

## 廢棄物의 熔融處理에 의한 시멘트 原料의 合成 (II)

黃 演 · 孫龍雲 · 鄭憲生 · 李洪基\* · 朴賢緒\*

韓國資源研究所 資源活用素材部, \*三聖重工業(株) 中央研究所

### Synthesis of Cement Raw Materials by Melting of Industrial Wastes (II)

Y. Hwang, Y. U. Sohn, H. S. Chung, H. K. Lee\* and H. S. Park\*

*Korea Institute of Geology, Mining and Materials,  
Minerals Utilization and Materials Division*

*\*Samsung Heavy Industries Co. Ltd. Daduk R & D Center*

#### 요 약

산업 폐기물의 일종인 석회석 슬러지, 폐주물사, 석탄회 및 폐유리병을 고온에서 용융 슬래그화 하여 시멘트 원료로서의 활용 가능성을 검토하고자 하였다. 각 폐기물을 혼합한 후 용융처리하여 얻은 용융 슬래그는  $\beta\text{-C}_2\text{S}(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$  및  $\text{C}_2\text{AS}(2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$ 의 2가지 상으로 구성되어 있다. 폐기물의 용융처리시 용융온도, 냉각속도 및 염기도 등을 변화시키면서 이들 요인이  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  상의 생성율에 미치는 영향을 조사하였다. 시멘트 원료로서 활용이 가능한  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  상의 함율을 높이기 위해서는 첫째 용융온도를 낮추어 용융슬래그의 제조에 필요한 최소한의 온도에서 용융시키고, 둘째 용융물을 고온에서 급냉시키며, 셋째 낮은 염기도를 갖도록 혼합물의 조성을 조절하는 것이 필요하다.

#### ABSTRACT

The feasibility of using the industrial inorganic waste materials such as limestone sludge, foundry sand, coal fly ash, and chemical glasses as a raw material for cement clinker by melting treatment was investigated. The slag which is obtained from the melts of the mixtures of waste materials is composed of  $\beta\text{-C}_2\text{S}(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$  and  $\text{C}_2\text{AS}(2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$  phases. The effect of melting temperature, cooling condition and C/S ratio on the formation of  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  phase was examined. In order to obtain the  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  phase which is useful in the utilization as a clinker material, it is found that such considerations as low melting temperature as possible of the waste mixture, quenching the melts and low C/S ratio of the mixture are necessary.

#### 1. 서 론

산업발달과 함께 필연적으로 발생된 부산물인 각종 산업 폐기물은 최근 급격하게 증가하는 추세에 있고 심각한 환경 문제를 일으키고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 폐기물의 매립 처리는 침출에 의한 오염이라는 한계를 수반하고 있고, 단순 소각은 대기오염, 유독물질 발생, 에너지 다소비라는 문제점이 있다. 최근에는 폐기물의 처리 후 최종 부산물을 무공해 물질로써 재활용 가능한 기술로써 고온 용융처리 기술이 검토되고 있다. 고온 용융처리에 적용 가능한 폐기물로는 합철 폐기물, 중금속 함유 소각 비산회, 폐수 슬러지, 유독원

소에 오염된 폐유리병 및 폐주물사 등을 들 수 있다

제철분야의 석회석 슬러지, 주물업체의 폐주물사, 화력발전소의 석탄회, 농약용 유리병들과 같은 폐기물들이 다량으로 발생되고 있는데, 이들의 조성 성분이  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등의 무기물질이기 때문에 용융처리에 의한 무해화 및 재활용의 측면에서 주목받고 있다. 본 연구진은 상기 폐기물의 조성에 주목하여 이들 무기 폐기물들을 혼합하여 적당한 조건하에서 고온 용융처리하여 시멘트 클링커를 이루는 상(相)의 일부인  $\text{C}_2\text{S}(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 와 유사한 슬래그를 얻을 수 있음을 보고한 바 있다.<sup>2)</sup>

폐기물을 이용한 재자원화는 이미 고로 슬래그를 사용

한 고로 시멘트의 제조 분야에서 활발히 이루어 지고 있다. 고로 시멘트는 원료의 절반 정도를 슬래그로 사용하기 때문에 산업 폐기물을 재활용한다는 측면 뿐만 아니라 포틀랜드 시멘트에 비하여 석회석 사용량이 절반으로 줄면서 이산화탄소의 발생량이 절반으로 줄고 소성에 필요한 에너지도 절감되기 때문에 에너지 절약형 시멘트라고 할 수 있다. 본 연구에서는 각종 산업 폐기물을 사용하여 시멘트 클링커 상의 일부를 제조함으로써, 고로 시멘트와는 다른 방법으로 시멘트 원료를 제조할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

폐기물의 용융 처리에 의한 슬래그화에 있어서 위에서 언급한 C<sub>2</sub>S 상 이외에도 C<sub>2</sub>AS(2CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub>) 상이 생성되는데, C<sub>2</sub>AS 상은 시멘트 클링커의 제조시 나타나는 중간 생성물이다. 한편 C<sub>2</sub>S는 28일 이상의 잠기강도 발현에 중요한 역할을 하는 상으로 보통 시멘트 클링커에 20~25% 정도 함유되어 있다. 석회석 슬러지, 폐주물사, 석탄회, 폐유리병을 고온에서 용융 슬래그화 하여 C<sub>2</sub>S 상을 얻고, 시멘트 원료로서의 활용 가능성을 검토하고자 하였는데, 제 1보<sup>3)</sup>에서 폐기물 원료의 배합비율에 따른 최종 생성상의 변화를 알아본데 이어, 본고에서는 폐기물의 용융처리시 용융 온도 및 냉각속도 등을 변화시키고, 폐기물의 혼합시 염기도를 변화시키면서 이들 요인이 C<sub>2</sub>S 및 C<sub>2</sub>AS 상의 생성물에 미치는 영향을 조사하였다.

**2. 실험 방법**

본 실험에 사용된 4가지 폐기물로 제철소에서 발생한 석회석 슬러지, 화력 발전소의 석탄회, 주물공장에서 발생한 폐주물사 및 수집된 유독 화학약품용 유리병을 사용하였다. 석회석 슬러지 및 석탄회의 평균 입도는 각각 14 μm 및 83 μm 이었다. 유리병은 jaw crusher 및 hammer crusher를 사용하여 분쇄한 후 70 mesh의 체로 걸러서 평균 입도 160 μm의 분말 형태로 사용하였다. 폐주물사는 30 mesh의 체로 거른후 사용하였다. 각 원료는 전기건조기에서 완전히 건조시킨 후 사용하였다.

각 폐기물을 ICP-AES로 분석한 조성표를 Table 1에 나타내었다. 석회석 슬러지의 주성분은 CaCO<sub>3</sub> 이므로 용융처리시 CaO의 공급원이 된다. SiO<sub>2</sub>는 폐주물사, 폐유리병 및 석탄회 등으로부터, 그리고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 석탄회로부터 첨가됨을 알 수 있다. 각 폐기물 원료를 XRD 분석한 결과 폐주물사의 주 peak는 quartz 이었으며, 석회석 슬러지는 calcite가 주성분으로 나타났다.

슬래그 염기도의 정의 방법은 몇가지가 있으나 본 연구

**Table 1.** Compositions of waste materials (wt %)

	석회석슬러지	석탄회	폐주물사	폐유리병
CaO	51.38	3.35	0.10	10.45
MgO	0.71	0.78	0.033	1.41
SiO <sub>2</sub>	3.30	51.11	90.36	63.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	27.20	2.73	4.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.83	5.51	0.36	0.17
Na <sub>2</sub> O	0.018	0.43	1.17	14.42
K <sub>2</sub> O	0.20	1.35	1.31	1.27
TiO <sub>2</sub>	0.047	1.29	0.14	0.14
MnO	0.029	0.045	0.006	0.01
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	4.28
Ig. Loss	42.48	-	-	-

**Table 2.** Mixing ratio of waste materials with various C/S ratio (wt %).

No.	석회석 슬러지	폐주물사	석탄회	폐유리병	C/S
1	61.6	12.8	12.8	12.8	1.0
2	64.0	12.0	12.0	12.0	1.1
3	66.4	11.2	11.2	11.2	1.2
4	68.4	10.5	10.5	10.5	1.3
5	70.3	9.9	9.9	9.9	1.4
6	72.1	9.3	9.3	9.3	1.5

에서는 다음과 같은 식으로 정의 하였다.<sup>3)</sup>

$$C/S \text{ ratio (염기도)} = \%CaO / (\%SiO_2 + \%Al_2O_3) \quad (1)$$

용융온도, 냉각속도 및 염기도의 영향을 규명하기 위하여 각 폐기물을 혼합하였는데, 일반적으로 제철공정에서 사용되는 슬래그의 염기도가 1.2 정도이므로 본 실험에서 용융 온도 및 냉각속도의 영향을 구할 때에 염기도를 1.2로 고정시켰다. 한편 염기도는 1.0에서 1.5 사이의 값으로 변화시켰다. 이때 각 폐기물의 혼합 비율은 Table 2. 폐기물이 혼합된 조성은 Table 3과 같이 된다. 각 폐기물은 칭량된 후 폴리에틸렌 재질의 볼밀에서 알루미늄나 불을 사용하여 2시간 동안 건식 혼합 하였다.

혼합된 폐기물을 용융시켜 슬래그를 제조하기 위해서 수퍼칸탈 발열체를 사용한 수직형 튜브전기로를 사용하였다. 혼합된 분말을 순도 99.8%의 알루미늄나 도가니에 충전시키고, 이를 다시 보호용 알루미늄나 도자기에 넣은 후에 전기로 내에 장입 시켰다. 250°C/hr 의 속도로 각 용융온도까지 온도를 올린후 20분간 유지시켜 용융 슬래그를 얻었다. 용융된 슬래그를 냉각시킬 때 로냉시킴으로써 서냉 슬래그를 얻었고, 각 용융온도에서 1300°C 까지 온도를 내린 후 도가니

**Table 3.** Compositions of waste mixtures with various C/S ratio (wt %).

No.	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C/S
1	46.23	39.04	7.11	1.00	1.77	2.85	0.87	0.32	0.04	0.76	1.0
2	48.41	37.36	6.86	1.01	1.76	2.70	0.84	0.31	0.04	0.71	1.1
3	50.65	35.58	6.61	1.02	1.74	2.57	0.81	0.30	0.04	0.68	1.2
4	52.56	34.03	6.38	1.03	1.72	2.44	0.86	0.29	0.04	0.65	1.3
5	54.35	32.71	6.17	1.04	1.71	2.32	0.77	0.28	0.04	0.61	1.4
6	55.87	31.51	6.01	1.05	1.71	2.22	0.74	0.26	0.04	0.58	1.5

를 전기로로부터 들어내어 수냉 시킴으로써 급냉 슬래그를 얻었다. 알루미늄이나 도가니를 절단하여 슬래그 시료를 얻었는데, 도가니와 접합된 슬래그 부위는 분석에서 제외시켰다.

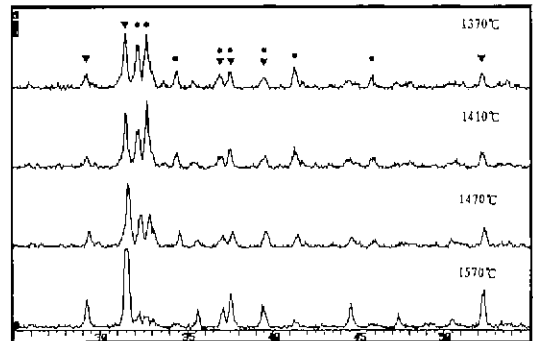
용융 슬래그를 분쇄하여 분말 X선 회절기로 상분석을 하였는데, Rigaku사의 X-ray diffractometer를 사용하여 전압이 30 kV, 시편전류 40 mA, 주사속도 8°/min, step 0.05°인 조건에서 회절도를 얻었다. 주사속도 및 step을 각각 0.8°/min 및 0.01°로 변화시켜서 측정하여도 XRD pattern의 피크 강도 및 반가폭에 영향을 미치지 않았으므로 전자의 조건하에서 측정하였다. 슬래그를 1 μm 크기의 알루미늄 분말을 사용하여 연마한 후 JEOL사의 전자현미경을 사용하여 SEM 및 EDS 분석을 행하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 용융온도의 영향**

Table 3의 No. 3에 표시한 조성(염기도=1.2)을 갖는 폐기물 혼합물을 1370, 1410, 1470 및 1570°C에서 용융시킨 후 서냉시킨 슬래그를 XRD로 상분석을 행한 결과는 Fig. 1과 같다. 그림으로부터 혼합물의 용융물은 주로 2가지 상으로 이루어져 있고 있음을 알 수 있는데, 하나는 ●로 표시된 β-C<sub>2</sub>S 상이며, 다른 하나는 ▼로 표시된 C<sub>2</sub>AS 상이다 XRD를 사용한 상분석시 함유량의 절대치를 구하기 위해서는 여러개의 peak에 대하여 적분강도를 구하여야 하나<sup>4)</sup>, 본 연구의 경우는 2가지 상의 상대적인 분율 변화를 동일한 조건하에서 알아보고자 하였으므로 주 peak의 강도만을 비교하였다.

CaO-SiO<sub>2</sub> 계의 상태도<sup>5)</sup>를 보면 C<sub>2</sub>S는 2130°C에서 녹으며 α, α', β, γ-C<sub>2</sub>S의 4가지 상을 가진다. β-γ 상의 전이는 느리게 일어나지만 일단 진행이 시작되면 전이가 완전히 이루어지는 특성이 있다. β-γ 상전이시 부피팽창을 수반하므로 수화된 후 기계적 강도의 저하가 발생한다. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 불순물은 0.2-0.5 mol% 정도의 적은 양으로도 β 상을 안정화 시키는 것으로 알려져 있는데<sup>6)</sup>, 그 정확한 기구는



**Fig. 1.** X-ray diffraction patterns of waste mixture (C/S = 1.2) melted at 1370, 1410, 1470 and 1570°C (●; β-C<sub>2</sub>S, ▼, C<sub>2</sub>AS).

아직 명확하지 않다. 본 실험의 경우 Table 1 및 3을 보면 폐유리병의 조성에는 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 4.28 wt% 함유되어 있고 최종 혼합물에는 0.58-0.76 wt% 포함되어 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 실험한 조성의 경우 최종 용융 슬래그는 β-C<sub>2</sub>S 상이 안정한 조성을 갖게 되는 것으로 판단된다

Fig. 1을 보면 용융온도가 높아질수록 C<sub>2</sub>AS 상의 peak가 증가하는 것을 알 수 있는데, 각 상에 있어서 가장 강한 강도를 보이는 β-C<sub>2</sub>S 상의 (121)면 및 C<sub>2</sub>AS 상의 (211)면의 강도비율을 Fig. 2에 나타내었다. 1370°C의 온도는 염기도가 1.2인 혼합물을 슬래그화 시킬수 있는 최소 온도이다 SEM을 사용하여 미세조직을 관찰하면 matrix에 grain이 분산된 조직을 갖고 있는데 1470°C까지의 용융온도에서는 Fig. 3(a)에 나타낸 것과 유사한 형태를 갖는다. 그러나 Fig. 3(b)에서 보듯이 1570°C에서 용융시킨 경우 grain의 크기가 매우 작아지고 matrix에 대한 상대 분율이 낮아짐을 알 수 있다. 이와 같은 용융온도에 의한 상변화는 1370°C 이상으로 온도가 상승하면서 용융 폐기물의 평형 조성이 바뀌고 있음을 의미한다 즉 혼합된 폐기물이 1370°C에서 완전한 액상으로 존재하는 것이 아니라 그 온도에서 평형인 고상을 함유하고 있으며, 그 조성은 온도가 더욱 올라감에 따라

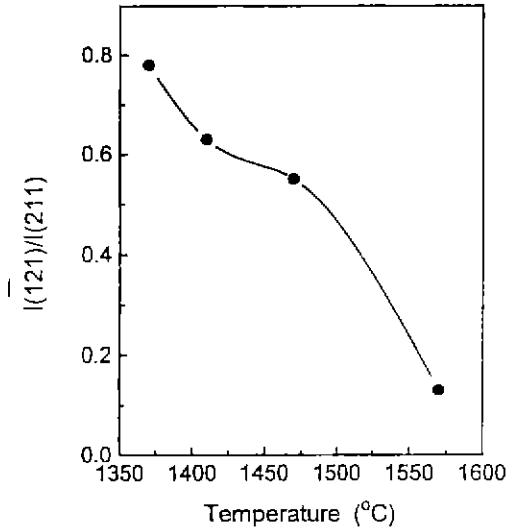


Fig. 2. X-ray intensity ratio of  $\beta$ -C<sub>2</sub>S(121) and C<sub>2</sub>AS(211) at various melting temperature.

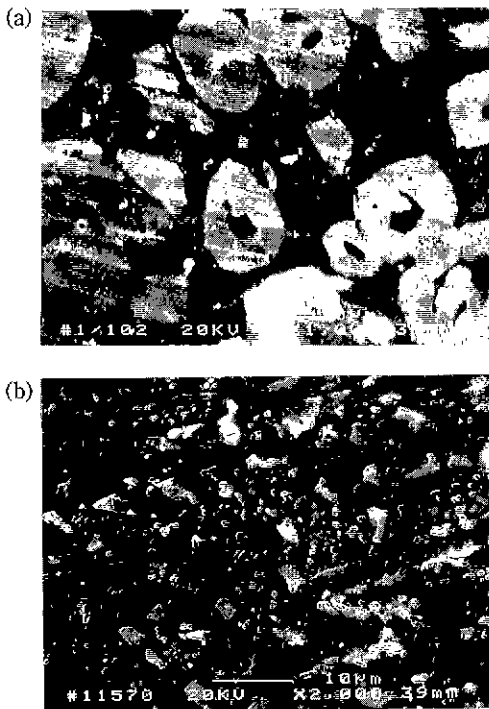


Fig. 3 SEM photographs of waste mixture (C/S=1.2) melt at (a) 1470 and (b) 1570°C.

변화한다. 따라서 본 연구에서 사용한 폐기물의 경우 시멘트의 원료로 사용하기 위해서는 용융슬래그로 제조할 수 있는 최소한의 온도에서 용융 처리하는 것이 유리함을 알

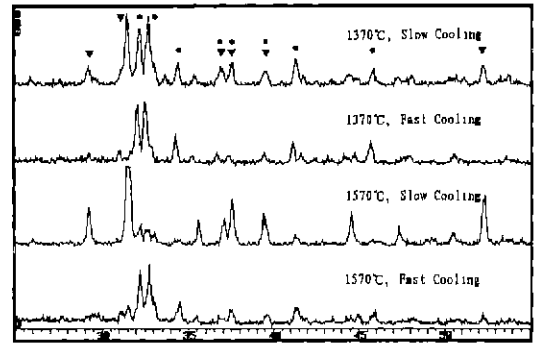


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of waste mixture (C/S=1.2) at various cooling conditions (●;  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, ▼; C<sub>2</sub>AS).

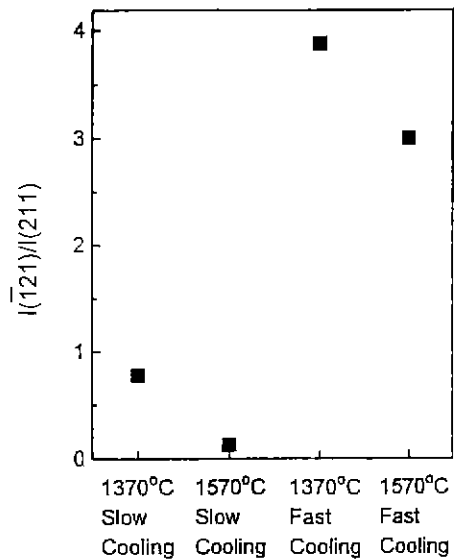


Fig. 5. X-ray intensity ratio of  $\beta$ -C<sub>2</sub>S(121) and C<sub>2</sub>AS(211) at various cooling conditions

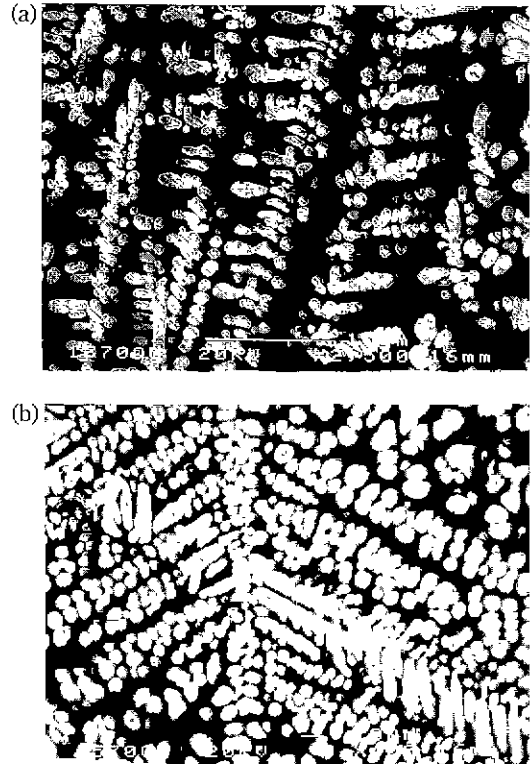
수 있었다.

### 3.2. 냉각속도의 영향

Table 3의 No. 3 조성물(염기도=1.2)을 1370°C와 1570°C에서 용융시킨 후, 급냉시켜 얻은 슬래그와 서냉시켜 얻은 슬래그를 비교하였다. Fig. 4에 이들 시료의 XRD pattern을 나타내었다. 각 온도에서 급냉시키면 서냉시켰을 때보다  $\beta$ -C<sub>2</sub>S의 함량이 높아짐을 알 수 있다. 각 냉각조건에 대하여  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 상의 (121)면 및 C<sub>2</sub>AS 상의 (211)면의 강도비율을 Fig. 5에 나타내었다. 급냉시키면  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 상이 75~80%를 차지함을 알 수 있다. 특히 1570°C에서 용융시킨 경우, 서냉하면 C<sub>2</sub>AS 상이 대부분을 차지하나 급냉에 의하여  $\beta$ -C<sub>2</sub>S 상을 석출

**Table 4.** EDS analysis of melt slag (C/S=1.2) at various cooling conditions

Sample Condition	Position	Element	Atomic Percent
1370°C, Slow Cooling	Grain	Si	36.87
		Ca	60.70
		Al	1.23
	Matrix	Si	33.10
		Ca	47.02
		Al	13.90
1370°C, Fast Cooling	Grain	Si	34.78
		Ca	63.92
		Al	0.69
	Matrix	Si	36.80
		Ca	42.60
		Al	13.01
1570°C, Slow Cooling	Matrix	Si	33.43
		Ca	36.31
		Al	27.96
1570°C, Fast Cooling	Grain	Si	35.93
		Ca	62.54
		Al	0.84
	Matrix	Si	40.16
		Ca	33.26
		Al	15.83



**Fig. 6.** SEM photographs of rapidly cooled waste mixtures (C/S=1.2) from (a) 1370°C and (b) 1570°C.

시킬 수 있다.

Fig. 6의 SEM사진은 1370°C와 1570°C에서 급냉하여 얻은 시편의 미세 조직을 보여주고 있다 각각의 냉각조건에 대하여 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) 분석을 행한 결과를 Table 4에 나타내었다. 용융온도 및 냉각조건에 관계없이 Al의 함량은 matrix에서 많은 반면에 Ca은 grain에서 많으므로 grain이  $\beta$ - $C_2S$  상이고 matrix가  $C_2AS$  상임을 알 수 있다. 사진에는 나타나지 않았으나 시편의 부위에 따라서 Fig. 6에서 보이는 grain 보다 크기가 큰 grain이 관찰되기도 하는데, 이는 시편을 물에 담구어 급냉시키는 과정에서 부위별로 냉각속도에 차이가 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 1570°C에서 서냉시킨 시편의 경우는 grain의 크기가 너무 작아서 EDS 분석을 하지 못하였다.

한편 XRD 분석에 의하면 용융물을 급냉시킴으로써  $\beta$ - $C_2S$  상의 분율을 높일 수 있는 것으로 판단되는데, 미세 조직 사진을 보면 matrix 상이 완전히 제거되고 있지는 않다. 미세 조직에서 grain이  $\beta$ - $C_2S$  상으로 되는 이유는 각 상의 용점의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.  $\beta$ - $C_2S$  상의 용점이

2130°C인 반면에  $C_2AS$  상은 1593°C로 낮아서 용융 폐기물이 냉각될 때 용점이 높은  $\beta$ - $C_2S$  상이 먼저 석출되고  $C_2AS$ 가 matrix 상을 형성하게 된다. 용융온도 및 냉각속도가 2가지 상의 분율에 미치는 영향을 종합하면 1570°C의 온도에서는  $\beta$ - $C_2S$  상이  $C_2AS$  상보다 안정한 반면에, 그 온도에서 낮아질수록  $C_2AS$  상이 안정해 지는 것을 알 수 있다. 또한 슬래그화 되기까지의 열적 이력이 중요하게 작용한다. 고온에서  $\beta$ - $C_2S$  상이 형성되었으나 냉각도중  $C_2AS$  상으로 전이되는데, 이를 억제하고 시멘트 클링커에 유용한 성분을 얻기 위해서는 급냉시킬 필요가 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 폐기물의 조성이 복잡하여 여러 불순물의 영향을 모두 알기는 어려우며,  $\beta$ - $C_2S$  상의 형성 기구의 규명에는 더욱 깊은 연구를 요구한다.

### 3.3. 염기도의 영향

석회석 슬러지, 폐주물사, 석탄회 및 폐유리병을 염기도가 1.0에서 1.5 사이로 변화도록 혼합하여 염기도가 용융 슬래그의 상형성에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

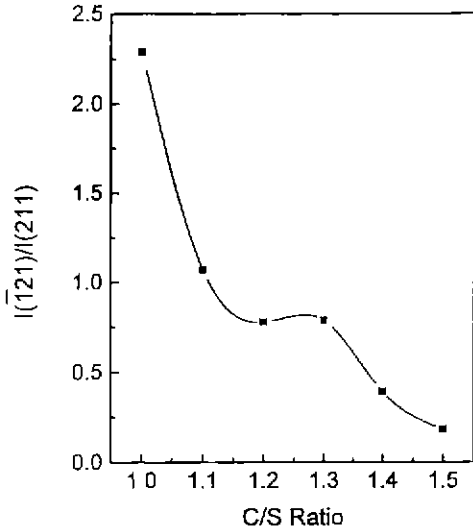


Fig. 7. X-ray intensity ratio of  $\beta$ - $C_2S$ (121) and  $C_2AS$ (211) at various C/S ratio.

CaO는 대부분 석회석 슬러지에 함유되어 있으므로 폐주물사, 석탄회 및 폐유리병을 같은 비율로 배합하고 이들의 함량에 대하여 석회석 슬러지의 양을 조절함으로써 염기도를 맞추었다. 각 염기도에 대한 혼합 폐기물의 성분은 Table 3과 같다. 염기도의 계산에는 CaO, SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량만을 사용하였다

염기도가 높아지면 석회석 슬러지의 함량이 높아져서 CaO의 함량이 많아지므로 용점이 높아질 것으로 예상된다. 혼합된 폐기물 원료의 연화점(softening point), 용융점(melting point) 및 유동점(fluid point)을 고온현미경을 사용하여 측정된 결과 염기도가 1.3을 넘으면 각 point가 급격히 높아졌다 따라서 염기도의 영향을 조사하기 위하여 염기도가 1.3 이하의 시료는 1370°C 에서 용융시킨 반면에, 염기도가 1.4 및 1.5인 시료는 1570°C 에서 용융 처리 하였다.

Fig 7에 각 염기도에 대한 XRD pattern으로부터 구한 2가지 상의 분율을 표기하였다. 염기도가 낮을수록  $\beta$ - $C_2S$  상의 분율이 높아지고 있으므로, 본 연구의 경우 시멘트 클링커에 유용한 성분을 얻기 위해서는 염기도가 낮은 조성으로 폐기물 원료를 혼합하여야 함을 알 수 있다. Table 3을 보면 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 제외한 나머지 성분의 함량은 거의 일정함을 알 수 있다 따라서 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 계의 상태를 본 실험에서 사용한 폐기물의 혼합물에 개략적으로 적용할 수 있고, C/S ratio의 변화에 대한 조성변화를 추적하면 혼합물의 조성이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 비율은 거의 일정하고 CaO와 SiO<sub>2</sub>의 비

율이 변하는 직선상에 놓이게 된다. 이 영역에서는 C/S ratio가 감소할수록  $C_2S$  상으로부터 멀어지고  $C_2AS$  상은 큰 변화가 없는 것으로 나타나는데, 이러한 실험 결과와의 불일치는 본 실험에서 사용한 폐기물의 복잡한 조성에 따른 것으로 보인다. 각종 불순물의 영향을 배제할 수 없으며, 동시에 앞서 언급한 바와 같이 용융온도의 영향도 존재하므로 염기도의 영향에 대한 더욱 자세한 연구는 이와 같은 요인을 배제시킨 실험이 필요하고 하겠다. 한편 각 염기도의 슬래그에 대하여 SEM 사진을 관찰하면 염기도가 더욱 높아짐에 따라  $\beta$ - $C_2S$  상으로 이루어진 grain이 작아져서 1.5의 염기도에서는 grain이 1.0  $\mu m$  이하로 매우 작아짐을 확인할 수 있었고, 이는 XRD 분석 결과와 일치한다.

#### 4. 결 론

석회석 슬러지, 폐주물사, 석탄회 및 폐유리병 등의 폐기물을 용융처리할 때 용융온도, 냉각조건 및 염기도의 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 용융 슬래그는  $\beta$ - $C_2S$  및  $C_2AS$ 의 2가지 상으로 구성되어 있으며,  $C_2AS$  상인 matrix에  $\beta$ - $C_2S$  상인 grain이 분산된 미세구조를 갖고 있다. 용융온도가 낮을수록 슬래그는  $\beta$ - $C_2S$  상의 함량이 높아지고, 용융슬래그의 제조에 필요한 최소한의 온도에서 용융시키는 것이  $\beta$ - $C_2S$  상의 형성에 유리하다. 고온의 용융물을 급냉시킴으로써  $\beta$ - $C_2S$  상을 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 염기도가 낮을수록  $\beta$ - $C_2S$  상의 함량이 높아졌다.

#### 참고문헌

1. 한국자원리싸이클링학회 편저 : "자원리싸이클링의 실제", (동화기술, 1994).
2. 황 연, 손용운, 정현생, 이홍기, 박현서. "폐기물의 용융 처리에 의한 시멘트 원료의 합성", 자원리싸이클링학회지, 5(1), 3-8 (1996).
3. 심재동, 반봉찬 · "금속공학에서의 슬래그", 대광문화사 (1991).
4. H.P Klug and L.E. Alexander : "X-Ray Diffraction Procedures", (John Wiley & Sons, 1974).
5. National Institute of Standards and Technology "Phase Diagrams for Ceramists", (The American Ceramic Society, 1964) Vol. 1.
6. F.P. Glasser "Phase diagrams: Materials Science and Technology", ed A.M. Alper (Academic Press, London, 1970) Vol. II.