

자기건조수축을 고려한 고강도 콘크리트의 수축변형 특징에 관한 연구

Effect of Autogenous Shrinkage on Shrinkage behavior in High Stength Concrete

백낙승* 차수원** 이성철***
 Paek, Nak Seung Cha, Soo Won Lee, Seong Cheol

ABSTRACT

The shrinkage mechanism of high strength concrete is different from that of normal concrete. The shrinkage of normal concrete is subjected to evaporate moisture in concrete, but most shrinkage in high strength concrete is caused by chemical reaction. To analyze shrinkage of concrete exactly, it is necessary to divide drying shrinkage with autogenous shrinkage in terms of degree of hydration, especially in concrete with low W/C ratio. The proposed method can provide a rational basis for prediction of shrinkage in high strength concrete structure.

1. 서론

콘크리트의 건조수축은 시멘트의 특성에 기인한 것으로 물-시멘트비와 시멘트량에 가장 큰 영향을 받게 된다. 실제로 Fig. 1에서 보통콘크리트와 고강도 콘크리트에서 발생하는 수축메카니즘을 보면 낮은 물-시멘트 비를 갖는 고강도 및 고성능 콘크리트에서 대부분의 수분이 수화반응에 사용되고 있어 대기로 빠져나가는 수분으로 인한 콘크리트의 수축은 미미함을 알 수 있다.

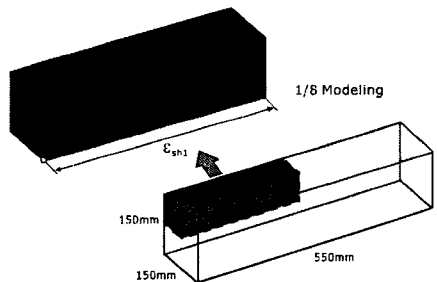


Fig. 1 Beam specimen geometry

그러나 현재

사용하고 있는 MC90 설계기준은 주요변수가 강도의 함수로서 콘크리트의 습도분포를 고려하고 있지 않고 있어 최근 사용이 증가하고 있는 고강도 및 고성능 콘크리트에는 적용하기 곤란하다. 콘크리트에 발생하는 수축변형을 예측하기 위해서는 좀 더 세분하여 접근할 필요가 있는데, Fig. 2와 같이 순수하게 수분의 대기중으로 소산되면서 발생하는 체적의 감소로 인한 건조수축변형률과 콘크리트 수화에 따른 수분의 자기건조(self-desiccation)로 인한 자기건조수축변형률(autogenous shrinkage strain)로 분리하여 접근하는 것이 합리적이다.

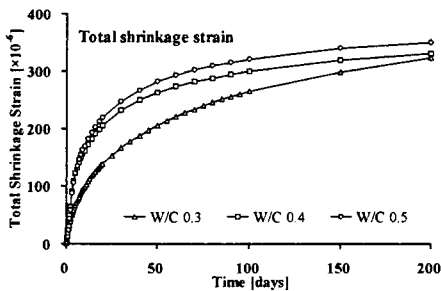


Fig. 2 Total shrinkage strain in different W/C ratio

* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학과 석사
 ** 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 교수
 *** 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학과 박사과정

2. 수화도의 수학적 모델

2.1 수화도의 정의

수화도는 시멘트의 반응정도에 비례하지만, 시멘트의 반응정도를 정량적으로 구하기 어렵다. 따라서 실제 수화도를 근사적으로 추정하는 수단으로, 일반적으로 수화반응에 기인한 발열량(Q)이나 결합수량(W_n)의 크기로 식 (1)과 같이 간접적으로 수화도를 표현할 수 있다.

$$\alpha_c = \frac{Q(t)}{\max Q} = \frac{W_n(t)}{\max W_n} \quad (1)$$

2.2 콘크리트의 수화도 예측모델의 개념

기존의 연구에 의하면 콘크리트의 수화 진행에 영향을 미치는 요인으로 온도에 관한 반응속도함수만을 고려하였으나, 실제 콘크리트 요소는 온도 뿐 만 아니라 내부 수분상태에 따라 수화도가 변화한다. 이는 다음 식 (3)과 같이 기준상태의 수화도의 반응속도에 세 가지의 속도함수의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha_c(t)}{\partial t} = \beta_T \beta_{W/C} \beta_w \frac{\partial \alpha_c(t_{eq})}{\partial t} \Big|_{ref} \quad (2)$$

여기서, 속도함수 β 의 아래첨자는 각각 양생온도(T , temperature), 물-시멘트비(W/C , ratio), 수분분포(w , water distribution)의 영향을 나타낸다. 식 (2)에서 수화도는 배합, 온도와 습도를 고려하므로 성숙도 개념 중 등가재령을 적용할 수 있고, 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_c = \exp\left(-\lambda_1 \ln\left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1}\right)^{-\kappa_1}\right) \quad (3)$$

여기서, λ_1 , t_1 , κ_1 는 시멘트의 화학조성에 따라 결정되는 재료상수이다. 식 (2)와 (3)에서 t_{eq} 는 양생온도와 내부수분상태가 상이한 경우 동일한 수화도를 얻는데 소요되는 등가재령을 나타낸다. 따라서, 등가재령은 다음 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{W/C} \beta_w dt \quad (4)$$

3. 온도와 습도의 비선형 해석모델

온도와 습도의 분포모델은 확산방정식을 기본으로 하여 수화반응시 발생하는 온도와 수분의 손실을 묘사할 수 있는 항이 필요하다. 온도와 습도의 확산방정식은 Table. 1과 같이 구성되어 있다.

Table 1. Thermal & Moisture Diffusion Equations

Diffusion equation	Main Variables	Transport parameters		
		Capacity	Conductivity	Source/Sink
$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \frac{\partial Q}{\partial t}$	T	ρc constant	k constant	$\frac{\partial Q}{\partial t}$
$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D_w \nabla^2 \varphi + \frac{\partial \varphi_s}{\partial t}$	φ	D_w		$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t}$

4. 자기건조수축의 특성평가

4.1 해석개요

콘크리트의 건조 및 자기건조 수축의 특성을 알아보기 위해 수화도에 따른 콘크리트 내의 수분과 온도의 비선형분포를 고려하여 해석하였다. Fig. 6과 같이 단면 형상이 150mm×150mm이고, 길이가 550mm인 빔 시험체의 1/8모델을 대상으로 Table 2와 3의 물성과 조건으로 해석하여, 자기건조수축의 특성을 알아보았다.

Table 2. Initial & boundary conditions

	Temperature field	Moisture field
Initial conditions	20℃	100%
Boundary conditions	<ul style="list-style-type: none"> • convection coefficient of heat - 12.0 kcal/m² · hr · ℃ • Ambient temperature - 20 ℃ 	<ul style="list-style-type: none"> • convection coefficient of humidity - 5.0 mm/day after 1day • Ambient relative humidity - 70 %

Table 3 Material properties

W/C Ratio	0.3	0.4	0.5
f_{ck} [MPa]	55	38.5	21
Young's modulus [MPa]	32240.2	28231.8	2.1538.1
Poission ratio		0.18	
Density [kg/m ³]		2500	
Specific heat [kcal/kg · ℃]		0.25	
Thermal conductivity [kcal/m · hr · ℃]		2.2	
Thermal expansion coefficient [1/℃]		1.0E-5	
Shrinkage coefficient [1/unit]		1.3E-03	
Initial setting time		after 1 day	
creep		CEB-FIP Model Code 1990	
Cement type		Type 5	

4.2 해석결과

각각의 물-시멘트비에 대한 콘크리트의 전체수축변형률은 Fig. 2와 같다. 초기에는 물-시멘트비에 따라 수축변형률이 차이를 보이지만, 200일 이후의 장기재령에서는 물-시멘트비에 상관없이 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타낸다.

Fig. 3에서는 물-시멘트 비에 따라 자기건조수축변형률이 구성하고 있는 부분을 나타내었다. 물-시멘트비가 낮을수록 전체 수축 변형률 중 대부분이 수화반응으로 인한 자기건조수축변형률이 차지하고 있으며 수화반응이 진행됨에 따라 계속해서 자기건조수축이 발생하는 것을 볼 수 있다. 높은 물-시멘트 비에서는 수화에 필요한 수분이 충분히 공급됨에 따라 대부분의 자기수축변형이 초기에 대부분 발생하며, 수축변형은 콘크리트내의 수분이 대기로 빠져나가면서 발생하는 건조수축의 지배를 받게 된다.

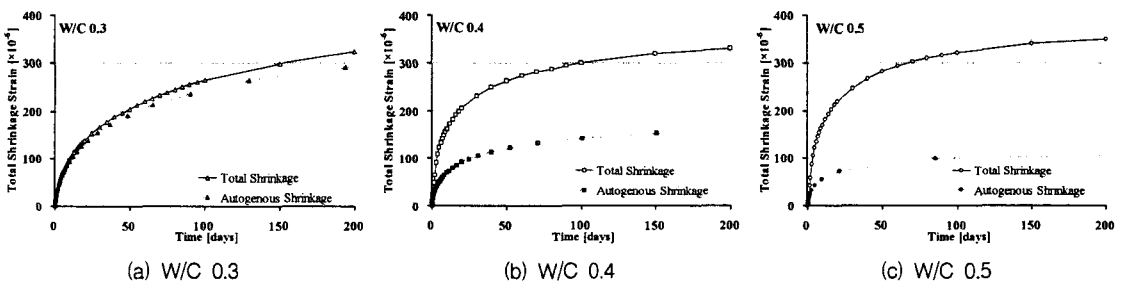


Fig. 3 Total & autogenous shrinkage strain

콘크리트 수화 초기에 물-시멘트비에 따른 자기건조수축은 Fig. 4에와 같다. 물-시멘트비가 0.4, 0.5에서는 초기강도 발현시점(1일)이후 건조수축으로 인한 수축이 발생하기 시작하는 것을 볼 수 있다. 반면 물-시멘트비가 0.3에서는 건조수축으로 인한 수축변형 보다는 자기건조수축이 양생초기에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig 5에서는 수화도에 근거한 수분의 비선형 분포를 고려한 모델과 CEB-FIP Model Code 1990(이하 MC90)과 그에 따른 Bulletin(이하 MC90 Bulletin)에서의 수축변형률을 물-시멘트 비에 따라 비교하였다.

물-시멘트비가 0.5인 경우는 MC90, MC90 Bulletin 큰 차이를 보이지 않고 있으나 물-시멘트비가 낮아질수록 자기수축을 고려하고 있지 않는 MC90은 전체적인 콘크리트의 수축변형률을 과소평가하고

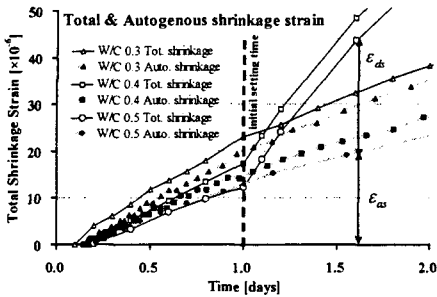


Fig. 4 Total & Autogenous shrinkage strain at early age concrete

있다. 낮은 물-시멘트비의 배합에서 자기건조수축을 고려하고 있는 MC90 Bulletin은 비교적 수축변형을 잘 예측하고 있으나 전반적으로 자기건조수축의 영향을 과소평가하고 있어, 물-시멘트비가 0.4, 0.5에서 초기의 콘크리트 수축변형을 과소평가하는 경향을 나타냈다.

5. 결론

콘크리트 내의 온도와 수분의 비선형 분포를 고려하여 콘크리트에 발생하는 건조수축 및 자기건조수축 응력을 평가하고, CEB-FIP Model과 비교하여 자기건조수축의 검토 필요성을 알아보았다. 연구로부터 내릴 수 있는 결론은 다음과 같다.

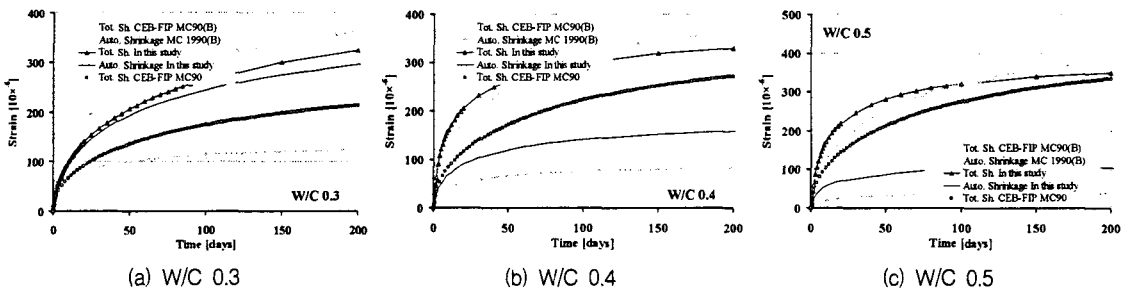


Fig. 5 Comparison with different shrinkage models

- (1) 많은 양의 시멘트와 낮은 물-시멘트비를 사용하는 고강도 콘크리트에서는 수분이 대기중으로 빠져나가면서 발생하는 건조수축보다 콘크리트의 수화반응으로 인하여 소모되는 수분의 손실인 자기건조수축이 지배적인 영향을 미치고 있기 때문에 해석시 이를 고려할 필요가 있다.
- (2) 현재의 콘크리트 재료에 대한 설계식으로 사용하고 있는 CEB-FIP Model Code 1990은 높은 W/C비의 콘크리트에 대해서는 적용에 큰 문제가 없지만, 낮은 물-시멘트비의 콘크리트에 대해서는 자기건조수축을 반영하지 못하고 과소평가하는 경향을 보인다.
- (3) CEB-FIP Model Code 1990의 Bulletin에서는 자기건조수축을 고려할 수 있는 항이 있어 자기건조수축이 지배적인 낮은 물-시멘트비의 콘크리트에 대한 해석도 가능하다. 그렇지만, 콘크리트 단면 위치에 따른 응력분포를 고려하지 못하고, 자기건조로 인한 수축응력을 과소평가하는 경향을 보인다.

참고문헌

1. Ei-ichi Tazawa(1998). "Autogenous Shrinkage of Concrete", Proceeding of the International Workshop organized by JCI(Japan Concrete Institute), 13-14, June, 1998, pp. 9~52
2. Cha, S. W.(1999). "Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygal Stresses in Hardening Concrete", PhD dissertation, Seoul national University, Seoul, Korea.
3. Choi, S. C.(2004). "Assesment of Risk for Early-age Transverse Cracking of Concrete Decks in Composite Bridges", PhD dissertation, Seoul national University, Seoul, Korea.
4. D. Stephan Lane(2003). "Development of Concrete Shrinkage Performance Specifications", Virginia Transportation Research Council, August, 2003
5. Bazant, Z. P., "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete", John Wiley and Sons, 1988, pp. 154~155, 180~182