

# 전산해석에 의한 온도응력 및 온도균열 검토

## A thermal stress and crack study by computer modelling

문 수 동<sup>\*</sup>      이 상 호<sup>\*\*</sup>      문 한 영<sup>\*\*\*</sup>  
Su-Dong Moon      Sang-Ho Lee      Han-Young Moon

---

### ABSTRACT

Tong-young LNG tank is a LNG storage tank of 140,000 kℓ, and it is composed of Bottom Slab(Annular, Center), Outer Wall, Ring Beam and Roof.

Generally, when concrete temperature arise, the complex thermal stress of inner and outer part can cause serious thermal crack and damage at structure.

So in this paper, for the control of this thermal crack, we did the concrete mix design with the base of fly-ash 30% substitute at binder, and through the computer modelling at Bottom Slab(Annular, Center), Outer Wall, Ring Beam and Roof, we studied the probability of thermal crack by thermal crack index.

---

### 1. 서 론

통영 LNG 지상식 탱크 #6, 7호기는 안지름 84.0m의 14만 kℓ의 용량으로, Bottom Slab, Outer Wall, Ring Beam 및 Roof로 구성되어 있다. 특히, Bottom Slab는 두께(thickness)가 1.8m정도이고, Outer Wall의 두께는 약 1.0m로 대형 매스콘크리트 구조물에 해당하고, 콘크리트 타설후 시멘트 수화열에 기인한 높은 온도응력이 발생할 수 있다.

매스 콘크리트는 온도상승시에 단면내에 온도차에 의해 발생하는 내부구속응력과 최대 온도에 도달한 후 온도하강시에 외부구속과 내부구속에 의한 두가지의 응력이 겹쳐진 복합응력이 문제가 되며, 각각의 성분의 대소에 따라 온도균열의 발생시기 및 발생양상도 달라진다.

본 보고서는 이와 같은 매스콘크리트 시공시 발생될 수 있는 온도균열을 제어하기 위해서, 전체 Binder(결합재)에 플라이애쉬를 30% 치환한 배합을 기본 Base로하여 수화열을 저감시킨 배합에 대해, Bottom Slab(Annular, Center), Outer Wall, Ring Beam, Roof에 대한 수화열 Mock-up test 및 온도응력 전산해석을 통하여, 온도균열 발생 가능성에 대하여 정량적으로 평가하였다.

---

- \* 정회원. 대림산업(주) 기술연구소 과장
- \*\* 정회원. 대림산업(주) 기술연구소 대리
- \*\*\* 정회원. 한양대학교 토목공학과 교수

## 2. 수화열 Mock-up test

### 2.1. 시험개요

본 시험은 콘크리트의 수화열 측정을 통하여 온도균열 방지를 통한 콘크리트 품질관리에 그 목적이 있고, 그 배합비는 아래의 표 1과 같다.

표 1 콘크리트 배합비

규격	W/B (%)	s/a (%)	C (kg)	FA (kg)	W (kg)	S (kg)	G (kg)	Ad. (%/B)	구분
19-400-18	36.1	36.0	331	142	171	584	1,083	1.3	
19-300-10	41.0	39.5	273	117	160	682	1,090	1.1	
19-300-18	39.7	38.5	291	125	165	651	1,084	1.3	

### 2.2 온도센서의 설치

Annular Bottom Slab, Center Bottom Slab 및 Wall을 가정한 모형시험체를 제작하여 다음과 같은 위치에 Censor를 설치하였다.

센서의 설치위치는 Side part ①(1EA), Center part②(1EA), Upper part③(1EA), 대기④(1EA)와 같고, 센서는 T-type Thermocouple을 사용하였다. 측정장비는 DATALOGGER를 사용하였고, 매 1시간 간격으로 7일간에 걸쳐 측정하였다.

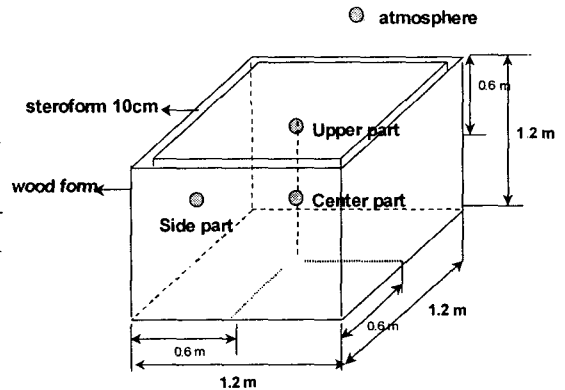


그림 1 온도센서 설치위치

## 3. 온도응력 전산해석

### 3.1 전산 해석방법

콘크리트의 수화열 및 온도응력해석을 위한 해석프로그램으로는 현재 ABAQUS, DIANA, ANSYS, HACON 및 KAIST에서 만든 온도응력해석 전문프로그램들이 있다.

본 해석에는 2차원 축대칭 비정상 열전도 유한요소해석기법(FEM)을 사용하고, 수화열 및 온도응력 전산해석을 위한 열응력 전용해석프로그램인 HACON을 사용하였다. 전산해석시 콘크리트 열전도율, 비열, 밀도, 탄성계수, 외기온도, 풍속 및 거푸집의 재질 및 두께 등의 물성치들이 고려되었다.

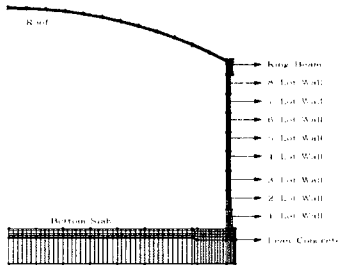


그림 2 전산해석을 위한 Mesh

Bottom Slab에서 Roof까지의 콘크리트 타설부터 양생종료시까지의 단계별해석을 실시하여 각각의 검토대상부재에 대한 수화열 및 인장강도, 온도응력을 구하고, 이에 따른 온도관열지수를 계산하여 온도관열발생가능성을 검토하였다.

수화열 해석시에는 지반까지 모델링하여 해석을 실시하였다. 온도해석에 사용된 2차원 유한요소해석(FEM)에 의한 Pre-Process과정으로 완성된 Mesh는 그림 2와 같다.

### 3.2 재료물성 및 양생조건

재료의 물성치는 아래의 표 2와 같다

표 2 Input Data

특 성	단 위	설계기준강도별 물성치		비 고
		fck:400kgf/cm <sup>2</sup>	fck:300kgf/cm <sup>2</sup>	
단위결합재량	kg/m <sup>3</sup>	473	416	
단열온도상승량(K)	℃	54.0	48.4	
반응속도(a)	-	0.293	0.235	
열전도율	Kcal/mhr℃	2.2	2.2	
비 열	Kcal/kg℃	0.25	0.25	
밀 도	kg/m <sup>3</sup>	2,319	2,323	

## 4. 수화열 전산해석 및 Mock-up test 결과

### 4.1 수화열 전산해석 및 Mock-up test 결과

수화열 전산해석 및 Mock-up test 결과는 아래의 그림 3, 4와 같다.

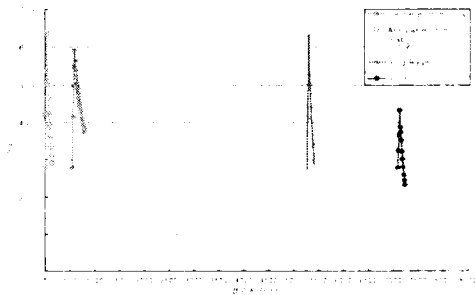


그림 3 수화열 전산해석결과

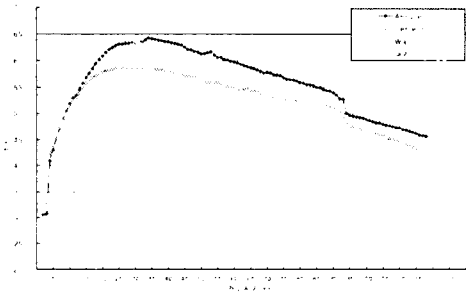


그림 4 수화열 Mock-up test 결과

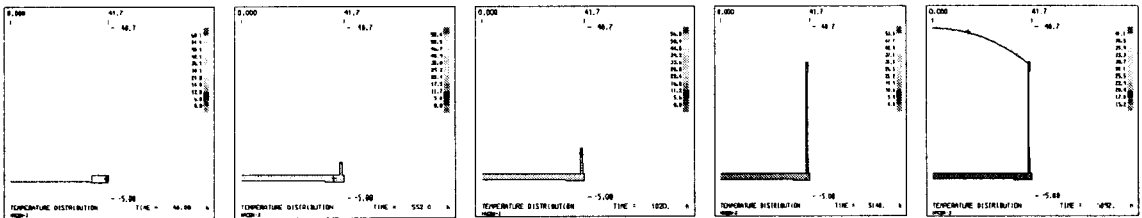
표 3 수화열 전산해석과 Mock-up test결과 비교

구 분		수화열 전산해석 결과	Mock-up test 결과
Annular Bottom Slab	최대온도(℃)	63.5	64.2
	도달시간(hr)	36	36
Center Bottom Slab	최대온도(℃)	59.0	59.0
	도달시간(hr)	48	48
Outer Wall	최대온도(℃)	62.7	62.7
	도달시간(hr)	48	48

수화열 전산해석과 Mock-up test결과를 비교하면, Annular 및 Center Bottom Slab의 경우에는 비교적 전산해석결과와 실제 Mock-up test결과가 잘 match가 되나, Wall의 경우는 외기의 온습도의 변화가 심하여 이를 충분히 해석에 반영하기 어려움으로 인한 편차로 판단되나, 비교적 유사한 값의 온도분포를 보였다.

전산해석결과 콘크리트 타설전 사전에 전산해석을 실시하여, 콘크리트의 온도균열에 대한 예측이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

HACON에 의한 수화열 Output은 다음의 그림5와 같다.



<ABS> <CBS> <2-Lot Wall> <Ring Beam> <Roof>

그림 5 콘크리트 최고온도시의 온도분포

#### 4.2 온도응력 해석결과

인장강도 해석결과, 설계기준강도 300kgf/cm<sup>2</sup>에 해당하는 Center Bottom Slab가 매스구조물로 인해, 보다 빠른 강도발현을 보이고 있고, 설계 기준강도 400kgf/cm<sup>2</sup>의 Annular Bottom Slab, 2-Lot Wall 및 Ring Beam중 Ring Beam의 두께가 두꺼워 보다 빠른 인장강도의 발현을 보임을 확인할 수 있었다.

온도응력 해석결과 Center Bottom Slab의 경우, 두께가 1.5m에 해당하는 대형구조물의 영향으로 400kgf/cm<sup>2</sup>의 구조물들과 상응하는 온도응력 분포를 보이고 있고, 이는 온도균열지수와 연관되어 구조물에 온도균열을 발생시키는 원인을 제공할 수 있다. 그리고, Roof의 경우는 두께가 50cm정도로 얇아서 많은 열이 빨리 외부로 발산되어 Center Bottom Slab에 비해 열응력이 보다 낮은 수치를 보임을 알 수 있다 인장강도 및 열응력 해석결과는 그림 6, 그림 7과 같다.

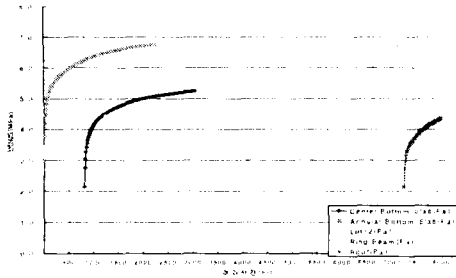


그림 6 인장강도 해석결과

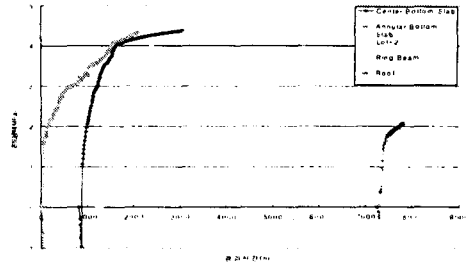


그림 7 온도응력 해석결과

#### 4.3 온도균열지수 검토결과

콘크리트표준시방서에 의하면, 온도균열에 대한 위험도를 나타내기 위한 구체적인 지표로서 온도균열지수를 도입하고, 이 값을 기준으로하여 구조물의 중요도에 따라 균열의 판단기준을 정한다.

표 4 온도균열지수와 온도균열발생(콘크리트표준시방서)

분 류	온도균열지수	비 고
균열을 방지하고 싶은 경우	1.5이상	$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)}$ I <sub>cr</sub> (t) : 온도균열지수 f <sub>sp</sub> (t) : 인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> ) f <sub>t</sub> (t) : 온도응력(kgf/cm <sup>2</sup> )
균열발생을 제한하고 싶은 경우	1.2이상 1.5미만	
유해균열을 제한하고 싶은 경우	0.7이상 1.2미만	
유해균열 발생	0.7미만	

표 5 온도응력해석에 의한 온도균열지수 결과

구 분	균열 지수	도달시간 (hr)	현 장 시방기준
Annular Bottom Slab	1.3	36	1.2
Center Bottom Slab	1.2	48	1.5
2-Lot Wall	1.3	48	1.5
Ring Beam	1.3	36	1.2
Roof	2.1	36	-

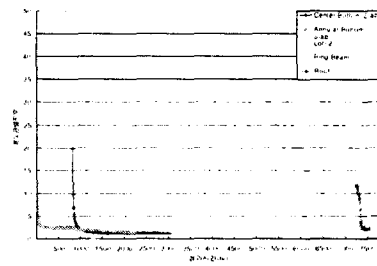


그림 8 온도균열지수 결과

LNG tank #6, 7호기의 온도응력전산해석에 의한 온도균열지수 산출 결과 1.2이상의 값으로 나타났고, 이는 균열발생을 제한하는 값이다. 하지만, 현장시방기준인 Center Bottom Slab와 2-Lot Wall의

온도균열지수 기준인 1.5 이하이므로, 온도균열지수를 높이기 위해 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 물 탱크에 얼음을 투입시키는 방법
- ② 스프링쿨러를 통한 굵은골재의 온도저감
- ③ 굵은골재 중간저장소에의 그늘막설치를 통한 온도저감

## 5. 결론

통영생산기지 2단계 1차확장공사현장 Tank #6,7에 타설될 콘크리트의 수화열, 온도응력 해석결과는 다음과 같다.

### (1) 수화열 해석결과

최고수화열이 모두 현장특기시방 기준인 65℃를 초과하지 않는 결과로 나타나 온도응력에 취약한 서중콘크리트 타설시에도 충분히 현장 관리기준에서 관리가 가능하다는 결론을 얻었다.

### (2) 수화열 전산해석결과와 Mock-up test 결과비교

실제 현장에서 실시한 수화열 Mock-up test결과와 비교해 본 결과 유사한 결과를 얻었고, 향후 유사구조물에서의 온도응력 전산해석의 적용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

### (3) 온도균열지수 계산결과

온도응력해석에 의한 온도균열지수 계산결과 모두 1.2이상의 값을 얻었고, 현장특기시방기준을 만족시키지 못하는 일부 구조물 시공시에는 다음과 같은 조치가 취해져야 될 것으로 판단된다.

- ① 물 탱크에 얼음을 투입시키는 방법
- ② 스프링쿨러를 통한 굵은골재의 온도저감
- ③ 굵은골재 중간저장소에의 그늘막설치를 통한 온도저감

## 참고문헌

1. 현대건설(주), “매스콘크리트의 溫度解析 시스템 開發”, 현대건설(주) 기술연구소 연구보고서, 1995.
2. 이 장화, “주변환경을 고려한 매스콘크리트의 온도이력해석”, 연세대학교 공학박사 학위논문, 1995.
3. 대우건설(주), “매스콘크리트의 온도균열 예측 및 시공제어 시스템 연구”, 대우건설(주) 기술연구소 연구보고서, 1995.
4. 장 민조, “매스 콘크리트의 현장계측을 통한 수화열 범용 해석 프로그램의 영향도 분석”, 부산대학교 산업대학원 석사학위 논문, 2002년 8월.