

# 직접용융자원화 시스템

■ 정복석 / (주)포스코건설 환경사업그룹, recycle1@poscoenc.com

## 서론

지금까지 국내의 생활폐기물 중간처리방법은 소각방식 및 매립이 주류를 이루어 왔으나, 생활폐기물 처리방식에 대한 사회적 관심고조, 배가스 중의 다이옥신 논란가중, 소각재에 의한 2차오염에 대한 우려 증대 문제로 대두되고 있다. 또한 생활환경개선에 대한 증가되는 주민의 환경요구, 매립장 확보의 어려움으로 인한 사회적 비용증가, 2008년 원자재급등에 따른 폐기물의 자원화 필요성 등 사회적 요구를 배경으로 국내에서도 폐기물의 무해처리, 재자원화를 위한 신기술의 필요성이 인식이 확산되고 있으며, 이를 위해 열분해 용융기술등 친환경적이고 경제성있는 처리방법에 대해 본격적으로 검토되고 있다.

일본의 경우 90년대 들어 열분해 가스화기술이 차대세 쓰레기 처리방식으로 본격적으로 연구개발되어 왔으며, 2001년 소각재에 대한 다이옥신

함량 규제 및 2002년 폐기물처리시설 배가스에 대한 다이옥신 규제가 강화됨에 따라 가스화 열분해 기술이 급속히 전파되고 있다.

일본의 기술개발은 샤프트로식 용융기술을 제외한 대부분이 유럽에서 기술을 도입한 후에 그 기술에 대하여 추가적으로 별도의 연구를 수행하여 상용화에 따르는 문제점을 해결하고 자체 기술화하는 방식을 주로 취하였으며 도입된 기술을 자체적으로 소화하고 더 새로운 기술로 발전시키는 방법을 채택하였다. 열분해 가스화기술의 특징은 폐기물을 열분해 용융처리함으로써 소각시 발생하는 잔사를 무해하게 처리하여 환경오염에 대한 우려를 불식시키고 최종 처리량을 대폭 저감할 수 있다는 것이다.

그러나 기존의 소각방식에 비해 초기 투자비용이 다소 많이 든다는 경제성의 단점이 있으므로 이를 보완함과 동시에 본 방식이 좀 더 효율적인 시스템으로 자리잡기 위해서는 배가스 처리의 문제 뿐만

### 다양한 폐기물처리

- 농촌, 폐기물, 가연물, 불연물, 하수 슬러지, 소각재, 페플라스틱 등

### 고온용융

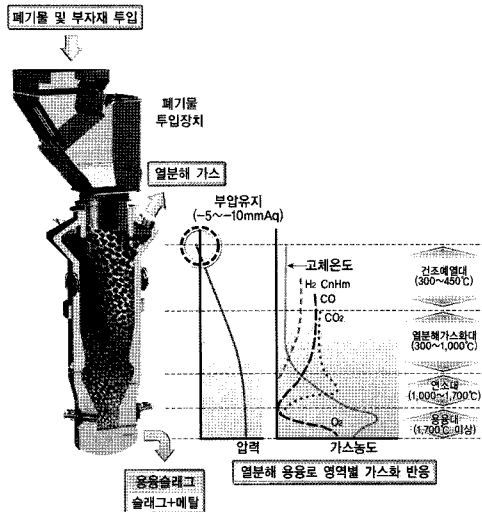
- 불연물, 고온점 폐기물 등을 1,700℃에서 완전용융 (철, 도자기 등)

### 슬래그 안정화

- 고온용융에 따른 중금속 등의 휘산축진으로 균일화, 무해화된 슬래그 생산

### 일체형 구조

- 내부에 기계 구동부가 없는 단순한 구조 (고장요소가 없음)



[그림 1] 직접 용융 처리 시스템

아니라 용융물(슬래그 및 메탈)이 유용한 자원으로 재활용할 수 있다는 것을 증명해야 할 필요가 있을 것이다.

폐기물의 자원화기술을 달성하기 위한 기술적인 포인트는 고온 안전용융, 염기도 조정, 슬래그내 중금속 제거, 그리고 슬래그와 메탈의 확실한 분리를 통해 고순도의 용융부산물을 생산하는데 달려 있다고 할 수 있다. 이러한 기술적인 포인트들을 충족시키기 위해서 당사의 직접용융처리시스템은 용융물을 광범위한 고온용융대인 적열 코크스베드(1700 ~ 1800℃)층내를 통과시켜 가열용융함으로써 고온에서 안전용융이 가능케하고, 석회석을 투입하여 염기도를 조정함으로써 유동성이 향상됨과 동시에 슬래그와 메탈의 분리가 용이하고 입경을 고르게 만들 수 있다.

그리고 슬래그내의 중금속제거는 코크스를 투입하여 용융로내부를 고온 환원분위기로 만들어 중금속이 산화한 후 염화물을 형성하여 휘산을 촉진 시킴으로써 가능하게 하며, 또한 수쇄설비 기술을 바탕으로 자원화를 위해 필요조건인 슬래그, 메탈의 고순도 분리가 가능하다. 신일본제철의 직접용융방식은 코크스를 용융열원으로 도시쓰레기를 직접용융 처리하는 시스템 및 도시쓰레기의 소각재를 용융처리하는 시스템을 직접 건설 및 운영하고 있고, 가동중인 시설에서 생산되는 부산물

전량이 시장유통 되고 있다.

### 일본의 열분해가스화 용융시스템

열분해가스화 용융시스템은 쓰레기의 질이나 크기에 따라 파쇄방식이 달라지나 열분해 가스화로에 투입되는 쓰레기는 대체적으로 파쇄 전처리를 전제로 한다.

파쇄된 쓰레기가 열분해가스화로에 투입되면 열분해가스화가 일어나게 되는데, 가스화로의 구조와 연소공기비에 따라 부분연소 열분해가스화(유동상 가스화로의 경우) 프로세스, 완전 열분해가스화(간접가열 킬른형 또는 Pusher형, 드럼형 가스화로의 경우)프로세스 및 샤프트로에 의한 직접용융프로세스로 분류된다.

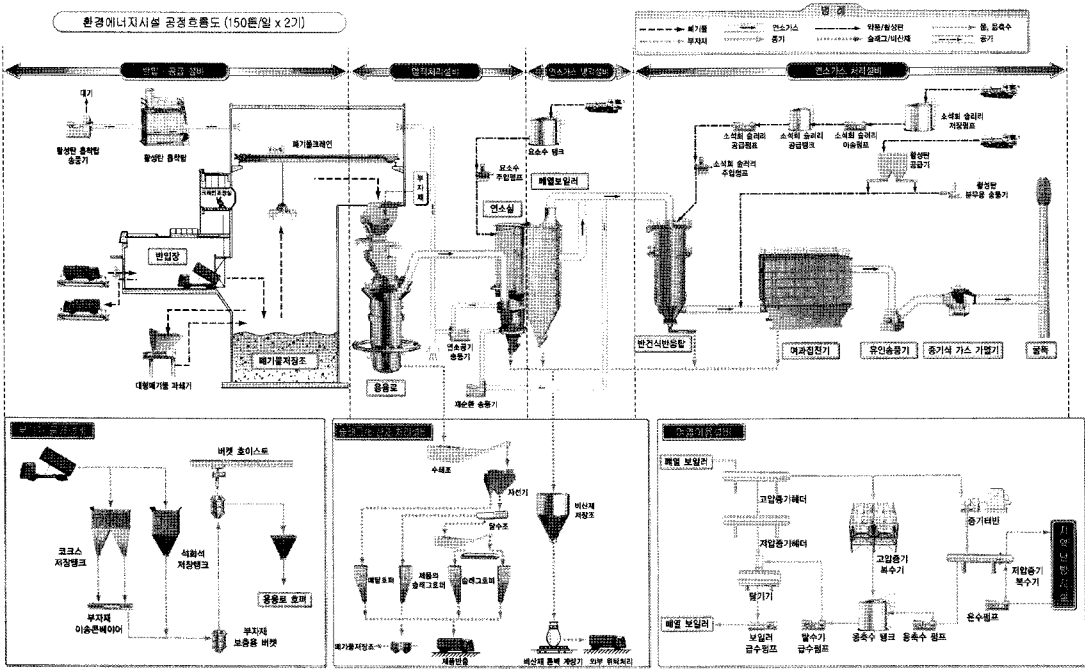
열분해가스화 용융시스템에 있어서 설비구성 형식은 열분해가스화로와 용융로가 별도로 설치되는 분리식 열분해가스화 용융시스템, 열분해가스화 용융로가 일체화 되어 있는 비분리식 열분해가스화 용융시스템으로 분류할 수 있으며, 일본에서 개발되고 있는 열분해가스화용융시스템에 있어서 분리식 및 비분리식의 대표적인 예는 다음과 같고, 여러 형식중 비분리식의 가스화용융로가 세계적으로 가장 많은 건설 및 가동실적을 보유하고 있다.

<표 1> 분리식

No	공정방식	플랜트 메이커
1	열분해가스화드럼 + 중형선회용융로	미쓰이조선
2	유동상가스화로 + 선회용융로	에바라제철소
3	유동상가스화로 + 선회용융로	가와사키중공업, 미쓰비시중공업
4	외열 킬른형열분해로 + 회전식표면용융로	IHI

<표 2> 비분리식

No	공정방식	플랜트 메이커
1	가스화 직접용융로	신일본제철(NSC), NKK
2	유동상가스화로 + 용융방식	히다찌조선, 가와사키중공업
3	유동상가스화로 + 선회류용융방식	고베제철, 일본가이시
4	Pusher형 열분해킬른 + 용융방식	IHI



[그림 2] 직접용융·자원화시스템 공정

### 직접용융 자원화시스템 개요

본 장에서는 상기의 기술 중에서 최대 실적을 보유한 신일본제철의 기술을 바탕으로 당사의 직접용융자원화시스템(Direct Melting System)을 소개한다.

#### 기술의 개요 및 원리

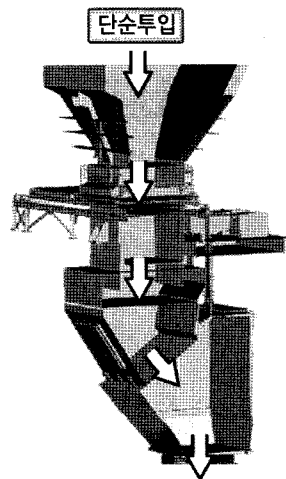
- 폐기물 투입공정

로의 중앙 상부에서 용융 대상물(쓰레기)은 폐기물 크레인에 의해 슈트로 투입된다.

슈트에는 2중 구조의 Damper와 질소 Purge설비가 설치되어 있어 용융로의 열분해가스가 외부로 누출되지 않는 안전한 구조로 되어 있다. 용융로내의 쓰레기 Level에 따라 폐기물투입과 동시에 코크스와 석회석이 슈트에 투입 된다.

- 용융공정

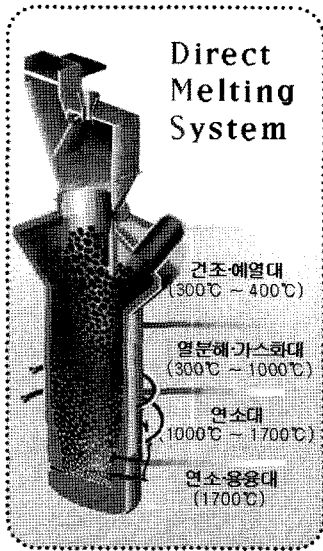
본 공정의 가장 큰 특징은 건조, 예열, 열분해



[그림 3] 폐기물 투입공정

(가스화), 용융 등의 공정이 한 개의 로내에서 이루어진다는 것이다.

로 내부는 상부에서부터 건조 예열대(약 300℃), 열분해가스화대(300 ~ 1000℃), 연소대(1,000℃),



[그림 4] 용융과정

용융대(1700 ~ 1800℃)로 구분되어 있으며, 내부에는 기계적인 구동부가 없어, 유지관리 및 동력절감 등에서 우수하며, 입형으로 설치면적이 적어 건설시 유리하다.

투입된 폐기물은 건조, 예열대에서 가열되어 수분이 증발되고, 건조된 폐기물은 열분해 가스화대에서 가연분이 가스화 된다. 가스화 되지 않고 남은 쓰레기중의 탄소성분은 공기에 의해 연소되고 건조와 열분해가스화의 열원이 된다. 쓰레기 중 회분과 불연물은 코크스와 함께 용융대까지 하강하며, 코크스는 산소부화된 공기에 의하여 고온 연소되어 고열을 발생하고 이 열에 의하여 회분과 불연물이 완전히 용융된다.

• 폐열 회수과정

열분해 가스를 별도로 연소로에서 안정적으로 연소시키므로 열회수시스템의 일반소각시설에 문제가 되고 있는 불규칙한 열량변동이 안정되어 고온 고압증기를 발생시키므로 발전효율을 향상시킬 수 있다.

일본에서는 100톤/일 × 2기 시설은 3,000 kW, 200톤/일 × 2기 시설은 8,500 kW 전력생산 실적을 갖고 있다.

• 슬래그 수쇄과정

용융물은 석회석에 의해 염기도가 조정되어 유동에 적절한 점도를 가지며, 수쇄처리장치로 떨어진 용융물은 급냉되면서 자선기에 의해 슬래그와 메탈로 분리되어 별도 저장, 판매된다. 또한 슬래그 수요처의 요구에 따라 가장 적절한 조건의 슬래그로 생산할 수 있다.

• 배가스 처리과정

열분해가스를 연소실에서 일정한 온도 유지가 가능함으로 안정적인 운전조건에서 다이옥신 파괴 등이 가능함에 따라 별도 복잡한 시설이 필요없이 일반적인 배가스처리 공정으로 다이옥신을 저감시킬 수 있다(0.01 ng-TEQ/m<sup>3</sup>N 이하).

직접용융 · 자원화시스템의 특성

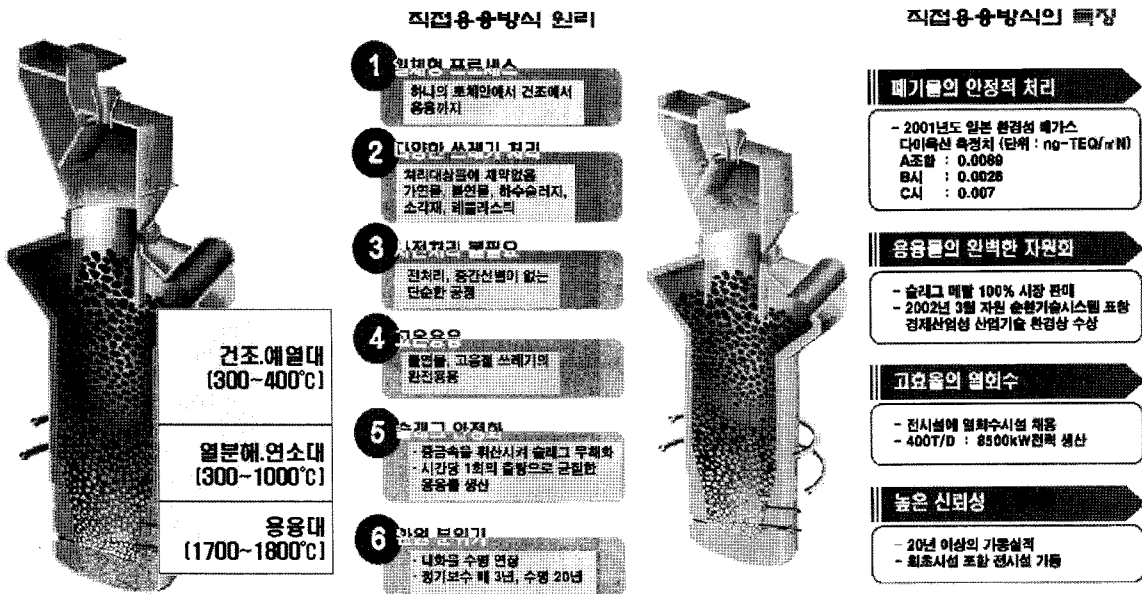
• 가스화 연소특성

가스화 용융로는 기존의 소각로와 같이 쓰레기를 직접 연소하지 않고 열분해가스화하여 연소하기 때문에 연소성이 우수하다는 것이 커다란 장점으로 되어 있다.

특히 가스화 용융 일체형으로 되어 있는 샤프트로식 가스화 용융로는 건조 열분해 가스화에서 용융까지가 하나의 로내에서 동시에 이루어지기 때문에 열효율이 매우 높은 것이 특징이다.

가스화 용융기술에 있어서는 가스화 특성은 시스템전체의 성능에 커다란 영향을 준다. 샤프트로식 가스화용융로에 있어서 쓰레기 중의 가연분은 하나의 노 내에서 (1) 건조, 열분해 (2) 솔루션반응, (3) 코크스와 쓰레기의 고온 연소 등의 완전히 다른 세가지의 프로세스에 의하여 가스화 된다. 여기서 솔루션반응에 의한 가스화는 코크스와 쓰레기 중의 탄소가 하부의 고온 연소대역에서 상승하는 고온의 이산화탄소 가스와 반응하여 일산화탄소 가스로 전환하는 것이다. 본 반응은 측면의 흡에서 공급된 산소가 연소되어 소비되고 온도가 1,800℃를 초과하는 온도에서부터 흡열에 의해 가스의 온도가 1,000℃ 이하로 되는 온도의 범위까지 진행된다.

이러한 반응은 본 시스템에 있어서 샤프트로식



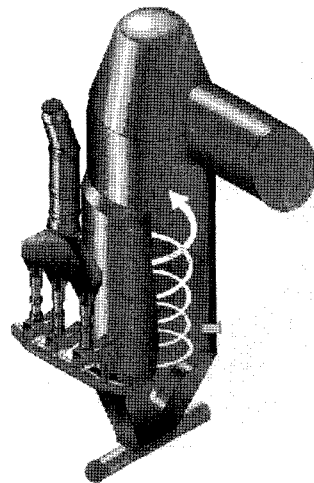
용융로의 고온 가스화를 특징지우는 반응으로서 폐기물의 가스화 효율 향상에 기여한다.

• 2차 연소특성

샤프트로식의 가스화 용융방식은 발생된 열분해 가스를 독립된 연소실에서 연소시키는 방법을 채용하고 있다. 일반적으로 가스 연소에서는 버너 형식, 공기 혼합 상태의 설계 수법을 다양하게 선택할 수 있고 연소할 때에 미연분의 발생을 기본적으로 줄일 수 있어 완전 연소가 가능하다는 특징이 있다.

본 시스템에서는 가스화 용융로 본체에서 가연물의 가스화와 함께 불연물 및 회분의 완전용융이 달성되고 있으므로 연소실에서는 열분해 가스만의 연소제어를 행하는 것이 가능하다.

직접용융로에서 발생한 가연성가스(CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> 등)는 연소실의 메인 버너부에서 불어 넣어 1차, 2차 연소용 공기에 의한 확산 혼합 연소를 하면서 선회화염류를 형성시키고, 850 ~ 950℃의 연소 온도 제어, 2초 이상의 체류시간의 확보, 선회화염의 형성에 의한 3T(Temperature, Time, Turbulance)를 확실히 실행하여 극히 안정적인



[그림 6] 연소실 개념도

연소를 달성한다. 평균 CO 농도는 10 ppm 이하로 안정되어 있고, 연소실 출구 다이옥신류에 대해서도 0.1 ngTEG/Nm<sup>3</sup> 이하로 나타났다. 조업시의 CO 평균 농도는 2 ~ 3 ppm으로 순간치 피크도 거의 발생하지 않으며, 배가스 온도 또한 안정적이다.

### DMS 용융 부산물의 자원화 기술

폐기물의 자원화기술을 달성하기 위한 기술적인 포인트는 고온 안전용융, 염기도 조정, 슬래그 내 중금속 제거 및 슬래그와 메탈의 확실한 분리를 통한 고순도의 용융부산물을 생산하는데 달려있다고 할 수 있다. 이러한 기술적인 포인트들을 충족시키기 위해서 당사의 직접용융처리시스템은 용융물을 광범위한 고온용융대인 적열 코크스베드(1700 ~ 1800℃)층내를 통과시켜 가열·용융함으로써 안전함 고온용융이 가능하고, 석회석을 투입하여 염기도를 조정함으로써 유동성이 향상됨과 동시에 슬래그와 메탈의 분리가 용이하고 입경을 고르게 만들 수 있다. 그리고 슬래그 내의 중금속제거는 코크스를 투입하여 용융로 내를 고온·환원분위기로 만들어 중금속이 산화한 후 염화물을 형성하게 하여 휘산을 촉진시킴으로써 가능하게 하며, 또한 수쇄설비 기술을 바탕으로 자원화를 위해 필요조건인 슬래그, 메탈의 고순도 분리가 가능하다.

#### 코크스 및 석회석의 사용

##### · 코크스 특성 및 기능

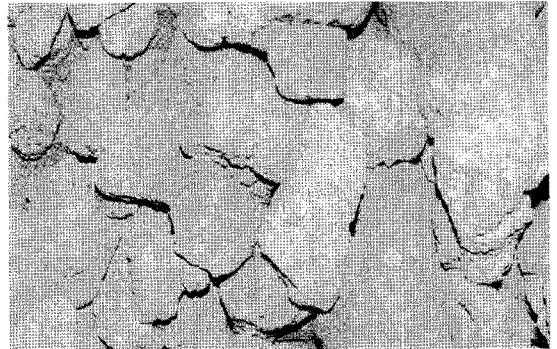
코크스는 국내에서 유통되고 있는 열량대비 비용이 가장 싼 연료로서 고품질의 슬래그 생산과 반입폐기물의 변동에 대응하여 안정적인 시설 운영을 위해 필요한 부원료이다.

##### (1) 코크스 성질

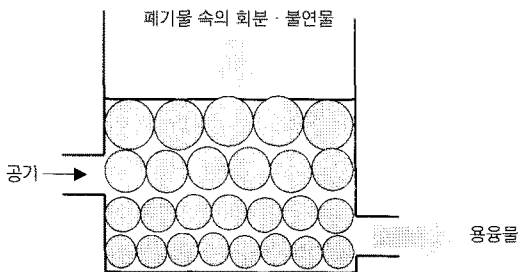
- ① 원소분석  
C < 86%, H > 1%, N < 1.5%,  
S < 0.5%, Cl < 0.01%, Ash < 12.5%
- ② 공업분석 : 고정탄소 > 90%, 무기물질 < 10%
- ③ 석탄을 1,050 ~ 1,100℃의 고온에서 약 20시간 열분해
- ④ 석탄이 고온에서 열분해되는 과정중에 유해물질이 모두 방출되어 매우 환경 친화적인 연료임.
- ⑤ 검은색의 돌형태로서 매우 단단하고 쉽게 부서지지 않아서 분진발생의 염려가 적음.

##### (2) 용융로 하부에서의 기능

첫째, 고온 용융열원으로서의 기능은 1700 ~ 1,800℃의 고온상태를 용이하게 유지하고 도자기, 유리, 금속등 고융점의 폐기물을 안정적으로, 균일하게 용융시킬 수 있으므로 슬래그는 다



[그림 7] 코크스



a) 용융로 하부 코크스층 모습도

종류명	용점(연화점)
유리	730 ~ 1,670℃
도자기	1,250 ~ 1,400℃
금속	1,400 ~ 1,530℃

연화점이란 물질이 자중으로 흐르기 시작하는 온도를 말함.

b) 불연물류의 용점

[그림 8] 용융로 하부 코크스 베드층



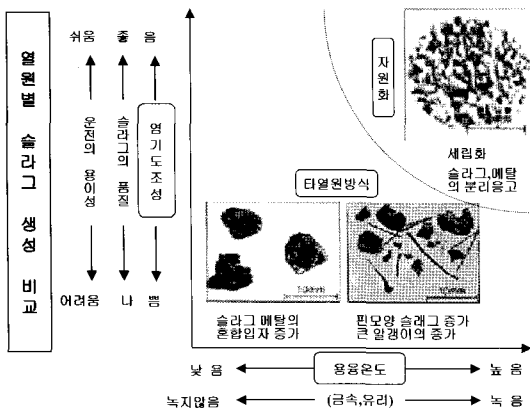
양한 수요처로 고가로 판매될 수 있다.

둘째, 고적열화 격자로서의 기능은 용융로의 하부 고온에서도 안정적인 코크스층을 형성하여 계절적 쓰레기질의 변동에도 안정적으로 용융시킬 수 있다.

셋째, 환원재로서의 기능은 용융로의 내부를 고온환원 분위기(산소가 없는 상태)로 유지하기 때문에 중금속이 휘산하여 슬래그 속으로 녹아들지 않게 함으로써 슬래그의 무해화를 가능하게 한다.

넷째, 고열량 CO가스 발생 기능은 코크스연소에 의해 발생한 고온의 CO<sub>2</sub> 가스는 노상부로 올라가면서 탄소와 솔루션 반응을 일으켜 고열량의 CO 가스로 변환되어 2차 연소 열원으로 이용된다.

• 석회석의 역할 및 기능



[그림 9] 열원별 슬래그 생성 비교

폐기물 투입량의 2% 내외로 투입되는 석회석은 첫째, 용융물의 염기도를 조정하여 유동성을 향상시켜 원활하게 용융물이 로 외부로 배출될 수 있도록 한다. 따라서 용융물의 고착으로 인한 막힘 현상을 방지하여 용이한 운전을 가능케 한다.

둘째, 유동성이 향상된 용융물은 수쇄처리 후 슬래그와 메탈로 개별 응고되는데 이들의 완전한 분리를 가능케 함으로써 순도를 높여 슬래그와 메탈이 고가로 재활용될 수 있게 한다.

셋째, 열분해 가스 중의 HCl나 SOx의 중화역할을 함으로써 간소한 가스처리가 가능하므로 엄격한 환경규제에 쉽게 대응할 수 있다.

메탈과 슬래그의 분리

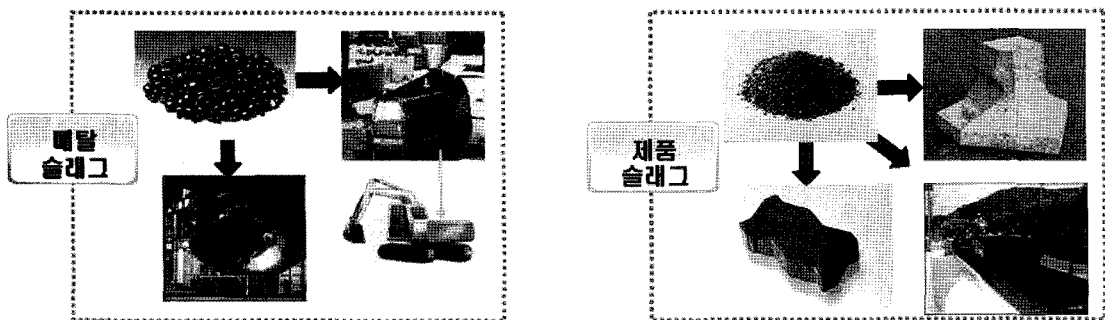
1,700℃ 이상의 고온용융방식이므로 금속류를 포함한 고융점의 불연물도 고온에서 완전히 용융된다. 금속은 철이 주체로서 로내에서 일부는 산화되어 FeO로 슬래그 속에 용해되고 나머지는 금속철로서 다른 금속을 고용하여 슬래그와 함께 배출된다.

직접용융방식은 출탕온도가 높고 염기도 조절이 되므로써 슬래그의 점성이 낮으므로, 수쇄 시 슬래그와 메탈이 독립 입자로서 분리 고화되며, 높은 자선 효과를 얻을 수 있다.

직접용융슬래그의 품질

• 슬래그의 성분

표 3의 직접용융 슬래그의 조성과 현재 다방면



[그림 10] 메탈과 슬래그

에서 유효 이용되고 있는 고로 슬래그의 조성 예를 나타낸다. 참고적으로 두 슬래그 모두 염기도 조정을 하고 있으므로 고로 슬래그에 가까운 조성을 나타내고 있지만 알칼리, 특히 나트륨이 높은 것이 다르다.

직접용융슬래그는 90% 이상이 SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 구성되어 천연모래와 유사한 성상이며 철성분이 1% 이내로 유효이용이 가능하여 현재 일본에

서 100% 재활용되고 있다(국내 최초의 직접용융 슬래그인 양산자원회수 시설에서 생산되는 슬래그는 아스팔트 배합재로 전량 사용되고 있다).

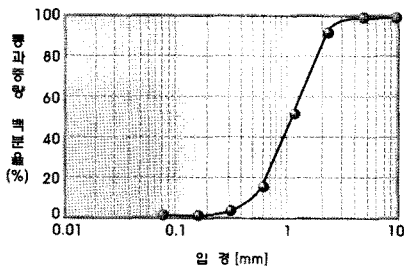
직접용융슬래그와 성분이 유사한 고로슬래그도 시멘트 원료, 콘크리트 골재, 아스팔트 배합제 등으로 국내에서 전량 유통되고 있다.

<표 3> 슬래그의 조성 비교

화합성분	직접용융슬래그(%)	고로슬래그(%)	
주 성분	SiO <sub>2</sub>	37 ~ 42	30 ~ 41
	CaO	33 ~ 45	35 ~ 45
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12 ~ 18	12 ~ 20
기타 성분	MgO	1.2 ~ 1.8	3 ~ 7
	Na <sub>2</sub> O	3.5 ~ 6.3	0.23
	K <sub>2</sub> O	0.4 ~ 0.6	0.24
	S	0.2 ~ 0.3	0.6 ~ 1.6
	FeO	0.1 ~ 0.8	0.3 ~ 1.7
	M-Fe	0.1 ~ 0.4	

<표 4> 슬래그의 물성치

구분	물성치
절건비중	2.28 ~ 2.42
단위용적중치	1.15 ~ 1.29
흡수율(%)	1.3 ~ 2.0
안정성(%)	3 ~ 7.2
수정CBR	18 ~ 25
색상	회백색



[그림 11] 슬래그의 입도 분포

• 슬래그의 물리적 성상

그림 11의 그래프는 슬래그의 입도 분포를 나타낸다. 고온에서 용융되어 점성이 낮은 상태로 수쇄화 되어 있기 때문에 균질하고 울, 침상(針狀)의 슬래그가 거의 존재하지 않는 모래 상태가 되어 있다. 슬래그의 입도분포는 0.6 ~ 2.36 mm의 범위에서 전체의 80 wt% 중량을 차지한다.

• 슬래그의 안정성

표 5는 직접용융 슬래그 용출 시험 결과를 나타낸다. 표 5에 나타난 대로 모든 중금속의 용출농도가 정량 하한치 이하이며, 표 6에서 보는 바와 같이 슬래그속의 중금속의 함량이 자연토양과 유사하여 안전하고 전량 재활용 가능하다.

<표 5> 중금속 용출시험

(단위 : mg/l)

성분	직접용융 슬래그	기준치 (도양)	분석 재한치 (Low limit)
Cd	N.D	0.01	0.001
pb	N.D	0.01	0.005
T-Cr	N.D	0.05	0.005
As	N.D	0.01	0.005
T-Hg	N.D	0.0005	0.005
Se	N.D	0.01	0.005

<표 6> 슬래그속의 중금속함량 발표자료

(단위 : mg/kg)

구분	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni
직접용융방식	7.8	364	15.4	182	20.4
저온용융 방식 (킬른식, 유동상식)	440	2,300	2,200	900	110
자연 토양	12.5	55	70	100	75

자료: "폐기물 처리시설 설비계획 설계요령" (사)전국도시청소 협회, (재)폐기물연구재단, 일본





<표 7> 직접용융방식 열분해용융로 국내 시공실적

구분	고양 환경에너지시설	양산 자원회수시설
전경		
시설개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 처리방식 : 열분해가스화 용융방식</li> <li>· 시설용량 : 150 (톤/일), 2기 (일일처리용량 : 300톤)</li> <li>· 용융로 Type : 직접용융방식 (샤프트로 방식)</li> <li>· 2009.9 현재 시공 중(2010.3 준공예정)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 처리방식 : 열분해가스화 용융방식</li> <li>· 시설용량 : 100 (톤/일), 2기 (일일처리용량 : 200 톤)</li> <li>· 용융로 Type : 직접용융방식 (샤프트로 방식)</li> <li>· 2008.3 ~ 현재 상업운전 중</li> <li>- 슬래그는 아스팔트 배합재로 전량사용</li> <li>- 메탈은 고철 판매</li> </ul>

**결론**

국내 생활폐기물 처리방법 중 매립이 차지하는 비율이 가장 많지만 국토 면적이 협소하여 매립지 확보가 어려우며, 매립시 발생하는 침출수 및 악취, 지반침하, 넘비현상 등의 많은 문제점을 지니고 있어 생활폐기물의 처리 및 처분 방법이 매립에서 소각으로 바뀌고 있는 실정이다.

기존의 소각방식은 다이옥신 저감과 소각재를 재처리등 문제를 안고 있으므로 처리방식에 대한 새로운 대안의 필요성이 점차 인식되고 있는 중이다.

국내에서는 2001년부터 열분해·용융로 분야가 이슈화되어 각 연구기관 및 관련업체에서 관심을 집중하게 되었고, 연구 및 기술도입을 활발히 추진하고 있다. 또한 국내의 다수 지자체에서 생활폐기물 용융시설 도입을 위한 기술검토를 진행하고 있으며 양산시에서 열분해·용융방식인 당사의 직접용융자원화 시스템을 국내 최초로 도입하여 생활폐기물 용융시설을 상업운전 중에 있으며, 고양

시, 양주시, 화성시 등에서 열분해 용융시설을 건설중에 있다.

현재 위 지자체 등이 건설중인 열분해·용융시설이 성공적으로 완성될 경우 주민들의 현 소각시설 2차 오염 물질에 대한 관심으로 볼 때 생활폐기물 처리시설로서 열분해·용융 시스템의 도입은 신도시를 중심으로 지속적으로 확산될 것으로 예상된다.

특히 당사의 직접용융자원화시스템은 공정 특성상 기존 스토커 방식에서 매립 처분되는 바닥재, 폐기물의 회분, 미연분, 불연물 및 저온 용융시설에서 발생하는 불연물을 재활용 가능한 자원화물로 회수하므로 매립부하의 감소와 함께 정부의 재활용확대 및 자원화 정책에 기여할 수 있다.

**참고 문헌**

1. 제철연구, (301), 11 (1980)
2. 슬래그의 성질이용, 일본철강협회, p.60, 1982