지하식 LNG 저장탱크 구조물의 온도균열 제어에 관한 연구

권영호^{1)*}

¹⁾동양대학교 건축소방행정학과

A Study on the Thermal Crack Control of the In-Ground LNG Storage Tank as Super Massive Structures

Yeong-Ho Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture and Fire Service Administration, Dong Yang University, Youngju 750-711, Korea

ABSTRACT In this study, thermal stress analysis are carried out considering material properties, curing condition, ambient temperature, and casting date of the mass concrete placed in bottom slab and side wall of the in-ground type LNG tank as a super massive structure. Also, based on the numerical results, cracking possibility is predicted and counter measures to prevent the cracking are proposed. For the tasks, two optimum mix proportions were selected. From the results of the thermal stress analysis, the through crack index of 1.2 was satisfied for separately caste concrete lots except for the bottom slab caste in 2 separate sequences. For the double caste bottom slab, it is necessary introduce counter measures such as pre-cooling prior to the site construction. Also, another crack preventive measure is to lower the initial casting temperature by 25°C or less to satisfy 1.2 through crack index criterion. In the 1st and 2nd caste bottom slab, the surface crack index was over 1.2. Therefore, the surface cracks can be controlled by implementing the curing conditions proposed in this study. Since the side wall's surface crack index was over 1.0, it is safe to assume that the counter preventive measures can control width and number of cracks.

Keywords : adiabatic temperature rising test, through crack index, surface crack index, pre-cooling, limestone powder

1. 서 론

현재, 급증하고 있는 액화천연가스(이하, LNG)의 수요에 대응하기 위한 방안으로 LNG 저장탱크가 인천, 평택, 통영 및 삼척 인수기지에서 건설 또는 가동 중에 있으며, 그 용량도 10만 k에서 14만 및 20만 k급의 대용량으로 증가되어 왔다.¹⁾ 특히, 지하식 LNG 저장탱크의 구조물은 지하연속벽, 파일캡 슬래브, 그리고 본체인 바닥슬래브와 측벽 및 지붕으로 구성되어 있는데, 대부분 초대형 구조물에 속하기 때문에 수화열에 의한 온도균열의 제어대책이 매우 중요한 요인으로 대두되고 있다.²⁾

일반적으로 콘크리트는 경화 과정에서 수화발열에 의하여 내부 온도가 상승하게 되는데, 콘크리트의 열전도율이 낮기 때문에 내부와 외부의 온도차가 발생하게 된다. 또한, 이러한 온도차와 더불어 구조물의 외부구속에 따른 온도응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하면 균열이 발생하게 된다.^{3,4)}

지하식 LNG 저장탱크는 토압 및 지하수압을 견딜 수 있는 지하연속벽(slurry wall) 구조물을 미리 시공한 후에

탱크내부의 굴착작업과 탱크하부의 파일캡 슬래브(pile cap slab) 공사를 선행하게 된다. 뒤이어 본체인 바닥슬래브(bottom slab) 및 측벽(side wall)을 순차적으로 시공한 후에 탱크내부의 바닥에서 지붕(roof) 구조체를 조립한 후 공기부양(air raising)으로 지상까지 인양하여 측벽의 상부에 고정하고 마지막으로 보냉재와 멤브레인을 설치하게 된다.⁵⁾ 특히, 지하식 LNG 저장탱크의 본체 구조물인 바닥슬래브 및 측벽의 두께가 각각 9.0 m와 3.0 m의 초대형 구조물로 매스 콘크리트를 순차적으로 타설해 나가기 때문에, 이에 따른 온도균열의 발생이 매우 중요한 품질관리 포인트로 간주되고 있다.⁶⁾

이러한 매스 콘크리트의 수화열 저감 및 온도균열 방지를 위한 대책으로 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트의 배합설계, 원재료의 선행냉각(pre-cooling) 뿐만 아니라, 콘크리트의 타설온도, 외기온 및 양생조건 등에 대한 온도균열의 검토가 선행되어야 한다.⁷⁻⁹⁾ 온도균열을 제어하기 위하여 온도균열지수를 1.2이상으로 설계하여야 하며, 이를 만족하기 위한 대책을 세워야 한다.¹⁰⁾

이 연구에서는 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브와 측벽에 사용되는 매스 콘크리트의 온도균열 대책의 일환으로 저열 포트랜드 시멘트에 석회석 미분말을 치환하는 콘크리트의 배합설계 및 양생, 온도조건 등의 현장조건을 대상으로 온도응력 해석을 실시하였으며, 해석 결과

*Corresponding author E-mail: kyh00127@hanmail.net

Received August 2, 2011, Revised September 22, 2011,

Accepted September 29, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

를 토대로 온도균열 제어를 위한 매스 콘크리트의 현장 최적화 방안을 제시하고자 한다.

2. 해석 방법 및 조건

2.1 해석 요소

2차원 유한요소법(FEM)에 의한 해석요소는 열전달 해석에서 시간에 따른 시멘트의 수화열, 표면 열전달, 외기온 및 온도응력 해석에서 시간에 따른 탄성계수와 인장강도 등이 사용되었다.¹¹⁾

2.2 해석모델링

열전달 해석에서는 바닥슬래브, 측벽(5Lot까지), 지반, 지하연속벽, 파일캡 슬래브 및 자갈층을 대상으로 모델링하였다. 바닥슬래브와 측벽 사이에 설치된 시트는 분리가 가능하기 때문에, 온도응력 해석에서 측벽은 바닥슬래브에 구속되지 않는다는 것을 가정하여 바닥슬래브와 측벽을 각각 모델링 하였다.

바닥슬래브와 측벽 하부에 있는 강관파일과 지반 및 파일캡 슬래브는 응력해석에 있어서 선형 스프링으로 대체하였다. 지하연속벽과 측벽의 접합부는 전단키(shear key)로 연결되어 있기 때문에 지하연속벽과 측벽은 구속되지 않는 것으로 가정하였다. 측벽은 구속된 전단키의 기능과 온도감소 등에 의하여 방사상으로 수축을 받지만, 수축의 효과가 무시할 수 있을 정도로 크지 않기 때문

에 측벽과 지하연속벽은 분리하여 생각할 수 있다.^{2,5)} 바닥슬래브 및 측벽의 경계조건과 유한요소법에 의한 모델링은 Fig. 1과 같다.

2.3 온도균열지수

매스 콘크리트의 온도균열 가능성은 온도균열지수에 의해 평가하는 것을 원칙으로 한다. JSCE¹²⁾ 및 KCI¹³⁾ 기준에서 제시하고 있는 온도균열지수는 식 (1)과 같다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (1)$$

여기서, $f_t(t)$ 는 재령 t 에서의 수화열에 의하여 생긴 부재내부의 온도응력 최대값(MPa)이고, $f_{sp}(t)$ 는 재령 t 에서 콘크리트의 쪼갬인장강도(MPa)로서 재령 및 양생온도를 고려하여 산정한다.

온도균열지수는 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응할 수 있도록 선정해야 하는데, 철근이 배근된 일반적인 구조물의 온도균열지수는 Fig. 2 및 다음과 같다.

- ① 균열발생을 방지하여야 할 경우 : 1.5이상
 - ② 균열발생을 제한할 경우 : 1.2이상 1.5미만
 - ③ 유해한 균열발생을 제한할 경우 : 0.7이상 1.2미만
- 수화열에 의한 온도균열은 초기에 콘크리트의 표면부와 중심부의 온도차이로 발생하는 표면균열(surface crack)과 수화열에 의한 온도상승이 최고값에 도달한 후 온도강하에 의한 수축이 외적으로 구속되어 발생하는 관통균열(through crack)로 구분된다.¹⁴⁾

이 연구에서 바닥슬래브와 측벽에 타설할 콘크리트의 온도균열 관리기준은 철근콘크리트 구조물에 대한 내구성의 확보에 있다. 따라서, 관통균열은 실제 현장에서 조정할 수 있는 경우에도 제한되어야 한다.

일반적으로 온도균열지수가 관리기준이 되는데, 바닥슬래브 및 측벽에서 관통균열을 방지할 수 있는 균열지수는 1.2이상을 만족해야 한다. 표면균열은 콘크리트의 내구성을 심각하게 저해하지 않기 때문에, 허용할 수 있는 것으로 가정하지만 가능하면 발생하지 않도록 한다.

Fig. 1 Model finite elements

Fig. 2 Thermal crack index-probability of cracking

여러 가지 양생방법을 적용할 수 있는 바닥슬래브 표면의 경우에는 표면균열지수가 1.2이상이면 표면균열을 제어할 수 있다. 측벽 표면의 경우에는 현장시공에서 적용할 수 있는 양생방법이 제한되어 있어서 표면균열을 제어하기 어렵지만, 균열 폭과 수는 제어할 수 있다. 콘크리트 표준시방서에 따라 측벽의 경우, 유해한 균열을 제어할 수 있는 온도균열지수는 0.7이상이 되어야 한다.⁶⁾

이 연구에서는 측벽에서 표면균열지수의 관리기준을 안전값을 고려하여 1.0이상으로 제안한다. 관통균열을 방지하기 위한 균열지수가 1.2이상 확보할 수 있더라도 균열이 발생할 가능성은 남아 있기 때문에 현장시공에 앞서서 유해한 균열의 발생에 따른 대책을 세워야 한다.¹⁵⁾

3. 콘크리트 배합 및 해석조건

3.1 콘크리트 배합설계 조건

이 연구의 바닥슬래브 및 측벽에 적용할 매스 콘크리트의 배합조건 및 단열온도 상승시험의 결과는 Table 1 및 Fig. 3과 같다.¹⁶⁾

여기서, 시멘트는 저열 포틀랜드 시멘트(belite cement), 결합재는 석회석 미분말(LSP, limestone powder)을 사용하였다. Table 1에 제시된 콘크리트의 배합조건에서 단

Fig. 3 Test results of the adiabatic temperature rising

Table 1 Adiabatic test results for mix conditions

W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)					Adiabatic test		Specific strength (MPa)
		Water	Cement	LSP	Sand	Gravel	Q_{∞} (°C)	γ	
48.6	40.0	158	221	104	714	1148	22.0	0.556	24 (Bottom)
47.1	40.0	158	228	107	710	1143	24.0	0.558	
44.5	40.5	155	244	105	718	1131	24.9	0.563	30 (Side wall)
43.4	41.0	155	250	107	724	1117	25.3	0.577	
41.6	41.0	155	261	112	718	1109	28.4	0.596	

Table 2 Optimum mix design proportions

Members	Specific strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit material weight (kg/m ³)				
				Water	Cement	LSP	Sand	Gravel
Bottom slab	24	47.1	40.0	158	228	107	710	1143
Side wall	30	43.4	41.0	155	250	107	724	1117

열온도 상승시험, 재령별 압축강도와 인장강도, 탄성계수 및 경제성 등을 고려한 바닥슬래브 및 측벽 콘크리트의 최적배합조건은 Table 2와 같다.

3.2 콘크리트의 재료 특성

콘크리트의 재료 특성 중에서 온도해석에 기준이 되는 단열온도 상승의 경향을 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하다. 이 연구에서 경시변화에 따른 수화열 특성을 예측하기 위한 단열온도 상승량의 모델식은 (2)와 같다.

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot (1 - e^{-\gamma t}) \quad (2)$$

여기서, t 는 콘크리트의 재령(일)이며, Q_{∞} 는 최종단열온도 상승량(°C), γ 는 단열온도 상승속도를 의미한다. 콘크리트의 단열온도 상승 특성은 시멘트의 종류, 단위시멘트량 및 콘크리트의 타설온도 등의 영향을 받기 때문에 단열온도 상승시험으로 평가하여 반영해야 한다.³⁾ 이 연구에서 수화열 저감을 위하여 저열 포틀랜드 시멘트 및 석회석 미분말을 사용하였으나, 사전의 연구 결과¹⁷⁾ 및 시공사례^{2,6)} 등을 고려하여 실제 단열온도 상승시험을 실시하고 식 (2)로 단열온도 상승량을 평가하였다. Table 1에 나타난 단열온도 상승시험 결과를 고려하여 이 연구의 부재별 적용할 단열온도 상승 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Q_{∞} and γ values of the mass concrete

Members	Placing Lot	Q_{∞} (°C)	γ	Initial concrete temperature (°C)
Bottom slab	1st	26.47	0.546	17.0
	2nd	25.88	0.671	29.0
Side wall	1st	28.27	0.524	10.0
	2nd	27.62	0.615	23.0
	3rd	27.22	0.697	29.0
	4th	27.22	0.697	29.0
	5th	27.62	0.615	23.0

Table 4 Thermal properties of the mass concrete

Properties		Side wall	Bottom slab
Thermal conductivity (kcal/mhr°C)		2.3	2.3
Specific heat (kcal/kg°C)		0.275	0.275
Expansion coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		10	10
Unit weight (kg/m ³)		2,353	2,346
Compressive strength (MPa)	3 days	8.4	6.2
	5 days	10.8	8.1
	7 days	13.5	10.5
	14 days	19.7	15.7
	28 days	27.8	22.3
	56 days	35.5	29.8
	91 days	40.5	34.1
Poison's ratio		0.2	0.2
Tensile strength (MPa)		Test results or $f_t(t) = 0.297 \times \{f'_c(t)\}^{0.797} f'_c(t)$ is compressive strength at the age of t.	
Creep coefficient	$\phi(t) = 0.42$	When the temperature of concrete is increasing,	
	$\phi(t) = 0.65$	When the temperature of concrete is decreasing,	

Table 3의 Q_{∞} 값은 최적 콘크리트의 배합조건에 대한 단열온도 상승시험의 실험값보다 안정적인 측면에서 1.1 배 증대시켜 적용하였다. 또한 γ 값은 단열온도 상승시험의 측정 결과에서 콘크리트의 타설온도를 고려하여 적용하였다. 열전도율, 비열, 확산계수 등과 같은 콘크리트의 열적특성 값은 JSCE¹²⁾ 및 KCI¹³⁾ 기준과 시공사례^{2,6)} 등을 고려하여 적용하였다. 콘크리트의 역학적 특성은 최적배합조건의 실험 결과를 적용하였으며, 크리프의 영향을 고려한 유효탄성계수는 식 (3)에 의하여 산정하였다.

$$E_e(t) = \Phi(t) \times E_c(t) \quad (3)$$

여기서, $E_e(t)$ 는 재령(t)에서 콘크리트의 크리프 영향을 고려한 탄성계수이며, $\Phi(t)$ 및 $E_c(t)$ 는 재령(t)에서 콘크리트의 크리프 계수 및 탄성계수를 나타낸 것이다.

Table 4는 매스 콘크리트의 열적 특성을 나타낸 것으로, 콘크리트의 열전도율은 2.2~2.4 kcal/mhr°C, 비열은 일반적으로 0.25~0.3 kcal/kg°C의 범위로 산정하였다. 특히, 크리프계수는 JSCE¹²⁾ 및 시공사례^{2,6)} 등을 고려하여 보 간법으로 상수값을 정하였다.

3.3 콘크리트의 양생조건 및 외기온

열전달 계수는 콘크리트 구조체와 외기사이의 열전달 특성을 나타내는 기준으로, 콘크리트 표면에서의 열분산과 콘크리트의 단위수량에 영향을 받는다.¹⁸⁾

콘크리트는 실제 현장에서의 태양복사열, 물의 증발, 바람, 단열재료 및 습윤양생을 위한 분사 등과 같은 여

Table 5 Curing conditions-heat convection coefficient

Members		Curing condition	Heat convection coefficient (kcal/m ² hr°C)
Bottom slab	Top surface	Covered with a wet mat and a sheet for 2 weeks, and a curing mat and a sheet for next 2 weeks.	5 (2 weeks) 7 (next 2 weeks) 12 (otherwise)
	Side surface	Covered with a wet mat for 1 week.	5 (1 week) 12 (otherwise)
Side wall	Top surface	Covered with a wood form for 5 days	7 (5 days) 12 (otherwise)
	Side surface

Fig. 4 Ambient temperature during 1 year (site)

러 가지의 요인에 영향을 받지만, 수시로 이러한 요인들이 변동되기 때문에 이들의 영향을 정확하게 기술하기는 어렵다. 따라서, 실제 현장에서 콘크리트를 타설하는 동안에 양생조건이 변하지 않는다는 가정하에서 인위적인 양생조건을 고려하였다.¹⁹⁾

Table 5는 이 연구에서 가정한 양생조건과 열전달 계수를 나타낸 것이며, 매스 콘크리트를 적용할 대상 현장의 월별 평균기온은 Fig. 4와 같다.

3.4 콘크리트의 타설시기 및 조건

이 연구에서 고려한 현장조건에서의 콘크리트 타설 일정 및 각각의 구획별 콘크리트의 초기온도는 Table 6에 나타난 바와 같다.

콘크리트의 초기온도는 대상 현장에서의 외기온과 콘

Table 6 Lift data of concrete placement

Members	Lot	Data of concrete placement	Ambient temperature (°C)	Initial concrete temperature (°C)
Bottom slab	1 st	30. April	13.1	17.0
	2 nd	23. August	23.7	29.0
Side wall	1 st	31. January	-2.2	10.0
	2 nd	7. June	18.9	23.0
	3 rd	13. July	23.5	29.0
	4 th	20. August	24.1	29.0
	5 th	24. September	18.7	23.0

크리트의 생산조건으로부터 가정한 값이며, 이러한 콘크리트의 초기온도를 만족하기 위한 대책이 필요하다.

Table 6에 제시된 콘크리트의 초기온도를 관리하기 위한 방안으로 여름철에는 물의 온도를 낮출 수 있는 냉각장치를 마련해야 하며, 겨울철에는 온수를 공급할 수 있는 보일러 장치를 갖추어야 한다.¹⁴⁾ 이 연구에서는 겨울철의 경우에 콘크리트의 초기온도를 10°C 이상, 겨울철의 경우에 30°C 이하로 관리하도록 제시하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 온도해석 결과

이 연구에서 실시한 바닥슬래브 및 측벽의 온도해석 결과는 Table 7 및 Fig. 5와 같다.

4.2 응력 해석 결과

이 연구에서 실시한 바닥슬래브 및 측벽의 응력 해석 결과는 Table 8과 같다.

또한, 바닥슬래브 및 측벽에 따른 응력 해석 결과는 최저균열지수 분포도, 인장응력 및 균열지수의 이력으로 각각 Figs. 6 및 7에 나타내었다.

Table 8에서 보듯이 관통균열에 대한 최소균열지수는 바닥슬래브 2단(2nd)을 제외하면 대부분 1.2이상을 만족하는 것으로 나타났기 때문에, 관통균열을 제어할 수 있을 것으로 예측된다. 이때, 콘크리트의 인장강도는 3.09~3.55 MPa 범위를 나타내었다. 바닥슬래브 2단의 경우에는 최소균열지수가 1.2보다 작은 1.08이기 때문에 균열이 발생할 확률은 약 35% 정도이다. 따라서 바닥슬래브 2단에 대한 균열방지 대책을 고려해야 한다.

현장에서 균열방지 대책으로 제시할 수 있는 가장 적절한 방법은 선행냉각(pre-cooling) 방식인데, 이러한 방식을 사용하여 콘크리트의 초기온도를 약 25°C 정도로 낮추면 관통균열지수가 1.2이상 만족하게 될 것으로 사료된다.

Table 9 및 Fig. 8은 바닥슬래브 2단에서 콘크리트의 초기온도를 25°C로 가정하였을 때 온도해석 및 응력해

Table 7 Results of heat condition analysis

Members	Lot	Initial concrete temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Temperature rising (°C)	Age (days)
Bottom slab	1 st	17.0	43.0	26.0	9.0
	2 nd	29.0	53.7	24.7	5.5
Side wall	1 st	10.0	34.4	24.4	5.0
	2 nd	23.0	49.0	26.0	5.5
	3 rd	29.0	53.9	24.9	4.5
	4 th	29.0	54.0	25.0	4.5
	5 th	23.0	48.0	25.0	5.0

Fig. 5 Result graphs of thermal stress analysis

석을 한 결과를 나타낸 것이다.

바닥슬래브에 있어서, 표면균열에 대한 최소균열지수는 전체 부재에서 1.2이상을 만족하였다. 따라서 이 연구에서 제시한 양생조건을 확보할 수 있다면, 표면균열은 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 측벽에 있어

Table 8 Results of thermal stress analysis

Members	Lot	Surface crack			Through crack		
		Minimum crack index	Age (days)	Stress at this age (MPa)	Minimum crack index	Age (days)	Stress at this age (MPa)
Bottom slab	1 st	1.51	4.5	0.67	2.06	120.5	1.50
	2 nd	1.48	3.3	0.67	1.08	152.0	2.87
Side wall	1 st	1.73	5.5	0.65	1.63	130.5	2.18
	2 nd	1.38	7.5	1.04	1.60	40.0	2.04
	3 rd	1.31	2.3	0.15	1.22	185.0	2.90
	4 th	1.19	2.3	0.17	1.54	131.0	2.31
	5 th	1.23	2.3	0.18	2.31	219.0	1.54

(a) Minimum crack index contour

(b) Tensile stress histories

(c) Crack index histories

Fig. 6 Results of stress analysis of bottom slab

서도 표면균열에 대한 최소균열지수가 대부분 1.0을 초과하기 때문에 균열의 발생을 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브 및 측벽을 대상으로 수행한 매스 콘크리트의 온도균열 방지를 위한 온도응력 해석의 결론은 다음과 같다.

- 1) 매스 콘크리트의 수화열 저감대책으로 저열 포트랜드 시멘트(벨라이트 시멘트)에 석회석 미분말을 사용하는 등의 재료 선정에 유의해야 한다.
- 2) 초대형 매스 콘크리트 구조물인 바닥 슬래브와 측

(a) Minimum crack index contour

(b) Tensile stress histories

(c) Crack index histories

Fig. 7 Results of stress analysis of side wall

Table 9 Results of analysis

(a) Heat condition

Initial concrete temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Temperature rising (°C)	Age (days)
25.0	49.9	24.9	6.0

(b) Thermal stress

Initial concrete Temperature (°C)	Surface crack			Through crack		
	Minimum crack index	Age (days)	Stress at this age (MPa)	Minimum crack index	Age (days)	Stress at this age (MPa)
25.0	1.63	3.5	0.61	1.22	160.0	2.53

(a) Tensile stress histories (temperature 25°C)

(b) Crack index histories (temperature 25°C)

Fig. 8 Result graphs of analysis

벽에 타설되는 콘크리트의 관리기준으로 관통균열에 대한 최소균열지수는 1.2이상으로 제시하였으나, 표면균열은 콘크리트의 내구성에 치명적인 원인이 되지 않기 때문에 어느 정도 허용하는 것으로 제시하였다.

- 온도응력 해석 결과에 따르면, 바닥슬래브 2단을 제외한 대부분의 단계에서 관통균열지수가 1.2이상을 만족하였기 때문에, 관통균열은 제어할 수 있을 것으로 사료된다.
- 바닥슬래브 2단의 경우, 관통균열지수가 1.2보다 적고 균열발생 확률도 35% 정도로 나타났기 때문에, 이를 방지하기 위한 방안으로 선행냉각 방식을 통

한 콘크리트의 초기온도를 25°C 이하로 관리하는 방안으로 제시하였으며, 이때의 관통균열지수는 1.2 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

- 바닥슬래브의 경우, 표면균열지수가 1.2이상이기 때문에 양생조건을 준수하면 표면균열을 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 측벽의 경우에도 표면균열지수가 1.0이상을 만족하기 때문에 균열의 수 및 폭을 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김기수, “천연가스(LNG)의 향후 수요와 전망,” 콘크리트 학회지, 15권, 1호, 2003, pp. 1~3.
- 高木淳, 中下兼次, 名倉健, 中村龍, 和賀秀脫, 小野武, 小野定, “世界最大のLNG地下タンクの合理化施工-東京ガス根岸工場 TL-41 LNG地下式貯槽,” セメント・コンクリートウ・572, 1994.10, pp. 8~13.
- 김진근, 양은익, “매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향 요인,” 콘크리트학회 학회지, 9권, 3호, 1997, pp. 15~23.
- 강석화, “매스콘크리트의 온도균열제어를 위한 시공방법,” 콘크리트 학회지, 9권, 3호, 1997, pp. 4~14.
- 中野正文, “LNG地下タンク建設技術の變遷と技術開發,” 日本土木學會論文集, No.679, VI-51, 2001, pp. 1~20.
- 冢原裕, 田中佳利, 鈴木克南, “地下タンク側壁コンクリート自動打設システムの開發,” 建設機械と施工法ンボジウム論文集, Vol. 13, 1993, pp. 238~241.
- 박찬규, “파이프쿨링 공법적용에 따른 벽체구조물의 온도균열 특성,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 14권, 1호, 2002, pp. 23~24.
- 김은검, 유상건, 송준석, 박지용, “지하철 콘크리트 Box 구조물의 수화열에 의한 온도균열 제어를 위한 최적의 시공방법 제안,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 21권, 2호, 2009, pp. 185~186.
- 하재담, 박찬규, 엄태선, 이종열, 백승준, 손영준, “LNG 저장탱크 벽체의 동절기 온도균열 제어방안,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 637~640.
- 이재삼, 배연기, 박희곤, 권해원, 이진우, “매스 콘크리트의 온도균열 예측에 관한 온도이력 해석과 실측의 비교 연구,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 581~584.
- 강석화, 이용호, 정한중, 박철림, “유한요소법을 이용한 매스 콘크리트 구조물의 수화열 및 온도응력 해석에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 7권, 4호, 1995, pp. 137~148.
- JSCE, *Specification for Design and Construction of Concrete Structures (Construction part)-Mass Concrete*, 1996, pp. 173~193.
- KCI(Korea Concrete Institute), *Concrete Standard Specifications*, Korea Concrete Institute, 2003, pp. 142~157.
- ACI(American Concrete Institute) Committee 207., “Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete,” *ACI Manual of Concrete Practice Part 1*, 1994, 207.2R.
- Yoon, D. Y., Song, H. S., and Min, C. S., “Finite Element Analysis on Hydration Heat of Concrete under the Influence of Reinforcing Steel Bars,” *International Journal of Con-*

- crete Structure and Materials (Korea Concrete Institute), Vol. 19 No. 1E, 2007, pp. 33~39.
16. Kwon, Y. H. and Lee, H. J., "A Study on the Optimum Mix Proportion of the Mass Concrete Designed as Massive and Deep Structure," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17 No. 2, 2005, pp. 293~302.
 17. 青木 茂, "地下連續壁におけるコンクリートの品質評價に關する研究," 東北大學校, 工學部 建設材料研究室, 博士學位論文, 1997, 149 pp.
 18. Kim, J. K. and Muhammad, N. A., "Thermal Stress Simulation of Mass Concrete using Thermal Stress Device," 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 474~477.
 19. 김진근, 이윤, "초기재령 매스 콘크리트의 온도수축 예측 기술," 콘크리트학회 학회지, 17권, 4호, 2005, pp. 41~44.

요 약 이 연구는 초대형 매스 구조물인 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브 및 측벽에 타설되는 매스 콘크리트의 재료특성, 배합조건, 양생조건 및 콘크리트의 타설시기와 초기온도, 외기온 등을 고려한 온도응력 해석 결과를 기술하였다. 해석 결과를 토대로 유해한 균열의 발생 가능성을 예측하고, 이를 방지하기 위한 방안을 제시하였다. 이 연구에서는 콘크리트의 단열온도 상승시험을 통하여 수화열 관리에 유리하다고 평가된 2종류(벨라이트 시멘트+석회석 미분말)의 최적배합조건을 선정하였다. 온도응력 해석의 결과에 따르면, 바닥슬래브 2단을 제외한 대부분의 분할타설 블록에서 관통균열지수가 1.2이상을 만족하였다. 바닥슬래브 2단의 경우 균열방지 대책으로 선행냉각 방안을 제시하였으며, 콘크리트의 초기온도를 25°C 범위에서 관리할 경우에는 대부분의 타설블록에서 관통균열지수 1.2이상을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 바닥슬래브의 경우, 표면균열지수가 1.2이상이기 때문에 양생조건을 준수하면 표면균열을 제어할 수 있으며, 측벽의 경우에도 표면균열지수가 1.0이상을 만족하기 때문에 균열의 수 및 폭을 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 단열온도 상승시험, 관통균열지수, 표면균열지수, 선행냉각, 석회석 미분말