

일본해용융로의 합성가스와 매립가스의 혼합가스 에너지 특성

국내의 생활폐기물을 대상으로 일본해 용융 실험을 수행하여 압축식 용융로에서 발생하는 합성가스의 주요 구성 성분을 분석하고, 이 합성가스를 매립가스와 혼합하여 만든 혼합가스의 에너지를 재활용하는 방법의 가능성을 알아본다.

임연정

(주)한양 환경사업본부(lim2109@hanmail.net)

서론

각국의 소각방식에 따른 생활폐기물 처리율은 미국 14.8%, 일본 77.9% 및 독일 18%인데 비해서 우리나라는 14.5%이다. 생활폐기물 처리현황은 재활용 44%, 매립 41.5% 및 소각 14.57%이다. 일본해용융기술은 다이옥신의 발생을 근원적으로 방지하고, 소각재는 용융 및 유리화해서 중금속의 토양유출을 방지하고 잔재물은 도로 노반재 및 인공골재 등으로 재활용된다. 본 연구에서는 압축식 일본해용융 실험 장치를 이용하여 국내 K지역의 생활폐기물을 대상으로 일본해 용융실험을 수행하여 압축식 일본해 용융로에서 발생하는 합성가스의 주요 구성 성분을 분석하였다. 그리고 잉여가스를 생활폐기물 매립장에서 추출한 매립가스와 혼합하여 만든 혼합가스 에너지의 재활용 가능성을 알아보기 위하여 압축 및 탈가스화 실험, 가스화용융 및 합성가스 정제실험, 균질화 및 슬랙 냉각실험, 매립가스의 추출 및 정제실험을 수행하였다.

문헌고찰

생활폐기물의 소각시설과 열이용상태

(1) 소각시설 현황

우리나라의 대형 생활폐기물 연속식 소각시설 건설은 1984년 서울시 목동 신시가지의 생활폐기물 소

각여열 이용에 의한 집단에너지화 사업의 일환으로 1986년 150톤/일 규모의 스토커형 연속식 소각시설을 시작으로, 1990년 200톤/일 규모의 대구 성서소각시설, 100톤/일 규모의 성남시 소각시설이 건설되었으며, 최근 40개 시설이 설치완료 단계에 있다.

생활폐기물 소각시설은 독일, 일본, 덴마크 및 스위스 등의 선진기술을 도입하여 건설되었으며, 1997년 소각시설별 다이옥신 농도 분석결과가 발표된 후 각 소각시설별로 다이옥신류에 대한 긴급대책이 시행되었다. 대부분의 소각시설이 대기오염 방지시설, 특히 다이옥신류는 소각과정에서 대부분이 분해되고 온도가 낮은 후단으로 갈수록 그 농도가 증가하므로 저감시설을 설치해서 시설을 운영하고 있다.

(2) 소각로의 열이용

- ① 대구광역시 성서소각장 : 열공급 39.6%, 전력 사용 20.8%, 수영장 이용 0.2%, 단지내 이용 39.4%로 이용되고 있다.
- ② 부산광역시 다대소각장 : 전력 사용 56%, 수영장 이용 3%, 단지내 이용 41%로 이용되고 있다.
- ③ 경상남도 창원시소각장 : 발전 이용 43%, 단지내 이용 57%로 이용되고 있다.
- ④ 서울특별시 양천자원회수시설 : 폐열 판매 66.9%, 전력 사용 2.7%, 단지내 이용 30.7%로 이용되고 있다.
- ⑤ 경기도 광명시소각장 : 전력 사용 39%, 단지내

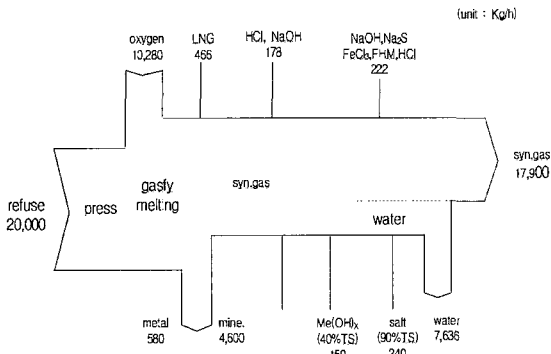


<표 2> Comparison sheet for synthesis gas among three countries of Japan, Germany and Korea

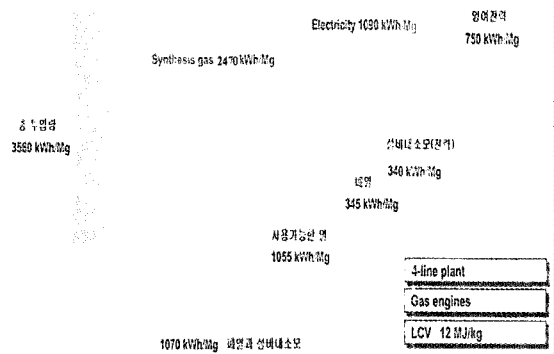
Japan	Chemical component(%)						Synthesis gas(%)				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	41.4	5.9	32.5	0.63	0.06	0.25	30.6	31.9	27.6	1.8	1633
Max.	47.7	7.3	36.7	1.34	0.34	0.52	35.2	36.1	32.9	2.7	1908
Ave.	44.0	6.5	34.5	0.82	0.08	0.37	32.5	33.8	30.7	2.3	1770
Germany	Chemical component(%)						Synthesis gas(%)				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	-	-	-	-	-	-	34.0	22.5	32.0	2.8	1849
Max.	-	-	-	-	-	-	39.0	27.0	35.7	3.7	2095
Ave.	-	-	-	-	-	-	36.5	25.0	34.5	3.3	1989
Korea	Chemical component(%)						Synthesis gas(%)				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	52.0	6.7	21.2	0.6	0.4	0.6	(30.6)	(22.5)	(27.6)	(1.8)	1633
Max.	56.1	7.6	27.3	1.1	0.5	0.8	(39.0)	(36.1)	(35.7)	(3.7)	2095
Ave.	54.1	7.0	24.2	0.9	0.4	0.7	(34.8)	(29.3)	(31.7)	(2.8)	1866

<표 3> Comparison of synthesis gas in Kawatesu

Analysis item		Treated gas (activated carbon tower outside)		
Item	Unit	Min.	Max.	Ave.
CO	%	30.6	35.2	32.5
H ₂	%	27.6	32.9	30.7
COv	%	31.9	36.1	33.8
N ₂	%	1.8	2.7	2.3
Heating value	kcal/Nm ³	1,724	1,894	1,824
Dust	mg/Nm ³	23.8	97	69.2



[그림 4] Mass balance of high temperature reactor with press



[그림 5] Heat balance of high temperature reactor with press

실험재료 및 방법

실험재료

압축식열분해용융로에서 생성되는 합성가스를 얻기 위하여 압축식 열분해용융 실험에 사용한 폐기물은 K지역의 생활폐기물이었다.

주요 삼성분 중 수분은 41.06% ~ 52.71%로서 평균 46.22%을 나타내었고 가연분은 33.99% ~ 50.23%로서 평균은 43.03%로 나타났으며 회분은 8.71% ~

13.30%로서 평균 10.75%를 나타내었다. 화학 성분 중 C는 21.29% ~ 30.88%로서 평균 26.66%, H는 2.23% ~ 3.89%로서 평균 3.15%, O는 10.01% ~ 13.81%로서 평균 12.12%, N은 0.17% ~ 1.06%로서 평균 12.12%, S는 0.08 ~ 0.27%로서 평균 0.17%, Cl은 0.21% ~ 0.32%로서 평균 0.27%를 나타내었다.

실험에 사용한 폐기물의 저위발열량은 1,647 ~ 2,287 kcal/kg으로서 평균 2,303 kcal/kg을 나타내었다. 이 폐기물을 압축식 열분해용융로에서 용융시켰

<표 4> Component of MSW and synthesis gas in Germany

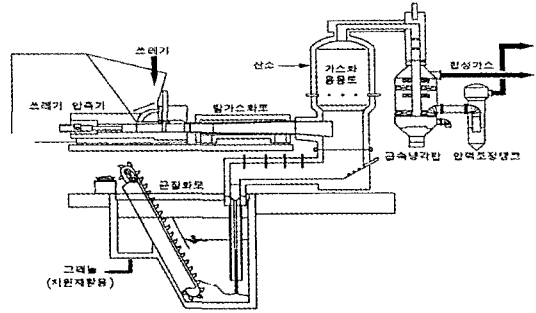
		Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Mean	Max	Min
	I N P U T [kg/Mg]	Waste total	1000	1000	1000	1000		
Combustible		500	552.7	513	514	519.925	552.7	500
Ash		250	242.1	238.7	209	234.95	250	209
Water		250	205.2	248.3	277	245.125	277	205.2
Natural gas		23.3	32.1	57.4	47.6	40.1	57.4	23.3
Oxygen		514	583.5	633.1	589.1	579.925	633.1	514
Agents		20	6.1	8.5	7.4	10.5	20	6.1
Total		1557.3	1621.7	1699	1644.1	1630.525	1699	
O U T P U T [kg/Mg]		Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Mean	Max	Min
	Total of synthesis gas	895	967.4	957.1	966.4	946.475	967.4	895
	CO	421	447.8	416.8	434.3	429.975 (45.4%)	447.8	416.8
	CO ₂	444.8	457.3	482.7	465.8	462.65 (48.9%)	482.7	444.8
	H ₂	26.5	27.2	24.3	29.9	26.975 (2.9%)	29.9	24.3
	H ₂ O	25.5	27.6	26.2	28.3	26.9 (2.8%)	28.3	25.5
	N ₂	7.2	7.5	7.1	8.1	7.475	8.1	7.1
	Mineral materials	230	216	210.8	183.6	210.1	230	183.6
	Metals	29	21.5	22.2	19.8	23.125	29	19.8
	Process water	381.8	394.8	478	444.2	424.7	478	381.8
	Mixed salt	12	9	15.4	9.6	11.5	15.4	9
	Me(OH)S	7.5	11.6	14.3	19.5	13.225	19.5	7.5
	Sulphur	2	1.4	1.2	1.1	1.425	2	1.1
Total	1587.3	1621.7	1699	1644.2	1638.05	1699	1587.3	

을 때 발생하는 합성가스를 실험재료로 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 매립가스는 K지역의 P매립지에서 추출하여 사용하였다. 매립가스의 성상은 메탄의 함량이 55% ~ 65%이었으며 이산화탄소 함량은 35 ~ 40%이었다.

실험장치 및 방법

(1) 실험장치

가스 채취기 및 분석기 사양은 각각 표 7, 8과 같다.



[그림 6] 실험장치도

<표 5> Characteristics of waste used in the research

Item		Date of sampling			Average
		'02. 12. 11	'03. 3. 4	'03. 8. 29	
Component (Wt %)	Water	52.71	41.06	44.90	46.22
	Waste	33.99	50.23	44.86	43.03
	Ash	13.30	8.71	10.24	10.75
Chemicals (Wt %)	C	21.29	30.88	27.81	26.66
	H	2.23	3.89	3.31	3.15
	O	10.01	13.81	12.55	12.12
	N	0.17	1.06	0.76	0.66
	S	0.08	0.27	0.16	0.17
	Cl	0.21	0.32	0.27	0.27
	Low heating value(kcal/kg)	1.647	2.827	2.434	2.303

<표 6> Landfill gas component

Component	Unit	Composition
Methane (CH4)	vol %	55-65
C2+	vol %	< 0.1
Carbon dioxide (CO2)	vol %	35 - 40
Nitrogen (N2)	vol %	< 5
Oxygen (O2)	vol %	< 2
Sulphur, inorganic	mg/m ³	0-100
Mercaptans	mg/m ³	0-10
Halogenated hydrocarbons	mg/m ³	0-150
Water		Saturated

<표 7> Specification of synthesis gas sampler

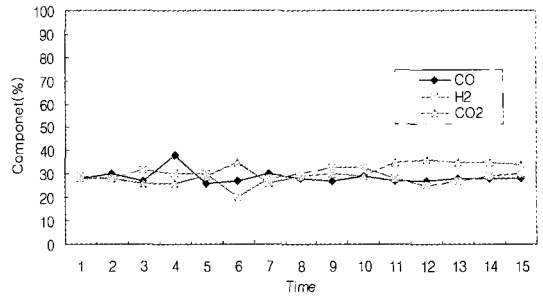
Model	Maker	No.(EA)	Flow(ℓ /min)	Vacuum(mmHg)	Pressure(bar)
B85 DE double ended pump	Chares AUSTEN PUMPS	2	33	700	2.5

결과 및 고찰

합성가스 조성

매립가스 주요성분 농도분석내용

P위생매립장의 매립가스 주요 성분조사 결과는 Table 10에 제시하였으며 주요 성분의 하나인 메탄 성분은 50 vol% 이상을 나타내었으며 산소의 농도는 1 vol% 이하를 나타내었다.



[그림 7] Synthesis gas composition ratio in continuous operation.(1st~15th)

<표 8> Specification of synthesis gas analyzer

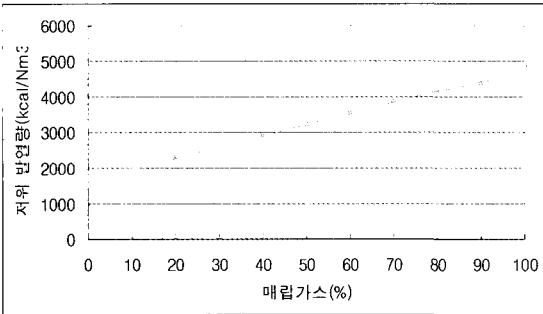
Model	Gas of analysis	Analysing method	Flow gas			Detecting range(vol%)
			Temp.(℃)	Pressure(psi)	Flow rate(ℓ /min)	
Unor 615	CO	NDIR	5~45	0.25~3.60	0.167~1.67	0~60
Thermor 615	H ₂	TCD	"	0.29~2.9	0.333~1.667	0~50
Multor 615	CH ₄	NDIR	"	0.25~3.6	0.167~1.67	0~5.0
Ultramat 23	CO ₂	NDIR	0~50	-	1.2~2.0	0~50
	O ₂	EC				0~25
Deltagas	NH ₃	NDIR	"	-	3.0	0~0.3
3HH CiTiceLs	H ₂ S	EC	"	-	0.4	0~0.1

<표 9> Comparison result for synthesis gas among three countries of Japan, Germany and Korea

Japan	Chemical component(%)						Synthesis gas(Vol.%)				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	41.4	5.9	32.5	0.63	0.06	0.25	30.6	31.9	27.6	1.8	1633
Max.	47.7	7.3	36.7	1.34	0.34	0.52	35.2	36.1	32.9	2.7	1908
Ave.	44.0	6.5	34.5	0.82	0.08	0.37	32.5	33.8	30.7	2.3	1770
Germany	Chemical component						Synthesis gas				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	-	-	-	-	-	-	34.0	22.5	32.0	2.8	1849
Max.	-	-	-	-	-	-	39.0	27.0	35.7	3.7	2095
Ave.	-	-	-	-	-	-	36.5	25.0	34.5	3.3	1989
Korea	Chemical component						Synthesis gas				Heating value (kcal/Nm ³)
	C	H	O	N	S	Cl	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	
Min.	21.3	2.2	10	4.2	0.1	0.2	26	26	20		1633
Max.	30.9	3.9	13.8	1.1	0.3	0.3	38	36	32		2095
Ave.	26.7	3.2	12.1	0.7	0.2	0.3	28.5	30.7	28.8		1866

결론

1. 압축식 열분해용융로에서 발생하는 합성가스의 조성은 CO 23 ~ 40%, H₂ 20 ~ 35% 및 CO₂ 22 ~ 43% 범위로 측정되었으며 합성가스의 발열



[그림 8] Heating value according to composition ratio of LFG in mixed gas.

량은 양질 폐기물의 경우는 2,100 ~ 2,200 kcal/Nm³, 기준 폐기물의 경우는 1,800 ~ 1,900 kcal/Nm³, 저질 폐기물의 경우는 1,500 ~ 1,600 kcal/Nm³이었다.

2. 압축식 열분해용융로에서 발생하는 합성가스와 매립가스를 비율 70 : 30으로 혼합한 결과 CH₄ 12.20%, CO 20.79%, CO₂ 27.91%, H₂ 20.72%, N₂ 2.55% 및 O₂ 0.15%로 나타났으며, 이때의 저위발열량은 2,588 kcal/Nm³이었다. 비율 50 : 50으로 혼합한 결과 CH₄ 27.0%, CO 14.85%, CO₂ 32.65%, H₂ 14.8%, N₂ 4.25% 및 O₂ 0.25%로 나타났으며, 이때의 저위발열량은 3,220 kcal/Nm³이었다. 그리고 비율 20 : 80으로 혼합한 결과 CH₄ 43.2%, CO 5.94%, CO₂ 35.26%, H₂ 5.92%, N₂ 6.8% 및 O₂ 0.4%로써 저위발열량은 4,168 kcal/Nm³이었다.

3. 기존 스토카식 소각로는 공기로써 연소하며 과

<표 10> Analysis of major components of LFG

Component	Analysis frequency	Unit	Average
CH ₄	65	V/V(%)	54
CO ₂	65	V/V(%)	37
O ₂	65	V/V(%)	0.5
Miscellaneous (N ₂ , mercaptans, VOC, etc.)	65	V/V(%)	8.5

<표 11> 합성가스와 매립가스의 혼합가스 에너지특성

LFG (%)	Synthesis gas (%)	Component (%)						Low heating value(kcal/Nm ³)
		CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	O ₂	
0	100	-	29.70	28.30	29.60	-	-	1,640
10	90	5.40	26.73	29.17	26.64	0.85	0.05	1,956
20	80	10.80	23.76	30.06	23.68	1.70	0.10	2,276
30	70	12.20	20.79	27.91	20.72	2.55	0.15	2,588
40	60	21.60	17.82	31.78	17.76	3.40	0.20	2,904
50	50	27.00	14.85	32.65	14.80	4.25	0.25	3,220
60	40	32.40	11.88	31.27	11.84	5.10	0.30	3,536
70	30	37.80	8.91	34.39	8.88	5.95	0.35	3,852
80	20	43.20	5.94	35.26	5.92	6.80	0.40	4,168
90	10	48.60	2.97	36.13	2.86	7.65	0.45	4,384
100	0	54.00	-	37.00	-	8.50	0.50	4,800

잉공기를 사용시 필요한 산소량의 약 8배를 연소용 공기로써 투입한다. 한편 열분해 용융로는 순산소로써 연소하므로 실제로 배출가스량은 기존 스토카방식에 비해 상당히 적은 대기배출량을 유발한다. 따라서 교토의정서가 발효되면 신규 열생산 시설의 경우 배출가스 부담금을 부과할 수도 있으나 열분해 용융시설은 상당히 그 영향이 적다.

참 고 문 헌

1. Stahlberg, R., and Lim, Y. J., "Thermoselect high temperature recycling for the disposal of all kinds of waste," Korea Associate Council of Incineration Technology, (2003) pp. 77-102.
2. Stahlberg, R., and Feuerriegel, U., "Thermoselect Energy and Raw Materials Recovery, Part 1: Process Foundation for the Continuous Utilization of Waste." Chem, Technik 46, no. 5 (1994) pp. 257-266
3. Stahlberg, R., "High Temperature Recycling and Minimization of Environmental Pollution through Complete Thermal-Chemical Material Conversion. " MUT International Congress for Environmental Engineering and Research, Topic A. (1992) pp. 7-22.
4. 송효순, "폐기물매립장의 매립가스발생특성 및 자원화에 관한 연구," 석사학위논문, 계명대학교, 2003.
5. 이성호, 임연정, 김병찬, "대형소각시설의 배출가스 중 다이옥신의 저감효율분석에 관한 연구," 환경과학논집 8, no. 1 (2004) pp. 215-224
6. 이협희, 임연정, "Thermoselect 열분해용융시설의 처리기술 및 공정특성," 한국폐기물학회지 18, no. 3, (2001) pp. 21-28
7. 윤용승, 폐기물 가스화용융 공정기술 개발, 서울, 한국소각기술협의회, (2002) (주)