

論文

무배향/일방향 섬유강화 적층매트를 갖는 플라스틱
복합재의 3차원 압축변형 해석

채경철* · 조선희** · 김이곤*

**3-Dimensional Deformation Analysis for Compression Molding of
Polymeric Composites with Random/Unidirectional
Fiber-Reinforced Laminates**

Kyung-Chul Chae*, Seon-Hyung Jo** and E-Gon Kim*

ABSTRACT

Fiber reinforced composite materials are widely used in automotive industry to produce parts that are large, thin, lightweight, strong and stiff. It is very important to know a charge shape in order to have good products in the compression molding. In particular, the product such as a bumper beam is composed of the random and unidirectional fiber mats. The characteristics of flow fronts such as a bulging phenomenon for random mat and unidirectional fiber mat and slip parameters are studied numerically. And the effects of viscosity ratio and stack type on mold filling parameters are also discussed.

1. 서 론

섬유강화 플라스틱 복합재의 기계적 특성은 섬유유율, 섬유의 배향, 섬유와 모재와의 계면상태에 의해서 영향을 받지만 높은 강화 효율을 얻기 위해서는 강화 섬유의 배향성이 부하응력의 방향과 일치할 필요가 있다. 이러한 목적에 부합하기 위하여 개발된 일방향 섬유강화 플라스틱 복합재는 자동차의 범퍼빔이나 구조부재로서 널리 이용되고 있으며 플라스틱의 용융점 전후의 온도로 가열하여 열간압축 성형하는 것이 일반적인 성형법이다.

이 복합재는 두께방향에 대해 양외측에는 무배향 섬유매트, 중앙부에는 일방향 섬유층이 각각 위치하는 2개의 섬유층으로 구성되어 있기 때문에 무배향 섬유층

으로만 구성된 복합재와는 아주 상이한 유동특성을 나타낸다. 즉 일방향 섬유가 놓여있는 길이방향과 이것에 직각방향에 대한 점성이 상이한 상태에 무배향 섬유매트까지 겹쳐 있기 때문에 이러한 복합판의 구조를 갖는 복합재의 금형내 충전상태와 성형 파라미터들을 미리 예측하는 것은 최적성형조건의 결정이나 금형설계에 있어서 매우 중요하다.

섬유강화 플라스틱 복합재에 대하여 열간압축 성형을 하는 경우 금형내의 재료거동 등에 관한 연구 중 금형과 재료사이의 마찰 및 재료의 이방성을 고려하여 연구한 예를 살펴보면, Barone과 Caulk[1-2]는 SMC재내의 두께변화를 수반한 압축성형을 통하여 금형표면과 재료사이에는 미끄럼이 존재하며 이를 지배하는 상수로 유체마찰계수를 제안하였고, 이 유체마찰

* 국민대학교 기계자동차공학부

** 동서대학교 금형설계과

계수를 도입하여 금형표면과 수지와의 미끄럼을 고려한 지배방정식으로 유동상태를 표현하였으며, Barone과 Osswald[3]는 이러한 방정식을 이용하여 경계요소법으로 SMC재의 유동상태와 니트라인 등에 관한 해석을 하였다. 그리고 Hojo와 Kim 등[4]은 중공원형 평판압축을 통해서 미끄럼 상태를 지배하는 상수를 Barone 등이 구한 방법과는 별도로 구하였으며, 장수학 등[5]은 섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 금형과 재료계면의 미끄럼을 고려하여 유동해석을 하였다. 그리고 Agassant 등[6]은 유한요소법을 이용, 유리섬유매트의 구조변화에 따른 먹지수법칙 유체의 계수를 달리하여 해석하였고, 조선행 등[7,8]은 이방성이 강한 일방향 섬유강화 복합재를 해석하는 경우와 전단점성과 인장점성을 도입하여 유동해석을 하는 각각의 경우에 있어서 금형-재료 계면에서의 미끄럼을 고려하여 속도장과 충전패턴 등을 계산하였다.

또한 윤두현 등[9]은 섬유강화 복합재료의 3차원 유동해석에 있어서 금형-재료계면의 미끄럼을 고려하고 등방성 뉴턴유체로 가정하여 3차원 유한요소해석을 하였으며, 별징현상과 같은 유동선단 특성과 성형하중 등에 미치는 미끄럼 지배상수의 영향에 대해서 고찰한 바 있다. 그러나 두께가 두껍고 이방성이 강한 복합재료를 금형과 재료의 미끄럼을 고려하고 무배향 섬유층과 일방향 섬유층과의 점도의 상이성을 고려하여 3차원 유동해석을 한 예는 아직 없는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 무배향 섬유층과 일방향 섬유층의 점도와 금형-재료간의 미끄럼을 지배하는 미끄럼 지배상수 등을 변화시켜 별징현상과 같은 유동선단 특성과 복합재내의 속도분포, 압력 분포 등을 수치적으로 계산하여 이에 미치는 일방향 섬유층의 점도비 A와 섬유의 적층형태등의 영향에 대하여 분석한 결과를 보고한다.

2. 이 론

2.1 지배방정식

섬유강화 플라스틱 복합재를 Fig. 1과 같이 압축성형 하는 경우의 비압축성 조건에 의하여 연속방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

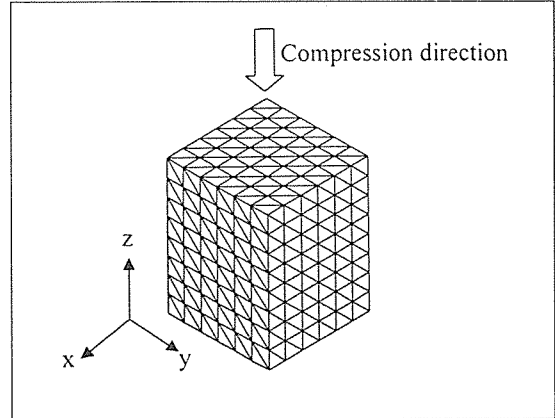


Fig. 1. Finite element mesh for a specimen with 1728 elements and 441 nodes

점성을 고려한 경우의 Newtonian fluid의 구성 방정식은

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 3개의 수직응력을 더하여 3으로 나눈 것이 정수압이기 때문에 이를 만족하기 위해서는 $(3\lambda + 2\mu)\Theta = 0$ 이 되어야 한다. 이와같은 관계를 대입하면

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

인 Stokes방정식을 얻으며, 이것을 Euler의 운동방정식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) + \rho f_x \quad (4.a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) + \rho f_y \quad (4.b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho f_z \quad (4.c)$$

일반적으로 점도는 압력과 온도의 함수로 주어지는데, 유동에 저항을 나타내지만, 식 (4)에서 x방향 유속(u)에 저항을 주는 점도를 μ_x , y방향 유속(v)에 저항을 주는 점도를 μ_y , z방향 유속(w)에 저항을 주는 점도를 μ_z 라고 하면 즉, 복합재 내에서 한 방향 섬유층에 대한 길이방향의 점도를 μ_y , 가로방향에 대한 점도를 각각 μ_x , 두께방향에 대한 점도를 μ_z 라고 할 수 있다. 일방향 섬유층에서 가로방향의 점도 μ_x 에 대한 길이방향의 점도 μ_y 를 A라하고 여기서 A를 이방성 점도비로 정의 하였다. 또한 물체력, 관성력을 무시하고, 비압축성을 고려한 후 다음과 같은 무차원화된 특성값들을 정의 하였다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{x}{L}, \bar{y} = \frac{y}{L}, \bar{t} = \log h_0 - \log h = \log \frac{h_0}{h}, \\ \bar{u} &= \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}}, \bar{v} = \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}}, \bar{P} = -\frac{ph}{k_H h L^2}, \\ \alpha_x &= \frac{\mu_x}{k_H L^2}, \alpha_y = \frac{\mu_y}{k_H L^2}, \alpha_z = \frac{\mu_z}{k_H L^2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, L은 특성길이, h_0 는 초기두께, h는 나중두께 그리고 α 는 미끄럼 지배상수를 나타낸다. 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 무차원화된 연속방정식과 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + \alpha_x \left(2 \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} \right) \\ + \alpha_y \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y} \partial \bar{x}} + \alpha_z \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}} - \bar{u} = 0 \end{aligned} \quad (7.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + \alpha_x \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}} + \alpha_y \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + 2 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{z}^2} \right) \\ + \alpha_z \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z} \partial \bar{y}} - \bar{v} = 0 \end{aligned} \quad (7.b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} + \alpha_x \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} + \alpha_y \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y} \partial \bar{z}} \\ + \alpha_z \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{y}^2} + 2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{z}^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7.c)$$

금형-재료계면의 미끄럼을 지배하는 무차원 상수는 유동장에 의해서 결정되며 그 범위는 0에서 ∞ 사이에 있다. α 가 0인 경우에는 단순확장 흐름이고, α 가 커질수록 계면에서의 미끄럼이 크기 때문에 성형중 초기의 형상을 유지하면서 유동하는 상태로 된다. 즉 마찰이 큰 경우에는 미끄럼이 없기 때문에 벌징현상이 크게 나타나고, 마찰이 작은 경우에는 모두 미끄러져 유동선단은 초기충전 상태의 형상을 유지하면서 움직인다.

2.2 유동해석

무차원화된 연속방정식과 운동방정식에 가중함수를 곱하여 가중 잔차방정식으로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\int_V (\bar{u}_{,x} + \bar{v}_{,y} + \bar{w}_{,z}) dV = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \sigma_{x,x} dV + \int_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \sigma_{y,x} dV + \int_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \sigma_{z,x} dV \\ - \int_V \bar{u} \sigma_{x,x}|_S dS - \int_V \bar{u} \sigma_{y,x}|_S dS - \int_V \bar{u} \sigma_{z,x}|_S dS = 0 \end{aligned} \quad (9.a)$$

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \sigma_{x,y} dV + \int_V \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \sigma_{y,y} dV + \int_V \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \sigma_{z,y} dV \\ - \int_V \bar{v} \sigma_{x,y}|_S dS - \int_V \bar{v} \sigma_{y,y}|_S dS - \int_V \bar{v} \sigma_{z,y}|_S dS = 0 \end{aligned} \quad (9.b)$$

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \sigma_{x,z} dV + \int_V \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \sigma_{y,z} dV + \int_V \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \sigma_{z,z} dV \\ - \int_V \bar{w} \sigma_{x,z}|_S dS - \int_V \bar{w} \sigma_{y,z}|_S dS - \int_V \bar{w} \sigma_{z,z}|_S dS = 0 \end{aligned} \quad (9.c)$$

위 식에 경계조건을 대입하고, 또한 금형과 재료계면에서의 마찰 경계 조건 $\tau = k_H v$ 을 적용하여 풀면

$$\begin{aligned} \int_V \bar{u}_{,x} \sigma_{x,x} dV + \int_V \bar{u}_{,y} \sigma_{y,x} dV \\ + \int_V \bar{u}_{,z} \sigma_{z,x} dV + \int_V \bar{u} k_H dS = 0 \end{aligned} \quad (10.a)$$

$$\begin{aligned} \int_V \bar{v}_{,x} \sigma_{x,y} dV + \int_V \bar{v}_{,y} \sigma_{y,y} dV \\ + \int_V \bar{v}_{,z} \sigma_{z,y} dV + \int_V \bar{v} k_H dS = 0 \end{aligned} \quad (10.b)$$

$$\int \bar{w}_{\bar{z}} \bar{\sigma}_{\bar{x}\bar{z}} dV + \int \bar{w}_{\bar{y}} \bar{\sigma}_{\bar{y}\bar{z}} dV + \int \bar{w}_{\bar{z}} \bar{\sigma}_{\bar{z}\bar{z}} dV = 0 \quad (10.c)$$

를 얻게된다. 그리고 가중 함수를 고려하여 이산화된 연속방정식과 평형방정식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{H}_{\lambda\beta}^x \bar{u}_\beta + \mathbf{H}_{\lambda\beta}^y \bar{v}_\beta + \mathbf{H}_{\lambda\beta}^z \bar{w}_\beta = 0 \quad (11)$$

$$\mu_x (2\mathbf{M}^{xx} + \mathbf{M}^{yy} + \mathbf{M}^{zz}) \bar{u}_\beta + \mu_y \mathbf{M}^{xy} \bar{v}_\beta + \mu_z \mathbf{M}^{xz} \bar{w}_\beta - \mathbf{H}^x \bar{p}_\lambda + f_1 = 0 \quad (12.a)$$

$$\mu_x \mathbf{M}^{yx} \bar{u}_\beta + \mu_y (\mathbf{M}^{xx} + 2\mathbf{M}^{yy} + \mathbf{M}^{zz}) \bar{v}_\beta + \mu_z \mathbf{M}^{yz} \bar{w}_\beta - \mathbf{H}^y \bar{p}_\lambda + f_2 = 0 \quad (12.b)$$

$$\mu_x \mathbf{M}^{zx} \bar{u}_\beta + \mu_y \mathbf{M}^{zy} \bar{v}_\beta + \mu_z (\mathbf{M}^{xx} + \mathbf{M}^{yy} + 2\mathbf{M}^{zz}) \bar{w}_\beta - \mathbf{H}^z \bar{p}_\lambda = 0 \quad (12.c)$$

이산화된 연속방정식과 운동방정식을 행렬형태로 나타내면 아래와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \mathbf{T}^{xx} & \alpha_y \mathbf{M}^{xy} & \alpha_z \mathbf{M}^{xz} & -\mathbf{H}^x \\ \alpha_x \mathbf{M}^{yx} & \alpha_y \mathbf{T}^{yy} & \alpha_z \mathbf{M}^{yz} & -\mathbf{H}^y \\ \alpha_x \mathbf{M}^{zx} & \alpha_y \mathbf{M}^{zy} & \alpha_z \mathbf{T}^{zz} & -\mathbf{H}^z \\ \mathbf{H}^x & \mathbf{H}^y & \mathbf{H}^z & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}_\beta \\ \bar{v}_\beta \\ \bar{w}_\beta \\ \bar{p}_\lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

유동장에 있는 각각의 요소에 대해서 강성행렬을 구하고 이것들을 중첩함으로써 전체 해석대상에 대한 유한요소 방정식을 얻을 수 있으며, 경계조건식을 대입하여 해를 구하면 속도장과 유동선단 등을 구할 수 있으면 두께방향의 벌징현상을 예측할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 해석에 사용된 모델의 요소는 4면체 2차요소로서 주 절점은 441개, 총 절점은 2873개, 요소의 개수는 1728이다. 그리고 무배향섬유층에서의 미끄럼 지배상수는 0.02, 일방향 섬유층의 섬유 길이방향 미끄럼 지배상수는 0.01, 가로방향은 0.05, 0.1, 1.0으로 하였다 [10].

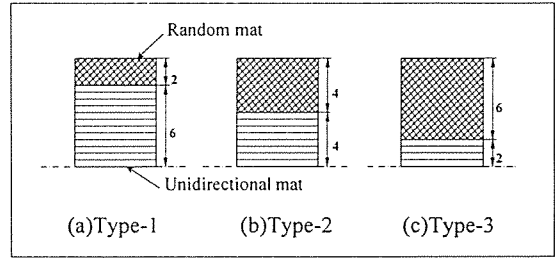


Fig. 2. Definition of stack type in a symmetric laminates

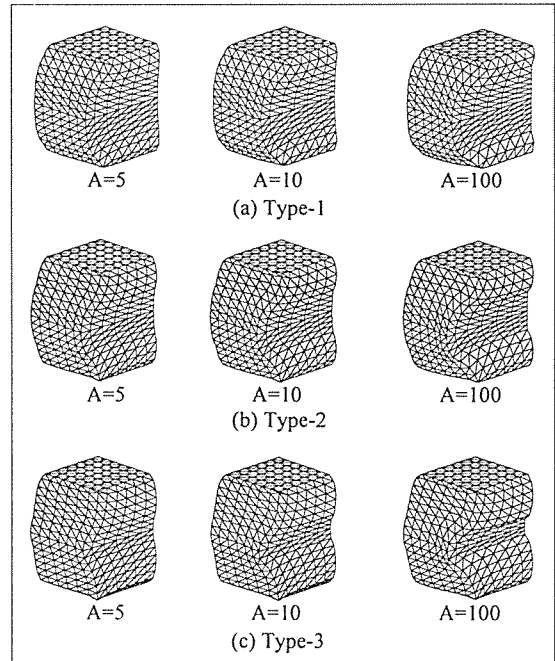


Fig. 3. Effects of viscosity ratio A and layer type on deformed shapes in case of $R_{cr} = 0.375$

Fig. 2는 무배향/일방향 섬유강화 적층매트를 갖는 복합재의 유동해석에 사용된 적층 상태를 나타내고 있는 그림으로 3가지의 형태를 사용하였다.

Fig. 3 (a)~(c)는 점도비와 미끄럼 지배상수의 변화에 대한 성형품의 형상변화를 적층유형별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 동일한 적층형태 일지라도 이방성 점도비 A가 커짐에 따라서 y방향의 점도 μ_y 가 x방향의 점도보다도 더 커지기 때문에 y방향으로의 유동이 적어지는 결과를 초래한다.

Fig. 4(a)~(c)는 이방성 점도비 A의 변화에 대해 적층유형별로 성형품의 변형상태를 xz 평면상에 나타

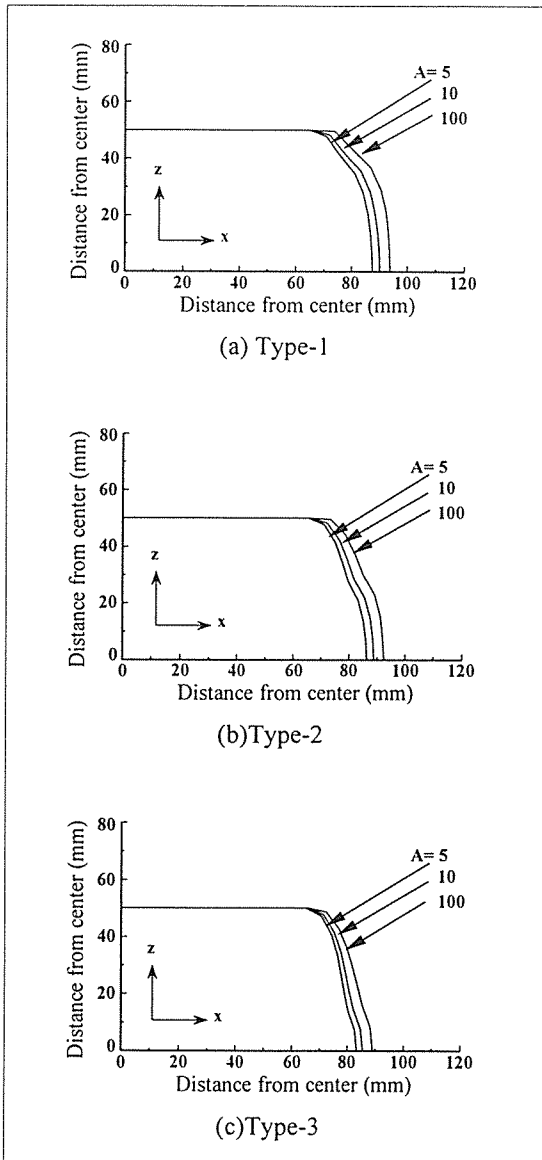


Fig. 4. Effects of viscosity ratio A and stack type on shapes of flow fronts in case of $R_{cr}=0.375$ (XZ-plane)

낸 것이다. 점도비 A 가 증가하면 x 축 방향으로 많이 퍼져나가는 것은 적층상태에 상관없이 동일한 현상이지만 일방향 섬유층이 많은 Type 1인경우가 일방향 섬유층이 적은 Type 3보다도 더 많이 퍼져나가고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 일방향 섬유층이 놓인 방향이 y 축 방향이기 때문에 이것에 수직을 이루고 있

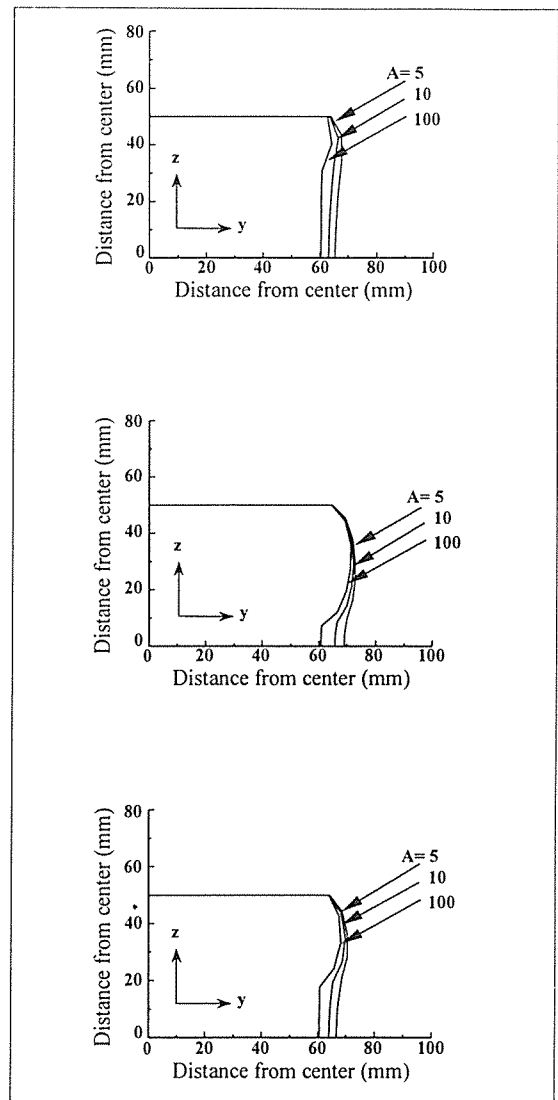
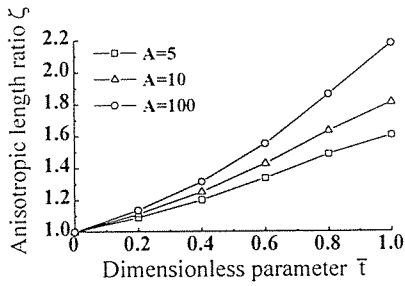


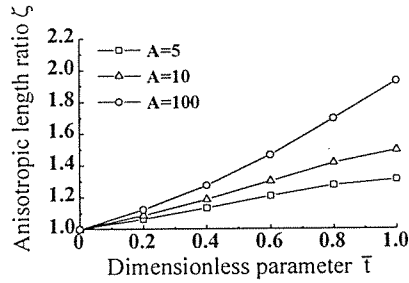
Fig. 5. Effects of viscosity ratio A and stack type on shapes of flow fronts in case of $R_{cr}=0.37$ (YZ-plane)

는 x 축 방향에서는 일방향 섬유층이 많을수록 더 많이 x 축 방향으로 진전되어 있음을 알 수 있다.

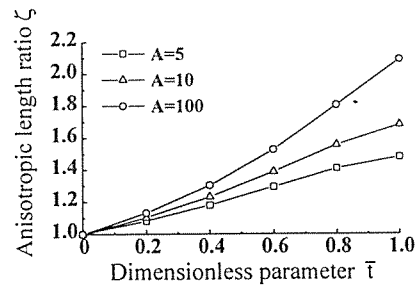
Fig. 5(a)~(c)는 섬유층 적층 유형별 유동선단의 형상을 yz 평면상에 나타낸 그림으로 무배향 섬유층이 많을수록 벌징현상이 두드러진 유동선단을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 일방향 섬유층이 y 축 방향으로 배열되어 있기 때문에 일방향 섬유층이 많을수록 y 축 방향의 유동이 작아서 최초의 형상을 유지하게 된



(a) Type-1

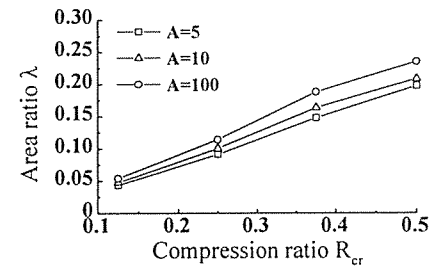
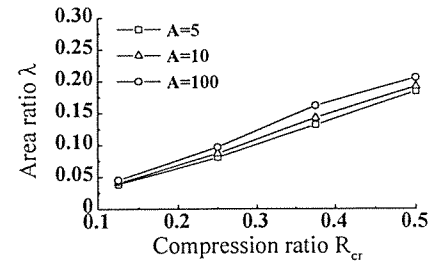
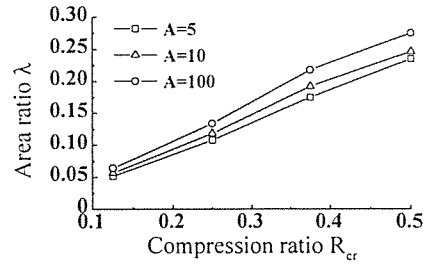


(b) Type-2

Fig. 6. Anisotropic length ratio ζ as function of \bar{T} for stack type

다. xz 평면상의 유동패턴과 상반되는 현상을 보여주고 있다. Fig. 4와 Fig. 5를 통해 일방향 섬유층과 무배향 섬유층으로 적층된 복합재의 두께방향에 대한 유동선단을 적층형태별로 파악할 수 있다.

Fig. 6 (a)~(c)는 이방성 길이비 ζ 에 미치는 무차원 변수의 영향을 나타낸 것이다. 여기에서 이방성 길이비 ζ 는 성형품의 유동선단 중 xy 평면내에 있는 y 방향 길이에 대한 x 방향 길이로서 성형품의 이방성에 대한 정

Fig. 7. Area ratio λ as a function of R_{cr} for stack type(xdirection)

도를 나타내고 있다고 볼 수 있다. Fig. 6을 통해서 알 수 있는 것은 섬유층 적층상태에서 일방향 섬유층이 많을수록 또 이방 성점도비 A 가클수록 일방향 섬유층의 길이방향으로 더욱 유동하기 어려운 상태로 되기 때문에, y 방향 보다는 x 방향으로의 유동선단 길이가 더 길게 전진되어 가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(a)~(c)는 성형품의 xz 평면의 단면에 대한 형상에서 별징부분을 포함한 전체면적과 별징부분 면

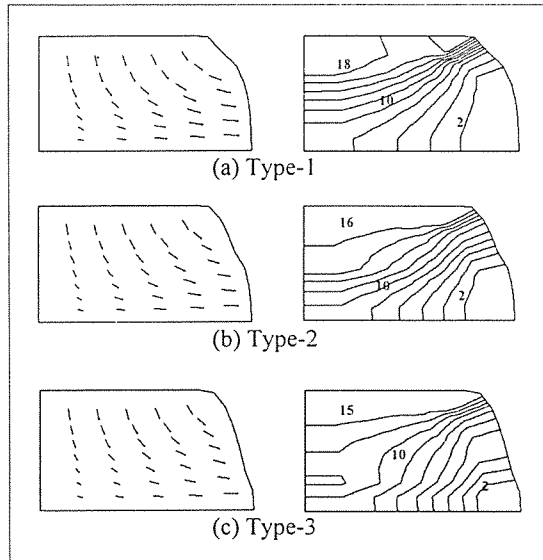


Fig. 8. Velocity vector and pressure contour in case of $R_a=0.375$ (XZ-plane)

적과의 비를 λ 라 하였을 때 압축비와의 관계를 나타내었다. 점도비 A가 증가할수록 또, 일방향 섬유층이 두꺼운 경우가 적은 경우보다도 면적비 λ 가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 두꺼운 성형품의 두께방향의 변위에 따라서 반드시 수반되는 벌징현상을 정량적으로 표현할 수 있다.

Fig. 8 은 성형품의 xz 평면에서 속도벡터와 압력 분포를 나타낸 그림이다. 일방향 섬유층에서 외측으로 속도가 크게 나타나는 것은 섬유의 길이방향과 직각을 이루고 있기 때문이다. 그리고 무배향/일방향 섬유의 경계층에서 압력이 집중되고 있음을 알 수 있습니다.

성형품의 yz면에서의 속도벡터와 압력분포를 Fig. 9 에 나타내었다. 무배향 섬유층에서는 외측으로 속도가 있으나 일방향 섬유층에서는 외측으로의 속도가 거의 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 섬유가 섬유의 길이방향으로 형성되어있기 때문이다. 여기서도 또한 경계층에서 압력이 집중됨을 알 수 있다.

4. 결 론

재료의 특성이 균질한 무배향 섬유층과 이방성 점도비를 갖는 일방향 섬유층으로 적층된 플라스틱 복합재의 3차원 해석 프로그램을 개발하고 이를 통해 다음과

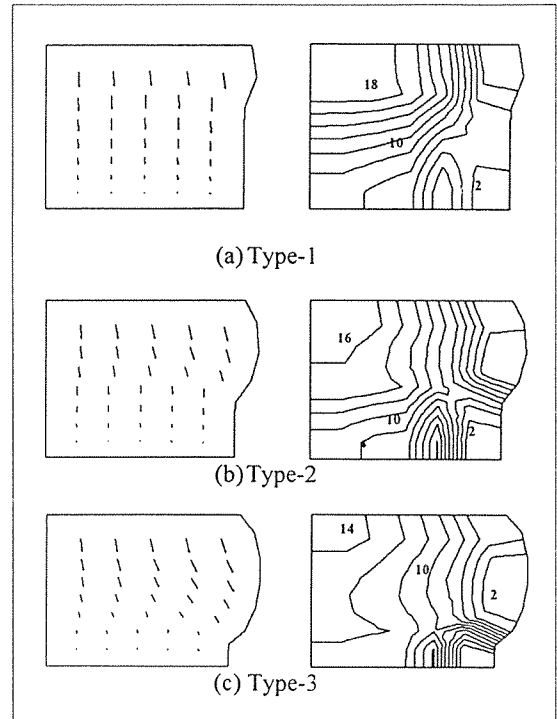


Fig. 9. Velocity vector and pressure contour in case of $R_a=0.375$ (YZ-plane)

같은 결론을 얻었다.

1) 일방향 섬유층의 이방성 점도비A가 커짐에 따라 x방향으로의 벌징현상은 두드러지게 나타나지만 y방향으로의 벌징현상은 점도비 A가 적은 경우 현저하게 나타난다.

2) 일방향 섬유층이 무배향 섬유층보다 많이 적층되어 있는 경우 x방향으로의 벌징현상은 뚜렷하나 y방향으로의 벌징현상은 x방향과 반대의 현상을 보인다.

3) 무배향/일방향 섬유강화 복합재료의 압축성형에서 일방향 섬유층의 섬유 길이방향의 변위는 일방향 섬유만의 재료와 동일하게 거의 없음을 알 수 있었다.

4) 무배향층과 일방향층의 경계면에서 압력이 집중되고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Barone, M. R. and Caulk, D. A., "A Model for the Flow of a Chopped Fiber Reinforced Polymer Compound in Compression Molding", J. Applied Mechanics, Vol. 53, 1985, pp. 361~371.
2. Barone, M. R. and Caulk, D. A., "Kinematics of Flow in Sheet Molding Compound", Polymer Composites, Vol. 6, 1985, pp. 105~109.
3. Barone, M. R., Osswald, T. A., "A Boundary Element Analysis of Flow in Sheet Molding Compound", Polymer Composites, Vol. 9, No. 2, 1988, pp. 158~164.
4. Hojo, H., Kim, E. G., Onodera, T., Yaguchi, H., Kim, S. H., Koshimoto, M., "Position of Neutral Surface during Hollow Disk Compression Molding of Long Fibre -Reinforced Thermoplastics", Int. Polym. Process. Vol. 4, 1989, pp. 179~182.
5. 장수학, 김석호, 백남주, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 금형-재료계면의 미끄럼을 고려한 유동해석", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제1호, 1991, pp. 163~168.
6. Ducloux, R., Vincent, M. and Agassant, J. F., "Simulation of Compression Molding of Long-Glass-Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets", Polymer Composites, Vol. 1, 1992, pp. 30~37.
7. 조선행, 임영호, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 이방성을 고려한 유동해석", 한국복합재료학회지, 제 9권, 제 1호, 1996, pp. 1~9.
8. 조선행, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 인장점성과 전단점성을 고려한 유동해석", 한국소성가공학회지, 제6권, 제4호, 1997, pp. 311~318.
9. 윤두현, 김형철, 조선행, 김이곤, "섬유강화 플라스틱 복합재의 압축성형에 있어서 3차원 유동해석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 1997, pp. 859~865.
10. 윤두현, 김형철, 조선행, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 금형면의 미끄럼 지배상수에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제10권, 제4호, 1997, pp. 50~58.