

단섬유 보강 사출성형품의 휨 예측을 위한 통합 CAE 해석

김진곤* · 정성택*

Integrated CAE Analysis to Predict Warpage of Fiber Reinforced Injection Molded Parts

Jin Gon Kim and Seong Taek Chung

Key Words : 휨해석(Warpage Analysis), 섬유배향(Fiber Orientation), 잔류응력(Residual Stress), 사출성형품(Injection Molded Parts), 삼각형 셸요소(Triangular Shell Element)

Abstract

A warpage analysis program has been developed for fiber-reinforced injection molded parts. The warpage is predicted from the residual stress and anisotropic thermo-mechanical properties coupled with fiber orientation in the integrated injection molding simulation. A simple elastic model is used for the calculation of thermally and pressure-induced residual stresses which are employed as the initial conditions in the structural analysis. To improve the reliability of warpage analysis, a new triangular flat shell element superimposing well-known efficient plate bending and membrane element is presented. The numerical examples address the necessity to use anisotropic models for fiber-reinforced materials and show that predicted warpage is in good agreement with experimentally measured one.

1. 서론

단섬유 보강 사출성형품은 섬유배향에 따른 이방성 물성 변화 때문에 일반 성형품과는 다른 수축과 휨변형이 발생하게 된다. 일반 플라스틱 재료에 대한 사출성형 공정, 성형품의 잔류응력, 수축 및 휨에 관한 연구⁽¹⁻⁷⁾는 오래전부터 활발히 진행되어 오고 있다. 단섬유 보강 플라스틱 성형의 경우에는 주로 섬유배향과 성형품의 평균 물성에 관한 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾가 주를 이루고 있으며, 섬유배향과 연계된 수축 및 휨 변형에 관한 연구^(11,12)는 상대적으로 미미한 편이다.

본 연구에서는 충전/보압/냉각 공정 및 섬유배향 해석을 바탕으로 단섬유 보강 사출성형품의 잔류응력과 이방성 물성을 계산하고 수축 및 휨 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 섬유배향과 이방성 열/기계적 물성을 체계적으로 연계시키기 위하여 배향텐서를 도입하였다. 서로 다

른 섬유배향을 갖는 두께 방향의 각 층은 각각의 배향축에 대하여 직교 이방성 물성을 갖는다고 가정하였다. 고화 온도 이상에서의 잔류응력은 무시하고 용융수지의 온도가 고화온도 이하로 떨어진 이후를 탄성체로 가정하여 열과 압력에 의한 잔류응력을 계산하였다. 휨 구조해석을 위해 두께가 비교적 얇은 사출성형품에 적층판 이론을 적용하여 합력과 합모멘트 및 재료의 인장강성행렬과 굽힘강성행렬을 구하였다.

이형 후 과정 동안 사출성형품은 어떠한 외부의 구속조건도 갖지 않으므로, 이러한 사출성형품의 수치해석 시 발생하는 강제거동을 방지하기 위하여 정적으로 정정한 구속조건을 자동적으로 찾아 경계조건으로 부과하도록 하였다. 구조해석에 사용되는 요소는, Batoz 등⁽¹³⁾이 제안한 이산 Kirchhoff 이론에 근거한 DKT 굽힘요소와 면내변형이 지금까지 알려진 삼각형요소 중 가장 우수한

* 삼성전자, 중앙연구소

것으로 알려진 Bergan 등⁽¹⁴⁾의 막요소를 결합한 새로운 평면셀요소를 정식화하여 해석에 이용하였다.

2. 이방성 물성 및 잔류응력 해석

2.1 성형 공정 및 섬유배향

단섬유 보강 사출성형품에 대한 이형 후의 수축 및 힘 예측을 위해서는 이방성 물성 및 잔류응력 해석이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 사출성형공정 중에 고분자수지의 온도 및 압력변화와 섬유배향에 대한 해석이 필요하다. 금형 상하 캐비티면의 비대칭 온도분포에 의한 힘의 영향을 고려하기 위해서는 금형냉각해석도 병행되어야 한다.

두께가 얇은 사출성형품에 대한 용융수지의 금형 내 충전, 보압 및 고화 과정은 압축성 점성 유체의 Hele-Shaw 유동모델을 적용하고, 유한요소/유한차분법을 이용하여 해석하였다.⁽¹⁻³⁾ 금형 냉각 채널의 배치에 따른 상하 캐비티 면의 비대칭 온도분포는 정상 상태의 사출성형 사이클 평균 온도 모델⁽⁴⁾을 바탕으로 경계요소법을 이용하여 구하고, 충전 및 보압 해석의 경계조건으로 이용하였다.

충전 및 보압 공정 중의 섬유배향 상태를 효율적으로 계산하고, 이에 따른 이방성 물성을 체계적으로 연계시키기 위하여 배향텐서⁽⁶⁾를 도입하였다. 2차 배향텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(\mathbf{p}) d\mathbf{p} \quad (1)$$

여기에서 배향 분포 함수 $\psi(\mathbf{p})$ 는 섬유가 단위 벡터 \mathbf{p} 방향으로 배향되어 있을 확률을 나타낸다. 보강 섬유는 성형 중에 용융수지의 유동장에 따라 배향되며, 두께방향으로 서로 다른 층 구조를 형성하게 된다. 따라서, 배향텐서 변화 방정식은 충전 및 보압 공정 해석과 동시에 용융수지가 고화될 때까지 모든 유한요소와 두께 방향의 유한차분 격자점에서 계산된다.⁽⁹⁾

2.2 이방성 열/기계적 물성

배향텐서를 이용하여 섬유배향에 따른 이방성 열/기계적 물성을 계산하기 위하여 배향 평균 모델⁽⁸⁾을 이용하였다. 국부적으로 일정 변형률을 가정하면 4차 강성 텐서 C_{ijkl} 과 2차 선형열팽창계수(linear thermal expansion coefficient) 텐서 α_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ijkl} = B_1 a_{ijkl} + B_2 (a_{ij} \delta_{kl} + a_{kl} \delta_{ij}) + B_3 (a_{ik} \delta_{jl} + a_{jl} \delta_{ik} + a_{jk} \delta_{li} + a_{li} \delta_{jk}) + B_4 \delta_{ij} \delta_{kl} + B_5 (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (2)$$

$$C_{ijmn} \alpha_{mn} = D_1 a_{ij} + D_2 \delta_{ij}, \quad \alpha_{kl} = C_{ijkl}^{-1} C_{ijmn} \alpha_{mn} \quad (3)$$

식(2)의 4차 배향텐서 a_{ijkl} 은 본 저자가 수정 제안

한 "modified hybrid closure approximation"⁽¹⁰⁾을 이용하여 2차 텐서 a_{ij} 로 근사하였다. 상수 B_i 와 A_i 는 단섬유 보강 복합재료 구성성분의 물성에 따라 Halpin-Tsai 식⁽¹⁵⁾과 Schapery 식⁽¹⁶⁾을 이용해서 구해진다.⁽¹⁰⁾ 섬유배향 해석을 통해 용융수지가 고화된 시점에서의 2차 배향텐서를 알면, 모든 유한요소와 두께 방향의 유한 차분 격자에서 서로 다른 강성 텐서와 선형열팽창계수 텐서를 구할 수 있다.

2.3 잔류 응력

용융 고분자는 사출성형 공정 동안에 불균일한 온도와 압력의 변화를 겪으며 고화된다. 이 과정에서 성형품에는 잔류응력이 발생하며, 이형 후 변형을 초래한다. 높은 온도에서 성형된 성형품은 이형 후 상온에서 수축한다. 그리고, 보압이 작용하는 상태에서 고화된 부위는 이형 후 대기압 하에서 팽창하게 된다. Bushko와 Stokes⁽¹⁷⁾는 이러한 요인을 고려하여 직교이방성 점탄성 재료의 잔류응력 모델을 제시하였으나, 구체적인 수치해석은 등방성 재료에 국한하였다. 본 연구에서는 용융 상태에서 발생하는 잔류응력은 무시하고, 고화 온도 이하의 고분자를 직교이방성 탄성체로 가정하여, 냉각에 의한 열응력과 고화 압력에 의한 이형 후 팽창 효과를 고려한 잔류응력을 계산하였다.

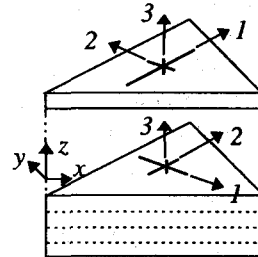


Fig. 1 Principal material axes, 1-2-3, at each layer and element local coordinates, x-y-z.

Fig. 1과 같이 두께 방향의 각 층은 2차 배향텐서 a_{ij} 의 3개의 주축에 대하여 직교이방성을 갖는다고 가정하고, 고화층 내의 전단응력을 무시하면 구성 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_i = C_{ij} (\epsilon_j - \theta_j) \quad (4)$$

여기에서 $i, j = 1, 2, 3$ 으로 2차 배향텐서의 3개의 주축을 의미하며, 특히, 3방향은 성형품의 두께 방향 z 와 일치한다. C_{ij} 는 식(2)의 4차 텐서로부터 축약된 강성 행렬이고, ϵ_i 는 변형률이다. 열변형률 θ_i 는 아래와 같다.

$$\theta_i = \int_{T_s(P)}^T \bar{\alpha}_i(P, T') dT' \quad (5)$$

여기에서 T_s 는 용융 고분자가 고화되는 시점의

온도로서, 본 논문에서는 압력과 온도에 따른 비체적의 변화를 나타내는 2-domain modified Tait 상태 방정식⁽¹¹⁾의 전이온도를 이용하였다. 선형열팽창계수 $\bar{\alpha}_i$ 는 Tait 상태방정식으로부터 구한 체적팽창율과 식(3)의 섬유배향에 따른 선형열팽창계수의 주축 성분을 이용하여 아래와 같이 가정하였다.

$$\bar{\alpha}_i(P, T) = \frac{\alpha_i}{(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)^v} \left(\frac{\partial v(P, T)}{\partial T} \right)_p \quad (6)$$

용융수지에 압력 $P(t)$ 가 작용하는 상태에서 고화된 고체층 내에 $\sigma_3 = -P$ 이고, 금형 캐비티 내의 성형용은 평면 방향으로 고정($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$)되어 있다고 가정하면, 평면상의 잔류응력 σ_1 과 σ_2 는 식(4)로부터 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma_1 = \left(\frac{C_{13}C_{13}}{C_{33}} - C_{11} \right) \theta_1 + \left(\frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} - C_{12} \right) \theta_2 - \frac{C_{13}}{C_{33}} P_5 \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{C_{13}C_{23}}{C_{33}} - C_{12} \right) \theta_1 + \left(\frac{C_{23}C_{23}}{C_{33}} - C_{22} \right) \theta_2 - \frac{C_{23}}{C_{33}} P_5 \quad (8)$$

여기에서, P_5 는 고화될 때의 압력으로서, 보압에 의한 이형 후 팽창 효과를 반영하고 있다.

적층판 이론에 입각한 이형 후의 수축 및 휨 구조해석을 위해 각 층별 배향 축에 대한 잔류응력 σ_1 과 σ_2 를 각 유한요소의 국소좌표계로 변환한 후, 두께 방향으로 적분하여 합력과 중심층에 대한 합모멘트를 계산하였다. 이 때 국소좌표계에 대한 전단 응력에 의한 성분도 발생하게 된다.

$$N_x = \int \sigma_x dz, N_y = \int \sigma_y dz, N_{xy} = \int \tau_{xy} dz \quad (9)$$

$$M_x = \int \sigma_x z dz, M_y = \int \sigma_y z dz, M_{xy} = \int \tau_{xy} z dz \quad (10)$$

합력과 합모멘트에 대한 적층판의 재료강성행렬은 식(2)의 4차 강성텐서를 유한요소의 국소좌표계에 대해 각 층별로 구하고, Kirchhoff-Love 가정($\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0$)과 평면응력조건($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$)을 적용한 후 두께방향으로 적분하여 구한다.

3. 휨 구조해석

3.1 유한요소 정식화

삼각형 요소는 사각형 요소에 비해 성능이 많이 떨어져 구조해석에서는 가능한 적게 사용하는 요소이다. 하지만, 휨 해석에서는 충전/보압/냉각과 같은 이전 단계의 사출성형해석이 삼각형 요소에 의해서 이루어지므로, 삼각형 요소의 사용이 불가피하다. 각 절점에서 6자유도를 가지는 평면 쉘 요소는 사용상의 편리성, 수치계산상의 효율성

등으로 인하여 가장 널리 사용되는 쉘 요소이다. 평면 쉘 요소에서는 요소단위에서는 굽힘 거동과 막 거동간의 연성이 없으므로, 보다 효율적인 쉘 요소의 정식화를 위해 현재까지 알려진 막 요소와 판굽힘 요소중 성능이 우수한 것으로 알려진 요소들을 각각 결합하여 새로운 평면 쉘요소를 구성하여 해석에 사용하였다.

먼저, 정확한 굽힘거동을 기술할 수 있도록, 기존 문헌에 발표된 3절점 판굽힘요소 중 가장 효율적인 것으로 알려진 이산 Kirchhoff 이론에 근거한 Batoz⁽¹³⁾의 DKT 요소를 선택하여 유한요소해석의 효율성과 정확성을 높였다. 이 요소는 회전량과 변위를 독립적으로 근사하되 영역의 몇 개의 점에서 Kirchhoff 제한조건을 만족하도록 하여, 전단변형을 고려한 Mindlin 이론에 근거한 두꺼운 판 요소와 얇은 Kirchhoff 판요소의 중간적인 성질을 지니는 요소로서 가성 에너지 모드가 없으며 요소 뒤틀림에 대한 민감도가 작은 것으로 알려져 있다.

다음으로, 가장 잘 알려진 3절점 평면요소인 일정변형률요소는 면내에 굽힘이 작용하는 경우에 강성과잉현상에 의해 면내 변형강성이 과도하게 커져서 부정확한 결과를 보여주는 경우가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 많은 논문에서 그 우수성이 입증된 Bergan⁽¹⁴⁾의 막 요소를 사용하고자 한다. 이 요소는 요소면내 수직인 방향의 회전자유도를 면내변형을 기술하는데 이용함으로써, 요소내에서 선형적인 변형률을 구현하는 것이 가능하다. 그리고, 요소의 수렴성을 보장하기 위해서, 요소 정식화 과정에서 강제적으로 패치 테스트 조건을 만족하도록 하였다.

이상의 판굽힘요소와 막요소를 결합하여 구성된 평면 쉘요소의 강성행렬을 최종적으로 전체 좌표계로 변환되어 요소의 합성을 통해 전체 시스템의 강성행렬을 구성한 후 해석을 수행하게 된다. 본 연구에서 정식화하여 사용한 평면 쉘요소에 대한 수치실험 결과는 부록에 나타나 있다.

3.2 하중 조건

2절에서 기술한 바와 같이 충전/보압/냉각 과정의 해석결과로부터 계산된 잔류응력은 적층판 이론으로부터 식(9), (10)과 같이 유한요소의 중심에서 이에 상응하는 평면상의 합력과 합모멘트로 변환되어 휨해석을 위한 초기응력값으로 주어지게 된다. 이러한 초기응력값은 다음과 같이 각 절점에서 변위에 대응되는 등가의 하중값으로 변환되어 해석에 이용한다.

$$\mathbf{R}_c = - \int_A [\mathbf{B}_b \quad \mathbf{B}_m] \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} dA = \begin{Bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ f_z^i \\ m_x^i \\ m_y^i \\ m_z^i \end{Bmatrix}_{i=1,2,3} \quad (11)$$

여기서, f_x^i , f_y^i , 그리고 f_z^i 는 절점 i 에서 x , y , z 방향의 절점 하중을 나타내며, m_x^i , m_y^i , 그리고 m_z^i 는 각 x , y , z 방향의 절점 모멘트들이다. \mathbf{B}_b , \mathbf{B}_m 은 굽힘과 면내변형에 대한 변형률-변위행렬을 나타낸다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

본 절에서는 단섬유 보강 사출성형품에 대한 수축과 휨 해석을 수행하였다. 먼저, 직사각 평판에 대하여 섬유배향이 수축에 미치는 영향을 고찰하였다. 다음으로, 개발된 휨 해석 프로그램의 신뢰성을 입증하기 위하여 실제 사출성형품을 해석하여 구한 결과를 실험 결과와 비교하였다.

4.1 원형 구멍이 있는 직사각 평판

해석에 사용된 캐비티의 형상은 Fig. 2와 같은 지름 50 mm의 원형 구멍이 있는 직사각형 평판 (200 mm × 100 mm × 3 mm)이다. 수치 해석에 사용된 재료는 30wt%의 유리 섬유를 포함한 PBT(Skyton 1060, SK Chemical)이며, 자세한 물성치는 Table 1에 나타나있다. 사출성형 충전 시간은 1초, 사출 온도는 250°C, 보압 시간은 1초, 보압은 40 MPa, 냉각 시간은 9초, 냉각수 온도는 60°C이다.

Table 1 Thermo-mechanical properties of reinforced fiber and polymer matrix

PBT	Tensile modulus	2000 MPa
	Poisson ratio	0.38
	Linear thermal expansion coefficient	$6 \times 10^{-5} / \text{K}$
PA66	Tensile modulus	3000 MPa
	Poisson ratio	0.41
	Linear thermal expansion coefficient	$1.1 \times 10^{-4} / \text{K}$
Glass Fiber	Aspect ratio	20
	Tensile modulus	72400 MPa
	Poisson ratio	0.22
	Linear thermal expansion coefficient	$5.6 \times 10^{-6} / \text{K}$

Fig. 2는 사출성형 충전/보압/냉각 공정이 끝난 후에 중심층의 섬유배향 및 두께에 대한 평균 배

향 분포를 나타낸다. Fig. 2(a)의 중심층의 섬유배향을 살펴보면, 섬유는 게이트 주위의 diverging flow 영역에서는 유동에 수직인 방향으로 배향된다. 그리고, 유동 영역이 좁아지는 원형 구멍 주위에서는 converging flow의 영향으로 유동 방향으로 배향되는 경향을 띠다가, 이후 원형 구멍 뒷부분의 접합선(weld line) 부위에서 유동에 수직인 방향으로 재배향되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로, 중심층으로부터 금형의 표면에 가까워질수록 전단 유동의 영향이 커지면서 섬유는 유동 방향으로 배향된다. Fig. 2(b)의 두께 평균 배향 분포로부터 중심층을 제외한 대부분의 층에서 섬유가 유동 방향으로 배향되어 있음을 확인할 수 있다.

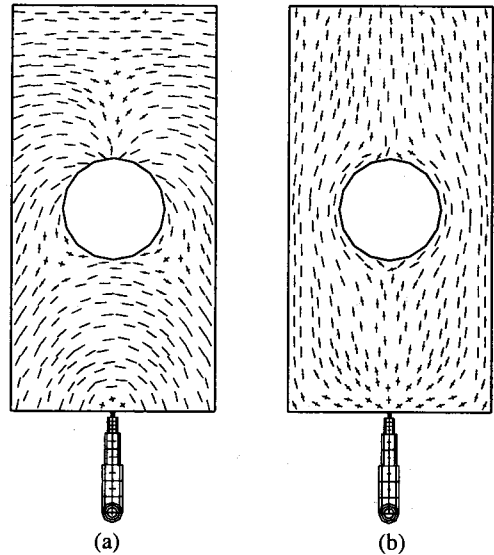


Fig. 2 Fiber orientation at center layer (a) and gapwise-averaged fiber orientation (b).

섬유배향에 따른 이방성이 수축에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 등방성 재료에 대한 해석 결과와 비교하여 보았다. Fig. 3(a)는 Fig. 2의 섬유배향에 따른 이방성을 고려한 수축 해석 결과이며, Fig. 3(b)는 재료의 물성이 등방성인 경우의 수축 해석 결과이다. Fig. 3(b)의 등방성 재료의 경우에서의 성형 조건하에서 길이 방향과 폭 방향의 수축률이 거의 같으며, 중심의 원형 구멍이 수축이 일어난 후에도 원형을 그대로 유지하고 있다. 반면에 Fig. 3(a)의 단섬유 보강 성형품의 경우에는 폭 방향의 수축률이 길이 방향의 수축률보다 크며, 중심의 구멍도 폭 방향의 길이가 줄어든 타원형상으로 변형되었다. 이는 일반 플라스틱 재료에 비해 보강 유리 섬유가 낮은 열팽창계수와 높은 강성을 갖고 있으며, Fig. 2(b)의 두께 평균 섬유배향 분포에서 보는 바와 같이 대부분의 보강 섬유가 길이 방향으로 배향되어 있기 때문이다.

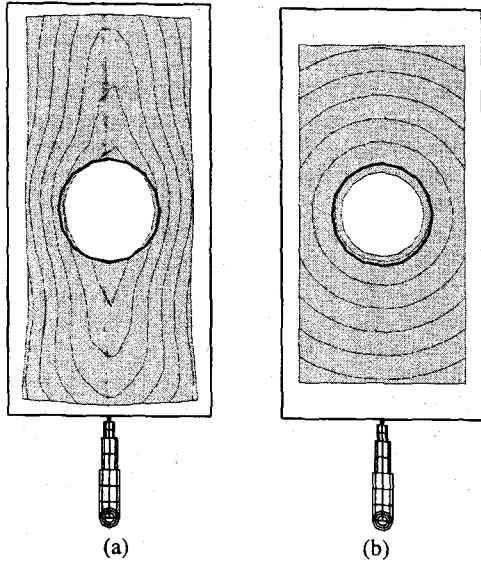


Fig. 3 Shrinkage prediction using (a) anisotropic material model and (b) isotropic material model. Displacements are amplified by a factor of ten.

위의 해석 결과로부터 단섬유 보강 성형품의 경우에 섬유배향에 따른 이방성 변형 해석의 필요성을 확인할 수 있다.

4.2 자동차 라디에이터용 Tank

본 연구에서 개발한 힘 해석 프로그램의 신뢰성을 입증하기 위하여 실제 성형품에 대한 힘 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 성형품은 Fig. 4와 같이 반 원통 형상으로서 자동차 라디에이터용 부품이다. 캐비티의 길이는 약 500 mm 정도이며, 두께는 3~4 mm이다. 금형 냉각 시스템은 직경 10 mm의 일반 채널과 baffle로 구성되어 있으며 배치는 Fig. 4와 같다. 성형 재료는 30wt%의 유리 섬유를 포함한 PA66 (Zytel 70G30 HSL, DuPont)이며, 자세한 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 금형 재질은 ANSI P20이며, 냉각수는 물을 사용하였다. 충전 시간은 3 초, 용융수지의 사출 온도는 300°C, 보압 시간은 6 초, 보압은 55 MPa, 냉각 시간은 30 초, 냉각수 온도는 90°C다.

Fig. 5는 금형 냉각 및 사출성형 충전/보압/섬유배향 해석 결과를 이용한 이형 후의 wireframe의 변형 모습을 보여주고 있다. 전체적으로 수축이 발생하고 있으며, 상하 측면 부위가 캐비티의 중심쪽으로 휘어 들어가는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에 표시된 상하 측면 'A'와 'B'에서 성형품의 길이 방향을 따라 중심쪽으로 휘어진 변위에 대한 수치해석과 측정치의 비교 결과이다. 상측면 'A'에서 측정치는 전체적으로 'U'자 모양의 휨을 나타내고 있는 반면에 수치 해석 결과는 'M'자 모양의 휨을 나타내고 있어서 차이를 보여 주고 있다. 그러나, 하측면 'B'에서는 수치해

석 결과와 측정치가 모두 'M'자 모양을 나타내며 정량적으로도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

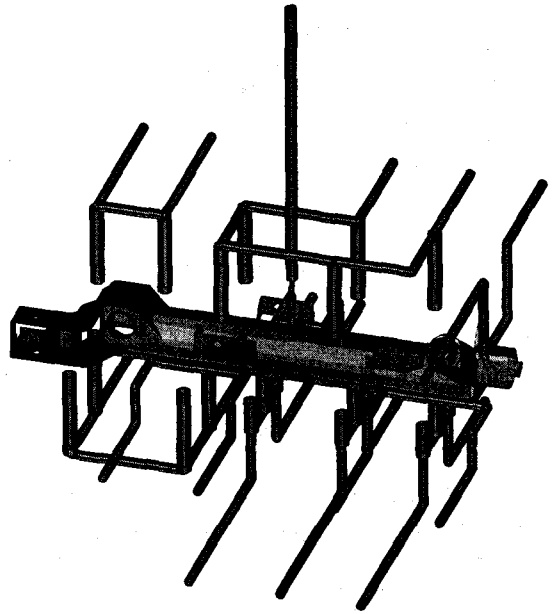


Fig. 4 The geometry of the direct-gated tank-like part and the layout of the cooling channels and baffles.

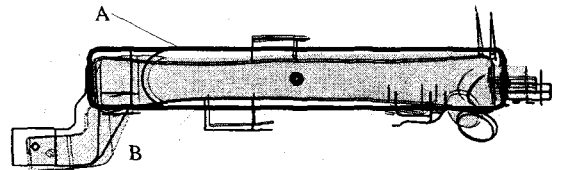
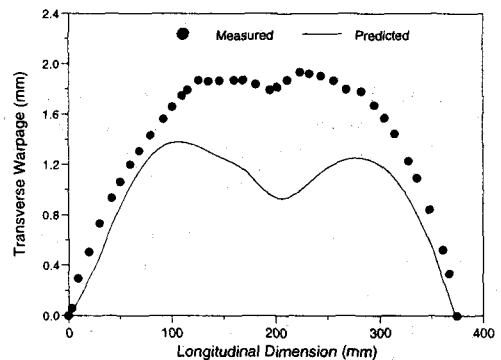
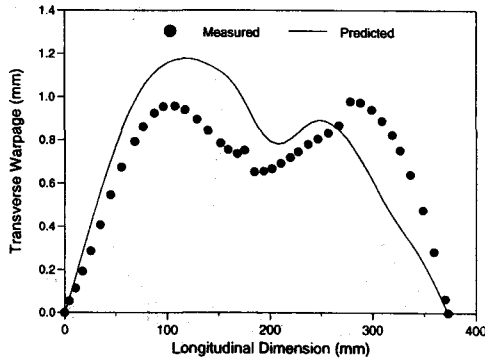


Fig. 5 Predicted final part shape using a magnification factor of five.



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of predicted and measured warpage along (a) side A and (b) side B as shown in Fig. 5.

5. 결론

본 연구에서는, 단섬유 보강 사출성형품에 대한 사출성형 공정과 섬유배향 해석 결과를 바탕으로 워프 해석 프로그램을 개발하였다. 섬유배향에 따른 이방성 물성과 잔류응력을 효과적으로 연계시키기 위하여 배향텐서를 도입하였고, 간단한 탄성 모델을 적용하여 냉각에 의한 수축과 고화 압력에 의한 이형 후 팽창 효과를 고려한 잔류응력을 계산하였다.

등방성 재료에 대한 해석과의 비교를 통해서 섬유배향에 따른 이방성 변형해석의 중요성을 확인할 수 있었다. 그리고, 실제 성형품에 대한 워프 측정치와의 비교를 통해 본 연구에서 개발된 수치 해석 프로그램의 신뢰성을 검증할 수 있었다. 향후 연구에는, 보다 정확한 해석을 위하여 리브와 같이 기하학적인 형상이 급격히 변화하는 부위에서의 국부적인 3 차원 열/유동 및 섬유배향 효과와 적층판의 굽힘과 인장 간의 상호 연성 등을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Chiang, H. H., Hieber, C. A. and Wang, K. K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part 1. Formulation," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 31, pp. 116-124.
- (2) 구본홍, 신효철, 이호상, 1993, "사출성형시 보압 및 냉각 과정이 성형품에 미치는 영향," 대한기계학회, 제 17 권, pp. 1150-1160.
- (3) 한경희, 임용택, 1997, "압축성을 고려한 사출성형 충전과정에 관한 연구," 대한기계학회, 제 21 권, pp. 735-745.
- (4) Chiang, H. H., Himasekhar, K., Santhanam, N. and Wang, K. K., 1993, "Integrated Simulation of Fluid

Flow and Heat Transfer in Injection Molding for Shrinkage and Warpage," *J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 115, pp. 37-47.

- (5) Chang, R.Y. and Tsaur, B. D., 1995, "Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, Warpage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 35, pp. 1222-1230.
- (6) 정정훈, 윤재륜, 1997, "보압과 냉각 과정을 고려한 사출 성형 제품의 잔류 응력 예측," 유변학, 제 9 권, 제 1 호, pp.16-26.
- (7) Kabanemi, K. K., Vaillancourt, H., Wang, H. and Salloum, G., 1998, "Residual Stresses, Shrinkage, and Warpage of Complex Injection Molded Products: Numerical Simulation and Experimental Validation," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 38, pp. 21-37.
- (8) Advani, S. G. and Tucker, C. L., 1987, "The Use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites," *J. Rheol.*, Vol. 31, pp.751-784
- (9) Chung, S. T. and Kwon, T. H., 1995, "Numerical Simulation of Fiber Orientation in Injection Molding of Short Fiber Reinforced Thermoplastics," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 35, pp. 604-618.
- (10) 정성택, 권태현, 1996, "단섬유 보강 플라스틱 사출성형품의 섬유방향성에 따른 기계적 성질 예측," 유변학, Vol. 8, pp. 78-91.
- (11) Matsuoka, T., Takabatake, J., Koiwai, A., Inoue, Y., Yamamoto, S. and Takahashi, H., 1991, "Integrated Simulation to Predict Warpage of Injection Molded Parts," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 31, pp. 1043-1050.
- (12) 이재형, 이웅식, 윤성기, 1997, "SMC 압축성형 공정에서의 열변형에 관한 유한요소해석," 대한기계학회, 제 21 권, pp. 154-163.
- (13) Batoz, J. L., 1982, "An Explicit Formulation for an Efficient Triangular Plate-Bending Element," *Int. J. num. Meth. Engrg.*, Vol. 18, pp. 1077-1089.
- (14) Bergan, P. G. and Felippa, C. A., 1985, "A Triangular Membrane Element with Rotational Degrees of Freedom," *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 50, pp. 25-69.
- (15) Halpin, J. C. and Kardos, J. L., 1976, "The Halpin-Tsai Equations: A Review," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 16, pp. 344-352.
- (16) Schapery, R. A., 1968, "Thermal Expansion Coefficient of Composite Material Based on Energy Principles," *J. Compos. Mater.*, Vol. 2, pp. 380-404.
- (17) Bushko, W. C. and Stokes, V. K., 1993, "Pressure Effects on the Solidification of Thermoviscoelastic Melts: Part I - Formulation of Model Problem, Part II - Parametric Results," *Use of Plastics and Plastic Composites: Materials and Mechanics Issues*, ASME, MD-Vol. 46, pp. 131-152, pp. 153-179.