

## 유한요소법에 의한 초기재령 콘크리트의 거동해석

### Finite Element Analysis of the Behavior of Early-age Concrete

송 하 원\*      조 호 진\*\*      박 상 순\*\*      변 근 주\*\*\*  
Song, Ha-Won    Cho, Ho-Jin    Park, Sang-Soon    Byun, Keun-Joo

#### ABSTRACT

With the introduction of durability examination into design code of concrete structure, a prediction of early-age behavior of concrete and its cracking resistance becomes very important. But, the early-age behaviors such as hydration, micro-structure development, moisture transport and mechanical properties development is quite complicated and coupled each other, and thus those can not be solved independently. One way to analyze those is to model their behaviors analytically and solve those computationally within a unified framework.

In this paper, we propose a finite element technique to predict the early-age behaviors of concrete within the unified framework. The technique is applied to evaluation of cracking in a massive concrete structure and then the analysis results are discussed.

#### 1. 서      론

콘크리트는 시멘트, 잔골재, 굵은골재, 물 및 각종 혼화재료를 구성물로 하여 완성되는 복합재료로서, 구성재료의 혼합 이후 젤상태의 액상에서 시간에 따른 경화과정을 거치면서 구조재료로서의 콘크리트의 특성을 발현하게 된다. 이러한 경화과정중의 초기재령 콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의한 열적변형과 수분의 손실 및 이동에 의한 체적의 변화가 발생된다. 발생된 변형성분은 콘크리트의 경화정도에 따른 탄성계수의 발현에 비례하여 구조물의 구속조건에 따라 응력을 발생시키고, 그 응력이 발현된 콘크리트 강도보다 크게되는 경우 구조물에 균열을 야기한다. 이러한 초기재령에서 발생된 균열은 외부 유해물질의 침투를 원활하게 하므로 콘크리트 구조물의 장기적인 내구성 및 내하력을 저하시킨다. 그러므로 콘크리트 구조물의 장기 사용성 및 내구성을 예측하기 위해서는 초기재령 콘크리트의 거동을 고려하는 균열저항성에 대한 정략적인 해석이 필요하다. 그러나 초기재령 콘크리트의 각 거동특성은 콘크리트 배합성분들의 종류 및 배합비율, 초기조건, 외부환경 등의 영향을 받아 매우 복잡하고, 더구나 각 거동들 간에 상호작용이 존재하므로 이 모든 변수를 고려한 정량적인 해석이 매우 힘든 실정이다.

본 연구는 콘크리트 구조물의 장기적인 내구성 큰 영향을 미치는 초기재령 콘크리트의 거동특성을 정량적으로 해석할 수 있는 해석적인 거동모델을 정립하고, 정립된 모델들을 유한요소법의 정식화를 통하여 초기재령 콘크리트의 거동을 해석할 수 있는 해석프로그램의 개발에 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위해서 먼저 각기 다른 특성을 보이는 개개의 거동들을 연성하여 통합적으로 해석할 수 있는 알고리즘을 구축하고, 거동특성에의

\*      정회원 · 연세대학교 토목공학과 부교수  
\*\*     연세대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*    정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수

모델을 알고리즘에 대입하고 유한요소 정식화를 수행한다. 작성된 유한요소해석 프로그램을 이용하여 대표적인 매스 콘크리트 구조물에 대해 유한요소해석을 수행하여 콘크리트의 초기재령특성 및 균열저항성을 평가하고, 이의 결과를 분석하여 구축된 수치해석방법의 타당성 및 적용성 등을 검증한다.

## 2. 초기재령 콘크리트 거동특성의 연성 및 통합해석 알고리즘

초기재령의 콘크리트에서 시멘트의 수화반응을 통해 발생된 열은 콘크리트의 낮은 열전도율로 인하여 초기에 구조물의 내부에 축적되나, 시간에 따라 외기와와의 상호작용에 의해서 열의 흐름이 생기는 전도현상이 발생된다. 또한, 콘크리트 내부에 존재하는 수분도 외부환경의 영향을 받아서 점차적으로 확산하게 된다. 이러한 열의 전도 및 수분의 확산 거동은 각각 독자적인 메커니즘을 가지지만 상호작용을 통하여 각각의 거동에 영향을 미치게 된다. 예를 들면, 콘크리트 내부의 수분확산은 세공구조의 형성정도에 크게 영향을 받으며, 이러한 세공구조의 형성은 시멘트의 수화반응 정도를 나타내는 수화도의 함수이다. 시멘트의 수화반응은 반응이 일어나는 온도 및 반응에 필요한 가용수량의 영향을 크게 받으며, 이러한 온도 및 가용수량은 열전도 지배방정식과 수분확산 지배방정식으로부터 구할 수 있다. 열의 전도 및 수분의 확산 거동으로 인하여 야기되는 체적변화는 콘크리트 구조물 내에 응력을 야기하게 되는데, 이때 야기되는 응력은 탄성계수의 발현에 비례하고, 탄성계수의 발현은 시멘트의 수화도 및 세공구조발현의 함수이다.

이상에서 보듯이 초기재령의 콘크리트를 지배하는 거동은 각기 독립적인 메커니즘을 가지면서도 상호작용을 통하여 서로에게 영향을 미친다. 기존의 수치해석방법들은 각각의 거동을 독립적으로 정식화하여 해석하였으나, 이러한 접근방식은 부분적으로는 상호작용을 고려할 수 있지만 초기재령 콘크리트의 실제거동을 재현하지 못하는 약점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 거동을 열전도 거동, 수분확산 거동 그리고 구조 및 역학적 거동으로 대별하고, 각 거동간 상호작용을 고려할 수 있도록 거동특성을 연성하여 이를 통합하여 해석할 수 있는 통합해석 알고리즘(그림 1)<sup>1)</sup>을 사용한다.

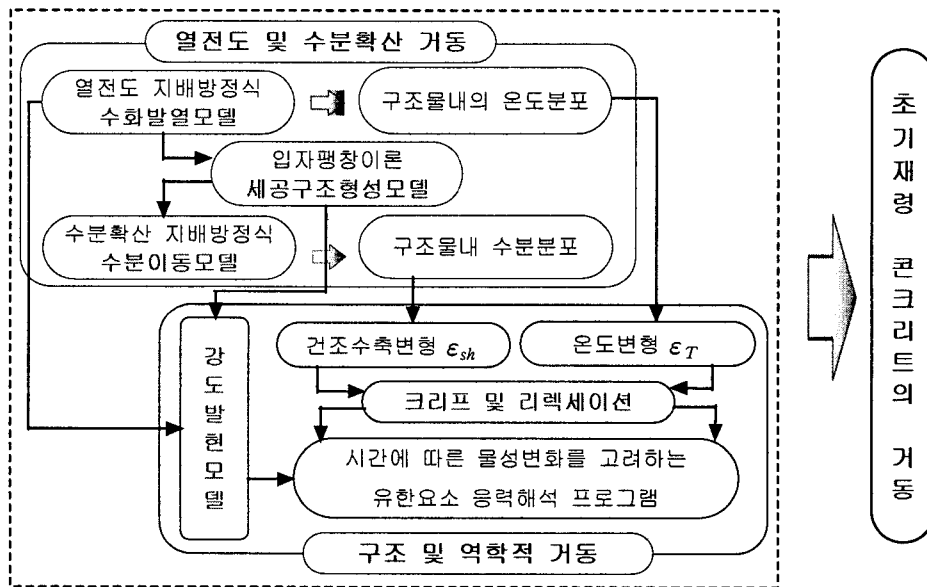


그림 1 초기재령 콘크리트 거동특성의 연성

### 3. 초기재령 콘크리트의 거동특성 모델

#### 4.1 열전도 거동특성 모델

초기재령 콘크리트의 열전도 거동은 여러 가지 인자의 영향을 받는다. 대표적인 영향인자로는 내부에서 열의 이동을 지배하는 열전도율, 표면에서 열의 방출정도 결정짓는 대류계수, 콘크리트의 열적용량을 결정하는 비열 그리고 열발생량에 따른 변형정도를 나타내는 열팽창률 등이 있다. 이러한 영향인자 중 가장 지배적인 인자는 콘크리트 자체의 수화발열특성을 나타내는 수화발열속도이다. 콘크리트의 수화발열특성은 수화반응의 온도의 존성으로 인하여 초기배합온도 및 외기온도 조건의 영향을 받으며, 동일 조건으로 타설된 구조물 내에서도 위치 별 온도이력의 차이로 인하여 각각 다른 발열특성을 나타낸다. 또한 시멘트는 다양한 크기의 여러가지 광물질로 구성된 복합체이므로 시멘트종류 및 분말도에 따라서 발열특성이 영향을 받고, 그외 콘크리트 배합비, 혼화재료의 첨가 등에도 발열특성은 영향을 받으므로 이들 조건의 변화를 복합적으로 고려할 수 있는 수화발열모델의 수립이 필요하다. 더구나 수화발열특성은 구조물의 열전도 거동의 해석뿐 아니라 초기재령 콘크리트의 대부분 특성에 영향을 미치는 수화도의 산출에 사용되므로 정확한 수화발열모델을 수립하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서의 이상의 영향인자들을 고려할 수 있는 Kishi 등<sup>2)</sup>이 제안한 수화발열모델(식(1))을 사용하였고, 다른 영향인자들은 기존의 시방서 등에서 제시한 값을 사용하여 열전도 거동특성을 모델링 하였다.

$$\overline{H}_i = \beta_i \gamma \mu s_i \overline{H}_{i, T_0}(\overline{Q}_i) \exp\left\{-\frac{E_i(\overline{Q}_i)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}, \quad \overline{Q}_i = \int \overline{H}_i dt \quad (1)$$

$$Q = C \cdot Q_c \quad Q_c = \sum p_i \cdot \overline{Q}_i \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 단위배합에 사용된 시멘트량이며,  $\overline{H}_{i, T_0}(\overline{Q}_i)$ 와  $E_i(\overline{Q}_i)$ 는 각 구성광물의 누적발열량  $\overline{Q}_i$ 에 따른 기준열발생률(기준온도  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ )과 활성화에너지를 나타내는 재료상수이다. 그외  $\beta_i$ ,  $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $s_i$ 는 전술한 영향인자를 고려하는 계수이며,  $p_i$ 는 각 구성광물의 전체에 대한 중량분률이다.

#### 4.2 세공구조 형성특성 모델

초기재령 콘크리트에서의 세공구조 형성특성은 수분확산거동에서 가장 중요한 확산계수의 산출을 지배하는 특성이며, 역학적 거동에서 지배적인 탄성계수 및 강도의 산출에도 중요한 변수로 사용된다. 콘크리트내의 세공구조는 시멘트의 수화에 따라 진행되며 물-시멘트비, 시멘트의 종류, 비표면적, 혼화재의 첨가여부 등에 영향을 받으므로 이들 영향을 고려하여 세공구조를 나타낼 수 있는 해석적모델의 수립이 필요하다. 본 연구에서는 수화도에 기초한 세공구조형성 모델<sup>3)</sup>을 이용하였고, 수화발열모델로부터 구한 평균 수화도와 화학적 결합수량에 기초하여 식(3)과 같은 공극분포함수로 나타낼 수 있다.

$$\phi(r) = \phi_{lr} + \phi_{gl}\{1 - \exp(-B_{gl}r)\} + \phi_{cp}\{1 - \exp(-B_{cp}r)\} \quad (3)$$

여기서,  $r$ 는 공극반경을 나타내고,  $\phi_{lr}$ ,  $\phi_{gl}$ ,  $\phi_{cp}$ 는 각각 충전공극률, 젤공극률, 그리고 모세관공극률을 나타낸다.  $B_{cp}$ ,  $B_{gl}$ 는 각각 모세관공극과 젤공극의 공극분포계수로서 각 공극의 단위체적에 대한 표면적을 구함으로서 얻을 수 있다.

#### 4.3 수분확산 거동특성 모델

콘크리트 내부의 공극 및 미세균열 등에는 수분이 존재하며 함수비의 구배에 의한 확산 및 외부 환경과의 상대습도 차이를 통한 발산에 의해 액상 및 기체상의 이동이 발생한다. 낮은 상대습도에서의 수분이동은 주로 수증기의 확산을 통해 발생하며 높은 상대습도에서의 모세관 응축수가 주요한 수분이동기구로 작용한다. 일반적으로 이러한 수분 이동 과정은 Fick의 확산 법칙으로 알려져 있는 수분량 평형 방정식으로 표현할 수 있다.

본 연구에서는 Shimomura와 Maekawa<sup>4)</sup>가 제안한 수분이동 모델을 기초로 콘크리트 공극내의 열역학적 평형 관계에 기초한 미시적 모델링 및 수분 흡착 등온선의 도출을 통해 콘크리트내의 수분이동기구를 지배하는 수분확산 방정식 식(4)와 같이 도출하였다.

$$\alpha_p \frac{\partial P_l}{\partial t} - \text{div}(D_p \nabla P) + Q_p = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_p$ 는 수분용량을 나타내며 흡착등온선으로부터 구할 수 있으며  $D_p$ 는 확산계수를 나타내며 세공구조 형성모델로부터 산출된다. 수분손실항  $Q_p$ 는 초기재령에서 수화에 의한 자기수축으로 발생하는 내부 수분손실량을 나타내며, 수화발열모델로부터 산출된다.

도출한 비선형 수분확산방정식을 초기재령 콘크리트의 건조 및 자기수축 거동과 연관지을 수 있다. 즉, 미세공극내 상대습도의 변화로 공극벽면에 작용하는 모세관 장력이 건조 및 자기 수축거동을 발생시킨다고 가정하고, 이 모세관 응력  $\sigma_s$ 은 식(5)와 같이 모세관 현상에 의한 압력차  $\Delta P_c$ 에 수분이 차지하는 면적을 고려하는 면적계수  $A_s$ 를 곱하여 구하고, 모세관 응력에 의해 발생하는 건조 및 자기수축 변형량  $\epsilon_{sh}$ 은 식(6)과 같이 모세관응력과 모세관응력에 대한 탄성계수  $E_s$ 의 곱으로 구할수 있다.

$$\sigma_s = A_s \cdot \Delta P_c = -A_s \frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} \ln h \quad (5), \quad \epsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (6)$$

#### 4.4 초기재령 콘크리트의 강도 및 탄성계수 발현 모델

초기재령에서의 체적변화로 인해 도입되는 응력의 정도는 발현된 강성에 비해하고, 이로 인한 균열의 발생여부는 발현된 강도정도에 따라 결정된다. 따라서 초기재령 콘크리트의 균열저항성 등 거동을 정량적으로 평가하기 위해서는 초기재령에서의 강도 및 탄성계수의 발현을 정확하게 나타낼 수 있는 재료모델이 필요하다. 일반적으로 역학적특성의 발현은 표준공시체의 실험을 통하여 구하였다. 그러나 콘크리트의 역학적특성발현은 온도이력의 영향을 크게 받으므로, 실제구조물 내부의 온도이력을 따르지 않은 표준공시체의 실험결과는 실제와는 많은 차이를 가지게 된다. 또한, 콘크리트 내부의 모든 온도이력에 대한 역학적특성의 발현을 실험적으로 구하는 것이 사실상 불가능하므로 온도 및 시간의 영향을 고려할 수 있는 해석적모델의 개발이 요구된다.

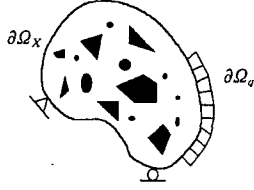
본 연구에서는 성숙도이론에 기반한 Chanvillard and D'Aloia의 연구를 기반으로 하여<sup>4)</sup> 강도와 수화도의 관계식으로부터 콘크리트의 강도발현을 추정하는 해석적 방법을 정립하였고, 전절에서 제시한 수화발열모델과 세공구조모델로부터 구해지는 수화도와 공극률을 이용하여 초기재령 콘크리트 강도발현을 해석적으로 구할 수 있는 예측모델<sup>1)</sup>을 식(7)과 같이 도출하였다.

$$S_c = \overline{\alpha_c} \overline{\gamma_f} S_{c28, T_{20}} [1 - k(T - 20)] \quad (7)$$

여기서,  $S_c$ 는 발현된 강도,  $S_{c28, T_{20}}$ 는 20°C의 등온표준양생을 통한 28일 강도,  $T$ 는 양생온도(°C),  $k$ 는 상수(일반적인 경우 0.01),  $\overline{\alpha_c}$ 는 기준조건에 정규화된 수화도,  $\overline{\gamma_f} (= e^{-n(1-\bar{p})})$ 는 공극률을 고려하는 계수,  $\bar{p}$ 는 기준조건에 정규화된 공극률,  $n$ 은 재료상수이다.

#### 4. 열전도 및 수분확산 거동의 유한요소 정식화

초기재령 콘크리트의 열전도 및 수분확산 거동은 에너지보존법칙의 지배를 받고, 이를 수식화 하면 다음 식(8)과 같은 편미분형태의 지배방정식을 얻을 수 있다.



$$\alpha \frac{\partial X}{\partial t} - D \nabla^2 X + Q = 0 \quad (8)$$

초기조건 ;  $X(\mathbf{x}, 0) = x_0(\mathbf{x})$   
 경계조건 ;  $X(\mathbf{x}, t) = q(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_x$   
 $D \frac{\partial X}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}, t) = -q(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_q$

여기서, 구하고자 하는 변수  $X$  및 각각의 거동에 연관된 매개변수  $\alpha$ ,  $D$ ,  $Q$  는 표 1과 같다.

표 1 열전도 및 수분확산 거동의 매개변수

변수	Specific capacity, $\alpha$	Conductivity, $D$	Sink term, $Q$
온도, $T$	열용량	열전도계수	수화발열량
공극압, $P$	수분용량	확산계수	화학적 결합수량

일반적으로 식 (8)과 같은 공간과 시간에 대한 편미분방정식을 유한요소 정식화하기 위해서는 두 단계의 근사법을 사용하여야 한다. 먼저 식 (8)의 편미분방정식을 시간에 대한 연립 상미분방정식으로 변환시키기 위해 공간좌표와 시간좌표를 분할하여 시간에 대한 상미분방정식 얻고, 구해진 시간에 대한 상미분 방정식을 유한차분법에 의하여 시간영역에서 근사화하여 정식화 한다.

식(8)에 변분원리를 적용하면 식(9)와 같다.

$$\int_{\Omega} \eta \left( Q - D \nabla^2 X + \alpha \frac{\partial X}{\partial t} \right) d\Omega = 0 \quad (9)$$

식(9)의 두번째항에 부분적분정리를 적용하여 전개하고 경계조건을 적용하여 식(9)를 다시 정리하면 식(10)과 같다.

$$\int_{\Omega} \nabla \eta D \nabla X d\Omega + \int_{\Omega} \eta \alpha \frac{\partial X}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \eta Q d\Omega + \int_{\partial\Omega_q} \eta q d\Gamma = 0 \quad (10)$$

다음 식(11), (12)의 형상함수를 도입하여 식(10)의 각항을 정리하면 식(13), (14), (15), (16)과 같다.

$$X(\mathbf{x}, t) \simeq \bar{X}(\mathbf{x}, t) = \sum_{I=1}^N N_I X_I(t) + X_b(\mathbf{x}, t) \quad (11)$$

$$\eta(\mathbf{x}) \simeq \bar{\eta}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^N N_I \eta_I \quad (12)$$

$$\int_{\Omega} \eta \alpha \frac{\partial X}{\partial t} d\Omega \simeq \sum_I \eta_I^T \int_{\Omega} N_I^T \alpha \left( \sum_J N_J \dot{X}_J + \dot{X}_b \right) d\Omega \quad (13)$$

$$= \sum_I \sum_J \eta_I^T \int_{\Omega} N_I^T \alpha N_J d\Omega \dot{X}_J + \sum_I \eta_I^T \int_{\Omega} N_I^T \alpha \dot{X}_b d\Omega$$

$$\int_{\Omega} \nabla \eta D \nabla X d\Omega = \sum_I \sum_J \eta_I^T \int_{\Omega} B_I^T D B_J d\Omega X_J + \sum_I \eta_I^T \int_{\Omega} B_I^T D \nabla X_b d\Omega \quad (14)$$

$$\int_{\Omega} \eta Q d\Omega = \sum_I \eta_I^T \int_{\Omega} N_I^T Q d\Omega \quad (15)$$

$$\int_{\Gamma} \eta q d\Gamma = \sum_I \eta_I^T \int_{\partial\Omega_q} N_I^T q d\Gamma \quad (16)$$

식(13), (14), (15), (16)을 식(5)에 대입하여 정리하면 식(17)과 같이 시간에 대한 상미분방정식을 얻는다.

$$\sum_I \eta_I^T \left[ \sum_J C_{IJ} \dot{X}_J + \sum_J K_{IJ} X_J + f_{OI} + f_{qi} + f_{bi}^{(1)} + f_{bi}^{(2)} \right] = 0 \quad (17)$$

즉,  $C \dot{X} + K X + f = 0$

여기서,  $C = \sum_I \sum_J \int_{\Omega} N_I^T \alpha N_J d\Omega$   $K = \sum_I \sum_J \int_{\Omega} B_I^T D B_J d\Omega$

$$f = f_{OI} + f_{qI} + f_{bl}^{(1)} + f_{bl}^{(2)}$$

$$\text{여기서, } f_{OI} = \sum_I \int_{\Omega} N_I^T Q d\Omega \quad f_{qI} = \sum_I \int_{\partial\Omega_e} N_I^T q d\Gamma$$

$$f_{bl}^{(1)} = \sum_I \int_{\Omega} N_I^T a \dot{X}_b d\Omega \quad f_{bl}^{(2)} = \sum_I \int_{\Omega} B_I D \nabla X_b d\Omega$$

식(17)를 유한차분법에 의해 시간영역에서 근사화하면 식(18)과 같다

$$C \dot{X}_{n+a} + K X_{n+a} + f_{n+a} = 0 \quad (18)$$

이때,  $\dot{X}_{n+a} = \frac{X_{n+1} - X_n}{\Delta t}$

$$X_{n+a} = X_{n+1} - (X_{n+1} - X_n)\theta = (1 - \theta) X_n + \theta X_{n+1} \quad (19)$$

$$f_{n+a} = (1 - \theta) f_n + \theta f_{n+1}$$

식(19)를 식(18)에 대입하여 정리하면 최종적인 식(20)의 대수방정식을 얻는다.

$$\therefore [C + K\theta\Delta t] X_{n+1} = [C - K(1-\theta)\Delta t] X_n + f_{n+a} \Delta t \quad (20)$$

본 연구에서는 시간영역에서의 근사화를 위해서 Crank-Nicolson의 방법 ( $\theta=0.5$ )을 사용하였다.

이상의 통합알고리즘 및 유한요소정식화를 이용한 초기재령 콘크리트 거동의 해석흐름도는 다음과 같다.

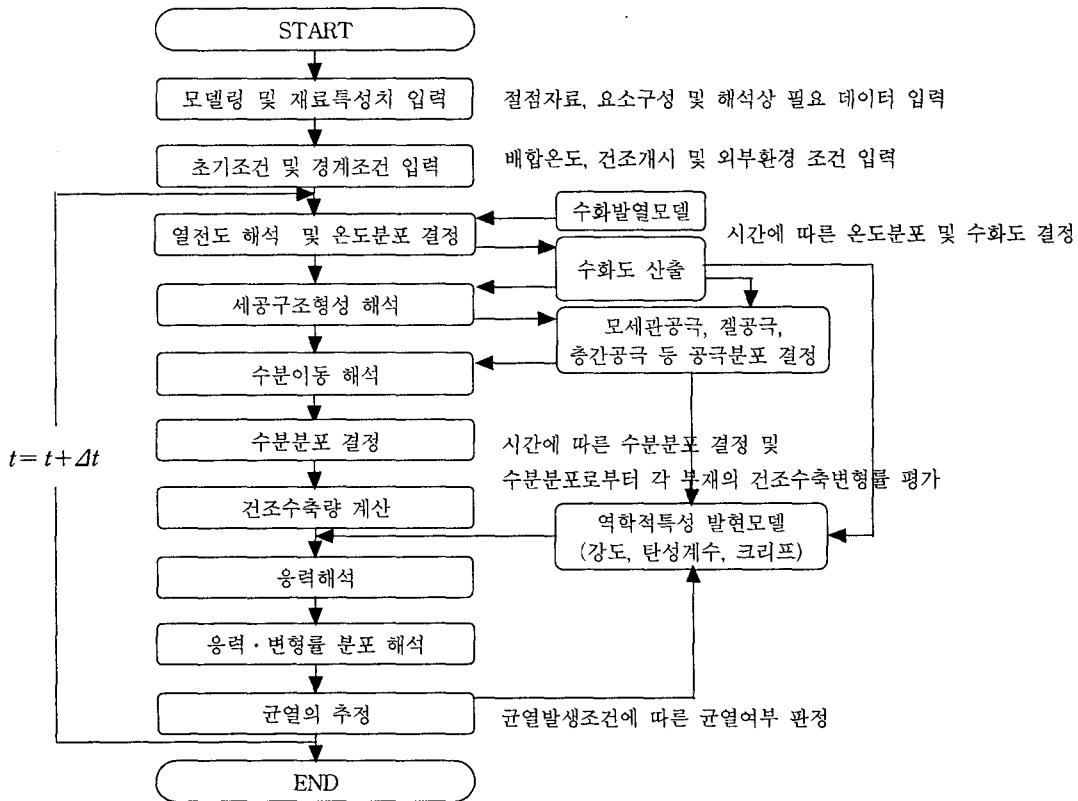


그림 2 초기재령 콘크리트의 거동해석 흐름도

### 5. 해석예제 및 결과분석

이상에서 제시한 초기재령 콘크리트의 거동특성 및 지배방정식의 유한요소정식화를 통하여 전절에서 제시한 통합알고리즘에 입각한 유한요소 해석프로그램을 완성하였다. 본 절에서는 완성된 해석프로그램을 사용하여 예제 구조물의 초기재령에서의 거동을 해석하고 이의 결과를 분석한다.

균열저항성 평가를 위한 해석대상 구조물로는 초기재령에서 수화열 및 부등건조수축에 의해 균열발생확률이 높은 벽체구조로 정하였다. 대상벽체는 3m의 기타설된 기초위에 높이 3m, 길이 6m, 두께 1.6의 제원을 가지는 매스콘크리트 구조물로 하였고, 그림 2와 같이 거동의 대칭성을 이용하여 1/4로 유한요소모델을 구성하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 배합조건은 표 2에 정리하였고, 열전도 및 수분확산 거동 해석을 위한 환경조건 및 초기조건은 표 3과 같다. 건조수축이 발생하는 시점은 타설후 7일로 가정하였다.

표 2 해석에 사용된 콘크리트의 배합표

시멘트 종류	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위중량 (kg/cm <sup>3</sup> )			
			시멘트	물	잔골재	굵은골재
1종 보통	55	47.0	335	185	835	959

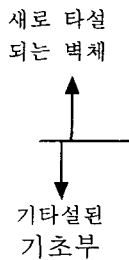


그림 2 유한요소모델

표 3 열전도 및 수분이동 해석을 위한 해석조건

환경조건	열전도 해석	수분이동 해석	초기조건	열전도 해석	수분이동 해석
	외기온도 20℃	건조개시후 RH 60%		20℃	100% RH 건조개시재령 ; 5일

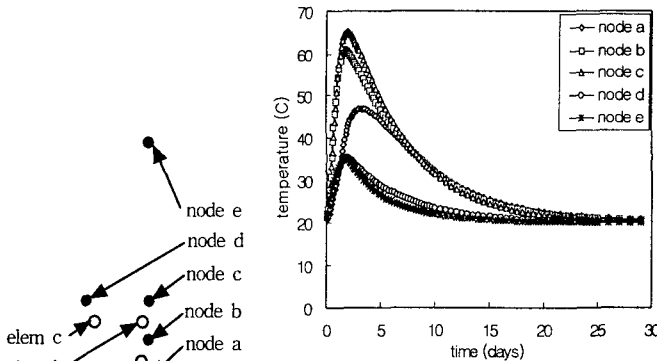


그림 4 온도 이력 비교

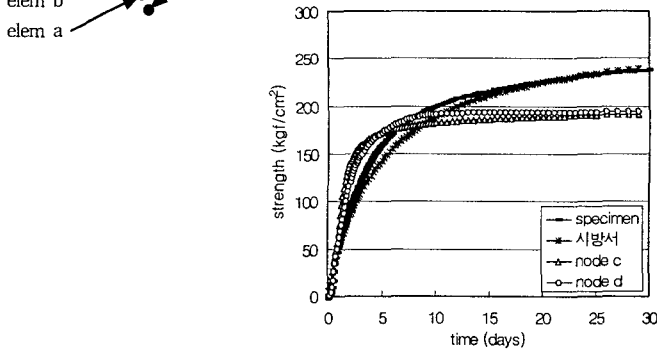


그림 5 강도 발현 비교

그림 4는 구조물내 위치별 온도이력 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 5는 구조물내 위치별 강도발현 해석결과를 시방서식을 이용한 강도발현 및 표준공시체를 사용한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 벽체내부(node c) 및 벽체외부(node d)의 압축강도는 각각 65℃와 50℃의 고온에서 양생되는 것과 같으므로 초기에는 강도발현이 빠르지만 후반부로 갈수록 강도발현이 저하되는 것으로 나타났고, 시방서식의 강도발현이나 표준공시체를 통한 강도추정은 실제보다 강도발현을 과대평가하는 것으로 나타났다.

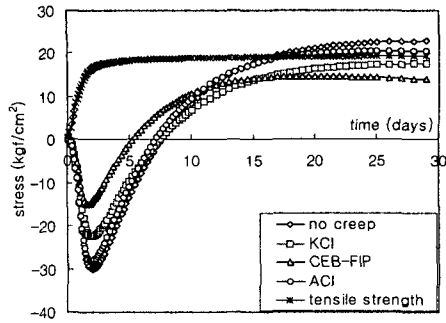


그림 6 벽체내부(elem a)에서의 응력이력 비교

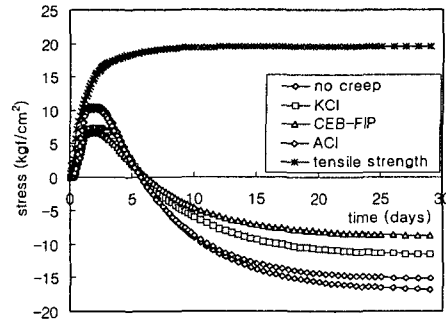


그림 7 벽체외부(elem c)에서의 응력이력 비교

그림 6과 그림 7은 초기재령에서 응력리랙세이션의 고려방식에 따른 벽체 내·외부의 응력이력을 비교한 것이다. 현재 초기재령에서의 응력리랙세이션에 대한 연구는 아직 기초적인 단계이므로 본 연구에서는 각 시방서에서 제시한 크리프계수를 사용하여 리랙세이션을 고려하였다. 단, KCI의 해석결과는 KCI의 크리프계수를 사용한 것이 아니고 콘크리트표준시방서 매스콘크리트편의 규정을 따른 것이다. 해석결과의 비교에서 보듯이 제안식에 따라서 발생응력이  $10\text{kgf/cm}^2$  정도의 편차를 보였고, 벽체내부의 경우 적용여부 및 방법에 따라 균열의 발생여부가 다르게 평가됨을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

- 1) 열전도 및 수분확산 거동과 역학적 거동이 동시에 발생하는 초기재령 콘크리트의 거동을 통합적으로 해석할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 2) 초기재령 콘크리트의 열전도 및 수분확산거동에 대한 지배방정식을 변분원리를 적용하여 시간 및 공간영역에서 정식화 하였다.
- 3) 초기재령 콘크리트의 대표적인 거동특성인 수화발열특성, 세공구조형성특성, 수분확산 및 수축발생특성 그리고 강도 및 탄성계수 발현특성에 대한 모델을 미시적 재료 역학적 관점에서 정립하였다.
- 4) 초기재령 콘크리트의 각 거동특성을 연성하여 통합 알고리즘에 따른 해석 유한요소프로그램을 개발하였고, 개발된 프로그램으로 실제 콘크리트 벽체에 대한 해석을 실시하여 초기재령 콘크리트의 거동을 분석하였다.
- 5) 본 연구의 해석프로그램은 구조물 내 위치별 각기 다른 강도발현특성 및 양생온도에 따른 강도발현의 차이 그리고 응력 리랙세이션을 고려할 수 있으므로 기존의 방법에 비해 보다 정량적으로 초기재령 콘크리트의 거동을 분석하여 균열저항성 평가가 가능하다.

## 참고문헌

- 1 Song, H. W, Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J and Maekawa, K., "Early-age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structures", *Int. J. Concrete Science and Engineering*, accepted.
2. Kishi, T. and Maekawa, K., "Hydration Heat Model For Blended Cement Including Blast Slag and Fly Ash", *Proceedings of the JCI*, Vol.15, No.1, 1993, pp.1211-1216.
3. Chaube, R. P. and Maekawa, K., "Coupled Moisture Transport, Structure Formation and Hydration in Cementitious Materials", *Proceedings of the JCI*, Vol.17, No.1, 1995, pp.639-644.
4. Shimomura, T. and Maekawa, K., 'Analysis of the Drying Shrinkage Behavior of Concrete using a Micromechanical Model based on the Micropore Structure of Concrete', *Magazine of Concrete Research*, Vol.49, No.1, 1997, pp.303-322.
5. Chanvillard, G. and D'Aloia, L., 'Concrete Strength Estimation at Early Ages : Modification of the Method of Equivalent Age', *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.6, 1997, pp.520-530.