

## 메타카올린을 사용한 고성능 경량 콘크리트의 염소이온 확산 특성

### The Chloride Ion Diffusion Characteristics of High Performance Lightweight Concrete Using Metakaolin

이 장 수<sup>†</sup> · 김 영 옥\* · 남 창 식\*\*

Lee, Changsoo · Kim, Youngook · Nam, Changsik

**Abstract** The objectives of this study is replaced Silicafume with Metakaolin that is used to lightweight concrete to better performance. So, this study made high-performance lightweight concrete using Metakaolin and characteristics of the fundamental properties and chloride ion diffusion. Consequently, its compressive strength and chloride ion penetration resistance is lower than lightweight concrete using Silicafume, the performance of compressive strength contrast Silicafume is about 88 to 95%. Also, this study got a content result because the chloride ion penetration resistance showed the performance in around 80 to 90%. As a result, this study insist that replacement ratio of Metakaolin is suitable for 10 to 15%. Silicafume and Metakaolin have similar characteristics. In addition, it is similar to the performance of alternative materials is possible.

**Keywords** Metakaolin, Lightweight Concrete, Chloride Ion Diffusion

요 지 본 연구에서는 실리카흙을 대체하고 경량 콘크리트의 성능 향상을 위하여 메타카올린을 사용한 고성능 경량 콘크리트를 제조하여 기초물성 및 염소이온 확산 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과, 메타카올린을 사용한 경량 콘크리트는 압축강도와 염소이온 침투 저항성이 실리카흙을 사용한 경량 콘크리트보다 낮게 나왔지만, 실리카흙 대비 압축강도는 약 88~95%의 성능을 보였고, 염소이온 침투 저항성은 약 80~90%의 성능을 보여 만족할 만한 결과가 나왔다. 본 연구에서의 결과를 바탕으로 메타카올린의 적정 치환율은 10~15%가 적절하다고 사료된다. 메타카올린은 실리카흙과 유사한 특성을 갖고 있고, 비슷한 성능을 나타내기 때문에 대체재로의 가능성이 있다고 판단된다.

핵심어 : 메타카올린, 경량 콘크리트, 염소이온 확산

## 1. 서론

최근 건설기술이 급격히 발달함에 따라 교량의 장대화, 건축물의 초고층화 및 구조물의 대형화 경향이 나타나고 있다. 이에 따라 고강도 및 고내구성을 갖춘 고성능 콘크리트와 자중감소를 목적으로 하는 경량 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고

† 교신저자 : 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

E-mail : csll@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2428 FAX : (02)2210-5208

\* 정회원, 서울시립대학 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

있다(곽윤근 등, 2000).

고성능 콘크리트는 고강도와 고내구성을 충족시키는 것을 기본적으로 지향하고 있으며 이를 만족시키는 혼화재로 실리카흙을 일반적으로 사용하고 있다. 하지만, 실리카흙은 국내생산이 어려워 전량 수입에 의존하고 있어 비용에 대한 부담이 발생하고 슬럼프 손실, 블리딩에 의한 소성 수축, 높은 분말도로 인한 단위수량 증가 등 여러 가지 문제점이 나타나고 있다.

경량 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 자중이 상대적으로 작기 때문에 낮은 탄성계수를 갖으며, 이로 인하여 변형률이 크다는 문제점을 갖고 있다. 또한, 경량 콘크리트에 사용되는 경량골재의 다공질성으로 인하여 강도가 보통 콘크리트에 비해 낮고 내구성이 떨어지는 문제점들이 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해서는 경량 콘크리트의 고성능화가 필수적이라고 할 수 있다. 상기에 명시된 문제점을 보완하기 위한 대안으로 메타카올린을 사용하고자 한다. 메타카올린은 국내생산이 가능하여 취급이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 성능면에서 실리카흙과 유사한 특성을 갖고 있기 때문에 실리카흙을 대체할 수 있는 혼화재로 평가되고 있으며, 메타카올린을 경량 콘크리트에 적용하였을 경우 고강도 및 고내구성을 충족시키는 고성능 경량 콘크리트의 제조가 가능하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 실리카흙을 대체하고 경량 콘크리트의 성능 향상을 위하여 메타카올린을 사용한 고성능 경량 콘크리트를 제조하여 염소이온 침투 저항성을 분석하고, 고성능 경량 콘크리트의 실용화를 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 1.1 메타카올린

메타카올린(meta-kaolin)의 원료인 카올린(kaolin, 고령토)은 원래 중국 강서성에서 산출되는 자색의 점토로서 도자기를 만드는데 사용된 광석에 대하여 붙여진 광석명이다. 국내에서 산출되는 카올린은 대부분 할로사이트(halloysite)로 구성되어 있고, 서부 경남지역의 풍화산류형 광상에 많이 분포하고 있다.(문희수, 1996)

콘크리트 구조물에 일반적으로 많이 사용되는 포졸란 재료의 대표적인 화학적 성질은 Table 1과 같다. 표에서 보듯이 실리카 및 알루미나 등의 산화물의 함량은 서로 다르지만, 천연 및 인공 포졸란 모두 주요성분은 실리카이다. 천연 포졸란의 유리질 실리카는 용암의 급속한 냉각에 의해 생성되어, 보통 구형의 다공질 입자로 구성된다. 비결정질 유리구조를 갖는 플라야시, 실리카흙, 고로슬래그 등의 인공 포졸란도 역시 급속한 냉각에 의해 생성된다. 메타카올린의 경우에는 액체상태로 만들고 냉각하여 유리질을 생성하기 위한 온도보다 낮은 온도에서 소성되므로 결정구조가 파괴된다.(Cucio et al., 1998)

메타카올린은 ASTM C 618의 N급 포졸란으로 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  $Fe_2O_3$  성분에 의해 차이가 발생한다. 주성분은  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 이며, S/A의 이론적 비는 1.18 정도이다. 국내에서 생산되는 메타카올린의 경우에는 할로사이트질의 카올린을 원료로 하기 때문에 다른 것과는 달리  $Fe_2O_3$  성분 함량이 다소 높아 연황색을 띄고 있으며, 강열감량도 약간 높다. 메타카올린의 미세구조는 Fig 1에 나타내었다.(E. Moulin et al., 2001)

Table 1. 각종 포졸란 재료의 화학적 성질 (Sabir et al., 2001)

구 분	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	-

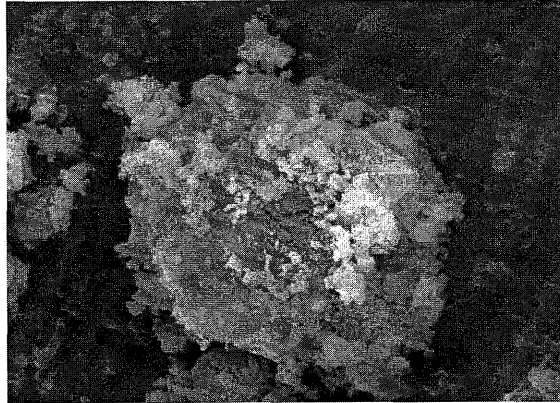


Fig. 1. 메타카올린의 미세구조 ( $\times 10000$ )

## 1.2 염해 메커니즘

염화물은 철근 콘크리트 구조물에 침투하여 구조물에 손상을 일으키며, 그 손상과정은 잠복기, 진전기, 가속기, 성능저하기로 나눌 수 있다.

잠복기는 임계염화물량까지 콘크리트 내부로 침투하여 축적되는 과정으로 Fick의 1법칙과 2법칙에 의한 염화물 이온 확산 속도에 의해 지배되지만 콘크리트 내부에 이미 염화물이 상당히 포함되어 있는 경우에는 잠복기 없이 바로 진전기로 진행되어 그만큼 콘크리트 구조물의 열화속도가 빠르게 된다.

진전기는 철근의 부식이 시작되어 철근의 팽창에 의해 피복콘크리트에 균열이 발생하는 과정으로 주로 용존산소, 수분의 공급량, 콘크리트의 전기저항 등에 의해 지배된다.

가속기는 철근방향으로 균열이 발생하는 과정으로 철근의 팽창으로 발생한 균열로 부식이 더욱 가속되어 구조물의 내구성 뿐 만 아니라 내하력이 저하되기 시작하는 단계이다.

성능저하기는 철근의 단면감소로 내하력이 심각히 저하되어 대대적인 보강공사나 교체공사가 필요한 단계이다. 또한 철근 부식의 개시는 이론적으로 염화물이온의 농도가 임계농도(Critical Concentration 또는 Threshold Concentration)에 도달할 때 발생한다. 따라서, 임계농도를 정확히 알고 있다면 염화물이온의 침투예측을 통해 구조물 부식개시시기를 예측할 수 있으므로, 부식임계농도를 정확하게 아는 것이 염화물의 침투를 정확히 예측하는 것만큼 중요하다고 할 수 있다. 때문에 그동안 부식임계농도를 밝히기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으나, 불행히도 아직 그 결과는 그다지 명확하지 못한 것으로 보인다. 여러 연구결과에 따르면, 임계농도는 pH, 온도, 습도, 노출환경, 산소농도, 철근의 표면특성 등 다양한 영향인자에 의해 좌우되는 것으로 알려지고 있다(Sidney Mindess et al., 2003).

철근 부식에 의한 구조물의 내구수명 모델은 대체로 Tuutti 가 제시한 2단계모델이 주로 적용된다. 이에 따르면, 부식개시 이전의 단계는 개시단계(Initiation Period), 부식개시이후의 단계는 진전단계(Propagation Period)가 되며, 개시단계에서는 염화물의 확산과 구속이 지배적인 결정인자가 되며, 부식개시 이후에는 염화물의 침투보다는 산소 및 수분의 확산과 부식반응속도에 주로 좌우된다. 그러나, Clifton에 따르면 구조물의 내구수명기간에서 부식개시까지의 시간이 일반적으로 더 긴 것으로 보고 되어 있으며, 일단 부식이 발생한 이후에는 급격한 성능저하가 발생하므로 내구성설계 및 시공에서는 부식개시시기를 늘리도록 하는 것이 더 중요할 것으로 보인다.

외부에서 염화물 이온이 침투할 경우 포틀랜드 시멘트에 포함되어 있는 칼슘알루미네이트와 반응하여 침식성이 없는 프리델염(Friedel's salt)이라는 고정염을 생성한다. 염화물의 고정화는 콘크리트 구조물이 접하고 있는 환경에 따라 다르지만 24시간 이내에 염화물의 50%이상이 고정화되고 서서히 고정화율이 낮아져 최종적으로 전염화물의 60~80% 정도까지 고정화된다. 그러나 콘크리트 내부에 황산염이 존재할 경우 황산염이 먼저 칼슘알루미네이트 화합물과 반응하기 때문에 고정화율은 매우 낮아지게 된다(P. Kumar Metha et al., 2006).

### 3. 시험 개요

#### 3.1 사용 재료

##### 1) 결합재

시멘트는 국내 H사의 비중 3.15, 비표면적 3,112cm<sup>2</sup>/g인 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였다. 광물질 혼화제로는 비중 2.63, 비표면적 12,000cm<sup>2</sup>/g인 국내산 메타카올린(MK)과 비중 2.20, 비표면적 200,000cm<sup>2</sup>/g인 수입산 실리카흄(SF)을 사용하였다. 결합재의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. 결합재의 화학성분 및 물리적 성질

	Chemical Composition(%)						Specific Gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
	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		
OPC	21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	-	3.15	3,112
MK	56	37	2.4	0.2	0.3	0.9	2.63	12,000
SF	94	0.3	0.8	0.3	0.4	1.0	2.20	200,000

##### 2) 골재

잔골재는 비중 2.65, 조립률 2.71인 인천산 세척사를 사용하였고, 굵은 골재는 비중 1.90, 조립률 6.24인 국내산 인공경량 골재(SSD)를 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. 골재의 물리적 성질

	Density	F.M.	Absorption(%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )
Fine Aggregate	2.65	2.71	1.90	1,420
Lightweight Coarse Aggregate	1.90	6.24	20.19	910

##### 3) 혼화제

혼화제는 굳지 않은 콘크리트의 요구되는 성능의 확보를 위하여 국내산 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

#### 3.2 시험인자 및 수준

Table 4는 시험인자 및 수준을 나타낸 것이고, 물-결합재 비와 포졸란 계열의 혼화재인 메타카올린과 실리카흄의 치환율을 변수로 하여 시험을 진행하였다. 물-결합재 비는 30%, 35%, 40%를 갖도록 하였으며 메타카올린은 5%, 10%, 15%씩 치환하였고, 실리카흄은 5%, 10%씩 치환하였다. 공기량은 전체부피의 5%로 고정하였으며 잔골재율은 40%로 고정하였다.

Table 4. 시험인자 및 수준

시험인자	수준	수준수
물-결합재 비	0.30, 0.35, 0.40	3
골재	인공경량골재(SSD)	1
결합재 치환율(%)	메타카올린(MK) 5, 10, 15 실리카흙(SF) 5, 10	5

### 3.3 콘크리트 배합

메타카올린 및 실리카흙 치환율에 따른 경량콘크리트의 염소이온 침투 시험을 통한 확산계수를 파악하기 위한 배합을 다음과 같이 설정하였고, 배합표는 Table 5와 같다.

Table 5. 콘크리트 배합

구분 배합	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )						
			Binder			W	S	G	
			C	MK	SF				
L30	30	40	550	-	-	165	647	695	
L30MK5			518	27	-	164	647	695	
L30MK10			486	54	-	162	646	694	
L30MK15			455	80	-	161	646	694	
L30SF5			518	-	27	164	647	695	
L30SF10			486	-	54	162	647	695	
L35	35		40	510	-	-	179	646	694
L35MK5				480	25	-	177	647	695
L35MK10				450	50	-	175	646	694
L35MK15				422	74	-	174	646	694
L35SF5				480	-	25	177	647	695
L35SF10				451	-	50	175	646	694
L40	40	40		474	-	-	190	647	695
L40MK5				447	24	-	188	647	695
L40MK10				419	47	-	186	646	694
L40MK15				393	69	-	185	646	694
L40SF5				447	-	24	188	647	695
L40SF10				419	-	47	186	647	695

경량골재는 다공성 재료로서 내부에 많은 양의 공극을 가지게 된다. 이러한 공극속에 사전흡수수를 가지게 되며 이러한 사전흡수수에 의하여 콘크리트의 수화에 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는 경량골재의 사전흡수수가 수화에 미치는 영향을 고려하기 위하여 배합 설계에 있어 골재가 차지하는 부피를 일정하게 유지하도록 배합을 결정하였다. 또한 경량콘크리트의 경우 일반골재를 갖는 콘크리트에 비하여 낮은 중량으로 인하여 탄성계수가 낮아지게 되고 이는 구조물의 처짐량 증가로 이어지게 된다. 처짐량의 증가를 막기 위하여 경량콘크리트는 일반적으로 고강도로 배합설계를 하게 되며 이에 따라 일반 콘크리트에 비하여 낮은 물-결합재 비를 갖도록 배합을 결정하였다. 이에 본 연구에서는 물-결합재 비와 실리카흄 치환율을 변수로 하여 배합설계를 진행하였다. 물-결합재 비는 30%, 35%, 40%로 설정 하였으며, 각 배합의 슬럼프는 실제 현장에서의 작업성을 고려하여 18±1cm로 설정하였고, 목표 슬럼프를 확보하기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하여 배합설계를 실시하였다.

### 3.4 염소이온 침투시험 방법

염해에 대한 저항성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 NT Build 492(Fig. 2) (NT Build 492, 1999)에 준하여 실험을 실시하였다. 시편의 제작은  $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  의 원주형 공시체를 제작하여 28일간 양생한 후 두께  $50 \pm 2\text{ mm}$ 로 절단하여 제작하였다. 시험을 위한 전처리로 Fig. 3와 같이 시편을 진공 챔버에 넣어 3시간 동안 진공 시킨 후 수산화칼슘 용액에 하루 동안 침지시켰다.

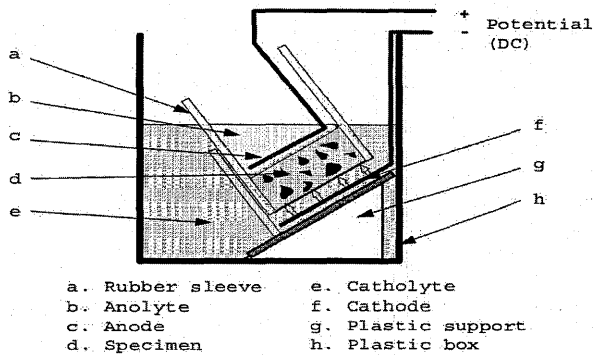


Fig. 2. 염소이온 침투 시험장치



Fig. 3. 염소이온 침투 시험 전처리 과정

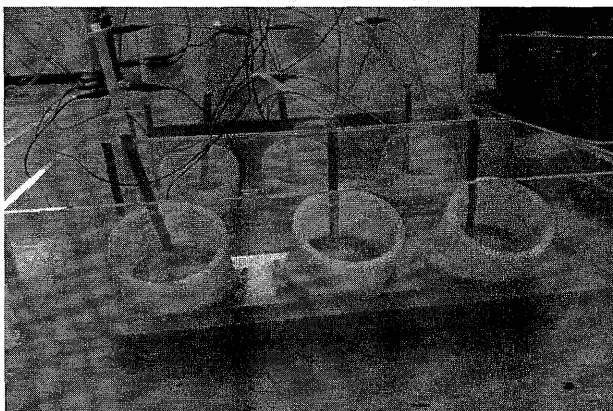


Fig. 4. 염소이온 촉진 시험 준비 과정

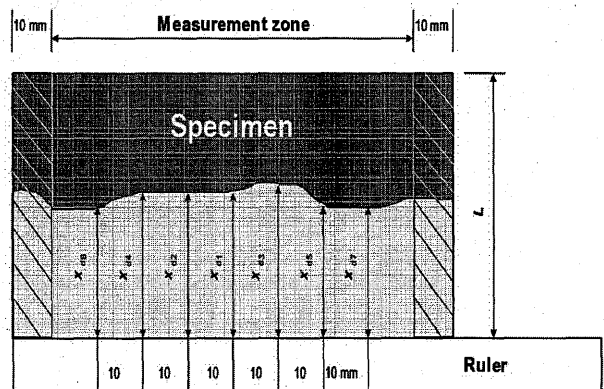


Fig. 5. 염소이온 침투깊이 측정 범위

전처리 된 시료를 그림 Fig. 4와 같이 장치하고 음극용액은 10%의 염화나트륨 용액을 채웠으며 양극용액은 0.3M의 수산화나트륨 수용액을 채웠다. 그 후 초기 전압 30V를 가하여 최초 인가시의 전류값을 측정후 그에 따라 각 시편마다 10~30V 전압의 전류를 6~96시간까지 흘려보냈다.

시험이 종료된 후 시편을 지름 방향으로 절단하고 0.1M의 질산은 용액을 분무하여 염소이온의 깊이를 측정하였다. 침투 깊이와 측정 범위는 Fig. 5와 같이 버니어캘리퍼스로 시편의 양쪽 가장자리 10mm를 제외하고 10mm 간격으로 7개소를 측정하여 평균으로 하였다.

측정된 침투 깊이를 토대로 염소이온 확산계수를 산정하였으며 이 때 사용된 식은 NT Build 492에서 제시한 식 (1)~(3)에 의해 유도된 식 (4)를 사용하여 염소이온 확산계수를 산정하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \tag{1}$$

여기서,  $E = \frac{U-2}{L}$  (2)

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \tag{3}$$

$\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2}\right) = 1.28$ 이므로

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273 + T)}{U-2}}\right) \tag{4}$$

- 여기서,  $D_{nssm}$  : 염소이온 확산계수( $10^{-12} m^2/s$ )
- $z$  : 이온의 원자가(염소이온의 경우  $z=1$ )
- $F$  : 페러데이 상수( $9.648 \times 10^4 J/V \cdot mol$ )
- $U$  : 가인 전압의 절대값( $V$ )
- $R$  : 기체 상수( $R = 8.314 J/K \cdot mol$ )
- $T$  : 측정 전후의 용액 평균 온도( $K$ )
- $L$  : 시험편의 두께( $m$ )
- $x_d$  : 염소이온의 침투 깊이( $m$ )
- $t$  : 실험 지속시간( $sec$ )
- $\operatorname{erf}^{-1}$  : 오차 함수
- $c_d$  : 비색법에 의한 염화물 반응 농도(0.07)
- $c_0$  : 음극의 염소 이온 농도( $2N \approx 10\%$ )

#### 4. 시험결과 및 분석

염소이온 침투 시험에 대한 전체적인 결과를 Table 6에 나타내었다. 표를 보면 물-결합재 비가 낮고, 혼화재 치환율이 높을수록 염소이온 확산계수가 낮음을 알 수 있다.

Table 6. 배합별 염소이온 확산계수

	확산계수 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	L35	확산계수 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	L40	확산계수 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )
L30	12.595	L35	14.013	L40	19.745
L30MK5	12.284	L35MK5	13.813	L40MK5	16.144
L30MK10	11.792	L35MK10	13.046	L40MK10	15.098
L30MK15	7.799	L35MK15	12.620	L40MK15	13.717
L30SF5	11.857	L35SF5	13.781	L40SF5	16.436
L30SF10	9.640	L35SF10	13.231	L40SF10	14.512

4.1 물-결합재 비에 따른 염소이온 확산계수

물-결합재 비에 따른 확산계수를 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 혼화재를 치환한 시험체들이 일반 경량 콘크리트의 확산계수 보다 낮은 값을 나타냄을 확인할 수 있고, 물-결합재 비 30% 배합들의 확산계수에서 메타카올린을 치환한 콘크리트와 실리카흄을 치환한 콘크리트의 확산계수를 비교해보면 혼화재의 치환율이 같을 경우, 실리카흄을 사용한 콘크리트의 확산계수가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 실리카흄이 메타카올린 보다 높은 분말도를 갖고 있어 콘크리트 내의 공극을 좀 더 밀실하게 했기 때문이라고 판단된다. 그러나, 메타카올린의 치환율이 15%인 콘크리트의 확산계수를 보면 다른 시험체들에 비해 확산계수가 크게 낮음을 확인할 수 있는데 혼화재의 치환율이 다른 시험체들 보다 높아 콘크리트의 내부가 밀실해져 염소이온의 침투 저항성이 높아졌기 때문이라고 판단된다.

물-결합재 비 35, 40%의 시험체들은 물-결합재 비 30%인 시험체들과 확산계수가 비슷한 경향을 보이고 있다. 물-결합재 비가 40%인 경우, 혼화재를 치환한 배합들이 일반 경량 콘크리트의 확산계수에 비해 크게 낮음을 확인할 수 있다. 이는 물-결합재 비가 높을수록 상대적으로 결합재량이 줄어들어 자유수 증가에 따른 내부 공극률 증가로 인하여 염소 이온의 침투 저항성에 불리한 것으로 판단되지만, 메타카올린과 실리카흄을 치환한 배합들은 시멘트의 수화가 진행되어 생성되는

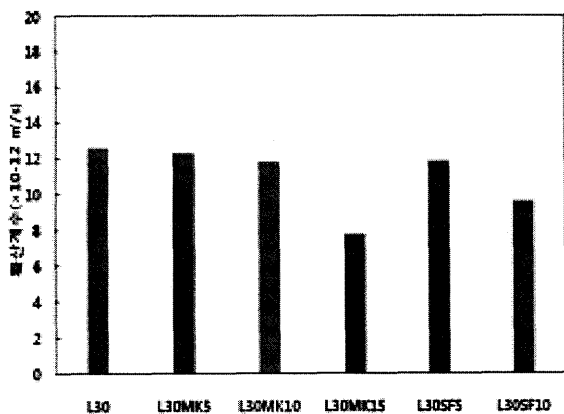


Fig. 6. 물-결합재 비에 따른 확산계수(W/B비 30%)

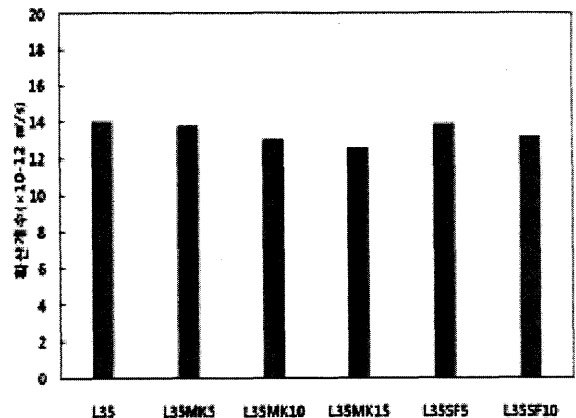


Fig. 7. 물-결합재 비에 따른 확산계수(W/B비 35%)



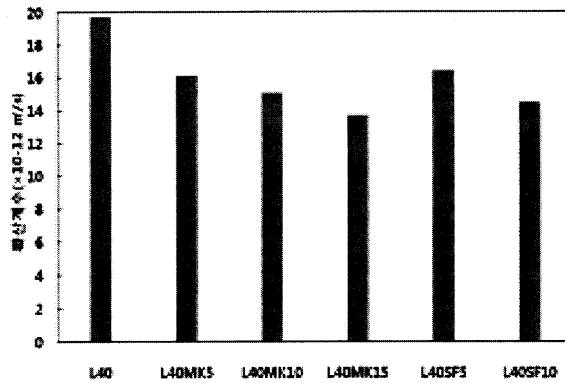


Fig. 8. 물-결합재 비에 따른 확산계수(W/B비 40%)

수산화칼슘과의 반응으로 콘크리트 페이스트의 조직구조를 치밀하게 하여 모세공극의 생성량을 감소시켜 염소이온 침투의 저항성을 높이기 때문이라고 판단된다.

#### 4.2 메타카올린의 치환율에 따른 염소이온 확산계수

메타카올린의 치환율에 따른 염소이온 침투 시험 결과, 염소이온 확산계수는 다음 Fig. 9와 같다. 메타카올린의 치환율이 높아질수록 염소이온 확산계수는 낮아짐을 실험을 통하여 확인할 수 있었고, 물-결합재 비 30%일 때 확산계수의 감소율이 약 38%로 가장 큰 감소율을 보였고, 물-결합재 비 35%일 때 확산계수의 감소율이 약 10%로 가장 낮은 감소율을 나타냈다. 일반적으로 콘크리트에서 시멘트가 수화되기 위하여 필요한 물-시멘트 비는 32% 정도로 알려져 있다. 물-결합재 비가 35%인 시험체들은 수화에 필요한 물을 다 사용하였기 때문에 메타카올린의 치환으로 인한 효과는 미비하게 나타났다.

하지만, 물-결합재비가 낮은 경우에는 수화에 필요한 물이 부족하기 때문에 많은 물을 필요로 하는데 메타카올린을 치환하면 부족한 물로 인해 수화되지 못한 부분을 포졸란 반응으로 생성된 C-S-H 및 C-A-H 수화물들이 매워줌으로서 보완하게 되고, 메타카올린의 치환율이 높아질수록 그 효과는 커지게 되기 때문에 확산계수의 감소율도 커지게 되는 것이라고 판단된다.

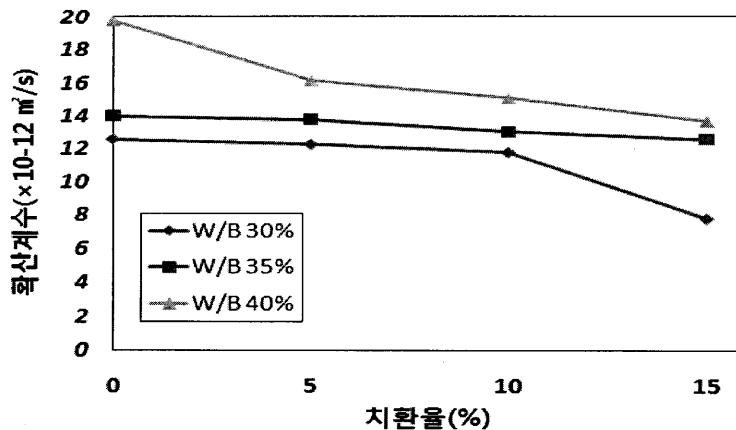


Fig. 9. 메타카올린 치환율에 따른 확산계수

## 5. 결 론

본 연구에서는 실리카흙을 대체하고 경량 콘크리트의 성능 향상을 위하여 메타카올린을 사용한 고성능 경량 콘크리트를 제조하여 염소이온 확산 특성에 대하여 분석하였다. 분석 결과를 토대로 본 연구를 요약하자면 다음과 같다.

(1) 두 혼화제간의 확산계수를 비교해 본 결과, 두 혼화제의 치환율이 같을 경우 물-결합재 비 30, 35, 40% 모두에서 비슷한 경향을 보였으나, 실리카흙을 사용한 경량 콘크리트의 염소이온 침투 저항성이 메타카올린을 사용한 경량 콘크리트 보다 좀 더 우수함을 확인할 수 있었다. 같은 포졸란 계열의 재료이지만 실리카흙의 분말도가 더 높아 콘크리트 내의 공극을 좀 더 밀실하게 했기 때문이라고 판단된다. 하지만, 메타카올린을 15% 치환한 경량콘크리트의 경우 다른 배합들 보다 낮은 확산계수를 보였고 높은 염소이온 침투 저항성을 나타내었다. 이는 혼화제의 치환율이 다른 배합들 보다 높아 콘크리트의 내부가 밀실해져 염소이온의 침투 저항성을 개선시킨 것으로 판단된다.

(2) 물-결합재 비가 낮을 경우, 메타카올린의 치환율이 높을수록 확산계수의 감소비율이 크게 나왔다. 물-결합재비가 낮은 경우에는 수화에 필요한 물이 부족하기 때문에 많은 물을 필요로 하는데 메타카올린을 치환하면 부족한 물로 인해 수화되지 못한 부분을 포졸란 반응으로 생성된 C-S-H 및 C-A-H 수화물들이 메워줌으로서 보완하게 되고, 메타카올린의 치환율이 높아질수록 그 효과는 커지게 되기 때문에 확산계수의 감소율도 커지게 되는 것이라고 판단된다.

(3) 경량 콘크리트 구조물의 고성능화를 위해 사용되는 실리카흙 대신 국내생산이 가능하고 취급이 용이한 메타카올린을 사용하여 염소이온 확산 특성에 대한 연구를 진행하였다. 시험 결과, 메타카올린을 사용한 경량 콘크리트는 염소이온 침투 저항성이 실리카흙을 사용한 경량 콘크리트 보다 낮게 나왔지만, 실리카흙 대비 약 80~90%의 성능을 보여 만족할 만한 결과가 나왔다고 판단되고, 메타카올린의 적정 치환율은 약 10~15%가 적절하다고 사료된다.

결론적으로, 메타카올린은 실리카흙과 유사한 특성을 갖고 있고, 비슷한 성능을 나타내기 때문에 대체재료의 가능성이 있다고 판단되며, 실제 구조물에 메타카올린을 사용한 경량 콘크리트를 적용시키기 위해서는 내구성에 대한 활발한 연구가 요망된다.

### 참고문헌

- [1] Cucio, F., Deangleis, B.A, Pagliolico, S. (1998). "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars." *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.6, pp.803-809.
- [2] Moulin, E., Blanc, P., Sorrentino, D. (2001). "Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements." *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, pp.463-469.
- [3] NT Build 492 (1999). *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments. Nordtest Method.*
- [4] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials. Third Edition*, McGraw-Hill, New York.
- [5] Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J. (2001). "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review." *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, pp.441-454.
- [6] Mindess, S., Young, J.F., Carwin, D. (2003). *Concrete. Second Edition*, Pearson Education.
- [7] 곽윤근, 장일영 (1998). "구조용 경량 콘크리트의 연구동향." *한국콘크리트학회 논문집*, Vol.10, pp.5-15.
- [8] 문희수 (1996). *접토광물학*. 민음사.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 02월 18일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 02월 19일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 03월 08일