

SMC 금형의 가열채널레이아웃 평가기술에 관한 연구

이성희*(한국생산기술연구원 정밀금형팀), 고영배(한국생산기술연구원 정밀금형팀), 이종훈((주)도하인더스트리)

A Study of Evaluation Technology for Heating Channel Layout in SMC Molds

Sunghee Lee(Precision Molds & Dies Team, KITECH), Y. B. Ko(Precision Molds & Dies Team, KITECH), J. H. Lee(Doha Industry Inc.)

ABSTRACT

In the present study, an evaluation technology for heating channel layout was investigated in SMC molding system design. Conventional design rules of cooling channel in injection molding process were applied to the present work. Finite element thermal analysis with ANSYSTM was performed to evaluate the temperature distribution of mold surface. SMC mold was manufactured to test the effect of a proposed heating channel layout system on the temperature distribution of mold surface and infrared camera was applied to a measurement of temperature. It was shown that infrared camera application was possible in a measurement of temperature distribution on mold surface.

Key Words : Heating channel layout (가열 채널 레이아웃), Molding system design (금형 시스템 설계), Cooling channel (냉각 채널), Infrared camera (적외선 카메라)

1. 서론

본 연구에서는 복합재료 성형공법중의 하나인 SMC(Sheet Molding Compound) 성형법에서 금형의 가열채널레이아웃(HCL: Heating Channel Layout)이 금형표면의 온도분포에 미치는 영향 및 이를 평가하기 위한 기술에 대해 조사하였다. 일반적으로 복합재료는 보강섬유의 종류, 형태, 배열방향 그리고 모재의 종류에 따라 역학적 성질이 변하는 이방성, 이종성 재료로서 고강도, 고강성, 경량성, 내부식성, 피로저항성 등의 우수한 재료 역학적 성질을 보이며, 설계자의 의도에 따라 역학적 성질을 변화시킬 수 있다. 이러한 장점으로 인해 복합재료는 고도의 구조 역학적 기능을 요구하는 우주항공 산업에서 자동차 산업에 이르기까지 모든 산업분야에 사용되고 있다^[1]. 특히 SMC 공법의 경우는 현재 25~70%정도의 보강섬유를 함유하면서 비교적 면적이 크면서도 얇은 부품을 요구하는 자동차 등의 외장재에 널리 사용되고 있다^[2]. 물론 이러한 SMC의 성형성에 대한 연구는 많은 연구자에 의해 수행되어 왔다^[3]. 즉, 리브와 같은 형상에서 온도 및 압력변화에 따른 제품

의 성형성 등에 대한 연구^[4], 삼차원적으로 복잡한 형상을 성형하기 위한 장입재의 배치 및 이를 묘사할 수 있는 기술 등에 대한 많은 연구^[5]들이 진행되어 왔다. 이렇듯 제품의 성형적인 측면에서의 연구들은 쉽게 찾아볼 수 있으나, 이러한 제품을 성형할 수 있는 금형 자체에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 물론 이러한 이유에는 상대적인 문제의 중요성이 언급될 수 있으나, 금형 및 성형조건에 따라 성형과정에서 기포(void), 핀홀(pin hole), 싱크 마크(sink mark) 등과 같은 성형불량이 발생할 수 있음을 생각할 때 경우에 따라서는 중요한 문제가 될 수 있다. 예를 들어 상기의 성형불량 중 핀홀과 같은 성형 불량인 경우는 설계된 금형의 표면 온도분포에도 큰 영향을 받게 되는데, 현재 일반적으로 SMC 금형의 설계시 금형표면의 온도를 결정하는 가열시스템의 설계는 설계자의 경험에 전적으로 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 SMC 금형의 HCL의 설계 및 설계된 레이아웃이 실제 금형표면의 온도분포에 미치는 영향성을 평가할 수 있는 기술에 대해 언급하기로 한다. 이를 위해 일반 사출성형과정에서 제시된 냉각채널설계 방식을 적용하여 SMC 금형을 설

계 하였으며, 설계된 금형의 온도분포특성을 엔지니어링적으로 평가하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 또한 설계된 금형의 제작을 수행한 후 실제 온도분포가 어떻게 형성되는지를 알아보기 위해 접촉식 온도측정기 및 적외선 카메라를 이용한 온도측정을 수행하였으며, 이를 유한요소 해석결과와 비교하였다.

2. 가열채널설계

본 연구에서는 일반 사출성형(injection molding)에서 적용되고 있는 냉각채널설계 기준을 사용하여 SMC 금형의 HCL을 설계 하였다. 또한 실제 적용모델의 분석을 통해 해석의 효율성을 높이기 위한 모델의 단순화를 수행하였으며, 수정된 모델을 사용한 삼차원 금형설계 결과를 제시하였다.

2.1 냉각채널설계기준

SMC 금형의 가열채널설계에 사용된 일반사출성형에서의 냉각채널 설계 가이드를 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1(a)는 Fig. 1(b)에 비해 상대적으로 큰 채널 직경과, 넓은 채널 간격 그리고 제품에서 가까운 채널설계에 따른 제품으로부터의 상대적으로 불균일한 열의 제거 결과 효과를 보여주고 있다. 따라서 제품측면에서의 균일한 열제거 혹은 열전달을 위해서는 Fig. 1에서 제시하는 설계 가이드를 참조해야 한다. 본 SMC 금형의 삼차원적인 HCL 설계에서도 Fig. 1에서 제시된 가이드를 기준으로 하였다.

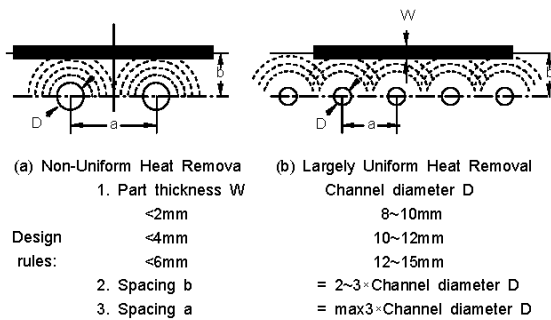


Fig. 1 Conventional design guide for cooling channel in injection molding^[6]

2.2 모델분석 및 채널생성

본 연구에서 고려되는 SMC 모델의 형상을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 모델의 상측에는 매우 작은 홀과 국부적으로 낮은 단차가 있고, 하측에는 전체치수대비 상대적으로 작은 리브, 홀 그리고 보스가 있음을 알 수 있다. SMC 금형의 가열채널은 Fig. 2의 제품을 성형할 수 있는 캐비티(cavity)와 코어(core)부에 설계되므로, 추후 효율적인

유한요소 열해석을 수행하기 위해서는 Fig. 2 모델을 Fig. 3와 같이 단순화 할 필요가 있다. 왜냐하면 국부적으로 작은 삼차원형상을 모두 고려하여 캐비티와 코어를 분할 한 후 여기에 HCL을 고려한 유한요소를 생성할 경우 매우 많은 수의 유한요소가 생성되어 해석을 수행하는데 매우 많은 시간과 메모리를 요구하게 되기 때문이다. 하지만 단순화를 위한 기준은 필요하므로, 본 연구에서는 유한요소크기를 기준으로 하여, 이보다 작은 기하학적 형상들은 단순화하였다. 물론 국부적인 중요부분의 열적특성을 조사하는 경우는 상기와 같은 가정 및 기준이 다소 무리일 수 있다. 하지만 본 연구와 같이 설계된 HCL의 전체적인 설계의 신뢰성을 평가하는 경우는 단순화가 필요하다고 사료된다. 한편 설계시 가장 중요하게 고려된 사항은 캐비티 금형의 온도분포가 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내에 존재하도록 하는 것이며, 상기의 설계기준에 준하여 여러 차례 반복 작업을 통해 최종적으로 설계된 SMC금형의 HCL을 Fig. 4에 제시하였다. 기본적으로 제품의 전체를 둘러싸는 HCL을 설계하였고, 제품에서 높이차가 있는 부분에는 baffle 형태의 가열시스템을 추가적으로 높이가 다르게 설계(b₁)하여 제한 조건이 만족될 수 있도록 설계하였다.

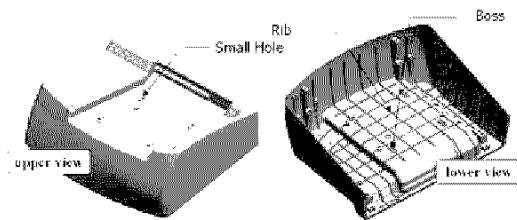


Fig. 2 3D Geometry of SMC model

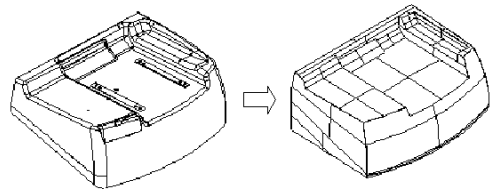


Fig. 3 Simplified 3D model for parting of cavity/core

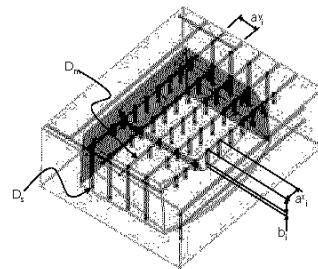


Fig. 4 3D CAD model of cavity with designed heating channel(D: diameter of channel, a & b: span)

3. 유한요소해석

설계된 SMC 금형의 온도분포 특성을 평가하기 위해 유한요소 열해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 재료의 특성, 열전달기초이론 및 경계조건은 각각 다음과 같다

3.1 금형재료의 기계적 특성

SMC 금형에 사용된 재료는 KP-1으로써 금형가공성이 양호하여 기계 가공시간이 단축되며, 적절한 열처리로 내부의 잔류 응력이 제거 되어 금형 가공시 변형의 발생 우려가 적은 소재이다. 따라서 일반 잡화용, 형판, 형재, 정밀 부품용 base 재에 널리 사용되는 소재이다. 본 연구에서는 설계 평가와 관련된 기계적 특성치만을 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Mechanical properties of KP-1

Temperature (°C)	Thermal conductivity (cal/cm·sec·°C)	Specific heat (cal/g·°C)	Coefficient thermal expansion (10-6/°C)	Density (gr/cm ³)
100	0.120	0.116	13.76	7.82
200	0.115	0.125	14.51	
300	0.107	0.132	15.36	
400	0.098	0.138	15.81	
500	-	-	16.22	
600	-	-	16.54	

3.2 전도, 대류 및 경계조건

SMC 금형에서 HCL이 금형의 온도분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 열역학 측면에서의 에너지 보존에 대한 식 (1)이 고려되어야 한다^[7].

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, T 는 온도, v 는 질량열 이동에 대한 속도 벡터, q 는 단위체적당의 열발생률을 그리고 k 는 열전도계수를 의미한다. 만약 질량이동이 없으며, 내부발열이 없고, 정상상태인 경우 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 해를 구하기 위해서는 시스템 표면에 대한 온도, 열유속 또는 대류의 경계조건이 부여되어야

한다(Fig. 5).

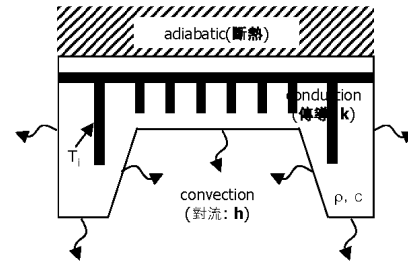


Fig. 5 Schematic diagram of boundary conditions for temperature and convection of SMC mold

따라서 본 연구에서는 유한요소 해석을 사용하여 금형의 온도분포를 구하기 위해, HCL의 표면은 일정한 가열온도(150°C)를 부여하였고, 모델의 고정측 상측면은 단열의 경계조건을 그리고 그 외의 외부면은 자연대류 경계조건을 적용하였다. 한편 Table 1에 제시된 재료의 열전도 계수값은 온도의 상승에 따라 주어진 범위에서 약 20%정도의 차이를 보이지만, 본 연구에서는 금형의 최대온도가 가열부의 온도 150°C이므로 이 온도를 기준으로 한 열전도 계수값을 사용하였다.

3.3 유한요소 및 해석결과

금형의 온도분포를 구하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 ANSYSTM를 사용하였다. 해석에 사용된 유한요소는 SOLID87 10노드 요소로써 각 노드에서 온도 자유도를 갖는 유한 요소이다. 이 요소는 CAD/CAM 시스템에 의해 생성된 기하 모델에 적합한 요소이다^[7].

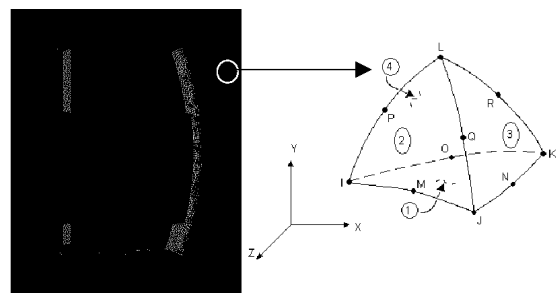


Fig. 6 Geometry of solid87 element and result of meshing for SMC cavity mold

사용된 SOLID87요소의 기하학적 형상을 Fig. 6에 제시하였으며, 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해 충분히 작은 크기로 요소분할을 하였다. 특히 HCL의 직경을 기준으로 하여 요소분할을 수행하였는데, 만약 HCL의 직정보다 큰 값을 사용하여 요소분할을 할 경우 HCL의 형상이 제대로 표현되지 않을 수 있

다. 반대로 HCL의 곡률을 고려할 수 있는 유한요소 크기를 선정할 경우 유한요소수가 급격히 증가하게 되어 해석에 필요한 시간이 역시 기하급수적으로 증가할 수 있다. 한편 본 연구에서는 약 73만개의 요소수로 유한요소분할을 수행한 후 해석을 수행하였으며, 그 결과 중 가장 중요한 부분의 대표적인 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 설계 제한상 금형표면의 온도는 기준온도대비 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 이내를 유지해야 하는데, 해석결과에서 보듯이 전체적으로 이 조건을 만족함을 확인할 수 있다. 따라서 유한요소 해석상으로는 설계결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

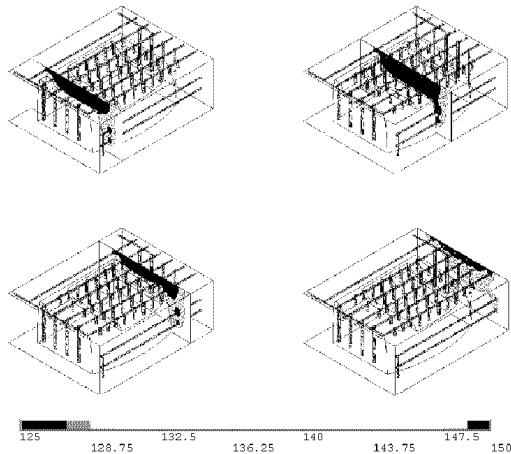


Fig. 7 Finite element analysis result of temperature distribution

4. 금형온도측정 및 비교

앞 절에서는 유한요소해석을 통해 SMC 금형의 HCL이 금형표면의 온도분포에 미치는 영향을 살펴 보았다. 설계 결과의 신뢰성을 유한요소해석을 통해 간접적으로 확인하였다. 수차례의 반복을 통해 최종 확정된 설계 결과를 사용하여 금형을 제작하였으며, 제작된 금형표면의 온도측정을 위해 적외선 카메라 (Infrared Camera: IRC)를 사용하였다. 사용된 적외선 카메라의 측정 개념도를 Fig. 8에, 사양을 Table 2에 제시하였다.

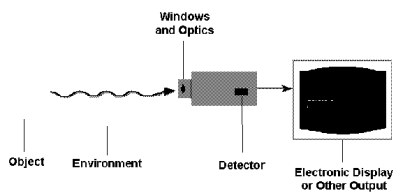


Fig. 8 Schematics of measurement for infrared camera

일반적으로 절대영도(Absolute Zero : -273.15°C) 이상의 온도 값을 가지는 모든 물체는 빛의 속도로

적외선에너지를 방사하며 이때 이 에너지를 적외선 온도계의 렌즈 및 Detector를 통하여 감지 및 수집한다. 이때 감지 및 수집된 에너지 량은 Detector가 에너지 량에 비례하는 전기적 신호로 바꾸어 주고, 이때 바뀐 전기적 신호가 본 기기의 마이크로 프로세서를 통해서 온도 값으로 표시 된다. 한편 가공/제작된 금형 및 적외선 카메라를 사용한 측정과정을 Fig. 9에 제시하였다. 그림에서는 SMC 금형의 CORE측의 온도 분포 결과를 보여주고 있으며, 캐비티 측의 가열시작 시점에서부터 300초 간격으로 측정된 온도 분포 결과를 Fig. 10에 제시하였다.

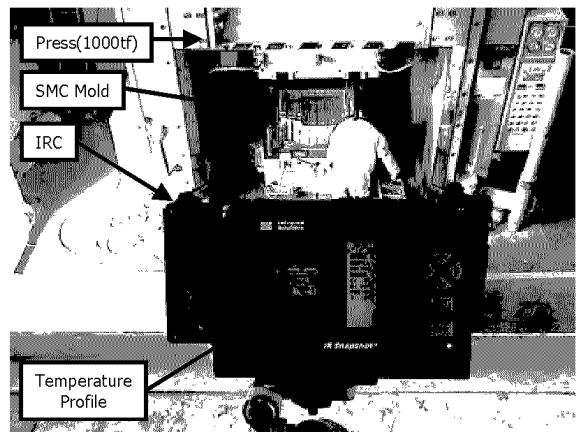


Fig. 9 Photograph of manufactured SMC mold and experimental setup for measurement of temperature using IRC

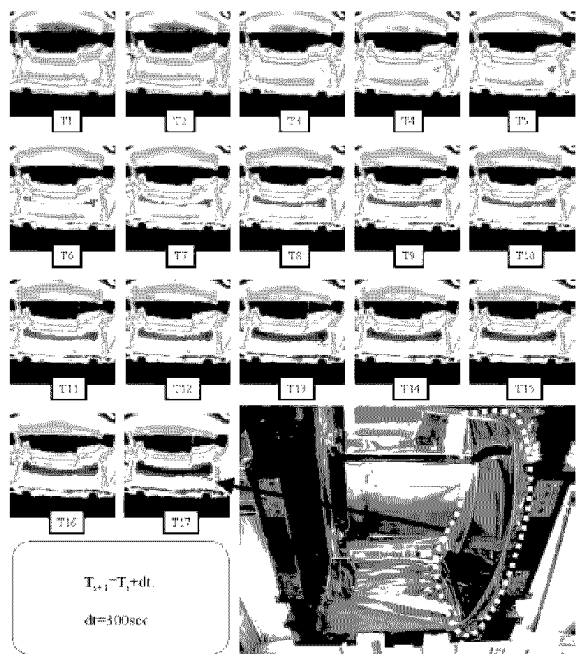


Fig. 10 Measured transient temperature results of SMC cavity mold using IRC

Table 2 Specifications of infrared camera

디텍터	120개 소자의 비냉각 디텍터 linear array
Detector sensitivity	0.1℃
파장대역	8-12 microns
Standard Lens	20mm Germanium f/0.8
Field of View(FOV)	17.2 x 17.2
온도표시레인지	0 ~ 350℃
측정오차	+/- 2℃ 혹은 2%

Fig. 10의 결과에서 보듯이 금형이 가열된 후 우선은 T3시점에서 확실한 온도 상승효과를 볼 수 있으며, 이후는 가열온도로 고온 영역이 점차 넓어짐을 볼 수 있다. T17단계에서 보면 실제 금형에서 표시된 부분이 전체적으로 가열되어 있음을 볼 수 있다. 비록 온도 분포가 어느 정도 균일하게 형성된 결과를 얻을 수 있었으나, 예상 도달시간은 약 30%초과된 결과를 보였다. 한편 마지막으로 설계된 SMC 금형의 온도측정결과와 유한요소해석 결과의 비교를 Fig. 11에 제시하였다.

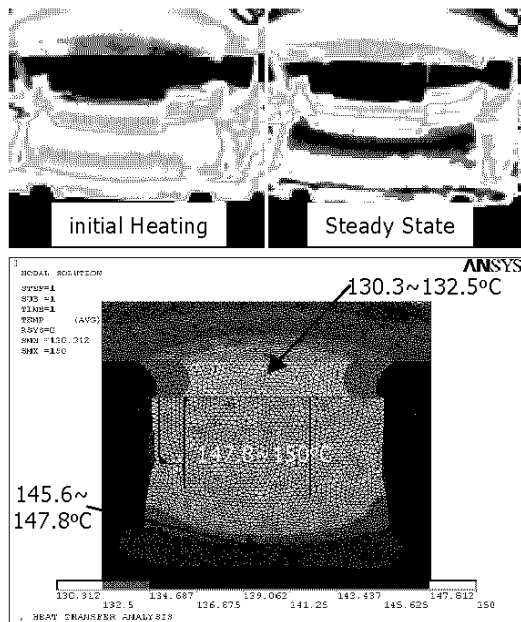


Fig. 11 Comparison of result between experiment and numerical analysis

그림에서 상측 결과는 온도측정결과이며, 왼쪽은 Fig. 10의 T1, 오른쪽은 T17일 때의 결과이다. 그리고 하측은 유한요소해석에 의한 Fig. 10에서 금형에 표시된 부분의 온도분포를 보여주고 있다. 유한요소해석결과와 비교하여는 전형 정상상태해석에 의해 얻어진

결과이므로, 충분히 금형이 가열된 경우의 결과로 볼 수 있으므로, T17의 결과와 비교하는 것이 바람직하다. 비교 결과에서 보듯이 매우 비슷한 온도 분포가 형성되어 있음을 알 수 있다. 하지만 좀 더 정확한 비교를 위해서는 유한요소해석에서 재료의 비선형성, 대류경계조건의 정확한 부여, 과도해석 등이 진행되어야 하고, 온도측정의 경우는 각 시간대별 정확한 방출률의 설정 및 금형표면의 처리 등이 필요함을 연구를 통해 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재료 성형방법중의 하나인 SMC 성형에 사용되는 금형의 설계된 가열시스템을 평가할 수 있는 기술에 대해 연구하였다.

일반사출성형에 사용되는 냉각채널설계개념을 적용하여 HCL을 삼차원 적으로 설계하였으며, 설계된 HCL의 신뢰성을 평가하기위해 삼차원 유한요소 열해석을 수행하였다. 이러한 간접적인 신뢰성을 바탕으로 SMC 금형을 제작하였으며, 제작된 금형의 가열과정에서의 온도분포특성을 직접적으로 평가하기 위해 IRC를 이용한 온도측정을 수행하였다. 유한요소해석결과와 온도측정 실험결과와 상호 비교를 통해 본 연구에서 설계된 HCL의 신뢰성을 직/간접적으로 평가할 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부 부품소재종합기술지원 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이대길, "복합재료 역학 및 가공론," 성안당, 1993.
2. M. M. Schwartz, "Composite Materials Handbook," McGraw-Hill, Second Edition, 1992.
3. B. A. Davis, P. J. Gramann, T. A. Osswald, A. C. Rios, "Compression Molding," 2003.
4. D. K. Kim, H. Y. Choi, N. S. Kim, "Experimental investigation and numerical simulation of SMC in compression molding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 49, PP.333~344, 1995.
5. T. Osswald and C. L. Tucker, "Compression mold filling simulation for non-planar parts," Intern. Polymer. Process., Vol. 2, 79~87, 1990.
6. Georg Menges, Walter Michaeli, and Paul Mohren, "How to Make Injection Molds," Hanser Gardner Publications, Inc. 2001.
7. ANSYS Theory Manual.