

초기재령 콘크리트의 크리프를 고려한 온도 및 수축응력 해석

차수원^{1)*} · 오병환²⁾ · 이형준³⁾

¹⁾(주)노하우 솔루션 ²⁾서울대학교 토목공학과 ³⁾한밭대학교 토목공학과
(2001년 12월 19일 원고접수, 2002년 1월 18일 심사완료)

Evaluation of Thermal and Shrinkage Stresses in Hardening Concrete Considering Early-Age Creep Effect

Soo-Won Cha^{1)*}, Byung-Hwan Oh²⁾, and Hyung-Joon Lee³⁾

¹⁾ Knowhow Solution Co., LTD, Anyang, 431-060, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received December 19, 2001, Accepted January 18, 2002)

ABSTRACT

This study is devoted to the problems of thermal and shrinkage stresses in order to avoid cracking at early ages. The early-age damage induced by volume change has great influence on the long-term structural performance of the concrete structures such as its durability and serviceability. To solve this complex problem, the computer programs for analysis of thermal and shrinkage stresses were developed. In these procedures, numerous material models are needed and the realistic numerical models have been developed and validated by comparison with relevant experimental results in order to solve practical problems. A framework has been established for formulation of material models and analysis with 3-D finite element method. After the analysis of the temperature, moisture and degree of hydration field in hardening concrete structure, the stress development is determined by incremental structural formulation derived from the principle of virtual work. In this study, the stress development is related to thermal and shrinkage deformation, and resulting stress relaxation due to the effect of early-age creep. From the experimental and numerical results it is found that the early-age creep plays important role in evaluating the accurate stress state. The developed analysis program can be efficiently utilized as a useful tool to evaluate the thermal and shrinkage stresses and to find measures for avoiding detrimental cracking of concrete structures at early ages.

Keywords: thermal and shrinkage stresses, early-age damage, long-term structural performance, 3-D finite element method, early-age creep

1. 서 론

초기재령 콘크리트의 경화는 시멘트의 수화반응에 기인하고, 콘크리트 타설 후 수 일간 급격히 진행되는 수화과정에서 단면 내 온도 및 습도상태에 따라 상당한 체적변화를 유발한다. 온도가 상승하는 시기는 콘크리트의 강성이 낮으므로 체적 팽창에 의한 압축응력은 비교적 작으나, 온도가 하강하는 시기는 상대적으로 콘크리트의 강성이 크므로 구조물에 따라 큰 인장응력이 발생, 잔류하게 된다. 체적변화에 의한 균열은 온도응력(thermal stress)에 의한 것과 수축응력(shrinkage stress)에 의한 것으로 나눌

수 있고, 주로 하중이 재하 되기 전에 발생한다.¹⁾

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. 초기재령 균열은 철근 부식, 중성화 및 알칼리 골재반응 등을 촉진시키고, 장기적인 성능저하를 가속화한다.

내구성능을 향상시킬 목적으로 사용되는 고강도 및 고성능 콘크리트(high strength and high performance concrete)와 같은 고품질의 콘크리트는 수화과정에서 일반 콘크리트에 비해 매우 큰 자기건조(self-desiccation)에 의한 자기수축(autogenous shrinkage)을 필연적으로 동반한다. 수축응력은 수화과정에 의해 제어되는 자기수축과 외부 환경에 의해 제어되는 건조수축 응력으로 구분되고,

* Corresponding author

Tel : 011-790-4611 Fax : 02-872-3775

E-mail : chasw@simmami.com

물-시멘트비가 낮은 고강도 및 고성능 콘크리트의 수분거동은 건조수축(drying shrinkage)에 의한 것보다 오히려 자기수축에 의한 것이 지배적이다²⁾.

많은 토목 기술자들이 초기재령 콘크리트의 체적변화에 의한 응력문제를 심도 깊게 다루지 않는 데는 장기적인 내구성과 사용성에 대한 인식이 부족하고, 경화가 진행되는 콘크리트의 체적변화는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 매우 복잡한 영향인자를 고려해야 되기 때문이다¹⁾. 또한, Bazant는 콘크리트 구조물에서 온도 및 수분이동과 관련된 문제를 고려하지 않고 실제 응력(realistic stresses)을 구하고, 이를 통해 균열을 예측하기는 불가능하다고 지적했다³⁾.

기존에 개발된 프로그램들은 주로 수화열에 의한 온도 분포 및 열응력 해석에 국한되거나, 수화과정과 연계되어 있지 않은 습도분포(주로 수화에 의한 습도감소, 즉 자기수축현상을 제외한)에 의한 수축 응력 해석을 대상으로 한다^{4~8)}. 초기재령 콘크리트의 거동에 있어서 내부구축 및 외부구축에 의한 온도응력과 수축응력의 발생은 동일한 메카니즘으로 설명되고, 또한 전 단계 연구인 습도 해석시 지배방정식에서 수분 감소항을 모델링함으로써 수화도에 따라 발생하는 자기수축 현상을 예측할 수 있다. 따라서 초기재령 콘크리트의 체적 변화에 의한 모든 응력 요소를 Fig. 1과 같은 하나의 통합적인 해석 시스템(integrated analysis system)으로 구성할 수 있다¹⁾.

본 연구는 초기재령 콘크리트의 온도 및 수분에 관련된 재료 물성 뿐 만 아니라 역학적 특성 등 모든 재료 물성을 수화도에 기초하여 모델링하였다. 또한 콘크리트가 강성(stiffness)을 가지는 시점(역학적 특성이 발현되는 시점)부터의 초기재령 크리프 실험을 수행하고, 그 결과로부터

터 수화도에 따른 크리프 거동을 모델링하여 해석 프로그램에 반영하였다.

따라서 본 연구는 초기재령 콘크리트의 단면 내 온도 및 습도분포로부터 온도응력 및 수축응력을 평가하는 3차원 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 수치해석 결과와 실험결과를 비교하여 그 타당성을 검증하고, 해석 예제를 통하여 각 변형률 성분(strain component)에 의한 잔류 응력(residual stress)의 변화 양상을 비교, 분석하였다.

2. 수화도에 기초한 역학적 특성

2.1 개요

초기재령 콘크리트의 균열 위험성을 평가하기 위하여 수화과정에 의한 급변하는 강성 변화(development of stiffness)를 모델링하는 것은 매우 중요하다. 특히 단면이 큰 대스콘크리트는 각 콘크리트 요소의 성숙도가 다르므로 이를 해석에 고려해야 하고, 본 연구는 가장 근본적인 성숙도개념인 수화도에 기초하여 역학적 특성을 모델링하였다.

2.2 압축강도

압축강도와 수화도는 선형식 (1)에서 $a=1$ ⁹⁾ 또는 포물선곡선식 (1)에서 $a=4/3\sim 3/2$ ^{10~11)}의 관계를 가지는 것으로 알려져 있다.

$$\frac{f'_c(a)}{f'_c(a=a_{28})} = \left(\frac{a-a_0}{a_{28}-a_0}\right)^a = \left(\frac{a-a_0}{a_{28}-a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

여기서, $f'_c(a)$ 는 수화도가 a 일 때의 압축강도이고, $f'_c(a=a_{28})$ 는 28일 표준양생시 수화도인 $a=a_{28}$ 일 때의 압축강도이고, a_0 는 임계수화도(critical degree of hydration)이다.

임계수화도는 굳지 않은 콘크리트가 최초로 강성을 가지는 시기의 수화도로써 물-시멘트비에 따라 변화하고 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$a_0 = k_1 \cdot \frac{W}{C} \quad (2)$$

여기서, k_1 은 0.4~0.46의 값을 가지는 계수이다¹²⁾.

2.3 탄성계수

수화도에 따른 콘크리트의 압축강도로부터 탄성계수는 결정되고, 일반적으로 식 (3)과 같은 관계에 있다. 본 연

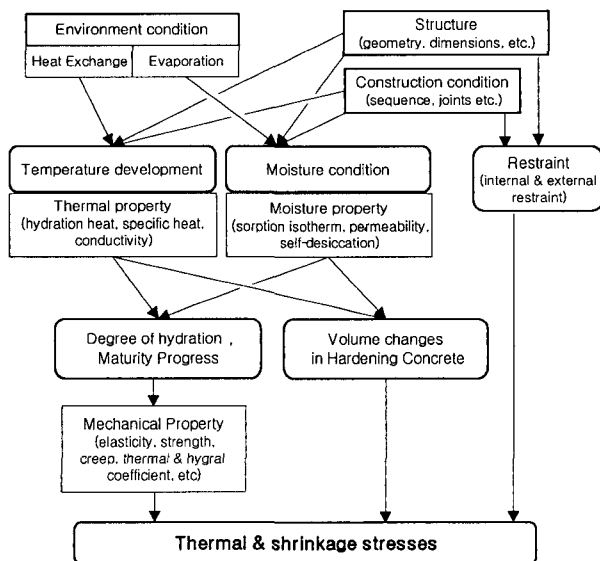


Fig. 1 Evaluation of thermal and shrinkage stresses in hardening concrete

구에서는 ACI building code가 추천한 $n=1/2$ 를 사용하였다¹³⁾.

$$E_c = k_2 \cdot (f'_c)^n \quad (3)$$

따라서, 탄성계수의 발현은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{E_c(\alpha)}{E_c(\alpha=\alpha_{28})} = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^b = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^{\frac{a}{2}} \quad (4)$$

2.4 인장강도

압축강도와 인장강도의 관계는 다음 식 (5)와 같고, 본 연구에서는 CEB-FIP MC 90에서 추천한 $m=2/3$ 를 사용하였다¹⁴⁾.

$$f'_t = k_3 \cdot (f'_c)^m \quad (5)$$

따라서, 인장강도 발현은 다음 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{f'_t(\alpha)}{f'_t(\alpha=\alpha_{28})} = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^c = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^{\frac{2}{3}a} \quad (6)$$

본 연구에서 적용한 수화도에 기초한 역학적 특성변화는 Fig. 2과 같이 모델링하였다.

2.5 포아송비

굳지 않은 콘크리트에서 발생하는 변형은 체적변화 (volume change)가 없으므로 포아송비는 0.5가 되고, 배합 후 수 시간이 경과하여 응결시간에 도달하는 극 초기재령 (very early age)의 포아송비는 굳은 콘크리트에 비하여 다소 낮은 값을 가진다¹³⁾. 이는 응결시간 전후에 발생하는 underpressure가 시멘트 경화시 시멘트 겔과 공극의 형성으로 인하여 사라지는 기구로 설명할 수 있다. 따라서 본 연구는 기존연구자의 실험결과¹²⁾를 근거로 Fig. 3과 식 (7)과 같은 수화도에 따른 포아송비를 제안하여 적용하였다.

$$\nu = 0.5 \exp(-7\alpha) + 0.2(1 - \exp(-10\alpha^3)) \quad (7)$$

3. 증분 유한 요소 해석 절차

시간에 따른 온도 및 습도응력을 구하기 위하여, 가상일의 원리를 이용한 증분형태(incremental form)의 평형방정식에 다음 식 (8),(9)와 같은 변위장과 변형을 증분으로 유한요소법에 의한 근사화를 시도하였다.

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

$$\dot{\varepsilon} = B \dot{d} \quad (9)$$

여기서, N 은 변위 보간 행렬이고, d 는 절점 변위 증분이고, B 는 변형률 보간 행렬이다.

최종적인 증분 형태의 방정식은 다음 식 (10)~(13)과 같이 표현된다¹⁵⁾.

$$K_t \dot{d} = R - R_i \quad (10)$$

$$K_t = \int_V B^T E B dV \quad (11)$$

$$R = \int_V B^T E \varepsilon_i dV + \int_V N^T p dV + \int_A N^T t dA \quad (12)$$

$$R_i = \int_V B^T \sigma_0 dV \quad (13)$$

여기서, K_t 는 접선 강성행렬(tangential stiffness matrix)이고, R 은 하중벡터이고, R_i 는 각 시간단계에서 구조물

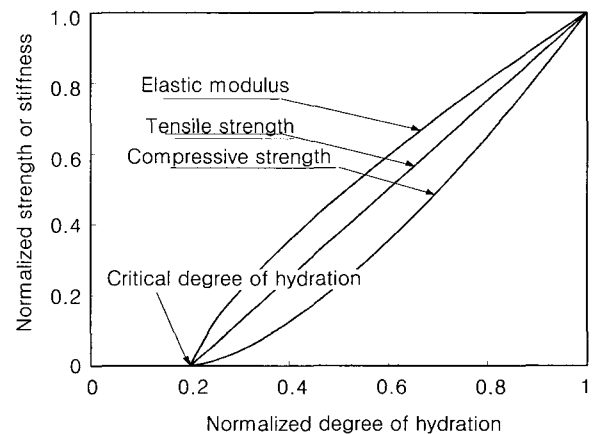


Fig. 2 Degree of hydration-based model for mechanical properties

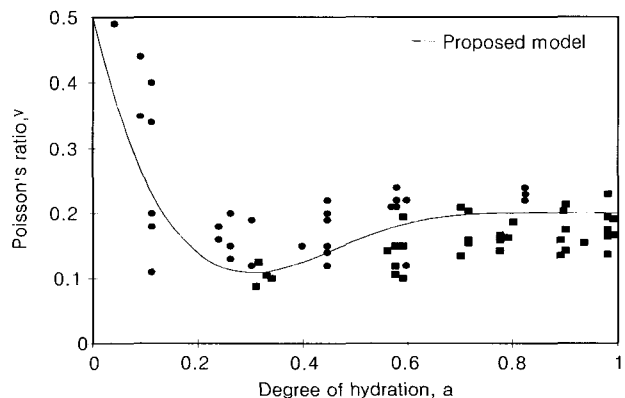


Fig. 3 Poisson's ratio according to degree of hydration

내부의 응력 σ_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.

중분 구성방정식(incremental constitutive equation)은 다음 식 (14)와 같이 표현할 수 있고, 식 (12)와 (14)에서 초기변형률 성분 ϵ_i 은 크리프 변형률 ϵ_c , 수축 변형률 ϵ_{sh} , 온도 변형률 ϵ_T 으로 구성된다.

$$\sigma = E_i(\epsilon - \epsilon_i) \quad (14)$$

$$\text{여기서, } E_i = E_i(T, \varphi, \alpha) \quad (15)$$

$$\epsilon_i = \epsilon_c + \epsilon_{sh} + \epsilon_T \quad (16)$$

4. 크리프 및 수축의 재료 모델

4.1 크리프 모델

탄성변형을 포함한 컴플라이언스 함수(compliance function) $J(t, t')$ 와 시간 t 에서 재하된 응력 $\sigma(t')$ 에 의한 시간중속적 총 변형률 $\epsilon(t)$ 는 다음과 같은 관계에 있다.

$$\epsilon(t) = J(t, t') \sigma(t') \quad (17)$$

중첩원리(principle of superposition)를 이용하여 임의의 재하하중에 의한 변형률 이력을 3차원으로 확장하면 다음 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon(t) = \int_0^t G J(t, t') d\sigma(t') + \epsilon_T + \epsilon_{sh} \quad (18)$$

$$\text{여기서, } \sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31})^T,$$

$$\epsilon = (\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31})^T,$$

$$\epsilon_T = (\epsilon_T, \epsilon_T, \epsilon_T, 0, 0, 0)^T,$$

$$\epsilon_{sh} = (\epsilon_{sh}, \epsilon_{sh}, \epsilon_{sh}, 0, 0, 0)^T,$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

본 연구에서는 크리프 법칙을 고체화이론(solidification

theory)을 적용하여 정식화하였고, 이는 Fig. 5에서 보인 바와 같다.¹⁶⁾ 본 연구에서 적용한 고체화이론의 컴플라이언스 함수는 다음 식 (19)와 같다.

$$J(t, t') = q_1 + q_2 F(\sigma) Q(t, t') + q_3 F(\sigma) \ln \left[1 + \left(\frac{t-t'}{\lambda_0} \right) \right] + q_4 \ln \frac{t}{t'} \quad (19)$$

여기서, q_1 은 instantaneous compliance, q_2 와 q_3 은 aging and non-aging viscoelastic compliance, q_4 은 viscous flow compliance이다. (Fig. 5에서 각각 탄성 변형, 점탄성 변형, 점성 변형에 해당하는 컴플라이언스 함수) 또한 식 (19)의 $F(\sigma)$ 는 크리프의 응력상태에 따른 비선형성을 의미한다.

식 (19)의 크리프 컴플라이언스 함수는 지수형 알고리즘(exponential algorithm)¹⁶⁾을 이용하여 콘크리트 구조물의 크리프를 고려한 응력 해석(structural creep analysis)을 수행한다.

4.2 수축 발생 기구 및 수축 변형률의 정식화

수축 발생 기구(shrinkage mechanism)는 노 건조된(oven dried) 시멘트 페이스트의 팽창(swelling)시험 결과를 통하여 Fig. 6과 같이 표면 자유 에너지(surface freeenergy)와 분리 압력(disjoining pressure)에 의한 길이

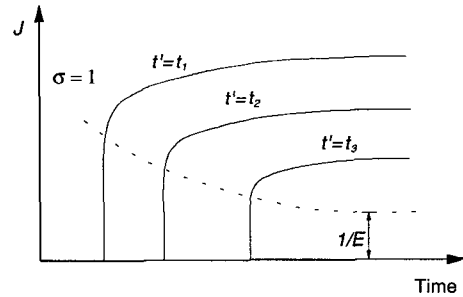


Fig. 4 Compliance function of an aging material

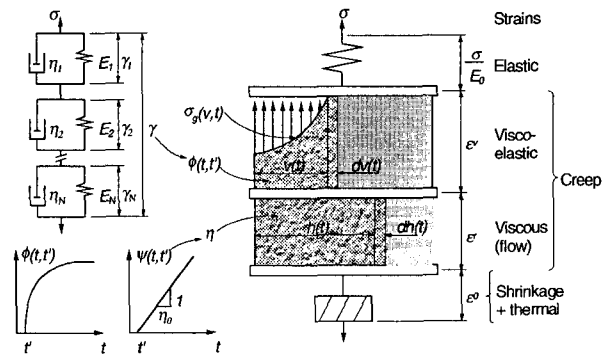


Fig. 5 Model for the role of solidification in creep

변화로써 설명된다¹⁷⁾. 이와 같이 미시적 단계(micro-level)에서 설명되는 수축 기구를 이용한 수축 변형의 산정은 물리적인 의미에서 타당성을 가지지만, 내부 습도변화에 의한 변형률과 응력을 정량적으로 구하는 문제에서는 거시적 단계(macro-level)에서의 외견상 수축 기구(apparent mechanism)로 접근하는 것이 보다 현실적이다. Fig. 6에서 보인 바와 같이 상대습도 40% 이상의 범위에서 건조수축 현상은 분리 압력 이론에 의해 지배되고¹⁸⁾, 내부 습도와 수축변형률은 선형 관계에 있음을 알 수 있다.

따라서, 일반적인 대기 습도는 상대습도 40% 이상이므로, 내부 습도 변화($\Delta\phi$)에 의한 수축 변형률 변화($\Delta\epsilon_{sh}$)는 식 (20)과 같이 수축 계수(α_{sh})를 도입함으로써 표현할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_{sh} = \alpha_{sh} \Delta\phi \quad (20)$$

Baroghel Bouny와 Alvarado에 의하면, Fig. 7에서 보인 바와 같이 보통강도(NSC) 및 고강도 콘크리트(HSC)의 자기수축 및 건조수축은 모두 내부습도와 식 (20)과 같은 선형관계를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7과 Table 1에서 보인 바와 같이 수축 계수는 $1.5 \sim 1.8 \times 10^{-3}$ 의 범위를 가진다^{19,20)}.

Fig. 8은 Table 2와 같은 고성능 콘크리트의 자기수축 실험과 본 연구의 수치해석 결과를 비교한 것으로, 본 연구의 수축 계수는 콘크리트 단면 내의 습도 분포로부터 수축 변형률을 결정하는 적절한 방법임을 알 수 있다.

5. 초기재령 콘크리트의 크리프 실험 및 모델링

5.1 실험 개요

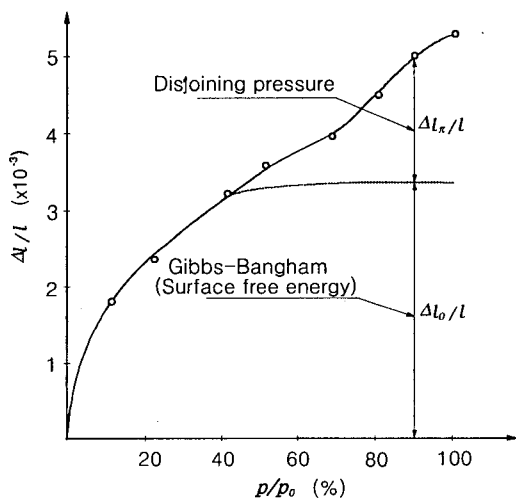
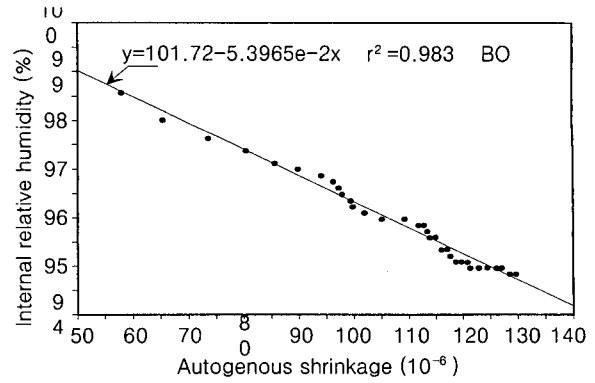
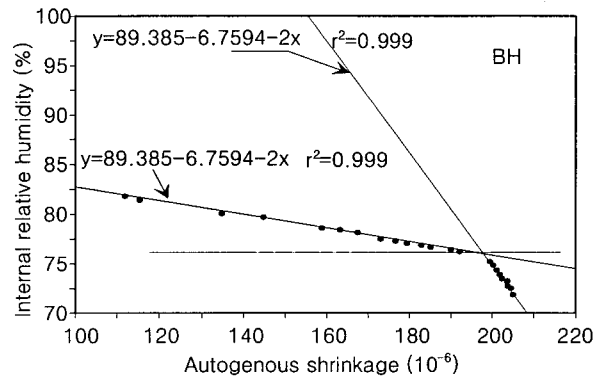


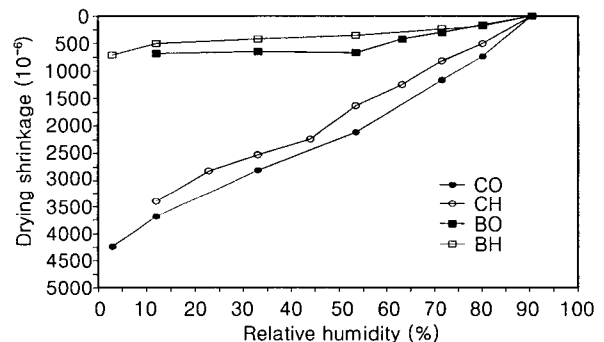
Fig. 6 Length change due to variation in surface free energy and disjoining pressure as a function of relative humidity according to Munich Model



(a) Autogenous shrinkage in normal strength concrete



(b) Autogenous shrinkage in high strength concrete



(c) Drying shrinkage in normal and high strength paste and concrete

Fig. 7 Correlation with shrinkage strain and internal relative humidity

Table 1 Shrinkage coefficient

Author	Shrinkage coefficient	Remark
Alvarado	1.50×10^{-3}	Concrete core
	1.70×10^{-3}	Concrete skin(depth 15mm)
	1.90×10^{-3}	Concrete skin(depth 10mm)
	2.50×10^{-3}	Concrete skin(depth 5mm)
Baroghel bouny	1.85×10^{-3}	Autogenous shrinkage(NSC)
	1.62×10^{-3}	Autogenous shrinkage(HSC)
	1.52×10^{-3}	Drying shrinkage(NSC)
	1.81×10^{-3}	Drying shrinkage(HSC)

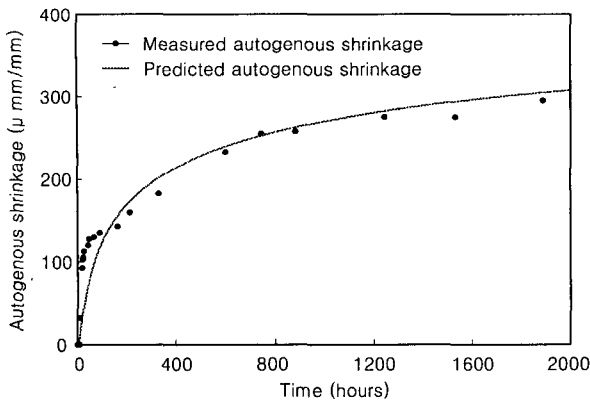


Fig. 8 Comparison between measurement and prediction of autogenous shrinkage

Table 2 Mix proportioning of high performance concrete

W/B (%)	SF/B (%)	Unit weight(kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G
31	9	167	490	48	728	1151

고체화이론에 의한 콘크리트의 크리프 모델은 주로 재하재령 2일 이상인 실험자료를 근거로 하였고, 극 초기재령(응결시간부터 재령 1일이하의 재령)에서 컴플라이언스 함수는 큰 오차를 가진다¹⁰⁾. 따라서 주로 재하 재령 2일 이하의 초기재령 콘크리트의 크리프 실험을 통하여 컴플라이언스 함수의 적정성을 검토하고자 한다.

초기 재령 콘크리트의 크리프 실험은 15×30 cm 원주형 시편을 하중 재하가 가능한 시점부터 Fig. 9와 같은 콘크리트 시편에 극 초기재령의 변형을 측정할 수 있는 장치에 변위계를 부착하여 수행하였고, 콘크리트 시편은 플라스틱 포일로 표면을 밀봉하여 수분손실을 방지하여 기본 크리프 변형만을 대상으로 하였다. 크리프 실험은 MTS servo-loop machine을 이용하여 일정한 응력이 되도록 하중을 재하하였고, 양생온도 및 크리프 실험시 온도는 18~22 °C를 유지하였다. 또한 크리프 시험시 하중 재하가 가능한 시점은 압축강도가 2 MPa 이상 발현될 때이며, 응력 수준은 압축강도의 20~30 %로 선형 탄성상태의 크리프 실험을 수행하였다.

주요 실험변수는 물-시멘트비와 재하재령으로, 콘크리트 배합은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 Table 3과 같이 물-시멘트비 30, 45, 55 %의 3종류이다.

5.2 실험결과 및 크리프 컴플라이언스의 수정

Fig. 10은 물-시멘트비 30 %, 45 %와 55 %인 경우의 크리프 컴플라이언스를 보여주고 있고, 재하재령 1일 이하의 극초기재령에서 하중 재하 후 1시간동안 발생하는 크리프 변형은 매우 크며 기존 크리프 예측 모델이 이를 반영하

지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 5.1절에서 언급한 것과 같이 기존 모델 등이 재하재령 1일 이하의 크리프 실험결과를 전혀 반영하지 못하고 있기 때문인 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구는 재하 지속 시간 1시간동안 발생한 크리프 변형률 결과를 바탕으로 식(19)의 고체화이론에 의한 컴플라이언스 함수를 식(21)과 같이 극 초기재령 콘크리트의 재하재령의 영향을 고려하는 함수 $K(t)$ 를 도입함으로써 초기재령 콘크리트의 크리프 함수를 개선하였다.

$$a_1 = \frac{1}{E_0} + K(t)$$

$$= \frac{1}{E_0} + 30 \cdot 10^{-10} \exp(-35(a - a_0)) \text{ (/Pa)} \quad (21)$$

Fig. 11은 물-시멘트비가 30%인 실험을 대상으로 기존 고체화이론에 의한 크리프 함수(식 (19)), ACI에서 제시한 탄성계수식을 이용한 방법, 본 연구의 크리프 실험결과(Fig. 10) 및 제안식(식 (21))에 의한 재하 초기 1시간 동안의 크리프 응답을 비교한 것으로, 본 연구에서 제안한 극 초기재령의 크리프 예측값이 실험결과와 가장 근접한 결과를 보임을 알 수 있다.

6. 외부구속을 받는 벽체구조물의 실험과 수치해석 결과의 비교

기 경화된 바닥 슬래브 위에 단면두께 1.0 m, 높이 1.2 m, 길이 10 m의 벽체를 타설하고, Fig. 12와 같이 수화열 및 온도응력이 최대가 되는 중앙 단면에 온도계이지(T-type thermocouple) 및 유효응력계(stress meter)를 매

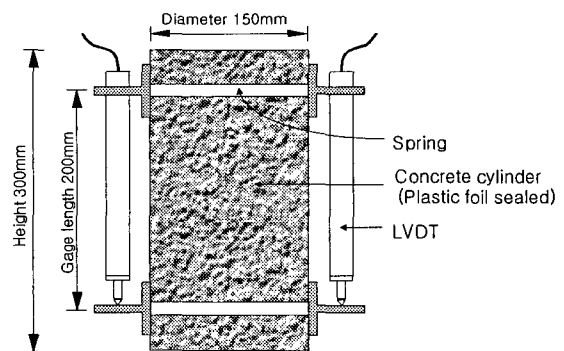


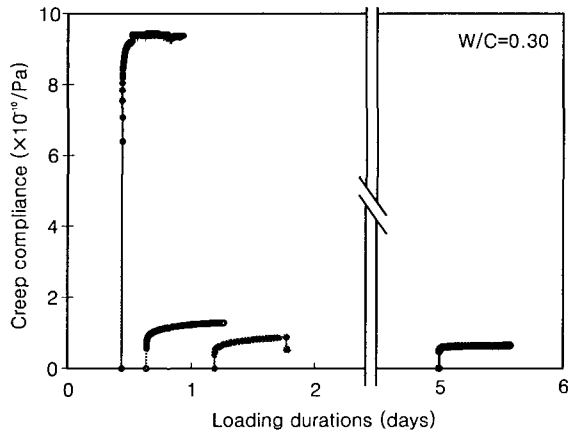
Fig. 9 Concrete specimen used in early-age creep tests

Table 3 Mix proportioning of creep tests

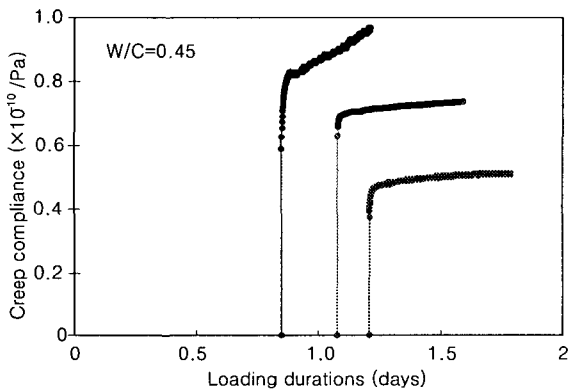
W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)			
		W	C	S	G
30	40	165	550	633	1059
45	45	179	398	799	1009
55	45	179	325	826	1044

설하여 온도이력 및 바닥 슬래브의 외부구속작용에 의한 잔류응력(residual stress)을 측정하였다.

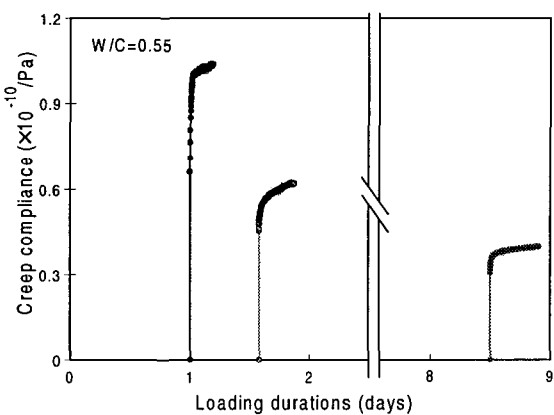
슬래브와 벽체부 콘크리트의 배합은 Table 4와 같고, 벽체부의 온도 및 습도분포와 이에 의한 잔류응력의 수치적 계산에 사용된 재료물성은 Table 5에 정리한 것과 같다. 콘크리트의 타설온도와 평균 대기온도는 측정값을 적용하였다.



(a) W/C = 30 %



(b) W/C = 45 %



(c) W/C = 55 %

Fig. 10 Creep test results of early-age concrete

체적변화에 의한 응력을 결정하기 위하여 Fig. 13과 Fig. 14와 같이 벽체 단면 내의 온도 및 습도분포와 이력을 먼저 구해야 한다. Fig. 13은 최대온도가 발생하는 온도센서 설치부에서의 온도 측정값과 해석결과를 비교한 것으로, 전 단계 해석 모델이 매우 정확한 온도이력을 예측할 수

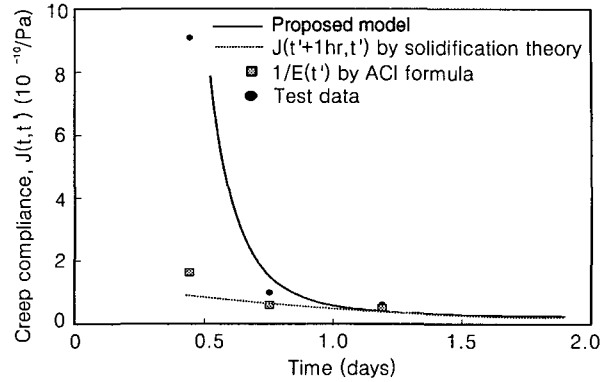


Fig. 11 Modification of instantaneous compliance (W/C=30 %)

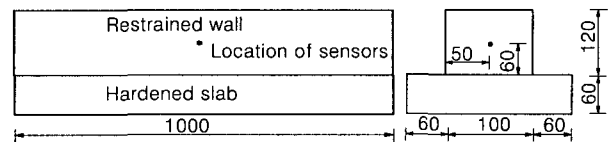


Fig. 12 Geometry and location of sensors

Table 4 Mix proportioning of restrained wall

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)			
		W	C	S	G
45.2	46.3	175	387	815	989

Table 5 Material properties used in analysis

Field	Parameter	value	
Temperature	Initial condition	15 °C	
	Convective coefficient	12 kcal/m ² hr°C	
	Ambient temperature	7°C	
	Specific heat	0.25 kcal/kg°C	
	Density	2300 kg/m ³	
Moisture	Initial condition	$\phi=1$	
	Boundary condition	Sealed	
	Conductivity at $\phi=1$	3.4×10^{-7} kg/m s	
Stress	Critical degree of hydration	0.2	
	Compressive strength at 28 days	32.7 MPa	
	Tensile strength at 28 days	2.53 MPa	
	Young's modulus at 28 days	27000 MPa	
	Creep parameters(/MPa)	q_1	0.208×10^{-10}
		q_2	0.783×10^{-10}
Thermal properties	Thermal expansion coefficient	$10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	
	Thermal contraction coefficient	$8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	
	Shrinkage coefficient	q_3	0.058×10^{-10}
		q_4	0.073×10^{-10}

있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 14는 센서 설치부의 습도 이력을 예측한 것으로 자기건조에 의한 습도감소량이 5.3%이었고, 이러한 예측값은 물-시멘트비 45% 내외인 기존 연구결과와 유사한 결과를 보였다¹⁾.

벽체부 단면의 온도 및 습도 뿐 만 아니라 수화도장 (temperature, moisture and degree of hydration fields)이 결정되면, 이를 입력자료로 초기재령 콘크리트의 온도 및 습도에 의한 변형과 이로 인한 응력을 구하게 된다¹⁾.

Fig. 15는 온도 및 건조수축응력의 수치 해석 결과와 유효응력계의 측정결과를 비교한 것이다.

초기재령 크리프를 고려하지 않은 해석은 잔류응력을 과대 평가하는 경향이 있으며, 실제 측정응력의 2배 이상에 해당하는 인장응력을 보인다. 따라서 초기 재령 콘크리트의 온도 및 수축응력을 보다 정확히 예측하기 위하여 크리프의 고려는 필수적임을 알 수 있다.

Fig. 13의 온도 측정결과에서 타설 후 120~240시간 사이의 온도하강량이 5°C이므로 추가적인 인장응력의 증가가 예상되지만, Fig. 15의 실제 응력 측정결과는 120시간 이후의 인장응력의 증가가 거의 없음을 보여준다. 이는 Fig. 15의 해석결과에서와 같이 120시간 내외에서 인장응

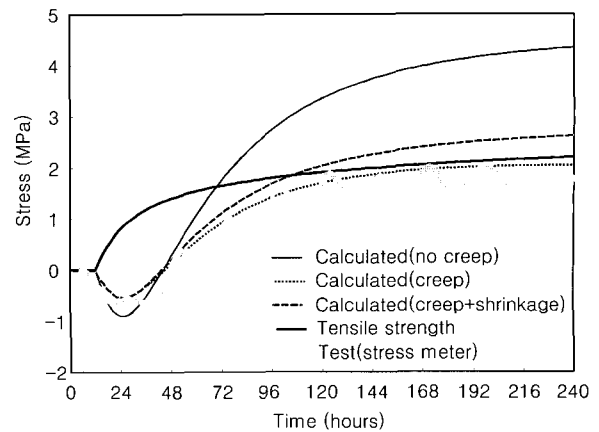


Fig. 15 Experimental and numerical results of thermal and shrinkage stresses

력이 인장강도를 초과하여 유효응력계 주위에 미세 균열 (완전한 응력 이완이 발생하지 않으므로)이 발생했을 가능성이 높고, 또한 고인장응력(high tensile stress)에 의한 크리프 때문에 인장 응력이 이완되는 현상에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 15에서와 같이 수축응력은 온도에 의한 인장응력을 증가시키는 요인으로 작용하고, 온도하강이 종료된 이후의 장기적인 인장응력의 증가를 유발시킬 수 있다. 본 연구의 실험 및 해석은 물-시멘트비 45.2%의 보통강도 콘크리트를 대상으로 하고, 이는 Fig. 14와 Fig. 15에서와 같이 내부습도가 95%내외이고 이에 상응하는 수축변형과 응력은 각각 69 μ 와 0.6 MPa이다. 그러나 고강도 및 고성능 콘크리트의 경우 내부 습도는 75%내외로 감소하게 되고, 약 200~300 μ 의 자기수축 변형률을 보이므로 본 해석 예제에 비하여 상당한 인장응력의 증가가 예상된다¹⁹⁾. 따라서 본 연구에서 개발한 초기재령 콘크리트의 크리프를 고려한 온도 및 수축응력 해석 프로그램은 보통 강도 뿐만 아니라 고강도 및 고성능 콘크리트를 포함한 다양한 재료에 대한 초기 균열 문제와 나아가 장기 내구성능 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

7. 결 론

본 연구는 전 단계 해석 모듈에서 콘크리트의 단면 내 수화도와 온도 및 습도분포를 결정하고, 이를 입력자료로 고강도 및 고성능 콘크리트의 자기수축을 포함한 초기재령 콘크리트의 온도 및 수축응력을 평가하는 3차원 유한 요소 해석 프로그램을 개발하였다. 콘크리트 단면 내 온도 및 수축 응력을 정확히 예측하기 위하여, 초기재령 크리프 실험 및 결과 분석을 통하여 초기재령 크리프의 영향을 모델링하여 해석 프로그램에 반영하였다. 개발된 해석프로그램을 이용한 수치해석 결과는 벽체 구조물을 대상으로 한 실험결과와의 비교를 통하여 그 타당성을 검증

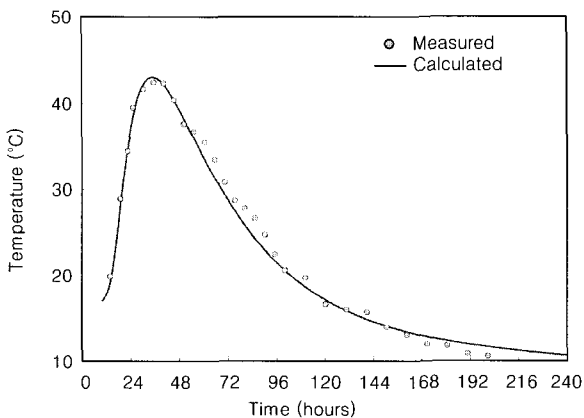


Fig. 13 Calculated and measured temperature history at the location of sensors

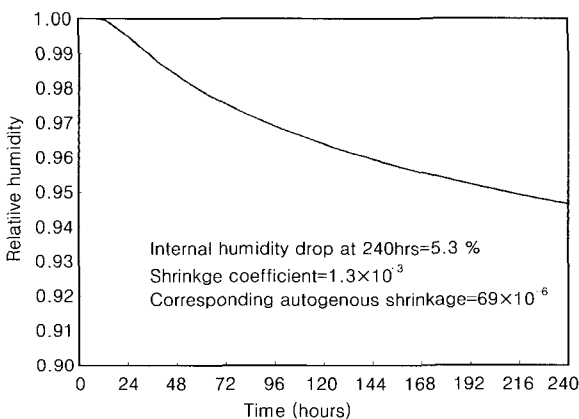


Fig. 14 Calculated internal humidity drop due to self-desiccation at the location of sensors

하였고, 따라서 본 통합 해석 프로그램은 초기재령 콘크리트의 균열 위험성과 장기 내구성능을 평가하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Cha, S. W., "Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygral Stresses in Hardening Concrete," Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.
2. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology," *5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Edited by Bazant, Z. P. and Carol, I., Barcelona, Chapman and Hall, 1993, pp.159~168.
3. Bazant, Z. P., "Current Status and Advances in the Theory of Creep and Interaction with Fracture," *5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, 1993, pp.291~308.
4. Oh, B. H. and Baik, S. W., "Temperature Analysis and Crack Control of Large Scale Massive Concrete Structures Due to Hydration Heat," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 7, No. 1, 1995, pp.97~108.
5. Kim, J. K. and Kim, K. H., "Thermal Stress Analysis for the Heat of Hydration Considering Creep and Shrinkage Effects in Mass Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 4, No.3, 1992, pp.101~111.
6. Kang, S. H., Lee, Y. H., Jeong, H. J., and Park, C. L., "A Study on the Heat Transfer Analysis and Thermal Stress Analysis of Mass Concrete Structure by Finite Element Method," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.7, No. 3, 1995, pp.137~148.
7. Kim, E. K., Kim, L. H., and Shin, C. B., "Development of Temperature-Analysis Program for Mass Concrete Using Finite Element Method," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 7, No. 6, 1995, pp.167~175.
8. Kim, J. K. and Lee, C. S., "Differential Drying Shrinkage of Concrete an Early - Ages Considering Self-desiccation," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 5, 1998, pp.197~204.
9. Hoden, W. C. and Reinhardt, H. W., "Temperatuur en Spanningen in Tetrapods Tijdens de Verharding," *Cement* 1986, No. 12, pp.49~52.
10. Rostasy, F. S. and Laube, M., "Experimental and Analytical Planing Tools to Minimize Thermal Cracking of Young Concrete," *RILEM Proceeding 11, Testing During Construction*, pp.207~223.
11. Rostasy, F. S., Gutsch, A., and Laube, M., "Creep and Relaxation of Concrete at Early-Ages-Experiments and Mathematical Modeling," *5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete*, Barcelona, 1993, pp.453~458.
12. Byfors, J., "Plain Concrete at Early Ages," Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.
13. Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Detherage, J. H., "Elastic Moduli, Poisson's Ratio and Compressive Strength Relationship at Early Ages," *ACI Materials Journal*, 1991, pp.3~10.
14. *CEB-FIP Model Code 1990*, CEB Bulletin d'information No. 213/214, 1993.
15. Damkile, L., "Stability of Plates of Elastic-plastic Material," Ph. D. Dissertation, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 1983.
16. Bazant, Z. P. and Prasannan, "Solidification Theory for Concrete Creep, I. Formulation, II. Verification and Application," *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 115, No. 8, 1989, pp.1691~1725.
17. Wittmann, F. H., "The Structure of Hardened Cement Paste - A Basis for a Better Understanding of the Materials Properties," *Proceedings of Conference on Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties*, Sheffield, 1976, pp.96~117.
18. Ferraris, C. F. and Wittmann, F. H., "Shrinkage Mechanisms of Hardened Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, 1987, pp.453~464.
19. Baroghel - Bouny, V., "Characterization of Cement Pastes and Concretes - Methods, Analysis, Interpretations," Ph. D. Dissertation, Laboratoire Central des Fonts et Chaussées, France, 1994 (in French).
20. Alvaredo, A. M., "Drying Shrinkage and Crack Formation," Ph. D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss, 1994.

요 약

본 연구에서 초기재령 콘크리트의 크리프 특성을 고려한 단면 내 온도 및 수축응력을 구하는 3차원 유한요소 해석 프로그램을 개발하기 위한 수치해석 절차에 관하여 정립하였다.

최근 들어 구조물의 노후화에 따른 콘크리트의 내구성에 대한 관심이 고조되고 있고, 초기재령에서 발생하는 균열은 구조물의 내구성 및 사용성과 같은 장기적인 성능에 큰 영향을 미친다. 많은 토목 기술자들이 초기재령 콘크리트의 체적변화에 의한 응력 및 균열 문제를 심도 깊게 다루지 않는 데는 장기적인 내구성과 사용성에 대한 인식이 부족하고, 경화가 진행되는 콘크리트의 체적변화는 매우 복잡한 영향인자를 고려해야 되기 때문이다. 또한 초기재령 콘크리트의 체적변화로 인한 응력을 예측하는 기존 프로그램들은 주로 수화열에 의한 온도 및 열응력 해석에 국한되거나, 수화과정과 연계되지 않은 습도분포에 의한 수축 응력 해석을 대상으로 한다. 따라서 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 체적 변화에 의한 모든 응력 요소를 하나의 통합적인 해석 시스템으로 구성하여, 초기재령 콘크리트의 균열 제어 수단으로 활용하고자 한다.

본 연구는 초기재령 콘크리트의 온도 및 수분에 관련된 재료 물성 뿐 만 아니라 역학적 특성 등 모든 재료 물성을 수화도에 기초하여 모델링하였다. 또한 콘크리트가 강성을 가지는 시점부터의 초기재령 크리프 실험을 수행하고, 그 결과로부터 수화도에 따른 크리프 거동을 모델링하여 해석 프로그램에 반영하였다.

개발된 해석프로그램을 이용하여 수치해석 결과와 실험결과를 비교하여 그 타당성을 검증하고, 해석 예제를 통하여 각 변형률 성분에 의한 잔류 응력의 변화 양상을 비교, 분석하였다.

핵심용어 : 온도 및 수축응력, 초기재령 손상, 장기구조성능, 3차원 유한요소해석, 초기재령 크리프
