

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 콘크리트 벽체 구조물의 수화 발열 특성 연구

Characterization of Hydration Heat in Concrete Wall Structures of Nuclear Power Plant

방기성, 이종림, 송영철, 조명석

한국전력공사
대전 유성구 문지동 103-16

요 약

콘크리트 수화열에 의한 온도응력 예측을 위해 온도변화 해석과 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등의 역학적 물성 해석 및 온도응력 해석이 가능한 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 이의 검증을 위해 원자력 발전소 격납 구조물 텐던갤러리 벽체에 게이지를 매립 수화열에 의한 콘크리트 구조물의 온도응력을 측정하여 해석결과와 비교하였다. 그 결과 구조물 위치에 따른 온도 분포는 외기와 접하는 표면으로부터의 거리와 거푸집의 유무에 의해 영향을 받으며 중앙 단면에서 보다 단부 단면에서 열대류가 크게 일어남을 알 수 있고 이는 해석에 의한 결과와도 일치하고 있다. 또한 온도응력은 상대적 구속 정도가 높은 중앙단면 중간부 이하에서 가장 큰 인장 온도응력이 발생하며 이는 콘크리트 인장강도보다 매우 낮은 수준으로 온도균열은 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 초기재령에서 온도응력의 크기와 발생시기에 있어서의 예측과 해석의 차이는 벽체의 구속정도 와 고온에서의 크리프 특성치에 기인함을 알 수 있었다.

Abstract

In order to estimate thermal stress by hydration heat in concrete structures, the finite element program, which is able to calculate concrete internal temperature change, mechanical properties and thermal stress, was developed. To verify the analytical results, temperature change, strain and thermal stress induced from hydration heat were measured by using the embedded type concrete gauges in the tendon gallery wall of the containment building. The experimental results were strongly affected by the location of measuring points and surrounding environmental conditions of members. A finite element analysis was also performed to clarify the thermal behavior of concrete. The analytical results correlated very well with the tendency of measuring value. Slight differences in stress value and generation timing were noticed due to the differences in restraint condition of the basemat against the walls and creep characteristics of high temperature concrete.

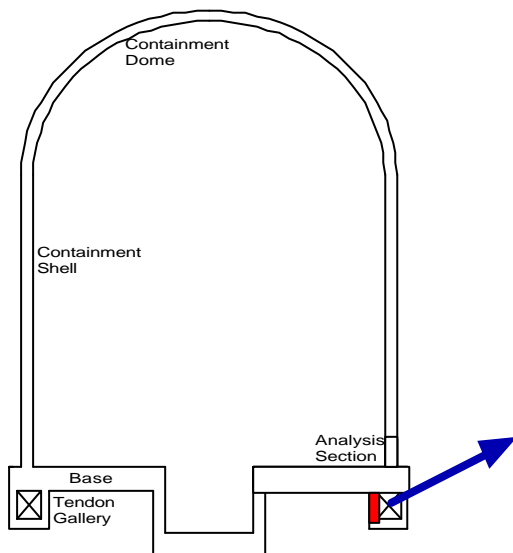
1. 서론

매스 콘크리트 구조물의 시공 계획 또는 콘크리트 타설 단계에서 구조물 내부에 발생하는 온도응력을 예측하고 이에 대한 적절한 사전 조치를 강구하는 것은 구조물의 안전성 및 내구성을 고려할 때 매우 중요한 사항이라 할 수 있다. 그러나 매스 콘크리트 구조물 내부에 발생하는 온도응력은 다양한 현장 조건에 따라 변화하는 것으로 각 조건을 대상으로 하여 실험을 실시하는 것은 사실상 매우 어려운 일이다.

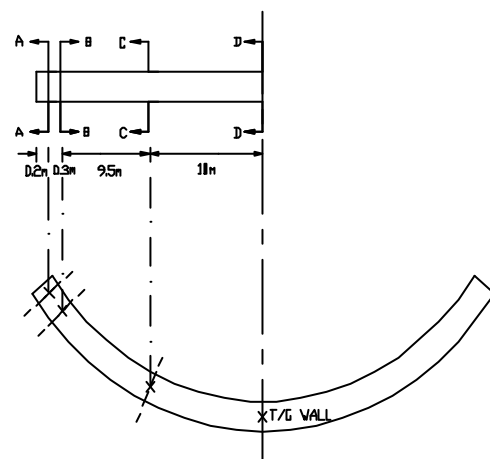
따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 격납 구조물 텐던갤러리 벽체에서 콘크리트 수화열에 의한 온도응력 연구를 위해 현장 계측 실험을 통한 실제 구조물에서의 온도 및 온도응력 거동을 분석하고 또한 해석 프로그램을 사용하여 현장조건 변화에 대응한 해석을 수행 이들 결과를 비교 검토 하므로써 텐던갤러리 벽체의 각 단면에 대한 온도 변화 및 온도응력 변화를 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

계측 구조물은 영광 원자력 발전소(5호기) 격납 구조물 텐던갤러리 벽체에서 120° 로 3등분 분할 타설하는 벽체를 선정 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, 변형을 및 내부 온도 변화를 평가하기 위하여 대상 벽체의 4개 단면을 선정하였으며 격납구조물의 형상과 측정 단면의 위치는 [그림 1] 및 [그림 2]와 같다. [그림 2]의 A단면에는 Thermo-couple을, B단면에는 변형률 게이지를, C단면에는 Thermo-couple, 변형률 게이지 및 무응력 게이지를, D단면에는 유효 응력 게이지와 변형률 게이지를 각각 설치하였다.



[그림 1] 격납구조형상



[그림 2] 측정 단면 위치

[표 1] 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 변형률과 온도변화 (응력 변형률+온도 신축 변형률+건조 수축 변형률)
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

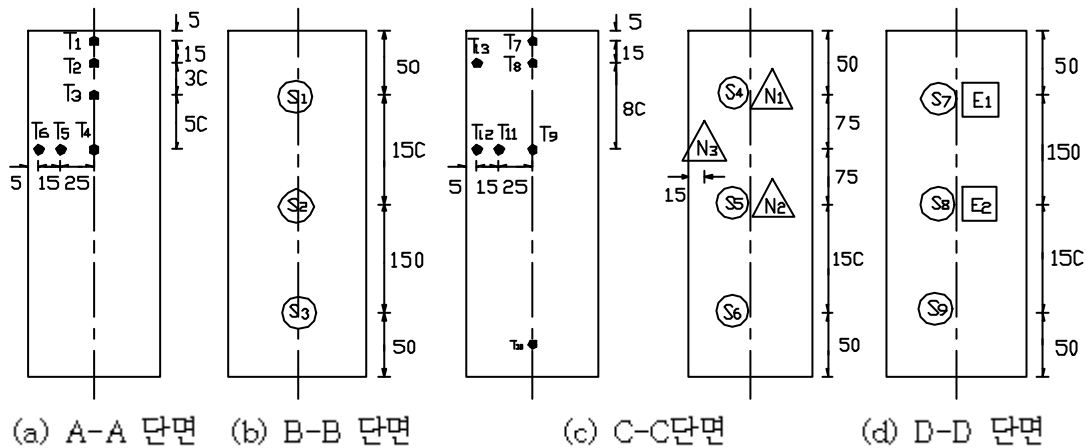
[표 2] 매립 게이지 기호 및 상세

게이지 종류	기호	제품 모델명
유효응력게이지	Ⓜ	GK-100-505
변형률 게이지	Ⓢ	KM-100B
무응력 게이지	△	KMF-51, KM-100B
Thermo-couple	■ T	T-type

[표 3] 콘크리트 배합비

w/c (%)	s/a (%)	W	C ⁴¹	S ⁴²	G ⁴³	WRA	AEA
		(kg/m ³)					
44.0	44.5	172	391	757	945	1,345	0.012

C⁴¹ : 5종 시멘트, S⁴² : 무안해제모래, F, M=2.90, G⁴³ : 쇄석(19mm)



[그림 3] 각 단면에서의 온도, 응력 및 변형률 게이지 설치 위치

가. 게이지의 종류 및 용도

현장 계측을 위하여 사용한 매립 게이지는 콘크리트 유효 응력 게이지, 무응력 게이지, 콘크리트 변형률 게이지 및 Thermo-couple 이며 각 매립 게이지의 종류 및 용도는 [표 1]에, 기호 및 상세는 [표 2]와 같고 각 매설 게이지의 위치를 [그림 3]에 나타내었다.

나. 콘크리트 배합

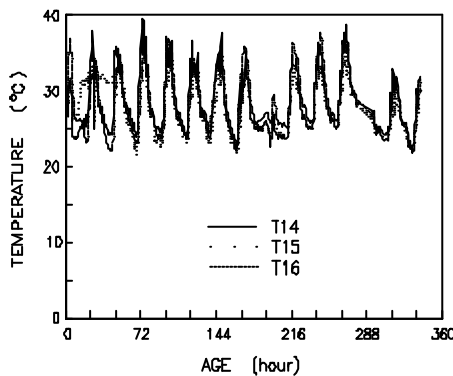
계측 대상 구조물인 텐던 갠러리 내측 벽체에 사용한 콘크리트는 설계기준강도 5500 psi (385 kg/cm²)인 보통강도 콘크리트로서 배합은 [표 3]과 같으며 콘크리트는 냉각 배합수를 사용 프리쿨링을 실시한 것으로 타설시 콘크리트 온도가 약 22°C 이었다.

다. 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.

라. 현장 기상 조건

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 변화량으로서 결정되므로 온도 응력 발생 기간중의 주변 온도, 상대습도 및 풍속을 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 4]와 같고 상대습도 및 풍속은 [표 5]와 같다.



[그림 4] 주변 온도 변화

[표 4] 콘크리트 강도 및 탄성계수

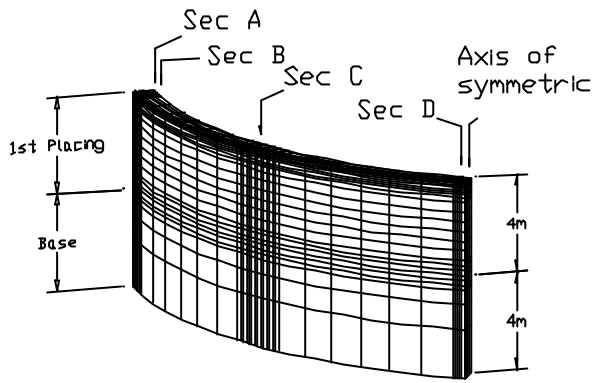
재령	1 일	3 일	7 일	28 일
항목				
압축강도 (kg/cm ²)	134	231	297	447
할열인장강도 (kg/cm ²)	17.5	26.2	28.3	37.8
탄성계수 (kg/cm ²)	2.15×10^6	2.57×10^6	2.72×10^6	2.97×10^6

[표 5] 상대습도 및 풍속 변화 범위

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

3. 해석 방법

해석을 수행함에 있어서 해석방법 및 해석변수는 가능한 현장 조건을 반영하고자 하였다. 먼저 해석대상은 [그림 5]의 일시 타설한 텐던갠러리 벽체로서 좌우 대칭을 고려하여 반쪽만을 요소 분할하였다. 기초판과 벽체를 연결하는 주철근과 접촉면의 부착에 의한 구속을 고려하기 위하여 벽체 저면의 절점은 기초판과 동일한 절점을 사용하였다. 또한 거



[그림 5] 텐던갤러리 벽체 요소 분할

[표 6] 해석 변수 상세

변수	사용 값	비고
단열상승온도 (°C)	62.0	실험값 참조
반응속도 (α)	0.70	실험값 참조
외기대류계수 (kcal/m ² hr°C)	8.0 ~ 10.0	거푸집 거치면
	10.0 ~ 15.0	거푸집 탈형면
타설온도 (°C)	22.0	실측값 적용
외기온도 (°C)	30.0	평균 기온
열전도율 (kcal/m ² hr°C)	2.5	
비열 (kcal/kg°C)	0.23	
콘크리트 단위중량 (kg/m ³)	2400	

푸집의 거치와 탈형에 의한 온도 변화 효과를 반영하기 위하여 거푸집 거치면과 탈형된 콘크리트 면에 대하여 각각 다른 외기 대류 계수를 적용하여 해석하였다. 해석에 사용된 벽체의 요소 분할은 [그림 5]에 나타난 바와 같으며 해석시 사용한 단열상승온도(K) 및 반응속도(α)를 비롯한 해석변수값들은 실험에 의해 얻어진 결과들이며 [표 4]와 같다.

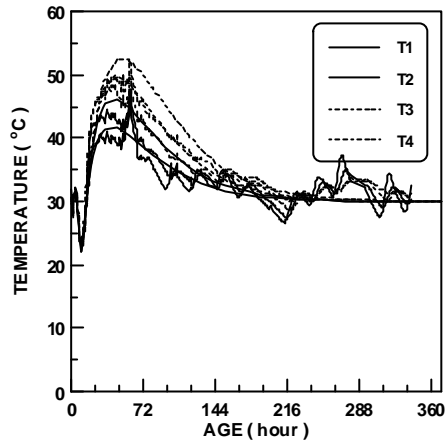
4. 실험 및 해석 결과 비교 분석

가. 온도변화

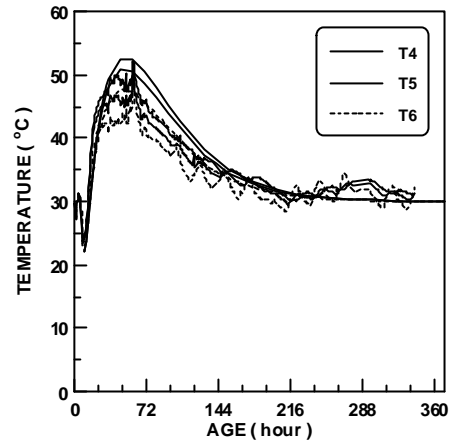
온도 계측 결과와 해석 결과와의 비교를 위해 수화열과 외기 대류의 영향을 받아 변화하는 위치에 따른 온도 변화 결과를 [그림 6]과 [그림 7]에 나타내었다.

계측실험 결과 [그림 6]에서와 같이 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 상승온도는 중심부에서 약 50°C를 나타내었으며 이 값은 표면부의 최대 상승 온도 보다 10°C정도 높은값이다. 이러한 온도 차이는 온도 하강시 차츰 감소되며 거푸집 탈형 이후 급속히 외기온에 수렴하여 재령 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 6]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 7]의 결과에 따르면 콘크리트의 온도 변화는 외기와 접하는 표면으로부터의 거리와 거푸집 유무에 의해 차이가 있으며 [그림 6]에서 나타난 경향과 거의 동일한 경향을 보였다. 그러나 C단면 중심부에서의 최대 상승 온도는 A단면 중심 온도 보다 약 8°C 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. 한편 각 그림의 콘크리트 초기 온도가 외기온보다 상당히 낮은 것을 알 수 있는데 이것은 현장에서 생산한 얼음을 배합수에 혼입하여 실시한 프리클링 효과에 기인하고 있다.

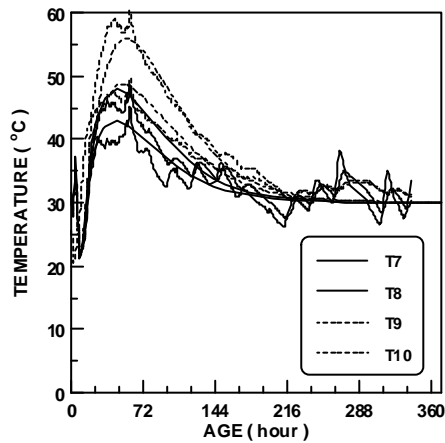


(a) 벽체 높이 방향

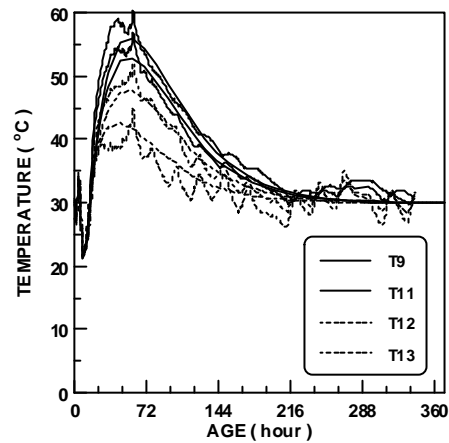


(b) 벽체 두께 방향

[그림 6] 위치에 따른 콘크리트 온도 변화 (A단면)



(a) 벽체 높이 방향



(b) 벽체 두께 방향

[그림 7] 위치에 따른 콘크리트 온도 변화 (C단면)

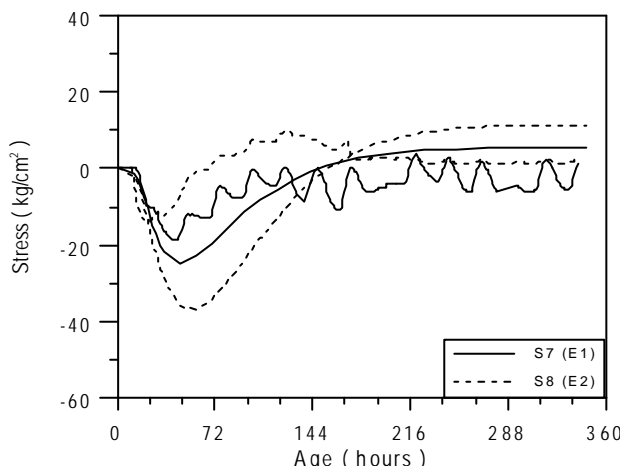
해석 결과에 따르면 온도 해석의 정확도를 높이는 가장 중요한 요인으로는 현장 여건을 적절히 나타낼 수 있는 변수값의 결정이라 할 수 있다. 본 해석에 있어서는 [표 6]에 서술한 바와 같이 실내 실험 결과를 참조한 단열온도상승곡선을 사용하였으며 본 실험에서와 같이 계속 기간 중 거푸집의 탈형에 의한 영향을 고려하기 위하여 거푸집면과 탈형면에 대한 별개의 외기대류계수를 적용하였고 각 계수를 변화시켜 가장 실험 결과와 근접하는 해석결과를 도출하고자 하였다. 한편 시시각각으로 변화하는 풍속과 외부 기온의 변화를 현장 여건으로서 반영하는 것이 바람직하지만 간편성과 작업성을 고려하여 본 해석에서는 평균 풍속 1 m/sec와 평균 외기온 30°C를 사용하였다. 외기대류 계수로써 [표 6]에 나타난 범위의 값을 사용하여 반복 해석한 결과 거푸집을 거치한 콘크리트 면에서의 외기대류 계수값으로는 9.0 kcal/m²hr°C를 거푸집이 없는 콘크리트 면에서의 외기대류 계수값으로는 11.0 kcal/m²hr°C를 사용하는 것이 실험 결과와 잘 부합하는 것으로 나타났다. 이 값들은 기존의 연구 결과에 따른 추정값과도 잘 일치하고 있어 해석에 의한 각 부위의 온도 분포가 신뢰성 있는 결과임을 보였다. [그림 6]과 [그림 7]에서 알 수 있는 바와 같이 해석에 의한 온도 결과는 실험 결과의 경향을 잘 나타내고 있으며 표면으로부터의 거리에 따라 온도가 크게 변화함을 알 수 있다. 또한 A단면과 같이 중앙 단면보다 측면으로의 열방출이 예상되는 단면에서의 온도는 C단면에서의 온도보다 낮게 되는 것을

보여 본 해석 구조물과 같은 조건하에서는 3차원 온도 해석에 의해 각 부위의 온도 분포를 정확히 예측할 수 있음을 보였다. 중앙 단면의 중심부에 대한 온도를 살펴보면 최고 온도가 56°C로서 단열상승 온도 보다 낮은 상태에 있음을 알 수 있다. 이것은 본 해석 벽체와 같이 단면 두께가 90 cm인 경우에는 외부로의 온도 전달이 커서 중심부는 물론 각 부위에서의 온도 상승이 매스 콘크리트와 같은 단열상태가 아님을 의미하고 있다.

나. 온도 응력

수화열과 열전도에 의해 결정되는 각 부위의 온도변화는 콘크리트의 온도팽창과 신축을 발생시키며 이러한 체적변화가 구조물 내외부 구속에 의해 구속될 때 콘크리트에는 응력이 생기게 된다. 이러한 응력은 시간에 따른 콘크리트의 물성변화에 의해 크기가 결정되며 지속 응력하에서의 크리프 영향을 받아 응력변화를 일으키게 된다. 따라서 본 연구에서는 구조물 내에서 콘크리트가 받는 응력을 직접적으로 검출할 수 있는 유효 응력계이저를 이용하여 측정한 온도응력 결과와 수화열 해석 프로그램에 의한 온도응력 해석 결과를 비교 평가하고자 하였다.

계측실험 결과 [그림 8]에서와 같이 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 중



[그림 8] 콘크리트 온도 응력 (D단면)

양점과 비슷한 경향을 보였으며 재령 6 일 경부터 0에 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 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 텐던캘러리 벽체에서는 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.

해석 결과 [그림 8]에 나타낸 E1값이 내부 온도상승에 기인한 압축응력이 재령 초기에 발달하였으나 최고 온도 이후로는 압축응력이 점차 감소하여 무응력 상태로 수렴하는 결과를 보였고 이러한 경향은 실험 결과와 일치하였다. 그러나 압축응력값 자체는 실측값의 약 1/2을 나타내고 있어 초기 재령에서의 탄성 계수 산정에 대한 보완 연구가 필요함을 시사하였다. 한편 E2값의 실측값과 해석값을 비교하여 보면 초기 재령에서의 압축응력이 내부 온도 저하에 따라 점차 감소하고 결국 부재에 인장응력이 발생함을 알 수 있다. E1

과 같이 외부구속이 약한 위치와는 달리 외부구속이 강한 중간 부위 이하의 위치에서는 수화열에 의한 온도의 강하에 의해 부재 내부에 인장응력이 발달하게 되고 이러한 응력이 잔류응력으로 존재하거나 균열을 발생시키는 원인이 되는 것으로 판단된다. 즉 본 구조물에서의 초기 온도 균열은 벽체의 중간 부위 아래에서 시작될 것으로 예측되었다. 그러나 [그림 8]에서 알 수 있는 바와 같이 최대 압축응력의 크기, 압축응력에서 인장응력으로 전환하는 재령 및 온도응력의 구배등에서 차이를 보였다. 이러한 현상의 원인은 해석시 구조물의 국부적인 조건이 실제 부재의 거동과 상이한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

원자력 구조물의 텐던갤러리 벽체의 온도응력에 대한 실측 및 해석을 실시하여 비교 분석한 결과 해석시 구조물의 구속정도 및 크리프 특성등의 입력 데이터 결정이 현장 여건을 정확하게 반영하는데 어려움이 있어 초기재령의 정확한 온도응력 예측에는 이르지 못하였으나 재령 6일 이후의 온도응력은 일정오차 범위내에서 실험값과 해석값이 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

격납 구조물 텐던 갤러리 벽체에서 콘크리트 수화열에 의한 온도응력 연구 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조물내 위치에 따른 온도 분포는 외기와 접하는 표면으로 부터의 거리와 거푸집의 유무에 의해 영향을 받으며 중앙 단면에서 보다 단부 단면에서 열대류가 크게 일어남을 알 수 있다.
- (2) 온도해석에 의한 온도 분포는 실험 결과의 경향을 잘 나타내고 있으며 3차원 해석에 의해 각 부위의 온도분포를 정확하게 예측할 수 있다.
- (3) 계측한 온도응력은 상대적 구속 정도가 높은 중앙단면 중간부이하에서 가장 큰 인장 온도응력이 발생하며 이 값은 콘크리트 인장강도보다 매우 낮은 수준으로 온도균열은 발생하지는 않을 것으로 판단되며 이는 콘크리트 제조시 프리클링의 효과에 기인한 것으로 사료된다.
- (4) 온도응력에 대한 해석결과 구조물의 구속정도 및 크리프 특성등의 입력 데이터 결정이 현장 여건을 정확하게 반영하는데 어려움이 있어 초기재령의 정확한 온도응력 예측에는 이르지 못하였으나 재령 6일 이후의 온도응력은 일정 오차 범위내에서 실험값과 해석값이 일치하였다.

참고문헌

1. 김진근, 이종대, "크리이프를 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제4호, pp.771-781, 19947
2. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 한국콘크리트학회 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