



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

에너지 모델링을 통한 도시의 탄소
저감방안에 대한 생태경제적 평가



2011년 2월

부경대학교 대학원

환경공학과

임정혁

공학박사 학위논문

에너지 모델링을 통한 도시의 탄소
저감방안에 대한 생태경제적 평가

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2011년 2월

부경대학교 대학원

환경 공 학 과

임 정 혁

任廷赫의 工學博士 學位論文을 認准함

2011년 2월 25일

| | | | | |
|---|---|---------|-------|---|
| 주 | 심 | 공 학 박 사 | 이 태 운 |  |
| 위 | 원 | 공 학 박 사 | 여 석 준 |  |
| 위 | 원 | 공 학 박 사 | 강 대 석 |  |
| 위 | 원 | 공 학 박 사 | 송 교 육 |  |
| 위 | 원 | 공 학 박 사 | 이 석 모 |  |

목 차

| | |
|----------------------------------|----------|
| 목 차 | i |
| List of Tables | iv |
| List of Figures | vi |
| List of Appendices | x |
| Abstract | xi |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| | |
| II. 이론적 배경 | 4 |
| 1. 지속가능한 발전 | 4 |
| 가. 지속가능한 발전의 개념 | 4 |
| 나. 지속가능한 발전에 대한 평가 | 5 |
| 다. 도시의 지속가능성에 대한 평가 | 7 |
| 2. 온실가스 저감방안 | 11 |
| 가. 온실가스의 개념 및 배출량 | 11 |
| 나. 온실가스 저감방안 | 17 |
| 3. 에머지 평가법 | 20 |
| 가. 시스템 생태학 | 20 |
| 나. 에머지와 에너지변환도의 정의 | 23 |
| 다. 에머지 지수 | 26 |
| 라. 에머지 평가법 및 모델링을 이용한 연구사례 | 28 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| III. 연구방법 | 31 |
| 1. 대상지역 선정 및 현황 | 31 |
| 2. 대상지역의 에머지 평가 | 37 |
| 가. 에머지 분석표 작성 | 37 |
| 나. 에머지 지수를 이용한 평가 | 41 |
| 3. 온실가스 저감 방안에 대한 에머지분석 | 42 |
| 가. 온실가스 저감방안 선정 | 42 |
| 나. 온실가스 저감방안에 대한 에머지 분석 | 48 |
| 4. 에너지 시스템 모델링 | 50 |
| 가. 에너지 다이어그램 작성 | 50 |
| 나. 모델의 수식화 | 52 |
| 다. 모델의 보정 및 정규화 | 53 |
| 라. 프로그램 작성법 | 54 |
| IV. 결 과 | 57 |
| 1. 에머지 분석 및 평가 | 57 |
| 가. 에머지 분석 결과 | 57 |
| 나. 에머지 지수를 이용한 평가 | 66 |
| 2. 온실가스 저감방안에 대한 에머지 평가 | 71 |
| 가. 온실가스 저감방안 적용을 위한 에머지 예측 | 71 |
| 나. 온실가스 저감방안을 적용한 에머지 평가 | 74 |
| 3. 에너지 시스템 모델링 | 82 |
| 가. 에너지 시스템 모델 수립 | 82 |

나. 온실가스 배출을 고려한 에너지 모델링 88

다. 온실가스 저감방안을 적용한 에너지 모델링 91

라. 지속가능한 도시를 위한 에너지 모델링 95

V. 결 론 107

참 고 문 헌 110

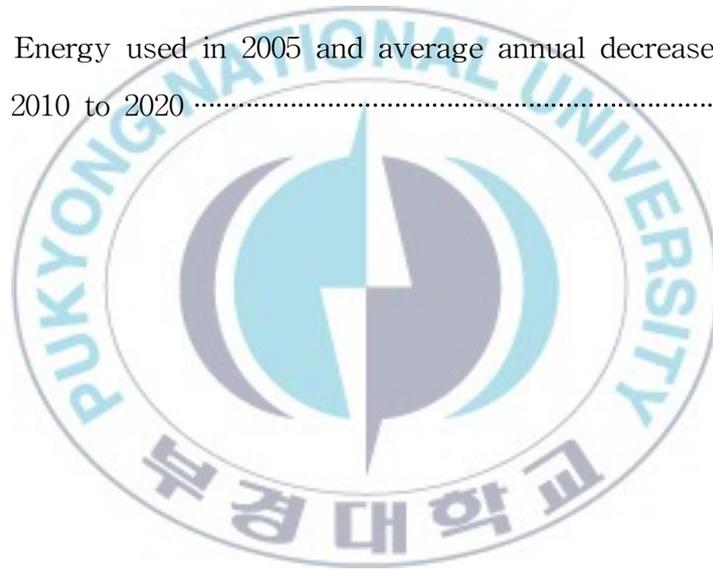
Appendices 118



List of Tables

| | |
|---|----|
| Table 2.1 The ranking of city applying EPI index | 10 |
| Table 2.2 A type of the greenhouse gases | 13 |
| Table 2.3 Greenhouse gas emissions in Korea | 14 |
| Table 2.4 The result of estimation for greenhouse gas emissions in Busan | 16 |
| Table 3.1 The change of energy consumption in Busan. | 34 |
| Table 3.2 Tabular format of emergy analysis table for Busan | 40 |
| Table 3.3 Greenhouse gas emissions of energy section in Busan | 42 |
| Table 3.4 The reduction plan and the amount of greenhouse gas inventory of Busan | 44 |
| Table 3.5 Reduction of greenhouse gas emissions in each reduction plan | 47 |
| Table 3.6 Calculation of constants for the Model FISH using numbers on the diagram in Fig. 3.8 | 54 |
| Table 4.1 Emergy flows of the Busan metropolitan city in 2007 | 58 |
| Table 4.2. Summary of flows for Busan in 2007 | 61 |
| Table 4.3 Indices for overview of Busan using emergy in 2007 | 62 |
| Table 4.4 Variation of Emergy inflow from renewable sources(R), Nonrenewable sources(N) and Purchased input(F) | 63 |
| Table 4.5 Variation of emergy indices from 1998 to 2007 | 67 |
| Table 4.6 Sustainability state based on ESI in nation system | 70 |
| Table 4.7 Variation of predicted emergy indices in Busan form 2010 to | |

| | |
|--|----|
| 2020 | 73 |
| Table 4.8 Nonrenewable sources(Oil) changes by reduction plan of greenhouse gas emissions | 76 |
| Table 4.9 Nonrenewable sources(electricity) changes by reduction plan of greenhouse gas emissions | 77 |
| Table 4.10 Variation of energy indices by reduction plan | 80 |
| Table 4.11 Initial values of the storage and flow in Energy diagram .. | 86 |
| Table 4.12 Normalization and calibration for the model | 87 |
| Table 4.13 Energy used in 2005 and average annual decrease rate from 2010 to 2020 | 92 |



List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 The contribution of greenhouse gas emissions for the each section in Busan | 16 |
| Fig. 2.2 Symbols of the energy systems language | 21 |
| Fig. 2.3 The methodological roots of systems ecology | 22 |
| Fig. 2.4 Energy quality chain used to calculate solar transformity | 24 |
| Fig. 2.5 Concepts of energy transformation hierarchy and transformity | 25 |
| Fig. 2.6 Energy based indices, accounting for local renewable energy inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F) | 26 |
| Fig. 2.7 A comparison of energy sustainability index in regional systems | 30 |
| Fig. 3.1 The graph of population change in Busan | 32 |
| Fig. 3.2 The graph of progress in energy consumption in Busan | 33 |
| Fig. 3.3 The flow chart for this study | 36 |
| Fig. 3.4 Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right | 38 |
| Fig. 3.5 Energy system diagram of Busan | 39 |
| Fig. 3.6. Model of world carbon dioxide | 51 |
| Fig. 3.7 Kinds of equations for the simple storage model TANK | 53 |
| Fig. 3.8 Minimodel FISH with three evaluated pathways to show how to calibrated equations | 54 |
| Fig. 3.9 Example of Module in Visual Basic Editor from MS EXCEL | |

| | |
|---|----|
| program | 55 |
| Fig. 4.1 Emergy signature in Busan | 60 |
| Fig. 4.2 The contribution of emergy inflow average from Renewable sources(R), Nonrenewable sources(N) and Purchased input(F) | 64 |
| Fig. 4.3 Variation of emergy inflow from Renewable, Nonrenewable sources and Purchased input | 64 |
| Fig. 4.4 Variation of coal, oil, gas, electricity, and inflow of Good & Service | 65 |
| Fig. 4.5 Variation of emergy indices in Busan | 68 |
| Fig. 4.6 Variation of predicted emergy inflow from purchased input | 72 |
| Fig. 4.7 Change of energy consumption by reduction plan | 78 |
| Fig. 4.8 Variation of predicted emergy inflow from purchased input by reduction plan | 79 |
| Fig. 4.9 Energy systems diagram of Busan for energy modeling | 83 |
| Fig. 4.10 Energy systems diagram of Busan with letters for each storage and pathway | 84 |
| Fig. 4.11 The results of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan | 89 |
| Fig. 4.12 R, F, and Y values of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan | 90 |
| Fig. 4.13 EYR, ELR and ESI indices of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan | 91 |
| Fig. 4.14 The results of energy simulation applying the reduction plan | 93 |
| Fig. 4.15 Change of R, F, and Y values applying the reduction plan | 94 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.16 Change of EYR, ELR and ESI indices applying the reduction plan | 95 |
| Fig. 4.17 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year | 96 |
| Fig. 4.18 Change of R, F and Y values applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year | 97 |
| Fig. 4.19 Change of EYR, ELR and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year | 98 |
| Fig. 4.20 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 20% per year | 99 |
| Fig. 4.21 Change of EYR, ELR and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 20% per year | 100 |
| Fig. 4.22 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 30% per year | 101 |
| Fig. 4.23 Change of EYR, ELR and ESI indices of the system applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 30% per year | 102 |
| Fig. 4.24 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 40% | |

per year 103

Fig. 4.25 Chage of EYR, ELR and ESI indices applying the case of
reduction plan and increasing usage of renewable energy
sources by 40% per year 104

Fig. 4.26 ESI index applying the case of reduction plan and increasing
usage of renewable energy sources from 10% to 40% per
year 105



List of Appendices

| | |
|---|-----|
| Appendix 4.1. Emergy evaluation for Busan metropolitan city form 1998 to 2007 | 118 |
| Appendix 4.2. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2007 | 127 |
| Appendix 4.3. Summary of flows in Busan | 131 |
| Appendix 4.4. Solar transformity used in Emergy analysis of Busan · | 132 |
| Appendix 4.5. Predictied emergy evaluation for Busan metropolitan city from 2010 to 2020 | 133 |
| Appendix 4.6. The code of Visual Basic programming about the system of greenhouse gas emissions in Busan | 136 |
| Appendix 4.7. The code of Visual Basic programming about the system of greenhouse gas emissions in the case of applying the reduction plan in Busan | 138 |

An Ecological Economic Evaluation on the Carbon Reduction Plan of Urban by the Energy Modeling

Jung Hyuk Im

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

Abstract

Research to solve the global climate change crisis by reducing greenhouse gas emission and to achieve sustainable development of urban is in process. It is desirable to reduce nonrenewable energy use by greenhouse gas reduction, but the change of system should be evaluated to adapt the ripple effects.

The aim of this study is to confirm the present condition of urban system and to predict the changes of urban system by the policy for responding to climate change crisis through the approach of system ecological method.

In this study, we selected Busan metropolitan city as a target site and studied the system of Busan using Energy evaluation from 1998 to 2007.

As the result, energy basis of Busan includes environment energies such as sun, rain, river, tide, wave, earth cycle and purchased input such as supplied coal, oil, gas, electricity, good & service from out of system boundary. Total energy of Busan was shown $5.82E22 \sim 6.91E22$ sej/yr and about 84% of it was purchased sources from outside.

Energy flows from the environment was shown about 10 percent in total energy in Busan. The energy from river was shown the highest proportion in the environment energy resource, and the energy from tide was the next.

Emergy yield ratio(EYR) and Emergy investment ratio(EIR) of Busan in year 2007 were 1.12 and 8.05. Also, Environmental loading ratio(ELR), showing the ratio of rising environmental load from the development of urban system was 8.14, which is similar with the ELR of South Korea. Emergy Sustainability. Emergy Sustainability index(ESI) was 0.14, which means Busan has a low sustainability level.

We tried to predict the future of Busan after 2007 based on the data from Emergy analysis and statistical analysis, and also considered applying the reduction plan of Greenhouse gas emissions of Busan.

Predicted amount of purchased input shows a clear increment trend until 2020. The green house gas emission reduction plan made to reduce the amount of purchased input slightly but there was no significant change to emergy indices such as EYR, ELR or ESI.

The results of simulation on greenhouse gas emission of Busan shows decrement of stored environmental resource(Q) and money(M) due to the increasing of economical asset(A) and the consumption of the city. The simulation also shows the prediction on amount of greenhouse gas emissions(C) which increases steadily until 2020, the amount of export(Ex) decreased gradually.

In the case of applying reduction plan of greenhouse gas emissions on the simulation, Economical asset(A) slowed it increment. The Money storage(M), and the amount of export(Ex) also decreased due to the reduction of fossil fuels use. The increasing trend of greenhouse gas emissions(C) was switched to decreasing by 15% until 2020. However, applying the reduction plan of greenhouse gas emissions did not occur the positive changes to emergy indices.

Therefore we applied the reduction plan and increased usage of renewable energy source by 10% per year on the simulation. The result of the simulation shows the reduction in greenhouse gas emission and increment on emergy sustainability index(ESI) in Busan.

The result of performing the simulation through various stages for the

realizability of sustainable city, more amount of greenhouse gas emissions(C) decreased while energy sustainability index(ESI) increased up to 0.98 in the case of applying the reduction plan and to 40% increase on usage of renewable energy source per year simultaneously.

These results indicate that the transition in industrial structure is required by promoting renewable energy industry based on energy in the environment through enhanced usage of renewable energy source and reducing use of fossil fuels simultaneously.



I. 서론

1970년대 로마클럽의 보고서인 ‘성장의 한계’를 시작으로 부각된 지구적 위기의식은 1990년대에 이르러 이를 극복하기 위한 ‘환경적으로 건전하고 지속가능한 발전(environmentally sound and sustainable development)’이란 패러다임의 확산으로 이어져 환경·경제·사회 각 분야에 큰 영향을 주었으며 그 결과 지속가능성에 대한 많은 연구를 진행하게 되었다.

특히 재생불가능한 자원 고갈에 따른 에너지 문제와 이에 따라 파급되는 환경, 경제적인 문제는 환경적으로 건전하고 지속가능한 발전에 핵심적으로 해결되어야 될 과제로 제시되었다.

21세기에 이르러 이러한 지속가능성에 대한 관심은 급격한 기후변화 문제를 해결해야 가능하다는 논의로 이어졌으며, 기후변화의 주요 원인을 과도한 온실가스 배출에 따라 발생하는 결과로 인정하고 전 세계적으로 온실가스 배출을 관리하고 저감하는 방안에 대하여 협의하고 정책방향을 제시하고 있다. 이는 재생불가능한 자원사용을 줄이고 효율적으로 이용하여 지속가능한 발전을 이루고자하는 지난 세기의 연구와 이어져 지구적 에너지 관리정책의 중심적인 역할을 하고 있다.

기후변화와 온실가스 배출과의 연관성은 1970년대부터 나타나기 시작하였다. 1988년 국제연합(UN)이 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)를 조직하여 기후변화의 원인을 조사하였으며 그 원인을 온실가스의 과다 배출로 제시한 바 있다.

온실가스의 과다 배출 원인으로 산업혁명 이후 화석연료를 이용하는 과정을 통하여 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO₂)가 급격히 배출된 점을 설명하고 있으며, 또한 산림의 농경화로 인한 과다한 방목, 석탄채광, 하수

처리, 폐기물 매립 등에 따른 메탄가스(CH₄)의 배출도 포함하고 있다. 그 밖에 온실가스에 포함되는 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(Hydrofluorocarbons, HFC), 과불화탄소(perfluorocarbons, PFC), 육불화황(Sulphur hexafluoride, SF₆)와 같은 기체는 인간의 산업 활동에 의해 생산된 온실가스로 기후변화에 영향을 미친다고 보고되고 있다.

온실가스 배출 조사결과 경제·생산 활동을 통한 화석연료 소비에 따라 온실가스 배출이 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 화석연료의 이용이 가장 활발하게 이루어지고 있는 도시지역은 온실가스 배출관리에 중요한 지역으로 체계적인 관리의 필요성이 강조되고 있다.

온실가스 배출 외에도 도시 지역은 인구 집중으로 인한 도시 기반시설의 과밀화, 생산·소비활동을 통해 발생하는 많은 오염물 배출 등으로 여러 가지 에너지·환경·경제적 문제를 야기하고 있으며, 이러한 복합적인 문제를 해결하기 위하여 경제학, 생태학, 환경공학을 중심으로 지속가능한 모델 및 분석 등이 진행되고 있다.

지속가능한 모델들은 전원도시, 생태도시, 저탄소도시 등의 패러다임으로 폐기물의 재활용, 친환경적 도시 건설, 신재생에너지 활용 등에 중점을 두고 추진된 바 있으며, 이러한 모든 접근방법의 목표는 결국 과다하게 이용되는 재생불가능한 에너지를 줄이고 어떻게 재생가능한 에너지를 활용하는가에 기본을 두고 있었다. 이는 온실가스 배출량 감축을 통한 저탄소 녹색도시 조성이란 현재의 대한민국 국가 정책과도 부합되는 내용이다.

저탄소 녹색도시 구현을 위하여 수행되고 있는 온실가스 배출량 조사 및 인벤토리 구축은 기후변화 대응 및 에너지를 목표에 맞게 총량적으로 관리할 수 있는 과정 및 지표로 유용하나, 이와 같은 결과를 연계하여 배출량을 관리하고 감축하는 방안은 아직 체계적이지 못하며, 개별적인 경제적 비용분석을 통하여 제시되고 있어 과학적이고 시스템학적인 분석이 필요한

시점이다. 또한 온실가스 감축에 따른 사회·경제적인 분석 및 평가가 함께 수행되어야 보다 생태효율적인 도시 구현이 이루어 질 것이다.

본 연구에서는 이러한 온실가스에 대한 효율적 저감 및 관리를 위하여 생태경제적인 분석 및 평가를 추진하고자 시스템 생태학의 접근방법을 제시하고자 한다.

시스템 생태학에서는 자연환경과 경제활동의 발전에 관여하는 에너지원을 동일한 가치 척도에 두고 에머지(Emergy) 분석법을 도입하여 실질적인 가치를 평가하고 있다. 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 통합한 시스템 생태학은 국가, 지역, 생태계 및 개별적 사업 단위의 시스템 등에 적용되어 시스템의 에너지원에 대한 분석과 함께 에머지 지수 등을 통한 생태효율성 및 생태경제성을 평가하고 있다.

본 연구에서는 에머지 분석 및 평가를 통하여 도시의 지속성 및 변화를 검토하고, 현재 추진되고 있는 온실가스 저감 방안 적용에 따른 미래의 전망과 과급효과를 예측하기 위하여 에머지 분석 및 에너지 모델링을 통한 생태경제성 평가결과를 제시하고자 한다.

이와 같은 생태경제적 평가를 위한 에머지 분석 및 모델링 연구는 시스템에 대한 과학적인 이해를 높이고 지속가능한 도시계획 수립 및 온실가스 감축을 위한 정책방향을 보여줄 뿐만 아니라 시스템의 변화를 관찰하여 통합적인 도시의 생태경제학적 평가에 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 이론적 배경

1. 지속가능한 발전

가. 지속가능한 발전의 개념

지속가능한 발전(sustainable development)은 1987년 세계환경개발위원회(WCED)의 보고서로부터 개념이 정립되어 1990년대에 이르러 지속적인 이용(Sustainable use)의 개념이 합성되어 환경적으로 건전하고 지속가능한 발전(environmentally sound and sustainable development)의 개념으로 환경·경제·에너지 관련된 문제에서 가장 중요한 가치로 인식되고 있다. 특히 지속가능한 발전은 그동안 인식되어온 경제적 생활수준의 향상을 의미하는 단순한 성장뿐만 아니라 전체적인 지구환경 및 사회복지의 안정이 결합되어 삶의 질의 향상을 도모하는 의미를 내포하고 있다.

이와 같은 지속가능한 발전 개념은 현 세대의 삶의 질 향상을 넘어 미래 세대의 욕구나 선택권에 대해서도 배려하는 개념으로 이전의 현실적 가치 개념을 넘어서 미래지향적이고 장기적인 안목을 강조하게 되었으며, 동시에 현 세대 간의 형평을 추구하여 인류를 제외한 자연환경과의 공존에도 눈을 돌리게 하는 계기가 되었다.

또한 환경을 있는 그대로 지키자는 소극적인 환경보전에 대한 인식을 인간 활동과 연계하여 공존할 수 있는 보다 적극적인 환경보전에 대한 인식으로 변화하게 되는 시발점이 되어, 모든 경제, 사회, 환경계획이 하나의 방향으로 나가는데 중요한 개념으로 자리 잡았다.

이러한 지속가능한 발전을 이루기 위하여 현재까지 유지하여온 도시 내

생활환경 및 생산·소비 체계의 전환과 같은 큰 틀에서 변화가 필요하다는 점이 강조되고 있으며, 보다 다양한 분야 및 시각에서 연구될 필요성이 있는 개념으로 여겨진다.

나. 지속가능한 발전에 대한 평가

지속가능한 발전 개념에 따라 이를 뒷받침할 수 있는 평가방법이 꾸준히 제안되고 있다. 유엔(UN), 경제협력개발기구(OECD), 세계경제포럼(WEF) 등의 국제기구에서는 지구 전체에서 동일하게 이용할 수 있는 평가기준 및 방법을 제시하고 있으며, 각 분야에서 지속가능성을 평가할 수 있는 지수 및 지표를 개발하여 제시하고 있다.

국제기구 등에서 제안하고 있는 평가 방법은 대표적인 것은 환경지속성 지수(ESI), 생태학적 발자국(EF) 등이 있으며, 그 중 세계경제포럼(WEF)에서 2001년에 제시된 각 국가별 환경지속성 지수(ESI)는 환경, 사회, 경제 등의 분야에서 20개의 지표와 변수 등으로 평가하였다. ESI 평가방법은 국가 간의 분야, 지표별 비교를 통하여 현 시점에서의 경제적 부유함이 지속가능한 발전과는 일치하지 않음을 설명하게 하였으며 장기적 환경계획 수립의 필요성을 제시하였다. 하지만 많은 지표와 변수로 인하여 국가적 평가에는 효율적이지만 지역별, 사업별 평가에는 유용하게 사용되지 못하고 있는 것이 현실이다.

생태학적 발자국(Ecological Footprints : EF)에 따른 평가방법은 토지이용에 따른 평가방법으로 인류의 소비가 자원고갈과 환경오염 문제에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 파악하고 소비를 위해 필요한 토지면적을 계산하여 지구의 면적과 비교함으로써 지금의 소비상태가 지구의 환경에 어떠한 영향을 주고 있는지를 알아보는 방법이다(Wackernagel and Rees, 1996).

EF 평가법은 환경수용용량을 토지에서 기초하여 산정하고 있으며, 인류가 소비하는 자원과 폐기물의 자국을 검토하여 지속가능한 발전을 위하여 소비한 자원과 생산 가능한 토지를 비교하여 알려줄 수 있다.

경제학적 측면에서도 환경의 영향을 최소화하면서 경제성장을 이루기 위한 연구로 이어져 환경경제학적으로 지속가능성을 평가하기 위하여 환경경제모형에서부터의 생태-경제 통합 모형, 조건부가치측정법 지불의사 분석, 편익·비용분석법 등을 통한 환경경제학적 가치평가법 등이 개발되어 이용되고 있다.

시스템 생태학적인 지속가능한 발전에 대한 평가방법으로는 에머지 분석을 통한 지속성 지수(ESI)가 제시된 바 있다. 시스템 생태학에서는 자연환경과 경제활동이 상호 작용하는 농업, 공업, 그리고 도시 내의 경제 시스템 등에 대해 자연과학, 공학, 사회과학 등의 모든 학문분야의 기술과 방법을 연계시킬 수 있는 에너지 척도를 기초로 에머지 분석을 통한 시스템의 평가 및 분석, 에너지 시스템 모델링을 통한 예측으로 시스템을 종합적으로 평가하고 있다.

에머지 평가방법에서의 지속성 지수(ESI)는 환경적 부하를 줄이며 시스템에 진정한 기여를 할 수 있는 생산 활동을 할 수 있는 것을 평가하기 위하여 생산물이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는 에머지 생산비(EYR)와 시스템의 생산과정 중, 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 환경부하율(ELR)의 비로 계산된다. 결국 지속적이지 못한 비영속성 에너지의 의존성을 줄이는 과정에서 최대의 동력을 유지하는 것을 평가한다고 볼 수 있다.

지속성 지수(ESI)는 자원의 효율적 사용을 위하여 단위 생산과정 당 최소한의 자원 투입으로 최대한의 가치를 창출하고자 하는 생태효율성 및 생태경제성을 평가하기 위한 방법으로 제시될 수도 있다.

다. 도시의 지속가능성에 대한 평가

도시란 인간의 주거를 위하여 조성된 지역으로 산업혁명 이후 공업제품의 대량 생산으로 인한 인류의 경제활동, 생산과 소비가 급격히 늘어남에 따라 성장하게 되었다.

도시의 발전은 크게 성장-정체-쇠퇴의 세 가지 단계를 가지고 변화한다(문태훈, 2007). 도시의 생성 이후 지속적인 시설과 서비스가 공급되어 생산성을 향상시키면 인구 증가를 야기하게 되어 적정규모 이상으로 팽창하는 경향을 보이며, 과도한 인구 및 에너지 사용은 도시를 정체단계로 이르게 하고 주변 도시로의 인구 및 산업의 이동현상을 야기하여 쇠퇴단계에 이르게 된다.

이러한 방식의 양적 성장은 한정된 지역 내에서의 인구 과밀화, 과다생산과 무분별한 소비활동, 과밀화로 인한 도시 내 기반시설의 효율성 저하, 인간 활동에 의한 오염물과 같은 부산물의 발생 등으로 과밀화, 공업화에 따른 부작용을 일으키게 된다. 우리나라의 경우는 도시의 생성이 타 유럽 및 미국에 비하여 늦었기 때문에 성장단계에 이르는 도시가 대부분이나, 양적인 성장 위주의 개발방식으로 짧은 시기 동안 초고밀도의 도시로 개발되었기 때문에 현 시점에 이르러 각 도시에서 이러한 환경적, 공간적인 문제가 심각한 정체단계에 이른 도시가 나타나기 시작하고 있다.

더불어 양적인 도시의 성장 방법은 지구 전체의 시스템에 과부하를 발생시키는 원인으로 인식되고 있으며, 이를 해결하기 위하여 여러 대책을 제시하지만 양적인 성장방식의 시스템 안에 포함된 다수의 하위 시스템의 변화로만으로는 효율적인 성과를 얻기 힘들다.

도시 성장방법을 개선하기 위하여 지속가능한 도시의 패러다임이 대두되었으며 앞서 제기된 개발위주의 패러다임을 변화시키는데 초점을 두고 여

러 가지 특징을 바탕으로 새로운 도시 모형을 제시하고 있다.

미국에서 1980년대말 시작된 뉴어바니즘, 스마트성장, 콤팩트시티 등은 고밀도화된 도시의 구조 및 무분별화 교외화로 인한 토지손실에 대한 환경 문제에 대응하기 위하여 추진된 바 있으며, 영국에서는 도시공간의 물리적 요소에 지역특성과 환경을 고려하는 어번빌리지라는 패러다임이 제시된 바 있다. 제시되고 있는 패러다임의 대부분은 모두 환경적으로 지속가능한 도시 발전을 위하여 부산물의 재활용, 생태계를 모델로 한 순환적 시스템 구축 등과 같은 친환경적, 생태적 접근방법을 제안하고 있다.

도시의 패러다임 변천에 따라 각 개념을 내포하고 실질적으로 원활히 진행되고 있는지 파악할 수 있는 평가법이 활용되기 시작하였다. 국가단위의 환경지속성지수 외에 국외에서는 도시 성장의 메카니즘과 에너지론에 대한 연구(Huang et al., 1999), 이탈리아 로마에 대한 에머지 분석을 통하여 도시 성장 및 발전요인을 평가(Ascione et al., 2009), 중국의 여러 도시에 대한 에머지 분석 및 지수를 비교 및 평가(Su et al., 2009; Liu et al., 2009, Zhang et al., 2009) 등을 수행한 사례가 있다. 조사된 연구사례는 모두 도시에 대한 에머지 분석 및 지수를 통하여 도시의, 특성 및 현황을 파악하고 변화에 대한 방향 등을 제시하고 있다.

이탈리아 로마에 대한 에머지 분석 결과는 각 마카오, 타이페이, 포르투리코와 같은 다른 국가의 도시와 Emergy/GDP, Emergy/person, EYR, ELR, empower density, ESI와 같은 에머지 기반의 지수로 비교·분석하였다.

Zhang(2007)의 경우 중국 Shenzhen이란 도시를 대상으로 일정기간 동안의 에머지 분석을 통하여 GDP, 산업가치 인구 증가 등에 따른 도시 내 에너지 자원의 변화를 확인하고 각 사례에 대한 자원의 재활용 측면을 평가하는 자원효율성(Resource efficiency)과 산업공정으로 발생하는 폐기물을

대상으로 평가하는 환경효율성(Environmental efficiency), 두 가지 효율성 지수를 분석하여 연도별 생태효율성을 제시한 바 있다.

국내에서는 부산시를 대상으로 생태학적 발자국분석(Ecological Footprint)을 이용한 도시의 지속가능성 평가(문경주, 2004)의 결과로 부산 시민의 1인 총 EF(Ecological Footprint)값은 1995년에 1.31 ha에서 2002년에는 2.92 ha로 123 % 증가하였으나, 이는 행정구역면적 1,400 ha 증가와 더불어 도시인구가 15만 명이 감소하는 결과에 따른 것으로 판단되어졌다. 또한 부산 시민 1인당 물질과 에너지를 소비하고 소비되는 폐기물을 흡수하는데 요구되는 토지면적은 행정·지리적 면적보다 143배에 이르는 것으로 환경친화적 도시계획을 마련하기 위해서는 산림 및 녹지와 같은 물리적 토지관리정책을 제안하고 있다.

에머지 평가에 의한 국가 및 지역의 자연환경과 경제에 대한 Emergy 평가(Lee and Odum, 1992; 최영근, 2003), 아파트의 건설 및 주거환경에 대한 평가(임정혁 등, 2005), 지속가능한 토지이용을 위한 에머지 생태지도 개발과 활용에 관한 연구(박상현 2010) 등이 연구되어왔으며, 이 중 부산광역시 지속가능성 평가(손지호와 이석모, 2000)에서도 부산은 비영속적 에너지원으로는 낙동강의 유량에 큰 영향을 받고 있으며, 화석연료 및 각종 재화와 용역의 에머지가 전체 에머지의 90 %를 차지하여 생산성 지수 및 환경부하율 등이 전형적인 공업화 도시의 특성을 나타내어 시스템 개선의 필요성을 요구한 바 있다.

환경성과지수(EPI)를 이용한 국내 7개 도시의 도시환경지속성 성과평가(김유나와 문태훈, 2009)에서는 환경지속성지수(ESI)가 지나치게 광범위하여 평가결과를 정책지침에 활용하기에 미흡한 면이 있음에 착안하여, 2006년 세계경제포럼에서 발표된 환경성과지수(EPI)를 이용하여 정책수립과 집행에 구체적인 도움을 줄 수 있도록 환경보전목표(건강에 미치는 환경영향

감소)와 생태계활력목표(생태계의 쇠퇴와 자연자원의 감소 억제)를 측정하고 있다. 그 결과 각 환경보전분야, 대기질분야, 수자원분야, 생물다양성 분야 등에 도시별 순위를 매겼으며, 최종 EPI 적용 결과에 따른 도시별 순위는 아래와 같다(Table 2.1).

Table 2.1 The ranking of city applying EPI index

| Rank | Metropolitan city | EPI index value |
|------|-------------------|-----------------|
| 1 | Daegu | 77.4 |
| 2 | Gwangju | 75.0 |
| 3 | Busan | 74.6 |
| 4 | Daejeon | 74.1 |
| 5 | Seoul | 72.1 |
| 6 | incheon | 70.3 |
| 7 | Ulsan | 68.2 |

그 외 경제학적 조건부가치측정 및 정책적 통합모형 제시에 관한 연구(목정훈, 2009; 윤소원과 이동근, 2001)가 국내 도시별, 사업별로 수행된 바 있다. 각 평가방법을 통하여 도시의 현황을 분석하고 지속가능한 발전을 위하여 필요한 시스템 전환 등을 제시하고자 하였다.

2. 온실가스 저감방안

가. 온실가스의 개념 및 배출량

지구는 태양으로부터 막대한 양의 복사에너지를 받고 있으며, 태양으로부터 유입된 복사에너지는 지구표면으로부터 적외선으로 방사되고 이를 지구 재복사의 과정이라고 말한다. 지구 재복사의 과정에서 일부 적외선이 지구 바깥으로 나가지 못하고 지구 대기권 내에 머물러 대기의 온도가 점차적으로 상승되는 현상을 대기 온실효과(greenhouse effect)라고 한다. 그리고 온실효과로 인하여 지구온난화의 지표인 지구표면온도는 지구표면 온도는 지난 100년 동안(1906 ~ 2005) $0.74 \pm 0.18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 상승하였다고 보고된 바 있다(IPCC, 2007).

온실효과를 통한 지구 온난화로 인하여 육지 및 해양 자연 생태계가 급격히 변화하며 오존파괴가 일어나 지속적인 지구온난화를 일으킬 것으로 예상되고 있다. 이러한 지구 온난화는 많은 화석 연료의 사용에 따라서 비례적으로 높아진다는 통계자료도 보고되고 있다. EIA(Energy Information Administration) 통계자료에 따르면 1980년부터 2004년까지 세계에너지 소비는 약 60 %까지 증가하였으며, 향후 25년간 비슷한 수준의 에너지 소비 증가가 예상되고 있다.

기후변화에 따른 지구적 환경문제 해결을 위하여 1992년 리우유엔환경개발회의에서 국제기후변화협약을 채택하고 1997년 부속서 I 국가에 강제적으로 온실가스를 감축하는 교토의정서를 채택하였다. 2007년 12월에는 인도네시아 발리섬에서 제13차 유엔 기후변화협약 당사국 총회가 개최되었으며, 교토의정서 시한이 끝나는 2012년 이후의 온실가스 감축체제 구축을 위한 발리 로드맵이 채택되었고 2009년 덴마크 코펜하겐에서 포스트 교토

체제의 기후변화 대응 방향을 설정하게 되었다.

우리나라에서는 2006년에 에너지 기본법, 2007년에는 지속가능발전기본법을 제정하였고 그간 기후변화, 에너지 및 지속가능발전 등 저탄소 녹색성장 관련법들이 유기적으로 연계되지 못하고 개별적으로 시행되어 저탄소 녹색성장 관련 기존법의 통합 필요성에 따라 2009년 저탄소 녹색성장기본법을 제정하였으며, 녹색성장 5개년 계획 등 각 부처별 계획이 수립되고 있다.

우리나라의 경우 현재 강제적으로 온실가스 배출을 감축하는 부속서 I 국가에 포함되지 않았지만 향후 온실가스를 강제적으로 감축하는 국가로 포함될 가능성이 높기 때문에 현재 온실가스 배출량 산정 및 감축대책 마련에 주력하고 있다.

적극적인 온실가스 저감 활동을 전개해 나가는데 필요한 목표와 전략체계를 설정하기 위해서는 가장 먼저 현재 어떠한 온실가스가 어디서 어떻게 얼마나 발생하고 있는지를 파악할 수 있는 체계 마련이 필요하다고 볼 수 있다. 이러한 온실가스 배출현황을 파악하기 위하여 온실가스 배출 목록(inventory)을 작성 중에 있으며, 온실가스 배출 인벤토리를 통하여 온실가스 관련 규제에 따른 향후 발생 가능한 리스크를 확인하고 온실가스 목표량을 설정하고 경과의 측정 및 보고를 하고자 진행 중에 있다. 온실가스 배출 인벤토리의 과정은 조직경계 안에서의 직·간접적인 온실가스 배출원을 규명하고, 해당 배출원으로 인한 각각의 온실가스 배출량을 산정하여 총 온실가스 배출량을 목록화하는 작업으로 설명할 수 있다(김찬규, 2009).

온실가스 배출량 산정은 현재 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소 및 육불화황의 6종류로 규정하여 산정하고 있으며(Table 2.2), 지구 온난화 지수는 낮지만 이산화탄소는 전체 온실가스 배출량 중 약 80 % 이상을 차지하고 있기 때문에 온실가스 중 가장 핵심 요소로 분

류되고 있다.

온실가스 배출량 측정, 보고 등 온실가스 관리 전반에 걸쳐 가장 보편적으로 사용되고 있는 국제기준에는 국제표준화기구(International Organization for Standardization)에서 개발한 ISO 14064와 세계자원연구소(World Resources Institute) 및 세계지속가능발전협의회(World Business Council for Sustainable Development)에서 개발한 GHG Protocol이 있으며, 정부간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 가이드라인도 범세계적으로 온실가스를 측정하고 관리하는데 활용되고 있다.

Table 2.2 A type of the greenhouse gases

| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | HFCs, PFCs, SF ₆ |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Emission Source | Energy use/Industrial Processes | Waste/Agriculture, Forestry | Industrial Processes/Fertilizer use | Refrigerant/Cleaning |
| Global warming potentials (GWPs) | 1 | 21 | 310 | 1,300~23,900 |
| Contribution to global warming(%) | 55 | 15 | 6 | 24 |
| Total domestic emissions(%) | 88.6 | 4.8 | 2.8 | 3.8 |

지자체별 온실가스 배출량 및 배출특성 분석결과(지식경제부, 2009)에서 우리나라의 온실가스 배출량 결과는 Table 2.3과 같이 1990년도에 총배출량 298.1 백만tonCO₂에서 2004년도에 590.0 백만tonCO₂로 산정되었으며, 2006년도에는 599.5 백만tonCO₂으로 증가하여 연간 4.5 %의 꾸준한 증가

세를 보여주고 있다.

Table 2.3 Greenhouse gas emissions in Korea('90 ~ '06)

(unit : millionTonCO₂)

| Section | '90 | '00 | '04 | '05 | '06 | Annual average increasing ratio(%) |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------------------|
| Energy | 247.7 (83.1) | 438.5 (82.6) | 489.0 (82.8) | 498.5 (83.9) | 505.4 (84.3) | 4.6 |
| Industrial Processes | 19.9 (6.7) | 58.3 (11.0) | 68.5 (11.6) | 64.8 (10.9) | 63.7 (10.6) | 7.5 |
| Agriculture | 13.5 (4.5) | 17.0 (3.2) | 16.4 (2.8) | 16.1 (2.7) | 15.1 (2.5) | 0.7 |
| Waste | 17.0 (5.7) | 17.2 (3.2) | 16.5 (2.8) | 14.9 (2.5) | 15.4 (2.6) | -0.6 |
| Total emission | 298.1 (100.0) | 531.0 (100.0) | 590.0 (100.0) | 594.4 (100.0) | 599.5 (100.0) | 4.5 |
| Land use/forestry | -23.7 | -37.2 | -31.5 | -32.0 | -31.2 | 1.7 |
| Net emission | 274.4 | 493.8 | 559.0 | 562.4 | 568.4 | 4.7 |

각 부문별 특징으로는 폐기물 부문은 배출량이 감소한 반면 전체 배출량 부문의 90 %를 차지하고 있는 에너지 부문과 산업공정 부문의 연평균 증가율은 총배출량의 연평균 증가율(4.5 %)을 웃돌고 있었다. 특히 에너지 부문은 전체 배출량의 80 % 이상을 차지하고 있으며 매년 증가하는 추세를 보이고 있었다.

서울시의 온실가스 배출량 조사결과의 경우 2004년도 기준으로 25.6 백만톤CO₂로 산정된 바 있으며, 같은 해에 경기도는 45.5 백만톤CO₂로 분석된 바 있다(서울시정개발연구원, 2006; 경기개발연구원, 2006).

본 연구에서 대상지역으로 선정하고자 하는 부산시는 23.3 백만톤CO₂으로 서울시와 유사한 배출량을 보이고 있다(부산광역시 온실가스 배출량 조사, 2007). 이러한 국가 및 지자체의 온실가스 배출량 산정은 IPCC 가이드라인, 국가온실가스 배출통계, 선행연구결과 등을 통해 조사·분석하고 있으나, 아직 국내 온실가스 배출량 산정 지침 및 활동도 자료 확보가 미흡하여 하위 단계로 조사를 진행하면서 계속 보완하고 있는 실정이다.

부산시 온실가스 배출량 조사에서는 IPCC 2006 가이드라인의 배출계수를 이용하였고, 우리나라 국가 여건에 적합한 배출계수가 있는 경우 우리나라 배출계수를 활용하였다. 이를 바탕으로 1990년 ~ 2005년까지의 배출현황을 산정하고, 2010 ~ 2020년까지 배출전망을 추정하였다.

부산시의 온실가스 배출량 산정 결과는 Table 2.4와 같다. 1990년부터 2005년까지 총배출량 기준으로 연평균 2.21 % 증가하고 있었으며 산업공정 부분의 연평균 증가율이 가장 높았다.

부문별 배출량에 따른 온실가스 배출 기여도를 살펴보면, Fig 2.1과 같이 에너지부문이 가장 높은 배출기여도(89.4 ~ 78.9%)를 보였으며 다음으로 산업공정, 환경부문, 농축산업의 순으로 나타났다. 부산광역시의 온실가스 배출기여도는 에너지 부문의 배출기여도가 상대적으로 크게 높으며, 산업공정 부분의 증가세가 나타나고 있다.

Table 2.4 The result of estimation for greenhouse gas emissions in Busan(Busan Metropolitan City, 2007)

(unit : GgCO₂)

| Section | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | Annual average increasing ratio(%) |
|---|--------|--------|--------|--------|------------------------------------|
| Energy | 15,045 | 20,961 | 18,728 | 18,710 | 1.37 |
| Industrial Processes | 855 | 2,070 | 2,701 | 3,556 | 9.32 |
| Environment | 855 | 1,575 | 1,752 | 1,390 | 3.90 |
| Agriculture/stockbreeding | 59 | 66 | 64 | 54 | -0.55 |
| Total emission | 16,814 | 24,672 | 23,245 | 23,710 | 2.21 |
| Forestry | -46 | -130 | -71 | -48 | 0.27 |
| Net emission | 16,768 | 24,542 | 23,174 | 23,662 | 2.21 |
| Greenhouse gas emissions (ton/cap/year) | 4.46 | 6.34 | 6.10 | 6.48 | 2.37 |

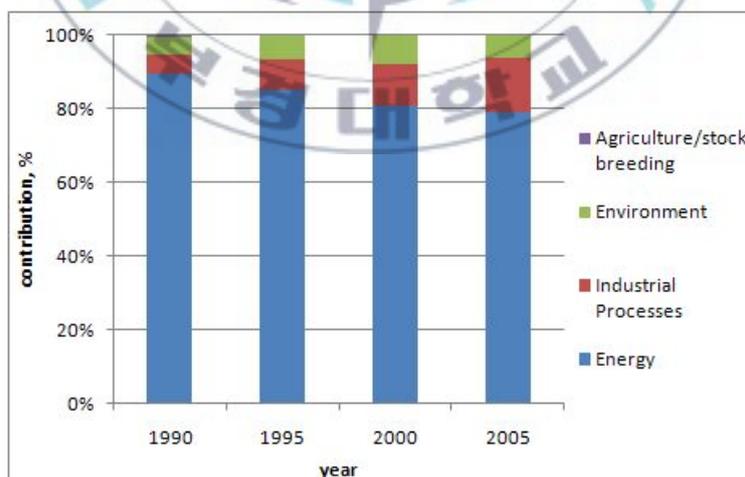


Fig. 2.1 The contribution of greenhouse gas emissions for the each section in Busan(Busan Metropolitan City, 2007).

나. 온실가스 저감방안

우리나라에서는 온실가스 인벤토리 구축에 따른 저감방안을 시범적으로 제시하여 운영하여 왔으며, 2006년도에는 서울시 온실가스 저감목표 수립 및 이행계획 평가 연구를 수행한 바 있다. 서울시의 온실가스 배출량은 2000년도의 28,771 만톤CO₂에서 2004년에는 25,63 만톤CO₂수준으로 약 10.9 % 감소하는 경향을 보였다(서울시정개발연구원, 2006)

이러한 배출량 산정결과에 대하여 서울시에서는 저감목표에 대한 시나리오 3가지를 제시하고 부분별 저감 대책을 제시한 바 있다. 에너지 대책으로는 도시가스 확대 보급, 집단에너지 확대보급, 구역형 집단에너지(CES) 공급 확대, 재생에너지 이용 보급(태양열, 태양광, 바이오디젤)방안을 제시하였으며, 자원·폐기물 대책으로는 생활쓰레기 등의 원천 감량방안을, 자동차 오염대책으로는 노후 경유차량 조기 폐차, 천연가스 시내버스 보급, 하이브리드 자동차 보급 확대방안을 제시하였다. 이와 더불어 자연환경보전대책과 시민참여 부문을 제시하여 연차별 삭감총량을 2000년 대비 2014년 온실가스 삭감목표 달성율을 51.0 %로 책정한 바 있다.

현재 부산시의 저감방안은 부산광역시 온실가스 배출량 조사(2007)에서 제안된 방안을 포함하는 녹색성장 추진 5개년 계획과 부산시 온실가스 저감시책이 포함되는 「부산시 기후변화대응 종합대책 및 연차별 시행계획」이 수립되어 진행될 예정이다. 향후 이와 같은 모든 정책 추진방안에 대해서도 사업계획 수립 시 각 시나리오별뿐만 아니라 모델링을 통한 사업별 전망치에 따른 저감효과와 상호인자 간의 예측이 필요하며, 본 연구에서는 앞서 연구된 저감방안 중 정량화될 수 있는 사업을 선정하여 에머지 분석 및 모델링에 이용하고자 한다.

이렇게 도입되는 저감방안은 BAU 대비 온실가스 전망에 따라 감축목표를 정하고 추진된다. 하지만 이러한 저감방안에 대한 비용편익분석과 같은 기본적인 경제성 분석이 이루어지지 않은 경우가 많아 그 효율성에는 많은 검토가 필요하다. 각 사업별로 미래 예측에 대한 온실가스 감축량은 제시되고 있으나 이에 대한 효율성 및 경제성에 대한 분석이 더 먼저 되어야 하고 이를 뒷받침하기 위해서 최근에는 생산조직의 효율성을 평가하기 위한 모형으로 상대적인 효율성을 구할 수 있는 DEA(Data Envelopment Analysis : 자료포락분석)모형을 이용한 분석을 시도하고 있다(심홍석, 2009). 예를 들어 발전사업장을 대상으로 한다면 분석의 투입물을 온실가스 배출량과 종업원 수를 사용하고 산출물로는 발전량을 사용하는 방식으로 각 사업별 효율성의 우선순위를 매겨 효율성이 높은 사업을 먼저 추진 하자는 의도로 반영되고 있다.

다른 연구사례로 경기도 31개 시군을 대상으로 조사된 온실가스 배출량에 대하여 군집분석과 상관관계분석을 통하여 특성을 파악하고 온실가스 배출저감전략을 군집별로 제안하였다(최충익과 고재경, 2010). 본 연구에서는 산업, 수송, 주거 및 상업, 농업, 폐기물, 산림으로 구성된 카테고리에 따라 각 시군을 군집으로 구성한 후 인구 수, 인구밀도, 배출량 GRDP, 이용되는 토지 등에 대한 상관관계 분석을 수행하였으며, 상관성이 있는 지역별 기후변화전략 도출의 필요성을 제시한 바 있다. 위와 같은 경제적이 며 통계적 방법은 온실가스 저감방안에 대한 사업 선정 및 우선순위 제시에는 효율적이나 미래 전망에 대한 예측과 도시 내 미치는 영향에 대하여서는 고려하지 못한 점이 있다.

이러한 점을 대하여 최근에는 온실가스 감축목표가 경제와 환경 등에 미치는 파급효과에 대하여 연구하는 사례가 늘고 있다. 그 중 다지역투입산출모형(탄소세 부과에 따른 가격 모형)을 이용하여 이산화탄소 배출가스

저감대책을 적용시 시나리오별로 분석한 바가 있다(김홍배와 유원환, 2002). 그 결과 정책 시나리오 중 산업별로 탄소세를 1 % 차등 부과와 산림면적 1 % 증가를 병행했을 때 생산액, 부가가치, 토지수요, 이산화탄소 변화량이 작게 감소하는 것으로 나타났다. 아울러 각 정책 시나리오를 통하여 환경개선을 위한 어떤 정책을 제시하여도 지역경제는 쇠퇴함을 보여 주고 있다는 것을 보여주었다.

임재규(2010)에 따르면, 선진국 및 주요 개도국이 발표한 2020년까지의 자발적 온실가스 감축목표를 Global CGE 모형을 활용하여 분석한 결과 선진국의 온실가스 배출량은 1990년 대비 약 14.0 % 감축하는데 그칠 것이라고 분석하였다. 또한 본 연구에서 제시하고 있는 과급효과는 선진국과 주요 개도국의 자발적 온실가스 감축목표 이행은 전 세계 실질 국내총생산을 1.18 % 감소시킬 것으로 분석하였다. 한국의 경우 국내총생산이 1990 ~ 2020년 동안 연평균 4.72 % 증가할 것으로 예측한 반면 온실가스 배출량은 이보다 낮은 3.06 %가 증가할 것으로 예측되었다. 산업적 측면에서는 고부가가치 산업화로 인하여 서비스산업의 성장과 에너지 집약산업의 상대적 둔화를 전망하고 있다.

이러한 연구결과에 따라 기후변화대책 및 온실가스 저감방안 수립 및 시행에는 우선적으로 도시 시스템에 미치는 영향에 대한 분석 및 예측이 필요하다고 볼 수 있으며, 이와 함께 도시 내 생태계, 생산·소비 시스템 등 다양한 하위 분야에 대한 전망도 함께 고려되어야 온실가스 저감 및 관리를 통한 실질적인 지속가능한 발전이 이루어 질 것이다.

3. 에머지 평가법

가. 시스템 생태학

시스템 생태학에서는 자연환경과 경제활동을 포괄하는 척도인 에너지를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동을 동일한 가치 단위(emergy)로 평가하는 접근방법을 적용한다.

그러므로 시스템 생태학은 자연환경과 경제활동이 상호 작용하는 농업, 공업, 상업 그리고 도시 등의 다양한 시스템에 대해 모든 학문분야의 기술과 방법을 연계시킬 수 있는 에너지를 기초로 자료를 수집, 분석, 예측하여 시스템을 종합적으로 평가할 수 있다. 그러기 위하여 대상 시스템에 대한 경계(boundary)를 설정하고 대상 시스템에 대한 다양한 요소들과 여러 가지 관계를 특정 기호를 통하여 그 관계를 설명하고 파악할 수 있도록 에너지 다이어그램을 작성한다. 에너지 다이어그램 내에 포함된 각 기호들은 에너지 흐름, 에너지원, 저장고, 열손실, 상호작용, 생산자, 소비자, 스위치, 상자, 거래 등으로 나누어 에너지의 흐름이나 상태를 적절히 표현할 수 있게 만든다(Fig. 2.2).

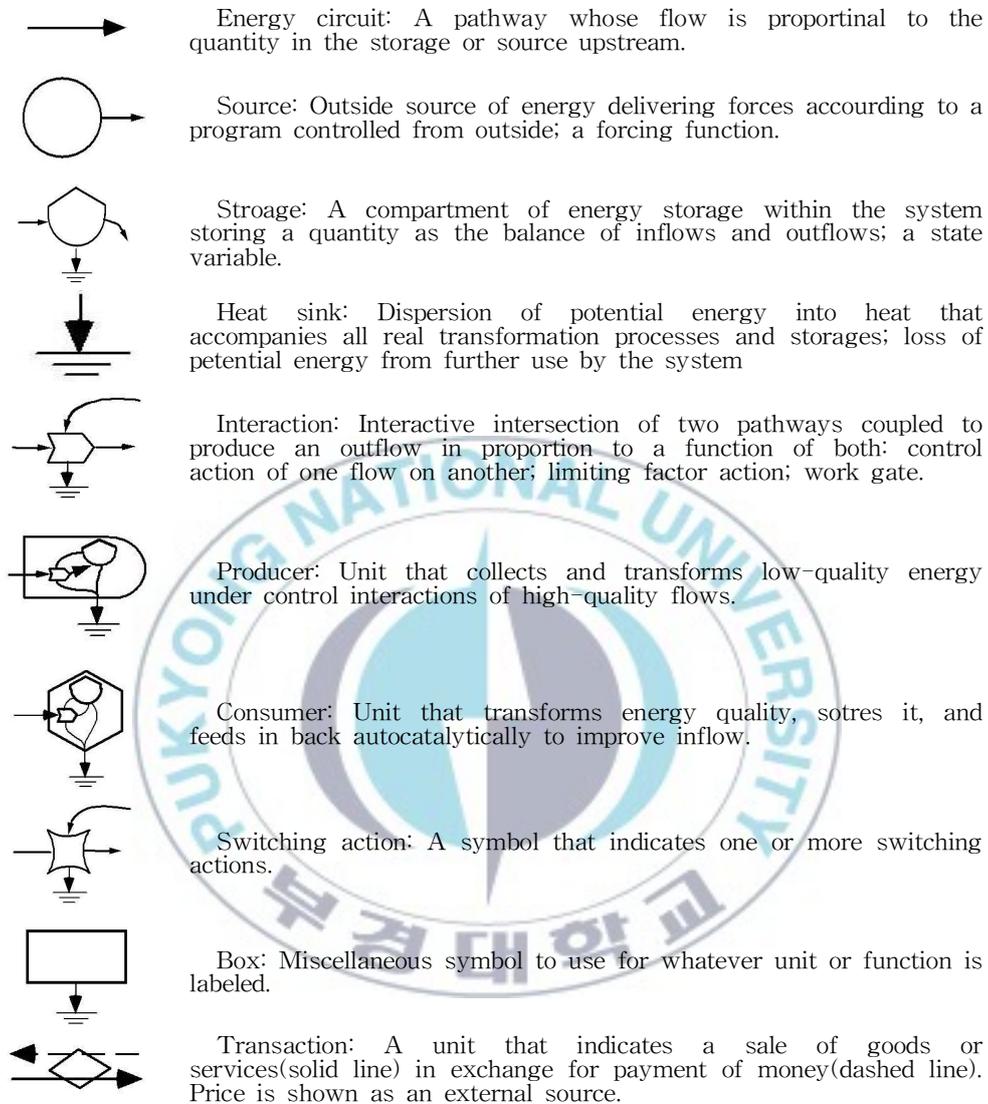


Fig. 2.2 Symbols of the energy systems language (Odum, 1971; 1983).

에너지 다이어그램은 시스템 내에서 일어나는 모든 과정을 시스템 언어로 분석하여 경제활동과 생태계를 함께 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.

기본적으로 에머지 분석 및 에너지 모델링은 Fig 2.3과 같이 환경보전 및 경제발전을 동시에 해결하기 위하여 수행되어왔으며, 본 연구에서는 온실가스 저감이란 환경정책적 결정사항이 지속가능한 도시발전의 한 방향이 될 수 있도록 에머지 분석 및 에너지 모델링을 통하여 분석 및 평가를 수행하고 적합한 대안을 제시하여 공공의 이익과 실질적인 부의 창출에 도움이 되고자 한다.

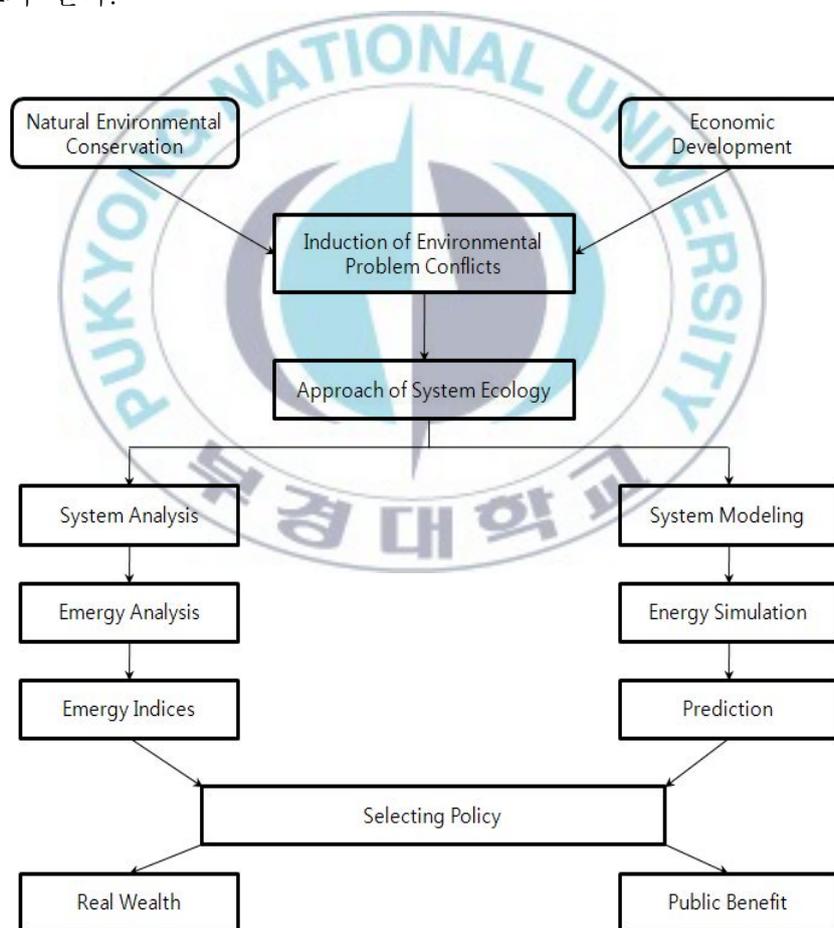


Fig. 2.3 The methodological roots of systems ecology(Odum, 1983).

나. 에머지와 에너지변환도의 정의

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 “재화와 용역을 생산하는 과정에 직접 그리고 간접으로 이미 이용된 유효에너지”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 이용되었던 모든 에너지(energy memory)를 말한다. 이는 서비스 과정이나 생산과정에서 이용되었던 에너지가 없었다면 우리가 이용하는 서비스나 생산물이 형성되지 못하기 때문이다. 현재 에머지 개념에서 서로 다른 형태의 에너지를 비교하기 위해 기준으로 사용하는 “유효 에너지”는 태양에너지이며, 단위는 Solar emjoules(sej)이다(Odum, 1996).

40,000 J의 태양에너지양이 이용되어 2 J의 목재를 생산하고 이 나무가 오랜 시간 지질학적 작용에 의해 1 J의 석탄으로 전환된다. 마지막으로 이 1 J의 석탄을 통해 전기를 생산하게 되면 0.25 J의 전기를 생산하게 된다. 따라서 우리가 흔히 사용하는 전기 에너지의 가치는 단순히 발전소에서 전기가 만들어져 사용하는 실제 에너지량(0.25 J)이 아니라 태양에서부터 나무, 지질작용, 석탄, 발전소를 거치면서 각 단계별로 이용되었던 40,000 sej가 되어야 한다는 것이다(Fig 2.4).

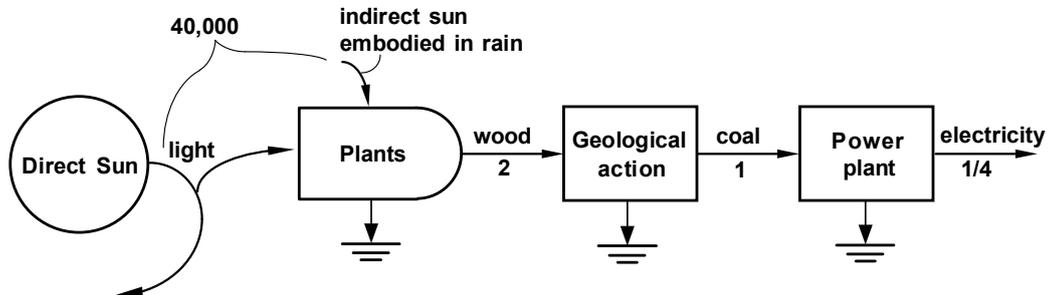


Fig. 2.4 Energy quality chain used to calculate solar transformity (Odum, 1988).

에너지의 흐름은 에너지 변환, 퇴먹임, 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 변환과정을 통해 형성되기 위해 직간접적으로 사용된 모든 에너지의 합, 즉 내재된 에너지(embodied energy)로 환산하여 측정하게 된다(Fig. 2.5).

에머지는 각 에너지원에 내재된 태양에너지에 대한 척도이며, 이를 계산하기 위해 지구 시스템 내에서 태양에너지로부터의 전환정도를 나타내는 Solar transformity가 사용된다. Solar 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).

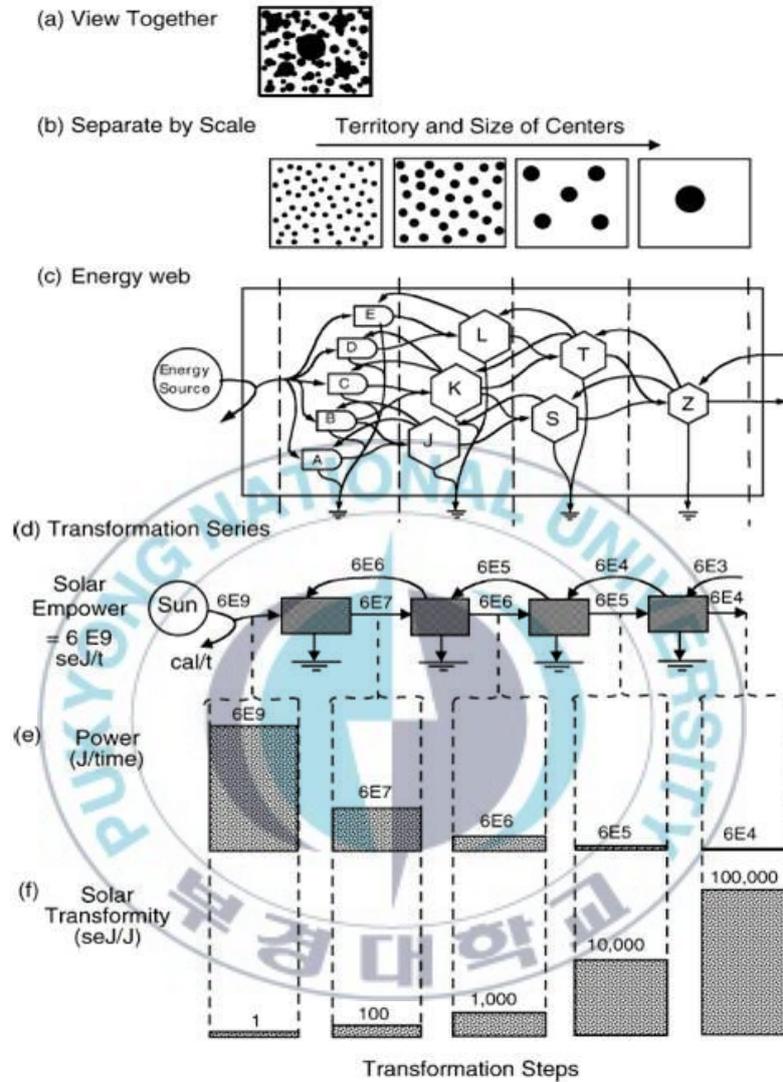
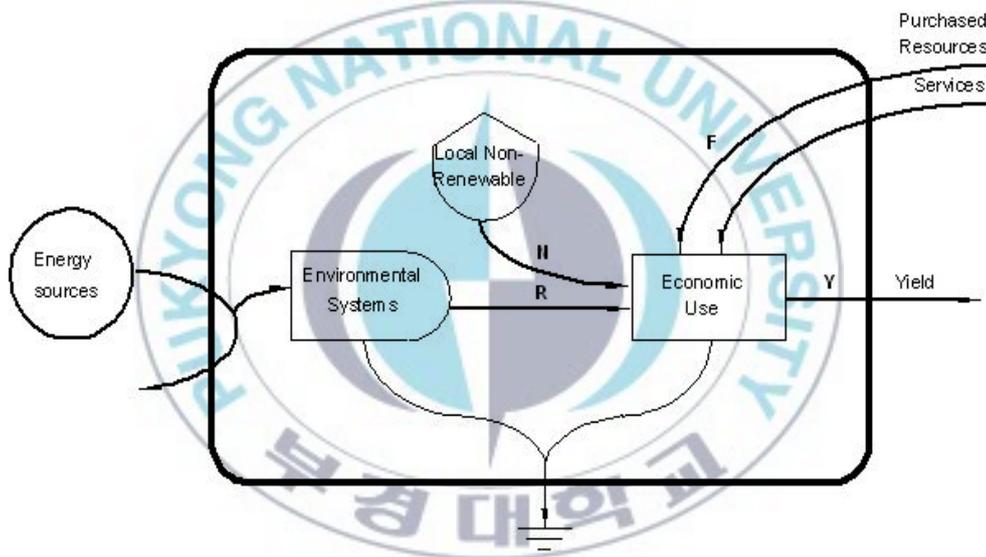


Fig. 2.5 Concepts of energy transformation hierarchy and transformity, (a) All units view together; (b) Units separated by scale; (c) Units as a web of energy flows; (d) Processes shown as an ordered series; (e) Flows of energy per unit time; (f) Transformities (Brown et al., 2004).

다. 에머지 지수

에머지 분석에서 구한 에머지를 기초로 분석대상 시스템을 비교하고, 그 특성을 파악하기 위해 Fig. 2.6과 같이 에머지 지수들을 계산한다.

시스템에 유입되는 에머지를 지구 활동에 의한 환경 에너지원의 에머지(R)와 시스템 내부의 보유에너지원의 에머지(N), 그리고 시스템 경계 밖에서부터 유입되는 화석연료, 전기와 같은 자원과 각종 재화와 용역(Good & Service)을 구매 에머지(F)로 구분하여 에머지 지수들을 계산한다.



$$\text{Yield}(Y) = R+N+F \dots \dots \dots (1)$$

$$\% \text{Renew.} = R/(R+N+F) \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Energy Yield Ratio(EYR)} = Y/R \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Environmental Loading Ratio(ELR)} = (F+N)/R \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{Energy Sustainability Index(ESI)} = \text{EYR}/\text{ELR} \dots \dots (5)$$

Fig. 2.6 Emergy based indices, accounting for local renewable emergy inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F)(Brown and Ulgiati, 1997).

(1) 영속성 에너지원의 점유율(% Renew.)

시스템에 유입되는 에너지원의 전체 에머지 양은 지구 활동에 의한 환경 자원(R), 내부보유자원(N) 그리고 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원(F)의 에머지(Emergy)의 합[Yield(Y)=R+N+F, (Eq. 1)]으로 계산되고, 이중 지구 활동에 의한 환경자원(R)이 차지하는 비율을 계산하여 영속성 에너지원의 점유율[% Renew.=R/(R+N+F), (Eq. 2)]로 나타낸다.

(2) 에머지 생산비(Emergy Yield Ratio : EYR)

에머지 생산비[Emergy Yield Ratio, (Eq. 3)]는 시스템으로부터 생산된 생산물이 가지는 전체 에머지[Yield=R+N+F, (Eq. 1)]에 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원의 에머지(F)로 나누어 계산하며, 생산물(product)이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는데 이용한다. EYR이 1보다 크면 이 시스템은 외부로부터 유입되는 것보다 최종 생산되는 에머지 양이 더 크므로 경제에 순 기여를 하게 된다.

(3) 환경부하율(Environmental Loading Ratio : ELR)

자연환경 활동에서 기인한 환경자원에 대한 내부보유자원과 구매자원의 유입비율을 의미하는 환경부하율[Environmental Loading Ratio, (Eq. 4)]는 내부보유자원과 구매자원으로부터의 에머지 이용량(F+N)에 대해 자연환경 자원의 에머지 이용량(R)으로 나누어 계산하며, 시스템의 생산과정 중, 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 지표로 이용된다.

(4) 에머지 지속성 지수(Emergy Sustainability Index : ESI)

에머지 지속성 지수(Emergy Sustainability Index, Eq. 5)는 에머지 생산비(Eq. 3)와 환경부하율(Eq. 4)의 비로써 계산된다. 지수의 값이 1보다 작

으면 지속성이 적은 시스템이고, 10보다 클 경우에는 지속성이 높은 시스템이며, 1에서 10사이의 경우에는 지속성이 중간정도인 시스템을 반영한다고 평가하고 있다(Brown and Ulgiati, 2002).

라. 에머지 평가법 및 모델링을 이용한 연구사례

국외 사례로는 영국에서 에너지 수요와 공급을 통한 모델링을 수행하기 위하여 Visual Basic, Mapinfo, GAMS와 같은 언어와 시스템으로 모델링 후 Excel의 도표화 기능으로 결과를 제시한 연구 사례가 있다(Brownsword et al., 2005). 태양광을 이용하여 에너지 절감과 온실가스 저감목표 두 가지를 이루고자 할 때의 최적 소요비용을 확인하고자 하였다.

2009년도에는 중국을 대상으로 수송연료의 Life cycle을 분석하고 연료사용을 통하여 CO₂가 얼마만큼 배출되는지를 확인하는 연구도 진행되었다(Yan et. al., 2009). 본 연구와 같이 하나의 도시를 대상으로 연도별 에머지 분석을 수행한 유사한 사례로는 1990년부터 2004년까지의 중국 베이징에 대한 에머지 분석을 한 연구가 진행된 바 있다(Zhang et. al., 2010). 베이징에 대한 에머지 분석결과를 토대로 각 에머지 지수를 산출하고 타 도시와 비교한 연구로써, 장기간에 걸쳐 하나의 도시 시스템을 대상으로 에머지 분석을 한 후 지수 등을 산출하고 비교하는 연구가 국외에도 활발히 진행 증임을 보여주고 있다.

아직까지 각 국가별로 지역별로 에머지 분석·비교 및 새로운 지수를 개발한 사례는 많이 있으나 미래 예측치를 통한 에머지 분석과 온실가스 배출량 저감방안 적용과 같은 국가 정책에 대하여 에머지 분석을 시도한 사례는 많지 않다.

국내에서도 부산에 대하여 1985년부터 1995년까지 에머지 분석을 한 결

과를 바탕으로 자연지역, 농업지역, 시가화지역을 구분하여 에너지 시스템 모델링을 수행하였다(손지호, 1999). 연구결과에 따르면, 시가화지역의 환경 부하율(ELR)이 증가하게 되어 지속성 지수가 감소하게 됨에 따라 시가화된 도시지역을 완충할 수 있는 자연녹지면적의 필요성을 제시하였다.

그 외에 국가와 우리나라의 지역별 시스템에 대한 에머지 분석을 하고, 각 시스템에 대한 지수를 통하여 지속성을 평가한 사례가 있다(최영근, 2003). 각 국가 간의 지속성을 비교 분석하였으며, 특히 Fig 2.7과 같이 우리나라의 지역별 에머지 분석을 통하여 각 지역의 지속성을 평가한 점은 향후 지속적으로 지역별 지속성 및 변화를 분석하고 평가할 수 있음을 보여준다.

우리나라 전체를 대상으로 에머지 분석을 이용하여 산출한 ESI지수는 0.11로 지속성이 적은 시스템으로 평가되었으며, 각 지역별 결과도 0.004(광주)에서 0.825(전남)까지의 범위로 나타나, 한국의 각 지역 시스템은 지속성이 적은 시스템($ESI \leq 1$)으로 평가되었다. 부산의 ESI지수는 0.153으로, ESI지수가 1이하로 지속성이 낮은 지역이지만 보유하고 있는 풍부한 하천 및 해양의 자연에너지원 등에 의하여 16개 광역시·도 중 전남, 제주, 충남, 인천 다음으로 높은 지속성을 가지고 있다고 분석된 바가 있다(최영근, 2003).

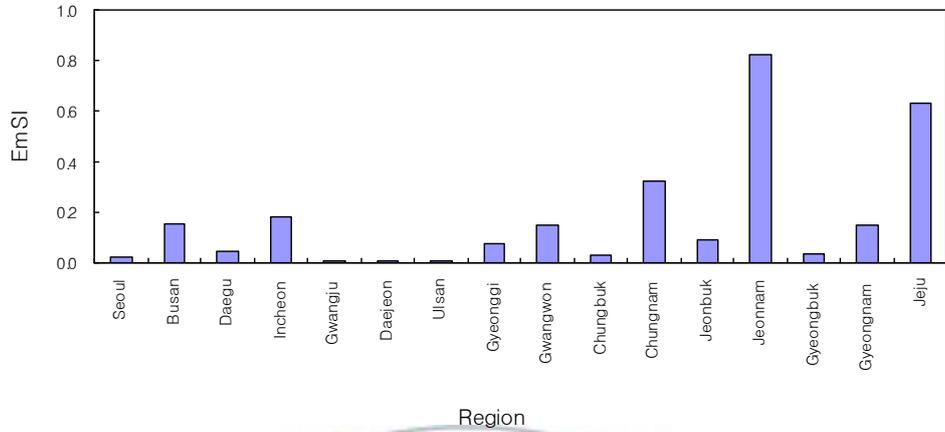


Fig. 2.7 A comparison of energy sustainability index in regional systems(choi, 2003).

에머지 분석을 통한 지속성을 평가한 결과에 대하여 시스템 내에서 환경 부하량이 큰 단위 시스템에 대한 분석 및 에너지 모델링을 별도로 수행한다면 지역 내 시스템을 이해하고 발전방안 마련에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

III. 연구방법

1. 대상지역 선정 및 현황

본 연구에서는 우리나라의 16개 광역시·도 중에 부산광역시의 에머지 분석을 통하여 도시의 현황 및 특성을 파악하고 온실가스 배출량 저감방안에 대한 자연환경 및 인간 경제활동에 대한 에머지 분석과 에너지 모델링을 통하여 생태경제성을 평가하고자 하였다.

부산시는 환경 정책적으로 온실가스 저감을 통한 새로운 지속가능한 도시 발전에 앞장서고 있다. 먼저 탄소중립도시화를 위하여 옥상조경 및 인공지반 조경 등의 설치를 권장하고 빗물저수조설치, 주변 녹지공간들을 연계되도록 하고 신재생에너지와 고효율인증기자재를 사용하여 에너지 절감하는 방안을 검토하고 있다. 또한 탄소중립도시 구체화를 위한 국·내외 사례를 통해 통합된 생활권 탄소중립도시모델 연구를 추진하고 있다(부산시 환경보전 종합계획, 2010).

2008년에는 부산시를 기후변화 대응 시범도시로 조성하기로 하는 환경부와 협의에 따라 2015년까지 2005년 온실가스 배출량 대비 10 %를 감축하기로 결정한 바 있다. 이에 더 나아가 2010년도 부산시 기후변화대응 종합대책에서는 2020년 온실가스 총배출량 및 감축 목표량을 온실가스 배출 전망(BAU) 23,670 GgCO₂ 의 30 % 수준인 7,101 GgCO₂ 감축을 목표로 제시하였다. 이러한 부산시의 온실가스 저감정책에 따라 도시의 자연환경과 경제활동에 대한 생태경제학적 관점에 대하여 좀 더 심도 있는 연구가 필요하다고 생각된다.

부산시 일반 현황을 살펴보면, 인구는 지속적인 증가추세에서 1990년대

의 400만 명 선에서는 정체를 보이다가 2000년대에 들어서에는 서서히 감소하는 추세로 진행 중에 있다(Fig 3.1). 1980년에는 3,159천여명으로 300만명이 넘는 대도시로 성장하였으나, 1990년에 3,798천여명으로 인구 증가는 둔화되면서, 1995년에는 행정구역(기장군) 확장으로 인구가 3,892천여명으로 약간의 증가가 있었지만, 이후 경제침체에 따른 영세기업의 역외이전과 출산을 감소 등의 이유로 인구가 감소하기 시작하였다고 파악되고 있다.

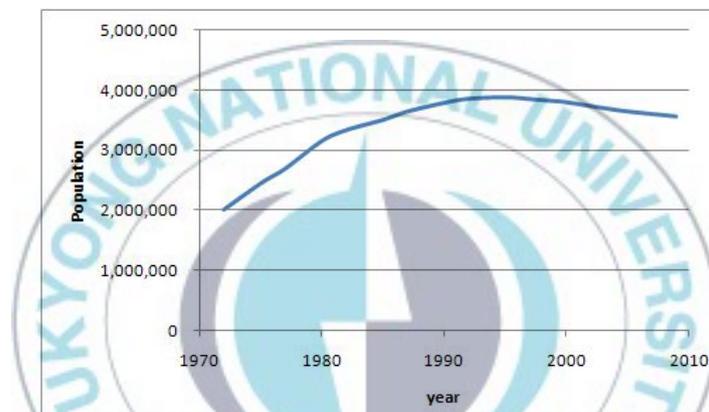


Fig. 3.1 The graph of population change in Busan(Busan metropolitan city statistics, 2009).

부산권 광역도시계획(2005)에 따르면 부산시 인구지표 기준은 2010년도에 4,100천명으로 증가할 것으로 고려하고 있으나 실제로는 2009년 기준의 인구(3,574천명)로 2005년도 이후에도 꾸준한 감소세를 보이고 있다. 향후 부산시 인구는 특별한 지자체의 변동사항이 없는 한 원만한 감소세를 유지할 것으로 판단된다. 이러한 인구의 감소는 온실가스 감축뿐만 아니라 산업 및 경제활동에도 영향을 미칠 것으로 생각된다.

부산시의 에너지 현황을 살펴보면, 부산시의 에너지 생산은 고리원자력 발전이 대부분이며 에너지 소비량은 경남 전체량보다 조금 적으며, 석유제

품 소비가 가장 많은 것으로 파악되고 있다. 부산시의 에너지 소비는 1998 년도에 큰 폭으로 하락하였으나 다시 증가하여 일정한 소비율을 보이고 있 다(Fig 3.2).

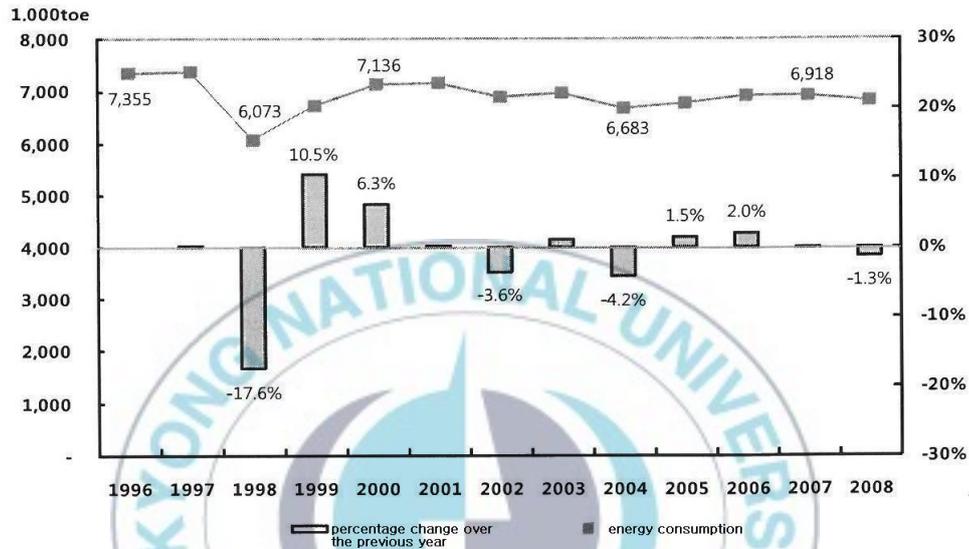


Fig. 3.2 The graph of progress in energy consumption in Busan(Busan metropolitan city environmental conservation plan, 2010).

이러한 에너지부문의 전망에 대하여 부산광역시 제3차 지역에너지 계획 (2007)에서는 석유수요는 고성장과 저성장 시에 나타날 수 있는 범위 안에서 연평균 2.53 % 증가할 것으로 전망하였으며, 전력수요는 연평균 3.83 %, 도시가스 수요는 연평균 5.41 % 증가할 것으로 전망하고 있었다. 그러나 본 계획은 고성장과 저성장 안에서의 전망치로 성장범위에 따라 유동적으로 파악되도록 설정하여 놓은 상황이다. 실제 본 연구에서 이용한 부산시통계연감자료에서는 1998년부터 2007년 동안의 석탄사용량은 연평균 4 % 증가, 석유사용량은 연평균 1 %정도 감소하였으며, 가스사용량은 연평균 13 % 증가, 전기사용량은 연평균 6 %가 증가하여 지역 에너지계획과

조금의 차이가 있었다(Table 3.1).

Table 3.1 The change of energy consumption in Busan(1998~2007)

| Year | Coal (E04 MT) | Oil (E07 BBL) | Gas (E05 MT) | Elect. (E04 Gwh) |
|-------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 1998 | 3.56 | 3.23 | 2.18 | 1.09 |
| 1999 | 3.95 | 3.52 | 2.76 | 1.13 |
| 2000 | 3.05 | 3.68 | 3.17 | 1.24 |
| 2001 | 4.65 | 3.47 | 3.41 | 1.34 |
| 2002 | 4.10 | 3.41 | 3.81 | 1.43 |
| 2003 | 4.13 | 3.41 | 4.00 | 1.48 |
| 2004 | 4.28 | 3.21 | 4.23 | 1.55 |
| 2005 | 4.97 | 2.97 | 4.88 | 1.66 |
| 2006 | 6.66 | 2.92 | 4.95 | 1.72 |
| 2007 | 5.06 | 2.97 | 5.09 | 1.79 |
| Average annual increase ratio(%) | 4 | -1 | 13 | 6 |

이러한 인구 수 및 에너지사용량에 대하여 공식적인 장기광역계획을 활용하는 것이 가장 합리적이겠지만, 본 연구에서 준비한 예측 기간과 활용한 에너지원이 각 광역계획의 범위와 달라서 이용하기 어려웠다. 개별적인 공식 자료 이용보다 부산시 온실가스 배출량 조사 보고서에서 온실가스 배출량 전망치를 산정할 때 이용한 회귀분석법을 에너지 사용에 대한 예측에서도 이용하고자 하였다. 향후 에너지 예측을 통한 에너지 분석 시에는 부산시의 최종에너지원별 소비량 중 각 세부항목에 대한 에너지 종류별 질의 차이, 각 발생 비용 및 전망에 대한 기초자료와 함께 자연환경 에너지원 등에 대한 자료도 통계적 처리 기법으로 분석하는 방안을 검토할 필요성을 일깨워주었다.

부산시의 산업구조는 1970년대까지 식품·섬유·합판 산업 등 경공업을 중심으로 활성화되었으나, 산업기반 여건과 산업구조가 취약하여 점차 인근 타 지역과의 경쟁력이 떨어져 1,2차 산업의 비율은 지속적으로 감소되고 있으며 3차 산업의 비중이 늘어나는 추세이다. 전체적으로도 사업체수가 2002년을 정점으로 점차 감소하여 2007년에는 262,906개소로 7대 광역시 중 서울시 다음으로 사업체 수가 많으나 감소추세는 계속 이어지고 있다.

2007년 기준으로 부산시의 명목 지역내총생산은 51조 1,694 억원 규모로 2006년보다 약 4.9% 증가하였으며, 지역내총생산 중 서비스업이 생산의 69.4%를 차지하고 있으며, 제조업(18.1%), 건설업(8.9%)순으로 제시되었다. 지출구조를 보면 최종소비지출의 비중은 89.3%로 민간소비지출이 71%, 정부지출이 18.2%를 나타내고 있다. 각 시·도별 지역내총생산에서 부산은 5.6%를 차지하여 서울, 경기, 경남, 경북, 충남 다음으로 비중이 높았으나, 서비스업 및 기타부분의 생산과 민간소비지출은 16개 광역시·도 중에 서울, 경기 다음으로 부산의 비중이 컸다.

인구, 산업 구조 및 생산·소비지출 변화에 따라 부산시에 적합한 새로운 지속가능한 도시 모델을 구축하는 것이 필요하며 온실가스 저감방안 적용 시 이러한 특징을 고려할 수 있는 방안을 찾고자 Fig 3.3과 같이 연구 방향을 제시하고자 한다.

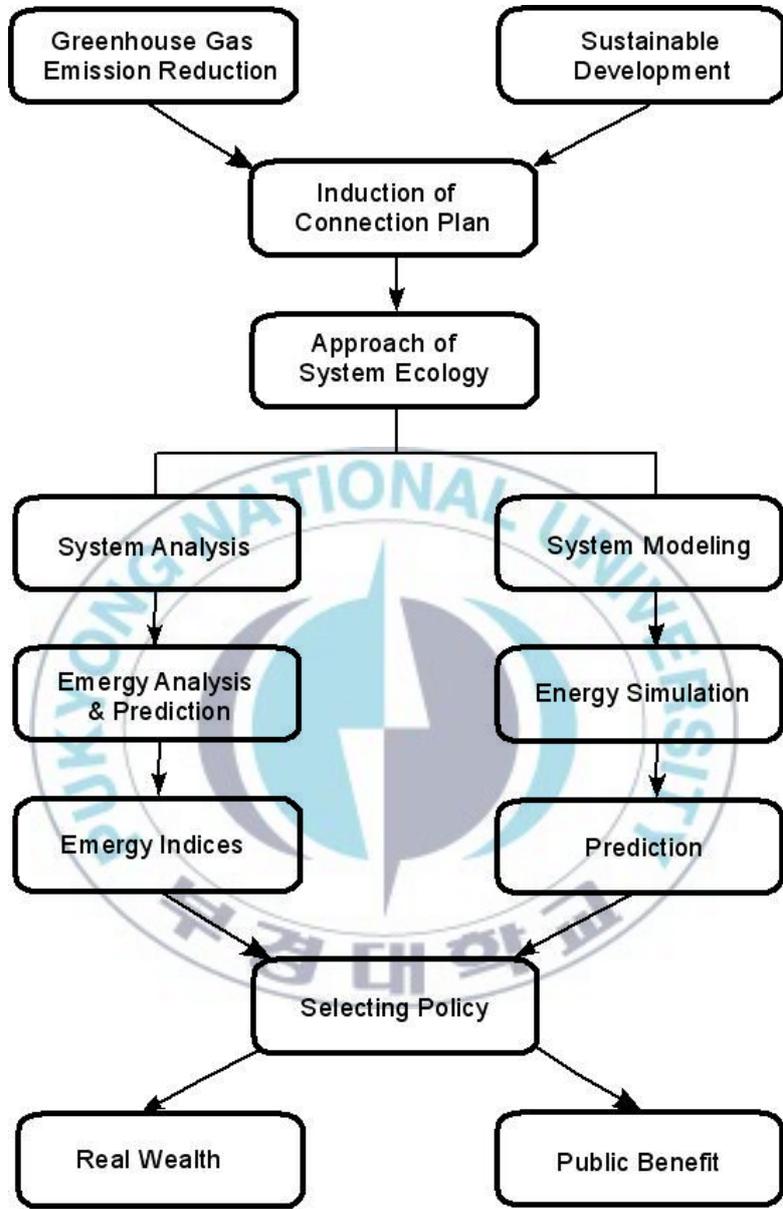


Fig. 3.3 The flow chart for this study.

환경 정책적으로 탄소중립 도시를 구상하는 부산시의 현황을 살펴본 결과 도시의 성장이 어느 정도 정체된 상황으로 판단되며, 이러한 시기에 추

진되는 온실가스 감축대책은 부산시의 지속가능한 도시발전과 맞물려 상호 연계성을 가지고 진행되는 것이 무엇보다 필요하다.

탄소중립 도시와 지속가능한 도시 간에 추구하는 목적은 탄소를 줄여 에너지 자립도 및 소비를 줄이고, 재생가능한 에너지와 신재생에너지를 활용하여 지속가능한 도시발전을 이루고자 하는 것이 될 것이다. 이러한 목적을 이루기 위해서는 탄소 저감방안에 대한 충분한 검토 및 도시에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 여겨지며, Fig 3.3과 같이 연구를 추진하여 상호 간의 연계성 및 필요성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 대상지역의 에머지 평가

가. 에머지 분석표 작성

에머지 분석표를 작성하기 위하여 먼저 Odum(1996)이 제안한 에너지 시스템 언어를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동의 생산, 소비, 재순환 등의 변화를 전체적으로 파악(Top-down)할 수 있는 에너지 시스템 다이어그램을 작성하는 것이 필요하다(Fig. 3.4).

작성 순서로는 첫째, 분석대상 시스템의 경계를 설정한다. 부산시의 시스템 분석을 위해서 부산시의 육지면적과 해양면적(대륙붕)을 시스템의 공간적인 경계로 설정하였다.

둘째, 시스템 외부로부터의 주요 에너지원, 그리고 대상시스템 내의 생산, 소비, 재순환 과정을 파악한다. 부산의 경우 외부로부터 유입되는 지구 활동에 의한 에너지원은 태양, 바람, 비, 조석, 파도, 하천에너지원이 있는 것으로 파악되었다. 시스템 내부의 보유에너지원 및 생산물은 지하수, 표토, 농업생산물, 수산업생산물가 해당되고, 생산 및 소비활동을 위하여 외

부로부터 이용되는 에너지원은 석탄, 가스, 석유, 전기, 그리고 각종 교역과 교환을 통해 유입되는 재화와 용역으로 구분하여 구성하였다.

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.

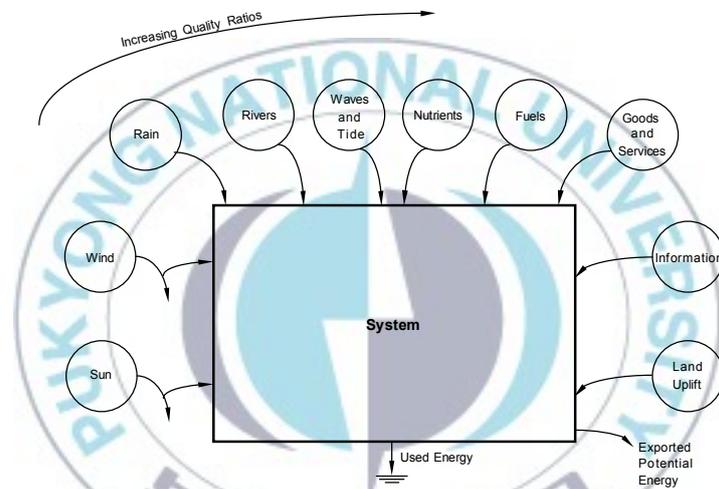


Fig. 3.4 Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

위와 같은 방법을 통한 부산시 에너지시스템 다이어그램은 앞서 연구된 우리나라의 도시 시스템 다이어그램을 활용하여 아래 Fig 3.5와 같이 작성되었다. 외부로부터 태양, 비, 바람, 조석, 하천의 에너지원이 있으며 이를 통하여 농업, 임업 등의 생산 활동이 발생하며, 이와 연계하여 소비되고 재화와 용역의 교역이 이루어지는 일반적인 한국의 도시 다이어그램 모형이다. 본 연구에서는 온실가스 저감방안 적용에 활용하기 위하여 외부에서 유입되는 자원

중 석유, 석탄, 가스, 전력을 고려하였다.

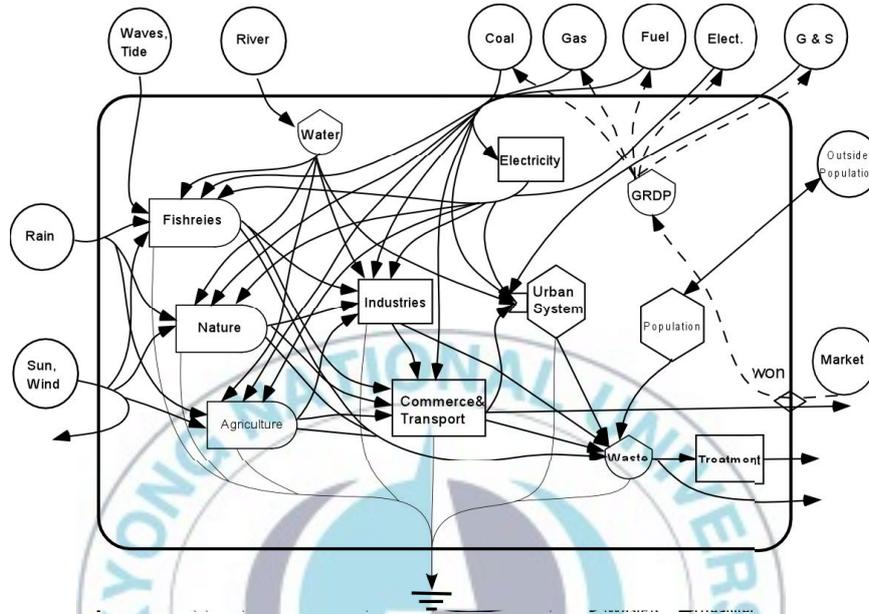


Fig. 3.5 Energy system diagram of Busan.

대상시스템의 자연환경과 경제활동에 있어 외부에너지원이 가지는 실질적인 역할과 가치를 평가하기 위해서 Table 3.2와 같은 형식의 에머지 분석표를 작성한다.

첫 번째 열에는 대상 시스템의 자연환경과 경제활동을 유지하는 외부의 주요 에너지원을 기입한다. 두 번째 열에는 주요 에너지원이 가지는 실질적인 에너지(J), 또는 화폐 단위(₩, \$)의 값을 기입한다. 본 연구에서는 각 에너지원의 순서에 따라 영속적 에너지원(태양, 바람, 비, 하천, 파도, 조석) 지역 내 생산되는 에너지(농업생산, 수산업생산), 지역 내 비영속적 에너지원(지하수, 표토), 외부로부터 유입되는 에너지원 중 석탄, 천연가스, 석유, 전력 순(에너지 단위)으로, 마지막에는 교역과 교환을 통한 재화

와 용역(원 화폐 단위)순으로 산출하여 기입하고자 하였다.

Table 3.2 Tabular format of emergy analysis table for Busan

| No | Item | Raw Units (J or ₩) | Solar tranformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value(₩/yr) |
|----|------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
|----|------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|

에머지 분석은 대상지역 부산광역시를 시스템 경계로 1998년부터 2007년까지 총 10년간의 에머지 분석을 수행하였으며, 주요 에너지원의 실질적인 에너지, 화폐 단위 값을 산정하기 위해서, 자연환경 활동에서 기인한 태양 에너지는 기상 연보에 수록된 연간 수평면 일사량 값을 인용하였고, 바람 에너지는 기상청 발행의 고층기상연보를 기초로 바람의 구매 값을 계산하였다. 강우는 기상연보에 수록된 부산지역의 년 간 강수량 자료를 인용하였고, 하천의 유입량은 각 연도별 한국수문조사연보에서 인용하였으며, 하천의 화학적 에너지 계산을 위한 총용존고형물 값은 환경부의 수질측정망 운영에 의해 조사되는 낙동강 환경관리처의 자료를 이용하였다. 조위는 조석표의 부산지역 조위값을 이용하여 평균값을 계산하였고, 파도는 부산연근해 조사값을 수집하여 이용하였다. 내부 보유 자원인 지하수 이용량은 환경부의 지하수 조사연보를 인용하였다. 토지면적 및 인구는 부산시통계연감을 활용하였으며, 해양면적 및 해안선 길이는 지도 측정치(최영근, 2003)를 활용하였다.

화석연료와 관련된 자료는 부산시통계연감 및 연도별 에너지통계연보에서 인용하였고, 전력은 한국전력통계자료를 사용하였다. 재화와 용역에 관련된 자료는 부산통계연보, 부산지역 경제지표 등에서 인용하였다.

세 번째 열에는 주요 에너지원에 대한 Solar tranformity 와 재화와 용역

에 대한 Energy/won ratio를 기입한다. 본 연구에서는 Solar transformity의 경우 Appendix 4.4 과 같이 기존의 가치를 이용하였고, 교환을 통해 유입되는 재화와 용역의 경우의 Energy/won ratio는 각 연도별 석유사용량과 외부로부터 유입되는 재생가능한 에너지양과의 합에 각 연도별 GDP를 나누어 산정하였다.

네 번째 열에는 두 번째 열의 주요 에너지원이 가지는 실제적인 값에 세 번째 열의 Solar transformity와 Energy/won ratio를 곱하여 산정한 Energy 값을 기입한다. 다섯 번째 열에는 주요 에너지원의 에머지 값을 Energy/won ratio로 나누어 계산한 생태 경제적 가치를 기입한다.

나. 에머지 지수를 이용한 평가

에머지 분석에 의해서 얻어진 에머지 값을 기초로, 시스템의 특성을 평가하기 위해 에머지 지수가 산정된다.

본 연구에서는 부산 시스템의 지속적인 발전 가능성을 평가하기 위해서 시스템 외부로부터 유입되는 하천의 에머지와 내부에서 발생하는 조석 에머지의 합을 영속성의 에너지원의 에머지(R)로 구분하고, 내부의 지하수 이용량으로부터 기여된 에머지와 표토의 에머지의 합을 비영속성 보유에너지원의 에머지(N)로 하였으며, 그리고 외부로부터 교역과 교환을 통해 유입되는 석탄, 석유, 가스, 전기 그리고 각종 재화와 용역의 에머지 합을 교역과 교환을 통해 유입되는 에너지원의 에머지(F)로 분류하였다.

부산의 시스템에서 분류된 R, N, F값을 바탕으로 시스템을 평가할 수 있는 에머지 지수들을 산정하게 된다. 본 연구에서는 도시에서 중요한 영속성 에너지원의 점유율(% Renew.)로 도시의 산업화를 확인하고, 에머지 생산비(EYR)를 통하여 외부에서 들어오는 재화와 용역에 따른 부산시의 생

산성을 파악하고자 한다. 환경부하율(ELR)은 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하게 되며, 지속성 지수(ESI)를 통하여 부산시의 지속가능성을 확인하고자 한다.

3. 온실가스 저감 방안 에 대한 에머지분석

가. 온실가스 저감방안 선정

1998년부터 2007년까지의 부산시 에머지 분석결과를 바탕으로 온실가스 배출량 조사(부산광역시, 2007)에서 제안된 저감방안에 대한 에머지 분석을 수행하고자 한다. 저감방안을 통한 시스템의 변화를 비교·확인하기 위하여 10년간 분석된 에머지 분석결과를 바탕으로 2020년까지 평균치 및 회귀 분석을 통한 예측된 에머지 분석결과를 제시하고자 한다.

2005년도의 온실가스 배출량 조사 결과에 따르면 에너지, 산업공정, 환경, 농축산업 부문 중 에너지부문이 총배출량의 80 %에 가까운 배출량을 보이고 있다. 이러한 에너지부문은 다시 산업, 수송, 가정산업, 공공기타부문으로 세분화되어 나눌 수 있으며, 이중 2004년도를 기준으로 수송 > 가정산업 > 산업 > 공공기타부문의 순서로 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다(Table 3. 3).

Table 3.3 Greenhouse gas emissions of energy section in Busan

(unit : GgCO₂)

| Section | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Industry | 3,026 | 3,053 | 3,066 | 2,853 | 2,643 |
| Transport | 10,045 | 10,674 | 9,999 | 10,442 | 10,780 |
| Household/ commerce | 5,467 | 5,335 | 5,105 | 5,118 | 4,531 |
| Public, etc. | 190 | 192 | 168 | 217 | 204 |
| Total | 18,728 | 19,254 | 18,338 | 18,630 | 18,158 |

배출량에 대한 저감방안 선정은 본 연구의 에머지 분석에서 접근하지 못한 환경부문의 폐기물량을 제외하고 에너지, 수송, 시민실천부문의 주요 저감방안에 대한 도입을 시도하고자 한다. 이러한 저감방안에 대한 전망치 및 정량적인 저감량이 제시된 것을 대상으로 최대한 계획에 따른 저감량이 충분히 포함될 수 있도록 검토하였다.

각 부문별 저감방안 및 방안에 따른 연도별 저감량은 Table 3.4와 같다 (부산광역시, 2007). 에너지 부문과 시민실천 부문을 가장 많이 온실가스를 저감할 수 있는 부문으로 제시하고 있으며, 에너지 부문에서는 산업부문의 신재생에너지 도입 확대방안이 시민실천 부문의 트리플 윈(111) 운동 확대 및 수송부문의 배출허용기준 강화(미국)가 각 부문에서 가장 큰 감축효과를 나타내고 있었다.

본 연구에서는 산업부문, 공공 및 기타부문의 신재생에너지 도입 확대, BD20 보급 확대, CNG 버스 보급 도입 확대, 가정에서의 에너지 절약, 트리플 윈(111)운동 확대, 자율부제 운행 방안, 총 7가지 저감방안을 대상으로 에머지 분석 및 평가를 하고자 한다.

Table 3.4 The reduction plan and effect of greenhouse gas inventory of Busan(Busan metropolitan city, 2007)

(unit : GgCO₂)

| Section | Reduction plan | 2010 | 2015 | 2020 |
|------------------|--|-------|---------|---------|
| Energy | Expanding renewable energy in industrial section | 135.8 | 280.4 | 434.0 |
| | Expanding renewable energy in public, etc. section | 12.7 | 29.0 | 49.1 |
| | Supplying BD 20 | 39.4 | 82.0 | 124.6 |
| | Total reduction | 187.8 | 391.4 | 607.6 |
| Transport | Emission permit standard intention(America) | 13.0 | 404.0 | 864.0 |
| | Expanding homeworking support | 0.3 | 1.1 | 1.9 |
| | Inducement to scrap decrepit car | 1.3 | 1.4 | 1.4 |
| | Expanding central bus road | 0.0 | 0.1 | 0.1 |
| | Expanding CNG bus supply | 38.5 | 38.5 | 385 |
| | Total reduction | 40.1 | 445.0 | 906.0 |
| Citizen practice | Energy conservation in household | 86.0 | 257.0 | 429.0 |
| | Expanding triple one(111) campaign | 258.0 | 465.0 | 765.0 |
| | Expanding autonomous traffic restriction | 85.0 | 183.0 | 288.0 |
| | Total reduction | 429.0 | 905.0 | 1,482.0 |
| Environment | Policy of waste reduction | 61.0 | 75.0 | 81.0 |
| | Increasing recovery rate on sewage sluge | 0.9 | 2.0 | 3.0 |
| | Total reduction | 61.9 | 77.0 | 84.0 |
| Total | | 718.9 | 1,818.4 | 3,079.6 |

2010년 기준으로 선정된 저감방안을 다 수행한다면 보고서 상에 제시된 전체 계획된 감축량의 약 91 %의 감축효과를 보이게 된다. 2015년도에는 저감방안에 따른 계획 감축량의 73 %, 2020년도에는 계획량의 69 %까지

감축할 수 있는 방안을 대상으로 에머지 분석 및 에너지 모델링을 하였다.

「산업부문, 공공 및 기타부문의 신재생에너지 도입 확대」 방안은 소비되는 에너지 중 2010년에는 5 %, 2015년에는 10 %, 2020년에는 15 %를 신재생에너지로 대체하는 것을 가정하였다. 그로 인해 산업부문과 공공 및 기타부문의 온실가스 감축량을 살펴보면 2010년에는 약 149 GgCO₂, 2015년에는 약 309 GgCO₂, 2020년에는 약 483 GgCO₂ 가 감축될 것으로 산정되었다.

「BD 20 보급방안」은 도로 수송부문에 BD 20(경유 80 %에 바이오디젤유 20 %를 혼합한 것)을 보급하여 현재 수송부문에서 온실가스 배출량이 큰 경유를 연료로 사용하는 차량에 대해 온실가스를 감축하였다. 이 시나리오의 경우 2010년에는 10 %, 2015년에는 20 %, 2020년에는 30 %를 BD20이 경유를 대체한다고 가정하였다. 그 결과 각 계획 연도별로 39 GgCO₂, 82 GgCO₂, 125 GgCO₂를 감축하는 전망치를 제시하고 있었다.

BD 20 보급방안은 서울시정개발연구원의 자료에 의하여 부산시가 추진하고자하는 2010년까지 2,860대의 버스를 CNG 버스로 전환 계획에 의해 38 GgCO₂가 감축된다는 것을 추정할 수 있다고 판단하고 제시한 결과이다.

「가정에서의 에너지 절약에 대한 저감」 방안에서는 부산시의 2006년 기준으로 모든 세대수가 에너지절약을 한다고 가정하면 약 2백만 MWh의 전력이 절감된다. 그렇지만 부산광역시의 전 세대가 절약 가능한 사항을 다 실천하지는 못할 것으로 판단되어 2010년에는 전체 세대수의 10 %, 2015년에는 30 %, 2020년에는 50 %의 세대가 에너지 절약을 한다고 가정하는 바 있다.

「트리플 윈(111)운동 확대」 방안은 한사람이 하루에 1kg의 CO₂ 를 줄이자는 운동을 뜻하며, 이는 일상생활 속에서 쉽게 실천할 수 있는 항목을

제시하고 개개인이 매일 실천항목 중 본인이 쉽게 실천할 수 있는 항목을 선택하고 실천하는 방법이다. 감축량방안에서는 2010년까지 전체 시민의 30 %가 250일 동안 참여, 2015년에는 시민의 50 %가 280일 동안 참여, 2020년에는 80 %의 시민이 300일 동안 실천을 한다고 가정한 전망이다.

「자율부제 운영」방안의 경우는 현재 부제 운영의 참여율을 2010년에는 20 %, 2015년에는 40 %, 2020년에는 60 %의 참여를 유도한다고 가정하고 온실가스 저감량을 제시하였다.

본 연구에서 이용하고자 하는 저감방안에 따른 기준 연도별 온실가스 저감량은 아래 Table 3.5와 같다.

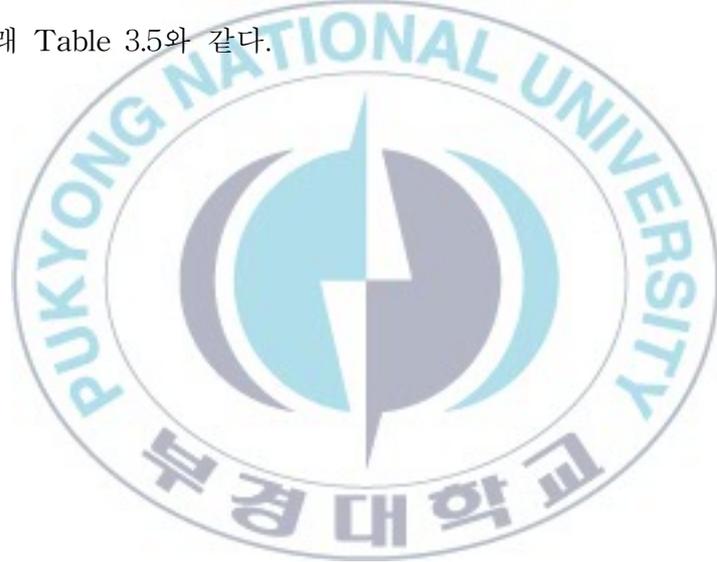


Table 3.5 Reduction of greenhouse gas emissions in each reduction plan

| Reduction plan | Year | Greenhouse gas reduction(GgCO ₂) |
|--|------|--|
| Expanding renewable energy in industrial section | 2010 | 135.8 |
| | 2015 | 280.4 |
| | 2020 | 434.0 |
| Expanding renewable energy in public, etc. section | 2010 | 12.7 |
| | 2015 | 29.0 |
| | 2020 | 49.1 |
| Supplying BD 20 | 2010 | 39.4 |
| | 2015 | 82.0 |
| | 2020 | 124.6 |
| Emission permit standard intention(America) | 2010 | 13.0 |
| | 2015 | 404.0 |
| | 2020 | 864.0 |
| Expanding CNG bus supply | 2010 | 38.5 |
| | 2015 | 38.5 |
| | 2020 | 38.5 |
| Energy conservation in household | 2010 | 86.0 |
| | 2015 | 257.0 |
| | 2020 | 429.0 |
| Expanding triple one(111) campaign | 2010 | 258.0 |
| | 2015 | 465.0 |
| | 2020 | 765.0 |
| Expanding autonomous traffic restriction | 2010 | 85.0 |
| | 2015 | 183.0 |
| | 2020 | 288.0 |
| Total reduction | 2010 | 668.4 |
| | 2015 | 1,738.9 |
| | 2020 | 2,992.2 |

Table 3.5의 저감량은 2007년도의 배출량 조사 결과 및 저감방안에 따른 저감량으로 일반적인 저감실천계획을 제시하여 전망치를 보여준 것으로 생각된다. 2008년도 이후 매년 새로운 온실가스 산정 지침으로 부산시 및 지자체에 대한 온실가스 배출량 조사를 수행 중에 있어 부산시 현재 정책방향과 일치하지는 않으나 부산시에서 공식적으로 처음 조사한 온실가스 배

출량 조사 자료이며 올해 제시될 부산시 기후변화대응 종합대책에서는 본 내용을 바탕으로 다양한 저감대책이 발표될 예정이다. 향후 이러한 저감계획이 수립되어 시행되는 사업이 있다면 사업에 들어가는 비용 및 외부 과급효과를 알 수 있어 보다 나은 에머지 예측 전망치가 나올 수 있을 것으로 판단된다.

나. 온실가스 저감방안에 대한 에머지 분석

1998년부터 2007년까지의 데이터를 바탕으로 온실가스 저감방안에 대한 변화를 살펴보기 위하여 2010년, 2015년, 2020년도의 에머지 분석결과를 예측하고자 한다. 각 에너지원별로 거의 변화가 없는 자연환경에너지는 평균치를 동일하게 제시하고, 외부에서 구매된 에너지원에 대하여는 회귀분석법을 이용하여 계산하였다.

이러한 에머지 예측분석 후 선정된 저감방안을 적용시킨 에머지 분석결과와 비교하고자 한다. 에너지 부문의 저감방안 중 산업과 공공 및 기타 부문에 소비되는 에너지 중 신재생에너지로 대체하는 방안과 신재생에너지인 바이오 디젤(BD20) 보급, 자율부제 운행, CNG 버스 보급 확대 저감방안을 수행할 경우 석유 사용량 감소가 이루어질 것으로 예측된다.

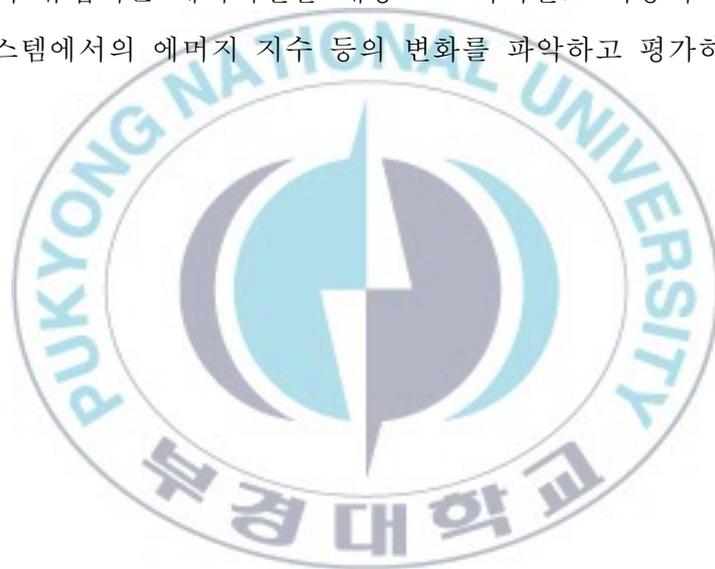
가정에서의 에너지 절약 및 트리플 윈(111)운동을 통한 에너지 절감은 가정에서 사용되는 전력, 물, 쓰레기 감축 중에 대부분 전력사용량 감소로 이어질 것으로 가정하였다.

온실가스 저감량을 각 항목별로 에너지원으로 역산하는 방법은 온실가스 에너지 부문의 계산방법 중 Tier 1방법을 이용하여 감소되는 GgCO₂ 값을 석유(BBL), 전력(Gwh)로 변환하고자 하였다.

Tier 1 방법 : $Emission = Fuel_i \times EF_i$

여기서, $Fuel_i$: 연료별 에너지소비량, EF_i : 연료 i에 대한 온실가스 배출계수

위의 각 에너지원별 증감량을 예측된 에머지 분석결과에 적용하여 저감 방안이 수행된 경우의 부산시 에머지 분석 및 평가를 하였다. 본 에머지 분석 예측의 타 자료는 대부분 앞서 수행된 10년간의 부산시 데이터의 평균 및 동일한 데이터를 활용하거나 회귀분석을 통한 자료이다. 궁극적으로는 외부에서 유입되는 에너지를 대상으로 화석연료 사용이 줄어들 경우 부산시 시스템에서의 에머지 지수 등의 변화를 파악하고 평가하고자 한다.



4. 에너지 시스템 모델링

가. 에너지 다이어그램 작성

부산시 온실가스 배출에 관련된 시스템의 에너지 모델링을 위하여 부산시 시스템에 온실가스 배출을 적용할 수 있는 에너지다이어그램을 작성하고 모델의 수식화, 프로그램 작성 그리고 저감방안 등을 적용한 경우의 시뮬레이션 수행 순으로 진행하고자 한다.

먼저 부산시를 대상으로 에너지 다이어그램을 작성한다. 다이어그램 작성 방법은 에머지 분석 시와 동일하다. 첫째, 에머지 분석 시와 동일하게 부산시를 시스템의 경계로 설정하고 관찰하고자 하는 대상에 대한 다이어그램의 전체 구성을 마련한다. 둘째, 모델링 시 필요한 주요 외부 에너지원을 파악하고 작성한다. 셋째, 대상시스템 내의 주요 성분들의 목록을 작성한다. 넷째, 각 에너지원 및 주요 성분들을 연결하여 주는 에너지 흐름, 상호작용, 생산, 그리고 소비의 과정에 관련된 목록을 작성한다. 마지막으로 상기의 목록을 기초로 다이어그램을 작성한다.

에너지 다이어그램은 부산시 에머지 분석 시의 에너지 시스템 다이어그램을 바탕으로 온실가스 저감방안이 적용될 수 있는 모델링을 위한 에너지 시스템 다이어그램을 작성하게 되며, 각 에너지원들에 대한 데이터를 통하여 수식을 완성하게 된다.

이산화탄소 순환 모델링에 대한 이전 연구사례에서는 아래 Fig. 3.6과 같이 이산화탄소량을 산정할 수 있는 다이어그램을 작성한 바 있다(Odum, 2000). 본 연구에서는 육상과 해상으로 지역을 나누고 탄소순환과정에 초점을 두어 대기 중 이산화탄소 보유량을 산정할 수 있는 모델이다. 육상은 육상식물이 광합성을 통하여 유기물을 생성하고 유기물은 생물의 호흡과

분해, 벌목 등에 의해 다시 대기로 방출된다. 외부에서는 화석연료가 유입되어 사용되는 양만큼 이산화탄소가 방출되는 것을 나타내고 있다. 해양에서는 대기에서 들어오는 이산화탄소가 해양의 탄산염 완충작용에 의해 용존 무기탄소가 되고 이는 외부의 태양에너지와 함께 이용되어 해양의 식물이 광합성을 통해 유기물과 탄산칼슘을 생성하게 만든다. 생성된 유기물은 육상과 같이 생물의 호흡과 분해로 이산화탄소로 대기에 방출되는 시스템을 보여준다.

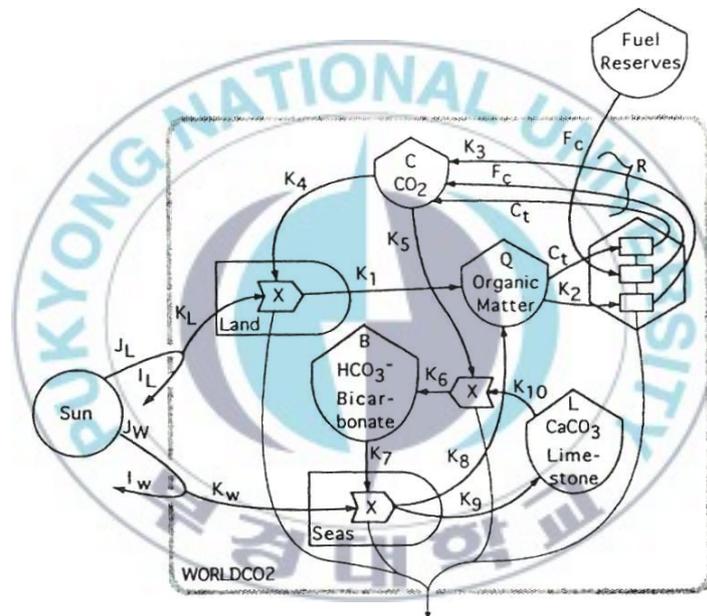


Fig. 3.6. Model of world carbon dioxide(Odum, 2000).

본 연구에서는 Fig. 3.6과 같은 자연발생적 이산화탄소 순환보다는 도시에서 각 부분별로 발생하는 온실가스와 외부에서 유입되는 에너지원과의 관계 및 이를 통하여 내부 저장고의 변화를 파악하는 것이 우선 시 되었다. 먼저 부산시 에너지 다이어그램을 바탕으로 자연환경 자원, 1차 산업, 2차 산업 및 도시 소비 활동이 먼저 고려되고 외부로부터 유입되는 에너지

원 소비 및 시스템 내 생산 활동이 나타날 수 있는 구성이 필요하였다. 마지막으로 각 부문별 온실가스 배출량이 나타나며, 이에 따른 대기 중 방출되는 온실가스의 변화를 살펴볼 수 있는 에너지 다이어그램을 작성하고자 시도하였다.

본 모델링에서는 에너지 분석에서 사용된 2005년도의 부산시 자료를 최대한 활용하여 초기 값으로 제시하고 정량화하였다. 이외에 필요한 지역별 분야별 에너지원별 소비량은 지역에너지통계연보를, 각 에너지원별 소요비용은 에너지절약핸드북에서 확인하여 산업분야 및 그 외 부분을 도시 분야로 나눈 에너지양(toe or Gwh/yr)을 산출하였으며 지역내총생산에 따른 총자산 형성 및 생산에 따른 재화와 용역의 순이출과 같은 경제적 금액은 통계청의 부산시 지역내 총생산 및 지출의 통계자료 등을 활용하였다. 이와 같은 자료를 바탕으로 부산시에 유입되는 외부의 에너지원 중 알 수 없는 기타(1.2 %)를 제외한 석탄(1.2 %), 석유제품(60.7 %), 도시가스(15.9 %), 전력(21 %)를 모두 외부로부터 들어오는 에너지원으로 산출하였으며, 그 중 전력은 타 에너지원과 별도로 나누어 산업분야와 도시 분야에 공급하게 함으로 그 결과를 확인하고자 하였다.

나. 모델의 수식화

모델의 수식화하기 위하여 먼저 에너지 다이어그램 내의 외부 에너지원, 내부 보유량, 그리고 각각의 에너지 경로들을 확인해야한다. 다이어그램 내의 각 심볼 및 경로는 그 자체에 수학적 의미들을 포함하여 수학적 조작이 가능하며, 동시에 에너지 법칙을 따르기 때문에 각 보유량에 대한 방정식은 다이어그램으로부터 얻을 수 있다.

예를 들어 아래 그림 Fig. 3.7의 다이어그램에 따라 내부 보유량 Q 의 시

간 인터벌(dT)에 따른 변화율은

$$DQ = J - K1*Q \text{ 로 성립되며,}$$

BASIC 프로그램에서는 각 DT만큼의 Q의 변화량을

Q_{T+DT} (변화된 Q)= Q_T (전의 Q)+ DQ (변화율)* DT (시간 인터벌)로 제시한다.

이러한 TANK모델에서 만약 Q의 보유량이 1000L이고 유출되는 양이 100L/hr라고 한다면 $K1*Q = 100L/hr$,

Q로 나누어 주면, $K1=100/Q=100/1000=0.1L/hr$ 로 계수값이 정해진다.

이러한 방식으로 각 계수값을 구한 후 초기값과 함께 정규화 시킨다.

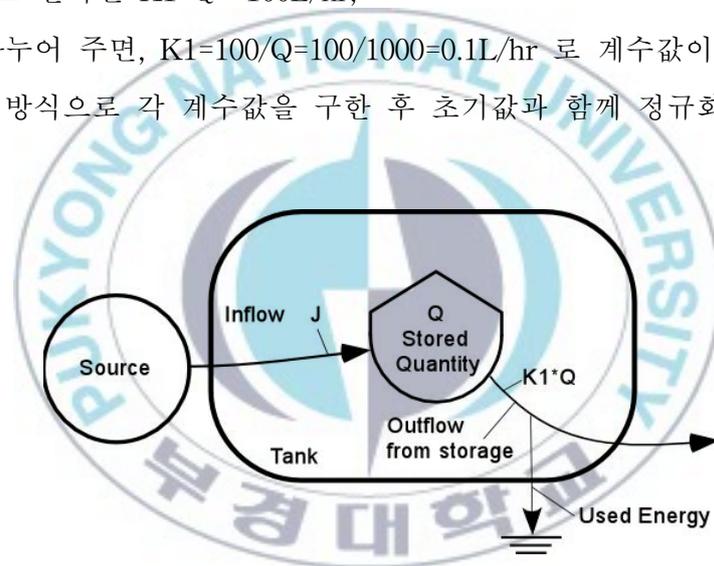


Fig. 3.7 Kinds of equations for the simple storage model TANK(Odum, 2000).

다. 모델의 보정 및 정규화

모델의 수식화에 이어 실제 자료를 모델에 적합하게 만들기 위하여 보정 및 정규화 작업을 거치게 된다. Fig 3.8에서는 외부로부터 유입되는 에너지 (E, F)와 내부 보유량(Q)의 초기 값을 정규화 시킨 후 각 에너지 플로우

($K1 \cdot E$, $K2 \cdot Q$, $K3 \cdot Q \cdot F$)를 보정한다. 보정된 에너지원 및 플로우를 통하여 모델에 이용되는 각 계수 값은 Table 3. 6과 같은 방법으로 산정된다.

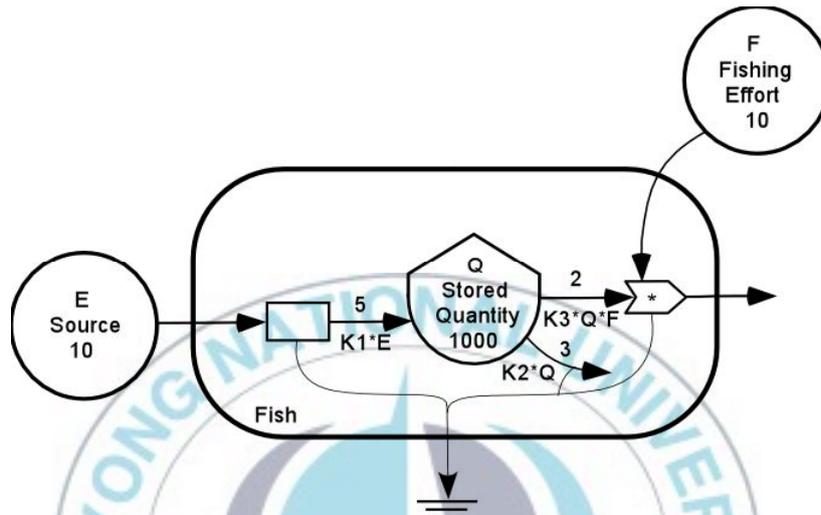


Fig. 3.8 Minimodel FISH with three evaluated pathways to show how to calibrated equations(Odum, 2000).

Table 3.6 Calculation of constants for the Model FISH using numbers on the diagram in Fig 3.8

| Expression and value | Coefficient expression | Calculation | Coefficient value |
|--------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| $K1 \cdot E = 5$ | $K1 = 5/E$ | $K1 = 5/10$ | $K1 = 0.5$ |
| $K2 \cdot Q = 3$ | $K2 = 3/Q$ | $K2 = 3/1000$ | $K2 = 0.003$ |
| $K3 \cdot Q \cdot F = 2$ | $K3 = 2/(Q \cdot F)$ | $K3 = 2/(1000 \cdot 10)$ | $K3 = 0.0002$ |

라. 프로그램 작성법

모델링을 수행하기 위한 프로그램으로는 엑셀에서 Visual Basic 프로그램

램을 이용하였으며, 엑셀의 차트 기능을 통하여 도표화하여 나타내었다. 엑셀에는 Visual Basic Editor와 연동하여 Basic 수식을 입력하여 엑셀시트의 cell별로 데이터를 확인할 수 있다. 또한 나타난 데이터는 엑셀의 연산, 차트, 분석기능을 활용하여 검토가 가능하다.

타 연구에서는 QBasic, Stella, Extend 등을 이용한 모델링을 수행한 바 있으나, 본 연구에서 수행한 엑셀의 Visual Basic 프로그램을 사용한 모델링 방식은 일반인들이 손쉽게 쓸 수 있으며, 얻어지는 데이터를 엑셀의 다양한 부가 기능을 통하여 확인할 수 있다는 편리함을 갖추고 있다.

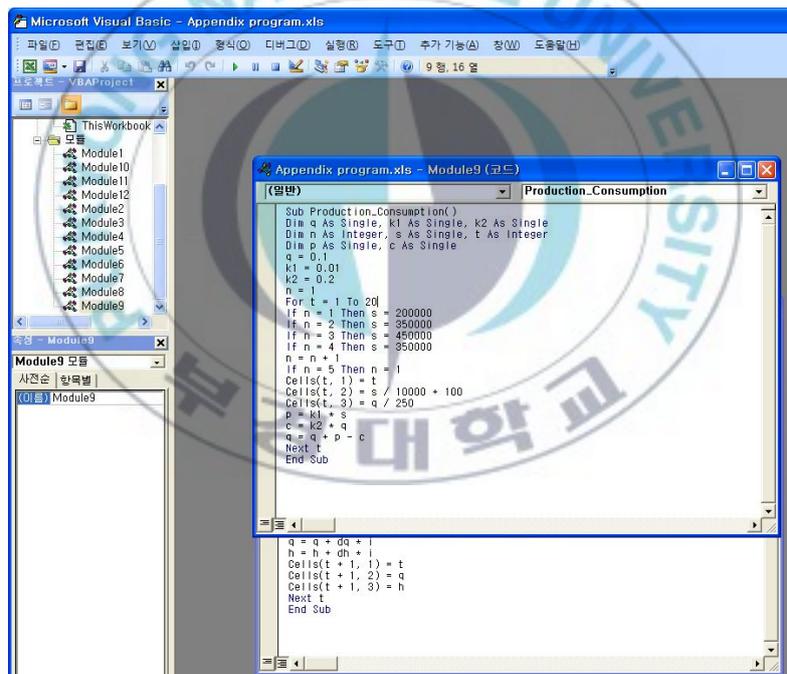


Fig. 3.9 Example of Module in Visual Basic Editor from MS EXCEL program.

데이터를 입력하는 방법은 아래 순서와 같다.

먼저 엑셀프로그램의 새로운 시트를 오픈한 후 ALT+F11키로 MS Visual Basic Editor 창으로 전환한다(Fig3.9). 맨 왼쪽 위의 VBA 프로젝트창에 새로운 모듈을 추가시키고 코드를 입력 후 F5키로 매크로를 실행시키면 먼저 지정되어 있는 엑셀시트의 정해진 Cell에 각 값들이 기록되어진다. 그 이후로는 에너지원에 대하여 데이터를 지정하고 차트를 선정하여 도표로 변화를 확인 할 수 있다. 또한 모듈 내 코드에서 또 다른 Cell 위치를 에너지원(source) 및 흐름(flow)에 대한 입력을 지시하게 되면 각 단계의 변화도 파악할 수 있는 장점이 있다.

코드의 입력 순서는 모델 이름 입력 및 계수, 저장고(storage), 스케일 팩터(scale factor)를 입력 후 Cell 명령어로 초기 값을 제시한다. 다음으로 For next구문을 활용하여 반복 연산을 수행하게끔 한다.

For next 구문은 먼저 for 시간계수(t) to 순환횟수 순으로 입력하여 시작 시점(t) 및 종료 시점을 결정하고 각 저장고의 보유량 변화식을 입력 후 다시 한 번 더 Cell 명령어로 파악하고자 하는 각 저장고 및 흐름을 지정한 후 next t를 입력하여 반복 연산식을 종료하게 한다.

기본적으로 모델링은 2005년을 기준으로 15년 동안의 각 저장고(storage) 및 흐름(flow)의 변화를 확인하여 전반적인 변화의 흐름 및 온실가스 저감 방안에서 제시한 2010년, 2015년, 2020년의 데이터를 확인할 수 있게 구성하고자 시도하였다.

IV. 결 과

1. 에머지 분석 및 평가

가. 에머지 분석 결과

본 연구에서는 1998년부터 2007년까지 각 연도별 부산시의 에너지원에 대한 에머지 분석을 수행하였으며, 1998년부터 2006년까지의 에머지 분석표는 Appendix 4.1에, 2007년도 에머지 분석표 및 footnotes는 Appendix 4.2에 제시하였다. 예시로 2007년도의 에머지 플로우와 에머지 지수에 대한 정리표를 Appendix 4.3에 기재하였으며, 본 연구에서 이용한 Solar transformity는 Appendix 4.4에서 제시하였다.

부산시의 에머지 분석에서는 외부의 자연환경 에너지원으로 태양에너지, 바람, 비, 조석, 파도, 하천 유입량 순으로 배열하였으며, 내부의 에너지원으로는 농업 및 어업에 의한 생산, 포토 및 지하수가 보유한 비영속적 에너지원이 포함된다. 또한 외부에서 들어오는 주요 에너지 소비항목인 석탄, 천연가스, 석유, 전력 사용량과 Good & Service 항목을 산정하여 분석하였다. Table 4.1에서는 2007년도 부산시 에머지 분석결과를 나타내었다.

Table 4.1 Energy flows of the Busan metropolitan city in 2007

| No | Item | Raw Units | | Solar tranformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2007 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 2.10E+19 | J | 1.00E+00 | 2.10E+19 | 1.74E+10 |
| 2 | Wind | 5.20E+15 | J | 2.51E+03 | 1.30E+19 | 1.08E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.38E+14 | J | 4.70E+04 | 1.59E+19 | 1.31E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 4.82E+15 | J | 3.05E+04 | 1.47E+20 | 1.22E+11 |
| 5 | Tide | 8.55E+15 | J | 7.39E+04 | 6.32E+20 | 5.23E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.29E+11 |
| 7 | River, chemical | 7.79E+16 | J | 8.13E+04 | 6.33E+21 | 5.24E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.65E+14 | J | 5.76E+04 | 4.41E+19 | 3.65E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 6.44E+14 | J | 3.36E+05 | 2.17E+20 | 1.79E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.22E+15 | J | 3.36E+06 | 4.08E+21 | 3.38E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 1.78E+14 | J | 2.72E+05 | 4.85E+19 | 4.01E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.33E+14 | J | 1.24E+05 | 1.64E+19 | 1.36E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.47E+15 | J | 6.71E+04 | 9.85E+19 | 8.16E+10 |
| 14 | Oil | 1.87E+17 | J | 9.06E+04 | 1.69E+22 | 1.40E+13 |
| 15 | Gas | 2.71E+16 | J | 8.05E+04 | 2.18E+21 | 1.80E+12 |
| 16 | Electricity | 6.45E+16 | J | 2.91E+05 | 1.88E+22 | 1.55E+13 |
| 17 | Inflow of G.&S. | 4.39E+13 | ₩ | 4.25E+08 | 1.86E+22 | 1.54E+13 |

2007년도를 기준으로 각 에너지원의 실질적인 기여 측면에서 살펴보면, 자연환경활동에서 발생된 에너지원의 경우, 태양에너지로부터 2.10 E19

sej/yr, 바람으로부터 1.30 E19 sej/yr, 비의 위치에너지로부터 1.59 E19 sej/yr, 비의 화학적 에너지로부터 1.47 E20 sej/yr, 조석으로부터 6.32 E20 sej/yr, 파도에너지로부터 2.77 E20 sej/yr, 하천으로부터 6.33 E21 sej/yr, 지각활동에 의하여 4.41 E19 sej/yr,가 유입되고 있었다. 외부의 자연환경활동에 따른 에너지원의 경우 하천에서의 에너지가 6.33 E21 sej/yr,로 가장 많은 에머지를 유입시키고 있었다. 그리고 조석, 파도, 비의 화학적 에너지, 바람, 지각운동, 태양에너지, 비의 위치 에너지 순으로 에머지가 높은 것이 확인되었다.

지역의 농업활동에 의하여 2.17 E20 sej/yr, 어업활동에 의하여 4.08 E21 sej/yr 시스템 내의 지하수로부터 4.85 E19 sej/yr, 표토로부터 1.64 E19 sej/yr 만큼의 에머지가 이용되었다.

외부로부터 유입되는 에너지는 석탄이 9.85 E19 sej/yr, 석유가 1.69 E22 sej/yr, 천연가스가 2.18 E21 sej/yr, 전력이 1.88 E22 sej/yr로 나타났으며 그 외 Good & Service는 총 1.86 E22 sej/yr로 나타났다.

Fig 4.1에서는 2007년도를 기준으로 분석된 각 에너지원의 에머지 플로우를 도표로 나타내었다. 외부로부터 유입되는 자연환경에너지 중에는 하천, 조석, 파도, 비의 화학적 에너지, 지각활동에 의한 에너지, 태양에너지, 비의 위치에너지, 바람 순으로 에머지가 컸으며, 생산에서는 수산생산물, 농업생산물 순으로 나타났다. 경제활동에 필요한 에너지자원 중에는 전력, Good & Service, 석유, 가스, 석탄 순으로 실질적인 기여를 나타내고 있었다.

자연환경 자원으로부터의 영속성 에너지원은 시스템 외부로부터 유입되는 하천과 시스템 내부에서 발생하는 조석 에머지를 합하여 이용하였으며, 내부자원의 비영속성 에너지원은 지하수와 표토 에머지의 합으로 재화와 용역의 형태로 구성된 외부로부터 구입된 에너지원은 석탄, 석유, 가스, 전력 및 재화와 용역 에머지의 합으로 산정하였다.

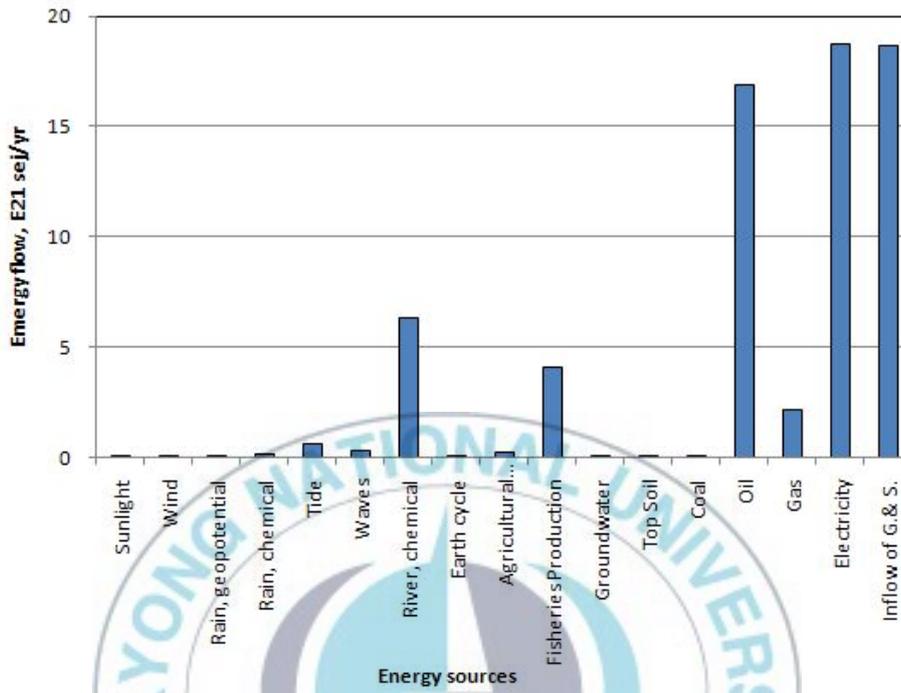


Fig. 4.1 Energy signature in Busan.

각 에너지원을 영속성 에너지, 비영속성 에너지, 그리고 재화와 용역으로 구분할 경우, Table 4.2와 같이 자연환경 자원으로부터의 영속성 에너지원은 10.95 %, 내부자원의 비영속성 에너지원은 0.10 %, 유입된 화석연료와 전기, 재화와 용역의 형태로 구성된 외부로부터 구입된 에너지원은 88.95 %를 차지하여 외부로부터 유입되는 에너지원이 큰 전형적인 도시 시스템을 보이고 있었다. 2007년도의 총 에너지 유입량은 6.36 E22 sej/yr으로 1998년도의 총 에너지 유입량 5.82 E22 sej/yr보다 약 9.3 % 증가하였다.

Table 4.2. Summary of flows for Busan in 2007

| Energy flows | Solar Energy (sej/yr) | Contribution (%) |
|---|--------------------------|---------------------|
| Renewable sources used(R) | 6.96E+21 | 10.95 |
| Nonrenewable sources flow from within Busan(N) | 6.49E+19 | 0.10 |
| Imported minerals and fuels(F) | 5.66E+22 | 88.95 |
| Total energy inflow(Y) | 6.36E+22 | 100 |

위와 같은 영속성의 에너지원(R), 내부의 비영속성 보유에너지원(N), 그리고 시스템 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입되는 에너지원(F)으로부터 유입된 에머지를 중심으로 에머지 지수를 산정한 결과는 Table 4.3과 같다.

총 에머지(Y)에서 영속적 에너지원의 비중은 10.95 %로 나타났으며, 부산시의 단위면적당 Emergy 사용량은 $8.32 \text{ E}^{13} \text{ sej/yr/m}^2$, 1인당 Emergy 사용량은 $4.89 \text{ E}^{16} \text{ sej/yr/cap}$ 로 나타났다.

생산물이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는데 이용되는 에머지 생산비(EYR)는 화석연료, 철강 등의 자원으로서의 가치를 평가하는 척도로서 각 에너지원이 생산되기까지 이용된 에머지(Y)에 대해 생산된 에머지(F)의 비로 계산하였다. 2007년도 부산의 에머지 생산비는 1.12으로 나타났으며, 한국(Lee and Odum, 1994)의 1.12와 동일한 생산비를 보이고 있다. 국가나 지역시스템에 대한 에머지 생산비는 자원에 대한 평가와는 다소 상이하나, 국가나 지역시스템의 총생산 에머지를 교역과 교환에 의해 유입된 에머지를 나누어 계산할 수 있으며, 이것은 총 생산이 경제에 미치는 에머지 기여로 볼 수 있다(Brown and Ulgiati, 1997).

시스템의 생산과정 중의 에머지 생산비(EIR)은 8.05로 나타났으며, 자연환

경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 지표인 환경부하율(ELR)은 8.14으로 산정되었다. 한국의 환경부하율 9.88과 비교하면 다소 낮은 수치를 보이고 있다. Brown(1997)에 의하면 환경부하율이 2보다 적을 경우에 환경적 영향이 적은 시스템으로 평가하고 있으며, 10 이상의 값을 나타낼 경우에는 상대적으로 환경에 대한 영향이 큰 시스템으로 평가하고 있다.

지속성지수(ESI)는 에머지 생산비(EYR)와 환경부하율(ELR)과의 비로서 계산되며 시스템 생태학적 관점에서 지수 값이 1보다 작으면 지속가능한 발전 가능성이 적은 시스템으로 볼 수 있다. 2007년도 부산시의 경우 0.14로 1보다 작아 지속성이 적은 도시로 판단될 수 있었다.

Table 4.3 Indices for overview of Busan using emergy in 2007

| Name of Index | Expression | Value |
|--|----------------|----------|
| Renewable energy flow(sej/yr) | R | 6.96E+21 |
| Flow from indigenous nonrenewable reserves(sej/yr) | N | 6.49E+19 |
| Flow of imported emergy(sej/yr) | F | 5.66E+22 |
| Total emergy inflow(sej/yr) | R+N+F | 6.36E+22 |
| Total emergy used(sej/yr) | Y=N+R+F | 6.36E+22 |
| Emergy to money ratio | P1=Y/GNP | 1.21E+09 |
| Fraction used, locally renewable (% Renew) | R/Y | 10.95 |
| Use per unit area (7.58E8 m ²) | Y/(area) | 8.32E+13 |
| Use per capita (3.83E6 people) | Y/(population) | 4.89E+16 |
| Emergy yield ratio(EYR) | Y/F | 1.12 |
| Emergy investment ratio(EIR) | F/(R+N) | 8.05 |
| Environmental loading ratio(ELR) | (N+F)/R | 8.14 |
| Emergy Sustainability index(ESI) | EYR/ELR | 0.14 |

1998년부터 2007년까지의 연도별 에머지 분석결과에 따라 영속성 에너지원(R)으로부터의 유입 범위는 6.04 E21~1.40 E22 sej/yr, 비영속성 에너지원(N)의 범위는 5.93 E19~1.05 E20 sej/yr, 외부로부터 구매되는 에너지원(F)은 4.74 E22~5.66 E22 sej/yr으로 일정한 수준을 유지하지 하고 있었다 (Table 4.4). 10년 동안 평균적으로 영속성 에너지원(R)은 15.5 %, 비영속성 에너지원(N)은 0.1 %, 외부로부터 구매된 에너지원(F)은 84.4 %를 차지하고 있었다(Fig.4.2).

Fig. 4.3과 같이 전체 에머지(Y)은 1998년도의 5.76 E22 sej/yr에서 2007년도에는 6.30 E22 sej/yr으로 연평균 0.9 % 증가하였으나, 10년간 증가세와 감소세를 반복하며 큰 변화가 없는 추세이다.

Table 4.4 Variation of Emergy inflow from renewable sources(R), Nonrenewable sources(N) and Purchased input(F)
(unit : sej/yr)

| Year | R | N | F | Y |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1998 | 1.07 E22 | 1.05 E20 | 4.74 E22 | 5.82 E22 |
| 1999 | 9.37 E21 | 9.38 E19 | 5.12 E22 | 6.07 E22 |
| 2000 | 8.49 E21 | 9.88 E19 | 5.45 E22 | 6.31 E22 |
| 2001 | 6.04 E21 | 9.79 E19 | 5.46 E22 | 6.07 E22 |
| 2002 | 1.10 E22 | 7.13 E19 | 5.53 E22 | 6.64 E22 |
| 2003 | 1.40 E22 | 7.86 E19 | 5.50 E22 | 6.91 E22 |
| 2004 | 1.00 E22 | 7.38 E19 | 5.36 E22 | 6.37 E22 |
| 2005 | 8.34 E21 | 7.31 E19 | 5.40 E22 | 6.24 E22 |
| 2006 | 1.34 E22 | 5.93 E19 | 5.48 E22 | 6.83 E22 |
| 2007 | 6.96 E21 | 6.49 E19 | 5.66 E22 | 6.36 E22 |
| Average | 9.84 E21 | 8.17 E19 | 5.37 E22 | 6.36 E22 |

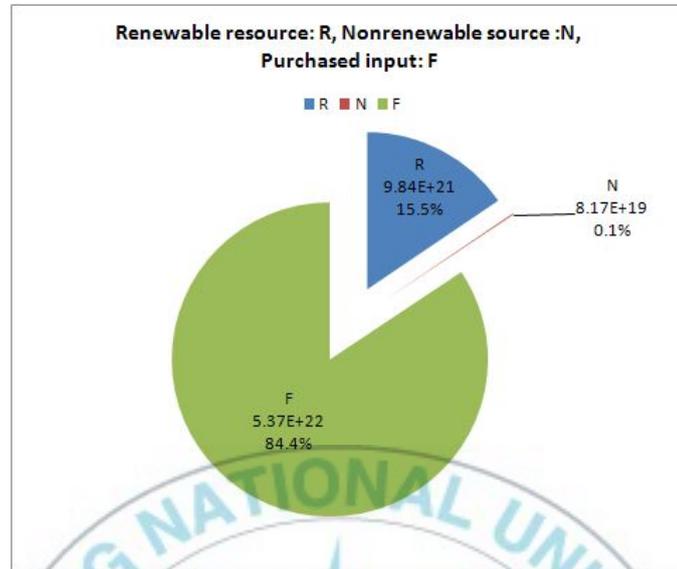


Fig. 4.2 The contribution of energy inflow average from Renewable sources(R), Nonrenewable sources(N) and Purchased input (F).

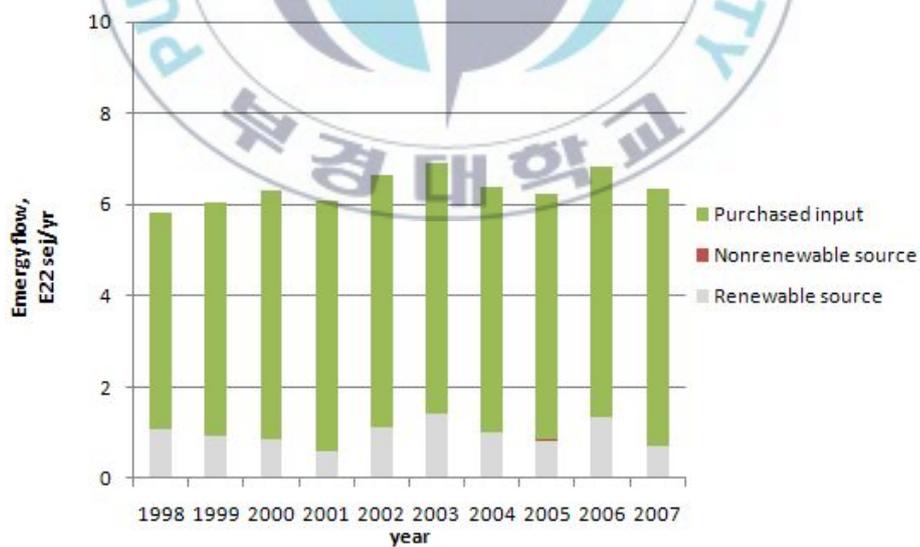


Fig. 4.3 Variation of energy inflow from Renewable, Nonrenewable sources and Purchased input.

전체 에너지 중 석탄, 석유, 가스, 전력, 구매된 재화와 용역에 대한 에너지 유입량의 분포는 Fig. 4.4와 같이 나타났다. 2004년까지는 석유, 구매된 재화와 용역, 전력 순으로 에너지 유입량이 가장 높았으나, 2005년부터는 전력, 구매된 재화와 용역, 석유 순으로 순서가 바뀌었다. 10년 동안 전력의 에너지 유입량이 꾸준히 증가하는 반면에 석유의 에너지 유입량은 서서히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 1999년 기준으로 석유는 연평균 4.69 %가 증가하였으나, 전력은 연평균 6.35 % 증가한 결과이다.

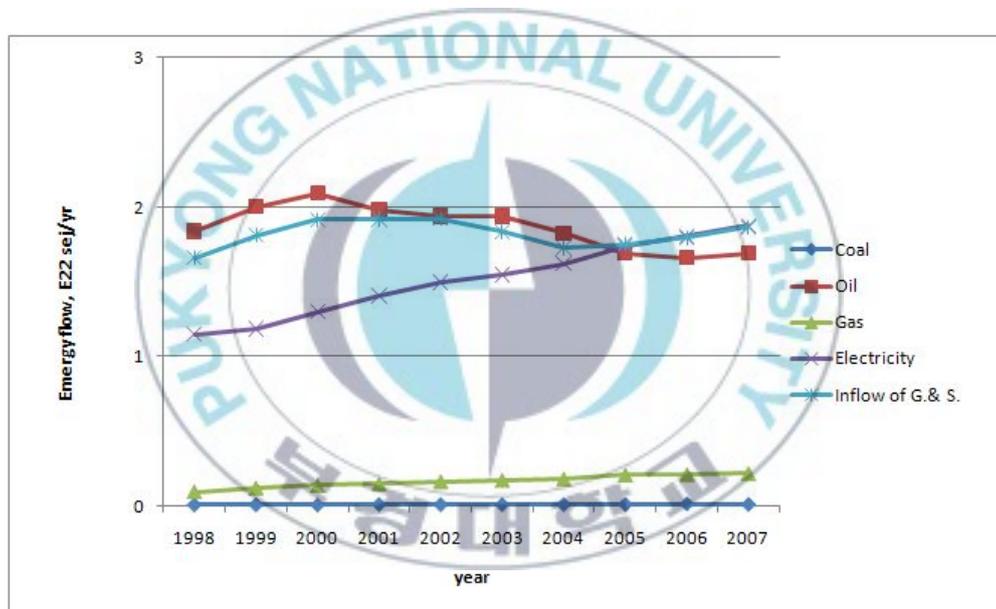


Fig. 4.4 Variation of coal, oil, gas, electricity, and inflow of Good & Service.

나. 에머지 지수를 이용한 평가

에머지 분석을 통하여 1998년부터 2007년까지 10년간 부산시의 에머지 지수를 산정한 결과 Table 4.5와 같이 영속성 에너지원의 에머지 점유율(%Renew.)은 9.96 ~ 20.31의 범위로 나타났으며, 하천 유량에 따른 영향으로 증감을 반복하고 있었다. 에머지 생산비(EYR)는 1.11 ~ 1.26의 범위에서 큰 변화 없이 유지되고 있었다. 에머지 생산비는 화석연료 등에 대한 자원으로서의 가치를 평가하는 척도로서 국가나 지역시스템에 대한 에머지 생산비는 자원에 대한 평가와는 다르나, 총생산이 시스템 경제에 미치는 에머지 기여로 볼 수도 있다.

대상시스템으로부터 생산물이 만들어지기까지의 교역, 교환으로 유입되는 에너지원의 에머지(F)를 자연환경활동에서 기인한 영속성 에너지원의 에머지(R)와 나누어 산정하는 에머지 투자비(EIR)는 3.90 ~ 8.88의 범위를 나타내어 외부로부터 경제활동을 통하여 들어오는 에머지 양이 자연환경활동에서 기인하는 에머지 양보다 4배 이상 높다는 것을 보여주고 있다. 생산 활동에 외부로부터 유입되는 비영속성 에너지원의 비중이 자연환경에서 유입되는 영속성 에너지원보다 높은 점은 지역생산의 투자가치는 높으나 지속가능한 발전을 저해한다는 점도 고려해야 된다.

환경부하율(ELR)은 9.04 ~ 3.92의 범위로 나타났으며, 2001년도에 크게 증가하였다가 다시 낮아진 후 조금씩 증가하고 있는 추세이다. 이러한 점은 영속성 에너지원의 에머지 점유율(%Renew.)지수와 상반되는 의미로, 2001년도 이후 시스템 내의 영속성 에너지원의 점유율에 비해 비영속성 에너지원의 유입이 꾸준히 증가하는 경향을 보이는데 기인한다.

EYR, ELR 지수들 간의 관계를 통하여 산정되는 지속성 지수(ESI)는 0.12 ~ 0.32의 범위로 나타나, 부산시의 경우는 지속적인 발전 가능성이

적은 시스템($ESI < 1$)에 해당되었다 국가와 도시의 지속성 지수는 산정되고 지속적인 발전가능성이 있는 시스템, 지속적 발전 가능성이 변동적인 시스템, 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템으로 구분된다.

Fig 4.5에서는 에머지 생산비, 에머지 환경부하율, 지속성 지수를 도표화하여 보여주고 있다.

Table 4.5 Variation of emergy indices from 1998 to 2007

| Year | %Renew. ¹⁾ | EYR ²⁾ | EIR ³⁾ | ELR ⁴⁾ | ESI ⁵⁾ |
|------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1998 | 18.38 | 1.23 | 4.39 | 4.44 | 0.28 |
| 1999 | 15.44 | 1.18 | 5.41 | 5.48 | 0.22 |
| 2000 | 13.46 | 1.16 | 6.34 | 6.43 | 0.18 |
| 2001 | 9.96 | 1.11 | 8.88 | 9.04 | 0.12 |
| 2002 | 16.63 | 1.20 | 4.97 | 5.01 | 0.24 |
| 2003 | 20.31 | 1.26 | 3.90 | 3.92 | 0.32 |
| 2004 | 15.77 | 1.19 | 5.30 | 5.34 | 0.22 |
| 2005 | 13.37 | 1.16 | 6.41 | 6.48 | 0.18 |
| 2006 | 19.64 | 1.25 | 4.07 | 4.09 | 0.30 |
| 2007 | 10.95 | 1.12 | 8.05 | 8.14 | 0.14 |

1) %Renew. = $R/(R+N+F)$

2) EYR, Emergy yield ratio = $(F+R+N)/F$

3) EIR, Emergy investment ratio = $F/(R+N)$

4) ELR, Emergy loading ratio = $(F+N)/R$

5) ESI, Sustainability index, $ESI = EYR/ELR$



Fig. 4.5 Variation of energy indices in Busan.

1999년도를 기준으로 부산시에 대한 에머지 분석(최영근, 2003)을 한 결과와 비교하면 자연환경에 기인한 영속적 에너지원(R)로 조석과 하천에너지가 선정된 것은 동일하나 %Renew 지수는 11.89보다 높은 15.44로 본 연

구에서 계산된 것을 확인할 수 있었다. EIR 지수는 1.14보다 낮은 1.18로, EYR 지수는 7.40이 5.41으로, ELR 지수는 7.41에서 5.48로, ESI 지수는 0.15에서 0.22로 높아졌다. 각 지수들은 자료의 출처와 Solar transformity의 변화 등에 의하여 조금씩 차이를 보이고 있으나 경향은 유사한 것으로 파악되었다.

시스템 생태학적 관점에서 지속성 지수는 긴 안목으로 보았을 때 얼마만큼 발전가능성을 높일 수 있는지 판단할 수 있는 척도가 될 수 있다. 부산시의 경우 0.12 ~ 0.32의 범위로 나타났으며, 이와 같은 범위는 국가별 지속성 지수에 관한 연구(최영근, 2003)를 통하여 나타난 1999년도의 우리나라의 지속성지수는 0.11과 유사하며, Table 4.6에서 유사한 값을 보이는 나라들이 폴란드(0.11), 일본(0.12), 프랑스(0.14), 영국(0.30)등으로 현재 개발도상국 이상의 국가들이며 10을 넘는 국가로는 콜롬비아, 호주, 칠레 등 풍부한 자연자원을 가진 국가라는 점에서 선진국과 자연이 풍부한 저개발국으로 구분될 수 있다. 현재 외부에서 유입되는 자원에 기대여 다른 선진국들과 같이 풍부한 소비활동을 누리고 있지만, 장기적인 관점에서 보았을 때 부산시의 지속성 지수가 1 이상으로 유지될 수 있다면 향후 지속적인 도시의 성장과 발전을 모색할 수 있을 것으로 판단된다.

Table. 4.6 Sustainability state based on ESI in national systems(Choi, 2003).

| The state of national systems | | | | | |
|------------------------------------|-------------|--------------------------------------|------|---------------------------------|--------|
| Unsustainable systems (ESI < 1) | | Transitional Systems 1 < ESI < 10 | | Sustainable Systems 10 < ESI | |
| Nation | ESI | Nation | ESI | Nation | ESI |
| Belgium | 0.01 | Thailand | 1.01 | Colombia | 10.80 |
| Israel | 0.01 | Philippines | 1.16 | Australia | 12.27 |
| Germany | 0.03 | Pakistan | 1.44 | Chile | 15.28 |
| Czech | 0.04 | Mexico | 1.48 | Bangladesh | 19.84 |
| Italy | 0.05 | Nigeria | 1.77 | Brazil | 21.70 |
| Netherlands | 0.05 | India | 1.95 | Russia | 45.55 |
| Switzerland | 0.07 | Canada | 2.24 | New Zealand | 57.52 |
| Austria | 0.09 | Ireland | 2.40 | Argentina | 137.68 |
| Jordan | 0.10 | South Africa | 3.65 | Ethiopia | 153.53 |
| Spain | 0.10 | Indonesia | 4.09 | | |
| Korea Rep. | 0.11 | Peru | 4.56 | | |
| Poland | 0.11 | Norway | 6.62 | | |
| Japan | 0.12 | Venezuela | 7.23 | | |
| France | 0.14 | | | | |
| Greece | 0.14 | | | | |
| Turkey | 0.19 | | | | |
| Denmark | 0.19 | | | | |
| Sweden | 0.20 | | | | |
| Finland | 0.26 | | | | |
| United Kingdom | 0.30 | | | | |
| Portugal | 0.40 | | | | |
| USA | 0.46 | | | | |
| Egypt | 0.63 | | | | |
| Hungary | 0.66 | | | | |
| Costa Rica | 0.74 | | | | |
| China | 0.80 | | | | |
| Malaysia | 0.87 | | | | |

2. 온실가스 저감방안에 대한 에머지 평가

가. 온실가스 저감방안 적용을 위한 에머지 예측

1998년부터 2007년까지의 부산시 에머지 분석데이터를 바탕으로 2010년, 2015년, 2020년에 해당하는 부산시의 에머지 유입량을 예측하고 분석하였다. 이러한 결과는 부산시 온실가스 배출량 조사(2007)에서 제시된 저감량을 에머지 분석 결과에 도입하여 시스템 내 에머지의 변화를 파악하는데 도움이 될 것이다.

하지만 현재까지 에머지 분석을 미래 자료 예측을 통하여 수행한 연구사례는 없으며, 본 연구에서도 국가가 아닌 지역 도시에 대한 통계자료의 부족과 전망치가 부족하여 기본적인 경향을 알 수 있도록 대부분의 자료는 평균치(일사량, 강우량, 조석차, 평균풍속, 해안면적, 평균고도, 평균과고, 농산물, 수산물, 지하수 보유량)로 유지하고, 부산시 온실가스 전망에서도 이용된 선형 회귀분석방법을 통하여 면적, 토지이용면적, 유량, 석탄, 석유, 가스, 전기사용량, 지역내 총생산(GRDP), 인구에 대하여 예측하였다.

이러한 예측방식으로 인하여 각 연도별 에머지 및 지수는 명확하게 신뢰되지는 못하나, 본 예측을 통하여 추이를 살펴보고, 여기서 이용된 외부에서 유입된 에너지원의 감소량을 확인하여 모델링에서 이용하였다.

그 결과 Fig.4.6과 같이 외부로부터 구매된 에너지원의 유입되는 에머지가 예측되었다. 외부로부터 구매되어 유입된 에머지(purchased input)의 경우 증가추세를 계속 이어나가고 있다.

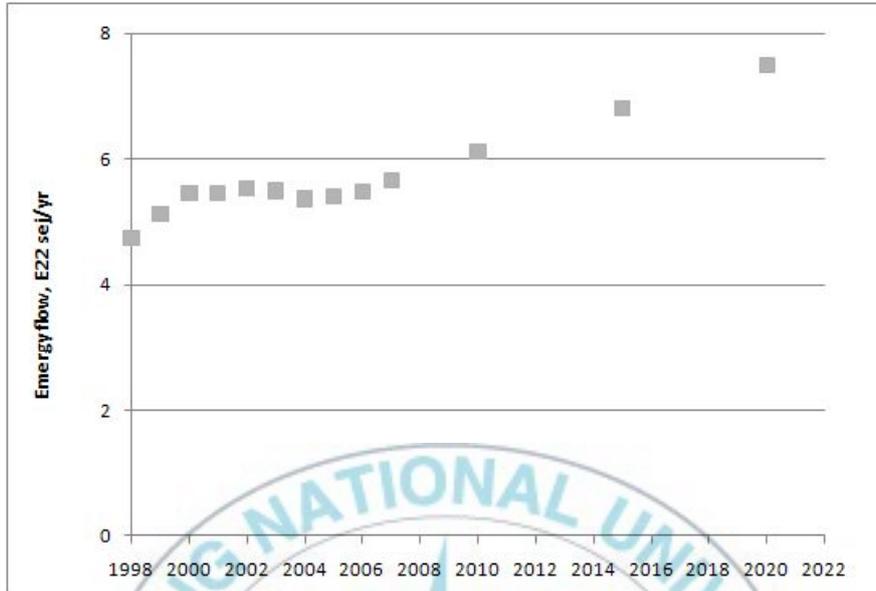


Fig. 4.6 Variation of predicted energy inflow from purchased input.

2010년, 2015년, 2020년의 예측된 에너지 분석표는 Appendix 4.5에 제시하였다. 에너지 분석표에 따라 향후 부산시의 시스템을 평가할 수 있는 지수를 Table 4.7과 같이 예측하였다.

예측된 부산시의 EYR은 1.16에서 1.13사이의 값을 보여주고 있으며 감소하는 추세를 보여주고 있다. 부산시는 투입한 에너지에 비해 많은 에너지를 산출하는 시스템을 가지고 있으며 그 효율은 계속 떨어지고 있었다. Brown and Ulgiati(2002)는 EYR이 2에서 5사이의 값을 가지면 이차에너지원(Secondary energy source)으로서 경쟁력이 있다고 하였으나 부산 시스템의 경우 에너지원으로의 경쟁력이 없는 것을 알 수 있었다.

시스템이 자연환경에 미치는 부정적인 영향을 평가하는 지수인 ELR은 6.22에서 7.62 사이의 값으로 계산되었으며 증가하는 추세로 나타났다. Brown and Ulgiati(1997)는 ELR이 3보다 작을 경우 환경에 미치는 부정적

인 영향이 적으며, 3 ~ 10사이의 값을 나타내면 사회 경제 활동이 환경에 미치는 부하가 크지는 않으나 지속적으로 증가한다고 평가한 바 있다.

또한, EYR과 ELR의 비로 나타내는 지속성지수인 ESI는 0.19에서 0.13 사이의 값을 보여주며 꾸준히 감소하는 패턴이 예측되어 점차 지속성이 떨어지고 있었다. 본 결과를 토대로 온실가스 저감방안을 적용 시켰을 때 감소하는 외부에서 구매한 자원(F)이 각 지수의 변화에 어느 정도 기여를 할 수 있는지를 살펴보고자 하였다.

Table 4.7 Variation of predicted emergy indices in Busan from 2010 to 2020.

| year | Indices | %Renew | EYR | EIR | ELR | ESI |
|------|---------|--------|------|------|------|------|
| 2010 | | 13.85 | 1.16 | 6.16 | 6.22 | 0.19 |
| 2015 | | 12.63 | 1.15 | 6.85 | 6.92 | 0.17 |
| 2020 | | 11.61 | 1.13 | 7.55 | 7.62 | 0.15 |

나. 온실가스 저감방안을 적용한 에너지 평가

부산광역시 온실가스 배출량 조사(2007)에서는 연도별 부산시의 활동도 자료를 사용하여 온실가스 배출량을 산정한 바가 있다. 그리고 산정된 배출량을 대상으로 각 부문마다 증감률이나 회귀분석 등을 통해 BAU 대비 배출량을 전망하였고 본 연구에서는 연구방법에서 선정된 7가지 저감방안을 적용시켜 온실가스 감축량을 각 해당 에너지 감소량으로 산정하여 분석하였다.

감축과정으로 어느 항목의 온실가스 감축량이 아닌 각 분야별로 감축 시 몇 %의 GgCO₂가 줄어든다는 가정을 통하여 이루어진 저감방안인 관계로 본 연구에서도 각 해당 에너지원 중 가장 밀접한 관계가 있다고 생각되는 에너지원을 선정하여 줄어드는 에너지양을 산출할 수 밖에 없었다.

에너지 부문의 저감방안 중 산업과 공공 및 기타부문에 소비되는 에너지 중 신재생에너지로 대체하는 것을 가정한 결과 온실가스 감축량만큼의 석유 소비량이 감소될 것으로 예상된다. 신재생에너지인 바이오 디젤(BD20) 보급 또한 바이오디젤의 포함된 일정량의 석유 소비량 감소를 유발하게 될 것이며 CNG 버스 보급 확대 또한 석유 소비량의 감소로 이어지게 될 것이다. 본 연구에서는 온실가스 감축량이 석유제품 중 어느 품목에서 줄어드는지 확인할 수 없는 관계로 가장 많은 소비량을 보이는 경유로 가정하여 소비량 감소를 예측하였다.

가정에서의 에너지 절약 및 트리플 윈(111)운동을 통한 에너지 절감은 가정에서 사용되는 전력, 물, 쓰레기 감축 중에 대부분 전력사용량 감소로 이어질 것으로 가정하였다. 마지막으로 자율부제 운영을 통한 석유 사용량 감소가 이루어질 전망이다.

각 저감방안에서 제시한 온실가스 저감량에 따른 에너지 소비의 감소량

을 Table 4.8과 Table 4.9에 나타내었다. 온실가스 저감량을 통한 에너지별 사용량 분석방법은 부산시 온실가스 조사보고서의 경유, 천연가스, 전력사용에 따른 CO₂ 발생량 산출법 및 에너지열량 환산기준표로 단위변환을 하여 산출하였다.

경유의 경우, 감소하는 GgCO₂값에 역으로 경유의 CO₂, CH₄, NO₂의 배출계수(74100 kg/TJ, 3 kg/TJ, 0.6 kg/TJ)와 각 온난화지수(1, 21, 310)를 곱한 각 배출량을 합한 값으로 나누어 주어 열량단위인 TJ로 환산 후 에너지열량 환산기준표(경유 1L당 37.9 MJ)를 이용하여 경유 소비량을 부피단위로 환산하였다. 전력 사용 감소량은 전력 MWh 당 0.424 tonCO₂인 배출계수를 적용하여 GgCO₂양을 MWh로 환산하여 이용하였다.

이러한 석유, 전력 사용량의 변화량은 회귀분석으로 예측된 2010년, 2015년, 2020년 에너지 사용량을 감소시켜 분석하였다.



Table 4.8 Nonrenewable sources(Oil) changes by reduction plan of greenhouse gas emissions

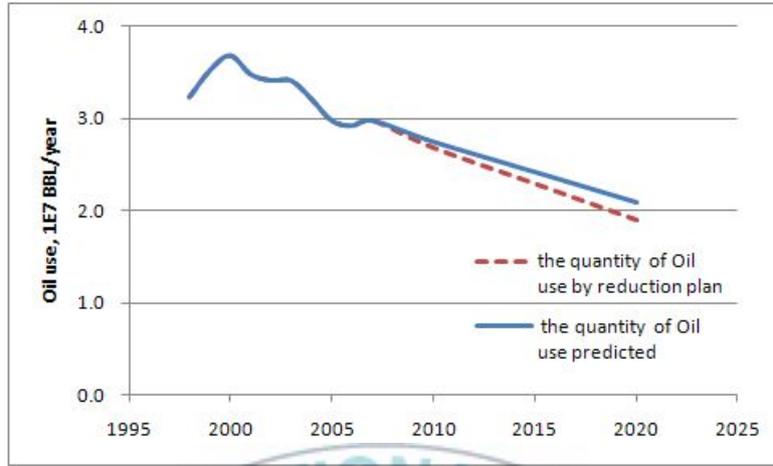
| | Reduction plan | Greenhouse gas reduction (GgCO ₂) | Oil reduction (BBL) |
|------|--|---|---------------------|
| 2010 | Expanding renewable energy in industrial field | 135.8 | 306,356 |
| | Expanding renewable energy in public, etc. field | 12.7 | 28,650 |
| | Supplying BD 20 | 29.4 | 7,777 |
| | Expanding CNG bus supply | 38.5 | 86,853 |
| | Expanding autonomous traffic restriction | 85.0 | 191,754 |
| | Total | 301.4 | 631,300 |
| 2015 | Expanding renewable energy in industrial field | 280.4 | 147,989 |
| | Expanding renewable energy in public, etc. field | 29.0 | 65,422 |
| | Supplying BD 20 | 82.0 | 36,997 |
| | Expanding CNG bus supply | 38.5 | 86,853 |
| | Expanding autonomous traffic restriction | 183.0 | 412,836 |
| | Total | 612.9 | 537,320 |
| 2020 | Expanding renewable energy in industrial field | 434.0 | 979,076 |
| | Expanding renewable energy in public, etc. field | 49.1 | 110,766 |
| | Supplying BD 20 | 124.6 | 56,218 |
| | Expanding CNG bus supply | 38.5 | 86,853 |
| | Expanding autonomous traffic restriction | 288.0 | 649,709 |
| | Total | 934.2 | 1,882,622 |

Table 4.9 Nonrenewable sources(electricity) changes by reduction plan of the greenhouse gases emission.

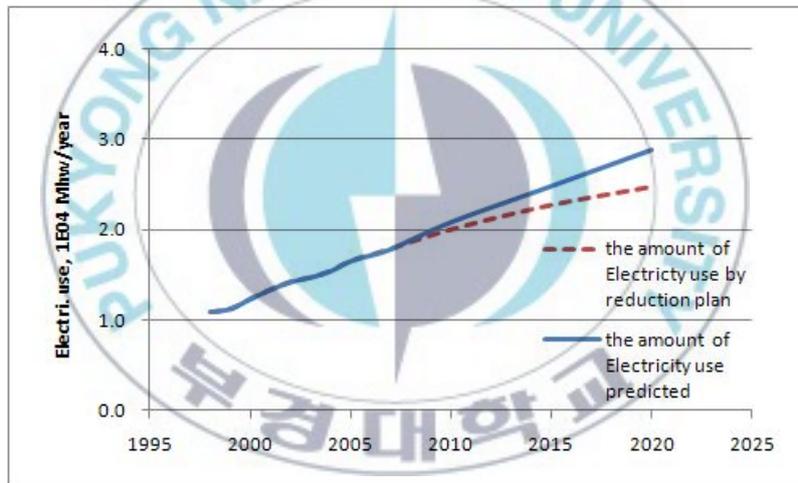
| | Reduction plan | Greenhouse gas reduction (GgCO ₂) | Electric. reduction (Gwh) |
|------|------------------------------------|---|---------------------------|
| 2010 | Energy conservation in household | 86 | 202.8 |
| | Expanding triple one(111) campaign | 258 | 608.5 |
| | Total | 344 | 811.0 |
| 2015 | Energy conservation in household | 257 | 606.1 |
| | Expanding triple one(111) campaign | 465 | 1096.7 |
| | Total | 722 | 1,702.8 |
| 2020 | Energy conservation in household | 429 | 1,011.8 |
| | Expanding triple one(111) campaign | 765 | 1,804.3 |
| | Total | 1,194 | 2,816.0 |

저감방안에 따라 에너지 분석에서는 외부로부터 들어오는 석유, 전력량의 변화가 예측되었다. 석유사용량의 경우 2020년도에 1.88 E06 BBL만큼 줄어들며, 가정부문의 전력사용량은 2.8 E03 Gwh 만큼 줄어들 것으로 예측되었다. 이 같은 사용량은 2020년도의 에너지 분석에서 예측된 석유 소비량의 9 %, 전력 사용량의 9.68 %를 차지하고 있다.

Table 4.8과 4.9의 저감방안을 모두 수행한다면 Fig. 4.7과 같이 석유, 전기 부문에 대한 에너지 사용량 감소를 예상할 수 있다.



(a) Oil



(b) Electricity

Fig. 4.7 Change of energy consumption by reduction plan((a)Oil, (b)Electricity).

온실가스 저감 방안 적용에 따른 에너지 소비량 감소로 나타나는 에머지의 변화는 Fig. 4.8과 같다. 저감방안에 따라 2010년도에는 외부에서 유입되는 에머지(F)가 1.29 E21 sej/yr만큼 감소하였으며, 2020년에는 5.50 E21 sej/yr만큼 줄어들었다. 본 데이터는 외부에서 유입되는 에너지원의 감소만

을 고려하여 분석한 결과이며, 저감방안에 따른 제품 구입 감소, 타 에너지 이용 증가, 감소 시 제공되는 인센티브 등과 같은 파급효과 및 추진사업비는 고려되지 않았다.

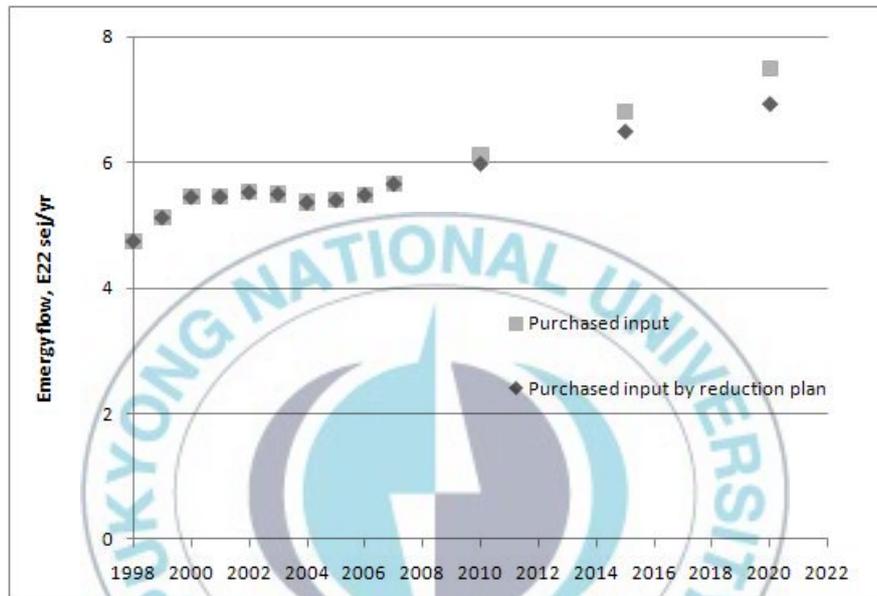


Fig. 4.8 Variation of predicted energy inflow from purchased input by reduction plan.

다음으로 온실가스 저감방안을 적용시킨 예측 값에 대한 에머지 지수를 비교하여 보았다. 온실가스 저감 방안을 적용한 부산시의 EYR은 2020년에는 1.13에서 1.14로 높아졌으며, 부산시의 시스템의 경우 에너지원으로의 경쟁력이 작았으나 온실가스 저감 방안 적용으로 EYR이 약간 높아졌음을 알 수 있다.

시스템이 자연환경에 미치는 부정적인 영향을 평가하는 지수인 ELR은 7.62에서 7.07로 계산되었으며 외부에서 유입되는 에머지의 증가로 온실가스 저감 방안을 적용하기 전보다 약간 늦게 증가하고 있다.

Brown and Ulgiati(1997)는 ELR이 3보다 작을 경우 환경에 미치는 부정적인 영향이 적으며, 3 ~ 10사이의 값을 나타내면 사회 경제 활동이 환경에 미치는 영향이 그리 크지 않은 것으로 구분하였다. 부산시 시스템의 경우 환경에 미치는 영향이 약간 더 낮아졌음을 알 수 있다.

또한, EYR과 ELR의 비로 나타내는 지속성지수인 ESI는 0.15에서 0.16로 변한 값을 보여주며 2020년이 되어서야 온실가스 저감 방안을 적용하기 전보다 증가한다는 것을 보여주었다(Table 4.10).

Table 4.10 Variation of energy indices by reduction plan

| Index | Original energy indices | | | | | Energy indices by reduction plan | | | | |
|-------|-------------------------|------|------|------|------|----------------------------------|------|------|------|------|
| | %Renew | EYR | EIR | ELR | ESI | %Renew | EYR | EIR | ELR | ESI |
| 2010 | 13.85 | 1.16 | 6.16 | 6.22 | 0.19 | 14.11 | 1.17 | 6.03 | 6.09 | 0.19 |
| 2015 | 12.63 | 1.15 | 6.85 | 6.92 | 0.17 | 13.14 | 1.15 | 6.55 | 6.61 | 0.17 |
| 2020 | 11.61 | 1.13 | 7.55 | 7.62 | 0.15 | 12.41 | 1.14 | 6.99 | 7.06 | 0.16 |

본 연구의 에머지 분석 예측을 통한 온실가스 저감방안의 적용으로 석유와 같은 화석연료의 사용량 감소로 외부로부터 구매한 에너지원의 증가추세가 둔화되었으며, 각 에머지 지수에도 일정양의 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 예측된 외부로부터 구매한 에너지원의 증가를 완화시켰지만 외부에서 구매한 에너지원의 증가추세를 감소추세로 바꾸기에는 부족하였다.

본질적으로는 외부에서 들여오는 에너지의 이용이 안정적 추세로 전환될 필요성은 있으나, 이를 추진하기 위해서는 저감방안에서 제시된 이상의 화석연료 사용량을 줄여야하고 또한 그로 인해 발생하는 추가적인 재화 및 용역의 증가가 예상되므로, 효율적인 저감방안 추진이 필요하며, 본 연구에

서 수행된 부산시 전체의 에머지 분석에 뒤따라 각 사업별로 생태효율적 분석 및 평가가 이루어져야 되겠다.

아울러 부산시의 경우는 자연환경 에너지원이 외부에서 공급되는 에너지보다 8배나 적은 시스템으로 화석연료 감소만큼이나 낙동강 유량 증가 등 자연환경 에너지원 보유 및 이용의 확대도 부산시 생태효율적인 발전에 도움을 줄 것으로 사료된다.



3. 에너지 시스템 모델링

가. 에너지 시스템 모델 수립

본 연구에서는 2005년도 에머지 분석 및 온실가스 배출량 조사에서 이용된 자료를 바탕으로 부산시 온실가스 배출량 조사연구에서 선정된 저감방안이 수행되었을 때 발생하는 온실가스 저감효과가 환경과 경제에 미치는 영향에 대하여 파악할 수 있는 에너지 모델링을 수행하였다. 에머지 분석에서는 각 항목별 변화량을 통하여 예측이 가능하였다면 에너지 모델링을 통하여 각 항목간의 상호관계를 통한 경제적 요인의 변화량 예측이 가능할 것이다.

전체 시스템 다이어그램의 경계는 부산시를 대상으로 하였다. 외부에서 들어오는 자연환경에너지는 시스템 내부에 유입하게 되어 자연환경자원의 보유량(Biomass)이 축적됨에 따라 1차 산업의 생산 활동이 이루어지며 산업체를 통한 2차 생산물이 도시 내의 소비활동과 연계된다. 이러한 생산 소비활동에 외부의 에너지원(Electricity, Good & Service)이 유입되어 이용된다.

외부에서 구매되는 재화와 용역(Electricity, Good & Service) 및 소비활동을 통하여 경제적 자산(Asset)이 축적되고 시스템 내부에 화폐 보유량(Money)을 통하여 외부에너지원의 유입 및 화폐의 유입, 유출(Export)이 이루어진다. 또한 생산·소비와 같은 각 경제활동을 통하여 온실가스(Carbon)가 배출된다. 이러한 에너지 시스템 다이어그램은 Fig 4.9와 같이 작성하였다.

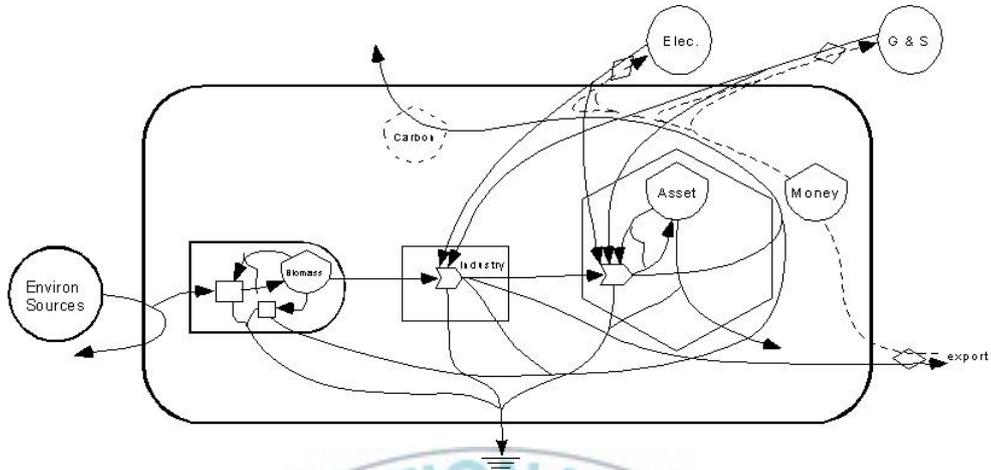
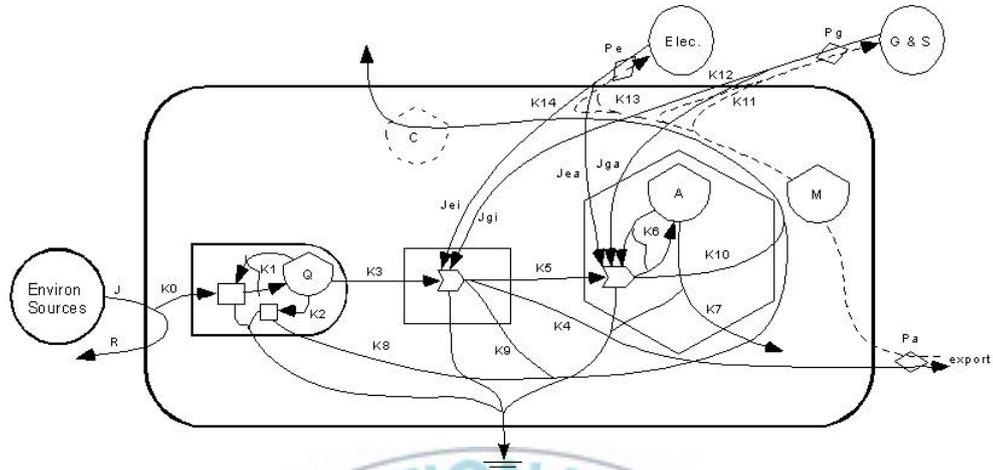


Fig. 4.9 Energy systems diagram of Busan for energy modeling.

그리고 외부에서 유입되는 에너지원과 내부 보유량의 에너지 경로에 Fig. 4.10과 같이 문자와 계수를 할당하였다. 그리고 시간에 따른 각 저장고의 변화량과 에너지 플로우에 대한 수식을 에너지 시스템 다이어그램에 따라 작성하여 이용하였다.



$$R = J - K0 * R * Q, \quad R = J / (1 + K0 * Q)$$

$$U(\text{Consumption}) = K5 * Q * Jei * Jgi$$

$$DQ = K1 * R * Q - K2 * Q - K3 * Q * Jei * Jgi$$

$$DA = K6 * U * Jea * Jga * A - K7 * A$$

$$DM = K4 * Q * Jei * Jgi * pa - K11 * M - K12 * M - K13 * M - K14 * M$$

$$C(\text{CO}_2 \text{ emission}) = K8 * Q + K9 * Q * Jei * Jgi + K10 * U * A * Jea * Jga$$

$$Ex(\text{Export}) = K4 * Q * Jei * Jgi$$

Fig. 4.10 Energy systems diagram of Busan with letters for each storage and pathway.

에너지 시스템 다이어그램의 에너지 플로우(flow)는 먼저 외부로부터 유입되는 자연환경 에너지원(Environment Source)에서 에너지가 유입하여 부산시 내부에서 자연환경 에너지원에 의한 생산 활동이 이루어진다. 자연환경자원 보유량(Q)의 시간에 따른 변화(DQ)는 자연환경의 일차생산력($K1 * R * Q$)과 자연적인 감소($K2 * Q$), 1차 산업에 이용되는 생산물($K3 * Q * Jei * Jgi$)로 이루어진다.

이어서 산업(Industry)는 1차 산업을 통한 생산물과 외부로부터 유입되는 에너지원으로 2차 산업의 생산 활동을 진행하는 형태로 그려졌다. 2차 산업을 통하여 생산된 생산물은 도시의 소비활동(U(Consumption) : $K5 * Q * J_{ei} * J_{gi}$)으로 이어지며 시스템 외부로 유출되는 재화와 서비스($K4 * Q * J_{ei} * J_{gi}$)로 나누어진다. 그리고 이러한 생산 및 소비활동을 위하여 외부에서 전력 및 Good & Service가 유입된다. 본 연구에서는 Good & Service로 전력 외에 부산시에서 이용되는 석탄, 석유, 도시가스 사용량을 지역에너지통계연보를 통하여 산업별과 그 외 도시의 소비별(가정 및 서비스, 수송부분 등)로 나누어 산정하였다.

도시지역에서는 가공된 생산물과 외부로 들어오는 에너지를 통한 소비활동과 더불어 보유한 자산(Asset)에 고정자산이 형성되어진다. 그리고 연간 감가상각율(0.02)을 고려한 감소량($K5 * A$)도 함께 고려하였다.

이러한 도시의 생산·소비활동을 통하여 각 1차 산업, 2차 산업, 도시 분야에서는 온실가스를 배출하게 된다($C = K8 * Q + K9 * Q * J_{ei} * J_{gi} + K10 * U * A * J_{ea} * J_{ga}$). 자료는 부산광역시 온실가스 배출량 조사 자료(2007)를 참고하여 1차 산업인 농축산부문의 배출량과 산업공정 배출량, 그 외 배출량으로 구분하여 산정하였으며, 배출된 온실가스는 시스템 대기 중에 있거나 외부로 유출된다.

이러한 각 저장고과 에너지 플로우의 초기값은 Table 4.11과 같다.

Table 4.11 Initial values of the storage and flow in Energy diagram

| | | | |
|------------------|----------|-----------------------|---|
| J= | 2.08E+19 | J/yr | Enviornmental energy |
| R= | 2.08E+18 | J/yr | Radiant energy |
| Q= | 1.81E+06 | ton | Biomass |
| C= | 1.54E+04 | GgCO ₂ | Amount of CO ₂ emission |
| A= | 3.41E+14 | ₩ | Economical asset |
| M= | 4.81E+13 | ₩ | Amount holding money |
| K0*R*Q= | 1.87E+19 | J/yr | Energy flow from Environ. |
| K1*R*Q= | 5.68E+06 | ton/yr | Productivity of Environ. |
| K2*Q= | 5.25E+06 | ton/yr | Natural decrement |
| K3*Q*Jei*Jgi= | 4.30E+05 | ton/yr | Product form primary industry |
| K4*Q*Jei*Jgi= | 3.84E+12 | ₩/yr | Export of Good & service |
| K5*Q*Jei*Jgi(U)= | 4.42E+13 | ₩/yr | Amount of consumption |
| K6*U*Jea*Jga*A= | 1.36E+13 | ₩/yr | Money using formation about total liabilities and net worth |
| K7*A= | 6.81E+12 | ₩/yr | Depeciation |
| K8*Q= | 5.40E+01 | GgCO ₂ /yr | CO ₂ emission from primary industry |
| K9*Q*Jei*Jgi= | 3.56E+03 | GgCO ₂ /yr | CO ₂ emission from secondary industry |
| K10*U*A*Jea*Jga= | 2.01E+04 | GgCO ₂ /yr | CO ₂ emission from the consumption in city |
| Jga=K11*M/pg | 4.26E+06 | toe/yr | Energy using in city except for electricity. |
| Jgi=K12*M/pg | 1.02E+06 | toe/yr | Energy using in industry except for electricity |
| Jea=K13*M/pe | 1.09E+04 | Gwh/yr | Electricity using in city |
| Jei=K14*M/pe | 4.86E+05 | Gwh/yr | Electricity using in industry |

Fig. 4.9와 Table 4.11의 결과를 활용하여 각 초기 값에 대하여 모델링에 이용할 수 있도록 보정하였다. 각 해당되는 저장고에 따라 에너지 흐름을 보정하였으며, 이에 대한 결과는 Table 4.12와 같다.

Table 4.12 Normalization and calibration for the model

| Source and Storage used for Calibration : | | |
|--|--|---------------------------|
| J=10 | Jga=8.76 | |
| R=1 | Jgi=2.10 | |
| Q=10 | Jea=1.94 | |
| A=10 | Jei=1.00 | |
| M=10 | | |
| C=10 | | |
| Normalization value | Calculation of coefficient | |
| $K0 \cdot R \cdot Q = 8.99$ | $K0 = 8.99 / (R \cdot Q)$ | Therefore, $K0 = 0.8990$ |
| $K1 \cdot R \cdot Q = 31.4$ | $K1 = 31.4 / (R \cdot Q)$ | Therefore, $K1 = 3.1381$ |
| $K2 \cdot Q = 29$ | $K2 = 29 / Q$ | Therefore, $K2 = 2.9003$ |
| $K3 \cdot Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi} = 2.38$ | $K3 = 2.38 / (Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi})$ | Therefore, $K3 = 0.1228$ |
| $K4 \cdot Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi} = 0.799$ | $K4 = 0.799 / (Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi})$ | Therefore, $K4 = 0.0381$ |
| $K5 \cdot Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi} = 9.19$ | $K5 = 9.19 / (Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi})$ | Therefore, $K5 = 0.4381$ |
| $K6 \cdot U \cdot J_{ea} \cdot J_{ga} \cdot A = 0.4$ | $K6 = 0.4 / (Q \cdot J_{ea} \cdot J_{ga} \cdot U)$ | Therefore, $K6 = 0.0003$ |
| $K7 \cdot A = 0.2$ | $K7 = 0.2 / A$ | Therefore, $K7 = 0.0200$ |
| $K8 \cdot Q = 0.0228$ | $K8 = 0.0228 / Q$ | Therefore, $K8 = 0.0023$ |
| $K9 \cdot Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi} = 1.5$ | $K9 = 1.5 / (Q \cdot J_{ei} \cdot J_{gi})$ | Therefore, $K9 = 0.0715$ |
| $K10 \cdot U \cdot A \cdot J_{ea} \cdot J_{ga} = 8.48$ | $K10 = 8.48 / (A \cdot J_{ea} \cdot J_{ga} \cdot U)$ | Therefore, $K10 = 0.0054$ |
| $K11 \cdot M = 0.913$ | $K11 = 0.913 / M$ | Therefore, $K11 = 0.0913$ |
| $K12 \cdot M = 0.173$ | $K12 = 0.173 / M$ | Therefore, $K12 = 0.0173$ |
| $K13 \cdot M = 0.212$ | $K13 = 0.212 / M$ | Therefore, $K13 = 0.0212$ |
| $K14 \cdot M = 0.0705$ | $K14 = 0.0705 / M$ | Therefore, $K14 = 0.0070$ |

완성된 공식 및 보정된 저장고와 에너지 흐름에 대한 값을 이용하여 Visual Basic 프로그램을 수행하기 위한 코드를 작성하였다. 먼저 해당되는 코드의 제목을 입력 후 산출된 각 저장고 및 계수의 초기 값을 입력하였다.

그리고 For next 구문을 활용하여 2005년을 기점으로 온실가스 저감방안

이 수행되는 2020년까지 총 15년의 기간을 주었으며, 에너지 흐름에 맞도록 공식을 배열하여 저장고의 변화량을 예측하도록 하였다. For next 구문의 맨 아래에는 Cell 명령문을 이용하여 해당되는 엑셀 시트의 Cell별로 값이 입력도록 유도하였다.

시뮬레이션을 수행한 과정은 엑셀의 Microsoft Visual Basic 창을 활성화 시킨 후 새로운 모듈을 추가시킨 후 코드를 입력하였다. 본 코드에서는 각 수치에 대한 정수, 실수 등에 대한 범위를 고려하지 않았으며, 결과 값은 해당되는 엑셀시트의 연도순으로 자연환경자원의 보유량(Q), 경제적 자산(A), 화폐보유량(M), 온실가스 배출량(C), 외부 시스템으로의 재화와 용역의 순이출(Ex) 순으로 입력되도록 구성하였다. 모델링 코드는 Appendix 4.6에 제시하였다.

나. 온실가스 배출을 고려한 에너지 모델링

2005년 기준으로 2020년까지 시뮬레이션 결과로 Fig 4.11과 같이 경제적 자산(A)과 온실가스 배출량(C)는 증가추세를 보이고 있으며, 자연환경자원의 보유량(Q)과 화폐보유량(M)은 감소하는 추세로 나타났다.

경제적 자산(A)의 경우는 생산되어 외부로 유출되는 재화와 용역에 비하여 구매된 재화와 용역이 많기 때문에 증가하지만, 외부로 생산 판매되는 금액에 비하여 구매비용의 증가에 따른 화폐 보유량(M)은 감소하는 추세를 보이고 있다. 대기 중 온실가스의 배출량(C)은 도시의 소비 활동의 증가로 인하여 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 시스템 외부에 판매되는 양(Ex)을 확인한 결과에서는 자산의 증가에 따라 아주 낮은 비율로 감소하고 있음을 파악하였다.



Fig. 4.11 The results of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan.

본 모델링 결과를 에머지 평가 결과와 비교하고 에머지 지수를 산정하기 위하여 1차 생산에 이용되는 자연환경 자원 이용량(R)과 외부에서 유입되는 재화와 용역(F)의 변화량을 파악하고자 하였다.

1차 산업의 생산에 이용되는 자연환경 자원 이용량(R)은 모델링 수식 중 $K3*Q*Jei*Jgi$ 의 에너지 플로우를 선정하였으며 외부에서 유입되는 에너지 양(F)는 Jga, Jgi, Jea, Jei 의 값으로 정하였다. 모델링 코드에서는 R과 F의 범위를 설정하고 Cell 구문을 입력하여 R, F, $Y(R+F)$ 값이 입력되도록 보완하였다. 또한 나타내는 값은 보정 및 정규화되기 전의 초기 값으로 전환시킨 후 에머지 분석에서 이용되는 수식을 활용하여 sej/yr 단위의 나타내도록 유도하였다. R, F의 변화된 결과 값에 따라 온실가스 저감방안을 적용한 경우에 나타나는 에머지 지수를 확인하고자 하였다.

Fig. 4.12과 같이 본 모델에서의 자연환경 자원 이용량(R)은 $4.88 E21 \sim$

4.85 E21 sej/yr의 범위에서 감소하고 있었으며, 외부로부터 구매된 자원에너지원은 매년 3.62 E22 sej/yr만큼 유입되고 있었다. 총 에너지 양(Y)은 4.11 E22 ~ 4.10 E22 sej/yr 범위로 나타났다. 이와 같은 R, F, Y값을 기초로 에너지 지수를 산정할 수 있었다.

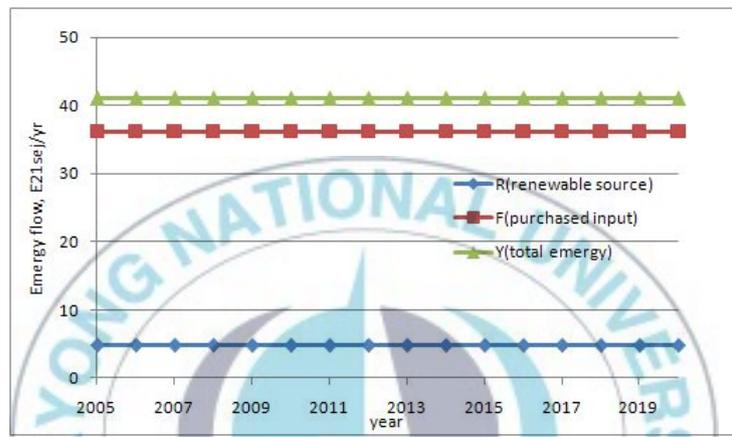


Fig. 4.12 R, F, and Y values of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan.

위 결과를 바탕으로 에너지 지수(EYR, ELR, ESI)를 산정하여 시스템의 생산성, 환경부하율, 지속가능성을 평가하고자 하였다. 시스템의 생산성을 나타내는 EYR(Y/F)은 1.13의 범위에서 미소하게 감소하고 있었으며, 환경부하율을 나타내는 ELR(F/R)은 7.41에서 7.46으로 증가하고 있었다. 지속성 지수(ESI)는 0.15에서 소폭으로 감소하고 있었다. 앞서 2005년도 부산시 에너지 분석에서 나온 EYR(1.16), ELR(6.41), ESI지수(0.18)와 유사한 범위를 보인 점을 확인하였다(Fig 4.13).

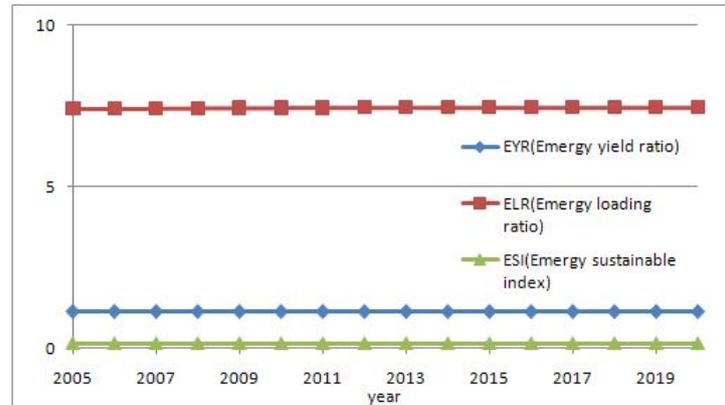


Fig. 4.13 EYR, ELR and ESI indices of energy simulation about the system of greenhouse gas emissions in Busan.

다. 온실가스 저감방안을 적용한 에너지 모델링

본 에너지 모델링에서도 에머지 분석법과 동일하게 온실가스 저감방안을 실제 적용할 경우 변화하는 미래 상황을 예측하여 적용 전과의 모델링 결과와 비교하여 생태경제성 및 효율성, 지속가능성을 평가하고자 하였다.

모델링에 이용되는 코드는 부산시 모델링 코드와 동일하며 온실가스 저감에 따른 에너지원의 변화는 에머지 예측에서 이용된 각 에너지원별 저감량을 기간별로 입력하였다. 관련 코드는 Appendix 4.7에 수록하였다.

본 연구에서는 온실가스 저감방안을 적용하기 위하여 산업공정과 그 외 도시지역에서 소요되는 에너지원으로 구분하여 도시지역에서 소비하는 Good & Service(Jga), 도시지역에서 소비하는 전력량(Jea), 산업공정에서 사용하는 Good & Service(Jgi)로 표기한 바 있다. 저감방안 안에서는 산업공정에서 저감되는 전력사용 감소량은 없어 제외하였으며, 각 기준 연도 2010, 2015, 2020년에 따른 연평균 감소율을 산정하여 분석에 이용하였다. 각 에너지원별 기준 사용량 및 기준 단가는 2005년도 기준으로 에너지관리

공단에서 제시한 지역에너지통계연보 및 에너지절약핸드북의 자료를 토대로 적용하였다. 에너지 모델링에서 적용한 각 외부에너지원의 감소율은 Table 4.13과 같이 적용하였다.

Table 4.13 Energy used in 2005 and average annual decrease rate from 2010 to 2020

| | | Energy used in 2005 | 2010 | 2015 | 2020 |
|-----------|-----|---------------------|--------|--------|--------|
| Oil | Jpa | 4.26E06 toe/yr | 0.19 % | 0.22 % | 0.52 % |
| | Jpi | 1.02E+06 toe/yr | 0.74 % | 0.36 % | 2.35 % |
| Electric. | Jea | 1.09E+04 Gwh | 1.48 % | 3.12 % | 5.15 % |

모델링 결과 산업에 이용되지 않은 자연환경 자원의 보유량(Q)은 감소세가 조금 둔화되었으며, 경제적 자산(A)은 적용하기 전과 동일하게 증가하고 있으나 적용하기 전보다는 증가추세가 둔화되었다. 화폐보유량(M)은 적용하기 한 후에 소폭으로 더 감소하고 있으며, 외부로 판매되는 양(Ex) 또한 조금 더 감소하고 있었다. 온실가스의 배출(C)은 원래 증가하던 패턴에서 외부로부터의 에너지 사용을 줄임에 따라 2005년 기준으로 2020년까지 약 15 %가 감소하였으며 증가추세는 감소추세로 전환되었다(Fig 4.14).

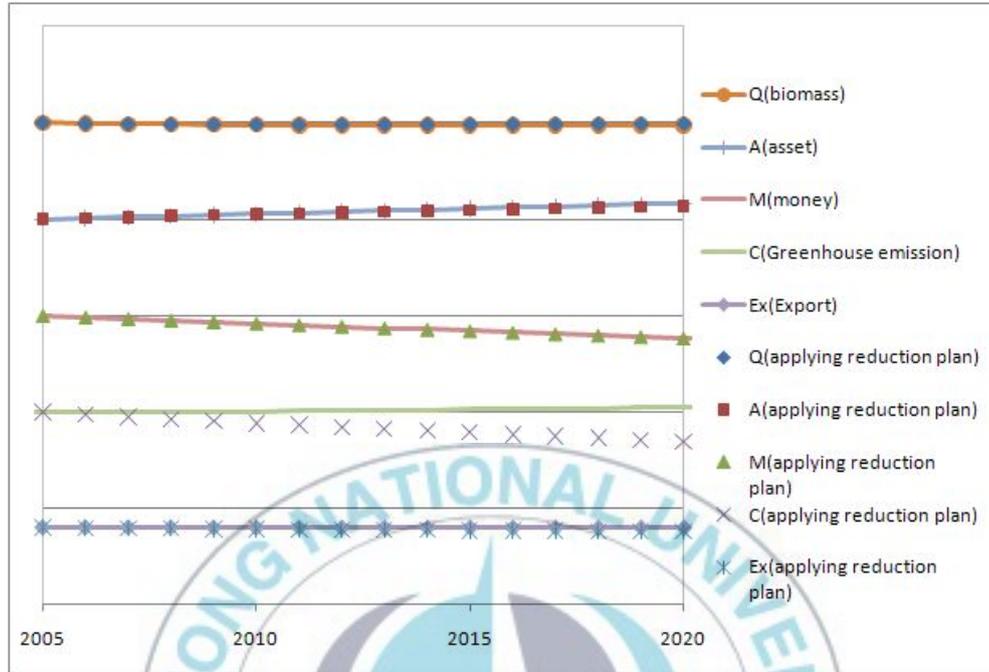


Fig. 4.14 The results of energy simulation applying the reduction plan.

다음으로 온실가스 배출량 저감방안을 적용하였을 경우 변화되는 에머지 양과 지수를 확인하였다. Fig. 4.15 에서는 온실가스 저감방안을 적용하였을 경우 각 R, F, Y값의 변화를 보여주고 있다. 생산에 이용되는 자연환경자원 이용량(R)은 4.88 E21 sej/yr에서 4.6 2E21 sej/yr으로 감소하고 있었 으며, 외부에서 구매된 자원(F)도 3.62 E22 sej/yr에서 3.42 E22 sej/yr으로 줄어들고 있었다. 온실가스 저감방안을 적용하였을 때 총 에머지양(Y)은 4.11 E22 sej/yr에서 3.89 E22 sej/yr로 감소함을 알 수 있었다.

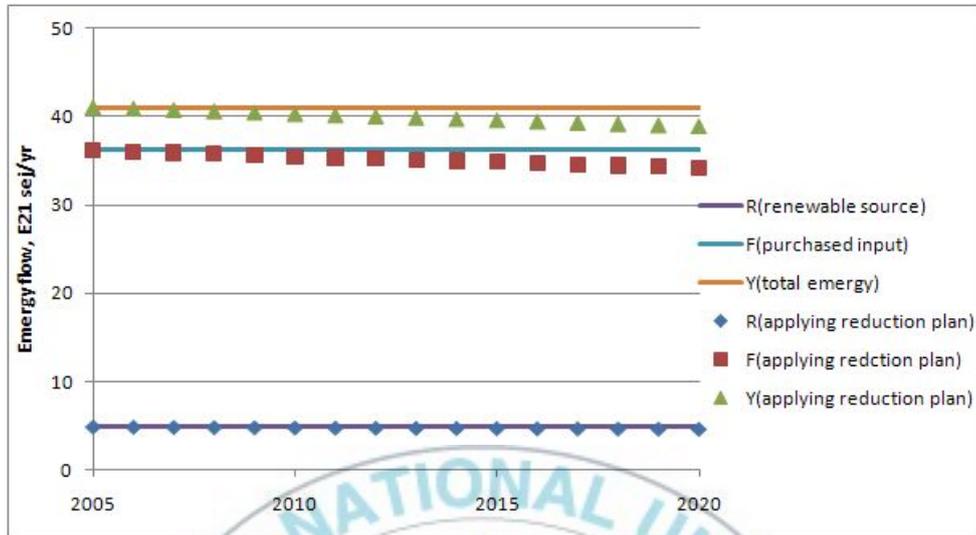


Fig. 4.15 Change of R, F, and Y values applying the reduction plan.

R, F, Y값의 변화에 따른 에머지 지수의 변화는 Fig 4.16과 같다. 전체 에머지 양의 변화 중에 F값이 R값보다 더 많이 감소하였기에 에머지 생산비(EYR)와 지속성 지수(ESI)는 소폭의 감소세에서 소폭의 증가세로 전환되었으며, 환경부하율(ELR)이 저감방안을 적용 전에 7.41에서 7.46으로 증가하던 패턴이 7.41에서 7.40으로 감소추세로 전환된 것이 확인되었다.

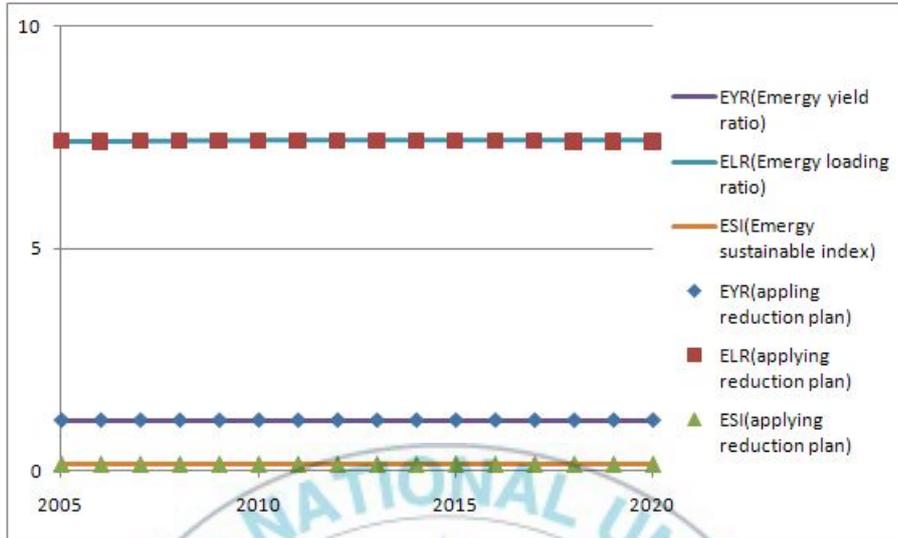


Fig. 4.16 Change of EYR, ELR, and ESI indices applying the reduction plan.

라. 지속가능한 도시를 위한 에너지 모델링

부산시의 온실가스 저감방안을 적용한 모델링 결과로 온실가스 배출량 저감을 위하여 외부로부터 유입되는 화석연료를 줄이는 것은 온실가스 배출량 감소에 기여하고 있었다. 하지만 에너지 지수로 평가한 결과 유입되는 총 에너지가 감소하는 것과 동시에 부산시의 생산에 이용되는 자연환경의 자원 이용량이 줄어들어 지속성 지수는 소폭으로만 증가추세로 전환되었다.

부산시가 온실가스 저감과 더불어 지속가능한 도시로 발전하기 위해서는 외부로부터 유입되는 화석연료 사용을 줄여 온실가스를 감축하는 것과 함께 내부에서 자연환경자원의 이용률을 높일 수 있는 방안 마련이 필요한 것으로 판단되었다.

외부에서 유입되는 에너지의 감소는 현실적으로 도시 시스템 내의 체계 변경 없이는 한계범위가 있기 때문에 단기간 내에 저감량을 확대하는 것은 실질적으로 어려우며 또한 생산 활동에도 영향을 미쳐 전체 시스템의 에너지 생산비(EYR)과 지속성 지수(ESI)에는 별다른 효과를 보이지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 앞서 수행한 온실가스 저감방안에 따른 외부 에너지 사용량 감축과 동시에 내부에서 자연환경 자원의 보유량을 이용하는 에너지 플로우를 증가시키기 위하여 온실가스 저감방안을 적용하면서 자연환경에너지의 이용률을 2005년 기준으로 2020년까지 매년 10 %씩 향상시킬 경우를 가정하여 모델링을 수행하였다.

온실가스 저감방안만을 적용한 모델 결과와 저감방안 및 매년 자연환경에너지 이용률 10 % 상승, 두 가지를 다 고려한 경우를 비교하여 Fig 4.17에 나타내었다.

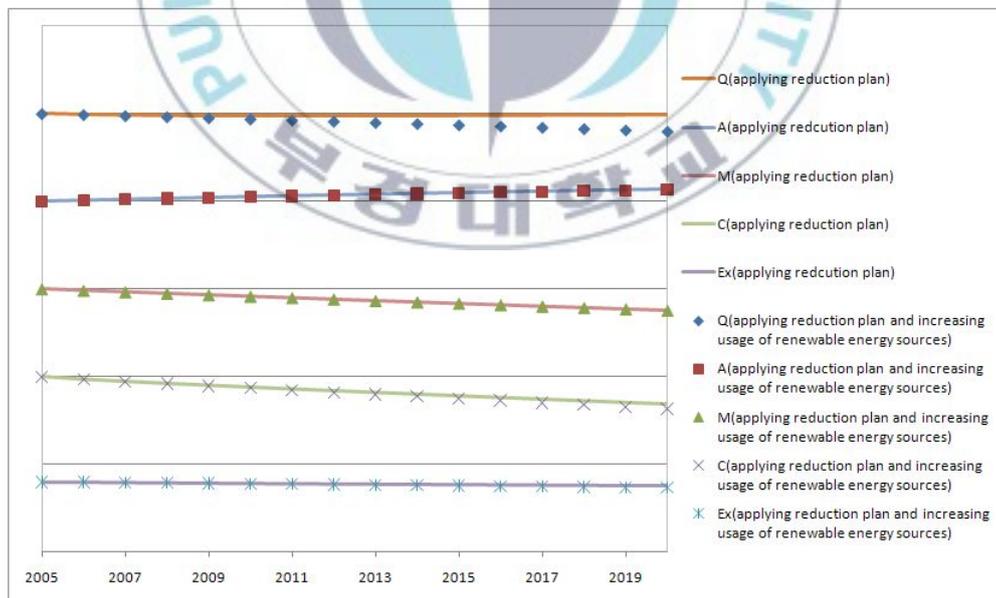


Fig. 4.17 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year.

온실가스 저감방안만을 적용한 결과와 비교한 결과, 자연환경 자원의 보유량(Q)은 자연환경 에너지 이용률의 향상으로 인하여 저감방안만을 적용할 때보다 더 많이 감소하고 있었으며, 경제적 자산(A)은 증가 추세가 조금 둔화되었고 화폐보유량(M)과 외부로 판매되는 양(Ex)은 미소하게 감소폭이 커졌다. 온실가스 배출량(C)은 저감방안을 적용한 경우보다 더 많이 줄어든 추세로 진행되고 있는 것을 확인하였다.

위의 에너지 모델링 결과에 따른 에머지양과 에머지 지수에 대하여서도 파악하고자 하였다. Fig 4.18에서는 온실가스 저감방안을 적용한 경우와 저감방안과 동시에 자연환경에너지원에 대한 이용률을 향상시킨 경우의 에머지양을 비교하여 보았다. 그 결과 자연환경자원의 보유량(R)값은 감소추세에서 증가추세로 전환하였으며, 외부에서 구매된 에너지원(F)값은 변화가 없었으나, 총 에머지 양(Y)값이 감소추세에서 소폭의 증가추세로 전환된 점을 확인할 수 있었다.

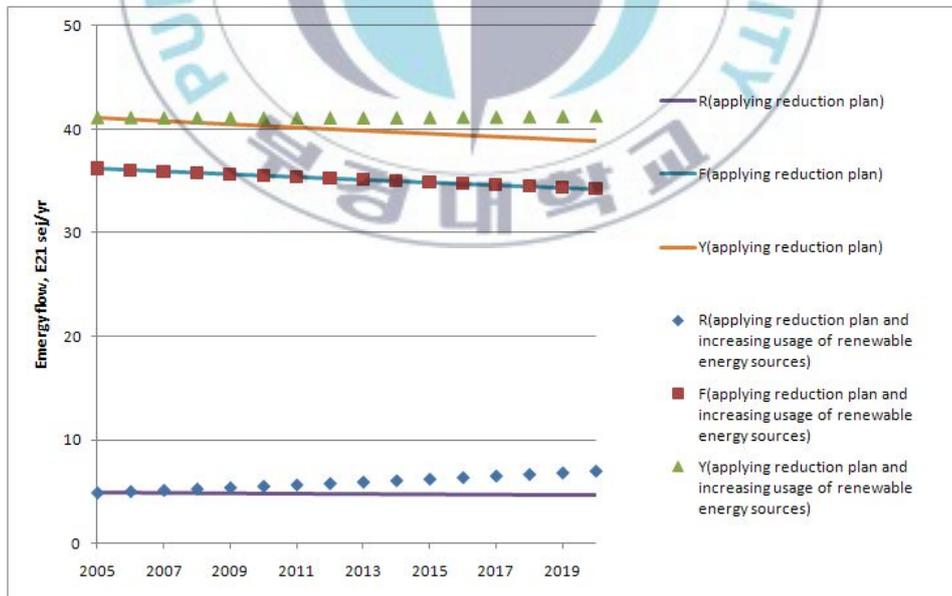


Fig. 4.18 Change of R, F and Y values applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year.

이러한 내부 자연환경에너지원의 이용률 증가에 따른 에머지 지수의 변화는 Fig 4.19와 같다. 에머지 생산비(EYR)은 증가폭이 미세하게 커졌으며, 특히 환경부하율 지수(ELR)는 7.4에서 4.9로 크게 감소하였다. 온실가스 저감방안만을 적용한 경우에서 0.15에서 소폭의 증가세를 보인 지속성 지수(ESI)도 0.15에서 0.24까지 증가한 것을 확인할 수 있었다.

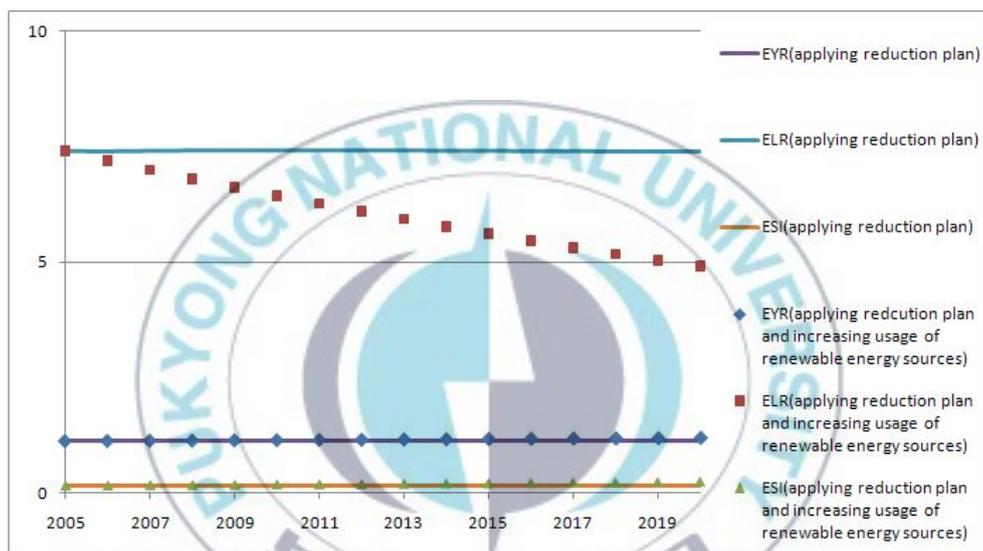


Fig. 4.19 Change of EYR, ELR, and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 10% per year.

위와 같은 결과를 바탕으로 온실가스 저감방안을 적용한 경우에는 온실가스 배출량을 감소시키는 역할은 하지만 시스템 전체에서 판단하여 보았을 때 에머지 생산비, 환경부하율, 지속성 지수 측면에서 긍정적인 효과를 보이지 못하고 있었다.

하지만 온실가스 저감방안과 더불어 자연환경에너지원의 이용률을 향상시킨 결과 환경부하율이 크게 줄었으며, 지속성 지수의 상승에도 많은 기

여를 한 것으로 판단된다. 온실가스 저감방안을 추진하면서 자연환경에너지원의 이용률을 어느 정도까지 올리면 부산시의 지속성 지수가 1로 될 수 있을 것인지도 함께 고려하여 보았다.

온실가스 저감방안을 적용시킨 상황에서 자연환경 이용률을 연간 20%까지 증가시켜 보았다. 이러한 경우는 화석연료의 사용을 줄이면서 생산성 효율을 높이는 방안과 화석연료를 이용하지 않고 최대한 자연환경의 에너지원을 사용하여 생산효율을 높이는 방안을 가정한 상황이다.

저감방안만을 적용한 경우와 비교하여 자연환경 자원의 보유량(Q)은 조금 더 줄어들었으며, 경제적 자산(A)의 증가추세도 둔화되었다. 화폐보유량(M)과 외부로 판매되는 양(Ex)의 감소율이 조금 더 높아졌으며 외부로 파 온실가스 배출량(C) 또한 더 줄어든 것을 확인하였다(Fig 4.20).

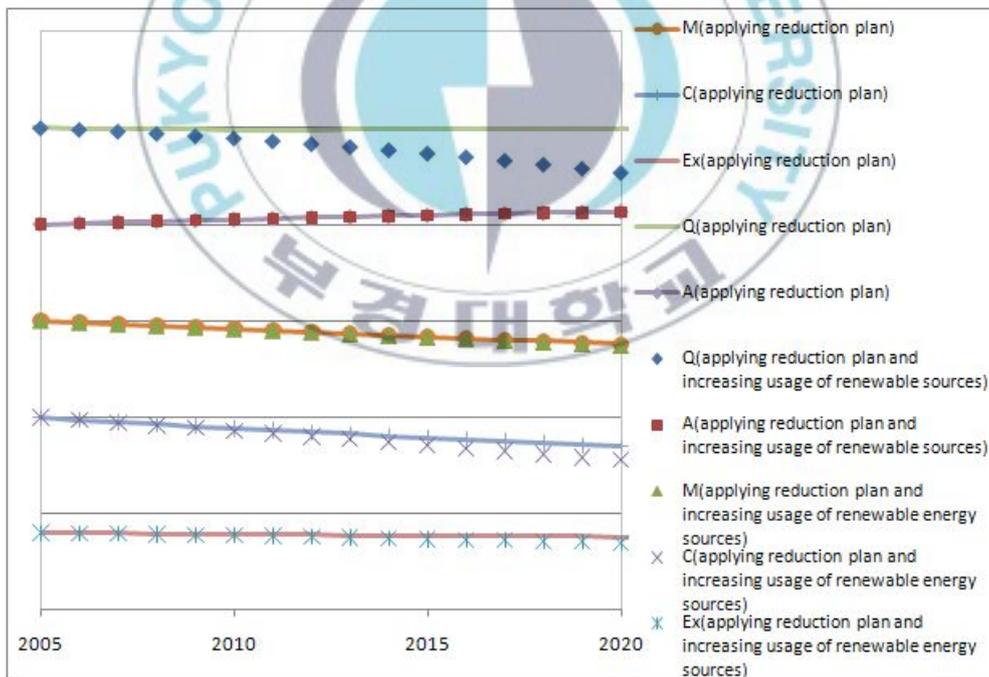


Fig. 4.20 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 20% per year.

자연환경에너지원의 이용률을 연 20 % 증가시킬 경우의 에머지 지수는 Fig 4.21과 같다. 10 %를 적용시켰을 때보다 환경부하율(ELR)은 더 급격히 감소하고 있으며, EYR지수와 ESI지수는 눈에 띄게 증가하였다. ELR지수는 7.40에서 3.31로, EYR지수는 1.13에서 1.30으로 ESI지수는 0.153에서 0.392로 증가하였다. 이러한 ESI지수 값은 Table 4.6에 제시된 국가의 ESI 지수 순위 중 영국(0.30), 포르투갈(0.40))이 유사한 수준으로 제시될 수 있다.

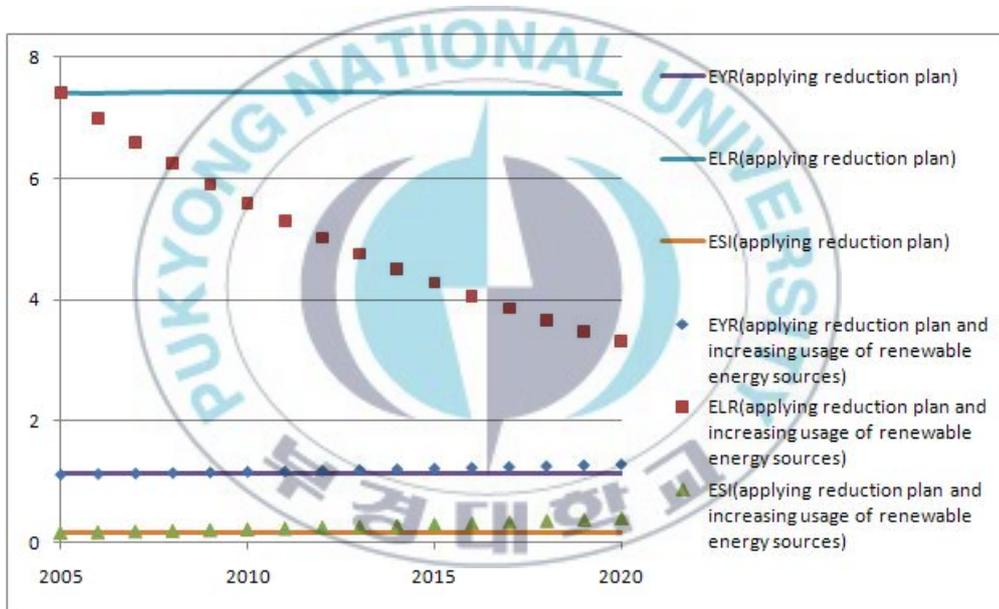


Fig. 4.21 Change of EYR, ELR, and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 20% per year.

다음은 Fig 4.22와 같이 온실가스 저감방안을 적용시킨 상황에서 자연환경 이용률을 연간 30 %까지 증가시켜 보았다. 자연환경보유량(Q)는 꾸준히 감소하고 있으며, 경제적 자산(A)의 증가추세는 둔화되었지만 감소하지는 않았다. 화폐보유량(M), 외부에 판매되는 양(E_x)과 온실가스 배출량 또

한 감소추세가 조금 더 커진 것을 확인할 수 있었다.

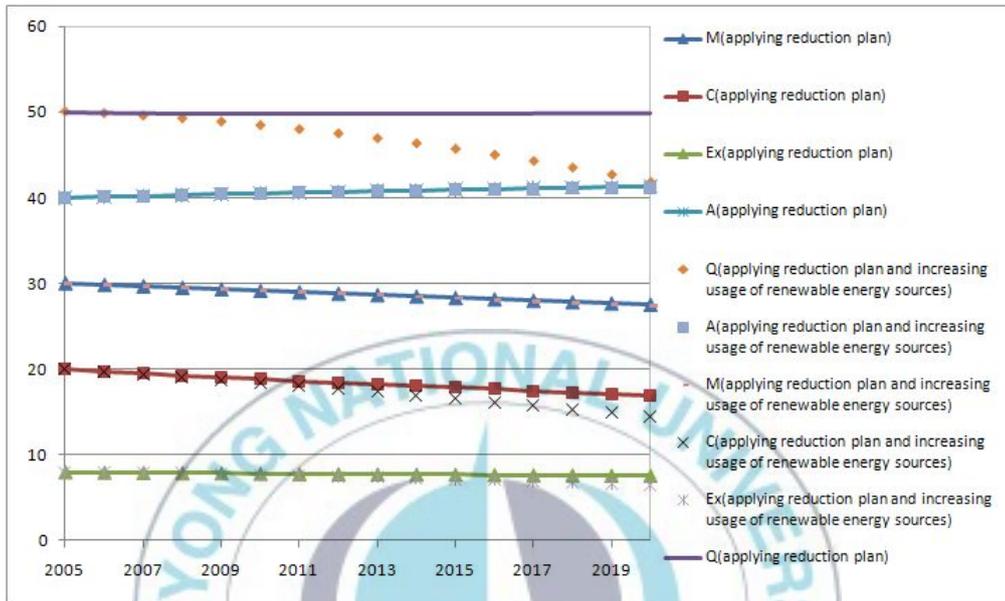


Fig. 4.22 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 30% per year.

Fig 4.23과 같이 EYR지수는 1.43으로 소폭 증가하였으며, ELR은 2.29로 크게 감소가 될 수 있었고, ESI지수는 1.5에서 0.62까지 증가하였다. 이와 같은 지속성 지수(ESI)의 값은 헝가리(0.63), 이집트(0.66)와 유사한 수준에 이르렀다는 것을 보여주고 있다.

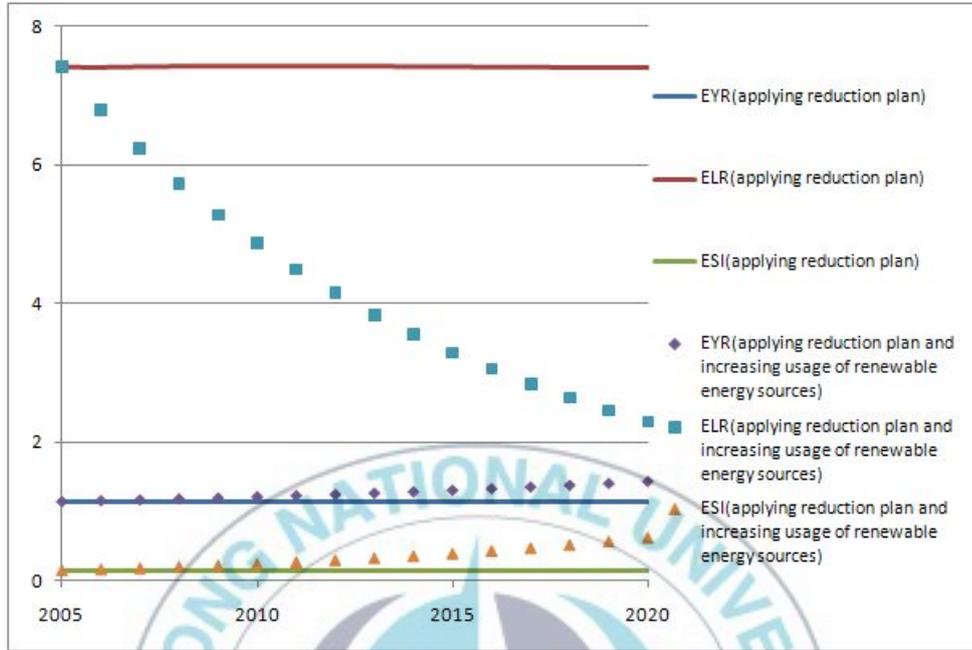


Fig. 4.23 Change of EYR, ELR, and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 30% per year.

온실가스 저감방안만을 적용시킨 경우와 지속성 지수가 1이 되기 위하여 온실가스 저감방안 및 자연환경 자원의 이용률(40%)을 향상시킨 사례와 비교한 결과는 Fig 4.24와 같다.

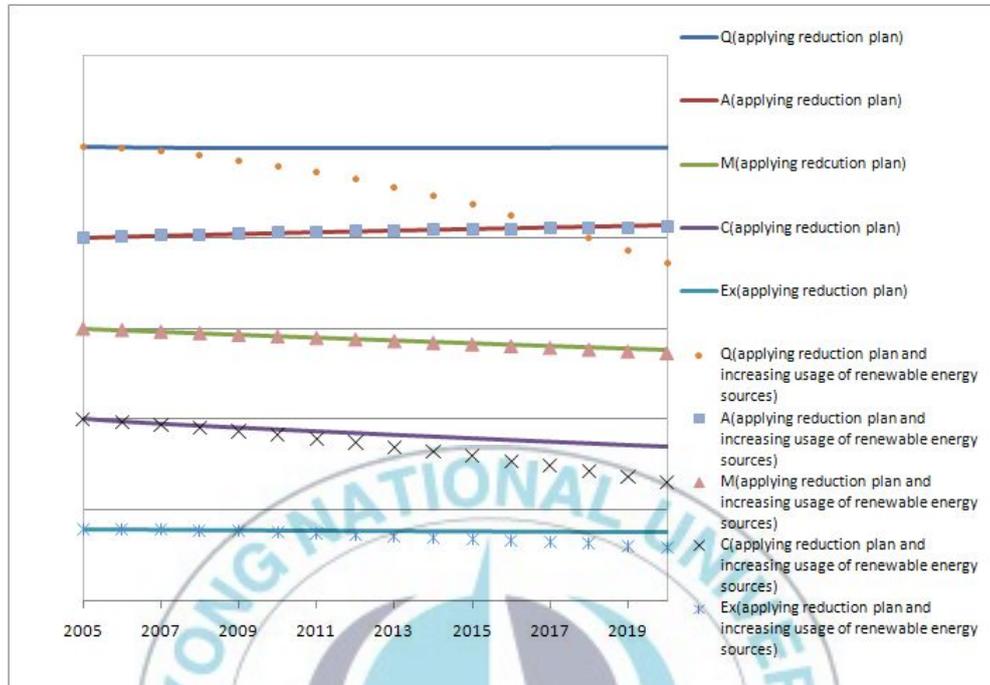


Fig. 4.24 The results of energy simulation applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 40% per year.

Fig 4.24에서는 온실가스 저감방안과 더불어 자연환경자원의 이용률을 40%로 증가시킨 경우 앞서 이용률을 높인 경우와 유사한 결과를 나타내었다. 자연환경 자원의 보유량(Q)은 산업 생산에 따라 급격히 감소하며, 경제적 자산(M)과 화폐 보유량(M)은 소폭의 감소세를 보였다. 온실가스 배출량(C)와 외부로 판매되는 양(Ex)도 감소하는 경향이 뚜렷이 나타났다.

그리고 EYR, ELR지수는 지속성지수(ESI)와 함께 아래 Fig 4.25와 같이 나타났다. EYR지수는 1.61으로 소폭 증가하였으며, ELR지수는 1.63까지 감소하였다. ESI지수는 0.982까지 증가하여 1에 가까운 값으로 증가하였다.

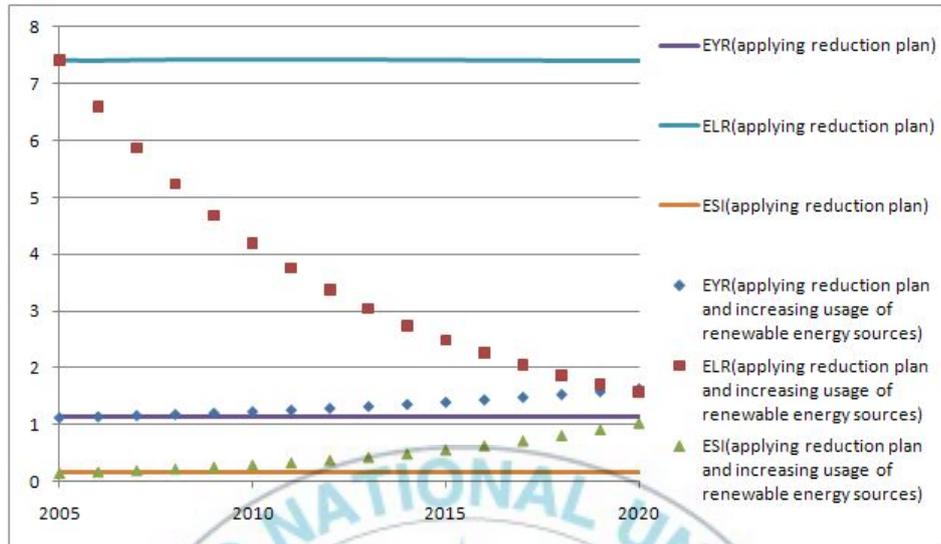


Fig. 4.25 Change of EYR, ELR, and ESI indices applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources by 40% per year.

자연환경 에너지 이용률을 높임에 따라 나타난 지속성 지수(ESI)의 변화를 Fig 4.26에서 나타내었다. 생산성 향상에 따라 지속성 지수는 증가하였으며, 생산 효율을 40%로 적용 시 지속성 지수는 0.98로 1에 가까운 수치를 보여주고 있었다. 국가 지속성지수 연구에 따르면 지속성 지수가 1에 해당되는 국가는 말레이시아(0.87), 태국(1.01) 등으로 연구된 바 있다.

에머지 평가에 대한 타 연구에 따르면 지속성 지수가 1 이하로 나타나는 도시의 경우 산업화된 소비형 도시의 시스템으로 단기적인 측면에서는 외부의 에너지원 및 재화와 서비스를 통한 도시의 자산 증대 및 생산성 향상에 도움을 받고 있지만, 장기적인 측면에서는 지속성이 적은 시스템으로 평가 받고 있다.



Fig. 4.26 ESI index applying the reduction plan and increasing usage of renewable energy sources from 10% to 40% per year.

2005년부터 2020년까지 총 15년간 외부로부터 유입되는 화석연료 사용량의 감소율을 정하여 에너지 모델링을 수행한 결과 온실가스 저감에는 크게 도움이 되었지만, 시스템 내부의 생산성 및 지속성을 영향을 미치지 못하고 있었다. 향후 온실가스 저감을 위하여 감축하고자 하는 에너지원에 대한 대안이 필요하며, 본 연구에서는 도시의 생태경제적 평가를 위하여 에너지 모델링 수행 결과 이러한 시스템의 변화에 대비하여 자연환경 에너지의 이용률을 증대시켜 균형을 맞추어준다면 시스템의 지속성의 증가를 이루면서 일정한 경제성장을 통한 온실가스 감축에 기여할 수 있을 것으로 파악되었다..

본 모델링에서는 온실가스 저감사업에 따른 부가적 요인 발생에 대한 평가는 포함되지 못하였기 때문에 향후 온실가스 저감사업 추진에 따라 오히려 추가적인 재화와 서비스가 투입되는 결과가 초래할 수도 있으며, 관련

산업의 생산성 저하와 같은 시스템 내 상호 연관된 부분에서 발생하는 파급효과를 고려해야 될 것으로 생각된다.

본 대상 시스템인 부산시의 경우 외부로부터 많은 재화와 서비스를 통한 소비형 도시로 인구 감소 및 서비스 산업 중심으로 개편되고 있는 현실에서 신재생에너지 등 자연환경자원의 이용률을 높이는 1차 산업구조로의 개편과 생산의 효율 향상 등이 온실가스 저감방안과 함께 추진한다면 이를 통하여 온실가스 저감 및 시스템의 지속성을 향상시키는 도시 발전으로 이어질 것이다.



VI. 결 론

재생불가능한 자원 고갈에 따른 에너지 관리의 필요성과 이에 따라 과급되는 환경, 경제적인 문제는 환경적으로 건전하고 지속가능한 발전에 핵심적으로 해결되어야 될 과제로 제시되었다. 온실가스 배출 저감은 기후변화 대응 및 에너지를 목표에 맞게 총량적으로 관리할 수 있는 지표 및 과정으로 유용하다. 하지만 온실가스 배출량을 관리하고 감축하는 방에 대하여 이차적인 환경·경제적 비용분석 등이 제시되지 않고 있어 과학적이고 시스템학적인 접근방법이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 시스템 생태학적인 관점에서 도시의 에머지 분석 및 평가와 에너지 모델링을 수행하였으며 아울러 온실가스 저감방안의 생태경제학적 평가를 위하여 저감방안에 대한 예측 분석 및 모델링을 수행하였다.

1) 부산시를 대상으로 1998년부터 2007년까지 10년간의 에머지 분석 및 평가를 하여 시스템을 평가하였다. 2007년도의 부산시의 에너지원 구성은 자연환경 자원으로부터의 영속성 에너지원은 10.95 %, 내부자원의 비영속성 에너지원은 0.10 %, 유입된 화석연료와 전기, 재화와 용역의 형태로 구성된 외부로 구입된 에너지원은 88.95 %로 분석되어 외부자원에 의존하는 도시 구조의 특징을 나타내고 있었다. 10년간의 에머지 분석을 통해서도 영속적 에너지원은 감소하는 추세를 보이고 있으며, 외부로부터 구매하는 에너지원과 총 에머지 양은 증가하고 있었다.

2) 10년간의 에머지 지수를 평가한 결과 영속성 에너지 점유율(%Renew.)과 에머지 생산비(EYR), 환경부하율(ELR), 지속성 지수(ESI)

모두가 지속성이 없는 범위에서 증감을 반복하고 있으며, 외부의 자원에 의존하며 도시 내 인구가 줄어들고 있음에도 불구하고 소비되는 외부에너지원은 증가하고 시스템 내 생산성이 낮아 점차 지속성이 적은 시스템으로 변화하는 추세를 보이고 있었다.

3) 2005년 기준으로 2020년까지의 에머지 분석결과를 예측한 결과에서도 영속성 에너지 점유율(%Renew)과 에머지 생산비(EYR), 지속성 지수(ESI) 모두 감소하여 진행될 예정이며, 반대로 환경부하율(ELR)은 증가할 전망이다.

4) 온실가스 저감방안을 적용한 경우를 예상하여 에머지 분석을 수행한 결과 외부에서 구매되는 에너지원은 감소하게 되며 부산시의 에머지 생산비와 환경부하율, 지속성 지수는 적용하지 않은 경우보다는 조금 개선되는 추세를 보이고 있으나 지속성이 없는 시스템으로 진행하는 추세에는 영향을 주지 못하였다.

5) 부산시를 대상으로 한 시스템 에너지 모델링 결과, 2005년부터 2020년까지 시스템 내 자연환경 자원의 보유량(Q)과 화폐보유량(M)은 시스템 내부의 소비활동 및 경제적 자산(A)의 증가에 따라 감소하고 있으며, 온실가스 배출량(C)은 지속적인 증가 추세를 나타내었다. 외부에 판매되는 양(Ex)를 파악한 결과 자산의 증가에 따라 아주 낮은 비율로 감소하고 있음을 파악하였다.

6) 온실가스 저감방안을 도입한 경우를 가정하여 시뮬레이션 한 결과 온실가스 배출량(C)은 2005년 기준으로 2020년에는 약 15%정도 줄어들었으

며, 구매자원인 외부의 화석연료 사용 감소로 인하여 경제적 자산(A) 및 화폐 보유량, 외부에 판매되는 양(Ex)의 증가세가 둔화되었으며 온실가스 저감에 대한 자연환경 및 경제성에 미치는 영향을 동시에 판단할 모델링과 지표가 필요하다는 것을 보여주었다.

7) 에너지 모델링을 통하여 나타난 에머지 지속성 지수는 0.15였으며, 온실가스 저감방안을 적용시킨 결과, 온실가스 배출 저감에는 크게 기여하나, 시스템 내부의 생산 및 산업 활동에 영향을 주어 에머지 생산비(EYR) 및 지속성 지수(ESI)에 영향을 미치지 못하였다.

온실가스 저감사업에 대한 부가적인 투자비용 및 과급효과가 산정된다면 총생산이 시스템 경제에 미치는 에머지 기여가 줄어들어 생산효율은 더 줄어들고 외부로 수출하는 재화 및 서비스도 감소할 수 있으며, 이를 고려하여 자연환경 에너지원의 이용률 및 생산효율을 높일 수 있는 생태효율적인 산업 마련이 필요한 시점으로 보인다.

8) 온실가스 저감방안을 추진과 함께 시스템 내부에 산업 활동의 생산효율을 높여줄 경우를 포함하여 시스템을 분석하였다. 외부의 화석에너지원의 사용을 줄임과 동시에 자연환경 에너지원의 이용률을 2020년까지 연간 10%, 20%, 30%, 40%씩 증가시킨 결과, 에머지 생산비(EYR)와 지속성 지수(ESI)는 감소추세에서 증가추세로 전환되었으며, 환경부하율도 감소하였다. 자연환경 에너지원의 이용률을 40%까지 증가시켰을 때 지속성 지수가 1에 가깝게 유지된다는 점도 확인하였다. 이러한 결과는 온실가스 저감을 위하여 화석연료 사용을 줄임과 동시에 자연환경 에너지원에 의존하는 산업 및 신재생에너지 산업구조로의 개편과 생산의 효율성 향상을 모색하는 것이 부산시의 지속가능한 도시 발전을 위하여 필요함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- Ascione M., L. Campanella., F. Cherubini., and S. Ulgiati, 2009, Environmental driving forces of urban growth and development An energy-based assessment of the city of Rome, Italy, *Landscape and Urban Planning*, 93(2009), pp238-249.
- 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.
- Brownsword, R.A., P.D. Fleming, J.C. Powell, and N. Pearsall, 2005, Sustainable cities - modelling urban energy supply and demand, *Applied Energy*, 82(2005), pp167-180.
- Campbell D. E., 1998, Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability : an example using the state of maine, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 51, pp531-569.
- Doherty S. J. and M. T. Brown, 1993, Emergy synthesis perspectives, sustainable development and public policy options for Papua Newguinea. Research studies under contract to The Cousteau Society.
- George L. B., 1985, Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling(second edition), EPA, 455pp.
- Huang S. L. and C.W. Chen, 2005, Theory of Urban Energetics and Mechanisms of Urban Development, *Ecological Modelling*, 189,

49-71.

Huang S. L., H.Y. Lai and C.L. Lee, 2001, Energy Hierarchy and Urban Landscape System, Landscape Urban Plan, 53, pp145-161.

Kang D. S., 1999, Pulsing and self-organization, Ph. D. Dissertation, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida, Gainesville, 238pp.

Lee S. M. and H. T. Odum, 1994, Emergy analysis overview of Korea, J. of the Korean Environmental Sciences Society, Vol 3(2), pp165-175.

Lee S. M., J. H. Son, and D. S. Kang, 2000, Evaluation of Korea's Sustainable Development by the Systems Ecology(I) : Emergy Analysis of Korea's Natural Environmental and Economic Activity, J. of the Korean Environmental Sciences Society, Vol. 9, pp449-454.

Lee S. M., J. H. Son, and J. L. Kim, 2001, Evaluation of Korea's sustainability development by the system ecology : II. Simulating the Future of Korea's natural environment and economic development, J. Korean. Env. Sci. Soc., Vol. 10(2), pp91-97 (in Korean).

Liu. G. Y., Z. F. Yang., B. Chen, and S. Ulgiati, 2009, Emergy-based urban health evaluation and development pattern analysis, ecological Modelling, 220(2009), pp2291-2301.

Odum H. T., 1983, Systems Ecology : An Introduction, John Wiley & Sons, 644pp.

Odum H.T., and E.C. Odum, 1976, Energy Basis for Man and Nature.

- McGraw-Hill, New York, 296p.
- Odum H. T. and E. C. Odum, 1983, Energy analysis overview of nation, International institute for applied systems analysis A-2361 Laxenburg, Austria, 469pp.
- Odum H. T., 1987, Models for national, international, and global systems policy Chap. 13. pp203-251 in Economic-Ecological Modelling, ed by L.C. Braat and W. F. J. Van Lierop. Elsevier science Publishing, New York. 329pp.
- Odum H. T., E. C. Odum, and M. Blissett, 1987, Ecology and Economy: Energy analysis and public policy in Texas. L.B.J. School of Public Affairs and Texas dept. of Agriculture (Policy Research Publication 78). Univ. of Texas, Austin. 178pp.
- 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.
- Odum H. T. and E. C. Odum, 2000, Modeling for All Scales : An Introduction to Systems and Simulation, Academic Press, 398pp.
- Odum H. T. and E. C. Odum, 2001, A Prosperous Way Down : Principles and Policies, The University Press of Colorado, 326pp.
- Odum W. E., E. P. Odum and H. T. Odum (1995) : Nature's Pulsing

- Paradigm, Estuaries, Vol. 18(4), pp547-555.
- Su., M. R., F. Yang., B. Chen, and S. Ulgiati, 2009, Urban ecosystem health assessment based on emergy and set pair analysis-A comparative study of typical Chinese cities, Ecological Modelling, 220(2009), pp2341-2348.
- Ulgiati, S. and M. T. Brown, 1998, Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. Ecological Modelling, 108, 23-26.
- WEF(World Economic Forum(2002), 2002, Environmental Sustainability Index, 296pp.
- WWF(World Wildlife Fund in the US and Canada) (2002) : Living Planet Report 2002.
- Yan, Eiaoyu., Roy J. Crookes, 2009, Life cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions for road transportation fuels in China, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13(2009), 2505-2514.
- Zang Yan., Zhifeng Yang, and Xiangyi Yu (2009) : Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis : A case study for Beijing(China), Ecological Modelling, 220(2009), pp1690-1696.
- 강대석, 2005, Emergy개념과 생태계가치평가. 대한토목학회, 53(8):37-41.
- 강대석, 박석순, 1999, Emergy 개념을 이용한 다목적댐 건설의 생태경제학적인 평가방법에 관한 연구. 환경영향평가학회지, 8(2):45-51.
- 김남국, 김진이, 박동기, 이석모, 2008, 에머지(Emergy) 개념을 이용한 산지 가치의 계량화에 관한 연구. 한국환경과학회지, 17(3):305-314.
- 김남국, 손지호, 김진이, 조은일, 이석모, 2002, 시스템 생태학적 접근법에

- 의한 넙치생산의 지속성 평가 2, 넙치 육상양식산업에 대한 예측. 한국수산학회지, 35(6):660-665.
- 김영진, 김진이, 손지호, 이석모, 2001, 환경회계에 의한 낙동강 유역의 환경정책결정에 관한 연구. 한국환경과학회지, 10(2):85-90.
- 김유나, 문태훈, 2009, 환경성과지수(EPI)를 활용한 도시환경지속성 성과평가에 관한 연구, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」, 44(6): 171-182.
- 김홍배, 유원환, 2002, 다지역투입산출모형을 이용한 이산화탄소 배출가스 저감대책이 우리나라 지역경제에 미치는 파급효과 분석, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」, 37(7):195-206.
- 목정훈, 2009, 서울시 지속가능성 평가 운영과 평가방법 분석 연구, 서울시연구, 10(3):233-249.
- 문경주, 2004, Ecological Footprint분석을 이용한 도시의 지속가능성 평가: 부산광역시를 중심으로, 한국사회와 행정연구, 15(3):129-158.
- 문태훈, 2007, 시스템사고로 본 지속가능한 도시, 집문당.
- 문태훈, 김병석, 2009, 인과지도로 본 한국의 성장의 한계:인구, 경제, 자원, 환경, 식량 위기요인을 중심으로, 한국시스템다이내믹스연구, 10(3), 47-79.
- 문태훈, 2007, 지속가능한 발전을 위한 환경용량의 산정과 토지이용형태 연구 - 수도권지역을 중심으로, 한국시스템다이내믹스연구, 8(2), 51-82.
- 손지호, 1999, Emergy 분석법에 의한 도시의 지속적인 발전가능성 평가. 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 손지호, 이석모, 2000, Emergy평가에 의한 부산광역시의 지속적인 발전가능성 평가, 한국환경과학회지, 9(3), pp185-191.
- 심재형, 박용철, 1986, 한국 동남해역의 해양기초생산력과 질소계 영양염

- 동적 관계, 한국해양학회지, 21(1), pp13-24.
- 심홍석, 1999, 한국 화력발전산업의 생태효율성 평가 : 온실가스 배출을 고려한 분석, 아주대학교 에너지학과 석사학위논문.
- 이상현, 2010, 지속가능한 토지이용을 위한 에머지 생태지도 개발과 활용에 관한 연구, 부경대학교 박사학위논문.
- 이삼수, 2006, 도시패러다임 변화의 의의, 대한국토도시계획학회(도시정보), 2006(10):2-11.
- 이석모, 손지호, 강대석, 2000, 시스템 생태학적 접근법에 의한 한국의 지속적인 발전가능성 평가(I)-한국의 자연환경과 경제활동에 대한 Energy평가. 한국환경과학회지, 9(6):449-454.
- 이석모, 손지호, 김진이, 2001, 시스템 생태학적 접근법에 의한 한국의 지속적인 발전 가능성평가(II)-한국의 자연환경과 경제활동에 대한 미래 예측. 한국환경과학회지, 10(2):91-97.
- 이우성, 정성관, 유주한, 2006, 지속가능한 개발을 위한 대구광역시의 에머지 평가, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」, 41(3):137-150.
- 임제규, 2010, 세계 주요국의 자발적 온실가스 감축목표가 경제와 환경에 미치는 파급효과와 시사점, 환경정책연구, 9(3):115-142.
- 정희성, 강만옥, 임현정, 2002, 지속가능성평가를 위한 지역생태-경제모형개발연구I, 한국환경정책평가연구원
- 최영근, 2003, 국가와 지역시스템의 지속성평가에 대한 연구. 부경대학교 환경공학과 박사학위논문.
- 최충익, 고재경, 2010, 지방자치단체의 온실가스 배출 특성과 기후변화대응 정책적 함의, 대한국토·도시계획학회지, 45(2):261-273.
- 건교부·부산광역시·경상남도, 2005, 2020년 부산권 광역도시계획. 국무총리실 기후변화대책기획단, 2008, 기후변화대응 종합기본계획.

- 국립기상연구소, 2009, 기후변화 이해하기Ⅳ-부산의 기후변화-.
- 녹색성장위원회, 2009, 녹색성장 5개년 계획.
- 법제처, 2010, 저탄소 녹색성장 기본법.
- 부산광역시, 2007, 부산광역시 온실가스 배출량 산정.
- 부산광역시, 2009, 부산광역시 녹색성장 전략 및 5개년 추진계획.
- 부산광역시, 2010, 부산광역시 환경보전 종합계획.
- 지식경제부, 2009, 지자체별 온실가스 배출량 및 배출특성 분석결과.
- 환경부, 2009, 환경백서.
- 환경관리공단, 2008, 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인.



<통계 자료>

기상청, 1998~2007, 기상연보.

부산광역시, 2007~2008, 부산통계연보.

부산광역시, 2009, 2008년 기준 사회통계조사보고서.

부산광역시, 2008, 부산의 사회지표.

부산광역시, 2010, 2007년 기준 구·군 단위 지역내총생산 추계결과.

산업자원부·에너지경제연구원, 2006~2009, 에너지통계연보.

산업자원부·에너지경제연구원, 2005~2009, 지역에너지통계연보.

산업자원부·에너지경제연구원, 2006, 2005년도 에너지총조사보고서.

에너지관리공단, 2008, 에너지절약통계핸드북.

통계청, 2007~2008, 16개 시·도별 지역내총생산 및 지출.

통계청, 2007, 한국통계연감.

한국전력공사, 2009, 한국전력통계.

<인터넷 통계 자료>

국가에너지통계종합정보시스템, 2010, <http://www.kesis.net>

국가지하수정보센터, 2010, <http://groundwater.kowaco.or.kr/>

기상청 기상연감, 2010, <http://www.kma.go.kr/>

국토해양부 한강홍수통제소 자료실, 2010,

<http://www.hrfco.go.kr/html/dataroom/floodgate.jsp>

대한석탄공사, 2010, <http://www.kocoal.or.kr/>

부산광역시 통계자료실, 2010, <http://www.busan.go.kr/>

에너지관리공단 에너지통계관련자료, 2010, <http://www.kemco.or.kr/>

에너지경제연구원, 2010, <http://www.keei.re.kr/main.nsf/index.html>

통계청, 2010, <http://www.kostat.go.kr/>

해양수산연구정보포털, 2010, <http://portal.nfrdi.re.kr/>

Appendix

Appendix 4.1. Emergy evaluation for Busan metropolitan city from 1998 to 2006

4. 1. 1. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 1998

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 1998 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.63E+19 | J | 1.00E+00 | 1.63E+19 | 8.34E+09 |
| 2 | Wind | 7.81E+15 | J | 2.51E+03 | 1.96E+19 | 1.00E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 5.28E+14 | J | 4.70E+04 | 2.48E+19 | 1.27E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 7.55E+15 | J | 3.05E+04 | 2.30E+20 | 1.18E+11 |
| 5 | Tide | 8.77E+15 | J | 7.39E+04 | 6.48E+20 | 3.31E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.42E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.24E+17 | J | 8.13E+04 | 1.01E+22 | 5.14E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.53E+14 | J | 5.76E+04 | 4.34E+19 | 2.22E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.65E+14 | J | 3.36E+05 | 2.91E+20 | 1.49E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.57E+15 | J | 3.36E+06 | 5.27E+21 | 2.70E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 3.23E+14 | J | 2.72E+05 | 8.78E+19 | 4.49E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.39E+14 | J | 1.24E+05 | 1.72E+19 | 8.80E+09 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.03E+15 | J | 6.71E+04 | 6.93E+19 | 3.54E+10 |
| 14 | Oil | 2.03E+17 | J | 9.06E+04 | 1.84E+22 | 9.39E+12 |
| 15 | Gas | 1.16E+16 | J | 8.05E+04 | 9.31E+20 | 4.76E+11 |
| 16 | Electricity | 3.94E+16 | J | 2.91E+05 | 1.15E+22 | 5.86E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 2.54E+13 | ₩ | 6.54E+08 | 1.66E+22 | 8.48E+12 |

4. 1. 2. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 1999

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 1999 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.80E+19 | J | 1.00E+00 | 1.80E+19 | 9.62E+09 |
| 2 | Wind | 6.69E+15 | J | 2.51E+03 | 1.68E+19 | 8.95E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 6.29E+14 | J | 4.70E+04 | 2.95E+19 | 1.58E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 8.98E+15 | J | 3.05E+04 | 2.74E+20 | 1.46E+11 |
| 5 | Tide | 8.80E+15 | J | 7.39E+04 | 6.50E+20 | 3.47E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.48E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.07E+17 | J | 8.13E+04 | 8.72E+21 | 4.65E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.58E+14 | J | 5.76E+04 | 4.37E+19 | 2.33E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 9.22E+14 | J | 3.36E+05 | 3.10E+20 | 1.65E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.68E+15 | J | 3.36E+06 | 5.63E+21 | 3.01E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.82E+14 | J | 2.72E+05 | 7.68E+19 | 4.10E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.38E+14 | J | 1.24E+05 | 1.71E+19 | 9.11E+09 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.15E+15 | J | 6.71E+04 | 7.69E+19 | 4.10E+10 |
| 14 | Oil | 2.21E+17 | J | 9.06E+04 | 2.00E+22 | 1.07E+13 |
| 15 | Gas | 1.47E+16 | J | 8.05E+04 | 1.18E+21 | 6.31E+11 |
| 16 | Electricity | 4.07E+16 | J | 2.91E+05 | 1.18E+22 | 6.32E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 2.85E+13 | ₩ | 6.34E+08 | 1.81E+22 | 9.66E+12 |

4. 1. 3. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2000

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2000 Won |
|--|----------------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.94E+19 | J | 1.00E+00 | 1.94E+19 | 1.05E+10 |
| 2 | Wind | 6.70E+15 | J | 2.51E+03 | 1.68E+19 | 9.10E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.28E+14 | J | 4.70E+04 | 1.54E+19 | 8.34E+09 |
| 4 | Rain, chemical | 4.69E+15 | J | 3.05E+04 | 1.43E+20 | 7.73E+10 |
| 5 | Tide | 8.34E+15 | J | 7.39E+04 | 6.16E+20 | 3.33E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.50E+11 |
| 7 | River, chemical | 9.69E+16 | J | 8.13E+04 | 7.88E+21 | 4.26E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.60E+14 | J | 5.76E+04 | 4.38E+19 | 2.37E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.51E+14 | J | 3.36E+05 | 2.86E+20 | 1.55E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.45E+15 | J | 3.36E+06 | 4.87E+21 | 2.63E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 3.01E+14 | J | 2.72E+05 | 8.18E+19 | 4.42E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.37E+14 | J | 1.24E+05 | 1.70E+19 | 9.21E+09 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 8.85E+14 | J | 6.71E+04 | 5.94E+19 | 3.21E+10 |
| 14 | Oil | 2.31E+17 | J | 9.06E+04 | 2.09E+22 | 1.13E+13 |
| 15 | Gas | 1.68E+16 | J | 8.05E+04 | 1.36E+21 | 7.34E+11 |
| 16 | Electricity | 4.47E+16 | J | 2.91E+05 | 1.30E+22 | 7.03E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.17E+13 | ₩ | 6.05E+08 | 1.92E+22 | 1.04E+13 |

4. 1. 4. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2001

| No. | Item | Raw Units | | Solar tranformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2001 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.89E+19 | J | 1.00E+00 | 1.89E+19 | 1.19E+10 |
| 2 | Wind | 6.72E+15 | J | 2.51E+03 | 1.69E+19 | 1.06E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.09E+14 | J | 4.70E+04 | 1.45E+19 | 9.11E+09 |
| 4 | Rain, chemical | 4.41E+15 | J | 3.05E+04 | 1.34E+20 | 8.45E+10 |
| 5 | Tide | 8.46E+15 | J | 7.39E+04 | 6.25E+20 | 3.93E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.74E+11 |
| 7 | River, chemical | 6.67E+16 | J | 8.13E+04 | 5.42E+21 | 3.40E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.62E+14 | J | 5.76E+04 | 4.39E+19 | 2.76E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 9.30E+14 | J | 3.36E+05 | 3.13E+20 | 1.96E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.61E+15 | J | 3.36E+06 | 5.40E+21 | 3.39E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.98E+14 | J | 2.72E+05 | 8.09E+19 | 5.08E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.37E+14 | J | 1.24E+05 | 1.69E+19 | 1.06E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.35E+15 | J | 6.71E+04 | 9.04E+19 | 5.68E+10 |
| 14 | Oil | 2.18E+17 | J | 9.06E+04 | 1.98E+22 | 1.24E+13 |
| 15 | Gas | 1.81E+16 | J | 8.05E+04 | 1.46E+21 | 9.16E+11 |
| 16 | Electricity | 4.83E+16 | J | 2.91E+05 | 1.41E+22 | 8.83E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.38E+13 | ₩ | 5.68E+08 | 1.92E+22 | 1.20E+13 |

4. 1. 5. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2002

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2002 Won |
|--|----------------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 2.05E+19 | J | 1.00E+00 | 2.05E+19 | 1.26E+10 |
| 2 | Wind | 8.55E+15 | J | 2.51E+03 | 2.15E+19 | 1.33E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 5.50E+14 | J | 4.70E+04 | 2.59E+19 | 1.60E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 7.86E+15 | J | 3.05E+04 | 2.40E+20 | 1.48E+11 |
| 5 | Tide | 8.68E+15 | J | 7.39E+04 | 6.41E+20 | 3.96E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.71E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.28E+17 | J | 8.13E+04 | 1.04E+22 | 6.42E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.63E+14 | J | 5.76E+04 | 4.39E+19 | 2.71E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 9.06E+14 | J | 3.36E+05 | 3.05E+20 | 1.88E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.40E+15 | J | 3.36E+06 | 4.71E+21 | 2.91E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.00E+14 | J | 2.72E+05 | 5.45E+19 | 3.37E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.36E+14 | J | 1.24E+05 | 1.69E+19 | 1.04E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.19E+15 | J | 6.71E+04 | 7.97E+19 | 4.93E+10 |
| 14 | Oil | 2.14E+17 | J | 9.06E+04 | 1.94E+22 | 1.20E+13 |
| 15 | Gas | 2.02E+16 | J | 8.05E+04 | 1.63E+21 | 1.01E+12 |
| 16 | Electricity | 5.14E+16 | J | 2.91E+05 | 1.49E+22 | 9.24E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.62E+13 | ₩ | 5.31E+08 | 1.92E+22 | 1.19E+13 |

4. 1. 6. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2003

| No. | Item | Raw Units | | Solar tranformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2003 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.71E+19 | J | 1.00E+00 | 1.71E+19 | 1.09E+10 |
| 2 | Wind | 4.73E+15 | J | 2.51E+03 | 1.19E+19 | 7.53E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 6.22E+14 | J | 4.70E+04 | 2.92E+19 | 1.86E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 8.88E+15 | J | 3.05E+04 | 2.71E+20 | 1.72E+11 |
| 5 | Tide | 8.65E+15 | J | 7.39E+04 | 6.39E+20 | 4.06E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 1.76E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.65E+17 | J | 8.13E+04 | 1.34E+22 | 8.50E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.63E+14 | J | 5.76E+04 | 4.40E+19 | 2.79E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 7.22E+14 | J | 3.36E+05 | 2.43E+20 | 1.54E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.28E+15 | J | 3.36E+06 | 4.30E+21 | 2.73E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.27E+14 | J | 2.72E+05 | 6.18E+19 | 3.92E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.35E+14 | J | 1.24E+05 | 1.68E+19 | 1.07E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.20E+15 | J | 6.71E+04 | 8.03E+19 | 5.10E+10 |
| 14 | Oil | 2.14E+17 | J | 9.06E+04 | 1.94E+22 | 1.23E+13 |
| 15 | Gas | 2.13E+16 | J | 8.05E+04 | 1.71E+21 | 1.09E+12 |
| 16 | Electricity | 5.32E+16 | J | 2.91E+05 | 1.55E+22 | 9.82E+12 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.64E+13 | ₩ | 5.03E+08 | 1.83E+22 | 1.16E+13 |

4. 1. 7. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2004

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2004 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.93E+19 | J | 1.00E+00 | 1.93E+19 | 1.39E+10 |
| 2 | Wind | 4.30E+15 | J | 2.51E+03 | 1.08E+19 | 7.78E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.66E+14 | J | 4.70E+04 | 1.72E+19 | 1.24E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 5.23E+15 | J | 3.05E+04 | 1.59E+20 | 1.15E+11 |
| 5 | Tide | 8.51E+15 | J | 7.39E+04 | 6.29E+20 | 4.54E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.00E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.16E+17 | J | 8.13E+04 | 9.42E+21 | 6.80E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.63E+14 | J | 5.76E+04 | 4.40E+19 | 3.17E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.24E+14 | J | 3.36E+05 | 2.77E+20 | 2.00E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.33E+15 | J | 3.36E+06 | 4.48E+21 | 3.23E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.10E+14 | J | 2.72E+05 | 5.71E+19 | 4.12E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.35E+14 | J | 1.24E+05 | 1.67E+19 | 1.21E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.24E+15 | J | 6.71E+04 | 8.33E+19 | 6.01E+10 |
| 14 | Oil | 2.01E+17 | J | 9.06E+04 | 1.82E+22 | 1.32E+13 |
| 15 | Gas | 2.25E+16 | J | 8.05E+04 | 1.81E+21 | 1.31E+12 |
| 16 | Electricity | 5.57E+16 | J | 2.91E+05 | 1.62E+22 | 1.17E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.70E+13 | ₩ | 4.67E+08 | 1.73E+22 | 1.25E+13 |

4. 1. 8. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2005

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2005 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 2.08E+19 | J | 1.00E+00 | 2.08E+19 | 1.60E+10 |
| 2 | Wind | 4.30E+15 | J | 2.51E+03 | 1.08E+19 | 8.31E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.65E+14 | J | 4.70E+04 | 1.72E+19 | 1.32E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 5.22E+15 | J | 3.05E+04 | 1.59E+20 | 1.23E+11 |
| 5 | Tide | 8.03E+15 | J | 7.39E+04 | 5.94E+20 | 4.57E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.13E+11 |
| 7 | River, chemical | 9.53E+16 | J | 8.13E+04 | 7.75E+21 | 5.97E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.63E+14 | J | 5.76E+04 | 4.40E+19 | 3.39E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 7.95E+14 | J | 3.36E+05 | 2.67E+20 | 2.06E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.26E+15 | J | 3.36E+06 | 4.23E+21 | 3.26E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.08E+14 | J | 2.72E+05 | 5.65E+19 | 4.35E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.34E+14 | J | 1.24E+05 | 1.66E+19 | 1.28E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.44E+15 | J | 6.71E+04 | 9.67E+19 | 7.45E+10 |
| 14 | Oil | 1.87E+17 | J | 9.06E+04 | 1.69E+22 | 1.30E+13 |
| 15 | Gas | 2.59E+16 | J | 8.05E+04 | 2.09E+21 | 1.61E+12 |
| 16 | Electricity | 5.97E+16 | J | 2.91E+05 | 1.74E+22 | 1.34E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 3.87E+13 | ₩ | 4.53E+08 | 1.75E+22 | 1.35E+13 |

4. 1. 9. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2006

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2006 Won |
|--|----------------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.99E+19 | J | 1.00E+00 | 1.99E+19 | 1.44E+10 |
| 2 | Wind | 4.30E+15 | J | 2.51E+03 | 1.08E+19 | 7.82E+09 |
| 3 | Rain, geopotential | 4.04E+14 | J | 4.70E+04 | 1.90E+19 | 1.37E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 5.77E+15 | J | 3.05E+04 | 1.76E+20 | 1.27E+11 |
| 5 | Tide | 8.58E+15 | J | 7.39E+04 | 6.34E+20 | 4.59E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.01E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.57E+17 | J | 8.13E+04 | 1.28E+22 | 9.25E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.64E+14 | J | 5.76E+04 | 4.40E+19 | 3.19E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 6.63E+14 | J | 3.36E+05 | 2.23E+20 | 1.61E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.12E+15 | J | 3.36E+06 | 3.76E+21 | 2.72E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 1.57E+14 | J | 2.72E+05 | 4.28E+19 | 3.10E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.33E+14 | J | 1.24E+05 | 1.65E+19 | 1.19E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.93E+15 | J | 6.71E+04 | 1.30E+20 | 9.38E+10 |
| 14 | Oil | 1.83E+17 | J | 9.06E+04 | 1.66E+22 | 1.20E+13 |
| 15 | Gas | 2.63E+16 | J | 8.05E+04 | 2.12E+21 | 1.53E+12 |
| 16 | Electricity | 6.20E+16 | J | 2.91E+05 | 1.80E+22 | 1.31E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 4.11E+13 | ₩ | 4.37E+08 | 1.79E+22 | 1.30E+13 |

Appendix 4.2. Emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2007

| No. | Item | Raw Units | | Solar transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2007 Won |
|--|----------------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 2.10E+19 | J | 1.00E+00 | 2.10E+19 | 1.74E+10 |
| 2 | Wind | 5.20E+15 | J | 2.51E+03 | 1.30E+19 | 1.08E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 3.38E+14 | J | 4.70E+04 | 1.59E+19 | 1.31E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 4.82E+15 | J | 3.05E+04 | 1.47E+20 | 1.22E+11 |
| 5 | Tide | 8.55E+15 | J | 7.39E+04 | 6.32E+20 | 5.23E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.29E+11 |
| 7 | River, chemical | 7.79E+16 | J | 8.13E+04 | 6.33E+21 | 5.24E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.65E+14 | J | 5.76E+04 | 4.41E+19 | 3.65E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 6.44E+14 | J | 3.36E+05 | 2.17E+20 | 1.79E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.22E+15 | J | 3.36E+06 | 4.08E+21 | 3.38E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 1.78E+14 | J | 2.72E+05 | 4.85E+19 | 4.01E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.33E+14 | J | 1.24E+05 | 1.64E+19 | 1.36E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.47E+15 | J | 6.71E+04 | 9.85E+19 | 8.16E+10 |
| 14 | Oil | 1.87E+17 | J | 9.06E+04 | 1.69E+22 | 1.40E+13 |
| 15 | Gas | 2.71E+16 | J | 8.05E+04 | 2.18E+21 | 1.80E+12 |
| 16 | Electricity | 6.45E+16 | J | 2.91E+05 | 1.88E+22 | 1.55E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 4.39E+13 | ₩ | 4.25E+08 | 1.86E+22 | 1.54E+13 |

Footnotes to appendix 4.2

| RENEWABLE RESOURCES | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------------------|
| 1 | Sunlight | | |
| | Continental shelf | = 4.79E+09 | m ² |
| | Land area | = 7.65E+08 | m ² |
| | Insolation | = 5.41E+09 | J/m ² /yr |
| | Albedo | = 0.30 | (% given as decimal) |
| | Energy(J) | = (5.55E9 m ²)*(5.41E9 J/m ² /yr)*(1-0.30) | |
| | | = 2.10E+19 | J/yr |
| 2 | Wind | | |
| | Land area | = 7.65E+08 | |
| | Density of Air | = 1.3 | kg/m ³ |
| | Avg, annual wind velocity | = 3.3 | m/s |
| | Geostrophic wind | = 5.50 | m/s |
| | Drag Coeff. | = 1.00E-03 | |
| | Wind, kinetic energy | = (area)(air density)(drag coefficient)(velocity ³) | |
| | Energy (J) | = (7.65E8 m ²)(1.3 kg/m ³)(1.00E-03)(5.50 m/s) ³ (3.14E7 s/yr) | |
| | | = 5.20E+15 | J/yr (Here, 1997) |
| 3 | Rain, geopotential | | |
| | Area | = 7.65E+08 | m ² |
| | Rainfall | = 1.28 | m/yr |
| | Average elevation | = 69.2 | m |
| | Runoff rate | = 0.51 | (% given as decimal) |
| | Energy (J) | = (7.65E8m ²)*(0.51)*(1.28m/yr)*(1000kg/m ³)*(69.2m)*(9.8m/s ²) | |
| | | = 3.38E+14 | J/yr |
| 4 | Rain, chemical | | |
| | Land area | = 7.65E+08 | m ² |
| | Rainfall | = 1.28 | m/yr (used that for land area) |
| | Energy(land)(J) | = (7.65E8m ²)*(1.28m/yr)*(1000kg/m ³)*(4.94E3 J/kg) | |
| | | = 4.82E+15 | J/yr |
| 5 | Tide | | |
| | Cont. Shelf area | = 4.79E+09 | m ² |
| | Avg. Tide range | = 0.71 | m |
| | Density | = 1.03E+03 | kg/m ³ |
| | Energy (J) | = (area elevated)(0.5)(tides/yr)(height squared)(density)(gravity) | |
| | | = (4.79E9 m ²)*(0.5)*(706/yr)*(0.71) ² *(1.025 E3 kg/m ³)*(9.8m/s ²) | |
| | | = 8.55E+15 | J/yr |

| | | | |
|--|-------------------------|---|----------|
| 6 | Waves | | |
| | Shore Length | = 7.00E+04 | m |
| | Wave height | = 0.42 | m |
| | Energy (J) | = (shore length)(1/8)(density)(gravity)(height squared)(velocity) | |
| | | = (298.52m)*(1/8)*(1.025E3kg/m3)*(9.8m/s^2)*(0.42m)^2 | |
| | | = (9.8m/s^2*12.5m)^-1/2*(3.154E7sec/yr) | |
| | | = 5.41E+15 | J/yr |
| 7 | River | | |
| | Volume flow | = 1.58E+10 | m^3/yr |
| | Gibbs free energy | = 4.94 | J/g |
| | Energy (J) | = (1.58E9m^3/yr)*(1.0E6g/m^3)*(4.94J/g) | |
| | | = 7.79E+16 | J/yr |
| 8 | Earth cycle | | |
| | Area | = 7.65E+08 | m2 |
| | Energy (J) | = (7.65E8m2)*(1E6J/m2/yr) | |
| | | = 7.65E+14 | J/yr |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY : | | | |
| 8 | Agricultural Production | | |
| | Production | = 4.40E+04 | MT |
| | Energy(J) | = (4.40E5MT)*(1 E6g/MT)*(3.5 kcal/g)*(4186 J/kcal) | |
| | | = 6.44E+14 | J/yr |
| 9 | Fisheries Production | | |
| | Production | = 3.63E+05 | MT |
| | Energy(J) | = (3.63E5 MT)*(1 E6 g/MT)*(4 kcal/g)*(4186J/kcal)*(0.20) | |
| | | = 1.22E+15 | J/yr |
| NONRENEWABLE SOURCE FROM WITHIN SYSTEM : | | | |
| 10 | Ground water used | | |
| | Consumption in city | = 3.56E+07 | t/yr |
| | Gibbs free energy | = 5 | J/g |
| | | = (3.56E7ton/yr)*(1E6g/m3)*5 | |
| | | = 1.78E+14 | |
| 11 | Top Soil | | |
| | Soil loss | = 2.60E+02 | g/m^2/yr |
| | Mountain zone | = 3.61E+08 | m^2 |
| | Energy(J) | = (9.38E10g/yr)*(0.03organic)*(5.4Kcal)*(4186J/Kcal) | |
| | | = 6.36E+13 | J/yr |
| | Soil loss | = 8.50E+02 | g/m^2/yr |
| | Arable zone | = 1.20E+08 | m^2 |
| | Energy(J) | = (1.02E10g/yr)*(0.03organic)*(5.4Kcal)*(4186J/Kcal) | |
| | | = 6.90E+13 | J/yr |
| | Total | = 1.33E+14 | g/yr |

IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES:

| | | | | |
|----|-------------------|---|--|--------|
| 12 | Coal | | | |
| | Consumption | = | 5.06E+04 | MT |
| | Energy(J) | = | (5.06E4 MT/yr)*(2.9E10 J/MT) | |
| | | = | 1.47E+15 | J/yr |
| 13 | Oil | | | |
| | Imports | = | 2.97E+07 | BBL/yr |
| | Energy(J) | = | (2.97E7 BBL/yr)*(6.28 E9 J/BBL) | |
| | | = | 1.87E+17 | J/yr |
| 14 | Gas | | | |
| | Imports | = | 5.09E+05 | MT |
| | Energy(J) | = | (5.09E5 MT)*(1.27 E7 kcal/MT)*(4186J/kcal) | |
| | | = | 2.71E+16 | J/yr |
| 15 | Electricity | | | |
| | Consumption | = | 1.79E+04 | Gwh |
| | Energy(J) | = | (1.79E4 Gwh)(3.6E12 J/Gwh) | |
| | | = | 6.45E+16 | J/yr |
| 16 | Inflow of G. & S. | = | 4.39E+13 | ₩/yr |



Appendix 4.3. Summary of flows in Busan

| Name of Index | Expression | Value |
|--|---------------------|----------|
| Renewable energy flow(sej/J) | R | 6.33E+21 |
| Flow from indigenous nonrenewable reserves(sej/J) | N | 6.49E+19 |
| Flow of imported energy(sej/J) | F | 5.66E+22 |
| Total energy inflow(sej/J) | R+N+F | 6.30E+22 |
| Total energy used(sej/J) | U=N+R+F | 6.30E+22 |
| Emergy to money ratio | P1=U/GNP | 1.20E+09 |
| Fraction used, locally renewable(% Renew) | R/U | 10.05 |
| Use per unit area (7.58E8 m ²) | U/(area) | 8.23E+13 |
| Use per capita (3.83E6 people) | U/(population) | 4.84E+16 |
| Renewable carrying capacity at present living standard | (R/U)*(population) | 1.31E+05 |
| Developed carrying capacity at present living standard | 8(R/U)*(population) | 1.05E+06 |
| Emergy yield ratio(EYR) | U/F | 1.11 |
| Emergy investment ratio(EIR) | F/(R+N) | 8.85 |
| Environmental loading ratio(ELR) | (N+F)/R | 8.95 |
| Sustainability index(SI) | EYR/ELR | 0.12 |

Appendix 4.4. Solar transformity used in Emergy analysis of Busan

| Energy Sources | Solar Transformity(sej/J) |
|-------------------------|---------------------------|
| Sunlight | 1 |
| Wind | 2510 |
| Rain, geopotential | 47000 |
| Rain, chemical | 30500 |
| Tide | 73900 |
| Waves | 51200 |
| River, chemical | 81300 |
| Earth cycle | 57600 |
| Agricultural Production | 3.36E+05 |
| Fisheries Production | 3.36E+06 |
| Groundwater | 2.72E+05 |
| Top Soil | 1.24E+05 |
| Coal | 6.71E+04 |
| Oil | 9.06E+04 |
| Gas | 8.05E+04 |
| Electricity | 2.91E+05 |
| Inflow of G.& S. | 6.54E+08 |

Appendix 4.5. Emergy evaluation of predicted resource basis for Busan metropolitan city from 2010 to 2020

4. 5. 1. Predicted emergy evaluation for Busan metropolitan city in 2010

| No. | Item | Raw Units | | Solar Transformativity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2010 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.92E+19 | J | 1.00E+00 | 1.92E+19 | 1.65E+10 |
| 2 | Wind | 5.87E+15 | J | 2.51E+03 | 1.47E+19 | 1.27E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 4.49E+14 | J | 4.70E+04 | 2.11E+19 | 1.82E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 6.41E+15 | J | 3.05E+04 | 1.95E+20 | 1.69E+11 |
| 5 | Tide | 8.54E+15 | J | 7.39E+04 | 6.31E+20 | 5.44E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.39E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.13E+17 | J | 8.13E+04 | 9.21E+21 | 7.95E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.69E+14 | J | 5.76E+04 | 4.43E+19 | 3.82E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.12E+14 | J | 3.36E+05 | 2.73E+20 | 2.35E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.39E+15 | J | 3.36E+06 | 4.67E+21 | 4.03E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.38E+14 | J | 2.72E+05 | 6.48E+19 | 5.59E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.31E+14 | J | 1.24E+05 | 1.62E+19 | 1.40E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 1.80E+15 | J | 6.71E+04 | 1.21E+20 | 1.04E+11 |
| 14 | Oil | 1.72E+17 | J | 9.06E+04 | 1.56E+22 | 1.35E+13 |
| 15 | Gas | 3.38E+16 | J | 8.05E+04 | 2.72E+21 | 2.34E+12 |
| 16 | Electricity | 7.52E+16 | J | 2.91E+05 | 2.19E+22 | 1.89E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 4.89E+13 | ₩ | 4.25E+08 | 2.08E+22 | 1.79E+13 |

4. 5. 2. Predicted energy evaluation for Busan metropolitan city in 2015

| No. | Item | Raw Units | | Solar Transformity (sej/unit) | Solar Emergy (sej/yr) | Ecological economic value, 2015 Won |
|--|----------------------------|-----------|---|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.92E+19 | J | 1.00E+00 | 1.92E+19 | 1.82E+10 |
| 2 | Wind | 5.90E+15 | J | 2.51E+03 | 1.48E+19 | 1.41E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 4.51E+14 | J | 4.70E+04 | 2.12E+19 | 2.01E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 6.45E+15 | J | 3.05E+04 | 1.97E+20 | 1.87E+11 |
| 5 | Tide | 8.54E+15 | J | 7.39E+04 | 6.31E+20 | 5.99E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.63E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.13E+17 | J | 8.13E+04 | 9.21E+21 | 8.75E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.74E+14 | J | 5.76E+04 | 4.46E+19 | 4.23E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.12E+14 | J | 3.36E+05 | 2.73E+20 | 2.59E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.39E+15 | J | 3.36E+06 | 4.67E+21 | 4.44E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.38E+14 | J | 2.72E+05 | 6.48E+19 | 6.16E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.27E+14 | J | 1.24E+05 | 1.58E+19 | 1.50E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 2.16E+15 | J | 6.71E+04 | 1.45E+20 | 1.38E+11 |
| 14 | Oil | 1.52E+17 | J | 9.06E+04 | 1.37E+22 | 1.30E+13 |
| 15 | Gas | 4.23E+16 | J | 8.05E+04 | 3.40E+21 | 3.23E+12 |
| 16 | Electricity | 8.96E+16 | J | 2.91E+05 | 2.61E+22 | 2.48E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 5.80E+13 | ₩ | 4.25E+08 | 2.47E+22 | 2.34E+13 |

4. 5. 3. Predicted energy evaluation for Busan metropolitan city in 2020

| No. | Item | Raw Units | | Solar Transformativity (sej/unit) | Solar Emery (sej/yr) | Ecological economic value, 2020 Won |
|--|-------------------------|-----------|---|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| RENEWABLE RESOURCES | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 1.92E+19 | J | 1.00E+00 | 1.92E+19 | 1.96E+10 |
| 2 | Wind | 5.94E+15 | J | 2.51E+03 | 1.49E+19 | 1.53E+10 |
| 3 | Rain, geopotential | 4.54E+14 | J | 4.70E+04 | 2.14E+19 | 2.19E+10 |
| 4 | Rain, chemical | 6.49E+15 | J | 3.05E+04 | 1.98E+20 | 2.03E+11 |
| 5 | Tide | 8.54E+15 | J | 7.39E+04 | 6.31E+20 | 6.46E+11 |
| 6 | Waves | 5.41E+15 | J | 5.12E+04 | 2.77E+20 | 2.84E+11 |
| 7 | River, chemical | 1.13E+17 | J | 8.13E+04 | 9.21E+21 | 9.43E+12 |
| 8 | Earth cycle | 7.79E+14 | J | 5.76E+04 | 4.49E+19 | 4.59E+10 |
| INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY | | | | | | |
| 9 | Agricultural Production | 8.12E+14 | J | 3.36E+05 | 2.73E+20 | 2.79E+11 |
| 10 | Fisheries Production | 1.39E+15 | J | 3.36E+06 | 4.67E+21 | 4.78E+12 |
| NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM | | | | | | |
| 11 | Groundwater | 2.38E+14 | J | 2.72E+05 | 6.48E+19 | 6.64E+10 |
| 12 | Top Soil | 1.24E+14 | J | 1.24E+05 | 1.54E+19 | 1.57E+10 |
| IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES | | | | | | |
| 13 | Coal | 2.52E+15 | J | 6.71E+04 | 1.69E+20 | 1.73E+11 |
| 14 | Oil | 1.31E+17 | J | 9.06E+04 | 1.19E+22 | 1.21E+13 |
| 15 | Gas | 5.08E+16 | J | 8.05E+04 | 4.09E+21 | 4.18E+12 |
| 16 | Electricity | 1.04E+17 | J | 2.91E+05 | 3.03E+22 | 3.10E+13 |
| 17 | Inflow of G.& S. | 6.71E+13 | ₩ | 4.25E+08 | 2.85E+22 | 2.92E+13 |

Appendix 4.6. The code of Visual Basic programming about the system of greenhouse gas emissions in Busan

Sub Energy_modeling_Busan()

K0 = 0.899

K1 = 3.138

K2 = 2.9003

k3 = 0.1228

K4 = 0.0381

K5 = 0.4381

K6 = 0.0003

K7 = 0.02

K8 = 0.0023

K9 = 0.0715

K10 = 0.0054

k11 = 0.0913

k12 = 0.0173

k13 = 0.0212

k14 = 0.007

jga = 8.76

jgi = 2.1

jea = 1.94

jei = 1

pa = 1

pg = 2.04

pe = 1.96

j = 10

q = 10

a = 10

m = 10

c = 10

Ex = 0.799

q0 = 5

a0 = 4

m0 = 3

c0 = 2

Ex0 = 10

dt = 0.1



```

t = 0
Cells(1, 1) = t
Cells(1, 2) = q * q0
Cells(1, 3) = a * a0
Cells(1, 4) = m * m0
Cells(1, 5) = c * c0
Cells(1, 6) = Ex * Ex0
For t = 1 To 15
Ex = K4 * q * jei * jgi
u = K5 * q * jei * jgi
R = j / (1 + K0 * q)
c = K8 * q + K9 * q * jei * jgi + K10 * u * a * jea * jga
dq = K1 * R * q - K2 * q - k3 * q * jei * jgi
da = K6 * u * jea * jga * a - K7 * a
dm = K4 * q * jei * jgi * pa - k11 * m - k12 * m - k13 * m - k14 * m
q = q + dq * dt
a = a + da * dt
m = m + dm * dt
Cells(t + 1, 1) = t
Cells(t + 1, 2) = q * q0
Cells(t + 1, 3) = a * a0
Cells(t + 1, 4) = m * m0
Cells(t + 1, 5) = c * c0
Cells(t + 1, 6) = Ex * Ex0
Next t
End Sub

```

Appendix 4.7. The code of Visual Basic programming about the system of greenhouse gas emissions in the case of applying the reduction plan in Busan

```
Sub Energy_modeling_applying_Greenhouse_gases_reduction_plan()
```

```
K0 = 0.899
```

```
K1 = 3.138
```

```
K2 = 2.9003
```

```
K3 = 0.1228
```

```
K4 = 0.0381
```

```
K5 = 0.4381
```

```
K6 = 0.0003
```

```
K7 = 0.02
```

```
K8 = 0.0023
```

```
K9 = 0.0715
```

```
K10 = 0.0054
```

```
K11 = 0.0913
```

```
K12 = 0.0173
```

```
K13 = 0.0212
```

```
K14 = 0.007
```

```
jga = 8.76
```

```
jgi = 2.1
```

```
jea = 1.94
```

```
jei = 1
```

```
pa = 1
```

```
pg = 2.04
```

```
pe = 1.96
```

```
j = 10
```

```
q = 10
```

```
A = 10
```

```
M = 10
```

```
c = 10
```

```
q0 = 5
```

```
a0 = 4
```

```
m0 = 3
```

```
c0 = 2
```

```
dt = 0.1
```

```
t = 0
```



```

Cells(1, 1) = t
Cells(1, 2) = q * q0
Cells(1, 3) = A * a0
Cells(1, 4) = M * m0
Cells(1, 5) = c * c0
For t = 1 To 15
If 0 < t < 6 Then jga = jga * (1 - 0.0019 * dt)
If 0 < t < 6 Then jgi = jgi * (1 - 0.0074 * dt)
If 0 < t < 6 Then jea = jea * (1 - 0.0148 * dt)
If 5 < t < 11 Then jga = jga * (1 - 0.0022 * dt)
If 5 < t < 11 Then jgi = jgi * (1 - 0.0036 * dt)
If 5 < t < 11 Then jea = jea * (1 - 0.0312 * dt)
If 10 < t < 15 Then jga = jga * (1 - 0.0052 * dt)
If 10 < t < 15 Then jgi = jgi * (1 - 0.0235 * dt)
If 10 < t < 15 Then jea = jea * (1 - 0.0515 * dt)
Ex = K4 * q * jei * jgi
u = K5 * q * jei * jgi
R = j / (1 + K0 * q)
c = K8 * q + K9 * q * jei * jgi + K10 * u * A * jea * jga
dq = K1 * R * q - K2 * q - K3 * q * jei * jgi
da = K6 * u * jea * jga * A - K7 * A
dm = K4 * q * jei * jgi * pa - K11 * M - K12 * M - K13 * M - K14 * M
q = q + dq * dt
A = A + da * dt
M = M + dm * dt
Cells(t + 1, 1) = t
Cells(t + 1, 2) = q * q0
Cells(t + 1, 3) = A * a0
Cells(t + 1, 4) = M * m0
Cells(t + 1, 5) = c * c0
Cells(t + 1, 6) = i
Cells(t + 1, 7) = Ex
Next t
End Sub
-----

```