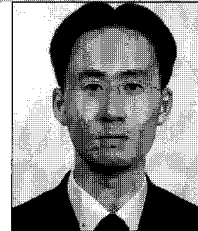


# 콘크리트 구조물의 온도해석

## Heat Transfer Analysis of Concrete Structures



전 세 진\*

\*(주)대우건설기술연구원 토목연구팀 책임연구원

### 1. 머리말

온도해석(Heat transfer analysis) 및 열응력해석(Thermal stress analysis)은 공학의 모든 분야에서 하중해석과 더불어 실용적인 중요성을 갖고 있으며 빈번히 접할 수 있는 해석 종류 중 하나이다. 토목·건축 분야의 콘크리트 구조물에 한정시켜 생각해 보더라도 화재시 안전성 평가, 매스(Mass) 콘크리트에서 수화열에 의한 균열 발생 가능성 평가, LNG 저장탱크의 누출사고시 극저온의 영향 평가 등 다양한 경우에서 온도 및 열응력해석의 필요성이 대두된다.

현재 통용되는 대부분의 유한요소기반 범용구조해석 프로그램들은 다양한 해석 기능 중 온도해석의 기능을 포함하고 있다. 이러한 프로그램에서 온도 및 열응력해석시 사용할 수 있는 요소들의 종류에는 온도해석만을 수행할 수 있는 요소, 응력해석만을 수행할 수 있는 요소, 온도해석 및 응력해석을 동시에 수행(Fully coupled thermal-stress analysis)할 수 있는 요소들이 있다. 이 중에서 온도 및 응력해석을 동시에 수행하는 요소를 사용하지 않더라도, 그 대안으로서 온도해석 요소를 사용하여 온도분포를 구하고 이러한 결과를 응력해석 요소(일반적인 하중해석을 수행하는 요소와 동일)에 온도하중처럼 작용시켜 해석을 수행하는 Sequentially coupled thermal-stress analysis 방식을 취할 수도 있다. 두 가지 방법은 해석의 정밀도나 해석 시간에 차이가 있을 수 있으므로 주어진 문제의 성격이나

파악하고자 하는 결과에 따라 적절히 취사선택해야 한다. 온도해석 요소의 경우 절점마다 1개의 자유도만이 배정되므로 절점마다 몇 개씩의 이동 또는 회전 자유도가 배정되는 응력해석 요소와 비교할 때, 일반적으로 온도해석의 소요 시간은 응력해석시보다 현저히 적다. 일부 공학 문제에서는 구조물의 온도분포가 비교적 단순하게 주어진 상태에서 이러한 온도분포가 유발하는 응력이나 단면력을 구하도록 하고 있는데, 물론 이 경우에는 온도해석을 따로 수행할 필요 없이 주어진 온도분포를 응력해석 요소에 바로 가하면 된다. 한 예로 도로교설계기준<sup>1)</sup>에서 합성거더교의 바닥판과 거더의 온도차가 주어진 경우가 이에 해당된다.

여기에서는 가급적 이론적인 논의를 최소화하여 콘크리트 구조물의 설계 또는 안전성 검토시 온도 및 열응력해석이 유용하게 활용되었던 사례를 소개해 보고자 한다.

### 2. 온도해석의 기본 이론

등방성이 있는 물체의 온도해석은 식 (1)과 같은 열확산 방정식을 지배 방정식으로 취하게 된다. 이러한 지배 방정식을 고정온도조건, 대류조건, 복사조건 등과 같은 경계조건과 함께 풀면 물체의 온도분포를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda_c} = \frac{\rho c_c}{\lambda_c} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기에서,  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $\lambda_c$ 는 열전도율(Thermal conductivity),  $\rho$ 는 밀도,  $c_e$ 는 비열(Specific heat),  $\dot{q}$ 는 발열이 있을 경우 단위부피당 열이 생성되는 속도이다. 온도해석은 크게 정상해석(Steady-state analysis)과 과도해석(Transient analysis)으로 나눌 수 있는데, 식 (1)의 우변에서 온도의 시간 의존성이 사라진 시점을 정상상태로 볼 수 있다. 일반적으로 해석 대상에 불리한 영향을 유발시키는 시점이 언제인가로 해석의 종류를 결정함이 바람직하며, 예를 들어 아래에서 소개할 내용 중 화재 해석이나 수화열 해석시에는 과도해석이 필수적이고 LNG 탱크의 극저온 해석시에는 정상해석이 주로 채택되고 있다. 과도해석을 충분한 시간동안 수행하면 정상상태의 결과도 얻을 수 있지만 과도해석은 보통 상당한 해석시간을 요하므로 정상상태의 파악이 목적이라면 정상해석만을 수행하는 것이 좋다. 또한 과도해석시에는 적절한 시간 간격 및 해석 종료 시간을 설정하여 해석시간을 최소화하려는 노력이 필요하다.

이렇게 온도분포가 구해지면 식 (2)와 같이 변형률 및 온도변화( $\Delta T$ )가 유발하는 열응력을 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} - \beta \Delta T \delta_{ij} \quad (2)$$

여기에서  $\lambda$  및  $\mu$ 는 Lamé의 상수로서  $\lambda = E\nu / [(1+\nu)(1-2\nu)]$ ,  $\mu = G = E / [2(1+\nu)]$ 이다.  $E$ 는 탄성계수,  $G$ 는 전단탄성계수,  $\nu$ 는 포아송비이다. 또한,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker's delta이고,  $\alpha$ 를 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion)라 할 때  $\beta = E\alpha / (1-2\nu)$ 이다.

여기에서 주로 다룰 콘크리트는 시멘트와 모래, 자갈 등이 복합적으로 혼합되어 제조되는 재료이므로 배합에 따라 열계수에 다소의 차이가 발생할 수 있지만, 일반적으로 콘크리트 구조물의 해석시 사용되는 물성은 표 1과 같다.<sup>2)</sup>

또한 콘크리트 구조물은 무근 콘크리트로 시공되는 경우도 있지만 대부분 철근콘크리트(RC) 또는 프리스트레스트콘크리트(PSC)로 철근이나 텐던이 함께 배치되어 콘크리트와 함께 구조적인 내력을 극대화하게 된다. 하지만, 연구 목적이 아닌 이상 콘크리트 구조물의 온도해석시 이

표 1 콘크리트의 열계수

열계수	사용값
열전도율 [W/(m·°C)]	2.6~2.8
비열 [J/(kg·°C)]	1,050~1,260
밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	2,300
열팽창계수 [1/°C]	1×10 <sup>-5</sup>

러한 철근이나 텐던을 함께 모델링하는 경우는 거의 없고 순수한 콘크리트로 가정하여 해석하는 경우가 대부분인데 여기에는 철근이나 텐던이 콘크리트의 온도분포에 미치는 영향이 크지는 않다는 가정이 내재된 것이다.

### 3. 화재 해석

#### 3.1 개요

연소되는 물질이나 주변 환경에 따라 화재시 도달되는 온도가 달라질 수 있지만 일반적으로 화재시 온도는 1000°C를 상회하므로 화재는 콘크리트 구조물에 가장 극단적인 온도변화를 유발하는 경우로 볼 수 있다. 화재에 의한 피해는 급격한 박리 및 박락현상인 폭렬(Explosive spalling)에 의한 철근 노출에서부터 구조물 전체의 붕괴까지 매우 광범위하게 발생할 수 있다. 여기에서는 원자력발전소 격납건물이나 LNG 저장탱크와 같은 격납건물에서 화재 해석을 수행했던 사례를 소개하고자 한다.<sup>3,4)</sup>

화재를 모델링하기 위해 크게 다음과 같은 방법론이 사용된다. 첫째, 주어진 화재의 온도이력곡선을 그대로 화재 노출면에 고정온도 경계조건으로 적용하는 것이다. 하지만, 실제로는 화재와 구조물 표면과의 대류 등 상호작용에 의해 노출면의 온도이력이 화재의 온도이력을 그대로 따라 간다고 보기 어렵다는 단점이 있다. 둘째, 화재 노출면에 유입되는 열속(Flux)을 정의하는 방법이다. 실제의 화재상황에서 표면이 화재에 노출된 초기에는 표면으로 유입되는 열속이 큰 반면 표면온도가 화재온도와 비슷해지는 화재 후반부에는 열속이 작아지는데, 이러한 열속의 변화를 정량적으로 추정하기 어렵다는 문제가 있다. 그렇다고 열속을 일정하게 가할 경우 화재의 이력이 올바르게 모사되지 않고 또한 화재온도 이상으로 표면온도가 계속적으로 상승하는 모순점이 생긴다. 셋째, 화재를 대류와 복사를 통해 모델링하는 방법으로 실제의 화재상황을 가장 올바르게 모사할 수 있는 방법이라 사료된다. 즉, 화재 발생시 주변 외기온도가 화재온도까지 상승하면 그러한 외기와 콘크리트 표면 사이에는 대류를 통한 열전달 현상이 발생하며, 또한 화재가 유발시킨 열은 고온이므로 복사 열전달의 영향도 무시할 수 없다. 식 (3)과 (4)는 각각 대류 및 복사 열전달 식을 나타내고 있다.

$$q = h_c(T_f - T_s) \quad (3)$$

$$q = \epsilon \sigma \left\{ (T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4 \right\} \quad (4)$$

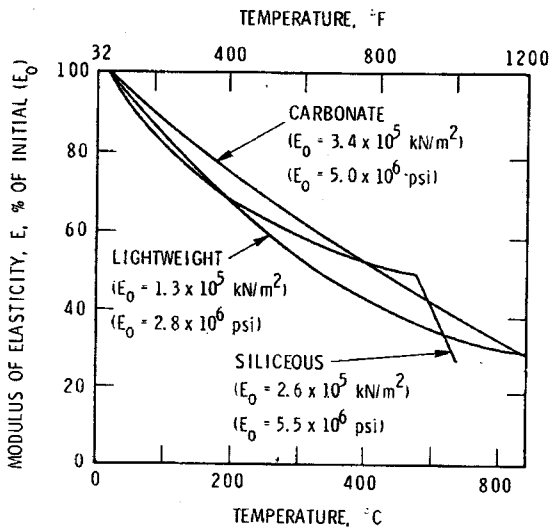
여기에서,  $q$ 는 열속,  $h_c$ 는 대류계수(Convection coefficient),  $T_f$ 는 화재 온도,  $T_s$ 는 화재 노출면의 표면온도이다. 한편,  $\epsilon$ 은 콘크리트의 방사율(Emissivity),  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수[ $=5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ]이다. 식 (4)의 복사 열전달식을 살펴볼 때 비록  $\sigma$ 값이 매우 작기는 하지만 복사 열속은 온도의 4제곱의 차에 비례하므로 화재와 같이 열원의 온도가 높은 경우에는 지배적인 열전달 요인이 된다. 원래 복사식에는 형상계수(Form factor)가 곱해져야 되지만, 화재의 경우 면들 상호간의 복사작용이 아닌 표면과 대기와의 복사이므로 형상계수를 1로 둘 수 있다.

실험에 의하면 화재와 같은 고온하에서 콘크리트나 강재와 같은 구조재료의 물성이 급격히 변하는 것으로 알려져 있으며, 따라서 이러한 물성 변화를 올바로 고려하는 것은 화재 평가시 가장 기본적이면서도 중요한 사항이다. 여

기에서 의미하는 물성에는 강재의 항복강도, 콘크리트의 압축강도 및 인장강도, 탄성계수, 열전도율, 비열, 열팽창 계수 등이 모두 포함되며 고온시 물성 변화식은 설계기준<sup>5-8)</sup>에 따라 차이가 있다. 물성 변화식은 온도 및 열응력해석시 반영될 뿐 아니라 단면 안전성 평가시에도 사용된다. 그림 1은 물성 변화의 한 예로 고온시 콘크리트의 탄성계수와 압축강도가 급격히 저하됨을 보여주고 있다.

### 3.2 원전 격납건물의 화재 해석

국내 원전의 설계시 격납건물 내부에서 발생하는 설계 기준사고나 중대사고시의 예상 온도인 141°C ~ 143°C를 고려하되, 화재는 고려하지 않고 있다. 하지만, 2001년 미국 세계무역센터와 펜타곤의 항공기 테러 사건 이후 항공기 충돌에 의해 발생하는 화재에 대한 평가가 전세계적인 이슈가 되었다. 이러한 연구추세에 부응하여 한국형 원전(Korean Standard Nuclear Power Plant) 격납건물에 대



(a) 탄성계수<sup>6)</sup>

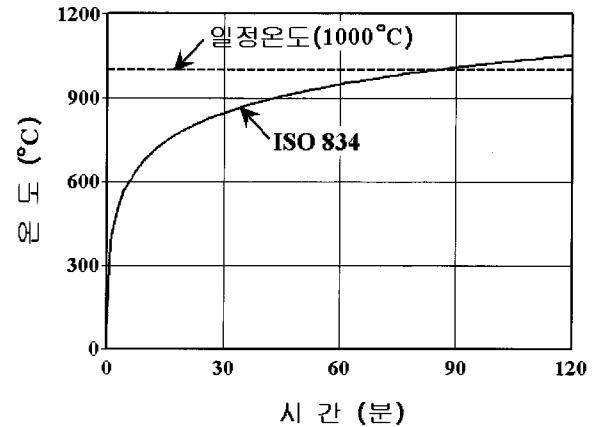
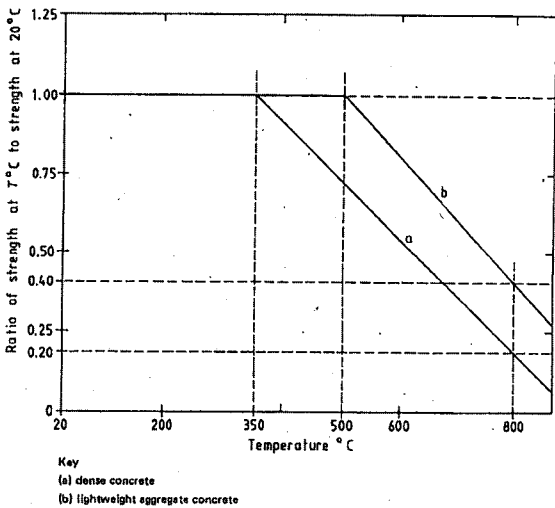


그림 2 가정된 화재온도 이력



(b) 압축강도<sup>7)</sup>

그림 1 고온시 콘크리트 물성의 변화

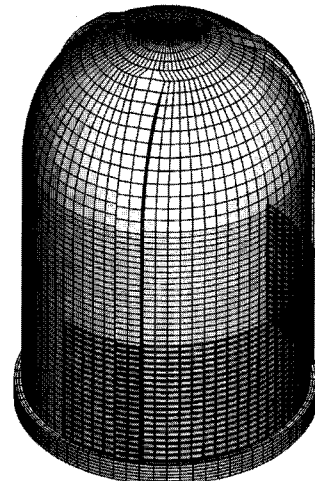


그림 3 격납건물의 유한요소모델 및 화재 분포

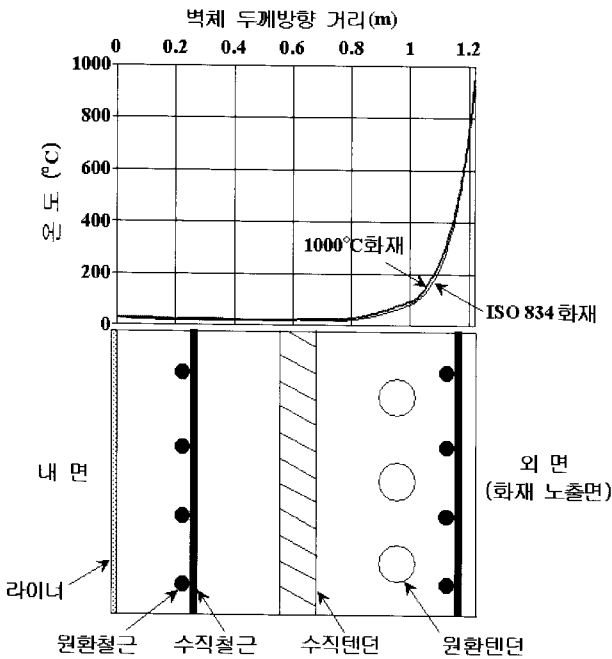


그림 4 화재시 격납건물 벽체의 온도분포

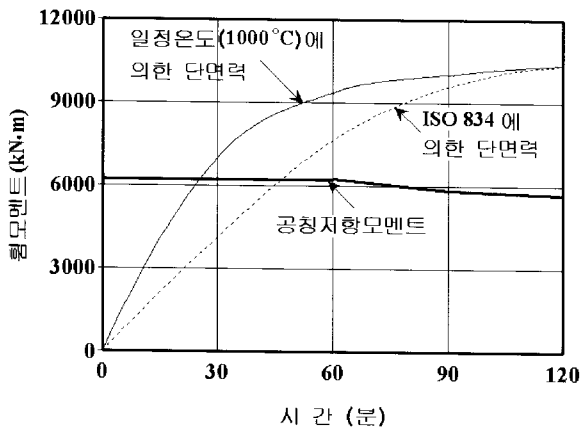


그림 5 격납건물 벽체의 내화시간 산정

한 화재 해석을 수행하고 내화성능을 평가했던 사례를 소개하고자 한다.<sup>3)</sup>

해석대상 항공기는 국내에서 높은 운항 빈도를 보이는 보잉 767기이다. 화재온도의 이력은 그림 2와 같이 ISO 834 국제표준<sup>9)</sup>과 더불어 항공기 연료의 연소 특성을 고려하여 1000°C로 일정한 화재를 고려하였다. 화재의 분포는 항공기 충돌 시나리오나 격납건물 주변 보조건물의 배치 등에 의존하지만 여기에서는 보수적인 결과를 얻기 위해 보조건물을 고려하지 않은 상태에서 항공기가 격납건물 벽체의 중간 높이에 충돌한다고 가정하였다. 그림 3은 화재 해석을 위한 격납건물의 유한요소모델과 더불어 가정된 사고 시나리오시 화재에 노출되는 면을 보여주고 있다. 화재는 3.1절에서 설명한 방법 중 대류와 복사를 병용하는

방식으로 모델링하였다.

범용구조해석 프로그램 ABAQUS<sup>10)</sup>의 3차원 솔리드 요소를 사용하여 2시간 동안 해석을 수행한 결과 화재에 노출된 1.22m 두께 벽체의 온도분포는 그림 4와 같았다. 콘크리트는 열전도율이 비교적 작아 내화성능이 우수하므로 화재에 2시간 동안 노출된 경우 비록 노출면 온도는 화재온도 가까이 상승하였지만 벽체 내부로 들어갈수록 온도가 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 벽체의 온도분포로부터 철근과 텐던의 온도 상승량 및 고온에 의해 저하된 강도를 추정할 수 있다. 그림 4를 참조하면 라이너, 안쪽 철근, 수직방향 텐던, 원환방향 텐던은 온도 증가량이 거의 없거나 크지 않아 강도 저하 및 프리스트레스의 손실이 미미한 것으로 나타났다. 화재 노출면에 가까운 바깥쪽 철근의 경우 400°C 정도로 비교적 온도상승량이 큰 편이지만 설계기준을 참조하면 원래 강도의 80~90% 수준은 유지하는 것으로 나타났다.

온도에 의한 신축팽창이 내적 또는 외적인 요인으로 구속될 때 열응력이 발생하게 된다. 이 경우에는 화재에 노출된 벽체의 바깥쪽에는 압축응력이, 벽체의 안쪽에는 인장응력이 주로 발생하며 벽체 두께를 따라 비선형의 응력 분포를 보인다. 이러한 비선형 응력은 적절한 절차를 통해 단면력으로 치환할 수 있다.<sup>3)</sup> 내화성능을 평가하는 여러 가지 방법론이 제안되어 왔지만,<sup>5,6,8)</sup> 여기에서는 ACI 216과 같이 단면력과 단면내력을 비교하는 방법론을 취해 보았다. 이 때 단면내력 즉, 공칭모멘트강도 산정시에는 고온에 의해 저하된 콘크리트, 철근 및 텐던의 강도를 고려하였다. 그림 5는 벽체의 수직방향에 대해 내화성능을 평가한 예로서 화재가 유발하는 단면력과 공칭모멘트강도가 만나는 시점을 내화시간으로 볼 수 있다. ISO 834 화재에 의할 경우 수직방향으로는 약 47분의 내화시간을 보유하고 있는 것으로 파악되었다. 이처럼 내화성능이 확보되는 시간 내에 소화조치가 적절히 이루어질 경우 격납건물의 화재 손상이 최소화되고 방사능 차폐성이 보장된다고 볼 수 있다.

### 3.3 LNG 저장탱크의 화재 해석

국내에서 천연가스는 도시가스, 복합화력발전소, 자동차 연료 등에 널리 쓰이며 그림 6과 같은 LNG(Liquefied Natural Gas: 액화천연가스) 저장탱크의 건설도 활발히 이루어지고 있다.

LNG 저장탱크의 설계시 또는 안전성 평가시 고려되는 화재 시나리오에는 탱크 외부로 돌출된 배관에서 화재,

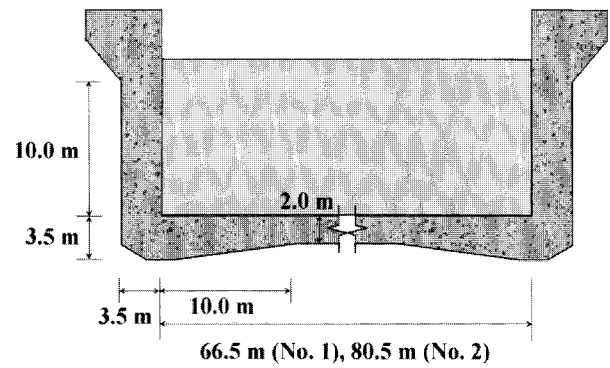


듯이 발생하는 외부구속(External restraint) 균열로 나눌 수 있다.

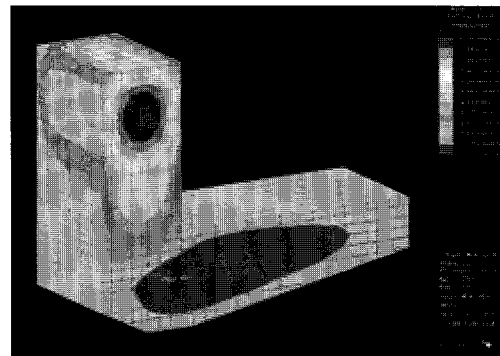
수화열은 시멘트의 수화과정에서 발생하므로 강도가 만족되는 범위에서 시멘트량을 최소화하고 시멘트의 일부를 플라이애쉬나 고로슬래그와 같은 혼화재료로 치환하는 것은 수화열 저감을 위한 가장 기초적이면서도 중요한 조치이다. 또한, 콘크리트 구조물 내부에 파이프를 매입하여 냉각수를 순환시키는 파이프쿨링(Pipe-cooling) 기법이나, 얼음이나 액체질소를 이용하여 배합의 온도를 낮추는 프리쿨링(Pre-cooling) 기법, 분할타설 기법 또한 수화발열시 구조물의 중심부 온도를 낮추기 위한 조치로 볼 수 있다. 이상은 내부구속 및 외부구속으로부터 야기되는 균열을 저감하는 데 모두 효과가 있다. 또한, 외기온도가 낮은 경우 콘크리트 표면에 대해 보온양생을 실시하거나 탈형시기를 늦춤으로써 내부와 표면부의 온도차 및 내부구속 균열을 저감할 수 있다.

매스 콘크리트 구조물의 경우 수화열 저감 측면 및 타설 가능 물량과 시공성을 종합적으로 고려하여 분할타설을 실시하는 경우가 많은데, 이는 유한요소해석시 요소의 생성 기능을 통한 시공단계해석으로 구현할 수 있으며, 이때 분할된 각 블록의 실제 타설시간 간격도 고려되어야 한다. 수화열 해석시에는 외기온도의 변화를 고려하여 적어도 계절별 검토가 필요하며, 타설시의 배합온도는 초기온도 조건으로 고려되게 된다. 또한, 거푸집이나 보온양생에 의한 효과는 대류계수로 반영되는데 예를 들어 외기에 노출되거나 강재 거푸집을 사용한 콘크리트 면은  $14W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , 양생포를 사용하거나 합판 거푸집을 사용해서 보온성을 강화한 경우  $8W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 의 대류계수를 근사적으로 사용할 수 있지만,<sup>2)</sup> 좀 더 엄밀하게는 풍속의 영향을 고려한 CFD해석으로 구하는 것이 바람직하다.

수화열 해석은 이처럼 도출된 배합이나 제반 시공계획을 적용할 경우 수화열에 의한 균열 발생 가능성이나 범위를 목표 수준 이하로 줄일 수 있는지 평가하기 위한 목적으로 수행된다. 수화열 해석은 식 (1)에서 내부 발열에 해당하는  $\dot{q}$ 가 포함된다는 점에서 외적인 온도변화가 야기하는 문제를 다루는 화재 해석이나 극저온 해석과 차별화된다. 수화열이 유발하는 구조물의 온도 상승의 범위는 수화열이 과도한 경우에도 보통  $90^\circ C$ 를 넘지는 않으므로 온도에 따른 물성 변화는 미미하다고 보고 고려하지 않는다. 수화열에 의한 균열은 콘크리트의 재료비선형성을 고려한 응력해석으로 평가할 수도 있지만, 해석의 용이성을 위하여 선형해석을 수행한 후 (인장강도/온도응력)로 정의되는 온도균열지수로 평가하는 경우가 많다.<sup>2)</sup> 즉, 온도균열지수가 클 수록 균열 발생



(a) 구조물 단면도



(b) 유한요소해석 결과

그림 9 Dry dock의 수화열 해석

가능성이 적어진다고 보는 것이다. 수화열 해석은 콘크리트의 강도나 탄성계수와 같은 물성이 급격히 변화하는 초기재령에서의 해석이므로 이를 함의적으로 고려할 수 있는 재료모델링 방법을 선택하는 것이 해석의 성패를 좌우한다.<sup>14)</sup> 중요 구조물의 경우 수화열 해석 결과에만 의존하기 보다는 실시공시 주요 부위에 열전대(Thermocouple)를 설치하여 수화열에 의한 온도를 측정 후 수화열 해석 결과와 비교하고 필요시 해석시의 가정값을 수정해 나가는 피드백 과정이 요망된다.

#### 4.2 Dry dock 구조물의 수화열 해석

그림 9는 전형적인 매스 콘크리트 중 하나인 조선소 Dry dock 구조물에 대해 범용구조해석 프로그램 MIDAS<sup>15)</sup>의 3차원 솔리드 요소를 사용하여 수화열 해석을 실시한 사례를 보여주고 있다. 해당 공사시방서에서는 수화열에 의한 중심부 최고온도는  $65^\circ C$  이하, 내부와 표면부의 최대온도차는  $20^\circ C$  이내로 비교적 엄격하게 규정하고 있어, 이를 만족하기 위해 위에서 언급한 다양한 수화열 제어기법들이 동원되었다.

10m 높이의 벽체의 경우 다양한 경우에 대한 분할타설 해석을 실시하고 결과를 비교하여 최종적으로는 총높이를

3단으로 나누어 타설하는 것으로 계획하였다. 그림 9(b)는 3단 중 2단을 타설한 후 중심부 온도가 최대가 되는 시점에서의 온도분포를 보여주고 있다. 매스 콘크리트에서 기본적으로 발생하는 내부구속에 의한 응력에 부가하여 이처럼 분할타설시에는 기타설 블록과 신타설 블록의 경화도의 차이에 의해 외부구속에 의한 응력이 추가로 발생하게 된다.

### 5. 극저온 해석

#### 5.1 개요

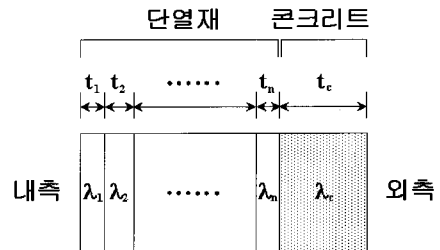
설계시 극저온의 영향을 고려해야 하는 대표적인 구조물은 액화가스를 저장하고 있는 탱크 구조물이다. 기체의 부피를 최소화하여 저장을 용이하게 하기 위해 액화 과정을 거치게 되며, 예를 들어 LNG의 경우  $-163^{\circ}\text{C}$ , 액화질소의 경우  $-196^{\circ}\text{C}$  까지 온도를 저하시키게 된다. 액화가스 저장탱크 구조물은 다양한 소재의 단열재 층이 존재하는 등 구조가 다소 복잡하므로 온도해석시 이를 합리적으로 반영하기 위한 기법이 요구된다.

극저온에 노출된 콘크리트도 비교적 큰 물성 변화를 겪게 되므로 온도 및 열응력해석시, 그리고 안전성 평가시 이를 고려해야 한다.<sup>16)</sup> 한 예로 극저온시에는 콘크리트 사이의 공극수가 동결되어 팽창하면서 콘크리트 조직이 밀실하게 되므로 강도 및 탄성계수가 증가하는 현상을 보인다.

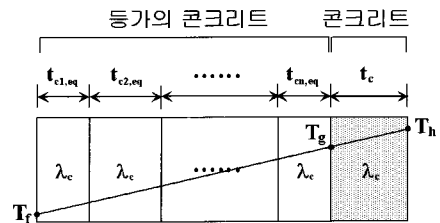
#### 5.2 LNG 저장탱크의 누출시 해석

그림 6과 같은 LNG 탱크의 설계에서 일반적인 해석 외에 추가적으로 고려해야 하는 중요한 사항은 LNG의 극저온( $-163^{\circ}\text{C}$ )에 대한 구조안전성 및 사용성의 확보이다. 정상가동시에는 내조가 LNG를 보유하고 있으며 또한 단열재가 온도를 차단하는 역할을 하여 콘크리트 외조가 직접적으로 극저온에 노출되지는 않는다. 그러나, LNG가 내조로부터 누출되어 단열재에 스며드는 사고가 발생했을 경우 외조에는 급격한 온도변화로 인한 큰 단면력 또는 응

력이 발생하게 되며, 이는 균열을 유발하고 단면의 안전성이나 수밀성을 저하시킬 수 있다. 따라서 LNG 누출시의 온도해석은 설계시 고려해야 하는 중요 항목 중의 하나이다. 정상가동시나 누출시의 온도해석에서는 온도가 정상

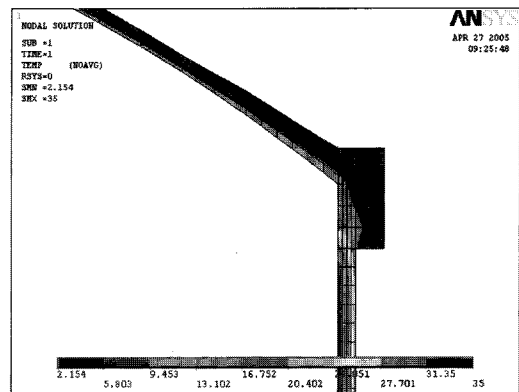


(a) 실제 단열재 층

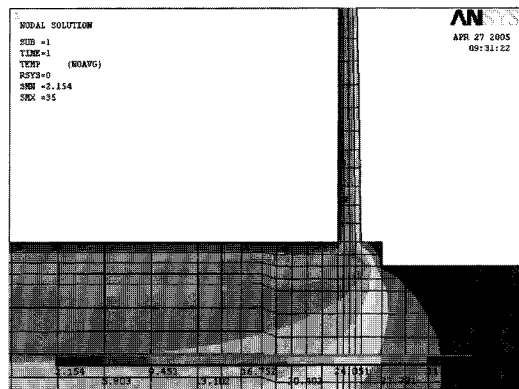


(b) 등가 콘크리트 층

그림 11 단열재 영향의 고려



(a) 지붕-벽체 접합부



(b) 벽체-바닥판 접합부 (지반 포함)

그림 12 LNG 탱크의 누출시 온도분포

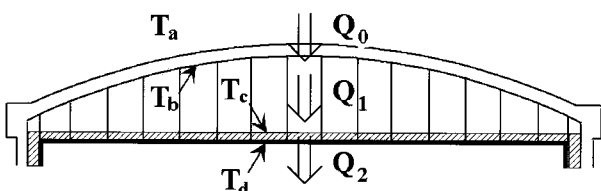


그림 10 LNG 탱크 지붕의 열유동

표 2 벽체의 등가 콘크리트 두께

재료명	두께 (mm)	열전도율 [W/(m·°C)]	등가 콘크리트 두께 (mm)	비고
내조 (9% Ni)	10		미고려	누출시 손실
Resilient glass blanket	300	0.038	18347	
Perlite powder	635	0.040	36894	
PUF (Poly-Urethane Foam)	50	0.023	5052	
라이너 (Carbon steel)	5		미고려	
외조 벽체 (콘크리트)	750	2.324	750	
대류 효과			182	
합계			정상가동시 : 61225 누출시 : 5984	

표 3 벽체의 온도 경계조건

위 치	누출시 (°C)		정상가동시 (°C)	
	PUF 있을 때	PUF 없을 때	PUF 있을 때	PUF 없을 때
벽체 내면	3.1	-170	31.9	31.6
벽체 외면	28.8	-5.0	34.4	34.3
외기온도	35	35	35	35

상태에 이르렀을 때 온도구배에 따른 단면력이 가장 커질 것으로 예상되므로 정상해석을 수행하는 것이 보통이다.

여기에서는 복잡한 구조로 이루어진 LNG 탱크의 온도 해석을 수행할 때 외조만을 모델링하고 현수천정이나 단열재가 외조의 온도분포에 미치는 영향은 별도로 고려하는 기법을 적용한 예를 소개하고자 한다.<sup>16)</sup> 이를 위해서는 다양한 기법들을 동원하여 외조 내면의 온도 경계조건을 도출해야 한다. LNG 탱크의 현수천정 위에는 Resilient glass blanket이 단열재로 얹혀져 있어 콘크리트 지붕이 극저온에 직접적으로 노출되는 것을 상당부분 차단하고 있다. 이를 반영하기 위해 그림 10과 같이 열유동율(Heat flow rate)의 평형을 고려하여 지붕 내면의 온도인  $T_b$  값을 유도할 수 있다.

한편, 벽체 및 바닥판에서는 내조와 외조 사이에 서로 다른 재질을 가진 여러 층의 단열재가 사용된다. LNG가 내조로부터 누출되는 사고시에는 최악의 경우 LNG가 콘크리트 외조 내면에 직접 접하게 되지만 이러한 극단적인 상황을 피할 수 있는 조치를 마련해 놓기도 한다. 예를 들어 단열재 층에 PUF(Poly-Urethane Foam)를 배치할 경우 이는 누출시에도 건전성을 유지하여 극저온에 대한 완충역할을 하게 된다. 단열재의 영향은 열속의 동등성을 고려하여 그림 11과 같이 단열재 층의 두께를 등가의 콘크리트 층의 두께로 변환함으로써 일목요연하게 고려할 수 있다. 표 2 및 표 3은 벽체에 대해 이러한 기법을 적용한 예를 보여주고 있으며, 이렇게 구한 벽체 내면의 온도인  $T_i$  값을 외조의 유한요소모델에 온도 경계조건으로 작용시키게 된다. 바닥판의 경우에도 벽체와 유사한 기법으로 바닥판 내면의 온도를 구할 수 있으며 단, 이때에는 바닥판에

매입되어 있는 히터의 영향을 추가로 고려해야 한다.

그림 12는 범용구조해석 프로그램 ANSYS<sup>13)</sup>의 축대칭 솔리드 요소에 위와 같이 구한 경계조건을 적용하여 누출시 온도해석을 수행한 결과를 보여주고 있다.


## 6. 맺음말

여기에서는 공학에서 접할 수 있는 다양한 온도해석 및 열응력해석 중 콘크리트 구조물에 대한 해석을 대표적으로 소개해 보았다. 화재 해석, 수화열 해석, 극저온 해석을 언급하였지만 이 외에도 온도해석이 필요한 경우는 실무에서 매우 다양하게 발생한다. 온도해석의 성패를 좌우하는 여러 가지 요인이 있겠지만, 그 중에서도 온도 경계조건을 실제와 가깝게 설정하는 것이 매우 중요하다. 고정온도조건, 대류조건, 복사조건 중 고려하고자 하는 상황을 가장 가깝게 모사할 수 있는 기법 및 입력값을 적용해야 한다. 또한, 고온이나 저온에 대한 해석의 경우 물성의 변화를 합리적으로 고려한 해석이 요망되며 콘크리트의 수화열 해석의 경우에는 배합의 발열특성을 올바르게 고려해야 한다.

대부분의 유한요소기반 범용구조해석 프로그램들은 온도해석을 수행할 수 있는 기능을 제공하고 있으며, 이를 통해 온도해석 또는 온도해석과 기타 해석이 연계된 해석을 비교적 용이하게 수행할 수 있다. 비단 온도해석에만 국한된 이야기는 아니지만, 범용구조해석 프로그램의 기능이 크게 발전하고 사용이 용이해져 프로그램에 내재된 이론에 대해 깊은 지식을 가지고 있지 않아도 다양한 종류의 해석을 수행할 수 있게 되었다 하더라도 타당한 해석 결과를 이끌어 내는 입력자료를 작성하는 것은 전적으로 해석자의 몫이다. 널리 인정받는 구조해석 프로그램이므로 스스로 알아서 바람직한 결과를 산출할 것이라고 기대한다면 큰 오산이며 해석자는 그러한 결과를 여러가지 방식으로 검증해보려는 철저한 노력이 필요하다고 생각된다.



## 참 고 문 헌

1. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 2005.
2. 한국콘크리트학회, “콘크리트표준시방서”, 2003.
3. 전세진, 이윤석, 김영진, 정연석, “가상의 항공기충돌 화재에 대한 원전격납건물의 내화성능 평가”, 토목학회논문집, 제25권, 제6A호, 2005, pp. 1177-1187.
4. Daewoo Engineering and Construction, “Technical Proposal for Above-ground LNG Storage Tank with 200,000 kl Capacity”, 2004.
5. European Committee for Standardization(CEN), “Design of Composite Steel and Concrete Structures (Eurocode 4). Part 1-2. General Rules - Structural Fire Design”, 1994.
6. ACI Committee 216, “Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements(ACI 216R-89)”, American Concrete Institute, 1994.
7. British Standard Institution, “Structural Use of Concrete(BS 8110). Part 2. Code of Practice for Special Circumstances”, 1985.
8. International Federation for Structural Concrete(FIB), “Structural Concrete”, 1999.
9. International Organization for Standardization, “Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction (ISO 834)”, 1985.
10. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, “ABAQUS/Standard 6.3”, 2002.
11. 대림산업주식회사, “Inchon LNG-receiving Terminal (1st Extension) 실시설계”, 한국가스공사, 1995.
12. 한양대학교 기계공학과, “강재지붕형 LNG 저장탱크의 안전성평가”, 한국가스안전공사, 2008.
13. ANSYS, “ANSYS 5.6”, 2000.
14. Jeon, S. J., “Advanced assessment of cracking due to heat of hydration and internal restraint”, ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 4, 2008, pp. 325-333.
15. (주)마이다스아이티, “MIDAS/Civil”, 2006.
16. Jeon, S. J., Jin, B. M., Kim, Y. J., and Chung, C. H., “Consistent thermal analysis procedure of LNG storage tank”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 25, No. 4, 2007, pp. 445-466. 

[ 담당 : 전세진, 편집위원 ]