

# 메타카올린 콘크리트 교량바닥판의 장기 역학적 특성 및 내구성에 관한 연구

## A Study on Long-Term Mechanical Properties and Durability in Metakaolin Concrete Bridge Deck

양 은 익<sup>1)\*</sup>      김 명 유<sup>2)</sup>      양 주 경<sup>3)</sup>      박 해 군<sup>4)</sup>      최 윤 석<sup>5)</sup>  
Yang, Eun Ik      Kim, Myung Yu      Yang, Joo Kyoung      Park, Hae Geun      Choi, Yoon Suk

### Abstract

The requirement for durability of concrete bridge deck is increasing as the deterioration for the concrete bridge deck exposed to severe environment has been increased. For this reason, the concern about high-durable concrete is being high. Recently, a metakaolin is highly spotlighted as new admixture because its strength and durability are equivalent to silica fume. On the other hands, there are few researches for the metakaolin concrete bridge deck in domestic. So many various long-term data on the mechanical property and durability is needed to apply metakaolin concrete at the concrete bridge deck construction field. This study is aim to evaluate the long-term mechanical properties and durability of metakaolin concrete bridge deck with curing age. Mechanical properties are estimated by the compressive and flexural strength, and the drying shrinkage, the chloride resistance, the scaling, and freezing and thawing characteristics are compared with curing age. According to the results, when the metakaolin concrete is used, the development of compressive and flexural strength proceed in both the early and old ages. It is also improved the resistance of chloride penetration, freezing and thawing in concrete. It was showed that replacement of metakaolin was efficient for the reduction of the drying shrinkage.

**Keywords** : Metakaolin concrete, Bridge deck, Durability, Mechanical properties, Curing age

### 1. 서론

최근 차량하중의 증가는 물론 과다 제설제 사용 등과 같은 가혹 환경에 대한 노출이 빈번해짐에 따라 콘크리트 교량바닥판의 열화 피해가 날로 급증하고 있는 실정이다.(이병덕 등, 2005) 이에 따라 고성능 콘크리트 확보를 위하여 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흙과 같은 광물질 혼화재의 시멘트 대체가 시도되기도 하고(고경택 등, 2003; 송하원 등, 2003; 원종필 등, 2005; Michael et al, 1998), 노출 콘크리트 교량바닥판의 적용성이 검토되기도 하고 있다.(서진원 등, 2007)

한편, 콘크리트 재료의 다양화와 다양한 활용을 위해 여러 종류의 혼화재료 사용이 시도되고 있으며, 최근에는 일정 수준의 강도와 내구성 확보가 가능한 메타카올린이

새로운 혼화재로써 높게 평가되고 있다. 메타카올린은 고령석(Kaolin)을 약 600~850°C의 열로 소성하여 고령석 자체의 육방정계 층상 결정구조가 부분적으로 분해되어 생성되는 비정질 또는 결정도가 낮은 알루미노실리케이트가 주성분이다.(이효민, 2003) 이러한 온도에서 생성된 메타카올린은 포졸란 반응 특성을 가지며, 강도 및 내구성에 우수한 성능을 발휘한다.(Sabir, 2001)

해외의 경우, 메타카올린에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구 결과에 기초하여 고강도 및 고성능 콘크리트 제조에 많이 사용하고 있다.(Gruber et al, 2001; Luc et al, 2006; Poon et al, 2003) 그러나, 국내에서는 현재 메타카올린에 대한 연구 및 대체 사용은 많이 부족한 상태이다. 국내의 경우, 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 시공성 및 대체율과 같은 기초물성에 관한

1) 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수  
2) 학생회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정  
3) 정회원, 청운대학교 철도행정토목학과  
4) 정회원, 삼성물산 건설부문  
5) 학생회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정

\* Corresponding author : eiyang@gwnu.ac.kr 033-640-2418

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

연구(박조범 등, 2008)와 압축강도, 내화성 및 염소 확산 계수와 같은 내구성에 관한 연구(김남욱 등, 2007; 이문환 등, 2008; 이상호 등, 2005)가 보고된 반면, 메타카올린 콘크리트를 교량바닥판에 적용하기 위해 요구되는 성능을 검토한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 메타카올린 콘크리트를 적용한 교량바닥판의 장기적인 역학적 특성과 교량바닥판의 내구성 확보에 필수적인 염화물 침투저항성, 스케일링 특성, 동결융해저항성 및 건조수축 발생량에 대하여 검토하였으며, 실리카흙을 혼합한 경우와 비교하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 변수 및 배합

본 연구에서는 Table 1과 같은 실험 변수를 가지고 메타카올린을 혼입한 콘크리트 교량바닥판의 양생 재령에

Table 1 Test variable

Specimen	Type	Replacement ratio	Item
OPC	OPC	0%	Strength Drying Shrinkage Chloride resistance Scaling Freezing & thawing
SF	Silica fume	5, 10%	
MK	Metakaolin	5, 10, 15%	
MS	Metakaolin +Silica fume	10%(5 +5%)	

Table 2 Chemical-Physical compositions and properties of materials

Chemical component (%)											
MK	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	density	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)
	52.1	45.3	0.6	0.05	1.64	0.21	0.16	0.21	0.16	2.5	150,000
SF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	density	Fineness		
	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-	2.3	2.2	200,000		

Table 3 Mix proportions of concrete

	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Admixture		
						W	C	S	G	MK/SF	AE	SP
OPC	25	18	5	45	44	175	389	754	974	0 / 0	0.03	0.8
MK5							369	752	972	19 / 0	0.03	1.1
MK10							350	750	969	39 / 0	0.03	1.35
MK15							331	748	967	58 / 0	0.03	1.6
SF5							370	751	970	0 / 19	0.03	1.2
SF10							350	748	966	0 / 39	0.04	1.5
MS5							350	759	981	19 / 19	0.03	1.5

따른 역학적 특성과 내구성을 살펴보았다. 역학적 특성은 재령 180일 까지 압축강도와 휨강도를 측정하였고, 내구성은 건조수축특성과 장/단기 염화물 저항성, 양생 재령을 달리한 스케일링, 동결융해 저항성을 알아보려고 하였다. 메타카올린의 대체율은 시멘트 중량당 0, 5, 10, 15%이며, 시공성을 고려하여 실리카흙은 5, 10%를 대체하였다. 시멘트는 1종 보통시멘트를 사용하였으며, 자연사의 잔골재와 쇄석의 굵은골재를 사용하였다. Table 2는 시멘트 대체재로 사용된 메타카올린과 실리카흙의 물리-화학적 특성이다. Table 3은 본 연구에서 사용된 배합표이다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 압축 강도 및 휨 강도

압축강도는 KS F 2405에 따라 측정하였으며, 장/단기적인 강도 발현특성을 알아보기 위하여 7, 28, 91, 180일 재령까지 살펴보았다. 압축강도에 사용된 시험체는  $\varnothing 100 \times 200$ (mm)의 원주 공시체가 사용되었다.

휨강도는 압축강도와 동일한 재령에서 측정되었으며, 시험체는  $100 \times 100 \times 400$ mm의 각주 시험체가 사용되었다. 시험 방법은 KS F 2408(2005)에 따라 측정되었는데, 지점 사이의 거리( $l$ )은 350mm, 하중 재하율은 1950 N/min로 실험하였다.



Fig. 1 Drying shrinkage test

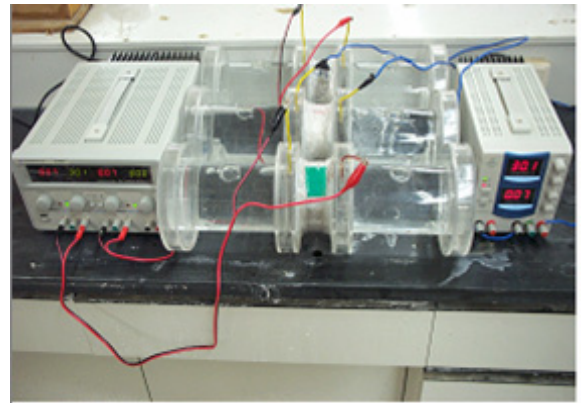


Fig. 2 Rapid chloride penetration test



Fig. 3 Scaling test



Fig. 4 Freezing and thawing test

### 2.2.2 건조수축

건조수축은 KS F 2424(모르타르 및 콘크리트의 길이 변화시험방법)에 따라 콘크리트 공시체를 제작하여 중심축의 길이 변화를 측정한다. 건조수축에 의한 길이 변화량을 측정하기 위하여 Demec gage(표점거리:250mm)를 사용하였으며, 양 측면의 길이변화를 측정한 다음 평균값을 산정하였다. 이 때, 시험체는 7일 수중양생 후 온도  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $60 \pm 3\%$ 인 항온항습 챔버에서 보관하였다(Fig. 1).

### 2.2.3 염화물 저항성

본 연구에서는 염화물 저항성을 검토하기 위하여 장, 단기 염화물 저항성을 각각 실시하여 비교하였다. 단기 염화물 저항성은 전기적 촉진시험법인 RCPT법(ASTM C1202)을 적용하였고, 장기 저항성은 NT Build 443에서 제안하는 3% 염화나트륨 용액에 침지하여 실험하였다. Fig. 2는 단기 저항성평가에 사용된 RCPT 장치를 보여준다.

### 2.2.4 스케일링

스케일링 실험은 28일과 91일 수중양생한 다음 각각 ASTM C 672에 따라 실험하였다. 염화칼슘 5% 수용액을 제조하여 직접 제작한 스케일링 측정용 콘크리트 공시체의 표면에 수용액 200g을 표면에 고루 살포하였다. 마찬가지로 비교대상을 위해 증류수를 실험에 추가하였다. 제작한 콘크리트 공시체는 각 변수당 총 4개이며, 크기는  $220 \times 220 \times 80\text{mm}$ 이다. ASTM C672에 콘크리트 표면의 스케일링 정도를 파악하기 위한 기준이 마련되어 있다. 이 방법은 육안 관측으로 인한 시각적 판단에 의거하고 있다. 따라서 본 연구에서는 파손정도에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 파손의 정도를 스케일링에 의해 떨어져 나간 콘크리트 공시체의 중량 변화율과 함께 나타내었다. Fig. 3은 스케일링 실험전경을 나타낸다.

### 2.2.5 동결융해 저항성

콘크리트의 동결융해 저항성은 동결 융해 시험법(KS F 2456)에 의해 비교 평가하였다. Fig. 4는 본 연구에서 실

시한 실험전경을 나타낸 것이다. 시험법에 따라, 30사이클마다 시험체의 동탄성계수와 중량변화를 측정하였으며, 최종적으로 300사이클까지 실험하였다. 동결 용해에 사용된 시험체는 100×100×400mm의 각주 공시체이며, 20℃에서 14일 수중양생 후 실험하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 강도 특성 비교

##### 3.1.1 양생 재령에 따른 압축강도

양생재령에 따른 콘크리트의 강도 특성을 Table 4에 정리하였으며, Fig. 5는 양생 재령에 따른 강도발현을 재령 28일 OPC 압축강도 대비 상대발현으로 나타낸 것이다. 측정된 압축강도 결과를 살펴보면, 메타카올린 대체는 실리카흙과 마찬가지로 콘크리트 초기강도발현에서부터 장기강도에 이르기까지 안정적으로 기여하는 것으로 판단된다. 메타카올린은 포졸란 재료로서 시멘트 수화반응에 의

해 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 결합하여 보다 강도가 높은 수화물로 결합되기 때문에 판단된다. 본 실험의 경우 메타카올린의 사용이 가장 효과적인 강도증진을 나타냈다. 한편, 본 연구에서는 15%의 메타카올린을 대체한 경우가 10% 경우에 비해 압축강도가 크게 증가하지 않았다. 기존연구(Sabir, 2001)에서도 메타카올린의 치환율이 15%일 경우에는 치환율의 증가에 따른 장/단기적 강도증가의 효율성이 떨어진다는 것을 발표한 바 있다. 또한, 국내 연구진(이상호 등, 2005)도 91일까지의 역학적 특성 결과에서 10%이상 치환은 강도증진의 효과가 뛰어나지 않음을 보고 하였다. 메타카올린의 비표면적에 따라 강도 발현특성이 달라지는 점을 감안할 경우, 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 메타카올린은 압축강도 측면에서 10%의 대체 사용이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

##### 3.1.2 양생 재령에 따른 휨강도

Fig. 6은 양생 재령에 따른 휨강도의 결과로써, 재령 28일 OPC 휨강도 대비 발현상태를 나타낸다. 결과에 따

Table 4 Compressive and flexural strength results with curing age

(Unit: MPa)

Ages		OPC	MK05	MK10	MK15	SF05	SF10	MS5
7	Comp.	24.4	30.4	32.8	30.9	32.2	27.7	27.1
	Flex.	4.18	5.22	5.60	5.86	5.04	5.36	4.00
28	Comp.	32.8	39.4	44.3	41.9	37.61	34.6	41.7
	Flex.	4.56	6.14	6.40	6.59	6.21	5.75	5.88
91	Comp.	38.0	44.0	48.6	48.5	37.6	41.1	44.5
	Flex.	5.57	6.50	7.41	5.85	6.55	6.61	6.00
180	Comp.	39.1	45.6	50.0	49.4	42.4	42.9	46.2
	Flex.	5.78	6.56	7.44	6.69	6.75	7.24	6.25

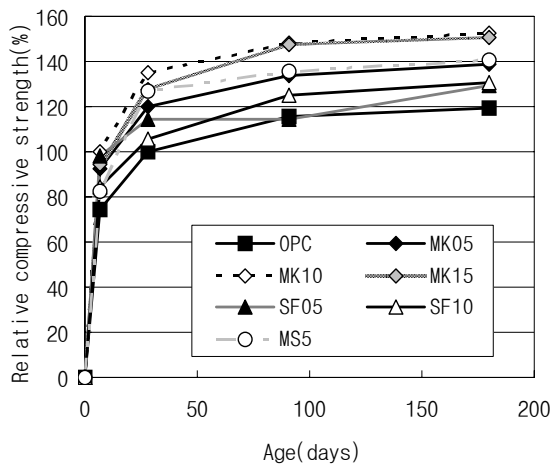


Fig. 5 Relative compressive strength with curing age

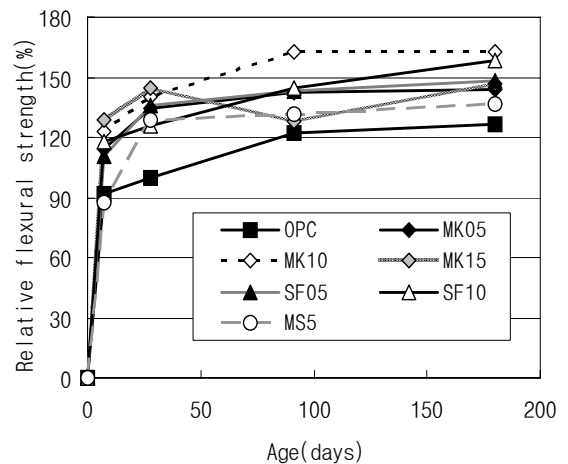
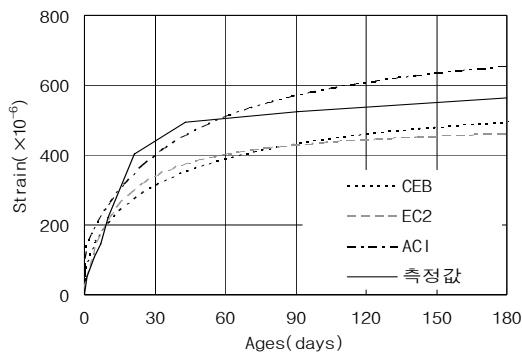


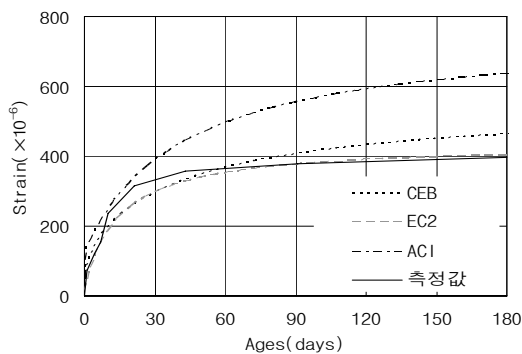
Fig. 6 Relative flexural strength with curing age

르면, 메타카올린이나 실리카흙을 대체 사용하였을 경우 OPC보다 더 높은 휨강도를 보였으며, 양생 재령이 증가함에 따라 휨강도 또한 증가하였다. 그러나, 압축강도 발현만큼의 휨강도 발현은 발생하지 않았으며, 메타카올린을 대체한 경우가 가장 높은 휨강도를 보였다. 압축강도와 마찬가지로 10% 이상 메타카올린을 대체하더라도 휨강도에 있어서 큰 강도 발현이 없는 것으로 나타났다.

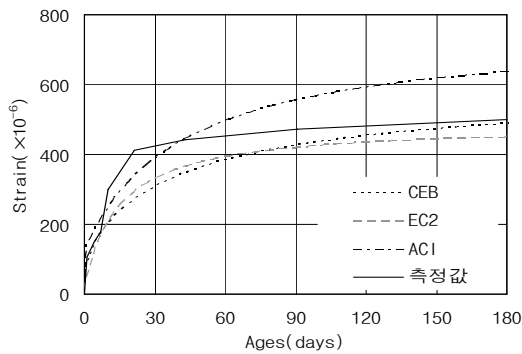
### 3.2 건조수축특성 비교



(a) OPC concrete



(b) MK concrete



(c) SF concrete

Fig. 7 Measured and simulated results of drying shrinkage with binder

Fig. 7은 광물질 혼화제 종류에 따른 건조수축 결과를 나타낸다. 측정된 결과에 따르면, OPC의 경우 재령이 증가함에 따라 건조수축이 지속적으로 발생하여 상대적으로 큰 건조수축이 발생하였다. 이에 비해 MK의 경우에는 초기부터 건조수축이 감소하여 가장 적은 건조수축량을 보였으며, SF의 경우에는 초기 건조수축이 OPC와 동등한 수준으로 발생하다가 장기적으로는 감소하는 것으로 나타났다. 즉 메타카올린을 사용할 경우에는 장기적인 건조수축 저감에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

한편 실험결과와 신뢰도 및 경향을 검토하기 위하여 기존의 코드값과 실험결과값을 비교하여 Fig. 7에 함께 나타내었다. Fig. 7을 살펴보면, OPC의 경우 ACI보다는 작았으며, CEB나 EC2 코드보다는 큰 값을 보이지만 경향은 CEB나 EC2 코드와 유사한 것으로 나타났다. 이에 비해 메타카올린이나 실리카흙을 대체 사용하는 경우에는 전체적인 건조수축량이 감소하여 CEB, EC2 코드값에 근접하는 것으로 판단된다.

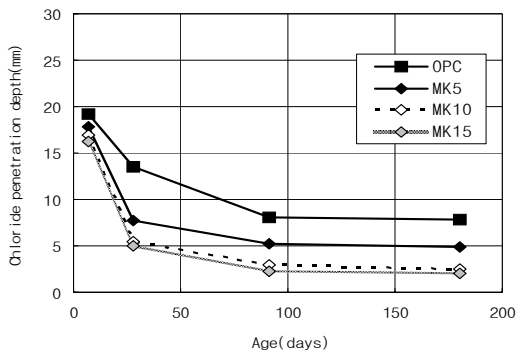
### 3.3 염화물 저항성 비교

#### 3.3.1 단기 염화물 저항성

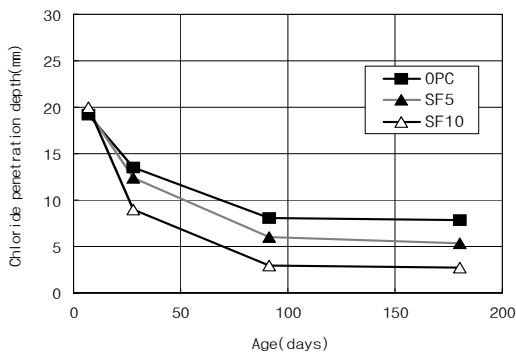
Fig. 8은 RCPT법으로 측정한 촉진 염화물 저항성 결과이다. 결과에 따르면, 7일 양생한 콘크리트의 염화물 침투 깊이는 OPC와 비교할 때, 메타카올린 대체에 따라 큰 차이가 없었다. 그러나 28일 이상 양생한 콘크리트 시험체는 혼화제 대체율에 따른 염화물 침투 깊이가 크게 영향을 받는다. 즉, 28일 이상의 재령에서는 메타카올린의 대체율이 증가함에 따라 염화물 침투 깊이가 급격하게 감소함을 보였다.

실리카흙의 경우에 있어서도 7일 동안의 짧은 기간을 양생한 콘크리트는 염화물 침투저항성이 아직 확보되지 않은 것으로 보이지만, 28일 이상으로 충분히 양생한 실리카흙 콘크리트는 메타카올린과 비슷한 수준의 염화물 저항성을 발휘한다.

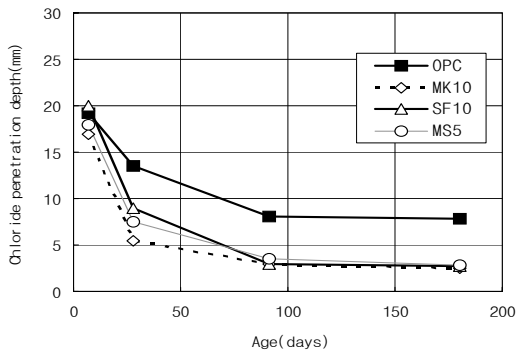
Fig. 8(c)의 결과는 동일한 양의 혼화제가 대체될 때의 재령에 따른 염화물 침투 저항성을 보여준다. 시멘트 중량당 10% 대체된 경우 모두 보통콘크리트(OPC)에 비해서는 우수한 염화물 저항성을 보였으며, 메타카올린(MK series)과 실리카흙(SF series), 혼합사용(MS)한 경우는 동등 수준의 염화물 저항성을 발휘하였다. 메타카올린이나 실리카흙을 10% 이상 대체한 경우에 약 65% 이상 염화물 저항성이 향상됨을 알 수 있었다.



(a) MK concrete



(b) SF concrete

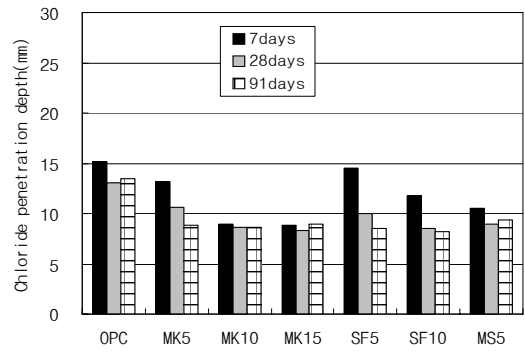


(c) 10% replacement concrete

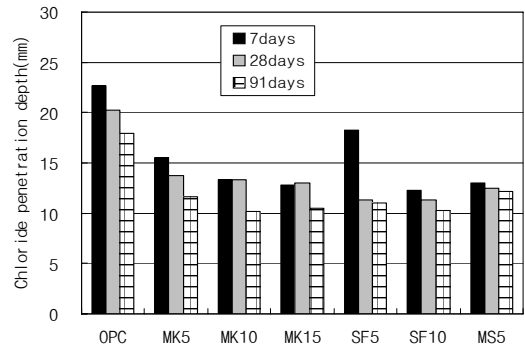
Fig. 8 RCPT results with curing ages and binder

### 3.3.2 장기 염화물 저항성

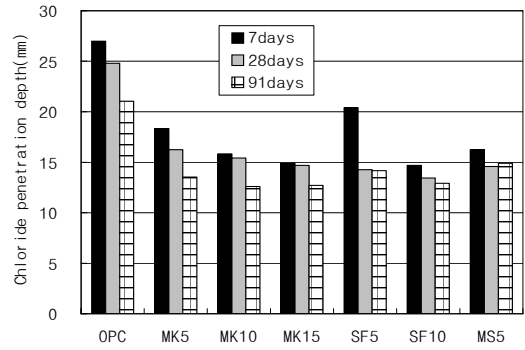
일반적인 염화물 환경에서 염화물은 콘크리트의 내부 공극을 통하여 침투하며, 이러한 염화물의 침투는 주로 농도차에 의한 확산을 통하여 발생한다. 따라서 실제 구조물에 대한 염화물 저항성을 알아보기 위해서는 일정 수준의 농도를 가지는 염화물 용액에 침지 또는 반복건습을 수행함으로써 확산을 통하여 침투시켜 평가하는 것이 바람직하다.



(a) 3months



(b) 6months



(c) 9months

Fig. 9 Chloride immersion test results with curing ages and binder

본 연구에서는 3%의 염화나트륨 용액에 침지시켜 염화물이 확산되도록 실험하였는데, 콘크리트바닥판이 염화물에 노출되는 시기를 고려하기 위해 시험체는 각각 7, 28, 91일 동안 수중양생한 후 염화물 용액에 침지시켰다. Fig. 9는 각각 수중양생기간이 다른 시험체에 대하여 실시한 침지 기간에 따른 염화물 침투 깊이를 나타낸다.

실험결과에 따르면, 광물질 혼화재를 혼입함으로써 보통콘크리트(OPC)에 비해 염화물 침투 저항성이 크게 증

Table 5 Chloride diffusion coefficient (RCPT & Immersion)

(Unit:  $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )

Ages	Test method	OPC	MK5	MK10	MK15	SF5	SF10	MS5
7days	RCPT	24.33	22.43	21.22	20.41	24.73	25.41	22.70
	Immersion	4.63	2.57	1.60	1.48	3.26	1.82	1.79
28days	RCPT	16.65	9.04	6.14	5.50	15.21	10.68	8.72
	Immersion	3.68	1.87	1.54	1.43	1.47	1.25	1.46
91days	RCPT	9.48	5.82	3.00	2.10	6.78	3.00	3.62
	Immersion	3.11	1.32	1.14	1.20	1.27	1.11	1.49
180days	RCPT	9.15	5.31	2.46	1.80	5.92	2.70	2.76

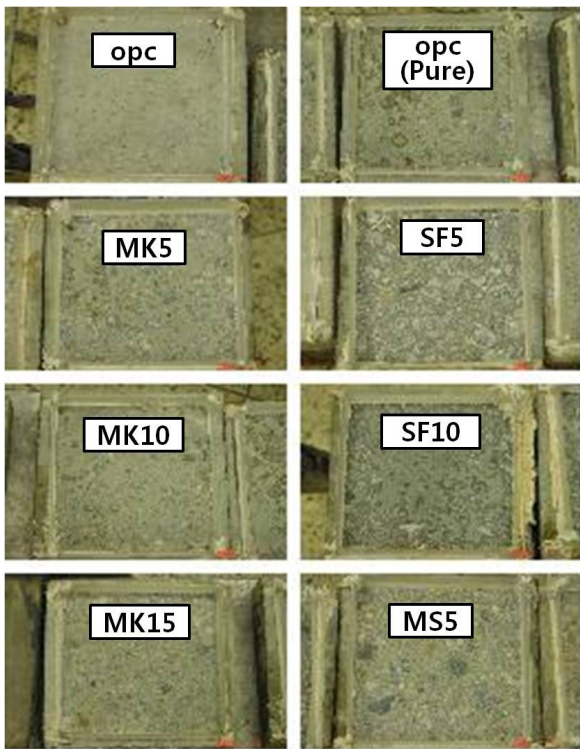
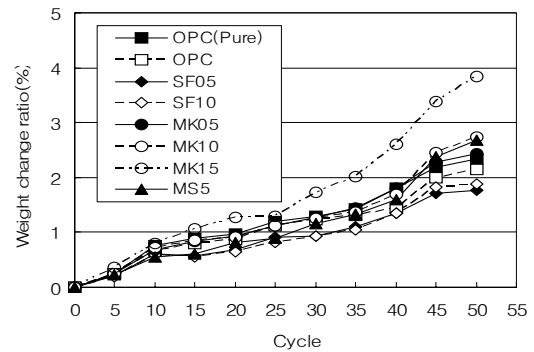


Fig. 10 Surface deterioration pictures due to scaling (91days curing result)

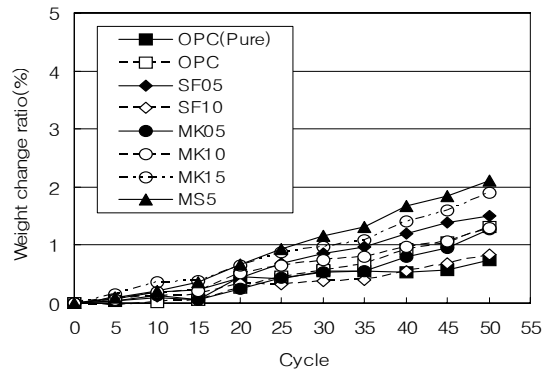
가하였으며, 또한 염화물에 노출되는 시기가 늦어질수록 (수중양생의 기간이 증가) 염화물 침투저항성이 증가하였다. 그러나 수중양생기간 증가에 의한 효과보다는 광물질 혼화재 사용에 따른 침투저항성 향상이 효율적인 것으로 판단된다.

즉, 염화물 침투저항 성능은 메타카올린과 실리카흄 모두 10% 이상을 혼합할 경우에 크게 향상하였으며, 장기적인 침지에 대해서도 효과적으로 침투저항능이 유지되는 것으로 판단된다. 한편, 10% 이하로 혼합할 경우에는 염화물 노출시기를 연장시킴으로써 염화물 저항성이 어느 정도 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Table 5는 침투 깊이를 토대로 Fick's second law를



(a) 28days curing



(b) 91days curing

Fig. 11 Scaling test results with curing ages

이용한 겉보기 확산계수를 계산한 결과를 나타낸다.

### 3.4 스케일링에 관한 내구성능 결과

Fig. 10은 스케일링에 따른 콘크리트바닥판 표면열화 현상을 보이고 있으며, Fig. 11은 양생 기간을 28일과 91일로 달리하였을 경우의 혼화재 대체에 따른 스케일링 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 각 기호는 사용하는 재료를 의미하며, 비교를 위해 염화칼슘 대신 증류수를 사용한 경우는 OPC(Pure)로 표현하였다. 스케일링은 각 시험체에 대하여 각각 28일, 91일 수중양생 후, -1

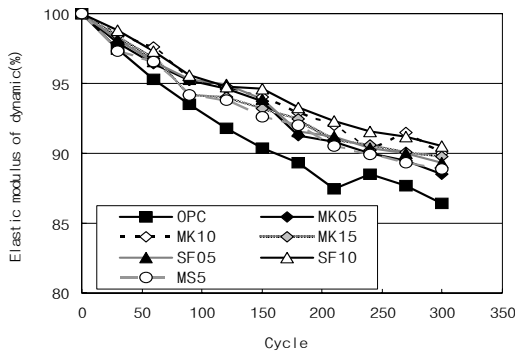


Fig. 12 Freezing and thawing test results

8°C (16시간-동결)와 23°C (8시간-융해)를 1사이클로 하여 매 5사이클마다 50사이클까지 측정된 결과이다. 측정 결과를 살펴보면, 전체적으로 혼화재를 많이 사용할수록 스케일 저항성은 저하하는 것으로 판단된다. 즉, 메타카올린 10%까지의 대체는 스케일링 발생 수준이 보통콘크리트(OPC)와 비슷한 수준이나, 15%의 대체는 스케일링이 크게 증가함을 알 수 있었다. 이것은 사용하는 혼화재료가 미분이고 교량바닥판 완성 후에 표면에 떠오를 가능성이 크기 때문에 표면 경도를 저하시키는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 메타카올린과 실리카흙을 혼합사용한 경우에 스케일링이 가장 크게 발생하였다.

실험결과에서 수중양생재령의 영향을 살펴보면, 3개월 이상 충분한 양생을 하게 되면 모든 경우에서 스케일링 발생이 현저히 떨어짐을 보였다. 즉, 스케일링 환경에 노출이 우려되는 구조물은 충분한 양생기간을 고려하여 시공할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 3.5 동결융해 저항성 결과

Fig. 12는 -18°C와 4°C를 1사이클로 하여 매 30사이클마다 300사이클까지 동탄성계수 변화를 측정된 결과이다. 결과에 따르면, 메타카올린 및 실리카흙의 대체는 내부조직을 치밀하게 하고 미세 공극을 많이 만들기 때문에 동결융해 저항성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 한편, 메타카올린의 대체는 실리카흙과 동등한 수준의 동결융해 저항성을 보였으며, 동결융해 저항성에 있어 10% 이상의 메타카올린 대체는 염화물 저항성과 마찬가지로 대체율에 비례하여 향상되지는 않는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

양생재령에 따른 메타카올린 콘크리트 교량바닥판의 장기특성에 관한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동일한 대체율에서 메타카올린 콘크리트가 실리카흙 콘크리트와 동등 수준의 높은 압축 및 휨강도를 초기 재령에서 보였으며, 장기재령에서 메타카올린 콘크리트는 보통콘크리트와 실리카흙 콘크리트에 비해 우수한 강도발현 특성을 보였다. 그러나 과도한 메타카올린의 사용은 바람직하지 않으며 10%까지의 대체 사용이 효과적인 것으로 나타났다.
- (2) 축진 전기-화학적 염화물 저항성 실험결과에 따르면, 메타카올린을 대체한 경우가 보통콘크리트에 비해서 우수한 염화물 저항성을 보였으며, 장기침지 실험에서도 실리카흙 콘크리트 성능 이상의 염화물 저항성을 보였다.
- (3) 양생 재령에 따른 스케일링 발생량을 검토한 결과 스케일링 발생을 저하시키기 위해 3개월 이상의 충분한 양생이 효과적인 것으로 나타났다. 한편, 혼화재를 사용할수록 스케일링 발생이 크게 증가하였으며, 메타카올린의 경우 10%까지의 대체는 스케일링 발생 수준이 보통콘크리트와 비슷한 수준이나, 그 이상의 대체는 스케일링을 크게 증가시켰다. 특히, 메타카올린과 실리카흙을 혼합 사용한 경우 스케일이 크게 증가하였다.
- (4) 메타카올린 및 실리카흙의 대체는 동결융해 저항성을 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 비표면적이 큰 혼화재의 혼입에 의해 조직이 치밀해지고 내부공극을 작게 하는 것에 기인한다고 판단된다.
- (5) 건조수축 실험결과에 따르면, 메타카올린 콘크리트를 사용할 경우 건조수축이 크게 저감하여 교량바닥판의 장기거동에 유효할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. 고경택, 박정준, 이종석, 김성욱, "광물질 혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성", 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No. 6A, 2003, pp.1133-1141.
2. 김남욱, 여동구, 송준호, 배주성, "메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 2007, pp.499-506.
3. 박조범, 김호수, 전준영, 김은겸, 류득현, "실리카흙과 메타카



올린을 사용한 고강도 콘크리트의 특성”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No. 3, 2008, pp.307-315.

4. 서진원, 이지영, 구분성, 심도철, “교량 바닥판 콘크리트의 내구성 증진을 위한 실험적 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 2007, pp.393-399.
5. 송하원, 이창홍, 이근주, 김재환, 안기용, “삼성분계 혼합콘크리트의 염화물 침투 저항성 및 내구성에 대한 고찰”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No. 4, 2008, pp.439-449.
6. 원종필, 서정민, 이창수, 박해균, 이명섭, “실리카흄을 혼합한 교면 포장용 고성능 콘크리트의 단기 및 장기 성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 5, 2005, pp.743-750.
7. 이문환, 이세현, “메타카올린과 페타이어 잔입자를 사용한 고강도콘크리트의 내화성능에 관한 기초적 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No. 1, 2008, pp.89-97.
8. 이병덕, 윤병성, 이주광, 정영환, “체설제 종류에 따른 응빙성능 및 콘크리트에 미치는 영향 평가에 관한 연구”, 한국도로학회논문집, Vol. 7, No. 4, 2005, pp.113-123.
9. 이상호, 문한영, “Metakaolin 혼합 고강도 콘크리트의 내구특성 예측”, 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 9, No. 2, 2005, pp.173-180.
10. 이효민, “콘크리트 성능 향상을 위한 광물혼화제로서 메타카올린의 특성”, 한국광물학회지, Vol. 16, No. 1, 2003, pp.41-50.
11. ASTM C672(2003), “Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals”
12. ASTM C1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, 1994.
13. Gruber, K. A., Terry Ramlochan, Andrea Boddy, R.D.

Hooton, M. D. A. Thomas. “Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin”, Cement & Concrete Composites, Vol. 23, 2001, pp.479-484.

14. Luc Courard, Anne Darimont, Marleen Schouterden, Fabrice Ferauche, Xavier Willem, Robert Degeimbre. “Durability of mortars modified with metakaolin”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp.1473-1479.
15. Michael G., Fitch and Osama A., Abdulshafi., “Field and Laboratory Evaluation of Silica Fume Modified Concrete Bridge Deck Overlay in Ohio”, Transportation Research Record, No. 1610, 1998, pp.20-27.
16. NT Build 443, “Nordtest Method NT Build 443 Accelerated Chloride Penetration”, 1995-11.
17. Poon, C. S., Kou, S. C., Lam, L., “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 20, 2006, pp.858-865.
18. Sabir, B. B., “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review”, Cement & Concrete Composite, Vol. 23, 2001, pp.441-454.
19. Tang, L., “Rapid Estimation of Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field”, ACI Materials Journal, Jan-Feb, 1992, pp.49-53.

(접수일자 : 2010년 9월 30일)

(수정일자 : 2011년 1월 11일)

(심사완료일자 : 2011년 1월 12일)

## 요 지

가혹한 환경에 노출되는 콘크리트 교량바닥판에 대한 피해가 증가하면서 콘크리트 교량바닥판의 내구성 향상에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 따라 고성능 콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근, 새로운 광물질 혼화제로써 실리카흄과 같은 수준의 강도와 내구성 확보가 가능한 메타카올린이 높게 평가되고 있다. 이에 비해 국내의 메타카올린에 대한 연구 및 대체사용은 미진한 수준이며, 메타카올린 콘크리트를 교량바닥판에 적용하기 위한 검토도 매우 부족한 실정이다. 따라서 메타카올린 콘크리트를 교량바닥판에 적용하기 위해서는 장기적인 역학적 특성 및 교량바닥판에 요구되는 내구성에 대한 다양한 자료가 필요하다. 본 연구는 메타카올린 콘크리트를 적용한 교량바닥판의 장기적인 역학적 특성 및 내구성을 양생 재령에 따라 검토하는데 목적을 두었다. 역학적 특성은 압축강도 및 휨강도가 측정되었으며, 내구성의 경우는 건조수축, 염화물 저항성, 스케일링, 동결융해 저항성을 양생 재령에 따라 비교 평가하였다. 연구결과에 따르면, 메타카올린의 대체는 압축강도 및 휨강도 발현이 초기 및 장기 재령에서 우수하였다. 또한, 내구성 측면에서도 염화물 침투 저항성과 동결융해 저항성을 향상시켰다. 또한, 건조수축을 저감시키는 것으로 나타났다.

**핵심 용어** : 메타카올린 콘크리트, 교량바닥판, 내구성, 역학적 특성, 양생재령