

초기재령 고강도 콘크리트의 자기수축 예측기술

Estimation Method of Autogenous Shrinkage at Early Age in High-Strength Concrete Structures



이광명*
Kwang-Myong Lee



이회근**
Hoi-Keun Lee

1. 서 론

최근 고성능 감수제와 실리카폼 등과 같은 혼화 재료들의 사용으로 고강도 및 고성능 콘크리트의 제조가 가능해지고, 이러한 고기능 콘크리트의 실제 적용이 증가하면서 초기균열의 원인 중의 하나인 자기수축에 대한 인식이 재고되기 시작하였다. 콘크리트의 자기수축은 물-결합재비(W/B)에 상관없이 모든 콘크리트에서 발생하나, 공학적으로 의미가 있는 자기수축은 W/B가 0.40 이하인 콘크리트에서 주로 발생하며, W/B가 낮을수록 잠재적인 자기수축은 더 커지기 때문에 고강도 콘크리트에서는 더 이상 무시할 수 없는 수축현상이다¹⁾. 이러한 자기수축의 대부분은 콘크리트의 인장강도가 낮은 재령 초기에 주로 발생하기 때문에 초기균열의 발생 가능성을 높일 수 있으며, 자기수축으로 인해 발생한 균열은 외부로부터 유해한 물질의 이동 경로를 제공하여 콘크리트 구조물의 내구 성능을 저하시켜 구조물의 사용 수명이 단축된다. 따라서 고강도 콘크리트의 균열 제어 및 내구적 성능 향상을 위해서는 초기균열의 주요 원인인 자기수축에 대한 올바른 이해와 정확한 측정 및 예측이 요구된다.

2. 자기수축의 정의 및 메커니즘

2.1 자기수축의 정의

1934년 Lyman²⁾은 자기수축을 '온도 또는 대기 중으로의 수분 손실 등에 의해 발생하는 수축들과 구별되는 수축'으로 정의하였다. 6년 후 Davis³⁾는 'autogenous'를 '외부로부터의 수

분 이동, 온도 변화, 그리고 외부 하중 또는 구속에 의한 응력 등의 원인 이외의 이유로 인해 질량 내부의 물리적, 화학적인 구조가 변화하여 콘크리트의 체적이 변화하는 현상'으로 정의하였다. 가장 최근에 일본 콘크리트공학협회의 자기수축 위원회⁴⁾에서는 자기수축을 '초결 이후에 시멘트가 수화할 때 발생하는 결합재의 체적 감소'로 정의하고, 자기수축에는 물질의 손실 또는 침투, 온도 변화, 외부 하중 또는 구속에 의한 수축은 포함되지 않는 것으로 명시하였다.

2.2 자기수축 메커니즘

자기수축은 외부로부터의 수분 공급이 없고 일정한 온도 하에서 시멘트의 수화반응에 의해 배합 시 사용된 배합수가 소비되면서 콘크리트 내부의 상대 습도가 감소하는 자기건조(self-desiccation) 현상에 의해 발생한다. 따라서 배합수량이 상대적으로 적은 고강도 콘크리트는 재령 초기에서부터 내부가 건조한 상태로 되기 쉽기 때문에 자기수축이 크게 발생할 수 있다.

콘크리트의 건조화는 콘크리트내의 모세관공극과 대기 중의 상대습도 불균형으로 인해 콘크리트 표면과 연결된 모세관공극 속에 있던 수분의 일부가 증발되어 나타난다. 콘크리트의 수분이 가장 처음 손실되는 부분은 콘크리트 표면 주위의 매우 큰 공극과 모세관공극 내에 있던 수분이며, 수분이 계속해서 증발함에 따라 크기가 작은 모세관 내에 메니스커스가 발생한다. 모세관공극 내에 발생한 모세관력은 모세관 직경에 반비례하며, 이러한 모세관력이 콘크리트의 인장 강도보다 작으면 콘크리트는 탄성적으로 수축한다. 만약 모세관력이 콘크리트의 인장 강도보다 크면 페이스트에 균열이 발생한다. 하지만, 수중 양생 하에 있는 콘크리트의 모세관공극은 모두 수분으로 채워져 있기 때문에 메니스커스가 발생하지 않으며 따라서 자기수축도 발생하지 않고 균열도 발생하지 않는다.

자기건조와 일반적인 건조의 차이를 살펴보면(그림 1), 자기

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수
leekm79@skku.edu

** 정회원, Dept. of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Canada, 박사후 연구원
actcon91@dreamwiz.com

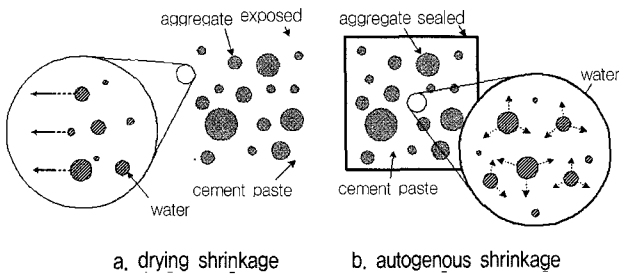


그림 1. Comparison of moisture transportation between drying and autogenous shrinkage

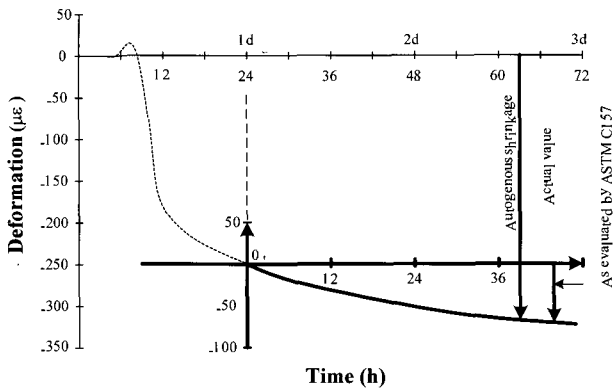


그림 2. Why ASTM C 157 test method cannot be used to measure autogenous shrinkage of concrete with low W/B?

건조는 수분 공급이 차단된 콘크리트 내의 모든 곳에서 균일하게 진행된다. 하지만 일반적인 건조는 증발이 일어나는 콘크리트 표면에서 발생하기 시작하는 국부적인 현상으로, 콘크리트 미세구조의 다짐 정도와 대기의 건조 정도에 따라 다르다. 다시 말해, 건조수축은 수분이 외부로 증발하면서 발생하지만 자기수축은 수화반응에 의한 수분의 소비에 의해 발생한다. 하지만 콘크리트 내의 습도가 감소한다는 점은 동일하다. 고강도 콘크리트의 공극은 매우 미세하고 이미 자기건조로 인해 물이 소모되었기 때문에 고강도 콘크리트 표면에서의 건조화가 느리게 진행되어 건조수축 변형량은 일반 콘크리트에서 보다 적어진다. 따라서, 보통강도 콘크리트의 수축은 건조수축이 지배적인 반면에, 고강도 콘크리트의 경우에는 자기수축이 많은 부분을 차지한다.¹⁾

3. 자기수축 측정 방법

3.1 측정 시점의 중요성

지금까지 일반 콘크리트의 건조수축을 측정하기 위해 ASTM C157과 같이 표준화된 방법이 이용되어 왔으나 이러한 방법으로는 W/B가 낮은 고강도 콘크리트의 자기수축을 제대로 측정

할 수 없다. 자기수축은 배합 후 24시간 이전부터 발생하기 시작하기 때문에 콘크리트 전체 수축 또는 자기수축을 정확하게 측정하기 위해서는 초결시간 전부터 측정이 이루어져야 한다⁴⁾. Davis³⁾는 '경화된 콘크리트의 체적 변화를 결정하기 위해서는 콘크리트 타설시간부터, 그렇지 아니면 적어도 응결시간부터 체적 변화를 모니터링 해야 한다'고 언급하였다. 만일, W/B가 매우 낮은 콘크리트의 초기 길이 변화를 측정하고자 타설 후 처음 24시간을 기다린다면, <그림 2>에 나타난 바와 같이 자기수축의 대부분을 측정할 수 없게 된다. 따라서 최대 자기수축 변형률을 측정하기 위해서는 가능한 한 콘크리트 타설 후 수 시간 내에 측정을 시작해야 한다.⁵⁾

그러나 응결 전 콘크리트의 자기수축을 측정하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면, 굳지 않은 콘크리트의 길이를 정의하기 어렵고, 응결과 동시에 측정을 시작하는 것 또한 액성-소성의 한계를 명확히 하기 어렵기 때문이다. 이러한 문제를 해결하는 한 가지 방법은 자기수축을 응결 전부터 측정함과 동시에 구속 조건하에서 자기수축으로 인해 발생한 응력을 함께 측정하는 것이다. 그 후 응력이 발생하기 시작하는 순간의 자기수축 변형률을 0으로 하면 경화이후의 자기수축만을 측정할 수 있다⁶⁾. 또한, 콘크리트의 내부 미세 구조 성장 및 응결을 비파괴적인 방법으로 모니터링 함으로써 콘크리트의 응결 과정을 간접적으로 예측하여 자기수축의 발현 시점을 정할 수도 있다.⁷⁾

3.2 시멘트풀의 자기수축 측정

시멘트풀의 자기수축 측정은 기본적으로 두 가지의 방법으로 이루어져 왔는데, 하나는 시멘트풀의 체적 변화(volumetric deformation)를, 다른 하나는 자기수축을 선형적인 변형으로 간주하여 1차원적 변형(linear deformation)을 측정하는 것이다. 먼저, 시멘트풀의 자기수축으로 인한 체적 변화를 측정하기 위해 가장 일반적으로 사용된 방법으로는 <그림 3>에 나타난 바와 같이, 아직 굳지 않은 시멘트풀을 고무풍선에 넣어 수조에서 양생시킨다. 즉, 시멘트풀의 체적 변화에 따른 수조 내 물의 변화를 측정함으로써 시멘트풀의 체적 변화를 측정한다. 이 방법은 타설 직후부터 측정할 수 있는 장점이 있으나 시멘트풀과 고무 풍선사이에서 블리딩이나 연행 공기의 영향으로 고무풍선의 체적 변화가 시멘트풀의 체적 변화와 일치하지 않을 수 있다는 단점이 있다. 또한 고무풍선의 조여짐으로 인해 응결 전 매우 약한 시멘트풀의 변형으로 체적 변화가 생겨 이로 인한 오차가 발생할 수 있다.⁸⁾

다음은 <그림 4>에서 보듯이, 3차원 현상인 자기수축 변형률을 1차원적인 변형률로 간주하여 측정하는 방법으로, 마찰이

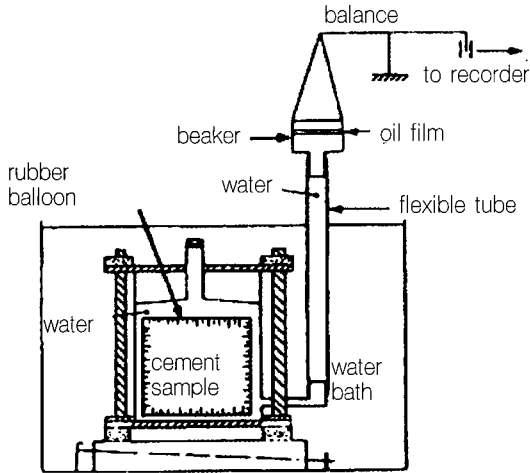


그림 3. Apparatus for measurement of volumetric autogenous deformation of cement paste⁸⁾

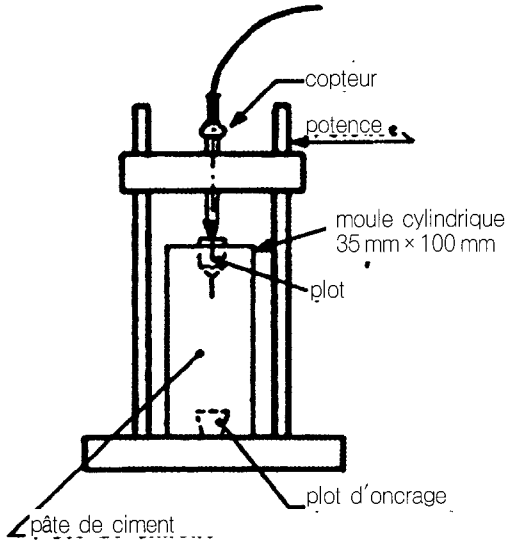


그림 4. Apparatus for measurement of linear autogenous deformation of cement paste⁹⁾

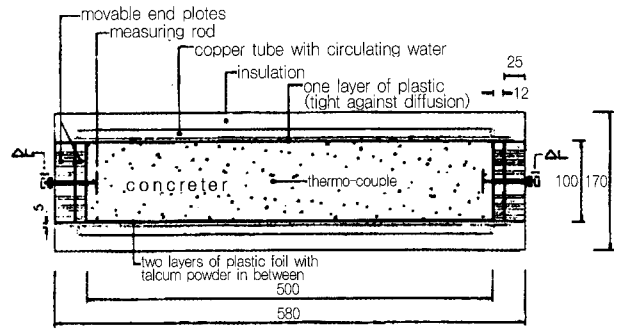


그림 5. Measuring system with cast-in nails¹⁰⁾

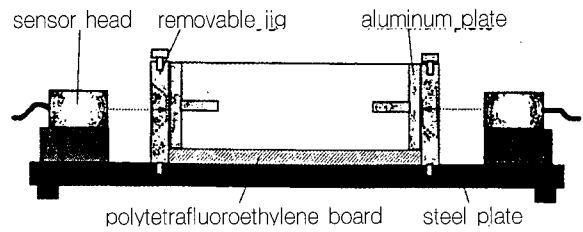


그림 6. Measuring system with movable end plates in 40x40x160 mm beam¹¹⁾

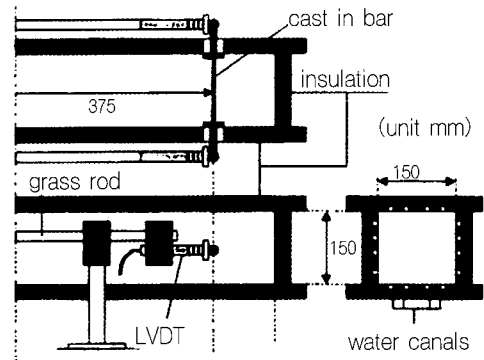


그림 7. Measuring system with horizontal cast-in bar in a 150x150x1000 mm beam¹³⁾

적은 몰드에 시멘트풀을 넣고 시편의 길이 변화를 측정함으로써 자기수축 변형률을 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 응결 전 소성 상태에서는 시멘트풀의 길이를 정의하기에 어렵기 때문에 시멘트풀이 응결된 이후부터 측정이 가능하다.⁹⁾

3.3 콘크리트의 자기수축 측정

콘크리트의 경우에는 굵은 골재가 고무풍선에 상처를 줄 수 있기 때문에 3.2절의 방법으로는 체적 변화를 측정할 수 없다. 따라서 <그림 5 ~ 7>에 나타난 바와 같이 각기 다른 선형적인 방법이 이용된다^{10~16)}. 수축으로 인한 변형량은 IDT나 LVDT 등을 이용하여 측정하는데, 근래에 들어서는 <그림 8 ~ 10>에

서와 같이 콘크리트 매입 게이지 등을 이용하기도 한다. 대부분의 자기수축 측정을 위해 각주형 시편이 사용되지만, <그림 11>과 같이 실린더 시편을 이용하여 시멘트풀 또는 콘크리트의 초기 변형을 측정할 수도 있다.

모든 자기수축 측정 시스템의 신뢰성을 결정하는 주요 변수로는 측정 장치와 콘크리트와의 정확한 접촉, 수분 손실 방지, 일정한 온도의 유지 등이 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 배합 직후 로드(rod)를 시편에 묻은 후에 측정 점을 고정시킴으로써 콘크리트와 측정 점과의 정확한 접촉을 유도하고, 마찰의 영향을 가능한 줄이고 수분 손실을 억제시키기 위해 플라 스틱 혹은 알루미늄 호일을 이용하여 시편을 덮는다. 또한 일정한 온도를 유지하기 위하여 항온 항습실이나 몰드 내에 차가

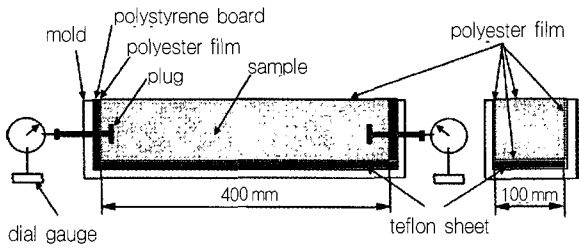


그림 8. Measurement length change before mold removal¹⁴⁾

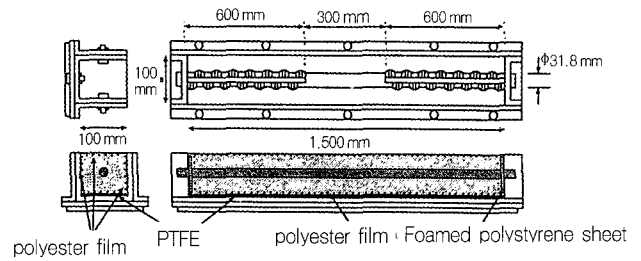


그림 12. Restraining body test⁴⁾

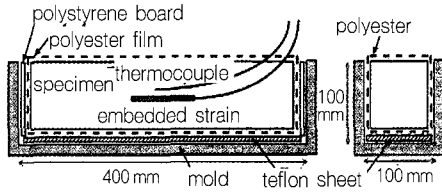


그림 9. Measurement length change using embedded strain gauge¹⁵⁾

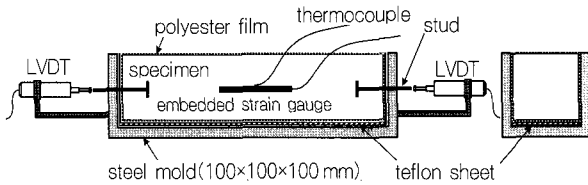


그림 10. Experimental setup for measuring the length change of concrete⁷⁾

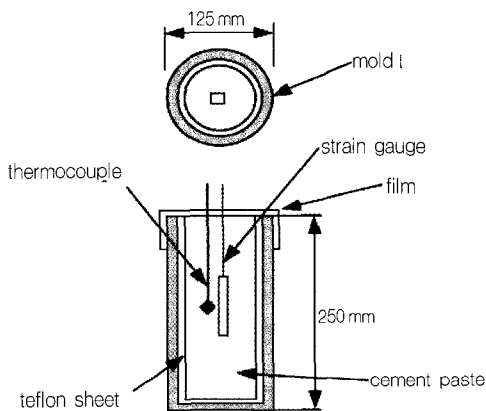
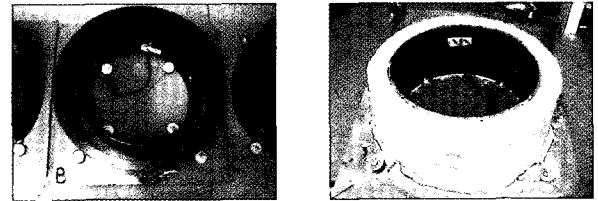
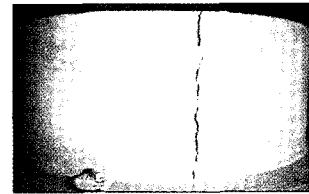


그림 11. Measurement of autogenous deformation using cylindrical specimen¹⁶⁾



a. Inner and outer steel mould

b. Removal of outer mould



c. Photo of crack

그림 13. Ring test¹⁷⁾

운 액체를 순환시키는 방법 등이 사용된다.

4. 자기수축으로 인한 구속 응력 측정

공학적인 측면에서는 자기수축의 크기 자체보다는 자기수축으로 인해 발생하는 응력과 이로 인한 균열 발생 여부에 더 많은 관심이 있다고 할 수 있다. 재령 초기에 큰 자기수축이 발생했다 하더라도 콘크리트의 강성(탄성계수)이 작으면 응력은

발생하지 않는다. 따라서 콘크리트의 강성이 발현되는 시점부터 자기수축으로 인해 발생한 응력이 균열 발생에 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 재령 초기에서의 응력 발생과 균열 발생 여부를 예측하기 위해서는 강도, 탄성계수, 그리고 인장 크리프 등이 중요한 인자가 된다.

자기수축으로 인한 응력을 정량적으로 측정하기 위하여 여러 가지 방법들이 이용되어 왔는데 대표적인 방법에는 일본 콘크리트공학회 자기수축 위원회에서 제안한 철근 구속 자기수축 응력 측정 방법(그림 12), 건조 수축과 온도 수축에 의한 균열 폭을 측정할 목적으로 사용되던 원환 응력 측정(ring test) 방법(그림 13), 구속으로 인한 응력을 측정할 수 있는 캔틸레버 보 시험 방법¹⁸⁾ 등이 있다. 이 중에서 원환 응력 시험은 콘크리트의 수축으로 인한 구속 응력 측정의 표준화된 방법으로 현재 ASTM의 표준방법으로 제안되어 있다. 이 방법은 직경이 서로 다른 링 사이에 콘크리트를 채운 후 내측 링에 설치한 변형률 게이지로부터 변형률을 모니터링하여 이로부터 콘크리트의 인장 크리프 계수와 콘크리트의 수축에 의한 응력을 구할 수 있다. 이 밖에도(그림 14 ~ 16)에 나타난 바와 같이, 콘크리트의 수축에 의한 구속 응력을 직접 측정할 수 있는 다양한 장치들이 개발되어 사용되고 있다.

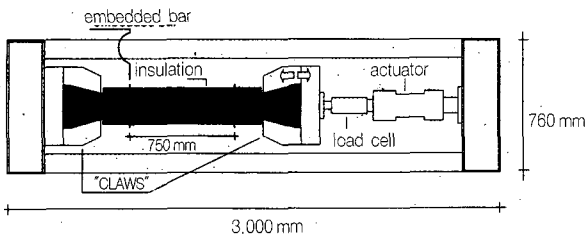


그림 14. Experimental setup for the determination of stress development in hardening concrete¹⁹⁾

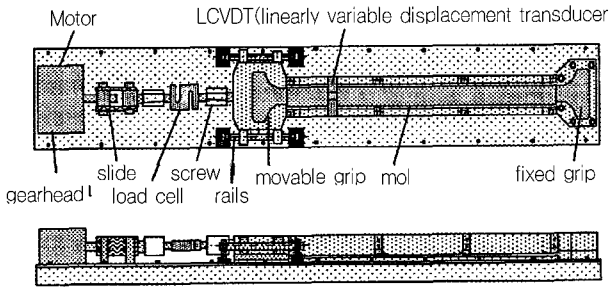


그림 15. Restrained shrinkage apparatus²⁰⁾

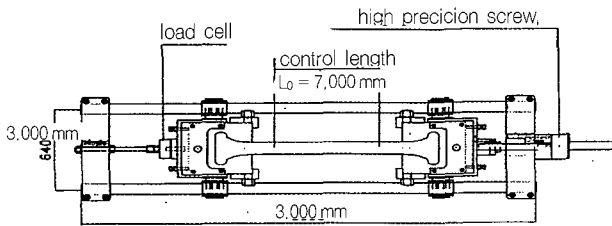


그림 16. The stress-rig²¹⁾

5. 자기수축 예측모델

5.1 일본 콘크리트공학협회 자기수축 위원회 모델⁴⁾

자기수축은 무엇보다도 W/B에 따라 크게 좌우된다. W/B가 감소함에 따라 자기수축은 증가하며, W/B가 낮은 콘크리트의 자기수축은 W/B가 높은 콘크리트 보다 더 빠르게 발생하고 이른 재령에서 최대값에 도달하게 된다. 이러한 관점에서, 재령에 따른 자기수축을 자기수축 최대값, ϵ_{∞} W/B와 시간에 따른 자기수축의 발현을 나타내는 계수 $\beta(t)$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{\infty}(W/B) \cdot \beta(t) \quad \text{식(1)}$$

$$\epsilon_{\infty}(W/B) = 3,070 \exp[-7.2(W/B)] \quad \text{식(2)}$$

$$\beta(t) = 1 - \exp[-a(t-t_0)^b] \quad \text{식(3)}$$

여기서, γ 는 시멘트와 혼화재의 영향을 나타내는 계수(보통

표 1. Constants, a and b, in Eq. (3)

W/B	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
a	1.2	1.5	0.6	0.1	0.03
b	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8

표 2. Coefficient of α_{as} in Eq. (4)

Cement type	α_{as}
Slowly hardening cement	800
Normal or rapidly hardening cement	700
Rapidly hardening high-strength cement	600

포틀랜드 시멘트의 경우 $\gamma = 1.0$), $\epsilon_{\infty}(W/B)$ 는 W/B에 따른 최대 자기수축 변형률($\times 10^6$), a, b는 상수 <표 1>, t_0 는 초결 시간(day), t는 재령(day)이다. 이 모델은 W/B가 0.20 ~ 0.56이고 보통의 골재 체적을 갖으며 콘크리트 주위 온도가 20 ~ 60°C인 경우에 유효하게 적용될 수 있다.

5.2 CEB-FIP 모델²²⁾

콘크리트의 총 수축량을 건조수축량과 자기수축량의 합으로 정의하고 있으나, 건조수축과는 달리 자기수축은 습도와 부재 크기에 따른 영향이 적으며 더 빠른 발현율을 나타내며 자기수축의 주된 인자로는 압축강도를 고려하였다.

$$\epsilon_{as}(t) = -\alpha_{as} \left[\frac{f_c'(t)/10}{6 + f_c'(t)/10} \right]^{2.5} \cdot [1 - \exp(-0.2\sqrt{t})] \quad \text{식(4)}$$

여기서, $f_c'(t)$ 는 재령 t에서의 압축강도(MPa), α_{as} 는 시멘트 종류에 따른 계수<표 2>, t는 재령(day)을 나타낸다.

5.3 Jonasson과 Hedlund 모델²³⁾

콘크리트의 자기수축은 재령 초기부터 발생하나, 재령 초기 콘크리트는 소성 상태이므로 공학적인 관점에서는 일반적으로 배합 후 24시간 이후부터의 응력과 변형이 유효하다고 보고 다음과 같은 식을 사용하여 재령 1일 이후의 자기수축을 예측하였다.

$$\epsilon_{as}(t) = [-0.65 + 1.3(W/B)]10^{-3} \cdot \exp\left[-\left(\frac{5}{t-1}\right)^{0.3}\right] \quad \text{식(5)}$$

5.4 Dilger와 Wang 모델²⁴⁾

실리카퓌의 사용 유무에 따라 W/B가 0.15 ~ 0.40인 범위에서 다음과 같은 식으로 자기수축을 제안하였다.

$$\epsilon_{as}(t, t_s) = \epsilon_{as}(t) - \epsilon_{as}(t_s) \quad \text{식(6)}$$

$$\epsilon_{as}(t) = \epsilon_{aso} \cdot \frac{t^{0.7}}{16.7(1 - \alpha_{as}) + \alpha_{as} \cdot t^{0.7}} \quad \text{식(7)}$$

$$\epsilon_{aso}(t) = 700 \cdot \exp[-3.5(W/B)] + 120: \text{실리카폼} \quad \text{식(8)}$$

$$\epsilon_{aso}(t) = 700 \cdot \exp[-3.5(W/B)]: \text{실리카폼 미사용} \quad \text{식(9)}$$

$$\alpha_{as} = 1.04 - \frac{1}{3}(W/B) \text{ for } 0.15 \leq W/B \leq 0.40 \quad \text{식(10)}$$

여기서, t 는 콘크리트의 재령(day)이며, t_s 는 수축이 시작시점으로부터의 재령(day)이다.

5.5 이광명 등의 모델⁷⁾

식 (1)의 일본 콘크리트공학협회의 자기수축 예측모델에서 최종 자기수축 변형률이 아닌 28일 자기수축 변형률을 사용하여 W/B 가 0.27 ~ 0.42인 콘크리트의 유효자기수축을 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{28}(W/B) \cdot \beta(t) \quad \text{식(11)}$$


$$\epsilon_{28}(W/B) = 2180 \exp[-7.6(W/B)] \quad \text{식(12)}$$

$$\beta(t) = \exp \left\{ a \left[1 - \left(\frac{28 - t_{1500}}{t - t_{1500}} \right)^b \right] \right\} \quad \text{식(13)}$$

여기서, $\epsilon_{as}(t)$ 는 재령 t 에서의 자기 수축 변형률($\times 10^{-6}$), $\epsilon_{28}(W/B)$ 는 재령 28일 OPC 콘크리트의 자기수축 변형률($\times 10^{-6}$), $\beta(t)$ 는 시간에 따른 자기 수축 발현 속도, γ 는 시멘트 종류 또는 혼화제에 따른 계수, a , b 는 W/B 와 혼화제 사용량에 따른 상수, t_{1500} 은 초음파 속도가 1500 m/s에 도달했을 때의 시간(day)이다.

6. 결 론

본고에서는 콘크리트의 체적 변화의 하나인 자기수축에 대한 정의와 발생 메커니즘, 측정 방법, 그리고 예측 모델 등에 대해 알아보았다. 앞에서도 언급한 바와 같이, 재령 초기에서의 콘크리트 체적 변화는 여러 가지 다른 형태의 수축으로 나타나며, 그 중에서도 상대적으로 낮은 W/B 와 많은 결합재량

이 사용되고, 또한 콘크리트의 공학적인 성질 개선을 위해 여러 가지 혼화 재료들이 사용되는 고강도, 고성능, 자기충전 콘크리트 등과 같은 고기능의 콘크리트는 초기재령에 큰 자기수축을 나타낼 가능성이 매우 높다. 따라서, 이로 인해 콘크리트 구조물의 성능 저하 및 사용 수명 단축을 야기하는 균열 발생에 대한 우려가 높기 때문에 안정적이고 고품질의 고강도 콘크리트를 얻기 위해서는 자기수축에 대한 검토가 반드시 이루어져야 할 것이다. 

참고문헌

1. Aitcin, P. C., "High-Performance Concrete," E&FN Spon, London and New York, 1998.
2. Lyman, C. G., "Growth and Movement in Portland Cement Concrete," Oxford University Press, London, 1934, pp.24~45.
3. Davis, H.E., "Autogenous Volume Change of Concrete," Proceedings of the 43rd Annual Meeting, American Society for Testing Materials, Atlantic City, N. J., June, 1940, pp.1103~1113.
4. Japan Concrete Institute Technical Committee Report on Autogenous Shrinkage, "Autogenous Shrinkage of Concrete: Proceedings of the International Workshop," ed. Tazawa, E&FN Spon, London, 1998, pp.3~63.
5. Lepage, S., Dallaire, E., and Aitcin, P. C., "Control of the Development of Autogenous Shrinkage - Part One: Small Concrete Specimens," International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke 98, August 1998, Vol.4, pp.347~363.
6. Lura, P., "Autogenous deformation and internal curing of concrete," Ph.D. Thesis, Delft University, 2003.
7. 이광명, 권기현, 이희근, 이승훈, 김규용, "고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축특성", 한국콘크리트학회 논문집, 16권 5호, 2004, pp.621~626.
8. Setter, N. and Roy, D. M., "Mechanical Features of Chemical Shrinkage of Cement Paste," Cement and Concrete Research, Vol.8, No.5, 1978, pp.623~634.
9. Buil, M., "Studies of the Shrinkage of Hardening Cement Paste (in French)," Ph.D. Thesis, Rapport de recherche LPC No. 92, Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, Paris, France, 1979.
10. Bjontegaard, O., "Thermal Dilation and Autogenous Deformation as Driving Forces to Self-Induced Stresses in High Performance Concrete," Ph.D. Thesis, NTNU Division of Structural Engineering, Trondheim, Norway, 1999.
11. Morioka, M., Hori, A., Hagiwara, H., Sakai, E., and

- Daimon, M., "Measurement of Autogenous Length Changes by Laser Sensors Equipped with Digital Computer System," Autogenous Shrinkage of concrete, Ed. by Tazawa, E., E&FN Spon, London and New York, 1999, pp.203~210.
12. Holt, E. E. and Leivo, M. T., "Autogenous Shrinkage at Very Early Ages," Autogenous Shrinkage of concrete, Ed. by Tazawa, E., E&FN Spon, London and New York, 1999, pp.135~142.
13. Lokhorst, S. J., "Deformational Behavior of Concrete Influenced by Hydration Related Changes of the Microstructure," Research Report, Delft University, Delft, Netherlands, 1998.
14. Hansen, K. K. and Jensen, O. M., "Equipment for Measuring Autogenous RH-Change and Autogenous Deformation in Cement Paste and Concrete," Proceedings of International Research Seminar on Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology, Lund, Sweden, 1997, pp.27~30.
15. Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T., and Mori, H., "Effects of Artificial Lightweight Aggregate on Autogenous Shrinkage of Concrete," Cement and Concrete Research, Vol.29, No.4, 1999, pp.611~614.
16. Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., and Saito, T., "Effect of Fly Ash on Autogenous Shrinkage," Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp.473~482.
17. See, H. T., Attiogbe, E. K., and Miltenberger, M. A., "Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens," ACI Materials Journal, Vol.100, No.3, 2003, pp.239~245.
18. Igarashi, S., Bentur, A., and Kovler, K., "Autogenous Shrinkage and Induced Restraining Stresses in High-Strength Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 30, No.11, 2000, pp.1701~1707.
19. Lura, P., Breugel, K., and Maruyama, I., "Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete," Cement and Concrete Research, Vol.31, 2001, pp.1867~1872.
20. Toma, G., Pigeon, M., Marchand, J., Bissonnette, B., and Barcelo, L., "Early Age Autogenous Restrained Shrinkage: Stress Build Up and Relaxation," Proceedings of International Research Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Lund, Sweden, 1999, pp.61~71.
21. Bjmtgaard, O., Sellevold, E., and Hammer, T.A., "High Performance Concrete (HPC) at Early Ages: Self-Generated Stresses due to Autogenous Shrinkage and Temperature," Proceedings of International Research Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Lund, Sweden, 1997, pp.1~7.
22. CEB-FIP 2000, "Structural Concrete: Textbook on Behavior," Design and Performance, Vol. 1, Sprint-Druck Stuttgart, 1999, pp.43~46.
23. Jonasson, J. and Hedlund, H., "An Engineering Model for Creep and Shrinkage in High Performance Concrete," Proceedings of International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, Shrinkage 2000, Edited by Baroghel-Bouny, V. and Aïtcin, P. C., Paris, France, 2000.
24. Dilger, W.H. and Wang, C., "Creep and Shrinkage of High Performance Concrete," Creep and Shrinkage Structural Design Effects, Edited by Al-Manaseer, A., SP-194, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, pp.361~379.

도서소개

레미콘 플랜트 설비와 콘크리트 품질

◆ 소개

: ... 이 시리즈는 그간 각 분야별로 학회지 특집기사에 참여한 전문가들의 경험과 축적된 연구결과 및 국내외에서 개발된 각종 기술 등에 대하여 체계적이고 깊이 있는 내용을 수록하고 있어 관련분야에 종사하는 실무자나 학생들에게 매우 유익한 도서가 될 것이다.

- 저 자: 한국콘크리트학회
- 출판사: 기문당
- 발행일: 2004년 12월 30일
- 정 가: 10,000원(회 원: 8,000원)
- ISBN: 89-7086-631-0
- 총쪽수: 139 쪽(판형: B5)

