

# 메타카올린을 사용한 콘크리트의 활용방안에 대한 연구

이 상 수

〈(주)대우건설 기술연구소 선임연구원, 공박〉

김 동 석

〈(주)대우건설 기술연구소 전임연구원〉

## 1. 서론

콘크리트는 일반적으로 널리 사용되고 있는 구조재료로서 과거에는 반영구적인 재료로 인식되어 왔다. 그러나, 구조물이 고층화, 다양화되면서 콘크리트에 대한 내구성 및 신뢰성 향상에 대한 요구도 증가됨에 따라 더욱더 우수한 강도와 수밀성을 갖는 콘크리트에 대한 필요성이 증가되고 있다.

콘크리트를 고품질화 하기 위한 연구는 여러 가지 측면에서 이루어져 왔다. 그 중의 하나로써 시멘트의 대체재로 각종 혼화재의 사용에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 지금까지 개발된 대표적인 혼화재로는 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카 흙 등이 있다.

이러한 혼화재들은 각각의 특성이 요구되는 부위에 적용되어 왔으며, 또한 양호한 품질을

갖는 혼화재의 사용은 산업폐기물의 건설재료에의 재활용 측면과 함께 콘크리트의 수밀성과 내구성 향상에 효과를 발휘함으로써 지속적인 관심을 모으고 있다.

특히, 실리카 흙은 강도나 내구성 측면에서 우수하여, 고강도콘크리트나 내화확성이 요구되는 콘크리트 등에 적극 활용되고 있다. 그러나, 이러한 실리카 흙은 다른 혼화재에 비해서 단가가 높아 건설비용이 상승하게 됨에 따라, 실리카 흙과 동일한 정도의 우수한 효과를 가지면서도 보다 경제적인 혼화재에 대한 요구가 증대함에 따라 새로이 주목받게 된 혼화재가 메타카올린이다.<sup>1),2)</sup>

메타카올린은 카올린을 고온에서 소성한 후, 급랭시키면 조직이 비정질화되면서 잠재수경성을 갖게 되며, 강도 및 내구성 개선에 우수한 효과를 발휘하기 때문에, 이미 외국에서

는 이러한 메타카올린을 고성능의 콘크리트를 제조하기 위한 실리카 함의 대체재로 인식하여 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>3),4)</sup> 이러한 메타카올린은 국내에서도 제조되고 있어 비용측면에서도 유리하지만, 아직 국내의 콘크리트 분야에 활용된 경우는 없으며, 고성능콘크리트에 적용하기 위한 기초적인 연구가 진행되어지고 있다.<sup>5)</sup>

이에, 본 연구에서는 일반강도에서 고강도 범위에 걸쳐 실리카 함과의 비교를 통하여, 국내산 메타카올린이 콘크리트의 유동성, 강도 특성 및 염해에 대한 내구성 등에 미치는 효과에 대하여 검토하였다.

## 2. 메타카올린의 특성

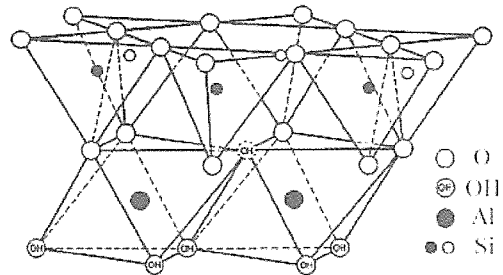
### 2.1 카올린족 광물의 성질

메타카올린(meta-kaolin)의 원료인 카올린(kaolin, 고령토)은 원래 중국 강서성의 요업중심지인 경덕진(景徳鎭) 동쪽 45km에 있는 고륙(高陸)에서 산출되는 자색의 점토로서 도자기를 만드는데 사용된 광석에 대하여 붙여진 광석명이다. 시멘트·콘크리트에 적용할 수 있는 메타카올린(meta-kaolin)은 카올린을 특수 처리하여 제조하게 되었으므로, 카올린에 Meta-라는 접두어를 붙여 변화를 표시하기 위하여 사용되었다. 국내에서 산출되는 카올린은 대부분 할로이사이트(halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화잔류형 광상에 많이 분포하고 있다.

카올린에 유사한 어휘를 가지고 있는 카올리나이트(kaolinite)는 자색을 띠는 함수규산염광물로서 카올린의 주 구성광물이다. 카올린을 구성하고 있는 광물은 기본화학식이  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  또는  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ 이며, 카올리나이트 이외에 할로이사이트

(halloysite), 나크라이트(nacrite), 디카이트(dickite)가 있으나, 카올리나이트와 할로이사이트가 주 구성광물이다. 카올린의 불순물로 운모, 석영, 장석, 스�멕타이트, 산화철광물, 산화티탄광물, 산화망간광물 등이 소량 함유되어 있다.<sup>6)</sup>

이 광물들은 모두 화학식이  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 이지만 결정구조가 서로 다르다. 주 구성광물의 하나인 카올리나이트의 결정구조는 [그림 1]과 같이, 1개의  $[Si_4O_{10}]$  사면체층과 1개의  $[Al_4O_4(OH)_4]$  팔면체층으로 구성되어 있다.



[그림 1] 카올리나이트의 결정구조

입자들의 형태와 크기는 카올린의 성질을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 그것은 이 두 가지가 점토와 물의 혼합물의 변형성을 좌우하기 때문이다. 또한, 이물질의 혼입은 이들 성질에 큰 영향을 준다. 카올린에 다른 점토광물들이 존재한다거나 또는 철분이 카올린 광물 격자내에 있거나 독립체로 존재할 경우에는 카올린의 원광과 제품의 밝기를 낮추기 때문에, 이들 불순물은 카올린의 질을 저하시키는 가장 큰 요인이다.

### 2.2 메타카올린의 활성화 및 제조

카올린을 고온소성한 후 급랭시키면 카올린은 결정화 에너지를 내부에 보존하여 유리상

태가 되며 카올린은 잠재 수경성을 가지게 된다. 즉, 카올린을 이러한 처리에 의해 활성화시키면 높은 에너지 상태로 되어 반응성은 커지나, 그 분말을 그대로 물과 접촉시켜도 수화 반응은 거의 진행되지 않고 특정조건(알칼리 조건)하에서 아주 현저한 수경성을 보이게 된다. 이처럼 활성화된 카올린은 잠재수경성과 함께, 시멘트의 수화생성물인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응을 일으키는 메카니즘을 가지게 된다.

이와 같은 활성화 메카니즘과 카올린의 열간변화를 기초로 카올린을 소성하여 메타카올린을 제조하게 된다. 카올리나이트가 탈수되어 활성화되는 소성온도는  $500\sim 800^\circ\text{C}$  범위이고, 탈수가 일어나는 이 온도를 넘게 되면, 카올리나이트는 2차원의 유리구조를 가지는 메타카올린으로 변화한다.

소성된 점토의 포졸란 활성도는 비표면적과 고활성도를 갖는 비결정질 또는 반 비결정질을 생성하는 결정질 점토층의 결정수 제거와 관계된다.<sup>7)</sup> 점토원료의 성질과 수산기 이온을 방출하기 위한 열적 에너지에 따라 소성온도는 달라지고, 소성된 입자의 집적을 막고 반응면적을 늘리기 위해 분쇄가 도입된다.

포졸란의 활성도에 기초한 여러 가지 이론이 있지만, 유리질인 비정질 실리카의 용해로 시멘트의 반응이 촉진되고, 공극용액 내에 용해된 실리카는 수산화칼슘과 반응하여 CSH 겔을 형성한다. 또한, 높은 pH에서 용해된 알루미늄의 일부는 CSH겔과 결합하지만, 대부분은 CAH와 CASH를 형성하여 강도증진에 기여한다. 콘크리트의 강도증진에 기여하는 시기의 관점에서 본 활성도의 차이에 기여하는 주요인인 비표면적에 따라 용해율은 달라진다.

예를 들면, 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 경우에 초기강도가 기준 콘크리트보다 작

게 되는 원인은 시멘트량의 감소와 상대적으로 작은 플라이애시의 비표면적( $3,000\sim 4,000\text{cm}^2/\text{g}$ )으로 인한 실리카의 늦은 용해 때문이다. 그러나, 재령과 함께 더 많은 실리카가 용해, 반응하여 CSH겔을 형성함으로써 장기강도의 증진을 가져온다. 한편, 실리카흙과 메타카올린 입자는 플라이애시보다 세립하여 훨씬 큰 비표면적을 가지므로서, 콘크리트에 혼입할 경우 빠른 강도증진을 발현한다. 따라서, 메타카올린의 큰 비표면적은 단위수량의 증가가 요구되고, 실리카흙 콘크리트만큼은 아니지만 동일 물결합재비와 단위시멘트량의 경우의 워커빌리티는 저하된다.

제조공정은 일반적인 세라믹 제조공정과 유사하여, 원료를 투입 및 분쇄하여 1차 건조한 후, 로터리 킬른(rotary kiln)에서 소성하고, 생성된 클링커를 입도분포를 조절하여 분쇄하여 제조하게 된다. 이러한 공정에서도 중요한 변수가 많아서, 균일한 제품의 메타카올린을 제조하기 위해서는 원료의 성분, 소성시간 및 소성온도, 입도분포 등의 인자들을 정확하게 제어하여야 한다. 특히, 콘크리트 혼화재료로 사용되는 메타카올린의 경우에는 포졸란 특성을 갖도록 하기 위해서 가능한 한 과열되지 않고 거의 완전한 탈수(dehydroxylyzation)가 이루어지도록 하는 것이 가장 중요하다. 소성온도 이상으로 과열되어 소결되면, 반응성이 없는 비활성의 몰라이트(mullite)가 되어버리므로, 최적의 메타카올린을 제조하기 위해서는 카올리나이트를 하소되지 않도록 주의하면서 완전히 탈수시켜야 한다.<sup>8)</sup>

## 2.3 메타카올린의 물리·화학적 성질

일반적으로 많이 사용되는 포졸란재의 대표적인 화학적 성질은 [표 1]과 같다. 표에서 보듯이 실리카 및 알루미늄 등의 산화물의 함량

은 서로 다르지만, 천연 및 인공 포졸란 모두 주요성분은 실리카이다. 천연 포졸란의 유리질 실리카는 용암의 급속한 냉각에 의해 생성되어, 보통 구형의 다공질 입자로 구성된다. 비정질 유리구조를 갖는 플라이애시, 실리카 흙, 고로슬래그 등의 인공 포졸란도 역시 급속한 냉각에 의해 생성된다. 메타카올린의 경우에는 액체상태로 만들고 냉각하여 유리질을 생성하기 위한 온도보다 낮은 온도에서 소성되므로 결정구조가 파괴된다.

[표 1] 각종 포졸란 재료의 화학적 성질<sup>9)</sup>

구분	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	SO <sub>3</sub>
GGBS	34.0	16.0	0.32	36.92	8.83	0.87	2.67
FA	49.1	26.4	9.3	1.4	1.4	5.0	0.8
SF	92.0	0.7	1.2	0.2	0.2	2.0	-
MK	52.1	41.0	4.32	0.07	0.19	0.89	-

메타카올린은 ASTM C 618의 N급 포졸란으로 원료가 되는 제조된 지역의 카올린 광물에 따라 약간씩 물리·화학조성이 변할 수도 있으며, 색깔 또한 백색 및 연황색 등이 있다. 이러한 색상의 차이는 함유된 미량성분에 따라 변하게 되는데, 주로 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분에 의해 차이가 발생한다. 주성분은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이며, S/A의 이론적 비는 1.18 정도이다. 국내에서 생산되는 메타카올린의 경우에는 할로이사이트질의 카올린을 원료로 하기 때문에 다른 것과는 달리 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분 함량이 다소 높아 연황색을 띄고 있으며, 강열감량도 약간 높다.

또한, 국내에서 생산되는 메타카올린의 경우에는 해외에서 생산되는 메타카올린에 비해 비표면적이 다소 작다. 이러한 비표면적의 차이는 제품의 사용환경 및 조건에 따라 변동이 다소 가능한 것으로 보여진다.

일반적으로 시멘트 대체재로서 사용되는 포졸란은 가스화 이온의 확산성 저감하여 내구

성을 개선함과 함께 더 치밀한 조직의 콘크리트를 만든다. 또한, 초미립 플라이애시, 실리카흙 및 메타카올린은 화학적으로 활동적이면서 유해한 대량의 수산화칼슘을 콘크리트에서 신속히 소비한다.

### 3. 실험개요

#### 3.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 [표 2]에 나타낸 바와 같이, 물결합재비(W/B)를 일반강도 범위에서 고강도 범위에 이르는 4수준에서, 메타카올린(MK) 및 실리카 흙(SF)의 혼입율에 따른 균지않은 콘크리트의 유동특성, 경화콘크리트의 강도특성 및 내구특성으로서 염소이온 확산계수를 비교 검토하였다. 시멘트에 대한 메타카올린의 혼입율은 0, 5, 10, 15, 20(%)이며, 실리카 흙의 혼입율은 그 동안 많은 연구가 수행된 결과에서 10% 이하가 많고, 특히 일본 건축학회에서는 알칼리골재반응을 고려해 15% 이하<sup>10)</sup>로 하고 있으므로, 본 연구에서는 5, 10, 15(%)를 대상으로 하였다.

[표 2] 실험계획

실험요인		수준
물결합재비 (%wt)		40, 45, 50, 55
혼화재	종류	메타카올린, 실리카 흙
	혼입율(%wt)	0, 5, 10, 15, (20)
목표 슬럼프치 (cm)		18±2.5

균지않은 콘크리트의 유동특성은 목표슬럼프치 18±2.5cm를 만족하기 위한 고성능감수제(SP)의 사용량으로 평가하였다. 경화 콘크리트에서는 재령 7, 28, 56, 91(일)의 압축강도 및 재령 28일의 할랄인장강도를 측정하여 혼화재 종류 및 W/B에 따른 콘크리트의 강도

특성을 평가하였다. 또한, 염해에 대한 내구특성을 평가하기 위하여 재령 7, 28, 56, 91일의 염소이온 확산계수를 측정하였고, W/B 50%에 대하여 재령 7, 28일의 세공분포를 측정하여 공극구조를 검토하였다.

[표 3] 콘크리트 배합

W/C(%)	S/a(%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
40	45.6	158	395	793	954
45	46.7	158	351	829	954
50	47.7	158	316	861	951
55	47.8	164	298	863	949

[표 3]은 혼화재를 치환하지 않은 기준 콘크리트의 배합으로서, 수 차례의 시험배합 결과를 바탕으로 물시멘트비(W/C) 40~50%에서 단위수량 158kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율(S/a) 45.6~47.7%로 선정한 배합과 W/C 55%, 단위수량 164kg/m<sup>3</sup>, S/a 47.8%인 배합을 선정하였다.

### 3.2 사용재료

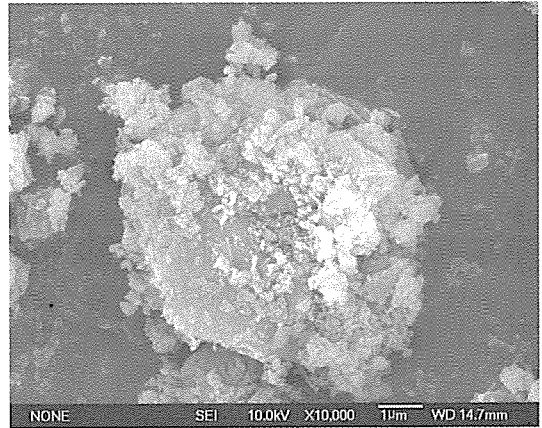
실험에 사용한 재료로서, 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 혼

[표 4] 시멘트의 물리적 성질

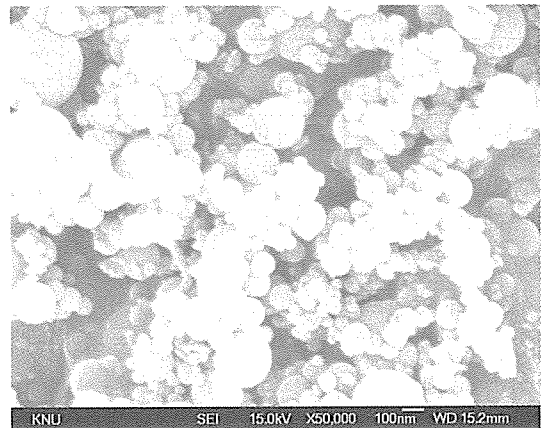
비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3.200	0.05	3:50	6:10	195	293	397

[표 5] 혼화재의 물리·화학적 성질

구분	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감 량 (%)	화학적 성분(%)				
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
SF	2.20	200,000	2.10	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3
MK	2.59	10,000	-	52.0	40.0	3.0	1.2	0.5



[사진 1] 메타카올린의 SEM 사진(×10000)



[사진 2] 실리카 흙의 SEM 사진(×50000)

화재는 캐나다산의 실리카 흙 및 국내 A사의 메타카올린을 사용하였으며, 각각의 물리·화학적 성질은 표 4, 5에 나타난 바와 같다.

사진 1, 2는 두 혼화재의 SEM(scanning electron microscopy) 촬영결과이다. 사진에서 보는 바와 같이 실리카 흙은 매끄러운 구형의 모양을 나타내는 반면, 국내산 메타카올린은 크기 및 표면형상이 상당히 불균질한 것으로 나타났다.

잔골재는 남양만산 해사를 세척하였으며, 굵은골재는 용원석산의 25mm 쇄석을 사용하였

[표 6] 골재의 물리적 성질

구분	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	실적율 (%)	씻기손 실량 (%)	단위용적중량 (kg/l)
잔골재	2.60	0.52	2.60	64.8	0.5	1.690
굵은골재	2.63	0.53	6.96	58.1	0.1	1.497

[표 7] 고성능감수제의 물리적 성질

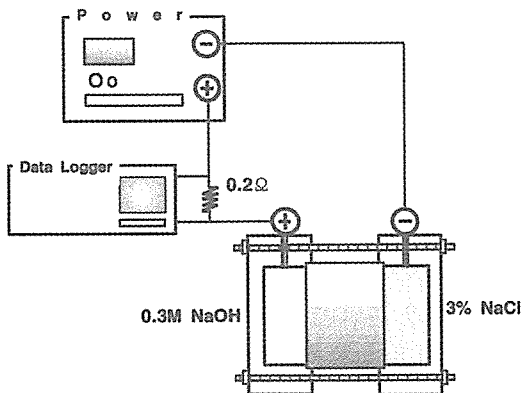
색상	주성분	고형분 (%)	pH	비중	감수율 (%)	블리딩 량비 (%)
암갈색	나프탈렌계 축합물	40±2	7.0±1.0	1.20±0.02	23	51

고, 물리적 성질은 [표 6]과 같다. 혼화제는 국내 E사의 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였으며, 물리적 성질은 [표 7]과 같다.

### 3.3 실험항목 및 방법

굳지않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험은 KS F 2402 및 KS F 2421에 따라 실시하였고, 압축강도와 활렬인장강도는  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주형 공시체를 소정의 재령에서 UTM으로 측정하였다.

염소이온 확산시험체는 소요의 재령까지 수중양생을 실시한  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  원주형 공시체



[그림 2] 염소이온 확산시험기기 모식도

의 일정부위를 커터기를 사용하여 두께 50mm로 커팅한 후, 수분의 증발을 방지하기 위하여 랩으로 원주면을 보호하였다. 염소이온 확산 시험은 Tang & Nilsson이 제안한 전기촉진 시험방법<sup>11)</sup>을 참조하여, [그림 2]에 나타난 바와 같이 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, 3% NaCl 수용액을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때 0.2Ω의 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 8시간 동안 측정하였다.

염소이온의 침투깊이는 시험이 종료한 후 시험편을 활렬하여 0.1N AgNO<sub>3</sub>를 분무하였을 때 변색되는 부위를 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 다음과 같은 식을 이용하여 염소이온 확산계수를 산출하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

$$\text{여기서, } a = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

$D$ : 확산계수 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )

$z$ : 이온의 원자가 (염소이온의 경우  $z = 1$ )

$F$ : 패러데이 상수 (96,481.04 J/Vmol)

$U$ : 양극과 음극 사이의 전압차 (V)

$R$ : 기체상수 (8.314 J/Kmol)

$T$ : 용액의 온도 (K)

$L$ : 시편의 두께 (m)

$x_d$ : 염소이온의 침투깊이 (m)

$t$ : 실험 지속시간

$\text{erf}$ : error function

$c_d$ : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도

$c_0$ : 음극쪽 셀의 염소이온 농도

또한, 재령 7, 28일에서 W/B 50%, 실리카 흙 혼입율 0, 10%, 메타카올린 혼입율 0, 10, 20%의 경화된 콘크리트 시험체에서 채취한 모르타르 시료에 대하여 Mercury Porosimeter(AUTOPORE II 9220, 미국 Micro Meripices사)를 사용하여 공극반경 0.002~1000 $\mu$ m 범위의 세공용적분포와 전체 공용적을 측정하였다.

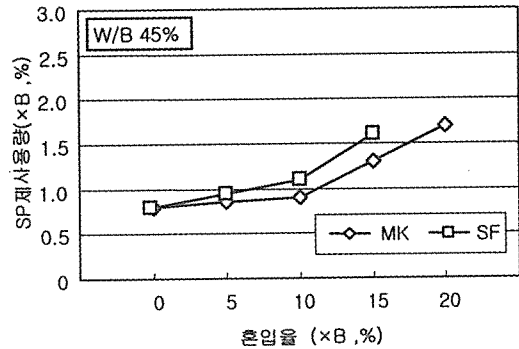
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 굳지않은 콘크리트의 유동특성

[그림 3]은 혼화재 혼입율에 따른 SP제 사용량을 나타낸 것이다. 모든 W/B에 있어서 기준 콘크리트에 비해 두 종류의 혼화재 모두 혼입율이 증가할수록 목표슬럼프치를 만족시키기 위해 요구되는 SP제의 사용량도 증가하는 것으로 나타났으며, 그 경향은 W/B가 클수록 증가하였다.

또한, SP제의 사용량은 배합조건마다 약간 다르지만 혼입율이 동일한 경우, 메타카올린을 혼입한 콘크리트가 실리카 흙을 혼입한 콘크리트에 비해서 8~28% 적게 소요되었다. 이것은 실험에 사용된 메타카올린의 분말도가 10,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  정도로서 200,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 인 실리카 흙에 비하여 1/20정도 낮아서 동일한 슬럼프를 갖기 위해 요구되는 단위수량이 적어지기 때문으로 생각된다.

그러나, 작업성 측면에서 관찰결과, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트는 혼입율이 증가하여도 양호한 작업성을 보였으나, 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 혼입율 증가에 따라 점성이 크게 증가되어 작업성이 나쁘게 되었다. 이것은 사진 1, 2와 같은 입자의 형상에 기인하는 것으로 보인다. 따라서, 메타카올린의 혼입율이 증가하는 경우에는 유동성 향상을 위한 방



[그림 3] 혼화재 혼입율에 따른 SP제 사용량 (W/B 45%)

법으로 고로슬래그 등의 혼화재와 병용하는 삼성분계 배합을 검토해 볼 필요도 있을 것으로 사료된다. 공기량은 대부분의 배합에 있어서 목표값을 만족하고 있었다.

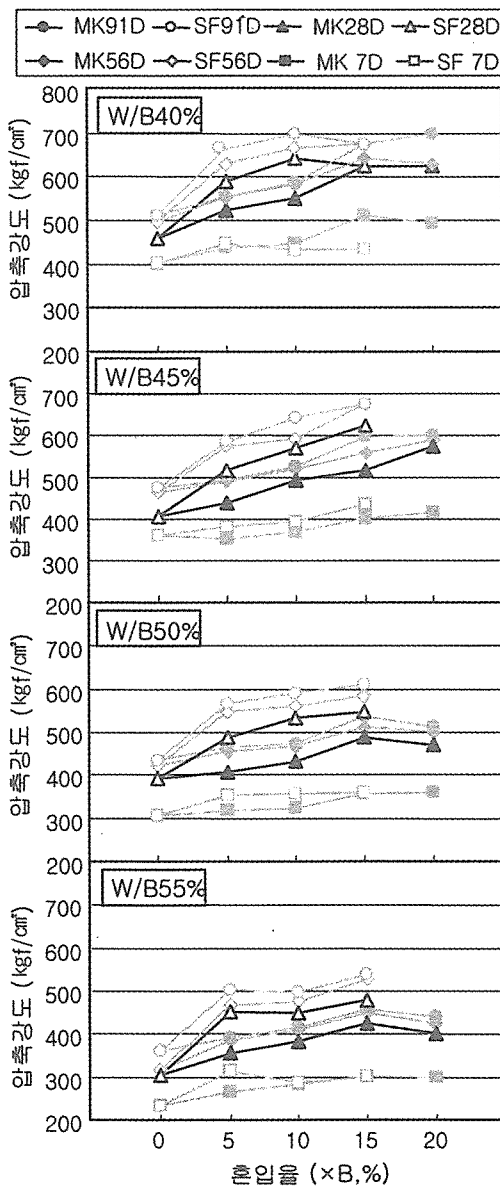
### 4.2 경화 콘크리트의 강도특성

#### 4.2.1 압축강도

각 재령별 메타카올린 및 실리카 흙의 혼입율에 따른 경화콘크리트의 강도발현성상은 [그림 4]에 나타낸 바와 같다. 그림에서 보듯이, 동일 W/B에서 압축강도 발현성상은 혼화재 종류에 상관없이 혼화재를 혼입함으로써, 모든 재령에서 기준 콘크리트에 비해 높은 강도발현을 나타내었다.

혼화재 혼입율에 상관없이 재령 7일의 압축강도는 모든 W/B에서 메타카올린을 혼입한 콘크리트가 실리카 흙을 혼입한 콘크리트와 유사한 발현성상을 보이고 있으나, 재령 7일에서 재령 28일 사이에서 실리카 흙을 혼입한 콘크리트가 급격한 강도발현을 보였다. 반면, 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 강도발현이 기준 콘크리트보다는 크지만, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트보다는 상대적으로 낮았다. 그러나, 그 이후 재령에서의 발현정도는 두 혼화재

를 혼입한 콘크리트 모두 유사하였다. 이러한 경향은 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 포졸란 반응은 재령 7일 정도에 활발한 반면, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 포졸란 반응은 재령 28일까지 활발히 진행된 결과로 생각된다.



(그림 4) W/B별 혼화재 혼입율에 따른 압축강도

한편, 혼입율에 따른 경향을 보면, 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 모든 W/B 및 재령에서 혼입율 15%인 경우가 가장 우수한 강도발현을 보이고 있어, 본 연구의 범위에서 강도측면만을 고려한 국내산 메타카올린의 혼입율은 15%가 최적이라고 할 수 있다.

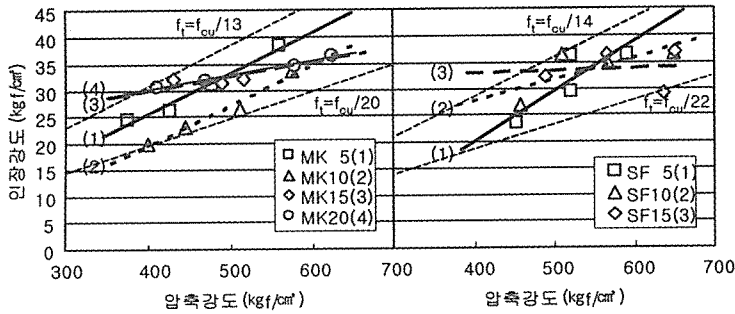
특히, 상대적으로 부배합인 W/B 40%에서 메타카올린 혼입율이 15%인 경우의 재령 28일 압축강도가 실리카 흙 혼입율 10%인 경우의 압축강도와 유사한 값을 보이고 있어, 부배합에서 메타카올린의 실리카 흙 대체재로서의 가능성을 시사하는 것으로서, 향후 실리카 흙 대체재로서 메타카올린의 폭넓은 활용성 검토를 위해서는 W/B 40% 미만의 부배합에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 4.2.2 인장강도

메타카올린 및 실리카 흙을 혼입한 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 관계는 [그림 5]에 나타난 바와 같이, 본 연구에서의 인장강도 측정치는 혼화재 종류에 관계없이 20.0~38.3 kgf/cm²의 범위로 나타났다. 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 1/13~1/20 범위인 반면, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트는 1/14~1/22의 범위로 나타나고 있어, 실리카 흙을 혼입한 콘크리트는 압축강도가 증가하여도 인장강도 증진은 메타카올린에 비해 상대적으로 작은 경향으로 나타났다.

또한, 각 혼입율별 압축강도에 대한 인장강도 증진율을 나타내는 추세선의 기울기를 보면, 메타카올린 및 실리카 흙의 혼입율이 증가함에 따라 기울기가 완만하게 되고 있어 인장강도의 증진율이 적게 되고 있는 경향이였다. 이것으로부터 혼화재 혼입율이 증가할수록 압축강도는 증진되지만, 인장강도의 증진에 미치는 영향은 적은 것을 알 수 있다.





(그림 5) 혼화재 종류별 혼입율에 따른 압축강도와 인장강도의 관계

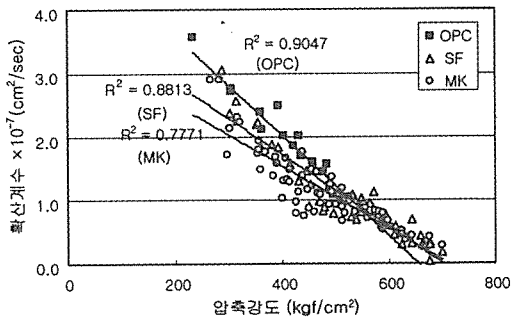
### 4.3 압축강도와 염소이온 확산계수 및 세공분포

#### 4.3.1 압축강도와 염소이온 확산계수

압축강도와 염소이온 확산계수의 상관관계는 (그림 6)과 같다.

압축강도는 재령, 혼화재 종류 및 혼입율에 상관없이 234kgf/cm<sup>2</sup>~699kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 나타났으며, 동일재령에서 전기축진시험에 의해 구해진 염소이온 확산계수는 4.50 × 10<sup>-9</sup>cm<sup>2</sup>/sec ~ 3.57 × 10<sup>-7</sup>cm<sup>2</sup>/sec의 범위로 나타났다.

그림에서 보듯이, 압축강도와 염소이온 확산계수 사이에는 반비례적으로 높은 선형의 상관성이 있었으며, 혼화재 종류에 따라서는



(그림 6) 압축강도와 염소이온 확산계수의 관계

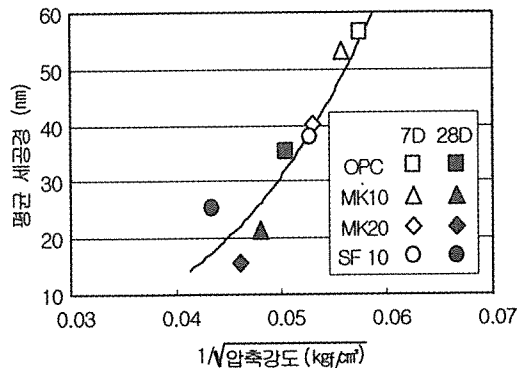
동일 압축강도에서 OPC<실리카 흙<메타카올린의 순으로 염화물 침투저항성이 양호한 것으로 나타나, 메타카올린이 염해에 대한 내구성 증진에 효과적임을 보여주고 있다.

#### 4.3.2 압축강도와 세공분포

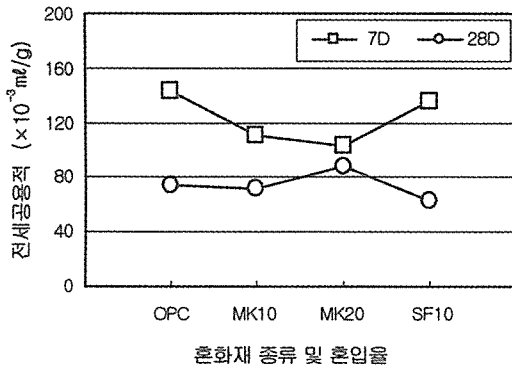
혼화재 종류에 따른 재령 7일, 28일의 1/√(압축강도)와 평균 세공경의 관계를 (그림 7)에 나타냈다.

그림에서 보듯이, 혼화재를 혼입한 콘크리트는 모두 기준콘크리트보다 평균 세공경이 작게 되었다. 또한, 평균 세공경과 압축강도는 높은 상관성을 보이고 있어, 평균 세공경이 작게 되는 것이 콘크리트의 수밀성이나 염소이온 침투저항성을 개선하는 하나의 요인이라고 할 수 있다.

그러나, (그림 8)에서 보듯이 전세공 용적은 재령에 따라 감소하고 있어 양생기간에 크게 의존함을 보여주고 있지만, 혼화재 혼입에 따른 경향은 보이지 않았다.



(그림 7) 재령별 혼화재 종류에 따른 1/√(압축강도)와 평균 세공경의 관계



(그림 8) 재령별 혼화재 종류에 따른 전세공용적

## 5. 결론

본 연구는 국내에서 생산되는 메타카올린을 콘크리트 혼화재로 사용하여, 일반강도에서 고강도에 이르는 범위에서 실리카 흙을 사용한 콘크리트를 비교대상으로 하여, 국내산 메타카올린이 콘크리트의 유동성, 강도특성 및 염해에 대한 내구성 등에 미치는 효과에 대하여 검토한 것으로서 결론은 다음과 같다.

1. 모든 W/B에 있어서 기준 콘크리트에 비해 메타카올린 및 실리카 흙 모두 혼입율이 증가할수록 동일 슬럼프를 만족시키기 위한 SP제의 사용량은 증가하였다. 혼입율이 동일한 경우, SP제의 사용량은 실리카 흙 혼입 콘크리트에 비해 메타카올린 혼입 콘크리트가 8~28% 적게 소요되었으나, 혼입율이 증가하여도 실리카 흙 혼입 콘크리트는 양호한 작업성을 보이는 반면 메타카올린 혼입 콘크리트는 점성이 크게 증가하였다.
2. 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 재령 7일에서는 실리카 흙과 유사한 압축강도 발현성상을 보이고 있어 메타카올린은 초기강도발현이 우수한 것으로 나타났

다. 또한, 본 연구범위에서 메타카올린 혼입율에 따라서는 15%인 경우가 가장 우수한 강도발현을 보였고, 특히 W/B 40%에서는 재령 28일 압축강도가 실리카 흙 혼입을 10%인 경우의 압축강도와 유사한 값을 보이고 있어, 부배합에서 메타카올린의 실리카 흙 대체재로서의 가능성을 보였으나, 인장강도에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다.

3. 압축강도와 염소이온 확산계수 및 평균 세공경 사이에는 높은 상관성이 있었으며, 메타카올린은 콘크리트의 평균세공경을 작게하므로써 수밀성을 개선하고 염화물 침투저항성을 높임으로써 염해에 대한 내구성 증진에 효과적인 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 1) 김동석 ; 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구, 공주대 석사학위논문, 2003. 2
- 2) 김진만, 이상수, 김동석, "메타카올린을 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 2003. 5, pp.47~52.
- 3) Caldarone M.A., Gruber K.A. and Burg R.G. "High-Reactivity MetaKaolin : A New Generation Mineral Admixture", Concrete International, Vol.16, No.11, 1994, pp.37~40.
- 4) D.M. Roy, P. Arjunan and M.R. Silsbee, "Effect of Silica Fume, Metakaolin, and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.31 Issue.12, 2001. 12, pp.1809~1813.

- 5) 김용태, 안태호, 강범구, 이정율, 김병기, “콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린의 기초적인 특성 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, 2001, pp.281~286.
- 6) 문희수, “점토광물학”, 민음사, 1996. 3.
- 7) Lea F.M., “The chemistry of cement”, 3rd ed., London, Arnold, 1970.
- 8) Advanced Cement Technologies, LLC, “Physical & Chemical & Properties”, Technical report-10, 2001.
- 9) Sabir. B.B., Wild. S., Bai. J., “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete : a review”, Cement & Concrete Composites, 23, 2001, pp.441~454.
- 10) 日本建築學會, “シリカフェームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン”, 1996.
- 11) L.Tang and L.O.Nilsson, Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal, Jan.-Feb., 1992, pp.49~53.

