

< 논 문 >

열유동을 고려한 SMC 압축성형공정의 3차원 유한요소해석

김수영* · 임용택**

(1995년 3월 26일 접수)

Coupled Thermo-Viscoplastic Three Dimensional Finite Element Analysis of Compression Molding of Sheet Molding Compound

Soo Young Kim and Yong Taek Im

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Preferential Flow(선행유동), SMC(Sheet Molding Compound), Compression Molding(압축성형공정)

Abstract

SMC(sheet molding compound) is a thermosetting material reinforced with chopped fiber-glass. The compression molding of SMC was analyzed based on a rigid thermo-viscoplastic approach using a three dimensional finite element program coupled with temperatures. Only the temperature analysis part was tested in this paper by solving one-dimensional heat transfer problem and comparing with the exact solutions available in the literature. Based on this comparison the program was proved to be valid and was further applied in solving compression molding of SMC between flat dies. To investigate the usefulness of a rigid thermo-viscoplastic approach in the compression molding analysis of SMC charge, compression of rectangular shaped SMC charge at plane strain and three dimensional deformation condition was analyzed under the same condition as given in the literature. From this comparison it was found out that the rigid thermo-viscoplastic approach was useful in analyzing SMC compression molding between flat dies.

1. 서 론

SMC(sheet molding compound)는 여러가지 화학 첨가제가 포함된 폴리에스터수지 모재에 유리섬유가 단섬유 형태로 함침되어 있는 재료로, 비강도와 비강성이 뛰어나고 내부식성과 내충격성이 우수하며 재료의 열팽창이 적어 성형품의 치수 정밀도가 높기 때문에 최근에 경량구조재로 다양하게 응용되고 있으며 특히 차체경량화의 일환으로 자동차 외판 성형재료로서의 쓰임이 증가하고 있다. SMC의

성형은 압축성형공정에 의해 이루어지는데 압축 성형공정에서 SMC 장입재는 가열된 상태의 하부 몰드에 놓여지고 상부몰드가 빠른 속도로 하강하여 제품을 성형하게 된다. 몰드의 온도는 150°C 정도이며 장입재의 온도는 실온과 같다. 상부몰드가 장입재의 윗면에 접촉한 순간부터 금형충진(mold filling) 과정이 시작되며 장입재 내부의 온도분포에 따라 경화 반응이 시작된다. 이와 같이 압축성형 공정은 유동과 열전달, 경화반응이 복합적으로 일어나기 때문에 금형 내의 유동, 온도분포와 경화정도를 예측하기가 매우 어렵고 제품 성형 후에 섬유 의 분포 및 방향성에 대한 예측도 어려운 실정이다.

*한국과학기술원 기계공학과

**회원, 한국과학기술원기계공학과

SMC 압축성형공정에서 장입재 내의 유동양상에 대한 실험적 연구는 1970년대부터 이루어져 왔으며, (1,2) 1980년대에 들어서 실험적 연구와 함께 해석적 연구가 병행되어 이루어졌다. Barone 등(3)과 Silva-Neito(4,5) 등은 SMC를 비압축성, 등방성인 뉴턴니언유체(Newtonian fluid)로 가정하여 해석하였는데 이러한 모델은 얇은 두께의 SMC 장입재에 대해서는 유동선단을 잘 예측하였으나, 장입재의 두께가 두꺼워지면 유동이 실제의 경우보다 덜 일어나는 것으로 예측하였으며 성형압력 역시 낮게 예측하는 단점이 있었다. Lee(6,7) 등은 여기에 금형과 장입재 사이의 수직응력의 효과와 열전달을 고려하였으며 수직방향으로의 점도구배를 가정하여 금형과 장입재의 접촉면에서 일어나는 선행유동현상(preferential flow)을 해석하였다. Barone 등(8)은 실험과 해석적 연구를 통하여 이러한 선행 유동현상이 장입재의 두께가 두껍고 매우 느린 속도로 성형되는 경우에 일어난다는 것을 밝혀 내었다. Lee 등(9)은 금형과 장입재 사이의 마찰을 고려하여 축대칭, 그리고 평면변형인 경우의 압축성형공정을 해석하여 마찰현상이 유동양상에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 강열접소성 유한요소법을 사용하여 평면변형인 경우 간단한 직육면체 형상의 SMC 압축성형공정을 3차원적으로 해석하여 개발된 프로그램이 SMC 압축성형공정을 해석하는데 유용하게 사용되어질 수 있는지 검증해 보았다. 이미 개발된 프로그램을 사용하여 알루미늄 블록의 업세팅(upsetting)을 해석함으로써 변형해석 부분의 신뢰성을 검증한 바 있으므로, (10) 본 연구에서는 간단한 열전달 문제를 해석하여 엄밀해(exact solution)와 그 결과를 비교하여 온도해석 부분의 신뢰성을 평가하였다.

2. 유한요소법

2.1 변형해석의 유한요소 수식화

강열접소성 유한요소법에 관한 자세한 이론적 서술은 이미 Kobayashi 등(11)이 자세히 기술한 바가 있으므로 그 요점만을 간단히 기술하였다. 강열접소성 유한요소해석에 사용되어지는 약형은 다음과 같다.

$$\int_V \left(\frac{2}{3} \bar{\sigma} / \bar{\epsilon} \right) \delta \bar{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \bar{\epsilon}_{kk} \delta \bar{\epsilon}_{ii} dV$$

$$-\int_{S_f} t_i \delta u_i dS = 0 \tag{1}$$

여기에서, $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 소재의 유효 응력과 유효 변형률속도를 나타내며 K 는 소재의 비압축성을 만족하는 벌칙상수(penalty constant), $\bar{\epsilon}_{ij}$ 는 소재의 유효 변형률속도 성분, t_i 는 경계면에서의 마찰력을 나타낸다.

위의 약형에서 변형률속도와 속도성분을 선형보간함수(shape function)를 사용하여 이산화시키면 식 (2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(\bar{v}) = F(\bar{v})\bar{v} + G\bar{v} - h = 0 \tag{2a}$$

$$F(\bar{v}) = \int_V \left(\frac{2}{3} \bar{\sigma} / \bar{\epsilon} \right) B^T D B dV \tag{2b}$$

$$G = \int_V K B^T c c^T B dV \tag{2c}$$

$$h = \int_{S_f} N^T dS \tag{2d}$$

이 때, N 과 B 는 각각 선형보간함수와 그 미분항들로 이루어진 행렬이며 c 와 D 는 상수벡터이다.

소재와 금형 사이의 접촉면에서 일어나는 마찰력 t 는 구간선체에서 미분이 정의될 수 있도록 다음과 같이 모델링하였으며 이를 대입하면 h 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 m_r 는 소재와 금형 사이의 마찰상수이고 v_r 은 둘 사이의 상대속도를 나타낸다.

$$t = -m_r k \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{a} \right) \right\} \frac{v_r}{|v_r|} \tag{3}$$

$$h(\bar{v}) = \int_{S_f} N^T \left[-m_r k \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|v_r|}{a} \right) \right\} \frac{v_r}{|v_r|} \right] dS \tag{4}$$

식 (2)는 $\bar{\epsilon}$ 에 \bar{v} 가 포함되어 있어 비선형식이므로 뉴턴-랩슨법을 사용하여 해를 구한다. 식 (2)에 뉴턴-랩슨법을 적용하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{N-R} \Delta \bar{v} = L_{N-R} \tag{5a}$$

$$K_{N-R} = \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{v}} = \frac{\partial F}{\partial \bar{v}} + F\bar{v} + G - \frac{\partial h}{\partial \bar{v}} \tag{5b}$$

$$L_{N-R} = -\Phi = -F\bar{v} - G + h \tag{5c}$$

2.2 열전달 해석의 유한요소 수식화

SMC 압축성형공정시에 장입재의 온도분포는 유동양상을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 그러므로 SMC 압축성형공정 해석시에는 변형 해석과 더

불어 금형과 장입재 사이의 열전달 해석이 함께 수행되어야 한다. 열전달 해석에 사용되어지는 약형은 다음과 같다.

$$\int_V k_T \mathbf{T}_i \delta \mathbf{T}_i dV + \int_V \rho C_p \dot{T} \delta T dV - \int_V \eta \sigma_{ij} \dot{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (6)$$

이 때, k_T 는 소재의 열전도율, ρ 와 C_p 는 각각 소재의 밀도와 비열, η 는 소성일률이 열에너지로 변환되는 효율이며, q_n 은 소재 경계에서의 열유동을 나타낸다.

위의 약형을 선형보간함수(shape function)를 사용하여 이산화하면 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다. 여기서, M 은 선형보간함수 벡터 N 의 미분항으로 3차원 유한요소법의 경우 $M_{ij} = M_{i,j}$ ($i=1\sim 8$, $j=1\sim 3$)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C\dot{T} + K_c T = Q \quad (7a)$$

$$K_c = \int_V k_T M M^T dV \quad (7b)$$

$$C = \int_V \rho C_p N N^T dV \quad (7c)$$

$$Q = \int_V \eta (\bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon}) N dV + \int_{S_q} q_n N dS \quad (7d)$$

SMC 압축성형공정시 열유동은 비정상 상태이므로 이를 해석하기 위해서는 \dot{T} 에 대한 시간적분(time integration)을 해야 한다. 여러가지 시간적분 방법이 알려져 있는데, 본 연구에서는 다음과 같은 시간적분법을 이용하였다.⁽¹²⁾

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \Delta T \{ (1-\beta) \dot{T}_t + \beta \dot{T}_{t+\Delta t} \} \quad (8)$$

여기서, β 는 0에서 1사이의 값을 가지며 모든 경우에 안정적인 해를 얻기 위해서는 0.5보다 큰 값을 사용 하여야 한다. 본 연구에서는 0.75를 선택 하였다. 이 식을 사용하여 식 (7)을 정리하면 다음과 같다.

$$\left(K_c + \frac{1}{\beta \Delta t} C \right) T_{\Delta t} = Q_{\Delta t} - C \hat{T} \quad (9)$$

$$\hat{T} = -\frac{T_0}{\beta \Delta t} - \left(\frac{1-\beta}{\beta} \right) \dot{T}_0 \quad (9 \cdot 1)$$

초기조건으로 주어진 온도로부터 식 (7)을 사용하여 초기의 온도변화율을 구한 다음 식 (9)를 사용하여 다음 시간스텝의 온도를 구해 나가면 임의의 시간에서 SMC 장입재와 금형의 온도 및 온도 변화율 분포를 얻을 수 있다.

2.3 경화반응의 모델링과 해석

SMC는 열경화성 수지로 이루어져 있으므로 압축성형공정 시에 경화반응을 수반하게 된다. 경화반응속도는 장입재의 온도에 의하여 결정되어지며, 경화반응시 생성되는 반응열은 장입재의 온도분포에 영향을 미친다. 경화반응의 수치적 모델은 Stevenson⁽¹³⁾에 의해 제안된 모델을 사용하였는데 그 지배방정식은 다음과 같다.

(a) 개시반응(initiation) :

$$\frac{dR}{dt} = 2k_a I \quad (10)$$

(b) 억제반응(inhibition) :

$$qZ_0 = 2fI_0 \left\{ 1 - \exp \left(- \int_0^{t_z} k_a dt \right) \right\} \\ = 2f(I_0 - \bar{I}_0). \quad (11)$$

(c) 전파반응(propagation) :

$$\frac{d\alpha}{dt} = 2f\bar{I}_0 k_p \left[(1-\alpha) \left\{ 1 - \exp \left(- \int_0^{t-t_z} k_a dt \right) \right\} \right] \quad (12)$$

여기서, I_0 와 Z_0 는 개시제와 억제제의 초기농도이며, \bar{I}_0 는 억제제가 모두 소비된 후의 개시제의 농도이다. f 와 q 는 개시제와 억제제의 효율이며, t_z 는 경화 개시시간(induction time), k_a 와 k_p 는 개시제의 분해율 상수와 단량체(monomer)의 전파율 상수이고, α 는 전환분율(fractional conversion)이다. 식 (11)에서 개시제의 농도가 커지기 시작하면 이 때의 시간을 경화 개시시간으로 정하고 이때 부터 경화반응이 시작되면 식 (12)를 사용하여 전환분율의 변화율을 계산한다. 이러한 경화반응의 결과로 생성되는 경화 반응열은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{r} = H_R M_0 \frac{d\alpha}{dt} \quad (13)$$

여기에서, H_R 는 단위질량당 반응열이고, M_0 는 단량체의 초기농도이다.

3. 개발된 프로그램의 신뢰성 평가

변형해석 부분에 대한 신뢰성 평가는 이미 다루어진바가 있으므로⁽¹⁰⁾ 여기에서는 온도해석 부분에 대한 신뢰성 평가만을 다루었다. 간단한 1차원 열전도 문제를 해석하여 엄밀해(exact solution)와 해석결과를 비교해 보는 방법으로 신뢰성을 평가하

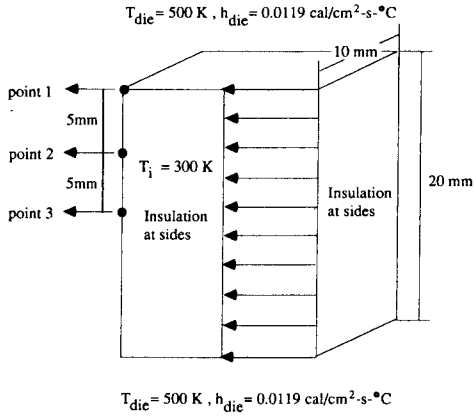


Fig. 1 Initial workpiece geometry and simulation conditions used in simulations.

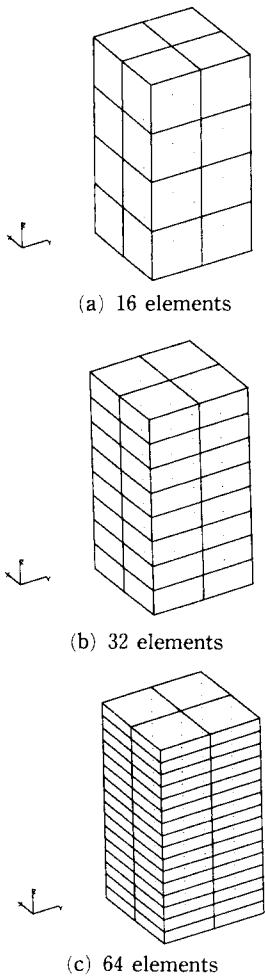
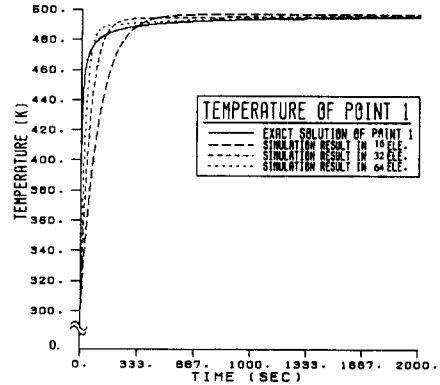
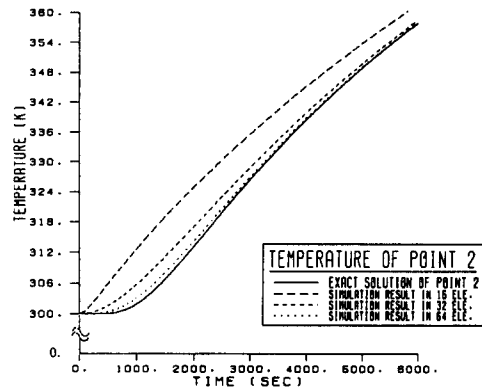


Fig. 2 Initial mesh layout used in simulations

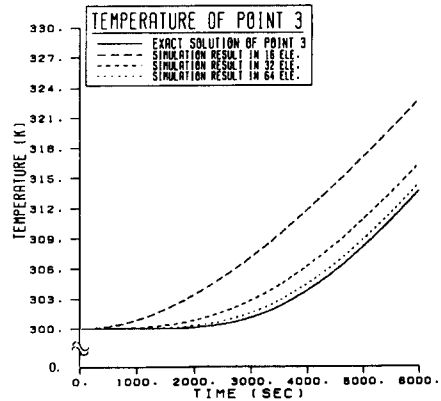
었다. 장입재의 모든 옆면에 단열 경계조건을 주고 장입재 내의 초기 온도분포를 균등하게 분포시킨 다음 장입재의 윗면과 아랫면에 닿아있는 금형의 온도를 장입재의 온도와 다르게 설정하여 주면 장



(a) Point 1



(b) Point 2



(c) Point 3

Fig. 3 Comparisons of temperature between simulation results and exact solutions⁽¹⁴⁾ at various points

입재의 위, 아랫면에서의 온도차에 의하여 경계면에서 열유동이 발생하게 되는데 이러한 문제는 1차원 문제로 해석할 수 있다. 이러한 1차원 문제는 다음과 같은 지배방정식과 경계조건, 초기조건을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \alpha = \frac{k_T}{\rho C_p} \quad (14a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(L, t) = h_{die}\{T(L, t) - T_{die}\} \quad (14b)$$

$$T(x, 0) = T_i \quad (14c)$$

이 식에서 k_T 는 소재의 열전도율, ρ 와 C_p 는 각각 소재의 밀도와 비열, h_{die} 는 장입재 표면에서 금형으로의 열전달 계수이며 T_{die} 와 T_i 는 각각 금형의 온도와 소재의 초기온도를 나타낸다.

위의 식을 적당히 치환하고 역시 변수분리법을 사용하여 풀면 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \exp(-\zeta_n^2 F_0) \cos(\zeta_n x^*)) \quad (15a)$$

$$C_n = \frac{4 \sin(\zeta_n)}{2 \zeta_n + \sin(2 \zeta_n)} \quad (15b)$$

이때 식 (15b)의 ζ_n 은 다음과 같은 식을 만족하는

값이다.

$$\zeta_n \tan(\zeta_n) = B_i, \quad B_i = \frac{h_{die} L}{k_T}, \quad F_0 = \frac{\alpha}{L^2} \quad (16)$$

식 (15a)에서 구한 θ^* 값으로부터 장입재의 온도 T 를 구한다. 그 치환식은 다음과 같다.

$$\theta^* = \frac{T - T_{die}}{T_i - T_{die}}, \quad x^* = \frac{x}{L} \quad (17)$$

이렇게 구한 엄밀해(exact solution)와 비교하기 위하여 옆면을 단열시킨 직육면체 형상의 장입재를 해석하였다. 장입재 내의 초기 온도분포는 전 영역에서 300 K로 설정 하였고 장입재의 윗면과 아랫면의 온도는 500 K로 고정하였으며 장입재와 대기 사이의 열전달계수는 0.0119 cal/cm²/s/°C로 주었다. 소재의 형상과 해석조건이 Fig. 1에 나타나 있다. 대칭성을 고려하여 z방향으로 3점에서 시간에 따른 온도변화를 관찰하였으며 Fig. 2에 나타나 있는 요소구조를 사용하여 해석을 수행 하였다.

Fig. 3에 유한요소해석에 의한 온도분포와 엄밀해를 비교한 결과가 나타나 있다. 역시 요소의 수가 증가할수록 해석으로 구한 온도분포와 엄밀해가 일치해 가는 것을 알 수 있었다. 시간이 6000초 경과한 후 각 관찰점에서의 해석결과와 엄밀해 사이

Table 1 Comparisons of temperatures between simulation results and exact solutions at time=6000 seconds

	Temperature (K)				Error (%)		
	16 ele.	32 ele.	64 ele.	Exact sol.	16 ele.	32 ele.	64 ele.
Point 1	472.468	466.903	465.710	465.343	1.531	0.335	0.079
Point 2	445.530	444.986	444.725	444.623	0.204	0.082	0.023
Point 3	354.470	355.014	355.275	355.377	0.255	0.102	0.029
Point 4	327.532	333.097	354.290	334.657	2.219	0.466	0.110

Table 2 Comparisons of temperatures between simulation results and exact solutions at time=5000 seconds

	Temperature (K)				Error (%)		
	16 ele.	32 ele.	64 ele.	Exact sol.	16 ele.	32 ele.	64 ele.
Point 1	497.877	497.507	497.431	497.409	0.0941	0.0198	0.00461
Point 2	361.293	358.115	357.629	357.508	1.06	0.170	0.0339
Point 3	322.756	316.345	314.379	313.683	2.89	0.848	0.222

의 오차가 Table 1에 나타나 있다. 요소의 개수가 16개일 때는 약 0.1~2.9%의 오차를 가지고 있으며 요소 개수가 64개일때 약 0.004~0.22%의 오차를 가짐을 알 수 있어 경계면에서의 열 유동이 있는 경우에도 해석의 결과가 실제 엄밀해를 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다.

또한 장입재 내부의 온도를 선형적으로 불균일하게 분포시키고 모든 경계면을 단열시킨 경우를 Fig. 2의 요소구조를 사용하여 해석하여 그 계산결과를 엄밀해와 비교한 결과가 Table 2에 주어져 있는데 요소의 개수가 16개일때 약 1.5~2.1%, 요소의 개수가 64개일 때 약 0.08~0.11%의 오차를 가져 해석결과가 엄밀해를 잘 모사함을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 개발된 프로그램이 3차원 열 전달 해석을 신뢰성 있게 수행하고 있음을 알 수 있었다.

4. 평면 변형인 경우 SMC 장입재의 압축성형공정 해석

앞 장의 신뢰성 평가를 통하여 개발된 프로그램

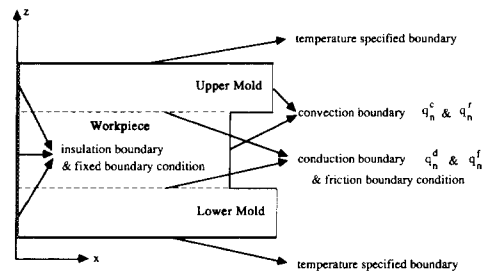
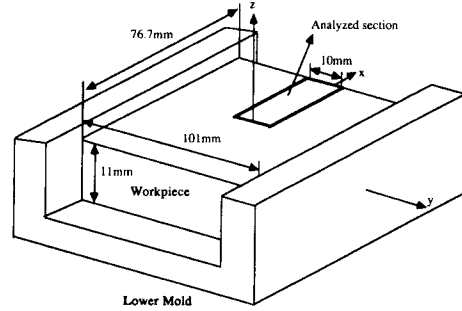


Fig. 4 Initial workpiece geometry and boundary condition of SMC charge for plane strain condition

Table 3 Thermal and Kinetic data of SMC used in simulations⁽¹⁷⁾

SMC		
Density	ρ (g/cm ³)	1.89
Specific heat	C_p (cal/g°C)	0.258
Conduction heat transfer coeff.	k_T (cal/cm-s-°C)	0.00092
Convection coeff. of lubricant	h_{lub} (cal/cm ² -s-°C)	0.0119
Convection coeff. of ambient	h_{amb} (cal/cm ² -s-°C)	0.000119
Reaction heat with unit mass	H_R (cal/g)	29.40
Initial initiator concentration	$2fI_0$ (mole/g-SMC)	7.32×10^{-3}
Parameter for initiator decomposition rate constant	A_d (app. unit)	7.82×10^{13}
Parameter for initiator decomposition rate constant	E_d (kcal/g-mole)	31.90
Parameter for propagation rate constant	A_p (app. unit)	1.71×10^{13}
Parameter for propagation rate constant	E_p (kcal/g-mole)	16.71
Mold (low carbon steel)		
Density	ρ (g/cm ³)	7.833
Specific heat	C_p (cal/g°C)	0.877
Heat transfer coeff.	k (cal/cm-s-°C)	0.1296

이 이론적 측면에서 올바른 결과를 보여줄 수 있을 것이다. 다음은 열전달과 경화반응을 고려한 경우 개발된 프로그램이 실제의 압축성형공정을 어느 정도로 정확히 모사할 수 있는지 알아보기 위하여 평면 변형인 경우의 SMC 압축성형공정을 해석한 다음 그 결과를 참고문헌⁽¹⁵⁾에 나와있는 실험결과와 비교하여 보았다.

초기 장입재의 형상은 $76.7 \times 101 \times 11$ (mm³) 이었으며 y방향으로의 변형을 제한하여 평면변형 조건을 만족하도록 하였다. 기하학적 대칭성을 고려하여 x방향으로는 전체의 반을, 그리고 평면 변형의 경우 y방향으로는 변형 및 열유동을 무시할 수 있으므로 계산의 효율성을 위하여 전체의 1/10만을 해석하였다. 상부 금형의 속도는 실험과 같이 15 mm/min으로 하였으며 소재와 금형 사이의 마찰 조건은 $m_f=0.1$ 이라고 가정 하였다. 상부 금형의 초기 온도는 150°C이고 장입재의 초기 온도는 실온인 27°C로 하였으며 대칭면에 대해서는 단열 경계 조건을 주었다. 초기소재의 형상과 경계조건이 Fig. 4에 나타나 있으며 해석에 사용된 SMC의 유동응력 식은 다음과 같다.⁽¹⁶⁾

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= C(T) \dot{\epsilon}^{m(T)} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \\ C(T) &= 8.123 \times 10^{-4} \exp(2182.325/T) \\ m(T) &= 1.450 - 2.5145 \times 10^{-9} \exp(5775.838/T) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 T 는 절대온도를 나타낸다. 해석에 사용된 SMC의 열전달계수와 경화반응 관련 계수, 그리고 금형의 열전달계수는 참고문헌에서 인용하였으며⁽¹⁷⁾ Table 3에 나타나 있다.

변형 각 단계에서의 변형 양상이 Fig. 5에 나타나 있다. 본 해석에 사용된 유동응력식의 특성에 따르면, 장입재의 온도가 높아지면 유동응력 값이 작아지게 된다. 그러한 영향으로 금형과 닿아 있어 상대적으로 높은 온도분포를 보이게 되는 장입재의 위, 아랫면이 횡방향으로 더 많은 변형량을 가지게 되어 전체적으로 C자 형의 유동선단(flow front)이 나타난다. 변형이 시작될 때 상부 금형은 공정의 특성 상 장입재와 어느 정도 거리를 두고 하강하게 된다. 이로 인하여 장입재의 하부가 상부에 비하여 먼저 가열되어 z축 방향으로 비대칭 온도분포를 가지게 된다. 본 해석에서는 이러한 하강 시간을 10 초로 가정하였다. 비대칭 온도분포는 변형양상에 직접적으로 영향을 주게 되어 장입재 아랫부분이

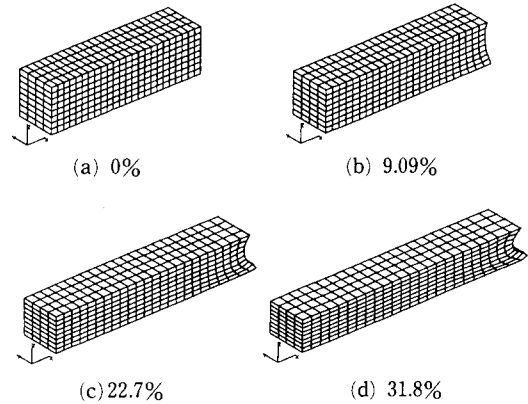


Fig. 5 Deformed shapes at various reductions of height

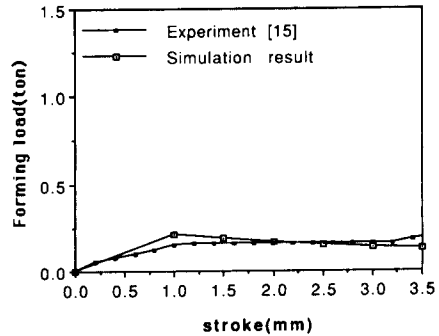
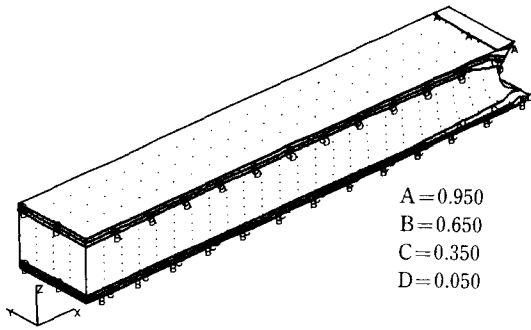


Fig. 6 Comparisons of forging loads between simulation and experiment⁽¹⁵⁾

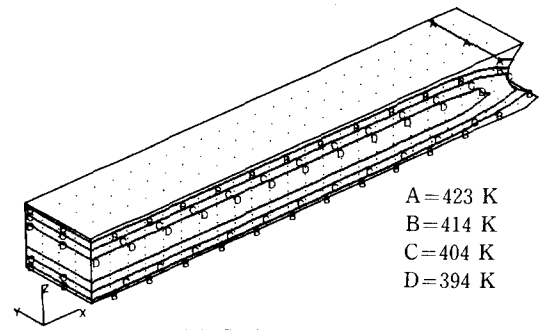
윗부분에 비하여 횡방향으로 더 많이 변형함을 알 수 있다.

해석결과에서 구한 성형하중을 같은 조건으로 수행되어진 평판 압축성형 실험⁽¹⁵⁾에서의 성형하중과 비교해 보았는데 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 문헌에서 인용한 실험은 밀폐형 금형을 사용하여 완전한 평판을 성형한 것으로 공정 후반부에 채움현상으로 인한 하중의 급격한 증가가 있음을 알 수 있다. 하지만 개발된 프로그램은 평면형상의 금형만이 적용가능하므로 채움현상을 모사할 수가 없다. 따라서 채움현상이 일어나기 전까지의 성형공정만을 해석하였다. 해석의 결과가 실험의 결과를 그 경향과 크기 면에서 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

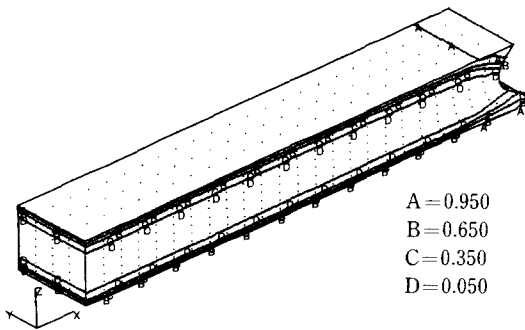
시간에 따른 경화정도를 전환분율을 사용하여 Fig. 7에 나타내었는데 전환분율 값이 1에 가까울



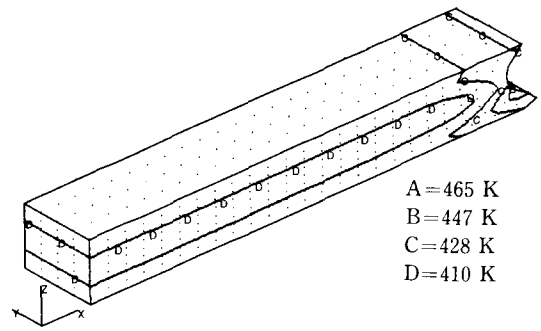
(a) Curing time=68



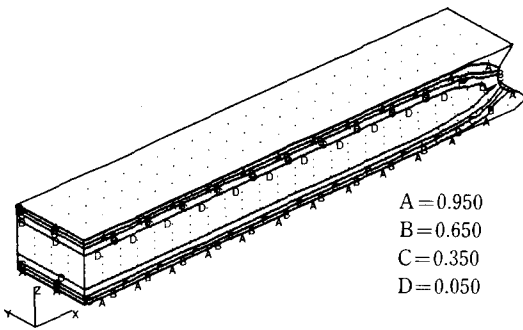
(a) Curing time=68



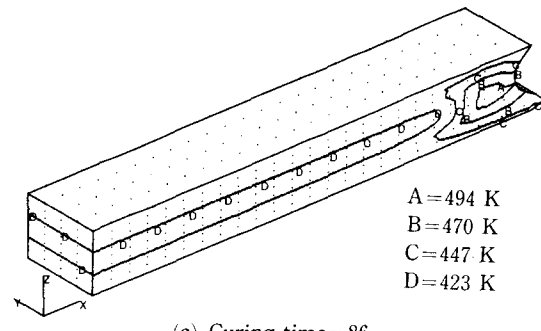
(b) Curing time=74



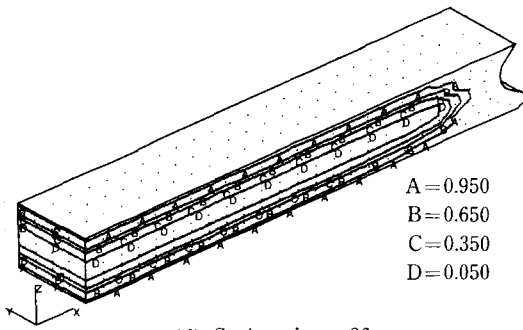
(b) Curing time=80



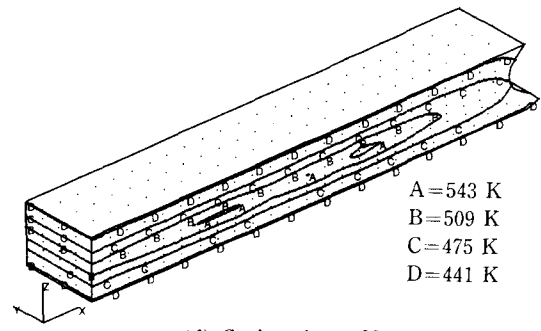
(c) Curing time=80



(c) Curing time=86



(d) Curing time=86sec



(d) Curing time=92 sec

Fig. 7 Conversion rate distributions for various time steps

Fig. 8 Temperature distributions for various time steps

수록 많이 경화되었음을 나타낸다. 경화반응은 장입재의 윗면과 아랫면에서, 그리고 유동선단에 가까운 부분일수록 더 빨리 일어나고 있음을 알 수 있다. 경화가 가장 먼저 일어나는 부분은 장입재 윗면의 유동선단 부근이며 그 아랫면의 경화가 그 다음으로 진행된다. 이는 변형 초기에는 윗면에 비하여 아랫면의 온도가 더 높지만, 변형 최종 단계에서는 장입재의 아랫면 유동선단 부분이 금형에서 떨어지게 되어 온도가 내려가기 때문이다. 전체적인 경화반응은 우선 금형과 접한면과 유동선단부분에서 먼저 일어난 후 장입재 내부로 전파되어 가고 있음을 보여준다. 또한 Fig. 7에 나타난 경화과정은 모두 78초~96초 사이에 일어난 것으로 전체 경화시간을 고려할 때 일단 경화반응이 개시되어지면 전체 영역에 걸쳐 빠른 속도로 경화가 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 8에는 경화과정 중 장입재 내의 온도분포를 나타내었다. 경화반응이 활발히 일어나는 곳이 높은 온도분포를 보임을 알 수 있으며 경화반응이 종료된 부분의 온도는 하강하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 경화과정 중의 장입재 내의 온도 분포를 결정하는 가장 큰 변수는 경화 반응열임을 예측할 수 있다. 경화과정의 각 단계에서 가장 높은 온도분포를 보이는 부분은 유동선단의 윗부분, 유동선단의 아랫부분, 유동선단의 중앙부, 그리고 장입재 중심부분의 순서로 변화해 감을 알 수 있다.

장입재의 중심에서 온도의 시간에 따른 변화를 도시하여 문헌^[15]에서 인용한 실험의 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 해석결과와 실험의 결과 사이에 다소간의 오차가 있음을 알 수 있으나

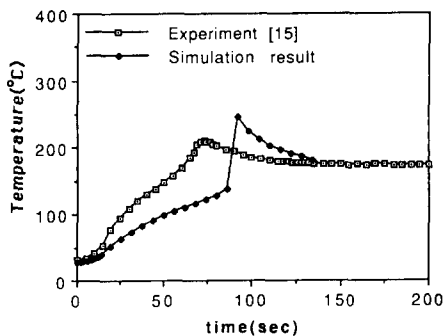


Fig. 9 Comparisons of temperatures at the center of the symmetric surface between simulation and experiment^[15]

비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 실험의 결과가 해석결과와 일치하지 않는 것은 열전달에 관련된 물성치가 실제 실험에 사용된 SMC의 물성치와 다르기 때문이라 생각되어진다. SMC는 수지와 유리섬유가 섞여있는 복합재료이기 때문에 제조과정의 차이에 따라 물성치가 변화할 확률이 크고 또한 사용한 개시제와 억제제의 종류에 따라 경화반응에 관련된 계수들의 값이 변하게 되므로 일반적인 물성치를 얻기가 매우 어렵다. 여러가지 실험적인 방법을 통하여 좀더 정확한 SMC의 물성치를 확보한다면 실제 경우에 더욱 근접한 해석결과를 얻을 수 있을 것이며 해석의 결과를 통하여 실험으로 구하기 힘든 물성치를 역으로 추정하는 것도 가능할 것이다.

5. 직육면체 형상 SMC 장입재의 3차원 압축성형공정 해석

앞 절에서의 검증과정을 통하여 개발된 프로그램이 SMC 압축성형공정을 3차원적으로 모사할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 3차원 유한요소해석의 가장 기본적인 경우인 직육면체 형상인 경우의 압축성형을 성형 속도와 성형온도를 변화시켜 가며 해석해 보아 성형속도와 온도의 변화가 압축성형공정에 미치는 영향을 알아보았다. 상부 몰드의 속도는 15 mm/min, 그리고 250 mm/min의 두 가지로 변화시켰으며 소재와 몰드 사이의 마찰 조건은 $m_f=0.1$ 이라고 가정하였다. 몰드의 초기 온도는 130 °C와 150 °C로 변화시켰으며 장입재의 초기 온도는 실온인 27 °C로 가정하였다. 장입재의 크기는 $76.7 \times 101 \times 11$ (mm³)로 기하학적인 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 해석하였다. 해석에 사용된 몰드와 SMC 장입재의 열전달 물성치는 Table 3에 나타나 있으며 유동응력 식은 앞 절에서와 같이 식 (18)을 사용하였다.

변형 최종 단계에서의 x-y평면과 x-z평면에서의 변형양상이 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에는 몰드의 초기온도가 150°C인 경우 성형속도가 15 mm/min 그리고 250 mm/min인 경우의 변형양상을 나타내었다. 성형속도가 15 mm/min인 경우, x-z평면에서의 변형양상은 C자 형태의 유동선단을 보여주고 있음을 알 수 있다. 성형속도가 250 mm/min인 경우 x-z평면에서의 변형양상은 성형속도가 15 mm/min인 경우에 비하여 C자형의 유동선단

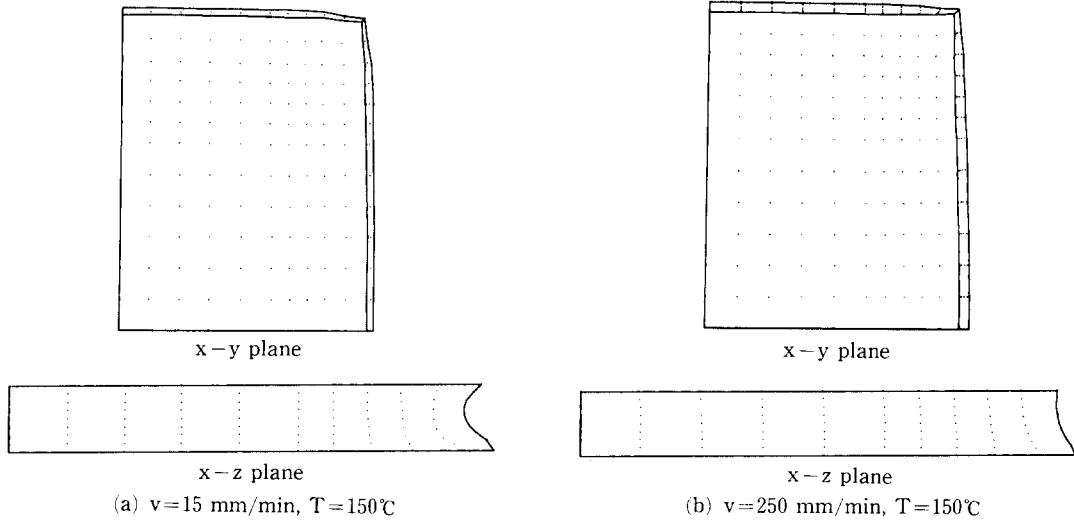


Fig. 10 Deformed shapes at 38.2% reduction of height for various cases at various planes

이 거의 나타나지 않고 있으며 윗면의 변형이 그다지 크지 않음을 알 수 있었다. 이는 장입재의 성형속도가 빨라 상부물드로부터 유입되는 열량이 적어지게 되어, 장입재 내의 온도분포가 성형속도가 낮은 경우에 비하여 균일화되기 때문이다.

각 성형조건에서의 성형하중이 Fig. 11에 나타나 있다. 성형속도가 증가하고 성형온도가 낮아질수록 성형하중이 증가함을 알 수 있었는데 이러한 현상은 장입재의 유효 변형률속도와 온도분포가 유동응력식에 영향을 미치기 때문이다. 성형속도가 15 mm/min인 경우 성형하중은 변형이 진행될수록 감소하고 있으나 성형속도가 250 mm/min인 경우는 증가하고 있음을 알 수 있는데 이로부터 성형속도

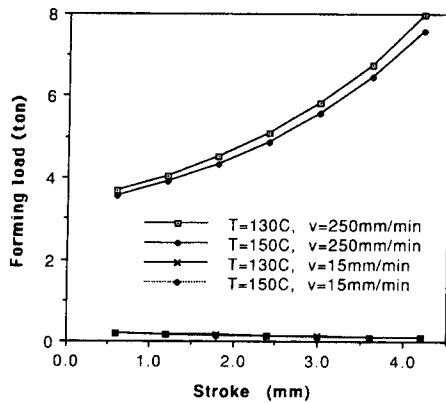


Fig. 11 Forging loads for various cases

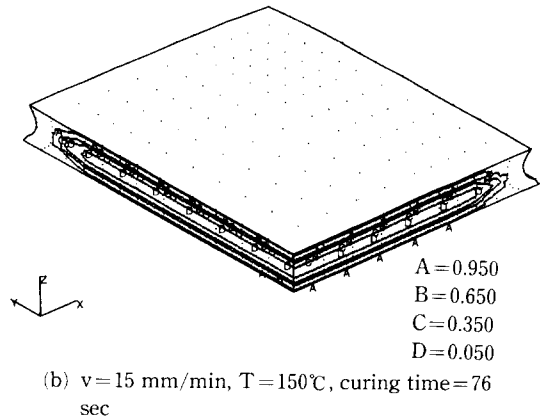
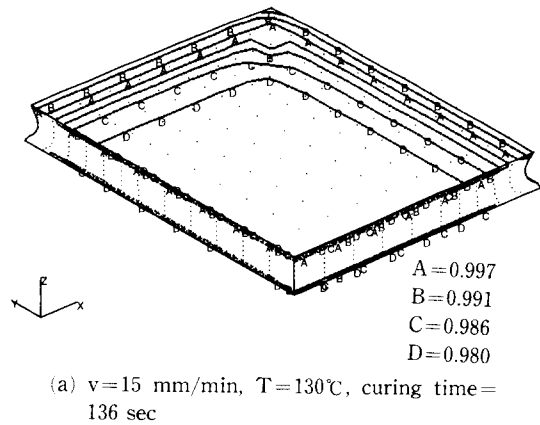


Fig. 12 Conversion rate distributions at the final stages of curing process for various cases

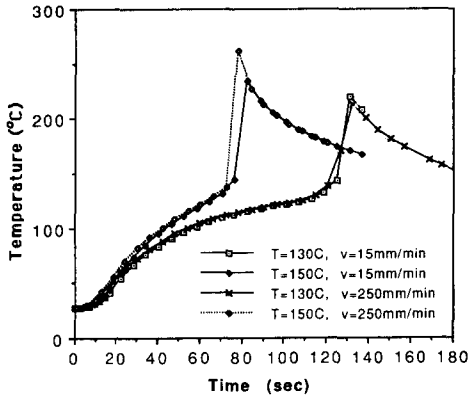


Fig. 13 Temperatures at the center of the rectangular shape SMC for various cases

가 15 mm/min인 경우는 장입재 내의 온도증가가, 250 mm/min인 경우는 유효 변형률속도의 증가가 각각 성형하중에 주된 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 또한 성형하중은 온도의 변화에 비하여 성형속도의 변화에 더욱 민감하게 변하고 있음도 알 수 있었다.

Fig. 12에 성형속도가 15 mm/min인 경우 경화반응 후반부의 경화정도를 전환분율을 사용하여 나타내었다. 성형온도가 150 °C인 경우에는 몰드와 접해있는 바깥면으로부터 경화가 진행되어 전체적으로 불균일한 경화분포를 보이는데 비하여 성형온도가 130 °C인 경우 전체적으로 매우 고른 경화정도를 보여줌을 알 수 있었다. 이러한 현상은 몰드와 장입재 사이의 온도차로 인한 열유동의 정도가 경화정도에 영향을 미치기 때문이다. 장입재 중심점에서의 시간에 따른 온도변화가 Fig. 13에 나타나 있다. 성형속도의 변화는 경화반응시 온도 변화에 큰 영향을 끼치고 있지 않음을 알 수 있었으며 성형온도가 증가하게 되면 경화반응열로 인해 온도가 최고로 상승하는 시간도 더 짧아지고 최고온도도 더 높아지는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

SMC의 압축성형공정을 해석하기 위하여 3차원 강열점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하여 엄밀해(exact solution)를 구할 수 있는 간단한 1차원 열전달 문제를 해석함으로써 열전달 해석 부분의 신뢰성을 평가 하였다. 신뢰성을 검토한 후 평면 변형인 경우의 장입재의 압축성형공정을 해석하

여 그 결과를 실험의 결과⁽¹⁵⁾와 비교하고 또한 직육면체 형상 장입재의 3차원 압축성형공정을 해석하여 실제 압축성형공정을 어느정도로 모사할 수 있는지 알아보았다.

해석결과 장입재는 몰드 단힘속도에 따라 C자 형태의 유동선단을 보여주었는데 이러한 변형양상은 몰드와 장입재 사이의 열전달에 의한 영향때문이며 참고문헌⁽¹⁵⁾에서 인용한 실험에서도 이와 유사한 변형양상이 나타남을 알 수 있었다. 성형하중을 비교한 결과 해석결과가 실험결과를 잘 모사하고 있는 것을 알 수 있었으며 장입재 중심부에서 온도변화를 비교한 결과 다소간의 오차가 있으나 비슷한 경향을 보임을 알 수 있었다. 이러한 오차의 원인은 SMC 재료의 열전달에 관련된 물성치의 부정확성에서 기인한 것으로 좀더 정확한 SMC의 물성치를 확보한다면 실제 경우에 더욱 근접한 해석결과를 얻을 수 있을 것이므로 이에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 상공자원부와 과학재단의 연구지원사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Marker, L. F. and Ford, B., 1977, "Rheology and Modeling Characteristics of Glass Reinforced Sheet Molding Compounds," *Modern Plastics*, Vol. 54, pp.64~74.
- (2) Smith, K. L. and Suh, N. P., 1979, "An Approach toward the Reduction of Sink Marks in Sheet Molding Compound," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 19, pp.829~834.
- (3) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1979, "The Effect of Deformation and Thermoset Cure on Heat Conduction in a Chopped-fiber Reinforced Polymer during Compression Molding," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp.1021~1032.
- (4) Silva-Neito, R. J., Fisher, B. C. and Birley, A. W., 1981, "Rheological Characterization of Unsaturated Polyester Resin Sheet Molding Compound," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 21, pp.499~506.

- (5) Lee, C. C., Folgar, F. and Tucker, C. L., 1984, "Simulation of Compression Molding for Fiber-Reinforced Thermosetting Polymers," *ASME Trans., J. Eng. Ind.*, Vol. 106, pp.114~125.
- (6) Lee, C. C. and Tucker, C. L., 1987, "Flow and Heat Transfer in Compression Mold Filling," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 24, pp.245~264.
- (7) Lee, L. J., Marker, L. F. and Griffith, R. M., 1981, "The Rheology and Mold Flow of Polyester Sheet Molding Compounds," *Polymer Composites*, Vol. 2, pp.209~218.
- (8) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1986, "A Model for the Flow of a Chopped-Fiber Reinforced Polymer Compound in Compression Molding," *ASME Trans., J. Appl. Mech.*, Vol. 53, pp. 361~371.
- (9) Lee, L. J., Fan, J. D., Kim, J. and Im, Y. T., 1991, "Flow Analysis of Sheet Molding Compound in Compression Molding," *International Polymer Processing*, Vol. 6, pp.61.
- (10) 김수영, 임용택, 1995, "SMC 압축성형공정의 3차원 유한요소해석," 한국소성가공학회지, Vol. 4, pp.39~47.
- (11) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press, pp.54~88.
- (12) Dahlquist, G. and Bjorck, A., 1974, *Numerical Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (13) Stevenson, J. F., 1986, "Free Radical Polymerization Models for Simulating Reactive Processing," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 26, pp.746~759.
- (14) Holman, J. P., 1963, *Heat Transfer-SI Metric Edition*, McGraw-Hill, pp.131~206.
- (15) 김기택, 정진호, 임용택, 1994, "SMC 압축성형의 열 및 유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 18, pp.2386~2395.
- (16) 조재호, 김낙수, 1993, "SMC 압축성형에 관한 해석적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp.256~261.
- (17) Fan, J. D., Lee, L. J., Kim, J., and Im, Y. T., 1989, "Cure Analysis of Sheet Molding Compound in Molds with Substructures," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 29, pp.740~748.