



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

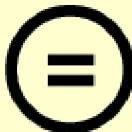
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



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

원주시 생활폐기물 고형연료화
시설의 에머지 평가



2010년 2월

부경대학교 대학원

생태공학과

임진아

공학석사 학위논문

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가

지도교수 강 대 석

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함.



2010년 2월

부경대학교 대학원

생 태 공 학 과

임 진 아

林眞娥의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2010 년 2월



목 차

I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 자원순환형 사회	3
2. 폐기물 발생 및 처리	5
가. 폐기물 정의와 종류	5
나. 국내 폐기물 발생 및 처리현황	6
3. 폐기물 에너지화 기술	13
가. 폐기물 바이오가스화	14
나. 매립가스 에너지자원화	15
다. 소각장 소각여열 회수	17
라. 폐기물 고형연료화	17
4. 폐기물 고형연료화 사업	18
가. 폐기물 고형연료의 정의	18
나. 폐기물 고형연료의 특성 및 활용분야	21
다. 폐기물 고형연료화 사업의 사례	23
5. 에머지 개념	28
가. 에머지의 정의	28
나. 에너지변환도	29
6. 선행연구	31
가. 폐기물 처리 에머지 평가	31

나. 고형연료화 사업 경제성 분석 국내 사례	32
III. 재료 및 방법	35
1. 연구대상	35
2. 에머지 평가	38
가. 에너지시스템 다이어그램 작성	38
나. 에머지 평가표	40
다. 에머지 지수	41
라. 에머지 평가 자료	44
3. 에머지 비용·편익 평가	47
가. 비용·편익분석	47
나. 에머지 비용·편익평가	48
IV. 결과	49
1. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설 다이어그램	49
2. 원주시 생활폐기물의 에머지 평가	51
3. 고형연료화 시설의 에머지 평가	53
4. 에머지 비용·편익분석	58
V. 고찰	60
1. 폐기물관리 대안으로서 고형연료화	60
2. 고형연료화 사업의 타당성	61
3. 고형연료화 시설의 효율성 개선	62
4. 선행 연구 비교	64

VI. 결론	69
참고문헌	72
Appendices	76



표 목 차

Table 2.1. Changes in the composition of domestic wastes over time in Korea	8
Table 2.2. Statistics of the Korean landfill facilities in operation	10
Table 2.3. Uses of methane gas recovered from landfills in Korea	16
Table 2.4 Quality and grade criteria for refuse-derived fuels	20
Table 2.5. Environmental yield ratio(emergy savings/emergy investment) and net emergy of three solid waste treatment alternatives evaluated by Marchettini et al.	32
Table 2.6. Construction and maintenance costs of a RDF processing facility with different treatment capacities	33
Table 2.7. Emergy recovery rates of a refuse-derived fuel processing facility for different processing capacities	34
Table 3.1 Grade examination result for the refuse-derived fuel produced by the Wonju refuse-derived fuel processing facility, Korea	36
Table 3.2. Tabular format for the typical emergy evaluation table	41
Table 4.1. Emergy evaluation of the combustible wastes collected in Wonju, Korea	52
Table 4.2. Emergy evaluation table for the Wonju refused-derived fuel processing facility in Korea	56
Table 4.3. Emergy indices for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea	57

Table 4.4 Emergy cost-benefit evaluation for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea	59
Table 5.1 Emergy investment per unit waste processed in the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea	66
Table 5.2 Comparison of emergy costs and recovery for solid waste treat alternatives	68



그림 목차

Fig. 2.1. Classification of wastes in the waste statistics of Korea	5
Fig. 2.2. Change in the quantity of wastes generated over time in Korea	7
Fig. 2.3. Composition of the national wastes generated in Korea, 2007 ...	7
Fig. 2.4. Changes in the fraction of wastes treated by different disposal methods over time in Korea	9
Fig. 2.5. Quantity of combustible wastes and organic wastes that could be used for energy resources	12
Fig. 2.6. Refuse-derived fuel manufactured in the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea	19
Fig. 2.7. Emergy quality chain used to calculate solar transformity	30
Fig. 2.8. Composition of the operation and maintenance cost of a refuse-derived fuel processing facility for different processing capacities	34
Fig. 3.1. Flowchart for refuse-derived fuel production in the Wonju refuse-derived fuel processing facility, Korea	37
Fig. 3.2 Examples of the energy systems language symbols	39
Fig. 3.3. Emergy indices used in this study	43
Fig. 3.4. Composition of municipal wastes collected in Wonju, Korea in 2007	45

Fig. 4.1. Energy systems diagram for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea	50
Fig. 4.2. Composition of emergy inputs in the construction stage of the Wonju refuse-derived fuel processing facility	54
Fig. 4.3. Composition of emergy inputs in the operation and maintenance stage of the Wonju refuse-derived fuel processing facility	55
Fig. 4.4. Composition of total emergy inputs to the Wonju refuse-derived fuel processing facility	55



Emergy evaluation of a refuse-derived fuel processing facility in Wonju, Korea

Jin A Im

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

Abstract

In Korea, wastes are disposed of through landfilling, incineration, and ocean dumping. Recognizing the limited capacity of the environment in treating wastes, the Korean government has adopted a zero-waste society policy in which the generation of wastes is minimized first and then those wastes generated are reused or recycled. The waste-to-energy initiative is one of several initiatives proposed to realize the zero-waste society. The initiative supports development of technologies, such as refuse-derived fuel (RDF) production, biogas extraction, landfill gas recovery, and incineration heat recovery, to extract or recover useful energy from wastes.

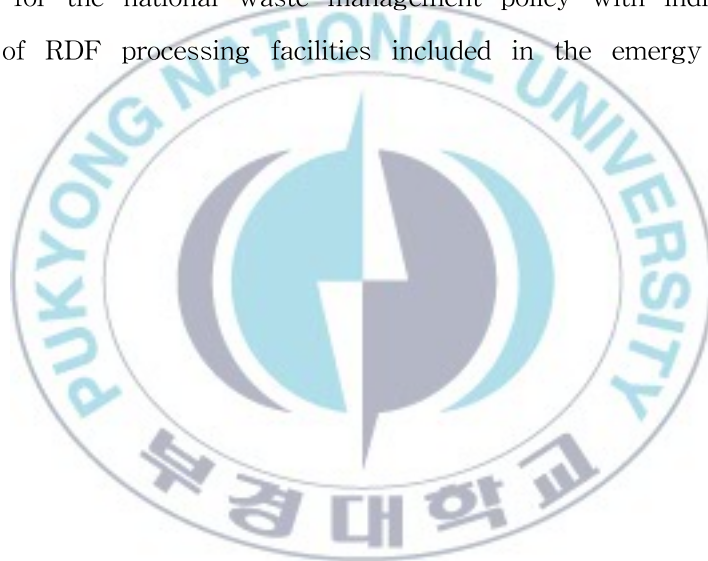
RDF is a solid fuel produced by mechanically crushing, separating, drying, and molding combustible solid wastes such as papers, woods, plastics, and the like into a cylindrical form. The RDF processing has recently been recognized as a viable alternative to landfilling and ocean dumping because it could provide a stable source of solid fuels, save landfill capacity by reducing the

volume of wastes to be filled. Construction of several RDF processing facilities is underway or planned in Korea.

This study carried out an emergy evaluation on a refuse-derived fuel processing facility in the city of Wonju, Korea, to evaluate the macroeconomic contribution of solid fuels produced and compare its costs and benefits to see if the project were feasible in the emergy perspective. The emergy methodology is a system evaluation tool that uses energy as the common currency to compare different resources on a common basis. The Wonju RDF processing facility uses combustible wastes collected in the city of Wonju to produce solid fuels, with a processing capacity of 80 tons/day. Only direct benefits and costs of the facility were considered in this study because of lack of data and information on the indirect benefits and costs. Direct benefits of the Wonju RDF facility included RDF production and reduced landfill cost, and direct costs considered were costs for construction, and operation and maintenance.

The emergy quantity in the combustible solid wastes treated by the Wonju RDF processing facility was 1.51×10^{19} sej/yr and their emvalue was calculated as 5.65 billion em₩/yr. This means that the facility prevented the loss of useful resources with a potential worth of 5.65 billion em₩ in 2007. The facility also contributed to increasing the lifetime of the Wonju Landfill nearby by reducing the amount of wastes to be filled by about 4% of its annual landfill treatment in 2007. Total emergy input required to produce 5,801 ton of RDF was 3.57×10^{19} sej/yr, resulting in the solar transformity of the RDF of 3.22×10^5 J/yr. The emvalue of RDF produced in the facility was calculated as 13.4 billion em₩/yr which is the real wealth contribution of the facility to the Korean society. The emergy yield ratio of the Wonju RDF processing facility was calculated as 1.73, implying that the facility contributed more to the economy beyond the investment costs required to construct and operate.

Direct emergy benefits of the Wonju RDF processing facility were calculated as 1.42×10^{10} em $\text{\$/yr}$ and direct emergy costs as 7.75×10^9 em $\text{\$/yr}$. This gave a net emergy benefit of 6.41 billion em $\text{\$/yr}$ for the facility and the emergy benefit/cost ratio was calculated as 1.83. The emergy benefit-cost evaluation revealed that the facility was a feasible project for the solid waste management of Wonju in the emergy perspective. This study suggested that RDF processing facilities could be an effective solid waste disposal alternative in building a sustainable zero-waste society. Further studies are needed to provide better information for the national waste management policy with indirect benefits and costs of RDF processing facilities included in the emergy benefit-cost evaluation.



I. 서론

인간은 자연이 제공하는 풍부한 지하자원을 이용하여 농업사회에서 산업사회로 발달할 수 있었으며, 이에 따라 경제 발달과 동시에 우리의 생활 수준도 향상되었다. 그러나 이와 동시에 인구는 기하급수적으로 증가하였는데, 1960년대 전 세계 인구는 30억 명에 불과하였지만 2009년 6월 현재 전 세계 인구는 약 68억 명으로 2배 이상 증가하였다(CIA, 2009). 산업화와 도시화, 인구증가는 자원과 환경문제 등 현재 인류가 처해있는 다양한 문제를 일으켰으며, 여전히 현대 인류의 경제활동은 대량소비, 대량생산, 대량폐기의 악순환을 계속하고 있다.

대량생산과 대량소비로 인해 자연이 정화할 수 있는 폐기물량을 초과한지 이미 오래되었고, 인체의 건강과 자연환경을 위협하는 유해폐기물 또한 발생하고 있으며 그 양도 증가하고 있다. 자연의 자정능력을 초과하여 발생하는 폐기물은 매립이나 소각 등과 같이 인위적으로 처리하지만, 매립지 용량의 한계, NIMBY(Not In My Back Yard) 현상, 고비용의 시설투자비 등 사회경제적 문제와 환경오염 등 여러 가지 문제와 한계가 있다. 인류의 경제활동을 뒷받침하기 위한 자원을 공급하고 경제활동의 부산물을 처리하는데 있어서 생태계의 수용능력이 가지고 있는 한계를 고려한다면 폐기물 발생을 최소화하고, 재이용 하거나 재활용하는 자원순환형 사회의 실현은 인류경제의 지속성을 높이기 위해 반드시 필요한 과제이다.

그냥 버려지는 폐기물을 자원으로 회수하는 폐기물 에너지화 사업은 자원순환형 사회를 실현하기 위해 폐기물관리 차원에서 추진되고 있는 사업이다. 여기에는 폐기물고형연료화(Refuse-derived fuel, RDF) 사업, 폐기물 바이오가스화 사업, 매립가스(Landfill Gas, LFG) 에너지자원화 사업, 소각장 소각여열 회

수사업 등이 포함된다. 이 가운데 매립이나 소각으로 처리하는 폐기물 중 가연성 폐기물을 선별하여 연료로 만드는 고�형연료화 사업은 협소한 국토로 인한 매립지 부족난을 해결하고 국토의 효율성을 증진하며, 소각보다 친환경적으로 폐기물을 처리하여 환경에 대한 부하가 적다(환경부, 2008). 또한 폐기물고형연료라는 에너지가 생산되므로 자원과 환경문제를 동시에 해결해 줄 수 있는 방안 가운데 하나로 판단된다. 이에 따라 정부는 고�형연료화 사업의 확대를 적극적으로 추진하고 있다.

정부는 2012년까지 1조 9,507억 원을 들여 RDF 시설과 전용보일러 및 발전시설을 설치·운영하여 175만 톤의 생활폐기물을 에너지원으로 이용하고자 한다(환경부, 2008). 현재 부천, 강릉, 부안 등에서 시범사업을 진행하고 있으며, 부산, 대전, 나주 등 여러 곳에서 RDF 시설 건설을 신청한 상태이다. 현재 유일하게 원주시에서 생활폐기물로 RDF를 생산하여 무상으로 공급하고 있다.

따라서 본 연구에서는 자연환경과 인간 경제활동을 동일한 척도로 평가하는 에머지(emergy) 개념과 방법론을 이용하여 현재 우리나라에서 보급 단계에 있는 폐기물고형연료화(RDF) 사업을 평가하고자 하였다. 우리나라에서는 아직까지 에머지 방법론을 이용하여 폐기물 관리에 대해 연구한 사례는 아직 없으며, 본 연구는 국내에서 폐기물에 대하여 에머지 평가한 최초 연구이다. 이 연구는 강원도 원주시에서 운영하고 있는 생활폐기물 고�형연료화 시설을 대상으로 단순히 매립하는 가연성 폐기물 중 일부가 고�형연료로 바뀌면서 폐기물이 어느 정도 자원으로 회수되는 지, 사업의 타당성은 있는지 에머지 관점에서 평가하는 것을 목적으로 하였다. 또한 그 결과를 이용하여 향후 폐기물 관리와 관련한 시사점을 제시하고자 하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 자원순환형 사회

인간은 많은 양의 자연자원을 이용하여 농경사회, 산업사회를 거쳐 현재 정보·서비스 중심의 사회에 나아가고 있으며, 우리의 생활수준 또한 향상되었다. 현대 경제는 대량생산과 대량소비로 특징지을 수 있다. 대량소비는 대량생산을 촉진하였으며 대량생산을 하기 위해 유한한 자연자원을 많이 사용함으로써 지하자원의 고갈문제를 일으켰고, 대량폐기는 폐기물처리 문제를 일으켰다.

폐기물은 여러 가지 환경문제와 인간에 유해한 영향을 끼치므로 체계적인 관리가 필요하다. 우리나라의 경우 매립과 소각 위주의 폐기물 정책을 펴고 있다. 과거에 조성한 비위생 매립지로 인한 환경문제와 매립지 부족 등에 대한 해결책으로 소각시설을 운영하고 있지만, 대기오염 발생, 주민반발 등과 같은 이유로 확대에 어려움을 겪고 있다. 또한 앞으로 시행할 폐기물 해역배출 금지 등에 따라 폐기물 육상처리에 대한 보완이 필요하다. 이러한 상황을 극복하기 위해 지속가능한 자원순환형(zero waste) 사회체제로의 전환이 필요하며, 이를 위해 정책적으로 많은 변화가 진행 중이다.

자원순환형 사회는 폐기물 발생을 억제하고 순환적 이용 및 적절한 처리를 통해 환경부하를 최소화하면서 자연자원을 효율적으로 이용하는 사회 형태로, 물질과 에너지의 흐름을 순환형(생산 → 소비 → 재활용 → 열회수 → 처리)으로 전환하여 환경문제, 자원절약과 국가경제에 기여하는 사회이다(환경관리공단, 2006). 특히 우리나라와 같이 지하자원 부존량이 빈약하고 국토면적이 좁은 국가에서 폐기물 문제뿐만 아니라 자원문제에도 대처할

수 있다는 점에서 중요한 대안이라고 할 수 있다. 자원순환형 사회의 우선 순위는 유한한 지하자원의 사용을 줄이는 것이고 다음으로는 발생한 폐기물의 전부 또는 일부를 재사용하며, 재사용 하지 않는 경우 물질로 재활용하거나 에너지로 회수하는 것이다. 이런 과정을 통해 자연자원을 최대한 보전하고 환경오염을 최소화 할 수 있다. 자원순환형 사회 구축을 통하여 생산, 유통, 소비, 폐기까지 물질자원을 효율적으로 이용하고 재활용을 촉진하여 자원의 소비를 억제하고 환경부하를 줄이는 것이 폐기물 관리의 큰 방향이다. 자원순환형 사회에서 폐기물은 쓸모없어 처분해야 하는 대상이 아니라 다시 이용하거나 재활용하는 물질로 간주한다. 그러므로 자원순환형 폐기물 관리 정책은 폐기물의 발생이전 단계에서 발생이후 최종 소멸까지 폐기물을 관리하여 자원을 효율적으로 이용하여 자연으로 돌아가는 폐기물을 최소화하고 자연환경을 보전하며 인간건강을 보존하는 지속가능한 폐기물 정책이라 할 수 있다(환경관리공단, 2006; 이승희, 2008).

현재 우리나라에서는 에너지로 이용할 수 있는 연간 470만 톤의 가연성 폐기물과 연간 748만 톤의 유기성 폐기물을 단순 매립·소각 처리하고 있으며, 이로 인한 2차 오염도 발생하고 있다. 자원순환형 사회 구축을 위한 방법으로 폐기물처리의 문제점을 보완하고 폐기물을 자원으로 이용할 수 있는 기술이 여러 가지 있다. 환경부는 폐기물의 활용을 최대로 하기 위하여 2008년 5월 ‘폐기물 에너지화 종합대책’을 수립·발표하였다. 2020년까지 가용폐기물 전량을 회수할 계획이며, 폐기물 에너지화 사업의 확대를 위하여 관계부처와 공동 시범사업을 추진하고 있다(환경부, 2008).

2. 폐기물 발생 및 처리

가. 폐기물 정의와 종류

폐기물은 ‘사람의 소비활동이나 생산과정에서 필요하지 아니하게 된 물질로서 쓰레기·연소재·오니·폐유·폐산·폐알칼리·동물의 사체 등을 포함하는 것’을 말한다(폐기물관리법, 제2조 제1호).

폐기물은 Fig. 2.1과 같이 가정생활폐기물과 사업장폐기물로 나뉜다. 생활폐기물은 우리 일상생활에서 발생하여 더 이상 필요 없어 버린 폐기물을 말한다. 사업장폐기물은 배출시설 설치 사업장과 대통령이 정한 사업장에서 발생하는 폐기물을 말하며, 사업장일반폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 나뉜다. 사업장일반폐기물은 다시 사업장생활폐기물, 사업장배출시설계 폐기물로 분류된다. 지정폐기물은 주변 환경을 오염시킬 수 있거나 감염성 폐기물 등 인체에 해를 끼칠 수 있는 유해한 물질로서 대통령령이 정하는 폐기물을 말한다. 폐기물 통계 작성시 폐기물은 생활폐기물(가정생활폐기물과 사업장생활폐기물), 사업장배출시설폐기물, 건설폐기물의 세 가지로 분류된다.

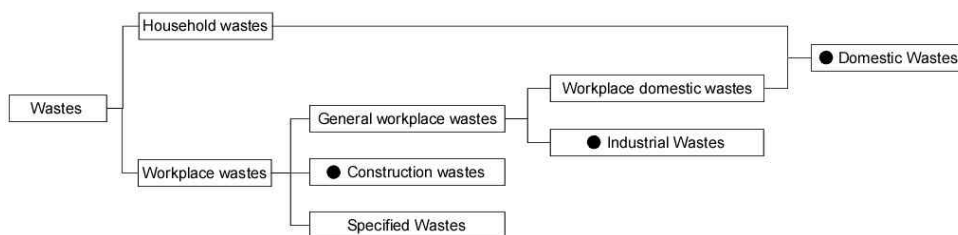


Fig. 2.1. Classification of wastes in the waste statistics of Korea(MOE et al., 2008).

나. 국내 폐기물 발생 및 처리현황

2002년부터 2007년까지 지난 6년 간 폐기물 발생량 변화추이를 살펴보면 총 폐기물 발생량이 연평균 4.6% 증가하였으며, 2007년에 발생한 폐기물량은 2002년 대비 25%나 증가하였다(Fig. 2.2). 2007년 기준 폐기물 발생비율을 살펴보면(Fig. 2.3) 건설폐기물 51%, 사업장배출시설계폐기물 34%, 생활폐기물 15% 순으로 발생하였으며, 2006년에 비해 총 폐기물발생량은 5.7%, 건설폐기물은 1.8%, 사업장배출시설계폐기물은 13.6%, 생활폐기물은 3.1% 증가하였다(환경부 등, 2008). 사업장배출시설계폐기물이 상대적으로 더 많이 증가한 이유는 소각재, 연소재, 분진 등 중간처리시설 잔재물 처리량이 증가하여 폐기물이 더 많이 발생한 것으로 볼 수 있다. 생활폐기물의 경우 2004년, 2005년 폐기물발생량이 감소하였지만 그 후로 다시 증가하고 있다. 이는 1인당 1일 생활폐기물 발생량이(2006년 0.99kg → 2007년 1.02kg) 다소 늘어난 결과이다. 생활폐기물 발생량이 가장 높은 지역은 강원도로 1인당 1일 발생하는 폐기물의 양이 1.51kg으로 평균보다 높았다. 건설폐기물의 증가는 배출사업소가 2006년도 103,753개소에서 2007년도 112,796개소로 8.7% 증가하였기 때문이다(환경부 등, 2008)

본 연구에서는 생활폐기물을 이용한 폐기물 에너지화에 중점을 두었으므로 생활폐기물에 좀 더 자세히 살펴보았다. 연도별 생활폐기물 발생량과 성상변화를 Table 2.1에 나타내었다. 2002년 이후 생활폐기물 발생량은 감소하고 있으며, 가연성 폐기물이 차지하는 양은 2002~2007년 동안 평균 84%(81.4~86.8%)를 유지하였다. 2007년 발생한 생활폐기물은 가연성 82.8%, 불연성 17.2%로 가연성이 대부분이었고, 분리배출·수거한 양을 포함하면 음식물·채소류가 약 30%로 가장 많이 차지하였다(환경부 등, 2008).

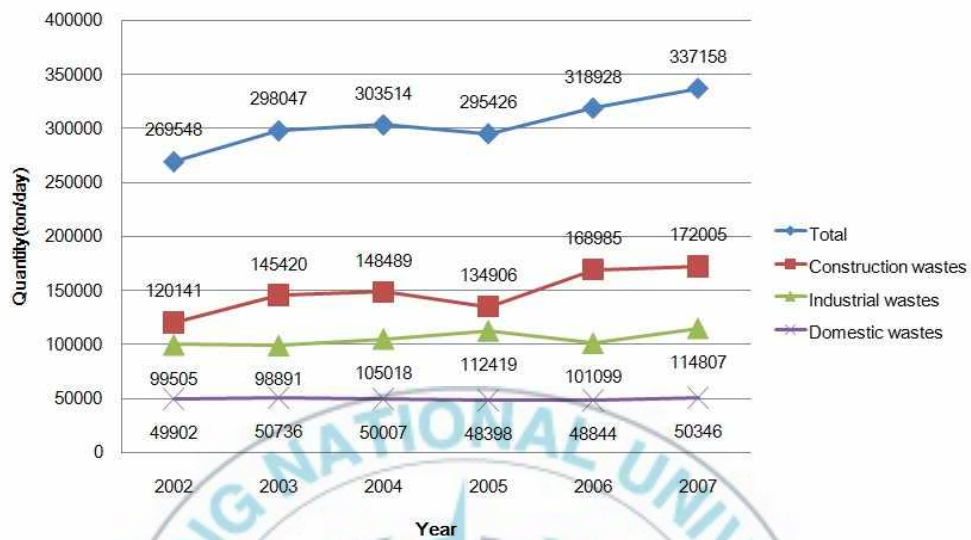


Fig. 2.2. Change in the quantity of wastes generated over time in Korea (MOE et al., 2008).



Fig. 2.3. Composition of the national wastes generated in Korea in 2007 (MOE et al., 2008).

Table 2.1. Changes in the composition of domestic wastes over time
in Korea(MOE et al., 2008)

(unit: ton/day)

		2002	2003	2004	2005	2006	2007
Total		35,302	35,786	35,142	33,670	22,739	21,937
Combustible wastes	Subtotal	30,079	30,118	29,439	29,213	18,520	18,159
	food	11,397	11,398	11,464	12,977	1,910	698
	paper	5,641	5,624	5,735	5,473	5,166	5,586
	wood	2,400	2,424	2,421	2,261	2,308	2,425
	others	10,641	10,642	9,819	8,502	8,911	9,450
Incombustible wastes	Subtotal	5,223	5,668	5,703	4,457	4,219	3,778
	used briquets	535	595	574	611	563	-
	glasses	-	-	-	-	-	405
	ferrous metals	886	896	845	705	711	570
	others	3,802	4,177	4,284	3,141	2,944	2,803

우리나라 폐기물처리 여건을 살펴보면(환경부, 2006, 2008) 경제규모에 비해 국토면적이 매우 좁아 폐기물을 매립하는데 한계가 있다. 일인당 생활폐기물 발생량은 선진국 수준으로 감소하였지만 총 인구증가에 따른 높은 인구밀도와 서비스 중심의 산업구조로 인해 단위면적당 생활폐기물이 미국의 7.6배, 일본의 1.3배 많다. 또한 지속적인 경제성장과 신도시 건설, 도시 재개발 및 중화학공업 발달 등으로 폐기물량이 증가하고 있다.

우리나라에서는 발생한 폐기물을 매립, 소각, 재활용, 해양배출 등 4가지로 처리한다. 폐기물관리법에서 규정하는 재활용은 ‘폐기물을 재사용, 재생 이용하거나 재사용, 재생 이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 또는 폐기물로부터 환경부령이 정하는 기준에 따라 에너지이용합리화법의 규정에 의한 에너지를 회수하는 활동’을 말한다(폐기물관리법, 제2조 7호). 2007년에 발

생한 폐기물의 81.1%가 재활용되었는데, 전년도에 비해 2.4% 감소하였지만 2002년 이후 재활용 비중은 꾸준히 증가하고 있다(Fig. 2.4). 폐기물별 재활용률을 살펴보면 생활폐기물이 57.8%, 사업장폐기물이 66.9%, 건설폐기물이 97.5%로, 건설폐기물의 재활용률이 가장 높았다. 재활용은 다른 폐기물처리 방법에 비해 처리비용이 적게 들며 매립장이나 소각장처럼 시설장을 건설하는데 주민반발 등이 적다. 그러나 수요의 한계가 있고 재활용 물질을 자원화할 수 있는 기술과 시설이 부족하여 수익성이 낮다는 단점이 있다(건설교통부, 2006).

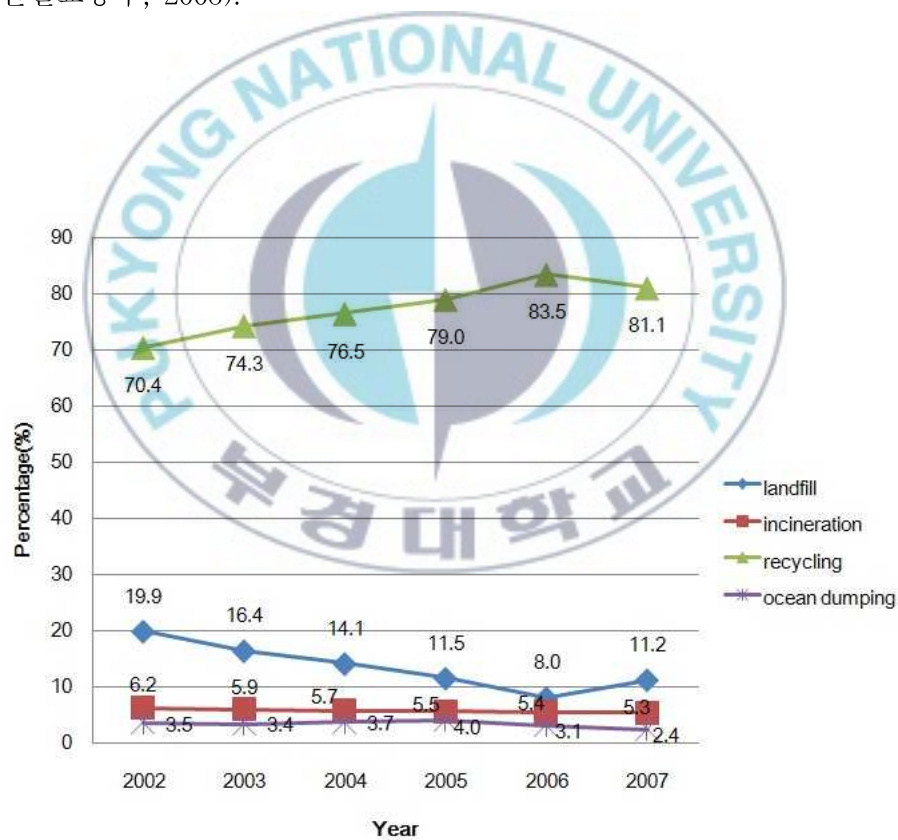


Fig. 2.4. Changes in the fraction of wastes treated by different disposal methods over time in Korea(MOE et al., 2008).

2007년 발생한 폐기물 중 11.2%가 매립되었는데, 2006년에 비해 폐기물 처리에서 매립이 차지하는 비중이 3.2% 증가하였다. 그러나 2007년도를 제외하고는 2002년 이후 폐기물처리에서 매립이 차지하는 비중은 점차 줄어들고 있다. 국토가 매우 협소한 우리나라의 실정 상 폐기물 처리방식을 매립방식에 의존하는 것은 한계가 있다. 현재 우리나라의 매립지 수명은 2008년도 연간 매립량을 기준으로 수도권매립지를 포함할 경우에는 앞으로 약 20년 사용 가능하며, 수도권매립지를 제외할 경우 향후 약 13년 사용가능하다(Table 2.2; 환경부, 2009). 매립 시설 중 15년 이상 사용가능한 시설은 73개소, 3년 미만 시설은 54개소로, 3년 미만의 수명을 가진 시설이 전체 시설수의 24.5%를 차지한다. 매립은 폐기물 대량처리가 가능하고 초기 투자비가 저렴하며, 매립이 완료된 경우에는 생태공원이나 체육시설 등으로 이용가능하다는 장점이 있다. 그렇지만 매립지 부족문제 외에도 악취발생으로 인한 주민반발, 매립에 부적절한 가연성폐기물 매립과 매립 후 발생하는 침출수 처리에 비용이 매우 많이 든다. 그리고 에너지로 이용가능한 자원의 매립량이 많아 자원이 낭비된다(신대현, 2001; 환경관리공단, 2006).

Table 2.2. Statistics of the Korean landfill facilities in operation
(MOE, 2009)

	Number of landfill	Area (1000m ²)	Capacity (1000m ³)	Annual quantity received (1000m ³)	Used capacity (1000m ³)	Residual capacity (1000m ³)	Remaining lifetime
2008	220	29,468	384,963	9,425	192,498	192,465	20 years
2007	226	29,251	379,635	10,651	184,286	195,349	18 years
2006	227	29,213	379,416	10,639	176,499	202,917	19 years
2005	232	28,567	372,111	10,529	166,418	205,693	20 years
2004	235	28,122	359,917	13,408	158,519	201,397	15 years
2003	238	28,231	362,508	15,644	150,859	211,649	14 years
2002	232	28,164	362,561	15,334	140,034	222,527	15 years
2001	242	28,255	361,648	14,248	126,950	234,698	17 years
1996	496	12,765	190,088	13,051	80,185	109,903	8 years

이런 매립의 문제점을 극복하고자 소각시설이 건설되었다. 2007년에는 폐기물의 5.3%가 소각되었다. 이는 2006년에 비해 0.1% 감소한 비중이지만, 전체적으로 처리율에는 큰 변화가 없었다. 소각은 폐기물의 부피를 감량한다는 점이 가장 큰 장점이며, 소각 과정에서 열에너지로 회수 가능하지만 초기투자비와 유지관리비가 많이 든다. 소각시설도 매립지 선정과 마찬가지로 혐오시설로 인식되어 적합한 설치 장소를 선정하기 어려우며, 소각 시 다이옥신 등과 같은 유해물질이 발생하여 2차 환경오염을 유발하는 심각한 문제점이 있다(신대현, 2001; 환경관리공단, 2006).

2007년 발생한 폐기물 중 2.4%는 해역으로 배출되었으며, 2005년 이후 처리율이 감소하고 있다. 해역배출은 육상처리가 곤란한 분뇨, 축산폐수, 음폐수 등 유해성이 적은 폐기물을 처리할 수 있으나, 2012년부터 해역배출이 금지됨에 따라 이에 대한 대응이 필요하다(환경부, 2008).

폐기물은 매립, 소각, 재활용, 해역배출로 처리하지만, 에너지로 이용할 수 있는 폐기물이 여전히 매립, 소각, 해역배출 등을 통해 버려지고 있다. 생활폐기물과 건설폐기물, 사업장폐기물에서 하루 12,885톤의 가연성폐기물이 에너지로 이용될 수 있으며, 해역으로 배출하는 가축분뇨나 음폐수에서 하루 20,491톤의 유기성폐기물을 에너지로 이용할 수 있다(Fig. 2.5). 따라서 연간 1,218만 톤을 에너지로 만들 수 있다(한국환경자원공사, 2008).

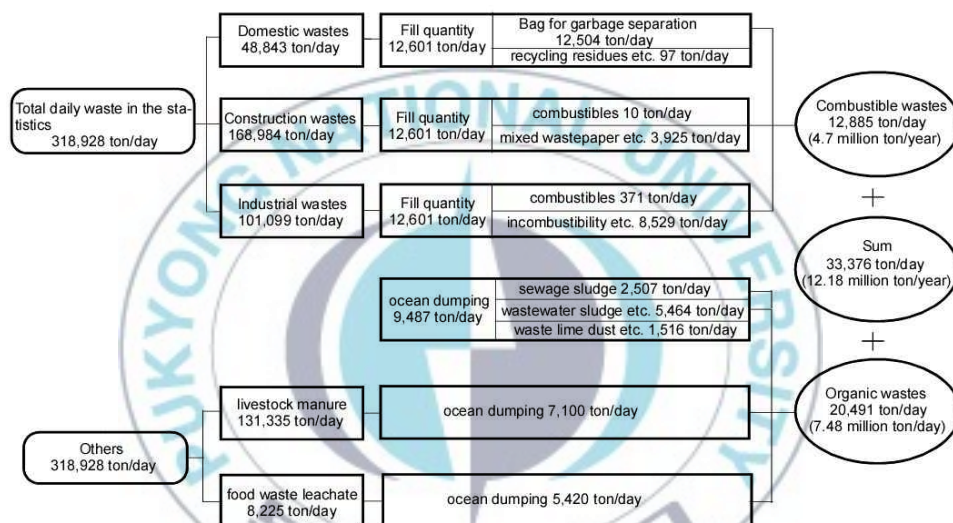


Fig. 2.5. Quantity of combustible wastes and organic wastes that could be used for energy resources(ENVIC, 2008).

3. 폐기물 에너지화 기술

폐기물에너지는 사업장폐기물과 생활폐기물을 단순히 매립이나 소각으로 처리하지 않고 석탄과 같은 고체연료, 석유와 같은 액체연료 또는 가스연료, 폐열 등으로 생산한 것이다. 폐목재와 폐플라스틱 등과 같이 가연성이 높은 폐기물을 열분해, 고형화, 연소 등의 가공처리를 통하여 생산 활동에 재이용 할 수 있게 하는 것이 특징이다(산업자원부 등, 2005, 2008).

폐기물에너지는 자원 재활용 및 에너지 절약 측면에서 많은 이익을 얻을 수 있으며, 쓰레기 발생량을 줄이고 자원을 재활용하므로 유한한 자원을 효율적으로 이용할 수 있다. 폐기물 에너지화는 매립이나 소각 등과 같은 폐기물 처리 방식과 달리 환경에 대한 부하를 저감할 수 있으며, 지방자치단체나 산업체에서 폐기물을 처리하는데 드는 부담을 줄일 수 있다. 폐기물 에너지는 여러 신·재생에너지 중 비교적 단기간 내에 보급·상용화가 가능하며 저렴한 비용으로 경제성이 높다. 하지만 폐기물 에너지화는 고도의 기술과 연구개발을 필요로 하며, 폐기물 에너지화 과정 중 예상치 못한 환경문제가 발생할 수도 있다. 또한 폐기물의 특성상 문화적으로나 산업적으로 처리 기술이 다양하게 필요하다는 단점도 있다(지식경제부, 2008; 환경부, 2008).

폐기물 에너지화 기술에는 폐기물 바이오가스화, 매립가스 에너지자원화, 소각장 소각여열 회수 그리고 폐기물 고형연료화가 있다. 각 기술의 정의와 국내현황을 살펴보면 다음과 같다.

가. 폐기물 바이오가스화

유기성폐기물은 음식물류, 축산분뇨, 하수 슬러지 등 생물학적으로 분해 가능한 폐기물을 말한다. 유기성폐기물 안에 있는 유기물질은 일정한 조건이 되면 분해되기 시작하는데 분해과정에서 바이오가스가 발생한다. 이 바이오가스에는 메탄가스(CH_4) 40~70%, 이산화탄소(CO_2) 30~60%, 기타 황화수소(H_2S), 수소(H_2) 등이 포함된다. 이 중 가장 많은 양을 차지하는 메탄가스(CH_4)를 에너지원으로 사용하는 것이 바이오가스화 사업이다. 포집된 바이오가스는 자동차 연료, 도시가스, 전기, 열 등으로 사용한다(환경부, 2008; 윤 등, 2008).

우리나라는 폐기물 해양배출기준을 강화하여 2012년 1월부터 하수 슬러지 및 가축분뇨를, 2013년 1월부터는 음식물폐수를 해양에 배출하는 것을 금지할 예정이다. 해양배출이 금지된 폐기물은 육상에서 소각이나 매립에 의해 처리되는데, 이를 에너지화하기 위한 사업이 활발히 진행되고 있다(환경부, 2008).

혐기성소화조는 밀폐공간에 유기성폐기물을 일정기간 저장하여 바이오가스를 포집하는데, 우리나라의 음식물 처리시설 264개소 중 혐기성소화시설을 갖춘 곳은 6개소에 불과하다. 부산 생곡매립지에서는 하루 200톤의 음식물쓰레기로 2MW의 전기를 생산하고 있고, 광주광역시에서는 생산한 바이오가스를 음식물류폐기물 사료화시설의 보일러 연료로 공급하고 있다. 경기 파주시 같은 경우에는 음식물과 가축분뇨를 함께 처리하는데 하루 80톤을 처리하여 80kW의 전기를 생산한다(환경부, 2008).

2005년 6월을 기준으로 운영 중인 가축분뇨 공공처리장은 47개소이며, 혐기성소화를 이용한 처리장은 5개소이다. 현재 가동 중인 축산분뇨 혐기성소화 시설은 소규모 연구용으로, 경기도 수원에서는 하루 10톤의 가축분뇨로 100kW, 경

기도 이천에서는 하루 20톤의 가축분뇨로 120kW의 전기를 생산하고 있다(허남호, 2007).

하수 슬러지는 2008년 현재 77%가 해양으로 배출되고 있어 하수 슬러지를 이용한 바이오가스 외에 고형연료 등의 에너지화 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내 하수처리장에 설치된 바이오가스 생산시설은 59개소가 가동하고 있다. 2007년부터 2011년까지 1단계, 2단계로 나누어 수도권 광역자원화시설 1개소, 소각시설 17개소, 재활용시설 63개소 등 총 81개소의 슬러지 처리시설을 확충할 계획이다(한국환경자원공사, 2008).

나. 매립가스 에너지자원화

매립한 폐기물은 혐기성 상태에서 미생물에 의해 분해되면서 가스를 발생하는데, 그 중 50~60%가 메탄가스(CH_4)이며, 이산화탄소(CO_2)가 35~39%, 기타 1% 미만의 산소, 질소, 황화수소, VOCs, 탄화수소류 등의 악취유발가스가 발생한다(환경부, 2008). 매립가스(Landfill Gas, LFG) 에너지자원화 사업은 발생하는 가스 중 가장 많은 양을 차지하며 이산화탄소보다 21배에 달하는 온실효과를 유발하는 메탄가스(CH_4)를 포집하여 에너지로 이용하는 것을 말한다. 메탄가스는 발전용 연료로 곧바로 쓸 수 있으며, 정제과정을 거치면 자동차 연료나 도시가스 등으로도 사용할 수 있다.

국내에서 운영되고 있는 227개의 생활폐기물 매립장 중 매립가스 회수 에너지화 시설이 설치된 곳은 11개소로 아주 적다. 매립가스 회수 에너지화 시설은 주로 규모가 큰 매립장에 설치되어 있는데, 수도권매립지에서는 세계 최대 규모인 50MW급 발전시설을 가동하고 있으며, 2007년도에는 전력 판매로 178억 원의 수익을 올렸다. 그 밖에 Table 2.3과 같이 부산 생곡매립지에서는 6MW급 발전시설을 가동하고 있으며, 광주 운정, 대전 금고, 포

항 호동, 군산 내초 등에서 총 14.73MW급 발전시설을 가동하고 있다. 또한 울산 성암동 매립장에서는 매립가스를 인근 산업시설에 판매함으로써 연간 12억 원의 수익을 올렸다. 정부는 2012년까지 대규모 매립장 6개소, 중규모 매립장 21개소를 대상으로 매립가스 회수 에너지화 시설을 확충할 계획이다(환경부, 2008).

Table 2.3. Uses of methane gas recovered from landfills in Korea(MOE, 2008)

Landfills		use of landfill gas	capacity	Gas recovered (Nm ³ /min)	uses
total				469	
Busan	saenggok	power generation	6MW	39	gas engine
Gwangju	unjeongdong	power generation	1MW	20	gas engine
Daejeon	geumgodong	power generation	3.4MW	40	gas engine
Pohang	hodong	power generation	2MW	19	gas engine
Kunsan	naechodong	power generation	1MW	8	gas engine
Cheongju	hakcheonri	power generation	1.05MW	10	gas engine
Jeju	hoecheondong	power generation	2MW	25	gas engine
Suncheon	wangjildong	power generation	1.85MW	60	gas engine
Yosu	manheungdong	power generation	1.85MW	30	gas engine
Masan	deokdong	power generation	0.8MW	13	gas engine
Daegu	bangcheonri	gas supply	187.2 1000m ³ /day	130	gas engine
Seoul	nanjido	gas supply	662 1000m ³ /day	50	boiler fuel
Ulsan	seongamdong	gas supply	60.5 1000m ³ /day	20	supplementary, boiler fuel
Wonju	heungupmyun	gas supply	7.6 1000m ³ /day	5	boiler fuel

다. 소각장 소각여열 회수

소각장 소각여열 회수사업은 말 그대로 폐기물 소각시 발생하는 여열을 회수하여 전기를 생산하고 난방열을 공급하는 것이다. 우리나라에서 하루에 소각하는 폐기물의 양은 2007년 기준 17,554톤으로 매우 많은 양이 소각되었는데, 소각시 발생하는 열은 대부분 대기 중으로 방출되어 대기오염을 유발하고 있다. 우리나라의 경우 42개의 대형 생활폐기물 소각시설에서 발생한 총 550만Gcal의 소각여열 중 88.6% 정도인 490만Gcal를 회수하고 있으며, 이 중 77%는 지역난방에, 23%는 전력생산에 이용하고 있다. 현재 정부는 2012년까지 총 994억 원을 투입하여 소각여열 회수 및 이용 관련 시설을 확충할 계획이다(환경부, 2008; 지식경제부, 2008).

라. 폐기물 고형연료화

일상 생활이나 사업장에서 나온 폐기물을 쓸모없는 것으로 여겨 매립하던 것을 파쇄·분쇄·건조·선별·성형의 과정을 거쳐 고체연료로 만드는 것이 폐기물 고형연료화(Refuse-derived fuel, RDF) 사업이다. 발열량이 높은 RDF를 생산하는 사업은 현재와 같은 고유가 시대에 원유 수입에 대한 부담을 덜어줄 수 있다는 점 때문에 국내외에서 급속히 발전하고 있다. 또한 폐기물을 처리하는 소각이나 매립보다 RDF 생산비용이 적으며 환경에 대한 부담도 적어 효율적인 방법이라 할 수 있다(건설교통부, 2006; 한국환경자원공사, 2008; 환경부, 2008). RDF는 RDF 전용 발전소, 산업용 보일러, 시멘트 소성로, 석탄 화력발전소 등에서 이용할 수 있으며, 일반 가정의 난방열로도 공급된다. RDF 사업에 대하여 더 자세한 내용은 다음 절에 제시하였다.

4. 폐기물 고형연료화 사업

가. 폐기물 고형연료의 정의

폐기물 고형연료(RDF)는 폐기물 중에서 금속류, 캔류 등 타지 않는 불연성 물질을 제거하고, 가연성 물질인 종이, 나무, 플라스틱 등을 기계적 분쇄·분리·선별·건조·성형 등의 가공 공정을 거쳐 석탄과 비슷한 고체 형태로 만든 저공해 고형연료이다(Fig. 2.6; 건설교통부, 2006; 한국환경자원공사, 2008; 환경부, 2008). 이 중 폐플라스틱을 60% 이상 사용하여 고형연료제품의 품질·등급기준(Table 2.4)에 적합하게 제조한 고형연료 제품을 폐플라스틱고형연료(Refuse Plastic Fuel, RPF)라 하며, 폐타이어를 사용하여 고형연료제품의 품질·등급기준에 적합하게 만든 고형연료제품을 폐타이어고형연료(Tire Derived Fuel, TDF)라 한다(한국환경자원공사 등, 2008).

RDF는 발열량이 4,000~4,500kcal/kg으로 국내 무연탄의 발열량(3,900kcal/kg)보다 높으며, 폐기물을 이용하므로 국내에서 안정적으로 원료를 확보할 수 있는 저렴한 연료이다. 그리고 다른 에너지원에 비해 장기간 보관이 가능하며 고형연료의 특성상 운반이 용이하다. 이런 RDF는 석탄대용의 에너지원으로 사용할 수 있을 뿐 아니라 폐기물의 청정한 처리가 가능하므로 에너지 자원의 부족과 환경문제를 동시에 해결하는데 기여할 수 있는 우리나라 실정에 매우 적합한 기술이라 할 수 있다(김 등, 2003; 산업자원부 등, 2006; 신대현, 2001; 한국환경자원공사, 2008; 환경부, 2008).

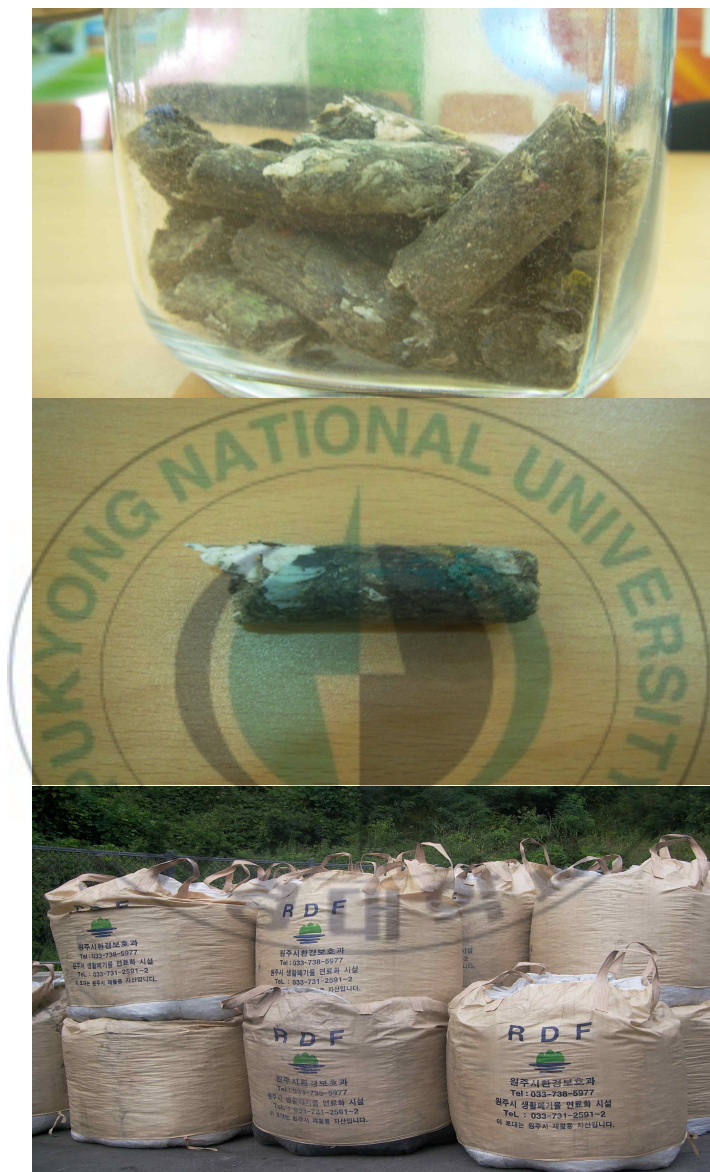


Fig. 2.6. Refuse-derived fuel manufactured in the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea.

Table 2.4. Quality and grade criteria for refuse-derived fuels(ENVIC, 2008)

Types			Criteria
1. shape and size	RDF		combustible solid wastes that are not crushed, ground or cut are prossed, heated or rubbed to produce products with consistent shape and size; the cross section of the products should be circular through out the column with a diameter of less than 30mm and a length of less than 100mm
	RPF		combustible solid wastes that are not crushed, ground or cut are prossed, heated or rubbed to produce products with consistent shape and size; the cross section of the products should be circular with a diameter of less than 50mm and a length of less than 120mm
	TDF		sorted, crushed and cut to produce products with the same size, with final products with a length less than 120mm on the longest side
	2. low heating value		$\geq 3,500 \text{ kcal/kg}$ (for RPF and TDF, $\geq 6,000 \text{ kcal/kg}$)
2. heating value	3. moisture		$\leq 10\%$ of RDF weight
	4. ash(dry)		$\leq 20\%$ of RDF weight (for TDF, $\leq 4\%$ weight)
	5. chlorine(dry)		$\leq 2\%$ of RDF weight
	6. sulfur(dry)		$\leq 0.6\%$ of RDF weight (for TDF, $\leq 2\%$ weight))
	7. metal(dry)	Hg	$\leq 1.20\text{mg/kg}$
		Cd	$\leq 9\text{mg/kg}$
		Pb	$\leq 200\text{mg/kg}$
		As	$\leq 13\text{mg/kg}$
3. chlorine concentration(dry)	1. heating value	I	$\geq 6,500 \text{ kcal/kg}$
		II	$5,500 \sim 6,500 \text{ kcal/kg}$
		III	$4,500 \sim 5,500 \text{ kcal/kg}$
		IV	$3,500 \sim 4,500 \text{ kcal/kg}$
	2. chlorine concentration(dry)	I	$< 0.5\%$
		II	$0.5\% \sim 1\%$
		III	$1\% \sim 1.5\%$
		IV	$1.5\% \sim 2\%$

나. 폐기물 고형연료의 특성 및 활용분야

(1) 특성

RDF의 특성은 크게 환경적 특성과 에너지 특성으로 나눌 수 있다. 환경적 특성으로는 폐기물처리 관련 특성, 대기오염 관련 특성, 기타 특성이 있고, 에너지 특성에는 연소특성, 자원화 특성, 건설비 및 유지관리비의 측면을 들 수 있다(김 등, 2003).

먼저 환경적 특성 가운데 폐기물처리 관련 특성을 살펴보면, 기존의 폐기물을 처리하는 매립지 부족과 소각시설 확대의 어려움 등과 같은 문제점을 보완해 줄 수 있으며, 고분자 폐기물의 매립과 해양투기 등으로 인한 환경오염을 방지할 수 있다. 또한 선별, 파쇄, 건조, 성형의 공정을 거치므로 균일하고 견고한 연료로 제조 가능하다. 대기오염 관련 특성으로는 발열량의 변동이 적어 완전연소 및 연소로 내의 온도 관리가 용이하고 염화수소의 발생 농도가 낮다. 그리고 배연가스에 수분이 적어 백연방지 대책이 필요 없다. RDF는 연소시 다이옥신 배출농도가 소각에 비해서 매우 적은 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 다이옥신이 생성되는 De-novo 합성 과정에서 촉매제인 철 및 구리 등의 금속이 RDF 공정 시 제거되고, RDF 성형 시 첨가되는 석회성분이 염소를 중화하여 안정적인 연소가 가능하기 때문인 것으로 분석되었다(최연석, 2008). 이런 특성 때문에 폐기물 고형연료화 사업은 국제기후변화 협약에 따라 이산화탄소 배출량 저감을 위한 대응책의 하나가 될 수 있다. 기타 특성으로는 연소재 불연물이 미리 제거되기 때문에 소각재의 발생량이 적고 소각재 내의 중금속 함량도 미량이다.

RDF의 연소특성은 연소가 안정적이어서 발열량이 일정하며 양질의 열회수가 가능하다는 것이다. 그리고 RDF는 전용보일러를 이용하므로 열에너지의 회수율이 높아 자원으로서의 특성을 가진다. 또한 열이용에 적합한

형태의 전용보일러를 선택함에 있어 열이용의 범위가 넓고, 기존의 석탄보일러 등에서 이용이 가능하며 발전 용도로 이용 시 석탄과 혼소가 가능하다. RDF 시설은 대기오염 물질 배출농도가 낮기 때문에 굴뚝 및 공해방지의 설비가 필요 없다. 설비도 단순하며 소형이기 때문에 많은 부지가 필요하지 않으며 건물도 작고 기계설비비 등도 저렴하여 같은 규모의 소각시설에 비하여 설비비가 상당히 저렴하다. 하지만 폐기물 처리라는 관점에서 보면 RDF를 연소해야만 폐기물이 처리되는 것이므로 RDF전용 보일러의 건설비를 고려해야 하는 단점이 있다((주)고려자동화, 2009).

(2) 활용분야

우리나라는 「자원의 절약 및 재활용 촉진에 관한 법률」에서 고형연료제품을 환경부령이 정하는 사용시설에서 사용하도록 정하고 있다(자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률, 제20조의3). 고형연료제품 사용시설은 시멘트소성로, 고형연료제품 전용발전시설 및 10MW 이상인 화력발전시설, 석탄사용량이 시간당 2톤 이상인 지역난방시설·산업용보일러·제철소 로(爐), 고형연료제품 사용량이 시간당 400kg이상인 전용보일러 시설 또는 고형연료제품 사용량이 시간당 200kg이상이고 연속적으로 가동하는 전용보일러시설과 그 밖에 환경부장관이 고형연료제품의 사용에 적합하다고 인정하여 고시하는 시설로 정한다. 생활폐기물 연료화 정책의 제약을 개선코자 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」 시행규칙 일부개정령(안)을 2009년 4월 24일 입법예고하여 기존 시간당 400kg 이상 보일러시설을 시간당 200kg 이상 사용하는 보일러 시설로 완화하고 열병합발전시설을 추가하였다.

RDF는 발열량이 높아 불에 태울 때 일정한 화력을 내므로 전용 발전소,

산업용 보일러, 시멘트 소성로, 석탄 화력발전소 등에서 이용할 수 있으며, 난방열로도 이용가능하다(환경부, 2008).

우리나라는 생산한 RDF를 시멘트 소성로에 사용하고 있으며, 원주시 청사에 냉·난방용 RDF 전용보일러를 설치하여 RDF를 보일러연료로 사용하는 시범사업을 실시하였다. 원주시 청사 시범사업의 경우 2006년 8월부터 2008년 7월까지 RDF를 연료로 사용한 결과 에너지 절감효과가 연간 1,188TOE로 추정되었다(한국환경자원공사, 2008). 또한 영농조합(금난원)에 RDF 전용보일러를 설치하여 연구한 결과, 연간 에너지 절감효과가 648TOE로 추정되었다. 그 밖에도 2011년 준공을 목표로 원주시에 10MWe급의 대형 RDF 전용발전소를 건설하고 있다(최연석, 2008).

다. 폐기물 고형연료화 사업의 사례

(1) 국외사례

(가) 유럽연합(EU)

유럽연합의 매립지침(Landfill Directive)과 폐기물소각지침(Waste Incineration Directive)은 RDF와 직접 관련있는 유럽연합 차원의 법적 규정이다. 매립지침은 생분해성 물질(유기탄소 5% 이상) 및 가연성 물질(발열량 1,433kcal/kg 이상)의 직매립을 금지하고 있으며, 폐기물소각지침에서는 직접소각과 혼합소각에 필요한 제반 규정을 담고 있다. 그리고 처리하지 않은 생활폐기물(untreated municipal waste)의 소각은 허용하지 않으며, 전처리과정을 거치도록 하고 있는 등 기존의 소각관련 법보다 강화된 규정을 제시하고 있다

(한국환경자원공사, 2008; 환경관리공단, 2007; 환경부, 2008). 이러한 이유 등으로 인해 유럽에서는 RDF 생산과 활용이 더욱 활발해지고 있다.

독일에서는 1980년대 세계 최초로 전처리시설(Mechanical Biological Treatment, MBT)기술을 개발하여 폐기물을 분리·선별하여 RDF를 생산하고 있다. MBT는 미생물에 의해 발효되는 유기성 폐기물과 플라스틱, 종이 등과 같은 일반 가연성 폐기물이 혼합되어 있을 때, 기계적으로 각각 분리한 후 유기성 폐기물은 미생물을 이용하여 처리하고 고발열량의 RDF 원료 물질을 선별하는 기술이다. 2006년 기준으로 독일은 전국 78개 시설에서 폐기물 720만 톤으로 연간 300만 톤의 RDF를 생산하고 있으며, 전용발전시설, 시멘트 소성로 및 화력발전소에 보조 연료로 활용하고 있다.

오스트리아와 이탈리아 역시 MBT 기술을 이용하여 RDF를 생산하고 있는데, 오스트리아는 연간 180만 톤 이상의 RDF를 제지, 목재 생산공정에 이용하며, 이탈리아에서는 시멘트 킬른에 연간 97만 톤의 RDF를 이용하고 있다.

이 밖에도 벨기에에서는 고형폐기물(Municipal Solid Waste, MSW)의 40~50%인 27만 톤을 RDF로 생산하여 1톤당 50~70유로의 가격으로 시멘트 공장에 판매하고 있으며, 네덜란드에서는 13개 공장에서 연간 70만 톤의 RDF를 생산하여 전력생산, 가스화 공정 등에 이용하고 있다.

최근 유럽에서는 RDF에 대한 인식이 급격히 높아지고 있으며, 2005년부터는 그리스, 덴마크 등에서도 RDF를 생산하고 있고 교역량도 증가하고 있는 추세이다(산업자원부 등, 2006, 2009; 지식경제부, 2008; 환경부, 2008).

(나) 미국

국가마다 배출하는 폐기물의 종류와 성상, 성분이 다른데, 미국의 경우 배출하는 폐기물에 수분이 적고 가연성 폐기물이 많아 생산한 RDF의 발열량이 높기 때문에 발전용 연료로 사용하는데 이점이 있다. 또한 RDF 공장과 발전소가 같은 장소에 있어 수거한 생활폐기물을 RDF 공장에서 가공한 다음 발전소로 이송하여 전기를 생산한다. 1972년 St. Louis시에 300톤/일 규모의 RDF 생산시설을 최초로 가동하였고, 1975년 가동하기 시작한 Ames시의 200톤/일 규모의 시설을 비롯한 30여개의 수 백 톤급 RDF 생산 시설을 건설하였다. 현재 미국은 25개 이상의 RDF 제조시설과 30여개의 RDF-석탄 혼합 발전소를 운영 중이다(김 등, 2003; 한국환경자원공사, 2008; 환경부, 2008).

(다) 일본

일본은 생활폐기물 처리형태가 소각 75%, 매립 15% 정도이다. 1990년대 중반 중소 도시의 중소형 소각로에서 다이옥신이 배출됨에 따라 사회적으로 심각한 문제가 되어 새로운 폐기물처리지침을 시행하고 있다. 1994년 토야미현 난토 리싸이클 센터의 RDF시설부터 보조금 지원을 시작하였고, 1997년 이후 다이옥신 발생량이 많은 중소형소각로를 RDF 생산 시설로 대체하여 RDF를 일괄적으로 모아서 사용하는 광역화 처리개념을 도입하였다. 일본의 RDF 발전소는 RDF를 목재석탄과 혼소하는 시설과 RDF만 단독으로 사용하는 전용시설이 있다. 현재 70여개의 RDF 시설이 가동 중이며, 생활폐기물 RDF 전용 발전소 5곳과 사업장폐기물 발전소 11곳을 가동하고 있다. RDF/RPF 생산량은 약 15,000~20,000톤/일 정도로 파악되며, RDF연료를 이용하여 약 500MW 정도를 발전하고 있다(김 등, 2003; 산업자원부 등, 2006, 2009; 지식경제부, 2008).

(2) 국내 사례

우리나라에서는 1983년 서울시 난지도 매립지에 처음으로 생활쓰레기를 대상으로 한 1,500톤/일 규모의 RDF 생산시설을 설치하였다. 이 시설은 덴마크로부터 도입한 대용량 시설이었지만 폐기물의 함수율이 높고, 연탄재(40% 이상)가 많이 포함되어 있어 정상 가동하지 못하였다. 1990년대에는 중소기업체를 중심으로 RDF가 많이 제조되었다. 1990년대 초에는 소규모 민간 기업이 개발한 200m³/일 규모의 RDF 시설을 청주시 용정동에 설치하였으나, 성형품의 지름이 100mm 정도로 커서 연소성이 나뻐서 처리용량이 부족하였다. 또한 단위공정별 수지가 불균형하였고 설비의 잦은 고장으로 중단되었다. 이후 진해시, 광주시 등에서 미국의 기술을 도입하여 RDF 생산시설을 설치하였지만 성공하지 못하고, 1995년 군포시에 100톤/일 규모의 RDF 생산시설을 미국 Golden Energy Cooperation사가 설치하였다. 그 후에는 한국폐자원(주), 현대 RDF(주) 등에서 많은 관심을 가지고 개발하였으나 기술적 문제로 실용화되지 못하였다. 1996년부터 1998년 3년 동안 생활폐기물을 대상으로 하는 RDF 제조 장치를 한국기계연구원과 (주)고려자동화가 공동으로 개발하여 현재 원주시에서 가동 중에 있다(김 등, 2003; 신대현, 2001; 환경부, 2008).

RDF 기술이 우리나라에 정착하지 못했던 이유는 우리나라의 폐기물 품질이 매우 낮았으며 우리나라 폐기물의 특성을 고려하지 않은 채 기술 도입 및 개발을 추진하였기 때문이다(신대현, 2001). 기술개발에 참여한 국내 기업의 경우 처리비용을 낮추기 위해 품질이 낮은 원료를 사용하였고, 최소의 전처리 공정만을 갖추었으며 핵심장치들을 외국기술에 의존하였다는 점도 RDF 기술이 국내에 일찍 정착하지 못한 이유로 들 수 있다. 또한 기업들이 영세하여 투자가 불가능하였으며, 정부의 지원이 미미하여 RDF 기

술의 발전이 빨리 이루어질 수 없었다.

1995년도부터 쓰레기 종량제·분리수거를 시행함에 따라 기존의 폐기물보다 RDF를 제조하는데 적합한 환경이 조성되었다. 2003년도부터는 생산자 책임활용제도(Extended Producer Responsibility, EPR)가 도입되었는데, 이는 가전제품이나 포장재처럼 재활용이 가능한 폐기물을 일정량 이상 재활용하도록 생산자에게 의무를 부여하고, 재활용 의무를 이행하지 못할 경우 실제 재활용에 드는 비용 이상을 생산자로부터 징수하는 제도이다(건설교통부, 2006). 이 제도의 도입으로 RDF 생산에 지원이 가능하게 되었다. 2006년 원주시에 생활폐기물 연료화 시설을 설치하여 현재까지 RDF를 생산하고 있으며, 많은 지자체에서 RDF 생산을 검토하고 계획, 추진 중에 있다. 현재 수도권매립지관리공사에 200톤/일 규모의 RDF 생산시설을 건설하고 있으며, 부천시에 90톤/일 규모, 행복도시에 103톤/일 규모의 RDF 생산시설 건설계획이 확정되었다(김 등, 2003; 산업자원부 등, 2006, 2009; 신대현, 2001; 환경부, 2008).

5. 에머지 개념

가. 에머지의 정의

인간 생활에 필요한 재화와 용역의 가치는 전통적으로 수요자의 지불의사(willingness-to-pay)에 의해 결정되어 왔다. 그러나 인간 중심의 가치는 자연 환경이 우리 삶에 기여하는 바를 평가하는데 한계가 있다. 지불의사를 이용한 가치평가는 자연환경의 이용이나 재화와 용역의 개발에 들어간 인간의 노동력만을 평가하므로 자연환경과 자원의 진정한 부(real wealth)를 평가하지 못하였다. 이를 위한 대안으로 Odum은 에너지를 공통화폐(common currency)로 사용할 것을 제안하였다(Odum, 1996). 에머지(emergy) 개념은 에너지를 공통화폐로 이용하여 우리 삶에 기여하는 재화와 용역의 기여 가치를 평가한다.

에머지는 “energy memory”를 줄여서 표현한 것으로, “한 가지 서비스나 생산물을 만드는데 직·간접적으로 사용된 한 종류의 이용 가능한 에너지”로 정의하며, 단위는 emjoule을 사용한다(Odum, 1996). 예를 들어 우리가 흔히 구입할 수 있는 종이의 가치를 에머지 관점에서 평가한다면 나무를 베어 운반하고 가공하는데 들어간 인간의 노동력뿐만 아니라 이 나무가 성장하는데 필요했던 모든 에너지(태양, 바람, 비, 영양물질, 연료, 기계 등)까지 포함하는 것이다.

현재 에머지 개념에서 서로 다른 에너지를 비교하기 위해 사용하는 ‘한 종류’의 에너지는 태양에너지이다. 따라서 태양에너지로부터 시작하여 하나의 생산물이 만들어지기까지 직·간접적으로 사용된 모든 에너지량을 태양에너지량을 기준으로 나타낸 것을 태양에머지(solar emergy)라고 하며, 단위는 solar emjoules(sej)를 사용한다(Odum, 1996).

나. 에너지변환도

에머지 개념의 핵심 논리 가운데 한 가지는 에너지의 종류마다 일을 할 수 있는 능력이 다르다는 것이다(Odum, 1996). 이에 따라 앞의 에머지 정의에서 살펴본 바와 같이 에머지 평가에서는 ‘한 종류의 이용가능한 에너지’인 태양에너지를 기준으로 다른 에너지를 환산하여 이용한다.

에머지 개념에서 서로 다른 종류의 에너지가 가지고 있는 일을 할 수 있는 능력의 차이는 에너지변환도(transformity)로 나타낸다. 에너지변환도는 한 가지 생산물이나 서비스가 만들어지는데 직·간접적으로 투입된 에너지의 합계, 즉 에머지를 이 자원이 가지고 있는 에너지량으로 나누어 구하며, 단위는 사용한 자료에 따라 emjoules/J, emjoules/g, emjoules/W, emjoules/\$ 등을 이용한다(Odum, 1996).

Fig. 2.7은 태양에너지가 생태적, 경제적 과정을 거쳐 전기에너지로 바뀌는 에너지변환사슬(energy transformation chain)을 보여준다. 열역학 제1법칙에 따라 태양에서 유입하는 40,000J의 에너지가 나무, 석탄, 전기로 차례로 변환하면서 2J, 1J, 1/4J로 그 양이 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 2.7의 접지기호는 열역학 제 2법칙을 따라 에너지변환 과정에서 손실되는 에너지를 나타낸다. Fig. 2.7에서 시스템으로 들어오는 유일한 에너지인 태양 에너지 40,000J은 시스템 내부에서 일어나는 모든 에너지변환과정에 직·간접적으로 관여한다. 따라서 이 시스템의 에머지 유입량은 40,000 sej가 된다(에머지량은 태양에너지를 기준으로 나타낸 값이다). 태양에머지 40,000 sej를 각 단계의 에너지량으로 나누어 주면 나무, 석탄, 전기의 에너지변환도는 각각 20,000 sej/J, 40,000 sej/J, 160,000 sej/J이 되며, 에너지변환이 더 많이 일어날수록 에너지변환도는 커진다. 에너지변환도가 클수록 자원의 질은 더 높는데, 이는 에너지변환 계층구조 내에서 각 에너지의 위치를 지시

한다(Odum, 1983, 1996).

에너지변환도를, 에머지 개념에서 기준으로 사용하고 있는 태양에너지로 나타낸 것을 태양에너지변환도(solar transformity)라 하며, 단위는 solar emjoules per joule(sej/J)이다(Odum, 1996).

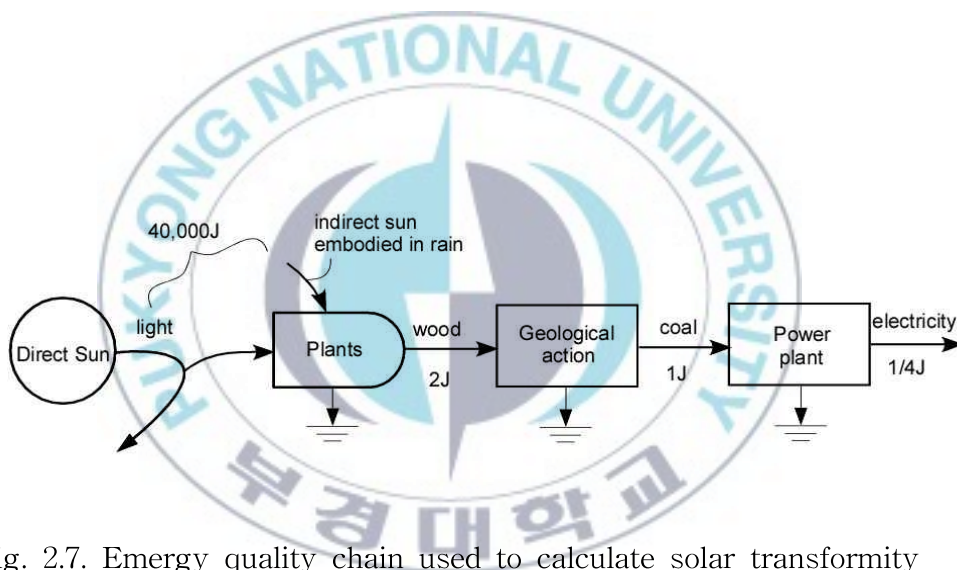


Fig. 2.7. Emergy quality chain used to calculate solar transformity (Odum,1988).

6. 선행연구

가. 폐기물 처리 에머지 평가

국내외에서 에머지 개념을 이용하여 RDF 사업을 평가한 사례는 아직 없다. 따라서 여기에서는 에머지 방법론을 이용하여 폐기물 처리 대안을 평가한 국외 사례를 검토하였다. 우리나라에서는 아직 폐기물 처리에 관한 에머지 평가 사례가 없다.

Marchettini et al.(2007)은 이탈리아의 고형폐기물 관리대안을 비교하기 위하여 에머지 방법론을 적용한 사례이다. 이 연구에서는 폐기물처리 방법(매립, 소각, 퇴비화)별로 수집, 처리, 처분의 세 단계로 나누어 에머지 평가를 수행하였다. Marchettini et al.(2007)은 서로 다른 고형폐기물 관리대안을 비교하기 위하여 단위 폐기물(1g)을 처리하는데 드는 비용을 에머지로 나타낸 값, 즉 에머지 비용(emergy costs)과 각 처리방법별로 단위 폐기물당(1g) 회수한 자원(전기, 열, 퇴비 등)의 에머지량, 즉 에머지 편익(emergy savings)을 계산하였다. 에머지 편익과 에머지 비용 사이의 비로 나타낸 environmental yield ratio는 퇴비화가 3.93으로 가장 높았다(Table 2.5). 즉, 퇴비화가 투입 비용대비 편익이 가장 컸다. 이에 비해 매립은 투입 에머지 비용의 19%만 에머지 편익으로 회수하여 가장 나쁜 결과를 보였다. 그러나 에머지 편익과 에머지 비용 사이의 차로 나타낸 순 에머지(net emergy)는 소각이 가장 높았다. 즉, 소각은 다른 대안에 비해 단위 폐기물당 순 에머지 편익이 가장 컸다.

Table 2.5. Environmental yield ratio(energy savings/energy investment) and net energy of three solid waste treatment alternatives evaluated by Marchettini et al.(2007)

System	Environmental yield ratio	Net energy
Composting	3.93	3.59×10^8
Landfilling	0.19	-4.21×10^8
Incineration	3.20	3.84×10^8

나. 고형연료화 사업 경제성 분석 국내 사례

우리나라에서 RDF 사업에 대한 경제성 분석을 수행한 연구로 「가연성 폐기물 고형연료(RDF)의 경제성 분석 및 제도도입에 관한 연구」를 들 수 있다. 이 연구에서는 RDF 사업의 경제성 분석의 국외 사례에 대한 검토는 수행하지 않았다.

수도권매립지관리공사(2006)는 W시 RDF의 사업의 경제성을 분석한 사례인데, 시설 규모별 제조비용을 계산한 결과는 Table 2.6과 같다. 시설규모가 커질수록 처리 비용은 낮아지고, 준 연속식으로 운전하는 80톤/일 이상의 규모에서는 폐기물 1톤당 10만원 전후의 비용이 필요한 것으로 나타났다.

여기서는 RDF 시설에 필요한 비용을 건설비와 유지관리비로 구분하였다. 건설비의 경우 시설의 감가상각비로 제시하였고, 유지관리비는 다시 인건비, 유지관리비(등유, 소석회, 활성탄, 수도, 전기 비용), 기타경비(유지보수비, 관리비), 선별잔사 처리비, RDF 운반비로 구분하여 분석하였다. Fig. 2.8은 시설 규모별 처리비의 항목별 구성비율을 나타낸 것이다. 규모에 관계없이 기타 처리비와 인건비가 차지하는 비율은 거의 일정하게 유지되었

다. 그러나 규모가 커질수록 감가상각비 비율은 낮아지고, 연료가 차지하는 비율은 증가하였다. 시설의 규모에 상관없이 처리비 중 연료(등유)가 차지하는 비율이 가장 높았다. 하루 처리용량 80톤 규모의 RDF 제조시설에서 연간 24,000톤의 폐기물을 처리할 경우 RDF 제조비용은 총 127,829원/(톤-폐기물)으로 추정되었다. 이 가운데 유지관리비가 96,579원/(톤-폐기물)으로 75.6%를 차지하였고, 건설비(감가상각비)는 31,250원/(톤-폐기물)으로 24.4%를 구성하였다.

수도권매립지관리공사(2006)는 RDF 제조과정에는 전력과 연료가 많이 소비된다는 점을 고려하여 전력과 연료비용의 합과 RDF 에너지 보유량의 비율로 RDF 에너지 회수율을 계산하였다(Table 2.7). 그 결과 W시 RDF 사업의 에너지 회수율은 76.6% 이상이었으며, RDF 생산에 사용한 전력과 등유에너지 대비 RDF의 에너지량이 2배 이상 많았다. 이 연구에서 분석한 RDF 시설규모와 같은 80톤/일인 경우 등유환산량이 6,735kl로, 약 2,125세대의 연간 등유사용량에 해당한다.

Table 2.6. Construction and maintenance costs of a RDF processing facility with different treatment capacities(SLC, 2006)

(unit : ₩/ton-waste)

Items	Capacity(ton/day)					
	20	40	80	100	200	400
Waste throughput (ton/year)	6,000	12,000	24,000	30,000	60,000	120,000
Depreciation	67,130	60,571	31,250	30,093	17,747	15,160
Labor	37,333	18,667	17,500	14,000	11,667	8,167
Fuel	55,250	55,250	51,000	51,000	51,000	51,000
Slaked lime	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
Activated carbon	1,150	1,150	1,150	1,150	1,150	1,150
Water	120	120	120	120	120	120
Electricity	9,000	9,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Maintenance	10,025	9,045	7,000	6,741	5,300	4,527
Management	9,333	4,667	4,375	3,500	2,917	2,042
Residue disposal	1,065	1,065	1,065	1,065	1,065	1,065
RDF transportation	7,269	7,269	7,269	7,269	7,269	7,269
Total	198,776	167,904	127,829	122,038	105,334	97,600

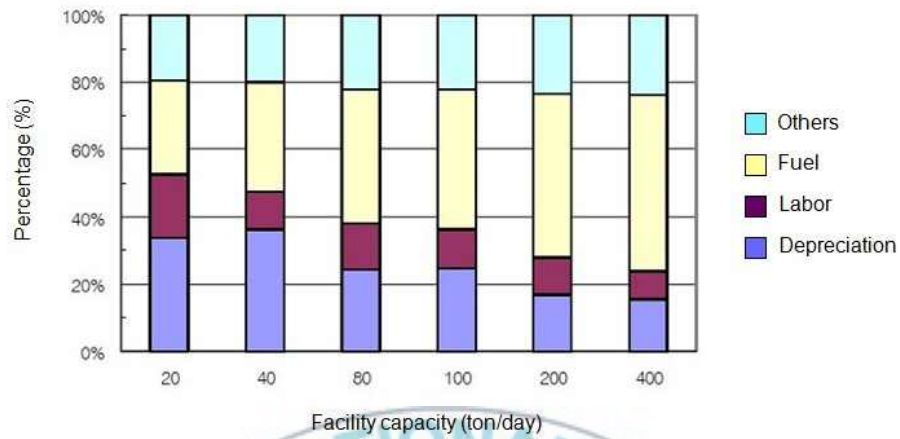


Fig. 2.8. Composition of the operation and maintenance cost of a refuse-derived fuel processing facility for different processing capacities(SLC, 2006).

Table 2.7. Energy recovery rates of a refuse-derived fuel processing facility for different processing capacities(SLC, 2006)

scale	Waste throughput		Electricity consumption		Fuel consumption		RDF production		Fuel conversion	Energy recovery
	ton/year	Gcal/year	MWh/year	Gcal/year	kℓ/year	Gcal/year	ton/year	Gcal/year	kℓ	%
20	6,000	13,812	900	2,025	420	3,738	3,330	14,985	1,684	76.6
40	12,000	27,624	1,800	4,050	840	7,476	6,660	29,970	3,367	76.6
80	24,000	55,248	2,400	5,400	1,560	13,884	13,320	59,940	6,735	80.4
100	30,000	69,060	3,000	6,750	1,950	17,355	16,650	74,925	8,419	80.4
200	60,000	138,120	6,000	13,500	3,900	34,710	33,300	149,850	16,837	80.4
400	120,000	276,240	12,000	27,000	7,800	69,420	66,600	299,700	33,674	80.4

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 연구대상

본 연구에서 에머지 평가 대상으로 선정한 폐기물 고형연료화 시설은 강원도 원주시에 있는 생활폐기물 고형연료화 시설이다.

강원도 원주시 광역매립장 내에 있는 생활폐기물 연료화시설은 (주)한화건설과 거봉종합건설(주), 고려자동화(주)가 시공하였다. 2005년 5월 30일부터 2006년 9월 19일까지의 공사기간을 거쳐 2006년 10월 9일 가동을 시작하였다. 국비, 도비, 시비로 총 115억 원의 사업비가 들었으며, 시설 규모는 부지면적 11,276㎡, 건축면적 2,496㎡, 연면적 3,148㎡이다(원주시, 2009). 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 광역매립장 지구 내에 있지만 매립장과는 분리되어 있다. 따라서 매립장을 제외한 고형연료화 시설의 부지면적 11,276㎡를 시스템 경계로 하여 해당 면적에 연간 들어오는 에너지량을 계산하였다.

원주에서 발생하는 폐기물은 원주시 광역매립장에 매립하는데 이 중 일부가 고형연료화 시설에 투입된다. 따라서 시설의 관점에서 본다면 폐기물 수거에 대한 비용 없이 무상으로 폐기물을 공급받고 있다. 이 시설은 하루에 80톤의 폐기물을 처리할 수 있고, 1일 16시간을 가동하고 있다(원주시, 2009). 현재 (주)REM에서 위탁 운영하고 있으며, 위탁운영비는 반입폐기물 기준으로 1톤 당 60,510원이다. 여기서 생산한 RDF는 Table 3.1에 나타난 RDF 품질등급 "다"군에 2등급을 받아 2007년 1월 10일 고형연료제품 품질·등급인증서를 획득하였다.

RDF 생산과정은 크게 반입공급설비, 전처리설비, 건조설비, 선별설비,

성형 및 반출설비로 나타낼 수 있다. Fig 3.1과 같이 크레인을 이용하여 반입한 폐기물은 투입호퍼에 저장하고, 파쇄기를 통해 파쇄 된 폐기물은 1, 2차 선별을 통해 건조된다. 풍력선별기를 통해 다시 1, 2차선별을 거친 후 비철금속을 선별하고 Ring-Dies type 성형기를 통해 성형된다(한국환경자원공사, 2008).

Table 3.1. Grade examination result for the refuse-derived fuel produced by the Wonju refuse-derived fuel processing facility, Korea (www.kacrdf.co.kr)

Item		Criteria	Results	grade
RDF size (mm)	diameter	≤ 30	15	
	length	≤ 100	43	
Low heating value (kcal/kg)		$\leq 3,500$	4,569	III
Moisture(% wt)		≤ 10	1.29	
Ash(% wt)		≤ 20	18.1	
Chlorine(% wt)		≤ 2	0.96	II
Sulfur(% wt)		≤ 0.6	0.31	
Metals (mg/kg, dry standard)	Hg	≤ 1.20	not detected	
	Cd	≤ 9	1.49	
	Pb	≤ 200	48.54	
	As	≤ 13	not detected	
	Cr	input measurements have or provide them to end users	34.14	
	Sb		5.47	
	Co		1.98	
	Cu		60.32	
	Mn		137.52	
	Ni		16.62	
	Tl		not detected	
	V		10.94	

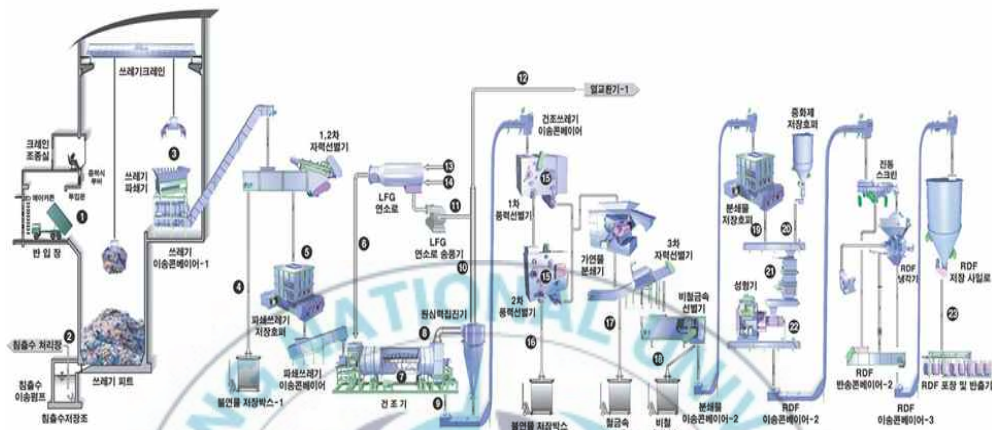


Fig. 3.1. Flowchart for refuse-derived fuel production in the Wonju refuse-derived fuel processing facility, Korea(www.kacrdf.co.kr).

이 시설에서 생산한 RDF는 강원도 동해시에 있는 쌍용양회 동해공장, 강릉시에 있는 라파즈한라시멘트 옥계공장에 연간 12,000톤을 공급하여 8,500톤의 유연탄 수입을 절감하는 효과를 거두었다(원주시, 2009). 또한 원주시 청사에 RDF 전용 보일러를 설치하여 RDF를 이용함으로써 연간 3~5 억원의 에너지 비용을 절감하였다. 이 밖에도 이 시설에서 생산한 RDF는 엘콘파워, 대한제지 등 총 11곳에 사용자 운반비용 부담으로 무상 공급하고 있다.

2. 에머지 평가

에머지 평가과정은 에너지시스템 다이어그램 작성, 에머지 평가표 작성, 에머지 지수 계산 등 크게 3가지 단계로 나뉜다.

가. 에너지시스템 다이어그램 작성

에너지시스템 다이어그램은 평가하고자 하는 대상의 네트워크 특성을 파악하고, 연구 목적에 따라 주요 평가항목을 구분하기 위하여 작성하는 시스템 모델이다. 에너지시스템 다이어그램은 시스템 생태학자인 Howard T. Odum(1996)이 개발한 에너지시스템언어(energy systems language)를 이용하는데, 에너지시스템언어의 기호 가운데 일부를 Fig. 3.2에 제시하였다.

에너지시스템 다이어그램 작성과정은 5단계로 나누어진다.

첫째, 평가하고자 하는 시스템의 경계를 정하는데, 시스템의 경계는 연구목적에 명확히 반영하여야 한다.

둘째, 평가대상 시스템의 경계가 결정되면 시스템 외부에서 시스템 내부에 영향을 미치는 요소들을 모두 파악한다. 여기서 말하는 요소들은 태양, 바람, 비 등의 자연요소는 물론 연료, 재화와 용역 등 외부에서 구입한 모든 요소를 포함한다.

셋째, 평가대상 시스템 내부의 구성요소를 파악한다.

넷째, 평가대상 시스템의 내부 구성요소와 외부 요소를 연결하는 주요 흐름을 파악한다.

다섯째, 외부 에너지원과 내부 에너지를 에너지변환도(transformity)가 낮은 것부터 왼쪽에서 오른쪽으로 배치하고, 네 번째 단계에서 파악한 흐름에 따라 각 구성요소들을 연결한다.

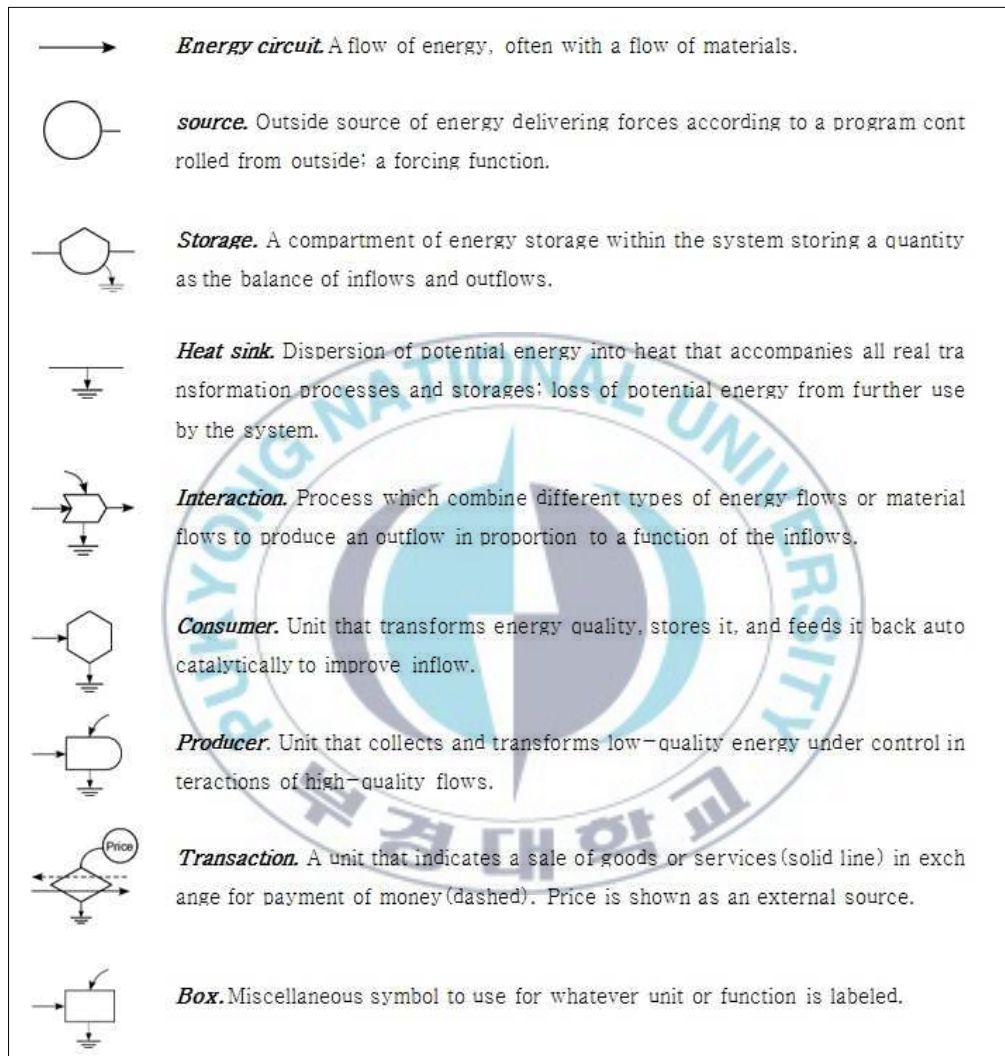


Fig. 3.2 Examples of the energy systems language symbols (Odum, 1996).

나. 에머지 평가표

에머지평가의 두 번째 단계에서는 평가대상 시스템의 다이어그램을 이용하여 에머지 평가표를 만든다. 에머지 평가표의 전형적인 양식은 Table 3.2와 같다.

에머지 평가표의 첫 번째 열에는 각 항목의 자료 출처와 에머지 계산과정을 나타내기 위한 주석번호를 기입한다.

두 번째 열에는 평가항목(흐름량 또는 저장량)의 이름을 적고, 세 번째 열에는 각 평가항목의 에너지, 물질 또는 화폐단위의 값(J/yr, g/yr, ₩/yr 등)을 기입한다.

네 번째 열에는 각 항목의 태양에너지변환도를 기입하는데, 직접 계산하거나 문헌자료를 이용한다. 평가항목의 자료가 에너지 단위가 아닌 경우 에너지 변환도를 energy intensity, specific emergy라고 부른다(Brown and Ulgiati, 2004). 자료의 단위가 화폐인 경우에는 에머지화폐비율(Emergy-Momey Ratio, EMR)이라고 한다.

다섯 번째 열에는 세 번째 열의 실제 자료와 네 번째 열의 태양에너지 변환도를 곱하여 계산한 태양에머지값(sej/yr 등)을 적는다.

여섯 번째 열에는 각 평가항목의 태양에머지값을 에머지화폐비율(EMR)로 나누어 구한 Emvalue(em\$/yr, em₩/yr 등)를 기입한다.

평가대상 시스템으로 유입하는 총 에머지량은 평가표에 있는 각 유입항목의 태양에머지를 더하여 구하는데, 이 과정에서 이중 계산(double counting)을 피해야 한다(Odum, 1996). 예를 들어 시스템 외부에서 유입하는 자연활동에서 바람과 강우는 태양에너지가 지구를 가열하여 생기는 현상으로, 세 값을 더하여 총 에머지량을 계산하면 태양에머지의 값을 이중 계산하게 되는 것이다. 따라서 이런 경우에는 에머지 값이 가장 큰 에너지

만 선택하여 총 유입 에머지량 계산에 이용한다.

Table 3.2. Tabular format for the typical emergy evaluation table

No.	Item	Data unit	Solar transformity	Solar emergy	Emvalue
		J/yr, g/yr,	sej/J, sej/g		em\$/yr or
1	...	\$/yr(or	sej/\$(or sej/₩),	sej/yr, etc	em₩/yr,
		₩/yr), etc	etc		etc

다. 에머지 지수

에머지 평가의 세 번째 단계에서는 에머지 평가표에서 구한 값을 이용하여 대상 시스템의 특성을 평가하는데 유용한 에머지 지수를 계산한다. 에머지 지수를 계산할 때는 평가대상 시스템에서 사용하는 에머지원을 시스템 내로 유입하는 자연환경자원(태양, 바람, 강우 등)과 같은 재생가능 에머지(R), 시스템 내부의 재생불가능한 에머지(N), 시스템 외부에서 유입하는 에머지(F)로 나눈다. 평가대상 시스템의 최종산물에 포함된 에머지량(Y)은 R, N, F를 더하여 구한다. 이 연구에서 생활폐기물 고형연료화 사업을 평가하는데 활용한 에머지 지수는 에머지화폐비율, emvalue, 에머지산출비율(Emergy Yield Ratio, EYR)이다(Fig. 3.3).

(1) 에머지화폐비율

에머지화폐비율(EMR)은 평가대상 경제의 화폐가 구매할 수 있는 에머지량, 즉 에머지구매력(emergy buying power of money)을 나타낸다(Odum, 1996). EMR이 감소하면 같은 양의 화폐로 구매할 수 있는 실질적인 부(real wealth)가 감소한다는 것을 의미한다. EMR은 평가 대상 시스템이 1년 동안 사용한 총 에머지량을 그 해의 경제적 총생산(GDP, RGDP 등)으로 나누어 구한다.

(2) Emvalue

Emvalue는 평가항목의 에머지량을 EMR로 나누어 계산하는데, 이를 통해 에머지값을 화폐단위로 바꾸어 기존의 경제 통계자료나 경제학적 평가자료와 비교할 수 있게 된다. Emvalue의 단위는 사용한 EMR에 따라 Emdollar(Em\$), Emwon(Em₩) 등으로 나타낸다. 본 연구에서는 우리나라의 2007년 $EMR(2.66 \times 10^9 \text{ sej/₩})$ 을 구하여 고형연료화 사업의 평가항목별 Emvalue를 계산하였다.

(3) 에머지산출비율

에머지산출비율(EYR)은 평가대상시스템이 생산한 최종 산물의 에머지(Y)를 시스템 외부에서 구매하여 투입한 에머지량(F)으로 나누어 구한 값으로, 평가대상 시스템의 경쟁력을 나타낸다(Fig. 3.3). EYR은 시스템의 효

을성을 나타내는데, EYR이 높은 시스템이 실질적인 부를 생산하는데 있어 경쟁력이 높다. Brown and Ulgiati(2002)에 따르면 EYR이 5보다 크면 일차 에너지원(primary energy source), 2~5인 경우 이차에너지원(secondary energy source)으로 구분할 수 있다. EYR이 2이하이면 에너지원으로서의 성격보다는 소비재의 성격을 가지거나 실제 에너지원보다 더 많은 변형단계를 거친 것을 의미한다.

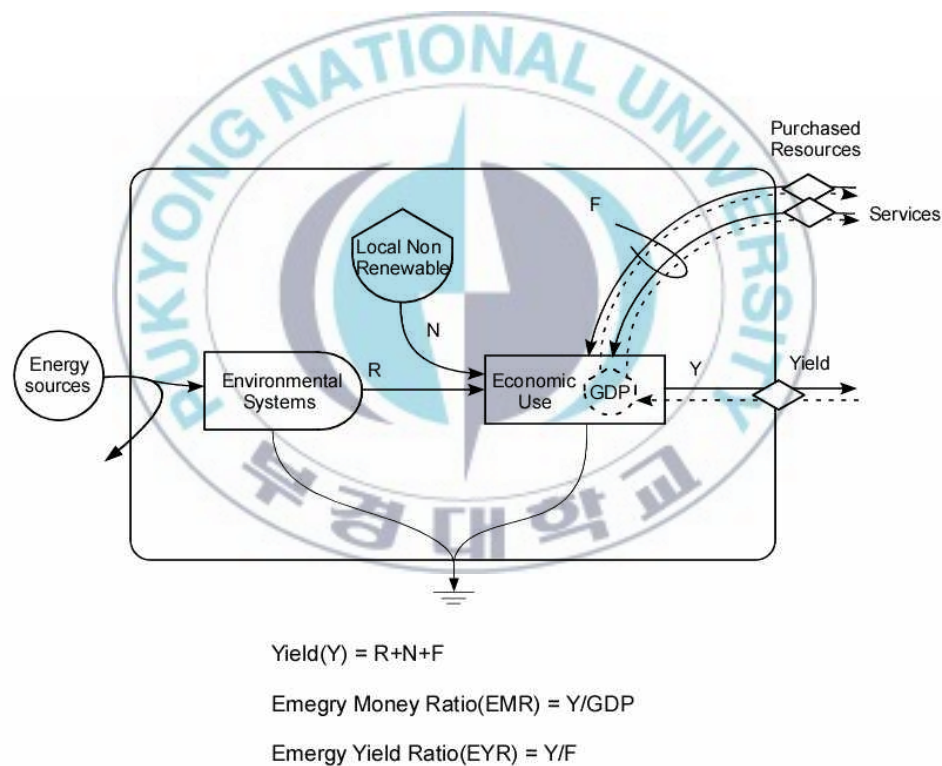


Fig. 3.3. Emergy indices used in this study; R = local renewable emergy inputs, N = local nonrenewable inputs, F = purchased inputs from outside the system (Brown and Ulgiati, 1999).

라. 에머지 평가 자료

(1) 원주시 생활폐기물 수거

원주시 생활폐기물 고형연료화 사업의 에머지 평가에 앞서 원주시에서 발생하는 생활폐기물에 대한 에머지 평가를 수행하였다. 생활폐기물은 RDF의 주원료이기 때문에 RDF 시설의 에머지 평가에서 생활폐기물에 포함된 에머지량은 중요한 입력 자료가 된다. 하지만 현재 우리나라에서 폐기물에 대한 에머지 평가를 따로 연구한 바가 없어 본 연구에서 원주시 생활폐기물의 에머지 평가를 통하여 RDF 시설에 투입하는 생활폐기물의 에머지량을 계산하였다.

원주시에서는 하루에 약 200톤 정도의 생활폐기물이 수집된다(강민수, 원주시청, 2009, Pers. Comm.). 원주시 생활폐기물의 물리적 성상은 2007년 전국 폐기물 발생 및 처리현황(환경부 등, 2008)을 참고하여 구분하였다. 발생량 기준으로 볼 때 원주시 생활폐기물은 가연성 기타물질이 34%로 가장 많고, 플라스틱 14%, 고무와 가죽류 13%, 종이류 12%, 목재류 9%, 음식물류 8%, 불연성 기타 물질 6%, 철금속류 3%, 유리류 1% 순으로 나타났다(Fig. 3.4). 이 중 직접적으로 RDF가 되는 가연성 폐기물(원주시 생활폐기물의 90%)을 대상으로 에머지 평가를 실시하였는데, 종이류, 플라스틱류, 목재류, 고무 및 가죽류, 음식물류, 기타 가연성 물질이 이에 포함된다. RDF가 되는 폐기물의 에머지 평가는 가연성 생활폐기물의 물리적 조성(생활폐기물 수거단계(노동력, 서비스, 운송수단, 연료)로 나누어 계산하였다. 생활폐기물은 물리적 조성으로 나누어 평가하였는데 종량제 봉투안의 폐기물은 제품으로서의 성질을 잃어버리고 RDF라는 연소 물질이 되므로 이를 고려한 에너지변환도를 적용하였다. 또한 생활폐기물을 수집하는데 드는 노동력,

운반수단, 연료는 2009년 생활폐기물 수집·운반비용 원가 산정용역을 기준을 이용하여 구하였다(우미영, 원주시청, 2009, Pers. Comm.).

생활폐기물을 수집하는 노동력은 하루 평균작업시간 8시간을 기준으로 하였고 운송수단은 하루 5시간 기준으로 5톤 암롤차와 0.5톤 라보차를 사용하므로, 이들의 유효수명 10년으로 나누어 연간 투입량으로 변환하여 계산하였다. 운송수단에 이용된 연료는 경유로 2009년 5월부터 9월까지의 평균값으로 계산하였다(한국광물자원공사, 2009).

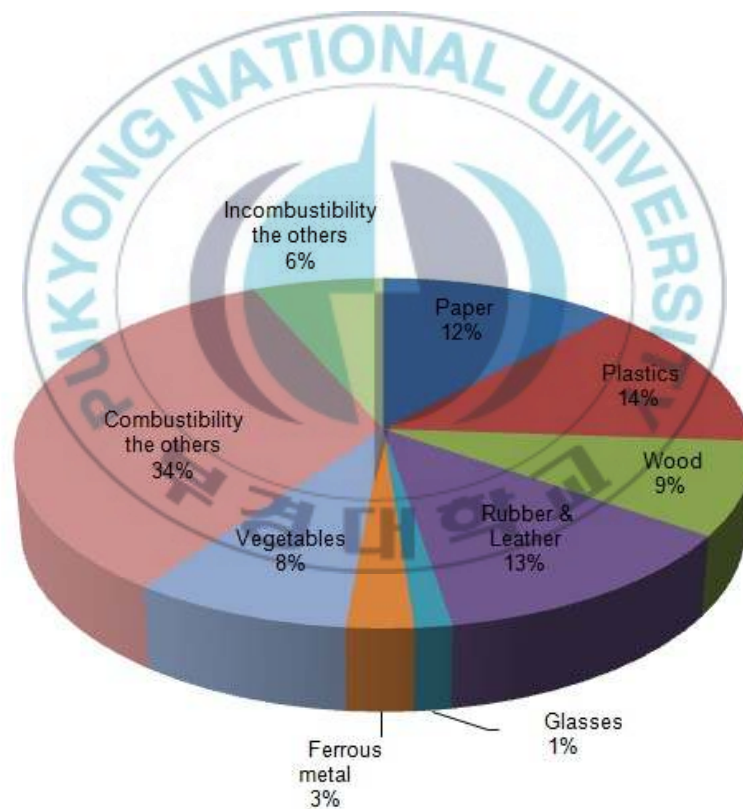


Fig. 3.4. Composition of municipal wastes collected in Wonju, Korea in 2007(MOE et al., 2008).

(2) 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설

평가대상인 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설로 들어오는 재생가능자원은 태양, 바람, 강우이다. 태양에너지 유입량, 바람, 강우 자료는 2007년 원주시 기상관측소 자료를 이용하였다(기상청, 2007).

시스템 외부에서 시설로 투입하는 생활폐기물은 2007년 원주시에서 수거한 73,000톤 중 13,029톤이 시설에 투입되었고, (주)고려자동화의 물질수지 분석자료를 바탕으로 투입한 폐기물의 50.8%가 RDF가 된다고 가정하였다. 즉, RDF 공정에서 고형연료로 변환되는 폐기물량은 원주시 전체 가연성 폐기물의 9%인 6,618톤/yr이었다.

고형연료화 시설 건설단계의 재료, 서비스, 노동력은 고형연료화 시설의 유효수명 20년, 공정의 각 기계는 유효수명 10년으로 나누어 연간 에너지량으로 변환하였다. 콘크리트 사용량과 건축물의 철골·철근 사용량은 (주)한화건설, 기계 설비 재료에 관한 자료는 (주)고려자동화에서 자료를 제공받았다. 기중기는 건설할 때 사용한 철골과 철근의 양으로 2009 건설공사표준품셈을 참고하여 하루 8시간 작업한다는 가정 하에 계산하였으며, 굴삭기는 2009 건설공사표준품셈에 나와 있는 굴삭기 시간당 작업량으로 계산하였다. 서비스는 건설설계비, 재료구입비, 기계·장비비 등을 포함한다.

RDF 시설 운영단계의 자료는 원주시, Ring dies nozzle과 Roller의 자료는 (주)고려자동화에서 제공받았다. 이 부품들은 2~3개월에 한번 씩 교체를 해 주는데, 3개월에 한번 씩 교체한다는 가정 하에 계산하였다. 시설에서는 사용하는 연료는 부생1호와 부생2호¹⁾이며, 서비스는 전기료, 연료비, 부품비 등을 나타낸다.

1) 부생1호: 석유화학공장에서 나프타를 원료로 하여 제품을 생산하는 과정에서 생산되는 탄소 수 9~8개 정도의 제품, 환경친화적 연료

부생2호: 석유화학공장에서 나프타를 원료로 하여 에틸렌, 프로필렌 등 석유화학 제품을 생산하는 과정에서 생산되는 탄소 수 9~12개 정도의 제품, 산업용으로 한정(www.yeschem.co.kr)

3. 에머지 비용·편익 평가

가. 비용·편익분석

모든 사업에 있어 우리는 비용과 편익을 따져 사업의 타당성을 판단한다. 이와 같이 특정 사업의 비용과 편익을 비교·평가하여 사업의 타당성을 검토하는 것을 비용·편익분석(cost-benefit analysis)이라고 한다. 여기에서 비용(cost)은 공공투자사업으로 희생되는 현재의 사회적 소비, 편익(benefit)은 공공투자사업으로 발생할 증가된 사회적 소비이다(안상훈, 2004). 사업의 추진 타당성을 평가할 때 편익이 비용보다 크면 사업의 타당성을 인정한다.

노(2005)는 넓은 의미의 비용·편익분석은 경쟁적인 공공투자기회의 긍정적인 효과와 부정적인 효과를 체계적으로 평가하고 가능한 이들을 계량화하여 대안의 비교평가에 명시적으로 포함시키는 일련의 방법론을 지칭하는 것이라 하였다. 환경부(2003)는 정부가 수행하는 갖가지 정책이나 투자 사업에 대한 평가를 하기 위해 사용하는 가장 일반적인 분석 틀로서, 여러 가지 정책대안을 수행하는데 소요되는 비용과 그로 인한 편익을 측정하고 이에 기초하여 최선의 대안을 선택하기 위해 사용되는 기법이라 하였다. 또한 한(2007)은 의사결정을 하는데 있어 가능한 모든 비용과 편익을 따져 대안들 중 최적대안을 선정하는 기법이라 하였으며, 김(2004)은 정해진 공공목표를 달성하기 위하여 예상되는 여러 대안들(alternatives) 각각의 비용과 편익을 측정하고 비교 평가하여 최선의 대안을 도출하는 기술적 방법이라 하였다.

비용편익 분석은 말 그대로 사업에 들어간 비용과 그 사업으로 인해 얻을 수 있는 편익을 비교·평가하여 사업 타당성의 유무를 가리키는 방법으로 우선적으로 비용과 편익을 비교하고, 여러 대안들 중 선택을 하여야 한다면 비

용이 동일할 경우 편익이 큰 대안을 선택, 편익이 동일할 경우 비용이 가장 작은 대안을 선택한다. 비용·편익분석은 현재의 편익과 비용의 차이, 비용의 현재가치에 대한 편익의 현재가치비율인 비용편익비(benefit cost ratio, B/C ratio)를 계산하여 비교·평가한다.

나. 에머지 비용·편익평가

에머지 비용·편익평가는 위에서 언급한 비용·편익분석과 같은 개념이다. 특정 사업의 비용과 편익을 에머지 단위로 나타내 비교·평가하는 점이 다를 뿐이다. 이에 따라 화폐단위를 사용하는 경제학적 비용·편익분석과 다른 관점의 시각을 제공할 수 있다. 이 연구에서는 비용과 편익의 에머지 값을 EMR로 나누어 Emvalue로 변환한 후 에머지 비용·편익평가를 실시하였다.

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 비용은 시설을 설계하고 건설하는데 들어간 비용과 시설을 운영하고 관리하는데 들어가는 유지관리비로 나눌 수 있다. 고형연료화 사업의 에머지 편익은 일차적으로 시설을 통해 생산하는 연료인 RDF를 들 수 있으며, 폐기물을 자원으로 회수함으로써 매립하는 폐기물의 양이 줄어들어 얻는 매립지 시설비 절감효과를 들 수 있다. 고형연료화 시설의 간접적 편익은 우리나라처럼 국토가 좁은 경우 국토의 효율성을 증진할 수 있으며, 유연탄 사용량 감소에 따른 에너지 절감효과와 소각에 비해 대기오염물질이 덜 배출된다는 점이다. 하지만 본 연구에서는 평가 자료의 한계로 원주시 생활폐기물 고형연료화 사업으로 인한 직접적인 에머지 비용과 편익만을 다루었다. 이에 따라 설계 및 건설, 유지관리에 들어가는 재료, 연료, 서비스, 노동력 등을 에머지 비용, RDF 생산과 매립지 시설비 절감효과를 에머지 편익으로 평가하였다.

IV. 결과

1. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설 다이어그램

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에너지시스템 다이어그램은 Fig. 4.1과 같다. 평가대상 시스템으로 들어오는 재생가능한 자원은 태양, 바람, 강우로 나타내었고, 이 시스템 내에는 재생불가능한 자원이 없어 제외하였다. RDF의 주요 원료인 고형폐기물(Municipal Solid Waste, MSW)이 시스템 외부로부터 들어오고, 시설을 설계하고 건설하는데 들어간 재료, 기계 장비, 연료, 노동력, 예산, 그리고 시설을 운영하고 관리하는데 필요한 노동력, 예산, 전기, 연료 등도 외부로부터 구입하여 투입된다.

시스템 내부에 포함된 RDF 생산설비(Fig. 4.1의 structure 저장고)의 왼쪽에는 이 시설의 건설과정을, 오른쪽에는 이 시설을 이용하여 RDF를 생산하는 공정을 배치하였다. 이 시설에서 생산한 RDF는 각 공급처에서 직접 운송하는 조건으로 무상으로 공급하고 있다. 그리고 여러 공정 과정을 거치면서 RDF가 되지 않은 폐기물은 매립지로 운반되어 처리된다.

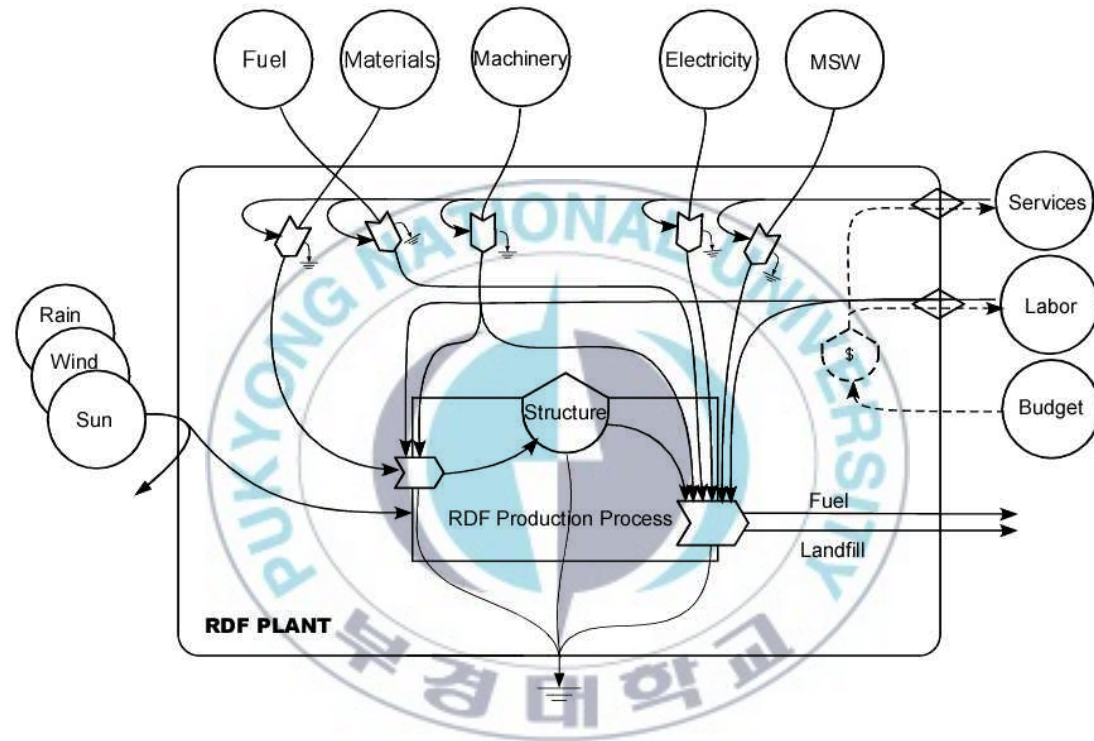


Fig. 4.1. Energy systems diagram for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea.

2. 원주시 생활폐기물의 에머지 평가

원주시 생활폐기물에 대한 에머지 평가 결과는 Table 4.1과 같다. 생활 폐기물의 에머지량은 물리적 조성별 구성 물질이 가지고 있는 에머지량과 이러한 생활폐기물을 수거하는데 투입한 에머지량(노동력, 트럭, 연료, 서비스 등)으로 구분하여 계산하였다. 원주시 생활폐기물 가운데 기타 가연성물질의 에머지량이 8.27×10^{19} sej/yr로 가장 많았고, 플라스틱류 3.40×10^{19} sej/yr, 고무 및 가죽류 3.16×10^{19} sej/yr, 음식물류 6.33×10^{18} sej/yr, 종이류 1.47×10^{18} sej/yr, 목재류 1.10×10^{18} sej/yr 순으로 나타났다.

원주시 매립장에서 처리하는 가연성 생활폐기물을 수집하는데 필요한 노동력의 에머지량은 5.09×10^{18} sej/yr로 나타났으며, 트럭은 3.48×10^{15} sej/yr, 연료는 4.23×10^{18} sej/yr, 운송수단과 연료에 포함된 서비스는 7.22×10^{17} sej/yr의 에머지를 공급하였다. 이를 종합하면 원주시 가연성폐기물에 포함된 연간 에머지량은 1.67×10^{20} sej/yr에 해당하였다.

Table 4.1. Emergy evaluation of the combustible wastes collected in Wonju, Korea

Item	Raw data	Solar transformity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (2007 em₩/yr)
Combustible Wastes	6.57×10^{10} g/yr	-	1.67×10^{20}	6.28×10^{10}
Paper	8.76×10^9 g/yr	$1.68 \times 10^{8a)}$	1.47×10^{18}	5.53×10^8
Plastics	3.07×10^{14} J/yr	$1.11 \times 10^{5a)}$	3.40×10^{19}	1.28×10^{10}
Wood	6.57×10^9 g/yr	$1.68 \times 10^{8a)}$	1.10×10^{18}	4.14×10^8
Rubber & Leather	2.85×10^{14} J/yr	$1.11 \times 10^{5a)}$	3.16×10^{19}	1.19×10^{10}
Vegetables	8.56×10^{13} J/yr	$7.40 \times 10^{4c)}$	6.33×10^{18}	2.38×10^9
Others	7.45×10^{14} J/yr	$1.11 \times 10^{5a)}$	8.27×10^{19}	3.10×10^{10}
Collection				
a. Labor	1.91×10^9 ₩/yr	$2.66 \times 10^{9g)}$	5.09×10^{18}	1.91×10^9
b. Trucks(steel)	5.12×10^5 g/yr	$6.79 \times 10^{8e)}$	3.48×10^{15}	1.31×10^6
c. Fuel	7.70×10^{12} J/yr	$5.50 \times 10^{5f)}$	4.23×10^{18}	1.59×10^9
d. Services	2.71×10^8 ₩/yr	$2.66 \times 10^{9g)}$	7.22×10^{17}	2.71×10^8

- 1) References for transformities; ^aOdum (1996), ^bBrown and Bardi (2001), ^cBrown and Buranakarn (2003), ^dBastianoni et al. (2005), ^ethis study
- 2) Emergy-money ratio for Korea in 2007(Appendix A)
- 3) Detailed calculation procedures for raw data in the table are given in Appendix B

3. 고형연료화 시설의 에머지 평가

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가표는 Table 4.2에 제시하였다. 여기에서는 유입 항목을 재생가능에머지, 생활폐기물 에머지, 건설단계, 운영단계로 구분하여 제시하였는데, 평가표의 맨 아래에는 최종 산물인 RDF의 에머지값을 제시하였다.

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설로 유입하는 재생가능 에머지량은 태양은 3.64×10^{13} sej/yr, 바람은 8.59×10^{12} sej/yr, 강우는 1.20×10^{15} sej/yr이었다. 이중계산을 피하기 위하여 유입 에머지 총량을 계산할 때는 에머지량이 가장 많은 강우만 포함하였다.

고형연료화 시설에 투입하는 폐기물은 매립장으로 운반되는 폐기물의 일부이므로 시설은 RDF의 원료인 폐기물을 무상으로 공급받고 있다. 따라서 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가에서는 폐기물 수거에 대한 항목은 포함하지 않았다. 시설에 투입하여 공정과정을 거쳐 고형연료가 되는 생활폐기물의 양은 원주시 전체 가연성 생활폐기물의 9%(6.62×10^9 g/yr)라는 가정 하에 Table 4.1의 결과(1.67×10^{20} sej/yr)를 이용하여 계산하였다. 그 결과 생활폐기물의 에머지량 중 고형연료화 시설에 투입하는 에머지량은 1.51×10^{19} sej/yr에 해당하였다.

고형연료화 시설의 건설과정에 투입한 총 에머지량은 4.41×10^{18} sej/yr으로 계산되었다. 이 가운데 건설재료에 포함된 서비스가 차지하는 비중이 46.7%(2.05×10^{18} sej/yr)로 가장 컸으며, 투입 노동력의 에머지가 37.3%(1.65×10^{18} sej/yr)로 두 번째로 많았다(Fig. 4.2).

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 운영단계에서는 총 1.62×10^{19} sej/yr의 에머지가 필요하였다. 이 단계에서는 연료의 에머지량이 65.5%로

가장 큰 비중을 차지하였으며, 전기 14%, 노동력 9.7%, 유지·관리에 필요한 각종 재료의 장비에 포함된 서비스 9.3% 순이었다(Fig. 4.3).

이상의 결과를 종합해보면 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설에서 5,801톤/년의 RDF를 생산하는데 소요되는 에머지는 총 3.57×10^{19} sej/yr이었다. 시설을 운영하는데 필요한 에머지가 45.6%로 가장 많이 차지하였고, RDF의 원료인 가연성 생활폐기물에 포함된 에머지(42.2%), 시설을 건설하는데 필요한 에머지(12.4%)의 순이었다(Fig 4.4).

Table 4.2에서는 RDF 생산에 필요한 에머지량과 RDF 생산량(에너지량 단위)을 이용하여 RDF의 에너지변환도(에머지량/에너지량)를 구하였다. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설에서 생산한 RDF의 에너지변환도는 3.22×10^5 sej/J로 계산되었다.

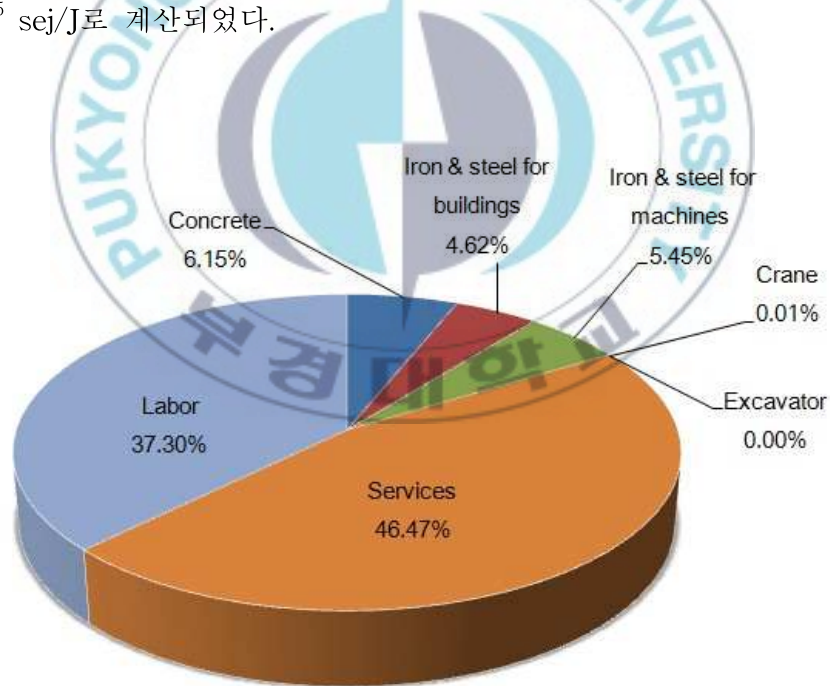


Fig. 4.2. Composition of emergy inputs in the construction stage of the Wonju refuse-derived fuel processing facility.

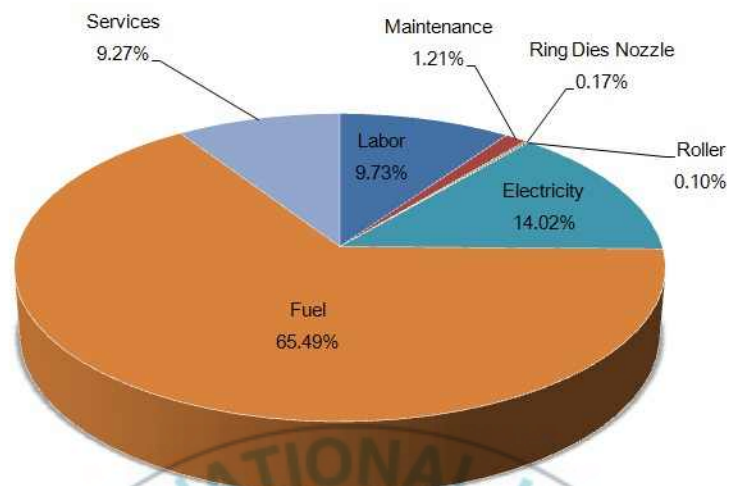


Fig. 4.3. Composition of energy inputs in the operation and maintenance stage of the Wonju refuse-derived fuel processing facility.

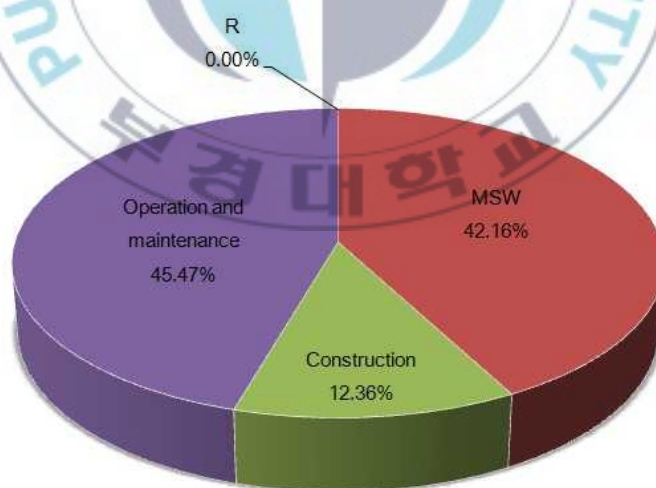


Fig. 4.4. Composition of total energy inputs to the Wonju refuse-derived fuel processing facility.

Table 4.2. Emergy evaluation table for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea

No.	Item	Raw data	Solar transformity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (2007em₩/yr)
Renewable Sources					
1	Sunlight	3.76×10^{13} J/yr	1	3.64×10^{13}	1.37×10^4
2	Wind	2.86×10^{10} J/yr	$2.45 \times 10^{(3a)}$	8.59×10^{12}	3.22×10^3
3	Rain, chemical	3.55×10^{10} J/yr	$3.05 \times 10^{(4a)}$	1.20×10^{15}	4.50×10^5
Waste Processed					
4	Combustible wastes	6.62×10^9 g/yr	-	1.51×10^{19}	5.65×10^9
Construction					
5	Materials				
	a. Concrete	1.50×10^8 g/yr	$1.81 \times 10^{(9b)}$	2.72×10^{17}	1.02×10^8
	b. Iron & Steel (building)	3.00×10^7 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	2.04×10^{17}	7.65×10^7
	c. Iron & Steel (machines)	3.54×10^7 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	2.41×10^{17}	9.04×10^7
6	Machinery				
	a. Crane	4.59×10^4 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	3.12×10^{14}	1.17×10^5
	b. Excavator	7.06×10^3 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	4.80×10^{13}	1.80×10^4
7	Services	7.70×10^8 ₩/yr	$2.66 \times 10^{(9e)}$	2.05×10^{18}	7.70×10^8
8	Labor	6.18×10^8 ₩/yr	$2.66 \times 10^{(9e)}$	1.65×10^{18}	6.18×10^8
Operation and Maintenance					
9	Labor	5.93×10^8 ₩/yr	$2.66 \times 10^{(9e)}$	1.58×10^{18}	5.93×10^8
10	Maintenance	7.40×10^7 ₩/yr	$2.66 \times 10^{(9e)}$	1.97×10^{17}	7.40×10^7
11	Ring dies nozzle	4.00×10^6 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	2.72×10^{16}	1.02×10^7
12	Roller	2.40×10^6 g/yr	$6.79 \times 10^{(9c)}$	1.63×10^{16}	6.12×10^6
13	Electricity	7.32×10^{12} J/yr	$3.11 \times 10^{(5d)}$	2.28×10^{18}	8.55×10^8
14	Fuel	1.93×10^{13} J/yr	$5.50 \times 10^{(5a)}$	1.06×10^{19}	3.99×10^9
15	Services	5.65×10^8 ₩/yr	$2.66 \times 10^{(9e)}$	1.50×10^{18}	5.65×10^8
Production					
16	Refuse-derived fuel	1.11×10^{14} J/yr	$3.22 \times 10^{(5e)}$	3.57×10^{19}	1.34×10^{10}

1) References for transformities: ^aOdum (2000), ^bSimoncini (2006), ^cBrown and Buranakarn (2003), ^dBrown and Ulgiati (2004), ^ethis study

2) Detailed calculation procedures for raw data in the table are given in Appendix C

Table 4.2의 에머지 평가표를 이용하여 Table 4.3과 같이 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 지수를 계산하였다. 고형연료화 시설로 유입하는 재생가능에머지량은 총 에머지 사용량의 0.003%(1.20×10^{15} sej/yr)로 고형연료화 시설에 기여하는 바가 아주 적었다. 고형연료로 변환되는 폐기물 에머지는 1.51×10^{19} sej/yr, 외부에서 구입한 에머지량은 2.06×10^{19} sej/yr이었다. 이상의 세 가지 종류의 에머지를 더하여 구한 RDF 생산공정의 에머지 산출량(Y)은 3.57×10^{19} sej/yr이었다. 이를 외부에서 구입한 총 에머지량(F)인 2.06×10^{19} sej/yr으로 나누어 구한 고형연료화 시설의 에머지산출비율(EYR)은 1.73으로 나타났다. 이는 고형연료화 시설을 건설, 운영하기 위해 외부에서 구입하여 투입한 에머지량보다 최종산물인 RDF의 에머지가 1.73배 많다는 것을 의미한다.

Table 4.3. Emergy indices for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea

Indices	Quantity
Renewable energy flow (sej/yr)	1.20×10^{15}
Combustible wastes processed (sej/yr)	1.51×10^{19}
Flow of imported energy (sej/yr)	2.06×10^{19}
Total energy used (sej/yr)	3.57×10^{19}
Emergy yield ratio	1.73

4. 에머지 비용·편익분석

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 비용과 편익을 Table 4.4에서 평가하였다. 고형연료화 시설의 직접적인 에머지 편익은 시설에서 생산한 RDF에 포함된 에머지량(3.57×10^{19} sej/yr)과 매립감량에 따른 매립 시설비 절감으로 얻는 에머지 편익(2.02×10^{18} sej/yr)을 더하여 총 3.77×10^{19} sej/yr으로 계산되었다. 고형연료화 시설의 에머지 비용은 총 2.06×10^{19} sej/yr로 나타났다. 건설단계에서 4.41×10^{18} sej/yr, 운영단계에서 1.62×10^{19} sej/yr의 에머지가 필요하였다.

2007년 기준 고형연료화 시설의 편익과 비용의 차는 1.71×10^{19} sej/yr로 이를 2007년 우리나라 에머지화폐비율(EMR)로 나누어 화폐단위로 환산하면 64.1억 emW/yr에 해당하였다. 원주시 고형연료화 시설의 에머지 비용편익비(B/C ratio)는 1.83이었다. 즉, 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 에머지 관점에서 타당성이 있는 사업으로 평가되었다.

Table 4.4. Emergy cost-benefit evaluation for the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea

No.	Item	Raw data	Solar transformity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (2007em₩/yr)
<i>Emergy benefits</i>					
1	Refuse-derived fuel	1.11×10^{14} J/yr	3.22×10^5	3.57×10^{19}	1.34×10^{10}
2	Reduced landfill cost	7.59×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	2.02×10^{18}	7.59×10^8
	Total			3.77×10^{19}	1.42×10^{10}
<i>Emergy costs</i>					
3	Construction				
	a. Materials				
	concrete	1.50×10^8 g/yr	1.81×10^9	2.72×10^{17}	1.02×10^8
	iron & steel for building	3.00×10^7 g/yr	6.79×10^9	2.04×10^{17}	7.65×10^7
	iron & steel for machines	3.54×10^7 g/yr	6.79×10^9	2.41×10^{17}	9.04×10^7
	b. Machinery				
	crane	4.59×10^4 g/yr	6.79×10^9	3.12×10^{14}	1.17×10^5
	excavator	7.06×10^3 g/yr	6.79×10^9	4.80×10^{13}	1.08×10^4
	c. Services	7.70×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	2.05×10^{18}	7.70×10^8
	d. Labor	6.18×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.65×10^{18}	6.18×10^8
4	Operation and Maintenance				
	a. Labor	5.93×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.58×10^{18}	5.93×10^8
	b. Services	6.39×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.70×10^{18}	6.39×10^8
	c. Ring dies nozzle	4.00×10^6 g/yr	6.79×10^9	2.72×10^{16}	1.02×10^7
	d. Roller	2.40×10^6 g/yr	6.79×10^9	1.63×10^{16}	6.12×10^6
	e. Electricity	7.32×10^{12} J/yr	3.11×10^5	2.28×10^{18}	8.55×10^8
	f. Fuel	1.93×10^{13} J/yr	5.50×10^5	1.06×10^{19}	3.99×10^9
	Total			2.06×10^{19}	7.75×10^9

V. 고찰

1. 폐기물관리 대안으로서 고형연료화

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가 결과 고형연료로 변환되는 6,618톤의 생활폐기물이 가지고 있는 에머지량은 1.51×10^{19} sej/yr이었다. 이를 화폐단위로 환산하면 56억 5천만 em₩/yr이 된다. 이는 폐기물 고형연료화 시설을 통해 자원으로 회수한 폐기물이 가지고 있는 실질적 가치이다. 따라서 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 매립하거나 소각하였을 폐기물을 자원으로 회수함으로써 연간 56억 5천만 em₩의 자원 손실을 막는 기능을 수행한다고 할 수 있다.

원주시에서 발생하는 폐기물은 원주시 광역매립장에 매립된다. 2008년 말 기준 매립장 잔여용량은 318,000m³로, 한 해에 약 152,400m³를 매립할 경우 향후 사용가능 연수는 2.5년이다. 2007년 고형연료화 시설에 투입한 폐기물량은 13,029톤(약 36톤/일)으로, 이 중 6,618톤이 RDF로 제조되었다. 이는 원주시 광역매립장 전체 매립량의 약 4% 정도를 채울 수 있는 폐기물이 매립되지 않고 고형연료로 다시 회수 되었다는 것을 말한다. 이 시설이 하루에 처리할 수 있는 폐기물의 양은 80톤이지만 2007년 처리한 폐기물량은 하루 36톤으로 전체 처리용량의 45%에 불과하다. 앞으로 RDF의 수요가 늘어나 처리용량을 최대로 하여 시설을 운영한다면 자원으로 회수되는 폐기물은 연간 14,712톤 정도가 될 것이다. 이는 매년 원주시 광역매립장에 매립하는 폐기물의 약 10%에 해당하는 양이다.

원주시는 2012년 완공을 목표로 2009년 10월부터 원주시 생활폐기물 종합처리단지를 조성하고 있다. 여기에는 음식물 자원화 시설, 재활용 선별시

설 및 기존 RDF 시설과 처리용량이 동일한 RDF 시설을 건설한다. 기존의 고형연료화 시설과 새로 만들 고형연료화 시설이 각각 하루 최대 80톤의 폐기물을 처리하면 원주시 광역매립장 전체 매립량의 20%에 해당하는 폐기물을 매년 자원으로 회수할 수 있게 된다. 이는 자원으로 회수되는 폐기물의 양만큼 매립장의 수명이 연장될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 폐기물 고형연료화 사업은 국토면적이 협소한 우리나라 실정을 감안할 때 더 활성화할 필요가 있는 사업으로 판단된다. 이를 위해서는 RDF의 수요를 확대하기 위한 정책적 지원이 필요하다.

2. 고형연료화 사업의 타당성

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 에머지 평가표를 이용하여 계산한 RDF의 에너지변환도는 3.22×10^5 sej/J로, 고형연료인 석탄(6.71×10^4 sej/J), 이탄(3.19×10^4 sej/J), 갈탄(6.20×10^4 sej/J)의 에너지변환도(Odum, 1996)²⁾ 보다 훨씬 높은 값이다. 에너지변환도는 최종 산물을 만드는데 필요한 총 에머지를 최종 산물의 에너지로 나눈 것으로, 에너지변환도가 높을수록 투입 에머지량이 많다는 것을 의미한다. 즉, 유사한 재화나 용역을 생산하는 공정의 에너지변환도는 이들 공정의 효율성을 비교하는데 활용할 수 있다. 이 경우 에너지변환도가 높을수록 효율성이 낮다. 원주시 고형연료화 시설은 기존의 고형연료보다 효율성은 낮다. 그러나 고형연료화 시설은 폐기물 처리와 고형연료의 생산이 동시에 이루어지기 때문에 석탄, 이탄, 갈탄 생산공정과

2) 여기에 제시한 석탄, 이탄, 갈탄의 에너지변환도는 이 연구에서 사용한 지구 전체의 연간에머지 유입량 기준인 15.84×10^{24} sej/yr에 맞추기 위하여 Odum(1996)의 에너지변환도 자료에 1.68을 곱하여 계산한 값임.

같이 고행연료의 생산이 핵심 목적인 시스템과 직접 비교하기는 힘들다.

RDF 사업의 에머지산출비율(EYR)은 1.73으로, RDF를 생산하는데 투입한 에머지량보다 최종산물에 포함된 에머지량이 더 많아 경제에 기여하는 시스템이라고 할 수 있다. 또한 사업의 타당성을 검토하는 에머지 비용편익비는 1.83으로, 에머지 비용보다 1.83배 많은 에머지 편익을 얻는 사업으로 평가되었다(Table 4.4). 이는 원주시 생활폐기물 고행연료화 시설은 에머지 관점에서 충분한 타당성이 있는 사업이라는 것을 보여준다.

또한 고행연료화 시설에서 생산한 고행연료의 에머지량은 3.57×10^{19} sej/yr으로, 이를 화폐단위로 환산하면 134억 em₩/yr이다. 이는 현재 무상으로 제공하고 있는 고행연료가 가지고 있는 실질가치에 해당한다. 즉, 원주시 고행연료화 시설은 연간 134억 em₩의 경제적 가치를 창출하는 시설이라고 할 수 있다. 따라서 폐기물 고행연료화 사업은 국가적 차원에서 폐기물 관리에 활용할 가치가 큰 사업이므로 향후 고행연료화 사업의 확대를 추진할 필요가 있다.

3. 고행연료화 시설의 효율성 개선

원주시 생활폐기물 고행연료화 시설의 에머지 평가 결과 외부에서 구입한 에머지 중 21%가 건설단계, 79%가 운영단계에 필요하였다. 따라서 고행연료화 사업은 초기 설비투자보다 시설을 운영하는데 더 많은 에머지가 필요하므로, 좀 더 효율적인 시설의 운영을 위하여 고행연료를 생산하는데 드는 에머지량을 줄일 필요가 있다.

Fig 4.3에 제시한 바와 같이 운영단계에서 가장 많은 에머지가 투입되는

항목은 연료이다. 따라서 고형연료화 시설의 효율을 높이기 위해서는 우선적으로 고형연료화 공정에서 연료 사용효율을 개선할 필요가 있다. 고형연료화 공정에서 연료를 가장 많이 사용하는 곳은 폐기물의 건조 공정이다. 고형연료화 공정에서 연료 사용량을 줄일 수 있는 방법으로는 기계설비의 효율향상, 매립가스나 소각여열의 활용, 폐기물 수분량감소 등을 들 수 있다. 기계 효율 향상의 경우 기계 개발에 따른 비용이 많이 발생하는 문제점이 있다. 매립가스나 소각여열 등 자원을 재회수하여 연료로 사용하는 방안의 경우 매립가스는 일정시간이 지나야 생성되며 그 양 또한 유한하고, 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설 근처에 소각장이 없어 소각여열로 대체하기에는 한계가 있다. 따라서 고형연료화 시설에서 생산한 RDF를 기존 연료와 병합하여 사용하여 연료의 사용량을 줄이는 방안을 강구할 필요가 있다고 사료된다.

폐기물의 수분량이 줄어든다면 건조에 필요한 연료도 자연히 줄어들 것이다. 따라서 우리 생활에서 폐기물 배출시 좀 더 관심을 가지고 분리수거를 철저히 하여 폐기물의 수분량을 낮추어야 한다. 그러나 가정에서 분리수거를 철저히 하여 배출을 하더라도 수거과정에서 비와 눈과 같이 날씨의 영향을 받을 경우 쓰레기의 수분량이 많아질 수밖에 없다. 이러한 수거과정의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 1990년대 초부터 우리나라에 적용된 자동집하시설 방식을 들 수 있다. 이 방식은 기존의 폐기물 수거방식이 인력과 차량에 의존하는 것과 달리 “생활폐기물을 관로에 의하여 수집·운반하여 일정한 장소에서 압축과 동시에 차량에 적재, 수송하거나, 처리시설에 직접 반입하는 설비”이다(김영신 등, 2006). 자동제어와 전기 시스템으로 노동력과 연료의 절감뿐만 아니라 여러 측면에서 많은 이점이 있다. 폐기물을 지하로 운송하기 때문에 악취 및 해충의 발생이 적으며 위생 및 미관상의 문제가 없다. 특히 날씨의 영향을 거의 받지 않아 수거과정의 수분유입을 방지할 수 있다.

4. 선행 연구 비교

국내 RDF 제조시설의 건설규모에 따른 경제성을 추진한 수도권매립지관리공사(2006)의 연구는 편익·비용분석을 수행하지 않았다. 그러나 이 연구는 규모별 RDF 시설의 건설 및 유지관리비를 추정하였는데, 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 처리용량에 해당하는 80톤/일 규모의 연간 RDF 제조비용은 127,829원/톤-MSW(건설 31,250원/톤-MSW, 유지관리 96,579원/톤-MSW)로 평가되었다. 이는 Table 4.4에서 계산된 건설 및 운영단계의 단위 폐기물당 에머지 비용을 이용하여 계산한 Emvalue인 595,000 em₩/t-MSW(건설 127,000 em₩/톤-MSW, 운영 468,000em₩/톤-MSW)의 1/5 정도에 불과하였다. 이 연구와 수도권매립지관리공사(2006)에서 평가에 포함한 항목에 차이가 있지만, 이러한 차이는 에머지 평가에서는 화폐단위로 나타내지 못하는 물질 자체에 포함된 에머지량과 인간의 활동을 반영하는 서비스 및 노동력(화폐 단위로 표시 가능)을 동시에 포함하여 평가하였기 때문이다.

자연환경의 일과 인간 활동을 동일한 기준에서 비교하는 에머지 평가 결과는 고형연료화 시설의 운영 시 화폐로 나타낸 비용보다 자연환경의 실질 가치를 반영하는 에머지 관점에서 보았을 때 그 비용이 더 클 수 있음을 보여주었다.

그러나 건설단계와 운영단계의 상대적인 구성비율은 수도권매립지관리공사(2006)의 경우 각각 24%, 76%, 이 연구의 경우 각각 21%, 79%로 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 두 연구 모두 RDF 시설의 운영단계에 더 많은 비용이 든다는 것을 보여주었다.

폐기물 관리에 대한 기존 에머지 평가(Niccolucci et al., 2003; Marchettini

et al., 2007)와 비교하기 위하여 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설에 투입하는 에머지 비용을 폐기물 수거단계, 고형연료화 시설 건설단계 및 운영단계의 세 단계로 나누어 고형연료화 시설에서 처리하는 단위 폐기물량(1g)당 에머지량으로 계산하였다. 각 사례에서 다루는 폐기물 처리방식과 처리용량, 소요면적이 다르기 때문에 이들 결과를 직접 비교할 수는 없지만 평가 결과를 단위 폐기물당 에머지량으로 나타내면 직접 비교가 가능해진다. 단위 폐기물량당 에머지량을 계산하기 위해 Table 4.1과 Table 4.2를 이용하였다. 수거단계의 단위 폐기물량당 필요 에머지량의 계산에는 원주시에 연간 생활폐기물 발생량(73,000톤/년)의 18%인 13,029톤이 고형연료화 시설에 투입되는 점을 고려하여 전체 수거비용의 18%만 고려하였다. Table 5.1의 마지막 칸에 있는 solar emergy investment(sej/g MSW)는 1g의 생활폐기물을 처리하는데 필요한 각 항목의 에머지량을 나타낸다.

원주시 생활폐기물 고형연료화 시설에서 1g의 생활폐기물을 처리하는데 필요한 에머지 비용은 1.73×10^9 sej/g MSW로 계산되었다. 이를 단계별로 살펴보면 수거단계에서는 단위 폐기물(1g)당 1.43×10^8 sej/g MSW의 에머지가 필요하였으며, 건설단계에서는 3.39×10^8 sej/g MSW, 운영단계에서는 1.25×10^9 sej/g MSW의 에머지가 투입되었다.

이 연구에서는 Marchettini et al.(2007)의 정의를 따라 고형연료화 시설의 자원회수율(matter recovery)을 이 시설에서 생산한 유용 자원인 RDF의 양(5.80×10^9 g/yr)을 투입한 폐기물의 양(1.30×10^{10} g/yr)으로 나눈 값으로 정의하였다. 그 결과 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 자원회수율은 0.45 g RDF/g MSW로 나타났다. 즉, 고형연료화 시설에 투입한 폐기물의 45%가 유용자원인 RDF로 다시 회수되었다. 이 자원회수율과 이 연구에서 계산한 RDF의 에너지변환도를 곱하여 고형연료화 시설의 에머지 회수율을 계산한 결과 2.74×10^9 sej/g MSW로 나타났다.

Table 5.1. Emergy investment per unit waste processed in the Wonju refuse-derived fuel processing facility in Korea

No.	Item	Raw data	Transformity (sej/unit)	Solar Emergy (sej/yr)	Solar emergy investment (sej/g MSW)
MSW collected		1.30×10^{10} g/yr			
	MSW collection				
1	Labor	3.82×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.02×10^{18}	7.81×10^7
2	Fuel	1.54×10^{12} J/yr	5.50×10^9	8.46×10^{17}	6.50×10^7
3	Trucks	1.02×10^5 g/yr	6.79×10^9	6.59×10^{14}	5.34×10^4
4	Services	5.82×10 ₩/yr	2.66×10^9	1.55×10^{11}	1.19×10
					1.43×10^8
Construction					
5	Materials				
	a. Concrete	1.50×10^8 g/yr	1.81×10^9	2.72×10^{17}	2.08×10^7
	b. Iron & steel for buildings	3.00×10^7 g/yr	6.79×10^9	2.04×10^{17}	1.56×10^7
	c. Iron & steel for machines	3.54×10^7 g/yr	6.79×10^9	2.41×10^{17}	1.85×10^7
6	Machinery				
	a. Crane	4.90×10^7 g/yr	6.79×10^9	3.12×10^{14}	2.39×10^4
	b. Excavator	8.71×10^6 g/yr	6.79×10^9	4.80×10^{13}	3.68×10^3
7	Services	7.70×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	2.05×10^{18}	1.57×10^8
8	Labor	6.18×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.65×10^{18}	1.26×10^8
					3.39×10^8
Operation and Maintenance					
9	Labor	5.93×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.58×10^{18}	1.21×10^8
10	Maintenance	7.40×10^7 ₩/yr	2.66×10^9	1.97×10^{17}	1.51×10^7
11	Ring dies nozzle	4.00×10^6 g/yr	6.79×10^9	2.72×10^{16}	2.08×10^6
12	Roller	2.40×10^6 g/yr	6.79×10^9	1.63×10^{16}	1.25×10^6
13	Electricity	7.32×10^{12} J/yr	3.11×10^5	2.28×10^{18}	1.75×10^8
14	Fuel	1.93×10^{13} J/yr	5.50×10^5	1.06×10^{19}	8.16×10^8
15	Services	5.65×10^8 ₩/yr	2.66×10^9	1.50×10^{18}	1.15×10^8
					1.25×10^9
	RDF production		5.80×10^9 g/yr		
	Total solar emergy(sum of items 1-15)		2.25×10^{19} sej/yr		
	MSW collection(sum of items 1-4)		1.43×10^8 sej/g MSW		8%
	Construction(sum of items 5-8)		3.39×10^8 sej/g MSW		20%
	Operation and Maintenance(sum of items 9-15)		1.25×10^9 sej/g MSW		72%
	Total solar emergy investment(sum of items 1-15)		1.73×10^9 sej/g MSW		

이탈리아의 폐기물처리 에머지 평가와 비교할 때 처리 공정에 투입되는 폐기물량은 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설이 가장 적었지만, 단위 폐기물량(1g)당 처리비용(Solar emergy investment)은 가장 높았다(Table 5.1). 이는 고형연료화 공정을 통한 폐기물처리가 기존의 폐기물 처리 방식인 매립이나 소각보다 더 많은 에머지가 필요하다는 것을 나타낸다. 이 값은 Marchettini et al.(2007)이 평가한 매립의 3.3배에서 퇴비화의 14.2배에 이르는 값에 해당하였다. 이 같은 결과는, 사회경제적 여건과 폐기물 발생 양상이 다른 이탈리아의 사례와 비교한 결과이기 때문에 명확한 결론을 도출하는데 한계가 있지만, 폐기물 처리라는 관점에서만 본다면 고형연료화는 다른 처리방안에 비해 경쟁력이 떨어지는 시스템일 가능성을 제기한다.

단위폐기물(1g)의 처리에 드는 에머지 비용은 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설이 아주 높았지만, 폐기물의 처리과정에서 단위 폐기물당 얻는 유용자원의 에머지량(emergy recovery)은 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설이 가장 높았다(Table 5.1). 이 값은 Marchettini et al.(2007)이 평가한 소각의 4.9배에서 매립의 27.1배까지 많은 양이다. 이는 비록 고형연료화 시설이 폐기물처리를 중심으로 볼 때는 더 많은 에머지 비용을 유발하지만, 유용자원의 회수라는 관점에서는 앞에서 언급한 비교의 한계에도 불구하고 고형연료화가 우리나라 폐기물처리의 훌륭한 대안이 될 수 있음을 시사한다.

Table 5.2의 마지막 칸에 제시한 environmental yield ratio는 단위 폐기물당 에머지 회수량과 에머지 비용 사이의 비율로, 단위 폐기물처리에 드는 비용에 비해 자원회수를 통해 어느 정도의 편익을 얻을 수 있는지 나타낸다. Marchettini et al.(2007)이 평가한 퇴비화가 3.93으로 가장 높았으며, Niccolucci et al.(2003)과 Marchettini et al.(2007)이 평가한 매립의 경우 0.19로 유용자원의 회수를 통해 폐기물처리에 든 에머지 비용의 19%만 회수하였

다. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설의 경우 environmental yield ratio가 1.59로, 단위 폐기물당 에머지 비용에 비해 고형연료를 통해 얻은 에머지 편익이 더 많아 폐기물 처리와 유용자원의 회수를 종합하여 판단할 때 우리나라 폐기물 처리에 활용할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 RDF 시설은 매립이나 해양배출과 같은 폐기물 처리방법보다 처리비용이 많이 들 수 있으나 매립지나 침출수 문제, 국제적으로 금지될 해양배출 등의 사회·경제적 편익은 훨씬 크다(Dong et al., 2008). 그러나 다른 폐기물 처리 대안과 비교해서 고형연료화 사업의 타당성에 대해 좀 더 명확한 결론을 이끌어내기 위해서는 국내의 다른 폐기물 처리 대안에 대해서도 동일한 에머지 평가를 수행한 뒤 이를 비교할 필요가 있다.

Table 5.2. Comparison of energy costs and recovery for solid waste treat alternatives

		Waste treated(g/yr)	Solar energy investment (sej/g MSW)	Emergy recovery (sej/g MSW)	Environmental yield ratio
Landfill	Niccolucci et al.(2003)	1.15×10^{11}	1.47×10^8	2.74×10^7	0.19
	Marchettini et al.(2007)	1.70×10^{11}	5.22×10^8	1.01×10^8	0.19
Incineration	Niccolucci et al.(2003)	1.08×10^{11}	1.27×10^8	1.31×10^8	1.03
	Marchettini et al.(2007)	1.08×10^{11}	1.75×10^8	5.59×10^8	3.20
Compost	Marchettini et al.(2007)	1.29×10^{10}	1.22×10^8	4.82×10^8	3.93
RDF	this study	1.30×10^{10}	1.73×10^9	2.74×10^9	1.59

* RDF = Refuse-derived fuel

* Emergy recovery

= energy or matter recovery/g MSW $\times$ transformity of recovered energy or matter

VI. 결론

산업화 및 도시화로 인한 인구증가는 대량소비, 대량폐기를 가져왔다. 대량으로 발생된 폐기물은 자연환경이 정화할 수 있는 능력을 이미 초과하였으며 매립이나 소각 등의 인위적인 방법으로 폐기물을 처리하고 있다. 하지만 매립지 부족, 환경문제, 고비용의 투자설비 등과 같이 폐기물을 처리하는데 있어 문제와 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하고 지속가능한 사회를 위하여 자원순환형 사회의 구축이 필요하다. 이 연구는 에머지 평가법을 이용하여 폐기물 에너지화 기술 중 하나인 폐기물 고형연료화 사업에 대해 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설을 대상으로 선정하여 평가하였다.

1. 2007년 기준 원주시 생활폐기물 고형연료화 사업의 에머지 평가 결과, 폐기물 고형연료화 과정을 통해 연료로 변환되는 폐기물이 가지는 에머지량은 1.51×10^{19} sej/yr로, 실질가치는 56.5억 emW/yr이었다. 따라서 원주시 생활폐기물 고형연료화사업은 매립 또는 소각으로 사라졌을 폐기물 자원의 회수를 통해 연간 56.5억 emW의 자원손실을 막는 사업이라 할 수 있다.

또한 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 폐기물을 자원으로 회수함으로써 매립장의 수명을 연장하는데 기여한다. 2007년 원주시 광역매립장에 매립하는 전체 폐기물량 중 약 4%가 RDF로 생산되어 그만큼 매립장 수명을 연장하는데 기여한 것으로 평가되었다.

2. 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설에서 생산한 RDF의 에머지량은 3.57×10^{19} sej/yr로, 이는 현재 무상으로 공급하는 RDF의 실질가치이다. 따라서 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 연간 134억 emW의 경제적 가치

를 가지는 사업이라 할 수 있다.

3. 시스템의 경쟁력을 나타내는 에머지산출비율(EYR)이 1.73으로, 시설에 투입한 에머지량보다 최종산물의 에머지량이 더 많아 원주시 생활폐기물 고형연료화 사업은 경쟁력 있는 시스템이라 할 수 있다. 원주시 고형연료화 시설의 에머지 비용·편익 평가결과 고형연료를 제조함으로써 얻는 에머지 편익과 시설의 건설과 운영에 드는 에머지 비용의 차는 연간 64.1억 em₩, 비용편익비(B/C ratio)는 1.83로 투입한 비용보다 1.83배 정도 많은 편익을 얻는 사업이었다.

4. 에머지 평가 결과 RDF 사업은 운영단계에서 가장 많은 에머지를 필요로 하였다(건설단계 21%, 운영단계 79%). 따라서 효율적으로 시설을 운영하기 위해서는 운영단계에서 가장 많은 비중을 차지하는 연료의 사용효율을 우선적으로 개선할 필요가 있다고 판단된다. 이를 위해서는 에너지가 가장 많이 드는 공정인 폐기물 건조 효율을 향상할 수 있는 방안이 필요한데, 매립장이나 소각장에서 발생하는 가스와 열을 회수하여 연료로 하거나 시설에서 생산한 RDF를 기존의 연료와 병합하여 사용하는 것을 고려할 필요가 있다. 또한 폐기물 수거 시스템의 개선으로 폐기물의 수분함유량을 줄일 필요가 있다.

5. 이 연구의 결과와 국내의 RDF 사업 경제성 분석사례와 비교한 결과 평가 방법이 달라 분석항목과 자료에 차이는 있었지만, 두 연구 모두 RDF 사업은 운영단계에 더 많은 비용이 든다는 것을 보여주었다. 또한 이탈리아의 폐기물 처리 대안별(매립, 소각, 퇴비화) 에머지 평가 사례와 비교한 결과 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 1g의 생활폐기물을 처리하는데

가장 많은 에머지 비용이 들었다. 그러나 단위 폐기물당 얻는 유용 자원의 에머지량은 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설이 가장 높아, 자원 회수의 관점에서는 효율적인 시스템이었다. 에머지 회수량과 에머지 비용의 비로 나타내는 environmental yield ratio는 1.59로, 원주시 생활폐기물 고형연료화 시설은 단위 폐기물당 에머지 비용에 비해 고형연료를 통해 얻는 에머지 편익이 더 많았다.

이 연구는 원주시 생활폐기물 고형연료화 사업이 에머지 관점에서 타당성 있는 사업임을 보여주었다. 따라서 우리나라 폐기물 처리에 충분히 활용할 수 있는 방안으로 판단되며, 향후 국가적 차원에서 기술개발과 RDF 수요확대를 위한 정책을 지속적으로 추진할 필요가 있다. 그러나 폐기물 관리와 관련한 더 의미 있는 정보를 제공하기 위해서는 다음과 같은 한계를 보완한 연구가 더 필요하다. 본 연구에서는 고형연료화 시설의 에머지 비용·편익 분석 시 편익 중 매립감량에 따른 매립시설비 절감효과는 화폐단위로만 계산하였으며, 비용과 편익의 연구 자료의 한계상 직접적인 편익과 비용만 고려하였다. 따라서 매립시설비 절감효과의 경우 재료, 연료, 장비, 서비스 및 노동력 등 세분화된 항목을 대상으로 평가를 수행하고, RDF 사업의 간접적인 편익과 비용을 계량화하여 에머지 편익/비용 평가에 포함할 필요가 있다.

또한, 이 연구에서는 고형연료화 사업 이외의 다른 폐기물 처리방안에 대해 에머지 평가를 수행하지 못하여 폐기물 처리방안 사이의 경제성 판단 및 우선순위 설정에 필요한 정보를 제공하지 못하였다. 따라서 향후 고형연료화 이외의 다른 폐기물 처리대안들에 대해서도 이 연구와 동일한 에머지 평가를 수행하여 비교·분석하기 위한 연구를 진행할 필요가 있다.

참고문헌

- (주)고려자동화·(주)한화건설, 2005. 원주시 생활폐기물 연료화시설 설치사업 실시설계서, 464pp.
- 강대석, 남정호, 2003. 에머지 개념을 이용한 해양환경 자원의 가치평가와 정책활용 방안, 107pp.
- 건설교통부, 2006. 자원절약형 도시환경을 위한 환경순환시스템 구축방안, 189pp.
- 기상청, 2007. 기상연보 2007, 310pp.
- 김광임, 여준호, 전홍락, 정희성, 2002. 대규모 개발사업의 환경경제성 분석 도입방안 I, 190pp.
- 김광임, 최진석, 임현곤, 2006. 지속가능한 물질관리를 위한 자원순환정책 방안, pp.121
- 김석준, 최연석, 김우현, 2003. RDF의 국내외 기술동향, 첨단환경기술, 11(1):104-113
- 김영신, 배재근, 2006. 생활폐기물 수집·운반체계의 개선을 위한 자동집하시설의 검토, 유기성자원학회 학술발표대회논문집, p.262-268
- 노화준, 2005. 환경부문 규제 영향분석의 방법과 사례연구, 358pp.
- 산업자원부, 신재생에너지센터, 국회신재생에너지정책연구회, 2006. 05 신재생에너지 백서, 534pp.
- 산업자원부, 신재생에너지센터, 국회신재생에너지정책연구회, 2009. 08 신재생에너지 백서, 470pp.
- 수도권매립지관리공사(SLC), 2006. 가연성폐기물 고형연료(RDF)의 경제성 분석 및 제도도입에 관한 연구, 164pp.
- 신대현, 2001. 국내의 폐기물 고형연료(RDF)기술 현황 및 보급 활성화 방안, ETIS 분석지, 15:184-196
- 윤영만, 이상은, 김창현, 2008. 축산바이오매스의 자원화(바이오가스화), 한국토양비료학회, 토양과 비료 33:21-30
- 이승희, 2008. 폐기물최소화와 자원화 사례 및 관리방안, 경기도인재개발원, 12pp.
- 이원우, 2005. 고유가의 원인과 대응방안, 177pp.
- 이혜경, 2006. 유럽에서의 바이오에너지 발전 동향, 유기성자원학회지,

4(2):45-50

- 정희성, 안형기, 2008. 자원 순환 사회 거버넌스의 구축: 폐기물 관리정책을 중심으로, 한국정책과학학회보, 12(3):79-97
- 제윤미, 2004, Emergy 분석법에 의한 제조업의 환경친화성 지수에 관한 연구, 부경대학교 환경공학과 석사학위논문, 81pp.
- 지식경제부, 2008. 신·재생에너지 산업화 촉진방안 연구, 597pp.
- 최원, 김지형, 2004. 매립가스에 대하여, 한국지반환경공학회, 지반환경 5(2):43-47
- 최지용, 자원순환형 생태도시의 건설, 국토, 296:16-25
- 한국건설기술연구원, 2009. 2009 건설공사 표준품셈, 1373pp.
- 한국환경자원공사(ENVIC), 2008. Waste-to-Energy Report, 260pp.
- 한승필, 2007. 시스템 다이내믹스를 이용한 비용편익 분석 모델 구축, 한양대학교 건축공학과 석사학위논문 61pp.
- 해양안전부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부, 산림청, 2008. 녹색성장과 기후변화 대응을 위한 폐자원 및 바이오매스 에너지 대책, 115pp.
- 허남효, 2005. 유기성폐기물의 바이오가스화 기술 및 현황, 한국태양에너지 학회지, 4(1):9-25
- 환경관리공단, 2006. 자원순환형 사회구축을 위한 생활폐기물의 적정처리기술, 266pp.
- 환경관리공단, 2007. 유럽의 RDF 현황과 전망, 39pp.
- 환경부(MOE), 2003. 환경정책의 비용/편익분석 지침서, 268pp.
- 환경부, 2006. 제2차 국가폐기물관리종합계획 수정계획 마련연구, 343pp.
- 환경부, 2008. 2008 환경백서, 728pp.
- 환경부, 2008. 경제살리기와 기후변화 대응을 위한 폐기물 에너지화 종합대책, 111pp.
- 환경부, 2008. 폐기물에너지로 저탄소 녹색성장을!, 27pp.
- 환경부, 국립환경과학원, 한국환경자원공사, 2008. 2007 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 613pp.
- 환경부, 2009. 전국 매립시설 설치·운영실태 조사결과 및 조치계획, 12pp.
- Brown, M.T. and S. Ulgiati, 2002. Emergy evaluation and environmental

- loading of electricity production systems, *Journal of cleaner Production*, 10:321–334
- Lei, K. and Z. Wang, 2008. Municipal waste and their solar transformativities: An emergy synthesis for Macao, *Waste Management* 28:2522–2531
- Luchi, F. and S. Ulgiati, 2002. Energy and Emergy Assessment of Municipal Waste Collection. A case study. In: Brown, M.T., Brandt-Wiliams, Tilley, D., Ulgiati, S. (Eds.), *Emergy Synthesis: Theory and application of emergy methodology* (Proceedings of the First Biennial International Emergy Research Conference). University of Florida, Gainesville, FL., USA. pp. 303–316
- Marchettini, N., R. Ridolfi, and M. Rustici, 2007. An environmental analysis for comparing waste management options and strategies, *Waste Management* 27:562–571
- Niccolucci, V., M. Panzieri, M. Porcelli, and R. Ridolfi, 2003. Emergy assessment of incineration and landfilling of municipal solid waste in Italy, In: Brown, M.T., Odum, H.T., Tilley, D., Ulgiati, S. (Eds.), *Emergy Synthesis 2: Theory and application of emergy methodology* (Proceedings of the First Biennial International Emergy Research Conference). University of Florida, Gainesville, FL., USA. pp. 409–419
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting, Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York, 370pp.
- Dong, T.T.T. and B.-K. Lee, 2009. Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea, *Waste Management* 29:1725–1731
- Ulgiati, S., M.T. Brown, S. Bastianoni, and N. Marchettini, 1995. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use

of resource, Ecological Engineering, 5:519-531

(주)고려자동화, 2009. <http://www.kacrdf.co.kr>

(주)예캠상사, 2009. <http://www.yeschem.co.kr>

온라인 행정학전자사전, 2009. <http://www.epadic.com>

한국광물자원공사, 2009. <http://www.kores.or.kr>



Appendices

Appendix A. Emergy flows for Korea in 2007

No.	Item	Raw data	Solar transformity (sej/unit)	Solar emergy (sej/yr)	Emvalue (Em\$/yr)
RENEWABLE SOURCES:					
1	Sun	1.12E+21 J	1	1.12E+21	4.20E+08
2	Wind, kinetic energy	1.97E+17 J	2.45E+03 ^{a)}	4.83E+20	1.80E+08
3	Rain, chemical	2.06E+18 J	3.05E+04 ^{a)}	6.29E+22	2.35E+10
4	Rain, geopotential	2.10E+17 J	4.66E+04 ^{a)}	9.79E+21	3.66E+09
5	Waves	2.03E+17 J	5.10E+04 ^{a)}	1.03E+22	3.86E+09
6	Earth cycle	9.97E+16 J	5.76E+04 ^{a)}	5.74E+21	2.15E+09
7	Tide	7.44E+18 J	7.39E+04 ^{a)}	5.50E+23	2.05E+11
NONRENEWABLE SOURCES FROM WITHIN SYSTEM:					
8	Coal production	8.37E+16 J	6.71E+04 ^{b)}	5.62E+21	2.10E+09
9	Metallic Minerals	4.90E+11 g	1.68E+09 ^{b)}	8.24E+20	3.08E+08
10	Nonmetallic Minerals	9.67E+13 g	1.68E+09 ^{b)}	1.62E+23	6.07E+10
11	Top Soil Loss	5.27E+16 J	1.24E+05 ^{b)}	6.54E+21	2.44E+09
IMPORTED SOURCES:					
12	Fuels	1.06E+19 J	8.64E+04	9.17E+23	3.42E+11
13	Metal ores & products	9.35E+13 g	1.68E+09 ^{b)}	1.57E+23	5.87E+10
14	Nonmetal Minerals & products	1.21E+13 g	1.68E+09 ^{b)}	2.03E+22	7.58E+09
15	Food and Ag. Products	3.10E+17 J	3.36E+05 ^{c)}	1.04E+23	3.89E+10
16	Livestock, Meat, Fish	9.53E+15 J	3.36E+06 ^{c)}	3.20E+22	1.20E+10
17	Plastics and Rubber	6.80E+16 J	1.11E+05 ^{b)}	7.55E+21	2.82E+09
18	Chemicals	1.42E+13 g	1.48E+10 ^{c)}	2.10E+23	7.86E+10
19	Finished Materials	2.20E+13 g	1.22E+10	2.68E+23	1.00E+11
20	Machinery, Transp., Equip	5.44E+12 g	7.76E+09 ^{d)}	4.22E+22	1.58E+10
21	Services in Imports	3.57E+11 \$	1.41E+12 ^{d)}	5.03E+23	1.88E+11
EXPORTS:					
22	Fuels	1.83E+18 J	1.11E+05 ^{b)}	2.04E+23	7.61E+10
23	Metallic Minerals	2.83E+11 g	1.68E+09	4.76E+20	1.78E+08
24	Nonmetallic Minerals	5.71E+11 g	1.68E+09 ^{b)}	9.60E+20	3.58E+08
25	Metal products	2.34E+13 g	1.68E+09 ^{b)}	3.93E+22	1.47E+10
26	Nonmetallic products	6.42E+12 g	1.68E+09	1.08E+22	4.03E+09
27	Food and Ag. Products	1.78E+16 J	3.36E+05 ^{c)}	5.89E+21	2.23E+09
28	Livestock, Meat, Fish	2.24E+15 J	3.36E+06 ^{c)}	7.53E+21	2.81E+09
29	Plastics and Rubber	3.61E+17 J	1.11E+05	4.01E+22	1.50E+10
30	Chemicals	1.95E+13 g	1.48E+10 ^{c)}	2.88E+23	1.08E+11
31	Finished Materials	7.09E+12 g	4.47E+10	3.17E+23	1.18E+11
32	Machinery, Transp., Equip	2.25E+13 g	7.76E+09 ^{d)}	1.75E+23	6.53E+10
33	Services Exports	3.71E+11 \$	2.68E+12 ^{g)}	9.94E+23	3.71E+11

* Transformity based on total renewable emergy flow of 15.83×10^{24} sej/yr

* References for transformities: ^{a)}Odum (2000), ^{b)}Odum (1996), ^{c)}Brown (1996), ^{d)}Campbell (2005), ^{e)}Brown and Arding (1991), ^{f)}Choi (2009), ^{g)}this study

Footnotes and Data

RENEWABLE RESOURCES:

1 Sunlight

Land area	= $9.97\text{E}+10 \text{ m}^2$	(KOS, 2008)
Continental shelf area	= $2.35\text{E}+11 \text{ m}^2$	
Insolation	= $4.80\text{E}+09 \text{ J/m}^2/\text{yr}$	(KMA, 2007)
Albedo	=0.3	
Energy (J)	=(Area)*(Insolation)*(1-albedo)	
	= $1.12\text{E}+21 \text{ J/yr}$	

2 Wind

Area	= $9.97\text{E}+10 \text{ m}^2$	
Avg. wind speed	= 2.1868 m/s	(KMA, 2007)
Geostrophic wind	=(Avg. wind speed)*(10/6)	
	=(1.3kg/m^3)*($1.0\text{E}-3$)*(Geostrophic wind) ³ *(3.14 E7	
Energy (J)	s/yr)*(Area)	
	= $1.97\text{E}+17 \text{ J/yr}$	

3 Rain, chemical

Rain	= 1.4924 m/yr	(KMA, 2007)
Evapotranspiration	=0.45	
Energy(land) (J)	=(Landarea)*(Rain)*(Evapotrans)*(1000kg/m^3)*(4.94	
	E3 J/kg)	
	= $3.31\text{E}+17 \text{ J/yr}$	
Energy(shelf) (J)	=(Shelf area)*(Rain)*(1000 kg/m^3)*(4.94E3J/kg)	
	= $1.73\text{E}+18 \text{ J/yr}$	
Total energy (J)	= $2.06\text{E}+18 \text{ J/yr}$	

4 Rain, geopotential

Area	= $9.97\text{E}+10 \text{ m}^2$	
Rainfall	= 1.4924 m/yr	(KMA, 2007)
Average elevation	= $2.62\text{E}+02 \text{ m}$	
Runoff rate	=0.55	
Energy (J)	=(Area)*(Rainfall)*(Runoffrate)*(1000kg/	
	m^3)*(Avg. elevation)*(9.8 m/s^2)	
	= $2.10\text{E}+17 \text{ J/yr}$	

5 Waves

Total energy (J)	= $2.03\text{E}+17 \text{ J/yr}$	(Lee and Odum, 1994)
------------------	----------------------------------	----------------------

6 Earth cycle

Land area	= $9.97\text{E}+10 \text{ m}^2$	
Energy(J)	=(Land area)*($1\text{E6J/m}^2/\text{yr}$)	
	= $9.97\text{E}+16 \text{ J/yr}$	assumed stable geology

7 Tide

Continental shelf area	= $2.35\text{E}+11 \text{ m}^2$	
------------------------	---------------------------------	--

Avg. tidal range =2.98 m (NORI, 2009)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Density} \times \text{Area} \times \text{Tidal range}) \times (9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}) \times (0.5 \times \text{Tidal range}) \times (706/\text{yr})$
 =7.44E+18 J/yr

NONRENEWABLE SOURCE USE FROM WITHIN SYSTEM:

8 Coal production

Production =2.89E+06 MT (www.kesis.net)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Production}) \times (2.9 \text{ E10 J/MT})$
 =8.37E+16 J/yr

9 Metallic Minerals

Production =4.90E+05 MT/yr (www.mrportal.net)
 =4.90E+11 g/yr

10 Industrial Minerals

Production =9.67E+07 MT/yr (www.mrportal.net)
 =9.67E+13 g/yr

11 Top Soil

Annual soil erosion =5.00E+07 MT/yr (Chung et al., 2005)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Soil erosion}) \times (1\text{E6g/MT}) \times (0.07\text{gOM/g sed}) \times (3.6 \text{ kcal/g}) \times (4186 \text{ J/kcal})$
 =5.27E+16 J/yr

IMPORTS AND OUTSIDE SOURCES:

12 Fuels

Total =1.06E+19 J/yr
 Transformity =8.64E+04 sej/J Weighted average transformity for fuels

Coal

Imports =8.48E+07 MT/yr (www.kesis.net)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Imports}) \times (2.9 \text{ E10 J/MT})$
 =2.46E+18 J/yr
 Transformity =6.71E+04 sej/J

Oil, crude

Imports =8.73E+08 BBL/yr (www.kesis.net)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Imports}) \times (6.28 \text{ E9 J/BBL})$
 =5.48E+18 J/yr
 Transformity =9.06E+04 sej/J

Petroleum Products

Imports =2.09E+08 BBL/yr (www.kesis.net)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Imports}) \times (6.28 \text{ E9 J/BBL})$
 =1.31E+18 J/yr
 Transformity =1.11E+05 sej/J

Natural gas(LNG)

Imports =2.56E+07 MT (www.kesis.net)
 $\text{Energy (J)} = (\text{Imports}) \times (1.27 \text{ E7kcal/MT}) \times (4186 \text{ J/kcal})$

		=1.36E+18 J/yr	
	Transformity	=8.05E+04 sej/J	
13	Metal ores & products		
	Imports	=9.35E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=9.35E+13 g/yr	
14	Nonmetallic Minerals (cement included)		
	Imports	=1.21E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=1.21E+13 g/yr	
15	Food and Ag. Products		
	Imports	=2.64E+07 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1E6g/MT)*(3.5kcal/g)*(4186J/kcal)*(80%)	
		=3.10E+17 J/yr	
16	Livestock, Meat, Fish		
	Imports	=2.07E+06 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1E6g/MT)*(5kcal/g)*(4186J/kcal)*(0.22 protein)	
		=9.53E+15 J/yr	
17	Plastics and Rubber		
	Imports	=2.22E+06 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1000kg/MT)*(30.6E6J/kg)	
		=6.80E+16 J/yr	
18	Chemicals		
	Imports	=1.42E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=1.42E+13 g/yr	
19	Finished Materials		
	Imports	=2.20E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=2.20E+13 g/yr	
	Transformity	=1.22E+10 sej/g	
	Leather products	=2.85E+05 MT/yr	
	Transformity	=7.18E+06 sej/J	(Campbell, 2005)
	Lumber, wood prod.	=9.37E+06 MT/yr	
	Transformity	=1.49E+09 sej/g	(Campbell, 2005)
	Paper	=4.87E+06 MT/yr	
	Transformity	=3.69E+09 sej/g	(Luchi, 2000)
	Textile	=1.75E+06 MT/yr	
	Transformity	=7.18E+06 sej/J	(Campbell, 2005)
	Glass, ceramics, etc	=4.99E+06 MT/yr	
	Transformity	=3.50E+09 sej/g	(Brown and Ulgiati, 2004)
	Others	=7.53E+05 MT/yr	
	Transformity	=1.61E+09 sej/g	(Campbell, 2005)
20	Machinery, Transportation, Equipment		
	Imports	=5.44E+06 MT/yr	(www.kita.net)

		=5.44E+12 g/yr	
21	Service in imports	=3.57E+11 \$/yr	(KSO, 2008)
EXPORTS:			
22	Fuels		
	Petroleum Products		
	Exports	=2.92E+08 BBL/yr	(www.kesis.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(6.28 E9 J/BBL)	
		=1.83E+18 J/yr	
	Transformity	=1.11E+05 sej/J	
23	Metallic Minerals		
	Exports	=2.83E+05 MT/yr	(www.mrportal.net)
		=2.83E+11 g/yr	
24	Nonmetallic Minerals		
	Exports	=5.71E+05 MT/yr	(www.mrportal.net)
		=5.71E+11 g/yr	
25	Metal products		
	Exports	=2.34E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=2.34E+13 g/yr	
26	Nonmetallic products		
	Exports	=6.42E+06 MT/yr	(www.kita.net)
		=6.42E+12 g/yr	
27	Food and Ag. Products		
	Exports	=1.52E+06 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1E6g/MT)*(3.5kcal/g)*(4186J/kcal)*(80%)	
		=1.78E+16 J/yr	
28	Livestock, Meat, Fish		
	Exports	=4.87E+05 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1E6g/MT)*(5kcal/g)*(4186J/kcal)*(0.22 protein)	
		=2.24E+15 J/yr	
29	Plastics and Rubber		
	Exports	=1.18E+07 MT/yr	(www.kita.net)
	Energy (J)	=(Imports)*(1000kg/MT)*(30.6E6J/kg)	
		=3.61E+17 J/yr	
30	Chemicals		
	Exports	=1.95E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=1.95E+13 g/yr	
31	Finished Materials		
	Exports	=7.09E+06 MT/yr	(www.kita.net)
		=7.09E+12 g/yr	
	Transformity	=4.47E+10 sej/g	
	Leather products	=9.01E+04 MT/yr	

	Transformity	=7.18E+06 sej/J	(Campbell, 2005)
Lumber, wood prod.		=6.63E+04 MT/yr	
	Transformity	=1.49E+09 sej/g	(Campbell, 2005)
Paper		=3.55E+06 MT/yr	
	Transformity	=3.69E+09 sej/g	(Luchi, 2000)
Textile		=2.71E+06 MT/yr	
	Transformity	=7.18E+06 sej/J	(Campbell, 2005)
Glass, ceramics, etc		=4.80E+05 MT/yr	
	Transformity	=3.50E+09 sej/g	(Brown and Ulgiati, 2004)
Others		=1.97E+05 MT/yr	
	Transformity	=1.61E+09 sej/g	(Campbell, 2005)
32 Machinery, Transportation, Equipment			
	Exports	=2.25E+07 MT/yr	(www.kita.net)
		=2.25E+13 g/yr	
33 Service in exports		=3.71E+11 \$/yr	(KSO, 2008)



Appendix B. Footnotes to Table 4.1

MSW	=	7.30E+10	g/yr	(Wonju city, 2009)
Paper	=	8.76E+09	g/yr	(MOE et al., 2008)
Plastics	=	1.02E+10	g/yr	(MOE et al., 2008)
	=	1000	kg/g	
	=	30.0E+06	J/kg	
Energy (J)	=	3.07E+14	J/yr	
Wood	=	6.57E+09	g/yr	(MOE et al., 2008)
Rubber & Leather	=	9.49E+09	g/yr	(MOE et al., 2008)
	=	1000	kg/g	
	=	30.0E+06	J/kg	
Energy (J)	=	2.85E+14	J/yr	
Vegetables	=	5.84E+09	g/yr	(MOE et al., 2008)
	=	3.5	kcal/g	
	=	4186	J/kcal	
Energy (J)	=	8.56E+13	J/yr	
Combustibility the others	=	2.48E+10	g/yr	(MOE et al., 2008)
	=	1000	kg/g	
	=	30.0E+06	J/kg	
Energy (J)	=	7.45E+14	J/yr	
Collection				
Labor	=	2.12E+09	₩/yr	
Trucks(Armroll+LABO)	=	6.32E+06	g	
lifetime	=	10	yr	
% steel	=	0.9		(Niccolucci et al., 2003)
total steel	=	5.69E+05	g/yr	
Fuels	=	8.55E+12	J/yr	
light oil	=	2.95E+08	₩/yr	
	=	1.31E+03	₩/ℓ	(www.opinet.co.kr)
heating value	=	9.05E+03	kcal/ℓ	(NRE, 2008)
	=	4.19E+03	J/kcal	
Services	=	3.01E+08	₩/yr	
fuel	=	2.95E+08	₩/yr	
armroll	=	5.87E+07	₩	
lifetime	=	10	yr	
LABO	=	5.21E+06	₩	
lifetime	=	10	yr	

Appendix C. Footnotes to Table 4.2

Renewable Sources

1. Sunlight

System area	=	1.13E+04	m ²	
Insolation	=	4.62E+09	J/m ² /yr	(KMA, 2007)
Albedo	=	0.3		
Energy	=	(System area)*(Insolation)*(1-Albedo)		
	=	3.64E+13	J/yr	

2. wind

Area	=	1.13E+04	m ²	
Air density	=	1.23E+00	kg/m ³	
Avg. wind speed	=	1.20E+00	m/s	
Drag coefficient	=	1.00E-03		
Geostrophic Wind %	=	1.67E+00		
Energy	=	(Area)*(Air density)*(Drag coefficient)*(Avg. wind speed * Geostrophic Wind %) ³		
	=	3.50E+09	J/yr	(3.14E+07)

3. Rain

Area	=	1.13E+04	m ²	
Rainfall	=	1.57E+00	m/yr	(KMA, 2007)
Evaporation	=	0.45		(KOWACO, 1998b)
	=	1.00E+03	kg/m ³	
	=	4.94E+03	J/kg	
Energy	=	(Area)*(Rainfall)*(Evaporation)*(1.00E+03kg /m ³)*(4.94E+03J/kg)		
	=	3.93E+10	J/yr	

Waste Processed

4. Municipal Waste

= 6.62E+09 g/yr

Construction

5. Materials

Concrete	=	3.00E+09	g	
lifetime	=	20	yr	
	=	1.50E+08	g/yr	
Iron & steel (structure)	=	6.00E+08	g	
lifetime	=	20	yr	
	=	3.00E+07	g/yr	
Steel for equipments	=	3.23E+08	g	(kac, 2005)
lifetime	=	10	yr	
steel %	=	0.9		
	=	2.91E+07	g/yr	
Iron for equipments	=	1.27E+08	g	(kac, 2005)

lifetime	= 20	yr	
	= 6.35E+06	g/yr	
6. Machinery			
Crane*2 weight	= 4.90E+07	g	
lifetime	= 10	yr	
amount of steel and iron	= 600	ton	
work capacity	= 40	ton/d	
working days	= 15	day	
daily working hours	= 8	hr/d	
total working hours	= 120	hr	
content hour	= 87600	hr	
	= (Crane*2 weight)/(content hour)*(total working hours)/(lifetime)		
used crane weight	= 4.59E+04	g/yr	
Excavator	= 1.30E+07	g	
steel %	= 0.67		(Pulselli et al., 2007)
steel weight	= 8.71E+06	g	
lifetime	= 10	yr	
work capacity, Q	= 73.98	m ³ /hr	(KICT, 2009)
bucket capacity, q	= 0.5	m ³	
volumetric conversion factor, f	= 1.37		
work efficiency, E	= 0.6		
bucket factor, K	= 0.9		
1 cycle time, cm	= 18	cm	
daily working hours	= 8	hr/d	
work capacity	= 591.84	m ³ /d	
total excavated volume	= 6000	m ³	
total working hours	= 10.14	d	
	= 81.10	hr	
content hour	= 87600	hr	
	= (steel weight)/(content hour)*(total working hours)/(lifetime)		
used excavator weight	= 7.06E+03	g/yr	
7. Labor	= 6.18E+08	₩/yr	
8. Services	= 7.70E+08	₩/yr	
Operation and Maintenance			
9. Labor	= 5.93E+08	₩/yr	
10. Maintenance	= 7.40E+07	₩/yr	
11. Ring Dies Nozzle	= 1	ton	(kac, 2005)
lifetime	= 3	month	
total Nozzle used	= 4.00E+06	g/yr	
12. Roller*2	= 0.6	ton	(kac, 2005)

lifetime	= 3	month	
total Roller used	= 2.40E+06	g/yr	
13. Electricity	= 2.03E+06	kW/yr	
	=(2.03E+06kW/yr)/(1.00E+06kW/GW)(3.60E+12J/GW)		
Energy	= 7.32E+12	J/yr	
14. Fuel	= 1.93E+13	J/yr	
Hi-sene(by-product fuel # 1)	= 4.07E+05	ℓ /yr	
heating value	= 8.85E+03	kcal/ℓ	(NRE, 2008)
	= 4.19E+03	J/kcal	
Energy	= 1.51E+13	J/yr	
c-9(by-product fuel #2)	= 1.05E+05	ℓ /yr	
heating value	= 9.70E+03	kcal/ℓ	(NRE, 2008)
	= 4.19E+03	J/kcal	
Energy	= 4.24E+12	J/yr	
15. Services	= 5.65E+08	₩/yr	
Production			
Refuse-derived fuel	= 5.80E+03	ton/yr	
	=(Refuse-derived fuel)*(1.00E+03kg/ton)* (4569		
	kcal/kg)*(4186J/kcal)		
Energy	= 1.11E+14	J/yr	
