

# 시멘트 종류별 수화열 및 온도응력 비교를 위한 모형타설 실험 연구

## Mock-up test for the comparison of hydration heat and thermal stress in different types of cements

김 상 철\*      이 두 재\*\*      강 석 화\*\*\*      김 진 근\*\*\*\*  
Kim Sang Chel   Rhee Doo Jae   Kang Suck Hwa   Kim Jin Keun

### ABSTRACT

Recent construction method in mass concrete structures would depend on the control of hydration heats and thermal stresses by using the low heat cement, optimized block size and a lift height, or both. This experimental study aims at the possibility of thermal cracks according to the different types of cementitious material and at the investigation of these effects. Four different types of cements are applied to the mock-up test and are evaluated in terms of temperature rises and thermal stresses with the use of thermocouples, strain gauges and effective stress gauges..

As a result of this study, it was found that stresses measured from effective stress gauges agree well with ones from strain gauges, and the trend of stress occurrence can be well evaluated from theoretical analysis.

### 1. 서 론

댐 구조물과 같이 기존 매스콘크리트 시공에서는 골재 크기를 크게 하고 시멘트량을 대폭 감소시키면서 수화열을 제어하였으나, 최근들어서는 대형 중요 매스구조물이 축조되면서 일반 콘크리트에서 사용하던 배합상태는 유지하면서 수화열을 제어해야 하는 시공상 기법을 요구하는 문제가 많이 발생하고 있다. 이에 대한 수화열 제어 방법으로 재료적인 측면에서 저열성 시멘트를 사용하는 방안이 사용되거나, 시공 개선으로 타설블록크기를 조정하던지 냉각시스템을 적용하여 수화열에 의한 균열을 제어하는 방법이 현재 많이 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 재료적 측면에서 수화열 제어방안의 일환으로 해양구조물에 많이 사용되고 있는 시멘트 및 수화열 저감을 위해 현재 국내에서 생산하고 있는 혼합형시멘트 등이 매스콘크리트에 적용되었을 때 수화열 발생크기 및 응력상태를 조사하고자 하였다. 본 연구에 사용된 시멘트로는 내황산염에 대해 저항성이 큰 것으로 알려져 있는 Type A 및 2 성분계 혼합형 시멘트인 Type B와 Type B보다는 무기혼화제의 량을 많이 첨가된 Type C와 3성분계

\* 정희원, 동아건설산업(주) 책임연구원, 공박

\*\* 동아건설산업(주) 주임연구원

\*\*\* 정희원, 동양중앙연구소 건설재료연구실장, 공박

\*\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

혼합형 시멘트인 Type D 등 4가지 종류의 시멘트에 대하여 모형타설시험을 실시하였다. 모형타설 시험은 시멘트 종류별로 온도발생량 및 온도응력을 각 재령별로 계측하여 온도발생량과 온도응력값을 비교하고, 또한 수화열 해석 프로그램을 이용하여 계측치와 해석치를 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

## 2. 모의시험체의 제원 및 형상

### 2.1 모의 시험체의 크기 및 형상

4가지 종류의 시멘트를 이용한 모형타설시험은 1997. 12. 12 및 13일 양일간에 걸쳐 수행하였다. 모의 시험체의 크기는 각 시멘트 종류별로 배합을 실시하여 단열온도상승시험으로 최대온도상승치와 반응속도값을 구하고, 이들을 수화열 해석에 적용하여 시멘트 종류별로 비교·평가할 수 있는 최적의 모의 시험체의 크기를 결정하였다. 또한, 크기 선정과정에서 본 구조물의 형상과 시공방법 등을 고려하여 그림 1과 같이 6m×2.5m×1.5m(길이×높이×폭)로 하였다. 타설할 구조물은 내부구속에 의한 영향보다 외부구속에 의한 영향을 주로 받는 구조물이므로 모형 제작시 베이스 콘크리트를 미리 설치하고 그 내부의 철근을 모의시험체까지 연장한 후 타설하므로써 외부구속을 반도록 하였고 외기온도의 영향을 최소화하기 위하여 4번은 50cm의 단열재를 감싸주어 외기의 영향을 극소화하였다.

### 2.2 재료의 배합

표 1은 모형타설시험에 사용한 시멘트를 나타낸 것이며 배합표는 표 2와 같다. 배합은 타설할 콘크리트 구조물이 해양에 위치하기 때문에 염분에 의한 콘크리트 열화현상 등 콘크리트의 내구성에 중점을 두어 콘크리트시방서에 제시하고 있는 것처럼 물-시멘트비를 50% 이내로 하여 배합설계를 하였다.

### 2.3 측정계이지 설치 및 측정방법

모의 시험체에 대한 주요 측정항목은 시험체 중앙부의 최고발생 온도 및 콘크리트의 변형률과 온도응력 등이다. 측정계이지의 설치 위치는 그림 2와 같이 중앙부와 측면부에 집중적으로 배치하였다.

#### 1) 온도계이지

콘크리트의 초기 경화시 중앙부와 표면부의 온도차가 균열(내부구속에 의한 균열) 유발할 수 있으므로 중앙부와 표면부에 온도계이지를 총 36개(각 모형당 9개)를 설치하여 재령별로 온도를 측정하였다.

#### 2) 콘크리트 변형계

콘크리트의 경화시 모의시험체 중앙부와 표면부에서의 변형률 경시변화를 검토하기 위하여 총 36개(각 모형당 9개)의 계이지를 설치하였다.

표 1 시멘트 종류별 물성

시멘트 종류	비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	주 도 (%)	용 결 시 간 (h:m)	
				초 결	종 결
Type A	3.22	3.277	22.7	04:24	07:59
Type B	3.05	4.034	25.0	02:57	06:29
Type C	2.97	4.294	27.0	02:43	07:40
Type D	2.78	3.929	27.5	03:08	06:40

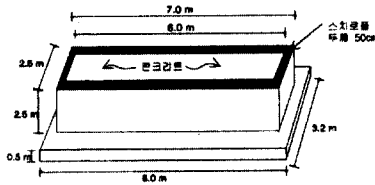
표 2 모형타설 배합비

시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	배 합 비(kg/cm <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	SP제	AE제
Type A	47.6	48.5	162	340	858	929	2.55 (C×0.75%)	0.204 (C×0.060%)
Type B (45%)	47.5	49	160	337	866	918	2.36 (C×0.70%)	0.270 (C×0.080%)
Type C (65%)	47.5	46	166	349	791	947	2.44 (C×0.70%)	0.332 (C×0.095%)
Type D	47.5	45	174	366	765	953	2.93 (C×0.80%)	0.329 (C×0.090%)

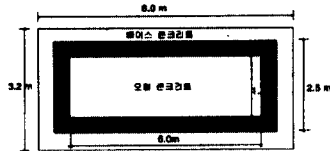
3) 무응력계

무응력계는 내부에서 발생하는 응력을 직접 계측하는 것이 아니고, 직경 10cm, 높이 30cm되는 PVC 통을 제작하고 그 주변은 수분 통과가 자유롭도록 뚫어놓은 무응력통안에 콘크리트 변형계를 설치해 놓은 것을 말한다. 무응력계의 주요 용도는 콘크리트 변형계에 의해 측정된 변형률로부터 온도응력을

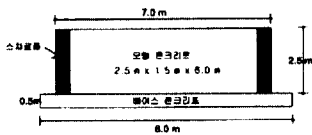
환산할 때 응력을 야기시키지 않는 자유변형량을 측정하기 위한 수단으로 사용되고, 다른 하나는 측정된 자유변형률과 온도와의 관계를 이용해서 타설한 콘크리트의 열 팽창계수를 측정하는데 사용된다. 따라서 본 실험에서는 각 시험체당 중앙부에 2개, 측면부에 1개씩 총 12개를 설치하였다.



모형타설 전체도



평면도



측면도

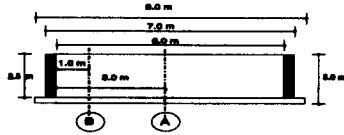
그림 1 모의 시험체의 크기

4) 유효응력계이지

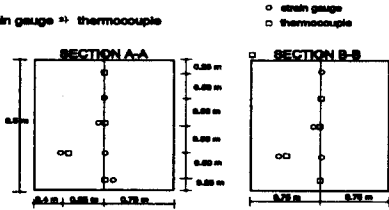
콘크리트 내부에 실제로 발생하는 응력을 측정하기 위하여 콘크리트 유효응력계를 시험체의 중앙부와 측면부에 각 시험체당 2개씩 총 8개를 설치하였다. 유효응력계는 로드셀을 통하여 직접 콘크리트 내부에서 발생하는 건조수축 변형률, 자기수축변형률, 크리이프 변형률 등을 계측기를 통해 측정한 후 이를 응력으로 환산하지 않고도 콘크리트 내부에서 발생하는 응력을 계측하기 때문에 현재 매스콘크리트 구조물의 응력을 측정하는데 널리 사용되고 있다. 또한 변형률계이지를 사용하여 변형률을 측정할 경우 변형률을 가지고 응력으로 환산하기 위하여 매 재령마다 탄성계수를 구해야 하는데, 이같은 불편함도 덜어주고 있다.

5) 데이터 측정

데이터의 측정은 수화반응이 가장 활발히 일어나는 타설 후 1주간은 매 30분 간격으로, 그 다음 1주 즉, 2주가 시작되는 시점부터는 1시간씩, 3주부터는 2시간 간격으로 타설일로부터 약 50일에 걸쳐 측정을 실시하였다.



(1) strain gauge → thermocouple



(2) effective stress gauge → non-stress gauge

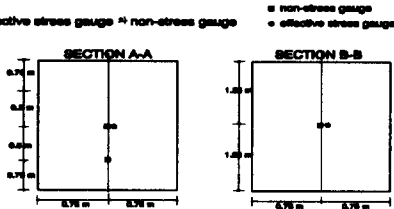


그림 2. 측정계이지 설치 위치

### 3. 수화열 해석을 위한 유한요소

#### 3.1 수화열 해석을 위한 재료적 특성

본 수화열 해석 프로그램 수행을 위하여 필요로 하는 콘크리트의 재료적 특성은 각각의 시멘트별로 단열온도 상승실험을 실시하여 최대상승온도(K) 및 수화반응속도( $\alpha$ )를 산출하고, 콘크리트의 탄성계수, 압축강도 및 인장강도는 속성도 개념에 입각하여 산출하였다. 표 1의 배합비에 토대로 수화열 해석을 위해 사용된 열적 특성치는 표 3과 같다.

#### 3.2 유한요소 모델링

유한요소 매쉬는 타설길이 방향으로 0.5m, 타설높이로는 0.25m, 타설폭 방향으로 0.35m씩 분할하였고, 압반의 경우는 2.5m씩 분할하였다.

표 3. 해석프로그램에 사용한 시멘트별 입력자료

입력 항목		Type A	Type B	Type C	Type D	암 반
단열온도	K (°C)	43.9	51.7	41.91	36.7	-
	$\alpha$	0.63	0.44	0.36	0.36	-
열전도율 (kcal/m · hr · °C)		2.3	2.3	2.3	2.3	2.5
비열 (kcal/kg · °C)		0.25	0.25	0.25	0.25	0.18
외기대류계수 (kal/m <sup>2</sup> · hr · °C)	7 (상부)	7 (상부)	7 (상부)	7 (상부)	7 (상부)	-
	5 (측면)	5 (측면)	5 (측면)	5 (측면)	5 (측면)	-
초기온도 (°C)		10	10	10	10	20
28일 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		240	240	240	240	-
28일 탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )		2.3 × 10 <sup>9</sup>	2.3 × 10 <sup>9</sup>	2.3 × 10 <sup>9</sup>	2.3 × 10 <sup>9</sup>	3.0 × 10 <sup>9</sup>
열팽창계수 (1/°C)		1.0 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>	1.0 × 10 <sup>-7</sup>
포아송비		0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

### 4. 모의 시험체 계측결과 및 해석결과 분석

그림 3은 시멘트 종류별로 모의 시험체 중앙부에서의 시멘트 종류별 온도값을 나타낸 것으로 최고온도의 크기는 Type C, Type A, Type B, Type D의 순으로 나타났다. 최고온도 도달시간에 대해 살펴보면 Type B 시멘트에서 약 4일, Type C 및 Type A 시멘트에서는 약 5일, Type D 시멘트에서 약 6일에 나타났다. 이와 같은 결과는 수화반응이 Type B 시멘트에서 가장 활발히 일어나고, Type A, Type C, Type D와 같은 저열성 시멘트는 Type B보다 수화반응이 서서히 진행함을 알 수 있다. 균열방지 대책의 일환으로 구조물의 내·외부 온도차가 작을수록 균열발생 확률이 작아지므로 이러한 사

항을 종합할 때 중앙부에서 온도가 가장 낮은 값을 나타내는 Type D 시멘트가 균열발생 확률이 가장 작은 것으로 판단된다. 그림 4는 Type D 시멘트의 경우 중앙부에서의 계측치와 해석치의 값을 비교한 것으로 해석결과가 계측결과를 잘 모사하고 있으며 특히, 온도에서 중요한 인자로 작용하고 있는 최대온도 크기 및 최대온도 발생시점은 해석프로그램과 잘 일치하고 있어 이론적 해석을 통해 매스콘 크리트의 온도를 비교적 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

그림 3과 4에서 곡선의 후반부에서 온도하강율이 크게 나타난 것은 모의시험시 30일 이후에 단열재를 제거하므로써 외기의 온도영향을 받게 되어 나타난 것으로 판단된다.

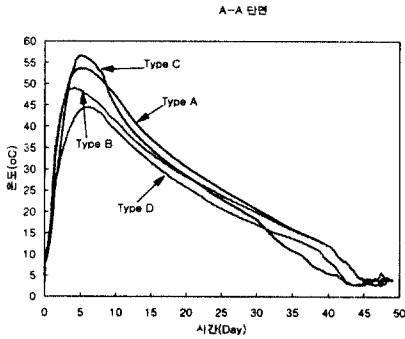


그림 3. 시멘트 종류별 A-A단면 중앙부의 온도계측값

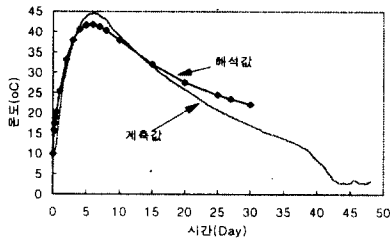


그림 4 Type D 시멘트의 온도계측값과 해석값 비교

그림 5는 시멘트 종류별로 모의 시험체 중앙부(A-A단면)에서의 유효응력 계측값을 나타낸 것으로 4종류의 시멘트의 경우 최대 압축응력값상 차이는 있으나 압축에서 인장으로 바뀌는 양상이 비슷한 것으로 나타났다. 또한, 본 그림에서 30일 이후에는 응력값상에 노이즈가 많이 발생하고 있는데 이와 같은 현상의 발생 원인으로 단열재를 제거함으로써 구조물 자체가 외기에 노출됨으로써 주야의 온도차로 인해 콘크리트 구조물의 팽창과 수축을 받게되어 발생한 것으로 사료된다. 그림 6은 단면 B-B에서의 유효응력값을 나타낸 것으로 응력발생의 경향은 그림 5와 비슷하나 그 값상에서 차이를 나타내고 있다. 이는 A-A 단면이 B-B단면보다 외부구속을 더 받기 때문에 기인한 것으로 판단된다.

그림 7은 Type A 시멘트에 있어서 단면 B-B에서의 유효응력계를 이용하여 계측한 값과 변형률계이지에서 계측된 변형률에 숙성도를 이용하여 구한 재령별 탄성계수 곱하여 구한 응력값을 서로 비교한 그림으로, 서로의 응력값이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 유효응력계의 가격이 매우 비싼 점을 감안할 때 다소 번거롭지만 변형률계를 이용하여 계측치에 숙성도 개념을 적용하여 응력값을 적용하여도 결과상에는 큰 무리가 없음을 나타내고 있다.

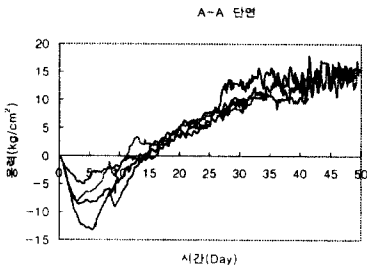


그림 5. 시멘트 종류별 A-A단면의 응력 계측값

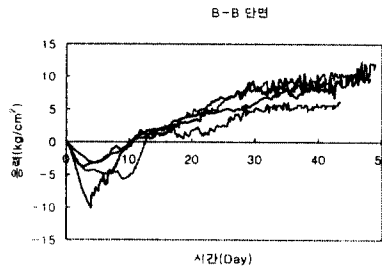


그림 6. 시멘트 종류별 B-B단면의 응력 계측값

그림 8은 Type A시멘트의 계측값과 해석값을 비교한 것으로 계측값이 해석값보다 다소 크게 나타나고 있지만 해석을 통해서 실제 발생하는 응력의 경향은 비교적 정확히 파악할 수 있음을 나타내고 있다.

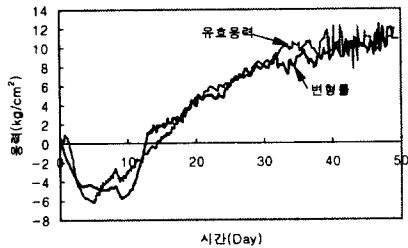


그림 7. Type A시멘트의 응력비교  
(유효응력, 변형률)

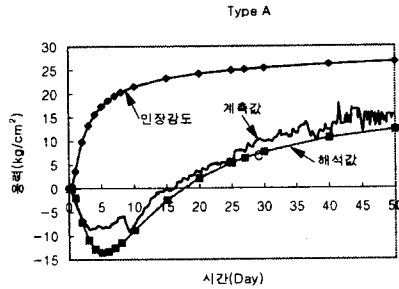


그림 8 Type A시멘트의 응력계측값 및  
해석치

## 5. 결론

(1) 단열온도 상승값이 적은 콘크리트에서 최고온도가 가장 적게 나타나고 있으며 균열발생 확률도 비교적 낮은 것으로 나타났다. 그러나 혼합형 시멘트의 경우 온도의존성이 높기 때문에 매스콘크리트에서 주위 온도가 상승하게 되면 이에 따라 수화반응 속도가 증가하므로 온도제어 측면에서 오히려 불리할 수 있다.

(2) 유효응력계를 이용하여 측정된 유효응력값과 변형률에서 계산된 응력값은 비교적 정확히 일치하고 있어 경제적인 측면에서 변형계를 이용하여 계측하여도 그 결과상에는 신뢰성을 얻을 수 있었다.

(4) 응력에 대한 계측값과 이론적 해석값에서 계측값이 해석값보다 다소 크게 나타나고 있으나, 응력의 발생 추이형태는 비교적 정확히 나타났다. 차후 좀더 정확한 응력값을 예측하기 위해서는 콘크리트의 재료적 특성에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

## 6. 참고문헌

1. 김진근, 김상철, 이두재, 김국한, "매스콘크리트 벽체구조물의 타설개선을 위한해석적 연구", 한국콘크리트학회 1997년 가을학술발표회, 제9권 2호, pp. 539~545
2. 김진근, 김상철, 이두재, 김국한, "매스콘크리트에서 최적의 타설 단면 결정을 위한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 1997년도 봄학술발표회, 제9권 1호, 1997.5, pp.422~429.
3. 정철현, 강석화, 정한중, 박칠림, 오병환, "매스 콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제6권, 제5호, 1994.10, pp. 203~212.
4. 内田清彦, 構原弘辛, "積算發熱量に基づくセメントの水和熱拘束度の定式化と溫度上昇の豫測", 콘크리트工學, Vol. 24, No. 4, 1986.4, pp. 105~113
5. 鈴大康範, "溫度依存性を有するセメントの水和發熱過程と熱傳導との連成を考慮した非線型溫度解析", 土木學會論文集 第426號, V-14, 1991.2, pp. 167~176
6. 日本コクリート工學協會, "マスコクリートの溫度應力發生メカニズムに 關すコロキウム", pp.112, 1982