

Emergy 분석을 이용한 낙동강유역의 오염총량관리계획에 대한 환경회계

김진이[†] · 이수웅 · 김용석 · 이석모^{*}

국립환경과학원 물환경연구부

^{*}부경대학교 생태공학과

Environmental Accounting of the Total Maximum Daily Loads (TMDL) Program in the Nakdong River Basin using the Emergy Analysis

Jin Lee Kim[†] · Su-Woong Lee · Yong-Seok Kim · Suk-Mo Lee^{*}

National Institute of Environmental Research Water Environmental Research Department

^{*}Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

(Received 5 October 2010, Revised 9 May 2011, Accepted 12 May 2011)

Abstract

This study, which evaluated the contribution of the real economic value and system in the Nakdong River Basin, estimated the emergy analysis for environmental accounting of the TMDL program. And an environmental accounting for TMDL is evaluated before and after adopting TMDL program respectively. The value of emergy after adopting the TMDL was 7.90 E+20 sej/yr. Although the real yield of the river after governmental investment was high (before: 9.7118 E+20 sej/yr and after: 9.7224 E+20 sej/yr), the effects of improvement was not great, in terms of an investment cost. The benefit/cost ratio resulted from environmental accounting has decreased from 1.493 to 1.230 due to the cost of managing treatment facilities. The method of improving water quality in the Nakdong River Basin by the TMDL program should be changed into an ecological treatment facilities using resources efficiently from a control of water quality depending on expansion of the wastewater treatment facilities and advanced treatment plant using high cost and non-renewable energies.

keywords : Benefit/cost ratio, Emergy, Environmental accounting, Nakdong River Basin, Total maximum daily loads (TMDL)

1. 서론

현재 낙동강유역은 중·하류에 인구 및 산업시설이 과도하게 밀집되어 있어 오·폐수 발생량 증가는 물론 유역으로부터 유출되는 오염부하량, 하천의 정화능력을 고려하지 않은 무분별한 난개발로 수질오염이 점점 악화되고 있는 실정이다.

환경부에서는 낙동강유역 뿐만 아니라 금강 및 영산강·섬진강유역을 동시에 기존의 농도규제방식으로는 하천의 환경기준 달성에 근본적으로 어려움이 있어 총량중심으로 관리하고자 오염총량관리제를 의무제로 도입하였다. 이 제도는 하천의 목표수질을 확정된 뒤 이를 달성하고 지역의 개발과 함께 수질을 과학적이고 체계적으로 관리하는 제도이다.

낙동강유역의 경우 41개 단위유역별로 목표수질을 설정하고, 그 기준을 달성하기 위해 배출원에 대한 오염부하량을 산정하여 유역 및 하천수질을 지속적으로 유지하기 위한 계획을 수행 중에 있다. 1단계(2003~2010년)는 41개 단위유역별 목표수질(BOD₅)을 초과한 대구광역시와 부산광역시, 경북의 11개 시·군(고령군, 김천시, 군위군, 경산시, 상

주시, 성주군, 안동시, 의성군, 영천군, 칠곡군, 청도군)과 경남의 10개 시·군(고성군, 김해군, 거창군, 마산시, 의령군, 진주시, 창녕군, 창원시, 함안군, 함천군)의 해당 단위유역에 대해 오염부하량의 총량 및 삭감계획, 지역개발계획 등이 포함된 시행계획을 수립하여 매년 이행사항을 평가 받고 있다. 2단계(2011~2015년)에는 T-P를 추가하여 목표수질(T-P)을 설정한 후 BOD와 T-P를 동시에 관리하는 계획으로 단위유역별 목표수질을 초과한 지역은 기승인된 기본계획 및 시행계획에 따라 매년 이행사항을 평가 받게 될 것이다. 특히, 낙동강의 하류지역은 물금지점(낙본K)이 상수원으로 이용되고 있기 때문에 II등급 이내로 목표수질(BOD 3.0 mg/L, T-P 0.074 mg/L)을 설정한 후 달성하기 위해 많은 노력을 하고 있다(환경부, 2006).

수질개선을 위한 삭감노력으로 대부분의 정책들은 아직까지는 전적으로 경제적인 비용·편익분석에만 의존되고 있다. 이러한 경제활동이나 시장경제 체제하에서의 경제적인 분석은 생태학적인 영향, 환경영향 그리고 자연환경자원의 지속가능한 이용 등과 같은 자연환경가치에 대한 실질적인 평가가 어려운 실정이다. 그러므로 총량관리제도 도입 전과 후의 삭감시설 투자계획에 따른 노력을 에너지, 환경, 경제가 상호 관련되어 이루어져 있는 시스템에 대해 자연환경

[†] To whom correspondence should be addressed.

emergy99@korea.kr

과 인간경제활동 등이 어떻게 상호작용하고 영향을 미치는지를 파악하는 Top-Down 방식의 접근법을 기초로 emergy 분석을 수행하여 낙동강유역의 총량관리계획에 대한 환경회계를 실시하고자 한다.

이러한 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 파악하는 emergy 개념으로 유역의 지속성 평가 연구는 국외·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 환경회계에 의한 하천 유역의 관환경정책 결정에 관한 연구(김영진, 2000), 서낙동강 유역의 지속성 평가(김진이 등, 2010) 등 현재까지 많은 연구자들이 자연환경자원의 가치평가 연구를 수행하였다. 김영진 등(2001)은 환경회계에 의한 낙동강유역의 환경정책결정에 관한 연구에서 낙동강 하류 지역의 수질 II등급 달성을 위한 수질관리 정책 중 유량조절댐 건설, 하·폐수 처리장 및 하·폐수 차집수송 등에 대하여 환경회계에 의한 편익 평가, 수질개선을 위한 하·폐수처리장의 처리비용에 따른 환경개선 효과, 상수원으로부터 인체 유해물질을 배제시키기 위해 하·폐수를 차집수송하는 소요비용 및 환경손실비용에 따른 환경개선 효과 등의 내용으로 수질개선에 대한 환경편익을 제시한 연구내용으로 도출한 바 있다.

본 연구에서는 환경보존과 경제개발에 관련된 정책 및 계획시 상반되는 의사결정과 혼란 등을 조율해 주는 환경회계의 개념을 도입하여 낙동강 하류지역의 목표수질을 달성하기 위한 대안으로 총량관리계획 도입 전과 후를 환경회계를 통해 비교·검토하고 보다 과학적이고 합리적인 수질개선 및 하천유역 관리를 위한 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상범위

낙동강유역의 자연환경을 형성하는 주된 요소인 강우량은 연평균 1,372 mm이고, 수자원 총량은 연간 385억 m³이며 이중 하천유출량 197억 m³과 증발산량 189억 m³을 제외한 총 이용가능량은 95억 m³에 불과한 실정이다. 이 양은 경상남도와 경상북도에 거주하는 주민의 생활용수 및 공업용수, 농업용수와 하천유지용수로 이용되고 있다.

낙동강유역의 자연환경과 지역 경제시스템에 대한 기여도 평가, 하천 이용에 따른 emergy 수치 및 지속성 평가를 위해서 유역전체를 공간적 경계로 설정하였다.

낙동강유역의 오염총량관리계획 수립 이전은 1999년부터 2003년까지 설정하였으며 수립이후는 제1차 오염총량관리계획 기간인 2004년부터 2010년까지 설정하여 자료를 조사하였다.

2.2. Emergy 분석

2.2.1. Emergy

Emergy는 한가지의 상품이나 용역을 생산하기 위하여

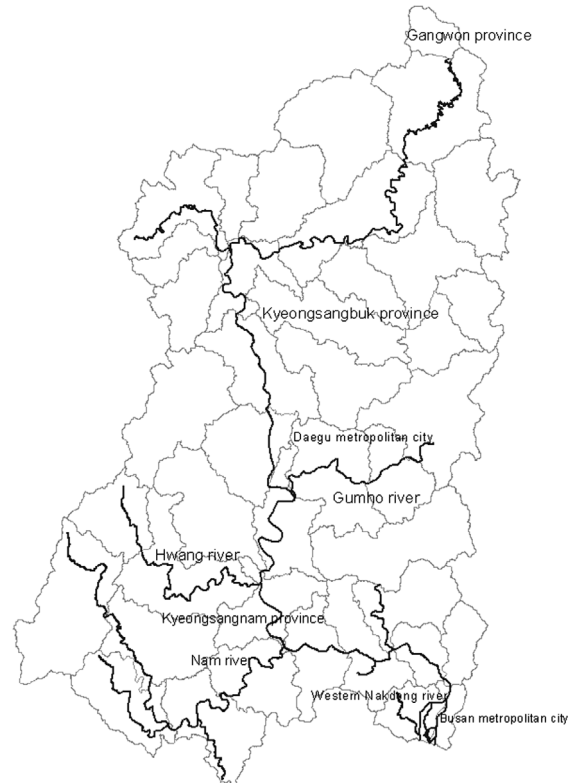


Fig. 1. Map of the Nakdong River Basin (Kim, 2007).

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.

2.2.2. 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.

2.2.3. EmWon

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

2.2.4. Emergy 분석표 작성

낙동강유역은 경제적인 요인과 환경적인 요인이 결합된 시스템으로 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 emergy 값을 산정한다. 다섯 번째 열에는 주요 에너지원의 emergy 값을 emergy dollar ratio로 나누어 화폐로 환산된 가치를 기입한다(Table 1).

2.3. Emergy 분석에 의한 환경회계

과학적 평가체제에 근거한 공통의 척도인 emergy는 상품이나 용역을 생산하는데 기여한 자연과 인간의 역할 모두를 동일한 단위로 표현할 수 있다. 따라서 emergy의 생산과 이용을 최대화 할 수 있는 환경회계에 의한 정책 선택과 의사결정을 통해서만 진정한 부와 전체의 경제적 이익 그리고 공공의 편익을 최대화 창출할 수 있게 된다(Brown and Ulgiati, 1997; Odum, 1998).

Emergy 분석에 의한 환경회계는 여러 가지 개발계획과 대안을 비교하기 위하여 시스템에서 이용되고 있는 모든 에너지원을 포함하는 각 시스템의 emergy 평가표를 만들어 지역의 평균적인 구매에 의한 emergy와 자연환경 emergy비에 기초하여 보존할 경우의 잠재 생산력과 각종 개발 계획 및 대안에 따른 emergy 변화를 환경회계에 의하여 평가할 수 있다. 여러 환경정책 중 수질개선을 위한 저감시설의 투자비용과 그에 따른 수질개선 효과를 비교분석하여 정책대안 전과 후를 비용/편익으로 구분하여 환경회계를 실시할 수 있다.

첫째, 오염총량관리계획에 대한 에너지 시스템을 작성한다.

둘째, Emergy 분석표 작성을 위한 각종 자료를 분석하고 수질개선을 위한 저감시설에 대해 시설공사에 따른 원자재량 및 공사비, 유지관리비로 구분하여 작성한다. 저감시설에 따른 시설의 사용년수는 20년으로 설정하며 이러한 자료를 통해 에너지원들의 실질적인 에너지를 구한 후 transformity를 곱하여 emergy를 구한다. 다음으로 emergy 값에 emergy money ratio로 나누어 생태·경제적 가치를 나타내는 emwon을 구한다.

셋째, emwon을 구한 후 비용과 편익으로 에너지원을 구

분하고 총량관리계획에 따른 환경회계표를 작성한다.

본 연구에서는 오염총량관리계획 수립 전과 후의 emergy 분석에 의한 비용/편익 분석을 실시하기 위하여 저감시설의 시설공사시 투입되는 원자재 및 공사비와 유지관리와 같은 구매자원은 환경비용으로 설정하고 저감시설에 따른 수질개선 효과를 편익으로 설정하여 Table 2와 같이 환경회계표를 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 총량관리계획에 대한 환경비용/편익분석

3.1.1. 총량관리계획 도입 이전의 emergy 분석

총량관리계획 수립 이전에 물금지점(낙본K) 수질 목표는 II 급수(3.0 mg/L)로 개선하는 것이다. 그간의 수질정책으로 정부에서는 낙동강의 수질관리를 위해 많은 노력을 기울여 왔으나 개선효과가 높지 않았으며, 개선효과를 얻기 위해 대부분이 점오염원을 저감시키는 환경기초시설 확충에 치중해 왔다.

낙동강의 경우 하천 유입수량이 급격히 줄어드는 갈수기에 수질이 악화되고 있는 실정이며 특히 하류지역이 상수원으로 이용되기 때문에 수질이 악화되는 것에 대한 민감도가 높은 상태였다.

본 연구에서 총량관리계획 수립 이전의 저감시설에 대한 다이어그램은 Fig. 2와 같다. 시스템 대상으로는 점오염원

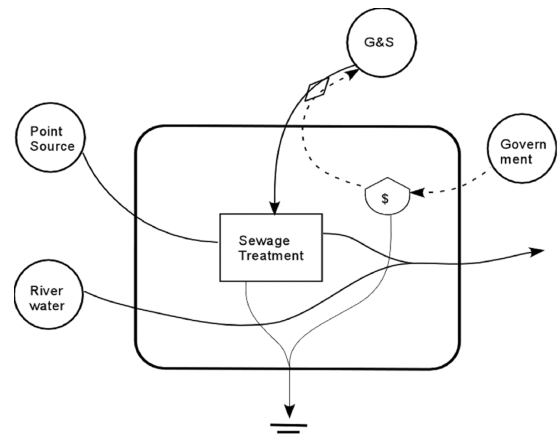


Fig. 2. Energy diagram of point sources treatment system before Total Maximum Daily Load (TMDL) program.

Table 1. Tabular format for emergy 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)				

Table 2. Tabular format for environmental accounting

Item	Environmental cost (Emwon/yr)	Environmental benefit (Emwon/yr)
Water quality improvement		
Facility investment		
Management		
Total		
Cost-benefit		

의 저감시설인 하수처리시설로 설정한 후 외부로부터 유입 되는 에너지원은 상류에서 하류로 유하하는 자연환경자원 인 하천수와 유역내에서 발생하는 점오염원, 이를 저감하기 위한 노력으로 정부에서는 시설공사 및 유지관리비를 설정 하였다.

3.1.2. Emergy 분석결과

낙동강유역의 오염총량관리계획 수립 이전의 emergy 분석결과는 Table 3과 같다.

오염총량관리계획 수립 이전 수질개선 노력으로 2005년 까지 낙동강유역내의 기존 환경기초시설 현황을 파악한 후

Table 3. Emergy analysis of point sources treatment system before Total Maximum Daily Load (TMDL) program

Note	Item	Raw units (J, g, ₩/yr)		Trans formity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emwon (₩/yr)
1	Water quality improvement	1.195E+16		81,300	9.7118E+20	4.625E+11
FACILITY INVESTMENT						
Treatment plant for the point sources						
2	Electricity	1.04E+14	J	2.91E+05	3.03E+19	1.44E+10
3	Oil	4.27E+14	J	9.07E+04	3.87E+19	1.84E+10
4	Concrete	9.34E+10	g	7.34E+08	6.86E+19	3.26E+10
5	Iron	1.16E+10	g	2.65E+09	3.07E+19	1.46E+10
6	Cost of construction	1.49E+11	₩	2.10E+09	3.12E+20	1.49E+11
	Sum				4.80E+20	2.29E+11
MANAGEMENT						
Treatment plant for the point sources						
7	Chemicals	7.84E+09	g	2.65E+09	2.08E+19	9.9E+09
8	Electricity	2.08E+14	J	2.91E+05	6.05E+19	2.88E+10
9	Oil	1.64E+14	J	9.07E+04	1.49E+19	7.09E+09
10	Sludge disposal	1.75E+10	₩	2.10E+09	3.67E+19	1.75E+10
11	Labor	1.08E+10	₩	2.10E+09	2.26E+19	1.08E+10
12	Management	6.95E+09	₩	2.10E+09	1.46E+19	6.95E+09
	Sum				1.70E+20	8.10E+10

*) Footnote for Table 3

River water
 1 TDS = 193.4656 ppm
 Gibb's free energy(J/g) = (8.33J/mole/deg)(300°C)(mole/18g)ln((1000000-s)ppm/965000)
 = 4.9194 J/g
 volume flow = 2.43E+09 m3/yr
 Energy (J) = (volume flow(m3))(density(g/m3))(G(J/g))
 (2.43E+09m3)(1000000g/m3)(4.9194J/g)
 1.195E+16 J/yr

FACILITY INVESTMENT
 2 Electricity
 Consumer = 1.18E+06 KWh/yr
 volume flow = 3.54E+07 m3/yr
 Total purchased = (1.18E6KWh/yr)*(3.6E6 J/KWh)/(3.54E+07 ton/yr)
 = 1.20E+05 J/m3
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.04E+14 J/yr

3 Oil
 Purchased to plant = 0.013 L/ton
 = (0.013L/ton)*(3.78E7 J/L)
 = 491400 J/m3
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 4.27E+14 J/yr

4 Concrete
 Consumer = 7.61E+10 g
 Total amount of concrete = (7.61E10g)/(20yr)/(3.54E07ton/yr)
 = 1.08E+02 g/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 9.34E+10 g/yr

5 Iron
 Consumer = 9.44E+09 g
 Total amount of concrete = (9.44E+09g)/(20yr)/(3.54E07ton/yr)
 = 1.33E+01 g/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.16E+10 g/yr

6 Cost of construction
 = (1.2117E+11₩)/(20yr)/(3.54E7ton/yr)
 = 1.71E+02 ₩
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.49E+11 ₩/yr

MANAGEMENT
 7 Chemicals
 NaOH+CH3OH = (5.2g/m3+3.83g/m3)
 9.03 g/m3
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 7.84E+09 g/yr

8 Electricity
 Consumer = 2.35E+06 KWh
 Total purchased = (2.35E6KWh/yr)*(3.6E6 J/KWh)
 = 2.39E+05 J/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 2.08E+14 J/yr

9 Oil
 0.005 L/ton
 Consumer = (0.005L/ton)*(3.78E7 J/L)
 Total purchased = 1.89E+05 J/yr
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.64E+14 J/yr

10 Sludge disposal
 = 2.01E+01 J/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.75E+10 J/yr

11 Labor
 = 12.4 ₩/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 1.08E+10 ₩/yr

12 Maintenance
 = 8.0 ₩/ton
 volume flow = 8.69E+08 m3/yr (2.38E+06m3/day)
 Energy = 6.95E+09 ₩/yr

시설투자비와 유지관리비를 산정하였다. 점오염원을 처리하는 환경기초시설 현황 중 90% 이상이 하수종말처리시설로 파악되었다. 오염총량관리계획 수립 이전의 물금지역(낙본K) 수질 4.1 mg/L의 emergy값은 9.7118 E+20 sej/yr로 산정되었다. 시설공사에 투자된 원자재 및 시설비는 4.80 E+20 sej/yr이며 이중 기타 공사비가 3.12 E+20 sej/yr로 가장 높게 산정되었다. 유지관리비는 총 1.70 E+20 sej/yr로 전력사용량이 6.05 E+19 sej/yr로 가장 높게 산정되었다.

낙동강유역의 수질개선 노력은 각 지역에서 저감시설 투자계획을 수립하였고 각 지역별, 처리공법별로 아주 다양하였다. 이중 환경기초시설 계획에 따른 정보를 이용하여 저감시설의 시설공사에 관한 자료 및 공사비, 향후 유지관리비 등을 산정하여 평가하였다.

3.1.3. 총량관리계획 도입 이후의 emergy 분석

오염총량관리제도는 수질관리정책의 일환으로 지역의 환경관리정책 및 개발정책과 연계되어 지역 오염부하 관리목표 및 오염원별 할당·관리과정에 지역특성을 반영한 합리적인 지역 내 오염원관리 정책으로 실행되고 있다. 총량관리제도의 시행에 따라 지역적 오염관리 정책과 시행에 미치는 영향을 점오염원과 비점오염원으로 구분하여 분석하고자 한다.

본 연구의 대상범위로 설정된 지자체는 상주시, 안동시, 김천시, 경산시, 대구광역시, 영천시, 군위군, 청도군, 의성군, 성주군, 칠곡군, 고령군, 부산광역시, 김해시, 진주시, 창원군, 거창군, 고성군으로 18개 시·군이며 단위유역별로는 병성A, 위천B, 금호B, 금호C, 낙본F, 낙본G, 낙본N, 황강A, 남강D의 9개 단위유역이다.

낙동강유역은 상수원으로 이용되는 하천으로 하류지역의 물금 취수원(낙본K)의 목표수질인 BOD 3.0 mg/L를 달성하기 위하여 오염총량관리계획 수립 이후 점오염원과 비점오염원의 저감시설에 따른 다이어그램은 Fig. 3과 같다.

오염총량관리 수립 이후의 시스템 대상으로는 점오염원

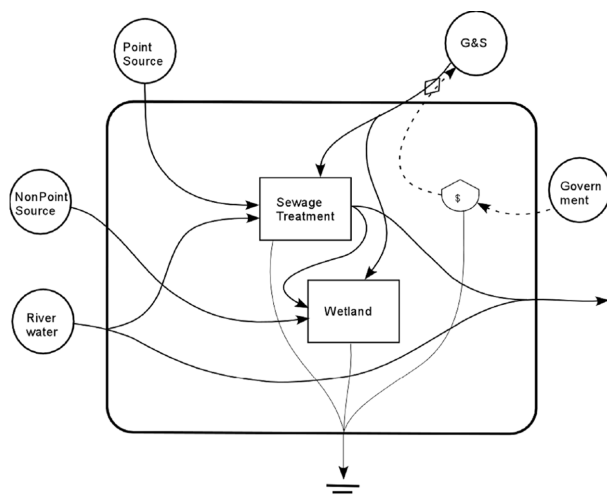


Fig. 3. Energy diagram of point and non-point sources treatment system after Total Maximum Daily Load (TMDL) program.

은 기존의 하수처리시설을 통해 삭감을 하고, 비점오염원은 인공습지나 저류형 습지 등의 시설을 설정한 후 외부로부터 유입되는 에너지원은 비점오염원 제거시설을 통해 상류에서 하류로 유하하는 자연환경자원인 하천수, 유역내에서 발생하는 점오염원과 비점오염원이며, 이를 저감하기 위한 노력으로 정부에서는 시설공사 및 유지관리비를 설정하였다. 또한 2차 처리된 하수처리시설에서의 방류수를 질소와 인 제거를 위한 고비용이 고도처리시설을 설치할 경우 정부의 지원이 과대하게 필요하며 인공습지를 이용할 경우 저비용의 저감효과를 기대할 수 있다.

3.1.4. Emergy 분석결과

제1차 오염총량관리제 적용기간인 2004년부터 2010년까지 낙동강하류의 물금지점(낙본K) 목표수질을 달성하기 위한 수질개선 노력은 현재 각 단위유역별·행정구역별로 오염총량관리 시행계획에서 제시된 계획대로 추진 중에 있다. 또한 목표수질 달성여부를 판단하는 시행계획 이행평가의 절차가 매년 진행 중에 있다. 낙동강유역의 오염총량관리 시행계획 수립시 제시된 저감시설은 95% 이상이 환경기초시설 확충계획이며 그 외 비점오염원을 저감시키기 위한 노력으로 자연형 하천정화사업과 저류지 조성이 계획되어져 있다.

현재 광역시·도에서 실시한 기준년도 2004년부터 최종년도인 2010년까지 낙동강유역내의 신설 환경기초시설 현황을 파악한 후 시설용량에 대한 공사시 사용되는 원자재 및 유지관리비를 산정하였다. 수질개선 노력으로 투자된 비용은 총 1.05 E+12 won이다. 이는 물금지점(낙본K) 이후의 단위유역 및 행정구역은 제외하였다. 환경기초시설의 사용년수는 20년으로 산정하였다. 20년을 고려한 제1차 오염총량관리계획에서 제시한 저감시설의 연간 투자계획을 살펴보면 5.25 E+10 won으로 산정되었다.

오염총량관리계획 수립 이후 점오염원과 비점오염원에 대한 저감시설의 시설투자비와 유지관리비에 대하여 emergy 분석표를 살펴보면 Table 4와 같다.

오염총량관리계획 수립 이후의 물금지역(낙본K) 하천수질 3.0 mg/L의 emergy 값은 9.7224 E+20 sej/yr로 산정되었다. 시설공사에 투자된 원자재 및 시설비는 총 6.00 E+20 sej/yr이고 점오염원 저감시설은 5.08 E+20 sej/yr이며 이 중 시설공사비용이 3.20 E+20 sej/yr로 가장 많이 사용되었다.

반면 비점오염원 저감시설에 대한 투자계획은 9.22 E+19 sej/yr로 산정되었다. 유지관리에 따른 총 emergy 값은 1.90 E+20 sej/yr로 산정되었으며 이 중 전력사용량이 6.77 E+19 sej/yr로 가장 크게 산정되었다. 하지만 시설공사비가 많이 투자되고 향후 유지보수를 위한 관리가 많이 투자되는 환경기초시설 설치의 재정적인 부담이 큰 것으로 사료된다.

3.2. Emergy 분석에 의한 환경비용/편익분석

삭감체계를 구축하여 하천 및 상수원의 수질개선을 위한 노력으로는 유역내 발생부하량 저감과 오염총량관리계획으로의 총량관리가 절실히 필요하다. 이에 따른 저감대책으로

Table 4. Energy analysis of point and non-point sources treatment system after Total Maximum Daily Load (TMDL) program

Note	Item	Raw units (J,g,₩/yr)		Trans formity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emwon (₩/yr)
1	Water quality improvement	1.196E+16		81300	9.7224E+20	4.630E+11
FACILITY INVESTMENT						
Treatment plant for the point sources						
2	Electricity	1.17E+14	J	2.91E+05	3.39E+19	1.62E+10
3	Oil	4.77E+14	J	9.07E+04	4.33E+19	2.06E+10
4	Concrete	1.04E+11	g	7.34E+08	7.67E+19	3.65E+10
5	Iron	1.30E+10	g	2.65E+09	3.43E+19	1.64E+10
6	Cost of construction	1.52E+11	₩	2.10E+09	3.20E+20	1.52E+11
Treatment plant for the non point sources						
7	Wetland	4.40E+10	₩	2.10E+09	9.24E+19	4.40E+10
	Sum				6.01E+20	2.86E+11
MANAGEMENT						
Treatment plant for the point sources						
8	Chemicals	8.77E+09	g	2.65E+09	2.33E+19	1.11E+10
9	Electricity	2.33E+14	J	2.91E+05	6.77E+19	3.22E+10
10	Oil	1.84E+14	J	9.07E+04	1.67E+19	7.93E+09
11	Sludge disposal	1.95E+10	₩	2.10E+09	4.10E+19	1.95E+10
12	Labor	1.20E+10	₩	2.10E+09	2.53E+19	1.20E+10
13	Management	7.77E+09	₩	2.10E+09	1.63E+19	7.77E+09
	Sum				1.90E+20	9.06E+10

*) Footnote for Table 4

River water
 1 TDS = 154.7456 ppm
 Gibb's free energy(J/g) = $(8.33\text{J/mole/deg})(300^\circ\text{C})(\text{mole}/18\text{g})\ln((1000000-s)\text{ppm}/96500)$
 = 4.92475432 J/g
 volume flow = 2.43E+09 m3/yr
 Energy (J) = (volume flow(m3))(density(g/m3))(G(J/g))
 (2.7814E+10m3)(1000000g/m3)(4.92J/g)
 1.196E+16 J/yr

FACILITY INVESTMENT

2 Electricity
 Consumer = 2.36E+06 KWh/yr
 volume flow = 7.08E+07 m3/yr
 Total purchased = $(2.36\text{E}6\text{KWh/yr}) \times (3.6\text{E}6 \text{ J/KWh}) / (7.08\text{E}+07 \text{ ton/yr})$
 = 1.20E+05 J/m3
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.17E+14 J/yr

3 Oil
 Purchased to plant = 0.026 L/ton
 = $(0.026\text{L/ton}) \times (3.78\text{E}7 \text{ J/L})$
 = 9.83E+05 J/m3
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 4.77E+14 J/yr

4 Concrete
 Consumer = 1.52E+11 g
 Total amount of concrete = $(1.52\text{E}11\text{g}) / (20\text{yr}) / (7.08\text{E}07\text{ton/yr})$
 = 1.08E+02 g/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.04E+11 g/yr

5 Iron
 Consumer = 1.89E+10 g
 Total amount of concrete = $(1.89\text{E}10\text{g}) / (20\text{yr}) / (7.08\text{E}07\text{ton/yr})$
 = 2.67E+01 g/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.30E+10 g/yr

6 Cost of construction
 = $\{(1.467\text{E}11)\text{₩} / (20\text{yr}) / (3.54\text{E}7\text{ton/yr})\}$
 = 2.07E+02 ₩
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.52E+11 ₩/yr

7 Wetland
 = 4.40E+10 ₩

MANAGEMENT

8 Chemicals
 $\text{NaOH} + \text{CH}_3\text{OH} = (18.06\text{g/ton})$
 = 18.06 g/m3
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 8.77E+09 g/yr

9 Electricity
 Consumer = 4.70E+06 KWh
 Total purchased = $(4.70\text{E}6\text{KWh/yr}) \times (3.6\text{E}6 \text{ J/KWh}) / (3.54\text{E}+07 \text{ ton/yr})$
 = 4.78E+05 J/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 2.33E+14 J/yr

10 Oil
 0.01 L/ton
 Consumer = $(0.01\text{L/ton}) \times (3.78\text{E}7 \text{ J/L})$
 Total purchased = 3.78E+05 J/yr
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.84E+14 J/yr

11 Sludge disposal
 = 4.02E+01 J/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.95E+10 J/yr

12 Labor
 = 2.48E+01 ₩/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 1.20E+10 ₩/yr

13 Maintenance
 = 1.60E+01 ₩/ton
 volume flow = 9.72E+08 m3/yr
 Energy = 7.77E+09 ₩/yr

는 환경기초시설 확충, 지역별 수질환경기준 설정 등 오염총량관리계획 실시에 따른 자치단체에 대한 재정적, 행정적 지원방안이 강구되어야 하므로 경제적인 비용부담이 클 것이다.

낙동강의 상류부터 하류까지 저감시설의 투자계획에 따른 생태·경제적인 가치 평가의 환경비용/편익 분석표는 Table 5, Table 6과 같다.

Table 5. Environmental cost/benefit of the Nakdong River Basin before Total Maximum Daily Loads (TMDL) program

No.	Item	Environmental cost (Emwon/yr)	Environmental benefit (Emwon/yr)
1	Water quality improvement		4.625 E+11
2	Facility investment	2.288 E+11	
3	Management	8.099 E+10	
	Subtotal	3.098 E+11	4.625 E+11
	Cost-Benefit		1.527 E+11
	Benefit/Cost		1.493

Table 6. Environmental cost/benefit of the Nakdong River Basin after Total Maximum Daily Loads (TMDL) program

No.	Item	Environmental cost (Emwon/yr)	Environmental benefit (Emwon/yr)
1	Water quality improvement		4.630 E+11
2	Facility investment	2.859 E+11	
3	Management	9.058 E+10	
	Subtotal	3.765 E+11	4.630 E+11
	Cost-Benefit		8.650 E+10
	Benefit/Cost		1.230

오염총량관리계획 수립 이전의 경우 Table 5와 같다. 낙동강하류 물금지점(낙본K)의 수질은 4.1 mg/L이며 이에 대한 편익은 연간 4.625 E+11 won이다. 수질개선 노력의 저감시설 투자비에 따른 환경비용은 연간 3.098 E+11 won이며 오염총량관리계획 수립 이전의 환경비용/편익분석 결과 연간 1.527 E+11 won의 편익으로 평가되었다. 오염총량관리계획 수립 이후 기본계획에 따른 시행계획을 기초하여 저감시설에 대한 환경비용/편익분석을 살펴보면 향후 제1차 오염총량관리계획 최종년도인 2010년까지 낙동강하류 물금지점(낙본K) 목표수질인 3.0 mg/L에 대한 편익은 연간 4.630 E+11 won이며, 저감시설 투자비에 따른 환경비용은 연간 3.765 E+11 won으로 수립 전보다 저감시설 투자계획이 추가되어 높게 산정되었다.

오염총량관리계획 수립 이전의 환경비용은 연간 약 3,098억 원이었으며 이 때 수자원의 실질적 가치는 연간 약 4,625억 원으로 편익/비용의 비는 1.494로 산정되었다. 계획 수립 이후 환경비용은 Table 6과 같으며 연간 약 3,765억 원의 비용으로 평가되었다. 이 때 수자원의 실질적 가치는 연간 약 4,630억 원으로 편익/비용의 비는 1.230로 다소 낮아진 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 BOD 4.1 mg/L에서 3.0 mg/L으로 수질개선이 이루어질 경우 동일한 유량하에서 emergy 분석한 결과 연간 약 5억 원의 생태·경제적 가치가 증가되는 것으로 평가되었다.

수질개선을 위한 새로운 정책인 오염총량관리제를 도입 이후에 적게나마 오염총량관리계획의 도입 이전보다 편익이 발생하였다. 그러나 오염총량관리계획 수립 이후 계획되거나 설치된 저감시설을 살펴보면 점오염원에 치중되어 고비용의 저감시설에 의존하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 증가하는 오염부하를 줄이기 위해서는 점오염원의 저감계획보다는 비점오염원을 제거하는 저감시설에 더 많은 노력을 하여야 할 것이다. 향후 제2차 오염총량관리계획의 대상물질은 BOD와 T-P로 유기물은 물론 영양염까지 목표

수질을 설정한 후 달성하는데 노력을 기울여야 한다.

4. 결론

낙동강유역의 총량관리계획 수립 전과 후의 수질개선 노력을 위한 저감시설 및 개선효과에 대하여 emergy 분석을 통해 환경비용/편익분석을 실시하였다.

총량관리계획에 대한 환경비용/편익분석 결과를 살펴보면 수질개선 효과를 위한 노력으로 수립전과 후 모두 편익이 발생하지만 수립 이후 추가 저감시설의 투자비용으로 편익/비용의 비율은 1.493에서 1.230으로 낮아졌다. 추가 저감시설의 투자비용에 비해 BOD 4.1 mg/L에서 3.0 mg/L로 동일한 유량하에서의 수질개선 효과가 다소 미비한 것으로 평가되었다. 비용/편익을 통해 생태·경제적인 가치를 살펴보면 약 5억 원 정도 증가되는 것으로 평가되었다. 이는 최근 수질개선을 위한 새로운 정책인 오염총량관리제를 도입한 후에 적게나마 도입 이전보다는 이후에 편익이 발생한 것으로 평가되었다. 그러나 오염총량관리계획 도입 이후의 저감시설계획을 살펴보면 점오염원에 대부분이므로 고비용의 저감시설에 의존하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 오염부하량을 줄이기 위해서는 저비용의 점오염원의 저감시설 계획과 비점오염원의 저감시설 계획을 증가시켜야 할 것이다.

오염총량관리계획에 따른 낙동강수계의 수질개선을 위해서는 환경비용만을 유발하는 에너지 소모적인 고비용의 하수처리시설 확충 및 고도처리시설에 의존한 수질관리보다는 시설투자비와 유지관리비가 적게 투자되고 보다 효율적인 자연환경자원을 이용하는 생태공학적인 처리시설로 점차 전환되어야 할 것이다.

참고문헌

김영진(2000). 환경회계에 의한 하천유역의 환경정책 결정

- 에 관한 연구. 박사학위논문, 부경대학교.
- 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, 박배경, 이수웅, 류덕희(2010). 시스템 생태학적 접근법에 의한 서낙동강 유역의 지속성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(3), pp. 439-445.
- 환경부(2006). *물환경관리 기본계획(4대강 대권역 수질보전 기본계획)*.
- Brown, M. T. and McClanahan, T. R. (1996). Energy 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.
- Odum, H. T. (1998). Energy, environment and public policy: A guide to the analysis of system. UNEP Regional Seas Reports and Studies, No.95, United States Environment programme, Nairobi, Kenya, pp. 109.
- 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*.