

## 고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성

원종필<sup>1)\*</sup> · 권연성<sup>1)</sup> · 이준자<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 건국대학교 지역건설 환경공학과

(2001년 11월 29일 원고접수, 2002년 3월 2일 심사완료)

### Properties of High-Performance Concrete Containing High-Reactivity Metakaolin

Jong-Pil Won<sup>1)\*</sup>, Youn-Sung Kwon<sup>1)</sup>, and Jon-Ja Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

(Received November 29, 2001, Accepted March 2, 2002)

#### ABSTRACT

This research deals with the properties of fresh and hardened high-performance concrete(HPC) incorporating high-reactivity metakaolin(HRM). The properties of fresh and hardened state concrete were investigated included air content, slump flow, setting time, heat of hydration, compressive strength, resistance to chloride-ion penetration, abrasion and repeated freezing and thawing. The properties of the HRM concrete were also compared with those of the portland cement concrete and silica fume(SF) concrete.

The laboratory test results indicate that HRM material can be used as a supplementary cementitious material to produce high-performance concrete.

**Keywords:** high-performance concrete(HPC), high-reactivity metakaolin(HRM), silica fume

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물이 초고층화, 대형화, 그리고 특수화 되어감에 따라 보다 합리적이고 경제적인 구조시스템의 개발이 요구되고 있다. 새로운 구조시스템은 보다 효율이 높은 건설재료를 필요로 하고 있으며 이를 위한 방안으로 현재까지 지구상에서 가장 보편적인 건설재료인 콘크리트의 고품질화가 적극적으로 검토되고 있다. 콘크리트의 고품질화의 일환으로 고강도화가 그의 무게에 대한 낮은 강도를 개선하기 위하여 국내외에서 많이 사용되어지고 있다.<sup>1,2)</sup>

고성능 콘크리트는 콘크리트의 모순이라 할 수 있는 문제들, 즉 높은 강도를 내기 위해 물-시멘트비를 대폭 낮추고도 작업이 용이한 콘크리트와 같이 서로 상치되는 요구를 조화할 수 있는 기법을 들 수 있다. 이처럼 고강도이면서 높은 유동성을 나타내며 양호한 내구성을 가지는 콘크리트 제조에 있어 주로 사용되는 대표적인 혼화재로는 실리카 흙을 들 수 있다. 실리카 흙은 높은 포졸란 반응과 큰 비표면적을 가지는 특별한 특성 때문에 콘크리트의 역학적 성능 및 화학저항성을 향상시킨다<sup>3-5)</sup>. 실리카

흙은 미국의 자원이용국(bureau of reclamation)에서 1950년 초에 최초로 개발되었고 1980년 초에는 유럽에서 생산된 실리카 흙이 다량의 고유동화제와 함께 사용됨으로써 미국이나 캐나다에 큰 시장을 형성하게 되었다<sup>6)</sup>. 현재는 분말상태나 슬러리 상태의 실리카 흙이 주로 사용되는데 원료생산지에 따라 그 성상이 약간의 차이를 보이지만 그 효과는 유사한 것으로 보고되고 있다<sup>6)</sup>.

실리카 흙과 유사한 성능을 가지는 새로운 혼화재로써 메타카올린은 콘크리트 건설 산업에 소개된 가장 최근의 광물질 혼화제이다<sup>7)</sup>. 포졸란 재료로써 메타카올린의 특성은 실리카 흙과 유사하며, 따라서 그 성능이 실리카 흙과 비교가 많이 된다. 그러나 실리카 흙이 폭넓게 사용되고 관계 문헌이 풍부한 반면 메타카올린은 그 적용에 대한 관심이 점점 증가는 하고 있지만 연구는 많이 되고 있지는 않은 실정이다<sup>8,9)</sup>.

메타카올린은 특정 온도 범위(650~800 °C)내에서 양질의 카올리나이트를 열처리함으로써 생성된다<sup>10)</sup>. 따라서 카올린이 풍부한 우리나라의 경우 대량 생산 설비가 갖추어진다면 자체생산이 가능하여 전량 수입에 의존하는 실리카 흙을 대체할 수 있어 수입대체효과를 가져올 수 있다. 또한 그 색상이 흰색을 띄기 때문에 대부분 색상이 어두운 실리카 흙에 비해 미관상 좋게 보일 수 있어 건축 구조물에서의 사용이 더 용이하다고 사료된다. 그리고 메

\* Corresponding author

Tel : 02-450-3750 Fax : 02-2201-0907

E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

타카올린은 수산화칼슘과 빠르게 반응하여 초기강도를 상당히 증진시킨다<sup>9)</sup>. 국내의 경우 실리카 흙, 플라이애쉬, 고로슬래그 등 산업화 과정에서 나오는 광물질 혼화재를 사용하여 고성능 콘크리트에 대한 연구를 한 사례는 있지만 인위적으로 생산되는 메타카올린에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 메타카올린을 첨가한 고성능콘크리트의 기초물성을 기존에 고성능콘크리트에 널리 쓰이던 혼화재인 실리카 흙을 첨가한 것과 비교하여 실험을 실시하여 그 성능을 고찰하였다. 굳지 않은 콘크리트의 성능을 측정하기 위하여 응결시간과 수화열 실험을 실시하였다. 경화된 콘크리트의 경우 압축강도와 내구 성능을 측정하였는데, 본 실험에서 수행된 내구성능 평가 시험은 투수성, 마모 및 동결·융해 반복 저항성이다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 품질 시험 결과는 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 비중 2.61의 강모래를 사용하였고, 굵은 골재는 비중 2.62, 최대치수 25mm의 부순돌을 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

#### 2.1.3 실리카 흙 및 고반응성 메타카올린

실리카 흙은 캐나다산이며 물리·화학적 특성은 Table 3과 같다. 고반응성 메타카올린은 미국산으로 물리·화학적 특성은 Table 4와 같다.

Table 3과 4에서 알 수 있듯이 실리카 흙이 약 90% 이상이 SiO<sub>2</sub>인데 비하여 메타카올린은 SiO<sub>2</sub>와 함께 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>도 많은 비중을 차지하고 있다. 메타카올린은 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 반응하여 칼슘 실리케이트 하이드레이트(CSH) 겔(gel)을 생산하는 실리카 기초 제품이라는 관점에서 실리카 흙과 유사하다. 그리고 분말도가 200,000 cm<sup>2</sup>/g이나 되는 실리카 흙에 비해 상대적으로 분말도(150,000 cm<sup>2</sup>/g)는 작지만 메타카올린이 작업성과 마무리성 등에서 더 좋은 성능을 발휘한다<sup>7)</sup>.

Fig. 1, 2는 두 혼화재의 SEM(scanning electronic microscope) 촬영사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 실리카 흙은 둥근 구형의 모양을 나타내는 반면 메타카올린은 작은 판상 모양을 하고 있다.

### 2.2 배합 및 양생

Table 1 Physical properties of cement

Fineness (cm <sup>2</sup> /gr)	Specific gravity	Stability (%)	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			3 days	7 days	28 days
3,322	3.15	0.13	238	302	416
Initial setting time(min.)			216		
Final setting time(min.)			316		

Table 2 Properties of aggregate

Aggregate	Specific gravity		
	Bulk	Bulk(SSD)	Apparent
Coarse aggregate	2.90	2.62	2.83
Fine aggregate	2.59	2.61	2.63

Table 3 Physical and chemical properties of silica fume

Specific gravity	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Average particle size(μm)	L.O.I. (%)				
2.2	180,000-200,000	0.1	1.5				
Chemical compositions(%)							
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>
94.0	0.3	0.8	0.3	0.4	0.2	0.8	-

Table 4 Physical and chemical properties of HRM

Specific gravity	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Average particle size(μm)	L.O.I. (%)				
2.5	150,000	1.5	0.89				
Chemical compositions(%)							
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>
49.40	46.23	0.54	0.05	-	0.16	0.17	1.79

실리카 흙과 메타카올린을 사용한 고성능콘크리트의 실험을 위한 배합사항은 Table 5와 같다. 단위시멘트량과 단위수량은 각각 600 kg/m<sup>3</sup>와 180 kg/m<sup>3</sup>로 고정시켰으며 실리카 흙과 메타카올린을 시멘트 중량에 대해 0%, 2.5%, 5%, 10%의 대체수준으로 변수를 정하였다. 공기량을 3~4%, 슬럼프를 60~70 cm로 맞추기 위해 고유동화제 및 공기연행제의 양을 Table 5와 같이 조절하였다.

콘크리트는 23±2 °C의 실험실에서 팬형 강제식 믹서를 사용하여 배합을 실시하였다. 재료투입 순서 및 혼합은 시멘트, 골재 및 광물질혼화제를 투입하여 30초간 건비빔한 후 물을 첨가하여 1분간 비빔 후에 고유동화제와 공기연행제를 넣고 1분 30초간 총 3분에 걸쳐 혼합하였다. 공기시체는 23±2 °C, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생 후 23±2 °C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

### 2.3 실험방법

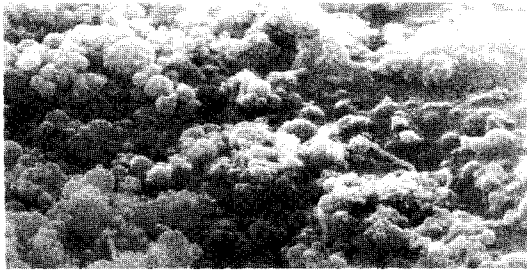


Fig. 1 Scanning electron micrograph of the silica fume particle( $\times 50000$ )

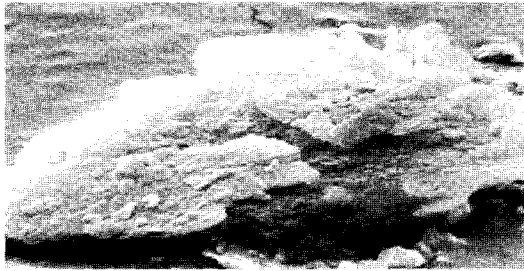


Fig. 2 Scanning electron micrograph of the metakaolin particle( $\times 15000$ )

굳지 않은 콘크리트의 경우 수화열 및 응결시간을 측정하였다. 경화된 콘크리트에 대해서는 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. 또한 내구성능에 대한 평가로 투수성, 마모성 및 동결·융해 저항성 시험을 실시하였다.

### 2.3.1 기본 물성시험

#### 1) 응결시간

응결시간 시험은 KS F 2436의 「관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법」으로 측정하였다<sup>11)</sup>.

#### 2) 수화열

스티로폼 용기로 단열장치를 만들어 실험을 실시하였다.  $300 \times 300 \times 250$  mm의 몰드에 콘크리트를 채워 중심부에 온도센서(Thermocouples) 2개를 묻고 콘크리트의 온도상승을

측정하였다.

### 3) 압축강도

압축강도는 KS F 2405에 의하여 측정하였으며,  $\phi 100 \times 200$  mm의 실린더를 제작하여 재령 7일, 14일, 28일에 대하여 3개씩 2회 반복실험 하였다<sup>12)</sup>.

### 2.3.2 내구성 시험

#### 1) 염화물 투수시험

염화물 투수시험은 ASTM C 1202(electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration)과 AASHTO T 259(rapid determination of chloride permeability of concrete)에 준하여 실시하였다<sup>13,14)</sup>.

$\phi 100 \times 200$  mm의 실린더형 공시체를 제작하여 7일과 28일의 재령에서 가운데 부분을  $\phi 100 \times 50$  mm로 절단해서 시험을 실시하였다. 각 재령에서 4개의 공시체를 제작하여, 절단 후 공시체 내부의 갇힌공기를 제거하기 위해 테시게이터 안에 넣고 진공펌프를 3시간 동안 작동시킨 후, 다시 공시체를 물로 포화시키기 위하여 테시게이터 안에 물

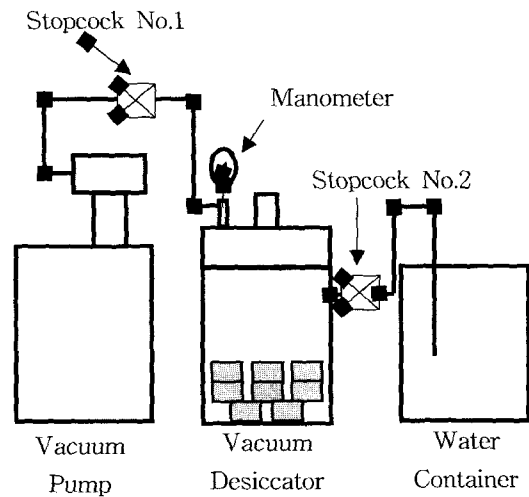


Fig. 3 Prepare of specimens before chloride permeability test

Table 5 Mix proportions

Type of concrete	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	S	G	Mineral admixture	AE*	SP**
0	30	50	180	600	769.3	772.2	0	0	10.2
S2.5				585			15	0.012	10.8
S5				570			30	0.018	12
S10				540			60	0.024	14.4
M2.5				585			15	0.024	10.8
M5				570			30	0.030	11.4
M10				540			60	0.042	13.2

S: Silica fume, M: Metakaolin

\*: Air entraining agent

\*\* : Superplasticizer

을 넣어 1시간 동안 펌프를 작동시켰다. 그 후에 진공펌프의 작동을 중지시키고 공시체를 물 속에서 완전히 포화시킨 상태로 18±1 시간 동안 유지하였다. Fig. 3는 투수성 시험 전의 공시체 준비장치를 도식화한 것이다.

### 2) 마모저항성 시험

마모저항성을 측정하기 위하여 ASTM C 944의 실험 방법으로  $\phi 150 \times 60$ mm의 실린더 공시체 4개를 제작하여 23±2°C의 항온조건에서 7일, 28일간 수중양생 후 재령별로 2 개씩 마모시험을 실시하였다.

### 3) 동결·융해 저항성 시험

동결·융해 저항성을 측정하기 위해서 100×100×400mm의 각주형 공시체를 제작하여 실내에서 23±2°C의 항온조건으로 14일간 수중양생한 후 KS F 2456에 따라 동결융해시험을 실시하였다. 1 사이클을 4시간으로 하였으며, 기준 공시체를 제작하여 공시체 중심에서의 온도를 4°C에서 -18°C로 떨어뜨리는 동결작용과 다시 4°C로 올리는 융해작용을 반복하였다. 34 사이클마다 상대동탄성계수를 측정하였으며 시험은 공시체 2개를 제작하여 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기본 물성 시험결과

#### 3.1.1 응결시간

응결시간 시험결과는 Fig. 4~6과 같다. 각 대체수준에서 메타카올린과 실리카 흙 모두 10시간 이상의 응결시간을 나타내었다. 실리카 흙을 혼입한 콘크리트는 모든 대체수준에서 보통 포틀랜드 시멘트보다 응결시간에서 감소효과를 나타내었고, 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 10% 대체수준에서만 보통 포틀랜드 시멘트보다 응결시간의 지연효과를 나타내었다. 또한 각 대체수준끼리 비교할 때 메타카올린을 혼입한 콘크리트가 실리카 흙을 혼입한 콘크리트보다 더 큰 응결지연효과를 나타내었다. 더 많은 양의 고유동화제를 사용하였음에도 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 응결시간이 더 짧아진 이유는 낮은 물-시멘트비에서 실리카 흙이 고유동화제와 함께 사용될 때 응결시간을 감소시키는 효과를 가져오기 때문이다.

#### 3.1.2 수화열

수화열 시험결과는 Fig. 7~9와 같다. 각 대체수준에서 메타카올린과 실리카 흙은 비슷한 경향을 보였으며, 2.5%와 5% 대체수준에서는 보통 포틀랜드 시멘트보다 수화열이 약간 낮은 경향을 보였으나 10% 대체수준에서는 더 높은 수화열을 나타내었다. 이는 대체수준이 높아질수록 메타카올린과 실리카 흙의 미세한 입자에 의해 수화반응

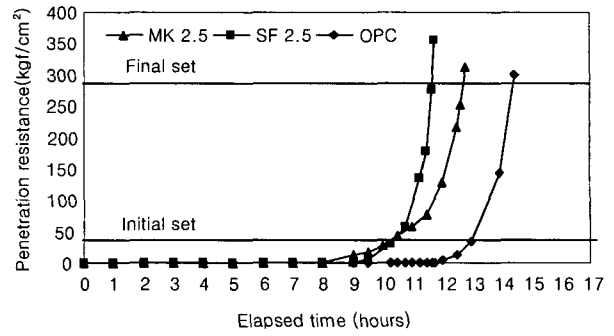


Fig. 4 The setting time of 2.5% substitution ratio of admixtures

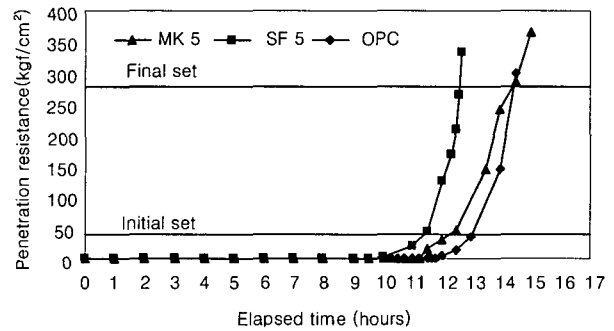


Fig. 5 The setting time of 5% substitution ratio of admixtures

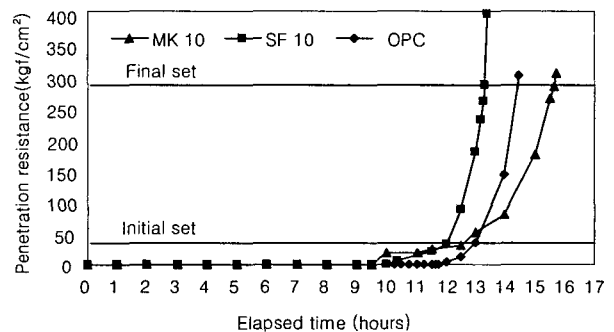


Fig. 6 The setting time of 10% substitution ratio of admixtures

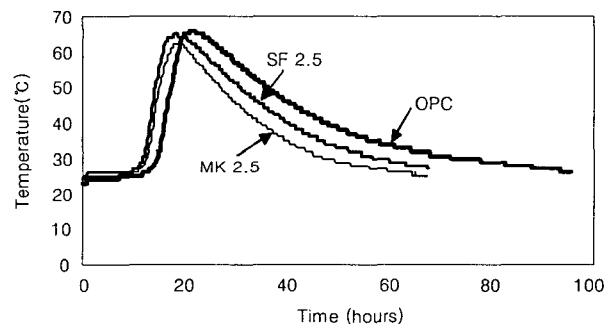


Fig. 7 Heat of hydration of 2.5% substitution ratio of admixtures

이 더 활발히 일어나기 때문이다.

#### 3.1.3 압축강도

보통 포틀랜드 시멘트와 메타카올린, 실리카 흙을 사용한 고성능 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Table 6과 같다. Table 6에서와 같이 압축강도는 혼화재의 대체 수준

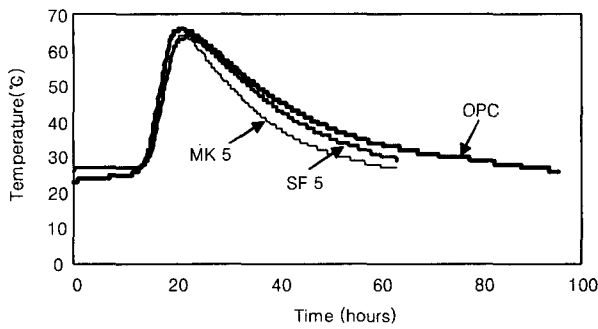


Fig. 8 Heat of hydration of 5% substitution ratio of admixtures

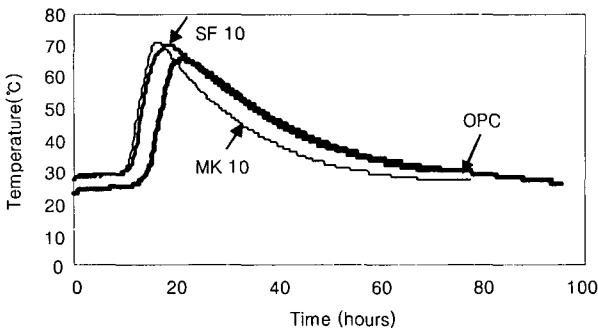


Fig. 9 Heat of hydration of 10% substitution ratio of admixtures

이 증가할수록 커지는 경향을 보였다. 2.5% 대체수준에서 메타카올린 혼입 콘크리트가 실리카 흙 콘크리트보다 7일에 약 4%, 14일에 2% 정도 큰 강도를 보이다가 28일에는 거의 같은 압축강도를 나타내었다. 대체수준 5%에서는 7일에 메타카올린 혼입 콘크리트가 실리카 흙 혼입 콘크리트보다 약 10%의 높은 강도를 나타내었다가 14일에는 그 차이가 1.5%로 줄어들었으며 28일에는 약 2%의 감소를 나타내었다. 그러나 10% 대체수준에서는 7일과 14일에 약 8%의 강도증진을 나타냈으며, 28일에는 2% 높은 압축강도를 나타내었다. 이처럼 28일에 비해 7일과 14일에서 메타카올린을 혼입한 콘크리트가 실리카 흙을 혼입한 콘크리트보다 더 높은 강도를 나타내는 것은 메타카올린이 실리카 흙보다 초기에 더 빠른 수화반응을 하기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2 내구성 시험결과

#### 3.2.1 염화물 투수성

염소이온 투과에 의한 전하량 측정방법에 따라서 고성능 콘크리트의 투수성을 측정하였으며 Table 7은 ASTM 1202에서 제시된 통과전하량으로 투수성을 평가하는 기준이다<sup>14)</sup>. 실험 결과 7일과 28일 양생에서 대체 수준이 증가할수록 투수성이 감소하는 것을 알 수 있다. 보통 포틀랜드 시멘트와 실리카 흙, 그리고 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 염화물 투수시험결과는 Table 8과 같다. ASTM에서 제시된 평가기준과 비교해 보면 보통 포틀랜드 시멘

Table 6 Results of compressive strength

	Curing time(days)	Batch 1			Batch 2			Mean(St.Dev)**)
OPC	7	460	457	490	459	503	496	477.50(21.06)
	14	503*	527	515	558	549	523	534.4(18.24)
	28	513*	537	561	528	571	563	552.00(18.47)
SF2.5	7	514	508	524	539	526	521	522.00(10.67)
	14	542	541	577	572	497*	559	558.20(16.60)
	28	566*	601	595	587	597	599	595.80(5.40)
SF5	7	537	522	551*	521	529	523	526.40(6.69)
	14	595	618	620	596	606	621	609.30(11.99)
	28	655	662	660	664	651	653	657.50(5.24)
SF10	7	494*	586	584	597	576	500*	585.75(8.66)
	14	618	624	483*	645	658	612	631.40(19.39)
	28	673	690	675	701	677	681	682.83(10.74)
MK2.5	7	549	538	540	534	541	549	541.83(6.05)
	14	565	581	560	568	569	574	569.50(7.29)
	28	591	584	601	589	584	604	592.17(8.52)
MK5	7	586	567	578	571	581	574	576.17(6.91)
	14	613	525*	620	629	610	619	618.20(7.33)
	28	635	645	639	651	645	648	643.83(5.88)
MK10	7	621	645	628	629	650	633	634.33(11.02)
	14	675	692	672	691	675	598*	681.00(9.67)
	28	699	698	695	694	703	693	697.00(3.74)

\*: Outlier t-value(95%) \*\*: Standard deviation

Table 7 Chloride permeability based on charge passed<sup>13,14)</sup>

Charge passed(coulombs)	Chloride permeability
> 4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
<100	Negligible

Table 8 Results of chloride permeability test

Type of concrete	Curing time(days)	Specimen		Mean
		1	2	
SF 2.5	7	4897	5233	5065.0
	28	2734	2512	2623.0
SF 5	7	3225	3216	3220.5
	28	1061	1188	1124.5
SF10	7	1997	2015	2006
	28	577	506	541.5
OPC	7	8830	8171	8500.5
	28	3824	3917	3870.5
MK 2.5	7	5503	5849	5676
	28	3778	3621	3699.5
MK 5	7	3230	3372	3301
	28	2172	2470	2321
MK 10	7	1458	1426	1442
	28	697	677	687

트의 경우는 7일에서 높은 투수성을, 28일에는 보통의 투수성을 나타내었다. 2.5%의 혼화재 대체수준에서는 양생 7일에 실리카 흙 혼입 콘크리트와 메타카올린 혼입 콘크리트 모두 ASTM에서 제시된 기준에 대해 높은 수준의 투수성을 나타내었으나 28일에는 보통의 투수성을 나타내었다. 5%의 대체수준에서 7일에서는 메타카올린 혼입 콘크리트와 실리카 흙 혼입 콘크리트 모두 보통의 투수성을 나타내었으나 28일에서는 실리카 흙 혼입 콘크리트가 메타카올린 혼입 콘크리트보다 낮은 투수성을 나타내었다. 10%의 대체 수준에서 7일에는 메타카올린 혼입 콘크리트가 낮은 투수성을 나타낸 반면 실리카 흙 혼입 콘크리트는 보통의 수준을 나타내었고 28일에서는 모두 매우 낮은 투수성을 나타냈다. 이와 같이 염화물 투수 시험에 있어서는 2.5%와 5% 대체수준에서는 실리카 흙에 비하여 메타카올린의 효과가 뚜렷하게 보이지 않았다. 그러나 10% 대체수준에서 7일에 실리카 흙 혼입 콘크리트가 보통 수준의 투수성을 나타낸 반면 메타카올린 혼입 콘크리트는 낮은 수준의 투수성을 보였다. 28일에는 두 혼화재 모두 같은 수준의 매우 낮은 투수성을 보였다. 이는 10%의 대체수준에서 압축강도에서도 볼 수 있었듯이 메타카올린과 실리카 흙 혼입 콘크리트가 거의 같은 것과 같이 생각할 수 있다.

### 3.2.2 마모저항성

고성능 콘크리트의 마모저항성에 대한 시험 결과는 Fig. 10~12와 같다. 2.5% 혼화재 대체수준에서 7일에는 마모된 양이 같았고 28일에는 실리카 흙 혼입 콘크리트가 메타카올린 혼입 콘크리트보다 약 12%정도 마모된 양이 많았다. 5% 대체 수준에서는 실리카 흙 혼입 콘크리트가 메타카올린 혼입 콘크리트와 비교해 7일에는 약 11%, 28일에는 약 18%의 높은 마모량을 나타내었다. 10%의 대체수준에서는 7일에 실리카 흙 혼입 콘크리트가 메타카올린 혼입 콘크리트에 비해 30%의 높은 마모량을 나타내었고 28일에는 약 13%의 높은 마모량을 나타내어 그 차이가 작아진 것을 알 수 있다. 이처럼 마모저항성에 있어서는 메타카올린 혼입 콘크리트가 실리카 흙 혼입 콘크리트에 비해 마모저항성이 더 좋은 결과를 나타내었다. 또한 압축강도에서 볼 수 있었듯이 10% 대체수준에서 7일에 비해 28일에 그 저항성에 대한 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이 메타카올린의 더 빠른 강도 증진과 비교하여 설명될 수 있을 것이다.

### 3.2.3 동결융해 저항성

고성능 콘크리트의 동결·융해에 대한 저항성은 Fig. 13 및 14와 같다. 메타카올린과 실리카 흙을 첨가한 콘크리트와 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트 모두 300 싸이클 까지 95% 이상의 우수한 내구성능을 나타내었다. 이는 고성능 콘크리트의 고강도화에 의한 영향으로 판단된다.

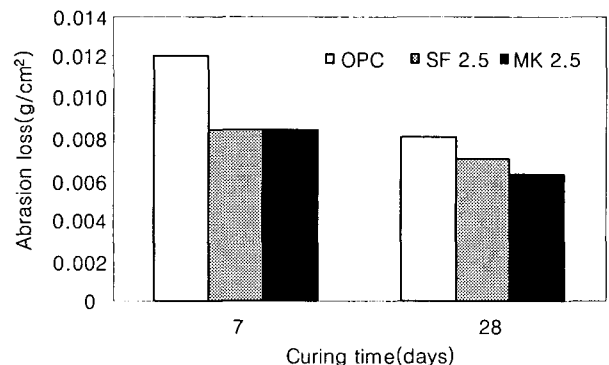


Fig. 10 Abrasion resistance of 2.5% substitution ratio of admixtures

## 4. 결 론

본 연구에서는 실리카 흙의 대체재료로서 메타카올린의 적용가능성을 평가하기 위하여 두 광물질 혼화재를 변수로 하여 고성능 콘크리트의 기본물성 및 내구성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공기 량의 경우 미세한 분말도로 인하여 메타카올린을 혼입한 콘크리트와 실리카 흙을 혼입한 콘크리트 모두 그 대체수준이 증가할수록 일정 수준의 공기량을 맞추기 위해 공기연행제의 사용량이 커지는 경향을 보였다.

2) 슬럼프 플로우의 경우 메타카올린과 실리카 흙의 대체 수준이 증가할수록 미세한 분말도로 인해 작아지고, 메타카올린을 첨가한 콘크리트가 실리카 흙을 첨가한 콘크리트보다 더 양호한 유동성을 나타내었다.

3) 응결시간은 다량의 고유동화제의 사용에 의하여 모든 대체수준에서 10시간 이상의 지연효과를 나타내었고, 각 대체수준에서 메타카올린이 실리카 흙보다 응결지연 효과가 더 크게 나타났다.

4) 수화열은 각 대체수준에서 메타카올린은 실리카 흙과 비슷한 거동을 나타내었다.

5) 압축강도는 혼화제의 대체 수준이 증가할수록 커지는 경향을 보였는데, 28일에 비해 7일과 14일에 메타카올린을 혼입한 콘크리트가 실리카 흙을 혼입한 콘크리트보다 더 높은 강도를 나타내었다.

6) 염화물 투수 시험에 있어서는 2.5%와 5% 혼화제 대체수준에서는 실리카 흙에 비하여 뚜렷한 메타카올린의 효과가 보이지 않았으나 10% 대체수준에서는 7일에 메타카올린 혼입 콘크리트가 더 낮은 수준의 투수성을 보였다. 28일에는 거의 동일한 투수율을 보였다.

7) 마모저항성에 있어서는 메타카올린 혼입 콘크리트가 실리카 흙 혼입 콘크리트에 비해 더 좋은 결과를 나타내었다.

8) 동결·융해 저항성에서는 모든 대체수준에서 95% 이상의 양호한 성능을 나타내었다.

9) 이상의 시험결과 메타카올린을 혼화재료로 사용한 콘크리트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 비교해 우수한 성능을 나타내었고, 실리카 흙 콘크리트와 비교해 보아도 그 성능이 비슷하거나 더 우수하게 나타났다. 따라서 기존의 실리카 흙을 대신해 메타카올린을 고성능 콘크리트의 혼화재료로 사용할 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

1. 한국 콘크리트학회, 최신 콘크리트공학. 1999, pp. 155.
2. Kmita, A., "A new Generation of Concrete in

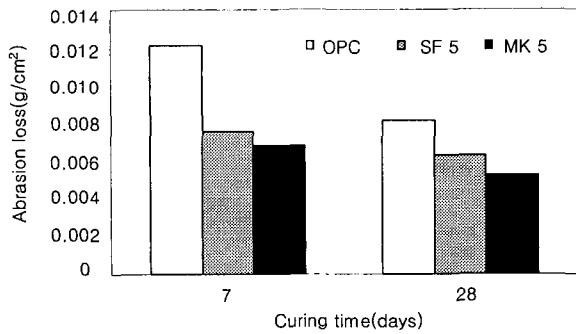


Fig. 11 Abrasion resistance of 5% substitution ratio of admixtures

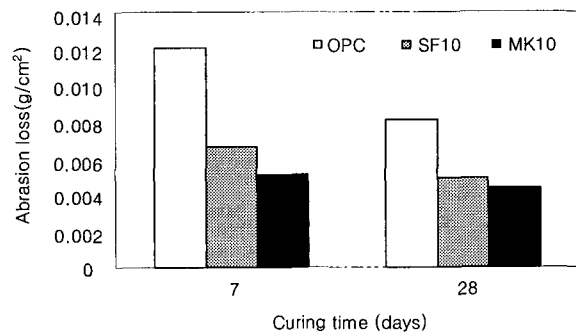


Fig. 12 Abrasion resistance of 10% substitution ratio of admixtures

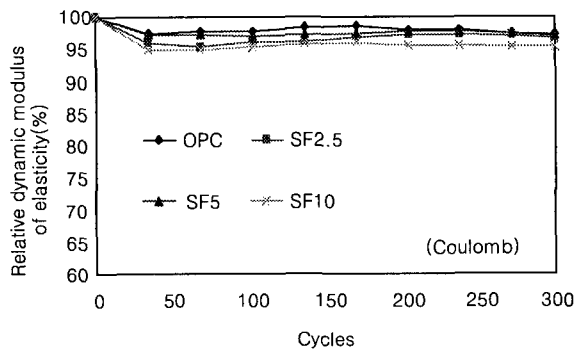


Fig. 13 Repeated freezing and thawing cycles of high-performance concrete with silica fume

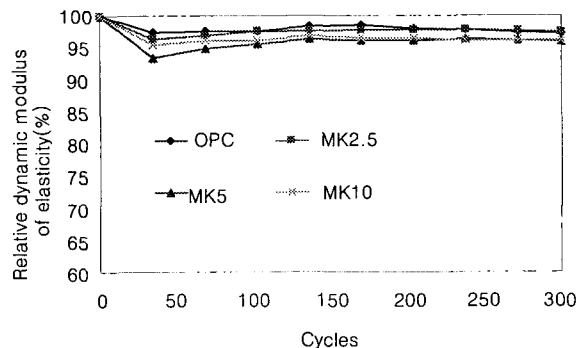


Fig. 14 Repeated freezing and thawing cycles of high-performance concrete with metakaolin

- Civil Engineering," *Journal of Material Processing Technology* 106. 2000. pp.80~86.
3. Zelic, J., R., Krstulovic, E., and Tkalcec, P. Krolo, "The properties of Portland cement limestone silica fume mortars," *Cement and Concrete Research* 30. 2000. pp.145~152.
  4. Shannag, M. J., "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume," *Cement & Concrete Composites* 22 2000, pp.399~406.
  5. Wild, S., Sabir, B. B., and Khatib, J. M., "Factors Influencing Strength Development of Concrete Containing Silica Fume," *Cement and Concrete Research* 25. 1995, pp.1567~1580.
  6. 한국콘크리트학회 편찬, "시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리," 1995, pp.290~331.
  7. Terrence Ramlochan, Michael Thomas, Karen A. Gruber, "The Effect of Metakaolin on Alkali-Silica Reaction in Concrete," *Cement and Concrete Research* 30. 2000. pp.339~344.
  8. Palomo, A., Blanco, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T., and Grutzeck, M. W., "Chemical Stability of Cementitious Materials Based on Metakaolin," *Cement and Concrete Research* 29. 1999. pp.997~1004.
  9. Curcio, F., DeAngelis, B. A., and Pagliolico, S., "Metakaolin as A Pozzolan Microfiller for High-Performance Mortars," *Cement and Concrete Research* 28. 1998. pp.803~809.
  10. Pera, J., "Metakaolin and Calcined Clays," *Cement & Concrete Composites* 23(2001) iii. Guest Editorial.
  11. KS F 2436, 관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법.
  12. KS F 2405, 콘크리트 압축강도 시험방법.
  13. AASHTO T 259, Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete.
  14. ASTM C 1202, Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

## 요 약

본 연구는 고반응성 메타카올린(HRM)을 혼입한 고성능 콘크리트(HPC)의 굳지 않은 콘크리트와 경화된 콘크리트의 특성을 평가하기 위해 수행되었다. 굳지 않은 콘크리트에 대해서는 공기량과 슬럼프 플로우, 응결시간 및 수화열 측정 시험을 실시하였다. 경화된 콘크리트에 대해서는 압축강도 및 염화물 투수시험, 마모저항성, 동결·융해 저항성 시험을 하였다. HRM 콘크리트의 특성은 또한 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 실리카 흙 콘크리트와 비교하여 나타내었다.

실험 결과 HRM 재료가 고성능 콘크리트를 생산하기 위한 시멘트 대체 재료로서 사용할 수 있음을 보여주었다.

**핵심용어 :** 고성능 콘크리트, 고반응성 메타카올린, 실리카 흙