

## 직접용융자원화 시스템의 슬래그 재활용 방안

정복석, 이 동석

(주)포스코건설 환경기술팀(recycle1@poscoenc.com)

### I. 서론

현재 생활폐기물의 중간처리방법으로 소각방식이 주류를 이루고 있으나, 생활폐기물 처리방식에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 배가스 중의 다이옥신 논란, 소각재에 의한 2차오염이 우려되고 있다. 생활환경 개선에 대한 증가되는 주민의 환경욕구와 매립장 확보의 어려움 등의 사회적 요구를 배경으로 국내에서도 폐기물의 무해처리, 재활용화를 위한 신기술의 필요성이 인식이 확산되고 있으며, 이를 위해 열분해 용융기술이 본격적으로 검토되고 있다.

일본의 경우 90년대 들어 열분해 가스화기술이 차대세 쓰레기 처리방식으로 본격적으로 연구개발 되어 왔으며, 2001년 소각재에 대한 다이옥신 함량 규제 및 2002년 폐기물처리 시설 배가스에 대한 다이옥신 규제가 강화됨에 따라 가스화 열분해 기술이 급속히 전파되고 있다.

이 방식의 특징은 폐기물을 열분해 용융처리함으로써 소각시 발생하는 잔사를 무해화 처리하여 환경오염에 대한 우려를 불식시키고 최종 처분량을 대폭 저감할 수 있다는 것이다. 그러나 소각방식에 비해 초기투자비용이 다소 많다는 경제성의 단점이 있음으로 이를 보완함과 동시에 본 방식이 좀더 효율적인 시스템으로 자리 잡기 위해서는 배가스 처리의 문제뿐만 아니라 용융 잔사가 유용한 자원으로 재활용할 수 있다는 것을 증명해야할 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 달려있다고 할 수 있다. 이러한 기술적인 포인트들을 충족시키기 위해서 당시의 직접용융처리시스템은 용융물을 광범위한 고온용융대인 적열 코크스베드(1700~1800℃)층내를 통과시켜 가열용융 함으로써 고온안전용융이 가능하고, 석회석을 투입하여 염기도를 조정함으로써 유동성이 향상됨과 동시에 슬래그와 메탈의 분리가 용이하고 입경을 고르게 만들 수 있다. 그리고 슬래그내의 중금속제거는 코크스를 투입하여 용융로 내를 고온 환원분위로 만들어 중금속이 산화한 후 염화물을 형성하게 하여 휘산을 촉진시킴으로써 가능하게 하며, 또한 수쇄설비 기술을 바탕으로 자원화를 위해 필요조건인 슬래그, 메탈의 고순도 분리가 가능 하다.

신일본제철의 직접용융방식은 코크스를 용융열원으로 해서 도시 쓰레기를 직접용융처리 하는 시스템 및 도시 쓰레기 소각회를 용융처리하는 시스템을 직접 건설 및 운영하고 있

고, 기가동중인 시설에서 생산되는 부산물 전량이 시장유통 되고 있다. 본 논문에서는 직접용융 자원화시스템 개요 및 용융부산물의 자원화 원리를 설명하고 직접용융슬래그의 품질 및 일본에서의 재활용 현황 및 판매체계를 소개한다. 또한 국내 유사 슬래그의 재활용 사례 및 유통현황과 관련규격에 대한 비교검토를 통해 직접용융슬래그의 국내에서의 재활용 가능성에 대해 알아보고자 한다.

## II. 직접용융 자원화시스템 개요

### 2.1 기술현황

기술명	직접 용융 · 자원화 시스템
기술분야	소각 · 열분해 · 고온용융
처리대상물	가연쓰레기, 불연 · 대형쓰레기, 소각재 · 소각비회
기술적용분야	열분해/가스화(샤프트형) 용융기술
홈페이지	<a href="http://www.poscoencdms.com/">http://www.poscoencdms.com/</a>

### 2.2 기술개발 현황 (신일본제철)

- ▶1974년 : 20톤급 연구시설 설치, 설계 및 운전 Data 확보
- ▶1977년 : 40톤급 연구시설 설치, 설계 및 운전 Data 확보
  - 동경도와 공동실험
- ▶1979년 : 최초 상용화 플랜트 준공
  - 조업기술 확립 및 시설개선 연구
  - 처리대상 확대 : 소각재, 오니, 매립쓰레기, 분진 등
  - 운영비 절감 : 코크스 첨가량 최소화, 산소부하량 저감 등
  - 환경오염 저감기술 : 다이옥신 저감, 비산재 저감 및 무해화 등
- ▶1993년 : 10톤급 개량 연구시설 설치, 운영
  - 매립폐기물처리기술 공동연구(동경도)
  - 분진, 매립쓰레기처리기술 개발위탁(통산성, NEDO)
  - 차세대 쓰레기처리기술 연구 참가(폐기물연구재단)
- ▶1998년 : 20톤급 개량 연구시설 설치 운영중
  - 쓰레기 가스화 용융기술 공동연구(오오사카시)

## 2.3 기술의 개요 및 원리

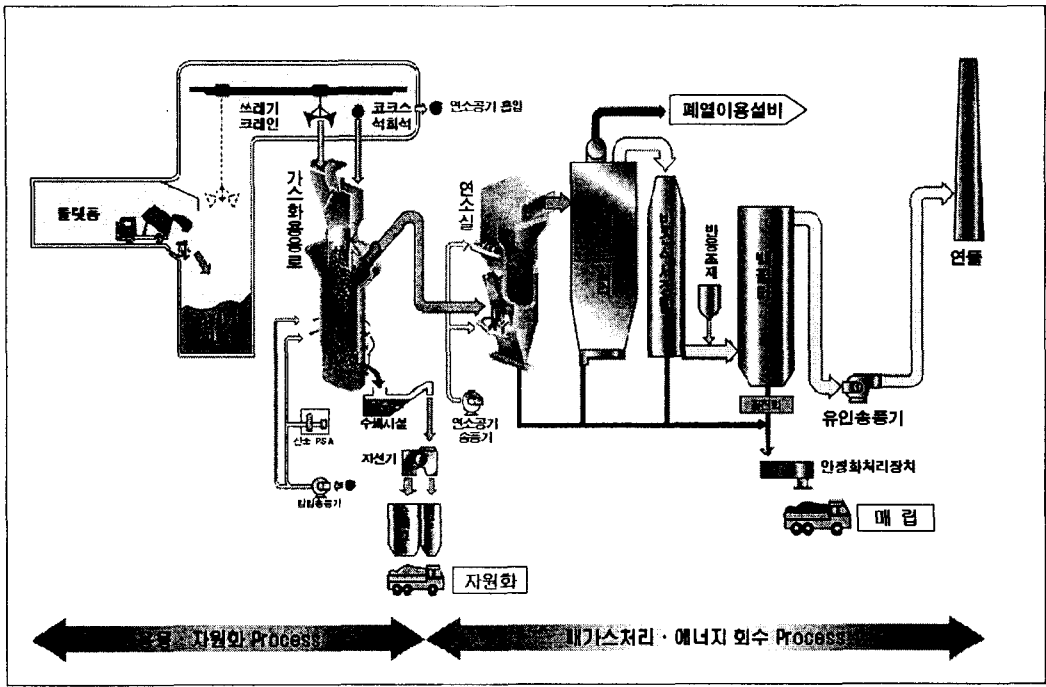


Fig.1 직접용융.자원화시스템 공정

### 2.3.1 폐기물 투입공정

로의 중앙 상부에서 용융 대상물(쓰레기)은 폐기물 크레인에 의해 슈트로 투입된다. 슈트에는 2중 구조의 Damper와 질소 Purge설비가 설치되어 있어 용융로의 열분해 가스가 외부로 누출되지 않는 안전한 구조로 되어있다. 용융로내의 쓰레기 Level에 따라 폐기물 투입과 동시에 코크스와 석회석이 슈트에 투입 된다

### 2.3.2 용융공정

건조, 예열, 열분해, 용융 등의 공정이 한 개의 로내에서 이루어 진다는 것이 본 공정의 가장 큰 특징이다. 로 내는 상부에서부터 건조 예열대(약300℃) 열분해 가스화대(300~1000℃), 연소대(1000℃) 용융대(1700~1800℃)로 구분되어 있다. 또한, 내부에는 기계적인 구동부가 없고, 입형으로 설치면적, 유지관리, 동력절감 등에서 유리하다.

투입된 폐기물은 건조, 예열대에서는 가열되어 수분이 증발된다. 이와 같이 건조된 폐기물은 열분해 가스화대에서 가연분이 가스화 된다. 가스화 되지 않고 남은 쓰레기 중의 탄소성분은 공기에 의해 연소되고 건조와 열분해 가스화의 열원이 된다. 쓰레기 중의 회분과 불연물은 코크스와 함께 용융대까지 하강한다. 코크스는 산소부화된 공기에 의하여 고온 연소되어 고열을 발생하고 이 열에 의하여 회분과 불연물이 완전히 용융된다.

### 2.3.3 폐열 회수공정

열분해 가스를 별도 연소로에서 안정적으로 연소시키므로 열회수시스템의 일반소각

시설에 문제가 되고 있는 불규칙한 열량변동이 안정되어 고온 고압증기를 발생시키므로 발전효율을 향상시킬수 있다. 100톤/일x2기 시설은 3000kw, 200톤/일 x 2기 시설은 8500kw 전력생산 실적을 갖고 있다.

2.3.4 슬래그 수쇄공정

용융물은 염기도가 조정되어 유동에 적정한 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.

2.3.5 배가스 처리공정

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

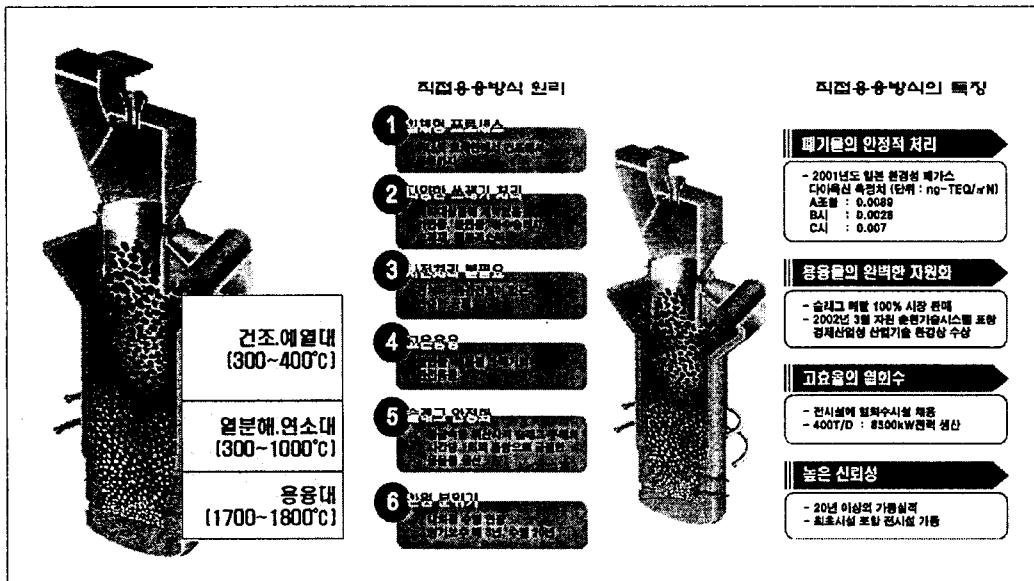


Fig.2 직접용융·자원화시스템의 원리 및 특징

2.4 직접용융·자원화시스템의 특성

2.4.1 가스화 연소특성

가스화 용융로는 종래의 소각로와 같이 쓰레기를 직접연소하지 않고 열분해 가스화하여 연소하기 때문에 연소성이 우수하다는 것이 커다란 장점으로 되어있다.

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

또한 가스화 용융기술에 있어서는 가스화 특성이 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 연소 대역에서 상승하는 고온의 이산화탄소 가스와

반응하여 일산화탄소 가스로 전환하는 것이다. 본 반응은 측면의 흡에서 공급된 산소가 연소되어 소비되고 온도가 1800℃를 초과하는 온도에서부터 흡열에 의해 가스의 온도가 1000℃이하로 되는 온도의 범위까지 진행된다.

이러한 반응은 본 시스템에 있어서 샤프트로식 가스화 용융로의 고온 가스화를 특징 지우는 반응으로서 폐기물의 가스화 효율 향상에 기여한다.

#### 4.2 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 불연물과 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 불어넣어 1차, 2차 연소용 공기에 의한 확산 혼합 연소를 하면서 선회화염류를 형성시키고, 850~950℃의 연소 온도 제어, 2초 이상의 체류시간의 확보, 선회 화염의 형성에 의한 3T (Temperature, Time, Turbulance) 를 확실히 실행하여 극히 안정적인 연소를 달성한다. 평균 CO농도는 10ppm 이하로 안정되어 있다. 또 연소실 출구 다이옥신류에 대해서도 0.1ngTEG/Nm<sup>3</sup> 이하로 나타났다. 조업시의 CO 평균 농도는 2~3 ppm으로 순간치 피크도 거의 발생하지 않으며, 배가스 온도 또한 안정적이다.

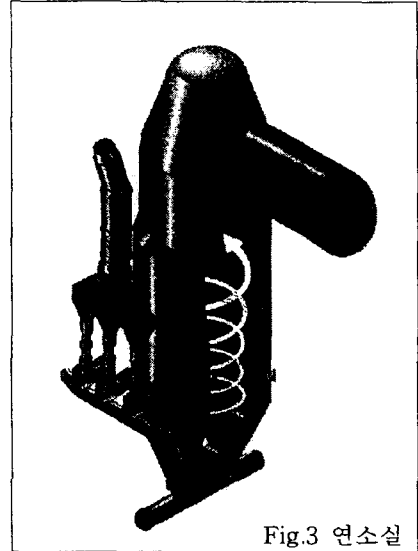


Fig.3 연소실

### III. DMS 용융 부산물의 자원화 기술

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

#### 3.1 코크스 및 석회석의 사용

### 3.1.1 코크스 특성 및 기능

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

#### 3.1.1.1 코크스 성질

- 원소분석 : C > 86%, H > 1%, N < 1.5%, S < 0.5%, Cl < 0.01%, Ash < 12.5%
- 공업분석 : 고정탄소 > 90%, 무기물질 < 10%
- 석탄이 1050 ~ 1100℃의 고온에서 약 20시간 열분해된 제품
- 석탄이 고온에서 열분해되는 과정중에 유해물질이 모두 방출되어 매우 환경친화적인 연료임.
- 검은색의 돌형태로서 매우 단단하고 쉽게 부서지지 않아서 분발생의 염려가 없음

#### 3.1.1.2 용융로 하부에서의 기능

첫째, 고온 용융열원으로서의 기능은 1700 ~ 1800℃의 고온상태를 용이하게 유지하고 도자기, 유리, 금속등 고융점의 폐기물을 안정적으로, 균일하게 용융시킬 수 있으므로 슬래그는 다양한 수요처로 고가로 판매될 수 있다.

둘째, 고적열화 격자로서의 기능은 용융로의 하부 고온에서도 안정적인 코크스 층을 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 함으로 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 CO가스로 변환되어 2차연소 열원으로 이용된다

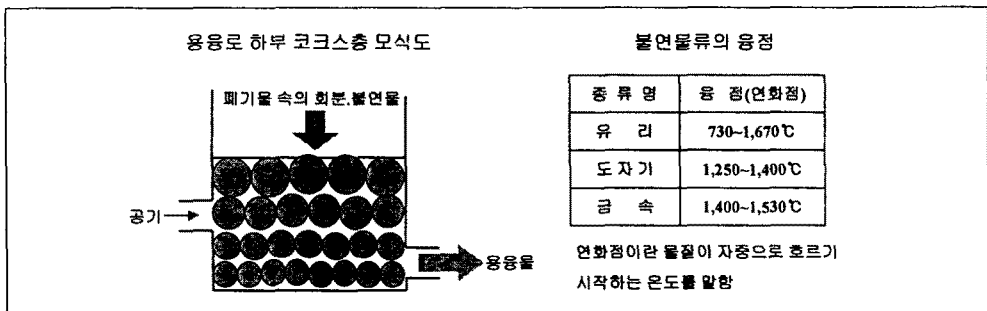


Fig.4 용융로 하부 코크스베드층

### 3.1.2 석회석의 역할 및 기능

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 운전의 용이함을 가능케 한다.

둘째, 유동성의 향상으로 용융물은 수쇄처리후 슬래그와 메탈로 개별 응고되는데 이들의 완전한 분리를 가능케함으로 순도를 높여 슬래그와 메탈이 고가로 재활용될 수 있게 한다.

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

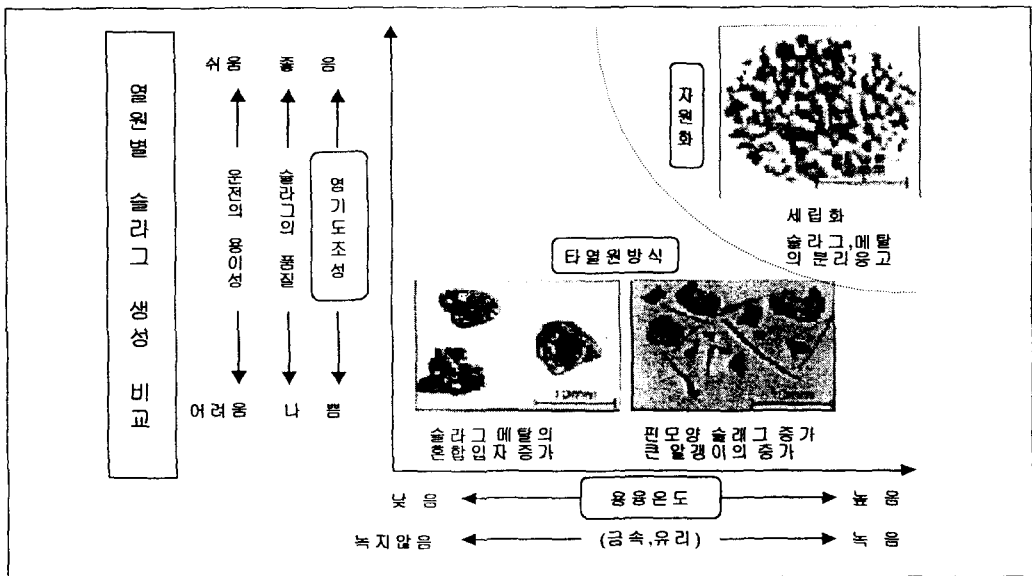


Fig 5. 열원별 슬래그 생성 비교

### 3.2 메탈과 슬래그의 분리

1700℃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, 수쇄시 슬래그와 메탈이 독립 입자로서 분리 고화되며, 높은 자선 효과를 얻을 수 있다.

### 3.3 직접용융슬래그의 품질

#### 3.3.1 슬래그의 성분

Table 1에 직접용융 슬래그의 조성과 현재 다방면에서 유효 이용되고 있는 고로 슬래그의 조성 예를 나타낸다. 참고적으로 두 슬래그 모두 염기도 조절을 하고 있으므로 고로 슬래그에 가까운 조성을 나타내고 있지만 알칼리, 특히 나트륨이 높은 것이 다르다.

화학성분		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	

Table 1. 슬래그의 조성 비교

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 일본에서 100% 재활용되고 있다. 직접용융슬래그와 성분이 유사한 고로슬래그도 시멘트 원료, 콘크리트 골재, 아스팔트 배합제 등으로 국내에서 전량 유통되고 있다.

3.3.2 슬래그의 물리적 성상

Fig.6의 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 0.6~2.36mm의 범위에서 전체의 80wt% 중량을 차지한다.

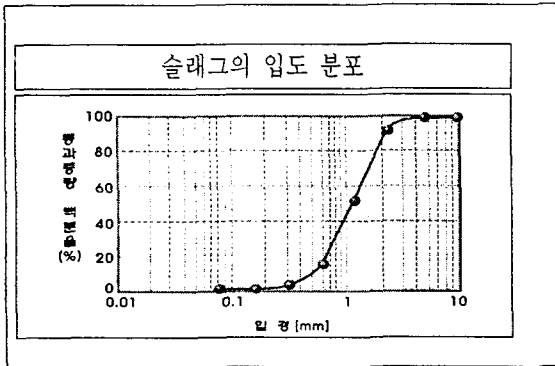


Fig 6. 슬래그의 입도 분포

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

Table 2. 슬래그의 물성치

3.3.3 슬래그의 안정성

Table 3은 직접용융 슬래그 용출 시험 결과를 나타낸다. 표에 나타난 대로 모든 중금속의 용출농도가 정량 하한치 이하이며, Table 4에서 보는바와 같이 슬래그속의 중금속의 함량이 자연토양과 유사하여 안전하고 전량 재활용 가능하다.



(단위 : mg/ℓ)

성분	직접용융 슬래그	기준치 (토양)	분석 제한치 (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

Table 3. 중금속 용출시험

Table 4. 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)전국도시청소협회, (재)폐기물연구재단, 일본

IV. 일본내 직접용용 자원화시스템의 용융부산물 유효이용 현황

4.1 슬래그의 유효이용

4.1.1 슬래그의 용도

일본내에서 유통되고 있고 재활용 가능성이 있는 항목에 대한 연구 결과를 Table 5.에 나타낸다. (◎ : 우수, ○ : 양호, △ : 보통)

구분	적용성	적용조건	
세 골 재	콘크리트 세골재	○	일반 모래 혼합사용
	공동 블럭	◎	
	표면화장재	-	
	인테리어 블럭	△	일반 모래 혼합사용
	콘크리트 이차 제품	○	
토 목	하층로반재	◎	
	매립재	◎	
시 멘 트	시멘트크링커재	○	알칼리 영향 조사필요
	시멘트혼화재	○	

Table 5. 슬래그의 용도별 평가

용도로서 크게 나누면 토목자재, 시멘트 원료, 콘크리트 세골재를 들 수 있다. 토목자재로서, 도로용 하층로반재, 복토재(backfilling材) 등으로 사용하는 것은 문제없다고 생각된다. 단, 이 경우 정상적인 사용이 아니라 한번에 대량 사용하므로 대량의 저장장소나 중간처리장을 필요로 하는 점, 2중 운반에 대한 지리적 경제성을 검토해야 한다. 또한 시멘트 원료로서는, I시의 슬래그에서는 고로 시멘트와 동등 이상의 시멘트 강도를 얻을 수 있는 것이 시멘트 메이커의 테스트 결과를 얻었다. 단 본 슬래그 안의 알칼리의 장기적인 영향에 대해 앞으로 연구해 갈 필요가 있다. 정상적인 사용이 가능하고 경제적으로도 유리한 활용법으로서는 콘크리트 세골재로서의 활용이다. I시의 슬래그는 회백색인 것도 이 점에서 유리하다. 세골재로서 단독사용은 Table 6에 나타내듯이 천연모래에는 미치지 못하지만, 혼합사용하면 천연모래 단독의 경우에 가까운 강도를 얻을 수 있다.

(단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

종재	휨강도	압축강도	비고
천연사	76	360	※배합비율: 물 338, 시멘트 520, 골재 1040
슬래그	55~59	276~317	
천연사+슬래그 혼합	70~71	340~350	

Table 6. 직접슬래그의 모르타르 강도시험

또한 빈 블럭인 경우에는 완전히 천연모래와 대체할 수 있다.

#### 4.1.2 슬래그의 유효 이용 사례

현재 일본 내에서의 용융슬래그의 유효이용 사례들은 다음과 같다.

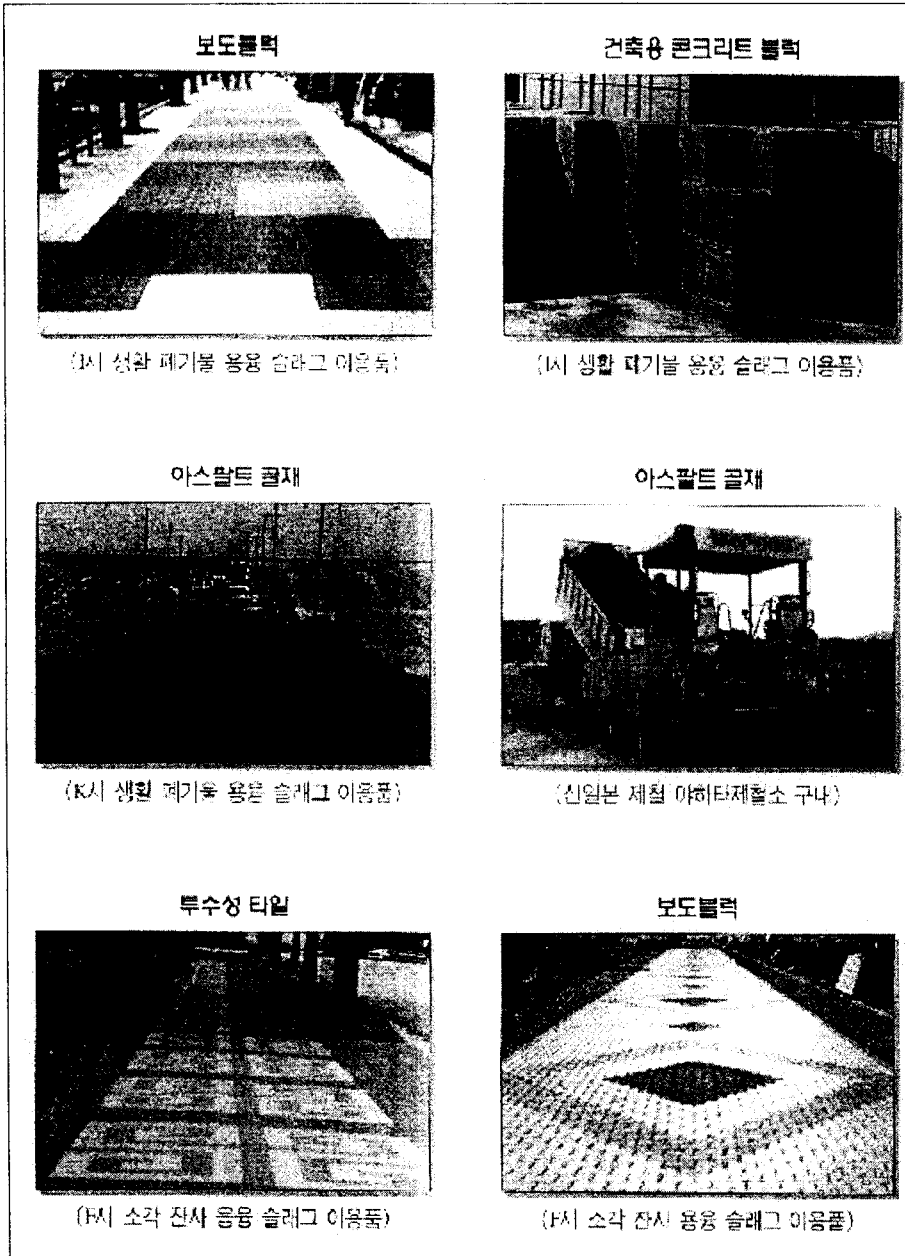


Fig 7. 용융슬래그의 유효이용 사례

#### 4.1.3 슬래그의 유통 현황

Table 7은 직접용융슬래그의 유통실적을 나타내며, 당사의 직접용융식과 타방식 용융슬래그의 이용현황을 아래 Fig.4에 비교해 보았다. Fig.4에서도 알 수 있듯이 직접용융방식의 용융슬래그는 전량 재생이용 되고 있지만 타방식의 재생이용 비율은 절

반에 그치고 있고 나머지는 매립처리에 의존하고 있는 실정이다.

용도	시장 유통량
콘크리트 2차 제품 • 인터로킹 블록 • 조적용콘크리트 블록 • 조적용콘크리트 벽돌	30,923 Ton
아스팔트 배합제	3,332 Ton
합계	34,255 Ton (가동 7개 시설)
1997년 실적 : 22,357 ton(4개시설)	이용율 100%
1998년 실적 : 27,346 ton(5개시설)	
1999년 실적 : 29,917 ton(6개시설)	
2000년 실적 : 35,194 ton(7개시설)	

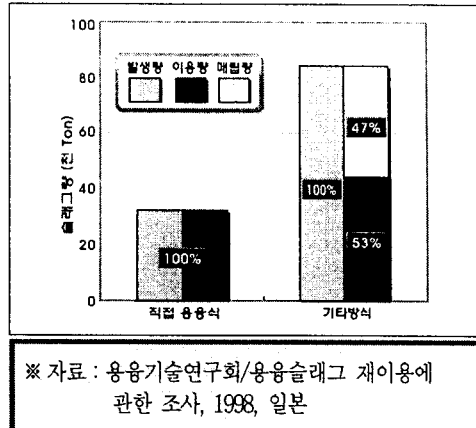
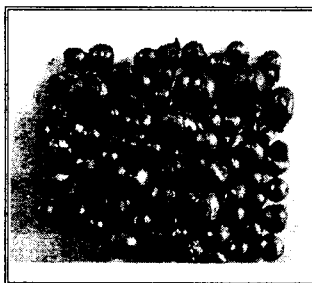


Table7. 직접용용슬래그 이용실적(2001년 기준) Fig6. 일본내 슬래그 이용현황(1998년기준)

## 4.2. 메탈의 유효이용

### 4.2.1 메탈의 형상

Fig 7.은 슬래그와 분리된 메탈의 형상을 보여주고 있다.



- 외관 : 일정한 비중을 가진 알갱이 형태
- 특징 : - 취급 및 가공이 용이함  
 - 메탈(Metal)성분 이외의 열분해 카본, 유동사 등의 불순물이 없어 중간처리 불필요

Fig 7. 메탈의 형상

### 4.2.1 메탈의 조성

용융슬래그에서 분리된 입상메탈의 조성비를 살펴보면 Table 8.와 같다.

성분	Fe	Si	Cu	P	Ni	Cr	Mn	비고
조성비	86.5	5.5	2.8	1.2	0.2	0.4	0.4	

Table 8. 메탈의 조성비

### 4.2.1 메탈의 유효이용 사례

용융슬래그에서 분리된 메탈은 제철소의 제철원료로 사용할 수 있고, 메탈의 무게와

성형성의 특징을 이용해서 현재 카운터 웨이트 등의 중량골재로써 이용된다. 일본에서 생산된 용융메탈(약2만t/년 정도)은 일본내 카운트 웨이트 제조회사에서 전량 사용되고 있다. Fig 8.은 메탈의 재활용 사례를 보여준다.



Fig 8. 메탈의 재활용 사례

### 4.3 슬래그 메탈의 판매체계

폐기물처리시설의 부산물 재활용은 가능성만으로 해결될 수 있는 간단한 문제는 아니다. 따라서 직접용융.자원화 시스템은 20년 이상 운전경험을 바탕으로 재활용 수요처의 정확한 용도, 부산물의 사용에 따른 품질저하 및 지자체 범규의 수용여부 등을 파악하여 가장 적합한 고부가가치의 제품을 생산해 냄으로서 원활한 유통망을 확보하고 있다. 신일본제철의 직접용융방식으로 생산된 용융 부산물은 품질이 뛰어나 전량 시장 유통되고 있으며 아래는 대표적인 일본내 유통체계 및 제품을 소개한다.

#### (1) 후쿠오카현의 예

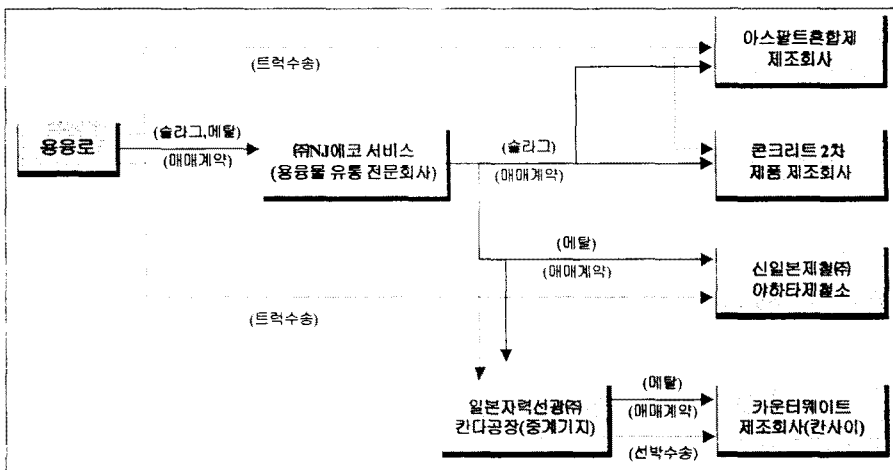


Fig 9. 후쿠오카현의 자원화 유통현황

(2) 이이즈카시의 예

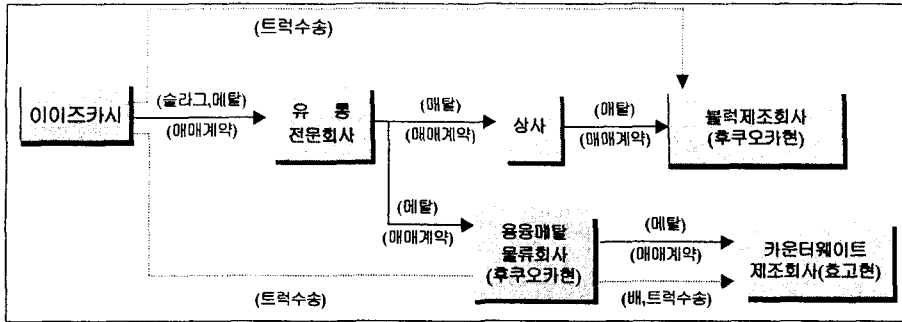


Fig 10. 이이즈카시의 자원화 유통현황

V. 국내의 슬래그 이용 현황

국내에서 생산되는 슬래그는 크게 고로 슬래그와 제강 슬래그로 나뉘는데, 이 중 고로 슬래그는 철광석, 코크스, 석회석 등을 고로(용광로)에서 용융하여 약 1,500℃의 쇳물과 함께 광물성분이 용해된 용융 슬래그이다. 발생한 용융 슬래그는 비중의 차이를 이용하여 쇳물과 분리하게 되는데 용융상태로부터 냉각하는 방법에 따라 서냉시킨 괴재 슬래그(Palletized Slag - Air Cooled)와 고압의 물로 급냉시킨 수재 슬래그(Granulated Slag - Water Cooled)로 구별된다. 다시말하면, 괴재 슬래그는 용융 슬래그가 자연 공냉과 살수에 의해서 서서히 냉각되어 결정화 된 것으로, 결정질이 거의 형성되지 않고 비정질 상의 모래와 유사한 입상으로 생성되고, 수재 슬래그는 용융 슬래그에 고압의 물을 분사하여 급냉에 의해 모래상태로 유리질화 시킨 것으로 매우 미세한 입자로 파쇄, 분쇄되어 시멘트의 성질을 가지게 되므로 시멘트의 혼화재로 사용하기에 적합하다.

5.1 철강 슬래그 발생 현황

		(천톤/년)		
구분		포항제철소	광양제철소	계
고로슬래그	수재슬래그	2,420	2,150	4,570
	괴재슬래그	1,520	1,900	3,420
	Total	3,940	4,050	7,990
제강슬래그	전로슬래그	1,770	2,110	3,880
	전기로슬래그	170	220	390
	Total	1,940	2,330	4,270

Table 9. 철강 슬래그 발생현황 \* 포스코 내부자료

5.2 고로슬래그의 유효 이용

고로 슬래그는 시멘트 공업에서 대규모로 사용되고 있으며, 발생량의 2/3가 시멘트용, 1/5이 도로용으로 이들 양자가 고로 슬래그 용도의 대부분을 점하고 있다. 고로 슬래그 쇄석의 도로재료의 이용 역사는 길며, 용도의 확대로 노반재 만이 아니고 표층재, 기층재, 지반개량재, 아스팔트용 골재 등의 도로건설재료의 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 콘크리트의 골

재로서 이용하는 것도 역사가 길며, 큰 것은 쇠석으로서, 작은 것은 모래로 이용한다. Table 10은 고로슬래그의 유효이용 사례와 특징을 보여주고 있다.

유효이용		특 징
도로용 재료	공통	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 대부분 하층노반, 상층 노반에 사용</li> <li>◎ 일본 - 괴재슬래그, 프랑스 - 수재슬래그 많이 사용</li> <li>◎ 도로용 고로 슬래그 이용시 유흡분에 의한 황색수가 유출되지 않고, 기타 유해물질을 포함하지 않는 것을 사용</li> <li>◎ 역사가 길며 사용량이 가장 많은 분야</li> </ul>
	괴재 슬래그	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 도로는 두께를 얇게 하기 위해 시멘트 또는 석회로 안정</li> <li>◎ 괴재슬래그는 결정질, 총밀에는 유리질부를 포함</li> <li>◎ 괴재슬래그를 이용한 도로의 일축압축강도는 시간에 따라 증가</li> <li>◎ 황색수 문제는 에이징 처리를 하여 보완</li> </ul>
	수재 슬래그	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 그레브레티 : 조골재 80% + 수재슬래그 20% + 소석회 1%</li> <li>◎ 소다활성화를 병용하여 응고 촉진</li> <li>◎ 소석회 대신 석고 사용하여 강도 향상</li> </ul>
시멘트		<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 포틀랜드 시멘트에 6%의 고로슬래그 첨가 허용</li> <li>◎ <math>Al_2O_3/SiO_2</math> 비를 맞추기 위해 <math>SiO_2</math> 원료 병용</li> <li>◎ 고로시멘트 A종, B종, C종 -슬래그 배합량 30%, 60%, 60~70%</li> </ul>
콘크리트용 조골재 · 세골재		<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 특성 - 진비중 : 2.9~3.0, 절건비중 : 2.2~2.7, 흡수율 : 1.1~6.0%, 압축강도 : 400~2700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>◎ 슬래그의 표면은 요철의 각성에 뛰어나 시멘트 페이스트 편 화제 와 결합이 잘 일어난다.</li> <li>◎ 조골재 : 40~50mm, 세골재 : 0.15~1.0mm</li> <li>◎ 기공의 많고 적음이 슬래그 골재의 품질을 크게 좌우</li> </ul>
비 료		<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 1928년 독일의 KAPPEN이 처음 비료시험 실시</li> <li>◎ 석회질 비료로 사용 → 규산질 보급원으로 중요시</li> <li>◎ 수재슬래그가 구용성이 커서 주로 이용</li> <li>◎ 규산질 비료로 사용시 비생산에 중요</li> </ul>
도자기 원료		<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 슬래그의 반응성 소결성을 이용 → 25~50% 첨가 사용</li> <li>◎ 유원료로 수재슬래그 배합시 타원료와 반응해서 용융 쉬움</li> </ul>
유 리		<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 양광 글래스의 착색제로 이용</li> <li>◎ 슬래그 울, 슬래그 시타르 등</li> </ul>

Table 10. 고로슬래그 유효이용 사례

### 5.3 슬래그 관련 국내규격

#### 5.3.1 콘크리트용 고로 슬래그 골재 (KS F 2544)

고로 슬래그 골재란, 용광로에서 선철과 동시에 생성하는 용융 슬래그를 물, 공기 등으로 급랭한 다음 입도 조정된 것을 말한다. 고로 슬래그 골재는 냉각 방법과 파쇄 과정의 차이에 따라 골재로서 적당하지 않은 것도 있으므로 주의해야 한다. 고로 슬래그는 크게 굵은 골재와 잔 골재로 나누어지는데, 고로 슬래그 굵은 골재는 다음 Table 11에 나타난 종류의 것으로 하고, 고로 슬래그 잔 골재는 Table 12에 나타난 종류로 한다.

종 류	입자 크기의 범위 mm
고로 슬래그 굵은 골재 467	40 ~ 5
고로 슬래그 굵은 골재 4	40 ~ 20
고로 슬래그 굵은 골재 57	25 ~ 5
고로 슬래그 굵은 골재 67	20 ~ 5
고로 슬래그 굵은 골재 7	13 ~ 5

Table 11. 고로 슬래그 굵은 골재

종 류	입자 크기의 범위 mm
5mm 고로 슬래그 잔 골재	5 이하
2.5mm 고로 슬래그 잔 골재	2.5 이하
1.2mm 고로 슬래그 잔 골재	1.2 이하
5~0.3mm 고로 슬래그 잔 골재	5~0.3

Table 12. 고로 슬래그 잔 골재

콘크리트용 고로 슬래그 굵은 골재의 규격과 고로 슬래그 잔 골재의 규격은 1981년에 제정되었으며 1997년에 개정되었는데, 개정시 KS F 2544와 KS F 2559를 통합하여 KS F 2544로 개정하였다. 종류에 관해서는 그 규격을 그대로 유지하도록 하였으며, 규격 중 비중과 흡수율에 따라 A종(비중 2.20 이상, 흡수율 6.0% 이하)과 B종(비중 2.40 이상, 흡수율 4.0% 이하)으로 구분하여 규정하고 있는데, A에 속하는 골재는 내구성이 중요하지 않은 곳에 사용해야 한다. 또한 알루미늄 시멘트와 고로 슬래그 골재를 같이 사용하는 것은 급결성을 나타내므로 특수한 경우에는 피해야 한다. 규격에서 제시한 기준은 Table 16와 같으며(6.1 항 참조). 자세한 사항은 KS 규격 F 2544에 나와 있다.

#### 5.3.2 고로 슬래그 시멘트 (KS L 5210)

시멘트 원료용으로서의 수재 슬래그는 일반시멘트에 5%, 고로 슬래그 시멘트에는 30~60%가 원료로 사용되고 있는데, 고로 슬래그 시멘트는 일반 시멘트에 비하여 수밀성, 내열성, 내해수성, 내약품성 등이 우수하여 해양 및 연안 시설물, 각종 산업기지 및 도시하수시설 등으로 이용도가 넓어지고 있다. 고로 수재 슬래그의 사용용도에 따른 KS, JIS 표준규격은 다음 Table 13과 같다.



목적용도구분	KS규격화	이용기술지침	JIS 규격화	이용기술지침
고로시멘트	KS L 5210	작성완료	JIS R 5211	작성완료
보통 포틀랜드 혼합재	KS L 5201	-	JIS R 5210	-

Table 13. 고로 수재 슬래그의 사용용도에 따른 표준규격

고로 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트 클링커와 고로 슬래그에 적당량의 석고를 가하여 분말로 하거나, 포틀랜드 시멘트 클링커, 고로 슬래그 또는 석고를 각각 또는 조합시켜 분말로 한 것을 충분히 혼합한 것이다. 포틀랜드 시멘트 클링커는 KS L 5201 (포틀랜드 시멘트)에서 규정한 것을 사용한다. 고로 슬래그는 용융 상태의 용광로 고로 슬래그를 수중 급냉한 유리상이며, 혼합량은 무게로 포틀랜드 고로 슬래그 시멘트의 25~65%로 한다.

포틀랜드 고로 슬래그 시멘트는 다음 Table 14에 표시한 화학 성분의 규정에 따라야 하고, 물리 성능은 Table 15에 따라야 한다.

		특 급	1 급
무수황산(SO <sub>2</sub> ) %		3.0 이하	4.5 이하
강열 감량 %		3.0 이하	3.0 이하
황 분(S) %		2.0 이하	-

Table 14. 고로 슬래그 시멘트의 화학 성분

항 목		특 급	1 급	
분말도	비표면적(cm <sup>2</sup> /g)	각각	2600 이상	2600 이상
		평균	2800 이상	2800 이상
안정도	오오토클레이브 팽창도 또는 수축도 (%)	0.20 이하	0.20 이하	
응결 시간	길모아 시험	초결 (분)	60 이상	60 이상
		종결 (시간)	10 이하	10 이하
	비이커 시험	초결 (분)	45 이상	60 이상
		종결 (시간)	7 이하	10 이하
강 도	압축 강도	3일 (kgf/cm <sup>2</sup> )	130 이상	100 이상
		7일(kgf/cm <sup>2</sup> )	200 이상	160 이상
		28일(kgf/cm <sup>2</sup> )	250 이상	250 이상
수화열	7일 (Cal/g)	70 이하	70 이하	
	28일 (Cal/g)	80 이하	80 이하	
모르터의 공기 함유량 (%)		12 이하	-	

Table 15. 고로 슬래그 시멘트의 화학 성분

주) 응결 시간 시험 방법은 수요자의 요구에 따라 길모아 시험과 비이커 시험 중 택일하여 실시한다.

VI. 국내 DMS 슬래그의 유효 이용 방안

6.1 DMS 용융슬래그와 국내 슬래그 KS 규격과의 비교

DMS 용융슬래그 역시 포스코의 고로슬래그와 같이 급냉 처리를 하여 균일한 입자의 슬래그를 배출하므로 골재 및 블록 등 건축자재로 사용 가능할 것으로 판단된다. 국내 KS 규격인 “콘크리트용 고로슬래그 골재 KS F 2544 규격”에 적합성 여부를 알아보기 위해 다음과 같이 DMS 용융슬래그 성분을 비교 하였으며, 표에서 보이는 바와 같이 국내 규격에 적합함을 알 수 있었다.

구분	국내 규격	고로슬래그		DMS 용융슬래그	
		KS F 2544	KS F 2544	잔골재	용융슬래그
화학적 성분 총 함유량 %	산화칼슘(CaO)	45.0 이하		45.0 이하	33.0~45.0
	황(S)	2.0 이하		2.0 이하	0.2~0.3
	삼산화황(SO3)	0.5 이하		0.5 이하	-
	철(FeO)	3.0 이하		3.0 이하	0.1~0.8
물리적 성질	절대건조 비중	2.2 이상	2.4 이상	2.5 이하	2.63
	흡수율 %	6.0 이하	4.0 이하	3.5 이하	2.65
	단위용적 중량 kg/m <sup>3</sup>	1250 이상	1350 이상	1450 이상	1470
수중 침지 시험	균열, 분해, 니상화, 분화 등의 현상이 없을 것.			-	-
자외선(360nm)조사 시험	발광하지 않거나 또는 균일한 자색을 띠고 있을 것.			-	-

Table 16. 물리적 성질 비교

또한 국내에서 유통되는 슬래그 골재규격과 입도상 적합성을 살펴보기위한 DMS 용융슬래그의 입도 시험을 실시하여 고로슬래그 잔골재로서 적합한 것으로 판명되었다..

<표 6-10> 잔골재 입도 비교

잔골재 입도	잔골재 통과하는 무게 백분율 %						
	100	75	45	25	15	7.5	4.75
5mm 고로 슬래그 잔 골재	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15
2.5mm 고로 슬래그 잔 골재	100	95~100	85~100	65~95	30~70	10~45	2~20
1.2mm 고로 슬래그 잔 골재	-	100	95~100	80~100	35~80	15~50	2~20
5~0.3mm 고로 슬래그 잔 골재	100	95~100	65~100	10~70	0~40	0~15	0~10

Table 17. 잔골재 입도 비교

## 6.2 DMS 용융슬래그의 재활용 방안

앞서 살펴본 바와 같이 고로 슬래그의 재활용 분야는 매우 넓으며, 그 활용 현황 또한 매우 활발히 이루어지고 있다. 외국에서의 사례뿐만 아니라 우리나라에서도 그 경제성과 환경 친화적인 성격 때문에 그 수요가 점점 늘어나고 있는 실정이며, 기존의 포스코(포항 제철)의 경우만 하더라도 대부분의 슬래그가 주로 양회업체나 비료 개량제 등으로 사용되고 있다.

이미 제품화가 완료된 고로 슬래그 시멘트 등을 제외하고는 슬래그의 종류에 대한 언급이 없으므로, 품질기준만 맞춘다면 얼마든지 재활용이 가능할 것이며, 현재 DMS 용융 슬래그의 경우는 유통되는 고로 슬래그와 그 성질 및 특성이 유사하므로 추후 품질 성분 검사를 거쳐 비슷한 용도로의 사용이 가능할 것이다. 또한 구체적인 슬래그 재활용 가능분야에 대해서는 다음 Table 18과 같다.

		특성	적용규격
바로 유통가능한 항목	보도블럭	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자전거 도로, 산책로 보도, 광장, 캠퍼스 등에 적용</li> <li>○ JIS규격의 구부림 강도와 투수계수 만족</li> <li>-보통보도블럭 :구부림강도 50kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>-투수성보도블럭 :구부림강도 30kgf/cm<sup>2</sup>, 투수계수 0.01cm/sec</li> <li>-잔디블럭 :구부림강도 40kgf/cm<sup>2</sup></li> </ul>	KS F 4001
	건축용 콘크리트 블럭	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고온으로 용융·고화하여 얻는 슬래그를 한층 더 가열·제냉하여 생성된 결정화 석재 가공하여 건축용 블럭, 해안 구조물에 사용</li> </ul>	KS F 4002 KS F 4006 ...
	투수성 타일	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 휠터층과 보조기층을 형성한 후 기층용 투수콘크리트를 포설하고 표면층에 투수콘크리트 포장 방식</li> <li>○ 칼라 투수 콘크리트는 다채로운 색상, 문양으로 주변 환경과 조화</li> </ul>	KS A 1014
	아스팔트 골재	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 혼합재에 용융슬래그를 100% 배합, 연간 800만톤 시장형성</li> </ul>	KS M 2001 KS M 2208
보완후 유통가능한 항목	시멘트	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 조성이 Ca, Al, Si의 산화물로구성되므로, 석회석 배합량이 줄고, 석회석의 열분해에 요하는 열량을 절감할 수 있으며, 로의 용량을 반비례적으로 올림 가능</li> <li>○ 용융 슬래그에 적용시 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비가 시멘트의 성상과 유사하지 않으면 추가적으로 이 비율을 조정하기 위한 조정단계가 필요</li> </ul>	KS L 5210

Table 18. DMS(직접용융) 슬래그 유통가능 항목

### 6.2.1 바로 유통 가능한 품목

가동되는 용융시설에서 생산되는 슬래그는 그 지역의 천연골재 수급 상황이나 골재활용 공장의 입지를 고려하여 용도를 확립 하는 것이 요구된다. 현재 국내 골재 수급 상황은 수요에 비해 공급이 모자라는 상황이며 조사한 바에 의하면 천연골재 대신 재활용 골재, 제강슬래그 등을 이용하여 재활용품을 생산하고 있다. 앞에서 기술한 DMS 용융 슬래그의 일본내에서의 재활용 현황과 국제 골재 수급현황을 감안할 때 보도블럭, 건축

용콘크리트 블럭, 투수성 타일, 아스팔트 등의 재활용품으로 유통이 가능할 것으로 사료된다. 특히 보도블럭으로 이용은 유해성분이 거의 없고 강도면에서도 우수한 DMS 용융슬래그가 적합할 것으로 여겨지며 실제 DMS 용융슬래그를 이용한 보도블럭 샘플을 제작하여 KS 절차에 따른 강도시험을 실시하였다. 검사결과 다음과 같이 국내 규격을 상회하는 실험과를 얻었다.

종류	구부림강도 KS F 4001	구부림강도 (TEST결과)	비 고
보통보도블럭	50kgf/cm <sup>2</sup>	78kgf/cm <sup>2</sup>	샘플구성비 : 물(5.8%), 모래(7.3%), 자갈(13.2%), 시멘트(23.1%), 슬래그(50.6%)
투수성보도블럭	30kgf/cm <sup>2</sup>		
잔디블럭	40kgf/cm <sup>2</sup>		

Table 19. 보도블럭 강도시험

## 6.2.2 보완후 유통 가능한 품목

### 6.2.2.1 시멘트

시멘트 원료의 경우 고로 슬래그의 수요구조가 고로 슬래그의 장점을 활용하여 부가가치가 높은 시멘트로의 활용이 증대되고 있다. 시멘트의 경우 그 조성이 Ca, Al, Si의 산화물로부터 되기 때문에, 석회석 배합량이 줄고, 석회석의 열분해에 요하는 열량을 절감할 수 있으며, 로의 용량을 반비례적으로 올리게 할 수 있다. 이를 용융슬래그에 적용시 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비가 문제가 될 수 있으나 구성비가 고로슬래그와 유사하므로 가능성은 충분히 갖추고 있다. 일반적으로 손에 넣기 쉬운 포틀랜드 시멘트에 임의의 양의 슬래그를 콘크리트 배합에 첨가하여 이용되고 있으며, 이에 따라 시멘트의 생에너지와 생력과 안정성 및 슬래그의 고도이용이 극대화 될 수 있는 효과를 낳는다. 독일의 경우 생자원, 생에너지를 위해 5% 이내의 슬래그 또는 시멘트 원료, 반소성품의 첨가도 허용하도록 규격개정이 행하여 졌으며, 일본에서도 포틀랜드 시멘트에 소량의 배합을 허용하는 JIS 개정이 행해졌다.

### 6.2.2.2 기타

위에 나타난 주된 재활용 외에도 고로 슬래그가 이용될 수 있는 모든 분야에 대해 용융 슬래그의 적용은 가능할 것이라 판단되며, 성상이 비슷하나 조합시 차이가 나는 부분은 적절한 중간처리과정을 통해 고부가가치를 가지는 상품으로 재활용을 할 수 있어야 하겠다.

## 6.3 양산시 자원회수시설 용융슬래그 재활용 방안

앞에서 살펴본 바와 같이 직접용융슬래그는 성분 및 성상이 고로슬래그와 유사하고 국내 고로슬래그 골재규격을 만족하므로, 우선 바로 유통 가능한 품목의 고로슬래그 대체재로서 전량 재활용 예정이며, 타 용도로의 KS 규격화를 통하여 재활용범위를 확대할 예정이다.

## VI. 결론

우리나라 생활폐기물 처리방법 중 매립이 가장 큰 비율을 차지하고 있으나, 우리나라의 국토 면적이 협소하기 때문에 매립지 확보가 어려우며, 발생하는 침출수 및 악취, 그리고 지반 침하 등의 많은 문제점을 지니고 있어 우리나라 생활폐기물의 처리 및 처분 방법이 매립에서 소각으로 바뀌고 있는 실정이다. 한편, 기존의 스토커 방식 소각은 다이옥신 저감과 소각재를 재처리하여야 하는 문제를 안고 있으므로 처리방식에 대한 새로운 대안의 필요성이 점차 인식되고 있는 중이다.

일본 내에서는 다이옥신에 관련된 규제 강화의 움직임을 계기로 쓰레기 처리시설의 용융기능의 부가가 급속하게 진행되어 왔으며, 종래의 소각로에 비산재 용융시설의 부가설치에 머무르지 않고 가스화 용융로의 선진성에 기대하는 지방자치단체가 증가하고 있고, 1999년 이후 열분해 가스화용융시설의 발주가 급증하고 있다.

국내에서도 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 국내 최초로 열분해 용융방식의 당사의 직접용융자원화 시스템을 도입하여 생활폐기물 용융시설을 건설 중에 있다. 양산시의 자원회수시설이 성공적으로 완성될 경우 주민들의 현 소각시설 2차오염 물질에 대한 관심으로 볼 때 생활폐기물 처리시설로서 열분해·용융 시스템의 도입은 더욱 급속히 확산될 것으로 예상된다. 특히 당사의 직접용융자원화시스템은 공정 특성상 기존 스토커 방식에서 매립 처분되는 바닥재 대신, 폐기물의 회분, 미연분, 불연물을 재활용 가능한 자원화물로 회수하므로 매립부하의 감소와 함께 정부의 재활용확대 및 자원화 정책에 기여할 수 있다.

## VII. 참고 문헌

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