

격납건물 텐던갤러리 벽체의 온도응력에 대한 연구

A Study on Thermal Stress in T/G Wall of Containment Building

김진근^{*} 양은익^{**} 박영진^{***} 송영철^{****} 방기성^{*****}
Kim, Jin-Keun Yang, Eun-Ik Park, Young-Jin Song, Young-Chul Pang, Gi-Sung

ABSTRACT

In this study, the change of concrete temperature, strain and thermal stress were measured by using the embedded type concrete gauges in tendon gallery wall of containment building. A finite element analysis was performed to clarify the thermal behavior of concrete. The analytic and test results were investigated to improve the validity of analytic method.

According to the test results, concrete temperature, strain and thermal stress were strongly affected by measuring point and environment condition of member. And the thermal stress was developed in the member which was not demoulded at early ages. This is caused by the change of internal temperature and restrained condition.

A finite element analysis effectively interpreted the test results by estimating the concrete properties and the site condition.

1. 서론

매스 콘크리트에서의 수화열에 의해 발생하는 온도응력은 구조물에 균열을 발생시키거나 잔류응력으로 잔존하므로써 구조물의 내력 저하, 내구성 저하 및 수밀성 저하를 야기시키는 요인으로 인식되고 있다. 이러한 온도응력은 수화열에 의한 온도 변화 이외에도 콘크리트의 물성 및 현장 조건에 의해 크게 변화하므로 온도응력을 보다 합리적으로 평가하기 위해서는 이러한 모든 조건을 고려한 종합적인 검토가 필요하다.

일반적으로 구조물에서의 온도 변화 및 온도응력을 평가하기 위하여 콘크리트의 열적 특성과 물성 및 현장 여건을 적절히 모사한 해석 방법^{1,2)}을 사용하고 있다. 그러나 콘크리트 및 현장의 내외적 조건을 완벽하게 모사하여 정확한 온도 변화와 온도응력을 예측하는 것은 사실상 어려운 일이므로 해석에 의한 결과는 온도 변화 및 온도응력의 추이를 나타내는데 사용되거나 실제 현장 실험 결과와의 검증을 거친 후 전체적인 온도응력 예측에 사용되어야 한다.

이 연구에서는 타설 직후부터 발생하는 원자력 발전소 격납건물 T/G 콘크리트 벽체에서의 수화열에 의한 온도 변화 및 온도 변화에 따른 변형률 및 온도 응력의 변화를 매립 게이지를 사용하여 계측하고 그 결과를 T/G 벽체의 각 부위에 대한 해석 결과와 비교하므로써 실제 구조물에서 발생하는 온

- 1) *정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
- 2) **정회원, 한국해양연구소 선임연구원
- 3) ***정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정
- 4) ****정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
- 5) *****정회원, 한국전력공사 전력연구원 연구원

도 응력 추이를 정량화하고 온도 응력 해석 프로그램의 정확도를 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 하였다. 또한 T/G 벽체에서의 균열 발생 여부, 발생 시기 및 잔류 응력 상태를 검토하므로써 온도 응력 저감 대책 자료로써 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 계측 구조물 및 계측 간격

계측 구조물은 영광 원자력 발전소(5호기)의 격납건물에서 3등분 분할 타설하는 T/G 내측 벽체중 북측 벽체를 선정하였으며 1997년 8월 21일부터 9월 4일 까지의 14일간 계측을 실시하였다.

측정 시간 간격은 각 매립 게이지로부터 측정하는 측정값의 연계성과 정확도를 고려하여 콘크리트 타설 직후부터 측정 종료시 까지 일정하게 30분 간격으로 실시하였다.

측정 단면에 따른 응력, 변형률 및 내부 온도의 변화를 평가하기 위하여 대상 벽체의 4개 단면을 선정하였으며 각 단면의 위치는 [그림 1]과 같다. [그림 1]의 A단면에는 Thermo-couple을, B단면에는 변형률 게이지를, C단면에는 Thermo-couple, 변형률 게이지 및 무응력 게이지를, D단면에는 유효 응력 게이지와 변형률 게이지를 각각 설치하였다.

2.2 사용 매립 게이지의 종류 및 용도

현장 계측을 위하여 사용한 매립 게이지는 콘크리트 유효 응력 게이지, 무응력 게이지, 콘크리트 변형률 게이지 및 Thermo-couple 이며 각 게이지의 측정점 수 및 용도는 [표 1]과 같다.

[표 1] 사용 매립 게이지의 종류 및 용도

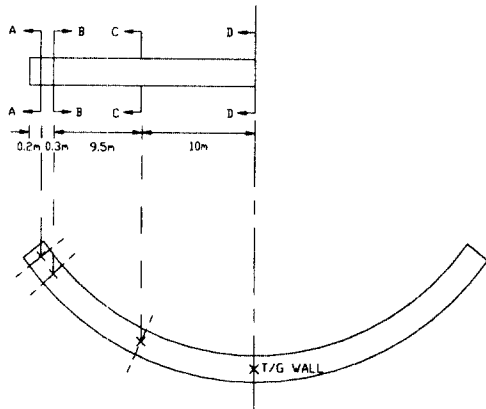
게이지 종류	측정점 수	용도
유효 응력 게이지	2 개소	매설 위치에서의 콘크리트가 받는 응력을 검출
변형률 게이지	9 개소	매설 위치의 콘크리트에 발생하는 총 변형률 (응력 변형률+온도 신축 변형률+건조 수축 변형률) 과 온도 변화 출력
무응력 게이지	3 개소	매설 위치에서의 콘크리트에 생기는 온도 신축과 건조수축에 의한 변형률 및 온도 변화 측정
Thermo-couple	16 개소	매설 위치에서의 온도 변화 측정

[표 2] 각 매설 게이지에 대한 기호 및 상세

게이지 종류	사용 기호	제품 모델명
유효 응력 게이지	Ⓔ	GK-100-505
변형률 게이지	Ⓢ	KM-100B
무응력 게이지	Ⓝ	KMF-51, KM-100B
Thermo-couple	● T	T-type

각 매설 게이지는 콘크리트 타설 또는 다짐 작업등에 의해 위치가 이동되지 않도록 배근된 철근을 이용하여 견고하게 설치하였으며 각 단면에 설치된 각종 게이지의 위치를 [그림 2]에 나타내었다. [그림 2]에 나타낸 기호의 설명은 [표 2]와 같다.

2.3 콘크리트 배합



[그림 1] 각 측정 단면의 위치

[표 3] 콘크리트 배합비

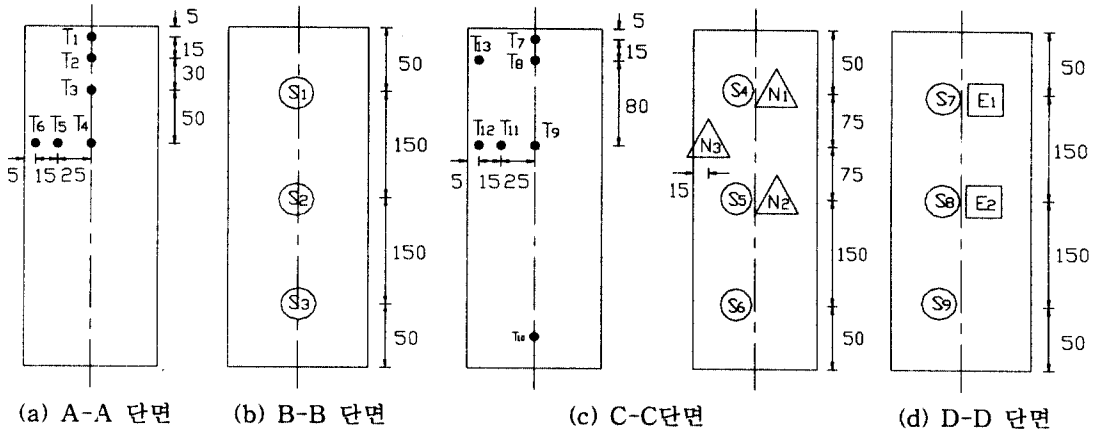
W/C (%)	s/a (%)	W	C ^{*1}	S ^{*2}	G ^{*3}	WRA	AEA
		(kg/m ³)					
44.0	44.5	172	391	757	945	1.345	0.012

*1: TYPE V Cement *2: 무안 해제, F.M=2.90

*3: 기초부 굴착암 ($G_{max}=19$ mm)

측정 대상물인 T/G 내측 벽체에 사용한 콘크리트는 설계기준강도 5500 psi (385 kg/cm²)인 보통강도 콘크리트로서 배합은 [표 3]과 같다.

콘크리트는 냉각 배합수를 사용하는 프리쿨링을 실시한 것으로 타설시 콘크리트 온도가 약 22℃이었으며 타설은 콘크리트 펌프카를 사용하였다.



[그림 2] 각 단면에서의 온도, 응력 및 변형을 게이지 설치 위치

3. 측정 결과 및 분석

3.1 콘크리트 강도 및 탄성계수

사용한 콘크리트의 강도 및 탄성계수 발현 상황을 검토하기 위하여 표준 양생한 $\phi 15 \times 30$ cm 공시체의 재령 1일, 3일, 7일 및 28일에서의 압축강도, 할열인장강도 및 압축탄성계수를 측정하였다. 탄성계수 측정에 있어서는 wire strain gage (gage length = 60 mm)를 사용하였다. 동일 조건인 공시체 3개로부터 구한 콘크리트의 압축강도, 할열인장강도 및 탄성계수는 [표 4]와 같다.

3.2 현장 기상 조건

(1) 기온 변화

콘크리트 구조물의 초기 온도 변화는 시멘트 수화열 및 주변 온도와의 열 교환에 의해 결정되며 콘크리트 구조물에 온도 응력을 발생시키는 온도 상승 및 온도 강하량은 주변 온도에 대한 상대적 온도

[표 4] 콘크리트의 강도 및 탄성계수

재령 항목	1 일	3 일	7 일	28 일
압축강도 (kg/cm ²)	134	231	297	447
활열인장강도 (kg/cm ²)	17.5	26.2	28.3	37.8
탄성계수 (kg/cm ²)	2.15×10 ⁹	2.57×10 ⁹	2.72×10 ⁹	2.97×10 ⁹

도를 측정 한 T16의 결과가 계측기 보호를 위해 설치한 천막의 영향을 받아 양생 초기에 구조물 주변의 기온과 다소 다른 경향을 보였음을 알 수 있다. 계측 기간중의 외기 온도는 평균 30℃이며 일교차의 영향을 받아 ±7℃ 범위에서 기온이 변화하였다.

(2) 상대 습도 및 풍속

콘크리트 구조물과 대기와의 사이에서 이루어지는 열교환과 수분 이동은 상대 습도와 풍속에 의해 크게 영향을 받으므로 구조물의 외부 조건으로서 측정하여 둘 필요가 있다. 계측 구조물 현장 주변의 기상 자료에 의한 상대 습도 및 풍속은 [표 5]와 같다.

[표 5] 상대 습도 및 풍속 변화 범위

항 목	상대 습도 (%)	풍 속 (m/sec)
측정값	77.3±10.0	0.5~1.5

3.3 구조물의 내부 온도 변화

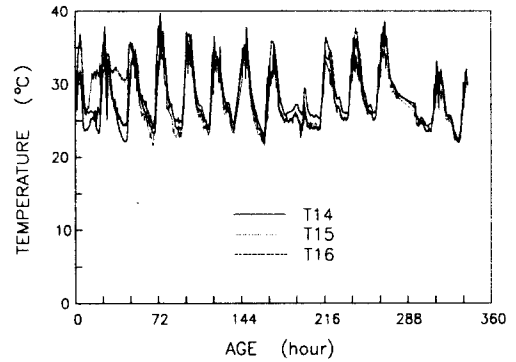
계측 기간중의 수화열과 외기 대류의 영향을 받아 변화하는 위치별 온도 변화 예를 [그림 4]와 [그림 5]에 나타내었다. [그림 4]의 계측값을 살펴보면 초기의 온도 상승 구간에서는 거의 동일한 온도 이력을 나타내지만 부재의 표면부에 근접할수록 외기의 영향을 받아 최대 상승 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 단면 A에서의 최대 상승 온도는 중심부에서 약 50℃를 나타내었으며 이 값은 표면부의 최대 상승 온도 보다 10℃정도 높은 값이다. 이러한 온도 차이는 온도 하강시 차츰 감소되며거푸집 탈형 이후 급속히 외기온에 수렴하여재령 9일 부터는 전 위치의 온도가 외기온에 의해 좌우되는 경향을 보였다. 특히 재령 9일 이후 표면부의 온도 변화는 외기의 일교차와 동일한 주기의 온도 곡선을 보여 표면부일 수록 외기온의 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

또한 [그림 4]의 T1, T2 와 T6, T5의 값을 비교하여 보면 표면부로 부터의 깊이가 동일하다 하더라도 거푸집의 유무에 의해 최대 상승 온도 및 온도 변화가 상이함을 알 수 있다. 이것은 거푸집에 의한 보온 효과가 반영된 결과로서 온도 예측에 있어서는 거푸집의 종류 및 거푸집의 존치 기간에 대한 고려가 필요함을 나타내는 것으로 사료된다.

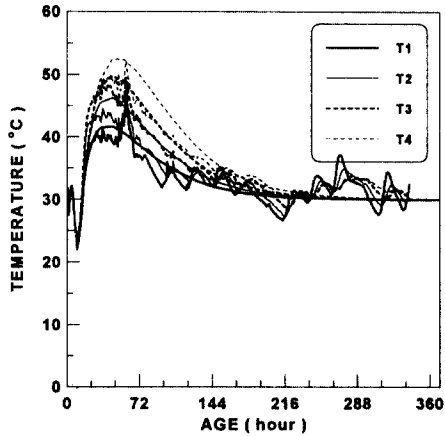
[그림 5]의 결과에 따르면 콘크리트의 온도 변화는 외기와 접하는 표면으로부터의 거리와 거푸집 유무에 의해 차이가 있으며 [그림 4]에서 나타난 경향과 거의 동일한 경향을 보였다. 그러나 C단면 중심부에서의 최대 상승 온도는 A단면 중심 온도 보다 약 8℃ 높은 온도를 보이며 표면부를 제외한 중앙 단면에서의 온도가 단부 단면에서의 온도 보다 높은 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 중앙 단면에서 보다 단부 단면에서의 열·대류가 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다.

변화량으로서 결정되므로 온도 응력 발생 기간중의 주변 온도 변화를 측정하여 둘 필요가 있다. 이를 위해 계측 현장 주변에 설치한 Thermo-couple(T14, T15, T16)을 사용하여 30분 간격으로 현장 계측 기간중의 기온 변화를 측정하였으며 측정 결과는 [그림 3]과 같다.

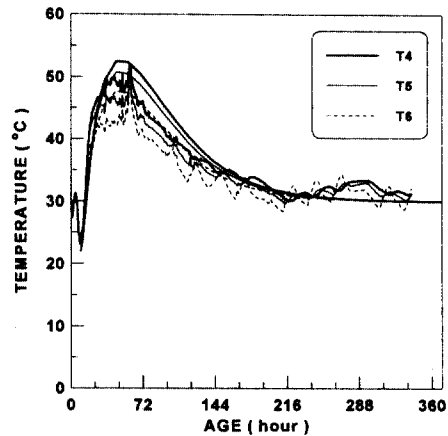
[그림 3]에 의하면 계측 구조물 주변에 설치한 3점의 온도 변화는 거의 동일하였으며 계측기 주변 온



[그림 3] 주변 온도 변화

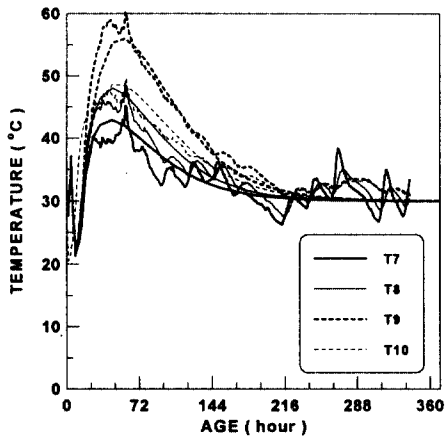


(a) 벽체 높이 방향

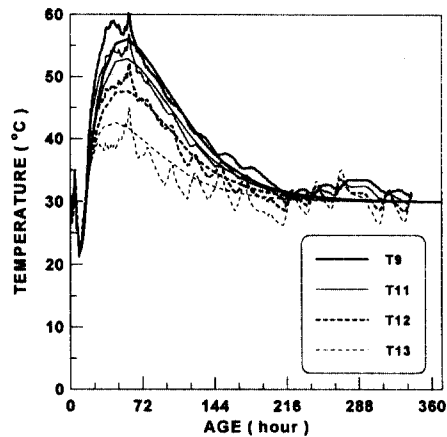


(b) 벽체 두께 방향

[그림 4] 위치에 따른 콘크리트 온도 변화 (A단면)



(a) 벽체 높이 방향



(b) 벽체 두께 방향

[그림 5] 위치에 따른 콘크리트 온도 변화 (C단면)

한편 각 그림의 콘크리트 초기 온도가 외기온보다 상당히 낮은 것을 알 수 있는데 이것은 현장 냉각 프랜트에서 생산한 얼음을 배합수에 혼입하여 실시한 프리쿨링 효과에 기인하고 있다.

이러한 제반 실험 결과를 해석적으로 근사 시키기 위하여 적절한 콘크리트 열특성 계수를 사용한 온도 해석을 실시하였으며 특히 표면부의 정확한 온도 예측을 위하여 거푸짐의 유무에 따른 대류 계수를 구분하여 사용하였다. 해석 결과에 따르면 거푸짐 거치면과 탈형면의 외기 대류 계수는 각각 9, 11 kcal/m²hr가 적합한 것으로 나타났으며 이러한 결과는 기존의 결과³⁾와 부합하는 것으로 판단된다. 해석에 의해 얻어진 결과를 [그림 4]와 [그림 5]에 함께 표시하였다.

3.4 콘크리트 응력 변화

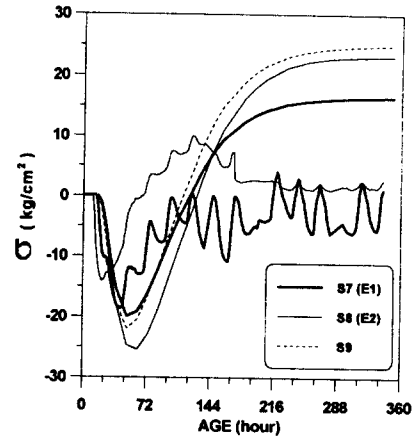
구조물 내에서 콘크리트가 받는 응력을 직접적으로 검출하는 유효 응력계를 D단면의 상부 및 중간부에 설치하여 콘크리트의 응력 변화를 측정하였다. 그 결과를 나타내면 [그림 6]과 같다.

[그림 6]의 실험 결과를 살펴보면 중앙 측정점에서의 응력은 내부 온도 상승기간 중에는 압축응력이 증가하지만 온도 강하가 시작되면 압축응력이 감소되고 내부 온도가 외기온에 도달하기 전에 인장응력이 진전함을 보였다. 이러한 온도의 상승·강하만에 의해 콘크리트가 인장 응력을 받게 되는 것은 콘크리트의 탄성계수 및 상대 구속 정도가 변화하는 것에 기인하는 것으로 매스 콘크리트에서의 온도 응력 및 균열 발생의 메커니즘을 예측할 수 있다. 마찬가지로 상부 측정점의 경우 외기온의 영향을 크게 받고 있지만 중앙점과 비슷한 경향을 보였다. 또한 이러한 온도응력들은 거푸집을 탈형하지 않은 초기 재령에서 크게 변화함을 보였다. 단 각 측정점의 결과가 재령 6일 경부터 0에 수렴하는 경향을 나타내고 있으나 이에 대한 원인이 재측 기기의 오류인지 콘크리트 물성이나 환경 변화에 기인하는 지에 대한 분석이 필요하다.

유효 응력계에 의한 최대 압축 응력과 최대 인장 응력은 E1과 E2가 각각 -15 kg/cm^2 , 10 kg/cm^2 및 -19 kg/cm^2 , 4 kg/cm^2 로서 중앙부의 인장 응력이 상부보다 크게 발생하였으며 이것은 구속도의 차이에 기인하는 것으로 상부 단면에서의 구속도가 중앙 단면에 비해 낮은 것을 의미한다.

따라서 계측한 T/G벽체에서는 상대적 구속 정도가 높은 중앙 단면의 중간부 또는 하부에서 가장 큰 인장 온도응력이 발생하며 향후 건조수축이나 재하에 의해 응력이 추가될 경우 균열 발생의 시발점이 될 것으로 예상된다. 계측 구조물의 계측 기간중 결과를 살펴보면 발생된 인장응력이 콘크리트 인장강도 보다 매우 낮은 수준임을 보이고 있으므로 온도 균열이 발생하지는 않은 것으로 판단되는데 이러한 낮은 인장응력 발생은 콘크리트 제조시에 실시한 프리쿨링의 효과로 판단된다.

한편 콘크리트 구조물의 온도 응력 계측값을 해석적으로 검토한 해석 결과를 [그림 6]에 함께 나타내었다. [그림 6]의 해석 결과는 실측값의 변화 경향을 잘 표현하고는 있으나 응력값의 수준이나 발생 시기는 다소 차이가 있음을 보이고 있다. 이것은 벽체에 대한 기초의 구속 정도 및 콘크리트의 고온하크리프 특성에 대한 차이에 기인하는 것으로 판단되므로 정확한 온도 응력 예측을 위해서는 구속 정도 및 크리프에 대한 연구가 추후 추진되어야 할 것으로 사료된다.



[그림 6] 콘크리트 온도 응력 변화 (D단면)

4. 결론

- (1) 구조물내 위치에 따른 온도 분포는 표면부로 부터의 거리와 거푸집의 유무에 의해 영향을 받는다.
- (2) 상대적 구속 정도가 높은 중앙 단면에서 10 kg/cm^2 의 인장 응력이 발생하였으며 콘크리트 온도 응력은 구속 정도와 크리프 특성에 크게 영향을 받는다.
- (3) 매스 콘크리트 구조물에 대한 해석을 실시하여 계측 결과와 비교 분석하였으며 정확한 해석 결과를 도출하기 위한 검토 사항을 제시하였다.

참고문헌

1. 김진근, 이종대, "크리이프를 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, pp.771-781, 1994.7
2. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 한국 콘크리트학회 논문집, 제4권, 제3호, pp.101-111, 1992.9
3. 日本コンクリート工學協會, "マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに関するコロキウム", p.112, 1982