

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성과 사용시 유의사항

이상수(주)대우건설 기술연구소, 선임연구원
박상준(주)대우건설 기술연구소, 주임연구원

1. 개요

일반적으로 콘크리트용 혼화재료(混和材料: admixture)라 함은 모르타나 콘크리트를 제조할 때 소정의 성능을 부여하거나 개선 또는 향상시키기 위해 혼합하여 사용되는 재료로서 물리, 화학적 작용에 의해 굳지 않은 콘크리트 또는 경화한 콘크리트의 성능을 개선시키거나 경제성 및 에너지 절약 등의 목적으로 사용되는 것이라 정의할 수 있다. 즉, 대표적인 콘크리트용 혼화재료로는 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 그리고 실리카흄 등과 같은 각종 광물질 혼화재를 비롯하여 AE제, AE감수제, 고성능 AE감수제, 응결지연제 및 방청제와 같은 각종 화학 혼화제 등을 들 수 있으며, 이들의 특성 및 용도 또한 매우 다양하다.

이중 고로슬래그 미분말의 경우는 다른 광물질 혼화재에 비해 품질이 균일하고, 콘크리트내에서 수화열을 저감하는 효과가 크며, 콘크리트의 수밀성과 화학저항성 향상에 우수한 성능을 발휘한다는 등의 이유로 각종 해양콘크리트 구조물을 비롯하여 고내구성이 요구되는 각종 사회간접자본시설에도 크게 활용하도록 권장되고 있는 실정이다. 그러나, 고로슬래그 미분말의 경우 앞서서도 언급한 바와 같이 콘크리트에 있어 많은 긍정적인 효과를 나타내는 반면, 콘크리트의 응결시간을 지연시키는 특징으로 인해 거푸집 존치기간을 연장시킨다거나 저온환경하에서 초기동해에 쉽게 노출될 수 있다는 점 그리고, 고로슬래그 미분말의 수산화칼슘 소비로 인해 콘크리트의 중성화 속도가 크게 되는 등의 부정적 효과도 있기 때문에, 실제 현장에서 이를 활용하기 위해서는 적용구조물의 각종 여건, 고로슬래그 미분말의 특징, 특히 분말도, 활성도 지수 및 치환율 등에 대한 충분한 사전검토가 있어야 한다.

따라서, 본고에서는 점차로 활용성이 증대되고 있는 고로슬래그 미분말을 대상으로 고로슬래그 미분말의 성질, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 각국의 규격 그리고, 사용시 유의사항 등에 대하여 간략하게 정리하였다.

2. 고로슬래그 미분말(Blast-furnace slag)의 제조 및 특성

2.1 개요

고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과정에 생성되는 용융슬래그를 물로 급냉시켜 얻은 입상의 수쇄슬래그를 건조·분쇄한 것으로 사용목적에 따라 석고를 첨가하여 사용하기도 한다.

고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있으며, 그 자체로는 경화하는 성질이 미약하지만, 알칼리에 의해 경화하는 특성을 갖고 있다. 즉, 시멘트와 혼합한 경우 수산화칼슘과 석고 등에 의해 경화가 촉진되어 수화열 저감, 장기강도 향상, 수밀성 향상, 염화물 이온 침투 억제, 화학저항성 향상 및 알칼리 골재반응을 억제하는 등의 효과를 나타낸다고 보고¹⁾²⁾³⁾하고 있다.

그러나, 고로슬래그 미분말은 분말도나 치환율 등에 따라 콘크리트의 특성이 크게 상이하게 되므로 사용목적에 부합되는 적절한 선택이 요구된다.

2.2 고로슬래그 미분말의 제조

고로슬래그 미분말은 용융상태의 고로슬래그에 가압수를 분사시킴으로서 얻어진다. 즉, 수분을 포함하고 있는 고로수쇄슬래그를 분쇄(ball mill)하기 위해서는 분쇄전에 미리 건조시켜야 하지

만, 최근에는 열풍장치를 장착한 롤러밀(roller mill)을 사용하여 건조와 분쇄를 동시에 실시하여 제조한다.

2.3 화학성분과 반응기구

[표 21]은 대표적인 고로슬래그 미분말의 화학성분, 염기도 및 유리질화율 등을 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 비교하여 나타낸 것이다.

고로슬래그 미분말의 주요 화학성분으로는 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 및 MgO 등이며, 이들은 전체 성분에 94~97%를 차지하고 있다. 한편, 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 MgO 의 함유율이 5%를 초과하면 유리마그네시아가 과다하게 생성되기 때문에 이상평창을 일으키게 되는데, 고로슬래그 미분말의 경우는 15% 정도까지 포함하고 있어도 콘크리트에 해가 없다는 연구보고^{2M)}도 있으며, 대체로 9% 이하의 함유율을 나타낸다.

고로슬래그 미분말의 반응성은 일반적으로 염기도[($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3$)/ SiO_2], 유리질화율, 석고 첨가량 및 분말도 등이 높을수록 반응성이 크게 되는 경향이 있다. 고로슬래그 미분말을 pH 12 이상의 수산화칼슘 용액중에 넣으면 알루미늄규산염의 연결고리(鎖狀結合)가 절단되어 수화가 진행된다, 이때 칼슘이온이 서서히 소비된다. 그러나, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 공급이 중단되어 일정 농도의 알칼리량 이하가 되면, 반응은 진행되지 않는다. 즉, 슬래그가 물과 접하면 슬래그 입자의 표면에 치밀한 불투수성의 산성피막이 형성되기 때문에 강알칼리에 의해 이 피막을 파괴해야만 반응이 계속 진행되는 것이다. 강알칼리의 자극작용에 의해 슬래그 표면이 용해되면 이후, 불용성의 물질이 생성되기 시작하는데, 이 경우 고로슬래그는 장기적으로 슬래그 양의 10%에 상당하는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 결합하게 된다.

고로슬래그 미분말은 사용하는 자극물질에 따라 다소 차이가 있으나, 어느 것이나 토버모라이트상의 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H, 표면조성 $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{H}_9$)을 생성하며, 에너지 분산형 X선 마이크로 분석기를 이용해서 칼슘실리케이트의 주요성분을 조사해 보면, 보통 포틀랜드 시멘트와 유사한 성분을 나타내면서 치밀하지만, 결정성은 좋지 않은 것으로 나타난다.

2.4 고로슬래그 미분말의 규격

고로슬래그 미분말의 규격은 ASTM C 989-82(Standard Specification for Ground Iron Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars), BS 6699-1986(British Standard for Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use with Portland Cement) 및 CSA Standard A 363-M 1983(Cementitious Hydraulic Slag) 등이 있으며, 일본에서는 토목학회 규준[콘크리트용 고로슬래그 미분말의 규격]이 1986년에 제정된 바 있다. 즉, [표 22]는 고로슬래그 미분말에 대한 각국의 규격을 정리한 것이다.

2.5 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성

2.5.1 굳지 않은 콘크리트에 미치는 영향

콘크리트에 고로슬래그 미분말을 혼합함으로써 소정의 유동성을 얻기 위한 단위수량은 저감시킬 수 있다. 그러나, 이러한 특성은 물결합재비의 범위와 고로슬래그 미분말의 분말도 등에 따라 다소 차이가 있는데, 즉 [표 23]에서와 같이 물결합재비가 45~60%이고 분말도가 6,000 cm^2/g 과 8,000 cm^2/g 인 경우에 있어서는 단위수량의 저감효과를 뚜렷하게 확인할 수 없다.

따라서, 고로슬래그 미분말의 유동성 향상이나 단위수량 저감효과는 사용전에 반드시 이를 확인한 후, 사용해야 할 것으로 사료된다.

한편, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 응결특성은 [그림 21]에서와 같이 보통 콘크리트에 비해 최고 2~4시간 정도 지연되는데, 이러한 특성은 저온환경일수록 더욱 현저하다. 즉,

비빔온도가 5°C인 조건에서 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 경우에 비해 고로슬래그 미분말의 치환율이 55%인 경우 4~6시간 정도 크게 지연된다는 연구보고¹³⁰⁾가 있다.

따라서, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 한병기에 시공하는 경우에는 이러한 특성을 충분히 고려하여 초기동해 방지대책이나 거푸집 제거시기 등을 결정해야 한다.

2.5.2 수화열

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 수화열은 배합조건이나 시공방법 이외에도 고로슬래그 미분말의 염기도, 유리화율, 분말도 및 석고의 치환율 등에 따라 커다란 영향을 받는다. 즉, 염기도나 유리화율 그리고 분말도가 적은 슬래그를 사용한 경우는 슬래그의 치환율이 증가함에 따라 수화열은 낮아지는 것이 일반적인 특성이나, 반대로 이들의 값이 크게 되는 경우에는 [그림 22]에서와 같이 슬래그의 치환율이 비교적 낮은 범위에서 수화열은 낮아지지 않고, 오히려 크게 되는 특성을 나타내는데, 이러한 특성은 분말도가 4,000cm²/g 정도인 슬래그를 50% 정도까지 치환한 연구결과에서도 확인되고 있다.¹³⁰⁾

2.5.3 압축강도

현재 국내에서 생산되고 있는 고로슬래그 미분말의 시판량은 그리 많지 않으며, 생산되는 고로슬래그 미분말의 분말도는 약 4,000~5,000cm²/g 정도의 범위이다. 즉, 분말도가 3,000~5,000cm²/g 범위인 1종의 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 경우 초기강도가 보통콘크리트보다 낮은 것으로 평가되는데, 이는 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록, 물결합재비와 양생온도가 낮을수록 더욱 현저하다. 그러나, 장기재령에서의 압축강도는 보통콘크리트에 비해 상당히 우수한 것으로 평가되고 있다.([그림 23]참조)

2.5.4 화학저항성

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 [그림 24]에서와 같이 보통콘크리트에 비해 화학저항성이 우수한 것으로 평가되고 있다. 즉, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우는 수화반응시 다량의 수산화칼슘을 방출하는 CaS나 황산염 그리고, 염화물의 존재하에서 복염을 생성시키는 CaA 등을 함유하고 있는데, 여기에 고로슬래그 미분말을 사용하면 치환율에 따라 희석되고, 또 방출되는 수산화칼슘은 슬래그로부터 용출되는 실리케이트나 알루미늄에이트와 장기적으로 포졸란 반응을 일으켜 치밀한 조직을 형성하기 때문에 수밀성을 갖게 된다.

3. 고로슬래그 미분말(Blast-furnace slag)의 사용시 유의할 사항

3.1 수화열

고로슬래그 미분말을 30~50%정도 치환한 콘크리트의 경우 분말도나 배합조건에 따라 다소 상이할 수 있으나, 고로슬래그 미분말이 클링커 광물의 수화를 촉진시키는 것에 기인하여 고로슬래그 미분말을 치환하지 않은 경우보다 오히려 높은 단열온도상승량을 나타낸다는 연구결과¹³¹⁾도 있다. 즉, 대표적인 포졸란 재료인 플라이애쉬와는 달리 고로슬래그 미분말의 경우 비교적 다량을 사용함에도 불구하고, 기존에 알려진 것과는 달리 상대적으로 수화열 저감효과는 그다지 우수하지 못하다는 것이다.

3.2 초기경화지연

일반적으로 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 다소 늦게 경화하는 성질을 가지고 있다. 따라서, 최소한의 수화율을 초기재령에서 확보함으로써 이후의 경화작용에 커다란 영향을 미치지 않도록 해야 하는데, 특히 동절기에 있어서는 콘크리트의 초기동해피해가 우려되므로 이에 대비한 세심한 양생관리 요구된다.

3.3 중성화

[그림 3.1]은 1개월간 실시한 중성화 촉진시험의 결과를 나타낸 것이다. 즉, 물결합재비가 45% 이하이고, 고로슬래그 미분말의 치환율이 50%이하인 경우 혼입하지 않은 콘크리트와 거의 유사한 중성화 깊이를 나타내고 있으나, 고로슬래그 미분말의 치환율이 70%인 경우는 무혼입 콘크리트에 비해 중성화에 불리한 것으로 나타났는데, 특히 물결합재비 45%와 55%의 경우에 있어서는 중성화 깊이가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3.4 내해수성

일반적으로 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 경우 염분에 대한 차폐성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나, 황산염 뿐만아니라 Mg^{2+} 나 Ca^{2+} 를 포함하고 있는 해수와 접하게 되는 경우에 있어서는 아직까지도 많은 연구가 필요한 실정이다.

이상을 종합하여 볼 때 고로슬래그 미분말은 장기재령의 콘크리트내에서 많은 우수한 성능을 발휘하는 반면, 초기재령에서 경화가 지연 되는 특성이나 중성화 측면에서는 보통콘크리트에 비해 상당히 불리한 것으로 평가되고 있다. 따라서, 이를 실무에 활용하기 위해서는 이들 특성을 복합적으로 고려하여야 할 것으로 사료되나, 아직까지 현실적으로는 많은 어려움이 있기 때문에 이 부분에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.