

에머지(Emergy) 개념을 이용한 다목적댐 건설의 생태경제학적인 평가방법에 관한 연구

강대석 · 박석순
이화여자대학교 환경공학과

A Methodological Study on Ecological Economic Evaluation of a Multipurpose Dam Construction Using Emergy Concept

Kang, Dae Seok · Park, Seok Soon

Dept of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

Abstract

Emergy concept was used to evaluate the contributions of a dam construction to the real wealth of our economy. A dam that is proposed as a multi-purpose dam was used to illustrate emergy evaluation methodology. Models for emergy evaluation were constructed with energy systems language, a symbolic modeling language which presents network properties of systems holistically. Water supply was the most important contribution in terms of emergy, which reflects that the dam is proposed for stable water supply to a local region. Generation of electricity was the second in emergy benefits of the dam. Emergy costs were more evenly distributed among the costs which would occur as a result of the dam construction. Emergy yield ratio was 1.30 if sediments are not included, and 1.15 if sediments are included, which results in net yield in both cases. The ratio would, however, fall below 1.0 if rare species within the system boundary are lost as a result of the dam construction because of the high emergy value included in biotic species, which means that emergy costs will be greater than emergy benefits. This study illustrated a new methodology in environmental impact assessment to better manage our environments in an age of diminishing resources.

Keywords: emergy, dam construction, ecological economic evaluation

I. 서론

지난 40여년 동안의 급속한 경제성장은 생활수

준의 향상을 가져다주었지만, 이와 동시에 이러한 고도성장의 기반이 되었던 자원의 고갈 및 환경의 파괴를 초래하였다. 따라서, 최근에는 개발

과 보존의 적절한 조화를 통해 미래에까지 지속 가능한 성장을 추구하려는 노력들이 대두되고 있다. 그러나, 지속 가능한 성장을 위한 정책을 수립하는데 있어서 우리의 현대 산업문명을 지탱해주는 자연 환경 및 자원에 대한 올바른 가치 평가가 반드시 선행되어야 한다. 본 연구에서는 자연 자원이 우리의 경제에 기여하는 진정한 가치를 평가하기 위한 노력들 중의 하나인 에머지(Emergy, spelled with an "m") 평가 방법을 통하여 개발과 보존이 상충되는 사안들에 있어서 정책 결정을 위한 새로운 시각을 제시해 보고자 하였다. 에머지 평가는 한 가지 자원이 가지고 있는 가치는 이를 생산하기 위해 직접 및 간접적으로 필요한 에너지에 비례한다는 가정에 기반하고 있다¹⁰⁾.

우리 나라에서 그 동안 전력 생산, 용수 공급, 홍수 조절 등을 위하여 건설되었던 댐들은 대부분 전통적인 비용-편익 방법을 통하여 분석되어 왔다⁴⁾. 그러나, 이러한 경제학적인 방법들은 제안된 댐이 주변의 자연 환경 및 경제에 미치는 장기간의 영향들을 포함하지 못하였다. 에머지 개념을 이용한 자연 환경 및 경제에 대한 분석은 자연 환경의 보존 및 개발에 관한 많은 새로운 관점들을 제시해왔으며¹⁰⁾, 브라질의 아마존강에 건설되었던 댐과 태국의 메콩강에 건설이 제안되었던 댐이 가져올 영향들을 평가하는데 이용되어 왔다^{5,6)}. 우리 나라에서는 에머지 개념을 이용한 우리 나라 전체의 개관모델⁷⁾, 수산업 분석²⁾ 등에 적용되어 왔지만, 댐의 건설이 가져올게 될 영향을 에머지 개념을 이용하여 분석한 예는 아직 없다.

본 연구에서는 현재 국내에서 수자원 개발계획의 일환으로 추진되고 있는 댐을 예로 들어 댐 건설이 가져올 긍정적인 효과들과 부정적인 영향들을 에머지 개념을 이용하여 분석, 비교하여 보았다.

II. 에머지(Emergy) 개념의 소개

에머지는 “한 가지의 서비스나 생산물을 만드는 과정에서 직접 및 간접적으로 이미 소모된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의된다^{8,9,10)}. 에머지의 단위로는 emjoule을 사용한다. 에머지 이론은 여러 가지 다양한 환경 자원들을 에너지라는 공통 화폐로 표시하려는 시도이다. 이렇게 함으로써 서로 다른 특성을 가진 자원들을 동일한 기준에서 비교할 수 있게 되는 것이다.

에머지는 “Energy Memory”를 줄여서 표현한 용어로 간주될 수 있는데¹⁰⁾, 한 가지 자원이 가지고 있는 에너지 관점에서의 가치는 이 자원이 형성되기까지 열역학 제2법칙에 따라 소모되었던 모든 에너지들까지 포함시켜야 한다는 개념이다. 즉, 목재 1 m³의 가치에는 열량계로 측정이 가능한, 현재 이 목재에 남아 있는 에너지(실제 에너지량)뿐만 아니라, 1 m³의 목재가 형성되는 동안에 더 이상 사용될 수 없는 에너지로 사라졌던 모든 에너지-태양, 바람, 강우, 영양물질 등-까지 포함시켜야 한다는 것이다. 열역학 제2법칙을 따라 사라졌던 에너지가 존재하지 않았다면 1 m³의 목재가 생산되지 못했을 것이기 때문이다.

현재 에머지 평가 방법론에서 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준으로 삼은 에너지는 태양 에너지이며, 따라서 에머지의 단위는 solar emjoules(sej)을 사용하고 있다.

또한, 에머지 개념은 다양한 에너지들 사이에 일을 할 수 있는 능력이 다르다는 점을 강조한다. 즉, 동일한 에너지량이라도 태양 에너지 1 calorie는 우리 인간에 포함되어 있는 에너지 1 calorie가 할 수 있는 것과 같은 작용을 할 수 없다는 것이다. 더 고급의 일을 할 수 있으며, 더 큰 조절작용을 할 수 있다는 점에서 인간의 에너지 1 calorie는 태양 에너지 1 calorie보다 더 질이 높다고 할 수 있다. 많은 양의 태양 에너지가 생태계의 먹이사슬을 따라 축적되는 과정을 통해 에너

지의 질이 높아진 후에야 우리 인간에게까지 도달하는 것이다. 에머지 이론에서는 이러한 서로 다른 에너지 사이의 질의 차이를 Transformity 라는 개념으로 나타낸다. Transformity는 한 가지 자원이 형성되는데 직접 및 간접적으로 투입되었던 기준이 되는 에너지량의 차이를 나타내며, Transformity 가 클수록 자원의 질은 더 높다. Solar transformity 는 모든 자원의 질을 현재 에머지 이론에서 기준으로 사용하고 있는 태양 에너지를 사용하여 나타낸 값으로, 단위는 solar emjoules per joule (sej/J)을 사용한다.

앞에서 사용한 목재의 예에서 현재 이 목재에 포함되어 있는 에너지가 100J 이고, 이 목재가 형성되는 동안에 직접 및 간접적으로 투입되었던 모든 에너지를 태양 에너지 기준으로 표현하여 1,000,000 J이라고 가정한다면, 이 목재의 에머지값은 1,000,000 emjoules 이 되고, Solar Transformity 는 10,000 sej/J 가 된다. 따라서, 주어진 자원의 실제 에너지량과 이 자원의 Transformity 값을 알고 있다면, 이 자원이 가지고 있는 에머지값을 계산할 수 있게 된다.

III. 모델 및 에머지 평가표 작성

댐 건설이 인간을 포함한 주변 생태계에 미치는 영향을 시스템의 관점에서 분석하기 위하여 댐 건설 전과 후로 나누어 모델이 작성되었다. 이를 위해 미국의 생태학자인 Howard T. Odum 이 개발한 에너지 시스템 언어(Energy systems language)가 이용되었다⁸⁹⁾. 에너지 시스템 언어는 분석하고자 하는 시스템의 성분들과 이들 사이의 연결관계를 특별한 의미들이 부여된 기호들을 이용하여 시각적으로 나타내며, 이를 통해 전체 시스템의 유기적인 관계를 종합적으로 파악할 수 있도록 해준다.

에너지 시스템 모델은 첫째 연구하고자 하는 시스템의 경계를 설정하고, 둘째 중요한 외부의

에너지원들에 대한 목록을 작성하고, 셋째 시스템 내부의 주요 성분들을 파악하고, 넷째 시스템 내부에서 일어나는 주요 생산 및 소비 과정들에 대한 목록을 작성하고, 다섯째 시스템 경계외부의 에너지원들로부터 시작하여 시스템 내부의 각 성분들을 적절히 배치한 후 이들을 에너지, 물질, 정보 및 화폐의 흐름에 따라 연결함으로써 작성된다.

이상에서 작성된 모델로부터 예로 제시된 댐의 건설이 가져오게 될 영향들이 파악되고, 이것이 에머지 평가표를 작성하는데 이용되었다. 에머지 평가표에 사용된 각 항목에 대한 원자료들은 기존의 문헌들로부터 파악되었으며, 각 항목에 대한 Transformity 역시 기존의 에머지 분석결과로부터 구하였다. 각 항목의 원자료에 이에 해당하는 Transformity 값을 곱하여 각 항목이 기여하는 에머지값이 계산되었으며, 이로부터 댐의 건설이 가져올 이득과 손실사이의 비율인 에머지 산출비율(Energy yield ratio)이 계산되어 댐 건설의 효과를 파악하고자 하였다.

IV. 결과 및 고찰

건설예정인 다목적댐이 주변 지역의 환경에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이 지역의 시스템 다이어그램이 각각 댐 건설 전과 건설 후로 나누어 작성되었다 (Figure 1과 Figure 2). 이들은 댐 건설이 추진되고 있는 지역의 주요 외부 에너지원 및 구성 성분들과 이들 사이의 연결관계를 시각적으로 보여주고 있다. Figure 1은 사업시행 이전의 주변 지역에 대한 시스템 다이어그램을 보여 주고 있다. 이 다이어그램에서 시스템의 경계는 댐 건설 예정 지역뿐만 아니라 댐이 완공되었을 때 이로부터 혜택을 받게 될 주변의 도시 지역까지를 포함하였다. 이렇게 함으로써 댐의 건설이 가져올 영향이 좀 더 큰 시스템에서 파악될 수 있기 때문이다. Figure 1은 다양한 형태의 에

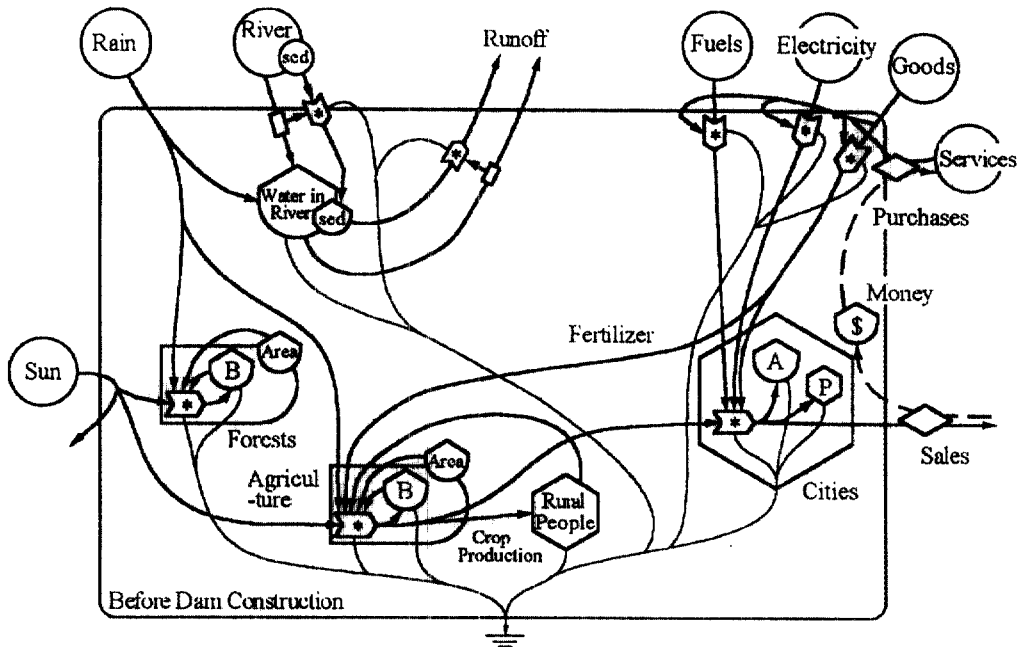


Fig. 1. Energy systems diagram before the dam construction.
A=Assets, B=Biomass, P=Population, sed=sediments.

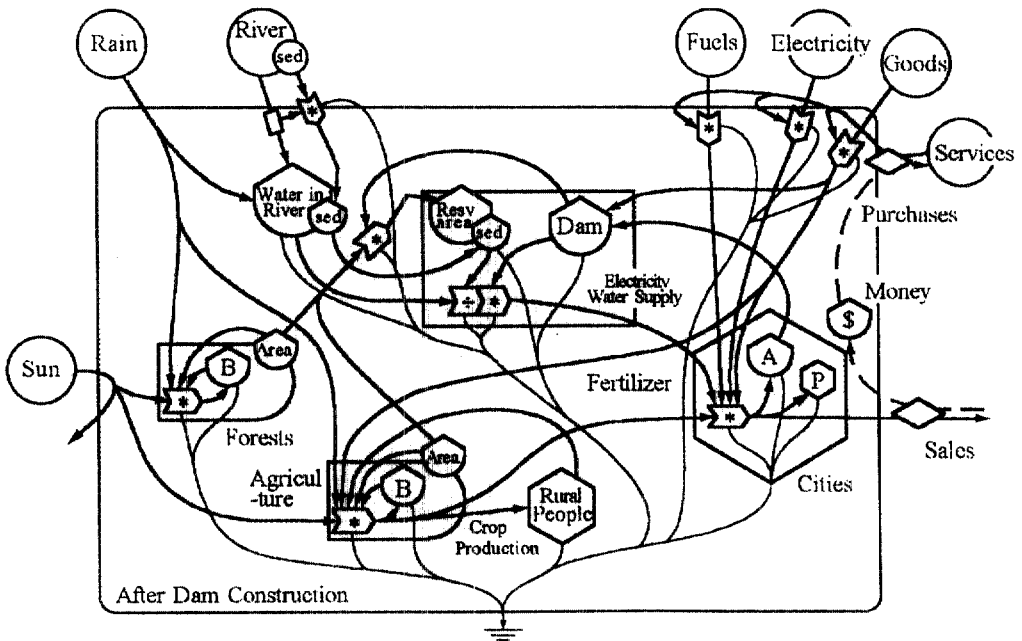


Fig. 2. Energy systems diagram after the dam construction.
A=Assets, B=Biomass, P=Population, sed=sediments.

너지원들이 시스템의 경계를 가로질러 유입되고 있음을 보여주고 있다. 태양에너지, 강우, 강물의 유입 등의 자연 자원과 함께 연료, 전력, 상품 및 용역 등 시장을 통해 구입하여야 하는 항목들도 외부 에너지원에 포함되어 있다.

이 시스템 내에서 삼림은 태양에너지와 강우를 이용하여 숲에 생물량을 저장하며, 지역 주민들에 의해 경작되는 농지는 태양에너지 및 강우 등의 자연 에너지와 비료 등과 같이 외부로부터 구입된 물품들이 사용되어 지역 주민 및 주변 도시 주민들을 위한 식량을 생산해낸다. 도시는 농업 부문의 생산물과 연료, 전력, 상품 및 용역 등을 외부로부터 구입하여 자산을 형성하며 도시에 거주하는 사람들의 생활 기반을 제공한다. 또한, 도시 생산중의 일부는 외부로 판매되어 화폐가 시스템 내로 유입된다. 이렇게 유입된 화폐는 외부 자원들을 구입하기 위하여 사용된다.

시스템 내에 위치하는 강물은 강우와 강의 상류로부터 유입되며, 이 물은 댐이 건설되기 전에는 이 시스템을 통과하여 하류로 빠져나간다. 또한, 물의 흐름과 함께 강의 상류로부터 유입되는 퇴적물들도 이 시스템을 통과하여 하류로 공급된다. 이 퇴적물들은 강의 하구에서 나타나는 높은 생산성을 뒷받침한다.

댐이 건설될 경우 나타날 사업 지역의 시스템 다이어그램이 Figure 2에 제시되어 있다. 일차적으로 댐의 건설은 건설 이전에는 하류로 흘러나가는 강물과 이에 포함된 퇴적물을 댐의 건설로 형성되는 호수에 가두어 둔다. 이로 인해 강 하류로의 퇴적물 운반이 제한되어 강의 하류 및 하구 지역에 나타나는 높은 생산성이 감소하게 된다. 또한, 기존의 삼림 및 농지의 수몰로 인해 시스템 내의 생산이 감소한다. 댐의 건설 및 유지 관리에 투입되는 재화 및 용역 또한 제한된 댐이 유발하는 비용에 속한다. 댐의 건설로 인해 수몰되는 지역 주민의 이주에 비용이 소모되며, 이로 인한 지역사회의 혼란 또한 댐의 건설이 유발하는 손실

에 속한다. 그러나, 댐의 건설로 주변 지역에 안정적인 용수 공급 및 홍수 조절 등의 효과를 기대할 수 있으며, 아주 높은 가치를 지닌 에너지인 전기가 생산되어 주변 도시 지역 및 산업단지의 높은 경제적 생산을 뒷받침하는 이익이 발생한다. 또한, 댐의 건설로 손실되는 삼림과 농지의 생산성이 댐의 건설로 형성되는 호수에서 나타나는 생산성의 증가로 인해 어느 정도 상쇄될 수도 있다.

이상의 두 모델을 통해 파악된 다목적댐 건설이 가져오게 될 긍정적인 효과들과 이로 인한 손실이 Table 1에서 에머지의 관점에서 비교되었다. Table 1은 댐의 건설이 가져오게 될 대부분의 에머지 이득은 용수 공급(전체 에머지 이득의 89.6%)에 있음을 보여주고 있다. 이는 예로 제시된 다목적댐 건설이 수자원개발계획의 일환으로 추진되고 있다는 것과 일치한다. 용수공급 다음에는 전력생산이 전체 에머지 이득의 10.3%를 차지하였다. 나머지 두 항목인 홍수조절과 댐의 건설로 생기는 호수의 생산성으로부터 얻게 될 에머지 이득은 0.1% 미만으로 미미하였다.

댐 건설이 초래할 에머지 손실에는 Table 1에 제시된 각 항목이 고루 기여하였으며, 상위 세 가지 항목인 댐의 건설비용, 수몰민의 재정착에 소요되는 비용, 그리고 지역사회 혼란이 약 58%를 차지하였다.

댐 건설이 초래할 에머지 비용과 댐건설이 가져올 에머지 이득사이의 비율인 에머지 산출비율(Energy yield ratio)은 댐이 건설됨으로써 하류로의 운반이 차단될 퇴적물을 에머지 손실에 포함시키지 않은 경우 1.30, 퇴적물을 손실에 포함시킨 경우 1.15로 나타났다. 에머지 산출비율이 1.0보다 크다는 것은 댐의 건설이 가져올 에머지 이득이 이로 인해 초래될 에머지 손실보다 큼을 나타낸다.

그러나, Table 1의 에머지 손실에는 아직 조사가 이루어지지 않은 희귀 생물종의 손실 등과 같

Table 1. Emery evaluation of a multipurpose dam construction.

No.	Item	Raw Units	Transfomity (sej/unit)	Solar Emery (sej/yr)
1	River geopotential	8.33E+13 J	23564	1.96E+18
EMERGY BENEFITS				
2	Electricity	1.99E+13 J	159000	3.16E+18
3	Aquatic productivity	1.27E+13 J	440	5.59E+15
4	Water supply	6.70E+14 J	41000	2.75E+19
5	Flood control	3.70E+04 \$	1.52E+12	5.62E+16
	Total			3.07E+19
EMERGY COSTS				
6	Operation and maintenance	1.80E+06 \$	1.52E+12	2.74E+18
7	Construction services	3.62E+06 \$	1.52E+12	5.50E+18
8	Agricultural production	1.59E+09 g	9.70E+08	1.54E+18
9	Forest production	2.10E+14 J	1.87E+04	3.93E+18
10	Resettlement	3.58E+06 \$	1.52E+12	5.44E+18
11	Social disruption	452 peo	1.00E+16	4.52E+18
12	Sediments	4.88E+13 J	6.30E+04	3.07E+18
	Total	2.67E+19		
	Emery yield ratio without sediments:		1.30	
	Emery yield ratio with sediments:		1.15	

Data sources and calculations are given below.

Footnotes to Table 1.

1. River geopotential
Average discharge = 5.4 m³/sec (Ref. 4)
Energy (J) = (1.7 E8 m³/yr)*(1.0 E3 kg/m³)*(9.8 m/s²)*(50 m) = 8.33 E13 J/yr
2. Electricity
Average power = 5522 MWh/yr (Ref. 4)
Energy (J) = (5522 MWh/yr)*(3.6 E9 J/MWh) = 1.99 E13 J/yr
3. Aquatic productivity
Reservoir area = 8.3 km² (Ref. 4)
Productivity = 1 gC/m²/day (assumed)
Energy (J) = (1 gC/m²/day)*(2.5 gOM/gC)*(1674 J/gOM)*(365 day/yr)*(8.3 km²)*(1.0 E6 m²/km²) = 1.27 E13 J/yr
4. Water supply
Yearly water supply = 3.72 E5 m³/day (Ref. 4)
Energy (J) = (1.36 E8 m³/yr)*(1000 kg/m³)*(4.93 E3 J/kg) = 6.70 E14 J/yr
5. Flood control
Yearly benefits = ₩ 4.4 E7/yr = \$ 3.7 E4 /yr (Ref. 4)
6. Operation and Maintenance
Yearly costs = ₩ 2.16 E9/yr = \$ 1.8 E6/yr (Ref. 4)
7. Construction services (assumes a useful dam life = 50 years)
Costs = ₩ 2.17 E11 = \$ 1.81 E8 (Ref. 4)
Yearly costs = (\$ 1.81 E8)/(50 years) = \$ 3.62 E6/yr

8. Lost agricultural production

- Agricultural Area = 2.97 km² (Ref. 4)
Yield = 5.37 E5 kg/km²/yr (estimated from Ref. 3)
Toal yield = (5.37 E5 kg/km²/yr)*(1000 g/kg)*(2.97 km²) = 1.59 E9 g/yr

9. Lost forest production

- Forest area = 5.33 km² (Ref. 4)
Net production = 13.1 t/ha/yr (used that of Ref. 1)
Gross production = (5.33 km²)*(100 ha/km²)*(13.1 t/ha/yr)*(1.0 E6 g/t)*(2)*(3.6 kcal/g)*(4186 J/kcal) = 2.10 E14 J/yr

10. Resettlement (assumes a useful dam life = 50 years)

- Costs = ₩ 2.15 E11 = \$ 1.79 E8 (Ref. 4)
Yearly costs = (\$ 1.79 E8)/(50 years) = \$ 3.58 E6/yr

11. Social disruption (assumes social disruption is equal to the emery value of the population over a 30-year generation)

- Number of people = 753 people (Ref. 4)
Emery per capita = 10.01 E15 sej/yr/cap. (Ref. 7)
People years lost = (753 people)*(30 years)/(50 years) = 452 people

12. Sediments

- Volume = 1.08 E5 m³/yr (Ref. 4)
Energy (J) = (1.08 E5 m³/yr)*(2.0 E6 g/m³)*(1% OM)*(5.4 cal/g)*(4186 J/cal) = 4.88 E13 J/yr

이 댐 건설이 자연 생태계에 미치는 영향들이 포함되지 않았다. 예를 들어, 생물종의 Transformity 값은 $1.00E19$ sej/species로 아주 높기 때문에 만약 댐의 건설로 인해 이 연구에서 설정한 시스템의 경계 내에서 희귀 생물종의 손실이 일어난다면 댐의 건설이 가져올 에머지 손실이 에머지 이득보다 크게 될 것이다. 따라서, 댐의 건설이 주변 자연생태계에 미치는 영향들이 포함되고 난 후에야 댐 건설이 에머지의 관점에서 이익인가 손해인가 하는 점이 명확해질 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 댐 건설이 가져올 이득과 손실이 에머지의 관점에서 평가되었다. 댐 건설이 자연 생태계에 미치는 영향이 포함되지 않은 경우에 댐 건설은 에머지 분석 결과 순산출(net yield)을 보여주었지만, 희귀 생물종의 손실과 같이 댐 건설이 생태계에 미치는 영향이 포함된다면 에머지 손실이 에머지 이득보다 더 클 수 있음이 제시되었다.

우리가 현재의 생활 수준을 유지하고자 한다면 자연 환경의 개발은 필수적이다. 그러나, 이것이 우리의 생존에 있어서 가장 기본적인 자연 환경을 파괴하는 것이 되어서는 안되며, 또한 맹목적인 자연 환경의 보존 또한 우리의 삶의 수준을 향상시킬 수 없음도 분명하다. 이상의 연구 결과는 개발과 보존이 상충되는 사안들에 있어서 지금까지 개발의 여부를 판단하는데 이용되어 왔던 전통적인 방법들 이외에 자연 환경이 우리 경제에 기여하는 가치를 제대로 평가할 수 있는 방법론이 필요함을 보여주었다. 에머지 평가와 같은 방법론을 이용하여 현상 보존을 포함하여 여러 가지 개발 대안들을 비교, 분석하고, 이를 토대로 좀

더 환경 친화적이고 경제에 기여하는 바가 큰 대안을 선택함으로써 우리 사회의 진정한 부의 증대 및 지속가능한 성장이 보장될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 박인협, 이석일, 1990, 한국산 4개 지역형 소나무 천연림의 물질생산에 관한 연구, 한국임학회지, 79:196-204.
2. 손지호, 신성교, 조은일, 이석모, 1996, 한국수산업의 EMERGY 분석, 한국수산학회지, 29: 689-700.
3. 통계청, 1998, 한국통계연감. 720p.
4. 한국수자원공사, 1998, 호남동남부지역 수자원 개발계획 수립조사 보고서.
5. Brown, M.T., 1986, Energy analysis of a hydroelectric dam near Tucuruí, in H.T. Odum et al. (ed.), Energy systems overview of the Amazon basin, 82-91.
6. Brown, M.T., and T.R. McClanahan, 1996, Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals, Ecological Modelling, 91:105-130.
7. Lee, S.M., and H.T. Odum, 1994, Emergy analysis overview of Korea, J. of the Korean Environmental Sciences Society, 3:165-175.
8. Odum, H.T., 1983, Systems Ecology, Wiley, New York, 644p.
9. Odum, H.T., 1994, Ecological and General Systems, University Press of Colorado, Niwot, 644p.
10. Odum, H.T., 1996, Environmental Accounting, Wiley, New York, 370p.