

설계강도 40N/mm² 매스콘크리트인 전이층보의 수화열 해석을 통한 온도 균열 제어에 관한 연구

A Study on the Temperature Crack Control for Analysis of Hydration Heat of Mass Concrete Transfer Girder with Design Strength 40N/mm²

이종석* 김주상* 강연우** 김재환*** 이상수**** 송하영****
 Lee, Jong-suk Kim, Ju-Sang Kang, Youn-Woo Kim, Jae-Hwan Lee, Sang-Soo Song, Ha-Young

Abstract

In order to select the optimum mix for the required fluidity and strength of mass concrete which is applied to transfer girder and to choose the optimum curing method depending on circumstances through hydration heat analysis of mass concrete, this study examined slump flow, air content and elapsed variation (0, 30, 60, 90) in unhardened concrete properties and reviewed compressive strength characteristics in hardening properties. And hydration heat analysis results through simulation are as follows:

- 1) Fluidity changes of unhardened concrete showed no significant difference, and those of elapsed variation also showed no difference but a bit of tendency to increase in comparison with the initial properties.
- 2) The higher the water-binder ratio was, the lower the compressive strength properties were, and the higher the fly ash replacement rate was, the lower the compressive strength development was.
- 3) In case of $F_c=40N/mm^2$, the optimum mix was fly ash replacement rate of 15% from water-binder ratio of 33.0%.
- 4) Hydration heat analysis results showed that in case of bundle cast, concrete temperature profile characteristics around transfer girder was unfavorable, and in case of separate cast, constant curing for at least seven days guaranteed thermal cracking index of 1.2.

키워드 : 매스콘크리트, 전이층보, 온도균열, 수화열

KeyWords : Mass Concrete, Transfer Girder, Temperature Crack, Hydration Heat

1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 대형화, 초고층화, 고강도화 및 시공방법의 발전에 따라 대량 급속 시공의 증가에 의해 수화열에 의한 온도균열 문제가 큰 관심사로 부각되고 있고, 또한 콘크리트에 과도한 수화열 발생에 따른 온도균열 문제가 콘크리트 품질확보에 있어 많은 문제점으로 대두 되고 있다.

실제 구조물의 설계 및 시공시 이러한 수화열에 의한 온도응력은 무시할 수 없는 영향을 일으키는 경우가 빈번히 일어나고 있다. 온도균열은 일반적으로 그 폭이 크고, 구조물을 관통하게 되어 구조물의 시공초기에 발생하여 구조물의 수밀성, 내구성 및 미관에 영향을 주므로 시공 및 관리 단계에서 각별히 주의가 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 전이보에 적용하는 매스콘크리트의 소요 유동성 및 강도를 위한 최적배합을 선정하고 매스콘크리트

의 수화열 해석을 통해 현장여건에 따라 최적인 양생방법을 선정하는 것에 목적을 두었다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타낸 바와 같이 배합조건별 매스콘크리트의 특성을 검토하기 위하여 설정하였다.

표 1. 실험계획

항 목		조 건
물-결합재비(%)		31.0, 33.0, 35.0, 37.0
단위수량(kg/m ³)		165
혼화제 (플라이애쉬)		FA0, FA5, FA10, FA15
시험 항목	굳지않은 콘크리트	슬럼프 플로우 경시(0, 30, 60, 90분)
	굳은 콘크리트	압축강도(3, 7, 14, 28일)

본 실험에서 매스콘크리트의 수화열, 유동성 및 강도측면을 고려하여 굵은골재 최대치수 25mm를 선정하여 실시하였고, 물-

* 정회원, 한밭대학교 공과대학 건축공학과 대학원, 석사과정

** 정회원, 대우자동차판매(주) 건설부문, 과장

*** 정회원, 한밭대학교 공과대학 건축공학과 겸임교수, 공박

**** 정회원, 한밭대학교 공과대학 건축공학과 교수, 공박

결합재비 31.0, 33.0, 35.0, 37.0(%)의 4수준, 단위수량 165(kg/m³), 유동성 및 강도를 고려하여 혼화재료로는 플라이애쉬를 선정하였으며, 치환율 0, 5, 10, 15(%)의 4수준으로 검토하였다.

2.2 사용재료

본 연구의 사용된 재료와 물리적 성질은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2. 사용재료

사용재료		물리적 성질
시멘트		보통포틀랜드 시멘트, 분말도 3,264cm ² /g, 강열감량 1.6%
플라이애쉬		보령산 F급, 분말도 3,681cm ² /g, 강열감량 3.6%
골재	잔골재	혼합사 (강:50, 부:50), 조립율 2.70, 표면비중 2.55, 흡수율 1.50%
	굵은골재	부순자갈, 조립율 6.89, 표면비중 2.67, 흡수율 0.97%
고성능감수제		플리카르본산계, 비중 1.10

3. 실험방법 및 콘크리트 배합

3.1 실험방법

본 연구의 실내배합시험은 팬형 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료누입은 단위결합재량이 많은 매스콘크리트이기 때문에 재료의 균질성을 위하여, 선모르타르 방법을 사용하였다. 비빔 시간은 30초간 건비빔을 실시하였으며, 모르타르 비빔 60초, 콘크리트 비빔 150초로서 총 240초로 하였다. 또한, 낮은 물-결합재비와 과도한 점성에 기인한 시공성 저하요인을 보완할 목적으로 고성능 감수제를 사용하였다.

굳지않은 콘크리트에 대한 재료의 분리저항성과 충전성을 고려하여 슬럼프 플로우 시험을 선정하였으며, KCI CT-103, JASS 5T-503 및 JSCE-F 503, 공기량 시험은 KS F 2421의 시험 방법에 따라서 실시하였다.

3.2 콘크리트 배합

매스콘크리트의 최적 배합조건을 도출하기 위하여 충전성 및 유동성 등을 만족하기 위해 선정된 플레인 콘크리트의 배합 조건은 표 3과 같다.

표 3. 고강도콘크리트의 배합표

물-결합재비(%)	잔골재율(%)	단위수량(kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)				고성능감수제(%)
			시멘트	강모래	부순모래	굵은골재	
31.0	46.5	165	532	379	379	931	1.1
33.0			500	389	389	937	
35.0			471	394	395	950	1.0
37.0			446	399	399	961	

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지않은 콘크리트의 성상

그림 1은 매스콘크리트의 유동성을 알아보기 위한 것으로, 슬럼프 플로우를 플라이애쉬 치환율에 따른 유동성의 변화는 커다란 차이를 보이지 않았다. 또한, 경시변화에 따른 유동성은 시간이 경과됨에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으나 그 수준은 미미하였다.

한편, 물-결합재비에 따른 유동성은 60cm를 상회하고 있으므로, 소요 슬럼프 플로우 성능에서 만족하는 경향을 나타내었다.

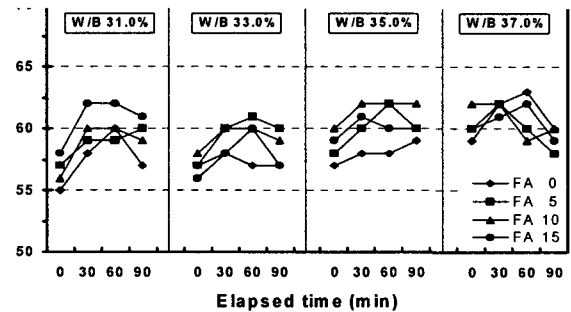


그림 1. 물-결합재비별 슬럼프플로우 시험결과

4.2 굳은 콘크리트의 성상

그림 2는 경화 콘크리트의 종류별 물-결합재비 및 플라이애쉬 치환율 변화에 따른 재령별 압축강도 발현 성상을 나타낸 것이다. 물-결합재비가 높을수록 낮은 압축강도 성상을 나타내고 있으며, 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 낮은 압축강도 발현을 나타냈다. 이는 플라이애쉬의 포졸란반응에 인한 강도증진성상이 장기재령에서 일어나기 때문이라 판단된다.

본 연구의 실내시험을 종합한 결과, 설계강도 40N/mm²(배합강도 48N/mm²-할증계수1.2적용)를 만족하는 배합조건은 물-결합재비 33.5%와 플라이애쉬 치환율이 15%의 경우가 최적의 배합에 가까운 것이라 판단된다.

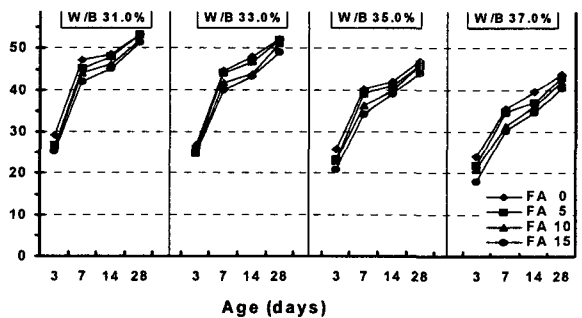


그림 2. 물-결합재비별 압축강도 시험결과

5. 전이층보의 수화열 해석

5.1 수화열 해석을 위한 부재 모델링 및 입력조건

해석대상 부재는 매트기초로서 표 4에 부재 모델링의 개요를 나타냈다.

표 4. 부재 모델링의 개요

항목	부재크기(m)	두께(m)	설계기준강도(N/mm ²)	사용재료	비고
전이층보	5.75(L)×2.50(W)	3.5	40	OPC+FA15%	-

본 해석에 적용된 콘크리트의 배합은 표 5와 같고 이에 따른 기본 입력 데이터는 표 6과 같다.

표 5. 콘크리트 배합표

배합조건	물-결합재비(%)	잔골재율(%)	단위수량(kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)				고성능감수제
				시멘트	플라이애쉬	잔골재	굵은골재	
W/B33.5-F15 (전이보)	33.5	46.5	165	420	74	768	926	5.43

콘크리트의 최고상승온도 (K) 및 상승속도 (a)는 각종 시공여건 및 타설온도 등에 따라 크게 상이하게 되므로 이에 대한 정확한 평가가 이루어져야 하며, 본 수화열 해석에서는 상기의 배합조건을 바탕으로 콘크리트 표준시방서를 참고하여 최고상승온도 (K) 및 상승속도 (a)를 산정하였다.

표 6. 수화열 해석을 위한 입력 Data

재료의 물성	사용재질	콘크리트
비열(kcal/kg°C)		0.25
밀도(kg/m ³)		2,500
열전도율(kcal/mh°C)		2.30
열전달률(kcal/mh°C)	노출/살수	12.0
	시트(Blue sheet)	6.0
	양생매트	5.0
	양생매트+Blue sheet	2.5
외기온도(°C)		8.3
콘크리트 온도(°C)		15
91일 압축강도(MPa)		40
압축강도 발현계수		a=4.5, b=0.95
91일 탄성계수(kgf/cm ²)		Auto calculation
발열합수		K=42, α=0.351

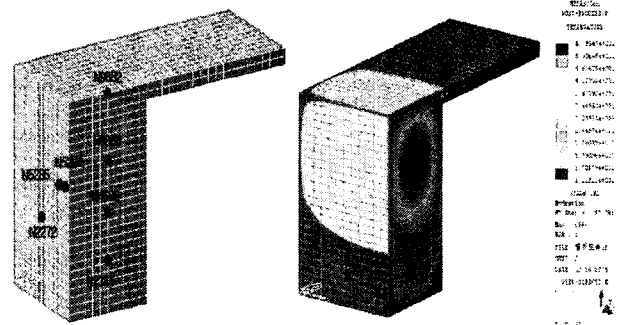
5.2 수화열 해석 결과

5.2.1 노출 살수 양생한 경우

본 연구에서는 전이층보의 콘크리트 타설을 분할타설로 하였을 때 콘크리트 타설 후 대기의 노출 살수 양생한 경우에 대하여 적용하였으며, 수화온도 및 각 절점의 온도이력과 온도균열 지수를 평가하고자 하였고, 그림 3(a)는 해석에 사용된 전이층보의 절점번호를 나타냈다.

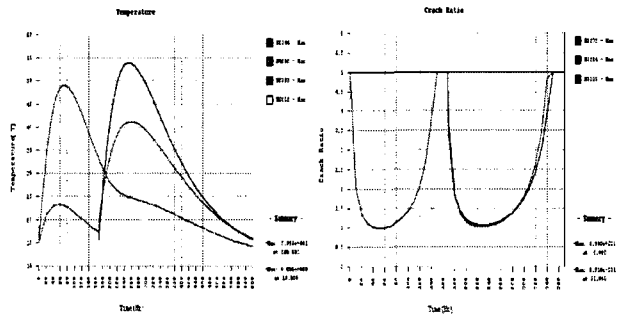
그림 3(b)는 콘크리트 타설 후 대기상태에 노출된 경우에 예상되는 전이층보의 온도분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 전이층보의 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 53.9°C(250hr.-2차 타설시) 정도까지 도달하는 것으로 해석되었다.

그림 4(a)는 각 절점별 온도이력을 나타낸 것이며, 1차 타설의 경우, 최고상승시점에서 중심부 온도가 49°C일 때 표면부 온도는 24°C로 나타나고 있어 약 25°C 정도의 온도차가 발생하고 있으며, 2차 타설의 경우에는 최고상승시점에서 중심부 온도가 54°C일 때 표면부 온도는 24°C로 나타나고 있어 약 30°C 정도의 온도차가 발생하였다.



(a) 부재의 절점번호 (b) 수화온도 분포도

그림 3. 모델링 부재의 절점번호 및 수화온도분포도



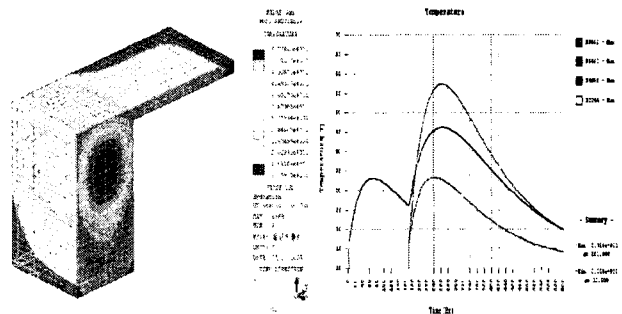
(a) 각 절점의 온도이력 (b) 온도균열지수

그림 4. 온도이력 및 온도균열지수 평가결과

그림 4(b)는 온도균열지수 평가결과, 온도균열의 발생이 우려되었던 절점에서도 1.0정도의 값을 나타내고 있어, 본 양생 조건에서는 온도응력에 의한 균열발생의 위험성은 존재할 것으로 판단된다.

5.2.2 P.E Film(Blue sheet) 양생한 경우

그림 5(a)는 콘크리트 타설 후 P.E Film 양생한 경우 예상되는 전이층보의 온도분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 전이층보의 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 57.3°C정도까지 도달하는 것으로 해석되었으며, 그림 5(b)는 각 절점의 온도이력을 나타낸 것이다.

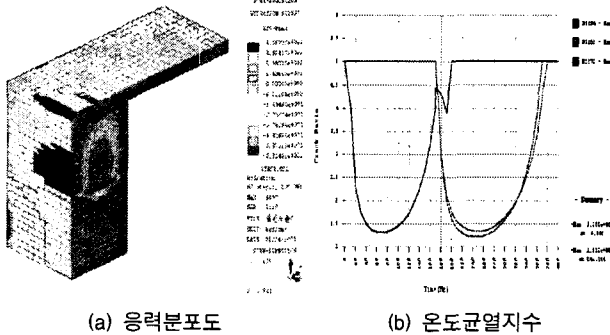


(a) 수화온도 분포도 (b) 각 절점의 온도이력

그림 5. 분포도 및 온도이력

그림 6(a)는 온도 응력분포도를 나타낸 것이며, 그림 6(b) 에 온도균열지수 평가결과 온도균열의 발생이 우려되었던 절점에

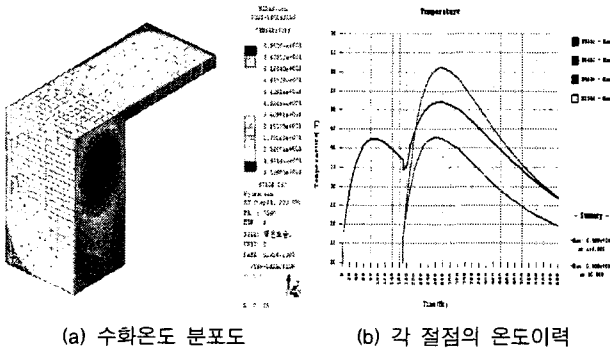
서 1.25정도로 나타내고 있어, 본 양생조건에서는 온도응력에 의한 균열발생의 위험성은 존재 할 것으로 판단된다.



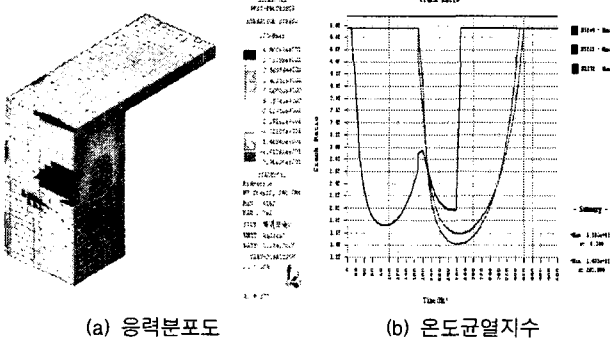
(a) 응력분포도 (b) 온도균열지수
그림 6. 분포도 및 온도균열지수 평가결과

5.2.3 [P.E. Film+양생매트] 양생한 경우

그림 7(a)는 콘크리트 타설 후 P.E. Film+양생매트로 양생한 경우에 예상되는 전이층부의 온도분포를 나타낸 것이며, 전반적으로 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 최고 61.0℃ 정도까지 올라가는 것으로 해석되었다.



(a) 수화온도 분포도 (b) 각 절점의 온도이력
그림 7. 수화온도 분포도 및 온도이력



(a) 응력분포도 (b) 온도균열지수
그림 8. 분포도 및 온도균열지수 평가결과

그림 8(a)는 콘크리트 타설 후 P.E. Film + 양생매트로 양생한 경우에 예상되는 전이층부의 응력분포를 나타냈다. 전반적으로 전이층부의 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 61.0℃(270hr. 2차 타설시)정도까지 도달하는 것으로 해석되었다.

균열이 발생하는 절점에 대해 온도균열지수 평가결과를 그림 8(b)에 나타냈으며, 온도균열의 발생이 우려했던 절점에서

도 1.45이상의 값을 나타내고 있어, 본 양생조건에서는 균열발생의 위험성은 거의 없을 것으로 판단된다. 이는 콘크리트 표준 시방서에서 제시한 「균열발생을 방지 할 경우 ; 온도균열지수 1.5이상」에 거의 해당된다고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구의 결과로, 경화 콘크리트 상태에서 설계기준강도 40N/mm²(배합강도 48N/mm²)만족하는 최적배합은 물-결합재비 33.5%에서 플라이애쉬 치환율 15%로 도출되었다.

수화열 해석 결과, 전이층부 부위의 콘크리트의 분할타설할 경우에 온도균열지수는 노출양생, P.E. Film양생, P.E. Film+양생매트의 순으로 증가하는 것으로 나타나고 있어 양생방법에 따라 온도균열제어 효과가 상이하다는 것을 알 수 있었다.

또한, 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 제어는 수화열 해석의 결과는 단지, 해석프로그램에 의해 제시된 것이기 때문에 현장여건에 따라 다소 상이할 수 있다. 따라서, 실제 콘크리트의 양생방안(양생재료 및 기간)은 시공된 매스콘크리트의 온도이력을 실제분석함으로써 그 결과를 바탕으로 조정하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 이상수, 원 철, 김동석, 박상준, “매스콘크리트의 배합설계 및 온도균열제어에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표 논문집 제13권1호, 2001.5, pp.533-538
2. 정철현 등, “매스콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구.” 콘크리트 학회지, 제 6권 5호, 1994, pp. 203-212
3. ACI Committee 207, "Mass Concrete." ACI Manual of Concrete Practice, 1987, 207.1R
4. ACI Committee 207, "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures". Journal. of ACI, No.4, Vol.67, 1970.4, pp.273-309