

## 도시폐기물의 성상과 생분해정도에 따른 에너지회수공정의 비교

## Fundamental Aspects of Energy Recovery Systems based on Municipal Solid Waste Characteristics and Its Biodegradability

崔 義 昭\* · 朴 厚 遠\*\*  
Choi, Eui So · Park, Hoo Won

## Abstract

This study was carried out to provide basic data to be necessary for the selection of an energy recovery process based on the characteristics of municipal solid wastes(MSW).

The samples were collected at Kangdong-Ku in Seoul and conducted ultimate and proximate analyses. Laboratory scale anaerobic digesters were operated to determine the nonbiodegradable fractions of the wastes.

The results indicated that carbon and hydrogen contents, and lower heating values could be calculated from the volatile contents of MSW by the following equations :  $C=0.57 VS$ ,  $H=0.084 VS$ , and  $HL=49.5 VS-(6-0.045 VS) W$ . Nonbiodegradable fractions were respectively 58.9% of volatile matters and 77.7% of MSW.

Incineration and refuse derived fuel(RDF) processes appeared to be the most efficient processes in terms of weight reduction and energy recovery. But determining the energy recovery processes, the fluctuations of heating values of MSW throughout a year and available landfill site and secondary pollution should be considered.

## 要 旨

본 연구는 도시폐기물의 성상을 이용하여 에너지회수공정 선택을 위한 기초자료를 얻고자 수행되었다. 폐기물은 서울시 강동구 지역에서 채취하여 물리적조성과 화학적조성이 조사되었으며, 혐기성소화 실험을 통해 폐기물내의 생물학적 분해불능물질함량을 결정하였다.

분석결과에 의하면 폐기물의 탄소함량, 수소함량 및 저위발열량은 다음식에 의해 계산되어질 수 있다;  $C=0.57VS$ ,  $H=0.084 VS$ ,  $HL=49.5VS-(6-0.045 VS)W$ . 또한 폐기물내의 생물학적 분해불능물질함량은 가연성물질의 58.9%, 전체폐기물의 77.7%로 나타났다.

폐기물의 처리공정중 무게감량이 가장 큰 것은 소각이며 에너지생산량은 연료생산이 가장 큰 것으로

\*정회원 · 고려대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\*정회원 · 고려대학교 대학원 토목공학과 박사과정

나타났으나 에너지회수공정의 결정시는 폐기물의 연중 발열량변화, 매립지 확보문제 및 추가환경오염여부 등의 제반조건이 충분히 고려되어야 할 것이다.

## 1. 序 論

우리나라 대도시의 인구집중과 함께 발생한 가장 큰 문제점의 하나가 폐기물의 처분문제일 것이다. 현재 우리나라는 이용가능한 폐기물 관련자료가 매우 부족하기 때문에 본 연구에서는 성상분석과 생물분해실험을 통하여 폐기물내의 생물학적 분해가능물질함량을 결정하였다. 또한 각 처리방법별 물질수지를 구하여 우리나라 도시폐기물로부터의 에너지회수 공정을 비교 분석함으로써 도시폐기물의 처리방법을 선택하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실 험

실험에 사용된 시료는 서울시 강동구지역을 대상으로 채취하였으며 채취된 시료는 실험실에서 삼성분함량, 발열량, 탄소·수소·산소·질소의 원소함량등이 분석되었다. 수분함량은 105°C에서 1시간이상 건조시켜 측정하였으며, 가연분함량은 약 900°C에서 연소시켜 측정하였다. 발열량은 Bomb Calorimeter, 원소분석은 원소분석기에 의해 각각 분석하였다.

생물분해를 통한 물질수지방법으로 생물학적 분해가능물질함량을 결정하기 위하여 혐기성소화법이 이용되었다<sup>(1)</sup>. 혐기성소화실험에 사용된 시료는 폐기물중 미생물분해가 가능한 유기물질만을 선별한 혼합폐기물과 음식류를 대상으로 하였으며, 각 시료는 건조시킨 후 분쇄하여 소화조투입이 용이하도록 하수와 혼합하여 사용하였다.

본 연구에 이용된 실험실용 소화조는 1일 1회 시료를 주입시키며 배출시키는 완전혼합형으로 22~25L의 소화조가 35°C에서 운전되었으며 소화조의 혼합방식은 1일 평균 3회 이상 손으로 흔들어서 혼합하였다.

수질분석은 특별한 경우를 제외하고는 *Standard Methods*<sup>(2)</sup>에 준하였다.

## 3. 결과 및 결과분석

### 3.1 도시폐기물의 성상

표 1은 물리적조성에 의해 구분된 생물학적 분해가능물질 및 퇴비화 가능물질의 성상을 보여주고 있는데 전체폐기물 중 생물학적 분해가능물질과 퇴비화 가능물질은 습윤중량으로 각각 58.9%와 58.4%이며 건조중량으로는 29.6%와 29.1%로 나타났다. 표 2는 도시폐기물의 화학적조성을 나타내고 있는데 수분함량, 가연분함량, C/N비는 각각 35.6%, 29.2%, 22.4로 나타났으며 저위발열량(이하 발열량은 저위발열량을 말함)은 1259kcal/kg으로 나타났다. 미국<sup>(3)</sup>의 경우 도시 폐기물의 발열량은 2200kcal/kg정도로 우리나라보다 매우 높으나 독일<sup>(4)</sup>과 일본<sup>(5)</sup>은 각각 1500kcal/kg과 1400kcal/kg정도로 우리나라의 발열량보다 약간 높은 값이다.

폐기물의 성상분석시 원소분석과 발열량을 측정하는 것은 그 방법이 매우 복잡할 뿐아니라 고가의 장비를 필요로 하기 때문에 삼성분(수분, 가연성물질, 비가연성물질) 분석을 통한 원소함량과 발열량을 예측함으로써 시간과 비용을 절약할 수 있다. 그림 1은 가연분함량(VS 함량, %)에 대한 탄소함량과 수소함량의 관계를 나타낸 것인데 다음과 같은 관계이었다.

$$C=0.57 VS \quad (1)$$

$$H=0.084 VS \quad (2)$$

여기서, C : 탄소함량(Dry Base, %), H : 수소함량(Dry Base, %), VS : 가연분함량(Dry Base, %)

그림 2는 가연분함량에 대한 고위발열량의 관계를 나타낸 것인데 다음과 같은 관계가 있다.

$$Hh=54 VS \quad (3)$$

여기서, Hh : 고위발열량(kcal/kg), VS : 가연분함량(Wet Base, %)

고위발열량으로부터 폐기물의 저위발열량을 구하는 공식은 다음과 같다.

$$Hl = Hh - 6(9H + W) \quad (4)$$

표 1. 물리적조성에 의해 구분된 생물학적 분해가능물질 및 퇴비화 가능물질의 성상

단위 : %Wt

조 성	생물학적 분해여부		퇴비화여부	
	분해가능	분해불능	퇴비화가능	퇴비화불능
	음식류, 종이류, 섬유류, 목재류, 고무/가죽류	비닐/플라스틱류, 금속류, 연탄재, 유리/자기류, 기타	음식류, 종이류, 섬유류, 목재류	고무/가죽류, 비닐/플라스틱류, 금속류, 연탄재, 유리/자기류, 기타
건조중량함량	29.6	34.4	29.1	34.8
수분함량	29.3	6.7	29.3	6.6
계	58.9	41.1	58.4	41.6

표 2. 도시폐기물의 화학적조성

단위 : % Wt

구 분	연탄재 포함		연탄재제외	
	범 위	평 균	범 위	평 균
수 분	23.1-55.1	35.6	37.8-55.1	43.8
가 연 성 물 질	14.6-44.2	29.2	31.5-44.2	39.7
비 가 연 성 물 질	9.8-62.3	35.2	9.8-21.6	16.5
발 열 량 * C/N비	195-1873	1259	905-1873	1442
		224		21.9

\* Bomb Calorimeter로 측정하여 저위발열량으로 환산한 값(Kcal/kg)

여기서, HI : 저위발열량(kcal/kg), H : 수소함량(Dry Base, %), W : 수분함량(%)

(4)식에 (2)식과 (3)식을 대입하면 우리나라 폐기물의 저위발열량을 구하는 공식은 다음과 같다.

$$HI = 49.5VS - (6 - 0.045 VS) W \quad (5)$$

여기서 (1)식, (2)식, (5)식을 이용하면 원소함량과 발열량을 직접 측정하지 않고 삼성분분석을 통하여 폐기물내의 탄소와 수소함량 및 저위발열량을 예측할 수 있다.

### 3. 2 폐기물의 생물분해정도

그림 3은 음식류와 혼합폐기물을 혐기성소화시킨 결과로서 체류시간의 역수에 따르는 COD와 VS의 제거효율을 나타내고 있다. 체류시간이 무한히 길어지는 경우에 VS 제거효율은 음식류가 76%, 혼합폐기물이 69% 정도로 추정되는데, 이 값들이 생물학적 분해가능부분을 말해주고 있다. 또한 COD 제거효율은 음식류가 63%, 혼합폐기물이 74% 정도를 보여주고 있다.

사실상 이 값들에는 합성된 미생물이 포함되고 있어 실제적인 분해가능 부분은 이 값들보다 클 수 있으나 그 미생물 양은 그리 크지 않으므로 이를 무시하여도 무방할 것이다. 표 3은 음식류와 혼합폐기물의 생물학적 분해불능한 유기물질함량을 요약한 것이다. 위의 결과를 이용하여 폐기물 중 생물학적 분해불능물질의 함량을 구하면 건조중량기준으로 가연성폐기물 중 58.9%, 전체폐기물중 77.7%가 생물학적 분해불능물질이다.

### 3. 3 혐기성소화시 가스생산량 및 에너지생산량

그림 4는 수리학적 체류시간에 따른 가스생산량과 가스구성비를 나타내고 있다. 혼합폐기물의 경우 20일의 체류시간에서 KgVS 주입당 가스생산량과 메탄가스함량은 각각 0.6m<sup>3</sup>과 52%였다. 이 결과를 이용하여 우리나라 도시고형폐기물 100kg을 혐기성소화로 처리할 때 생산가능한 가스량과 에너지량은 각각 12.43m<sup>3</sup> 및 237MJ 이 된다.

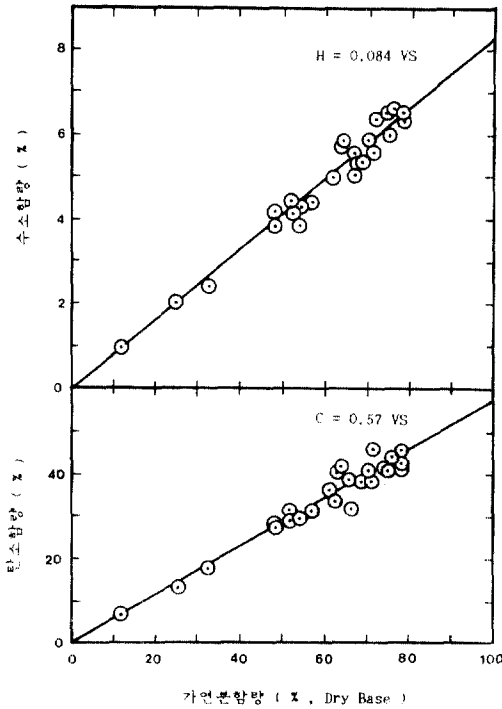


그림 1. 폐기물내의 가연분함량에 대한 탄소함량과 수소함량간의 관계

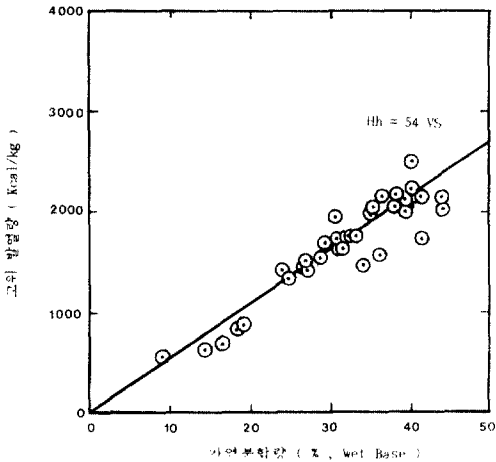


그림 2. 폐기물내의 가연분함량과 고위발열량간의 관계

### 3. 4 매립지 최대가스발생량 및 에너지생산량

100kg의 도시폐기물을 매립처리할 때 최대가스발생량은 가연분함량으로부터 구한 탄소함량을 COD로 환산하여 구하면 18.64m<sup>3</sup>이 된다. 따라서 매립지

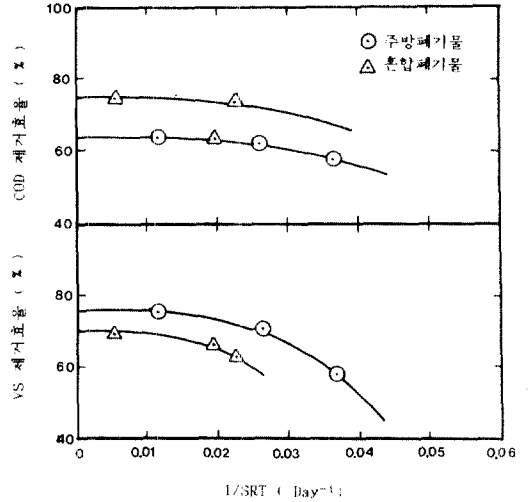


그림 3. 체류시간의 역수에 따른 COD 및 VS제거효율

표 3. 폐기물내의 생물학적 분해가능한 유기물질함량

Unit : %

시 료	COD	VS
음 식 류	37	24
혼합폐기물	26	31

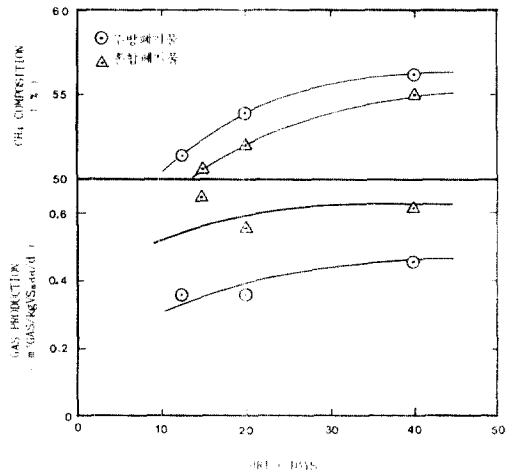


그림 4. HRT에 따른 가스생산량 및 가스구성비

에서 발생한 가스를 모두 포집할 수 있다면 100kg의 도시 폐기물당 356MJ의 에너지를 회수할 수 있다. 표 4는 폐기물 매립지에서의 가스생산량을 비

표 4. 폐기를 매립지에서의 가스생산량 비교

제안자	가스생산량 (m³/Kg)	온도(°C)	비 고	참고문헌
이	0.09	23-30	Lysimeter에 의한 실험치	(6)
이	0.18-0.2	25	조성별 반감기를 이용한 추정치	(7)
Tobasaran	0.235	25	Gc=(5.23T+104.61)m³/ton에 의한 계산치	(8)
Rettich	0.12-0.14	-	실험치	(9)
본 연구	0.19	35	최대가스발생량 예측치	

교한 것으로 본 연구에서 구한 값은 이<sup>(7)</sup>와 Tobasaran<sup>(8)</sup>의 값과 유사한 결과이며 이<sup>(6)</sup>와 Rettich<sup>(9)</sup>의 실험치로 미루어볼 때 매립지에서 실제 발생가능한 가스량은 최대가스발생량의 약 47~74%정도일 것으로 사료된다.

이것을 이용하여 도시폐기물을 매립처리할 때 최대가스발생량을 예측하는 식은 다음과 같이 제안된다.

$$V = 0.79(W) (Pbd) (Pvs) (273+T) / 273 \quad (6)$$

여기서,

V : 매립시 발생하는 가스량 (m³ Gas)

$$0.79 : 0.57 \times 32 / 12 \times 0.74 \times 0.35 / 0.5$$

W : 매립처리하고자 하는 총폐기물의 습윤중량 (Kg)

Pbd : 전체폐기물중 물리적조성에 의해 구분된 생물학적 분해가능물질의 건조중량함량 (%)

Pvs : 전체폐기물중 물리적조성에 의해 구분된 생물학적 분해가능물질의 가연분함량 (%)

T : 온도(°C)

### 3.5 소각시 열수지 및 물질수지

그림 5는 발생원에서 수거된 100kg의 폐기물을 소각처리하였을 때의 물질수지 및 열수지를 나타내고 있다. 100kg의 폐기물을 소각처리하였을 때 steam생산에 사용된 에너지는 339MJ로서 약 70%의 에너지회수율을 가지며, steam 생산량은 129.7kg(@100°C), stack gas 발생량은 664.2m³(@180°C, 1 atm), ash발생량은 7.7kg(@800°C)이며 총무게감량은 약 66%정도이다. 미국<sup>(10)</sup>의 경우 steam생산량은 약 2.9kg/kg MSW이며 독일<sup>(9)</sup>은 1.7kg/kg MSW로 우리나라의 경우보다 높는데 이는 우리나라 폐기물의 재의 함량이 높기 때문이다.

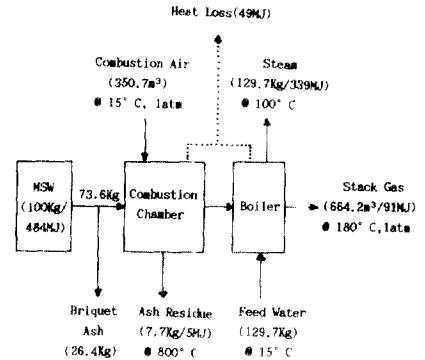


그림 5. 소각시 물질수지 및 열수지

### 3.6 도시폐기물로부터의 연료생산

그림 6은 정형적인 Powder RDF(Eco-Fuel II)의 제조방법으로 100Kg의 도시폐기물을 2%의 수분함량을 가지는 Powder RDF로 생산할 때의 물질수지이다. 이 방법에 의해 생산된 Powder RDF의 가연분함량 및 재의함량은 각각 85.5%와 12.5%이며 고위발열량은 4100Kcal/Kg(저위발열량 : 4018Kcal/kg)이 되며 총에너지양은 506MJ이 된다. 이 값은 일반적인 Powder RDF의 성질<sup>(11)</sup>인 수분함량이 2%, 재의 함량과 고위발열량이 각각 9.4%와 4300Kcal/kg인 것과 비교할 때 유사한 값이다.

### 3.7 기타공정에서의 물질수지

폐기물로부터 에너지를 회수하는 공정은 아니지만 대표적인 자원화공법으로 퇴비생산을 들 수 있다. 퇴비를 생산하기 위해서는 산소공급을 위한 에너지가 소요되기 때문에 산소소요량이 중요한 요소가 된다. 따라서 100kg의 도시폐기물을 퇴비화시킬 때 산소소요량 계산은 가연분함량으로부터 구한 탄소함량을 이용하여 구하면 24.4kgO₂가 된다.

### Fuel production process

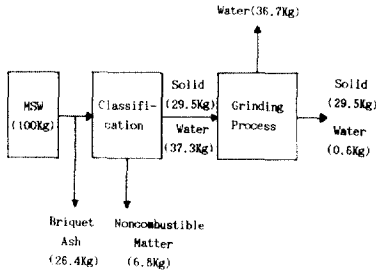


그림 6. 연료생산시 물질수지

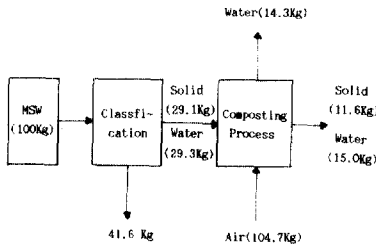


그림 7. 퇴비화시 물질수지

퇴비화시의 수분제거량<sup>(2)</sup>은 퇴비의 온도가 60°C로 올라간다고 가정했을 때 약 0.137gH<sub>2</sub>O/g air이므로 약 14.3kg의 수분이 퇴비화과정에서 제거된다. 위의 결과를 이용하여 100kg의 도시폐기물을 퇴비화시킬 때의 물질수지가 그림 7에 나타나 있는데 퇴비화에 의한 총무게감량은 약 29%정도이며 생산된 퇴비의 수분함량은 56%정도이다. 이것을 이용하여 도시폐기물을 퇴비화시킬 때 산소소요량을 예측하는 식은 다음과 같다.

$$W_o = 1.0(W_w)(P_c)(P_{vs}) \quad (7)$$

여기서,

W<sub>o</sub> : 퇴비화에 요구되는 산소소요량(kg O<sub>2</sub>)

$$1.0 : (0.69 \times 0.57 / 12) \times 32$$

W<sub>w</sub> : 퇴비화시킴과자 하는 총폐기물의 습윤중량(kg)

P<sub>c</sub> : 퇴비화 가능물질의 건조중량함량(%)

P<sub>vs</sub> : 퇴비화 가능물질의 가연분함량(%)

### 3.8 각 처리방법의 비교

표 5에는 각 처리방법에 의해 100kg의 도시폐기물을 처리했을 경우 에너지생산량 및 무게감소율이

나타나 있는데 에너지생산량은 연료생산의 경우가 506MJ, 무게감소율은 소각처리시 66%로 가장 크다. 그러나 소각시에는 소각로내의 양호한 자연상태를 유지할 수 있는 1000-1200Kcal/kg이상의 발열량이 유지되어야 하는데 우리나라의 경우 하절기에 강우일수가 집중되어 있을 뿐 아니라 동절기에는 연탄사용으로 인하여 평균발열량에 크게 미달될 수 있기 때문에 철저한 발열량 관리와 함께 소각로 설계시 발열량 변화를 충분히 고려하여야 할 것이다. 또한 혐기성소화는 무게감소율이 23.2% 밖에 되지않고 추가 수질오염원이 될 수 있다.

폐기물 매립지로부터의 에너지회수방법은 가장 비용이 적게 소요되는 것으로 예측되나 지하수오염이나 매립지 확보문제등의 문제점을 내포하고 있다. 퇴비화와 연료생산은 적절한 소비수단이 마련된다면 도시폐기물의 적절한 처리방법이 될 수도 있을 것이다.

표 5. 도시폐기물 100kg을 처리할 때 처리방법별 에너지 생산량 및 무게감소율(연소효율 불고려시)

처리방법	에너지생산량 (MJ)	무게감량 (%)	비 고
혐기성소화	237	23.2*	
매립	214	24.1*	가스발생량은 최대량의 60%로 가정
소각	484	66.0	
퇴비화	-	29.2	27kg의 퇴비 생산
연료생산	506	36.7	
건조	-	35.6	

\* 건조중량기준

### 4. 결 론

도시폐기물의 성분분석과 생물학적 분해정도에 의한 도시폐기물로부터의 적용가능한 에너지회수 공정을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 우리나라 도시폐기물의 삼성분분석을 통한 폐기물내의 탄소와 수소함량 및 저위 발열량을 예측하는 식은 다음과 같다; C=0.57 VS, H=0.084 VS, HI=49.5 VS-(6-0.045 VS)W. 또한 생물분해실험

을 통해 얻은 폐기물내의 생물학적 분해가능물질함량은 건조중량기준으로 가연성폐기물중 58.9%, 전체폐기물중 77.7%이다.

2) 발생원기준으로 100kg의 도시폐기물을 혐기성 소화시키는 경우 발생가능한 가스량 및 에너지생산량은 각각 12.43m<sup>3</sup>과 237MJ이며, 무게감량은 약 23.2%로 계산된다. 또한 매립시키는 경우 발생가능한 최대가스량 및 에너지생산량은 각각 18.64m<sup>3</sup>과 356MJ이며, 무게감량은 약 24.1%로 계산된다. 매립시 최대가스발생량 예측식은 다음과 같다.

$$V=0.79(W) (Pbd) (Pvs) (273+T)/273$$

3) 발생원기준으로 100kg의 도시폐기물을 소각처리하는 경우 총무게감량은 약 66%, 에너지생산량은 연소효율 고려시 339MJ, 연소효율 불고려시 484MJ로 계산된다. 또한 2%의 수분함량을 가진 Powder RDF(Eco-Fuel II)로 생산할 경우 무게감량은 36.7%, 에너지생산량은 506MJ로 계산되며, 퇴비화처리할 경우 총무게감량은 약 29%로 계산된다. 퇴비화처리시 산소소요량 예측식은 다음과 같다.

$$W_o=1.0 (W_w) (P_c) (P_v_s)$$

4) 위의 결과를 종합하여 볼때 우리나라 도시폐기물의 처리공정중 무게감량이 가장 큰 것은 소각이며, 에너지생산량은 연료생산이 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 에너지회수공정의 결정시는 폐기물의 연중 성상변화, 매립지 확보문제, 추가 환경오염여부등의 제반조건이 충분히 고려되어야 할 것이다.

## 後 記

본 연구는 1986년도 한국학술진흥재단의 학술연구조성비에 의하여 고려대학교 생산기술연구소에서 수행된 "에너지 개발 및 효율적 활용방안에 관한 연구" 사업중 "대체에너지 개발에 관한 연구"의 일환으로 수행되었음을 알려드립니다. 본 연구를 위하여 고려대학교 대학원

환경공학전공의 권수열, 임봉수, 강정구, 최준기군등의 노고가 컸습니다.

## 참 고 문 헌

1. 최의소, "고형폐기물내의 생물학적으로 분해가능한 유기물질의 함량의 결정에 관한 연구", 대한토목학회지, 제8권, 제3호, 1988
2. APHA, AWWA, WPCF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 15th Edition, 1985
3. Nissen, W. R., "Combustion and Incineration Process", Marcel Dekker, Inc., NY, 1978
4. 최의소, "서독의 환경오염관리의 이모저모", 대한토목학회지, 제28권, 제6호, 1980
5. 박승조 외, "도시 쓰레기의 발열량의 추산", 한국폐기물학회지, 제3권, 제1호, 1986
6. 이정전, "도시폐기물로부터 Biogas생산에 관한 기초적연구", 고려대학교 박사학위논문, 1986
7. 이승무, "도시폐기물 매립지 안전도 조사연구", 연세대학교 산업기술연구소, 1981
8. Tobasaran, O., "Gas Production from Landfill, Household Waste Management in Europe by Birdgwater", A. V. and Lidgren, K.(ed), Van Nostrand Reinhold Co., 1981
9. Rettich, S., "Biogas aus Hausnull", FGU. Berlin. V. Seminar, 1982
10. Diaz, L. F., et al., "Resource Recovery from Municipal Solid Waste", Vol. 2, Final Processing, CRC Press, 1982
11. Wilson, D. C., "Waste Management, Planning, Evaluation, Technologies", Clarendon Press, Oxford, 1981
12. Haug, R. T., "Engineering Principles of Sludge Composting", JWPCF, Vol. 51, No. 8, 2189, 1979

(接受: 1991. 3. 27)