

무작위 격자 모델을 이용한 파이버 보강 콘크리트의 건조수축 균열 거동 해석

Simulation of Cracking Behavior Induced by Drying Shrinkage in Fiber Reinforced Concrete Using Irregular Lattice Model

김근휘* · 박종민** · Bolander, John E.*** · 임윤목****
Kim, Kunhwi · Park, Jong Min · Bolander, John E. · Lim, Yun Mook

Abstract

Cementitious matrix based composites are vulnerable to the drying shrinkage crack during the curing process. In this study, the drying shrinkage induced fracture behavior of the fiber reinforced concrete is simulated and the effects of the fiber reinforcement conditions on the fracture characteristics are analysed. The numerical model is composed of conduit elements and rigid-body-spring elements on the identical irregular lattice topology, where the drying shrinkage is presented by the coupling of nonmechanical-mechanical behaviors handled by those respective element types. Semi-discrete fiber elements are applied within the rigid-body-spring network to model the fiber reinforcement. The shrinkage parameters are calibrated through the KS F 2424 free drying shrinkage test simulation and comparison of the time-shrinkage strain curves. Next, the KS F 2595 restrained drying shrinkage test is simulated for various fiber volume fractions and the numerical model is verified by comparison of the crack initiating time with the previous experimental results. In addition, the drying shrinkage cracking phenomenon is analysed with change in the length and the surface shape of the fibers, the measurement of the maximum crack width in the numerical experiment indicates the judgement of the crack controlling effect.

Keywords : fiber reinforced concrete, drying shrinkage, rigid-body-spring network, conduit element, semi-discrete fiber element

요 지

시멘트계 기질을 사용하는 복합재료는 재료 양생 과정에서 발생하는 건조수축 균열에 취약하다. 본 연구에서는 파이버 보강 콘크리트의 건조수축에 의한 파괴 거동을 시뮬레이션 하고, 파이버의 조건이 균열 특성에 미치는 영향에 대해 분석한다. 수치 해석 모델은 무작위 격자 형태의 기하학적 구조를 공유하는 관로 요소와 rigid-body-spring 요소로 구성되는데, 각 요소가 담당하는 비역학적-역학적 거동의 커플링에 의해 건조수축이 표현된다. 파이버 보강을 모델링하기 위해 rigid-body-spring network 내부의 semi-discrete 파이버 요소를 적용하였다. KS F 2424 자유 건조수축 실험을 해석하고 시간에 따른 건조수축 변형률 변화를 비교함으로써 재료의 건조수축 관련 계수들을 산정한다. 다음으로 여러 파이버 혼입률에 대해 KS F 2595 구속 건조수축 실험을 시뮬레이션 하고 균열 발생 일자를 선행 실험 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검증한다. 또한, 파이버의 길이와 표면 형태를 변화시켜 건조수축 균열 해석을 수행하고 최대 균열 폭을 측정하여 시뮬레이션에서 나타나는 균열 제어 효과를 판단한다.

핵심용어 : 파이버 보강 콘크리트, 건조수축, rigid-body-spring network, 관로 요소, semi-discrete 파이버 요소

1. 서 론

현대 공학에서 널리 사용되는 복합재료의 성질은 그 물질을 이루고 있는 각 재료의 강성, 인장·압축강도, 그리고 밀도 등의 역학적인 특성에 의해 결정된다. 특히 파이버(fiber) 보강 복합재료의 경우, 주재료 기질(matrix)과 보강재의 성질

뿐만 아니라 주재료와 보강재 사이의 경계면(interface)의 성질 또한 재료의 전체적 성능에 큰 영향을 미친다(Hahn and Tsai, 1980). 따라서, 복합재료의 거동을 제대로 이해하기 위해서는 각 재료의 특성과 경계면의 성질에 대하여 유기적인 이해가 필요하다.

한편, 주재료의 거동은 비역학적인 조건들에 의하여 그 체

*정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : kunhwi@yonsei.ac.kr)

**삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 주임 (E-mail : jm0227.park@samsung.com)

***Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, Associate Professor (E-mail : jebolander@ucdavis.edu)

****정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (E-mail : yunmook@yonsei.ac.kr)

적이 쉽게 변화하는데, 내부 습도(Filho 등, 2005), 화학 성분의 변화(Lin 등, 2008), 혹은 내부 발열에 의한 온도 변화(Shabana 등, 2006) 등에 의한 거동 변화가 그 예이다. 일반적으로 이러한 비역학적 조건에 의한 체적 변화는 물질 내부에서 자연적으로 발생하는 것이 아니라 물질 외부의 비역학적 조건의 차이에 대해 평형 상태를 찾아가는 형태로 나타난다. 즉, 물질과 외부의 접촉면에서부터 변화가 시작되어 물질 중심부에 변화가 일어날 때까지 시간차가 존재하게 된다. 비역학적 조건의 변화가 물질 내부의 위치에 따라 불균등함에 따라, 물질의 팽창과 수축이 다르게 나타나 역학적으로 하중이 가해지지 않은 상태라 하더라도 내부 응력이 발생하게 된다. 이러한 내부 잔류 응력의 발생은 복합재료 전체의 역학적 거동에 영향을 줄 수 있다.

토목공학 분야에서 주로 사용되고 있는 시멘트 복합재료는 타 재료에 비해 재료의 내부 응력에 대한 연구가 상대적으로 미비한 편이다(Chandlera 등, 2000; 김은겸 등, 2005). 콘크리트로 대표되는 시멘트계 복합재료들은 금속이나 세라믹과 같은 균질 재료에 비해 다양한 성분을 갖고 그 구성 형태가 불균일하기 때문에 미세 거동을 정확히 알기 힘들다. 또한, 콘크리트의 체적 변화의 주된 원인은 온도(Schulsona 등, 2001; Papayianni and Valliasis, 2005)와 습도(Neto 등, 2008; 이창수 등, 2009) 등의 변화로서, 재료 양생 후 평형 상태가 되면 내부 응력이 다시 감소하기 때문에 실제 사용 구조물에서 나타나는 주요 문제로 고려되지는 않았다. 그러나 인장 거동에 취약한 콘크리트 재료는 건조수축과 같은 체적 변화 과정에서 내부 응력에 의해 균열이 발생하기 쉽다. 재료의 균열은 재료의 역학적 성능을 저하시키는 물론 내구성을 포함한 부가적인 문제에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 시멘트 복합재료의 내부 응력에 대한 연구가 더욱 필요한 실정이다.

본 연구에서는 파이버 보강 콘크리트의 건조수축에 의해 재료 내부에 발생하는 응력이 표면에 균열을 발생시키는 과정과 균열에 의한 역학적 거동 변화를 수치 해석을 통해 시뮬레이션 한다. 콘크리트 기질과 파이버의 역학적 거동을 표현하기 위하여 무작위 격자 모델(irregular lattice model)의 일종인 rigid-body-spring network와 semi-discrete 파이버 요소를 사용한다. 또한, 무작위 격자 모델의 기하학적 구조를 공유하는 관로(conduit) 요소를 이용하여 각 위치에 따른 습도의 변화를 계산하고 재료 내부의 수분 확산과 표면의 수분 건조를 표현한다. 파이버 보강 콘크리트의 자유 건조수축 실험과 구속 건조수축 실험을 시뮬레이션하고 실제 실험 결과와 비교하여, 수치 해석 모델의 신뢰성을 확인한다. 마지막으로 재료 내부의 파이버의 조건들을 변화시켜가며 건조수축 균열 발생을 해석하고, 파이버 보강에 따른 균열 제어 효과를 분석한다.

2. 수치 해석 모델의 적용

2.1 파이버 보강 콘크리트의 파괴 모델

Rigid-body-spring network(이하, RBSN) 모델은 기존의 beam-spring network 모델의 발전된 형태로서 Kawai(1978)에 의해 처음 제안되었다. 해석 대상은 그림 1(a)와 같이

Delaunay-Voronoi 분할에 의해 정의된 불규칙한 형태의 강체 입자들로부터 이루어져 있고, 각각의 입자는 주변 입자들과의 경계면(facet)에 일정량의 강성을 가진 6 자유도의 스프링 세트에 연결되어 있다. 그림 1(b)의 요소 지역좌표계($n-s-t$) 내에서 병진운동에 대한 스프링 강성은 요소의 위치관계에 따라

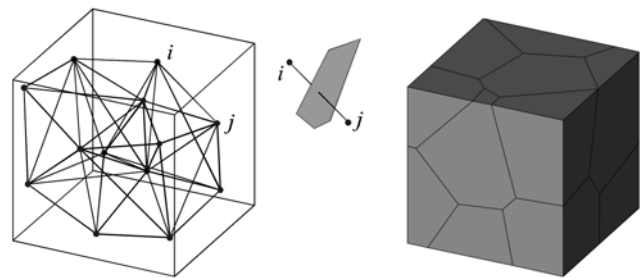
$$k_n = k_s = k_t = E \frac{A_{ij}}{h_{ij}} \quad (1)$$

와 같고, 각 좌표축 회전운동에 대한 스프링 강성은 다음과 같이 결정된다.

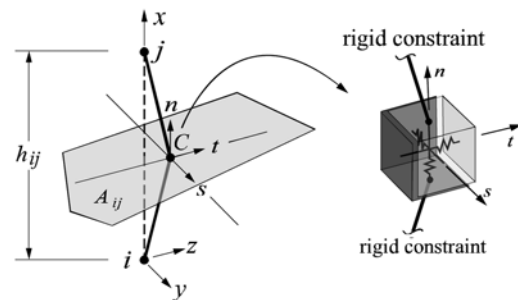
$$k_{\phi_n} = E \frac{J_p}{h_{ij}^3}; k_{\phi_s} = E \frac{I_{ss}}{h_{ij}^3}; k_{\phi_t} = E \frac{I_{tt}}{h_{ij}^3} \quad (2)$$

여기서 E 는 물질의 탄성계수이고, A_{ij} 와 h_{ij} 는 각 입자면(facet)의 넓이와 입자 사이의 거리를 의미한다. 또한 J_p 는 입자면의 극관성 모멘트이고, I_{ss} 와 I_{tt} 는 면의 전단 방향($s-t$)에 대한 관성 모멘트이다. 이와 같이 무작위로 나뉜 요소 형태에 의해 재료의 불균일성을 표현할 수 있으므로, 여러 해석적 연구에서 콘크리트의 파괴 거동을 효과적으로 표현하는데 사용되었다(Bolander and Saito, 1998; Bolander and Berton, 2004).

콘크리트의 파괴는 Bazant와 Oh(1983)의 crack band 개



(a) Voronoi-Delaunay 분할



(b) 입자면에 존재하는 RBSN 스프링 세트

그림 1. RBSN 모델링 및 요소 스프링 세트 구성

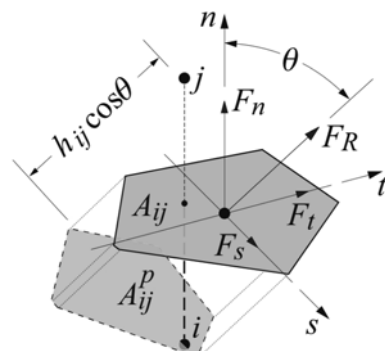


그림 2. 입자면에 작용하는 합력

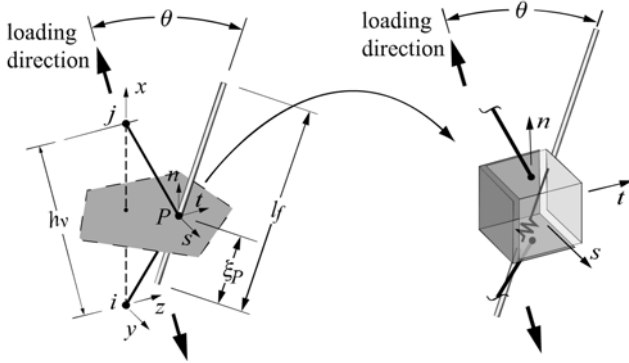


그림 3. Semi-discrete 파이버 요소

념을 적용하여 재료의 균열을 판단한다. RBSN에서 파괴는 입자면에서 이루어지는 것으로 가정하는데, 그림 2의 입자면에 가해지는 합력 F_R 로부터 합응력 σ_R 을 계산한다.

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_{ij}^P} \quad (3)$$

여기서, A_{ij}^P 는 입자면의 합력 방향으로의 정사영으로서 $A_{ij}^P = \cos \theta A_{ij}$ 이다. σ_R 이 파괴 기준 응력보다 클 경우 스프링 세트가 점차적으로 손상된다(Rots 등, 2008).

Semi-discrete 파이버 요소는 RBSN으로 표현되는 콘크리트 기질 내부에 존재하는 파이버의 효과를 표현한다 (Bolander and Saito, 1997). 단, 파이버의 거동을 독립적으로 계산하지 않고 RBSN 요소의 스프링 세트에 파이버의 영향을 더하는 방식으로 시뮬레이션 한다. 그림 3에서 i 와 j 입자핵(nuclei) 사이의 입자면을 파이버가 교차하는 경우, 그 교차점 P 에서 파이버에 의한 가상의 스프링을 추가한다. 이때 스프링의 방향은 파이버의 방향과 같고, 스프링의 강성은

$$k_f = \frac{A_f \sigma_f}{(h_v / \cos \theta) \varepsilon_m} \quad (4)$$

이다. 여기서, A_f 는 파이버의 단면적, θ 는 파이버의 방향과 입자면에 작용하는 합력 F_R 사이의 각도, ε_m 은 파이버 방향에 대한 RBSN 요소의 변형률, h_v 는 합력 방향에 대한 입자핵 i 와 j 사이의 거리이다. P 지점에서의 파이버의 축방향 응력 σ_f 는 Cox(1952)의 shear lag theory를 적용하여 계산할 수 있고, 파이버와 기질 사이의 경계면(interface)에서 슬립(slip)은 일어나지 않는다고 가정한다. 이러한 방법을 통해 파이버 보강 콘크리트의 역학적 거동을 설명할 수 있다.

2.2 수분 확산 모델

본 연구에서는 콘크리트 기질 내부의 수분 확산을 해석하기 위해서 RBSN 모델의 기하학적 형태인 Delaunay triangulation의 격자 구조에 기반을 둔 관로 요소를 사용한다. 그림 4(a)에서 Delaunay triangulation을 통해 생성된 삼각형의 각 변들을 입자 i - j 의 수분을 이동시키는 관로 요소로 볼 수 있다(Sadouki and van Mier, 1996). 수분 확산에 대하여 등방성을 띄고 내부에서 수분 생성 및 소멸이 없는, 일정한 온도의 물질에 대한 과도 확산(transient diffusion) 지배방정식은

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot [D \nabla \phi] \quad (5)$$

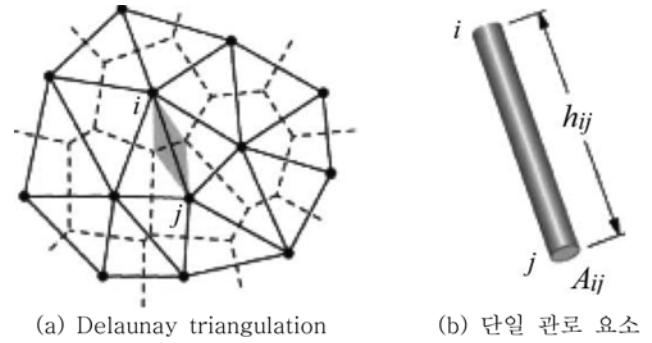


그림 4. 수분 확산 해석을 위한 관로 모델

이다. 여기서, H 는 상대습도이고, D 는 물질 내부의 수분 확산 계수이다. 이 식을 수치 해석을 위해 이산화 된 형태의 행렬 방정식으로 변화시키면 다음과 같다.

$$M\dot{\phi} + K\phi = f \quad (6)$$

M 과 K 는 각각 수분 용량 행렬과 확산 계수 행렬을 의미하는데, 이는 각 요소 행렬 M_e 와 K_e 의 조합으로 이루어진다. 그림 4(b)의 단일 요소에서 요소 수분 용량 행렬

$$M_e = h_{ij} \frac{A_{ij}}{6N} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이고, 요소 확산 계수 행렬

$$K_e = \frac{DA_{ij}}{h_{ij}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이다. 식 (7)의 N 은 해석 차원을 나타내는 수로서, $N=3$ 이다. 대기에 노출된 면에 대한 수분 이동은 대류(convective) 경계조건을 적용하였고, 표면에서 증발하는 수분의 흐름(flux)은 다음과 같다.

$$q_s = C_f(H_s - H_a) \quad (9)$$

여기서 H_s 와 H_a 는 각각 표면에서의 물질과 대기의 상대습도를 의미하고, C_f 는 필름계수이다. 식 (8)과 (9)의 D 와 C_f 는 실험 결과와의 비교를 통해 결정되는데, 이는 다음 절의 자유 건조수축 실험에서 설명한다.

3. 건조수축 및 파괴 거동 해석

3.1 자유 건조수축 실험

파이버 보강 콘크리트의 수분 확산과 건조수축을 관찰하고, 그와 관련된 특성 계수들을 결정하기 위해 자유 건조수축 실험을 시뮬레이션 하였다. KS F 2424 표준 시험 방법을 적용하였고, 시편의 형태와 경계조건은 그림 5와 같다. 시편의 모든 표면에서 동시에 건조가 일어나고, 시편 내부의 초기 상대습도 H_0 는 1.0이며 대기 표면의 상대습도 H_a 는 0.6이다. 이 조건은 타설 7일 후, 거푸집을 탈거한 $60 \pm 5\%$ 의 상대습도를 갖는 실제 시편과 유사한 환경이다.

본 연구에서 콘크리트 파괴는 가상 균열 모델(Hillerborg 등, 1976) 및 crack band 모델(Bazant and Oh, 1983)의 인장연화(tension-softening) 거동을 통해 표현된다. 또한, 파이버의 종류는 Kim 등(2008)의 연구에서 사용된 재생 PET 파이버

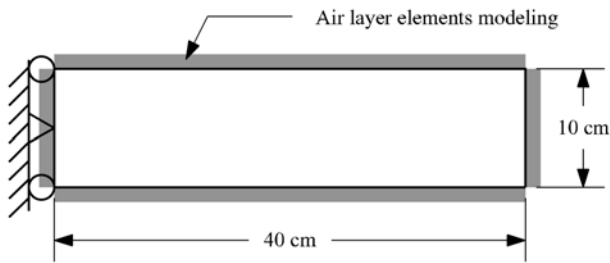


그림 5. 자유 건조수축 실험 모델의 형상 및 경계조건

표 1. 콘크리트와 파이버 재료의 물성치

재료 종류	물성	값
콘크리트	탄성계수	19.014 GPa
	인장강도	3.16 MPa
	파괴 에너지	34.1 N/m
PET 파이버	탄성계수	10.175 GPa
	비중	1.38
	인장강도	420.7 MPa
	파이버 길이	50 mm
	단면	0.2×1.3 mm

표 2. 콘크리트의 건조수축 관련 계수 조합

	수분 확산 계수, D (mm ² /일)	필름계수, C_f (mm/일)	수축 계수, α_{sh}
Case 1	1.9	0.8	0.002
Case 2	1.9	0.8	0.0023
Case 3	1.9	1.6	0.002
Case 4	3.8	1.6	0.002

로 적용한다. 콘크리트와 파이버의 물성치는 표 1에 정리하였다. 습도에 따른 체적 변화를 표현하기 위한 수축 계수는 수분 확산 계수 및 필름계수와 함께, 해석 결과와 실제 실험 결과(김장호 등, 2008)와의 비교를 통해 보정된다. 표 2는 수치 해석에 적용된 계수 조합의 경우이다.

그림 6은 위의 4가지 계수 조합을 적용한 해석 결과를 실험 결과와 비교한 그래프이다. 시간에 따른 수축 변형률의 변화를 살펴보면, 수분 이동의 위치에 따라 시편의 전체적인 수축 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 초기 수축에 지배적인 영향을 미치는 인자는 물질 표면과 대기 사이의 대류를 표현하는 필름계수이고, 그 이후의 수축은 물질 내부의 수분 확산 계수에 영향을 받는 것으로 이해할 수 있다. 비교를 통해 실험과 가장 유사한 건조수축 거동을 보인 경우는 case1이고, 이 계수 조합은 구속 건조수축 실험 시뮬레이션에 적용한다.

3.2 구속 건조수축 실험

콘크리트 시편이 외부 구속 상태에서 건조수축이 발생할 경우, 내부 응력에 의해 표면에 인장력이 발생해 균열이 발생하게 된다. 본 연구에서는 KS F 2595 시험 방법에 따라 건조수축 파괴 거동을 시뮬레이션 한다. 해석 시편 모델링과 경계조건은 그림 7과 같다. 시편 양단에 고정(fixed) 경계조건을 고려한 부분은 표면에서 수분이 증발하지 않고, 중앙부

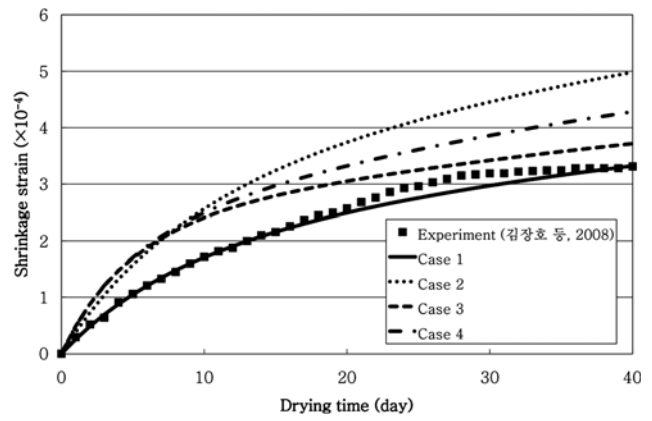


그림 6. 시간-건조수축 변형률 곡선

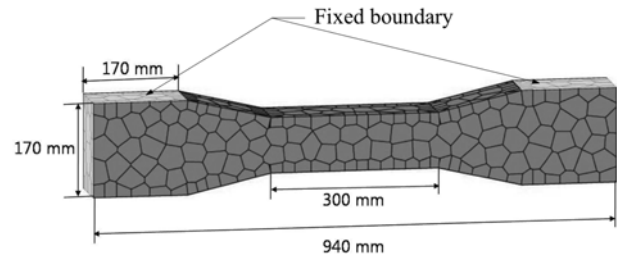


그림 7. 구속 건조수축 해석 시편 모델링 및 경계조건

에서만 수분의 증발이 일어날 수 있도록 공기층을 모델링하고 대류 경계조건을 적용한다.

파이버는 Kim 등(2008)의 실험에서 사용한 50 mm, 돌기 표면의(embossed) 형태를 사용하고, 함유량은 전체 시편에 대한 부피비(volume fraction)로서 0.5%, 0.75%, 1.0%의 3가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 또한, 콘크리트 기질 내부에 존재하는 파이버의 보강 효과를 확인하기 위해 파이버를 첨가하지 않은 일반 콘크리트에 대해서도 같은 방법으로 시뮬레이션 하고 그 결과를 비교한다. 해석 결과로 도출된 시간에 따른 건조수축 변형률 변화 곡선을 통해 파이버 함유량이 균열 특성에 미치는 영향을 분석한다.

구속 건조수축 실험에서 변형률 게이지를 시편 상부 중앙에 부착하여 건조수축 변형률을 측정하였다. 본 연구에서는 해석 모델의 변형률 측정을 위해 모델링 과정에서 의사 무작위(pseudo-random) 입지책을 위치시켜 해당 스프링 요소의 상대 변위를 계산하는 방법을 이용한다. 실제 실험에서는 건조수축 균열이 발생하면 시편 내부 응력이 해방되면서 구속 조건이 더 이상 유효하지 않으므로 거동상의 물리적 의미가 없지만, 해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 균열 발생 이후에도 변형률 측정을 계속하고 실험 결과와 비교한다.

그림 8은 파이버 혼입률에 따른 시간-건조수축 변형률 곡선이다. 곡선에서 변형률이 급격히 증가하는 부분은 재료에 균열이 발생하는 시점을 의미한다. 수치 해석을 통해 얻은 결과에서 일반 콘크리트의 균열 발생일자는 6일이고, 혼입률 0.5%, 0.75%, 1.0%의 파이버 보강 콘크리트는 각각 8일, 11일, 15일에 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 실험 결과(김장호 등, 2008)에서 나타난 변형률 변화는 해석 결과와 비슷한 양상을 보이지만, 해석 결과의 균열 발생 일자와 전체 변형률 값이 실험 결과보다 낮은 것을 관찰할 수 있다. 이러한 차이가 나타나는 것은 해석에서의 고정 경계조건이 실제 실

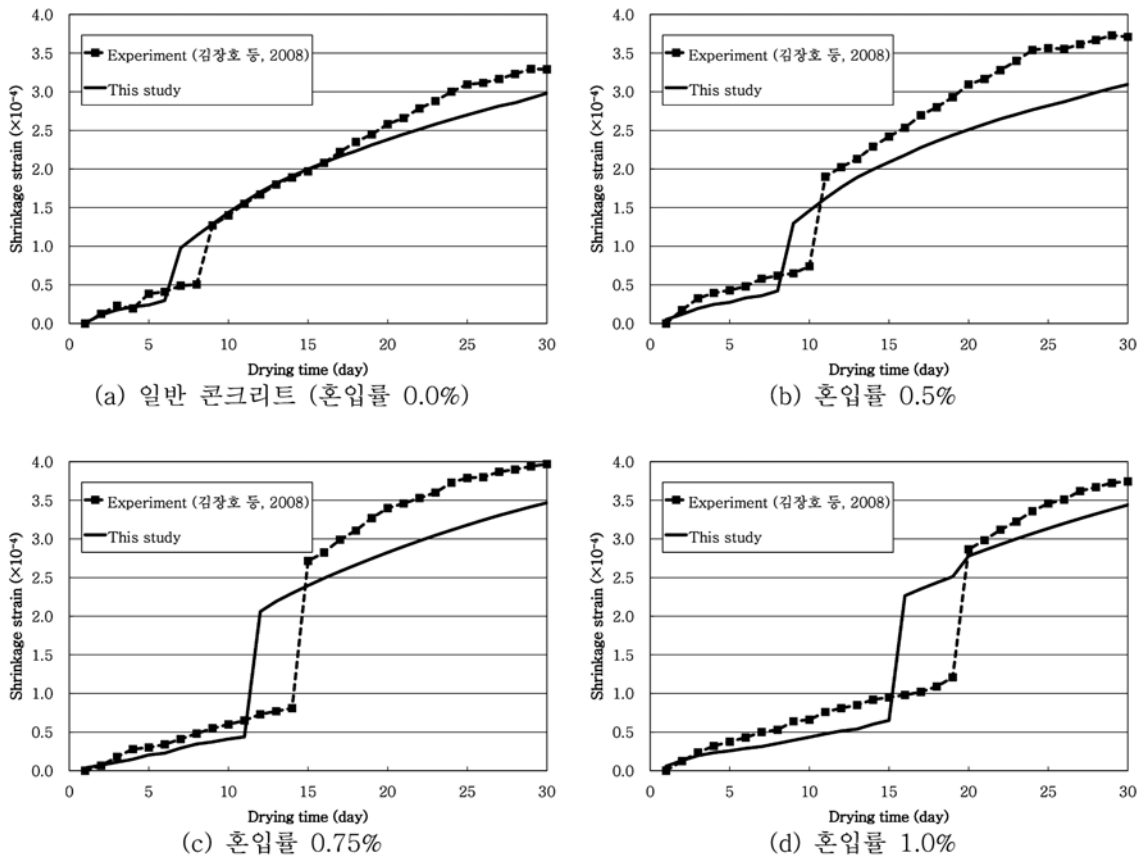


그림 8. 파이버 혼입률에 따른 시간-건조수축 변형을 변화

험에서 양단을 고정시키는 클램프의 미세한 변형을 고려하지 않았고, 해석의 용이성을 위해 초기 양생 과정에서 시간에 따른 콘크리트 기질의 물성치 변화나 균열면과 파이버의 각도가 파이버의 인발 하중에 미치는 영향(Naaman 등, 1991) 등을 무시한 수치 해석의 제한 조건 때문으로 추측된다.

4. 파이버의 조건에 따른 균열 제어 효과

본 절에서는, 앞에서 제시한 건조수축 균열 모델에서 파이버의 길이 및 형태를 변화시키며 해석한다. 3.2절의 해석 결과에서 나타난 최대 균열 폭을 파이버의 조건을 변화시킨 해석 결과와 비교하고, 균열 폭의 감소 정도를 기준으로 균열 제어 효과를 판단한다. 균열 폭은 각 입자핵 사이의 상대 변위를 통해 계산 될 수 있다.

그림 9(a)는 비교 기준이 되는 대조 해석으로서 3.2절의 시뮬레이션에서 얻은 최대 균열 폭을 정리한 그래프이다. 해석에서 사용한 파이버는 50 mm, 돌기표면의 재생 PET 파이버이다. 파이버의 혼입률이 증가할수록 최대 균열 폭이 감소하고, 이는 파이버의 인장력에 저항하는 성질에 의해 복합 재료 전체의 연성(ductility)이 증가한 것으로 생각할 수 있다.

그림 9(b)에서 파이버의 길이를 25 mm로 변화시켜 혼입한 시편의 구속 건조수축 실험 시뮬레이션 결과를 대조 해석과 비교하였다. 같은 파이버 혼입률을 갖는 경우, 25 mm의 파이버를 혼입한 시편에서 50 mm의 경우보다 최대 균열 폭이 약 0.015 mm 크게 발생한다. 이는 슬립에 의해 생기는 부착응력의 총 합력이 짧은 파이버의 표면적에서 작게 나타나므로, 식 (4)에서 σ_f 가 감소하기 때문에 보강 효

과가 낮아지는 것으로 이해할 수 있다. 같은 혼입률의 파이버 보강 콘크리트를 제작할 경우, 파이버의 개수는 그 길이에 반비례한다. 결국 짧은 파이버 하나가 견딜 수 있는 인장력은 줄어들지만, 균열면을 통과하는 파이버의 개수가 증가하여 재료 전체의 파괴 거동은 크게 차이가 나지 않는다. 이러한 결과는 실제 파이버 보강 콘크리트 제작 시, 콘크리트 배합의 용이성을 위해 짧은 길이의 파이버를 혼입하는 것이 균열 제어 효과를 크게 감소시키지 않음을 시사한다.

다음으로 파이버의 표면 형태를 변화시켜가며 균열 제어 효과를 비교하였다. 대조 해석에서 고려한 돌기표면 형태가 아닌 매끈한(straight) 형태의 파이버를 혼입한 시편에 대해 건조수축 균열 해석을 수행하였다. 파이버의 표면 형태 변화는 해석 모델 내에서 semi-discrete 파이버 요소의 부착 특성을 변화시키는 것으로 적용되는데, Kim 등(2008)이 수행한 파이버 인발(pull-out) 실험을 시뮬레이션하고 그 결과를 통해 부착응력-슬립 관계를 정의한다. 그림 9(c)에서 볼 수 있듯이, 매끈한 형태의 파이버를 사용한 시편에 발생한 균열 폭은 대조 해석의 균열 폭에 비해 최대 0.077 mm 정도 증가하였다. 이러한 결과로부터 파이버의 표면 형상이 건조수축 균열을 제어하는데 중요한 변수로 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

무작위 격자 모델과 semi-discrete 파이버 모델을 이용하여 파이버 보강 콘크리트를 사실적으로 표현하고, 재료의 건조수축에 의해 발생하는 내부 응력이 파괴 거동에 미치는 영

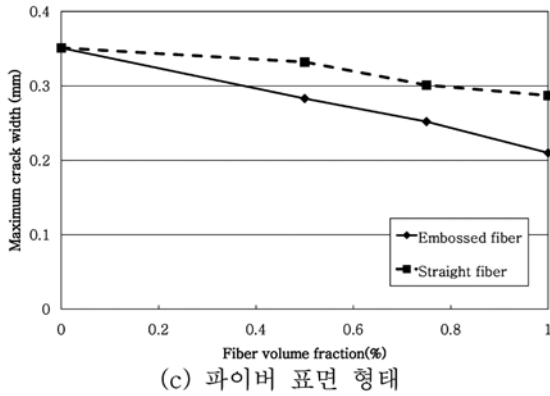
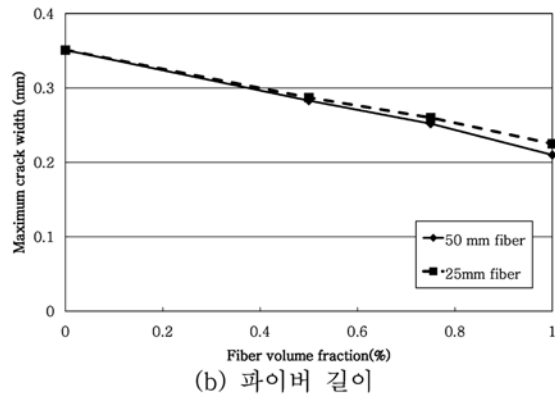
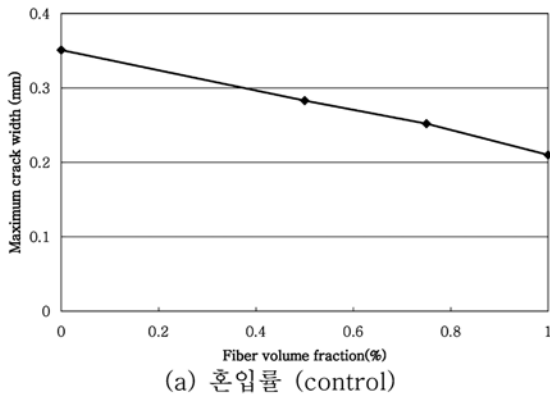


그림 9. 파이버의 조건에 따른 균열 제어 효과 비교

향을 해석하였다. 실제 실험 결과와 해석 결과를 비교·분석하여 해석 모델의 타당성을 검토하였다. 파이버의 조건에 따른 균열 제어 효과를 비교하기 위해 파이버의 길이와 표면 형태를 변화시켜가며 다양한 파이버 혼입률에 대해 시물레이션을 수행하였다. 연구의 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 무작위 격자 모델과 같은 기하학적 구조를 갖는 판로 요소를 사용하여 재료 내부의 수분 확산을 표현하였고, 습도 변화에 따른 건조수축 변형률을 계산하여 실제 실험과 비교함으로써 적합한 건조 수축 계수들을 결정하였다.
2. 건조수축 균열 해석에서 콘크리트 내부의 파이버 혼입률을 증가시키에 따라 균열 발생 일자는 일반 콘크리트에 비해 최대 9일 이상 늦춰지고, 최대 균열 폭은 약 40% 정도 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 파이버에 의해 복합재료 전체의 연성이 증가하는 것으로 생각할 수 있고, 실제 실험에서도 유사한 결과를 나타낸다.
3. 파이버의 길이와 표면 형태를 변화시켜 혼입한 구속 건조 수축 실험 시물레이션을 통해 파이버의 조건에 따른 균열 제어 효과를 판단하였다. 50 mm 파이버 보강 콘크리트의 최대 균열 폭은 25 mm의 경우보다 약 7% 감소하는 반면, 돌기표면 형태의 파이버를 사용한 시편은 매끈한 형태의 파이버에 비해 최대 균열 폭이 최대 27% 정도 감소하는 것이 관찰되었다. 이러한 결과를 통해, 균열 제어를 위해 파이버의 부착 성능을 향상시키는 방법이 길이가 긴 파이버를 사용하는 것보다 더 효과적임을 시물레이션에 의해서도 알 수 있다.
4. 파이버의 표면 형태 변화는 해석 모델에서 semi-discrete 파이버 모델의 부착응력-슬립 관계 곡선의 변화를 통해

표현될 수 있다. 본 연구에서는 파이버 인발 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 부착응력-슬립 관계를 정의한다. 이와 같은 방법으로 다양한 조건의 파이버의 부착 특성을 고려할 수 있으므로, 보강 콘크리트의 파괴거동 해석에 폭넓게 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

- 김은겸, 최영왕, 차수원, 문대중(2005) 콘크리트 체적변화의 중요성과 대책, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제17권 제4호, pp. 14-24.
- 김장호, 원종필, 임운목(2008) 재활용 PET병에서 추출한 화이버를 이용한 수축균열 제어용 화이버 콘크리트 개발, 연구보고서, 한국과학재단.
- 이창수, 박중혁, 정봉조, 최영준(2009) 물-시멘트비에 따른 경량 콘크리트 및 일반콘크리트의 수축과 습도와와의 관계, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제4A호, pp. 385-393.
- Bazant, Z.P. and Oh, B.H. (1983) Crack band theory for fracture of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 155-176.
- Bolander, J.E. and Saito, S. (1997) Discrete modeling of short-fiber reinforcement in cementitious composites, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 76-86.
- Bolander, J.E. and Saito, S. (1998) Fracture analysis using spring network with random geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 569-591.
- Bolander, J.E. and Berton, S. (2004) Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 861-871.
- Chandlera, H.W., Macpheebe, D.E., Atkinsonb, I., Hendersona, R.J., and Merchant, I.J. (2000) Enhancing the mechanical behaviour of cement based materials, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, pp. 1129-1133.
- Cox, H.L. (1952) The elasticity and strength of paper and other

- fibrous materials, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 3, pp. 72-79.
- Filho, R.D.T., Ghavami, K., Sanjuan, M.A., and England, G.L. (2005) Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable bres, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 537-546.
- Hahn, H.T. and Tsai, S.W. (1980) *Introduction to Composite Materials*, Technomic Pub, Westport, Conn.
- Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson P.E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, pp. 773-782.
- Kawai, T. (1978) New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 48, pp. 207-229.
- Kim, J.J., Park, C.G., Lee, S.W., Lee, S.W., and Won, J.P. (2008) Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites, *Composites: Part B*, Vol. 39, pp. 442-450.
- Lin, S.P., Shen, J.H., Han, J.L., Lee, Y.J., Liao, K.H., Yeh, J.T., Chang, F.C., and Hsieh, K.H. (2008) Volume shrinkages and mechanical properties of various ber reinforced hydroxyethyl methacrylate polyurethane unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 709-717.
- Naaman, A.E., Namur, G.G., Alwan, J.M., and Najm, H.S. (1991) Fiber pullout and bond slip. I: Analytical study, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, pp. 2769-2790.
- Neto, A.A.M., Cincotto, M.A., and Repette, W. (2008) Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 565-574.
- Papayianni, I. and Valliasis, T.H. (2005) Heat deformations of fly ash concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 249-254.
- Rots, J.G., Belletti, B., and Invernizzi, S. (2008) Robust modeling of RC structures with an event-by-event strategy, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 590-614.
- Sadouki, H. and van Mier, J.G.M. (1996) Analysis of hygral induced crack growth in multiphase materials, *HERON*, Vol. 41, No. 4, pp. 267-286.
- Schulsona, E.M., Swainsonb, I.P., and Holden, T.M. (2001) Internal stress within hardened cement paste induced through thermal mismatch Calcium hydroxide versus calcium silicate hydrate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1785-1791.
- Shabana, Y.M., Bruck, H.A., Pines, M.L., and Krufft, J.G. (2006) Modeling the evolution of stress due to differential shrinkage in powder-processed functionally graded metal-ceramic composites during pressureless sintering, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 7852-7868.

(접수일: 2010.3.15/심사일: 2010.6.13/심사완료일: 2010.6.13)