

## 용융 고로슬래그의 보통 포틀랜드 시멘트 원료로의 적용 특성

김형석

한국지질자원연구원

철강슬래그는 철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하여 고로에서 선철을 만들어 내는 제선 공정에서 발생하는 고로슬래그와 전로에서 철강을 제조하는 제강공정에서 발생하는 전로슬래그 그리고 고철을 주원료로 사용하는 전기로에서 발생하는 전기로슬래그 등으로 나눌 수 있다.

철강산업에서는 원료가격과 함께 에너지 가격이 생산원가에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 세계 각국에서는 철강산업에서의 합리적인 에너지 관리를 위해 노력하고 있으며, 그 하나로 각종 공정에서 배출되는 에너지를 회수하기 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.

철강산업에서 배출되는 에너지라 함은 각 단위 공정의 생산물이나 부산물이 가지는 열에너지나 압력에너지 중 공정에 재이용되지 않는 에너지를 말하고, 현재 많은 부분의 배출 에너지는 그 회수기술이 개발되어 경제적인 효과를 상당히 나타내고 있으나, 아직도 회수하여 재활용할 수 있는 많은 에너지가 버려지고 있다. 에너지 회수기술 분야에서 아직 실용화 단계까지 개발되지 않은 대표적인 분야가 고로(blast furnace)나 전로(converter) 슬래그의 현열을 회수하는 기술이다.

고로에서 1ton의 용선(pig iron)을 생산할 때 약 300kg의 고로슬래그가 발생한다. 이의 배출은

도는 약 1,400℃ 이상으로 고로슬래그 1kg 당 약 374(고체)~455(액체)kcal의 막대한 현열을 가지고 있다. 그러나 현재는 용융된 고로슬래그를 서냉시켜 결정화된 고로서냉슬래그를 파쇄하여 골재 등으로 활용하거나, 또는 물로 급냉시켜 유리질화 된 고로수쇄슬래그는 분쇄하여 시멘트 혼화재, 시멘트 원료, 비료 등으로 재활용되고 있어 용융 고로슬래그에 함유된 막대한 양의 현열(약 374kcal/kg)이 버려지고 있는 실정이다.

고로수쇄슬래그는 반응성이 좋은 비정질 형태로 존재하며, 전로슬래그의 경우 Metal Fe, FeO, 2CaO · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO · SiO<sub>2</sub>, 2CaO · SiO<sub>2</sub>, CaO 등의 광물상으로 전기로슬래그는 Metal Fe, Wustite (FeO), Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), Gehlenite (2CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub>), Monticellite (CaO · MgO · SiO<sub>2</sub>) 등으로 존재하며 그 화학성분은 표 1과 같다.

한편 시멘트는 인간의 삶과 가장 밀접한 재료 중 하나로서 가장 많이 사용되는 시멘트 종류인 보통 포틀랜드 시멘트 (OPC : Ordinary Potland Cement)의 경우 석회석, 점토, 규석, 철광석 등을 분쇄하여 혼합한 후 로터리 킬른에서 혼합 원료 광물을 1,450℃수준에서 소성하여 클링커 광물을 생성한 후 응결지연제로 석고를 첨가하고 분쇄하여 제조한다. 표 2는 포틀랜드 시멘트 클링

표 1. 철강산업 슬래그의 화학성분(wt%)

화학조성	고로슬래그	제강슬래그		
		전로슬래그	전기로슬래그	
			산화슬래그	환원슬래그
CaO	41.7	45.8	22.8	55.1
SiO <sub>2</sub>	33.8	11.0	12.1	18.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.4	1.9	6.8	16.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	17.4	29.5	0.3
MgO	7.4	6.5	4.8	7.3
SO <sub>3</sub>	0.8	0.06	0.2	0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	1.7	0.3	0.1
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0

표 2. 포틀랜드 시멘트 클링커 반응의 열균형

구분	생성반응	반응열 (kcal/kg · clinker)	
흡 열	원료의 가열	20 → 450℃	170
	점토의 탈수	450℃	40
	원료의 가열	450 → 900℃	195
	CaCO <sub>3</sub> 열분해	900℃	475
	분해생성물의 가열	900 → 1,400℃	125
	용해열		25
	계		1,030
발 열	탈수점토의 결정화열		10
	시멘트 화합물의 생성열		100
	클링커의 냉각	1,400 → 20℃	360
	CO <sub>2</sub> 가스의 냉각	900 → 20℃	120
	수증기의 냉각	450 → 20℃	20
	계		610
차 이			420

키 1kg 제조에 필요한 생산과정에서의 이론적 열량을 나타낸 것으로 포틀랜드 시멘트 클링커 1kg을 제조하기 위해서 필요한 이론적 열량은 약 420 kcal/kg · clinker 이다. 그러나 실제 포틀랜드 시멘트 제조에서는 배출 가스를 통한 열손실, 노체로부터의 방열도 있어 이론치보다 큰 값을 갖는다. 실제로 소비되는 열원단위(THC, Total Heat Consumption)는 과거의 습식 로타리 킬른에서는 약 1,300~1,400kcal/kg · clinker였으나 현재의 NSP 킬른에서는 배출되는 열을 원료의 건조 및 석회석의 하소에 이용하여 열원단위를 약 700kcal/

kg · clinker 정도까지 낮추고 있으며 이러한 열원단위는 시멘트 제조비용의 약 70% 이상을 차지한다. 또한 포틀랜드 시멘트 제조용 원료로 사용되는 대량의 석회석, 점토, 규석, 철광석 등은 자연에서 얻을 수밖에 없기 때문에 천연자원의 소모 및 환경파괴가 수반되고 원료의 파 · 분쇄, 건조, 혼합, 소성에 따른 다량의 에너지가 소모되며 석회석의 하소 및 에너지 사용에 따른 다량의 온실가스(CO<sub>2</sub>(g))가 필연적으로 발생될 수밖에 없는 구조를 가지고 있다.

따라서 고로에서 용선 제조 시 발생된 1,400℃ 이상의 용융 고로슬래그에 시멘트 합성에 부족한 Ca 성분(석회질 원료) 공급물질로 석회석, 폐석회, 시멘트킬른더스트 등과 Fe 성분(철질원료) 공급물질로 제강슬래그 및 철광석등을 추가로 첨가한 후 시멘트 클링커 광물 합성을 위한 에너지는 고로슬래그의 현열과 부족한 에너지는 외부에서 추가로 공급하여 1,450℃ 온도를 유지시키면 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 등의 포틀랜드 시멘트 클링커 주요 광물의 합성할 수 있다. 또한 클링커를 냉각할 때 회수 되는 현열은 철광석의 건조 등의 철강공정에 재활용하는 것이 가능하고 냉각된 클링커에 1종 이상의 석고(CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)를 첨가한 후 분쇄하여 보통 포틀랜드 시멘트를 제조하는 것이 가능하다.

### ● 시멘트 클링커의 합성

포틀랜드시멘트 클링커를 합성하기 위해서는 포틀랜드 시멘트 클링커의 주요 원료 성분(CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 고온에서 반응하여 일정한 함량의 포틀랜드 시멘트 구성광물(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)이 생성되도록 원료의 종류 및 품위에 따라

Modulus (LSF, SM, IM) 값을 변화시켜 배합한다. LSF (Lime Saturation Factor, 석회포화도)는 CaO 성분과 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분과의 반응성을 나타내며, SM (Silica Modulus, 규산율)은 SiO<sub>2</sub> 성분과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분과의 반응성을, 그리고 IM (Iron Modulus, 철율)은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분과 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분의 비로서 용액상의 특성을 나타내는 기준이다.

그림 1은 표 1과 같은 화학조성을 갖는 고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회포화도(LSF) 변화에 따른 고로슬래그와 석회석의 원료 배합비를 나타낸 그래프이다. 그림 2는 고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회포화도(LSF)의 변화에 따른 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S 광물 함량 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 1 및 그림 2에서 나타낸 바와 같이 석회포화도 값이 78~100범위에서 고로슬래그는 47~35%, 석회석은 53~65% 범위에서 원료 배합이 가능하고 이 범위 내에서 포틀랜드 시멘트 클링커의 주요 구성광물인 칼슘실리케이트 광물(C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S) 함량을 조절 할 수 있으며 바람직한 석회포화도의 값은 84~96 수준이다.

석회포화도의 값이 84 미만의 경우는 C<sub>3</sub>S 함량이 22% 수준 이하로 적어지고 C<sub>2</sub>S 함량이 49% 수준으로 많아져 초기 강도발현이 지연될 수 있으며, 반대로 석회포화도의 값이 96을 초과하게 되

면 C<sub>3</sub>S 함량이 55% 이상으로 증가되어 포틀랜드 시멘트 클링커의 소성성 저하를 초래한다. 그러나 석회포화도의 값이 낮아지면 칼슘 실리케이트 광물(C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S) 중 C<sub>3</sub>S와 C<sub>2</sub>S 광물 함량의 비율이 감소되어 결국 C<sub>2</sub>S 광물 함량이 높은 포틀랜드 시멘트 Type II (2종, 중용열 시멘트) 및 Type IV(4종, 저열 시멘트)의 제조가 가능하며, 포틀랜드 시멘트 클링커의 생성영역을 1,250℃ 정도까지 낮출 수 있다는 장점도 있다. 또한, 석회포화도의 값이 높아지면 칼슘 실리케이트 광물(C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S) 중 C<sub>3</sub>S와 C<sub>2</sub>S 광물 함량의 비율이 증대되어 결국 C<sub>3</sub>S 광물 함량이 높은 포틀랜드 시멘트 Type III(3종, 조강 시멘트)의 영역으로서 이 때 포틀랜드 시멘트 클링커의 소성이 어려워지나 형석(CaF<sub>2</sub>)과 같은 소성성 향상을 돕는 mineralizer (광화제)를 0.1~2.0% 정도 첨가 사용함으로써 초기강도가 높은 포틀랜드 시멘트 Type III(3종, 조강 시멘트)의 제조도 가능하다. 이 외에도 고로슬래그에 Ca 및 Fe 성분비를 조절함으로써 여러 가지 포틀랜드 시멘트 클링커의 구성 광물 함량을 변화시킨 특수시멘트의 조성 영역까지 확대할 수 있다.

한편, 고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서는 고로슬래그의 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 성분이 높아 포틀랜드 시멘트 클링커의 C<sub>3</sub>A 함량이 높아지기 때

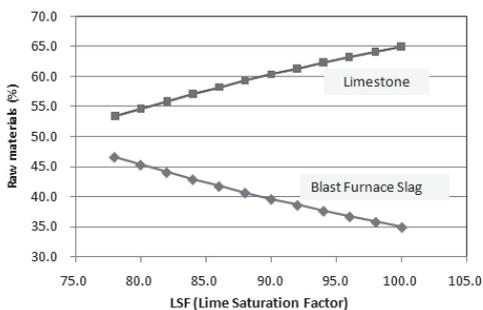


그림 1. 석회포화도(LSF)에 따른 고로슬래그와 석회석의 배합비

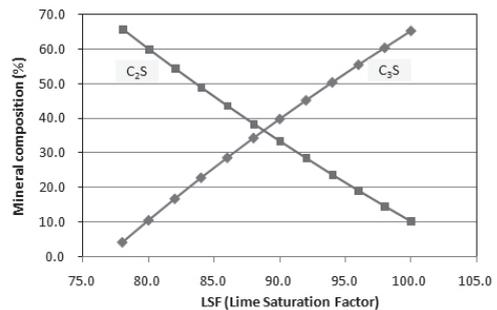


그림 2. 석회포화도(LSF)에 따른 C<sub>2</sub>S 및 C<sub>3</sub>S 광물함량 변화

문에 일부 간극질(C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF) 함량을 조절하기 위해서는 철질 원료를 사용할 필요성이 있다.

그림 3은 고로슬래그, 석회석 및 철질 원료로서 제강슬래그를 사용한 3성분계 원료에서 석회포화도의 값이 94인 경우 제강슬래그의 함량에 따른 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF 광물 함량 변화를 나타낸 그래프이다.

그림에서와 같이 제강슬래그의 함량의 범위는 포틀랜드 시멘트 클링커의 용액상에서의 클링커링 반응을 원활하게하기 위해서는 5~20% 수준이 바람직하다. 제강슬래그의 함량이 5% 미만의 경우는 C<sub>3</sub>A 함량이 16% 이상으로 증가되어 용액의 점성이 증가되며, 반대로 20%를 초과하면 C<sub>4</sub>AF 함량이 26% 이상, C<sub>3</sub>A 함량이 5% 이하로 되어 용액의 함량 증가 및 포틀랜드 시멘트의 초기강도 발현이 지연된다

고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회포화도 값이 88.0이 되게 원료배합설계한 후 먼저 고로슬래그를 탄소 용기에 투입하였다.

그리고 용융로에서 1,300°C에서 1,450°C까지 50°C 간격으로 변화시켜 용융된 고로슬래그로 만든 후 용융된 고로슬래그에 석회석을 투입하여 5~60분 동안 용융온도를 유지하면서 반응시킨 후 대기 중에서 급냉하여 제조한 시멘트 클링커의

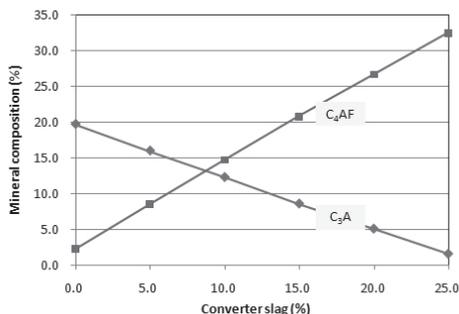


그림 3. 제강슬래그 함량에 따른 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF 광물 함량 변화

XRD 분석결과를 그림 4에 나타내었다.

1,300°C에서도 주요 포틀랜드 시멘트 클링커의 주요 광물인 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 등이 생성되었지만 소성온도가 낮기 때문에 미반응 CaO (Free-CaO)가 남아있는 것으로 나타났다. 그러나 용액의 온도가 1,400°C 이상으로 높아짐에 따라 미반응 CaO도 C<sub>2</sub>S와 반응하여 C<sub>3</sub>S를 형성하므로 전형적인 포틀랜드 시멘트 클링커의 주요 광물인 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 등으로만 존재하는 것으로 나타났다.

그림 5는 그림 4와 같은 원료배합 및 반응조건의 1,450°C의 반응로에서 합성한 포틀랜드 시멘트 클링커의 광물 함량을 Q-XRD로 정량 분석한 결과이다.

포틀랜드 시멘트 클링커의 구성 광물을 정량 분석한 결과, C<sub>3</sub>S: 38.5%, C<sub>2</sub>S: 40.0%, C<sub>3</sub>A: 14.6%, C<sub>4</sub>AF: 0.3%, MgO(Periclase): 2.8% 등으로 구성된 것으로 계산되어, C<sub>3</sub>S와 C<sub>2</sub>S의 성분비를 보면 4종 시멘트인 저열시멘트와 유사한 포틀랜드 시멘트 클링커 구성비를 보였다. 그러나 C<sub>3</sub>A의 함량이 다소 많고 C<sub>4</sub>AF의 함량은 매우 적은 것으로 나타났다.

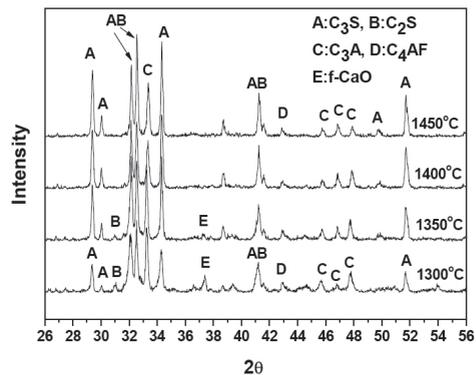


그림 4. 석회포화도 값 88.0으로 제조한 시멘트 클링커의 XRD 분석결과

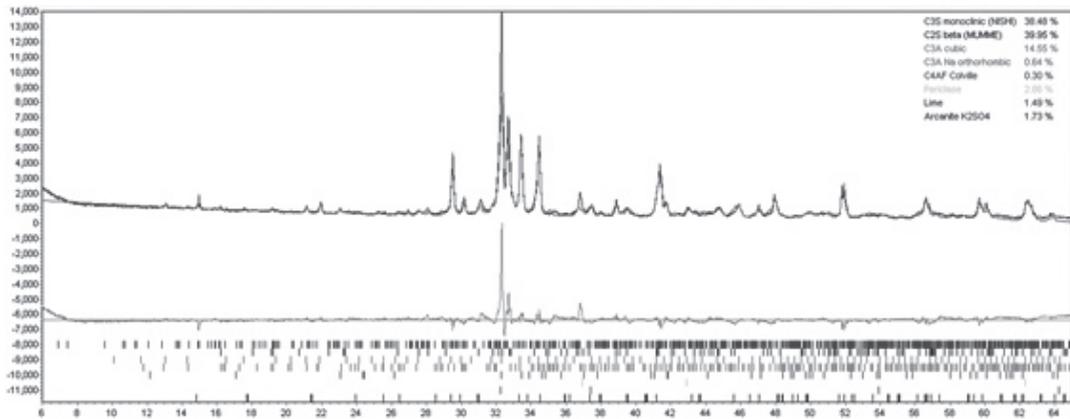


그림 5. 석회포화도 값 88.0 소성온도 1,450°C로 제조한 시멘트 클링커의 Q-XRD 분석결과

용융 고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회포화도의 값이 각각 92.0 및 94.0 및 96.0이 되도록 배합설계한 후 먼저 고로슬래그를 탄소 용기에 투입하고, 용융로에서 1,450°C에서 용융된 고로슬래그로 만든 후 용융된 고로슬래그에 석회석을 투입하여 5~60분 동안 용융온도를 유지하면서 반응시킨 후 대기 중에서 급냉하여 제조한 포틀랜드 시멘트 클링커의 XRD 분석결과는 그림 6과 같다.

포틀랜드 시멘트 클링커 주요 구성 광물(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)이 잘 발달되어 있는 것을 알 수 있으며, 이 때 생성된 칼슘 실리케이트 광물(C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S) 함량이 73% 수준, 간극질 광물(C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF) 함량이 22% 수준을 나타내었다.

용융 고로슬래그, 석회석 및 제강슬래그의 3성분계 원료에서 제강슬래그의 배합량은 각각 5.0% 및 15.0%로 고정하고 석회포화도의 값이 94.0이 되도록 배합설계한 후 먼저 고로슬래그를 탄소 용기에 투입하고 용융로에서 1,450°C에서 용융된 고로슬래그로 만든 후 용융된 고로슬래그에 석회석 및 제강슬래그를 투입하여 5~60분 동안 용융온도를 유지하면서 반응시킨 후 대기 중에서 급냉하였다.

그림 7 및 그림 8은 상기 반응에 의해 제강슬래

그의 배합량이 각각 5.0% 및 15.0% 인 경우의 원료배합 및 용융조건에서 생성된 포틀랜드 시멘트 클링커의 구성 광물 함량을 Q-XRD로 정량 분석한 결과이다.

포틀랜드 시멘트 클링커의 구성 광물을 Q-XRD로 정량 분석한 결과 제강슬래그 5.0% 배합한 경우는 C<sub>3</sub>S: 55.0%, C<sub>2</sub>S: 20.8%, C<sub>3</sub>A: 7.3%, C<sub>4</sub>AF: 8.7%로 구성되어 있었다. 그리고 제강슬래그 15.0% 배합한 경우는 C<sub>3</sub>S: 53.5%, C<sub>2</sub>S: 24.9%, C<sub>3</sub>A: 1.4%, C<sub>4</sub>AF: 12.5%로 구성되어 있어 전형적인 보통 포틀랜드 시멘트 클링커 화합물의 구성비를 보였다.

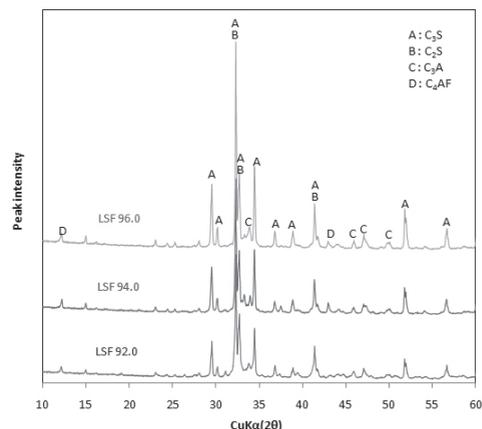


그림 6. 석회포화도값에 따른 클링커의 XRD 분석결과

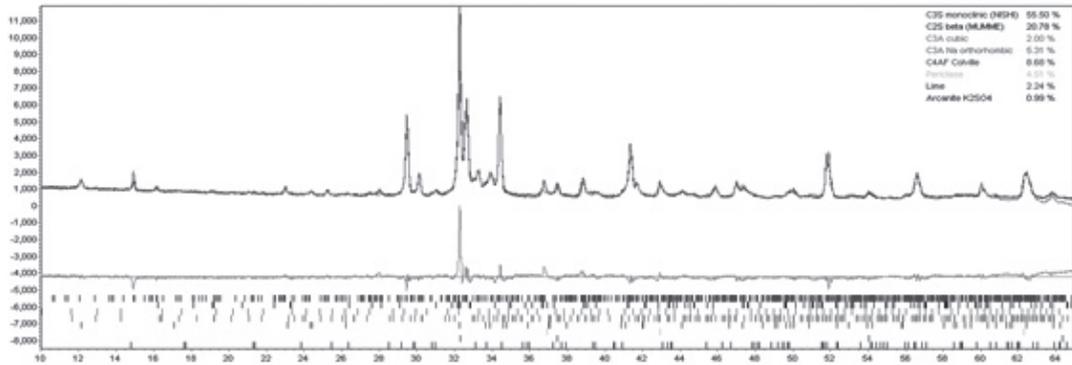


그림 7. 전기로 슬래그를 5% 추가하여 제조한 클링커의 Q-XRD 분석결과

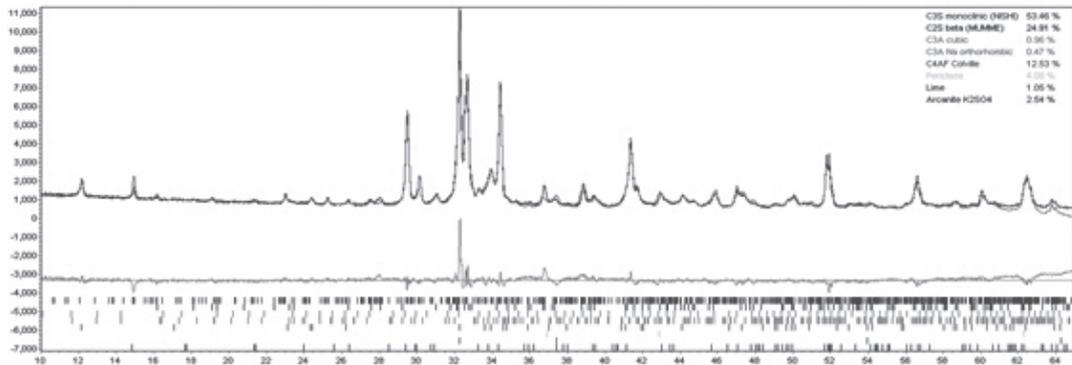


그림 8. 전기로 슬래그를 15% 추가하여 제조한 클링커의 Q-XRD 분석결과

### ● 철강슬래그를 사용한 시멘트 클링커 제조 방법의 제안

용융슬래그의 성분 및 현열을 활용하여 그림 9와 같은 포틀랜드시멘트 제조공정을 제안할 수 있다.

먼저 그림 9와 같이 고로에서 발생된 용융 고로 슬래그에 Ca 및 Fe 성분이 포함된 원료 또는 산업 부산물을 공급물질로 하여 시멘트 클링커 화합물이 생성되는 성분비를 갖도록 혼합한 다음, 자체발열 또는 외부 공급 열에너지를 클링커 반응에 이용할 수 있는 반응기에서 포틀랜드 시멘트 클링커를 제조하고, 이 때 발생하는 현열을 회수하여 제철공

정에 활용하게 되는데 클링커회득 단계에서 용융 고로슬래그와 Ca 및 Fe 공급물질의 배합물을 반응기 내에서 반응시킬 때 배출되는 고온 가스는 자체 발열 가능한 가스 가열기로 공급되고 그 가스 가열기에 의해 더 가열된 고온 가스가 Ca 및 Fe의 공급물질 예열을 위해 사용되거나 반응기의 자체발열 부하 감소를 위해 사용되며 고온 가스는 축열부로 공급되어 이 축열부에 저장된 열에너지가 철강제조공정에 재사용된다. 또한 현열회수부를 통해 회수된 현열은 축열부로 공급되어 이 축열부에 저장된 열에너지도 철강제조 공정에 사용된다. 다시 말해서 고로에서 발생하는 용융 고로슬래그를 Ca 및

Fe 성분이 포함된 원료 또는 산업부산물과 함께 자체 발열가능한 반응기에 투입하고, 반응기 내 배합물의 균질한 혼합 및 이로부터 발생하는 열을 재활용하기 위하여 반응기에서 발생하는 고온의 가스를 포집하여 다시 반응기로 유입시켜 피반응물 즉, 반응기 내 배합물을 버블링(bubbling)하여 유동시키며, 이 때 가스 가열기를 이용하여 포집 가스를 추가적으로 가열함으로써 반응기 내로 투입되는 공기의 온도를 보다 더 고온으로 유지함으로써 반응기의 자체발열부하를 감소시킬 수도 있다. 반응기의 발열부하를 경감하기 위한 또 다른 방법으로 가스 가열기로부터 추가되는 고온의 가스에 Ca, Fe 함유 원료를 접촉시켜 원료를 예열한 후 예열된 원료와 가스를 반응기에 동시 혼합하여 투입하는 방식도 가능하다. 또한 최초 공정 개시 단계에서는 외부공기를 가스 가열기로 공급하여 가열한 후 반응기로 투입하고 반응기에서 반응이 완료된 포틀랜드 시멘트 클링커는 현열 회수부를 통과하여 냉각되고 현열 회수부를 통하여 회수된 고온의 공기는 축열부로 공급되어 축열되었다가 철강공정에 재활

용되며, 냉각된 포틀랜드 시멘트 클링커를 과쇄하고 이에 석고를 첨가하여 분쇄함으로써 최종적으로 포틀랜드 시멘트가 된다. 이러한 포틀랜드 시멘트 제조공정에서 Steady State로 공정이 운전될 때 반응기로부터 발생하는 고온의 가스 중 물질의 유동을 위하여 가스 가열기를 거쳐 다시 반응기로 투입되고 남은 과잉의 가스(석회질 원료의 탈탄산 반응 등에 의해 획득되는 잉여 가스)는 축열부로 이송되어 철강공정에 재활용할 수 있다.

### ● 결 언

고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회화도 값이 88이 되게 원료 배합을 설계한 경우 용융된 고로슬래그에 석회석을 투입하여 5~60분 동안 용융온도(1,300~ 1,450℃까지 50℃간격으로 변화시키며)를 유지하면서 반응시킨 후 대기중에서 급냉하였을 때 1,300℃에서도 포틀랜드 시멘트 주요 광물인 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 등이 생성되었지만, 소성온도가 낮기 때문에 미반응 CaO(Free-CaO)가 남아있는 것으로 나타났으며 온도가 1,400℃ 이상으로 높아짐에 따라 미반응 CaO가 C<sub>2</sub>S와 반응하여 C<sub>3</sub>S를 형성하므로 전형적인 포틀랜드 시멘트 주요광물로만 존재하는 것으로 나타났으며, 1,450℃에서 합성한 포틀랜드 시멘트 클링커 광물 함량을 Q-XRD 분석한 결과 C<sub>3</sub>S: 38.5%, C<sub>2</sub>S: 40.0%, C<sub>3</sub>A: 14.6%, C<sub>4</sub>AF: 0.3%, MgO(Periclase): 2.8% 등으로 구성된 것으로 계산되어, C<sub>3</sub>S와 C<sub>2</sub>S의 성분비를 보면 4종 시멘트인 저열시멘트와 유사한 포틀랜드 시멘트 클링커 구성비를 보였다. 그러나 C<sub>3</sub>A의 함량이 다소 많고, C<sub>4</sub>AF의 함량은 매우 적은 것으로 나타났다.

고로슬래그와 석회석의 2성분계 원료에서 석회

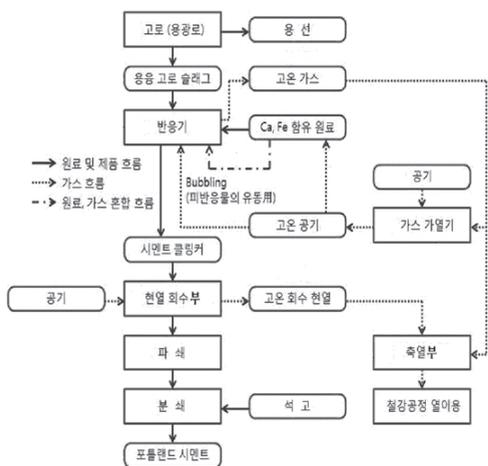


그림 9. 용융 고로슬래그와 그 현열을 이용한 포틀랜드 시멘트 제조공정

포화도의 값이 각각 92.0 및 94.0 및 96.0이 되도록 배합설계한 후 먼저 고로슬래그를 탄소 용기에 투입하고, 용융로에서 1,450℃에서 용융된 고로슬래그로 만든 후 용융된 고로슬래그에 석회석을 투입하여 5~60분 동안 용융온도를 유지하면서 반응시킨 후 대기 중에서 급냉하여 시멘트 클링커를 제조한 결과, 포틀랜드 시멘트 클링커 주요 구성 광물(C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)이 잘 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 이 때 생성된 칼슘 실리케이트 광물(C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S) 함량이 73% 수준, 간극질 광물(C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF) 함량이 22% 수준을 나타내었다. 또한 고로슬래그, 석회석 및 제강슬래그의 3성분계 원료에서 제강슬래그의 배합량은 각각 5.0% 및 15.0%로 고정하고, 석회포화도의 값이 94.0이 되도록 배합설계한 후 먼저 고로슬래그를 탄소 용기에 투입하고, 용융로에서 1,450℃에서 용융된 고로슬래그로 만든 후 용융된 고로슬래그에 석회석 및 제강슬래그를 투입하여 5~60분 동안 용융온도를 유지하면서 반응시킨 후 대기 중에서 급냉하여 시멘트 클링커를 제조하여 시멘트 클링커의 구성 광물 함량을 Q-XRD로 정량 분석한 결과, 제강슬래그 5.0% 배합한 경우는 C<sub>3</sub>S: 55.0%, C<sub>2</sub>S: 20.8%, C<sub>3</sub>A: 7.3%, C<sub>4</sub>AF: 8.7%로 구성되어 있으며, 제강슬래그 15.0% 배합한 경우는 C<sub>3</sub>S: 53.5%, C<sub>2</sub>S: 24.9%, C<sub>3</sub>A: 1.4%, C<sub>4</sub>AF: 12.5%로 구성되어 있어 전형적인 보통 포틀랜드 시멘트 클링커 화합물의 구성비를 보였다.

이러한 결과는 슬래그를 냉각처리(급냉 또는 서냉)하여 골재 및 시멘트 혼화제로 재활용하는 기존 방식보다 슬래그의 현열을 활용한다는 점에서 에너지적인 측면에서 더 뛰어난 재활용 방법이라고 할 수 있지만 현열을 이용하기 위해서는 철강 산업 내에서 시멘트를 제조해야 한다는 점이 가장 큰 해

결과제로 남아있다. 하지만 이러한 문제점을 해결할 수 있다면 막대한 에너지를 재활용함으로써 작게는 기업의 생산원가를 절감할 수 있으며, 크게는 현재 전 세계적으로 이슈인 지구온난화의 주범으로 꼽히고 있는 철강 및 시멘트 산업이 이산화탄소 배출을 최소화 할 수 있게 됨으로써 친환경적인 산업으로 발돋움 할 수 있는 디딤돌이 될 수 있을 것이라 생각된다.

## 참고문헌

- 윤재환 포틀랜드시멘트 및 콘크리트 세진출판사 22~26 (1994)
- 장복기 시멘트재료화학 전남대학교출판부 133~134, 169~176, 256~273 (1998)
- Bensted, J and Varma, S Prakash Cement Technology 4 (3) 112~116 (1973)