

Metakaolin 혼합 고강도 콘크리트의 내구특성 예측

Estimation on the Durability of High-Strength Concrete using Metakaolin

이 상 호*

문 한 영**

Lee, Sang-Ho

Moon, Han-Young

Abstract

Metakaolin is a cementitious material for producing high-strength concrete. This material is now used as substitute for silica-fume. In this paper, we did the mechanical and durability test such as compressive /tensile/flexural strength test, chloride ion diffusion, chemical attack and repeated freezing and thawing, carbonation test. In the mechanical tests, 10~15% for binder is optimum substitute rate. And, in the chloride ion diffusion test, according to the increase of substitute of metakaolin & silica-fume for binder, the diffusion coefficient was more reduced. In the chemical attack test, by the filler effect of fine powder such metakaolin and silica-fume, the resistance is more excellent than normal concrete. In the other durability test, the concrete using metakaolin also compared with those of silica-fume substitute concrete. Through these tests, we recognized that metakaolin can be used as a substitute for silica-fume.

요 지

메타카올린은 고성능 콘크리트를 제조하기 위해 콘크리트에 혼합재로서 사용되는 결합재의 일종이다. 이 재료는 일반적으로 국내에서는 내화벽돌의 재료로 많이 사용되었으나, 현재는 이러한 고성능 콘크리트를 제조하기 위하여 필요한 실리카흙의 대용으로 사용되어지고 있다. 본 연구는 실리카흙 및 메타카올린 두 결합재를 콘크리트 중에 일정량 치환하여 폴르타르 및 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 휨강도와 같은 역학적 시험뿐만 아니라, 염소이온확산시험, 화학침식에 대한 저항성 시험, 동결융해저항성 시험과 같은 내구성시험을 병행 실시하였다. 역학적 시험결과 메타카올린을 결합재전체 대비 10에서 15%정도 치환 사용했을 때 가장 적당한 강도결과를 보였다. 그리고, 메타카올린 및 실리카흙 두 결합재의 치환율이 증가할수록 염소이온확산이 훨씬 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 두 결합재의 미세분말에 의한 충전효과에 의해 일반 콘크리트에 비해 화학적침식저항성이 훨씬 뛰어남을 보였다. 다른 내구성 시험에서도 메타카올린을 사용한 콘크리트가 실리카흙을 사용한 콘크리트에 상응하는 상당한 역학적, 내구특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 이들 시험을 통해 우리는 메타카올린이라는 재료가 충분히 고가의 실리카흙을 대체가능할 수 있을 것이라고 판단할 수 있었다.

Keywords : Metakaolin, Mechanical/Durability test, Freezing/Thawing, Carbonation, Chloride ion diffusion, Chemical attack

핵심 용어 : 메타카올린, 역학적특성, 내구특성, 염화물 침투, 중성화, 동결융해, 산침식, 기기분석, 단열온도

* 대림산업(주) 기술연구소, 한양대학교 토목공학과 박사과정

** 한양대학교 토목공학과 교수

E-mail : sangho@daelim.co.kr 011-559-7337

•본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2005년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 구조물이 다양화 되면서 콘크리트의 작업성 및 내구성에 대한 관심이 크게 증가함에 따라 고강도, 고 내구성을 가지는 고성능 콘크리트에 대한 요구가 증대 되고 있다. 이러한 고성능 콘크리트를 제조하기 위한 수단으로 혼화제의 사용에 관한 연구가 활발히 진행되 어 왔으며, 지금까지 개발된 대표적인 혼화제로서는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙 등을 들 수 있다. 특히 실리카 흙을 혼합한 콘크리트는 강도나 내구성 면에서 우수하여, 고강도 콘크리트나 내화학성이 요구되는 콘크리트에 적극 활용되고 있다. 그러나, 실리카 흙은 다른 혼화재료에 비하여 단가가 높아 건 설비용이 크게 상승하므로 실리카 흙과 유사한 정도의 효과를 가지면서 경제적인 혼화재료로 메타카올린에 대한 연구가 주목받고 있다. 최근 메타카올린 관련 연구동향은 기초물성 및 역학적특성에 초점이 맞춰져 왔 으나, 본 연구논문은 내구성 및 고성능 콘크리트의 제 조/적용 쪽에 보다 더 비중을 둔 연구이다.

2. 시험개요

2.1 사용재료

결합제는 S사의 1종 보통 포틀랜드시멘트와 광물질 혼화제로 플라이애쉬(FA), 메타카올린(MK) 및 실리카 흙(SF)을 사용하였으며, 이들의 화학성분 및 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 세척사를, 굵 은 골재는 최대치수 20mm 부순 골재를 사용하였다. 또한 화학혼화제로 PNS계열 고성능AE감수제를 사용 하였다.

2.2 시험방법

(1) 콘크리트의 압축강도

콘크리트의 압축강도는 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 공시체 로 재령 1,3,7,28,56 및 91일에서 KS F 2405에 준 하여 시험하였다.

(2) 콘크리트의 염분침투 저항성

콘크리트의 염분침투 저항성 실험은 ASTM C 1202에 준하여 재령 28, 56, 91일에 측정하였으며, 총통과 전하량은 아래 식(1)과 같이 구하였다. 또한 Berke가 제안한 식 (2)로부터 염화물이온 확산계수를 산정하였다.

$$Q_{total} = 900 \times (I_0 + 2(I_{30} + I_{60} + \dots + I_{330}) + I_{360}) \quad (1)$$

$$D_{Berke} = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad (m^2/s) \quad (2)$$

(3) 모르타르의 산침식 저항성

압축강도용 모르타르 공시체 제작 28일 동안 수중 양생 후 2% 황산용액에 침지시켜, pH의 증가에 따라 황산용액을 약 일주간의 기간을 두고 교환하면서, 소 정의 압축강도를 KS L 5105에 의하여 측정하였으며, 압축강도 감소율은 다음 식(3)와 같이 계산하였다.

$$\text{압축강도감소율}(\%) = \frac{C_w - C_s}{C_w} \times 100 \quad (3)$$

여기서, C_w : 침지전 압축강도,

C_s : 침지후 압축강도

(4) 동결융해저항성 시험

KS F 2456(ASTM C 666)의 동결융해시험에 의 하여 300cycle까지 반복하여 상대 동탄성계수를 측정 하였다.

Table 1 Chemical and physical properties of binder

	Composition (%)							specific gravity	Blaine (cm/g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O		
NPC	21.95	6.59	2.81	-	60.1	3.32	-	3.15	3,112
FA	66.65	22.98	1.92	-	1.61	0.87	-	2.20	4,258
MK	56	37	2.4	0.2	2.4	0.3	0.9	2.63	120,000
SF	94.0	0.3	0.8	-	0.3	0.4	1.0	2.20	200,000

(5) 중성화시험

KS F 2596의 페놀프탈레인 지시약 법에 의하여 촉진 재령 7, 14, 28 및 56일에서 콘크리트에 대한 촉진 중성화 깊이를 측정하였다.

2.3 콘크리트의 배합

설계기준강도 60MPa, 배합강도 72MPa 슬럼프플로 우 50±5.0cm, 공기량 3.0±1.0%, 물-결합재비(W/B)를 25 %로 정한 콘크리트의 배합은 Table 2와 같다. 모든 콘크리트 배합에서 결합재 중량의 20%는 플라이애쉬로 치환하였다. 메타카올린과 실리카 흡을 각각 시멘트 중량에 대해서 5,10,15 및 20%로 혼합한 8배합과 광물질을 혼합하지 않은 콘크리트(기준콘크리트)의 배합으로, 나프탈렌계 고성능AE감수제는 결합재 대비 2.2% 사용하였다.

Table 2 Mix proportions of concrete

	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)							
			Binder				W	S	G	Chemical admixture
			C	FA	MK	SF				
Control	25	37	563	141	-	-	176	532	915	15.488
MK05	25	37	528	141	35	-	176	529	909	15.488
MK10	25	37	493	141	70	-	176	525	903	15.488
MK15	25	37	458	141	106	-	176	522	897	15.488
MK20	25	37	422	141	141	-	176	518	891	15.488
SF05	25	37	528	141	-	35	176	530	911	15.488
SF10	25	37	493	141	-	70	176	528	908	15.488
SF15	25	37	458	141	-	106	176	526	904	15.488
SF20	25	37	422	141	-	141	176	524	900	15.488

3. 시험결과 및 고찰

3.1 역학시험결과

콘크리트의 압축강도, 인장강도, 휨강도 시험결과를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 1~3이다.

Fig. 1은 메타카올린과 실리카흡을 결합재 대비 5~20% 치환하여 치환율에 따른 압축강도 발현정도를 확인하기 위해 재령 91일까지의 압축강도를 시험하였다.

재령 91일 까지 압축강도 시험결과, 메타카올린과 실리카흡을 각각 전체 결합재에 대하여 10~15% 치환율에서 목표강도 72MPa를 만족하는 것을 확인할 수

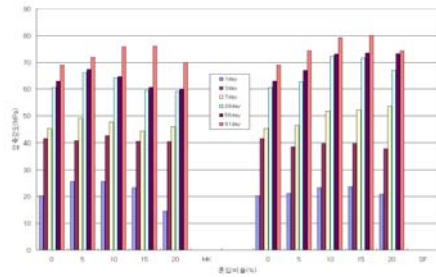


Fig. 1 The result of compressive strength test

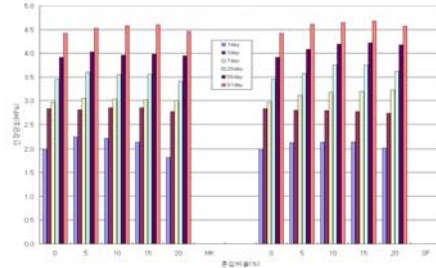


Fig. 2 The result of tensile strength test

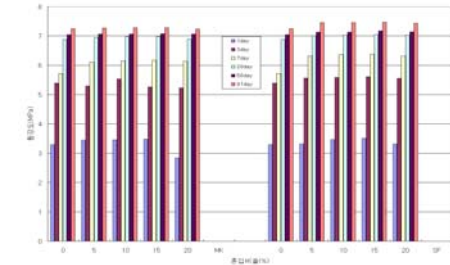


Fig. 3 The result of flexural strength test

있었으며, 15%에서는 강도증진효과가 있으나 20%에서는 강도발현이 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 다시 정리하면, 10%에서 15%치환율일때 가장 뛰어난 강도발현의 경향을 보이고 있고, 15%치환시 10%치환시에 비해 강도증진의 효과가 뛰어나지 않음을 알 수 있다. 따라서 메타카올린이 고가의 재료임을 감안하면 메타카올린의 최적 치환율은 10% 정도인 것으로 생각된다.

Fig. 2는 메타카올린과 실리카흡을 결합재 대비 5~20% 치환하여 치환율에 따른 인장강도 발현정도를 확인하기 위해 재령 91일까지의 인장강도를 시험하였다. 시험결과, 메타카올린과 실리카흡을 각각 전체 결합재에 대하여 10~15% 치환율에서는 치환율이 증가할수

록 강도가 증진되는 경향을 보였으나, 20%를 치환할 경우 오히려 강도가 감소하는 경향을 보였다. 인장강도는 압축강도대비 약 6/100 정도의 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. 압축강도의 발현경향과 마찬가지로 치환율 10%를 넘어서게 되면 효율이 떨어지기 때문에 경제성을 감안하면 메타카올린의 최적 치환율은 10% 정도인 것으로 생각된다.

Fig. 3은 치환율에 따른 휨강도 발현정도를 확인하기 위해 재령 91일까지의 휨강도를 나타내었다. 시험결과, 메타카올린과 실리카흙을 각각 전체 결합재에 대하여 10~15% 치환율에서는 치환율이 증가할수록 강도가 증진되는 경향을 보였으나, 20%를 치환할 경우 오히려 강도가 감소하는 경향을 보였다. 휨강도는 압축강도대비 약 10/100 정도의 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.2 콘크리트의 염분침투 저항성

콘크리트의 종류별 확산계수 시험결과를 정리하여 나타낸 것이 Fig. 4이다.

혼화재료의 치환율이 증가할수록 확산계수값은 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 압축강도와는 달리 치환율이 20% 이상 증가하여도 분말도가 큰 특성 때문에 콘크리트의 공극을 충전하는 filler 효과에 의하여 염분침투에 대한 저항성이 증가되었다고 생각된다.

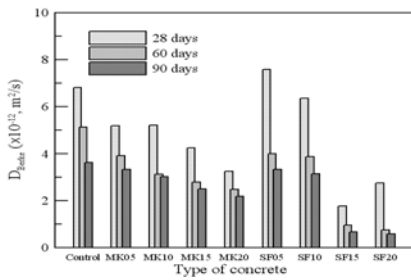


Fig. 4 The result of chloride ion diffusion test

3.3 모르타르의 산침식 저항성

모르타르 공시체를 2% 황산용액에 침지시켜 압축강도 감소율을 비교하였다. 메타카올린과 실리카 흙이

치환되지 않은 상태보다 강도감소율이 상당량 감소함을 확인할 수 있었다. 56일 압축강도에서 메타카올린을 15% 치환시 실리카흙 15%치환시에 비해 약 20% 정도로 큰 압축강도 감소율의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 실리카흙 치환 모르타르에 비해 산침식 저항성이 떨어짐을 알 수 있다.

3.4 동결융해 저항성

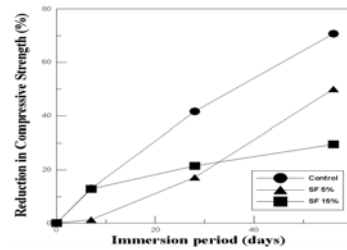
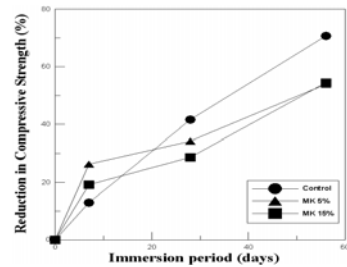


Fig. 5 Reduction in com. strength

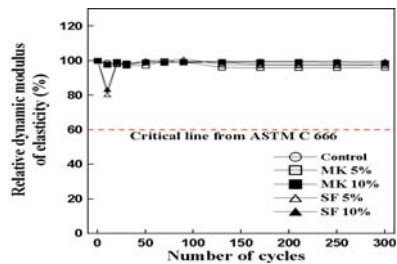


Fig. 6 Dynamic modulus of Elasticity

메타카올린과 실리카 흙 혼합 고강도 콘크리트의 동결융해 특성을 나타낸 것이 Fig. 6이며, 이때 배합은 혼화재료를 치환하지 않은 Control 배합과, MK와 SF를 각각 5, 10% 치환한 5배합에 대해 물-결합재

비 25%에 대해 시험을 실시하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 300cycle까지는 5가지 종류 콘크리트의 상대탄성계수에는 거의 변화가 없었다. 그 이유는 물-결합재비가 25%로 낮은 고강도콘크리트에 기인되었다고 생각된다. 본 실험연구의 범위에서는 메타카올린 혼합 콘크리트의 동결융해 저항성도 실리카 흙 혼합 콘크리트에 상응하는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

3.5 중성화 깊이

Fig. 7에서 메타카올린 치환 콘크리트의 중성화 깊이는 치환율 5 및 10%에서는 기준 콘크리트와 비교하여 재령 28일 까지는 평균 20~30% 큰 반면, 재령 56일에서는 치환율 5%에서 40%, 치환율 10%에서 70%정도 큼을 알 수 있다. 한편 치환율 15 및 20%에서는 재령에 관계없이 100~370% 정도로 상당히 중성화 깊이가 증가함을 나타내었다.

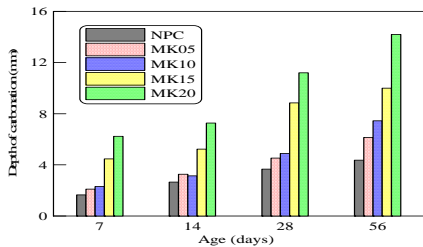


Fig. 7 Depth of carbonation(MK)

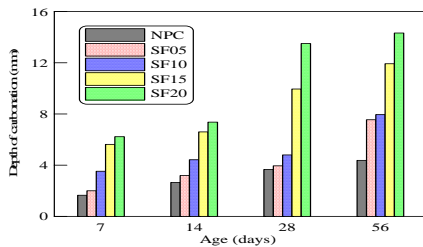


Fig. 8 Depth of carbonation(SF)

Fig. 8에서 실리카흙을 치환한 콘크리트의 경우도 메타카올린을 치환한 콘크리트와 마찬가지로 재령 및 치환율에 관계없이 콘크리트의 중성화 깊이가 상당히 크게 나타났다. 메타카올린 및 실리카흙 두 종류의 광

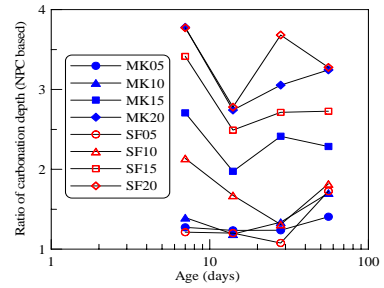


Fig. 9 Ratio of depth of carbonation

물질 혼화재를 혼합 사용한 콘크리트의 탄산화 특성은 치환율이 증가할수록 중성화 깊이가 크게 증가함을 알 수 있었다. 두 종류의 광물질 혼화재 치환율에 대하여 각 재령에서 측정된 기준 콘크리트의 중성화 깊이를 1로 놓고 상대 비교를 하여 나타낸 것이 Fig. 9이다. 이 그림에서 재령 7일에 측정된 중성화 깊이 결과가 가장 크며, 재령 14일에서 중성화 깊이의 상대 비교값이 가장 작음을 알 수 있으며, 광물질 혼화재의 종류에 상관없이 치환율이 증가할수록 중성화 깊이가 또한 증가한다.

3.6 기기분석결과

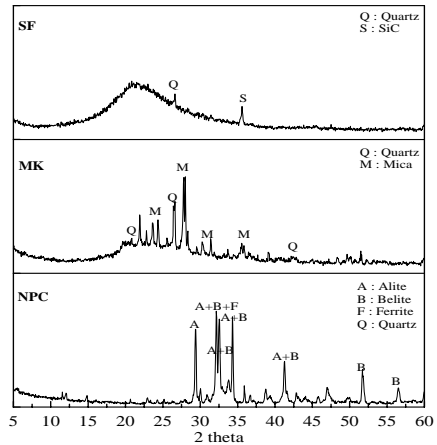


Fig. 10 시멘트 & 혼화재의 XRD 회절패턴

3.6.1 시멘트 및 광물질 혼화재의 XRD 분석결과
보통포틀랜드시멘트 및 광물질 혼화재인 메타카올린과 실리카흙의 결정학적 특성을 파악하기 위하여 XRD

회절분석을 실시한 결과를 Fig.10에 정리하여 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트의 경우 Alite, Belite, Ferrite 상 등 주요 광물질의 결정피크 등이 확인되었으며, 실리카함의 경우는 대부분이 비정질의 SiO₂와 소량의 결정질 SiO₂ 및 SiC로 구성되어 있음을 알 수 있다. 메타카올린은 실리카 함과 유사한 범위의 비정질 물질과 더불어 결정질의 SiO₂ 및 Mica 성분으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

3.6.2 수화생성물의 XRD 및 SEM 분석결과

보통포틀랜드 시멘트 및 메타카올린과 실리카함을 각각 5, 10, 15, 20% 혼합한 시멘트 페이스트를 대

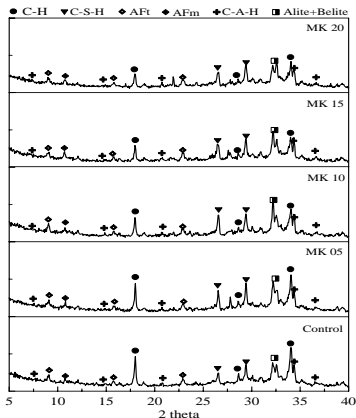


Fig. 11 MK 치환율에 따른 수화생성물

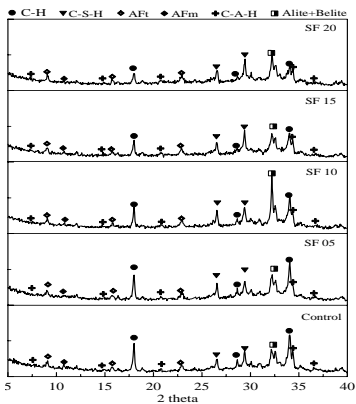


Fig. 12 SF 치환율에 따른 수화생성물

상으로 재령 28일에서 측정한 XRD분석결과를 정리한 것이 Fig. 11 및 Fig. 12이다.

Fig. 11은 메타카올린을 각각 5, 10, 15, 20% 치환한 시멘트 페이스트를 대상으로 한 수화생성물의 XRD분석결과를 나타낸 것으로 치환율이 증가할수록 CH의 결정피크는 감소하는 반면, C-S-H의 피크와 메타카올린의 수화생성물인 C-A-H피크가 증가한다

Fig. 12는 실리카함을 각각 5, 10, 15, 20% 치환한 시멘트 페이스트를 대상으로 한 수화생성물의 XRD분석결과를 나타낸 것으로 치환율이 증가할수록 CH의 결정피크는 감소하는 반면, C-S-H의 피크가 증가함을 알 수 있다.

이들 분석결과로부터 메타카올린은 실리카함과 유사한 포졸란 재료로써, 수화생성물인 CH와 반응하여 C-S-H 및 C-A-H를 생성함을 알 수 있다.

Fig. 13 ~ 15는 각각 NPC, 메타카올린 10% 치환, 실리카함 10% 치환한 상태의 SEM 및 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 메타카올린이 치환될 경우 C-S-H 및 C-A-H가 주요 수화생성물로 나타났다.

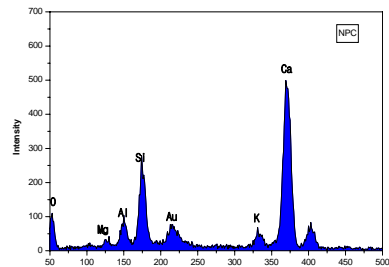
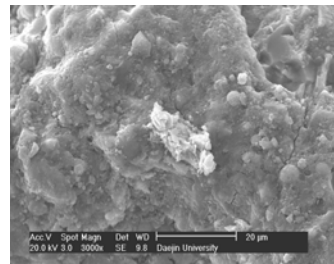


Fig. 13 NPC 수화생성물의 SEM/EDS 분석결과

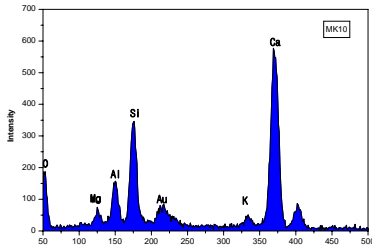
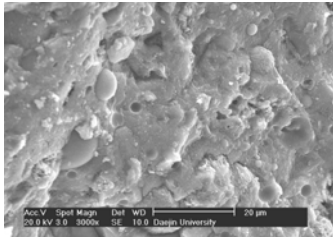


Fig. 14 MK10 수화생성물의 SEM/EDS 분석결과

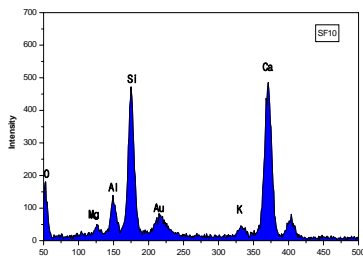
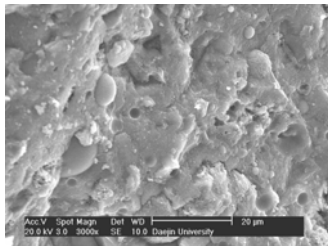


Fig. 15 MK10 수화생성물의 SEM/EDS 분석결과

3.7 단열온도상승시험

메타카올린의 수화 발열특성을 고찰하기 위한 온도
응력전산해석 과정의 열적특성치에 대한 Input Data

를 확보하기 위하여, NPC, 메타카올린 10%치환 및 실리카흙 10%치환의 3개의 배합에 대한 단열온도상승시험을 실시하였다. Fig. 16은 단열온도 상승시험 결과를 도시한 것이다.

단열온도상승식은 실험식으로써 단열온도상승량을 재령의 함수로 표시하는 여러 식들이 제안되어 있다. 일반적으로 콘크리트 단열온도상승은 식(4)와 같은 지수형태의 함수로 나타내며, 최대 단열온도 상승값(K)과 반응속도(a)로서 단열온도상승 특성을 나타낸다.

$$T = K [1 - e^{-at}] \quad (4)$$

여기서, T : 시간 t에서의 단열온도상승값(°C)

K : 최대 단열온도상승값(°C)

a : 반응속도 정수

t : 재령(일)

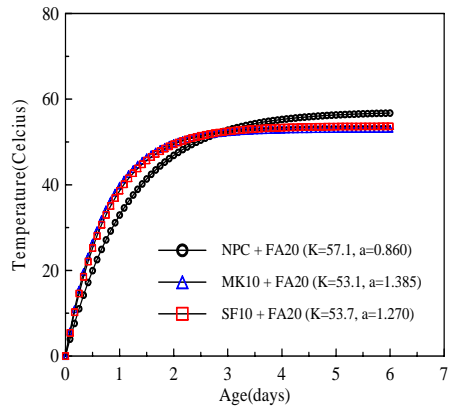


Fig. 16 단열온도상승시험결과

재령 6일까지 실시한 3종류 배합에 대한 콘크리트의 단열온도 상승 시험결과, NPC+FA20의 경우 최대 온도상승량은 재령 6일에서 57.1°C로써 가장 컸으며, 상대적으로 MK10+FA20 및 SF10+FA20배합은 NPC+FA20보다 낮은 53.1°C 및 53.7°C를 나타내어 NPC배합보다 유리함을 알 수 있다. 반면, 반응속도정수(a)는 MK10+FA20 및 SF10+FA20이 각각 1.385 및 1.270으로써 NPC+FA20의 0.860보

다 상대적으로 빠르며, 이는 강도발현의 속도가 빠르다는 것을 의미한다.

4. 결 론

초고강도 및 고내구성 콘크리트를 제조하기 위하여 혼화재료로 메타카올린을 사용하여 역학 및 내구성시험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메타카올린과 실리카흙을 치환하여 W/B 25%에서 목표강도인 72MPa를 상회하는 것을 확인할 수 있었다. 두종류 혼화재의 치환율이 15%까지는 압축, 인장, 휨강도의 증진효과가 있었다. 치환율 20%에서는 오히려 강도발현정도가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 15%치환시 10%치환에 비해 강도증진의 효과가 뛰어나지 않아, 고가의 메타카올린 재료를 감안하면 적정치환율은 10% 정도로 판단된다.
- 2) ASTM C 1202에 의한 염분침투저항성 시험결과, 혼화재료의 치환율이 증가할수록 확산계수값은 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Blaine값이 큰 특성 때문에 콘크리트의 공극충진효과에 의해 염분 침투저항성이 증가되었다고 사료된다.
- 3) 모르타르의 산침식저항성 시험결과, 56일 압축강도에서 메타카올린을 5%와 15% 치환할 경우 압축강도 감소율이 비슷한 결과를 나타냈으며, 실리카 흙 치환 콘크리트에는 못 미치지만 좋은 성과를 얻을 수 있었다.
- 4) 동결융해저항성 시험결과, 300cycle이 경과한 후에도 상대동탄성계수의 변화의 거의 없었고, hair line 균열의 발생도 거의 찾아볼 수 없었다. 실리카흙 치환 콘크리트에 상응하는 좋은 결과를 얻을

수 있었다.

- 5) 중성화시험결과, 광물질 혼화재의 종류와는 상관없이 치환율이 증가할수록 중성화깊이 또한 증가함을 확인할 수 있었다.
- 6) 기기분석결과, 메타카올린은 실리카흙과 유사한 범위의 비정질 물질과 더불어 결정질의 SiO₂ 및 Mica성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고, C-S-H 및 C-A-H의 주요 수화생성물을 확인하였다.

참고문헌

1. E. Moulin, P. Blanc and D. Sorrentino, "Influence of Key Cement Chemical Parameters on the Properties of Metakaolin Blended Cements", Cement Concrete Composites, 23. 2001, pp 463 ~ 469.
2. D.M. Roy, P. Arjunan and M. R. Silsbee, "Effect of Silicafume, Metakaolin, and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete", Cement and Concrete Research, 31. 2001, pp. 1809 ~ 1813.
3. Advanced Cement Technologies, LLC, "Physical Chemical Properties", Technical report-10. 100, 2001.
4. 이종근, 무기재료원료공학, 반도출판사, 1995, pp 41 ~ 51.
5. 김용태, 안태호, 강범구, 이정율, 김병기, "콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린의 기초적인 특성연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표 논문집, 2001, pp. 281 ~ 286.
6. 안태호, 김용태, 강범구, 김병기, "혼화제종류에 따른 메타카올린 콘크리트의 특성", 한국콘크리트학회 봄 학술발표 논문집, 2002, pp. 539 ~ 544.

(접수일자 : 2005년 1월 28일)