

# 시멘트·콘크리트에 혼합·혼화재 사용에 따른 유의점 고찰

이 승 현 (군산대학교 신소재공학과 교수)

## 1. 머리말

시멘트 제조에서 배출되는 CO<sub>2</sub>의 대부분은 소성 공정에서 발생하기 때문에 시멘트 클링커의 생산량을 감소시킬 수 있는 고로 슬래그 미분말, 플라이 애시의 이용은 시멘트의 CO<sub>2</sub> 배출량 저감에 유효하다. 따라서 최근에 국내에서 고로 슬래그 미분말, 플라이 애시를 시멘트 클링커 대신에 다량으로 치환하여 콘크리트 구조물에 적용하려는 연구·개발이 진행되고 있다. 그러나 CO<sub>2</sub> 저감이라는 관점이 너무 강조되다보니까 고로 슬래그 및 플라이 애시 다량 사용에 따른 유의점에 대해서는 소홀히 하는 경향이 있다.

고로 슬래그 미분말을 콘크리트에 사용하면 수화열에 의한 온도상승 억제, 알칼리 골재반응의 억제, 황산염이나 해수에 대한 화학저항성의 향상 등과 같은 장점이 있다. 그러나 고로 슬래그 미분말의 분말도 및 치환율에 의해 상기와 같은 장점이 발휘되지 않는 경우가 있다. 예로서 고로 슬래그 미분말 혼화에 의한 콘크리트 온도상승 억제는 치환율이 50% 이상이 되지 않으면 효과가 없는 것으로 밝혀졌으며, 고로 슬래그의 분말도가 증가하면 자기수축과 수화열이 증대되어 구조물에 균열을 초래할 수 있다는 것이 최근에

보고되고 있다.

플라이 애시를 콘크리트 혼화재로 사용하게 되면 유동성의 개선, 수화열의 저감, 장기강도의 증대, 알칼리 골재반응의 억제, 내해수성의 향상 등의 효과가 기대된다. 특히 이 중에서도 수화열 저감과 알칼리 골재반응의 억제는 플라이 애시의 효과 중에서도 매우 중요하다. 현재 플라이 애시는 특별한 경우를 제외하고 콘크리트 혼화재로서 사용량은 20% 미만이어서 플라이 애시의 품질편차 즉 유리질의 함유량, 미연탄소의 함유량, 화학조성의 불균일, 광물조성의 불균일 등이 차이가 나도 콘크리트의 특성에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 플라이 애시의 사용량이 20%를 넘게 되면 플라이 애시의 품질 편차가 콘크리트 특성에 미치는 영향이 커지므로 플라이 애시의 품질관리 기술개발이 필요하다.

앞으로 콘크리트에 요구되는 성능의 다양화와 온실가스 저감에 부응하기 위해서라도 시멘트 및 콘크리트에 혼합·혼화재 사용은 지금보다 많아질 것으로 예상된다. 따라서 혼합·혼화재의 장점만이 강조되는 것이 아니라 단점도 면밀히 검토하여 혼합·혼화재 사용에 따른 콘크리트의 특성을 명확하게 하는 것은 매우 중요하다. 그리고 포틀랜드 시멘트만큼 오랜 시간동안 검증된 건

설재료는 없기 때문에 포틀랜드 시멘트 치환에 따른 구조물의 안전성과 장수명이라는 측면에서도 반드시 검증이 필요하다.

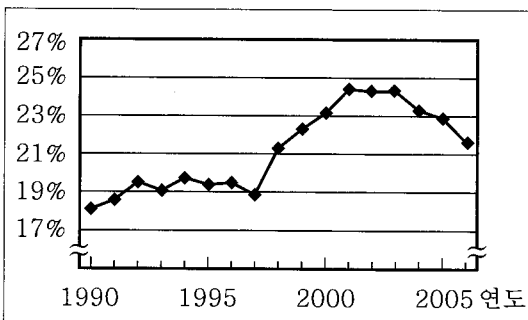
## 2. 혼합·혼화재의 재료설계상의 고려사항

혼합시멘트란 시멘트 클링커의 일부를 혼합재로 치환한 것으로서, 혼합재로는 선철 제조 시에 부생하는 고로 슬래그나 화력발전소에서 발생하는 플라이 애시 등이 쓰이고 있다. 또 유립 등에서는 석회석 미분말 등이 사용되고 있다. 우리나라 및 일본에서 사용되는 혼합시멘트는 대부분이 고로 슬래그 시멘트이다. 국내에서 고로 슬래그 시멘트의 생산 비율은 2001년 10.7%, 2005년 17.4%에서 매년 1% 씩 증가하여 2008년에는 21.4%를 점유하였으나 그 후 점차 감소하여 2010년에는 17.1%로 감소하였다. 그 이유로는 시멘트 가격의 하락으로 고로 슬래그 시멘트의 사용에 따른 가격 경쟁력이 저하됐기 때문으로 생각된다. 일본에서는 <그림-1>에서 보듯이 최근에는 고로 슬래그 시멘트 생산량이 감소하는 경향이 있다. 이러한 요인으로서 일본 사회의 경기침체에 따른 것도 있으나 고미분말 고로 슬래그를 사용한 콘크리트 구조물에서 초기균열 등의 결함이 발생한 것도 큰 영향을 준 것으로 생

각된다. 이들 결합은 고로 슬래그 혼합시멘트의 특징을 충분히 고려하지 않는 재료설계에서 비롯된 것으로 생각된다. 그러므로 혼합시멘트의 요구 성능을 충분하게 고려한 재료설계는 혼합시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트와 차별화하여 발전해 나가는데 매우 중요한 요소이다. 각각의 혼합·혼화재를 시멘트에 치환재로 이용할 때 재료설계상 고려해야 할 사항에 대하여 <표-1>에 정리하였다.

어떠한 혼합·혼화재도 엘라이트( $C_3S$ )의 초기 수화반응을 촉진한다. 이것은 혼합재의 표면에 수화생성물이 석출하기 때문에 초기에 엘라이트 표면에 생성하는 수화물 층이 얇아짐으로써 반응이 촉진하는 미분말 효과에 의한 것이다. 또한 석회석 미분말은 고로 슬래그 미분말이나 플라이 애시에 비하여 동일한 분말도에서도 엘라이트의 초기 수화 촉진 효과가 높다. 이것은 석회석 표면에 수화생성물이 석출하기 쉽기 때문이라고 생각되나, 결정구조에 기인하는 것인지 입자의 표면특성인지에 관해서는 밝혀진 것이 없다.

한편 고로 슬래그 미분말이나 플라이 애시는 벨라이트( $C_2S$ )의 수화를 지연시킨다. 특히 높은 비율의 벨라이트 시멘트에 플라이 애시를 사용한 경우는 이러한 경향이 강하다. 그러나 플라이 애시의 경우 재령 2년 경과, 고로 슬래그 미분말의 경우 재령 3개월 경과 시에는 벨라이트의 수화 지연 영향은 거의 관찰되지 않는다. 간극질의 수화는 플라이 애시, 석회석 미분말을 사용한 경우에 지연된다. 플라이 애시의 경우에는 특히  $C_4AF$ 의 수화가 지연된다. 석회석 미분말의  $C_3A$  초기수화 억제제는 표면에 생성하는 겔 상 수화물의 작용 때문이다.  $C_3A$ 의 초기수화에서 표면에 생성하는 겔 상의 수화물 중에  $SO_4^{2-}$ 나  $CO_3^{2-}$  등 여러 가지 이온이 존재하면 이온의 확산이 억제되어  $C_3A$ 의 수화가 억제된다. 시멘트의 초기 유동성의 확보나 수화열 저감으로서는 석회석 미분말 이용이 효과적이라고 할 수 있다.



출처: 사회환경머티리얼, 한국세라믹학회 시멘트부회, 한림원, 2009.

<그림-1> 일본에서의 고로 슬래그 시멘트의 생산비율

<표-1> 혼합·혼화재의 반응적인 측면에서 재료설계상 주의해야 할 사항

종 류	혼합·혼화재의 반응	시멘트 구성 화합물	수화 생성물
고로 슬래그 미분말	<ul style="list-style-type: none"> <li>*초기부터 반응이 진행(수화열 억제효과 낮음)</li> <li>*장기적 반응은 거의 진행하지 않음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*벨라이트의 반응이 장기적으로 진행(91일 이전에는 수화 억제)</li> <li>*간극질 수화에는 영향을 주지 않음</li> <li>*엘라이트 반응 촉진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*저염기도를 쓴 경우, 분말도를 미세하게 할 필요가 있으며 수산화칼슘 양이 저하(중성화 저항성이 저하)</li> <li>*모노설페이트 생성이 OPC보다 빠름(중금속 고정화)</li> </ul>
플라이 애시	<ul style="list-style-type: none"> <li>*7일 정도까지는 반응하지 않음</li> <li>*유리상이 반응, 초기에는 플라이 애시의 염기도가 중요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*벨라이트의 수화 억제</li> <li>*C<sub>4</sub>AF의 수화 억제</li> <li>*엘라이트의 반응 촉진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*낮은 CaO/SiO<sub>2</sub>비의 C-S-H 생성</li> <li>*포졸란 반응에 의한 CH 생성량 저하</li> </ul>
석회석 미분말	<ul style="list-style-type: none"> <li>*시멘트의 간극질 양에 의존</li> <li>*반응한 CaCO<sub>3</sub>의 80% 정도가 모노카보네이트를 생성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*엘라이트의 현저한 반응 촉진</li> <li>*C<sub>3</sub>A의 초기수화 억제</li> <li>*C<sub>4</sub>AF의 수화 억제</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*에트린자이트와 모노카보네이트를 생성</li> <li>*모노설페이트는 생성하지 않음</li> </ul>

출처 : 사회환경머티리얼, 한국세라믹학회 시멘트부회, 한림원, 2009.

혼합·혼화재로 보통의 환경 하에서 반응하여 강도발현에 관여하는 것은 고로 슬래그 미분말과 플라이 애시이다. 석회석 미분말은 반응은 하지만 C<sub>3</sub>A와의 반응으로 모노카보네이트를 생성하지만 장기적인 강도증진에는 기여하지 않는다. 그리고 고로 서냉 슬래그 미분말은 CO<sub>2</sub>와 반응하여 조석을 치밀화 시키지만, 시멘트로서의 통상의 사용에 있어서는 이를 재료설계에서 고려하는 것은 곤란하다. 따라서 혼합시멘트의 혼합재의 반응과 관련하여 강도발현성 등으로 재료설계상으로 고려해야 할 것은 고로 슬래그 미분말과 플라이 애시이다.

고로 슬래그 미분말을 혼합·혼화재로 사용할 때 재료설계상 고려해야 할 사항은 고로 슬래그의 염기도와 분말도이다. 염기도가 낮은 고로 슬래그를 사용한 경우에는 분말도를 증가시킴으로써 강도를 확보할 수가 있다. 그러나 고로 슬래그의 염기도가 낮은 경우에는 수산화칼슘 생성량

이 저하되므로 염기도의 저하를 분말도로 보충해야 한다. 그러나 결국 수산화칼슘의 생성량이 저하하기 때문에 중성화 저항성 등의 내구성능에 있어서 반드시 같은 성능을 가지지 않을 가능성이 높다. 따라서 고로 슬래그의 염기도를 확보하는 것은 매우 중요하다.

고로 슬래그의 반응에는 분말도나 석고 첨가도 영향을 미친다. 고로 슬래그의 반응율은 분말도에 따라 증가하여 장기까지 유지된다. 한편, 석고 첨가에 의해 초기반응은 촉진되나 이것은 재령 7일 정도까지이며 재령 28일에서는 거의 동일한 반응율을 나타낸다. 이것은 분말도의 조정과 석고 첨가에 의해 요구 성능에 부응하는 고로 시멘트의 재료설계가 가능하다는 것을 보여주고 있다. 단 고로 슬래그의 분말도를 높이는 것은 강도면에서는 유리하나, 초기수화열 억제의 관점에서는 바람직하지 않다.

플라이 애시의 혼합·혼화재로서의 이용을 보

면, 분말도가 같은 경우에도 유리화율이 큰 쪽으로 다르다는 것이 재료설계상의 문제이다. 유리화율의 차이는 1년까지의 콘크리트 강도에 영향을 미친다.

플라이 애시 시멘트를 사용한 콘크리트의 설계기준강도는 재령 56일 또는 91일로 설정되는 경우가 많으며 플라이 애시의 유리화율을 어떻게 제어하는지가 문제가 된다. 또한 어떤 플라이 애시를 써도 재령 7일 정도까지는 반응하지 않고 있어 수화열제어의 관점에서 보면, 시멘트에 치환한 비율만큼 유효하다고 할 수 있다.

### 3. 현재 제기되고 있는 고로 슬래그 미분말의 유의점

일반적으로 고로 슬래그 혼합·혼화 시멘트·콘크리트는 초기강도의 발현은 늦지만, 저발열이고 장기강도의 향상이 우수하여 내구성이 우수한 콘크리트 구조물을 만들 수 있다는 특징이 있어, 수화열의 저감, 화학저항성의 향상, 내해수성의 향상, 알칼리골재반응의 억제 등 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와는 차별화하여 사용되고 있다. 그러나 최근 고로 슬래그의 분말도가 커지면서 상기 효과가 나타나지 않는 경우가 있다. 우리나라에서 시멘트에 대한 고로 슬래그의 사용량은 구조물의 종류나 용도 등을 고려하여 한국산업표준(KS L 5210, 고로 슬래그 시멘트)에 최대 70%까지 사용 할 수 있다. 그러나 현재 초기강도 등을 고려하여 40~50% 정도를 혼합하여 고로 슬래그 시멘트로 판매되고 있으며, 주로 보통 포틀랜드 시멘트 대체용이나 염해나 황산염 저항성을 요구하는 용도 등에 주로 사용되고 있다.

고로 슬래그 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 초기강도가 떨어져 공사기간이 길어지는 등의 문제점이 있다. 따라서 초기강도를

개선하기 위하여 고로 슬래그 시멘트는 고로 슬래그의 분말도를 4,500cm<sup>2</sup>/g 정도로 높여서 출하되고 있다. 이와 같이 고로 슬래그의 분말도를 높임으로서 초기강도가 향상되어 고로 슬래그 시멘트가 초기 강도형이 되면서, 구조물에서 양생기간이나 거푸집의 탈형 시기가 단축되어 시공에 필요한 시간이 단축된다. 그러나 고로 슬래그 시멘트 본래의 특징인 장기 안정성, 내구성이 발휘되지 않고 발열 및 수축량이 커지게 되어 내구성이 저하되는 경우가 있다. 이에 따라 고로 슬래그 시멘트를 100년 정도 사용한 일본 등에서는 고로 슬래그 시멘트에 대한 올바른 사용법에 대한 논의가 일고 있다.

(1) 저열발화의 특징이 나타나지 않고 있다.

고로 슬래그 시멘트(슬래그 함유량 30~60%, 2종)는 초기강도 개선으로 콘크리트의 단열 온도 상승량이 보통 포틀랜드 시멘트보다 크게 되는 경우가 있어, 내구성에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 원인으로는 고로 슬래그 시멘트의 모체인 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 슬래그의 분말도의 증가로 추측되고 있다. 보통 포틀랜드 시멘트의 분말도는 강도 향상을 위해 매년 증가 경향을 나타내어 3,000cm<sup>2</sup>/g에서 3,500cm<sup>2</sup>/g 정도로 상승하였다. 반면에 고로 슬래그 분말도는 초창기에는 3,500cm<sup>2</sup>/g 정도였지만 매년 증가하여 최근에는 4,500cm<sup>2</sup>/g 정도로 약 1,000cm<sup>2</sup>/g 상승했다. 따라서 분말도 향상에 따른 수화반응의 촉진과 반응을 향상으로 인한 수화열 증가가 그 원인으로 생각된다.

(2) 수축량(자기수축 및 건조수축)이 증가한다.

고로 슬래그 분말도의 향상에 따른 자기수축과 건조수축의 증가로 구조물의 균열을 초래하여 내구성을 저하시킬 수 있다. 콘크리트에 있어 건조수축은 구조물에 균열을 일으키는 가장 커다란 원인 중 하나이다. 콘크리트는 외부와 접하

면서 표면에서부터 대기로 수분이 증발되어 건조하기 시작한다. 건조된 콘크리트 외부는 수축 변형을 일으키게 된다. 이렇듯 건조수축은 구조체 내부 전면에 걸쳐 일어나는 자기수축과 다르게 표면에서의 국부적인 현상이 주를 이루며 이후 내부의 직경이 큰 기공부터 수분이 건조하기 시작한다. 이와 같은 현상을 통해 일어나는 균열이 건조수축 균열이며 이는 단위 수량이 클수록, 잔골재율이 높을수록 더 심해진다. 이렇듯 콘크리트는 물을 사용해야하는 것으로 어떤 경우에도 재료설계에 있어 건조수축을 고려해야만 한다. 건조수축에 대한 고로 슬래그 분말도(고로 슬래그 혼합량 50% 기준)에 따른 본인들의 연구결과를 보면, 분말도가 증가 할수록 건조수축이 증가하는 경향을 나타내었으며 그 값은 시판 고로 슬래그 시멘트(분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g)에 비해 분말도 2,000cm<sup>2</sup>/g, 2,500cm<sup>2</sup>/g, 3,000cm<sup>2</sup>/g에서 각각 63%, 40%, 37%의 건조수축이 감소하였다.

최근 고로 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에서 균열을 조사할 경우, 자기수축이 무시할 수 없는 사례로서 보고되고 있으며, 특히 분말도가 큰 고로 슬래그 미분말을 대량으로 배합한 경우 이러한 현상이 나타나고 있다. 자기수축에 대한 고로 슬래그 분말도(고로 슬래그 혼합량 50% 기준)에 따른 본인들의 연구결과를 보면, 고로 슬래그 분말도는 2,000cm<sup>2</sup>/g, 2,500cm<sup>2</sup>/g, 3,000cm<sup>2</sup>/g에서의 자기수축은 재령 7일에 오히려 약간의 팽창을 보인 후 56일까지 팽창이 지속되었다가 56일 이후 수축변형이 일어나기 시작하였으나 그 값이 최종적으로 91일에서  $-19 \times 10^{-6}$ ,  $-18 \times 10^{-6}$ ,  $-11 \times 10^{-6}$ mm의 작은 값을 나타내었다. 이와는 상반되게 분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g급의 일반 고로 슬래그 시멘트로 제작한 콘크리트의 경우, 초기 재령부터 수축을 보이기 시작한 이후 지속적으로 그 값이 증가하여 최종 자기수축은  $-216 \times 10^{-6}$ mm을 나타냈다.

이와 같은 결과를 요약하면 고로 슬래그 시멘트에서 고로 슬래그의 분말도가 증가하면 수축량, 특히 자기수축량이 증가하므로 이에 대비가 필요하다.

### (3) 중성화에 대한 검토가 필요하다.

고로 슬래그 미분말을 사용하는 경우, 포틀랜드 시멘트의 수화에 의해 생성되는 수산화칼슘과 고로 슬래그가 화학반응하기 때문에 수산화칼슘의 양이 적어진다. 따라서 콘크리트 경화체의 pH가 낮아지고 수화물이 공기 중의 탄산가스와의 반응하여 전체적인 중성화 속도가 빨라져서 철근을 부식시킬 우려가 있다.

특히 물/시멘트비가 50% 정도인 보통 콘크리트 경화체의 중성화 문제는 철근 콘크리트에 치명적이므로 고로 슬래그 함유량이 증가할수록 철근 콘크리트 구조물에의 사용은 주의해야 한다. 따라서 고로 슬래그 시멘트는 일반적으로 지하구조물 등 중성화의 영향을 받지 않는 환경 하에서 주로 사용된다.

〈표-2〉는 2008년 일본에서 고로 슬래그 시멘트의 용도를 나타낸 것이다. 일본에서 시멘트 사용량은 71 백만톤이고 이중 고로 슬래그 시멘트 사용량은 14 백만톤으로 19.7%를 나타내고 있다. 위에서 언급한 여러 가지 사항을 고려하여 건축구조물에서는 기초·지하 구조에 6 백만톤 사용되고 상부구조에는 전혀 사용되지 않았다. 토목구조물에서는 교량, 하천공사, 항만공사, 해안공사 등 내해수성이 요구되고 조기강도가 필요하지 않은 곳에 주로 사용되어져서, 건축구조물보다는 토목구조물 사용량이 훨씬 많음을 보여 주고 있다.

## 4. 플라이 애시 사용 시의 유의점

플라이 애시는 화력발전소가 같더라도 사용하는 석탄의 생산지가 다르게 되면 품질은 변화한

〈표-2〉 일본에서 고로 슬래그 시멘트(2종)의 사용 현황(추정)

용도구분		전체 시멘트 사용량(백만톤)	전체 시멘트 중 고로 슬래그 시멘트 사용량	
			비율(%)	사용량(추정, 백만톤)
건축	기초·지하구조	6	20~30	1~2
	상부구조	22	0	0
토목	국토교통성 그린조달	3	94	2
	기타	17	50~60	9~10
프리캐스트 제품		7	약 2	0
고화재		6	20	1
수출		10	0	0
총 시멘트 사용량		71		14

출처 : Concrete Journal, Vol. 48, No. 9, 2010.

다. 현재 대부분의 발전소는 생산지가 서로 다른 몇 종류의 석탄을, 그 품질에 따라서 단독 혹은 배합하여 사용하고 있다. 그렇기 때문에 납품시기가 다르면 사용하는 석탄의 종류가 변화하여 플라이 애시의 품질도 변화하게 될 가능성이 높다는 것을 인식할 필요가 있다.

그래서 플라이 애시 반입시점의 잔량을 파악하고 어떤 시기에 새롭게 납품하는 플라이 애시의 대체 여부를 파악해 둘 필요가 있다. 콘크리트 혼합·혼화재로서 플라이 애시의 사용에 의하여 콘크리트의 특성이 저하하는 사례로서는 소정의 공기량을 연행하기 위하여 필요한 AE제 양의 증가, 소정의 성능을 얻기 위하여 필요한 감수제 및 고성능감수제의 증가, 초기강도의 저하, 중성화 깊이의 증대, 동결융해작용에 의한 표면의 열화 등을 들 수 있다.

이와 같은 특성은 사용하는 플라이 애시의 특성, 배합조건, 양생조건 등에 영향을 받는 것으로, 플라이 애시를 혼합한 콘크리트가 반드시 위에서 열거한 이점과 결점을 지니고 있다고는 단정 지을 수 없다.

또한, 미연탄소의 양에 의하여 콘크리트의 색조가 변화하는 가능성도 있어 특히 2차 제품에 사용하는 경우는 문제가 될 가능성이 있다. 최근

에 플라이 애시의 혼합·혼화재의 양이 증가함에 따라 초기강도의 저하를 막기 위해 알칼리 자극제를 첨가하는 경우가 있다. 알칼리 자극제에 의해 초기강도의 향상은 초래할 수 있지만 알칼리 골재반응, 표면의 취약화, 수축율, 장기강도의 저하 등 구조물에 적용하기 위해서는 집고 넘어가야 할 많은 문제가 있어 사용에 주의가 기울여야 한다.

플라이 애시는 그 기원에 따라 근원식물 중의 무기질과 석탄 생성 시에 혼입한 점토와 암석이 산탄지에 의하여 크게 다르지만, 수은, 카드뮴, 납, 비소 등의 중금속이 미량 함유되어 있다. 플라이 애시가 환경 중에 운반될 경우의 문제를 생각할 때는 플라이 애시와 토양과의 조성 비교, 플라이 애시로 부터 각종 성분의 용출성 등을 유념해 둘 필요가 있다.

보통 포틀랜드 시멘트의 미량원소와 비교하여 붕소, 셀렌 및 수은이 많이 함유되어 있다. 플라이 애시의 용출실험결과를 보면 보통 포틀랜드 시멘트의 용출농도와 비교하여 붕소, 비소 등이 높은 값으로 나타난다. 한편, 6가 크로뮴은 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 낮은 용출농도이다. 또한 경화체인 경우에는 이와 같은 미량성분의 용출은 문제가 되는 경우는 없다.

## 5. 지오폴리머 콘크리트 등 무시멘트 콘크리트에 대한 유의점

지오폴리머 콘크리트는 결합재로서 포틀랜드 시멘트를 필요로 하지 않는 콘크리트로서 CO<sub>2</sub>를 포틀랜드 시멘트보다 적게 배출하기 때문에 저탄소 녹색성장에 부합하는 콘크리트로 회자되고 있다. 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 마찬가지로 골재가 가장 큰 부피를 차지하며 질량으로 환산하면 약 75~80%이다. 지오폴리머 콘크리트는 플라이 애시, 고로 슬래그 미분말 등에 알칼리 활성화제를 혼합하여 반응시키는 것으로 알칼리 활성화제로는 NaOH, 물유리가 대표적으로 사용된다.

NaOH는 NaCl을 전기분해하여 제조하는 것이 일반적으로 제조 시 상당한 전력을 소비하게 되고, Na-Hg 아말감의 분해 공정으로 제조하는 경우에는 수은을 안전하게 취급할 수 있는 폐쇄 공정이 필요하다. 물유리는 주로 건식법으로 제조하며 킬른에서 규석과 소다회를 소성하여 제조하는 것으로 제조공정에서 400~550kg/톤의 이산화탄소가 발생하는 공정이다. 따라서 지오폴리머에 알칼리 활성화제를 사용한다고 해서 이산화탄소를 생각보다 크게 저감한다고는 볼 수 없다. 알칼리 활성화제는 강알칼리의 부식성 물질로 취급, 보관이 까다로우며 특히 콘크리트 제조 공정에서는 기존의 설비와는 다른 설비와 취급의 주의가 필요하다. 중업원의 보건 문제에도 주의를 기울일 필요가 있다. 알칼리 활성화제는 고가이므로 알칼리계 폐기물을 활용하여야 하나 이 경우 안정적인 물성을 발현하기 어려운 점이 있다.

지오폴리머 콘크리트는 알칼리 활성화제와 혼합 시 급격히 경화되거나 건조하는 특성이 있어 알칼리 활성화제는 NaOH와 물유리를 복합해서 사용하는 것이 일반적이다. 지오폴리머 콘크리

트 혼합물은 응집력이 크고 점도가 높아서 기존의 콘크리트 믹서로 혼합이 어려우며 고속으로 혼합을 해야 하는 필요성이 있어 혼합 과정에서 반응열로 인해 온도가 상승하는 단점이 있다.

또한 기존의 성능이 우수한 콘크리트 분산제를 사용하더라도 워커빌리티를 향상시키기가 곤란하다. 지오폴리머 콘크리트를 구조물에 타설하는 경우, 점도가 높아서 진동 다짐으로는 기포의 제거가 불완전하고 따라서 1회 타설 높이를 낮게 해서 매 층마다 충분한 다짐으로 기포를 제거해야 한다. 그러나 다짐 시 액상이 분리되기 쉽고 이로 인해 타설 경계면에 조인트가 발생할 수 있다.

지오폴리머의 양생은 시멘트를 사용한 콘크리트보다 매우 큰 주의가 필요하다. 상온에서 양생하는 경우 상대습도가 높은 상태에 방치하면 반응이 거의 일어나지 않으며 습도를 낮추고 밀봉 양생을 해야 강도가 발현되는 특성이 있다. 밀봉 기간이 짧으면 표면에 소다회에 의한 백화가 발생하는 경우가 있고, 또한 수축이 일어나므로 장기간의 밀봉양생이 필요하다. 따라서 지오폴리머 콘크리트는 상온보다는 45℃ 이상의 고온에서 밀봉양생을 해야 반응을 촉진하고 백화나 수축을 최소화할 수 있다.

이러한 점에서 지오폴리머 콘크리트는 시멘트 사용 콘크리트처럼 레미콘 형태로 구조물에 적용하기는 쉽지 않다. 지오폴리머 콘크리트의 내구성과 신뢰성에 대해서는 충분한 데이터가 부족한 실정이다. 지오폴리머는 원재료나 제품의 물성, 제조 공정상의 특성 때문에 일반 시멘트 사용 콘크리트와는 다른 분야로 적용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

## 6. 맺는 말

건설 산업에서 환경부하를 감소시키기 위해 국내에서 다량 배출되고 있는 고로 슬래그와 플

라이 애시의 사용은 사회적 및 시대적인 요구뿐만 아니라 기업의 니즈의 입장에서 타당하다. 그러나 고로 슬래그 및 플라이 애시 등이 단순히 CO<sub>2</sub> 저감과 혼합·혼화재가 가지는 장점만을 고려하여 사용하게 된다면, 추후에 구조물에 발현되는 단점으로 인해 구조물의 내구성 저하를 초래하여 사용 수명을 단축시킬 수 있는 위험성을 내포하고 있다.

이러한 경우, 오히려 CO<sub>2</sub> 저감 효과는 희석되

고 사회적 비용 증가가 초래되어 본래의 목적과도 어긋나게 될 수도 있다. 따라서 혼합·혼화재가 시멘트·콘크리트 재료로 안전하게 사용하기 위해서는 이에 따른 체계적인 검토가 필요하며, 또한 확립된 기술아래서 안전하게 사용할 수 있도록 혼합·혼화재 사용 콘크리트 제조 매뉴얼, 콘크리트 배합설계지침, 콘크리트의 시공지침 같은 것이 빠른 시일 내에 분야별로 정립되어야 할 것이다. ▲

## 시사 용어 해설

### ▶ 표준지공시지가

국토해양부장관이 전국의 개별토지 약 2,750만 필지 중 대표성이 있는 지가 50만 필지를 선정·조사하여 공시하는 것으로 매년 1월 1일을 기준으로 표준지의 단위면적당 가격(원/m<sup>2</sup>)으로 표시한다. 표준지 공시지가는 개별공시지가의 산정기준이 되는 공적지가로서 국토의 효율적 이용과 국민경제 발전에 이바지할 목적으로 감정평가사가 국토해양부장관으로부터 의뢰받아 조사·평가한다. 표준지 공시지가를 결정하기 위해서는 우선 국토해양부장관이 표준지별로 각 2인의 감정평가업자에게 조사평가를 의뢰하며, 지역별로 감정평가사가 표준지를 선정하고 토지의 특성 및 가격 수준 등을 조사한다. 감정평가사는 표준지의 특성 등을 조사·평가하고 시·군·구 및 토지소유자의 의견을 청취한 후 적정가격으로 감정 평가한다. 표준지의 평가가격에 대해 중앙부동산평가위원회의 심의를 거쳐 공시지가를 결정한 후 관보에 공시한다. 표준지공시지가는 다양하게 활용되고 있다. 우선, 공공용지의 매수 및 토지의 수용·사용에 대한 보상, 국·공유토지의 취득 및 처분, 법령에 의해 조성된 공업용지·주거용지·관광용지 등의 공급 또는 분양, 토지구획 정리 사업, 도시재개발 또는 정리를 위한 환지·체비지의 매각 또는 환지 신청, 토지관리의 매입·매각·경매·재평가 등에 활용된다. 국토해양부가 제시한 표준지 공시지가에 대해 이의가 있을 경우에는 부동산가격 공시 및 감정평가에 관한 법률 제8조 제1항의 규정에 표준지 공시지가 결정 공시일로부터 30일 이내에 서면으로 국토해양부부장관에게 이의신청을 할 수 있도록 규정하고 있다. 국토해양부부장관은 이의신청기간 만료일로부터 30일 이내에 이의신청을 심사하여 그 결과를 신청인에게 서면으로 통지하도록 되어 있다. 공공기관의 정보공개에 관한 법률 제7조 제1항에 의거하여 국토해양부의 부동산 공시가격 알리미를 통해 표준지 공시지가를 열람할 수 있다.