

액화질소를 이용한 매스 콘크리트 구조물의 수화열 제어

The Control of Hydration Heat by Using Liquefied Nitrogen in Mass Concrete Structures

양인환* 어준**
Yang, In Hwan Eo, Jun

ABSTRACT

Temperature rise and restraint condition in mass concrete structures may induce the cracks at early ages. The method to prevent the cracks induced by heat of hydration has become the major concern in mass concrete structures. Therefore, the purpose of this study is to propose a method to control heat of hydration in mass concrete structures by using cryogenic liquefied nitrogen. The method in this study was applied to actual mass concrete structure to prevent the occurrence of thermal cracks at early ages. The surface observation of structure during more than one month shows that there are seldom cracks. This represent that the method in the study is effective in the control of heat of hydration.

1. 서론

구조물의 대형화 추세에 따라 매스 콘크리트 구조물의 시공이 증가하고 있는 추세이다. 특히, 장대교량의 기초, 교각을 비롯하여 콘크리트 댐 구조물, 원자력 발전소 및 액체 저장탱크 구조물, 해양항만 및 수리 구조물, 두께가 두꺼운 지하 박스 구조물 등에서는 매스 콘크리트의 시공이 불가피한 실정이다^(2,3). 이러한 매스 콘크리트 구조물에서는 초기의 수화열 발열에 따른 온도 응력으로 인하여 균열이 발생할 수 있으며, 균열을 제어하기 위한 효율적인 기법이 필요한 실정이다. 또한, 최근에는 콘크리트 구조물이 점차 대형화 및 고강도화 되어감에 따라 콘크리트에는 다량의 시멘트가 혼입되고 초기 강도가 많이 요구되어 초기에 수화열에 의한 온도균열이 발생하여, 구조물 설계에 무시할 수 없는 영향을 일으키는 경우가 빈번히 일어나고 있다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 일종의 프리 쿨링 기법으로써, 저온의 액화질소(LN₂)를 이용한 매스 콘크리트 구조물의 수화열 감소에 따른 온도 응력 제어 기법을 연구하였다. 콘크리트 배합시 저온의 액화질소를 투입함으로써 콘크리트의 타설 온도를 낮게 유지한다. 유한요소해석 기법을 이용한 열전달 해석과 온도 응력 해석 및 균열 지수 산출을 통하여 실제 구조물의 온도균열 제어 연구를 수행하였다.

* 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사

** 대림산업(주) 기술연구소 연구원

2. 구조물 및 재료의 특성

본 연구에서의 대상 구조물은 액화천연가스(LNG) 저장 탱크이다. 본 구조물의 콘크리트 타설시 예상되는 환경조건은 서중 콘크리트 타설 환경조건이므로, 콘크리트 타설시 온도 균열 제어를 위한 적절한 수화열 제어방안이 필요하게 되었다. 서중 환경조건에서의 콘크리트 타설과 관련된 구조물 시공지침은 콘크리트의 타설온도를 25℃ 이하로 규정하고 있다. 이러한 시공지침을 만족시키기 위하여 -17.0℃의 액화질소를 이용하여 콘크리트의 초기 타설온도를 낮춤으로써 콘크리트의 수화열을 저하시키며, 이로 인해 온도 응력을 제어하고자 하였다. 액화질소의 투입은 1차적으로 콘크리트가 배치 플랜트의 믹서에서 레미콘 트럭으로 배출될 때, 액화질소를 콘크리트에 분사하므로써 온도 저하 효과를 기대하였다. 또한, 2차적으로 콘크리트 타설기간이 길어질 경우를 대비하여 배치 플랜트 이외에 구조물 근처에 추가로 설치된 액화질소 탱크를 이용하여 온도저하 효과를 기대하였다.

표 1 콘크리트 배합표

시멘트	설계강도 (kgf/cm ²)	물/결합재 (W/B)비 (%)	단위 중량 (kg/m ³)				
			물	시멘트	플라이애쉬	잔골재	굵은골재
보통포틀랜드 시멘트	400	35.5	168	331	142	558	1084

구조물의 형상을 그림 1에 나타내었다. 구조물에 사용된 콘크리트는 일반 포틀랜드 시멘트 (1종시멘트)이며, 시멘트의 30%를 플라이 애쉬로 대체하였다. 콘크리트의 91일 설계강도는 400kgf/cm²이다. 표 1에 콘크리트의 배합특성을 나타내었다. 열전달 해석시 사용되는 콘크리트의 열적 특성값과 및 온도 응력 해석시 사용되는 콘크리트의 역학적 재료특성값을 표 2에 각각 나타내었다.

표 2 콘크리트의 재료특성값

구 분		재료 특성값
열적 특성	비 열	0.25 Kcal/kg · °C
	열전도율	2.2 Kcal/m · hr · °C
	밀 도	2300 kg/m ³
	최대온도상승량	56.4°C
	수화반응속도	0.85
역학적 특성	열팽창계수	10×10 ⁻⁶ /°C
	프와송 비	0.167

3. 온도해석

수화열 해석은 범용 유한요소 해석프로그램 ANSYS5.5⁽⁶⁾를 이용한 열전달 해석을 통하여 수행한다. 구조물에서 해석 대상 부분은 바닥판 슬래브의 외측 원환부분 및 벽체 1단이며, 이들은 일체로 타설된다. 해석 대상 구조물은 2차원 축대칭 요소를 이용하여 모델링하였다. 유한요소해석 모델링시 타설되는 콘크리트와 지반을 함께 모델링하여 열전달 해석을 수행하였으며, 해석모델은 그림 2와 같다.

실제 구조물의 수화열에 의한 온도 변화를 파악하기 위해 그림 2에 나타낸 바와 같이 구조물의 대

표 단면에 온도 센서를 매설하였다. 매설된 온도 센서는 슬래브의 중앙, 지반과 접하는 슬래브의 하부 및 벽체 1단과 접하는 슬래브 상부에 각각 위치한다. 그림 3에 바닥슬래브 대표 단면에서의 상부, 중앙부 및 하부에서의 콘크리트 타설 후 10일 동안의 온도 계측결과와 해석결과를 비교하여 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 예측값과 계측값은 대부분 일치하고 있으며, 단면 중앙부의 계측값은 예측값보다 최대온도 도달 후 다소 빠르게 온도가 낮아지고 있는 것으로 나타난다. 구조물 단면내의 최대 온도 발생시의 온도분포는 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트 타설부터 약 70시간 (3일) 후에 구조체 내부에서 최대온도 70℃에 도달한다. 최대 도달 온도는 지반과 접하고 있는 하부 표면에서 제일 작게 발생되며, 최대온도 도달 후 시간에 따른 온도 감소율은 제일 작게 나타나고 있다. 최대 온도 발생 시점에서의 전체적인 온도 분포 형상을 그림 4에 나타내었다.

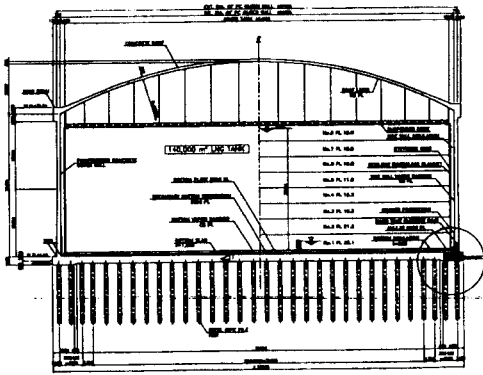


그림 1 LNG 저장탱크 구조물 단면

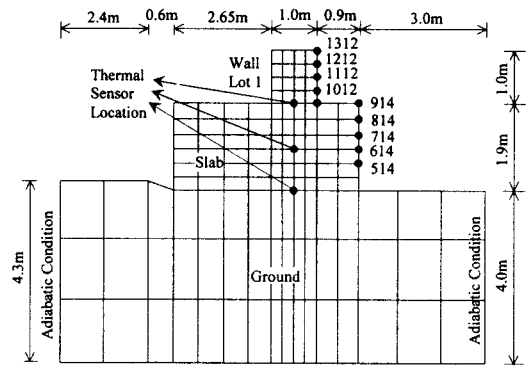


그림 2 수화열 해석을 위한 모델

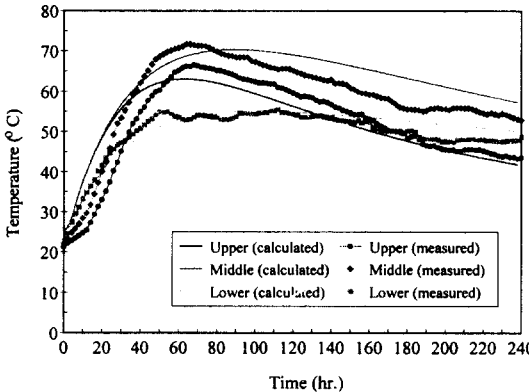


그림 3 시간에 따른 온도 변화 비교

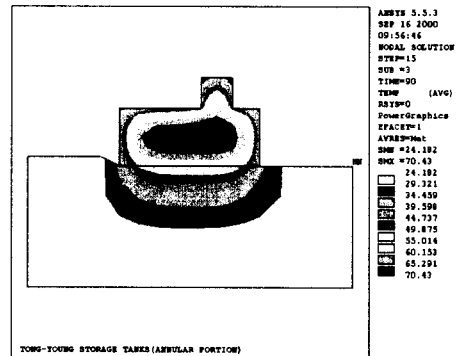


그림 4 최대 온도 발생시점의 온도분포

4. 온도응력해석 및 균열지수 산정

4.1 해석 기법

온도응력 해석은 ANSYS5.5⁽⁶⁾를 이용하였으며, 해석모델은 수화열 온도해석시 이용된 유한요소 해석모델과 동일하다. 응력 해석동안 사용되는 유효탄성계수는 콘크리트표준시방서⁽¹⁾에 규정되어 있는 식을 적용하며, 재료의 역학적 특성값을 표 2에 나타내었다.

콘크리트는 초기 재령시, 수화 반응에 의해 시간에 따라 온도 변화가 발생한다. 온도변화에 의해 온도 변형률이 발생하며, 온도변형률 변화, 구속 정도 및 콘크리트의 탄성계수 발현에 따라 온도 응력 양상이 결정된다⁽⁵⁾. 매스 콘크리트 구조물에서 초기재령 콘크리트의 온도 응력을 정밀히 모델링하기 위해서는 양생시간에 따른 재료의 역학적 특성치의 변화, 특히 콘크리트 탄성계수의 변화를 정밀히 모델링하는 것이 중요하다. 대부분의 범용 유한요소 해석 프로그램은 탄성계수가 일정한 상태 및 탄성계수가 온도에 따라 변하는 경우의 온도응력을 산정하기 위한 과도해석시 사용될 수 있으나, 초기재령 콘크리트 탄성계수의 변화 같은 재료의 역학적 특성값이 시간에 따라 변화할 때의 과도해석시 온도응력을 산정하기 위해서 직접적으로 사용하는 경우에는 많은 제약이 따른다. 즉, 콘크리트의 성숙 과정을 고려한 탄성계수를 직접적으로 반영할 수 없는 경우에 온도응력을 직접적으로 산정할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 ANSYS5.5를 사용하여 온도응력을 정밀히 산정하기 위한 과도 해석시, 콘크리트의 성숙과정에 따른 탄성계수의 변화를 고려하기 위해 해석시간 구간 마다 다음과 같은 해석과정을 적용하였다.

- (1) 단계 1 : 과도 열전달 해석을 통해 i 번째 시간 구간 마다 각 절점의 온도 T_i 를 산출.
- (2) 단계 2 : ANSYS 프로그램 외부에서의 별도의 데이터베이스를 통한 각 시간 구간에서의 각 절점에서의 온도 변화량 ΔT_i 산정.

$$\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$$

- (3) 단계 3 : 유한요소 해석 프로그램을 이용한 응력 증분량 $\Delta\sigma_i$ 의 산정. 이때, ΔT_i 는 온도하중을 나타내는 입력자료로 적용. 또한, 각 시간구간의 유효 탄성계수를 사용.
- (4) 단계 4 : 온도 응력 σ_i 산정.

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma_i$$

4.2 온도응력 해석결과

표면부에서의 원환방향응력의 시간에 따른 변화를 그림 5에 나타내었으며, 각각의 그림은 바닥슬래브 외측 표면부의 절점 814 및 벽체 1단 외측 표면부의 절점 1112에서의 원환방향응력 변화이다. 온도 응력 변화양상은 초기 재령에서는 압축응력을 나타내다가 80~100 시간 경과후 인장응력 양상으로 변화한다. 이러한 양상은 강⁽⁴⁾의 연구에서 주목하였듯이 내부구속과 외부구속이 공존하는 경우, 또는 외부구속이 지배적인 경우의 응력 변화 양상이다. 따라서, 본 구조체에서 온도 균열에 대한 제어는 재령 초기 보다는 5일 이후 부터의 재령에 더욱 주의를 기울여야 한다고 사료된다.

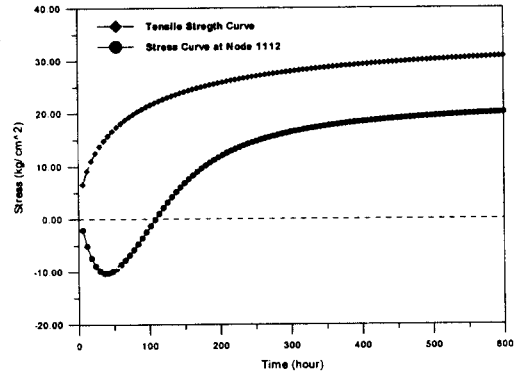
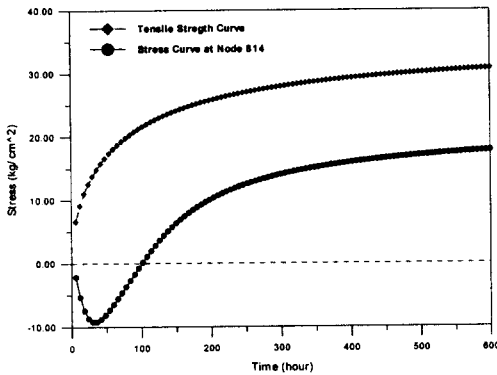


그림 5 표면부 절점에서의 시간에 따른 응력 변화

4.3 온도균열지수 산정

매스콘크리트의 시공시 온도균열 발생 여부는 현행 콘크리트표준시방서⁽¹⁾에 명기되어 있는 온도균열지수로부터 평가하였다. 콘크리트표준시방서에서 규정하는 온도균열지수는 수화열로 인한 최대 온도 응력과 동일 재령에서의 콘크리트 인장강도의 비로써 식 (1)에 의해서 산정된다.

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

여기서, $f_t(t)$: 재령 t 일에서의 온도 응력

$f_{sp}(t)$: 재령 t 일에서의 콘크리트의 인장강도

표면부 절점 814 및 1112의 각각의 시간에 따른 온도균열지수를 그림 6에 각각 나타내었다. 바닥판 외측 표면부 절점에서의 최소 균열지수는 1.25~2.47이며, 벽체 1단 외측 표면부의 최소균열지수는 1.30~2.69이다. 그림 2에 표시된 대표 절점 위치에서의 최소균열지수를 정리하면 표 3과 같다. 표 3에서 알 수 있듯이 최소온도균열지수가 표면부에서 1.25정도가 예상된다. 콘크리트표준시방서에서는 균열발생을 제한할 경우 온도균열지수를 1.2이상으로 확보할 것을 규정하고 있다. 콘크리트표준시방서의 기준값을 참조하면 본 대상 구조물은 균열발생이 억제되는 경우이다. 실제로 콘크리트 타설 후, 약 1달 후까지 구조물의 표면을 관찰한 결과, 주목할 만한 균열은 발생하지 않은 것으로 나타나고 있다.

표 3 최소균열지수

구 분	절 점	균열지수	구 분	절 점	균열지수
바닥판 외측 표면	914	2.47	벽체1단 외측 표면	1312	2.69
	814	1.73		1212	1.85
	714	1.49		1112	1.53
	614	1.44		1012	1.39
	514	1.25		912	1.30

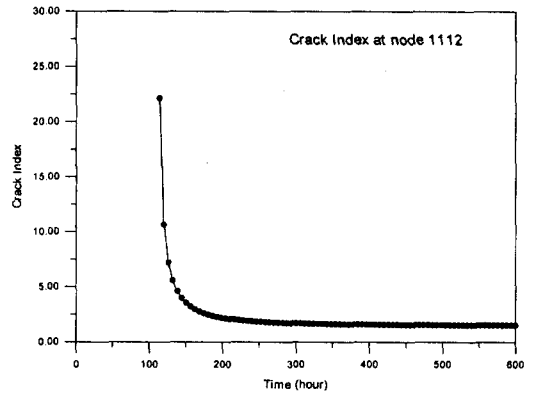
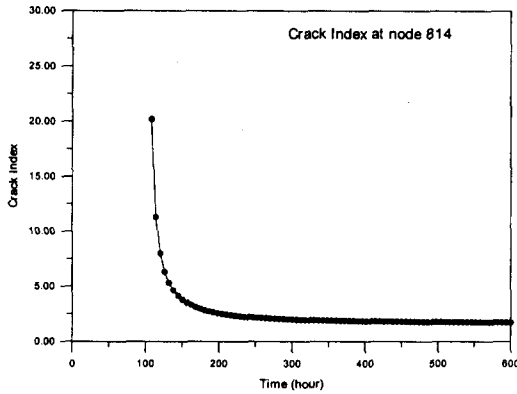


그림 6 시간에 따른 균열지수

5. 결론

본 연구에서는 프리 쿨링 기법으로써, 저온의 액화질소를 이용한 매스 콘크리트 구조물의 수화열 제어 기법을 연구하였다. 콘크리트 배합시 저온의 액화질소를 투입함으로써, 수화열에 의한 온도 상승량을 줄이고자 하였다. 또한, 구조물의 시공전에 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 콘크리트 수화열에 의한 온도 발현 및 응력을 실측치에 가깝게 예측하여 균열발생을 최소화하고자 하였다. 본 연구에서의 수화열 제어기법을 실제 구조물에 적용하여 콘크리트 타설 후 약 1달 후까지 구조물의 표면을 관찰한 결과, 주목할 만한 균열은 발생하지 않은 것으로 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서의 수화열 제어기법은 효율적이라 사료된다. 다만, 본 논문에서 고찰한 액화질소를 사용한 프리 쿨링 방법은 액화질소가 매우 고가라는 측면에서 이의 적용이 일반화되기는 아직 어렵다고 판단되며, 적용시 액화질소의 투입 시기에 따라 그 효용성을 극대화할 수 있는 방법이 면밀히 검토되어야 한다.

참고문헌

1. 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 1999.
2. 오병환, 양인환, 이명규, 한승환, 장봉석 "원자력 발전소 두꺼운 슬래브 콘크리트의 수화열 발생 및 온도 응력 분포에 관한 연구", 대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집, 1995, pp.583-586.
3. 초저발열 콘크리트의 개발 및 대형 매스콘크리트 구조물의 수화열 제어 시공기술 개발, 건설교통부, R&D/96-0040, 1998.
4. 강석화, 정한중, 박칠림 "매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토," 콘크리트학회논문집, 제8권, 5호, 1996, pp.111-122.
5. Springenschmid, R. "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages," E&FN SPON, 1994.
6. ANSYS User's Manual, Revision 5.5, Swanson Analysis Systems Inc., 1999.