

3차원 섬유분포를 고려한 섬유보강 시멘트 모르타르의 전단흐름에 따른 섬유방향성 변화

Variation of Fiber Orientation with Shear Flow of Fiber-Reinforced Cement Mortar considering 3-D Fiber Distribution

강 수 태*·김 진 근**

Kang, Su-Tae · Kim, Jin-Keun

요 약

본 논문에서는 3차원 섬유분포를 가정하여 고유동 섬유보강 시멘트 모르타르의 유동에 따른 섬유방향성 변화를 해석적으로 파악해 보았다. 유동흐름은 평면상의 2차원 완전발달 전단흐름을 고려하였다. 유동에 따른 섬유의 회전운동은 섬유간의 상호 간섭효과를 무시한 Jeffery의 기본식에 근거하였다. 굳지 않은 섬유 혼입 모르타르의 유동에 따른 섬유방향성 분포 변화를 흐름선과 동일 유동거리 상의 단면에 대해 파악하였다. 그 결과, 단면 내 위치에 따라서 섬유방향성 분포 변화가 크게 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유동거리에 따른 단면상의 섬유방향성 분포는 초기 유동거리에서 분포 형상에 큰 변화가 발생하였고, 유동에 따라 섬유가 유동방향과 나란하게 놓이는 경향이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 섬유방향성 변화의 예측은 섬유보강 시멘트 복합체의 인장특성에 예측하는데 유용하게 사용될 것이다.

keywords : 섬유보강, 전단흐름, 방향성, 확률밀도함수

1. 서 론

최근 콘크리트 기술의 괄목할만한 성장과 함께 등장한 초고성능 섬유보강 시멘트 복합체는 아주 높은 강도특성 (압축강도 200MPa 이상, 인장강도 10MPa 이상), 고내구성, 고인성 및 고유동성의 복합적인 장점을 가진 재료이다. 일반적으로 콘크리트는 강도가 증가함에 따라 보다 취성적 거동특성을 나타내고, 이러한 문제점으로 인해 고강도 콘크리트의 사용이 제약을 받은 것이 사실이다. 재료의 연성 또는 인성을 향상시키기 위한 유익한 방법 중의 하나가 섬유를 혼입하는 방법이다. 혼입된 섬유가 미세균열에 걸쳐 가교역할을 하여 균열진전을 억제하고 향상된 연성거동을 확보하게 된다. 보편적으로 섬유보강 콘크리트에서는 굵은 골재의 간섭효과 등으로 인해 타설 과정에서 특정한 섬유 방향성에 대해 별도의 고려를 하지 않지만, 본 연구에서 다루는 재료인 초고성능 섬유보강 시멘트 복합체는 굵은 골재를 포함하지 않는 상대적으로 균질한 매트릭스 특성과 고유동성으로 인해 타설 방향 또는 구조물의 형상 등에 기인한 굳지 않은 상태의 유동특성에 따라 불가피하게 섬유의 방향성을 유발하게 되고 (Kang 등, 2008), 결과적으로 섬유방향성 분포에 기인한 재료의 비등방성이 재료의 역학적 거동 특성 및 적용 구조물의 성능에까지 영향을 미치게 된다. 이러한 일련의 상관

* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 수석연구원 alphard@kict.re.kr

** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 kimjinkeun@kaist.ac.kr

관계를 규명하기 위한 선행연구로서 우선 유동에 따른 섬유방향성 분포에 관한 연구를 수행하였다. 이전의 연구에서 2차원 섬유분포를 가정한 전단흐름에서의 섬유방향성 변화에 관한 연구를 수행하였으며 (강수태 등, 2009), 본 연구에서는 기존 연구를 확장하여 3차원 섬유분포를 고려하여 전단흐름에서의 초고성능 시멘트 복합체의 섬유방향성 변화를 파악하고자 하였다.

2. 유체흐름과 섬유방향성

섬유 하나의 방향성은 그림 1과 같이 구면좌표계에서 θ 와 ϕ 를 이용한 단위벡터 \bar{p} 로 나타낼 수 있으며, 직교좌표계에서 \bar{p} 의 성분은 다음 식 (1)로 표현된다.

$$p_1 = \sin\theta\cos\phi, \quad p_2 = \sin\theta\sin\phi, \quad p_3 = \cos\theta \quad (1)$$

또한 섬유의 방향각이 θ 에 대해 θ_0 와 $\theta_0 + d\theta$ 에 있고, ϕ 에 대해 ϕ_0 와 $\phi_0 + d\phi$ 에 존재할 확률은 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다. 여기서 $\psi(\theta, \phi)$ 는 3차원 무작위 섬유분포에 대해 $1/4\pi$ 의 초기값을 가진다.

$$P_r(\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + d\theta, \phi_0 \leq \phi \leq \phi_0 + d\phi) = \psi(\theta, \phi) \sin\theta_0 d\theta_0 d\phi \quad (2)$$

한 개의 섬유 개체에 대한 회전운동에 대한 기본 방정식은 섬유 상호간의 간섭작용을 고려하지 않는다면 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Jeffery, 1922).

$$\dot{p}_i = -\frac{1}{2}\omega_{ij}p_j + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ij}p_j - \dot{\gamma}_{ki}p_k p_i) \quad (3)$$

위 식에서 ω_{ij} 는 와류도(vorticity)를 의미하고, $\dot{\gamma}_{ij}$ 는 시간에 따른 전단변형률 변화율(shear strain rate)을 의미하며, 식 (4)로 정의된다.

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad \dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

V_i 는 유속 성분을 나타내며, λ 는 섬유의 형상계수($r_e = l_f/d_f$)와 관련한 계수로서 $\lambda = (r_e^2 - 1)/(r_e^2 + 1)$ 의 관계식으로 계산된다.

3. 섬유방향성 분포 예측

3.1. 해석조건

섬유길이가 13mm이고 직경이 0.2mm인 강섬유 혼입한 고유동 섬유보강 시멘트 복합체를 그림 2와 폭

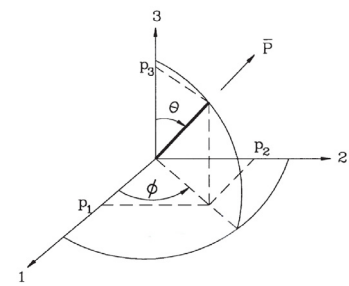


그림 1 섬유방향성에 대한 단위벡터

180mm, 길이 2900mm의 보를 제작하기 위해 한쪽 끝에서 부어서 자유흐름에 의해 타설하는 과정을 가정하였으며, 유동흐름에 대한 해석적 해를 이용하기 위하여 복합체의 유동흐름은 완전발달 유동흐름으로 가정하였다. 유량은 실제 타설 시의 투입속도를 고려하여 0.001m³/s로 가정하였으며, 콘크리트 타설층의 높이는 100mm로 가정하였다. 해석은 유체가 유입되는 단부에서 중앙면까지의 거리에 대해 18개의 유체 흐름선과 200개의 흐름간격을 고려하여 실시하였으며 유동거리에 따른 점유방향성 분포를 구하였다.

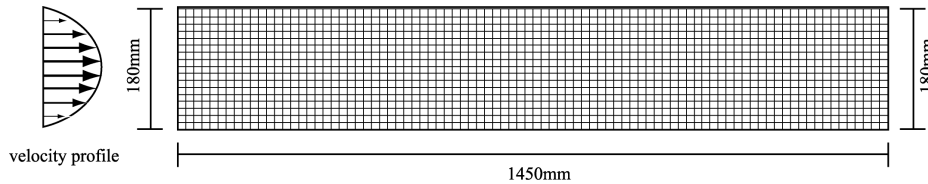
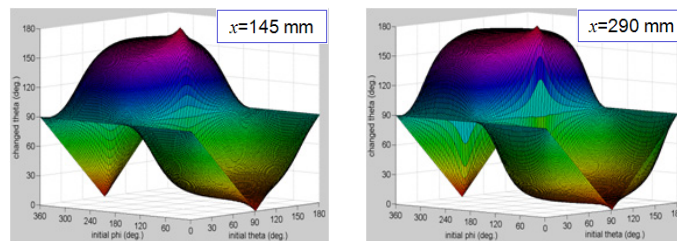


그림 2 해석 시 고려한 유동흐름 및 요소

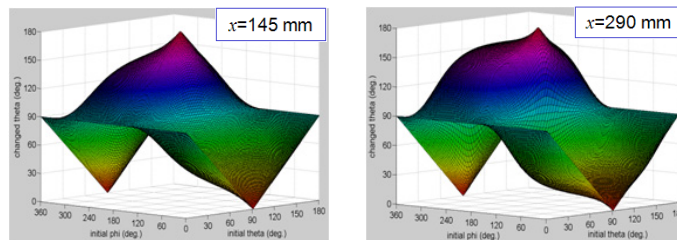
3.2. 해석결과

앞에서 설명한 과정을 통해 유동거리에 따른 각 요소에서의 점유방향성 분포를 먼저 구하였으며, 동일 거리에 놓여진 모든 요소의 방향성 분포로부터 임의의 단면에서의 점유방향성 분포를 구하였다. 이 때 구하고자 하는 방향성 분포가 유동방향에 대한 점유의 방향각으로부터 결정되어야 하기 때문에, 처음에 적용한 구면좌표계 상의 (θ, ϕ) 는 유동방향에 대한 (θ', ϕ') 으로 좌표변환을 하여야 하며, ϕ' 에 대해 적분함으로써 유동방향에 대한 경사각, θ' 에 대한 점유방향성 분포를 얻을 수 있다.

그림 3은 유체 흐름선 중 좌우경계면으로부터 세 번째와 일곱 번째 흐름선 상의 요소에 대해 유동거리에 따른 점유방향성 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 세 번째 흐름선 상의 점유방향성 분포 변화가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있으며, 이와 같은 결과는 2차 포물선 형태의 전단흐름 속도분포에 기인한 것으로 속도구배가 경계면으로 갈수록 크며, 이로 인해 동일한 거리의 유동에서 점유의 회전이 상대적으로 크기 때문임을 쉽게 알 수 있다.



(a) 경계로부터 세 번째 흐름선에서의 분포변화



(b) 경계로부터 일곱 번째 흐름선에서의 분포변화

그림 3 단면 내 위치에 따른 점유방향성 변화 비교

그림 4는 유동거리에 따른 단면 내 섬유방향성 분포의 변화를 나타낸 것으로 그림 4(a)는 초기 290mm까지의 변화를 나타내고 있으며, 그림 4(b)는 1450까지의 변화를 나타내고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 굳지 않은 섬유혼입 시멘트 복합체가 흘러감에 따라 섬유는 흐름방향에 나란하게 배열되는 경향을 확인할 수 있다. 또한 분포형상은 초기 유동흐름에서 크게 변화하며, 725mm와 1450mm의 분포를 비교했을 때 0°에 가까운 방향각의 섬유분포가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

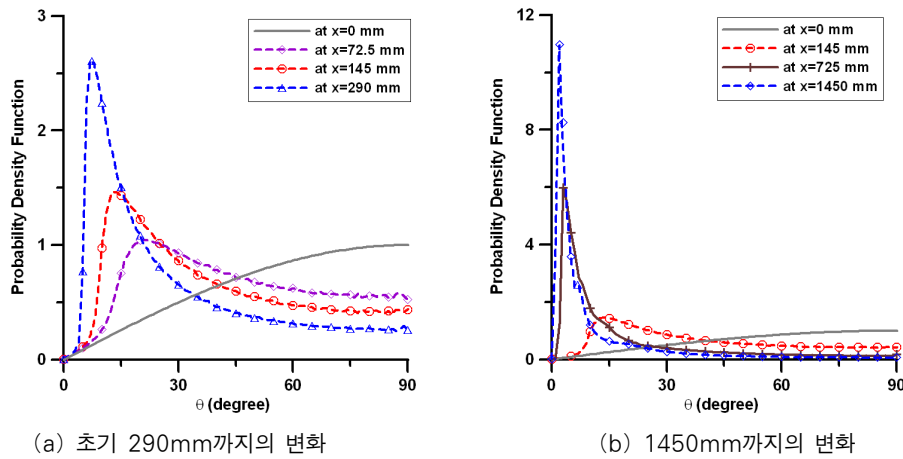


그림 4 유동거리에 따른 섬유방향성 분포 변화

섬유보강 복합체의 인장거동 특성이 섬유의 배열상태와 밀접한 관련이 있음을 상기해 보면, 이상과 같이 구해진 유동에 의한 섬유방향성 분포변화는 타설조건이나 구조물 형상 등을 고려한 복합체의 인장거동 예측에 유용하게 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2011년도 주요사업인 “(11주요) 해양 콘크리트 성능 향상 기술 개발”과제의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Kang, S.T., Park, J.J., Ryu, G.S., Kim, S.W. (2008) Investigation of Fiber Alignment of UHSFRC in Flexural Members, *Proceedings of 8th Int'l Symposium on Utilization of HSC and HPC*, pp.709~714.
- 강수태, 김진근 (2009) 고유동 강섬유보강 모르타르의 유동에 따른 섬유의 방향성 분포특성 변화의 예측, **한국전산구조공학회 논문집**, 22(6), pp.221~230.
- Jeffery, G.B. (1922) The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid, *Proceeding of Royal Society of London A*, 102, pp.161-179.