

(論 文)

## 리브를 가진 일체형 SMC 압축성형재의 Sink Mark 형성에 관한 실험적 연구

정진호\* · 임용택\*\*

(1995년 1월 19일 접수)

### An Experimental Study on Sink Mark Formation in Compression Molded SMC Parts with Rib

Jin-Ho Jeong and Yong-Taek Im

**Key Words :** Compression Molded SMC (SMC 압축성형재), Substructure (보강재), Sink Mark (가는 홈), SEM (주사전자현미경), In Mold Coating (금형내 코팅)

#### Abstract

Compression molding of SMC (Sheet Molding Compound) in a thin plaque with substructures like a rib is involved with the formation of surface defect along the centerline over the rib area called by sink mark depending on process parameters. The surface quality of the external panels in automotive manufacturing is so critical that this kind of defect should be eliminated during manufacturing stages. The effect of process parameters on sink mark formation and the distribution of chopped fiberglasses in the compression molded thin plaque with a rib was experimentally investigated in the present study. In order to estimate the effect of the molding parameters such as molding temperature, mold closing speed, depth of the rib, corner radius of the rib, and final molded part thickness of flat portion on the depth of sink mark and the distribution of fiberglasses in the molded SMC part with the rib under the present experimental conditions, the molding parameters used in experiments were non-dimensionalized considering physical relevance among various parameters. The non-dimensionalized equation for predicting the depth of sink mark was determined through dimensional analysis based on the experimental data. The orientation and distribution of fiberglasses and fillers which directly affect the formation and depth of sink mark were investigated by taking the photographs of the cross-sectional area of the molded specimen using scanning electron microscope. The experimental results proposed from this investigation are useful in understanding the formation of sink mark and predicting the depth of sink mark in compression molding of SMC with substructures.

#### 1. 서 론

SMC(sheet molding compound)는 열경화성 고

분자수지에 저수축첨가제, 경화개시제, 증점제, 이형제 등의 여러가지 화학첨가제를 혼합한 후, 유리섬유를 함침시켜 판상상태로 증점시킨 복합재료로서 비강도, 비강성이 뛰어나고, 내부식성, 내충격성, 흡음성 등이 좋으며 재료원가가 저렴하므로 최근에 그 수요가 증가하고 있는 소재이다. 특히

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

SMC는 성형된 제품의 기하학적인 정밀도가 높은데, 이는 재료의 열팽창률이 열가소성 수지보다 낮기 때문이다. 따라서 제품의 치수 정밀도가 유지되어야 하는 경우에는 열가소성 수지에 비해 응용이 유리하다. 이러한 장점에 따라 욕조, 세면대, 물탱크 등의 각종 생활용품의 제작에 SMC의 사용이 증가되고, 최근에는 특히 자동차 산업에서 각종 환경 및 연비 규제에 따른 차체 경량화의 필요성에 따라 자동차 외관 성형재로서의 쓰임이 증가하고 있다. 자동차의 외관 가운데 후드, 쉐더, 트렁크 등에서의 적용은 특히 SMC의 장점을 적절히 활용한 부분으로서 보강재를 일체형으로 성형하는 경우에는 기술적, 경제적으로 유용한 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 이러한 보강재를 가진 일체형 구조물의 경우, 보강재인 리브의 반대편에 리브의 중심을 따라 오목하게 패인자국이 남는 가는 흠(sink mark)이라는 표면결함이 공정변수에 따라 생기는 것으로 알려져 있다. 이러한 결함은 SMC의 자동차 외관 등에서의 적용에 치명적인 결함이 되며, 따라서 보강재를 가진 일체형 구조물을 자동차 외관 등에 사용하기 위해서는 기계적 특성의 확보와 함께 가는 흠과 같은 표면결함을 없애기 위한 노력이 중요하다.

가는 흠 결함의 형성원인은 중합과정과 냉각과정 중의 수지수축, 그리고 수지에 포함된 공기에 의한 수축으로 나눌 수 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 원인들은 특히 리브주위의 유동에 따른 수지와 유리섬유의 불균일한 분포에 의해 나타난다. 즉, SMC 장입재는 압축성형 중에 온도가 증가함에 따라 점도가 현저히 감소하여 금형 내부를 채우게 된다. 이 때, 리브로의 유동이 시작되어 리브주위의 영역은 리브 모서리 부분의 유리섬유와 충전재(filler)가 몰려있는 유리섬유 충전지역과 리브 반대편에 생기는 역삼각형 모양의 수지 충전지역으로 나뉘게 된다.<sup>(2)</sup> 유리섬유는 SMC 소재의 강도 및 강성을 높이기 위해 첨가되며, 충전재는 SMC 소재의 유동성 향상 및 가격 절감은 물론 수축량을 줄이기 위해 첨가되는 소재이다. 이러한 유리섬유 및 충전재가 유동에 의해 수지와 분리를 일으켜 모서리부에 몰림으로써 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역으로 나뉘게 되면, 나뉘어진 두 영역의 열적인 재료특성은 다르게 되고, 이에 따라 중합 및 냉각과정 중에 두 영역의 수축량의 차이에 의한 표면 결함으로 가는 흠이 생기게 된다.

앞서 밝힌 바와 같이 SMC를 자동차의 외관에 적용하기 위해서는 이와 같은 표면결함은 치명적이기 때문에 주로 선진 자동차 공업국의 자동차 회사를 중심으로 한 표면결함 생성에 대한 실험적 연구가 진행되었다. 이러한 실험적 연구결과를 김<sup>(1)</sup>이 정리하여 가는 흠 결함을 줄일 수 있는 압축성형 공정변수들에 관해 고찰하였으며, Smith 등<sup>(2)</sup>은 가는 흠 결함의 크기가 리브입구 부분의 형상비에 직접 관련된다는 가정으로부터 각 관련 형상변수들 사이의 무차원 변수들을 도입해 실험적 연구를 수행하였고, 리브주위의 유동을 해석하기 위한 수치적 모델을 제안하였다. 또한, SMC automotive alliance<sup>(3)</sup>는 리브와 같은 보강재를 가진 일체형 구조물이 A급 표면정도(Class-A)를 가지도록 리브 각 부분의 형상을 성형된 제품의 평판부 두께를 기준으로 평가하였다.

가는 흠 생성의 원인이 되는 유리섬유의 분포 및 방향성에 관련한 연구를 살펴보면, Hojo 등<sup>(4)</sup>이 등온상태에서 섬유함유비의 분포를 고체-액체의 2상 유동모델을 사용하여 계산하였고, 실험을 통해 제안된 모델을 검증하였다. Kamal 등<sup>(5)</sup>은 섬유가 수지에 부유하는 단순 유동내에서 섬유방향을 예측하고, 섬유의 구조적 변화와 유동특성 사이의 상호관계를 설명할 수 있는 수학적 모델을 제안하였다. 최근에는 Advani 등<sup>(6)</sup>이 얇은 평판의 SMC 압축성형시, 섬유의 방향을 예측하기 위해 2차 텐서를 도입한 유한요소해석기법을 개발하였다. 또한, 성형된 제품의 표면정도에 관한 연구가 수행되어 Hersam<sup>(7)</sup>이 Loria 표면 측정장비를 사용하여 다양한 공정변수에 따른 SMC 압축성형체의 표면 정도를 실험적으로 평가하였으며, Infield<sup>(8)</sup>는 60초 이하의 짧은 성형시간에 A급 표면정도를 얻기 위한 프레스설계 및 공정조건 제어에 관해 고찰하였다.

이상의 연구와 함께 성형된 제품 표면을 금형 내 코팅(in mold coating)함으로써 가는 흠과 같은 표면 결함을 제거하여 A급 표면정도를 얻기 위한 연구도 진행되었다. Pelfrey<sup>(9)</sup>는 다양한 열가소성 플라스틱소재를 이용한 차체 외관 성형시의 금형내 코팅 공정조건을 제시하였고, Castro 등<sup>(10)</sup>은 금형내 코팅 공정의 수학적 모델링을 통해 SMC 소재 자동차 후드 성형시의 사출압력, 충전시간, 그리고 충전경향 등을 고찰하였다. 또한, Liebold<sup>(11)</sup>는 보강재 일체형 SMC 압축성형체의 금형내 코팅시,

필요한 장비 및 공정조건에 대해 고찰하였다. 본 연구에서는 한개의 리브를 가진 단면이 T형 상인 판재를 압축성형하는 과정에서 관련되는 성형 공정변수들과 리브입구부의 형상변수들을 바꾸어 관련 변수들 사이의 연관성을 실험적으로 검토하였다. 압축성형된 제품의 표면에 형성되는 가는 홈 결함의 크기를 예측할 수 있는 관계식을 얻기 위해 성형공정변수와 형상변수들을 적절히 무차원화하고 차원해석을 수행하였다. 실험결과의 정확성을 기하기 위해 각 조건 하에서 5개의 시편으로부터 얻은 결과를 평균해 사용하여 필요한 무차원식을 구하였다. 또한, 리브주변의 수지와 유리섬유의 분포가 표면결함 형성에 미치는 영향을 검토하기 위해 주사전자현미경을 이용하여 각 공정변수에 따른 제품의 단면 사진을 찍어 이들의 분포를 고찰하였다.

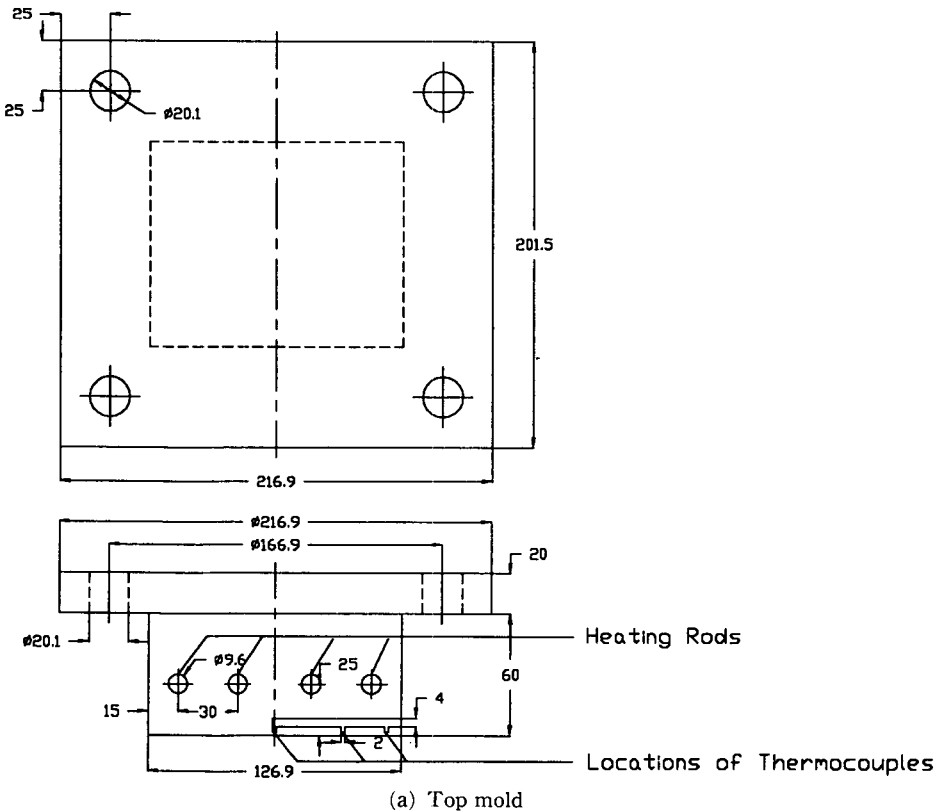
## 2. 실험

압축실험을 위해 Shimadzu사의 Model명 UH-50

A 50 ton 유압식 만능시험기를 사용하였으며, Fig. 1에서와 같이 127×101 mm<sup>2</sup>의 단면적을 갖는 상·하부 금형을 제작하여 이용하였다. 하부금형의 중심부에는 가로 20 mm, 세로 25 mm의 홈을 만들고, 고려하고자 하는 형상 공정변수에 맞도록 리브 부분의 슬롯을 바꿔 장착하여 실험을 수행하였다. 금형을 원하는 온도로 가열하기 위해 1개당 100 W의 용량을 갖는 히터봉을 상·하부 금형에 각각 4개씩 장착하였고, 압축성형 중에 원하는 온도를 일정하게 유지하도록 온도조절기를 제작하여 사용하였다.

실험에 사용된 SMC 시편은 25.4 mm 길이의 유리섬유가 30%의 무게비를 갖는 A급의 소재를 (주)LG화학으로부터 제공받았다. 초기시편의 형상은 가로 63.5 mm, 세로 50.5 mm 로서, 하부금형 단면적의 25%를 차지하도록 하부금형에 장입하였고, 초기시편의 높이는 11 mm와 22 mm로 하였다.

성형된 SMC 압축성형재의 가는 홈의 크기를 정



(a) Top mold

Fig.1 Continued

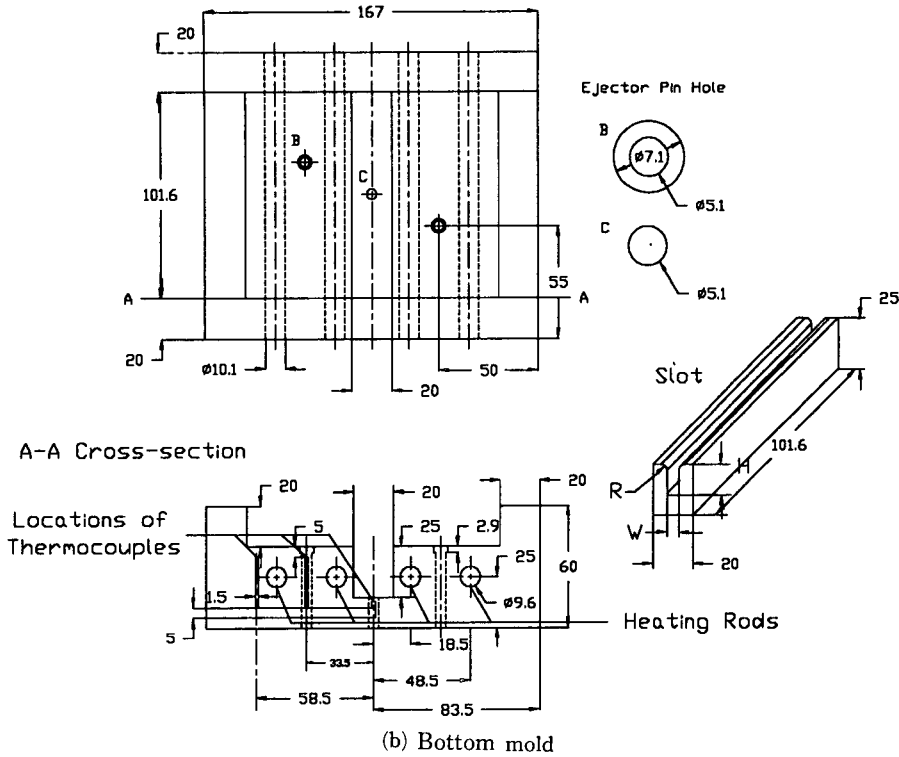


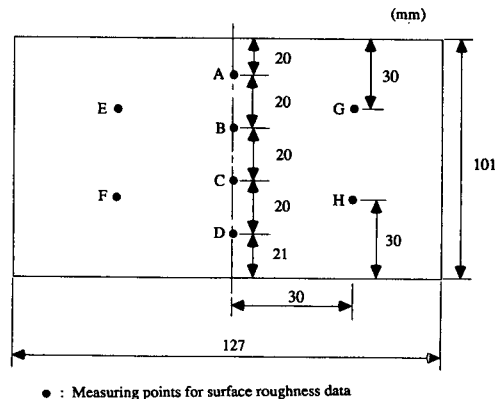
Fig. 1 Schematic design of molds used for SMC compression molding experiments

량적으로 측정하기 위해서 직접 접촉식 표면거칠기 측정장비인 Mitutoyo사의 Model명 Sufstest-400을 사용하였다. 이 장비는 측정하고자 하는 시편의 표면 위를 다이아몬드 축침이 일정거리를 일정속도로 지나가며, 표면거칠기의 편차를 측정하여, 산술 평균한 평균 거칠기와 최대 거칠기 등을 측정하도록 되어있다.

각 시편에 생기는 가는 흠의 크기를 측정하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 시편표면의 좌·우 평판부 네 점(E, F, G, H)에서 측정한 평균 표면거칠기값들을 산술평균하고, 중심선을 따라 네점(A, B, C, D)에서 측정한 최대 표면 거칠기값들을 산술 평균한 후, 후자에서 전자를 뺀 값을 가는 흠의 크기로 정의하였다.

각 공정변수에 따른 가는 흠의 크기를 공정하게 측정하기 위해 각 공정변수에서 5개씩의 시편을 성형하여, 각 시편에서 측정한 가는 흠의 크기를 산술평균하였다. 또한, 각 공정변수에서 성형된 시편의 가는 흠 형성에 큰 영향을 끼치는 리브 주위의 유동양상을 파악하기 위해 리브 단면 주사전자현미

경 사진을 찍었다. 사용된 주사전자현미경 사진기는 Jeol사의 가속전압 20 kV 사용하는 Model명 JSM840A였으며, 찍고자 하는 시편들이 플라스틱이었기 때문에 주사전자현미경 사진을 찍기위해서 각 시편의 표면에는 백금 도금을 하였고, 측면에는



● : Measuring points for surface roughness data

Fig. 2 Schematic diagram of measuring points of the surface roughness in the molded specimen for estimating sink mark depth

전자의 흐름을 가능하게 하기 위해 액체 탄소를 발라서 사용하였다.

### 3. 차원해석

본 실험적 연구에서는 성형공정변수로서 성형온도와 금형 단형속도를 고려하였고, 형상공정변수로서 리브입구부의 모서리 반경, 리브깊이, 그리고 성형된 시편의 평판부 두께를 고려하였다. 이와같은 공정변수들을 이용해 각 공정변수들이 성형된 시편의 가는 홈 크기에 영향을 미치는 상관관계를 고려하여 무차원 변수들을 조합하였고, 이들이 가는 홈의 크기에 미치는 효과를 수학적으로 표현하기 위해 다음 식으로 표현되는 차원해석을 수행하였다.

$$v_s = \frac{S.M.}{t} = F(v_T, v_V, v_W, v_H, v_R) \quad (1)$$

여기서, S.M.은 측정된 가는 홈의 크기이고, t는 성형된 시편의 평판부 두께이다. 또한, 위의 식에 사용된 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$v_T = \frac{T_m}{T_c} \quad (2)$$

$$v_V = \frac{V \cdot t}{\alpha} \quad (3)$$

$$v_W = \frac{W}{t} \quad (4)$$

$$v_H = \frac{H}{W} \quad (5)$$

$$v_R = \frac{H-R}{H} \quad (6)$$

여기서,  $T_m$ 은 금형의 초기 절대온도,  $T_c$ 는 SMC

장입재의 초기 절대온도,  $V$ 는 금형단형속도,  $\alpha$ 는 SMC 소재의 열확산계수,  $W$ 는 리브의 폭,  $H$ 는 리브의 깊이, 그리고  $R$ 은 리브 모서리반경으로 각 형상변수들은 Fig. 3에 보인 바와 같다.

주어진 무차원변수들을 이용한 가는 홈 크기 계산식은 다음과 같이 수식화할 수 있으며, 각 계수들은 실험을 통해 결정하였다.

$$v_s = K \cdot v_T^a \cdot v_V^b \cdot v_W^c \cdot v_H^d \cdot v_R^e \quad (7)$$

### 4. 실험결과 및 검토

앞서 제안된 식(7)에서 각 상수들을 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 고려된 성형공정변수로는 금형온도를 130과 150°C, 금형단형속도는 25와 50 mm/min으로 나누었으며, 형상공정변수로는 성형된 시편의 평판부 두께를 1.55와 4 mm, 리브의 깊이는 10, 12, 14, 16, 18, 20 mm의 여섯가지 경우, 그리고 리브 모서리반경은 0, 2, 4, 6 mm의 네가지 경우로 나누어 실험하였다.

Table 1에 무차원변수  $v_T$ 에 따른 성형된 시편의 평판부 두께에 대한 무차원화된 가는 홈의 크기  $v_s$ 의 변화를 정리하였다. 실험시, 성형온도는 130°C와 150°C로 나누어 사용하였으며, 초기시편의 온도는 25°C, 금형단형속도는 50 mm/min, 리브의 깊이는 20 mm, 리브의 폭과 리브 모서리반경은 각각 6 mm, 그리고 성형된 시편의 평판부 두께는 1.50 mm가 되도록 하였다.

정리된 결과로부터  $v_T$ 의 값이 작을 때,  $v_s$ 의 값도 작음을 알 수 있었다. Fig. 4에는 이 때 각 시편의 리브 단면 주사전자현미경으로부터 얻은 사진

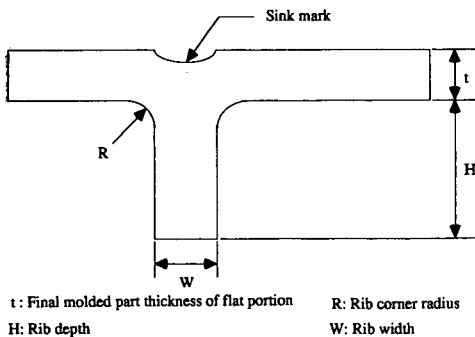


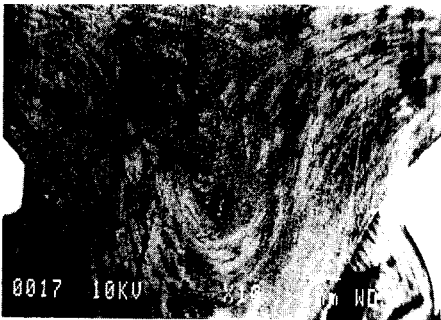
Fig. 3 Schematic diagram of the rib geometry variables used in experiment for estimating sink mark depth

Table 1 Comparison of the values of  $v_s$  versus  $v_T$  (molding conditions used in experiment : mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, rib corner radius=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.50 mm)

$v_T \left[ = \frac{T_m}{T_c} \right]$	$v_s \left[ = \frac{S.M.}{t} \right] \times 10^{-3}$
1.42	25.3
1.35	25.0



(a)  $v_T=1.42$  and  $v_w=3.87$



(b)  $v_T=1.35$ ,  $v_v=6.63$ ,  $v_H=3.33$ , and  $v_R=0.7$

**Fig. 4** SEM photographs observing fiber distribution for rib entrance of cross-sectional T-shape molded part with various non-dimensional parameters (molding conditions used in experiment : mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, rib corner radius=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.50 mm)

을 보였다. 사진에서 검게 보이는 부분은 내부 기공이 존재하는 부분이며, 흰선처럼 보이는 부분은 유리섬유와 충전재가 수지의 유동을 따라 늘어서 있는 부분이다.

Fig. 4(a)는  $v_T$ 의 값이 1.42일 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진이며, Fig. 4(b)는  $v_T$ 의 값이 1.35일 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진으로, 두 사진에서 리브 안쪽의 유동을 따라 유리섬유와 충전재가 모서리부에 몰려있는 모습을 볼 수 있었다. 따라서, 리브 모서리부에서의 유리섬유 충전지역과 리브 반대편에 생기는 역삼각형모양의 수지 충전지역의 분리가 일어났음을 알 수 있었다.  $v_T$ 의 값이 1.42로 큰 경우 (Fig. 4(a)),  $v_T$ 의 값이 1.35로 작은 경우 (Fig. 4(b))에 비해 리브 안쪽의 유동이 더 원활히 일어남으로써 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역

**Table 2** Comparison of the values of  $v_s$  versus  $v_v$  (molding conditions used in experiment : molding temperature=130°C, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, rib corner radius=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.50 mm)

$v_v \left[ = \frac{V \cdot t}{a} \right]$	$v_s \left[ = \frac{S.M.}{t} \right] \times 10^{-3}$
3.31	27.73
6.63	25.00

의 구분이 더 크게 일어났음을 알 수 있었으며, 이로부터 생각시,  $v_T$ 의 값이 큰 경우에 가는 흠의 크기가 더 커짐을 확인하였다. 이러한 결과는 초기 시편의 온도를 포함한 다른 공정조건들이 동일할 때, 성형온도가 높아지게 되면 같은 압축비에서 낮은 성형온도의 경우에 비해 장입된 SMC 시편의 온도가 더 높아지게 되고, 이에 따라 점도가 더 낮아짐으로써 유동은 더욱 활발해지게 된다. 따라서, 낮은 점도에 의한 리브 안쪽의 활발한 유동에 의해 리브 모서리부에서 유리섬유와 충전재가 수지와 분리되는 정도가 커짐으로써 리브 모서리부에서는 유리섬유와 충전재가 몰려 유리섬유 충전지역을 이루게 되고, 리브의 반대편에서는 유동의 흐름에 의해 역삼각형모양의 수지 충전지역이 더 크게 생기게 된다.

Table 2에는 무차원변수  $v_v$ 의 변화에 따른  $v_s$ 의 변화를 보였다. 무차원변수  $v_v$ 는 금형단함속도가 금형으로부터 SMC 시편으로 전달되는 열전달양에 직접적인 관계가 있는 점을 고려해, 금형단함속도와 성형된 시편의 평판부 두께를 곱한 후, 열확산계수,  $\alpha$ 로 나눈 값으로 정의하였다. 금형단함속도를 25와 50 mm/min으로 나누었으며, 성형온도는 130°C, 리브의 깊이는 20 mm, 리브의 폭과 리브의 모서리반경은 각각 6 mm, 그리고 성형된 시편의 평판부 두께는 1.50 mm가 되도록 하였다.

정리된 결과로부터  $v_v$ 가 작은 값을 가지는 경우, 큰 값을 가지는 경우에 비해 더 큰 가는 흠이 생김을 알 수 있었다.  $v_v$ 를 제외한 다른 공정변수들이 동일한 값을 가지는 경우,  $v_v$ 의 값이 작을 때, 금형내에서 SMC 장입재의 점도가 같은 압축비에서 상대적으로 더 낮아 리브 안쪽의 유동이 더 원활하게 일어날뿐 아니라 유리섬유 및 충전재와 수

지 사이의 분리가 일어나는 정도가 더 커지는 것을 알 수 있었다. 이 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 5와 Fig. 4(b)로부터 이를 확인할 수 있다.

$v_w$ 의 값이 3.31일 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 5와  $v_w$ 의 값이 6.63일 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 4(b)의 비교로부터  $v_w$ 의 값이 작은 경우, 리브 안쪽에서의 유동이 더 활발하게 이루어졌음을 볼 수 있었으며, 유리섬유와 충전재가 리브 모서리부에 더 많이 몰려있음을 볼 수 있었다. 본 실험조건에서와 같이 금형단힘속도가 작아  $v_w$ 의 값이 작게 되는 경우, 같은 압축비까지의 성형시간이 더 길어지게 되고, 이에 따라 금형으로부터 SMC 장입재로의 열전달량이 많아지게 됨으로써 SMC 장입재의 점도가 현저히 감소해 압축에 따른 유동이 활발하게 진행되고, 이에 따라 유리섬유와 충전재의 수지와와의 분리도 촉진되게 된다. 성형된 시편의 평판부 두께가 얇거나 열확산계수,  $\alpha$ 가 큰 경우도 마찬가지로 같은 압축비에서 금형으로부터 SMC 장입재로의 열전달량이 많아지게 됨으로써 같은 결과를 보일 것이다.

성형된 시편의 리브 폭과 평판부 두께의 비로 정의한 무차원 변수  $v_w$ 의 변화에 따른  $v_s$ 의 크기변화를 Table 3에 보였다. 시편의 리브 폭은 6 mm로 고정하였고, 성형된 시편의 평판부 두께를 1.55 mm와 4.00 mm로 바꾸었다. 성형온도는 150°C,

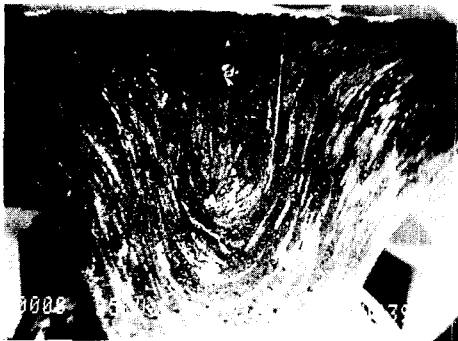


Fig. 5 SEM photograph observing fiber distribution for rib entrance of cross-sectional T-shape molded part with  $v_w$  of 3.31 (molding conditions used in experiment : molding temperature=130°C, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, rib corner radius=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.50 mm)

Table 3 Comparison of the values of  $v_s$  versus  $v_w$  (molding conditions used in experiment : molding temperature = 150°C, mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, and rib corner radius=6 mm)

$v_w \left[ = \frac{W}{t} \right]$	$v_s \left[ = \frac{S.M.}{t} \right] \times 10^{-3}$
3.87	24.52
1.50	8.20

금형단힘속도는 50 mm/min, 리브깊이는 20 mm, 그리고 리브 모서리반경은 6 mm로 하였다.

결과로부터  $v_w$ 의 값이 3.87인 경우, 1.50일 때에 비해 더 큰  $v_s$ 의 값을 보임을 알 수 있었다. 이는 리브의 폭이 커지든지, 성형된 시편의 평판부 두께가 작아지면, 상대적으로 많은 양의 SMC 장입재가 리브 안쪽으로 유동함으로써 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역의 분리가 크게 일어나기 때문이다. 이러한 결과는 Fig. 4(a)와 Fig. 6의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진들을 통해 잘 알 수 있다.

$v_w$ 의 값이 3.87인 경우의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 4(a)에서는 리브방향으로의 유동양이 평판부 유동량에 비해 상대적으로 많음으로써 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역



Fig. 6 SEM photograph observing fiber distribution for rib entrance of cross-sectional T-shape molded part with  $v_w$  of 1.50 (molding conditions used in experiment : molding temperature=150°C, mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, and rib corner radius=6 mm)

의 구분이 뚜렷하게 나타났으나,  $v_w$ 의 값이 1.50인 경우의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 6의 경우에는 성형된 시편의 평판부 두께가 두꺼움으로 인해 리브방향의 유동양이 상대적으로 적어 사진에서 보는 바와 같이 Fig. 4(a)에서 보이는 것과 같은 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역의 뚜렷한 구분이 보이지 않았다. 이로부터 리브의 폭과 성형된 시편의 평판부 두께의 비는 가는 홈의 크기와 직접적인 관계가 있음을 알 수 있었으며, 무차원 변수  $v_w$ 의 정의를 통해 정량적인 관계식을 유도할 수 있을 것으로 고찰되었다.

Table 4에는 리브의 깊이와 성형된 시편의 평판부 두께의 비로 정의한 무차원변수  $v_H$ 의 변화에 따른  $v_s$ 의 크기 변화를 정리하였다. 이 경우 성형된 시편의 평판부 두께는 1.53 mm로 고정하였고, 리브의 깊이를 20, 18, 16, 14, 12, 그리고 10 mm의 여섯가지로 나눠 실험하였다. 성형온도는 130°C, 금형단힘속도는 50 mm/min, 그리고 리브의 폭과 리브 모서리반경은 각각 6 mm로 하였다.

정리된 결과로부터,  $v_H$ 의 값이 작아지면,  $v_s$ 의 크기도 점차 작아지는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 성형된 시편의 평판부 두께가 같은 경우에는 리브의 깊이가 깊을수록 가는 홈의 크기가 커지며, 리브의 깊이가 같은 경우에는 성형된 시편의 평판부 두께가 얇을수록 가는 홈의 크기가 커짐을 예측할 수 있었다. Fig. 4(b)와 Fig. 7에는 실험한 결과

를 각각의 경우의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면 사진으로 보였다.

$v_H$ 의 값이 3.33일 때의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 4(b)와  $v_H$ 의 값이 3.00에서 1.67까지의 주사전자현미경으로부터 얻은 리브 단면사진인 Fig. 7(a)~(e)까지의 사진들의 비교를 통해,  $v_H$ 의 값이 감소함에 따라 리브 안쪽에서의 유동양이 감소함으로써 리브 모서리부에서 유리섬유의 배향기울기가 완만해짐을 알 수 있었으며,  $v_H$ 의 값이 클 때 보이는 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역의 분리된 정도와 크기도 점차 감소함을 알 수 있었다. 리브의 깊이와 성형된 시편의 평판부 두께의 비는 리브 안쪽에서의 유동양에 직접적인 영향을 미침으로써, 결국 가는 홈의 형성 및 크기에 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다.

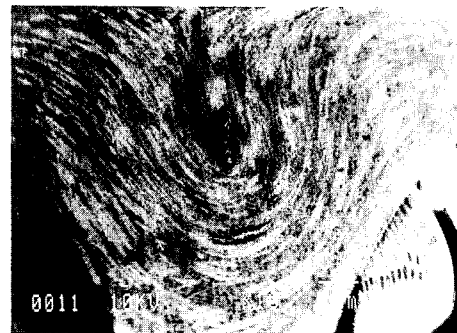
Table 5에서는 리브깊이에서 곡면부를 뺀 값과 리브깊이와의 비로 정의한 무차원변수  $v_R$ 의 변화에 따른  $v_s$ 의 크기 변화를 고찰하였다. 시편의 리브깊이는 20 mm로 고정하였고, 리브 모서리부의 반경을 6, 4, 2, 그리고 0 mm로 변화시켰다. 성형온도는 130°C, 금형단힘속도는 50 mm/min, 리브

**Table 4** Comparison of the values of  $v_s$  versus  $v_H$  (molding conditions used in experiment : molding temperature = 130°C, mold closing speed=50 mm/min, rib width=6 mm, rib corner radius=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.53 mm)

$v_H \left[ = \frac{H}{W} \right]$	$v_s \left[ = \frac{S.M.}{t} \right] \times 10^{-3}$
3.33	24.51
3.00	23.59
2.67	20.39
2.33	19.74
2.00	16.34
1.67	15.10



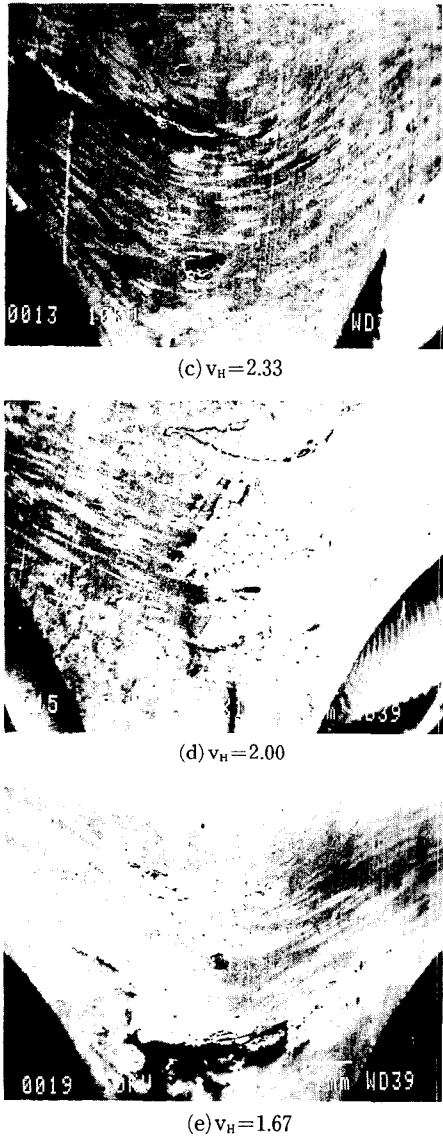
(a)  $v_H=3.00$



(b)  $v_H=2.67$

Fig. 7 Continued





**Fig. 7** SEM photographs observing fiber distribution for rib entrance of cross-sectional T-shape molded part with various values of  $v_H$  (molding conditions used in experiment : molding temperature = 130°C, mold closing speed = 50 mm/min, rib width = 6 mm, rib corner radius = 6 mm, and final molded part thickness of flat portion = 1.53 mm)

의 폭은 6 mm, 그리고 성형된 시편의 평판부 두께는 1.53 mm가 되도록 하였다.

정리된 결과로부터  $v_R$ 의 값이 0.7로 가장 작을 때,  $v_s$ 의 크기가  $24.51 \times 10^{-3}$ 으로 가장 컸으며,  $v_R$ 의 값이 1.0으로 모서리가 직각인 경우에는  $v_s$ 의

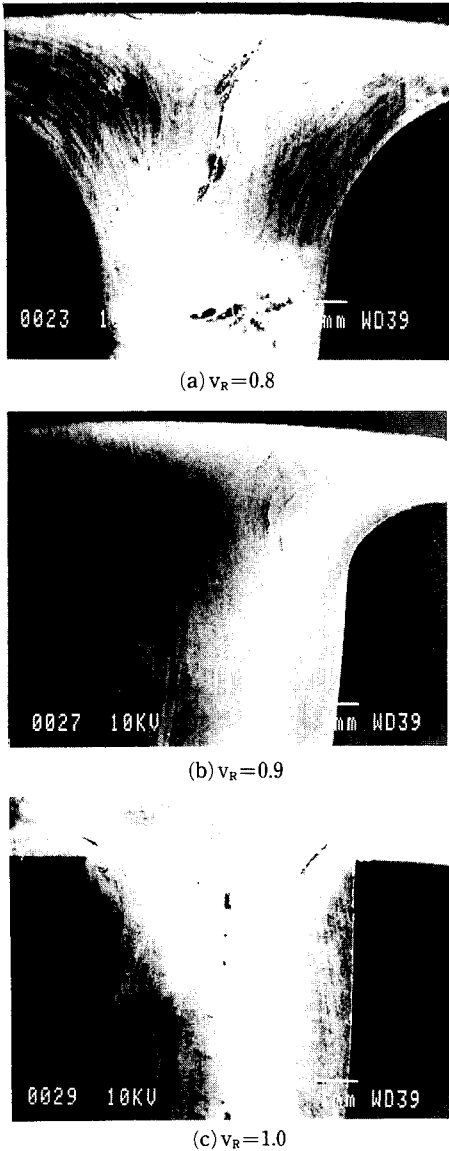
**Table 5** Comparison of the values of  $v_s$  versus  $v_R$  (molding conditions used in experiment : molding temperature = 130°C, mold closing speed = 50 mm/min, rib depth = 20 mm, rib width = 6 mm, and final molded part thickness of flat portion = 1.53 mm)

$v_R \left[ = \frac{H-R}{H} \right]$	$v_s \left[ = \frac{S.M.}{t} \right] \times 10^{-3}$
0.7	24.51
0.8	20.72
0.9	19.41
1.0	17.71

크기가  $17.71 \times 10^{-3}$ 으로 가장 작았다. 이로부터 리브 모서리부의 반경이 클수록 가는 흠의 크기가 커지며, 리브 모서리부의 반경이 작을수록 가는 흠의 크기가 작아짐을 알 수 있었다.  $v_R$ 의 값이 0.7일 때의 리브 단면 주사전자현미경 사진인 Fig. 4(b)로부터, 완전한 리브 모서리부를 따라 유동이 원활하게 일어나 유리섬유와 충전재가 모서리부에 몰려 있음을 볼 수 있었으며, 이렇게 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역의 구분이 크게 일어남으로써 가는 흠의 크기가 커지는 것을 알 수 있었다.  $v_R$ 의 값이 0.8, 0.9, 1.0으로 점차 커지는 경우의 사진인 Fig. 8(a), (b), (c)를 비교해 봄으로써,  $v_R$ 의 값이 점차 커짐에 따라 리브 모서리부에서의 유동이 원활하게 이루어지지 못함을 볼 수 있었으며, 특히  $v_R$ 의 값이 1.0인 Fig. 8(c)의 경우에는, 직각인 모서리부에서 유동이 모서리를 따라 이루어지지 못함으로써 유리섬유와 충전재가 모서리부 가까이에서 몰리지 못하는 것을 볼 수 있었다.

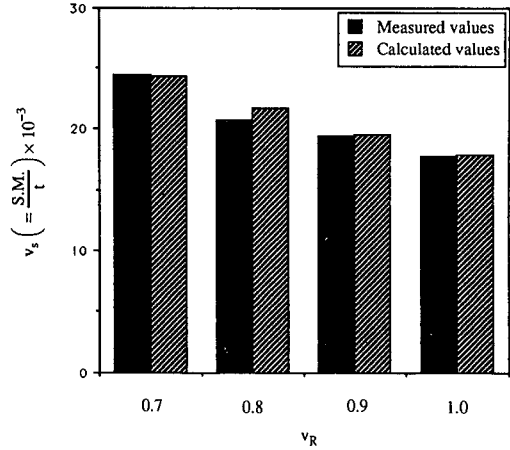
이러한 유동의 결과로 수지 충전지역과 유리섬유 충전지역의 구분이 감소하여, 가는 흠이 상대적으로 작게 생성되었다. 결과적으로 리브 모서리부의 반경에 따른 무차원변수  $v_R$ 의 고려를 통해 리브 모서리부의 유동양상 및 유리섬유, 충전재의 배향 및 분포정도가 가는 흠의 크기에 큰 영향을 끼침을 알았다.

초기 장입재의 두께와 최종 제품의 평판부 두께 비가 가는 흠의 크기에 미치는 영향을 검토해 보면, 본 실험에서 금형 단면적에 대한 초기 장입재



**Fig. 8** SEM photographs observing fiber distribution for rib entrance of cross-sectional T-shape molded part with various values of  $v_R$  (molding conditions used in experiment : molding temperature=130°C, mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, and final molded part thickness of flat portion =1.53 mm)

의 면적비를 25%로 일정하게 유지하고, 초기 장입재의 두께를 11 mm와 22 mm로 변화시켜 최종 제품의 평판부 두께를 1.55 mm와 4.0 mm로 성형하여 Table 3의 결과를 얻었다. 이 경우 초기 장입



**Fig. 9** Comparison of  $v_s$  between measured and calculated values at various  $v_R$  values (molding conditions used in experiment : molding temperature=130°C, mold closing speed=50 mm/min, rib depth=20 mm, rib width=6 mm, and final molded part thickness of flat portion=1.53 mm)

재의 두께와 최종 성형된 제품의 평판부 두께비는 7.1과 5.5였다. 결과적으로 Table 3으로부터 초기 장입재의 두께와 최종 성형된 제품의 평판부 두께비가 7.1인 경우에 가는 흠의 크기와 최종 제품의 평판부 두께의 비,  $v_s$ 의 값은  $24.52 \times 10^{-3}$  이었으며, 초기 장입재의 두께와 최종 성형된 제품의 평판부 두께비가 5.5인 경우에는  $v_s$ 의 값이  $8.2 \times 10^{-3}$  이었다. 이로부터 초기 장입재의 두께와 최종 성형된 제품의 평판부 두께비가 큰 경우에 가는 흠의 크기가 커짐을 간접적으로 알 수 있었다.

이상의 실험결과를 정리하여 식(7)로 제한한 무차원식에서 각 계수들을 결정하였다. 결정된 계수들을 이용해 구한 식은 다음과 같다.

$$v_s = \frac{S.M.}{t} = 1.2 \times 10^{-3} \cdot \frac{v_T^{0.236} \cdot v_W^{1.005} \cdot v_H^{1.282}}{v_V^{0.150} \cdot v_R^{0.881}} \quad (8)$$

이상으로 결정된 무차원식을 이용해 대표적으로 무차원변수  $v_R$ 의 변화에 따른  $v_s$ 의 변화를 계산하여 실험을 통해 측정된 값과 비교해 보았다. 이 경우의 비교한 결과를 Fig. 9에 보였으며, 계산값과 측정값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서, 결정된 무차원식을 통해 가는 흠의 크기를 성형된 시편의 평판부 두께로 나눈 무차원변수,  $v_s$ 와 성형된 시편의 유동양상에 관계하는 공정변수들의 조합으로 정의한 무차원변수들을 이용해 주어진 공

정조건에서 가는 흠의 크기를 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

SMC 압축성형공정에서 생기는 표면결함인 가는 흠의 크기변화를 공정 및 형상변수에 따른 실험적 연구를 통해 고찰하였다. 본 실험적 연구에서는 공정변수로서 성형온도와 금형단속도를 고려하였으며, 성형된 시편의 형상변수로서 리브의 깊이, 리브 모서리반경, 그리고 성형된 시편의 평판부 두께를 고려하였다. 또한, 관련 공정변수들 사이의 연관성을 고려해 이들 공정변수들을 적절하게 무차원화한 후, 차원해석을 통해 가는 흠의 크기를 평가할 수 있는 무차원식을 제안하였고, 실험을 통해 제안된 무차원식을 결정하였다. 본 실험을 통해 구한 무차원식은 본 연구에서 사용된 재료와 공정조건에서 크게 벗어나지 않는 경우, 리브를 가지는 SMC 압축성형 및 공정설계시, 고려되는 공정변수 사이의 역할을 고찰하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 일반적인 경우에 적용될 수 있는 결과는 본 연구결과를 확장함으로써 얻어질 수 있으리라고 생각한다.

## 후 기

본 연구는 상공자원부와 한국과학재단의 연구지원 사업과 삼성중공업(주), 현대자동차(주), 제일모직, (주)LG화학, 화신산업의 연구지원에 의해 수행된 것으로 이에 관계자 제위께 감사드린다. 또한, 주사전자현미경 사진을 찍는데 큰 도움을 주신 한국과학기술원 재료공학과와 남수우 교수님과 SMC 시편 제작을 위해 인장시험기 사용을 허락해 주신 기계공학과와 허 훈 교수님께도 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

- (1) Kim, J. I., 1990, "Computer Modeling and Analysis of Anisotropic Material Flow in Compression Molding of Short-Fiber-Reinforced Composite Material," Ph. D. Thesis, The Ohio State University, pp. 18~22.
- (2) 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. 829~834.
- (3) SMC Automotive Alliance, 1991, *SMC Design Manual*, The Composites Institute of the Society of the Plastics Industry, Inc., pp. 21~22.
- (4) Hojo, H., Kim, E. G. and Tamakawa, K., 1987, "The Fibre Content Distribution of Compression Molded Long Fiber-Reinforced Thermoplastic Products," *Intern. Polymer Processing*, Vol. 1, No. 2, pp. 60~65.
- (5) Kamal, M. R. and Mutel, A. T., 1989, "The Prediction of Flow and Orientation Behavior of Short Fiber Reinforced Melts in Simple Flow Systems," *Polymer Composites*, Vol. 10, No. 5, pp. 337~343.
- (6) Advani, S. G. and Tucker III, C. L., 1990, "A Numerical Simulation of Short Fiber Orientation in Compression Molding," *Polymer Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 164~173.
- (7) Hersam, T., 1989, "Evaluation of Specific Variables Influencing Automotive Grade SMC Smoothness : Part 1," *44th Annual Conference, SPI*, 12A, pp. 1~5.
- (8) Infield, F., 1988, "Compression Molding-Presses to Produce Parts with Tight Tolerances and Class "A" Finishes in Less than Sixty Seconds," *43rd Annual Conference, SPI*, 10B, pp. 1~4.
- (9) Pelfrey, E. S., 1987, "In Mold Coating For Thermoplastics," *Automotive Plastics RETEC '87*, pp. 237~239.
- (10) Castro, J. M. and Griffith, R. M., 1989, "Mathematical Modelling of the In-Mold Coating Process," *44th Annual Conference, SPI*, 7C, pp. 1~9.
- (11) Liebold, R., 1989, "In-Line Painting of Ribbed SMC Parts with IMC," *44th Annual Conference, SPI*, 7B, pp. 1~6.