

# 전기로 산화슬래그의 특성 및 국내외 연구동향

## Characteristics of Electric Arc Furnace Oxidized Slag and Domestic and International Research Trend



민태범 Tae-Beom Min  
성신양회(주) 기술연구소 연구원  
E-mail : tbmin@sscem.com



김하영 Ha-Yeong Kim  
성신양회(주) 기술연구소 연구원  
E-mail : B10087@sscem.com



임희섭 Hee-Seob Lim  
한남대학교 건설시스템공학과  
연구교수  
E-mail : heesubjm@naver.com

### 1. 서론

제철산업은 대량의 원료와 에너지를 소비하며 철강생산 및 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 다량 발생시키고 있다. 양적으로는 주 제품인 철강의 약 50%에 이르고 있으며 일관제 철공정을 갖춘 제철소의 경우 원료, 제선, 제강, 압연 및 스테인레스 등 복잡한 연결 생산 체제를 거치면서 수많은 종류의 부산물 및 폐기물을 다량으로 발생시키고 있다. 이러한 폐기물은 철, 탄소 및 석회석 등의 재활용이 가능한 유효한 자원을 다량 함유하고 있어 이들을 그대로 매립해 버리는 것은 자원 및 에너지의 낭비일 수도 있다. 또한 지구환경이 큰 이슈가 되고 있는 사회적 시선에서 생각할 때 각종 제철 폐기물의 발생량을 가능한 줄이고, 발생된 것은 자원화를 도모함으로써 폐기물 처리비용을 경감하는 동시에 환경공해를 방지해야 한다. 특히 건설사업에 투입되는 콘크리트 골재의 요구량은 매우 막대하며, 따라서 고갈되어 가는 천연자원의 보호 측면에서 제철 부산물과 슬래그는 천연자원의 대체재로 최대한 활용되어야 한다. 제철산업의 주된 부, 폐산물은 철강슬래그로서, 철강슬래그는 고로슬래그와 제강슬래그(전로슬래그, 전기로슬래그)로 <그림 1>과 같이 구분된다.

고로슬래그는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 생성물을 말하는 것으로 주원료(철광석)와 부원료(코크스, 석회석)의 회분에 존재하는  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등이 고온에서 석회와 반응하여 생성되며 구성 원소는 일반 암석과 같고 성분은 시멘트와 유사하다. 발생량은 1톤 조강 생산시 약 300kg 가량 발생하며 냉각 방식에 따라 급냉슬래그(수재슬래그)와 서냉슬래그(괴재슬래그) 구분된다. 이중 급냉 슬래그는 시멘트 및 콘크리트 제조시 부원료로 100% 재활용 되는 실정이다.<sup>1)</sup>

그러나 철강슬래그 중 제강슬래그는 free CaO에 의한 팽창 붕괴성으로 인하여 재활용에 많은 제약 받고 있다. 제강슬래그는 고로슬래그와 달리 Free CaO를 적게는 0.1% 많게는 20%까지 다양하게 함유하고 있다. Free CaO의 함량이 1% 이상이 되면 Free CaO는 슬래그 내부로 침투되는 물과 반응하여  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성과 더불어 체적 팽창을 유발하여 붕괴를 초래할 수 있기 때문에 사용이 한정 되어왔다. 그러나 최근 들어 제강슬래그의 재활용 사용량

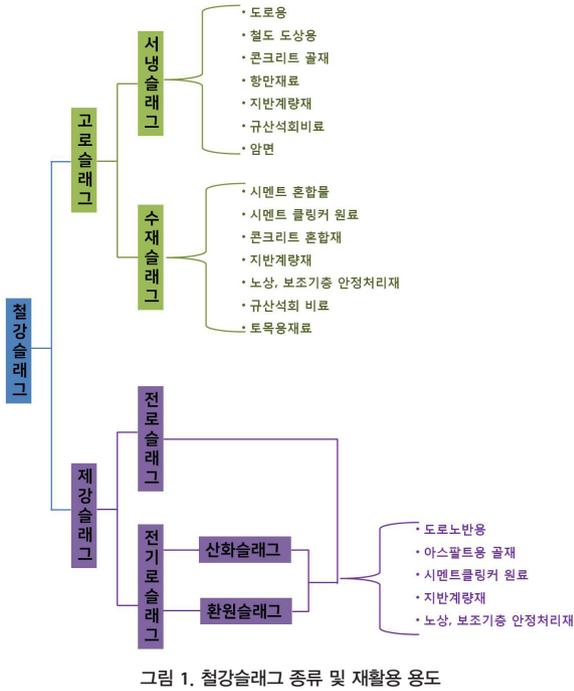


그림 1. 철강슬래그 종류 및 재활용 용도

을 높이기 위해서 용융된 제강슬래그중 전기로슬래그를 대상으로 서냉시키지 않고 급냉시켜 제강슬래그 중의 Free CaO를 화합물 상태로 존재시킴으로써 Free CaO의 생성량을 감소시키는 방법이 활성화 되면서 콘크리트 골재대체제로서 연구가 이루어지고 있으며 최근 국내외로 재활용이 증가되고 있는 추세이다.<sup>2)</sup>

따라서 본고에서는 제강슬래그 부산물중 재활용이 되고 있는 전기로산화슬래그에 대하여 특성 및 재활용 현황에 대해 알아보려고 한다.

## 2. 전기로산화슬래그의 발생현황

<그림 2>는 제강슬래그의 발생 분포 현황을 나타낸 것이다. 국내의 조강 생산능력은 꾸준히 증가하여 2015년 기준 4,343만 톤의 철강슬래그가 발생되고 있으며 전기로 슬래그는 전체 슬래그 발생량의 약 10% 차지하고 있다. 국내 전기로 슬래그 발생량 현황 및 지역을 살펴보면 [표 1]에 나타낸 바

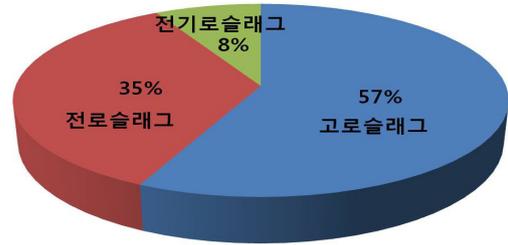


그림 2. 슬래그 발생 분포현황

[표 1] 국내 전기로 산화슬래그 발생현황

회사	공장	발생량
현대제철	인천	845,136
	당진	448,760
	포항	339,588
포스코	포항	212,351
	광양	464,962
동국제강	인천	339,687
	포항	322,427
한국철강	창원	216,000
세아베스틸	군산	165,584
창원특수강	창원	140,096
YK스틸	부산	104,900
한국제강	함안	86,573
환영철강	전주	78,000
대한제강	부산	67,360
합계		4,204,678

와 같이 2015년 420만 톤 발생하고 있으며 현대제철, 포스코에서 발생하는 슬래그가 대부분 차지하고 있다.<sup>3)</sup>

## 3. 전기로 산화슬래그의 특성 및 규정

### 3.1 전기로 산화슬래그 특성

제강슬래그는 철광석 코크스, 석회석을 원료로 하여 고로

에서 선철을 만들어내는 소결 및 제선 공정에서 발생하는 고로슬래그와 전로에서 철강을 제조하는 제강공정에서 발생하는 전로슬래그, 그리고 고철을 주원료로 사용하는 전기로에서 발생하는 전기로슬래그의 세 가지로 나눌 수 있다. 고로슬래그의 경우 다양한 용도로 활용되고 있으며 시멘트 원료 및 콘크리트 원료 등으로 이용이 확대되어 이미 고부가가치로서 재활용 되고 있다.

그러나 전기로슬래그는 <그림 3>과 같은 Free CaO, MgO에 의해 팽창붕괴의 반응성을 가지고 있기 때문에 콘크리트용 골재로 사용은 못할 뿐만 아니라 성토한 경우에도 성토지반의 불균일한 팽창에 의해 안정한 지반을 형성하지 못하는 문제점이 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 Aging 처리를 통해 골재의 자원화가 이루어지고 있다. 그러나 Aging 처리시 장기간의 야적 및 공정의 진행에 따른 공간적, 경제적 추가 비용이 발생하는 등 전기로슬래그의 콘크리트용 골재로서 활용하기 위해서는 추가적인 공정 및 비용이 발생함으로 경제성 측면에서 문제점을 가지고 있다.<sup>4)</sup>

이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 제강회사들은 전기로 제강법에서 <그림 4>와 같이 생산성과 용강 품질향상 목적으로 전기로의 정련공정에 있어서 산화 및 환원 공정을 분화시킴으로 인해 전기로 슬래그중 환원슬래그가 혼입되지 않은 안정화된 전기로산화슬래그의 분급이 가능하게 되었다. 분급

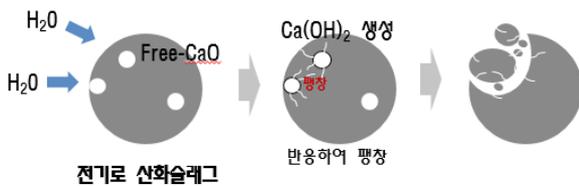


그림 3. 전기로 산화슬래그 팽창 Mechanism

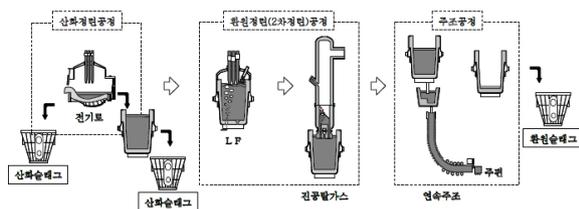


그림 4. 전기로 제강공정에서의 산화슬래그·환원슬래그 분급 공정

공정의 발전을 토대로 전기로슬래그 활용을 위한 가장 중요한 문제점인 Free CaO, MgO에 의한 팽창 반응성의 억제화가 어느 정도 가능하게 되었으며 전기로산화슬래그 골재화를 통한 콘크리트용 골재로의 활용기술에 대한 연구가 전기로 제강업체를 중심으로 진행되고 있으며 현재는 아스팔트 골재용, 성토용으로 재활용 되고 있다.

### 3.2 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트 특성<sup>5)6)</sup>

#### (1) 슬럼프 및 공기량의 변화

전기로 산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트에서 잔골재의 대체율이 증가할수록 슬럼프는 증가하는 경향을 나타내며 슬럼프의 증가는 전기로 산화슬래그 잔골재의 흡수율은 낮고 밀도는 높아서 슬럼프 시험시 골재 자중에 의한 슬럼프형상의 붕괴 및 골재에 의한 콘크리트 배합수의 흡착이 세척사에 비해 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

공기량 실험에 있어서는 전기로산화슬래그 잔골재 대체율이 증가할수록 공기량은 감소하는 경향이 나타난다. 이는 전기로 산화슬래그 잔골재의 제조공정이 부순모래의 제조공정과 유사한 파쇄·분쇄 및 분급 공정에 의해 제조되기 때문에 부순모래와 유사한 특성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>7)</sup>

굵은골재 대체율별 슬럼프의 변화에 있어서는 굵은골재 대체율이 증가할수록 슬럼프는 다소 증가하는 경향이 있으며 공기량 발현성능에 있어서는, 골재 대체율이 증가할수록 공기량도 증가한다. 공기량의 증가는 골재의 입형이 거칠고 다공성의 입형특성에 따라 공기량이 증가하는 현상을 나타낸다. 대체적으로 전기로 산화슬래그의 대체율이 증가할수록 슬럼프 및 공기량 저하는 증가하는 경향을 나타내고 있다.

#### (2) 블리딩 및 응결 특성

전기로 산화슬래그 골재를 대체한 경우가 기준배합에 비해 높은 블리딩률을 나타내고 있으며, 특히 잔골재를 대체한 경우가 굵은골재를 대체한 경우 보다 블리딩률이 다소 높은 것

으로 보고되고 있다. 이는 전기로 산화슬래그 골재 밀도에 의한 자중압밀효과로 시료 내부의 잉여수가 부유하게 되어 블리딩 발생량이 증가하며, 특히 잔골재의 경우 굵은골재에 비해 실적률이 높기 때문에 골재에 의한 압밀효과가 크므로 블리딩 발생량이 상대적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

전기로 산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 응결특성의 경우, 잔골재를 대체한 경우에 있어서는 대체율이 증가할수록 응결시간은 단축되는 것으로 나타났으며, 굵은 골재를 대체한 경우에는 대체율과 상관없이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 응결시험 진행시 시료 상면에 부유되는 블리딩수를 제거하는 과정에 있어서 전기로 산화슬래그 잔골재의 경우 굵은 골재에 비해 대체율이 증가할수록 블리딩수가 많이 상승하기 때문에 시료 내부의 잉여수는 상대적으로 감소하여 시료 내부의 실질적인 물결합재비 감소효과로 인한 수화 촉진이 진행된 것으로 보고되고 있다.

#### (3) 단위 용적 질량 변화

전기로 산화슬래그 골재의 밀도가 높기 때문에 대체율이 증가할수록 단위 용적질량도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 경화 전·후의 단위 용적 질량 변화는 크게 변화되지 않는다.

#### (4) 압축강도 발현

잔골재의 대체율에 따른 강도 증진 효과가 나타난다. 전기로 산화슬래그 잔골재는 골재의 입형이 부순모래의 특성을 갖고 있어서 골재 부착강도 증진 효과이외에도 골재 밀도가 세척사에 비해 높은데 기인하는 것으로 사료되며 굵은 골재의 대체율에 대해서는 강도 증진 효과가 소량으로 나타나지만, 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 하지만, 콘크리트 기본 강도가 높아짐에 따라 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 경우 증가증진 효과가 높아지는 경향을 보인다. 이는 압축강도 발현시 전기로 산화슬래그 굵은골재의 입형이 다공성으로 인하여 골재와 시멘트페이스트의 부착시 골재표면에 공극이 발생할 가능성이 높아 초기 재령에서 시멘트의 수화가 충분히 진행되지 못한 것으로 보고되고 있으며 고강도의 콘크리트 배합시에는 전기로 산화슬래그 굵은골재의 입형이 다공성에 의

해 골재와 페이스트의 부착면이 거칠어짐에 따라 강도 증진 효과가 나타나는 것으로 사료된다.

### 3.3 전기로 슬래그 규정

#### (1) KS F 4571 [콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재]

2007년도에 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재로 KS 규격으로 제정되었으며, 2012년도 굵은 골재에 대한 규정이 추가 되면서 현재의 KS규격이 만들어졌다. 하지만, 국내에서는 아직 활용성에 문제가 있다고 판정하고 있어서, 사용성은 전무한 실정이다. KS규격이 제정 및 개정이 되었음에도 신뢰성에 문제가 있다고 판정하고 있으며, 지역적으로 생산되는 곳이 한정되어 있으며, 높은 비중으로 인한 운송비의 문제가 있는 실정이다. [표 2]와 같이 현재 KS규격 내에는 품질관리 기준으로서 산화칼슘 및 산화마그네슘, 전철, 염기도 이상 4 가지 항목에 대해서 화학 성분을 규정하고 있으며, 특히 산화칼슘(CaO)에 대한 규정은 최대 40 % 이하로 관리 규정되어 있다. 하지만, KS F 4571에서는 free-CaO 함유량이 미소량이고, 실험 방법이 복잡하다는 이유로 한계치를 규정하고 있지 않다.

#### (2) JIS A 5011-4 [콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재]<sup>8)</sup>

일본에는 전기로 공장이 약 70개로 전기로 산화슬래그의 물리적, 화학적 성질 차이가 크지 않음에 따라 JIS A 5011-4에 대한 규정을 제정하였다. JIS A 5011-4 해설서에는 전기로 산화슬래그 골재가 칼슘 실리케이트상의 안정적인 미네랄 성분으로 이루어져 있으며, 실리카 함량이 적고, 팽창 붕괴를

[표 2] 전기로산화슬래그 품질기준 (KS F 2527)

항목		전기로 산화슬래그	
		N	H
화학	산화칼슘(CaO) %	40.0 이하	
	산화마그네슘(MgO) %	10.0 이하	
	전철(FeO) %	50.0 이하	
	염기도(CaO/SiO <sub>2</sub> )	2.0 이하	

일으키는 Free CaO, MgO가 적어 콘크리트에 유해하지 않아 팽창 균열이 발생하지 않는다고 나타나 있다. 또한, 전기로 산화슬래그는 알칼리 실리카 반응성에 대한 우려가 되지 않으며, 내구성능은 일반골재 콘크리트와 동등하다고 나타나 있다. 전기로 산화슬래그 골재의 대체율은 30~50% 이내로 설정하고 있다. 대체율 30% 이내에서는 일반골재와 동일하게 취급이 가능하지만, 50% 이상에서는 단위용적질량이 증가하고 시공성을 확인하여야 한다고 나타나 있다. 단, 전기로 산화슬래그 잔골재와 전기로 산화슬래그 굵은 골재를 각각 단독으로 이용한 경우, 콘크리트의 단위용적질량은 보통골재 콘크리트 보다 약  $700 \text{ kg/m}^3$  크게 됨에 따라, 방파제 콘크리트블록, 앵커리지, 사방댐, 중력식용벽, 방사선 차폐 콘크리트 등에 유리할 것으로 나타났다. 하지만, 전기로 환원슬래그는 Free CaO, MgO가 다량 함유함에 따라 팽창 파괴의 우려가 있어 혼입이 일부 되더라도 콘크리트에 팽창에 우려가 있다고 나타나 있다.

또한 <그림 5>는 염기도와 Free CaO의 함량관계를 나타낸 그림이다. JIS A 5011-4에 따르면 염기도가 2.0 이하일 경우 전기로 산화슬래그 골재 내의 Free-CaO의 양이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 <그림 6>과 같이 염기도가 JIS A 5011-4 규격 범위 내일 때 콘크리트의 길이변화율이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 염기도를 2.0 이하로 하는 것에 의해 유리석회의 함유량을 미량으로 하여 콘크리트의 길이 변화율도 0.05% 이하로 하는 것이 가능하며, 염기도가 2.0 이상일 경우 콘크리트가 팽창하여 콘크리트용 골재로 활용할 수 없다는 것을 알 수 있다.

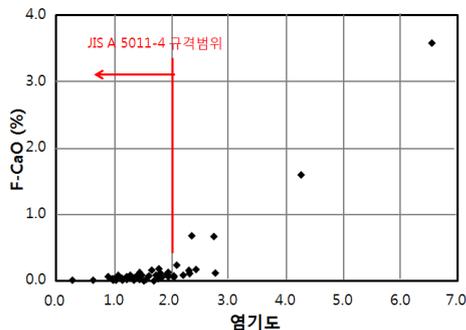


그림 5. JIS 기준 염기도와 Free-CaO 함량 관계

## 4. 전기로산화슬래그의 연구 현황

### 4.1 국내 전기로산화슬래그 연구 동향

철강 산업의 지속적인 증가로 인하여 부산물인 슬래그를 사용하기 위하여 1981년 고로슬래그가 콘크리트용 고로슬래그 굵은골재에 관한 한국산업규격이 제정되었다. 하지만, 전기로 슬래그는 팽창성의 문제로 인하여 골재로서 사용할 수 없다고 콘크리트표준시방서(건설교통부 1999년)<sup>9)</sup>에 명시되어 있었다. 그러나 전로 및 전기로 슬래그에 대한 많은 연구가 진행됨에 따라 1985년 “제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계시공지침”(대한토목학회 1985년)이 제정되고 1997년 “도로용 철강슬래그”에 대한 한국산업규격과 “전기로 슬래그를 사용한 도로포장설계 시공지침안”(대한토목학회 1997년)을 발표하여 전로 및 전기로산화슬래그 골재 사용에 대한 관심이 높아졌다.

문한영 등은 전기로산화슬래그를 잔골재로 사용한 콘크리트에 관한 기초적 연구에서는 전기로슬래그의 안정화 방법으로 공주기중, 살수 및 수중 에이징 처리한 전기로슬래그 잔골재의 물리, 화학적 성질 및 전기로슬래그가 시멘트의 수화 반응에 미치는 영향을 검토하고 전기로슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 워커빌리티, 압축강도 및 탄성계수 등을 검토한 결과 수중 및 살수 에이징을 실시하는 것이 효과적이라 하였으며<sup>9)</sup> 강완협 등은 전기로슬래그를 대상으로 팽창성에 영향을 미칠 것으로 생각되는 화학성분에 대하여 에이징 전·후 X선 형광분석을 분석하고, 전기로슬래그 자체의 중금속류 오

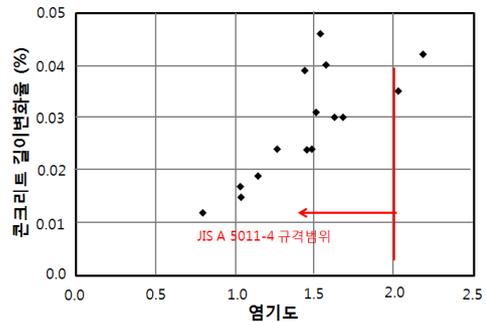


그림 6. JIS 기준 염기도와 콘크리트의 길이변화율과의 관계

염물질 총량과 중금속 용해도와 pH의 관계를 평가한 결과 에이징 전·후에 따른 중금속 용출농도는 큰 차이가 없었다. 전기로 슬래그의 환경 안정적 재활용 시 중금속류 오염물질 총량의 고려가 필요하며, 최적의 에이징에 의한 팽창성 물질인 유리석회의 제거와 함께 용출 가능한 유해 중금속의 제거에 대한 지속적 연구가 필요하다는 결론을 내렸다.<sup>10)</sup>

또한 류득현 등은 전기로산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 기초 물성에 관한 실험적 연구에서는 전기로 산화슬래그 골재에 대한 천연골재 대체에 따른 콘크리트의 품질 특성 검토 결과, 높은 밀도와 낮은 흡수율에 의해 적정 대체율에서는 작업성 개선 및 강도 증진, 탄성계수 증진 등의 품질 개선 효과가 있는 것으로 나타나지만, 콘크리트용 골재로서 활용을 위한 골재의 안정성 및 장기 재령에서의 내구특성에 대한 다양한 접근과 연구가 필요하다고 나타나 있다. 그리고 김남욱 등은 급냉 제강슬래그의 대체율에 따른 콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구에서는 급냉시킨 전기로 산화슬래그를 대상으로 잔골재 대체율에 따른 압축강도가 증진되고 있으며, 길이변화시험 결과 대체율이 증가할수록 수축제어에 효과적이라 하였다.<sup>11)</sup> 곽은구 등은 급냉 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 골재로서의 활용성 평가에서는 급냉시킨 전기로 산화슬래그를 대상으로 콘크리트용 골재로서의 평가를 나타내었다. 급냉 전기로 산화슬래그를 사용시 모르타르 플로가 증가하였으며, 압축강도는 증진하였다고 하였으며<sup>12)</sup> 정유진 등은 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 철근콘크리트 기둥의 휨 거동에서는 일반 철근콘크리트와 전기로 산화슬래그를 100% 대체한 실험 결과 약 1.3배 높은 변위연성지수를 나타남에 따라 높은 연성력을 나타낸다고 발표하고 있다.<sup>13)</sup>

이밖에 전기로 산화슬래그 골재를 사용하여 인공어초용 콘크리트 개발연구도 있다.

## 4.2 국외 전기로산화슬래그 연구 동향

### (1) 유럽

국의 전기로 산화슬래그는 국내와 비슷한 실정으로 대부분 도로용 또는 매립용으로 의존하고 있는 실정이다. 대부분

의 국외 연구는 전기로 산화슬래그를 천연 골재 대체재로서의 가능성을 확인하는 연구가 진행되어 왔으며 대부분의 국외 국가에서는 전기로 산화슬래그를 도로용으로 사용되었다. 먼저, Jose T. San-Jose는 스페인에서 생산되고 있는 전기로 산화슬래그 골재를 대상으로 실험을 진행하였다. 연구내용은 전기로 산화슬래그의 물성에 대하여 평가하였으며 2가지 종류의 전기로 산화슬래그를 대상으로 콘크리트의 기계적 성능을 검증하였다. 검증 결과로는 압축강도 증진효과가 크게 나타났으며, 골재의 물리적 성능 평가를 통하여 콘크리트의 골재 대체재로서 충분한 가능성에 대해 설명하였다.<sup>14)</sup>

A. Santamaria는 전기로 산화슬래그의 혼입양을 조절하여 콘크리트의 기계적 성능을 검증하였다. 전기로 산화슬래그의 발생을 통한 파쇄 공정에 의한 골재의 입도분포가 고르지 못한 점을 지적하였다. 또한 이에 대한 품질 성능을 검증하였으며 각 전기로산화슬래그의 사이즈별에 따른 입도를 결정하여 콘크리트 배합을 결정하였다. 또한 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 콘크리트는 압축강도 및 휨강도 증진에 대해 기술하였다.<sup>15)</sup>

M. Maslehuddin은 전기로 산화슬래그 콘크리트의 내구성 실험을 진행하였다. 전기로 산화슬래그 골재를 45~65%까지 치환하여 실험을 진행하여 내구성 실험, 건조수축 및 팽창성 실험, 압축강도 실험을 진행하였다. 내구성 실험으로는 일반 콘크리트에 비해 전기로 산화슬래그 콘크리트에서 우수한 성능을 나타냈으며, 건조수축 및 팽창성 실험에서는 일반 콘크리트에 비해 전기로 산화슬래그 콘크리트에서 팽창이 진행되었으나, ASTM 규격 기준 내에 만족하였다. 최종 실험 결과로는 전기로 산화슬래그를 잔골재 50%, 굵은 골재 50%로 대체함에 따라 가장 효과적인 내구성능이 나타났다.<sup>16)</sup>

Alan Sekaran은 전기로 산화슬래그 골재에 플라이애시를 첨가하여 천연골재 콘크리트와 비교 실험을 진행하였다. 비교 실험으로는 압축강도 실험, 휨강도 실험, 인장강도 실험, 내구성 실험을 진행하였고, 모든 결과에서 전기로 산화슬래그를 사용한 콘크리트에서 증진효과가 나타났다.<sup>17)</sup>

Luca Rondi는 이탈리아에서 생산되고 있는 전기로 산화슬래그를 대상으로 콘크리트의 기계적 성능 실험을 진행하였다. 콘크리트 골재 대체 재료로서 충분한 성능을 나타내었고,

장기 강도 실험결과에서 모두 안정적으로 나타났다. 또한 전기로 산화슬래그 콘크리트가 인산염, 암모니움 이온 제거 능력이 높다는 연구결과를 보고하였다.<sup>18)</sup>

Luigi Coppola는 전기로 산화슬래그가 ASTM 팽창 성능에 만족하고 있지만, 최적의 배합을 위하여 전기로 산화슬래그 골재의 치환율을 15%가 최적사용량이라 설명하였다.<sup>19)</sup>

Flora Faleschini는 전기로 산화슬래그의 내구성 평가에 관한 연구로 염화물 침투 실험을 진행하였으며, 고강도 콘크리트로서의 적용성을 검토하였다. 실험 결과로는 전기로 산화슬래그 콘크리트의 물시멘트비를 높였지만, 무기 첨가제를 사용하지 않고도 고강도 콘크리트로서 생산이 가능하였다고 나타냈으며, 이에 대해 고밀도 콘크리트 용도에 적합하다고 나타냈다. 또한 염화물 침투 실험 결과 염화물 확산 계수가 낮아 염화물 노출 환경 콘크리트로서 뛰어날 것으로 나타냈다.<sup>20)</sup>

## (2) 일본

일본에서는 1994년에 전기로 제강공정 설비에 따른 조업 방법의 진전으로 전기로 산화슬래그는 과거 문제시되어졌던 불안정광물상의 함유가 전체적으로 감소되어졌기 때문에 부가가치를 높이기 위해 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 잔골재로 이용하는 것을 검토하였으며 1995년에는 냉각조건이 상이한 3종류의 전기로 산화슬래그를 급냉시킨 급냉전기로 산화슬래그, 살수냉각 후 고화시켜 파쇄시킨 수냉전기로 산화슬래그, 야적 방치로 서냉시켜 파쇄한 서냉 전기로 산화슬래그를 잔골재 및 굵은골재로서 사용하여 모르타르 및 콘크리트의 팽창성상, 강도 및 탄성계수의 재령별 변화를 조사하여 유리석회 및 불안정광물 등에 의해 콘크리트의 팽창 강도저하 등에 관하여 연구를 진행 하였으며 일본철강연맹은 Clean Japan Center로부터 통상산업성의 1996년도 및 1997년도의 폐기물 등의 용도개발을 위하여 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 골재로서의 적용성에 관한 연구한 결과 전기로 산화슬래그의 무겁고 단단한 것 등의 특성을 살려 파광을 줄이는 테트라포드를 제조하였다. 또한 일본 일부 지역에서는 레미콘 제조시, 천연의 잔골재 20%를 전기로 산화슬래그 잔골재로 치환하여 사용하고 있다.<sup>21)</sup>



그림 7. 나고야시 우시지마 재개발 공사 지하 변전실 매트콘크리트



그림 8. 후쿠이항 테트라포드

또한 전기로 산화슬래그 콘크리트는 보통 콘크리트에 비교하여 단위용적질량이 약 15% 정도 크기 때문에, 방파제 블록, 중량식 옹벽, 지하수의 부력대책 등 중량을 요구하는 콘크리트에 사용하였으며 굵은골재 및 잔골재등을 모두 대체하여 사용시 고중량 콘크리트 제조가 가능하여 일본에서는 구조물의 안정성 향상을 위해 병원 건물의 저층부에 사용하거나, 변전설비 매트부재, 화물 X선 검사장 등에 사용된 사례도 보고되고 있다.<sup>22)</sup>

## 5. 결론

전기로 산화슬래그의 특성 및 국내·외 연구현황 및 이용 사례에 대해 간략히 살펴보았다. 전기로 산화슬래그 골재의 활용기술 개발에 따른 콘크리트용 골재로서의 활용에 따른 기대효과는 다음과 같다.

1) 산업 폐기물을 고부가가치로 재활용하는 것으로 효율적 자원 재활용 효과, 2) 대부분의 도로용이나 성토용으로 사용

되는 전기로산화슬래그를 콘크리트용 골재로 사용할 수 있도록 하여 전기로산화슬래그의 시장확대, 3)골재 자원에 대한 천연 자원의 고갈에 대응할 뿐만 아니라 천연 자원 개발에 따른 환경 파괴에 대한 환경부하저감형 원자재의 공급 기술 확보를 통한 지속적인 콘크리트용 골재 보급 방안 제시 등 다양한 효과를 기대 할 수 있다.

일본에서는 전기로산화슬래그에 대한 품질관리 기준인 JIS가 확립되어 있으며 콘크리트용 골재로서 활용을 위한 시방

서가 있으며 국내에서도 2년전 KS규격이 제정됨으로 인해 전기로 산화슬래그의 재활용은 시작단계라 할 수 있다. 따라서 산업부산물의 재활용을 통한 자원화를 적극적으로 도모하기 위해 다양한 연구 활동 및 실용화 기술보급이 요구되어야지만 향후 전기로산화슬래그 골재의 활용 범위가 확대될 것으로 사료된다.

담당 편집위원 : 민태범(성신양회(주))

## 참고문헌

- Kim, H. (2015). Application and Prospects of Iron&Steel Making Slag for Creating the High Added value in Construction Material, Korean Recycled Construction Resources institute, 10(3), 7-11[in korean]
- Ryu, D.H., Kim, K.H. (2009). The prospect for utilization of Electronic arc furnace oxidizing slag as concrete's aggregate, Korean Recycled Construction Resources institute, 4(1), 17-25[in korean]
- Korea iron & steel Association. Crude steel production in 2015
- Hisham Qasrawi, Faisal Shalabi, Ibrahim Asi, (2009). Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate, Construction and Building Materials, 23, 1118-1125
- Kim, J.M., Cho, S.H., Kwon, K.J., Kim, M.H. (2005). Experimental Study on the Engineering Properties of Radiation Shielding Concrete According to the Replacement Ratio of Rapid-Chilled Steel Slag Fine Aggregate, Architectural institute of korea, 21(3), 121-128[in korean]
- Kim, J.M. (2004). The Engineering Properties of High Strength Concrete using Rapid-Chill steel Slag, Architectural institute of korea, 24(2), 527-530[in korean]
- JIS A 5011-4. (2013). Electric arc furnace slag aggregate for concrete
- Concrete Standard Specification, (2016).
- Mun, H.y., Choi, J.J., Choi, Y.W. (1989). Fundamental Study on the Utilization of Electric Furnace Slag as a Fine Aggregate for Concrete, Korean Society of Civil Engineers, 9(2), 55-61[in korean]
- Kang, W.H., Lee, H.K., Par, J.Y. (2001). Assessment of Chemical Leachability of Electric Arc Furnace Slag Before and After Aging Treatments for Environmentally Safe Reuse, Korean Society of Civil Environmental Engineers, 23(1), 1919-1928[in korean]
- Kim, N.W., Bae, J.S. (2009). A Fundamental Study on the Characteristics of Concrete with the Substitution Ratio of the Rapidly Cooled Steel Slag, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 13(1), 78-87[in korean]
- Kwak, E.G., Kim, J.M. (2010). Evaluation of Application for the Concrete Aggregate of Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Treated by Rapidly Cooling Method, Architectural institute of korea, 26(2), 63-70[in korean]
- Jung, Y.J., Lee, Y.H., Kim, S.W., Kim, K.H. (2012). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Using Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregates, Korea concrete Institute, 24(3), 267-273[in korean]
- Jose, T.S.J., Inigo, V., Idoia, A., Ignacio, M. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state, materials and design, 60, 612-619
- A. Santamaria, A. Orbe, M.M., Losanez, M., Skaf, V., Ortega-Lopez, J.J., Gonzalez. (2017). Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate, Materials and design, 115, 179-193
- M. Maslehuiddin, A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M. S. Barry. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes, Construction and building materials, 17, 105-112
- Alan Sekaran, Murthi Palaniswamy, Sivagnanaprakash Balaraju. (2015). A Study on Suitability of EAF Oxidizing Slag in Concrete: An Eco-Friendly and Sustainable Replacement for Natural Coarse Aggregate, Hindawi Publishing Corporation, 15, 179-193
- L. Rondi, G. Bregoli, S. Sorlini, L. Cominoli, C. Collivignarelli, G. Plizzari. (2016). Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation, Composites Part B, 90, 195-202
- L. Coppoal, A. Buoso, D. Coffetti, P. Kara, S. Lorenzi. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete, Construction and Building Materials, 123, 115-119
- F. Faleschini, M. A. Fernandez-Ruiz, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, E. Hernandez-Montes. (2015). High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties, Construction and Building Materials, 101, 113-121
- 山戸 博晃, 野口 陽輔, 参納 千夏男, 鳥居 和之. (2004). 電気炉酸化スラグを使用したコンクリートの物理・化学的安定性, コンクリート工学年次論文集, 26, pp.1641-1646
- 國府(勝郎, 四谷進. (2003). 電気炉酸化スラグ骨材の概要, 本コンクリート工学協会, 41, 3-7