

해 설



## 콘크리트 성능 향상을 위한 광물 혼화제로서 메타카올린의 특성

이 효 민

부산대학교 지질학과

콘크리트는 골재, 시멘트와 물이 주 구성성분이나 성능 및 내구성 향상을 위해 고품질화, 현장 작업의 능률 향상, 수송, 경제성 등의 다양한 목적을 위하여 다양한 형태의 혼화제(admixtures)가 사용된다. 이러한 혼화제에는 화학 혼화제와 광물 혼화제가 있다. 화학 혼화제는 그 기능에 따라 다음과 같이 5가지로 구분될 수 있다: 기포생성제(air-entrainment agent), 감수제(water-reducer), 응결지연제(retarder), 급결제(accelerator)와 가소제(plasticizers or superplasticizers). 다양한 광물 혼화제가 내구성 향상을 통한 고기능성 콘크리트, 경제성 향상 등을 위하여 사용되고 있다. 전통적으로 화산회가 천연 포졸란(pozzolan)으로 고대로부터 사용되었으며, 점토 광물, 제올라이트, 응회암, 세일, 사암, 규조토 등의 다양한 천연광물이 혼화제로서 사용되어왔다. 그러나, 근래에 들어서 산업 폐기물의 활용과 자원 절약 차원에서 플라이애쉬(Fly ash), 고로슬래그 미 분말(Ground granulated blast-furnace slag), 실리카흄(Silica fume)이 광물 혼화제로서 널리 사용되고 있다. 이들 광물 혼화제들은 (1) 콘크리트 내에서 포졸란반응을 야기함으로써 콘크리트의 강도 증가, (2)투수성의

감소로 인한 외부의 유해성 화학물질들의 유입을 차단 혹은 감소, (3) 알칼리-골재 반응의 방지, (4) 경제성 향상에 효과적인 것으로 알려져 있다.

최근에, 우수한 포졸란 반응특성으로 인해 새로운 광물 혼화제로서 특수 목적 및 고기능성 콘크리트 개발로 그 활용이 연구되고 있는 물질이 메타카올린(metakaolin)이다. 이 글은 메타카올린의 생산, 콘크리트에 첨가될 때의 콘크리트 강도 특성 및 내구성예의 영향, 특수 목적 콘크리트로서의 활용 전망 등에 대한 것을 정리하고, 마지막에 일반적으로 널리 사용되는 광물 혼화제에 대한 간략한 소개와 함께 그 특성을 비교한다.

### 메타카올린의 제조

점토 광물은 열이 가해질 때 구조, 화학조성, 결정크기와 결정도에 따라 그 열에 대한 반응을 달리한다. 일반적으로, 층간수는 100-250°C 온도에서 탈수되며, 300-400°C에서 수산기(OH<sup>-</sup>)의 탈수가 시작되어 500-600°C에서 점토의 결정 구조의 붕괴가 시작된다. 메타카올린은 고령

석(kaolin:  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ )에 약 600-850℃의 열을 가할 경우에 탈수에 의한 고령석의 유방정계의 층상 결정구조의 부분적인 분해로 생성되는 비정질 혹은 결정도가 낮은 알루미늄실리케이트(aluminosilicate:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  or  $Al_2Si_2O_7$ )이다(그림 1, 표 1 참조). 그러나, 900℃이상의 열이 가해지면 Al-Si첨정석(spinel), 크리스토파라이트(crystobalite), 무라이트(mullite >1100℃)와 같은 새로운 결정질 광물이 생성된다. 이럴 경우에는 콘크리트의 광물 혼화재로서 그 기능이 약화된다. 연구에 의하면 약 700℃의 온도로 소성한 메타카오린이 콘크리트의 최적 강도를 발현하며, 그 이하에서는 많은 고령석이 잔류되어 포졸란 반응성이 낮은 것으로 나타났다. 그리고, 850℃ 이상에서는 재 결정화가 시작되어 그 반응성이 역시 약화되는 것으로 보고되었다(Sabir et. al., 2001).

메타카오린은 일반적으로 회전식 가마(rotary kiln) 혹은 유동질층(fluidised bed)에서 수분에서 수 시간의 소성으로 생성되나, 플래쉬소성(flash-calcination)으로 아주 빠른 시간 내에 가열, 소성, 냉각작용을 수행함으로 수 초(0.5-12초)내에 생산 가능하다.

상기한 바와 같이 메타카오린은 순수한 고령석의 소성으로 생산되나, 다른 원료 물질로부터 제조 할 수 있다. 그 중 하나가 라테라이트 토양의 소성으로 생산 가능한 것으로 알려져 있다. 700-800℃의 온도로 라테라이트 토양을 소성하면, 고령석과 깁사이트(gibbsite)가 메타카오린과 비정질 알루미늄을 형성하여 효율적인 포졸란 반응성을 가지게 되어 콘크리트의 강도가

증가하게 된다. 또한, 메타카오린은 종이 재생 산업에서 나오는 슬러지의 소성으로도 생산 가능하다. 슬러지 재생 메타카오린은 고령석의 소성으로 생산된 것보다 더 나은 반응성을 보인다 고도 한다(Sabir et. al, 2001).

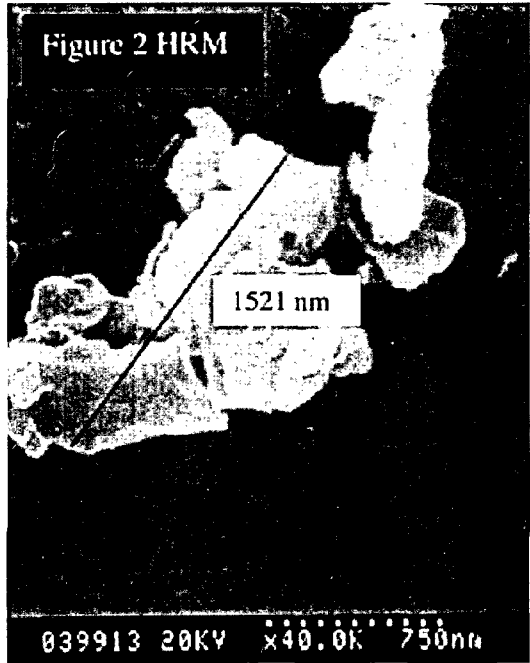


그림 1. 메타카오린의 전자현미경 사진 (Bindiganavile and Banthia, 2001).

### 포졸란 반응 특성

포졸란이란  $SiO_2$  혹은  $Al_2O_3-SiO_2$ 의 기본 구조를 가지는 물질로서 그 자체는 거의 교질 물질로서의 성질을 가지지 않으나, 수분이 존재할 경우 포틀랜드 시멘트의 수화반응에 의해 생성

표 1. 메타카오린의 화학성분 범위(Sabir et al. 2001).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O
52.1-59.4	41-45.3	0.6-4.64	0.83-1.64	0.05-0.09	0.01-0.621	0.16-0.62	0.1-0.03

표 2. 시멘트를 구성하고 있는 주요한 화합물.

명 칭	약식표현	화학성분	수화반응 및 반응 생성물
규산3석회 (Tricalcium Silicate)	C <sub>3</sub> S	3CaO · SiO <sub>2</sub>	2C <sub>3</sub> S + 6H = C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> + 3c
규산2석회 (Dicalcium Silicate)	C <sub>2</sub> S	2CaO · SiO <sub>2</sub>	2C <sub>2</sub> S + 4H = C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> + 3c
알루미늄산3석회 (Tricalcium Aluminate)	C <sub>3</sub> A	3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A + 12H + c = C <sub>3</sub> AcH <sub>12</sub>
철알루미늄산4석회 (Tetracalcium aluminoferrite)	C <sub>4</sub> AF	3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF + 10H + 2c = C <sub>6</sub> AFH <sub>12</sub>

\* C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H=H<sub>2</sub>O, c=Ca(OH)<sub>2</sub>

되는 포트랜드아이트(Ca(OH)<sub>2</sub>)와 결합하여 교질 물질을 형성하는 물질을 말한다. 이때 생성되는 교질 물질은 규산석회수화물(calcium silicate hydrates, CSH), 알루미늄산3석회(calcium aluminum hydrates, CAH)와 알루미늄노규산3석회(calcium aluminosilicate hydrates, CASH)로서 포틀랜드 시멘트의 주 구성 성분을 형성하는 것이다(표 2 참조). 따라서, 콘크리트 내 무게비로 약 25%를 차지하는 포트랜드아이트의 비를 감소시킨다. 생성되는 CSH의 Ca/Si 비는 낮아지게 되며, 스트래팅자이트(stratingite) 혹은 수화석류석(hydrogarnet)이 형성될 수 있다(Taylor, 1990).

메타카올린이 혼화제로 시멘트와 적절한 비율로 혼합 될 경우 우수한 포졸란의 기능을 하게 되어, 콘크리트의 강도를 증진시키게 된다. 모든 포트랜드아이트를 소모 할 수 있는 메타카올린의 양(표 3 참조)은 메타카올린의 소성 온도 및 품질과 w/b 양(water/binder ratio)에 따라 다양하나, 대략적으로 약 20-40%의 포틀랜드 시멘트를 메타카올린으로 대체 할 경우, 28일 재령 후 거의 모든 포틀랜드아이트를 소모할 수 있다고 한다(Oriol and Pera, 1995).

메타카올린의 입자 크기에 따른 비 표면적

(specific surface)증가는 빠른 시일 내 최고강도에 도달하게 하며, 메타카올린의 혼합율에 영향을 미친다.

표 3. 다양한 포졸란의 포졸란 반응성(Sabir et al. 2001).

포졸란	실리카흙	플라이애쉬	메타카올린
반응성 (mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g 포졸란)	427	875	1050

### 강도 특성

메타카올린의 혼합에 따른 강도에 대한 연구는 대체적으로 5-40% 범위에서의 시멘트와의 혼합율, 재령일 및 수화온도가 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 5-30%의 치환율에서는 약 1년까지 지속적으로 강도가 증가하나, 대체적으로 초기 7-14일 재령까지의 포졸란 반응이 강도에 중요한 영향을 미치는 요인이 된다. 이후에는 비록 강도는 증가하나 그 증가율은 현저하게 떨어진다. 그리고, 메타카올린의 치환율이 15%이상일 경우에는 치환율의

증가에 따른 장·단기적 강도증가의 효율성이 떨어진다. 그리고 재령온도가 올라가는 경우 (50℃) 메타카오린이 치환된 콘크리트의 초기 (7일) 강도 발현이 상온에서 보다 좋아진다 (Sabir et. al, 2001).

고강도 콘크리트의 경우 메타카오린의 혼합은 플라이애쉬와 실리카흙과 같이 경화시간을 지연시키며, 그 혼합율이 증가함에 따른 경화시간은 더욱 지연되는 경향이 있다. 메타카오린의 포트랜드아이트 시멘트와 혼합은 대체적으로 다른 광물 혼화재인 플라이애쉬와 실리카흙보다 약간 높은 강도의 증가를 보인다.

### 내구성에의 영향

메타카오린이 혼합된 콘크리트는 세공구조가 현저히 변화된다. 평균 세공의 크기를 현저히 감소시키고, 이로 인하여 유해성 외부 화학물질의 확산과 수분 흡수율에 중대한 영향을 미치게 된다. 0.05-10 $\mu$ m 크기의 모세 공극의 부피가 감소함에 따라 투수계수가 감소된다. 일반적으로, 대부분의 세공의 형성은 재령 14일, 즉 최고 상대 강도가 형성되는 시점과 일치된다. 이와 같이 극 미세공의 형성에 의한 투수계수의 감소로 외부 기원의 특정 유해성 화학물질의 침투율을 감소시키는 것은 콘크리트의 내구성에 중요한 영향을 미치는 하나의 요인이 된다 (Gruber et al., 2001). 내구성에 영향을 미치는 또 다른 주요한 요인은 메카카오린이 혼합된 콘크리트에서의 포트랜드아이트의 감소이다. 일반적으로 포트랜드아이트는 콘크리트내의 pH를 유지하는 기능과 함께 경화된 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 주요한 화학반응에 관여하는 물질이다.

### 알칼리 실리카 반응에의 효과

알칼리-실리카 반응은 알칼리-골재반응의 두 가지 유형 중 하나로서, 시멘트의 알칼리(K와 Na)가 반응성 골재의 규산염(SiO<sub>2</sub>)성분과 반응하여 알칼리-실리카겔을 혹은 알칼리-칼슘-실리카겔을 형성시키는 반응이다. 생성된 겔은 다량의 물을 흡수하여 팽창함으로써 콘크리트의 균열을 유발하게 하는 콘크리트의 내구성 저하의 중요한 요인이다. 근래에 들어 화학적으로 안정한 골재가 고갈되어 가고, 환경문제로 인한 제조 공정의 변화로 더욱 많은 알칼리가 시멘트에 포함됨에 따라, 알칼리-골재 반응의 문제는 더욱 심화 될 것으로 예상되고 있다. 따라서, 오늘날 콘크리트 기술에서 알칼리-골재반응에 의한 피해 방지가 주목받는 분야가 되고 있다.

보통의 포틀랜드 시멘트로 제작된 콘크리트에서 6개월 후 0.45%의 팽창을 유발한 반응성 골재를 10-15%의 메타카오린을 혼합한 시멘트를 사용한 콘크리트에서는 0.1%이하의 팽창이 일어나고, 골재 반응에 의한 균열과 표면 부식이 되지 않는다 한다(Sabir et al., 2001). 그리고, 메타카오린의 혼합율 20%까지는 골재반응에 의한 팽창은 현저히 감소하고, 10%의 혼합율이면 알칼리-골재 반응에 의한 유해성이 방지된다(Gruber et al., 2001). 높은 Ca 함량과 상대적으로 낮은 Na 혹은 K의 함량을 가지는 알칼리-칼슘-실리카겔을 형성하는 경우에는, 더욱 현저한 팽창이 수반되어 내구성이 저하되며, 겔의 양은 가용한 Ca(OH)<sub>2</sub>의 양과 silica의 양에 좌우된다(Aquino et al., 2001). 실제로, Ca(OH)<sub>2</sub>의 함량을 증가한 경우는 알칼리-골재 반응에 의한 팽창이 증가되는 연구 사례도 있다. 따라서, 콘크리트내의 가용 포틀랜드아이트의 양이 줄어들 경우, 유해성의 '높은 Ca-함유 겔(high Ca-gel)'의 형성이 감소되어 팽창률이

저하 될 것으로 해석된다. 메타카올린의 혼합은 전술한 바와 같이, 포졸란반응에 의해서 시멘트 수화작용시 형성되는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 소모함으로써, 알칼리-골재 반응에 의한 팽창을 감소 할 수 있다고 생각된다. 그러나, 알칼리-골재 반응에 의한 팽창 메커니즘에 대해서는 현재까지 논란의 여지가 많으므로 더욱 많은 연구와 함께 그 방지책이 모색되어야 하는 부분이다.

### 유해성 화학 용액에 대한 저항성

메타카올린을 혼합한 콘크리트는 해수나 산성 용액의 침투에 강한 저항성을 보이는 것으로 알려졌다. 메타카올린을 혼합한 콘크리트는 20-30℃의 온도로 해수에 노출되었을 경우, 일반 콘크리트보다 강도가 60% 정도 높게 유지되고 훨씬 적은 길이 변화를 나타내며, NaCl의 확산율은 현저하게 감소된다. 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 에 520일간 노출시킨 메타카올린이 혼합된 콘크리트는 현저한 팽창률의 감소를 나타낸다. 이 경우, 메타카올린의 혼합율이 15%-25%의 범위에서는 혼합율이 증가함에 따라 팽창률 감소는 더욱 현저해진다. 그러나, 메타카올린의 혼합율 10%까지는  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액에 의한 강도 저하를 방지하지 못한다. 전반적으로, 황산염에 대한 저항성을 가지려면 최소 15%의 혼합이 이루어져야 한다(Sabir et al. 2001).

### 그외 내구성 증가를 위한 적용

메타카올린을 유해성 폐기물과 독성금속의 고정화에 적용하는 연구들이 진행되고 있다. 납, 크롬, 카드뮴과 같은 독성메탈을 함유한 오염수와 메타카올린 혼합을 20%로 제작한 시멘트나 모르타르는 강도와 용출 특성이 개선되어, 오염물질들의 고정화에 효과가 있음이 증명되었다

(Pera and Bonnin, 1996). 또한, 도시 소각장에서 발생하는 염화물과 황산염의 유출도 모래나 플라이애쉬를 사용한 콘크리트보다 더욱 효율적으로 감소시키며, 동결/융해에 대한 저항성도 현저히 증가시킨다. 이러한 결과는 메타카올린의 혼합이 전술한 바와 같이 포졸란반응에 의해 콘크리트 세공의 구조가 개선되어 투수도를 현저히 감소시킨 결과로 해석된다. 향후, 메타카올린의 혼합에 의한 고강도, 저 투수성의 고기능성 콘크리트의 개발로 다양한 용도로 사용 가능 할 것으로 전망된다.

## 메타카올린과 다른 포졸란 물질들과의 비교

### 플라이애쉬(Fly ash)

플라이애쉬는 콘크리트에서 가장 광범위하게 사용되는 포졸란이다. 화력발전소에서 석탄(무연탄, 유연탄)이 연소될 때 석탄에 포함된 불순물들(점토, 장석, 석영과 세일)이 용화(fuse)되어 배기가스와 함께 운반되어 집진기(electrostatic precipitator 혹은 bag filter)에서 수집·냉각되어 구형의 미세한 입자로 경화된 물질이다(그림 2). 석탄재는 하나의 산업 폐기물로서 과거에는 매립대상물이었으나, 1950년대부터 선진국에서는 석탄재 처리 문제를 해결하고, 자원재활용 측면에서 많은 연구개발이 진행되었다. 그 결과, 플라이애쉬가 콘크리트의 성능 개선을 위한 혼화제로 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로, 플라이애쉬는 시멘트 혹은 콘크리트 혼화제로 전 처리 과정 없이 사용된다(오병환과 고재균, 1991).

대부분의 플라이애쉬 입자는 구형의 고체이나, 일부는 속이 빈 구형체(hollow cenosphere),

또는 구형체내 작은 구형체가 포함된 형태 (pleroaphere)이다(Taylor, 1990). 입자 크기는  $1\mu\text{m}$  이하로부터  $100\mu\text{m}$  이상까지 다양하나, 전형적으로  $20\mu\text{m}$  정도이며, 무게비로 10-30%의 입자들이  $45\mu\text{m}$  이상의 크기를 나타낸다. 표면적은  $200\text{m}^2/\text{kg}$  혹은  $700\text{m}^2/\text{kg}$ 에 해당하는 것도 포함되나, 일반적으로  $300\text{-}500\text{m}^2/\text{kg}$ 의 범위에 해당된다(Kosmatka and Panarese, 1994).

플라이애쉬는 주로 Si, Al, Fe와 Ca 성분을 포함하는 규산염 유리(silicate glass)이며, 부 성분으로는 Mg, S, Na, K와 C가 포함되어 있다(표 4). 아주 적은 양의 결정질 물질이 포함되어 있으며, 비중은 2.2-2.8 정도로서 황갈색 내지 회색을 띤다.

Class F와 Class C 플라이애쉬가 콘크리트의 포졸란 혼화제로 주로 사용된다. Class F는 낮은 Ca 함량( $< 10\%$ )과 탄소 함량 5% 이하를 포함하는 것이 일반적이나, 10%까지의 탄소를 포함하기도 한다. Class C는 높은 Ca 함량(10-30% CaO)이 특징적이고, 탄소 함량은 일반적으로 2% 이하이다(Kosmatka and Panarese, 1994).

플라이애쉬의 사용에는 다음의 세 요소가 고려되어야 한다: (1)연소하지 않은 탄소의 함량, (2)콘크리트 배합에 필요한 물의 양, (3)포졸란 반응력. 과잉의 탄소량은 콘크리트를 변색시키며, 기포생성제와 같은 다른 혼화제의 기능을

방해한다. 배합수 양은 플라이애쉬의 느린 포졸란 반응속도로 인하여 28일 최대 강도를 유지하기 위하여 최적 물/시멘트 비(w/c)를 산정할 필요가 있다. 플라이애쉬가 혼합 시에는 정상적인 포트랜드아이트 시멘트의 배합에서 보다 일반적으로 훨씬 적은 양의 배합수가 필요하다(Taylor, 1990).

Class F 플라이애쉬는 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창을 70 %이상 감소 할 수 있다. 대부분의 Class C도 역시 골재반응에 의한 팽창을 감소하나, Class F보다 덜 효과적이어서 더 많은 혼합량이 요구된다. 그러나, 알칼리가 과다 함유된 Class C 플라이애쉬는 알칼리-실리카 반응을 촉진함으로 주의가 요구된다.

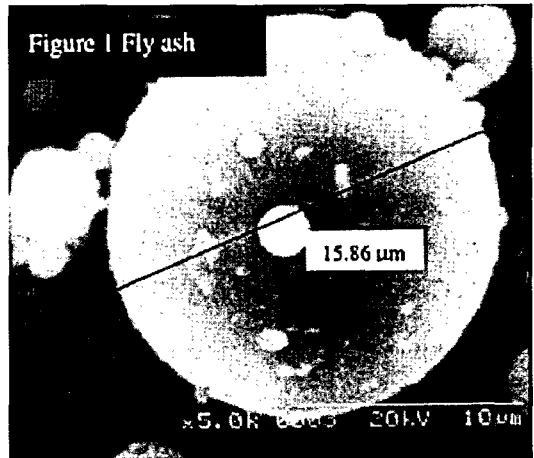


그림 2. 플라이애쉬의 전자현미경 사진 (Bindiganavile and Banthia, 2001).

표 4. 플라이애쉬의 화학성분(Taylor, 1990).

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	C	H <sub>2</sub> O	Total
Class F	48.7	27.9	9.5	1.6	2.4	1.5	4.2	0.9	0.9	1.2	1.5	0.3	99.9
Class C (Montana, USA)	35.2	20.3	6.3	6.8	25.0	0.2	0.5	-	-	1.1	-	-	95.7

### 고로슬래그 미분말(Granulated blast-furnace slag)

고로슬래그는 제철소에서 고로로부터 용융 상태의 쇳물을 생산하는 과정에서 발생하는 비철 부산물로서 주로 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO로 구성되어 있다. 고로슬래그는 용융 상태에서부터 냉각하는 방법에 따라 서서히 냉각시킨 괴재슬래그와 고압의 물로 급냉시킨 수재슬래그로 크게 구분 가능하다. 괴재슬래그는 고온의 액상의 슬래그를 대기 중에서 서서히 냉각되어 결정구조가 형성된 것이다. 따라서, 단단한 암석상태의 결정질 슬래그임으로 교결 물질로서 특성을 나타내지 못한다. 수재슬래그는 용융 상태의 고로슬래그를 고압의 물을 사용하여 빠른 속도로 냉각시킨 것으로, 결정질은 거의 형성되지 못하고 비정질의 모래와 유사한 입상으로 생성된다. 이를 건조하여 미세한 분말로 만든 것이 고로슬래그 미분말로서, 95% 이상이 유리질로 구성되어 시멘트의 혼화제로서 널리 사용된다. 고로슬래그 미분말의 화학성분은 표 5에 나타내었다(김장수외, 2002).

수재슬래그는 강한 포졸란 반응 특성을 나타내므로, 고로시멘트의 제조에 사용된다. 고로시멘트는 건조한 수재슬래그와 크린커에 적정량의 석고를 첨가해 혼합 분쇄하거나, 또는 별도로 분쇄하여 균일하게 혼합하여 제조한다. 따라서, 고로슬래그의 제조는 일반 포틀랜드아이트의 제조 보다 훨씬 적은 양의 에너지와 석회석을 사용함으로써 자원 절약, 에너지 절약형 시멘트 원료가 된다. 또한, 탄산가스의 발생량을 억제

하여 지구 환경보호에 기여할 수 있다.

고로슬래그 미분말의 시멘트 혼화제로 사용은 다른 포졸란과 같은 장점을 나타내어 콘크리트의 성능을 향상시킨다:

- (1) 낮은 수화열로 댐과 같은 대규모 콘크리트 구조물 건설에 적합하다.
- (2) 장기 강도가 포틀랜드아이트보다 우수하다.
- (3) 높은 표면적으로 콘크리트 내의 세공구조를 조밀하게 하여 낮은 투수도를 유지하고, 유해물질에 대한 저항성을 높임으로서, 하수도 시설, 항만공사, 해양구조물 등에 적합하다.
- (4) 알칼리-골재 반응을 억제하는데 유효하다.

수재 슬래그는 기포가 많이 포함되고 각진 형상으로서 경량성, 높은 내부 마찰각, 투수성으로 호안매립, 연약지반 복토, 급사면의 성토재료, 경사 방호용, 운동장의 배수층으로도 사용이 가능하다. 괴재 슬래그는 도로 노반재용 파쇄 골재 및 골재 대응, 저 알칼리성의 시멘트 크린커 원료, 단열·보온·흡음성의 암면 원료로 사용되고 있다.

### 실리카흄(Silica fume)

실리카흄은 실리콘 혹은 실리콘합금의 제조 시 산업부산물로 회수되는 비정질 물질이다. 휘로실리콘(ferrosilicon)은 원재료인 규사와, 환원제로 석회나 철을 첨가하여 전기로에서 용융하여 제조된다. 이러한 제조 과정 중 발생하는 탄산가스에 포함된 안개형상의 SiO<sub>2</sub>인 실리카흄은 집진 장치를 이용하여 회수된다(Taylor, 1990). 공기 중에서 형성되는 플라이에쉬와 마

표 5. 고로슬래그 미분말의 화학성분(김장수외, 2000).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	others	Total
33.48	13.29	1.24	5.99	42.24	0.39	0.70	0.55	0.13	0.04	0.64	1.54	99.68

참가지로서 구형의 아주 미세한 입자로서, 일반적인 시멘트입자 평균 크기보다 100배정도 작은 크기이다(그림 3).

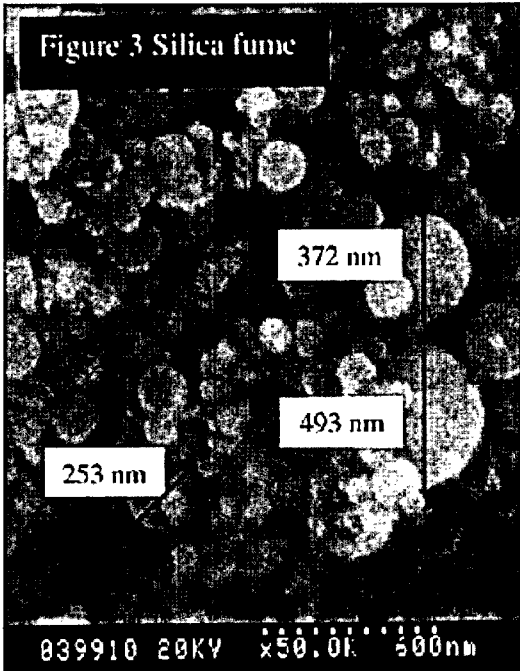


그림 3. 실리카흙의 전자 현미경 사진  
(Bindiganavile and Banthia, 2001).

미국, 유럽의 많은 나라에서 콘크리트에 사용하기 위하여 상당 양의 실리카흙이 생산 판매되고 있다. 이외에 실리카흙이 생산되는 다른 종류의 실리콘 합금은 웨로크로미움(ferrochromium), 웨로마그네슘(ferromangnesium), 칼슘실리콘(calcium silicon) 등이 있다(김형태, 1991). 실리카흙은 원재료인 규사와 석탄의 품질, 로의

종류에 따라 화학적 성질이 달라진다. 실리카흙의 화학조성은 생산되는 실리콘합금이나 실리콘 종류에 따라 다르나, 일반적으로 90% 내외의 SiO<sub>2</sub>로 구성된 구형의 비정질 물질이다. 열이 방출되는 개방형로에서는 배기가스의 온도가 200-400℃의 비교적 저온이므로 미연소 탄소의 존재로 흑색에 가까운 회색을 따며, 밀폐형로의 배기가스는 800℃에 달하여 대부분의 탄소가 연소됨으로 백색에 가까운 회색을 띤다. 비중은 2.1-2.25 범위이며, 표면적은 20,000m<sup>2</sup>/kg, 입자 크기는 직경 1μm 이하이다. 단위용적중량은 250-300kg/m<sup>3</sup> 정도로서 수송 시에는 물을 가하여 슬러리 상태로 운반하기도 한다(Kosmatka and Panarese, 1994). 표 6에 실리콘과 75% 웨로실리콘 합금으로부터 생산되는 실리카흙의 성분을 나타내었다.

실리카흙은 분말도가 높고 실리카 양이 많은 매우 효율적인 포졸란 물질이다. 따라서, 실리카흙은 시멘트 대체재와 강도 및 내구성 증진을 위한 혼화제로서 전술한 메타카오린이 가지는 거의 모든 특성을 나타낸다. 그러나, 높은 표면적과 실리카 양으로 수산화칼슘과 단시간에 반응하여 겔 상태의 물질을 형성함으로써 슬럼프가 나빠져 큰 슬럼프의 손실을 나타낸다. 대체적으로 포졸란 반응은 재령 7-14일에서 가장 현저하게 일어나며, 생성되는 CSH의 Ca/Si 비는 대략 1:1이다. 약 30%의 실리카흙을 시멘트 대신 혼합함으로써 재령 14일경에 모든 수산화칼슘이 소모된다. CSH의 Ca/Si 비는 실리카흙의 혼합율이 증가함에 따라 낮아지므로, 0.8

표 6. 실리카흙의 화학성분 (Taylor, 1990).

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	C	S	LOI
Elementary Si	94-98	0.1-0.4	0.02-0.15	0.3-0.9	0.08-0.3	0.1-0.4	0.2-0.7	0.1-0.3	0.1-0.3	0.8-1.5
75% Ferosiliconalloy	86-90	0.2-0.6	0.3-1.0	1.0-3.5	0.2-0.6	0.8-1.8	1.5-3.5	0.8-2.3	0.2-0.4	2.0-4.0



이상 유지하기 위한 최대 실리카흙 반응량은 100g 시멘트당 35g 정도에 해당된다(Taylor, 1990).

### 메타카올린과 다른 광물 혼화제와의 비교

메타카올린을 비롯한 전술한 광물 혼화제들은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 산성산화물들의 다양한 함량을 나타내지만, 공통적으로 이들은 모두 급랭에 의해 형성된 유리질 SiO<sub>2</sub>가 주성분인 미세한 입자를 이루고 있다. 플라이애쉬와 실리카흙은 다공질의 구형체를 형성하고 있으며, 메타카올린과 고로슬래그 미 분말은 각진 형태를 가지고 있다.

광물 혼화제들은 포졸란반응 결과 포틀랜드이 트를 소모하고 시멘트의 주성분 교질 물질인 CSH gel, CAH, CASH(표 2 참조)를 형성함으로써 강도를 증가한다. 입자의 크기와 비표면적의 차이는 포졸란 반응성을 달리하는데, 메타카올린, 플라이애쉬, 실리카흙의 순으로 반응성의 차이를 나타내고 있다(표 3 참조). 실리카흙과 메타카올린은 플라이애쉬보다 약 50배의 비표면적을 가지므로 이들이 콘크리트에 혼합될 경우 더욱 빠른 강도 발현이 이루어진다. 그리고 메타카올린의 높은 표면적은 배합수의 량을 증가하여, 주어진 물/바인더(w/b)에서 플라이애쉬나 고로슬래그를 혼합하는것 보다 작업률(workability)을 낮추나, 실리카흙만큼 심각하지 않다. 반대로, 플라이애쉬는 콘크리트의 유동성을 개선시킨다. 이들 혼화제들은 공통적으로 콘크리트에 적절한 비율이 포함될 때 더욱 치밀한 콘크리트를 형성하여, 가스나 이온의 확산율을 감소함으로써, 결과적으로 콘크리트의 내구성을 향상시킨다. 또한, 이들 광물 혼화제들은 화학적으로 아주 활성적이고 유해성의 포틀랜드이 트를 급속히 소모하여 콘크리트의 성능저

하에 관련된 주요한 원인을 제거하여 성능을 향상한다(Sabir et al., 2001). 앞으로, 이러한 각 광물 혼화제의 특성을 이용한 고강도, 고기능성 콘크리트의 개발이 광범위하게 이루어 질 것으로 예측하고 있다. 따라서, 환경문제와 자원재활용에 대한 문제가 부수적으로 해결되는 긍정적인 결과가 있으리라 전망된다.

### 참고 문헌

- 김형태 (1991) 실리카흙 및 실리카흙 콘크리트의 특성과 이용, 콘크리트학회논문집, 3. 3. 23-30.
- 김장수, 성기웅, 손건목 (2000) 철강슬래그의 활동동향 및 전망, POSCO Forum 발표집, 3-20.
- 오병환과 고재균 (1991) 플라이애쉬 콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구, 콘크리트 학회논문집, 3. 2. 87-95.
- Aquino, W., Lange, D. A. and Olek, J. 2001. The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products. Cement & Concrete Composite. 23. 485-493.
- Bindiganavile, V and Banthia, N. 2001. Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin. Cement & Concrete Composite. 23. 503-514.
- Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D. and Thomas, M. D. A. 2001. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. Cement & Concrete Composite. 23. 479-484.
- Kosmatka, S. H. and Panarese, W. C.

1994. Design and control of concrete mixture. 13th ed. PCA(Portland Cement Association). Skokie, Illinois. pp205.

Oriol, M and Pera, J. 1995. Pozzolanic activity of metakaoli under microwave treatment. Cement & Concrete Res.. 25. 2. 265-270.

Pera, J. and Bonnin, E. 1996, Inertization of toxic metals in metakaolin-blended cements. In Jain, V. and Peeler, D.

editors. Environmental issues and waste manangement thechnologies in the ceramic and nuclear industries II, Ceramic transactions. 72. ACS. 365-374.

Sabir, B. B. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolams for concrete: a review. Cement & Concrete Composite. 23. 441-454.

Taylor, H. F. W., 1990, Cement Chemistry. London, Academic Press Ltd. 475 p.



추천 클릭 홈 페이지

한국광물학회 <http://mskorea.or.kr>

이번에 소개할 홈페이지는 한국광물학회의 홈페이지이다. 1986년 처음으로 창립된 학회 역사에 비해 비교적 늦게 2002년 11월에 처음으로 문을 열었다. 홈페이지의 주소는 <http://mskorea.or.kr> 로서 경상대학교 지질학과 교수님들이 직접 제작 및 운영을 맡고 있다. 문을 연지 얼마 안되는 홈페이지인 관계로 아직은 최근의 광물학계 소식과 광물학회지 검색 정도의 정보만이 정상적으로 제공되고 있다. 이밖에 광물학 자료실에 여러 다양한 광물 자료들과 해설이 추가될 예정이며 광물학자와의 대화실에서는 광물관련분야에 대한 여러 질문사항에 대해 충실한 답변이 이루어질 예정이다. 국내 광물관련 전문 홈페이지가 매우 부족한 실정에서 새롭게 문을 연 한국광물학회의 홈페이지에서는 관심있는 여러 광물관련 종사자 및 학자들의 참여를 기다리고 있다.

**한국광물학회**  
THE MINERALOGICAL SOCIETY OF KOREA

Home | About Us | Membership | Publications | News | Contact Us | Admin

**welcome**

아이디   
 비밀번호

**공지사항** More

- ▶ 2003년 춘계 공동학술발표회 및 일정 광물학회 2003-05-21
- ▶ 한국광물학회 정기총회 및 학술발표회 안내 총무이사 2003-04-21
- ▶ 한국광물학회지 등재지 평가 신청 총무이사 2003-04-21
- ▶ 학회지 검색은 [광물학회지]란 검색 운영자 2002-11-15
- ▶ 회원님들, 온라인 회원가입 부탁드립니다. 운영자 2002-11-15

**학회지 검색**

키워드   
 제목   
 저자   
 년도  에서  까지

**학회동정** More

- ▶ 11월 30일 학회 홈페이지 대모 시연 운영자 2002-11-15
- ▶ 학회를 11월30일로 연기합니다. 운영자 2002-11-15
- ▶ 광물학회지 편집회의를 개최합니다. 편집취 2002-11-15
- ▶ 모든 회원의 회원가입 부탁드립니다 운영자 2002-11-15
- ▶ 홈페이지를 시험가동합니다. 운영자 2002-11-15

**광물학회지**

「광물과산업」지  
 한국광물학회와 산업광물운영  
 공동으로 발행하는  
 연구개발 관련  
 학술정보지

**대한지질학회**  
The Geological Society of Korea

**산업광물은행**  
Industrial Mineral Bank

한국학술진흥재단 <http://www.krf.or.kr> 한국과학재단