

## 〈論 文〉

## SMC 압축성형의 소재유동과 겹침선 형성에 관한 유한요소해석

한영원\* · 임용택\*\*

(1995년 1월 27일 접수)

Finite Element Simulation of Material Flow and Weld Line Formation  
in SMC Compression Molding

Young Won Hahn and Yong Taek Im

**Key Words :** Finite Element Method(유한요소해석), Self-Contact Algorithm(접촉알고리즘),  
Weld Line(겹침선), Plug Flow(평면유동), Preferential Flow(선택형 유동)

## Abstract

SMC (Sheet Molding Compound) is made of unsaturated polyester resin and other additives reinforced with randomly distributed chopped fiberglass strands. Because of its higher stiffness per unit mass, SMC was used as a substitute for steel for automotive steel outer panels. Thus, understanding of flow characteristics during fabrication of SMC is of importance since the formation of weld line depends on material flow. In the present study, SMC compression molding simulations in the flat and T-shape molds were accomplished. During simulations, the preferential flow occurred at the low mold closing speed while plug flow was observed for the higher mold closing speed. When the preferential flow was observed, the weld line was seen at the final stage. For simulations, rigid-viscoplastic finite element method was applied. Self-contact algorithm was also applied in order to predict the formation of the weld line. Simulation results were compared to the experimental results available in the literature.

## 1. 서 론

복합재료의 사용은 최근 군수용으로부터 자동차, 스포츠용품에 이르기까지 점차 늘어나고 있다. 유리섬유강화 복합재료의 하나인 SMC는 수지모재에 저수축제, 충전제 등을 혼합한 페이스트상의 혼합물에 유리섬유를 함침시켜 필름에 봉한 후, 일정 온도, 일정 시간동안 화학반응에 의해 중점시킨 점착성이 없는 판상상태로 가공한 열경화성 복합재료이다. SMC 압축성형은 대량 생산을 가능케 하여

생산성이 우수하며 비강성과 비강도가 높아 구조재 생산에 응용이 늘어나고 있는 추세이다.

SMC 압축성형공정에 관한 연구는 1970년대 후반부터 있어 왔다. Marker 등<sup>(1)</sup>은 칼라로 적층된 장입재를 사용하여 SMC가 변형될 때의 유동속도 분포가 어떻게 일어나는지 실험하였는데, 여기에서 초기 장입재의 표면층은 운할제로 작용하고, 안쪽 층은 평면방향으로 변형한다고 해석하였다. Lee 등<sup>(2,3)</sup>은 몰드의 마찰조건을 다르게 하여 전단변형과 길이변형으로 SMC 유동을 모델링하였다. Barone 등<sup>(4,5)</sup>은 SMC 압축유동을 몰드 표면에서는 미끄러짐을 갖고 두께방향으로는 일정하게 변화하는 2차원 유동으로 가정하여 연구를 수행하였다. 또한 Lee 등<sup>(6)</sup>은 압축성형공정을 유동과 경화과정

\*기아자동차(주) 중앙연구소

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

의 조합으로 가정한 수치적 해석을 하여 해석치를 실험값과 비교하였다. Kim 등<sup>(7)</sup>은 장입재를 이방성 물질로 간주하여 보강재를 가진 금형내의 유동을 해석하였다. 최근 국내에서는 김낙수<sup>(8)</sup>가 변형과 열전달 그리고 발열반응을 포함하는 수치적 해석을 통하여, 보강재가 있는 단면이 T형상인 경우에 있어서 성형과정을 해석하였다. 그리고 김덕기와 최형연,<sup>(9)</sup> 조재호와 김낙수 등<sup>(10)</sup>이 리브깊이의 변화에 따른 열전달과 유동에 관한 연구가 있었다. 그러나 아직도 소재의 정확한 유동응력식을 구하기 어려운 점과 공정조건과 소재의 유동특성으로 인한 겹침선의 형성에 대한 정확한 이해는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 평판과 T형상 SMC 압축성형공정에서 공정조건과 소재의 유동특성으로 인하여 최종형상의 자유경계면에서 겹침선이 발생하는 현상을 수치적으로 해석하였다. 해석에는 강점소성 유한요소법을 사용하였고 자유경계면에서 접촉을 처리할 수 있는 알고리즘이 포함된 프로그램을 사용하였다. 또한 SMC 압축성형공정을 다이의 속도를 변화시켜 해석을 수행하여 이의 자유경계면의 유동에 미치는 영향을 검토하고 실험결과와 비교하였다.

## 2. 유한요소 수식화

본 연구에서는 강점소성 유한요소법을 사용하였다. 해석은 변형해석과 열전달해석으로 나누어져 있다. 그리고 자유경계면 접촉처리를 위하여 개발된 접촉알고리즘을 사용하였다. 접촉알고리즘은 접촉탐색과 접촉구속 부분으로 나누어져 있다. 접촉탐색은 단면 알고리즘을 사용하였고, 접촉구속은 벌칙방법을 사용하였다.

### 2.1 변형해석

강소성 유한요소 수식화는 이미 많은 문헌<sup>(9,10)</sup>에 나타나 있으므로 여기에서는 간략하게 소개하였다.

평형방정식과 경계조건을 약형(weak form)에 비압축조건을 벌칙상수인  $k$ 를 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V k \epsilon_{kk} \delta \epsilon_{mm} dV = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i \quad \text{on } S_U \\ \sigma_{ij} n_j &= \bar{t}_i \quad \text{on } S_F \end{aligned} \right\} S_U + S_F = S_{Total} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{ij}$ 는 응력,  $\epsilon_{ij}$ 는 변형률속도,  $\bar{t}_i$ 는 마찰력을 포함한 경계하중,  $\epsilon_{kk}$ 는 체적 변형률속도,  $v_i$ 는 절점속도,  $n_j$ 는 수직방향벡터, 그리고  $V$ 는 해석에 고려되는 소재의 체적이다. 그리고 위의 식을 유한요소 이산화과정(discretization)을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형방정식이 되므로, 이를 직접반복법과 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)반복법을 사용하여 해를 구하였다.

한편, 금형과 장입재 사이에 존재하는 마찰력,  $F$ 는 전단마찰계수(shear friction factor)  $m_f$  ( $0 < m_f < 1$ )를 사용하여 다음과 같이 수식화하였다.<sup>(9,10)</sup>

$$F = -m_f k_f \left( \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{|v_r|}{a} \right) \right) \frac{v_r}{|v_r|} \quad (3)$$

여기서,  $k_f$ 는 장입재의 전단항복응력,  $v_r$ 는 소재와 금형사이의 상대속도,  $a$ 는 충분히 작은 상수 ( $10^{-3}$  또는  $10^{-4}$ )이다.

### 2.2 열전달해석

열전달해석의 지배방정식은 다음과 같다.

$$(k_i T_{,i})_{,i} - \rho C_p \dot{T} + \dot{r} = 0 \quad (4)$$

$$T = T^* \quad \text{on } S_T$$

$$q_n = q_n^* = k_n \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)^* \quad \text{on } S_q \quad (5)$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $\dot{T}$ 는 온도변화율,  $k_i$ 는  $i$ 방향으로의 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $\dot{r}$ 는 단위체적당 열발생률, 그리고  $q_n$ 은 경계면에서의 열유속이다. 식 (4)의 에너지방정식에 경계조건인 식 (5)를 적용하고, 유한요소 이산화시켜 시간에 대해 적분을 하여 온도분포를 시간의 함수로 얻었다.

### 2.3 접촉알고리즘

임의의 변형체가 다른 물체의 표면에 접촉이 이루어지는 순간에는 두 물체 사이의 수직거리는 항상 0보다 크거나 같아야 하고 이 때 접촉에 의해 발생하는 수직힘은 압축력이어야 한다. 또한 수직 압축력과 수직거리 사이의 벡터 내적값은 0이어야 한다. 따라서 본 해석에 사용된 접촉탐색 알고리즘은 쉽게 프로그램화 할 수 있고 신뢰성이 높은 단면 알고리즘을 사용하여 자유경계면 상에 있는 각

절점으로부터 요소세그먼트 사이의 수직거리를 계산하고 이 거리가 주어진 상수값 0.001보다 작으면 그 부분은 접촉이 이루어졌다고 가정하였다. 본 단면 알고리즘에 따르면 자유경계면 상의 절점(접촉이 일어날 수 있는 절점)들을 해석 전에 주절점과 종속절점으로 구분하지 않고 자유경계면 상의 모든 절점들을 종속절점과 주절점으로 인식될 수 있다고 가정하였다. 즉, 소재의 경계면에 있는 임의의 한 절점을 종속절점으로 가정하면, 경계면의 나머지 절점들을 주절점으로 하여 접촉탐색을 수행하게 된다. 하나의 종속절점에 대하여 접촉탐색이 완료되면 다음 종속절점에 대하여 같은 방법으로 접촉탐색을 모든 자유경계면의 절점에 대하여 수행하였다.

두 물체가 접촉을 이루었을 때 접촉면에 작용하는 수직 접촉력,  $F_n$ 은 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$F_n = \alpha v_{rel} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha$ 는 벌칙상수이고  $v_{rel}$ 은 접촉이 이루어지는 절점에서의 두 접촉면의 상대속도이다. 이 수직 접촉힘을 이용해 접촉이 일어나는 소재 경계에서의 불침투조건의 약형을 만들면 다음과 같은 식이 된다.

$$\int_{\Gamma} F_n \delta v_i d\Gamma = \int_{\Gamma} \alpha v_{rel} \delta v_i d\Gamma \quad (7)$$

이 식에서  $v_i$ 는 절점에서의 속도벡터이고  $\Gamma$ 는 접촉이 이루어지고 있는 경계를 나타낸다. 이 식은 두 물체가 접촉을 이룰 때 접촉하는 부분의 두 물체 사이의 상대속도를 벌칙상수를 이용하여 0으로 구속함으로써 절점간의 침투를 방지하는 것이다. 이 적분값을 계산하기 위해서는  $v_{rel}$ 을 계산해야 하는데 이 값을 정확하게 계산하는 것이 매우 어려우므로 본 연구에서는 접촉이 이루어진 부분은 접촉을 이루는 절점들의 산술평균속도와 같은 속도로 움직인다고 가정하여 계산에 사용하였다. 따라서 접촉점에서의 상대속도,  $v_{rel}$ 은 접촉이 이루어지는 점의 속도에서 접촉을 이루는 절점들의 산술평균을 뺀값으로 계산하였다. 본 알고리즘의 검증을 위해 기공폐쇄 해석을 수행하여 ABAQUS로부터 얻은 결과와 비교하였는데 비교적 양호한 결과를 얻었다. <sup>(11)</sup>

### 3. SMC 압축성형공정 해석

#### 3.1 평판 SMC 압축성형공정 해석

일반적으로 실린더 모양이나 직사각형 모양의 금속 소재를 다이에 놓고 압축공정을 수행하면, 벌징(bulging)이 일어난다. 하지만 플라스틱재료인 SMC 소재를 압축하면, 온도와 유지시간(dwelling time)에 따라 벌징이 일어나기도 하고, 소재의 경계가 서로 만나는 접침(folding)현상이 일어나기도 한다. 본 연구에서는 평판 형상의 다이에서 SMC의 유동을 각 조건에 따라 해석하였다.

다이와 소재의 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 실험이 평면변형으로 수행되었기에 해석결과를 비교하기 위하여 변형은 평면변형으로 가정하였고, 대칭성을 고려하여 전체 형상의 1/2만 해석하였다. 상부 다이의 속도는 15 mm/min, 250 mm/min으로 하였고, 하부 다이는 고정하였다. 상·하부 다이의 온도는 423 K, 소재의 온도는 300 K로 하였다. 압축성형 중 소재와 다이 사이의 마찰계수는 Lee 등<sup>(6)</sup>의 링시험 결과에 따라 0.1로 가정하였다. 또한 상부 다이가 소재와 접촉하기까지의 유지시간(dwelling time)을 10초로 하여 해석을 수행하였고, 계산에 사용된 SMC의 물성치는 참고문헌<sup>(12)</sup>에 주어져 있는 압축실험 결과로부터 얻은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= C(T) \dot{\epsilon}^{m(T)} \quad [\text{MPa}] \\ C(T) &= 0.009086 * \exp(2100.3/T) \\ m(T) &= 1.41817 - 1.51745E-9 * \\ &\quad \exp(5944.44/T) \end{aligned} \quad (8)$$

Figs. 2, 3, 그리고 4에 각각의 다이속도에 따른 소재의 유동양상이 나타나 있다. Fig. 2를 보면 유동 선단에서 선택형 유동(preferential flow)이 생기고 이러한 유동특성으로 인하여 접침선이 생김을

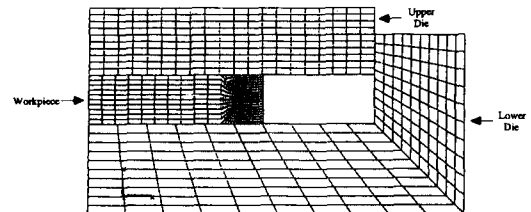


Fig. 1 Initial mesh configuration of flat SMC compression molding simulation

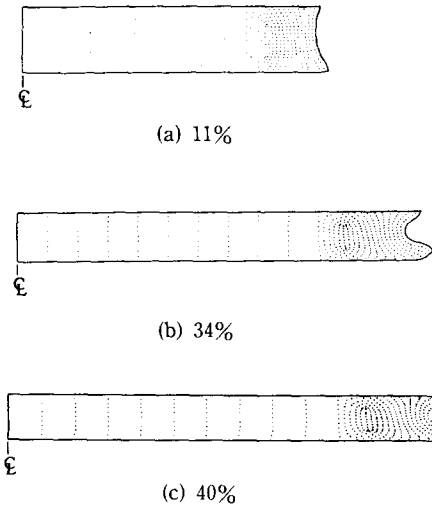


Fig. 2 The deformed shapes of the SMC charge at several stages of reductions when the closing die speed was 15 mm/min

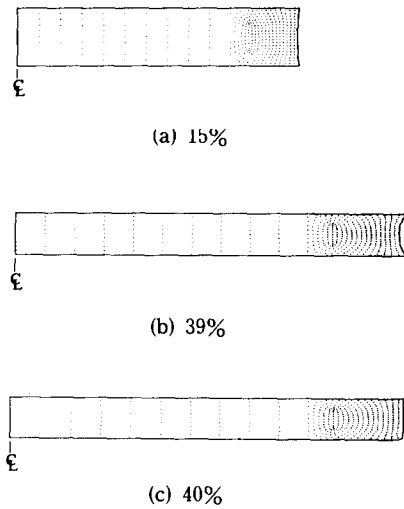


Fig. 4 The deformed shapes of the SMC charge at several stages of reductions when the closing die speed was 250 mm/min

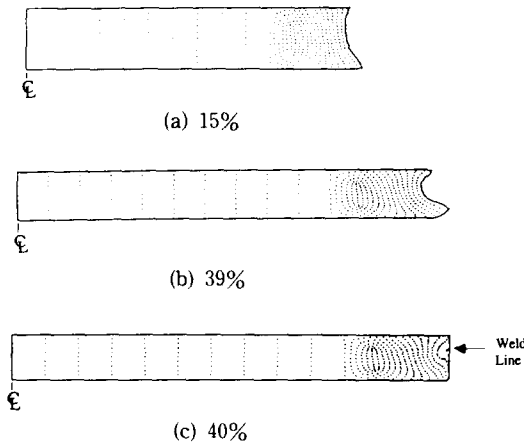


Fig. 3 The deformed shapes of the SMC charge at several stages of reductions when the closing die speed was 50 mm/min

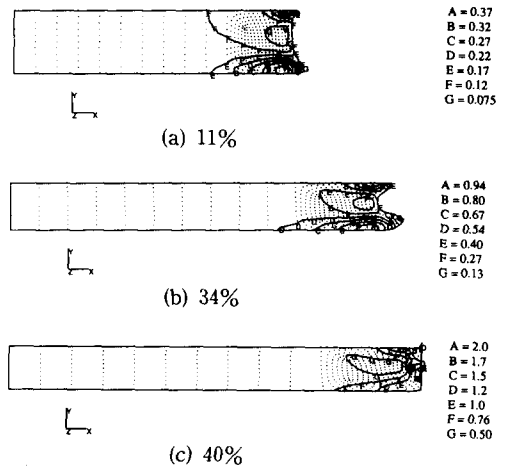


Fig. 5 Effective strain distributions of SMC compression molding simulation at several stages of reductions when the closing die speed was 15 mm/min

알 수 있다. 선택형 유동은 다이에서 소재로의 열 전달에 의하여 다이에 가까운 소재의 점도가 다이에서 먼 소재의 점도보다 상대적으로 낮아져서 발생하는 유동이다. 이러한 유동에 따른 겹침선이 생기는 위치에 관해 본 연구에서 적용된 접촉알고리즘이 실제 현상을 잘 예측해 주고 있는 것을 Fig. 2로부터 알 수 있었다. 그러나 다이의 속도가 상당히 빠른 250 mm/min에서는 선택형 유동이 일어나지 않았고 평면유동이 일어나 결과적으로 겹침선도

발생하지 않았다. 이것은 열전달에 의한 소재의 점도 변화율이 유동특성에 미치는 영향을 높은 변형률속도가 상쇄시킨데 따른 것이다. 또한 Fig. 2와 3을 비교해 볼 때 다이속도가 커짐에 따라 겹침선이 생기는 위치가 달라지고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 다이속도가 클수록 겹침선의 위치가 상부다이쪽으로 가까워짐을 알 수 있었다.

Fig. 5에 다이속도가 15 mm/min일 때 소재의 유

동에 따른 유효 변형률분포를 나타내었다. 높은 변형률이 유동의 선단에서 나타남을 알 수 있었고, 선택형 유동이 생기면서 다이 부근의 소재의 유동 선단에서 변형률이 커지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6에 다이속도가 15 mm/min일 때 소재의 유동에 따른 온도변화가 나타나 있다. 금형으로부터의 열전달로 인해 다이에서 가까운 소재의 온도가 소재의 중심에서의 온도보다 상당히 높음을 알 수 있었다.

Fig. 7에 다이속도가 15 mm/min일 때의 하중-변위 선도가 나타나 있다. 해석에서 얻은 결과를 실험<sup>(13)</sup>을 통해 얻은 결과와 비교해 볼 때 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이 그림의 하중변위 선도를 보면 압축 초기에 실제 하중치보다 계산치가 큰 것을 알 수 있는데 이는 유동특성식이 정확한 유동응력을 표현해 주지 못하고 있기 때문이다. 또한 실제 실험에서는 초기에 장입재 내부에 기공이 존재할 수 있기 때문에 하중치가 적을 수도 있다. 해석결과에서 하중이 점차 감소하다가 갑자기 상승함을 보이는데, 이것은 열전달에 의한 장입재의 온도상승으로 점도가 떨어져서 유동이 원활해져 하중이 감소하다가 소재가 유동을 하면서 하부 물드의 벽과 접촉을 하면서 하중이 갑자기 증가하

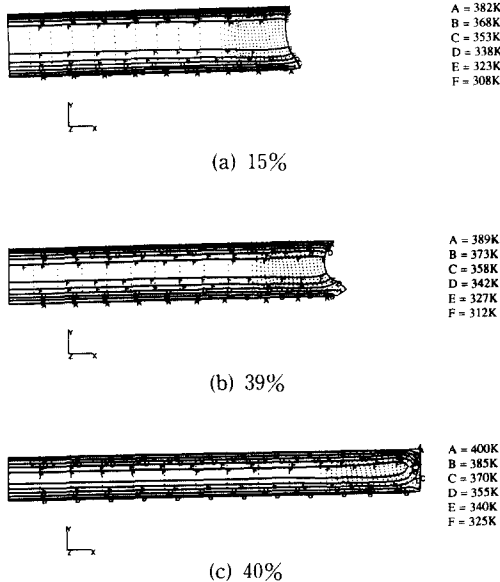


Fig. 6 Temperature distributions of SMC compression molding simulation at several stages of reductions when the closing die speed was 250 mm/min

기 때문이다. 한편, 다이속도가 250 mm/min에서의 하중이 다이속도가 15 mm/min일 때의 하중과는 차이가 많이 나고 있음을 알 수 있었다. 다이의 닫힘속도가 커질수록 하중의 크기도 커짐을 알 수 있는데 이는 다이의 닫힘속도가 빨라질수록 소재로의 열전달이 충분히 일어날 수 있는 시간이 줄어들어 소재의 온도가 낮아 유동응력이 커지기 때문이다.

Fig. 8에는 실험<sup>(13)</sup>에서 얻은 제품과 다이속도가 15 mm/min일 때의 해석시 얻은 결과를 나타내 주고 있다. 이 그림을 비교해 보면 겹침선(weld line)의 위치가 근사함을 보여주고 있다. 따라서 본 해석이 믿을만하며 이러한 겹침선은 제품의 결함의 요인이 되므로 가능한 제품에서 없애는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

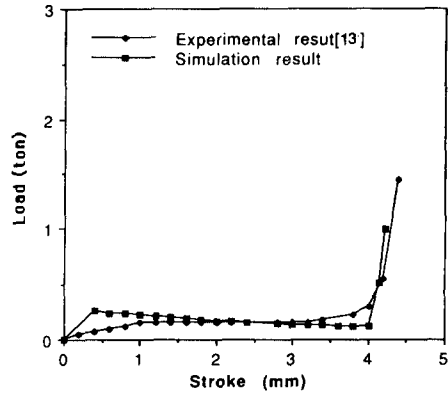


Fig. 7 Comparison of load-stroke curves of flat plate compression molding between simulation and experiment<sup>(13)</sup> when the closing die speed was 15 mm/min

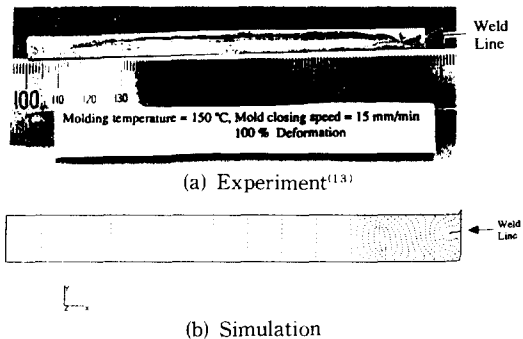


Fig. 8 Comparison of the weld line location between

### 3.2 T형상 SMC 압축성형공정 해석

Fig. 9에 초기의 다이와 소재의 요소상태가 나타나 있다. 대칭성을 고려하여 1/2 형상에 대해 해석을 수행하였고, 변형상태는 평면변형으로 가정하였다. 유지시간은 10초로 하고 상부 다이의 속도를 15 mm/min, 250 mm/min으로 하여 해석을 수행하였다. 상·하부 다이의 온도는 423 K, 소재의 온도는 300 K로 하였다. 압축성형중 소재와 다이 사

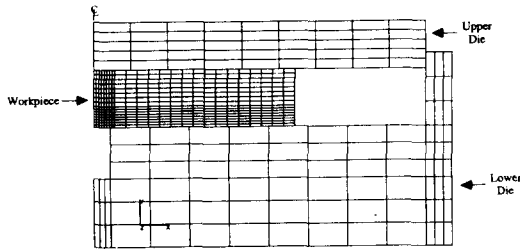


Fig. 9 Initial mesh configuration of T-shape SMC compression molding simulation

이의 마찰계수는 0.1로 하였다. 계산에 사용된 SMC의 물성치는 식 (8)과 같다.

Figs. 10, 11, 그리고 Fig. 12에는 각각 다이 속도에 따른 소재의 변형양상을 나타내주고 있다. 평판 SMC 압축성형공정에서 나타난 선택형 유동 양상이 다이속도가 적을 때 나타나고 있었다. 이러한 선택형 유동으로 인하여 다이속도가 적을 때 최종 제품에서 겹침선이 발생하였다. 또한 다이속도가 빨라질수록 겹침선의 위치가 높아지고 있었다. 그러나 다이속도가 상당히 빠른 250 mm/min의 경우에는 평판 압축성형공정에서와 같이 평면유동에 가까운 소재의 유동이 발생하여 겹침선이 발생하지 않았다. 이것은 평판 압축성형에서와 마찬가지로 다이속도가 낮을 때 다이에서 소재로의 열전달에 의해 변화된 점도가 다이에서 가까운 소재에서보다 다이에서 멀리 떨어진 소재보다 상대적으로 낮아 선택형 유동이 생기는 것에 비해, 다이속도가 상당히 빠르면 열전달에 의한 점도의 변화가 다이 속도에 의해 상쇄되고 있는 것으로 생각되어진다. 이것

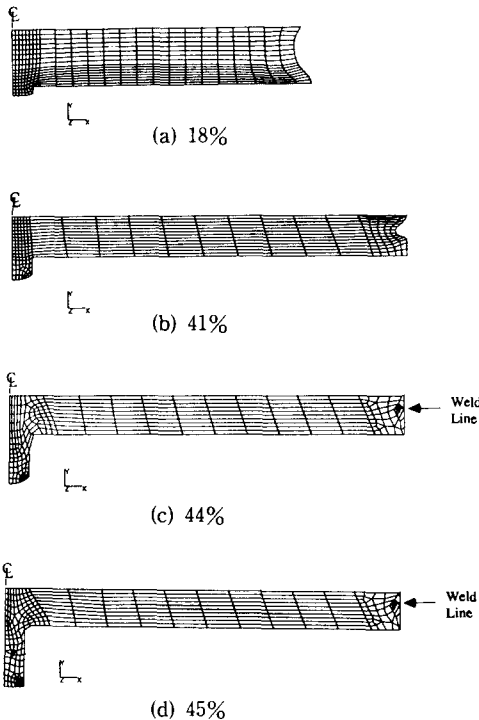


Fig. 10 Simulation results of T-shape SMC compression molding simulations at several stages of reductions when the closing die speed was 15 mm/min

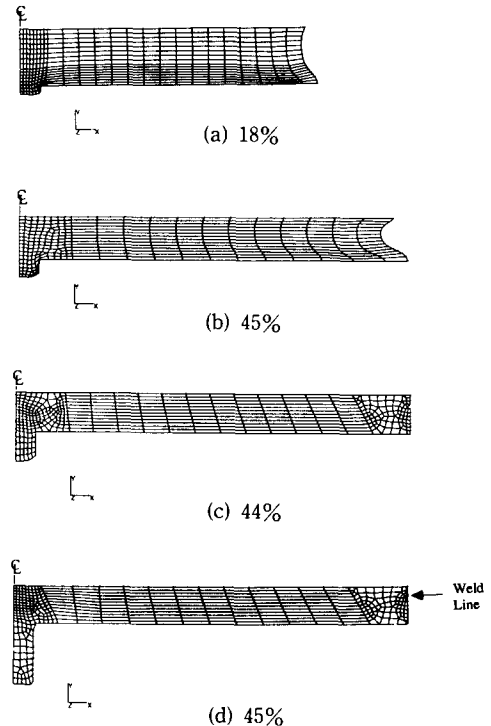


Fig. 11 Simulation results of T-shape SMC compression molding simulations at several stages of reductions when the closing die speed was 30 mm/min

은 Fig. 13에 나타난 하중변위선도에 잘 나타나 있다.

이 그림을 보면 다이속도가 15 mm/min일 때 하중이 약간씩 감소하는 경향을 보이는데 이것은 앞

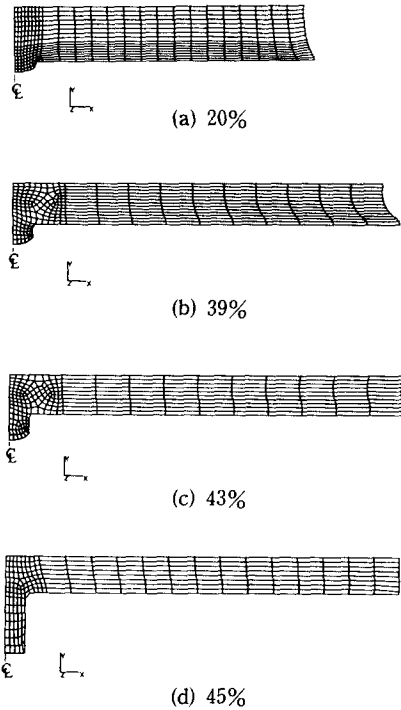


Fig. 12 Simulation results of T-shape SMC compression molding simulations at several stages of reductions when the closing die speed was 250 mm/min

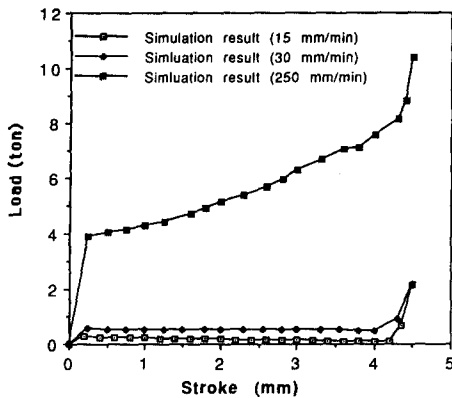


Fig. 13 Load-stroke curves obtained from the T-shape SMC compression molding simulations for various closing die speeds

에서 언급하였듯이 열전달에 의한 소재의 점도 감소에 따른 영향이다. 평판의 경우와 마찬가지로 소재가 다이의 벽과 만났을 때 하중이 갑자기 증가하는 현상을 보이고 있다. 하지만 다이속도가 250 mm/min일 때는 계속 하중이 증가하고 있어 열전달에 의한 점도의 감소보다는 다이속도가 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 실제 공정에서는 다이속도를 빠르게 하여 제품의 결함을 없애는 것이 바람직하다.

또한 T형상의 SMC 압축성형공정에서는 소재의 독특한 유동경향이 있었다. 이는 하중-변위선도에서 주어지는 것과 같이 먼저 횡방향으로 유동이 일어나서 다이를 채운 후에 리브방향으로의 유동이 일어나는 것이다. 이러한 변형양상에 따르면 소재의 가장자리에서 일단 겹침선이 생기면 이러한 겹침선은 계속 잔존하여 제품의 결함을 유발하는 요인이 될 수 있음을 알 수 있었다.

본 공정 해석에는 리브의 존재로 인해 해석 도중 격자의 찌그러짐이 발생하여 격자 재구성을 하였다. 격자 재구성은 소재의 유동을 고려하여 리브 부분과 겹침선이 발생하는 부분을 중심으로 수행하

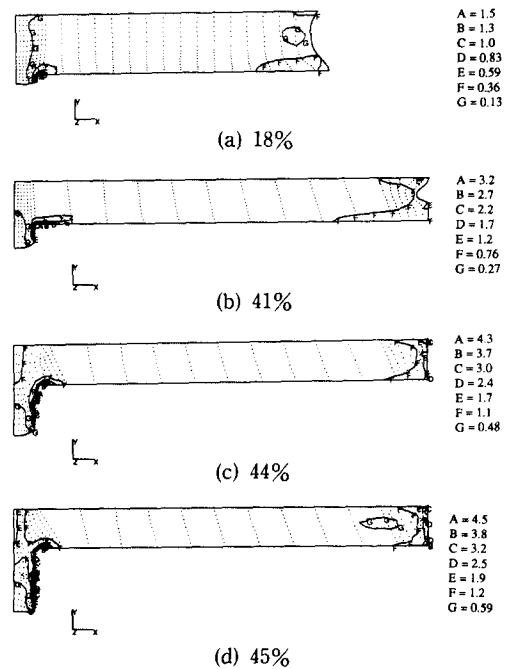


Fig. 14 Effective strain distributions of T-shape SMC compression molding simulations at several stages of reductions when the closing die speed was 15 mm/min

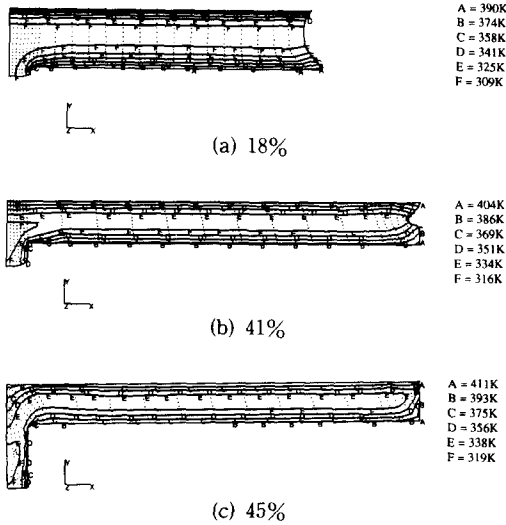


Fig. 15 Temperature distributions of T-shape SMC compression molding simulation at several stages of reductions when the closing die speed was 15 mm/min

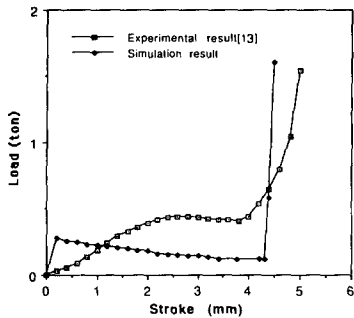


Fig. 16 Comparison of load-stroke curves of T-shape SMC compression molding between experiment<sup>(13)</sup> and simulation when the closing die speed was 15 mm/min

였다.

Fig. 14에는 다이속도 15 mm/min에서의 변형 양상에 따른 유효 변형률분포가 나타나 있는데 리브 부근에서 큰 변형이 생김을 알 수 있었다.

Fig. 15에는 다이속도 15 mm/min에서의 변형 양상에 따른 온도 분포가 나타나 있다. 평판 압축성형과 마찬가지로 다이에서 가까운 소재의 온도가 높아서 상대적으로 점도가 낮아지고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 16에는 다이의 속도가 15 mm/min일 때의 하중 변위선도를 실험치와 비교하였다. 해석의 결

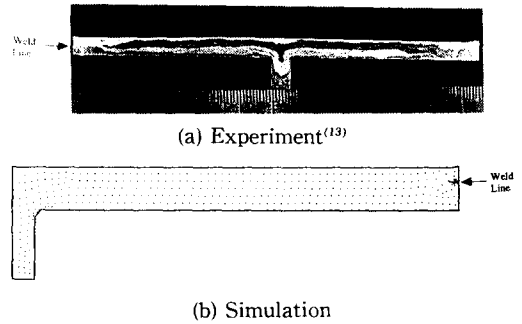


Fig. 17 Comparison of the weld line location between

과와 실험치를 비교해 볼때 Fig. 7에 나타난 평판의 경우에 비하여 그 오차가 큼을 알 수 있었는데 이는 소재의 물성치가 소재의 특성을 충분히 반영하지 못하는 것으로 보다 정확한 물성치를 측정하기 위한 연구가 매우 중요함을 알 수 있었다.

Fig. 17에는 다이속도가 15 mm/min일 때 실험<sup>(13)</sup>에서 얻은 제품과 해석에서 얻은 결과를 비교하여 나타내었다. 겹침선의 위치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 강소성 유한요소법과 자유경계면에서의 접촉을 처리할 수 있는 알고리즘을 사용하여 평판형상과 T형상 SMC 압축성형공정을 해석하였다. SMC의 유동응력식은 압축시험으로부터 얻은 식을 사용하였고, 접촉탐색은 단면 알고리즘, 접촉구속은 벌칙방법을 사용하였다. 해석중 요소의 찌그러짐이 발생하여 재구성을 하였고, 해석결과를 실험결과와 비교하여 얻은 사실은 다음과 같다.

(1) 해석결과와 실험결과를 비교하였을 때, 하중 변위선도에서 해석결과와 실험결과가 오차가 있음을 알 수 있었다. 이것으로 SMC의 유동응력식에 대한 보완이 필요함을 알 수 있었다.

(2) 다이속도에 따라 겹침선의 위치가 바뀌었고, 속도가 상당히 빠른 경우에는 겹침선이 나타나지 않았다.

(3) T형상의 압축성형에서는 크게 유동이 두 가지의 상태로 나뉜다. 먼저 횡방향으로의 유동이 일어나고, 다음에 리브방향으로의 유동이 발생한다.

(4) 다이의 속도가 적을 때, 소재의 선택적 유동으로 최종 형상에서 겹침선이 발생하였고, 실험과 해석결과를 비교하였을 때 만족한 결과를 얻을 수



있었다.

## 후 기

본 연구는 상공자원부의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 연구에 많은 조언을 주신 김낙수교수께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Marker, L. F. and Ford, B., 1977, "Rheology and Molding Characteristics of Glass Reinforced Sheet Molding Compounds," *Modern Plastics*, Vol. 54, pp. 64.
- (2) Lee, L. J., Marker, L. F. and Griffith, R. M., 1981, "The Rheology and Mold Flow of Polyester Sheet Molding Compound," *Polymer Composites*, Vol. 2, pp. 209.
- (3) Lee, L. J., 1981, "Curing of Compression Molded Sheet Molding Compound," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 21, No. 8, pp. 483.
- (4) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1982, "The Effect of Deformation and Thermoset Cure on the Heat Conduction in a Chopped-Fiber Reinforced Polymer during Compression Molding," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 1021.
- (5) 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.
- (6) Lee, L. J., Fan, J. D., Kim, J. and Im, Y. T., 1991, "Flow Analysis of Sheet Molding Compound in Compression Molding," *Int. Poly. Processing*, Vol. 6, No. 1, pp. 61.
- (7) Kim, J., Shiau, Y. C., Lee, L. J. and Im, Y. T., 1992, "Compression Molding of Chopped Fiber Reinforced Polymeric Composites in Plate-Rib Type Geometry," *Polymer Composites*, Vol. 13, No. 2, pp. 97.
- (8) Kim, N. S., 1992, "An Analysis of Molding and Curing of SMC by the Finite Element Method," 한국소성학회 춘계학술대회 논문집, pp. 177.
- (9) 김덕기, 최형연, 1993, "SMC압축성형에 대한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (I), pp. 251.
- (10) 조재호, 김낙수, 1993, "SMC압축성형에 관한 해석적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (I), pp. 256.
- (11) 한영원, 임용택, 1995, "성형공정의 자유경계면 접촉에 관한 유한요소해석," 한국소성가공학회지, 제4권, 제1호, pp. 48.
- (12) 정진호, 한영원, 임용택, 1995, "SMC의 물성치 평가에 관한 연구," 한국소성가공학회지, 제4권, 제3호, pp. 245.
- (13) 김기택, 정진호, 임용택, 1994, "SMC압축성형의 열 및 유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2386.