

시스템 생태학적 접근법에 의한 서낙동강 유역의 지속성 평가

김진이[†] · 박배경 · 이수웅 · 류덕희

국립환경과학원 물환경연구부

Sustainability Evaluation of Western Nakdong River Basin by the Systems Ecology

Jin Lee Kim[†] · Bae Kyung Park · Su Woong Lee · Doug Hee Rhew

National Institute of Environmental Research Water Environmental Research Department

(Received 7 November 2009, Revised 20 February 2010, Accepted 4 March 2010)

Abstract

An energy analysis of the main energy flows driving the economy of humans and life support systems consists of environmental energies, fuels, and imports, all expressed as solar emjoules. Total energy use (371 E20 sej/yr) of the Western Nakdong River Basin is 97 per cent from imported sources, fuels and goods and services. Energy flows from the environment such as rain and geological uplift flux accounted for only 2.9 percent of total energy use. Energy yield ratio and environment loading ratio were 1.03 and 33.27, respectively. Energy sustainability index, a ratio of energy yield ratio to environment loading ratio, is therefore less than one, which is indicative of highly developed consumer oriented economies. It is necessary for an efficient management of Western Nakdong River Basin to reduce pollution load basically and to restructure economic activities into an environmental friendly industrial structure depending on renewable energy and resources.

keywords : Energy analysis, Energy sustainability index, Energy yield ratio, Environment loading ratio, Renewable sources

1. 서론

서낙동강은 낙동강 서쪽으로 흐르는 강으로, 낙동강 권역의 서낙동강 수계에 속하며, 유로연장 26.4 km·하천연장 18.5 km·유역면적 285.1 km²이다(서낙동강유역 관계기관 합동, 2005). 강서구 대저동 대저수문부터 명지동·녹산동의 명지수문·녹산수문 경계지점까지 흐르며 이후 남해 앞바다로 흘러나간다. 인근에 관개용수와 농업용수를 공급하는 역할을 하지만, 물의 흐름이 여러 수문에 가로막혀 본류와 차단됨으로써 고여 있는 호수 상태를 이루고 있다. 또한 농업 및 축산활동에 의한 비점오염원과 내수면 양식어업에 의한 오염원의 유입, 가정과 공장, 식당 등의 각종 오·폐수가 여러 지천을 통해 유입되면서 수질이 나빠졌다(서낙동강유역 관계기관 합동, 2005).

환경부에서는 유역 및 수질관리를 위한 노력으로 기존의 농도규제방식에서 총량중심으로 관리하고자 오염총량관리제를 도입하였다. 서낙동강 유역의 오염총량관리 단위유역은 낙본N유역에 해당되며 행정구역으로는 경상남도 김해시와 부산광역시 강서구의 경계유역이다. 1단계 최종년도('10년)까지 대상물질 BOD로 설정하여 시행 중에 있으며, 2단계 최종년도('15년)까지는 BOD와 T-P를 동시 관리하는 계획으로 낙동강수계 오염총량관리 기본계획에서 제시한 낙본N단위유역 할당부하량을 준수하기 위한 노력으로 환경기

초시설 신·증설과 하수관거정비 및 비점오염원 저감시설로 저류조 설치 등 많은 노력을 하고 있다(김해시, 2006; 부산광역시, 2005). 1단계 시행계획에 따른 연차별 BOD 삭감계획을 살펴보면, 부산광역시의 경우 2007년까지 38.9%, 2008년~2010년에 61.1%로 집중되어 있으며, 김해시의 경우 2007년까지 44.5%, 2008년~2010년까지 55.5%로 집중되어 있는 것으로 추진계획 중에 있다(박재홍, 2008). 그럼에도 불구하고, 서낙동강 유역은 하천의 자연적인 정화능력을 고려하지 않은 무분별한 난개발로 수질오염이 심화되어, 오염총량관리제도 시행으로 유역으로부터의 오염물질에 대한 삭감계획 등 유역관리 및 수질개선사업이 시급한 실정이다. 하천유역 및 수질관리를 위해 삭감계획뿐만 아니라 시스템 생태학적 접근법을 통해 서낙동강의 지속적인 유역관리방안을 제시하고자 한다.

자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 파악하는 energy 개념은 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정뿐만 아니라 인간과의 유기적 상호관계를 과학적이고 정량적으로 파악할 수 있는 생태계 가치평가 개념이다. 이러한 energy 개념을 이용한 시스템 생태학적 접근법은 국외 및 국내에서 많은 연구자들에 의해 활발히 사용되고 있다. 국외에서의 Odum과 Brown 등은 국가, 지역, 도시, 하천, 자연환경 등의 다양한 대상 시스템에 대한 연구를 수행하였으며(Brown and McClanahan, 1996; Odum et al., 1987, 1996), 국내에서는 한국의 자연환경과 경제활동(이석모 등, 2000; Lee and Odum, 1994)에 대한 지속성 평

[†] To whom correspondence should be addressed. emery99@korea.kr

가, 도시시스템에 대한 지속성 평가(손지호, 1999), 환경회계에 의한 낙동강 유역 관리(김영진 등, 2001) 및 낙동강 유역의 지속성 평가(김진이 등, 2000) 등 현재까지 많은 연구자들이 자연환경자원의 가치평가 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템에서 동일한 가치척도로 비교하는 emergy로 하천의 실질적인 가치와 경제시스템에 대한 emergy 지표인 영속성 에너지원의 점유율, emergy 생산비, emergy 투자비, 1인당 emergy 사용량, 인구수용력, 단위 면적당 emergy 사용량, 환경부하율, 지속성 지수를 평가하여 서낙동강 유역의 자연환경과 경제활동에 대한 실질적 가치와 각종 지표를 통해 진정한 수질관리는 물론 서낙동강 유역의 사전예방적인 차원에서 오염원 저감방안 및 지속가능한 발전을 이룰 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상 범위

서낙동강 유역은 평가천, 맥도강, 대감천, 예안천, 주중천, 신어천, 지사천, 조망강 유역으로 구성되어 있으며 행정구역상 부산광역시 강서구와 경상남도 김해시에 걸쳐있다. 유역면적 285.1 km², 유로연장 18.5 km이며 주로 농업용수 공급원으로 이용되고 있다(Fig. 1).



Fig. 1. Western Nakdong River Basin.

2.2. 시스템 경계의 설정 및 다이어그램 작성

서낙동강 유역은 경제적인 요인과 환경적인 요인이 결합된 시스템으로, 자연환경자원과 경제적인 요인으로 구분하여 공간적 경계를 설정하며 자연환경과 경제활동에 대한 생산, 소비, 재순환 등을 전체적(Top-down)으로 파악하기 위해서 다이어그램을 작성한다.

먼저, 대상 시스템의 경계를 설정하고 대상시스템 내의 각 요소로서 생산, 소비 그리고 재순환 과정을 파악한 다음 이들에 대한 목록을 작성하고, 이 목록을 토대로 외부에너지원과 내부의 각 요소를 배치한다. 에너지, 물질 및 화폐의 흐름에 따라 에너지 시스템 언어의 각 기호를 연결한다.

2.3. Emergy 분석

2.3.1. 시스템 생태학

자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 파악하는 시스템 접근법(System approach)은 많은 연구자들에 의해 활발히 사용되고 있는데 Odum은 1962년 이후 에너지 언어를 생태계 시스템의 분석, 합성, 그리고 시뮬레이션에 이용하였다. 그리고 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템에서 동일한 가치척도로 비교하는 emergy 개념을 이용하여 여러 분야를 연계시킬 수 있는 에너지 척도를 기초로 자료를 수집, 분석, 예측하여 시스템을 종합적으로 평가하였다(Odum, 1983).

시스템 생태학은 지속적인 발전가능성을 평가하기 위한 구체적인 접근법으로 시스템 분석과 에너지 시스템 모델로 구분할 수 있다. 이러한 시스템 분석을 통해 국가와 도시 그리고 유역 시스템은 영속성 에너지를 포함하여 교역과 교환을 통해 유입되는 화석연료 및 각종 재화와 용역에 의해 제한되는 것으로 파악되고 있으며, 에너지 시스템 모델링을 통해서 시스템의 지속적인 발전가능성의 변화양상을 파악하는 데 유용하게 이용된다(Brown and Ulgiati, 1997).

2.3.2. Emergy

Emergy는 한가지의 상품이나 용역을 생산하기 위하여 직·간접적으로 이용된 모든 에너지를 평가하기 위한 가치 척도이다. 지구 순환과정에서 각 에너지원은 다량의 저급 에너지로부터 소량의 고급에너지로 전환되는 계층구조를 가지고 있으므로 물리학적으로 같은 크기의 에너지라도 실질적으로 일을 할 수 있는 능력에는 차이가 있다. 이러한 차이를 지구생산활동의 원동력인 태양에너지를 기준으로 동일한 척도로 평가하기 위하여 각기 다른 형태의 재화와 용역이 형성되기까지 직·간접적으로 소모된 태양 에너지를 Solar emergy라고 정의한다.

2.3.3. Transformity

Emergy는 각 에너지원에 내재된 태양에너지에 대한 척도이며, 이를 계산하기 위해 시스템 내에서 태양에너지로부터의 전환정도를 나타내는 solar transformity가 사용된다. 이는 에너지 질의 척도로 어떤 형태의 에너지 1 joule을 만들기 위해서 직·간접적으로 소모된 태양에너지 양으로 정의되며, 단위는 solar emjoules per joule(sej/j)로 표현된다. Transformity는 에너지 변환의 계층구조를 따라 진행하면서 점차적으로 증가되며, 에너지 계층구조 내의 에너지 흐름이나 보유량에 대한 질의 척도로 이용된다.

2.3.4. EmWon

Emergy를 화폐단위로 환산한 것으로 경제적 생산을 위하여 소모된 총 emergy와 생산된 화폐가치와의 비를 이용하여 계산한다. 이 가치는 단순한 화폐가치가 아니라 과학적 척도로서 실질적인 부를 평가하는 emergy에 기초한 거시경제적 가치이다.

2.3.5. Energy 분석표 작성

서낙동강 유역에서 생산활동을 가능케하는 에너지원이 가지는 실질적인 역할과 가치를 동일한 척도로 평가하기 위해서 Table 1과 같은 energy 분석표를 작성한다.

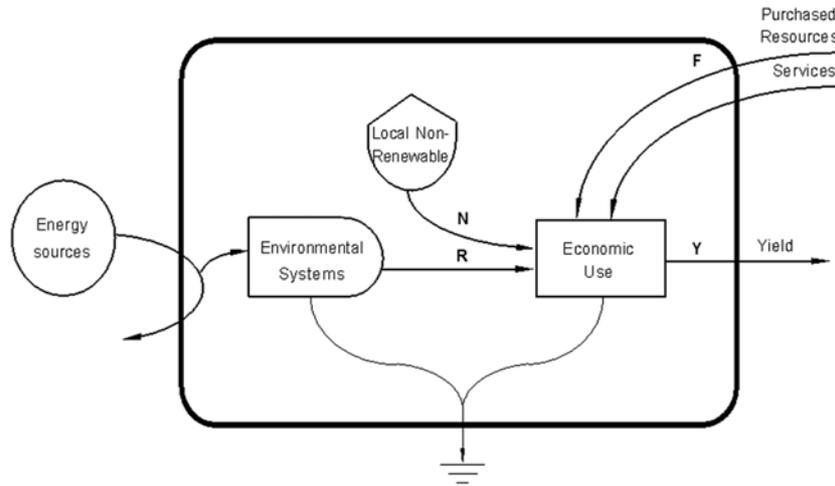
첫 번째 열에는 에너지 시스템 다이어그램에서 파악된 주요에너지원에 관한 항목을 기입한다. 두 번째 열에는 각 항목의 실제 에너지(J/yr), 물질(G/yr), 또는 화폐(\$/yr)단위의 값을 각종 통계자료로부터 산정한다. 세 번째 열에는 각 항목에 알려진 transformity 값을 기입한다. 네 번째 열에는 각 항목의 실제 값에 대한 transformity 값을 곱하여 energy 값을 산정한다. 다섯 번째 열에는 주요 에너지원의 energy 값을 energy dollar ratio로 나누어 화폐로 환산된 가치를 기입한다.

Table 1. Tabular format for energy evaluation

| Item | Date units (J,G,or\$) | Solar transformity (sej/unit) | Solar emergy (sej/yr) | Macro-economic value (Em\$) |
|--|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| (one line here for each source, process, or storage) | | | | |

2.3.6. Energy 지표 계산

Emergy 분석에서 구한 emergy 값을 기초로, 서낙동강 유역에 대한 특성을 파악하기 위해서 시스템의 요소들을 자연환경의 유입과 인간경제활동에 의한 유입으로 분류하고, 이를 바탕으로 emergy 지표들을(영속성 자원의 점유율, emergy 생산비, emergy 투자비, 환경부하비, 지속성지수) 계산한다(Fig. 2).



Yield(Y) = R + N + F

% Renew = R / (R + N + F)

EMERGY yield ratio = Y / F

EMERGY investment ratio = F / (R + N)

Environmental loading ratio = (F + N) / R

Sustainability index = EYR / ELR

Fig. 2. Emergy used indices, account for local renewable emergy inputs (R), local nonrenewable inputs (N), and purchased inputs from outside the system (F).

3. 결과 및 고찰

3.1. 서낙동강 유역에 대한 시스템 분석

서낙동강 유역의 자연환경과 경제활동에 대한 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 3과 같다. 시스템 외부로부터는 자연환경 활동에서 기인한 태양, 바람, 비와 지질작용과 같은 영속성 에너지원과 경제활동을 통한 석탄, 천연가스, 석유, 그리고 재화와 용역 등이 유입되고 있다.

시스템 내부에서는 자연녹지 및 농업의 생산활동과 교역 및 교환을 통하여 유입된 에너지원을 이용한 각종 산업 및 상업활동 그리고 도시의 소비활동이 이루어지고 있다.

시스템 내부의 생산자인 자연녹지 및 농경지에서는 시스템 외부의 자연환경 활동으로부터 유입되는 태양, 바람, 비를 이용하여 생산이 이루어지고 있다. 서낙동강 유역의 경제활동은 자연녹지 및 농경지에서의 생산물을 기초로 교환과 교역을 통해 유입되는 화석연료와 각종 재화와 용역을 이용하여 시스템 내부의 총 경제활동을 형성하며, 이를 화폐가치로 평가한 것이 지역내 총생산액(GRDP)이다.

3.2. Emergy 분석결과

서낙동강 유역에 해당되는 경남의 김해시와 부산광역시 강서구의 자연환경과 경제활동을 유지시켜 주는 주요 에너지원을 파악하기 위해 김해시(통계청, 2005a)와 부산광역시(통계청, 2005b) 각종 통계자료 및 지역경제시스템을 분석하기 위해 지역내총생산(통계청, 2005c)자료를 이용하여 물리·화학적 에너지 및 emergy 단위로 계산한 결과 Table 2,

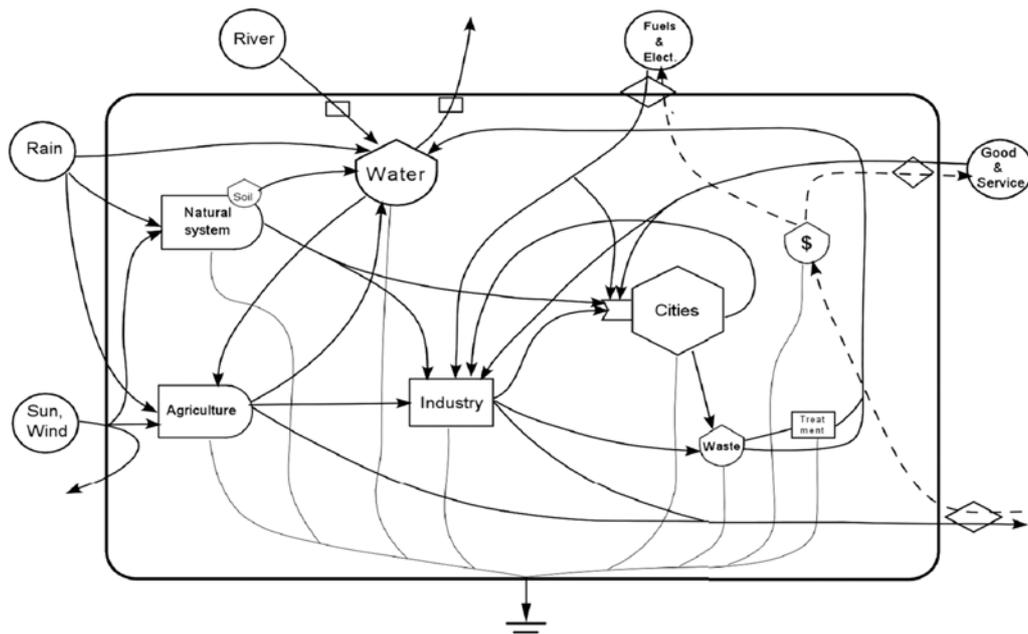


Fig. 3. Complex energy diagram of the Western Nakdong River Basin.

Fig. 4와 같다.

다량의 저급 에너지(low quality energy)인 태양에너지를 비롯한 자연 에너지와 소량의 고급에너지(high quality energy)인 화석연료 그리고 재화와 용역이 상호작용하는 에너지 계층(energy hierarchy) 구조를 형성하고 있다.

Emergy 분석을 통한 각 에너지원의 실질적인 기여 측면에서 살펴보면, 자연환경 활동에서 기인한 에너지원의 경우, 태양 에너지로부터 0.09 E18 sej/yr, 바람으로부터 0.009 E18 sej/yr, 비로부터 84.1 E18 sej/yr, 하천으로부터

84.8 E18 sej/yr, 지질작용으로부터는 23.6 E18 sej/yr가 유입되고 있어 바람, 태양, 지질작용, 비, 하천 순으로 실질적인 기여도가 높아지는 것으로 평가되었다.

시스템 내부의 보유자원은 Topsoil로써 8.22 E18 sej/yr가 있으며 경제활동에 필요한 에너지원의 경우는 재화와 용역이 2.830 E18 sej/yr, 가스사용이 222 E18 sej/yr, 유류사용이 1,480 E18 sej/yr, 전력사용이 1,900 E18 sej/yr의 순으로 유입되는 것으로 평가되었다.

이러한 결과는 이 지역의 경제활동이 다량의 저급 에너지

Table 2. Emergy evaluation of resource basis for western Nakdong River Basin

| Note | Item | Raw Units | | Trans formity (sej/unit) | Solar emery (sej) | Emwon (₩) |
|---|------------------------|-----------|---|--------------------------|-------------------|-----------|
| Renewable resources: | | | | | | |
| 1 | Sunlight | 9.49E+16 | J | 1 | 9.49E+16 | 3.72E+07 |
| 2 | Wind | 3.61E+12 | J | 2513 | 9.06E+15 | 3.55E+06 |
| 3 | Rain | 2.75E+15 | J | 30574 | 8.41E+19 | 3.29E+10 |
| 4 | Rivers | 1.04E+15 | J | 81411 | 8.48E+19 | 3.32E+10 |
| 5 | Earth Cycle | 4.11E+14 | J | 57600 | 2.36E+19 | 1.13E+10 |
| Indigenous renewable energy: | | | | | | |
| 6 | Agricultuer Production | 1.95E+15 | J | 3.36E+05 | 6.56E+20 | 2.57E+11 |
| 7 | Livestock Production | 1.68E+14 | J | 3.36E+06 | 5.65E+20 | 2.21E+11 |
| 8 | Water Supply | 1.36E+15 | J | 8.13E+04 | 1.11E+20 | 4.34E+10 |
| Nonrenewable sources from within system: | | | | | | |
| 9 | Top Soil | 6.61E+13 | J | 1.24E+05 | 8.22E+18 | 3.22E+09 |
| Imports and outside sources: | | | | | | |
| 10 | Oil | 1.63E+16 | J | 9.07E+04 | 1.48E+21 | 5.78E+11 |
| 11 | Gas | 2.75E+15 | J | 8.06E+04 | 2.22E+20 | 8.68E+10 |
| 12 | Electricity | 9.48E+15 | J | 2.00E+05 | 1.90E+21 | 7.43E+11 |
| 13 | Good & Service | 1.35E+09 | ₩ | 2.10E+09 | 2.83E+18 | 1.11E+09 |
| Exports: | | | | | | |
| 14 | Good & Service | 1.29E+09 | ₩ | 1.16E+09 | 1.50E+18 | 5.86E+08 |

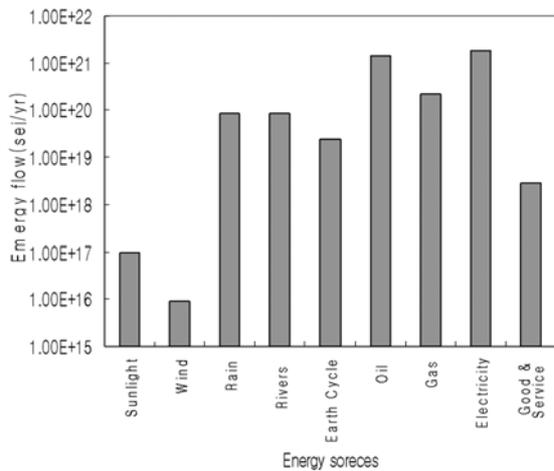


Fig. 4. Energy signature of energy source in Western Nakdong River Basin.

지보다는 소량의 고급에너지에 의존하는 특성을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

3.3. Energy 지표를 통한 지속성 평가

서낙동강 유역의 각종 energy 지표를 계산한 결과 Table 3 과 같다. 또한 낙동강 유역 및 다른 국가 하천유역의 energy

Table 5. Sustainable state index based on energy indices (Brown and Ulgiati, 1997)

| Energy indices | The state of system | | |
|----------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| | Unsustainable system | Transitional system | Sustainable system |
| % Renew | < 19 | 20 ~ 49 | < 50 |
| EIR | 0.5 > | 0.08 ~ 0.4 | > 0.07 |
| EYR | < 4 | 5 ~ 14 | < 15 |
| ELR | 10 > | 3 ~ 9 | > 2 |
| SI | < 1 | 2 ~ 9 | < 10 |

지표(김진이, 2007)와 서낙동강 유역의 energy 지표와 비교분석한 결과는 Table 4와 같으며, 각종 energy 지표를 바탕으로 지속적인 발전가능성을 평가하는 지표는 Table 5와 같다(Brown and Ulgiati, 1997).

3.3.1. 영속성 에너지원의 점유율(%Renew)

서낙동강 유역의 경우 에너지원에는 태양 에너지, 바람, 비, 그리고 지질작용이 있으며, 동일 에너지원에 의한 이중 산정을 배제할 경우 낙동강 유역의 영속성 에너지원은 이 대상 지역에 내린 강수량과 지질작용에 의존하고 있다. 지역시스템의 자연환경과 경제활동을 가능케 하는 전체 에너

Table 3. Indices using energy for overview of Western Nakdong River Basin

| Name of index | Expression | Value |
|--|---------------------|----------|
| Renewable energy flow | R | 1.08E+20 |
| Flow from indigenous nonrenewable reserves | N | 8.22E+18 |
| Flow of imported energy | F | 3.60E+21 |
| Total energy inflow | R+N+F | 3.71E+21 |
| Total energy used | U=N+R+F+P2I | 3.71E+21 |
| Total exported energy | P1E | 1.50E+18 |
| Energy to money ratio | P1=U/GNP | 1.17E+09 |
| Fraction of energy used derived from home sources | (N+R)/U | 0.03 |
| Imports minus exports | (F+P2I)-P1E | 3.60E+21 |
| Ratio of imports to exports | (F+P2I)/P1E | 2402.65 |
| Fraction used, locally renewable (%Renew) | R/U | 2.91 |
| Fraction of energy used purchased (imports) | (F+P2I)/U | 0.97 |
| Energy Yield Ratio (EYR) | U/(F+P2I) | 1.03 |
| Use per unit area (3.04E08 m ²) | U/(area) | 1.22E+13 |
| Use per capita (4.06E05 people) | U/(population) | 9.15E+15 |
| Renewable carrying capacity at present living standard | (R/U)*(population) | 1.19E+06 |
| Developed carrying capacity at present living standard | 8(R/U)*(population) | 9.48E+06 |
| Energy Investment Ratio (EIR) | (F)/(R+N) | 30.85 |
| Environmental Loading Ratio (ELR) | (N+F)/R | 33.27 |
| Sustainability Index (SI) | EYR/ELR | 0.03 |

Table 4. A comparison of energy indices of the Western Nakdong River Basin with other basins

| Name of index | Western Nakdong river basin | Nakdong river basin | Mississi-ppi river basin | Amazon basin |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------|
| % renew (R) | 2.91 | 3.14 | 6.50 | 88.0 |
| Energy Yield Ratio (EYR) | 1.03 | 1.06 | 2.51 | 12.04 |
| Energy Investment Ratio (EIR) | 30.85 | 17.50 | 0.49 | 0.10 |
| Environmental Loading Ratio (ELR) | 33.27 | 30.82 | 17.65 | 0.20 |
| Energy Sustainability Index (ESI) | 0.03 | 0.03 | 0.14 | 60.20 |

지원 중에서 영속성 에너지원의 점유율(%Renew=R/U)은 장기적으로 볼 때 시스템의 지속적인 발전가능성을 결정하는 주요인자로 energy 투자비, 인구수용력, 환경부하율, 지속성 지수 등의 여러 energy 지수에 영향을 미친다.

서낙동강 유역의 영속성 에너지원의 점유율은 2.91%로서, Table 3에서 같이 낙동강 유역 및 다른 국가 하천의 영속성 에너지원의 점유율을 비교해 보면 낙동강 유역 3.14%, 미시시피강 유역 6.50%, 브라질의 아마존 유역 88.0%에 비해서 서낙동강 유역의 경우 다소 낮은 수준을 나타내고 있었다.

3.3.2. Energy 생산비(EYR)

서낙동강 유역의 energy 생산비는 Table 3과 같이 1.03로서 지역의 생산이 주경제에 적게나마 기여하고 있는 것으로 평가되었다.

Energy 생산비는 화석연료, 광물, Top soil 등에 대하여 자원으로서의 가치를 평가하는 척도로서 각 에너지원이 생산되기까지 이용된 energy 양에 대해 생산된 energy의 비로서 계산된다. 석유, 석탄과 같은 1차 에너지원의 경우에는 energy 생산비가 5이상이며, 철강, 시멘트와 같은 2차 에너지원의 경우에는 energy 생산비가 2에서 5사이의 범위이며, energy 생산비가 2보다 낮은 경우에는 자원으로서의 가치보다는 소비재의 성격을 가진다. 즉 energy 생산비는 자원 생산의 시스템에서 효율(eficiency)을 평가하는데 이용될 수 있다.

서낙동강 유역의 경우에는 energy 생산비가 1.03으로써 낙동강 전유역 1.06보다는 다소 낮으나 한국 경제에 평균적인 수준으로 기여하는 것으로 평가되었다. 그리고 다른 국가 하천의 energy 생산비를 비교해 보면, 미시시피강 유역의 2.51, 브라질의 아마존 유역의 12.04에 비해서는 매우 낮은 수준을 나타내고 있었다.

3.3.3. Energy 투자비(EIR)

Energy 투자비는 지역간 생산활동의 경제적인 경쟁력과 자연환경에 의한 개발의 강도를 나타내는데 Table 4에 있는 낙동강 유역 및 다른 국가 하천의 energy 투자비를 비교해 보면 낙동강 유역 17.50, 미시시피강 유역 0.49, 브라질의 아마존 유역의 0.10에 비해서 서낙동강 유역의 energy 투자비는 30.85의 값으로서 공업화가 집중되어 환경압박이 큰 지역임을 알 수 있다.

3.3.4. 1인당 Energy 사용량

서낙동강 유역 주민들의 실질적인 풍요와 안녕에 대한 지표로서 생활수준을 나타내는 1인당 연간 energy 사용량은 Table 3과 같이 9.15 E15 sej/yr/cap.로서 한국 3.34E16 sej/yr/cap.(Lee and Odum, 1994)의 27.4% 정도인 수준으로 낙동강 유역의 주민들의 실질적인 풍요와 안녕의 정도는 열악함을 입증하고 있다.

경제적 복지수준을 의미하는 1인당 소득과 비교하여, 경제 활동에서 기인한 화석연료, 재화와 용역의 사용량뿐만 아니라 자연환경으로부터 기인한 에너지원의 사용량을 포함하는 1인당 energy 사용량은 보다 더 실질적인 복지수준을 의미한다.

3.3.5. 인구수용력

현재의 emery 소비수준을 유지하면서 자연환경 자원에만 의존할 경우 서낙동강 유역의 인구수용능력은 Table 3과 같이 1.19 만명으로 현재 인구의 2.4% 정도밖에 수용할 수 없으며, 선진국형으로 자연환경 자원의 약 7배의 emery가 유입될 경우에는 약 17%정도밖에 수용할 수 없으므로 현재의 서낙동강 유역의 인구수용 능력은 이미 포화상태를 넘어섰음을 알 수 있다.

3.3.6. 환경 부하율(ELR)

서낙동강 유역의 환경부하율은 33.27의 값으로 Table 4에 있는 낙동강 유역 및 다른 국가 하천의 환경부하율을 비교해 보면 낙동강 유역 30.82, 미시시피강 유역 28.52, 브라질의 아마존 유역 17.65에 비해서 서낙동강 유역의 환경부하율은 다소 높게 나타났다.

환경부하율이 2보다 적을 경우에는 환경적 영향이 적은 시스템으로 평가하고 있으며, 반면 10 이상의 값을 나타낼 경우에는 상대적으로 환경에 대한 영향이 큰 시스템으로 평가하고 있고, 3과 9 사이에서는 환경에 대한 영향이 온건한 것으로 파악하고 있다. 서낙동강의 경우 상대적으로 자연환경 활동에 비해 화석연료를 비롯한 비영속성 emery가 많이 투입되어, 환경부하율이 높고, 자연환경에 대한 압박이 큰 시스템으로 평가되었다.

3.3.7. 지속성 지수(ESI)

지속성 지수를 Table 5와 같이 세 가지 종류의 시스템으로 그룹화하면 지속적인 발전 가능성의 시스템(Sustainable system), 지속적인 발전 가능성이 변동적인 시스템(Traditional system), 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템(Unsustainable system)으로 구분된다.

첫째, 지속적인 발전 가능성의 시스템은 지속성 지수가 10 이상이고, 영속성 에너지원의 점유율은 50%이상, energy 투자비는 0.07 이상, energy 생산비는 15 이상, 환경부하율은 2 이하이다. 둘째, 지속적인 발전 가능성이 변동적인 시스템은 지속성 지수가 2에서 9까지의 범위이고, 영속성 에너지원의 점유율은 20%에서 49%까지의 범위, energy 투자비는 0.08에서 0.4까지의 범위, energy 생산비는 5에서 14까지의 범위, 환경부하율은 3에서 9까지의 범위이다. 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템은 지속성 지수가 1 이하이고, 영속성 에너지원의 점유율은 19% 이하, energy 투자비는 0.5 이상, energy 생산비는 4 이하, 그리고 환경부하율은 10 이상이다(Brown and Ulgiati, 1997).

서낙동강 유역의 지속성 지수는 0.03의 값을 나타내고 있었으며, Table 4에 있는 낙동강 유역 및 다른 국가 하천의 지속성 지수를 비교해 보면 낙동강 유역 0.03, 미시시피강 유역 0.14, 브라질의 아마존 유역 60.20으로 매우 높은 지속성을 나타내고 있었다. 서낙동강 유역의 경우 도시와 공업화되면서 지속성 지수가 점차 낮아지는 것으로 분석결과 평가되었다.

서낙동강 유역은 경제 활동의 측면에서는 교역과 교환을

통한 비영속성 에너지원의 유입이 서낙동강 유역의 부를 유지하고 있으나, 장기적인 측면 즉, 자연활동을 포괄하는 시스템 생태학의 관점에서 보면 지속성 지수가 0.03로 나타나 지역의 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템으로 평가되었다.

4. 결론

서낙동강 유역의 지속적인 발전가능성을 평가하기 위하여 시스템 생태학적 접근법에 따라 자연환경과 경제활동을 동일한 척도인 emergy로 평가한 결과 다음과 같다.

자연환경과 경제활동을 가능케 하는 전체 에너지원 중에서 영속성에너지원의 비율은 시스템의 지속적인 발전가능성을 결정하는 주요인자이다. 서낙동강 유역의 영속성에너지원에서 가장 큰 기여부분은 낙동강 상류하천이며 다음으로 강우량의 변동에 기인하는 것으로 나타났다.

서낙동강 유역의 emergy 생산비는 1.03으로서 지역의 생산이 주 경제에 적게나마 기여하고 있는 것으로 평가되었으며 투자비는 지역간 생산활동의 경제적인 경쟁력과 자연환경에 의한 개발의 강도를 나타내는데 서낙동강 유역의 emergy 투자비와 환경 부하율이 각각 30.85, 33.27의 값으로써 비교적 공업화가 집중되어 환경압박이 큰 지역임을 알 수 있다. 서낙동강 유역의 경제활동은 단기적인 측면에서는 교역과 교환을 통한 비영속성 에너지원 유입이 서낙동강 유역의 부를 유지하고 있으나, 장기적인 측면 즉, 자연활동을 포괄하는 시스템 생태학의 관점에서 보면 지속성 지수가 0.03로 나타나 지역의 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템으로 평가되었다.

이상의 결과를 기초로 서낙동강 유역의 지속적인 발전가능성을 위해서는 자연환경의 지속적인 이용이 가능한 유역설계로 주변 배후지역의 완충역이 무엇보다도 중요함을 인식하여야 한다.

장기적인 측면에서 지속적인 발전가능성을 가진 시스템으로 유지하기 위해서는 현재와 같은 외부의 화석연료를 비롯한 재화 및 용역에 의존하여 형성되고 있는 산업구조를 지역내의 자연환경자원인 영속성 에너지와 보유자원에 의존하여 이를 효율적으로 이용할 수 있는 시스템인 환경친화적인 산업구조로 재편성하여야 한다.

참고문헌

김영진, 김진이, 손지호, 이석모(2001). 환경회계에 의한 낙동강 유역의 환경정책결정에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **10**(2), pp. 85-90.

김진이(2007). 낙동강 유역의 오염총량관리계획에 대한 환경회계. 박사학위논문, 부경대학교.

김진이, 손지호, 김영진, 이석모(2000). 낙동강유역의 지속가능한 이용을 위한 emergy 분석. *한국환경과학회지*, **9**(1), pp. 49-55.

김해시(2006). *낙동강수계 김해시 오염총량관리 시행계획 보고서*.

박재홍(2008). 수질오염총량관리 시행계획에서 수립된 삭감계획의 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 297-305.

부산광역시(2005). *낙동강수계 부산광역시 오염총량관리 시행계획 보고서*.

서낙동강 유역 관계기관 합동(2005). *서낙동강 수질개선 종합대책*.

손지호(1999). EMERGY 분석법에 의한 도시의 지속적인 발전가능성 평가. 박사학위논문, 부경대학교.

이석모, 손지호, 강대석(2000). 시스템 생태학적 접근법에 의한 한국의 지속적인 발전가능성 평가 (I)-한국의 자연환경과 경제활동에 대한 emergy 평가-. *한국환경과학회지*, **9**(6), pp. 449-454.

통계청(2005a). *경남 통계연보*.

통계청(2005b). *부산 통계연보*.

통계청(2005c). *지역내 총생산*.

Brown, M. T. and McClanahan, T. R. (1996). Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*, **91**, pp. 105-130.

Brown, M. T. and Ulgiati, S. (1997). Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, **9**, pp. 51-69.

Lee, S. M. and Odum, H. T. (1994). Emergy analysis overview of Korea. *J. of the Korean Env. Sci. Soc.*, **3**(2), pp. 165-175.

Odum, H. T. (1983). *Systems Ecology*, John Wiley & Sons, New York.

Odum, H. T., Brown, M. T., and Christianson, R. A. (1996). *Energy systems overview of the Amazon basin*.

Odum, H. T., Diamond, C., and Brown, M. T. (1987). *Energy systems overview of the Mississippi river basin*.