Journal of Environmental Science International
22(4); 507~514; April 2013

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2013.22.4.507

ORIGINAL ARTICLE

환경 생태학적 개념을 이용한 낙동강 하류의 에머지 비용–편익 평가

정화숙 · 이석모[1] · 손형식[2] · 손희종

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소, [1]부경대학교 생태공학과, [2]부산대학교 미생물학과

Emergy Cost-Benefit Evaluation of the Down Stream of Nakdong River Using Environmental-Ecological Concept

Hwa-Sook Jung, Seog-Mo Lee[1], Hyeng-Sik Son[2], Hee-Jong Son

Water Quality Institute of Busan, Gimhae 621-813, Korea
[1]Pukyung National University, Dept. of Ecological Engineering, Busan 608-737, Korea
[2]Busan National University, Dept. of Microbiology, Busan 609-735, Korea

Abstract

The Nakdong River being used as drinking water sources for the Busan metropolitan city has the vulnerability of water management due to the fact that industrial areas are located in the upper Nakdong River. This study used emergy analysis method to evaluate ecological-economics of water treatment systems of D water treatment plant (WTP) where located in the downstream of the Nakdong River. The emergy methodology is a system evaluation tool that uses energy as the common currency to compare different resources on a common basis. Emergy yield ratio (EYR) and emergy sustainability index (EmSI) of D WTP were 1.16 and 0.18, respectively. It means not resources and sustainable system but consumer goods and not sustainable system. Ratio of emergy benefit to the purchaser (EBP) shows 2.7 times higher than economic costs. To change the weak water source and situations we need to diversity water intake.

Key words : Emergy, Nakdong River Water, Water Treatment System, Cost-Benefit Evaluation

1. 서 론

급속한 산업화 및 도시화로 인해 필요한 물 수요량은 증가하고 수질오염 등으로 인한 사용가능한 물은 점점 적어지는 물 부족 현상과 전 지구적인 이상기후 현상으로 수자원의 지역적 불균형 현상이 심화되고 있다. 이런 물 부족 현상 및 수자원의 지역적 불균형 현상으로 인해 수자원에 대한 인식이 변화하고 있다. 물은 과거에는 가치개념이 없는 자유재였으나 물 부족 현상 등으로 인해 점차 경제적 가치를 가진 준경제재 및 준공공재라는 인식이 확산되고 있으며 근래에는 질이 더 좋은 수자원 확보에 대한 관심이 커져 경제재로 자리를 굳혀가고 있다.

수자원에 대한 이런 인식의 변화는 공공재라고 여겨지던 수돗물에 대한 인식전화도 가져와 더 안전하고 질 좋은 수돗물에 대한 욕구도 커지고 있다. 이에 반해 부산시의 주요 상수원인 낙동강은 그 유역면적이 23,702.02 km^2로 우리나라 국토면적의 23.7%를

Received 18 March, 2013; **Revised** 28 March, 2013;
Accepted 10 April, 2013
***Corresponding author** : Hee-Jong Son, Water Quality Institute of Busan, Gimhae 621-813, Korea
Phone: +82-51- 669-4797
E-mail: menuturk@hanmail.net

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

차지할 정도로 넓고, 중 · 상류지역에는 대도시 및 산업단지가 입지하고 있다. 이에 따라 낙동강 중 · 상류지역의 대도시 및 산업단지에서 배출되는 다량의 오염물질로 인해 낙동강 하류의 수질은 생물화학적 산소요구량(BOD)을 기준으로 볼 때 고도의 정수처리를 한 후 생활용수로 이용할 수 있는 보통 정도의 수준이며 1,4-다이옥산 및 퍼클로레이트 등과 같은 크고 작은 유해물질의 수질오염사고가 끊이지 않고 있다. 낙동강 하류가 부산시의 상수원으로 사용되고 있음에도 불구하고 상수원보호구역으로 지정되어 있지 않다. 이러한 수질관리의 취약성 때문에 시민들은 낙동강 수질에 대한 깊은 불신을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 자연환경의 가치를 경제활동과 동일한 척도로 평가할 수 있는 에머지 개념을 이용하여 낙동강 정수처리시스템의 생태 · 경제성을 평가해 낙동강 하류의 수질개선 방안 모색은 물론 취수원 다변화와 같은 대안 검토에 필요한 근거 자료로 활용하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

2.1.1. 에머지(Emergy) 개념

에머지(emergy)는 한 가지의 상품이나 생산물을 만드는 과정에서 직 · 간접적으로 이미 소모된 한 종류의 이용가능한 에너지로 정의된다(Odum, 1983; 1994; 1996). 에머지 이론은 여러 가지 다양한 환경 자원들을 에너지라는 공통 화폐로 표시하려는 시도이며, 이렇게 함으로써 서로 다른 특성을 가진 자원들을 동일한 기준에서 비교할 수 있게 된다.

에머지는 energy money를 줄여서 표현한 용어이며(Odum, 1996), 한 가지 자원이 가지고 있는 에너지 관점에서의 가치는 이 자원이 형성되기까지 열역학 제2법칙에 따라 소모되었던 모든 에너지들까지 포함시켜야 한다는 개념이다. 현재 에머지 평가 방법론에서 서로 다른 자원들을 비교하기 위하여 기준으로 삼은 에너지는 태양 에너지이며, 따라서 에머지의 단위로는 solar emjoules (sej)가 사용되고 있다. 또한 에머지 개념은 다양한 에너지들 사이에 일을 할 수 있는 능력이 다르다는 점을 강조한다. 즉 동일한 에너지량이라도 태양 에너지 1칼로리는 우리 인간에 포함되어 있는 에너지 1칼로리가 할 수 있는 것과 같은 사고 작용을 할 수 없다. 더 고급의 일을 할 수 있으며, 더 큰 조절작용을 할 수 있다는 점에서 인간의 에너지 1칼로리는 태양 에너지 1칼로리 보다 더 질이 높다. 많은 양의 태양 에너지가 생태계의 먹이사슬을 따라 축적되는 과정을 통해 에너지의 질이 높아진 후에야 우리 인간에게까지 도달하는 것이다. 즉, 에너지 질의 계층구조가 형성되어 이 계층구조를 따라 올라감에 따라 각 단계에서 나타나는 실제 에너지량은 감소하지만 단위 에너지가 할 수 있는 일의 능력은 증가한다. 낮은 질의 에너지는 보다 높은 질의 에너지를 위한 기반이 되며, 높은 질의 에너지는 낮은 질의 에너지에 조절의 피드백을 제공한다(Kang과 Park, 1999). 에머지 이론에서는 이런 서로 다른 에너지 사이의 질의 차이를 에너지변화도(transformity)라는 개념으로 나타낸다. 에너지 변환도는 한 가지 자원이 형성되는데 직접 및 간접적으로 투입되었던 기준이 되는 에너지량, 즉 에머지를 이 자원의 실제 에너지량으로 나눈 값으로, 에너지변환도가 클수록 자원의 질은 더 높다. 따라서 먹이사슬의 상층으로 갈수록 에너지변환도가 증가한다. 태양 에너지 변환도(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(Kang과 Park, 1999). 현재 우리 주변에서 일어나고 있는 환경문제의 해결을 위해서는 시스템적 사고가 필요하다. 문제발생시 기존의 사고방식이 발생된 문제에만 집착하여 시스템 전체를 바라보지 못한다며 시스템적 사고는 시스템을 구성하고 있는 요소들을 파악하고 이들 간의 상호작용을 알아내어 문제를 해결하는 방법이다(Kang과 Park, 1999). 이런 시스템적 사고에 바탕을 둔 에머지 개념은 자연환경과 사회경제활동 사이의 관계를 전체적인 관점에서 파악하고, 이를 통해 자연환경이 인간 사회에 기여하는 바를 생태학적인 관점에서 평가하고자 하는 시도이다(Odum, 1996; Odum과 Odum, 2000).

2.2. 연구방법

2.2.1. 에머지 시스템 다이어그램 작성 (Odum, 1996)

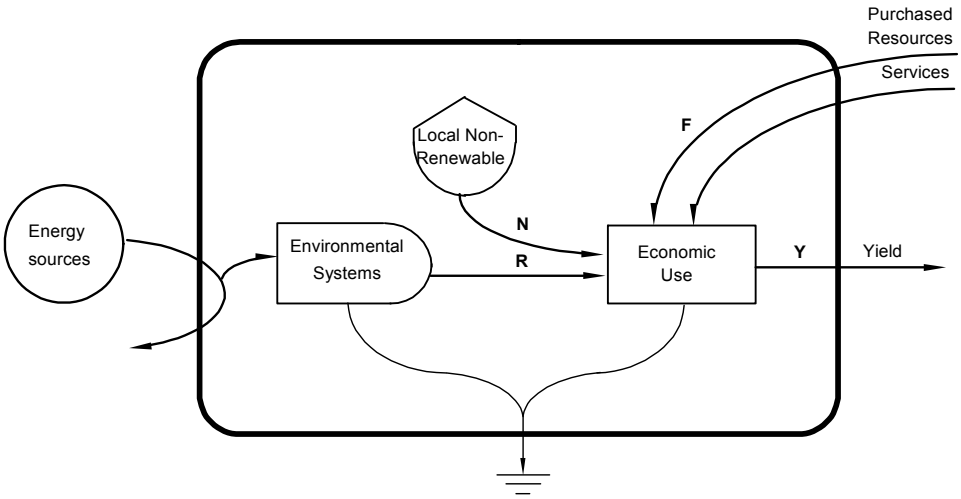
낙동강 정수처리시스템의 생태 · 경제성 평가를 위

한 모델의 작성에는 미국의 생태학자인 Odum이 개발한 에너지 시스템 언어가 이용되었다(Odum, 1983; 1994). 에너지 시스템 언어는 분석하고자 하는 시스템의 성분들과 이들 사이의 연결 관계를 특별한 의미들이 부여된 기호들을 이용하여 시각적으로 나타내며, 이를 통해 전체 시스템의 유기적인 관계를 종합적으로 파악할 수 있도록 해준다. Fig. 1에 에너지 시스템 언어에서 사용되는 주요 기호들과 이들의 의미를 제시하였다. 낙동강 정수처리시스템은 자연환경적 요인과 경제적인 요인이 결합된 시스템이므로 수돗물 생산에 기여하는 자연환경자원과 경제활동 간의 상호관계를 에너지 시스템 다이어그램을 통해 나타내었다. Odum (1996)이 제안한 에너지 시스템 언어를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동의 생산, 소비, 재순환 등의 변화를 전체적으로 파악(top-down)하기 위해 에너지 시스템 다이어그램을 작성한다.

에너지 시스템 다이어그램 작성 단계는 크게 5단계로 구분되며, 첫째, 분석하고자 하는 대상의 시스템 경계를 설정하는 것이며, 본 시스템의 공간적 경계는 취수장 및 정수장으로 하고 공정의 경계는 취수에서 정수생산까지로 하였다. 둘째, 설정된 시스템의 경계를 기준으로 시스템에 영향을 미칠 수 있는 외부 요소들을 파악하는 것으로 정수처리 시스템의 운영과정에 필요한 연료, 재화와 용역 등 외부 구입요소뿐만 아니라, 태양, 바람, 비, 하천 등의 자연요소도 포함한다. 셋째, 시스템 내부 구성요소를 파악하는 것이며, 넷째, 시스템의 외부 요소와 내부 구성요소간의 상호작용을 파악하고 연결하는 것이다. 다섯째, 외부 에너지원을 에너지변환도(transformity)가 낮은 순으로 왼편에서 오른편으로 시스템의 경계외부에 차례로 배열하고, 시스템 경계 밖의 외부 에너지원으로부터 시작하여 내부 에너지, 물질 그리고 화폐의 흐름에 따라 선을 연결하여 다이어그램을 완성한다.

2.2.2. 에머지 평가표 작성 (Odum, 1996)

수돗물 생산에 투입되는 에너지원이 가지는 실질적인 역할과 가치를 동일한 척도로 평가하기 위해서 Table 2에 에머지 평가표를 나타내었다. 낙동강 정수처리 시스템의 에너지 시스템 다이어그램을 바탕으로



Yield(Y) = R+N+F (1)
% Renew. = R/(R+N+F) (2)
Emergy yield ratio (EYR) = Y/R (3)
Environmental loading ratio (ELR) = (F+N)/R (4)
Emergy sustainability index (EmSI) = EYR/ELR (5)

Fig. 1. Emergy based indices, accounting for local renewable emergy inputs (R), local nonrenewable inputs (N), and purchased inputs from outside the system (F) (Brown과 Ulgiati, 1997).

한 해 동안 수돗물 생산을 위해 정수처리 시스템에 투입되는 에너지원별 에너지(J/yr), 물질(g/yr) 또는 화폐(won/yr)의 값을 각종 통계자료 및 문헌 등을 통해 구한 후 이 값에 각각의 태양 에너지변환도를 곱하여 에머지 값을 산정하는 방법으로 에머지 분석표를 작성하였다. 수돗물 에머지 평가표에서 구한 에머지 값을 기초로 분석대상 시스템을 비교하고, 그 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 에머지 지표들을 계산한다. 시스템에 유입되는 에머지를 강우 등의 지구 활동에 의한 환경 에너지원의 emergy (R)와 시스템 내부의 보유에너지원의 emergy (N), 그리고 경계 밖으로부터 유입되는 화석연료, 전기, 그리고 각종 재화와 용역의 구매 emergy (F)로 구분하여 영속성 에너지원의 점유율(% Renew.), Emergy 생산비(Emergy Yield Ratio: EYR), 환경부하율(Environmental Loading Ratio: ELR), Emergy 지속성 지수(Emergy Sustainability Index: EmSI) 등의 emergy 지표들을 계산하였다.

(1) 영속성 에너지원의 점유율(% Renew.) : 대상 시스템에 유입되는 에너지원의 전체 에머지량은 환경자원(R), 내부 보유자원(N) 그리고 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입되는 구매자원(F)의 에머지 합[Yield (Y), Fig. 1, equation (1)]으로 계산되고, 이중 환경자원이 차지하는 에머지 비율을 계산[% Renew., Fig. 1 equation (2)]하여 점유율로 나타내었다.

(2) 에머지 생산비(emergy yield ratio: EYR) : 에머지 생산비[Fig. 1 equation (3)]는 시스템으로부터 생산된 생산물이 가지는 전체 에머지량(Y)에 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원의 에머지량(F)으로 나누어 계산하며, 생산물이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가한다.

(3) 환경 부하율(environmental loading ratio: ELR) : 자연환경 활동에서 기인한 황경자원에 대한 내부 보유자원과 구매자원의 유입비율을 의미[Fig. 1 equation (4)]하며, 내부 보유자원과 구매자원의 에머지 이용량(F+N)에 대해 환경자원의 에머지 이용량(R)으로 나누어 계산하며, 시스템의 생산과정 중 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 지표이다.

(4) 에머지 지속성 지수(emergy sustainability index: EmSI) : 에머지 생산비(EYR)와 환경 부하율(ELR)의 비로서 계산된다[Fig. 1 equation (5)]. 지수의 값이 1보다 작으면 지속성이 낮은 시스템, 10보다 클 경우에는 지속성이 높은 시스템, 1～10 사이의 경우에는 지속성이 중간정도인 시스템으로 평가한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙동강 원수의 에너지 변환도

낙동강 정수처리시스템의 재생가능한 자원인 낙동강 원수에 대한 에머지 평가표는 Table 1과 같다. 낙동강 정수처리시스템 영향을 미칠 수 있는 낙동강 원수의 유역면적은 8,657.3 km^2이며, 이 유역에는 9.41E+20 sej/yr의 강우가 유입되었고, 이를 기준으로 한 낙동강 원수의 에너지 변환도는 2.86E+04 sej/J로 나타났다.

3.2. 낙동강 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램

부산시 낙동강 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 2와 같다. 재생 가능한 자연환경 자원인 낙동강에서 정수처리 시스템의 주요 원료인 원수를 취수하여 정수장으로 도수한다. 정수장의 건축물 및 시설은 외부로부터 콘크리트 및 철강과 같은 물질을 투입하여 조성되며, 이와 같은 건축물 및 시설을 이용해 전기 및 약품과 같은 재화를 투입하여 수돗물을 생산한다. 수돗물을 사용한 시민은 수도요금을 정부에 내고 정부는 이를 예산으로 확보하여 원수, 전기, 약품, 콘크리트 및 철강과 같은 재화를 외부로부터 구입한다.

3.3. 낙동강 정수처리시스템의 에머지 평가표

낙동강 정수처리시스템의 에머지 평가표를 Table 2에 나타내었다. 낙동강 정수처리 시스템의 유입 항목은 재생가능 에머지, 건설단계 투입 에머지, 운영단계 투입 에머지로 구분하였고 최종산물인 수돗물의 에머지값을 맨 아래에 나타내었다. 낙동강 정수처리 시스템에서 수돗물을 생산하기 위해 투입한 총 에머지량은 2.74E+20 sej/yr이고, 수돗물 톤당 투입된 에머지량은 1.06E+12 sej/㎥이며 이를 이용하여 계산한 수돗물의 에너지 변환도는 2.14E+05 sej/J로 나타났다.

Table 1. Emergy evaluation of Nakdong River water

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per ㎥ (sej)
Renewable resources						
1.	Rainfall on river watershed	J	3.08E+16	3.05E+04	9.41E+20	1.38E+11
Emergy per unit of Nakdong River water						
2.	River water	㎥	6.84E+09	1.38E+11	9.41E+20	1.38E+11
3.	River water	g	6.84E+15	1.38E+05	9.41E+20	1.38E+11
4.	Chemical pot. Energy of river water	J	3.30E+16	2.86E+04	9.41E+20	1.38E+11

Footnotes to Table 1.

1.	Drainage area of Nakdong river	= 8.66.E+03 km^2	
	Drainage area of Nakdong river	= 8.66.E+09 m^2	(㎢)*[(10^6 ㎡)/㎢]
	Annual rainfall on drainage area	= 7.21.E+02 mm/yr	
	Annual rainfall on drainage area	= 7.21.E-01 m/yr	[(mm/yr) / (m/10^3mm)]
	Rainfall on drainage area	= 6.24.E+09 m^3/yr	(㎡)(m/yr)
	Chem. Potential energy of rainfall	= 3.08.E+16 J/yr	(㎥/yr)(10^6 g/㎥)(4.94 J/g)
	Transformity	= 3.05.E+04 sej/J	chemical energy, rain on land
2.	Annual flow of Nakdong river (Jindong)	= 6.84.E+09 m^3/yr	
	Emergy/volume of river water	= 1.38.E+11 sej/m^3	(sej/yr from line 1) / (㎥/yr)
3.	Annual flow of Nakdong river (Jindong)	= 6.84.E+09 m^3/yr	
	Annual mass of Nakdong river (Jindong)	= 6.84.E+15 g/yr	(㎥/yr)(10^6 g/㎥)
	Emergy per mass of river water	= 1.38.E+05 sej/g	(sej/yr from line 1) / (g/yr)
4.	Avg. BOD5 of Nakdong river (Namgi)	= 1.40.E+00 mg/L	
	Conductivity of Nakdong river (Namgi)	= 1.54.E+02 ppm	
	Total Dissloved Solid of Nakdong river (Namgi)	= 9.84.E+01 ppm	
	Avg. Gibbs free energy of Nakdong river (Namgi)	= 4.82.E+00 J/g	[(8.33J/mol/C)(Temp.+273.15K) / (18g/mole)]*ln[(10^6-TDS)/965000]
	Chem. Potential energy of Nakdong river water	= 3.30.E+16 J/yr	(J/g)(g/yr)
	Transfomity(chem. pot.) of river water	= 2.86.E+04 sej/J	(sej/yr from line 1) / (J/yr)

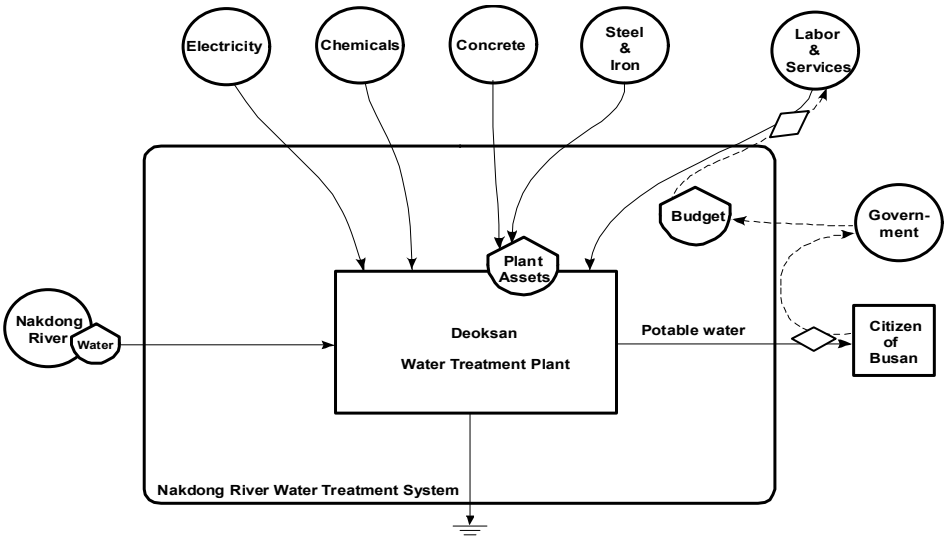


Fig. 2. Energy systems diagram of Nakdong River water treatment system.

Table 2. Emergy evaluation of Nakdong River water treatment system

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per ㎥ (sej/㎥)
Renewable resources						
1.	Raw water	J	1.30E+15	2.86E+04	3.71E+19	1.43E+11
Construction						
2.	Plant					
a.	Concrete	kg	1.22E+06	1.81E+09	2.22E+15	8.56E+06
b.	Steel & iron	kg	4.61E+05	6.79E+09	3.13E+15	1.21E+07
3.	Construction costs	won	1.92E+09	2.66E+09	5.09E+18	1.97E+10
Operation and maintenance						
4.	Electricity	J	3.89E+14	3.11E+05	1.21E+20	4.67E+11
5.	Chemicals	kg	1.30E+07	1.68E+12	2.18E+19	8.42E+10
6.	Operation and maintenance costs	won	3.35E+10	2.66E+09	8.92E+19	3.45E+11
Emergy per unit of potable water						
7.	Drinking water produced	㎥	2.59E+08	1.06E+12	2.74E+20	1.06E+12
8.	Drinking water produced	J	1.28E+15	2.14E+05	2.74E+20	1.06E+12

Footnotes to Table 2.

1. Raw water
   - Avg. BOD5 of Nakdong river (Maeri) = 3 mg/L
   - Conductivity of Nakdong river = 220 ppm
   - Total Dissloved Solid of Nakdong river = 141 ppm
   - Gibbs Free Energy (G) = 4.81 J/g [(8.33J/mol/C)(Temp.+273.15K) / (18g/mole)]*ln[(10^6-TDS)/965000]
   - Water pumped per year = 2.70E+08 ㎥/yr
   - Annual energy = 1.30E+15 J/yr (J/g)(10^6g/㎥)(㎥/yr)
   - Transformity = 28,554 sej/J
2. Plant

a. Concrete, kg
   - Total mass of concrete = 6.12E+07 kg
   - Average useful life of plant = 50 yr assumed
   - Total concrete = 1.22E+06 kg/yr (kg) / (useful plant life)
   - Emergy per mass of concrete = 1.81E+09 sej/kg

b. Steel & iron, kg
   - Total mass of steel & iron = 2.30E+07 kg
   - Average useful life of plant = 20 yr assumed
   - Total steel & iron = 1.15E+06 kg/yr (kg) / (useful plant life)
   - Emergy per mass of steel = 6.79E+09 sej/kg (Brown과 Buranakarn, 2003)

3. Construction costs
   - Intake facility = 2.96E+10 won
   - Water treatment facility = 6.62E+10 won
   - Total construction costs = 9.58E+10 won
   - Average useful life of plant = 5.00E+01 yr
   - Construction costs per year = 1.92E+09 won/yr
   - Emergy per money ratio = 2.66E+09 sej/won

4. Electricity, J
   - Total electricity in to plant = 1.08E+08 kWh/yr
   - Total annual energy used = 3.89E+14 J/yr (kWh/yr)(3.6*10^6 J/kWh)
   - Transformity = 3.11E+05 sej/J (Brown과 Ulgiati, 2004)

Table 2. Continue

5.	Chemicals, kg		
	Total weight of all chemicals used	= 1.30E+07 kg/yr	
	Emergy per weight	= 1.68E+12 sej/kg	assumed (Odum, 1996)
6.	Operation and Maintenance costs		
	Maintenance cost	= 2.53E+10 won/yr	
	The costs of purchasing electricity	= 5.65E+09 won/yr	
	The costs of purchasing chemicals	= 2.56E+09 won/yr	
	Total won spent for Service	= 3.35E+10 won/yr	
	Emergy per money ratio	= 2.6.E+09 sej/won	
7.	Drinking Water Produced, m^3		
	Total emergy of drinking water (Y)	= 2.74E+20 sej/yr	(sum of items 1 to 7)
	Water to the distribution system	= 2.59E+08 m^3/yr	
	Emergy per volume of drinking water	= 1.06E+12 sej/m^3	(sej/yr) / (m^3/yr)
8.	Drinking water produced, J		
	Water to the distribution system	= 2.59E+08 m^3/yr	
	Total energy of water	= 1.28E+15 J/yr	(m^3/yr)(4.94J/g)(1E6g/m^3)
	Total emergy of drinking water (Y)	= 2.74E+20 sej/yr	(sum of items 1 to 7)
	Transformity of drinking water	= 2.14E+05 sej/J	(sej/yr) / (J/yr)

Table 3. Emergy indices for the Nakdong River water treatment system

Name of Index	Short expression	Quantity
Total emergy used	Y	2.74E+20
Reneable emergy flow	R	3.71E+19
Nonrenewable emergy flow	N	-
Flow of imported emergy	F	2.37E+20
Percent renewable emergy	100*(R/Y)	14
Emergy investment ratio (EIR)	F/(N+R)	6.39
Emergy yield ratio (EYR)	Y/F	1.16
Environmental loading ratio (ELR)	(N+F)/R	6.39
Emergy sustainability index (EmSI)	EYR/ELR	0.18
Ratio of emergy benefit to the purchaser (EBP)	Emwon/won	2.70
Em-won value of potable water per m^3	Emwon/m^3	398.24
Production costs of potable water per m^3	won/m^3	147.36

낙동강 정수처리 시스템으로 재생가능 자원인 낙동강 원수가 1.30E+15 J/yr 만큼 유입되며 이를 통해 공급되는 에머지량은 3.71E+19 sej/yr으로 이는 낙동강 정수처리 시스템으로 유입되는 총 에머지량의 13.5%에 해당한다. 즉 낙동강 정수처리 시스템은 자연환경으로부터 13.5%의 에머지를 무상으로 공급받고 있는 것이다. 낙동강 정수처리 시스템은 건설과정에 5.10E+18 sej/yr (1.9%)의 에머지가 투입되었고, 운영단계에 2.32E+20 sej/yr (84.6%)의 에머지를 투입하고 있으며 이중 전기의 에머지량이 1.21E+20 sej/yr (44.6%)으로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 3).

3.4. 낙동강 정수처리시스템의 에머지 지표

Table 2의 에머지 평가표를 이용하여 Table 3과 같이 낙동강 하류의 정수처리 시스템의 에머지 지수를

계산하였다. 시스템내 재생불가능한 자원이 없어 에머지 투자비율(EIR)과 환경 부하비율(ELR)이 6.39로 동일하며, 평가대상 시스템의 경쟁력을 알아볼 수 있는 에머지 산출비율(EYR)은 1.16이고 에머지 지속성 지수는 0.18이다. 자연환경자원 등을 고려했을 때 낙동강 하류의 정수처리 시스템을 통해 생산된 수돗물은 기존 경제적 비용만을 고려했을 때보다 2.7배 높은 비용이 소모된다(Table 3, EBP).

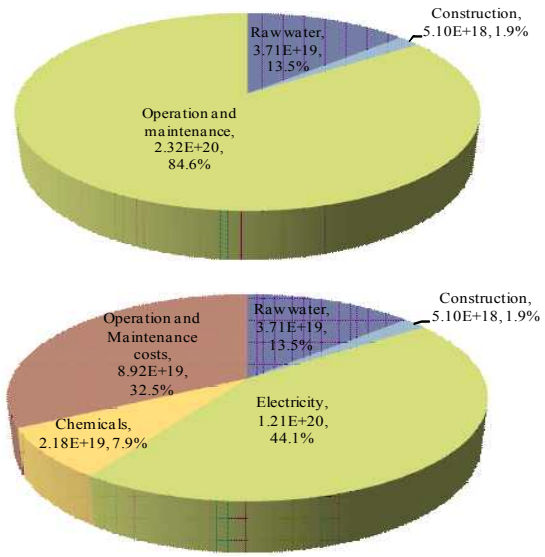


Fig. 3. Composition of emergy inputs to the Nakdong River water treatment system (sej/yr).

4. 결 론

환경 생태학적 개념인 에머지 평가법을 이용하여 낙동강 하류의 생태·경제성을 평가해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 낙동강 원수로부터 얻는 재생 가능한 에머지량은 수돗물 1톤당 1.43E+11 sej/m^3으로 수돗물 톤당 투입되는 총 에머지량의 약 14% 정도이며, 연간 수돗물 생산에 약 144억 emwon의 자연환경 자원을 무상으로 공급받고 있었다.

2. 낙동강 하류의 정수처리 시스템의 에머지 산출비율(EYR)은 1.16으로 자원으로서의 가치보다는 소비재의 성격을 나타내었고, 에머지 지속성 지수(EmSI)의 경우는 0.18로 나타나 지속성이 낮은 시스템으로 평가되었다.

3. 낙동강 하류의 정수장에서 생산된 수돗물의 톤당 투입 에머지량은 1.06E+12 sej/m^3, 수돗물의 에너지 변환도는 214,436 sej/J로 나타나 낙동강 원수의 톤당 에머지량(1.38E+12 sej/m^3) 및 에너지변환도(28,554 sej/J)와 비교하면 대략 7.6배 정도 높아 수돗물을 생산하는 데 많은 양의 에머지가 투입되는 것으로 나타났다. 이를 에머지에 기초한 거시경제적 가치로 환산하면 기존 경제적 비용만을 고려했을 때보다 2.7배 높은 비용이 소모되었다.

4. 따라서 이런 고비용성 수돗물 생산을 방식을 개선하기 위해서는 낙동강 하류의 수질개선 방안의 모색은 물론 취수원 다변화와 같은 대안의 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

Brown, M. T., Buranakarn, V., 2003, Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options, Resour. Conserv. Recycl., 38(1), 1-22.

Brown, M. T., Ulgiati, S., 1997, Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation, Ecol. Eng., 9, 51-69.

Brown, M. T., Ulgiati, S., 2004, Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems, Ecol. Model. 178(1), 201-213.

Kang, D. S., Park, S. S., 1999, Emergy cost-benefit evaluation on a proposal of water supply using water division, Korean J. Limnol., 32(3), 238-244.

Odum, H. T., 1983, Systems Ecology, Wiley, New York, 644.

Odum, H. T., 1994, Ecological and General Systems, University Press of Colorado, Niwot, pp. 644.

Odum, H. T., 1996, Environmental Accounting, John Wiley & Sons, New York, 370.

Odum, H. T., Odum, E. C., 2000, Modeling for All Scales: An Introduction to Systems and Simulations, Academic Press, 458.