

철강산업부산물인 전기로 산화슬래그 잔골재를 이용한 고성능콘크리트 포장 보수재료 개발 및 적용사례



정 원 경 | (주)삼우아이엠씨 기술연구소 책임연구원·토목품질시험기술사
 길 용 수 | (주)삼우아이엠씨 기술연구소 선임연구원·토목시공기술사
 배 종 오 | (주)삼우아이엠씨 기술연구소 소장·도로 및 공항기술사

1. 서론

산업부산물을 이용한 건설재료 개발 및 적용은 유효한 자원의 재활용과 환경보존 측면에서 매우 중요한 사항으로 다양한 건설분야에서 활발히 연구 및 활용되고 있다. 이러한 산업부산물 중 가장 대표적인 사례가 고로슬래그의 재활용으로 고로슬래그의 경우 다양한 용도로 토목 및 건축 현장에서 활용되고 있으며 시멘트 원료 및 도로용 골재 등으로의 이용이 확대되어 이미 고부가가치로 재활용되고 있다(김길희, 2007).

철을 만드는 철강공정은 크게 제선, 제강, 연주, 압연의 4단계로 구분되며 제선공정은 고로공정으로 분류되기도 한다. 이러한 고로공정은 그림 1과 같이 고로에 원료인 철광석을 넣고 코크스를 태워서 철광석 중의 산소를 제거하고 용해시켜 용선을 만드는 공정으로 이때 발생하는 슬래그를 고로슬래그라 하며 철광석 및 코크스 회분 중의 불순물이 조제제인 석회석과 함께 용융되어 상부로 배출되는 것이다. 제강공정

은 전로 및 전기로에서 용강을 제조하는 것으로 전로 공정은 고로에서 생산된 용선을 주원료로 순산소를 수냉 랜스로 분사해 5대 불순물을 산화 연소시켜 산화물을 슬래그화하여 제거하는 공정이며 전기로공정은 전기를 이용하여 원료인 고철 및 철스크랩을 용해, 정련하여 용강을 제조하는 방법으로 용강 내 불순물 제거방식에 따라 산화성, 환원성으로 구분되며 이때 발생하는 부산물이 전기로 산화 슬래그 및 전기로 환원 슬래그이다(이승헌, 2012).

이러한 슬래그의 발생량은 연간 고로슬래그 1,300만톤 이상, 전로슬래그 약 700만톤 및 전기로 슬래그 약 300만톤 등이며 이중 전기로 슬래그는 기타 슬래그와 달리 부가가치가 낮은 분야에 적용되고 있다(김상명, 2008).

이러한 원인은, 제강슬래그가 그에 포함된 불안정한 유리석회(free-CaO)등이 물과 반응하여 $Ca(OH)_2$ 를 생성하면서 체적팽창을 하여 붕괴되기 때문이며 이에 따라 콘크리트용 골재로서 이용하기에 부적절하다고 인식되어 있기 때문이다. 현재 많은 연구를 통하여 급

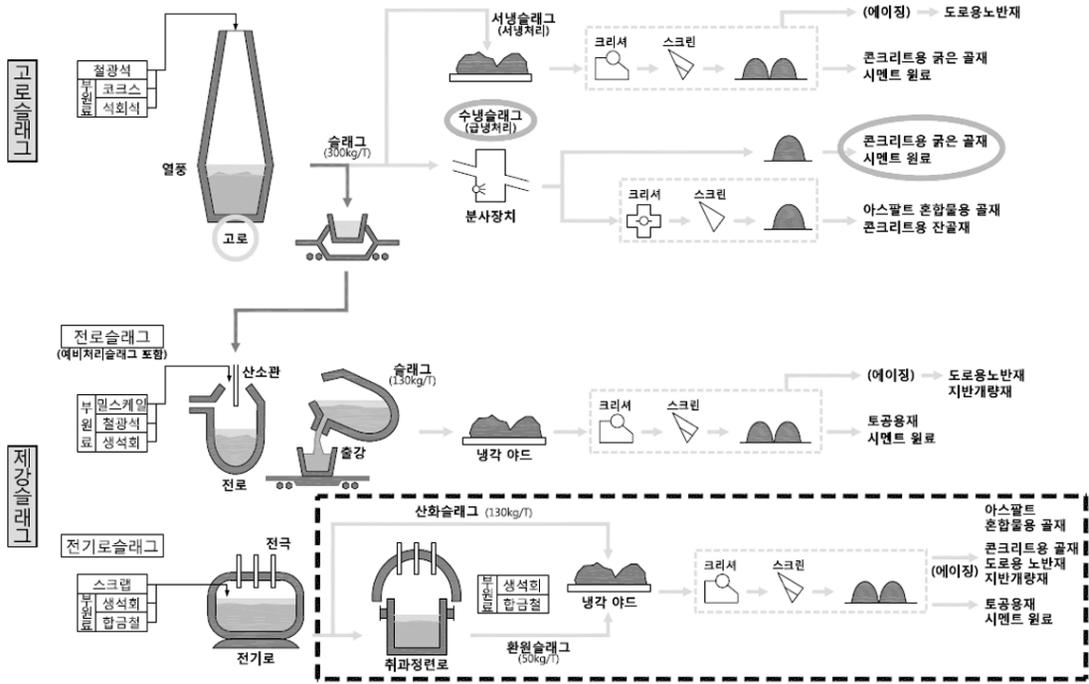


그림 1. 제선 및 제강공정에서 발생하는 슬래그 및 활용분야(이승현, 2012)

냉 및 서냉 등의 에이징(Aging) 처리를 통해 free-CaO의 함유량을 1% 이하로 낮추어 팽창붕괴의 위험이 없는 콘크리트용 잔골재를 개발, 그 활용가능성이 연구되었으나(김남욱 2009; 김상명 2008; 김진만 2007) 콘크리트용 골재로의 활용을 위해서는 이와 같은 별도 가공처리가 필요하며 이에 따른 가공비용이 수반됨에 따라 소비자의 활용요구가 있다 하더라도 현재까지는 경제적 타산이 맞지 않는 실정이다(조봉석 2009; 이훈하 2008).

즉, 철강산업부산물인 전기로 산화슬래그의 콘크리트 골재로서의 활용은 생산지역의 한정에 따른 운송비 증대, 높은 밀도에 의한 적용성 한계 등으로 콘크리트 전분야에 걸쳐 폭넓게 활용되기에는 태생적인 한계점을 지니고 있으나 여러 연구논문을 통해 천연잔골재 대체 재료가능재료로서 이미 검증이 된 상태이며 이를 근거로 KS규격이 제정된 상태이다.

이를 보다 자세히 살펴보면, 최근 국내에서는 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 골재(Electric arc furnace oxidizing slag aggregate, 이하 EFS)로 활용하기 위한 제도적 기반으로 KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재 품질기준이 제정되어 부산물의 자원화 시스템 기반이 마련되었으나, 현재까지 전기로 산화슬래그 골재는 실용화 단계에는 도달하지 못하고 있는 실정이다. 그러나, 콘크리트용 잔골재로서 전기로 산화슬래그의 치환율에 따른 콘크리트의 굳지 않은 성상, 역학적 성능 및 염해, 탄산화, 동결융해 등의 내구성능 평가 등 콘크리트용 잔골재로서의 치환이 가능하다는 연구결과가 다수 발표되고 있다(문한영 2002; 조봉석 2009).

따라서 본 기사에서는 콘크리트분야에 적용되고 있는 철강산업부산물인 슬래그 관련 국내자료를 정리하여 소개하며 특히 용융상태의 전기로 산화슬래

그를 급냉방식으로 에이징처리한 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재를 이용하여 보다 경제적이고 활용가능성이 높은 특수분야의 콘크리트 개발 및 적용 사례를 소개하고자 한다.

2. 슬래그의 종류 및 활용특성

2.1 슬래그 종류

제선공정에서 발생하는 고로슬래그는 1,400~1,500℃의 용융상태로 배출되며 냉각방식에 따라 다양한 슬래그가 얻어진다. 서냉슬래그란, 공기 중에서 천천히 냉각하여 제조, 덩어리상태로 산출되어 밀도가 높은 회색의 결정질이며, 노반재 및 콘크리트 골재로 사용하고 있다. 수쇄슬래그는 용광로에서 배출된 용융슬래그의 스트림을 많은 양의 물속에 쏟아 분거나 워터젯으로 쏘아서 매우 빠르게 냉각시켜 생성시키는 것으로 냉각의 목적은 슬래그가 결정화되는 것을 방지하여 유리질로 고체화시키기 위함이며, 시멘트 용도 이외에도 소량으로 유리제조, 마모제, 콘크리트용 잔골재 등으로 이용되고 있다. 현재 고로슬래그는 지역을 벗어나 공급하게 되면, 운반거리의 상승에 따라 골재의 가격 경쟁력을 상실하게 되기 때문에 골재사용에 한계점을 지니고 있으며 급냉(수쇄) 슬래그 대부분은 시멘트 및 콘크리트용 원재료로서 고부가가치의 건설자재로 활용되고 있으며 서냉 슬래그는 노반재료로 활용되고 있다(김형석, 2012).

제강공정 중 하나인 전로공정은 전로에 쇳물을 부은 후 고압, 고순도의 산소를 불어넣어 탄소를 태우고 불순물을 없애는 공정으로 전로 내에 산소가스를 위에서 고압으로 취입하여 선철에 함유되어 있는 탄소, 망간, 규소, 인, 황 등을 산화 연소키며 이 과정에서 발생하는 산화물이 전로슬래그이다. 이러한 전로슬래그는 산소가 직접 쇳물에 충돌하기 때문에 석회에 의한 슬래그화가 신속히 진행되나 석회의 슬래그화 냉각과정에서 유리화되어 팽창 반응성이 높은

유리 석회가 생성되기 때문에 냉각되어 배출된 슬래그는 높은 팽창 반응성을 갖고 있어서 슬래그의 재활용 범위는 매우 제한적이다(김진만, 2012).

전기로 제강법에서는 아크식 전기로에 의해 고철을 용해하여 정련하며 전기로에서 철 슬래그를 용해시켜 산화 정련하여 얻어진 용강을 2차 정련 공정으로 이송하여, 환원 정련을 실시한 후, 연속주조에서 주철을 제조하며 이때 1차 산화 정련 공정에서 배출된 것을 산화슬래그, 2차 정련 공정에서 생성된 연속주조 후에 배출된 것을 환원슬래그로 구분한다. 환원슬래그는 팽창 붕괴 물질인 유리석회, 유리 마그네시아의 함유율이 높아 콘크리트용 자재로서 사용이 곤란하나 산화슬래그는 철 성분의 함유량이 다소 많지만, 팽창 반응성을 유발하는 유리 석회의 함유량은 매우 적어 콘크리트용 자재로서 활용 가능성이 높으며 특히 골재 자원으로 활용이 기대되는 슬래그이다. 즉, 전로슬래그 및 전기로 환원슬래그는 유리 석회의 함유량이 비교적 높아서 골재로서의 품질 안정성 확보가 곤란하기 때문에 콘크리트용 골재 등과 같은 부가가치가 높은 골재 자원으로서의 활용은 미미하나 전기로 산화슬래그의 경우에는 콘크리트용 골재로서 활용에 대한 KS 관리기준이 제정되어 활용성이 기대된다.

2.2 슬래그의 국내 재활용 현황

2011년 철강슬래그는 전년대비 357만톤 증가한 2,392만톤이 발생되었으며, 이중 2,390만톤이 재활용되었다. 종류별로는 고로슬래그가 1,359만톤이 발생되어 전량 재활용되었으며 제강슬래그는 1,033만톤이 발생되었으며, 이중 1,030만톤인 99.9%가 재활용되고 있다고 보고되고 있다(한국철강협회, 2012).

2.2.1 고로슬래그 재활용

고로슬래그는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 생성물을 말하는 것으로, 주원료(철광석)와 부원료(코크스, 석회석)의 회분에 존재

하는 SiO_2 와 Al_2O_3 등이 고온에서 석회와 반응하여 생성되며, 구성 원소는 일반 암석과 같고 성분은 시멘트와 유사하며 발생량은 1톤 조강생산 시 약 300kg 가량 발생한다. 냉각방식에 따라 급냉슬래그, 서냉슬래그로 구분되며, 급냉슬래그는 화학성분이 포틀랜드시멘트와 유사하여 수경성이 있으므로 슬래그 시멘트의 원료로 사용된다. 이러한 고로슬래그는 발생량의 63%인 856만톤이 시멘트 원료로 사용되고 있으며, 다음으로 성토용 골재 25.6%, 도로용 골재 5.3% 순으로 재활용되었다(한국철강협회, 2012).

표 1. 슬래그 재활용을 위한 품질기준(조봉석, 2012)

고로슬래그
<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트용 고로슬래그 미분말(KS 2563) • 고로슬래그 시멘트(KS L 5210) • 콘크리트용 고로슬래그 골재(KS F 2544) • 래디믹스트 콘크리트(KS F 4009)
제강슬래그
<ul style="list-style-type: none"> • 도로용 철강슬래그(KS F 2535) • 케이슨 채움용 철강슬래그(KS F 2579) • 콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재(KS F 4571) • 액형표면 처리용 부순골재, 부순 슬래그 및 골재(KS F 2532)

2.2.2 제강슬래그 재활용

제강슬래그는 성토용 골재 40.1%, 도로용 골재 26.3%, 토목용 골재 14.9% 순으로 재활용되었다(한국철강협회, 2012).

(1) 전로슬래그

전로에 사용하는 원료는 크게 주원료, 부원료, 합금철의 3가지이다. 주원료는 철의 원료로 용융 선철(용선), 고철 등이 있는데 이 가운데 용선 배합률이 높은 경우에 이용하는 것이 전로제강법이다. 부원료로는 생석회(CaO), 석회석(CaO_3) 및 Dolomite($\text{MgCO}_3-\text{CaO}_3$) 등이 있다. 전로에서는 용융선철에 포함된 순탄소를 99.5%이상 제거하기 위하여 용선에 포함된 탄소 등 불필요 성분을 산화 연소시킨다. 생성된 산화물은 슬래그를 형성하고 철과의 비중차로 분리시킨다. 전로

슬래그의 발생량은 배합비에 따라 용강 1톤당 150~180kg으로 고로슬래그에 비하여 발생량이 적다.

(2) 전기로슬래그

전기로는 전로와 달리 주원료로는 스크랩(고철)을 주로 사용하는 것으로 외부에서 열을 가하여 원료를 용해하여 정련한다. 전기로의 특징은 불순물 제거방식에 있어 산화성과 환원성 방식으로 구분되며, 이때 각각의 경우에 발생되는 슬래그가 산화슬래그, 환원슬래그이다. 국내에서는 일괄제철방식인 포스코와 현대제철을 제외하고 전기로 공정을 이용한다. 이들 슬래그 재활용과 관련된 품질기준은 표 1과 같이 생산되는 슬래그별, 적용범위별로 구분, 제정되어 있는 상태이다.

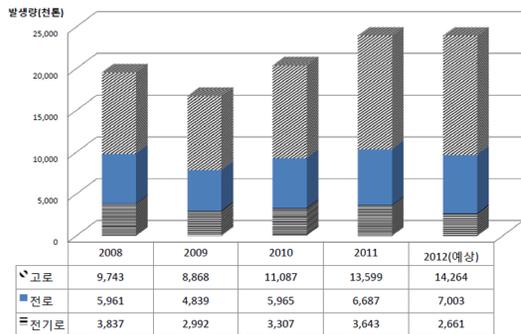


그림 2. 연도별 철강부산물 배출현황(한국철강협회, 2012)

2.2.3 연도별 슬래그 발생량

2008년도부터 2012년까지의 철강슬래그 예상 발생량을 살펴보면 그림 2와 같이 현대제철 고로 가동 시점인 2010년에 철강슬래그는 2천만톤을 돌파하여 2012년에는 고로슬래그 1,426만톤, 전로슬래그 700만톤, 전기로슬래그 366만톤이 발생될 것으로 추정하고 있다. 또한, 동부제철 전기로 가동에 의해, 제강슬래그 또한 지속 증가할 것으로 예상된다. 최근 건설산업에서는 환경 문제가 무엇보다 중요한 사안으로 대두됨에 따라 새로운 대처방안이 요구되고 있다. 특히 콘크리트 산업에서는 환경 문제와 함께 부존자원의 고갈대책도 중요한 문제점으로 부각되어, 이를 한꺼번에 해결하기 위한 각종 산업부산물이나

산업폐기물을 콘크리트용 자원으로 재이용하는 제로 에미션(Zero emission)화 차원의 방법이 검토되고 있다(한국철강협회, 2012).

시멘트, 콘크리트 제조 산업에 있어서 환경부하를 감소시키기 위해서 슬래그, 플라이애시와 같은 산업부산물의 활용을 높이는 것이 무엇보다 큰 효과를 나타낼 수 있으며, 산업부산물인 슬래그를 혼합 사용하여 시멘트 제조에 필요한 클링커의 상대적 사용량을 줄이고 CO₂의 저감효과를 얻는 등의 효과를 가질 수 있다.

이에 외국의 경우, 슬래그를 사용한 콘크리트 구조물의 사용이 포틀랜드시멘트 사용량에 거의 육박하고 있으며, 관련 규정의 제정으로 인하여 국가차원에서 슬래그의 활용을 통한 콘크리트 양을 늘리고 있는 추세이다(한국철강협회, 2012).

3. 급냉식 전기로 산화슬래그 잔골재의 특성

3.1 제조방법 및 안정성

제강슬래그의 사용상 제약은 팽창붕괴에 의한 불안정성 때문이다. 제강슬래그의 성분 중 유리석회(Free-CaO)와 Free-MgO가 팽창붕괴성을 나타내기 때문이다. 유리석회(Free-CaO)는 식 1과 같이 수화에 의한 팽창붕괴가 가장 일반적으로 발생되는데 상온에서 수분을 접할 경우 Ca(OH)₂로 변화하면서 용적이 약 2배 증가하게 된다. 반응성이 높은 찰입자와 같은 형태의 유리석회는 그림 3과 같이 대기중의 수분과 같은 물과의 접촉을 통해 팽창붕괴하고 이 같은 반응이 반복되어 안정화된다(김진만, 2012).

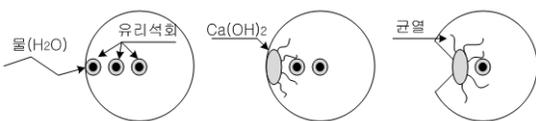
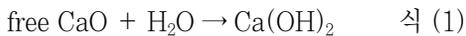


그림 3. 제강슬래그의 체적팽창 메커니즘(유정훈, 2006)

따라서 이 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 이루어졌으며, 그 방법으로 에이징(Aging)을 시행하고 있다. 에이징의 방법으로는 서냉에이징과 급냉에이징으로 분류할 수 있다. 서냉에이징은 대기 중에 전기로산화슬래그를 방치하는 공기 중 에이징, 물로 살수하는 살수에이징, 물에 침지하는 수중에이징이 있으며, 가장 일반적인 공기 중 에이징방법은 고온의 제강슬래그를 서냉시킨 후 적절한 입도로 파쇄한 다음 대기 중에 방치하여 인위적으로 유리석회를 수분에 노출시켜 Ca(OH)₂로 변화시켜 콘크리트 시공 중에 팽창 붕괴가 발생되지 않도록 사전 수화반응을 유도하는 방법이다. 그러나 팽창이 안정되기까지 3~6개월의 장기간의 시간이 요구되며, 생산 후 에이징을 위한 별도의 공간이 요구되는 단점이 있다. 살수에이징과 수중에이징은 슬래그의 균질화에 대한 문제로 인하여 널리 실용화되지 못하고 있다. 급냉에이징은 증기에이징, Autoclave에이징, 특수공법에 의한 SAT 방법 등이 있다. 증기에이징과 Autoclave에이징은 에이징기간을 공기 중 에이징과 비교하여 약 1/30로 단축할 수 있지만 고온고압의 증기를 이용하여 수화반응을 촉진시키는 방법으로 처리비용이 고가이고, 1회 처리량이 소규모인 단점이 있다.

본 연구에서 활용된 잔골재용 전기로산화슬래그는 유리석회의 함량이 0.15% 이하로 매우 낮게 생산된 재료로 급냉분사하는 특수처리방식의 에이징처리로 안정화된 분자구조로 변환시킨 복합산화물이 표면을 이루고 있는 골재이다. 화학반응에 필요한 이온이나 전자의 이동이 어렵게 되어 안정된 화합물을 이루고, 풍화와 같은 화학적, 물리적 요인에 대해 매우 강한 저항성을 갖게 된다. 또한 제강슬래그의 문제점인 Free CaO를 용출하지 않게 차단하는 입자로 변화되므로 안정성을 확보할 수 있다. 슬래그는 서냉할 때 일반적인 경우 각기 이온들이 응고되면서 격자의 분자가 응집하여 결정체가 석출되지만 고온의 용융 상태에서 복합산화물인 슬래그를 고속의 공기로 급냉하게 되면 그림 4와 같이 스피넬(Spinel)형인 2개의 산화물과 3개의 산화물의 복합체를 형성하게 된

다. 스피넬 구조의 새로운 구조는 정8면체의 외형을 띠는 특징을 가지고 있다. 이 결정은 8면체형 속에서 6개의 산소에 포위된 B원자와 4면체형에 4개의 산소에 의해 포화된 A원자가 들어 있는 일반적인 스피넬형이다. 이러한 결정체는 자연적으로 많이 존재하나 인공적으로도 제조가 가능하다.

이들의 성질은 대체로 경도가 2.5~8.0으로 유리 같은 광택을 가지며 굴절율이 높고, 아주 견고하여 내식성과 내풍화성이 강한 결정체이다. 모든 화학반응은 이온의 이동 또는 전자의 이동으로 이루어지는데 이러한 스피넬형의 복합 산화물 표면을 이루게 되면 이온의 이동이 어렵게 되어 안정된 화합물 상태가 되며, 풍화 등 물리, 화학적인 외부의 영향에 대한 저항력을 키워 원래 상태를 유지할 수 있다(김무한, 2005). 그림 5는 특수처리방법에 의한 급냉 전기로 산화슬래그의 생산공정을 나타낸다.

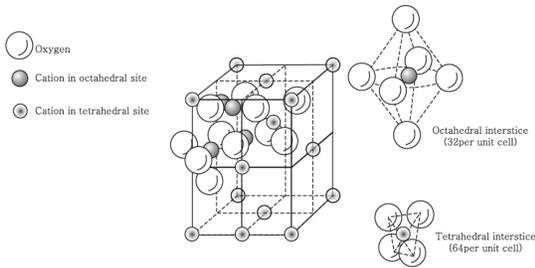


그림 4. 급냉에이징에 의한 스피넬 구조(에코마이스터, 2003)



그림 5. 급냉전기로 산화슬래그 생산공정

3.2 콘크리트용 잔골재로서의 특성

3.2.1 물리적 특성

그림 6은 일반 강모래와 본 연구에서 사용된 전기로 산화슬래그의 입형을 비교한 것으로 용융상태의 전기로 산화슬래그를 급냉시킨 전기로 산화슬래그 잔골재는 천연 골재인 강모래에 비해 구형에 가까운 형상을 가지고 있다. 골재 입형이 구형에 가까우면 높은 실적율을 가지게 되며 그로 인하여 동일한 콘크리트에서 단위시멘트량 감소가 가능하고, 슬래그 입자의 볼베어링 효과로 인해 유동성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(한국콘크리트학회, 2009). 또한 전기로 산화슬래그에 대하여 급냉방식의 에이징처리를 할 경우 슬래그 내부가 안정화된 분자구조로 변환되어 팽창붕괴의 우려가 없는 전기로 산화슬래그 잔골재 제조가 가능하게 된다.

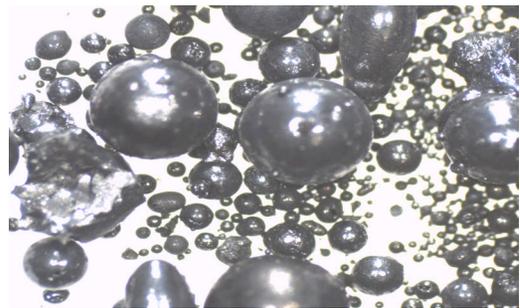


그림 6. 골재종류별 형상

고속으로 급냉시킨 전기로 산화슬래그 잔골재의 화학성분은 기존의 제강슬래그와 같이 CaO, Fe₂O₃,

SiO₂가 주성분을 이루고 있으나, F-CaO가 0.15% 이하로 나타나는데 대부분의 CaO는 Fe₂O₃, SiO₂와 반응하여 2CaO·Fe₂O₃와 2CaO·SiO₂의 화합물 상태, 즉 스피넬 구조로 존재하게 된다. 스피넬 구조의 복합산화물은 화학반응에 필요한 이온이나 전자의 이동이 어렵게 되어 안정된 화합물을 이루고, 풍화와 같은 화학적, 물리적 요인에 대해 매우 강한 저항성을 갖게 된다(에코마이스터, 2003).

표 2는 콘크리트용 일반 잔골재와 전기로 산화슬래그 잔골재의 규정 및 측정된 물성치를 비교한 것으로, 전기로 산화슬래그 잔골재는 일반 잔골재에 비하여 0.41%의 매우 낮은 흡수율을 지니고 있어 전기로 산화슬래그 잔골재를 콘크리트에 사용할 경우 콘크리트의 건조수축, 내동결성 등 내구성에 긍정적인 것으로 판단된다.

표 2. 잔골재별 품질규정 및 물리적 특성

Items	Max size (mm)	Specific gravity	Water absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	Solid volume (%)
Electric arc furnace oxidizing slag aggregate	5.00	3.70	0.41	2,554	70.0
KS F 4571*	5.00	3.10<	<2.00	1,800<	-
Natural sand	5.00	2.60	1.11	1,559	60.0
KS F 2526**	5.00	2.50<	<3.00	-	-

KS F 4571* : electric arc furnace oxidizing slag aggregate for concrete

KS F 2526** : aggregate for concrete

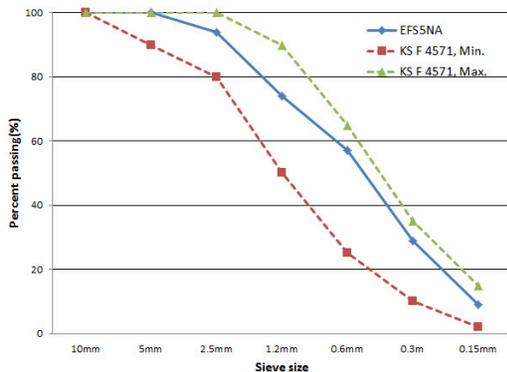


그림 7. 전기로 산화슬래그 잔골재의 입도분포

전기로 산화슬래그 잔골재의 실적률은 약 70%로 이는 전기로 산화슬래그 잔골재의 입형이 일반골재에 비해 구형이기 때문에 충전 효과가 높아 이를 활용할 경우 콘크리트 제조 시 단위시멘트량 저감, 건조수축저감, 고밀도의 콘크리트 제조가 가능하게 된다.

또한 전기로 산화슬래그 잔골재에 대한 체가를 시험 측정 결과, 그림 7과 같이 KS 규격에 적합한 결과를 보였으며 이는 전기로 산화슬래그를 급냉처리한 후 별도의 선별과정을 걸쳐 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재에 맞도록 균일한 입도로 생산된 것으로 이를 통해 균질한 제품 생산에 따른 현장 품질 관리에도 도움을 줄 것으로 기대된다.

3.2.2 화학적 특성

제강슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 어려운 문제점 중 하나가 바로 약 1% 이상의 유리석회(free-CaO)함량이다. 슬래그에 함유된 유리석회는 함유량이 1% 이상일 경우 콘크리트의 체적팽창을 유발하므로 1% 이하로 저감시켜야 한다. 유리석회를 저감시키기 위한 방법은 Aging 처리 혹은 급냉방법이 대표적이라 할 수 있다(김남욱 2009). 본 연구에서 활용된 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재도 급냉방식으로 에이징처리된 것을 사용하였으며 free-CaO함유량은 0.15%로 free-CaO+H₂O에 의한 Ca(OH)₂의 체적팽창 우려가 없는 유리석회 1% 이하의 슬래그로 평가되었다.

표 3. 전기로 산화슬래그 잔골재의 화학조성물(백분율, %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	K ₂ O, CO ₂ , SO ₃	Free CaO
11.12	4.58	39.31	23.1	7.02	1.58	5.04	6.42	0.15

표 3은 XRF를 이용하여 급냉처리된 전기로 산화슬래그 잔골재를 분석한 것으로 Fe₂O₃의 함유량이 가장 높고 CaO와 SiO₂의 함유량이 순차적으로 높게 나타났다. 이런 산화물 분석 결과를 토대로 하여 슬

래그의 밀도가 높은 원인은 산화철 함량이 많은 것에 기인한다는 것을 알 수 있다.

표 4. 전기로 산화슬래그 잔골재의 중금속함유량

항 목	단 위	허용 범위	결과
Pb	mg/l	below 3	0.02
Cu	mg/l	below 3	0.043
As	mg/l	below 1.5	0.028
Hg	mg/l	below 0.005	N.D
CN-	mg/l	below 1	N.D
Cr(VI)	mg/l	below 1.5	N.D
Cd	mg/l	below 0.3	N.D
Oil	%	below 5	N.D

표 4는 폐기물관리법에서 제시하고 있는 공정시험 기준에 준하여 급냉으로 전처리된 전기로 산화슬래그 잔골재에 대한 중금속용출특성을 알아보기 위하여 ICP를 이용한 시험 결과이며, 폐기물관리법의 중금속 허용 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 Cu, As, Pb 등이 검출되었지만 그 양은 매우 미량으로 콘크리트 골재로서 사용이 가능함과 동시에 이를 이용할 경우 발생가능한 환경적 문제는 없을 것으로 판단되었다.

3.3 사용기준

앞서 언급한 바와 같이 산화슬래그는 환원슬래그와 달리 팽창 반응을 일으키는 유리 석회 및 유리 마그네슘의 함량이 매우 적어 유효 자원화가 가능하며 KS F 4571:2011 「콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재」편에 전기로 산화슬래그의 콘크리트 잔골재에 대한 정의로 전기로로 용강과 동시에 생성되는 용융

표 5. 전기로 산화슬래그 잔골재의 표기방법(KS F 4571)

Marking	Gmax (mm)	Specific gravity		Potential reactivity of alkali-aggregate	
		3.1~4.0 N	4.0~4.5 H	harmless A	harm B
EFS	5	N		A	

산화슬래그를 서냉 또는 물과 공기 등에 의하여 급냉되어 철분을 제거하여 입도 조정한 것으로 정의하고 있으며 화학성분과 물리적 성질을 표 5처럼 규정하고 있다.

표 6. 전기로 산화슬래그의 화학성분 및 물리적 성질 품질기준

항 목		KS F 4571	
		N	H
화학 조성 (%)	CaO	40.0 이하	
	MgO	10.0 이하	
	FeO	50.0 이하	
	CaO/SiO ₂	2.0 이하	
절건 밀도(g/cm ³)		3.1 이상 4.0 미만	4.0 이상 4.5 미만
흡수율(%)		2.0 이하	
단위용적질량(kg/l)		1.8 이상	2.2 이상

4. 전기로 산화슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트 포장 보수재료 개발

4.1 개발 목적

철강산업부산물 중 전기로 산화슬래그 잔골재는 콘크리트용 골재로서 공학적 안정성과 활용가치가 입증되고 품질기준이 제정되어 있음에도 불구하고 생산지역 한계, 단위중량 증대 등으로 기존 잔골재 대체자원으로써 그 활용성에 한계가 있는 것이 사실이다. 그러나, 적용범위 및 활용분야에 대한 생각의 전환으로 운송비 증대에 따른 경제성 저하를 극복할 수 있는 분야와 단위중량 증대에 영향을 받지 않는 구조물에 적용할 경우 오히려 새로운 녹색기술이 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 기사에서는 일반 콘크리트용 잔골재로서의 폭넓은 적용이 아닌 특수분야, 특수재료, 특수환경에 전기로 산화슬래그 잔골재를 활용할 수 있는 새로운 블루오션을 개발하고자 하였다.

현재 콘크리트포장 단면보수 재료의 경우, 공용성

확보와 이용자 불편을 최소화하기 위한 공법들이 다수 개발되어 적용되고 있으며 이들 공법들의 공통점은 고가의 속경성바인더와 폴리머 제품의 사용으로 공사비가 매우 높은 실정이다. 이러한 분야에 전기로 산화슬래그 잔골재를 적용하여 바인더와 폴리머 사용량을 절감시킬 수 있다면, 오히려 운송비 증대에 따른 적용 한계와 단위중량 증대에 따른 문제가 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 사용재료 및 배합표

본 연구에 사용된 속경성 시멘트는 초속경계열의 시멘트로 국내에서 SB라텍스 개질 콘크리트 생산전용 시멘트로 개발, 생산된 것으로 주요 시멘트의 화학적 성분은 표 7과 같다.

표 7. 초속경성 시멘트의 화학조성물

Blain (cm ² /g)	Specific gravity	Rapid setting cement compounds(%)					
		C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A ₃ S	C ₄ AF	C ₃ A	CaSO ₄
5,602	2.92	16.0	16.0	30.0	6.0	3.0	20.0

본 실험에 사용된 라텍스는 국내 J사의 제품으로 성분은 스티렌/부타디엔 계열이며 라텍스 고형분 47%와 물 53%의 액상상태로 시멘트 모르타르와 콘크리트에 사용하도록 생산된 제품으로, 교면재포장과 콘크리트포장 보수용 라텍스개질 콘크리트에 널리 적용되고 있는 제품이다. 본 연구에 사용된 잔골재는 관련 기준인 KS F 4571(콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재)를 만족하는 EFS5NA의 전기로 산화슬래그 잔골재와 KS F 2526을 만족하는 비중 2.6의 일반 강모래를 사용하였으며 굵은골재는 교면포장의 덧씌우기 용도로 최대치수 19mm 골재를 사용하였다.

표 8은 잔골재를 전기로 산화슬래그로 100% 치환한 후 산정한 최적배합비로 기존의 교면재포장체인 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트와 비교하여 볼 때, 단위시멘트량 60kg/m³와 단위라텍스량 51kg/m³을

줄일 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 단위시멘트 저감 및 라텍스 저감의 원인은 구상형 전기로 산화슬래그 잔골재를 치환함으로써 낮은 물시멘트비 조건에서도 매우 높은 작업성을 나타내며, 잔골재의 높은 실적율에 의해 결합재량을 매우 크게 절감시킬 수 있었다.

표 8. 전기로 산화슬래그 잔골재 치환 고성능 콘크리트 개발을 위한 배합표

	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)				
			W	C	Latex	S	G
PRCC	38	55	360	76	115	922	777
EFS-Con	38	47	89	300	51	1,212	1,020

4.3 강도 및 내구특성

4.3.1 강도발현 특성

폴리머 속경성 시멘트 콘크리트는 스티렌/부타디엔 계열 폴리머를 물 속에 고르게 분사시킨 SB라텍스와 초기강도 발현이 우수한 초속경계열 시멘트, 모래, 자갈 및 소량의 혼화제와 물을 적정비율 혼합하여 제조한 콘크리트이다.

표 9에 나타난 것과 같이 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트 강도에 대한 실내실험 결과, 압축강도는 4시간 기준강도 21MPa 보다 13MPa 이상을, 7일 압축강도에서는 2배 이상 상회하는 것으로 나타났다. 휨강도는 4시간 강도 6.0MPa, 7일 8.1MPa의 휨강도를 나타내는 특성을 보였다. 또한, 부착강도도 4시간 강도에서 1.5MPa로 기준 1.4MPa를 만족하는 결과를 얻었으며 7일 강도에서는 기준 대비 2배 이상의 강도발현 특성을 보였다. 잔골재를 전기로 산화슬래그 잔골재로 치환한 EFS-Con의 강도 측정결과, 4시간 압축강도는 기준 21MPa 보다 약 16MPa, 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트 34.1MPa 보다 2.8MPa 높은 36.9MPa의 고강도를 나타냈다.

휨강도는 4시간 기준강도인 3.15MPa의 2배 이상의 강도발현을 보였으며 7일 휨강도에서는 10.7MPa

까지 강도발현이 되는 특성을 보였다. 또한, 부착강도는 라텍스가 첨가량이 저감되었음에도 불구하고 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트와 유사한 강도발현 특성을 보였다.

표 9. 전기로 산화슬래그 잔골재 치환 고성능 콘크리트 강도발현 특성

구분	압축강도(MPa)			휨강도(MPa)			부착강도(MPa)		
	4hr.	1일	7일	4hr.	1일	7일	4hr.	1일	7일
PRCC	34.0	39.0	46	6.0	7.5	8	1.5	2.0	2.7
EFS-Con	36.9	52.6	55	7.6	10	11	1.45	2.6	2.6

이러한 전기로 산화슬래그 잔골재를 이용한 콘크리트의 높은 강도발현 이유는, 천연잔골재를 치환한 전기로 산화슬래그 잔골재의 구형 입형에 의한 유동성 증진(볼베어링)에 의한 라텍스 첨가량 감소, 골재 자체의 높은 실적률에 의한 단위수량 및 단위 결합재량 감소에도 불구하고 콘크리트 내부의 체적안정성 향상 및 밀도 증대에 따른 원인으로 판단된다(길용수, 2012).

4.3.2 내구특성

기존의 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트는 수성 폴리머 일종인 라텍스를 다량으로 혼합하여 라텍스 필름막에 의존하여 콘크리트의 제성질을 크게 향상시킨 것으로 첨가되는 라텍스의 함량에 의해 콘크리트 내구성이 변화하게 된다. 그러나 전기로 산화슬래그 잔골재를 이용한 고성능 콘크리트의 경우는 실적률이 높고 밀도가 큰 안정적인 잔골재를 사용함으로써 콘크리트 구성재료 자체의 수밀성, 내구성을 향상시키며 라텍스는 재료간의 부착력 증진과 콘크리트 내구성 증진에 일정부분만을 담당하게 된다. 즉, 라텍스에 의한 콘크리트 성능개선은 불연속적인 라텍스필름막에 의존하므로 콘크리트 전단면에 걸친 균질한 성능개선에 한계가 있으나 콘크리트 구성재료 중 가장 큰 부피를 차지하는 골재를 개선할 경우 콘크리트 성능개선을 안정적으로 균질화할 수 있다.

표 10은 개발된 고성능 콘크리트와 기존 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트와의 내구성능을 비교평가한 것으로 모든 내구성항목에 있어서 기존의 보수재와 동일한 성능을 나타내는 것으로 평가되었다. 이를 통해 단위시멘트를 20% 절감시키고 라텍스 함량을 50% 이상 저감시켜도 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용하여 속경성 콘크리트를 제조할 경우, 초기 높은 컨시스턴시 확보, 조기 고강도 발현 및 내구성 규정을 만족하는 고내구성의 고성능 콘크리트 제조가 가능한 것으로 평가되었다(길용수, 2012).

표 10. 내구특성 평가결과

내구성평가 항목	단위	PRCC	EFS-Con
탄성계수[7days]	MPa	25,841	32,328
염소이온투과저항성[7days]	Coulombs	220	313
표면박리 저항성 [56cycles]	kg/m ²	0.02	0.02
동결융해 저항성 [A type, 300cycles]	%	84	87
균열저항성(ring test)	균열없음	균열없음	균열없음

4.4 적용사례

4.4.1 공사개요

개발된 전기로 산화 슬래그 잔골재를 이용한 고성능 콘크리트는 녹색성과 새로운 건설재료로써 그 우수성이 입증되어 녹색기술 제GT-12-00030호 인증 및 건설신기술 제665호로 지정된 국내 최초의 콘크리트용 전기로 산화슬래그 잔골재 활용 기술로 공용 중인 노후 및 손상된 콘크리트 포장을 조속히 보수 및 재포장하고 교통을 조기 개통함으로써 고객의 불편과 사용자의 부담비용을 최소화함은 물론 콘크리트포장 슬래브의 구조기능을 향상, 유지함으로서 주행성과 내구성을 증진시켜 도로의 공용수명을 연장코자 개발되었으며 다음과 같이 현장적용성 평가를 실시하였다.

- (1) 공 사 명 : 2012년 국도46호선 내 콘크리트포장 단면보수 시험시공

- (2) 시공위치 : 국도46호선 내 경춘국도
 홍천국도유지건설사무소 관내
- (3) 공사기간 : 2012년 11월
- (4) 시공물량

구분	방향	위치	면적(m ²)			절삭 두께(m)
			소계	세로	가로	
절삭 덧씌우기	서울	국도46호선	100.0	30.0	70.0	0.05

4.4.2 작업공정 및 적용성 평가결과

아래의 그림 8은 시공순서에 따른 작업공정을 나타낸 것이며 표 11은 시간대별 작업일지를 기록한 것이다. 이를 살펴보면, 오전 교통차단 이후 양생, 줄눈재설치 및 교통개방까지 총 10시간이 소요되었으며 강도발현 평가 결과, 표 12와 같이 4시간 초기 압축강도 31MPa, 휨강도 6.2MPa의 고강도 특성을 나타내어 Fast-track에 요구되는 작업공정과 품질을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

표 11. 현장적용을 위한 공정별 작업일지

시간	내용	장비	비고
AM 09:30	교통차단 시행	싸인카 3대	
AM 10:00	1차 파쇄시행	바브켓파쇄기	T=0.05cm B=0.45m
AM 10:40	VnW 청소 시작	VnW Blasting	
AM 12:10	타설시작	모빌믹서	EFS 100% 치환 보수재
PM 14:00	포설마무리		
PM 16:30	줄눈컷팅 시행	컷팅기	
PM 17:30	백업재 및 실런트 주입		
PM 19:30	마무리 및 교통개방	총 작업시간 10시간	

표 12. 현장적용성 평가결과

구분	공기량 (%)	슬럼프 (mm)	압축강도(MPa)		휨강도(MPa)	
			f4hr	f28day	f4hr	f28day
시방 기준	3~6	160~220	21 이상	30 이상	콘크리트포장 휨설계 강도 4.5MPa	
측정 결과	4.7	205	31	56	6.2	9.1



(a) 출탕 (b) 보수부위 파쇄



(c) 파쇄부 VnW 청소시행 (d) 전기로 산화슬래그 잔골재



(e) 전기로 산화슬래그 잔골재 치환 고성능 콘크리트 생산 (f) 타이닝 및 양생제 살포 후 양생 시행



(g) 기존 줄눈부 재절삭 (h) 줄눈부 백업재 삽입



(i) 줄눈부 실런트 주입 (j) 보수완료 및 교통개방

그림 8. 전기로 산화슬래그 잔골재 치환 콘크리트 포장 단면 보수 현장적용 공정

5. 결론

본 기사에서는 철강산업부산물에 대한 현황과 콘크리트용 골재로서의 재활용 가능성에 대한 기존의

연구발표자료를 소개하고자 하였다. 또한, 이를 제품화하기 위한 연구로 진행되었던 급냉식 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용한 속경성 라텍스개질 고성능 콘크리트의 개발 및 현장적용성 평가결과를 제시하였다.

이를 종합하여 볼 때, 제선공정에서 파생되는 고로슬래그는 성분 특성 상 이미 시멘트원료 등으로 고부가가치 분야에서 100% 재활용되고 있으나 제강 슬래그 분야에 있어서는 비록 수치상 100%에 가까운 재활용률을 보이고는 있으나 팽창성 문제, 에이징처리기간 및 비용, 생산지역 한계에 따른 경제성 약화 등으로 단순 도로성토용 등의 저부가가치 분야에서만 활용되고 있다.

그러나, 이와 달리 전기로 산화슬래그의 경우 콘크리트용 골재로써 사용가능성과 관련 규격이 제정되었음에도 최적의 재활용분야를 찾지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 기고에서는 전기로 산화슬래그 잔골재의 재활용분야에 있어 공용 중인 콘크리트 포장 단면보수 재료 개발에 접목함으로써 보다 경제적이고 내구적인 새로운 녹색기술 개발과정과 적용성에 대해 소개하고자 하였다. 이를 통해 철강산업부산물에 대한 이해와 특수분야에 활용함으로써 보다 높은 고부가가치 창출과 따라서 폴리머 속경성 시멘트 콘크리트제조에 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용함으로써 콘크리트 성능개선 효과와 더불어 경제성 확보까지 이를 수 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 2011년 국토해양부 건설교통R&D정책인프라 기술사업의 연구비 지원(과제번호 11TRPI-C057479-01)에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김길희, 임지영, 류득현, 최성우, 2007: 전기로 산화슬래그의 국내외 이용사례, 한국콘크리트학회집 기술자료, 제19권 6호, pp. 51~57.

김남욱, 전준홍, 배규성, 2009: 전처리방식의 변화에 따라 제작된 전기로 슬래그 콘크리트의 특성연구, 한국리사이클링학회, 제18권 4호, pp.52~61.

김상명, 박주원, 이훈하, 김기호, 2008: 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 활용, 대한토목학회, 제28권 제3A호, pp.407~415.

김진만, 조성현, 오상윤, 곽은구, 2007: 아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 특성, 콘크리트학회지 제19권 6호, pp.39~28.

김진만, 2012, 전기로슬래그의 공학적 특성, 2012년 제1회 기술강좌: 철강산업부산물의 콘크리트에의 활용 기술

김형석, 2012, 철강슬래그 기반의 무기 결합재 특성, 2012년 제1회 기술강좌: 철강산업부산물의 콘크리트에의 활용 기술

문한영, 유정훈, 2002: 콘크리트용 골재로서 에이징처리한 제강슬래그의 활용, 한국콘크리트학회논문집, Vol.14, No.4, pp.597~607.

조봉석, 이훈하, 양승규, 이웅중, 엄태선, 2009: 전기로 산화슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 성능 평가, 한국콘크리트학회논문집, Vol.21, No.3, pp.367~375.

이승현, 2012, 철강슬래그의 발생 및 재활용 현황, 2012년 제1회 기술강좌: 철강산업부산물의 콘크리트에의 활용 기술

이한승, 2012, 전기로 산화슬래그 골재의 활용기술, 2012년 제1회 기술강좌: 철강산업부산물의 콘크리트에의 활용 기술

이훈하, 김승진, 2008: 스테인레스 전기로 산화슬래그의 콘크리트용 잔골재 활용성 평가, RIST 연구논문 제22권, 제1호, pp.60~68.

에코마이스터, <http://www.ecomaister.com/> 한국철강협회 외 12개사, 슬래그 콘크리트 기술 및 현장 적용 사례, pp.10~13, 2012.

한국콘크리트학회, 2009: 최신콘크리트공학.