

## -shotcrete의 고성능화를 위한 미분말 혼화재의 활용



**배규진**  
한국건설기술연구원  
지반연구부장



**장수호**  
한국건설기술연구원  
선임연구원



**신휴성**  
한국건설기술연구원  
선임연구원



**박해균**  
삼성물산(주) 건설부문  
토목기술팀 과장



**이명섭**  
삼성물산(주) 건설부문  
토목기술팀 부장



**김재권**  
삼성물산(주) 건설부문  
토목기술팀 상무

### 1. 서론

-shotcrete 라이닝과 록볼트를 영구지보재로 적용하는 싱글셀 터널공법을 국내에 도입하고 터널의 장기내구성을 향상시키기 위해서는 고성능 -shotcrete의 개발이 필수적이다. 그러나 이러한 관점에서 현재 국내에서 시공되고 있는 -shotcrete의 강도나 내구성은 주지보재로서 활용되기에는 매우 낮아 -shotcrete의 재료 및 배합기법에 대한 전반적인 연구가 필요한 실정이다.

-shotcrete의 성능은 골재, 시멘트, 물/시멘트비, 각종 혼화재료 등의 재료적인 측면뿐만 아니라 타설과정과 같은 시공적인 측면에 의해서도 큰 영향을 받는다.

최근에 들어서는 -shotcrete가 빠른 시간내에 응결하여 충분한 초기강도를 발현하도록 하고 터널 벽면에 잘 부착되도록 하는데 있어 중요한 역할을 하는 급결제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 -shotcrete의 장기강도 저하를 방지하고 친환경적인 시공을 위해 시멘트광물계 급결제(건설신기술 441호)와 알칼리프리카계 급결제에 대한 관심이 증대되고 있다.

그러나 싱글셀 터널공법을 적용하고 국내의 -shotcrete 품질을 표 1과 같은 선진 외국 수준으로 향상하기 위해서는 고성능 급결제뿐만 아니라 실리카 흙과 같은 고성능 미분말 혼화재의 적용이 필수적이라 할 수 있다. 일례로 표 2는 총 연장이 24km로서 세계 최장대 터널인 노르웨이의 Lærdal 터널에 적용되었던 -shotcrete 배합설계의 예이다(Melbye, 2000). 표에서 알 수 있듯이 -shotcrete의 고강도/고내구성화 및 부착력 향상을 위해 실리카 흙을 시멘트 중량의 0.3~1.0%의 고성능감수제와 함께 사용한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 유럽에서는 1990년대 중반부터 -shotcrete에 실리카 흙이 사용되기 시작하였으며(Dimmock, 1999), 또한 일본의 싱글셀 터널공법에 대한 검토 보고서에서도 실리카 흙의 사용을 권장하고 있는 실정이다(ジェオフロンテ研究会, 2001).

이와 같이 -shotcrete의 고강도/고내구성화를 위해 고성능 혼화재의 사용이 필수적임에도 불구하고 아직까지 국내에서 미분말 혼화재에 의한 -shotcrete의 고성능화 연구가 매우 미진한 실정이다. 특히 대표적인 미분말 혼화재인 실리카 흙의 생산에 전력이 많이 소요되어 경제적인 측면

표 1. 국외의 shotcrete 압축강도 기준(ITA, 1993)

양생일수	압축강도 (MPa)	출 처
8시간	5	Wood(1992)
1일	5	일본 터널협회(1991)
	7	오스트리아(J1기준)
	8*	AFTES(1992), 영국
	9	오스트리아(J2기준)
	10	EFNARC(1992) 등
3일	20	Wood(1992)
7일	17*	AFTES(1992)
	25	EFNARC(1992)
	30	Morgan(1991), Wood(1992)
	18	일본 터널협회(1991)
	25**	AFTES(1992)
	30	JCI(1991), EFNARC(1992)
	35	영국, 스웨덴 스톡홀름 교통국(1990)
	35***	Maidl(1992)
	38	오스트리아(J1기준)
	40*	Maidl(1992)
28일	40	오스트리아(J2기준), Morgan(1991) 등
	45	스웨덴 철도청(1991)
	35	EFNARC(1992)
90일	35	EFNARC(1992)

\* 산술평균    \*\* 특성강도(characteristic strength)    \*\*\* 단일수치  
 EFNARC : European Specification for Sprayed Concrete  
 AFTES : French Tunnelling Association    JCI : Japan Concrete Institute

표 2. 노르웨이 Lærdal 터널에 적용된 배합설계에

재료	단위수량
Cement(CEM 42.5)	439 kg/m <sup>3</sup>
Aggregate(0~8mm)	1,670 kg/m <sup>3</sup>
Silica fume(Microsilica)	30 kg/m <sup>3</sup>
Super-plasticizer(Glenium T803)	2.7 kg/m <sup>3</sup>
Concrete improver(MEYCO TCC735)	5 kg/m <sup>3</sup>
Steel fiber(Dramix 30/50)	44 kg/m <sup>3</sup>
Water/Cement ratio	0.42
Slump	20~22cm
Thickness applied	10~15cm
Alkali-free accelerator(MEYCO SA161)	7.5%
Rebound	< 5%
Ages	Compressive strength(MPa)
30 minutes	0.8 ~ 0.9
28 days	~ 42

표 3. 숯크리트 혼화재의 입자크기, 비표면적 및 형상

혼화재	평균입자크기( $\mu\text{m}$ )	비표면적( $\text{m}^2/\text{g}$ )	입자형상
Carbon black	0.05	44	구형
실리카 흙	0.10	20	구형
고반응성 메타카올린	< 2.5	10	판상
플라이 애쉬	10	0.5	구형
시멘트(비교대상)	50	0.3	엷은 조각모양

표 4. 숯크리트 혼화제 사용량 계산시 각 결합재별 K 요소

Binder	K 요소
시멘트	1
실리카 흙	2(사용량 < 8%) 1(사용량 < 8~15%)
플라이애쉬	0.5
고로슬래그	0.5

표 5. 숯크리트 혼화재의 최대 사용량 (중량비)

혼화재	최대 사용량
실리카 흙	15% × 포틀랜드 시멘트
플라이애쉬	30% × 포틀랜드 시멘트 15% × 포틀랜드/플라이 애쉬 시멘트
고로슬래그	20% × 고로슬래그 시멘트 30% × 포틀랜드 시멘트

에서 국내 생산이 이루어지지 않고 있으며 전량 수입에 의존하고 있다. 따라서 실리카 흙을 적용하기 위해서는 숯크리트의 경제성 분석이 선행되어야 하며 실리카 흙을 대체할 수 있는 고성능 국산 혼화재의 적용이 필요하다.

따라서 본 기사에서는 현재 숯크리트의 고성능화를 위해 적용되고 있는 미분말 혼화재인 실리카 흙, 플라이애쉬 및 고로슬래그에 대한 자료를 분석하였다. 또한 숯크리트의 고성능화를 위한 국산 신 혼화재로서 메타카올린을 선정하고 관련 자료를 제시하였다.

## 2. 숯크리트용 혼화제의 개요

콘크리트의 혼화재료(admixture)는 시멘트, 골재, 물

이외에 혼합할 때 필요에 따라 숯크리트의 한 성분으로 더 넣는 재료로서, 응결중의 굳지 않은 콘크리트와 경화중 및 굳은 콘크리트의 특성들을 개선하기 위해 사용된다.

혼화재(混和材)는 혼화재료중 사용량이 비교적 많아서 그 자체의 부피가 콘크리트의 배합계산에 관계되는 것으로 통상 시멘트 중량의 1%(또는 5%)를 초과하는 재료를 의미한다. 일반적으로 분말 형태가 많으며 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카 흙, 기타 실리카질 혼화재, 콘크리트용 팽창재, 착색재 및 내마모재 등이 포함된다. 이들 혼화재는 표 3과 같이 서로 다른 특성을 가지고 있다.

시멘트뿐만 아니라 혼화재도 결합재(binder)에 포함되므로 EFNARC(1999)에서는 표 4와 같은 K 요소를 고려하여 숯크리트의 혼화재의 사용량을 계산할 것으로 추천하고 있다.

예를들어 시멘트 외에 혼화재로서 플라이애쉬와 실리카흙을 사용하고 급결제 사용량이 5%인 경우(1m<sup>3</sup>당),  
 시멘트 300kg(K 요소: 1) = 급결제 15.0kg  
 플라이애쉬 100kg(K 요소: 0.5) = 급결제 2.5kg  
 실리카 흙 20kg(K 요소: 2) = 급결제 2.0kg  
 가 되어 숏크리트에 사용되는 급결제의 총 사용량은 19.5 kg/m<sup>3</sup>이다.

또한 혼화재의 사용량은 표 5에 규정된 비율을 넘지 않도록 추천된다(EFNARC, 1999).

### 3. 플라이애쉬

플라이애쉬(Fly ash, Pulverised fuel ash)는 미세한 무기질의 포졸란 재료로서 소성 또는 경화상태의 물성을 향상시키기 위해 사용될 수 있다. 특히 시멘트량을 감소시키고 배합시 워커빌리티(workability)를 향상시키며, 염해 및 알칼리-골재 반응에 대한 저항성을 증진시킨다. 하지만 초기강도 발현이 지연되는 현상이 나타나므로 주의해야 한다.

오스트리아 콘크리트 학회에 의하면 최대 사용량을 포틀랜드 시멘트에 대해 15% 그리고 고로슬래그 시멘트에 대해서는 20%로 규정하고 있다(표 6).

콘크리트의 고강도/고내구성화를 위해서는 사용된 실적이 많으나 아직까지 숏크리트에 플라이애쉬를 적용하는 것은 일반적이지 않으며 적용 실적도 드물다.

### 4. 고로슬래그

고로슬래그(Ground Granulated Blastfurnace Slag, GGBS)는 용광로에서 철광석으로부터 선철을 만들 때 생기는 슬래그이다.

고로슬래그는 미세한 입상 수경성 결합재료로서 소성 또는 경화상태의 물성을 향상시키기 위해 사용될 수 있다. 특히 고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있는데, 즉 그 자체는 경화하는 성질이 취약하지만 포틀랜드 시멘트와 혼합한 경우는 수산화칼슘과 황산염의 작용으로 경화가 촉진되어 포틀랜드 시멘트만을 단독으로 사용했을 경우보다 수화열 감소, 장기강도 향상 및 수밀성 증대 등 우수한 품질을 얻을 수 있다.

그러나 플라이애쉬와 마찬가지로 아직까지 숏크리트에 고로슬래그를 적용한 실적은 매우 드물다. EFNARC(1999)에서는 고로 슬래그의 최소 비표면적을 450±25m<sup>2</sup>/kg로 추천하고 있다.

표 6. 플라이 애쉬에 대한 추천사항(EFNARC, 1999)

특 성	추천사항	출 처
허용가능한 최대사용량	포틀랜드 시멘트	≤ 15%
		≤ 30%
	PFA 시멘트	≤ 15%
	고로슬래그 시멘트	≤ 20%
비표면적	≥ 450m <sup>2</sup> /kg (BS3892)	오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC(1992)
		오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC(1992)
탄소 함유량	≤ 5%	오스트리아 콘크리트 학회(1990) SANCOT(1991)
SO <sub>3</sub> 함유량	≤ 2.5%	SANCOT(1991)
(시멘트 내의 총 SO <sub>3</sub> + PFA ≤ 4%)		

## 5. 실리카 흙

1950년대초 노르웨이에서 실리카 흙을 콘크리트에 처음으로 사용하기 시작했으며 1952년 노르웨이 수도 오슬로에 있는 Blindtarman 터널에서 최초로 실리카 흙을 현장에 적용하였다. 캐나다에서는 1971년 Quebec시에 있는 Sherbrooke 대학에서 실리카 흙 콘크리트에 대한 연구가 시작되었으나 1980년이 되어서야 SKW사에 의해 건설된 도로에 처음으로 실리카 흙을 적용하기 시작했다. 초기에는 실리카 흙 스투크리트를 습식공법으로 시공하였으며, 1983년 Hardy Associate 회사가 건식 공법으로 실리카흙 스투크리트를 시공하는 연구를 시작하여 60년된 Pier의 보수에 적용하기에 이르렀다.

실리카 흙은 실리콘 금속이나 실리콘 합금의 제조과정에 사용되는 전기 아크 용광로에서 나오는 산업부산물로써 무정질 상태의 실리카를 80% 이상 함유하고 있으며 매우 미세하면서도 구형의 입자인 고도의 포졸란성 재료이다. 실리카 흙은 가스 형태로 생성되어 포집된 비정질의 산화실리콘( $\text{SiO}_2$ )이며 배출가스온도가  $800^\circ\text{C}$ 이고, 탄소가 대부분 연소하여 색깔이 백회색인 것을 밀폐형이라 하고  $200^\circ\text{C}$ 에서 미연소 탄소가 남아 색깔이 회회색인 것

을 개방형이라 한다. 일반적으로 실리카 흙은 제품형태에 따라 응축처리된 과립상, 응축처리되지 않은 분말상 그리고 슬러리 상태의 세 가지 형태로 분류할 수 있으며 그 형태에 따른 장단점을 정리하면 표 7과 같다.

양질의 실리카 흙을 사용하고 적절한 배합, 타설, 양생을 실시하면 실리카 흙의 포졸란 반응은 수화초기부터 시작되어 공극 충전 효과에 따른 강도 증진과 투기/투수성을 감소시키므로 콘크리트의 각종 물리적, 역학적 성질을 시킬 수 있다. 그러나 실리카 흙을 콘크리트에 다량으로 사용하면 일반적으로 동일한 반죽질기를 얻기 위해 단위수량이 증가하기 때문에 여러 가지 나쁜 영향을 끼쳐 초기 균열을 발생시키기도 하고 실리카 흙을 혼입한 경우 블리딩이 작기 때문에 보유수량이 많게 되어 결과적으로 건조수축이 크게 되므로 고성능 감수제를 사용한 경우 균열발생이 크기 때문에 사용시 주의가 필요하다.

### 5.1 실리카 흙의 특성

실리카 흙의 색깔은 일반적으로 회색이며 흑색과 백색의 것도 있다. 색의 차이는 철분의 함유량에 따른 영향도 있지만 주로 탄소량의 다소에 따라서 결정된다. 비중은

표 7. 실리카 흙의 제품형태에 따른 특성

특성 형태	장 점	단 점
분 말 상	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 포졸란의 반응</li> <li>• 기술적 성능 및 효율성</li> <li>• 수송, 저장, 배합시의 온도보호가 필요없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 먼지와 습기에 민감</li> <li>• 높은 수송비</li> <li>• 제한된 수송거리</li> </ul>
과 립 상	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최저의 수송비</li> <li>• 최소의 저장 및 수송부피</li> <li>• 먼지감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최소의 포졸란 반응성, 기능 및 효율성</li> <li>• 습기에 민감</li> </ul>
슬 러 리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 먼지가 없음</li> <li>• 간편한 수송과 배합설계</li> <li>• 현탁액으로 만들어 사용하므로 콘크리트에 혼합시 실리카 흙의 혼합 및 분산이 용이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 침전 때문에 실리카량이 부정확</li> <li>• 단위수량 조절이 어려움</li> <li>• 동결을 방지하기 위하여 수송, 저장, 배합시의 온도조절 필요</li> <li>• 조속한 질형성을 방지하기 위하여 pH량 조절</li> <li>• 저장, 분배 탱크는 현탁액 속에서 실리카 흙을 유지하기 위하여 일정 교반</li> </ul>

종류에 따라 다르며 단위중량은 150~300kg/m<sup>3</sup> 정도로서 시멘트의 약 1/4~1/8 정도이다. 모양은 구형이며 평균 지름은 0.2 $\mu$ m 정도이다. 실리카흙의 입도분포는 그림 1과 같으며 비표면적은 150,000~250,000cm<sup>2</sup>/g(BET법) 정도로서 보통 포틀랜드시멘트의 약 20~30배이다.

실리카 흙의 화학조성은 실리콘 함금의 종류에 따라 다른데 SiO<sub>2</sub>의 함량이 많으며 대부분 비정질로 되어 있어서 알칼리 용액 중에서 쉽게 용해되는 특징이 있다. 실리카 흙의 입자 크기는 시멘트 입자의 1/25 정도로 미세하기 때문에(그림 2) 시멘트 입자의 공극을 충전하는 마이크로 필러(micro-filler) 효과가 있으며, 또한 입자 모양이 구형으로 되어 있어서 볼 베어링 역할을 하기도 한다(그림 3).

한편 실리카 흙은 시멘트 수화반응시 생성되는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하여 부가적인 CSH 겔을 형성하는 포졸란 반응[3Ca(OH)<sub>2</sub> + 2SiO<sub>2</sub> → 3CaO · 2SiO<sub>2</sub> · 3H<sub>2</sub>O(안정)]을

하여 강도가 향상됨은 물론 자유수에 의해 형성된 공극을 메워 치밀한 구조체를 형성하고 다른 포졸란 물질과 같이 수화열을 감소시키고 강도의 증진과 투수성/투기성을 감소시키는 데에도 기여한다. 실리카 흙을 혼입한 시멘트 페이스트는 0.1 $\mu$ m 이상의 큰 지름을 갖는 세공량이 작다.

## 5.2 시멘트계 재료에 미치는 영향

### ① 굳지 않은 콘크리트

실리카 흙은 비표면적이 커서 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 매우 짧은 시간에 반응하고 겔상의 물질을 생성하여 점성이 커져 슬럼프가 저하되며 시간에 따른 슬럼프 손실도 크다. 그러므로 소요의 슬럼프를 얻기 위해서는 고성능감수제의 사용이 불가피하다. 비표면적이 크고 미연소 탄소를 포함하고 있기 때문에 공기연행제의 흡착에 의해서 공

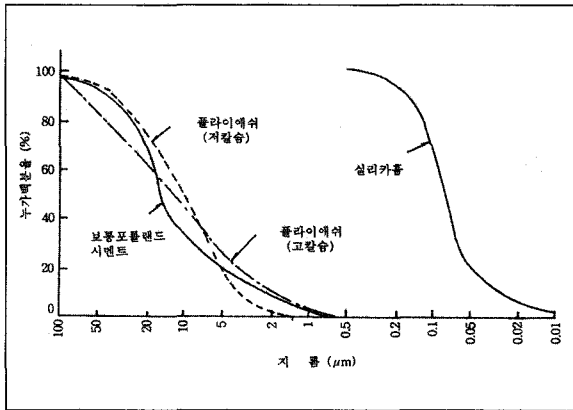


그림 1. 실리카 흙의 입도분포

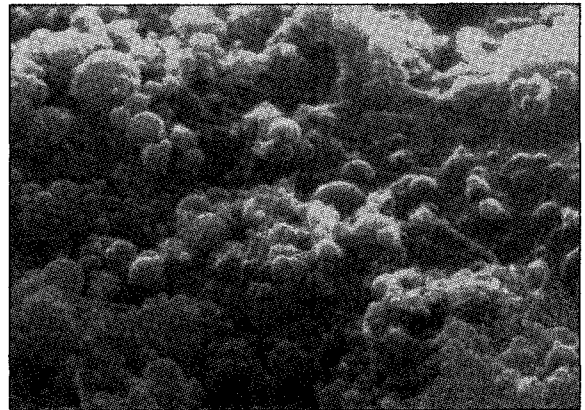


그림 2. 실리카 흙의 입자형태

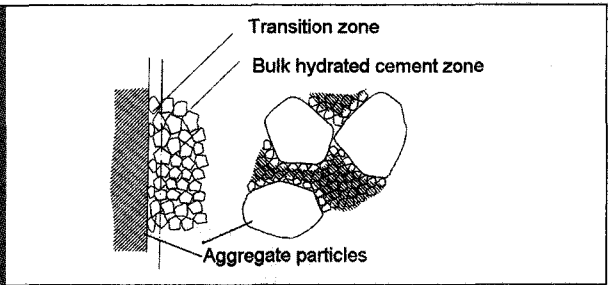
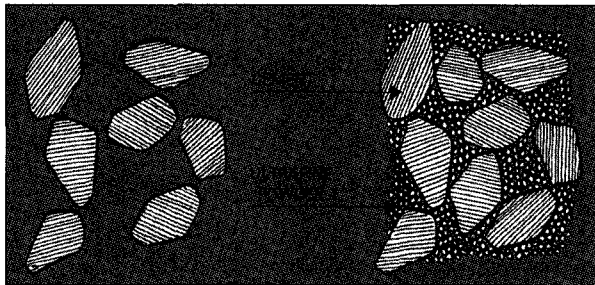


그림 3. 실리카흙으로 인한 콘크리트 개선 효과

기를 연행시키기가 어려우므로 소정의 공기량을 얻기 위해서는 공기연행제 사용량을 증가시킬 필요가 있다. 실리카 흙의 혼입율이 많을수록 블리딩이 작아지는데 그 이유는 실리카 흙의 입자가 수산화칼슘과 단시간에 반응하여 수화생성물인 겔층을 만듦으로써 겔층이 블리딩수의 이동을 억제하기 때문이다.

## ② 경화한 콘크리트의 성질

실리카 흙은 주성분이 비정질의  $\text{SiO}_2$ 로서 수산화칼슘과 반응하여 칼슘 실리케이트 하이드레이트(C-S-H)겔을 생성하고 플라이애시 등의 다른 포졸란 재료와 비교하여 매우 미세한 초미립 분말이기 때문에 초기 재령에서 포졸란 반응이 발생한다. 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 혼입률이 증가함에 따라 증가하는데 일반적으로 알려진 적정 혼입률은 5~15% 정도이다. 너무 많은 실리카 흙을 혼입하면 블리딩이 감소되므로 초기재령에서 건조환경에 노출되면 소성 수축균열이 발생하기 때문에 주의해야 한다(한국콘크리트학회, 2001a).

동일 물-결합재비에 대하여 실리카 흙의 혼입량 증가에 관계없이 총 공극량은 거의 비슷하다고 알려져 있다. 그러나 실리카흙을 혼합하면 마이크로 필러 효과와 포졸란 반응에 의해 0.1 $\mu\text{m}$  이상의 큰 공극은 작아지고 미세한 공극이 많아져 전이영역에서 골재와 결합재간의 부착력이 증가하여 콘크리트의 강도증진에 기여한다(한국콘크리트학회, 2001a, b).

## ③ 내구성능

실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 동결·융해 저항성은 실리카 흙의 종류, 시험방법, 혼입률, AE제의 사용유무 및 배합 등에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 화학적 저항성에 있어서는 융해성이 있는 수산화칼슘이 감소되고 유해한 이온의 확산이 억제된다. 실리카 흙을 콘크리트에 혼입하면 수화열을 저감시키고 강도발현이 현저하며 수밀성, 화학저항성 및 내구성능을 향상시킬 수 있어 고강도

및 고내구성의 콘크리트 제조에 있어서 효과적이다(한국콘크리트학회, 2001b).

## 5.3. 실리카 흙의 숏크리트에의 적용

숏크리트에서 실리카 흙의 일반적인 사용량은 시멘트 중량의 3~10%로 보고되고 있으나 EFNARC에서는 포트랜드 시멘트의 건조중량비로 3~8%를 사용할 것을 추천하고 있다. 더 많은 양을 사용할 경우에는 숏크리트의 수축을 최소화하기 위한 주의가 필요하기 때문이다. 또한 다음의 표 8과 같은 조건을 만족할 것을 제시하고 있다(EFNARC, 1999). 특히 사용량에 따라 굳지 않은 콘크리트의 작업성이 변화하므로 사전에 충분한 시험을 거친 후 최적을 사용량을 결정해야 한다.

실리카 흙은 숏크리트의 최상의 품질을 얻는데 있어 많은 장점을 가지고 있으나, 조밀성으로 인해 실리카 흙을 분산시키기 위해 항상 높은 비율의 유동화제나 고성능감수제를 사용하는 것이 필수적이다. 실리카 흙을 사용하지 않는 숏크리트와 비교할 때 혼화재료의 첨가량이 대략 20% 정도 증가하는 것으로 보고되고 있다(Melbye, 2000). 또한 실리카 흙의 생산에 전력이 많이 소요되므로 인해 경제적인 측면에서 국내 생산이 어려운 실정이다. 상대적으로 전력비용이 저렴한 북유럽, 체코 또는 이집트에서 생산된 제품을 전량 수입하고 있어 비용이 고가이다. 이상과 같이 숏크리트의 성능에 미치는 실리카 흙의 장, 단점을 정리하면 표 9와 같다.

## 6. 메타카올린

오늘날까지 콘크리트의 성능을 향상시키기 위해 사용되는 포졸란 재료는 플라이 애시, 슬래그, 실리카 흙과 같은 산업 부산물이 주를 이루어왔다. 그러나 그 출처에 따라 각각의 재료는 그 성능이 약간씩 다를 수가 있다. 이에

표 8. 숏크리트용 실리카 흙에 대한 추천사항

특징/규정	출처
추천 사용량(습식) 3~5%(터널 지보) 4~8%(연구지보로서 PFA 시멘트와 사용할 경우) 6~10%(연구지보로서 포틀랜드 또는 SR시멘트와 사용할 경우) 8~13%	노르웨이 콘크리트 협회(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) Morgan(1992)
사용량의 허용 한계(습식): 3~15% 표면적: $\geq 1,800 \text{ m}^2/\text{kg}$ (densified) 표면적: $\geq 1,200 \text{ m}^2/\text{kg}$ (BET) 입자크기: 평균 0.2 micron SiO <sub>2</sub> 함유량: $\geq 85\sim 90\%$ 탄소 함유량: $\leq 5\%$ 총 알칼리: $\leq 1\%$ 용해성 SO <sub>3</sub> : $\leq 1\%$ 연소손실: $\leq 4\%$ 염화물 함유량: $\leq 0.1\%$ 자유 CaO: $\leq 1.0\%$ 수리 유효성(hydraulic effectiveness): 100% 활동지수(activity index): $\geq 95\%$ (재령 28일)	노르웨이 콘크리트 협회(1992) SANCOT(1991) EFNARC(1992) 노르웨이 콘크리트 협회(1992) SANCOT(1991), EFNARC(1992) SANCOT(1991) SANCOT(1991) Austrian Concrete Society(1990) EFNARC(1992) EFNARC(1992) EFNARC(1992) 오스트리아 콘크리트 학회(1990) EFNARC(1992)

표 9. 숏크리트 성능에 대한 실리카흙의 장·단점

장 점	단 점
① Pumpability의 향상 ② 접착성이 향상되어 급결제 사용 감소 ③ 각 layer 사이의 접착강도 증가 ④ 강도 및 내구성 증가 ⑤ 알칼리-골재반응에 대한 저항성 향상 ⑥ 투수계수의 감소 ⑦ 리바운드의 감소 ⑧ 황산염에 대한 저항성 향상 ⑨ 강섬유의 조기 혼합 ⑩ 강섬유의 리바운드 감소 ⑪ 시멘트 기질과 강섬유 사이의 접착성 향상 ⑫ 해수에 대한 저항성 향상 ⑬ 굳지 않은 콘크리트의 재료분리 저항성 증진 ⑭ 굳지 않은 콘크리트의 블리딩(bleeding) 감소	① 사용량에 따른 작업성의 변화가 발생하므로 일정한 작업성을 확보하기 위하여 적정량의 유동화제 또는 고성능 감수제를 사용해야 함 ② 타설후 양생과정에서 수축이 발생할 수 있으므로 주의해야 함 ③ 매우 미세한 미립자이므로 장시간 작업시에 방진 마스크를 반드시 착용 ④ 국내 생산 안됨(전량 수입에 의존) ⑤ 고가의 단가

비해 메타카올린은 다른 광물질 혼화재와는 달리 양호한 관리 통제에 의해 생산되기 때문에 물리·화학적 특성에 있어서 그 변화가 매우 적으며 메타카올린은 다른 광물질 혼화재와는 달리 산업화 과정에서 나오는 부산물이 아니

라 특정온도(650~800℃) 내에서 양질의 카올린을 열적으로 활성화함으로써 제조되는데, 결과물인 무수물의 알루미노 규산염( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ )은 고도의 반응성인 인공 포졸란으로 거동하는 비정질의 재료이다.



특히 메타카올린은 실리카 흡과 같이 포졸란 반응을 하는 재료로서 콘크리트의 강도와 내구성을 저하시키는 수산화칼슘을 감소시키는 효과가 있다.

그리고 분말도가 200,000cm<sup>2</sup>/g이나 되는 실리카 흡에 비해 상대적으로 분말도 (100,000~150,000cm<sup>2</sup>/g)는 작지만 메타카올린이 작업성과 마무리성 등에서 더 좋은 성능을 발휘하는 것으로 보고되고 있다(원종필 등, 2002).

## 6.1 메타카올린의 특성

메타카올린은 특정온도(650~800℃) 내에서 양질의 카올린을 열적으로 활성화함으로써 제조되는데 결과물인 무수물의 알루미늄 규산염(Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)은 고도의 반응성인 인공 포졸란으로 거동하는 비정질의 재료이다. 메타카올린의 평균입경은 시멘트 입자(10μm)보다는 더 작으나 실리카 흡(0.1μm)보다는 더 큰 약 1~2μm 정도이다. 입자의 형상은 실리카 흡이 둥근 구형인데 반하여 메타카올린은 작은 판상 모양을 하고 있으며 비표면적은 120,000~150,000cm<sup>2</sup>/g 정도이며 비중은 종류에 따라 다르나 약 2.4~2.5 정도이다.

SiO<sub>2</sub>가 90% 이상인 실리카 흡과 달리, 메타카올린은 주로 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 함량이 많다(표 10). 이 두 성분은 모두 비정질이고 큰 비표면적을 가지고 있으며, 시멘트 수화작용의 결과로서 생산되는 수산화칼슘과 반응하여 칼슘 실리케이트 하이드레이트(CSH) 겔을 생산한다. 이러한 수산화칼슘과의 반응으로 인해 유해한 알칼리 작용이 감소되고 풍화에 대한 더 양호한 잠재성을 가지게 된다. 또한 시멘트 페이스트 배합에 혼입될 때 뚜렷한 수밀성을 가지고, 이러한 수밀성은 강도 증진과 투수성 감소의 결과를 나타낸다.

또한 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 이러한 메타카올린에 관한 연구가 많이 진행되어 시멘트/콘크리트 제조시 활발히 응용되고 있는 실정이고, 국내의 경우 실리카 흡에 비하여 국내 자원이 풍부하기 때문에 시공시 건설재료 비용 부담 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 국내에서 생산되는 메타카올린은 해외에서 사용되고 있는 제품에 비해 비표면적이 다소 작으며, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 성분함량이 높아 연황색을 띠고 있으며 강열감량도 다소 높은 것으로 알려져 있다. 그림 4는 메타카올린의 입자형태를 보여준다.

표 10. 메타카올린과 실리카 흡의 화학적 성분 비교(단위: %)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
고반응성 메타카올린	49.4	46.23	0.54	0.05	-	0.16	0.17	1.79
실리카 흡	94.0	0.3	0.8	0.3	0.4	0.2	0.8	-

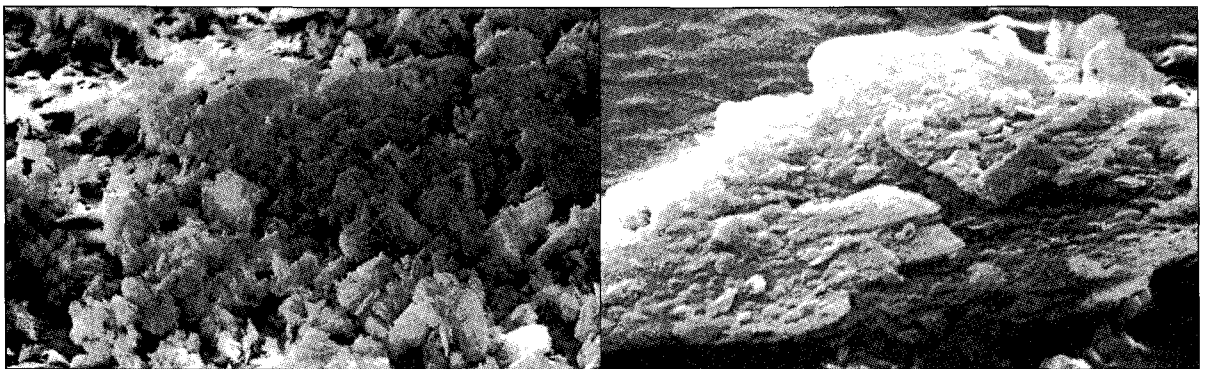


그림 4. 메타카올린의 입자형태

## 6.2 시멘트계 재료에 미치는 영향

### ① 굳지 않은 콘크리트

일반적으로 콘크리트 배합에서 유사한 슬럼프를 만들기 위해 메타카올린 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트보다 더 많은 양의 고성능 감수제 또는 고유동화제를 필요로 한다. 하지만 입자가 과도하게 미세한 실리카 흙을 사용한 콘크리트와 비교할 때 상대적으로 더 큰 입자를 가진 메타카올린 콘크리트는 적은 양의 고성능 감수제 및 고유동화제가 사용된다. 같은 물-시멘트 비에서 실리카 흙 콘크리트보다 메타카올린 콘크리트는 적게는 20%, 많게는 50%까지 고유동화제의 양을 줄일 수 있으며 실리카흙 콘크리트보다 덜 끈적거리기 때문에 양호한 작업성 및 마무리성을 나타낸다(원종필 등, 2002).

### ② 경화된 콘크리트의 성질

Curcio 등(1998)은 생산지와 분말도가 각기 다른 네 가지의 상업적으로 이용되는 메타카올린과 실리카 흙의 성능을 비교하였다. 비표면적이 비교적 큰 세 가지의 메타카올린은 실리카 흙과 유사하거나 더 양호한 포졸란 반응과 강도 증진을 나타내는 것으로 나타났다.

Zhang & Malhotra(1995)는 메타카올린의 물리적·화학적 특성을 분석하였고, 메타카올린을 혼입한 굳지 않은 콘크리트와 경화된 콘크리트의 성질을 보통 포틀랜드 시멘트 및 실리카 흙 콘크리트와 비교하는 연구논문을 발표하였다. 연구결과, 메타카올린은 높은 포졸란성이고 포틀랜드 시멘트와 비교하여 많은 유동화제와 AE제를 필요로 한다는 것이 밝혀졌다. 또한 메타카올린 10%의 대체 수준에서 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 비교하여 높은 강도 특성을 보였으며, 실리카 흙 콘크리트에 대해서는 초기에 더 빠른 강도 증진을 보이나 28일후에 비슷해지는 경향을 보였다. 28일에 있어서 메타카올린 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트 및 실리카 흙 콘크리트에 비해 다소 더 높은 활력, 인장, 휨강도, 영탄성

계수를 나타내었다.

### ③ 내구성능

Palomo 등(1999)은 NaOH 용액과 메타카올린을 혼입한 모르타르가 이온제거수, 바닷물, 황산나트륨 용액, 유황산 용액 등 독한 용액에 침지되었을 때의 화학적 안정성과 이들의 물리·역학적, 미세구조적 성질에 대해 연구하였다. 메타카올린이 특정량의 NaOH 용액과 혼합되어 100℃ 이하의 온도에서 양생되면 양호한 역학적 성질을 가지는 새로운 재료(hydroceramic)가 형성되며, 이러한 유해 용액들은 모르타르 재료의 미세구조와 강도의 진전에 부정적 영향을 거의 미치지 못했다는 결론이 얻어졌다.

Zhang과 Malhotra(1995)는 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 내구 특성을 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 실리카 흙 콘크리트와 비교하였다. 연구된 내구 특성은 건조수축, 염화물 이온 침투 저항성, 동결 융해 저항성과 표면 박리 저항성이었다. 실험결과, 표면 박리 저항성을 제외하고 메타카올린은 실리카 흙과 비슷한 수준의 내구 특성을 보였으며 포틀랜드 시멘트에 비해서는 상당히 높은 내구성능을 나타내었다.

Khatib과 Wild(1998)는 메타카올린으로 부분 대체된 시멘트 모르타르가 황산나트륨( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 용액에 대하여 상당히 양호한 저항성을 가진다고 하였다. 또한 Boddy 등(2001)은 메타카올린을 함유하는 콘크리트의 염화물 침투저항성에 대한 장기간의 연구결과로부터 메타카올린의 대체 수준이 증가하고 물-시멘트 비가 감소할수록 투수성이 감소하여 염화물 환경에서 철근 보강 콘크리트의 부식을 지연시키는 효과를 가진다고 보고하였다.

## 6.3 메타카올린의 숏크리트에의 적용

메타카올린의 원료인 카올린이 풍부한 우리나라의 경우, 대량 생산설비가 갖추어진다면 자체생산이 가능하여 전량 수입에 의존하는 실리카 흙을 대체할 수 있는 효과

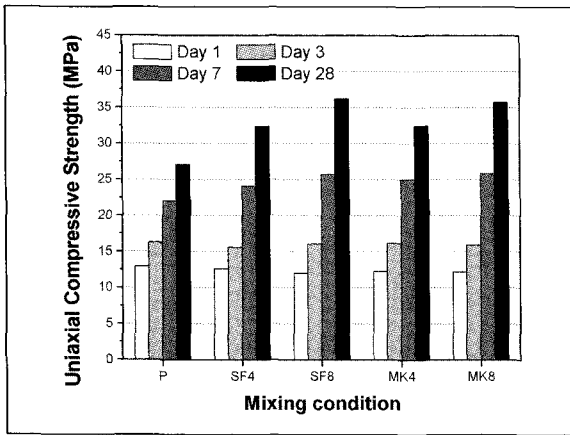


그림 5. 혼화재 종류와 사용량에 따른 숯크리트 압축강도

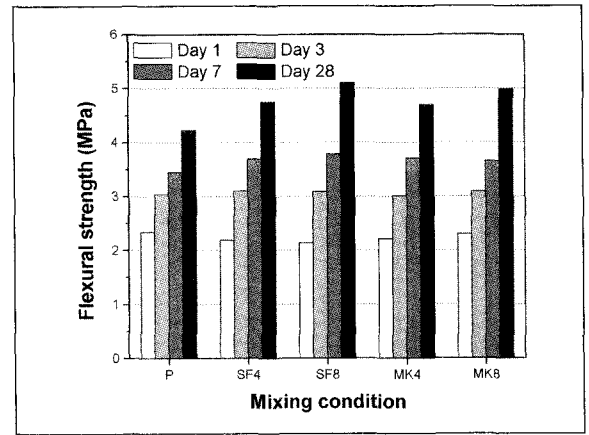


그림 6. 혼화재 종류와 사용량에 따른 숯크리트 휨강도

를 기대할 수 있다.

그리고 이상에서 살펴본 바와 같이 메타카올린은 수산화칼슘과 빠르게 반응하여 조기강도를 상당히 증진시키고 양호한 유동성을 나타내며, 수화열, 압축강도, 투수계수, 동결융해 저항성 등에 있어서는 실리카 흙과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 또한 색상이 흰색을 띠기 때문에 대부분 색상이 어두운 실리카 흙에 비하여 미관상 좋게 보일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나 메타카올린이 최근에 개발된 관계로 메타카올린 관련 기존 연구는 모두 콘크리트나 모르타르를 대상으로 하였으며, 숯크리트에 대한 적용 연구는 Bindiganavile과 Banthia(2001)가 건식 숯크리트에 적용한 연구가 유일하다. 그들의 연구에서는 콘크리트에서와 마찬가지로 메타카올린으로부터 실리카 흙과 거의 동일한 숯크리트 성능을 얻을 수 있는 것으로 보고되었다.

이와 같이 실리카 흙의 대체 재료로서 메타카올린이 매우 유망함에도 불구하고 현재까지 숯크리트, 특히 습식 숯크리트에 메타카올린을 적용하기 위한 기초 연구가 이루어지지 않고 있다.

본 연구진은 숯크리트에서 실리카 흙을 대체하기 위한 메타카올린의 적용성 평가와 관련된 연구를 수행하고 있으며 그림 5~6에 일례를 제시하였다(Bae 등, 2005). 이

때 시멘트 광물계 급결제를 사용하였으며, 실리카 흙(SF4 및 SF8)과 메타카올린(MK4 및 MK8)은 시멘트 중량의 4% 및 8%로 혼입하였다. 그 결과, 혼화재를 사용한 경우 재령 28일 압축강도와 휨강도는 급결제만 혼입된 배합(P)과 비교하여 각각 30% 및 20% 이상의 강도 증진 효과가 나타났다. 특히 혼입량이 증가할수록 강도는 약간 증가하였으나, 실리카 흙(SF)과 메타카올린(MK)의 종류에 따른 강도 차이는 없었다.

이와 같이 강도 측면에서 메타카올린은 실리카 흙과 동등한 숯크리트 성능 개선효과를 가지는 것으로 나타나 실리카 흙의 대체 재료로서의 가능성을 보였다. 그러나 다양한 현장 조건에 따른 메타카올린의 적용성과 메타카올린에 의한 내구성 증진효과에 대한 추가적인 연구가 반드시 선행되어야 할 것이다.

## 7. 맺음말

향후 싱글셀 터널공법을 국내에 도입하고 터널의 장기 내구성을 향상시키기 위해서 고강도/고내구성의 고성능 숯크리트의 개발이 선행되어야 한다.

숯크리트의 성능 향상을 위해 급결제뿐만 아니라 실리

카 흙으로 대표되는 미분말 혼화재의 사용이 필수적임에도 불구하고, 높은 단가와 국내 생산이 불가능하다는 문제점으로 인해 -shotcrete에 실리카 흙이 아직까지 널리 적용되지 못하고 있으며 이에 대한 기초 연구도 매우 미진한 실정이다.

본 기사에서는 실리카 흙을 대체할 수 있는 미분말 고성능 혼화재로서 메타카올린의 가능성과 기초 실험 자료를 제시하였다. 기존 연구결과들로부터 콘크리트와 모르타르에서 메타카올린이 실리카 흙과 동등의 성능을 나타내어 실리카 흙의 대체 재료로서 높은 가능성을 가지고 있는 것으로 보고 되었으며, 본 연구진이 수행한 기초 실험에서도 메타카올린은 실리카 흙과 동등한 -shotcrete의 강도 향상 효과를 가지는 것으로 나타났다. 또한 국내 생산이 가능하며 가격이 실리카 흙과 비교했을 때 저가인 점은 시공과 경제성 면에서 유리하게 작용할 것으로 사료된다.

그러나 다양한 현장 조건에 따른 메타카올린의 적용성과 메타카올린에 의한 -shotcrete의 내구성 증진효과에 대한 추가적인 연구가 반드시 선행되어야 한다. 또한 실리카 흙과 메타카올린 등의 미분말 혼화재를 사용할 경우, 현행 -shotcrete와 비교하여 높은 재료 단가와 고성능감수제의 사용량 증가 등으로 인해 시공단가 상승이 예상되므로 합리적인 경제성 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 원종필, 권연성, 이준자, 2002, 고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회 논문집, 제14 권 제3호, pp. 349~356.
2. 삼성물산(주), (주)유니온, 2004, 수냉 비정질 C12A7계 시멘트 광물계 곁결제와 복합 에어인젝션 시스템으로 구성된 타설장비를 이용한 습식 -shotcrete 공법, 건설신기술 441호.
3. 한국콘크리트 학회, 2001a, 콘크리트 혼화재료, 기문당.
4. 한국콘크리트학회, 2001b, 최신콘크리트공학, 기문당.
5. ジェオフロンテ研究會 シングルシェル分科會, 2001, シングルシェルトンネルのケーススタディ報告書, 日本ジェオフ

- ロンテ研究會.
6. Austrian Concrete Society, 1990, Guideline on shotcrete.
7. Bae, Gyu-Jin, Chang, Soo-Ho, Shin, Hyu-Soung, Park, Hae-Geun, Lee, Myeong-Sub, Kim, Jae-Kwon, 2005, Improvement of Wet-Mix Shotcrete Performance by Addition of High Reactivity Metakaolin, Proc. of ITA-ITES 2005(accepted).
8. Bindiganavile, V. & Banthia, N., 2001, Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin, Cement & Concrete Composites, Vol. 23, pp. 503~514.
9. Curcio, F., DeAngelis, B.A., & Pagliolic, S., 1998, Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 28, pp. 803~809.
10. Dimmock, R.H., 1999, Permanent Sprayed Concrete for UK Tunnels, Proc. of the 3rd Int. Symp. on Sprayed Concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, pp. 186~195.
11. EFNARC, 1999, European Specification for Sprayed Concrete - Guidelines for Specifiers and Contractors.
12. ITA, 1993, Shotcrete for Rock Support :a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No.4, pp. 441~470
13. Khatib, J.M. & Wild, S., 1998, Sulphate resistance of metakaolin mortar, Cement and Concrete Research, Vol. 28, pp. 83~92, 1998.
14. Melbye, T., 2000, Sprayed Concrete for Rock Support, MBT International Underground Construction Group.
15. Palomo, A., Blanco, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. & Grutzeck, M.W., 1999, Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 997~1004.
16. Zhang, M.H. & Malhotra, V.M., 1995, Characteristic of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and use in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 1713~1725.