

# 반응로 기술의 폐기물 환경분야 적용

유 영 돈

고등기술연구원 Plant Engineering 센터

## Application of Gasifier Technology on Waste Treatment

Yoo Young Don

Institute for Advanced Engineering, Plant Engineering Center

### 1. 서론

현재 유럽과 미국을 중심으로 활발한 상용화가 진행되고 있는 석탄가스화복합발전 기술은 석탄 내의 탄소 및 수소 성분을 가스화 하여 청정 연료인 일산화탄소 및 수소 가스가 주성분인 연료 가스로 전환함과 동시에, 석탄 내의 포함된 불연물인 회분을 용융하여 환경적으로 무해하면서도, 기존 석탄화력발전 기술보다 에너지 효율이 높은 발전 기술이다. 이러한 석탄가스화복합발전 기술은 대부분 수백 Mw급 이상의 대형 복합발전 시스템으로 개발, 상용화가 진행되어왔으며, 발전과 아울러, 증기 생산, 수소 생산 그리고 화학 원료 생산 등과 같은 다목적으로 그의 적용 범위가 확장되고 있다.

최근들어 기존의 매립이나 중간처리 개념의 단순 소각에 의해 처리되던 폐기물 처리에 보다 환경적으로 안정적이며 무해하며 재활용이 가능한 처리 방법이 요청되고 있으며, 이러한 사회적인 분위기에 의해 새로운 기술 개발 또는 기존 기술을 이용한 고도화 처리 등이 시도되고 있다. 특히 기존 소각 방식을 이용한 폐기물 처리에서 기술적으로, 사회적으로 문제가 되고 있는 것은 소각시 발생하는 다이옥신류와 퓨란류(PCDD, PCDF)같은 독성 유기물질 배출 문제와 소각 후 발생하는 소각재에서의 중금속 용출에 따른 환경 오염 문제라 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 폐기물의 소각 처리 시 발생될 수 있는 문제를 해결할 수 있는 방법으로써 가스화/용융 기술의 적용성과 실제 적용 예를 조사하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기존 폐기물 처리시의 문제점

기존 폐기물 처리 방법에서 감용화 및 안정화가 타 처리 방법에 비해 상대적으로 우수한 폐기물 중간 처리 개념인 소각 처리 방법의 문제점을 [그림 1]에 나타내었다. 먼저 소각 처리시 발생하는 다이옥신과 같은 독성 유기물질의 배출을 들 수 있는데, 이들 독성 유기물질의 배출 메커니즘은 소각로 내부에서 불완전 연소될 때, 공급된 폐기물 내의 전구물질과 염소 등이 반응하여 생성되는 것과, 배가스 처리 공정에서, denova 반응에 의해 재합성 된다는 것이 이미 잘 알려져 있다. 특히 배가스 처리 공정에서의 재합성되는 다이옥신의 양은 소각로 내부에서 발생하는 다이옥신의 양보다 수십배 이상될 수 있다는 연구 결과가 보고되고 있다. 이들 발생 메커니즘은 [그림 2]에 도식적으로 나타낸 것과 같이, 먼저 소각로 내에서 플라스틱 또는 PVC 같은 비닐류가 불완전 연소할 때 다이옥신류(PCDD) 또는 퓨란류(PCDF)로 형태로 발생할 수 있으며, 배가스 처리 공정 중에서, 온도가 250~350℃ 정도에서, 배가스 내의 Cl 성분과 전구물질이 비산재 내의 Cu 등의 촉매 작용에 의한 denova 반응에 의해서 발생될 수 있다.

이러한 다이옥신류의 배출을 억제하기 위한 현재 적용되고 있는 대책으로는 먼저, 소각로 내에서 연소 가스 체류시간을 850℃ 이상에서 2초 이상 체류하도록 법적으로 요구하고

있으며, 발생된 다이옥신류는 배가스 처리 공정에서 활성탄 주입에 흡착 그리고 이들 입자를 백필터에서의 포집등을 통하여 환경 규제치인 0.1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 이하까지 제거되는 운전 결과가 계속 발표되고 있다.

**가스상 공해 물질**

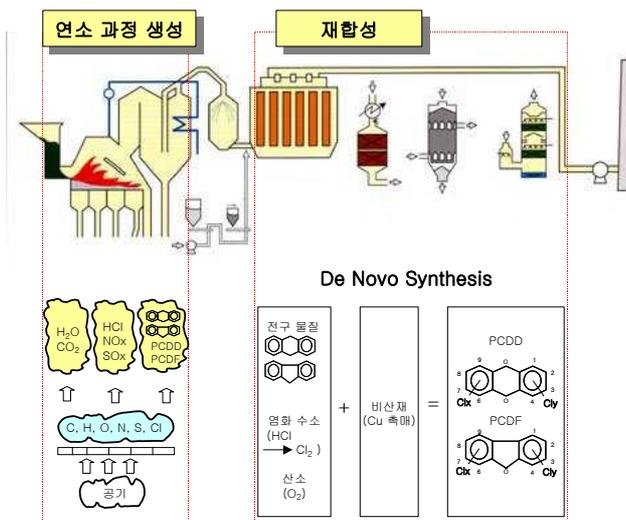
1. 소각로 내에서 독성 유기물 (다이옥신류 등) 배출, 배가스 처리 공정에서의 재합성
2. 제거 방법 : 노 내 온도 및 고온 체류 시간을 유지에 의한 분해(850°C, 2초 이상 체류)  
배가스 처리 공정에서 분리 및 분해(활성탄에 의한 흡착, 백필터에서 포집, SCR 촉매에서 분해)

**입자상 공해 물질**

1. 재처리 : 비산재(fly ash) : 지정 폐기물로 처리  
고가의 안정화 비용 지불  
별도의 용융로에서 슬러적으로 무해화 처리 시도  
바닥재(bottom ash) : 매립이나 벽돌 등으로 재활용 중  
중금속 용출 허용 범위 이상 용출되어 문제 야기
2. 바닥재 내의 중금속 용출, 바닥재 재활용 기준 강화 예정



[그림 1] 폐기물 소각 처리 문제점



[그림 2] 폐기물 소각 처리시 다이옥신 발생 메커니즘

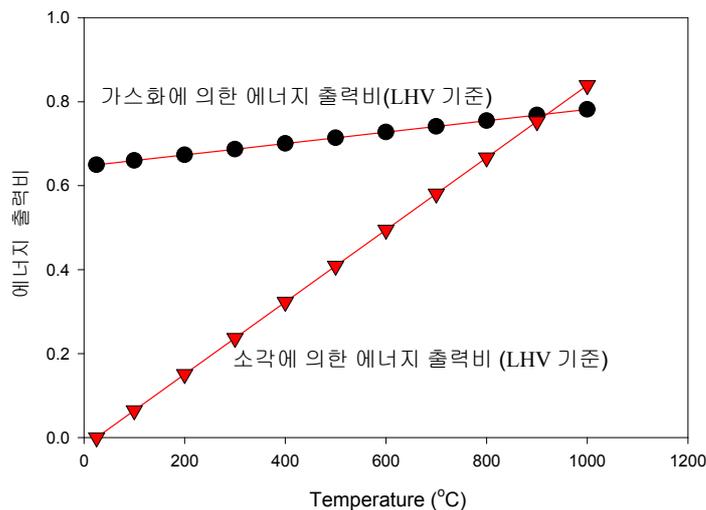
다이옥신과 같이 소각로에서 배출되는 오염 물질로 최근들어 사회 문제로 대두되는 있는 것으로는 소각 후 발생하는 소각재의 처리라할 것이다. 소각재는 바닥재와 비산재로 분류되며, 비산재는 지정 폐기물로 분류되어 고가의 처리 비용으로 안정화 처리 후 매립하고 있으며, 일반 폐기물로 분류되어 직매립이나, 벽돌등으로 재활용이 가능하였던 바닥재는 일부 소각장에서 중금속이 허용치 이상으로 용출되어 일반 폐기물로 분류되기 어려운 경우도 최근 발생하고 있다. 또한 최근에 정부에서는 바닥재의 재활용 기준을 독일 수준으로 강화를 추진하고 있어 재활용을 위해서는 현재보다도 엄격한 처리 및 제거 대책이 요구되는 실정이다.

## 2.2 가스화/용융 기술의 특징

가스화 용융 기술은 공급된 시료 내의 탄소 및 수소 성분을 가스상의 일산화탄소 및 수소 가스로 전환함과 동시에 시료 내에 포함된 불연물은 용융하여 슬랙으로 처리하는 것을 말한다. 이러한 가스화 용융 기술은 기존에서 석탄 가스화 기술로부터 출발하여, 현재 다양한 그 응용 범위를 갖고 있다. 폐기물의 가스화 처리시의 공해 물질 배출 측면의 장점으로는 먼저, 가스화 반응과 같이 환원성 분위기에서는 소각로와 같이 연소 반응(산화성 분위기)에 근거한 공정에서 발생하는 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>가 발생치 않고 시료내의 S와 N 성분이 대신 H<sub>2</sub>S와 NH<sub>3</sub>로 대부분 발생되므로 후단공정에서의 처리가 용이하게 된다는 점이 있다. 또 다른 장점으로는 가스화와 용융이 연계될 때, 생성된 가스는 가스화로 내부에서 1400℃ 이상 고온에서 수 초이상 체류하게 되므로, 이 과정에서 시료내의 다이옥신등의 발생을 유발하는 전구 물질이 완전 분해되며, 소각로의 배가스 처리 공정에서 발생하는 재합성 반응도 생성된 가스 내의 산소가 없기 때문에 HCl에서 Cl<sub>2</sub>로 변환하는 decon 반응이 억제되어 재합성 반응이 일어나지 않는다는 것이 밝혀졌다. 따라서 가스화 용융에 의한 폐기물 처리는 소각 공정에서 발생할 수 있는 독성 유기물의 배출 문제를 완전히 해결할 수 있는 대안이 된다는 것을 알 수 있다.

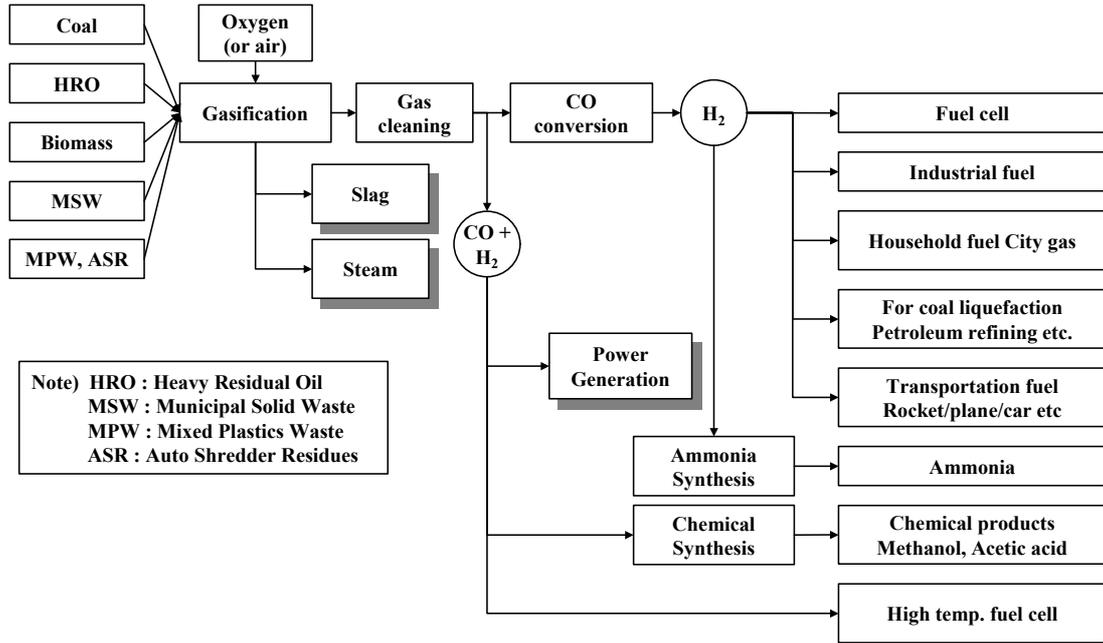
소각재 처리는 가스화가 진행됨과 동시에 불연물을 용융하여 슬랙으로 처리함으로써, 기존 소각로에서 발생하는 소각재 처리 문제를 완전히 해결할 수 있다. 용융 슬랙에 대한 중금속 용출 결과를 보면, 전자재 등으로 재활용이 가능한 수준이므로 도로의 노반재 또는 벽돌 제작 시 첨가제 등으로 재활용이 가능하다.

가스화와 소각의 에너지 이용 효율 측면을 비교하며, 가스화인 경우 공급된 시료의 열량 대부분을 생성 가스의 발열량인 화학에너지(chemical energy)로 바꾸게 되므로, 후단 정제 공정에서의 온도변화에 전체공정의 효율감소가 적다는 점이다. 즉, 연소반응에 의한 생성가스는 주로 CO<sub>2</sub>이고 CO<sub>2</sub>는 발열량이 없기 때문에 급속 냉각 세정을 하게 되면 가스내의 현열을 잃게 되어 에너지의 손실이 크게 된다. 반면에 가스화 반응의 주요 생성물은 CO와 H<sub>2</sub>이므로 이들 가스는 연소시 큰 발열량을 내게 된다. 즉, 가스화반응에 의해서는 시료내의 상당부분 에너지가 CO나 H<sub>2</sub>의 발열량으로 전환되어 이들 가스를 급속 냉각을 시키더라도 자체의 화학에너지가 그대로 유지되어 연소나 다른 전환 방법을 적용하여 에너지를 재회수할 수가 있게 된다. [그림 3]은 동일한 폐기물에 대하여, 소각과 가스화시 에너지 출력비를 비교한 것으로, 소각 후 연소 가스는 온도에 해당되는 현열 만큼의 에너지를 갖지만, 가스화인 경우, 상온에서도, 공급된 시료가 갖는 에너지의 60% 이상을 갖고 있는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 가스화와 소각에 따른 에너지 출력비

따라서 소각을 한 경우, 에너지는 연소가스의 현열인 반면 가스화인 경우, 연료 가스로의 화학 에너지이므로, 이 연료 가스를 이용하여 다양한 응용 범위를 찾을 수 있다. 한 예를 [그림 4]에 나타내었다.



[그림 4] 가스화에 발생된 생성 가스의 응용 범위 예

### 2.3 폐기물 가스화/용융 기술 예

가스화기를 크게 분류하면, 공급된 시료의 크기 및 반응물의 공급 방법에 따라 크게, 고정층(이동층), 유동층 그리고 분류층 가스화 방식으로 나눌 수 있으며, 고정층 방식의 가스화기는 대용량화, 부하 변동에 적응하기 어려운 점이 있는 반면, 운전 신뢰성이 높은 장점이 있다. 현재 상용화되어 가동 중인 것으로는 BGC/Lurgi를 들 수 있다. 유동층 가스화기는 독일의 HTW로를 들 수 있으며, 유동층 방식의 특성상 용융 처리가 불가능하므로, 불연물에 대한 용융이 필요 없는 bio-mass 가스화 등에 적용되고 있다. 고정층과 유동층 가스화기 비해, 대용량화 및 부하 변동성이 우수한 분류층 방식은 시료를 수송용 가스 또는 물과의 슬러리 상태로 만든 다음, 가스화제와 함께 고온 고압의 노 내부로 분사하여 노 내부에 강한 난류장을 만들어 순간적으로 가스화가 행하도록 하는 것이다. 노 내부의 유동 형태에 따라 선회상승류형, 대향류형 그리고 하강류형의 3종류로 크게 분류할 수 있다.

도시 폐기물 또는 산업 폐기물과 같이 크기, 조성과 같은 물리적, 화학적 성상 변화가 심한 폐기물에 대한 안정적인 가스화/용융을 위해서는 기존 석탄과 같이 성상이 비교적 일정한 가스화/용융 방식보다는 운전 측면이나, 시스템 구성 측면에서 다양한 점을 고려한 설계가 요구된다. 이와같이 폐기물 가스화 용융 방식을 폐기물에 적용하여 상업화를 진행하고 있는 예를 <표 1> 나타내었으며, 알 수 있는 바와 같이 제작사 고유의 공정을 구성하여 처리하고 있음을 알 수 있다.

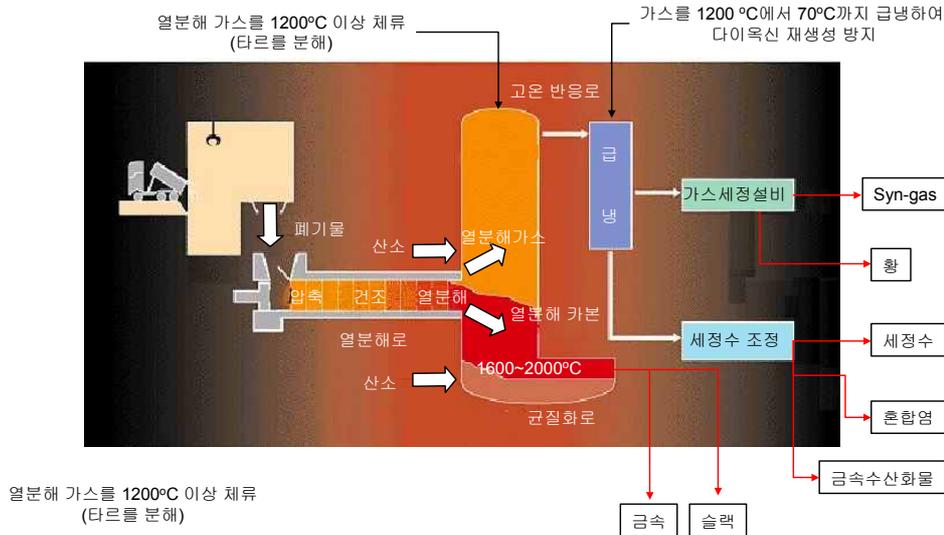
도시 폐기물과 같이 다양한 성상을 갖는 폐기물의 가스화 용융으로 상용화 단계에 있는 이태리의 Thermostelect 사의 열분해 가스화 용융 방식의 개략도는 [그림 5]에 나타내었다. 이 방식에서는 폐기물에 대한 특별한 전처리가 필요 없이 투입된 쓰레기를 먼저, 100기압 정도로 압축한 다음, 터널식 열분해로에서 쓰레기를 탄화시켜 가스화 용융으로 투입되기 직전에 성상을 균일하게 한 후, 가스화 용융로에서 산소와 가스화 반응시켜, CO, H<sub>2</sub>가 주성분인 연료 가스를 얻고, 불연물을 용융시키는 공정이다. 특히 생성가스의 세정시, 발생된 슬

러지로부터 금속류는 회수되고, 세정 공정에서 부산물로 황과 염 등이 발생하여 폐기물의 zero-emission 처리의 한 예로 인정되고 있다.

<표 1> 가스화 소각 용융로의 상용화 현황

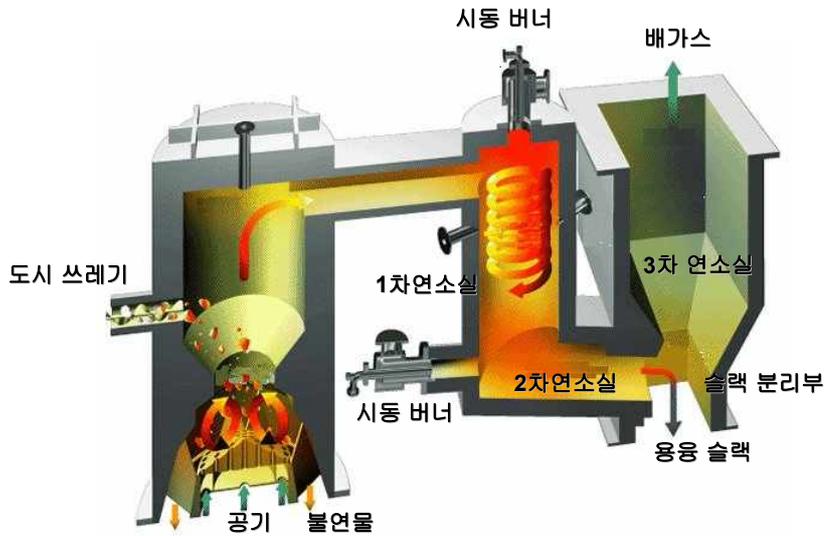
Status	Suppliers	Process	Markets
Fully commercial	ABB/Ebara	Gasification/Combustion/Melting	ASR, MPW
	Nippon Steel	Gasification/Melting	MSW, ASR, MPW
	Thermoselect	Pyrolysis/Gasification/Melting	MSW, Industrial waste
Commercial	Mitsui	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
	Takuma	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
	Von Roll	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
Semi-commercial	Krupp Uhde	Gasification/Melting	MSW, ASR
	PKA	Pyrolysis/Gasification/Melting	Mixed waste
Pilot Scale	NKK	Gasification/Melting	MSW, MPW, ASR

주) MSW : Municipal Solid Waste, MPW : Mixed Plastic Waste, ASR : Auto Shredder Residue

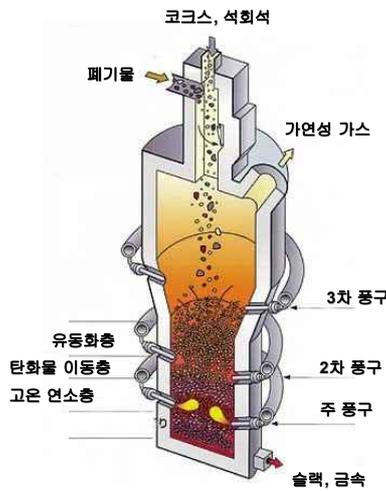


[그림 5] 열분해와 고정층 가스화/용융로의 결합된 가스화 용융 방식 (Thermoselect 사)

[그림 6]도 도시 폐기물을 처리하는 한 예로, 비교적 기술적으로 안정된 유동상 열분해로에서 폐기물을 열분해하고 배출되는 열분해 가스와, 고형물을 선회류 방식의 소각과 동시에 용융까지 행하는 방식이다. 이러한 방식은 현재 일본 등에서 활발히 상용화가 진행되고 있으며, 대표적으로는 일본의 Ebara 사를 들 수 있으며, 로타리킬른형 열분해와 선회 소각 용융로에서 처리하는 일본의 Mitsui 조선의 Recycling 21 플랜트를 들 수 있다. [그림 7]은 제철로에서 오래동안 확보한 기술을 폐기물 처리에 응용한 것으로, 폐기물의 특별한 전처리 공정이 필요없이, 코크스와 폐기물을 교대로 장입하고, 하부에서 산소를 공급하여, 하부에서 불연물은 용융되고, 폐기물은 열분해되어 가스는 노 상부로 배출하는 방식이다.



[그림 6] 유동층 열분해와 분류층 가스화/용융로의 결합된 소각 용융 방식 (ABB/Ebara 사)



[그림 7] 코크스를 이용한 고정층 가스화 용융로 (Nippon Steel 사)

### 3. 결론

가스화/용융 기술은 가스화 반응 특성상 소각 공정에서 발생될 수 있는 독성 유기물 배출 문제, 소각재 처리 문제를 동시에 해결하면서도, 에너지 이용 효율을 높일 수 있는 청정, 고효율 폐기물 처리 신기술이라 할 수 있다. 이러한 처리 기술은 유럽을 중심으로 이미 일본 등에서는 활발한 사업화가 진행되고 있다. 지금과 같이 환경과 에너지 문제가 점차 심각해지고 일반인들의 환경에 대한 인식도가 높아지는 상황에서는 국내의 폐기물 처리 분야에서도 현재와 같은 연소에 근거한 공정으로부터 가스화에 근거한 공정으로의 전이는 필연적으로 보여진다. 단지 가스화에 근거한 공정은 생성가스가 폭발성 및 유독성을 지니고 있으므로 설비의 복잡성은 피할 수 없는 상황이므로 얼마나 경제성 있고 안정성 있게 공정을 구성하는가가 실용화를 얼마나 앞당길 수 있는가를 결정하는 가장 중요한 인자가 될 것으로 판단된다.