

(論 文)

## SMC 압축성형의 열 및 유동에 관한 실험적 연구

김기택\* · 정진호\*\* · 임용택\*\*

(1994년 3월 28일 접수)

### An Experimental Study on Heat Transfer and Flow in Compression Molding of SMC

Ki-Taek Kim, Jin-Ho Jeong and Yong-Taek Im

**Key Words :** SMC Compression Molding(SMC 압축성형), Heat Transfer(열전달), Flow(유동), Pressure(압력), Load(하중), Slab Method(초등해법)

#### Abstract

An experimental study on heat transfer and flow in compression molding of class-B and A SMC(Sheet Molding Compounds) in a flat plate and a cross-sectional T-shape was carried out. The temperature was measured with thermocouples at two locations in the 4 layered SMC charge and pressure was measured at the center of the top mold during compression molding. Three different mold speeds, 15, 45, 50 mm/min and two different mold temperatures, 130°C and 150°C were used for compression molding experiments. Experiments with different colored SMC layers were used to study flow patterns at various compression stages. In order to predict the pressure and load in SMC compression molding, slab method was used. The predicted values of pressure and load from the slab analysis were compared well with the measured data.

#### 1. 서 론

복합재료는 높은 중량대비 비강성, 비강도, 내부 식성, 저소음 등의 장점을 가진 신소재로서 군용, 항공기, 우주기기 등에 주로 응용되었으나 점차 스포츠 분야에까지 그 응용이 확대되고 있다. 더욱이 최근에는 그 응용이 자동차 산업에까지 퍼져있음으로 인해 그 효용가치를 더욱 높이고 있는 실정이다.

복합재료 중 특히 SMC(sheet molding compounds)는 기계적 강도가 뛰어나고 생산성이 우수하며 성형시간이 비교적 짧고 대량생산이 가능하기 때문에

고강도가 요구되는 분야에서 그 응용이 늘어나고 있다. SMC는 수지모재에 저수축제, 충전제 등을 혼합한 페이스트상의 혼합물에 유리섬유를 합침시켜 플라스틱 필름에 입힌 후, 일정 시간동안 일정 온도로 화학반응에 의해 점도를 증가시킨 점착성이 없는 판상상태로 가공된, 열경화성 성형재료이다. SMC는 보통 성형하기 전에는 점도가 높은 상태, 즉 증점된 상태로 있지만 압축성형과정에서는 유체와 같은 유동을 하므로 강판의 프레스작업에 비해 낮은 용량의 프레스를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점을 가진 SMC에 대한 연구가 본격화된 후, 자동차 경량화를 위해 이를 내·외부 판넬에 적용하여 진동과 소음을 줄이려는 노력도 진행되고 있다.

Marker 등<sup>(1)</sup>은 서로 다른 색으로 적층된 장입재를 사용하여 SMC가 변형될 때의 유동속도가 어떻

\*삼성종합기술원 CAD/CAM실

\*\*한국과학기술원 정밀공학과

\*\*\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

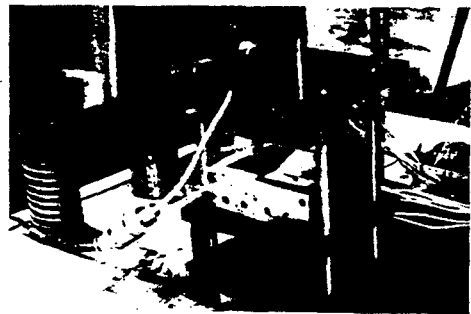
제 분포하는지 실험하였는데, 금형 표면을 통한 열 전달의 결과로서 초기 장입재의 표면층은 윤활제로서 작용하고, 안쪽층은 평면방향으로 변형한다고 가정하였다. Lee<sup>(2,3)</sup> 등은 금형과 SMC와의 마찰조건을 다르게 하여 SMC 유동을 전단변형과 길이변형으로 모델링하였으며, 성형과정에서의 장입재 내의 온도분포를 수학적 모델에 의해 예측할 수 있도록 하였다. Herman<sup>(4)</sup>은 금형 내에서의 열과 유동을 각각 제어할 수는 없지만, 서로 잘 조화시키면 경화시간을 미리 결정할 수 있으므로 성형시간을 단축할 수 있다고 해석하였다. Barone<sup>(5,6)</sup> 등은 SMC 압축유동을 금형 표면에서는 미끄러짐을 갖고 두께방향으로는 일정하게 변화하는 2차원 유동으로 가정하여 유리섬유의 방향성이 유동에 미치는 영향과 기계적 특성을 고찰하였다. 또한 압축성형시에 열전달과 경화과정에 대한 수치적 해석으로 적층된 장입재 두께에 따라 열전달과 경화정도가 어떻게 달라지는지 해석하였다. Kau<sup>(7,8)</sup>는 탄소트레이서를 이용하여 SMC의 시각적 유동연구를 수행함으로써, 유동의 정량적인 기술을 어느 정도 가능하게 하였다. Fan<sup>(9)</sup>은 압축성형공정을 유동과 경화과정의 조합으로 가정하고 수치적 해석을 통하여 실험과 비교하였다. Kim<sup>(10)</sup>은 장입재와 금형사이의 마찰에 대한 영향과 유동에 미치는 금형단속도의 영향을 해석하였다. 또한 Kim<sup>(11)</sup>은 변형과 열전달 그리고 발열반응을 포함하는 수치적 해석을 통하여, T형상인 경우에 있어서 성형과정을 해석하였으며, 김<sup>(12)</sup>과 조<sup>(13)</sup> 등이 리브깊이의 변화에 따른 열전달과 유동에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 제품의 형상이 평판인 경우와 리브를 가지고 있는 T형상인 경우에 대해서 주식회사 애경화학에서 제조한 B급과 A급 SMC를 이용하여 실험을 하였으며 압축비에 따른 SMC의 유동을 관찰하여 초기 장입재의 각 층이 압축과정중에 어떻게 유동을 하는지 고찰해 보았다. 그리고 SMC 압축성형시에 금형온도(130°C, 150°C)와 금형단속도(15, 45, 50 mm/min)를 변화시켜 상부 금형이 초기 장입재를 압축해 최종 성형품을 만들 때까지 경화되는 동안 장입재 내에서의 온도변화를 열전대를 이용하여 알아보았으며, 최종 성형품을 만드는 과정에서 압력과 하중을 측정하였다. 이론적인 방법으로 압력과 하중을 결정하기 위해 슬랩 방법을 이용하여 계산하고 계산결과를 실험치들과 비교하였다. 본 연구의 결과로 SMC의 압축성형공

정을 보다 잘 이해하고 분석하여, 성형공정에서 발생할 수 있는 여러가지 문제점을 파악하고 공정설계 시에 발생할 수 있는 시행착오를 줄여 공정의 생산성을 높이고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 조건

본 실험에 사용된 프레스는 Shimadzu사의 Model UH-50A 50ton 유압식 만능시험기였다. Fig. 1에 보여진 바와 같이 실험실 규모의 상, 하부의 금형을 설계, 제작한 후 원하는 온도로 일정하게 유지되는지 알아보기 위해서 지름 0.25 mm의 J-type (iron-constantan) 열전대를 금형 표면에서 5 mm 떨어진 부분에 장착하여 금형의 온도를 측정하였고, 금형을 일정한 온도로 가열하기 위하여 1개당 100 W의 용량을 낼 수 있는 상, 하 4개씩의 가열봉으로 구성된 온도조절기를 사용하였다. 또한 압축성형 중에 장입재 내에서의 온도변화를 측정하기 위하여 지름 0.25 mm의 K-type(chromel-alumel) 열전대를 사용하였다. 압축변위에 따른 하중의 변화는 Dataletty 402를 이용하여 측정하였으며, 금



(a)



(b)

Fig. 1 Experimental set up used for compression molding: (a) upper and lower mold and (b) data acquisition system

형중심에서의 압력은 Dynisco사의 PT422A 압력 트랜스듀서(pressure transducer)를 이용하여 측정하였고 신호증폭을 위해 Measurements Group사의 스트레인게이지 타입 signal conditioning amplifier 2310을 사용하였다.

데이터 측정 시스템은 A/D converter(ADA 1200, Real Time Devices Inc.)와 IBM PC 286을 사용하였으며, 소프트웨어로는 SIGNAL×MATH Version 2.0을 사용하였다. 실험 중, 장입재 또는 금형 내의 온도분포를 구하기 위해 앞서 기술한 K-type 또는 J-type 열전대를 사용하였으며 온도 측정치들이 아날로그신호(analog signal)들로 주어지므로 이 값들을 디지털신호들로 바꾸기 위해 온도 측정 전용 IC chip인 AD 594/595를 이용한 측정 장치를 제작하여 사용하였다. 이 IC chip은 1°C 당 10 mV를 나타내며 300°C까지는 거의 선형적이어서 측정하는 온도범위에서 유용하였다. 그리고 A/D 변환시 들어오는 온도가 수 mV의 미소전압인 만큼 외부에서의 노이즈(noise)를 제거할 필요가 있었다. 이러한 노이즈는 동일 프린트기판 상의 다른 회로(디지털회로나 발진회로)로부터 생기는 경우가 많으며 특히 OP Amp전원의 온도미동에 의해 수%의 전원전압미동이 생겨 측정값의 신뢰도가 떨어지게 된다. 그러므로 미소전압 증폭회로의 전원은 특히 안전도가 중요하다고 할 수 있으며, 이를 확보하기 위해 버퍼(buffer)를 제작하여 사용하였다. 완성된 실험장치는 Fig. 1과 같으며, 아날로그 신호를 디지털신호로 받아 유용하게 저장하기까지의 데이터 측정 및 처리과정의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

실험에 사용된 SMC 원단은 class B급 및 A급으로 주식회사 애경화학으로부터 제공받았다. 유리섬유의 길이는 25.4 mm이고 전체 무게의 28%를 차지하고 있으며, 증점상태는 45°C에서 12시간 놓여 있었다. Fig. 3은 하부 금형에 놓여있는 초기 장입재의 크기 및 SMC재료 내부의 온도 측정을 위한 열전대의 위치를 보여주고 있다.

본 연구에서는 압축성형시 공정변수로서 금형온도와 금형달림속도를 변화시켰다. 금형달림속도는 15, 45, 50 mm/min의 세가지로 하였으며, 금형의 온도변화에 따른 경화시간과 최대 경화온도의 변화양상을 보기 위하여 금형의 온도를 130°C와 150°C로 바꿔서 실험하였다. 실험에 사용된 초기 장입재의 형상은 101(L)×76.7(W)×11(H) mm였으며

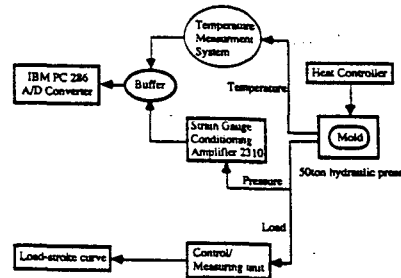


Fig. 2 Schematic diagram of data acquisition system

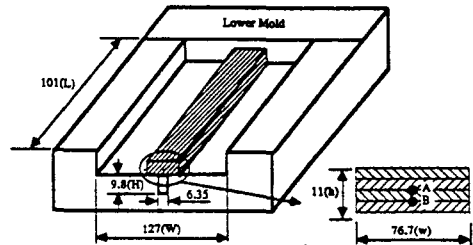


Fig. 3 Dimension of initial SMC charge on the lower mold and the locations of thermocouples

장입재의 단면적이 하부 금형 단면적의 60%를 차지하도록 하였다. 그리고 경화반응시의 온도변화를 시간에 따라 측정하기 위하여, 지름이 0.25 mm인 K-type(chromel-alumel) 열전대를 초기 장입재에 심어 금형으로부터의 열전달과 화학적 발열반응에 의한 온도변화를 측정할 수 있게 하였다. 또한 SMC 내에서 금형으로부터 장입재 내부까지의 거리에 따른 온도변화의 양상과 그에 따른 경화반응의 거동 차이를 측정하기 위해, 장입재의 중심부와 하부 금형에 가까운 부분에 2개의 열전대를 Fig. 3에 보여진 바와 같이 나눠 장착하였다. 시편의 최종 형상은 평판과 보강재를 가진 단면이 T형상인 경우로 나누었으며, 압축성형 중에 장입재의 유동이 2차원 평면 변형상태가 되도록 하기 위하여 Fig. 3과 같이 장입재의 한쪽 길이(L)를 금형의 길이와 같도록 하였다.

실험과정은 먼저 상, 하부 금형을 온도조절기에 장착된 가열봉으로 가열하여 미리 원하는 온도로 유지되도록 하였으며, 적정온도가 유지되면 하부 금형에 SMC 장입재를 올려 놓았다. 이때 상부 금형이 SMC 장입재에 접촉하기까지의 시간은 하부 금형에 장입재를 올려놓은 후 10초가 되도록 하였다. 그리고 상부 금형을 일정 속도로 원하는 최종 두께까지 압축한 후, 경화가 이루어지도록 적절한

시간을 유지시켰다. 성형공정이 완료된 후, 제품을 금형으로부터 분리하기 위해 실리콘 이형제와 이펙트 핀을 사용하였고 실험 중 금형면의 위치에 따른 온도차이는 3~5°C 정도였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

SMC 압축성형 중의 유동의 양상을 보기 위하여 색깔이 서로 다른 2개의 SMC 원단을 서로 번갈아가며 4층으로 적층하여 실험을 하였다. 이렇게 다른 색으로 적층된 SMC 장입재는 압축되는 동안 점도의 변화에 의해 유동을 일으켜 금형을 충전시킨 후 금형내에서 경화되어, 시편의 유동상태를 시각적으로 볼 수 있게 해준다. 이를 이용해 최종 성형이 이루어질 때까지 압축단계를 구분하여 성형되는 과정중의 유동의 양상을 고찰하였다. 이 때 금형의 온도는 150°C, 속도는 15 mm/min로 고정하였으며, 단면이 T형상인 경우에 리브의 폭은 6.35 mm, 깊이는 9.8 mm로 하였다.

압축에 따른 변형률을 다음과 같이 정의하였다. 단, 단면이 T형상일 때의 변형률 기준은 평판 부분의 높이로 하였다.

$$\text{변형률} = \frac{(h_o - h)}{(h_o - h_f)} \times 100 \quad (1)$$

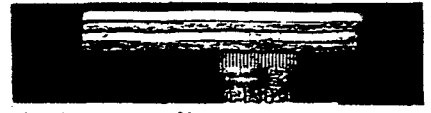
여기서,

$h_o$  = 초기 두께

$h$  = 각 압축공정 단계에서의 두께

$h_f$  = 최종 두께

Fig. 4는 최종두께가 7 mm인 경우에 있어서, 평판에서의 유동양상을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 초기 장입재의 크기를 보여주고 있으며, Fig. 4(b)는 변형률이 45%, Fig. 4(c)는 변형률이 70%일 때이고 Fig. 4(d)는 변형률이 100%일 때이다. 이상의 유동양상을 고찰해 보면, 초기에 4장으로 적층된 장입재 가운데 네번째층은 평면방향으로 금형내를 완전히 채우고 나머지 층을 감싸는 양상을 보여주고 있으며 두번째층과 세번째층은 첫번째층과 네번째층에 감싸여 유동이 완전하게 이루어지지 못하고 그 안에 갇히는 양상을 보이고 있다. 이러한 유동양상을 보이는 이유는 초기 장입재가 하부 금형위에 놓여 상부 금형이 접촉하기까지 10초의 유지시간(dwelling time)을 가짐으로 장입재의 네번째층이 다른 부분보다 먼저 하부 금형으로부터 열



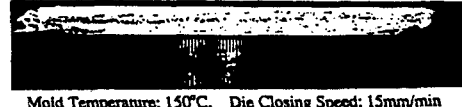
Mold Temperature: 150°C, Die Closing Speed: 15mm/min  
0% Deformation

(a) Initial charge



Mold Temperature: 150°C, Die Closing Speed: 15mm/min  
45% Deformation

(b) 45%



Mold Temperature: 150°C, Die Closing Speed: 15mm/min  
70% Deformation

(c) 70%



Mold Temperature: 150°C, Die Closing Speed: 15mm/min  
100% Deformation

(d) 100%

Fig. 4 Cross-sectional flow patterns of SMC charge during compression molding of flat plate at various deformation stages

전달을 받아 온도가 더 높아져 점도가 현저히 낮아지게 됨으로써 다른 층에 비해 평면방향으로의 유동이 먼저 일어나게 되기 때문이다. 이에 따라 두번째층과 세번째층의 유동은 첫번째층과 네번째층보다 늦어지게 되고 앞서 유동하여 퍼져나간 바깥층에 의해 둘러 싸여지게 된다. 이러한 불균일한 유동이 일어나지 않고 적층된 장입재 각층이 균일하게 퍼져 나가게 하기 위해서는, 하부 금형이 장입재와 접촉하는 시간을 짧게 하고 하부 금형의 온도보다 상부 금형의 온도를 높게 하는 등의 방안을 고려하여 상부 금형이 내려오는 동안에 하부 금형에서 장입재로의 불균일한 열전달을 보정할 필요가 있다.

Fig. 5는 평판부분의 최종 두께가 7 mm인 경우에 있어서 단면이 T형상인 경우의 유동양상을 보여주고 있다. 금형내에서의 유동은 특성상 평면방향과 리브방향의 유동으로 나눌 수 있으며, 유동은 평면방향으로 먼저 이루어지고 리브방향으로 이어진다는 해석적 가정이 상당히 일반적이다.<sup>(9)</sup> 이는

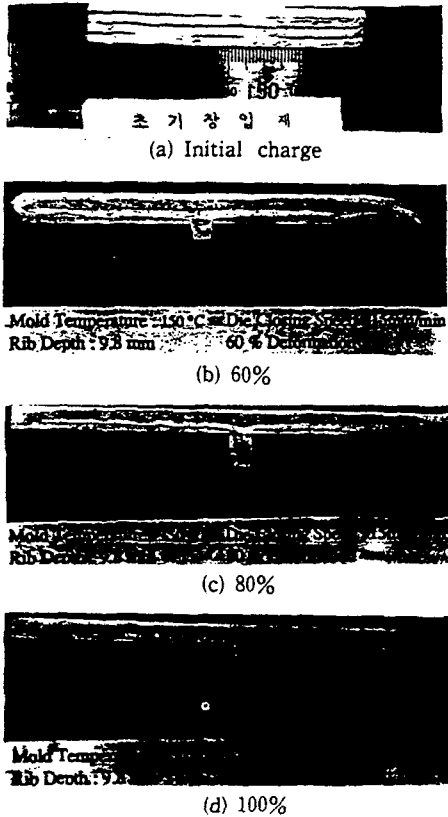


Fig. 5 Cross-sectional flow patterns at various deformation stages of SMC charge in compression molding of cross-sectional T-shape.

변형률에 따른 유동의 흐름을 살펴보면 잘 알 수 있다. Fig. 5(b)는 변형률이 60%일 때의 유동을 보여주고 있다. 이 그림을 보면 리브방향의 유동과 평면방향의 유동이 완전히 이루어지지 않았음을 볼 수 있다. 여기서 평면방향의 유동이 완전하지 못하다는 것은 장입재가 하부 금형의 폭을 다 채우지 못하였음을 의미한다. Fig. 5(c)는 변형률이 80%일 때의 유동양상이다. 평면방향의 유동은 완전히 일어났지만 리브방향의 유동은 완전하지 않음을 보여주고 있다. Fig. 5(d)는 변형률이 100%일 때 유동양상으로 평면방향과 리브방향의 유동이 완료된 상태이다.

이 그림의 단면을 살펴보면, 변형률이 80%일 때까지도 기공이 존재하고 있음을 알 수 있는데, 이런 기공에 의하여 리브에서의 성형이 완전하게 일어나지 않을 수도 있으므로, 포집되어 있는 공기를 제거할 수 있는 금형의 설계와 SMC 원단의 제조 시 기공의 최소화와 적층시의 압착을 위한 적절한

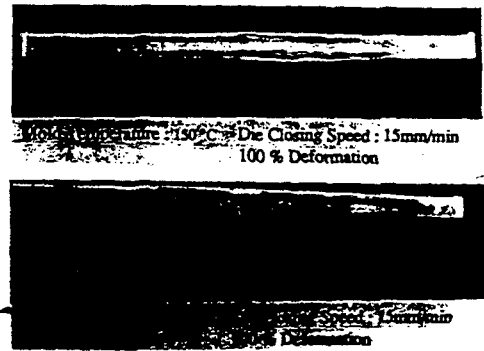


Fig. 6 Inter-laminar crack occurred in compression molded parts

원단의 증점상태의 확보도 중요하다. 또한 참고문헌에 의하면 압축성형 중에 중심부분이 최고 발열점에 도달하였을 때 경화가 90%정도 진전되며 이때까지의 시간을 최소 경화시간이라고 한다.<sup>[14]</sup> 이 최소 경화시간보다 빠르게 제품을 탈형시키면, 중심의 경화가 완료되지 않은 상태에서 압력이 제거되게 됨으로 Fig. 6에 보여진 바와 같이 제품의 중심 부분에서 층간균열(interlaminar crack)이 발생할 수 있으며 이 현상은 최종 압축압력이 부족하기 때문에도 발생할 수 있다. 이와 같은 결함을 가진 제품 성형품의 최종 기계적 성질에 좋지않은 영향을 끼치므로 적절한 최종 압력의 선택과 유지는 매우 중요하다.

SMC의 압축성형 중에 장입재 내의 온도변화는 금형으로부터의 열전달과 장입재내의 화학반응에 의한 경화과정으로부터 발생한다. Fig. 7에서 Fig. 9까지를 살펴보면 SMC시 편내 열전대를 심은 두 곳(위치는 Fig. 3 참조)에서 시간에 따른 온도변화를 잘 기술해 주고 있음을 알 수 있다. 이 그림들은 장입재가 초기 하부 금형에 놓여 있는 동안의 유지시간인 10초 후 상부 금형이 장입재와 접촉하고 경화과정이 완료된 후까지의 온도변화 곡선을 나타내준다. 초기 시간이 0일 때에는 상부 금형이 장입재와 접촉하였을 때를 나타내준다.

Fig. 7은 금형온도를 130°C로 일정하게 유지하였을 때, 시편내의 다른 위치에서의 온도변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초기 유지시간을 10초로 하였기 때문에 압축공정 초기에는 하부 금형에 가까운 점(B점)에서의 온도가 중심(A점)에서의 온도보다 더 높다. 또한 중심에서의 초기 온도는 대기온도와 거의 변함이 없는 것

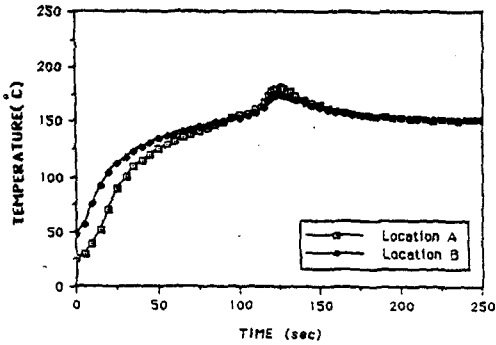


Fig. 7 Measured temperature versus time at two locations in compression molding of flat plate: mold temperature 130°C, closing speed 15 mm/min

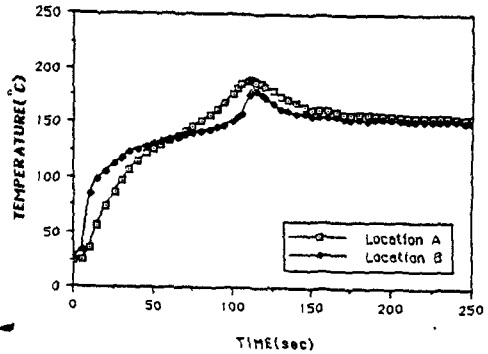


Fig. 8 Measured temperature versus time at two locations in compression molding of flat plate: mold temperature 130°C, closing speed 50 mm/min

으로 보아 하부 금형으로부터 중심까지로 열전달이 아직 일어나지 않았음을 알 수 있다. 열전달이 금형으로부터 SMC 장입재로 전달됨에 따라 장입재 내에 있는 촉매제의 활성도가 점차 높아져 경화 반응의 진행속도가 빨라지게 되고 이에 따라 화학적 발열반응이 촉진되게 된다. 장입재의 온도가 금형의 온도를 초과하게 되면 이제까지와는 반대로 장입재로부터 금형으로의 열전달이 이루어지게 된다. 또한 경화반응이 완료되는 시점에서 중심에서의 온도가 하부 금형에 가까운 부분에서의 온도를 초과하게 된다. 이러한 양상을 보이는 이유는 금형으로부터의 열전달의 결과로 경화반응이 금형면에 가까운 곳에서부터 먼저 일어나 서서히 장입재 중심으로 이동하게 되는데 SMC의 열전도도가 좋지 않아 중심부에서의 경화반응열이 바깥으로 방출되는데 방해받지 않고, 금형에 접하는 바깥면보다 외부로의 열전달이 신속히 일어나지 못하기 때문이다.

또한 Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있는 것은 금형 온도가 일정한 경우에 있어서, 금형당힘속도가 빠를수록 최고 온도에 도달하는 시간이 짧아진다는 것이다. Fig. 7과 Fig. 9를 비교하여보면 금형온도가 높을수록 최고 온도에 도달하는 시간이 짧아질 뿐만 아니라 최고 온도도 증가함을 알 수 있다. 이는 금형당힘속도가 빠르고, 금형온도가 높으면 장입재가 금형과 접촉하는 면적이 금형당힘속도가 느린 경우와 금형온도가 낮은 경우보다 넓어져서 금형에서 장입재로의 열전달량이 많아져, 장입재내에서의 화학적 발열반응이 빠르고 순간적으로 일어나기 때문이다.

제품이 성형된 후 금형 밖에서 식는 동안에도 경

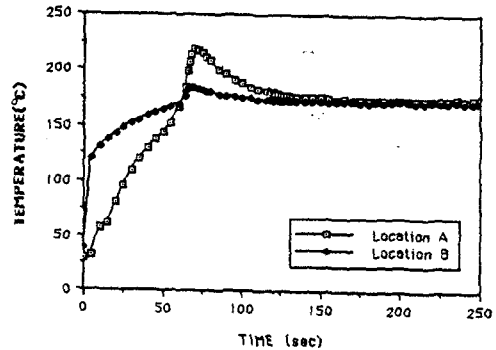


Fig. 9 Measured temperature versus time at two locations in compression molding of flat plate: mold temperature 150°C, closing speed 50 mm/min

화와 수축반응이 계속해서 발생한다. 이와 같은 후경화는 압력이 작용하지 않는 상태에서 일어나므로 장입재 내에서 냉각되는 정도가 다르게 나타나기 때문에 제품의 뒤틀림 등의 원인이 된다. 따라서 후경화시 냉각되는 동안의 온도분포가 중요하므로 냉각 시의 냉각환경을 잘 고려해야 하며, 경화반응이 끝난 후 제품내의 전체적인 온도분포가 균일하게 빨리 내려갈 수 있는 방안을 모색하여야 한다.

최종제품의 두께까지 압축성형시 장입재 두께의 변화, 즉 상부 금형의 변위(stroke; 증가에 따른 압력과 하중의 변화를 알아보았다. 평판 부분의 최종 두께는 3mm가 되도록 하였으며 class A급의 SMC 원단을 두 장 적용하였고 초기 장입재의 형상은 평판일 때 101(L)×64(W)×6(H)mm, 단면이 T형상일 때는 101(L)×76.7(W)×6(H)mm로 하였다. 직경이 7.77mm인 Dynisco사의 압력 트

랜스듀서 (pressure transducer ; PT422A)는 압력측정을 위해 상부금형면의 중심을 따라 금형의 상단부 표면에서 30.91 mm 아래까지는 직경이 13.08 mm인 구멍을 뚫고, 공칭 최대 직경 (nominal major diameter)이 12.7 mm이고, 25.4 mm당 나사산의 수가 20인 암나사를 35.23 mm까지 가공하여 압력 트랜스듀서 하단부에 장착된 숫나사를 금형하부의 암나사에 고정시켰다. 압력의 측정은 SMC 압축공정시 압력 트랜스듀서의 압력 측정부가 직접 SMC 장입재 상부 표면에 접촉하도록 상부금형의 아랫면으로부터 직경 7.95 mm이고 길이가 5.72 mm인 구멍을 뚫어 이루어졌다.

Fig. 10에서 Fig. 13까지는 금형온도를 130°C로 고정하고, 금형닫힘속도를 15 mm/min과 45 mm/min으로 변화시키며 측정된 압력과 하중의 변화를 보여주고 있다. 평판인 경우 (Fig. 10, Fig. 12), 압력과 하중변화곡선은 유동에 관해서 세영역으로 나눌 수 있다. I 영역에서는 적층된 장입재 내부에

존재하는 기공이 제거되면서 층 사이에서 압착 (compaction)이 일어나고 있다. 그리고 상부 금형이 장입재와 접촉 후 압축할 때 금형에서 장입재로의 열전달이 많이 일어나지 못했기 때문에, 장입재의 점도가 비교적 높은편이어서 압력과 하중이 선형적으로 증가하였다. II 영역에서는 충분한 열전달이 이루어져서 유체와 같은 유동을 할만큼 점도가 떨어져 유동이 원활하게 일어나므로써 중심점에서 측정되는 압력은 서서히 감소하고 있다. 그리고 하중은 속도가 작은 경우에는 약간 감소하는 경향을 보이고 있으며 속도가 빠른 경우에는 약간 증가하는 경향을 보인다. III 영역에서는 장입재의 유동이 하부 금형의 벽면과 접하면서 압력과 하중이 갑자기 증가하게 되며 각 방향의 유동이 완전하게 이루어질 때 최고값을 갖는다.

단면이 T형상인 경우 (Fig. 11, Fig. 13)에 있어서의 압력과 하중변화 곡선 역시 평판인 경우처럼 세 영역으로 나눌 수 있다. I 영역에서는 평판인

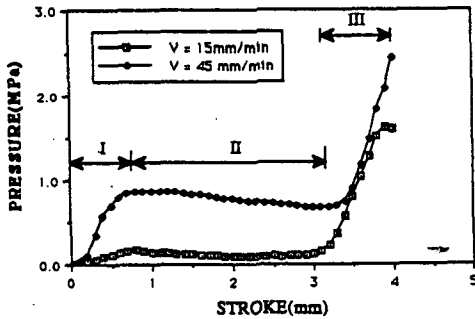


Fig. 10 Measured pressure vs. stroke of SMC compression molding with mold temperature of 130°C of flat plate with thickness of 3 mm at various mold closing speeds.

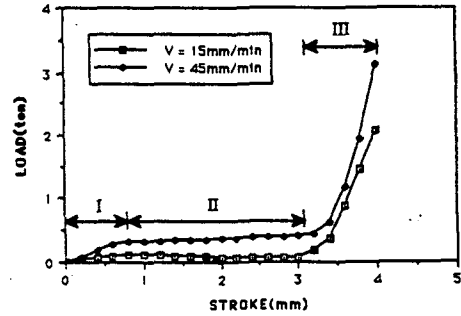


Fig. 12 Measured load vs. stroke of SMC compression molding with different molding conditions of flat plate with thickness of 3 mm.

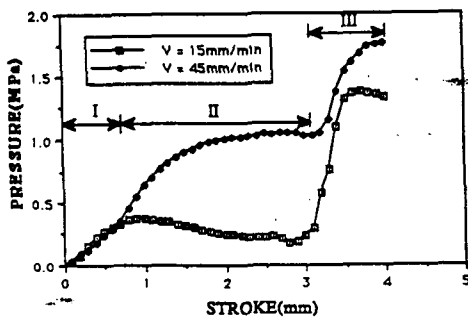


Fig. 11 Measured pressure vs. stroke of SMC compression molding with mold temperature of 130°C of cross-sectional T-shape with thickness of 3 mm at various mold closing speeds.

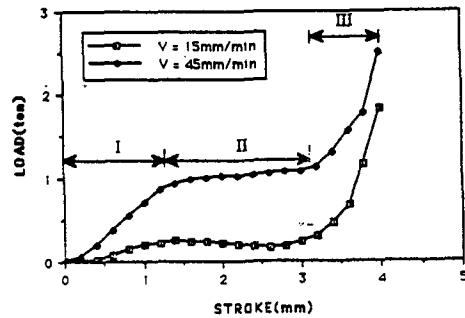


Fig. 13 Measured load vs. stroke of SMC compression molding with different molding conditions of cross-sectional T-shape with thickness of 3 mm.

경우의 I 영역에서의 양상과 같으며 평면방향의 유동이 리브방향의 유동보다 더 활발하였다. 이는 Fig. 5에서의 유동 고찰에서 잘 설명되고 있다. II 영역에서는 금형으로부터 받은 열전달에 의해 평면방향뿐 아니라 리브위에 놓여 있는 장입재도 유동이 활발해져서 리브방향으로 유동을 하므로 압력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 III 영역에서는 평면방향과 리브방향의 유동이 다루어지는 단계이기 때문에 압력과 하중이 갑자기 증가하였다. 본 실험에서 측정된 압력은 측정된 하중을 단면적으로 나누어 계산된 평균 압력보다 더 크게 나타나고 있는데, 이는 압력을 그 값이 가장 큰 중심부에서 측정하였기 때문이다.

압력 및 하중을 이론적으로 예측하기 위해 슬랩 방법을 이용하여 SMC 압축성형 공정중의 압력과 하중을 계산하고 그 값을 실험에서 측정된 값과 비교하여 보았다. 평면 변형률상태의 경우 von Mises 항복조건식을 고려해 슬랩방법으로 유도한 압력,  $P$  및 하중,  $F$  계산을 위한 최종 식<sup>(15)</sup>은 다음과 같다.

$$P = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left[ 1 + \frac{m}{h}(x_0 - x) \right]$$

$$F = \frac{2\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} L(x_0 - x) \left[ 1 + \frac{m}{2h}(x_0 - x) \right] \quad (2)$$

여기서,

- $\bar{\sigma}$  : 유동응력
- $m$  : 마찰 전단계수
- $h$  : 성형 중의 순간높이
- $L$  : 하부 금형의 넓이길이

위의 식에 사용된 유동응력은 SMC 재료의 단순 압축실험을 통하여 구한 다음의 유동응력식을 사용하였다.<sup>(16)</sup>

$$\bar{\sigma} = K(T) (\dot{\epsilon})^{R(T)} \text{ (MPa)}$$

$$K(T) = 1.1108 \times 10^{-4} \exp(3546.6/T)$$

$$R(T) = 7.682 \exp(-800.48/T) \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 절대온도이다.

위의 유동응력식에서 보듯이 재료의 유동응력은 온도의 함수이다. 따라서 장입재가 금형면에 접할 때부터의 장입재내의 시간에 따른 온도분포를 정확히 아는 것이 중요하다. 본 해석에서는 해석의 편의를 위해 장입재내의 온도분포를 균일하게 가정할 비정상 Lumped heat capacity system으로 간주하

여 유도된 온도계산식<sup>(17)</sup>에서 상부 금형이 장입재와 접하는 시간에 계산된 온도가 실험을 통해 구하여진 금형면 접촉시의 온도와 같다고 하여 각 금형단속도에서의 유효 열전달계수를 계산하였다. 계산된 유효 열전달계수는 금형단속도가 15 mm/min일 경우 0.2179 N/mm·s·°C 이었고, 45 mm/min일 경우는 0.2412 N/mm·s·°C 이었다. 이렇게 계산된 열전달계수와 비정상 lumped heat capacity 방법을 이용해 압축변위에 따른 장입재의 온도를 계산하고 각 온도에서의 유동응력을 계산하여 압력과 하중의 계산에 이용하였다. 계산에 이용한 공정변수로는 금형온도가 150°C, 금형단속도는 15 mm/min과 45 mm/min이었다.

Fig. 14에서 Fig. 17까지의 압력과 하중의 실험값과 슬랩식을 이용한 계산값의 비교, 고찰에서 마찰 전단계수  $m$ 의 값에 따라 압력과 하중의 계산값이

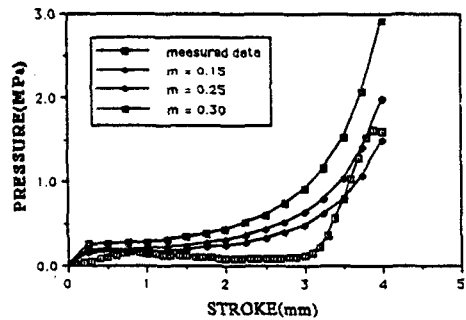


Fig. 14 Comparison of pressure between measured and predicted values in the case of compression molding of flat plate under mold temperature of 130°C and mold closing speed of 15 mm/min.

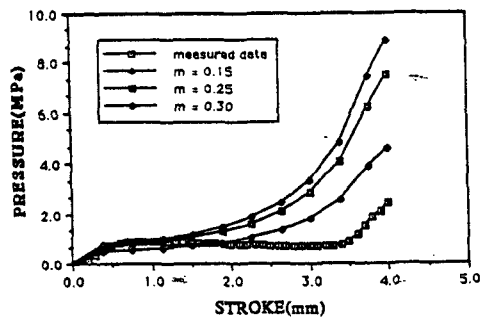


Fig. 15 Comparison of pressure between measured and predicted values in the case of compression molding of flat plate under mold temperature of 130°C and mold closing speed of 45 mm/min.



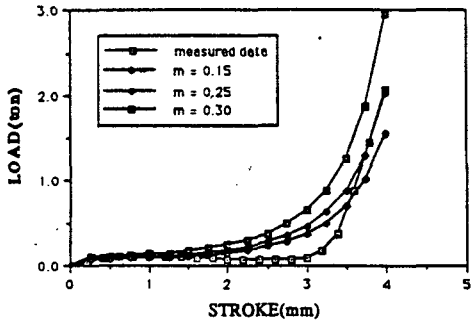


Fig. 16 Comparison of load between measured and predicted values in the case of compression molding of flat plate under mold temperature of 130°C and mold closing speed of 15 mm/min.

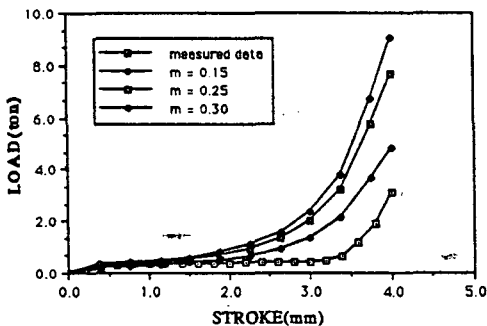


Fig. 17 Comparison of load between measured and predicted values in the case of compression molding of flat plate under mold temperature of 130°C and mold closing speed of 45 mm/min.

매우 민감하게 변화함을 알 수 있었다. 압력과 하중의 계산이 마찰 전단계수  $m$ 에 민감하게 변화한다는 것은 SMC 압축성형시 전단유동이 상대적으로 두드러지게 발생함을 의미한다.

Fig. 14에서 Fig. 17까지의 그림에서 계산값과 측정값이 전체적으로는 같은 경향을 보이고 있으나 압축 초기에는 큰 차이가 없다가 압축 변위가 증가하여 유동응력식의 변형률속도가 커지고 장입재의 온도가 금형면의 온도와 거의 일치될 정도로 높아지면 오차가 커짐을 알 수 있었다. 이러한 불일치는 금형단힘속도가 더 클수록 따라 더 큰 변형률속도를 갖는 Fig. 16과 Fig. 17에서 더 확실하게 보였다. 이러한 이유는 다음의 두가지 원인에서 찾을 수 있다. 첫째 이유는 세가지 온도영역(20, 50, 75°C)에서 단순 압축실험을 하고 그 결과를 외삽하

여 구한 유동응력식이 고온에서의 유동응력을 충분히 묘사하지 못했기 때문이며 두번째 이유는 SMC 장입재와 금형면 사이의 마찰 전단계수를 정확히 알지 못했기 때문이다. 보통 마찰 전단계수는 링압축실험을 통해 결정하게 되는데 실제 작업온도와 같은 온도에서는 이의 실험이 불가능하여 경험식을 이용한 계산시 그 값을 전혀 예측할 수 없었으며 또한 압축비와 온도변화에 따라 그 값이 변화하여야 하나 계산에서는 이러한 변수들이 전혀 고려되지 않았다. 따라서 고온에서의 적절한 유동응력식과 마찰 전단계수를 이용한다면 지금보다 실제 측정값에 충분히 근접하는 계산결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SMC 압축성형공정에서의 시간에 따른 재료의 유동 및 열유동을 실험적으로 고찰해 보았고 성형시 필요한 압력과 하중도 검토하여 보았다. 본 실험적 연구를 통하여 얻은 결론을 기술하면 다음과 같다.

- (1) 평판제품의 유동에서 유지시간 등의 영향으로 인해 전체적으로 유동이 불균일하게 이루어져 중심부의 유동이 바깥면의 유동에 갖혀 완전하게 이루어지지 못하는 양상을 보였다.
- (2) 단면이 T형상인 경우에는 평면부의 충전이 끝난 후 리브에서의 충전이 최종적으로 이루어졌다. 또한 리브에서는 적층된 순서대로 충전되었다.
- (3) 금형온도가 증가함에 따라 경화반응에 의한 최고 온도에 도달하는 시간이 짧아질 뿐 아니라 최고 온도도 증가하였다. 또한 금형온도가 일정한 경우에 금형단힘속도가 빨라짐에 따라 최고 온도에 도달하는 시간이 짧아짐을 알 수 있었다.
- (4) 압력과 하중은 금형단힘속도가 증가함에 따라 증가하고 금형온도가 증가함에 따라 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 중심점에서 측정된 압력은 측정된 하중으로부터 계산된 평균 압력보다 더 크게 나타났다.
- (5) 슬랩방법을 이용해 계산한 압력과 하중을 실험값과 비교함으로써 이의 계산이 실험값에 근접하는 값을 가짐을 확인하였다. 계산결과의 정확도를 높이기 위해서는 SMC 장입재의 물성치와 마찰력의 정확한 측정이 필요하다. 본 슬랩식은 SMC 압축성형에 필요한 압력 및 하중을 일차적으로 예측

하는데 공학적으로 유용한 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구지원사업에 의해 수행된 것으로 이에 관계자 제위께 감사드린다. 또한 SMC 재료를 공급하여 주신 주식회사 애경화학 관계자 제위와 SMC 압축실험을 위해 인장시험기의 사용을 허락해 주신 한국과학기술원 정밀공학과 의 허 훈 교수님께도 감사드린다.

## 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. 209~218.
- (3) Lee, L. J., 1981, "Curing of Compression Molded Sheet Molding Compound," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 21, No. 8, pp. 483~492.
- (4) Herman, E. A., 1978, "Heat Transfer in Compression Molding SMC," *Modern Plastics*, pp. 59~64.
- (5) Barone, M. R. and Caulk, D. K., 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.
- (6) 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.
- (7) Kau, H. T., 1987, "Molding Analysis of Sheet Molding Compound," *SPE ANTEC Tech. Papers*, pp. 27.
- (8) Kau, H. T. and Hagerman, E. M., 1987, "Experimental and Analytical Procedures for Flow Dynamics of Sheet Molding Compound(SMC) in Compression Molding," *Polymer Composites*, Vol. 8, No. 3, pp. 176~183.
- (9) Fan, J. D., 1988, "Process Analysis of Sheet Molding Compounds in Molds with or without Substructures," Ph. D. Dissertation, The Ohio State University.
- (10) Kim, J. I., 1990, "Computer Modeling and Analysis of Anisotropic Material Flow in Compression Molding of Short-Fiber-Reinforced Composite Material," Ph. D. Dissertation, The Ohio State University.
- (11) Kim, N. S., 1992, "An Analysis of Molding and Curing of SMC by the Finite Element Method," 한국소성가공학회, '92년 추계학술대회논문집, pp. 365~385.
- (12) 김덕기, 최형연, 1993, "SMC 압축성형에 대한 실험적 연구," 대한기계학회, '93년 춘계학술대회논문집(I), pp. 251~255.
- (13) 조재호, 김낙수, 1993, "SMC 압축성형에 대한 해석적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 256~261.
- (14) 이대길, 1993, "복합재료 역학 및 가공론," 성안당, pp. 281~330.
- (15) 김동원, 1989, "소성학," 청문각, pp. 133~177.
- (16) 김기택, 1994, "SMC 압축성형에서의 열 및 유동에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위논문, pp. 20~22.
- (17) Holaman, J. P., 1986, *Heat Transfer*, McGraw-Hill, pp. 131~136.