

고유동 강섬유보강 모르타르의 유동에 따른 섬유 방향성 분포 특성 변화의 예측

Numerical Simulation for the Variation of the Fiber Orientation Distribution according to the Flow of High-Flow Steel-Fiber Reinforced Mortar

강 수 태* 김 진 근*

Kang, Su-Tae Kim, Jin-Keun

(논문접수일 : 2009년 9월 28일 ; 심사종료일 : 2009년 11월 4일)

요 지

고유동 강섬유보강 모르타르는 타설과정에서 특정한 섬유 방향성 분포를 가질 수 있으며, 이에 따라 재료의 인장거동 특성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 고유동 강섬유보강 모르타르의 타설단계에서의 유동에 따른 강섬유의 섬유 방향성 분포의 변화를 해석적으로 구하였다. 해석결과에 따르면 180mm 간격으로 나란히 놓여진 두 평판 사이에 흐르는 모르타르의 전단흐름에 의한 섬유의 방향성 변화는 초기 150mm 이내에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이후에서는 방향성 분포의 경향은 크게 변하지 않으며, 다만 흐름방향에 나란한 섬유의 밀도가 집중적으로 커지는 것을 볼 수 있었다. 섬유의 방향성과 섬유보강 복합체의 인장거동과 밀접한 관련성을 고려할 때, 이와 같은 방향성의 예측을 바탕으로 유동에 따른 고유동 강섬유보강 모르타르의 인장거동 변화의 예측이 가능할 것이다.

핵심용어 : 고유동, 섬유보강, 강섬유, 전단흐름, 섬유 방향성, 확률밀도함수

Abstract

High-flow steel-fiber reinforced mortar may induce a certain fiber orientation distribution in the process of placing and thus have an influence on the tensile properties. In this paper, the variation of the fiber orientation distribution according to the flow of high-flow steel-fiber reinforced mortar was estimated in numerical simulation. The analytical results present that the major variation of fiber orientation distribution is made within 150mm of flow distance, thereafter the tendency of the fiber orientation distribution is not noticeable even though the peak of distribution density in the orientation parallel to the flow direction get bigger along the distance. Considering the close relation between the fiber orientation and the tensile behavior of composite, prediction of fiber orientation distribution make it possible to predict the variation in the tensile behavior of high-flow steel-fiber reinforced mortar according to the flow.

Keywords : *high-flow, fiber reinforced, steel fiber, shear flow, fiber orientation, probability density function*

1. 서 론

콘크리트는 건설산업에서 가장 많이 사용되는 건설재료이다. 하지만 본질적으로 인장에 대해 강도가 작고 취성적 거동을 보이는 문제점을 안고 있다. 이러한 인장의 결함 및 문제점을 개선하기 위한 노력 중의 하나가 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)이다. 섬유보강 콘크리트는 콘

크리트 내에 길이가 짧고 단면이 작은 섬유를 임의로 혼입함으로써 콘크리트가 응력을 받을 때 발생하는 콘크리트 내 미세균열들을 임의방향으로 분포된 섬유가 가교(Bridging) 작용을 하여 균열진전을 억제하고 콘크리트의 강도 및 인성을 향상시키게 된다. 이와 같은 역학적 특성의 향상은 인장응력의 방향에 맞게 섬유가 배열되도록 함으로써 극대화될 수 있다.

일반적인 섬유보강 콘크리트에서는 15~30mm 길이의 단

† 책임저자, 정회원 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 선임연구원
Tel: 031-910-0106 ; Fax: 031-910-0715

E-mail: alphard@kict.re.kr

* 종신회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

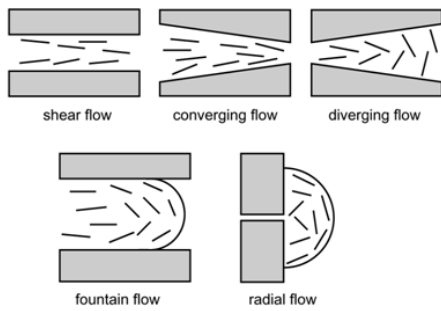


그림 1 여러 가지 유동장 형태에 따른 섬유의 방향성 변화

섬유를 사용하여 임의방향으로 골고루 분산되도록 하여 등방성을 가지도록 한다. 그러나 고유동 강섬유보강 모르타르(High-Flow Steel-Fiber Reinforced Mortar)에서는 굵은 골재를 사용하지 않고 높은 유동성을 가지므로 타설방향 또는 구조물의 형상에 의한 유동방향에 따라 불가피하게 섬유의 방향성을 유발하게 되고, 이에 따라 섬유보강 모르타르는 비등방성을 나타내게 되어 재료의 역학적 특성 및 경화 후 구조물의 구조적 성능에 영향을 미치게 된다.

섬유보강 콘크리트에서의 섬유의 방향성 및 분산성에 관한 연구는 70년대 초반부터 지금까지 많은 연구가 이루어졌다(Shah 등, 1991; Naaman 등, 1995; Akkaya 등, 2000). 하지만 주로 재료역학적 관점에서 이루어졌으며, 유체역학적 관점에서 접근한 연구는 거의 없었다(Poitou 등, 2001).

만약 유체흐름에 따른 섬유 방향성의 변화를 예측할 수 있다면 고유동 강섬유보강 모르타르의 비등방성을 이용하여 구조물의 성능을 효율적으로 향상시킬 수도 있을 것이며, 섬유 방향성을 제어하지 않은 구조물에서 나타내는 섬유 방향성 변화에 따른 구조적 성능의 큰 변동성을 크게 줄일 수 있어 신뢰성 있는 구조물의 설계 및 시공이 가능할 것이다. 따라서 모르타르와 같은 점성유체에 대해 타설 과정에서 발생하는 유동장을 파악하고, 이에 따른 섬유의 방향성의 변화 예측에 관한 연구가 필요하다.

콘크리트 또는 모르타르의 타설 중 유동흐름은 거푸집의 형상, 타설 위치 및 방향, 모르타르 유체의 특성 등에 의해 크게 영향을 받으며, 일반적으로 콘크리트 또는 모르타르의 타설 과정에서 발생할 수 있는 점성유체의 유동흐름은 그림 1과 같이 분류하여 나타낼 수 있다.

유동흐름 및 섬유 방향성 분포를 예측하기 위한 해석 기법으로는 3차원 유동해석이 복잡하기 때문에 일반적으로 길이 또는 깊이 방향의 2차원 평면에서 유동해석이 이루어지고 있으며, 그 결과로부터 섬유 방향성에 대해 해석을 수행하고 있다.

본 연구에서는 고유동 강섬유보강 모르타르에 대해 평면에

서의 2차원 유동해석을 바탕으로 유동에 따른 모르타르 내 섬유의 방향성 분포 변화를 시뮬레이션을 통해 파악해 보고자 하였다.

2 유체흐름에 대한 이론적 고찰

2.1 지배방정식

유체의 흐름은 두 개의 지배방정식에 의해 정의되며, 첫 번째는 질량보존의 법칙에 대한 연속방정식이며, 두 번째는 운동량 보존의 법칙을 나타내는 모멘텀 방정식이다.

2.1.1 연속방정식(Continuity Equation)

첫 번째 유체의 지배방정식인 연속방정식은 3차원 비압축성 유체에 대해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{dM}{dt}\Big|_s = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

여기서, \vec{V} 는 속도 벡터(velocity vector)를 나타내고, ρ 는 밀도를 말하며, dV 는 미소체적을 의미한다. S 는 대상 시스템을 의미하며, CV 는 제어 체적(Control Volume)을 나타내고 CS 는 제어 단면(Control Surface)을 나타낸다. 그리고 M 은 제어 체적에 대한 유체의 질량을 의미한다.

$$M = \iiint \rho dV \quad (2)$$

비압축성 유체의 경우, 시스템 계 내에서 유체는 생성되거나 소멸되지 않기 때문에 식 (1)에서 좌변 항은 0이 되며, 정상상태 유체흐름에 대해서 제어 체적 내 유량의 변화가 없으므로 식(1)은 식 (3)과 같이 간단한 식으로 표현이 가능하다.

$$\int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3)$$

2.1.2 모멘텀 방정식(Momentum Equation)

또 다른 지배방정식으로 운동량 보존의 법칙을 표현하는 모멘텀 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum F = \vec{F}_s + \vec{F}_b \Big|_s = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \vec{V} \rho dV + \int_{CS} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

위 식에서 $\sum F$ 는 제어 체적에 작용하는 모든 외력을 나

타내는 것으로 중력, 전자기장, 표면장력 효과, 압력 및 마찰력 등의 모든 작용력을 포함하며, 표면력(\vec{F}_S)과 체적력(\vec{F}_B)으로 구분하여 나타낼 수 있다. 일반적으로 비압축성 유체에 대해 표면력은 주로 마찰력 또는 외부 압력에 의해 나타나며, 체적력은 주로 중력에 의한 작용력으로 나타낼 수 있다. 압력에 의한 표면력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_S = \int_A -pd\vec{A} \tag{5}$$

표면력은 항상 제어 단면으로 작용하며, $d\vec{A}$ 는 단면 바깥 방향을 양으로 하는 벡터이다.

단위 질량에 대한 체적력을 \vec{B} 라고 정의할 때, 체적력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F}_B = \int_{CV} \vec{B}dm = \int_{CV} \vec{B}\rho dA \tag{6}$$

위 식에서 체적력이 중력에 의한 힘만 존재한다면, \vec{B} 는 \vec{g} 로 나타낼 수 있다.

2.2 두 평판 사이에서의 전단 유체흐름

그림 2에서와 같이 나란히 놓여진 두 플레이트 사이에서 흐르는 비압축성 점성유체의 흐름 내 미소체적 $dV = dx dy dz$ 를 고려해 보자. 두 플레이트는 a 만큼 떨어져 있고, 두 개의 플레이트는 z 방향으로 무한한 길이를 가진다고 가정한다.

몇 가지 가정과 함께 전단흐름의 유동장에 대한 해석적 해를 구할 수 있다. 유체의 속도벡터는 x 방향 성분(u)만 있으며, y 및 z 방향의 속도성분(v, w)은 없다. 그리고 유체가 완전발달유동(fully developed) 상태이며, 따라서 x 방향으로 유속 변화는 없고, y 만의 함수, $u = u(y)$ 로 정의된다.

모멘텀 방정식에서 체적력(body force)은 중력에 의한 힘으로 x 방향에 대해서는 0이며, 표면력(surface force)은 벽면에서의 마찰력이 없다고 가정하면, 압력에 의한 힘만을 고

려한다.

그렇게 되면, 그림 2(b)에서 미소체적에 작용하는 힘의 평형관계로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{d\tau_{yx}}{dy} \tag{7}$$

위 식에서 좌변과 우변이 서로 독립적이므로 상수로 두고 적분을 하게 되면, 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\tau_{yx} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y + c_1 \tag{8}$$

위 식에서 전단응력과 유속 변화율과의 관계식을 이용하면 유체의 속도 분포를 구할 수 있다. 유체는 전단응력과 유속 변화율 관계에 따라 뉴턴유체(Newtonian fluid)와 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid)로 구분할 수 있으며, 비뉴턴 유체에는 다일러턴트 유체, 점탄성 유체, 빙함 유체 등으로 다시 나누어진다. 모르타르나 콘크리트는 일반적으로 빙함 유체(Bingham fluid)로 분류된다.

뉴턴 유체의 경우, 전단응력과 유속 변화율 사이에 식 (9)가 성립하며, 빙함 유체의 경우에는 식 (10)의 관계가 성립한다.

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \text{ (뉴턴유체의 경우)} \tag{9}$$

$$\tau_{yx} = \tau_o + \mu \frac{du}{dy} \text{ (빙함유체의 경우)} \tag{10}$$

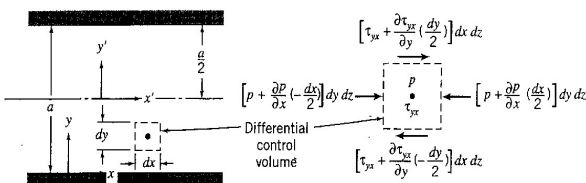
위 식에서 μ 는 점성계수($N \cdot s/m^2$)를 나타내며, τ_o 는 빙함 유체에서 정지해 있는 유체가 움직이는데 필요한 초기 항복 응력을 의미한다.

위의 식 (9) 또는 (10)을 식 (8)에 대입하여 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + \frac{c_1}{\mu} y + c_2 \text{ (뉴턴유체의 경우)} \tag{11}$$

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + \frac{c_1 - \tau_o}{\mu} y + c_2 \text{ (빙함유체의 경우)} \tag{12}$$

식 (12)에서 $c_1' = c_1 - \tau_o$ 으로 다시 나타내면 식 (11)과 식 (12)는 같은 형태를 가지며, 위의 식에 경계조건, $u = 0$ (at $y = 0$)과 $u = 0$ (at $y = a$)을 대입하여 미지수를 결정하게 되면 식 (13)과 같이 뉴턴 유체와 빙함 유체에 대해 동일



(a) Geometry of CV (b) Forces acting on CV

그림 2 두 평판 사이에 흐르는 전단흐름 해석을 위한 제어체적(Fox 등, 2004)

한 유속 분포 방정식을 얻을 수 있다.

$$u = \frac{a^2}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[\left(\frac{y}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{a} \right) \right] \quad (13)$$

$0 \leq y \leq a$ 의 구간을 $-h/2 \leq y' \leq h/2$ 구간으로 다시 표현하면, 식 (13)은 다음의 식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{h^2}{2\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[\left(\frac{y'}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \quad (14)$$

3. 유체흐름과 섬유 방향성의 관계에 대한 이론적 고찰

유체흐름에 따른 섬유 방향성 변화에 관한 연구는 콘크리트 분야에서는 연구가 거의 없지만, 단섬유 보강 폴리머의 기계 성형 분야에서는 많은 연구들이 있었다(Batchelor 1970; Ausias 등, 1992; Advani 1994; Vincent 등, 1997; Chiba 등, 1998 2001; Moses 등, 2001; Han 등, 2002; Lin 등, 2008). 열가소성의 폴리머는 일반적으로 점탄성 유체로 취급된다. 단섬유 보강 복합체의 성형 제조과정에서의 섬유 방향성과 관련한 이들 연구의 대부분은 Jeffery(1922)의 방정식에 근거하고 있다.

1922년에 Jeffery(1922)는 유체동역학(hydrodynamics)에 근거하여 뉴턴 유체 내 타원형 입자의 방향성을 나타내는 식을 제안하였다. 1970년에는 Batchelor(1970)이 세장형 물체(slender-body)에 대해 유체동역학적 응력을 계산할 수 있는 일반식을 제안하였다. 그리고 Dinh and Armstrong(1984)는 이 두 식을 이용하여 임의의 형상비(l_f/d_f)의 섬유가 혼입된 유체에 대한 구성방정식을 제안하였다. Ausias 등(1992)은 Dinh and Armstrong(1984)의 방법과 유사한 접근법으로 섬유혼입률이 매우 낮은 경우와 매우 높은 경우에 대해 각각 모델을 제시하였다.

Jeffery(1922)의 방정식에서는 섬유 사이의 상호작용에 의한 영향을 고려하지 않고 있는데, Folgarand Tucker(1987)은 Jeffery(1922)의 식에 이와 같은 섬유 사이의 상호작용을 고려하여 뉴턴 유체에서 섬유의 회전운동을 표현하였다.

실제 섬유 보강 복합체에서는 한 개의 섬유가 아닌 수많은 섬유들이 존재하며, 따라서 단면 내 섬유 방향성 분포를 효율적으로 나타내기 위해서는 방향성 분포 함수(orientation distribution function)를 필요로 한다. Dinh and Armstrong(1984)은 균질한 유동장에 적용이 가능한 방향성 분포함수에 대한 해석적 해를 도출하였다. Advani and Tucker(1987)은

섬유의 방향성을 표현하기 위해 섬유방향성 텐서와 방향성 분포 함수를 도입하여 공간 내 임의의 위치에서의 섬유 배향 상태의 표현을 보다 용이하게 하였다.

3.1 두 평판 사이에서의 전단 유체흐름

섬유의 방향성 분포를 표현하기 위해서 우선 섬유 하나에 대한 방향성을 정의할 필요가 있으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 구면좌표계에서의 θ 와 ϕ 를 이용한 단위벡터 \bar{p} 로 나타낼 수 있다. 직교좌표계에서 \bar{p} 의 성분은 θ 와 ϕ 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} p_1 &= \sin\theta\cos\phi \\ p_2 &= \sin\theta\sin\phi \\ p_3 &= \cos\theta \end{aligned} \quad (15)$$

섬유보강 복합체는 수많은 섬유를 포함하고 있으므로 식 (15)를 이용하여 섬유 한 개의 방향성을 표현하는 것은 큰 의미가 없다. 일반적으로 여러 개의 섬유에 대해 3차원 섬유 방향성 분포를 표현하기 위해서는 확률분포 개념을 사용한다. 섬유의 방향성 분포 함수(Orientation Distribution Function, ODF), ψ 가 정의되면 임의의 시간에서 섬유가 방향성 \bar{p} 을 나타낼 확률을 구할 수 있다. 임의의 시간에서 섬유의 방향각이 θ 에 대해 θ_o 와 $\theta_o + d\theta$ 에 있고, ϕ 에 대해 ϕ_o 와 $\phi_o + d\phi$ 에 존재할 확률은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} P_r(\theta_o \leq \theta \leq \theta_o + d\theta, \phi_o \leq \phi \leq \phi_o + d\phi) \\ = \psi(\theta, \phi) \sin\theta_o d\theta_o d\phi_o \end{aligned} \quad (16)$$

방향성 분포 함수(ψ)는 다음의 두 가지를 반드시 만족해야 한다. 첫 번째는 주기 π 에 대한 조건으로 다음 식을 만족해야 한다.

$$\psi(\bar{p}) = \psi(-\bar{p}) \quad (17)$$

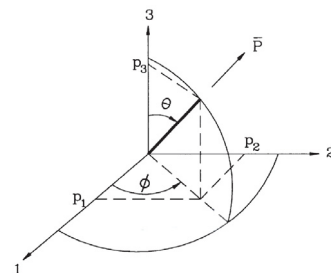


그림 3 섬유의 방향성을 나타내기 위한 좌표시스템

그리고 두 번째 조건은 ψ 를 전체 구간에 대해 적분했을 때 1이 되어야 한다는 것으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi = 1 \quad (18)$$

3.2 유동장과 섬유 방향성의 관계

한 개의 섬유에 대한 회전운동에 대한 기본 방정식은 식 (19)와 같다(Folgar 등, 1987).

$$\dot{p}_i = -\frac{1}{2}\omega_{ij}p_j + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ij}p_j - \dot{\gamma}_{ik}p_k p_i) - \frac{D_r}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial p_i} \quad (19)$$

위 식에서 ω_{ij} 는 와류도(vorticity)를 의미하고, $\dot{\gamma}_{ij}$ 는 시간에 따른 전단변형률 변화율(shear strain rate)을 의미하며, 각각 식 (20)과 식 (21)로 정의된다.

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (20)$$

$$\dot{\gamma}_{ij} = \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (21)$$

V_i 는 유속 성분을 나타낸다. 그리고 λ 는 섬유의 형상계수($r_e = l_f/d_f$)와 관련한 계수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda = \frac{r_e^2 - 1}{r_e^2 + 1} \quad (22)$$

그리고 D_r 은 회전확산율(rotary diffusivity)로 정의되며, 회전에 대한 섬유 상호간의 간섭작용을 고려하기 위한 것으로, 이 영향을 무시한다면 식 (19)는 Jeffery(1922)의 방정식과 같아진다.

Folgar and Tucker(1984)는 D_r 에 대해 $D_r = C_f \dot{\gamma}$ 의 관계식을 제안하였으며, C_f 는 섬유의 형상과 섬유혼입률에 영향을 받는 계수로서 실험을 통해 구할 수 있으며, $\dot{\gamma}$ 는 유효 전단 변형률로서 $\dot{\gamma} = \sqrt{(\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij})}/2$ 의 관계식으로 주어진다.

3.3 방향성에 대한 확률밀도함수

방향성 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF), P_r 는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$P_r(\theta, \phi) = \psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (23)$$

$x=0$ 일 때, 모든 섬유가 임의 분포로 배열되어 있다고 하면, 초기 방향성 분포함수, ψ 는 $\psi(\theta, \phi) = 1/4\pi$ 의 관계가 성립한다.

유동거리에 따라 섬유의 방향성은 초기값 (θ, ϕ) 에서 (θ', ϕ') 으로 변하게 되고, 방향성 분포함수도 $\psi(\theta, \phi)$ 에서 $\psi(\theta', \phi')$ 으로 바뀌게 된다. 따라서 유동거리의 함수로 표현된 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r(\theta', \phi', x) = \psi(\theta', \phi', x) \sin\theta d\theta d\phi \quad (24)$$

유동거리에 따른 $P_r(\theta', \phi', x)$ 로부터 유체흐름에 따른 섬유의 방향성 분포 변화를 구할 수 있다.

4. 고유동 강섬유보강 모르타르의 유동에 따른 섬유 방향성의 변화 예측

여기에서는 섬유길이가 13mm이고, 직경이 0.2mm인 강섬유를 혼입한, 플로우 값이 약 250mm내외인 고유동 강섬유보강 모르타르를 이용하여 단면의 크기가 폭 180mm, 높이 270mm이고, 길이가 2,900mm인 균일 단면의 보를 제작하는 과정을 모사하여 유동에 따른 섬유 방향성 변화를 예측해 보았다. 고유동 강섬유보강 모르타르의 유동흐름에 대한 해석적 해를 이용하기 위해서 앞서 언급한 바와 같이 두 플레이트 사이에서의 정상상태 단순전단 흐름으로 가정하였다. 따라서 유속 성분은 흐름방향으로만 존재하며, 전단흐름은 완전발달유동(fully developed) 상태로 가정하여 유속분포는 식 (14)와 같으며 변하지 않는다. 유입되는 유량, Q 는 실제 타설 시의 투입속도를 고려하여 0.001m³/s로 가정하였다. 유동흐름을 2차원 평면 흐름으로 나타내기 위해서는 유체흐름의 높이를 적절한 값의 상수로 가정할 필요가 있다. 이 때 유체흐름의 높이는 유체의 종류와 특성에 따라 달라진다. 유체흐름의 높이는 실제 타설 시 발생하는 유체의 흐름 방향에 대한 수위의 구배로부터 구할 수 있으며, 유체의 선단부가 거푸집의 끝에 도달했을 때의 전체 길이에 대한 평균 수위로 가정하였다. 여기에서는 100mm로 가정하였다.

해석은 유체가 유입되는 단부에서 중앙단면까지의 거리에

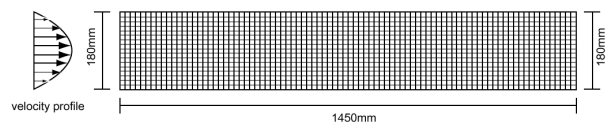


그림 4 유동 및 섬유 방향성 해석을 위한 요소

대해서 수행하였으며, 유체의 흐름선은 18개로 나누었으며, 흐름방향에 대한 간격은 200등분하였다(그림 4).

유동흐름에 대한 섬유의 방향성 변화는 Folgar and Tucker(1987)의 식을 적용하였으며, 섬유 상호간의 간섭작용(interaction among fibers)은 고려하지 않았다. 따라서 식 (25)와 같이 Jeffery(1922)의 방정식과 동일한 형태가 된다.

$$\dot{p}_i = -\frac{1}{2}\omega_i p_j + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ij} p_j - \dot{\gamma}_{kl} p_k p_l p_i) \quad (25)$$

2차원 섬유 분포에 대해 섬유의 방향 단위벡터 \bar{p} 는 식 (15)에 $\theta = \pi/2$ 를 대입하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} p_1 &= \cos \phi \\ p_2 &= \sin \phi \\ p_3 &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

그리고 식 (25)와 식 (26)으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & \frac{1}{2} \lambda \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cos 2\phi - \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sin 2\phi \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

초기 섬유분포는 임의적으로 배열되어 있다고 가정하였으며, 위 식으로부터 시간단계에 따른 ϕ 의 분포함수를 구할 수 있으며, 다음의 식 (28)을 이용하여 유동거리에 따른 방향성 확률밀도함수(PDF)를 얻을 수 있다.

$$P_r(\phi', x) = \psi(\phi', x) dx \quad (28)$$

그림 5는 해석을 수행한 단면의 위치를 나타내는 것으로 해석은 전체길이의 1/100지점(14.5mm), 1/50지점(29mm), 1/10지점(145mm), 1/5지점(290mm), 1/2지점(725mm)

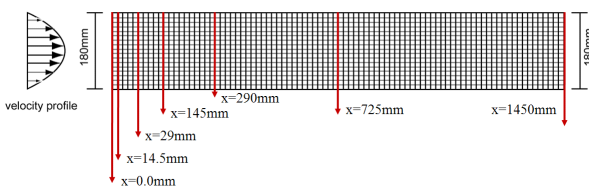
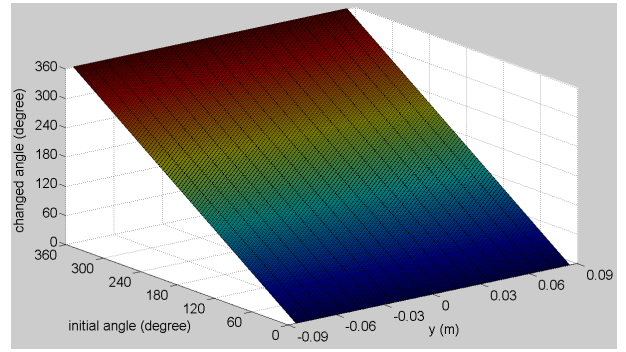
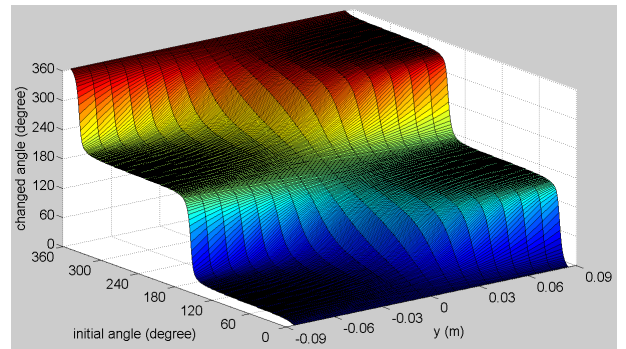


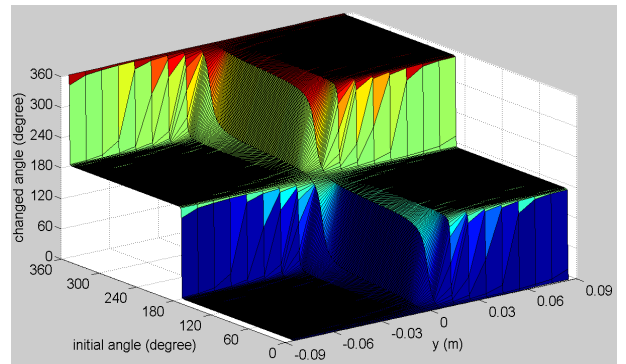
그림 5 해석 시 고려한 유동거리의 위치



(a) 초기시점



(b) x=145mm 지점



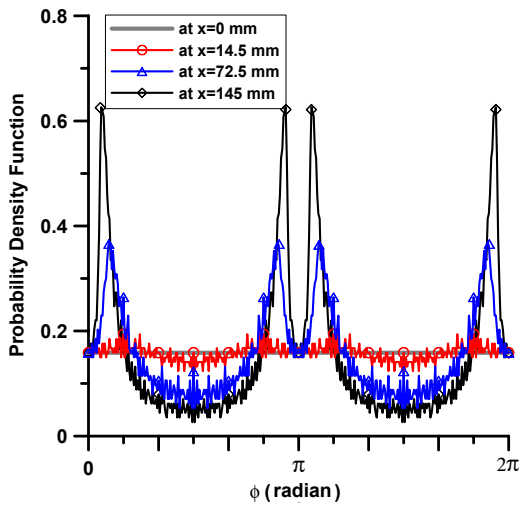
(c) x=1,450mm 지점

그림 6 유동거리에 따른 섬유 방향성 분포의 변화

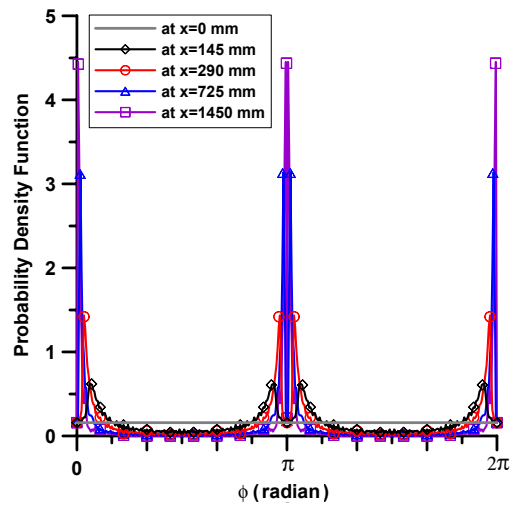
및 1,450mm 거리 지점이다.

그림 6은 식 (27)로부터 구한 초기에서와 유동거리가 각각 145mm와 1,450mm에서의 회전이동한 ϕ 의 분포를 나타낸 것이다.

그림 7은 식 (28)로부터 구한 방향성 확률밀도함수(PDF)를 ϕ 가 0에서 2π 까지 영역에서 나타낸 것이고, 그림 8은 ϕ 의 대칭성을 고려하여 0에서 $\pi/2$ 영역으로 다시 나타낸 확률밀도함수를 보여준다. 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이 유동흐름에 따라 섬유가 유동방향에 나란하게 배열되는 경향을 확인할 수 있다.

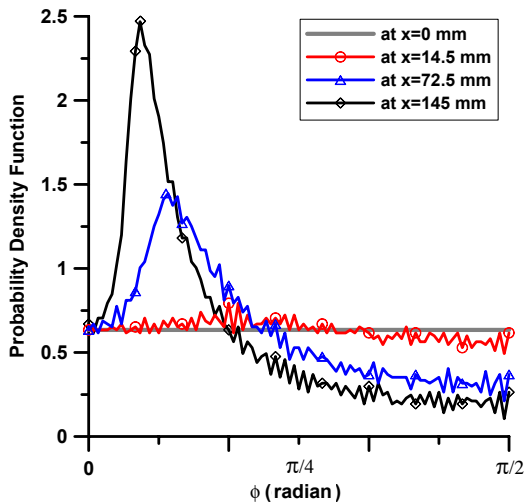


(a) $x = 145\text{mm}$ 까지의 변화

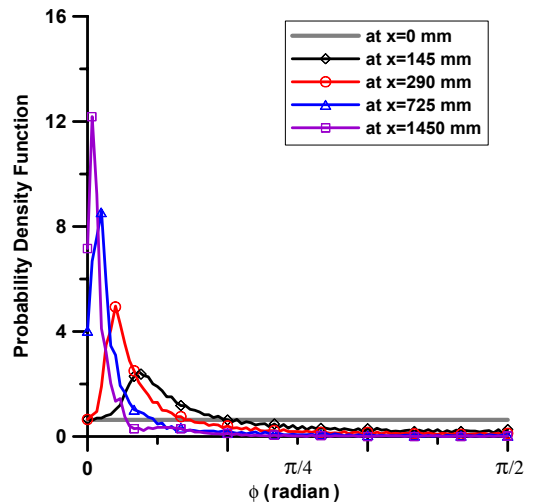


(b) $x = 1,450\text{mm}$ 까지의 변화

그림 7 2π 범위 내에서 나타난 ϕ 의 확률밀도함수 분포의 변화



(a) $x = 145\text{mm}$ 까지의 변화



(b) $x = 1,450\text{mm}$ 까지의 변화

그림 8 $\pi/2$ 범위 내에서 나타난 ϕ 의 확률밀도함수 분포의 변화

5. 결 론

본 연구에서는 고유동 강섬유보강 모르타르의 타설단계에서의 유동에 따른 모르타르 내 강섬유의 섬유 방향성 분포의 변화를 해석적으로 구하였다. 본 연구에서 고려한 형상의 구조물에 대해 주어진 해석조건으로부터 구한 해석결과에 따르면 두 평면 사이에 흐르는 모르타르의 전단흐름에 의한 섬유의 방향성 변화는 초기 150mm 이내에서 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이후에서는 방향성 분포의 경향은 크게 변하지 않으며, 다만 흐름방향에 나란한 섬유의 밀도가 집중적으로 커지는 것을 볼 수 있었다. 섬유의 방향성과 섬유보강 복합체의 인장거동과 밀접한 관련성을 고려할 때, 이와 같은 방향성의 예측을 바탕으로 유동에 따른 고유동 강섬유

보강 모르타르의 인장거동 변화의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 '하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 인성 향상 기술 개발' 연구과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Advani, S.G. (1994) *Flow and Rheology in Polymer*

- Composites Manufacturing*, Elsevier Science, Amsterdam.
- Advani, S.G., Tucker III, C.L.** (1987) The Use of Tensor to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites, *Journal of Rheology*, 31(8), pp.751~784.
- Akkaya, Y., Picka, J., Shah, S.P.** (2000) Spatial Distribution of Aligned Short Fibers in Cement Composites, *ASCE Materials in Civil Engineering*, 12(3), pp.272~279.
- Ausias, G., Agassant, J.F., Vincent, M.** (1992) Rheology of Short Glass Fiber Reinforced Polypropylene, *Journal of Rheology*, 36(4), pp.525~543.
- Batchelor, G.K.** (1970) Slender-Body Theory for Particles of Arbitrary Cross Section in Stokes Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 44, pp.419~440.
- Chiba, K., Nakamura, K.** (1998) Numerical Solution of Fiber Suspension Flow through a Complex Channel, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 78, pp.167~185.
- Chiba, K., Yasuda, K., Nakamura, K.** (2001) Numerical Solution of Fiber Suspension Flow through a Parallel Plate Channel by Coupling Flow Field with Fiber Orientation Distribution, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 99, pp.145~147.
- Dinh, S.M., Armstrong, R.C.** (1984) A Rheological Equation of State for Semiconcentrated Fiber Suspensions, *Journal of Rheology*, 28, pp. 207~227.
- Folgar, F., Tucker III, C.L.** (1984) Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 3, pp.98~119.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J.** (2004) *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Han, K.H., Im, Y.T.** (2002) Numerical Simulation of Three-Dimensional Fiber Orientation in Short-Fiber-Reinforced Injection-Molded Parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 124, pp.366~371.
- 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.
- Lin, J.Z., Sun, K., Zhang, W.** (2008) Orientation Distribution of Fibers and Rheological Property in Fiber Suspensions Flowing in a Turbulent Boundary Layer, *Acta Mech Sin*, 24, pp.243~250.
- Moses, K.B., Advani, S.G., Reinhardt, A.** (2001) Investigation of Fiber Motion near Solid Boundaries in Simple Shear Flow, *Rheol Acta*, 40, pp.296~306.
- Naaman, A.E., Reinhardt, H.W.** (1995) Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites-HPFRCC, *Proceedings of the Second International Workshop 'HPFRCD2'*, pp.3~6.
- Poitou, A., Chinesta, F., Bernier, G.** (2001) Orienting Fibers by Extrusion in Reinforced Reactive Powder Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(6), pp.593~598.
- Shah, S. P., Ouyang, C.** (1991) Mechanical Behavior of Fiber-reinforced Cement-based Composites, *Journal of American Ceramic Society*, 74(11), pp.2727~2738.
- Vincent, M., Delivers, E., Agassant, J.F.** (1997) Fiber Orientation Calculation in Injection Moulding of Reinforced Thermoplastics, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 73, pp.317~326.