

# 온도, 변형 및 응력 계측을 통한 초기재령 콘크리트의 임계수화도 및 열팽창계수 추정

## Estimation of Critical Degree of Hydration and Thermal Expansion Coefficient of Early-Age Concrete from Measured Temperature, Strain and Stress

오 병 환<sup>\*</sup>      최 성 철<sup>\*\*</sup>      신 준 호<sup>\*\*</sup>  
Byung-Hwan Oh   Seong-Cheol Choi   Joon-Ho Shin

---

### ABSTRACT

Recently, the properties of early-age concrete are increasingly important because these properties directly influence the behavior of early-age concrete structures including stress and cracking behavior. Nevertheless, the studies on early-age concrete are limited to strength and temperature development. The purpose of present study is to propose a simple and rational method which can predict the stress and strain behavior of young age concrete.

A series of test have been done to measure the temperature development, strains and stresses in concrete members. The concept of equivalent age was used to define the degree of hydration and this degree of hydration was used to calculate the strength and elastic modulus. The critical degree of hydration and thermal expansion coefficient were calculated using experimental data. It is seen that the critical degree of hydration range from 0.05 to 0.11 based on the measuring method. The thermal expansion coefficient was calculated based on the measured non-mechanical strain and it is found that the coefficient decreases slightly with the increase of age. The consideration of critical degree of hydration in calculating stresses gives more accurate results. The present study provides useful method and data in evaluating early-age behavior of concrete structure.

---

### 1. 서    론

초기재령 콘크리트 내에서 발생하게 되는 균열은 철근부식, 중성화 및 알칼리 골재반응 등을 촉진 시키게 되므로 구조물의 내구성 및 사용성에 악영향을 미치게 되며 궁극적으로 장기적인 성능저하를 가속시키게 된다. 본 연구에서는 실제 구조물의 초기 거동 및 열응력 특성을 나타낼 수 있는 모형시험

---

\* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 대학원

체를 제작하여 온도, 변형 및 응력계측을 수행하였다. 또한 동일한 배합의 콘크리트의 단열온도상승시험을 수행하여 온도상승에 따른 수화도를 모델링하고 계측된 결과로부터 열응력 해석에 필요한 임계수화도 및 열팽창계수를 실험적으로 분석하여 제시하였다. 제시된 재령에 따른 수화도, 임계수화도 및 열팽창계수는 초기재령 콘크리트의 온도 및 열응력 해석의 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 초기재령 콘크리트의 거동

### 2.1 수화도 및 역학적 특성 예측 모델

수화반응이 진행되고 있는 구조물은 각 위치별로 서로 다른 온도이력 및 수화도를 갖게 된다. 임의의 온도이력  $T(t)$ 을 갖는 콘크리트의 등가재령( $t_{eq}^c$ )은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$t_{eq}^c = \int_0^t \exp\left(\frac{E}{R} \left\{ \frac{1}{293} - \frac{1}{T(t)+273} \right\}\right) dt \quad (1)$$

여기서  $\frac{E}{R}$ 은 활성화온도(activation temperature)를 의미하는 상수이다.

단열온도 상승시험에서 온도상승량( $\Delta T_{ad}$ )에 따른 등가재령과 수화도( $\alpha(t_{eq})$ )의 관계는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\alpha(t_{eq}) = \frac{\Delta T_{ad}(t_{eq})}{\max \Delta T_{ad}} \quad (2)$$

여기서  $\max \Delta T_{ad}$ 는 최대 단열온도 상승량이다. 식 (1) 및 (2)를 이용하여 임의의 온도이력을 갖는 구조물의 등가재령 및 수화도를 구할 수 있다.

### 2.2 임계수화도에 따른 역학적 특성변화

임계수화도는 굳지 않은 콘크리트가 최초로 강성을 가지는 시기의 수화도로서 물-시멘트비에 주된 영향을 받는다. 이러한 임계수화도는 열응력 해석에 필요한 탄성계수와 같은 역학적 특성의 초기 발현 시기를 결정하게 되며 따라서 초기 거동에 영향을 미치게 된다. 초기재령 콘크리트의 탄성계수, 인장강도와 같은 역학적 특성은 기본적으로 압축강도를 통하여 표현되며 수화반응에 따른 강도발현을 임계수화도를 이용하여 표현하면 아래 식 (3), (4) 및 (5)와 같다.

$$\frac{f_c'(a)}{f_c'(a=a_{28})} = \left(\frac{a-a_0}{a_{28}-a_0}\right)^a \quad (3)$$

$$\frac{E_c(a)}{E_c(a=a_{28})} = \left(\frac{a-a_0}{a_{28}-a_0}\right)^b \quad (4)$$

$$\frac{f'_i(\alpha)}{f'_i(\alpha = \alpha_{28})} = \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^c = \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^{\frac{2}{3} \alpha} \quad (5)$$

여기서,  $f'_c(\alpha)$ 는 수화도가  $\alpha$ 일 때의 압축강도,  $f'_c(\alpha = \alpha_{28})$ 는 28일 표준양생시 수화도인  $\alpha = \alpha_{28}$ 일 때의 압축강도,  $\alpha_0$ 는 임계수화도(critical degree of hydration)이다. 압축강도로부터 탄성계수 및 인장강도는 ACI Building Code 및 CEB-FIP MC90을 이용하여 계산하였다.

### 2.3. 자기수축(Autogenous Shrinkage)

자기건조는 일반적으로 물·시멘트비가 0.5이하의 낮은 물·시멘트비를 갖는 시멘트 페이스트에서 나타난다. 수화과정에서 화학적으로 결합되어 있는 물은 비체적(specific volume)이 감소하게 되어 시멘트 페이스트는 부피변화를 하게 될 것이다. 만약 추가적인 수분의 공급이 없다면 직경이 큰 공극부터 점차로 공극은 비워지게 된다. 따라서, 공극내 수증기압 및 상대습도도 감소하게 되며 이러한 현상을 자기건조(self-decission)라고 하며 이러한 습도의 감소에 의해 발생한 변형을 자기수축(autogenous shrinkage)이라 한다. 본 논문에서는 CEP-FIP MC90에서 제시되어 있는 모델을 사용하여 자기수축을 계산하였다.

### 2.4 열팽창계수

열응력이 발생한 구조물의 시간간격( $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ )에서 발생한 전체변형변화( $\Delta \epsilon_i^t$ )는 탄성변형변화( $\Delta \epsilon_i^e$ ), 크리프변형변화( $\Delta \epsilon_i^c$ ), 온도변형변화( $\Delta \epsilon_i^T$ ) 및 수축변형변화( $\Delta \epsilon_i^{sh}$ )의 합으로 표현할 수 있다. 식 (6)에서와 같이 응력의 발생에 관계된 역학적 변형변화( $\Delta \epsilon_i^m$ )는 탄성변형과 크리프변형의 변화의 합이며 온도변형변화 및 수축변형 변화의 합은 응력의 발생과 무관한 비역학적(non-mechanical) 변형변화( $\Delta \epsilon_i^{nm}$ )의 합이다. 비역학적 변형계에서 예측된 변형의 변화는 온도변형 및 자기수축변형 변화의 합이며 온도이력변화( $\Delta T_i$ )으로부터 열팽창계수( $\theta_{i+1/2}$ )를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_i^t &= \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_i^c + \Delta \epsilon_i^T + \Delta \epsilon_i^{sh} \\ &= \Delta \epsilon_i^m + \Delta \epsilon_i^{nm} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta_{i+1/2} = \frac{\Delta \epsilon_i^{nm} - \Delta \epsilon_i^{ash}}{\Delta T_i} \quad (7)$$

## 3. 바닥 구속된 벽체의 초기 거동 시험

타설 중 발생하는 수화열로 인한 초기 재령 콘크리트의 거동 및 열응력 특성을 분석하기 위하여 온도 균열이 발생하는 대표적인 구조물인 바닥이 구속된 벽체 구조물을 실제 현장에서 사용하고 있는 배합(표 1) 및 시공순서에 따라 제작하였으며 부재의 형상 및 배근 상세는 그림 1과 같다.

표 1. 타설 벽체 콘크리트 배합

W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
45.2	46.3	175	387	815	989

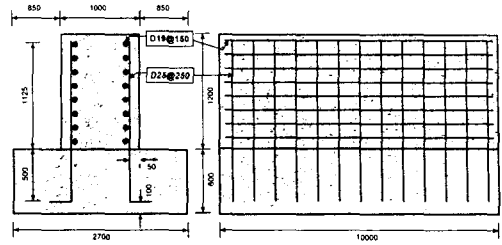


그림 1. 부재의 형상 및 배근 상세

#### 4. 시험 결과 및 분석

##### 4.1 단열온도 상승시험 및 수화도

콘크리트의 타설과 동시에 실시한 단열온도 상승시험한 결과는 그림 2와 같다. 부재 1 및 5에서 얻어진 온도이력과 식 (1)과 (2)를 사용하여 계산된 구조물의 중심부에서의 수화도는 그림 3과 같다.

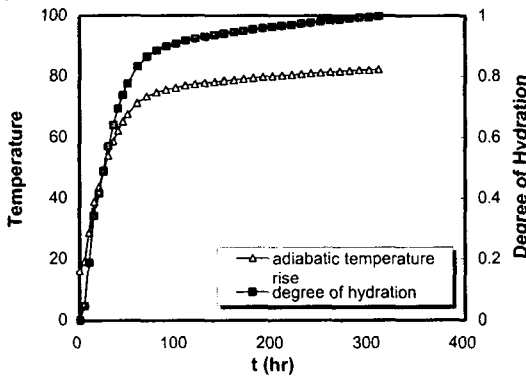


그림 2. 단열온도 상승시험

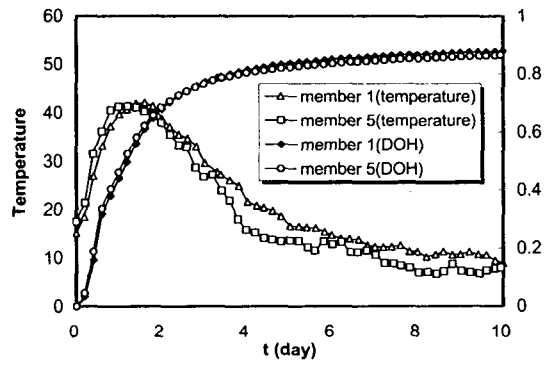


그림 3. 온도 이력 및 수화도

##### 4.2 비역학적 변형

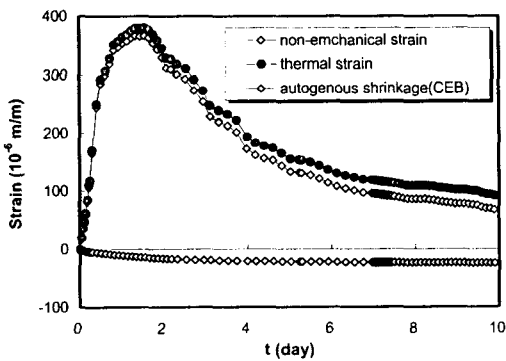


그림 4. 비역학적 변형(부재 1)

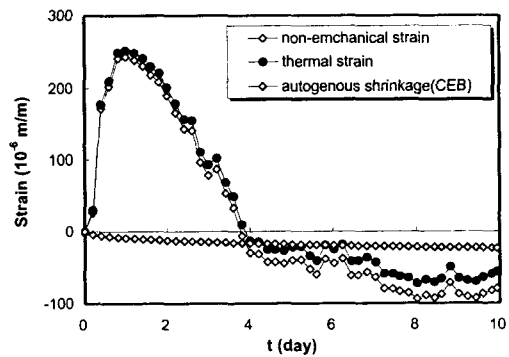


그림 5. 비역학적 변형(부재 5)

매립형 콘크리트 게이지를 통하여 콘크리트의 전체 변형을, 비역학적 변형계에 의하여 비역학적 변형을 계측하였다. 응력의 발생과 무관한 비역학 변형의 시간에 따른 변화는 물·시멘트비가 0.45인 콘크리트 내에서 자기건조에 의한 수축은 매우 작으며 따라서 온도변형이 비역학적 변형의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.3 임계 수화도 및 열팽창 계수

매립형 콘크리트 게이지 및 비역학적 변형계로부터 계산된 역학적 변형의 초기 계측 결과를 살펴 보면 타설직후 swelling이 발생하다가 그림 4에 나타난 바와 같이 부재 1의 경우 0.11(등가재령 0.33일), 부재 5의 경우 0.05(등가재령 0.2일)의 수화도에 이른 후에 압축 변형이 발생하였으며 이 때의 수화도를 임계수화도로 정하였다. 또한 계산된 열팽창계수는  $(8\sim 10)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 가지며 시간이 경과함에 따라 감소하다가 일정한 값으로 수렴한다.

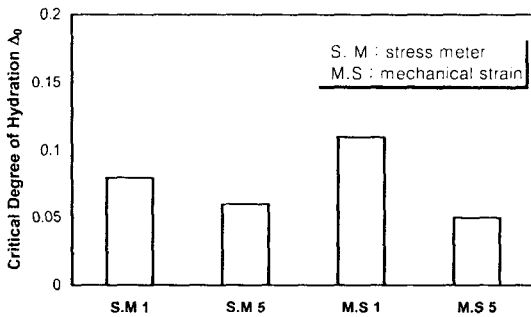


그림 4. 계측 방법에 따른 임계수화도

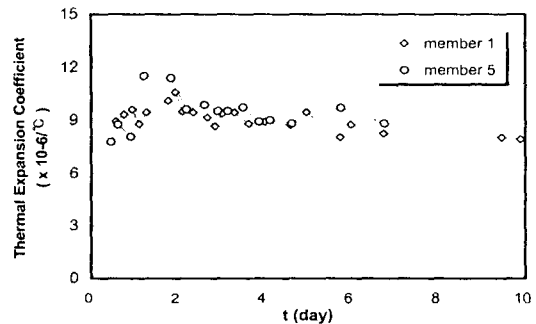


그림 5. 재령에 따른 열팽창계수

#### 5. 결 론

본 연구는 초기재령 콘크리트의 시간에 따른 거동 및 열응력을 합리적으로 평가하기 위하여 실제 구조물의 초기 거동 및 열응력 특성을 나타낼 수 있는 현장 실물 콘크리트 부재의 제작 및 계측을 수행하였으며 계측된 역학적 변형으로부터 중심부 응력해석을 수행하여 계측된 응력과 비교하였다. 이를 통하여 임계수화도가 응력 해석에 미치는 영향 및 크리프 변형이 응력의 크기에 비례한다는 선형 가정을 만족하는 응력 범위를 구하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초기 재령에서 수화열로 발생된 응력이 콘크리트 강도의 40% 이하에서는 크리프 변형의 선형 이론이 실험결과와 잘 일치하고 있으나 발생 응력이 강도의 40%의 초과하는 경우에는 크리프 변형의 선형이론은 발생 응력을 과대 평가하는 것으로 나타났다. 이는 높은 응력(high stress)에서의 비선형성과 미세균열 등의 영향으로 판단되며, 높은 응력에서의 비선형성의 추가 고려가 필요하다.

2) 임계수화도를 고려하지 않고 무시한 경우에는 실제 발생하는 응력을 과대 평가하는 것으로 나

타나 초기재령 콘크리트의 정확한 거동의 예측을 위해서는 임계수화도의 고려가 필요하다.

본 연구에서 제시된 초기재령 콘크리트의 재료 특성 및 거동분석을 위한 방법론은 수화반응에 따른 콘크리트의 온도 및 열응력 해석에 유용한 기초자료로 활용될 수 있으며 궁극적으로 초기재령 콘크리트의 균열 위험성과 장기내구성을 평가하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. Emborg, M., "*Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages*," Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1989.
2. Bazant, Z. P., "*Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*," John Wiley and Sons, 1988.