

# 고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 내구성

## The Durability of Concrete Mixed with Blast Furnace Slag



이승태 Seung-Tae, Lee  
군산대학교 토목공학과 부교수  
E : stlee@kunsan.ac.kr



박광필 Kwang-Pil, Park  
한국건설기술연구원  
지오인프라연구실 선임연구원  
E : bamto97@kict.re.kr



정호섭 Ho-Seop, Jung  
(주)세일콘 기술연구소 소장  
E : hsnjs97@nate.com



김종필 Jong-Pil, Kim  
부천대학교 토목과 교수  
E : kjp@bc.ac.kr

### 1. 서론

철강슬래그는 철을 생산하는 과정에서 발생하는 산업부산물로, 철강공정에서 발생하는 철 이외의 불순물과 이 불순물을 제거하기 위해 투입되는 원료의 물리화학적 혼합에 의해 형성되며, 발생하는 공정에 따라 크게 제강슬래그와 고로슬래그로 분류한다.(그림 1) 2000년 중반 이후 우리나라의 철강슬래그 재활용률은 매우 높은 수준에 달하고 있다. 이중 고로슬래그의 경우 약 70%가 시멘트 원료 및 콘크리트 혼화재로, 나머지는 도로용, 성토용 및 비료용으로 재활용 되고 있으며, 제강슬래그의 경우 약 80%가 도로용, 성토용 및 잡석용 등의 저부가가치의 용도로 거의 이용되고 있는 실정이다. 고로슬래그는 고로(용광로)에서 선철을 제조하는 과정에서 얻어지는 부산물로서, 철광석중의 점토성분과 석회석이 합성되면서 형성된다. 고로슬래그의 물리적 특성과 광물학적 구조는 주로 냉각방법에 따라 달라진다. 약 70%는 공기 중에서 서서히



그림 1. 철강슬래그의 생산 방법 및 주요 성분

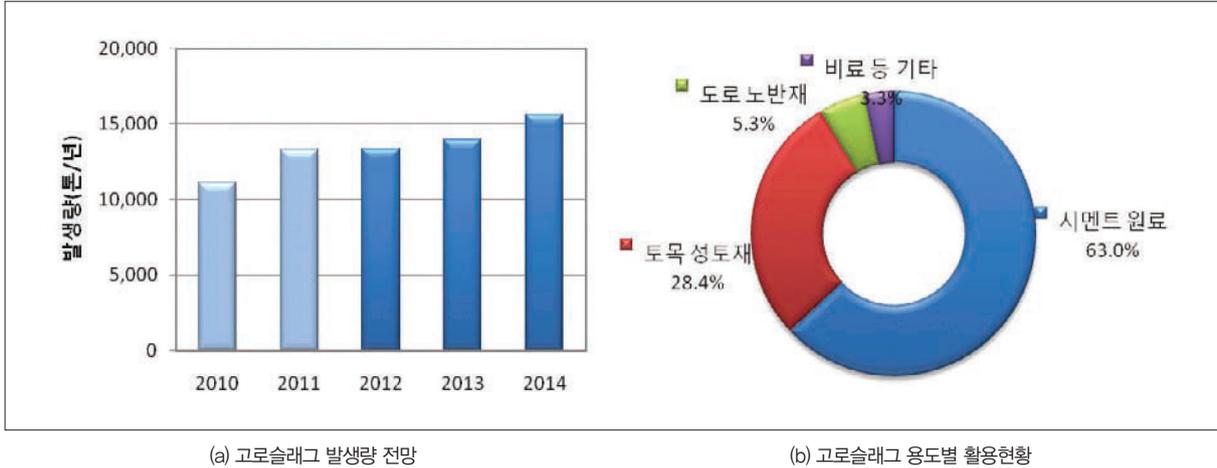


그림 2. 고로슬래그의 발생량 및 활용현황(2011, 철강협회)

냉각 및 분쇄되는데, 분쇄될 때 결정구조를 갖는 압과 같은 재료가 생성되며, 자연산 골재의 훌륭한 대체재로 사용되고 있다. 또, 약 25%는 물에 의하여 냉각처리 되는데, 이때는 급격한 응결로 인하여 알갱이 모양의 유리질 재료가 생성된다. 이와 같이 얻어지는 재료는 시멘트 크기의 입자로 분쇄되어 콘크리트에 사용시 잠재수경성 반응으로 인하여 콘크리트의 장기강도 증진 및 내부 조직의 치밀화로 콘크리트의 내구성 증진에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 고로슬래그의 잠재 수경성 반응은 pH가 높은 환경에서 지속적인 반응이 유지되고 있기 때문에 콘크리트 재료로서 고로슬래그의 사용은 콘크리트의 성능 향상에 크게 기여할 수 있다. 따라서 본 소고에서는 고로슬래그의 일반적인 특징과 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 내구성에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 고로슬래그의 일반사항

### 2.1 고로슬래그의 생산 및 활용

1862년 독일에서 처음 생산된 고로슬래그 미분말은 국내의 경우 1953년에 최초로 생산되었으며, 매년 생산량이 꾸준히 증가하고 있다. 생산되는 고로슬래그의 약

70% 이상은 고로에서 발생한 용융슬래그를 물로 급속 분사시켜 급랭시킨 수재로, 비정질로 형성되며 잠재수경성을 지니고 있어 고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말 제조 시 원료로 주로 활용되고 있으며, 최근 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 시공지침도 제정되었다. 고로슬래그 발생량은 고로의 선철 생산량에 의하여 좌우되며, 그림 2에서와 같이 우리나라의 경우, 최근 고로 증설에 따라 생산량이 계속적으로 증가하는 추세이다. 예를 들어 2014년 연간 발생량은 2011년 대비 200만톤 증가한 1,500만톤 수준에 이를 것으로 전망되고 있으며, 이에 따른 고로슬래그 수요 및 용도 확대를 위한 다양한 방안을 강구할 필요가 있을 것으로 사료된다. 이외에도 입도선별 등의 과정을 거쳐 도로 노반재, 성토용 골재 등으로도 활용되고 있으며 일부는 규산질 비료로도 사용되고 있는 실정이다.

### 2.2 고로슬래그의 성질

고로슬래그의 화학조성은 제철공정에서 사용되는 원재료의 성분, 고로의 종류 및 그 공정에 따라 차이가 있어 그 성분은 상당한 범위에서 변화하게 되나, 철저한 품질관리 체제하에서 생산되므로 품질은 대체적으로 균질

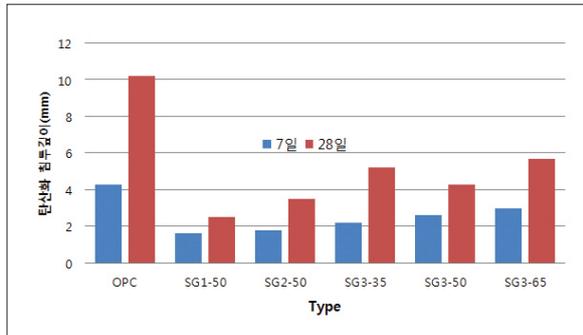


그림 3. 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 탄산화 깊이

하다고 할 수 있다. 고로슬래그의 주성분은 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 MgO 등으로써, 4성분이 93~98% 정도를 차지하고 있으며, 그 외에 소량의 SO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO 및 alkali를 함유하고 있다. 고로슬래그미분말이 콘크리트에 혼입되어 경화작용을 나타내기 위해서는 알칼리성 또는 황산염의 자극물을 첨가하여, OH<sup>-</sup> 및 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 이온이 충분히 존재하는 조건이 필요하다. 이러한 조건하에 고로슬래그 미분말은 포틀랜드시멘트와 마찬가지로 수경성의 특성을 나타낸다. 일단 수화가 시작되면 장기적으로 석회결합 기능도 나타나기 때문에 고로슬래그 미분말은 포졸란반응(pozzolanic reaction)을 나타내는 물질로도 해석되고 있다. 고로슬래그시멘트의 잠재수경성은 주로 유리량과 염기도에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다. 유리량이 많은 슬래그는 내부구조가 불안정한 상태이며, 반응성이 풍부한 결정화의 에너지가 내재되어 있기 때문에 잠재수경성이 크게 된다. 일반적으로 고로슬래그의 반응성은 KS L 5210에 나타난 바와 같이 염기도 1.4이상으로 규정하고 있으며 염기도가 큰 슬래그를 사용한 것이 강도 및 반응성이 좋은 것으로 평가된다. 장기적이 측면에서의 고로슬래그 미분말의 사용에 있어서 이러한 장점이 있음에도 불구하고 일반적으로 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트보다 고로슬래그를 사용한 콘크리트가 상대적으로 초기 강도증진이 느리게 나타나는 것으로 보고 있는데 이는 슬래그시멘트 사용을 기피하는 이유 중에 가장 큰 원인이며, 단점으로 지적되고 있다.

### 3. 고로슬래그 콘크리트의 내구성

#### 3.1 탄산화 저항성

콘크리트가 탄산가스의 침투, 산성비, 산성토양과의 접촉, 화재 등으로 알칼리성이 저하하는 현상을 총칭하여 중성화라 하며, 이 중 콘크리트 내부의 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>), 수산화나트륨, C-S-H, 에트링가이트(ettringite), 모노설페이트(monosulphate) 등이 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 반응하여 탄산화합물 및 기타 물질로 분해되는 현상을 탄산화라 한다. 그림 3은 보통 포틀랜드시멘트(OPC)만 사용한 콘크리트와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 28일 양생 후, 측진 탄산화 실험결과를 나타낸 것으로써, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 탄산화 저항성이 다소 우수하게 나타났다. 그러나 고로슬래그미분말 치환률의 증가에 따라 초기재령에서 침투깊이는 다소 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 다량의 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 잠재수경성 반응으로 인하여 장기재령에서 조직이 치밀화됨으로써 나타나는 특성이 있는 반면, 초기재령에서는 일반 콘크리트보다 수산화칼슘의 생성량이 적기 때문에 초기에 탄산화를 받는 환경에서는 스팀양생 등의 초기양생 대책이 필요하다고 할 수 있다.

#### 3.2 염해 저항성

콘크리트의 염화물에 의한 침식은 황산염 등에 비해서 일반적으로 침식성은 작으나, 철근부식의 원인이 되므로 콘크리트구조물에 상대적으로 큰 영향을 미치게 된다. 콘크리트의 부식에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 세공용액의 pH이며, 또, 염소이온의 침투로 인하여 부식현상이 발생하게 된다. 대표적으로, 염화칼슘에 의한 콘크리트의 열화기구는 근본적으로 Cl<sup>-</sup>이온의 침투정도에 따라 결정된다. Cl<sup>-</sup>이온이 콘크리트 내부로 침투하면 시멘트 경화체 중의 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 반응하여 생성된 가용성

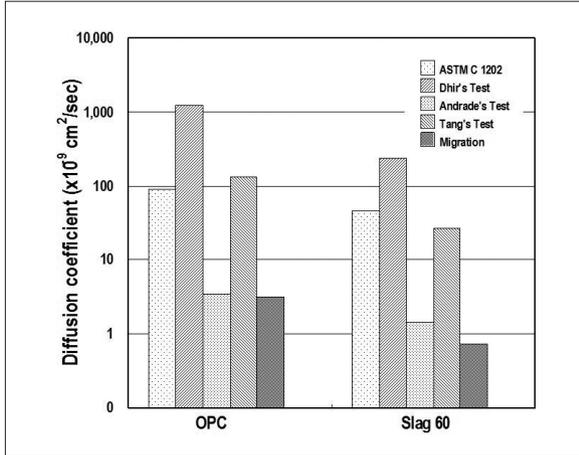


그림 4. 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 실험방법에 따른 확산계수 변화

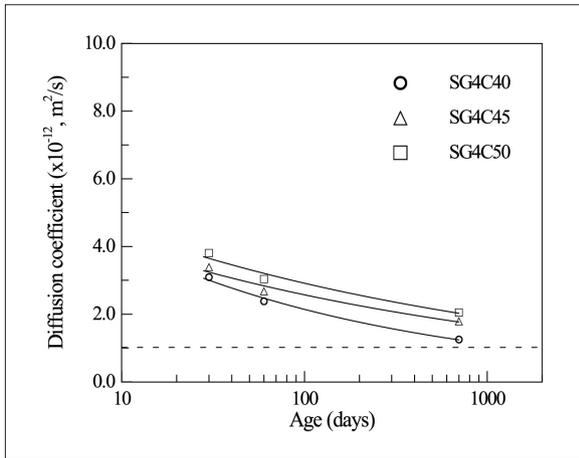


그림 5. 고로슬래그미분말 치환률에 따른 염소이온 확산계수 변화(분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g)

의 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)의 용출에 따라 콘크리트가 다공화되며, 일부는 침식성이 없는 프리델스(Friedel's)염으로 고정된다고 알려져 있다. 그림 4는 W/B 45%이며 재령 1년의 보통 포틀랜드시멘트 및 고로슬래그미분말 60% 혼합 콘크리트에 대하여 급속 염소이온 침투 저항성 실험(RCPT), Dhir, Andrade 및 Tang의 실험방법 및 확산계수 계산모델에 의한 촉진 염소이온 확산실험을 실시한 결과를 정리한 것이다. 고로슬래그 미분말을 함유한 콘크리트가 실험조건에 관계없이 염소이온 확산모델에 따른 확

산계수 값이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또, 그림 5는 고로슬래그미분말의 치환률에 따른 염소이온 확산계수의 변화를 나타낸 것으로서 고로슬래그미분말 치환률이 40~50% 범위에서는 치환률증가에 따라 염소이온 확산계수값이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.3 동결융해 저항성

한랭지역에 건설되는 콘크리트 구조물은 주변 기후 변화에 의하여 공극조직이 변하게 되며, 공극 중 수분의 상 변화에 의하여 체적변화가 발생하게 된다. 액상과 고상의 체적차이에 의하여 발생하는 콘크리트의 성능저하는 주로 동탄성계수 변화 및 중량감소 측정을 통하여 평가할 수 있다. 그림 6은 광물질 혼화재를 사용한 혼합시멘트계 콘크리트의 동결융해 저항성을 고찰하기 위하여 520 사이클까지의 상대동탄성계수 측정결과를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 콘크리트는 W/B 50%이고, 사용된 고로슬래그미분말은 분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g으로 각각의 콘크리트를 14일간 양생하여 급속 동결융해 시험을 실시하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g인 고로슬래그미분말을 50% 대체하여 사용한 고로슬래그 콘크리트의 상대동탄성계수가 상대적으로 높게 나타나는 좋은 결과임을 알 수 있다. 그림 7은 고로슬래그 미분말의 분말도 차이에 따른 동결융해 저항성을 평가하기 위하여 상대동탄성계수를 비교한 결과로 분말도가 4,000cm<sup>2</sup>/g인 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트의 경우, 150 사이클 이후에서 상대동탄성계수가 고분말도 고로슬래그미분말을 사용한 콘크리트보다 상대적으로 높게 나타나는 좋은 결과를 보였다. 그러나, 분말도가 6,000 및 8,000cm<sup>2</sup>/g인 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 520 사이클의 동결융해 반복작용 후 약 40%의 낮은 상대동탄성계수 값을 나타내었다. 결론적으로, 고분말의 고로슬래그미분말을 사용할 경우, 오히려 콘크리트의 동결융해 저항성이 저하되는 것으로 나타났다.

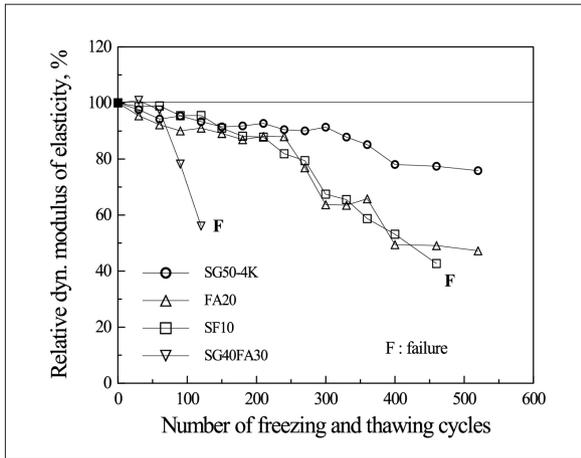


그림 6. 혼합시멘트계 콘크리트의 상대동탄성계수

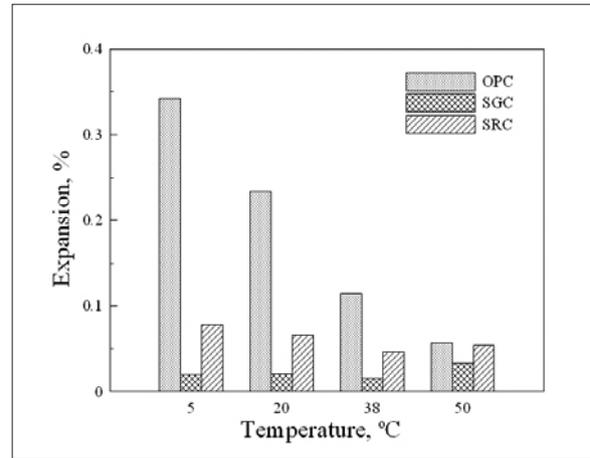


그림 8. 콘크리트의 결합재에 따른 황산염 침식 팽창거동

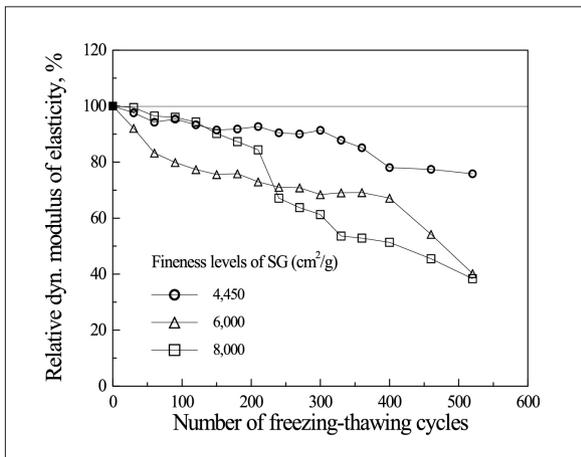


그림 7. 고로슬래그미분말 분말도에 따른 콘크리트의 상대동탄성계수

### 3.4 황산염침식 저항성

일반적으로 콘크리트 내에서 황산염침식과 관련한 팽창이론은 주로 ettringite의 생성과 관련이 있으며 다음 두가지 이론이 보편화되어 있다. 즉, ettringite 결정체의 생성에 따라 인장압력이 증가하는 것과 알칼리 환경에서 ettringite 결정체가 물을 흡수하여 팽윤하는 현상으로 구분할 수 있다. 이외에도 양이온 교환반응으로 생성되는 석고(gypsum)로 인하여 팽창이 발생하기도 한다. 그림 8은 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 내황산염시멘

트(SRC) 및 고로슬래그(SGC) 미분말을 혼입한 시멘트의 황산염에 대한 팽창량을 환경온도별로 측정된 결과이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 고로슬래그미분말을 사용한 모르타르는 포틀랜드계 시멘트와 비교해보면 노출온도에 관계없이 팽창량이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 황산염침식을 받는 콘크리트구조물은 시멘트의 일정부분을 고로슬래그 미분말로 대체할 경우, 고로슬래그의 잠재수경성 반응으로 인하여 다량의 2차 반응 칼슘실리케이트수화물(C-S-H)이 생성되어 콘크리트의 미세구조가 치밀하게 형성되며, 또, 고로슬래그미분말의 대체에 따른 시멘트 중의  $C_3A$  양이 감소되어 황산염침식이 우수하게 나타나게 된다. 이러한 이유로 인하여 황산염 및 화학적 침식을 받는 지역에 타설되는 콘크리트구조물의 경우 고로슬래그미분말을 치환하여 사용하는 것이 점차적으로 권장되고 있는 실정이다.

### 4. 결론

철강슬래그는 1,500°C 이상의 고온의 용광로에서 형성되므로 불순물이 포함되지 않고 환경호르몬, 다이옥신과 같은 유해물질이 없으며, 크롬이나 납과 같은 유해중금속이 용출되지 않는 자원순환형 재료라고 할 수 있다. 또한

시멘트 원료 혹은 토목용, 콘크리트용 골재로 활용할 경우 천연자원을 보전함과 동시에 에너지 및 CO<sub>2</sub>를 저감할 수 있는 재료로써 슬래그의 가치가 재조명되고 있는 실정이다. 특히 전 세계의 지속가능 발전이라는 명제하에 슬래그의 고부가가치 재활용에 대한 기술들이 급격히 증가하고 있으며, 고로슬래그는 단순히 시멘트 혼화재에서 탈피하여 저발열, 고강도, 고내구성의 하이볼륨 슬래그 시멘트 및 시멘트 100% 대체의 알칼리활성 슬래그 결합재 등로도 발전되고 있다. 고로슬래그는 유용한 잠재수경성 물질이고, 다른 공업적 부산물과 달리 화학조성과 성질이 안정적이라는 특징이 있다. 특히 우리나라의 경우, 고로슬래그 발생량이 많기 때문에 이를 적극적 활용하는 것은 매우 중요하다. 콘크리트의 내구성에 영향을 많이 미치는 염해, 탄산화, 동결융해 및 화학적침식 등을 받는 지역에 신축되는 구조물에 고로슬래그를 사용하는 것은 구조물의 내구성 증진 및 구조물의 유지관리 측면에서 매우 유리하다고 할 수 있다. 2015년 이후 고로슬래그 생산량이 현재의 약 1.5배 이상이 예상되고 있으며, 저탄소·재활용에 대한 요구는 더욱 증가할 것으로 전망됨에 따라 고로슬래그를 사용한 고부가가치 콘크리트 재활용 기술은 더욱 다양하게 발전할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 김동현 외 “철강슬래그 발생, 재활용 현황 및 전망”, 한국콘크리트학회, 2012.
2. 이승헌 외 “고로슬래그의 수화반응 메커니즘”, 한국콘크리트학회, 2012.
3. 한국건설기술연구원, “고로슬래그미분말 누수방지재료를 이용한 보수보강공법 개발”, 한국건설기술연구원, 2008.
4. 김진철, “전위차를 이용한 콘크리트 중의 염소이온 확산평가와 고정화 특성 연구”, 한양대학교, 2000.
5. 이승태 외 “환경온도의 조건을 받는 시멘트 경화체의 황산염치식 저항성 평가”, 한국콘크리트학회, 2007.
6. 이승태 외 “해수의 영향을 받은 콘크리트의 동결융해 특성”, 한국콘크리트학회, 2011.
7. 박광필 외, “복합적 요인에 의한 콘크리트의 내구성능저하”, 한국콘크리트학회, 2010.