

초미세 발포 사출 성형 공정에서 성형된 플라스틱의 수축률 측정에 관한 연구

황 윤 동* · 차 성 운** · 이 정 현***

A Study on Measurement of Shrinkage of Molded Plastics in a Microcellular Foaming Injection Molding Process

Yun Dong Hwang, Sung Woon Cha and Jung Hyun Lee

Key Words : Microcellular Foaming Process (초미세 발포 공정), Mold Dimensions (금형 치수), Injection Molding Process (사출 성형 공정), Shrinkage (수축률), Injection Pressure (사출 압력), ASTM (American Society for Testing and Material)

Abstract

Microcellular foaming process was developed at MIT in 1980's to save a quantity of raw materials and improve mechanical properties. There are many process variables in applying microcellular foaming process to the conventional injection molding process. Of all process variables, part dimension control and shrinkage are the most influential on the post molded dimension. The post molding dimensional change of thermoplastic resins is important to tool designers for predicting the specific difference of molded part vs. actual mold cavity. Generally, articles injection molded are smaller in size than the cavity; hence, the term shrinkage factor is used to define the allowance a designer specifies. It is important to consider the factors that influence molded part dimension. According to ASTM Designation : D 955, shrinkage from mold dimensions of molded plastics was measured. In injection molding, the difference between the dimensions of the mold and of the molded article produced therein from a given material may vary according to the design and operation of the mold. In this paper, shrinkage data of molded plastic parts was obtained. It can be an important information for designing optimum mold system in a microcellular foaming injection molding process.

기호설명

- 2-h S : 2 시간 뒤의 수축률
- 24-h S : 24 시간 뒤의 수축률
- 48-h S : 48 시간 뒤의 수축률

1. 서 론

기존의 발포 기술이 가지고 있는 우수한 단열 성능, 비절연성 등으로 인해 각종 발포 제품이 현재 여러 분야에서 널리 사용되고는 있지만, 기계적 강성이 저하되기 때문에 구조물과 같이 힘을 요구하는 곳에는 단독으로 사용될 수 없다. 부피에 대한 제품의 무게가 감소하는 단점을 해결하기 위해 1980년대 초 미국 MIT에서 초미세 발포 공정이 개발되었다.⁽¹⁾

그 동안 이 새로운 프로세스를 기존의 일반적 인 플라스틱 성형 기술인 압출성형과 사출성형 등에 적용하기 위하여 많은 연구가 진행되어져 왔다. 특히 초미세 발포 사출성형 공정은 불활성 가스에 압력과 열을 가함으로써 초임계 상태로

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계전자공학부

*** 회원, LG 생산기술원 정밀가공기술그룹

만들고, 이를 사출 성형기의 실린더에 분사하여 플라스틱과 가스를 혼합시킴으로써 하나의 상인 용액을 만든다. 이를 금형에 사출하게 되면 가스가 팽창하면서 성형품 내부에 미세한 기포들이 균일하게 형성된다. 초미세 발포 사출성형 공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

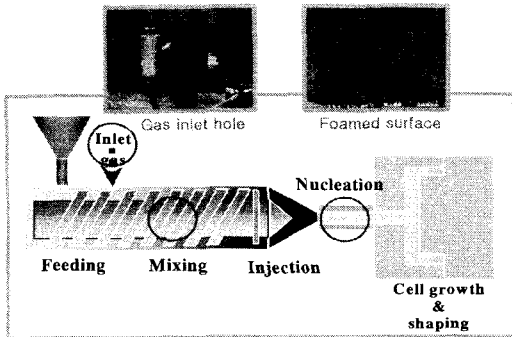


Fig. 1 Schematic diagram of microcellular foaming injection molding process

이러한 초미세 기포 구조의 발포 플라스틱 성형품은 일반 발포 플라스틱 성형품보다 밀도가 낮고, 더 높은 기계적 강도를 갖는다. 이. 밖에도 잔류 응력, 싱크 마크(Sink Mark), 변형 및 수축을 감소시킬 수 있는데 수지 점도의 감소는 금형 내 충진을 향상시킬 뿐만 아니라 잔류 응력과 방향성을 감소시킨다. 이는 성형품의 수축이나 변형에 대한 해결책이 될 수 있는 것이다. 예를 들어 TV 스피커 박스의 경우, 일반 사출성형에서 나타난 성형품의 변형이 초미세 발포 사출성형 공정을 적용하면서 해결되어 제품의 형압성을 향상시킨 바 있다.⁽²⁾

이러한 초미세 발포 공정을 기존의 일반 사출성형 공정에 적용하기 위해서는 고려해야 할 많은 설계 변수와 제약 조건들이 존재한다. 공정 변수의 변화에 따라 전체적인 공정 시간과 최종 제품의 품질이 결정되기 때문에 새로운 제조 공정 시스템을 구축하기 위한 많은 아이디어와 설계 요소들이 거론되고 있다.⁽³⁾

그 중에서 성형 수축으로 인한 플라스틱 제품의 치수 변화는 설계자가 실제 금형 캐비티에 대한 성형품의 수축률을 예측하고 금형을 설계하는데 있어서 매우 중요한 고려사항이라고 할 수

있다. 일반적으로 사출성형 공정에 의해서 성형된 제품은 냉각되면서 수축을 일으키게 된다. 따라서 금형 설계자는 성형품의 수축 정도를 고려해서 캐비티의 치수 허용오차를 설정해야만 한다. 특히 수축률의 변화에 큰 영향을 미치는 성형품의 불균일한 냉각은 금형 안에서의 전단 응력과 휨성을 촉진시킨다. 따라서 금형은 적당한 온도를 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 형상의 두꺼운 부분은 제품의 전반적인 수축률의 균형을 유지하기 위해 추가적인 냉각이 필요하다.

기존의 일반 사출성형에 있어서 여러 가지 성형 조건에 따른 각 수지의 종류별 수축률 변화 데이터는 도표화되어 있기 때문에 금형의 설계 등에 참고 자료로 활용되고 있다. 하지만 초미세 발포 사출성형은 일반 사출성형과는 다른 수축률 변화를 나타내기 때문에 실제 산업 현장에서 적용하기 위해서는 별도의 수축률 변화 데이터의 확보가 필요하다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 초미세 발포 사출성형 공정에서 성형된 플라스틱의 수축률을 ASTM 규격에 의거하여 측정하였다. 그리고 일반 사출성형과 초미세 발포 사출성형에서 수축률의 변화 정도가 어떻게 나타나는지를 상호 비교 및 분석하였다. 아울러 이러한 새로운 프로세스를 기존의 일반 사출성형 공정에 적용하여 실제 산업 현장에서 양산 시스템으로 안정하게 구축하기 위한 기반을 잡아 보고자 하였다.

2. 수축률

수축률은 사출성형, 압출성형 등에서 금형이나 다이의 크기보다 성형된 제품의 크기가 작아지는 현상을 측정하는 항목으로서 금형이나 다이의 초기설계에 중요한 영향을 미친다. 본 논문에서 수축률은 성형품과 금형의 캐비티 치수 사이의 차이로서 정의하였다.

사출 성형기의 종류, 성형된 샘플의 두께, 금형 안에서 고분자 재료의 유동 등은 일정하게 유지하였다. 그 외에 노즐, 스프루, 러너, 게이트의 치수 및 작동 사이클 시간 또한 유지하였다. 하지만 사용된 고분자 재료의 소성특성은 수축률 변화에 간접적으로 영향을 줄 수도 있다.

열가소성 수지는 신장률과 탄력성이 크기 때문에 강성이 높고 신장률 및 탄력성이 작은 금속처럼

럼 엄격한 허용오차를 필요로 하지 않는다. 성형 수축값은 방향과 두께에 따라 달라지며, 이런 경향은 유리섬유 강화 재료의 경우 더욱 뚜렷하게 나타난다. 유리섬유의 배향이 종단방향과 횡단방향의 성형수축 차이에 큰 영향을 주어 결과적으로 치수가 부정확해진다. 성형 부품의 모양도 수축 및 허용오차에 영향을 미친다. 허용오차를 정밀하게 하면서 복잡한 성형을 하려면 실제 수축값과 휨성에 대한 정확한 정보가 필수적이다.

결정성 재료의 경우에는 성형 후 수축도 고려하여야 한다. 성형 후 수축은 주로 사출성형 조건인 영향을 많이 받는데, 디몰딩 이후 부품의 치수 변화를 가져올 수 있다. 결정성 열가소성 수지는 비결정성 열가소성 수지보다 성형 후 수축이 크다. 강화 열가소성 수지의 수축은 종단방향(유리섬유의 배향방향)과 횡단방향에 차이가 있다. 그리고 벽이 두꺼우면 싱크 마크, 치수 차이 및 휨이 발생한다.^(5,6)

금형 캐비티의 치수로부터 성형된 플라스틱의 수축률을 측정하기 위해서 관련 규격인 ASTM Designation D 955 규격을 참고하였다. 시험자의 필요에 따라 성형의 흐름방향만 측정할 수도 있고, 흐름의 직각방향까지 측정할 수도 있다. 본문에서는 성형의 흐름방향만 측정하였다.⁽⁷⁾

사용되는 수지의 종류와 가스의 종류별로 수축률 변화 데이터를 취득하고자 하였다. 이는 수지와 가스의 종류에 따라서 발포 효과가 다양하고 아울러 기계적 특성이 다양하기 때문에 발포 비율에 따른 수축률 변화를 살펴보고자 하였다.

3. 실험

초미세 발포 사출성형 공정에서 성형된 플라스틱의 수축률을 측정하기 위해 ASTM Designation D 955 규격에 맞추어 금형 시스템을 준비하여 실험하였다.

3.1 실험 조건

이번 연구에서 사용한 고분자 재료는 마멸에 대한 저항과 경도가 높아 장난감, 기어, 자동차 건전지 케이스, 살균 가능한 의료장비 등에 사용되는 폴리프로필렌(PP) 수지이다.⁽⁸⁾ 그리고 금형의 온도를 30℃, 50℃, 70℃로 증가시키면서 금형 캐비티의 치수로부터 수축률의 변화가 각각 어떻

게 나타나는지를 살펴보았다. 사출 성형기의 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions of machine

Injection Pressure (MPa)	Fill Time (s)	Melt Temp. (°C)	Cooling Time (s)
12	3	180	20

가스 공급 장치로부터 공급되는 이산화탄소의 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions of CO₂ gas

Main Pressure (MPa)	Sub Pressure (MPa)	Working Pressure (MPa)	Gas Temp. (°C)
24.13	17.24	10.34	50

실험에 사용한 가스의 양은 가스 공급 장치의 제어기에 의해서 일정하게 유지되며, 성형온도, 스크류의 회전수(rpm) 및 배압, 보압 등 모든 사출 성형기의 실험 조건을 일정하게 유지하였다.

3.2 실험 방법

수축률 변화의 비교기준인 금형 캐비티의 치수는 127 mm × 12.7 mm × 3.2 mm 이며, 성형 수축을 측정하기 위한 도구로는 버니어 캘리퍼스를 사용하였다. 시편은 가스를 주입하지 않은 상태에서 성형된 일반 시편과 가스를 주입한 후에 성형된 초미세 발포 시편으로 각각 10개씩 준비하여 그 평균값을 계산하였다.

성형된 각 시편은 초기 성형 수축값을 의미하는 2-h Shrinkage로부터 24-h Shrinkage, 48-h Shrinkage에 이르기까지 3차례에 걸쳐서 변화 정도를 측정하였다. 금형 캐비티의 치수에 대한 성형된 플라스틱의 수축률을 계산하기 위하여 각 시편의 치수를 측정하였으며, 수축률은 다음 식으로 정의된다.^(9,10)

$$\text{Shrinkage Ratio} = \frac{D_m - D_s}{D_m} \times 100 (\%) \quad (1)$$

식 (1)에서 D_m 은 금형 캐비티의 치수이고, D_s 는 각 시편의 치수이다.

4. 실험 결과

먼저 일반 사출성형에서 시간과 금형의 온도에 따른 막대시편의 수축률 변화를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 막대시편의 세로방향(12.7 mm) 측정값은 모두 12.6 mm로서 수축률은 약 0.79% 정도였다. 그리고 두께방향(3.2 mm) 측정값은 모두 3.2 mm로서 수축률은 0% 정도였다. 상대적으로 치수 변화의 정도가 가장 큰 가로방향(127 mm) 측정값을 통해 수축률의 변화를 비교해 보았다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 시간과 금형 온도의 증가에 따라서 시편의 수축률이 비례하여 증가하는 사실을 알 수 있다. 그리고 48시간이 지난 이후에는 수축률의 변화가 거의 나타나지 않았다.

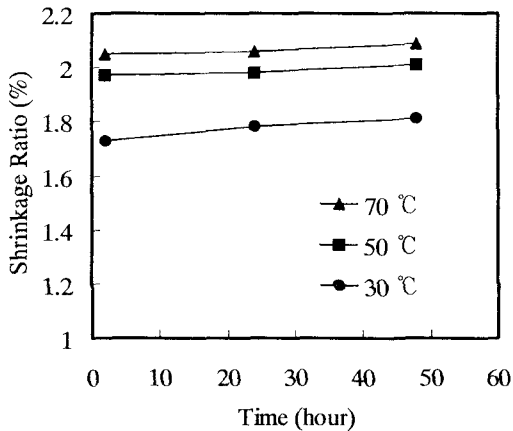


Fig. 2 Shrinkage from mold dimensions of molded plastics in a conventional injection molding process

다음으로 초미세 발포 사출성형에서 시간과 금형의 온도에 따른 막대시편의 수축률 변화를 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우에 있어서 막대시편의 세로방향 측정값은 모두 12.7 mm로서 수축률은 0% 정도였다. 그리고 두께방향 측정값은 모두 3.25 mm로서 수축률은 약 -1.56% 정도였다. 이에 시편의 가로방향 길이를 측정하여 수축률의 변화를 비교해 보았다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 시간과 금형 온도의 증가에 따라서 시편의 수축률이 증가하는 사실을 알 수 있다. 또한 초미세 발포 사출성형 공정에서는 일반 사출성형 공정에 비해서 수축률의 변화 범위가 더욱 낮다는 것을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

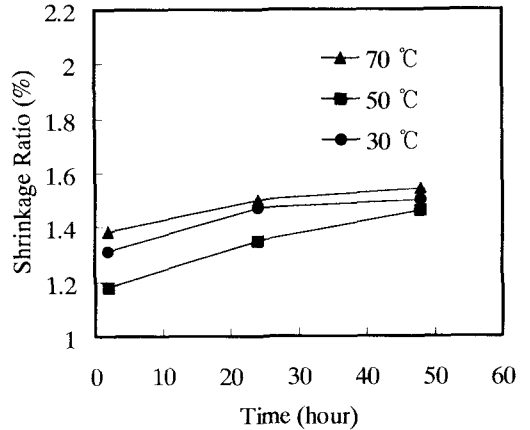


Fig. 3 Shrinkage from mold dimensions of molded plastics in a microcellular foaming injection molding process

금형의 온도가 30°C, 50°C, 70°C인 경우에 대해서 일반 사출성형과 초미세 발포 사출성형시 막대시편의 수축률 변화 정도가 어느 정도 차이가 나는지를 보다 명확하게 비교하기 위해 세 가지 경우를 Fig. 4와 Fig. 5와 Fig. 6에 차례대로 나타내었다.

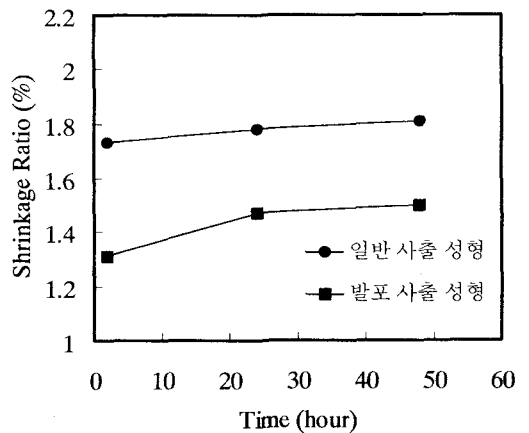


Fig. 4 Shrinkage at mold temperature of 30°C

금형의 온도가 30℃인 경우를 나타내는 Fig. 4를 살펴보면 일반 사출성형에 비해서 초미세 발포 사출성형으로 성형된 시편이 전체적으로 수축률의 값이 더 낮게 측정되었다. 그 변화의 정도는 약 19.3%였다.

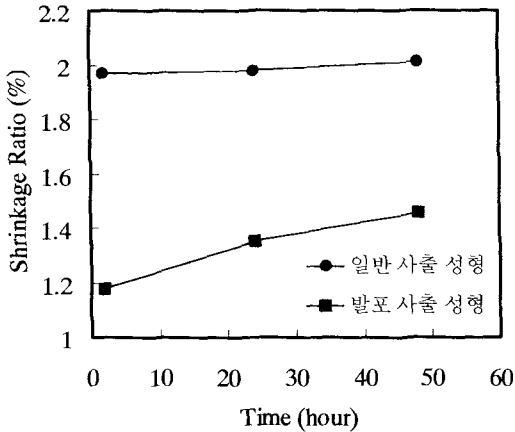


Fig. 5 Shrinkage at mold temperature of 50°C

Fig. 5에서 보는 바와 같이 금형의 온도가 50℃인 경우에는 일반 사출성형에 비해서 초미세 발포 사출성형으로 성형된 시편의 수축률이 약 33.1% 더 낮게 측정되었다.

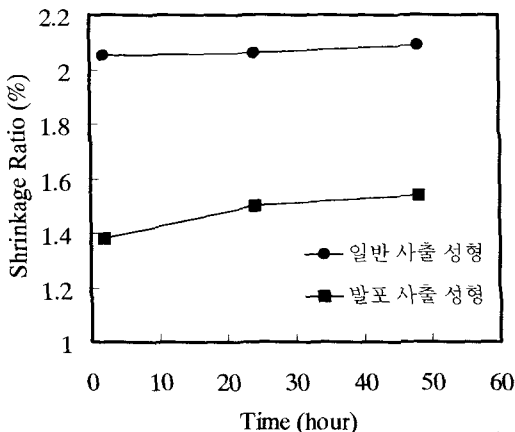


Fig. 6 Shrinkage at mold temperature of 70°C

Fig. 6에서 살펴보면 금형의 온도가 70℃인 경

우에는 일반 사출성형에 비해서 초미세 발포 사출성형으로 성형된 시편의 수축률이 약 28.7% 정도로 더 낮게 측정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 초미세 발포 공정을 기존의 일반 사출성형 공정에 적용하여 최적의 프로세스를 도출하고자 금형의 치수로부터 성형된 플라스틱의 수축률을 측정하였다. 실험한 결과를 바탕으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시간과 금형의 온도가 증가할수록 성형된 플라스틱의 수축률은 점점 증가한다. 특히 금형과 용융 수지의 온도가 증가할수록 수축률도 증가하였는데 이는 어닐링 효과의 상승작용으로 인하여 플라스틱 분자의 사슬구조가 변화하였기 때문인 것으로 간주된다.

(2) 일반 사출성형에 비해서 초미세 발포 사출성형으로 성형된 시편의 수축률이 더 낮게 측정된다. 이것은 고압의 가스로 발포된 플라스틱 수지의 점도가 감소되어 금형 내부의 충진을 향상시켰을 뿐만 아니라 잔류 응력과 방향성을 감소시켰기 때문이라고 판단된다. 따라서 초미세 발포 공정은 성형품의 수축이나 변형을 감소시킬 수 있는 해결책이 될 수 있다.

(3) 초미세 발포 사출성형 공정이라는 새로운 제조 공정을 보다 합리적이고 효율적으로 구축하는데 있어서 성형된 플라스틱 수지의 수축률 변화 데이터는 금형의 최적 설계시 보다 객관적인 정보를 제공해 준다. 무엇보다 작업 현장에서 형압성의 약화로 야기되는 수축이나 변형 등 치수의 결함으로 인한 불량률의 최소화를 위해 충분히 고려할 만한 가치를 가진다.⁽¹²⁾

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(과제번호 : 2000G0100)와 LG 생산기술원의 지원으로 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Sung Woon Cha, 1994, "A Microcellular Foaming / Forming Process Performed at Ambient Temperature and a Super Microcellular Foaming Process," M.I.T., pp. 20~96.
- (2) 2001, "LG 생산기술," LG 생산기술원, 제4권, 제1호, pp. 17~18.
- (3) Nam P. Suh, 1990, "The Principles of Design," The Oxford University Press, pp.25~154.
- (4) L. Sridhar, Wenyue Yin, and K. A. Narh, 2000, "The Effect of Shrinkage Induced Interface Gap on the Thermal Contact Resistance Between the Mold and Plastic in Injection Molding," Journal of Injection Molding Technology, SPE, Vol. 4, No. 1, pp. 44~49.
- (5) K. A. Narh and L. Sridhar, 1997, "Measurement and Modeling of Thermal Contact Resistance at a Plastic Metal Interface," SPE ANTEC Technical Papers, Vol. 43, pp. 2273~2277.
- (6) C. J. Yu, J. E. Sunderland, and C. Poli, 1990, "Thermal Contact Resistance in Injection Molding," Polymer Engineering & Science, SPE, Vol. 30, pp. 1599~1605.
- (7) 1994, "Annual Book of ASTM Standards," Vol. 8, No. 1, pp. 213~216.
- (8) 윤재동, 차성운, 김한중, 1999, "초미세 발포 공정이 폴리프로필렌의 충격 강도에 미치는 영향," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 1084~1088.
- (9) 조용희, 1999, "다재 사출 성형품 및 금형 설계를 위한 전문가 시스템 개발에 관한 연구," 연세대학교 대학원 기계공학과, pp. 20~54.
- (10) Dominick V. Rosato and Donald V. Rosato, 1986, "Injection Molding Handbook : The Complete Molding Operation : Technology, Performance, Economics," New York : Van Nostrand Reinhold, pp. 34~105.
- (11) 문병기, 차성운, 오세용, 2000, "초미세 발포 성형 고분자 물질의 열전달 모델링," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B권, pp. 367~372.
- (12) 문용락, 차성운, 강영주, 1999, "정보의 공리를 이용한 사출기 정보량 측정," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 1134~1138.