(kg), D: DBH(cm) 흉고직경

H: height(m), a: 상수, b, c: 지수

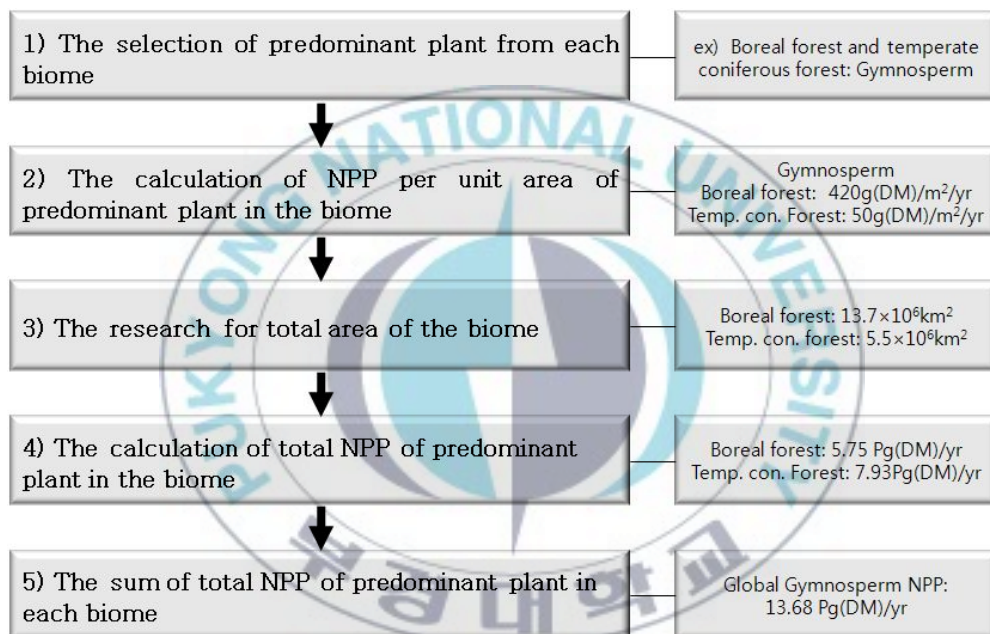


Fig. 10. The calculation process of net primary production(NPP) of terrestrial plants per each taxon.

한편, 에머지 분석에 앞서 시스템 내부로 유입한 외부 에너지량에 대한 기초 자료가 필요하다. 주로 각 지역별 태양에너지의 입사량(insolation), 반사율(albedo), 평균 풍속, 평균 강수량 등인데 이는 Atmospheric science data center(<http://eosweb.larc.nasa.gov>)에서 각 생물군별로 10-20개 지점을 선정하여 평균값을 계산하였다(Fig. 12). 또한 농업생태계(Crops ecosystem)에 대한 자료는 특정한 생물군계에 나타나는 것이 아니고 육상생태계 대부분의 지역에서 나타나기 때문에 지구 평균 자료를 토대로 추정하였다.

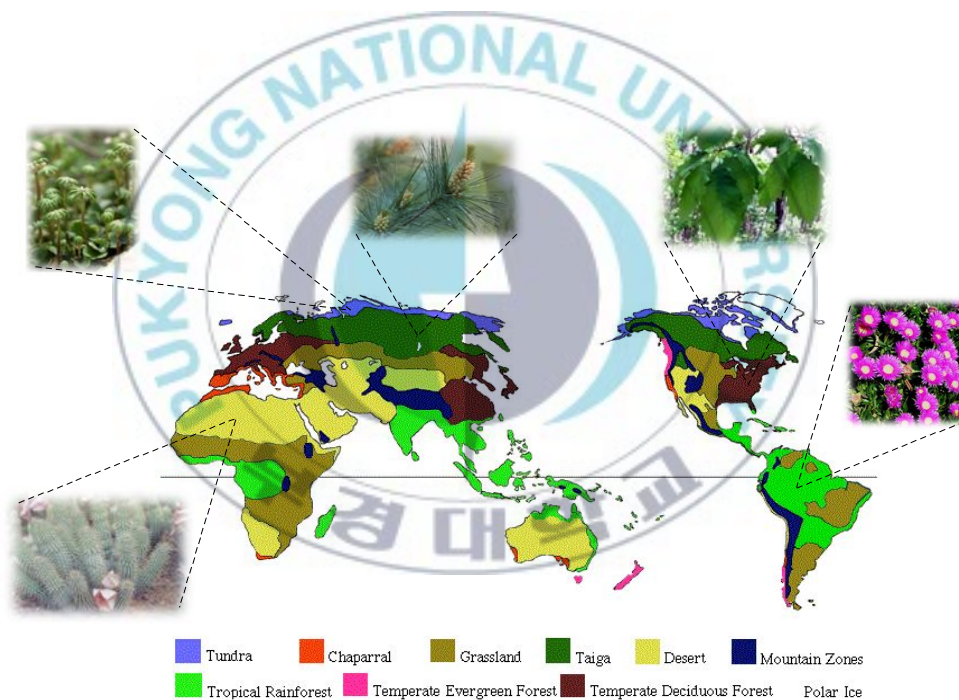


Photo by M. Ritter(Geography Department of Geography & Geology University of Wisconsin)

http://www.digitalpencil.org/Projects_AllGrades/AroundtheWorld/Biomes

Fig. 11. Assumption of net primary production and biomass of each biome type.



Fig. 12. Measurement method of input energy required energy analysis; Atmospheric science data center (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>).

나. 육상 및 해양 동물군

육상 동물군의 에머지 분석을 하기 위해서는 동물의 2차생산성(secondary production)과 생체량(biomass)이 필요하다. 기존의 연구는 대부분 포유류나 조류와 같이 일부 육상 대형 동물의 종 수준에서 이차생산성이나 생체량을 조사하지만 무척추동물군과 같이 미소 동물군에 대한 자료는 극히 제한적이다. 또한 본 연구에서는 육상 동물을 초식동물, 육식동물, 부식동물로 구분하여 분석하는데, 이는 각 분류군별로도 이런 특성들이 혼합되어 있어 이에 대한 자료 추정이 매우 힘들다.

따라서 본 연구에서는 분류군별에 따른 생체량(Bowen, 1966)을 기초로 각 종류별 P/B ratio를 조사하여 이차생산성을 추정할 것이다. 또한 초식, 육식, 부식에 대한 구분에서는 조사된 분류군 중 환형동물이나 일부 무척추동물과 같이 그 종류 대부분이 부식성인 종류들은 부식성 동물로 선정하였고 그 외 나머지 생물군들은 Odum(1957)의 Pyramid of biomass의 비율에 따라 초식과 육식동물로 구분하였다(Fig. 13).

해양동물은 편의상 유영동물, 저서동물, 부유동물로 구분하였는데 이들 역시 많은 종들이 혼합되어져 있어 이에 대한 자료 추정도 매우 힘들다. 따라서 해양 동물군도 Bowen(1966)이 언급한 분류군의 생체량 자료를 기초로 각 분류군별 P/B ratio를 구하여 이차 생산성을 추정하고 이 후 각 분류군의 서식 특성에 따라 유영, 저서, 부유동물로 구분하여 나타내었다.

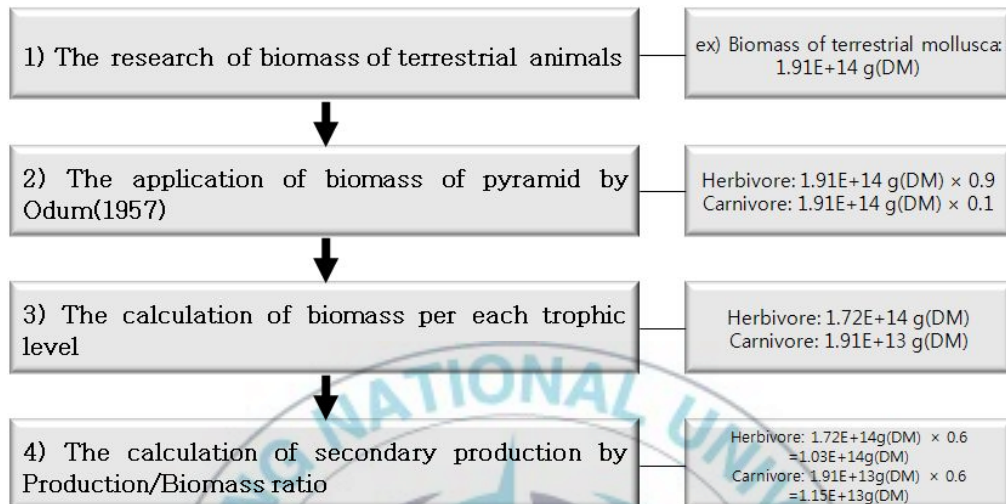


Fig. 13. The calculation process of secondary production of terrestrial animals.

IV. 결과

1. 지구 육상 식물군의 에머지 평가

가. 에너지시스템 다이어그램

지구 육상 식물의 에머지 분석을 위해 작성한 에너지시스템 다이어그램은 Fig. 14와 같다. 식물이 생육하는데 필요한 외부에너지에는 태양, 바람, 비, 지구 내부 열과 같은 재생가능한 에너지를 포함하였고, 내부 구성요소는 식물, 동물, 토양(물, 영양분 포함), 유기체설물로 단순화하여 나타내었다. 태양, 바람, 비, 지구 내부 열 에너지를 이용한 식물의 생산과, 동물 및 미생물에 의한 유기물소비, 그리고 이를 통한 물질 재순환을 표시하였다. 시스템에서 외부로 빠져나가는 물질 흐름은 증발산을 통한 물의 흐름, 표면수, 바다 유출과 이에 동반한 토양, 영양분 유출이 있으며, 또한 열역학 제 2법칙에 따라 나타나는 에너지 손실을 시스템 경계를 나타내는 네모 상자의 아래쪽에 나타내었다.

나. 순일차생산성

지구 육상 식물군의 에머지 분석을 실시하기 위해서는 각 식물군의 에너지량이 먼저 계산되어야 한다. 이를 위해서는 식물의 생물량과 순일차생산성(NPP) 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 생물군별로 많은 연구자들이 조사한 우점 식물군이나 주요 서식종의 생산성 자료를 이용하여 각 지역별로 분류군에 따른 식물생산성을 최대한 추정하였다(Table 7).

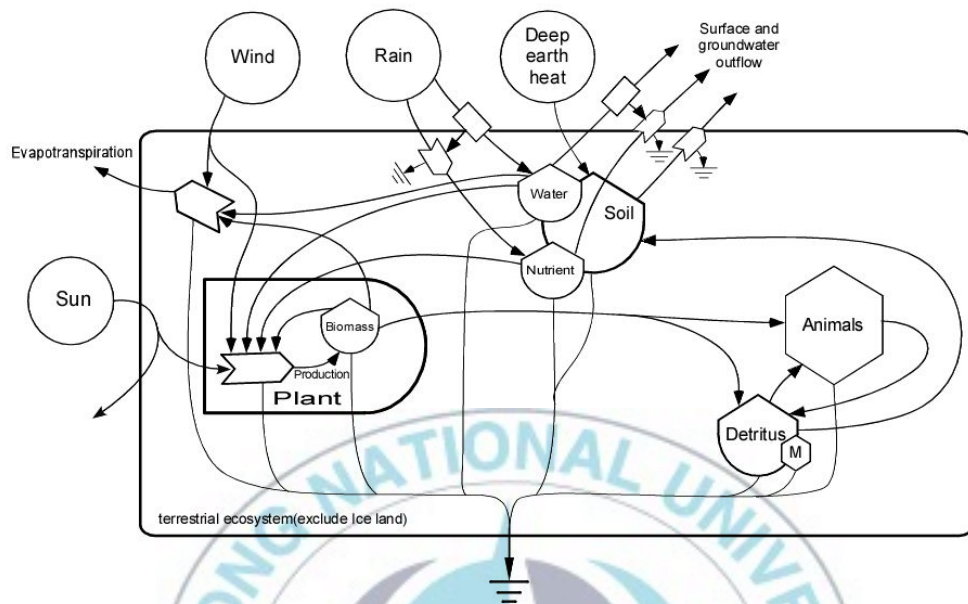


Fig. 14. Energy systems diagram for the global terrestrial ecosystem.

즉, 지구 생물권에서 나자식물의 경우 대부분 북방아한대산림(boreal forest)이나 온대 침엽수림(temperate coniferous forest) 지역에서 가장 우점적으로 서식하고 있어 그 지역의 생물량이나 생산성은 대부분 나자식물에 의한 것으로 추정할 수 있다. 또한 피자식물은 그 외 툰드라(tundra), 온대활엽수림(temperate deciduous forest), 온대초지(temperate grassland), 사바나(savanna), 사막(desert), 지중해 관목림(Mediterranean shrublands), 열대우림(tropical rain forest) 등에 서식하는 대부분의 식물들이 현화식물인 피자식물군에 속하기 때문에 이 지역들의 생물량이나 생산성은 피자식물에 포함시켰다.

특히 선태식물은 대상 생태계에서 우점을 한다기보다는 다른 생물군계에 비해 툰드라, 북방아한대산림, 열대우림지역에서 그 서식비율이 비교적 높기 때문에 선정하였다. 그러나 실질적으로는 각 식물군들이 주요 서식지가 아니어도 전 세계 대부분의 지역에서 산발적으로 서식하고 있기 때문에 자료 선정에는 일정한 한계가 있을 수밖에 없다.

따라서 이를 토대로 각 분류군별 NPP의 양을 추정한 결과 선태식물은 $4.30\text{E}+15 \text{ g(DM)/yr}$, 나자식물은 $1.37\text{E}+16 \text{ g(DM)/yr}$, 피자식물은 $1.10\text{E}+17 \text{ g(DM)/yr}$ 로 나타났다. 각 분류군의 NPP를 모두 합한 지구 전체 육상식물의 NPP는 $1.28\text{E}+17 \text{ g(DM)/yr}$ 이었다. 이는 Ajtay et al.(1979), Whittaker & Likens(1975)의 결과와 일부지역에서 약간 차이를 보이지만, 최근의 연구인 Roy et al.(2001)의 결과와 비교적 유사하여 지구 육상식물 전체 및 분류군별 에너지 계산을 위한 자료로 이용하는데 큰 문제는 없을 것으로 보인다(Table 8).

Table 7. Net primary production of biomes of the earth

Biome type	Dominant plant group & NPP (gDM/m ² /yr)	Total NPP (Pg DM/yr)	Area (10 ⁶ km ²)
Arctic tundra	As: 201g ^{a,l)} Bp: 11g ^{b)}	1.13 0.06	5.6
Boreal forest	Gs: 420g ^{c,m)} Bp: 50g ^{d)}	5.75 0.69	13.7
Temperate forest	As: 1,200g ^{e,n)} Gs: 1,300g ^{f,o)}	6.60 7.93	11.6 (Gs:5.5, As:6.1)
Temperate grassland	As: 666g ^{g)}	9.99	15
Mediterranean shrublands	As: 1,000g ^{h)}	2.80	2.8
Crop ecosystem	As: 687g ^{h)}	9.27	13.5
Tropical savanna & grassland	As: 1,347g ^{h)}	37.18	27.6
Desert	As: 150g ^{i,p)}	4.16	27.7
Tropical rain forest	As: 2,200g ^{j)} Bp: 203g ^{k)}	38.50 3.55	17.5
Ice and other	—	—	14.3
Total		127.61	149.3
Total bryophyte (Bp) NPP		4.30E+15g(DM)/yr	
Total gymnosperm (Gs) NPP		1.37E+16g(DM)/yr	
Total angiosperm (As) NPP		1.10E+17g(DM)/yr	
Total terrestrial plant NPP		1.28E+17g(DM)/yr	

* NPP=Net primary production, Pg=10¹⁵g

Reference: a: Bliss & Matveyeva, 1992; b: Bliss, 1962; c: Gower et al., 1994; d: Bisbee et al., 2001; e: Nadelhoffer et al., 1985; f: Vogt, 1991; g: Melillo et al., 1993; h: Roy et al., 2001; i: Hadley & Szarek, 1981; j: Whittaker & Likens, 1975; k: Clark et al., 1998; l: Pearsall & Newbould, 1957; m: Lieth, 1975; n: Powell & Day, 1991; o: Ewel et al., 1987; p: Rundel & Gibson, 1996;

Table 8. Comparison of the net primary production of each biome type

Biome type	Reviewed for this study Pg(DM)/yr	Roy et al. (2001) Pg(DM)/yr	Ajtay et al. (1979) Pg(DM)/yr	Whittaker & Likens (1975) Pg(DM)/yr
Arctic tundra	1.2	1.0	2.0	1.1
Boreal forest	6.4	5.2	6.4	9.6
Temperate forest	14.5	16.2	12.6	14.9
Temperate grassland	10.0	11.2	8.8	5.4
Mediterranean shrublands	2.8	2.8	1.8	6.0
Crops ecosystem	9.3	8.2	13.6	9.1
Tropical savanna and grassland	37.2	29.8	35.4	25.5
Desert	4.2	7.0	2.8	1.6
Tropical rain forest	42.1	43.8	36.4	37.4
Others	–	–	–	6.9
Total	127.7	125.2	118.8	116.5

* Pg = 10^5 g

다. 에머지 분석

지구 육상 식물군의 총 에머지는 지구 내부로 들어오는 외부 에너지인 태양, 지구 내부 열, 조석 에너지로 부터 기인하여 각 식물의 생산에 이용 되기 때문에 지구 총 에머지인 $15.83E+24$ sej/yr이 지구 육상 식물군의 총 에머지가 된다. 또한 본 연구에는 총 육상 식물뿐만 아니라 분류군별에 따라 각각의 에머지를 분석하였다. 먼저 각 식물군의 에머지 분석에 앞서 시

시스템 내부로 유입한 에너지량을 계산하기 위하여 Table 9와 같이 유입에너지 기초 자료를 정리하였다. 이 연구에서 식물군의 에머지 평가 경계(면적)는 생물군계를 기초로 정하였는데, 각 생물군계 내에서도 지역별로 태양에너지의 입사량(insolation), 반사율(albedo), 평균풍속, 평균 강수량 등이 다양하게 나타났다. 따라서 각 지역별 에너지를 Atmospheric Science Data Center (<http://eosweb.larc.nasa.gov>)에서 각 생물군별로 10-20개 지점을 선정하여 평균값을 계산하였다. 또한 농업생태계(Crop ecosystem)에 대한 자료는 특정한 생물군계에 나타나는 것이 아니고 육상생태계 대부분의 지역에서 나타나기 때문에 지구 평균 자료를 토대로 추정하였다.

Table 9. Energy inputs to each biome type

Biome type	Avg. Insolation ^{a)} (J/m ² /yr)	Avg. Albedo ^{b)}	Avg. Wind V. ^{c)} (m/s)	Avg. Precipitation ^{d)} (mm)	Avg. evapo-transpiration (mm)
Arctic tundra	3.02E+09	0.41	4.99	200	120
Boreal forest	3.69E+09	0.31	4.40	600d)	360
Temperate forest	4.99E+09	0.19	5.14	1,300	780
Temperate grassland	5.63E+09	0.24	4.93	650	390
Mediterranean shrublands	5.60E+09	0.18	4.37	650	390
Crop ecosystem	5.44E+09	0.30	3.28 ^{e)}	800	510
Tropical savanna & grassland	7.15E+09	0.18	4.02	750	450
Desert	7.01E+09	0.28	5.03	250	150
Tropical rain forest	6.42E+09	0.14	2.74	2,000	1,200

Source : Atmospheric Science Data Center (<http://eosweb.larc.nasa.gov>)

a) appendix 15; b) appendix 16; c) appendix 17; d) Roy et al., 2001; e) Global average wind velocity from Archer & Jacobson (2005).

지구 식물군의 에머지 분석은 Table 10에 나타내었는데, 지구 육상생태계에서 식물이 생육하는데 이용한 에너지 계산에 태양, 바람, 증발산을 이용하였다. 전체 강수량 가운데 증발산량을 제외한 표면 유출수는 식물이 이용하지 않는 부분이어서 제외하였다. 각 식물분류군별로 태양에너지(전체 육상식물 $4.89\text{E}+23$ J/yr, 선대식물 $2.32\text{E}+22$ J/yr, 나자식물 $4.67\text{E}+22$ J/yr, 피자식물 $4.19\text{E}+23$ J/yr)가 에너지량 측면에서는 가장 많은 부분을 차지하였다. 그러나 에머지량을 살펴보면 증발산 에머지(전체 육상식물 $1.47\text{E}+25$ sej/yr, 선대식물 $1.28\text{E}+24$ sej/yr, 나자식물 $1.95\text{E}+24$ sej/yr, 피자식물 $1.15\text{E}+25$ sej/yr)가 각 분류군별 에머지 사용량의 대부분을 차지하였다. 따라서 각 분류군별 총 에머지 사용량에는 증발산 에머지만을 포함하였다. 이는 증발산 에너지나 바람 에너지는 지구 생태계에 유입하는 태양에너지원을 원동력으로 하여 나타나는 에너지이기 때문에 이들을 단순히 더하게 되면 중복계산이 된다. 따라서 이를 피하기 위하여 유입되는 에너지 중 가장 큰 증발산 에너지만을 선택하여 계산하였다.

Table 10. Energy evaluation for the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms and angiosperms

Item	Energy (J/yr)	Transformity (sej/J) Campbell et al., 2005	Solar emergy (sej/yr)
Terrestrial plants(exclude others)			
Sunlight	4.89E+23	1	4.89E+23
Wind, kinetic energy	7.21E+19	2,513	1.81E+23
Evapotranspiration	3.07E+20	48,000	1.47E+25
Deep earth heat	1.45E+20	12,000	1.74E+24
Subtotal emergy			1.47E+25
Bryophytes			
Sunlight	2.32E+22	1	2.32E+22
Wind, kinetic energy	1.54E+19	2,513	3.87E+22
Evapotranspiration	2.67E+19	48,000	1.28E+24
Deep earth heat	4.33E+19	12,000	5.19E+23
Subtotal emergy			1.28E+24
Gymnosperms			
Sunlight	4.67E+22	1	4.67E+22
Wind, kinetic energy	1.69E+19	2,513	4.25E+22
Evapotranspiration	4.07E+19	48,000	1.95E+24
Deep earth heat	2.52E+19	12,000	3.03E+23
Subtotal emergy			1.95E+24
Angiosperms			
Sunlight	4.19E+23	1	4.19E+23
Wind, kinetic energy	5.34E+19	2,513	1.34E+23
Evapotranspiration	2.39E+20	48,000	1.15E+25
Deep earth heat	1.14E+20	12,000	1.37E+24
Subtotal emergy			1.15E+25
Others			
Subtotal emergy			1.13E+24
Total emergy			1.58E+25

Appendix 11~14

라. 에너지변환도 산정

앞서 밝혔듯이 에너지변환도 산정은 에머지 연구에서 매우 필수적인 요소로, 에너지 계층구조의 에너지 흐름이나 보유량에 대한 질의 척도로 이용되고 그 양에 따라 에머지를 계산하기 때문에 이에 대한 정확한 연구가 필요하다. Table 11에서 보듯이 지구 육상식물의 에너지변환도는 총 에너지 $2.13\text{E}+21$ J/yr와 에머지 $1.58\text{E}+25$ sej/yr을 통해 $7.43\text{E}+03$ sej/J로 산출되었다. 선태식물은 에너지량 $7.18\text{E}+19$ J/yr와 에머지량 $1.28\text{E}+24$ sej/yr에 의해 $1.78\text{E}+04$ sej/J의 에너지변환도가 나타났고 나자식물은 에너지량 $2.28\text{E}+20$ J/yr와 에머지량 $1.95\text{E}+24$ sej/yr에 의해 $8.55\text{E}+03$ sej/J 그리고 피자식물은 에너지량 $1.83\text{E}+21$ J/yr와 에머지량 $1.15\text{E}+25$ sej/yr을 통해 $6.28\text{E}+03$ sej/J의 에너지변환도가 계산되어졌다.

Table 11. Transformities of the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms, and angiosperms

Item	Energy Data (J/yr)	Solar Emergy (sej/yr)	Transformity (sej/J)
Terrestrial plants (include others)	$2.13\text{E}+21$	$1.58\text{E}+25$	$7.43\text{E}+03$
Bryophytes	$7.18\text{E}+19$	$1.28\text{E}+24$	$1.78\text{E}+04$
Gymnosperms	$2.28\text{E}+20$	$1.95\text{E}+24$	$8.55\text{E}+03$
Angiosperms	$1.83\text{E}+21$	$1.15\text{E}+25$	$6.28\text{E}+03$

마. 에머지 보유량 분석

각 식물의 전 세계 식물생체량(phytomass)을 이용한 보유저장고(storage)의 에머지 분석을 위해 먼저 각 식물군별 생체량을 계산하였다(Table 12). 이는 앞서 제시된 NPP의 양을 추정된 방법과 동일하게 각 생물군계별로 우점하는 식물군의 생체량을 통해 각 지역별로 분류군 별에 따른 그 양을 추정하였다. 그 결과 선태식물은 $4.29\text{E}+16$ g(DM), 나자식물 $2.89\text{E}+17$ g(DM), 피자식물 $1.09\text{E}+18$ g(DM)으로 나타나 총 지구 육상식물의 생체량은 $1.42\text{E}+18$ g(DM)으로 나타났다. 따라서 생체량 자료에 따른 에너지와 Table 11에서 계산한 에너지변환도를 곱하여 각 식물군의 에머지 보유량(storage)을 구하였다. 전체 육상식물의 에머지 보유량은 $1.76\text{E}+26$ sej로 나타났고, 선태식물은 $1.28\text{E}+25$ sej, 나자식물은 $4.13\text{E}+25$ sej, 그리고 피자식물이 $1.14\text{E}+26$ sej로 나타났다(Table 13).

Table 12. Phytomass estimation of the global plant groups for the terrestrial plants energy evaluation

Biome type	Plant group	Phytomass Pg(DM)
Arctic tundra	As	4.5 ^{a)}
	Bp	0.5 ^{b)}
Boreal forest	Gs	114.0 ^{17a)}
	Bp	6.9 ^{b)}
Temperate forest	As	165.0 ^{a)}
	Gs	175.0 ^{a)}
Temperate grassland	As	14.0 ^{a)}
Mediterranean shrublands	As	34.0 ^{a)}
Crops ecosystem	As	14.0 ^{a)}
Tropical savanna and grassland	As	158.0 ^{a)}
Desert	As	20.0 ^{a)}
Tropical rain forest	As	680.0 ^{a)}
	Bp	35.5 ^{b)}
Total bryophyte phytomass		4.29E+16g(DM)
Total gymnosperm phytomass		2.89E+17g(DM)
Total angiosperm phytomass		1.09E+18g(DM)
Total terrestrial plant phytomass		1.42E+18g(DM)

* Pg = 10⁵g

a: Ajtay et al., 1979; b: Rodin & Bazilevich, 1965

Table 13. Energy evaluation for storages of the global terrestrial plants, bryophytes, gymnosperms, and angiosperms

No.	Item	Energy Data (J)	Transformity (sej/J)	Solar Emergy (sej)
1.	Terrestrial plants	2.37E+22	7.43E+03	1.76E+26
2.	Bryophytes	7.16E+20	1.78E+04	1.28E+25
3.	Gymnosperms	4.83E+21	8.55E+03	4.13E+25
4.	Angiosperms	1.82E+22	6.28E+03	1.14E+26

2. 지구 육상 동물군의 에머지 평가

가. 에너지시스템 다이어그램

지구 육상 동물군의 에머지 분석을 위해 작성한 에너지시스템 다이어그램은 Fig. 15과 같다. 생산자인 식물이 생육하는데 필요한 외부에너지로 태양, 바람, 비, 지구 내부 열을 포함하였고, 내부 구성요소는 식물과 토양(물, 영양분 포함), 각각의 동물군, 유기쇄설물로 나타내었다. 태양, 바람, 비, 지구 내부 열 에너지를 이용한 식물의 생산은 1차 소비자인 초식동물이 이용을 하고 그 나머지는 땅속으로 부식되어 부식동물이 이용한다. 그리고 육식동물은 초식동물을 이용하고 이들 각각은 유기 쇄설물로 전환되어 다시 토양으로 물질의 재순환이 나타난다. 시스템 외부로 빠져나가는 물질 흐름은 증발산, 표면수, 토양, 영양분 유출이 있고 열역학 제 2법칙에 의한 에너지 손실이 나타난다.

나. 이차생산성

지구 육상 동물군의 에머지 분석을 실시하기 위해서는 각 동물군의 에너지량이 먼저 계산되어야 하는데, 이는 동물의 연간 이차생산성을 통해 산출되어진다. 그러나 각 동물의 연간 이차생산성에 대한 연구는 가축과 같이 생산성이 중요시 되는 일부 동물에서 매우 제한적으로 이루어지고 있기 때문에 이에 대한 자료가 매우 부족한 상태이다. 따라서 각 동물군의 생체량과 P/B ratio를 통해 이차생산성을 추정하였다.

본 연구에서 분석할 육상 동물군은 초식동물과 육식동물 그리고 부식동물과 같이 먹이습성에 따라 구분하여 분석을 실시하였는데, 이런 집단은 대부

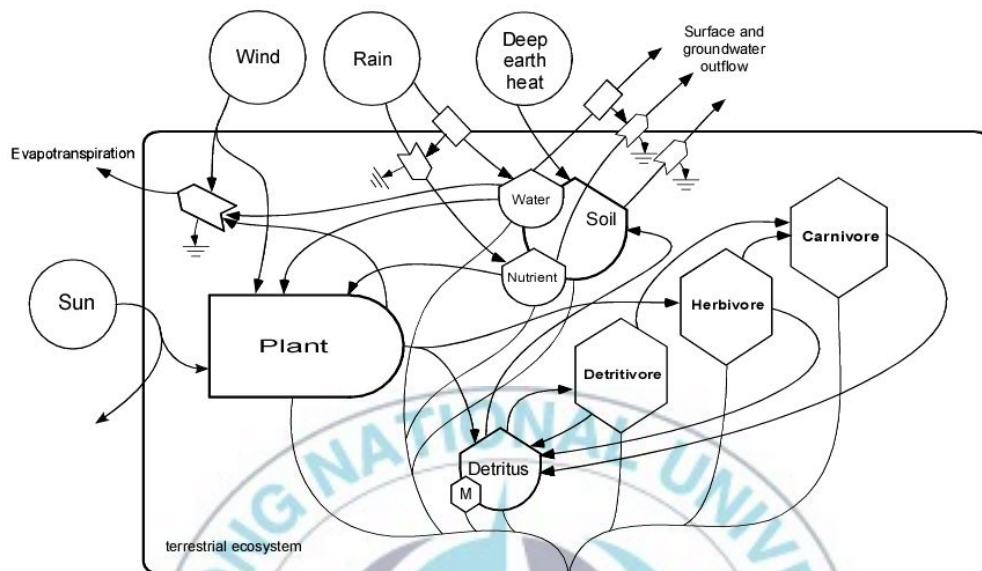


Fig. 15. Energy systems diagram for the global terrestrial animals.

Table 14. Biomass and Secondary production of terrestrial animal group

Group	Biomass g(DM) ^{a,b)}	P/B ratio	Secondary production g(DM)/yr
Annelida	9.10E+14	2 ^{c)}	1.82E+15
Nematoda	2.40E+14	5.1 ^{d)}	1.20E+15
Mollusca	1.91E+14	0.6 ^{e)}	1.15E+14
Arthropoda	8.39E+14	2.9 ^{c)}	2.19E+15
Aves	2.40E+11	0.1 ^{c)}	2.40E+10
Mammalia	9.00E+12	0.65 ^{c)}	5.85E+12
Total	2.19E+15		5.57E+15

a: Bowen, 1966; b: Whittaker & Likens, 1973; c: 김 등, 1993; d: Phillipson et al., 1977; e: Lappalainen & Kangas, 1975.

분의 동물류들이 혼합되어 있기 때문에 실질적으로 정확한 데이터를 찾기는 매우 힘들다. 따라서 Bowen(1966)과 Whittaker & Likens(1973)의 자료를 통해 각 분류군에 따른 생체량과 각각의 P/B ratio를 통해 이차생산성을 추정하였다. 그 결과 Table 14에서 보듯이 환형동물(annelida)의 이차생산성은 1.82E+15 g(DM)/yr으로 나타났고 선형동물(nematoda)은 1.20E+15 g(DM)/yr, 연체동물(mollusca) 1.15E+14 g(DM)/yr, 절지동물(arthropoda) 2.19E+15 g(DM)/yr, 조류(aves) 2.40E+10 g(DM)/yr, 포유동물(mammalia) 5.85E+12 g(DM)/yr로 총 육상동물의 이차생산성은 5.57E+15 g(DM)/yr로 나타났다.

이 자료를 통해 초식동물, 육식동물, 부식동물에 대한 이차생산성을 추정하였는데, 앞서 언급하였듯이 각 분류군별로 초식, 육식, 부식동물에 대한

이차생산성을 정확히 구분하는 것은 매우 힘들다. 따라서 Odum(1957)의 pyramid of biomass을 통해 생태계 내에서 초식동물과 육식동물의 생체량은 육식동물이 초식동물의 약 10% 정도로 추정하되 그 비율을 각각의 분류군에 적용하여 초식동물과 육식동물의 이차생산성을 추정하였다. 그 결과 초식동물은 $3.16E+15$ g(DM)/yr로 나타났고 육식동물은 $3.51E+14$ g(DM)/yr로 나타났다. 또한 부식동물은 각 분류군 중에서 환형동물(annelida)이 대부분 토양에서 부식물을 통해 영양원을 얻는 종류들이기 때문에 부식동물군에 포함시켰고, arthropoda의 경우 초식, 육식, 부식이 매우 혼재되어 있지만 pyramid of biomass에 의해 총 생체량의 10%를 부식동물이 차지하는 것으로 나타나 그 생체량과 이차생산성을 추정하였다. 그 외 나머지 동물문에서도 부식동물군이 일부 포함되어 있지만 그 양이 매우 적기 때문에 본 연구에서는 포함시키지 않았다. 따라서 부식동물의 이차생산성은 총 $2.06E+15$ g(DM)/yr로 추정되었다(Table 15).

한편, 지구 동물군에서 인간이나 가축은 연구 대상에서 제외시켰는데, 이는 사람의 경우 사회적 정보, 역사, 문화 등 다양한 사회적 활동을 하기 때문에 단순히 사람의 에너지량이나 생체량을 통해서 그 가치를 분석하는 것이 아니라 인간의 사회성에 대한 추가 분석이 있어야 사람에 대한 진정한 가치평가라 할 수 있을 것이다. 또한 가축은 대부분 현 시장경제에서 각각의 경제적 가치가 이미 정해져 있고 유입에너지원도 대부분 자연자원에서 얻기 보다는 인간들에 의해 사육되어지기 때문에 이는 본 연구의 방법과는 다른 각도에서 분석되어야 할 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서 분석하는 대상은 인간의 간섭을 받지 않는 천연 자연 지역에서 서식하는 동물군들을 기본적인 연구대상으로 선정하였다.

Table 15. Secondary production of herbivores, carnivores and detritivores

Group	Terrestrial animal biomass g(DM)	Carni. & Herbi. ratio	Biomass g(DM)	P/B ratio	Secondary Production g(DM)/yr
Herbivores					
Nematoda	2.40E+14		2.16E+14	5.1	1.08E+15
Mollusca	1.91E+14		1.72E+14	0.6	1.03E+14
Arthropoda	7.55E+14	0.9 ^{a)}	6.80E+14	2.9	1.97E+15
Aves	2.40E+11		2.16E+11	0.1	2.16E+10
Mammalia	9.00E+12		8.10E+12	0.65	5.27E+12
Total	1.20E+15		1.08E+15		3.16E+15
Carnivores					
Nematoda	2.40E+14		2.40E+13	5.1	1.20E+14
Mollusca	1.91E+14		1.91E+13	0.6	1.15E+13
Arthropoda	7.55E+14	0.1 ^{a)}	7.55E+13	2.9	2.19E+14
Aves	2.40E+11		2.40E+10	0.1	2.40E+09
Mammalia	9.00E+12		9.00E+11	0.65	5.85E+11
Total	1.20E+15		1.20E+14		3.51E+14
Detritivores					
Annelida	9.10E+14			2	1.82E+15
Arthropoda	8.39E+13 ^{a)}			2.9	2.43E+14
Total					2.06E+15

a: Odum, 1957.

다. 에머지 분석

지구 육상 동물군의 에머지 분석을 위해서는 시스템 내부로 유입한 총 에머지량을 알아야 한다. 일반적으로 육상 동물이 받는 에너지원은 식물인 1차 생산자로 육상 식물의 총 에머지가 육상 동물이 이용하는 총 외부 유입원이 된다. 따라서 Table 10에서 나온 지구 육상 식물군의 총 에머지 $1.58E+25$ sej/yr 가 동물군이 이용하는 총 에머지가 된다.

그러나 동물류들은 식물을 전부 이용하는 것이 아니고 일부는 초식동물이 섭취를 하고 그 나머지 부분은 모두 부식물로 전환된다. 따라서 실질적으로 동물류들이 이용하는 부분이 동물이 이용하는 에머지량이 된다. 따라서 초식동물이 식물을 이용하는 양과 이용하지 않는 부분을 통하여 에머지량을 산정하여야 한다. 먼저 에너지량의 분할(split)을 보면 Thomas & Packham(2007)에 의한 육상 생태계 에너지 흐름은 육상 식물을 초식동물이 대략 30%정도 이용하고 70%정도는 부식되어 토양의 유기물로 전환되는 것으로 나타났다. 이런 경향은 본 연구의 각 영양단계별 생태효율을 이용한 에너지 흐름에서도 보여지는데 Odum(1957)에 의하면 생태계 내에서 각각의 영양단계에서 에너지가 흐를 때 각 단계별로 대략 10%의 에너지 전환효율이 나타난다고 하였다. 즉 흡수된 총 에너지량에서 90%는 배설, 호흡, 소화와 같은 에너지 손실로 인해 소비되고 다음 영양단계로 전환되는 에너지 비율이 대략 10% 정도 되는 것이다. 따라서 이를 본 논문의 일차 및 이차생산성에 따른 에너지 흐름에 적용해 보면 Fig. 16와 같이 나타난다. 먼저 식물의 순일차생산성이 $1.27E+17$ g(DM)/yr로 이를 에너지로 전환하면 $2.13E+21$ J/yr가 되는데, 여기서 초식동물이 섭식하는 양은 초식동물의 이차생산성인 $3.16E+15$ g(DM)/yr(에너지량: $5.28E+19$ J/yr)를 전환된 에너지량으로 보면 초식동물로 유입되는 총 에너지량은 $6.40E+20$ J/yr

가 된다. 따라서 이 에너지량에 식물의 에너지변환도 $7.43\text{E}+03 \text{ sej/J}$ 을 곱하면 $4.76\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 의 초식동물 에머지가 산출된다. 따라서 그 외 남는 잉여량은 부식물로 전환되어 $1.11\text{E}+25 \text{ sej/yr}$ 가 부식물의 에머지가 된다. 한편, 부식동물은 그 이차생산성 $2.06\text{E}+15 \text{ g(DM)/yr}$ (에너지량: $3.45\text{E}+19 \text{ J/yr}$)를 전환된 에너지량으로 보게 되면 부식물을 섭식하여 받는 부식동물의 에머지는 $2.23\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 가 된다. 이를 통하여 최종 소비자인 육식동물에 대한 에머지 계산을 하여 보면 초식동물과 부식동물의 에너지 전환 효율에 따라 부식동물이 $2.10\text{E}+14 \text{ g(DM)/yr}$ (에너지량: $3.45\text{E}+18 \text{ J/yr}$)에서 부식동물의 에너지변환도를 곱하여 $2.21\text{E}+23 \text{ sej/yr}$ 로 계산되어졌고, 초식동물은 $3.16\text{E}+15 \text{ g(DM)/yr}$ (에너지량: $5.28\text{E}+19 \text{ J/yr}$)에 초식동물의 에너지변환도 $9.02\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 을 곱하여 $4.76\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 로 계산되어져 이 두 에머지를 합한 $4.98\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 가 육식동물의 에머지값으로 계산되어졌다. 따라서 결과적으로 지구 육상동물의 총 에머지는 각각의 동물 에머지를 합한 $6.99\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 로 계산되었다.

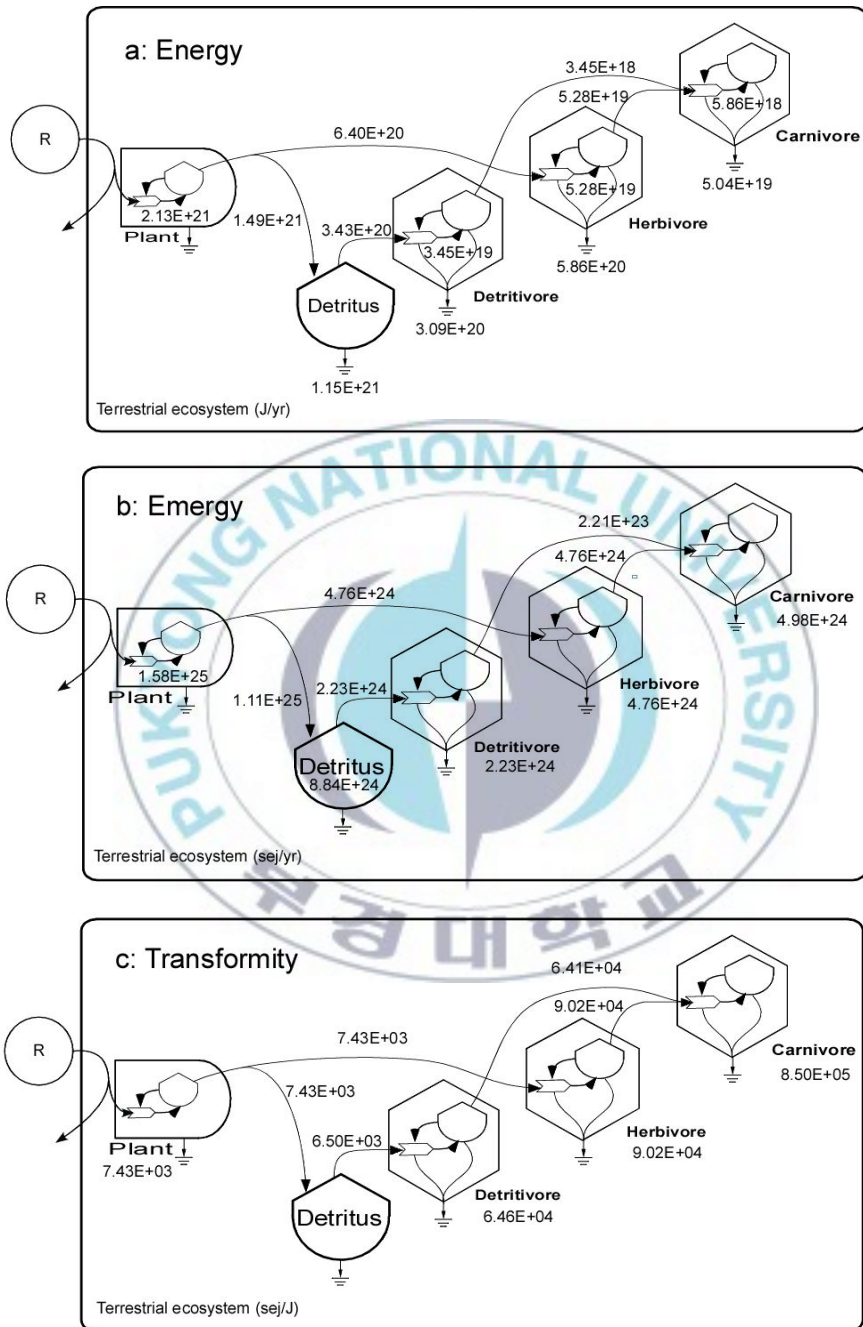


Fig. 16. Energy, emergy and transformity of terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores.

라. 에너지변환도 산정

지구 육상 동물군의 에너지변환도를 산정하기 위해서는 앞서 계산되어진 에너지값과 에머지값을 통해 계산되어진다. Table 16에서 보듯이 지구 육상동물의 에너지변환도는 총 에너지 $9.33\text{E}+19$ J/yr와 에머지 $6.99\text{E}+24$ sej/yr을 통해 $7.50\text{E}+04$ sej/J로 산출되었다. 초식동물은 에너지량 $5.28\text{E}+19$ J/yr와 에머지량 $4.76\text{E}+24$ sej/yr에 의해 $9.02\text{E}+04$ sej/J의 에너지변환도가 나타났고 육식동물은 에너지량 $5.86\text{E}+18$ J/yr와 에머지량 $4.98\text{E}+24$ sej/yr에 의해 $8.50\text{E}+05$ sej/J 그리고 부식동물은 에너지량 $3.45\text{E}+19$ J/yr와 에머지량 $2.23\text{E}+24$ sej/yr을 통해 $6.46\text{E}+04$ sej/J의 에너지변환도가 계산되어졌다.

Table 16. Transformativities of the global terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores

Item	Energy(J/yr)	Solar Emergy(sej/yr)	Transformity(sej/J)
Herbivores	$5.28\text{E}+19$	$4.76\text{E}+24$	$9.02\text{E}+04$
Carnivores	$5.86\text{E}+18$	$4.98\text{E}+24$	$8.50\text{E}+05$
Detritivores	$3.45\text{E}+19$	$2.23\text{E}+24$	$6.46\text{E}+04$
Terrestrial animals	$9.33\text{E}+19$	$6.99\text{E}+24$	$7.50\text{E}+04$

마. 에머지 보유량 분석

지구 육상 동물의 생체량을 이용한 보유저장고(storage)의 에머지 분석을 위해 각 동물군의 생체량을 계산하였다. 앞서 언급하였듯이 pyramid of biomass에 의해 육식동물이 초식동물의 약10%를 차지하기 때문에 그 비율을 적용하여 계산하였는데 초식동물은 총 $1.08\text{E}+15$ g(DM)으로 계산되었고 육식동물은 $1.20\text{E}+14$ g(DM), 부식동물은 $9.94\text{E}+14$ g(DM)으로 나타나 지구 육상 동물의 총 생체량은 $2.19\text{E}+15$ g(DM)으로 나타났다. 이를 에너지로 전환시킨 후 앞서 산정된 에너지변환도를 곱하여 에머지 보유량을 구하여 보면 초식동물은 $1.62\text{E}+24$ sej, 육식동물은 $1.70\text{E}+24$ sej로 나타났고 부식동물은 $1.07\text{E}+24$ sej로 나타나 지구 육상 동물군의 총 에머지 보유량은 $2.75\text{E}+24$ sej로 나타났다(Table 17).

Table 17. Emergy evaluation for storage of the global terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores

Item	Terrestrial animal biomass g(DM)	Energy(J)	Transformity (sej/J)	Solar Emergy(sej)
Herbivores	$1.08\text{E}+15$	$1.80\text{E}+19$	$9.02\text{E}+04$	$1.62\text{E}+24$
Carnivores	$1.20\text{E}+14$	$2.00\text{E}+18$	$8.50\text{E}+05$	$1.70\text{E}+24$
Detritivores	$9.94\text{E}+14$	$1.66\text{E}+19$	$6.46\text{E}+04$	$1.07\text{E}+24$
Terrestrial animals	$2.19\text{E}+15$	$3.66\text{E}+19$	$7.50\text{E}+04$	$2.75\text{E}+24$

3. 지구 해양 식물군의 에머지 평가

가. 에너지시스템 다이어그램

지구 해양 식물의 에머지 분석을 위해 작성한 에너지시스템 다이어그램은 Fig. 17와 같다. 해양 식물이 생육하는데 직접적으로 필요한 외부에너지에는 태양, 바람, 조석, 해류와 같은 재생가능한 에너지를 포함하였고, 내부 구성요소는 식물, 동물, 영양물, 와류로 단순화하여 나타내었다. 해양 생태계는 태양, 바람, 조석, 해류 에너지를 이용하여 식물플랑크톤과 해조류가 1차 생산을 하고 이를 해양 소비자가 이용하며 최종적으로는 해양 부식물로 되돌아가는 물질 재순환 시스템으로 이루어져있다. 또한 열역학 제 2법칙에 따라 나타나는 에너지 손실을 시스템 경계를 나타내는 네모 상자의 아래쪽에 나타내었다.

나. 생체량과 순일차생산성

지구 해양 식물군의 에머지 분석을 실시하기 위해서는 각 대상에 대한 에너지량이 먼저 계산되어야 한다. 이를 위해서는 해양 식물의 생체량과 순일차생산성 자료가 필요하다. 본 연구에서는 해양의 식물을 식물플랑크톤과 해조류로 크게 구분하여 나타내었는데, 이에 대한 생물량이나 일차생산성 자료가 각 연구자별로 다양한 값을 제시하고 있어 가장 보편적으로 사용되는 자료를 통해 그 값을 계산하였다(Table 18). 따라서 지구 전 해양에서 나타난 식물플랑크톤의 생체량과 순일차생산성은 각각 $1.35\text{E}+15 \text{ g(DM)}$,

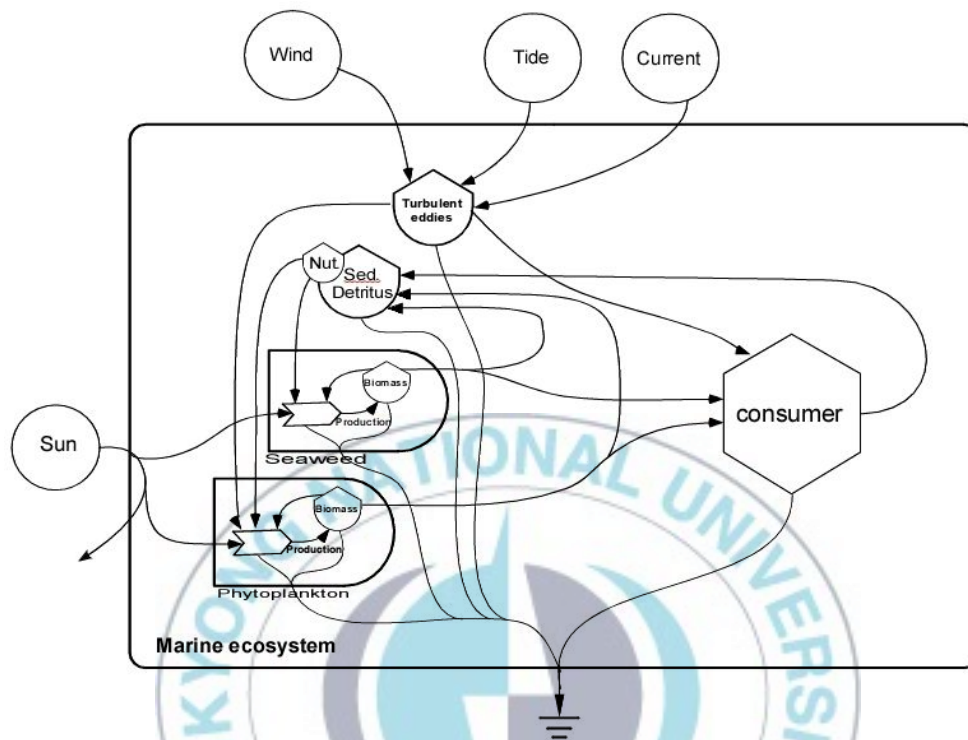


Fig. 17. Energy systems diagram for the global marine ecosystem.

1.76E+17 g(DM)/yr으로 나타났고, 해조류의 생체량과 순일차생산성은 각각 1.20E+15 g(DM) 1.50E+15 g(DM)/yr로 나타나 지구 해양 전체 식물의 생체량과 순일차생산성은 각각 2.55E+15 g(DM), 1.77E+17 g(DM)/yr로 나타났다.

Table 18. Biomass and net primary production of the global ocean ecosystem

Item	Biomass g(DM)	Net primary production, NPP g(DM)/yr
Phytoplankton	1.35E+15 ^{a)}	1.76E+17 ^{b)}
Seaweed	1.20E+15 ^{b)}	1.50E+15 ^{b)}
Marine plants	2.55E+15	1.77E+17

a: Ryther, 1960; b: Whittaker & Likens, 1973.

다. 에머지 분석

에머지 분석에 앞서 시스템 내부로 유입한 에너지량을 계산하기 위하여 Table 19와 같이 유입에너지의 기초 자료를 정리하였다. 일반적으로 지구 내부로 유입되는 태양상수(solar constant)는 $2\text{cal}/\text{cm}^2/\text{min}$ 이지만 지표면에 도달하는 양은 약 70%인 $1.3\text{cal}/\text{cm}^2/\text{min}$ 이기 때문에 이를 적용하여 입사량을 계산하였다. 그리고 일반적으로 지구 평균 반사율(albedo)은 0.7로 계산되지만 지표가 아닌 해양 표면이라는 특성상 Atmospheric Science Data Center (<http://eosweb.larc.nasa.gov>)를 이용하여 5개 대양 대표지점의 월별 자료를 이용한 결과 반사율이 0.05로 나타나 이를 적용하였다(appendix 20). 서식면적의 경우, 식물플랑크톤은 지구 해양 전 지역에서 서식하기 때문에 해양 전체 면적을 사용하였고, 해조류는 Copper(1994), Whittaker

(1975)가 제시한 서식면적을 사용하였다. 풍속은 지구 평균 풍속을 사용하였다.

따라서 이를 기초로 하여 지구 해양 식물군의 에머지 분석을 Table 20에 나타내었는데, 지구 해양 생태계에서 식물이 생육하는데 이용한 에너지 계산에 태양, 바람, 조석, 해류를 이용하였다. 그 결과 식물플랑크톤과 해조류에서 태양에너지가 각각 $9.87\text{E}+24 \text{ J/yr}$, $5.73\text{E}+22 \text{ J/yr}$ 로 가장 많은 부분을 차지하고 있으나, 에머지량에서는 식물플랑크톤이 해류에서 $1.55\text{E}+25 \text{ sej/yr}$ 로 가장 높게 나타났고, 해조류에서는 조석이 $3.34\text{E}+23 \text{ sej/yr}$ 로 가장 많은 양을 차지하였다. 따라서 식물플랑크톤의 총 에머지 사용량에는 해류 에머지만 포함하였고, 해조류의 총 에머지 사용량에는 조석 에머지만 포함시켰다. 이는 바람 에너지나 조석, 해류 에너지는 지구 생태계에 유입하는 태양 에너지를 원동력으로 하는 에너지이기 때문에 이들을 모두 더하게 되면 중복계산이 되는 오류가 생겨 가장 큰 값을 총에머지로 사용하였다. 결과적으로 지구 해양 식물군의 총 에머지량은 식물플랑크톤의 총 에머지량인 $1.55\text{E}+25 \text{ sej/yr}$ 와 해조류의 총 에머지 $3.34\text{E}+23 \text{ sej/yr}$ 를 합하여 $1.58\text{E}+25 \text{ sej/yr}$ 로 계산되어졌다.

Table 19. Energy inputs to ocean ecosystem

Item	Phytoplankton	Seaweed
Solar constant at the ocean surface	1.3cal/cm ² /min	
Insolation	2.87E+10J/m ² /yr	
Average albedo	0.05 ^{a)}	
Area	3.62E+14m ²	2.10E+12m ² ^{b,c)}
Average Wind velocity	3.28 m/s ^{d)}	

a: appendix 20; b: Copper, 1994; c: Whittaker, 1975; d: Archer & Jacobson, 2005;



Table 20. Emergy evaluation for the global marine plants, phytoplankton and seaweeds

Item	Energy(J/yr)	Transformity (sej/J)	Solar emergy (sej/yr)
Phytoplankton			
Sunlight	9.87E+24	1	9.87E+24
Wind, kinetic energy	1.13E+20	2,513	2.83E+23
Tide	5.20E+19	73,900	3.84E+24
Current	8.43E+17	1.84E+07	1.55E+25
Total emergy			1.55E+25
Seaweeds			
Sunlight	5.73E+22	1	5.73E+22
Wind, kinetic energy	6.53E+17	2,513	1.64E+21
Tide	4.68E+17	73,900	3.34E+23
Current	1.28E+16	1.84E+07	2.36E+23
Total emergy			3.34E+23
Marine plants emergy			1.58E+25

appendix 18-19

라. 에너지변환도 산정

지구 해양 식물군의 에너지변환도를 산정하기 위해서는 앞서 계산되어진 에너지값과 에머지값을 통해 계산되어진다. Table 21에서 보듯이 지구 해양식물의 에너지변환도는 총 에너지 $2.96\text{E}+21$ J/yr와 에머지 $1.58\text{E}+25$ sej/yr을 통해 $5.34\text{E}+03$ sej/J로 산출되었다. 식물플랑크톤은 에너지량 $2.93\text{E}+21$ J/yr와 에머지량 $1.55\text{E}+25$ sej/yr에 의해 $5.27\text{E}+03$ sej/J의 에너지변환도가 나타났고 해조류는 에너지량 $2.51\text{E}+19$ J/yr와 에머지량 $3.34\text{E}+23$ sej/yr에 의해 $1.38\text{E}+04$ sej/J의 에너지변환도가 계산되어졌다.

Table 21. Transformativities of the global marine plants, phytoplankton and seaweeds

Item	NPP g(DM)/yr	Energy Data (J/yr)	Solar emergy (sej/yr)	Transformity (sej/J)
Phytoplankton	$1.76\text{E}+17$	$2.93\text{E}+21$	$1.55\text{E}+25$	$5.27\text{E}+03$
Seaweeds	$1.50\text{E}+15$	$2.51\text{E}+19$	$3.34\text{E}+23$	$1.38\text{E}+04$
Marine plants	$1.77\text{E}+17$	$2.96\text{E}+21$	$1.58\text{E}+25$	$5.34\text{E}+03$

마. 에머지 보유량 분석

지구 해양 식물군의 총 생체량을 이용하여 보유저장고(storage)의 에머지 분석을 실시하였다. Table 22에서 보듯이 생체량을 에너지 단위로 전환한 후 앞서 계산된 에너지변환도를 곱하여 각 식물플랑크톤과 해조류 그리고 지구 해양 식물 전체의 에머지 저장량을 구하였다. 그 결과 식물플랑크톤의 에머지 저장고는 $1.19\text{E}+23$ sej로 나타났고, 해조류는 $2.76\text{E}+23$ sej, 총 지구 해양 식물의 에머지 저장량은 $5.72\text{E}+23$ sej로 나타났다.

Table 22. Emergy evaluation for storages of the global marine, phytoplankton and seaweeds

Item	Biomass g(DM)	Energy Data (J)	Transformity (sej/J)	Solar emergy (sej)
Phytoplankton	$1.35\text{E}+15$	$2.25\text{E}+19$	$5.27\text{E}+03$	$1.19\text{E}+23$
Seaweeds	$1.20\text{E}+15$	$2.00\text{E}+19$	$1.38\text{E}+04$	$2.76\text{E}+23$
Marine plants	$2.55\text{E}+15$	$4.26\text{E}+19$	$5.34\text{E}+03$	$2.27\text{E}+23$

4. 지구 해양 동물군의 에머지 평가

가. 에너지시스템 다이어그램

지구 해양 동물의 에머지 분석을 위해 작성한 에너지시스템 다이어그램은 Fig. 18과 같다. 해양 1차생산자인 식물이 생육하는데 필요한 외부에너지로 태양, 바람, 조석, 해류를 포함하였고, 내부 구성요소는 해양 식물, 와류, 각각의 동물군 그리고 유기채설물과 영양물질로 나타내었다. 태양, 바람, 조석, 해류의 에너지를 이용한 해양 식물의 생산은 동물플랑크톤과 저서동물 그리고 유영동물이 각각 이를 이용 하고 그 나머지는 땅속으로 부식되어 일부 저서동물이 그 유기물을 이용한다. 이후 각각의 해양 동물군들은 다시 유기 채설물로 전환되어 다시 해양 저질로 물질의 재순환이 일어나는 시스템을 나타내고 있다.

나. 이차생산성

지구 해양 동물군의 에머지 분석을 실시하기 위해서는 각 동물군의 에너지량이 먼저 계산되어야 하는데, 이는 동물의 연간 이차생산성을 통해 산출되어진다. 이는 기존에 다양한 연구에 의해 제시된 생체량에 생산성의 비율을 나타내는 P/B ratio를 통해 이차생산성을 추정하였다.

그 결과 Table 23에서 보듯이 동물플랑크톤은 $3.50\text{E}+15$ g(DM)/yr로 나타났고 유영동물에서는 어류가 $1.17\text{E}+15$ g(DM)/yr, 포유동물이 $2.75\text{E}+12$ g(DM)/yr로 나타나 총 $1.17\text{E}+15$ g(DM)/yr로 나타났다. 저서동물에서는 강장동물이 $4.80\text{E}+13$ g(DM)/yr, 환형동물 $4.16\text{E}+14$ g(DM)/yr, 선형동물 $1.33\text{E}+14$ g(DM)/yr, 연체동물 $5.61\text{E}+13$ g(DM)/yr, 절지동물 $4.11\text{E}+12$

g(DM)/yr, 극피동물 $1.38\text{E}+14$ g(DM)/yr로 나타나 총 $6.68\text{E}+14$ g(DM)/yr로 나타났다. 따라서 총 해양 동물의 이차생산성은 $5.34\text{E}+15$ g(DM)/yr로 나타났다.

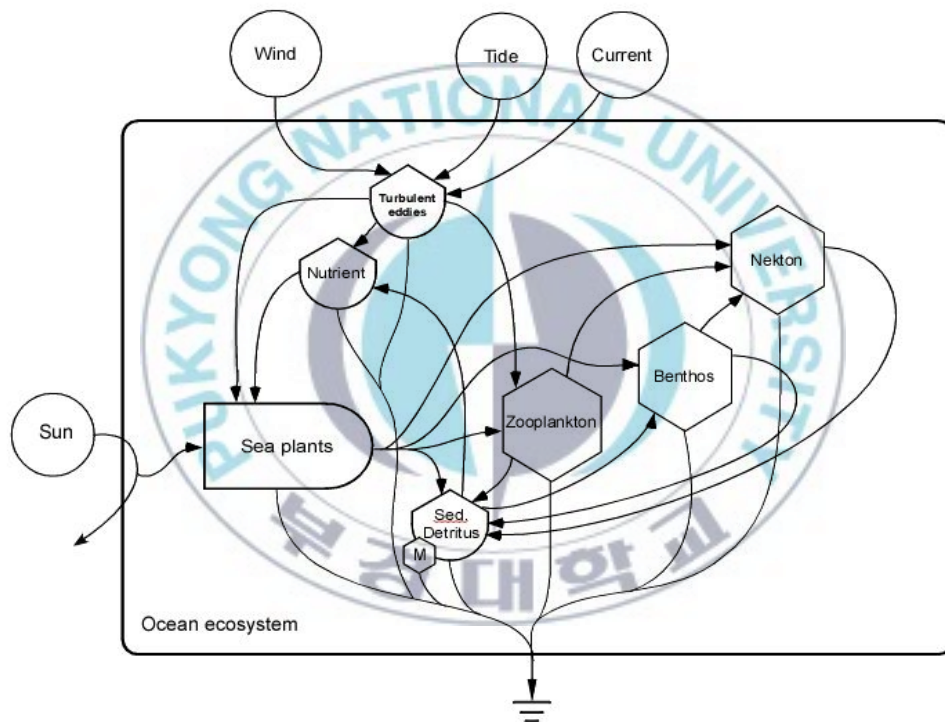


Fig. 18. Energy systems diagram for the global marine animals.

Table 23. Biomass and secondary production of marine animal group

Group	Biomass g(DM)	P/B ratio	Secondary production g(DM)/yr
Zooplankton	1.75E+14 ^{a)}	20 ^{c)}	3.50E+15
Nekton			
Pisces	6.50E+14 ^{b)}	1.8 ^{d,e,f)}	1.17E+15
Mammalia	5.50E+13 ^{b)}	0.05 ^{l)}	2.75E+12
Subtotal	7.05E+14	1.66	1.17E+15
Benthos			
Coelenterata	1.00E+14 ^{b)}	0.48 ^{c,d,k)}	4.80E+13
Annelida	2.00E+14 ^{b)}	2.08 ^{i,j)}	4.16E+14
Nematoda	2.30E+12 ^{b)}	58 ^{m,n)}	1.33E+14
Mollusca	2.10E+13 ^{b)}	2.67 ^{i,j)}	5.61E+13
Arthropoda	8.50E+11 ^{b)}	4.84 ^{g,h,i,j)}	4.11E+12
Echinodermata	7.60E+13 ^{b)}	1.81 ^{i,j)}	1.38E+14
Subtotal	3.50E+14	1.91	6.68E+14
Total	1.23E+15		5.34E+15

a) Strömberg et al., 2009; b) Bowen, 1966; c) Pauly & Christensen, 1993; d) Duan et al., 2009; e) Pitcher et al., 2002; f) Buchary, 1999; g) Pitcher et al., 1998; h) Chullasorn & Martosubroto, 1986; i) Ansell et al., 1978; j) Robertson, 1979; k) Weinbauer & Velimirov, 1995; l) Reilly & Barlow, 1986; m) Vranken et al., 1986; n) Vranken & Heip, 1986;

다. 에머지 분석

지구 해양 동물군의 에머지 분석을 위해서는 시스템 내부로 유입한 총 에머지량을 알아야 한다. 일반적으로 해양 동물이 받는 에너지원은 1차 생산자인 해양 식물로 이 해양 식물의 총 에머지가 해양 동물이 이용하는 총 외부 유입원이 된다. 따라서 Table 20에서 나온 지구 해양 식물군의 총 에머지 $1.58E+25$ sej/yr가 해양 동물군이 이용하는 총 에머지가 된다.

그러나 해양 동물들은 해양 식물을 전부 이용하는 것이 아니고 일부는 섭식을 하고 그 나머지는 모두 부식물로 전환되어 해양 저질에 퇴적된다. 따라서 실질적으로 해양 동물들이 이용하는 부분을 계산하여야 하는데, 먼저 Odum(1957)에 의해 제시된 생태계 에너지 흐름에 따라 해양 동물에 의해 섭식되는 비율과 해양 저질로 퇴적되는 비율이 대략 4:6으로 나타났다. 따라서 해양 동물이 이용하는 에머지는 $7.12E+24$ sej/yr이고 해양 저질로 퇴적되는 에머지는 $8.71E+24$ sej/yr이다. 여기서 해양 동물은 동물플랑크톤과 저서동물, 유영동물로 에머지가 분할(split)되는데 동물플랑크톤과 유영동물은 대부분 해양 식물을 이용하지만 저서동물의 경우 대부분 해양 저질의 유기물을 이용하기 때문에 해양 식물의 에머지 분할은 동물플랑크톤과 유영동물로 대부분 이루어진다. 따라서 현존 에너지 비율이 동물플랑크톤 75%, 유영동물 25%로 나눠짐에 따라 동물플랑크톤의 에머지는 $5.34E+24$ sej/yr으로 나타났고, 유영동물은 $2.33E+24$ sej/yr로 나타났다. 한편, 저서동물은 퇴적된 해양 유기물에서 대략 10%정도를 이용하는 것으로 나타나 $1.22E+24$ sej/yr의 에머지를 이용하는 것으로 나타났다. 따라서 해양 동물이 이용하는 전체 에머지량은 $8.36E+24$ sej/yr로 나타났다(Table 24).

라. 에너지변환도 산정

지구 해양 동물군의 에너지변환도를 산정하기 위해서는 앞서 계산되어진 에너지값과 에머지값을 통해 계산되어진다. Table 24에서 보듯이 지구 해양 동물의 에너지변환도는 총 에너지 $8.92\text{E}+19 \text{ J/yr}$ 와 에머지 $8.36\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 를 통해 $9.35\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 로 산출되었다. 동물플랑크톤은 에너지량 $5.85\text{E}+19 \text{ J/yr}$ 와 에머지량 $5.34\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 에 의해 $9.13\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 의 에너지변환도가 나타났고 유영동물은 에너지량 $1.96\text{E}+19 \text{ J/yr}$ 와 에머지량 $2.33\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 에 의해 $1.19\text{E}+05 \text{ sej/J}$ 그리고 저서동물은 에너지량 $1.12\text{E}+19 \text{ J/yr}$ 와 에머지량 $1.22\text{E}+24 \text{ sej/yr}$ 를 통해 $1.09\text{E}+05 \text{ sej/J}$ 의 에너지변환도가 계산되어졌다.

마. 에머지 보유량 분석

지구 해양 동물의 생체량을 이용한 보유저장고(storage)의 에머지 분석을 위해 Table 25에서 제시된 각 동물군의 생체량을 정리하였고 이를 에너지로 전환하였는데, 동물플랑크톤이 $2.92\text{E}+18 \text{ J}$ 로 나타났고 유영동물이 $1.18\text{E}+19 \text{ J}$, 저서동물이 $5.85\text{E}+18 \text{ J}$ 로 나타나 총 해양 동물은 $2.05\text{E}+19 \text{ J}$ 로 나타났다(Table 25). 이를 Table 24에서 제시된 각 해양 동물군의 에너지변환도를 곱하여 보유량에 대한 에머지 분석을 하였는데, 동물플랑크톤이 $2.67\text{E}+23 \text{ sej}$ 로 나타났고 유영동물 $1.40\text{E}+24 \text{ sej}$, 저서동물이 $6.38\text{E}+23 \text{ sej}$ 로 나타나 총 해양 동물의 에머지 보유량은 $1.92\text{E}+24 \text{ sej}$ 로 나타났다.

Table 24. Transformativities of the global marine animals, zooplankton, nekton and benthos

Item	Sec. Production g(DM)/yr	Energy (J/yr)	Solar Emergy (sej/yr)	Transformity (sej/J)
Zooplankton	3.50E+15	5.85E+19	5.34E+24	9.13E+04
Nekton	1.17E+15	1.96E+19	2.33E+24	1.19E+05
Benthos	6.68E+14	1.12E+19	1.22E+24	1.09E+05
Marine animals	5.34E+15	8.92E+19	8.36E+24	9.35E+04

Table 25. Emergy evaluation for storage of the global marine animals, zooplankton, nekton and benthos

Item	Marine animal biomass g(DM)	Energy(J)	Transformity (sej/J)	Solar Emergy(sej)
Zooplankton	1.75E+14	2.92E+18	9.13E+04	2.67E+23
Nekton	7.05E+14	1.18E+19	1.19E+05	1.40E+24
Benthos	3.50E+14	5.85E+18	1.09E+05	6.38E+23
Marine animals	1.23E+15	2.05E+19	9.35E+04	1.92E+24

5. 지구 생물군의 생태경제적 가치 평가

가. 전세계 에머지 화폐비율 산정을 위한 전세계 에머지 평가

본 연구에서 산출되어진 각각의 에머지값을 통해 지구 생물군의 생태경제적 가치 평가를 하기 위해서는 먼저 에머지값이 화폐단위로 환산되어야 한다. 이를 위해서는 전 세계의 총 에머지값과 총 생산값(GWP, Gross World Product)을 통해 전세계 에머지 화폐비율(world emergy/money ratio)의 값을 알아야 한다.

먼저 전 세계의 에머지값을 알기 위해 Table 26에서 보듯이 지구에서 받는 총 재생가능한 에너지 값을 sunlight, deep earth heat, tidal energy를 통해 구하였고, 지구 내에서 생산되는 재생불가능한 에너지값을 oil, natural gas, coal, nuclear energy, wood, soil erosion, phosphate, limestone, mineral 을 통해 계산하였다. 따라서 재생가능한 에너지는 $1.58\text{E}+25$ sej/yr의 에머지값을 나타내었고 재생불가능한 에너지는 $4.98\text{E}+25$ sej/yr로 나타나 총 $6.57\text{E}+25$ sej/yr의 에머지값을 나타내었다.

한편, 전 세계의 총 생산값(GWP)은 $4.67\text{E}+13$ \$(2008)\$로 나타나 이를 통해 전세계 에머지 화폐비율을 계산해 보면 $1.41\text{E}+12$ sej/\$로 나타났다. 이를 통해 각각의 에머지값에 적용하여 생태경제적 가치를 평가하여 보면 다음과 같다.

Table 26. Flux of renewable and nonrenewable energies driving global precesses

Item		Energy unit		Transformity (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)
Indigenous renewable energy					
1	Sunlight	3.94E+24	J/yr	1	3.94E+24
2	Deep earth heat	6.72E+20	J/yr	1.20E+04	8.06E+24
3	Tidal energy	5.20E+19	J/yr	7.37E+04	3.83E+24
Subtotal					1.58E+25
Nonrenewable source use from within system					
4	Oil production	1.63E+20	J/yr	9.06E+04	1.48E+25
5	Natural gas	1.34E+20	J/yr	8.05E+04	1.08E+25
6	Total coal production	1.05E+20	J/yr	6.71E+04	7.02E+24
7	Nuclear energy	2.60E+19	J/yr	3.36E+05	8.75E+24
8	Wood	5.31E+19	J/yr	1.85E+04	9.82E+23
9	Soil erosion	1.38E+19	J/yr	1.24E+05	1.71E+24
10	Phosphate	4.77E+16	J/yr	1.29E+07	6.17E+23
11	Limestone	2.29E+17	g/yr	2.72E+06	6.22E+23
12	Total mineral production	2.69E+15	g/yr	1.68E+09	4.52E+24
Subtotal					4.98E+25
Total					6.57E+25

appendix 25

나. 지구 육상 식물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치 평가

지구 육상 식물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치는 Table 27에서 보듯이 선태식물이 연간 9,070억 Em\$/yr의 가치를 기여하였고, 나자식물 1조 3,900억 Em\$/yr, 피자식물 8조 1,500억 Em\$/yr, 기타 8,000억 Em\$/yr의 가치를 나타내어 총 지구 육상식물의 가치는 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

또한, 생체량 저장고의 생태경제적 가치는 선태식물이 9조 600억 Em\$, 나자식물이 29조 3,000억 Em\$, 피자식물이 81조 1,000억 Em\$의 가치로 나타나 총 지구 육상 식물의 가치는 125조 3,500억 Em\$의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

Table 27. Ecological economic value of terrestrial plants, bryophytes, gymnosperm and angiosperms

Item	Solar Emergy	Emvalue
Production emergy		
Bryophytes	1.28E+24(sej/yr)	9.07E+11 (0.91 trillion) (Em\$/yr)
Gymnosperms	1.95E+24(sej/yr)	1.39E+12 (1.39 trillion) (Em\$/yr)
Angiosperms	1.15E+25(sej/yr)	8.15E+12 (8.15 trillion) (Em\$/yr)
Others	1.13E+24(sej/yr)	8.01E+11 (0.80 trillion) (Em\$/yr)
Terrestrial plants	1.58E+25(sej/yr)	1.12E+13 (11.25 trillion) (Em\$/yr)
Storage emergy		
Bryophytes	1.28E+25(sej)	9.06E+12 (9.06 trillion) (Em\$)
Gymnosperms	4.13E+25(sej)	2.93E+13 (29.30 trillion) (Em\$)
Angiosperms	1.14E+26(sej)	8.11E+13 (81.10 trillion) (Em\$)
Terrestrial plants	1.76E+26(sej)	1.25E+14 (125.35 trillion) (Em\$)

다. 지구 육상 동물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치 평가

지구 육상 동물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치는 Table 28에서 보듯이 초식동물이 연간 3조 3,800억 Em\$/yr의 가치를 기여하였고, 육식동물 3조 5,300억 Em\$/yr, 부식동물 1조 5,800억 Em\$/yr의 가치를 나타내어 총 지구 육상동물의 가치는 4조 9,600억 Em\$/yr의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

또한, 생체량 저장고의 생태경제적 가치는 초식동물이 1조 1,500억 Em\$, 육식동물이 1조 2,100억 Em\$, 부식동물이 7,600억 Em\$의 가치로 나타나 총 지구 육상 동물의 가치는 1조 9,500억 Em\$의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

Table 28. Ecological economic value of terrestrial animals, herbivores, carnivores and detritivores

Item	Solar Emergy	Emvalue
Production emergy		
Herbivores	4.76E+24(sej/yr)	3.38E+12 (3.38 trillion) (Em\$/yr)
Carnivores	4.98E+24(sej/yr)	3.53E+12 (3.53 trillion) (Em\$/yr)
Detritivores	2.23E+24(sej/yr)	1.58E+12 (1.58 trillion) (Em\$/yr)
Terrestrial animals	6.99E+24(sej/yr)	4.96E+12 (4.96 trillion) (Em\$/yr)
Storage emergy		
Herbivores	1.62E+24(sej)	1.15E+12 (1.15 trillion) (Em\$)
Carnivores	1.70E+24(sej)	1.21E+12 (1.21 trillion) (Em\$)
Detritivores	1.07E+24(sej)	7.59E+11 (0.76 trillion) (Em\$)
Terrestrial animals	2.75E+24(sej)	1.95E+12 (1.95 trillion) (Em\$)

라. 지구 해양 식물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치 평가

지구 해양 식물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치는 Table 29에서 보듯이 식물플랑크톤이 연간 11조 Em\$/yr의 가치를 기여하였고, 해조류가 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내어 총 지구 해양식물의 가치는 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

또한, 생체량 저장고의 생태경제적 가치는 식물플랑크톤이 800억 Em\$, 해조류가 2,000억 Em\$의 가치로 나타나 총 지구 해양 식물의 가치는 2,800억 Em\$의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

Table 29. Ecological economic value of marine plants, phytoplankton and seaweeds

Item	Solar Emergy	Emvalue
Production emergy		
Phytoplankton	1.55E+25(sej/yr)	1.10E+13 (11.00 trillion) (Em\$/yr)
Seaweeds	3.34E+23(sej/yr)	2.45E+11 (0.25 trillion) (Em\$/yr)
Marine plants	1.58E+25(sej/yr)	1.12E+13 (11.25 trillion) (Em\$/yr)
Storage emergy		
Phytoplankton	1.19E+23(sej)	8.44E+10 (0.08 trillion) (Em\$)
Seaweeds	2.76E+23(sej)	1.96E+11 (0.20 trillion) (Em\$)
Marine plants	2.27E+23(sej)	2.80E+11 (0.28 trillion) (Em\$)

마. 지구 해양 동물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치 평가

지구 해양 동물군의 에머지 및 저장고의 생태경제적 가치는 Table 30에서 보듯이 동물플랑크톤이 연간 3조 7,900억 Em\$/yr의 가치를 기여하였고, 유영동물 1조 6,500억 Em\$/yr, 저서동물 8,700억 Em\$/yr의 가치를 나타내어 총 지구 해양 동물의 가치는 5조 9,300억 Em\$/yr의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

또한, 생체량 저장고의 생태경제적 가치는 동물플랑크톤이 1,900억 Em\$, 유영동물이 9,900억 Em\$, 저서동물이 4,500억 Em\$의 가치로 나타나 총 지구 해양 동물의 가치는 1조 3,600억 Em\$의 가치를 기여하는 것으로 나타났다.

Table 30. Ecological economic value of marine animals, zooplankton, nekton and benthos

Item	Solar Energy	Emvalue
Production emergy		
Zooplankton	5.34E+24(sej/yr)	3.79E+12 (3.79 trillion) (Em\$/yr)
Nekton	2.33E+24(sej/yr)	1.65E+12 (1.65 trillion) (Em\$/yr)
Benthos	1.22E+24(sej/yr)	8.65E+11 (0.87 trillion) (Em\$/yr)
Marine animals	8.36E+24(sej/yr)	5.93E+12 (5.93 trillion) (Em\$/yr)
Storage emergy		
Zooplankton	2.67E+23(sej)	1.89E+11 (0.19 trillion) (Em\$)
Nekton	1.40E+24(sej)	9.93E+11 (0.99 trillion) (Em\$)
Benthos	6.38E+23(sej)	4.52E+11 (0.45 trillion) (Em\$)
Marine animals	1.92E+24(sej)	1.36E+12 (1.36 trillion) (Em\$)

V. 고찰

1. 지구 생물권의 생산성에 대한 에너지, 에머지 그리고 에너지변환도

지구 시스템에서 총 생산 에머지는 Odum et al.(2000)에서 나타내었듯이 지구 외부로부터 유입되는 태양 입사량 $3.93E+24$ sej/yr, 지구 내부 열에너지 $8.06E+24$ sej/yr, 조석 에너지 $3.84E+24$ sej/yr를 모두 합한 $15.83E+24$ sej/yr이다. 따라서 지구 내부에서 일어나는 모든 생산은 이 값을 초과하지 못하며 지구에서 생산되는 주요 에너지 흐름은 이 각각의 흐름과 상호적 관계를 가지게 된다. 즉, 바람, 강우, 강의흐름, 해류와 같이 전 지구적으로 발생하는 주요 에너지 흐름들은 서로가 네트워크처럼 연결되어 있어 각각의 상호작용을 통해 서로에 영향을 미친다. 따라서 각 흐름의 에너지값은 틀리지만 지구 총 생산 에머지에 의해 기인되기 때문에 결국 이들의 총 생산 에머지도 $15.83E+24$ sej/yr가 된다.

Fig. 19-21에서 지구 내부의 주요 에너지 흐름인 바람, 강우, 강, 해류를 에너지, 에머지, 에너지변환도의 순으로 비교해 보면 서로 연관되어 있는 대상으로부터 최종 유입되는 에머지가 $15.83E+24$ sej/yr가 되며 이들은 또한 영향을 주는 대상에 대하여 $15.83E+24$ sej/yr가 각각 분할(splite)되어 영향을 주게 된다. 결국 이런 주요 에너지 흐름들은 지각과 해양에 직-간접적인 상호작용을 통해 영향을 미치게 되는데, 지각의 경우는 태양, 강우, 바람, 강을 통해 에머지가 유입이 되지만 중복계산을 피하기 위해 유입된 에머지값 중 가장 높은 값을 사용하는 에머지 이론에 의해 그 중 가장 높은 값인 강의 에머지 $15.83E+24$ sej/yr가 총 유입 에머지가 된다. 해양도 마찬가지로 태양, 강우, 해류 등을 통해 에머지가 유입되지만 그 중 가장

높은 해류에 의해 해양내의 난류(turbulence)가 영향을 받아 해양의 총 유입 에머지도 $15.83E+24$ sej/yr가 된다.

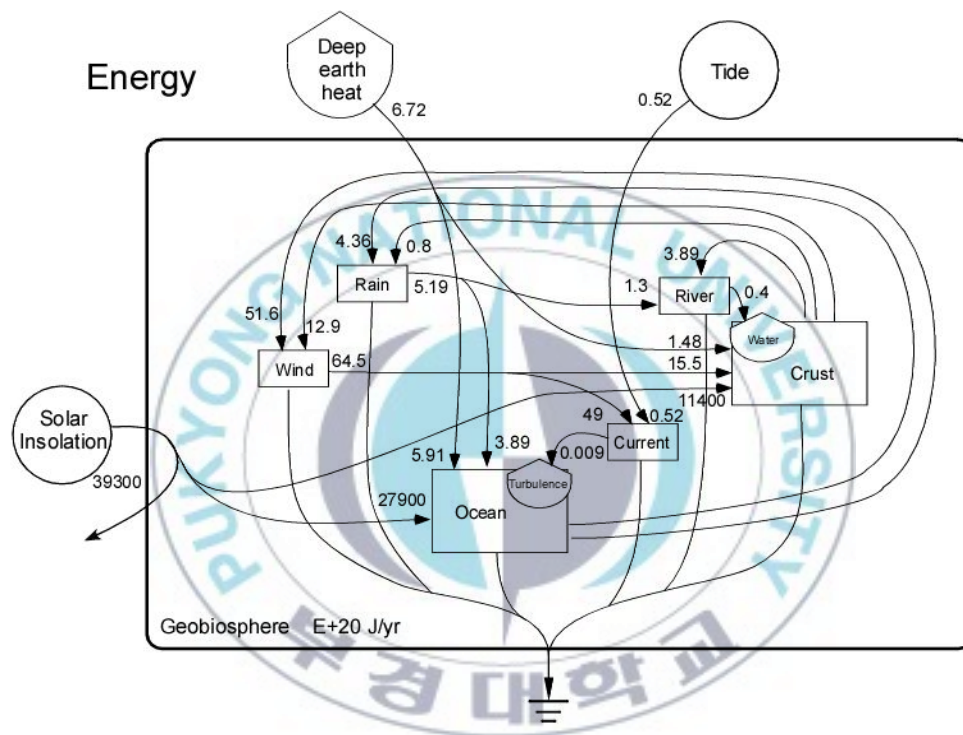


Fig. 19. Energy flows of products in geobiosphere.

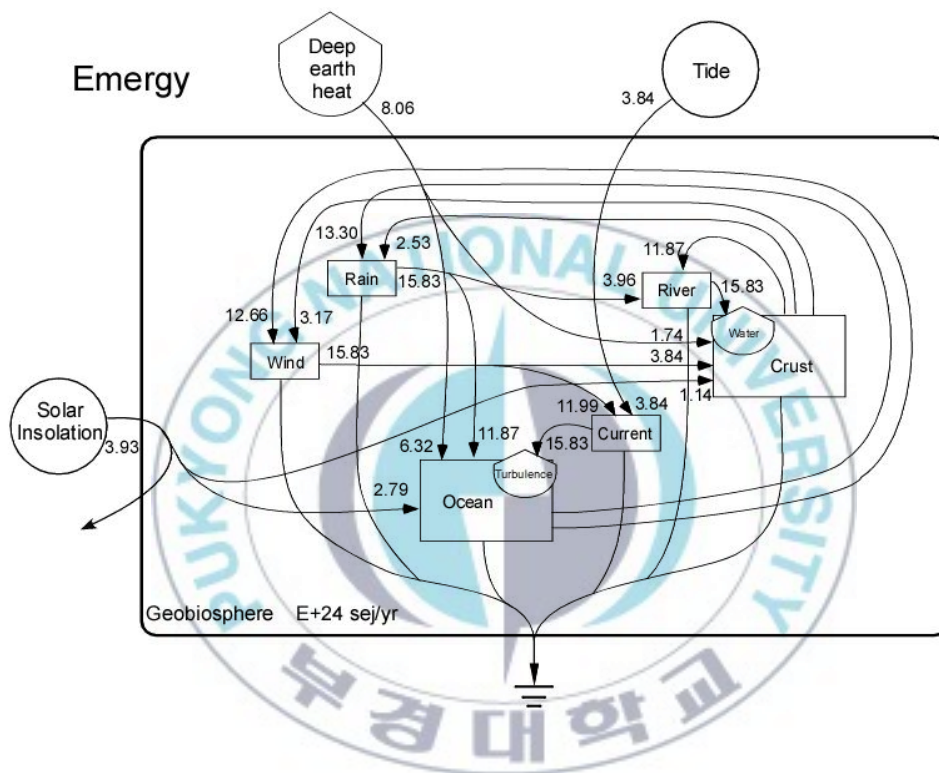


Fig. 20. Energy flows of products in geobiosphere.

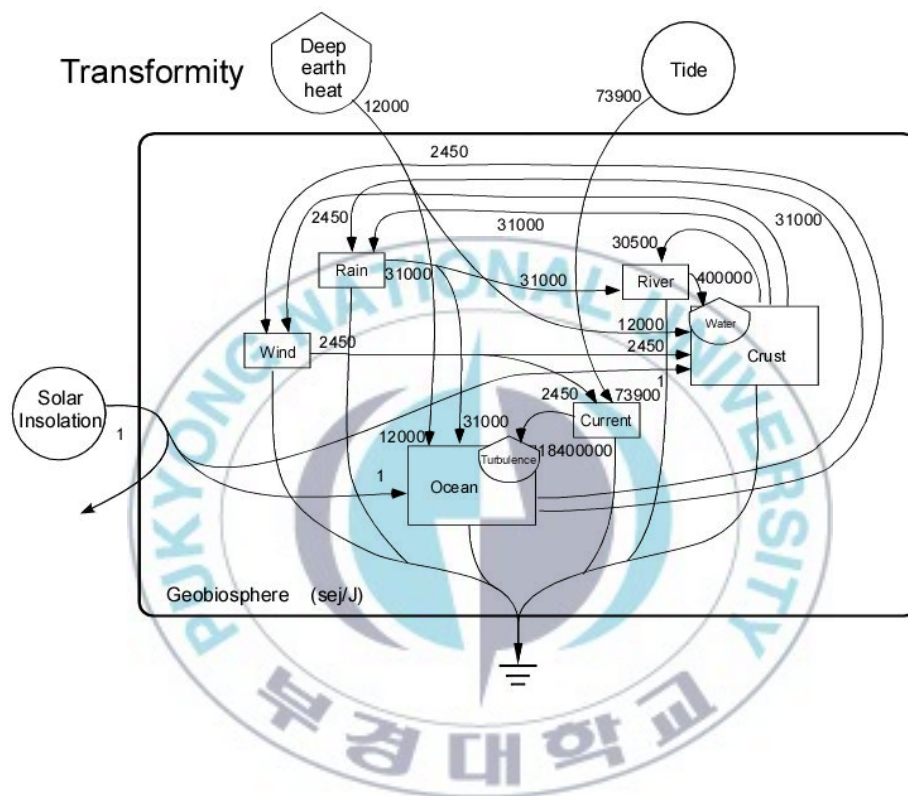


Fig. 21. Transformities of products in geobiosphere.

2. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에너지

지구 생태계는 오랜 기간의 진화과정을 통해 자신의 구조와 기능을 자가 조직(self-organization)하는 능력을 가지고 있다. 이는 여러 환경적 간섭에 의해 파괴된 생태계가 스스로 그 구조와 기능을 다시 조직하여 원래의 형태로 되돌아 갈 수 있다는 것을 의미한다. 이런 자가 조직 과정 중 한 에너지에서 다른 에너지로 변환되는 에너지변환과정이 많이 일어나는데, 특히 각 생물의 영양단계별로 이런 현상이 명확하게 나타난다. 태양으로부터 받은 에너지가 일차 생산자를 거쳐 소비자까지 진행되는 동안 각 과정마다 에너지변환이 일어나고 이런 모든 각 과정에는 반드시 에너지 손실이 일어나게 된다. 즉, 다량의 저급에너지에서 다음 단계로 전환 시에는 그 양이나 수가 줄어들게 되며 상위계급으로 올라갈수록 소량의 고급에너지로 전환되는 것을 말한다. 이를 에너지변환 계층구조(energy transformation hierarchy)라고 한다(강, 2003).

이를 본 논문에서 도출된 지구 각 생물군의 에너지 자료를 통해 적용해보면 Fig. 22 에서 보듯이 지구 육상 식물에서 그 다음 영양단계인 지구 육상 동물로 이어지면서 에너지의 변환이 일어나는데 다량의 저급에너지인 식물 생산성 $213.0E+19$ J/yr이 각각의 분류군별로 다른 에너지로 분할되었다가 다음 단계인 초식동물 및 부식동물 그리고 육식동물로 에너지가 전달되면서 $9.3E+19$ J/yr의 다량의 고급에너지로 변환됨을 알 수 있다. 이는 해양 생물군에서도 같은 경향을 보이게 되는데, 해양 식물 생산성 에너지 $295.5E+19$ J/yr가 식물플랑크톤과 해조류로 분할되었다가 소비자인 동물플랑크톤, 저서동물, 유영동물로 에너지가 전달되면서 최종 $8.9E+19$ J/yr까지 변환이 일어난다.

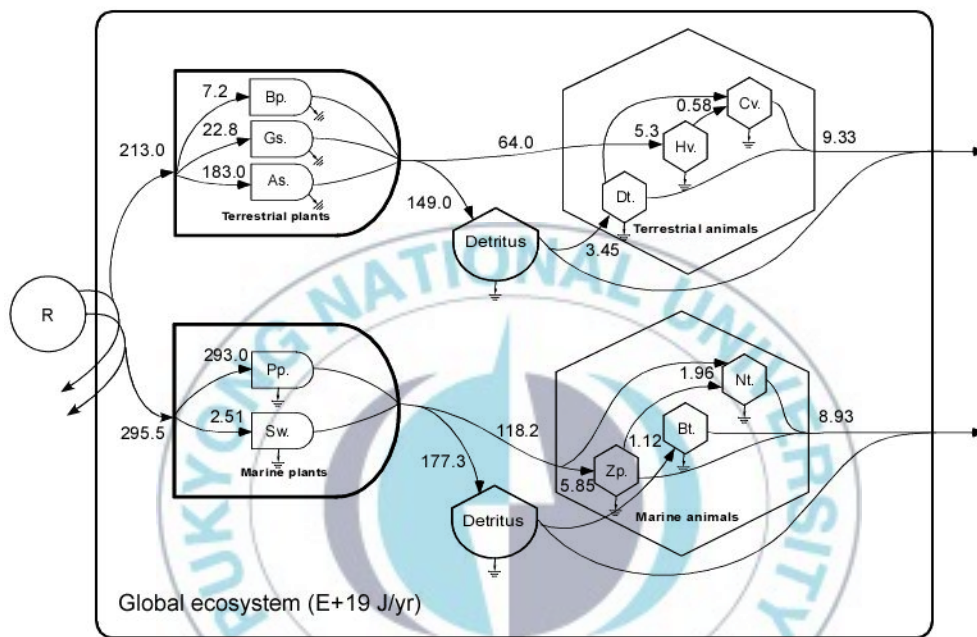


Fig. 22. Energy flows of terrestrial and marine organism in global ecosystem.

3. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에머지

앞서 산정된 지구 생물권의 각 생물군에 대한 각각의 에머지 흐름을 정리하여 보면 Fig. 23과 같다. 전 지구적으로 총 에머지 생산은 $15.83\text{E}+24$ sej/yr인데, 이는 Fig. 20에서 제시한 것처럼 지구 내부의 각 주요 에너지 흐름의 생산에 의해 지각과 해양 모두 $15.83\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 받게 된다. 따라서 지각과 해양 각각의 총 생산 에머지는 육상 식물군과 해양 식물군의 1차 생산을 하기 위한 에머지로 사용된다. 즉, 각각의 육상식물과 해양 식물이 받는 총 에머지는 각각 $15.83\text{E}+24$ sej/yr이 된다. 이를 기초로 하여 보면 먼저 육상 식물군은 각각의 분류군별로 에머지가 분할되는데 그 결과 선대식물이 $1.28\text{E}+24$ sej/yr, 나자식물이 $1.95\text{E}+24$ sej/yr, 피자식물이 $11.50\text{E}+24$ sej/yr, 그 외 기타가 $1.10\text{E}+24$ sej/yr으로 분할되어졌다. 이는 다시 소비자인 육상 동물로 전환되어지는데 직접적인 섭식을 통해 초식동물이 이용하는 에머지가 $4.76\text{E}+24$ sej/yr이고 그 외는 부식되어 부식물의 에머지가 $11.07\text{E}+24$ sej/yr가 된다. 부식동물은 대부분 부식물에서 에너지를 얻기 때문에 이에 따라 에머지가 $2.23\text{E}+24$ sej/yr으로 나타났고 초식동물과 부식동물을 섭식하는 육식동물은 각각 $4.76\text{E}+24$ sej/yr, $0.22\text{E}+24$ sej/yr의 에머지가 전달되어 총 $4.98\text{E}+24$ sej/yr로 나타났다. 결국 육상 동물의 총 생산에머지는 $6.99\text{E}+24$ sej/yr로 나타났고 그 외 남은 부식물의 에머지가 $8.84\text{E}+24$ sej/yr가 되어 다시 처음의 지구 총 에머지인 $15.83\text{E}+24$ sej/yr으로 된다.

해양의 경우도 마찬가지로 해양 식물군이 총 지구 생산 에머지 $15.83\text{E}+24$ sej/yr에 의해 식물플랑크톤은 $15.50\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 나타내었고 해조류는 $0.33\text{E}+24$ sej/yr을 나타내었다. 이는 다시 해양 동물로 전달되는데 해양 동물로 $7.12\text{E}+24$ sej/yr가 전달되고 해양 저서 퇴적물(부

식물)로 $8.71\text{E}+24$ sej/yr이 전달된다. 이후 동물플랑크톤은 $5.34\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 이용하고 유영동물이 $1.80\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 이용한다. 또한 유영동물이 동물플랑크톤의 $0.53\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 다시 이용하여 총 $2.33\text{E}+24$ sej/yr의 에머지가 된다. 저서동물은 부식물로부터 $1.12\text{E}+24$ sej/yr의 에머지를 전달받게 됨에 따라 지구 해양 동물의 총 에머지는 $8.36\text{E}+24$ sej/yr이 된다. 따라서 해양 부식물의 $7.47\text{E}+24$ sej/yr과 해양 동물의 $8.36\text{E}+24$ sej/yr을 다시 합하면 처음 지구 총 생산 에머지인 $15.83\text{E}+24$ sej/yr이 된다.

결국 지구 총 생산 에머지는 지구 식물과 동물의 생산을 하는데 모두 기여를 하면서 지구 생물군을 유지시키고 있다.



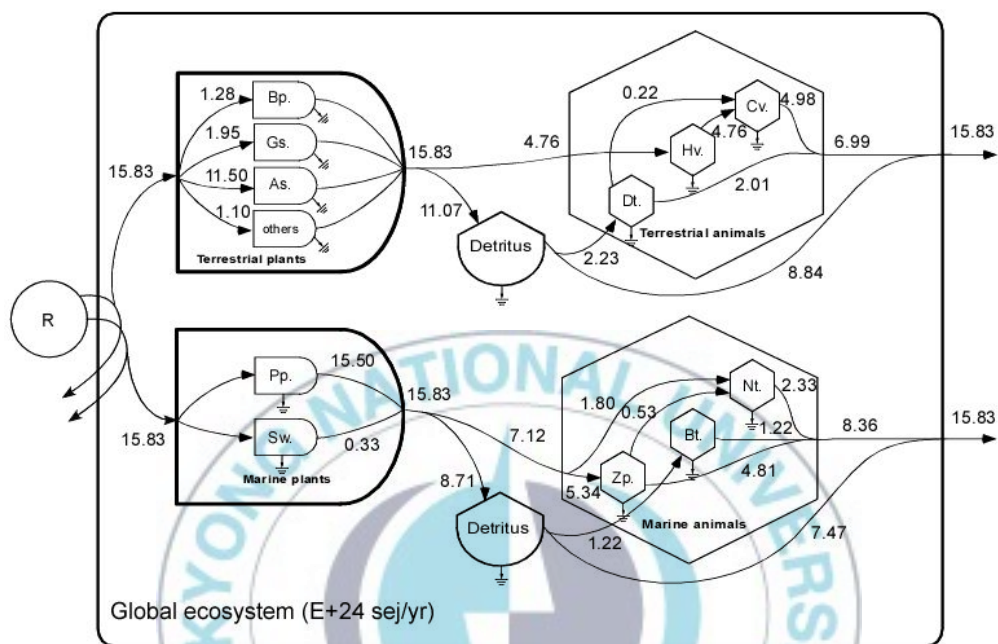


Fig. 23. Emergy flows of terrestrial and marine organisms in global ecosystem.

4. 지구 생물권의 계층구조에 따른 에너지변환도

이렇게 하위단계에서 에너지변환이 일어나 고위단계로 진행될수록 모든 각 과정에는 반드시 에너지 손실이 일어나게 되는데 이를 에너지변환도라고 한다. 따라서 높은 계층구조로 갈수록 에너지변환도는 높아지게 된다.

이를 본 연구의 결과로 정리하여 보면 Fig. 24 에서 보듯이 육상 생태계에서 육상 식물의 에너지변환도는 $7.43\text{E}+03 \text{ sej/J}$ 으로 나타났고 각 식물분류군별로 선대식물 $1.78\text{E}+04 \text{ sej/J}$, 나자식물 $8.55\text{E}+03 \text{ sej/J}$, 피자식물 $6.28\text{E}+03 \text{ sej/J}$ 로 구분되어졌다. 이는 다음 단계인 소비자로 변환되면서 부식동물 $6.46\text{E}+04 \text{ sej/J}$, 초식동물 $9.02\text{E}+04 \text{ sej/J}$, 육식동물 $8.50\text{E}+05 \text{ sej/J}$ 으로 그 단계별로 높아졌고 최종 육상동물의 에너지변환도 $7.5\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 으로 나타났다.

해양 생태계 역시 비슷한 경향을 보이고 있는데, 해양 식물의 에너지변환도는 $5.34\text{E}+03 \text{ sej/J}$ 로 나타났고 식물플랑크톤은 $5.27\text{E}+03 \text{ sej/J}$, 해조류는 $1.38\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 로 구분되어졌다. 이후 소비자로 변환되면서 동물플랑크톤 $9.13\text{E}+04 \text{ sej/J}$, 저서동물 $1.09\text{E}+05 \text{ sej/J}$, 유여동물 $1.19\text{E}+05 \text{ sej/J}$ 으로 최종 해양 동물의 에너지변환도는 $9.35\text{E}+04 \text{ sej/J}$ 로 나타났다.

결과적으로 앞서 언급되었듯이, 식물군에서 동물군으로 그 계층구조가 높아지면서 에너지량은 점차적으로 소량화 되었고 반면에 에너지질에서는 에너지변환도를 통해 고급화되어짐에 따라 본 연구의 결과가 지구 전 생물군의 에너지 전환 및 변환도의 흐름 과정을 과학적으로 증명하였다고 볼 수 있다(Fig. 25, 26). 또한 추 후 지구 생태계 및 생물군의 에너지 연구에서 중요한 기초 자료가 될 수 있을 것이다.

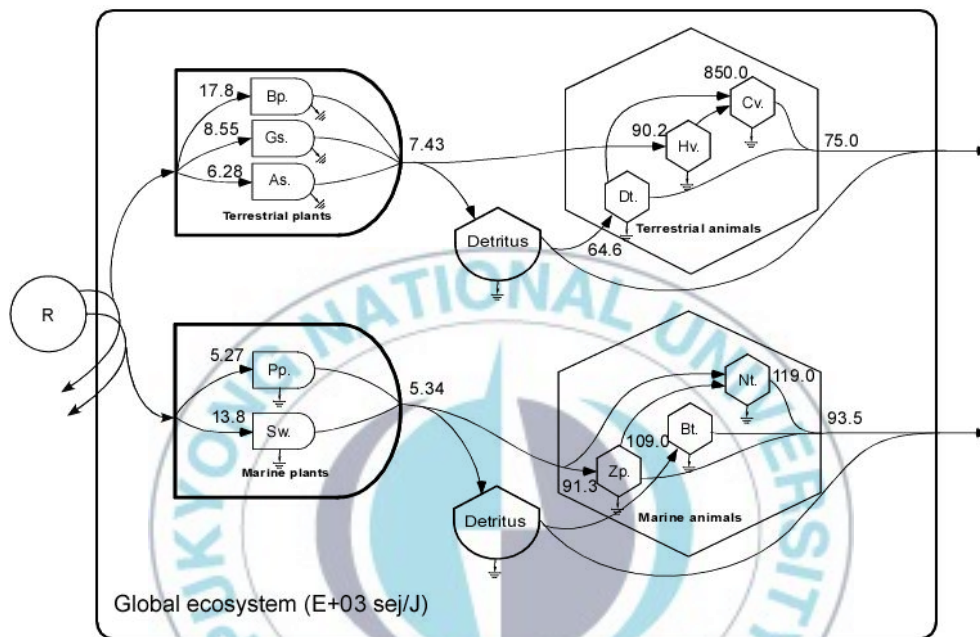


Fig. 24. Transformities flows of terrestrial and marine organism in global ecosystem.

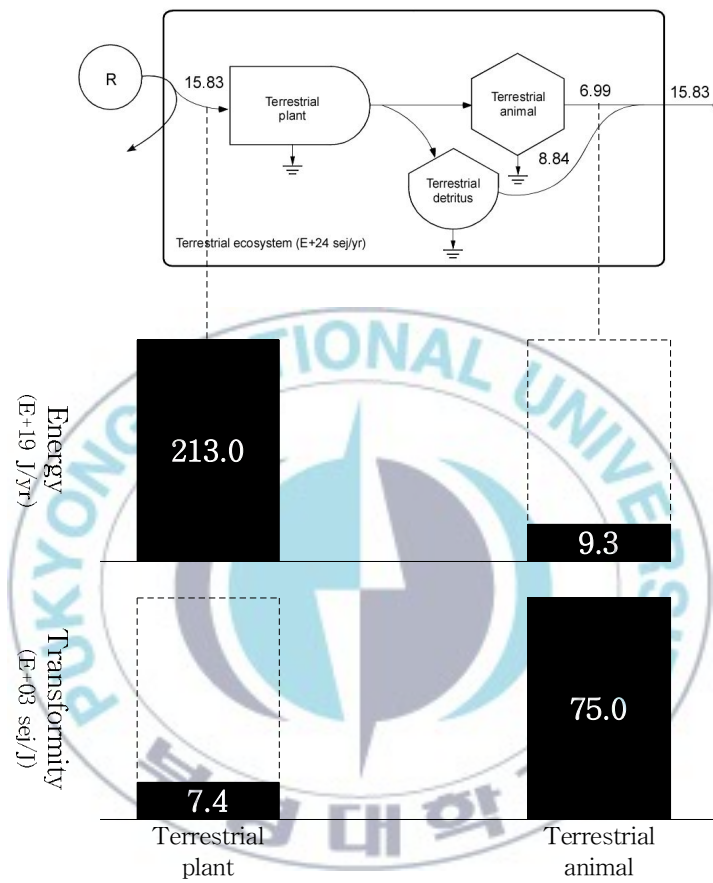


Fig. 25. Energy transformation hierarchy of terrestrial plant and animal.

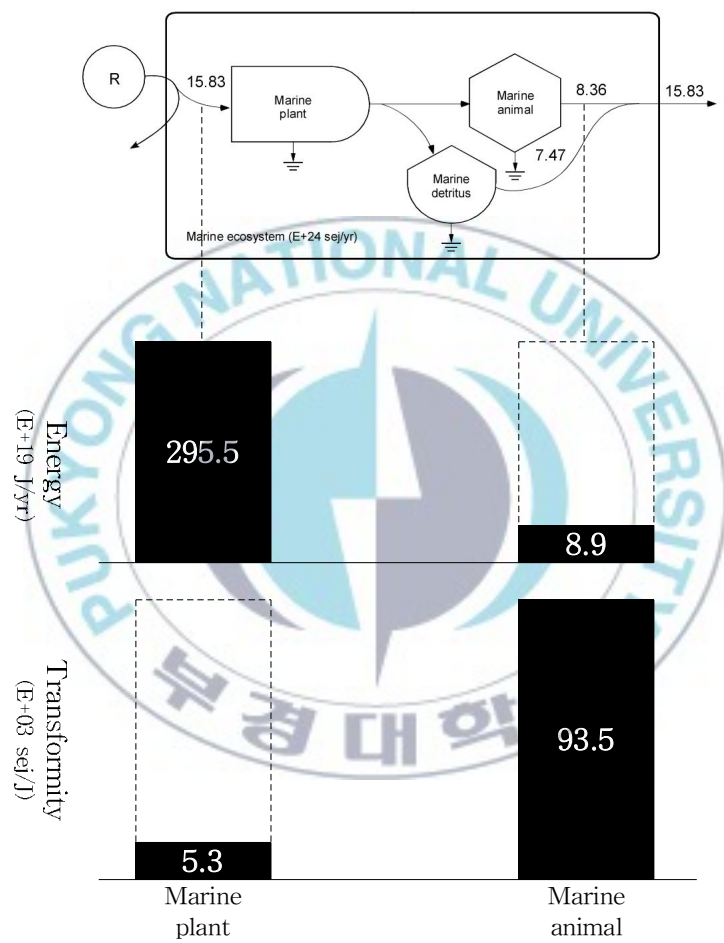


Fig. 26. Energy transformation hierarchy of marine plant and animal.

5. 지구 각 생물군의 에너지변환도 비교 및 타당성 검토

가. 육상 식물

본 논문의 결과에서 계산되어진 지구 육상 식물군의 각각의 에너지변환도를 비교, 검토하여 보면 다음과 같다. 먼저 appendix 21에서 나타난 것처럼 기존의 62개의 육상 식물 및 식생의 에너지변환도와 비교하여 보면 단순 평균값이 $2.05\text{E}+04$ sej/J로 나타났고, 그 범위는 최고값 $9.22\text{E}+04$ sej/J에서 최저값 $2.59\text{E}+03$ sej/J로 나타났다. 이를 본 연구에서 도출된 육상 식물 에너지변환도 $7.43\text{E}+03$ sej/J과 비교를 해 보면 최고값 및 최저값이 각각 12.4배에서 0.4배 정도 차이가 났고 평균값은 2.7배 정도의 차이가 나타나 본 연구에서 도출된 값보다 비교적 높은 값이 나타났다. 이는 특정 식물 또는 생태계의 값을 주로 평균한 것이고 또한 식물군 보다는 대부분 숲이나 생태계와 같이 다양한 요소들이 포함된 대상을 분석한 것이기 때문에 그 값에서 차이가 난 것으로 보인다.

따라서 Fig. 27에서는 각각의 식물군을 좀 더 구체적인 값들로 선별하여 비교해 보았는데 본 연구에서는 식물의 순일차생산성(NPP) 값을 바탕으로 에너지값을 계산하였기 때문에 비교 목록 중 순일차생산성을 통해 도출된 에너지변환도를 선정하여 보았다. 그 결과 $2.78\text{E}+03 \sim 4.05\text{E}+04$ sej/J의 범위에 평균 $8.80\text{E}+03$ sej/J로 나타나 본 연구의 결과와 비교해 0.37~5.45배의 범위에 평균이 1.18배 정도의 차이를 나타내어 비슷한 경향을 보였다. 또한 나자식물과 관련된 Spruce, Pine, Picea, Pinus 등은 $2.84\text{E}+03 \sim 9.78\text{E}+03$ sej/J의 범위에 평균은 $7.01\text{E}+03$ sej/J로 나타나 본 연구의 나자식물 $8.55\text{E}+03$ sej/J와 비교해 0.33~1.14배의 범위에 평균이 0.82배 정도로 비슷한 값을 나타내었고, 선태식물과 관련된 Epiphytes가 $1.01\text{E}+04$ sej/J로

나타나 본 연구의 $1.78E+04$ sej/J와도 큰 차이를 나타내지 않았다.

결국 본 연구에서 산출된 각 육상 식물군의 에너지변환도는 기존의 식물 군락이나 숲, 생태계와 비교했을 경우 비교적 낮게 나타나지만 NPP나 유사 분류군별로 구분하였을 경우 그 값이 비슷한 경향을 보임에 따라 본 연구 결과의 과학적 타당성을 입증한 것으로 보인다.

그러나 본 연구의 결과는 지구적 범위에서 각 식물 또는 각 지역에 분포하는 모든 식물의 조건을 기초로 하여 산정된 평균값이다. 따라서 본 연구에서 산정된 에너지변환도의 값을 직접적으로 사용하기 위해서는 전 지구 생물군이나 대륙 별 또는 거시 생태계 별 식생 연구 등에서 사용할 수 있으나 각각의 식물 중에 직접적으로 적용하기는 무리가 있어 보인다. 이는 육상 식물의 경우 1년생인 초본 식물에서부터 최고 수 백년까지 생존할 수 있는 교목류들 까지 각 식물군 별 수명의 차이와 계층구조의 차이가 분명히 나타나기 때문에 모든 종을 평균값으로 사용할 수는 없다. 그러나 본 연구 결과는 육상 식물 또는 각 분류군별로 나타낼 수 있는 육상 식물 에너지변환도의 기준점이 되는 것이다. 따라서 각 지역 별로 각 식물에 대한 에너지변환도 산정할 시 앞서 제시되었듯이 각 종별로 그 범위가 대략 최소 0.3배에서 최대 약 12배 정도의 차이까지 나타나기 때문에 이 범위 내에서 에너지변환도의 값이 산정된다면 그 과학적 타당성은 어느 정도 입증된다고 볼 수 있다는 것에 그 의미를 둘 수 있다.

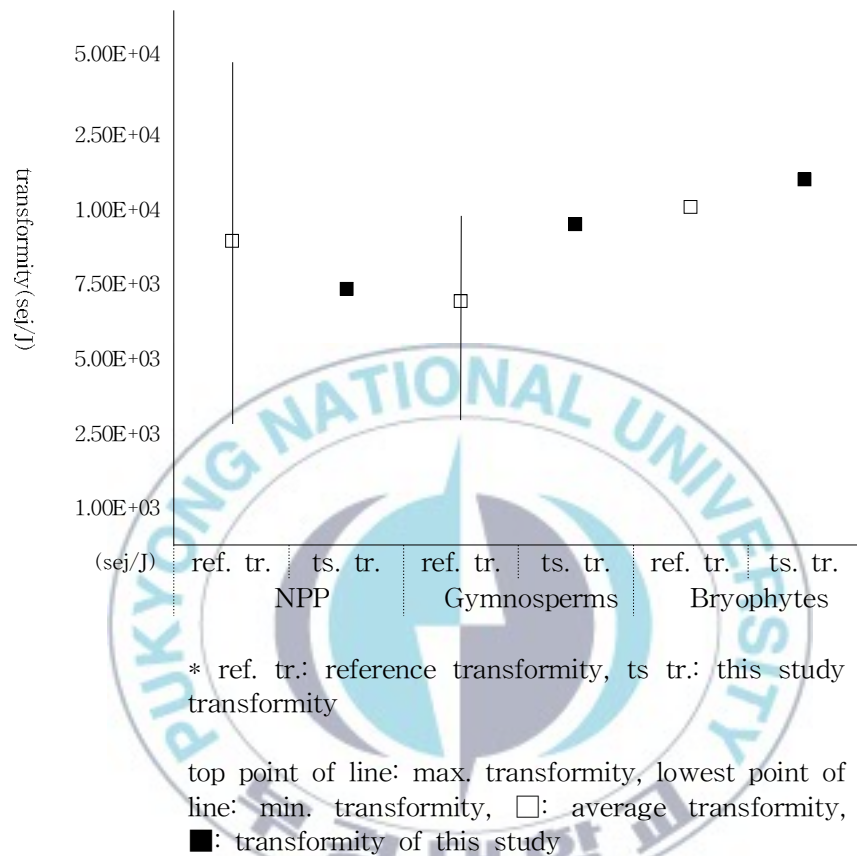


Fig. 27. Comparison of reference and this study transformities of the terrestrial plants.

나. 육상 동물

본 논문의 결과에서 계산되어진 지구 육상 동물군의 각각의 에너지변환도와 appendix 22에서 제시된 기존의 연구값을 비교해 보면 총 98개의 육상동물과 관련된 에너지변환도의 단순 평균값은 $3.55\text{E}+06$ sej/J로 나타났고, 그 범위는 최고 $5.12\text{E}+07$ sej/J부터 최저 $1.24\text{E}+04$ sej/J로 나타남에 따라 본 연구에서 산정된 지구 육상 동물군 $7.50\text{E}+04$ sej/J에 비해 최고 682배에서 최저 0.2배 그리고 평균값은 47.3배 정도의 차이로 비교적 큰 차이가 나타났다. 이를 각각의 영양단계별로 구분하여 보면 Fig. 28과 같이 대체적으로 초식동물류는 $1.00\text{E}+05$ sej/J~ $5.00\text{E}+05$ sej/J 사이에 포함되어 있어 본 연구의 결과값에 비해 1.1배에서 5.5배 정도로 비슷한 값을 나타내었고, 또한 Brown & Ulgiati(2004)의 초식동물의 결과 $1.27\text{E}+05$ sej/J와도 1.4배로 비슷한 결과를 나타내었다. 부식동물류는 직접적으로 비교하기는 힘들으나 일부 무척추동물이나 미소곤충류의 값과 비교해 보면 대략 $6.00\text{E}+04$ sej/J~ $3.00\text{E}+05$ sej/J 사이에 있어 본 결과인 $6.46\text{E}+04$ sej/J과 비교해 0.9배에서 4.6배로 최저값과 비슷한 값을 나타내고 있었다. 육식동물의 경우 $1.00\text{E}+06$ sej/J~ $5.00\text{E}+07$ sej/J까지 그 범위가 비교적 넓게 나타나 작게는 1.2배에서 최고 59배 정도의 차이가 났고 또한 Brown & Ulgiati(2004)의 결과에서도 일반 대형 육식동물은 $4.09\text{E}+06$ sej/J, 최상위 육식동물(top carnivores)은 $4.06\text{E}+07$ sej/J로 나타나는 등 본 연구의 결과인 $8.50\text{E}+05$ sej/J에 비해 약 4.8배와 48배의 비교적 높은 값을 나타내었다.

따라서 본 연구에서 계산되어진 초식동물이나 부식동물 그리고 육식동물의 에너지변환도는 기존의 에너지변환도 값에 비해 전체적으로 낮게 나타나거나 최소값과 비슷한 경향을 보이고 있는데, 이는 기존의 비교대상이 되는 동물류들은 대부분 대형척추동물과 같은 대형 종을 대상으로 분석 한

사례가 많고 지역적 연구가 대부분이기 때문에 그 값에서 차이가 나는 것으로 보인다.

또한 본 연구의 범위가 지구 육상 동물군이기 때문에 그 개체수나 생체량 등을 보았을 때 대부분 미소 및 하위동물들의 비율이 절대적으로 많기 때문에 그 비율에 따라 다른 기존의 에너지변환도와 비교해서 비교적 낮은 값이 산출된 것으로 보인다.

따라서 본 연구의 결과는 지구적 범위에서 각 동물 또는 각 지역에 분포하는 모든 영양단계 별 동물의 조건을 기초로 하여 산정된 평균값이다. 따라서 본 연구에서 산정된 에너지변환도의 값을 직접적으로 사용하기 위해서는 전 지구 생물군이나 대륙 별 또는 거시 생태계 별 동물군 연구 등에서 사용할 수 있으나 각각의 육상 동물 중에 직접적으로 적용하기는 무리가 있어 보인다.

이는 육상 동물의 경우 단 몇 시간이나 몇 일 정도 살 수 있는 미소 동물에서부터 최고 수 십년까지 생존할 수 있는 대형 척추동물들 까지 각 동물군 별 수명의 차이와 영양단계별 계층구조의 차이가 분명히 나타나기 때문에 모든 종을 평균값으로 사용할 수는 없다. 그러나 본 연구 결과는 육상 동물 또는 각 영양단계별로 나타낼 수 있는 육상 동물 에너지변환도의 기준점이 되는 것이다. 따라서 각 지역이나 종별로 각 동물에 대한 에너지변환도 산정할 시 앞서 제시되었듯이 각 종별로 그 범위가 대략 최소 0.2배에서 최대 약 682배 정도의 차이까지 매우 넓은 범위로 나타나고 있으나 각 분류군 별로 5배에서 50배 정도의 차이가 나기 때문에 비교적 그 값의 차이는 나지만 각 영양단계를 고려하여 이 범위 내에서 에너지변환도의 값이 산정된다면 그 과학적 타당성은 어느 정도 입증된다고 볼 수 있다는 것에 그 의미를 둘 수 있다.

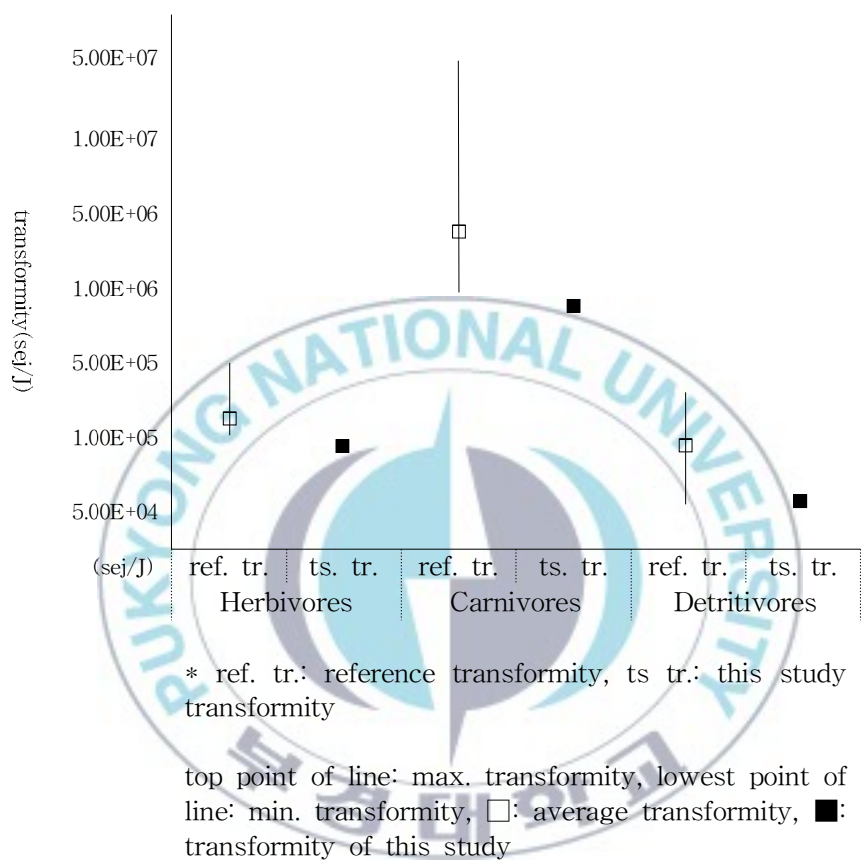


Fig. 28. Comparison of reference and this study transformities of the herbivores, carnivores and detritivores.

다. 해양 식물

본 논문의 결과에서 계산되어진 지구 해양 식물군의 각각의 에너지변환도와 appendix 23에서 제시된 기존의 연구값과 비교해 보면 총 5개의 해양 식물과 관련된 에너지변환도값의 평균값은 $1.54\text{E}+04$ sej/J로 나타났고, 그 범위는 최고값 $1.85\text{E}+04$ sej/J에서 최저값 $1.04\text{E}+04$ sej/J으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 나타난 해양 식물의 에너지변환도가 $5.34\text{E}+03$ sej/J로 나타나 평균값은 2.9배, 최고 3.5배에서 최저 1.9배로 비교적 낮게 나타나는 경향이 있다. 이는 지구 해양 식물의 대부분을 차지하는 식물플랑크톤이 $5.27\text{E}+03$ sej/J로 기존의 식물플랑크톤의 값보다 낮게 나타났기 때문인 것으로 보인다. 일반적인 계층구조상 육상 식물보다 식물플랑크톤은 하위계층의 식물이다. 그러나 앞서 제시된 육상 식물의 평균이 $8.80\text{E}+03$ sej/J이고 본 연구에서 나타난 육상식물도 $7.43\text{E}+03$ sej/J로 나타남에 따라 기존의 식물플랑크톤 에너지변환도 값이 비교적 높게 평가된 것으로 보인다.

이는 추후 좀 더 정확한 추적을 통한 재해석의 필요성이 있겠지만 현 시점에서는 지역적 자료를 통한 결과이기 때문에 본 논문에서 지구적 자료를 통해 좀 더 종합적 고려가 된 $5.27\text{E}+03$ sej/J의 값이 더 타당한 값으로 판단된다.

한편, 해조류의 경우는 $1.38\text{E}+04$ sej/J로 기존의 $1.10\text{E}+04$ sej/J과 거의 유사하게 나타나고 있는데 이는 해조류의 서식경계가 전 해양 면적에 비해 크지 않기 때문에 그 값의 차이가 적은 것으로 보인다.

이렇듯 해양 식물의 경우는 앞서 비교되었던 육상 식물, 육상 동물에 비해 각 종별 수명의 차이나 계층구조의 차이가 비슷하기 때문에 그 범위나 평균값에서 큰 차이를 나타내지는 않았다.

라. 해양 동물

본 논문의 결과에서 계산되어진 지구 해양 동식물군의 각각의 에너지변환도와 appendix 24와 비교를 해 보면 기존의 연구에서 23개의 해양동물과 관련된 에너지변환도의 평균은 $4.33\text{E}+07$ sej/J로 나타났고, 그 범위는 최고 $4.54\text{E}+08$ sej/J부터 최저 $1.68\text{E}+05$ sej/J로 나타났다. 이를 본 연구에서 도출된 해양 동물 에너지변환도 $9.35\text{E}+04$ sej/J와 비교를 해 보면 평균값에서 463배 차이가 났고 최고 4855배에서 최저 1.8배로 매우 큰 차이를 보이고 있다. 물론 이는 기존의 연구들이 고래나 바다표범과 같이 대형척추동물의 값이 포함되어 각 영양단계에 따른 계층구조의 상태를 무시하고 단순 비교한 것이기 때문에 큰 의미를 갖지는 않는다. 따라서 일반적으로 일부 대형종을 제외하고 동물군집에 대한 에너지변환도의 값은 대략 $1.10\text{E}+05$ sej/J~ $8.00\text{E}+05$ sej/J로 본 연구의 1.2배에서 8.6배 정도의 차이를 보여 크게 차이를 보이지 않았다.

Fig. 29와 같이 각 종류별로 에너지변환도 값을 구분하여 비교해 보면 부유동물은 Brown et al. (1993)에 의해 $1.68\text{E}+05$ sej/J으로 제시되었는데 이는 본 연구의 결과 $9.13\text{E}+04$ sej/J과 1.8배 정도 나 큰 차이는 없었고, 저서동물은 대부분이 $1.84\text{E}+05$ sej/J~ $8.39\text{E}+05$ sej/J 사이에 포함되어 있고 평균값이 $3.85\text{E}+05$ sej/J로 본 연구 결과 $1.09\text{E}+05$ sej/J와 비교해서 최저 1.7배에서 최고 7.7배 그리고 평균값에서 3.5배 정도의 차이가 나 기존 연구의 범위를 약간 벗어났으나 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 그러나 유영 동물에서는 그 범위가 대략 $1.10\text{E}+05$ sej/J~ $4.54\text{E}+08$ sej/J정도로 범위 자체가 매우 크게 나타났는데 본 연구결과인 $1.19\text{E}+05$ sej/J과도 크게는 3815배 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 이는 기존의 대부분의 연구에서 어류는 수산업과 관련되어 대형어종이나 유영 파충류, 포유류 등이 많이 포함되어

있어 그 값이 높은 것으로 보인다. 그러나 해양 전체 동물군을 대상으로 한 본 연구 결과의 값은 대형어류 뿐만 아니라 미소어류나 무척추동물까지 모두 포함하고 있어 기존 연구 범위의 가장 낮은 값과 비슷한 값이 나온 것으로 보인다.

따라서 본 연구의 결과는 지구적 범위에서 각 해양 동물이 분포하는 모든 지역의 조건을 기초로 하여 산정된 평균값이다. 따라서 본 연구에서 산정된 에너지변환도의 값을 직접적으로 사용하기 위해서는 전 지구 해양 생물군이나 대양 별 동물군 연구 등에서 사용할 수 있으나 각각의 해양 동물 종에 직접적으로 적용하기는 무리가 있어 보인다.

이는 해양 동물의 경우 단 몇 시간이나 몇 일 정도 살 수 있는 미소 동물에서 부터 최고 수 백년까지 생존할 수 있는 대형 척추동물들 까지 각 동물군 별 수명의 차이와 영양단계별 계층구조의 차이가 분명히 나타나기 때문에 모든 종을 평균값으로 사용할 수는 없다. 그러나 본 연구 결과는 해양 동물의 연구에 있어 에너지변환도의 기준점이 되는 것이다. 따라서 각 지역이나 종별로 각 해양 동물에 대한 에너지변환도 산정할 시 앞서 제시되었듯이 각 종별로 그 범위가 대략 최대 약 4,800배 정도의 차이까지 매우 넓은 범위로 나타나고 있으나 각 분류군 또는 각 영양단계를 고려하여 이 범위 내에서 에너지변환도의 값이 산정된다면 그 과학적 타당성은 어느 정도 입증된다고 볼 수 있다는 것에 그 의미를 둘 수 있다.

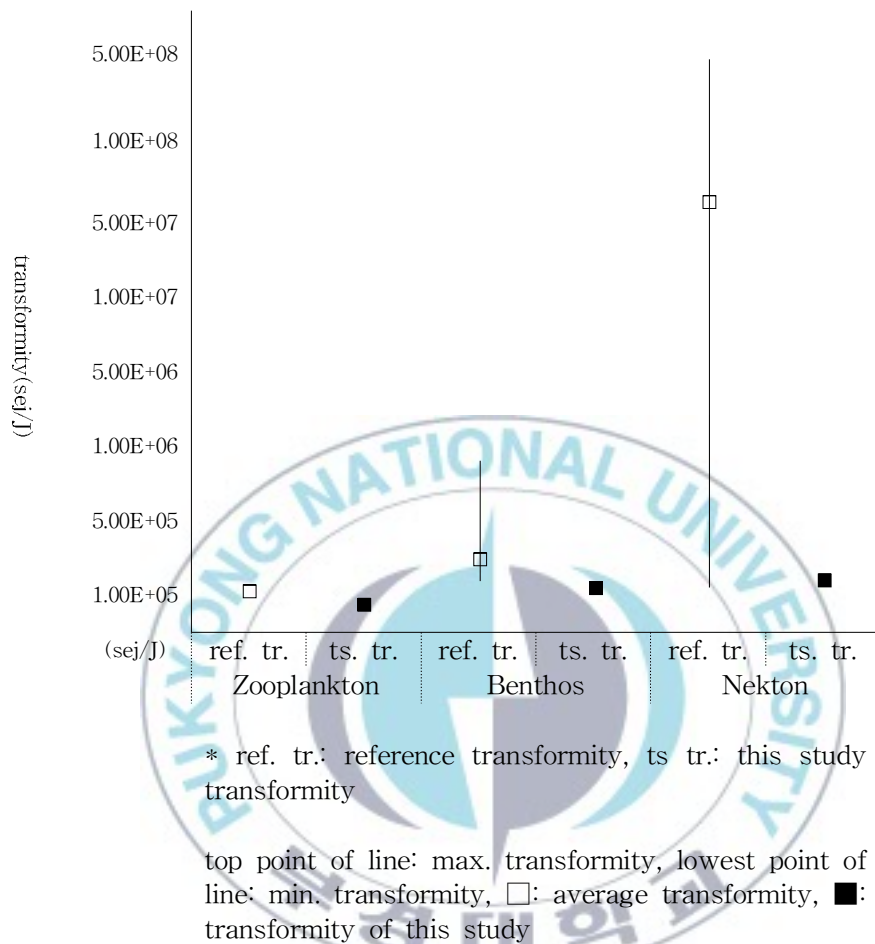


Fig. 29. Comparison of reference and this study transformities of the zooplankton, benthos and nekton.

6. 지구 생물군의 에너지변환도에 대한 종합적 검토

앞서 각 지구 생물군의 에너지변환도 흐름과 타당성을 검토하여 보았는데 이를 종합적으로 정리하여 보면 Fig. 30과 같다. 전체적으로 진화적 계층구조에 따라 해양식물이 가장 낮은 에너지변환도값을 나타내었고 그 다음으로 육상식물 그리고 해양동물, 육상동물 순서로 나타났다. 이런 경향은 기존의 연구에서 제시된 각 생물군의 에너지변환도의 결과와 비슷하게 나타났고 각 생물군의 진화적 패턴과도 유사함에 따라 각 생물군의 에너지 분석 시 본 결과를 적용함에 있어 그 과학적 타당성은 충분하다고 판단된다.

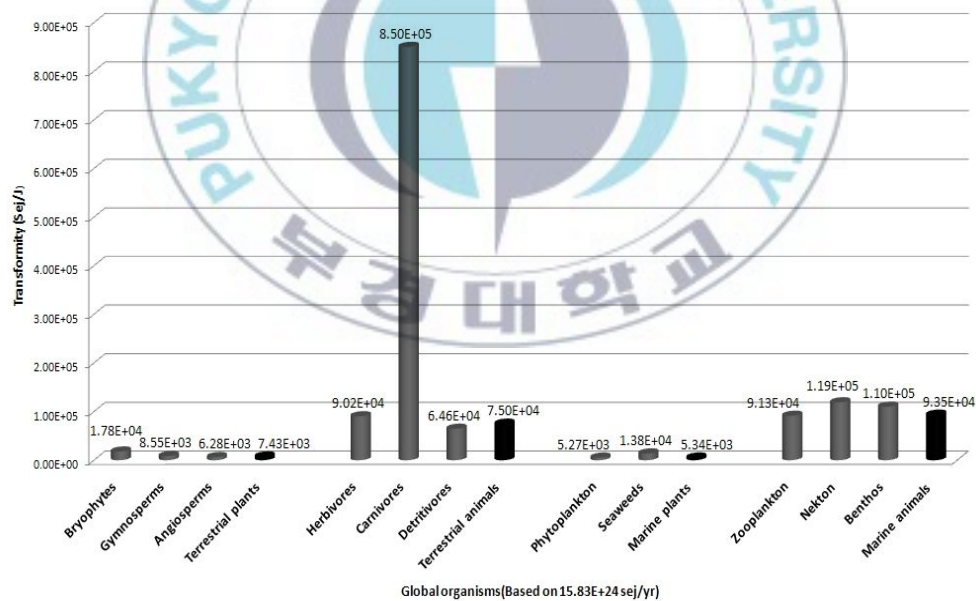


Fig. 30. Transformities of the global organism.

기존의 연구에서 제시된 각 생물군의 에너지변환도를 appendix 21~24까지 정리하였는데 이를 본 연구결과와 함께 도표로 재구성하여 보면 Fig. 31과 같다. 기존의 연구에서는 각각의 생물군에 대한 생태적, 분류학적 위치에서 다양한 에너지변환도의 값을 제시하고 있는데 그 범위는 중, 군집, 서식 생태계 등으로 혼합되어져 있다. 이렇게 혼재되어 있는 에너지변환도 값은 직접적으로 에너지변환도를 산출하는 일부 연구를 제외하고는 대부분 비슷한 단계의 다른 에너지변환도를 과학적 검증없이 인용하여 사용하는 경우가 많다. 무생물적 대상의 경우, 그 본질의 특성이 크게 변하지 않는 이상 기존의 에너지변환도의 값을 인용하여도 무방하지만 생물군은 그 특성상 매우 다양하고 혼합적이며 동적(動的)인 대상이기 때문에 그 대상에 적합한 실질적인 에너지변환도 값이 아닐 경우 그 대상이 과소 또는 과대 평가 될 우려가 많다.

Brown and Ulgiati(1999)에 의해 시도된 지구 자연 자원의 에머지 평가에서 식물과 동물의 에너지변환도 값을 예로 보면 지구 식물의 에너지변환도 값은 $1.00\text{E}+04$ sej/J을 사용하였고 지구 동물은 $1.00\text{E}+06$ sej/J을 사용하였다. 이는 본 결과보다 비교적 높은 값이 사용되었는데 먼저 지구 식물군의 에너지변환도를 보면 $1.00\text{E}+04$ sej/J이 본 연구결과와 크게 차이는 나지 않지만 기존의 평균값 $8.80\text{E}+03$ sej/J 이나 본 연구 결과보다 약간은 높은 값을 사용하여 최종 에머지 값이 일부 과대평가 되었을 것으로 판단된다. 또한 지구 동물군의 경우에서도 에너지변환도의 값이 $1.00\text{E}+06$ sej/J을 사용하였는데 이는 본 연구의 결과에서 나타난 육상동물 $7.50\text{E}+045$ sej/J, 해양동물 $9.35\text{E}+04$ sej/J보다 약 10배 정도의 높은 값이다. 그러나 Brown et al.(1993)과 비교해 봤을때 herbivores의 경우 $1.00\text{E}+05$ sej/J, meiofauna, microfauna and microflora는 $2.9\text{E}+05$ sej/J, macrofauna는 $8.1\text{E}+05$ sej/J, lower consumer는 $1.1\text{E}+05$ sej/J, 그리고 apex predators는

1.0E+06 sej/J을 사용하고 있어 Brown and Ulgiati(1999)이 사용한 1.00E+06 sej/J은 매우 높은 에너지변환도 값으로 판단된다. 따라서 이들이 주장한 지구 동물군의 에머지 저장고 값도 과대평가 되었을 것으로 판단된다.

이렇듯 지구 생물에 대한 정확한 분석을 통하여 가장 과학적이고 타당성 있는 에너지변환도의 값이 요구되어지는 상황인데 이런 오류를 줄이기 위하여 본 연구에서는 지구 생물이 생산 및 유지하는데 필요한 모든 서식 특성을 고려하여 각 생물을 분류군별, 영양단계별, 서식유형별로 구분하여 각각의 에너지변환도를 산정하였다. 따라서 기존의 경우 생물별로 각각의 에너지변환도 값이 달라 혼용되어 왔지만 본 연구 결과는 지구 전 생물의 종합적 분석을 통해 제시한 평균값이기 때문에 에머지 학문 분야에서 각 생물군의 에너지변환도 산정에 있어 그 과학적 타당성을 제시할 기준점을 제시한 것이다. 따라서 그 범위내에서 에너지변환도의 값이 산정된다면 그 과학적 타당성은 어느 정도 입증된다고 볼 수 있다는 것에 그 의미를 둘 수 있다.

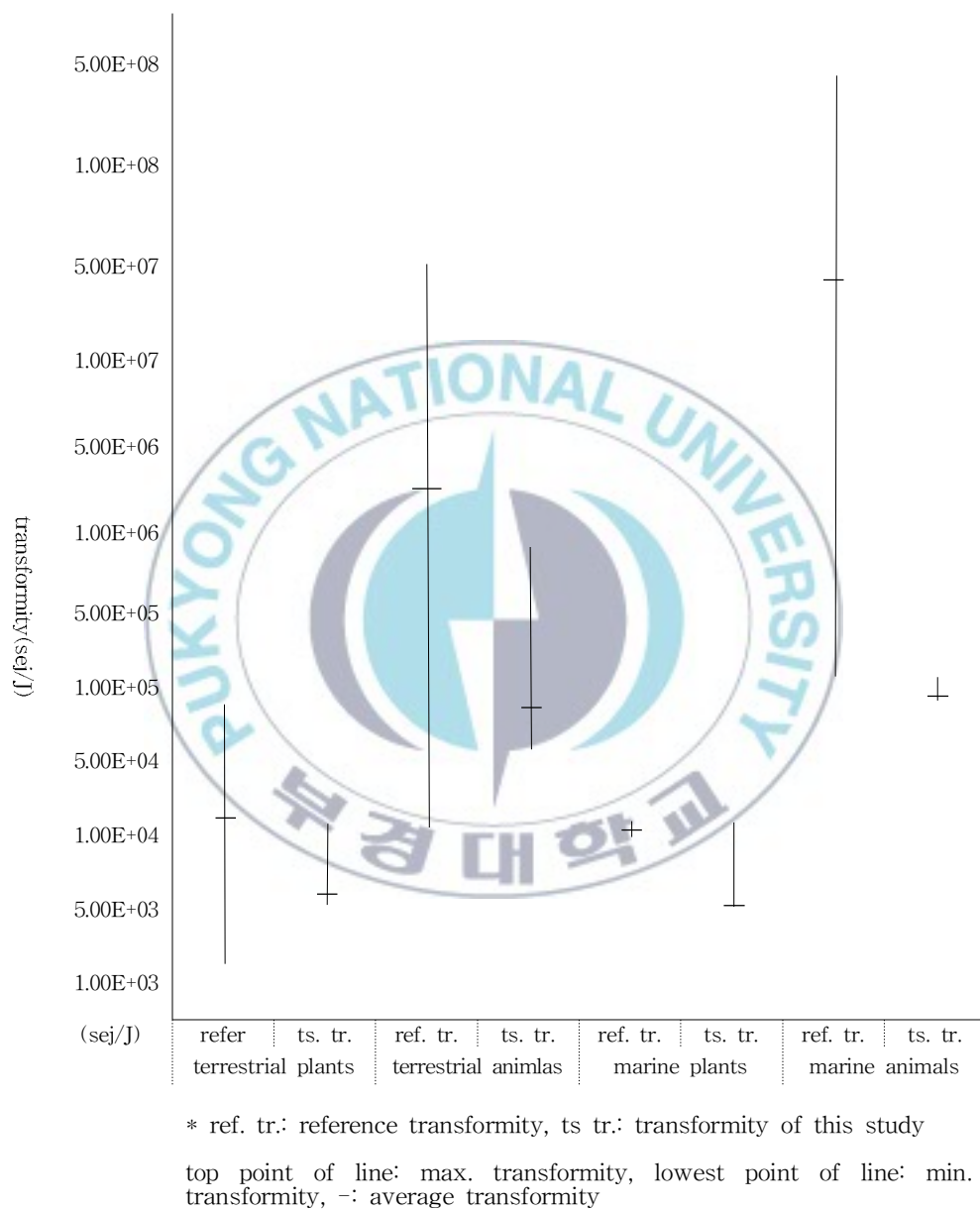


Fig. 31. Comparison of reference and this study transformities of the terrestrial plants, terrestrial animals, marine plants and marine animals.

7. 지구 생물군의 생태경제적 가치

최근 지구적 기후변화나 산업화에 따른 도시화 현상으로 인해 지구 곳곳에서 생물 감소에 대한 우려의 목소리가 제기되고 있고 이에 따라 많은 학자들에 의해 생물 보전을 위한 적절한 관리방안이 제시되고 있지만 대부분 개발과 보전의 소통이라는 난제에 부딪히면서 보전에 대한 당위성만을 강조할 뿐 타당한 과학적 근거를 제시하지 못하는 경우가 많다. 따라서 현실점에서 생물의 보전을 위해서 가장 중요한 요건은 일관된 관리 속에서 경제적 개발 요구와 자연보전 요구 사이의 균형을 맞추어 지속가능한 발전 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해서는 보전 대상에 대하여 신뢰할 수 있고 의미 있는 종합적인 생태경제학적 정보가 요구된다.

그러나 기존의 많은 연구들에 의해 제시된 생태학적 정보에서는 생물의 중요성이나 의미성을 나타내기 위하여 그 대상을 수치화 시키거나 또는 우점도, 풍부도, 다양도와 같이 지표화 시키고 있는데 이는 그 생물군의 상태를 어느 정도 반영할 수는 있지만 생물군의 특성을 단순화 시킬 수 있고 일반인들이나 정책결정자들의 이해를 난해하게 할 수 있는 단점이 있다(이, 2009).

따라서 균형 잡힌 의사결정을 내려 이를 관리 정책에 반영시키기 위해서는 이런 수치화된 자료뿐만 아니라 그 생물의 가치에 대한 중요성을 제시하여야 한다. 생물의 가치는 직접적인 이용을 통하여 그 생물의 가치를 결정짓는 직접가치(or 사용가치) 뿐만 아니라 사회경제적 측면을 보완해 줄 간접가치(or 비사용가치)까지 포함된 생물의 고유가치(intrinsic value)가 제시되어야 한다(이, 2009). 이는 다양한 환경경제학(environmental economics)적 분석의 발달로 인해 환경이나 생물이 제공하는 비시장적 재화와 서비스에 대한 가치를 화폐단위로 전환시켜 대상의 중요성을 누구나

쉽게 이해할 수 있도록 해 주었고 생물 관리와 환경 정책결정에 있어 객관적 판단 기준을 제시하게 해 주었다. 이로 인해 환경이나 생물군에 대한 일반인의 인식이 제고됨은 물론 자연 자원의 효율적인 활용에도 도움이 되었다.

따라서 본 연구에서는 지구 생물자산의 보전을 위해 정책적 제시와 더불어 그에 합당한 경제적 타당성을 입증하는데 필요한 생태경제적 가치를 과학적으로 측정하는데 있다. 이를 위하여 에머지 분석 방법을 이용하여 지구 생물권의 생태경제적 가치 평가를 실시하였는데, 그 결과를 종합해 보면 Table 31과 같다.

지구 육상 생물은 육상 식물이 연간 11조 2,500억 Em\$/yr, 육상 동물이 4조 9,600억 Em\$/yr로 총 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었고, 해양 생물은 해양 식물이 연간 11조 2,500억 Em\$/yr, 해양 동물이 5조 9,300억 Em\$/yr로 총 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었다. 따라서 지구 식물군은 연간 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었고, 지구 동물군은 연간 5조 4,600억 Em\$/yr를 나타내어 총 지구 생물권의 연간 총 생산 가치는 11조 2,500억 Em\$/yr로 나타났다.

여기서 육상 식물, 해양 식물, 총 육상 생물, 총 해양 생물 그리고 지구 식물과 총 지구 생물의 연간 총 생산 가치가 11조 2,500억 Em\$/yr로 동일하고 단지 육상 및 해양 동물의 생산 가치만 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 가치 평가 방법에서는 식물과 동물의 총 생산의 합이 총 생물의 생산이 되는 것으로 단순 계산 되지만 에머지 평가 방법에서는 에너지의 흐름과 질에 따라 그 대상을 평가하는 방법이기 때문에 단순히 식물과 동물을 더하게 되면 중복계산의 오류가 발생하게 된다. 즉, 식물과 동물의 에너지가 독립적으로 분할되어 있는 것이 아니고 생산자의 에너지를 소비자가 이용하고 이를 다시 최종 소비자가 이용하는 계층 구조로 되어

있기 때문에 결국 생산자의 에너지가 소비자의 에너지로 전환되는 것이 더 증가하는 것이 아니기 때문에 단순히 총합으로 나타낸다면 전환된 에너지량의 중복으로 인해 과대평가 될 수 있다. 따라서 지구 내부로 유입된 에너지원을 각 생물군이 공동으로 이용하고 생산(co-product)하는 시스템으로 그 생산 가치는 각 단계별로 모두 11조 2,500억 Em\$/yr 으로 나타나게 된다.

한편, 에머지 저장고의 경우는 에너지의 축적된 보유량을 평가하는 것이기 때문에 그 각각의 가치가 독립적으로 평가되고 각 생물군의 가치가 더해져야 총 생물군의 가치가 나타나게 된다. 따라서 에머지 저장고를 통한 생체량의 가치를 종합하여 보면 육상 생물에서 육상 식물이 125조 3,500억 Em\$, 육상 동물이 1조 9,500억 Em\$로 총 127조 3,000억 Em\$의 가치를 나타내었고, 해양 생물은 해양 식물이 2,800억 Em\$, 해양 동물이 1조 3,600억 Em\$로 나타나 총 1조 6,400억 Em\$의 가치를 나타내었다. 따라서 지구 식물군의 저장고의 가치는 125조 6,300억 Em\$의 가치를 나타내었고 지구 동물군은 3조 3,100억 Em\$의 가치를 나타내어 총 지구 생물권의 저장고에 따른 가치는 128조 9,400억 Em\$로 나타났다.

이 결과들의 타당성 검증을 위하여 기존에 Brown and Ulgiati(1999)의 지구 자연 자산에 대한 에머지 분석 중 지구 식물과 동물의 보유량에 대한 에머지 분석 결과와 비교하여 보면 먼저 에머지 분석을 위한 각 계산 과정에 있어서 지구 육상 식물은 $4.16E+22$ J의 에너지를 사용해 본 연구 결과인 지구 육상 식물군의 에너지량 $2.37E+22$ J과는 약 2배의 차이가 나타나고 있다. 그러나 생체량을 비교해 보면 Brown & Ulgiati가 $1.84E+18$ g(DM)로 나타내었는데 이는 육상과 해양의 모든 식물 생체량을 합한 것이지만 일단 해양 식물의 생체량(Table 22)이 매우 적다고 한다면 본 연구에서 나타낸 $1.42E+18$ g(DM)과 그 양이 비슷한 것으로 보인다. 따라서 비

슷한 생체량이지만 에너지로 전환되면서 그 양의 차이가 나타났다. 이는 동물군에서도 나타나고 있는데 육상 동물군의 경우 $1.01\text{E}+15 \text{ g(DM)}$ 의 생체량에 $2.26\text{E}+19 \text{ J}$ 의 에너지가 나타났지만 본 연구에서는 $2.19\text{E}+15 \text{ g(DM)}$ 의 생체량에 $3.66\text{E}+19 \text{ J}$ 에너지가 나타났다. 따라서 생체량의 경우 본 연구값이 2배 이상 높게 나타났지만 에너지값에서는 대략 0.6배 정도 높게 나타났다. 또한 해양 동물에서도 $9.98\text{E}+14 \text{ g(DM)}$ 의 생체량이 $2.26\text{E}+19 \text{ J}$ 의 에너지로 전환되었는데 본 연구에서는 $1.23\text{E}+15 \text{ g(DM)}$ 의 생체량이 $2.05\text{E}+19 \text{ J}$ 로 전환됨에 따라 생체량에서는 본 연구의 값이 컸지만 에너지량에서는 오히려 Brown & Ulgiati의 값이 더 커지는 것을 알 수 있다.

결국 이런 결과는 에너지 전환 시에 나타나는 문제로 좀 더 구체적으로 보면 에너지전환을 위한 계산에 있어 그램(gram)단위를 칼로리(calory)로 변환과정에서 차이가 나타났다. 기존의 많은 에머지 연구에서 일부 대형 육상 척추동물이나 해양 대형 동물에서는 1g 당 5 kcal을 사용하고 있지만 (Brown et al., 1993) 대부분의 식생이나 미소동물 등은 대부분 1g 당 4 kcal로 전환되는 것을 기본으로 한다. 이런 결과로 Brown and Ulgiati의 경우 지구 생물 전체의 에너지 변환에서 5.4 kcal/g을 사용하고 있는데, 일반적으로 지구 식물이나 동물의 대부분이 하위 또는 미소 생물군의 비율이 절대적으로 많기 때문에 대형 동물군에서 사용하는 5 kcal/g 보다 높은 5.4 kcal/g은 매우 높은 값으로 판단된다. 따라서 Brown and Ulgiati의 에너지 값이 높게 나타난 것으로 보인다. 또한 앞서 언급된 에너지변환도값에서도 높게 나타나서 최종 에머지의 값이 본 연구의 결과보다 높게 나타난 것으로 보인다.

한편 Brown and Ulgiati에 의해 도출된 에머지 값을 Emvalue로 전환하여 보면 먼저 지구 식물 보유량에 따른 총 가치는 약 335조 Em\$로 나타났다, 지구 동물은 약 37조 Em\$로 나타났다. 그러나 이 계산 과정에서 사

용된 EMR (emergy/money ratio)은 1995년에 제시된 $1.10\text{E}+12$ sej/\$로 본 연구와 동일한 기준에서 비교하기 위해서는 2008년 EMR($1.41\text{E}+12$ sej/\$)을 적용하여 재분석해야 한다. 그 결과 지구 식물은 약 295조 Em\$로 나타났다, 지구 동물은 약 33조 Em\$로 나타났다. 이를 본 연구에서 계산된 결과와 비교해 보면 지구 식물군의 에머지 저장고의 가치는 125조 6,300억 Em\$로 약 2.3배 정도 높게 나타났고 지구 동물군은 3조 3,100억 Em\$로 약 10배 정도 더 높게 나타남을 볼 수 있었다.

결과적으로 본 논문의 결과에서 사용한 에너지 전환값 4 kcal/g이 더 과학적 타당성이 있고 에너지변환도 역시 전 지구 생물군의 자료를 통해 직접적으로 산출하여 적용한 만큼 기존의 Brown and Ulgiati의 지구 생물의 보유량에 따른 가치평가 값은 본 연구의 결과와 비교하여 보았을 때 과대평가 되었다고 판단된다.

이렇듯 기존의 연구에서는 대부분 지역적 연구나 종에 대한 가치 분석을 많이 실시하였고 전 지구 생물을 대상으로 한 연구는 매우 부족하고 단순하게 평가되어 있었다. 따라서 본 연구에서 얻어진 전 지구 생물군의 생태경제적 가치 그리고 각 육상과 해양의 식물과 동물 및 분류군별, 영양단계별, 서식특성별로 구분하여 그 가치를 종합적으로 분석한 본 연구의 결과는 에머지 분야 뿐만 아니라 지구 생물의 가치 평가 부분에서도 가장 타당성 있는 첫 사례라고 판단된다.

한편 앞서 밝혔듯이 기존의 경제학적인 방법을 통해 지구 생물군에 대한 가치 평가는 전무한 실정이다. 그러나 유사한 연구로 Costanza et al.(1997)에 의해 지구 생태계의 서비스와 자연자산에 대한 가치 평가가 실시되었는데, Table 32에서 보듯이 전 지구 생태계의 서비스 가치는 총 33조 2,680억 US\$의 가치를 나타내고 있다. 그러나 이들 항목 중 water regulation, water supply, raw materials와 같은 일부 항목을 제외하고는 대부분 생태

계내의 식생이나 동물들에 의해 파생되는 서비스로 이는 대략 30조 US\$ 정도의 가치를 나타내고 있다.

이는 비록 접근방법이나 항목에서 차이가 나지만 기존의 경제학적 방법을 통한 가치평가는 대부분 지금 현재의 생물량이나 기능, 서비스 등을 통해 그 가치를 측정한다. 따라서 이들이 지금의 형태를 만들기 위해 투입되었던 과거의 직-간접적 에너지는 대부분 무시되는 경향이 많다. 그러나 에머지 분석법은 한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에서 직접 또는 간접적으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 모든 에너지를 포함하여 그 대상에 대한 실질적 가치를 평가하기 때문에 기존 방법의 결과보다 더 포괄적인 범위로 대상을 평가하는데, 결국 인간의 노력 이외에 자연환경의 일까지 포함하여 분석한 것이다. 또한 본 연구는 지구 생물 자체에 대하여 그 가치를 분석하였는데, 이는 그 생물의 생산량, 생체량, 기능, 서비스 등 대상 생물의 모든 부분을 포함한 것이기 때문에 기존의 연구 결과보다 더 포괄적인 결과가 나온 것으로 평가됨에 따라 에머지 평가법의 유용성을 확인할 수 있었다.

또한 본 연구와 같이 지구적인 범위를 대상으로 평가하는 연구의 경우 대부분 그 분석 자료의 정확성에 대한 비판이 제기되고는 있으나 이는 지구적 범위에 있어서 그 정확한 정보를 산출해 내는 것이 불가능하기 때문에 최대한의 많은 정보를 통해 가장 신뢰할 수 있고 평균적인 자료들을 선별하여 계산하였다. 추후 다양한 연구들이 진행된다면 좀 더 정확한 가치를 산정 할 수 있을 것으로 보인다.

결과적으로 최근의 다양한 가치평가 연구들은 기후변화나 환경오염, 생물다양성의 감소와 같은 전 지구적 문제에 있어서 우리가 가시적으로 보이는 대상을 평가하거나 사회적 이슈가 되는 대상에 대해 주로 그 가치를 평가하여 왔다. 그러나 그 외 우리가 쉽게 간과할 수 있는 생물들에 대한 가

치는 직접적으로 느끼지 못할 뿐만 아니라 오히려 불필요한 대상으로 인식하고 있기 때문에 그 대상들에 대한 진정한 의미의 가치 측정이 필요한 실정이다. 따라서 이런 대상을 모두 포함한 전 지구 생물들에 대한 가치평가는 비록 평가단위의 규모가 우리가 평소에 쉽게 인식할 수 있는 단위를 넘어서지만 이를 통하여 그 가치의 중요성을 인식하기에는 충분할 것으로 보인다. 또한 지구적 환경문제에 따른 생물의 감소에 따른 위기감을 고취시켜 그에 따른 적절한 보전 의식을 인식시킬 수 있을 것으로 보이며 일반인들에게는 환경이나 생물의 역할과 중요성을 일깨워 주고 환경정책 결정자들에게는 좀 더 객관적으로 문제를 판단할 수 있는 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한 전문가들에게는 생물의 중요성에 대한 경제적 타당성을 제시함에 따라 환경 정책 제시에 있어 간과될 수 있는 부분까지 종합적으로 판단할 수 있는 중요한 수단으로 사용될 수 있을 것으로 보인다.



Table 31. Summary of ecological economic value of global organisms

Item	Emvalue(ecological economic value)
Production emergy	(trillion Em\$/yr)
Terrestrial plants	11.25
Terrestrial animals	4.96
Terrestrial organisms	11.25
Marine plants	11.25
Marine animals	5.93
Marine organisms	11.25
Global plants	11.25
Global animals	5.46
(Global detritus)	(5.79)
Global organisms	11.25
Storage emergy	(trillion Em\$)
Terrestrial plants	125.35
Terrestrial animals	1.95
Terrestrial organisms	127.30
Marine plants	0.28
Marine animals	1.36
Marine organisms	1.64
Global storage plants	125.63
Global storage animals	3.31
Global storage organisms	128.94

Table 32. Summary of average global value of annual ecosystem services

Ecological services	Annual value (billion of dollars)
Gas regulation	1,341
Climate regulation	684
Disturbance regulation	1,779
Water regulation	1,115
Water supply	1,692
Erosion control	576
Soil formation	53
Nutrient cycling	17,075
Waste treatment	2,277
Pollination	117
Biological control	417
Habitat / refugia	124
Food production	1,386
Raw materials	721
Genetic resources	79
Recreation	815
Cultural	3,015
Total	33,268

Costanza et al., 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital.*

8. 지구 현존 보유량의 비교

전 지구적으로 보유하고 있는 재생불가능한 자원, 국가 경제적 부, 생물 자원 등이 가지고 있는 그 보유량을 경제적 가치로 비교해 보면 Fig. 32과 같다. 먼저 재생불가능한 자연자원은 석탄의 보유가치가 약 1,028조 Em\$로 전체의 40.91%를 나타내었고, 그 다음으로 원유 347조 Em\$로 13.81%, 천연가스 302조 Em\$로 12.02%, 광물 및 금속 207조 Em\$로 8.24%, 인광석 41조 Em\$로 1.63%, 우라늄 1조 8000억 Em\$ 0.07% 등으로 나타나 총 1,927조 Em\$로 전체의 76.67%로 나타났다.

또한 국가 경제적 부는 각 국가별 경제적 총 부의 양을 측정한 것으로 자연자원을 제외한 나머지 모든 경제적 부를 총합하여 나타내었다. 그 결과 458조 \$로 전체 18.23%를 나타냈다.

마지막으로 본 연구에서 실시한 각 생물군의 생태경제적 가치를 보면 지구 육상 생물이 126조 Em\$로 전체의 5.01%를 나타내었고 해양 생물이 2조 Em\$로 전체의 0.08%의 가치를 나타내었다. 따라서 지구 총 생물군은 약 128조 Em\$로 5.09%의 가치를 나타내었다.

결과적으로 지구가 보유하고 있는 각 자원 등의 가치를 비교해 보았을 때 대략 지구 생물이 지구 보유 자원 가치의 5%정도를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이는 비록 지구 전체 보유량으로 보았을 때는 그 비중이 다른 자원에 비해 크지 않지만 지구 총 경제적 부의 양의 28% 정도를 차지한다고 보았을 때 지구 생물이 기여하는 가치는 매우 크다고 볼 수 있다. 또한 다른 보유 자원에 비해 생물 자원은 생산성의 가치가 매우 높기 때문에 약 5%정도의 양으로 지구 전체의 생태계를 순환 및 유지시키는 생태적 기여를 하고 있어 그 가치 또한 매우 크다고 볼 수 있다.

따라서 본 논문의 결과는 생물 자원이 지구 환경 그리고 우리 경제 시스템

템에 얼마만큼의 가치 기여를 하는지에 대해 과학적으로 분석함에 따라 추후 다양한 각도에서 본 결과의 활용이 있을 것으로 보인다.

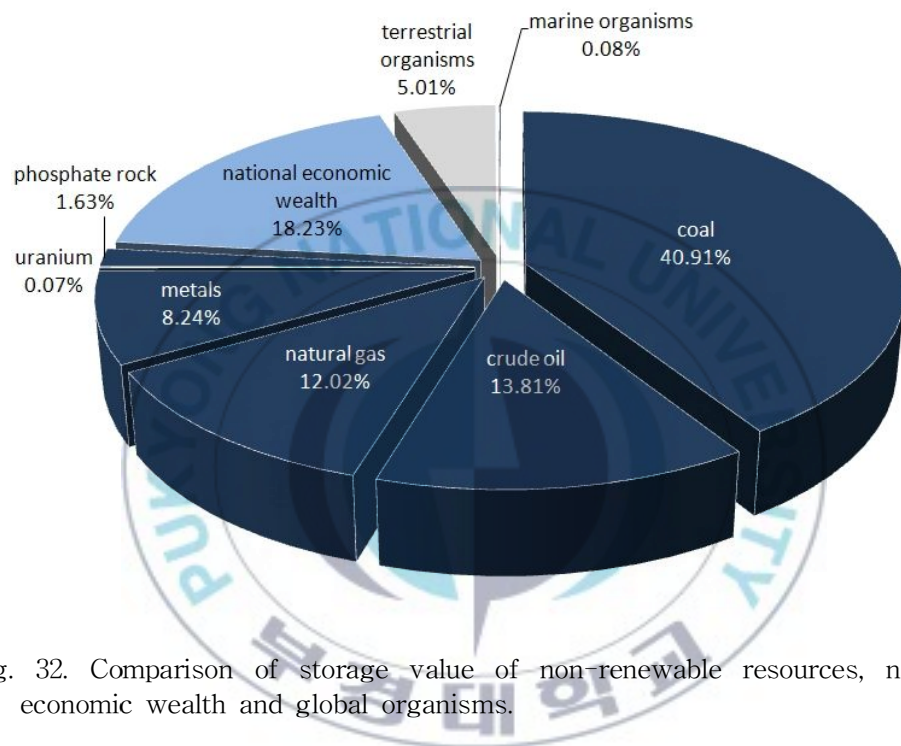


Fig. 32. Comparison of storage value of non-renewable resources, national economic wealth and global organisms.

9. 자료 선정의 한계점

본 논문에서 자료 선정에 따른 한계점은 다음과 같다. 먼저 대상이 지구 전 생물군을 대상으로 하기 때문에 대상에 대한 정확한 값이 정해져 있지 않을 뿐만 아니라 다양한 연구자들의 결과 값이 모두 다르기 때문에 최대한 최근 연구를 중심으로 선정하였다. 특히 육상 식물군의 에너지 선정에서는 분류군별에 따른 NPP의 정보가 전무하기 때문에 생물군계별에 따른 우점식물군의 NPP를 대체하여 사용하였다. 물론 우점지역에서도 다른 식물군이 서식을 하고 있으나 전체 양으로 보았을 때는 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 그 값은 무시하였다. 또한 동물군에서 이차 생산성에 대한 자료가 매우 부족하여 생체량에서 p/b ratio를 이용하여 이차 생산성을 추정하였는데 각각의 p/b ratio 값이 전 지구의 대상 동물군의 값을 대신하지는 못하나 최대한 많은 결과를 찾아내어 그 평균값을 사용하였다. 또한 육상 동물의 초식, 육식, 부식동물의 에너지 값 선정에서도 생체량 피라미드의 결과를 토대로 구분하였는데, 그 생체량 피라미드의 구조가 전 지구적으로 보편적으로 일어나는 것을 전제로 사용하였다. 따라서 일부 값에 대한 오차가 있을 수 있으나 최종 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 무시하였다.

결국 본 연구는 지구 전체 생물군에 대한 가치를 평가하는 것으로 생물군의 중요성에 대한 경향을 과학적으로 분석한 것이기 때문에 자료 선정에 있어서 그 값에 대한 오차가 발생할 수 있지만 결과에 큰 영향을 미치지 않는 선에서 최대한 추정하여 그 값을 사용하였다.

한편, 육상식물을 분류군으로 구분하여 평가할 때 양치식물에 대한 분석을 제외하였고, 해양식물에서도 해초류나 맹그로브에 대한 분석은 실시하지 않았다. 이는 과거 고생대 석탄기 시대에 지금의 피자식물과 같이 육상

생태계에서 가장 번성했던 양치 식물군은 현재 그 비중이 매우 작고 또한 일차생산성 및 분포에 대한 자료가 부족하여 이번 연구에서 제외시켰다. 또한 해양식물에서도 해초류나 맹그로브에 대한 전 지구적인 자료가 부족하고 그 비중이 다른 해조류나 식물플랑크톤에 비해 작기 때문에 본 연구에서는 제외시켰다. 따라서 추후 양치식물이나 해초류, 맹그로브에 대한 자료를 확보하여 좀 더 구체화된 에머지 분석이 진행되어야 할 것으로 보인다.



VI. 결 론

본 연구에서는 에머지 개념과 방법론을 이용하여 지구 육상생태계의 식물, 동물 그리고 해양 생태계의 식물, 동물이 가지는 생태경제적 가치를 분류별, 영양단계별, 기능별로 구분하여 제시하였다. 그리고 기존의 연구에서 혼용되어져 온 각 생물 별 에너지변환도의 값을 지구 모든 생물의 조건을 기초로 그 평균값을 제시하였고 그 과학적 타당성을 기타 연구들과 비교하여 검증하였다. 각 생물군들의 에너지, 에머지, 저장고, 에너지변환도, 생태경제적 가치의 결과에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 지구 생물군의 연간 에머지 및 저장고 분석은 다음과 같이 진행하였다. 지구 육상 식물군은 선대식물, 나자식물, 피자식물 그리고 지구 총 육상 식물로 구분하여 분석 하였는데, 각 식물군의 에머지값 중 증발산량이 가장 높게 나타나 그 값으로 각 식물군의 에머지량을 대체하였다. 지구 육상 동물은 초식동물, 육식동물, 부식동물 그리고 지구 총 육상동물을 대상으로 하였는데 각 에머지량은 육상 식물로부터 전달된 에머지량에 각 영양 단계에 따른 에너지 전환효율에 따라 계산되어졌다.

지구 해양 식물군은 식물플랑크톤과 해조류 그리고 지구 총 해양 식물로 구분하여 분석 하였는데, 각 에머지값 중 식물플랑크톤은 해류가 가장 높게 나타났고 해조류는 조류가 가장 높게 나타나 그 값으로 각각의 에머지량을 대체하였다. 지구 해양 동물군은 동물플랑크톤, 저서동물, 유영동물 그리고 지구 총 해양 동물로 구분하였는데 각각의 에머지량은 해양 식물로부터 전달된 에머지량에 각 기능별에 따른 에너지 소비효율에 따라 계산되어졌다.

이들 각 에머지값은 이후 분석하게 될 지구 생물군의 생태경제적 가치평

가에 사용되어 연간 각 생물군의 가치와 보유 저장량의 가치 평가에 사용되어질 것이다.

2) 앞서 계산되어진 각 생물군의 에너지량과 에머지량을 통해 에너지변환도를 산정하였다. 지구 육상 식물군에서 전체 육상식물은 $7.43\text{E}+03$ sej/J로 나타났고 선태식물은 $1.78\text{E}+04$ sej/J, 나자식물은 $8.55\text{E}+03$ sej/J, 피자식물은 $6.28\text{E}+03$ sej/J로 계산되었다. 지구 육상 동물군에서는 전체 육상 동물군은 $7.50\text{E}+04$ sej/J로 나타났고 초식동물은 $9.02\text{E}+04$ sej/J, 육식동물은 $8.50\text{E}+05$ sej/J, 부식동물은 $6.46\text{E}+04$ sej/J로 나타났다. 지구 해양 식물군에서 전체 해양 식물은 $5.43\text{E}+03$ sej/J로 나타났고, 식물플랑크톤이 $5.27\text{E}+03$ sej/J, 해조류가 $1.38\text{E}+04$ sej/J로 계산되었다. 지구 해양 동물군에서 전체 해양 동물은 $9.35\text{E}+04$ sej/J로 나타났고 동물플랑크톤이 $9.13\text{E}+04$ sej/J, 유영동물은 $1.19\text{E}+05$ sej/J, 저서동물은 $1.09\text{E}+05$ sej/J로 나타났다.

이들 각 에너지변환도를 기존의 연구에서 제시된 값과 비교하여 보았을 때 육상 및 해양 식물군의 값은 기존의 값과 크게 차이가 나지 않았으나 육상 및 해양 동물군의 경우 본 연구의 결과가 비교적 낮게 나타났다. 이는 기존의 연구들이 대부분 대형종에 대한 분석이 많아 그 값에서 차이가 난 것으로 보인다.

따라서 본 연구의 결과는 각 생물 또는 각 지역에 분포하는 모든 생물의 조건을 기초로 산정된 평균값이다. 이 값은 계층구조가 명확한 각 종에 직접적으로 사용할 수는 없지만 각 생물군의 에너지변환도값의 기준점을 과학적으로 제시하였다고 볼 수 있다.

3) 각 생물군별로 계산되어진 에너지와 에너지변환도 값을 종합적으로

정리하여 그 흐름을 보면 식물군에서 동물군으로 그 계층구조가 높아지면서 에너지량은 점차적으로 소량화 되었고 반면에 에너지질(에너지변환도)은 고급화되어짐에 따라 지구 에너지 및 에너지 전환을 한눈에 파악할 수 있었다.

에머지 흐름에서는 전 지구적으로 재생가능한 에너지를 통한 총 에머지 생산은 $15.83E+24$ sej/yr이다. 이 지구 총 에머지는 지구 내부의 주요 에너지 흐름을 통해 해양과 지각에 각각 $15.83E+24$ sej/yr의 에머지를 전달하기 때문에 이를 이용하는 각 식물군은 분류군별로 다시 분할되어 사용되고 이는 다시 소비자인 육상 동물로 전환되어 직접적인 섭식 부분과 잉여량으로 구분되고 결국 영양단계별 총 에머지와 잉여된 부식물의 총 에머지의 합은 처음에 유입된 $15.83 E+24$ sej/yr로 된다. 즉 지구 총 생산 에머지는 지구 식물과 동물의 생산을 하는데 모두 기여하고 있다.

따라서 본 연구의 결과가 지구 전 생물군의 에너지 전환 및 변환도 그리고 에머지의 흐름 과정을 과학적으로 증명하였다고 볼 수 있다.

4) 각 생물군별로 계산되어진 연간 에머지 및 에머지 저장고의 값과 전 세계 에머지 화폐비율($1.41E+12$ sej/\$)을 통해 생태경제적 가치를 평가 해 보면 다음과 같다.

지구 육상 생물은 육상 식물이 연간 11조 2,500억 Em\$/yr, 육상 동물이 4조 9,600억 Em\$/yr로 총 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었고, 해양 생물은 해양 식물이 연간 11조 2,500억 Em\$/yr, 해양 동물이 5조 9,300억 Em\$/yr로 총 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었다. 따라서 지구 식물군은 연간 11조 2,500억 Em\$/yr의 가치를 나타내었고, 지구 동물군은 연간 5조 4,600억 Em\$/yr를 나타내어 총 지구 생물권의 연간 총 생산 가치는 11조 2,500억 Em\$/yr로 나타났다.

한편, 에머지 저장고에 따른 축적된 보유량의 생태경제적 가치는 육상 생물에서 육상 식물이 125조 3,500억 Em\$, 육상 동물이 1조 9,500억 Em\$로 총 127조 3,000억 Em\$의 가치를 나타내었고, 해양 생물은 해양 식물이 2,800억 Em\$, 해양 동물이 1조 3,600억 Em\$로 나타나 총 1조 6,400억 Em\$의 가치를 나타내었다. 따라서 지구 식물군의 저장고의 가치는 125조 6,300억 Em\$의 가치를 나타내었고 지구 동물군은 3조 3,100억 Em\$의 가치를 나타내어 총 지구 생물권의 저장고에 따른 가치는 128조 9,400억 Em\$로 나타났다.

따라서 본 연구에서 얻어진 전 지구 생물군의 생태경제적 가치 그리고 각 육상과 해양의 식물과 동물 및 분류군별, 영양단계별, 서식특성별로 구분하여 그 가치를 종합적으로 분석한 본 연구의 결과는 에머지 분야 뿐만 아니라 지구 생물의 가치 평가 부분에서도 가장 타당성 있는 첫 사례라고 판단된다.

5) 에머지 분석을 통해 산정된 지구 생물군의 보유량에 대한 가치를 비교하기 위하여 지구 총 재생불가능한 자원과 각 국가별 경제 가치 보유량을 산정하였다. 그 결과 재생불가능한 자원이 총 1,927조 Em\$로 전체의 76.67%로 가장 높게 나타났고 경제 가치 보유량은 458조\$로 18.23%, 본 연구의 결과인 지구 생물군은 126조 Em\$로 5.09%의 가치를 나타내었다. 비록 보유량에서 그 비중이 다른 자원에 비해 크지 않지만 지구 총 경제 부의 양과 비교했을 때 약 28%정도로 나타남에 따라 생물 자원이 가지는 가치는 매우 크고 중요하다고 볼 수 있다. 또한 생물의 생산성 가치가 매우 높기 때문에 지구 환경에서 그 역할은 매우 크다고 볼 수 있다.

이런 가치 평가의 결과는 우리 주변에서 쉽게 간과할 수 있는 모든 생물

들에 대한 가치의 중요성을 인식하기에는 충분할 것으로 보인다. 또한 지구적으로 생물의 감소에 따른 위기감을 고취와 그에 따른 적절한 보전 의식을 인식시킬 수 있을 것으로 보이며 일반인들에게는 환경이나 생물의 역할과 중요성을 일깨워 주고 환경정책 결정자들에게는 좀 더 객관적으로 문제를 판단할 수 있는 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한 전문가들에게는 생물의 중요성에 대한 경제적 타당성을 제시함에 따라 환경 정책 제시에 있어 간과될 수 있는 부분까지 종합적으로 판단할 수 있는 중요한 수단으로 사용될 수 있을 것으로 보인다.



VII. Appendix

Appendix 1. Emergy analysis of arctic tundra ecosystem(Footnote for appendix 11, 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	5.60E+12	m ²	(Table 6)
Insolation	=	3.02E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.41		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	9.98E+21	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	5.60E+12	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	4.99	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	26.84	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	6.14E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy (Evapotranspiration)

Land area	=	5.60E+12	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.2	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.12	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	3.32E+18	J/yr	

Appendix 2. Emergy analysis of boreal forest ecosystem(Footnote for appendix 11, 12, 14)

1. Sunlight

Land area	=	1.38E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	3.69E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.31		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	3.52E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	1.38E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	4.4	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	18.40	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	1.04E+19	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	1.38E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.6	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.36	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	2.46E+19	J/yr	

Appendix 3. Emergy analysis of temperate (deciduous) forest ecosystem
(Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	6.12E+12	m ²	(Table 6)
Insolation	=	4.99E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.19		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	2.47E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	6.12E+12	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	5.14	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	29.33	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	7.33E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	6.12E+12	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.65	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.39	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	1.18E+19	J/yr	

Appendix 4. Emergy analysis of temperate (coniferous) forest ecosystem
(Footnote for appendix 12, 14)

1. Sunlight

Land area	=	5.46E+12	m ²	(Table 6)
Insolation	=	4.99E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.19		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	2.21E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	5.46E+12	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	5.14	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	29.33	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	6.54E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	5.46E+12	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.65	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.39	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	1.05E+19	J/yr	

Appendix 5. Emergy analysis of temperate grassland ecosystem (Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	1.50E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	5.63E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.24		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	6.42E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	1.50E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	4.93	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	25.88	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	1.58E+19	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy (Evapotranspiration)

Land area	=	1.50E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	1.3	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.78	mm/yr	(Table 9)
	=	(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	5.78E+19	J/yr	

Appendix 6. Emergy analysis of mediterranean shrubland ecosystem
(Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	2.80E+12	m ²	(Table 6)
Insolation	=	5.60E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.18		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	1.29E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	2.80E+12	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	4.37	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	18.03	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	2.06E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	2.80E+12	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.65	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.39	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	5.39E+18	J/yr	

Appendix 7. Emergy analysis of crops ecosystem (Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	1.35E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	5.44E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.30		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	5.14E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	1.35E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	3.28	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	7.62	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	4.20E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	1.35E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.85	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.51	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	3.40E+19	J/yr	

Appendix 8. Emergy analysis of tropical savanna and grassland ecosystem
(Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	2.76E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	7.15E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.18		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	1.62E+23	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	2.76E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	4.02	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	14.03	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	1.58E+19	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy
(Evapotranspiration)

Land area	=	2.76E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.75	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.45	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	6.14E+19	J/yr	

Appendix 9. Emergy analysis of desert ecosystem (Footnote for appendix 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	2.77E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	7.01E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.28		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	1.40E+23	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	2.77E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	5.03	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	27.49	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	3.11E+19	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy

(Evapotranspiration)

Land area	=	2.77E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	0.25	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	0.15	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	2.05E+19	J/yr	

Appendix 10. Emergy analysis of tropical rain forest ecosystem (Footnote for appendix 11, 13, 14)

1. Sunlight

Land area	=	1.75E+13	m ²	(Table 6)
Insolation	=	6.42E+09	J/m ² /yr	(Appendix 15)
Albedo	=	0.14		(Appendix 16)
Energy(J)	=	(land area)(insolation)(1-albedo)		
	=	9.66E+22	J/yr	

2. Wind, kinetic energy

Land area	=	1.75E+13	m ²	(Table 6)
Average annual wind velocity	=	2.74	m/sec	(Appendix 17)
Geostrophic wind	=	(6/10*avg. wind v.) ³		
	=	4.44	m/sec	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Seconds in a year	=	3.14E+07	sec/yr	
Air density	=	1.3	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(geostrophic wind)(seconds in a year)(air density)(drag coefficient)		
	=	3.17E+18	J/yr	

3. Rain, chemical potential energy (Evapotranspiration)

Land area	=	1.75E+13	m ²	(Table 6)
Rainfall	=	2	mm/yr	(Table 9)
Evapotranspiration	=	1.2	mm/yr	(Table 9)
		(est. as 60% of rain)		
Gibbs free energy	=	4.94E+03	J/kg	
Density	=	1,000	kg/m ³	
Energy(J)	=	(land area)(transpiration)(density)(Gibbs.)		
	=	1.04E+20	J/yr	

Appendix 11. Emergy analysis of bryophytes (Footnote for table 10)

Bryophytes

$$\begin{aligned}
 \text{Sunlight} &= (\text{Arctic tundra} * \text{covered area } \%)^{a)} + (\text{Boreal forest} * \text{use sunlight } \%) + (\text{Tropical rain forest} * \text{use sunlight } \%) \\
 &= (9.98\text{E}+21 * 0.3) + (3.52\text{E}+22 * 0.3) + (9.66\text{E}+22 * 0.1) \\
 &= 2.32\text{E}+22 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Wind, kinetic} &= (\text{Arctic tundra} * \text{covered area } \%) + \text{Boreal forest} + \text{Tropical rain forest} \\
 &= (6.14\text{E}+18 * 0.3) + (1.04\text{E}+19) + (3.17\text{E}+18) \\
 &= 1.54\text{E}+19 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rain, evapotranspiration} &= (\text{Arctic tundra} * \text{covered area } \%) + (\text{Boreal forest} * \text{use evapo. } \%) + (\text{Tropical rain forest} * \text{use evapo. } \%) \\
 &= (3.32\text{E}+18 * 0.3) + (2.46\text{E}+19 * 0.2) + (1.04\text{E}+20 * 0.2) \\
 &= 2.67\text{E}+19 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

a) Didiuk & Ferguson, 2005

Appendix 12. Emergy analysis of gymnosperms (Footnote for table 10)

Gymnosperms

$$\begin{aligned}\text{Sunlight} &= (\text{Boreal forest} * \text{use sunlight } \%)^{\text{a)}} + \text{Temperate (coniferous)} \\ &\quad \text{forest} \\ &= (3.52\text{E}+22 * 0.7) + (2.21\text{E}+22) \\ &= 4.67\text{E}+22 \text{ J/yr}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Wind,} &= \text{Boreal forest} + \text{Temperate (coniferous) forest} \\ \text{kinetic} & \\ &= (1.04\text{E}+19) + (6.54\text{E}+18) \\ &= 1.69\text{E}+19 \text{ J/yr}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rain,} &= (\text{Boreal forest} * \text{use evapo. } \%)^{\text{b)}} + \text{Temperate (coniferous)} \\ \text{evapotrans} &\quad \text{forest} \\ \text{-piration} & \\ &= (2.46\text{E}+19 * 0.8) + (2.10\text{E}+19) \\ &= 4.07\text{E}+19 \text{ J/yr}\end{aligned}$$

a) Messier et al., 1998; b) Heijmans et al., 2004

Appendix 13. Emergy analysis of angiosperms (Footnote for table 10)

Angiosperms

$$\begin{aligned}
 \text{Sunlight} &= (\text{Arctic tundra} * \text{covered area \%}) + \text{Temperate (deciduous)} \\
 &\quad \text{forest} + \text{Temperate grassland} + \text{Mediterranean shrubland} + \\
 &\quad \text{Crops ecosystem} + \text{Tropical savanna \& grassland} + \\
 &\quad (\text{Desert} * \text{covered area \%})^{\text{a)}} + (\text{Tropical rain forest} * \text{use} \\
 &\quad \text{sunlight \%}) \\
 &= (9.98\text{E}+21 * 0.3) + (2.47\text{E}+22) + (6.42\text{E}+22) + (1.29\text{E}+22) + \\
 &\quad (5.14\text{E}+22) + (1.62\text{E}+23) + (1.40\text{E}+23 * 0.1) + (9.66\text{E}+22 * \\
 &\quad 0.9) \\
 &= 4.19\text{E}+23 \text{ J/yr} \\
 \\
 \text{Wind, kinetic} &= (\text{Arctic tundra} * \text{covered area \%}) + \text{Temperate (deciduous)} \\
 &\quad \text{forest} + \text{Temperate grassland} + \text{Mediterranean shrubland} + \\
 &\quad \text{Crops ecosystem} + \text{Tropical savanna \& grassland} + \\
 &\quad (\text{Desert} * \text{covered area \%}) + \text{Tropical rain forest} \\
 &= (6.14\text{E}+18 * 0.3) + (7.33\text{E}+18) + (1.58\text{E}+19) + (2.06\text{E}+18) + \\
 &\quad (4.20\text{E}+18) + (1.58\text{E}+19) + (3.11\text{E}+19 * 0.1) + (3.17\text{E}+18) \\
 &= 5.34\text{E}+19 \text{ J/yr} \\
 \\
 \text{Rain, evapotranspiration} &= (\text{Arctic tundra} * \text{use evapo. \%}) + \text{Temperate (deciduous)} \\
 &\quad \text{forest} + \text{Temperate grassland} + \text{Mediterranean shrubland} + \\
 &\quad \text{Crops ecosystem} + \text{Tropical savanna \& grassland} + \\
 &\quad (\text{Desert} * \text{covered area \%}) + (\text{Tropical rain forest} * \text{use} \\
 &\quad \text{evapo. \%}) \\
 &= (3.32\text{E}+18 * 0.3) + (2.36\text{E}+19) + (2.89\text{E}+19) + (5.39\text{E}+18) + \\
 &\quad (3.04\text{E}+19) + (6.14\text{E}+19) + (2.05\text{E}+19 * 0.1) + (1.04\text{E}+20 * \\
 &\quad 0.8) \\
 &= 2.39\text{E}+20 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

a) Hadley & Szarek, 1981

Appendix 14. Emergy analysis of terrestrial plants (Footnote for table 10)

Terrestrial plants

Sunlight = (Arctic tundra * covered area %) + Boreal forest + Temperate (deciduous) forest + Temperate (coniferous) forest + Temperate grassland + Mediterranean shrubland + Crops ecosystem + Tropical savanna & grassland + (Desert * covered area %) + Tropical rain forest

$$= (9.98\text{E}+21 * 0.6) + (3.52\text{E}+22) + (2.47\text{E}+22) + (2.21\text{E}+22) + (6.42\text{E}+22) + (1.29\text{E}+22) + (5.14\text{E}+22) + (1.62\text{E}+23) + (1.40\text{E}+23 * 0.1) + (9.66\text{E}+22)$$

$$= 4.89\text{E}+23 \text{ J/yr}$$

Wind, kinetic = (Arctic tundra * covered area %) + Boreal forest + Temperate (deciduous) forest + Temperate (coniferous) forest + Temperate grassland + Mediterranean shrubland + Crops ecosystem + Tropical savanna & grassland + (Desert * covered area %) + Tropical rain forest

$$= (6.14\text{E}+18 * 0.6) + (1.04\text{E}+19) + (7.33\text{E}+18) + (6.54\text{E}+18) + (1.58\text{E}+19) + (2.06\text{E}+18) + (4.20\text{E}+18) + (1.58\text{E}+19) + (3.11\text{E}+18 * 0.1) + (3.17\text{E}+18)$$

$$= 7.21\text{E}+19 \text{ J/yr}$$

Rain, evapotranspiration = (Arctic tundra * covered area %) + Boreal forest + Temperate (deciduous) forest + Temperate (coniferous) forest + Temperate grassland + Mediterranean shrubland + Crops ecosystem + Tropical savanna & grassland + (Desert * covered area %) + Tropical rain forest

$$= (3.32\text{E}+18 * 0.6) + (2.46\text{E}+19) + (2.36\text{E}+19) + (2.10\text{E}+19) + (2.89\text{E}+19) + (5.39\text{E}+18) + (3.04\text{E}+19) + (6.14\text{E}+19) + (2.05\text{E}+18 * 0.1) + (1.04\text{E}+20)$$

$$= 3.07\text{E}+20 \text{ J/yr}$$

Appendix 15. Insolation of each biome(k Wh/m²/day) (Footnote for table 9)

No.	lat	lon	Tropical rain forest	lat	lon	Tropical savanna, grassland	lat	lon	Desert	lat	lon	Temperate forest	lat	lon	Temperate grassland
1	-2	-65	4.50	14	-5	6.09	-23	117	6.05	46	-87	3.52	-35	-71	4.79
2	-8	-57	4.61	14	17	6.52	-33	119	4.79	38	-77	3.91	50	-122	3.37
3	-16	-62	4.66	9	38	5.93	-24	130	5.54	49	21	2.91	36	-120	5.14
4	3	14	4.94	-1	30	4.88	-22	140	5.9	31	-90	4.38	42	-107	3.99
5	2	22	5.01	-17	20	5.64	-33	141	5.13	48	-1	3.04	47	-93	3.42
6	-9	16	5.26	-25	30	5.20	24	-106	5.21	50	47	3.57	31	-93	4.31
7	13	104	5.27	26	75	5.10	16	0	5.86	36	115	4.32	38	39	4.24
8	4	103	4.75	21	84	5.00	19	-104	5.26	38	127	3.86	26	66	5.38
9	-2	103	4.65	23	103	4.34	30	25	5.67	43	143	3.32	45	69	4.04
10	1	115	4.85	-16	134	6.18	35	7	4.47	-27	151	5.19	39	93	4.23
11	-4	137	4.84	21	-103	5.45	11	-14	5.68				40	116	4.28
12	-19	47	5.38	9	-73	5.12	23	46	5.78						
13				-6	-41	5.52	38	42	4.25						
14				-14	-49	5.13	33	53	5.18						
Mean			4.89			5.44			5.34			3.80			4.29
Insolation	6.42E+09	J/m ² /yr		7.15E+09	J/m ² /yr		7.01E+09	J/m ² /yr		4.99E+09	J/m ² /yr		5.63E+09	J/m ² /yr	

continue

No.	lat	lon	Boreal forest	lat	lon	Arctic tundra	lat	lon	Mediterranean shrublands
1	56	85	2.97	63	-47	2.91	40	-4	3.94
2	55	158	2.87	64	173	2.48	45.5	8.5	3.69
3	57	132	2.85	61	59	2.40	40	15	5.35
4	59	91	2.73	67	104	2.37	41.5	22.5	3.7
5	51	82	3.41	61	102	2.65	38.5	30.5	5.09
6	62	39	2.39	68	-163	2.29	35.5	2.5	4.43
7	66	16	2.09	76	103	1.88			
8	52	-59	2.80	65	-115	2.54			
9	56	-107	3.02	82	-74	1.83			
10	64	-138	2.36	68	126	2.17			
11	50	136	3.29	75	102	1.82			
12	62	117	2.77	69	-71	2.23			
13	55	-96	3.01	71	-110	2.31			
14									
Mean			2.81			2.30			4.26
Insolation			3.69E+09 J/m ² /yr			3.02E+09 J/m ² /yr			5.60E+09 J/m ² /yr

lat: latitude; lon: longitude

Appendix 16. Albedo of each biome (Footnote for table 9)

Biome	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	mean
Tropical rain forest	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.17	0.17	0.17	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16
	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.14	0.16	0.14	0.15	0.13	0.15	0.15
	0.14	0.14	0.15	0.14	0.16	0.15	0.15	0.19	0.18	0.15	0.15	0.13	0.15
	0.16	0.17	0.15	0.16	0.14	0.13	0.11	0.12	0.15	0.14	0.14	0.16	0.14
	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.12	0.11	0.12	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11
	0.12–0.14 (Roy et al., 2001)												0.14
Tropical savanna & grassland	0.18	0.19	0.19	0.22	0.23	0.25	0.18	0.18	0.22	0.21	0.20	0.19	0.20
	0.15	0.17	0.16	0.14	0.17	0.15	0.14	0.16	0.18	0.17	0.15	0.15	0.16
	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.06	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14
	0.20	0.21	0.22	0.21	0.21	0.24	0.25	0.25	0.24	0.23	0.22	0.20	0.22
	0.17	0.17	0.19	0.17	0.18	0.18	0.08	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17
	0.07–0.40 (Roy et al., 2001)												0.18
Desert	0.41	0.43	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.42	0.43	0.43	0.41	0.42	0.43
	0.30	0.31	0.33	0.38	0.36	0.32	0.31	0.30	0.32	0.34	0.33	0.30	0.33
	0.19	0.19	0.19	0.17	0.19	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.20
	0.22	0.25	0.22	0.24	0.25	0.26	0.25	0.25	0.27	0.25	0.22	0.20	0.24
	0.23	0.22	0.23	0.22	0.22	0.21	0.20	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	0.20–0.40 (Roy et al., 2001)												0.28

continue

Biome	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	mean
Temperate forest	0.11	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.10	0.09	0.08	0.09	0.09
	0.13	0.14	0.13	0.15	0.17	0.19	0.19	0.17	0.18	0.15	0.12	0.12	0.15
	0.44	0.45	0.31	0.16	0.17	0.15	0.16	0.16	0.18	0.16	0.18	0.21	0.23
	0.82	0.76	0.61	0.13	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.14	0.22	0.64	0.35
	0.14	0.14	0.10	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14
	0.1–0.18 (Roy et al., 2001)												0.19
Temperate grassland	0.27	0.21	0.13	0.10	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.15	0.12
	0.54	0.61	0.47	0.21	0.26	0.20	0.21	0.21	0.23	0.21	0.34	0.40	0.32
	0.62	0.56	0.42	0.22	0.23	0.22	0.21	0.20	0.21	0.19	0.30	0.51	0.32
	0.28	0.26	0.18	0.17	0.10	0.19	0.20	0.19	0.20	0.17	0.14	0.22	0.19
	0.46	0.45	0.27	0.12	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14	0.11	0.14	0.32	0.21
	0.15–0.25 (Roy et al., 2001)												0.24
Boreal foest	0.56	0.54	0.40	0.32	0.20	0.13	0.13	0.11	0.13	0.10	0.45	0.43	0.29
	0.71	0.66	0.57	0.11	0.13	0.16	0.14	0.14	0.14	0.11	0.70	0.62	0.35
	0.60	0.52	0.56	0.35	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.10	0.32	0.56	0.30
	0.65	0.57	0.56	0.11	0.12	0.14	0.16	0.14	0.15	0.11	0.65	0.54	0.33
	0.52	0.51	0.45	0.43	0.13	0.13	0.16	0.15	0.14	0.12	0.44	0.45	0.30
	0.10–0.30 (Roy et al., 2001)												0.31

continue

Biome	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
Arctic tundra	0.59	0.56	0.53	0.51	0.25	0.13	0.13	0.12	0.13	0.19	0.57	0.51	0.35
	0.72	0.79	0.75	0.76	0.76	0.54	0.28	0.27	0.38	0.67	0.77	–	0.61
	0.66	0.63	0.63	0.65	0.50	0.15	0.16	0.15	0.14	0.48	0.57	0.64	0.45
	0.72	0.66	0.69	0.28	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.09	0.35	0.45	0.32
	0.60	0.53	0.53	0.38	0.18	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.60	0.52	0.33
	0.20–0.80 (Roy et al., 2001)												
Mediterranean shrublands	0.15	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.17	0.15	0.14	0.18
	0.21	0.23	0.20	0.19	0.18	0.80	0.80	0.17	0.16	0.16	0.18	0.20	0.18
	0.12	0.12	0.13	0.14	0.16	0.16	0.16	0.14	0.12	0.12	0.10	0.10	0.13
	0.24	0.22	0.17	0.14	0.19	0.20	0.19	0.18	0.16	0.15	0.16	0.22	0.18
	0.24	0.25	0.20	0.16	0.19	0.20	0.20	0.19	0.18	0.19	0.17	0.21	0.19
	0.20	0.22	0.23	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.24	0.22	0.22	0.20	0.23
0.12–0.20 (Roy et al., 2001)													0.18

Appendix 17. Wind velocity of each biome(m/s) (Footnote for table 9)

No.	lat	lon	Tropical rain forest	lat	lon	Tropical savanna	lat	lon	Desert	lat	lon	Temperate forest	lat	lon	Temperate grassland
1	-2	-65	1.60	14	-5	3.39	-23	117	5.06	46	-87	6.25	-35	-71	5.20
2	-8	-57	1.91	14	17	5.31	-33	119	6.72	38	-77	5.46	50	-122	3.94
3	-16	-62	4.71	9	38	3.81	-24	130	5.81	49	21	5.40	36	-120	5.08
4	3	14	0.93	-1	30	2.98	-22	140	5.20	31	-90	4.14	42	-107	6.04
5	2	22	2.25	-17	20	5.75	-33	141	4.83	48	-1	5.99	47	-93	4.47
6	-9	16	4.21	-25	30	4.27	24	-106	4.08	50	47	5.35	31	-93	3.62
7	13	104	3.31	26	75	3.28	16	0	5.28	36	115	3.19	38	39	4.38
8	4	103	3.39	21	84	3.33	19	-104	3.56	38	127	4.03	26	66	4.80
9	-2	103	2.46	23	103	2.83	30	25	4.91	43	143	6.72	45	69	5.47
10	1	115	1.70	-16	134	5.37	35	7	4.65	-27	151	4.91	39	93	6.70
11	-4	137	2.63	21	-103	4.33	11	-14	3.97				40	116	4.52
12	-19	47	3.79	9	-73	3.38	23	46	5.28						
13				-6	-41	4.27	38	42	4.80						
14				-14	-49	3.96	33	53	6.26						
mean			2.74			4.02			5.03			5.14			4.93

No.	lat	lon	Boreal forest	lat	lon	Arctic tundra	lat	lon	Mediterranean shrublands
1	56	85	4.04	63	-47	7.16	40	-4	3.94
2	55	158	5.28	64	173	4.46	45.5	8.5	3.69
3	57	132	4.12	61	59	4.08	40	15	5.35
4	59	91	3.98	67	104	4.07	41.5	22.5	3.07
5	51	82	4.88	61	102	3.93	38.5	30.5	5.09
6	62	39	3.82	68	-163	5.46	35.5	2.5	4.43
7	66	16	5.92	76	103	5.31			
8	52	-59	5.62	65	-115	4.02			
9	56	-107	3.87	82	-74	6.20			
10	64	-138	3.92	68	126	4.52			
11	50	136	3.93	75	102	5.20			
12	62	117	3.87	69	-71	5.22			
13	55	-96	3.96	71	-110	5.17			
14									
mean			4.40			4.99			4.26

Appendix 18. Energy analysis of phytoplankton (Footnote for table 20)

1. Sunlight

$$\begin{aligned}
 \text{Ocean area} &= 3.62\text{E}+14 \quad \text{m}^2 \\
 \text{Insolation} & \\
 \text{Solar constant} &= 2 \text{ cal/cm}^2/\text{min} \\
 \text{Solar constant at the ocean surface} &= 1.3 \text{ cal/cm}^2/\text{min} \\
 &= (\text{solar constant at the ocean surface})(4.2\text{J/cal}) \\
 &\quad (10,000\text{cm}^2/\text{m}^2) (5.26\text{E}+05\text{min/yr}) \\
 &= 2.87\text{E}+10 \quad \text{J/m}^2/\text{yr} \\
 \text{Albedo} &= 0.95 \quad (\text{Appendix 20}) \\
 \text{Energy(J)} &= (\text{ocean area})(\text{insolation})(1-\text{albedo}) \\
 &= 9.87\text{E}+24 \quad \text{J/yr}
 \end{aligned}$$

2. Wind, kinetic energy

$$\begin{aligned}
 \text{Ocean area} &= 3.62\text{E}+14 \quad \text{m}^2 \\
 \text{Average annual wind velocity} &= 3.28 \quad \text{m/sec} \quad (\text{Archer \& Jacobson, 2005}) \\
 \text{Geostrophic wind} &= (6/10 * \text{avg. wind v.})^3 \\
 &= 7.26 \quad \text{m/sec} \\
 \text{Drag coefficient} &= 1.00\text{E}-03 \\
 \text{Seconds in a year} &= 3.14\text{E}+07 \quad \text{sec/yr} \\
 \text{Air density} &= 1.3 \quad \text{kg/m}^3 \\
 \text{Energy(J)} &= (\text{ocean area})(\text{geostrophic wind})(\text{seconds in a year})(\text{air density})(\text{drag coefficient}) \\
 &= 1.13\text{E}+20 \quad \text{J/yr}
 \end{aligned}$$

3. Tidal energy

$$\begin{aligned}
 &= \text{global tidal energy} \\
 &= 5.20\text{E}+19 \quad \text{J/yr} \quad (\text{Odum et al., 2000})
 \end{aligned}$$

4. Current

$$\begin{aligned}
 &= (\text{global current energy}) * (\text{phytoplankton area}) \\
 &= 8.60\text{E}+17 * 0.98 \quad (\text{Odum et al., 2000}) \\
 &= 8.43\text{E}+17 \quad \text{J/yr}
 \end{aligned}$$

Appendix 19. Emergy analysis of seaweeds (Footnote for table 20)

1. Sunlight

$$\text{Seaweed area} = 2.10\text{E}+12 \quad \text{m}^2 \quad \begin{array}{l} \text{(Copper, 1994)} \\ \text{(Whittaker, 1975)} \end{array}$$

Insolation

$$\text{Solar constant} = 2 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$$

$$\text{Solar constant at the ocean surface} = 1.3 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$$

$$= (\text{solar constant at the ocean surface})(4.2\text{J/cal}) \\ (10,000\text{cm}^2/\text{m}^2) (5.26\text{E}+05\text{min/yr})$$

$$= 2.87\text{E}+10 \quad \text{J/m}^2/\text{yr}$$

$$\text{Albedo} = 0.95 \quad \text{(Appendix 20)}$$

$$\text{Energy(J)} = (\text{ocean area})(\text{insolation})(1-\text{albedo})$$

$$= 5.73\text{E}+22 \quad \text{J/yr}$$

2. Wind, kinetic energy

$$\text{Seaweed area} = 2.10\text{E}+12 \quad \text{m}^2 \quad \begin{array}{l} \text{(Copper, 1994)} \\ \text{(Whittaker, 1975)} \end{array}$$

$$\text{Average annual wind velocity} = 3.28\text{m/sec} \quad \text{(Archer \& Jacobson, 2005)}$$

$$\text{Geostrophic wind} = (6/10 * \text{avg. wind v.})^3 \\ = 7.26\text{m/sec}$$

$$\text{Drag coefficient} = 1.00\text{E}-03$$

$$\text{Seconds in a year} = 3.14\text{E}+07 \quad \text{sec/yr}$$

$$\text{Air density} = 1.3\text{kg/m}^3$$

$$\text{Energy(J)} = (\text{ocean area})(\text{geostrophic wind})(\text{seconds in a year})(\text{air density})(\text{drag coefficient})$$

$$= 6.53\text{E}+17 \quad \text{J/yr}$$

3. Tidal energy

$$= (\text{global tidal energy}) * (\text{seaweed area} / \text{continental area})$$

$$= 5.20\text{E}+19 * 0.09 \quad \text{(Odum et al., 2000)}$$

4. Current

$$= (\text{global current energy}) * (\text{seaweed area})$$

$$= 8.60\text{E}+17 * 0.02 \quad \text{(Odum et al., 2000)}$$

$$= 1.28\text{E}+16 \quad \text{J/yr}$$

Appendix 20. Albedo of ocean surface

Month Location		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
Lat	40.5	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05
Lon	-39.5													
Lat	22	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
Lon	-51													
Lat	-33	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
Lon	-124													
Lat	21	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Lon	-169													
Lat	-19	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Lon	82													

Appendix 21. Comparison of transformities of terrestrial plants and ecosystems(Footnote for Fig. 27)

Plants and forest	Transformity	Reference
Terrestrial plants	7.43E+03	this study
Bryophytes	1.78E+04	this study
Gymnosperms	8.55E+03	this study
Angiosperms	6.28E+03	this study
Wood	1.10E+04	Odum et al., 2000
Boreal silviculture(Spruce and pine)	4.93E+03	Brown & Bardi, 2001
Slashpine silviculture	5.83E+03	Brown & Bardi, 2001
Temperate forest(oak), NPP	4.70E+03	Brown & Bardi, 2001
Savanna vegetation, NPP	9.96E+03 (1.67E+04*)	Pardo-Jutar & Brown, 1996
Subtropical mixed hardwood forest (Oka, gum, magnolia, pine), biomass	5.50E+03 (9.24E+03*)	Orrell, 1998
Subtropical mixed hardwood forest, NPP, FL	1.54E+03 (2.59E+03*)	Orrell, 1998
Subtropical forest, NPP, FL	1.69E+03 (2.84E+03*)	Orrell, 1998
Subtropical forest, biomass, FL	1.07E+04 (1.79E+04*)	Orrell, 1998
Floodplain forest(Cypress)	5.46E+03	Brown & Bardi, 2001
Subtropical herbaceous wetland, GPP, FL	4.32E+03 (7.26E+03*)	Bardi & Brown, 1999
Subtropical herbaceous wetland, biomass, FL	7.34E+04	Brown & Bardi, 2001
Subtropical shrub-scrub wetland (titi and willow), GPP, FL	4.26E+03 (7.16E+03*)	Brown & Bardi, 2001
Subtropical depressional forest (Cypress), GPP, FL	4.20E+03 (7.06E+03*)	Bardi & Brown, 1999
Subtropical shrub-scrub wetland, NPP, FL	4.05E+04	Brown & Bardi, 2001
Subtropical shrub-scrub wetland, biomass, FL	6.91E+04	Brown & Bardi, 2001
Subtropical depressional forested wetland, FL	5.29E+04	Brown & Bardi, 2001

Subtropical depressional forested wetland, biomass, FL	7.32E+04	Brown & Bardi, 2001
Subtropical herbaceous wetland, FL	6.19E+04	Brown & Bardi, 2001
Temperate forest, NPP	4.70E+03 (7.90E+03*)	Tilley, 1999
Temperate forest (<i>Quercus</i> spp.)	1.60E+04 (2.68E+04*)	Tilley, 1999
Wood biomass(USA)	3.49E+04 (5.86E+04*)	Odum, 1996
Pine flatwood forest, NPP, FL	1.69E+03 (2.84E+03*)	Orrell, 1998
Utricularia spp.	1.51E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Epiphytes	1.01E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Hardwood Wood	7.27E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Periphyton	3.56E+03 [§]	Cohen et al., 2005
Macrophytes	2.08E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Macrophytes	1.93E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Floating vegetation	1.25E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Floating vegetation	2.21E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Macroalgae	3.55E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Cypress wood	7.23E+04 [†]	Cohen et al., 2005
Grass production	4.70E+03	Zuo et al., 2004
Wornwood production	4.70E+03	Zuo et al., 2004
Reed production	4.70E+03	Zuo et al., 2004
Mangrove production	4.70E+03	Zuo et al., 2004
Macroalgae	4.70E+03	Zuo et al., 2004
NPP of <i>Phragmites</i> and <i>Aeluropus</i>	8.00E+03	Lu et al., 2007
NPP of <i>Spartina</i> and <i>Suaeda</i>	1.50E+04	Lu et al., 2007
Global plant biomass	1.00E+04 (1.68E+04*)	Brown & Ulgiati, 1999
Tropical dry savanna, GPP, Venezuela	1.88E+03 (3.15E+03*)	Prado-Jutar & Brown, 1996

Tropical dry savanna, biomass, Venezuela	1.05E+04 (1.77E+04*)	Prado-Jutar & Brown, 1996
Salt marsh, GPP, FL	2.12E+03 (3.56E+03*)	Odum, 1996
Salt marsh, biomass, FL	6.96E+03 (1.17E+04*)	Odum, 1996
Tropical mangrove, biomass, Ecuador	1.47E+04 (2.47E+04*)	Odum & Arding, 1991
Floodplain forest, GPP, FL	5.45E+03 (9.16E+03*)	Weber, 1996
Boreal silviculture, Sweden (<i>Picea aibes</i> , <i>Pinus silvestris</i>)	4.92E+03 (8.27E+03*)	Doherty, 1995
Subtropical silviculture (<i>Pinus elliotti</i>), FL	5.82E+03 (9.78E+03*)	Doherty, 1995
Subtropical plantation, FL (<i>Eucalyptus</i> and <i>Malaleuca</i> spp.)	1.60E+04 (2.68E+04*)	Doherty, 1995
Primary producer	3.39E+04	Brown & Ulgiati, 2004
Forest biomass(<i>Acacia mangium</i>)	5.44E+03	Cohen, 2003
Forest biomass(orange tree)	9.22E+04	Cohen, 2003
Forest biomass	4.56E+04	Cohen, 2003
Subtropical forest	1.82E+04	Scatena et al., 2002
Temperate forest, NPP	4.53E+03	Scatena et al., 2002
Subtropical forest, NPP	7.91E+03	Scatena et al., 2002
Luquillo forest NPP	6.64E+03	Scatena et al., 2002
Elfin cloud forest, NPP	1.29E+04	Scatena et al., 2002
Colorado forest, NPP	7.05E+03	Scatena et al., 2002
Palm forest, NPP	2.78E+03	Scatena et al., 2002
NPP, total live biomass	4.70E+03	Tilley & Swank, 2003

*: Based on 15.83 sej/yr

§: Computed transformity values for graminoid marsh (Cohen et al., 2005)

‡: Computed transformity values for Cypress swamp (Cohen et al., 2005)

Appendix 22. Comparison of transformities of terrestrial animals(Footnote for Fig. 28)

Terrestrial animals	Transformity	Reference
Herbivores	9.02E+04	this study
Carnivores	8.50E+05	this study
Detritivores	6.46E+04	this study
Terrestrial animals	7.50E+04	this study
Beef	6.30E+05	Campbell et al., 2005
All other livestock	7.92E+05	Campbell et al., 2005
live animals and live fish	4.39E+05	Campbell et al., 2005
Flagfish	1.24E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Macroinvertebrates	1.91E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Apple snail	1.97E+04 [§] 3.77E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Poecilids	2.23E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Lizards	2.67E+04 [§] 2.75E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Tadpoles	2.91E+04 [§] 1.90E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Crayfish	3.04E+04 [§] 3.71E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Freshwater prawn	3.87E+04 [§] 3.57E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Bluefin killifish	4.14E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Chubsuckers	4.26E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Mosquitofishes	4.35E+04 [§]	Cohen et al., 2005
	4.37E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Small fishes	1.22E+05(herb.) [†]	Cohen et al., 2005
	1.22E+06(carn.) [§]	Cohen et al., 2005

Shiners and Minnows	5.35E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Killifishes	5.68E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Large aquatic insects	6.37E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Terrestrial invertebrates	6.74E+04 [§] 5.09E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Topminnows	7.51E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Bluespotted sunfish	8.38E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Pigmy sunfish	8.42E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Opossum	8.63E+04 [§] 3.82E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Dollar sunfish	8.71E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Redear sunfish	8.83E+04 [§]	Cohen et al., 2005
Snakes	9.62E+04 [§] 6.21E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Ducks	1.01E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Centrarchids	1.03E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Small frogs	1.07E+05 [§] 1.25E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Muskrats	1.08E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Medium frogs	1.09E+05 [§] 1.25E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
White tailed deer	1.10E+05 [§] 1.99E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Salamander larvae	1.11E+05 [§] 1.17E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Catfish	1.18E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Gruiformes	1.28E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Large frogs	1.30E+05 [§] 1.46E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005

Alligators	1.34E+05 [§] 4.34E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Spotted sunfish	1.36E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Cichlids	1.36E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Warmouth	1.38E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Rabbits	1.41E+05 [§] 1.96E+05 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Large fishes	1.45E+05 [§] 1.71E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Turtles	1.51E+05 [§] 2.07E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Largemouth bass	1.52E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Snailkites	1.62E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Raccoons	1.63E+05 [§] 2.30E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Grebes	1.76E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Salamanders	1.79E+05 [§] 2.82E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Cape sable seaside sparrow	1.85E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Squirrels	1.95E+05 [†]	Cohen et al., 2005
Fishing spider	1.99E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Passerines	2.13E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Gar	2.17E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Rats and Mice	2.28E+05 [§] 1.30E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Bitterns	2.40E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Aquatic invertebrates	3.00E+05 [†]	Cohen et al., 2005
Anseriformes	3.91E+05 [†]	Cohen et al., 2005
Otter	4.00E+05 [§] 4.76E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005

Mink	4.38E+05 [§] 4.84E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Nighthawks	5.39E+05 [§]	Cohen et al., 2005
Galliformes	1.03E+06 [§] 7.15E+06 [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Passeriformes	1.23E+06(omni.) [†] 2.79E+06(pred.) [†]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Panthers	1.35E+06 [§]	Cohen et al., 2005
Woodpeckers	1.64E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Hogs	1.73E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Black Bear	1.77E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Hummingbirds	1.90E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Great blue heron	1.98E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Other herons	2.08E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Egrets	2.08E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Vertebrate det	2.46E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Wood stock	2.52E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Bobcat	2.71E+06 [†] 3.30E+06 [§]	Cohen et al., 2005 Cohen et al., 2005
Armadillo	3.21E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Gray fox	4.80E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Caprimulgiformes	5.02E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Bats	5.69E+06 [†]	Cohen et al., 2005
White ibis	6.61E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Kites and Hawks	7.13E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Owls	7.14E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Shrews	7.28E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Pelecaniformes	7.90E+06 [†]	Cohen et al., 2005
Vultures	1.29E+07 [†]	Cohen et al., 2005

Florida panther	1.48E+07 [‡]	Cohen et al., 2005
Waterfowls	3.00E+07	Zuo et al., 2004
Crabs and snails	1.50E+06	Zuo et al., 2004
waterfowls	5.12E+07	Lu et al., 2007
Bald eagles	2.50E+07 (4.20E+07*)	Brown et al., 1993
Aanimal biomass	1.00E+06 (1.68E+06*)	Brown & Ulgiati, 1999
Invertebrates	3.24E+05	Brown & Ulgiati, 2004
Fishes	9.87E+05	Brown & Ulgiati, 2004
Amphibians	1.16E+06	Brown & Ulgiati, 2004
Mammals	3.35E+06	Brown & Ulgiati, 2004
Reptiles	3.42E+06	Brown & Ulgiati, 2004
Birds	3.76E+06	Brown & Ulgiati, 2004
Herbivores	1.27E+05	Brown & Ulgiati, 2004
Carnivores	4.09E+06	Brown & Ulgiati, 2004
Top carnivores	4.06E+07	Brown & Ulgiati, 2004

*: Based on 15.83 sej/yr

§: Computed transformity values for graminoid marsh (Cohen et al., 2005)

‡: Computed transformity values for Cypress swamp (Cohen et al., 2005)

Appendix 23. Comparison of transformities of marine plants

Marine plants	Transformity	Reference
Phytoplankton	5.27E+03	this study
Seaweeds	1.38E+04	this study
Marine plants	5.34E+03	this study
Seaweeds	1.10E+04	Lee et al., 2001
NPP of phytoplankton	1.04E+04	Lu et al., 2007
Primary producers	1.10E+04 (1.84E+04*)	Brown et al., 1993
Phytoplankton	1.10E+04 (1.85E+04*)	Brown et al., 1993
Intertidal algae	1.10E+04 (1.85E+04*)	Brown et al., 1993

*: Based on 15.83 sej/yr

Appendix 24. Comparison of transformities of marine animals(Footnote for Fig. 29)

Marine animals	Transformity	Reference
Zooplankton	9.13E+04	this study
Nekton	1.19E+05	this study
Benthos	1.09E+05	this study
Marine animals	9.35E+04	this study
Shellfishes	8.10E+05	Lee et al., 2001
Fishes	1.60E+06	Lee et al., 2001
Benthos	2.90E+05	Lee et al., 2001
Gilthead sea bream(<i>Sparus aurata</i>)	1.32E+06 2.45E+07	Vassallo et al., 2007 Bastianoni, 2002
Salmon(<i>Salmo salar</i>)	9.70E+06	Odum, 2001
Tilapia(<i>Tilapia mariae</i>)	5.61E+05 (9.42E+05*)	Brown et al., 1992
Benthic fauna	2.41E+05	Lu et al., 2007
	2.73E+05	Lu et al., 2007
	3.81E+05	Lu et al., 2007
	8.39E+05	Lu et al., 2007
Zooplankton	1.00E+05 (1.68E+05*)	Brown et al., 1993
Harbor seals	6.10E+07 (1.02E+08*)	Brown et al., 1993
Sea otters	9.20E+07 (1.55E+08*)	Brown et al., 1993
Killer whales	1.70E+08 (2.86E+08*)	Brown et al., 1993
Intertidal herbivores	1.10E+05 (1.84E+05*)	Brown et al., 1993
Intertidal mieofauna	2.90E+05 (4.87E+05*)	Brown et al., 1993

Intertidal macrofauna	8.10E+05 (1.36E+06*)	Brown et al., 1993
lower consumers	1.10E+05 (1.84E+05*)	Brown et al., 1993
Apex predators	1.00E+06 (1.68E+06*)	Brown et al., 1993
Small nekton (molluskans, artropods, small fishes)	1.10E+06 (1.84E+06*)	Brown et al., 1993
Small nekton predators (fish)	9.70E+06 (1.63E+07*)	Brown et al., 1993
Mammals(seal, porpoise, belukha whale)	3.82E+07 (6.42E+07*)	Brown et al., 1993
Fishes, crabs, shrimp	2.70E+08 (4.54E+08*)	Odum & Hornbeck, 1997
Fishes, crabs, shrimp	1.38E+07 (2.32E+07*)	Odum & Hornbeck, 1997
Game fish	3.00E+07 (5.04E+07*)	Odum & Hornbeck, 1997
Blue crabs	4.00E+06 (6.72E+06*)	Odum & Hornbeck, 1997

*: Based on 15.83 sej/yr

Appendix 25. Emergy analysis of global processes (Footnote for table 26)

1. Sunlight

$$\begin{aligned}
 \text{solar constant} &= 2 \text{ cal/cm}^2/\text{min} \\
 \text{albedo} &= 0.3 \\
 \text{earth cross section facing the sun} &= 1.28\text{E}+14 \text{ m}^2 \\
 \text{energy} &= (\text{solar constant})(1-\text{albedo})(\text{earth cross section facing the sun})(10000\text{cm}^2/\text{m}^2) \\
 &\quad (5.26\text{E}+05\text{min}/\text{yr}) \\
 &= 3.94\text{E}+24 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

2. Deep earth heat

$$\begin{aligned}
 \text{heat released by crustal radioactivity} &= 1.98\text{E}+20 \text{ J/yr} \\
 \text{heat flowing up from the mantle} &= 4.74\text{E}+20 \text{ J/yr} \\
 \text{energy} &= (\text{heat released by crustal radioactivity}) + (\text{heat flowing up from the mantle}) \\
 &= 6.72\text{E}+20 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

3. Tidal energy

$$\begin{aligned}
 \text{energy received by the earth} &= 1.65\text{E}+19 \text{ erg/sec} \\
 \text{energy} &= (\text{energy received by the earth}) \\
 &\quad (3.15\text{E}+07\text{sec}/\text{yr})(1.00\text{E}+07\text{erg}/\text{J}) \\
 &= 5.20\text{E}+19 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

4. Oil production

$$\begin{aligned}
 \text{world oil production} &= 3.91\text{E}+09 \text{ TOE/yr} \quad (\text{KNSO, 2008}) \\
 \text{energy} &= (\text{world oil production})(1.00\text{E}+07\text{kcal}/1\text{TOE})(4186\text{J}/\text{kcal}) \\
 &= 1.63\text{E}+20 \text{ J/yr}
 \end{aligned}$$

5. Natural gas

$$\text{world natural gas production} = 2.65\text{E}+09 \text{ TOE/yr} \quad (\text{KNSO, 2008})$$

$$\begin{aligned} \text{energy} &= \frac{(\text{world natural gas production})}{(1150\text{m}^3/\text{TOE})} \left(\frac{\text{gas} 10500\text{m}^3/\text{kcal}}{(4186\text{J}/\text{kcal})} \right) \\ &= 1.34\text{E}+20 \text{ J/yr} \end{aligned}$$

6. Coal

$$\text{world coal(hard) production} = 3.14\text{E}+09 \text{ TOE/yr} \quad (\text{KNSO, 2008})$$

$$\begin{aligned} \text{coal(hard) energy} &= \frac{(\text{world coal(hard) production})}{(6.60\text{E}+06\text{kcal}/\text{TOE})} \left(\frac{4186\text{J}}{\text{kcal}} \right) \\ &= 8.66\text{E}+19 \text{ J/yr} \end{aligned}$$

$$\text{world coal(soft) production} = 1.30\text{E}+09 \text{ TOE/yr} \quad (\text{KNSO, 2008})$$

$$\begin{aligned} \text{coal(soft) energy} &= \frac{(\text{world coal(soft) production})}{(3.31\text{E}+06\text{kcal}/\text{TOE})} \left(\frac{4186\text{J}}{\text{kcal}} \right) \\ &= 1.80\text{E}+19 \text{ J/yr} \end{aligned}$$

$$\text{world coal production energy} = 1.05\text{E}+20 \text{ J/yr}$$

7. Neuclear energy

$$\text{world neuclear energy production} = 6.22\text{E}+08 \text{ TOE/yr} \quad (\text{KNSO, 2008})$$

$$\begin{aligned} \text{energy} &= \frac{(\text{world neuclear energy production})}{(11630\text{kwh}/\text{TOE})} \left(\frac{3.60\text{E}+06\text{J}}{\text{kwh}} \right) \\ &= 2.60\text{E}+19 \text{ J/yr} \end{aligned}$$

8. Wood

(Brown & Ulgiati, 1999)

$$\text{annual net forest area loss} = 1.46\text{E}+07 \text{ ha/yr}$$

$$\text{biomass} = 40 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{moisture} = 0.7$$

$$\begin{aligned} \text{energy} &= \frac{(\text{annual net forest area loss})(\text{biomass})}{(\text{moisture})(10000\text{m}^2/\text{ha})} \left(\frac{1.30\text{E}+07\text{J}}{\text{kg}} \right) \\ &= 5.31\text{E}+19 \text{ J/yr} \end{aligned}$$

9. Soil erosion

(Brown & Ulgiati, 1999)

$$\text{top soil erosion} = 6.10\text{E}+10 \text{ t/yr}$$

assume soil loss estimate	=	10	t/ha/yr
agricultural land	=	6.10E+16	g/yr
assume organic matter	=	0.01	[1%]
organic matter kcal	=	5.4	kcal/g
energy	=	(top soil erosion)(assume soil loss estimate)(agricultural land)(assume organic matter)(organic matter kcal) (4186J/kcal)	
	=	1.38E+19	J/yr
10. Phosphate	=	(Brown & Ulgiati, 1999)	
total global production	=	1.37E+08	t/yr
gibbs free energy phosphate rock	=	3.48E+02	J/g
energy	=	(total global production)(gibbs free energy phosphate rock)(1.00E+06g/t)	
	=	4.77E+16	J/yr
11. Limestone	=	(Brown & Ulgiati, 1999)	
total global production	=	6.57E+08	t/yr
gibbs free energy phosphate rock	=	3.48E+02	J/g
energy	=	(total global production)(gibbs free energy phosphate rock)(1.00E+06g/t)	
	=	2.29E+17	J/yr
12. Mineral			
metallic minerals		(Brown et al., 2009)	
bauxite	=	2.13.E+14	g/yr
bismuth	=	5.30.E+09	g/yr
cadmium	=	1.88.E+10	g/yr
chromium	=	2.40.E+13	g/yr
cobalt	=	6.10.E+10	g/yr
copper	=	1.55.E+13	g/yr
gold	=	2.34.E+09	g/yr
iron ore	=	2.04E+15	g/yr

lead	=	3.60.E+12	g/yr
lithium	=	2.00.E+10	g/yr
magnesium	=	2.50.E+10	g/yr
manganese	=	3.38.E+13	g/yr
mercury	=	1.40.E+09	g/yr
molybdenum	=	1.93.E+11	g/yr
nickel	=	1.63.E+12	g/yr
platinum	=	4.98.E+08	g/yr
potash	=	3.35.E+13	g/yr
silver	=	2.10.E+10	g/yr
strontium	=	9.50.E+11	g/yr
tantalum	=	9.00.E+08	g/yr
titanium	=	6.60.E+12	g/yr
tungsten	=	5.68.E+10	g/yr
uranium	=	4.14.E+10	g/yr
vanadium	=	6.90.E+10	g/yr
zinc	=	1.10.E+13	g/yr
nonmetallic minerals	=		(Brown et al., 2009)
antimony	=	1.74.E+11	g/yr
arsenic	=	1.50.E+09	g/yr
asbestos	=	2.30.E+12	g/yr
barytes	=	8.10.E+12	g/yr
bentonite	=	1.57.E+13	g/yr
fullers earth	=	4.00.E+12	g/yr
beryl	=	3.04.E+09	g/yr
borates	=	6.67.E+12	g/yr
bromine	=	4.61.E+11	g/yr
diamond	=	3.40.E+07	g/yr
diatomite	=	2.02.E+12	g/yr
feldspar	=	2.25.E+13	g/yr
fluorspar	=	5.70.E+12	g/yr
germanium	=	1.06.E+08	g/yr
graphite	=	2.10.E+12	g/yr
gypsum	=	1.50.E+14	g/yr
iodine	=	2.64.E+10	g/yr

kaolin	=	2.55.E+13	g/yr
magnesite	=	2.35.E+13	g/yr
mica	=	3.10.E+11	g/yr
nepheline syenite	=	2.00.E+12	g/yr
perlite	=	3.00.E+12	g/yr
rare earth	=	1.22.E+11	g/yr
selenium	=	1.60.E+09	g/yr
sillimanite	=	3.30.E+11	g/yr
sodium carbonate	=	1.11.E+13	g/yr
pyrites	=	4.80.E+12	g/yr
sulphur ore	=	1.30.E+12	g/yr
talc	=	8.60.E+12	g/yr
tellurium	=	1.13.E+08	g/yr
tin	=	3.03.E+11	g/yr
vermiculite	=	5.12.E+11	g/yr
wollastonite	=	6.91.E+11	g/yr
zirconium	=	1.52.E+12	g/yr
total	=	2.69.E+15	g/yr

VIII. 참 고 문 헌

- Abdalla C.W., B.A. Roach and D.J. Epp, 1992, Valuing environmental quality changes using averting expenditure: an application to groundwater contamination. *Land Economics*, 38(2):163-169.
- Ajtay G.L., P. Ketner and P. Duvigneaud, 1979, Terrestrial Primary production and phytomass. In: "The Global Carbon Cycle, SCOPE 13" (B. Bolin, E.T. Degens, and P. Ketner, eds.). John Wiley & Sons, New York, 129-182.
- Amirnejad H., S. Khalilian, M.H. Assareh and M. Ahmadian, 2006, Estimating the existence value of north forests of Iran by using a contingent valuation method. *Ecological Economics*, 58:665-675.
- Ansell A.D., D.S. McLusky, A. Stirling and A. Trevallion, 1978, Production and energy flow in the macrobenthos of two sandy beaches in South West India. *Proc. R. Soc. Edinburgh, Sect. B*, 76:269-296. In: H. Postma and J.J. Zijlstra. (eds.) 1988. *Ecosystems of the world 27, continental shelves*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Archer C.L. and Jacobson M.Z., 2005, Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical research*, 110:D12110 1-20.
- Bardi E., and M.T. Brown. 1999, Emergy evaluation of ecosystems: a basis for environmental decision making. In: M.T. Brown(ed) *Emergy Synthesis I: Proceedings to the first biennial emergy analysis research conference*. Gainesville, FL. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- Barnes J.I., 1996, Changes in the economic use value of elephant in Botswana: the effect of international trade prohibition. *Ecological*

- Economics, 18:215-230.
- Bastianoni S., 2002, Use of thermodynamic orientors to assess the efficiency of ecosystems: a case study in the Lagoon of Venice. *Scientific World Journal*, 2:255-260.
- Bennett J.W., 1984, Using direct questioning to value the existence benefits of preserved natural areas. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 28:136-152.
- Berrens R.P., P. Ganderton and C. Silva, 1996, Valuing the protection of minimum instream flows in New Mexico. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 21(2):294-309.
- Bisbee K.E., S.T. Gower, J.M. Norman and E.V. Nordheim, 2001, Environmental controls on ground cover species composition and productivity in a boreal black spruce forest. *Oecologia*, 129: 261-270.
- Bliss L.C., 1962, Net primary production of tundra ecosystems. In: *Die Stoffproduktion der Pflanzendecke*. H. Lieth (ed.): Fischer, Stuttgart, 35-46.
- Bliss L.C., and N.V. Matveyeva, 1992, Circumpolar arctic vegetation. In: *Arctic Ecosystems in a Changing Climate: An Ecophysiological Perspective* (F.S. Chapin III, R.L. Jefferies, J.F. Reynolds, G.R. Shaver, and J. Svoboda, Eds.). 59-89.
- Boman M. and G. Bostedt, 1995, Valuing the wolf in Sweden, Book No. 110. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Economics, Sweden.
- Bonan G.B., and H.H. Shugart, 1989, Environmental factors and ecological processes in boreal forests. *Annual Review of Ecology Systematics*, 20:1-28.
- Bowen H.J.M., 1966, Trace elements in biochemistry. Academic press, London and New York, 241p.

- Bowker J.M. and J.R. Stoll, 1988, Use of dichotomous choice nonmarket methods to value the whooping crane resource. *American Journal of Agricultural Economics*, 70:327-381.
- Boyle K.J. and R.C. Bishop, 1987, Valuing wildlife in benefit-cost analysis: a case study involving endangered species. *Water Resources Research*, 23:943-950.
- Boyle K.J., 1990, Dichotomous choice, contingent valuation question: functional form is important. *North-Eastern Journal of Agriculture and Resource Economics*. 19:125-131.
- Brey R., P. Riera and J. Mogas, 2007, Estimation of forest values using choicemodeling: An application to Spanish forests. *Ecological Economics*, 64:305-312.
- Brookshire D.S., L.S. Eubanks and A. Randall, 1983, Estimating option prices and existence values for wildlife resources. *Land Economics*, 59:1-15.
- Brown M.T. and E. Bardi, 2001, Folio 3. Emergy of Ecosystems. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville.
- Brown M.T. and S. Ulgiati, 1999, Emergy evaluation of the biosphere and natural capital. *Ambio*, 28(6):486-493.
- Brown M.T. and S. Ulgiati, 2004, Emergy, transformity and ecosystem health. In S.E. Jorgensen et al. (eds) *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health*. Elsevier. New York.
- Brown M.T. and T.R. McClanahan, 1996, Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*. 91:105-130.
- Brown M.T., H.T. Odum and S.E. Jorgensen, 2004, Energy hierarchy and transformity in the Universe, *Ecological Modelling*,

178:17-28.

- Brown M.T., P. Green, A. Gonzalez and J. Venegas, 1992, Emergy analysis perspectives, public policy options, and development guidelines for the coastal zone of Nayarit, Mexico. vol. 1-2. Center for wetlands, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Brown M.T., R.D. Woithe, H.T. Odum, C.L. Montague and E.C. Odum, 1993, Emergy analysis perspectives of the EXXON VALDEZ oil spill in prince William Sound, Alaska, Center for Wetlands and Water resources, University of Florida, Phelps Laboratory, Museum Road, Gainesville, Florida.
- Brown T.J., L.E. Hetherington, S.D. Hannis, T. Bide, A.J. Benham, N.E. Idoine and P.A.J. Lusty, 2009, World mineral production 2003-07. British Geological Survey 2009.
- Buchary E.A., 1999, Evaluating the effect of the 1980 trawl ban in the Java Sea, Indonesia: an ecosystem-based approach. M.Sc. thesis. Department of resource management and environmental studies. University of British Columbia. In: T. Pitcher, E. Buchary, P. Trujillo (eds.), 2002 Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: ecological and economic forecasting of marine protected areas with human-made reefs. Fisheries Centre Research Reports, 10(3):95p.
- Campbell D.E., S.L. Brandt-Williams and M.E.A. Meisch. 2005, Environmental accounting using emergy: evaluation of the state of West Virginia. U.S. Environmental protection agency, Office of research and development, National health and environmental effects research laboratory, Atlantic ecology division, Narragansett, RI.
- Carson R.T., L. Wilks and D. Imber, 1994, Valuing the preservation of Australia's Kakadu Conservation Zone. Oxford Economics

Papers, 46(5):727-749.

- Chambers C. and J. Whitehead, 2003, A contingent valuation estimate of the benefits of wolves in Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 26:249-267.
- Chopra K., 1993, The value of non-timber forest products: an estimate from India. *Economic Botany*, 47, 251-257.
- Chullasorn S. and P. Martosubroto, 1986, Distribution and important biological features of coastal fish resources in Southeast Asia. *FAO Fish. Tech. Paper* 278. 84p.
- Cianelli L., B.W. Robson, R.C. Francis, K. Aydin and R.D. Brodeur, 2004, Boundaries of open marine ecosystems: an application to the Pribilof Archipelago, southeast Bering Sea. *Ecological Application*, 14:942-953.
- Cintron G.A., A.E. Lugo and R. Martinez, 1985, Structural and functional properties of mangrove forests. In *Monographs in Systematic Botany* 10. The Botany and Natural History of Panama W.G. D'Arcy and M.D. Correa (eds.), 53-66. Missouri Botanical Garden, St. Louis.
- Clark K.L., N.M. Nadkarni and H.L. Gholz, 1998, Growth, net production, litter decomposition, and net nitrogen accumulation by epiphytic bryophytes in a Tropical Montane Forest. *Biotropica*, 30(1):12-23.
- Cohen M., E. Bardi, M.T. Brown and W. Ingwersen, 2005, Emergy, transformity and network analysis of Everglades ecosystems. In: (ed) *Emergy Synthesis III: Proceedings from the third biennial emergy analysis research conference*. Gainesville, FL. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- Cohen M.J., 2003, System evaluation of erosion and erosion control in a

- tropical watershed. Ph.D. Dissertation. University of Florida, Gainesville, FL.
- Cohen M.J., S. Sweeney, D. King and M.T. Brown, 2007, Emergy synthesis 4. Theory and applications of the emergy methodology. In: Soil, water, fish and forest: Natural capital in the wealth of nations. 18.1–18.22.
- Copper P., 1994, Ancient reef ecosystem expansion and collapse. *Coral Reefs*, 13:3–11.
- Costanza R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Delt, 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(15):253–260.
- de Mendonça M.J.C., A. Sachsida and P.R.A. Loureiro, 2003, A study on the valuing of biodiversity: the case of three endangered species in Brazil. *Ecological Economics*, 46(1):9–18.
- den Hartog C., 1967, The structural aspect in the ecology of sea-grass communities. *Helgol. Wiss. Meeresunter.* 15:648–659.
- Desvousges W.H., F.R. Johnson, R.W. Dunford, K.J. Boyle, S.P. Hudson and K.N. Wilson, 1993, Measuring natural resource damages with contingent valuation: tests of validity and reliability, in J.A. Hausman, *Contingent valuation: a critical assessment, contributions to economic analysis*. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.
- Diamond P.A., J.A. Hausman, G.L. Leonard and M.A. Denning, 1993, Does contingent valuation measure preferences? Experimental evidence. in J.A. Hausman, *Contingent valuation: a critical assessment, contributions to economic analysis*, North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.
- Didiuk A.B. and R.S. Ferguson, 2005, Land cover mapping of Queen

- Maud Gulf Migratory Bird Sanctuary. Nunavut, Disponible également en français. Cat. No. CW69-1-111E, 32p.
- Doherty S.J., 1995, Emergency evaluations of and limits to forest production. Ph.D. Dissertation. Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, Gainesville, FL.
- Duan L.J., S.Y. Li, Y. Liu, T. Jiang and P. Failler, 2009, A trophic model of the Pearl River Delta coastal ecosystem. *Ocean & Coastal Management*, 52(7):359-367.
- Duffield J.W. and D.A. Patterson, 1992, Field testing existence values: an instream flow trust fund for montana rivers, paper presented at the Allied social Science Association Annual Meeting. New Orleans, LA, US. values cited P.A.L.D. Nunes, J.C.J.M. van den Bergh, P. Nijkamp. 2003. *The ecological economics of biodiversity*. Edward Elgar Publisher. Cheltenham. UK. 165p.
- Eagle J.G. and D.R. Betters, 1998, The endangered species act and economic values: a comparison of fines and contingent valuation studies. *Ecological Economics*, 26:165-171.
- Ewel, K.C., Jr.W.P. Cropper and H.L. Gholz, 1987, Soil CO² evolution in florida slash pine plantations I. Changes through time. *Canadian Journal of Forest Research*, 17:325-329.
- Faber M., 2008. How to be an ecological economist.. *Ecological Economics*, 66(1):1-7.
- FAO, 1997, "FAOSTAT Agricultural Database." <http://apps/fao.org/>, March 1997.
- Figuerola E. and R. Pasten, 2008, Forest and water: the value of native temperate forests in supplying water for human consumption: A comment. *Ecological Economics*, 67:153-156.
- Garrod G. and K.G. Willis, 1999, Economic valuation of the

- environment: methods and case studies. Edward Elgar, Cheltenham, UK Northampton, MA, USA. 384p.
- Giraud K., B. Turcin, J. Loomis and J. Cooper, 2002, Economic benefit of the protection program for the stellar sea lion. *Marine Policy*, 26:451-458.
- Giraud K., J. Loomis and R. Johnson, 1999, Internal and external scope in willingness-to-pay estimates for threatened and endangered wildlife. *Journal of Environmental Management*, 56:221-229.
- Gower S.T., H.L. Gholz, K. Nakane, and V.C. Badwin, 1994, Production and allocation patterns of pine forest. *Ecological Bulletin*, (Copenhagen) 43:115-135.
- Groombridge B., 1992, *Global Biodiversity - Status of the Earth's Living Resources: A Report Compiled by the World Conservation Monitoring Centre*. Chapman and Hall, London, New York.
- Gunderson L., 1989, Emergy analysis of everglades national park in 1989. Special report. Center for Wetlands, University of Florida, Gainesville. 14.
- Guo Z., X. Xiao, Y. Gan and Y. Zheng, 2001, Ecosystem functions, services and their values—a case study in Xingshan County of China. *Ecological Economics*, 38:141-154.
- Hadley N.F. and S.R. Szarek, 1981, Productivity of desert ecosystems. *BioScience*, 31:747-753.
- Hageman R., 1985, Valuing marine mammal populations: benefits valuations in multi species ecosystems. in *Administrative book, Southwest Fisheries, values cited in J. Eagle and D. Betters*. 1998. The endangered species act and economic values: a comparison of fines and contingent valuation studies, *Ecological*

- Economics, 26:165–171.
- Halstead J.M., A.E. Luloff and T.H. Stevens, 1992, Protest bidders in contingent valuation. *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, 21(2):247–361.
- Hampicke U., K. Tampe, H. Kiemstedt, T. Horlitz, U. Walters and D. Timp, 1991, The economic importance of preserving species and biotops in the Federal Republic of Germany, values cited in P.A.L.D. Nunes, J.C.J.M. van den Bergh, P. Nijkamp. 2003. *The ecological economics of biodiversity*. Edward Elgar Publisher. Cheltenham. UK. 165p.
- Heijmans M.M.P.D., W.J. Arp and F.S. Chapin, 2004, Controls on moss evaporation in a boreal black spruce forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2):1–8.
- Heimann M.(edi), 1993, *The Global Carbon Cycle*. NATO ASI Series, I 15. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 559p.
- Hein L. and F. Gatzweiler, 2006, The econoic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources. *Ecological Economics*, 60:176–185.
- Hickman C.P., L.S. Roberts, and F.M. Hickman, 1984, *Integrated principles of zoology*. The C.V. Mosby Co.
- Hillman K., D.I. Walker, A.W.D. Larkum and A.J. McComb, 1989, Productivity and nutrient limitation. In *Biology of Seagrasses*, A.W.D. Larkum, A.J. McComb and S.A. Shepherd (eds.) 635–685. Elsevier, Amsterdam.
- Hodgson G. and Dixon J.A., 1988, Logging versus fisheries and tourism in Palawan. Occ. Paper 7, Honolulu, East - West Center Environment and Policy Institute.
- Hoehn J.P. and J.B. Loomis, 1993, Substitution effects in the valuation of multiple environmental programs. *Journal of Environmental Economics and Management*, 25(1):56–75.

- Huang S.L. and W.L. Hsu, 2003, Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning*, 63:61-74.
- Hung D.V., 2006, Emergy analysis and energy modeling for the sustainable use of the lower Mekong river basin. Department of Environmental Engineering. Ph.D. Thesis, Pukyong National University.
- Hussen A.M., 2000, Principles of environmental economics: Economics, ecology and public policy. Routledge, London & New York, 431p.
- Jakobsson K.M. and A.K. Dragun, 1996a, Contingent valuation and endangered species. Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Jakobsson K.M. and A.K. Dragun, 1996b, The economics of endangered species, working paper Swedish University Agricultural Sciences Presented at the 7th Annual Conference of the EAERE, Lisbon, Portugal. values cited in P.A.L.D. Nunes, J.C.J.M. van den Bergh, P. Nijkamp. 2003. The ecological economics of biodiversity. Edward Elgar Publisher. Cheltenham. UK. 165p.
- Jariya K., 2009, Emergy analysis and energy modeling for the sustainable use of Songkhla lake, Thailand. Interdisciplinary Program of Ocean Industrial engineering. Ph.D. Thesis, Pukyong National University.
- Jeroen C.J.M., van den Bergh, 2000, Themes, approaches, and differences with environmental economics. Tinbergen Institute Discussion Paper TI 2000-080/3, pp. 1-25.
- Johansson P.O., 1989, Valuing public goods in a Risky World: an experiment, in H. Folmer and E. van Ierland (eds), *Evaluation Methods and Policy Making in Environmental Economics*, North

- Holland, Amsterdam, The Netherlands.
- Kealy M.J. and R.W. Turner, 1993, A test of the equality of the closed-ended and the open-ended contingent valuations. *American Journal of Agriculture Economics*, 75(2):311-331.
- Kinerson R.S., C.W. Ralston and C.G. Well, 1977, Carbon cycling in a loblolly pine plantation. *Oecologia*, 29:1-10.
- King D.A. and J.A. Sinden, 1988, Influence of soil conservation on farm land values. *Ecological Economics*, 64:242-255.
- KNSO(Korea Natinal Statistical Office), 2008, International Statistics Yearbook.
- Kosz M., 1996, Valuing riverside wetlands: the case of the "Donau-Auen" national park. *Ecological Economics*, 16:109-127.
- Kotchen M. and S. Reiling, 2000, Environmental attitudes, motivations, and contingent valuation of nonuse values: a case study involving endangered species. *Ecological Economics*, 32:93-107.
- Kou J., R.C. Phillips, D.I. Walker and H. Kirkman (eds.), 1996, *Seagrass Biology, Proceedings of an International Workshop*. University of Western Australia, Nedlands.
- Kreuter U.P., H.G. Harris, M.D. Matlock and R.E. Lacey, 2001, Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 39:333-346.
- Krishnamurthy K.V., 2003, *Textbook of biodiversity*. Enfield, NH: Science Publishers, 260p.
- Krutilla J.V., 1967, Conservation reconsidered. *American Economic Review*, 57:787-796.
- Kuo J. and A.J. McComb, 1989, Seagrass taxonomy, structure and development. In *Biology of Seagrasses*, A.W.D. Larkum, A.J. McComb and S.A. Shepherd (eds.) 6-37. Elsevier, Amsterdam.
- Kurz W.A. and M.J. Apps, 1993, Contribution of Northern forests to the

- global C cycle: Canada as a case study. *Water, Air and Soil Pollution.*, 70:163-176.
- Lappalainen A. and P. Kangas, 1975, Littoral benthos of the northern Baltic Sea 11. Interrelationships of wet, dry, and ash-free dry weights of macrofauna in the Tvarminne area. *Internal Review of Hydrobiology.*, 60:297-312.
- Laughland A.S., W.N. Musser, J.S. Shortle and L.M. Musser, 1996, Construct validity of averting cost measures of environmental benefits. *Land Economics*, 72(1):100-112.
- Lee S.M. and H.T. Odum, 1994, Emergy Analysis Overview of Korea, *Journal of Korean Environmental Sciences*, 3:165-175.
- Lee S.M., W.S. Kim and J.H. Son, 2001, Environmental accounting for the Saemangeum tideland reclamation project. In:(ed) *Emergy Synthesis II: Proceedings from the second biennial emergy analysis research conference*, Gainesville, FL. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- Lee S.M., W.S. Kim and J.H. Son, 2003, Emergy synthesis 2. Theory and applications of the emergy methodology. In: *environmental accounting for the Saemangeum tideland recalcation project*. 61-76.
- Lieth H., 1975, Modelling the primary productivity of the world. In *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer Verlag, New York, 237-263.
- Loomis J.B. and D.M. Larson, 1994, Total economic value of increasing Gray Whale populations: results from a contingent valuation survey of visitors and households. *Marine Resource Economics*, 9:275-286.
- Loomis J.B. and D.S. White, 1996, Economic benefits of rare and endangered species: summary and meta-analysis. *Ecological*

- Econmices, 18:197-206.
- Loomis J.B. and G. Helfand, 1993, A tale of two owls and lessons for the reauthorization of the endangered species act. *Choices*, 21-25.
- Loomis J.B., 1989, Test-retest reliability of the contingent valuation method: a comparison of general population and visitor responses. *American Journal of Agriculture Economics*, 71(1):76-84.
- Loomis J.B., and E. Ekstrand, 1997, Economic benefits of critical habitat for the Mexican spotted owl: a scope test using a multiple-bounded contingent valuation survey. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 22(2):356-366.
- Losey J.E. and M. Vaughan, 2006, The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience*. 56(4):311-323.
- Lu H.F., D.E. Campbell, J. Chen, P. Qin and H. Ren, 2007, Conservation and economic viability of nature reserves: An emergy evaluation of the Yancheng Biosphere Reserve. *Biological conservation*, 139:415-438.
- Lugo A.E. and S.C. Snedaker, 1974, The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology Systematics*. 5:39-64.
- MacNae W., 1968, A general account of the fauna and flora of mangrove swamps and forests in the Indo-West-Pacific region. *Advances in Marine Biology*, 6:73-270.
- Mayr E., 1969, *Principles of Systematic Zoology*. New York: McGraw-Hill.
- McNeely J.A., 1988, *Economics and Biological Diversity: developing and using economic incentives to conserve biological resources*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Melillo J.M., A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, III Moore, B.C.J.

- Vorosmarty and A.L. Schloss, 1993, Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363:234-240.
- Messier C., S. Parent and Y. Bergeron, 1998, Characterization of understory light environment in closed mixed boreal forest: effects of overstory and understory vegetation. *Journal of Vegetable Science*, 9:511-520.
- Mitchell R.C. and R.T. Carson, 1984, Willingness to pay for national freshwater improvements. Draft Book to USEPA, Resources for the Future, Washington DC, US.
- Nadelhoffer K.J., J.D. Aber and J.M. Melillo, 1985, Fine roots, net primary production and nitrogen availability: A new hypothesis. *Ecology*, 66:1377-1390.
- Noble I.R. and H. Gitay, 1996, Deserts in a changing climate: Impacts. In "Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses". Cambridge Univ. Press, New York.
- Nunes P.A.L.D., J.C.J.M van den Bergh and P. Nijkamp, 2003, The ecological economics of biodiversity. Edward Elgar, Cheltenham, UK Northampton, MA, USA. 165p.
- Odum H.T. and D.A. Hornbeck, 1997, Emergy evaluation of Florida Salt Marsh and its contribution to economic wealth. St. Lucie Press.
- Odum H.T. and J. Arding, 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador. Coastal Resources Center, University of Rhode island, Narragansett, RI.
- Odum H.T. and J.E. Arding, 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador: Coastal Resources Center, University of Rhode Island, Narragansett.
- Odum H.T., 1957, Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida. *Ecological Monographs*, 27(1):55-112.

- Odum H.T., 1971, Environment, Power and Society. John Wiley & Sons, New York, 331p.
- Odum H.T., 1983, Systems Ecology. John Wiley & Sons, New York.
- Odum H.T., 1988, Self organization, transformity, and information. Science, 242:1132-1139.
- Odum H.T., 1994, Ecological and General Systems. University Press of Colorado, Niwot.
- Odum H.T., 1996, Environmental Accounting, John Wiley & Sons, New York, 370p.
- Odum H.T., 2001, Energy evaluation of salmon pen culture. University of Florida Press.
- Odum H.T., and E.C. Odum, 1976, Energy Basis for Man and Nature. McGraw-Hill, New York, 296p.
- Odum H.T., M.T. Brown and S. Brandt-Williams, 2000, Folio 1. Introduction and Global Budget. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville.
- Odum W.E., C.C. McIvor and T.J. Smith III, 1982, The ecology of the mangroves of South Florida: A community profile, FWS/OBS-81/24. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.
- Orrell J.J., 1998, Cross scale comparison of plant production and diversity. Ms thesis. Department of Environmental Engineering Sciences. University of Florida, Gainesville.
- Pardo-Jartar, M.A. and M.T. Brown, 1996, Interface ecosystem with an oil spill in an Venezuelan tropical savannah. Ecological Engineering, 8:49-78.
- Pauly D. and V. Christensen, 1993, Stratified models of large marine ecosystems: a general approach and an application to the South

- China Sea. p. 148-174. In: T. Pitcher, E. Buchary, P. Trujillo (eds.), 2002 Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: ecological and economic forecasting of marine protected areas with human-made reefs. Fisheries Centre Research Reports, 10(3):95.
- Pearce D.W., 1990, An Economic Approach to Saving the Tropical Forests. LEEC Discussion, London Environmental Economics Centre, UK.
- Pearce D.W., 1993, Economic values and the natural world. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Pearsall W.H. and P.J. Newbould, 1957, Production ecology. IV. Standing crops of natural vegetation in the sub arctic. Journal of Ecology, 45(2).
- Phillipson J., R. Abel, J. Steel and S.R.J. Woodell, 1977, Nematode number, biomass and respiratory metabolism in an Beech Woodland-Wytham woods. Oxford, Oecologia, 27:141-155.
- Pina C.M., 1994, cited in P.A.L.D. Nunes, J.C.J.M. van den Bergh, P. Nijkamp. 2003. The ecological economics of biodiversity. Edward Elgar Publisher. Cheltenham. UK. 165p.
- Pitcher T., E. Buchary and P. Trujillo (eds.), 2002, Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: ecological and economic forecasting of marine protected areas with human-made reefs. Fisheries Centre Research Reports, 10(3):95p.
- Pitcher T.J., R. Watson, A. Courtney, and D. Pauly, 1998, Assessment of Hong Kong's inshore fishery resources. Fisheries Centre Research Reports, 6(1):81p.
- Pomeroy L.R., 2001, Caught in the food web: complexity made simple? Scientia Marina, 65(2):31-40.
- Powell S.W. and Jr.F.P. Day, 1991, Root production in four communities

- in the Great Dismal Swamp. *American Journal of Botany*, 78:288-297.
- Qin P., Y.S. Wong and N.F.Y. Tam, 2000, Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes. *Ecological Engineering*, 16:271-280.
- Raven P.H., R.F. Evert and S.E. Eichhorn, 1992, *Biology of plants*. Worth publishers, New York.
- Reid W.V. and K.R. Miller, 1989, *Keeping Options Alive: The Scientific Basis for Conserving Biodiversity.*, WRI, Washington.
- Reilly S.B. and J. Barlow, 1986, Rates of increase in dolphin population size. *Fishery bulletin*, 84:527-533.
- Repetto R., W. Magrath, M. Wells, C. Beer and F. Rossini, 1989, *Wasting Assets: Natural Resources in the National Accounts*, World Resources Institute, Washington.
- Rhoads D.C., 1973, The influence of deposit-feeding benthos on water turbidity and nutrient cycling. *Am. J. Sci.*, 273:1-22.
- Rhoads D.C., 1974, Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 12:263-300.
- Richer J., 1995, Willingness to pay for desert protection. *Contemporary Economic Policy*, XIII:93-104.
- Robertson A.I. and D.M. Alongi (eds.), 1992, *Coastal and Estuarine studies 41. Tropical Mangrove Ecosystems*. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Robertson A.I., 1979, The relationship between annual production: biomass ratios and lifespans for marine macrobenthos. *Oecologia(Berlin)*, 38:193-202.
- Rodin L.E. and N.I. Bazilevich, 1965, *Production and Mineral Cycling in Terrestrial Vegetation*. (English translation, G. E. Fogg, (eds.).

- Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 288p.
- Rönnbäck P., 1999, The ecological basis for economic value of seafood production supported by mangrove ecosystems. *Ecological Economics*, 29:235-252.
- Roy J., B. Saugier, and H.A. Mooney, 2001, Terrestrial global productivity. Academic Press, 573p.
- Ruitenbeek H.J., 1989, Social cost-benefit analysis of the Korup Project, Cameroon. Prepared for WWF UK and the Republic of Cameroon. In, Krishnamurthy K.V. 2003, Textbook of biodiversity. Enfield, NH Science Publ.
- Rundel P.W. and A.C. Gibson, 1996, Ecological communities and processes in a Mojave Desert Ecosystem: Rock Valley, Nevada. Cambridge Univ. Press, New York.
- Ryther J.H., 1960, Organic production by plankton algae, and its environmental control, In: C.A. Tyron, Jr. and R.T. Hartman (eds.), The ecology of algae, Spec. Publ. No.2, Pymat. Lab. Field Biol., Univ. of Pittsburgh.
- Samples K. and J. Hollyer, 1989, Contingent valuation of wildlife resources in the presence of substitutes and complement, in Johnson, R. and G. Johnson (eds), Economic valuation of natural resources: Issues, Theory and Application, Westview Press, Boulder, CO, US.
- Sattout E.J., S.N. Talhouk and P.D.S. Caligari, 2007, Economic value of cedar relics in Lebanon: An application of contingent valuation method for conservation. *Ecological Economics*, 61:315-322.
- Scatena F.N., S.J. Doherty, H.T. Odum and P. Kharecha, 2002, An Emergy Evaluation of Puerto Rico and the Luquillo Experimental Forest. General Technical Report IITF-GTR-9. U.S. Dept. of Agriculture Forest Service, International Institute

of Tropical Forestry, Rio Piedras.

- Seidl A.F. and A.S. Moraes, 2000, Global valuation of ecosystem services: application to the Pantanal da Nhecolandia, Brazil. *Ecological Economics*, 33:1-6.
- Sieburth J.M., V. Smetacek and J. Lenz, 1978, Pelagic ecosystem structure: Het-erotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology Oceanography*. 23:1256-1263.
- Silberman J., D.A. Gerlowski and N.A. Williams, 1992, Estimating existence value for users and nonusers of New Jersey Beaches. *Land Economics*, 68(2):225-236.
- Singh J.S., W.K. Lauenroth, and D.G. Milchunas, 1983, Geography of grassland ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 7:46-80.
- Stanley D.L., 2005, Local perception of public goods: recent assessments of willingness-to-pay for endangered species. *Contemporary Economic Policy*, 2:165-179.
- Stevens T.H., N.E. DeCoteau and C.E. Willis, 1997, Sensitivity of contingent valuation to alternativ payment schedules. *Land Economics*, 73:140-148.
- Strömberg K.H.P., T.J. Smyth, J.I. Allen, S. Pitois and T.D. O'Brien, 2009, Estimation of global zooplankton biomass from satellite ocean colour. *Journal of Marine Systems*, 77(4):367-528.
- Thomas P.A. and J.R. Packham, 2007, *Ecology of woodlands and forests, description, dynamics and diversity*, Cambridge University Press.
- Tilley D.R. and W.T. Swank, 2003, EMERGY-based environmental systems assessment of a multi-purpose temperate mixed-forest watershed of the southern Appalachian Mountains, USA. *Journal of Environmental Management*, 69: 213-227.

- Tilley D.R., 1999, Emergy basis of forest system. Ph.D Dissertation. Department of Environmental Engineering Sciences. University of Florida, Gainesville.
- Torras M., 2000, The total economic value of Amazonian deforestation, 1978–1993. *Ecological Economics*, 33:283–297.
- Trainor F.R., 1978, *Introductory Phycology*. John Wiley, New York.
- UNEP, 1995, *Global Biodiversity Assessment*, published for the United Nations Environment Programme, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- van Kooten G.C., 1993, Bioeconomic evaluation of government agricultural programs on wetland conservation. *Land Economics*, 69:27–38.
- Vassallo P., S. Bastianoni, I. Beiso, R. Ridolfi and M. Fabiano, 2007, Emergy analysis for the environmental sustainability of an inshore fish farming system. *Ecological indicators*, 7:290–298.
- Vogt K., 1991, Carbon budgets of temperate forest ecosystems, *Tree Phys.*, 9:69–86.
- Vranken G. and C. Heip, 1986, The productivity of marine nematodes. *Ophelia*, 26:429–442.
- Vranken G. P.M.J. Herman, M. Vincx and C. Heip, 1986, A re-evaluation of marine nematode productivity. *Hydrobiologia*, 135(3):193–196.
- Walker D.J. and D.L. Young, 1986, The effect of technical progress erosion damage and economic incentives for soil conservation. *Land Economics*, 62(1):83–93.
- Walsh R.G., J.B. Loomis and R.A. Gillman, 1984, Valuing option, existence, and bequest demands for wilderness. *Land Economics*, 60:14–29.
- Weber T., 1996, Spatial and temporal simulation of forest succession

- with implications for management of bioreserves. M.S. Thesis. University of Florida, Gainesville, FL.
- Weinbauer M.G. and B. Velimirov, 1995, Biomass and secondary productin of the temperate gorgonian coral *Eunicella cavolini*(Coelenterata: Octocorallia). Marine Ecology Progress Series, 121:211-216.
- Whitehead J., 1992, Ex ante willingness-to-pay with supply and demand uncertainty: implications for valuing a sea turtle protection programme. Applied Economics, 24:981-988.
- Whittaker R., 1969, New concepts of kingdoms or organisms. Evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. Science, 163:150 - 160.
- Whittaker R.H. and G.E. Likens, 1973, Carbon in the biota. In: Woodwell, G.M. and Pecan, E.V. (eds), Carbon and the Biosphere. AEC symposium series 30, 281-302, NTIS U.S. Dept. of Commerce, Springfield, Virginia.
- Whittaker R.H. and G.E. Likens, 1975, The biosphere and man. in: Primary Productivity of the Biosphere, eds. Leith, H. & Whittaker, R. H., Springer, New York, 14, 305-328.
- Wilson E., 1989, Threats to biodiveristy. Scientific American, 261(3):108-116.
- Zuo P., S.W. Wan, P. Qin, J. Du and H. Wang, 2004, A comparison of the sustainability of original and constructed wetlands in Yancheng Biosphere Reserve, China: implications from emergy evaluation. Environmental Science & Policy, 7:329-343.
- 강대석, 2005, Emergy개념과 생태계가치평가. 대한토목학회, 53(8):37-41.
- 강대석, 2007, 한강유역의 자연환경과 사회경제활동에 대한 Emergy 평가. 한국해양환경공학회, 10:138-147.

- 강대석, 남정호, 2003, 에머지 개념을 이용한 해양자원의 가치평가와 정책 활용방안, 한국해양수산개발원.
- 강대석, 남정호, 이석모, 2006, 영산강 4단계 간척사업 대상 갯벌생태계 가치의 Emergy 평가 및 경제학적 평가와의 비교. 한국환경과학회지, 15(3):243-252
- 강대석, 박석순, 1999, Emergy 개념을 이용한 다목적댐 건설의 생태경제학적인 평가방법에 관한 연구. 환경영향평가학회지, 8(2):45-51.
- 고철환, 박철, 유신재, 이원재, 이태원, 장창익, 최중기, 홍재상, 허형택, 1997, 해양생물학. 서울대학교출판부.
- 김남국, 김진이, 박동기, 이석모, 2008, 에머지(Emergy) 개념을 이용한 산지가치의 계량화에 관한 연구. 한국환경과학회지, 17(3):305-314.
- 김남국, 손지호, 김진이, 이석모, 2001, 시스템 생태학적 접근법에 의한 넙치생산의 지속성 평가 1, 넙치생산에 대한 Emergy 분석. 한국수산학회지, 34(3):218-224.
- 김남국, 손지호, 김진이, 조은일, 이석모, 2002, 시스템 생태학적 접근법에 의한 넙치생산의 지속성 평가 2, 넙치 육상양식산업에 대한 예측. 한국수산학회지, 35(6):660-665.
- 김영진, 2000, 환경회계에 의한 하천유역의 환경정책결정에 관한 연구. 부경대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 김영진, 김진이, 손지호, 이석모, 2001, 환경회계에 의한 낙동강 유역의 환경정책결정에 관한 연구. 한국환경과학회지, 10(2):85-90.
- 김준호, 서계홍, 정연숙, 고성덕, 이점숙, 임병선, 문형태, 이희선, 민병미, 오경환, 1993, 현대 생태학. 교문사, 414p.
- 김진이, 2000, 시스템 생태학적 접근법에 의한 낙동강유역의 지속적인 발전가능성 평가, 부경대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 김진이, 2007, 낙동강유역의 오염총량관리계획에 대한 환경회계. 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 김진이, 손지호, 김영진, 이석모, 2000, 낙동강 유역의 지속가능한 이용을 위한 Emergy 분석. 한국환경과학회지, 9(1):49-55.

- 손지호, 1999, Emergy 분석법에 의한 도시의 지속적인 발전가능성 평가. 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 엄기혁, 손지호, 조은일, 이석모, 박청길, 1996, Emergy 분석법에 의한 득량만의 환경용량 산정. 한국수산학회지, 29(5):629-636.
- 오윤식, 2006, 해산식물학. 월드사이언스.
- 오현택, 2008, 시스템생태학적 접근법에 의한 가막만 패류생산의 지속성 평가, 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 이광웅, 강봉균, 김영상, 김원, 백상기, 윤권상, 이종섭, 최청일, 홍영남, 2003, 생명, 생물의 과학, 교보문고.
- 이상태, 김무열, 홍석표, 정영재, 박기룡, 이정희, 이중구, 김상태, 2005, 식물분류학, 계통학적 접근 2, 신일상사.
- 이석모, 손지호, 강대석, 2000a, 시스템 생태학적 접근법에 의한 한국의 지속적인 발전가능성 평가(I)-한국의 자연환경과 경제활동에 대한 Emergy평가. 한국환경과학회지, 9(6):449-454.
- 이석모, 손지호, 김진이, 2001, 시스템 생태학적 접근법에 의한 한국의 지속적인 발전 가능성평가(II)-한국의 자연환경과 경제활동에 대한 미래예측. 한국환경과학회지, 10(2):91-97.
- 이영애, 2007, 낙동강 하구둑의 기능에 대한 Emergy 분석. 부경대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 이종욱, 김창환, 문태영, 2000b, 동물 계통학. 형설출판사.
- 이창근, 2009, 인천 갯벌의 생태적 가치평가와 저서생물에 의한 정화기능 가치. 인하대학교 해양과학과 박사학위논문.
- 제윤미, 이석모, 2004, Emergy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성지수 개발. 한국환경과학회지, 13(4):349-357.
- 주용수, 2006, 시화호 조력발전 건설사업에 대한 에머지 평가. 부경대학교 환경공학과 석사학위논문.
- 최영근, 2003, 국가와 지역시스템의 지속성평가에 대한 연구. 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.

감사의 글

대학원 박사과정의 모든 과정을 무사히 잘 마칠 수 있도록 은혜를 베풀어 주신 하나님께 먼저 감사와 찬양을 올립니다.

오늘의 이 박사논문이 있기까지 부족한 저에게 많은 격려와 용기를 주신 많은 분들에게 감사드립니다. 먼저 부족하지만 박사과정 기간 동안 아낌없는 가르침을 통하여 연구자로서 올바른 길을 갈 수 있도록 해 주시고 바쁘신 와중에도 논문의 사소한 부분까지 지도 해 주신 이석모 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 업무와 일정에도 불구하고 에머지 세미나를 통해 많은 가르침과 충고를 해 주신 강대석 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 심사과정에서 아낌없는 충고를 통해 논문이 더욱 완성될 수 있도록 지도를 해 주신 성기준 교수님, 김상단 교수님께 감사드리며 학부 1학년 때부터 지금까지 저를 만들어 주시고 진심어린 충고와 삶의 방향을 이끌어 주신 고신대 문태영 교수님께 진심으로 존경을 표합니다. 또한 대학원 과정에서 환경, 생태공학의 진정한 의미를 깨닫게 해 주신 박청길 교수님, 강임석 교수님, 정용현 교수님, 김동명 교수님께도 감사를 드립니다.

하천 및 해양 생태공학 연구실이라는 지붕 아래 함께 생활한 많은 동료들에게도 감사를 드립니다. 먼저 같이 대학원에 입학하면서 연구실에서 많은 도움을 줬던 신봉균, 그리고 방의 기둥으로서 논문 이외에 학문적으로 많은 도움을 준 김영운 후배, 많이 챙겨주지 못했지만 옆 자리에서 묵묵히 자기 일에 열심을 다한 곽혜민 후배, 그리고 조사와 실험과 같이 연구실의 힘든 일에 있어 항상 열심을 다하는 이광섭 후배, 직장에서 다시 연구실로 돌아와 열심히 공부한 문주훈 후배, 막 대학원에 입학하였지만 자기 꿈을 위해 노력하는 이병현, 이동주 후배, 항상 에머지와 관련하여 진지하게 같이 고민하여준 김남국, 임정혁 선배님, 이영애 후배와 비록 많은 시간 같이 하지 못하였지만 항상 격려하여 준 이수웅 선배님과 주용수, 정화숙 후배에게도 감사의 말을 전합니다.

나와 함께 12년 동안 동고동락 하면서 매년 힘들 때 마다 같이 고민하고 이겨내면서 함께 학문의 길을 묵묵히 걸어온 박상현 박사에게 고마움을 전하며 같이 논문 준비하면서 항상 잘 챙겨주고 배려 해 준 조윤식 박사님, 김윤빈 후배에게도 감사를 드립니다. 선배의 말에 항상 잘 대응해주면서 연구실의 분위기를 밝게 했고 부탁에 있어서도 불평 없이 다 들어주었던 홍성훈, 오주연, 조효선, 정우성 후배들에게도 감사의 말을 전합니다. 비록 먼저 졸업하여 지금은 각자 소속된 곳에서 열심히 일을 하고 있지만 한때 연구실에서 동고동락 하면서 정말 많은 도움을 줬던 김종명, 고승혁, 장혜현 후배에게 감사드리고 연구실에 대한 애정이 깊고 연

구실의 발전을 위해 항상 노력하였던 권혜옥, 조하나 후배 그리고 1여년 정도 같이 있으면서 참 많은 교감을 나누면서 항상 의지가 되었던 정직영 후배에게 감사드립니다. 지금은 태국에 있지만 한국에 유학와서 좋은 추억과 학문의 깊은 교감을 나눈 오미(Dr. Kankamnerd Jariya)와 앞서 연구자의 길을 걸으면서 후배에게 정말 좋은 조언과 충고를 하시면서 후배들의 진로와 학문적 연구에 많은 도움을 주셨던 김진만 박사님, 이성호 박사님, 김진이 박사님, 오현택 박사님 그리고 삶에 있어 지식보다 더 깊은 삶의 지혜를 말씀하여 주신 최영근 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 항상 젊게 사시고 정말 많은 활동과 열정을 보여주어 삶에 있어 많은 것을 배우게 하신 Laura에게 정말 감사하다는 말씀 드리고 싶습니다. 비록 다른 연구실이지만 대학원 생활동안 참 많은 도움을 줬던 김기섭, 이용민, 이자연, 김영아, 김보라, 이중현, 허민지 후배에게도 감사를 드립니다. 또한 에머지라는 학문을 같이 연구 하면서 세미나를 통해 항상 같이 고민했던 김가람, 임진아 후배들에게도 감사드리고 앞으로 더욱 좋은 공동의 연구자로 가길 바랍니다.

항상 어려울 때마다 깊은 조언과 좋은 말씀으로 항상 저를 생각하여 주시며 챙겨 주셨던 이성진 선배님, 학부 때부터 같이 연구실 생활하면서 서로에게 학문의 격려를 아끼지 않았던 윤일 선배님, 주승철 선배님, 도운호 박사, 김성경, 이희민, 송화섭, 이영대 후배들에게도 깊은 감사의 말을 드립니다.

과거 하천연구센터 시절 무척 저를 아끼시고 많은 많은 도움을 주신 구영기 선생님과 이준경 처장님, 그리고 이연정, 최대현, 김양숙 선생님에게도 감사의 말을 전합니다. 대진학원에서 항상 좋은 말씀 해주시고 많은 도움을 주셨던 박재완 원장님과 김미정, 조정녕, 이지영 선생님들께 감사드립니다. 그리고 마지막까지 친구의 성공과 발전을 위해 기도하고 응원하여 준 최민호, 황호정 강도사 부부와 황성희에게도 감사드립니다.

친한 친구로서 그리고 진정한 인생의 조언자로서 항상 힘들 때 마다 서로에 의지가 되었던 이현정에게 감사드리며 일본 학회에서 많은 도움을 주신 일본 카나자와 대학의 홍천상 박사님 그리고 수영로 교회에서 저의 논문과 비전을 두고 함께 기도하여 준 조가현, 정현직, 명선, 박미화, 김동현에게도 감사를 드립니다.

항상 조카가 잘되기만을 바라신 큰 고모와 큰 고모부 그리고 대학원 기간 내내 조카 뒷바라지 하면서 고생하신 작은 고모와 작은 고모부께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 또한 논문 쓰는 과정에서 가족으로서 많은 격려와 응원을 하여준 동생 현정이, 성래, 래경이, 은지, 세계, 민경이 모두 모두 감사드립니다.

항상 건강하고 강한 아들이 되기를 바라시며 든든한 후원자가 되어주신 아버지와 부족하지만 아들이 잘 되기만을 항상 바라시며 뒤에서 묵묵히 기도로 아들을 응원하여 준 어머님께 이 작은 결과를 바칩니다.