

## 분수유동장내에서의 단섬유 배향의 수치모사

고 진 · 윤재륜

한국과학기술원 정밀공학과  
(1993년 4월 7일 접수)

### Simulation of Short Fiber Orientation in Fountain Flow Field

Jin Ko and Jae Ryoun Youn

Department of Precision Engineering & Mechatronics, KAIST  
373-1, Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-701, Korea

(Received April 7, 1993)

#### 요 약

유동성형시 발생하는 두께방향의 단섬유 배향을 수치모사하기 위하여 Navier-Stokes 방정식, 에너지방정식, 연속방정식, 배향텐서에 대한 배향변화방정식을 Lagrangian 기법을 이용하여 정형화하였고 Uzawa 기법을 이용한 벌칙함수를 이용하여 풀었다. Elliptic mesh generator를 이용한 자동격자 재구성방법을 개발하여 이용하였으며 parametric inversion에 의한 mesh rezoning 기법을 도입하였다. 배향의 수치모사는 이차의 배향텐서를 이용한 배향변화방정식을 이용하여 수행하였고 고차의 텐서는 복합근사에 의해 적용하였으며 단섬유 배향을 정성적, 정량적으로 해석하였다. 분수유동장의 배향에 대한 영향을 고찰하기 위하여 단면의 직사각형인 금형의 충전해석과 배향해석을 수행하였다. 일반적인 금형 형상에서의 두께방향 배향해석을 위하여 대표적인 기하학적 형태의 금형 형상을 선택하여 배향해석을 수행하였다.

두께방향면에서 단섬유 배향장의 배향은 유동방향을 따라 유동입구부, 유동선단부, 그리고 그 사이의 정상상태부로 분류될 수 있고, 두께방향으로는 표면부, 심부, 그리고 변화부로 분류될 수 있었다. 단섬유의 배향은 인장유동과 전단유동에 크게 영향을 받는다. 인장유동은 주로 유동선단부에 지배적이지만 전단유동은 주로 금형의 벽면을 따라 지배적인 영향을 미치며 인장유동보다 작은 배향도를 나타낸다. 유동조건에 따른 배향도의 임계값의 존재를 확인하였으며 임계배향도를 구하였다. 유동입구의 두가지 극단적인 배향에 대한 결과로 입구 배향조건에 따른 배향의 영향을 살펴보았으며 특히 심부에서 큰 영향을 나타내었다.

**Abstract**—Navier-Stokes equation, energy equation, continuity equation, and equation for orientation change of orientation tensor were formulated by Lagrangian scheme and solved simultaneously by using penalty method with Uzawa's scheme in order to simulate short fiber orientation in thickness direction during flow molding of short fiber reinforced plastics. Automatic mesh generation using elliptic mesh generator was developed and mesh rezoning scheme by parametric inversion was introduced. Numerical orientation simulations were performed by using equation for orientation change of second order orientation tensor higher order terms of which were approximated by hybrid closure and orientation of short fibers in flow field was analyzed qualitatively and quantitatively. In order to find the effect of fountain flow field on orientation, mold filling and orientation analyses were performed for rectangular shape cross-section. To determine orientation state in the flow field through cross-section of typical shape, analysis was performed for typical cross-section of mold cavity.

Short fiber orientation state in the thickness plane can be classified into different regions; flow inlet region, flow front region, and steady state region between two previous regions. In thickness direction, surface region, core region, and transition region have different states of orientation. Orientation of the short fiber was highly influenced by elongational flow and shear flow. Mainly, elongational flow has dominant effects on flow front and shear flow has dominant effects on surface layer region but the orientation in the surface layer region was lower than that in the elongational flow region. Critical values in the degree of orientation were present for specific flow conditions. Some critical degree of orientation were determined for given conditions. Effects of initial orientation at the inlet on the orientation field were studied and significant effects were identified especially at the core region.

**Keywords:** short fiber reinforced plastics, flow molding, fountain flow field, automatic mesh generation, mesh rezoning, parametric inversion, fiber orientation, orientation tensor

## 1. 서 론

고 비강도, 고 비강성, 고 인성과 우수한 내부식성 등의 특성을 가진 섬유 보강 고분자 복합재료 중 단섬유 강화 복합재료는 대량생산과 복잡한 구조의 제작이 가능하면서도 장섬유 복합재료의 장점을 공유할 수 있다. 단섬유 강화 고분자 복합재료(short fiber reinforced plastics : SFRP)에 대한 가공방법은 주로 사출성형(injection molding), 압축성형(compression molding), 전달성형(transfer molding) 등과 같은 유동성형(flow molding)에 의하는데 유동성형 과정 중에서 성형품 내부에는 유동에 의한 단섬유의 배향이 복잡한 방향성을 이루어 이방성이 발생하며 제품의 미시적 구조(micro-structure), 기하학적 모양(geometry, distortion), 그리고 강도, 강성, 인성, 경도 등과 같은 기계적 성질에 악영향을 미칠 수도 있다. 그러나 금형내의 유동장과 단섬유의 배향을 예측하고 단섬유 배향을 원하는 방향으로 제어할 수 있다면 이때의 이방성은 SFRP를 좀 더 강하고 가벼우며 신뢰성있는 제품이 될 수 있게 하므로 유동장의 특성과 배향기구를 고려한 단섬유의 배향에 대한 연구가 요구되고 있다.

SFRP의 기계적, 물리적 성질을 예측하고 개선하며 이를 실현시키기 위한 최적금형을 설계하고 최적 가공조건(processing condition)을 결정하는데 있어서 필수적인 단섬유 배향상태를 예측하기 위하여서는, 전단유동(shear flow)과 인장유동(elongational flow) 등 복합적으로 일어나는 금형의 유동장을 총체적으로 해석하고 이를 이용하여 단섬유 배향의 예측을 수행하여야 한다. 그러나 성형품의 3차원적

수치해석을 통한 유동해석과 배향해석은 수치해석상에 많은 어려움이 있어 평면내의 유동방향과 두께면내에서의 유동방향으로 분리하여 해석을 수행하고 있다. 평면방향의 유동은 주로 적절한 가정을 통한 GHS(generalized Hele-Shaw) 유동으로 수행되는데 반해, 두께방향의 유동에 의한 단섬유 배향은 배향기구와 유동현상이 다르므로 다른 정형화가 필요하게 된다.

유동성형시 유동장내의 단섬유 배향에 대한 이론적 연구는 1920년대에 Jeffery[1]가 이론적 연구를 수행한 것을 시발점으로 하여 1960년대부터 실험과 수치적 해법이 도입되었고, 1980년 이후 Givler, Folgar, Advani, Tucker 등에 의해 활발한 연구가 진행되어 오고 있다[2-11].

두께방향의(Fig. 1) 유동장에서는 인장유동과 전단유동이 복합적으로 일어나는데 일반적으로 분수유동장으로 대표되어질 수 있다. 두께방향의 단섬유 배향 해석을 위해서는 단섬유의 배향에 크게 영향을 미치는 유동장 해석 및 유동선단의 묘사가 정확해야 하고 비선형 Navier-Stokes 방정식을 비정상상태로

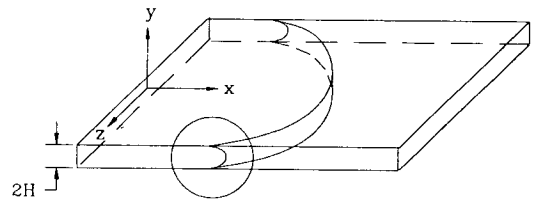


Fig. 1. Schematic presentation of the flow in the thickness direction and definition of the coordinate system.

해석을 해야 하는데 주로 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석되어지고 있다.

유한요소법을 이용한 분수유동장의 수치해석에서는 Eulerian 방법, Lagrangian 방법이 있고, 기존에는 주로 Eulerian 방법이 많이 사용되어 왔다[12-14]. 그러나 분수유동의 흐름과 같이 자유표면의 형상변화를 정확히 묘사하여야 하는 문제에서는 Eulerian 방법의 지배방정식이 비선형이며, 자유표면의 추적 및 초기값 설정을 위하여 별도의 많은 계산이 요구된다. 하지만 Lagrangian 방법에서는 자유표면의 추적이 용이하고 계산시간을 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 유동성형 과정 중 두께방향에서 일어나는 분수유동장에서 유동장 및 단섬유의 배향을 Lagrangian 정형화와 자동 격자 재구성을 이용하여 수치모사하고 단섬유 배향을 정성적, 정량적으로 해석하여 배향도 및 배향기구를 알아보았다. 또, 금형의 유동 입구부분과 유동 끝부분에서의 비정상상태 배향해석을 수행하고 일반적이고 복잡한 구조의 단면을 가진 금형의 경우에 대하여도 배향해석이 가능하도록 하였다.

## 2. 수치적 모사

수치해석을 통한 단섬유 배향의 예측은 유동해석과 불가분의 관계가 있으며 여기에 배향에 영향을 주는 배향인자(orientation factor)와 배향기구(orientation mechanism)를 고려하면 최종적인 단섬유 배향을 예측할 수 있다.

현재까지의 단섬유 현탁액(suspension)의 유동장 해석 및 섬유배향 예측은 FDM, FEM, FDM-FEM 혼용 기법이 이용되고 있다. 현탁액의 유동장 해석은 현탁액의 정확한 유변학적 특성(rheological characteristics)과 3개의 기본 미분방정식 즉, 연속방정식, 운동량방정식, 그리고 에너지방정식을 함께 풀어야 하며 단섬유 배향 해석은 배향텐서에 대한 배향변화방정식(equation for orientation change)을 풀어야 한다. 한편, 단섬유의 부피비, 세장비, 그리고 전단 변형률속도 등이 커짐에 따라 섬유들의 상호작용을 고려할 수 있도록 실험적 매개변수를 도입하였다. 그러나 배향이 구성방정식에 미치는 영향은 무시하였다.

### 2.1. 유동해석의 정형화

단섬유 강화 복합재료의 가공시 2차원 두께방향의 유동은 비압축성, 비등온, 비정상상태이므로 다음과 같은 운동량방정식에서 유도된 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하여 비등온, 비정상상태 해석을 수행한다.

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

온도분포는 다음과 같은 에너지방정식을 이용한다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \tau_{ij}$ 이고, 대류항은 Lagrangian 정형화를 사용하여 제거할 수 있다. 또, 고분자 현탁액이고 점성이므로 중력항을 제거하였다. 점성은 수정된 Cross model인 C-flow의 4-constant model을 사용하였는데

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \dot{\gamma}_a}{\tau_a^*} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

이다. 여기서,  $\eta_0(T)$ 는  $B \exp(T_b/T)$ 이고,  $n$ 은 power law index,  $\tau_a^*$ ,  $B$ ,  $T_b$  등은 모두 curve fitting 상수이다. 한편, Navier-Stokes 방정식에 비뉴턴유체의 인자인 전단변형률속도와 power law index를 사용한 것은 각 시간단계(time step)내에서는 일정한 점도를 가지고 각 시간단계가 지날 때에 점도의 변화를 고려하여 좀 더 실제 유동과 근사하도록 모사하기 위한 것이다.

경계조건은 no-slip 조건을 벽면에 적용시켰고, 입구에서의 속도는 일정 유량이 유입되도록 입구유량을 완전히 발달된 정상상태의 속도장으로 다음과 같이 변환하여 적용하였다.

$$V_a(y) = V_{avg} \left( \frac{2n+1}{n+1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{y}{H} \right)^{1+1/n} \right] \quad (5)$$

여기서,  $V_a(y)$ 는 입구의 유동속도이고  $V_{avg}$ 는 유동의 평균속도,  $H$ 는 금형 두께의 반이다.

고전적 Galerkin의 방법을 사용하여 다음과 같은 행렬식,

$$[M]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{F\} \quad (6)$$

$$[C]\{\dot{T}\} + [D]\{T\} = \{Q\} \quad (7)$$

을 구하고 fully implicit time stepping technique과 Newton-Raphson technique를 이용하여 절감속도  $\{V\}$ 와 절점온도  $\{T\}$ 을 구하였다. 식 (1)의 유동장은 비압축성을 만족하기 위해 벌칙상수(penalty constant :  $\lambda$ )를 이용한 벌칙법을 사용하였고 고점성의 유동해석시 수치적으로 발생하는 압축성을 보완하고 수정하기 위하여 Uzawa 기법을 사용하였다[15].

2.2. 자동 격자 재구성

비정상상태의 충전해석시 유한요소망의 요소(element)가 지나치게 변형되면 해의 질이 떨어지고 더 이상의 해석이 불가능해지므로 유한요소의 격자를 수정해 주어야 한다. 또, 충전시 매 시간 단계에서 유동해석의 영역이 변화하므로 즉, 금형내의 단섬유 현탁액의 부피가 증가하므로 새로운 격자를 형성하고 비정상해석을 위한 각 절점의 초기조건을 설정해 주어야 한다. 이때 유한요소망의 간헐적이고 인위적인 수정을 없애기 위해 자동 격자 재구성(automatic remeshing)과 역행렬을 이용한 mesh rezoning을 이용하였다.

격자 구성은 다음과 같은 elliptic grid generator를 사용하였다.

$$\begin{aligned} a x_{\xi\xi}^2 - 2b x_{\xi\xi} + c x_{\xi\xi} &= 0 \\ a y_{\xi\xi}^2 - 2b y_{\xi\xi} + c y_{\xi\xi} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, a는  $x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ , b는  $x_{\xi}x_{\xi} + y_{\xi}y_{\xi}$ , 그리고 c는  $x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ 이다.

elliptic grid generator는 식 (8)의 편미분 방정식을 풀어 내부 절점들을 구함으로써 격자를 구성하고[16], 경계부 절점들은 일정 간격을 유지할 수 있도록 매 시간 단계마다 수정, 재배치하였으며 금형의 모서리 부분은 해의 정확도를 높이기 위해 좀 더 많은 절점을 분포시켰다.

재구성된 격자의 초기값을 구하기 위하여 이전 시간 단계에서의 변화된 절점과 요소에 대하여 search와 interpolation 기법을 이용하였다[17]. 유동선

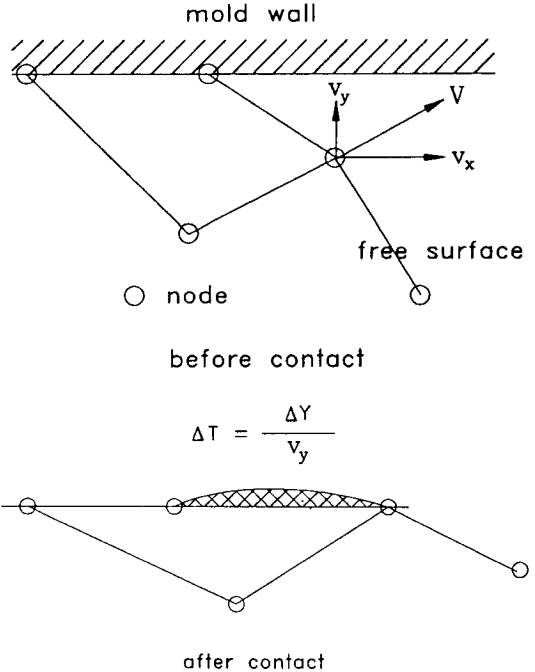


Fig. 2. Calculation of the variable time step and the volume loss after the time step.

단에서의 절점의 진행과 경계정의를 위한 시간 증분의 계산은 자유표면의 절점이 벽면을 뚫고 지나가는 시간으로 계산되었다(Fig. 2)[18]. 이때 유량의 손실이 미량 발생하는데 오차는 전체 부피의 1.0% 이하의 무시할 수 있을 정도로 나타났으며 더욱 세밀한 격자를 사용하면 유량손실을 더욱 줄일 수 있다.

2.3. 배향의 정형화

정규성, 대칭성을 가지고 있는 2차 배향텐서를 이용하여 성형시 나타나는 배향을 예측하기 위해서는, 구해진 변형 유동장(deformation fields)과 배향의 척도가 되는 배향변수나 배향함수와의 관계를 규명해야 하는데, 여기서는 Folgar와 Tucker[4]의 상호간섭계수(interaction coefficient)와 Advani와 Tucker[8]가 제안한 배향텐서에 대한 배향변화방정식(equations for orientation change)을 사용하였다.

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} = \frac{\partial a_{ij}}{\partial t} = -\frac{1}{2}(\omega_{ik}a_{kj} - a_{ik}\omega_{kj})$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \lambda (\dot{\gamma}_{ik} a_{kj} + a_{ik} \dot{\gamma}_{kj} - 2 \dot{\gamma}_{kl} a_{ijkl}) \\
 & + \frac{1}{2} C_I \dot{\gamma} (\delta_{ij} - 2a_{ij}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서  $\lambda$ 는  $(r_e^2 - 1)/(r_e^2 + 1)$ 로서 상당 세장비(equivalent aspect ratio)  $r_e$ 가 아주 큰 단섬유의 경우는 1이고 현탁액내에서 단섬유들 사이의 간섭정도를 나타내는 상호작용계수(interaction coefficient)  $C_I$ 는 0.1을 사용하였다.

윗 식에 나타나는 4차의 배향텐서는 linear closure  $\hat{a}_{ijkl}$ 와 quadratic closure  $\tilde{a}_{ijkl}$ 을 모두 고려한 hybrid closure approximation  $\bar{a}_{ijkl}$ 를 사용하였으며 [19] 이는 아래식으로 주어진다.

$$\bar{a}_4 = \bar{a}_{ijkl} = (1 - F) \hat{a}_{ijkl} + F \tilde{a}_{ijkl} \quad (10)$$

식 (10)에 나타난 바와 같이 복합적 근사는 배향의 정도에 의해 결정되는 상수척도  $F$ 에 의해 근사방법에 가중치를 주고 있는데, 이때의  $F$ 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$F = 1 - 4 \det a_2$$

배향해석을 위한 정형화는 유동해석에서 사용된 유한요소와 선형 형상함수(linear shape function)를 사용하여 이루어졌으며, 고전적 갤러킨의 방법을 이용하여 식 (9)를 아래식으로 정형화시켰다.

$$\begin{bmatrix} C_{ij} & 0 \\ 0 & C_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{a}_{1ij} \\ \dot{a}_{2ij} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{Iij} & K_{IIIij} \\ K_{IIij} & K_{IVij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{1ij} \\ a_{2ij} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_i \\ Q_j \end{Bmatrix} \quad (11)$$

즉,

$$[M] \{\dot{a}\} + [K] \{a\} = \{F\} \quad (12)$$

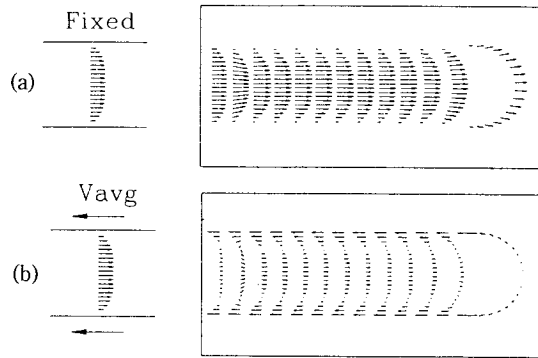
와 같은 행렬식이 되고 이 비선형 행렬식을 fully implicit time stepping technique과 Newton-Raphson technique을 이용하여 풀었다.

### 3. 결과 및 고찰

본 모사에서 사용한 유동조건으로는 C-mold에서 사용된 4-constant 모델에 의한 polypropylene의 물질상수를[20] 사용하였는데 Table 1에 기타 상

**Table 1.** Various constants for flow and fiber orientation simulations.

Const.	$\rho$	$C_p$	$\kappa$	
Material	$\left(\frac{g_m}{cm^3}\right)$	$\left(10^7 \frac{erg}{g_m K}\right)$	$\left(10^4 \frac{erg}{sec cm K}\right)$	$\chi$
PP	0.77	3.1	1.5	$1.0 \times 10^{10}$
Const.	n	$\tau_a^*$	B	$T_b$
Material				
PP	0.32	$1.6 \times 10^5$	2.0	$5.2 \times 10^3$



**Fig. 3.** Instantaneous velocity vectors representing fountain flow fields.  
(a) fixed boundary condition  
(b) moving boundary condition

수들과 함께 나타내었다. 입구에서의 유량조건은 평균속도가 단위 3이 되도록 하였으며 기하학적 치수는 유동입구의 크기가 단위 1이 되는 크기이다. 그리고, 유동입구에서의 현탁액의 온도는 513 K이고 금형벽의 온도는 323 K이다.

전술한 해석방법을 이용하여 유동성형시 두께면내에서의 유동장 및 단섬유 배향을 구하였다. Fig. 3은 유동장의 속도 벡터로 두께면내의 유동이 자유표면을 따라 인장유동이 발생하고 자유표면에 가까워짐에 따라 자유표면의 수직인 방향으로 유동속도가 감소하며 자유표면에 평행한 방향으로의 유동속도가 증가하는 분수유동장을 보여주고 있으며 두께면에서의 지배적인 유동현상이 분수유동임을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 유동선단의 진행을 시간별로 나타낸 그림으로서 충전초기 과도상태에서의 유동선단의 형상

Front #	Time	Front #	Time
0	0.0000	14	0.8643
1	0.0400	15	0.9325
2	0.0900	16	1.0060
3	0.1400	17	1.0849
4	0.1900	18	1.1656
5	0.2330	19	1.2371
6	0.2635	20	1.3135
7	0.3350	21	1.3883
8	0.4153	22	1.4691
9	0.4917	23	1.5454
10	0.5602	24	1.5879
11	0.6348	25	1.6075
12	0.7116	26	1.6163
13	0.7838	27	1.6256

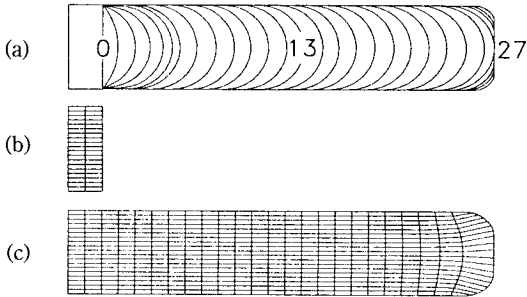


Fig. 4. Flow front advancement at various each time step and initial and final mesh generated. (a) advancing melt front (b) initial mesh (c) final mesh

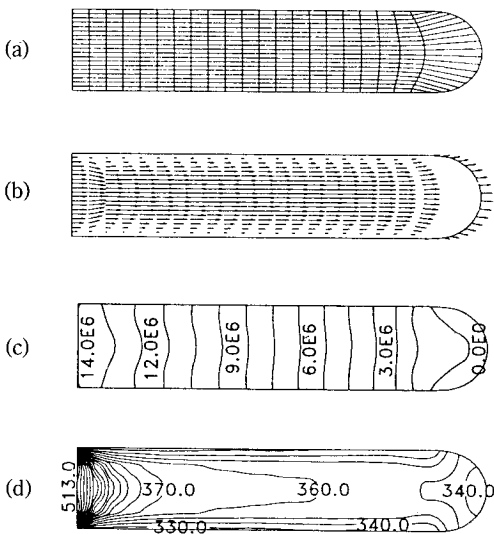


Fig. 5. Results of the flow simulation in the thickness direction at 1.5454 sec. (a) FEM mesh (b) velocity vectors (c) pressure contour (d) temperature contour (K)

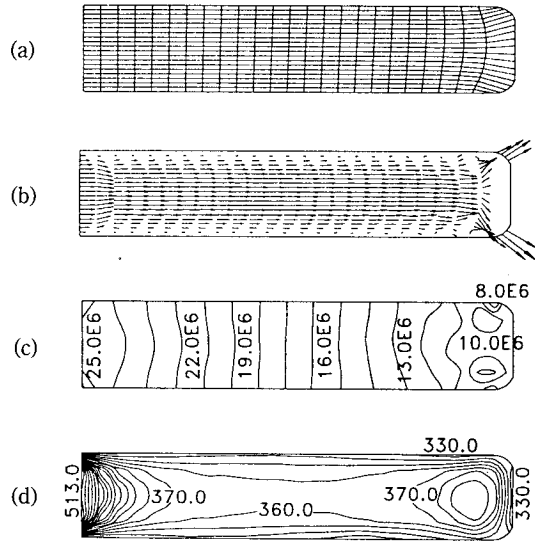


Fig. 6. Results of the flow simulation in the thickness direction at 1.6236 sec. (a) FEM mesh (b) velocity vectors (c) pressure contour (d) temperature contour (K)

및 위치로부터 유동의 진행형태와 유동의 발달 정도, 즉, 유동의 정상상태, 비정상상태를 결정할 수 있었다. 또, 금형 충전의 끝부분에서의 분수유동에 의한 충전현상과 기본적인 단섬유 배향상태를 예측할 수 있게 하였다. Fig. 5, 6에서는 유동이 진전할 때 정상상태 유동과 금형 충전완료 직전의 비정상상태 유동을 나타낸다. Fig. 5에서는 유동선단에서의 부압 발생, 유동선단이 금형벽면과 접하는 부분에서의 압력의 특이점 발생, 분수유동에 의한 온도의 상승 효과 등 정상상태시의 자유표면의 형상, 유동장, 그리고 유동특성을 알 수 있었다. Fig. 5의 (c)에서 유동선단을 따라 등압선 압력이 0.0인 영역이 나타나고 금형벽과 접촉부에서는 가장 큰 부압이 발생함을 알 수 있었다. 또, (d)에서는 분수유동에 의해 유동선단의 정점부보다 금형벽과의 접촉부 부근에서 더욱 높은 온도를 가짐을 알 수 있다. Fig. 6에서는 금형 충전 직전의 속도분포 및 압력의 급격한 상승 등의 확인과 함께 분수유동에서의 유동선단의 형상으로 인한 금형의 최종적 충전현상, 즉, 유동선단이 금형 끝부분에 먼저 닿은 다음 모서리가 충전되는 현상

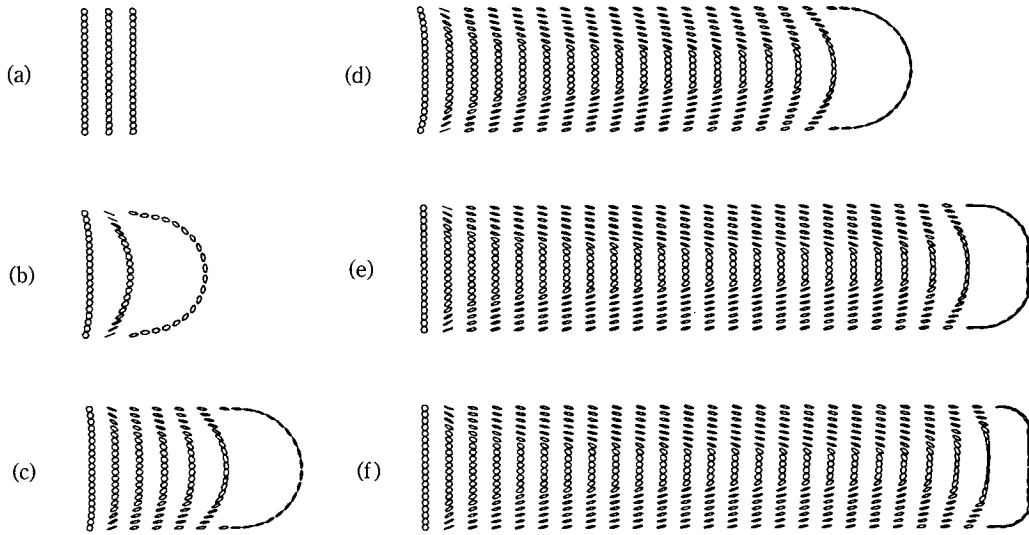


Fig. 7. Elliptic presentation of short fiber orientation in different period of time assuming random initial orientation.

(a)  $t=0.0000$ , (b)  $t=0.1400$ , (c)  $t=0.4153$ , (d)  $t=1.2371$ , (e)  $t=1.5879$ , (f)  $t=1.6236$

으로 인한 유동장의 변화를 예측할 수 있었다.

Fig. 7에서는 장축 및 단축이 섬유의 주배향 방향과 배향정도를 나타내는 타원을 이용하여 유동의 진행에 따른 단섬유 배향의 분포를 표시한 것인데, 초기상태의 마구잡이 배향(random orientation)으로부터 유동이 진행하여 충전시간이 지남에 따라 금형벽면에서는 전단에 의해 배향이 점차 증가함을 보여주었고, 즉, 입구의 원에서 점차 세장비가 증가한 타원으로 변화함을 보여주었고, 유동선단에서는 분수유동에 의한 인장유동의 영향으로 급격히 배향도가 증대하고 있음을 보여주었다. 또, 유동선단이 유동장에 수직인 금형벽면에 부딪히면 유동선단 부분의 배향도가 거의 유지되며 배향이 일어나므로 다른 금형벽면보다 큰 배향이 일어나는 것을 알 수 있었다. 하지만 유동선단이 금형벽면과 부딪히는 순간부터 유동방향이 바뀌면서 배향도가 떨어지는 부분과 배향도가 증가하는 부분 등이 생기며 복잡한 배향분포의 변화가 발생하게 된다. 따라서 금형의 기하학적 형태, 배치가 유동방향 및 유동선단과의 접촉하는 과정에 크게 영향을 미침을 인식하게 된다.

Fig. 8, 9에서는 정상상태와 충전 직전의 배향상태를 좀 더 자세히 나타내었다. Fig. 8에서는 분수유동장에서의 배향도를 나타내는 타원의 세장비와

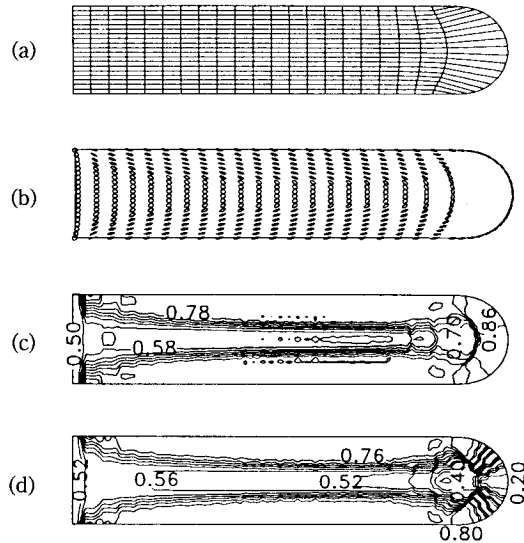


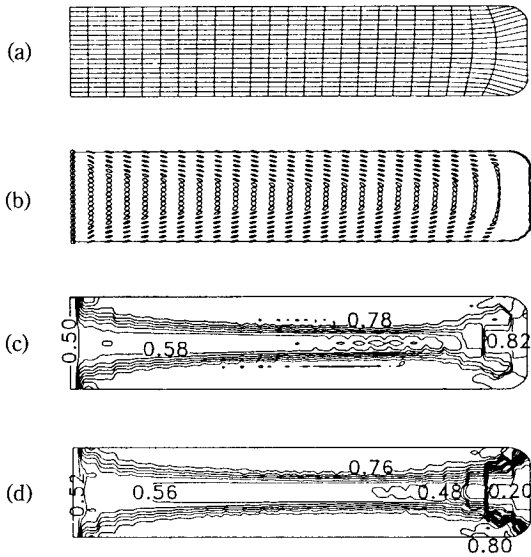
Fig. 8. Results of short fiber orientation simulation at 1.5454 sec assuming random fibers at the inlet.

- (a) FEM mesh
- (b) orientation ellipses
- (c) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor
- (d) contour plot of tensor component ( $a_{11}$ ) of orientation tensor

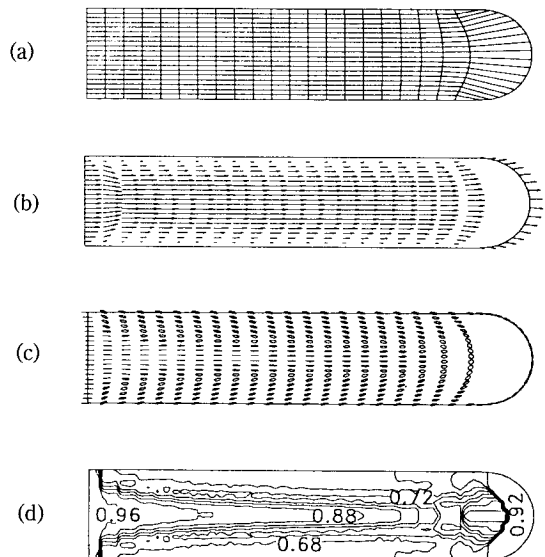
배향텐서의 최대 특성치(eigenvalue)가 유동선단에서 가장 크고 양쪽 벽면에서도 큰 값을 보여 배향이 일어나는 정도를 일견할 수 있었으며 유동선단이 최대 배향도를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 배향텐서의 성분인  $a_{11}$ 에 대한 등고선 선도(contour plot)와  $a_{22}$ 는  $1 - a_{11}$ 를 이용하여 x, y 방향의 배향도를 알 수 있었다. 이  $a_{11}$ 과  $a_{22}$ 는 유동방향과 유동방향의 직각방향으로의 배향을 나타낸다. Fig. 9에서는 충전 직전의 배향상태를 나타내는데 금형 끝부분의 복잡한 배향상태를 볼 수 있으며 이로부터 물성의 비등방성과 비균질을 쉽게 예견할 수 있었다. 금형의 끝부분에서 유동선단이 먼저 금형 끝에 부딪혀 저항을 받고 점차 주위가 접촉함으로 인하여 배향도의 변화가 나타남을 알 수 있었으며 배향도가 낮은 심부(core region)에서의 현탁액이 금형 모서리 부분으로 이송됨에 따른 배향도의 영향을 볼 수 있었다. 또, 최대 배향은 유동선단이 제일 처음 접촉된 금형 끝부분에서 유동선단의 배향을 그대로

유지함으로 인해 나타나고 모서리 부분에서는 다시 인장유동과 수렴유동(converging flow)이 발생함으로 인해 복잡한 배향분포가 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 10, 11은 유동입구의 초기 배향이 유동방향으로 완전히 배향된 경우의 정상상태와 충전 직전의 배향분포인데 유동이 진행되면서 초기 배향상태가 점차 흐트러지며 분수유동장의 특성과 전단유동에 의해 배향분포가 재배향되며 충전이 진행된다. Fig. 10, 11에서는 Fig. 9에서도 나타난 바와 같이 유동방향과 같은 벽면 부근의 배향은 유동입구의 배향상태에 큰 차이없이 비교적 빨리 재배향되어 정상상태의 배향에 접근하지만 두께면의 가운데 부분은 초기 배향상태가 서서히 변화하고 심부를 형성함을 알 수 있었다. Fig. 10에서는 유동선단부에서 분수유동에 의한 인장유동으로 초기 배향이 크게 흐트러지며 재배향이 일어나고 유동선단의 직후부에서 최소의 배향도를 나타내며 전단유동에 의해 금형벽 부분은 배향의 임계값에 접근하고 있음을 알 수

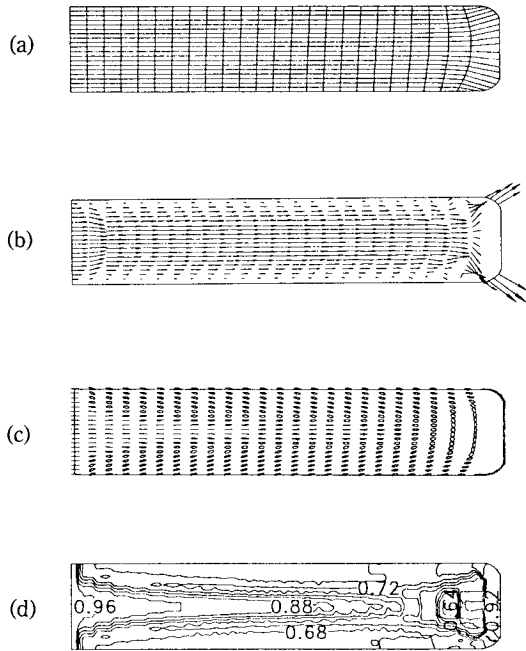


**Fig. 9.** Results of short fiber orientation simulation at 1.6236 sec assuming random fibers at the inlet.  
 (a) FEM mesh  
 (b) orientation ellipses  
 (c) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor  
 (d) contour plot of tensor component ( $a_{11}$ ) of orientation tensor



**Fig. 10.** Results of short fiber orientation simulation at 1.5454 sec assuming aligned fibers in the direction of flow at the inlet.  
 (a) FEM mesh  
 (b) velocity vectors  
 (c) orientation ellipses  
 (d) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor

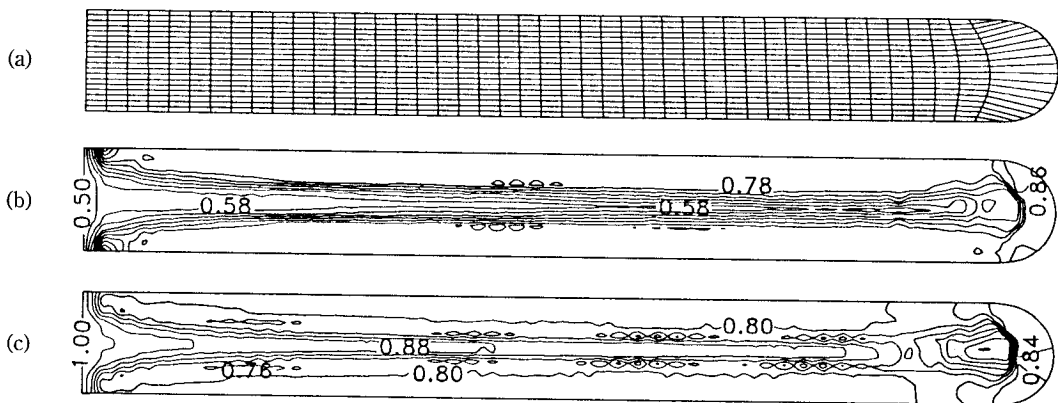




**Fig. 11.** Results of short fiber orientation simulation at 1.6236 sec assuming aligned fibers in the direction of flow at the inlet.  
 (a) FEM mesh  
 (b) velocity vectors  
 (c) orientation ellipses  
 (d) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor

있다. Fig. 11은 Fig. 10의 유동이 더 진행된 경우로 최소 배향도를 나타내는 유동선단의 직후부에서는 배향도의 특성치가 0.64 정도로 마구잡이 배향에 가까운 배향도가 나타남을 알 수 있었다. 초기 배향상태가 유동방향으로 완전히 배향된 경우 Fig. 8, 9의 경우와는 상당히 다른 배향분포를 나타내고 있는데 전단유동의 영향이 미미한 심부를 따라서는 특히 다른 배향분포를 나타내고 있다. 벽면을 따른 배향은 큰 배향도의 차이가 나타나지 않고 전단유동의 영향을 크게 받고 있음을 직관적으로 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13에서는 Fig. 8, 10과 Fig. 9, 11인 경우에 대하여 단섬유 배향이 정상상태에 도달하도록 더욱 오랜 시간 동안 유동을 전진시킨 경우로 유동이 진행하며 시간이 증가해도 배향도가 더이상 변화하지 않는 위치, 즉, 배향이 정상상태에 도달하는 위치가 나타남을 확인할 수 있었으며, 이때의 배향도가 임계배향도가 됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 주어진 유동조건에서는 전단에 의한 임계배향도는 0.8 정도, 유동선단의 인장에 의한 임계배향도는 0.86 정도로 나타났다. 초기 배향조건을 비교해 볼 때 초기배향의 영향은 전단유동이 지배적인 표면부(surface region)에서는 임계배향도에 영향이 아주 작게 나타났으나 심부에서는 정상상태에 도달 하더라도 큰 영향이 나타남을 알 수 있었다.



**Fig. 12.** Results of short fiber orientation simulation at 3.1872 sec.  
 (a) FEM mesh, (b) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor assuming random fibers at the inlet, (c) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor assuming aligned fibers in the direction of flow at the inlet

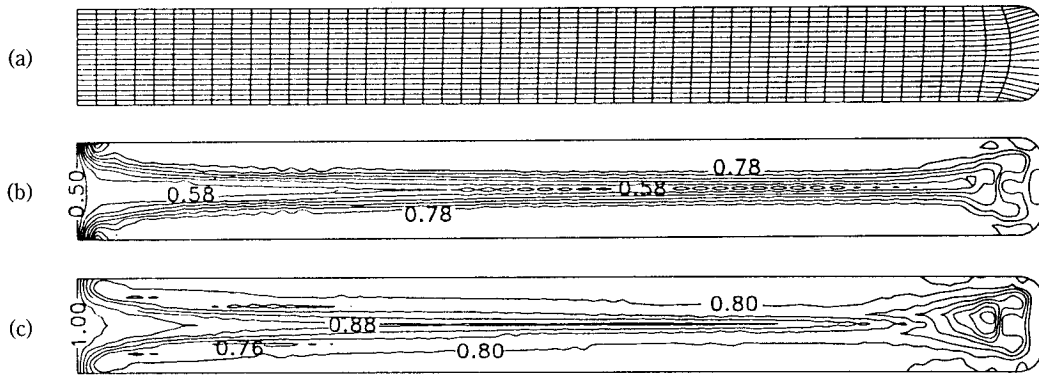


Fig. 13. Results of short fiber orientation simulation at 3.4220 sec.  
 (a) FEM mesh, (b) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor assuming random fibers at the inlet, (c) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor assuming aligned fibers in the direction of flow at the inlet

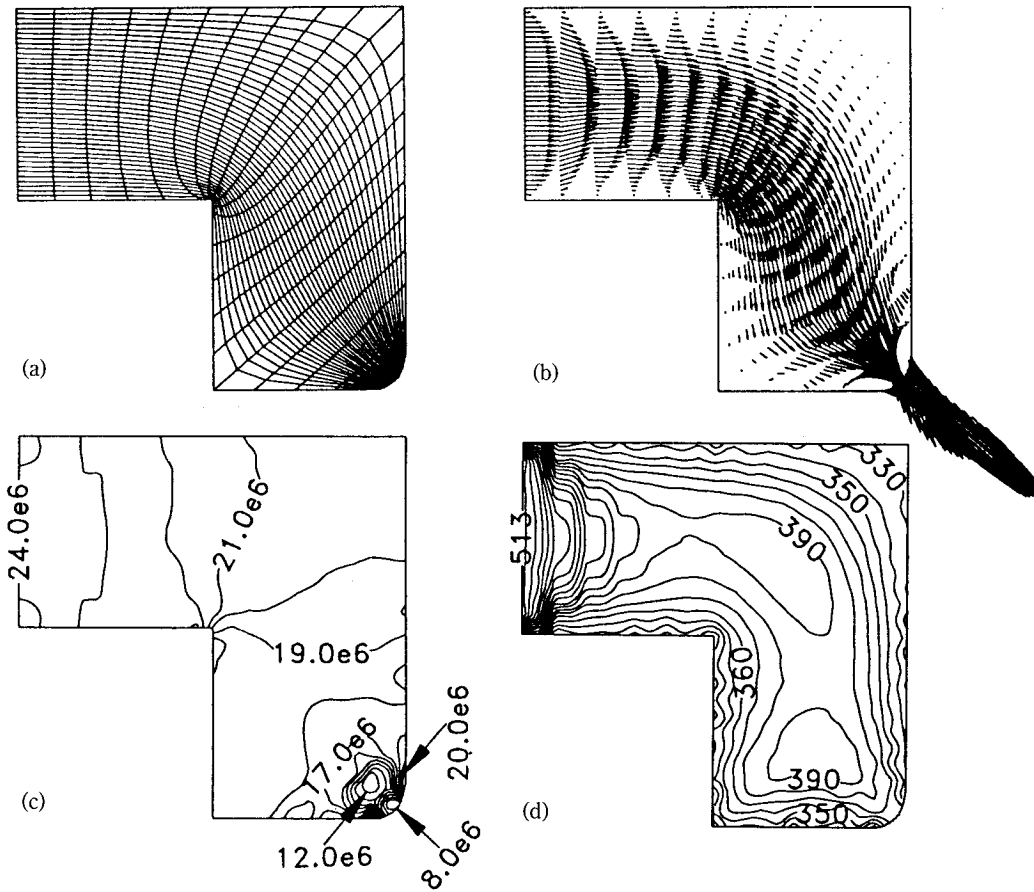


Fig. 14. Results of the flow analysis for L-crank shape cross-section.  
 (a) FEM mesh, (b) velocity vectors, (c) pressure contour, (d) temperature contour

Fig. 14부터 Fig. 18까지는 금형에서 나타날 수 있는 다양한 기하학적 구조를 고려하기 위하여 대표적 형태에 대한 단섬유 배향의 수치해석을 수행한 결과이다.

Fig. 14, 15는 단면의 형상이 L-crank 형태에 대해서 유동장과 배향을 수치모사한 결과인데, Fig. 14에서는 완전충전 직전의 온도, 압력 등을 나타내었다. Fig. 15의 배향 분포에서는 금형의 충전과정시 유동장의 변화가 큼으로 인해 단순한 형태의 금형 형태에 대한 배향분포보다 상당히 복잡한 배향분포를 나타내고 있으며 역시 유동선단의 인장유동의 효과가 배향에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 그리고 금형의 모서리부에서는 단섬유의 재배향이 크게 일어나고 주 배향방향과 배향도에 큰 변화가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 16은 Z-crank 형태에 대한 결과로 충전 직전의 유동선단의 형태와 배향분포를 알 수 있었으며 여러 개의 금형 모서리 부분에서 단섬유가 겪은 유동장의 영향이 다름으로 인해 상당히 다른 배향 분포를 가짐을 알 수 있었다. 여러 개의 모서리를 가지고 있는 단면형상을 가진 금형에서는 분수유동의 특성상 단섬유 현탁액의 유동선단이 금형의 평평한 부분에 먼저 닿고 모서리 부분은 그 이후에 충전이 되는 과정에서 큰 유동속도 및 변형률속도의 변화가 발생하게 되고 각 모서리가 충전되는 순서와 그 충전여부에 따라 유동장, 압력장, 온도장 등도 그 영향이 크며 배향분포 또한 영향을 크게 받음을 알 수 있었다.

Fig. 17, 18은 유동입구가 다른 2가지 T-crank 형태에 대하여 편의상 명명한 T1-crank, T2-crank 금형 단면에 대한 해석인데, Fig. 17에서는 유동선단이 평면인 금형벽에 부딪혔을 때의 단섬유의 배향분포에 대한 해석으로 상당히 넓은 부분에 걸쳐 유동선단의 배향도를 유지하고 있음을 알 수 있고, 그 배향도는 벽면을 따라 감소 후 다시 정상상태의 유동선단이 형성되며 배향도가 증가함을 볼 수 있었다. 즉 유동선단에 수직인 벽면의 국부적 배향도 감소는 유동선단이 벽면에 부딪힌 후 정상상태로 전환과정에서 국부적인 수렴유동이 배향도를 떨어뜨린 것으로 보여진다. Fig. 18에서는 이미 발달한 유동선단이 날카로운 금형 모서리 형상에 부딪혀

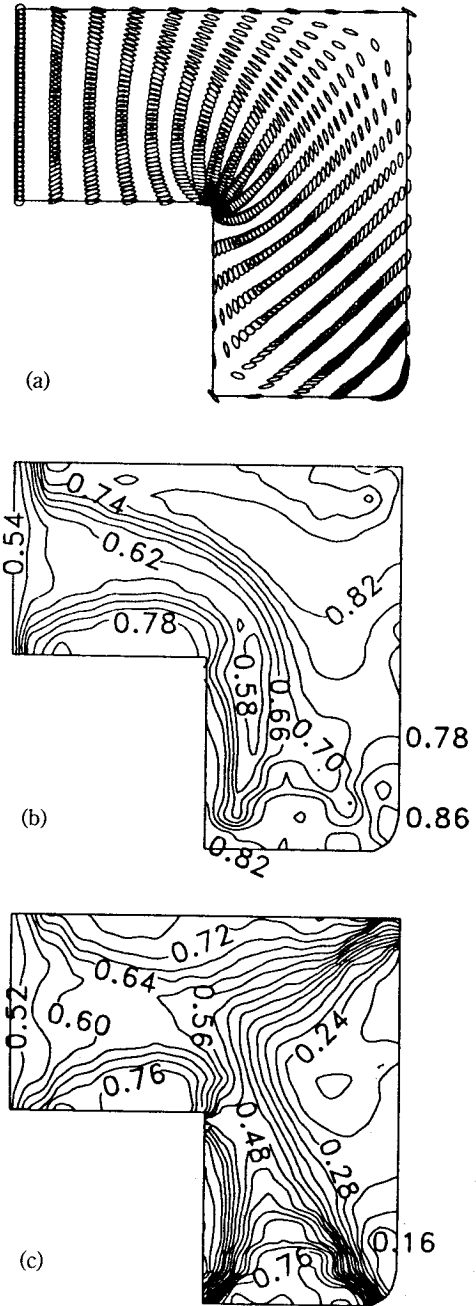


Fig. 15. Predicted short fiber orientation for L-crank shape cross-section.  
 (a) orientation ellipses  
 (b) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor  
 (c) contour plot of tensor component ( $a_{11}$ ) of orientation tensor

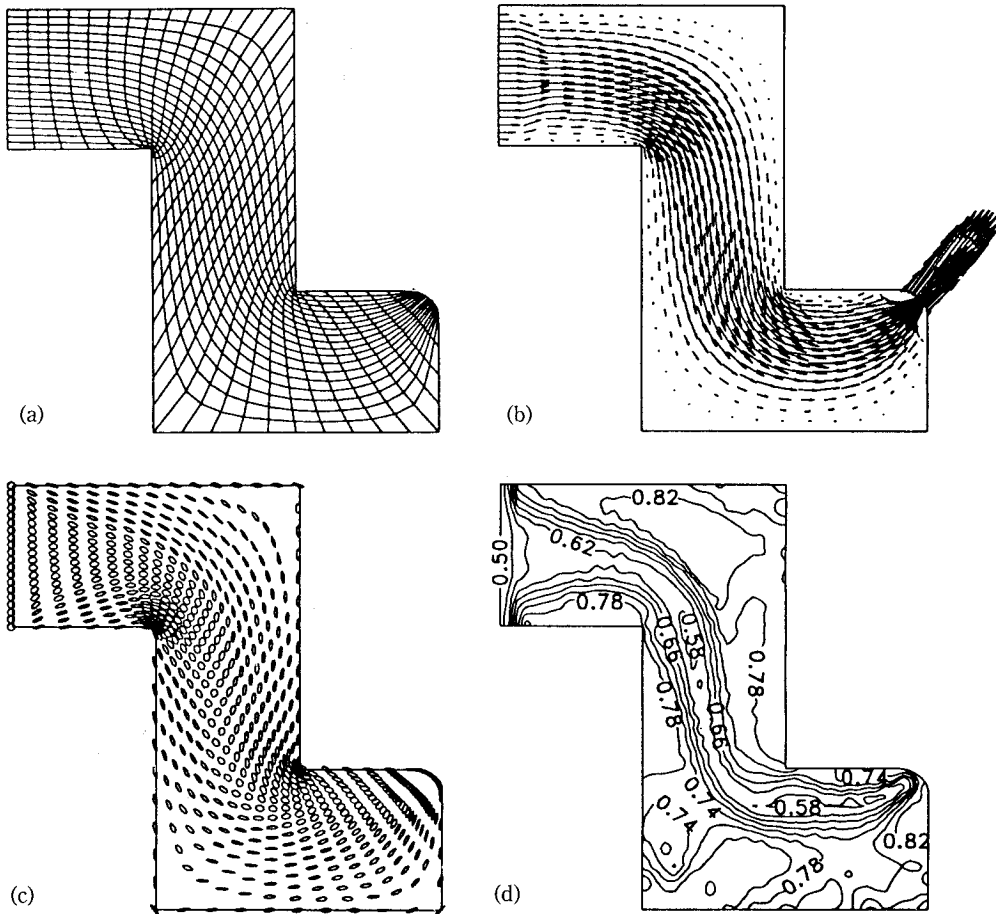


Fig. 16. Results of the short fiber orientation simulation for Z-crank shape cross-section.

(a) FEM mesh, (b) velocity vectors, (c) orientation ellipses, (d) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor

유동장이 급변할 때 유동장의 변화에 따른 배향도의 변화를 볼 수 있었다. 특히, 유동선단이 접하는 모서리의 곡부적 부분에서는 충돌직전의 배향상태의 배향도를 유지하지만 이웃하는 부분에서는 배향도가 떨어지고 유동이 더욱 진행하여 정상상태에 도달함에 따라 유동선단에서 다시 큰 배향도가 형성되어 가고 있음을 알 수 있다.

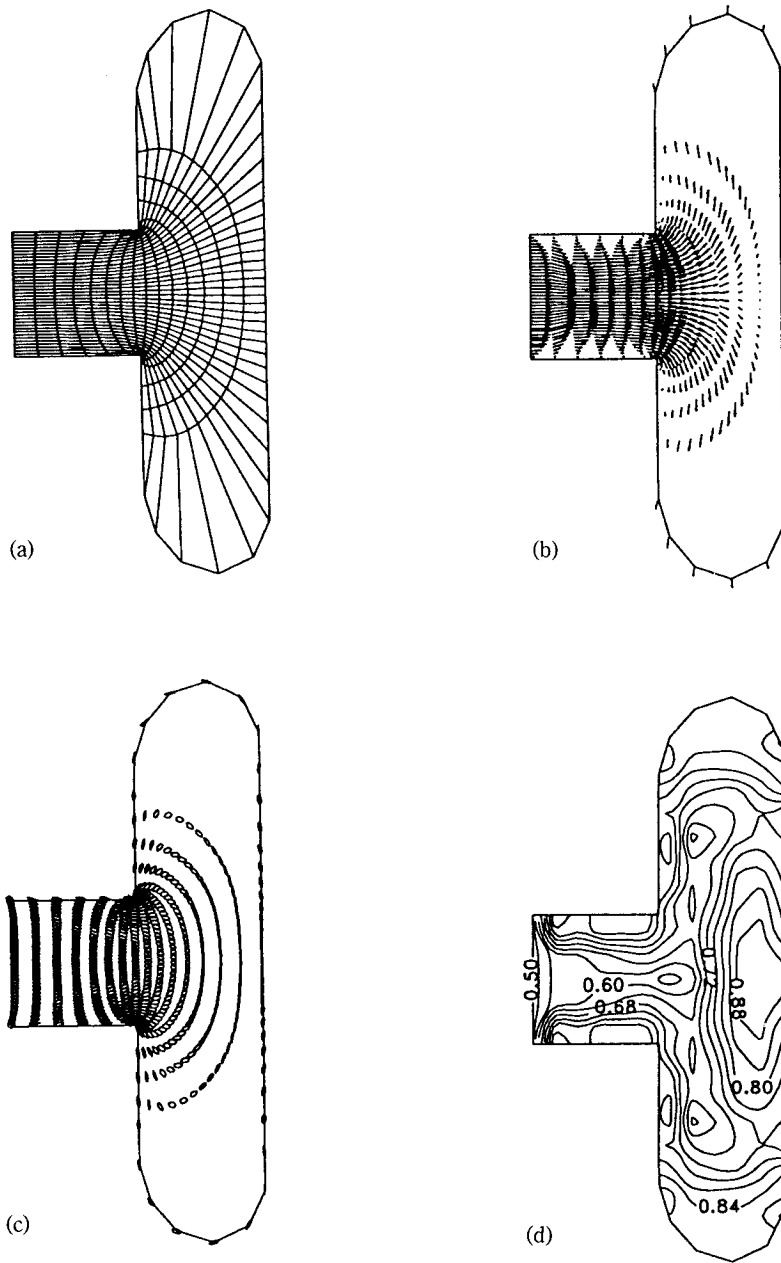
따라서, 복잡한 단면형상을 가진 금형에서는 예측하기 힘든 유동장의 변화와 배향분포가 수반되므로 유동성형에 의한 성형품의 가공시에는 수치모사에 의하여 금형의 설계와 가공조건 등의 결정에 많은 기여를 할 수 있으며 특히 두께방향의 배향분포는

본 연구에서 제시한 방법으로 구할 수 있다.

#### 4. 결 론

고 기능의 단섬유 복합재료의 대표적 가공방법인 유동성형에서 성형품의 두께면에서 발생하는 이방성을 예측하기 위하여, 두께면내의 2차원 유동해석과 단섬유 배향의 해석을 수행하였다. 분수유동장내에서의 두께방향의 단섬유 배향을 예측할 수 있는 program을 개발하여 대표적인 형상에 대하여 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자동 격자재구성 방법과 Lagrangian 기법의



**Fig. 17.** Results of the short fiber orientation simulation for T1-crank shape cross-section.  
 (a) FEM mesh, (b) velocity vectors, (c) orientation ellipses, (d) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor

유한 요소법을 사용하여 유동조건에 따른 유동선단의 진행형태와 발달과정 및 유동장을 성공적으로 구하였다.

2. 자유표면의 발달 과정시, 금형의 끝부분에서의

충전시 등의 비정상상태와 정상상태의 단섬유 배향을 수치해석을 통하여 예측하였다.

3. 일반적이고 다양한 기하학적 구조를 가진 금형내의 두께방향 배향해석을 수행하였으며, 대표적

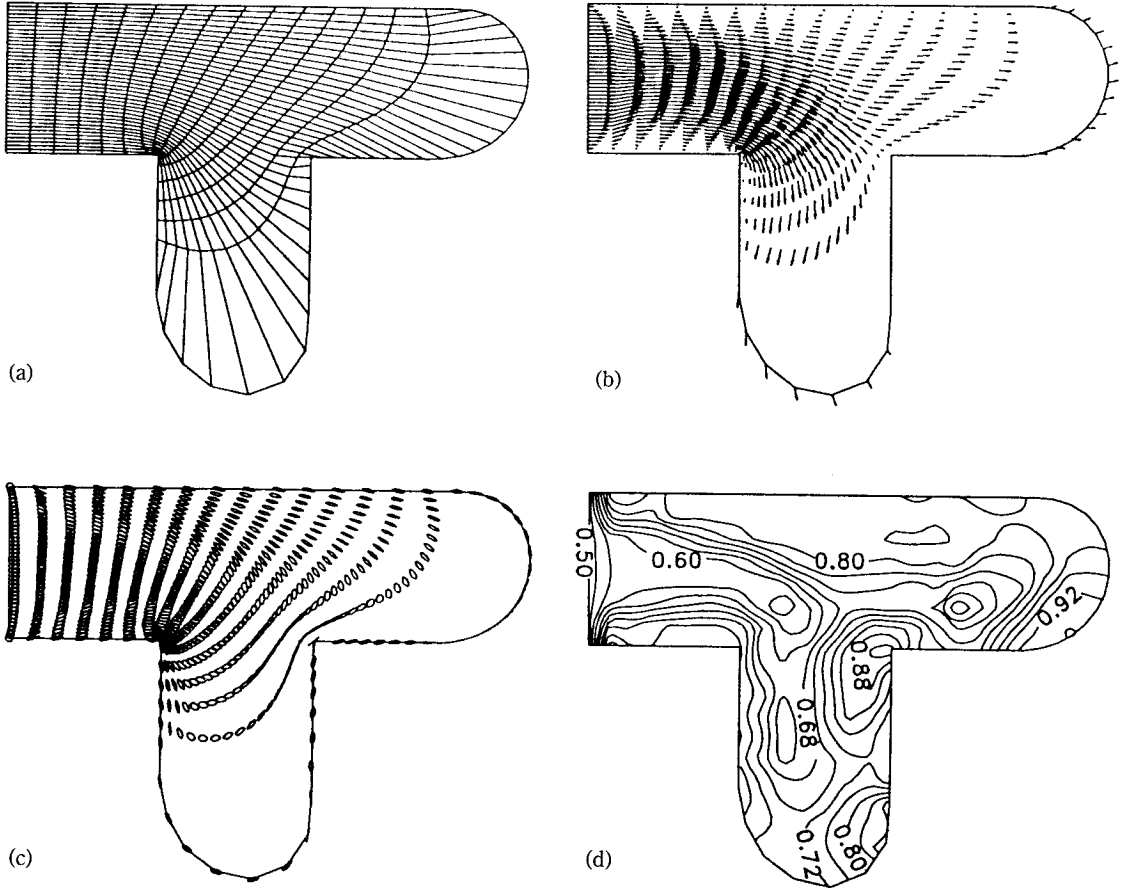


Fig. 18. Results of the short fiber orientation simulation for T2-crank shape cross-section.

(a) FEM mesh, (b) velocity vectors, (c) orientation ellipses, (d) contour plot of maximum eigenvalue of orientation tensor

인 기하학적 구조의 금형에 대한 유동해석을 통하여 단섬유 배향에 영향을 주는 유동형태와 단섬유의 배향기구를 알 수 있었다.

4. 분수유동장내에서는 유동선단의 인장유동이 전체 장(field)의 배향도에 크게 영향을 미치고 이때의 배향이 가장 큰 배향도를 가진다. 또, 전단유동은 배향도에서 인장유동보다 작은 배향도를 가지고 배향은 유동의 진행방향과 같은 벽면을 따라 분포한다.

5. 유동선단의 금형벽 충돌로 인한 배향은 가장 큰 배향도를 가지며 유동선단과 금형벽 사이의 수렴유동은 배향도를 떨어뜨린다. 또, 금형의 모서리 부분에서는 선단의 인장유동 및 수렴유동에 의하여

유동장의 급격한 변화를 수반하며 유동조건에 따라 복잡한 배향을 나타낸다.

6. 주어진 유동장내에서 단섬유의 배향도가 더 이상 증대되지 않고 정상상태에 머무르는 단섬유 배향도의 임계값인 임계배향도가 존재함을 알 수 있었고 그 위치와 임계값을 알 수 있었다. 본 실험조건에서 유동선단부의 임계배향도는 약 0.86, 전단유동이 지배적인 표면부의 임계배향도는 약 0.8 정도로 나타났다.

7. 단섬유 배향장은 배향도에 따라 유동방향으로는 유동입구부, 유동선단부, 그리고 그 사이의 정상상태부로 분류될 수 있고, 두께방향으로는 심부, 표면부, 그리고 그 사이의 변화부로 분류할 수 있다.

8. 금형 입구에서 주어진 초기 배향상태의 영향은 유동이 진전함에 따라 점차 소멸한다. 전단유동이 지배적인 표면부는 입구에 배향조건에 작은 영향을 받으나 심부는 큰 영향을 받는다.

### 감 사

본 연구는 과학기술처 특정연구사업에 의하여 지원되었으며, 그 관계당국에 감사드립니다.

### 기 호

- a : parameter of elliptic grid generator
- $a_2$  : second order orientation tensor
- $a_{ij}$  : component of second order orientation tensor
- $a_{ijkl}$  : component of 4th order orientation tensor
- $\hat{a}_{ijkl}$  : linear closure of 4th order orientation tensor
- $\tilde{a}_{ijkl}$  : quadratic closure of 4th order orientation tensor
- $\bar{a}_{ijkl}$  : hybrid closure of 4th order orientation tensor
- b : parameter of elliptic grid generator
- B : curve fitting constant of 4-constant model of viscosity
- c : parameter of elliptic grid generator
- $C_I$  : interaction coefficient representing strength of interaction
- $C_{ij}$  : component of mass matrix of orientation field formulation
- $C_p$  : heat capacitance of constant pressure
- [C] : mass matrix of flow field formulation
- [D] : stiffness matrix of flow field formulation
- F : scalar measure of orientation
- {F} : force vector of flow field formulation
- H : half thickness of cavity
- $K_{Iij}$  : component of stiffness matrix of orientation field formulation
- $K_{IIij}$  : component of stiffness matrix of orientation field formulation
- $K_{IIIij}$  : component of stiffness matrix of orientation field formulation

- $K_{IVij}$  : component of stiffness matrix of orientation field formulation
- n : power law index
- P : pressure
- PP : polypropylene
- {Q} : force vector of flow field formulation
- $\{Q_i\}$  : component of force vector of orientation field formulation
- $r_e$  : equivalent aspect ratio
- $\{R_i\}$  : component of force vector of orientation field formulation
- t : time
- T : temperature
- $T_b$  : curve fitting constant of 4-constant model of viscosity
- V : velocity vector
- $V_{ang}$  : average inlet velocity
- $V_a(y)$  : inlet velocity of fully developed flow
- $\kappa$  : thermal conductivity constant
- $\dot{\gamma}$  : strain rate tensor
- $\dot{\gamma}_a$  : apparent strain rate
- $\dot{\gamma}_{ij}$  : component of strain rate tensor
- $\lambda$  : parameter related to the shape of particle
- $\xi$  : coordinate of computational domain in elliptic grid generator
- $\zeta$  : coordinate of computational domain in elliptic grid generator
- $\eta$  : viscosity
- $\eta_0$  : zero-shear rate viscosity
- $\chi$  : penalty constant
- $\tau$  : deviatoric stress tensor
- $\tau_a^*$  : curve fitting constant of 4-constant model of viscosity
- $\delta_{ij}$  : Cronecker delta
- $\rho$  : density
- $\sigma$  : total stress tensor
- $\omega_{ij}$  : component of vorticity tensor

### 참고문헌

1. G.B. Jeffery, *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, **102**, 161 (1923).
2. R.C. Givler, M.J. Crochet, and R.B. Pipes, *J. Compos. Mater.*, **17**, 330 (1983).

3. M.C. Altan, S. Subbiah, S.I. Güçeri, and R.B. Pipes, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 848 (1990).
4. F. Folgar and C.L. Tucker III, *J. Reinf. Plast. Sci.*, **3**, 98 (1984).
5. W.C. Jackson, S.G. Advani, and C.L. Tucker III, *J. Compos. Mater.*, **20**, 539 (1986).
6. S.G. Advani and C.L. Tucker III, *Polym. Compos.*, **11**, 164 (1990).
7. T. Matsuoka, J.-I. Takabatake, Y. Inoue, and H. Takahashi, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 957 (1990).
8. S.G. Advani and C.L. Tucker III, *J. Rheol.*, **31**, 751 (1987).
9. 고 진, 윤재륜, *유변학*, **3**(2), 102 (1991).
10. 이성재, 이승종, *유변학*, **4**(1), 70 (1992).
11. 이미혜, 이기준, *유변학*, **4**(2), 138 (1992).
12. H. Mavridis, A.N. Hrymak, and J. Vlachopoulos, *AIChE J.*, **34**, 403 (1988).
13. H. Mavridis, A.N. Hrymak, and J. Vlachopoulos, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 449 (1986).
14. R.A. Behrens, M.J. Crochet, C.D. Denson, and A. B. Metzner, *AIChE J.*, **33**, 1178 (1987).
15. D. Pelletier, A. Fortin, and R. Camarero, *Int. J. Numerical Methods in Fluids.*, **9**, 99 (1989).
16. J.L. Steger and R.L. Sorenson, *J. Comput. Physics*, **33**, 405 (1979).
17. R.H. Crawford, D.C. Anderson, and W.N. Waggenpack, *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, **28**, 523 (1989).
18. H.P. Wang, R.T. McLay, *J. Fluids Eng.*, **108**, 465 (1986).
19. S.G. Advani and C.L. Tucker III, *J. Rheol.*, **34**, 367 (1990).
20. C.A. Hieber and H. Lobo, "C-flow user's guide: Material databank", Advanced CAE Tech., 1985.