

콘크리트 내의 건조수축으로 인한 응력 변화의 모델링

Modeling Drying Shrinkage Stress Gradients in Concrete



박철우*
Cheol-Woo Park

본 기사는 Cement, Concrete and Aggregates 26권 2호 (2004년 12월호)에 게재된 기사를 번역한 것이다.

[저자 : Zachary C. Gresley and David A. Lange]

1. 머리말

콘크리트에 있어 건조수축에 의해 발생하는 균열은 콘크리트 다면 내부에서의 상대습도구배와 밀접한 연관이 있다. 본 연구에서는 콘크리트 내부의 상대습도를 측정할 수 있는 물드를 사용하여 콘크리트 내부에 건조수축으로 인하여 발생하는 응력의 변화 구배를 측정하였다. 이러한 연구의 실험적 및 해석적 방법을 소개하고 있으며 건조수축에 의한 응력 구배의 변화 정도와 콘크리트에 균열이 발생하는 시간과 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있다. 향후의 연구는 이러한 미세균열의 생성과 진행 등에 관하여 본 연구의 결과를 발전시켜나가는 것이 필요하다.

2. 서 론

콘크리트 구조물이나 포장체의 균열 발생은 구조적 안전성, 사용성, 내구성뿐만 아니라 시각적인 부분에까지 좋지 못한 영향을 미치게 된다. 이러한 균열의 발생에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 건조수축은 콘크리트에 심각한 미세균열 및 거시균열을 유발하기에 충분한 응력의 변화를 초래할 수 있다. 또한 콘크리트 내부에는 습도의 변화 구배가 존재하고 노출된 표면이 건조하다면 표면 근방에서는 콘크리트에 작용하는 인장응력이 과도하게 증가하여 균열의 발생을 더욱 악화시킬 수 있다.

콘크리트에서 발생하는 건조수축은 내부의 공극 구조에서 증발과 발산에 의한 수분의 손실로 인하여 발생하게 된다. 공극

중에서 그 크기가 큰 것부터 수분의 손실이 발생하여 점차적으로 크기가 작은 것으로 진행되게 된다. 일단 공극에서 건조가 발생하게 되면, 모세관현상에 의하여 약 50 nm 크기의 오목한 형태의 메니스커스가 생성되게 된다¹⁸⁾. 이러한 곡률을 가진 메니스커스의 생성은 공극들 간에 있어 공극 수압과 수분의 증발로 인하여 발생하는 압력의 불균형을 초래하게 된다. 결과적으로 공극수 내부에는 음의 압력이 발생하게 되며 이러한 음의 공극 수압은 아래의 Laplace의 방정식으로 표현된다.

$$\sigma = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

여기서, σ 는 음의 공극 수압, γ 는 물의 표면장력 그리고 r 는 메니스커스의 곡률반경의 평균값이다. 공극수 내부에는 인장 응력으로 작용하는 음의 압력에 대한 반작용으로 경화된 고체의 미세구조에는 압축응력이 작용하게 되며 이러한 압축응력은 미세구조의 수축으로 나타나게 된다⁵⁾. 하지만, 이러한 수축이 내적 또는 외적으로 구속되어진다면 콘크리트에 균열을 유발할 수 있는 거시적 크기를 가지는 인장응력이 발생하게 된다.

한편, 내적 구속은 수분의 불균등 분포로 인한 변화 구배에 의하여도 발생할 수 있다. 수분의 변화 구배로 인하여 발생하는 응력은 수축에 대한 구속이 전혀 없는 즉, 자유 수축 상태의 콘크리트 또는 시멘트풀에서도 미세균열을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다^{4,12,13)}. 콘크리트가 건조가 진행될 때, 수분의 증발은 외부의 표면에서부터 발생하며 이때의 내부는 여전히 포화상태로 있게 된다. 작은 크기의 공극이라 할지라도 건조하는 표면 근방에서는 내부에 비하여 상대적으로 빠른 시간에 건조되게 된다. 따라서 이러한 구속되지 않은 건조수축, 즉 평형을 이루기 위한 수축은 건조 표면에서 아주 크게 발생하게 된다. 하지만, 콘크리트 재료의 전체적인 시각에서는 변형률에 대하여 외부의 건조한 부분과의 균형을 위하여 대부분의 내부의 포화된 부분에

* 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수
tigerpark@kangwon.ac.kr

서는 압축이 발생하게 된다.

현재 음의 공극 수압에 의하여 경화한 콘크리트의 미세 구조에 발생하는 압축응력을 측정하고 이를 정량화할 수 있는 방법은 존재하지 않는다. 하지만, 공극 구조 내부의 음의 압력과 상대습도와의 관계식은 아래의 Kelvin-Laplace 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\sigma = \frac{-\ln(RH)RT}{\nu_m} \quad (2)$$

여기서, σ 은 음의 압력, RH 는 내부의 상대습도, R 은 기체상수, T 는 절대온도 (Kelvin) 그리고 ν_m 는 물의 몰부피 (molar volume)이다. 이 관계식을 사용하면, 내부의 상대습도를 변수로 하여 건조수축으로 발생하는 내적 구속으로 인한 잔존응력의 변화 구배의 변화를 예측할 수 있다. 콘크리트의 건조수축응력과 상대습도와의 상관관계에 관한 상세한 연구 결과는 [참고문헌 9]를 참조할 수 있다. 본 논문에서는 건조수축응력을 정량화하는 실험 및 해석적 기법을 소개하고자 한다. 본 연구에서 제시되는 모델은 건조수축에 의한 균열, 파괴, 컬링 등을 연구할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한, 수분의 변화 구배로 인한 유효인장강도의 감소⁷⁾ 및 건조수축 균열에 영향을 미치는 인자인 배합, 양생 등과의 상관관계를 위하여도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

3. 실험

본 연구에서 제시된 모델을 건조수축이 구속되지 않은 콘크리트 시편의 응력 구배를 산정하기 위하여 세가지의 다른 실험 측정이 필요하다. 첫 번째로, 타설 후 재령에 따라 콘크리트 내부의 상대습도 변화 구배의 측정이 필요하다. 두 번째, 구속이 없는 상태의 자유 건조수축의 측정이며 세 번째는 구속된 콘크리트의 건조수축의 측정이 필요하다. 완전히 구속된 콘크리트의 응력 변화 구배를 산정하기 위해서는 외부 구속에 의하여 단면에 작용하는 총 응력 값이 필요하다.

4. 상대습도의 측정

콘크리트 내부의 상대습도 측정은 1940년대부터 시도되어 왔다⁸⁾. 그 후 상대습도를 측정하기 위한 센서나 탐침 등이 지속적으로 발전하여 왔다. 최근 경화한 콘크리트나 시멘트풀의 내부 상대습도에 관한 많은 연구들이 자가수축(self-desiccation)과 관련하여 진행되어 왔지만^{14,15,20)} 일부의 연구에서는 상대습도의

변화 구배를 성공적으로 측정하기도 하였다^{1,17,19,27)}. 일반적으로 콘크리트 내부의 상대습도는 경화한 시험체의 표면에 구멍을 뚫거나 타설 시에 튜브 등을 이용하여 공간을 확보한 후 이를 통하여 탐침 등을 넣어 측정한다. 최근 미국 일리노이대학교 (University of Illinois at Urbana-Champaign)에서 개발된 측정 장치는 기존의 이러한 측정 방법에 대하여 가격, 크기, 정확도, 측정 시간, 자료 저장 등의 많은 이점을 가지고 있다¹⁾. 이 측정 장치는 하나의 패키지로 형성된 센서와 동시에 14센서를 활용할 수 있는 디지털 신호 측정기와 자료 저장 프로그램으로 구성되어 있다(그림 1). 사용된 센서는 그 크기가 아주 작으며 전기량의 형태로 디지털 신호를 사용한다²⁴⁾. (그림 2)의 센서는 상대습도와 함께 온도도 동시에 측정이 가능한 센서이다. 작은 크기로 인하여 센서는 (그림 3)에서와 같이 플라스틱 튜브에 넣어져서 이를 경화 전의 콘크리트에 직접 삽입하여 사용할 수 있다. 플라스틱 튜브의 한쪽 끝은 고어텍스[®]로 감싸져 있어 외부로 부터의 직접적인 수분의 침투를 막아 센서를 보호함과 동시에 증기형태의 수분의 이동은 원활하여 콘크리트 내부의 상대습도를 측정할 수 있다. 이러한 센서패키지의 끝 부분에서는 콘크리트 내부 공극 구조와 센서튜브간의 내부 증기압의 평형이

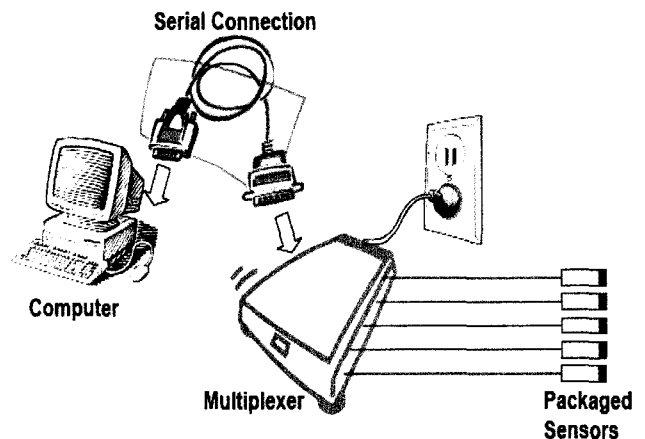


그림 1. 콘크리트 내부의 상대습도 측정 장치

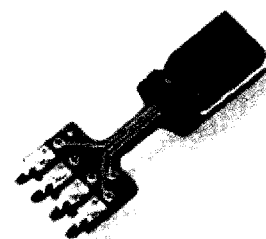


그림 2. 디지털 상대습도 센서(길이 20 mm 이하)

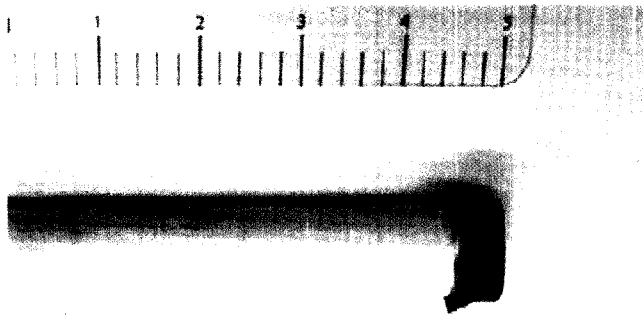


그림 3. 콘크리트에 삽입되기 전의 센서팩키지

이루어진다.

건조가 진행되고 있는 콘크리트의 상대습도를 측정하기 위해서는, <그림 4>에 보여지는 것과 같이 측정하고자 하는 깊이에서 센서를 정확히 설치할 수 있는 특수한 형태의 몰드를 사용하였다. 콘크리트의 경화가 시작되면, 측면의 판들을 제거하여 양면이 동일한 건조 조건에 노출되도록 하였다. 이러한 장치를 통하여 건조가 진행되어가고 있는 중의 콘크리트 내부의 상대습도의 변화 과정을 측정하였다.

센서의 팩키지는 콘크리트의 배합 이전에 미리 준비하여 두었으며, 끝부분은 플라스틱 튜브에 단단히 고정되어 타설시에 분리가 되지 않도록 접착제를 사용하여 제작하였다. 이때 주의하여야 할 것은 접착제의 사용 후 센서를 삽입하기 전에 충분한 접착제의 건조 시간을 가져한다. 이는 접착제로부터 발생하는 증기가 센서를 오염시켜 정밀도에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 이러한 과정을 거쳐 완성된 센서의 팩키지는 특수하게 제작된 몰드에 거치되고 콘크리트를 타설한다.

낮은 물-시멘트비를 가지는 콘크리트에서는 상대적으로 크기

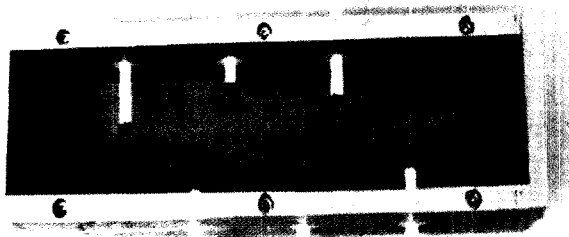


그림 4. 깊이별로 콘크리트 내부의 상대습도를 측정할 수 있도록 제작된 몰드

가 큰 모세공극(capillary pore)에서 수분의 손실이 센서가 내부의 상대습도와 평형을 이루기 이전에 발생할 수 있다. 따라서, 측정된 상대습도의 값은 자가수축(self-desiccation)이 발생하기 전에(즉, 상대습도가 97~98% 이하) 재료 내부의 상대습도의 최대치 값에 못 미칠 수도 있다. 이러한 문제가 발생한 경우에는 센서가 콘크리트에 설치되기 전에 미리 높은 상대습도의 조건에 노출시켜 전처리(pre-conditioning)할 수 있다. 예를 들면, 밀봉된 용기에 물을 넣고 센서를 노출한 뒤 재빨리 콘크리트에 삽입하는 방법이 있다.

5. 자유건조수축

콘크리트 시험체의 자유건조수축은 시험체의 형상 및 크기에 따라 다양한 방법으로 측정이 가능하다. 하지만, 본 연구에서는 상대습도 측정을 위한 시험체와 같은 단면적 및 노출 표면적 대비 체적의 비를 가지는 시험체를 활용하여 자유건조수축을 측정한다. 이는 두 가지의 시험체들이 즉, 상대습도 및 자유건조수축 시험체가 동일한 건조 환경에 노출되게 하기 위함이다.

본 연구에서 제시하는 모델은 시험체의 단면에 있어 발생하는 건조수축은 단면에 걸쳐 동일한 크기로 발생한다는 현상(translational symmetry)을 가정하고 있다²⁾. 이러한 가정은 자유건조수축 시험체의 단면에서 건조수축의 변화 구배가 구체적으로 측정되지 않는다면 유효한 가정으로 받아들여 질 것으로 판단된다.

6. 구속으로 인한 발생 응력과 탄성계수

건조수축으로 인한 콘크리트의 거동이 완전히 구속되어 있다면, 내부의 상대습도의 변화 구배에 의하여 발생하는 응력과 함께 시험체의 단면에 걸쳐 동일한 크기의 인장응력이 작용하고 있다. <그림 5>에서는 거동이 완전히 구속된 시험체에 있어 구속으로 인하여 단면에 동일 크기로 작용하는 응력과 자유건조수축으로 인한 단면에 구배를 가지는 응력의 중첩을 통하여 작용하고 있는 응력의 합을 표현하고 있다.

구속된 시험체의 건조수축으로 인한 응력을 산정하기 위하여 피드백 정보를 활용한 일방향 구속 실험 장치를 사용할 수 있다^{1,6,22,25,26)} <그림 6>. 의 일방향구속 실험 장치는 어느 정도의 특정 경계크기(threshold)까지의 수축은 허용하지만, 수축이 경계크기를 초과할 경우에는 시험체를 원래의 초기 변형 상태로 되돌려 놓는다. 이때 발생하는 인장응력은 다음의 경계크기의 수축이 발생하기까지 일정하게 작용하게 된다. 이러한 과정을 통하여 주기적으로 발생하는 인장응력은 계속하여 축적되게 되

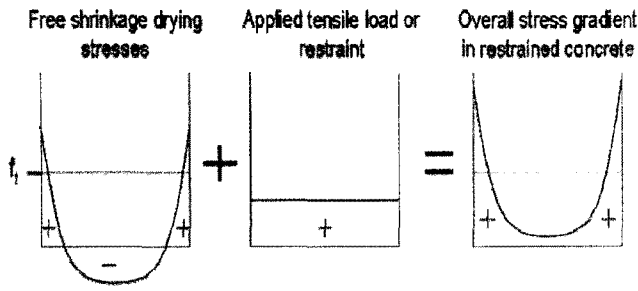


그림 5. 구속으로 인한 인장응력과 건조수축응력 구배의 중첩

며 이러한 인장응력의 작용 이력을 통하여 재령에 따른 콘크리트의 탄성계수 변화를 추적할 수 있다.

7. 모델링

〈그림 6〉의 시험 장치를 통하여 측정된 복합수축으로(bulk shrinkage 와 drying shrinkage의 구분을 분명히 할 것) 인하여 콘크리트 시험체에 발생하는 응력은 복합수축으로 인한 변형률, 순수 자유건조수축 변형률 및 크리프 변형률이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 본 연구에서 제시된 모델은 시험체의 단면에 있어 발생하는 건조수축은 단면에 걸쳐 동일한 크기로 발생한다는 현상(translational symmetry)을 가정하고 있으며 〈그림 7〉에서는 내적 구속으로 인하여 발생하는 변형률의 평형 상태에서의 측정 시점에서의 변형률의 차이를 보여주고 있다.

이러한 이유로 인한 변형률의 차이는 단면에 있어 응력의 발생으로 이어질 것이다. 이때 일부의 변형률은 크리프(인장크리프)에 의하여 이완될 것이며 최종적으로 측정된 복합변형률, ϵ_T 는 다음의 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\epsilon_T = \epsilon_{sh} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{el} \quad (3)$$

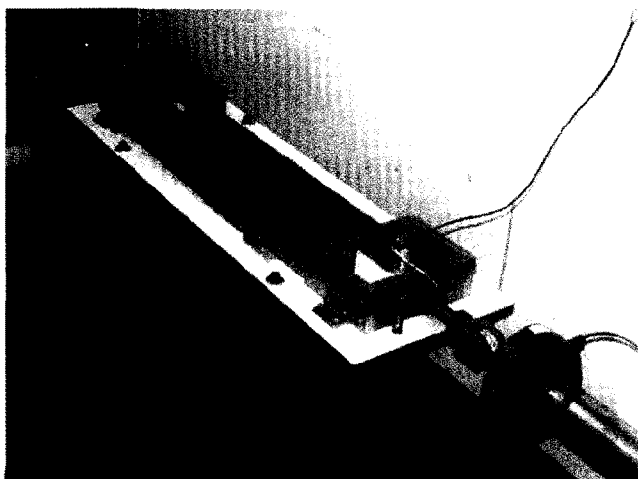


그림 6. 구속으로 인하여 발생하는 응력을 측정하기 위한 일방향 구속 실험 장치

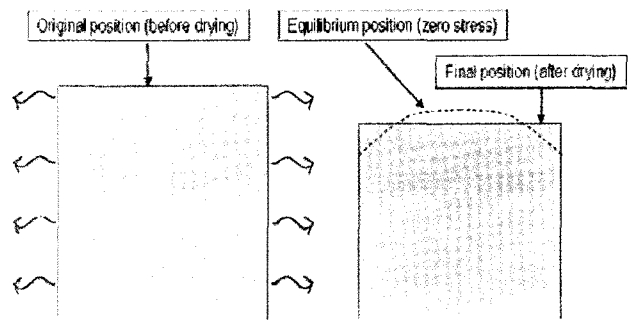


그림 7. Translational symmetry를 가정한 경우의 건조수축에 의한 응력 발생

여기서, ϵ_{sh} 는 순수 자유건조수축에 의한 변형률, ϵ_{cr} 은 크리프 작용에 의하여 이완된 변형률, 그리고 ϵ_{el} 은 작용하는 인장 응력에 의한 변형률이다. 콘크리트 내부 단면의 어떤 점에서 작용하는 불구속 상태의 순수 자유건조수축 변형률, ϵ_{sh} 는 내부상대습도의 측정을 통하여 산정할 수 있다. 식 (1)의 Kelvin-Laplace 방정식을 이용하면 측정된 상대습도의 값으로 공극수 내에 작용하는 음의 압력을 계산할 수 있다.

Mackenzie(1950)¹⁶⁾는 탄성을 가지는 재료의 원통형의 공극에 정수압과 비례하는 선형 변형률의 관계식을 제시한 바 있다. 선형 변형률은 다음의 식 (4)를 통하여 계산되어진다.

$$\epsilon = p \left[\frac{1}{3k} - \frac{1}{3k_0} \right] \quad (4)$$

여기서, ϵ 은 선형 변형률, p 는 정수압의 평균크기(이는 Kelvin-Laplace 방정식의 σ 에 해당), k 는 공극을 포함하는 고체의 평균 탄성계수, k_0 는 공극을 제외한 재료 자체의 평균 탄성계수이다. 여기서 사용된 식 (4)는 완전히 포화된 상태의 고체에서는 사실이지만 부분적인 포화 현상을 보이는 시멘트풀에서는 부분적으로만 적용된다. 따라서 Bentz 등³⁾은 식 (4)를 포화계수를 포함하는 식으로 수정하였다. 아래의 식 (5)는 포화계수를 포함하는 수정된 식이며 이는 부분적으로 포화된 매체에 있어 적절히 사용될 수 있음을 증명한 바 있다.

$$\epsilon = pS \left[\frac{1}{3k} - \frac{1}{3k_0} \right] \quad (5)$$

여기서, S 는 포화계수이다. 이때의 포화계수는 측정된 내부의 상대습도 값으로부터 추정될 수 있다. 하지만 보다 정확한 포화

계수를 결정하기 위하여는 콘크리트 시험체의 절단된 단면의 여러 지점에서 증발 가능한 수분의 측정이 필요하다. 한편 콘크리트는 골재를 포함하는 재료적인 복합체이며 골재에서는 수축이 발생하지 않는다. 식 (5)에는 이러한 영향을 고려하고 있지 않고 있으며 아래의 식 (6)은 골재가 콘크리트 내부에 차지하고 있는 체적 비율에 대한 영향을 포함하는 수정된 식이다.

$$\epsilon = pS \left[\frac{1}{3k} - \frac{1}{3k_0} \right] \frac{V_p}{V_c} \quad (6)$$

여기서, V_p/V_c 는 콘크리트 대비 시멘트풀의 부피 비율이다. Pickett²¹⁾은 콘크리트에서 발생하는 수축에서 시멘트풀에서 발생하는 수축의 크기 관계를 규명한 바 있으며 본 연구에서는 골재에 의하여 발생하는 수축에 대한 구속은 무시하기로 한다.

잠재응력(potential stress) 또는 크리프의 영향을 제외한 경우의 응력의 크기는 아래의 식 (7)과 같이 측정된 콘크리트의 탄성계수를 변형률에 곱하여 구할 수 있다.

$$\sigma_{pot} = (\epsilon_T - \epsilon_{sh}) E_{concrete} \quad (7)$$

여기서, $E_{concrete}$ 는 측정된 콘크리트의 탄성계수이다. 크리프(인장크리프)에 의하여 이완된 응력은 잠재응력의 함수이며 크리프의 크기를 예측하는 모델을 사용하여 구할 수 있다. RILEM²³⁾의 B3 모델은 재료의 응결이론(solidification theory)에 기초하여 콘크리트의 크리프 변형률을 계산하는 방법을 제시하고 있다. 만약 일정한 크기의 응력(σ)이 재령(일) t' 에 작용한다면, 콘크리트에 작용하는 복합변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_T = J(t, t') \sigma + \epsilon_{sh}(t) + \alpha \Delta T(t) \quad (8)$$

여기서, $J(t, t') \sigma$ 는 탄성변형률과 크리프를 포함하는 컴플라이언스 함수이며, $\epsilon(t)$ 는 시간의존적 수축변형률, 그리고 $\alpha \Delta T(t)$ 는 온도 변화에 의한 변형률이다. 여기서 컴플라이언스 함수는 다음의 식 (9)에서와 같이 세 부분으로 나누어 질 수 있다.

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0) \quad (9)$$

여기서, q_1 은 단위응력에 의하여 즉각적으로 작용하는 탄성변형률, $C_0(t, t')$ 는 단위응력에 대한 기초 크리프 변형률, 그리

고 $C_d(t, t', t_0)$ 는 단위응력에 의한 건조수축에 의한 크리프 변형률이다. 기초 크리프 컴플라이언스 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_0(t, t') = q_2 Q(t, t') + q_3 \ln(1 + (t - t')^n) + q_4 \ln\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (10)$$

여기서, q_2, q_3 및 q_4 는 경험상수이며, $Q(t, t')$ 는 RILEM(1995)²³⁾에 구체적으로 명시되어 있는 식으로부터 추정되는 이항적분식이다.

한편 건조수축에 의한 크리프 컴플라이언스 함수는 다음과 같이 더 세부적으로 구분되어 표현되어진다.

$$C_d(t, t', t_0) = q_5 [\exp(-8H(t)) - \exp(-8H(t'))]^{1/2} \quad (11)$$

여기서, q_5 는 극한크리프 값과 상관있는 상수이며 H 는 콘크리트 시험체 단면의 상대습도의 평균값이다.

RILEM의 B3 모델은 콘크리트 시험체 전체에 발생하는 일반적인 크리프 변형을 예측하기 위한 예측 모델이지만 시험체의 단면이 유한한 폭을 가지는 일련의 보가 연속적으로 있다고 가정함으로써 본 연구에서 제시하는 모델에 적용이 가능하다. 각각의 이러한 보의 단면은 식 (7)로부터 구하여지는 각각 그 크기가 다른 잠재응력이 작용하고 있다고 가정할 수 있다. 컴플라이언스 요소 $C_0(t, t')$ 와 $C_d(t, t')$ 는 각각의 독립된 보에 대하여 계산되어진다. 한편 B3의 건조수축 크리프 컴플라이언스 함수에서 사용하는 내부 상대습도의 평균값 대신, 본 연구에서 제시하는 모델에서는 실제로 각각의 독립된 지점에서 측정된 내부의 상대습도값을 사용한다. 콘크리트 시험체의 단면의 특정 지점에서 크리프에 의하여 이완된 응력의 총합은 최종적으로 다음의 식과 같이 계산된다.

$$\sigma_{cr} = [C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0)] \sigma_{pot} E_{concrete} \quad (12)$$

크리프에 의하여 이완된 응력의 값이 결정되면(식 12 사용), 이를 식 (7)로부터 계산된 잠재응력으로부터 감하면 콘크리트 시험체의 각 단면에 실제로 작용하는 응력의 크기를 계산할 수 있다. <그림 8>은 본 연구에서 제시하는 수축 응력 변화 구배 모델을 위한 실험적 해석적 절차를 나타내고 있다.

8. 건조수축 응력 구배 결과

여러 가지의 다른 재료적 특성을 가지는 시험체에 대하여 수축 응력 구배를 <그림 8>의 절차를 통하여 계산하여 보았다¹⁰⁾. 실험은 23°C와 상대습도 50%를 유지하는 항온항습실에서 진행되었으며 콘크리트 시험체는 타설 후 23시간 동안 젖은 상태로 덮혀져 있었으며 탈형되고 난 후에는 윗면과 아랫면은 수분의 증발을 방지하기 위하여 알루미늄 테잎을 부착하여 건조 노출 환경으로부터 차단하였다.

<그림 9>는 사각형 시험체의 양 옆면이 건조에 노출될 경우에, 콘크리트 내부에서 발생하는 상대습도의 감소를 측정된 결과의 일반적인 형태를 나타내고 있다. 콘크리트의 노출 표면에서의 상대습도는 초기의 약 95% 전후에서 재령 3일에는 항온항습조의 대기조건인 약 50%로 감소하는 것으로 가정하였다. 나머지 데이터들은 모두 실측된 자료들이다. <그림 10>에서는 물-시멘트비가 0.44인 콘크리트와 0.32이고 시멘트의 18%가 실리카폼으로 치환된 콘크리트의 상대습도를 비교하고 있다. 물-시멘트비가 0.32인 경우에는 건조가 진행되는 속도가 현저히 낮은 것을 확인할 수 있다.

<그림 11>은 마찬가지로 양 옆면이 건조에 노출된 시험체를 활용하여 자유수축 콘크리트 시험체에서 측정된 응력 구배의 변화를 보여주고 있다. 표면에서는 인장응력이 작용하지만 수분이 있는 내부에서는 평형을 맞추기 위한 압축응력이 작용하고 있다. 표면 근처의 응력구배 곡선에서 편평한 부분은 계산된 인장

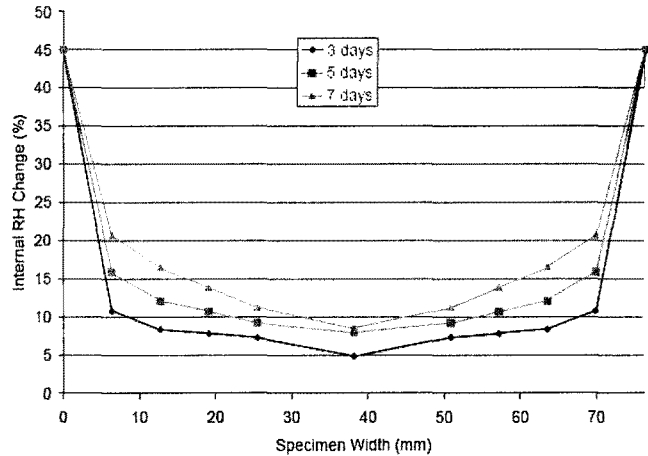


그림 9. 양면이 균등하게 건조하는 콘크리트의 내부 상대습도 감소

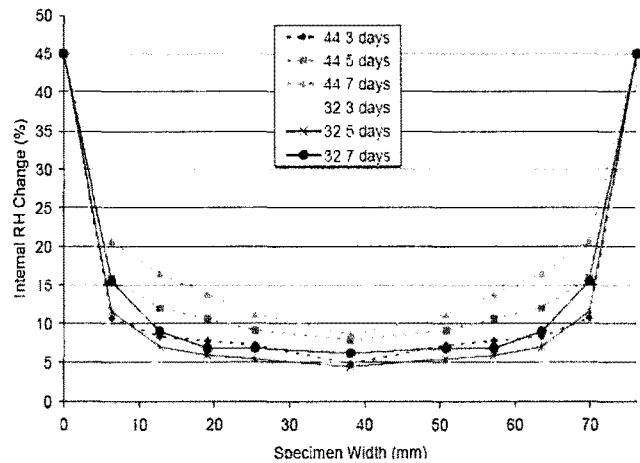


그림 10. 물-시멘트비의 변화(0.32와 0.44)에 따른 내부 상대습도의 감소 비교

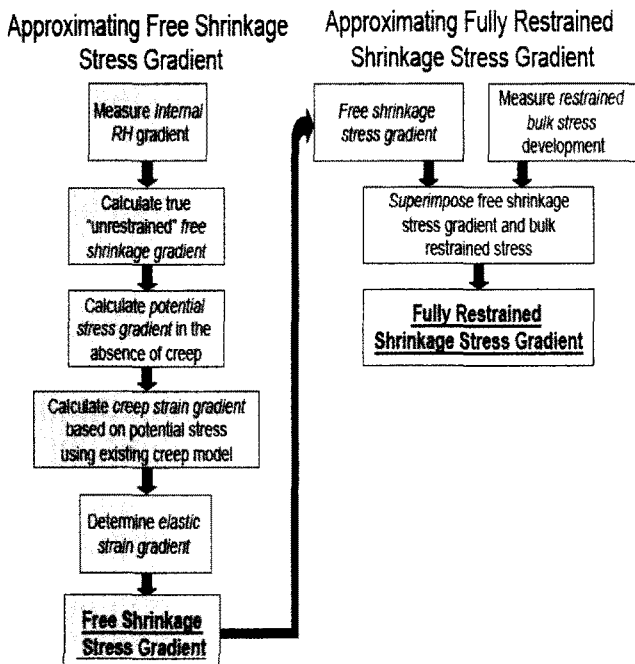


그림 8. 자유 또는 완전구속 건조수축응력 변화 결정의 흐름도

응력이 할렬 실험을 통하여 측정된 콘크리트의 인장강도를 초과하는 부분을 나타낸다. 이러한 부분들은 재료의 인장강도를 완전히 지지할 수 있는 손상부로 간주되며 주로 표면 근방에 미세 균열이 발생하는 부분을 표시한다. 이러한 표면 근방의 미세균열이 내부 수분의 변화 구배에 의하여 발생한 것이라는 연구가 많이 있다^{4,12,13)}.

<그림 11>의 자유건조수축 시험편의 결과로부터 건조가 진행됨에 따라 손상부의 깊이가 감소하는 것을 본 연구에서 제시하는 모델에서 잘 예측하고 있다. 수분의 변화 구배는 건조에 노출되는 초기에 아주 급격하며 내부의 상대습도가 대기 중의 상대습도와 평형을 이루어감에 따라 구배는 감소하게 된다. 따라서 손상부의 깊이가 더 이상 감소하지 않는다면, 미세균열은 시간이 경과함에 따라 닫혀지려는 경향이 있다¹³⁾.

<그림 12>는 완전히 구속된 시험체의 건조가 진행됨에 따라 응력 구배의 변화를 보여주고 있다. 완전한 구속이 된 경우, 시험체의 전단면에는 인장응력이 작용하고 있으며 인장강도의 평

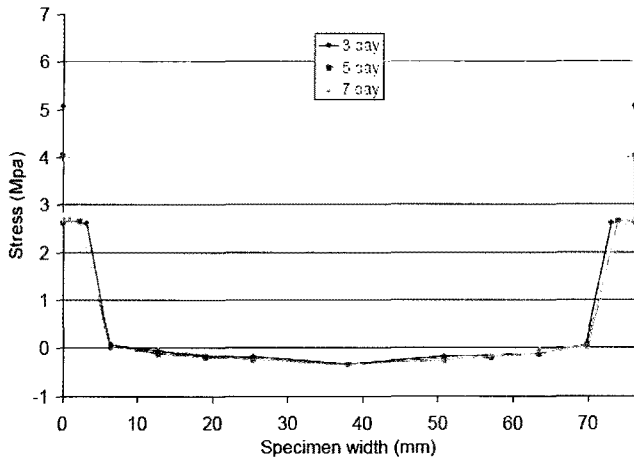


그림 11. 자유 건조수축 시험체의 응력 구배

균값은 건조가 진행됨에 따라 증가하게 된다. 자유건조수축 시험체와는 달리 건조가 진행됨에 따라 손상부는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

특성이 다른 콘크리트 시험체 간의 건조구배의 상대적인 변화 정도는 구속된 경우에 있어 균열이 발생하는 시간과 상관관계가 있다. <그림 13>에서는 물-시멘트비가 0.32에서 0.44까지 변화할 때, 응력의 변화 정도(구배의 급격도)의 최대치와 최종 파괴가 발생한 시간과의 상관관계를 나타내고 있다. 각각의 합에서 시멘트의 일부는 혼화재료로 치환된 배합이다. 이러한 상관관계는 향후 건조수축 응력 구배의 모델링과 배합 및 양생의 영향을 연구한다면 현장에서 건조수축에 의하여 발생하는 콘크리트의 균열에 대하여 많은 이득을 가질 수 있을 것이다.

9. 결론

건조수축으로 인하여 발생하는 균열은 콘크리트 내부에서 불균등하게 발생하는 건조로 인하여 발생하는 응력의 구배가 작을

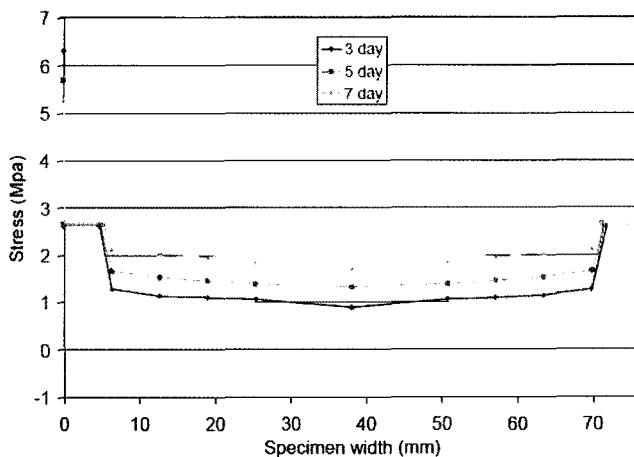


그림 12. 완전구속된 시험체의 응력구배

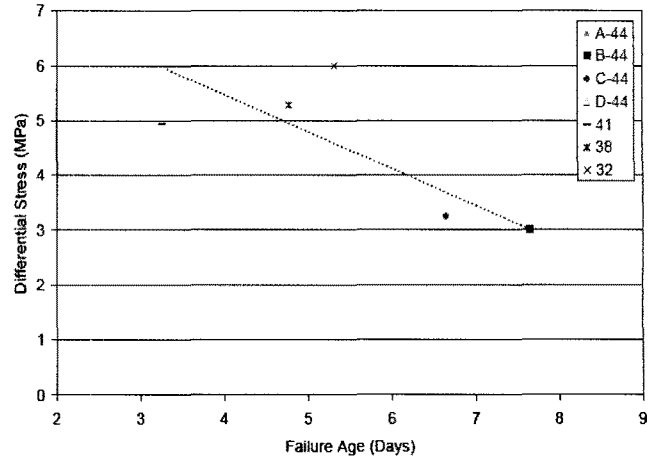


그림 13. 완전구속된 시험체의 건조 진행 정도와 균열발생 시간의 상관관계

하는 것이 분명하다. 본 연구에서는 건조수축으로 인한 응력을 추정할 수 있는 적절한 모델을 제시하고 있다. 제시된 모델은 내부의 상대습도를 측정하여 콘크리트 내부의 응력을 정량화하기 위한 기초 자료로 활용한다.

또한 본 연구에서 제시된 모델은 건조수축이 진행되는 콘크리트의 균열이 발생하는 잠재력을 연구하는데 중요하게 사용될 수 있다. 향후의 연구는 본 연구의 결과와 파괴역학과의 연관성을 활용하여 건조 표면에서 미세균열의 생성, 진전, 폭 등의 특성을 연구하는 것이다. □

참고문헌

1. Altoubat, S.A., *Early Age Stresses and Creep-Shrinkage Interaction of Restrained Concrete*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, 2000.
2. Bazant, Z.P. and Raftshol, W.J., "Effect of Cracking in Drying and Shrinkage Specimens", *Cement and Concrete Research*, Vol.12, 1982, pp.209~226.
3. Bentz, D.P., Garboczi, E.J., and Quenard, D.A., "Modelling Drying Shrinkage in Reconstructed Porous Materials: Application to Porous Vycor Glass", *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol.6, 1998, pp.211~236.
4. Bisschop, J., *Drying Shrinkage Microcracking in Cement-Based Materials*, Ph.D. Thesis, Delft University Press, Netherlands, 2002.
5. Bissonnette, B., Marchand, J., Charron, J.P., Delagrave, A., and Barcelo, L., "Early Age Behavior of Cement-Based Materials", *Materials Science of Concrete VI*, J. Skalny, S. Mindess, Ed., American Ceramic Society, 2001, pp.243~326.

6. Bloom, R. and Bentur, A., "Free and Restrained Shrinkage of Normal and High Strength Concretes", *ACI Material Journal*, Vol.92, 1995, pp.211~217.
7. Cady, P.D., Clear, K.C., and Marshall, L.G., "Tensile Strength Reduction of Mortar and Concrete Due to Moisture Gradients", *ACI Journal*, Nov. 1972, pp.700~705.
8. Gause, R.R. and Tucker, J. Jr., "Method for Determining the Moisture Condition in Hardened Concrete", *Journal of Research, National Bureau of Standards*, Vol.25, 1940, pp.403~416.
9. Grasley, Z.C., Lange, D.A., and D'Ambrosia, M.D., "Drying Shrinkage Stresses and Internal Relative Humidity in Concrete", Accepted for Publication in *Materials Science of Concrete VII*, J. Skalny, J.F. Young, Ed., American Ceramic Society, 2003.
10. Grasley, Z.C., Lange, D.A., and D'Ambrosia, M.D., "Embedded Sensors for Measuring Internal Relative Humidity in Concrete", Submitted to *Cement and Concrete Research*, 2003.
11. Grasley, Z.C., Lange, D.A., and D'Ambrosia, M.D., "Internal Relative Humidity and Drying Stress Gradients in Concrete", *Engineering Conferences International, Advances in Cement and Concrete IX*, Copper Mountain CO, 2003, pp.349~363.
12. Higgins, D.D. and Bailey, J.E., "A Microstructural Investigation of the Failure Behaviour of Cement Paste", *Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties*, Cement and Concrete Association, Slough, UK, 283, 1976.
13. Hwang, C.L. and Young, J.F., "Drying Shrinkage of Portland Cement Pastes I. Microcracking During Drying", *Cement and Concrete Research*, Vol.14, 1984, pp.585~594.
14. Jensen, O.M. and Hansen, P.F., "Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp.1859~1865.
15. Loukili, A., Khelidj, A., and Richard, P., "Hydration Kinetics, Change of Relative Humidity, and Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.577~584.
16. Mackenzie, J.K., "The Elastic Constants of a Solid Containing Spherical Holes", *Proc Phys Soc B*, Vol.683, 1950, pp.2~11.
17. McCarter, W.J., Watson, D.W., and Chrisp, T.M., "Surface Zone Concrete: Drying, Absorption, and Moisture Distribution", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Jan/Feb 2001, pp.49~57.
18. Mindess, S. and Young, J.F., *Concrete*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981.
19. Parrott, L.J., "Moisture Profiles in Drying Concrete", *Advances in Cement Research*, Vol.1, No.3, 1988, pp.164~170.
20. Persson, B., "Experimental Studies on Shrinkage of High-Performance Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, 1998, pp.1023~1036.
21. Pickett, G., "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis Concerning Shrinkage", *ACI Journal*, Vol.52, 1956, pp.581~590.
22. Pigeon, M., Toma, G., Delagrave, A., Bissonette, B., Marchand, J., and Prince, J.C., "Equipment for the Analysis of the Behaviour of Concrete Under Restrained Shrinkage at Early Ages", *Magazine of Concrete Research*, Vol.52, 2000, pp.297~302.
23. RILEM Draft Recommendation, "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3", Ed. Z.P. Bazant, S. Baweja, *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.357~365.
24. Sensirion, *Preliminary Specifications for SHT1x/SHT7x Humidity and Temperature Sensmitter*, Zurich, Switzerland, 2002.
25. Springenschmid, R., Breitenbücher, R., and Mangold, M., "Development of Thermal Cracking Frame and the Temperature-Stress Cracking Machine", *Proceedings of the International RILEM Symposium*, 1995, pp.137~144.
26. Van Bruegel, K., de and Vries, J., "Mixture Optimization of HPC in View of Autogenous Shrinkage", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Sandefjord, 1999, pp.1017~1026.
27. Yang, Q., "Inner Relative Humidity and Degree of Saturation in High-Performance Concrete Stored in Water or Salt Solution for 2 Years", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.45~53.