

〈技術論文〉

## SMC 압축성형공정의 모델링 및 유한요소법을 이용한 열유동 해석

이응식\* · 윤성기\*\*

(1994년 4월 11일 접수)

### Finite Element Analysis of the Flow in SMC Compression Molding and its Applications

Eung-Shik Lee and Sung-Kie Youn

**Key Words :** Newtonian Fluid(뉴턴유체), Specific Strength(비강도), Trivial Solution(무용해), Hydrodynamic Friction(마찰계수)

#### Abstract

A new flow model is developed for the analysis of compression molding of sheet molding compounds(SMC) and penalty finite element formulatiuon is presented to predict flow front progressions more accurately. In this model SMC is assumed nonisothermal fluid, which has different viscosities in extension and in shear. The flow is allowed to slip at the mold and is resisted by friction force which is proportional to the relative velocity at mold surface. For the verification of the model, the press force and flow patterns are compared with those of experiments and available results by other works in this field. It is also demonstrated, using the computational procedure described and the proposed model, that optimal initial charge shapes for the filling can be effectively computed.

#### 1. 서 론

SMC는 무작위 단섬유와 광물성 첨가제(filler)가 열경화성 수지에 합침되어 강화된 형태로 이 재료는 압축성형공정에 의하여 차체 부품과 같이 곡률이 작고 넓은 면적을 갖는 제품의 제조에 적합하며 복잡한 형상의 제품을 상대적으로 간단한 가공공정에 의하여 비교적 짧은 성형시간에 제조된다. 높은 섬유 함유물과 장섬유를 포함한 SMC 재료는 다른 경쟁 제품에 비하여 좋은 충격 저항을 가지고 있으며 적당한 강성과 강도 그리고 낮은 가격으로

인하여 승용차의 외측 패널, 후드 및 상용차의 적재함문 등 자동차의 외장재로서 최근에 많은 주목을 받고 있다.

SMC의 장점은 제품내에 리브, 보스, 구멍 등을 일체형으로 비교적 쉽게 실현할 수 있어 조립공정을 크게 줄일 수 있고 제품이 컴팩트하며 제품의 기계적 성질과 물리적 성질을 변화시키기 위하여 섬유의 함량과 종류를 변화시킬 수가 있고 열가소성 복합재료로 제조된 제품보다 온도와 환경에 대한 치수 안정성이 뛰어나다. 또한 SMC는 금속 구조재보다 낮은 비중을 가지며 금속재료와 비슷한 비강도(specific strength) 특성을 갖는다.

초기의 장입제가 전체 금형을 채우는 SMC 압축공정은 많은 유동을 포함하고 유동과 열전달, 경화

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

반응의 상호작용이 심하게 발생한다. 성형된 SMC의 기계적 성질은 SMC 각 구성요소, 즉 수지, 섬유, 충전제 등의 특성뿐 만 아니라 압축성형된 후의 섬유의 방향성과 경화정도에 따라 결정되므로 장입제의 모양, 금형내의 위치, 금형 온도, 금형 단합속도, 경화시간 등의 공정변수에 대한 최적화가 필요하다. 이는 수치적인 시뮬레이션을 통하여 실제 실험결과를 예측함으로써 원하는 구조적 성질을 가진 SMC 제품을 생산하는 금형의 설계 능력을 배양시키는 물론, 반복실험에 의한 경제적 손실을 최소화할 수 있다.

SMC 압축성형시 발생하는 여러 문제들을 해결하기 위하여 유동과 열전달에 대한 많은 수학적 모델이 제시되었으며 이를 통하여 공정변수들과 유동과의 상호관계를 밝히기 위한 연구가 행하여졌다. 초기의 유동해석은 사출성형에 사용되었던 등은 윤휘이론에 근거한 일반화된 Hele-Shaw(GHS) 모델을 이용하였다. Lee, Folgar와 Tucker<sup>(1)</sup>는 GHS 모델을 사용하여 사각 장입제에서의 유동 선단의 흐름을 해석하였고, Tucker<sup>(2)</sup>는 이 모델에 열전달과 온도에 따른 점성의 변화를 고려하여 유동을 해석하였다. 이 모델은 두께에 의한 영향을 고려하지 못함으로 얇은 장입제인 경우에는 비교적 잘 일치하나 두꺼운 경우는 실제 유동 양상과 많은 차이를 보인다.

Barone과 Caulk<sup>(3,4)</sup>은 실험적 고찰을 통하여 수지의 유동 형태를 고찰한 후 유체 마찰계수(hydrodynamic friction)를 도입하여 금형 표면과 수지와와의 미끄럼을 고려한 지배방정식으로 유동을 표현하였으며 Barone과 Osswald<sup>(5)</sup>는 이를 이용하여 경계요소법(boundary element method)으로 사각과 "L"자 형태를 갖는 장입제의 유동 양상 및 봉합선(knit line) 등에 관한 해석을 시도하였으나 SMC의 실제 점성치를 적용하지 못하고 무차원 변수값을 조절하여 실험결과에 가까운 유동 선단을 계산하였다.

이 논문에서는 SMC를 비압축성 유체이고 인장과 전단 점성이 다른 재료로 가정하여 이차원 평판의 충전과정을 해석하였다. 충전과정은 전체 공정에 비하여 짧은 시간이므로 경화에 의한 발열반응은 무시하고 금형에서의 열전달로 인한 온도의 영향만을 고려하였다. 금형면에서 장입제의 미끄러짐(slip)을 허용하고 속도에 비례한 마찰력을 적용하여 지배방정식을 유도하고 연속방정식을 제한 조건

으로 한 벌칙 유한요소법으로 수치화함으로써 압력을 소거하고 속도만을 미지수로 하여 유동 선단을 계산하였다.

## 2. 열유동 모델

### 2.1 유동모델

미시적으로 SMC 유동을 살펴보면, 수지에 함침된 섬유와 섬유 사이에 상대적 운동이 있고, 이로 인하여 이웃 섬유들간에 상호 저항력이 발생하여 인장 점성이 전단 점성에 비하여 훨씬 크다. 평판 사이에 놓인 길이  $L$ , 두께  $H$ 인 장입제의 인장과 전단 점성 사이에는 일차원 유동인 경우 다음과 같은 관계가 주어진다.<sup>(6)</sup>

$$\mu_e \approx \left[ \frac{1}{6} \left( \frac{L}{H} \right)^2 \frac{v_f}{1-v_f} \right] \mu \quad (1)$$

여기서,  $\mu_e$ 는 SMC의 인장 점성,  $\mu$ 는 수지 전단 점성,  $v_f$ 는 섬유 함유율을 나타낸다. 이 식은 SMC의 인장 점성이 수지의 전단 점성보다 수 백배 크게 예측하며 이는 실험치와 일치한다. 그러나 실제 SMC 압축성형공정은 2차원이고 섬유들이 무작위로 배열되어 있으므로 이 식을 유도한 가정과는 차이가 있다. Castro<sup>(7,8)</sup> 등은 압축속도와 프레스에 걸리는 힘의 관계 실험으로부터 온도에 대한 변화를 고려하여 SMC의 인장 점성을 아래와 같은 식으로 표현하였다.

$$\mu_e = 45.03 \exp(3282/T) \text{ (Pa-s)} \quad (2)$$

SMC의 전단 점성은 섬유들의 상호 인장력이 작게 작용함으로 수지의 전단 점성과 큰 차이를 보이지 않는다.<sup>(9)</sup> 수지의 전단 점성  $\mu$ 는 뉴턴유체인 가정하에서 온도의 지수함수로 가정하여 실험치와 최소 자승법에 의해 보정하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\mu_s = \mu_0 \exp(-bT) \quad (3)$$

여기서,  $\mu_0 = 4.57 \times 10^{17}$ ,  $b = 0.0949$ 이며 단위는 poise이다.

SMC를 비압축성 뉴턴유체(Newtonian fluid)이고 유동이 준 정상상태로 가속도 항을 무시하면 연속방정식과 평형방정식은 아래와 같이 간략화 될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\mu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_s \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_s \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (4a)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\mu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_s \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (4b)$$

SMC 압축속도가 평면내에서 균일하고 금형의 단협속도  $h$ 가 주어지면 충전제내의 압축속도  $w$ 는 연속방정식으로부터  $w = \frac{h}{h_0} z$ 임을 알 수 있다.<sup>(3)</sup> 상하부 금형과 SMC와의 경계에서 미끄럼이 발생하여 두께방향의 속도분포가 균일하다고 가정하면 위 식(4)의 마지막 항들은 무시할 수 있고 대신 금형과의 경계에서 속도에 비례한 마찰력을 가정하여 근사할 수 있다. 경계조건은 자유 유동 선단(free edge)에서 외력이 존재하지 않으며 금형과의 경계에서는 미끄럼을 허용하고 속도에 비례한 마찰력이 가해진다.

2.2 열전달 방정식

Lee and Tucker 등<sup>(9)</sup>의 연구에 의하면 평균 SMC 장입체의 유동이 일어나는 동안에 두께 방향, 즉 금형에 수직한 방향으로만 온도 구배가 존재한다. 불포화 폴리에스테르수지는 경화 억제제(inhibitor)이 영향으로 충진이 일어나는 짧은 시간 동안에는 경화반응이 일어나지 않는다고 가정할 수 있으므로 경화반응에 의한 열효과는 무시하고, SMC의 열확산도(thermal diffusivity)  $\alpha$ 는 약간의 비등방성 성질을 나타내나<sup>(6)</sup> 등방성으로 가정하면 열전달 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

초기 장입체의 온도 분포가  $T_0$ 로 균일하고 대칭적인 온도분포를 가지며 금형의 표면온도가  $T_w$ 로 일정하게 유지되면 위 식의 정해는 아래와 같이 주어진다.

$$T(z) = T_w + (T_0 - T_w) \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi - 1}{n} \sin \frac{n\pi z}{h} \exp \left( \frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{h_0(h_0 - \dot{h}t)} \right) \right\} \quad (6)$$

여기서,  $T_w$ ,  $T_0$ 는 각각 금형 표면온도, 장입체의 초기 온도를 나타내며  $\alpha$ 는 열확산도,  $h_0$ 는 장입체의 초기 두께,  $\dot{h}$ 는 압축속도를 나타낸다.

2.3 유한요소 수식화

금형내의 SMC 유동의 속도장을 얻기 위해서는 식(4)으로 표현된 지배방정식을 여러가지 수치해법, 즉, 경계요소법, 유한요소법 등에 의존하여 해를 구해야 한다. 성형된 SMC 제품의 기계적 물성치는 SMC 각 구성성분의 물성치뿐만 아니라 성형 후의 SMC 제품내의 섬유 방향성은 주로 속도장을 이용하여 계산됨으로<sup>(10,11)</sup> 속도장을 보다 더 정확히 계산하는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 연속방정식을 제한조건으로 하여 벌칙 유한요소법(penalty finite element method)으로 수식화하여 압력항을 소거하고 속도만을 미지수로 하여 장입체의 속도장을 계산한다.

벌칙함수를 이용하여 수식화하기 위해서는 식(4)에 대응하는 이차 형식의 범함수(functional),  $I_0$ 를 아래와 같이 정의할 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$I_0 = h \int_{\Omega} \left[ \mu_e \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \mu_s \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \mu_e \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \int_{\Gamma} (t_x u + t_y v) d\Gamma \quad (7)$$

경계조건은 유동선단이 전진하는  $\Gamma_1$ 과 고정된 경계

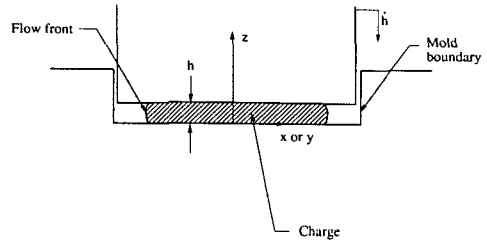


Fig. 1 Schematic diagram of compression molding

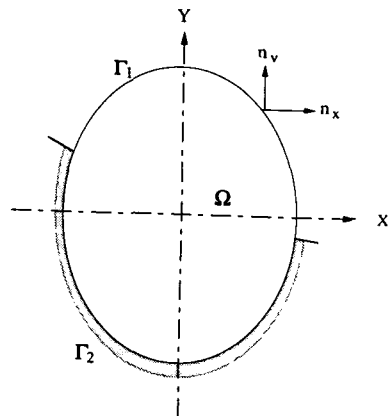


Fig. 2 Two dimensional charge model  $\Gamma_1 \Gamma_2 \Omega$

$\Gamma_2$ 에서 각각 아래와 같이 주어진다. (Fig. 2)

$$t_x = -ku, \quad t_y = -kv \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (8a)$$

$$u = \bar{u}, \quad v = \bar{v} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (8b)$$

압력을 소거하고 수식화하기 위해 연속방정식을 제한조건으로 한 벌칙 범함수  $I_p$  아래와 같이 쓸 수 있다.

$$I_p = I_0 + \frac{\lambda}{2} \int_a h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 d\Omega \quad (9)$$

위의 식에서  $\lambda$ 는 다른 항에 비하여 큰값을 갖는 주어진 상수이고, 계산상의 특성때문에  $\lambda = \mu \times 10^6$  같은 값이 제안되었다.<sup>(12)</sup>  $\lambda$ 값이 너무 크면 강성행렬이 너무 강해져 무용해(trivial solution)가 얻어지고 작으면 제한조건이 부정확해진다.

속도변수  $u, v$ 를 형상함수  $\phi_i$ 를 이용하여 아래와 같이 근사한 후,

$$u = \sum_{i=1}^n u_i \phi_i, \quad v = \sum_{i=1}^n v_i \phi_i \quad (10)$$

$u, v$ 를 식(9)에 대입하고  $I_p$ 의 일차 변분을 0으로 취하여 범함수  $I_p$ 를 최소화하면 속도만의 연립방정식이 얻어진다. 필요한 경우 압력  $p$ 는 계산된 속도장을 이용하여 식(11)로부터 구할 수 있다.

$$p = -\lambda e \left( \frac{\partial u^e}{\partial x} + \frac{\partial v^e}{\partial y} + \frac{h}{h} \right) \quad (11)$$

### 3. 수치해석 및 결과

SMC의 압축성형에 따른 유동을 계산하기 위해서는 재료의 변형 저항을 나타내는 점성과 금형과의 마찰을 나타내기 위한 유체 마찰계수가 필요하다. 일반적으로 유동이 진행됨에 따라 SMC 장입체는 열을 흡수함으로 온도가 상승하고 점성은 작아진다. 마찰계수  $k$ 는 금형면의 온도가 일정하게 유지됨으로 일정 상수로 가정할 수 있으나 금형의 온도와 밀접한 관계가 있고 실험치를 최소자승법에 의해 보간하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$k = 0.28 \exp(399.5/T) \quad (\text{Pa}\cdot\text{s}) \quad (12)$$

여기서,  $T$ 는 금형의 절대온도를 나타낸다.

식(4)로 표현된 SMC 장입체의 유동 방정식을 유한요소법으로 수식화하고 매 시간 간격으로 각 절점에서 속도성분  $u, v$ 를 계산하여 각 절점을  $u\Delta t, v\Delta t$ 만큼  $x, y$ 방향으로 각각 전진시킴으로써 유동 선단을 계산하였다. 유동 초기에는 오차를 고

려하여 적절한 시간 간격  $\Delta t$ 를 선택하고 장입체가 확장됨에 따라 절점이 금형 경계와 최초로 맞닿는 시간을 계산하여 그 시간 간격만큼 압축을 진행시켰다. 유동 선단끼리 맞닿는 경우에도 첫번째 요소 변이 만나는 시간을 계산하여 전진시키고 맞닿은 변은 접촉으로 처리하였다.

#### 3.1 유동모델 검증

Fig. 3은 일방향 유동을 하는 SMC의 압축성형시 프레스에 걸린 압축력의 변화를 해석결과와 실험치를 함께 나타내었다. 금형의 온도는 150°C이고 장입체의 초기 온도는 25°C이며 초기 두께는 6 mm이며 초기 예열시간(dwelling time)은 없는 것으로 가정하고 해석하였다. 압축공정이 진행되면 일정 정도까지는 금형으로부터의 열전달로 인하여 점성이 작아져 압축력이 약간 감소한다. 압축이 일정 수준 진행되면 SMC의 점도 감소효과보다는 장입체의 면적 증가로 인한 영향이 커져 압축력이 점차

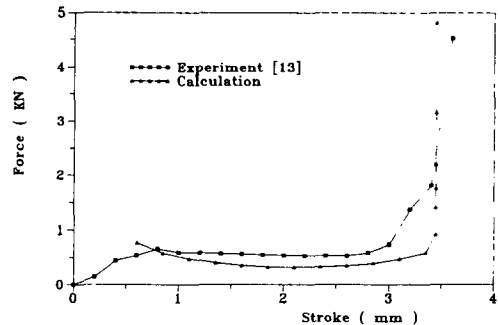


Fig. 3 Press force vs Stroke at  $v=0.25$  mm/sec

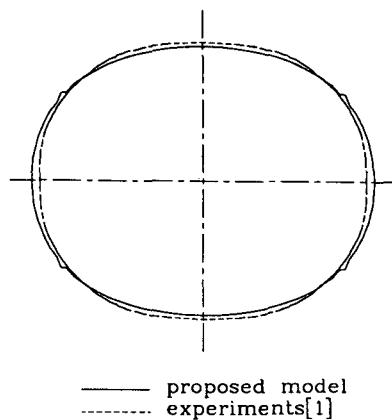


Fig. 4 Flow front progression of a thin rectangular charge ( $h_0=3$  mm)

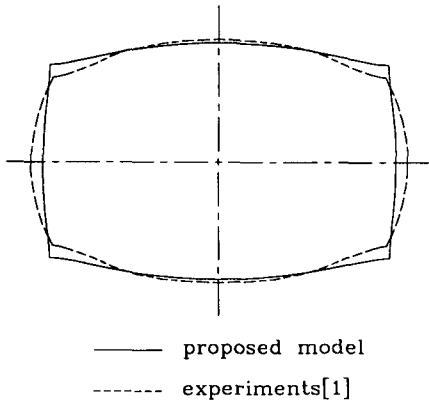


Fig. 5 Flow front progression of a thick rectangular charge ( $h_0=9$  mm)

증가함을 알 수 있다. 압축 거리가 3.5 mm 정도가 되면 장입체가 금형내를 전부 채우게 되어 압축력이 급격히 증가함을 볼 수 있다.

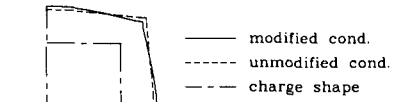
Figs. 4, 5는 초기 두께가 각각 3 mm와 9 mm로 얇은 경우와 비교적 두꺼운 경우의 사각 장입체의 유동 양상을 실험치와 함께 나타내었다. 초기 장입체의 크기는 모두 75 mm×150 mm이다. 얇은 장입체는 계산된 유동 양상이 실험치와 잘 일치함을 알 수 있으며 두꺼운 경우는 전체적인 경향성은 잘 일치하나 꼭지점 근처에서 실험 결과보다 초기 장입체의 형상을 더 많이 간직함을 알 수 있다. 이는 온도에 따른 점성과 마찰계수의 변화를 실험치를 외삽하여 사용함으로써 인하여 실제 값과 차이가 발생한 것으로 보인다. GHS모델은 두께의 영향을 고려하지 못함으로써 인하여 두꺼운 장입체의 유동 양상이<sup>(2)</sup> 실험결과와 많은 차이를 나타낸다.

3.2 유동모델의 응용

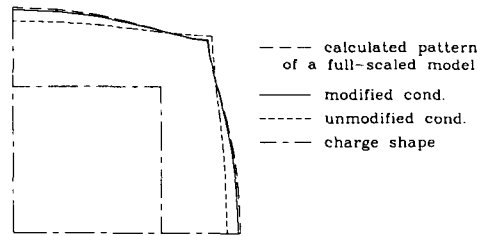
각 공정 변수들 사이의 유동에 미치는 상대적 영향을 알아보기 위하여 지배방정식을 아래와 같이 적절한 무차원 변수를 선택하여 무차원화하면 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$\begin{aligned} \hat{x}_\alpha &= x_\alpha/L & \hat{t} &= \log(h_0/h) \\ \hat{v}_\alpha &= dx_\alpha/d\hat{t} & \hat{p} &= -p/(2khL^2/h^2) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\alpha$ 는 1, 2를 뜻하며  $L$ 은 장입체의 크기를 대표하는 길이이고  $\mu$ 는 SMC의 변형 저항을 대표하는 점성이다. 위의 무차원 변수를 이용하여 인장과 전단 점성이 같은 값을 갖는 SMC로 간략화한 지배방정식을 무차원화하면 아래와 같은 식이 얻어



(a) Calculated patterns of 1/2-size model



(b) Scaled patterns(scale factor=2)

Fig. 6 Comparisons between calculated and adjusted models

진다.

$$\begin{aligned} -\hat{p}_{, \alpha} + \epsilon \hat{v}_{\alpha, \beta\beta} - \hat{v}_\alpha &= 0 \\ \epsilon &= \mu h / 2kL^2 \end{aligned} \quad (14)$$

무차원 변수  $\epsilon$ 은 변형 저항과 마찰력의 비이며 두께가 얇을수록, SMC 장입체의 온도가 높아 점성이 작을수록  $\epsilon$ 은 감소하며 마찰력의 영향이 점점 크게 나타난다.

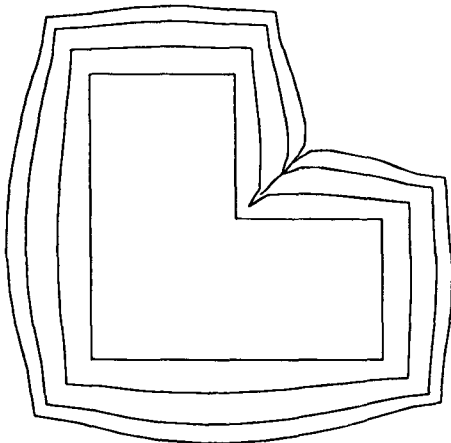
자동차의 후드 등과 같이 크기가 큰 제품은 금형의 크기 및 프레스의 용량 등으로 인하여 실제 크기의 실험을 수행하기가 불가능하므로 축소된 시편으로 실험을 해야 한다. 그러나 장입체의 크기에 따라 유동 양상이 현격히 다르므로 단순히 평판의 크기만을 줄인 시험은 실제 크기의 유동 양상을 적절히 표현하지 못한다. 두께가 6 mm로 같고 150°C 등온인 상태에서 한변의 길이가 각각 50 mm, 100 mm인 정사각형 장입체의 유동 양상을 Fig. 6(a), (b)에 점선으로 나타내었다.  $\epsilon$ 값이 큰 100 mm 장입체가 더 빨리 둥근모양으로 뒹을 알 수 있으며, 100 mm 정사각형과 유사한 유동 형태를 갖도록 50 mm 정사각형 장입체의 두께와 온도를 조절하여 충전 과정을 모사한 그림을 Fig. 6(a)에 실선으로 표시하였다. 50 mm 장입체의 두께를 1/2로 줄이고 초기 장입체의 온도를 37°C로 낮추어 점성과 마찰력의 비가 150°C일때의 1/2값을 갖도록 하면 150°C, 100 mm 장입체의  $\epsilon$ 값과 37°C, 50 mm 장입체의  $\epsilon$ 값이 같아지므로 크기가 다른 두 장입체의 유동양상이 일치하게 된다. 이는 전단 점성의

값을 인장 점성 값으로 바꾸어 계산한 결과이다. Fig. 6(a)의 실선은 조정된 조건하에서 프로그램에 의해 계산된 변형모습이고 100 mm 사각 장입제와 유동 형태를 비교하기 위해 2배 확대하여 Fig. 6(b)에 함께 표시하였다. 50 mm로 축소하여 계산된 유동 양상이 100 mm 장입제의 유동 양상과 거의 일치함을 알 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이  $\epsilon$ 의 값이 동일하면 유동 형상이 유사하므로 크기가 큰 제품을 축소하여 실험할 때 장입제의 초기 두께와 온도, 금형 온도, 또한 압축속도를 적절히 조절하여 실험함으로써 실제 성형시의 유동 형태를 고찰할 수 있다.

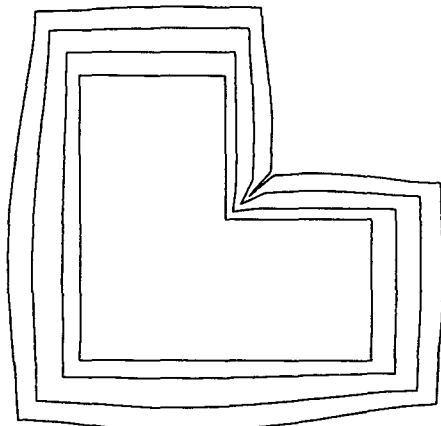
초기 장입제의 두께와 점성이 유동 양상에 큰 영향을 미치므로, 제품의 기계적 성질에 큰 영향을

미치는 봉합선의 형성을 피하기 위해서는 이들과의 관계를 고려한 성형이 요구된다. Fig. 7(a), (b)는 초기 두께가 각각 5, 15 mm인 "L"자 형상의 장입제를 60%까지 압축 성형했을 때의 유동 선단의 진행 모습을 나타내었다. 봉합선의 생성 정도가 두께에 따라 큰 차이가 남을 알 수 있다. 두꺼운 장입제는 마찰력에 비해 변형 저항이 커져 유동이 진행하여도 초기 형상의 모습을 더 많이 간직하며 변형하고 같은 정도의 압축률하에서는 봉합선의 생성이 감소함을 알 수 있다.

최종 형상에 따른 초기 장입제의 최적 위치 및 형상을 계산해낼 수 있으면 금형내의 장입제의 모양 및 크기 등에 의한 영향을 평가하여 성형 제품 및 금형의 최적 설계를 꾀할 수 있다. 그러나 장입제가 금형면이나 자기끼리 접촉하는 경우 유동 선단의 궤적을 역으로 계산하기가 어려워 임의의 최종 형상에 대한 적절한 초기 형상을 구하는 것은 많은 어려움이 있다. 장입제가 연속적으로 금형과 접촉하고 금형면에서 미끄러짐이 발생하면 섬유와 수지가 분리되어 불균일한 기계적 성질을 갖게 된다. 장입제가 금형의 모든 면에 동시에 접촉하면 섬유의 배열이 균일하게 되어 제품의 기계적 성질이 향상될 수 있고 봉합선의 생성을 꾀할 수 있다. 최종 형상이 "T" 형상인 경우에 각 금형면에 장입제가 동시에 만나는 초기 장입제의 위치 및 형상과 이 장입제를 압축 성형했을 때의 유동과정을 Fig. 8에 나타내었다. 이 해석은 최종 형상으로부터 두께 방향으로 압축대신 인장을 가하여 초기 형상을 계산한 후, 계산된 초기 형상을 다시 압축성형하여 결과를 확인하였다. 이 과정은 압축성형한 최종 형상이 "L", 또는 "T"인 경우에 균일한 기계적 성



(a)  $h_0=5\text{ mm}$ ,  $h_t=2\text{ mm}$



(b)  $h_0=15\text{ mm}$ ,  $h_t=6\text{ mm}$

Fig. 7 Flow front progression of a L-shaped charge

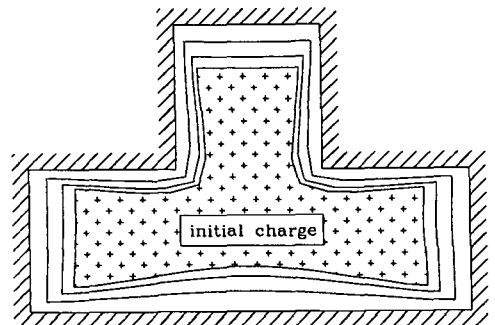


Fig. 8 Calculated initial charge shape for shapes for no knit line and optimal filling

질을 갖고 봉합선이 없는 제품의 초기 장입제의 최적 형상을 계산하는데 사용할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SMC 압축성형시장 입제의 유동 모델을 수립하고 유동 양상을 모사할 수 있는 수치 해석 기법을 제시하였다.

SMC를 비압축성이고 인장과 전단 점성이 다른 값을 갖는 비등온 유체로 가정하여 지배방정식을 유도하였다. Stokes방정식을 두계방향으로 균일한 속도분포를 가정하여 지배 방정식을 2차원으로 간략화한 후 연속방정식을 제한조건으로 한 벌칙 유한요소법으로 수식화하여 압력을 소거하고 속도만을 미지수로하여 속도분포를 계산하였다.

일방향 유동의 압축력과 사각 장입제의 평판 유동 해석을 통하여 인장 점성을 고려한 해석이 실제 SMC의 유동 특성과 더 잘 일치함을 알 수 있었으며, 무차원 변수를 도입하여 무차원화 한 유동방정식으로부터 실험이 불가능한 큰 제품의 축소 실험법을 제시하였고 유동 해석을 통하여 제시된 방법을 확인하였다. 장입제가 금형의 모든 면에 동시에 접촉함으로써 비교적 균일한 기계적 성질을 갖고 봉합선이 생성되지 않는 초기 형상을 "T" 형상에 대하여 제시하였다.

유동과 섬유 사이의 상호작용을 고려한 유동 해석 방법과 성형된 제품의 기계적 성질 예측을 위하여 섬유의 배양에 대한 연구가 앞으로 더 진행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, C. C., Folgar, F. and Tucker, C. L., 1984, "Simulation of Compression Molding for Fiber-Reinforced Thermosetting Polymers," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 114~125.
- (2) Lee, C. C. and Tucker, C.L., 1983, "A Simulation of Nonisothermal Compression Molding," *SPE Technical Paper*, Vol. 29, pp. 740~742.
- (3) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1986, "A Model for the Flow of a Chopped Fiber Reinforced Polymer Compound in Compression Molding," *J. Applied Mechanics*, Vol. 53, pp. 361~371.
- (4) Barone, M. R. and Caulk, D. A., 1985, "Kinematics of Flow in Sheet Molding Compounds," *Polymer Composites*, Vol. 6, pp. 105~109.
- (5) Barone, T. A. and Osswald, M. R. 1988, "A Boundary Element Analysis of Flow in Sheet Molding Compound," *Polymer Composite*, 9, pp. 158~163.
- (6) Lee, L. J., Marker, L. F. and Griffith, R. M., 1981, "The Rheology and Flow of Polyester Sheet Molding," *Polymer Composite*, Vol. 2, No. 4, pp. 209~218.
- (7) Castro, J. M. and Griffith, R. M., 1989, "Sheet Molding Compound Compression-Molding Flow," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 29, No. 10, pp. 632~63.
- (8) Castro, J. M. and Tomlinson, G., 1990, "Predicting Molding Forces in SMC Compression Molding," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol. 30, No. 24, pp. 1568~1573.
- (9) Lee, C. C. and Turker, C. L., 1987, "Flow and Heat Transfer in Compression Molding Filling," *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 24, pp. 245~264.
- (10) Jackson, W. C., Advani, S. G. and Tucker, C. L., 1986, "Predicting the Orientation of Short Fibers in Thin Compression Molding," *J. of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 539~557.
- (11) Adani, S. G. 1991, "A Numerical Simulation of Short Fiber Orientation in Compression Molding," *Polymer Composite*, Vol. 11, pp. 164~173.
- (12) Reddy, J. N., 1984, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill, Inc.
- (13) Kim, K. T., 1994, "An Experimental Study on Heat Transfer and Flow in Compression Molding of SMC," Master Thesis, KAIST.