

Research Paper

에머지(Emergy) 개념을 이용한 국토환경용량 산정 및 지속성 평가에 관한 연구

김남국 · 장윤영
광운대학교 환경공학과

A Study on the Estimation of Environmental Carrying Capacity and Sustainability in National Land using the Emergy Synthesis

Nam-Kook Kim · Yoon-Young Chang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약 : 본 연구는 자연환경이 우리의 사회·경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위한 노력들 중의 하나인 에머지(Emergy) 개념을 이용하여 국토의 실질적인 생태학적 가치와 사회·경제적 시스템간 상호작용을 규명하고, 국토의 지속성이 어느 정도 단계에 있는가를 평가하여 이를 바탕으로 국토환경용량을 산정하는데 주안점을 두고 시도되었다. 특히 인구에 회자되고 있는 환경용량을 고려한 지속가능한 개발이라는 개념이 논자의 주관에 따라 달리 평가되면서 이러한 지속가능성을 분석해 볼 수 있는 분석적인 틀(framework)이 잘 정비되어 있지 못함과 지속가능한 개발 또는 발전의 기본이 되는 인간과 자연간의 상호작용에 대한 보다 깊은 분석과 평가를 요구하는 현실을 주목하였다. 그리하여 환경용량을 고려한 지속가능한 발전이 지니는 함의를 토대로 환경과 경제를 통합하여 분석이 가능한 에머지 개념을 이용하여 국토의 지속가능한 개발이 가능한가를 평가하고 우리 국토에 알맞은 환경용량과 지수를 산정하여 국토의 올바른 개발 방향을 모색하고, 이를 통해 국토이용계획의 정책결정에 있어 지속가능한 국토의 이용 및 관리를 유도할 수 있는 정책을 마련하는데 그 기틀을 제공하고자 함을 목적으로 하였다.

주요어 : 국토, 환경용량, 지속성, 에머지 개념

Abstract : This study was conducted laying the focus on finding the mutual action between the substantial ecological value and economic system in the national land, and calculating the environmental carrying capacity and sustainability of the national land using the emergy synthesis. Particularly, this study pays attention watchfully to the reality that the analytic framework to analyze sustainability is not arranged well, as the concept of sustainable development considering environmental carrying capacity, which becomes a widely discussed topic today, is defined

First Author: Namkook Kim, Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139701, Korea, Tel: +82-02-356-3640
E-mail: nkkim@kw.ac.kr

Co-Author: Yoonyoung Chang, Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139701, Korea, Tel: +82-02-940-5496
E-mail: yychang@kw.ac.kr

Received : 30 March, 2016. Revised : 6 April, 2016. Accepted : 12 April, 2016.

differently according to the subjective views of respective researchers, and the situation which needs in-depth evaluation on the interaction between nature and economy which becomes the fundamental of sustainable development. This study also aims at groping for correct direction for the national land development by calculating the environmental carrying capacity and index value which is appropriate to the national land and providing the framework for preparing the policy to induce the sustainable use and management of the national land.

The concept of emergy synthesis which is used for the evaluation of environmental carrying capacity and sustainability in the national land, as in this case, can notify the information on current situation of the national land as well as explain how the national land transforms according to time pass (the role of information synthesis), and gives knowledge if the national land policies advances toward the direction of sustainable development (the role of policy evaluation and observation). Emergy synthesis also can take role for selecting best policy on the process of decision making on the exploitation of the national land (the role on the process of decision making).

Keywords : National land, Environmental carrying capacity, Sustainability, Emergy synthesis

I. 서론

그 동안 우리 국토의 성장과정이나 국토개발정책은 성장위주의 개발정책으로 부존자원이나 국토환경의 수용능력을 감안하지 못한 채, 환경적으로 건전하고 지속가능한 차원의 접근보다는 경제적 효율성 내지는 물적 양적시설의 공급에 치중하였다. 또한 환경적인 영향이 사전에 고려된 개발이기보다는 환경영향은 무시되었거나 또는 사후처리 중심이었으며, 환경의 고려는 경제성장을 저해한다는 인식이 팽배하였다. 자원의 관리도 경제개발을 최대한 지원하고자 하는 개발중심의 정책이었으며, 장기적인 관점에서 자원의 다목적 활용과 관리보다는 자원의 단기적인 효용성에 치중하여 무분별한 개발이 이루어졌다. 그 결과, 인간이 자연을 착취하는 경제·사회구조를 만들어 환경문제를 소홀히 함으로써 자연환경의 훼손과 환경오염이 가속화되고 있으며, 과연 앞으로도 이러한 방식에 의한 국토발전이 계속될 수 있을 것인가에 대하여 근본적인 문제가 제기되고 있다.

이러한 문제의 인식을 통해 앞으로의 국토이용은 국토의 생태적 측면과 자연과의 조화를 강조하는 지속가능한 발전의 필요성이 대두되고 있다. 그런데 지속가능한 발전 또는 이에 대한 평가는 본질적으로 생태학적인 지속가능성, 즉 환경용량을 그 핵심인자로 한다. 그러므로 인간의 경제 및 사회활동이 특정 지

역이나 국토 또는 생태계의 수용능력 범위 내에 있는지의 여부가 체계 안정성 즉, 지속가능성의 본질적인 제약요인으로 볼 수 있다. 따라서 이러한 환경용량을 파악하고 정량화하는 방법은 지속가능성을 평가하는데 있어 가장 중요한 문제라고 할 수 있다. 그러나 인구(人口)에 회자(膾炙)되고 있는 환경용량을 고려한 지속가능한 발전이라는 개념이 논자의 주관에 따라 달리 평가되면서 지속가능성을 평가해 볼 수 있는 분석적인 틀이 정립되어 있지 않아, 이에 환경용량 개념을 구체화하고 그것을 측정하기 위한 평가수단에 대한 연구가 시급한 실정이다. 따라서 환경용량 평가가 활성화되고 환경용량의 개념이 계획 및 정책결정자들에게 제대로 된 정책수단으로 활용되기 위해서는 환경용량에 대한 정확한 이해와 체계적인 접근(systems approach)이 필요하며, 자연환경과 경제 및 소비활동 등 인간환경과의 상호메커니즘을 통합적으로 연계하여 평가할 수 있는 객관적이고 통합적인 평가 수단이 모색되어야 할 것이다.

이러한 배경하에서 본 연구는 환경용량을 고려한 지속가능한 발전이 지니는 함의(含意)를 토대로 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정 뿐만 아니라, 인간과의 유기적 상호관계를 과학적이고 정량적으로 파악하는 에머지(Emergy) 개념을 통해 국토의 실질적인 생태학적 가치와 사회·경제적 시스템간 상호작용을 규명하여 국토환경용량을

산정하고, 이를 바탕으로 국토의 지속성이 어느 정도 단계에 있는가를 평가하는데 주안점을 두고 시도되었다. 이를 통해 국토이용계획의 정책결정에 있어 지속가능한 국토의 이용 및 관리를 유도할 수 있는 정책을 마련하는데 그 기틀을 제공하고자 함을 목적으로 하였다.

II. 연구방법

1. 에머지 개념

생태계와 경제계는 하나의 체계(體系, system)의 속성을 지니고 있다. 여기서 체계라 함은 가장 간단하게 “상호작용하는 구성요소의 집합”이라고 정의할 수 있다. 보다 구체적으로 말해 체계란 “에너지, 물질, 정보의 교환에 의해 함께 연결되어 상호작용하고 상호의존적인 부분들의 집합”을 말한다. 이런 측면에서 볼 때 생태계, 경제계, 사회계로 구성되어 있는 자연생태와 인간생활의 관계는 이들이 상호작용하면서 특정한 기능을 하는 체계의 속성을 지니고 있다고 할 수 있다. 지금까지 이러한 인간사회와 생태계의 관계에 대해 상당한 연구가 있었으나 대부분의 연구에서 사용용어, 논리구조, 이론전개, 모형구축 등에서 각기 다른 접근을 통해 각각 독립적으로 이루어졌다. 이러한 독립적인 연구는 근본적으로 중요한 생태학과 경제학의 상호 연관성을 간과(看過)할 수 밖에 없었다. 다시 말해 서로 다른 측정 단위와 용어를 사용하고 인간과 생태적 과정 간의 상호작용을 간과함으로써 지금까지의 생태-경제계의 모형화에 관한 연구는 효과적이지 못하였다. 따라서 생태계와 인간계 간의 상호작용관계에 대한 이해를 돕기 위해서는 이들이 작용하는 적절한 개념 구조와 공통된 언어가 필요하다. 이러한 문제를 극복하기 위해 공통분모로의 에너지 및 생태계와 경제계 사이의 연결을 거의 완벽하게 발전시킨 평가방법이 에머지(Emergy) 개념이다.

에머지 개념은 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정 뿐만 아니라, 인간과의 유기적 상호관계를 과학적이고 정량적으로 파악할 수 있는 생태계 가치평가 개념으로, “한 가지 서비스

나 생산물을 만드는 과정에서 직접 그리고 간접으로 이미 소모된 한 종류의 이용가능한 에너지”로 정의된다. 자연환경의 역할과 인간경제활동을 하나의 시스템에서 동일한 가치 척도로 비교하는 에머지 개념은 많은 연구자들에 의해 활발히 사용되고 있는데, 지금까지 국내외에서 이루어진 에머지 개념의 활용 및 선행연구로는 Odum et al.(1983; 1988; 1996)은 국가, 지역, 도시 등의 다양한 대상 시스템에 대한 연구를 수행하였으며, 국내에서는 우리나라의 자연환경과 경제활동(Lee & Odum 1994), 도시(Son & Lee 2000), 하천(Kim et al, 2001), 산업활동(Je & Lee 2004), 주택건설(Lim et al. 2005), 갯벌 및 해양생태계(Kang et al. 2006), 산지가치의 계량화(Kim et al. 2008), 수산업 및 양식업(Oh et al. 2008) 등 자연환경자원의 가치평가, 개발사업의 편익-비용평가, 환경수용력 평가, 개발대안 평가 등에 적용되었다.

2. 에머지 평가방법

에머지 평가 과정은 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 먼저 평가하고자 하는 시스템을 이루는 요소들이 무엇인지, 그리고 이러한 요소들은 어떻게 연결되어 있는가를 파악하는 것에서 시작한다. 즉, 시스템의 구성요소들과 이들 사이에 일어나는 에너지와 물질 흐름을 파악하는 것이다. 에머지 평가에서는 이러한 흐름을 분석하고자 하는 시스템의 성분들과 이들 사이의 연결 관계를 특별한 의미들이 부여된 에너지 시스템 언어(energy systems language)라는 기호들을 이용하여 시각적으로 나타내며, 이를 통해 전체 시스템의 유기적인 관계를 종합적으로 파악할 수 있도록 해준다.

에머지 평가 과정의 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 완성한 에너지 시스템 다이어그램을 바탕으로 시스템의 특성을 좌우하는 주요 에너지원의 실질적인 역할과 가치를 정량화하기 위해 에머지 분석표를 작성한다. 일반적으로 에머지 분석표는 다음 Table 1과 같은 형태로 제시된다. 세 번째 단계에서는 에머지 분석값을 기초로, 시스템을 평가하고 특성

Table 1. Template for inventorying and weighting resource inputs and outputs in emergy synthesis

1	2	3	4	5	6	7
Note	Item	Energy Data	Units	Transformity (sej/unit)	Solar emery (sej/yr)	Emprice (EmW/yr)

Column 1 is the line item number, which is also the number of the footnote found below the table where raw data sources are cited and calculations are shown. Column 2 is the name of the item, which is shown on the systems diagram. Column 3 is the raw data in joules, grams, dollars or other units. The units for each raw data item are shown in column 4. Column 5 is the transformity used for calculations, expressed in solar emery joules per Joule or other appropriate units (sej/j; sej/g; sej/W). Transformities may be obtained from previous studies or calculated for the system under investigation. Column 6 is the solar emery of a given flow, calculated as input times transformity (Column 3 × Column 5). Column 7 is the emprice of an item, which indicates its value relative to the economic system.

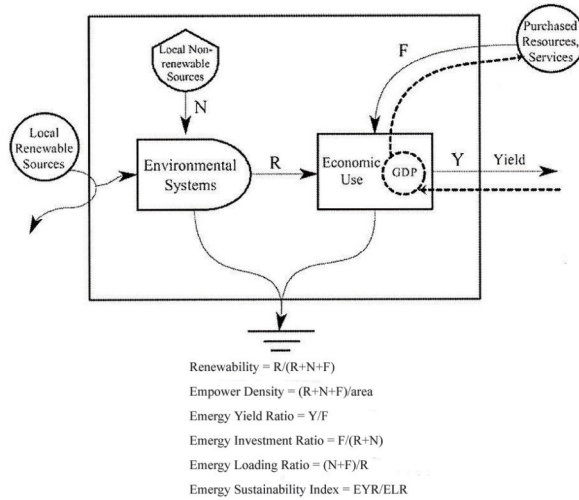


Figure 1. EMERGY based indices, accounting for renewable Energy flow(R), flow from indigenous nonrenewable reserves(N), purchased inputs from outside the system(F), and yield from system(Y)

을 파악하기 위해 Figure 1과 같이 에머지 지수(emergy index)를 산정한다. 본 연구에서 이용된 에머지 지수로는 지역 시스템에 유입되는 에너지원의 전체 에머지 양에 대한 자연환경 에너지원의 점유율(Renewability), 지역 시스템의 경제활동 강도를 나타내는 단위면적당 연간 에너지 사용량(Emergy use per unit area), 지역 시스템의 자연환경과 경제가 지탱할 수 있는 인간활동의 적정규모 및 수용능력(Carrying capacity), 인간의 경제활동이 자연환경에 미치는 영향의 정도를 나타내는 환경부하비(Environmental loading ratio), 지역 시스템의 산업화, 도시화 등 경제적 발전강도를 나타내는 에머지 투자비(Emergy investment ratio), 그리고 현재의 환경상태와 사회경제활동 상황에서 지역 시스템이 얼마나 지속가능할지를 나타내는 지속성 지수(Emergy Sustainability index)이다.

III. 결과 및 고찰

1. 에너지 시스템 다이어그램을 이용한 국토의 시스템 분석

평가대상 시스템의 경계 설정을 위해 본 연구에서는 2003과 2013년을 기준으로 하여 대한민국 국토에 대한 육지의 공간적 범위를 말하는 영토(Territory) 전체를 대상 시스템으로 설정하여(Figure 2), 국토의 자연환경과 경제활동의 유기적 상호관계를 포괄적으로 나타낸 에너지 시스템 다이어그램을 Figure 3과 같이 작성하였다.

국토를 유지하는데 필요한 에너지와 물질은 크게 자연환경이 공급하는 태양, 바람, 강우 등 자연의 재생가능한 에너지와 외부로부터 구입된 연료, 광물, 재화 및 용역 등의 에너지가 상호작용함으로써 국토의 유지 및 경제활동이 이루어짐을 보여주고 있다.

시스템 내부에서 생산되는 석탄, 광물과 같은 지하자원 또한 국토의 경제성장과 유지에 필요한 에너지원으로, 이들은 오랜 세월 동안 지질작용을 통해 형성된 내부 보유자원이다. 국토에서 일어나는 생산 활동은 크게 자연환경의 생산성을 이용하는 1차산업과, 1차산업이 제공한 재화와 용역, 국토내의 지하자원, 외국에서 수입한 에너지와 물질을 이용하여 공산품을 생산하는 2차산업(industry), 생산된 재화와 용역에 대한 유통 및 판매를 담당하는 3차산업(commerce)으로 구분하여 나타내었다. 이러한 생산 활동에 참여하고 조절하는 사람들과 정부의 활동은 다이어그램

의 가장 오른쪽에 표시하였다. Figure 3의 다이어그램에서 오른쪽 아래 부분에 나타난 폐기물(wastes)과 처리(treat) 과정은 다양한 사회경제활동을 통해 필연적으로 발생하는 오염물질을 처리하는 환경관리 활동을 나타내었다.

2. 국토의 에머지 분석

Figure 3의 에너지 시스템 다이어그램을 바탕으로 국토 시스템 특성을 좌우하는 자연환경과 경제활동의 실질적인 역할과 가치를 정량화하기 위한 에머지 분석 결과는 Table 2와 같다. 현재 에머지 분석법에서는 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준으로 삼은 에너지는 지구생산활동의 원동력인 태양에너지이며, 단위로는 Solar emjoules(sej)을 사용한다.

국토로 유입하는 재생가능에너지는 태양, 바람, 강수(위치에너지와 화학에너지로 구분), 조석, 파도, 지질작용으로 2013년 한 해 동안 국토에 필요한 에너지를 가장 많이 공급한 재생가능에너지는 태양에너지($3.51 E+20$ J/yr)이다. 이는 두 번째로 많은 에너지를 공급한 재생가능에너지인 강수의 화학에너지량($4.67 E+17$ J/yr)의 약 753배에 해당한다. 그러나 에머지 기여량을 살펴보면 재생가능에너지 가운데 에머지 기여도가 가장 높은 것은 강수의 화학에너지($8.49 E+21$ sej/yr)로, 에너지량은 태양에너지의 약 1/753에 불과하였지만 에머지 기여량은 태양에너지의 24배에 달하였으며, 지질작용, 강수의 위치에너지

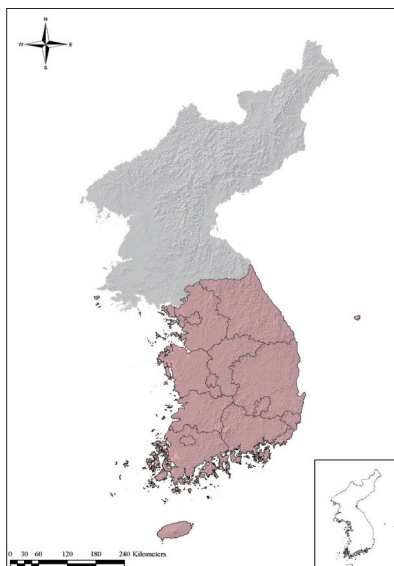


Figure 2. Location of study area

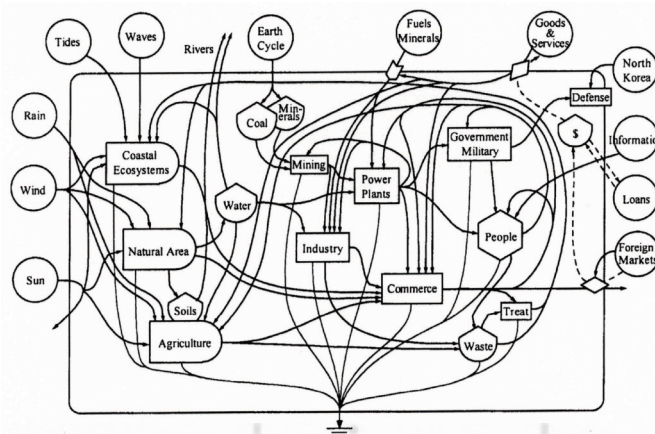


Figure 3. Energy systems diagram of National land

Table 2. Energy synthesis table of resource and economic flows of national land, 2013

No.	Item	Energy Data (unit/yr)	Units	Tranfomity (sej/unit)	Solar Emery (sej/yr)	Emprice (EmW)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Sunlight	3.51E+20	J	1 ^{a)}	3.51E+20	3.29E+11
2	Rain, chemical potential	4.67E+17	J	1.82E+04 ^{a)}	8.49E+21	7.96E+12
3	Rain, geopotential	2.17E+17	J	1.05E+04 ^{a)}	2.28E+21	2.13E+12
4	Wind, kinetic energy	3.59E+17	J	1.50E+03 ^{a)}	5.37E+20	5.03E+11
5	Waves	5.12E+14	J	3.06E+04 ^{a)}	1.57E+19	1.47E+10
6	Tide	9.25E+10	J	1.68E+04 ^{a)}	1.56E+15	1.46E+06
INDIGENOUS RENEWABLE ENERGY						
8	Hydroelectricity	3.08E+16	J	1.59E+05 ^{a)}	4.89E+21	4.59E+12
9	Agricultural Production	2.94E+17	J	2.00E+05 ^{b)}	5.88E+22	5.51E+13
10	Livestock Production	3.99E+16	J	2.00E+06 ^{b)}	7.98E+22	7.49E+13
11	Fisheries Production	5.41E+16	J	2.00E+06 ^{b)}	1.08E+23	1.01E+14
12	Fuelwood Production	3.17E+15	J	3.49E+04 ^{a)}	1.11E+20	1.04E+11
13	Forest Extraction	5.97E+16	J	3.49E+04 ^{a)}	2.08E+21	1.95E+12
NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM						
14	Coal	5.26E+16	J	4.00E+04 ^{a)}	2.11E+21	1.97E+12
15	Metallic Minerals	9.05E+11	g	1.00E+09 ^{a)}	9.05E+20	8.48E+11
16	Industrial Minerals	9.81E+13	g	1.00E+09 ^{a)}	9.81E+22	9.20E+13
17	Top Soil	1.82E+16	J	7.40E+04 ^{a)}	1.34E+21	1.26E+12
IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES						
18	Coal	3.68E+18	J	4.00E+04 ^{a)}	1.47E+23	1.38E+14
19	Oil, crude	5.75E+18	J	5.40E+04 ^{a)}	3.10E+23	2.91E+14
20	Petroleum Products	2.07E+18	J	6.60E+04 ^{a)}	1.36E+23	1.28E+14
21	Metallic Minerals	7.10E+13	g	1.00E+09 ^{a)}	7.10E+22	6.66E+13
22	Industrial Minerals	4.80E+12	g	1.00E+09 ^{a)}	4.80E+21	4.50E+12
23	Natural Gas	2.17E+18	J	4.80E+04 ^{a)}	1.04E+23	9.77E+13
24	Goods & Services	5.16E+11	\$	1.24E+12 ^{a)}	6.39E+23	6.00E+14
EXPORTS						
25	Goods & Services	5.91E+14	₩	1.07E+09 ^{a)}	6.30E+23	5.91E+14

References for Transformity. a) Odum 1996,¹⁵⁾ b) Brown & McClanahan¹⁶⁾ 1996, c) Calculated in this study 2016.

Table 3. Summary of flows in national land

	Item	Numerical value, 2013	Numerical value, 2003
R	Renewable sources used (sej/yr)	8.49E+21	1.03E+22
N	Nonrenewable sources flow from within Korea (sej/yr)	1.02E+23	1.05E+23
F	Imported minerals and fuels (sej/yr)	7.74E+23	5.51E+23
P ₂ I	Imported goods and services (sej/yr)	6.39E+23	2.22E+23
I	Money paid for imports (\$/yr)	5.16E+11	1.79E+11
E	Money paid for exports (₩/yr)	5.91E+14	2.32E+14
P ₁ E	Exported goods and services (sej/yr)	6.30E+23	2.85E+23
X	Gross domestic product (₩/yr)	1.43E+15	7.25E+14
P ₂	Ratio emery to dollar of imports (sej/\$)	1.24E+12	1.24E+12
P ₁	Ratio emery to dollar within the country and for its exports (sej/₩)	1.07E+09	1.23E+09

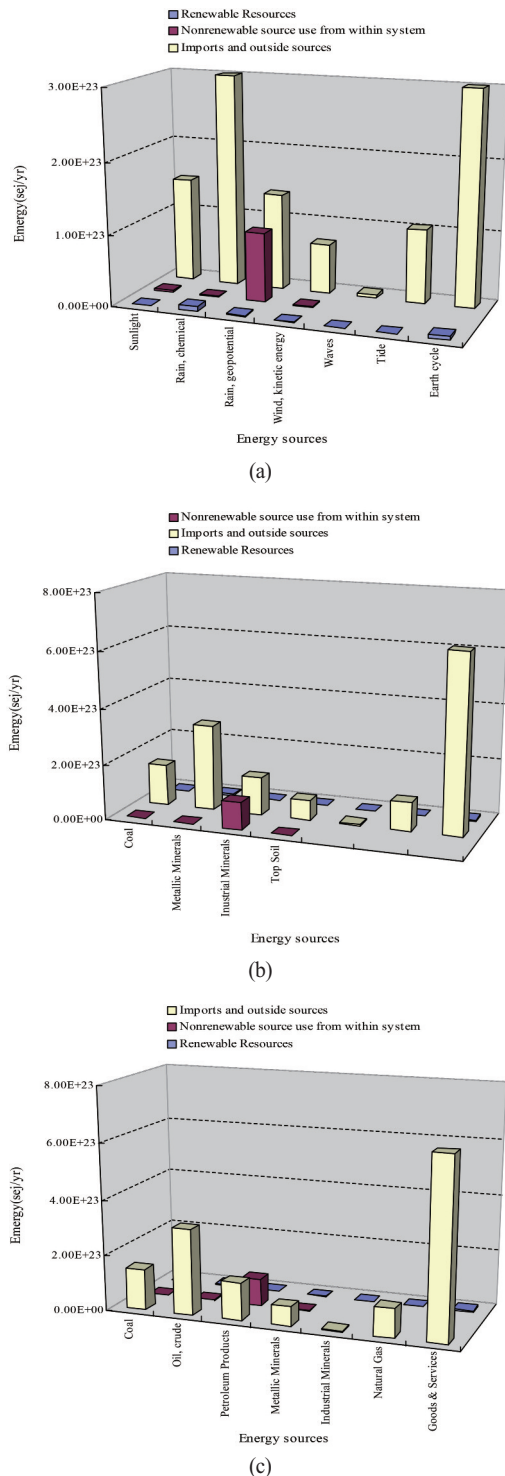


Figure 4. Emergy signature of each energy sources in National land, 2013. (a) Renewable Resources, (b) Nonrenewable source use from within system, (c) Imports and outside sources.

지, 바람, 태양에너지, 파도, 조석의 순서로 에머지 기여도가 감소하였다. 이는 일을 할 수 있는 능력이 서로 다른 에너지들을 그 능력에 대한 고려 없이 단순히 동일한 에너지 단위로 나타낸 후 비교하게 되면 각 에너지가 우리 국토에 기여하는 가치를 제대로 평가할 수 없다는 것을 보여준다. 태양, 바람, 조석 등 재생가능에너지가 2013년 한 해 동안 국토에 기여하는 총에머지량(R)은 $8.49 \text{ E}+21 \text{ sej/yr}$ 로 나타났다 (Table 3). 이 값은 Table 2에 제시된 재생가능에너지 가운데 강수의 화학에너지와 조석에너지를 더한 값이다. 지구와 달, 태양 사이의 인력에 의해 나타나는 조석에너지를 제외한 나머지 재생가능에너지는 기본적으로 지구로 유입하는 태양에너지를 그 원동력으로 하여 아주 밀접히 연결되어 있기 때문에 이들 에너지의 에머지량을 단순히 더하게 되면 중복계산 (Double counting)의 오류를 범하게 된다. 따라서 에머지 방법론에서는 태양에너지와 관련된 중복계산을 피하기 위하여 에머지량이 가장 많은 에너지를 총 에머지량 계산에 이용하도록 하고 있다. 이에 따라 태양, 바람, 강수의 위치에너지, 강수의 화학에너지, 파도가운데 에머지량이 가장 큰 강수의 화학에너지를 총에머지량 계산에 이용하였다.

국토 내부에서 공급되는 주요 재생불가능자원으로는 석탄과 광물자원(금속광물과 비금속광물)을 대상으로 하여 에머지 평가를 수행하였다. 또한 토양의 경우 새로 형성되는 속도에 비해 농업과 같은 사회경제활동으로 인해 침식되는 속도가 토양이 새로 만들어지는 속도보다 훨씬 빠르다는 점에서 재생불가능 자원에 포함하였다. 국토내의 재생불가능자원이 기여한 에머지량(N)은 $1.02 \text{ E}+23 \text{ sej/yr}$ 이었으며 (Table 3), 이 가운데 비금속 광물이 95.75%로 대부분을 차지하였다(Figure 4(b)).

수입을 통해 외국으로부터 유입하는 에머지는 크게 석탄, 원유, 석유류 제품, 천연가스와 같은 화석연료, 광물(금속, 비금속), 재화와 용역 등으로 나눌 수 있다. 이 가운데 에머지 기여도가 가장 높은 항목은 재화와 용역($6.39 \text{ E}+23 \text{ sej/yr}$)으로(Figure 4(c)), 총 에머지 수입량의 45.24%를 차지하였다. 재화와 용역 다음으로는 원유수입량, 석유제품 수입량의 에

머지 기여도가 높게 나타났으며, 이들 세 가지 항목이 전체 에머지 수입량의 약 76.84%를 구성하였다. 국토로의 2013년 한 해 동안 수입된 에머지 총량(F+P₂I)

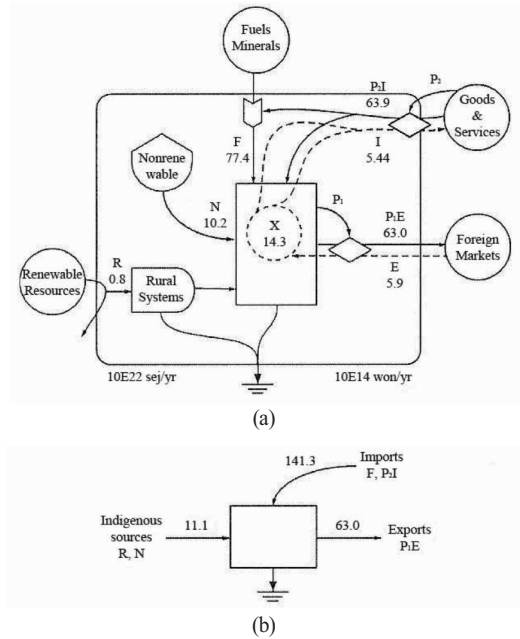


Figure 5. Summary diagram of energy flows of national land, 2013

은 1.41 E+24 sej/yr로 나타났다. 이상에서 제시한 Table 2의 에머지 평가 결과를 Table 3과 Figure 5에 요약하여 나타내었으며, 국토 전체의 에머지 특성을 파악하기 위한 에머지 지수(Emergy Index) 산정에 이용하였다.

3. 에머지 지수를 통한 국토의 환경용량 산정 및 지속성 평가

에머지 분석값을 기초로, 국토시스템을 평가하고 특성을 파악하기 위한 에머지 지수 산정 및 기존 평가(Lee & Odum1994; Lee et al, 2000)와의 비교는 Table 4와 같다.

자연환경 에너지원의 점유율(Renewability)은 대상 시스템에 유입되는 에너지원의 전체 에머지 양에 대한 자연환경 에너지원의 점유율을 의미한다. 우리 국토가 2013년 한 해 동안 사용한 에머지량은 국내의 재생가능에머지(R)와 재생불가능에머지(N), 외국에서 수입한 에머지(F+P₂I)를 더한 값으로 1.52 E+24 sej/yr 이다. 이 가운데 국토의 자연환경(R)과 보유자원(N)이 공급한 에머지량은 전체의 7.3%로,

Table 4. Comparison of main energy flows and indices for time series energy synthesis of national land

Emergy index	Expression	Quantity			
		1991	1997	2003	2013
Renewable energy flow	R	3.36E+22	3.63E+22	1.03E+22	8.49E+21
Flow from indigenous nonrenewable reserves	N	1.23E+22	1.08E+23	1.05E+23	1.02E+23
Flow of imported emergy	F+P ₂ I	3.91E+23	6.28E+23	7.73E+23	1.41E+24
Total emergy inflow	R+N+F+P ₂ I	4.37E+23	7.73E+23	8.88E+23	1.52E+24
Total emergy used	U=R+N+F+P ₂ I	4.37E+23	7.73E+23	8.88E+23	1.52E+24
Total exported emergy	P1E	1.12E+23	2.20E+23	2.85E+23	6.30E+23
Fraction used, locally renewable	R/U	0.08	0.05	0.01	0.01
Fraction of emergy used purchased (imports)	(F+P ₂ I)/U	0.90	0.81	0.87	0.93
Emergy use per unit area	U/(area)	4.40E+12	7.77E+12	8.92E+12	1.52E+13
Emergy use per capita	U/(population)	1.00E+16	1.68E+16	1.86E+16	2.98E+16
Renewable carrying capacity at present living standard	(R/U)(population)	3.32E+06	2.16E+06	5.52E+05	2.85E+05
Developed carrying capacity at present living standard	8(R/U)(population)	2.66E+07	1.73E+07	4.42E+06	2.28E+06
Renewable Support Area	(F+N)/Empd _(R)	1.19E+12	2.01E+12	8.53E+12	1.79E+13
Emergy to money ratio	P ₁ =U/GDP	1.93E+09	1.57E+09	1.23E+09	1.07E+09
Environmental loading ratio	(N+F+P ₂ I)/R	12.03	20.28	85.63	178.50
Emergy Investment Ratio	(F+P ₂ I)/(R+N)	8.53	4.35	6.69	12.74
Emergy sustainability index	EYR/ELR	0.09	0.06	0.01	0.006

태양, 강우, 바람, 조석 등 재생가능 에머지가 차지하는 비율은 0.6%에 불과하였다. 2013년 한 해 동안 국토내에서 사용된 에머지의 대부분(92.7%)은 외국에서 수입된 연료와 원료물질(F), 재화와 용역(P₂I)이 차지하였다(Figure 6).

단위면적당 연간 에머지 사용량(emergy use per

unit area)은 대상 시스템에서 일정기간 사용한 총 에머지량을 시스템의 전체 면적으로 나눈 값으로, 국가 또는 지역의 경제활동 강도를 간접적으로 나타내는 지수이다. 2013년 국토의 단위면적당 에머지 사용량은 $1.52 \text{ E}+13 \text{ sej/m}^2/\text{yr}$ 로, 좁은 국토면적과 인구밀도가 높은 상태에서 많은 양의 에머지를 교역을

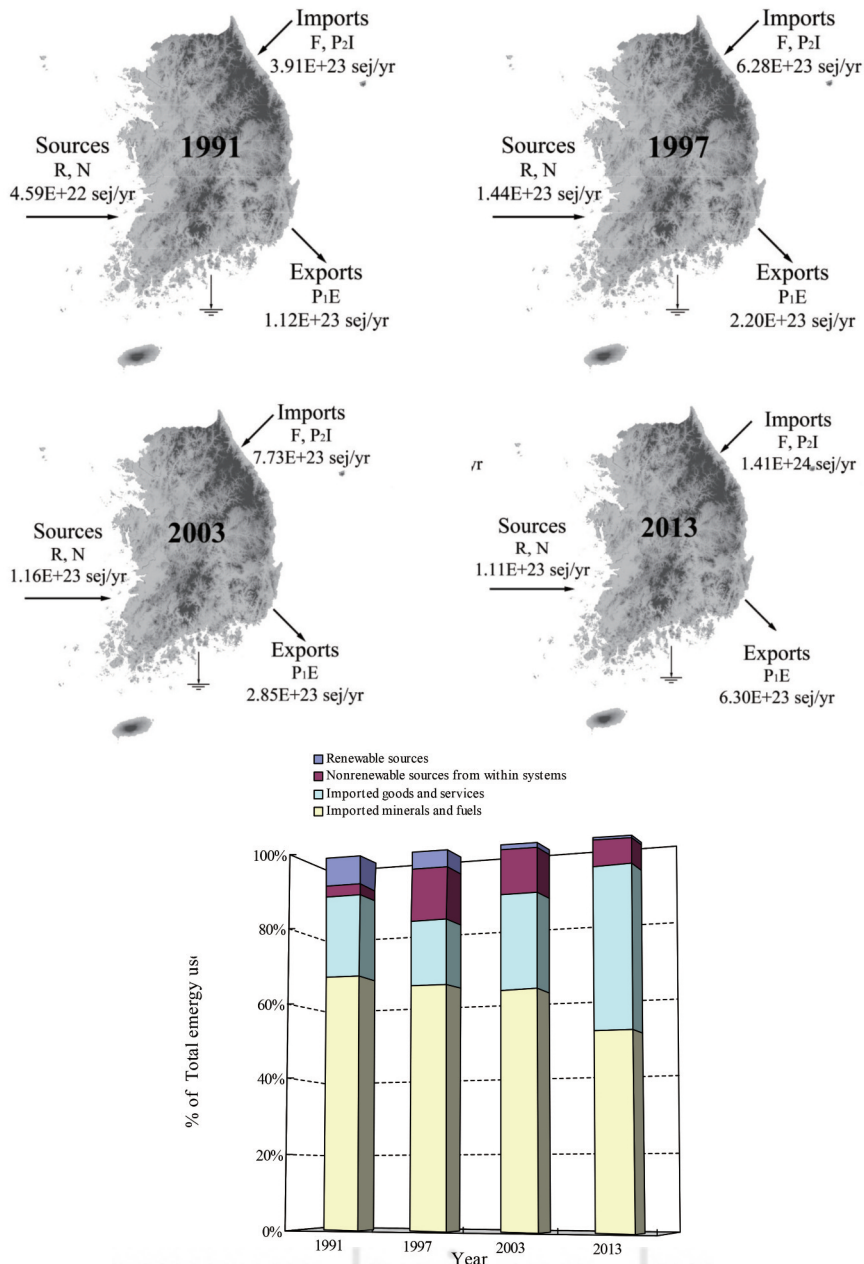


Figure 6. Summary three arm flow diagram for the main flows and energy budget of national land

통한 수입에 의존하는 국토의 상황을 반영하는 것으로 보인다(Figure 7(a)).

환경부하비(Environmental loading ratio)는 국토내에서 이루어지고 있는 인간의 경제활동이 자연 환경에 미치는 영향(스트레스)을 나타내는 지수로, 2013년 국토의 환경부하비는 기존 연구에서 제시되었던 1991년, 1997년, 2003년의 ELR 12.03, 20.28, 85.63 보다 높은 178.50으로, 국토내에서 이루어지고 있는 경제활동이 국토의 자연환경에 주는 부정적인 부담이 증가하는 것으로 파악되었다(Figure 7(b)).

에머지 투자비(Energy Investment Ratio)는 지역의 산업화, 도시화의 정도를 나타내는 경제적 발전 강도를 나타내며 에머지 투자비가 높을수록 개발의 강도가 높다는 것을 의미한다. 2013년 국토의 에머지

투자비는 12.74로, 이는 국토 내의 산업화, 도시화 등 개발의 강도가 높아진 것을 알 수 있다(Figure 7(c)). ELR과 관련하여 경제활동이 자연환경에 미치는 영향을 보여주는 에머지 지속가능성 지수(Energy sustainability index)는 현재의 환경상태와 경제활동 상황에서 대상 시스템이 얼마나 지속 가능한지를 나타내는 지수로, 2013년 국토의 EmSI는 0.006에 불과하여 지속가능성이 아주 낮게 나타났다(Figure 7(d)).

또한, 에머지 지수는 자연환경과 경제활동이 지탱할 수 있는 인간활동의 적정규모 및 수용능력에 대한 자료를 제공한다. 이러한 인간의 경제 및 사회활동이 특정 지역이나 국가 또는 생태계의 수용능력 범위 내에 있느냐의 여부는 체계 안정성 즉, 지속가능성의 본질적인 제약요인으로 볼 수 있다. 따라서 이러한

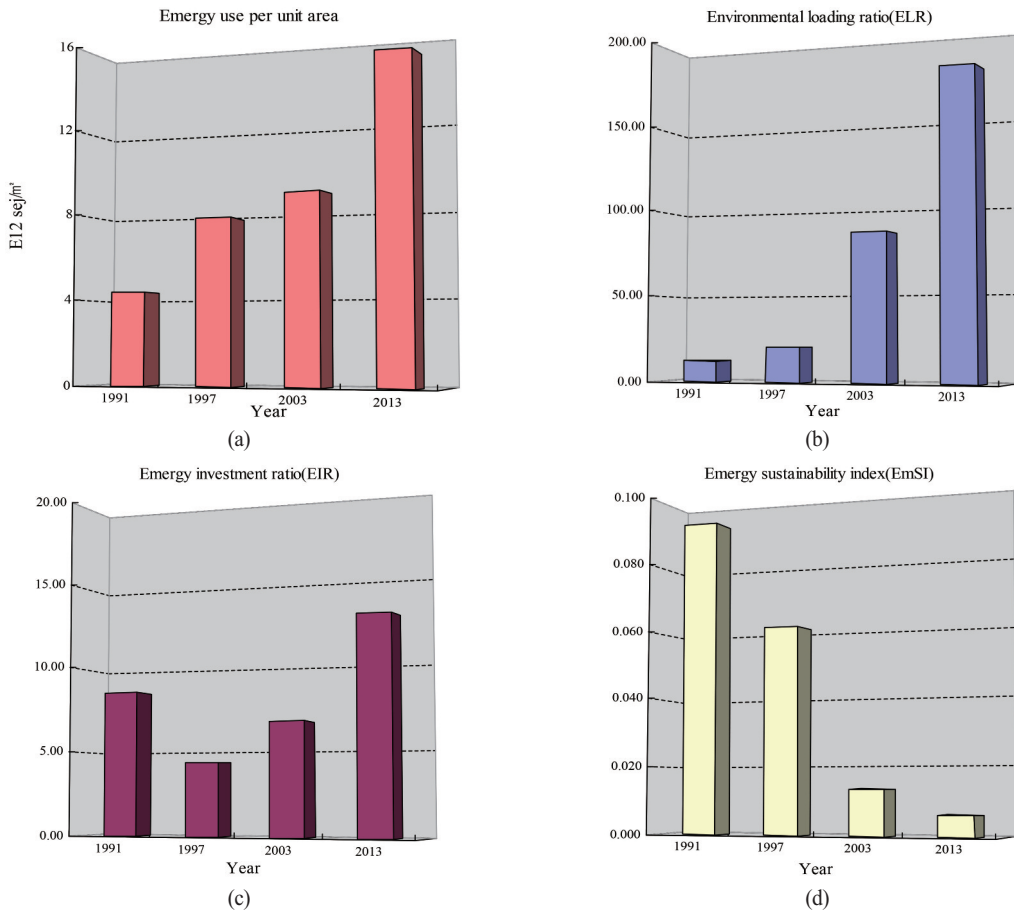


Figure 7. Comparison of energy indices: (a) Energy use per unit area, (b) Environmental loading ratio(ELR), (c) Energy investment ratio(EIR) and (d) Energy sustainability index(EmSI)

환경용량으로서의 수용능력을 파악하고 정량화하는 방법은 지속가능성을 평가하는데 있어 가장 중요한 문제라고 할 수 있다. Odum에 따르면, 어느 지역의 환경용량으로서의 수용능력은 그 지역의 에너지, 환경, 그리고 경제가 상호 연관관계를 이루고 있는 시스템에 의존하며, 특히 에너지의 개발과 이용의 정도가 그 지역의 수용능력을 결정한다고 하였다(Odum 1996). 따라서 이러한 수용능력은 주어진 인구에 대한 에너지 요구량이나 경제개발에 대한 에머지 강도의 기반 위에서 결정된다.

인구 수용력(Carrying capacity of Population)은 자연환경과 경제가 지탱할 수 있는 인간활동의 적정규모를 나타내며, 화석연료에 의존하는 경제활동이 없이 태양, 바람, 강수, 조석과 같은 자연환경활동에 의해서 공급되는 에너지원에 의존할 경우 국토의 인구 수용력(Renewable carrying capacity)은 284,905명으로 2013년 인구의 0.56%에 불과하며, 경제활동에 기반한 국토의 인구 수용력(Developed carrying capacity)의 경우 2013년 전체 인구의 약 4.46% (2,279,238명)에 해당하는 것으로 나타났다(Figure 8(a)). 따라서 현재 국토내의 인간활동의 규모는 국토내의 자연환경과 경제가 지탱할 수 있는 인구수용력에 비해 과다한 것을 말해주고 있다. 또한 자

연환경 에너지원의 기반위에서 현재 국토내의 인구 및 경제활동을 지탱하기 위한 수용면적(Support Area)은 1991년 1.19 E+12 m², 1997년 2.01 E+12 m², 2003년 8.53 E+12 m², 2013년 1.79 E+13 m²로 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다(Figure 8(b)).

에머지 지수를 통한 국토의 특성을 파악한 결과, 국토내에서 이루어지고 있는 경제활동이 자연환경에 부정적인 부담을 주고 있으며, 국토내부의 자연자원 보다는 외부와의 교역에 기초한 외부 경제에 크게 의존하고, 현재 국토내의 인구활동의 규모가 자연환경과 경제가 지탱할 수 있는 인구수용력에 비해 과다하여 이를 부양하기 위해서는 국토내부의 자원이 부족하므로 외부로부터 더욱 많은 양의 에머지가 유입되어야 한다. 그러나 이와 같은 과다한 에머지 유입은 오히려 자연환경에 압박(stress)을 가중시키게 되므로 지속가능한 국토의 이용을 오히려 더 힘들게 한다고 할 수 있다. 이와 같이 국토의 환경용량 및 지속성 평가를 위해 산정된 에머지 지수는 현재의 국토상태에 대한 정보를 알려줄 뿐만 아니라 시간의 흐름에 따라 국토가 어떻게 변하고 있는가를 설명해 주며(정보의 종합화 역할), 이러한 상황을 바탕으로 한 국토정책의 방향이 과연 지속가능한 발전의 방향으로 나아가고 있는지를 알 수 있게 한다(정책평가와 감시의

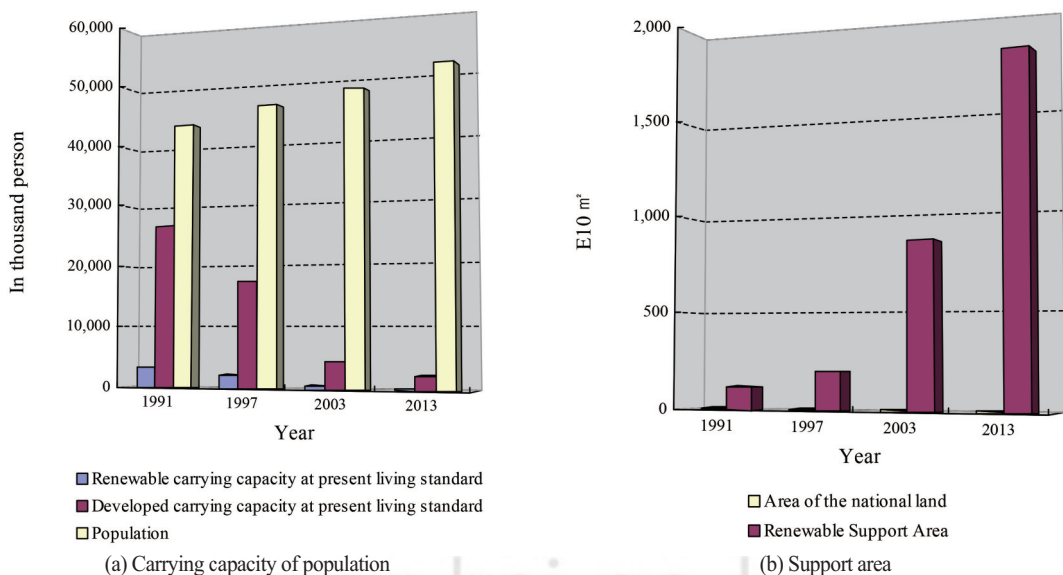


Figure 8. Evolution of carrying capacity in energy terms for national land

역할). 그리고 국토이용의 의사결정 과정에서 최선의 정책 선정을 위한 역할을 할 수 있다(의사결정 과정에서의 역할). 자연환경이 가지는 용량의 규모도 모른 채 시행되는 온갖 법령이나 대책들이 과연 올바른 길을 가는 것인가를 검토하는 데에 에머지 개념은 중요한 역할을 담당할 수 있는 대안의 하나임에 틀림이 없다.

IV. 결론

본 연구의 목적은 지속가능성을 추구하는 국토 및 환경정책을 분석하고 평가하는데 있어서 보다 유용한 방법론을 개척하고 보급하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 생태계에 대한 환경 및 경제적 이용 가치를 평가하는 유용한 하나의 지표로서의 에머지의 개념 및 방법론을 담고 있다. 현실의 실제적 부의 척도인 에머지를 이용하여 국토의 자연환경과 경제 시스템에 있어서의 한정된 자원의 이용을 위한 의사결정방법을 찾을 수 있으며, 국토 및 지역에서의 환경용량의 평가나 개발계획 및 대안의 정당성을 찾는 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 기존에 전혀 다른 별개의 체계로 인식하여 독자적인 연구가 진행되어 왔던 자연환경과 인간경제활동간의 통합화가 강조되고 있는 현재와 같은 시점에서 본 연구는 많은 시사점을 지니고 있다고 하겠다.

국토의 지속가능한 발전을 위한 본 연구가 시사하는 바는 첫째, 인간 편의위주에서 인간과 자연의 공존을 강조한다. 지금까지의 국토를 비롯한 자연환경의 이용은 인간의 자연이용을 당연시하여 자연 본래의 가치에 대한 인식이 낮은 상태에서 추진되어 왔다. 그러나 앞으로의 국토이용을 위한 국토의 개발과 보전에 대한 판단기준은 인간의 효용만이 아니라 생태계의 안전과 균형까지 배려하여야 할 것이다. 그러자면 국토의 환경이 지탱할 수 있는 범위, 특히 자연 자원과 에너지가 지속가능한 범위 안에서 개발을 이루고자 하는 노력이 필요하다.

둘째, 문제에 대한 개별적 접근보다는 통합적 접근을 강조한다. 지금까지 국토이용의 경제적 효율성, 환경오염 및 훼손에 의한 문제는 단편적·획일적인 것

대에 의한 분야별 접근으로 해결점을 추구하고자 하였다. 이 결과 경제와 환경이 조화되지 못한 채 별개의 문제인 것처럼 따로따로 떼어서 전문적으로 다루다보니 그 어느 것 하나 제대로 해결될 수 없었다. 또한 이와 같은 국토관련 문제들을 통합적으로 다루기 위해서는 정부의 노력이 특히 중요하지만, 현재 우리 정부 안에 팽배해 있는 부처할거주의(sectionalism) 및 부처이기주의(egoism)는 우리의 국토문제를 통합적 시각에서 통합적 접근방법으로 해결하는 데에 큰 장애가 되고 있다. 이와 같은 개별적 접근방식의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 자연환경과 인간과의 상호 연관성에 초점을 맞추어 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정 뿐만 아니라, 인간과의 유기적 상호관계를 과학적이고 정량적으로 파악할 수 있는 에머지(Emergy) 개념을 이용하여 국토의 실질적인 생태학적 가치와 사회경제적 시스템간 상호작용에 대한 통합적 규명을 통해 국토의 올바른 개발 방향을 모색하고자 하였다.

셋째, 자연의 수용능력을 감안한 국토의 이용과 개발을 추구한다. 이는 결국 우리가 살고 있는 국토의 생태-경제체계의 수용능력, 즉 환경용량을 기준으로 하는 것을 의미한다. 따라서 국토의 환경용량이 포화상태에 이른 현재와 같은 상황에서는 자연의 수용능력을 정량적으로 파악하고, 우리의 수요와 미래 세대가 향유(享有)할 자산의 질을 감안하여 우리 스스로 적정한 이용한계를 설정하는 것이 필요하다. 에머지 분석 및 지수 산정을 통해 국토내의 인간행위에 대한 국토이용의 범위를 정하는 것은 바로 국토의 이용과 개발에 따른 자연의 변화속도를 자연환경의 수용능력에 맞추기 위한 노력이라 할 수 있다.

넷째, 지속가능한 국토관리를 위한 국토계획과 환경계획체계와의 연계로, 그 동안 국토계획은 환경정책과의 정합성(整合性) 결여(缺如)에 따라 많은 문제를 야기해왔다. 국토계획 체계는 공간개발로 인해 발생하는 자연환경의 훼손을 충분히 고려하지 못한 채, 각종 국토계획의 환경부문계획은 환경문제를 형식적으로만 다루고 있고 토지이용계획 등 다른 부문계획과의 연계가 미흡한 실정이다. 환경계획 역시 공간개발에 따른 환경문제를 다루는 데 있어서는 많은 한계

를 노정(露呈)하고 있다. 환경계획 역시 수질·대기·폐기물·자연환경 등 부문계획을 통해 환경문제를 오염매체별로 각기 독립적으로 다루고 있고, 공간적 개념을 내포하지 않고 있다. 이로 인해 국토계획과 환경정책의 상충문제는 곳곳에서 나타나고 있으며, 이러한 국토이용을 둘러싼 갈등과 자연환경의 파괴는 환경정책과 분리된 국토정책의 부작용이라 할 수 있다. 국토의 개발과 환경보전은 모두 토지를 점유하는 인간의 활동을 규정짓는다는 점에서 불가분의 관계에 있다고 할 수 있다. 사실상 개발과 보전은 동전의 양면과 같아서 어떻게 개발할 것인가 하는 문제는 역으로 생각하면 어떻게 보전할 것인가 하는 문제이기도 하다. 따라서 개발과 환경보전을 동시에 고려하여 토지의 경제적 가치와 생태적 가치를 함께 인정하는 균형적 국토관리가 요구된다. 이를 위해 국토계획과 환경계획의 연계(連繫)를 위한 통합적 접근의 수단과 도구로서의 에머지 개념의 이용은 환경친화적인 국토공간구현에 기초가 되며 이것을 토대로 국토의 지속가능한 발전의 단초(端初)가 될 것이다.

References

- Brown MT, McClanahan TR. 1996. Emergy analysis perspectives for Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*. 91: 105-130.
- Brown MT, Ulgiati S. 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability. *Ecological Engineering*. 9: 51-69.
- Brown MT, Ulgiati S. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*. 108: 23-36.
- Brown MT, Ulgiati S. 2001. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. *Population and environment*. 22(5): 471-500.
- Je YM, Lee SM. 2004. Development of Environmental Responsibility Index for the Manufacturing Industry by Emergy Analysis. *J Environ Sciences*. 13(4): 349-357. [Korean Literature]
- Kang DS, Nam JH, Lee SM. 2006. Emergy Valuation of a Tidal Flat Ecosystem in the Southwestern Coast of Korea and Its Comparison with Valuations Using Economic Methodologies. *J Environ Sciences*. 15(3): 243-252. [Korean Literature]
- Kim NK, Kim JL, Park DG, Lee SM. 2008. A Study on the Quantification of Forest Land Values Using the Emergy Synthesis. *J Environ Sciences*. 17(3): 305-314. [Korean Literature]
- Kim YJ, Kim JL, Son JH, Lee SM. 2001. Environmental Decision Making of Nakdong River Basin by the Environmental Accounting. *J Environ Sciences*. 10(2): 85-90. [Korean Literature]
- Lee SM & Odum HT. 1994. Emergy analysis overview of Korea. *J Environ Sciences*. 3(2): 165-175. [Korean Literature]
- Lee SM, Son JH, Kang DS, 2000. EMERGY Analysis of Korea's Natural Environment and Economic Activity = Evaluation of Korea's Sustainable Development by the Systems Ecology (1). *J Environ Sciences*. 9(6): 449-454. [Korean Literature]
- Lim JH, Kang DS, Lee SM. 2005. Emergy evaluation of the optimum number of stories of new apartment buildings. *J Environ Sciences*. 14(5): 473-480. [Korean Literature]
- Odum HT. 1983. *Systems Ecology*. John Wiley & Sons. New York. p. 644.
- Odum HT. 1988. Energy, environment and public policy. *UNEP regional seas reports and studies*. 95: 109.
- Odum HT. 1996. *Environmental Accounting*.

- John Wiley & Sons. New York. p. 370.
- Oh HT, Kim NK, Lee SM. 2008. Sustainability Evaluation for Shellfish Production in Gamak Bay Based on the Systems Ecology: 1. EMERGY Evaluation for Shellfish Production in Gamak Bay. J Environ Sciences. 17(8): 841-856. [Korean Literature]
- Oh HT, Kim NK, Lee SM. 2008. Sustainability evaluation for shellfish production in Gamak bay based on the systems ecology: 2.Environment Based on the Emergy Evaluation. J Environ Sciences. 17(8): 857-869. [Korean Literature]
- Oh HT, Kim NK, Lee SM. 2008. Sustainability Evaluation of Shellfish Production in Gamak Bay Based on Systems Ecology: 3.Energy Modeling of Shellfish Aquaculture Production in Gamak Bay. J Environ Sciences. 17(9): 969-980. [Korean Literature]
- Son JH, Lee SM. 2000. A Study on the sustainable development of Pusan Metropolitan City by the EMERGY Evaluation. J Environ Sciences. 9(3): 185-191. [Korean Literature]