

매스콘크리트구조물에서의 온도응력 측정기법에 관한 연구

(A Study on the Measurement Technology of
Thermal Stress in Massive Concrete Structure)

0 강석화* 정철현* 이용호** 박철림***
Kang, Suck Hwa Chung, Chul Hun Lee, Yong Ho Park, Chil Lim

ABSTRACT

Recently, constructions of huge reinforced concrete structures such as nuclear power stations have been increased. When massive concrete is placed, cracking due to the hydration heat of cement is recognized as a major problem. The development of thermal stress is influenced by the structure shape and the constraint conditions, and cracks usually occur from tensile stresses which developed due to temperature drop. In this study a protocol specimen is made to examine the distribution of temperature and thermal stress of reaction wall of Daewoo Institute Construction Technology. The size of the specimen is made by considering minimum size of real structure.

In this study, concrete strain gauge, concrete stress gauge, concrete non-stress gauge, and thermocouples, are instrumented to measure thermal stress in massive concrete structure. A new measuring technique is proposed to calculate thermal stress.

1. 서론

최근 콘크리트구조물의 대형화, 고강도화 추세에 따라 매스콘크리트구조물이 시공되는 빈도가 증가하고 있다. 매스콘크리트구조물에서는 콘크리트의 경화단계에서 시멘트의 수화현상에 의해 내부에 상당히 높은 온도가 발생하게 되며, 이 온도에 의해 표면부와 중심부 사이에 온도차가 생긴 경우나 상승하였던 온도가 강하할 때에 내부적으로 구속을 받는 경우 콘크리트에는 인장응력이 발생하여 균열이 발생하는 경우가 있다. 이 온도균열은 일반적으로 그 폭이 크고, 구조물의 내력이나

내구성, 수밀성, 미관등의 요구성능을 손상시키기 때문에 문제가 되는 경우가 많다.

일반적으로 매스콘크리트 구조물의 온도응력 측정시, 콘크리트의 변형율을 측정하여 이 값에 탄성계수를 곱하여 응력을 간접적으로 구하는 방법이 이용되어 왔다. 그러나 이 방법에서는 탄성계수를 정확히 구해야 하고, 또한 측정값속에는 크리프변형률과 온도변화에 따른 자기수축변형률이 포함되어 특별한 보정방법에 의하지 않고는 온도응력의 산정이 곤란하였다. 그러나 최근에는 이러한 문제점을 보완한 유효응력계라는 게이지가 개발되어 많이 사용되고 있다.

본 실험은 실구조물에 있어서 발생이 예상되는 온도균열의 제어대책을 수립하기 위해서 실구조물과 동일한 조건을 가진 모의실험체를 제작하여 수행된 것으로서, 본 연구에서는 실험체내부에 콘크리트변형률과 온도응력을 측정할 수 있는 게이

* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원

** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 연구원

*** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 소장.

전무이사

지를 매설하여 실구조물 내부에서의 수화열 및 온도응력의 경시변화를 검토하고 각 측정계이지간의 상호관련성에 대해서도 검토하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 공시체의 제원 및 형상

본 연구에서 검토대상이 된 매스콘크리트구조물은 당연구소의 대형구조실험동에 시공예정인 반력벽 구조물로서, 온도응력 검토시 가장 문제제되고 있는 실구조물의 중앙부와 내부온도분포가 유사하도록 크기 및 주변조건을 맞추어 모의실험체를 제작하였다. 모의실험체의 크기는 실구조물의 최소치수를 고려하여 2.5m x 2.5m x 1.0m로 정하였으며, 모의실험체의 좌우편은 길이방향으로 내부의 온도변화가 거의 없도록 하기 위하여 기존의 연구결과¹⁾를 토대로 하여 공시체의 좌우에 40cm두께의 스티로폼을 설치하여 거의 단열에 가까운 상태를 유지시켰다. 그리고 본 실험에서는 모의실험체의 제작에 앞서 하면에 미리 타설한 콘크리트에 의한 구속영향을 검토하기 위하여 3.5m x 3.5m x 0.3m의 크기로 콘크리트 기초를 제작하였다.

모의실험체의 자세한 형상은 그림-1과 같다.

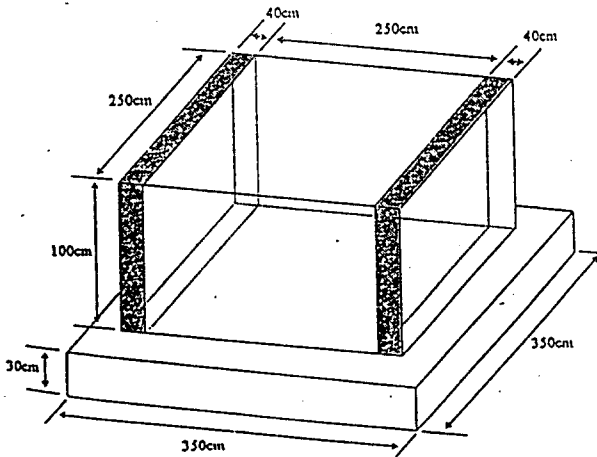


그림-1 모의실험체의 형상

모의실험체의 배근은 실험체의 주된 목적이 수화열에 의한 온도분포 및 온도응력을 검토하는데 있었기 때문에 ACI Code에서 규정하고 있는 수화

열에 의한 균열방지를 위한 최소철근비($\rho=0.15\%$) 정도의 철근만을 배근하였고, 철근은 실구조물에 실제 사용예정인 철근과 동일한 치수의 철근(D29)을 사용하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 모의실험체 제작에 사용한 콘크리트는 실구조물타설에 사용하는 것과 동일한 재료로서, 설계기준강도가 350kg/cm^2 인 고강도콘크리트이고, 37%의 낮은 물/시멘트비를 만족시키기 위하여 고성능감수제 Darex super-20을 1.5% 혼입시켰다. 또한 콘크리트 경화시 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 발생을 억제하기 위하여 플라이애쉬(비중 : 2.16)를 전체 결합재량의 20%를 시멘트량과 대체시켜 혼입하였다.

콘크리트는 동양시멘트안양공장에서 출하되는 레미콘을 사용하였으며, 출하시 목표슬럼프치는 21cm이고, 현장도착시의 목표슬럼프치는 18cm이상으로 하였다. 배합에 사용한 굵은 골재는 비중이 2.61이고 조립률은 6.90이며, 잔골재는 비중이 2.58이고 조립률은 2.83이다.

공시체제작에 사용한 콘크리트의 배합표는 표-1과 같다.

표-1 콘크리트의 시방배합표

W/B (%)	S/A (%)	SP (%)	W (kg/m^3)	결합재(kg/m^3)		공기량 (%)
				시멘트	플라이애쉬	
37.0	42.5	1.5	175	378.38	23.5	1.7

콘크리트에 대한 단열온도상승시험은 丸井사 제품의 콘크리트 단열온도상승 시험장치를 이용하여 수행되었으며, 시험결과를 회기분석하여 식(1)과 같은 단열온도상승식을 도출해내었다.

$$Q = 60.4 (1 - e^{-1.02t}) \quad (1)$$

여기서 t는 재령(day)

시험결과와 식(1)을 동시에 그림으로 나타내면

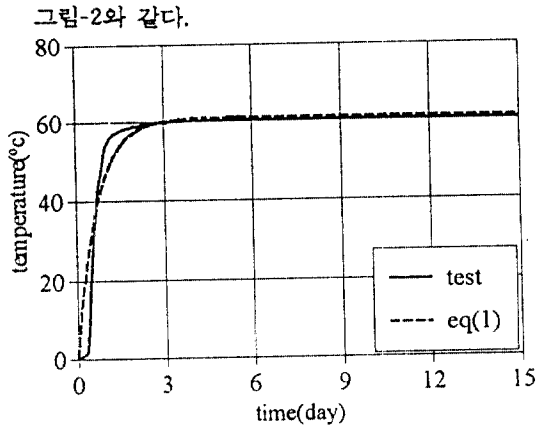


그림-2 콘크리트에 대한 단일온도상승시험 결과 및 회기분석결과

2.3 실험방법 및 측정

모의실험체에 대한 측정항목은 콘크리트의 내부 온도, 콘크리트변형률, 콘크리트자기수축변형률, 그리고 온도응력이며, 측정점수는 총22개이다. 측정개이지는 실험체가 좌우대칭형이기때문에 우측 1/4부분에 집중적으로 배치되었다.

측정개이지는 철근배근이 완료된 후 매설하였으며, 외부구속을 검토하기 위해서 하부에 설치한 기초콘크리트에는 설치하지 않았다.

모의실험체에 배치한 측정개이지의 설치위치는 그림-2와 같다.

(1) 온도 측정

모의실험체의 온도를 측정하기 위하여 열전대 (T-Type 열전대 $\phi 0.65$)를 10점 설치하여 그 중 8 점은 콘크리트의 온도, 나머지 2점은 단열재의 온도와 대기온도를 각각 측정하였다.

(2) 콘크리트 변형률의 측정

초기경화시의 콘크리트 변형률을 측정하기 위하여 매립형 콘크리트변형계(東京測器: KM-100B)를 총 10개 설치하였다. 그 중 5개는 그대로 사용하였고 나머지 5개는 무응력계용으로 사용하였다. 무응력계란 콘크리트변형계를 무응력봉(東京測器: KM-51)에 집어넣어 외부로부터 힘이 작용하지 않고 단지 온도변화에 의한 자기신축변형률값만 측정하도록 되어 있는 것이다.

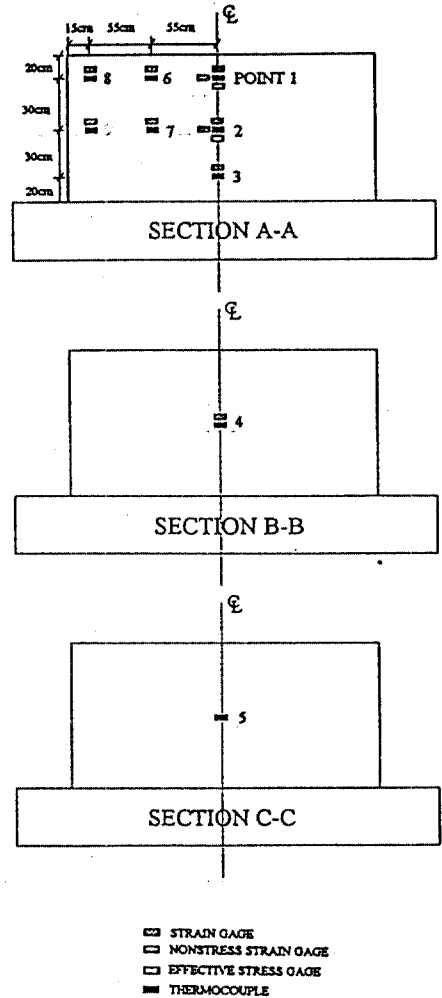


그림-3 각 측정개이지의 설치위치

(3) 온도응력의 측정

본실험에서는 콘크리트내부에서 실제로 발생하는 응력을 측정하기 위하여 콘크리트 유효응력계(東横ELMES: GK-200-505)를 실험체의 상부와 중앙에 각각 하나씩 2점을 설치하여 콘크리트변형계에 의한 측정치와 비교검토를 실시하였다. 기존의 콘크리트변형계는 변형률을 측정하여 응력으로 환산하도록 되어 있는데 반해, 유효응력계는 계이지에 설치된 Load Cell로 하중을 측정하여 단면적으로 나누어 곧바로 응력이 출력되도록 되어있다.

(4) 데이터 측정간격

데이터의 측정시 사용한 Data Logger System은

UCAM-10A, 50A, 50AT이며, 데이터측정은 수화현상이 가장 크게 일어나는 타설후 3일간은 1시간 간격으로, 그 후 4일간은 3시간 간격, 그리고 그 이후는 6시간 간격으로 측정을 하였고, 측정은 타설일로부터 1개월간 실시하였다.

(5) 콘크리트의 강도발현

본 실험에서는 모의공시체의 제작과 병행하여 콘크리트의 강도발현특성을 검토하기 위하여 원주형 공시체를 제작하였다. 강도시험은 원주형공시체를 재령 1, 3, 7, 28일에 대하여 압축 및 할렬 인장강도 시험을 수행하였다.

사용한 콘크리트의 재령별 강도발현 특성은 표-2와 같다.

표-2 콘크리트의 재령별 강도발현 특성
(단위 : kg/cm²)

재령	인장강도 (할렬강도)	압축강도
1일	19.20	134.0
3일	26.30	251.0
7일	30.16	330.0
14일	30.19	353.0
28일	34.86	441.0

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 온도측정 결과

전체 측정지점의 콘크리트 온도의 경시적인 변화는 그림-4와 같다. 그림-4에서도 알 수 있는 바

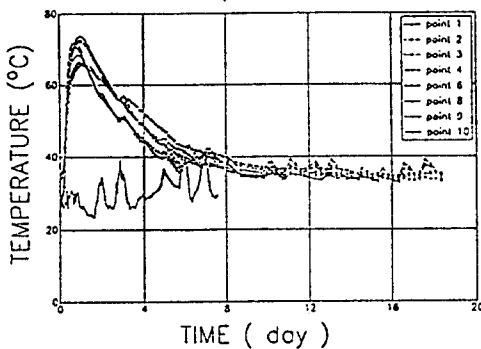


그림-4 각 측정지점의 온도이력

와 같이 각 지점의 최고온도 도달시간은 위치에 따라 약간씩 차이는 있지만, 타설완료후 대략 21 - 25 시간 정도였으며, 공시체내부의 최대온도는 실험체 중앙부에서 바깥쪽으로 50cm 떨어진 곳에서 나타났고, 타설후 21시간이 경과한 시점에서 80.6°C까지 도달한 후 서서히 하강하기 시작하였다.

3.2 콘크리트 변형률의 측정결과

콘크리트변형계로 측정된 변형률은 타설시점부터 경화가 막 일어나려는 시점까지는 콘크리트변형계의 탄성계수(약 400kg/cm²정도)가 콘크리트의 탄성계수보다 크기 때문까지는 불안정한 변형률이 측정된다²⁾. 따라서 콘크리트의 경화가 일어나 변형계에서 콘크리트의 변형률을 감지할 수 있는 시점(약 6~10시간경과후)을 초기치로 잡아 변형률을 보정하여야 한다.

그림-5는 콘크리트변형계에 의해 측정된 변형률값을 6시간 경과시점을 초기치로 정해 보정한 그림이다.

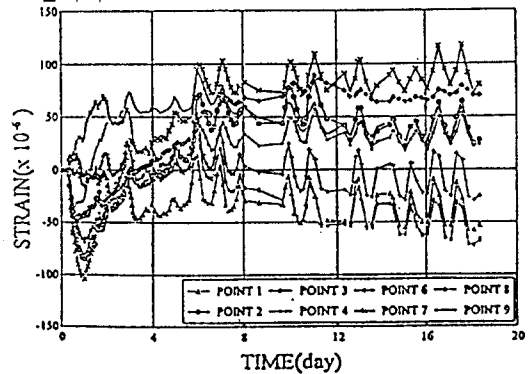


그림-5 콘크리트 변형계에 의한 측정값

또한 무응력계에 의해 측정된 콘크리트의 자기 신축변형률값에 대해서도 동일한 방법으로 보정을 하면 그림-6과 같이 된다.

3.3 유효응력계에 의한 온도응력 측정결과

그림-7은 유효응력계에서 측정된 콘크리트의 응력을 나타낸 그림이다.

실험결과에서 나타난 온도응력의 발생상황을

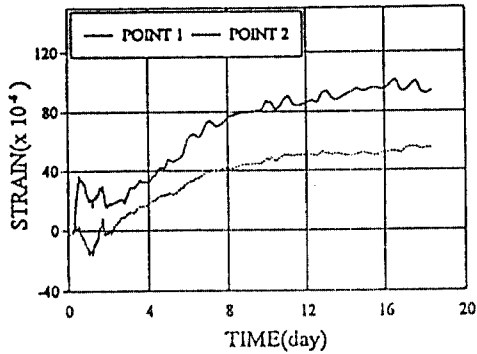


그림-6 무응력계에 의한 측정값

보면, 모의실험체의 중앙부(POINT 2)에서는 온도 상승에 따라서 압축응력이 발생하여 최고온도 도달시점 부근에서 압축응력이 최대가 되며, 그 이후에는 압축응력이 감소하여 인장영역까지 도달하였다. 모의실험체의 표면부(POINT 1)는 초기에 약간의 인장응력이 발생하다가 시간이 경과함에 따라 압축응력으로 변화하였으며, 이 때 표면부의 응력이 외부기온의 영향을 크게 받고 있는 것을 알 수 있다.

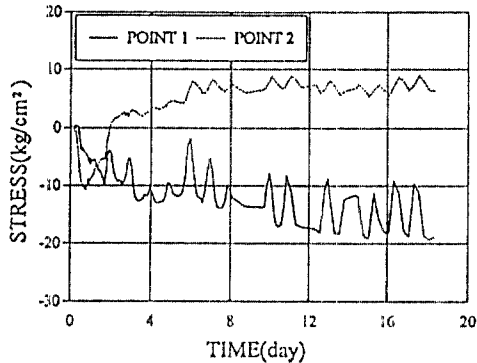


그림-7 콘크리트 유효응력계에 의한 측정값

4. 유효응력계와 콘크리트변형계의 측정값의 비교

콘크리트변형계의 측정치로부터 온도응력을 산정하기 위해서는 변형률에 탄성계수를 곱해야 하지만, 탄성계수는 시간의 경과에 따라 변화하고 크리프의 영향도 포함이 되어 있고, 자기신축변형률도 포함이 되어 있으므로 이 부분에 대하여 보정을 해야한다.

먼저, 탄성계수에 있어서는 해석적으로는 적산 온도개념에 의한 방법으로 산정을 할 수 있지만, 본 연수에서는 모의실험체제작과 병행하여 제작한

원주공시체에 대한 탄성계수측정시험을 통해 얻어진 값을 사용하였고, 크리프의 영향을 고려하기 위하여 구해진 탄성계수를 식(2)와 같이 크리프계수로 환산한 유효탄성계수를 사용하였다. 이 때에 크리프계수는 타설후 1일까지는 0으로 가정했고 5일 이후는 0.6으로 했고 그 사이는 보간한 값을 사용하였다³⁾.

$$E_{eff} = \frac{E_c}{(1 + \varphi)} \quad (2)$$

여기서 E_{eff} : 유효탄성계수

φ : 크리프계수

그림-8은 제작한 원주공시체에 대한 탄성계수 시험을 통해 얻어진 값과 이것을 크리프계수로 보정한 유효탄성계수의 경시변화를 그림으로 나타낸 것이다.

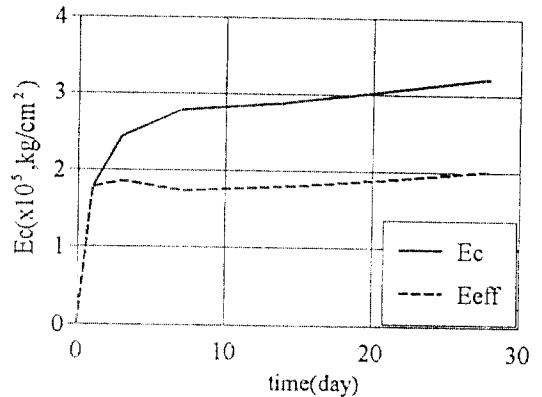


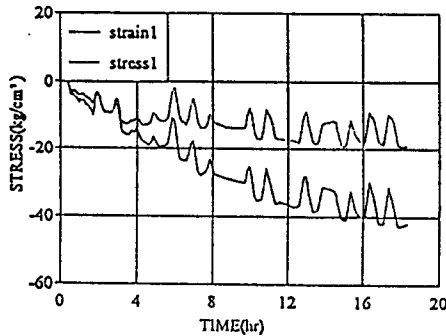
그림-8 시간이력에 따른 콘크리트 탄성계수의 변화

또한 자기신축변형률의 영향을 없애기 위해서는 무응력계에 의한 측정치가 엄밀하게는 건조수축의 영향도 약간 포함되어 있기는 하지만, 이를 무시한다면 순수한 온도변화에 의한 자기신축변형률이라 할 수 있다. 따라서 수화열에 의해서 발생하는 온도응력을 산정하기 위해서는 콘크리트변형계에 의한 측정값에서 무응력계에 의한 측정값을 빼주어야 한다.

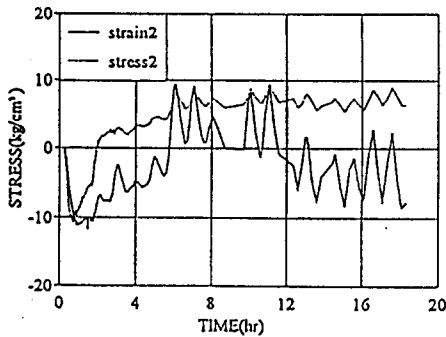
이상과 같은 보정방법을 간단한 식의 형태로 나타내면 식(3)과 같다.

$$\text{온도응력} = (\text{변형계에 의한 측정값} - \text{무응력계에 의한 측정값}) \times \frac{\text{탄성계수}}{(1 + \varphi)} \quad (3)$$

이러한 보정방법에 의해서 시험체 중앙부와 표면부에 대해서 콘크리트변형계에 의한 측정치로부터 환산한 온도응력과 유효응력계로 측정된 응력값을 비교하면 그림-9와 같다.



(a) 표면부



(b) 중앙부

그림-9 동일한 위치에서의 유효응력계와 콘크리트변형계측정값의 비교

그림에서 보면 두가지 방법에 의해서 측정된 초기재령시의 콘크리트의 응력은 응력의 크기에는 약간의 차이는 있지만 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있고 외부기온의 변화에 따른 온도응력의 변화를 두 측정치 모두 잘 묘사해 주고 있다.

따라서, 콘크리트변형계를 이용하여 온도응력을 측정할 경우에는 응력산정에 보다 세심한 주의가 기울이면 유효응력계를 사용하지않고도 충분히 온도응력을 추정해 낼 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 실구조물에 있어서 발생이 예상되는

온도균열의 제어대책을 수립하기 위하여 실구조물과 동일한 조건을 가진 모의실험체를 제작하여 수행된 것으로, 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 콘크리트변형계를 이용하여 온도응력을 측정할 경우에는 무응력계 또는 이와 동일한 특성을 가진 게이지를 동시에 매설하여 측정치를 보정해야 한다.

2) 콘크리트변형계로 온도응력을 측정할 경우 추정정도를 높이기 위해서는 다음과 같은 부분에 대하여 보다 연구가 필요할 것으로 사료된다.

- ① 경시변화에 따른 정확한 콘크리트 탄성계수의 산정,
- ② 초기재령시의 크리프계수 산정,
- ③ 초기치설정시기의 결정,
- ④ 무응력계에 의한 열팽창계수의 산정

감사의 글

본실험체의 제작에 있어서 콘크리트를 제공하여 주신 동양레미콘 안양공장여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

5. 참고문헌

1. 山川秀次, 野池悦雄, 東側豊二, 川原場博美, “콘크리트의現場斷熱溫度上昇試驗方法に關する提案”, 콘크리트工學年次論文報告集, 13-1, 1988, pp. 815-820
2. 竹下治之, 淺沼深, 横田季彦, “마스콘크리트計器特性”, 第2回마스콘크리트의溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1984.3, pp. 1-8.
3. Nobuhiro Machida and Kazuo Uehara, “Nonlinear Thermal Stress Analysis of a Massive Concrete Structure,” Computer & Structures, Vol. 26, No. 1/2, 1987, pp. 287-296