



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

하수슬러지의 처분에 대한
생태경제성평가



2007년 2월

부경대학교 대학원

환경공학과

신봉균

공학석사 학위논문

하수슬러지의 처분에 대한
생태경제성평가

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

The logo of Pukyong National University is a circular emblem. It features a central stylized figure that resembles a person or a flame, with a blue and grey color scheme. The text 'PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY' is written in a circular path around the top half of the emblem, and '부경대학교' is written in Korean along the bottom half.

2007년 2월

부경대학교 대학원

환경공학과

신 봉 균

신봉균의 공학석사 학위논문을 인준함

2006년 12월 22일



주 심 이학박사 박 청 길



위 원 공학박사 이 병 헌



위 원 공학박사 이 석 모



목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
부록 목차	v
<i>Abstract</i>	vi
I. 서 론	1
II. 연구 배경	3
1. 하수슬러지의 발생과 처분	3
1.1 국내	3
1.2 국외	7
1.3 하수슬러지 처분에 관한 정책	8
2. Emergy 개념	11
2.1 Emergy 정의	11
2.2 Transformity	11
2.3 Emwon	13
III. 연구 방법	14
1. 에너지 시스템 다이어그램 작성	14
2. Emergy 분석표 작성	15
3. Emergy 지표 산정	16

IV. 연구결과 및 고찰	18
1. 시스템 경계의 설정	18
2. 하수슬러지 처분에 대한 emergy 분석	19
3. 하수슬러지 처분에 대한 효율성 평가	30
4. 하수슬러지 처분에 대한 생태경제성 평가	32
V. 결론	36
<i>Appendix</i>	38
참고문헌	46



표 목차

Table 2.1 Amount & disposal status of sewage sludge	4
Table 2.2 Comparison between London convention and 1996 protocol	10
Table 3.1 Tabular format for emergy evaluation	15
Table 4.1 Emergy evaluation of ocean disposal with 1ton of sewage sludge	24
Table 4.2 Emergy evaluation of incineration with 1ton of sewage sludge	25
Table 4.3 Emergy evaluation of landfill with 1ton of sewage sludge	26
Table 4.4 Emergy evaluation of compost with 1ton of sewage sludge	27
Table 4.5 Comparison of indices using emergy for overview of the four disposals with 1ton of sewage sludge	32
Table 4.6 Environmental accounting of the ocean disposal with 1ton of sewage sludge	34
Table 4.7 Environmental accounting of the incineration with 1ton of sewage sludge	34
Table 4.8 Environmental accounting of the landfill with 1ton of sewage sludge ...	35
Table 4.9 Environmental accounting of the compost with 1ton of sewage sludge ·	35

그림 목차

Fig. 2.1 Energy quality chain used to calculate solar transformity	11
Fig. 2.2 Hierarchical chain of energy transformations	12
Fig. 2.3 Energy input used to evaluate the energy/money ratio of the national economy	13
Fig. 3.1 Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right	14
Fig. 3.2 Energy based indices, accounting for local renewable energy input(R) , local nonrenewable input(N), and purchased input from outside the system(F)	16
Fig. 4.1 Ocean disposal system boundary	18
Fig. 4.2 Energy system diagram of ocean disposal of sewage sludge	22
Fig. 4.3 Energy system diagram of incineration of sewage sludge	22
Fig. 4.4 Energy system diagram of landfill of sewage sludge	23
Fig. 4.5 Energy system diagram of compost of sewage sludge	23
Fig. 4.6 Energy sources signature of ocean disposal with 1ton of sewage sludge ·	28
Fig. 4.7 Energy sources signature of incineration with 1ton of sewage sludge ·····	28
Fig. 4.8 Energy sources signature of landfill with 1ton of sewage sludge	29
Fig. 4.9 Energy sources signature of compost with 1ton of sewage sludge	29

부록 목차

Appendix 1. Solar transformity used in emergy evaluation of disposal with 1ton of sewage sludge	43
Appendix 2. Footnotes of emergy evaluation of ocean disposal with 1ton of sewage sludge	44



Eco-efficiency evaluation of sewage sludge disposal

Bong Kyun Shin

Department of Environmental Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The debate on efficient sewage sludge disposal has become an issue of national policy in the world. Recent law on waste management in Korea has prohibited to reclaim waste directly since July, 2003 and the Korea government has decided to forbid ocean disposal of waste including sewage sludge until 2012 with the effectuation of the 1996 protocol.

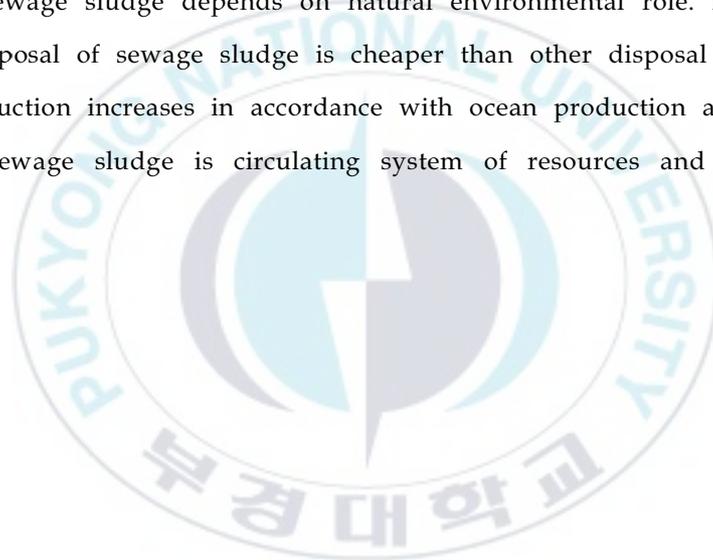
The purpose of this study was to search for eco-efficient disposal method for sustainable sewage sludge disposal and to increase in material recycling and energy recovery.

In this study, emergy analysis is applied to evaluate four different disposal methods of sewage sludge such as ocean disposal, incineration, landfill and compost. We can present eco-efficiency of sewage sludge disposal method with Emergy Yield Ratio(EYR) and cost-benefit based on emergy analysis.

The results of evaluation with EYR for 1ton of sewage sludge disposal were 122 for the ocean disposal, 0.02 for the incineration, 0.02 for the landfill and 0.04 for the compost respectively.

The result of cost-benefit evaluation for 1ton of sewage sludge disposal are as follows : the ocean disposal method gained 1,398,400 Emwon as net-benefit, the incineration method lost 109,250 Emwon as net-cost, the landfill method lost 36,921 Emwon as net-cost and the compost method lost 328,100 Emwon as net-cost.

These results show that ocean disposal is the most efficient system. The ocean disposal of sewage sludge depends on natural environmental role. In conclusion, the ocean disposal of sewage sludge is cheaper than other disposal methods and fisheries production increases in accordance with ocean production activity. Ocean disposal of sewage sludge is circulating system of resources and eco-efficiency method.



I. 서론

우리나라 헌법에는 모든 국민은 쾌적한 환경에서 생활할 권리인 환경권을 가지고 있다고 명시되어 있다. 1960년대를 시작으로 우리나라의 산업화가 급격히 진행되면서 경제규모의 양적인 성장과 더불어 국민들의 물질적인 삶에 대한 만족도는 증가하였고, 보다 나은 생활환경에 대한 욕구 또한 증가하게 되었다. 이에 국가적 차원에서 보다 쾌적한 생활환경을 유지하기 위해 하수도와 하수종말처리장을 지속적으로 건설하게 되었고, 그 결과 하수슬러지의 발생량 또한 지속적으로 증가하게 되었다. 하수도 보급률은 1998년에 65.9%에서 2004년에는 81.4%, 하수처리장의 수는 1998년에 114개에서 2004년에는 268개로 증가하였고, 하수슬러지의 경우도 매년 증가하여 1998년에 1,413,075톤에서 2004년도에 2,426,070톤이 발생하였다.

하수슬러지의 발생량이 매년 증가하고 있는 현실에서 농림부의 비료관리법에 의한 비료공정규격에 의해서 시·도 이상의 도시지역에서 발생하는 하수슬러지에 대해서는 유해물질의 유무에 상관없이 원천적으로 퇴비화가 금지되었고, 2001년 1월 폐기물관리법의 개정으로 인하여 하수슬러지 직매립 금지조항이 만들어졌으며, 유예기간을 거쳐 2003년 7월부터 하수슬러지의 매립장 반입이 금지되었다. 그리고 '96의정서에서도 배출허용품목으로 명시된 하수슬러지의 해양배출에 대한 잘못된 인식으로 인하여 해양수산부와 환경부에서는 2012년 1월부터 하수슬러지의 해양배출을 전면 금지하기로 합의하였다. 따라서 하수슬러지의 소각, 전처리 후 매립, 재활용 이외에는 더 이상 하수슬러지의 처분이 힘들어지는 현실에서 효율적인 하수슬러지의 처분을 위한 해양배출, 소각, 매립, 퇴비화에 대한 효율성의 재검토가 필요하다고 생각되었다.

본 연구에서 이용되는 emergy 분석은 top-down적인 접근방법에 의하여 자연환경과 인간경제활동을 동일한 척도로 평가할 수 있기 때문에 환경문제와 경제정책의 통합 연구가 가능하며 공공정책에 대한 과학적 근거를 제공할 수 있다. Odum(1996)은 1962년 이후 에너지 언어를 생태계 시스템의 분석, 합성, 그리고 시뮬레이션에 이용하고 있으며, 자연환경의 역할과 인간경제활동을 하나의 시스템에서 동일한 가치 척도로 비교하는 emergy개념을 이용하여, 농업, 임업 그리고 수산업의 기여도, 국가의

자연환경과 경제활동에 대한 통합 평가, 국가간 무역의 energy 손익 평가 등에 대한 연구 결과를 발표하였다(한국해양수산개발원, 2003).

국내에서는 Lee와 Odum(1994)이 energy 분석법을 통한 한국의 자연환경과 경제활동에 대하여 연구를 수행하였고, 손(1996)과 엄(1996)은 수산업과 양식업에 대하여 각각 energy 평가를 수행하였다. Kang과 Park(2002)이 다목적 댐 건설의 생태경제적 평가방법에 관한 연구를 수행하였으며, 김(2000)은 시스템 생태학적 접근법에 의한 낙동강 유역의 지속적인 발전가능성평가와 환경회계에 의한 하천 유역 환경정책 결정에 관한 연구를 실시하였다. 외국의 사례에서는 스웨덴에서 Bjorklund(2001)는 폐수처리 시스템의 자연생태계와 구매자원간의 관계에 대하여 energy 평가를 수행하였고, 미국에서는 Brown과 Ulgiati(2002)가 전력생산시설에 관한 energy 평가와 환경부하를 연구하여 구조물에 관한 energy 분석을 수행하였으며, 대만에서 Huang(2003) 등이 타이페이의 도시 건설에 대한 Material flow에 대하여 energy 분석을 수행하였다. 이러한 energy 분석을 통한 연구는 인간경제활동뿐 아니라 자연환경의 역할까지도 모두 고려할 수 있으므로 기존의 화폐경제적인 평가방법에 비하여 보다 객관적이고 과학적인 분석이 이루어질 수 있음을 보여주고 있다(김, 2001).

본 연구에서는 인간경제활동 뿐만 아니라 자연환경의 역할까지 모두 고려할 수 있는 energy 분석법을 이용하여 하수슬러지 처분방법에 대한 실질적인 가치를 평가하고, 이를 바탕으로 비용-편익 분석 및 효율성 평가를 실시하여 하수슬러지 처분의 효율적인 관리방안에 대한 정책 수립에 도움이 되고자 한다.

II. 연구 배경

1. 하수슬러지의 발생과 처분

1.1. 국내

가. 하수슬러지의 정의

하수슬러지(sewage sludge)라 함은 하수처리과정에서 1차 처리, 2차 처리 및 고차 처리 과정에서 생성되는 최종부산물로 수분함량이 95%미만이거나 고형물함량이 5% 이상인 것으로 정하고 있으며, 유기성 물질의 포함 정도에 따라 유기성 슬러지와 무기성 슬러지로 구분하고 있다. 하수슬러지는 고형물중 유기성 물질의 함량이 40% 이상인 것으로 정한다.

나. 우리나라에서 하수슬러지 발생량

우리나라의 하수슬러지 발생량은 Table 2.1과 같이 1998년에 1,413,075톤이 발생되었고, 그 양이 점차 증가하여 2004년에는 2,426,070톤이 발생하였다. 하수슬러지의 발생량은 매년 그 양이 증가할 것으로 생각된다.

Table 2.1 Amount & disposal status of sewage sludge(ton/year)

Year	Emission amount (ton/year)	Sewage sludge					
		Ocean disposal	Incineration	Landfill	Compost	The others	Untreated wastes
1998	1,413,075	552,188	20,947	792,828	34,466	12,646	34,095
		38.2%	1.4%	54.8%	2.4%	0.8%	2.4%
1999	1,574,303	820,135	33,351	640,516	80,293	8	18,698
		51.5%	2.1%	40.2%	5.0%	-	1.2%
2000	1,739,739	1,118,453	93,163	439,099	88,101	923	1,633
		64.2%	5.3%	25.2%	5.1%	0.1%	0.1%
2001	1,897,016	1,390,779	138,440	229,082	118,339	20,376	5,394
		73.1%	7.3%	12.0%	6.2%	1.1%	0.3%
2002	2,073,095	1,471,472	200,919	254,919	106,624	39,619	123
		71.0%	9.7%	12.3%	5.1%	1.9%	0%
2003	2,266,888	1,625,676	279,527	113,419	152,124	95,915	227
		71.8%	12.3%	5.0%	6.7%	4.2%	0%
2004	2,426,070	1,869,334	283,356	34,295	239,085	-	-
		77.0%	11.7%	1.4%	9.9%	-	-

다. 하수슬러지의 처분방법

하수슬러지 최종처분방법은 해양배출, 소각, 매립, 퇴비화 등의 방법이 사용되고 있다.

1) 해양배출

폐기물 관리법의 개정으로 인하여 하수슬러지의 직매립 금지에 대한 환경부의 발표 이후 하수슬러지의 해양배출에 대한 의존도는 점차 증가하여, 2004년 기준으로 1,869,334톤(77.0%)이 해양으로 배출되었다. 하수슬러지의 해양배출방법은 위해성이 적은 하수슬러지나 축산폐수 등을 대상으로 운반선을 이용하여 4노트 이상의 항해상태에서 배출하는 확산식과 선박이 정지된 상태에서 배출하는 집중식을 사용하고 있으며, 연안에서 100km이상 떨어진 동해'병', 서해'병'지역의 배출해역에서 하수슬러지를 처분하고 있다.

2) 소각

하수슬러지 소각은 대부분이 하수슬러지 소각에 적합한 유동상식 소각과 로터리 킬른식 소각을 많이 이용하고 있다. 국내 하수슬러지의 경우 선진외국에 비하여 수분 함량이 높고, 유기물 함량이 낮기 때문에 운전상 많은 에너지가 소비된다. 그래서 요즘은 건조-소각 연계시스템을 사용하여 폐목재나 소각 시 발생하는 열을 사용하여 미리 슬러지를 일정 비율 건조시킨 후 소각한다. 현재 하수슬러지 전용소각 시설은 일부에 불과하며 대부분이 경제적인 이유와 하수슬러지의 부족한 열량 및 높은 수분함량의 문제를 해결하기 위해 생활폐기물과 일정비율 혼합하여 소각하는 방법이 이용되고 있다.

3) 매립

하수슬러지의 매립은 2003년 7월부터 실시된 폐기물관리법의 개정에 의해서 1일 처리용량 1만톤 이상의 하수종말처리시설과 1일 폐수배출량 2천톤 이상인 배출업소에서 발생하는 유기성슬러지의 직매립이 금지되면서 현재는 거의 이루어지고 있지 않다. 일부 매립되는 하수슬러지의 경우 건조나 소각 등의 전처리가 이루어진 후 일반 생활쓰레기와 함께 매립처분 되고 있다.

4) 퇴비화(부숙도)

하수슬러지의 퇴비화는 하수슬러지를 녹농지에 이용하기 위하여 하수슬러지를 통기개량제와 혼합한 후 발효시켜 슬러지를 안정화시키는 것을 말한다. 예전에는 하수슬러지를 자연 상태에 야적하였으나, 요즘은 지렁이를 사육하여 먹고 남은 분변토를 재활용하거나 하수슬러지를 퇴비화를 시켜 부숙토를 만드는 방법을 사용하고 있다. 부숙도 생성의 경우 건조 및 발효과정을 거쳐 생성하게 되고, 부숙화 시설을 이용할 경우 기타의 첨가물 없이 퇴비화 시키며, 일반 야적시 퇴비화에 비해 1~2주 빠르게 퇴비가 안정화시킬 수 있다. 건조의 경우 함수율 75~80%인 탈수케이크를 함수율 30~50%로 감소시키는 공정으로 주로 매립이나 자원화의 전처리 공정으로 많이 이용되고 있다.

라. 하수슬러지 처분에 관한 국내 현황 및 연구

Table 2.1에 나타난 바와 같이 하수슬러지는 1998년에 1,413,075톤이 발생되었으며, 그 양이 점차 증가하여 2004년에는 2,426,070톤이 발생되었다. 1998년 기준으로 발생된 하수슬러지는 해양배출(552,188톤/년, 38.2%), 소각(20,947톤/년, 1.4%), 육상매립(792,828톤/년, 54.8%), 재활용(34,466톤/년, 2.4%), 기타(12,646톤/년, 0.8%), 미처리(34,095톤/년, 2.4%)의 비율로 처분되었으나, 2004년에는 해양배출(1,869,334톤/년), 소각(283,356톤/년), 육상매립(34,295톤/년), 재활용(239,085톤/년)의 비율로 처분되었다.

하수슬러지 처분에 관한 현황을 살펴보면 1998년 이전까지는 하수슬러지 처분 방법 중 매립이 가장 큰 비중을 차지하고 있었으나, 토지지가의 상승과 매립으로 인해 발생하는 2차 환경문제로 인하여 매립에 대한 비중이 낮아지고 해양배출의 비중이 점차 높아지게 되었다. 하지만 이 역시도 하수슬러지에 대한 잘못된 인식으로 인하여 '96의정서에서도 배출을 허용하고 있는 하수슬러지의 해양배출을 국가적 차원에서 2012년 1월부터 전면금지할 것으로 합의함에 따라 하수슬러지의 다양한 처분방법에 대한 연구가 실시되고 있는 중이다.

국내의 하수슬러지 처분에 대한 연구는 지자체를 비롯한 국가기관에서 실시한 하수슬러지 처리의 문제점 및 추진대책(환경부, 2003), 하수슬러지 적정처리 및 재활용방안(부산광역시, 2003), 하수슬러지의 효율적 처리방안(환경관리공단, 2004), 대구광역시 하수슬러지의 효과적 처리방안(대구광역시, 2004), 하수슬러지 처리 및 자원화 방안(환경관리공단, 2005) 등이 있으며, 학술연구로는 하수슬러지 처분 및 재활용 방안에 관한 연구(김, 2000), 하수슬러지 적정처분방안에 관한 연구(배, 2002), 하수슬러지의 재활용촉진을 위한 자원화방안에 관한 연구(이, 2003), 하수슬러지 소각재 특성과 재활용(장, 2005) 등으로 하수슬러지 처분 및 관리에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

1.2 국외

가. 미국

미국의 경우 하수슬러지를 Bio-solids로 정의하여 자원의 개념으로 생각하고 있다. 1998년을 기준으로 약 497만톤(건조중량)의 하수슬러지가 발생되었고 각 지역의 특성에 맞추어 하수슬러지에 대한 여러 가지 처분방법이 시행하고 있다. 미국은 사막이나 불모지 지역이 많고 슬러지에 대한 중금속 규제가 완화되어 있으므로 이들 지역에서는 하수슬러지를 토양살포(46.5%)나 매립(27%)하는 방법을 많이 사용하고 있으며, 중부와 동부의 대도시 지역에서는 소각(16%)을 많이 시행하고 있다. 그리고 미국은 일찍이 하수슬러지에 대한 관리의 중요성을 인식하여 슬러지의 재이용에 관한 연구와 더불어 슬러지처리 전반에 대하여 가이드라인을 설정하여 두고 있으며, 처리방법 및 유효이용방법에 대하여 간접적인 규제를 하고 있다(환경관리공단, 2004).

나. 일본

일본의 경우 1999년 기준으로 발생한 하수슬러지의 71.5%가 중간처리단계인 소각으로 처리되었으며, 최종처분방법으로는 매립(39.4%), 농경지 환원(14.4%), 건설자재로의 재이용(44%), 해양배출(0.2%), 기타(2.4%)의 비율로 처리되고 있다. 일본은 1980년대부터 대도시를 중심으로 하수슬러지의 처분을 매립에서 소각으로 전환하고 있으며, 이를 건축자재 등으로 이용하고 있다. 그리고 소도시에서는 토양으로의 직접 주입을 시행하고 있는 등 하수슬러지를 자원화 하는데 노력하고 있다.

다. 유럽

유럽의 경우 하수슬러지 처분에 관해 EU에서 정한 공통기준이 있으나 각국의 특성에 따라 독자적인 처리기준을 설정하고 운영하고 있다. 대체로 유럽에서의 하수슬러지의 처분은 녹농지 이용, 육상매립, 소각, 건설 자재화 등으로 이용되고 있다. 주로 발생한 하수슬러지의 40~50% 정도를 녹농지 이용에 이용하고 있으며, 육상매립 및 소각 등의 순으로 하수슬러지의 처분이 진행되고 있다.

1.3 하수슬러지 처분에 관한 정책

가. 유기성 슬러지의 직매립 금지

과거에는 생활하수를 처리하는 과정에서 발생하는 하수슬러지를 처리할 때 매립 처분하는 방식을 주로 사용하였다. 하지만 유기성 슬러지인 하수슬러지를 매립할 경우 슬러지에서 발생하는 침출수와 악취 등으로 인한 2차 환경오염이 발생할 수 있는 바 폐기물관리법시행령의 개정을 통하여 2001년 1월부터 1일 처리용량 1만톤 이상의 하수종말처리시설과 1일 폐수배출량이 2천톤 이상인 배출업소에서 발생하는 유기성슬러지의 직매립을 금지하였다. 그리고 하수슬러지를 매립할 경우에는 소각 및 건조과정 등의 전처리를 거친 후 그 잔재물만 매립하도록 규정하였다. 하지만 지방자치단체에서의 하수슬러지 처리시설 건설에 따른 재정확보와 처리공법 선정 등에 어려움이 있어 하수슬러지 처리시설 건설이 지연되었고, 이에 폐기물관리법시행규칙 재개정을 통해 수분함량 75%이하인 하수슬러지 직매립금지 규칙을 2003년 7월로 연기하여, 현재는 하수슬러지의 직매립이 전면 금지되었다(환경관리공단, 2005).

나. 농림부의 비료관리법 및 환경부의 부속토 관계법

우리나라의 하수슬러지의 자원화 정책은 시·도 이상의 도시에서 발생하는 하수슬러지는 비료의 원료로서 원천적으로 사용하지 못하도록 농림부의 비료관리법에 규정하고 있다. 이로 인하여 시·도 지역 이상의 도시에 위치하고 있는 하수처리시설에서 발생하는 하수슬러지 중 대부분이 비료 관리규정에는 만족하고 있으나, 이를 퇴비로 이용하지는 못하고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 환경부에서는 하수슬러지의 자원화를 촉진시키기 위하여 부속토에 관련된 자원화촉진 법규를 1999년에 법제화 하여 2000년도부터 시행하고 있다.

다. 폐기물 해양배출에 관한 국내·외 협약

1) 우리나라 폐기물 해양배출 제도

우리나라의 폐기물에 관한 해양배출제도는 1977년 12월에 해양오염방지법이 제정된 이후 1987년 8월에 해양오염방지법시행령의 개정으로 폐기물 해역배출 지정제도가 신설되었으며, 1996년 8월에 폐기물 배출해역을 지정하여 유기성 슬러지 및 축산폐수 등을 폐기물 배출해역에 배출하고 있다.

2) '72 런던협약

런던협약의 공식 명칭은 폐기물 및 기타물질의 투기에 의한 해양오염 방지에 관한 협약(Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matters)로 일반적으로 런던협약이라고 한다.

런던협약은 국내수역(internal waters) 밖에 있는 모든 해양지역에 특정 폐기물의 해양투기를 금지하여 해양오염을 예방하는 것을 목적으로 하고 있으며, 33개국의 가입을 시작으로 총 81개국이 이 협약에 가입하였다. 1972년 12월에 협약이 채택되었고 1975년 8월에 협약이 발효되었으며, 우리나라는 1993년 12월에 협약에 가입하였다. 런던협약에 가입한 국가들은 매년 자국이 해양에 투기하는 폐기물 현황을 협약 사무국에 보고할 의무가 있으나 협약내용을 준수하지 않을 경우 구속력이 없어 많은 당사국이 해양투기현황을 보고하지 않는 등의 한계성이 드러났다. 이 협약 중 해양투기가 금지된 항목은 Table 2.2와 같다.

3) '96 의정서

'96 의정서의 개정은 1972년 이후에 해양으로 처분되는 오염원의 양이 증가하고, 협약이행에 대한 규정 미비 등으로 인해 런던협약의 효율성에 대한 문제가 제기됨에 따라 1990년, 1992년 당사국회의를 거쳐 1996년 10월 런던에서 의정서가 채택되었다. 주요 개정사항은 첫 번째로 폐기물 해양배출 금지의 원칙으로 종래의 배출금지품목(negative listing)을 명시하는 것에서 배출허용품목(positive listing)을 명시하는 것으로

변경되었고, 7개의 폐기물 종류에 한해서만 해양배출을 예외적으로 허용하고 있다 (Table 2.2). 두 번째로 예방의 원칙으로 폐기물의 해양배출이 허용되었다고 대체방안을 마련해야하고, 불가피한 경우에만 환경에 최소한의 피해를 주는 범위에서 이를 허용해야 한다는 것이다. 세 번째로 오염자 부담원칙으로 해양배출을 허가 받은 자는 배출로 인해 발생될 오염을 방지하고 이에 관한 규제가 시행될 시 발생하는 모든 비용을 부담해야 한다는 것이다. 네 번째로 보고의무에 관한 원칙으로 당사국들이 배출하는 해양으로 배출되는 폐기물에 대해 지속적으로 보고해야 한다는 것이다.

Table 2.2 Comparison between London convention and 1996 protocol(Korea coast guard, 2003)

London convention	1996 protocol
- Organohalogen compounds	- Dredged material
- Mercury and mercury compounds	- Sewage sludge
- Cadmium and cadmium compounds	- Fish waste, organic materials resulting from industrial fish processing operations
- Persistent plastics and other persistent synthetic materials	- Vessels and platform of other man-made structures at sea, provided that material capable of creating floating debris or otherwise contributing to pollution of the marine environment has been removed to the maximum extent
- Crude oil and its wastes, refined petroleum products, petroleum, distillate residues, and any mixtures containing any of those, taken on board for the purpose of dumping	- Uncontaminated inert geological materials the chemical constituents of which are unlikely to be released into the marine environment
- Radioactive wastes or other radioactive matter	- Uncontaminated organic materials of natural origin
- Materials in whatever form produced for biological and chemical warfare	

2. Energy 개념

2.1 Energy 정의

지구 순환과정은 각 에너지원이 다량의 저급 에너지로부터 소량의 고급에너지로 전환되는 계층 구조를 가지고 있으므로 물리학적으로 같은 크기의 에너지라도 실질적으로 일을 할 수 있는 능력에는 차이가 있다.

이러한 차이를 지구 생산 활동의 원동력인 태양에너지를 기준으로 동일한 척도로 평가하기 위하여 각기 다른 형태의 재화와 용역이 형성되기까지 직·간접적으로 소모된 태양 에너지를 solar energy 라고 정의한다(Fig. 2.1).

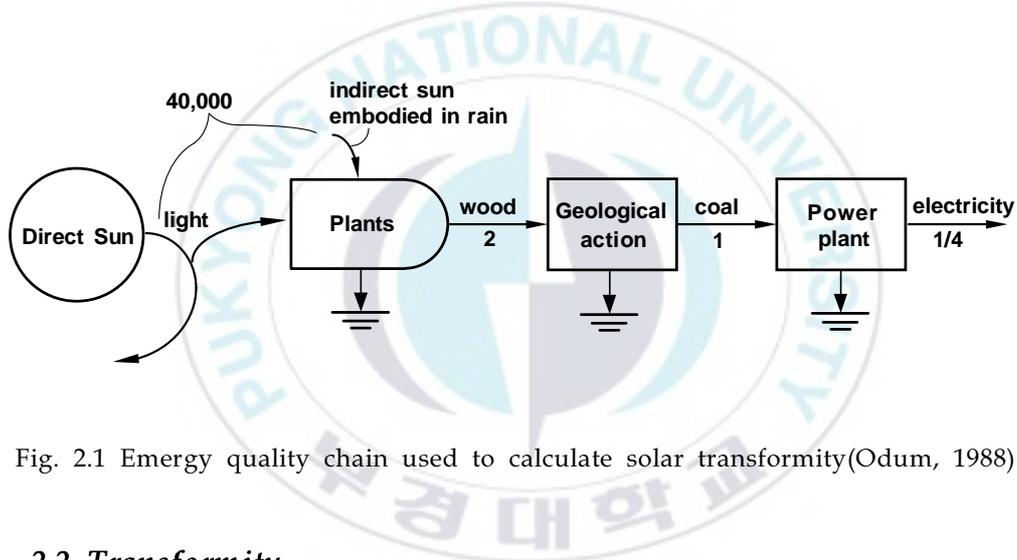


Fig. 2.1 Emergy quality chain used to calculate solar transformity(Odum, 1988).

2.2 Transformity

생태계 내의 에너지의 흐름은 에너지 변환, 되먹임, 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 측

정하게 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. 2.2). 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.

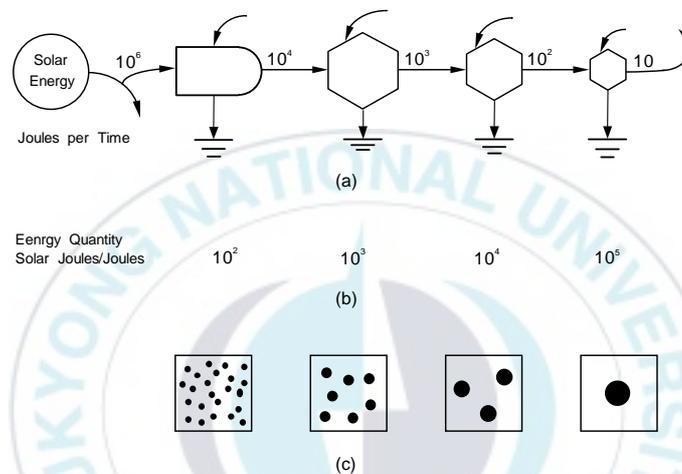


Fig. 2.2 Hierarchical chain of energy transformations: (a) decrease of energy in successive transformations; by-product pathways are omitted; (b) energy-transformation ratios in solar equivalents; (c) spatial hierarchy characteristics(Odum, 1983).

2.3 Emwon

Emwon은 energy를 화폐단위로 환산한 것으로 경제적 생산을 위하여 소모된 총 energy와 생산된 화폐가치와의 비를 이용하여 계산한다(Fig 2.3).

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

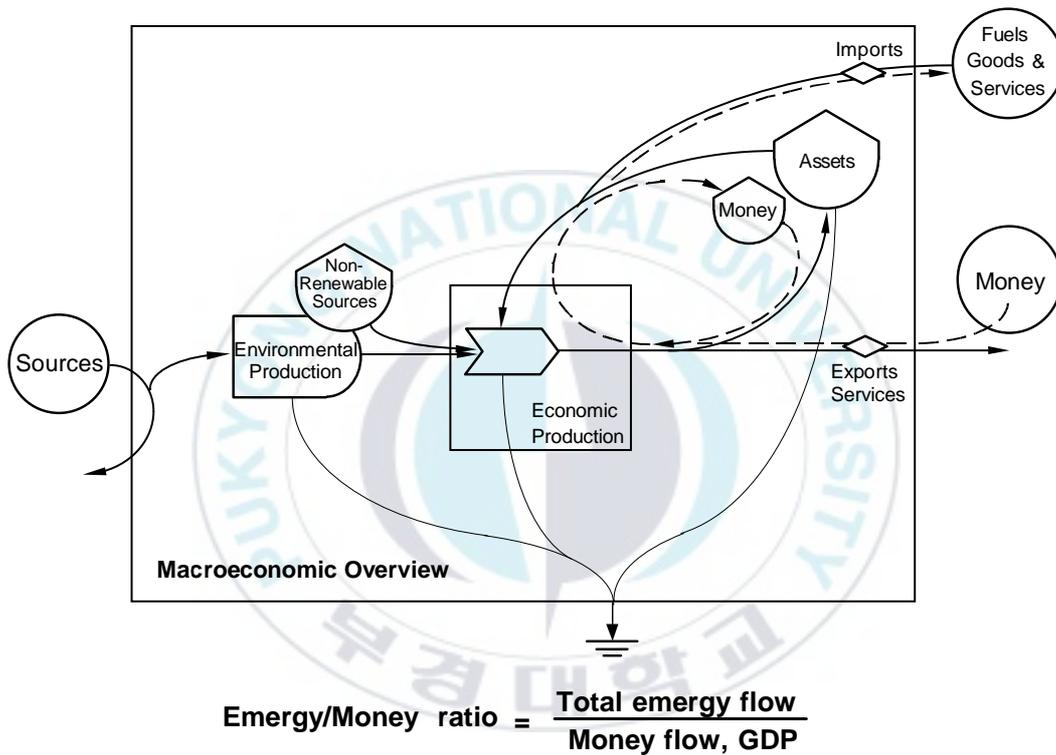


Fig. 2.3 Emergy inputs used to evaluate the emergy/money ratio of the national economy(Odum, 1996).

Ⅲ. 연구 방법

1. 에너지 시스템 다이어그램 작성

Odum(1996)이 제안한 에너지 시스템 언어를 이용하여, 시스템의 자연환경과 경제활동의 생산, 소비, 재순환 등의 변화를 전체적으로 파악하기 위해서 Top-down적 접근법을 이용하여 에너지 시스템 다이어그램을 작성한다(Fig. 3.1).

다이어그램의 작성 절차는 첫째, 분석대상 시스템의 경계를 설정한다. 시스템 분석을 위해서 각 시스템의 육지면적과 해양면적을 시스템의 공간적인 경계로 설정한다.

둘째, 시스템 외부로부터의 주요 에너지원, 그리고 대상시스템 내의 생산, 소비, 재순환 과정을 파악한다.

셋째, 외부 에너지원을 transformity 순으로 왼쪽에서 오른쪽으로 시스템의 경계 외부에 차례로 배열하고, 시스템 경계 밖의 외부 에너지원으로부터 시작하여 내부의 생산자, 소비자에 대한 에너지, 물질 그리고 화폐의 흐름에 따라 선을 연결하여 다이어그램을 완성한다.

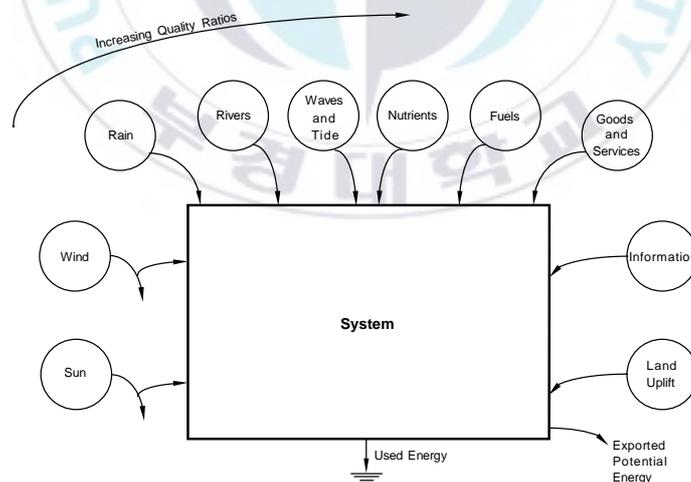


Fig. 3.1 Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

2. Emergy 분석표 작성

분석대상 시스템의 자연환경과 경제활동에 있어 외부 에너지원의 역할과 가치를 평가하기 위해서 Table 3.1과 같은 형식의 emergy 분석표를 작성한다.

첫 번째 열에는 분석대상 시스템의 자연환경과 인간의 경제활동을 가능케 하는 외부의 주요 에너지원을 기입한다. 각 분석대상 시스템에 있어 자연환경과 경제활동을 가능케 하는 외부의 주요 에너지원을 태양, 바람, 비, 파도, 조석, 해류와 석유소비량, 전기사용량, 그리고 각종 교역과 교환 등에 의해 유입되는 재화 및 용역으로 파악한다.

Table 3.1 Tabular format for emergy evaluation

Item	Data Units (J, g, or \$)	Solar Transformity (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Em\$ (dollar/yr)
(one line here for each source, process, or storage of interest.)				

두 번째 열에는 주요 에너지원의 실제 에너지, 물질 또는 화폐 단위의 값을 기입한다. 본 연구에서는 Table 3.1의 수집 자료와 계산식을 이용하여 태양, 바람, 비, 파도, 조석, 해류, 석유, 전기는 에너지 단위로, 교역과 교환을 통한 재화와 용역은 화폐 단위로 계산한다.

세 번째 열에는 주요 에너지원에 대한 solar transformity, 재화 및 용역에 대한 emergy/money ratio를 나열한다. 본 연구에서는 solar transformity의 경우 Appendix 1과 같이 기존의 평가치를 이용하였다.

네 번째 열에는 두 번째 열의 주요 에너지원이 가지는 실제 값에 세 번째 열의 solar transformity와 emergy/money ratio를 곱하여 emergy 값을 산출한다.

다섯 번째 열에는 주요 에너지원의 emergy 값을 emergy money ratio로 나누어 계산한 거시 경제적 가치(macroeconomic value)를 산출한다.

3. Emergy 지표 산정

Emergy 분석에서 구한 emergy 값을 기초로 분석대상 시스템을 비교하고, 그 특성을 파악하기 위해 Fig. 3.2와 같이 emergy 지표들을 계산한다.

시스템에 유입되는 emergy를 태양, 바람, 강우, 조석 및 해류에 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 emergy 지표들을 계산한다.

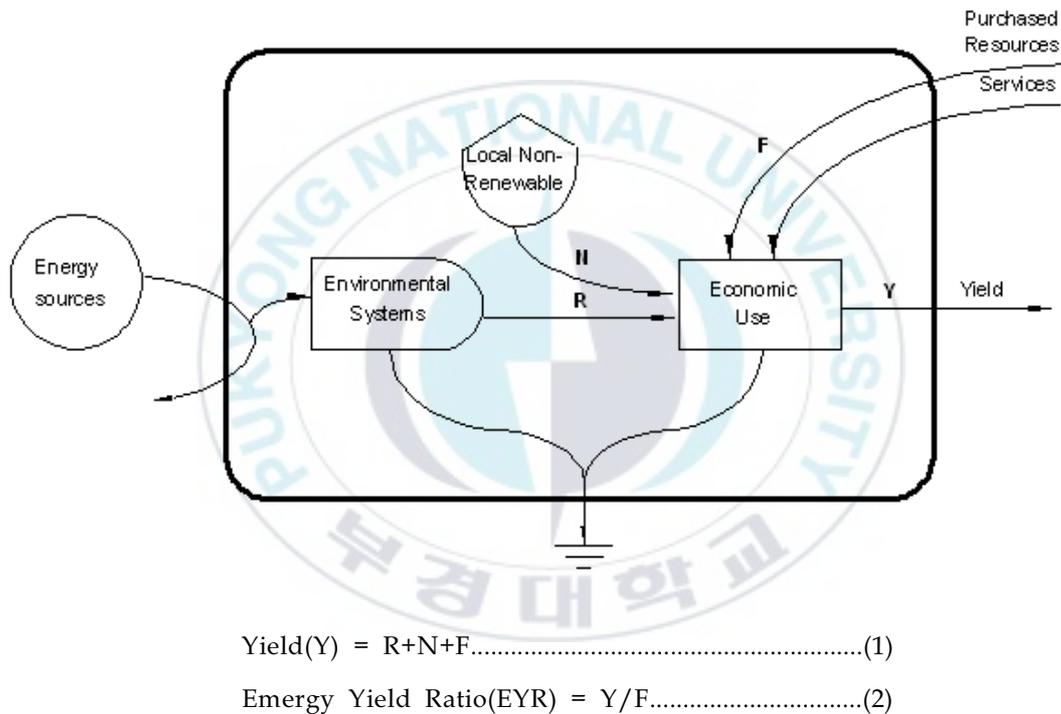


Fig. 3.2 Emergy based indices, accounting for local renewable energy inputs(R), local nonrenewable inputs(N), and purchased inputs from outside the system(F)(Brown and Ulgiati, 1997).

Emergy 생산비[Emergy Yield Ratio]는 시스템으로부터 생산된 생산물이 가지는 전체 emergy 양[Yield=R+N+F]에 경계 밖으로부터 교역과 교환을 통해 유입된 구매 자원의 emergy 양(F)으로 나누어 계산하며, 생산물(product)이 가지는 자원으로서의 가치와 시스템의 효율성을 평가하는데 이용한다(계, 2004).



IV. 연구 결과 및 고찰

1. 시스템 경계의 설정

가. 해양배출

하수슬러지의 해양배출은 Fig. 4.1과 같이 서해'병'(군산 서방 200km, 38.0km×83.3km=3,165km², 수심 80m) 지역과 동해'병'(포항 동방 125km, 33.3km×111.1km=3,700km², 수심 200~2,000m) 지역에 실시되고 있다. 우리나라 서해는 조류가 지배하는 지역으로서 조차는 4m가 넘으며, 조류는 40~100m/sec이었다. 동해의 경우 표면유속 70cm/sec, 1knot이상의 강한 대마난류가 대한해협을 통하여 유입되어 하수슬러지의 확산이 용이한 특성을 가지고 있어서 해양배출이 용이한 지역이다 (이, 1992).



Fig. 4.1 Ocean disposal system boundary.

나. 소각

하수슬러지 처분 중 소각의 경우는 경기도 구리시 수택동 69에 위치한 구리하수슬러지 전용 소각시설을 대상지역으로 선정하였다. 본 소각시설은 구리시 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지를 전량 소각 처리하는 하수슬러지 전용소각시설로서 1일에 최대 70톤의 하수슬러지를 처리할 수 있으며, 부지면적은 661m²이다. 소각로 시설은 하수슬러지 소각에 주로 사용되고 있는 유동층 소각 방식을 채택하고 있다.

다. 매립

하수슬러지 처분 중 매립의 경우 인천광역시 백석동에 위치한 수도권 매립지를 대상지역으로 선정하였다. 현재 제 1매립장은 매립이 완료된 상태이며, 제 2매립장에서 매립이 진행되고 있다. 제 2매립장의 경우 부지면적이 112만평, 매립면적이 75만평, 매립용량이 6700만톤을 수용할 수 있는 공간으로 서울, 경기, 인천에서 발생하는 하수슬러지 및 생활폐기물을 매립할 수 있는 공간이다. 하수슬러지의 매립 경우 폐기물법의 개정으로 인해 직매립이 금지되어 있으므로 전처리 단계인 고화처리를 실시한 이후에 생활폐기물과 함께 매립을 실시하는 방식을 채택하고 있다.

라. 퇴비화(부숙토)

하수슬러지 처분 중 재활용의 경우 경상남도 고성군 송학리 1번지에 위치한 하수슬러지 부숙시설을 대상지역으로 정했다. 이 시설은 고성하수처리시설 내 위치하고 있으며, 272m²의 면적에 5m³/일의 처리용량을 가지고 있는 시설이다.

2. 하수슬러지 처분에 대한 *emergy* 분석

하수슬러지의 처분에 관한 일반적인 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 4.1~4.4와 같고, 생태경제성 분석의 결과는 Table 4.1~4.4와 같다. 본 연구의 대상 범위는 공간적으로는 각 처분간의 처리시설 및 처리 해역을, 시간적으로는 2004년을 기준으로 평가하였다.

가. 해양배출

하수슬러지의 해양배출에 대한 생태경제성 분석을 실시한 결과를 각 에너지원 별로 실질적인 기여정도로 비교해보면, 하수슬러지 1톤을 해양에 배출할 경우 자연환경 에너지 중 가장 큰 기여를 하는 에너지원은 Table 4.1과 Fig. 4.5에서 나타난 바와 같이 조류로서 $5.85E+15\text{sej}$ 이고 이를 생태경제적 가치로 환산해보면 $2.80E+06$ 원이다. 경제활동에 의해서 유입되는 에너지원 중에 연료는 $1.30E+13\text{sej}$, 인건비는 $3.38E+12\text{sej}$, 관리비는 $7.92E+12\text{sej}$ 이며, 이를 생태경제적 가치로 환산하면 각각 $6.19E+03$ 원, $1.61E+03$ 원, $3.77E+03$ 원으로 나타났다. 시스템 내로 유입되는 자연환경 에너지와 경제활동에 의해서 발생하는 어획량은 $2.96E+15\text{sej}$ 으로 추정되며, 이를 생태 경제적 가치로 환산하면 $1.41E+06$ 원이다. 따라서 1톤의 하수슬러지를 해양처분 할 경우 이용되는 $5.99E+15\text{sej}$ 로 평가되었으며, 생태경제적 비용은 $2.85E+06$ 원으로 평가되었다. 하수슬러지의 처분방법 중 해양배출은 대부분이 자연환경에너지인 조류의 역할에 의해 처분되는 것으로 평가되었다.

나. 소각

하수슬러지의 소각처분에 대한 생태경제성 분석을 실시한 결과를 각 에너지원의 실질적인 기여정도로 비교해보면, 하수슬러지 1톤을 소각 처분할 경우 가장 큰 기여를 하는 에너지원은 Table 4.2와 Fig. 4.6에서 나타난 바와 같이 전기로서 $1.01E+14\text{sej}$ 이고 이를 생태경제적 가치로 환산해보면 $4.79E+04$ 원이다. 그 외의 경제활동에 의해서 유입되는 에너지 중에 연료는 $3.73E+13\text{sej}$, 관리비는 $5.32E+13\text{sej}$, 건설비는 $1.42E+13\text{sej}$ 이며, 이를 생태경제적 가치로 환산하면 $1.78E+04$ 원, $2.53E+04$ 원, $6.76E+03$ 원, $1.38E+04$ 원으로 나타났다. 하수슬러지의 소각처분을 위해 시스템 내로 유입되는 에너지로 인하여 발생하는 시멘트 원료물질은 $5.78E+12\text{sej}$ 이며, 이를 판매 시 발생하는 생태경제적 가치는 $2.75E+03$ 원인 것으로 평가되었다. 따라서 하수슬러지 처분방법 중 소각에 관여하는 모든 에너지는 경제활동에 의해서 유입되고 있으며, 그 중에서도 전기에너지의 영향을 가장 크게 받는 것으로 평가되었다.

다. 매립

하수슬러지의 매립처분에 대한 생태경제성 분석을 실시한 결과를 각 에너지원의 실질적인 기여정도로 비교해보면, 하수슬러지 1톤을 매립 처분할 경우 자연환경에너지 중 가장 큰 기여를 하는 에너지원은 Table 4.3과 Fig. 4.7에서 나타난 바와 같이 비의 화학적 에너지로서 $8.20E+10\text{sej}$ 이고, 이를 생태경제적 가치로 환산해보면 $3.90E+01$ 원이다. 그리고 경제활동에 의해서 유입되는 에너지 중 하수슬러지 1톤을 매립 처분할 경우 가장 큰 기여를 하는 외부 에너지원로서는 관리비용으로서 $2.69E+13\text{sej}$ 이고, 이를 생태경제적 가치로 환산해보면 $1.28E+04$ 원이다. 그 외의 경제활동에 의해서 유입되는 에너지 중에 연료는 $1.05E+13\text{sej}$, 전기는 $3.30E+13\text{sej}$, 매립장 건설비는 $5.18E+12\text{sej}$, 인건비는 $3.79E+12\text{sej}$ 이며, 이를 생태경제적 가치로 환산하면 $4.99E+08$ 원, $1.57E+04$ 원, $2.47E+03$ 원, $1.80E+03$ 원으로 나타났다. 하수슬러지의 매립처분으로 인해 발생하는 메탄가스를 이용하여 생산된 전기에너지는 $1.85E+12\text{sej}$ 이며, 발전된 전기를 판매할 때 발생하는 생태경제적 가치는 $8.79E+02$ 원인 것으로 평가되었다. 따라서 하수슬러지의 처분방법 중 매립은 대부분이 경제활동에 의해 유입되는 매립장 관리에 이용되는 에너지에 의해 하수슬러지가 처분되는 것으로 평가되었으며, 자연환경에너지인 비의 화학적 에너지의 역할은 미미한 것으로 평가되었다.

라. 퇴비화(부숙토)

하수슬러지의 퇴비화처분에 대한 생태경제성 분석을 실시한 결과 각 에너지원의 실질적인 기여정도를 비교해보면, 하수슬러지의 퇴비화에 기여하고 있는 경제활동에 의해서 유입되는 에너지 중 하수슬러지 1톤을 퇴비화 할 경우 가장 큰 기여를 하는 에너지원은 Table 4.4와 Fig. 4.8에서 나타난 바와 같이 전기로서 $5.90E+14\text{sej}$ 이고, 이를 생태경제적 가치로 환산해보면 $2.81E+05$ 원이다. 그 외의 경제활동에 의해서 유입되는 에너지 중에 관리비는 $1.05E+13\text{sej}$, 건설비는 $6.56E+13\text{sej}$, 인건비는 $5.26E+13\text{sej}$ 이며, 이를 생태경제적 가치로 환산하면 $5.01E+03$ 원, $3.12E+04$ 원, $2.50E+04$ 원으로 평가되었다. 하수슬러지의 퇴비화를 위해 시스템 내로 유입되는 에너지로 인하여 발생하는 부숙토는 $3.13E+13\text{sej}$ 이며, 이를 판매할 때 발생하는 생태경제적 가치는 $1.49E+04$ 원인 것으로 평가된다. 따라서 하수슬러지 처분 방법 중 퇴비화는 대부분이 경제활동

에 의해 유입되는 전기 에너지에 기인한 것으로 평가된다.

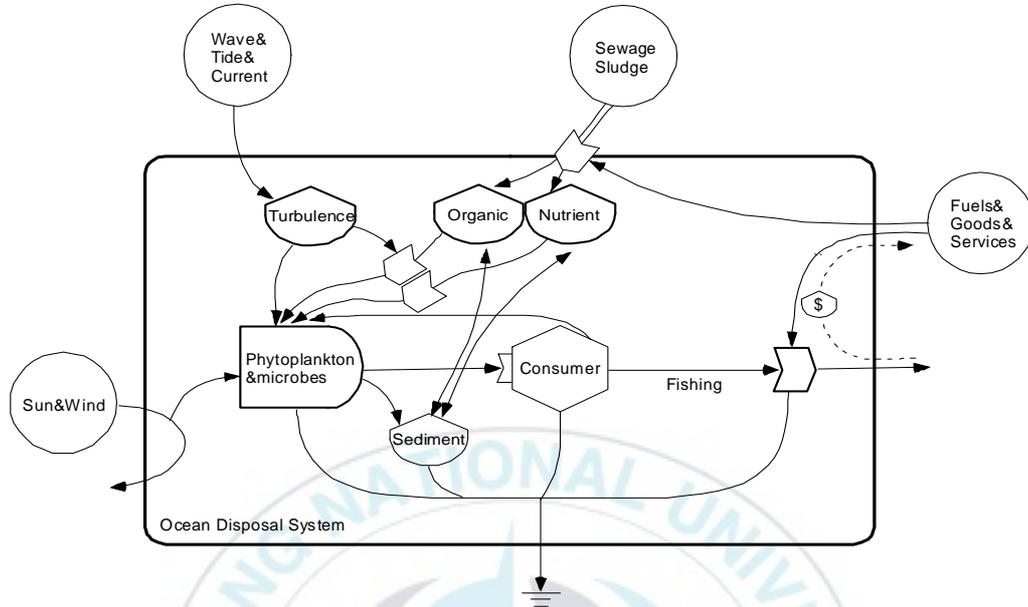


Fig. 4.2 Energy system diagram of ocean disposal of sewage sludge.

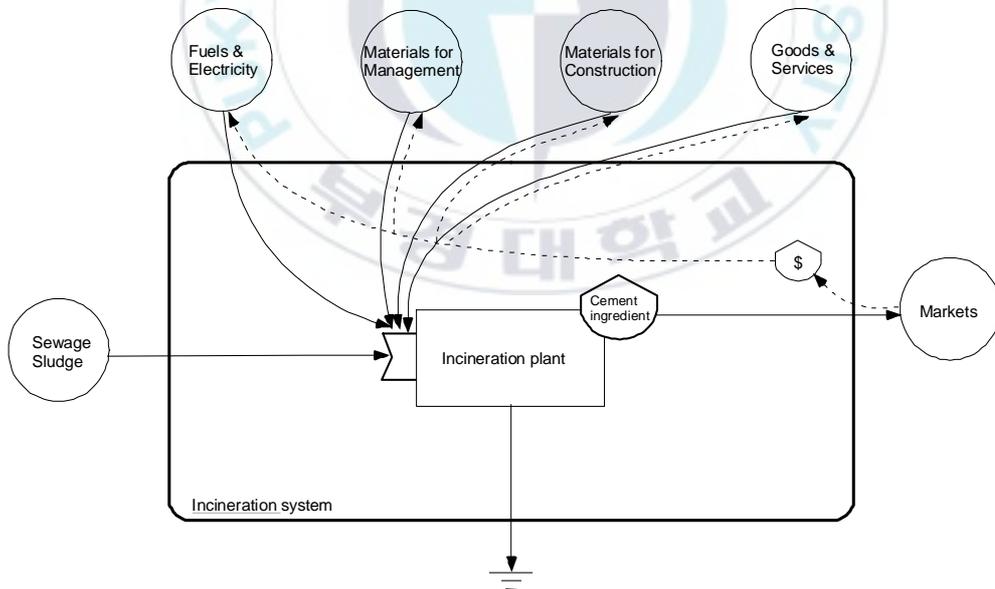


Fig. 4.3 Energy system diagram of incineration of sewage sludge.

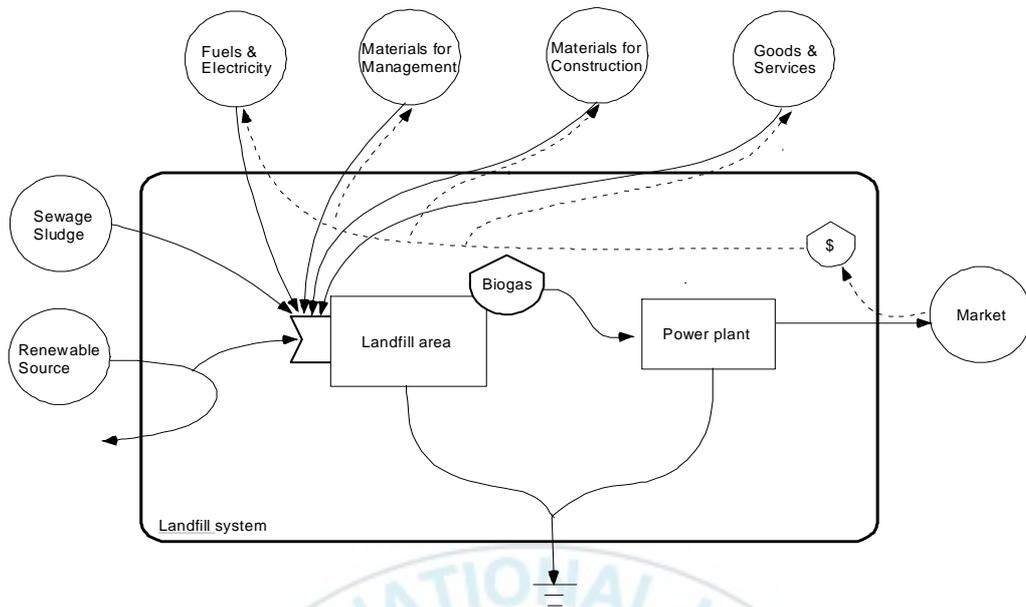


Fig. 4.4 Energy system diagram of landfill of sewage sludge.

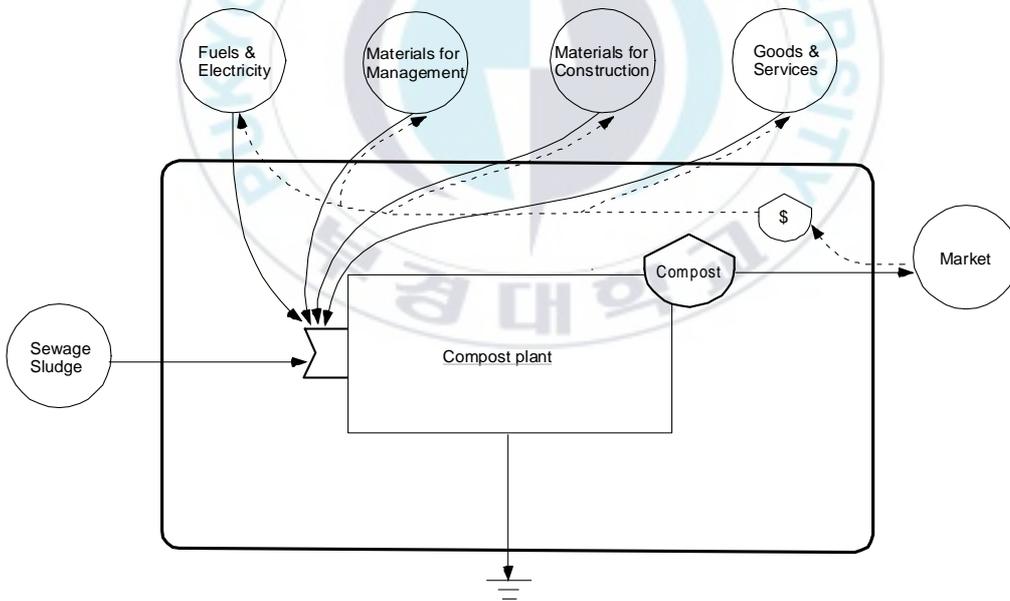


Fig. 4.5 Energy system diagram of compost of sewage sludge.

Table 4.1 Emergy evaluation of ocean disposal with 1ton of sewage sludge

<i>Note</i>	<i>Item</i>	<i>Data</i>	<i>Raw Units</i> <i>(J or won/ton)</i>	<i>Transformity</i> <i>(sej/unit)</i>	<i>Solar Emery</i> <i>(sej/ton)</i>	<i>Ecological Econmic Value</i> <i>(Emwons/ton)</i>
RENEWABLE RESOURCES						
1	Sun	1.07E+13	J/ton	1	1.07E+13	5.12E+03
2	Wind	1.23E+10	J/ton	2.51E+03	3.08E+13	1.47E+04
3	Waves	1.13E+11	J/ton	5.13E+04	5.81E+15	2.76E+06
4	Tide	7.96E+10	J/ton	7.39E+04	5.89E+15	2.80E+06
5	Ocean current	6.31E+06	J/ton	1.84E+07	1.16E+14	5.53E+04
IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES						
6	Fuel, oil	1.17E+08	J/ton	1.11E+05	1.30E+13	6.19E+03
GOODS & SERVICES						
7	Labors	1.61E+03	won/ton	2.10E+09	3.38E+12	1.61E+03
8	Cost for Management	3.77E+03	won/ton	2.10E+09	7.92E+12	3.77E+03
PRODUCTION						
9	Fisheries Production	8.84E+08	J/ton	3.35E+06	2.96E+15	1.41E+06

Table 4.2 Emergy evaluation of incineration with 1ton of sewage sludge

<i>Note</i>	<i>Item</i>	<i>Data</i>	<i>Raw Units</i> (J or won/ton)	<i>Transformity</i> (sej/unit)	<i>Solar Emergy</i> (sej/ton)	<i>Ecological Econmic Value</i> (Emwons/ton)
RENEWABLE RESOURCES						
IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES						
1	Fuel & Electricity					
	Fuels	3.36E+08	J/ton	1.11E+05	3.73E+13	1.78E+04
	Electricity	3.46E+08	J/ton	2.91E+05	1.01E+14	4.79E+04
2	Cost for Management	2.53E+04	won/ton	2.10E+09	5.32E+13	2.53E+04
3	Cost for Construction	6.76E+03	won/ton	2.10E+09	1.42E+13	6.76E+03
GOODS & SERVICES						
4	Labors	1.38E+04	won/ton	2.10E+09	2.91E+13	1.38E+04
PRODUCTION						
5	Cement Ingredient	2.75E+03	won/ton	2.10E+09	5.78E+12	2.75E+03

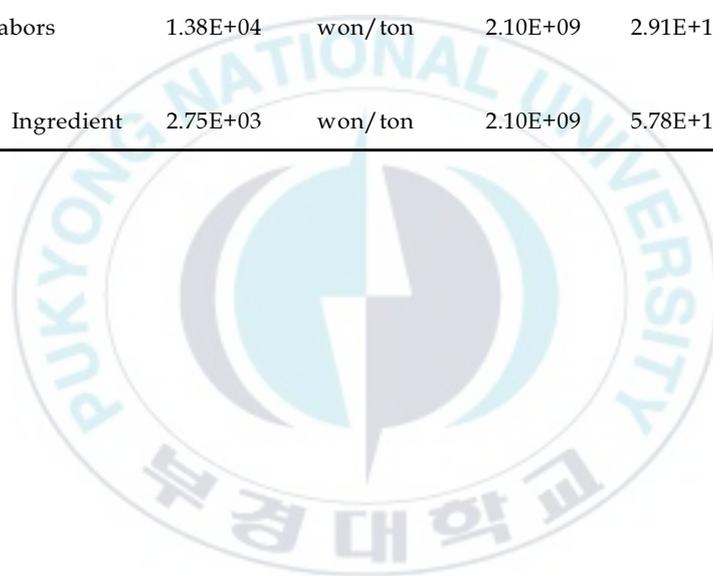
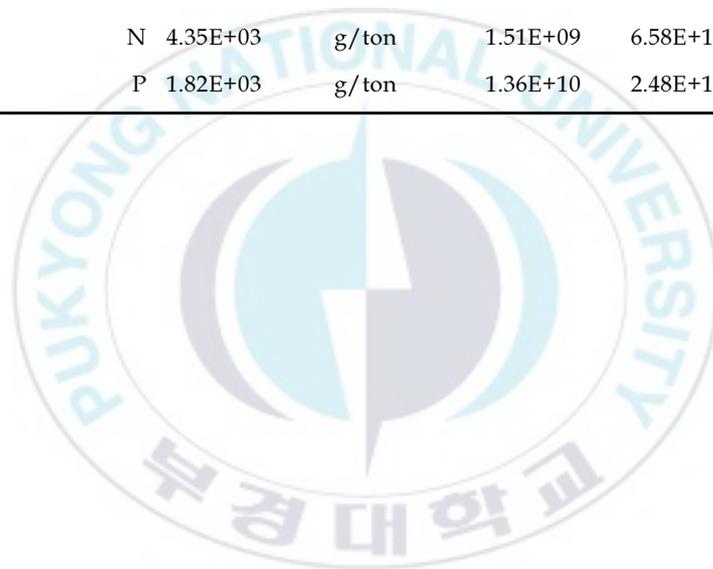


Table 4.3 Emergy evaluation of landfill with 1ton of sewage sludge

<i>Note</i>	<i>Item</i>	<i>Data</i>	<i>Raw Units</i> (J or won/ton)	<i>Transformity</i> (sej/unit)	<i>Solar Emery</i> (sej/ton)	<i>Ecological Econmic Value</i> (Emwons/ton)
RENEWABLE RESOURCES						
1	Sun	2.61E+09	J/ton	1	2.61E+09	1.24E+00
2	Wind	2.67E+06	J/ton	2.51E+03	6.71E+09	3.19E+00
3	<i>Rain, chemical</i>	2.63E+06	J/ton	3.12E+04	8.20E+10	3.90E+01
4	Rain, geo-potential	1.67E+06	J/ton	4.68E+04	7.82E+10	3.72E+01
IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES						
5	Fuel&Electricity					
	Fuels	9.45E+07	J/ton	1.11E+05	1.05E+13	4.99E+03
	Electricity	1.13E+08	J/ton	2.91E+05	3.30E+12	1.57E+04
6	Cost for management					
	landfill-cover soil	1.49E+05	g/ton	1.24E+05	1.85E+10	8.82E+00
	machine	1.98E+02	won/ton	2.10E+09	4.15E+11	1.98E+02
	solidification	9.36E+03	won/ton	2.10E+09	1.96E+13	9.36E+03
	leachate treatment	3.23E+03	won/ton	2.10E+09	6.78E+12	3.23E+03
7	Cost for Construction					
	landfill	2.52E+02	won/ton	2.10E+09	5.29E+11	2.52E+02
	solidification	8.50E+02	won/ton	2.10E+09	1.78E+12	8.50E+02
	leachate treatment	1.37E+03	won/ton	2.10E+09	2.87E+12	1.37E+03
GOODS & SERVICES						
8	Labors	1.80E+03	won/ton	2.10E+09	3.79E+12	1.80E+03
PRODUCTION						
9	Electricity from biogas	6.35E+06	J/ton	2.91E+05	1.85E+12	8.79E+02

Table 4.4 Emergy evaluation of compost with 1ton of sewage sludge

<i>Note</i>	<i>Item</i>	<i>Data</i>	<i>Raw Units</i> (J or won/ton)	<i>Transformity</i> (sej/unit)	<i>Solar Emergy</i> (sej/ton)	<i>Ecological Econmic Value</i> (Emwons/ton)
RENEWABLE RESOURCES						
IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES						
1	Electricity	2.03E+09	J/ton	2.91E+05	5.90E+14	2.81E+05
2	Cost for Management	5.01E+03	won/ton	2.10E+09	1.05E+13	5.01E+03
3	Cost for Construction	3.12E+04	won/ton	2.10E+09	6.56E+13	3.12E+04
GOODS & SERVICES						
4	Labors	2.50E+04	won/ton	2.10E+09	5.26E+13	2.50E+04
PRODUCTION						
5	Biosoils					
		N 4.35E+03	g/ton	1.51E+09	6.58E+12	3.13E+03
		P 1.82E+03	g/ton	1.36E+10	2.48E+13	1.18E+04



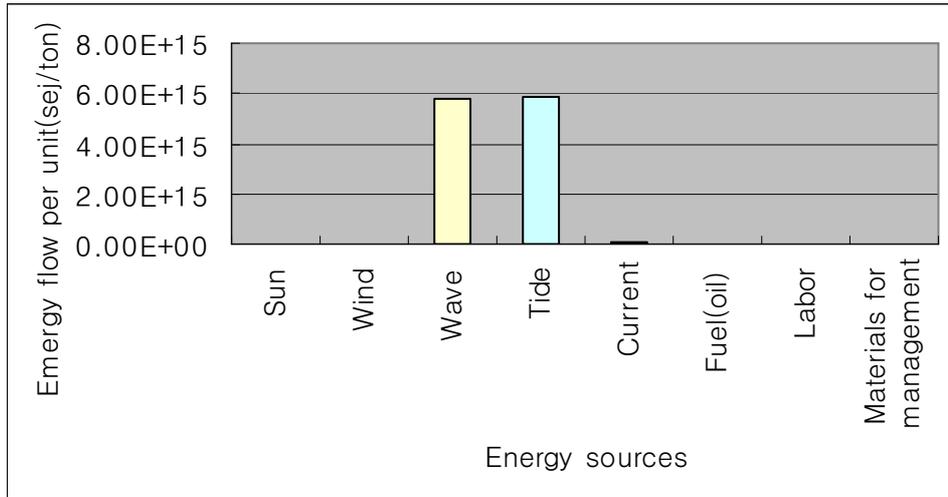


Fig. 4.6 Energy sources signature of ocean disposal with 1ton of sewage sludge.

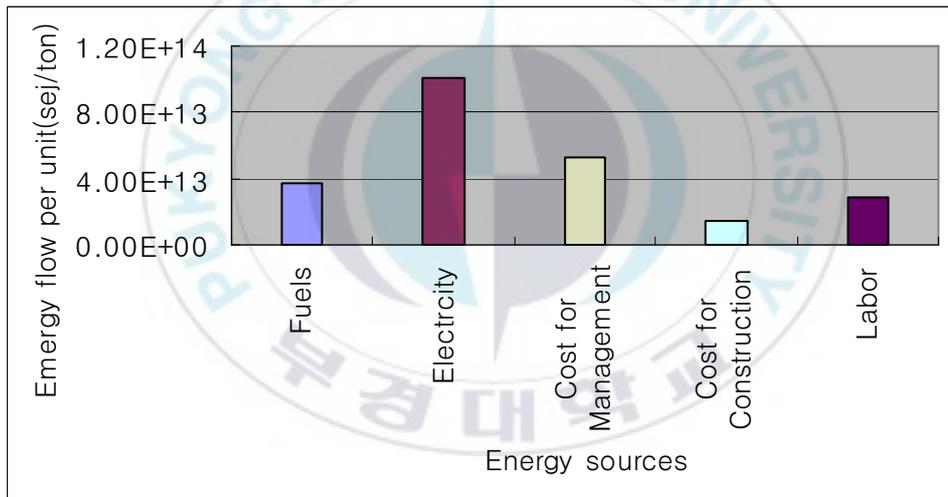


Fig. 4.7 Energy sources signature of incineration with 1ton of sewage sludge.

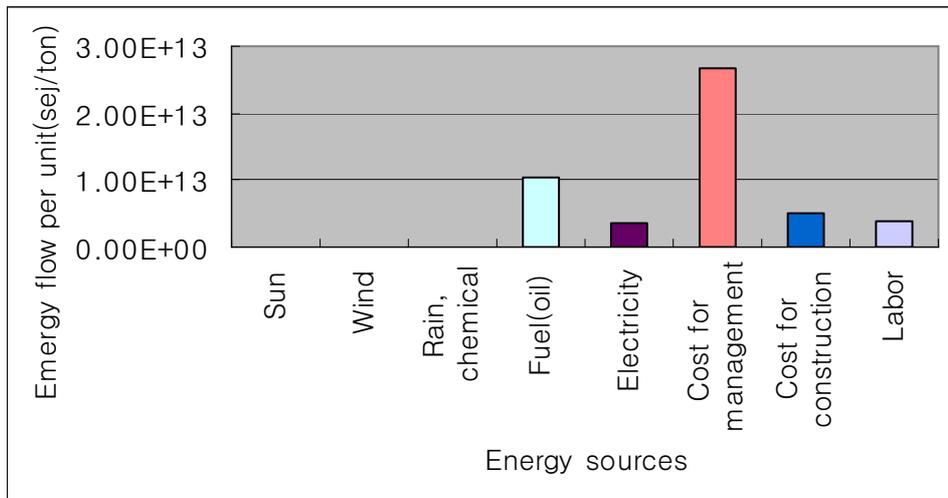


Fig. 4.8 Energy sources signature of landfill with 1ton of sewage sludge.

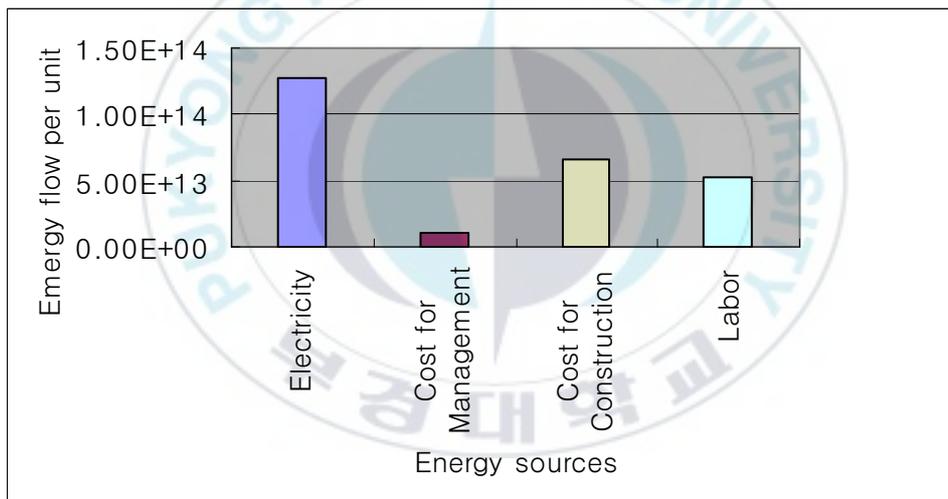


Fig. 4.9 Energy sources signature of compost with 1ton of sewage sludge.

3. 하수슬러지 처분에 대한 효율성 평가

하수슬러지의 각 처분 방법에 대한 energy 분석 결과로부터 산출된 energy 지수는 Table 4.5와 같다.

가. 해양배출

하수슬러지의 해양배출에 대한 energy 지표는 <Table 4.5>와 같다. 하수슬러지의 해양배출을 하기 위해 시스템 내로 유입되는 전체 energy양은 톤당 $5.91E+15$ sej이었고, 자연환경 에너지원의 의존도가 높은 구조적인 특성을 잘 반영하고 있다. 이는 하수슬러지를 해양배출 할 때 석유와 같은 재생 불가능한 에너지보다는 조류와 같은 재생 가능한 에너지 즉 자연환경 자원에 의해 하수슬러지의 해양배출이 이루어지고 있음을 나타내고 있음을 의미한다.

하수슬러지 해양배출에 관한 Energy 생산비(EYR)는 $1.22E+02$ 로서 하수슬러지의 해양배출을 위해 경제활동에서 유입되는 총 energy 양에 비하여 생산되는 energy 양이 더 많음을 알 수 있으며, 선행연구와 비교해 볼 때 EYR이 1이상일 경우 효율적인 시스템이라고 평가되므로 하수슬러지의 해양배출은 매우 효율적이라고 할 수 있다.

나. 소각

하수슬러지의 소각처분에 대한 energy 지표는 <Table 4.5>와 같다. 하수슬러지의 소각처분을 하기 위해 시스템 내로 유입되는 전체 energy양은 톤당 $2.34E+14$ sej이었고, 하수슬러지를 소각 처분할 때 자연환경에너지는 전혀 이용되지 않고 있으며, 전기와 같은 재생 불가능한 에너지를 이용하여 전량 처리되고 있음을 나타내고 있다.

하수슬러지의 소각처분에 관한 Energy 생산비(EYR)는 $2.46E-02$ 로서 하수슬러지의 소각처분을 위해 경제활동에서 유입되는 총 energy 양이 생산되는 energy양에 비하여 더 많음을 알 수 있으며, 선행연구와 비교해 볼 때 EYR이 1이하이므로 하수슬러지의 소각처분은 비효율적인 처분방법이라 할 수 있다.

다. 매립

하수슬러지의 매립처분에 대한 emergy 지표는 <Table 4.5>와 같다. 하수슬러지의 매립처분을 하기 위해 시스템 내로 유입되는 전체 emergy양은 톤당 $7.94E+13$ sej이었고, 자연환경에 대한 의존도 보다는 경제활동에서 유입되는 에너지에 대해 의존도가 높은 구조적인 특성을 나타내고 있다. 이는 하수슬러지를 매립 처분할 때 경제활동에서 유입된 에너지에 의해서 하수슬러지의 매립처분이 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

하수슬러지의 매립처분에 관한 Emergy 생산비(EYR)는 $2.33E-02$ 로서 하수슬러지의 매립처분을 위해 경제활동에서 유입되는 총 emergy 양이 생산되는 emergy양에 비하여 더 많음을 알 수 있으며, 선행연구와 비교해 볼 때 EYR이 1이하이므로 하수슬러지의 매립처분은 비효율적인 처분방법이라 할 수 있다.

라. 퇴비화(부숙도)

하수슬러지의 퇴비화 처분에 대한 emergy 지표는 <Table 4.5>와 같다. 하수슬러지의 퇴비화 처분을 하기 위해 시스템 내로 유입되는 전체 emergy양은 톤당 $7.18E+14$ sej이었고, 하수슬러지를 퇴비화 처분할 때 자연환경에너지 보다는 퇴비화 공정을 위한 건조과정에서 전기와 같은 재생 불가능한 에너지를 이용하여 전량 처리되고 있음을 나타내고 있다.

하수슬러지의 퇴비화 처분에 관한 Emergy 생산비(EYR)는 $4.36E-02$ 로서 하수슬러지의 퇴비화 처분을 위해 경제활동에서 유입되는 총 emergy 양이 생산되는 emergy 양에 비하여 더 많음을 알 수 있으며, 선행연구와 비교해 볼 때 EYR이 1이하이므로 하수슬러지의 퇴비화처분은 비효율적인 처분방법이라 할 수 있다.

Table 4.5 Comparison of indices using energy for overview of the four disposals with 1ton of sewage sludge

No.	Name of Index	Expression	Use(sej/ton)			
			Ocean disposal	Incineration	Landfill	Compost
1	Renewable sources	R	5.89E+15	-	8.20E+10	-
2	Purchased input	F	2.43E+13	2.34E+14	7.93E+13	7.18E+14
3	Yield	Y	2.96E+15	5.78E+12	1.85E+12	3.13E+13
4	EYR	Y/F	1.22E+02	2.46E-02	2.33E-02	4.36E-02

4. 하수슬러지 처분에 대한 생태경제성 평가

가. 해양배출

하수슬러지의 해양배출에 관한 생태경제적 비용-편익 분석은 Table 4.6과 같다. 자연환경의 조류와 경제활동에 의해 유입되는 연료, 인건비, 관리비를 모두 포함하여 하수슬러지의 해양배출에 이용되는 총 생태경제적 비용은 톤당 2,810,000원이 소요되었으며, 해양생산활동을 통해 톤당 1,410,000원의 편익이 발생됨을 알 수 있었다. 하지만 처분비용 중 99.9%이상이 자연환경활동에 의한 비용이므로, 자연환경의 역할을 화폐비용으로 고려하지 않았을 때의 경제적 비용은 톤당 11,600원이 소요되는 것으로 평가되었다. 하수슬러지의 해양배출로 인하여 발생하는 편익이 처분에 이용되는 총비용보다 1,398,400원이 더 많은 것을 나타냈다. 이를 볼 때 하수슬러지의 해양배출은 자연환경의 역할에 의존하여 경제적 비용을 절감하고 해역의 생산을 증가시키고 있음을 알 수 있다.

나. 소각

하수슬러지의 소각처분에 관한 생태경제적 비용-편익 분석은 Table 4.7과 같다. 연료, 전기비, 관리비, 건설비를 포함한 처분에 관한 총 생태경제적 비용은 톤당 112,000원이 소요되었으며, 소각활동을 통해 발생된 시멘트원료물질은 처리공정을 거친 후 시멘트의 생산 공정에 원료로서 이용되어 톤당 2,750원의 편익이 발생됨을 알 수 있었다. 하수슬러지의 소각처분 시 소요되는 비용 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 전기에너지이며, 하수슬러지를 처분하는데 들어가는 총비용이 처분에 의해 발생하는 총 편익보다 톤당 109,250원이 더 많은 것으로 나타났다.

다. 매립

하수슬러지의 매립처분에 관한 생태경제적 비용-편익 분석은 Table 4.8과 같다. 자연환경의 비의 화학적 에너지를 거시적 가치로 환산한 비용과 경제활동에 의해 유발되는 연료비, 전기세, 관리비, 건설비, 인건비를 포함한 처분에 관한 총 경제적 비용은 톤당 37,800원이 소요되었으며, 매립활동을 통해 생산된 바이오 가스는 발전장치를 이용하여 전기로 생산되어 톤당 879원의 편익이 발생됨을 알 수 있었다. 하수슬러지의 매립 시 소요되는 비용 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 매립을 위한 관리비용이었으며, 하수슬러지 매립 처분에 대해 자연환경의 역할인 비의 화학적 에너지의 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 하수슬러지를 처분하는데 들어가는 총비용이 처분에 의해 발생하는 총 편익보다 톤당 36,921원이 더 많은 것을 나타냈다.

라. 퇴비화(부숙토)

하수슬러지의 퇴비화처분에 관한 생태경제적 비용-편익 분석은 Table 4.9와 같다. 연료비, 전기세, 관리비, 건설비, 인건비를 포함한 처분에 관한 총 생태경제적 비용은 톤당 342,000원이 소요되었으며, 퇴비화를 통해 생산된 부숙토 판매함으로써 톤당 14,900원의 편익이 발생됨을 알 수 있었다. 하수슬러지의 퇴비화처분을 할 때 소요되는 비용 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 전기사용이었으며, 하수슬러지를 처분하는데 들어가는 총비용이 처분에 의해 발생하는 총 편익보다 328,100원이 더 많은 것을 나타냈다.

Table 4.6 Environmental accounting of the ocean disposal with 1ton of sewage sludge

<i>Item</i>	<i>Environmental Cost (Emwons/ton)</i>	<i>Environmental Benefit (Emwons/ton)</i>
Fuels	6,190	
Labors	1,610	
Cost for management	3,770	
Fisheries Production		1,410,000
Total(Emwons/ton)	11,600	1,410,000
Net-Benefit(Emwons/ ton)		1,398,400

Table 4.7 Environmental accounting of the incineration with 1ton of sewage sludge

<i>Item</i>	<i>Environmental Cost (Emwons/ton)</i>	<i>Environmental Benefit (Emwons/ton)</i>
Fuels&Electricity	65,700	
Cost for management	25,300	
Cost for constriction	6,760	
Labors	13,800	
Cement ingredient		2,750
Total(Emwons/ton)	112,000	2,750
Net-Cost(Emwons/ton)	109,250	

Table 4.8 Environmental accounting of the landfill with 1ton of sewage sludge

<i>Item</i>	<i>Environmental Cost</i> <i>(Emwons/ton)</i>	<i>Environmental Benefit</i> <i>(Emwons/ton)</i>
Fuels&Electricity	20,700	
Cost for management	12,800	
Cost for constriction	2,470	
Labors	1,800	
Electricity from biogas		879
Total(Emwons/ton)	37,800	879
Net-Cost(Emwons/ton)	36,921	

Table 4.9 Environmental accounting of the compost with 1ton of sewage sludge

<i>Item</i>	<i>Environmental Cost</i> <i>(Emwons/ton)</i>	<i>Environmental Benefit</i> <i>(Emwons/ton)</i>
Electricity	281,000	
Cost for management	5,010	
Cost for constriction	31,200	
Labors	25,000	
Compost(Biosoil)		14,900
Total(Emwons/ton)	342,000	14,900
Net-Cost(Emwons/ton)	328,100	

V. 결 론

하수슬러지의 발생량이 매년 증가하고 있는 현실에서 하수슬러지의 처분을 위한 해양배출, 소각, 매립, 퇴비화에 대한 효율성의 재검토가 필요하다. 이에 자연환경의 역할과 경제활동을 모두 고려할 수 있는 emergy 분석법을 이용하여 생태경제성 분석을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하수슬러지 처분에 대해 emergy 분석을 실시한 결과 자연환경 에너지원의 emergy 점유율(% Renew)은 해양배출, 매립, 소각 및 퇴비화 순으로 나타났다.

하수슬러지를 처리하는데 해양배출의 경우 자연환경의 의존도가 높은 구조적 특성을 잘 반영하고 있으며, 이는 하수슬러지를 해양 배출할 때 석유와 같은 재생 불가능한 에너지보다는 조류 및 해류와 같은 재생 가능한 에너지 즉 자연환경 자원에 의해 하수슬러지의 해양처분이 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

매립처분의 경우는 이용된 자연 환경에너지보다는 매립장 건설과 관리비용에 의해서 하수슬러지의 매립처분이 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

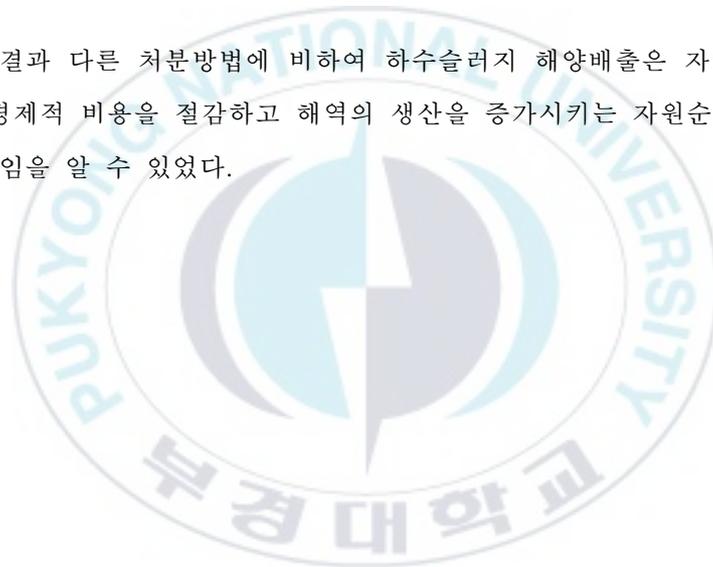
소각 및 퇴비화처분의 경우 자연환경에너지를 전혀 이용하지 않고, 전기와 같은 재생 불가능한 에너지만을 이용하여 하수슬러지의 소각 및 퇴비화처분이 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

2. Emergy 분석 결과를 바탕으로 emergy 지수를 산출해 본 결과, 시스템의 생산성을 나타내는 EYR은 해양배출 : $1.22E+02$ 소각 : $2.46E-02$, 매립 : $2.33E-02$, 퇴비화 : $4.36E-02$ 로 나타났다.

해양배출의 경우 하수슬러지를 처리할 때 경제활동에서 유입되는 총 emergy 양에 비하여 생산되는 emergy 양이 약 122배의 생산성을 가지는 것을 나타냈으므로 다른 처분 방법에 비하여 효율적인 시스템으로 평가되었다. 이에 반해 그 외의 처분방법인 소각, 매립, 퇴비화의 경우 $2.46E-02$, $2.33E-02$, $4.36E-02$ 로 경제활동에서 유입되는 총 emergy 양에 비하여 생산되는 emergy 양이 적으므로 효율적이지 못한 시스템으로 평가되었다.

3. 비용-편익 분석 결과를 바탕으로 생태경제성을 평가한 실시한 결과, 하수슬러지 1톤을 해양배출 하는데 이용된 총비용은 11,600 Emwon, 소각 시 이용되는 총비용은 112,000 Emwon, 매립 시 이용되는 총비용은 37,800 Emwon, 퇴비화 시 이용되는 총비용은 342,000 Emwon이었다. 그리고 하수슬러지 1톤을 처분하는데 해양배출 : 1,410,000 Emwon, 소각 : 2,750 Emwon, 매립 : 879 Emwon, 퇴비화 : 14,900 Emwon의 편익이 발생되었다. 분석된 비용과 편익을 바탕으로 생태경제성평가를 실시한 결과, 해양배출의 경우 처분을 위하여 소요되는 비용보다는 이로 인해 발생하는 편익이 톤당 1,398,400Emwon이 발생한다는 것을 알 수 있었고, 소각, 매립, 퇴비화의 경우 처분을 위하여 소요되는 비용이 이로 인해 발생하는 편익에 비하여 109,250Emwon, 36,921Emwon, 328,100Emwon 만큼 더 소요되는 것을 알 수 있었다.

4. 본 연구의 결과 다른 처분방법에 비하여 하수슬러지 해양배출은 자연환경의 역할에 의존하여 경제적 비용을 절감하고 해역의 생산을 증가시키는 자원순환형이고 생태경제적인 방법임을 알 수 있었다.



Appendix

Appendix 1. Solar transformity used in emergy evaluation of disposal with 1ton of sewage sludge.

Energy Sources	Solar Transformity(sej/J)
Sunlight	1
Wind, kinetic energy	2.51E+03
Rain, chemical	3.06E+04
Rain, geopotential	4.68E+04
Waves	5.13E+04,
Tide	7.39E+04
Current	1.84E+07
<i>Petroleum Products</i>	1.11E+05
<i>Top Soil</i>	1.24E+05
Electricity	2.91E+05
<i>EMR(Emergy/won)*</i>	2.10E+09

*Emergy/won is calculated in evaluation of Je-ju Island(proceeding) by Kim(최, 2003)

Appendix 2. Footnote of Emergy evaluation of ocean disposal with 1ton of sewage sludge

RENEWABLE RESOURCES

1 Sun

Area of marine = 6.87E+09 m² (www/oceanpumping.re.kr)
 Insolation = 4.18E+09 J/m²/yr (Korea meteorological administration, 2005, Annual climatological report)
 Albedo = 0.3 (% given as a decimal)
 Energy(J) = (Marine Area)*(Insolation)*(1-Albedo)
 = (_m2)*(J/m2/yr)*(1-0.3)
 = 2.01E+19 J/yr
 Transformity = 1 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

2 Wind

Area of marine = 6.87E+09 m²
 Density = 1.23E+00 kg/m³
 Avg.wind speed = 2.65E+00 m/s (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)
 Geostrophic Wind speed= 4.42E+00 m/s (observed wind is about 0.6 of geostrophic wind)
 Drag Coeff. = 1.00E-03
 Energy (J) = (Land Area)*(Air Density)*(Drag Coeff.)*(Geo.wind speed³)
 = (_m^2)*(1/8)*(1025kg/m^3)*(9.81m/sec^2)*((_m)^2)*(_m/sec)*(31536000sec/yr)
 = 2.29E+16 J/yr
 Transformity = 2.51E+03 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

3 Wave

Length = m (www/oceanpumping.re.kr)
 East sea = 1.11E+05
 West sea = 8.33E+04
 Average Wave Height= m (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)
 East sea = 2.92E+00
 West sea = 1.00E+00
 Energy (J) = (Shore Length)*(1/8)*(Density)*(Gravity)*((Avg. Wave Height)²)*(Velocity)
 = (_m)*(1/8)*(1025kg/m^3)*(9.81m/sec^2)*((_m)^2)*(_m/sec)*(31536000sec/yr)
 Energy (J) =
 East sea = 2.01E+17 J/yr
 West sea = 1.03E+16 J/yr
 Transformity = 5.13E+04 sej/J (Odum H. T et al., 2000, Handbook of emergy evaluation)

4 Tide

Area elevated = m²
 East sea = 2.52E+09 (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)
 West sea = 3.09E+09
 Average Tide = m
 East sea = 3.00E-01
 West sea = 4.00E+00
 Density = 1.03E+03 kg/m³
 Tide/year = 7.30E+02 (estm. of 2 tides/day in 365days)
 Energy (J) = (Area elevated)*(Tides/yr)*((Avg.Tide)²)*(Density)*(Gravity)
 = (_m^2)*(0.5)*(_/yr)*(_m)^2*(1025kg/m^3)*(9.81m/sec^2)
 Energy (J) = J/yr
 East sea = 8.33E+14
 West sea = 1.48E+17
 Transformity = 7.39E+04 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

<계속>

5 Current energy

Velocity of moving fluid = 2.30E-01 m/sec (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)

area = 3.70E+03 km²
= 3.70E+09 m²

depth = 1.00E+02 m

kinetic energy during year = (Area)*(Depth)*(1.025E+03kg/m³)*(Velocity of moving fluid)²
= 2.01E+13

Rate of replacement turnover from velocity and entr section = $\frac{(\text{Velocity of moving fluid}) * (3.15E+07 \text{sec/yr}) * (\text{depth}) * (100E+03)}{(\text{Area}) * (\text{Depth})}$
= 1.96E+02 times/yr

Energy = 3.93E+15 J/yr

Transformity = 1.84E+07 sej/J (Odum H. T. et al. 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador)

IMPORTS&OUTSIDE SOURCES

6 Fuels

Total fuels used for disposal = 6.07E+09 won/yr (Ministry of marine affairs & fisheries, 2005, Waste ocean disposal comprehensive management system construction)

Energy content per liter fuels(Diesel+Bunker a) = 9.30E+03 kcal/ℓ (Ministry of commerce, industry and energy, 2005, Yearbook of energy statistics)

fuel price = 7.41E-04 ℓ /won

Conversion factor = 4186 J/kcal

Total energy input = 2.19E+14 J/yr

Transformity = 1.11E+05 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

GOODS&SERVICES

7 Labor

Cost = 3.01E+09 won/yr (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)

EMR = 2.10E+09 sej/J

8 Cost for management

Cost = 7.05E+09 won/yr (National fisheries research and development institute, 2005, Annual report of oceanographic observations)

EMR = 2.10E+09 sej/J

PRODUCTION

9 Fisheries production

N in sewage sludge = 3.24 % (Bae , 1994, A Study on Investigation of Properties and Treatment Methods for Sewage Sludge)

P in sewage sludge = 0.22 %

P = 4.11E+03 ton/yr

Estimated fisheries production = 3.95E+05 ton/yr (Lee, 1998, A study on the ocean dumping of night soil)

Energy (J) = (Production)*(Energy Content)
= (_ton)*(1.00E+06g/ton)*(20%)*(5.0kcal/g)*(4186J/kcal)
= 1.65E+15 J/yr

Transformity = 3.35E+06 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

Footnote of Emergy evaluation of incineration with 1ton of sewage sludge

IMPORTS&OUTSIDE SOURCES

1	Fuels&Electricity			
	Fuels			
	Total fuels used for Incineration	= 7.64E+03	won/ton	(Internal data of Gu-ri environmental affairs agency , 2004)
		= 1/875.59	ℓ /won	(Korea national oil corporation
		= 8.73E+00	ℓ /ton	http://www.konetic.or.kr, 2005)
	Energy content per liter			
	fuels(Diesel)	= 9.20E+03	kcal/ ℓ	
	Conversion factor	= 4186	J/kcal	
	Total energy input	= 3.36E+08	J/ton	
	Transformity	= 1.11E+05	sej/J	(Odum, 1996, Environmental accounting)
	Electricity			
	Electricity	= 2.10E+00	Gwh/yr	(Internal data of Gu-ri environmental affairs agency&Waste treatment workshop , 2004)
		= 9.60E-05	Gwh/ton	
	Conversion factor	= 3.60E+12	J/Gwh	
	Total energy input	= 3.46E+08	J/ton	
	Transformity	= 2.91E+05	sej/J	(Odum, 1996, Environmental accounting)
2	Cost for Management			
	Cost for management	= 2.53E+04	won/ton	(Internal data of Gu-ri environmental affairs agency , 2004)
	EMR	= 2.10E+09	sej/won	
3	Cost for Construction			(Internal data of Gu-ri environmental affairs agency , 2004)
	Cost for construction	= 3.46E+09	won	
	Lifetime	= 20	yr	
	Cost for construction per year	= 1.73E+08	won/yr	
	Cost for construction per ton	= 6.76E+03	won/ton	
	EMR	= 2.10E+09	sej/won	
GOODS&SERVICES				
4	Labor			
	Cost	= 1.38E+04	won/ton	
	EMR	= 2.10E+09	sej/won	
PRODUCTION				
5	Ash production			
	Sewage sludge	= 2.19E+04	ton/yr	
	Ash mass	= 2.19E+03	ton/yr	(Internal data of Gu-ri environmental affairs agency , 2004)
	Selling prices of ash per ton	= 27500	won/ton	
	Selling prices of ash	= 6.02E+07	won/yr	
	Selling prices of ash per ton	= 2.75E+03	won/ton	
	EMR	= 2.10E+09	sej/won	

Footnote of Energy evaluation of landfill with 1ton of sewage sludge

RENEWABLE RESOURCES

1 Sun

Area of land = 7.80E+07 m² (Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)

Insolation = 4.40E+09 J/m²/yr (Korea meteorological administration, 2005, Annual climatological report)

Albedo = 0.3 (% given as a decimal)

Energy(J) = (Marine Area)*(Insolation)*(1-Albedo)
 = (_m2)*(_J/m2/yr)*(1-0.3)
 = 2.40E+17 J/yr

Transformity = 1 sej/J (Odum, 1996, Environmental accounting)

2 Wind

Area of land = 7.80E+07 m²

Density = 1.23E+00 kg/m³

Avg.wind speed = 2.60E+00 m/s (Korea meteorological administration, 2005, Annual climatological report)

Geostrophic Wind speed= 4.33E+00 m/s (observed wind is about 0.6 of geostrophic wind)

Drag Coeff. = 1.00E-03

Energy (J) = (Land Area)*(Air Density)*(Drag Coeff.)*(Geo.wind speed³)
 = (_m²)*(1/8)*(1025kg/m³)*(9.81m/sec²)*((_m)²)*(_m/sec)
 *(31536000sec/yr)
 = 2.46E+14 J/yr

Transformity = 2.51E+03 sej/J

3 Rain, chemical

Area of land = 7.80E+07 m² (Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)

Rainfall = 1.40 m/yr

Evapotranspiration = 0.63 m/yr (est as 45% of decimal)

Energy (J) = (Area of land)*(Evapotranspiration Rate)*(Gibbs free energy)
 = (_m²)*(_m)*(1000kg/m³)*(4.94E+03J/kg)

Energy (J) = 2.42E+14 J/yr

Transformity = 3.12E+04 sej/J

4 Rain, geopotential

Area of land = 7.80E+07 m²

Rainfall = 1.40 m/yr

Average Elevation = 262.00 m

Runoff Rate = 0.55 (est as 55% of decimal)

Energy (J) = (Area of land)*(Rainfall)*(Runoff Rate)*(Avg.Elevation)*(Gravity)
 = (_m²)*(_m)*(0.55)*(1000kg/m³)*(_m)*(9.81m/s²)
 = 1.54E+14 J/yr

Transformity = 4.68E+04 sej/J

<계속>

IMPORTS&OUTSIDE SOURCES

5	Fuels&Electricity			(Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)
	Fuels			
		Landfill =	1.16E+05 ℓ /yr	
			= 2.21E+03 ℓ /yr	
			= 1.92E-02 ℓ /ton	
		Solidification =	2.80E+05 ℓ /yr	
			= 2.43E+00 ℓ /ton	
		Total used fuels =	2.45E+00 ℓ /ton	
	Energy content per liter			
		fuels(Diesel) =	9.20E+03 kcal/ ℓ	
		Conversion factor =	4186 J/kcal	
		Total energy input =	9.45E+07 J/ton	
		Transformity =	1.11E+05 sej/J	(Odum, 1996, Environmental accounting)
	Electricity			
		Solidification =	4.97E+05 kwh/yr	
			= 3.06E+00 kwh/ton	
			= 3.06E-03 Mwh/ton	
		Leachate treatment =	4.34E+05 kwh/yr	
			= 3.41E-01 kwh/ton	
			= 3.41E-04 Mwh/ton	
		Total used electricity =	3.40E-03 Mwh/ton	
		Conversion factor =	3.60E+09 J/Mwh	
		Total energy input =	1.22E+07 J/ton	
		Transformity =	2.91E+05 sej/J	(Odum, 1996, Environmental accounting)
6	Cost for Management			(Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)
	Landfill process			
		Cover soils =	8.95E+05 ton/yr	
			= 8.98E+11 g/yr	
			= 2.42E+10 g/yr	
			= 1.49E+05 g/ton	
		Transformity =	1.24E+05 sej/J	
		Machine lent =	1.19E+09 won/yr	
			= 3.21E+07 won/yr	
			= 1.98E+02 won/ton	
		EMR =	2.10E+09 sej/won	
	Solidification process			
		Cost of materials =	6.48E+08 won/yr	
		Machine lent =	4.40E+08 won/yr	
		Maintain&repair =	5.90E+07 won/yr	
		Depreciation cost =	3.72E+08 won/yr	
		Total management cost =	1.52E+09 won/yr	
			= 9.36E+03 won/ton	
		EMR =	2.10E+09 sej/won	
	Leachate treatment			
		Cost for leachate treatment =	3.23E+03 won/ton	
		EMR =	2.10E+09 sej/won	

<계속>

7	Cost for Construction	(Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)
	Landfill = 3.37E+11 won	
	Solidification = 3.72E+09 won	
	Leachate treatment = 6.68E+10 won	
	Total construction cost = 4.08E+11 won	
	Lifetime = 20 yr	
	Construction cost per year = 2.04E+10 won/yr	
	Landfill = 1.69E+10 won/yr	
	= 2.52E+02 won/ton	
	Solidification = 1.86E+08 won/yr	
	= 8.50E+02 won/ton	
	Leachate treatment = 3.34E+09 won/yr	
	= 1.37E+03 won/ton	
	Total construction cost = 2.47E+03 won/ton	
	EMR = 2.10E+09 sej/won	

GOODS&SERVICES

8	Labor	(Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)
	Cost = 1.08E+10 won/yr	
	= 2.93E+08 won/yr	
	= 1.80E+03 won/ton	
	EMR = 2.10E+09 sej/won	

PRODUCTION

9	Electricity from biogas	(Sudokwon landfill site management corporation No. 4, 2005)
	Electricity from biogas = 5.51E+04 Mwh/yr	
	= 7.12E+02 Mwh/yr	
	= 1.76E-03 Mwh/ton	
	Conversion factor = 3.60E+09 J/Mwh	
	Total input energy = 6.35E+06 J/ton	
	Transformity = 2.91E+05 sej/J	(Odum, 1996, Environmental accounting)

Footnote of Emergy evaluation of compost with 1ton of sewage sludge

IMPORTS&OUTSIDE SOURCES

1 Electricity

Electricity

Electricity = 6.75E-01 Gwh/yr
 = 5.63E-04 Gwh/ton (Internal data Goseong sewage treatment plant, 2004)
 Conversion factor = 3.60E+12 J/Gwh
 Total energy input = 2.03E+09 J/ton
 Transformity = 2.91E+05 sej/J (Environmental Accounting Using Energy : Evaluation of the State of West Virginia, 2005)

2 Cost for Management

Maintain&repair = 5.00E+06 won/yr
 Packing charge = 1.00E+06 won/yr (Internal data Goseong sewage treatment plant, 2004)
 Total used cost = 6.00E+06 won/yr
 = 5.01E+03 won/ton
 EMR = 2.10E+09 sej/won

3 Cost for Construction

Cost for construction = 1.14E+09 won (National environmental technology information center, www.konetic.or.kr)
 Lifetime = 20 yr
 Cost for construction per year = 5.70E+07 won/yr
 Cost for construction per ton = 3.12E+04 won/ton
 EMR = 2.10E+09 sej/won

GOODS&SERVICES

4 Labor

Cost = 3.00E+07 won/yr (Internal data Goseong sewage treatment plant, 2004)
 = 2.50E+04 won/ton
 EMR = 2.10E+09 sej/won

PRODUCTION

5 Compost(Biosoil)

Compost(Biosoil) = 1.38E+02 ton/yr (Internal data Goseong sewage treatment plant, 2004)
 = 1.15E-01 ton/ton
 N(3.78%) = 4.35E-03 ton/ton
 = 4.35E+03 g/yr (Han et al., 2004, Investigation on possibility of composting by properties analysis of organic sludge composts)
 P(1.58%) = 1.82E-03 ton/ton
 = 1.82E+03 g/won
 Transformity = (Odum, 1996, Environmental accounting)
 N = 1.51E+09 sej/g
 P = 1.36E+10 sej/g

참고문헌

- 국립수산과학원, 2005, 해양조사연보, pp27~122.
- 기상청, 2005, 기상연보, pp1~256.
- 김남국, 2001, 시스템 생태학적 접근법에 의한 넙치생산의 지속성 평가, 부경대학교 대학원, pp2.
- 배재근, 1994, 하수슬러지의 성상조사 및 처리 방안 검토, 한국폐기물학회, pp252~261.
- 산업자원부, 2005, 에너지통계연보, pp394~396.
- 이석모, 1988, 분뇨의 해양투기에 관한 연구, 부산수산대학교 대학원, pp65~67.
- 이석우, 1992, 한국근해해상지, 집문당, pp98.
- 제윤미, 2004, Emergy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성 지수를 관한 연구, 부경대학교 대학원, pp49.
- 최영근, 2003, 국가와 지역 시스템의 지속성 평가에 대한 연구, 부경대학교 대학원, pp132, pp154~158.
- 한국해양수산개발원, 2003, 에머지 개념을 이용한 해양환경 자원의 가치평가와 정책활용방안, pp28~31, pp68~69.
- 환경관리공단, 2004, 하수슬러지의 효율적 처리방안, pp1~87.
- 환경관리공단, 2005, 제3회 폐기물처리기술 워크숍, pp473~478.
- 환경관리공단, 2005, 하수슬러지 처리 및 자원화 방안, pp2~52, pp78~80, pp292~298.
- 환경부, 2005, 하수도통계연감, pp682-698.
- 해양경찰청, 2003, 72런던협약 및 96의정서, pp160~161.
- 해양수산부, 2005, 폐기물 해양배출 종합관리 시스템 구축(I), pp195~220.
- Bjorklund J., U. Geber and T. Rydberg, 2000, Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge, pp294~313.
- Odum H. T., 1996, Environmental accounting, p304~311.
- Odum H. T., and J. E. Arding, 1991, Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador, pp50.
- Odum H. T., M. T. Brown and S. Brandt-Williams, 2000, Handbook of Emergy

Evaluation pp5~6.



감사의 글

2년 전 어색했던 모습으로 하천 및 해양생태공학 실험실의 문을 들어섰던 게 엇그제 같은데 벌써 졸업이라니 시간의 흐름은 강물과 같음을 느낍니다. 2년 동안 가족과 같은 분위기에서 생활할 수 있게 그리고 무사히 석사과정을 마무리 할 수 있게 도와 주신 분들에게 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

학문의 길 뿐만 아니라 사람이 살아가야 할 도리를 가르쳐주신 이석모 선생님께 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 아버지와 같은 마음으로 처음부터 마지막까지 진심어린 가르침과 인자한 웃음을 보여주신 박청길 선생님, 논문을 진행하는데 아낌없는 조언을 해주신 이병현 교수님, 저에게 항상 알찬 조언을 해주시는 강임석 교수님, 논문을 쓰는데 걱정과 조언을 아끼지 않으신 강대석 교수님, 성기준 교수님, 정용현 교수님, 김동명 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

말씀은 적으시지만 항상 열심히 해라고 격려해주시는 손지호 선배님, 학문적인 것 뿐 아니라 인생의 조언 또한 많이 해주시는 최영근 선배님, 김우석 선배님, 바쁘신 가운데 제가 하는 질문에 정성껏 답변해주신 김진이 선배님, 김남국 선배님, 임정혁 선배님, 멀리서나마 저에게 힘을 주시고 도움을 주신 제윤미 후배님, 송은지 후배님께도 감사드립니다.

그리고 나와 같이 2년 동안 동고동락 한 나에게 영원한 형님이신 진만 형님, 실험실 사람들 모두에게 따뜻한 마음씀씀이를 베푸는 용수, 나보다 나이는 어리지만 생각이 깊고 내가 항상 배울게 많은 그리고 미안한 감정과 함께 고마움을 느끼는 영륜, 2년 동안 조교일 하느라 공부하느라 수고 많았던 웃음이 이쁜 경미, 석사과정 2년 동안 잘해보자고 서로 격려하고 의지했던 영애, 지금은 고국 베트남에서 교수님이 되어 학생들을 가르치고 계시는 Mr. Hung, 타국에 와서 열심히 공부하고 있는 초코렛을 좋아하는 밝은 성격의 오미, 내가 게으름을 피울 때 마다 선배 잘되라고 항상 자극을 주었던 성실한 혜현, 뭐든 잘하고자 노력하는 멋쟁이 혜옥, 때론 이 놈이 나보다 형이 아닌가 착각하게 만드는 믿음직한 광섭, 무뚝뚝한 것 같지만 속정이 깊은 종명, 배우는데 욕심이 많은 카드 마술사 승혁, 미소녀에서 숙녀로 변하고 있는 순하디 순한 하나, 밥 먹을 때 항상 날 흐뭇하게 만들고 사람이 얼마나 많이 먹을 수 있을지 시험하

게 만들고 싶은 충동을 느끼게 하는 재근, 현재 꿈을 위해 노력하고 있는 미래의 극작가, 연출자, 영화감독까지 모두 다 할 것만 같은 막내 보라, 항상 뒤에서 술 한잔의 여유와 함께 늘 절 챙겨주시던 이성호 선배님, 커피 한잔과 함께 나의 고민을 들어주던 장세주 후배님, 2년 동안 고생한 우리 동기인 형욱, 광재, 성훈 그리고 로라 씨, 근주, 용민, 성훈, 창수를 포함한 환경연구동 2층 식구들에게 감사드립니다.

또한, 나의 20대를 함께 시작하고 마무리하는 나의 소중한 벗인 태안과 호림, 내가 아끼고 그리워했던 지숙 그리고 내가 아끼는 동생들 지희, 형모, 우창 이들이 있어 나의 20대가 행복했습니다. 호림과 태안아 틈틈이 대학원 생활하는 날 먹여 살린다고 수고 많았다.

마지막으로 29년을 한결같이 못난 아들을 걱정하시고 믿어주신 아버지와 어머니 사랑합니다. 그리고 아직 제가 학생이라는 이유로 저 대신 큰아들 역할까지 하시는 첫째 자형과 첫째 누나, 둘째 자형과 둘째 누나, 셋째 자형과 셋째 누나, 그리고 조카 주필이, 세정이, 석찬이, 막내 성훈이 모두 사랑합니다. 저는 이 분들이 모두가 행복했으면 좋겠습니다.

