

실리카폼을 사용한 매스콘크리트의 수화열과 자기수축 특성

Hydration heat and autogenous shrinkage properties of silica-fume included mass concrete

김진용* 김진근**
Kim, Chin Yong Kim, Jin Keun

ABSTRACT

Adiabatic temperature rise and autogenous shrinkage experiments were performed for three silica-fume included mass concrete mixtures and a reference mixture without silica-fume, in order to investigate the influence of silica-fume on the hydration heat and autogenous shrinkage properties of mass concrete, and to examine applicability of silica-fume to mass concrete. It was revealed from the experiment that, for mass concrete, the rate of hydration was hardly increased while the maximum adiabatic temperature rise decreased about 5°C by the addition of silica-fume, and the amount of autogenous shrinkage was almost the same regardless of silica-fume replacement. These facts imply that silica-fume can enhance the resistance of mass concrete to temperature cracking as well as the durability.

요 약

물/결합재비가 0.4이면서 5%의 실리카폼이 혼입된 3가지 매스콘크리트 배합과 실리카폼이 혼입되지 않은 1가지 매스콘크리트 배합에 대해 단열온도상승실험과 자기수축실험을 실시하여 실리카폼이 매스콘크리트의 수화발열특성과 자기수축에 미치는 영향을 규명하고, 그 결과를 통해 실리카폼의 매스콘크리트에 대한 적용 가능성을 검토하였다. 실험결과, 매스콘크리트 배합의 경우에는 실리카폼을 혼입하여도 수화반응속도가 거의 증가하지 않으면서 최종단열온도상승량이 5°C 정도 감소하는 것으로 나타났다. 콘크리트의 극한자기수축량은 실리카폼의 혼입여부에 상관없이 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 실무에서 매스콘크리트 구조물의 시공에 실리카폼을 적용하면 내구성뿐만 아니라 수화열 균열 제어에도 이점이 있을 것으로 판단된다.

* 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후과정

** 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

1. 서 론

이제까지는 콘크리트에 실리카폼을 혼입하면 수화반응속도가 빨라져 단열온도상승속도가 증가하고 수화반응에 의한 자기수축량도 증가한다는 인식 때문에 수화열 문제가 발생하는 매스콘크리트 구조물에 실리카폼을 사용하지 않는 것이 일반적이었다. 그러나 실리카폼을 혼입하는 것이 콘크리트의 내구성을 크게 향상시킨다는 점을 감안하면, 해안가에 지하철 선로를 시공하는 경우와 같이 타설 초기의 수화열 문제뿐만 아니라 장기 재령의 내구성 문제를 동시에 고려하여야 하는 경우에도 무조건 실리카폼의 사용을 제한하는 것은 바람직하지 않다. 이 연구의 목적은 실리카폼의 매스콘크리트에 대한 적용 가능성을 검토하기 위한 것으로서, 이를 위해 실리카폼이 사용된 매스콘크리트의 수화발열 특성과 자기수축 특성에 대해 알아보았다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료 및 배합설계

표1은 실험에 사용된 재료와 각 재료의 특성을 정리한 것이다. 이 연구에서는 일반적인 매스콘크리트 배합(기준배합)과 실리카폼이 혼입된 3가지 배합에 대해 초기재령에 단열온도상승실험과 자기수축실험을 실시하여 각 배합의 수화열 특성과 자기수축 특성에 대해 검토하였으며, 실험에 사용된 배합은 표2에 나타낸 것과 같다. 표에서 'Ref.'로 표시된 배합은 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 3성분계 매스콘크리트 배합이며, Mix I ~ Mix III은 실리카폼 적용을 위해 다양하게 선택된 배합으로서 특히 Mix III은 기준 배합에서 OPC의 일부만 실리카폼으로 대체한 배합이다(OPC의 10%를 실리카폼으로 대체).

표1. 사용 재료

재료명	재료 종류	비중	재료명	재료 종류	비중
실리카폼	엘켄사 920D	2.2	슬래그파우더 (S/P)	기초소재	2.90
혼화제	ROADCON-PEMA-SR3000F	-	플라이애쉬 (F/A)	태안화력발전소	2.2
시멘트 (OPC)	한일시멘트	3.15	잔골재 (S)	당진산 세척사	2.6
슬래그시멘트 (S/C)	한국슬래그 시멘트	3.05	굵은골재 (G)	비봉산 부순골재 (25mm)	2.65

표2. 배합설계

구분	W/C	S/A	단위재료량(kg/m ³)									
			W	C	S/C	S/P	F/A	S/F	S	G	혼화제	사용량
Ref.	39.9	47	155	194	-	116	78	-	816	931	2.13	0.5%
Mix I	39.9	47	155	-	272	-	97	19	810	924	2.72	0.7%
Mix II	39.9	47	155	252	-	-	116	19	811	925	2.72	0.7%
Mix III	39.9	47	155	175	-	116	78	19	813	927	2.72	0.7%

2.2 실험 방법

단열온도상승실험은 대전에 위치한 한국전력연구원에 의뢰하여 각 배합별로 1회씩 실시하였으며, 자기수축실험은 그림1과 같은 장치를 사용하여 타설 직후에는 LVDT와 매립게이지에서 동시에 자기수축량을 측정하다가, 타설 7일 후에 장치를 탈형하고 매립게이지를 통해서만 자기수축량을 측정하였다. 탈형 후에는 건조수축이 발생되지 않도록 그리스와 비닐랩으로 실험체를 완전 밀봉하였으며, 온도 변화에 의한 영향을 배제할 수 있도록 온도 및 습도 조절이 가능한 항온항습조 내부에서 자기수축실험을 수행하였다.

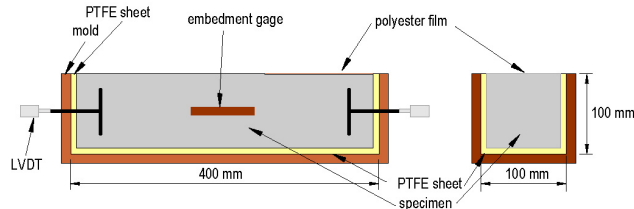


그림1. 자기수축 실험장치

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단열온도상승실험 결과

각 배합별 실험결과를 회귀분석하여 최종단열온도상승량(Q_{∞})과 수화반응속도(r)를 계산하였다. 이 때 사용된 모델식은 콘크리트표준시방서에 제시된 수식에 수화반응지연기간(t_0)이 추가로 고려된 다음과 같은 수식을 사용하였다.^{1),2)}

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)}) \quad (1)$$

그림2, 표3은 회귀분석 결과와 회귀분석으로 구한 단열온도상승 특성들을 각각 정리한 것으로서, 실리카폼을 혼입한 경우가 기준배합보다 최종단열온도상승량은 5°C 정도 작지만 수화반응속도가 최대 1.6배까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 기준배합에서 OPC의 일부분을 실리카폼으로 대체한 Mix III의 경우는 최종단열온도상승량뿐만 아니라 수화반응속도도 기준배합보다 더 작은 것으로 나타나 Mix III이 수화열 균열 제어에서 기준배합보다 더 우수한 것을 알 수 있다.

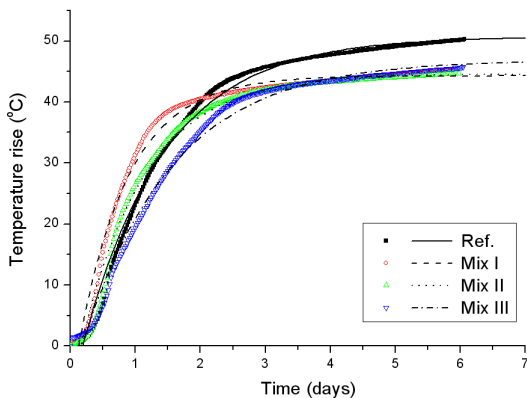


그림2. 단열온도상승실험 및 회귀분석 결과

표3. 단열온도상승 특성

	Ref.	Mix I	Mix II	Mix III
Q_{∞}	50.7	44.3	44.6	46.9
r	0.788	1.29	1.01	0.715
t_0	0.190	0.125	0.161	0.173

3.2 자기수축실험 결과

그림 3은 각 배합별 자기수축실험 결과와 이를 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 회귀분석에는 Bazant가 제안한 B3 모델의 자기수축식을 기본으로 구성된 아래의 식(2)를 사용하여 자기수축 거동을 묘사하였다.^{3),4)} 표4의 자기수축 특성을 살펴보면 모든 배합에서 극한자기수축량이 51~55 μ 정도로 유사하나, Mix II와 Mix III의 극한자기수축량이 기준 배합과 Mix I에 비해 3~4 μ 정도 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 이러한 차이는 극한자기수축량에 비해 무시가능한 수준이고(극한자기수축량의 7% 미만) 극한자기수축량 자체도 작기 때문에(일반적인 극한건조수축량의 7% 미만, 최대온도 변형량의 10% 미만), 배합별 자기수축거동의 차이가 구조물의 전체적인 온도균열 거동에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 예상된다. 즉, 물/시멘트비가 0.4인 매스콘크리트 배합에는 실리카폼을 혼입하여도 자기수축량에 변화가 없다고 간주할 수 있을 것으로 판단된다.

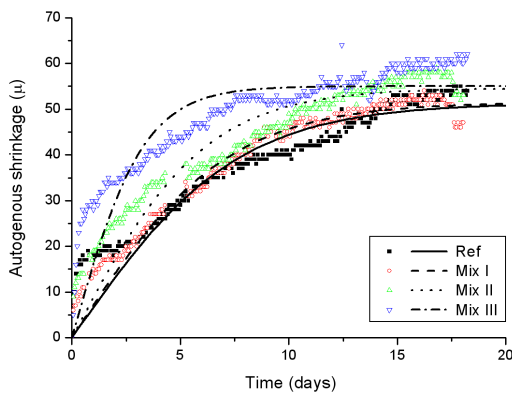


그림3. 자기수축실험 및 회귀분석 결과

$$\epsilon_a(t) = \epsilon_{a\infty} \tanh\left(\frac{t-t_s}{\tau_a}\right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_{a\infty}$: 극한자기수축량

τ_a : half time (일)

t_s : 시멘트 최종 응결시간 (일)

표4. 자기수축 특성

	Ref.	Mix I	Mix II	Mix III
$\epsilon_{a\infty}$ (μ)	51.3	51.5	54.6	55.0
τ_a (일)	7.6	7.1	6.1	3.3

4. 결 론

- 1) 물/결합재비가 0.4인 4가지 매스콘크리트 배합에 대해 단일온도상승실험을 실시하고 수화반응 지연기간을 고려하여 각 배합의 단일온도특성을 분석한 결과, 실리카폼을 혼입하여도 수화반응속도가 거의 증가하지 않으면서 최종단열온도상승량은 실리카폼을 혼입한 경우가 오히려 5°C 정도 더 작은 것으로 나타났다.
- 2) 물/결합재비가 0.4인 4가지 매스콘크리트 배합에 대해 자기수축실험을 실시하고 B3 모델을 사용하여 자기수축 특성을 분석한 결과, 콘크리트의 극한자기수축량은 실리카폼의 혼입여부에 상관없이 거의 동일한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 콘크리트 표준시방서 해설, 한국콘크리트학회, 2003, pp. 268.
2. 일본토목학회, “最新のマスコンクリート技術-14”, 콘크리트技術シリーズ, 1996.
3. Z. P. Bazant, S. Baweja, “Justification and Refinement of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage”, Materials and Structures, V. 28, 1995, pp. 488-495.
4. Z. P. Bazant, S. Baweja, “Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage, 1. Statistics and Sensitivity”, Materials and Structures, RILEM, V. 28, 1995, pp. 415-430.