

단부형상을 갖는 무배향/일방향 복합적층판의 압축성형에 있어서 3차원 유한요소해석

송 강석*, 채 경철*, 김 이곤*

Three-Dimensional Finite Element Analysis for Compression Molding of Step-Type Random/Unidirectional Polymer Composite Laminates

K. S. Song*, K. C. Chae*, E. G. Kim*

Key Words : Step-Type Random/Unidirectional Polymer Composite Laminates(단부형상의 무배향/일방향 복합적층판), 3-Dimensional Finite Element Analysis(3차원 유한요소해석), Ratio of Viscosity(점성비), Stack Type(적층상태), Slip-Parameter(미끄럼 지배상수), F.E.A.(유한요소해석)

ABSTRACT

Fiber reinforced plastic composites is widely used to make be lightening of aircraft and automotive owing to having high specific strength and specific modulus. And 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 composite mats. Its deformation and charge shape are very different by stack type of random and unidirectional mats. In this paper, the characteristics of flow fronts such as a bulging phenomenon for step-type random/unidirectional composite mats and slip parameters are studied numerically. And the effects of viscosity ratio and stack type on the mold filling parameters are also discussed.

기호설명

μ_x : 섬유길이방향 점도
 μ_y : 길이에 대한 직각 방향 점도
A : 이방성 점도비(μ_x/μ_y)
 α : 미끄럼 지배상수

1. 서론

일반적으로 이용되고 있는 섬유강화 고분자 복합재료는 열가소성 수지를 기지재료로 하고, 강화재료는 랜덤하게 배향된 유리섬유를 사용하고 있기 때문에 강도의 방향성이 없는 것이 특징이다. 그러나 자동차 등의 구조부재에 요구되는 특성으로서 어느 특정한 방향으로 강도가 필요한 경우가 많다. 이와 같은 목적으로 사용되는 일방

* 국민대학교 기계-자동차 공학부

향 섬유강화 고분자 복합판은 무배향의 랜덤매트와 한 방향으로 배향되어진 일방향 매트를 조합시킴으로서 강도의 방향성을 부여한 것이다.

이 복합재는 두께방향에 대해 양의측에는 무배향 섬유매트, 중앙부에는 일방향 섬유층이 각각 위치하는 2개의 섬유층으로 구성되어 있기 때문에 무배향 섬유층으로만 구성된 복합재와는 아주 상이한 유동특성을 나타낸다. 즉 일방향 섬유가 놓여있는 길이방향과 이것에 직각방향에 대한 점성이 상이한 상태에 무배향 섬유매트까지 겹쳐 있고, 상부와 하부의 형상이 상이한 단부형상의 적층판의 경우 더욱 복잡한 양상을 나타낼 것으로 예측된다. 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 압축 성형을 통하여 금형표면과 재료사이에는 미끄럼이 존재하며 이를 지배하는 상수로 유체마찰계수를 제안하였고, 이 유체마찰계수를 도입하여 금형표면과 수지와의 미끄럼을 고려한 지배방정식으로 유동상태를 표현하였으며, Barone과 Osswald⁽³⁾은 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 조선형 등^(6,7)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⁽⁸⁾은 섬유강화 복합재료의 3차원 유동해석에 있어서 금형-재료계면의 미끄럼을 고려하고 등방성 뉴튼유체로 가정하여 3차원 유한요소해석을 하였으며, 벌징현상과 같은 유동선단 특성과 성형하중 등에 미치는 미끄럼 지배상수의 영향에 대해서 고찰한 바 있다. 그러나 보다 여러 형태의 두께가 두껍고 이방성이 강한 무배향 섬유층과 일방향 섬유층의 복합적층판에 대하여 3차원 유동해석을 통한 유동형태와 유동

특성에 관한 연구는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 단부형상을 갖는 무배향/일방향의 섬유강화플라스틱 복합적층판의 압축성형시 3차원 유한요소법을 이용한 유동해석결과를 보고하도록 한다. 또한 금형-재료계면 간의 미끄럼지배상수와 이방성 점도비 A의 변화에 대한 유동특성을 보고하도록 한다.

2. 이론

섬유강화 플라스틱 복합재를 Fig. 1과 같이 압축성형 하는 경우, ρ 일정하고 비압축성 조건일 때, 연속방정식은

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

이다.

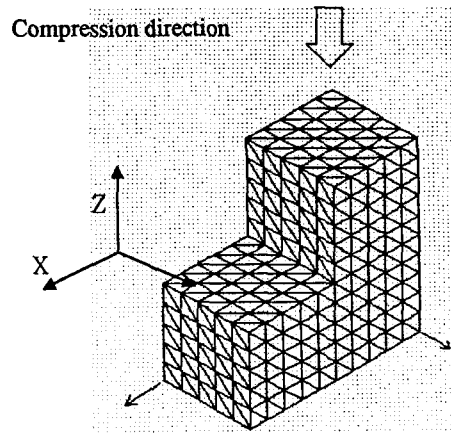


Fig. 1 Finite element mesh for a specimen with 2250 elements and 576 nodes.

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. 이와 같은 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 주어지며 유동에 저항을 나타내지만, 식 (4)에서 x 방향 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_x , 가로방향에 대한 점도를 각각 μ_y , 두께방향에 대한 점도를 μ_z 라고 할 수 있다. 일방향 섬유층에서 가로방향의 점도 μ_x 에 대한 길이방향의 점도 μ_x 를 A라하고 여기서 A를 이방성 점도비로 정의 하였다. 또한 물체력, 관성력을 무시하고, 비압축성을 고려한 후 다음과 같은 무차원화된 특성값들을 정의하였다.

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \bar{y} = \frac{y}{L}, \bar{z} = \log h_0 - \log h = \log \frac{h_0}{h},$$

$$\bar{u} = \frac{dx}{dt}, \bar{v} = \frac{dy}{dt}, \bar{p} = -\frac{ph}{k_H h L^2}, \quad (5)$$

$$\alpha_x = \frac{\mu_x}{k_H L^2}, \alpha_y = \frac{\mu_y}{k_H L^2}, \alpha_z = \frac{\mu_z}{k_H L^2}$$

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

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

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

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

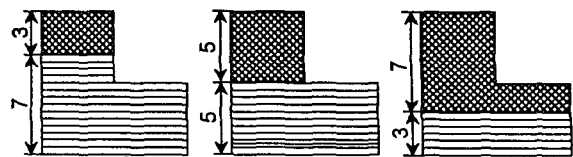
$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} + \alpha_x \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} + \alpha_y \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y} \partial \bar{z}} + \alpha_z \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{y}^2} +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

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 별징현상이 크게 나타나고, 마찰이 작은 경우에는 모두 미끄러져 유동선단은 초기충전 상태의 형상을 유지하면서 움직인다.

3. 결과 및 고찰

본 해석에 사용된 모델의 요소는 4면체 2차 요소로서 주 절점은 576개, 총 절점은 3751개, 요소의 개수는 2250이다. 그리고 무배향섬유층에서의 미끄럼 지배상수는 0.02, 일방향 섬유층의 섬유길이방향 미끄럼 지배상수는 0.01, 가로방향은 0.05, 0.1, 1.0으로 하였다.

Fig. 2 는 무배향/일방향 섬유강화 적층판의 유동해석에 사용된 적층상태를 나타내고 있는 그림으로 3가지의 형태를 사용하였다.



Unidirectional mat

(a)Type-1 (b)Type-2 (c)Type-3
 Fig. 2 Definition of stack type in a symmetric laminates.

Fig. 3(a)-(c)는 점도비와 미끄럼 지배상수의 변화에 대한 성형품의 형상변화를 적층유형별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 동일한 적층형태 일지라도 이방성 점도비 A 가 커짐에 따라서 y 방향의 점도 \square 가 x 방향의 점도보다도 더 커져, y 방향으로의 유동이 적어지고, 벌징현상이 크게 나타난다.

Fig. 4(a)~(c)는 이방성 점도비 A 의 변화에 대해 적층유형별로 성형품의 변형상태를 xz 평면상에 나타낸 것이다. 점도비 A 가 증가하면 x 축 방향으로 많이 퍼져나가는 것은 적층상태에 상관없이 동일한 현상이지만 일방향 섬유층이 많은 Type 1인 경우가 일방향 섬유층이 적은 Type 3보다도 더 많이 퍼져나가고 있음을 알 수 있다. 또한 일방향 섬유층이 적은 (a)의 경우 (b), (c)보다 벌징현상이 크게 나타남을 볼

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 된다. xz 평면상의 유동패턴과 상반되는 현상을 보여 주고 있다.

Fig. 6(a)~(c)는 섬유층 적층 유형별 유동선단의 형상을 xy 평면상에 나타낸 그림으로 (a),(b)에서는 모두 일방향 섬유층에서 섬유길이에 직각인 x 방향으로 유동이 이루어졌음을 알 수 있고, 반면 (c)에서는 일방향 섬유층인 중립면에서는 동일하지만 무배향층에 놓인 중간 부분에서는 길이 방향과 가로 방향 모두 유동이 이루어진 것을 나타내고 있다. Fig 4와 Fig. 5, 6을 통해 일방향 섬유층과 무배향 섬유층으로 적층된 복합재의 두께방향에 대한 유동선단을 적층형태별로 파악할 수 있다.

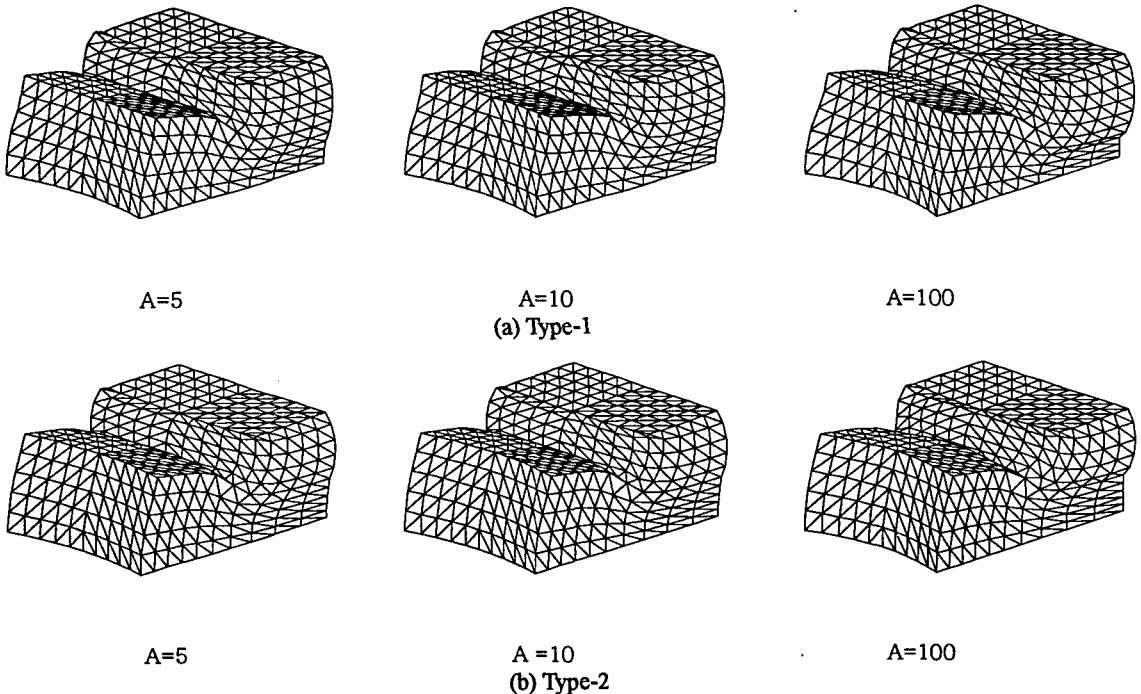
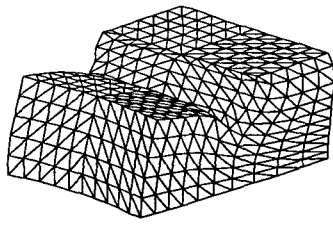
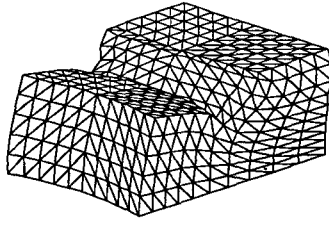


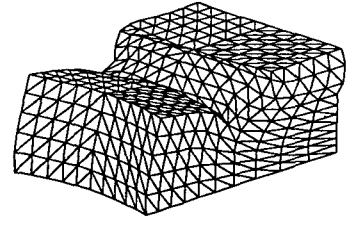
Fig. 3 Effects of viscosity ratio A and layer type on deformed shapes in case of $R_{cr}=0.4$



A=5



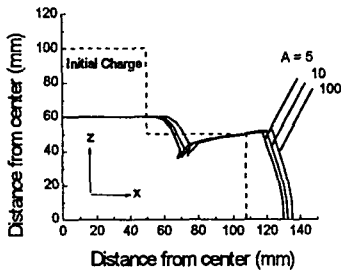
A=10



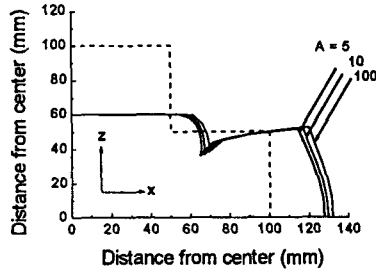
A=100

(c) Type-3

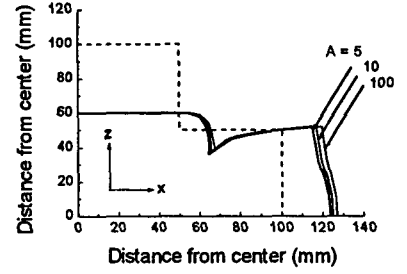
Fig. 3 (-Continued-)



(a) Type-1

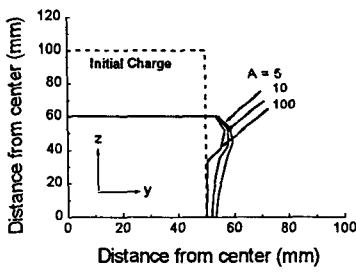


(b) Type-2

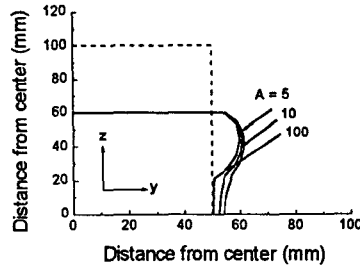


(c) Type-3

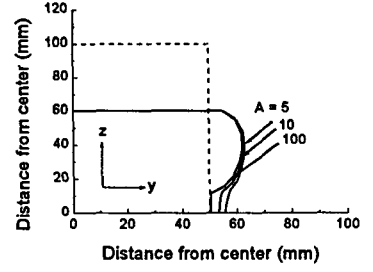
Fig. 4 Effects of viscosity ratio A and stack type on shapes of flow fronts in case of $R_{cr}=0.4$ (XZ-plane).



(a) Type-1

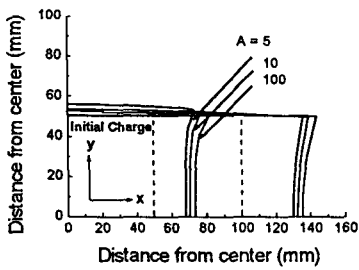


(b) Type-2

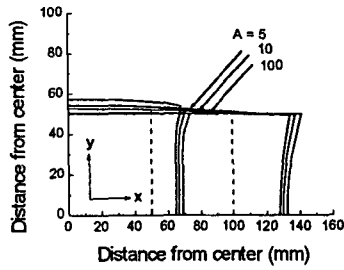


(c) Type-3

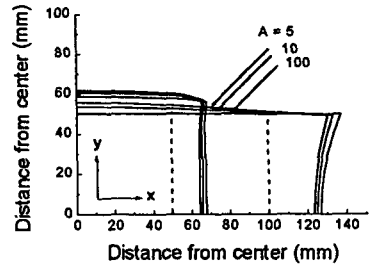
Fig. 5 Effects of viscosity ratio A and stack type on shapes of flow fronts in case of $R_{cr}=0.4$ (YZ-plane).



(a) Type-1



(b) Type-2



(C) Type-3

Fig. 6 Effects of viscosity ratio A and stack type on shapes of flow fronts in case of $R_{cr}=0.4$ (XY-plane).

4. 결론

단부형상을 갖는 무배향/일방향 복합적층판의 3차원 유동해석 프로그램을 개발하여, 미끄럼 지배 상수와 이방성 점도비 A 를 고려한 유동해석을 수행할 수 있었고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일방향 섬유층의 이방성 점도비 A 가 커짐에 따라 섬유길이방향(x)의 벌징현상은 두드러지게 나타나며, 점도비 A 가 작을 때, y 방향으로의 벌징현상이 크게 나타난다.
2. 일방향 섬유층이 무배향 섬유층보다 많이 적층되어 있는 경우 x 방향으로의 벌징현상은 뚜렷하나 y 방향으로의 벌징현상은 x 방향과 반대현상을 보인다.
3. 해석결과 단부형상을 갖는 적층판에서 금형으로부터 직접적인 압력을 받지 않는 부분은 적층형태에 상관없이 거의 일정한 유동형태를 갖는다.

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) 조선형, 임영호, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 이방성을 고려한 유동해석", *한국복합재료학회지*, 제 9권, 제 1호, 1996, pp. 1~9.
- (7) 조선형, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합재료의 압

축성형에 있어서 인장점성과 전단점성을 고려한 유동해석", *한국소성가공학회지*, 제6권, 제4호, 1997, pp. 311~318.

- (8) 윤두현, 김형철, 조선형, 김이곤, "섬유강화 플라스틱 복합재의 압축성형에 있어서 3차원 유동해석", *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, 1997, pp. 859~865.
- (9) 윤두현, 김형철, 조선형, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 금형면의 미끄럼 지배상수에 관한 연구", *한국복합재료학회지*, 제10권, 제4호, 1997, pp.50~58.