

## 초미세 발포 사출공정에서 금형의 온도가 스킨층 두께와 충격강도에 미치는 영향

이정주\*(연세대 대학원 기계공학과), 차성운(연세대 기계공학과)

### Influence of Mold Temperature on the Thickness of a Skin Layer and Impact Strength in the Microcellular Injection Molding Process

J. J. Lee(Mech. Eng. Dept. Yonsei University), S. W. Cha(Mech. Eng. Dept., Yonsei University)

#### ABSTRACT

The microstructure of the parts made by the microcellular injection molding process influence properties, including impact strength, tensile strength and density of material. Microstructure of microcellular plastics is divided into core foaming region and solid skin region. Core foaming region is influenced by pressure drop rate, viscosity and cell coalescence. However, actual mechanism of the skin layers is not known despite its importance. The study on the skin layer is getting important because foaming rate of the plastics is determined by the thickness ratio of the skin layer. Especially in case of large molded part, control of the skin layer is needed because skin layer thickness is changed largely.

Therefore it is necessary to study variation in skin layer thickness with processing parameters.

In this paper, the influence of temperatures in the mold cavity on the skin layer thickness was also addressed. In addition, the relationship between the temperature distributions across cavity of the mold with impact strength on parts made with the microcellular injection molding process was addressed. In addition, the method to predict the variation in skin layer thickness with mold temperature is discussed.

**Key Words :** microcellular injection molding process (초미세 발포공정), skin layer (스킨층), temperature gradient (온도 구배), impact strength (충격강도), mold temperature (금형 온도)

#### 1. 서론

고분자 재료는 다른 재료에 비해 가벼우면서 좋은 기계적 성질을 가지며 가공이 용이하기 때문에 산업계에서 널리 쓰이고 있다. 하지만 이러한 플라스틱의 사용은 석유자원의 고갈을 야기시키며 분해되지 않는 고분자 재료들로 인한 환경문제도 야기시키고 있다.

플라스틱 제품은 원재료의 가격이 제품 가격의 대부분을 차지하기 때문에 원재료의 절감은

플라스틱 산업에 있어서 해결해야 할 중요한 과제가 되었다. 가중되는 플라스틱 원료비의 부담과 환경문제를 해결하기 위해 플라스틱 원재료를 절감하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 초미세 발포공법(Microcellular Foaming Process)을 이용한 초미세 발포 플라스틱(Microcellular Plastics)이 대표적인 것으로 약 10~50%의 재료 절감에도 불구하고 우수한 기계적 성질을 지닌다는 장점이 있다. 초미세 발포 공법은 이러한 장점들을

가지고 있어서 원료비의 부담과 환경문제를 동시에 해결해주는 기술로 평가받고 있다.

초미세 발포플라스틱(MCPs)을 제조하는 방법으로는 일괄처리공정, 사출, 압출과 같은 공법들이 널리 사용되고 있다. 이 중, 초미세 발포 공법을 적용한 사출 공정은 적용범위가 넓기 때문에 산업계에서 필요로 하는 공정이다.

초미세 발포 사출공정에 의해 생산된 사출품은 일반 사출품에 비해 가볍고 화학 발포에 의한 사출품에 비해 우수한 강도를 가진다. 초미세 발포 사출품의 경우, 강도를 결정하는 중요한 인자들로는 사출품 내부에 형성된 기포크기와 스킨층의 두께와 같은 인자들이 고려된다 [1]. 그러나 사출품내의 cell size에 대한 연구는 계속해서 진행되어온 반면 초미세 발포 사출품의 스킨층이 어떠한 메카니즘으로 형성되며 무엇이 스킨층의 두께를 변화시키는 주요한 인자인지에 관한 연구가 진행되어 오지 않았다.

## 2. 이론

### 2.1 Microcellular Foaming Process

초미세 발포 공법은 질소나 이산화탄소를 초임계유체(Supercritical Fluid)로 고분자 재료 내부로 용해시킨 후, 이를 발포시키는 기술이다. 이 과정을 통해 재료 내부에 10 $\mu$ m 이하의 기포를 가지게 되어 단위 체적당(1cm<sup>3</sup>) 10<sup>9</sup>~10<sup>15</sup> 개 정도의 기포가 생성되게 된다. 초미세 발포플라스틱은 일반 플라스틱과 기존의 발포 플라스틱의 장점을 고루 갖추고 있어서 가벼우면서도 우수한 기계적 강도를 가지게 된다 [2, 3].

초미세 발포의 과정은 다음과 같다(Fig. 1). 고분자 재료에 고온과 고압에서 가스를 용해시킨 후 급격한 열역학적인 불안정을 유발시켜 용해된 가스는 핵 생성한다. 이 과정 이후 cell growth 단계를 거쳐 초미세 발포가 이루어지게 된다.

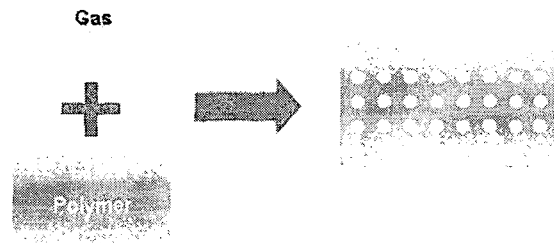


Fig. 1 Schematic Diagram of the Morphology Change of Polymer/Gas system in overall Microcellular Foaming Process

### 2.2 Microcellular Injection Molding Process

초미세 발포 사출 공정은 사출기에 가스주입구를 장착한 후, 가스주입구를 통해 고압의 초임계유체(Supercritical Fluid)를 주입하여 폴리머와 초임계유체를 스크류를 통해 혼합하게 된다(Fig. 2). 그 후, 혼합된 폴리머/초임계유체를 핵생성장치를 통해 사출하게 되는데 이 때 생성된 핵이 성장하게 된다 [4]. 이렇게 성장한 기포에 의해서 사출품의 내부에는 10<sup>9</sup>~10<sup>15</sup> 개/cm<sup>3</sup>의 기포가 생성되게 된다.

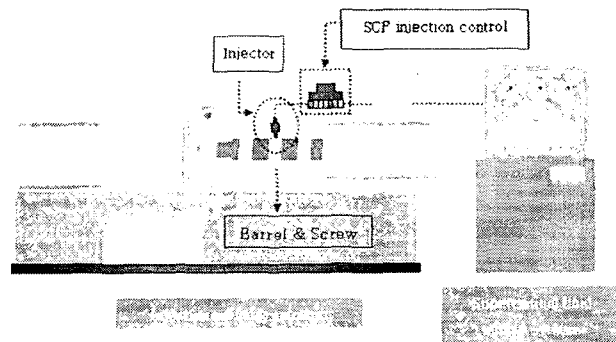


Fig. 2 Schematic Diagram of the Microcellular Injection Molding Process

### 2.3 Formation of the Skin Layer

Microcellular injection molding process에 의해 만들어진 제품의 단면은 Fig. 3과 같이 발포가 되는 core region과 발포가 일어나지 않는 solid skin

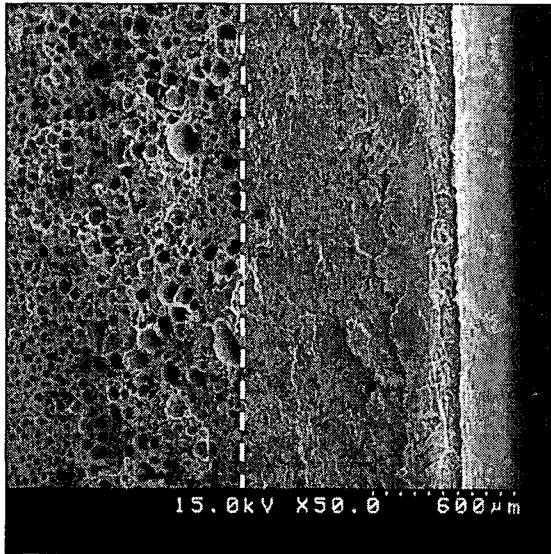


Fig. 3 Core Region and Skin Layer region 으로 구분된다. 스킨 영역에서 셀은 생성되지 않는데 이는 셀이 성장하기 전에 고화되기 때문으로 생각된다 [5].

Cell growth 는 polymer 의 surface tension 과 gas 의 팽창하는 힘 사이의 관계에 의해 결정이 되는데 surface tension 의 경우 온도에 큰 영향을 받게 된다. 즉, molten polymer 의 온도는 polymer/gas solution 의 발포에 직접적인 관련이 있는 factor 이다. 그리하여 수지가 금형을 채우는 동안 core region 과 skin region 은 mold cavity 내의 polymer melt 의 온도구배에 의해 구분 지어지게 된다. 이 때, polymer melt 의 온도구배는 기존연구들[6, 7]에 의하면 injection rate, viscosity 등의 영향을 받게 되므로 이러한 factor 들이 skin layer thickness 를 결정할 것으로 예상된다.

Cell growth 는 또한 압력의 영향을 받는다. 그러나 injection molding process 의 경우, melt front(flow 의 가장 앞)에서의 압력이 상당히 낮기 때문에 압력에 의한 skin layer thickness 의 변화는 고려하지 않는다.

이 연구에서는 injection flow rate 와 resin 의 점도를 변화시켜 cavity 내의 온도구배를 달리함으로써 온도에 의한 스킨층 두께 변화에

대한 연구를 진행하였다. 또한 semi-crystalline polymer 의 경우, 발포가 일어나는 온도가 대략 melting temperature 근처이므로 [8]  $T_M$  과 polymer melt temperature near the mold 사이의 관계에 의해 스킨층의 두께가 영향을 받을 것으로 예상된다. 반면 amorphous polymer 의 경우 glass transition temperature( $T_g$ )에서 발포가 일어나므로 polymer melt temperature 가  $T_g$  가 되었을 때 skin layer 가 형성될 것으로 생각된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

실험에 사용된 초미세 발포 공법을 적용한 사출기는 다음과 같이 구성된다.

사출기의 형체력은 120ton 으로 약 200g 의 중량을 가지는 플라스틱의 성형이 가능한 사출기이다. 사출기에 장착된 스크류는 직경 35mm 로 직경대비 길이비(L:D)가 28:1 인 스크류를 사용하였으며 계량 시 폴리머와 초임계유체의 혼합을 최대화하기 위하여 범용 스크류와는 다른 형태의 스크류를 실험에 사용하였다.

폴리머에 주입하는 초임계 유체로는 질소를 사용하였으며 약 20MPa 의 압력으로 한 공정 당 2 초 동안 주입하였다. 실험에 사용한 수지는 Polypropylene(PP)에 talc 가 20%가 첨가된 수지이다. 사출에 사용한 금형은 ASTM 규격의 충격강도를 측정할 수 있는 형상을 사용하였다.

#### 3.2 실험방법

먼저 10%의 발포율을 가지도록 계량량을 조절한다. 다음으로 온도조절장치를 통해 금형의 온도를 20°C 에서 110°C 까지 10°C 간격으로 조절하여 사출 시 금형 내에서 다양한 온도 분포를 가지도록 한다. 또한 injection flow rate 를 조절함에 의해 수지가 mold cavity 를 채울 때 온도 구배의

변화를 주었다. 이 때 실험의 정확성을 높이기 위해 각 조건에서 추출한 시편의 개수는 20 개이다.

다음으로 Izod Impact Test Machine 을 이용하여 각 조건에서 추출한 시편의 충격강도를 테스트하였다. 또한 충격강도 테스트를 실시한 시편의 경우, 시편이 반으로 절단되게 되는데 이 절단된 시편을 SEM (Scanning Electron Microscope) 을 이용하여 스킨층의 두께를 측정하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 Variation of skin layer thickness with mold temperature

Injection velocity 가 70mm/s 일 때의 injection flow rate 는 85.7cm<sup>3</sup>/s 이다. 이 때 금형 온도가 30 도에서 70 도까지의 경우 사출품의 스킨층은 사출품의 전체 두께의 약 19~20.5%의 두께를 가졌다. 그러나 금형 온도가 80 도가 되었을 때 스킨층의 두께는 약 17.5%로 급감하였으며 금형의 온도가 90 도가 되었을 때 약 15.5%, 100 도일 때 14.5%로 떨어졌다. 또한 금형의 온도가 110 도가 되었을 때는 금형이 열렸을 때 사출품의 표면이 완전히 굳지 않는 상태가 발생하여서 완전한 성형품이 만들어지지 않았다.

Fig. 4 는 금형온도에 따른 시편의 파단면의 SEM image 를 나타낸 것이다. 여기서 스킨층의 두께는 샘플의 오른쪽 면에서부터 평행하게 선을 그었을 때, cell 이 보이지 않는 곳까지의 거리로 계산을 하였다. 이 때, 금형의 온도가 70 도 이하에서 성형한 사출품의 경우 70 도에서 성형한 사출품과 육안상으로 스킨층의 두께가 비슷하기 때문에 모든 사진을 제시하지는 않기로 한다. 또한 금형의 온도가 110 도 이상에서 성형한 샘플의 경우도 표면이 완전히 굳지 않고 표면에 bubble 의 흔적들이 생겨났기 때문에 스킨층의 두께를

계산하는데 큰 오차가 있으므로 데이터에서 제외하였다.

Fig. 4(a)는 70 도의 금형온도에서 성형한 샘플의 SEM image 인데 샘플의 두께인 3.2mm 의 10%에 해당하는 약 320µm 가 스킨층의 두께가 됨을 알 수 있다. 이 때 스킨층은 샘플의 양쪽 면에 위치하므로 스킨층의 두께는 샘플의 두께의 20%가 된다. 또한 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c), Fig. 4(d)는 각각 금형 온도가 80 도, 90 도, 100 도에서 성형한 샘플의 SEM 사진이다.

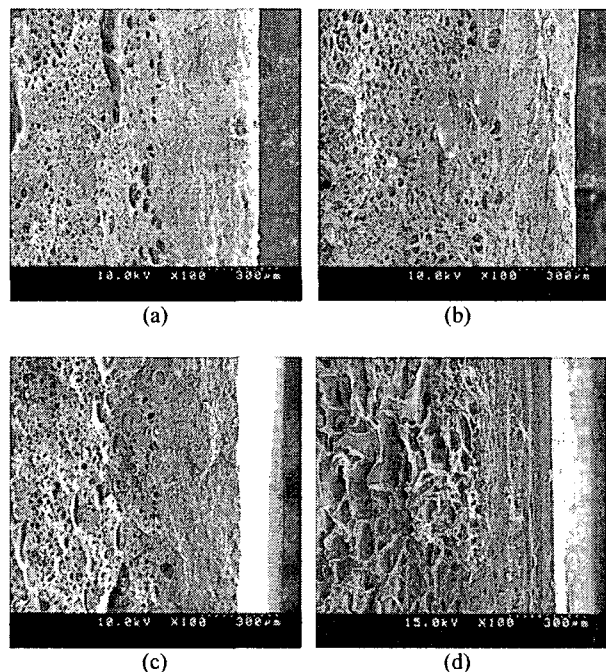


Fig. 4 SEM Image of Foamed Core and Non-Foamed Skin Region (Flow rate: 85.7cm<sup>3</sup>/s)  
T<sub>mold</sub> ? (a)70°C, (b)80°C, (c)90°C, (d)100°C

Fig. 5 는 injection flow rate 가 18.4cm<sup>3</sup>/s 일 때, 금형의 온도가 70°C, 80°C, 90°C, 100°C 일 때의 SEM image 를 보여준다. Fig. 4 의 사진에 비해 전체적으로 두꺼운 스킨영역을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7 에서처럼, 유량의 증가가 캐비티에 더 균일한 온도분포를 가지게 하며 그로 인해 skin layer region 은 injection velocity 에 의해서 변화하게

된다.

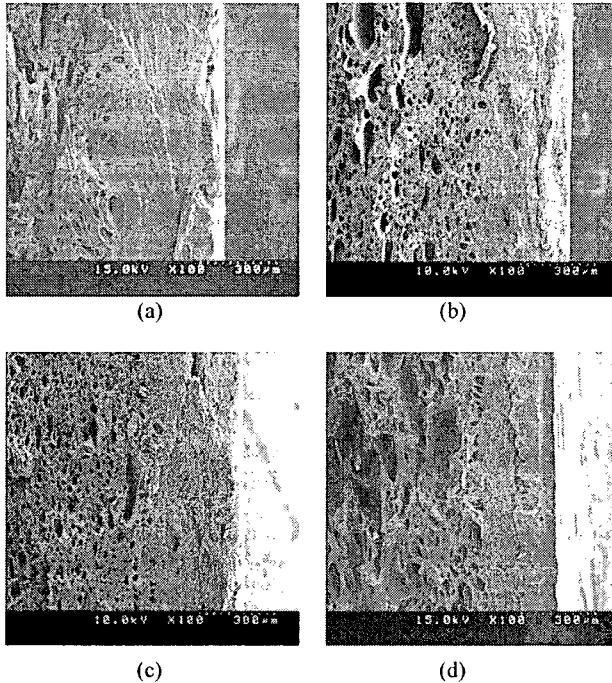


Fig. 5 SEM Image of Foamed Core and Non-Foamed Skin Region (Flow rate:  $18.4\text{cm}^3/\text{s}$ )  
 $T_{\text{mold}}$  ? (a)  $70^\circ\text{C}$ , (b)  $80^\circ\text{C}$ , (c)  $90^\circ\text{C}$ , (d)  $100^\circ\text{C}$

#### 4.2 Skin Layer Thickness vs. Impact Strength

Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 flow rate 가  $85.7\text{cm}^3/\text{s}$  와  $18.4\text{cm}^3/\text{s}$  일 때의 금형 온도에 따른 초미세 발포 사출품의 스킨층 두께와 충격강도를 나타낸 그래프로서 injection velocity 의 감소가 충격강도를 높일 수 있다는 것을 보여준다. 금형 온도와 충격강도와의 그래프를 보면, 금형온도 70 도 이하에서 생산된 사출품은 금형온도에 큰 영향 없이 충격강도가 일정함을 알 수 있다. 또한 이것을 금형 온도와 스킨층 두께와의 관계를 나타낸 그래프와 비교해보면 microcellular injection molded parts 의 스킨층 두께가 충격강도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 특히 고온으로 갈수록 20%가까운 강도 저하가 생긴다.

초미세 발포 사출품의 경우, 스킨층 영역이 감소하는 것보다는 증가함에 의해 생기는 유동거리

감소, 발포율 감소 등의 문제가 주요 고려사항이므로 충격강도의 저하 현상은 실제로 크게 발생하지는 않는다. 그러나 사출품의 표면 품질 향상 및 유동성 향상을 위한 너무 높은 금형 온도의 상승은 사출품의 충격 강도 저하를 가져올 수 있으므로 스킨층 두께의 관찰을 통해 주의를 요해야만 한다.

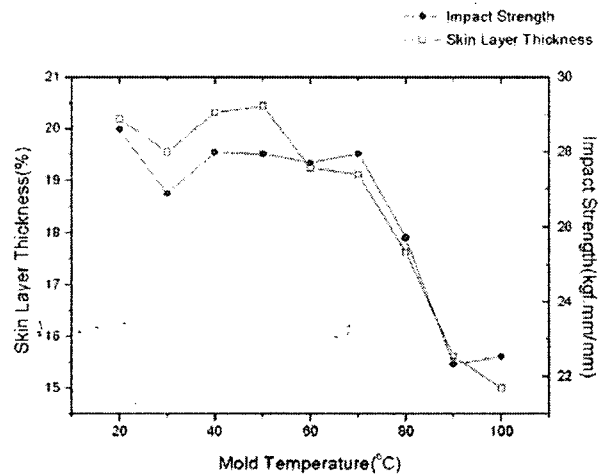


Fig. 6 Skin Layer vs. Impact Strength (flow rate:  $85.7\text{cm}^3/\text{s}$ )

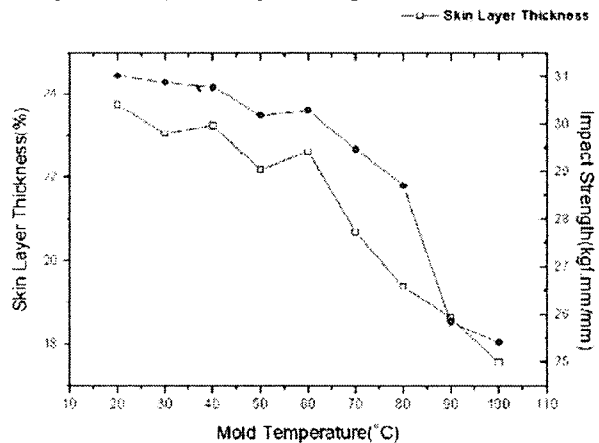


Fig. 7 Skin Layer vs. Impact Strength (flow rate:  $18.4\text{cm}^3/\text{s}$ )

#### 5. 결론

이 연구는 금형 벽면 근처에서의 수지의 온도구배와 스킨층의 두께 사이의 관계에 대해 보였다. 또한 스킨층의 형성 원리를 보였으며 스킨층의 두께를 조절할 수 있는 방법을 제시하였다. 금형 온도와 수지의 온도를 이용하여

스킨층의 두께를 예측할 수 있는 방법에 관해 논하였다.

1. 스킨층은 filling 단계에서 낮은 금형온도에 의해 용융된 수지의 셀이 성장하기 전에 고화되어 생기는 현상이다.

2. 스킨층이 형성되는 온도는 용융점 근처이며 수지의 온도구배에 의해 용융점 이하의 영역에서 스킨층이 형성된다.

3. 초미세 발포 사출공정에서 금형에 따라 20~30%의 스킨층 두께변화를 관찰할 수 있으며 그에 따라 충격강도가 감소하게 된다.

4. 스킨층의 두께는 사출속도와 금형온도의 영향을 받으며 금형의 온도에 영향을 받는 구간의 크기에 따라 스킨층의 두께를 예측할 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원에서 지원한 '경량 초미세 발포 플라스틱 부품 개발' 과제의 도움으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Kelvin T. Okamoto, 2003, "Microcellular Processing", Hanser Gardner Publications, Inc. Cincinnati., p.61~80
2. Sung W. Cha, 1994, "A Microcellular Foaming/Forming Process Performed at Ambient Temperature and a Super Microcellular Foaming Process", Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, p.21~24
3. Chul B. Park, 1993, "The Role of Polymer/Gas Solutions in Continuous Processing of Microcellular Polymers", Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, p.22~27
4. Sung W. Cha, Jae D. Yoon and Nariatsu Uto, 2004, "Study on the Effect of Porous CaCO<sub>3</sub> on MicroCellular Plastics as an Additive for Nucleation? Cellular Polymers, Vol. 23, No. 4, 2004, p.229~241
5. Alexander Chandra, Shaoqin Gong, Mingjun Yuan, Lih-Sheng Turng, "Microstructure and Crystallography in Microcellular Injection-Molded Polyamide-6 Nanocomposite and Neat Resin?"

Polymer Engineering and Science, 2005

6. Takashi Ohta, Hidetoshi Yokoi, "Visual Analysis of Cavity Filling and Packing Process in Injection Molding of Thermoset Phenolic Resin by the Gate-Magnetization Method? Polymer Engineering and Science, 2001, Vol. 41, No. 5, p.806~819
7. R. L. Frutiger, "The Effect of Flow on Cavity Surface Temperatures in Thermoset and Thermoplastic Injection Molding? Polymer Engineering and Science, 1986, Vol. 26, No. 3, p.243~254
8. Ghaus M. Rizvi, Chul B. Park, "Production of Fine-Celled HDPE/Wood-Fiber Composite Foams Using an Innovative System Design? PPS-17, Montreal, May