



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](#)

공학석사 학위논문

온실가스 감축을 위한 바다숲
조성사업의 에머지 비용·편익 평가



부 경 대 학 교 대 학 원

생 태 공 학 과

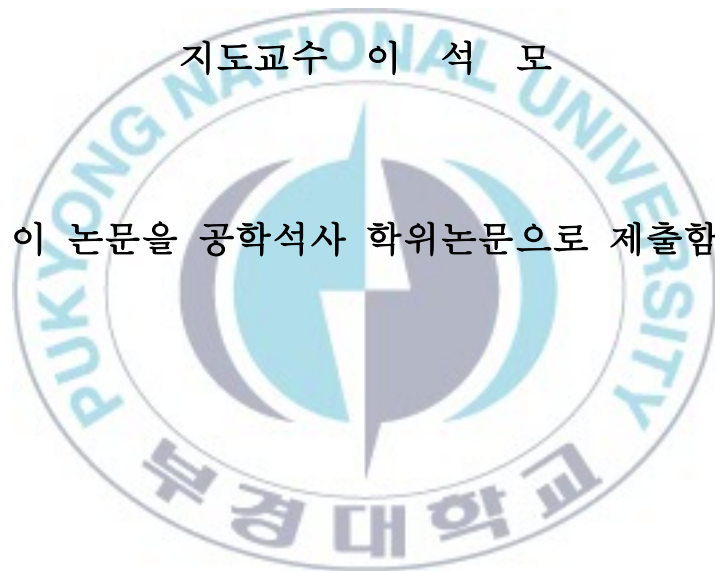
이 병 현

공학석사 학위논문

온실가스 감축을 위한 바다숲
조성사업의 에머지 비용·편익 평가

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2012 년 2 월

부경대학교 대학원

생 태 공 학 과

이 병 현

李炳賢의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2012 년 2 월



주 심 공학박사 김 동 명 ㉠

위 원 수산학박사 최 창 근 ㉠

위 원 공학박사 이 석 모 ㉠

목 차

I. 서론	1
II. 이론적 배경	4
1. 온실가스와 온실가스 감축정책	4
가. 우리나라 온실가스 배출현황	4
나. 국가 온실가스 감축정책	7
다. 지자체 온실가스 감축정책	9
2. 바다숲 조성사업	11
가. 갯녹음 현상	11
나. 바다숲 조성사업의 개념	14
다. 바다숲 조성사업의 평가	16
3. 시스템 생태학과 에머지	19
가. 시스템 생태학	19
나. 에머지	21
다. 에너지 변환도	22
III 연구 방법	25
1. 평가 대상	25
가. 온실가스 감축정책 선정	25
나. 바다숲 조성사업 평가자료	27

2. 에머지 평가과정	29
가. 에너지 시스템 다이어그램 작성	29
나. 에머지 분석표 작성	30
다. 에머지 지수 계산	32
3. 에머지 비용·편익 평가	36
 IV. 결과 및 고찰	37
1. 바다숲 조성 사업의 에너지 시스템 다이어그램	37
2. 바다숲 조성 사업의 에머지 평가표	39
3. 바다숲 조성 사업의 에머지 지수	42
4. 바다숲 조성 사업의 비용·편익 평가	43
 V. 결론	48
 참고문헌	50
 Appendix	53

표 목 차

Table 2.1. Position of GHG emission for Korea	5
Table 2.2. Categories of emission	6
Table 2.3. Comparison of GHG emission prediction and reduction scenario	8
Table 2.4. Present condition of whitening event	12
Table 2.5. Construction situation for marine afforestation	15
Table 2.6. Increase of fishery incoming for marine afforestation	16
Table 2.7. Benefit of carbon dioxide reduction for marine afforestation	17
Table 3.1. GHG reduction plan for Busan Metropolitan city	25
Table 3.2. Summary of marine afforestation	29
Table 3.3. Tabular format for emergy evaluation	31
Table 4.1. Emergy table of marine afforestation	40
Table 4.2. Emergy indices of marine afforestation	43
Table 4.3. Emergy cost-benefit evaluation of marine afforestation	44
Table 4.4. Emergy cost-benefit evaluation of marine afforestation with the sales of CERs	45

그림 목 차

Fig. 2.1. A road map of Busan metropolitan city GHG reduction plan	10
Fig. 2.2. Whitening event	13
Fig. 2.3. Marine afforestation	15
Fig. 2.4. The methodological roots of systems ecology	20
Fig. 2.5. Emergy quality chain used to calculate solar transformity	22
Fig. 2.6. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity	24
Fig. 3.1. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right	30
Fig. 3.2. Emergy based indices, accounting for renewable emergy inputs, nonrenewable inputs, purchased inputs from outside the system and yield from system	33
Fig. 4.1. Energy systems diagram for marine afforestation	38
Fig. 4.2. Emergy signature of marine afforestation	41
Fig. 4.3. Contribution of emergy for marine afforestation	41

Emergy evaluation of marine afforestation for GHG reduction

Byung Hyun Lee

*Department of Ecological engineering, Graduate school,
Pukyong National University*

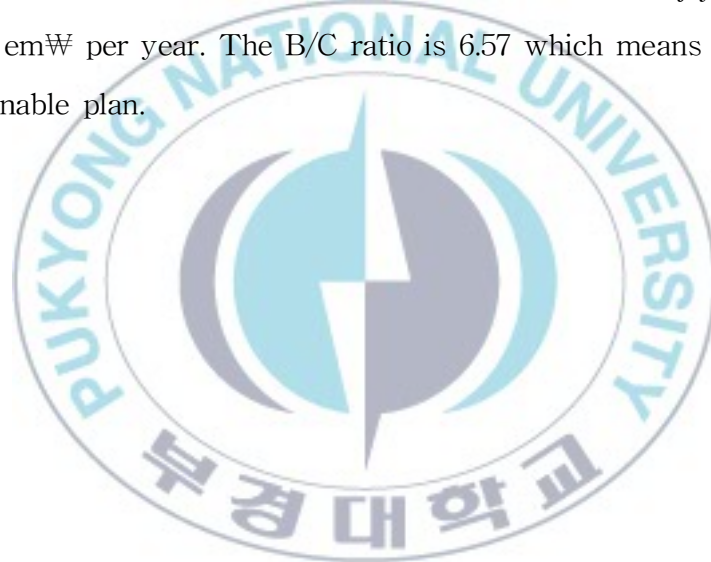
Abstract

Use of fossil fuel after the industrial revolution made the life of Human being wealthier, but the green house gases emission due to the use of fossil fuel is now threatening the lives of human being. Therefore reduction of green house gas emission in global stage is on the way as well as the local government. Studies on reduction of green house gas emission only show the result of reduction plan disregarding the cost of energy and materials due to the reduction plan. This study uses the emergy analysis that uses solar emergy to evaluate natural environment and human being's economic value as a common measure on marine afforestation which is one of the green house gas reduction plan of Busan.

As a result, total yield of marine afforestation is $4.50\text{E}+17$ sej/yr and 60.2% of it is based on renewable source. The amount of purchased

inputs from outside system is $1.79\text{E}+17$ sej/yr which is 39.8% of total yield. Therefore the marine afforestation is based more on renewable source.

Emergy Yield Ratio(EYR) of the marine afforestation is 2.51 which means it is an efficient system. Environmental Loading Ratio(ELR) of the marine afforestation is 0.66 and Environmental Sustainability Index(ESI) is 3.80 which means it is low environmental loading sustainable system. Net production of the marine afforestation is $9.97\text{E}+17$ sej/yr, which is 375million em $\text{\$}$ per year. The B/C ratio is 6.57 which means this system it is reasonable plan.



I. 서론

18세기 중엽 영국에서 산업혁명을 시작으로 인류는 기술혁신에 따른 산업화와 공업화로 풍족하고 편리한 생활을 영위하게 되었으나, 인구의 급속한 팽창과 대량소비에 따른 환경오염이라는 부산물이 생성되었다. 급격한 도시화와 무리한 토지이용의 변화, 인간의 활동에 따른 화석연료와 생물체의 연소 등은 기후변화를 야기시켰다. 이에 따라 생물의 멸종, 기상이변 현상, 해수면의 상승, 사막화, 생태계 변화 등에 의해 인류의 건강과 사회, 경제적 활동에 이르기 까지 인류의 생명을 위협하고 있다. 한편 지난 100년간 우리나라는 1.5℃ 기온이 상승하였고, 제주도의 경우 해수면이 40년간 22cm 상승하는 등 기후변화가 빠른 속도로 진행되고 있음을 알 수 있다(환경부, 2009).

온실가스 감축을 위해 국제사회는 세계 선진국들을 중심으로 기후변화협약을 체결하고 있으며, 가입된 나라들은 기후변화협약에 따라 화석연료의 소비 저감 및 온실가스 배출 억제를 위해 노력하여야 한다는 의무를 지니게 되었다. 우리나라는 기후변화협약에 가입할 당시 개발도상국의 지위에 있었기 때문에 2012년까지는 온실가스 감축에 대한 강제성이 없는 상태이지만, OECD 회원국이며 온실가스 배출량이 세계 10위권에 이르기 때문에 2013년 이후부터는 온실가스 의무감축국 편입이 불가피 할 것으로 예상되고 있다(부산광역시, 2010).

이에 우리 정부도 ‘저탄소 녹색성장 기본법’, ‘국가 온실가스 중기 감축목표 설정’ 등을 통해 국제적 움직임에 적극 동참하여 나가고 있다. 정부는 2008년 9월부터 국책연구기관 중심의 연구팀을 구성하여 온실가스 배출전망과 감축 잠재량을 분석하였으며, 분석결과를 토대로 감축목표와 감축수단이 포함된 3개의 시나리오를 제시하였다. 우리나라의 감축목표는 BAU(Business As

Usual) 대비 30% 감소로 미국, EU, 일본 등의 선진국보다 높은 수준으로 평가되었다(김, 2010).

한편 기후변화협약은 국가를 온실가스 감축의 단위주체로 지정해 가입국에게 온실가스 저감에 대한 기본 원칙과 이행사항을 부여하였지만, 각 국가들의 도시화, 산업화 진행과정에서 급속하게 성장한 도시나 지자체들이 주요 온실가스의 배출원으로 인식되면서 온실가스 감축의 실제 이행주체로서 도시, 지자체의 역할이 중요시되고 있다(부산지역환경기술개발센터, 2010). 국내의 경우에는 환경부가 온실가스 감축을 위해 국가·정부의 리더쉽과 함께 실행주체로 도시, 지자체의 노력을 중요시 하고 있어 각 지자체는 온실가스 배출정보를 파악하고 온실가스의 감축목표 및 감축계획을 수립하고 있다(환경부, 2010).

부산광역시는 기후변화대응 종합계획(2010)을 통하여 온실가스 배출량 현황과 2020년까지의 온실가스 배출량을 전망하였고, 이를 바탕으로 기후변화 대응 및 저탄소 사회의 구현을 위한 정책목표 및 방향의 설정과 온실가스 감축 목표 달성을 위한 연차별 시행계획을 수립하였다. 부산광역시에서 배출되는 온실가스의 총량은 19,834톤으로 산정되었고 에너지 부문이 전체의 89.9%를 차지하는 특징을 나타내었다. 효과적인 온실가스 감축을 위해 가정 부문, 상업·공공 부문, 산업 부문, 수송 부문, 공통 부문으로 구분하여 구체적인 사업을 제시하고 있다.

우리나라는 온실가스에 대한 국가 및 지자체의 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 국가 및 지자체, 시차원의 연구들은 온실가스 배출량 현황 및 장래전망과 감축정책 및 감축정책 별 온실가스 감축잠재량만 제시하고 있어 온실가스 감축정책 시행시 소요되는 여러 가지 비용과 물질, 에너지 등이 전혀 고려되지 못하는 문제점이 있다. 온실가스 저감을 위한 정책들이 온실가스 발생을 줄일 수 있지만, 더 많은 비용과 물질, 에너지 등이 투입되어

오히려 대상시스템에 악영향을 끼칠 우려가 있다.

부산광역시는 공통 부문의 사업으로 연안 해역에 대규모 바다숲을 조성하여 탄소 흡수원으로 활용하려 한다. 바다숲 조성사업은 이산화탄소 저감에 크게 기여할 뿐 아니라 수산자원의 증강, 어업생산력 증대 및 어업인의 안정적인 소득 기회를 제공하고, 유어 낚시와 스킨 스쿠버 등 해양레포츠 수요 확산에도 기여하는 등 많은 이점을 가진다(강, 2011). 삼면이 바다인 우리나라는 해조류 생산량이 세계 4위 수준이며, 해조류 양식이 유리해 이를 활성화 시켰을 때 온실가스 감축, 어민 소득 증대, 식품 가공 기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다(기후변화협약대책위원회, 2007).

따라서 본 연구에서는 생산물이나 서비스를 만드는데 들어가는 모든 에너지를 한 가지 형태의 에너지로 표현하며 자연환경과 인간의 경제활동을 동일한 척도로 평가하는 에머지(Emergy) 개념을 이용해, 부산광역시에서 제시한 온실가스 감축정책 중 바다숲 조성사업에 대해 에머지 관점에서의 비용과 편익을 평가해보았다. 국내에서 바다숲 조성사업에 대한 경제적 비용·편익 평가의 사례는 있으나, 에머지 개념을 이용한 평가 사례는 없다.

본 연구는 바다숲 조성사업에 이용되는 직·간접적인 에너지에 대한 통합평가를 통하여 실질적인 가치를 평가하고 바다숲 조성사업의 효율성과 지속가능성을 평가하여 진정한 의미에서의 저탄소 녹색성장을 이룩할 수 있는 온실가스 감축정책으로서의 타당성을 판단하고자 하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 온실가스 감축정책

가. 우리나라 온실가스 배출현황

지구온난화 문제를 해결하기 위해 선진국을 중심으로, 국가 간 기후협약을 체결하여 글로벌 차원의 대응을 추진하고 있다. 기후변화협약은 1992년 5월 유엔환경개발회의에서 채택되어 1994년 3월 공식적으로 발효된 국제협약이다(교통안전공단, 2009). 기후변화협약은 대기 중 온실가스 농도가 인간이 기후체계에 위험한 영향을 미치지 않는 수준에 도달하는 것을 목표로 하고 있으며 형평성, 공통의 차별화된 책임, 대응능력, 지속가능발전 등을 원칙으로 하고 있다. 우리나라는 1993년 12월 세계 47번째로 가입하였으며, 현재 일본, 우리나라 등을 포함하여 186개국이 가입된 상태이다(환경부, 2009).

우리나라는 기후변화협약에 가입할 당시에 개도국의 지위로서 2012년까지는 온실가스 감축 의무가 없었지만 2012년 이후 OECD국가이면서 온실가스 배출량이 세계 10위권인 우리나라도 2013년 이후에는 선진국들이 우리나라에 대해 의무감축국으로 편입하거나 다른 개도국과 차별화되는 감축행동을 할 것을 요구하고 있는 실정이다(부산광역시, 2010).

우리나라는 Table 2.1과 같이 2005년 기준 온실가스 총배출량은 591백만 CO₂톤으로 OECD 가입국 중에서 6번째로 많은 온실가스를 배출하고 있다. 1990년 대비 98.7% 증가하였고 이 중 에너지·산업 공정 부문이 95.3%의 높은 비중을 차지하였으며, 배출량 증가율은 OECD 국가 중 제일 높은 것으로

나타났다(국무조정실, 2007).

Table 2.1. Position of GHG emission for Korea

Indices of emission	Korea's position	Grade	Comparison of other countries
Total emission	5.9 hundred million ton CO ₂	6th	1st U.S.A, 2nd Japan
Rate of increase ('90~'04)	90.1%	1st	2nd Turkey, 3rd Spain
Emission per GDP	0.59 ton/thousand dollars	8th	1st Australia, 7th U.S.A
Emission per capita	12.28 ton/person	14th	1st Luxemburg

온실가스 배출 부문 중에서 에너지 부문이 차지하는 비중은 '06년 기준으로 84.3%를 차지하였고, '90 ~ '06년 사이에 4.6% 증가해 매년 증가하고 있는 것으로 나타났다(Table 2.2). 우리나라는 화석연료 중심의 에너지 다소비형 소비 구조이며 중화학 공업, 철강, 자동차, 조선 등 에너지 다소비 산업이 주력산업이다. 전 산업에서 에너지 다소비 업종의 비중은 '06년 기준 8.0%로 일본 4.6%, 미국 3.1%보다 그 비중이 크다. 전체 에너지원 중 화석연료 의존율은 80%에 육박해 에너지 다소비 산업에 대한 의존도가 높은 우리나라의 경제·사회적 구조가 온실가스 배출량 증가의 핵심 원인이다.

우리나라는 선진국 중심의 기후변화 규제 정책에 신속히 대응하기 어려운 산업구조를 보유하고 있으며, 녹색산업·기술 수준 역시 취약하기 때문에 온실가스 배출규제를 도입할 경우, 단기적 감축비용 부담이 높고, 이는 산업의 국제경쟁력 저하를 초래할 수 있다고 보고되고 있다(녹색성장위원회, 2009b).

Table 2.2. Categories of carbon dioxide emission for Korea('90 ~ '06)

Categories of emission	'90	'00	'04	Rate of increase	'05	Rate of increase	'06	Rate of increase	'90 ~ '06 Rate of increase
Energy	247.7	438.5	489.0	1.6	498.5	1.9	505.4	1.4	4.6
Industrial process	19.9	58.3	68.5	0.4	64.8	-5.3	63.7	-1.8	7.5
Agriculture	13.5	17.0	16.4	2.6	16.1	-1.9	15.1	-6.4	0.7
Wastes	17.0	17.2	16.5	-3.3	14.9	-9.5	15.4	2.9	-0.6
Total emission	298.1	531.0	590.4	1.4	594.4	0.7	599.5	0.9	4.5
Use of land /forestry	-23.7	-37.2	-31.5	-6.7	-32.0	1.5	-31.2	-2.5	1.7
Net emission	274.4	493.8	559.0	1.9	562.4	0.6	568.4	1.1	4.7

나. 국가 온실가스 감축정책

우리나라는 지금 단계에서 선진국과 같은 수준의 감축의무를 부담하는 것은 경제성장을 포기하는 것과 같은 의미로 선진국 수준의 온실가스 감축은 현실적으로 힘들다. 하지만 우리나라는 현재 온실가스 감축에 적극적인 동참 의사를 표명하고 있고, 국내 상황을 올바로 파악하고 국제사회에 대응하기 위해 적극적인 자세로 임하고 있다(교통안전공단, 2009).

범지구적 기후변화대응 노력에 동참하고 녹색성장을 통한 저탄소사회 구현이라는 비전을 제시하는 “기후변화대응 종합기본계획”을 국무총리실 기후변화대책기획단은 2008년 9월 19일 수립·발표 하였다. 또한 2009년 7월 기후변화대응 종합기본계획을 확대발전시키는 형태의 기본계획인 “녹색성장 국가전략 및 5개년계획”을 수립·발표 하였다(김, 2010).

또한 정부는 2009년 11월 17일 국무회의를 통해 국가 온실가스 중기 감축 목표를 확정하였다. 2008년 7월 G-8 확대정상회의시 대통령의 금년중 중기 감축목표를 발표한다는 선언을 시작으로 당해 9월부터 국책연구기관을 중심으로 연구팀을 구성하여 약 10개월 동안 국제적 기준의 모형과 분석체계를 통해 온실가스 배출전망과 감축잠재량을 국내 최초 체계적·통합적 분석을 실시하였다. 분석된 결과를 검토위원회로 하여금 신뢰성을 검증하고, 검증결과를 토대로 보완작업을 실시하였다(녹색성장위원회, 2009a).

BAU에서 감축수단 및 비용을 고려한 추가 감축잠재량을 분석한 결과와 국제사회 요구 수준 등을 감안하여 3개의 시나리오를 마련하였고 이에 대해 토론회를 통해 각계 의견 수렴 및 여론조사 결과 등을 토대로 최종적으로 3안을 확정하였다. Table 2.3과 같이 첫 번째 시나리오는 BAU 대비 21% 감축 수준으로 그린홈, 그린빌딩 보급 확대 등을 감축정책으로 채택하고 있다.

두 번째 시나리오는 BAU 대비 27% 감축 수준으로 지구온난화지수가 높은 불소계가스 제거, 하이브리드카 보급 등을 감축정책으로 채택하고 있다. 세 번째 시나리오는 BAU 대비 30% 감축으로 개도국 최대의 감축 수준이다. 차세대 그린카 보급, 최첨단 고효율제품 확대 등을 감축정책으로 채택하고 있다. 각 시나리오별 감축수단은 이전 시나리오의 감축수단을 포함하고 있고 가구당 부담금액은 13만원(시나리오 1), 16.6만원(시나리오 2), 21.7만원(시나리오 3) 정도이다(김, 2010).

Table 2.3. Comparison of GHG emission prediction and reduction scenario

Scenario	goal of reduction		main reduction plan
	comparison of BAU	'05 emission	
1	△21%	+ 8%	expansion of green home, green building LED low carbon dioxide·high efficiency transit system green process Renewable Energy, nuclear power generation smart grid
2	△27%	.	removal of SF ₆ , HFCs, PFCs hybrid car biofuel use CCS green car
3	△30%	△4%	using high tech and efficiency product reinforce on CCS

다. 지자체 온실가스 감축정책

기후변화협약은 참여하는 국가를 단위주체로 지정하여 온실가스 저감에 대한 기본원칙과 이행사항을 부여하고 있다. 하지만 도시화, 산업화에 의해 급속하게 성장한 도시나 지방들이 온실가스의 배출원으로 인식되어 온실가스 감축주체로서의 도시, 지방들의 역할이 중요시 되고 있다(부산환경기술개발센터, 2010).

우리나라의 경우, 환경부가 온실가스 저감을 위한 지방자치단체의 역할과 범위를 설정하고 있어 지자체 및 시차원의 기후변화대응에 대한 적절한 대책 수립이 필요하다. 또한 환경부는 2007년 하반기부터 기후변화대응 시범도시 MOU(Memorandum Of Understanding)를 체결해 지역의 특성에 맞는 온실가스 감축 프로그램 개발 및 중앙-지자체간의 유기적인 협력체제를 구축하고 있다(부산광역시, 2010).

강원도(2005), 경기도(2006), 대전시(2006), 부산시(2007), 서울시(2006), 충청남도(2006), 충청북도(2004) 등은 각 지자체별 기준연도를 정하여 온실가스 배출량을 산정하였고 이를 바탕으로 배출전망을 도출하여 각 지역의 특성에 맞는 온실가스 저감방안을 제시하였다.

부산광역시 기후변화대응 종합계획(2010)은 부산광역시 온실가스 배출량 조사용역(2007)을 일부 수정하여 부산광역시의 온실가스 배출현황과 온실가스 배출량 전망을 제시하고 있다. 또한 온실가스 배출량을 감축하기 위한 대책으로서 현재까지 시행 중인 기존 계획과 온실가스 감축목표 달성을 위한 추가 감축대책을 도출하였다. 그리하여 효율적·계획적 기후변화대응계획 추진을 위해 로드맵을 작성하였다(Fig 2.1).

적감역	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	적감률
그린홈(5.00 가구) 보급확대	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	9,220
에너지 자립형 저탄소 그린타운 조성	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	48
주거단소 배출량(에너지효율) 등급제 확산(국가정책)	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	정성
그린리더 1인당 육성 지원 사업	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	정성
공급의무화제도(EPC) 도입 (국가정책)	0%	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	555,818
도시가스 보급확대	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	186,960
산업계 온실가스 저감대책 수립 유도	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	정성
중소기업의 온실가스 저감 교육 홍보 강화	56%	67%	78%	89%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
산업부문 바이오디젤 확대	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25%	50%	75%	100%	정성
산업계 에너지 목표관리제(국가정책)	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	정성
생태산업단지 조성	0%	25%	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
지역에너지효율(에너지 진단지원)	0%	33%	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
건물관리에너지시스템(BEMS) 도입	0%	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	정성
공공기관 에너지효율관리제(국가정책)	0%	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	92%	정성
꼭도 해상풍력사업단지 건설	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	7,910
복지시설 신재생에너지 보급	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	33
소수력 발전소 건설(영장, 회동수월지)	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	684
소형조 태양광 발전기 보급(영장, 회동수월지)	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	3,604
수소에너지 시범단지 조성	0%	17%	33%	50%	67%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	3,004
해상풍력발전단지 조성사업	33%	40%	47%	53%	60%	67%	73%	80%	87%	93%	100%	350,444
고효율 LED 조명 공공기관 실내용 보급	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	14,550
광안대로 LED 교체	25%	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	5,084
도로주요 LED 교체	38%	44%	50%	56%	63%	69%	75%	81%	88%	94%	100%	9,700
산수도 관전시설 LED	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	660
육외광교 LED조명등 시범사업 조성	11%	22%	33%	44%	56%	67%	78%	89%	100%	100%	100%	정성
LED 교통신호등 보급 확대	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	27,141
생육에너지 LED 발전시설 운영	40%	47%	53%	60%	67%	73%	80%	87%	93%	100%	100%	4,572
생물자원을 연료화 및 전열보일러 건설	50%	67%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	74,295
소각장 여열 활용	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	42,479
녹색학교 조성	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	7,744
승용차 요일제 운행차 추진	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	86,795
예고 드라이브(경제운전) 활성화	23%	31%	38%	46%	54%	62%	69%	77%	85%	92%	100%	71,233
경유차 바이오에너지 보급	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	175,182
선박에 대한 바이오디젤 공급	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	16,940
국가 자전거 도로 구축	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	267
동부산 관광안내자 자전거 도로확충	0%	0%	17%	33%	50%	67%	83%	100%	100%	100%	100%	44
자전거 배출가스(국가정책)	0%	0%	25%	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2,673,870
자전거 도로 네트워크	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	369
고효율 어선 유통정밀검사 및 LED 등 지원	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	61,967
간선급행버스체계(BRT) 구축	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	12,550
경차 보급 및 이용확대	23%	31%	38%	46%	54%	62%	69%	77%	85%	92%	100%	38,598
그린카 보급확대(국가정책)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	258,786
대중교통 차량운행의 구축	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2,000
대중교통 전용지구 구축	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	590
자동차 공회전 제한장치 도입	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	108,091
제한구역(원격구역) 추진	33%	40%	47%	53%	60%	67%	73%	80%	87%	93%	100%	8,283
지능형 교통체계(ITS)사업추진	67%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	80,000
환경형 자동차 보급확대	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	6,882
그린스타트 네트워크 구성·운영	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%	1,421,606
부산시 기후변화 정책방향 및 탄소포인트제 홈페이지 운영	0%	0%	0%	0%	14%	29%	43%	57%	71%	86%	100%	정성
탄소 종합 프로그램 통합	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	2,000
탄소포인트제 운영	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	정성
가솔린·축하 및 정비	0%	25%	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
공회전(제한) 수축률 조성	14%	29%	43%	57%	71%	86%	100%	100%	100%	100%	100%	346
그린 하이웨이 조성	20%	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
그린웨이 조성	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
기온 및 난방 건물 옥상녹화	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	12,768
녹색 숲가꾸기	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	227,200
도시 작은 숲 조성	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	3,648
도시지 하단 녹지공간 확충	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	100
바다숲 조성(국가정책)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	514,000
부산시민공원 조성	17%	33%	50%	67%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	301
사상 환경복원 녹화	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	56
산림 복원해 방지	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	정성
산림자원 체계적 보호	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	1,472
소규모 바다목장 조성	40%	60%	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	6,425
시장사 옥상 비오름 조성	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	1,017
양평 공영 조성	50%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	6
음속도 생태공원 조성	14%	29%	43%	57%	71%	86%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
조립사업	9%	18%	27%	36%	45%	55%	64%	73%	82%	91%	100%	2,816
기후저지대 온실가스 배출량 상향(국가사업)	0%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성
오염물질 통합관리 방안 마련	0%	0%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	정성

Fig. 2.1. A road map of Busan metropolitan city GHG reduction plan.

2. 바다숲 조성사업

가. 갯녹음 현상(Whitening event)

갯녹음 현상은 연안에서 물리·화학·생물학 등 여러 요인에 의해서 엽상형 해조류가 소멸되고 시멘트와 같은 석회질로 된 암반 피복성 홍조류인 무절산호조류가 암반을 뒤덮는 현상이다. 몇몇의 석회성 식물이 암반을 우점하면 연안에 서식하는 해조류가 줄어들어 해조류를 먹이원으로 하는 무척추동물의 자원 감소를 유발할 뿐만 아니라, 바다숲을 서식, 산란 및 성육장으로 이용하는 다양한 해양생물의 자원량에도 큰 영향을 미쳐 종다양성이 낮아지는 등 심각한 해양 생태적 문제를 유발한다(국립수산과학원, 2009).

갯녹음 현상의 발생 원인은 지구 온난화에 의한 해수온도 상승, 매립·간척에 따른 부유물 발생 등의 물리적 요인, 영양 염류 부족과 환경오염 증가 등의 화학적 요인, 해조류를 섭식하는 조식동물 증가 등의 생물학적 요인 등 다양하게 나타나고 있다(김, 2010).

우리나라는 Table 2.4와 같이 1980년대 이후부터 제주도와 남해안 일대의 해역에서 갯녹음 현상이 나타나기 시작하였고, 1990년대 이후에는 동해 연안에서도 갯녹음 현상에 의한 피해들이 나타나고 있다. 2008년도 전국의 마을어장 35,101ha 중 6,954ha(19.8%)가 갯녹음 현상으로 피해를 받고 있어 수산업이나 환경·생태적 측면에서도 심각한 문제를 겪고 있다(강, 2011).

Table 2.4. Present condition of whitening event

Classification		Fishery area(ha)	Occurrence area(ha)	Occurrence rate(%)
All parts of the country		35,101	6,954	19.8
Kangwon	Goseong	3,489	48	1.4
	Sokcho	551	15	2.7
	Yangyang	1,854	26	1.4
	Gangneung	2,890	118	4.1
	Donghae	573	182	31.8
	Samcheok	1,859	540	29
	subtotal	11,216	929	8.3
Gyeongbuk	Pohang	2,973	571	19.2
	Gyeongju	554	73	13.2
	Yeongdeok	1,372	225	6.4
	Uljin	2,730	340	12.5
	Ulleung	793	102	12.9
	subtotal	8,422	1,311	15.6
Ulsan		1,012	173	17.9
Jeju		14,451	4,541	31.4

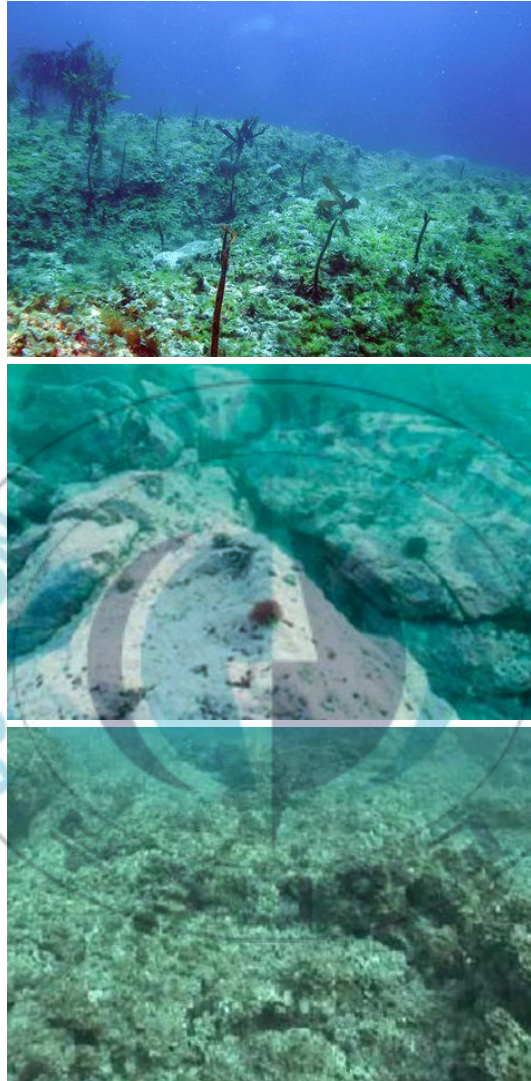


Fig. 2.2. Whitening event(권, 2008).

나. 바다숲 조성사업의 개념

갯녹음 현상에 대응하기 위하여 농림수산식품부는 유용한 해조류를 인공적으로 이식·부착시키는 바다숲 조성사업을 추진해오고 있다(김, 2010). 바다숲은 감태, 곰피와 같은 암초성 다년생 대형갈조군락이 높은 밀도로 서식하고 있는 해역을 일컬으며(오, 2010), 바다숲 조성사업은 갯녹음 현상에 대응하기 위하여 유용한 해조류를 인공적인 구조물에 이식·부착하여 해양환경을 개선시킴으로써 수산자원의 산란과 서식을 유리하게 하는 자원조성사업을 말한다(김, 2008).

해조류는 1차 생산자로서 이산화탄소를 흡수하여 바다의 기초생산력 증대의 효과를 가져 오고, 어류의 산란장, 은신처 등 유용 수산자원의 생육장을 제공하는 역할을 한다. 또한 바이오 대체에너지 및 신물질 개발에도 유용하게 쓰일 수 있으며(수산자원사업단 홈페이지), 어업생산력 증대로 어업인의 안정적인 소득 기회를 제공하고 해양레포츠 수요확산에도 크게 기여하는 등(강, 2011) 생태적, 경제적 측면에서 큰 도움이 될 수 있다(해양수산부, 2006).

국내의 바다숲은 Table 2.5와 같이 2002년부터 2009년까지 191억원의 사업비가 투입되어 667ha 면적에 달하는 바다숲이 조성되었으며(강, 2011), 농림수산식품부는 2009년 ~ 2012년까지 갯녹음 및 오염심화 지역에 750억원을 투입하여 7,000ha의 바다숲 시범 지역을 조성 중이며, 2013년 ~ 2020년까지 3,110억원을 투입해 28,000ha의 연안 대규모 바다숲 조성을 계획하고 있다(농림수산식품부, 2010b).

Table 2.5. Construction situation for marine afforestation

Classification	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total
area (ha)	65	60	60	60	81	74	121	146	667
Budget (millionwon)	1,250	1,250	1,250	1,938	2,375	2,250	3,850	4,938	19,101



Fig. 2.3. Marine afforestation(<http://www.depc.co.kr/>).

다. 바다숲 조성사업의 평가

강(2011)은 2009년 제주시 우도면 서광리 해역에 조성된 16ha의 바다숲에 대해 경제성을 평가하였다. 바다숲이 시설 이후 30년 동안 지속된다는 가정 하에서 바다숲 조성에 소요되는 비용과 사후관리비용 등을 비용항목으로, 어장형성에 의해 증가된 어획량으로 향상된 주민의 소득과 바다숲에 의한 이산화탄소 저감을 편익항목으로 평가하였다.

시설 설치 후 2년 후부터 포자가 발생하여 3년 후부터 반복·구현이 된다는 것을 고려하여 시설 설치 후 3년부터 조성효과가 나타난다고 가정하였고, 인공적으로 이식된 해조류 또한 28년간 지속적으로 반복·구현된다고 가정하였다. 이 때 어획량의 경우는 어업실태조사 및 자원량의 인식 조사 등의 사회과학적인 설문조사에 기초하여 추정하였고, 18,703.9kg의 어업생산량이 바다숲 조성사업으로 인해 증가하는 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 바다숲 조성사업의 어업소득 증대효과에 대해서 순현재가치(Net Present Value), 내부수익률(Internal Rate of Return), 비용편익평가(B/C) 등의 방법에 의해 평가되었다(Table 2.6).

Table 2.6. Increase of fishery incoming for marine afforestation

Classification	NPV (thousand won)	IRR(%)	B/C ratio
k = 4.04%	1,195,196	8.66	1.74
k = 6.5%	443,315	8.66	1.27
k = 8.5%	26,945	8.66	1.02

이산화탄소 저감효과의 경우 바다숲 시설지 1ha 당 감태가 5톤이 생산되는 것으로 나타나 이를 감태의 CO₂ 흡수량(0.89 ton CO₂·ton FW⁻¹·yr⁻¹)을 적용하면 연간 71.2톤 CO₂를 저감할 수 있는 것으로 분석하였다. 톤당 흡수원의 CERs 가격을 €8.575/톤 CO₂로 적용하여 이를 환율 1,774.4원을 이용해 환산해보면, 제주 우도 서광리 해역의 바다숲 조성사업은 이산화탄소 저감으로 연간 1,083천원의 수익을 창출해내는 것으로 평가되었다. 이를 순현재가치 방법을 적용한 결과는 Table 2.7과 같다.

Table 2.7. Benefit of carbon dioxide reduction for marine afforestation

Classification	NPV (thousand won)
k = 4.04%	16,595
k = 6.5%	12,171
k = 8.5%	9,721

또한 한국해양수산개발원(2010b)은 바다숲 조성사업의 정책적, 기술적, 경제적 타당성 분석을 실시하였다. 연안생태계 회복, 수산생물의 연안 산란장 및 성육장 제공으로 유용 자원 증대, 해조류를 이용한 바다숲 CDM 사업 가능성, 어촌경제 활성화 등 저탄소 녹색성장을 위한 신성장동력원으로서 국가 정책 및 지역경제 향상 등의 이유로 바다숲 조성사업은 정책적으로 타당하다고 분석되었다. 그리고 바다숲 조성사업은 2009년부터 시작되어 초기단계에 있으나, 적지 조사 및 조성 시설 관련기술은 충분한 기술력을 갖추고 있

는 것으로 판단되었다. 하지만 조성 향상 및 관리 분야의 기술은 미흡한 수준이므로 향후 기술 향상이 필요한 것으로 조사되었다. 마지막으로 경제성 타당성 분석 결과는 순현재가치 1,206백만 원, 비용/편익비가 1.8, 내부수익률은 13.7%로 경제적으로 타당한 것으로 나타났다.

한편 미국 연방정부와 주정부는 훼손된 바다숲 복원의 필요성 제고를 위해 바다숲 가치 평가에 대한 다양한 접근을 시도하였다. 직접적인 시장 가치보다는 관련 산업에 파급되는 가치를 중심으로 평가하였고, 2003년 플로리다 바다숲의 물질순환(nutrient cycle) 및 유어낙시로 인해 554억 달러의 경제적 가치가 있는 것으로 평가되었다. 그리고 2006년 플로리다 바다숲에 서식하는 주요 상업 어종을 어획한 금액은 1억 2천만 달러에 이른다고 보고된 바 있다 (한국해양수산개발원, 2010a).

바다숲 조성사업을 이산화탄소 감축대책으로서 평가한 해양수산부(2006)의 연구에 따르면 화석연료의 연소결과 발생한 이산화탄소를 제거하는데 소요되는 비용은 \$35 ~ \$264/톤 CO₂ 수준이고, 바다숲 조성사업으로 인한 이산화탄소 고정화 비용은 \$7.2/톤 CO₂ 으로 산정했다.

3. 시스템 생태학과 에머지

가. 시스템 생태학(Systems ecology)

시스템 생태학에서는 자연환경과 경제활동을 포괄하는 척도인 에너지를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동을 동일한 가치 단위로 평가하는 접근방법을 적용한다. 지구의 환경문제를 국지적인 차원의 지역적 문제나 개별적인 산업 또는 기술의 문제로만 인식하지 않고 하나의 통합된 시스템으로 파악하고, 인간을 포함한 모든 생물군과 그 주변의 환경을 하나의 통합된 시스템으로 인식하여 시스템내의 유기적인 관계와 상호 작용을 체계적이고 정량적으로 파악하는 학문이다.

그러므로 시스템 생태학은 자연환경과 경제활동이 상호 작용하는 농업, 공업, 그리고 도시 등의 다양한 시스템에 대해 모든 학문분야의 기술과 방법을 연계시킬 수 있는 에너지를 기초로 자료를 수집, 분석, 예측하여 시스템을 종합적으로 평가하고 있다(Fig. 2.4). 또한 시스템 내에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변환과정을 시스템 언어로 분석하여 인간 활동과 자연 활동의 유기적 관계와 상호 작용을 정량적으로 보여주어 생태계를 보는 새로운 안목을 가질 수 있게 해주며, 시스템 분석을 통한 에머지 분석으로 생태계의 실질적인 부(real wealth)의 평가와 공공의 이익을 위한 정책을 선택하는데 충분한 과학적 근거를 제공한다(Odum, 1983).

또한 각 시스템을 하나의 다이어그램으로 표현한 후 이들 요소들의 부분적 기능을 통합하여 하나의 시스템으로 연구하는 시스템 분석과 컴퓨터를 이용한 에너지 시스템 모델을 통하여 대상 시스템에 대한 종합적이고 포괄적인 평가를 실시할 수 있다.

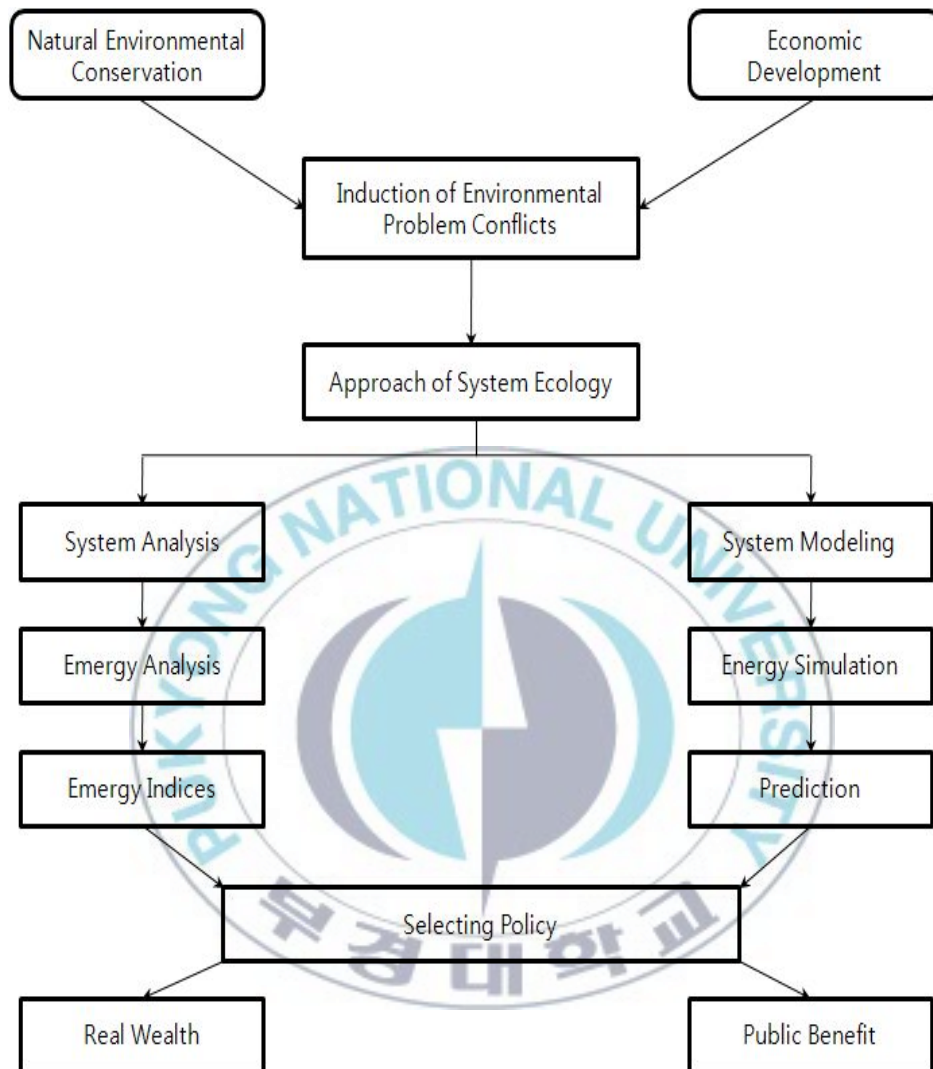


Fig. 2.4. The methodological roots of systems ecology(Odum, 1983).

나. 에머지(Emergy)

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

지구 순환과정은 각 에너지원이 다량의 저급 에너지로부터 소량의 고급 에너지로 전환되는 계층 구조를 가지고 있으므로 물리학적으로 같은 크기의 에너지라도 실질적으로 일을 할 수 있는 능력에는 차이가 있다.

에머지란 “한 가지 서비스나 생산물을 만드는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 단위는 emjoule을 사용한다(Odum, 1983, 1994, 1996). 즉, 한 가지의 서비스나 생산물이 가지고 있는 에너지 관점의 가치는 현재 남아 있는 실제 에너지가 아니라 서비스나 생산물이 생산되기까지 소모되었던 모든 에너지(energy memory)를 말한다. 이는 서비스 과정이나 생산과정에서 소모되었던 에너지가 없었다면 우리가 이용하는 서비스나 생산물이 형성되지 못하기 때문이다. 현재 에머지개념에서 서로 다른 형태의 에너지를 비교하기 위해 기준으로 사용하는 “한 종류의 이용 가능한 에너지”는 태양에너지이며, 단위는 Solar emjoules(sej)이다(Odum, 1996).

만약 태양에서 유입되는 40,000 J의 태양에너지량을 이용하여 2 J의 에너지를 가진 나무를 자라게 하고 이 나무가 오랜 시간 지질학적 작용에 의해 석탄이 되면 이 석탄의 에너지량은 1 J로 변환된다. 마지막으로 이 석탄을

통해 전기를 생산하게 되면 그 전기는 0.25 J의 에너지량을 보유하고 있게 된다. 따라서 우리가 흔히 사용하는 전기 에너지의 가치는 단순히 발전소에서 전기가 만들어져 사용하는 실제 에너지량 0.25 J뿐만 아니라 태양에서부터 나무, 지질작용, 석탄, 발전소를 거치면서 각 단계별로 사라졌던 모든 에너지가 포함되어야 한다는 것이다. 즉, 열역학 제2법칙에 의해 소실되어진 에너지가 없었다면 태양에너지가 전기로 만들어지지 않았다는 것이다(Fig 2.5).

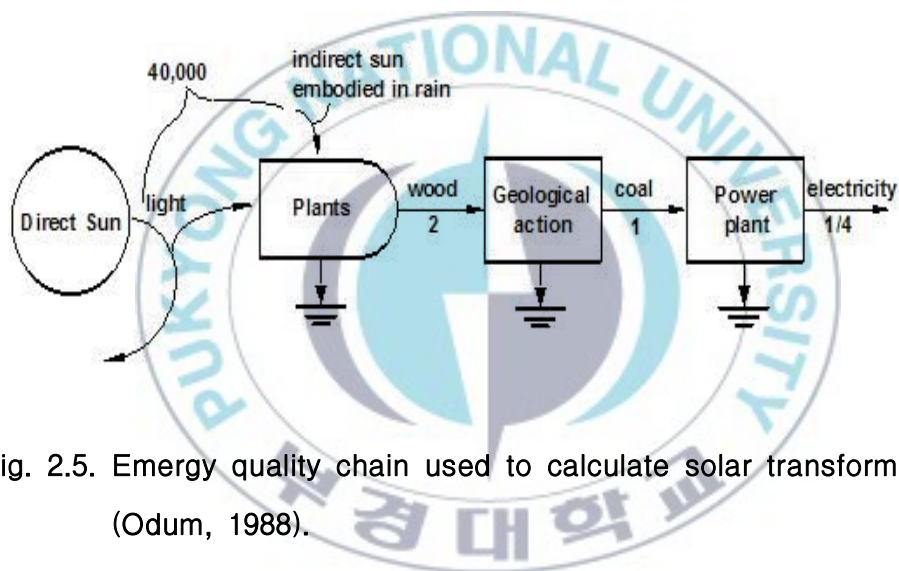


Fig. 2.5. Emergy quality chain used to calculate solar transformity (Odum, 1988).

다. 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 다르면 에너지의 질이 다르기 때문에, 한 생산물의 에너지 질은 이 에너지가 에너지 변환 과정을 통해 형성되기 위해 직간접적으로 사용된 모든 에너지의 합, 즉 내재된 에너지(embodied energy)로 환산하여 측정하게 된다(Fig. 2.6).

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 1 J을 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).

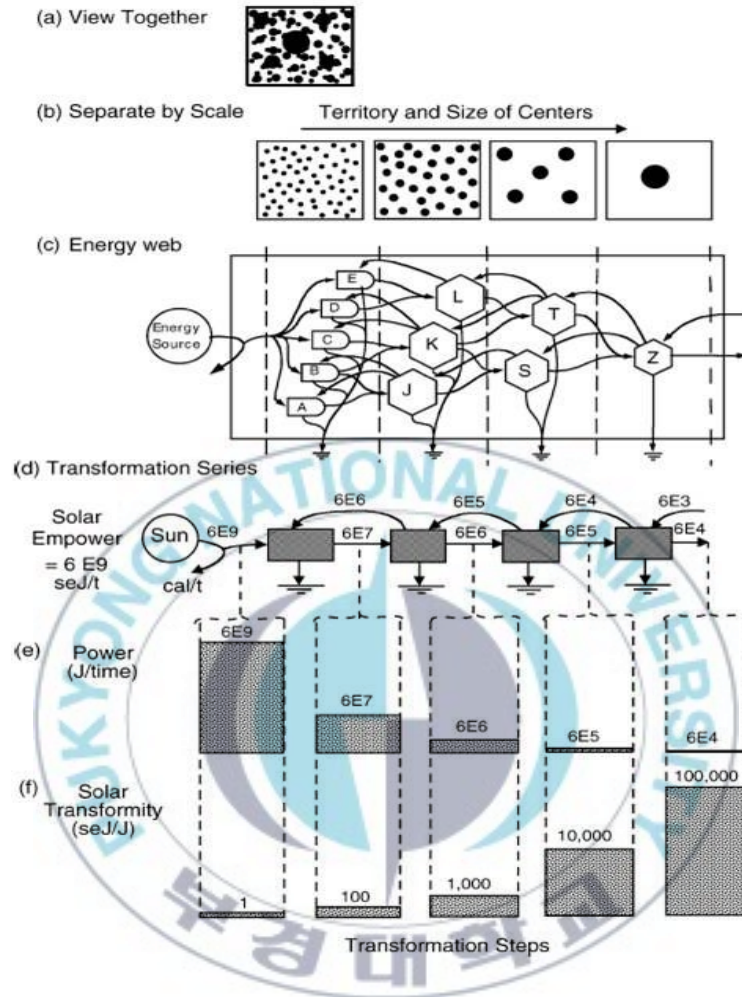


Fig. 2.6. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity, (a) All units view together; (b) Units separated by scale; (c) Units as a web of energy flows; (d) Processes shown as an ordered series; (e) Flows of energy per unit time; (f) Transformities (Brown et al., 2004).

Ⅲ 연구방법

1. 평가대상

가. 온실가스 감축정책 선정

앞서 제시된 부산광역시의 온실가스 감축 로드맵 중 감축량이 큰 감축대책 순으로 정리해보면, 자동차 배출허용기준 강화 > 그린스타트 네트워크 구성·운영 > 공급의무화제도(RPS) 도입 > 바다숲 조성사업 > 해상풍력발전단지 조성사업 순서로 총 감축대책의 약 80%의 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다(Table 3.1).

Table 3.1. GHG reduction plan for Busan Metropolitan city

Reduction plan	2020's Reduction GHG emission (unit:tCO ₂)	Rate(%)
Rigid enforcement of car effluent quality standard	2,673,870	37.7
Green start network organization	1,421,606	20.0
Induction of RPS	555,818	7.8
Marine afforestation	514,000	7.2
Construction of off-shore wind farm	350,444	4.9
subtotal	5,515,738	77.7
Total	7,101,158	100.0

먼저 자동차 배출허용기준 강화 사업을 살펴보면, 자동차에서 배출되는 이산화탄소를 배출허용기준은 140g/km 이하로 제정하는 감축정책이다. 부산광역시도 향후 2012년부터 차츰 배출허용 강화차량 보급률을 높여 2015년까지 100% 달성할 계획이다. 2020년에 자동차 배출허용기준 강화 사업 적용시 2,673,870 톤 CO₂를 저감하는 것으로 산정되었다..

그린스타트 네트워크 구성·운영은 저탄소 녹색성장 사회구현을 위한 녹색생활 캠페인, 녹색생활 우수실천집단에 대한 포상 등으로 시민들의 실천운동을 전개하는 것이다. 2020년까지 부산 시민의 40%가 참여하는 것을 목표로 하고 있고 참여자 중 70%가 실천하는 것을 가정하여 온실가스 감축량을 산정한 결과 1,421,606 톤 CO₂를 저감하는 것으로 나타났다.

지식경제부는 2012년부터 일정규모 이상의 발전사업자에게 총발전량 중 일정 이상 양 이상을 신재생에너지 전력으로 공급토록 의무화하는 제도인 공급의무화제도(RPS)를 도입하기로 확정하였다. 이에 부산광역시는 2012년 2%, 2020년까지 8%를 신재생에너지로 공급할 것을 계획하고 있다. 이에 2020년에 555,818 톤 CO₂를 저감 가능한 것으로 나타났다.

부산광역시는 국가 바다숲 조성사업 계획과 연계하여 연안 해역에 대규모 바다숲을 조성하여 탄소 흡수원으로 활용할 계획이다. 매년 200ha를 조성해 2020년까지 2000ha의 바다숲을 조성해 514,000 톤 CO₂를 감축하는 것을 목표로 하고 있다.

마지막으로 부산광역시는 남부발전과 부산연안 해상풍력발전단지 조성 MOU를 체결하여 2006년 ~ 2009년까지 다대도에서 가덕도까지 연안의 해상풍력단지 조성에 대한 타당성 조사를 완료하였다. 목도 해상풍력단지 완공 후 결과검토에 따라 2014년 ~2015년에 부산연안 풍력단지조성에 관한 계획을 수립할 예정이다. 이에 해상풍력발전단지 조성시 2020년 기준 350, 444 톤 CO₂를 저감하는 것으로 산정되었다.

현재 부산광역시에서 이행중인 온실가스 감축대책은 그린스타트 네트워크 구성·운영과 바다숲 조성사업이다. 하지만 그린스타트 네트워크 구성·운영의 경우 소요되는 비용은 명확하지만 사업으로 인해 생기는 편익이 정성적이기 때문에 평가가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 부산광역시의 온실가스 감축정책으로서 바다숲 조성사업에 대한 에머지 비용·편익 평가를 통해 사업의 생태경제적 타당성을 분석했다.

나. 바다숲 조성사업 평가자료

부산광역시는 연안암반의 해조군락이 급격히 감소한 해역을 대상으로 바다숲을 조성할 계획에 있다. 해역별 특성과 먹이장으로서의 효과, 사후 관리 등을 감안하여 개소당 5ha 이상을 조성하는 것과, 바다숲 조성 이후 최소한 3년 이상 조식동물 구제, 해조류 보식 및 모니터링 등 사후관리를 실시하는 것 등을 원칙으로 하고 있다(부산광역시, 2011).

현재 부산광역시는 영도구 동삼동에 바다숲을 조성하고 있지만 현재 진행중이기 때문에 본 연구에서는 부산광역시의 온실가스 감축정책에서 제시된 바다숲 조성 면적(200ha)과 동일한 2009년 제주도 서귀포시 안덕면 사계리 해역 바다숲 조성사업의 자료를 이용해 에머지 평가를 실시하였다.

바다숲 조성을 위한 적절한 해역을 선정하기 위해 Side Scan Sonar과 DGPS를 이용해 해상위치 및 해저지형을 조사하고, Line transect method를 이용해 서식 생물상, 갯녹음 발생정도, 지반조사 및 분포 상태 등을 잠수 조사하였다.

이식을 위한 해조류는 자연상태의 성숙된 감태를 채집하여 유주자를 방출시켜 실내배양을 실시하였다. 실내배양이 끝난 감태는 채묘틀 채로 로프에 고정하여 가이식하였다. 가이식을 마친 감태 종묘는 수직식 저연승 시설에

의한 중간양성을 실시하였고 인공어초에 중간양성을 거친 10cm내외의 감태를 사용해 종묘이식을 하였다. 본 연구에서는 바다숲 조성사업으로 인해 흡수되는 이산화탄소량을 강(2011)의 연구에 사용된 감태의 이산화탄소 흡수량($0.89 \text{ ton CO}_2 \cdot \text{ton FW}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)으로 나누어 계산되는 감태의 양을 바다숲 조성사업으로 인해 생성되는 해조류의 양으로 나타내었으며 적지조사 및 사전조사, 종묘생산 등의 과정을 분석과정에 포함시키지 않았다.

바다숲 조성을 위한 해중립초는 패널부착식 110개, 신요철형 112개, 터널형 40개, 반톱니형 35개를 사용하였다. 패널부착식 인공어초 자료의 한계로 인해 바다숲 조성 시설 후 모니터링 결과, 감태의 성장효율이 비슷한 터널형으로 대체하여 본 연구에서는 인공어초를 터널형 156개, 반톱니형 35개, 신요철형 112개로 구성하였다. 인공어초에 대해 수산자원사업단의 제공된 자료를 이용해 각 어초별 제조 및 운반, 설치 등에 드는 비용, 물질 등을 계산하였다.

바다숲 조성 이후 매월 1 ~ 2회 이상 조식동물의 구제, 청소 및 해조보식 등을 실시하였다. 따라서 월 1회, 6명의 다이버들이 10년간 바다숲 조성 시설의 유지를 위한 작업을 실시하는 것으로 가정하여 본 연구에서는 평가하였다.

앞서 제시된 자료를 바탕으로 바다숲 조성사업에 들어가는 연료, 물질, 재화와 용역, 노동력에 대해 에머지 평가를 실시하였다. 바다숲 조성사업의 유효수명은 30년이고, 이 기간 동안 생성되는 해조류 등은 반복·구현 된다고 가정하여 연간 사용되는 에머지량으로 계산해주었다.

Table 3.2. Summary of marine afforestation

Area (ha)	Reduction of GHG emission (ton CO ₂)	Type of artificial fish-reef	Creation method
200	51,400	tunnel (156ea) shaped half saw teeth (35ea) new unevenness (112ea)	rope method

2. 에머지 평가과정

에머지평가는 에너지시스템 다이어그램 작성, 에머지평가표 작성, 에머지 지수 계산 등의 크게 세 단계를 거쳐 이루어진다.

가. 에너지 시스템 다이어그램 작성

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. 3.1).

다이어그램의 작성 절차는 첫째, 분석대상 시스템의 경계를 설정한다. 시스템의 경계는 연구목적을 명확히 반영하여야 한다.

둘째, 시스템 외부로부터 시스템 내부에 영향을 미치는 태양, 바람, 비 등의 자연요소는 물론 연료, 재화와 용역 등 외부에서 구입한 모든 요소를 포함한다.

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.

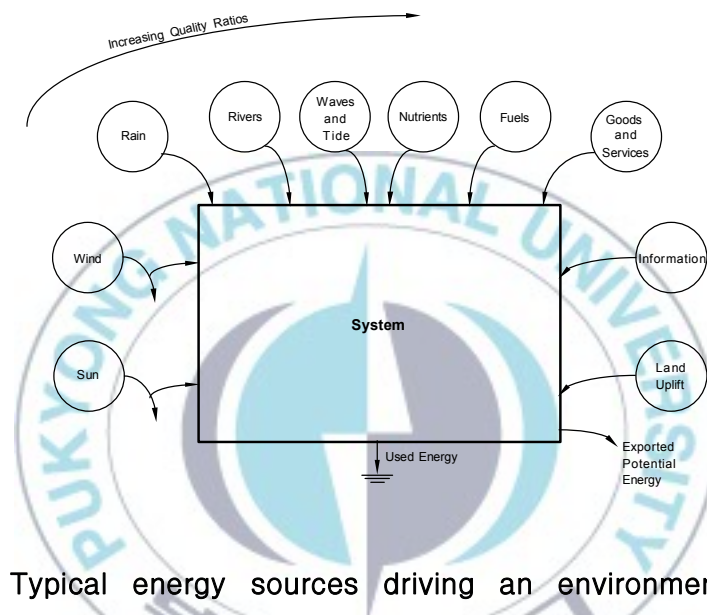


Fig. 3.1. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

나. Emergy 분석표 작성

에너지시스템 다이어그램을 완성하면 이를 토대로 Table 3.3과 같은 에머지 평가표를 작성한다.

첫 번째 열에는 각 항목에 대해 각주번호를 적고, 두 번째 열에는 평가항목에 대한 명칭을 입력한다.

세 번째 열에는 에너지, 물질 또는 화폐단위로 나타낸 각 항목의 실제자료를 기입한다.

네 번째 열에는 각 항목의 태양에너지변환도를 입력하는데, 에머지 평가 과정에서 독자적으로 계산하거나 기존 연구의 자료를 이용한다.

다섯 번째 열에는 세 번째 열의 각 평가 항목별 자료와 네 번째 열의 태양에너지변환도를 곱하여 태양에머지(sej) 값을 구한다.

마지막 여섯 번째 열에는 태양에머지 값을 에머지화폐비율(Emergy money ratio, EMR)로 나누어 구한 Emvalue를 입력한다.

Table 3.3. Tabular format for emergy evaluation

No.	Item	Data unit	Solar transformity	Solar emergy	Emvalue
		J/yr, g/yr,	sej/J, sej/g		
1	...	\$/yr(or ₩/yr), etc	sej/\$(or sej/₩), etc	sej/yr, etc	em\$/yr or em₩/yr, etc

평가대상 시스템으로 유입하는 총 에머지량은 각 항목의 에머지량을 더해서 구하는데, 이 과정에서 중복 계산(double counting)을 피해야 한다(Odum, 1996). 예를 들어 바람과 강우는 태양에너지에 의해 발생하는 에너지이므로, 이 세 가지 에너지를 모두 더할 경우 태양에너지를 중복으로 계산하게 된다. 따라서 에머지 평가법에서는 이러한 중복계산을 피하기 위해 동일한 에너지에 기반한 에너지들의 경우 에머지값이 가장 큰 것만 유입량 계산에 이용한다.

다. Emergy 지수 계산

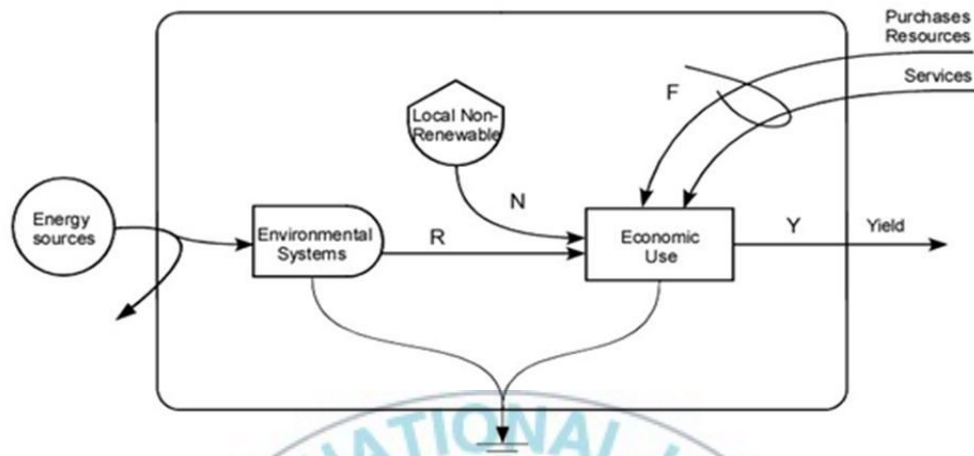
에머지 평가표를 이용하여 평가대상 시스템의 특성을 나타내는 에머지 지수를 계산하는 것이 에머지 평가의 세 번째 단계이다. 이 연구에서는 Fig. 3.2 에서 보는 바와 같이 태양에너지를 비롯한 바람, 강우 등의 재생 가능한 자원(R)과 내부의 재생 불가능 자원(N), 외부에서 유입한 자원(F)의 에머지 값을 이용하여 다음과 같은 에머지 지수를 계산하였다.

(1) 에머지화폐비율

에머지화폐비율(Emergy-Money Ratio, EMR)은 평가대상 경제시스템이 1년 동안 사용한 총 에머지량을 그 해의 총생산(GDP 등)으로 나누어 구한다. EMR은 평가대상 경제의 화폐구매력을 나타내므로 이 비율이 감소하는 것은 동일한 양의 화폐로 구입할 수 있는 가치가 감소하는 것을 의미한다(Odum, 1996).

(2) Emvalue

Emvalue는 에머지 단위(sej)로 나타낸 재화나 용역의 가치로 화폐 단위로 바꾸어 나타낸 값이다(Odum, 1996). Emvalue를 계산하고자 하는 항목의 에머지량(예를들어 sej/yr)을 EMR(예, sej/₩)로 나누면 Emvalue(예, em₩/yr) 값을 구할 수 있다. 이렇게 함으로써 에머지 자료를 경제학적 방법으로 구한 가치와 비교할 수 있게 된다.



$$\text{Yield}(Y) = R + N + F$$

$$\text{Emergy Yield Ratio(EYR)} = Y/F$$

$$\text{Environmental Loading Ratio(ELR)} = (F + N)/R$$

$$\text{Emergy Sustainability Index(ESI)} = \text{EYR}/\text{ELR}$$

Fig. 3.2. Emergy based indices, accounting for renewable emergy inputs(R), nonrenewable inputs(N), purchased inputs from outside the system(F) and yield from system(Brown and Ulgiati, 1997).

(3) 에머지 산출 비율(Emergy Yield Ratio : EYR)

에머지산출비율(EYR)은 시스템에서 생산한 최종산물의 에머지(Y)를 외부에서 구입하여 이용한 재화와 서비스(F)로 나누어 구한다. 이 지수는 평가대상 경제활동이 경제에 기여하는 정도를 나타내는데, EYR이 1보다 크면, 즉 외부구입 에머지보다 최종생산물에 포함된 에머지량이 더 많으면 이 시스템

은 경제에 순 기여를 한다는 것을 의미한다. Brown and Ulgiati(1997)에 따르면, EYR이 5보다 높은 값을 가지면 일차에너지원(primary energy source)이며, 2에서 5사이의 범위에 속하면 이차에너지원(secondary energy source), 2보다 작으면 에너지원으로서 경제성이 없다고 판단한다.

$$\text{Emergy Yield Ratio(EYR)} = Y / F$$

(4) 환경부하비율(Environmental Loading Ratio : ELR)

인류의 경제활동은 자연환경을 기반으로 발전하므로 자연과 인간은 서로에게 영향을 미치며, 경제활동이 활발해질수록 자연환경이 받는 압력(스트레스) 정도가 증가하게 된다. 이러한 압력의 정도를 나타내기 위해 제안된 에머지지수가 환경부하비율(ELR)이다. ELR은 외부에서 유입한 에머지(F)와 시스템 내부의 재생 불가능에머지(N)를 더한 값을 재생가능에머지(R)로 나누어 구한다(Brown and Ulgiati, 1997).

외부자원과 재생 불가능자원의 사용량이 많을수록 시스템의 경제활동이 활발하다는 것을 의미하며, 이로 인해 자연환경에 미치는 부정적인 영향은 커지게 된다. Brown and Ulgiati(1997)는 ELR이 3보다 작으면 사회경제 활동이 환경에 미치는 영향이 적으며, 10보다 클 경우 환경에 미치는 영향이 큰 것으로 평가하였다. 또한 ELR이 3~10사이의 값을 나타내면 사회경제 활동이 환경에 미치는 영향이 그리 크지 않은 것으로 구분하였다.

$$\text{Environmental Loading Ratio(ELR)} = (F + N) / R$$

(5) 에머지지속성지수(Emergy Sustainability Index, ESI)

장기적 관점에서 경제 시스템이 지속하기 위해서는 내부에서 공급되는 에머지량이 경제활동에서 차지하는 비중이 높고, 외부에서 구입하여 투입하는 에머지의 비중이 작아야 한다. 또한 내부에머지의 경우 재생 불가능 에머지 보다는 재생 가능에머지가 기여하는 비율이 더 높을수록 지속성은 증가하게 된다. 에머지지속성지수(ESI)는 경제시스템의 지속성을 평가하기 위하여 제안된 에머지지수인데, EYR과 ELR 사이의 비율이다. Brown and Ulgiati(1997)는 7개국의 ESI지수를 비교·분석하여 이들 나라를 저개발국, 개발도상국, 선진국형 국가로 구분하였다. 이들에 따르면 선진국형은 ESI 지수가 1보다 작은 값을 가지며, 개발도상국은 1에서 10사이의 값을, 10보다 높은 값을 가지는 국가는 저개발국으로 정의하였다. 따라서 1보다 낮은 값을 가지는 시스템은 지속성이 거의 없으며, 10보다 높은 값을 가지는 시스템은 장기적인 관점에서 지속성이 높은 시스템이다.

$$\text{Emergy Sustainability Index(ESI)} = \text{EYR} / \text{ELR}$$

3. 에머지 비용·편익 평가

경제성 분석은 사업의 경제적 가치가 어느 정도인지 판단할 수 있는 근거를 줌으로써 그 사업에 대한 이해를 도울 뿐 아니라 정책적 분석의 필수자료로서 활용되고 있다(김 등, 2002). 그 중 특정 사업에 소요되는 비용과 편익을 비교·평가하여 사업의 타당성을 검토하는 것을 비용·편익분석(cost-benefit analysis)이라고 하며, 비용편익비(B/C Ratio)가 1 이상일 때 그 사업은 타당성이 있다고 판단한다.

에머지 방법론을 이용한 비용·편익 평가는 경제성 분석과 같은 절차로 진행되나 비용과 편익의 단위가 화폐가 아닌 에머지 단위를 이용한다. 본 연구에서는 앞서 작성한 에머지 평가표를 바탕으로 바다숲 조성사업의 비용항목과 편익항목의 에머지 값을 에머지-화폐비율(EMR)로 나누어 Emvalue로 나타내었다.

바다숲 조성사업의 에머지 비용은 적지조사, 해조종묘생산, 인공어초 제작·운반 및 설치, 바다숲 시설 유지·관리 등에 들어가는 물질, 연료, 재화와 용역, 노동력 등이 있고, 에머지 편익은 생태계 회복, 이산화탄소 저감, 수산자원의 증대, 스쿠버다이빙 및 유어낚시 등의 편익이 있다. 본 연구에서는 적지조사 및 해조종묘생산에 들어가는 에머지를 제외한 나머지 항목을 비용에머지 값으로 계산하였고, 편익 에머지는 생산되는 해조류와 저감되는 이산화탄소의 양으로 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 바다숲 조성사업의 에너지 시스템 다이어그램

바다숲 조성사업의 에너지 평가를 위해 작성한 에너지 시스템 다이어그램은 Fig 4.1과 같다. 시스템 외부로부터 자연환경 활동에서 기인한 재생가능한 에너지원인 태양, 바람, 강우, 조석 등이 유입되고 있으며, 바다숲 조성을 위한 인공어초 제작, 운반 및 설치와 바다숲 조성 시설의 유지를 위해 사용되는 연료, 물질, 재화와 용역, 노동력 등이 유입된다. 시스템 내부에서는 자연활동으로부터 유입되는 태양, 바람, 강우, 조석 등을 이용하여 식물플랑크톤과 해조류가 성장을 하고 먹이사슬을 통해 저서생물과 어류 등이 성장한다. 이렇게 성장한 저서생물과 어류 등은 시스템 내·외부로 이동한다.

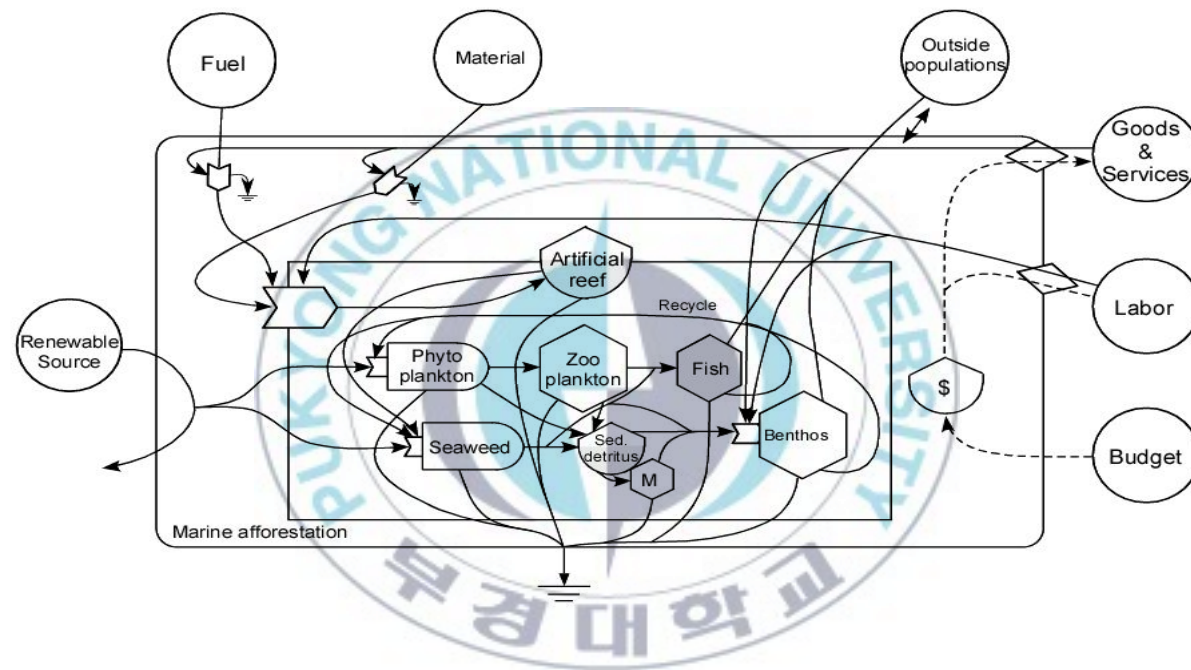


Fig. 4.1. Energy systems diagram for marine afforestation.

2. 바다숲 조성사업의 에머지 평가표

바다숲 조성사업의 에머지 평가표는 Table 4.1에 제시하였다. 유입되는 재생가능한 에머지, 외부에서 구입되는 에머지, 시설유지에 사용되는 에머지, 최종생산물인 해조류, 저서생물의 에머지량을 구분해서 제시하였다.

바다숲 시스템 내부로 유입하는 자연환경 자원은 태양, 바람, 강우 화학에너지, 조석으로 중복계산을 피해 이 중 가장 많이 차지하는 조석에너지로 재생가능한 에머지량은 $2.71\text{E}+17$ sej/yr에 해당하였다. 재생가능한 에머지는 전체 에머지의 60.2 %로 재생가능한 에머지가 재생불가능한 에머지 보다 바다숲 조성사업에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

바다숲 조성사업의 건설과정에 투입되는 에머지량은 $1.40\text{E}+17$ sej/yr으로 계산되었다. 이 가운데 인공어초 제조시 사용되는 철이 차지하는 비중이 37.2%($5.22\text{E}+16$ sej/yr)로 가장 컸으며, 바다숲 조성을 위한 재화와 용역이 34.3%($4.81\text{E}+16$ sej/yr)로 나타났다.

바다숲 조성 시설의 유지·관리 과정에서는 $3.89\text{E}+16$ sej/yr의 에머지가 필요하였으며, 이 중 82.0%($3.19\text{E}+16$ sej/yr)는 유지 및 관리에 사용되는 노동력이고 나머지 18.0%($7.02\text{E}+15$ sej/yr)는 유지 및 관리에 필요한 재화와 용역이다.

바다숲 조성사업을 통해 생산되는 해조류는 $1.18\text{E}+18$ sej/yr가 생산되는 것으로 나타났다.

이를 종합해보면 바다숲 조성사업에 소요되는 에머지는 총 $4.50\text{E}+17$ sej/yr로 자연환경에 기인한 재생가능한 에머지가 $2.71\text{E}+17$ sej/yr로 전체 사용에머지의 60.2%를 차지하였고, 외부에서 구입한 에머지는 $1.79\text{E}+17$ sej/yr로 39.8%로 나타났다.

Table 4.1. Emergy table of marine afforestation

No.	Item	RawData (unit/yr)	Transformity (sej/unit)	SolarEmergy (sej/yr)	Emvalue (2007EmW/yr)
Renewable Source					
1	Sunlight	9.72E+15 J/yr	1.00E+00 a)	9.72E+15	3.65E+06
2	Wind	1.41E+13 J/yr	2.51E+03 a)	3.53E+16	1.33E+07
3	Rain,chemical	1.75E+07 J/yr	3.05E+04 a)	5.33E+11	2.01E+02
4	Tide	3.67E+12 J/yr	7.39E+04 a)	2.71E+17	1.02E+08
	Subtotal			2.71E+17	1.02E+08
Purchased Input					
5	Fuel	2.16E+08 J/yr	5.30E+04 b)	1.14E+13	4.30E+03
6	Materials				
	a. Concrete	3.55E+07 g/yr	9.26E+07 b)	3.29E+15	1.24E+06
	b. Iron	7.79E+06 g/yr	6.70E+09 b)	5.22E+16	1.96E+07
7	Goods & Services	1.81E+07 W/yr	2.66E+09 c)	4.81E+16	1.81E+07
8	Labor	1.38E+07 W/yr	2.66E+09 c)	3.66E+16	1.38E+07
Maintenance					
9	Goods & Services	2.64E+06 W/yr	2.66E+09 c)	7.02E+16	2.64E+06
10	Labor	1.20E+07 W/yr	2.66E+09 c)	3.19E+16	1.20E+07
	Subtotal			1.79E+17	6.73E+07
Production					
11	Seaweeds	6.36E+13 J/yr	1.85E+04 d)	1.18E+18	4.42E+08
	Subtotal			1.18E+18	4.42E+08

* Transformity based on total renewable emergy flow of 15.83E+24 sej/yr

a) Cambell et al.,2005, b) Bardi and Brown, 2001, c) Im, 2010, d) Lee et al.,2001

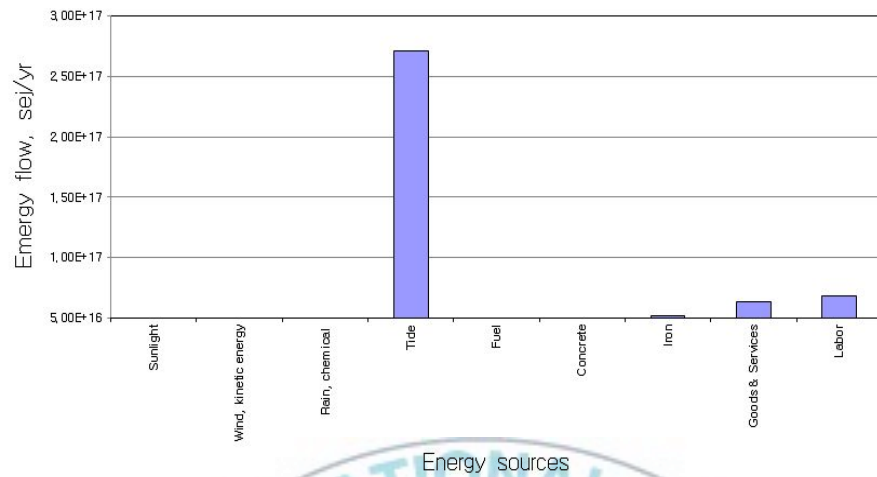


Fig. 4.2. Energy signature of marine afforestation.

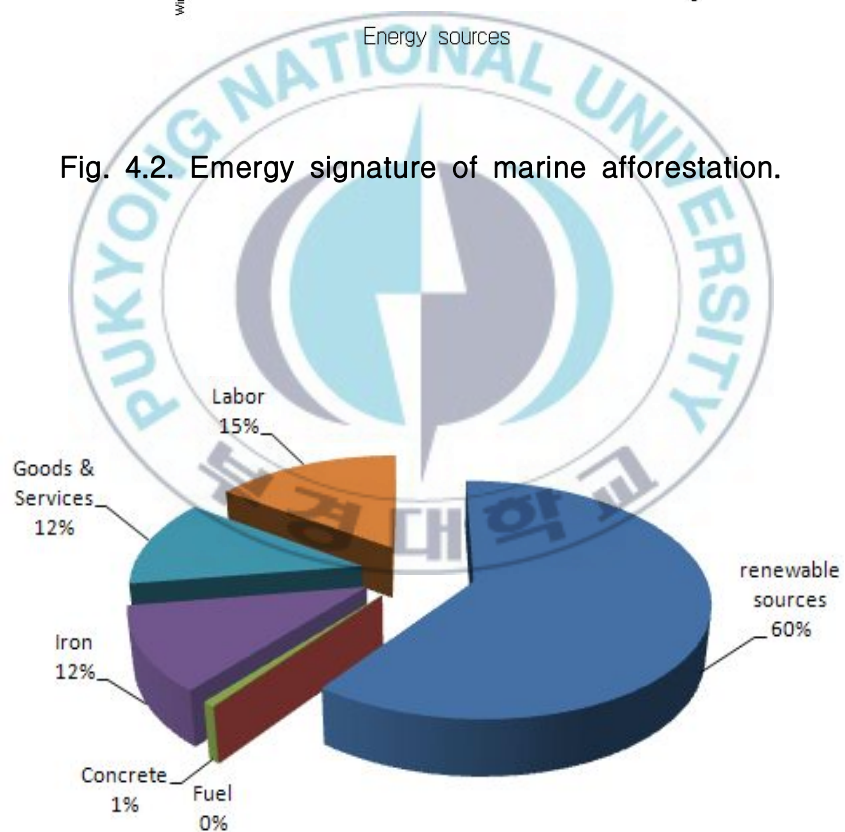


Fig. 4.3. Contribution of energy for marine afforestation.

3. 바다숲 조성사업의 에머지 지수

Table 4.1의 에머지 평가표를 이용하여 Table 4.2와 같이 바다숲 조성사업의 에머지 지수를 계산하였다. 바다숲 시스템 내부로 유입하는 재생가능에머지량과 외부에서 구입한 에머지량을 더한 에머지 산출량(Y)는 $4.50E+17$ sej/yr이었다. 이를 외부에서 구입한 총 에머지량(F)인 $1.79E+17$ 으로 나누어 구한 바다숲 조성사업의 에머지산출비율(EYR)은 2.51으로 나타났으며, 이는 바다숲 조성 사업은 바다숲 조성을 위해 투입되는 에머지에 비해 2.5배 많은 에머지를 산출하는 사업이라는 것을 의미한다.

자연환경에 미치는 부정적인 영향을 평가하는 지수인 환경부하비율(ELR)은 0.66로 계산되었다. Brown and Ulgiati(1997)는 ELR이 3보다 작을 경우 환경에 미치는 부정적인 영향이 거의 없는 시스템으로 분류함에 따라 바다숲 조성사업은 환경에 미치는 영향이 거의 없는 친환경적인 사업으로 평가할 수 있다.

또한 에머지산출비율(EYR)과 환경부하비율(ELR)의 비로 나타내는 에머지지속성지수(ESI)는 3.8으로 Brown and Ulgiati(1997)의 분류에 따라 바다숲 조성사업은 어느정도 지속성이 있는 시스템으로 평가될 수 있다.

본 연구는 바다숲 조성사업의 내구연수를 30년으로 가정해 분석하였지만 바다숲이 자연적인 천이 과정을 겪는다면 30년 이후에도 지속적인 시스템이 될 수 있다. 따라서 현재 바다숲 조성 향상 및 관리 분야의 기술은 미흡한 수준이지만 이 분야의 기술들이 향상되면 바다숲 조성사업이 더욱 효율적인 사업으로 거듭날 수 있을 것으로 판단된다. 또한 자연암반을 이용해 적은 양의 인공어초를 사용하여 기존의 암반대와 연계하여 바다숲을 조성하면 훨씬 더 높은 효율성과 지속성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.2. Energy indices of marine afforestation

Indices	Value
Renewable energy (R, sej/yr)	2.71E+17
Purchased energy (F, sej/yr)	1.79E+17
Total energy used (U, sej/yr)	4.50E+17
EYR = Y/F	2.51
ELR = (N+F)/R	0.66
ESI = EYR/ELR	3.80

4. 바다숲 조성사업의 에머지 비용·편익 평가

바다숲 조성사업의 에머지 비용과 편익을 Table 4.3에서 평가하였다. 바다숲 조성으로 인해 늘어난 해조류의 양이 바다숲 조성사업의 직접적인 편익에 해당한다. 편익 에머지는 생산되는 해조류 1.18E+18 sej/yr로 계산되었다. 비용부분은 바다숲 조성에 투입된 연료, 물질, 재화와 용역, 노동력 등이 포함되었으며 총 1.79E+17 sej/yr로 계산되었다.

바다숲 조성사업의 편익과 비용의 차이는 9.97E+17 sej/yr으로 에머지화폐비율(EMR)로 나누어 화폐비율로 환산하면 3.7억 em₩/yr과 같다. 또한 비용 편익비(B/C ratio)는 6.57로 바다숲 조성사업은 생태경제적으로 타당한 사업으로 평가되었다.

Table 4.3. Emergy cost-benefit evaluation of marine afforestation

No.	Item	SolarEmergy (sej/yr)	Emvalue (2007Em₩/yr)
Emergy benefits			
1	Seaweeds	1.18E+18	4.42E+08
	Benefit total	1.18E+18	4.42E+08
Emergy costs			
2	Fuel	1.14E+13	4.30E+03
3	Materials	5.55E+16	2.09E+07
4	Goods & Services	5.51E+16	2.07E+07
5	Labor	6.86E+16	2.58E+07
	Cost total	1.79E+17	6.73E+07
	Net Benefit	9.97E+17	3.75E+08

또한 200ha의 바다숲 조성사업으로 인해 51,400 톤 CO₂를 저감할 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 탄소배출권 거래가격 €6.93(2011년 12월 기준, 환율 1578.84원)을 감안하면 약 5.6억원(1.50E+18 sej/yr)의 간접적인 편익이 창출된다. 이를 포함하여 비용·편익 평가한 결과는 Table 4.4와 같다. 9.3억 em ₩/yr의 순편익이 발생하며 비용편익비는 14.92로 향상되는 것으로 나타났다.

Table 4.4. Emergy cost-benefit evaluation of marine afforestation with the sales of CERs

No.	Item	SolarEmergy (sej/yr)	Emvalue (2007Em₩/yr)
Emergy benefits			
1	Seaweeds	1.18E+18	4.42E+08
2	CERs	1.50E+18	5.62E+08
	Benefit total	2.67E+18	1.00E+09
Emergy costs			
3	Fuel	1.14E+13	4.30E+03
4	Materials	5.55E+16	2.09E+07
5	Goods & Services	5.51E+16	2.07E+07
6	Labor	6.86E+16	2.58E+07
	Cost total	1.79E+17	6.73E+07
	Net Benefit	2.49E+18	9.37E+08

본 연구는 부산광역시의 기후변화대응 종합계획을 토대로 바다숲 조성사업에 대해 에머지 평가를 실시하였다. 따라서 부산광역시의 계획대로 매년 200ha의 바다숲이 조성되면 본 연구의 결과가 적용 가능하지만 실제로 계획을 추진하지 못한 경우에는 상황에 맞는 추가적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

그리고 본 연구에서는 적지조사 및 해조종묘생산에 사용되는 에머지량을 자료의 한계 때문에 제외하였다. 하지만 적지조사 및 해조종묘생산에 투입되는 에머지량이 인공어초를 제작하고 운반 및 설치하는데 소요되는 에머지량

에 비해 적을 것이므로 평가에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 하지만 바다숲 조성사업의 에머지 평가에 대한 정확성을 높이기 위해 적지 조사 및 해조종묘생산에 사용되는 에머지 등을 추가적으로 포함시킬 필요가 있다.

저서생물, 어류 등과 같은 유용수산자원의 확대와 같은 직접적인 편익 에머지와 스킨스쿠버 및 유어낚시 등에 의해 생성되는 간접적인 편익 에머지는 자료의 한계에 의해 산정되지 못하였으나, 추후 간접적인 편익에 대한 적용 가능한 자료를 포함하여 평가한다면 향후 우리나라 정책결정에 관련하여 더 유익한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

강(2011)은 바다숲 조성사업의 어업소득 증대효과와 이산화탄소 저감에 대해 경제적 비용·편익 평가를 실시하였다. 어업소득 증대효과에 대해서는 어업실태조사 및 자원량의 인식 조사 등 사회과학적인 설문조사에 기초하여 어획량을 추정하였고, 이를 2009년 어업생산통계시스템에서 제시하는 제주도 해면어업에서 우도 서광리 주요 어획어종의 kg당 어가로 환산하여 생산비중에 따라 가중평균한 값인 kg당 가중평균어가로 계산하였으며, 결과 kg당 9,840원으로 나타났다. 수확하는 어획량은 18,703.9kg으로 연간 184,045.71천원의 이익을 나타내었다. 그리고 이식되는 감태의 경우 매년 5톤이 생산되어 연간 71.2 톤 CO₂를 저감하는 것으로 분석되었다. 이를 CERs의 가격을 톤당 €8.575라고 가정하여 연간 €610.54의 이익을 창출하고 환율 1,744.4원을 적용시켜 1,083천원의 바다숲 조성사업의 편익이 발생하는 것으로 나타났다.

바다숲 조성사업으로 인해 생산되는 생물량과 저감되는 이산화탄소를 편익으로, 사업으로 인해 소요되는 비용을 비용으로 나타낸 것은 본 연구와 강(2011)의 연구는 동일하지만 본 연구는 생산되는 생물량 자체만을 에머지를 실질가치로 나타내었다는 점에서 차이가 있기 때문에 직접적인 비교는 힘들

다. 하지만 화폐경제적인 가치에 대해 평가한 강(2011)의 연구와 에머지 방법을 통해 사업의 실질가치를 평가하는 본 연구 모두 바다숲 조성사업은 타당한 것으로 나타났다.

이산화탄소 고정원으로서 바다숲 조성사업은 1.7억 emW/yr을 투입해 51,400 톤 CO₂를 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 이산화탄소 고정화 비용을 계산해보면 3290 emW/톤 CO₂ 임을 알 수 있으며, 이는 자연환경이 기인하는 부분까지 고려해주는 에머지 방법론에 의한 결과라는 것을 감안하면 앞서 제시된 선행연구의 화폐경제적 결과에 비해 훨씬 효율적인 이산화탄소 감축대책이라는 것을 의미한다. 앞으로 조성 향상 및 관리 분야의 기술이 발달함에 따라 더욱 온실가스 감축대책으로서의 효율성이 높아질 것으로 판단된다.



V. 결론

산업혁명 이후 화석연료의 사용으로 인류는 편리한 생활을 영위하고 있지만, 현재 화석연료 사용후 발생하는 온실가스로 기인한 지구온난화로 인해 인류는 생명을 위협받고 있다. 따라서 온실가스를 줄이기 위해 범지구적인 노력을 하고 있으며 우리나라 또한 온실가스 주배출원인 지자체에 의무를 설정하는 등 온실가스를 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 하지만 국가, 지자체의 연구들은 온실가스 감축정책 및 감축정책 별 온실가스 감축잠재량만 제시하고 있어 온실가스 감축정책 시행시 소요되는 여러 가지 비용과 물질, 에너지 등이 전혀 고려되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 생산물이나 서비스를 만드는데 들어가는 모든 에너지를 한 가지 형태의 에너지로 표현하며, 자연환경과 인간의 경제활동을 동일한 척도로 평가하는 에머지 개념을 이용해 부산광역시에서 제시한 온실가스 감축정책 중 바다숲 조성사업의 생태경제적 타당성을 평가하였다.

1. 바다숲 조성사업에서 생산되는 에머지량은 $4.50E+17$ sej/yr이며, 이중 자연환경에서 기인한 재생가능한 에머지량은 $2.71E+17$ sej/yr로 전체의 60.2%의 비교적 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 외부에서 구입한 에머지량은 $1.79E+17$ sej/yr으로 전체의 39.8%(콘크리트 1.8%, 철 29.1%, 재화와 용역 30.7%, 노동력 38.3%)를 차지하는 것으로 나타나 바다숲 조성사업은 재생가능에너지가 기여가 더 큰 사업으로 분석되었다.

2. 바다숲 조성사업의 시스템 경쟁력을 나타내는 에머지산출비율(EYR)은 2.51으로 생산과정이 효율적이며 경쟁력 있는 시스템이라 할 수 있다. 또한

시스템이 환경에 미치는 영향을 나타내는 지수 환경부하비율(ELR)은 0.66로 바다숲 조성사업이 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 계산되었으며, 시스템의 지속성을 나타내는 에머지지속성지수(ESI)는 3.80으로 어느 정도의 지속성을 가지는 시스템으로 평가되었다.

3. 바다숲 조성사업의 순편익에머지량은 $9.97\text{E}+17$ sej/yr로 나타났으며, 이는 연간 3.7억 emW의 편익을 얻는 사업이다. 또한 비용편익비는 6.57로 투입한 비용에 대해 6.57배 정도 많은 편익을 얻는 사업이므로 생태경제적으로 타당한 사업으로 평가되었다.

4. 이산화탄소 고정비용은 에머지적인 관점에서의 3290 emW/톤 CO₂으로 선행연구의 화폐경제적 관점의 결과(\$7.2/톤 CO₂)에 비해 더 효율적임을 알 수 있었다. 앞으로 조성 향상 및 관리 분야의 기술이 발달함에 따라 더욱 온실가스 감축대책으로서의 효율성을 높아질 것으로 사료된다.

이 연구는 바다숲 조성사업이 에머지 관점에서 타당성이 있는 사업임을 보여주었다. 하지만 바다숲 조성사업으로 인해 생산되는 저서생물, 어류 등과 같은 생물량과 적지조사 및 해조종묘 등에 소요되는 자료 등이 포함된다면 더 정확한 평가가 될 것이다.

저탄소 녹색성장을 이룩하기 위한 온실가스 감축정책으로서 바다숲 조성사업이 활용 가능할 것으로 판단되며, 향후 국가정책이나 지자체의 정책 결정을 위해 다른 온실가스 감축대책에 관한 평가가 필요할 것이다.

참고문헌

- Bardi E. and M.T. Brown, 2001. Emergy evaluation of ecosystem: a basis for environmental decision making. In: Brown M.T., S. Brandt-Williams, D.R. Tilley and S. Ulgiati(eds.), 2000, Emergy synthesis: theory and applications of the emergy methodology, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, 328pp.
- Brown M. T. and S. Ulgiati, 1997. Emergy Based Indices and Ratios to Evaluate Sustainability: Monitoring Economies and Technology toward Environmentally Sound Innovation, Ecological Engineering, 9, pp51-69.
- 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.
- Campbell D.E., S.L. Brandt-Williams and M.A. Meisch, 2005. Environmental accounting using emergy: Evaluation of the State of West Virginia, Atlantic Ecology Division, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Narragansett, Rhode Island, USA, 124pp.
- Odum H. T., 1983. Systems Ecology : John Wiley & Sons, 644pp.
- Odum H. T., 1988. Energy, environment and public policy: A guide to the analysis of system. UNEP regional seas reports and studies, No.95, United States Environmental Programme, Nairobi, Kenya, 109pp.

- Odum H. T., 1994. Ecological and general systems, The University Press of Colorado, 644pp.
- Odum H. T., 1996. Environmental Accounting, John Wiley & Sons, New York, 370pp.
- 강석규, 2011. 해중림 조성사업의 경제성 분석 : 제주 우도 서광리 어장을 중심으로. 수산경영과학회지, 42(1), pp.37-55
- 강원발전연구원, 2005. 기후변화 대응 대기오염(온실가스) 저감을 위한 정책방향
- 경기개발연구원, 2006. 기후변화협약에 대한 경기도의 대응방안
- 교통안전공단, 2009. 온실가스 저감대책의 이해, 28pp.
- 국립수산과학원, 2009. 갯녹음 발생 동태조사, 130pp.
- 국무조정실, 2007. 기후변화 제 4차 종합대책
- 권혜옥, 2008. 갯녹음 해역의 해조장 복원 절차에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문, 108pp.
- 기후변화협약대책위원회, 2007. 기후변화협약 대응 제 3차 종합대책, pp. 64-66
- 김광수, 2008. 수산자원조성사업(인공어초, 해중림, 종묘방류), 12pp.
- 김광임, 여준호, 정홍락, 정희성, 2002. 대규모 개발사업의 환경경제성 분석 도입방안 1, 188pp.
- 김대영, 2010. 일본의 바다숲 조성사업 동향과 시사점, 8pp.
- 김용건, 2010. 온실가스 감축정책 성과와 과제, 15pp.
- 녹색성장위원회, 2009a. 국가 온실가스 중기(2020년) 감축목표 설정 추진계획, 23pp.
- 녹색성장위원회, 2009b. 녹색성장 국가전략, 136pp.
- 농림수산식품부, 2009. 바다숲 조성사업 보고서
- 농림수산식품부, 2010a. 바다숲 조성사업 보고서, pp.405-614
- 농림수산식품부, 2010b. 바다숲 사업 착수 1년, 녹색 꿈이 자란다 : 농식품부, 사업 1년 성과 발표, 3pp.
- 대전발전연구원, 2006. 지역온실가스 저감을 위한 시민실천방안 연구
- 부산광역시, 2007. 온실가스 배출량 조사용역
- 부산광역시, 2010. 부산광역시 기후변화대응 종합계획, 423pp.

- 부산광역시, 2011. 수산자원관리 시행계획, 38pp.
- 부산지역환경기술개발센터, 2010. 부산광역시의 비용효과적인 온실가스 감축시나리오 개발, 119pp.
- 서울시정개발연구원, 2006. 서울시 온실가스 저감목표 수립 및 이행계획 평가, 288pp.
- 오태건, 2010. 바다숲 조성을 위한 적지선정기법에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문, 116pp.
- 이석모, 2001. 새만금 간척종합개발사업에 대한 환경회계, 한국환경과학회지, pp.1-14
- 임진아, 2010. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가, 부경대학교 석사학위논문, 88pp.
- 충남발전연구원, 2006. 기후변화협약 대응을 위한 대기오염물질 배출특성 분석, 86pp.
- 충북발전연구원, 2004. 충북의 지구온난화 대책과 경제적 수법의 활용방안, 172pp.
- 한국해양수산개발원, 2010a. 월간 KMI 수산동향 12월호, pp. 6-13
- 한국해양수산개발원, 2010b. 한국해양수산개발원 연차보고서, pp. 332-335
- 해양수산부, 2002. 갯녹음 현상의 원인규명 및 대책, 243pp.
- 해양수산부, 2006. 해조류를 이용한 온실가스 저감연구사업 타당성 연구, 25pp.
- 환경부, 2009. 기후변화협약 및 국내외동향, 217pp.
- 환경부, 2010. 지자체 기후변화대응종합계획 수립 지원을 위한 온실가스 감축계획 수립 가이드라인(ver.1), 269pp.
- 디지털 에코 포토 클럽 홈페이지: (<http://www.depc.co.kr/>)
- 수산자원사업단 홈페이지: (<http://www.fira.or.kr/>)

Appendix

Footnotes and data

Renewable Source

1 Sunlight

System area	=	2.00E+06	m ²	
Insolation	=	5.40E+09	J/m ² /yr	기상연보, 2009
Albedo	=	0.1		
Energy	=	(System area)(Insolation)(1-albedo)		
	=	(2.00E+06m ²)(5.40E+09J/m ² /yr)(1-0.1)		
	=	9.72E+15	J/yr	
Transformity	=	1.00E+00	sej/J	Cambell et al.,2005

2 Wind, kinetic energy

System area	=	2.00E+06	m ²	
Density of air	=	1.23E+00	kg/m ³	
Avg. wind speed	=	3.40E+00	m/s	기상연보, 2009
Geostrophic wind speed	=	5.67E+00	m/s	
Drag coeff.	=	1.00E-03		
Energy	=	(Systemarea)(Airdensity)(Dragcoeff)(Geo.Windspeed) ³ (3.14E+07s/yr)		
	=	1.41E+13	J/yr	
Transformity	=	2.51E+03	sej/J	Cambell et al.,2005

3 Rain,chemical

System area	=	2.00E+06	m ²	
Rain	=	1.77E+00	m/yr	기상연보, 2009
Gibbs free energy	=	4.94E+00	m/yr	
Energy	=	(System area)(Rain)(Gibbs free energy)		
	=	1.75E+07	J/yr	
Transformity	=	3.05E+04	sej/J	Cambell et al.,2005

4 Tide

Tidal area	=	2.00E+06	m ²	
Avg. Tide range	=	7.19E-01	m	농림수산식품부, 2009
Density	=	1.03E+03	kg/m ³	
Energy	=	(area)(0.5)(tides/yr)(height)^2(density)(gravity)		
	=	(2.00E+06m ²)*(0.5)*(706/yr)*(1.67m) ² *(1025kg/m ³)*(9.8m/s ²)		
	=	3.67E+12	J/yr	
Transformity	=	7.39E+04	sej/J	Cambell et al.,2005

Purchased Input

5 Fuel

Consumption	=	1719.40	L	
	=	454.2	gal	

	Energy(J)	=	((consumption)*(34030kcal/gal)*(4186 J/kcal))/10		
	Energy(J)	=	6.47E+09	J	
	Lifetime	=	30	yr	
	Energy(J)	=	2.16E+08	J/yr	
	Transformity	=	5.30E+04	sej/J	Mark T.Brown and Eliaana bardi, 2001
6	Materials				
	Concrete	=	1.06E+09	g	
	Lifetime	=	30	yr	
	Energy(J)	=	3.55E+07	g/yr	
	Transformity	=	9.26E+07	sej/g	Mark T.Brown and Eliaana bardi, 2001
	Iron	=	2.34E+08	g	
	Lifetime	=	30	yr	
	Energy(J)	=	7.79E+06	g/yr	
	Transformity	=	6.70E+09	sej/g	Mark T.Brown and Eliaana bardi, 2001
7	Goods & Services				
	Costs	=	5.42E+08	₩	
	Lifetime	=	30	yr	
		=	1.81E+07	₩/yr	
	Transformity	=	2.66E+09	sej/won	임, 2010
8	Labor				
	Labor costs	=	4.13E+08	₩	
	Lifetime	=	30	yr	
		=	1.38E+07	₩/yr	
	Transformity	=	2.66E+09	sej/won	임, 2010
Maintenance					
9	Goods & Services				
	Costs	=	2.64E+06	₩/yr	
	Transformity	=	2.66E+09	sej/won	임, 2010
10	Labor				
	Labor costs	=	1.20E+07	₩/yr	
	Transformity	=	2.66E+09	sej/won	임, 2010
Production					
11	Seaweeds				
	yield	=	5.78E+07	kg/yr	
	Energy	=	(yield)(1E+03g/kg)(1.102E+03J/g)		
		=	6.36E+13	J/yr	
	Transformity	=	1.85E+04	sej/J	Lee et al.,2001