

# 국내·외산 메타카올린을 사용한 고강도 콘크리트의 내구특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Properties of Durability of High Strength Concrete Using Domestic·Foreign Meta-kaolin

이 강 필\*      이 승 민\*\*      이 상 수\*\*\*      송 하 영\*\*\*  
Lee, Kang-Pil      Lee, Seung-Min      Lee, Sang-Soo      Song, Ha-Young

### Abstract

As the high-rise building increase due to the gravitation of population to big cities recently, it requires high quality and high performance of Concrete. As a result, people are keenly interested in Meta-kaolin as new admixture favorable from an economic perspective, which has strength and endurance with admixture at the same level like Silica-fume. Accordingly, as to Meta-kaolin, this study was to set by three levels like domestic one, foreign one, and Silica-fume, the water-binding material ratio 25%, and four level substitute like 0, 10, 20, and 30(%) in order to compare and analyze the quality durability of high-concrete according to the substitute of Meta-kaolin applicable with replacement of Silica-fume. As a result of performing experiment it was found that when water-binding material ratio increases, resistance of neutralization, carbonation, salt damage and sulfate decrease, and when replacement ratio of mineral admixture increases, depth of accelerating carbonation gets greater. Also, the combination of SF and MK-B favored resistance to chloride ion penetration better than MK-A, and it was found that when replacement ratio of binding material increases, the resistance to sulphuric acid increases. Therefore, based on this study, it was understood that meta-kaolin is useable in replacement of silicafume.

키 워 드 : 국내·외산 메타카올린, 실리카흙, 고강도콘크리트, 내구성  
Keywords : Domestic·Foreign Meta-kaolin, Silica-fume, High strength concrete, Durability

### 1. 서 론

현재, 도시 집중화로 인한 건축물의 고층화 및 대형화됨에 따라 콘크리트를 고품질화 하기 위한 연구는 여러 가지 측면에서 이루어져 왔으며, 고품질 및 고성능화 그리고 산업폐기물의 활용과 자원보호 차원에서 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카흙이 광물 혼화재로 널리 사용되고 있다.

특히 실리카흙은 강도나 내구성 측면에서 우수하여 고강도 콘크리트나 내화확성이 요구되는 콘크리트등에 널리 활용되고 있으나 이러한 실리카흙과 유사한 효과를 가지면서도 경제적인 측면에서 유리한 메타카올린이 새로운 혼화재로 주목받고 있다.

메타카올린은 카올린을 약 600~800℃ 소성시킨 후 냉각하여 일정한 입도로 미분화 한 것으로 비표면적이 크므로 시

멘트와의 포졸란 활성반응에 의해 초기강도 및 장기강도 발현은 물론 내구성을 증진 시키는 효과가 있으므로 메타카올린을 고강도 콘크리트에 활용하면 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 국내에서 제조되며 강도 및 내구성 개선에 우수한 효과를 발휘하기 때문에 선진국에서는 이미 상품화되어 용도에 적합하게 사용되어지고 있는 추세이다.

또한, 고강도 콘크리트 제조시 사용되는 실리카흙의 대체재 및 콘크리트의 물성 개선용으로 널리 사용되어지고 있는 추세이며, 우리나라의 경우 카올린이 풍부하여 대량 생산설비가 갖추어지면 자체생산이 가능하여 전량 수입에 의존하는 실리카흙을 대체할 수 있어 수입 대체효과를 가져올 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 실리카흙의 대체재로 활용 가능한 메타카올린의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 내구특성에 대해 비교·분석하여 그 성능을 규명하고자 한다.

\* 정희원, 국립한밭대학교 건축공학과, 학사과정  
\*\* 정희원, 국립한밭대학교 건축공학과, 석사과정  
\*\*\* 정희원, 국립한밭대학교 건축공학과, 교수, 공박

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구는 실리카흙의 대체 재료로서 활용 가능한 메타카올린을 사용한 고강도 콘크리트의 내구특성을 검토하기 위한 실험계획은 표 1과 같이 설정하였으며, 배합은 표 2와 같이 설정하였다. 메타카올린과 실리카흙의 치환율에 따른 영향을 분석하기 위하여 메타카올린은 국내산, 국외산, 실리카흙 3수준과 물-결합재비는 25, 35(%)의 2수준으로 설정하였으며, 메타카올린 및 실리카흙의 치환율은 0, 10, 20, 30(%)의 4수준으로 설정하였다. 또한, 측정장비 및 실험항목은 사진 1에 나타난 바와 같으며, 실험항목으로는 중성화, 염해, 황산염을 측정하였다.

표 1. 실험계획

항목	수준
W/B(%)	25, 35
단위수량(kg/m <sup>3</sup> )	165
굵은골재 최대치수	25
혼화재 치환율(%)	0, 10, 20, 30
혼화재 종류	MK-A <sup>1)</sup> , MK-B <sup>2)</sup> , SF <sup>3)</sup>
시험항목	염해, 중성화, 황산염

<sup>1)</sup>국내산 메타카올린, <sup>2)</sup>국외산 메타카올린, <sup>3)</sup>실리카흙

표 2. 콘크리트 배합

W/B (%)	S/a (%)	MK Replacement ratio(%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				HRWR (%)	
				C	S	G	AD		
25	40	0	165	660	651	983	0	1.2	
		MK-A		594	643	975	66	1.5	
		MK-B		594	644	977	66	1.6	
		SF		594	637	967	66	2.1	
		MK-A		528	637	967	132	1.9	
		MK-B		528	639	970	132	2.1	
	30	MK-A	462	632	959	198	2.4		
	MK-B	462	635	964	198	2.7			
	SF	462	615	934	198	3.7			
	35	42	0	165	472	748	1042	0	0.5
			MK-A		424	742	1036	47	0.8
			MK-B		424	743	1037	47	1.0
SF			424		737	1030	47	1.4	
MK-A			377		738	1030	94	1.5	
MK-B			377		739	1032	94	1.6	
30		SF	377	729	1019	94	2.2		
MK-A		330	734	1025	141	2.0			
MK-B		330	736	1028	141	2.2			
SF		330	721	1007	141	3.3			

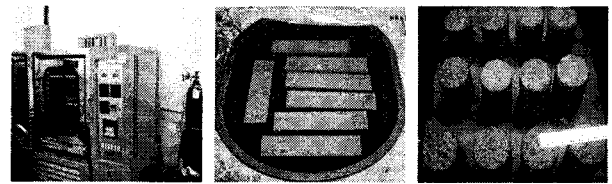


사진 1. 측정항목  
(a) 중성화 (b) 염해 (c) 황산염

### 2.2 실험방법

메타카올린 및 실리카흙의 물-결합재비에 따른 고강도 콘크리트의 내구특성을 분석하기 위한 실험방법으로서 믹서는 일축 스파이럴 믹서를 사용하였으며, 재료 투입은 단위결합재량이 많은 고강도 콘크리트라는 점을 감안하여 재료의 균질성을 확보하고자 선모르타르 방법을 사용하였다.

비빔시간은 그림 1에서 나타난 바와 같이, 분체재료 및 잔골재를 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하였으며, 배합수 및 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시한 후 굵은골재를 투입하여 150초간 비빔을 실시하였다.

고강도 콘크리트의 내구특성에 관한 시험은 KS시험방법에 준하여 실시하였으며, 황산염의 경우 국내에서 기준화된 시험방법이 전무(全無)하여 국외 일본의 'JIS K 8986'의 황산나트륨을 이용한 중량변화 시험 방법을 참고하였다.

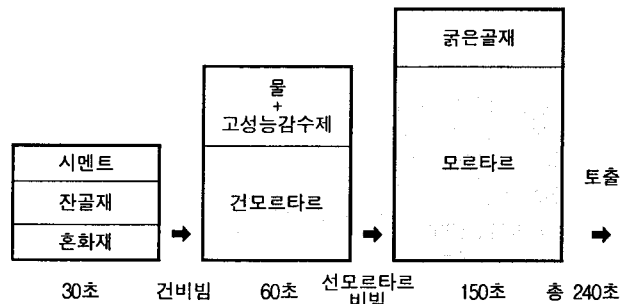


그림 1. 비빔방법

### 2.3 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 사용재료의 물리적 성질

구분	물리적 성질
시멘트	밀도 3.15g/cm <sup>3</sup> , 분말도 3,267cm <sup>2</sup> /g
국내산 메타카올린	밀도 2.53g/cm <sup>3</sup> , 분말도 10,000cm <sup>2</sup> /g
국외산 메타카올린	밀도 2.50g/cm <sup>3</sup> , 분말도 12,000cm <sup>2</sup> /g
실리카흙	밀도 2.20g/cm <sup>3</sup> , 분말도 220,000cm <sup>2</sup> /g
잔골재	밀도 2.60g/cm <sup>3</sup> , 흡수율 0.78%
굵은골재	밀도 2.62g/cm <sup>3</sup> , 흡수율 0.68%
고성능감수제	PC계, 액상, 비중 1.10

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 중성화

일반적으로 콘크리트에 중성화 현상이 진행되면 무근 콘크리트의 경우는 열화 현상이 없으나, 철근 콘크리트 건축물에서는 철근의 부식을 막아주는 알칼리성 부동태 피막이 파괴되면서 철근의 부식이 발생되어, 콘크리트가 철근의 부식에 따른 팽창에 의해 열화 현상이 서서히 진행되게 된다. 이러한 중성화 현상의 요인으로는 콘크리트 자체품질(기공율, 투기성, 함수율, 강도, 시멘트의 종류, 골재의 종류, 배합조건 등)과 같은 내적요인과 환경조건(대기 중 이산화탄소의 농도, 온도, 습도, 마감재 등)같은 외적요인으로 구분된다.

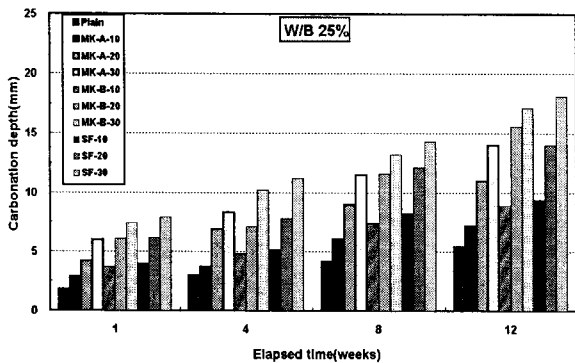


그림 2. 콘크리트의 촉진 탄산화 깊이변화(W/B 25%)

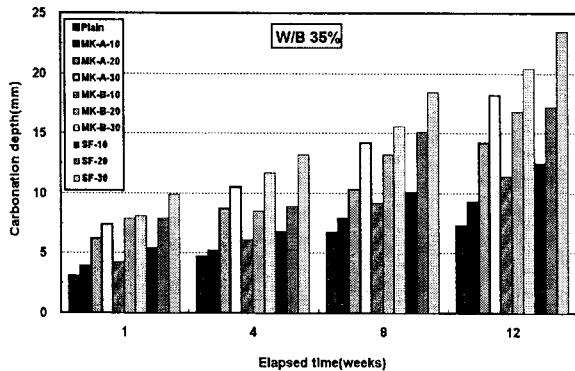


그림 3. 콘크리트의 촉진 탄산화 깊이변화(W/B 35%)

그림 2, 3은 배합조건별 고강도 콘크리트의 탄산화 깊이를 알아보기 위하여 12주 동안 중성화 챔버를 이용하여 시험한 결과를 나타낸 것으로서, Plain 배합의 경우 다른 혼화재를 첨가한 공시체 보다 탄산화 깊이가 적게 나타났으며, 재령이 증가 할수록 탄산화 깊이는 깊어지는 것으로 나타났다.

또한, 물-결합재비가 증가할수록 탄산화 깊이가 증가되는 것으로 나타났으며, 혼화재의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 상대적으로 단위

시멘트량이 줄어들고 동시에 시멘트에 포함된 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 양 또한 줄어들어 철근을 보호해 줄 수 있는 부동태 피막의 형성이 불리하기 때문으로 사료된다.

또한, Plain < MK-A < MK-B < SF순으로 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 염해

그림 4, 5는 고강도 콘크리트의 염화물 침투특성을 알아보기 위하여 물-결합재비별로 염화나트륨(3%) 용액에 침지 후 12주 경과까지의 염화물 이온 침투깊이를 나타낸 것이다.

물-결합재비가 25%일 때 염화물 이온의 침투깊이가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 물-결합재비가 높을수록 상대적으로 결합재량이 줄어들어 자유수 증가에 따른 내부 공극률 증가로 인하여 염화물 이온의 침투 저항성에 불리한 것으로 판단된다. 또한, Plain에 비해 결합재의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 저항성에 더 유리한 것으로 나타났으며, MK-A 보다 MK-B 및 SF를 치환한 배합이 염화물 이온의 침투 저항성이 유리하게 나타났다.

이는 비교적 높은 분말도의 MK-B 및 SF의 경우 결합재의 입자가 매트릭스 내의 공극을 충전시켜 좁으면서, 기공률을 낮추어 골재와 페이스트사이를 더 수밀화하기 때문으로 판단된다.

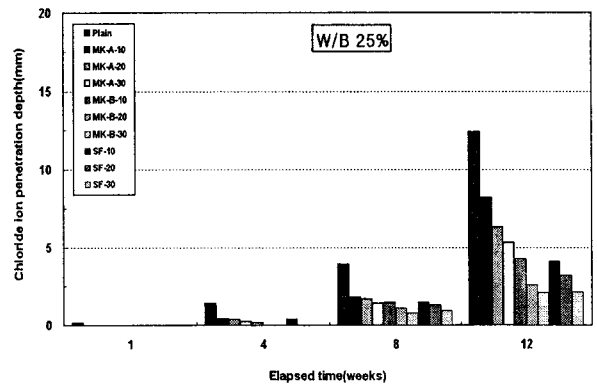


그림 4. 콘크리트의 염화물 이온 촉진 깊이의 변화(W/B 25%)

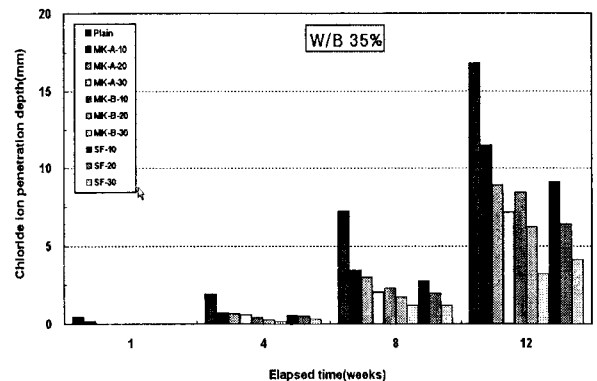


그림 5. 콘크리트의 염화물 이온 촉진 깊이의 변화(W/B 35%)

### 3.3 황산염

고강도 콘크리트의 황산염 침지에 대한 저항성을 알아보기 위하여 배합조건에 따라 재령 1주까지 표준양생 후, 온도 20°C 습도가 55%인 실내에서 3주간 기건 양생을 실시한 후, 'JIS K 8986'의 황산나트륨을 이용한 중량변화 시험 등을 이용하여 평가하였다.

즉, 5% 농도의 황산나트륨( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )용액과 황산마그네슘( $\text{MgSO}_4$ )용액을 1:1의 중량비로 혼합한 침지조 속에 시험체를 침적 양생시킨 후 7일 간격으로 12주 동안 측정하였다.

본 시험결과, 그림 6, 7에 나타난 것과 같이 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 재령에 따라 중량변화율은 감소하였으며, 물-결합재비가 증가할수록 황산에 대한 저항성은 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비가 낮을수록 상대적으로 단위 시멘트량이 증가하게 되며, 이와 동시에 시멘트 수화물이 증가하여 부식성 화학물질과 반응해 이수석고와 에트링가이트를 생성함에 따라 조직이 다공화 되거나 팽창을 일으켜 저항성이 낮아지는 것으로 사료된다.

또한, 결합재의 치환율이 증가 할수록 황산에 대한 저항성이 높아지는 것으로 나타났으며, SF과 MK-B를 치환한 배합이 MK-A보다 황산염 저항성이 높게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 결합재의 높은 분말도로 인한 공극충전 효과에 따른 경화체 조직이 치밀해짐으로서 침투 저항성을 높이는 것으로 사료된다.

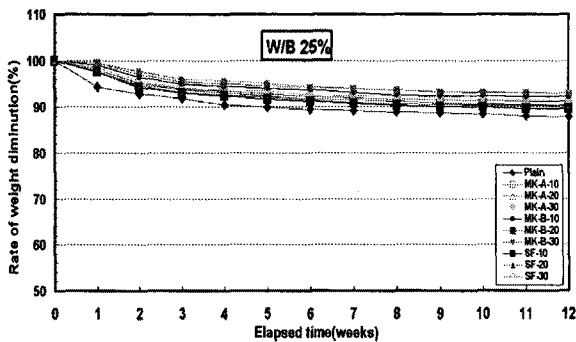


그림 6. 콘크리트의 황산염 침투 저항성의 변화(W/B 25%)

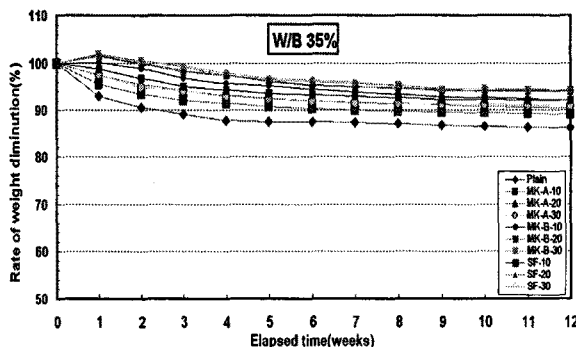


그림 7. 콘크리트의 황산염 침투 저항성의 변화(W/B 35%)

### 4. 결 론

본 연구에서는 실리카흙의 대체 재료로서 활용 가능한 국내·외산 메타카올린의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 내구특성을 실험을 통하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄산화 깊이의 변화를 알아본 결과, 물-결합재비가 증가할수록 탄산화 깊이가 증가되는 것으로 나타났으며, 혼화재의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, Plain < MK-A < MK-B < SF 순으로 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 염화물 이온 침투깊이를 알아본 결과, 물-결합재비가 증가할수록 염화물 이온 침투깊이가 증가하는 것으로 나타났으며, Plain에 비해 결합재의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 저항성에 더 유리한 것으로 나타났다. 또한, MK-A보다 MK-B 및 SF를 치환한 배합이 염화물 이온의 침투 저항성이 유리하게 나타났다.
- 3) 황산염 침지에 대한 저항성을 알아본 결과, 큰 차이를 보이지는 않았으나 재령에 따라 중량변화율은 감소하였으며, 결합재의 치환율이 증가 할수록 황산에 대한 저항성이 높아지는 것으로 나타났다. 또한, SF과 MK-B를 치환한 배합이 MK-A보다 황산염 저항성이 높게 나타났다. 이는 결합재의 높은 분말도로 인한 공극충전 효과에 따른 경화체 조직이 치밀해짐으로서 침투 저항성을 높이는 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 김을용외 3명, 메타카올린을 사용한 콘크리트의 유동특성 및 강도특성에 관한 실험적 연구 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol. 17, 2005, pp.425~428.
2. 송하영외 5명, 국내·외산 메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 특성에 미치는 물-결합재비의 영향에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 2008. 10, pp.519~522.
3. 송하영외 5명, 실리카흙 대체재로 활용 가능한 메타카올린의 치환율에 따른 고강도 콘크리트의 품질특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No.20, 2008. 11, pp.333~336
4. 이상수, 메타카올린을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, Vol. 22, 2006. 05, pp.137~144.
5. 이상수외 1명, [특집] 콘크리트용 혼화재료로서 메타카올린의 특성 및 활용 한국콘크리트학회지 : Vol. 15 No.5, 2003. 09, pp.23~32.