

물결합재비를 달리하여 제작한 메타카올린 혼입 콘크리트의 내구성능 평가

Estimation on the Durability of Metakaolin Concrete According to the W/B Ratio

김 춘 호¹⁾ 김 남 옥^{2)*}
Chun-Ho Kim Nam-Wook Kim

Abstract

In this study, in order to find the improvement effect of metakaolin for using improvement of strength in concrete structures, it is investigated the diffusion coefficient of chloride ions and adiabatic temperature rise test.

As a result, due to the mixing of metakaolin, it has been confirmed reducing diffusion coefficient of chloride ions and could prevent down of slump for use of adding fly ash.

Therefore, ensuring resistance to chloride ion penetration into concrete, it is possible to enlarge the W/B ratio and reduce the adiabatic temperature rise by mixing of metakaolin. So, it is confirmed that the durability of concrete structures is increased.

Keywords : Metakaolin, Fly ash, W/B ratio, Durability, Diffusion coefficient, Adiabatic temperature rise

1. 서 론

최근 들어 콘크리트 구조물에 요구되는 성능이 다양화됨에 따라 콘크리트의 품질 또한 고성능화가 요구되며 그중에서 고강도 콘크리트에 대한 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 고강도 콘크리트 제조에 관련하여 다양한 연구가 진행되고 있는데 그중 혼화재료의 개발 및 이의 활용에 관한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다 (Kim et al., 2007). 혼화재료는 시멘트와의 사용량에 따라 일반적으로 혼화재와 혼화제로 구분되는데 적정량 사용 시 수화열 저감, 압축강도 증진 및 내구성의 향상 등의 효과를 얻을 수 있다. 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 일반적으로 실리카 폼이 주로 사용되는데 성능은 매우 우수하나 경제성의 문제가 단점으로 지적되어 왔다 (Kim, 2008). 그러나 최근 들어 실리카 폼과 역학적 특성이 유사하면서 경제적으로 유리한 메타카올린에 대한 연구 결과가 다수 도출되어 실리카 폼의 대체재로서 고강도 콘크리트의 제조 시 널리 사용되고 있는 추세이다 (Kim et al., 2007). 메타카올린은 고령토에 함유되어 있는

천연물질인 카올린을 특수처리 하여 제조하여 얻어지는데 실리카 폼의 특성과 유사한 마이크로 필리효과 등의 발현으로 고강도 및 고내구성이 얻어지는 것으로 알려지고 있다 (Moon et al., 2003). 그러나 지금까지 고강도에 대한 연구는 많이 이루어지고 있으나 내구성에 관한 검토는 충분하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 메타카올린이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 하여 재령, 물결합재비 변화, 메타카올린의 혼입량 변화 및 플라이애쉬의 사용량을 달리하여 제작한 시험체에 대하여 평가항목으로서 염화물 이온침투저항성 및 단열온도상승시험을 실시하였다. 이러한 연구결과를 통하여 메타카올린을 내구성 콘크리트의 혼화재료로 활용하기 위한 자료를 도출하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 시 험

2.1 사용 재료

본 연구에서는 잔골재로 하천사를, 굵은골재로는 최대치수

1) 정회원, 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수
2) 정회원, 전북대학교 공과대학 토목공학과 부교수, 교신저자

* Corresponding author : asahi00@jbnu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

25mm의 쇄석을 사용하였으며 이들의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

시멘트는 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트 (OPC), 혼화제로 메타카올린 및 플라이애쉬를 사용하였으며, 이들의 화학 성분 및 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of aggregates

Aggregates	Gravity	Absorption (%)	Max. size (mm)	F.M
Fine aggregate	2.53	1.31	-	2.80
Coarse aggregate	2.64	0.63	25	6.66

2.2 배합

콘크리트 시험체의 배합강도는 OPC 콘크리트 기준으로 60MPa로 설정하였으며 물결합재비는 35%, 40%, 45% 및 50%로 하였다. 또한, 슬럼프는 150±30mm 및 공기량은 4.5±1.5%로 일정하게 유지하기 위하여 카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

혼화재료의 경우 메타카올린은 기존의 연구결과 등을 참고로 하여 시멘트 사용중량의 0%, 5%, 10% 및 15%로 대체하였으며, 플라이애쉬의 혼입 유무에 따른 초기 수화열 및 유동성 등의 효과를 확인하기 위해 물결합재비 45%의 경우에 0%, 15% 및 30%로 혼입하여 총 24종류의 시험체를 제

Table 2 Chemical composites and properties of materials

Kinds	Composition (%)							Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O		
Cement	21.4	5.1	2.99	0.32	64.0	1.6	0.79	3.15	3,360
Fly ash	49.5	27.9	7.82	0.82	2.00	2.03	5.20	2.23	3,327
Metakaolin	52.1	45.3	0.60	1.64	0.05	-	0.37	2.50	150,000

Table 3 Kinds of specimens

Specimens	W/B	Metakaolin (MK)	Fly ash (FA)	Remarks
OPCN-35	35%	0%	0%	OPCN : Basic specimen M00 : Usage of Metakaolin N : Non Fly ash F00 : Usage of Fly ash -00 : Ratio of W/B
M05N-35		5%	0%	
M10N-35		10%	0%	
M15N-35		15%	0%	
OPCN-40	40%	0%	0%	
M05N-40		5%	0%	
M10N-40		10%	0%	
M15N-40		15%	0%	
OPCN-45	45%	0%	0%	
M05N-45		5%	0%	
M10N-45		10%	0%	
M15N-45		15%	0%	
OPCN-50	50%	0%	0%	
M05N-50		5%	0%	
M10N-50		10%	0%	
M15N-50		15%	0%	
OPCF15-45	45%	0%	15%	
M05F15-45		5%	15%	
M10F15-45		10%	15%	
M15F15-45		15%	15%	
OPCF30-45	45%	0%	30%	
M05F30-45		5%	30%	
M10F30-45		10%	30%	
M15F30-45		15%	30%	

작하였다 (Kim et al., 2007). 본 연구에서 제작한 시험체의 종류는 Table 3과 같다.

2.3 시험방법

2.3.1 염화물이온침투저항성 시험

본 연구에서는 콘크리트 내부에 침투하는 염소이온의 저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전위차를 이용한 전기화학적 촉진시험을 이용하고자 하여 NT Build 492 (chloride migration coefficient from non steady state migration experiments) 시험방법에 의거 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 의 원주형 시험체를 제작하여 50mm 두께로 절단하였다 (Tang, 1992). 이 후 Fig. 1에 나타난 바와 같이 수산화칼슘 수용액으로 포화시킨 후 양극에는 0.3M의 NaOH 수용액, 음극에는 10%의 NaCl 수용액을 채워 전기적 전위차로 발생시켜 측정한다. 본 연구에서는 확산셀의 전압을 30 V로 하여 8시간동안 전류를 측정 한 후 일정시간동안 전위차를 가하여 염소이온의 이동을 촉진시킨 후 콘크리트 시험체를 할렬한 후 할렬면을 통하여 염소이온의 침투깊이를 측정한다. Tang이 제안한 식 (1)을 이용하여 비정상 상태의 촉진염소이온 확산계수 (D)를 구하였다 (Tang and Nilsson, 1992).

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $a = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$,

D 는 염소이온 확산계수 (m^2/s),

F 는 패러데이 상수 ($9.648 \times 10^4 \text{J}/\text{V} \cdot \text{mol}$),

L 은 시편의 두께 (m),

R 은 기체상수 ($8.314 \text{J}/\text{K} \cdot \text{mol}$),

t 는 실험 지속시간 (s),

c_d 는 비색법 (질산은)에 의한 반응 농도 (0.07N),

z 는 이온의 원자가 (염소이온의 경우 $z = 1$),

U 는 양극과 음극 사이의 전압차 (V),

T 는 용액의 온도 (K),

x_d 는 염소이온의 침투깊이 (m),

erf : error function,

c_0 는 음극셀의 염소이온 농도 ($2 \text{N} \approx 10\%$)이다.

2.3.2 단열온도 상승시험

콘크리트의 내부 발열량 측정은 일반적으로 미소수화열량계를 이용한 시멘트 수화열 측정법 및 콘크리트 단열온도상승 시험법 등이 이용되고 있다. 그러나 시멘트 수화열 측정법은 소량의 시료를 사용하여 측정하기 때문에 시멘트의 수화발열 특성을 측정하는 방법으로 시멘트와 물을 일정한 온도에서 반응시켜 발생하는 열량을 측정하므로, 시료의 온도 이력이 무시되고 실제 콘크리트의 배합조건이 고려되지 않는 단점이 지적된다 (Kim et al., 2007). 따라서 콘크리트의 수화반응에 의한 내부 발열량은 단열상승 시험방법을 이용하는 것이 보편적이다. 본 연구에서는 이를 고려하여 Fig. 2와 같은 일본 T사의 단열용기 장치에 온도측정용 Thermocouple을 매립하여 단열온도상승 시험을 실시하여 제작된 각종 콘크리트 시험체의 단열온도상승량을 비교하고자 하였다.

3. 시험결과

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

본 연구에서 제작된 총 24종류의 시험체에 대한 슬럼프 및

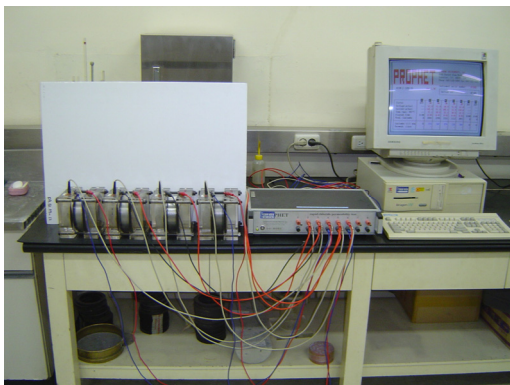


Fig. 1 View of chloride ion penetration test



Fig. 2 View of adiabatic temperature rise tester

Table 4 Results of slump and air test

Specimens	Slump (mm)	Air (%)
OPCN-35	140	3.9
M05N-35	135	3.7
M10N-35	135	3.7
M15N-35	130	3.5
OPCN-40	150	4.3
M05N-40	145	4.2
M10N-40	145	4.2
M15N-40	140	4.1
OPCN-45	160	4.6
M05N-45	155	4.5
M10N-45	155	4.5
M15N-45	150	4.3
OPCN-50	170	5.5
M05N-50	165	5.2
M10N-50	165	5.1
M15N-50	160	4.8
OPCF15-45	165	4.3
M05F15-45	160	4.2
M10F15-45	160	4.1
M15F15-45	155	4.0
OPCF30-45	170	4.2
M05F30-45	165	4.0
M10F30-45	165	4.0
M15F30-45	160	3.9

공기량 시험 결과는 다음의 Table 4와 같다. 결과로부터 모든 시험체는 고성능 AE감수제의 혼입을 통하여 목표 슬럼프 및 공기량을 만족시켰다. 전체적인 경향은 물결합재비가 낮을수록 또한 메타카올린의 치환율이 높을수록 슬럼프 및 공기량이 낮아져 유동성이 감소된 결과를 나타냈다. 한편, 동일한 물결합재비에서는 플라이애쉬의 혼입에 따라 슬럼프가 증가하는 경향을 나타내고 있는데 플라이애쉬의 첨가가 유동성을 증대시키는 일반적인 경향과 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 압축강도

Fig. 3에 재령에 따른 메타카올린 혼입율과 압축강도의 관계를 나타냈다. 모든 물결합재비에서 전반적으로 혼입율이 커질수록 압축강도가 향상되었으나 재령에 따라 약간 다른 경향을 나타냈다. 먼저 초기재령인 7일 및 표준재령인 28일에서는 혼입률이 높을수록 또한 무혼입 시험체에 비하여 압축강도의 향상이 컸는데 이는 메타카올린의 높은 분말도로부터 얻어지는 높은 반응성 및 충전효과로부터 기인된 결과로 판단된다. 장기재령인 91일의 경우, 메타카올린 치환율이 커질수록 압축강도의 증진율은 다른 재령과 마찬가지로 높아졌으나 혼입율 15%에서 압축강도의 증진율이 둔화되는

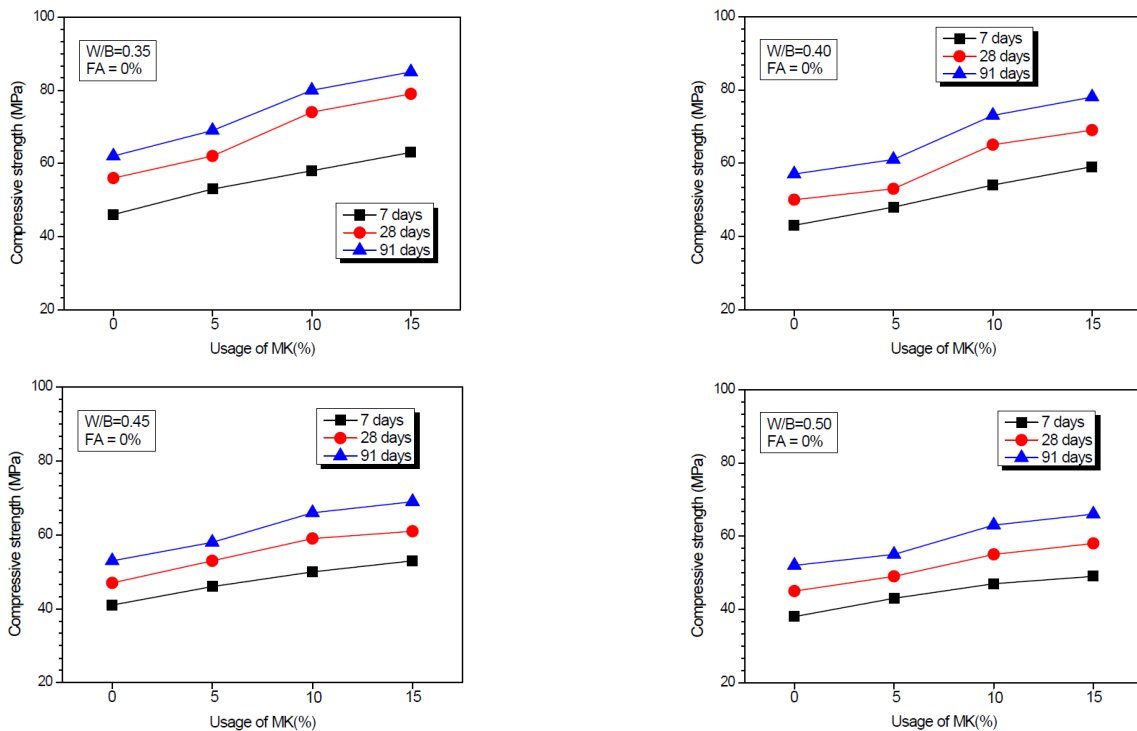


Fig. 3 Relationship between compressive strength and metakaolin replacement according to ages and W/B ratio

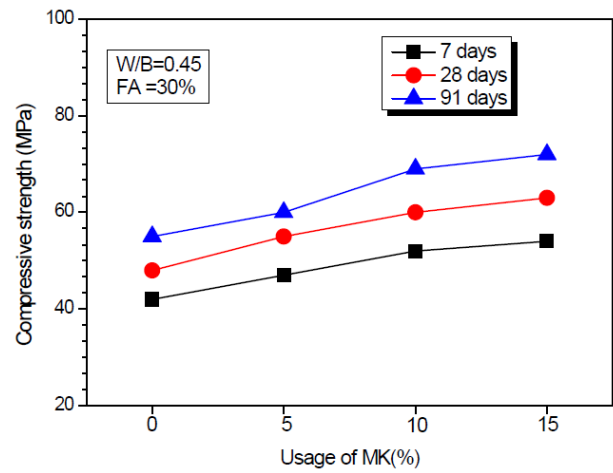
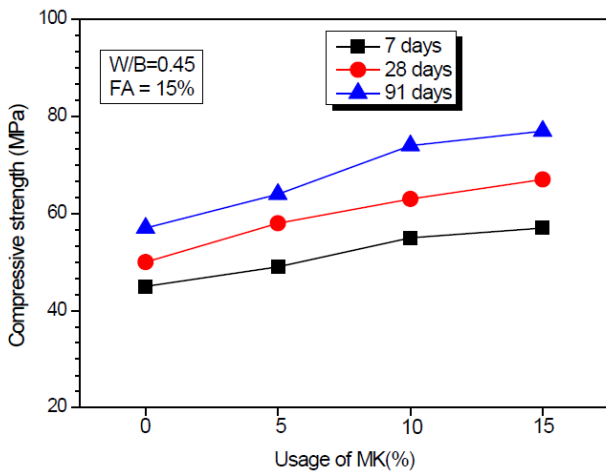


Fig. 4 Results of compressive strength according to fly ash replacement

결과를 나타내고 있다. 이는 메타카올린의 대체율이 증가할수록 시멘트의 수화생성물인 C-H의 양은 상대적으로 작아지고 메타카올린의 주성분인 SiO₂ 및 Al₂O₃ 양은 늘어나게 되므로 대체량에 비해 포졸란반응이 상대적으로 적게 나타나는 현상 때문으로 판단된다. 따라서 이와 같은 결과로부터 압축강도 증진 측면에서 메타카올린의 적정 대체율은 약 10% 정도로 판단된다.

한편, 메타카올린 혼입 시, 일반적으로 Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 유동성의 저하가 지적되는데 본 연구에서는 메타카올린의 혼입에 따른 시공성 등의 성능 향상을 위하여 플라이애쉬를 첨가하였다. Fig. 4에 플라이애쉬를 사용한 경우의 콘크리트 압축강도 발현 특성을 나타내었다. 본 실험의 범위내에서는 플라이애쉬를 혼입하는 것에 의해 압축강도의 증진은 크지 않아 플라이애쉬 치환율이 15%인 경우는 메타카올린의 혼입에 따른 압축강도의 증진이 나타났으나 30%의 경우에는 메타카올린을 혼입하여도 무혼입 시험체와 비교하면 압축강도가 거의 차이가 없었다. 따라서 경제성, 유동성 및 압축강도 등을 고려한다면 플라이애쉬의 첨가율은 15% 정도로 판단된다.

3.3 염화물이온 침투저항성

Fig. 5에 메타카올린의 혼입율과 염화물이온 확산계수와와의 관계를 나타내었다. 결과로부터 모든 물결합재비에서 메타카올린의 혼입은 염화물이온 침투저항성의 감소를 나타내는 것을 알았다. 특히, 메타카올린의 혼입율을 0%에서 10%로 증가시킬 경우 염화물이온 확산계수가 가장 크게 감소하였으며, 메타카올린의 혼입율을 10%에서 15%까지 증가시킨

경우에는 0%에서 10%의 경우에 비해서 염화물이온 확산계수를 감소시키는 효과가 작았다. 메타카올린의 치환율이 10%에서 15%로 증가함에 따라 압축강도는 소폭 증가하였으나 염화물이온 확산계수에는 큰 차이가 없었다. 따라서 경제성을 감안한다면 메타카올린의 치환율은 10% 정도가 적당한 결과로 판단된다. 메타카올린의 혼화에 의한 염화물이온 확산계수의 저감효과는 물결합재비, 치환율 및 메타카올린의 종류에 의해 약간 다르지만 메타카올린 무첨가 경우에 비해 염화물이온 실효확산계수가 대략 절반 정도로 나타났다. 또한, 당연한 결과이지만 물결합재비가 작아질수록 염화물이온 확산계수가 작아졌다. 메타카올린에 의한 염화물이온 확산계수의 저하는 포졸란 반응물과 메타카올린의 높은 분말도가 거대공극을 여러 개의 미세공극으로 변화시켜 염소이온의 침투경로가 길어져 나타난 결과로 판단된다 (Kim et al., 2007). 즉, 포졸란 반응에 의하여 형성된 C-S-H 및 C-A-H 수화물이 시멘트 경화체의 공극을 채움 (pore blocking)으로 매크로 공극이 감소하고 마이크로 공극이 증가하므로 공극의 연결성의 저하나 굴곡도를 증가시켜 염소이온의 확산경로를 길어지게 하는 것으로 판단되었다. 본 연구의 경우에는 물결합재비 35%, 메타카올린 무혼입인 시험체와 물결합재비 45%, 메타카올린 혼입율 10%인 시험체의 염화물이온 확산계수가 거의 같은 정도로 도출되었다. 결국, 메타카올린의 혼입으로 염화물이온 침투저항성을 확보할 수 있으며 물결합재비는 더 크게 할 수 있어 시공성의 향상이 가능하다는 것을 알았다. 한편, Fig. 6에 플라이애쉬 사용한 경우의 염화물이온 확산계수를 나타내었다.

플라이애쉬의 사용량에 따라 전반적으로 장기 재령 91일에 시험체의 염화물이온 확산계수가 작아지는 결과를 나타

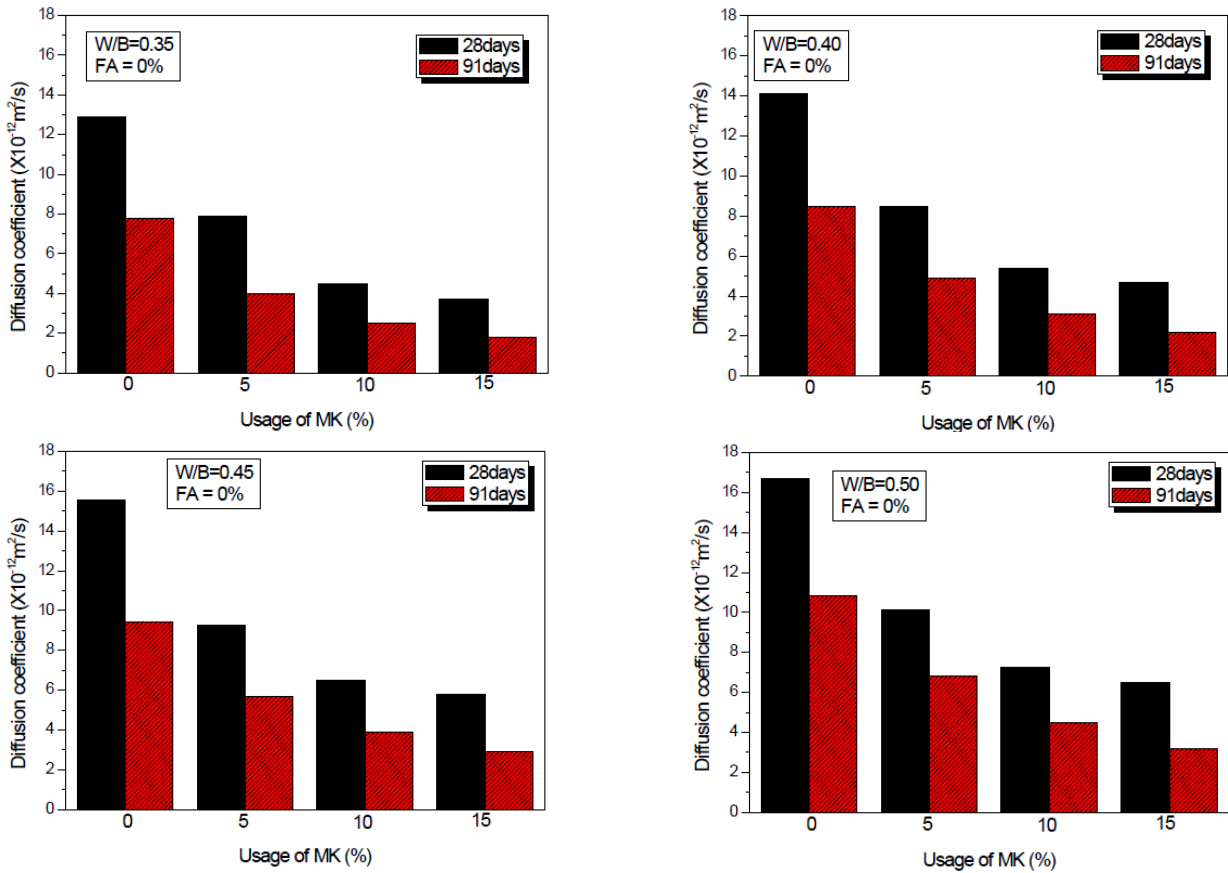


Fig. 5 Relationship between diffusion coefficient and metakaolin replacement according to ages and W/B ratio

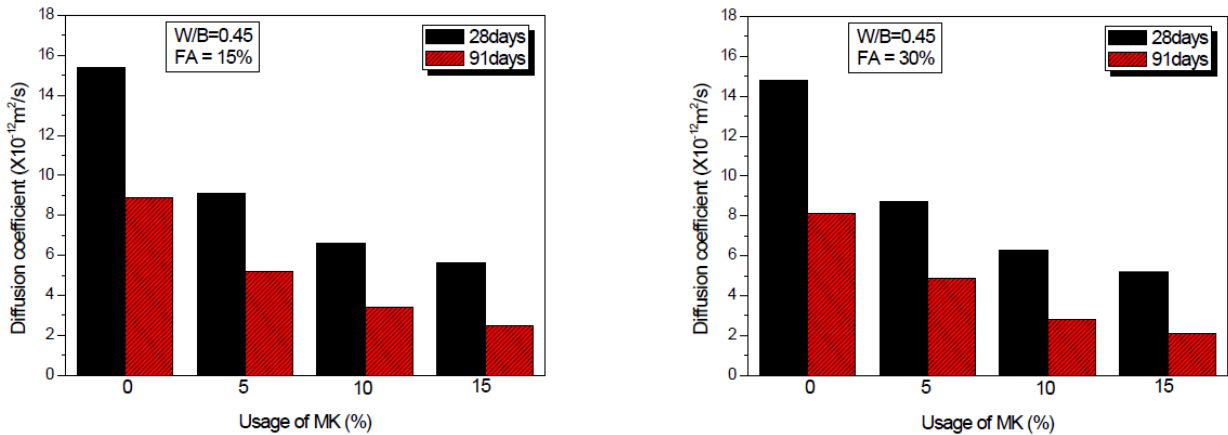


Fig. 6 Results of diffusion coefficient according to fly ash replacement

내고 있으나 염화물이온 저항 측면에서는 메타카올린과 플라이애쉬의 병용 사용은 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

3.4 단열온도상승에 대한 평가

본 연구에서는 메타카올린의 초기 수화반응의 촉진에 따

른 발열 현상 및 초기 온도균열에 대한 위험성을 비교하기 위하여 플라이애쉬의 사용을 통한 억제 효과를 확인하였다. 따라서 이를 위하여 물결합재비 45%인 시험체에 대하여 메타카올린 및 플라이애쉬의 혼입량에 따른 단열온도상승시험을 실시하였다.

Fig. 7에 단열온도상승시험에 의한 단열온도상승량을 나타

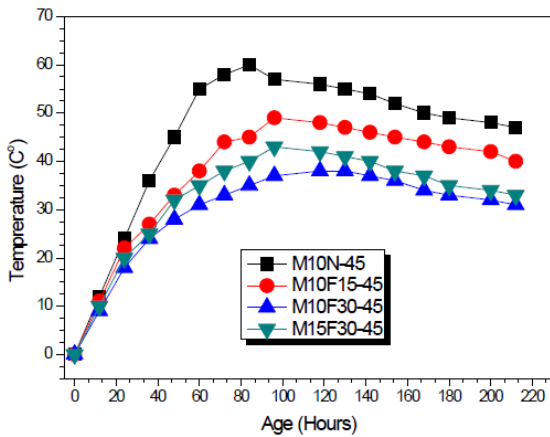


Fig. 7 Results of adiabatic temperature rise test

내었다. 결과로부터 메타카올린의 혼입량의 증가에 따라 단열온도는 상승하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 압축강도의 결과에서 확인한 바 메타카올린의 높은 비표면적 등에서 기인된 반응성의 결과로 판단된다. 이러한 초기의 빠른 반응은 초기강도의 향상에는 유리하지만 높은 수화열로 인하여 초기 온도균열의 가능성도 높으므로 이에 감소시키는 대책 또한 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이를 플라이애쉬의 사용을 통하여 유도하였는데 시험결과로부터 플라이애쉬의 사용으로 단열온도상승을 감소시켜 효과적인 것으로 나타났다. 물론 온도균열의 발생에는 온도이력, 구속조건 등의 여러 영향을 무시할 수 없기 때문에 이러한 부분을 충분히 고려해야 하지만 본 연구의 범위에서는 플라이애쉬 15% 정도의 혼입으로 이에 대하여 효과적 일 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 주로 메타카올린의 혼입에 따른 콘크리트 시험체의 내구성능 평가를 목적으로 하여 염화물확산계수 측정 시험 및 단열온도상승시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 물결합재비의 감소 및 메타카올린의 혼입률의 증가에 따라 유동성이 저하하였으나 플라이애쉬의 사용을 통하여 유동성이 개선됨을 확인하였다.
- (2) 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 동일 물결합재비의 무혼입 시험체와 비교하면, 특히 초기 재령에서 증가율이 높았으며, 혼입을 10%에서 가장 효과적 이었다.
- (3) 메타카올린의 혼입에 의한 염화물이온 침투저항성은

효과적인 것으로 판명되어 동일 물결합재비의 무혼입인 경우와 비교하면 염화물이온 확산계수는 약 50% 정도로 나타났다.

- (4) 메타카올린의 혼입율이 10%의 경우와 15%의 경우에는 염화물이온 확산계수의 차이가 크지 않으므로 경제적인 관점에서 메타카올린의 치환율은 10% 정도로 판단된다.
- (5) 메타카올린의 혼입으로 염화물이온 침투저항성을 확보면서 물결합재비를 크게 할 수가 있어, 단열온도상승의 억제 가능성이 높으며 초기균열의 발생 위험성을 저감하는 것이 가능하다고 판단된다.
- (6) 본 연구의 범위에서는 메타카올린 10% 정도의 혼입이 종합적인 측면에서 적절한 것으로 판단된다.

References

1. Kim, C. H., Kim, N. W., and Kim, S. D., (2013), Improvement of Durability in Concrete Structures Using CRM, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(6), 145-152 (in Korean).
2. Kim, N. W. (2008), A Study on the Evaluation of Durability of Fiber Reinforced Concrete according to the Change of External Conditions, *Journal of the Korean Society of Safety*, 23(5), 97-104 (in Korean).
3. Kim, N. W., Yeo, D. G., Song, J. H., and Bae, J. S. (2007), A Study on the Characteristic of Capillary Pore and Chloride Diffusivity by Electrical Difference of High-Strength Concrete using Metakaolin, *Journal of the Korean Concrete Institute*, 19(4), 499-506 (in Korean).
4. Lee, C. S., and Yoon, I. S., (2003), An Experimental Study on the Durability Performance for Ternary Blended Concrete Containing Both Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 7(1), 145-152 (in Korean).
5. Moon, H. Y., and Kim, B. K., (2004), Resistance of Chloride Penetration into High Strength Concrete Containing Mineral Admixtures according to Curing Conditions, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 8(2), 185-194 (in Korean).
6. Moon, H. Y., Kim, H. S., and Choi, D. (2003), The Characteristic of Capillary Pore and Chloride Diffusivity by Electrical Difference into Various Concrete, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 23(5-A), 969-976 (in Korean).
7. Moon, H. Y., Kim, Y. B., and Moon, D. J., (2005), Mechanical Properties and Resistance to Freezing and Thawing of the Recycled Aggregate Concrete with Metakaolin, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 9(4), 270-277 (in Korean).
8. Tang, L. (1992), Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development, *Magazine of Concrete Research*, 48(176), 173-179.

9. Tang, L., and Nilsson, O. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *American Concrete Institute Materials Journal*, 89(49), 46-59.

Received : 05/29/2014
Revised : 06/19/2014
Accepted : 06/26/2014

요 지

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 강도 향상을 위하여 혼입하고 있는 메타카올린의 내구성능 향상 효과를 규명하기 위하여 염화물이온 확산계수 및 단열온도상승량을 측정하였다. 그 결과, 메타카올린의 혼입으로 인하여 염화물이온 확산계수가 작아짐이 확인되었으며 플라이애쉬의 첨가를 통하여 유동성의 저하를 억제할 수 있었다. 따라서 염분침투저항성을 확보하면서 물결합재비를 크게 하는 것이 가능하므로 메타카올린의 혼입으로 발생하는 단열온도상승량을 억제할 수 있어 콘크리트의 내구성능이 향상될 수 있음을 확인하였다.

핵심 용어 : 메타카올린, 플라이애쉬, 내구성, 염화물이온 확산계수, 단열온도상승
