

〈論 文〉

SMC압축성형 공정에 관한 유한요소해석

이충호* · 허 훈*

(1995년 2월 20일 접수)

Finite Element Analysis of SMC Compression Molding Processes

Choong Ho Lee and Hoon Huh

Abstract

A finite element program is developed to analyze the flow phenomena in SMC compression molding as a viscoplastic model. The calculation of temperature distribution is also carried out by uncoupling the thermal analysis from the flow analysis. SMC molding processes with a flat plate substructure and the one with a T-shaped rib are considered in numerical simulation. The numerical results provide deformed shapes, temperature distribution in a SMC charge, and the forming load. The simulation of compression molding of a flat plate with a T-shaped rib requires a remeshing technique for the whole process.

Key Words : SMC Compression Molding, Viscoplastic Model, T-Shaped Molding.

1. 서 론

강판은 자동차 차체성형에 많이 사용되고 있고 복합재료보다 가격이 저렴하지만, 경량성, 내부식성, 일체성, 치수안정성 등에서 복합재료가 강판보다 우수하여 강판을 대체할 수 있는 재료로 각광을 받고 있다. 복합재료를 이용하여 자동차 차체성형에 많이 이용되는 방법중의 하나가 SMC를 소재로 한 압축성형 방법이다. SMC를 소재로 한 압축성형 공정은 장입준비와 배치, 금형의 닫힘, 경화 반응의 순서로 이루어진다.

SMC의 성분, 장입재의 양, 장입재의 위치, 금형의 하강속도, 금형의 온도, 유동, 열전달, 경화반응 등이 최종제품에 직접적인 영향을 주는 변수들이다. 특히, SMC의 유동은 열전달과 밀접하게 연계되어 있다.

SMC압축성형에 대한 연구는 1970년대부터 지금까지 많이 보고되어 왔다. 실험적 연구로, Marker와 Ford⁽¹⁾, Barone와 Caulk⁽²⁾는 색깔층이 있는 장입재를 이용하여 몰드의 온도와 하강속도 등에 따른 유동의 변화를 관찰하였다. Smith와 Suh⁽³⁾는 sink mark에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. Tung⁽⁴⁾은 성형공정변수를 다양하게 변화시켜 성형 후의 기계적인 성질과 열적인 성질을 평가하였다. Lee, Marker,

*한국과학기술원 기계공학과

Griffith⁽⁵⁾는 SMC의 유변학적인 거동을 연구하였다. Fan⁽⁶⁾은 리브가 있을 때와 없을 때를 다양하게 고려한 실험을 하였다.

SMC압축성형시 유동에 관한 수치해석을 위하여 이론적인 모델은 뉴우톤 모델, 비뉴우톤 모델, 점탄성 모델, 점소성 모델과 유효이론을 도입한 Hele-Shaw 모델 등이 있다. Lee와 Deen⁽⁷⁾, Silva-Neito⁽⁹⁾ 등은 뉴우톤 모델을 사용하였고 Barone와 Caulk⁽⁸⁾는 마찰특성과 섬유와 수지의 상호작용 등을 고려한 해석을 하였다. Lee, Folgar, Tucker⁽¹⁰⁾는 Hele-Shaw 모델을 이용하여 사각장입재에서 유동선단의 흐름을 해석하였다. Lee와 Tucker⁽¹¹⁾는 2차원 평판에서 열전달과 온도에 따른 점성의 변화를 고려하여 유동을 해석하였다. Lee⁽¹²⁾, Castro와 Lee⁽¹³⁾는 열전달과 경화반응에 대해 연구하였다. 또한 Kim⁽¹⁴⁾은 강소성 모델에 열전달과 경화반응을 고려하여 해석하였다. 현재까지 수행된 여러 가지 방법의 수치해석은 대부분 2차원의 간단한 모양에 관한 해석이었다.

본 논문에서는 SMC의 압축성형에 관한 해석을 위하여 유동을 점소성 모델로 가정하였고 열전달을 유동해석과 비연계하여 고려하였다. 하부물드가 평판인 경우와 T-형상의 리브가 있는 경우에 관하여 유동과 온도분포를 해석하였고, 성형하중은 실험에 의한 하중과 비교하여 보았다.

2. 이론적 수식화

SMC의 유동과 열전달은 상호작용을 하기 때문에 정확한 해석을 위해서는 연계해석이 바람직하다. 그러나 증분시간 Δt 을 충분히 작게 하여 비연계해석을 하면 연계해석과 거의 차이가 없으며 계산의 효율성을 증대시킬 수 있고 수식화의 복잡성을 피할 수 있다. 본 연구는 비연계해석 기법을 이용하였는데, 매 증분시간마다 유동해석을

먼저 수행하였고 다음에 열전달해석을 하였다. 즉,

- 1단계 : 시간 $t_0=0$, 해석영역의 유한요소 분할 및 초기화
- 2단계 : 시간 증분 $t_n=t_{(n-1)}+\Delta t$, Δt 동안의 상부물드 하강
- 3단계 : 유동해석 수행, 시간 t_n 의 변형상태 계산
- 4단계 : 열전달해석 수행, 시간 t_n 의 온도 분포 계산
- 5단계 : 해석을 계속 수행해야 할 상태이면 2단계 돌아감. 그렇지 않으면 해석을 종료함.

이 때, 시간 t_n 의 유동해석은 시간 $t_{(n-1)}$ 의 열전달해석에 의한 기계적 성질의 변화를 고려하였다. 그리고, 시간 t_n 의 열전달해석은 시간 t_n 의 유동해석에 의한 변형상태에서 수행되었다.

2.1 유동 해석

SMC는 섬유와 광물성 충전재가 열경화성 수지에 함침되어 있는 복합 적층판으로 온도상승에 의해 열경화성 수지의 점도가 크게 떨어진다. 따라서, SMC에 대한 구성 방정식은 변형률속도와 온도만의 함수로 가정할 수 있다. 시간 $t_{(n-1)}$ 에서의 표면의 형상과 유효 변형률속도 분포를 알고 있고, b_i 를 체적력이라 하고, 경계면 A_f 에서의 표면응력을 f_i 라 하면 평형방정식과 적합방정식은 응력장과 속도장을 만족한다. 이러한 경계조건 문제는 가상일 원리로부터 해석할 수 있다. 준정상상태의 평형방정식과 경계조건으로부터 발산정리를 이용하여 가상일의 원리를 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = \int_V b_i \delta u_i dV + \int_{A_f} f_i \delta u_i dA, \quad \forall \delta u_i \quad (1)$$

좌변은 변형에너지 항이고, 우변의 체적력

에 의한 일과 외부응력에 의한 일이다. 식 (1)의 변형에너지 항에서 편차응력과 정수압을 분리한 후, 유동응력식과 비압축성 구속조건을 부여하면 식(2)와 같다.⁽¹⁵⁾

$$\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \bar{\Lambda} \int_V \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} \\ = \int_V b_i \delta u_i dV + \int_{A_f} f_i \delta u_i dA, \quad \forall \delta u_i \quad (2)$$

여기서, 본 해석의 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 은 보통 0.003의 값을 가지며, 체적 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{kk}$ 는 거의 0에 가까운 값을 가진다. $\bar{\Lambda}$ 는 벌칙상수로 $\dot{\epsilon}_{kk}$ 보다 충분히 큰 10^8 정도의 값을 사용하였다. 접촉조건은 접촉면에 수직방향성분과 접선방향성분으로 식(3)과 같이 고려할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV \\ + \bar{\Lambda} \int_V \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV \\ = \int_V b_i \delta u_i dV + k_n \int_{A_c} (u_{n_i} - g_{n_i}) \\ \delta u_{n_i} dA \\ + \int_{A_c} \sigma_{t_i} \delta u_{t_i} dA + \int_{A_f} f_i \delta u_i dA, \\ \forall \delta u_i \quad (3)$$

여기서 k_n 은 벌칙상수이며, g_{n_i} , u_{n_i} , u_{t_i} 은 각각 수직방향의 주어진 속도벡터, 수직방향 속도벡터, 접선방향 속도벡터를 의미한다. 마찰응력 σ_{t_i} 은 식(4)와 같이 수정 마찰식을 이용하였다. 이때, 유한요소 계산중에는 접촉절점이 다이면에 대하여 접촉되어 있는지 상대운동을 하는지의 여부를 판단하기가 매우 어렵고 이에 따라 해가 수렴하지 않는 경우가 있다. 따라서, 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 유연화 함수로 tanh함수를 도입하였다.

$$\sigma_{t_i} = - \frac{u_{t_i}}{|u_{t_i}|} m \tau_y \tanh\left(\alpha \frac{u_{t_i}}{|u_{t_i}|}\right) \quad (4)$$

여기서, m 은 마찰상수이고 본 해석에서 사용한 m 값은 0.2이다. τ_y 는 전단항복응력이

고, α 는 1보다 큰 상수로 본 해석에서는 2를 사용하였다.

식(3)을 유한요소로 근사화하기 위하여 4절점 등매개 사각형 요소를 사용하였고, 유한요소 근사로 얻어진 행렬방정식은 뉴턴랩슨축차법을 이용하여 해를 구하였다.

2.2 열전달 해석

SMC성형과정중에는 금형이 약 150°C로 가열되어 있고, 또한 SMC의 점성이나 여러 기계적 성질이 온도에 따라 매우 크게 변하기 때문에 유동해석을 위하여 열전달해석이 필수적이다. 금형의 하강으로 SMC의 유동이 일어나는 시간은 전체성형시간에 비해 비교적 짧고, 유동중의 SMC의 온도가 충분히 높지 않기 때문에, 경화반응을 고려하지 않고 유동해석과 열전달해석을 하였다.

열전달해석을 위한 지배방정식, 경계조건 및 초기조건은 식(5)와 같다.

○ 지배 방정식 :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + b_q \quad \text{in } V \quad (5a)$$

○ 경계조건 :

$$\left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) n_i = -k_o (T - T_g) + h, \quad \text{on} \\ \partial V \quad (5b)$$

○ 초기조건 :

$$T = T_o(x_i) \quad \text{at } t=0, \quad \text{in } V \quad (5c)$$

여기서, ρ , c_p , k_{ij} , b_q 는 각각 밀도, 비열, 열전도 계수, 단위 체적당 발열량이다. 그리고, n_i , k_o , T_g , h 은 수직 벡터, 벌칙상수, 주어진 경계의 온도, 대류열전달 계수이다. 식(5a)에 가상일의 원리를 적용한 후, 경계조건과 발산정리를 이용하여 다음과 같은 적분형태의 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \left[\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \bar{T} + k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] dV$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_A k_o T \bar{T} dA \\
 & = \int_V b_q \bar{T} dV + \int_A (k_o T_g + h) \bar{T} dA, \\
 & \nabla \bar{T} \tag{6}
 \end{aligned}$$

유동해석과 같이 식(6)을 유한요소로 근사화하기 위하여 4절점 등매개 사각형 요소를 사용하였다. 그리고, 식(6)의 첫째항에 관한 시간적분은 유한차분 θ -method를 이용하였다⁽¹⁷⁾.

3. 수치해석 결과 및 고찰

앞 절에서 언급한 수식화는 유한요소프로그램으로 계산하여 SMC 압축성형공정을 모사해석하였다. 수치해석에 사용한 SMC의 점소성 모델에 관한 재료상수는 Table 1과 같다.⁽⁶⁾ 수치해석은 Fig. 1의 도식설명과 같이 하부몰드의 모양이 평판인 경우와 T-형상의 리브가 존재하는 경우의 유동을 해석하였다. 초기 장입재의 두께는 6 mm이고 3 mm까지 압축하였다. 장입재의 유지시간은 10 sec로, 상부몰드의 하강속도는 15 mm/min과 45 mm/min로 하였다. 상부몰드의 하강속도는 15 mm/min일 때, 하강시간은 12 sec이고 증분시간을 0.1 sec로 하여

120스텝으로 해석하였다. 그리고 상부몰드의 하강속도는 45 mm/min일 때, 하강시간은 4 sec이며 증분시간을 0.05 sec로 하여 80스텝으로 해석하였다. 상부몰드와 하부몰드의 온도는 150°C로 균일하게 유지되는 것으로 해석하였다. 상부몰드가 하강하는 시간은 전체성형시간에 비해 짧기 때문에 유동중의 열전달량은 그리 많지 않으나, 몰드와 접촉하는 SMC의 위와 아래는 SMC내부에 비해 상대적으로 온도가 많이 상승하게 되므로 수치해석에 고려하였다.

Fig. 2는 초기장입재의 두께가 6 mm일 때 상부몰드의 하강에 따른 성형형상을 변형된 유한요소로 표시한 그림이다. 상부몰

Table 1 Material data for SMC in numerical calculation

응력-변형률속도 관계식	$\bar{\sigma} = 1.732 \tau_0 + 1.8C \bar{\epsilon}^{0.07} \text{ N/mm}^2$ $\tau_0 = 0.05321 e^{3010.9(\frac{1}{T} - \frac{1}{295.15})}$ $C = 2.6159 e^{9021.7(\frac{1}{T} - \frac{1}{295.15})}$
밀도	$\rho = 1.89 \text{ g/cc}$
비열	$C_p = 0.258 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$
열전도계수	$k = 0.00092 \text{ cal/cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$
대류열전달계수	$h = 0.0119 \text{ cal/cm}^2\text{s}^\circ\text{C}$

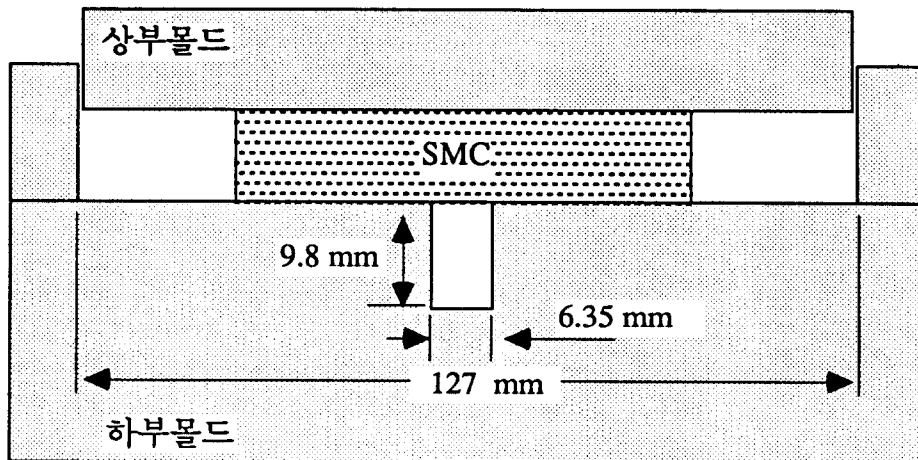


Fig. 1 Schematic diagram for a SMC compression molding process

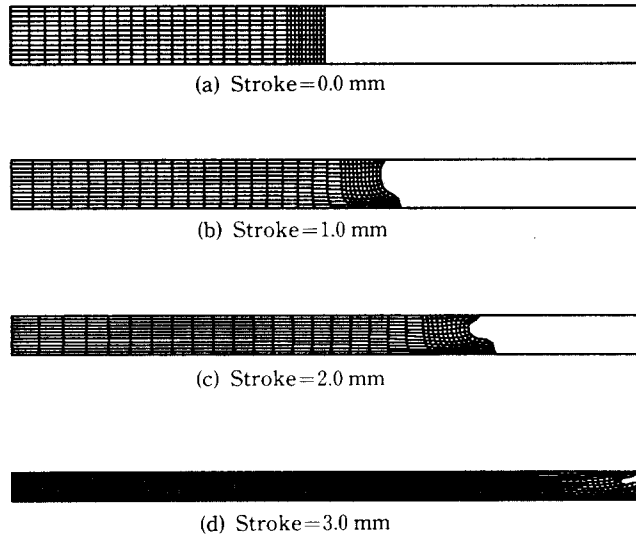


Fig. 2 Deformed configuration of a SMC charge in compression molding of a flat plate (die temperature=150°C, die closing speed=15 mm/min)

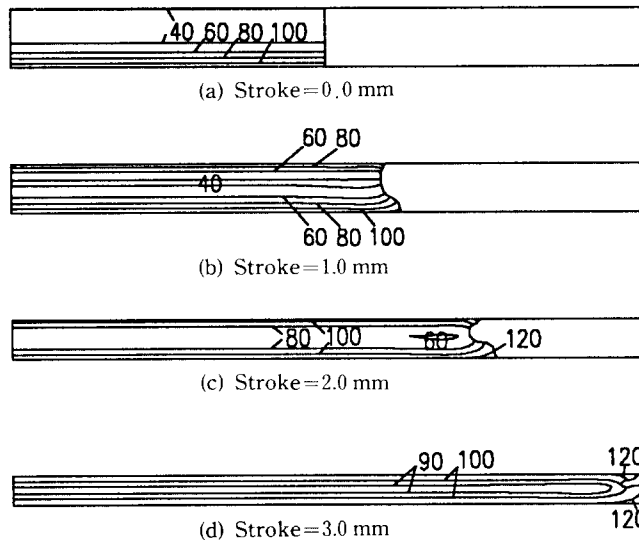


Fig. 3 Temperature distribution in a SMC charge in compression molding of a flat plate (die temperature=150°C, die closing speed=15 mm/min)

드와 하부몰드에 의한 장입재의 상하표면의 온도가 내부보다 높으므로 성형시에 상하표면부위의 SMC 유동이 더 많은 것을 알 수 있으며 성형이 진전되면 상부와 하부의 유동선단이 맞닿아 weld-line을 형성하게 됨을 알 수 있다. Fig. 2의 유동선단을 보면

금형과 닿는 부분은 다른 부분에 비해 점성이 크게 떨어져 preferential flow가 매우 잘 일어나고 장입재의 중간층은 extentional flow가 발생한다. 이와 같은 결과는 Barone와 Caulk⁽²⁾의 실험에서 비슷한 결과를 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는

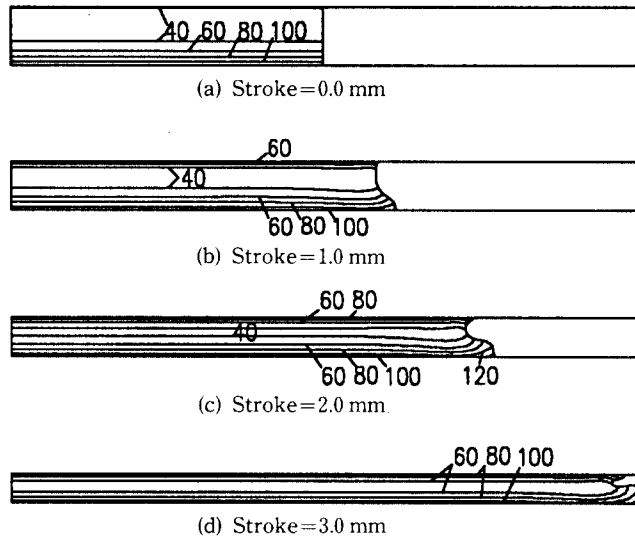


Fig. 4 Temperature distribution in a SMC charge in compression molding of a flat plate (die temperature=150°C, die closing speed=45 mm/min)

각각 상부몰드의 하강속도를 15 mm/min와 45 mm/min로 하였을 때 장입재의 성형에 따른 온도 분포를 도시한 것이다. Fig. 3(a)는 유지시간 동안 장입재가 하부몰드와 접촉하고 있어 장입재의 아래부분만 온도가 먼저 상승한 결과이다. 유지시간 때문에 장입재의 아래부분의 유동이 가장 잘 일어난다. Fig. 3과 Fig. 4를 비교해 볼 때, 상부몰드의 하강속도의 차이에 따른 온도분포의 차이는 있으나 유동선단의 변형모양은 큰 차이가 없다. Barone와 Caulk의 실험에 의하면 상부몰드의 하강속도의 차가 클 때 SMC 유동선단의 모양은 큰 차이를 갖는다. 본 수치해석 결과로 얻어진 유동선단의 모양은 실험에 의하여 비교 및 검토가 요구된다.

Fig. 5는 T형상의 리브가 존재할 때의 압축성형 해석결과를 변형된 유한요소로 표시한 그림이다. 리브가 존재할 때의 성형해석은 모서리 부분에서 요소의 찌그러짐이 심하여 요소의 재분할과 상태변수의 사상이 필요하다. Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)의 결과는 압축성형 중에는 수평유동이 많이 일어나고

있는 반면, 리브로의 유동은 상대적으로 작음을 보여주고 있다. Fig. 5(d)는 수평유동에 의해 평판다이가 다 채워진 후 리브에 충전이 거의 이루어진 상태이다. Fig. 6은 리브가 있을 때의 압축 성형공정 중의 온도 분포를 도시한 그림이다. 이때의 온도분포는 평판 압축의 경우와 거의 비슷하나 리브부분의 온도는 상대적으로 낮음을 알 수 있으며, 리브의 윗부분은 오히려 온도가 높아짐을 알 수 있다. Fig. 5의 장입재의 충전과정과 Fig. 6의 온도분포를 살펴보면 리브의 맞은편에 sink mark가 형성될 가능성이 높은 것으로 판명되나, 본 해석 과정중에는 sink mark는 형성되지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8은 상부몰드의 행정에 따른 하중곡선으로, Fig. 7은 평판 압축성형시, Fig. 8은 리브가 있는 평판압축성형시의 하중을 도시하였다. 수치해석으로 구하여진 하중곡선은 실험결과⁽¹⁸⁾와 비교하여 보았다. 수치해석에 이용된 물성치와 실험에 사용된 재료가 똑같은 것이 아니어서, 실험치의 결과와 전반적인 경향은 잘 일치하나

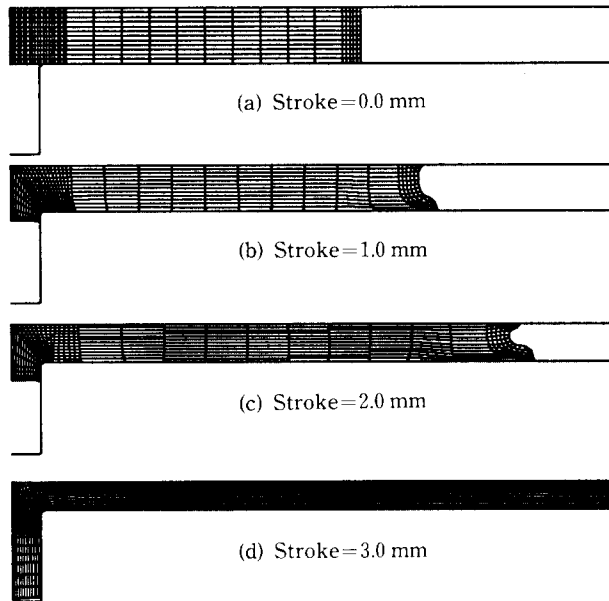


Fig. 5 Deformed configuration of a SMC charge in compression molding of a flat plate with a T-shaped rib(die temperature=150°C, die closing speed=15 mm/min)

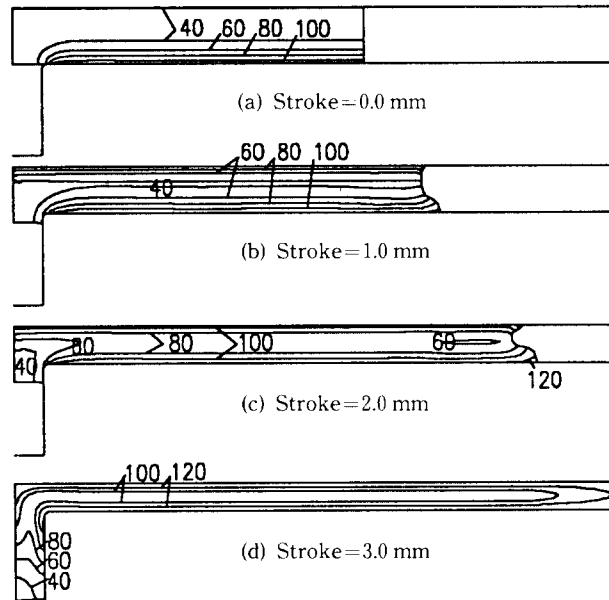


Fig. 6 Temperature distribution in a SMC charge in compression molding of a flat plate with a T-shaped rib(die temperature=150°C, die closing speed=15 mm/min)

하중값과 충전시기는 다소차이를 보이고 있다. 수치해석에 의한 하중은 점진적으로 감소하다가 충전시에는 급격히 상승하는 것을

보여준다. 하중이 감소하는 이유는 상부물드의 하강속도가 작은 경우로서 몰드가 하강함에 따라 압축하는 면적은 커지지만 열

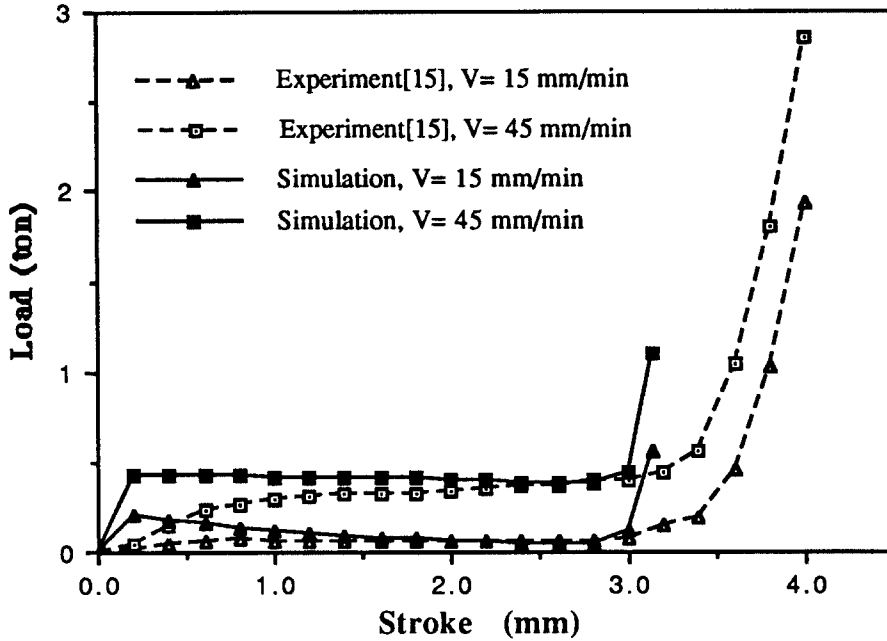


Fig. 7 Forming load in compression molding of a flat plate with respect to the die stroke

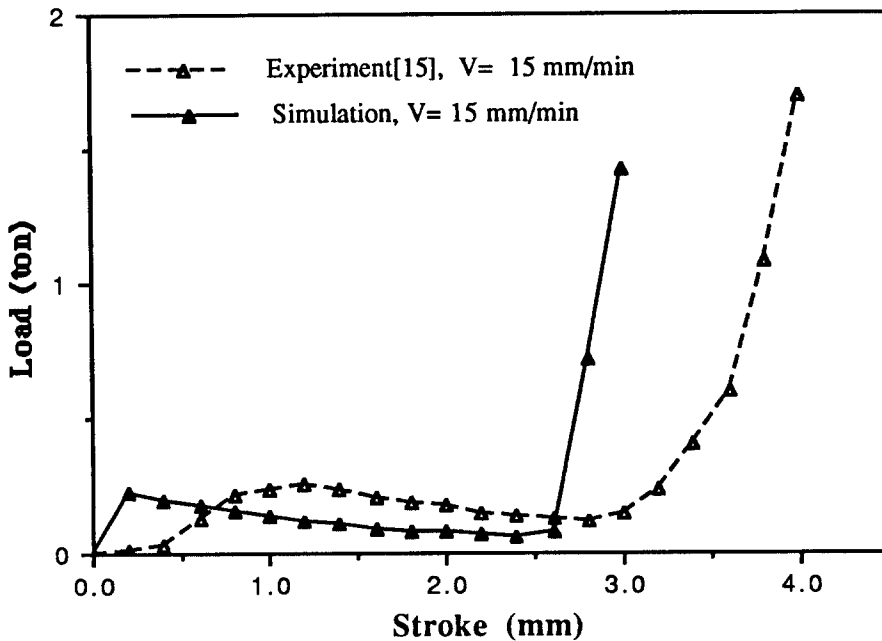


Fig. 8 Forming load in compression molding of a flat plate with a T-shaped rib with respect to the die stroke

전달에 의해 재료의 점도가 작아지기 때문이다. 하강행정 마지막에서 하중이 급격히 증가하는 이유는 충전이 이루어지기 때문이다. Fig. 7과 Fig. 8에서, 실험치의 하

강행정은 본 해석의 하강행정인 3mm보다 크다. 이것은 SMC플라이의 표면에 굴곡이 있어서 적층된 SMC플라이와 플라이 사이에 틈새가 있고, 이 틈새로 인하여 실험에

사용한 초기 장입재의 두께가 6 mm보다 커서 약 7 mm 정도가 되기 때문이다. 이 틈새가 합착되는 동안에는 초기 하중이 완만하게 증가하게 되므로, Fig. 8에서와 같이 수치해석에서 구한 하중은 초기하중이 크게 되었다가 점차적으로 감소하는데 비해 실험에서의 하중은 완만하게 증가하는 것을 보여 준다. Fig. 8에는 이것을 보이기 위하여 실험치와 수치해석치의 행정거리를 다르게 도시하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 SMC압축성형공정을 모사 해석할 수 있는 유한요소 해석프로그램을 개발하여 하부몰드의 모양이 평판인 경우와 리브가 있는 경우에 적용하여 보았다. 수치해석에서는 상부몰드의 하강속도와 장입재의 초기두께 등을 변화시켜 가며 유동양상 및 열전달에 의한 온도분포 등을 계산하였다. 리브가 있는 경우 요소재분할 과정을 수행하여 충전이 거의 이루어질 때까지 성형전체를 해석하였다. 평판압축성형과 리브가 있는 평판압축성형에서의 상부몰드의 행정에 따른 성형하중을 계산하여 실험치와 비교하였다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 특정연구개발사업으로 수행된 내용의 일부이며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Marker, L. and Ford, B., 1977, "Rheology and Molding Characteristics of Glass Reinforced Sheet Molding Compounds," SPI Conference Proceeding, sec. 16-E, pp. 1.
- (2) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1985, "Kinematics of Flow in SMC," Polymer Composites, Vol. 6, pp. 105.
- (3) Smith, K. L. and Suh, N. P., 1979, "An Approach Towards the Reduction of Sink Marks in Sheet Molding Compound," Polymer Engineering and Science, Vol. 19, No. 12, pp. 829.
- (4) Tung, R. W., 1982, "Effect of Processing Variable on the Mechanical and Thermal Properties of Sheet Molding Compound," ASTMSTP 772, pp. 51.
- (5) Lee, L. J., Marker, L. F. and Griffith, R. M., 1981, "The Rheology and Mold Flow of Polyester Sheet Molding," Polymer Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 209.
- (6) Fan, J. D., 1988, "Process Analysis of Sheet Molding Compounds in Molds with or without Substructures," Report ERC/NSM-88-28, The Ohio State University.
- (7) Lee, S. J., Denn, M. N., Crochet, M. J. and Metzner, A. B., 1982, "Compressive Flow Between Parallel Disks : 1. Newtonian Fluid with a Transverse Viscosity Gradient," J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 10, pp. 3.
- (8) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1986, "A Model for the Flow of a Chopped Fiber Reinforced Polymer Compound in Compression Molding," Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol. 53, pp. 361.
- (9) Silva-Nieto, R. J., Fisher, B. C. and Birley, A. W., 1980, "Prediction of Mold Flow for Unsaturated Polyester Resin Sheet Molding Compounds," Polymer Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 14.
- (10) Lee, C. C., Folgar, F. and Turker, C. L., 1984, "Simulation of Compression Molding for Fiber Reinforced Thermosetting Polymers," Trans. ASME, J.

- Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 114.
- (11) Lee, C. C. and Tucker III, C. L., 1987, "Flow and Heat Transfer in Compression Mold Filling," J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 24, pp. 245.
- (12) Castro, J. M. and Lee, C. C., 1987, "Thermal and Cure Analysis in Sheet Molding Compound Compression Molds," Polymer Engineering and Science, Vol. 27, No. 3, pp. 218.
- (13) Lee, L. J., 1981, "Curing of Compression Molded Sheet Molding Compound," Polymer Engineering and Science, Vol. 21, No. 8, pp. 483.
- (14) Kim, N. S., 1992, "An Analysis of Molding and Curing of SMC by the Finite Element Method," 소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 177~199.
- (15) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method," Oxford University Press, pp. 83~88.
- (16) Huh, H., Han, S. S., Lee, J. S. and Hong, S. S., 1995, "Experimental Verification of Superplastic Sheet-Metal Forming Analysis by the Finite-Element Method," J. of Material Processing Technology, Vol. 49, pp. 355~369.
- (17) Kikuchi, N., 1986, "Finite Element Methods in Mechanics," Cambridge Univ. Press, pp. 114~122.
- (18) 정진호, 김기택, 임용택, 1994, "SMC Compression Molding에서의 열 및 유동에 관한 연구(2)," 기계학회춘계학술대회 논문집, pp. 404.