



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

에머지 개념을 이용한
정수처리시스템의 생태·경제성 평가



부경대학교 대학원

생태공학과

정화숙

공학석사 학위논문

에머지 개념을 이용한
정수처리시스템의 생태·경제성 평가

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2010 년 8 월

부경대학교 대학원

생 태 공 학 과

정 화 숙

鄭花淑의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2010 년 8 월



주 심 공학박사 강 대 석 ㉠

위 원 공학박사 김 동 명 ㉠

위 원 공학박사 이 석 모 ㉠

목 차

I. 서론	1
II. 연구 배경	3
1. 수자원의 가치	3
가. 수자원이 가지는 가치의 종류	3
나. 수자원의 가치추정방법	5
2. 부산광역시 상수도 공급 현황	6
가. 상수도의 분류	6
나. 상수도의 공급체계	7
다. 부산광역시 수돗물 수질 현황	10
3. 부산광역시 취수원 다변화 계획	11
가. 부산광역시 수돗물 음용 현황	11
나. 상수원 관리의 취약성	12
다. 취수원 다변화 계획	14
4. 선행 연구 사례	15
가. 먹는물 관련 수자원의 가치추정	15
나. 취수원 다변화 계획 관련 연구	19
III. 연구방법	20
1. 연구범위	20
2. 에머지평가법	21
가. Emergy	22
나. Transformity	22
다. EmWon	24
라. 에너지 시스템 다이어그램 작성	25
마. 에머지 분석표 작성	27
바. 에머지 지표 산정	28

IV. 연구 결과	31
1. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 분석	31
가. 낙동강 원수의 에너지 변환도	31
나. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램	32
다. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 평가표	34
라. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 지표	36
2. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 분석	37
가. 남강댐 원수의 에너지변환도	37
나. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램	37
다. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지평가표	39
라. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 지표	41
3. 해수담수화시스템의 에머지 분석	42
가. 해수담수화 시스템의 에너지 시스템 다이어그램	42
나. 해수담수화시스템의 에머지 평가표	44
다. 해수담수화시스템의 에머지 지표	46
V. 고 찰	47
1. 원수의 생태·경제적 가치	47
2. 정수처리시스템별 생태·경제적 비용 분석	48
3. 수돗물 음용형태별 생태·경제적 비용/편익 분석	50
가. 수돗물을 바로 마시는 경우	50
나. 수돗물을 끓여서 먹을 경우	51
다. 수돗물을 정수기로 걸러서 먹을 경우	52
라. 부산시민의 수돗물 음용형태의 고비용성	53
VI. 결론	54
참고문헌	55
Appendix	57

표 목 차

Table 2.1 The water quality of tap water in the past three years	10
Table 2.2 Status of drinking water in major cities	11
Table 2.3 Reasons of not drinking tap water	12
Table 2.4 The emissions of water pollutants of the 4 major rivers	13
Table 2.5 Whether legal regulations of the major water supply river	13
Table 2.6 Annual number of pollution incidents Nakdong River	13
Table 2.7 Summary of major pollution accidents Nakdong River	13
Table 2.8 Estimating the value of tap water cases	15
Table 2.9 Distribution and emergy values of global water storages	17
Table 3.1 Scope of this study	20
Table 3.2 Tabular format for the typical emergy evaluation table	27
Table 4.1 Emergy evaluation of Nakdong River water	31
Table 4.2 Emergy evaluation of Nakdong River water treatment system	34
Table 4.3 Emergy indices for the Nakdong River water treatment system ..	36
Table 4.4 Emergy evaluation of Namgang Dam water	37
Table 4.5 Emergy evaluation of Namgang Dam water treatment system ..	39
Table 4.6 Emergy indices for the Namgang Dam water treatment system ..	41
Table 4.7 Emergy evaluation of seawater desalination system	44
Table 4.8 Emergy indices for the seawater desalination system	46
Table 5.1 Emergy cost-benefit evaluation for the Nakdong River water treatment system	50
Table 5.2 Emergy cost-benefit evaluation for the boiling water	51
Table 5.3 Emergy cost-benefit evaluation for the home filter	52

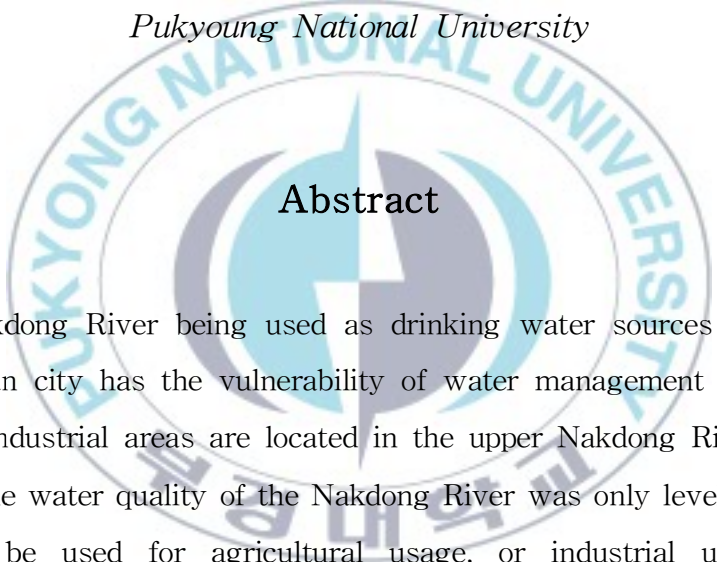
그림 목 차

Fig. 2.1 General principles for value in use	5
Fig. 2.2 A classification of waterworks	6
Fig. 2.3 A water supply system	7
Fig. 2.4 The waterworks of Busan	8
Fig. 2.5 Deoksan water treatment plant	9
Fig. 2.6 Emergy of the public water supply alternatives evaluated	18
Fig. 3.1 Emergy quality chain used to calculate solar transformity	22
Fig. 3.2 Hierarchical chain of energy transformations	23
Fig. 3.3 Emergy inputs used to evaluate the emergy/money ratio of the national economy	24
Fig. 3.4 Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right	26
Fig. 3.5 Emergy based indices, accounting for local renewable emergy inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F)	28
Fig. 4.1 Energy systems diagram of Nakdong River water treatment system	33
Fig. 4.2 Composition of emergy inputs to the Nakdong River water treatment system	35
Fig. 4.3 Energy systems diagram of Namgang Dam water treatment system	38
Fig. 4.4 Composition of emergy inputs to the Namgang Dam water treatment system	40
Fig. 4.5 Energy systems diagram of seawater desalination system	43
Fig. 4.6 Composition of emergy inputs to the seawater desalination system	45
Fig. 5.1 Emergy inputs in tap water each water treatment system	47
Fig. 5.2 Emergy inputs and transformity of tap water each water treatment system	49
Fig. 5.3 Additional costs each of intake forms of tap water	53

Ecological-economics evaluation of water treatment systems

Hwa suk, Jeong

*Department of Ecological engineering, Graduate school,
Pukyong National University*



Abstract

The Nakdong River being used as drinking water sources for Pusan metropolitan city has the vulnerability of water management due to the fact that industrial areas are located in the upper Nakdong River. Based on BOD the water quality of the Nakdong River was only level IV, which can only be used for agricultural usage, or industrial usage after meticulous filtration, precipitation and sterilization.

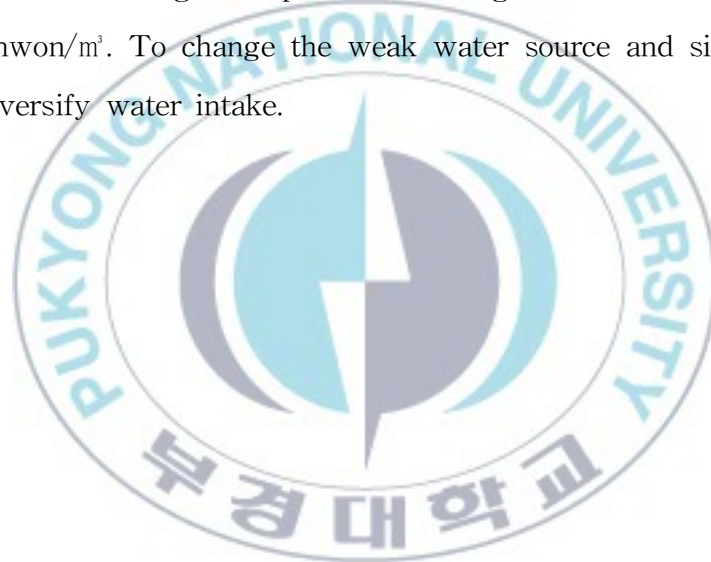
Alternatives for Busan's water source have been studied for long time but its qualitative solution led to conflict between each local governments.

This study used emergy analysis method to evaluate ecological-economics of each alternatives quantitatively to help making reasonable decision. The emergy methodology is a system evaluation tool that uses energy as the common currency to compare different resources on a common basis.

Emergy transformity of Namgang Dam's raw water is higher than emergy transformity of Nakdong River's raw water due to its high water quality.

High emergy transformity means high emergy input. seawater desalination system shows 7.9 times larger emergy input than Nakdong River water treatment system.

Most citizens of Busan boil the tap water or use the home filter. The additional cost of boiling the tap water or using the home filter is 8,314 or 104,300 emwon/m³. To change the weak water source and situations we need to diversify water intake.



I. 서론

급속한 산업화 및 도시화로 인해 필요한 물 수요량은 증가하고 수질오염 등으로 인해 사용가능한 물은 점점 적어지는 물 부족 현상과 전 지구적인 이상기후 현상으로 수자원의 지역적 불균형 현상이 심화되고 있다.

이런 물부족 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 수돗물을 시민들은 공급받기를 원하고 있다. 이런 관점에서 볼때 낙동강을 주 상수원으로 하고 있는 부산시는 수자원관리의 취약성을 가지고 있는 낙동강으로 인해 끊임없이 취수원 다변화계획이 요구되고 있다.

부산시의 주요 상수원인 낙동강은 그 유역면적이 23,702.02 km²로 우리나라 국토면적의 23.7 %를 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 BOD를 기준으로 볼 때 고도의 정수처리를 한 후 생활용수로 이용할 수 있는 보통 정도의 수준이다.

지리적 특성상 낙동강 상류에는 구미산업단지 등의 산업단지 및 공업지역이 위치하고 있어 낙동강에서는 최근에도 1,4-다이옥산 및 퍼클로레이트 등과 같은 유해물질이 검출되고 있고 크고 작은 수질오염사고가 끊이지 않고 일어나고 있어 부산시는 주 상수원인 낙동강의 수질관리에 취약한 구조를 가지고 있다.

낙동강 하류는 부산시의 상수원으로 사용되고 있음에도 불구하고 상수원 보호를 위한 법적장치인 상수원보호구역, 특별대책지역, 수변구역으로 지정되어 있지 않으며 낙동강 주변의 다른 지역의 지역 발전을 위하여 지속적으로 개발사업이 추진되고 있어 수돗물 공급의 기본이라 할 수 있는 안전한 상수원의 확보는 더욱 더 어려운 실정이다.

이러한 부산시 상수원의 구조적 취약성을 해결하기 위하여 새로운 상수원 확보를 위한 여러 대안이 오래전부터 논의되어 왔으나 그 논의가 정성적으로 이루어져 지방자치단체 간의 갈등과 분쟁의 소지를 낳고 있다.

따라서 본 연구에서는 자연환경의 가치를 경제활동과 동일한 척도로 평가할 수 있는 에머지평가법을 이용하여 각 대안의 생태경제성을 정량적으로 평가하여 과학적이고 합리적인 의사결정을 돕고자 한다.



II. 연구 배경

1. 수자원의 가치

급속한 산업화 및 도시화로 인해 필요한 물의 수요는 급증하고, 물 사용량이 증가함에 따라 쓰고 버리는 각종 오폐수의 배출량은 더욱더 증가하여 수질오염을 심화시켜 사용 가능한 물이 점점 적어지는 물 부족 현상이 발생하고 있다. 또한 지구온난화 현상 등으로 인한 전 지구적인 이상기후 현상인 한쪽에는 극심한 가뭄의 형태로, 또 다른 쪽에서는 홍수의 형태로 나타나 수자원의 지역적 불균형 현상이 심화되고 있다.

이런 물 부족 및 지역적 불균형 현상은 수자원에 대한 사회적 인식의 변화를 낳고 있다. 물이 풍족했던 과거에는 용수를 생산하기 위해 자본의 투입이 필요하지 않았기 때문에 물은 가치개념이 없는 자유재였다. 그러나 물 부족 및 지역적 불균형 현상으로 인해 용수에 경제적 가치를 부여하게 되어 준경제재와 준공공재적 성격을 지닌 일반 재화로 인식하게 되었으며 점차 이 단계를 넘어 자원상품화한 경제재로 인식하게 되어 수자원이 가지는 가치에 대한 연구가 이루어지고 있다(김, 1998).

가. 수자원이 가지는 가치의 종류

우리에게 평소 일상생활에서 사용하는 재화나 서비스가 가지는 가치가 얼마인지를 묻는다면 대부분 그 재화나 서비스를 얻는데 얼마의 경제적 금액을 지불하였는지를 생각하게 된다. 즉, 다수의 생산자와 소비자가 존재하는 시장을 통해 재화나 서비스가 거래됨으로써 이에 대한 적절한 가격이 형성되고, 이 가격이 그 재화나 서비스의 경제적 가치를 나타낸다고 볼 수 있다.

그렇다면 수자원의 가치를 알아보기 위해 시장에서 수자원이 얼마에 거래되는지를 알아보면 되는 것일까? 수자원은 공공재로서 일반적인 재화나 서비스와는 그 특성이 달라 시장에서 형성된 가격이 수자원이 가지는 경제적 가치를 나타낸다고 볼 수 없다. 또한 경제적 가치 이외 수자원이 가지는 다른 가치는 없는 것일까?

박(2007)은 수자원의 가치를 사용자와 사용 용도에 따라 분류하였다. 수자원의 가치는 현재 사용자 가치, 즉 경제적 가치와 본질적 가치의 두 종류로 크게 나뉘어 지며 이중 본질적 가치는 일반적으로 측정이 어렵다. 경제적 가치는 수자원 사용자에게 대한 가치, 순환수로부터의 순편익, 간접사용으로 인한 순편익, 사회적인 목표와 일치성을 포함한다(Fig. 2.1).

수자원이 가지는 경제적 가치를 세부적으로 살펴보면 수자원 사용자에게 따른 가치는 산업 및 농업 분야 사용의 경우 최소한 상품의 한계 가치만큼이며, 가정용의 경우 요금 납부 의지가 수자원의 사용가치인 것이다.

관개용수로 분배된 수자원의 일부가 해당 지역 지하수반을 재충전하거나 하천 및 운하 하류로 유입되는 순환수의 양을 증가시키므로 이 경우 순환수로부터 얻는 수자원의 가치로 볼 수 있다.

간접 사용으로 얻는 이익의 대표적인 예는 가정에서 식수로 사용하거나 개인위생 유지 용도 및 가축 사육 용도의 관개 작업을 통한 보전 증진 및 농촌 빈곤층 소득 증진과 같은 경우에서 찾아 볼 수 있다.

물 부족으로 농사를 지을 수 없어 식량 공급이 어려운 지역에서는 관개농업을 통해 식량 안정을 이루고 빈곤에서 벗어나는 등의 사회적 목표 달성이 가능하면 물이 가지는 경제적 가치 중 사회적 목표와의 일치성에 해당한다.

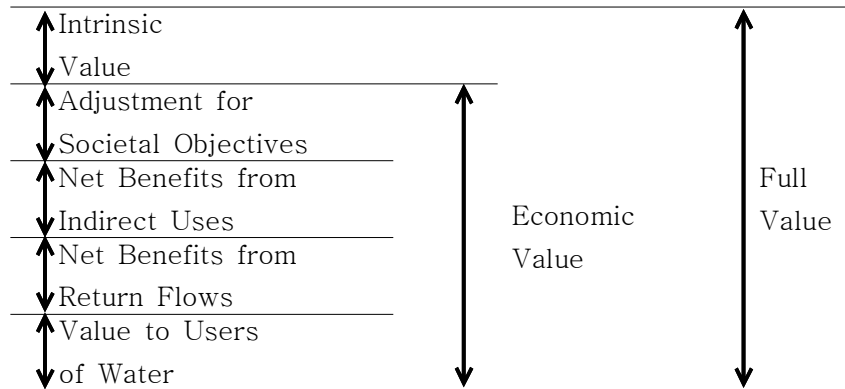


Fig 2.1 General principles for value in use.

나. 수자원의 가치추정방법

수자원의 가치를 추정하는 방법은 수자원의 가치를 경제적인 가치와 본질적인 가치로 나눈다고 할 때 주로 경제적인 가치에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 공공재인 수자원은 시장에서 거래되는 일반적인 재화나 서비스와는 그 특성이 달라 시장에서 형성된 가격이 수자원의 경제적 가치를 바로 나타낸다고 볼 수 없다. 그렇기 때문에 수자원의 경제적 가치에 대한 연구는 현시선호접근법 및 진술선호접근법 등의 특수한 경제적 접근방법 이용한다.

현시선호접근법은 환경재와 관련된 시장에서 발생하는 변화를 분석하고, 다양한 정책으로 인해 환경이 개선되면 각 개인은 자신의 행위를 변화시키며, 이러한 변화를 분석하여 환경개선편익을 도출하는 것을 말하며, 주요 분석 모델은 분석여행비용법(travel cost method), 특성가격모형(hedonic price model), 회피행위모형(averting behavior model)등 있다.

진술선호접근법은 가상의 시장을 형성하여 시장의 제 조건을 소비자에게 부여하고 소비자의 지불의사를 간접적으로 추정하는 방법으로 주로 조건부가치평가법(contingent valuation method ; CVM)을 이용한다.

2. 부산광역시 상수도 공급 현황

가. 상수도의 분류

수도란 관로(管路), 그 밖의 공작물을 사용하여 원수나 정수를 공급하는 시설의 전부를 말하며, 하수와 구별하기 위하여 상수도라는 용어를 사용한다. 상수도는 수도법 제3조에 의해 일반수도, 공업용수도, 전용수도로 나뉘며, 이중 일반수도는 공급주체, 수용가의 특성 등에 의해 광역상수도, 지방상수도, 마을상수도로 분류된다. 부산광역시의 상수도 공급은 지방자치단체인 부산광역시가 공급주체로 부산시민에게 원수 및 정수를 공급하므로 상수도 분류상 일반수도인 지방상수도에 해당한다(Fig. 2.2).



Fig. 2.2. A classification of Waterworks.

나. 상수도의 공급 체계

상수도의 공급은 상수원으로부터 원수를 취수하는 것에서부터 시작한다. 상수원에서 취수된 원수는 도수관거를 통해 정수장으로 보내지며 정수장으로 도수된 물은 정수처리과정을 거쳐 생활용수로 사용할 수 있는 깨끗한 물이 생산된다. 깨끗이 정수된 물은 다시 송수관거를 통해 배수지로 보내지며 배수지에서 급수관을 통해 수용가에 수도물이 공급된다(Fig. 2.3).



Fig. 2.3. A water supply system.

부산광역시의 상수원은 낙동강, 회동수원지 및 범기수원지이고 매리취수장, 물금취수장, 회동수원지 및 범기수원지 취수된 원수는 각각 덕산정수장, 화명정수장, 명장정수장 및 범어사정수장에서 정수처리공정을 거친 후 부산광역시 전역에 위치하고 있는 총 52개의 배수지로 나누어 송수된 후 각 정수장별 급수구역에 공급된다(Fig. 2.4).

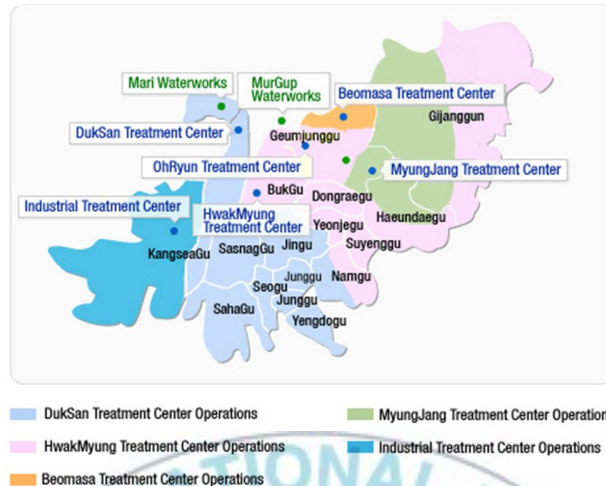


Fig. 2.4. The waterworks of Busan.

상수도 공급체계 중 취수 및 정수과정은 원수의 수량 및 수질 등의 성상에 영향을 많이 받는다. 취수시설의 경우 표류수를 수원으로 하는 경우에는 취수문, 취수탑, 취수관 등의 시설을 사용하지만, 지하수를 수원으로 하는 경우에는 집수매거, 천정호, 심정호 등의 시설을 사용하게 된다. 정수처리과정 또한 수질에 따라 적절한 처리공정을 선택해야한다. 일반적으로 하천수, 저수지수 등의 표류수를 수원으로 사용하는 경우에는 침사지, 응집·침전지, 여과지, 소독지 등의 여러 단계를 거치며 필요한 경우에는 활성탄 등의 고도처리를 적용한다. 반면에 표류수에 비해 오염가능성이 적은 지하수는 수질이 양호할 경우 여과와 소독과정만 거칠 수도 있다.

부산광역시의 경우 표류수인 낙동강, 회동수원지 등을 상수원으로 하고 있고 특히 낙동강의 경우 상류보다는 오염물질의 유입의 가능성이 많은 하류에서 취수를 하므로 깨끗한 수돗물 공급을 위해 아래와 같은 정수처리과정을 거친다.

각 취수장에서 취수된 원수는 침사지를 통과하게 되는데, 침사지에서는 원수에 함유된 흙, 모래 및 각종 이물질을 가라앉히고, 밴드 스크린이라는 걸름체로 부유물을 제거한 후 액체염소를 넣어 1차 살균·소독을 한다.

침사지를 거친 물은 전오존접촉조에서 2~6분간 오존을 접촉시켜 원수에 함유된 무기물 및 유기물질을 산화시킨다. 전오존처리를 거친 물은 착수지로 모이게 된다. 착수지에서는 물에 정수처리제(PAC, PSO, 황산알루미늄, 분말 활성탄 등)를 혼합시켜 다음 단계 처리과정인 침전지 용량에 알맞은 수량으로 물을 침전지에 배분한다. 침전지에서는 유입된 물에 함유된 각종 부유물질을 응집·침전시켜 슬러지라는 불순물을 모아 배출시키고 깨끗한 상등수를 모래여과지로 보낸다. 모래여과지는 침전지에서 가라앉지 않는 미세한 부유물질을 모래층으로 걸러내는 곳으로 침전수를 모래층 1.05m와 자갈층 0.05m의 여과막 사이로 통과시켜 미세한 침전 잔류물을 여과시킨 불순물이 없는 맑은 물을 만든다. 모래여과지를 통과한 물은 후오존처리시설에서 물속의 잔존유기물질을 산화시키고 박테리아 등을 살균하여 입상활성탄 여과지로 보낸다. 입상활성탄 여과지에서는 오존처리된 깨끗한 물을 2.35m의 활성탄 여과층을 약 8분동안 통과시켜 활성탄 내부의 수많은 흡착구멍에 의해 흡착시키거나 활성탄 표면에 부착된 미생물에 의해 물속에 녹아 있는 미세한 잔류물을 분해 제거한다. 마지막으로 정수지에 도착한 물은 2차 소독을 거친 후 공급된다(Fig. 2.5).

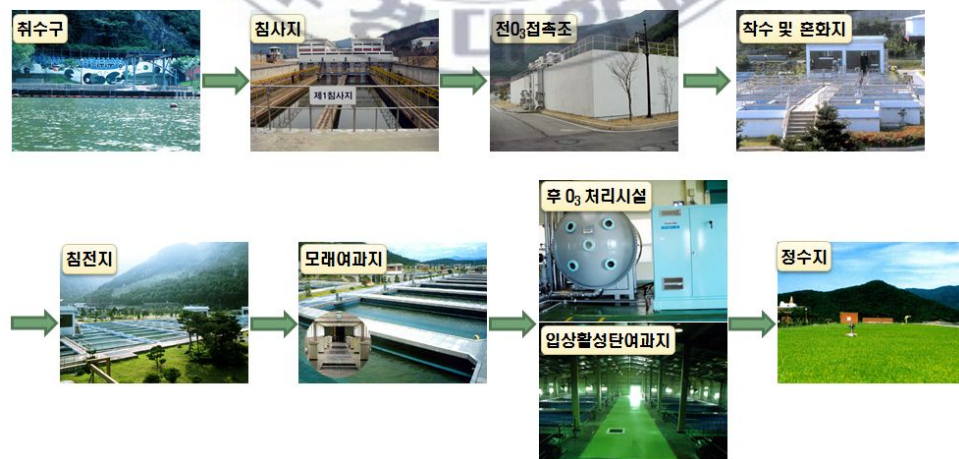


Fig. 2.5. Deoksan water treatment plant.

다. 부산광역시 수돗물 수질 현황

Table 2.1에 제시한 바와 같이 부산광역시는 안전하고 정확한 정수처리를 통해 먹는물 수질기준에 적합한 수돗물을 생산하고 있으며 고도정수처리시설을 전국 최초로 도입하여 이취미 부분에서도 빠지지 않는 수준의 수돗물을 공급하고 있다.

Table 2.1. The water quality of Busan tap water in the past three years

Index	Standard	2005	2006	2007	Index	Standard	2005	2006	2007
Total colony counts	100CFU/ml	0	0	0	Dichloromethane	0.02	N.D	N.D	N.D
Escherichia coli	ND/100ml	N.D	N.D	N.D	Benzene	0.01	N.D	N.D	N.D
Total Coliforms	ND/100ml	N.D	N.D	N.D	Toluene	0.7	N.D	N.D	N.D
Fecal Coliforms	ND/100ml	N.D	N.D	N.D	Ethylbenzene	0.3	N.D	N.D	N.D
Lead	0.05	N.D	N.D	N.D	Xylene	0.5	N.D	N.D	N.D
Fluoride	1.5	N.D	N.D	N.D	1,1-dichloroethylene	0.03	N.D	N.D	N.D
Arsenic	0.05	N.D	N.D	N.D	Tetrachlorocarbon	0.002	N.D	N.D	N.D
Selenium	0.01	N.D	N.D	N.D	Chloral hydrate	0.03	0.0011	0.0003	0.0000
Mercury	0.001	N.D	N.D	N.D	Dibromoacetonitrile	0.1	N.D	N.D	N.D
Cyanide	0.01	N.D	N.D	N.D	Dichloroacetonitrile	0.09	N.D	0.0001	N.D
Chrominu	0.05	N.D	N.D	N.D	Trichloroacetonitrile	0.004	N.D	N.D	N.D
Ammonium Nitrogen	0.5	N.D	N.D	N.D	Halocetic acids	0.1	0.0026	0.0033	0.0012
Nitrate Nitrogen	10	2.3	2.3	2.0	Hardness	300	83	91	81
Cadmium	0.01	N.D	N.D	N.D	Consumption of KMnO4	10	0.9	0.9	0.8
Boron	0.3	0.03	0.05	0.04	Odor	None	적	적	적
Phenols	0.005	N.D	N.D	N.D	Taste	None	적	적	적
THMs	0.1	0.024	0.025	0.033	Copper	1	N.D	N.D	0.007
chloroform	0.08	0.0134	0.0138	0.0180	Color	5	1	1	1
Diazinon	0.02	N.D	N.D	N.D	ABS	0.5	N.D	N.D	N.D
Parathion	0.25	N.D	N.D	N.D	pH	5.8-8.5	7.0	7.0	7.0
Fenitrothion	0.04	N.D	N.D	N.D	Zinc	1	0.008	0.004	0.002
Carbaryl	0.07	N.D	N.D	N.D	Chlorice	250	31	31	36
1,1,1-Trichloroethane	0.1	N.D	N.D	N.D	Total Solids	500	196	215	204
Tetrachloroethylene	0.01	N.D	N.D	N.D	Iron	0.3	N.D	N.D	N.D
1,2-Dibromo-3-chloropropane	0.003	N.D	N.D	N.D	Manganese	0.3	N.D	N.D	N.D
Trichloroethylene	0.03	N.D	N.D	N.D	Turbidity	0.5	0.09	0.09	0.09

자 료 : 부산광역시 상수도사업본부(2008)

3. 부산광역시 취수원 다변화 계획

가. 부산광역시 수돗물 음용 현황

부산광역시는 전국 최초로 고도정수처리시설을 도입하여 먹는물 수질기준에 적합한 맑고 깨끗한 수돗물을 공급하고 있으나, 수돗물 음용률은 전국 평균보다 낮으며 부산시와 같이 낙동강을 상수원으로 하고 있는 대구와 비교하여도 낮은 결과를 보였다. 부산시민이 수돗물을 먹지 않는 가장 큰 원인은 주상수원인 낙동강 수질에 대한 불신인 것으로 조사되었다(Table 2.2 및 Table 2.3).

낙동강 유역의 하수처리시설 확충, 낙동강 특별법 제정 등의 다양한 노력을 통해 낙동강의 수질이 점차 개선되고 있음에도 불구하고 낙동강 수질에 대한 시민들의 불신은 여전한 것이다. 이는 부산광역시가 상류에 비해 오염 가능성이 높고 수질오염 사고의 위험이 항상 내재되어 있는 하류에서 원수를 취수하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2.2. Status of drinking water in major cities

(단위 : %)

Index		Korea		Busan					Seoul	Daegu
Year		2000	2003	1999	2000	2001	2002	2003	2000	2003
Tap water	Direct	2.5	1.0	0.5	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2	0.7
	Boiling	59.1	44.8	38.6	42.8	42.2	43.5	44.4	62.7	62.4
	Home filter	13.7	33.6	10.2	14.2	20.3	26.4	28.2	19.6	30.7
Bottled water		5.0	10.4	6.1	5.7	8.5	9.6	8.1	9.5	3.1
Mineral water		2.6	10.3	26.8	24.6	24.6	16.0	15.8	7.9	3.1
Groundwater		4.2		16.5	11.8	1.9	2.6	1.4	-	-
etc.		-	-	1.3	0.6	2.2	1.8	1.8		

자 료 : 신성교, 2004, 부산광역시 수돗물 음용률 제고 방안, 부산발전연구원, pp.16~18

Table 2.3. Reasons of not drinking tap water

(단위 : %,)

Index	1999	2000	2001	2002	2003
Distrust raw water	42.0	65.8	65.8	67.0	48.3
Taste and Odor	26.9	53.4	45.4	49.3	35.4
Foreign substance	22.3	29.3	27.4	22.7	12.0
Prefer bottled water or mineral water	26.1	41.9	44.6	45.7	39.4
Inner pipe pollution	-	-	-	-	14.2
Outter pipe pollution	-	-	-	-	17.2
Distrust water treatment	-	-	-	-	11.7
etc.	2.9	4.0	5.2	6.0	6.5

자 료 : 신성교, 2004, 부산광역시 수도물 음용률 제고 방안, 부산발전연구원, pp.16~18

나. 상수원 관리의 취약성

부산광역시의 주요 상수원인 낙동강의 수질오염물질 배출량은 수질오염물질(유기물) 16,872 kg/일 및 특정수질유해물질 1,703.22 kg/일로 다른 4대강과 비교하였을 때 그 양이 상당하다(Table 2.5).

이런 수질오염물질의 유입을 막기 위해서는 상수원보호구역, 특별대책지역, 수변구역 지정 등의 법적 규제가 필요하나 낙동강 유역은 여러 지자체가 위치하고 있어 각 지자체의 이해관계가 달라 이런 법적 규제 지역을 지정할 수 없는 실정이다(Table 2.6).

또한 낙동강 상류에는 산업단지 및 공업지역이 입지하고 있어 해마다 크고 작은 수질오염사고가 발생하고 있으며 이중 주요 오염사고의 경우 폐놀 등 인체에 악영향을 미칠 수 있는 물질이 유출되는 경우도 있다(Table 2.7 및 Table 2.8).

Table 2.4. The emissions of water pollutants of the 4 major rivers(kg/day)

구 분	한 강 (팔당댐)	낙동강 (물금, 매리)	금 강 (대청댐)	영산강 (주암댐)
유기물	2,205	16,872	7,783	800
특정수질유해물질	10.26	1,703.22	13.45	7.81

자료 : 환경부(2006)

Table 2.5. Whether legal regulations of the major water supply river

구 분	한 강 (팔당댐)	낙동강 (물금, 매리)	금 강 (대청댐)	영산강 (주암댐)
상수원보호구역	○	-	○	○
특별대책지역	○	-	○	-
수변구역	○	-	○	○

Table 2.6. Annual number of pollution incidents in Nakdong River

년도	1994년	1995년	1996년	1997년	1998년	1999년	2000년
발생건수	39	17	28	31	20	24	19
년도	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006	2007
발생건수	27	20	6	1	5	10	5

자료 : 환경부(2009)

Table 2.7. Summary of major pollution accidents in Nakdong River

오염사고	발생일시	장소
페놀 오염사고	2001년 3월	경북 구미시 두산전자
악취(벤젠, 톨루엔) 오염사고	2004년 1월	미상
디클로로메탄 오염사고	2004년 2월	대구성서공단(추정)
1,4-다이옥산 오염사고	2004년 6월	경북 구미시 공단 합섬업체
퍼클로레이트 오염사고	2006년 6월	경북 구미시 LG반도체 등
페놀 오염사고	2008년 3월	경북 김천시
폐수유출사고	2008년 9월	경북 구미시
1,4-다이옥산 오염사고	2009년 1월	경북 구미시 공단 합섬업체

자료 : 부산광역시 상수도사업본부(2009)

다. 취수원 다변화 계획

부산광역시는 상수원으로서 낙동강의 취약성을 실감하고 안전한 수돗물 공급을 위해 취수원 다변화 계획의 한 방향으로 부산·경남권 광역상수도 사업을 추진하고자 하였으나 지역간의 갈등으로 여러차례 무산되었다. 그 예로 폐놀오염사건 후속대책으로 1993년 경상남도가 수립한 “합천댐 광역상수도 개발사업 타당성조사”를 바탕으로 건설교통부가 1996년 황강하류지역에 수중보를 건설하여 부산과 경남지역에 광역상수도를 공급하는 방안을 마련하였으나 합천지역 주민의 반대로 무산되었다. 또 1997년 위천국가산업단지 조성에 따라 부산지역의 용수공급대책 수립을 위해 광역상수도 사업을 재추진하고자 하였으나 합천지역의 주민의 반대 및 낙동강 수질오염 심화를 이유로 무산되었다. 이후 기존 합천댐에서 남강댐, 강변여과수 등으로 취수원을 변경한 부산·경남권 광역상수도사업이 추진되고 있으나 이 또한 지역간 갈등을 빚고 있는 실정이다. 현재 부산광역시는 기존 낙동강 위주의 취수원에서 낙동강과 더불어 부산·경남권 광역상수도사업을 통한 남강댐, 해수담수화 등의 여러 취수원 다변화계획을 검토하고 있다.

4. 선행 연구 사례

가. 먹는물 관련 수자원의 가치추정

(1) 경제학적 방법을 통한 가치추정

먹는물과 관련한 수자원의 가치추정방법은 주로 경제학적 방법을 이용하여 이루어졌다. 콧(1993), 김(1997), 김(1999) 등은 조건부가치추정법 및 회피비용분석법 등을 이용해 수돗물 및 하천의 수질개선키 지불의사금액을 추정하였다. 그 결과를 살펴보면 최소 가구당 월평균 2,560원의 금액을 지불할 의사가 있음을 알수 있고 이는 이는 수자원이 더 이상 공공재의 성격만을 가지고 있지 않다는 것으로 보여준다(Table 2.8).

그러나 이런 경제학적 방법은 상수원인 자연환경에 대한 가치는 고려하고 있지 않으므로 시스템 생태학적 방법을 통해 자연환경이 정수처리시스템에 기여하는 바를 평가하여야 할 것이다.

Table 2.8. Estimating the value of tap water

연구자	조사대상	가치추정방법	가치추정액 (가구당 월평균)
콧승준	수돗물	조건부가치추정법	2,560원
김도영	THMs 50% 감소	회피비용분석법	7,500~9,300원
김광임	한강 수자원의 식수용 이용가치	조건부가치추정법	7800원

(2) 시스템 생태학적 방법을 통한 가치추정

(가) 국내연구

시스템 생태학적 방법인 에머지 평가법을 이용하여 김(2007)은 낙동강 수자원의 가치를 평가하였다. 하천수에 내재된 자연환경자원의 가치는 상류는 $4.01\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ (190.86 Emwon/m^3), 중류는 $3.99\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ (190.09 Emwon/m^3), 하류는 $3.97\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ (190.09 Emwon/m^3)로 산정되어 상류에서 하류로 갈수록 낮게 평가되었다. 수돗물의 에너지변환도는 $207,438 \text{ sej/J}$ (김, 2000)이며, 하천수의 에너지변환도는 $81,300 \text{ sej/J}$ 으로 하천수를 처리하여 상수를 생산하는데 많은 비용이 소요됨을 알 수 있고 낙동강의 경우 하류로 갈수록 상수원수가 가지는 생태·경제적 가치는 다소 낮아지고 처리비용은 증가하는 시스템적 특징을 가지고 있는 것으로 평가하였다.

(나) 국외 연구

Buenfil(2000)은 에머지개념을 사용하여 지구적 범위 및 지역적 범위의 수자원의 가치를 평가하고 사용가능한 물을 생산하는 과정도 공공적 범위와 개인적 범위로 구분하여 에머지 평가를 실시하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 활용하여 플로리다의 경제적 환경적 복지를 극대화하기 위해 수자원을 어떻게 분배할지에 대한 연구도 수행하였다. 수자원 및 먹는물에 대한 사회적 평가가 평가절하되어 이로 인해 수자원의 낭비뿐만 아니라 사용가능한 물을 생산하는데 필요한 물질 및 화석 연료의 또한 낭비하는 결과를 초래하고 있다고 보았다. 따라서 수자원 보호 및 에머지개념을 이용하여 적절한 비용편익 분석을 실시한 미래 공공재 개발이 필요하다고 보았다.

수자원 및 사용가능한 물의 생산시설에 대한 에머지평가 결과를 살펴보면, 물은 그 물이 가지는 수량, 수질, 순환시간, 희귀성 및 수요량 등에 따라 가치가 달라진다. 지구적 범위로 보았을 때 극지방 빙하의 톤당 에머지량이 $5.21\text{E}+12 \text{ sej/m}^3$ 로 가장 크고 그 외 지하수($1.12\text{E}+12 \text{ sej/m}^3$), 습지($8.21\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$), 강($3.23\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$) 순으로 나타나 물의 가치에 순환시간이 큰 영향을 줄을 알 있다(Table 2.10). 플로리다 지역의 수자원별 톤당 에머지량을 비교하여 보아도 지하수 $68.14\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$, 표류수 $21.93\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$ (습지 $33.76\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$, 호소수 $26.87\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$, 하천수 $20.31\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$, 하구 등의 해수와의 중간지역 $4.50\text{E}+10 \text{ sej/m}^3$)순으로 나타났다(Table 2.9).

Table 2.9. Distribution and emergy values of global water storages.

water stock	average replacement time (yrs)	volume (10^3 km^3)	Emergy per volume (sej/m^3)	Transformity (chem. potential) (sej/J)
World ocean	3,278	1,370,000	-	-
Saline lakes	25	104	-	-
Water vapor in clouds	0.00015	0.08	$1.75\text{E}+10$	$3.54\text{E}+03$
Atmospheric vapor	0.026	14	$1.77\text{E}+10$	$3.59\text{E}+03$
Soil&subsoil water	0.77	67	$1.08\text{E}+11$	$2.19\text{E}+04$
Freshwater lakes	3	125	$2.27\text{E}+11$	$4.59\text{E}+04$
Biological water	0.05	2.1	$2.44\text{E}+11$	$4.94\text{E}+04$
Rivers and streams	0.04	1.2	$3.23\text{E}+11$	$6.54\text{E}+04$
Wetland water	1	11.5	$8.21\text{E}+11$	$1.66\text{E}+05$
Fresh groundwater	994	8,350	$1.12\text{E}+12$	$2.27\text{E}+05$
Polar ice and glaciers	16,000	29,000	$5.21\text{E}+12$	$1.05\text{E}+06$
Total freshwater resources	12,571	37,571	$3.16\text{E}+12$	$6.39\text{E}+05$

사용가능한 물을 생산하는 시스템별 에머지평가 결과를 살펴보면, 원수의 성상에 따라 사용가능한 물 1톤을 생산하는데 필요한 에머지량이 다를 수 있었다. 해수를 원수로 하는 시스템인 Stock Island, Tampa Bay, Dunedin에서 생산된 물이 가지는 톤당 에머지량은 각각 $67.9\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$, $22.6\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$, $18.8\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ 으로 지하수를 원수로 하는 시스템 (Gainesville : $14.6\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$), 하천수를 원수로 하는 시스템(Tampa(Hills. River) : $9.2\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$), 호소수를 원수로 하는 시스템 (W P. Beach : $6.9\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$)보다 큰 것으로 나타났다. 에너지변환도 또한 해수(Stock Island : $1.39\text{E}+06 \text{ sej/J}$, Tampa Bay : $4.57\text{E}+05 \text{ sej/J}$, Dunedin : $3.80\text{E}+06 \text{ sej/J}$), 지하수(Gainesville : $2.95\text{E}+05 \text{ sej/J}$), 하천수(Tampa : $1.87\text{E}+05 \text{ sej/J}$), 호소수(W. P. Beach : $1.39\text{E}+05 \text{ sej/J}$)를 원수로 하는 시스템 순으로 나타났다(Fig 2.7).

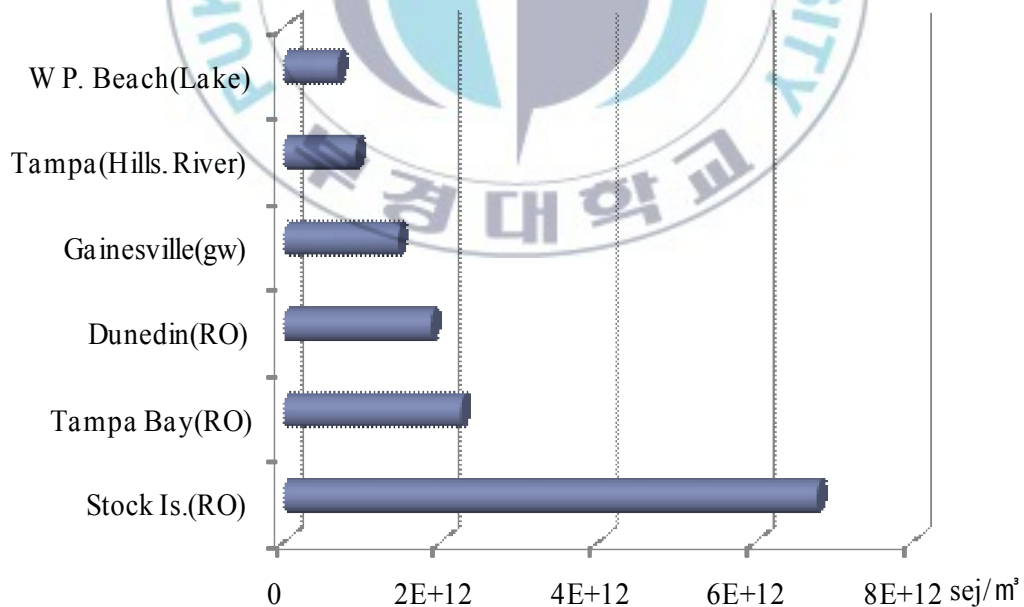


Fig. 2.7. Emergy of the public water supply alternatives evaluated

나. 취수원 다변화 계획 관련 연구

부산시 상수원 다변화 계획과 관련하여 신(2007)은 9가지 대체상수원 확보 방안에 대하여 객관적인 평가기준을 설정하고 지역전문가의 참여를 통한 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석방법에 따라 대안별 우선순위를 산정하고 추진전략을 제안하였다. 부산지역 필요수량 1,606천 m^3 /일을 대체할 수 있는 단일대안은 현재 없는 상태이고 이에 따라 몇 가지 대체상수원 확보 방안의 조합을 통해 대체 가능하리라 보았다. 이 조합은 대체상수원 확보 방안별 사업우선순위 결과에 따라 기존댐 이용 방안, 신규댐 건설 방안, 상수전 처리 방안을 우선대안으로 선정하였고 최근의 정책 여건의 급격한 변화에 따라 제시되는 해수담수화 활용 방안과 강변여과수 활용 방안을 정책대안으로 추가하였다. 이를 공급수량과 상수원이 입지한 위치적 특성을 반영하여 3개의 기존정수장과 1개의 신규정수장에 다음과 같이 배분하였다. 서부경남 권에서 공급되는 기존댐과 신규댐의 860천 m^3 /일의 공급물량은 낙동강 서쪽에 위치한 덕산정수장으로, 낙동강 원수전처리 방안을 통한 500천 m^3 /일의 공급물량은 물금지역 공간활용의 용이성을 고려하여 화명정수장에 배분하였다. 그리고 강변여과수 200천 m^3 /일의 공급물량은 비록 장거리 도수가 필요하여 입지의 적정성에 다소 문제가 예상되나 정수장의 규모를 고려하여 명장정수장에, 해수담수화를 통한 50천 m^3 /일의 공급물량은 해양 수질이 상태적으로 양호한 동부산권역에 신규 정수장을 설치하는 방안으로 배분하였다.

III. 연구방법

1. 연구범위

본 연구는 에머지 평가법을 이용하여 부산광역시 취수원 다변화 계획을 평가하고자 하는 것으로 상수원의 종류와 원수를 처리하는 정수장, 2개의 기준으로 취수원 다변화 계획을 구분하여 낙동강 원수 정수처리시스템, 남강댐 원수 정수처리시스템, 해수담수화시스템으로 나누었다.

낙동강 정수처리시스템은 현재 부산시의 정수처리시스템으로 낙동강을 상수원으로 하고 이를 덕산 정수장에서 정수처리하는 시스템이고 남강댐 원수 정수처리시스템은 남강댐을 상수원으로 하고 이를 덕산정수장에서 처리하는 시스템이며 해수담수화 시스템은 해수를 상수원으로 하여 신규로 조성되는 해수담수화시설을 이용하는 시스템이다(Table 3.1).

Table 3.1. Scope of the study

구 분	낙동강 원수 정수처리 시스템	남강댐 원수 정수처리시스템	해수담수화 시스템
상수원의 종류	낙동강 (매리취수장)	남강댐	해수
처리정수장	덕산정수장	덕산정수장	해수담수화 시설
용량(m ³ /일)	708,934 (2007년)	650,000 (취수량)	45,000 (생산량)
도수관로	6km 3열	56.9km 2열, 28.9km 2열, 8.6km 2열, 5.1km 2열, 0.3km 3열	430m 2열 330m 1열

2. Emergy 평가법

시스템이란 상호 관련되어 있는 제반 구성요소들이 유기적으로 통합된 집합을 의미하는데 구성요소들의 집합은 전체를 이루게 된다. 각 시스템은 전체 시스템의 구성요소로써 자신의 특정한 목적을 수행하게 되고 이러한 각 시스템이 유기적으로 통합될 때 전체 시스템을 이루고 목적을 제대로 잘 수행할 수 있게 된다. 이러한 시스템은 그 구성요소가 제대로 갖추어져 있을 때 제대로 작동하는 특징이 있는데 시스템 속해 있는 한 부분을 떼어내면 그 시스템의 기능과 구성요소들의 관계가 영향을 받게 된다. 그리고 각 시스템의 구성요소들은 특정한 방법으로 연결 및 배열되어 있고 보다 큰 시스템의 하위 시스템으로 특정한 목적을 갖게 되며 시스템은 조정과정을 통해 안정과 균형을 유지하게 되며 또한 시스템은 피드백의 특성을 가지게 된다(서혁, 2006).

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(김도훈, 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, 1983, 1994, 1996).

가. Emergy

지구 순환과정은 각 에너지원이 다량의 저급 에너지로부터 소량의 고급 에너지로 전환되는 계층 구조를 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 emergy 라고 정의한다(Fig. 2.7).

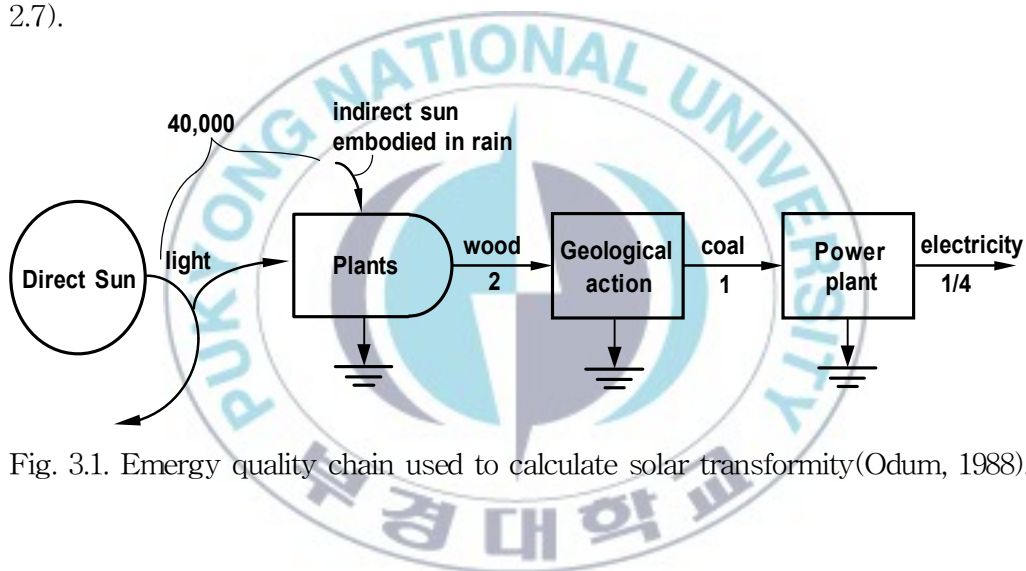


Fig. 3.1. Emergy quality chain used to calculate solar transformity(Odum, 1988).

나. Transformity

에너지의 흐름은 에너지 변환, 퇴적임, 상호작용 그리고 재순환으로 구성된 연결망 구조를 가지고 있다. 이러한 흐름의 연결망 구조는 에너지 변환이 수렴하는 계층구조(hierarchy)를 형성한다. 에너지의 형태가 다르면 에너지의 질이 다르기 때문에, 한가지의 에너지 질은 이 에너지가 에너지 변환과정을 통해 형성되기 위해 사용된 다른 형태의 에너지량, 즉 내재된 에너지(embodied energy)로 환산하여 측정하게 된다. 변환을 조절하는 잠재력(potential)도 내재된 에너지에 의존한다.

Emergy는 각 에너지원에 내재된 태양에너지에 대한 척도이며, 이를 계산하기 위해 지구 시스템 내에서 태양에너지로부터의 전환정도를 나타내는 solar transformity가 사용된다(Fig. 2.8). 이는 에너지질의 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 계층구조를 따라 진행하면서 점차적으로 증가되며, 에너지 계층구조내의 에너지 흐름이나 보유량에 대한 질의 척도로 이용된다.

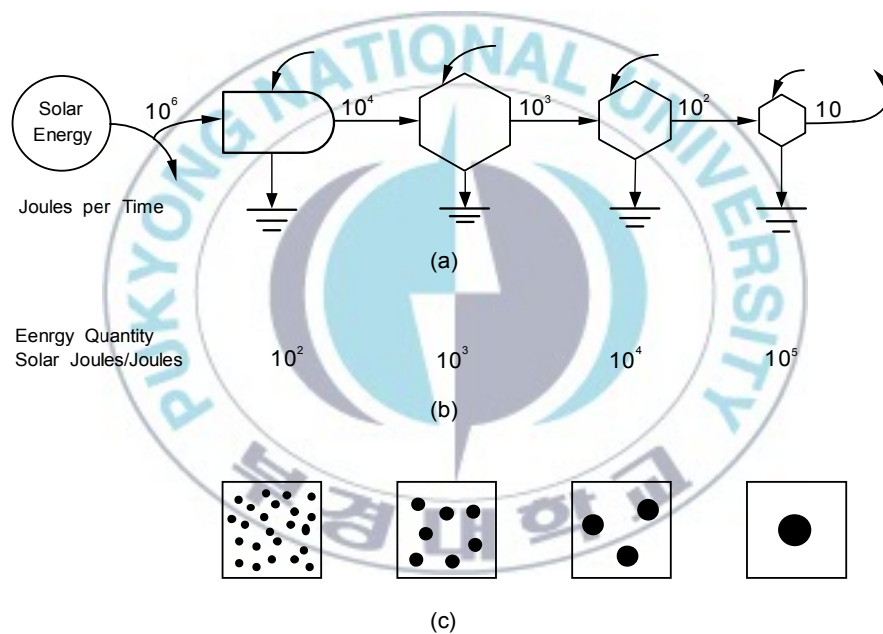
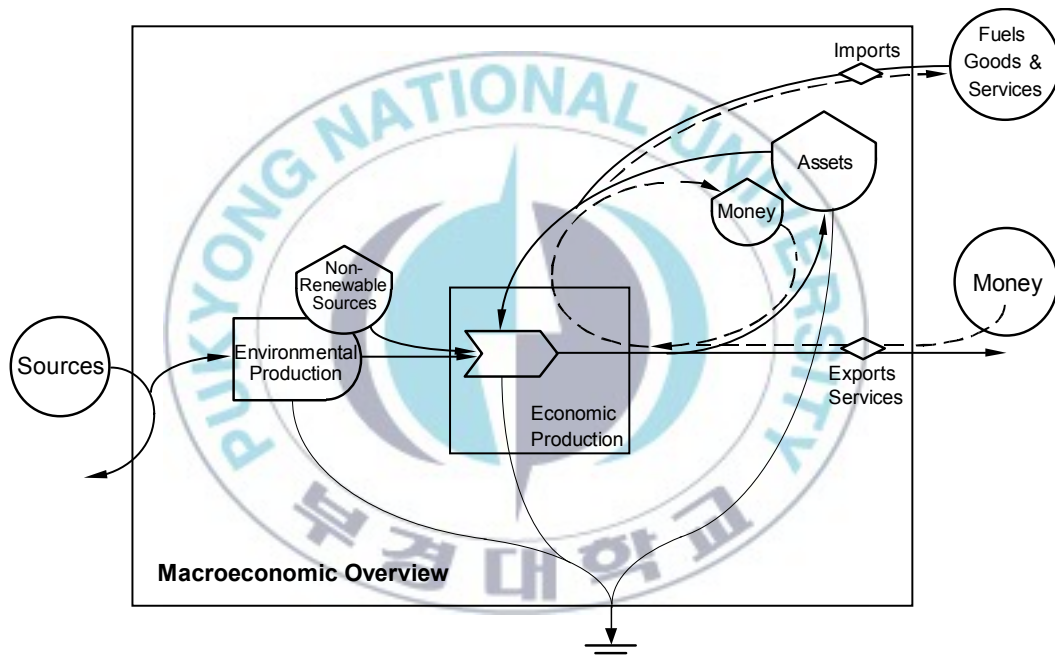


Fig. 3.2. Hierarchical chain of energy transformations: (a) decrease of energy in successive transformations; by-product pathways are omitted; (b) energy-transformation ratios in solar equivalents; (c) spatial hierarchy characteristics(Odum, 1983).

다. EmWon

EmWon은 emergy를 화폐단위로 환산한 것으로 경제적 생산을 위하여 소모된 총 emergy와 생산된 화폐가치와의 비를 이용하여 계산한다(Fig. 2.9).

이 가치는 단순화폐가치가 아니라 과학적 척도로서 실질적인 부를 평가하는 emergy에 기초한 거시경제적 가치이다.



$$\text{Energy/Money ratio} = \frac{\text{Total energy flow}}{\text{Money flow, GDP}}$$

Fig. 3.3. Emergy inputs used to evaluate the emergy/money ratio of the national economy (Odum, 1996).

라. 에너지 시스템 다이어그램 작성

자연환경적 요인과 경제적인 요인이 결합된 시스템이므로 생활용수 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(Fig. 3.4).

에너지 시스템 다이어그램 작성 단계는 크게 5단계로 구분할 수 있다.

첫째, 분석하고자 하는 대상의 시스템 경계를 설정한다. 시스템의 경계는 연구목적을 충분히 고려하여 설정하도록 한다. 본 시스템의 공간적 경계는 매리취수장 및 덕산정수장으로 하고 공정의 경계는 취수에서 정수생산까지로 한다.

둘째, 시스템의 경계를 설정하고 나면 이 경계를 기준으로 시스템에 영향을 미칠 수 있는 외부 요소들을 파악한다. 정수처리시스템의 운영과정에 필요한 연료, 재화와 용역 등 외부 구입요소뿐만 아니라, 태양, 바람, 비, 하천 등의 자연요소도 포함한다.

셋째, 분석 대상 시스템의 내부 구성요소를 파악한다.

넷째, 분석 대상 시스템의 외부 요소와 내부 구성요소간의 상호작용을 파악하고 연결한다.

다섯째, 외부 에너지원을 에너지변환도(transformity)가 낮은 순으로 원편에서 오른쪽으로 시스템의 경계외부에 차례로 배열하고, 시스템 경계 밖의 외부 에너지원으로부터 시작하여 내부 에너지, 물질 그리고 화폐의 흐름에 따라 선을 연결하여 다이어그램을 완성한다.

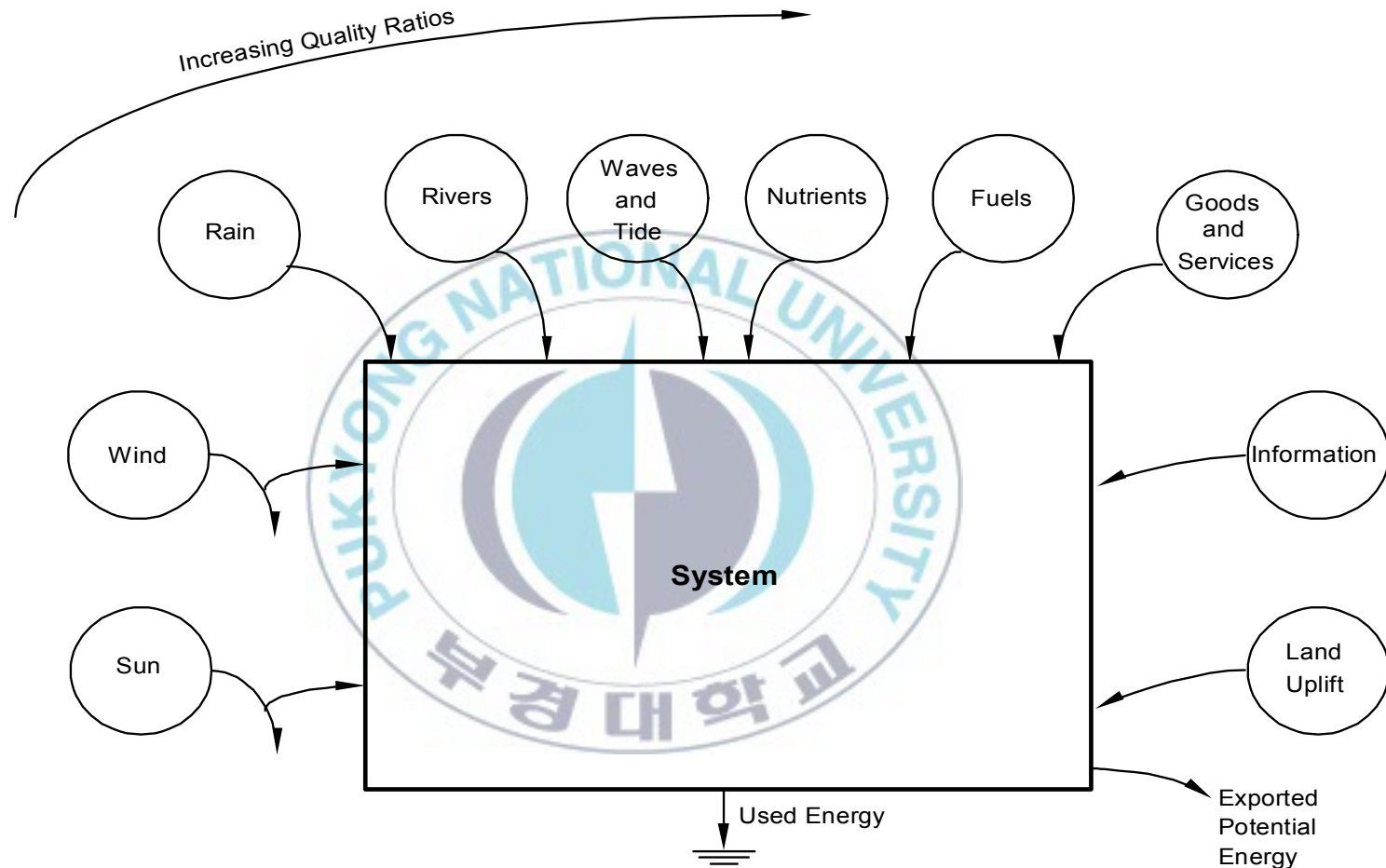


Fig. 3.4. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

마. 에머지 분석표 작성

에너지 시스템 다이어그램을 바탕으로 에머지 분석표는 한 해 동안 생활용수의 생산을 위해 정수처리시스템에 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 태양에너지 변환도를 곱하여 에머지 값을 산정하는 방법으로 작성한다.

분석 대상의 에너지 시스템 다이어그램을 기준으로 Table 3.2와 같은 형식의 emergy 분석표를 작성한다.

Table 3.2. Tabular format for the typical emergy evaluation table

No.	Item	Data Unit (J, g or \$)	Solar Transformity (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emvalue
(one line here for each source, process or storage of interest)					

첫 번째 열에는 각 항목의 자료출처와 에머지(emergy) 계산과정을 나타내기 위한 번호를 기입한다.

두 번째 열에는 평가대상 시스템 외부에서 유입되거나 외부로 빠져나가는 주요 에너지원을 기입하고 세 번째 열에는 주요 에너지원의 실제 에너지, 물질 또는 화폐단위의 값(J/yr, g/yr, ₩/yr 등)을 기입한다.

네 번째 열에는 각 항목의 태양에너지 변환도(solar transformity)를 기입하는데 직접계산하거나 기존의 연구를 통하여 계산 할 수 있다. 화폐인 경우에는 에머지화폐비율(emergy-momey ratio, EMR)을 기입한다.

다섯 번째 열에는 세 번째 열의 실제 자료와 네 번째 열의 태양에너지 변환도(solar transformity)를 곱하여 계산된 값을 산출한다.

여섯 번째 열에는 주요 에너지원의 태양에너지(solar energy)값을 에머지화폐 비율(EMR)로 나누어 구할 수 있다.

평가대상 시스템의 총 에머지량은 평가표에 있는 각 항목의 태양에너지(solar energy)값을 더하여 구할 수 있다. 이 과정에서 주의할 점은 항목의 이중 계산(double counting)을 피해야한다(Odum, 1996).

시스템 외부에서 유입되는 자연활동에서 바람과 강우는 태양에너지가 지구를 가열하여 생기는 현상으로 세 값을 더한 총 에머지량을 이용하면 태양에너지의 값을 이중 계산하게 되는 것이다. 따라서 이런 경우에는 에머지 값이 가장 큰 에너지만 선택하여 계산한다.

바. 에머지 지표 산정

에머지 평가표에서 구한 에머지 값을 기초로 분석대상 시스템을 비교하고, 그 특성을 파악하기 위해 Fig. 3.5와 같이 에머지 지표들을 계산한다.

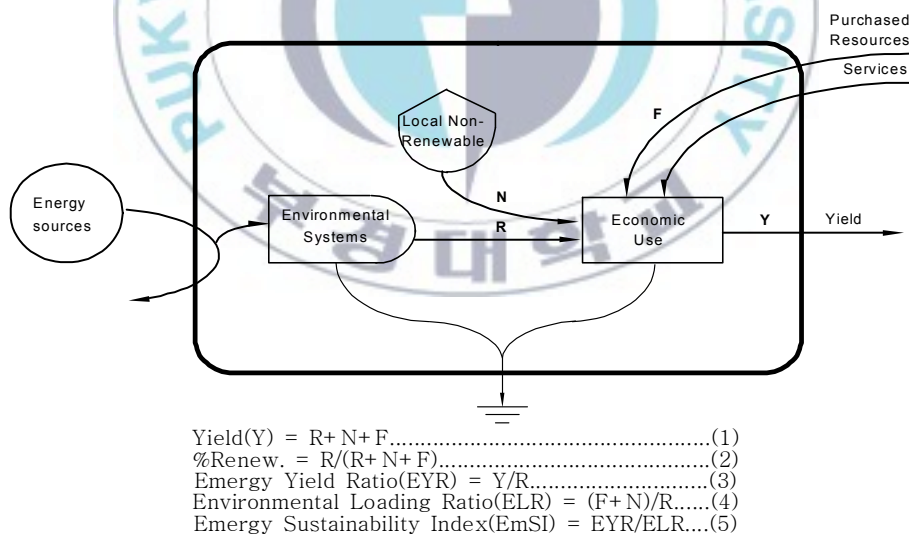


Fig. 3.5. Emery based indices, accounting for local renewable emery inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F)(Brown and Ulgiati, 1997).

시스템에 유입되는 에머지를 강우 등의 지구활동에 의한 환경 에너지원의 $emergy(R)$ 와 시스템 내부의 보유에너지원의 $emergy(N)$, 그리고 경계밖으로부터 유입되는 화석연료, 전기, 그리고 각종 재화와 용역의 구매 $emergy(F)$ 로 구분하여 $emergy$ 지표들을 계산한다.

(1) 영속성 에너지원의 점유율(% Renew.)

대상 시스템에 유입되는 에너지원의 전체 $emergy$ 양은 환경자원(R), 내부 보유자원(N) 그리고 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원(F)의 $emergy$ 합[Yield= $R+N+F$, (Eq. 1)]으로 계산되고, 이중 환경자원이 차지하는 $emergy$ 비율을 계산[% Renew., (Eq. 2)]하여 점유율로 나타낸다.

(2) Emergy 생산비(Emergy Yield Ratio : EYR)

Emergy 생산비[Emergy Yield Ratio, (Eq. 3)]는 시스템으로부터 생산된 생산물이 가지는 전체 $emergy$ 양[Yield= $R+N+F$, (Eq. 1)]에 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매자원의 $emergy$ 양(F)으로 나누어 계산하며, 생산물(product)이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는데 이용한다.

(3) 환경부하율(Environmental Loading Ratio : ELR)

자연환경 활동에서 기인한 환경자원에 대한 내부보유자원과 구매자원의 유입비율을 의미하는 환경부하율[Environmental Loading Ratio, (Eq. 4)]는 내부보유자원과 구매자원의 $emergy$ 이용량($F+N$)에 대해 환경자원의 $emergy$ 이용량(R)으로 나누어 계산하며, 시스템의 생산과정 중, 자연환경에 대한 환경적 부하의 정도를 파악하는 지표이다.

(4) Emergy 지속성 지수(Emergy Sustainability Index : EmSI)

Emergy 지속성 지수(Eq. 5)는 emergy 생산비(Eq. 3)와 환경부하율(Eq. 4)의 비로서 계산된다. 지수의 값이 1보다 작으면 지속성이 적은 시스템이고, 10보다 클 경우에는 지속성이 높은 시스템이며, 1에서 10사이의 경우에는 지속성이 중간정도인 시스템을 반영한다.



IV. 연구 결과

1. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 분석

가. 낙동강 원수의 에너지 변환도

낙동강 원수 정수처리시스템의 재생가능한 자원인 낙동강 원수에 대한 에머지 평가표는 Table 4.1과 같다. 낙동강 원수 정수처리시스템 영향을 미칠 수 있는 낙동강 원수의 유역면적은 8,657.3 km²이며, 이 유역에는 9.41E+20 sej/yr의 강우가 유입되며 이를 기준으로 하면 낙동강 원수의 에너지변환도는 2.86E+04 sej/J로 나타났다.

Table 4.1. Emergy evaluation of Nakdong River water

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per m3 (sej)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Rainfall on river watershed	J	3.08.E+ 16	3.05E+ 04	9.41E+ 20	1.38E+ 11
EMERGY PER UNIT OF NAKDONG RIVER WATER						
2	River water	m ³	6.84.E+ 09	1.38E+ 11	9.41E+ 20	1.38E+ 11
3	River water	g	6.84.E+ 15	1.38E+ 05	9.41E+ 20	1.38E+ 11
4	Chemical pot. Energy of river water	J	3.30.E+ 16	2.86E+ 04	9.41E+ 20	1.38E+ 11

나. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램

낙동강 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 4.1와 같다. 재생가능한 자연환경자원인 낙동강에서 정수처리시스템의 주요 원료인 원수를 취수하여 덕산정수장으로 보낸다. 덕산정수장의 건축물 및 시설은 외부로부터 콘크리트 및 철강과 같은 물질을 투입하여 조성하며, 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.



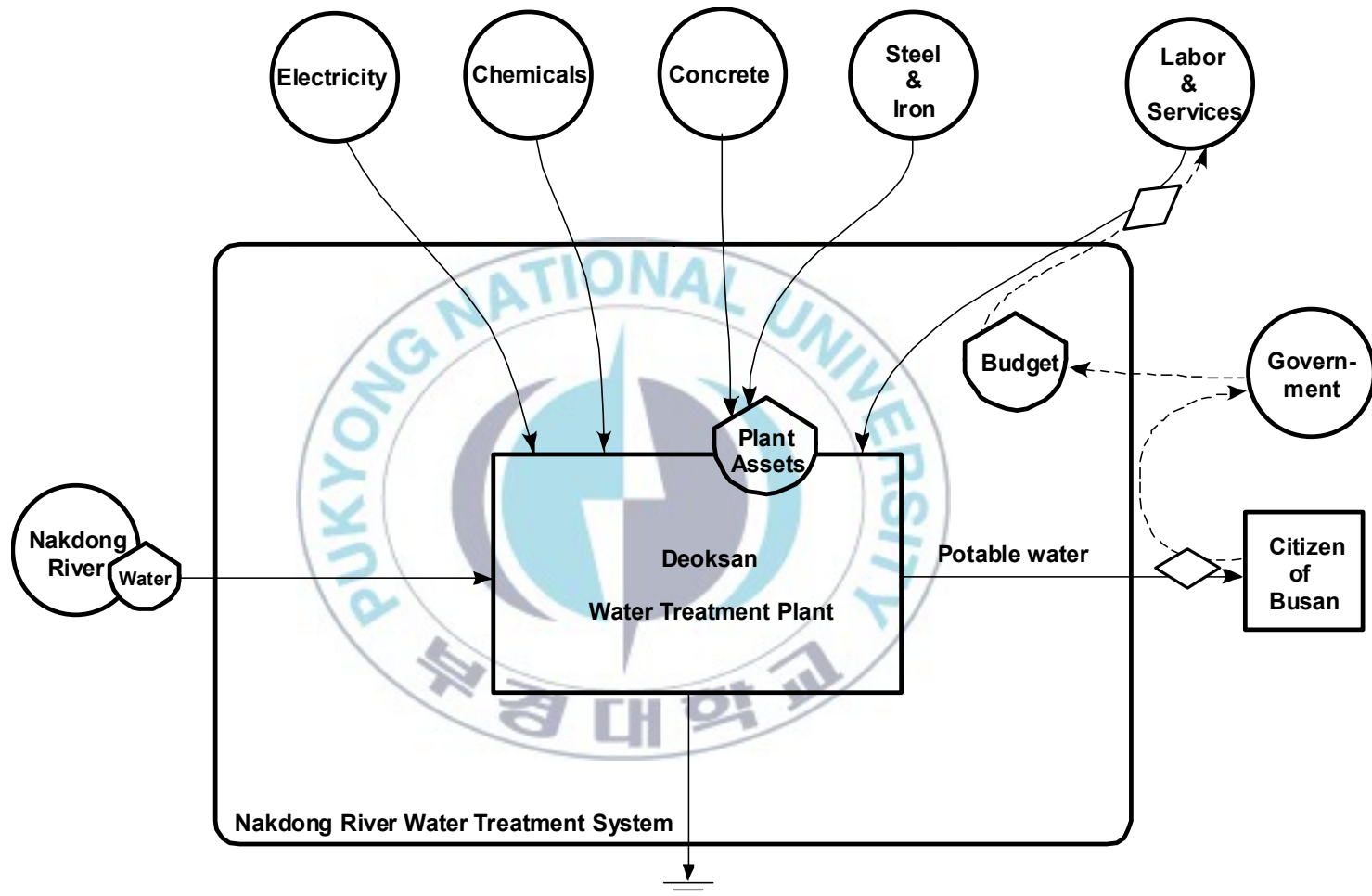


Fig. 4.1. Energy systems diagram of Nakdong River water treatment system.

다. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 평가표

낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 평가표는 Table 4.2에 제시하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템의 유입 항목은 재생가능에머지, 건설단계 투입 에머지, 운영 단계 투입 에머지로 구분하였고 최종 산물인 수돗물의 에머지값을 맨 아래에 제시하였다.

낙동강 원수 정수처리시스템에서 수돗물 생산하기 위해 투입한 총 에머지량은 $2.74\text{E}+20$ sej/yr이고, 수돗물 1 톤당 투입된 에머지량은 $1.06\text{E}+12$ sej/m³이며 이를 이용하여 계산한 수돗물의 에너지변화도는 $2.14\text{E}+05$ sej/J이다.

Table 4.2. 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 m' (sej/m')
RENEWABLE RESOURCES						
1	Raw water	J	$1.30\text{E}+15$	$2.86\text{E}+04$	$3.71\text{E}+19$	$1.43\text{E}+11$
CONSTRUCTION						
2	Plant					
	a. Concrete	kg	$1.22\text{E}+06$	$1.81\text{E}+09$	$2.22\text{E}+15$	$8.56\text{E}+06$
	b. Steel&iron	kg	$4.61\text{E}+05$	$6.79\text{E}+09$	$3.13\text{E}+15$	$1.21\text{E}+07$
3	Construction costs	won	$1.92\text{E}+09$	$2.66\text{E}+09$	$5.09\text{E}+18$	$1.97\text{E}+10$
OPERATION AND MAINTENANCE						
4	Electricity	J	$3.89\text{E}+14$	$3.11\text{E}+05$	$1.21\text{E}+20$	$4.67\text{E}+11$
5	Chemicals	kg	$1.30\text{E}+07$	$1.68\text{E}+12$	$2.18\text{E}+19$	$8.42\text{E}+10$
6	Operation and maintenance costs	won	$3.35\text{E}+10$	$2.66\text{E}+09$	$8.92\text{E}+19$	$3.45\text{E}+11$
EMERGY PER UNIT OF POTABLE WATER						
7	Drinking water produced	m'	$2.59\text{E}+08$	$1.06\text{E}+12$	$2.74\text{E}+20$	$1.06\text{E}+12$
8	Drinking water produced	J	$1.28\text{E}+15$	$2.14\text{E}+05$	$2.74\text{E}+20$	$1.06\text{E}+12$

낙동강 원수 정수처리시스템으로 재생가능자원인 낙동강 원수가 $1.30\text{E}+15$ J/yr 만큼 유입되며 이를 통해 공급되는 에머지량은 $3.71\text{E}+19$ sej/yr으로 이는 낙동강 원수 정수처리시스템으로 유입되는 총 에머지량의 13.5%에 해당한다. 즉 낙동강 원수 정수처리시스템은 자연환경으로부터 13.5%의 에머지를 무상으로 공급받고 있는 것이다. 낙동강 원수 정수처리시스템은 건설과정에 $5.10\text{E}+18$ sej/yr(1.9%), 운영단계에 $2.32\text{E}+20$ sej/yr(84.6%)의 에머지를 투입하고 있으며 이중 전기의 에머지량이 $1.21\text{E}+20$ sej/yr(44.6%)으로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 4.2).

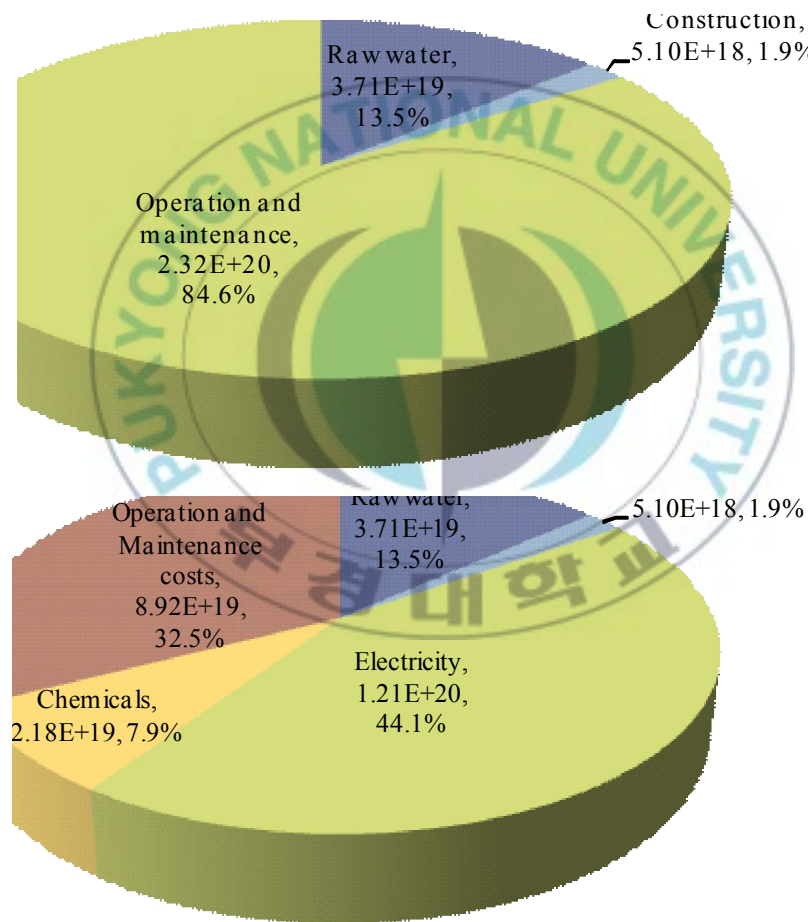


Fig. 4.2. Composition of energy inputs to the Nakdong River water treatment system(sej/yr)

라. 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 지표

Table 4.2의 에머지 평가표를 이용하여 Table 4.3과 같이 낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 지수를 계산하였다. 시스템내 재생불가능한 자원이 없어 에머지 투자 비율(EIR)과 환경부하비율(ELR)이 6.39로 동일하며, 평가대상 시스템의 경쟁력을 알아볼 수 있는 에머지산출비율(EYR)은 1.16이고 에머지 지속성 지수는 0.18이다. 자연환경자원 등을 고려했을 때 낙동강 원수 정수처리시스템을 통해 생산된 수돗물은 기존 경제적 비용만을 고려했을 때 보다 2.7배 높은 비용이 소모된다.

Table 4.3. Emergy indices for the Nakdong River water treatment system.

Name of Index	Short expression	Quantity
Total energy used	Y	2.74E+ 20
Reneable energy flow	R	3.71E+ 19
Nonrenewable energy flow	N	0.00E+ 00
Flow of imported energy	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
2007 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

2. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 분석

가. 남강댐 원수의 에너지변환도

자연환경자원인 남강댐 원수에 대한 에머지 평가표는 Table 4.4과 같다. 남강댐 유역면적은 2,285 km²이며 4.88E+20 sej/yr의 강우가 남강댐으로 유입되고 이를 기준으로 남강댐 원수의 에너지변환도는 3.33E+04 sej/J로 나타났다.

Table 4.4. Emergy evaluation of Namgang Dam water

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per m ³ (sej)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Rainfall on Dam's drainage area	J	1.60E+ 16	3.05E+ 04	4.88E+ 20	1.60E+ 11
EMERGY PER UNIT OF DAM WATER						
2	Dam water	g	3.04E+ 09	3.04E+ 09	9.24E+ 18	3.04E+ 09
3	Dam water	m ³	3.04E+ 15	1.60E+ 05	4.88E+ 20	1.60E+ 11
4	Chemical pot. Energy of Dam water	J	1.47E+ 16	3.33E+ 04	4.88E+ 20	1.60E+ 11

나. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램

남강댐 원수 정수처리시스템의 에너지 시스템 다이어그램은 Fig 4.3와 같다. 재생가능한 자연환경자원인 남강댐에서 정수처리시스템의 주요 원료인 원수를 취수하여 덕산정수장으로 보낸다. 남강댐에서 덕산정수장까지의 도수관을 포함한 정수처리에 필요한 건축물 및 시설은 외부로부터 콘크리트 및 철강과 같은 물질을 투입하여 조성하며, 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.

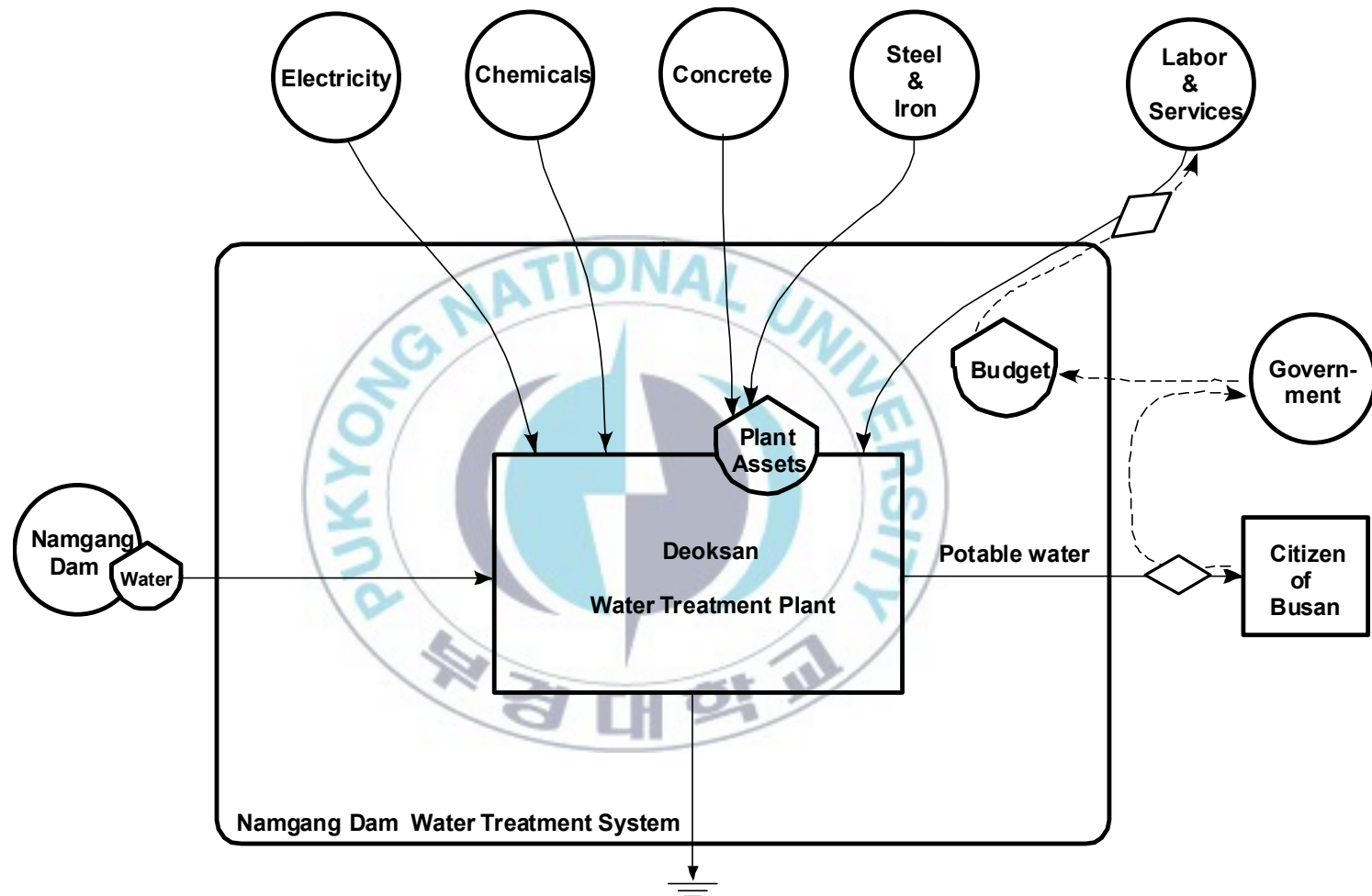


Fig. 4.3. Energy systems diagram of Namgang Dam water treatment system.

다. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지평가표

남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 평가표는 Table 4.5에 제시하였다. 남강댐 원수 정수처리시스템의 유입 항목은 재생가능에머지, 건설단계 투입 에머지, 운영 단계 투입 에머지로 구분하였고 최종 산물인 수돗물의 에머지 값을 맨 아래에 제시하였다.

남강댐 원수 정수처리시스템에서 수돗물 생산하기 위해 투입할 총 에머지량은 $3.05\text{E}+20$ sej/yr이고, 수돗물 1 톤당 투입될 에머지량은 $1.34\text{E}+12$ sej/m³ 이며 이를 이용하여 계산한 수돗물의 에너지변화도는 $2.72\text{E}+05$ sej/J이다.

Table 4.5. Emergy evaluation of Namgang Dam water treatment system

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per m ³ (sej/m ³)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Raw water	J	$1.14\text{E}+15$	$3.33\text{E}+04$	$3.81\text{E}+19$	$1.67\text{E}+11$
CONSTRUCTION						
2	Plant					
	a. Concrete	kg	$1.06\text{E}+06$	$1.81\text{E}+09$	$1.92\text{E}+15$	$8.44\text{E}+06$
	b. Steel&iron	kg	$5.20\text{E}+06$	$6.79\text{E}+09$	$3.53\text{E}+16$	$1.55\text{E}+08$
3	Construction costs	won	$2.37\text{E}+10$	$2.66\text{E}+09$	$6.31\text{E}+19$	$2.77\text{E}+11$
OPERATION AND MAINTENANCE						
4	Electricity	J	$3.42\text{E}+14$	$3.11\text{E}+05$	$1.06\text{E}+20$	$4.67\text{E}+11$
5	Chemicals	kg	$7.79\text{E}+06$	$1.68\text{E}+12$	$1.31\text{E}+19$	$5.74\text{E}+10$
6	Operation and Maintenance costs	won	$3.18\text{E}+10$	$2.66\text{E}+09$	$8.46\text{E}+19$	$3.72\text{E}+11$
EMERGY PER UNIT OF POTABLE WATER						
7	Drinking water produced	m ³	$2.27\text{E}+08$	$1.34\text{E}+12$	$3.05\text{E}+20$	$1.34\text{E}+12$
8	Drinking water produced	J	$1.12\text{E}+15$	$2.72\text{E}+05$	$3.05\text{E}+20$	$1.34\text{E}+12$

남강댐 원수 정수처리시스템으로 재생가능자원인 남강댐 원수가 1.14E+15J/yr 만큼 유입 될 것이며 이를 통해 공급되는 에머지량은 3.81E+19 sej/yr으로 이는 남강댐 원수 정수처리시스템으로 유입될 총 에머지량의 12.5%에 해당한다. 즉 남강댐 원수 정수처리시스템은 자연환경으로부터 12.5%의 에머지를 무상으로 공급받을 수 있다. 남강댐 원수 정수처리시스템은 건설과정에 6.32E+19 sej/yr(20.7%), 운영단계에 2.04E+20 sej/yr(66.8%)의 에머지를 투입할 것으로 예상되며, 이중 전기의 에머지량이 1.06E+20 sej/yr(34.8%)으로 가장 큰 비중을 차지할 것으로 나타났다(Fig. 4.4).

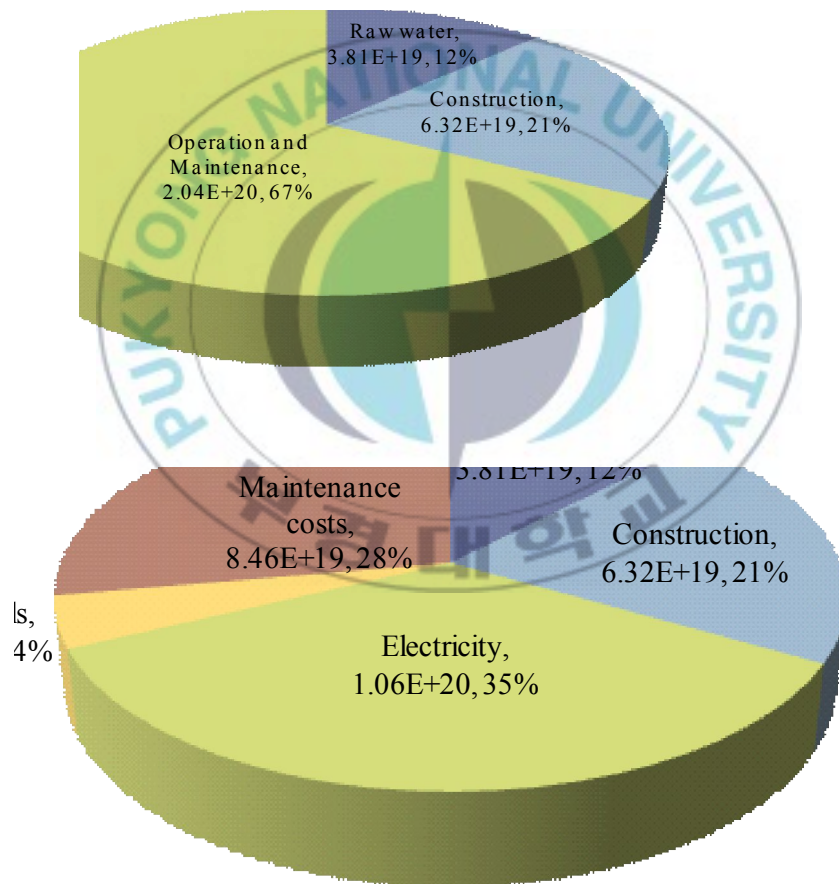


Fig. 4.4. Composition of energy inputs to the Namgang Dam water treatment system(sej/yr)

라. 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 지표

Table 4.5의 에머지 평가표를 이용하여 Table 4.6과 같이 남강댐 원수 정수처리시스템의 에머지 지수를 계산하였다. 시스템내 재생불가능한 자원이 없어 에머지 투자 비율(EIR)과 환경부하비율(ELR)이 7.02로 동일하며, 평가대상 시스템의 경쟁력을 알아볼 수 있는 에머지산출비율(EYR)은 1.14이고 에머지 지속성 지수는 0.16이다. 자연환경자원 등을 고려했을 때 남강댐 원수 정수처리시스템을 통해 생산된 수돗물은 기존 경제적 비용만을 고려했을 때 보다 2.07배 높은 비용이 소모된다.

Table 4.6. Emergy indices for the Namgang Dam water treatment system.

Name of Index	Short expression	Quantity
Total emergy used	Y	3.05E+ 20
Reneable emergy flow	R	3.81E+ 19
Nonrenewable emergy flow	N	0.00E+ 00
Flow of imported emergy	F	2.67E+ 20
Percent Renewable Emergy	$100*(R/Y)$	12.5
Emergy Investment Ratio(EIR)	$F/(N+ R)$	7.02
Emergy Yield Ratio(EYR)	Y/F	1.14
Environmental loading ratio(ELR)	$(N+ F)/R$	7.02
Emergy Sustainability Index(EmSI)	EYR/ELR	0.16
Ratio of Emergy Benefit to the Purchaser(EBP)	$Emwon/won$	2.07
2007 Em-won value of potable water per m ³	$Emwon/m^3$	504.44
Production costs of potable water per m ³ :	won/m^3	244.16

3. 해수담수화시스템의 에머지 분석

가. 해수담수화 시스템의 에너지 시스템 다이어그램

해수담수화 시스템의 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 4.5와 같다. 바다에서 해수를 취수하여 역삼투압 플랜트로 보낸다. 역삼투압 플랜트의 건축물 및 시설은 외부로부터 콘크리트 및 철강과 같은 물질을 투입하여 조성하며, 전기 및 약품과 같은 재화를 투입하고 역삼투압 플랜트를 이용하여 수돗물을 생산한다. 수돗물을 사용한 시민은 수도요금을 정부에 내고 정부는 이를 예산으로 확보하여 원수, 전기, 약품, 콘크리트 및 철강과 같은 재화를 외부로부터 구입한다.



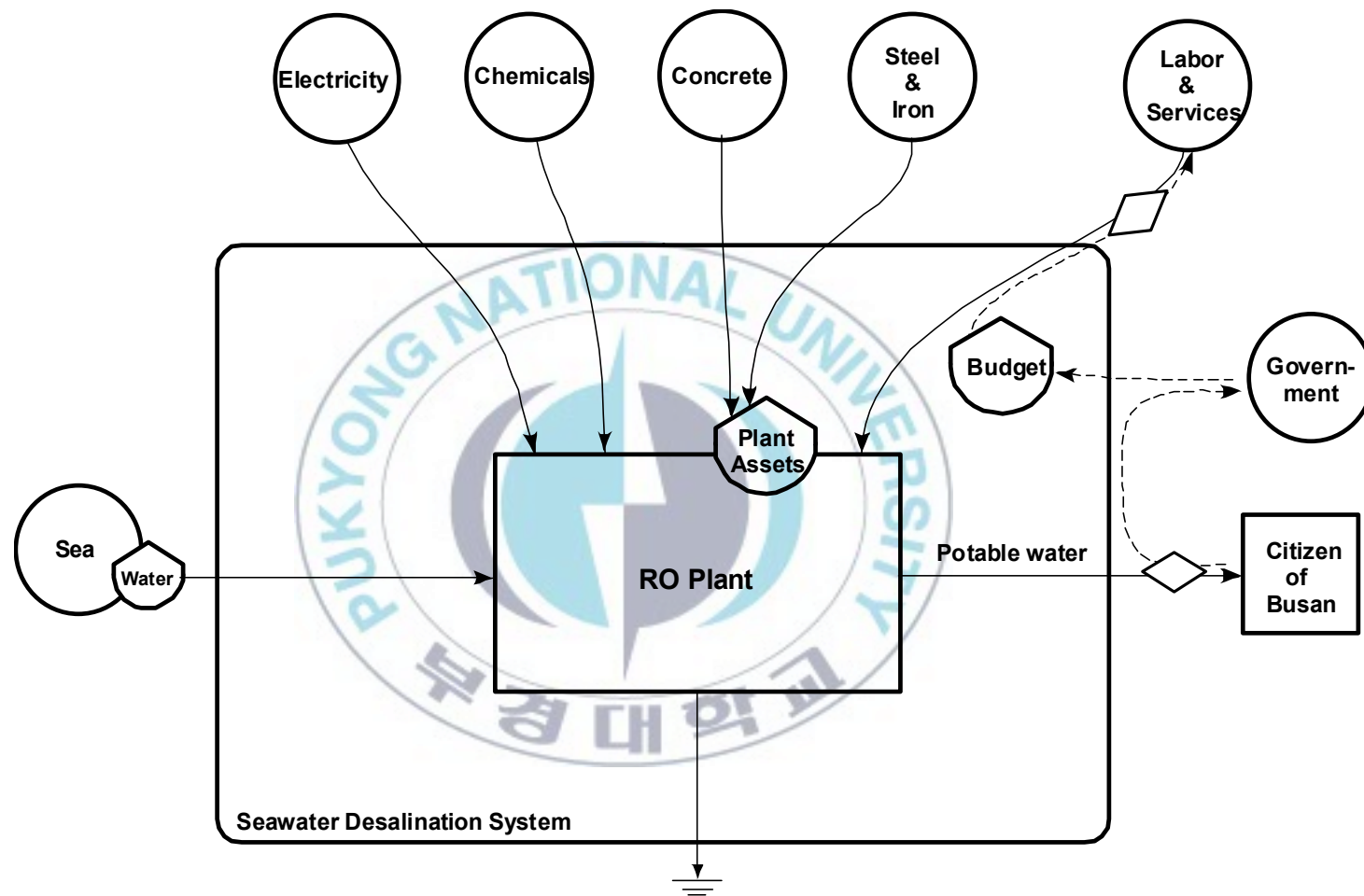


Fig. 4.5. Energy systems diagram of seawater desalination system.

나. 해수담수화시스템의 에머지 평가표

해수담수화 시스템의 에머지 평가표는 Table 4.7에 제시하였다. 해수담수화 시스템의 유입 항목은 재생가능에머지, 건설단계 투입 에머지, 운영단계 투입 에머지로 구분하였고 최종 산물인 수돗물의 에머지값을 맨 아래에 제시하였다.

해수담수화 시스템에서 수돗물 생산하기 위해 투입할 총 에머지량은 $1.23\text{E}+20$ sej/yr이고, 수돗물 1 톤당 투입될 에머지량은 $8.35\text{E}+12$ sej/m³ 이며 이를 이용하여 계산한 수돗물의 에너지변화도는 $1.69\text{E}+06$ sej/J이다.

Table 4.7. Emergy evaluation of seawater desalination system

Note	Item	Unit	Energy Data (unit/yr)	Emergy per unit (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Emergy per m ³ (sej/m ³)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Raw water	J	-	-	-	-
CONSTRUCTION						
2	Plant					
a.	Concrete	kg	4.12E+05	1.81E+09	7.47E+14	5.05E+07
b.	Steel&iron	kg	3.59E+04	6.79E+09	2.44E+14	1.65E+07
3	Construction costs	won	3.66E+09	2.66E+09	9.73E+18	6.58E+11
OPERATION AND MAINTENANCE						
4	Electricity	J	2.82E+14	3.11E+05	8.77E+19	5.93E+12
5	Chemicals	kg	4.54E+05	1.68E+12	7.61E+17	5.15E+10
6	Operation and maintenance costs	won	9.50E+09	2.66E+09	2.53E+19	1.71E+12
EMERGY PER UNIT OF POTABLE WATER						
7	Drinking water produced	m ³	1.48E+07	8.35E+12	1.23E+20	8.35E+12
8	Drinking water produced	J	7.30E+13	1.69E+06	1.23E+20	8.35E+12

해수담수화 시스템으로 유입되는 재생가능한 에너지량은 없으나 수량측면에서 해수는 제한이 없으므로 재생가능한 자원으로서 그 의미를 가진다고 볼 수 있다.

해수담수화 시스템은 건설과정에 $9.73\text{E}+19$ sej/yr(7.9%), 운영단계에 $1.14\text{E}+20$ sej/yr(92.1%)의 에너지를 투입할 것으로 예상되며, 이중 전기의 에너지량이 $8.77\text{E}+19$ sej/yr(71.0%)으로 가장 큰 비중을 차지할 것으로 나타났다(Fig. 4.6).

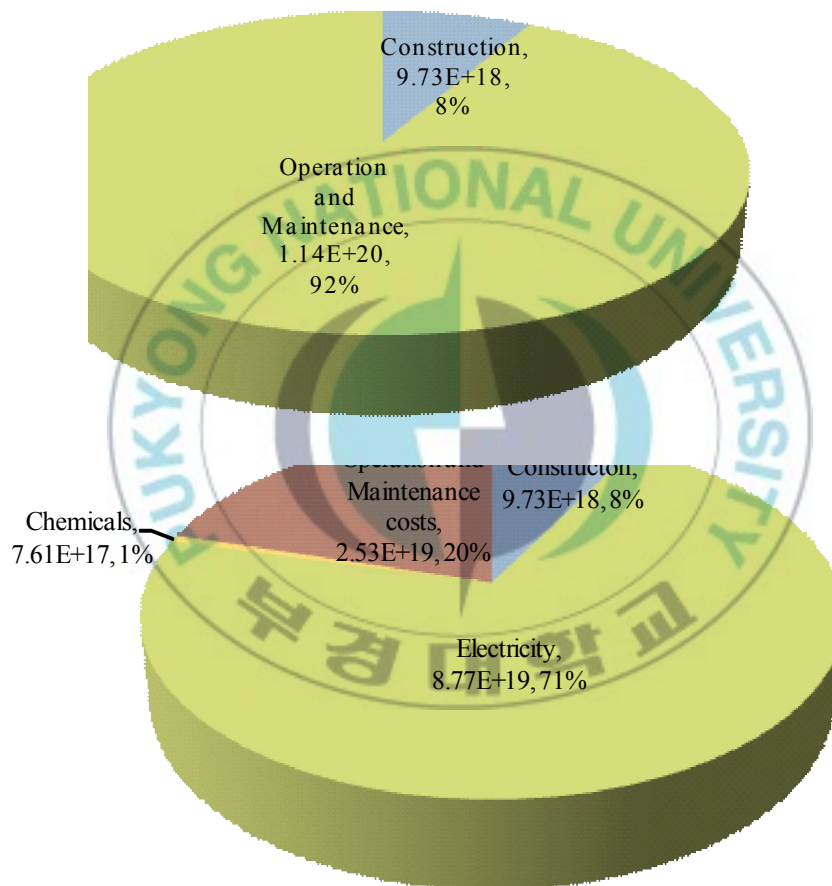


Fig. 4.6. Composition of energy inputs to the seawater desalination system(sej/yr)

다. 해수담수화시스템의 에머지 지표

Table 4.7의 에머지 평가표를 이용하여 Table 4.8과 같이 해수담수화 시스템의 에머지 지수를 계산하였다. 시스템으로 유입되는 재생가능한 에머지량이 없는 관계로 해수담수화 시스템의 에머지산출비율(EYR)은 1로 나타났고 해수담수화 시스템으로 유입되는 재화 및 용역의 에머지를 고려할 경우 해수담수화 시스템을 통해 생산된 수돗물은 기존 경제적 비용만을 고려했을 때 보다 3.53배 높은 비용이 소모된다.

Table 4.8. Emergy indices for the seawater desalination system.

Name of Index	Short expression	Quantity
Total emergy used	Y	1.23E+ 20
Reneable emergy flow	R	-
Nonrenewable emergy flow	N	-
Flow of imported emergy	F	1.23E+ 20
Emergy Yield Ratio(EYR)	Y/F	1.00
Ratio of Emergy Benefit to the Purchaser(EBP)	Emwon/won	3.53
2007 Em-won value of potable water per m ³	Emwon/m ³	3,140.43
Production costs of potable water per m ³ :	won/m ³	890.27

V. 고 찰

1. 원수의 생태·경제적 가치

정수처리시스템의 주요 원료인 원수는 하천 및 호소 등의 자연환경자원으로부터 공급받는 것으로 재생가능한 에머지의 형태로 유입된다. 각 정수처리시스템별 수돗물 1톤을 생산하는데 투입되는 에머지량 중 재생가능한 에머지량은 낙동강 원수 정수처리시스템이 $1.43\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$, 남강댐 원수 정수처리시스템이 $1.67\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ 으로 남강댐 원수 정수처리시스템이 낙동강의 수질보다 양호한 남강댐의 원수를 공급받음으로써 더 많은 재생가능한 에머지량을 확보할 수 있다. 그러나 수돗물 1톤을 생산하는데 투입되는 총 에머지량 중 재생가능한 에머지량이 차지하는 비율은 낙동강 원수 정수처리시스템이 13.5%, 남강댐 원수 정수처리시스템이 12.5%으로 남강댐 원수 정수처리시스템이 더 적은 것으로 나타났다. 이는 남강댐에서 덕산정수장까지 원수를 이송하는데 필요한 도수시설의 건설로 인해 건설단계에 투입하는 에머지의 증가량이 더 커 재생가능한 에머지량이 차지하는 비율은 감소할 것으로 분석되었다(Fig. 5.1).

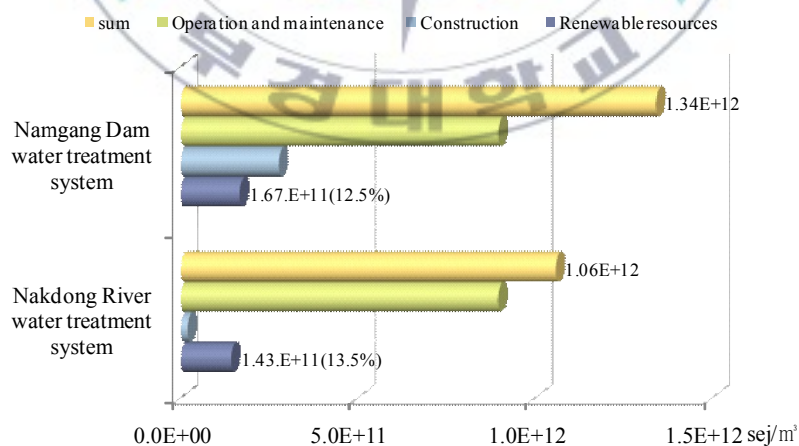


Fig. 5.1. Emergy inputs in tap water each water treatment system.

2. 정수처리시스템별 생태·경제적 비용분석

정수처리시스템별로 수돗물 1톤을 생산하는데 필요한 에머지량을 비교해보면 Fig. 5.2에서와 같이 해수담수화시스템이 $8.35\text{E}+12$ sej/m³, 남강댐 원수 정수처리시스템이 $1.34\text{E}+12$ sej/m³, 낙동강 원수 정수처리시스템이 $1.06\text{E}+12$ sej/m³로 나타나 현 부산광역시 정수처리시스템인 낙동강 원수 정수처리시스템을 기준으로 할 때 해수담수화시스템은 7.9배, 남강댐 원수 정수처리시스템은 1.3배 많은 에머지량을 필요로 한다.

이 결과는 선행연구인 Beunfill(2000)이 수행한 플로리다 지역의 정수처리시스템의 톤당 투입 에머지량이 해수담수화시스템(Stock Is : $67.9\text{E}+11$ sej/m³, Tampa Bay : $22.6\text{E}+11$ sej/m³, Dunedin : $18.8\text{E}+11$ sej/m³), 지하수 정수처리시스템(Gainesville : $14.6\text{E}+11$ sej/m³), 하천수 정수처리시스템(Tampa(Hills. River) : $9.2\text{E}+11$ sej/m³), 호소수 정수처리시스템(W P. Beach : $6.9\text{E}+11$ sej/m³) 순으로 나타난 결과와 비교하였을 때 해수담수화시스템이 가장 많은 에머지량을 필요로 하는 정수처리시스템임을 알 수 있다.

또한 각 정수처리시스템의 에머지변환도를 비교하여 보면 해수담수화시스템 $1.69\text{E}+6$ sej/J, 남강댐 원수 정수처리시스템 $0.27\text{E}+6$ sej/J, 낙동강 원수 정수처리시스템 $0.21\text{E}+6$ sej/J로 이는 각 정수처리시스템의 톤당 필요 에머지량과 같은 양상으로 나타나 수돗물의 에너지변환도가 클수록 그 수돗물을 만드는데 필요한 에머지량이 많음을 알 수 있다.

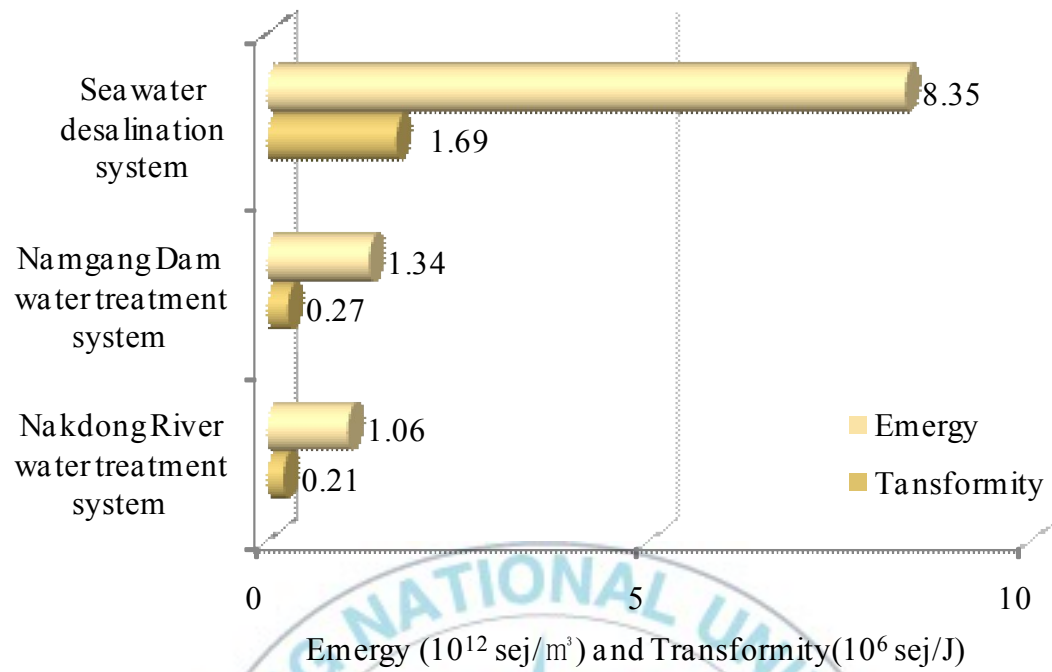


Fig. 5.2. Emergy inputs and Transformity of tap water each water treatment system

3. 수돗물 음용형태별 생태·경제적 비용/편익 분석

가. 수돗물을 바로 마시는 경우

낙동강 원수 정수처리시스템의 에머지 편익 및 비용을 Table 5.1에 제시하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템의 직접적인 에머지 편익은 시설에서 생산한 수돗물의 에머지량 $1.06\text{E}+12 \text{ sej/m}^3$ 이며, 에머지 비용은 정수처리시스템 건설단계와 운영단계에 투입되는 에머지량 $9.16\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ 으로 에머지 편익과 비용의 차는 $1.43\text{E}+11 \text{ sej/m}^3$ 이다. 2007년 기준 낙동강 원수 정수처리시스템의 편익과 비용의 차는 54 emwon/ m^3 에 해당한다.

Table 5.1. Emergy cost-benefit evaluation for the Nakdong River water treatment system.

Note	Item	Emergy (sej/ m^3)	Emvalue (emwon/ m^3)
Emergy Benefit			
1	Drinking water produced	$1.06\text{E}+12$	398
Emergy Costs			
2	Construction		
	a. Plant		
	①Concrete	$8.56\text{E}+06$	0.003
	②Steel&iron	$1.21\text{E}+07$	0.005
	b. Construction costs	$1.97\text{E}+10$	7
3	Operation and maintenance		
	a. Electricity	$4.67\text{E}+11$	176
	b. Chemicals	$8.42\text{E}+10$	32
	c. Operation and maintenance costs	$3.45\text{E}+11$	130
	Total	$9.16\text{E}+11$	344
Emergy Benefit - Emergy Costs		$1.43\text{E}+11$	54

나. 수돗물을 끓여서 먹을 경우

수돗물을 끓여서 먹을 경우의 에머지 편익 및 비용은 Table 5.2에 제시하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템과 비교하기 위하여 에머지 편익을 $1.06\text{E}+12 \text{ sej/m}^3$ 로 낙동강 원수 정수처리시스템과 동일하게 가정하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템과 같은 에머지량을 가진 먹는물을 생산하기 위해서는 총 $2.30\text{E}+13 \text{ sej/m}^3$ 의 에머지를 투입해야 한다. 2007년 기준 수돗물을 끓여서 먹을 경우 편익과 비용의 차는 $-8,260 \text{ emwon/m}^3$ 으로 수돗물을 그대로 마실 때보다 $8,314 \text{ emwon/m}^3$ 의 비용이 추가로 필요하다.

Table 5.2. Emergy cost-benefit evaluation for the boiling water

Note	Item	Emergy (sej/m ³)	Emvalue (emwon/m ³)
Emergy Benefit			
1	Drinking water produced	$1.06\text{E}+12$	$3.98\text{E}+02$
Emergy Costs			
2	Nakdong River water treatment system		
	a. Concrete	$8.56\text{E}+06$	$3.22\text{E}-03$
	b. Steel&iron	$1.21\text{E}+07$	$4.55\text{E}-03$
	c. Construction costs	$1.97\text{E}+10$	$7.40\text{E}+00$
	d. Electricity	$4.67\text{E}+11$	$1.76\text{E}+02$
	e. Chemicals	$8.42\text{E}+10$	$3.16\text{E}+01$
	f. Operation and maintenance costs	$3.45\text{E}+11$	$1.30\text{E}+02$
3	Boiling water		
	a. Work required to boil water	$2.97\text{E}+10$	$1.12\text{E}+01$
	b. Proportion of stove use for boiling	$4.16\text{E}+11$	$1.56\text{E}+02$
	c. Proportion of pot use for boiling	$1.01\text{E}+12$	$3.80\text{E}+02$
	d. Total materials required	$1.62\text{E}+09$	$6.10\text{E}-01$
	e. Electricity required to boil water	$1.39\text{E}+13$	$5.22\text{E}+03$
	f. Cost of electric power used for boiling	$6.78\text{E}+12$	$2.55\text{E}+03$
	Total(emergy costs)	$2.30\text{E}+13$	$8.66\text{E}+03$
EmergyBenefit - EmergyCosts =		$-2.20\text{E}+13$	$-8,260$

다. 수돗물을 정수기로 걸러서 먹을 경우

수돗물을 끓여서 먹을 경우의 에머지 편익 및 비용은 Table 5.3에 제시하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템과 비교하기 위하여 에머지 편익을 $1.06\text{E}+12 \text{ sej/m}^3$ 로 낙동강 원수 정수처리시스템과 동일하게 가정하였다. 낙동강 원수 정수처리시스템과 같은 에머지량을 가진 먹는물을 생산하기 위해서는 총 $2.78\text{E}+14 \text{ sej/m}^3$ 의 에머지를 투입해야 한다. 2007년 기준 정수기로 걸러서 먹을 경우 편익과 비용의 차는 $-104,246 \text{ emwon/m}^3$ 으로 낙동강 원수 정수처리시스템보다 $104,300 \text{ emwon/m}^3$ 의 비용이 추가로 필요하다.

Table 5.3. Emergy cost-benefit evaluation for the home filter

Note	Item	Emergy (sej/m ³)	Emvalue (emwon/m ³)
Emergy Benefit			
1	Drinking water produced	$1.06\text{E}+12$	398
Emergy Costs			
2	Nakdong River water treatment system		
	a. Concrete	$8.56\text{E}+06$	0.003
	b. Steel&iron	$1.21\text{E}+07$	0.005
	c. Construction costs	$1.97\text{E}+10$	7
	d. Electricity	$4.67\text{E}+11$	176
	e. Chemicals	$8.42\text{E}+10$	32
	f. Operation and maintenance costs	$3.45\text{E}+11$	130
3	Home filter		
	a. Filter replacement & maintenance cost	$2.29\text{E}+13$	8,611
	b. Purchase & installation cost	$1.06\text{E}+14$	39,824
	c. Materials(filter casing & storage tank)	$9.29\text{E}+11$	349
	d. Materials(filter replacements)	$1.48\text{E}+14$	55,516
	e. Total	$2.78\text{E}+14$	104,644
Emergy Benefit - Emergy Costs =		$-2.77\text{E}+14$	-104,246

라. 부산시민의 수돗물 음용형태의 고비용성

부산시민의 수돗물 음용형태를 살펴보면 바로 먹는 경우보다는 끓여서 먹거나 정수기로 걸러서 먹는 경우가 대부분이다. 수돗물을 끓여서 먹거나 정수기를 사용하는 경우에 대한 비용 분석결과 수돗물을 바로 먹는 경우보다 끓여서 먹는 경우에는 8,314 emwon/m³, 정수기를 사용하는 경우에는 104,300 emwon/m³의 추가비용을 지불해야하는 것으로 나타났다(Fig. 5.3). 이는 부산시민의 먹는물 음용형태가 고비용성임을 나타내는 것으로 신뢰할 수 있는 대체상수원 개발 등을 통해 개인이 지출하는 비용을 줄여 줄 수 있는 방안의 검토가 요구된다.

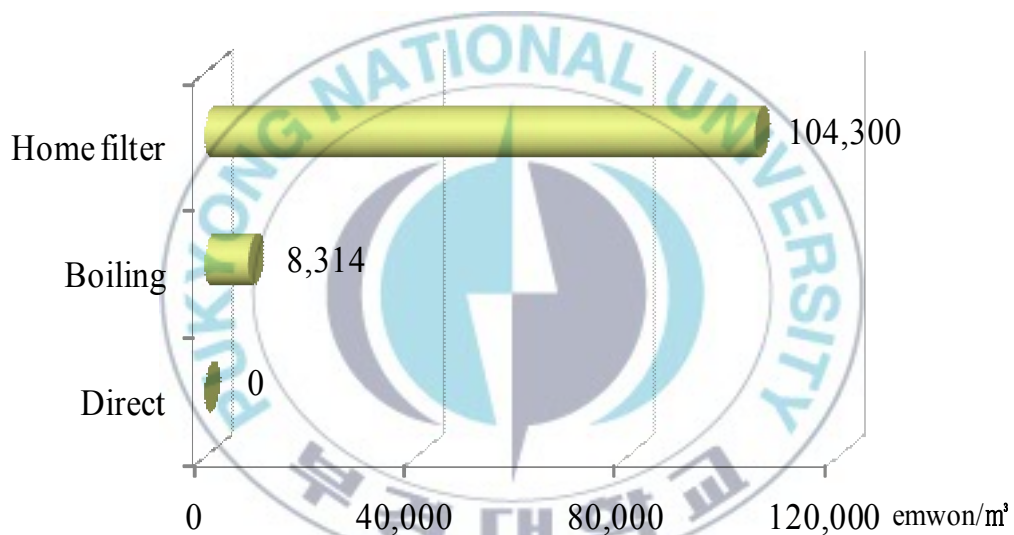


Fig. 5.3. Additional costs each of intake forms of tap water.

VI. 결론

급속한 경제발전 및 이상기후 현상으로 인해 물 부족현상 및 지역적 물 불균형 현상이 일어나고 있다. 이런 사회·환경적 변화로 인해 물에 대한 인식 전환이 이루어지고 있으며 질 좋은 물에 대한 욕구 또한 커지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 자연환경과 인간의 경제활동을 같은 기준에서 비교해 볼 수 있는 에머지평가법을 이용하여 정수처리시스템의 생태·경제성을 평가하였다.

1. 각 정수처리시스템의 자연환경자원인 원수의 에너지변환도는 낙동강 원수 28,554 sej/J, 남강댐 원수 33,267 sej/J로 호소수인 남강댐 원수가 하천수인 낙동강 원수보다 높게 나타났다. 이는 수질오염의 가능성이 적은 남강댐의 호소수가 낙동강의 하천수보다 양호한 수질을 유지하는 것을 반영하는 것으로 판단된다.

2. 정수처리시스템을 통해 생산된 수돗물의 에너지변환도가 클수록 그 수돗물을 생산하는데 필요한 에머지량이 많다는 것을 의미하며 부산광역시 취수원다변화 계획 중에서는 해수담수화시스템을 통해 생산된 수돗물의 에너지변환도가 $1.69\text{E}+06$ sej/J로 가장 크고 필요한 에머지량은 $8.35\text{E}+12$ sej/m³으로 이는 현 부산광역시 정수처리시스템인 낙동강 원수 정수처리시스템에 비해 7.9배 많을 것으로 분석되었다.

3. 부산시민의 수돗물 음용형태는 주로 끓여서 먹거나 정수기로 걸러서 먹는 형태로 이는 수돗물을 바로 마시는 경우에 비해 8,314 emwon/m³ 내지 104,300 emwon/m³의 추가비용이 발생한다.

4. 따라서 이런 고비용성의 수돗물 음용형태를 바꿀 수 있는 낙동강 수질개선 방안은 물론 취수원 다변화 계획을 비롯한 대안의 검토가 필요하다.

참고문헌

- 김가람. 2010. 에머지 개념을 이용한 풍력발전 시설의 편익·비용 평가. 80pp.
- 김광임. 1996. 상수도 수요 모형 개발. 한국환경기술개발원. 122pp.
- 김광임. 1999. 수질오염의 사회적 비용 계량화 연구 I. 한국환경정책평가연구원. 155pp.
- 김도훈, 문태훈, 김동한. 1999. 시스템다이내믹스. 대영문화사. 261pp.
- 김재홍. 2000. 시민지불의사에 기초한 상수도 수질개선의 편익추정. 한국정책학회보, 제10권 제3호, 245~361pp.
- 김진이. 2007. 낙동강 유역의 오염총량관리계획에 대한 환경회계. 125pp.
- 김충환. 1996. 해수의 담수화 시스템 및 적용방안 연구(1차년도). 한국수자원공사. 305pp.
- 김태유, 이길성 등. 1998. 물관리 최적화를 위한 수도요금 정책방향에 관한 연구. 한국수자원공사. 453pp.
- 김호석, 김종호, 이정호. 2009. 지속가능발전 관점에서의 녹색성장 의미와 평가방안에 관한 연구. 한국환경정책·평가연구원. 154pp.
- 낙동강 백서. 2009. 부산발전연구원. 564pp.
- 남강댐 재개발사업 및 부산·경남권 광역상수도사업(2009년도 예비타당성조사 보고서). 2009. 한국개발연구원
- 문현주. 1995. 상·하수처리의 효율적 운영방안 연구(I). 한국환경기술개발원. 326pp.
- 박두호 등. 2007. 수자원 및 기술가치 평가시스템 구축. 과학기술부. 741pp.
- 서혁. 2006. 시스템 사고에 의한 한국 방위산업의 동태성 연구. 박사학위논문. 충남대학교. 150pp.
- 신성교. 2004. 부산광역시 수돗물 음용율 제고 방안. 부산발전연구원. 82pp.
- 신성교. 2007. 부산상수도의 대체원수 확보 방안. 부산발전연구원. 130pp.

심명필. 2008. 수자원사업의 타당성분석 개선방안 연구. 국토해양부, 한국수자원공사. 535pp.

오현택. 2008. 시스템 생태학적 접근법에 의한 가막만 패류생산의 지속성 평가. 122pp.

유승훈. 2006. 원주시 가구의 상수도 수질개선에 대한 지불의사액 추정. 환경정책연구, 제5권 제3호 통권10호, 79~103pp.

임진아. 2010. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가. 88pp.

Andres A. Buenfil, 2001, Emergy Evaluation of Water. 264pp.

Howard T. Odum, Mark T. Brown, Sherry Brandt-Williams(2000) : Handbook Emergy Evaluation

Odum H. T.(1996) : Environmental Accounting, John Wiley & Sons, New York. 370pp.

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

< 법령 및 통계자료 >

기상청, 2000, 기상연보.

통계청, 2008, 국제통계연감.

상수도통계, 2008, 부산광역시 상수도사업본부

상수도통계, 2008, 환경부

수도법

< 인터넷 사이트 >

웅진코웨이 홈페이지

린나이 홈페이지

www.dssteel.co.kr

국토해양부 홈페이지

Appendix

Appendix A-1. Footnotes to Table 4.1.

1	drainage area of Nakdong river:	km ²	8.66.E+ 03	(한국수문조사연보,2008,국토해양부)
	drainage area of Nakdong river:	m ²	8.66.E+ 09	(km ²)*[(10 ⁶ m ²)/km ²]
	Annual rainfall on drainage area:	mm/yr	7.21.E+ 02	(한국수문조사연보,2008,국토해양부)
	Annual rainfall on drainage area:	m/yr	7.21.E-01	(mm/yr)/(m/10 ³ mm)]
	Rainfall on drainage area:	m ³ /yr	6.24.E+ 09	(m ³)(m/yr)
	Chem. Potential energy of rainfall:	J/yr	3.08.E+ 16	(m ³ /yr)(10 ⁶ g/m ³)(4.94 J/g)
	Transformity:	sej/J	3.05.E+ 04	chemical energy, rain on land
2	Annual flow of Nakdong river(Jindong):	m ³ /yr	6.84.E+ 09	(한국수문조사연보,2008,국토해양부)
	Energy/volume of river water:	sej/m ³	1.38.E+ 11	(sej/yr from line 1) / (m ³ /yr)
3	Annual flow of Nakdong river(Jindong):	m ³ /yr	6.84.E+ 09	(한국수문조사연보,2008,국토해양부)
	Annual mass of Nakdong river(Jindong):	g/yr	6.84.E+ 15	(m ³ /yr)(10 ⁶ g/m ³)
	Energy per mass of river water:	sej/g	1.38.E+ 05	(sej/yr from line 1) / (g/yr)
4	Avg. BOD5 of Nakdong river(Namgi)	mg/L	1.40.E+ 00	(2008,부산광역시상수도사업본부수질연구소)
	Conductivity of Nakdong river(Namgi)	ppm	1.54.E+ 02	
	Total Dissolved Solid of Nakdong river(Namgi)	ppm	9.84.E+ 01	
	Avg. Gibbs free energy of Nakdong river(Namgi):	J/g	4.82.E+ 00	[(8 . 3 3 J / m o l / K) (온 도 + 273.15K)/(18g/mol)]*ln[(10 ⁶ -TDSinppm)/(965,000)]
	Chem. Potential energy of Nakdong river water	J/yr	3.30.E+ 16	(J/g)(g/yr)
	Transformity(chem. pot.) of river water	sej/J	2.86.E+ 04	(sej/yr from line 1) / (J/yr)

Appendix A-2. Footnotes to Table 4.2.

1	raw water,J				
	Avg. BOD5 of Nakdong river(Maeri):	mg/L	3		(2008상수도통계연보,부산광역시상수도사업본부)
	Conductivity of Nakdong river:	ppm	220		
	Total Dissolved Solid of Nakdong river:	ppm	141		
	Gibbs Free Energy(G):	J/g	4.81		$[(8.33 \text{ J/mol/C})(\text{온도} + 273.15\text{K})/(18\text{g/mole})] \cdot \ln[(10^6 - \text{TD})/965000]$
	water pumped per year:	m ³ /yr	2.70.E+ 08		(2008상수도통계,2009,환경부)
	Annual energy:	J/yr	1.30.E+ 15		(J/g)(10 ⁶ g/m ³)(m ³ /yr)
	Transformity:	sej/J	28,554		(Table 11)
2	Plant				
a.	concrete, kg				
	Total mass of concrete:	kg	6.12E+ 07		
	Average useful life of plant:	yr	50		assumed
	Total concrete:	kg/yr	1.22E+ 06		(kg)/(useful plant life)
	Emergy per mass of concrete:	sej/kg	1.81E+ 09		simoncini(2006)
b.	steel & iron, kg				
	Total mass of steel & iron:	kg	2.30E+ 07		
	Average useful life of plant:	yr	20		assumed
	Total steel & iron:	kg/yr	1.15E+ 06		(kg)/(useful plant life)
	Emergy per mass of steel:	sej/kg	6.79E+ 09		(Broown and Buranakarn,2003)
3	construction costs:				
	intake facility:	won	2.96.E+ 10		(부산광역시상수도사업본부)
	water treatment facility:	won	6.62.E+ 10		(부산광역시상수도사업본부)
	Total construction costs:	won	9.58.E+ 10		
	Average useful life of plant:	yr	5.00.E+ 01		
	construction costs per year:	won/yr	1.92.E+ 09		
	Emergy per money ratio in 2007:	sej/won	2.66.E+ 09		임(2010)

4	Electricity, J				
	Total electricity in to plant:	kWh/yr	1.08E+ 08	(2008상수도통계연보,부산광역시 상수도사업본부)	
	Total annual energy used:	J/yr	3.89E+ 14	(kWh/yr)(3.6*10 ⁶ J/kWh)	
	Transformity:	sej/J	3.11E+ 05	(Brown and Ulgiati, 2004)	
5	Chemicals, kg				
	Total weight of all chemicals used:	kg/yr	1.30E+ 07	(부산광역시상수도사업본부)	
	Emergy per weight:	sej/kg	1.68E+ 12	assumed the same as limestone or coal (Odum, 1996; p.310)	
6	Operation and Maintenance costs:				
	maintenance cost:	won/yr	2.53.E+ 10	(부산광역시상수도사업본부)	
	The costs of purchasing electricity:	won/yr	5.65.E+ 09	(부산광역시상수도사업본부)	
	The costs of purchasing chemicals:	won/yr	2.56.E+ 09	(부산광역시상수도사업본부)	
	Total won spent for Service	won/yr	3.35.E+ 10		
	Emergy per money ratio in 2007:	sej/won	2.66.E+ 09	임(2010)	
7	DrinkingWaterProduced,m ³				
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	2.74E+ 20	(sum of items 1 to 7)	
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	2.59E+ 08	(2008상수도통계연보,부산광역시 상수도사업본부)	
	Emergy per volume of drinking water:	sej/m ³	1.06E+ 12	(sej/yr)/(m ³ /yr)	
8	Drinking water produced, J				
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	2.59E+ 08	(2008 상수도통계연보, 부산광역시 상수도사업본부)	
	Total energy of water:	J/yr	1.28E+ 15	(m ³ /yr)(4.94J/g)(1E6g/m ³)	
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	2.74E+ 20	(sum of items 1 to 7)	
	Transformity of drinking water:	sej/J	2.14E+ 05	(sej/yr) / (J/yr)	

Appendix A-3. Footnotes to Table 4.4.

1	Dam's drainage area:	km ²	2285	(한국수자원공사)
		m ²	2.29E+ 09	(km ²)(10 ³ m/km) ²
	Annual rainfall on drainage area:	mm/yr	1416	(한국수자원공사)
		m/yr	1.416	(mm/yr)(m/10 ³ mm)
	Rainfall on drainage area:	m ³ /yr	3.24E+ 09	(m ³)(m/yr)
	Chem. Potential energy of rainfall:	J/yr	1.60E+ 16	(m ³ /yr)(10 ⁶ g/m ³)(4.94 J/g)
	Transformity:	sej/J	3.05E+ 04	chemical energy, rain on land(Table 9)
2	방류량	m ³ /s	9.64E+ 01	
	Annual flow of Dam water:	m ³ /yr	3.04E+ 09	
	Emergy per volume of Dam water:	sej/m ³	1.60E+ 11	(sej/yr from line 1) / (m ³ /yr)
3	Annual flow of Dam water:	m ³ /yr	3.04E+ 09	
	Annual mass of Dam water:	g/yr	3.0E+ 15	(m ³ /yr)(1 E6 g/m ³)
	Emergy per mass of Dam water:	sej/g	1.6E+ 05	(sej/yr from line 1) / (g/yr)
4	Avg. BOD5 of Namgang Dam:	mg/L	1.00	(부산광역시상수도사업본부)
	Conductivity of Namgang Dam:	ppm	131.78	
	Total Dissolved Solid of Namgang Dam:	ppm	84.34	
	Avg. Gibbs free energy of Dam water:	J/g	4.82	[(8.33 J/mol/K)(20+ 293.15 K)/(18 g/mol)]*ln[(1 E6 - TDS in ppm)/(965,000)]
	Chem. Potential energy of Dam water	J/yr	1.47E+ 16	(g/yr)(J/g)
	Transformity(chem. pot.) of Dam water	sej/J	33267	(sej/yr from line 1) / (J/yr)

Appendix A-4. Footnotes to Table 4.5.

1	raw water, J			
	Avg. BOD5 of Namgang Dam:	mg/L	1.0	(부산광역시상수도사업본부)
	Conductivity of Namgang Dam:	ppm	132	
	Total Dissolved Solid of Namgang Dam:	ppm	84	
	Avg. Gibbs free energy of Dam water:	J/g	4.82	$[(8.33 \text{ J/mol/C})(\text{온도} + 273.15\text{K})/(18\text{g/mole})] \ln[(10^6 - \text{TDS})/965000]$
	water pumped per year:	m ³ /yr	2.37.E+08	(assumed)
	Annual energy:	J/yr	1.14.E+15	(J/g)(10 ⁶ g/m ³)(m ³ /yr)
	Transformity:	sej/J	3.33.E+04	(Dam water)
2	Plant			
	a. concrete			
	Total mass of concrete:	kg	6.12E+07	
	Average useful life of plant:	yr	50	assumed
	concrete per year:	kg/yr	1.22E+06	(kg)/(useful plant life)
	Energy per mass of concrete:	sej/kg	1.81E+09	simomcini(2006)
	b. steel & iron			
	Total mass of steel & iron:	kg	2.60E+08	
	Average useful life of plant:	yr	20	assumed
	steel & iron per year:	kg/yr	1.30E+07	(kg)/(useful plant life)
	Energy per mass of steel:	sej/kg	6.79E+09	(Brown and Buranakarn,2003)
3	construction costs			
	intake facility:	won	1.12.E+12	(assumed)
	water treatment facility:	won	6.62.E+10	(부산광역시상수도사업본부)
	Total construction costs:	won	1.19.E+12	
	Average useful life of plant:	yr	5.00.E+01	
	construction costs per year:	won/yr	2.37.E+10	
	Energy per money ratio in 2007:	sej/won	2.66.E+09	임(2010)
4	Electricity, J			
	Total electricity in to plant:	kWh/yr	9.50E+07	(assumed)
	Total annual energy used:	J/yr	3.42E+14	(kWh/yr)(3.6*10 ⁶ J/kWh)
	Transformity:	sej/J	3.11E+05	(Brown and Ulgiati, 2004)

5	Chemicals, kg				
	Total weight of all chemicals used:	kg/yr	7.79E+ 06	(assumed)	
	Emergy per weight:	sej/kg	1.68E+ 12	assumed the same as limestone or coal (Odum, 1996; p.310)	
6	Operation and Maintenance costs:				
	maintenance cost:	won/y	2.53.E+ 10	(assumed)	
	The costs of purchasing electricity:	won/y	4.97.E+ 09	(assumed)	
	The costs of purchasing chemicals:	won/y	1.54.E+ 09	(assumed)	
	Total won spent for Service	won/y	3.18.E+ 10		
	Emergy per money ratio in 2007:	sej/wo n	2.66.E+ 09	임(2010)	
7	DrinkingWaterProduced,m ³				
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	3.05E+ 20		
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	2.27E+ 08	(assumed)	
	Emergy per volume of drinking water:	sej/m ³	1.34E+ 12	(sej/yr)/(m ³ /yr)	
8	Drinking water produced, J				
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	2.27E+ 08	(2008 상수도통계연보, 부산광역시 상수도사업본부)	
	Total energy of water:	J/yr	1.12E+ 15	(m ³ /yr)(4.94J/g)(1E6g/m ³)	
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	3.05E+ 20	(sum of items 1 to 10)	
	Transformity of drinking water:	sej/J	2.72E+ 05	(sej/yr) / (J/yr)	

Appendix A-5. Footnotes to Table 4.7.

1	Seawater					
	Total Dissolved Solid of ppm					
	seawater:			35,000		
	Gibbs Free Energy(G):	J/g	0.00		[(8 . 3 3 J / m o l / C) (온 도 + 273.15K)/(18g/mole)]*ln[(10 ⁶ -TDS)/965000]	
	water pumped per year:	m ³ /yr	3.70.E+ 07		(회수율40%,가동률90%)	
	Annual energy:	J/yr	0.00.E+ 00		(J/g)(10 ⁶ g/m ³)(m ³ /yr)	
	Transformity:	sej/J				
2	Plant					
a.	concrete, kg					
	Total mass of concrete:	kg	2.06E+ 07			
	Average useful life of plant:	yr	50		assumed	
	Total concrete:	kg/yr	4.12E+ 05		(kg)/(useful plant life)	
	Emergy per mass of concrete:	sej/kg	1.81E+ 09		simomcini(2006)	
b.	steel & iron, kg					
	Total mass of steel & iron:	kg	1.80E+ 06			
	Average useful life of plant:	yr	20		assumed	
	Total steel & iron:	kg/yr	8.98E+ 04		(kg)/(useful plant life)	
	Emergy per mass of steel:	sej/kg	6.79E+ 09		(Broown and Buranakarn,2003)	
3	construction costs:					
	Total construction costs:	won	1.83.E+ 11			
	Average useful life of plant:	yr	5.00.E+ 01			
	construction costs per year:	won/yr	3.66.E+ 09			
	Emergy per money ratio in 2007:	sej/won	2.66.E+ 09		임(2010)	
4	Electricity, J					
	Electricity per m ³ :	kWh/m ³	5.3			
	Production capacity:	m ³ /day	45000			
	Operation rate:		0.9			
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	1.48E+ 07		(m ^ 3 / d a y) (o p e r a t i o n rate)(365 day/yr)	
	Total electricity in to plant:	kWh/yr	7.83E+ 07		(kWh/m ³)(m ³ /yr)	
	Total annual energy used:	J/yr	2.82E+ 14		(kWh/yr)(3.6*10 ⁶ J/kWh)	
	Transformity:	sej/J	3.11E+ 05		(Brown and Ulgiati, 2004)	

5	Chemicals, kg				
	Total weight of all chemicals	kg/yr	4.54E+ 05		
	used:				
	Emergy per weight:	sej/kg	1.68E+ 12	assumed the same as limestone or coal (Odum, 1996; p.310)	
6	Operation and Maintenance costs:				
	maintenance cost:	won/yr	1.83.E+ 09		
	labor cost:	won/yr	7.40.E+ 07		
	The costs of filter:	won/yr	7.99.E+ 05		
	The costs of purchasing electricity:	won/yr	6.57.E+ 09		
	The costs of purchasing chemicals:	won/yr	1.03.E+ 09		
	Total won spent for Service	won/yr	9.50.E+ 09		
	Emergy per money ratio in 2007:	sej/won	2.66.E+ 09	임(2010)	
7	DrinkingWaterProduced,m ³				
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	1.23E+ 20	(sum of items 1 to 6)	
	Production capacity:	m ³ /day	45000		
	Operation rate:		0.9		
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	1.48E+ 07	(m ³ /day)(operation rate)(365 day/yr)	
	Emergy per volume of drinking water:	sej/m ³	8.35E+ 12	(sej/yr)/(m ³ /yr)	
8	Drinking water produced, J				
	Water to the distribution system:	m ³ /yr	1.48E+ 07	(line 7)	
	Total energy of water:	J/yr	7.30E+ 13	(m ³ /yr)(4.94J/g)(1E6g/m ³)	
	Total emergy of drinking water(Y):	sej/yr	1.23E+ 20	(sum of items 1 to 6)	
	Transformity of drinking water:	sej/J	1.69E+ 06	(sej/yr) / (J/yr)	

Appendix B-1. Footnotes to Table 5.2.

2	Work required to boil water, J		
	Daily human kcal reqd. for boiling water:	kcal/day	4.2
	Annual human J reqd. for boiling water:	J/yr	6387.5
	Emergy per person per year in Korea:	sej/cap/yr	5.88E+ 16
	Avg. metabolic energy per cap:	J/cap/yr	4.58E+ 09
	Transformity(metabolic energy):	sej/J	1.28E+ 07
3	Proportion of electric ranger(stove) use for boiling water, \$		
	Avg. purchase price of an electric stove:	won	54000
	Stove use just for boiling water:	won	4320
	Average replacement time:	yr	10
	Annual cost:	won/yr	432
4	Proportion of pot use for boiling, \$		
	Purchase price of boiling pot:	won	15000
	Stove use just for boiling water:	won	10500
	Average replacement time:	yr	10
	annual cost:	won/yr	1050
5	Total materials required, g		
	Weight of stove:	kg	5.7
	Average replacement time of stove:	yr	10
	(a)Annual weight of stove:	kg/yr	0.57
	Weight of boiling pot:	kg	0.9
	Average replacement time of pot:	yr	10
	(b)Annual weight of pot:	kg/yr	0.09
	Total weight of all replaced filters/yr:	kg/yr	0.66
	Emrgy per mass of steel:	sej/kg	6.79E+ 09
6	Electric required to boil 2 L of water in the electric ranger(stove), J		
	Avg. power reqd.for one element(coil):	kW	0.4
	Avg. heating time before boiling:	min/day	6
	Boiling time reqd. to kill all pathogens:	min/day	10
	Total time fo required to burn the gas:	min/day	16
	Energy reqd. to boil:	J/yr	1.43.E+ 08
	Transformity:	sej/J	2.68.E+ 05
7	Money paid for the electric power used for boiling water, won		
	Avg. cost per m ³	won/m ³	709.24 (부산도시가스)
	Avg. cost per kW	won/kW-hr	177.31
	Total electric power used per year:	kW-hr/yr	40
	Gas used per minute in avg. stove:	won/yr	7040

Appendix B-2. Footnotes to Table 5.3.

2	Filter replacement & maintenance, won				
	Annual filter replacement costs:	won/yr	17600		
	Emergy per dollar ratio:	sej/won	2.66E+ 09		
3	Purchase & installation, won				
	retail purchase & installation:	won	814000		
	Average replacement time:	yr	10	assumed	
	Annual cost:	won/yr	81400		
	Emergy per won ratio:	sej/won	2.66E+ 09		
4	Materials(filter casing & storage tank), J				
	Total weight of unit:	g	5700		
	Average replacement time:	yr	10	assumed	
	Annualized material weight:	g/yr	570		
		J/kg	30000000		
	Annualized material :	J/yr	17100000		
	Emergy per weight:	sej/J	1.11E+ 05	(assume the same as Plastics)	
5	Materials(filter replacements), g				
	a) sediment & pre carbon filters replaced:	units/yr	2	1 filters per 6 months	
	b) RO filter replaced:		1	1 filters per 12 months	
	c) post carbon filter replaced:		0.67	1 filters per 18 months	
	d) ceramic filter replaced:	units/yr	0.5	1 filters per 24 months	
	Sum of filters replaced/yr:	units/yr	4.2	(a+ b)	
	Avg. weight per filter:	g/unit	600	Estimated	
	Total weight of all replaced filters/yr:	g/yr	2500	(total units/yr)(g/unit)	
	Emergy per weight:	sej/g	1.21E+ 11	(assume the same as silk; Odum, 1996; p.311)	

감사의 글

4학년 1학기를 마칠 때쯤 찾아온 취업의 기회를 따라 학교를 떠나면서 제가 다시금 학교에 돌아와 공부를 할 수 있을까 싶었는데, 어느새 돌아와 이렇게 졸업을 앞두고 있습니다.

뭘 해야겠다는, 어떻게 해야겠다는 아무런 계획도 없이 석사과정에 지원한 저를 받아주신 생태공학과 교수님들께 감사드립니다. 너무도 부족한 저를 교수님의 귀중한 시간을 내어 지도해주신 이석모 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 교수님의 가르침이 없었다면 저는 아마 생태공학이라는 학문에 받을 디딤 엄두조차 내지 못했을 것입니다.

바쁘신 와중에도 제 논문의 심사위원이 되어 자상하고 날카로운 가르침을 주신 강대석 교수님, 김동명 교수님께 감사드립니다. 너무나도 부족한 논문이었음에도 포기하지 않으시고 이끌어 주셔서 정말 감사드립니다. 그리고 생태공학이 무엇인지 그 개념조차 알지 못하고 있는 저를 지난 2년 동안 지도해 주신 정용현 교수님, 성기준 교수님, 최창근 교수님께도 감사드립니다. 2년이라는 시간이 결코 적은 세월이 아님에도 불구하고 아직도 모자란 제 자신을 돌아보니 2년이라는 시간이 그저 안타까울 뿐입니다.

제가 석사과정을 보내는데 있어 실험실 선·후배님들의 도움이 없었다면 저는 아마 논문은 커녕 수업하나도 제대로 듣기 못했을 것입니다. 저를 위해 여러 방면에서 애써주고 논문을 써 나가는데 많은 도움을 주었던 손지호 선배, 김진만 선배, 신봉균 선배, 주용수 선배, 김영윤 선배, 최문보 선배, 박상현 선배, 동갑내기 친구인 주훈이랑 혜민이, 가끔와서 선배라고 이것저것 시켜도 아무말 않고 선배라고 불러주는 광섭이, 종명이, 동주, 병현이, 주연이, 성훈이, 우성이, 효선이, 은지, 같이 생활한 건 아니지만 오며가며 챙겨주었던 진아를 비롯한 생태공학과 모든 선·후배님 모두 모두 고마워요.

제가 일을 하면서 진학을 결정하는데 있어 고민할 때 아낌없는 성원과 격려를 주시고 업무와 공부를 병행함에 있어 여러면에서 도움을 주신 빈재훈 소장님, 유평중 부장님, 노재순 과장님, 최진택 과장님, 배석문 쌤, 정현철 쌤, 김영진 쌤, 이희숙 쌤, 고재현 쌤, 문신득 쌤, 송미정 쌤, 이유정 쌤, 김용순 쌤을 비롯한 수질연구소 및 상수도사업본부의 모든 분들에게도 감사드립니다.

마지막으로 내가 하는 일은 무슨 일이든 믿고 맡겨주시는 사랑하는 우리 가족들 아빠, 엄마, 큰오빠, 큰언니, 작은오빠, 작은언니, 나의 사랑스런 조카들 예은이, 동길이, 예지, 혜린이 덕분에 항상 즐거운 마음으로 생활할 수 있었어요.

제가 여기까지 오는데 도움을 주신 모든 분들께 다시한번 더 감사드립니다.
다들 항상 행복하시고 건강하세요.

