

단섬유 복합계의 금형충전현상에 관한 연구

이성재·서동길*·이승종

서울대학교 공과대학 화학공학과

*한국화약그룹 종합연구소

(1989년 4월 3일 접수, 1989년 8월 8일 채택)

Study on the Mold Filling Process of Short Fiber Filled Composite Systems

Seong Jae Lee, Dong Gil Suh*, and Seung Jong Lee

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Research and Engineering Center, Korea Explosives Group, Daejeon 302-345, Korea

(Received 3 April 1989; accepted 8 August 1989)

요 약

Generalized 뉴턴 유체에 단섬유가 들어있는 복합계의 금형충전현상을 수치모사하기 위하여 planar channel 및 cylindrical tube를 대상으로 알고리즘을 개발하였으며, 수치모사 결과 자유표면이 시간에 따라 발달되어 가는 과정과 그 표면에서의 분수 유동현상을 잘 표시할 수 있었다. 또한, 뉴턴 유체 내에 포함되어 있는 단섬유의 분포와 배향(이차원 및 삼차원)을 Jeffery 식을 이용하여 계산한 결과 전단속도가 높은 벽면과 negative elongational 유동이 일어나고 있는 front를 따라서 평행하게 정렬되고 있음을 알 수 있었다.

Abstract— A numerical algorithm to simulate the mold filling process of short fiber filled (generalized Newtonian) composite systems was developed in the case of planar channel and cylindrical tube geometries. The transient movement of the frontal free surface and the fountain flow phenomena could be well simulated for those geometries. The distribution and orientation of fibers in the Newtonian fluid medium during the filling process were also calculated solving the Jeffery's eq'n, and the results showed that the fibers near the wall and the moving front align parallel to those surfaces.

1. 서 론

단섬유 강화 복합계는, 성형품의 여러 가지 물성 및 특성(mold shrinkage, strength, stiffness, heat distortion 등)을 향상시킬 수 있으며 용이하게 control 할 수 있을 뿐만 아니라, 종래의 프로세싱 기술 및 설비를 이용하여 비교적 쉽게 가공할 수 있다는 장점 때문에 최근 많이 사용되고 있는 복합소재의 하나

이다. 이 단섬유 강화 복합소재의 가공에 있어서 가장 많이 사용되고 있는 프로세싱 방법 중의 하나가 사출성형공정이다. 사출성형품의 경우 그 물성 및 특성은 제품 내에 섬유상이 어떠한 분포 및 배양을 가지고 있는가에 따라서 크게 좌우된다고 할 수 있으며, 이는 다시 금형충전시 섬유상이 겪게 되는 유동장의 변화상태에 의해서, 또는 그 상호작용에 의해서, 결정된다는 것이 잘 알려져 있다.

사출성형공정에 있어서 금형충전과정은, 금형의 최적 설계, 성형제품의 분자구조(morphology), 섬유상의 분포 및 배향 등에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 단계이므로 그동안 많은 연구가 진행되어져 왔다. 1958년 Spencer와 Gilmore[1]에 의한 연구가 사출성형공정을 체계적으로 연구하기 시작한 최초의 것이었으며, 그 다음해 Ballman 등[2]에 의하여 rectangular cavity의 충전에 관한 연구결과가 발표되었다. 1970년대에 들어서면서, Harry와 Parrot[3], Kamal과 Kenig[4, 5], Williams와 Lord[6, 7] 등에 의하여 실험적 및 이론적인 금형충전 연구들이 수행되었으며, 1980년대 들면서, Ryan과 Chung[8], Hieber와 Shen[9], Isayev와 Hieber[10] 등에 의해 수치모사에 의한 금형충전의 연구가 본격화되기 시작하였다. 1980년대 초까지 대부분의 연구는, 금형 내에서 melt front의 시간에 따른 움직임, weld line의 형성, 압력분포 등 overall 한 충전과정을 예측하는 데 주력하였으며, 그 결과 MOLDFLOW[11]나 C-FLOW[12]같은 상업적인 software package들이 개발되기에 이르렀다. 그러나, 성형제품의 결정구조, 섬유상의 분포 및 배향 등까지를 예측할 수 있기 위해서는, melt front에서의 fountain 유동 등 미세한 유동장의 변화를 예측할 수 있어야 한다. 1980년대 중반에 들어오면서, computer hardware 및 수치해석 기법들의 급속한 발달과 함께, fountain 유동 등 미세한 유동변화를 포함하는 금형충전의 수치모사 연구가 Mavridis 등[13], Behrens 등[14, 15]에 의하여 시작되었다.

뉴턴 유체의 유동장 내에서 섬유상의 운동을 수학적으로 처음 다룬 것은 1923년 Jeffery[16]였다. Jeffery는 섬유의 형상을 ellipsoid로 생각하고 ellipsoid의 무게중심이 유체의 유동장과 같이 움직인다는 것과 ellipsoid의 운동이 medium 유체의 유동에 영향을 주지 않는다는 가정을 사용하여 섬유배향의 시간에 따른 변화에 대한 지배방정식을 유도하였다. Goldsmith와 Mason[17]은 rod와 disk 모양을 한 입자의 운동을 uniform 및 nonuniform 전단유동에서 해석적으로 다루었으며, 최근 Givler 등[18]은 기하학적으로 복잡한 유동상황에서 ellipsoid의 운동(특히 배향)을 수치적으로 계산한 바 있다.

본 연구에서는, 단섬유 복합계의 금형충전과정과 섬유상의 분포 및 배향을 예측하기 위한 software의 개발을 궁극적인 목표로 다음과 같은 일들을 수행하였다.

1. Generalized 뉴턴 유체의 creeping 유동에 대하여 금형충전과정을 수치모사하기 위한 알고리즘의 개발

2. 충전시 섬유상의 분포 및 배향을 예측할 수 있는 알고리즘의 개발

3. 점탄성 유체 유동, 비등온 상태, 복잡한 geometry, 섬유-유체 및 섬유-섬유간의 상호작용 등 좀 더 복잡한 상황으로 알고리즘의 수정 및 확장 가능성 타진

2. 금형충전과정

2-1. 수학적 모델링

사출금형의 충전과정을 수치모사하기 위한 알고리즘을 개발하기 위하여, 본 연구에서는 Fig. 1에 보여지고 있는 바와 같은 planar channel과 cylindrical tube를 대상 geometry로 선택하였다. 등온상태에서, 비압축성 generalized 뉴턴 유체가 creeping 유동을 할 때, 그 무차원화된 지배방정식은 다음과 같이 표시된다.

Continuity eq'n :

$$\Delta^* \cdot \underline{\underline{V}}^* = 0 \quad (1)$$

Motion eq'n :

$$-\nabla^* p^* + \nabla^* \cdot \underline{\underline{\tau}}^* + St \cdot \underline{\underline{f}}^* = 0 \quad (2)$$

또, 경계조건은

$$\text{At the wall : no-slip condition} \quad (3)$$

$$\text{Along the axis of symmetry : symmetry condition} \quad (4)$$

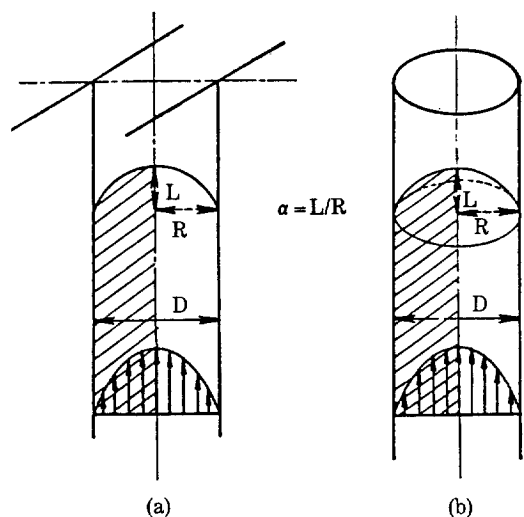


Fig. 1. Geometries studied in this work.

(a) planar channel, (b) cylindrical tube.

At the entrance: fully developed Poiseuille flow (5)

Along the free surface:

$$\underline{n}^* \cdot \underline{\tau}^* = \frac{1}{Ca} \frac{d\underline{s}^*}{ds^*} \quad (6)$$

으로 표시되며, 위에서 St 는 $\frac{\rho g D^2}{\eta V}$ 으로 정의되는 Stokes 수이고, Ca 는 $\frac{\eta V}{\sigma}$ 으로 정의되는 Capillary 수이다.

수치모사에서 사용된 점도모델식으로는 뉴턴 유체식과 Carreau-Yasuda 모델식이 쓰였는데 각각 다음과 같다.

Newton model:

$$\eta = \mu \quad (7)$$

Carreau-Yasuda model:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{-\frac{n-1}{a}} \quad (8)$$

2-2. 수치모사 기법

주어진 domain 내에서의 유동장은 Galerkin 유한 요소법[19]을 사용하여 계산하였으며, 시간이 진행해 감에 따라 자유표면 즉, melt front가 움직여 나가는 부분에 대해서는 predictor-corrector 방법을, 그리고 새로운 contact point의 결정은 projected shape function 방법을 사용하였다. 시간의 진행에 따라 mesh의 모양이 심하게 찌그러드는 경우에는 Laplace type의 mapping에 의한 좌표변환을 이용하여 mesh를 재구성하도록 하였다. 각각에 대하여 자세히 설명하면 다음과 같다.

2-2-1. 자유표면의 이동

시간이 진행해 감에 따라 자유표면이 이동해 나가는 과정은 predictor-corrector 방법을 사용하여 추적하였다. Explicit 2nd-order Adams-Bashforth 식이 predictor로 사용되었으며, corrector로는 modified Euler 식이 사용되었는데, 그 과정을 설명하면 다음과 같다.

1. 시간 t_n 에서 주어진 domain 및 mesh에 대하여 속도장 \underline{V}_n 을 유한요소법에 의하여 계산한다.

2. 자유표면을 따른 node들에 대하여, 시간 t_{n-1} 에서의 속도장 \underline{V}_{n-1} 을 interpolation에 의하여 구한다.

3. 시간 t_{n+1} 에서의, 자유표면 위에 있는 node들의 새로운 위치를 다음 2nd-order 식으로 계산한다.

$$\underline{X}_{n+1}^p = \underline{X}_n + \Delta t_n (\underline{V}_n + \Delta t_n (\underline{V}_n - \underline{V}_{n-1}) / (2\Delta t_{n-1})) \quad (9)$$

4. 시간 t_{n+1} 에서의 predicted 속도장 \underline{V}_{n+1}^p 을 유한 요소법으로 구한다.

5. 자유표면 위에 있는 node들의 corrected 위치 \underline{X}_{n+1} 을 다음 식으로 계산한다.

$$\underline{X}_{n+1} = \underline{X}_n + \Delta t_n (\underline{V}_n + \underline{V}_{n+1}^p) / 2 \quad (10)$$

6. 다음 time step(Δt_{n+1})의 결정은, local truncation error를 주어진 error tolerance(ϵ)와 비교하여 다음과 같이 결정한다.

$$\frac{LTE}{\epsilon} = \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_{n+1}} \right)^3 \quad (11)$$

여기서,

$$LTE = (\underline{X}_{n+1} - \underline{X}_{n+1}^p) / (3(1 + \Delta t_{n-1} / \Delta t_n)) + O(\Delta t)^4 \quad (12)$$

이다.

2-2-2. Contact point의 결정

자유표면을 포함하는 유동문제에 있어서 어려운 문제 중의 하나가, 매 시간에서 벽면과의 contact point를 결정하는 문제이다. 문헌들에 소개되어 있는 몇 가지 다른 방법들 중에서 projected shape function 방법[15]을 본 연구에서는 사용하였다. 이 방법에서는, 속도장이 주어져 있을 때 contact point 이웃에 있는 node가 벽면에 닿게 되는 시간간격을 계산하는 것인데, 이는 이웃에 있는 둘 또는 세 node의 위치를 linear 또는 quadratic extrapolation하여 구하게 된다. 따라서, boundary를 따른 isoparametric element의 사용이 필수적이다.

2-2-3. Mesh의 재구성

시간간격이 몇 번 지나가고 나면, 자유표면의 모양이 상당히 변화하고 mesh의 모양도 찌그러들기 시작한다. 그러면, 적당한 방법으로 mesh를 다시 구성해 주는 것이 필요하게 된다. 본 연구에서는, Laplace 형 mapping에 의한 좌표변환을 이용하여 mesh를 재구성하였다[20]. 이때 사용된 standard mesh와 typical한 real mesh가 Fig. 2에 주어져 있다.

2-3. 실험

개발된 수치모사 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 간단한 실험을 수행하였다. Fig. 3에 보여지고 있는 것과 같은 실험장치의 cylindrical tube를 통하여 뉴턴 유체를 일정한 유속으로 흘려 보내면서 형성되는 자유표면의 모양을 사진으로 찍어 가시화하였는데, 실험에서 사용된 유체는 밀도가 0.975 g/cm^3 이고 점도가 $10,000 \text{ cs}$ 인 silicone oil이었다.

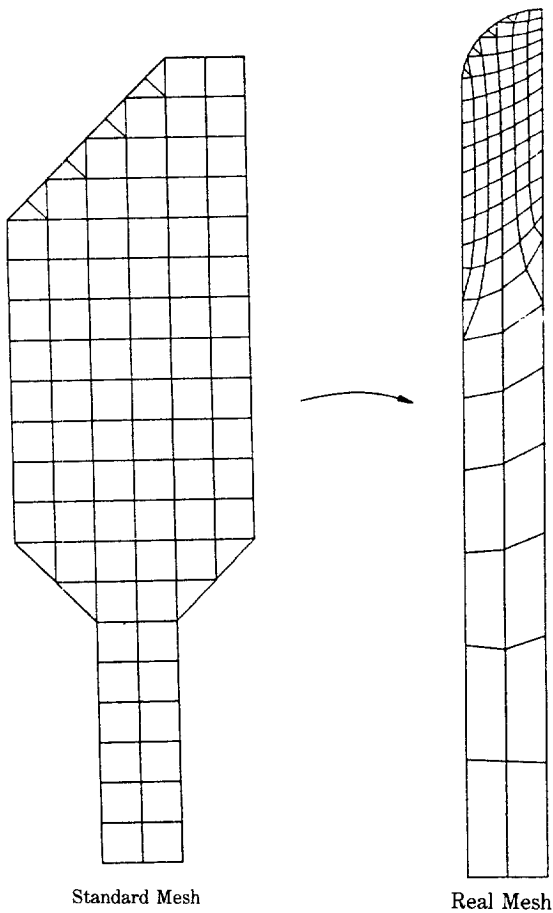


Fig. 2. Standard mesh and typical real mesh after coordinate transformation.

3. 섬유상의 분포 및 배향

3-1. 수학적 모델링

시간에 따라 충전되어 가는 유동장 내에서 섬유들이 어떤 분포 및 배향을 갖게 될 것인가를 계산하기 위하여 Jeffery[16]가 사용한 것과 같은 다음 가정들을 본 연구에서도 사용하였다.

1. 유체는 비압축성 뉴턴 유체이다.
2. 유체 유동은 creeping 유동이다.
3. 섬유와 유체의 계면에서 slip이 일어나지 않으며, 섬유가 유체 내에서 가라앉지 않는다.
4. Brown 운동은 무시한다.

이러한 가정 위에서 ellipsoid의 배향이 시간에 따라 변화하는 과정을 Goldsmith와 Mason[17]은 spherical polar coordinate를 사용하여 다음과 같이 표시

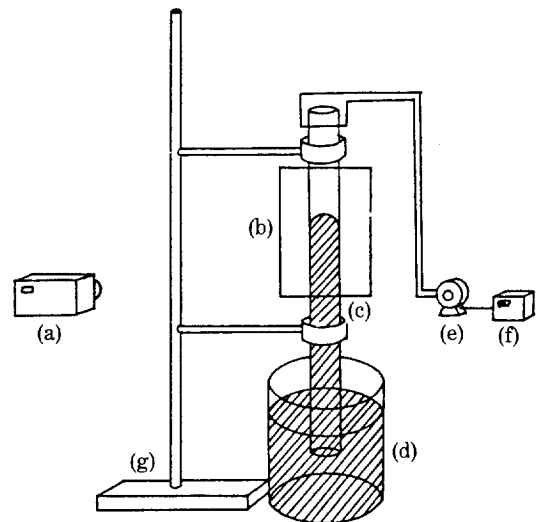


Fig. 3. Experimental apparatus to visualize the free surface of axisymmetric tubular flow.

- | | |
|--------------|--------------------------|
| (a) camera | (b) photographed section |
| (c) geometry | (d) fluid reservoir |
| (e) motor | (f) power controller |
| (g) stand | |

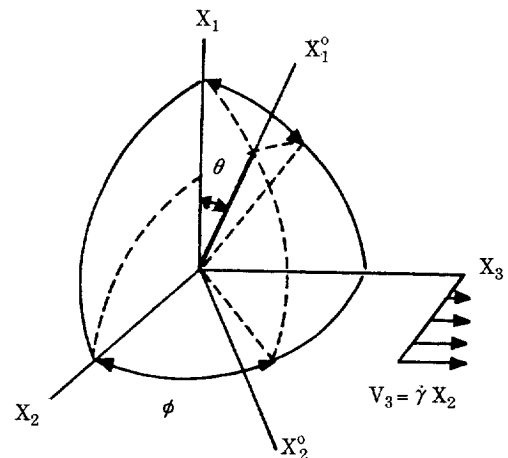


Fig. 4. The spherical polar coordinate system used in this work.

하였다.

$$\begin{aligned}
 d\phi/dt &= Z_1 - Z_2 \cos \phi \cot \theta - Z_3 \sin \phi \cot \theta \\
 &\quad + B [-D_{12} \sin \phi \cot \theta + D_{23} \cos 2\phi \\
 &\quad + D_{31} \cos \phi \cot \theta - 1/2 (D_{22} - D_{33}) \sin 2\phi] \quad (13) \\
 d\theta/dt &= -Z_2 \sin \phi + Z_3 \cos \phi \\
 &\quad + B [D_{12} \cos \phi \cos 2\theta + 1/2 D_{23} \sin 2\phi \sin 2\theta]
 \end{aligned}$$

$$+D_{31}\sin\phi\cos2\theta+1/4(D_{22}-D_{33})\cos2\phi\sin2\theta+3/4(D_{22}+D_{33})\sin2\theta] \quad (14)$$

여기서, ϕ 와 θ 는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 섬유 배향을 나타내기 위한 좌표변수이며, $B=(r_p^2+1)/(r_p^2-1)$, r_p 는 형상비(aspect ratio), Z_i 는 fluid rotation의 i 성분, D_{ij} 는 fluid dilatation의 ij 성분을 각각 나타낸다.

3-2. 수치모사 기법

금형충전과정에서 유체 내에 섞여 있는 섬유상의 배향을 계산하기 위해서는, 각 material point를 따라 가면서 위의 식 (13)과 (14)를 시간에 따라 적당한 방법으로 적분하여 ϕ 와 θ 를 그때 그때 구해 나가야 한다. 본 연구에서는, 다음과 같은 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치적분을 수행하였다.

$$\begin{aligned}\phi_{n+1/2} &= \phi_n + F1[\phi_n, \theta_n, t_o + n\Delta t]\Delta t/2 \\ \theta_{n+1/2} &= \theta_n + F2[\phi_n, \theta_n, t_o + n\Delta t]\Delta t/2\end{aligned}$$

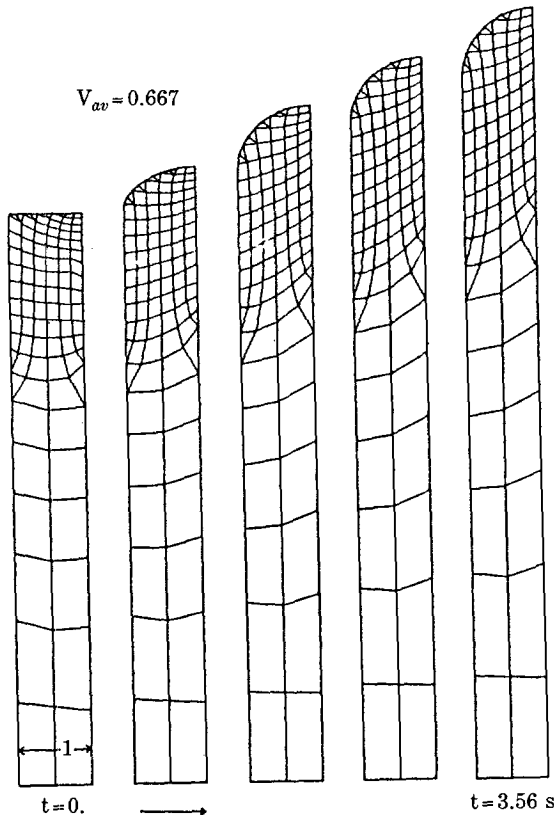


Fig. 5. Meshes varying with time for Newtonian creeping flow through planar channel.

$$\phi_{n+1} = \phi_n + F1[\phi_{n+1/2}, \theta_{n+1/2}, t_o + (n + \frac{1}{2})\Delta t]\Delta t$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n + F2[\phi_{n+1/2}, \theta_{n+1/2}, t_o + (n + \frac{1}{2})\Delta t]\Delta t \quad (15)$$

여기서, F1과 F2는 각각 식 (13)과 (14)의 오른쪽 항을 표시하며, ϕ_n 와 θ_n 는 각각 $t_o + n\Delta t$ 에서의 ϕ 와 θ 의 값을 나타낸다.

4. 결과 및 검토

4-1. 금형충전과정

먼저, 2-2절에서 설명된 수치모사 기법을 사용하여 대상 geometry로 택한 planar channel 및 cylindrical tube가 충전되어 가는 과정을 모사하여 보았다. Planar channel의 경우, 뉴턴 유체가 충전되어 가면서 자유표면이 형성되어 가는 과정이 그때 그때 사용된 mesh와 함께 Fig. 5에 주어져 있으며, Fig. 1에 정의되어 있는 α 값이 정상상태에 가까워짐에 따라 0.89의 값을 가짐을 알 수 있었는데, 이는 Mavridis 등 [13]이 정상상태에서 얻은 값과 비슷하게 나타났다. Fig. 6에는 자유표면의 위치만을 planar channel과

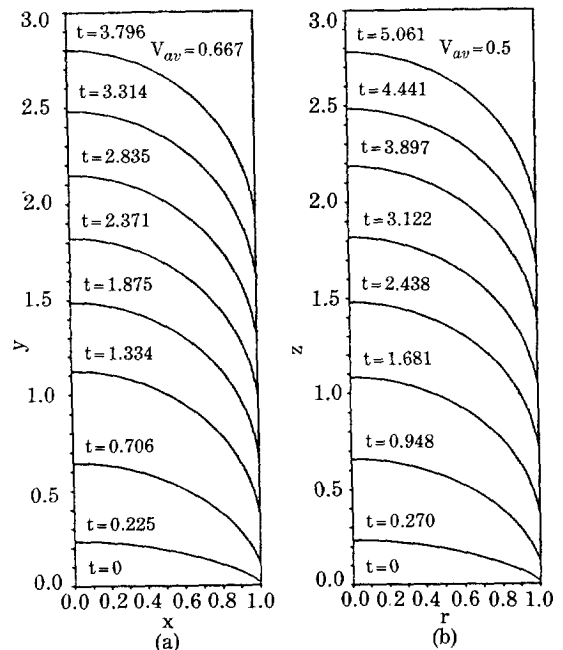


Fig. 6. Advancing frontal shapes varying with time for Newtonian creeping flow through (a) planar channel, and (b) cylindrical tube.

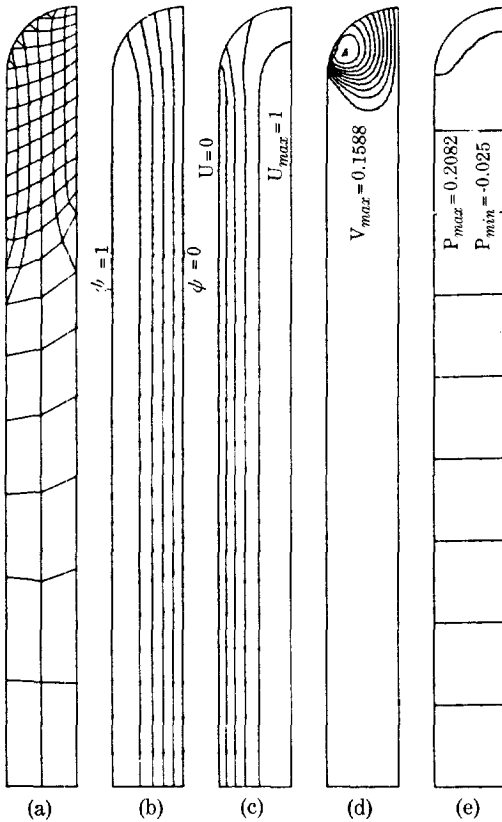


Fig. 7. Mesh and contours for Newtonian creeping flow through planar channel.

(a) finite element mesh (b) streamline
(c) axial velocity (U) (d) transverse velocity (V)
(e) pressure

cylindrical tube에 대하여 시간에 따라 표시해 보았고, Fig. 7과 8에는 각 경우 typical한 mesh, 유선, 속도장, 압력분포 등이 contour plot으로 주어져 있다. 자유표면의 시간에 따른 변화와 Front 부근에서 일어나고 있는 fountain 유동의 형태를 쉽게 관찰할 수 있었으며, cylindrical tube에 있어서 α 값은 0.82에 접근하는 것으로 나타났다. 다음, Fig. 9와 10에는 중력의 영향(Stokes 수가 33일 때)으로 자유표면의 모양이 상당히 평평해진 경우의 결과가 주어져 있다. 유체의 점도가 비뉴턴성인 경우를 보기 위하여 Carreau-Yasuda 점도식을 사용한 경우, 뉴턴 유체의 경우보다 더 불룩한 모양의 자유표면이 형성되고 있으며, nominal shear rate가 커서 전단박화 현상이 클수록 자유표면이 더욱 불룩해지는 것을 Fig. 11에서 볼 수 있다. 마지막으로, Fig. 12에는 2-3절에서의 실험

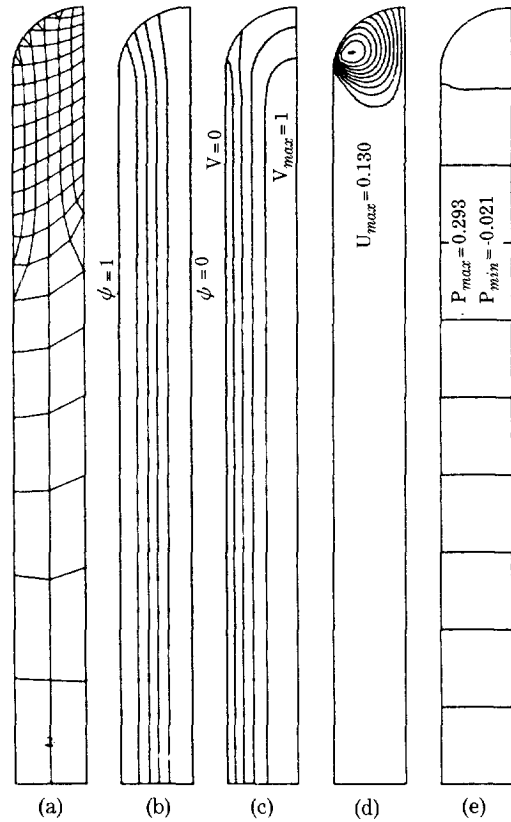


Fig. 8. Mesh and contours for Newtonian creeping flow through cylindrical tube.

(a) finite element mesh (b) streamline,
(c) axial velocity (V) (d) radial velocity (U)
(e) pressure

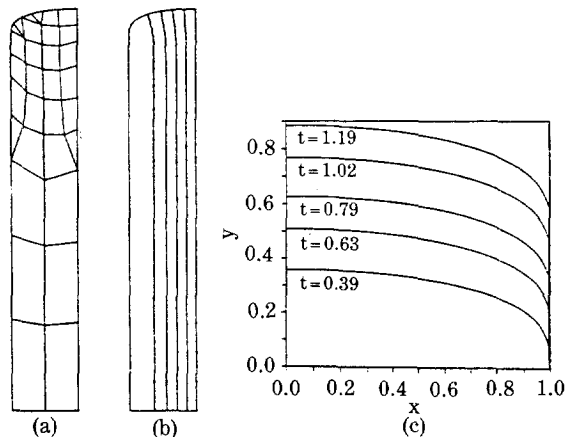


Fig. 9. The effect of gravity force for Newtonian creeping flow through planar channel when $St = 33$.

(a) finite element mesh (b) streamline
(c) advancing frontal shapes varying with time

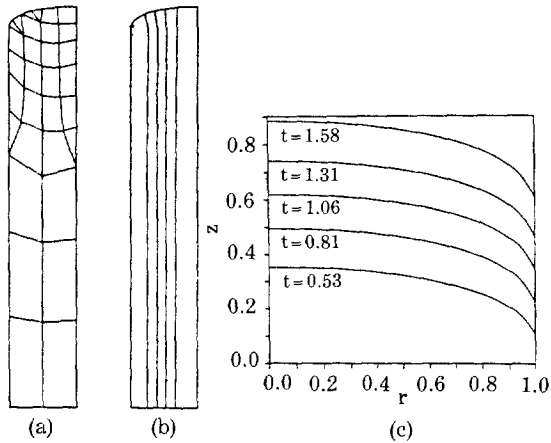


Fig. 10. The effect of gravity force for Newtonian creeping flow through cylindrical tube when $St = 33$.

- (a) finite element mesh
(b) streamline
(c) advancing frontal shapes varying with time

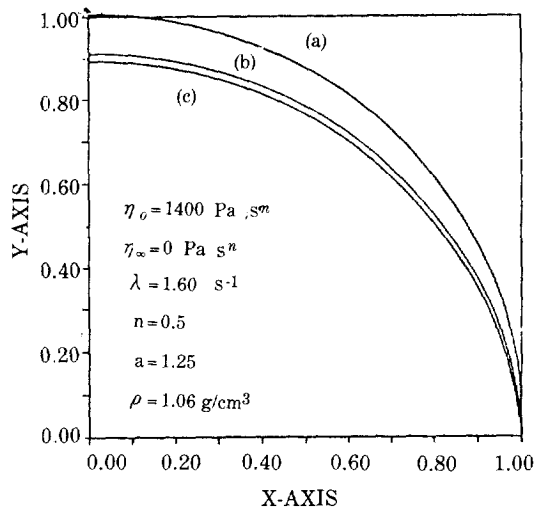


Fig. 11. Comparison of advancing frontal shapes for planar creeping flows of Newtonian and shear-thinning fluids.

- (a) Carreau-Yasuda model ($\dot{\gamma}_N = 7.5 \text{ sec}$)
(b) Carreau-Yasuda model ($\dot{\gamma}_N = 0.75 \text{ sec}$)
(c) Newtonian model

결과와 수치모사 결과가 서로 비교되어 보여지고 있는데 정상상태에서의 자유표면의 형상이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이때 실험 및 수치모사에서 사용된 조건들은 Table 1에 주어져 있는 바와 같다.

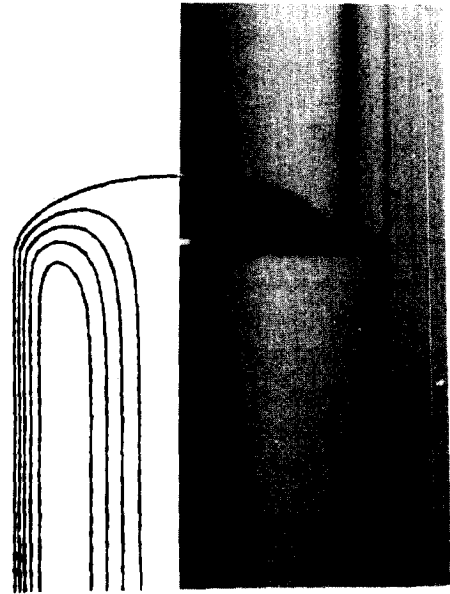


Fig. 12. Comparison of frontal shapes obtained by numerical simulation and visualization experiment.

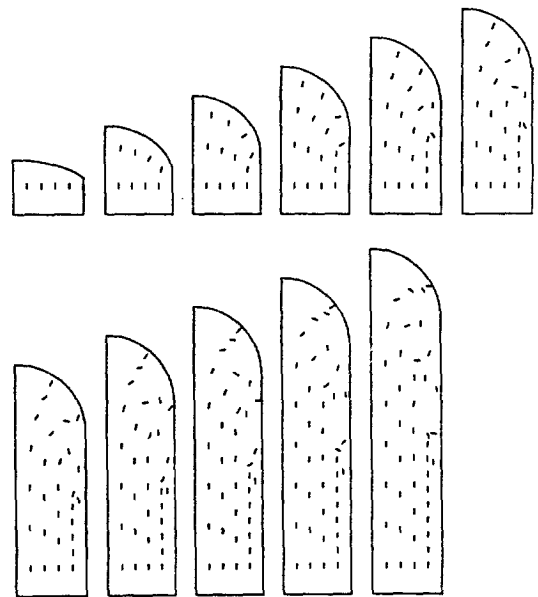


Fig. 13. Two dimensional fiber orientations in the planar channel filling process, $r_p = 1000$, $\phi_0 = 0^\circ$.

4-2. 섬유상의 분포 및 배향

3-2절에서 기술된 수치모사 기법을 사용하여 planar channel 이 뉴턴 유체로 충전되어 가는 과정에서 섬유

Table 1. Conditions used in the visualization experiment and corresponding numerical simulation

Average velocity	0.645 cm/s
Viscosity	9750 cp
Density	0.975 g/cm ³
Diameter	1.24 cm
Gravitational constant	980 cm/s ²
Re	0.008
St	23.36

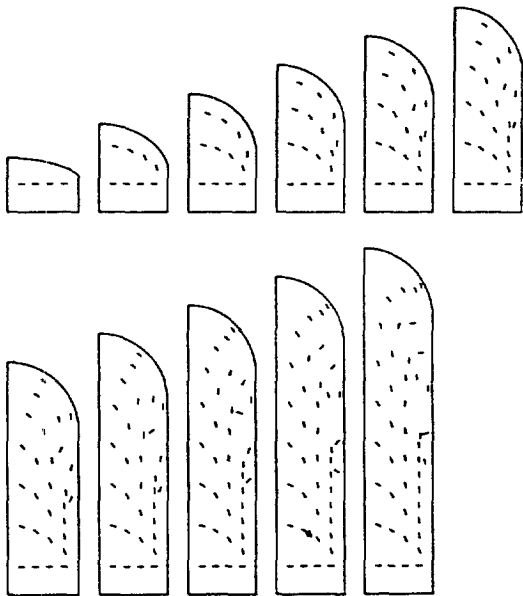


Fig. 14. Two dimensional fiber orientations in the planar channel filling process, $r_p = 1000$, $\phi_o = 90^\circ$.

들의 배향상태를 시간에 따라 계산해 보았다. 모든 경우에 형상비(r_p)는 1000으로 하였다. 먼저, Fig. 13-15에는 $\theta=0^\circ$ 인 경우 ϕ 의 변화(즉, 이차원 평면에서의 섬유배향) 결과가 주어져 있는데, ϕ 의 초기치(입구에서의 배향)가 각각 0° , 90° , random으로 주어진 경우들이다. 어느 경우에도 전단속도(shear rate)가 높은 벽 근처에서는 벽면을 따라서 쉽게 정렬되고 있음을 알 수 있으며, fountain 유동이 일어나고 있는 front 근처에서는 자유표면의 모양에 평행한 방향으로 정렬되고 있음을 알 수 있다. 이는, front 부근에서의 유동이 negative elongational 유동임을 감안해 볼 때, Givler 등[18]이 expansion geometry에서 얻은 결

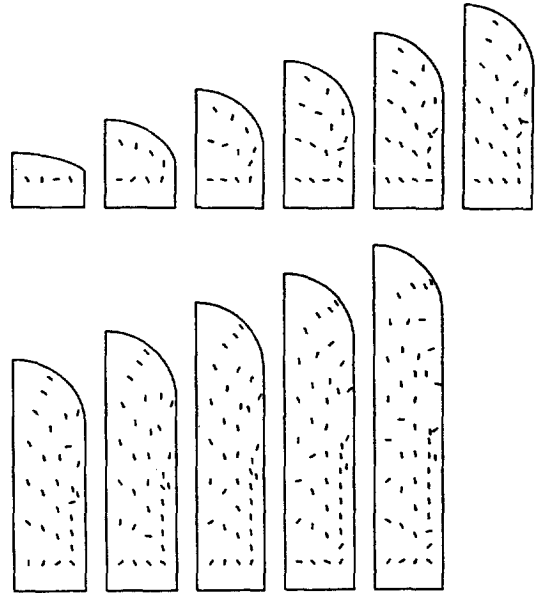


Fig. 15. Two dimensional fiber orientations in the planar channel filling process, $r_p = 1000$, ϕ_o : random.

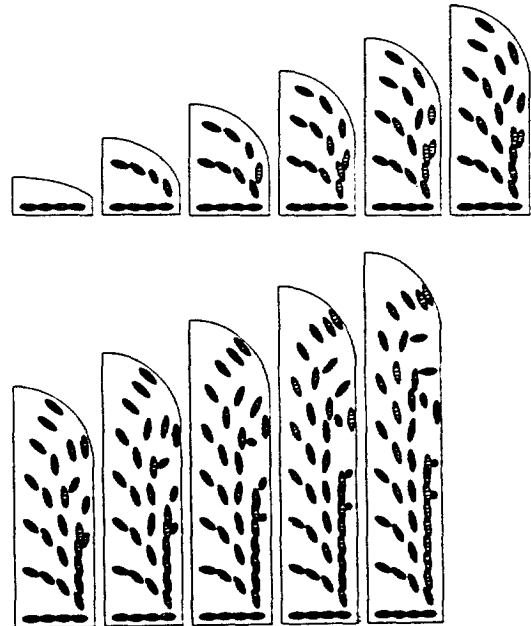


Fig. 16. Three dimensional fiber orientations in the planar channel filling process, $r_p = 1000$, $\phi_o = 90^\circ$, $\theta_o = 45^\circ$.

과와 일치하고 있음을 알 수 있다. 다음, Fig. 16과 17에는 ϕ 와 θ 가 다 변화하는 삼차원 섬유배향의 경우 대

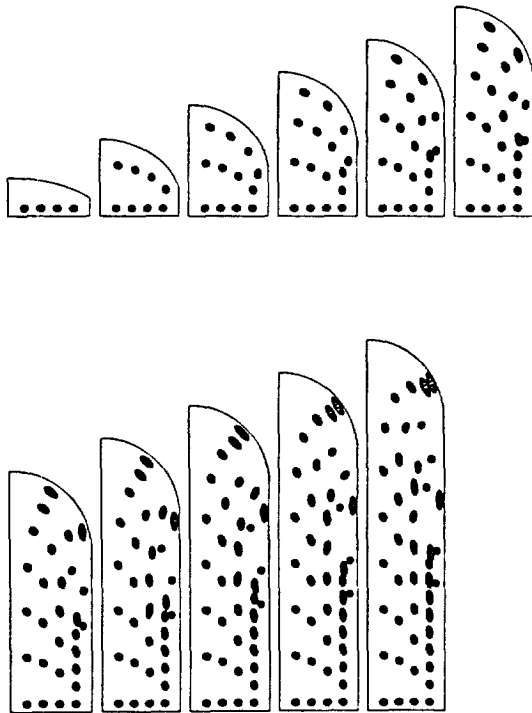


Fig. 17. Three dimensional fiber orientations in the planar channel filling process, $r_p = 1000$, $\phi_o = 90^\circ$, $\theta_o = 80^\circ$.

표적인 결과가 주어져 있다. Fig. 16은 ϕ 와 θ 의 초기치가 각각 90° 와 45° 로 주어진 경우이며, Fig. 17은 각각 90° 와 80° 로 주어진 경우이다. 이때에도 벽면과 front를 따라서 섬유들이 쉽게 배향되고 있음을 볼 수 있다.

4-3. 알고리즘의 확장 가능성

금형충전과정을 모사하기 위하여 본 연구에서 개발된 알고리즘은 generalized 뉴턴 유체의 유동을 다룰 수 있도록 구성되어 있으므로, 본 연구에서 사용된 점도모델식 이외의 점도식들도 쉽게 사용될 수 있다. 점탄성 유동까지 다루는 데에는 수치모사 알고리즘 상에 아직 많은 문제점들이 지적되고 있으나, 최근 Marchal과 Crochet 등[21]에 의하여 제안된 FEM-streamline upwind-subelement 방법은 본 연구에서 시도해 볼 만한 방법이라 하겠다. 비등온 상태의 경우로 확장시키기 위하여서는 에너지식이 추가되어야 하는 데 이때 나타나게 될 high Peclet 수의 문제를 수치적으로 잘 해결하여야 하며, 또, 좀 더 복잡한 geometry들을 다루기 위해서는 mesh의 재구성을 위한 scheme을 더 발

전시킬 필요가 있다 하겠다. 섬유-유체 및 섬유-섬유간의 상호작용을 고려하기 위한 한 방법으로는 non-dilute 단섬유 suspension 계에 대하여 최근 제안되고 있는 유변방정식들[22, 23]을 사용해 볼 적하다.

비뉴턴 유체의 유동장 내에서 섬유상의 배향을 계산하기 위한 지배방정식의 유도 및 수치해석 알고리즘의 개발 또한 앞으로 해결되어야 할 과제의 하나라 하겠는데, 이 경우 Papanastasiou 등[24]이 개발한 streamlined FEM 방법 등이 그 후보가 될 수 있다고 생각된다.

5. 결 론

단섬유 복합계의 금형충전현상을 수치모사에 의하여 주로 연구하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

1. Planar channel 및 cylindrical tube를 대상 geometry로 하여 충전과정을 수치모사할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 뉴턴 유체의 경우 수치모사된 자유표면의 형상이 간단한 실험결과와 잘 일치하였다. 자유표면의 형상이 시간에 따라 변화해 가는 과정과 front 부근에서 일어나고 있는 fountain 유동을 쉽게 관찰할 수 있었고, 비뉴턴성인 Carreau-Yasuda 유체의 경우, 전단박화현상이 커질수록 뉴턴 유체보다 더 불룩한 모양의 자유표면이 형성됨을 알 수 있었다.

2. Planar channel의 경우, 뉴턴 유체의 충전과정에서 섬유들의 배향상태를 시간에 따라 계산할 수 있는 알고리즘이 개발되었으며, 계산 결과 전단속도가 높은 벽면과 negative elongational 유동이 일어나고 있는 front를 따라서 평행하게 정렬되고 있음을 알 수 있었다.

3. 앞으로, 좀 더 복잡한 geometry, 비등온 상태, 점탄성 유동, 섬유-유체 및 섬유-섬유간 상호작용의 고려 등의 문제들로 발전시킬 필요가 있으며, 수치모사결과와 비교하기 위한 실험이 뒤따른다면, 단섬유 복합계의 금형충전공정을 위한 software 개발이 가능함을 보여주었다.

감 사

본 연구는 문교부 첨단공학(신소재 분야) 학술연구조성비와 한국과학재단 목적기초연구비에 의하여 이루어진 것입니다. 연구비를 지원해 준 문교부와 한국과학재단에 사의를 표합니다.

NOMENCLATURE

- a : material constant in eq'n (8)
 Ca : capillary number, viscous force/surface tension ratio
 D : diameter of the tube or channel gap thickness
 D_{ij} : ij component of fluid dilatation
 \underline{f} : body force per unit volume
 g : gravitational constant
 L : length defined in Fig. 1
 n : power-law index in eq'n (8)
 p : pressure
 r_p : aspect ratio of fiber
 R : $D/2$
 s : arclength along the surface
 St : Stokes number, viscous/gravity force ratio
 t : time
 \underline{t} : unit tangent vector
 \underline{U} : axial velocity in planar channel or radial velocity in cylindrical tube
 \underline{V} : transverse velocity in planar channel or axial velocity in cylindrical tube
 \underline{V} : velocity vector
 \underline{Z}_i : i component of fluid rotation

Greek Letters

- α : a parameter defined in Fig. 1
 γ : shear rate
 $\dot{\gamma}_N$: nominal shear rate
 η : viscosity
 η_0 : zero-shear viscosity
 η_∞ : infinite-shear viscosity
 θ : coordinate variable in the spherical polar coordinate system
 λ : time constant in eq'n (8)
 ρ : density of the fluid
 σ : surface tension coefficient
 $\underline{\tau}$: extra stress tensor
 ϕ : coordinate variable in the spherical polar coordinate system
 ψ : stream function

Subscripts

- o : initial condition
 n : number of time step

Superscripts

- p : predicted value
 $*$: dimensionless quantities

REFERENCES

- Spencer, R.S. and Gilmore, G.D.: *J. Coll. Sci.*, **6**, 118 (1958).
- Ballman, R.L., Shusman, T., and Toor, H.L.: *Ind. Eng. Chem.*, **51**, 847 (1959).
- Harry, D.H. and Parrott, R.G.: *Polym. Eng. Sci.*, **10**, 209 (1970).
- Kamal, M.R. and Kenig, S.: *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 295 (1972).
- Kamal, M.R. and Kenig, S.: *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 302 (1972).
- Williams, G. and Lord, H.A.: *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 553 (1975).
- Lord, H.A. and Williams, G.: *Polym. Eng. Sci.*, **15**, 569 (1975).
- Ryan, M.E. and Chung, T.S.: *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 642 (1980).
- Hieber, C.A. and Shen, S.F.: *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **7**, 1 (1980).
- Isayev, A.I. and Hieber, C.A.: *Rheol. Acta*, **19**, 168 (1980).
- Moldflow Pty. Ltd., Kilsyth, Victoria, Australia.
- Advanced CAE Technology, Inc., Ithaca, New York, U.S.A.
- Mavridis, H., Hrymak, A.N., and Vlachopoulos, J.: *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 449 (1986).
- Behrens, R.A.: Ph.D. Thesis, Univ. of Delaware (1983).
- Behrens, R.A., Crochet, M.J., Denson, C.D., and Metzner, A.B.: *AIChE J.*, **33**, 1178 (1987).
- Jeffery, G.B.: *Proc. Roy. Soc.*, **A102**, 161 (1922).
- Goldsmith, H.L. and Mason, S.G.: "Rheology" Ed. Eirich, Academic Press, 85 (1967).
- Givler, R.C., Crochet, M.J., and Pipes, R.B.: *J. Compos. Mater.*, **17**, 330 (1983).
- Crochet, M.J., Davies, A.R., and Walters, K.: "Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow", Elsevier (1984).
- Denayer, A.: *Comp. Struct.*, **9**, 359 (1978).
- Marchal, J.M. and Crochet, M.J.: *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **26**, 77 (1987).
- Lipscomb, G.G., Denn, M.M., Hur, D.U., and Boger, D.V.: *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **26**, 297 (1988).
- Dinh, S.M. and Armstrong, R.C.: *J. Rheol.*, **28**, 207 (1984).
- Papanastasiou, A.C., Macosko, C.W., and Scriven, L.E.: "Finite Elements in Fluids", Eds. Gallager, Oden, Carey, and Zienkiewicz, John Wiley & Sons (1985).