



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](#)

공학석사 학위논문

Emergy 분석법에 의한 생태효율성  
지수 개발



2012 년 2 월

부경대학교 대학원

생태공학과

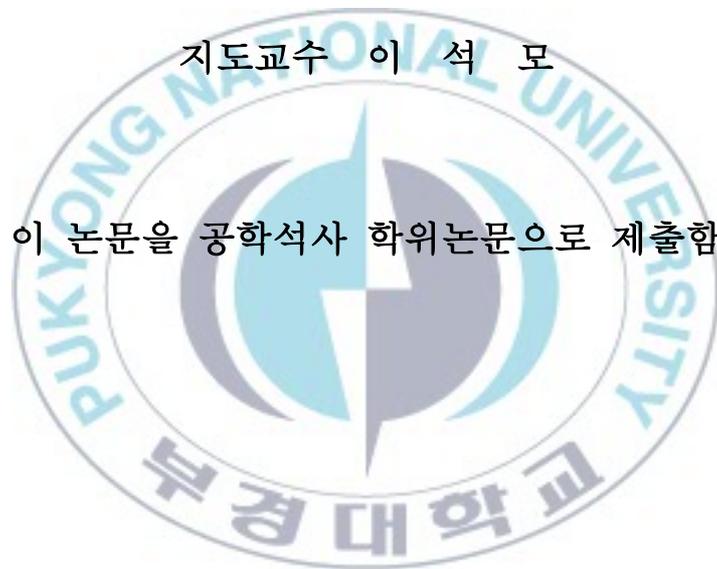
이동주

공학석사 학위논문

Emergy 분석법에 의한 생태효율성  
지수 개발

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2012 년 2 월

부경대학교 대학원

생 태 공 학 과

이 동 주

李東柱의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2012 년 2 월



주 심 공학박사 김 동 명 ㉠

위 원 공학박사 정 용 현 ㉠

위 원 공학박사 이 석 모 ㉠

# 목 차

I. 서론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. 생태효율성 .....	3
가. 생태효율성 산정식 .....	5
나. 생태효율성 달성 조건 .....	7
다. 그 외 환경경영기법 .....	9
2. 에머지 평가법 .....	12
가. 서식지 조성 .....	12
나. 시스템 생태학 .....	14
다. 에머지와 에너지변환도의 정의 .....	16
라. 에머지 지수 .....	19
3. 연구사례 .....	22
가. 생태효율성 연구 사례 .....	22
나. Emergy 분석법에 의한 환경친화성지수 개발 .....	23
다. Emergy 분석법을 이용한 생태효율성 연구사례 .....	25
III 연구 방법 .....	27
1. Emergy를 이용한 생태효율성 지수 개발 .....	27
2. 생태효율성 지수 적용 및 평가 .....	27
IV. 결과 및 고찰 .....	28
1. 에머지를 이용한 생태효율성 지수 개발 .....	28

가. 자원 효율 지표 .....	30
나. 노중 집약도 비율 .....	30
다. 재활용률 .....	33
라. 내구성 지표 .....	34
마. Emergy 생태효율성 지수 .....	35
2. 에머지를 이용한 생태효율성 지수 적용 및 평가 .....	37
가. 연료종류에 따른 승용차의 생태효율성 평가 .....	37
나. 발전소 종류에 따른 생태효율성 평가 .....	40
다. 제조업 종류에 따른 생태효율성 평가 .....	42
라. 기존 생태효율성 지수와 비교 평가 .....	44
<b>V. 결론</b> .....	<b>45</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>47</b>
<b>감사의 글</b> .....	<b>49</b>

## 표 목 차

Table 1. Evaluation factors of eco-efficiency .....	5
Table 2. Elements for eco-efficiency .....	8
Table 3. Comparison of eco-efficiency conditions with emergy indice ·	29



## 그림 목 차

Fig. 1. Diagram of the concept of impact evaluation .....	10
Fig. 2. Symbols of energy systems language .....	13
Fig. 3. The methodological roots of systems ecology .....	15
Fig. 4. Energy quality chain used to calculate solar transformity .....	17
Fig. 5. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity ·	18
Fig. 6. Emergy based indices, accounting for local renewable energy inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F) .....	19
Fig. 7. Eco-Efficiency value of each residential building type .....	26
Fig. 8. Eco-Efficiency of vehicle of each fuel type .....	38
Fig. 9. Eco-Efficiency of different types of power plant .....	40
Fig. 10. Eco-Efficiency of manufacturing industry of Korea .....	43

# Development of Eco-Efficiency Index by Emergy Analysis

Lee Dong Joo

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

## Abstract

The increment of quality of life as well as the concern to the environment make the consumers request the product which is friendly to the environment. Company puts a lot of effort to shift its operation structure and technology more efficiently, therefore high efficient, improved, alternative products have been developed.

Studies on eco-efficiency have been done by others by using financial value of product which can not show the real value of the product.

In this study, Eco-Efficiency Index based on emergy analysis, defined as Eco-Efficiency Index(EEI) = (Efficient Use of Resource(EUR) x Service Intensity Ratio(SIR) x Durability(DUR) x Recyclability(REC) has been developed to evaluate eco-efficiency based on eco-efficiency concepts and conditions declared by WBCSD.

This study also applies Eco-Efficiency Index on different types of vehicle, electrical power plants and manufacturing industry and assessment of Eco-Efficiency Index by comparing with other

eco-efficiency index. As a result product with more services and less goods came out to be the most eco-efficient product.

This study also proposes the use of Eco-Efficiency Index to help consumers to make green purchasing decisions and to help policy maker to make green policy decisions.



# I. 서론

인간의 기술적 진보는 삶의 질을 향상시켰지만 자원문제나 기후변화 문제 등 여러 가지 환경문제를 야기하고 있다. 삶의 질과 환경에 대한 관심이 고조되고 녹색 소비주의가 대두됨에 따라 소비자는 제품의 환경친화성을 요구하고 있다. 이에 따라 기업의 환경경영에 대한 논의는 실천단계에 접어들고 있으며, 우리 정부 역시 환경 친화적 산업구조 및 기술개발에 관한 법령을 제정·공포하여 이에 대한 많은 투자 및 과학 기술 평가방법의 개발에 관한 연구가 이루어지고 있고 이에 따라 기업체 역시 고효율 상품, 개선품, 대체 상품 등의 명목 하에 새로운 상품들이 개발되고 있다. 그러나 과학적 범주의 한계 및 적용상의 한계로 인해 경제 및 산업 활동과 그것의 근간이 되는 환경의 역할 및 부하 정도를 통합적으로 판단하기에는 미흡한 실정이다.

1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 지구정상회의에서 세계지속가능발전기업위원회(WBCSD, World Business Council for Sustainable Development)에서 제시한 생태효율성이 공식 채택된 이후로 제품의 가치와 제품을 생산하며 발생한 환경부하를 바탕으로 생태효율성을 산정하기 위한 다양한 평가법이 연구되었다.

국내에서도 생태효율성과 관련하여 정부 주도의 여러 가지 활동이 추진되어 생태효율성을 지속가능한 발전을 위한 핵심 지표로 만들기 위해 많은 노력을 기울인 결과 생태효율성에 대한 관심이 점점 증가하고 있다. 하지만 생산이나 정책결정을 위해 생태효율성 자료를 요구하는 제도가 구축되지 않아 생태효율성이 제한적으로 활용되고 있는 상태이다.

지금까지 개발된 생태효율성은 생태효율성의 정의에 따라 생산된 재화나 용역의 가치를 생산과정에서 발생한 환경부하량과 비교하는 방법으로 생태

효율성을 산정한다. 환경부하량은 다양한 방법으로 객관적이고 절대적인 평가가 가능 하지만 재화와 용역의 가치를 평가하는 과정에서 사용하는 화폐 경제적 가치를 척도로 생태효율성을 평가하는 방법은 수요와 공급에 따라 화폐 경제적 가치가 달라지는 경제적 특성 등에 의해 대상의 가치가 변동하기 때문에 절대적인 가치를 평가할 수 없고, 생산에 이용된 자연환경의 실질적인 가치역시 반영하지 못하는 한계성을 가지고 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 사용한 시스템 생태학은 자연환경과 경제 활동을 하나의 시스템으로 파악하는 시스템 접근법(System Approach)으로 많은 연구자들에 의해 활발히 연구되고 있는데, Odum은 1962년 이후 에너지 언어를 생태계 시스템의 분석, 합성 그리고 시뮬레이션에 이용하고 있으며, 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템에서 공통의 척도로 평가하는 Energy 개념을 이용하여 농업, 임업 그리고 수산업의 기여도, 국가의 자연환경과 경제활동에 대한 통합 평가, 국가 간 무역의 energy 손익평가에 대한 연구 결과를 발표하였다. 그 후로도 국내·외에서 다양한 생태경제학적인 평가방법에 관한 연구를 수행하였고 체운미와 이석모(2004)는 Energy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성지수를 개발하였다.

본 연구에서는 WBCSD의 생태효율성의 정의에 맞게 평가대상의 실질적인 생태효율성을 평가할 수 있도록 에머지 분석법을 이용하여 생태효율성지수(Eco-Efficiency Index, EEI)를 개발하였다. 또한 개발한 생태효율성 지수 산정식의 검증과 평가를 위해 개발된 생태효율성 지수를 다양한 연료를 사용하는 자동차, 발전 방식별 발전시설 그리고 UN국제표준산업분류표에 의거한 총 23개 제조업종에 대해 적용하여 각각의 생태효율성 산정 결과를 토대로 생태효율성 지수의 타당성을 검증하고 검증을 완료한 생태효율성 지수 산정식을 기존의 생태효율성 산정식과 비교하여 평가하였다.

## Ⅱ. 이론적 배경

### 1. 생태효율성

생태효율성(Eco-Efficiency)은 eco와 efficiency를 합성한 용어로 세계지속가능발전기업위원회(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)에 의해 제안된 개념으로 생태효율성에 대한 WBCSD의 정의는 다음과 같다. “Eco-efficiency is reached by the delivery of competitively priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life, while progressively reducing ecological impacts and resource intensity throughout the life cycle to a level at least in line with the earth’s estimated carrying capacity.” 즉, 지구의 환경용량 내에서 환경영향 및 자원소모의 크기를 저감함과 동시에 사람의 필요를 만족시키고 삶의 수준을 제고시키는 경쟁력 있는 제품에 의해 달성되는 지표이다. 생태효율성의 개념이 1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 지구정상회의에서 공식적으로 채택된 이후로 제품의 가치와 제품을 생산하며 발생한 환경부하를 바탕으로 생태효율성을 산정하기 위한 다양한 평가법이 연구되었으며 국내에서는 2005년도 서울에서 개최된 제5차 아시아·태평양 환경개발회의(Ministerial Conference on Environment and Development, MCED)에서 처음으로 생태효율성을 국가경제 전체에 적용하는 개념으로 확대한 녹색성장이 채택됨으로써 동일한 개념이 경제 성장과 지속가능성을 양립하기 위한 새로운 개념으로 보다 일반화 되는 계기가 되었다. 하지만 생산이나 정책결정을 위해 생태효율성 자료를 요구하는 제도가 구축되지 않아 생태효율성이 제한적으로 활용되고 있는 상태이다.

WBCSD의 정의에 따르면 생태 효율성이란 우리의 경제 활동, 즉 성장을 추구하는데 있어 물, 가용 토지, 에너지 등 생태 자원을 가장 적게, 효율적으로 사용하여 가장 큰, 경제적 성과를 창출하고, 그 과정에서 발생하는 오염 물질의 발생을 최소화하는 것이다.

생태효율성에 대한 개념은 국가, 기업 및 제품 레벨에 따라 각기 다른 의미를 갖는데, 생태효율성을 높이기 위해서는 환경영향을 줄임과 동시에 국가레벨에서는 국내총생산(GDP)을 증가시켜야 하며, 기업레벨에서는 매출액 또는 영업이익 등 기업이 사회에 제공하는 총 가치를 증대시켜야 하고, 제품레벨에서는 품질, 성능 등의 제품 가치를 올려야 한다. 일본에서는 전기전자 기업들이 에코효율성 개발을 주도하고 있는데, 파나소닉, 미쯔비시, 후지쯔, 히타찌, 도시바의 경우 제품레벨 생태효율성 평가를 적극적으로 수용해 왔고 몇몇 기업은 자발적으로 생태효율성을 이용한 라벨링 제도를 개발하기도 하는 등 많은 일본 기업들이 생태효율성 평가를 위해 자체적인 프로세스를 개발하고, 생태효율성의 성과를 개선하기 위하여 그 평가 결과를 정기적으로 공유하기도 하는 등 생태효율성에 대한 제도가 활발히 진행되고 있다(박지혜 등, 2006).

### 가. 생태효율성 산정식

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{Value of a product (Y)}}{\text{Environmental impact of a product (X)}}$$

생태효율성은 위 식과 같이 평가대상의 가치(Y)에 비례하고 평가대상의 생산과정에서 발생한 환경부하(X)에 반비례한다. 즉, 생태효율성 향상은 산출변수인 가치의 최대화(more is better) 또는 투입변수인 환경부하를 최소화(less is better)하거나, 이들 두 가지를 모두 달성함으로써 이를 수 있으며 각각의 변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Evaluation Factors of Eco-Efficiency (Kim et al., 2010)

Elements Type	
Product Index (Y)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selling Price</li> <li>• Output</li> <li>• Productivity</li> <li>• Yearly Output</li> </ul>
Input Index (X)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unit element (energy, Resources, Water, Land, Waste, etc.)</li> <li>• General elements (Comprehensive Environmental Impact)</li> </ul>

일반적으로 기업레벨 생태효율성 평가는 각 환경영향에 대해서 이루어진다. 생태효율성을 정의하는 항목들을 살펴보면, 대부분의 경우 경제적 가치를 표현하기 위한 지표로 부가가치 대신 매출액 또는 영업이익 등 기업이 사회에 제공하는 총 가치를 사용하고 있고, 환경영향으로는 화학물질 사용량, 온실가스 배출량, 폐기물 배출량을 주로 고려하고 있다. 기업들은 생태효율성 평가 시 대기오염이나 수질오염은 거의 고려하지 않는데 이는 많은 기업들이 경제 성과와 연계된 환경 영향을 평가 변수로 정하기 때문이다. 생태효율성 평가는 대체로 생산단계에 제한되어 이루어지는데 에너지 소비량의 경우 평가 영역이 확장되고 있다. 기업의 생태효율성 평가 결과는 제품 개발을 위한 내부 벤치마킹 목적으로 공유되며 몇몇 적극적인 기업들은 제품의 생태효율성 평가 결과를 기업 웹사이트뿐만 아니라 환경 보고서나 지속가능 보고서, 환경전시회 등에 공개하기도 한다(박지혜 등, 2006).

이와 같이 기존의 생태효율성 평가 기법은 평가 대상의 금전적 가치와 환경부하량을 사용하여 생태효율성을 평가하는데 대상의 가치를 화폐 경제적 척도를 바탕으로 산정하게 되면 수요와 공급의 변화에 따라 가격이 변하는 경제적 원리의 특성상 절대적이고 실질적인 가치의 평가가 어렵다는 한계점을 가지고 있다.

## 나. 생태효율성 달성 조건

세계지속가능발전기업위원회(WBCSD)는 생태효율성 향상을 위한 조건으로서 물질사용량 저감, 에너지 사용량 저감, 재생가능한 자원의 사용 극대화, 오염물질 배출 저감, 노동력 의존도 증가, 재활용 가능성 증가, 내구성 향상 등 Table 2 와 같이 7가지 방안을 제시하고 있다.

생태효율성을 달성하기 위해서는, 첫째, 생산되는 재화와 용역의 물질 의존도를 줄여야 한다. 원재료 사용량을 줄이면서도 동등한 제품을 만들거나, 같은 양의 원재료를 사용하면서 더 가치가 높은 제품을 생산할 경우 생태효율성은 높아진다. 둘째, 생산되는 재화와 용역의 에너지 의존도를 줄여야 한다. 생산물의 제조 공정의 효율화를 통해 동급의 제품을 생산하면서도 적은 양의 에너지가 투입되면 생태효율성은 높아진다. 셋째, 재생가능한 자원의 사용을 최대화 한다. 재생 가능한 자원 사용량의 증가는 화석연료 사용량의 감소로 나타난다. 오염물질을 배출하는 화석연료 대신 재생 가능한 자연자원을 최대한 이용하면 생태효율성은 높아진다. 넷째, 재화와 용역의 생산으로 인한 오염물질 배출을 줄인다. 제품을 생산하는 과정에서 배출 될 수 있는 오염물질을 줄이는 것은 가장 적극적으로 환경부하를 줄이는 방법이다. 다섯째, 재화와 용역의 노동력 의존도를 증가한다. 많은 에너지를 소모하는 기계화 작업 대신 노동집약적 생산을 하거나 연구를 통한 기술발달로 공정에 투입되는 에너지 소모량이 줄어들게 되면 생태효율성이 높아진다. 여섯째, 재활용 가능성을 증대한다. 제품의 디자인 단계에서부터 사용된 제품의 재활용까지 고려해서 자원의 낭비를 막게 되면 생태효율성이 높아진다. 일곱째, 제품의 내구성을 향상한다. 내구성이 향상하게 되면 동일한 목적을 위해 사용하게 되는 제품의 수가 줄어들어 제품의 생산에서 발생하는 모든 환경부하를 줄일 수 있어 생태효율성이 높아지게 된다.

**Table 2. Elements for eco-efficiency(WBCSD, 2000)**

---

Reducing material requirements for goods and services

Reducing energy intensity of goods and services

Maximizing the sustainable use of renewable resources

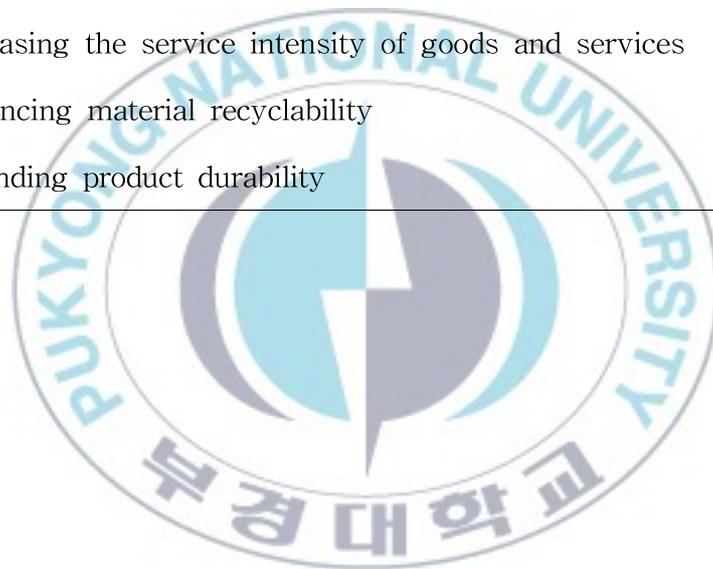
Reducing toxic dispersion

Increasing the service intensity of goods and services

Enhancing material recyclability

Extending product durability

---



## 다. 그 외 환경경영기법

### (1) 전 과정평가(Life Cycle Assesment : LCA)

LCA 방법론은 ISO 14040에서 ‘제품의 원료채취, 제조, 사용, 수송, 폐기처리 등 전 과정에 걸쳐 소모되고 배출되는 물질과 에너지의 양을 정량화하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 평가함으로써 환경마케팅, 제품 개발 등에 활용하고자 하는 국제적인 기법’이라 정의하고 있다.

전 과정평가는 원료획득에서부터 제조, 사용 및 처리에 이르기까지 제품의 전 과정(cradle-to-grave)에 관련된 환경측면 및 잠재적인 환경영향을 제품이나 시스템과 관련된 투입물과 산출물의 목록화 및 영향평가, 그 결과의 해석 등을 통하여 파악하는 것으로 일본산업환경관리협회(Japan Environmental Management Association for Industry, JEMAI)에서는 Fig. 1과 같이 어떤 제품이나 공정, 활동의 전 과정에 걸쳐 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화하여, 이를 분류화, 특성화, 정규화 과정을 통해 하나의 통합화지표로 만들어 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통하여 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적인 환경영향평가기법으로 표현하고 있다.

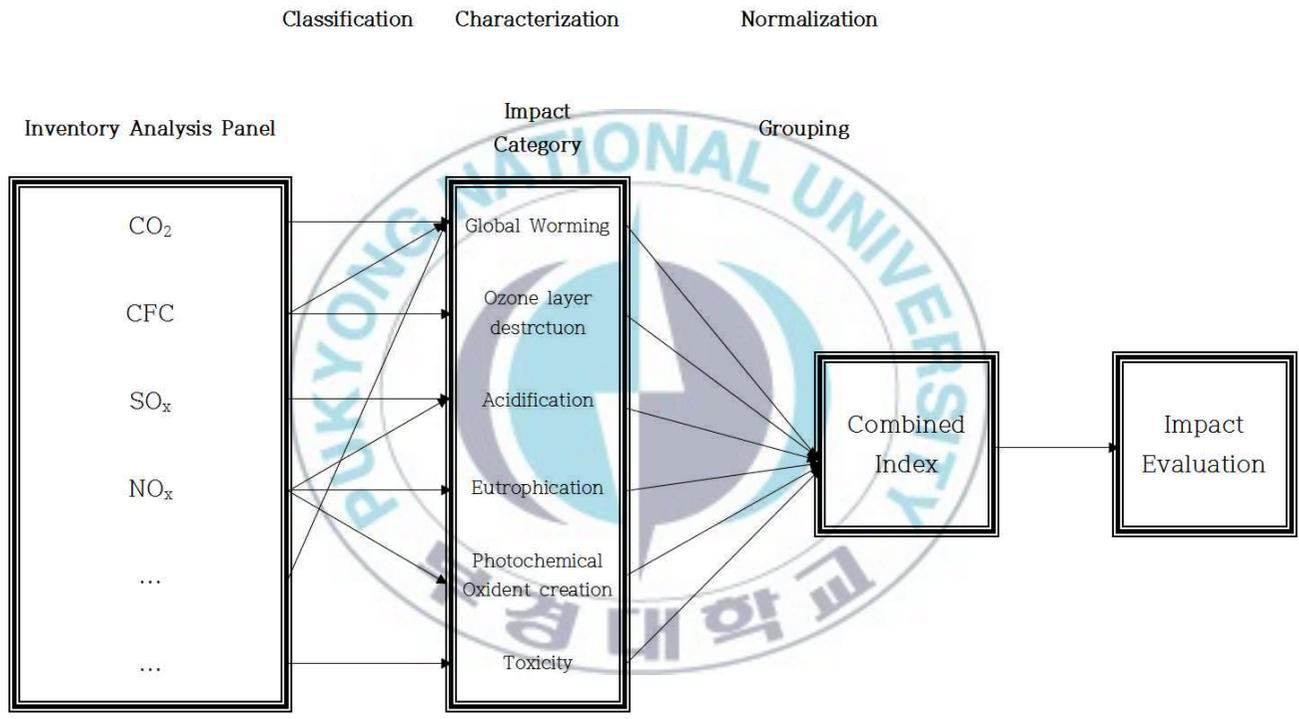


Fig. 1. Diagram of the concept of impact evaluation (JEMAI, 2004).

## (2) DfE(Design for Environment)

DfE는 미국, 일본 등 선진국에서는 개별기업 차원에서 이미 활발히 개발·적용되고 있는 선진 환경경영기법으로 제품에 대한 전과정영향평가(LCA)와 총비용분석을 기초로 분해를 고려한 설계(Design for Disassembly; DfD)와 재활용을 고려한 설계(Design for recycling; DfR), 회수 및 재사용을 고려한 설계(Design sign for recovery and reuse; DfR)등을 주된 내용으로 하는 선진 제품설계 기법이다.

DfE는 환경적으로 차별화 된 제품을 원하는 녹색소비자들의 욕구를 만족시키기 위해 제품개발초기단계에서부터 환경을 고려하여 제품을 설계하는 기법으로 제품 및 공정의 전과정에 걸쳐 환경, 안전, 보건측면에서 디자인성과를 체계적으로 고려하도록 하는 프로세스이며. 보다 구체적으로는 작업환경과 안전, 소비자의 보건과 안전, 자원소비, 오염예방, 폐기물최소화, 분리/해체, 재활용, 재사용 등을 고려하여 제품개발을 하는 것이다.

## (3) 물질흐름원가회계 (Material Flow Cost Accounting : MFCA)

물질흐름원가회계는 환경관리회계 기법 중 하나로 독일의 환경경영연구소(IMU)에서 그 원형이 개발되었다. MFCA에서는 원재료와 자재 등과 같은 재료(Material)의 흐름(Flow)과 재고(Stock)를 물량과 금액(Cost)의 양 측면에서 측정한다. 생산 공정 또는 제품 전 과정의 각 단계에 투입된 물질과 그로부터 산출된 제품 및 손실에 대한 원가를 파악하여 원가절감과 동시에 자원의 손실을 최소화하기 위한 관리기법이다.

## 2. 에머지 평가법

### 가. 에너지시스템언어

에너지시스템언어는 H.T. Odum에 의해 제안된 것으로 대상 시스템에 대한 다양한 요소들과 여러 가지 관계를 특정 기호를 통하여 설명하고 종합적으로 그 시스템을 파악할 수 있도록 해준다. Fig. 2와 같이 기본적으로 사용되는 기호들은 에너지 흐름, 에너지원, 저장고, 열손실, 상호작용, 생산자, 소비자, 스위치, 상자, 거래 등으로 나뉜다. 에너지시스템언어는 이 기호를 통해 시스템을 설명할 때 각 기호들이 에너지 법칙들을 충분히 대변할 수 있고 에너지의 흐름이나 상태를 적절히 표현할 수 있다. 또한 이 기호들 사이에는 수학적 관계가 내포되어 있기 때문에 에너지 모델링을 통하여 그 변화를 예측하는데 쉽게 사용될 수 있다(Odum, 1996).

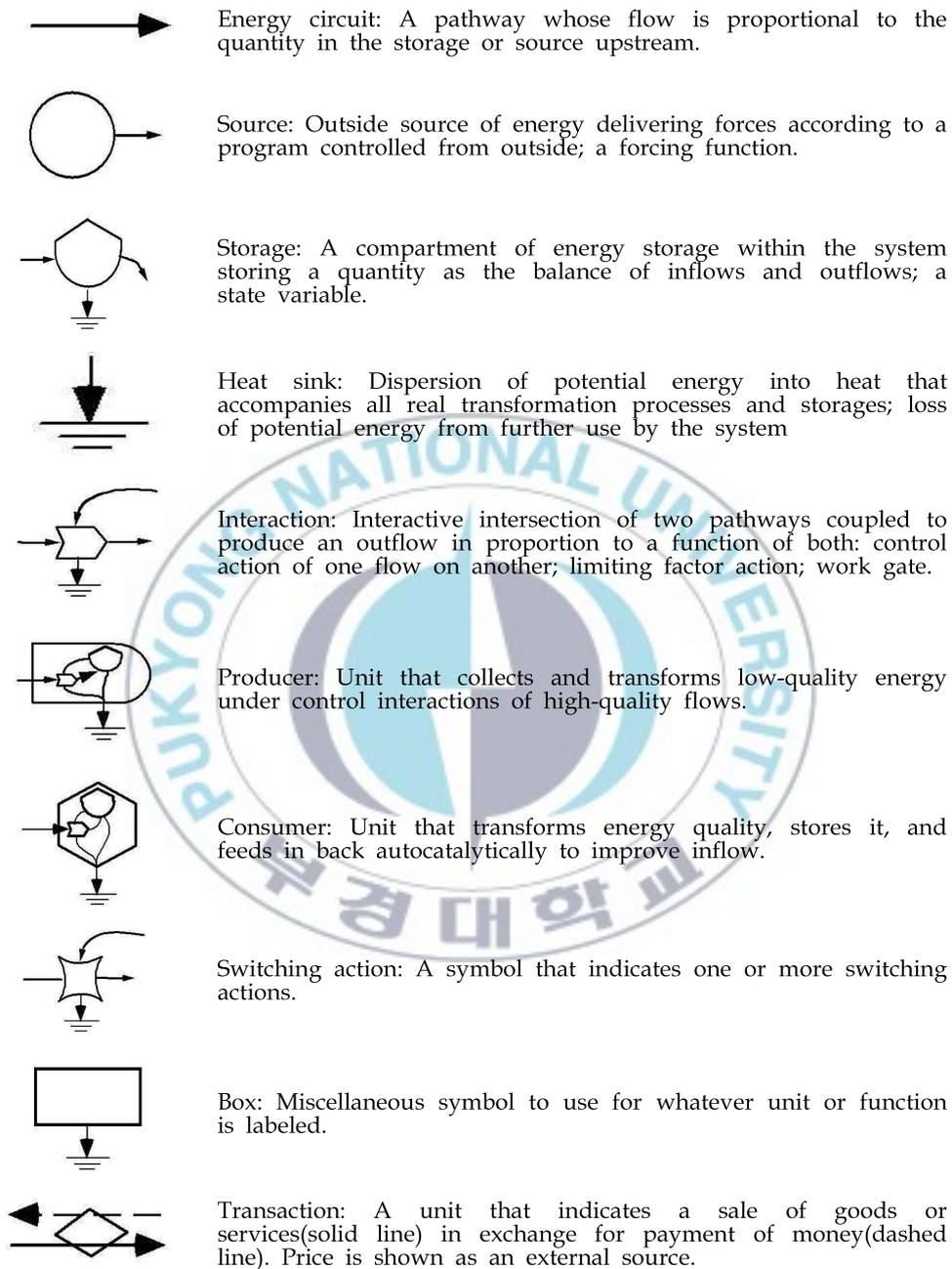


Fig. 2. Symbols of energy systems language (Odum, 1983).

## 나. 시스템생태학

시스템 생태학에서는 자연환경과 경제활동을 포괄하는 척도인 에너지를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동을 동일한 가치 단위로 평가하는 접근방법을 적용한다.

그러므로 시스템 생태학은 자연환경과 경제활동이 상호 작용하는 농업, 공업, 그리고 도시 등의 다양한 시스템에 대해 모든 학문분야의 기술과 방법을 연계시킬 수 있는 에너지를 기초로 자료를 수집, 분석, 예측하여 시스템을 종합적으로 평가하고 있다. 또한 시스템 내에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변환과정을 시스템 언어로 분석하여 인간 활동과 자연 활동의 유기적 관계와 상호 작용을 정량적으로 보여주어 생태계를 보는 새로운 안목을 가질 수 있게 해주며, 시스템 분석을 통한 에머지분석으로 생태계의 실질적인 부(real wealth)의 평가와 공공의 이익을 위한 정책을 선택하는데 충분한 과학적 근거를 제공한다(Fig. 3).

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

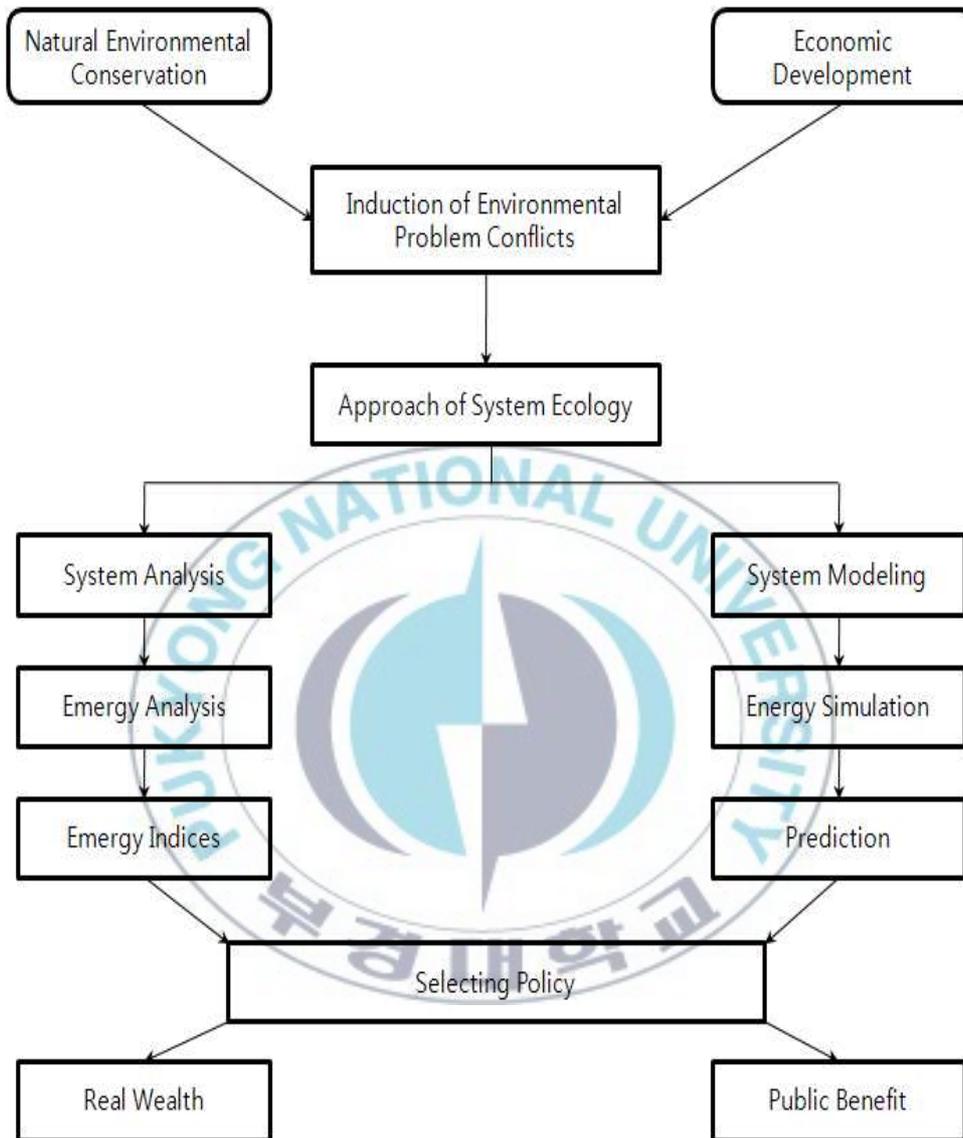


Fig. 3. The methodological roots of systems ecology(Odum, 1983).

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

Fig. 4와 같이 태양에서 유입되는 40,000 J의 태양에너지량을 이용하여 2 J의 에너지를 가진 나무를 자라게 하고 이 나무가 오랜 시간 지질학적 작용에 의해 석탄이 되면 이 석탄의 에너지량은 1 J이 된다. 마지막으로 이 석탄을 통해 전기를 생산하게 되면 그 전기는 0.25 J의 에너지량을 가지고 있게 된다. 따라서 우리가 흔히 사용하는 전기 에너지의 가치는 단순히 발전소에서 전기가 만들어져 사용하는 실제 에너지량뿐만 아니라 태양에서부터 나무, 지질작용, 석탄, 발전소를 거치면서 각 단계별로 사라졌던 모든 에너지가 포함되어야 한다는 것이다.

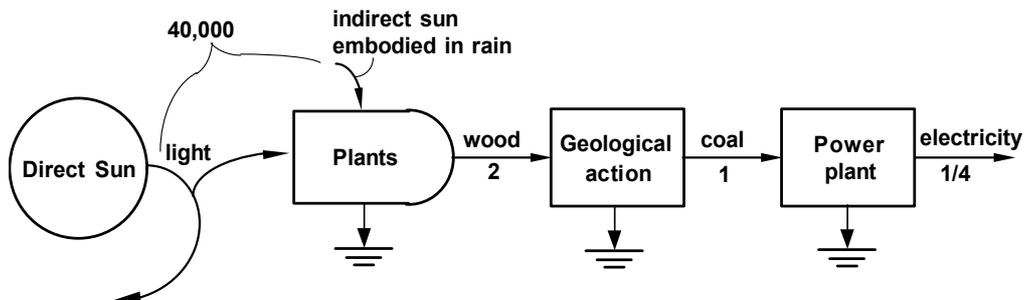


Fig. 4. Energy quality chain used to calculate solar transformity (Odum, 1988).

에너지의 흐름은 에너지 변환, 퇴적, 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. 5).

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

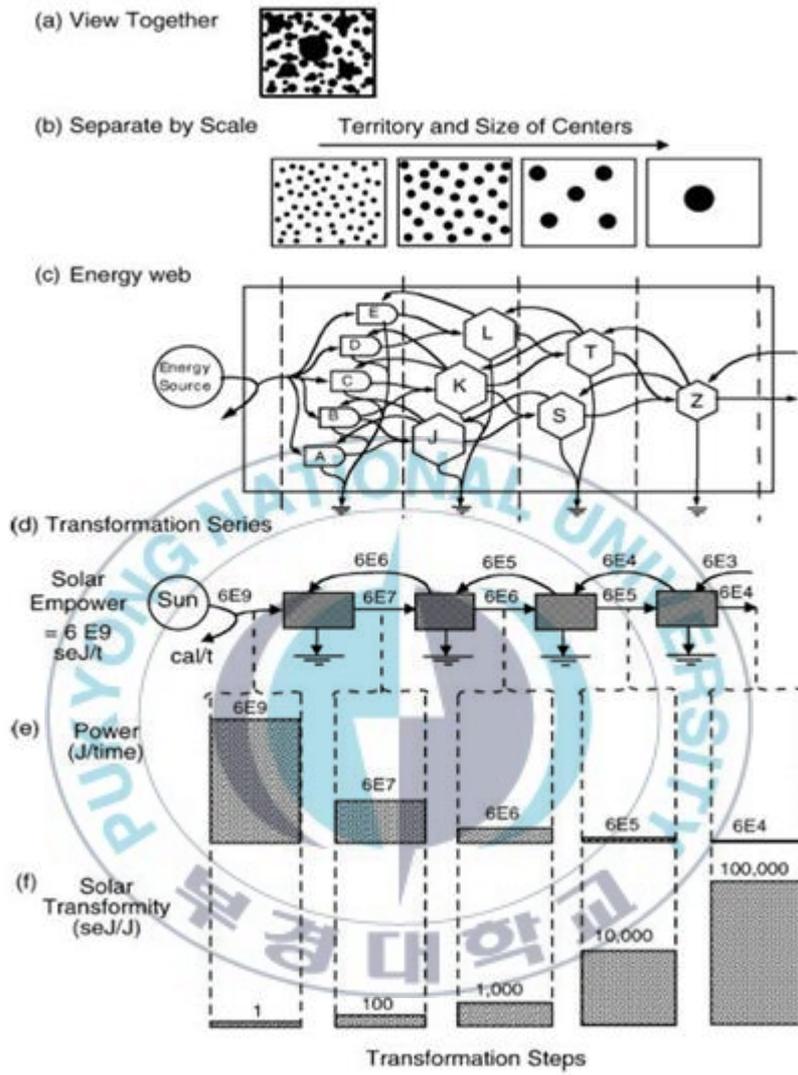
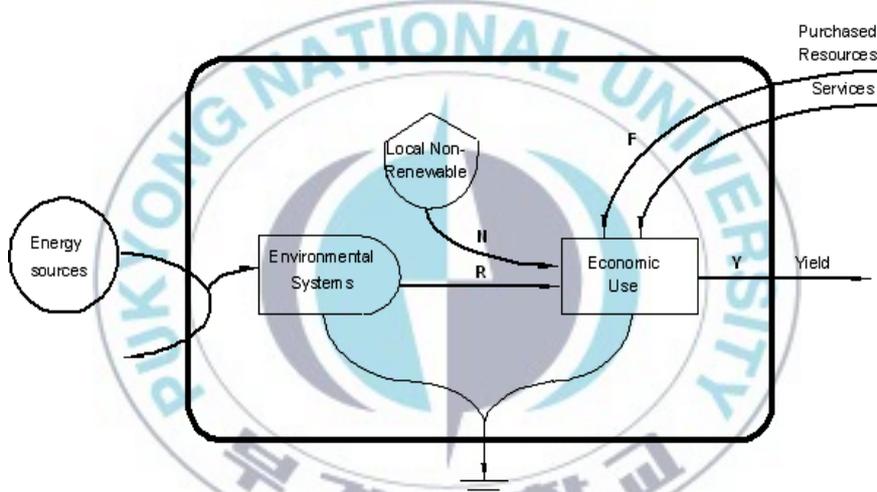


Fig. 5. Concepts of energy transformation hierarchy and transformity, (a) All units view together; (b) Units separated by scale; (c) Units as a web of energy flows; (d) Processes shown as an ordered series; (e) Flows of energy per unit time; (f) Transformities (Brown et al., 2004).

## 라. 에머지 지수

에머지분석에서 구한 에머지 값을 기초로 분석대상 시스템을 비교하고, 그 특성을 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 에머지 지수들을 계산한다.

시스템에 유입되는 에머지를 지구 활동에 의한 환경 에너지원의 에머지 (R)와 시스템 내부의 보유에너지원의 에머지(N), 그리고 시스템 경계 밖에서 부터 유입되는 화석연료, 전기, 그리고 각종 재화와 용역의 구매 에머지(F)로 구분하여 에머지 지수들을 계산한다.



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

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

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

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

$$\text{Emergy Sustainability Index(EmSI)} = \text{EYR}/\text{ELR} \dots\dots(5)$$

Fig. 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.)

대상 시스템에 유입되는 에너지원의 전체 energy 양은 재생가능한 자원 (R), 내부보유자원(N) 그리고 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원(F)의 energy 합(Yield = R + N + F)으로 계산되고, 이중 재생가능한 자원이 차지하는 energy 비율을 계산하여 아래 식과 같이 영속성 에너지원의 점유율로 나타낸다.

$$\%Renew. = \frac{R}{Y} = \frac{R}{R+N+F}$$

### (2) Energy 생산비(Energy Yield Ratio : EYR)

Energy 생산비는 시스템으로부터 생산된 생산물이 가지는 전체 energy 양(Y)에 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원의 energy 양 (F)으로 나누어 계산하여 아래 식과 같이 나타낸다. Energy 생산비는, 생산물(product)이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는데 이용한다.

$$EYR = \frac{Y}{F}$$

### (3) 환경부하율(Environmental Loading Ratio : ELR)

자연환경 활동에서 기인한 환경자원에 대한 내부보유자원과 구매자원의 유입비율을 의미하는 환경 부하율은 내부보유자원과 구매자원의 emergy 이용량(F+N)에 대해 환경자원의 emergy 이용량(R)으로 나누어 계산하여 아래 식과 같이 나타낸다. 환경 부하율 시스템의 생산과정 중, 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 지표이다.

$$ELR = \frac{N+F}{R}$$

### (4) Emergy 지속성 지수(Emergy Sustainability Index : EmSI)

Emergy 지속성 지수는 emergy 생산비(EYR)와 환경부하율(ELR)의 비로 소 아래의 식과 같이 계산된다. 지수의 값이 1보다 작으면 지속성이 적은 시스템이고, 10보다 클 경우에는 지속성이 높은 시스템이며, 1에서 10사이의 경우에는 지속성이 중간정도인 시스템을 반영한다.

$$EmSI = \frac{EYR}{ELR}$$

### 3. 연구사례

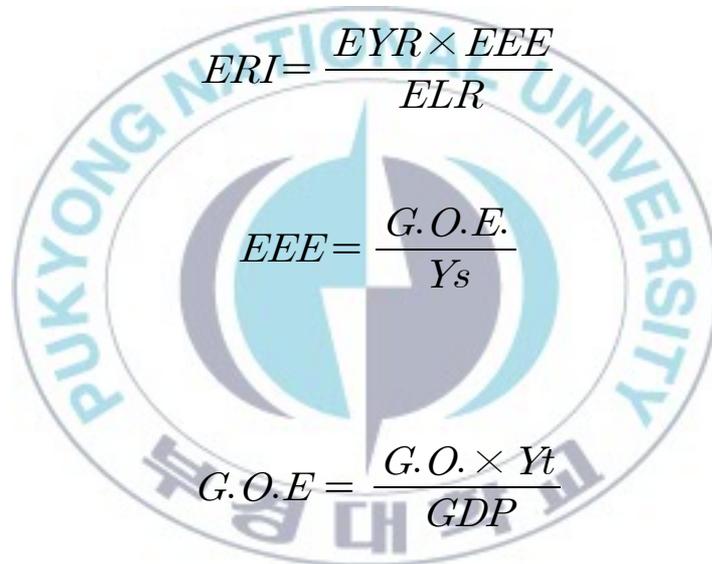
#### 가. 생태효율성 연구 사례

국내·외에서는 생태효율성에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다, 세계 지속가능발전기업위원회(WBCSD)의 생태효율성 정의에 따라 국내에서는 정인태 등(2005)이 가전제품 폐기단계의 생태효율성을 평가하였고 박지혜 등(2006)은 국내 전기전자 산업의 에코효율성을 측정 하였으며 최요한 등(2006)는 전동차의 생태효율성에 대해 연구하였고 김순구 등(2008)에 의해 하수처리시설, 홍성준 등(2009)에 의해 자동차, 심홍섭(2010)에 의해 화력발전산업에 대한 생태효율성 평가 등 다양한 연구가 이루어 졌다. 국외에서는 Zhang 등(2008)에 의해 중국 산업에 대한 생태효율성 평가, Aoe (2006)에 의해 전기·전자 제품의 생태효율성을 평가하는 등 다양한 연구가 이루어 졌다.

이들 평가는 세계지속가능발전기업위원회(WBCSD)의 생태효율성 정의에 따라 평가대상의 가치와 환경부하의 비를 이용하여 대상의 생태효율성을 평가하였으며, 평가 대상의 가치를 판단하는 단계에서 평가 대상의 가격이나, 그 평가 대상이 창출 해 낼 수 있는 금전적 수익을 가치의 기준으로 삼고 있다. 이는 수요와 공급에 따라 수시로 가격이 변동하는 경제적 원리에 의해 평가 대상의 가치 또한 변동하게 되기 때문에 절대적이고 실질적인 생태효율성을 평가하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

## 나. Emergy 분석법에 의한 환경친화성지수 개발

제윤미 등(2004)은 emergy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성지수 (Environmental Responsibility Index, ERI)를 개발했다. 환경친화성지수는 아래와 같이 생산성(EYR)에 비례하고, 환경부하율(ELR)에 반비례하며, 시장 경제적 이윤을 emergy 개념으로 표현한 생태경제성(Ecological Economic Efficiency, EEE)에 비례하는 함수로 정의되었다.


$$ERI = \frac{EYR \times EEE}{ELR}$$
$$EEE = \frac{G.O.E.}{Y_s}$$
$$G.O.E = \frac{G.O. \times Y_t}{GDP}$$

제안된 ERI를 제조업 및 중분류에 의한 제조업종 별로 적용해 본 결과, 0.01~0.34의 범위에서 평균 0.07로 평가되었으며, 그 중에서도 원료를 재생시켜 재활용하도록 하는 재생용 가공원료 생산업이 0.34로 환경친화성이 가장 높게 나타났다. 반면, 환경에 부하를 가장 많이 주고, 서비스가 가장 많은 부분을 차지하고 있어 현재 우리나라 제조업의 공동화 현상을 일으키는 컴퓨터 및 사무용 기기 제조업이 환경친화성이 가장 낮은 업종으로 평가되었다. 또한, 타 산업(농업, 임업, 수산업)에 비해 자연환경자원에 대한 의존율이 지

극히 낮아, emergy 생산성이 적고 환경 부하율이 높아 환경친화성 지수가 1/6,000이상 낮게 평가되었다.

이 방법 역시 생태경제성(EEE) 지수를 산정하는 과정에서 시스템에 의해 생산된 생산액(Gross Output, G.O.)과 총 생산 emergy를 GDP로 나눈 Emwon ratio를 사용하는 과정에서 화폐경제적인 척도가 사용되어 절대적이고 실질적인 평가를 할 수 없는 한계를 가지고 있다.



## 다. Emergy 분석법을 이용한 생태효율성 연구사례

Dezhi Li 등(2011)은 emergy 분석법에 기반을 둔 생태효율성 평가법으로 상해와 북경에 위치한 6개의 건물을 대상으로 생태효율성을 평가하였다. 이 연구에서는 아래 식과 같이 실질적인 가치를 평가하기 위해 건물의 면적을 건물의 가치로 정하고 건축 과정에서 사용된 재화, 용역 그리고 토지에 대한 emergy 분석 결과와 건축 과정에서 발생하는 폐기물의 emergy 분석 결과의 합을 환경부하로 설정하였다.

$$EEb = \frac{Sb}{Eb}$$

$$Eb = Em + El + Ew$$

즉, 건물의 생태효율성은 건물의 면적에 비례하고 건물을 만들기 위해서 사용되는 물질, 토지 그리고 발생하는 폐기물에 반비례 한다.

이 연구에서는 Fig. 7과 같이 넓은 면적을 만들어 낼 수 있는 고층 건물의 생태효율성이 높게 나타났지만, 건물을 고층으로 만들어 면적을 확보하는 방법 보다는 기술력의 향상을 통해 건설 단계에 사용되는 자재의 사용량을 줄이고, 지역의 원자재 사용으로 각 자재별 에너지 변환도를 줄이는 방법으로 단위 면적당 투입되는 자재의 emergy 양을 줄여 생태효율성을 향상 시키는 방법을 제시하고 있다. 하지만 건물의 가치를 평가하는 단계에서 면적만을 고려했기 때문에 건물의 내구성이나 용도 등 다른 가치를 반영하지 못했으며 건물의 emergy를 고려하는 과정에서는 물질, 면적, 폐기물만을 고려했기 때문에 자연자원에 대한 의존도나 노동력에 대한 의존도 등을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다.

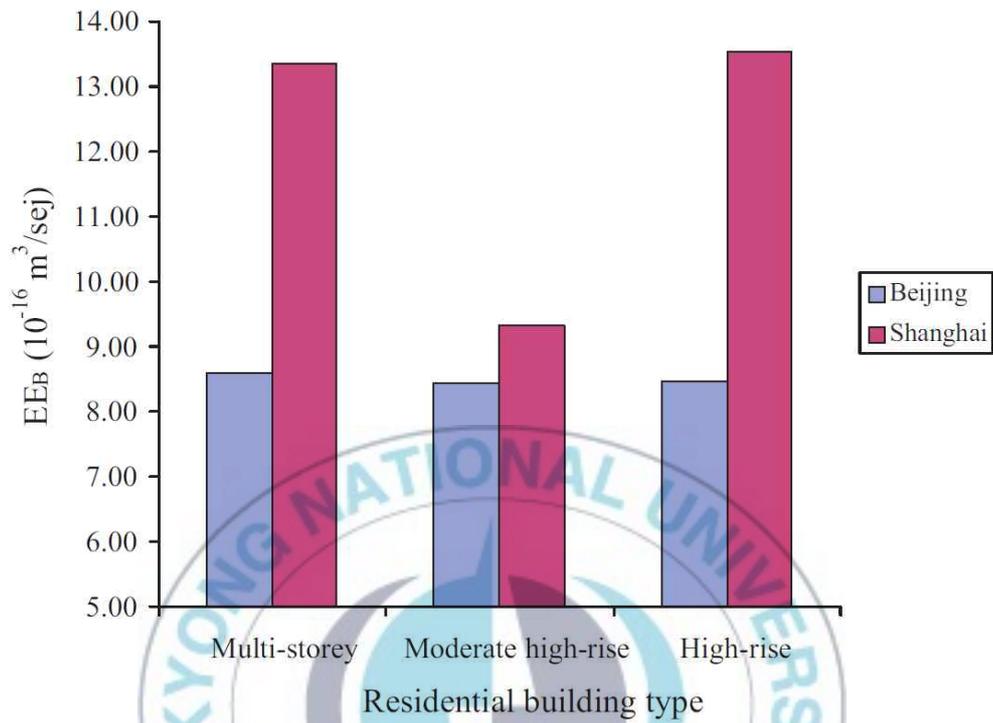


Fig. 7. Eco-Efficiency Value of each Residential building type  
(Li et al., 2011).

### Ⅲ 연구방법

기존의 생태효율성 평가법에 대한 연구는 생산된 재화나 용역의 화폐 경제적 가치를 척도로 생태효율성을 평가하기 때문에 생산에 이용된 자연환경의 실질적인 가치를 반영하지 못하는 한계성을 가지고 있다.

본 연구에서는 이 한계를 극복하기 위하여 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템에서 공통의 척도로 평가하는 emergy 개념을 이용하여 실질적인 생태효율성을 평가할 수 있는 방법을 개발한다.

#### 1. Emergy를 이용한 생태효율성 지수 개발

실질적인 가치를 고려하는 생태효율성 평가법을 개발하기 위해 WBCSD에서 제안한 생태효율성을 증가시키기 위한 7가지 조건을 emergy 분석법으로 재해석하여 자원이용의 효율, 노동집약도, 재활용율, 내구성 등을 반영하는 새로운 지표를 개발하고 이를 바탕으로 생태효율성 평가지수를 개발한다.

#### 2. 생태효율성 지수 적용 및 평가

본 연구에서는 개발된 생태효율성 평가법지수를 검증하기 위해 기존 emergy 분석 결과를 바탕으로 생태효율성을 산정한다. 연료종류에 따른 승용차의 생태효율성 평가, 발전시설 종류에 따른 생태효율성 평가 그리고 제조업 분류에 따른 생태효율성 평가를 실시하고 기존의 생태효율성 지수와 비교한다.

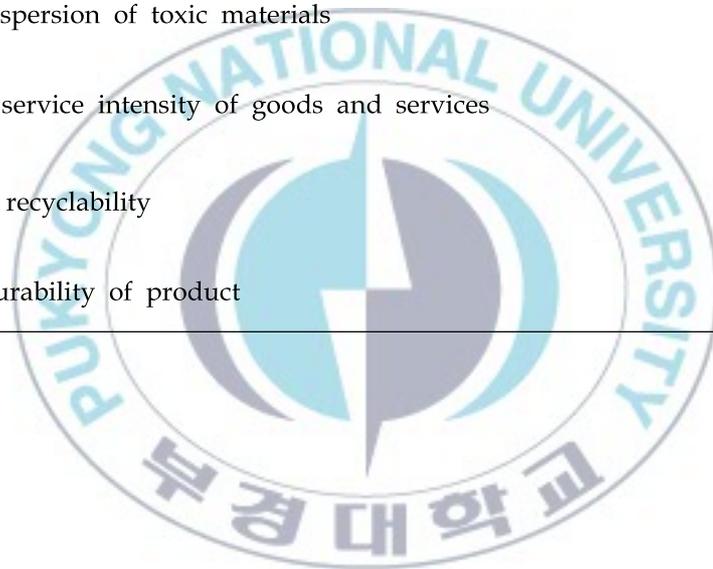
## IV. 결과 및 고찰

### 1. 에머지를 이용한 생태효율성 지수 개발

생태효율성을 증가시키기 위한 7가지 조건을 emergy 분석법으로 표현하면 Table. 3과 같이 “첫째, 생산되는 재화와 용역의 자원의존도를 줄인다. 둘째, 생산되는 재화와 용역의 에너지 의존도를 줄인다. 셋째, 재생가능한 자원의 사용을 최대화 한다. 넷째, 재화와 용역의 생산으로 인한 오염물질 배출을 줄인다.”는 생태효율성의 “Making more with less”의 개념에 맞게 생산물(Y)과 투입된 자원(N+F)의 비로 표현할 수 있다. 이중 구매자원(F)의 경우 재화(G)와 용역(S)으로 나누어지는데 “다섯째, 재화와 용역의 노동력 의존도를 증가한다.”의 항목은 구매자원(F)중 재화와 용역이 차지하는 비율을 이용해서 표현한다. 재화는 또한 신자재(Gf)와 재활용자재(Gr)로 나누어진다. “여섯째, 재활용 가능성을 증가한다.”의 항목은 재화(G)중 신자재와 재활용자재가 차지하는 비율을 이용해서 표현한다. 그리고 “일곱째, 제품의 내구성을 늘린다.”는 내구성 지표(Durability, DUR)를 이용해서 표현할 수 있다.

Table 3. Comparison of eco-efficiency conditions with Energy Indices

Eco-Efficiency Condition	Index
A reduction in the material intensity of goods or services	
A reduction in the energy intensity of goods or services	$\frac{Y}{N+F}$
Maximize of renewable resources	
Reduce dispersion of toxic materials	
Increased service intensity of goods and services	$\frac{G}{F}$
Improved recyclability	$\frac{Gf}{G}$
Greater durability of product	DUR



### 가. 자원 효율 지표( $Y/(N+F)$ )

생태효율성의 기본 개념인 “Making more with less”에 맞게 더 높은 가치의 생산물을 만들기 위해 필요한 자원의 투입량과 오염물질 발생량을 줄이면 생태효율성은 높아진다. 따라서 자원 효율 지표는 투입된 자원에 대한 생산물의 비( $Y/(N+F)$ )로 표현되며 이것은 생태효율성 평가의 기본식이 된다. 재화와 용역을 생산하는데 사용되는 요소는 재생가능자원(R), 시스템 내부의 재생불가능자원(N) 그리고 구매자원(F)으로 구성되어 있다. 이것을 이용해 생태효율성의 7가지 조건 중 물질사용 최소, 에너지 사용최소, 재생가능자원 사용의 최대, 오염물질 배출 최소 항목을 표현할 수 있다. 생산과정에서 내부 재생불가능한 자원과 구매자원의 사용량이 줄어들게 되면 물질사용 최소, 에너지 사용 최소의 항목을 만족하기 때문에 자원 효율 지표가 증가하며, 에머지 지수 중 환경부하율(ELR)에 따라 오염물질 배출량 역시 물질사용량과 함께 감소한다. 재생가능자원의 사용이 늘어나게 되면 화석연료등의 에너지 사용 없이 생산물(Y)이 증가하기 때문에 생태효율성이 증가한다( $Y = N + F + R$ ).

$$EEIa = \frac{Y}{N + F}$$

생산물의 에머지(Y)는 투입된 자연환경으로부터의 재생가능자원(R), 시스템 내부에 저장되어있는 재생 불가능한 자원(N), 그리고 시스템 외부로부터 구입 해 오는 구매자원의 합( $Y = R + N + F$ )으로 표현 된다. 따라서 위의 식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$EEI_a = \frac{Y}{N+F} = 1 + \frac{R}{N+F}$$

이 식은 재생가능한자원(R)에 대한 의존도가 자원효율지표에 영향을 주는 것을 볼 수 있으며, 이는 생태효율성을 증진시키기 위한 7가지 조건 중 재생가능한 자원에 대한 의존도를 상승하라는 조건을 표현한다. 또한 시스템 내부의 재생불가능자원(N)과 구매자원의 사용량은 생태효율성에 반비례하는 것을 볼 수 있다. 이는 물질사용 최소, 에너지사용 최소를 보여주며 물질과 에너지 사용으로 인해 발생하는 오염물질량 최소까지 표현한다.



## 나. 노동 집약도 비율

생태효율성 기본 식 중에서 시스템 외부로부터 구입 해 오는 구매자원(F)은 재화와 용역(Goods and Services)으로 이루어진다. 외부 구매자원(F) 중 재화(G)가 차지하는 비율이 많아질수록 용역(S)이 차지하는 비율은 줄어들게 되고 생태효율성의 정의에 따라 용역의 비율이 줄어들게 되면 생태효율성도 낮아지게 된다. 반면 노동 집약도가 늘어난다면, 즉 화석연료를 에너지원으로 사용하는 생산 장비 대신 인력을 사용하거나, 연구 인력의 투입으로 기술이 발달하여 화석연료의 사용이 줄어들게 된다면 생태효율성은 높아진다.

따라서 외부 구매자원(F) 중 재화(G)와 용역(S)의 비율을 고려할 필요가 있다.

$$EEIb = \frac{Y}{N + F \times \left(\frac{G}{F}\right)}$$

외부 구매자원(F)중 재화(G)의 비율이 높으면  $F * G / F$ 의 값이 커져 전체 생태효율성이 낮아지게 되고 반대로 용역(S)의 비율이 높으면  $F * G / F$ 의 값이 작아져 전체 생태효율성이 높아지게 된다.

#### 다. 재활용률

재활용(G)은 재활용( $G_R$ ) 자재와 신자재( $G_F$ )로 나눌 수 있으며 이들의 비를 사용하여 재활용률에 대한 평가를 할 수 있다. 국내 자동차 제조사에서는 Design for Recycle 이라는 개념을 도입하여 기획단계 부터 양산단계까지 차량 개발 전 단계에 걸쳐 재활용이 용이한 차량개발에 노력하고 있다(현대자동차, 2010). 이러한 노력으로 생산단계에서 사용되는 자재 중 재활용 자재의 사용이 늘어나면 재활용률이 높아지고 반대로 재활용 자재의 사용이 줄어들어 신재료의 사용이 늘어나게 되면 재활용률이 감소된다. 이를 앞에서 만들어진 식에 포함하면 아래와 같다.

$$EEI_c = \frac{Y}{N + F \times \left\{ \frac{G \times \left( \frac{G_f}{G} \right)}{S} \right\}}$$

재활용(G)중 신자재( $G_F$ )의 비율이 높으면  $G * G_F / G$ 의 값이 커지게 되고 이는 결국 전체 생태효율성식의 분모를 크게 만들어 생태효율성이 낮아지게 된다. 반대로 재활용자재( $G_R$ )의 비율이 높으면  $G * G_F / G$ 의 값이 작아지게 되고 전체 생태효율성식의 분모를 작게 만들어 생태효율성이 높아지게 된다.

## 라. 내구성 지표 (Durability, DUR.)

생태효율성의 7번째 조건은 생산물의 내구성에 관한 지표이다. 생산물의 내구성이 좋아진다는 것은 그만큼 적은양의 생산물을 사용해도 된다는 의미이다. 예를 들어 1년간 사용해야 할 물건의 내구성이 1년이면 하나의 생산물만 사용하면 되지만, 내구성이 6개월이 된다면 두 개의 생산물이 필요하게 된다. 이로 인해 똑같은 1년간 사용이라는 목적을 이루기 위해 후자의 경우 두 배로 많은 에너지와 자원을 사용하며 그 과정에서 환경부하 역시 발생하게 된다. 내구성에 대한 평가는 대상의 수명(Life time)과 평가시간(Work Time)의 비로 나타낸다. 다양한 대상을 평가하기 위해 특정한 평가시간을 정해놓고 평가시간보다 대상의 수명이 짧다면 다수의 대상이 필요한 것으로 인식한다. 따라서 대상의 수명이 길수록 내구성 지표는 증가하게 되어 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$DUR = \frac{Life\ Time}{Work\ Time}$$

대상의 내구성에 대한 자료가 없거나, 내구성이 의미가 없는 평가 대상에 대해서는 수명과 평가 시간이 같은 것으로 간주하여 1로 표현하며, 내구성 지표를 생태효율성 식에 추가하면 아래와 같다.

$$EEI = \frac{Y}{N + F \times \left\{ \frac{G \times \left( \frac{Gf}{G} \right)}{F} \right\}} \times DUR$$

#### 마. EMERGY 생태효율성 지수

Emergy 분석법을 이용한 제품의 생태효율성 지수(Eco-Efficiency Index, EEI)는 생태효율성의 기본 개념인 “Making more with less”에 따라 생산물(Y)과 투입자원(N+F)의 비에 기초하여 외부구매자원(F)을 구성하는 재화(G)와 용역(S)의 비, 재화를 구성하는 재활용재료(G<sub>R</sub>)와 신재료(G<sub>F</sub>)의 비를 고려하며, 마지막으로 내구성(DUR)까지 고려하는 식으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 EEI &= \frac{Y}{N + F \times \left\{ \frac{G \times \left( \frac{G_f}{G} \right)}{F} \right\}} \times DUR \\
 &= \frac{Y}{N + G_f} \times DUR \\
 &= \frac{N + F + R}{N + G_f} \times DUR \\
 &= \frac{N + S + G_f + G_r + R}{N + G_f} \times DUR \\
 &= \left( 1 + \frac{S + G_r + R}{N + G_f} \right) \times DUR
 \end{aligned}$$

마지막 정리와 같이 생태효율성 산정식은 생산에 투입되는 노동력(S), 재활용재료(Gr), 재생가능한 에너지(R), 내구성(DUR)에 비례하고 보유자원 사용량(N), 신재료 사용량(Gf)에 반비례하는 생태효율성의 7가지 조건을 모두 만족하는 식이다.



## 2. 에머지를 이용한 생태효율성 지수 적용 및 평가

개발된 생태효율성을 휘발유, 천연가스, 전기, 수소를 연료로 사용하는 자동차, 지열, 풍력, 열병합, 조력 등 4종류의 발전소 그리고 UN국제표준산업분류표에 의거하여 분류한 총 23개 제조업종의 emergy 분석 결과에 적용하여 각각의 생태효율성을 평가하였고, 평가 결과를 토대로 생태효율성 지수의 타당성을 검증하고 기존의 생태효율성 산정식과 비교하여 평가하였다.

### 가. 연료종류에 따른 승용차의 생태효율성 평가

개발된 생태효율성 지수를 연료 종류에 따른 승용차에 적용하기 위하여 휘발유 자동차, 가스자동차, 전기자동차 그리고 수소자동차의 에머지분석 결과를 바탕으로 생태효율성을 평가하였다. 평가를 위한 에머지분석 자료는 McGrane(1994)의 자료에서 인용하였다. 분석 결과에는 각 자동차의 수명을 100,000 mile로 가정 하여 자동차의 제조, 100,000 mile 주행에 필요한 연료, 유지 및 관리에 필요한 emergy가 포함되어 있다.

자동차 제조업의 특성상 필요한 모든 자재를 외부에서 구입해오고, 자연환경의 영향을 거의 받지 않기 때문에 재생 가능한 에너지원은 무시할 수 있으며, 시스템 경계 내에 저장되어 있는 자원 역시 외부에서 구입해 온 것을 제외하면 없기 때문에 재생가능한 자원(R)과 보유 재생불가능 자원(N) 값은 자동차의 에머지 분석에서 영향을 주지 못한다. 에머지분석 결과 100,000 mile 을 주행하기 위해서 가스 자동차가 73.04 E15 sej 로 가장 낮은 수치를 보인다. 이는 천연가스 자동차는 연료의 에너지 변환도가 낮고 차량 제작에 투입되는 물질과 에너지의 양이 다른 차량에 비해 비교적 적기 때문이다.

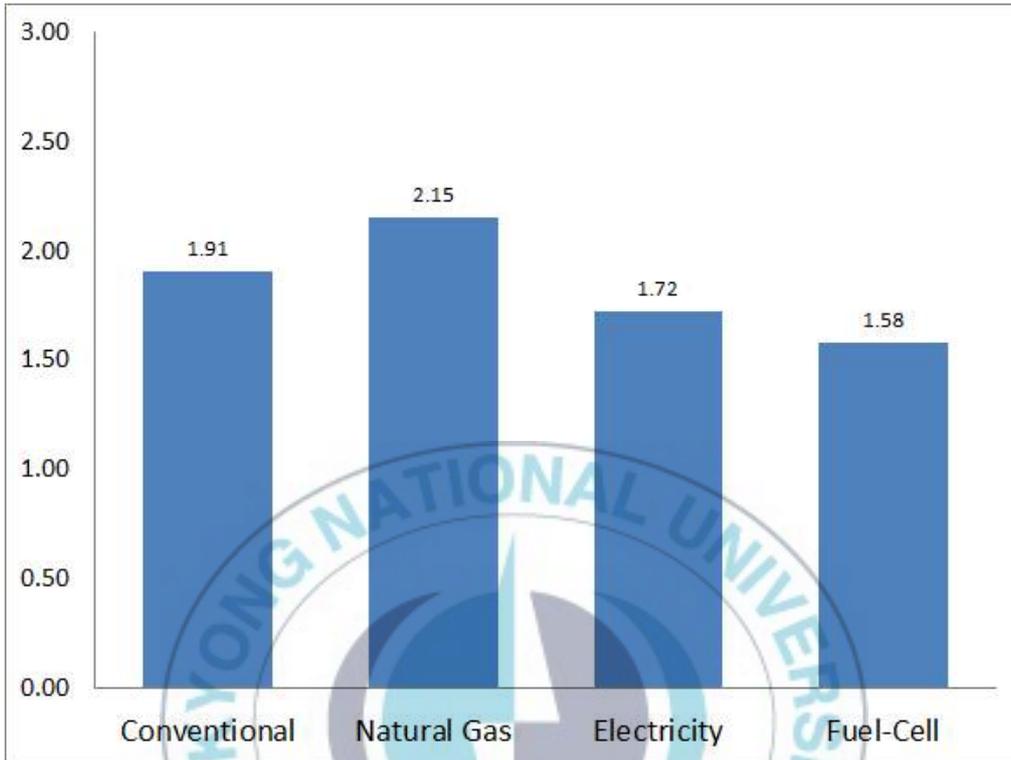


Fig. 8. Eco-Efficiency of vehicle of each fuel type.

자동차 제조업의 특성상 재생가능한자원(R)에 대한 의존율이 아주 낮기 때문에 전체적인 생태효율성 값은 대부분 낮게 나왔다.

생태효율성을 평가한 결과 Fig. 8과 같이 천연가스 자동차의 생태효율성이 가장 높은 것으로 나왔다. 100,000 mile을 주행하기 위해 사용되는 연료의 양은 고효율 자동차라 불리는 전기자동차나 수소연료전지 자동차가 월등하게 낮았지만 제조 공정 중 전기충전설비나 수소저장설비 등의 제작 과정에서 많은 에너지가 소비되기 때문에 결과적으로 생태효율성이 낮게 나타났다. 반

면 휘발유 차량과 천연가스 차량은 고효율자동차라 불리는 전기자동차나 수소연료전지 자동차에 비해 연료 소모량은 많았지만 제작 과정이 비교적 간단하고 에너지 소비가 적어 생태효율성이 높은 것으로 나왔으며 천연가스 자동차는 연료 자체의 에너지 변환도가 낮고 기존 휘발유 자동차를 개조하는 방식을 택하기 때문에 약간의 노동력이 추가되는 형태여서 외부구매요소(F)는 줄이고 노동력(S)는 높이는 생태효율성이 높아지는 구조를 보여주고 있다. 이러한 결과는 100,000 mile의 이동이라는 최종 결과물을 내기 위해 자원 및 에너지 투입이 낮아 더 적은 양의 자원과 환경부하로 더 많은 양의 재화와 용역을 창출한다는 생태효율성의 정의에도 가장 부합한다. 최근 고효율 자동차로 각광받고 있는 하이브리드 자동차 등 최신 기술의 자동차에 대한 어떠한 평가가 수반된다면 시대에 맞는 차량 비교도 가능할 것이다.



## 나. 발전소 종류에 따른 생태효율성 평가

개발된 생태효율성 지수를 풍력발전, 열병합발전, 조력발전, 지열발전의 에너지분석 결과를 바탕으로 생태효율성을 평가하였다. 평가는 강원도 평창군에 위치한 강원풍력발전시설(김, 2010), Italy의 Piombino에 위치한 열병합발전소(Ulgiati et al., 2002), Italy의 Castelnuovo V.C.에 위치한 Cornia2 지열발전소(Ulgiati et al., 2002) 그리고 France La Rance에 위치한 조력발전시설(Odum, 1996)을 대상으로 이루어졌다.

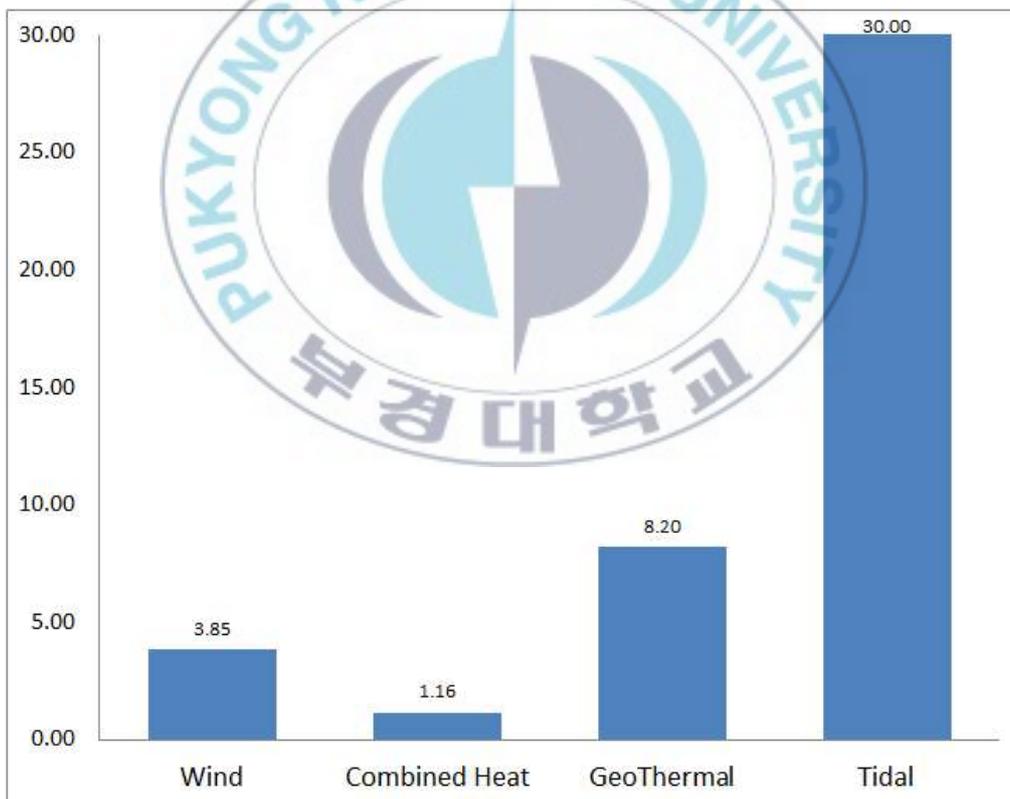


Fig. 9. Eco-Efficiency of different types of power plant.

각각의 발전소에 대한 생태효율성 평가 결과 Fig. 9와 같이 화석연료에 기반을 둔 열병합발전소가 가장 효율이 낮았고 자연에너지를 사용하는 조력발전이 가장 효율이 높은 것으로 나타났으며 그 뒤를 이어 지열과 풍력 순으로 나타났다.

열병합발전의 경우 화석연료를 기반으로 발전을 하기 때문에 자연환경으로부터의 재생가능자원(R)에 대한 의존도가 매우 낮고 시스템 외부로부터 구입 해 오는 구매자원(F)에 대한 의존도가 매우 높아 생태효율성이 낮게 나타났다. 풍력 발전의 경우 자연에너지에 기반 하여 발전을 하지만 부족한 풍량으로 인해 발전시설 설비에 투입한 에너지 대비 발전량이 풍부하지 않아 생태효율성이 낮은 것으로 나타났다. 지열발전 역시 자연에너지에 기반을 두어 발전하며 발전시설 설비에 투입한 에너지 대비 지열을 이용한 발전량이 풍부하기 때문에 높은 생태효율성을 보여주고 있다. 조력발전소 자체는 자연의 에너지를 이용하여 생산성도 높고 생태효율성도 높은 발전 방법이지만 조력발전소 건설에 투입되는 대부분의 자원이 방조제 건설에 사용되기 때문에 조력발전소 건설에 앞서 방조제에 대한 고려가 필요할 것이다.

지열발전과 열병합 발전에 대한 에머지 평가는 노동력에 대하여 Graduated, Technical and administrative, Not specialized work force, other technical services로 세분화하여 각각 다른 에너지 변환도를 적용하면서 노동력에 대한 평가가 이루어졌기 때문에 발전소에 대한 정확한 생태효율성을 평가 할 수 있었던 반면, 조력발전의 경우 emergy 평가 결과가 재화와 용역을 하나의 항목으로 다루고 있기 때문에 정확한 평가가 불가능했다. 화석연료에 기반한 열병합 발전을 제외한 나머지 발전유형에서 재화(G)보다 용역(S)이 더 많은 값을 차지하기 때문에 조력발전의 경우는 재화와 용역을 1:1의 비율로 나누어 계산했다. 정확한 분석 결과를 이용해서 생태효율성을 평가한다면 조력발전의 생태효율성은 더 높아질 것이다.

#### 다. 제조업 종류에 따른 생태효율성 평가

UN 국제표준산업분류표에 의거하여 분류한 총 23개 제조업종에 대한 energy 분석결과(제, 2004)를 대상으로 생태효율성을 평가하였다. 제조업 역시 자동차와 마찬가지로 재생가능한자원(R)에 대한 의존율이 아주 낮기 때문에 전반적으로 낮은 생태효율성 지수를 가진다. 기존 에머지 평가 자료에는 재활용 자재에 대한 분석이 없기 때문에 재활용을 하지 않는다는 가정하에 생태효율성 평가를 하였고, 이로 인해 재활용 산업 부분이 과소평가 되었다. 제조업에는 내구성이라는 항목이 없기 때문에 전체 결과에 영향을 주지 못하는 1로 표현하였다.

생태효율성 평가 결과 Fig. 10과 같이 봉제의복 제조업과 인쇄업의 생태효율성이 가장 큰 것으로 나타났다. 봉제의복 제조업과 인쇄업은 노동력에 의존하는 비율이 높은 대표적인 노동집약적 산업이기 때문에 생태효율성이 가장 크게 나타났다. 반면 재활용 업은 재활용 과정에서 사용되는 대부분의 에너지원이 화석연료에 의존하고 있으며 기존 에머지 평가에서 재활용품을 따로 고려하지 않았기 때문에 생태효율성 평가 단계에서 재활용 지수에 대한 평가가 부족하여 생태효율성이 낮게 평가되었다. 따라서 구체적인 에머지 평가가 수반된다면 정확한 평가를 할 수 있을 것이며 재활용 산업의 생태효율성은 높게 판정 될 것이다. Fig. 9의 파란 선은 각 분류별로 투입된 외부 구매자원(F)의 양을 표현한다. 이를 이용해서 생태효율성과 각 제조업에 이루어지고 있는 투자의 양을 비교할 수 있으며 생태효율성과 투자량이 적합하지 않는 경우를 찾아 올바른 정책 방안을 제시할 수 있을 것이다.

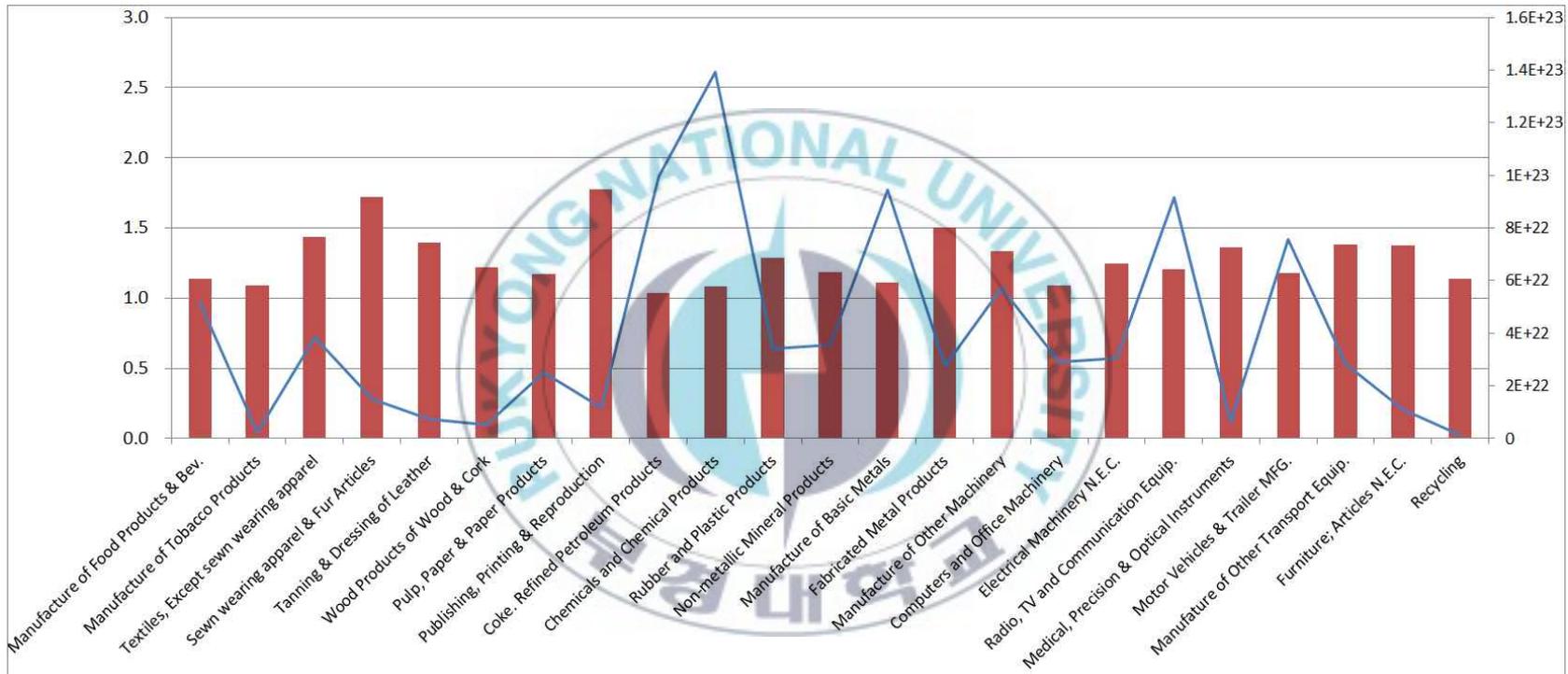


Fig. 10. Eco-Efficiency of manufacturing industry of Korea.

## 라. 기존 생태효율성 지표와 비교 평가

WBCSD의 정의에 따라 생태효율성을 평가한 기존의 연구에서는 대부분의 경우 제화와 용역의 가치를 표현하기 위한 지표로 매출액 또는 영업이익 등 화폐적 가치를 사용하고 있고, 환경영향으로는 화학물질 사용량, 온실가스 배출량, 폐기물 배출량을 주로 고려하고 있다. 이 과정에서 재화와 용역의 화폐 경제적 가치만을 고려하여 수요와 공급에 따라 변동하는 경제 원리에 의해 생산물의 가격이 변동할 경우 같은 평가 대상이라 하더라도 생태효율성이 달라지는 등 절대적이고 실질적인 가치평가를 하지 못하는 한계가 있었다.

본 연구에서 개발한 생태효율성 평가 기법은 이와 같은 한계를 극복하기 위해 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 파악하는 시스템 접근법(System Approach)을 사용하여 energy 분석법을 통해 평가대상의 절대적이고 실질적인 가치를 고려하여 진정한 생태효율성을 산정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

정확한 생태효율성을 평가하기 위해서는 목적에 맞는 energy 분석이 필요하다. 특히 labor, service, 재활용 원자재 등에 대한 심층적 분석이 수반되어야 정확한 생태효율성을 평가할 수 있다.

## V. 결론

환경문제에 따른 생산자의 제품에 대한 책임이 의무화되고, 국제 무역관계에 있어서도 환경성이 주요 경쟁력으로 인식됨에 따라, 미래의 지속가능한 산업을 위해 WBCSD에서 제시한 생태효율성의 정의에 기반을 두어 과학적으로 생태 효율성을 산정할 수 있는 생태효율성 지수 산정법을 개발하였다. 이는 자원 효율 지표, 노동 집약도 비율, 재활용지표, 내구성 지표를 energy 분석법을 통해 고려하여 대상의 생태효율성을 산정하는 방법으로 평가 대상의 화폐 경제적 가치에 기준하여 생태효율성을 평가하던 기존의 방법과 달리 대상의 실질적 가치를 고려하여 진정한 생태효율성을 산정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이 평가 법을 에너지원별 자동차, 에너지원별 발전시설 그리고 제조업을 대상으로 적용해본 결과 천연가스 자동차, 조력발전시설 그리고 인쇄업이 가장 생태효율적이라는 평가 결과가 나타났다.

정확한 생태효율성을 평가하기 위해서는 목적에 맞는 정확한 energy 분석이 필요하다. 특히 labor, service, 재활용 원자재 등에 대한 심층적 분석이 수반되어야 정확한 생태효율성을 평가할 수 있고, energy 분석결과의 신뢰도에 따라 생태효율성과 생태효율성의 신뢰도가 달라질 수 있기 때문에 생태효율성 평가를 위한 구매자원의 energy 분석에 대한 가이드라인 제시가 필요하다.

본 연구에서 개발된 생태효율성 산정식을 이용하여 다양한 제품의 생태효율성을 평가하게 되면 각 제품별 생태효율성 라벨링을 통해 제품의 생태효율성을 표시가 가능하게 되고 소비자가 비교 목적에 맞게 평가 대상을 분류하여 판단 후 구매를 하면 녹색 소비에 도움이 될 것이다. 또한 정부의 입장

에서는 다양한 정책에 대해 생태효율성의 비교, 평가 그리고 예측을 통해 생태효율성이 높은 정책을 선택하며, 산업부문에 대한 생태효율성 평가로 산업별 기준을 제시하여 그 결과를 바탕으로 국가의 산업구조 재편에 대한 지표를 삼으면 녹색 사회 구축에 도움이 될 것이다.



## 참고문헌

- Aoe T., 2007, Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products, *Journal of Cleaner Production*, 15, 1406-1414
- Brown M.T. and S. Ulgiati, 1997, Emergy based indices and ratios to evaluate substantiality: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation, *J. Ecological Engineering*, 9, 51069.
- Brown M.T. and S. Ulgiati, 2004, Emergy, transformity and ecosystem health. In S. E. Jorgensen et al. (eds) *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health*, Elsevier. New York
- Hur T., 2005, *Eco-Efficiency activities in Korea*. 106 pp.
- JEMAI. 2004, *Life-cycle assessment*, 153 pp.
- Kim L. H. J., 2011, Emergy evaluation of the tidal power plant in Saemanguem, Korea, Ph. D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, 101 pp.
- Li D., J. Zhu, E. Hui, B. Leung and Q. Li, 2011, An emergy analysis-based methodology for eco-efficiency evaluation of building manufacturing, *Ecological indicators*, 11, 1419-1425
- McGrane G. 1994, *An emergy evaluation of personal transportation alternatives*. M.S. Dissertation, University of Florida. Gainesville,
- Odum H. T., 1983, *Systemes ecology*, John Wiley & Sons, 644 pp.
- Odum H. T., 1998, *Emergy, 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, 109 pp.
- Odum H. T., 1994, *Ecological and general systems*, The University Press of Colorado, 644 pp.
- Odum H. T., 1996, *Environmental accounting*, John Wiley & Sons, New

- York, 370 pp.
- Ulgiati S., M. T. Brown, S. Bastianoni and N. Marchttini, 1995, Energy-based indices and rations to evaluate the sustainable use of resources, *Ecological Engineering*, 5, 519-531.
- Ulgiati S. and M. T. Brown, 2002, Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions The case of electricity production, *Journal of Cleaner Production*, 10, 335-348
- Ulgiati S. and M. T. Brown, 2002, Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems, *Journal of Cleaner Production*, 10, 321-334
- WBCSD, 2000, Eco-efficiency : Creating more value with less impact, 4-15.
- Zhang B., J. Bi, Z. Fan, Z. Yuan and J. Ge, 2008, Eco-Efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach, *ecological economics*, 68, 306-316
- 김가람, 2010, 에머지 개념을 이용한 풍력발전 시설의 편익·비용 평가, 부경대학교 석사학위논문, 76 pp.
- 김순구, 김윤중, 최정훈, 김익, 정태학, 2008, 하수처리시설에 대한 에코효율성 지수 제안 및 적용, 대한상하수도학회·한국물환경학회 2008공동 추계학술발표회 논문요약집, 206-207
- 김정인, 윤창한, 윤형선, 2010, 여수산업단지의 생태효율성지표 개발에 관한 연구, *CLEAN TECHNOLOGY*, Vol. 16, No. 3, 229-237
- 박지혜, 옥해명, 차경훈, 허탁, 2006, 국내 전기전자 산업의 에코효율성 측정 및 평가 동향, *Korean Journal of LCA*, Vol. 7, No. 1, 33-38
- 심홍섭, 2010, 한국 화력발전산업의 생태효율성 평가 : 온실가스 배출을 고려한 분석, 아주대학교 석사학위논문, 45 pp.
- 정인태, 이상용, 이건모, 2005, 가전제품 폐기단계의 생태효율성, 대한환경공학회 2005추계학술연구발표회, 737-741

- 제윤미, 이석모, 2004, Emergy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성지수 개발, 한국환경과학회지, 13(4), 349-357.
- 최요한, 정인태, 이건모, 김용기, 2006 전동차 생태효율성 방법론 개발, 한국철도학회 2006 학술발표대회 논문집, 17-24
- 현대자동차, 2010, 2010 지속가능성 보고서, 43-45.
- 홍성준, 조희욱, 홍병권, 양인목, 2008, 현대·기아자동차의 eco-efficiency 기법개발, 한국전과정평가학회 정기총회 및 학술연구논문발표회 논문집, 127-132

