

## 생활 폐기물로부터의 합성 가스 전환 연구

이정목, 유보선, 조성수, 변용수, 이협희\*  
고등기술연구원 Plant Engineering 센터  
\* (주)대우건설 플랜트 사업본부

### A study of Synthesis Gas Production from Municipal Solid Waste

J. M. Lee, B. S. Yu, S. S. Cho, Y. S. Byun, H. H. Lee\*  
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering  
\* Plant Division, DAEWOO E&C CO., LTD.

#### 1. 서론

본 연구는 폐기물로부터 CO와 H<sub>2</sub>가 주성분인 합성 가스를 얻는 방법에 대한 것으로, 주요 반응으로는, 폐기물 내의 탄소, 수소 성분과 외부에서 공급된 산소와의 발열반응인 부분 연소 반응과 부분 연소 반응에 의해 생성된 이산화탄소와 물이 미반응 탄소와의 흡열 반응인 가스화 반응으로 구성된다. 이러한 가스화 방법은 석탄과 같은 저급의 화석 연료나, 폐기물로부터 양질의 청정 연료를 얻으면서, 기존 처리 방법에서 문제가 되었던 2차 오염물질의 발생을 억제할 수 있어 환경적인 측면과 에너지 이용 효율적인 측면에서의 장점을 갖는다. 특히, 폐기물 처리에 있어 가스화 방법을 적용함에 있어 기존 소각 처리에서 문제가 되었던 다이옥신과 같은 독성 유기물질의 배출을 원천적으로 저감할 수 있어, 폐기물의 무해화 처리의 하나의 대안으로 유럽을 중심으로 일본 등에서 활발히 상업화 공정이 개발되고 있다. 특히 가스화 공정과 용융 공정이 결합된 폐기물 처리 설비는 처리 후 잔재를 유리화 하여 슬래크로 처리함으로써, zero emission이 가능한 가장 현실적인 신기술로 각광을 받고 있다.

그러나 가스화 용융 공정의 많은 장점에도 불구하고 신기술이 국내에 적용될 때, 해당 공정에 대한 국내 폐기물에 대한 운전 안정성, 경제성 등에 대한 사전 검증 자료가 필요하며, 이러한 결과를 바탕으로 국내 폐기물 특성을 감안한 공정의 구성 및 개선을 통해야만 실제 운전시 발생될 수 있는 시행착오를 최소화 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 고등기술연구원과 (주)대우건설의 공동 연구를 통해 외국에서 상업화된 공정에 대한 국내 폐기물 적용성 연구를 통해 향후 국내에 도입될 폐기물 가스화 용융 설비에 대한 기초 운전 결과를 제시하고자 한다.

#### 2. 실험 장치

가스화 용융 설비의 구성은 압축 공정, 열분해 공정, 가스화 용융 공정, 슬래크 배출 공정, 급속 냉각 공정으로 크게 구성된다. 먼저, 압축 공정은 걸보기 밀도가 200 kg/m<sup>3</sup> 정도의 생활 폐기물을 압축하여 걸보기 밀도가 1200 kg/m<sup>3</sup> 이상의 되도록 부피를 줄이는 과정으로, 압축을 통해 폐기물 내에 포함된 수분은 폐기물 내부에 균등하게 분포되며, 폐기물 내의 공간이 제거되므로 후단 공정인 열분해 공정에서 폐기물 내부로의 열전달을 촉진하여 열분해가 원활하게 일어나도록 하기 위함이다. 본 연구에서는 압축 압력은 73kg/cm<sup>2</sup> 으로 하여 폐기물 성상에 따라서 체적이 1/5~1/8 정도까지 압축되었다.

열분해 공정은 별도의 열분해 장치를 두지 않고, 압축기와 가스화 용융로 사이에 설치된 압축된 폐기물 공급 통로의 형상을 변경하여, 고온의 가스화 용융로로부터의 복사열에 의해 열분해되는 방법을 택하였다. 즉, 가스화 용융로에 연결된 폐기물 공급 통로의 폭을 넓게 하고 높이를 높게 하여, 가스화 용융로로부터의 복사열전달에 의해 폐기물이 가스화 용융로에

투입되기 전에 열분해가 진행되도록 한 것이다.

가스화 용융 공정은 열분해 공정에서 탄화물과 열분해가스로 분리된 폐기물을 CO, H<sub>2</sub>의 합성가스로 전환하면서 불연물은 용융시켜 슬래크로 처리하는 부분으로 본 가스화 용융설비의 핵심이라 할 수 있다. 가스화 용융로는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 탄화물이 가스화 용융로로 공급되는 입구를 기준으로 하여 하부 영역인 가스화 용융로의 하부에서는 주로, 부분 연소, 가스화 반응 그리고 불연물의 용융이 진행되는 영역과, 탄화물이 가스화 용융로로 투입되는 입구를 기준으로 상부 영역인 가스화 용융로 상부에서는 상부에 설치된 버너로부터 공급된 산소와 부분 산화 반응에 의해 1200℃ 이상으로 유지하면서 열분해가스를 개질하는 영역이다. 가스화 용융로 하부의 용융 슬래크가 발생하는 부분에서 가스화 용융로에 직각으로 연결되는 균질화로에서는 균질화로의 상부에서 설치된 순산소 버너에 의해 1400℃ 이상의 고온 영역을 형성하여, 용융 슬래크를 5분 정도 체류시켜 미용융물을 완전히 용융시켜 배출시키는 영역이다.

균질화로의 슬래크를 통해 슬래크 냉각 및 저장조로 떨어진 슬래크는 냉각수에 의해 급랭 파쇄되며 냉각된 슬래크는 2개의 호퍼로 구성된 슬래크 저장 장치 내에 저장되어 운전 중에도 주기적으로 외부로 배출이 가능하게 하였다.

가스화 용융로에서 배출되는 합성가스는 1,200℃에서 70℃ 이하까지 수분사에 의해 급랭시켜 다이옥신, 퓨란 그리고 다른 유해물질의 재합성을 방지시키도록 하였으며, 급속 냉각기 출구에서는 NaOH 수용액을 분사하여 합성 가스를 세정하였으며, 세정된 합성 가스는 입자와 액적을 제거하기 위한 데미스터를 통과한 후, 별도의 연소 장치에서 연소시킨 후 대기로 배출하였다.

이상과 같이 본 열분해 가스화 용융 시스템은 폐기물이 가스상태와 용융상태로 체류하는 동안 모든 생성된 물질이 재활용할 수 있는 품질을 갖기에 충분하도록 하였는데, 체류시간은 고형물질 상태로 1~1.5 시간, 가스상태로는 2~4초, 용융상태로 5분 이상이 되도록 하였다.

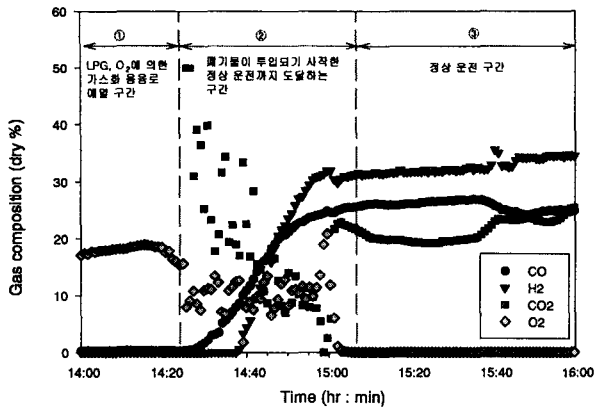
### 3. 실험 결과 및 토의

<표 1>에는 본 연구에서 적용한 폐기물의 성상을 나타낸 것으로, 주로 생활 폐기물을 대상으로 하였다.

<표 1> 대상 폐기물의 성상

		S시 (2002. 7)	Y시 (2002. 8)	S시 (2002. 9)	K시 (2003. 3)	B시 (2003. 4)
공업 분석 (%)	수분	15.9	55.8	미 분석	50.35	45.98
	휘발분	-	31.3		39.27	41.06
	고정탄소	-	6.0		4.90	4.77
	회분	-	6.9		5.47	8.19
원소 분석 (dry, %)	C	49.7	34.5		46.17	37.22
	H	6.5	4.3		6.09	4.46
	O	36.0	44.2		36.06	42.11
	N	0.12	1.2		0.59	0.96
	S	0.21	0.2		0.06	0.08
	회분	6.49	15.5		11.02	15.17
저위 발열량 (kcal/kg)		3301	1619		2229	2685

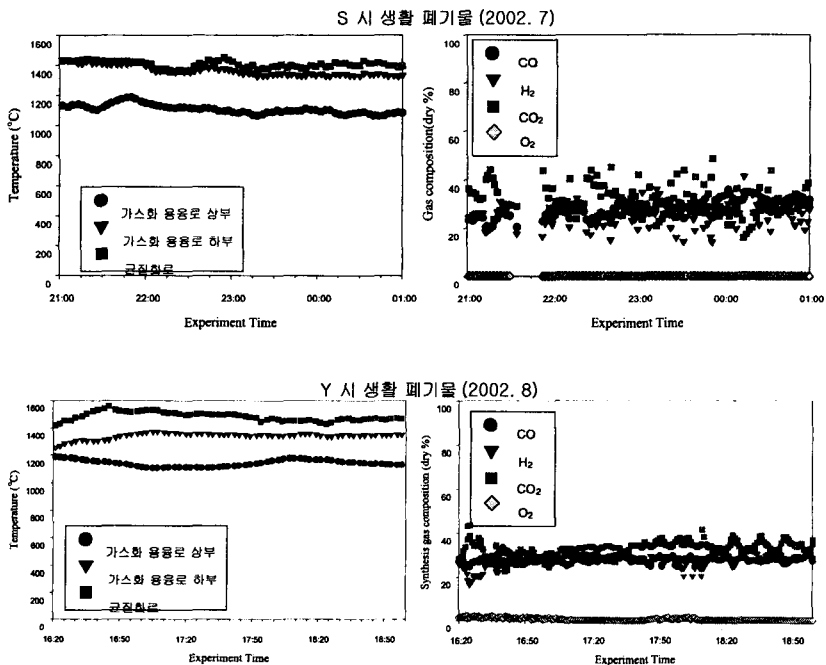
[그림 1]은 B시의 생활 폐기물을 사용하였을 때, 예열단계에서 정상 운전 단계까지의 합성 가스 조성의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 구간 ①은 폐기물은 투입하지 않은 상태에서, LPG와 순산소를 사용한 버너를 이용하여 가스화 용융로 내부의 내화재 온도를 1300℃ 이상으로 예열하는 단계이다. 배출가스 내의 O<sub>2</sub>는 17~20% 정도 나머지는 CO<sub>2</sub>가 차지함을 알



[그림 1] 가스화 용융로의 전형적인 운전 profile

까지 도달하는데 그림에서 알 수 있는 바와같이 대략 1시간 내외가 소요된다. 정상 상태 구간 ③에서는 투입된 폐기물에 대하여, 정상 상태로 도달되는 구간으로, CO 및 H<sub>2</sub>는 농도는 공급되는 폐기물의 성상, 산소 공급량에 따라 완만하게 변화한다. 이때부터는 가스화 용융로의 출구 온도는 1200℃ 정도, 슬래키 용융되고 5분 정도 체류하는 균질화로의 내부 온도는 1400℃ 이상이 되도록 보조 연료 및 산소량을 제어한다.

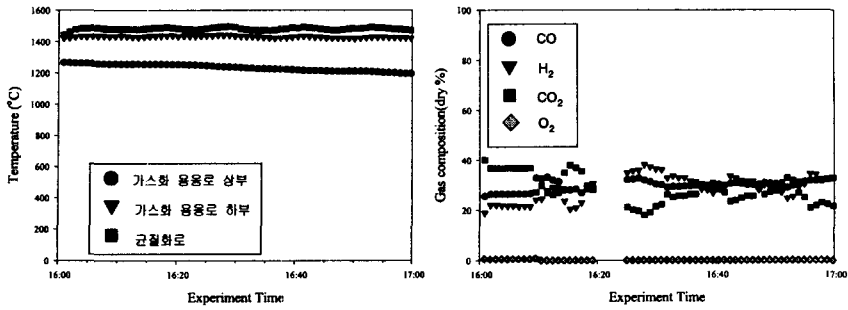
본 연구에서는 국내 생활 폐기물에 대한 가스화 용융 공정의 적합성을 파악하기 위하여, 음식물 분리가 비교적 잘된 아파트단지의 생활 폐기물(수분 15% 내외)로부터 음식물 분리가 실시되지 않는 생활 폐기물(수분 함량 50% 이상)까지 다양한 폐기물에 적용 실험을 실시하였다. 각각의 경우에 대하여, 가스화 용융로 내부 온도 및 얻어진 합성가스의 조성 분포를 [그림 2]에 나타내었으며, <표 2>에는 요약한 합성 가스 조성 및 발열량을 나타내었다.



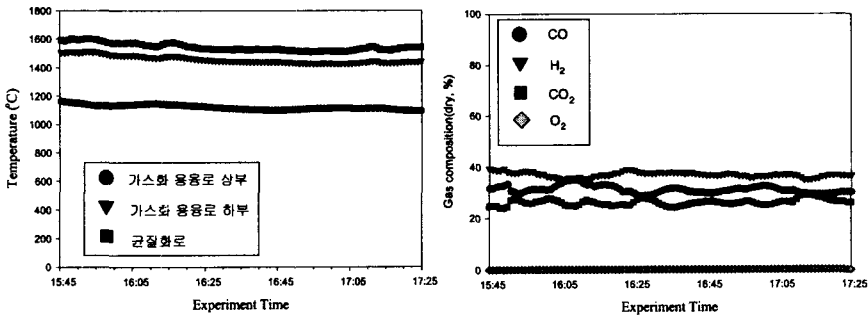
[그림 2] 생활 폐기물에 대한 가스화 용융로 온도 분포 및 합성 가스 조성

수 있다. 본 연구에서 사용한 CO<sub>2</sub> 분석기의 최대 측정 농도가 50% 이기 때문에 50% 이상의 가스 조성은 분석할 수 없었다. 통상적으로 예열 기간은 24시간에서 36시간 정도 소요되었다. 구간 ②는 폐기물을 2~2.5 분 간격으로 2~5 kg 정도를 계속 투입하기 시작하여 정상 운전 상태의 가스 조성을 얻을 때까지의 구간으로, 폐기물 투입에 따라 O<sub>2</sub>는 점차 감소하여, CO<sub>2</sub>도 역시 감소하며, 합성 가스의 주성분인 CO 및 H<sub>2</sub>는 점차 증가함을 알 수 있다. 이와같이 폐기물을 투입하여 정상 운전 상태

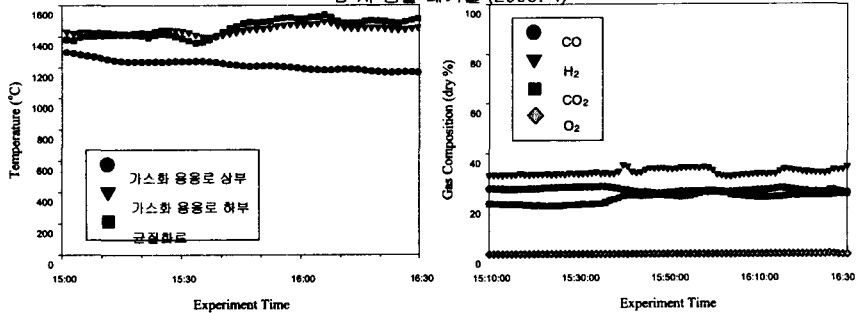
S 시 생활 폐기물 (2002. 9)



K 시 생활 폐기물 (2003. 3)



B 시 생활 폐기물 (2003. 4)



[그림 1] 생활 폐기물에 대한 가스화 용융로 온도 분포 및 합성 가스 조성(계속)

안정적인 가스화 용융로의 운전 조건에서의 온도 및 합성 가스 조성 그리고 발열량을 <표 2>에 나타내었다. 공급된 폐기물의 성상과 얻어진 합성 가스와의 명확한 관계는 확인할 수 없었으나, CO 20~35%, H<sub>2</sub> 18~40%, CO<sub>2</sub>는 20~45% 정도를 얻었으며, 합성 가스 발열량은 1400~1600 kcal/Nm<sup>3</sup> 정도의 값을 알 수 있었다. 이러한 운전 결과로부터, 다양한 성상을 갖는 도시 생활 폐기물에 대하여, 고정층 방식의 가스화 용융로를 통하여 국내 생활 폐기물에 대해서는 안정적인 운전이 가능하며, 양질의 합성 가스를 얻을 수 있다는 결과를 확인하였으며, 이에 따른 가스화 용융로의 국내 폐기물에 대한 적합성도 확인할 수 있었다.

또한 가스화와 동시에 폐기물 내의 회재를 용융하여 슬래크로 배출하는 경우, 발생된 슬래크에 대한 중금속 용출 시험 결과를 <표 3>에 나타내었다. Y시의 생활 폐기물의 용융 슬래크

에 대한 용출 실험 결과로, 슬래크의 용출액에서는 중금속이 거의 검출되지 않음을 확인할 수 있다.

<표 2> 대상 폐기물에 따른 가스화 용융로의 온도, 합성 가스 조성 및 발열량

		S시 (2002. 7)	Y시 (2002. 8)	S시 (2002. 9)	K시 (2003. 3)	B시 (2003. 4)
가스화 용융로 출구 온도 (°C)		1150~1200	1150~1200	1230~1260	1170~1200	1200~1300
균질화로 온도 (°C)		1400~1450	1400~1560	1400~1500	1550~1600	1400~1560
합성 가스 조성 (dry %)	CO	20~35	25~35	25~35	27~35	24~27
	H <sub>2</sub>	18~35	20~35	20~38	36~40	30~36
	CO <sub>2</sub>	20~45	28~40	20~40	24~30	20~27
	O <sub>2</sub>	~0	~0	~0	~0	~0
합성 가스 발열량 (kcal/Nm <sup>3</sup> )		1400~1600	1400~1700	1400~1600	1550~1700	1400~1700

<표 3> 슬래크 용출액에서의 중금속 농도

분석 항목	본 연구	국내 용출	분석 항목	본 연구	국내 용출
	측정치 (mg/l)	기준치 (mg/l)		측정치 (mg/l)	기준치 (mg/l)
총수은	검출안됨	0.005	사염화 탄소	검출안됨	-
카드뮴	검출안됨	0.3	1,2-시클로에틸렌	검출안됨	-
납	0.03	3.0	1,1,1-트리클로로에탄	검출안됨	-
6가크롬	검출안됨	1.5	벤젠	검출안됨	-
비스	검출안됨	1.5	아연	0.01	-
셀렌	검출안됨	-	니켈	0.02	-
총시안	검출안됨	-	총크롬	0.03	-
유기인	검출안됨	-	질산성 및 아질산성질소	검출안됨	-
알킬수은	검출안됨	-	베릴륨	검출안됨	-
PCB	검출안됨	-	바나듐	검출안됨	-
트리클로로에틸렌	검출안됨	-	구리	0.02	3.0
테트라클로로에틸렌	검출안됨	-	시클로 메탄	검출안됨	-

#### 4. 결론

본 연구에서는 고등기술연구원과 (주)대우건설에서 공동으로 개발한 국내 생활 폐기물을 대상으로 한 가스화 용융로에 대한 국내 폐기물에 대한 적합성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 수분 함량 15%에서 56% 정도의 고수분 생활 폐기물에 대한 운전을 통해, 폐기물 내의 불연물은 유리화 하여 슬래크로 처리할 수 있는 안정적인 가스화 용융로의 운전 기술을 확보하였으며, 얻어진 합성 가스의 조성(dry basis)은 CO 20~35%, H<sub>2</sub> 18~40%, CO<sub>2</sub>는 20~45% 정도 그리고 합성 가스 발열량은 1400~1700 kcal/Nm<sup>3</sup> 정도의 양질의 합성 가스 조성을 얻었다. 그리고 얻어진 슬래크의 용출 실험을 통해 중금속이 용출되지 않는 결과를 얻어 슬래크의 환경 안정성을 확인하였다.