

한국에너지공학회(2004년도)
춘계 학술발표회 논문집 P109-114

생활폐기물 자원화를 위한 파일럿 규모 가스화 용융시스템 실증 연구

구재희, 유영돈, 변용수 이협희*, 허일상*
고등기술연구원 Plant Engineering 센터, (주)대우건설 플랜트사업본부*

Studies on the Demonstration of Pilot Scale Gasification and Melting System for Municipal Waste Recycling

Jae Hoi Gu, Young Don Yoo, Yong Soo Byun, Hyup-Hee Lee, Il-Sang Huh
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering
*Plant Division, DAEWOO E&C CO., LTD.

연락처 : 031-219-2693, jaehoi@iae.re.kr

1. 서론

국내 폐기물 관리 종합계획에 의하면 소각, 매립 등의 처리방식에서 폐기물을 자원화할 수 있는 자원순환형 폐기물 재활용기술을 도입하여 폐기물의 재활용율을 증대시키고자 한다. 환경친화적으로 폐기물을 처리하고자 한다.

생활폐기물의 처리방법으로는 대부분 소각방식에 의해 처리되고 있으며, 공정 특성상 2차 오염물질이 필연적으로 발생되고 있다. 국내 생활 폐기물 소각 처리시 발생하는 다이옥신을 비롯한 질소산화물, 황산화물 과 같은 독성 유기물질, 가스상 또는 입자상으로 배출되는 저비점 중금속 그리고 소각잔재에 대한 안정화 및 무해화 처리가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 기존 소각 처리의 문제점을 해결할 수 있는 하나의 대안으로, 가스화 용융기술을 들 수 있으며, 이러한 기술의 장점은 다음과 같다. 기존 소각로에서는 1000℃ 이내의 산화성 분위기에서 폐기물을 처리하는 반면, 가스화 용융로에서는 1200℃ 이상의 환원성 분위기에서 폐기물을 처리하므로써 독성유기물질의 완전 파괴 및 분해가 가능하다. 가스화 분위기(배가스내의 과잉 산소가 없는 분위기)에서는 후단 가스 처리 공정에서의 다이옥신 재합성 반응(De-Novo synthesis)이 억제된다. 고형 잔류물은 전량 유리화 하여 재활용이 가능한 슬래그로 처리된다.

도시 폐기물의 무해화, 안정화 및 재활용이 가능한 처리 방법인 “가스화 용융” 기술은 유럽 및 일본 등에서 개발되었으며, 최근 일본에서는 건설되는 열분해 가스화 용융 방식 비율이 기존 단순 소각 방식의 비율보다 앞서가기 시작하였다.

또한 생활폐기물 소각공정에서의 에너지 회수 방법으로는 배출된 고온의 연소가스의 현열(sensible energy)만을 이용하여 증기나 온수를 이용하거나 증기에 의한 발전하는 방법이 있을 뿐 다양한 에너지 회수는 근본으로 불가능하다. 이러한 폐기물 소각 공정의 문제점을 해결하기 위해서는 상업화 단계에 접어든 소각 용융공정은 불연물을 안정화시켜 소각재를 크게 저감시키는데는 적합하지만 가연물 처리에 대한 환경성과 자원화 개념으로는 기존 소각 공정과 동일한 문제를 가지고 있다.

폐기물의 열분해 가스화 용융처리방법은 폐기물 내의 탄소 및 수소 성분은 일산화탄소 및 수소가 주성분인 가연성 합성가스로 전환함과 동시에 폐기물 내의 불연물은 용융함으로써, 폐기물을 환경적으로 안정하게 처리하고, 다양한 분야로 재활용이 가능하게 하는 새로운 폐기물 처리 개념일 뿐만 아니라 기존 소각 처리의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 처리 대안으로 부각되고 있다.

폐기물을 부분산화조건에서 열분해 가스화 용융시킴으로서 일산화탄소와 수소가 주성분으로 구성되는 합성가스로 가스화 함과 동시에 환원분위기에서 반응시켜 다이옥신의 발생을 억제하는 환경친화형 시스템의 도입이 선진국 뿐 만 아니라 국내에서도 보급이 확대되고 있는 실정이다. 고등기술연구원과 (주)대우건설에서는 국내 생활폐기물을 단순 소각하거나 고온소각용융시키는 기술에서 한 단계 앞선 친환경적인 폐기물 처리를 함과 동시에 이를 연료가스로 생산하기 위한 가스화 용융기술을 공동으로 국산화 개발하게 되었다. 이는 외국기술을 도입 기술을 기본으로 하였으나, 국내 생활폐기물에 적합한 파일럿 플랜트를 설계, 제작, 설치하고 개량하였다. 본 연구에서는 국내 생활폐기물을 자원화하는 기술을 상용화급으로 Scale up 할 수 있는 용량인 3t/d 규모의 파일럿 플랜트에서 실증한 연구 결과에 대해 고찰하였다.

2. 기술의 특징

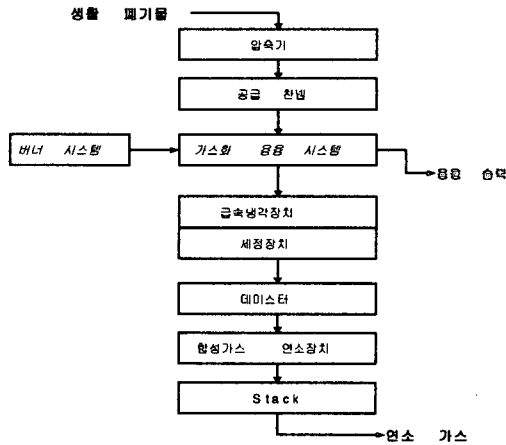
본 연구에서 개발한 기술은 생활폐기물 가스화 용융로에 이중 역확산화염 버너를 적용하여 버너 화염으로부터 방출되는 복사열유량을 증가시켜 슬래그 전환효율을 높이는 기술이다. 또한 생활폐기물 내의 가연분은 연료가스로 전환하고 불연분은 슬래그로 배출함으로써 폐기물을 환경적으로 안정하고 무해하며 재활용이 가능하도록 처리하는 생활폐기물 고정층 가스화 용융로에 이중역확산 버너를 적용하여 폐기물의 용융 효율을 증가시키는 가스화 용융기술이다.

3. 공정 구성

본 기술의 가스화 용융기술개발에서의 파일럿 플랜트의 공정구성도는 [그림 1]에 나타냈다. 본 설비의 구성은 폐기물 공급 설비, 가스화 용융 설비, 합성 가스 냉각 및 정제 설비로 크게 구성된다. 폐기물 공급 설비는 폐기물을 압축하여 폐기물의 체적을 감소시켜 가스화 용융로로 공급하는 역할을 한다. 압축기에서 폐기물 체적은 1/5~1/8 정도로 압축되어 폐기물 내의 수분을 일정하게 분포시키며, 폐기물 내의 기공을 제거하여 열분해 또는 가스화가 조속히 진행되도록 하였다. 압축기와 가스화 용융로를 연결하는 공급 채널은 압축된 폐기물을 가스화 용융로로 공급하는 덕트로, 가스화 용융로부터 가스가 배출되지 않도록 자체 밀폐구조를 갖고 있다. 공급 채널과 가스화 용융로 연결부에서는 가스화 용융로부터의 복사열전달에 의해 압축된 폐기물이 열분해 되는 구조를 갖는다.

가스화 용융로는 크게 가스화 반응에 의한 CO, H₂ 가스가 생성되는 가스화 용융로 본체와 용융된 슬래그를 일정 시간동안 유지하여 미용융물을 완전히 용융시켜 배출시키는 역할을 하는 균질화로로 구성되어 있다. 가스화 용융로 본체에는 가스화 반응과 폐기물과 반응하여 용융에 필요한 온도를 유지하는데 필요한 산소와 보조 연료를 공급할 수 있는 버너가 가스화 용융로 하부 영역, 상부 영역 그리고 균질화로에 각각 설치되어 있다. 가스화 용융로 하

부는 1400℃ 이상, 가스화 용융로 상부에서는 1200℃ 이상, 균질화로에서는 1550℃ 이상이 유지되도록 하였다.



[그림 1] 생활폐기물 가스화 용융시스템 공정구성도

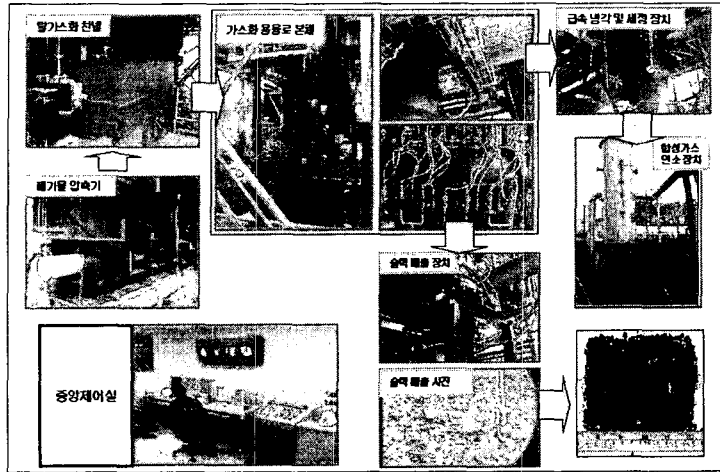
1200℃ 이상의 온도로 가스화 용융로부터 배출되는 합성 가스는 수분사(water spray)에 의해 급속 냉각에 의해 100℃ 이하까지 냉각되며, 합성 가스 내에 포함된 산성 가스를 세정하기 위한 NaOH 분사, 그리고 입자를 제거하기 위한 데미스터(demister)를 통과한 후 합성 가스 연소 장치로 공급된다. 세정 설비의 구성은 합성 가스 이용 설비에서 합성 가스를 연소시켜 대기로 배출할 때, 대기오염물질의 배출 농도를 환경 규제치 이하로 배출하기 위한 최소의 설비로 구성되었다.

합성 가스를 이용하는 가장 일반적인 방법으로는 보일러에서 연소시켜 증기를 얻거나 가스 엔진을 구동하여 발전하는 방식을 적용하고 있으며, 최근에는 연료 전지의 연료로 사용하거나, 메탄올, DME(Di-Methyl Ether) 등의 화학 원료 제조하는데 원료로 사용되는 연구가 진행되고 있다.

본 시스템에서는 가스화 용융 공정 개발이 주목적이므로, 합성 가스 이용을 보일러에서 연소하는 가장 일반적인 방법을 적용하였으며, 연소 장치에서 증기는 회수하지 않고 연소된 가스는 공기와 희석하여 온도를 낮춘 후 대기로 배출하였다.

[그림 2]에서는 생활폐기물 가스화 용융 파일럿 플랜트의 설비 구성 사진을 도식화 하였다. 본 시스템의 실험운전은 폐기물 열분해 가스화용융시스템의 운전은 크게 예열단계와 가스화 단계로 구분할 수 있다. 예열단계는 폐기물 투입없이 LPG를 사용하여 가스화 용융로 내의 내부 온도를 1,400℃까지 가열하는 단계이며, 가스화 용융단계는 예열이 완료된 후 폐기물을 투입하여 보조연료와 산소량을 조정하여 폐기물 내의 가연분은 합성가스로 전환하면서 불연분은 용융하는 단계이다.

생활폐기물의 불연분을 안정적으로 용융시키는 조건에서 가연분의 가스화 특성을 파악하기 위해 가스화 용융로 운전온도를 1,400℃ 이상으로 예열하여 고온으로 운전하였다.



[그림 2] 생활폐기물 가스화 용융시스템 공정구성 사진

4. 핵심공정의 기능 및 역할

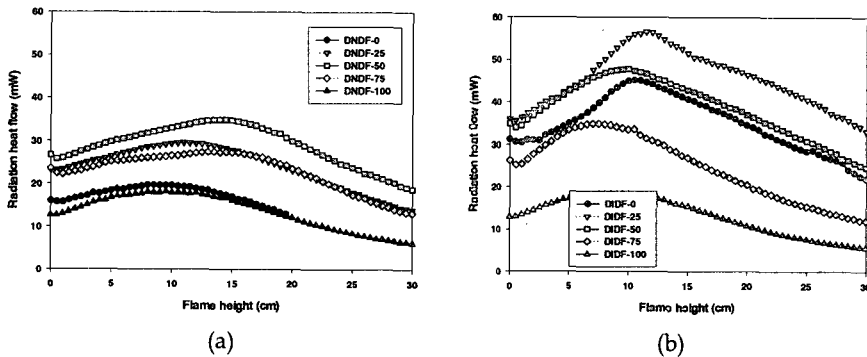
생활폐기물 가스화 용융시스템을 구성하고 있는 핵심공정인 폐기물 압축기, 탈가스화찬넬, 고온의 가스화 용융로, 슬랙배출장치, 합성가스 냉각 세정설비 및 합성가스연소설비에 대한 기능 및 역할은 <표 1>에 나타났다. 가스화 용융로에는 가스화용융로 본체와 균질화로로 구분되어 구성되어 있다.

<표 1> 핵심공정의 기능 및 역할

공정	기능 및 역할
폐기물 압축	폐기물의 부피를 1/5~1/8 정도로 압축시키고 폐기물 내부의 수분을 균일하게 분포 시키면서, 폐기물 내의 공기를 제거하여 후단 연계 공정인 열분해 공정에서의 열분해 시간을 단축
탈가스화찬넬	압축된 폐기물을 고온의 가스화 용융로 본체로부터의 복사 열전달에 의한 열분해
가스화 용융	열분해된 탄화물 내의 탄소, 수소 성분은 가스상의 CO, H ₂ 로 전환하면서, 무기물은 용융 처리
슬랙 배출	용융 슬랙은 슬랙 배출구를 통해 수냉 파쇄된 후 2개의 호퍼로 구성된 배출 장치에 의해 주기적으로 외부로 배출
급속 냉각 및 세정	가스화 용융로 출구에서 1200℃ 정도로 배출된 합성 가스는 70℃ 이하로 수분사에 의한 급랭 및 NaOH 수용액 분사에 의한 세정 <ul style="list-style-type: none"> · 다이옥신 재합성을 방지하기 위해 급랭 · 냉각에 의해 합성가스내의 중금속을 냉각수에 포집 · 급속 냉각기 출구에서 가성소다를 분사하여 합성 가스를 중화
합성 가스 연소	CO, H ₂ 가 주성분인 합성가스를 연소

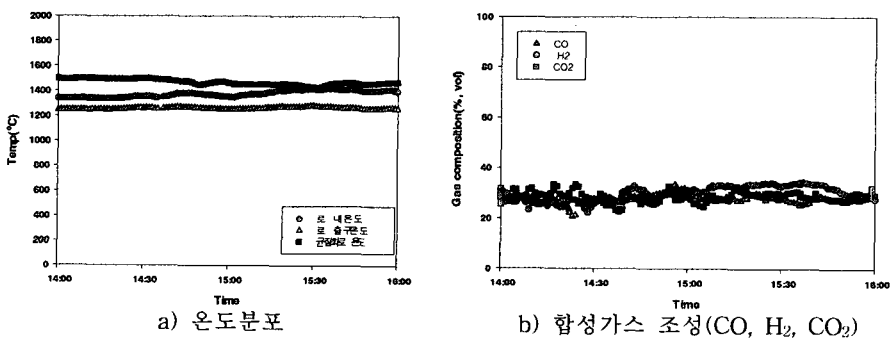
5. 처리 성능

가스화 용융로에 적용하기 위한 버너를 제작하여 실증 시험을 진행하였으며, 그 결과를 [그림 3]에 나타내었다. 여기서 [그림 3]의 (a)는 확산화염의 경우(DNDF로 표시, DNDF-25의 의미는 확산화염에서 $Q_s/Q_p=25\%$ 를 나타냄)를, [그림 3]의 (b)는 역확산화염의 경우(DIDF로 표시, DIDF-25의 의미는 역확산화염에서 $Q_s/Q_p=25\%$ 를 나타냄)를 나타냈다. 이중 역확산화염의 경우, 버너의 중심부로 전체 산소량의 75% 공급하고, 최 외곽으로 나머지 25% 산소량을 공급할 경우 화염으로부터의 복사열유속이 56.6 mW로, 확산화염의 최대 복사열유속은 34.8 mW보다 163% 정도 큰 값을 얻었다.



[그림 3] 기존버너와 이중역확산의 복사열유량 비교

운전시간에 따른 온도분포 및 합성가스의 조배출가스중 대기오염물질 분석결과는 [그림 4]에 나타냈다.



[그림 4] 운전시간에 따른 가스화용융로 온도분포 및 합성가스 조성

[그림 4]에서 나타낸 바와 같이 로내 온도분포는 가스화 반응온도 영역보다 높은 무기물의 용융 온도 조건으로 유지한 결과 주요 가스조성인 CO, H₂, CO₂가 20%~35%범위에서 유지되어 안정적인 가스화가 이루어짐을 알 수 있다.

본 연구를 통해 개발된 가스화 용융시스템의 성능을 평가하기 위하여 가스화 용융로의 평가 지표중에 하나는 공급된 폐기물냉의 회재가 용융 슬래크으로 전환되는 슬래그화율을 조

사하였다. 슬래그화율의 정의는 다음과 같다.

$$\text{슬래그화율(\%)} = \left[\frac{\text{슬래그 발생량 (kg/hr)}}{\text{슬래그 발생량(kg/h)} + \text{비산재 발생량(kg/h)}} \right] \times 100$$

3톤/일급 생활폐기물 가스화 용융시스템에서의 주요 처리 성능에 대하여 <표 2>에 나타났다.

<표 2> 생활폐기물 가스화 용융시스템의 처리 성능

구 분		단 위	측정치	기준치
슬래그화율		%	94~96	-
폐기물 중량 감량율	비산재	%	99.2~99.7 %	-
	슬래그+비산재	%	80.0~93.5 %	-
로내체류시간		초	2.58~3.61	1 이상
용융로 표면온도		℃	34.4~53.9	80 이하
강열감량	슬래그	%	무게변화없음	잔재물 1 이하
용융로 출구온도		℃	1200이상	1,200 이상

본 연구에서 실증한 파일럿 플랜트에서의 처리 성능은 슬래그화율이 94~96%로 높게 나타났고, 폐기물 중량감량율은 99.2~99.7 %로 높게 나타났다. 또한 용융로의 표면온도는 소각로 표면온도 기준인 80℃이하보다 크게 낮은 34.4~53.9℃로 유지할 수 있었다.

본 연구는 파일럿 시스템을 상용화하기 위해 실증하는 단계로서 폐기물을 연료가스 및 슬래크로 재활용 하는 공정은 전체 시스템이 환경적으로 타당성이 있어야 한다. 따라서 합성가스의 연소시 대기오염물질과 슬래크의 안전성을 환경법에 의해 규제기준에 준하여 시험분석한 결과 고온 용융처리시설로서 적합함을 알 수 있었다.

<표 3> 배출가스 중 대기오염물질 농도

구 분	단 위	측정치	배출허용기준	
			'04.12.31까지	'05.1.1이후
다이옥신	ng-TEQ/Nm ³	0.03	-	-
일산화탄소	ppm(12)	25.05	600(12)이하	300(12)이하
염화수소	ppm(12)	0.48	50(12)이하	50(12)이하
황산화물(SO ₂ 로서)	ppm(12)	1.48	300(12)이하	100(12)이하
질소산화물(NO ₂ 로서)	ppm(12)	31.52	200(12)이하	150(12)이하
먼지	mg/Sm ³ (12)	27.57	100(12)이하	100(12)이하

6. 결론

본 연구에서 생활폐기물을 3t/d 파일럿 규모 가스화 용융시스템에서 성능 시험한 결과 주요 성능인 높은 슬래크화율을 달성할 수 있었고, 합성가스의 안정적인 농도와 슬래크의 안정성을 만족하였으며 폐기물을 자원화 할 수 있는 가스화 용융시스템 전체 공정이 환경법 규제기준을 만족함을 실증할 수 있었다.