

# 장기팽창성 콘크리트의 체적변화에 의한 잔류응력 해석

## Residual Stresses Analysis due to Volumetric Changes in Long-term Autogenous Expansive Concrete

차 수 원†      장 봉 석\*      오 병 현\*\*

Cha, Soo-Won      Jang, Bong-Seok      Oh, Byung-Hyun

(논문접수일 : 2009년 10월 6일 ; 심사종료일 : 2009년 11월 20일)

### 요 지

본 연구에서는 MgO를 첨가하여 자기팽창을 유도하는 화학적 프리스트레싱 기법(chemically prestressing method)으로 균열을 제어하는 방법을 다루고자 한다. 수화열에 의한 온도변형 및 수축과 같은 콘크리트의 필연적인 체적변화는 시공 중 균열을 발생시키고, 이는 장기적인 콘크리트의 내구성 및 사용성을 저하시키는 주요 요인으로 작용한다.

시공 중 발생하는 균열을 제어하기 위하여 본 연구는 MgO 콘크리트의 팽창 특성을 모델링하고 콘크리트의 단면 내 온도분포로부터 온도응력 및 자기팽창 응력을 평가하는 3차원 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석프로그램은 온도의존적 자기팽창량과 팽창응력을 검증하였고, 예제 해석을 통하여 MgO 팽창 여부에 따른 잔류응력(residual stress)의 변화 양상을 비교, 분석하였다. 저온에서 소성한 MgO를 혼입하여 제조한 장기팽창성 콘크리트는 온도의존적 특성을 보이고 수년에 걸쳐 발생하는 경향을 보이므로, 장기적으로 높은 온도가 유지되는 매스콘크리트 구조물의 온도균열을 제어하는데 가장 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 화학적 프리스트레싱, 자기팽창, MgO 콘크리트, 3차원 유한요소해석 프로그램, 잔류응력, 매스콘크리트

### Abstract

This study is devoted to the problems of thermal and autogenous expansion stresses in order to avoid cracking using chemically prestressing method. The chemical prestress can be induced by autogenous expansion characteristics of MgO concrete made in specific burning temperature. The volume change induced cracking has great influence on the long-term durability and serviceability. To evaluate risk of cracking, the computer programs for analysis of thermal and autogenous expansion stresses were developed. In these 3-D finite element procedures, long-term autogenous expansive deformation is modeled and its resultant stress is calculated and then verified by comparison with manual calculation results. In this study, the stress development is related to thermal and autogenous expansive deformation. Using the developed program, residual stresses of MgO concrete were compared and analysed in the example

From the numerical results it is found that long-term, and temperature dependent expansive concrete with light-burnt MgO is most effective in controlling the risk of cracking of mass concrete because it has high temperature for long period. The developed analysis program can be efficiently utilized as a useful tool to evaluate the thermal and autogenous expansion stresses in mass concrete structures with lightly burnt MgO.

**Keywords** : *chemically prestressing method, autogenous expansion, MgO concrete, 3-D finite element procedures, residual stresses, mass concrete*

### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 타설 직후 강성이 발현되는 시점부터

수화열, 자기수축, 건조수축 등 체적변화를 유발하는 변형이 발생하고, 이에 따른 구속응력이 유발된다. 수화열에 의한 구속응력은 온도가 상승하는 시기에 압축응력이, 온도가 하강

† 책임저자, 정회원 · 울산대학교 건설환경공학부 교수  
Tel: 010-3790-4611 ; Fax: 052-259-2629  
E-mail: chasw@ulsan.ac.kr

\* 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원

\*\* 한국수자원공사 K-water연구원 댐안전연구소장

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

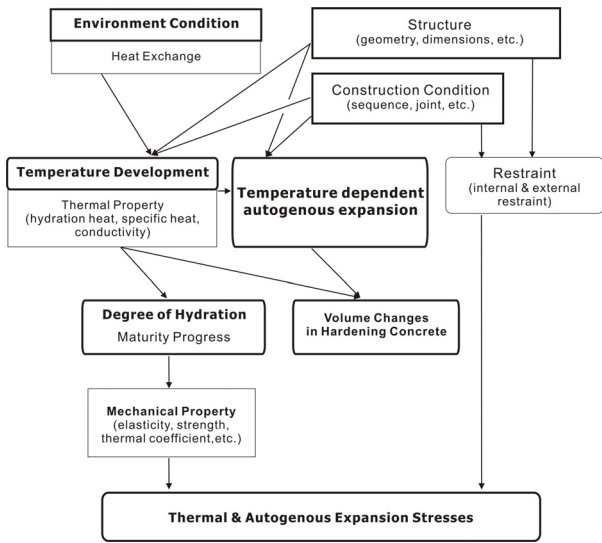


그림 1 온도 및 자기팽창응력에 영향을 미치는 요인

하는 시기에 인장응력이 유발되며, 수축에 의한 응력은 외부 구속에 의하여 인장응력이 시간에 따라 증가하는 경향을 가진다. 체적변화에 의한 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생하며, 이러한 균열은 주로 시공 중 발생하게 된다(차수원 등, 2002).

최근 들어 구조물의 노후화에 따른 콘크리트의 내구성에 대한 관심이 고조되고 있고, 이러한 초기재령에서 발생하는 균열은 구조물의 내구성 및 사용성과 같은 장기적인 성능(long-term performance)에 큰 영향을 미친다. 시공 초기에 발생하는 균열은 철근 부식, 중성화 및 알칼리 골재반응 등을 촉진시키고, 장기적인 성능저하를 가속화한다. 따라서 초기재령의 체적변화에 의한 균열 제어는 콘크리트 구조물의 내구성 향상에 매우 중요한 역할을 한다.

초기재령의 인장응력을 감소할 목적으로 주로 수화열 및 수축을 저감하려는 노력이 경주되어 왔다(차수원 등, 2008). 그러나 본 연구에서는 낮은 온도에 소성된 MgO를 첨가하여 자기팽창을 유도하는 방법으로 균열을 제어하는 기법을 다루고자 한다.

이를 위하여 본 연구는 MgO 콘크리트의 팽창 특성을 모델링하고 콘크리트의 단면 내 온도분포로부터 온도응력 및 자기팽창 응력을 평가하는 3차원 유한요소해석 프로그램을 개발하였다(그림 1). 개발된 해석프로그램은 온도의존적 자기팽창량과 팽창응력을 검증하였고, 예제 해석을 통하여 MgO 콘크리트의 장기팽창성을 활용한 균열제어 기법을 도출하였다.

## 2. 장기 팽창 및 역학적 특성

MgO를 첨가한 온도 및 수축보상(thermal and shrinkage

compensating) 개념의 콘크리트는 낮은 온도에서 소성된 MgO를 첨가한 콘크리트로서 MgO의 수화 생성물인 Mg(OH)<sub>2</sub>가 그 조성물인 MgO, H<sub>2</sub>O보다 더 큰 부피를 가지므로 MgO콘크리트는 팽창성을 가진다. 기존의 팽창성 콘크리트는 초기재령에서 팽창성을 가지는 반면 MgO콘크리트는 7일 이후 팽창을 시작하여 수년에 걸쳐 장기적으로 반응한다(Mehta 등, 1980).

MgO는 MgCO<sub>3</sub>를 600~650℃이상 온도에서 소성하여 생성된다. MgO는 소성온도에 따라 성질이 다르며, 850~1200℃에서 소성된 MgO는 콘크리트 첨가시 유해한 영향없이 팽창성을 나타내며 일정시간이 지나면 거의 수화되기 때문에 제어가 용이하다. 반면에 소성온도가 1500~1800℃인 MgO는 수화반응의 제어가 어렵고, 유해한 팽창을 유발할 수 있다. 시멘트에 자연적으로 포함되어 있는 MgO는 1450℃에서 소성되며, 장기 팽창성 효과를 위해 콘크리트에 첨가하는 MgO의 적당한 소성온도는 1100℃내외이다. 1000℃에서 소성된 MgO는 수화물 Mg(OH)<sub>2</sub>을 생성시키며, 이는 반응하기 전 MgO와 H<sub>2</sub>O의 2배 이상의 부피를 가진다. 이러한 팽창성능을 이용하여 매스콘크리트의 수축보상을 위해 사용될 수 있다(Du, 2005).

MgO 콘크리트의 자기팽창성은 MgO분말 종류에 따라 달라지고 첨가량, 콘크리트 온도에 비례하여 증가한다. 시멘트 내의 CaO는 MgO 콘크리트의 팽창을 감소시키기 위해 수화되지 않는 CaO의 양을 최소한으로 유지되어야 한다. 따라서 MgO의 종류와 양의 적절한 선택과 콘크리트 온도 조건에 따라 충분히 MgO 콘크리트의 팽창성이 유용하게 사용될 수 있다.

MgO 콘크리트의 자기팽창은 전체적으로 균일분포하기에 자기팽창에 의한 화학적 프리스트레싱 효과는 외부 구속에 의한 인장응력을 감소시키는 효과가 있다. 또한 장기적인 팽창효과가 탁월하여 매스콘크리트의 온도 저하와 건조수축에 의한 수축의 보상효과는 매우 훌륭한 것으로 알려져 있다.

MgO 콘크리트는 압축강도 인장강도, 탄성계수, 인장변형률용량(tensile strain capacity) 등 역학적 특성이 일반콘크리트 보다 다소 큰 특성을 보이고, 이에 따라 불투수성, 마모저항성이 개선되는 경향이 있다(Du, 2005).

## 3. 유한요소 정식화 및 재료특성 모델링

자기팽창의 온도의존성을 고려하기 위하여 본 연구에서는 구조물의 온도해석을 수행한 후, 이에 따른 온도응력 및 온도의존적 특성을 가지는 자기팽창응력을 계산하는 해석프로그램을 개발하였다. 이 때 단면의 온도분포에 따라 각 요소

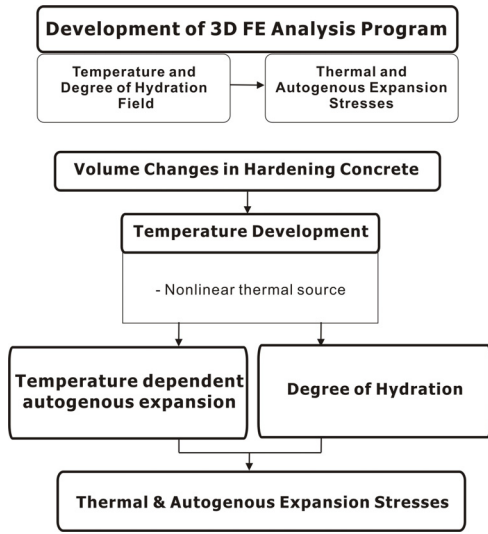


그림 2 개발된 해석프로그램의 구성 및 절차

의 역학적 특성은 성숙도(maturity)에 따라 변화하기 때문에 온도해석 후 수화도를 산정할 수 있도록 하였다(그림 2).

### 3.1 온도 해석

온도 확산방정식은 다음 식과 같은 비정상 Fourier 방정식으로 표현된다(Zienkiewicz, 1985).

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{k} \nabla^2 T + q \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $\mathbf{k}$ =구성행렬(constitutive matrix)로,  $k_x, k_y, k_z$ 를 갖는 대각행렬이 되며,  $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ 이고,  $q$ 는 시멘트 수화반응에 의한 내부 에너지 발생률이다.

경계조건은 세 가지 방법으로 표현될 수 있다. 즉, 필수 경계조건, 자연 경계조건 그리고 대류 경계조건이 그것이다.

$$\begin{aligned} T &= T_p \text{ on } A_p, \quad q^f = h_c(T - T_c) \text{ on } A_c, \\ q^f &= \mathbf{q}^T \mathbf{n} = f \text{ on } A_f \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $T_p$ 는 경계  $A_p$ 에 정의된 온도,  $q^f$ 는 경계  $A_c$ 에 수직인 열대류량,  $h_c$ 는 대류계수로 환경조건과 구조물의 표면특성에 따라 달라진다.  $T_c$ 는 외부환경의 온도, 경계  $A_f$ 에 정의된 열플럭스  $q$ 는 열 플럭스 벡터,  $\mathbf{n}$ 은 구조물 물체에서 바깥 방향으로 작용하는 단위벡터이다.

유한요소 방정식은 평형방정식에 Galerkin 가중치법을 적용하여 정식화하였다. 온도영역과 온도구배에 대한 공간적 근사는 다음과 같다.

$$T = \mathbf{N} T, \quad \nabla T = \mathbf{B} T \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{N}$ 은 온도 보간함수,  $\mathbf{T}$ 는 절점온도벡터이고,  $\mathbf{B}$ 는  $\mathbf{N}$ 을 미분하여 구한 온도구배의 보간함수이다.

또한, 온도변화율도  $\mathbf{N}$ 을 사용하여 보간한다. 즉,

$$\dot{T} = \mathbf{N} \dot{T} \quad (4)$$

본 연구에서는 3차원 8절점 고체요소를 적용하였고, 공간 차분화를 거친 후에 최종 유한요소방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K} \mathbf{T} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} &= \mathbf{R} \\ \mathbf{K} &= \int_{V_c} \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} dV + \int_{A_c} h_c \mathbf{N}^T \mathbf{N} dA \\ \mathbf{C} &= \int_V \mathbf{N}^T c\rho \mathbf{N} dV \\ \mathbf{R} &= -\int_{A_f} \mathbf{N}^T f dA + \int_{A_c} \mathbf{N}^T h_c T_e dA + \int_V \mathbf{N}^T q dV \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $\mathbf{K}$ 는 전도행렬,  $\mathbf{C}$ 는 용량행렬이고,  $\mathbf{R}$ 은 하중벡터이다. 이 평형방정식은 다시 시간 차분화 과정을 거치게 된다.

시간에 따른 응답을 얻기 위해서 식 (5)의 미분방정식을 시간에 대해 적분한다. Arrhenius형태의 발열현상, 복사 경계조건, 그리고 비등 열전달계수 등이 관련된 매우 복잡한 비선형의 확산 문제는 반복계산기법과 Newton방법을 사용해야 한다. 즉, 여기서는 2차 반복계산기법 등이 적용될 수 있다. 본 연구는 시간의 함수로 주어지는 온도영역의 해를 구하는데, 일반화된 Crank-Nicholson방법을 사용하였다. 이 방법은 다음과 같은 근사과정을 거치게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{T}}^a &= (\mathbf{T}_{n+1} - \mathbf{T}_n) / \Delta t \\ \mathbf{T}^a &= \theta \mathbf{T}_{n+1} + (1 - \theta) \mathbf{T}_n, \quad 0 \leq \theta \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)이 각  $\mathbf{T}^a$ 에 대해 구해지면, 위의 정의가 적용될 수 있다. 결과적으로 다음과 같은 알고리즘을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} &[\mathbf{C}(\mathbf{T}^a) + \theta \Delta t \mathbf{K}(\mathbf{T}^a)] \mathbf{T}_{n+1} \\ &= \Delta t [\theta \mathbf{R}_{n+1} + (1 - \theta) \mathbf{R}_n] + [\mathbf{C}(\mathbf{T}^a) - (1 - \theta) \mathbf{K}(\mathbf{T}^a)] \mathbf{T}_n \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $\Delta t$ 는 시간간격,  $\theta$ 는  $t_n$ 에서  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ 까지의 시간단계에서 어느 지점을 차분화할 것인가를 결정하는 매개

변수로,  $\theta=0$ 일 때 식 (7)은 Euler기법이 되고,  $\theta=0.5$ 이면 사다리꼴기법,  $\theta=1$ 이면, 후방차분 기법이 된다.  $\theta \geq 0.5$ 이면 차분화 기법은 안정적이며,  $\theta < 0.5$ 이면 시간간격이 특정 제한조건을 만족하는 경우에만 안정적이 된다.

### 3.2 응력 해석

시간에 따른 온도 및 습도응력을 구하기 위하여 가상일의 원리를 이용한 증분형태의 평형방정식에 다음 식과 같은 변위장과 변형률 증분으로 유한요소법에 의한 근사화를 시도하였다.

$$\dot{u} = N\dot{d}, \quad \dot{\epsilon} = B\dot{d} \quad (8)$$

여기서,  $N$ 은 변위 보간 행렬이고,  $\dot{d}$ 는 절점 변위 증분이고,  $B$ 는 변형률 보간 행렬이다.

최종적인 증분 형태의 방정식은 다음 식과 같이 표현된다 (Damkile, 1983).

$$\begin{aligned} K_i \dot{d} &= R - R_i \\ K_i &= \int_V B^T E B dV \\ R &= \int_V B^T E \epsilon_i dV + \int_V N^T p dV + \int_A N^T t dA \\ R_i &= \int_V B^T \sigma_0 dV \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $K_i$ 는 접선 강성행렬(tangential stiffness matrix)이고,  $R$ 은 하중벡터이고,  $R_i$ 는 각 시간단계에서 구조물 내부의 응력  $\sigma_0$ 에 의한 내부 하중벡터이다. 또한 하중벡터 중 외부하중으로 체적력  $p$ 와 표면력  $t$ 를 고려할 수 있다.

응력해석에서 8절점 등매개 고체요소(isoparametric solid element)를 사용하였고, 각 시간단계에서 비선형성을 가지므로 반복계산을 통하여 응력을 구하였다.

증분구성방정식(incremental constitutive equation)은 다음 식과 같이 표현할 수 있다. .

$$\dot{\sigma} = E_i(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_i) \quad (10)$$

여기서,  $E_i = E_i(T, \alpha)$

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_c + \dot{\epsilon}_{sh} + \dot{\epsilon}_T + \dot{\epsilon}_g$$

여기서, 접선탄성계수는 성숙도 또는 수화도의 함수로 결정

되고, 초기변형률 성분  $\dot{\epsilon}_i$ 은 크리프변형률  $\dot{\epsilon}_c$ , 수축변형률  $\dot{\epsilon}_{sh}$ , 온도변형률  $\dot{\epsilon}_T$ , 자기팽창변형률  $\dot{\epsilon}_g$ 으로 구성된다.

### 3.3 장기팽창성 콘크리트의 자기팽창 예측모델

MgO 콘크리트의 팽창은 MgO의 수화반응으로 MgO 분자의 체적이 증가하면서 발생하므로 그 팽창특성은 화학반응의 일반적인 법칙에 부합하게 된다. 즉 화학반응은 온도가 높을수록 반응속도가 더 빠르고 팽창증가량이 더 크며 동시에 팽창속도와 반응에 참여한 MgO의 함량은 정비례관계에 있다. 따라서 MgO 콘크리트의 팽창은 하나의 화학반응의 과정이며 화학반응의 일반법칙을 따르게 되어 MgO 반응속도는 온도와 농도의 함수이다. 온도가 반응속도에 미치는 영향을 표현하는 방법 중 Arrhenius방정식은 가장 광범하게 사용되는 방정식이다.

물질의 화학반응은 온도와 농도가 반응속도에 영향을 주는 주요 요인이다.  $\tau$ 시간의 팽창속도  $d\epsilon(\tau)/d\tau$ 은 그 시간의 잔여팽창량(농도)과 온도의 함수라고 가정하고 이를 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} = \alpha \epsilon_0 \left(1 - \frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0}\right)^\beta e^{-\frac{\gamma}{T+273}} \quad (11)$$

여기서,  $\epsilon_0(1 - \frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0})$ 은 MgO의 팽창잔여량이고, 화학반응방정식중의 농도에 해당하며,  $e^{-\frac{\gamma}{T+273}}$ 는 온도가 반응속도에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

표 1과 같이 기존의 실험자료(Du, 2005)의 분석으로부터 온도가 농도작용에 영향 주는 인자인 반응계수  $\beta$ 는 온도와 밀접한 관계가 있다는 사실을 알 수 있다.  $\beta$ 가 온도  $T$ 의 함수라고 가정하면 식 (11)은 다음과 같이 수정된다.

$$\frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} = \alpha \epsilon_0 \left(1 - \frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0}\right)^{(\beta_1 + \beta_2 T + \beta_3 T^2)} e^{-\frac{\gamma}{T+273}} \quad (12)$$

식 (12)는 일반 화학반응의 반응속도를 표현하고 있는 자기팽창 예측모델로 유한요소방정식에 적용하기 위하여 임의

표 1 양생온도에 따른 MgO 콘크리트의 팽창량(단위:  $\mu\epsilon$ )

T \ $\tau$	3일	7일	30일	93일	180일	389일	730일	1107일
20℃	8	10.3	23.2	52	78	110	136	150
30℃	12.5	22.5	42.5	88.5	120	148	169	181
40℃	28.3	42.3	100	145.1	168.5	190.5	202.1	208
50℃	47.5	77.5	143.7	182.8	203.8	220.4	224	224.3

표 2 자기팽창모델의 재료상수

$\epsilon_0$	$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\gamma$
225	$5.85 \times 10^9$	3.3057	0.009393	-0.00073214	8200

의 시간의 팽창량은 아래식과 같이 순차적인 증분형태로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_g^0 &= 0 \\ \epsilon_g^n &= \epsilon_g^{n-1} + \Delta\epsilon_g^n \\ \Delta\epsilon_g^n &= \alpha\epsilon_0 \left(1 - \frac{\epsilon_g^{n-1}}{\epsilon_0}\right)^{(\beta_1 + \beta_2 T + \beta_3 T^2)} e^{-\frac{\gamma}{T+273}} \Delta T \end{aligned} \quad (13)$$

자기팽창모델은 표 1의 등온조건에서 실험한 결과를 회귀 분석하여 표 2와 같이 식 (12)의 계수를 구하게 된다.

### 3.4 단열온도상승 모델링

콘크리트 구조물의 온도해석을 하기 위해서는 콘크리트의 수화반응에 대한 모델링식이 필요하다. 일반적으로 콘크리트 표준시방서에서 제시하고 있는 지수형태의 단열온도 상승곡선을 많이 사용하며, 수화도를 이용한 단열온도 상승식을 사용할 수도 있다. 지수형태의 단열온도 상승곡선의 경우 타설 온도 및 타설후의 온도이력을 고려하지 못하는 등의 단점이 있다. 따라서 본 해석프로그램에서는 콘크리트표준시방서의 단열온도상승식과 수화도를 이용한 단열온도상승식을 모두 내장하였다.

일반적으로 사용되고 있는 단열온도상승곡선은 다음과 같은 지수형태의 함수로 나타내며, 최대온도 상승량( $Q_\infty$ )와 반응속도( $r$ )로써 단열상승 특성을 표현한다(콘크리트표준시방서, 2009).

$$Q_\infty(t) = Q_\infty(1 - e^{-rt}) \quad (14)$$

콘크리트의 발열과정에서 발열량은 수화정도에 따라 다르게 된다. 따라서 반응이 어느 정도 진행되었는지 알기 위해, 수화도( $\alpha$ )라는 개념을 사용한다. 일반적으로 수화반응에 기인한 발열량의 크기로 다음식과 같이 수화도를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\text{시간 } t \text{ 에서 반응한 시멘트량}}{\text{시간 } t=0 \text{ 에서 총시멘트량}} \\ \alpha &= \frac{Q_{ad}(t_{ad})}{\max Q_{ad}} = \frac{\Delta T_{ad}(t_{ad})}{\max \Delta T_{ad}} \end{aligned} \quad (15)$$

수화과정은 온도이력에 따라 다른 특성을 가지게 된다. 따라서 서로 다른 이력에서의 수화도를 나타내기 위해서 등가 재령시간을 도입한다.

$$t_e = \int_0^t \frac{f(T)}{f'(t_0)} dt \quad (16)$$

여기서,  $f(T)$ 는 성숙도 함수이며,  $T_0$ 는 293K이다. 성숙도 함수는 여러 가지가 제안되고 있으나 본 연구에서는 Freisleben Hansen 등(1977)에 의해 제안된 다음 식과 같은 온도활성화에 대한 Arrhenius equation 형태의 함수를 사용하였다.

$$f(T) = ke^{-\frac{\theta}{T}} \quad (17)$$

여기서,  $\theta$ 은 활성화에너지/기체상수 이다

따라서 식 (16)을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$t_e = \int_0^t e^{\theta \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} dt \quad (18)$$

한편, 위에서 구한 등가재령시간에 대한 식으로 수화도를 모델링하기 위해서는 Jonasson(1985)에 의해 제안된 등가 재령시간에 대한 수화도식을 사용하였다.

$$\alpha = e^{-\lambda_1 \left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^{-\kappa_1}} \quad (19)$$

따라서, 콘크리트에서의 발열량(Q)와 단위시간당 발열량(q)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= (\max Q) \cdot \alpha \\ q &= (\max Q) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} \\ &= (\max Q) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t_e} \cdot \frac{\partial t_e}{\partial t} \end{aligned} \quad (20)$$

동일한 배합을 가진 콘크리트의 경우에도 타설온도에 따라 발열 특성이 변화하게 된다. 타설온도가 높을수록 반응속도가 빨라지고 최대온도상승량이 적어짐을 알 수 있다. 콘크리트표준시방서의 단열온도상승식으로는 타설온도에 따른 변화를 나타낼 수 없기 때문에 각각의 타설온도마다 다른 식을 사용해야 한다. 그러나 수화도를 고려한 발열량식을 사용할 경우 타설온도에 대한 영향을 효과적으로 모델링할 수 있다.

### 3.5 응력해석시 역학적 특성 모델링

온도균열의 발생을 추정하기 위해서는 새로 타설된 콘크리트의 인장강도를 적절히 정해야 한다. 콘크리트의 인장강도는 사용하는 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 골재의 종류, 온도 이력, 재령 등의 영향을 받는다. 본 프로그램에서는 콘크리트 표준시방서(2009)의 강도발현식과 CEB-FIP(1990)의 강도발현식을 모두 사용할 수 있다.

### 4. 해석프로그램의 검증

본 연구에서 개발된 해석프로그램은 매스콘크리트의 수화 열에 의한 온도응력 뿐만 아니라 MgO 콘크리트의 팽창에 의한 응력을 계산할 수 있도록 구성되었다. 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 양생온도가 변화할 때 MgO 콘크리트의 팽창량이 예측모델에서 계산되는 양과 동일한 지를 검증하였다. 또한 수계산을 통한 프로그램의 검증을 위하여 온도조건은 등온으로 가정하게 되면 온도응력은 발생하지 않고, 팽창에 의한 압축응력만 유발되어 팽창에 의한 응력만을 검증할 수 있고, 이 때 역학적 경계조건은 계산의 편의를 위하여 양단 고정되어 구속도가 100%인 경우를 가정하였다.

검증에 사용된 구조물은 폭, 높이가 각각 1m이고 길이가 10m인 양단구속 구조물을 가정하였고, 해석과 결과 분석의 편의를 위해 1/4 대칭 모델의 사용하였다.

#### 4.1 양생온도 변화에 따른 팽창량 검증

자기팽창 예측모델을 개발된 프로그램에 적절히 탑재되었는가에 대한 검증을 위하여 양생온도를 T=20, 30, 40, 50℃일 경우의 자기 팽창량 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 양생온도가 증가할수록 자기팽창량의 크기는 증가하였으며, 식 (12)와 같이 자기팽창모델을 수계산한 결과와 프로그램에서

표 3 콘크리트 재료특성 및 해석조건

해석조건 및 재료특성	입력값
• 해석부위	양단 구속 구조물
• 타설시 외기온도 (℃)	20
• 타설시 콘크리트온도 (℃)	20
• 타설길이 (m)	10
• 콘크리트 설계기준강도 (MPa)	27
• 콘크리트 28일 탄성계수 (MPa)	24,647
• 콘크리트 28일 인장강도 (MPa)	2.39
• 포아송비	0.18
• 시멘트 종류	1종시멘트
• 단열온도상승량, $Q_{\infty}$ (℃), 반응속도계수, r	$Q_{\infty}=55.9$ r=1.4460

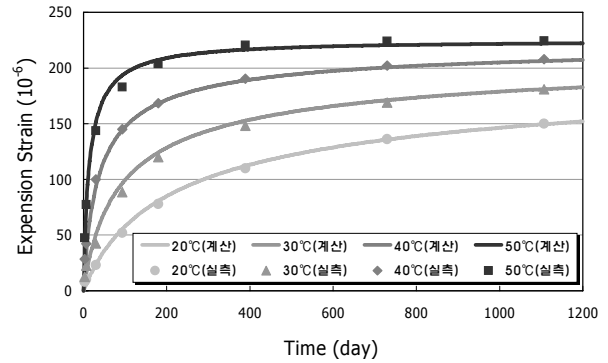


그림 3 등온조건에서 장기팽창성 콘크리트의 팽창량

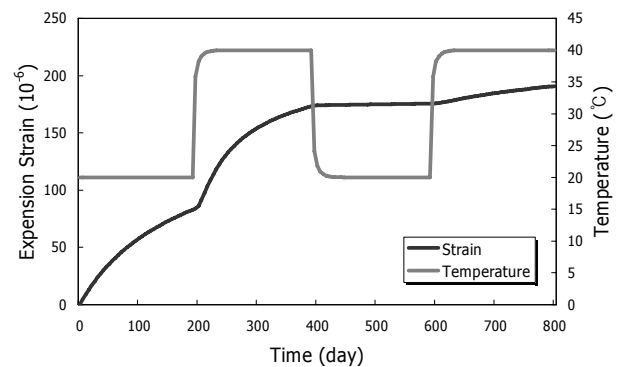


그림 4 온도가 변화할 때 장기팽창성 콘크리트의 팽창량

계산한 결과는 표 1에서 나타낸 실험결과와 동일하였다.

온도조건이 변화할 때 팽창량의 변화를 분석하기 위하여 그림 4와 같이 양생온도를 20℃~40℃~20℃~40℃로 변화하여 자기팽창량을 프로그램을 통하여 계산하였다. 그림 2와 같이 첫 번째 사이클에서 온도가 20℃에서 40℃로 상승하면 팽창속도가 빨라지고, 온도가 40℃에서 20℃로 하강하여도 팽창량은 여전히 증가하지만 단지 팽창속도만 다소 감소하였고, 팽창량은 단조증가하였다. 또한 두 번째 사이클에서 온도가 20℃에서 40℃로 재상승하면 팽창속도는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는 기존 변온조건에서 수행한 자기팽창결과와 부합할 뿐만 아니라 자기팽창 계산의 기본 가정과도 일치하는 결과를 보이고 있다.

#### 4.2 수계산을 통한 응력해석 프로그램 검증

응력프로그램의 검증은 수계산이 가능하도록 가정을 단순화하여 계산한 결과와 비교하여 수행하였다. 이 때 온도조건을 등온(T=40℃)으로 가정하게 되면, 그림 3과 같이 온도변형은 발생하지 않고 팽창 변형만 발생하게 된다. 등온조건으로 가정하였으므로 팽창량은 그림 5에서 T=40℃인 경우와 동일하게 되고, 약 1000일이 경과한 후 팽창변형률이 200με 발생

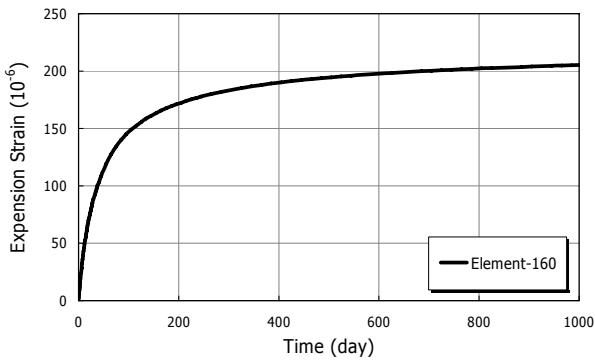


그림 5 등온조건(T=40°C)에서 MgO 콘크리트의 팽창량

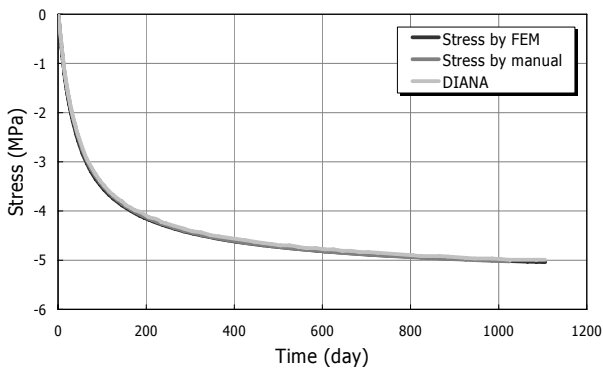


그림 6 MgO 콘크리트의 자기팽창에 의한 압축응력 검증

한다.

초기변형률성분이 팽창만 존재하고 이에 따른 압축응력만 유발되게 되어 팽창에 의한 응력만을 검증할 수 있고, 이 때 역학적 경계조건은 계산의 편의를 위하여 양단 고정되어 구속도가 100%인 경우를 가정하였다.

수계산에 의한 응력은 일반화된 구성방정식에서 완전구속인 경계조건으로 인하여 전체 변형률( $\epsilon$ )과 각 시간단계의 증분값( $\Delta\epsilon$ )은 모두 "0"이 된다. 이러한 수계산하는 과정을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma^n = \sigma^{n-1} + \Delta\sigma^n \quad (21)$$

$$\Delta\sigma^n = E(t)(\Delta\epsilon^n - \Delta\epsilon_g^n) = E(t)(0 - \Delta\epsilon_g^n) = -E(t)\Delta\epsilon_g^n$$

그림 6은 개발된 프로그램으로 계산된 응력과 상기의 방법으로 수계산한 응력 및 상용해석프로그램인 DIANA의 결과를 비교한 것으로, 3가지 결과가 완전하게 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 MgO 콘크리트의 자기팽창량과 이에 따른 응력 계산 프로그램은 합리적으로 구성되었다는 것을 알 수 있다.

### 5. 예제 해석

본 연구에서 개발된 해석프로그램을 이용하여 수화열에 의한 온도응력만 발생하는 경우와 온도응력과 팽창에 의한 압축응력이 동시에 발생하는 경우를 비교하여 장기팽창성 콘크리트의 특성을 분석하는 예제 해석을 수행하였다.

해석 대상구조물은 폭, 높이가 각각 0.5, 1.2, 5, 10m이고 길이가 각각 5, 10, 20, 50, 100m인 양단구속 구조물

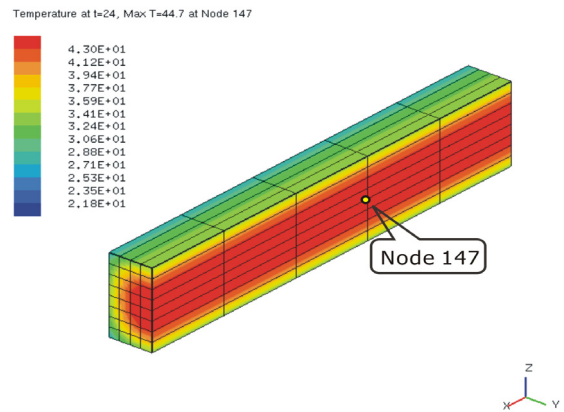


그림 7 최대온도발생시에서 온도분포(1×1×10m)

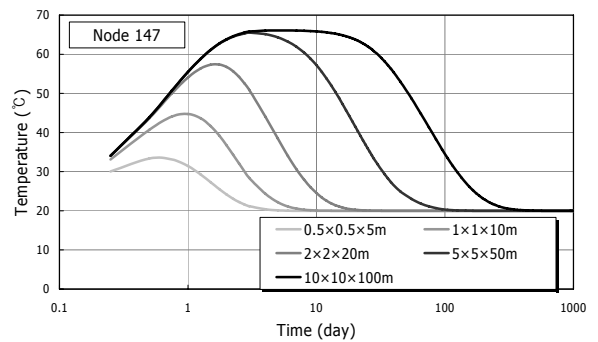


그림 8 최대온도발생시점의 온도이력

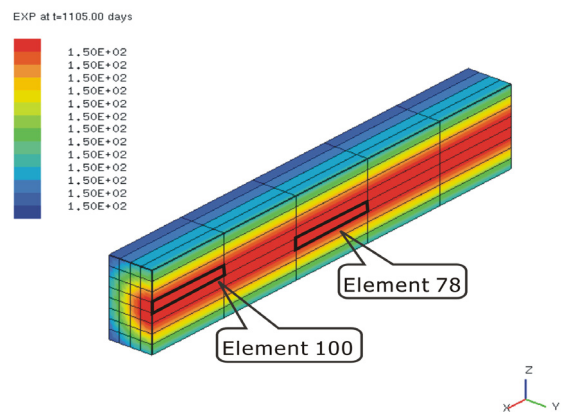


그림 9 팽창량 분포(1×1×10m)

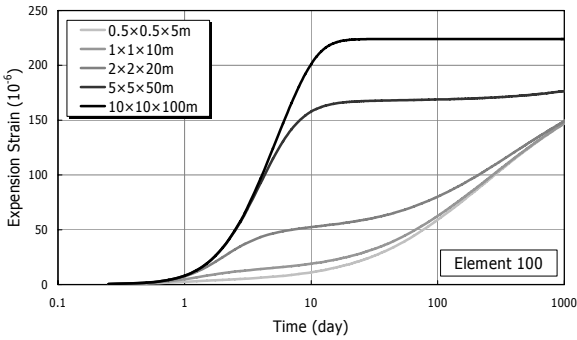


그림 10 장기팽창량 콘크리트의 팽창량 이력

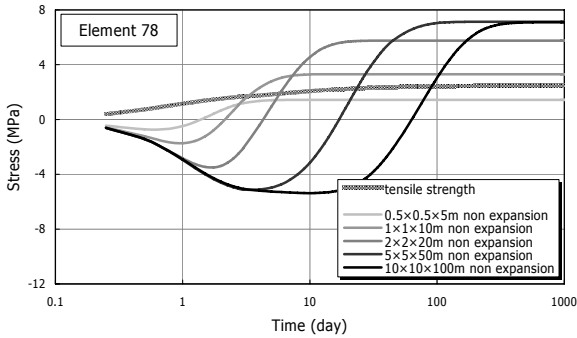


그림 11 수화열에 의한 온도응력 이력

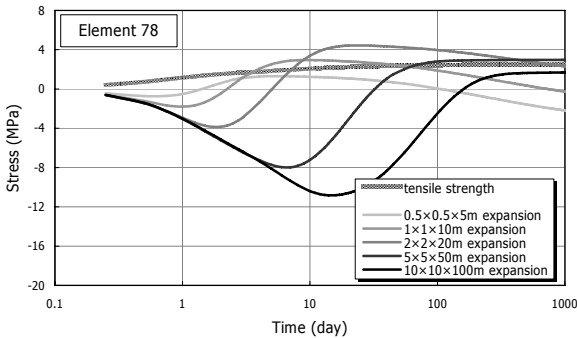


그림 12 온도 및 자기팽창응력 이력

을 가정하였고, 해석과 결과 분석의 편의를 위해 1/4 대칭 모델을 사용하였다. 검증과 예제에 사용된 해석조건은 4장에 설명한 것과 같다.

개발된 프로그램은 3차원해석이므로 유한요소의 모델링 및 결과 분석을 위하여 전후처리프로그램을 개발하여 탑재하였다. 그림 7은 후처리프로그램을 이용한 최대온도발생시 온도분포를 나타내고 있고, 그림 8은 최대온도발생지점의 온도 이력을 나타내고 있다. 단면이 클수록 최대수화열 발생온도가 높고 최대온도가 오래 유지됨을 알 수 있다.

그림 9는 시간에 따른 자기팽창변형률 분포를 나타내고 있다. 단면 중앙부의 높은 온도로 인하여 최대온도 시에 자기팽창량은 중앙부가 더 큰 값을 보이고 있으나, 시간이 경

과함에 따라 단면 전체가 균일한 팽창량을 보이고 있다. 그림 8은 단면중앙부 자기팽창변형률의 이력이며 단면이 클수록 최대온도가 높고 온도유지시간이 길므로 자기팽창량이 증가하며, 온도의존적인 팽창특성을 잘 묘사하고 있다.

그림 11은 수화열에 의한 온도응력만이 발생하는 경우 응력이력을 나타내고 있고, 그림 12는 수화열에 의한 온도응력과 MgO 콘크리트의 팽창에 의한 응력이 동시에 발생하는 경우 응력이력을 나타내고 있다. 해석대상 구조물의 경우 기하학적 형상과 경계조건에 의하여 x방향응력이 지배적이다.

그림 11과 같이 단면크기가 증가할수록 온도균열가능성은 증가하며, 단면이 1m이상의 경우 구속도가 100%이면 온도균열이 발생하는 것으로 나타났다. 그림 12와 같이 자기팽창이 발생하는 경우 장기재령에서 모든 단면은 압축응력상태에 놓이는 것을 알 수 있다. 그러나 최소단면이 5m이하인 경우 수화열에 의한 인장응력에 의해 재령 10~20일 사이에서 온도균열이 발생한다. 이는 재령 10일까지 발생하는 자기팽창변형률이 불과 20~50 $\mu\epsilon$ 정도 발생하였고, 이로 인하여 충분한 압축응력이 이 시기에 도입되지 못하였기 때문이다.

10m인 단면에서는 높은 수화열이 장기간 지속되어 최대 온도가 발현되는 10일 정도에서도 장기팽창성 콘크리트의 자기팽창량이 매우 크므로 큰 압축응력을 도입시켜 장기재령의 인장응력을 저감시켜 온도균열을 제어할 수 있다. 따라서 장기팽창성 콘크리트는 높은 온도를 장시간 유지하는 매스콘크리트가 외부구속작용을 크게 받을 경우 더욱 효과가 우수하다는 것을 알 수 있다. 자기팽창에 의해 온도균열을 제어하기 적합한 구조형식은 콘크리트 아치댐이나 중력식 콘크리트 댐의 저층부와 같이 외부구속이 큰 매스콘크리트로 판단된다.

## 6. 결 론

장기팽창성 콘크리트의 응력해석 연구를 통하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있다.

- (1) 본 연구에서는 MgO 콘크리트의 자기팽창량에 대한 실험결과를 이용한 예측모델을 구성하고, MgO 콘크리트를 사용한 경우 온도, 수축, 팽창 등의 체적변화 요인을 고려한 3차원 온도 및 응력해석 프로그램을 개발하였다.
- (2) 자기팽창에 의한 변형은 온도의 함수이고 먼저 단면내 온도분포를 구한 후 결정된다. 따라서 수화열에 의한 온도해석을 수행한 후, 응력해석시 팽창량을 구하여 초기변형률 성분으로 하중항을 결정하게 된다. 각 시간단계의 변위와 변형률을 구한 후 일반화된 구성방정식을 통하여 응력을 계산하였다.



- (3) 자기팽창량과 이에 따른 팽창응력을 수계산을 통해 개발된 해석프로그램의 타당성을 검증하였고, 다양한 온도조건에서 MgO 콘크리트의 자기팽창량과 이에 따른 응력 계산 프로그램은 합리적으로 구성되었다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 양단고정된 보의 수화열 및 MgO 팽창에 의한 온도응력 예제해석에서 장기팽창성 콘크리트는 높은 온도를 장시간 유지하는 매스콘크리트가 외부구속작용을 크게 받을 경우 가장 효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 장기팽창성 콘크리트가 온도균열을 제어하기 적합한 구조형식은 콘크리트담구조물에서 외부구속을 크게 받는 단면의 경우라고 판단된다.
- (5) 본 연구에서 개발한 수화열, 수축, 팽창을 고려한 3차원 온도 및 응력해석 프로그램은 향후 국내의 MgO 콘크리트를 이용한 매스콘크리트의 균열제어기술에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

차수원, 오병환, 이형준 (2002) 초기재령콘크리트의 크리프를 고려한 온도 및 수축응력 해석, 한국콘크리트학회논문집,

14(3), pp.382~391.

차수원, 장봉석 (2008) 시공단계 및 계절별 온도영향을 고려한 롤러다짐콘크리트담의 온도응력 해석, 대한토목학회논문집, 28(6A), pp.881~891.

콘크리트표준시방서 (2009), 한국콘크리트학회, 기문당.

Du, Chongjiang (2005), A Review of Magnesium Oxide in Concrete, *Concrete International, ACI*, pp.45~50.

Damkile, L. (1983) Stability of Plates of Elastic-plastic Material, PhD dissertation, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Denmark.

CEB-FIP Model Code 1990 (1993) CEB Bulletin d'information No. 213/214.

Friesleben Hansen, P., Pedersen, E.J. (1977) Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, *Journal of the Nordic Federation*, 1, pp. 21~25.

Jonasson, J.E. (1985), Slipform Construction-Calculation for Assessing Protection Against Early Freezing, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*.

Mehta P.K., Pirtz D. (1980) Magnesium Oxide Additive for Producing Selfstress in Mass-Concrete, *Proc. of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, 3, Paris, France, pp. 6~9.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (1989) *The Finite Element Method*, McGraw Hill, London, p.648.