



슬래그를 활용한 콘크리트 최신 기술

State-of-the-Art Technology of Concrete Using Slag

최세진 Se-jin Choi
포항산업과학연구원 건축건지재연구본부
책임연구원

양근혁 Keun-Hyeok Yang
경기대학교 플랜트 건축공학과 교수

1. 머리말

우리나라의 경우 2000년 중반 이후 철강슬래그의 재활용률은 100%에 달하고 있다. 철강슬래그의 종류에 따른 재활용률은 고로슬래그의 경우 약 70%가 시멘트 원료 및 콘크리트 혼화재료, 나머지는 도로용, 성토용 및 비료용으로 재활용되고 있으며, 제강슬래그의 경우 약 80%가 도로용, 성토용 및 잡석용 등의 저부가가치의 용도로 거의 이용되고 있는 실정이다¹⁾. 하지만 2000년대 후반부터 철강슬래그의 재활용을 고도화하기 위한 연구개발들이 적극적으로 행해지고 있으며, 관련 특허와 신기술들이 보고되고 있다.

본 고에서는 국내 최근특허 및 해외 관련 자료들을 조사하여 고로슬래그 및 제강슬래그의 최신 콘크리트 활용기술들을 소개하였다.

2. 슬래그의 재활용 콘크리트 최신기술

2.1 시멘트 치환 기술

고로슬래그의 고부가가치 활용기술 중 하나가 시멘트 대체용으로, 2000년대 이후 지속가능 기술에 대한 사회적 요구와 함께 고로슬래그의 시멘트 대체 기술이 더욱 주목받고 있다. 최근의 고로슬래그 시멘트 치환 및 대체에 대한 기술 및 그 특성을 <표 1>에 요약하였다. 국내 고로슬래그 시멘트는 고로슬래그의 함유량에 따라 1종, 2종 및 3종으로 구분하고 있다. 가장 일반적인 고로슬래그 시멘트는 그 함유량이 30~60%인 2종이지만, 내해수성, 내약품성이 요구되는 특수용 콘크리트에서는 그 함유량이 60~70%인 3종이 주로 이용되고 있다. 하이볼륨 슬래그 콘크리트는 결합재에서 슬래그 함유량이 60% 이상인 콘크리트를 의미하는데, 최근 저발열, 높은 장기강도 및 고내구성을 목적으로 점차 그 사용성이 증가하고 있다. 뿐만 아니라 고유동성, 초저발열 및 높은 초기강도 발현을 목적으로 고로슬래그 시멘트 2종을 기반으로 한 플라이에서 또는 실리카 폼이 첨가된 3성분계의 결합재 기술도 개발되고 있다. 하이볼륨 고로슬래그 시멘트 콘크리트에서는 일반적으로 낮은 단위수량을 적용하므로 고성능감수제가 이용되어 시멘트 및 고로슬래그미분말의 특성, 슬럼프 유지성능 등 종합적인 판단의 적절한 감수제 선택이 요구된다. 또한 70% 이상의 고로슬래그가 치환된 콘크리트에서는 낮은 초기강도 문제를 해결하기 위하여 적절한 알칼리 활성화제를 첨가하기도 한다.

한편, 시멘트를 100% 대체한 알칼리 활성 슬래그 결합재는 1940년대에 개발되었지만 시멘트 산업에서의 천연자원 보존 및 CO₂ 배출저감이라는 전 세계적 명제 앞에 1980년 후반부터 관련 연구개발이 급격히 증가하기 시작하였다. 국내에서는 2000년도 후반부터 알칼리 활성 슬래그 결합재에 대한 특허와 연구가 급증하였다. 알칼리 활성 슬래그 결합재는 사용 알칼리금속 이온에 따라 급결이 발생할 수 있으며, 건조수축 변형률도 시멘트 콘크리트에 비해 현저히 증가할 수 있으므로 현장 적용성을 고려한 적절한 알칼리 금속이온의 선택이 중요하다. 현재 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 경제성 및 실용적인 수준을 고려하면 압축강도 30 ~ 40 MPa까지가 적절하다²⁾. 일반적으로 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 장점으로 높은 초기 압축강도 발현, 내구성, 내화학적, 저발열 및 높은 내화능 등이 제시되고 있지만 실험적으로 증명된 사실들은 매우 부족하므로 구조체 적용을 위한 다양하고 깊이 있는 연구들이 지속적으로 필요하다. 제강슬래그를 성토용 골재가 아닌 고부가가치의 시멘

트 혼화제로 활용하기 위한 기술개발은 2000년도 후반부터 시도되고 있다(표 2). 전기로 산화슬래그를 이용한 비정질 잠재수경성 시멘트 제조 기술은 강을 제조하는 공정 중 전기 아크로에서 고철을 용융시킬 때 발생하는 1,400℃ 이상의 온도를 갖는 용융 산화슬래그의 현열을 이용한다. 필요하다면 열을 가하여 이들 슬래그에 함유된 산화철에 환원제를 사용하여 금속철로 변화시키고 나머지 슬래그는 잠재수경성을 발현하는 물질로 용융상태에서 개질한 후 급냉으로 비정질 물질로 만들어 미분쇄를 통해 금속철과 슬래그를 분리한 후 슬래그는 잠재수경성 시멘트 혼합재로 사용하는 기술이다. 이 전기로 산화슬래그 혼화제는 고로슬래그와 비슷한 화학적 조성을 갖게 되며, 시멘트 양의 30%까지 치환될 수 있음이 보고되고 있다. 한편, 환원 슬래그 분말을 이용한 초속경성 수경결합재 제조 기술도 제시되고 있는데, 전기로 환원 슬래그를 고압가스로 비산시켜 상온으로 급냉처리하여 분쇄한 환원 슬래그 분말을 석고와 혼합하여 제조한 초속경성 결합재 제조 기술이다.

표 1. 고로슬래그의 시멘트 하이볼륨 치환 및 대체에 대한 최신 기술^{3,4)}

슬래그 기반 결합재	주요 내용	용도
고로슬래그 시멘트 3종 • 밀도 : 2.98 g/cm ³ • 분말도 : 3,000 cm ² /g 이상	고로슬래그의 혼합률이 60 ~ 70%로써, 콘크리트의 내해수성 및 내약품성 등의 성능향상을 위해 사용되지만, 초기강도가 낮은 단점이 있다.	- 특수용 콘크리트 - 그라우트용
매스콘크리트용 고로시멘트 • 밀도 : 2.98 g/cm ³ • 분말도 : 3,700 cm ² /g 이상 • 수화열(J/g) : 7일-242, 28일-288, 91일-310	고로슬래그의 함유량이 70% 이상으로써, 수화열을 저감시키고 증용열 포틀랜드 시멘트의 수화열 규격에 적합한 매스 콘크리트용 고로슬래그 시멘트	- 댐, 침매함, LNG 지하탱크, 연속지중벽, 매스 기초
플라이애시를 첨가한 매스콘크리트용 고로시멘트 • 밀도 : 2.78 g/cm ³ • 분말도 : 3,700 cm ² /g 이상 • 수화열(J/g) : 7일-198, 28일-240, 91일-258	온도 및 균열제어를 목적으로 고로슬래그의 함유량과 플라이애시 함유량이 각각 60% 이상과 10% 이상인 3성분형 매스 콘크리트용 시멘트	- 하천, 항만, 지하구조물, 워터플랜트 및 매스 콘크리트 전반
슈퍼고로100 시멘트 • 밀도 : 3.05 g/cm ³ • 분말도 : 5,200 cm ² /g 이상	고강도 · 고내구성 콘크리트용으로 개발 · 제품화된 시멘트로서 고로슬래그 초미분말을 사용하여 단기 · 장기재령에서 강도발현이 조강시멘트를 능가함. 또한 치밀한 경화체가 형성되므로 콘크리트의 내염해 및 내구성 향상에 기여함.	- 고강도 · 고내구성 콘크리트, 조강 콘크리트 등
슈퍼고로100SF 시멘트 • 밀도 : 2.99 g/cm ³	슬래그 석고계 혼화제/실리카 폼을 사용한 초고강도/고유동 콘크리트용의 시멘트임. 다른 시멘트보다 고성능 감수제의 첨가량이 적고, 양호한 워커빌리티를 얻을 수 있음. 표준양생은 물론 고온하에 있어서도 높은 강도를 발현함.	- 고강도 · 고내구성 콘크리트, 조강 콘크리트 등
알칼리활성 슬래그 결합재 • 밀도 : 2.8 g/cm ³ • 분말도 : 3,000 cm ² /g 이상	알칼리 수산화물(ROH) 또는 R ₂ O · (n)SiO ₂ 형태의 규산염을 이용하여 고로슬래그의 수화반응을 유도한 결합재임. 여기서 R은 Na, K 및 Li와 같은 알칼리 금속이온으로서 수산화나트륨, 규산나트륨, 규산칼륨, 탄산나트륨 및 황산나트륨 등이 일반적으로 사용되는 알칼리 활성화제임. 알칼리 활성 고로 슬래그의 초기 수화반응은 OH ⁻ 와 H ₂ O의 효과에 의한 모재 속의 알칼리와 실리카 성분들의 용해에 의해 발생하며 결과로 [SiO ₄] ⁴⁻ , [AlO ₄] ⁵⁻ , Ca ²⁺ 및 CSH 화합물이 형성됨. 일반적으로 알칼리 활성화 된 페이스트의 경화과정에서 발열량은 비빔 후 8 ~ 10분 사이에서 최대값을 보임.	프리캐스트 콘크리트 2차 제품, 기름 탱크 등의 특수용 콘크리트, 보수제 등

표 2. 제강슬래그의 시멘트 혼화재에 대한 최신 특허기술

제강슬래그 혼화재	기술 요약
전기로 산화슬래그를 이용한 비정질 잠재수경성 시멘트 제조기술	슬래그에 함유된 산화철은 환원제를 사용하여 금속철로 변화시키고 나머지 슬래그는 잠재수경성을 발현하는 물질로 용융상태에서 개질한 후 급냉하여 비정질 물질로 만들어 미분쇄하여 금속철과 슬래그를 분리한 후 금속철은 철강 원료로 사용하고 슬래그는 잠재수경성 시멘트 혼화재로 사용하는 기술
환원 슬래그 분말을 이용한 초속경성 수경결합재 제조기술	전기로 환원 슬래그를 고압가스로 비산시켜 상온으로 급냉처리하여 분쇄한 환원 슬래그 분말을 석고와 혼합하여 제조한 초속경성 있는 수경성 혼화제 제조기술. 석고와의 혼합사용으로 응결 및 경화시간을 조정함으로써 보통포틀랜드 시멘트의 혼화재로 사용.
탈황슬래그로부터 제조되는 콘크리트용 고기능성 혼화제 제조기술	제강공정 중 쇳물에 포함된 불순물 중 황(S) 성분을 제거하는 용선예비처리 단계에서 발생하는 부산물인 탈황 슬래그를 냉각하여 분말도 4,000 cm ² /g 이상의 슬래그 혼화제 제조기술

2.2 특수 혼화재 기술

일반적으로 콘크리트용 혼화재는 분말도가 증가함에 따라 시멘트 수화과정 중 발생하는 수산화칼슘 및 배합수와의 접촉 면적이 증가하여 혼화재의 반응성은 증가한다. 이러한 특성을 고려하여 혼화재로서 고로슬래그의 분말도를 높이는 연구들이 수행되고 있다. 시멘트, 석회, 석고 등과의 초기 반응성을 높이고 고강도, 고내구성을 가진 경화체를 형성하도록 하기 위하여 분말도가 8,000 cm²/g(평균입도 4μ) 이상인 고로슬래그를 혼화재로 활용하는 기술은 1990년대 후반부터 실용화되고 있다. 이들 고분말도의 고로슬래그는 특수시멘트 혼화재, 고강도·고내구성 콘크리트, 고강도 그라우트 혼화재, 약액 주입용 혼화재 등으로 활용되고 있다. 한편, 최근에는 실리카 폼을 대체하고 초고강도 콘크리트의 혼화재로 적용하기 위하여 분말도 3.6 ~ 4.49 m²/g인 나노슬래그가 개발되고 있다(그림 1). 나노슬래그를 치환한 콘크리트의 유동성은 일반적으로 감소하나(그림 2)에 나타난 바와 같이 활성도가 실리카 폼에 비해 높아 기존 고로슬래그의 단점인 초기강도 저하의 문제점을 해결할 수 있는

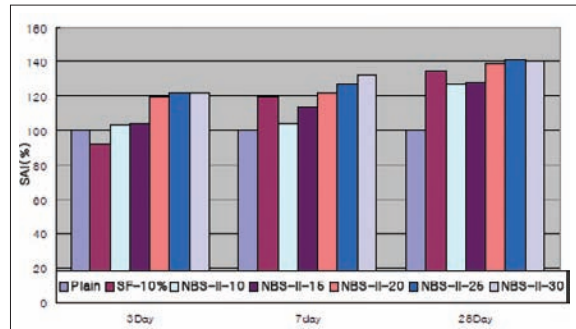


그림 2. 나노슬래그의 EDS 분석 및 SEM 이미지

며, 특히 고온하에서 폭렬저감에도 효과적임이 보고되고 있다⁵⁾.

일본에서는 고로슬래그를 일반 혼화재가 아닌 고강도형 셀프 레벨링제로 개발, 실용화에 성공하기도 하였다. 이 혼화재는 고강도 타입으로 내구성이 우수하며, 옥내의 모든 바닥에 사용될 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 학교, 병원, 공장, 주택 등의 신축바닥마감 및 콘크리트 바닥의 보수 등에 이용되고 있다.

2.3 골재활용 기술

콘크리트용 철강슬래그 골재관련 규격으로는 KS F 2544(콘크리트용 고로슬래그 골재), KS F 4571(콘크리트용 전기로산화슬래그 잔골재), KS F 2543(콘크리트용 동슬래그 골재), KS F 2583(콘크리트용 연슬래그 골재) 등이 있다. 고로슬래그 골재의 경우 용광로에서 선철과 동시에 생성되는 용융슬래그를 서냉한 고로서냉슬래그를 파쇄하여 고로슬래그 굵은 골재를 제조하고, 물, 공기 등에 의해 급냉한 후 입도 조정하여 고로슬래그 잔골재를 제조한다. 이때 가능하면 둥근형으로 파쇄하여 굵은 골재로 사용하고, 콘크리트 표면에 발생하는 녹에 의

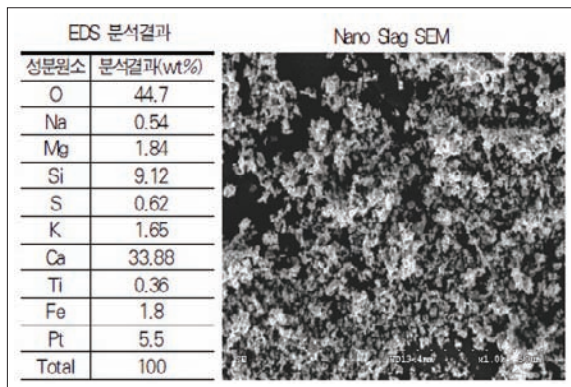


그림 1. 나노슬래그의 EDS 분석 및 SEM 이미지

한 오염을 막기 위해 철입자 제거장치를 설치한다. 고로 슬래그 잔골재는 단독으로 콘크리트용 골재로 사용할 수도 있지만 실제 사용에서는 입도 조정이나 바다모래 사용시 염분함유량 저감 등의 목적으로 천연모래와 혼합하여 사용하며, 또한 고로슬래그 잔골재 특유의 성질로 일 평균 20℃ 이상의 고온에서 저장할 때 골재 적치장에서 골재끼리 뭉치는 현상(잠재수경성)이 있기 때문에 시험 성적표에 저장의 안정성을 고려하여 고결되기 쉬운 것과 고결되지 않는 것을 구분해 놓거나 천연골재와 혼합하여 저장해야 한다. 고로슬래그 골재 사용이 활발한 일본의 경우 고로슬래그 굵은 골재는 1927년에, 고로슬래그 잔골재는 1974년에 처음 사용이 되었고, 2009년 기준으로 고로슬래그 굵은 골재 및 잔골재 각각 약 25만 톤 및 180만 톤이 사용되었다⁶⁾.

철강슬래그 중 제강슬래그는 Free CaO에 의한 팽창 붕괴성때문에 건설재료로 재활용하는데 많은 제약을 받으며, Free CaO를 적게는 0.1%에서 많게는 20%까지 다양하게 함유하고 있다. Free CaO의 함량이 1% 이상이 되면 Free CaO는 슬래그 내부로 침투되는 물과 반응하여 Ca(OH)₂의 생성과 더불어 체적팽창을 일으켜 제강슬래그의 붕괴를 초래한다. 이러한 문제 때문에 제강슬래그 처리는 일반적으로 용융된 슬래그를 서냉시키고, Free CaO에 의한 팽창 붕괴성을 방지하기 위하여 약 6개월에서 1년간 야적에 의해 에이징(aging)한 후 도로용 노반재 등으로 사용하고 있다. 하지만 제강슬래그의 고부가가치 재활용에 대한 기술들이 개발되면서 최근 용융된 제강슬래그를 급냉하여 제강슬래그 중의 Free CaO를 화합물 상태로 존재시켜 Free CaO의 생성량을 감소시키는 방법 및 이를 사용한 모르타르 및 콘크리트에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있으며, 제강슬래그, 바텀애시, 석분슬러지를 소성하여 인공경량골재

를 제조하는 시도도 이루어지고 있다⁷⁾.

최근 국내에서도 슬래그의 고품질 골재활용을 위하여 다양한 기술들이 개발되고 있다<표 3>. 고압가스 분사 및 급속 공기냉각에 의한 용융 상태의 제강슬래그 재활용 기술은 기존의 서냉 공기냉각법에 의한 제강 슬래그 처리공정에 비해 Free CaO 방출이 적고 에이징 공정이 필요 없어 전력사용량이 적은 특징을 갖고 있다. 이와 같은 기술로 제조된 골재는 일명 PS Ball<그림 3>로 명명되며, 비교적 높은 내구성과 중량이 요구되는 철도침목 등에 실용화되기도 하였다. 한편, 현대제철(주)에서는 전기로 산화슬래그의 비중을 줄이기 위하여 20~30% 정도의 높은 철 성분을 제거하여 천연골재 수준의 비중을 갖는 제품개발이 성공단계에 있음을 발표하기도 하였다. 또한 고로슬래그에 포함된 산화마그네슘의 팽창을 막고 상태를 안정화 시킨 고로슬래그에 나노기술을 접목하여 천연모래를 대체할 수 있는 슬래그 모래도 개발되었다.

2.4 기타

이외에도 콘크리트제품은 아니나 제철용 용광로에서 나오는 슬래그를 원료로 하여 솜처럼 만든 무기섬유를 제조하기도 하는데, 이를 슬래그 화이버 또는 슬래그




그림 3. 제강슬래그를 골재로 재활용한 PS ball 형상

표 3. 제강슬래그의 고품질 골재활용 기술

기술명	주요 특징
PS ball	고압가스 분사 및 급속 공기냉각에 의한 용융 상태의 제강슬래그를 골재로 활용하는 기술. 장점으로는 Free CaO 방출이 적고 에이징 공정 필요 없음.
특수 고기능성 슬래그 모래	나노기술을 이용하여 실리카포졸란을 10nm 이하의 미세입자로 분쇄한 뒤 이를 물과 혼합해 슬래그에 첨가함으로써 고로슬래그에 포함된 산화마그네슘의 팽창을 막고 상태를 안정화 시킨 고로슬래그 모래임. 장점으로는 활성도가 높기 때문에 천연모래 대비 시멘트 사용량을 10~15% 줄일 수 있고, 콘크리트의 내마모성이 뛰어나며 균열발생도 현저히 적음. 특히 1,000℃ 이상의 고온에서도 잘 견디기 때문에 화재시 콘크리트의 폭열현상을 현저히 감소시킬 수 있음.
낮은 비중의 슬래그 골재	제강슬래그에 포함된 철 성분을 제거하여 천연골재 수준의 비중을 갖는 제강슬래그 골재 기술.

올이라고도 한다. 고로슬래그에 고압의 증기를 분사하여 섬유상으로 만든 것으로써, 경우에 따라 고로슬래그와 자연광석을 고온에서 용융시켜 섬유상으로 만든 미네랄을 주원료로 하여 가볍고 보온 능력이 뛰어난 단열재, 불연재 및 흡음재 등을 제조하기도 하며, 사용온도는 500~650℃ 정도이다. 또한 건식 나노 분쇄기술을 이용해 슬래그를 나노 크기로 분쇄한 뒤 이를 고성능 접착재 원료와 고급 페인트 혼화재, 특수 고무 혼화재, 특수 플라스틱 혼화재 등의 고기능성 신소재를 만드는 기술들도 연구 중에 있다.

3. 맺음말

철강산업물의 부산물인 슬래그는 재활용하기에 성능 면에서나 경제 및 환경보호 측면에서 부족함이 없는 자원이다. 특히 전 세계의 지속가능 발전이라는 명제하에 슬래그의 고부가가치 재활용에 대한 기술들이 급격히 증가하고 있는데, 고로슬래그는 단순히 시멘트 혼화재에서 저발열, 고강도, 고내구성의 하이볼륨 슬래그 시멘트 및 시멘트 100% 대체의 알칼리활성 슬래그 결합재로 발전되고 있다. 뿐만 아니라 성토용 및 잡석용으로 단순 재활용되던 제강슬래그도 고부가가치 활용으로 전환되면서 시멘트 치환 혼화재로 이용되기 위한 기술 및 나노기술과 접목한 고품질의 모래와 급속 공기냉각방식을 적용한 PS ball 등의 천연골재 치환기술로 발전하고 있다. 2015년 이후 슬래그 생산량이 현재의 약 1.5배 이상이 예상되고, 저탄소·재활용에 대한 요구는 더욱 증가할 것으로 전망됨에 따라 슬래그의 고부가가치 콘크리트 재활용 기술은 더욱 다양하게 발전할 것으로 사료된다. 

담당 편집위원 : 유성원(우석대학교) imysw@woosuk.ac.kr

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 「콘크리트와 환경」, 2010.
2. Yang, K. H., and Song, J. K., "Empirical Equations for the Mechanical Properties of Ca(OH)₂-Based Alkali-Activated Slag Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 4, 2012, pp. 431 ~ 440.
3. 대한주택공사 주택도시연구원, 고로슬래그 시멘트·콘크리트의 물성평가 및 현장적용연구, 2006.
4. Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K. and S. H., Nam, "Hydration Products and Strength Development of Calcium Hydroxide-Based Alkali-Activated Slag Mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 29, No. 4, 2012, pp. 410 ~ 419.
5. 임남기, 허재원, 건설분야의 NT기술-실리카폼 대체 재료로서 고강도 콘크리트용 나노슬래그, 건축, 대한건축학회, 2008, pp. 28 ~ 29.
6. 세멘트저널사, 콘크리트용 고로슬래그 활용 핸드북, 2011.
7. 윤섭, 김정빈, 정용, '산업폐기물을 이용한 인공 경량골재 제조에 관한 실험적 연구', 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 247 ~ 248.



최세진 박사는 충남대학교 건축공학과에서 석탄회 대량사용 콘크리트에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후, (주)삼표 기술연구소를 거쳐 미국 U.C. Berkeley에서 Post-doc.을 마치고 2010년부터 (재)포항산업과학연구원 건축건자재연구본부에 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 친환경건설재료, 고성능콘크리트, 섬유보강콘크리트 등이다.

jmkim@kongju.ac.kr



양근혁 교수는 중앙대학교에서 박사학위를 받은 후 영국 University of Bradford에서 연구원으로 근무 하였다. 2003년부터 국립 목포대학교 건축공학과에서 재직하였고, 2010년부터 경기대학교 플랜트·건축공학과에서 부교수로 재직하고 있다. 주 관심분야는 지속가능 콘크리트 재료개발 및 구조 안전성 평가와 전과정 환경영향 평가이다. 2010년 1월에는 알칼리활성 콘크리트 연구로 '이달의 과학기술자상(교육과학기술부)'을 수상하였다.

yangkh@kyonggi.ac.kr