

고로슬래그 미분말 활용에 의한 콘크리트의 CO₂ 저감기술

CO₂ reduction technology of concrete by utilizing blast furnace slag powder concrete



류동우
Dong-Woo Ryu

1. 서론

고로슬래그는 철광석, 코크스, 석회석을 원료로 하는 고로(용광로)에서 선철을 제조하는 공정에서 발생하는 산업부산물이며, 발생 슬래그의 냉각방식에 따라 급냉 수쇄 슬래그와 서냉 슬래그로 구분된다. 급냉 수쇄 슬래그는 시멘트의 원료 및 콘크리트용 혼화재료 등으로 주로 활용되고 있으며, 서냉 슬래그는 도로용 골재 또는 성토용 골재로서 활용되고 있다. 서냉 슬래그는 최근 도로건설의 감소 및 콘크리트 재활용의 증가로 인하여 점차 그 사용량이 감소하고 있으며 비교적 부가가치가 높은 급냉 수쇄 슬래그가 고로슬래그 생산량의 약 70~80%를 차지하고 있다.

고로슬래그 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 미분말을 혼합하거나 클링커와 고로슬래그를 혼합분쇄 또는 단독분쇄 후 혼합 제조하는 혼합시멘트로서 KS L 5210 「고로슬래그 시멘트」에서는 고로 슬래그의 함유량에 따라 1종, 2종, 3종으로 규정되어 있다. 현재 국내에서 유통되고 있는 고로슬래그 시멘트의 약 90% 이상은 2종으로 고로슬래그의 함유량은 30~60%이다. 이러한 고로슬래그 시멘트는 거의 모든 콘크리트 구조물에 적용이 가능하지만 조기강도가 요구되는 콘크리트 부재나 콘크리트 2차 제품 등에서는 그 사용이 한정되고 있다. 현재 국내 고로

슬래그 미분말 판매량의 대부분은 고로슬래그 시멘트용 혼화재로 사용되고 있으며, 콘크리트 제조시 그 치환율에 따라 대량의 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있는 시멘트 대체 재료이다. 이러한 고로슬래그 미분말은 CO₂ 저감효과 뿐만 아니라 콘크리트의 수화발열량 감소, 알칼리골재 반응 및 염해 억제, 장기강도 증진 등 내구성 개선에 우수한 특성을 가지고 있다.

본고에서는 철강산업의 부산물인 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 활용시의 CO₂ 발생저감효과 및 향후 사용 확대 가능성에 대하여 일본콘크리트학회¹⁾에 발표된 내용을 일부 발췌해 소개하고자 한다.

2. 고로슬래그 미분말의 CO₂ 저감효과

(1) 제조시의 CO₂ 발생량

포틀랜드 시멘트는 소성공정에 있어서 석회석의 열분해 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$)와 소성에 필요한 연료에서 CO₂가 발생한다. 한편 고로슬래그 미분말은 소성이 필요없기 때문에 그 치환율에 비례해서 시멘트 제조시에 발생하는 CO₂량을 저감할 수 있다. 시멘트 1톤당 CO₂ 배출량은 <표1>과 같다. 예로 고로슬래그 시멘트 2종은 제조시 약 500kg/t의 CO₂를 배출하지만 포틀랜드 시멘트의 약 800kg/t에 대하여 약 40% 적다. 재료의 제조에서 양생종료까지 배출되는 전 CO₂중에서 시멘트 제조시 발생하는 CO₂가 대부분을 점하기 때문에 포틀랜드 시멘트에서 고로슬래그 시멘트 2종으

* 대전대학교 건축공학과, 전임강사

Department of Architectural Engineering Daejin University
E-mail : dwryu@daejin.ac.kr

로의 치환에 의해 콘크리트의 CO₂ 배출량을 약 30% 저감하는 것이 가능하다³⁾.

<표 1> 시멘트 1톤당 CO₂ (Kg) 배출량²⁾

CO ₂ 배출원	포틀랜드 시멘트 CO ₂ 배출량 ¹⁾	고로 시멘트 2종 CO ₂ 배출량 ²⁾	CO ₂ 저감량 ① - ②	CO ₂ 저감률 (%)
석회석	478.9	282.7	196.2	41
에너지	319.2	198.0	121.2	38
계	798.1	480.7	317.4	40

(구입전력분의 배출량을 포함하지 않음)

<표2>는 동일 공장에 있어서 고로슬래그 미분말 4000과 6000의 CO₂ 원단위의 일례를 나타낸 것이다. 산정 대상은 수쇄슬래그 수용에서부터 공장출하까지의 공정으로 하였으며 환경성(環境省)의 배출계수를 사용했다. 고로슬래그 미분말은 수쇄 슬래그를 건조·미분쇄한 후 분급기에서 소정 분말도의 것을 선별해서 제조하지만 건조열원의 종류, 분쇄기의 종류, 분급의 방법에 따라 CO₂ 원단위가 다르다. 과거에 보고된 고로슬래그 미분말의 CO₂ 원단위로서는 콘크리트 구조물의 환경성능조사(시안)⁴⁾에 40.26kg/t(고로슬래그 미분말 4000)으로 나타나고 있다.

고로슬래그 미분말 6000은 4000에 비하여 분쇄 및 분급시 전력을 많이 사용하기 때문에 CO₂ 원단위는 크지만 포틀랜드 시멘트와 같은 열분해나 소성에 기인하는 CO₂ 배출이 없고 포틀랜드 시멘트의 CO₂ 원단위에 비교하면 대단히 작다¹⁾.

<표 2> 고로슬래그 미분말의 CO₂ 원단위 일례

고로슬래그 미분말의 종류		원단위	CO ₂ 원단위	
			연료	전력
4000	연료	0.94 (l/t)	26 (kg/t)	20.9 kg/t
	전력	48.7 (kWh/t)	18.3 (kg/t)	
6000	연료	0.94 (l/t)	26 (kg/t)	52.7 kg/t
	전력	133.9 (kWh/t)	50.1 (kg/t)	
포틀랜드 시멘트	석회석 탈탄산 기원		478.9 (kg/t)	798.1 kg/t
	화석연료 연소 기원		319.2 (kg/t)	

(2) 슬래그 치환율과 CO₂ 발생량

<표3>에 단위결합재량 350kg/m³의 콘크리트에 관하여 결합재에 기인한 CO₂ 배출량의 일례를 나타내었다. 고로슬래그 미분말 및 포틀랜드 시멘트의 CO₂ 원단위는 <표2>의 값을 이용하였다. 결합재에 기인한 CO₂ 배출량은 슬래그 치환율과 거의 같은 정도로 감소하였으며, CO₂ 저감율은

고로슬래그 미분말 4000과 6000에서 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

<표 3> 고로슬래그 미분말의 치환율과 결합재에 기인한 CO₂ 배출량의 일례

슬래그 치환율		0%	20%	30%	40%	50%
단위량 (kg/m ³)	포틀랜드 시멘트	350	280	245	210	175
	고로슬래그 미분말	0	70	105	140	175
고로슬래그 4000	CO ₂ 배출량(kg/m ³)	279	225	198	171	143
	CO ₂ 저감율(%)	0	19	29	39	49
고로슬래그 6000	CO ₂ 배출량(kg/m ³)	279	227	201	175	149
	CO ₂ 저감율(%)	0	19	28	37	47

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 성상은 슬래그 치환율에 좌우된다. 슬래그 치환율의 선정에 있어서는 각종 지침을 참고하고 싶지만 염해 대책 등 콘크리트의 내구성을 특히 중시하는 경우에는 50% 이상이 바람직하고 초기강도가 요구되는 경우에는 치환율을 작게 하던가 분말도가 큰 고로슬래그 미분말을 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 이유로 2cycle/day 이상으로 제조되는 콘크리트 2차 제품에 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우에는 현저한 내구성의 개선과 초기강도의 양립에 어려운 것이 많다. 그러나 슬래그 치환율이 작은 경우도 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트보다 내구성이 향상하기 때문에 금후에는 CO₂ 저감의 관점에서 이용촉진이 기대된다. 특히 콘크리트 2차 제품에 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우에 증기양생 조건의 변경이 필요한 것은 거의 없고, 그것에 따른 CO₂ 발생량의 증가는 없다.

(3) 내구성 개선과 장수명화에 의한 CO₂ 저감

고로슬래그 미분말은 시멘트의 수화반응에서 생성한 수산화칼슘과 반응하여 안정한 수화물로 되는 것과 함께 경화체 조직을 치밀화한다. 게다가 시멘트에 비해 염소이온이나 알칼리 이온의 고정능력이 크다. 따라서 고로슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재로서 사용하면 수밀성, 화학저항성, 내해수성, 염분차폐성, 알칼리실리카 반응억제 등이 향상되는 것으로 알려져 있다. 고로슬래그 미분말이 콘크리트용 혼화재로서 사용되어져 왔던 목적의 대부분은 이러한 내구성 개선을 기대한 것이며, 고로슬래그 미분말을 적절히 사용함으로써 콘크리트 재료에 기인하는 CO₂ 저감뿐만 아니라 콘크리트 구조물의 장수명화에 의한 CO₂ 저감을 도모할 수 있는 가능성이 상당히 높다.

3. 고로슬래그 미분말의 특성을 활용한 향후 사용확대 가능성

(1) 골재자원 고갈화에 대한 대응

국내에서도 향후 한층 더 양질의 골재가 부족하기 때문에 저품질 골재나 순환골재의 사용을 도모할 필요성을 느끼고 있다. 고로슬래그 미분말은 알칼리골재반응 억제대책으로서 아주 유용하며 순환골재를 이용한 콘크리트에도 그 사용이 필요하게 되는 경우가 증가할 것으로 예상된다. 특히 일본에서는 프리캐스트 콘크리트 제품은 ‘사양규정’에서 ‘성능규정’으로 JIS 규격이 개정되었기 때문에 사용재료의 자유도가 향상됨에 따라 다양한 골재사용의 요구가 증가함과 동시에 고로슬래그 미분말의 사용확대가 전망된다.

(2) 융설제에 의한 염해의 예방

겨울철 도로결빙을 방지하기 위하여 도로면에 융설제가 살포되고 있지만 그 주성분은 CaCl₂, NaCl로 있기 때문에 내륙지역에서도 콘크리트 구조물의 염해피해가 증가하고 있다. 고로슬래그 미분말의 염분차폐성능을 활용해서 기존의 해안지역 뿐만 아니라 향후 내륙적설지역에서의 도로공사에 있어서도 사용확대가 전망된다.

(3) 육가 크롬의 용출 억제

고로슬래그에는 육가 크롬이 포함되어 있지 않기 때문에 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트 경화체는 육가 크롬의 용출이 적다. 이 기능을 활용해서 지반개량공사에 있어서 토양오염을 방지하기 위해 고로슬래그 미분말의 사용이 확대되고 있다.

(4) 장기강도 증진을 활용한 보증재령의 장기화

조기강도를 필요치 않는 구조물이나 부위에서는 콘크리트 강도의 보증재령을 28일에서 56일 내지 91일로 장기화하는 것이 가능한 경우가 있다. 이러한 장기보증재령 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 재령 28일에서 배합설계한 콘크리트에 비해 단위시멘트량을 적게 하는 것이 가능하다. 그 결과 CO₂ 배출량이 더욱 저감할 뿐만 아니라 수축이나 단열온도상승이 적게 되고 내구성이 우수한 콘크리트가 된다. 이미 토목분야 뿐만 아니라 건축분야에서도 시공이 되고 있고 2000년 일본건축학회의 조사에서 고로시멘트 B종(국내의 경우 고로슬래그 시멘트 2종)이 시공된 건물 중 35% 이상의 건물에 56일 내지 91일의 강도 보증재령에서 시공되고 있다. 또한 이와 같은 콘크리트는

단위시멘트량이 적기 때문에 경제적인 생산이 가능하다.

(5) 저발열형 고로슬래그 시멘트의 개발

일본의 여러 시멘트 회사에서는 「저발열형 고로시멘트 B종」이 개발·판매되어 매시브한 콘크리트 구조물이나 부위에 있어서의 시공실적이 최근 늘어나 주목받고 있다. 이 시멘트는 슬래그의 치환율을 대략 55%정도까지 늘림과 동시에 분말도가 작은 고로슬래그 미분말을 혼합하고 있다. 그 결과 시멘트 제조시의 CO₂ 발생량을 더욱 저감할 뿐만 아니라 앞서 기술한 고로슬래그의 우수한 내구특성을 한층 강화하였다. 주요 용도로는 기존의 교각이나 교대 이외에 상하수도 관선, 플랜트나 탱크의 기초, 건축물의 기초로 확대되어 2000년대 사용실적이 그 이전에 비해 10배 이상 증대하였다.

4. 고로시멘트 사용확대를 촉진하기 위한 정부대처방안

(1) 일본 국토교통성의 고로시멘트에 관한 그린구입 조달방침

고로시멘트는 그린조달법(Green Procurement Law)의 특정조달 품목에 지정되어 있기 때문에 정부는 그 조달을 추진하고 보급 확대를 도모하고 있다. 향후 각 지방자치단체나 민간기업 등도 포함하여 그린조달을 추진함으로써 고로시멘트의 수요확대가 기대된다. 정부 최대의 시멘트 조달 부처로 있는 국토교통성은 이하와 같이 그린구입 조달방침을 정하고 있다⁹⁾.

16. 공공공사

고로시멘트에 관해서는 공급상황에 지역차가 있는 것에 유의하면서 하천공사에 있어서 호안기초, 도로공사에 있어서 교량상하부공, 항만공사나 해안공사에 있어서 소파(테트라포드) 블록, 공항공사에 있어서 포장 등에서 조기강도를 필요로 하지 않는 경우에 그 사용을 추진한다.

국토교통성은 굵은 글씨로 표시한 부분 즉, 「고로시멘트에 관해서는 공급상황에 지역차가 있는 것에 유의하면서 조기강도를 필요로 하지 않는 경우에 그 사용을 추진한다.」가 그린조달 지침의 취지로 있다.

「하천공사에 있어서 호안기초, 도로공사에 있어서 교량상하부공, 항만공사나 해안공사에 있어서 소파(테트라포드) 블록, 공항공사에 있어서 포장 등」이란 어디까지나 「조기강도를 필요로 하지 않는 경우」의 예시로 있기 때

문에 주의가 필요하다⁶⁾.

(2) 동경도 건축물 환경계획서 제도 및 CASBEE

동경도 건축물 환경계획서 제도⁷⁾나 20개 이상의 지자체에서 도입되고 있는 CASBEE(건축환경 종합성능평가 시스템)⁸⁾은 환경배려를 촉진하기 위하여 특정 건축물의 건축주에 대하여 환경계획서의 제출을 의무사항으로 하고 있다. 이러한 제도에서는 고로슬래그 B종은 Eco-materials으로서의 가점대상으로 예를 들면 지하구조물에 사용하면 1포인트가 부여된다.

(3) 주택품질확법의 주택성능 표시제도에 있어서 특별평가방법 인정

주택품질확보 촉진 등에 관한 법률(주택품질확법)의 주택성능 표시제도 기준에서는 콘크리트의 물시멘트비 산정방법이 고로시멘트는 보통시멘트와 다르다. 이것에 대응해서 철강슬래그 협회에서는 일정조건하에서 물시멘트비의 산정방법을 동일로 하는 국토교통대신의 특별평가방법 인정을 취득하였으며 그 내용과 인정서의 사용방법을 홈페이지에서 공개하고 있다.

5. 결론

대표적인 CO₂ 대량 배출산업으로 인식되고 있는 시멘트 산업분야에서는 IEA(세계에너지 기구)와 함께 클링커 소성에 있어서의 석회석 열분해 및 연료사용에 따른 CO₂를 저감하기 위해 세계 전체의 클링커/시멘트 생산비율을 2006년 78%에서 2050년까지 71%로 삭감한다는 목표를 세워두고 있다(시멘트기술 로드맵 2009⁹⁾). 이러한 관점에서 소성이 필요치 않은 고로슬래그의 사용은 산업부산물의 유효 활용과 CO₂ 대량저감이라는 두가지의 목표를 동시에 해결할 수 있는 환경부하 저감 대책이다.

특히 고로슬래그 미분말은 콘크리트 제조시 사용목적에 따라 슬래그 치환율을 조절하거나 알칼리 자극제 등을 사용하여 조기강도 발현율을 높임으로써 광범위한 분야에서 대량 사용이 가능하기 때문에 그 특성에 대한 충분한 검토가 이루어진다면 앞으로의 사용 확대가 기대된다.

참고문헌

- 1 日本コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp58 ~ 65, 2010.9
- 2 日本セメント協会, セメントのLCIデータの概要, 2009.9.19

- 3 日本土木学会, コンクリート委員会コンクリートの環境負荷評価研究小委員会, コンクリート技術シリーズNo.44, コンクリートの環境負荷評価, I-24 ~ I-37, 2002.5
- 4 日本土木学会, コンクリートライブラリー125, コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)
- 5 国土交通省 報道発表資料, 環境物品等の調達推進を図るための方針について, 2009.7
- 6 鉄鋼スラグ協会, 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用2010年版
- 7 東京都環境局, 建築物環境計画書制度
- 8 (財)建築・環境省エネルギー機構, CASBEE(建築環境総合性性能評価システム)
- 9 IEA,WBCSD, Cement Technology Roadmap 2009-Carbon emissions reductions up to 2050.