

평판형 die내를 흐르는 단섬유 현탁계의 섬유배향과 압출팽창에 관한 수치해석

이종훈 · 박용민* · 이기준

서울대학교 공과대학 화학공학과
(1993년 1월 6일 접수, 1993년 4월 20일 채택)

A Numerical Analysis on the Fiber Orientation and Die Swell of the Fiber Suspensions in Slit Dies

Chong-Hoon Lee, Yong-Min Park* and Ki-Jun Lee

Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Received 6 January 1993; accepted 20 April 1993)

요 약

섬유현탁액이 평판형 압출성형 die내를 흐를 때, die의 기하학적인 형태와 초기유입배향상태가 섬유배향상태와 압출팽창비에 미치는 영향에 관해서 유한요소법을 사용하여 수치해석하였다. 섬유입자의 배향상태는 배향텐서의 개념을 사용하여 해석하였고, 섬유입자간의 상호영향을 고려하였다. 백면근처의 섬유입자는 초기유입배향상태에 관계없이 축방향으로 정렬이 되어가는 경향을 보였고, 중심선상에 놓인 섬유입자는 초기유입배향상태를 그대로 유지하였다. 팽창 및 수축형 도입부를 가진 die를 사용하면 초기유입배향상태의 조절이 가능하다는 것을 수치해석 결과 확인할 수 있었다. 섬유입자간의 상호영향을 나타내는 인자인 C_i 값이 증가함에 따라 섬유입자의 정렬상태는 흐트러지며 압출팽창비는 증가한다. 압출팽창비는 die의 L/D가 증가할수록 팽창평판 die의 경우 감소하였고, 수축평판 die의 경우 증가하였다. 또 정렬된 초기유입배향상태일 때의 압출팽창비가 임의배향의 초기유입배향 상태일 때의 그것보다 작았다.

Abstract—The effects of the geometrical shape of extrusion dies and the fiber orientation at the entrance on fiber orientation and die swell were analyzed numerically by finite element method. The fiber orientation and the interaction among the fibers were analyzed by way of the orientation tensors. The fibers near the die wall aligned along the flow direction regardless of its initial orientation. But the fibers near the center line retained its initial orientation. It was verified that the use of extrusion dies of contraction or expansion entrance made it possible to control the fiber orientation significantly. The C_i value which represents the interaction among fibers also affects the orientation and the die swell. The orientation disturbed and the swell ratio increased as the C_i increases. The swell ratio decreased in expansion die but increased in contraction die as the L/D ratio increases. The swell ratio when fibers were introduced as aligned state was smaller than the case of randomly introduced state.

1. 서 론

단섬유강화 고분자 복합재료는 고분자 재료의 기계적, 물리적 그리고 열적 물성의 향상을 위해 고분자수지상에 역학적 성질이 좋은 단섬유입자를 첨가한 것이다. 이 재료는 용융체상태로 가공이 가능하기 때문에 성형이 용이하고, 생산과정에서 기존의 공정설비를 거의 변경시키지 않고 사용할 수 있어서 경제적이기도 하다. 그러나 가공온도를 높여야 하며 가공장치의 마모가 심하고 섬유배향에 따라 최종제품의 물성이 비등방성을 가지는 단점이 있다.

이 재료의 성형공정에서는 첨가한 섬유입자의 양과 형태 그리고 현탁계내에서의 섬유배향상태 등이 유동장과 최종제품의 유변물성 및 기계적 특성에 영향을 미치며, 또한 유동장도 섬유의 배향분포에 영향을 미치는 상호작용을 한다. 섬유배향은 제조공정중의 유동장, 섬유의 파괴분율, 섬유의 형상비 그리고 die의 형태 등의 영향을 받으므로, 이런 현탁계에 대한 유변학적 연구를 통하여 첨가하는 섬유입자의 양과 형태 그리고 현탁계내에서의 배향분포 등의 여러 인자와 유동장과의 상호관계를 규명함으로써 복합재료 성형공정에 유용한 자료를 제시할 수 있다.

평판형 및 원통형 제품의 압출성형공정에서는 일반적으로 압출 die의 단면적보다 압출된 물질의 단면적이 더 크게 되는데, 이를 압출팽창현상이라고 한다. Die의 지름과 압출물의 지름의 비로 정의되는 압출팽창비는 고분자물질의 종류, 첨가한 섬유의 양과 형태 그리고 현탁계 내에서의 섬유의 배향상태 등의 영향을 받는다. 따라서 고분자 복합재료의 압출성형공정에서 정밀한 치수의 제품 생산을 위해서는 현탁계의 압출팽창현상 및 압출팽창비에 영향을 미치는 인자들에 대한 정확한 해석이 필요하다.

단섬유강화 고분자 복합재료에 대한 이론적 연구는 뉴튼성유체와 비구형입자로 구성된 현탁계에 대한 이론이 그 기본이 된다. 비구형입자 현탁계에 대한 이론적 해석은 Jeffery[1]에 의해 처음으로 시도되어 뉴튼성유체 내에 부유하는 타원형입자의 운동에 대한 운동방정식이 제시되었다.

Batchelor[2]는 섬유입자와 유체사이의 상호영향을 고려하여 뉴튼성유체와 입자의 모양을 가진 입자들로 구성된 현탁계에 대한 유변상태식을 유도하였다. Dinh과 Armstrong[3]은 Batchelor의 식을 토대로 형상비가 큰 섬유입자 현탁계의 균질유동장에 대한 적분식형태의 유변상태식을 유도하였다. Advani와 Tucker[4, 5]는 섬유현탁계의 이론적 해석에 배향텐서를 도입하여 여러 가지 형태의 유동장에 대한 섬유배향상태를 구하였다.

섬유현탁계의 유동장에 대한 수치모사는 Givler 등[6]에 의해 유한요소법을 사용한 입자추적방식으로 시도되었다. 이들은 섬유입자가 유동장에 미치는 영향이 무시될 정도의 묶은 현탁계를 가정하여 Jeffery가 제시한 섬유입자운동식을 유선을 따라 수치적분하여 섬유입자의 배향상태를 구하였다.

Gillespie 등[7], Altan 등[8]과 Jackson 등[9], Advani와 Tucker 등[10]은 이와 유사한 방법으로 각각 사출성형공정과 압출성형공정에 대해 수치해석을 수행하였다. Rosenberg 등[11]은 이와 같은 수치모사방법으로 평판 die에서의 압출팽창에 대해 해석하였다.

Papanastasiou와 Alexandrou[12]와 장재연[13]은 Dinh와 Armstrong이 제안한 적분식형태의 유변상태식을 사용하여 streamlined 유한요소법으로 뉴튼성유체내에 막대형 섬유입자가 들어 있는 현탁계의 압출팽창현상에 대해 해석하였다. 이들의 결과에서 압출팽창비는 섬유입자의 파괴분율이 증가에 따라 감소하였다.

본 연구에서는 slit die를 대상으로 하여 형상비가 큰 단섬유 현탁계의 섬유배향과 압출팽창에 대하여 유한요소법을 사용한 수치모사를 수행하였다. 특히 여러 형태의 유입부를 가진 die를 대상으로 die내로 유입되는 섬유입자의 초기유입배향상태에 따른 유동장과 섬유배향상태 그리고 압출팽창에 대해 유변학적 해석을 통하여 섬유입자의 배향을 조절하는 방법을 제시하였다.

2. 수학적 모델링과 지배 방정식

2-1. 배향텐서의 변화식

섬유의 배향상태를 수치적으로 표현하기 위하여 배향텐서를 상태변수로 도입하였다. 배향텐서는 섬유의 방향을 나타내는 단위벡터의 다이아드와 배향분포함수와 곱을 모든 가능한 방향으로 적분함으로써 정의할 수 있는데, 고려의 대상이 되는 2차, 4차 배향텐서는 다음과 같다.

$$\langle pp \rangle = \int PP\Psi(P)dP \quad (1a)$$

$$\langle pppp \rangle = \int PPPP\Psi(P)dP \quad (1b)$$

배향텐서가 섬유의 배향상태를 기술함에 있어서 유용성을 가지기 위해서는 배향텐서의 변화식을 변형율의 함수로써 나타낼 수 있어야 한다. 섬유입자 하나에 대한 운동방정식과 배향분포함수에 대한 연속방정식을 결합하면 배향분포함수에 대한 변화식을 얻을 수 있고, 이 식을 배향텐서의 정의와 결합하면 배향텐서에 대한 변화식을 얻을 수 있다.

섬유입자 하나에 대한 운동방정식은 다음과 같이 Jef-

ferly 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = W \cdot P + \lambda [D \cdot P - P(P \cdot D \cdot P)] \quad (2)$$

여기서, P 는 배향벡터로서 섬유입자의 놓인 방향을 나타내는 단위벡터, W 는 $(\nabla v - \nabla v^T)$ 로 표시되는 vorticity 텐서, D 는 $(\nabla v + \nabla v^T)$ 로 표시되는 변형율텐서, 그리고 λ 는 입자의 형상에 관련되는 인자로 $(r_p^2 - 1)/(r_p^2 + 1)$ 로 표시된다.

한편, 배향분포함수에 대한 연속방정식은 Fokker-Plank식으로부터 구할 수 있는데, Brown운동을 무시한 경우는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \nabla \cdot (P\Psi) \quad (3)$$

식 (2)와 (3) 그리고 배향텐서의 정의로부터 다음과 같은 배향텐서에 대한 변화식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{Da_2}{Dt} = & -(W \cdot a_2 - a_2 \cdot W) + \lambda(D \cdot a_2 + a_2 \cdot D - 2D : a_4) \\ & + 2C_I \dot{\gamma}(I - 2a_2) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 C_I 는 섬유입자간의 상호영향을 나타내는 계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 변형율 텐서의 스칼라량이다. 여기서 4차배향텐서는 quadratic closure 근사를 사용하여 $a_4 = a_2 a_2$ 로 표시하였다.

2-2. 지배 방정식과 경계 조건

수치해석을 위해 본 연구에서 사용한 가정은 다음과 같다.

- (1) 현탁계는 비압축성 뉴턴유체와 강체인 섬유입자로 구성되어 있다.
- (2) 중력 및 외력은 무시하고 온도는 일정하게 유지한다.
- (3) 유동장은 정상상태이고 관성질량은 무시한다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \tau = 0 \quad (6)$$

여기서 τ 는 현탁계의 응력으로서 다음과 같다.

$$\sigma = -P_0 I + 2\mu D + \Phi \sigma \quad (7)$$

여기서, μ 는 현탁매질의 점도, Φ 는 입자의 부피분율이다. 또, σ 는 입자의 존재에 의한 응력으로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma = & -P_0 I + 2\mu_0 D + \mu_1 \langle PP \rangle + \mu_2 D : \langle PPPP \rangle \\ & + 2\mu_3 (D \cdot \langle PP \rangle + \langle PP \rangle \cdot D) \end{aligned} \quad (8)$$

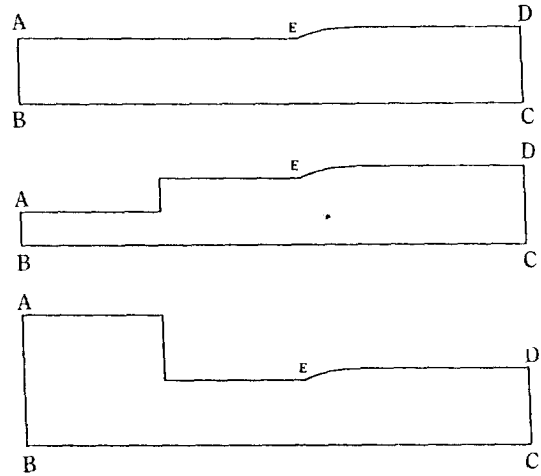


Fig. 1. Boundary conditions used in numerical simulation.

여기서 P 는 배향벡터로서 섬유입자가 놓인 방향을 나타내는 단위벡터이고, $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ 는 섬유의 형상비 r_p 가 100 이상의 큰 값을 갖는 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_0 = 2\mu \quad (9a)$$

$$\mu_1 = \mu_3 = 0 \quad (9b)$$

$$\mu_2 = \frac{\mu \pi r_p^2}{3 \ln(4/\Phi)} \quad (9c)$$

이상의 결과들과 배향텐서의 변화식을 정리하면 섬유형상비가 큰 경우의 섬유현탁계에 대한 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\text{연속방정식 : } \nabla \cdot V = 0 \quad (10)$$

$$\text{운동방정식 : } \nabla \cdot \tau = 0 \quad (11)$$

$$\text{유변상태식 : } \tau = -P_0 I + 2\mu(1 + 2\Phi)D + \mu_2 \Phi D : a_4 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{배향텐서식 : } V \cdot \nabla a_2 = & -(W \cdot a_2 + a_2 \cdot W) + \lambda(D \cdot a_2 \\ & + a_2 \cdot D - 2D : a_4) + 2C_I \dot{\gamma}(I - 2a_2) \end{aligned} \quad (13)$$

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 평판형 압출 die의 수치 해석영역을 도식한 것이다. 각 영역에 적용되는 경계 조건을 수식화하면 다음과 같다.

$$\text{유입구(AB) : } u = 1 - y^2, v = 0 \quad (14a)$$

$$\text{대칭면(BC) : } \tau_{xy} = 0, v = 0 \quad (14b)$$

$$\text{출구(CD) : } -p + \tau_{xx} = 0, v = 0 \quad (14c)$$

$$\text{자유경계면(DE)} : \tau_n = 0, -p + t_{nn} = 0 \quad (14d)$$

$$\text{벽면(EA)} : u = 0, v = 0 \quad (14e)$$

여기서 τ_n , τ_{nn} 은 각각 자유경계면에서 접선, 법선방향으로 미치는 단위 면적당의 힘을 나타낸다. 현탁계는 입구에서 포물선 모양의 속도분포를 가지고 유입되어, 출구에서 편평한 속도분포로 변화된다. 현탁계의 경우에는 유입구에서만 섬유배향상태를 달리하는 확정값을 주었으며, 벽면과 자유경계면, 중심부분과 출구부분에서는 확정값을 주지 않고 계산하였다.

3. 수치 해석

평판형 압출성형 die내에서의 유동장 및 섬유의 배향상태에 대한 연속방정식, 운동방정식, 배향텐서의 변화식을 유한요소법을 사용하여 수치 해석하였다. 해석의 대상이 되는 전영역을 300개의 사각형 요소로 분할하였으며, 유동장의 변화가 심한 부분-수축 또는 팽창부분, die의 출구부분-은 조밀하게 분할하였다.

유한요소법으로 유동장과 섬유배향상태를 해석하기 위하여 지배방정식을 Galerkin 수식화하면 직교좌표계에서의 연속방정식, 운동방정식은 다음과 같다.

$$\langle \phi_i; u_x \rangle + \langle \phi_i; v_y \rangle = 0 \quad (15)$$

$$\langle \phi_{ix}; -p + \tau_{xx} \rangle + \langle \phi_{iy}; \tau_{xy} \rangle = \langle \phi_i; t_x \rangle \quad (16a)$$

$$\langle \phi_{ix}; \tau_{xy} \rangle + \langle \phi_{iy}; -p + \tau_{yy} \rangle = \langle \phi_i; t_y \rangle \quad (16b)$$

여기서, $\langle \cdot \rangle$ 는 면적분을, $\ll \cdot \gg$ 는 선적분을 의미하며, ϕ_i , ϕ_n 는 각각 일차, 이차형상함수이며, t_x , t_y 는 contact force의 x, y성분으로 압출팽창의 유동의 경우 표면장력의 효과가 없다고 가정할 때 경계조건식 (14)로부터 무시된다.

식 (12)의 유변상태식과 식 (13)의 배향텐서식으로 부터 응력텐서의 각 성분과 배향텐서의 각 성분은 다음과 같다.

$$\tau_{xx} = 2\mu_0(1+2\Phi)u_x + \Phi\mu_1[v_y a_{11} + u_x a_{11} a_{12} + u_y a_{11} a_{12} + v_x a_{11} a_{12} - v_y a_{11} a_{11}] \quad (17a)$$

$$\tau_{xy} = \mu_0(1+2\Phi)(u_y + v_x) + \Phi\mu_1[v_y a_{12} + u_x a_{11} a_{12} + u_y a_{12} a_{12} + v_x a_{12} a_{12} - v_y a_{11} a_{12}] \quad (17b)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu_0(1+2\Phi)v_y + \Phi\mu_1[v_y + u_x a_{11} + v_x a_{12} + u_y a_{12} - 2v_y a_{11} - u_x a_{11} a_{11} - u_y a_{11} a_{12} - v_x a_{11} a_{12} + v_y a_{11} a_{11}] \quad (17c)$$

$$ua_{11,x} + va_{11,y} = (1/2)(2\lambda - 1)u_x a_{12} + (1/2)(2\lambda + 1)v_x a_{12} + \lambda[u_x a_{11} - v_y a_{11}]$$

$$-u_x a_{11} a_{11} - u_x a_{11} a_{12} - v_x a_{11} a_{12} + v_y a_{11} a_{11}] + 2D_r(1 - 2a_{11}) \quad (18a)$$

$$ua_{12,x} + va_{12,y} = (1/2)u_x a_{11} - (1/2)v_x a_{11} + (1/2)(\lambda - 1)u_y + (1/2)(\lambda + 1)v_y + \lambda[u_x a_{12} + v_y a_{12} - 2u_x a_{11} a_{12} - 2u_y a_{12} a_{12} - 2v_x a_{12} a_{12} - 2v_y a_{11} a_{12}] - 4D_r a_{12} \quad (18b)$$

식 (17)을 식 (16)에 대입하여 응력항을 소거하면 다음을 얻는다.

$$\langle \phi_{ix}; -p + 2\mu_0(1+2\Phi)u_x + \Phi\mu_1[v_y a_{11} + u_x a_{11} a_{12} + u_y a_{11} a_{12} - v_x a_{11} a_{12}] \rangle + \langle \phi_{iy}; \mu_0(1+2\Phi)(u_y + v_x) + \Phi\mu_1[v_y a_{12} + u_x a_{11} a_{12} + u_y a_{12} a_{12} - v_x a_{12} a_{12} - v_y a_{11} a_{12}] \rangle = 0 \quad (19a)$$

$$\langle \phi_{ix}; \mu_0(1+2\Phi)(u_x + v_x) + \Phi\mu_1[v_y a_{12} + u_x a_{11} a_{12} + u_y a_{12} a_{12} + v_x a_{12} a_{12} - v_y a_{11} a_{12}] \rangle + \langle \phi_{iy}; -p + 2\mu_0(1+2\Phi)v_y + \Phi\mu_1[v_y + u_x a_{11} + v_x a_{12} + u_y a_{12} - 2v_y a_{11} - u_x a_{11} a_{11} - u_y a_{11} a_{12} - v_x a_{11} a_{12} + v_y a_{11} a_{11}] \rangle = 0 \quad (19b)$$

한편, 직교 좌표계에서의 배향텐서의 변화식을 Galerkin 수식화하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\langle \phi_i; 2D_r \rangle - \langle \phi_i; ua_{11,x} \rangle - \langle \phi_i; va_{11,y} \rangle + \langle \phi_i; [\lambda(u_x - v_y) - 4D_r]a_{11} \rangle + \langle \phi_i; (1/2)[(2\lambda - 1)u_y + (2\lambda + 1)v_x]a_{12} \rangle + \langle \phi_i; \lambda(v_y - u_x)a_{11}a_{11} \rangle - \langle \phi_i; \lambda(u_x + v_x)a_{11}a_{12} \rangle = 0 \quad (20a)$$

$$\langle \phi_i; (1/2)[(\lambda - 1)u_y + (\lambda + 1)v_x] \rangle + \langle \phi_i; (1/2)(u_y - v_x)a_{11} \rangle - \langle \phi_i; ua_{12,x} \rangle - \langle \phi_i; va_{12,y} \rangle + \langle \phi_i; [\lambda(u_x + v_y) - 4D_r]a_{12} \rangle - \langle \phi_i; 2\lambda(u_x + v_y)a_{11}a_{12} \rangle - \langle \phi_i; 2\lambda(u_y + v_x)a_{12}a_{12} \rangle = 0 \quad (20b)$$

섬유현탁액에 대한 유동장과 섬유배향분포방정식, 식 (11)-(14)를 유한요소법을 사용하여 수치해를 구함에 있어서, 속도성분 u 와 v , 압력 p , 배향텐서성분 a_{11} 과 a_{12} 는 각각 다음의 형상함수를 써서 근사적으로 표시하였다.

$$u = \sum u_j \phi_j, \quad v = \sum v_j \phi_j, \quad p = \sum p_j \phi_j, \quad a_{11} = \sum a_{11j} \phi_j, \quad a_{12} = \sum a_{12j} \phi_j \quad (21)$$

여기서 u_j , v_j , p_j , a_{12j} , a_{11j} 는 각각 질점에서의 속도성분, 압력, 배향텐서성분을 나타낸다.

근사식 (21)을 식 (15), (19), (20)에 대입하면 비선형 대수방정식계를 얻을 수 있는데 이것은 반복적인 방법으로 해를 구할 수 있다. 운동방정식과 배향방정식을

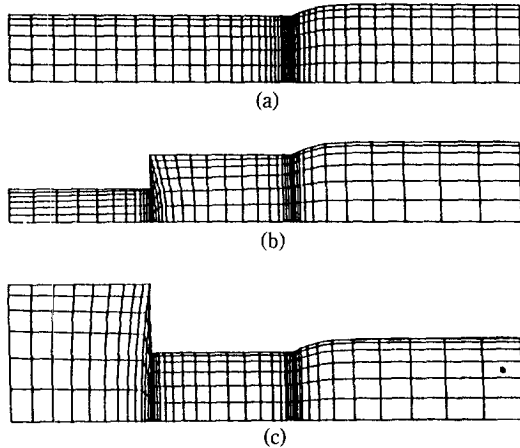


Fig. 2. Finite element grid system.

(a) simple die, (b) expansion die, (c) contraction die

Newton 반복법으로 각각 풀고, 이 두 개의 식을 Picard 반복법으로 서로 해를 교환해 가면서 풀었다. 초기유동장은 뉴튼성유체에 대한 유동장의 수렴해를 사용하였고, 섬유배향에 대한 초기값은 die 유입구에서만 확정값을 주었으며, 벽면, 중심부, 자유경계면 그리고 die의 출구에서는 확정값을 주지 않고 수치해를 구하였다.

4. 결과 및 검토

본 연구의 수치모사에 사용한 die의 구조는 Fig. 2에 나타나 있다. 단순평판 die는 L/D가 10인 경우에 대해서, 수축평판 die와 팽창평판 die는 L/D가 각각 3, 5, 10인 경우에 대해서 수치모사를 수행하였다. 섬유의 형상비는 100으로 고정하였고 초기유입배향상태는 배향텐서의 축방향배향을 나타내는 a_{11} 값을 1.0, 0.8, 0.5로 변화시켰다. 섬유입자간의 상호영향을 나타내는 인자인 C_f 는 1에서 0.001까지 점차적으로 줄여나가면서 수치해석을 수행하였다. 이상과 같은 수치해석을 통하여 die의 구조와 유입배향상태가 유동장과 섬유배향 및 압출배향에 미치는 영향을 섬유입자간의 상호영향을 고려하여 해석하였다.

4-1. 단순평판 die

Fig. 3과 4는 C_f 가 0.005인 경우에 대해서 초기유입배향상태에 따른 die의 벽면근처와 중심부에서의 섬유의 배향상태를 나타낸 것이다. 벽면근처의 섬유입자는 초기유입배향상태에 관계없이 짧은 거리내에서 축방향으로 정렬이 되는 경향을 보였지만, 중심선의 섬유입자는 초

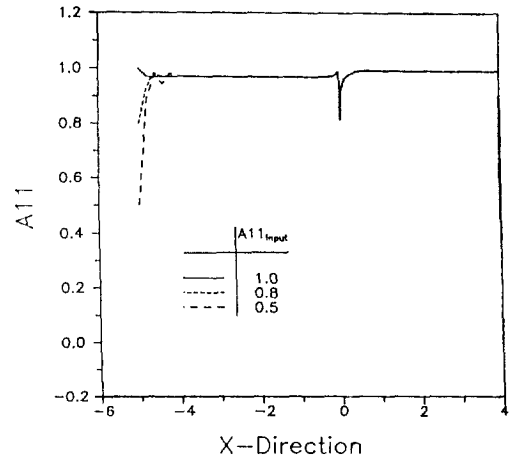


Fig. 3. The a_{11} values along x-direction with various input orientation states at $C_f=0.005$ near the die wall.

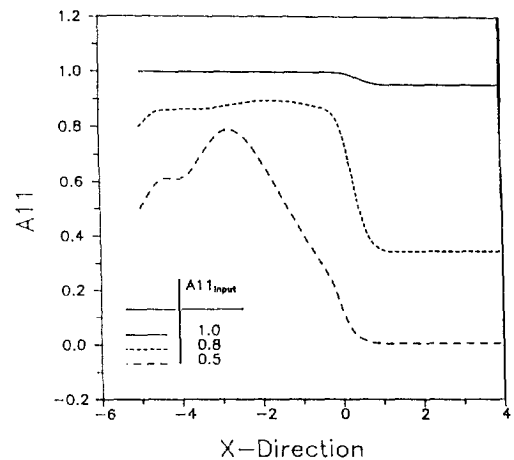


Fig. 4. The a_{11} values along x-direction with various input orientation states at $C_f=0.005$ at the center-line.

기유입배향상태를 그대로 유지하였다. 이는 벽면근처의 섬유입자들은 신장력과 강한 전단응력의 영향으로 인해 유동방향으로의 정렬이 이루어지지만 중심선의 섬유입자들은 압축력과 약한 전단응력의 영향으로 인해 초기배향상태가 유지되기 때문이다.

Fig. 5는 유입배향상태가 정렬배향상태인 경우에 대해서 C_f 값의 변화에 따른 중심선에서의 섬유의 배향상태를 나타낸 것으로 C_f 값이 커짐에 따라 die 밖에서의 섬유입자의 정돈상태가 급격히 깨어짐을 알 수 있다. C_f 값의 증가는 섬유입자간의 상호영향이 커졌음을 나타내는데 이것이 섬유의 배향상태에도 영향을 미친 것으로 생각된다.

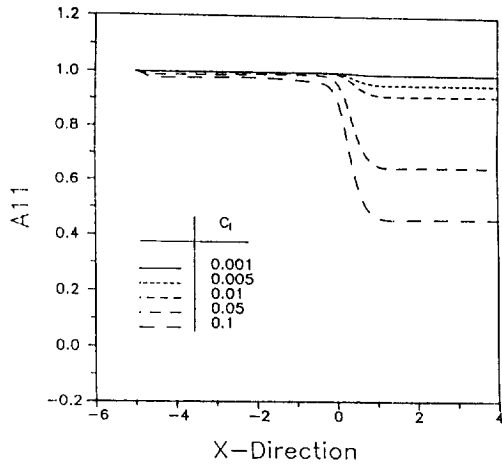


Fig. 5. The a_{11} values along x-direction with various C_i values at the center-line where the input orientation is 1.0.

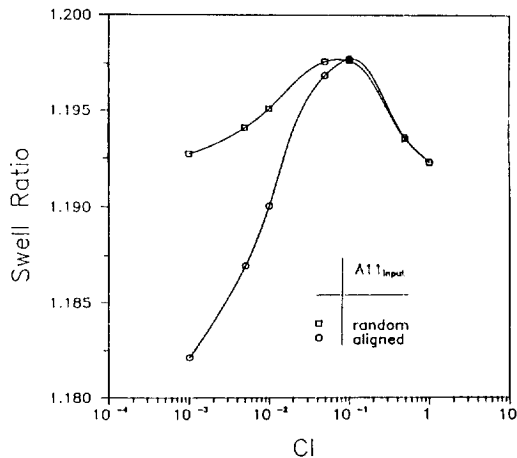


Fig. 6. Swell ratio versus C_i value with various input orientation states.

Fig. 6은 초기유입배향상태가 다른 경우에 대해서 C_i 값에 따른 압출팽창비를 나타낸 것이다. C_i 값이 작아질수록 임의배향상태로 유입된 경우의 압출팽창비가 정렬배향상태로 유입되었을 때의 그것보다 크게 나타나는데, 이는 유동장에서의 섬유입자들의 배향상태와 밀접하게 관련되어 있다. 앞에서 설명했듯이 벽면근처의 섬유입자들은 축방향으로 정렬이 잘 된 반면에 중심부의 섬유입자는 상대적으로 임의배향상태에 있게 된다. 따라서 신장점도는 벽면 및 자유경계면 근처에서 크게 나타나며 이는 유체의 신장을 저하시킴으로서 속도가 많이 증가하지 못하게 되어 압출팽창비가 증가하는 것이다[13].

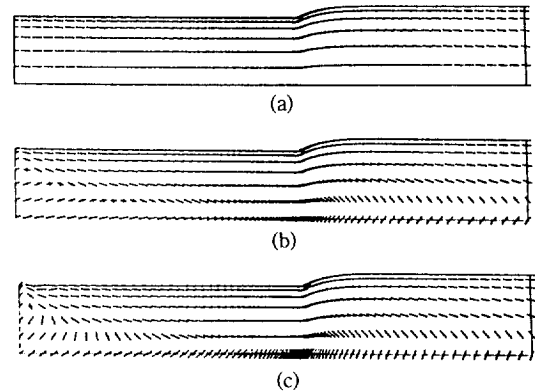


Fig. 7. The fiber orientation pattern where the input orientation is (a) 1.0, (b) 0.8 and (c) 0.5, respectively.

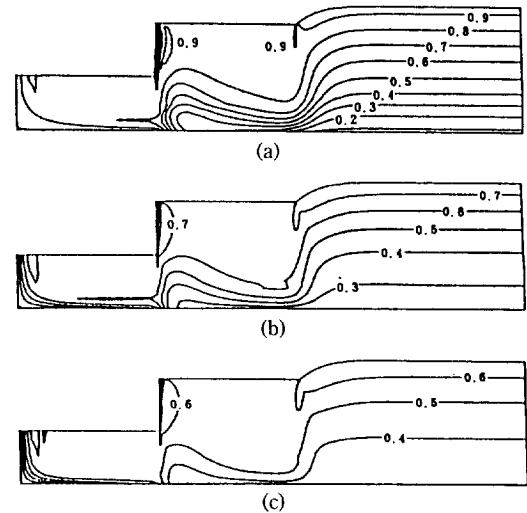


Fig. 8. The distribution of a_{11} values for the expansion die with L/D of 5, where C_i is (a) 0.2, (b) 0.5 and (c) 1.0, respectively.

또, Fig. 6에서 두 경우 모두 $C_i = 0.1$ 근처에서 압출팽창비가 최대가 되는 특성을 보였다. C_i 는 섬유입자간의 상호영향을 고려해 주기 위한 인자이다. 섬유입자간의 상호영향을 나타내기 위해서는 섬유의 부피분율, 형상비, 유동장 등의 함수이어야 함은 당연하다. 그런데 섬유의 부피분율, 섬유입자의 형상비, 유동장 등은 어떤 대상이 정하여지면 그에 따라 자연히 정하여지므로 그 대상에 대한 C_i 값도 정하여진다. Die 내부의 현탁계의 유동에서 die 벽근처의 섬유입자들은 강한 전단응력을 받는 반면에 die 중심부의 섬유입자들은 상대적으로 약한 전단응력을 받는다. 따라서 벽근처의 섬유입자들은 축방향으로 정렬이 잘 되고, 중심선상의 섬유입자들은

Table 1. Experimental values of interaction coefficient

Matrix fluid	Fiber material	Nominal aspect ratio r_f	Fiber volume fraction	Fiber weight fraction	Interaction coefficient C_I
Silicone oil	Nylon	16	0.01	—	0.0038
		16	0.08	—	0.0081
		16	0.016	—	0.0165
		16	0.063	0.08	0.035
	Polyester	83	0.0004	—	0.0032
		83	0.0030	—	0.0035
		83	0.0060	—	0.0042
		83	0.0130	—	0.0044
Polypropylene	Glass fiber	—	—	0.2	0.1

주어진 유입배향상태가 그대로 유지되어야 한다. Fig. 5를 보면 C_I 가 0.005, 0.001인 경우에는 유입배향상태가 거의 유지되고 있으나, C_I 가 0.01보다 크게 되면 die의 출구에서 섬유 배향이 급격히 임의배향상태로 변화함을 알 수 있다. 물론 die 출구에서는 유동장이 변화하지만 C_I 값에 따른 유동장의 차이는 거의 없으므로 유동장의 차이에 의한 영향이라고 보기는 힘들다. 그러므로 본 연구의 대상인 단순평판 die내에서의 현탁계의 유동에서 C_I 가 10^{-3} 정도의 값을 가진다고 해석할 수 있다. 또, Papanastasiou[14] 결과에 의하면 정렬상태에서의 압출팽창비는 뉴턴성유체의 압출팽창비(1.19)보다 작다. Fig. 8을 보면, C_I 값이 0.005보다 작을 때의 압출팽창비는 뉴턴성유체의 그것보다 작지만, C_I 가 0.01보다 크면 뉴턴성유체의 그것보다 크다. 이것 역시 단순평판 die내의 현탁액의 유동에서 C_I 가 10^{-3} 정도임을 의미하는 것이다. Table 1은 Funatsu 등[15]이 정리한 실험결과인데, 역시 C_I 값이 10^{-3} 정도임을 알 수 있다.

Fig. 7은 C_I 값이 0.005인 경우에 대해서 단순평형 die 내에서의 섬유배향상태를 도시한 것이다. 섬유입자는 두 축중에서 장축방향으로 정렬이 되어 있고, 두 축의 크기가 비슷한 지점에서는 임의배향상태에 있음을 의미한다. 초기유입배향상태가 정렬배향상태인 (a)의 경우에 벽면 근처와 중심선 모두에서 섬유입자는 축방향으로 정렬이 되어 있음을 알 수 있다. 반면에 초기유입배향상태가 임의배향상태인 (b)와 (c)의 경우에는 섬유입자가 벽면 근처에서는 짧은 거리내에서 축방향으로 정렬이 되지만 중심부에서는 주어진 초기유입배향상태가 거의 그대로 유지됨을 알 수 있다.

4-2. 팽창평판 die와 수축평판 die

앞의 단순평판 die에서는 배향텐서의 a_{11} 값을 die 입구에서 다르게 줌으로서 유입배향상태를 조절하였다. 그러나 이런 방법은 수치해석에서나 가능한 것이므로 실제 제조업에서 여러 초기유입배향상태를 가진 현탁계의 유

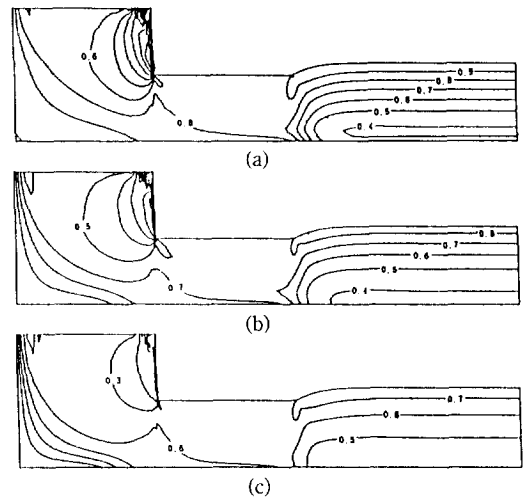


Fig. 9. The distribution of a_{11} values for the contraction die with L/D of 5, where C_I is (a) 0.2, (b) 0.5 and (c) 1.0, respectively.

동장을 얻기 위해서는 다른 방법을 고려해야 한다. 실제 제조업에서는 섬유의 배향상태를 원하는 상태로 조절하기 위해서는 앞의 Fig. 2에 도시된 바와 같이 유입부 앞쪽에 팽창, 수축하는 형태의 도입부를 설치한 팽창평판 die와 수축평판 die를 사용하는 방법이 유용하다. 본 연구에서는 이런 형태의 die를 대상으로 수치해석을 수행하여 배향상태의 조절에 적용될 수 있는 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 8과 9는 die의 L/D가 5인 경우에 대해서 C_I 값이 다를 때 각각 팽창평판 die와 수축평판 die내에서의 섬유의 배향분포를 나타낸 것으로, 각각의 숫자들은 축방향으로의 섬유배향을 나타내는 a_{11} 값이다. 팽창평판 die와 수축평판 die를 지나면서 섬유의 배향상태가 각각 임의배향상태와 정렬배향상태로 변화함을 알 수 있다. 또, C_I 값이 작아짐에 따라 섬유의 배향상태가 정렬배향

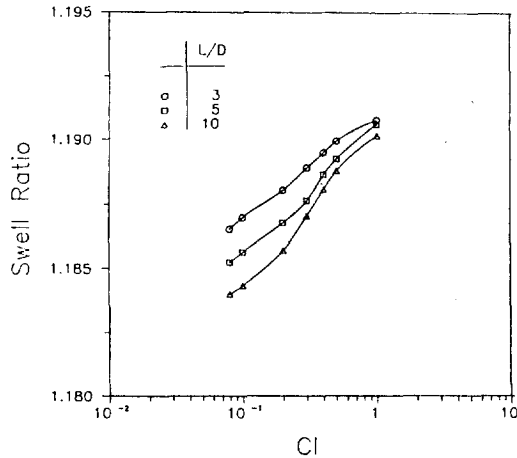


Fig. 10. Swell ratio versus C_I value for various L/D for the expansion die.

상태로 변화함을 알 수 있는데, 이는 섬유입자간의 상호영향이 작아질수록 섬유입자는 축방향으로 정렬이 더 잘 됨을 의미하는 것이다.

Fig. 10은 팽창평판 die에서 die의 L/D 가 다를 때 C_I 값에 따른 압출팽창비를 나타낸 것이다. C_I 값이 작아질수록 압출팽창비는 작아지는데, 이는 앞의 단순평판 die에서 설명했듯이 C_I 값이 작아질수록 즉, 섬유입자간의 상호영향이 작아질수록 섬유입자는 축방향으로 정렬되는 경향이 커지기 때문에 압출팽창비가 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 또, die의 L/D 가 증가할수록 압출팽창비는 감소하는데, 이는 뉴턴성유체의 경우와 반대되는 경향이다. 팽창 die에서는 입의배향상태의 섬유입자가 die로 유입되어 die를 지나면서 축방향으로 정렬이 되는데, die의 길이가 길수록 정렬이 더 잘 된다. 따라서, die의 L/D 가 큰 경우에 압출팽창비는 감소하는 것이다.

Fig. 11은 수축평판 die에서 die의 L/D 가 변화할 때 C_I 값에 따른 압출팽창비를 나타낸 것이다. C_I 값이 작을수록 압출팽창비는 작아지는데, 이는 팽창평판 die에서의 현상과 같은 경향이다. 즉, 섬유입자간의 상호영향이 작아질수록 섬유입자가 정렬상태로 유지되고, 따라서 압출팽창비는 감소하는 것이다. 또, die의 L/D 가 증가할수록 압출팽창비는 증가하는데, 이는 팽창평판 die에서의 현상과 상반되는 경향이다. 수축평판 die에서는 완전정렬 상태의 섬유입자가 die로 유입되는데, die를 지나면서 섬유입자간의 상호영향으로 인해 섬유입자의 정렬상태는 약간 깨진다. 팽창평판 die에서는 유입배향상태가 입의배향상태이므로 이러한 입자간의 상호영향이 두드러지게 나타나지 않았으나, 수축평판 die에서의 유입배향상태가 완전정렬상태이므로 이러한 입자상호

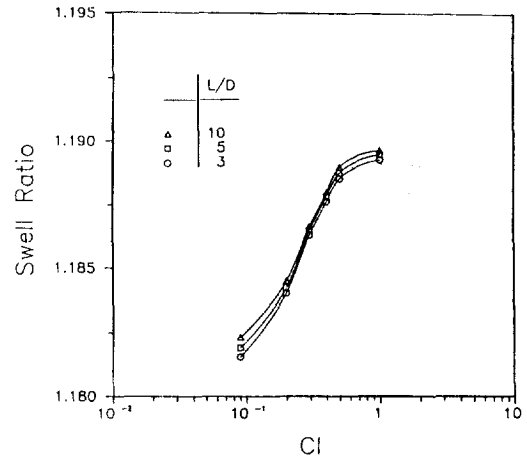


Fig. 11. Swell ratio versus C_I value for various L/D for the contraction die.

간의 영향이 나타난 것이다. 그러나 수축평판 die에서의 L/D 에 따른 압출팽창비의 차이는 그 절대적 크기에 있어서는 팽창평판 die에서의 L/D 에 따른 압출팽창비의 차이보다 작기 때문에 그 영향은 미미하다고 할 수 있다.

5. 결 론

단순평판, 팽창평판, 수축평판 등 3가지 형태의 평판형 die를 대상으로 die의 기하학적인 형태와 초기유입배향상태가 단섬유 현탁계의 섬유배향과 압출팽창에 미치는 영향에 관해 유한요소법으로 수치해석하였다. 벽면근처의 섬유입자는 초기유입상태에 관계없이 짧은 거리 내에서 축방향으로 정렬이 되었지만 중심선에서는 주어진 초기유입상태가 그대로 유지되었다. 팽창평판 die를 사용하면 입의배향의 유입배향상태를, 수축평판 die를 사용하면 정렬된 초기유입배향상태를 얻을 수 있음을 수치해석을 통해 확인하였다. 섬유입자간의 상호영향을 나타내는 인자인 C_I 값이 커짐에 따라 섬유입자는 정렬이 깨어져 가는 경향을 보였다. 또, 본 연구의 대상이 된 단순평판 die내에서의 단섬유 현탁계에 대한 적절한 C_I 값은 수치해석 결과 10^{-3} 정도임을 알 수 있다. 압출팽창비는 C_I 값이 작을수록 감소하고, 입의배향상태로 유입되었을 때의 압출팽창비가 정렬상태로 유입되었을 때의 압출팽창비보다 크다. 팽창평판 die에서의 압출팽창비는 die의 L/D 가 감소할수록, 수축평판 die에서의 압출팽창비는 die의 L/D 가 증가할수록 증가한다. 현탁계의 유동 특성 및 배향상태에 영향을 미치는 섬유입자의 첨가량, 섬유입자의 형상비, 유변물성의 변화 등에 대한 깊은 연구가 요망된다.

사용기호

a_2	: second-order orientation tensor
a_4	: forth-order orientation tensor
C_f	: phenomenological interaction coefficient
D	: deformation rate tensor
p	: pressure
P	: unit vector
r_p	: aspect ratio of fiber
v	: velocity vector
W	: vorticity tensor

그리스 문자

γ	: scalar magnitude of the strain-rate tensor
λ	: shape function of fiber
μ	: viscosity of suspending medium
μ_0	: material constant
μ_1	: material constant
μ_2	: material constant
μ_3	: material constant
σ	: deviatoric stress tensor
τ	: total stress tensor of suspension
Φ	: volume fraction of fibers
ϕ_i	: linear interpolation function
ϕ_j	: quadratic interpolation function
Ψ	: probability density function

참고문헌

1. Jeffery, G. B. : *Proc. Roy. Soc.*, **A102**, 161(1992).
2. Batchelor, G. K. : *J. Fluid Mech.*, **41**, 545(1970).
3. Dinh, S. M. and Armstrong, R. C. : *J. Rheology*, **28**, 207(1984).
4. Advani, S. G. and Tucker III, C. L. : *J. Rheol.*, **31**, 751(1987).
5. Advani, S. G. and Tucker, C. L. : *J. Rheol.*, **34**, 367(1990).
6. Givler, R. C., Crochet, M. J. and Pipes, R. B. : *J. Comps. Mater.*, **17**, 330(1983).
7. Gillespie, J. W., Vanderschuren, J. A. and Pipes, R. B. : *Polym. Compos.*, **6**, 82(1985).
8. Altan, M. C., Subbiah, S., Güçeri, S. J. and Pipes, R. B. : *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 848(1990).
9. Jackson, W. C., Advani, S. G. and Tucker, C. L. : *J. Compo. Mater.*, **20**, 539(1986).
10. Advani, S. G. and Tucker, C. L. : *Polym. Eng. Sci.*, **41**, 164(1990).
11. Rosenberg, J., Denn, M. M. and Keunings, R. : *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **37**, 317(1990).
12. Papanastasiou, A. C. and Alexandrou, A. N. : *J. Non-Newt. Mech.*, **25**, 313(1987).
13. Jang, J. E. : "Numerical Study on the Die Swell Flow of Semiconcentrated Fiber Suspension", M. S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea (1990).
14. Papanastasiou, A. C., Macosko, C. W. and Scriven, L. E. : "Streamlined Finite Element and Transit Times" in : Gallagher, R. H., Carey, G., Oden, J. T. and Zienkiewicz, O. C. (Eds.), *Fin. Elem. Fluid*, John Wiley and Sons, 6, 263(1985).
15. Funatsu, K., Tanoue, S. and Kajiwar, T. : "Numerical Simulation on Fiber Orientation and Dispersion in Extrusion", 6th Annual Meeting, PPS, 119(1990).