

초미세 발포 사출 성형품의 단열 특성

이정현* · 홍순국* · 김지현* · 윤재동*

The Insulation Property of Microcellular Injection Molding Plastics

Jung Hyun Lee, Soon Kug Hong, Ji Hyun Kim and Jae Dong Yoon

Key Words : Microcellular Plastics(초미세 발포 플라스틱), Injection Molding(사출 성형), Thermal Conductivity(열전도도)

Abstract

MCPs means Micro Cellular Plastics. The micro-cells are generated in the products by the difference of dissolution through the pressure drop after super critical fluid of CO₂ or N₂ dissolves into polymer. We have developed injection molding process adopting MCPs and applied it to a broad range of injection molded thermoplastic materials and applications. It can prevent the leakage of impact strength and increase the thermal conductivity, moreover regulate the thermal conductivity. Then we can develop the high strength foaming plastics. Also, it can be gained a competitive advantage by utilizing its processing benefits, e.g. the lightweight products and significant reductions in material consumption.

1. 서 론

지난 수 십년 동안 플라스틱 발포 성형품은 상업적인 성공을 거두며 우리의 일상 생활에 크게 적용되어 왔다. 특히 발포 성형품의 탁월한 단열 특성은 에너지 절약에 있어서 많은 양의 에너지가 열관리 및 보존 방법의 문제로 손실되는데 이를 줄이기 위한 수단으로 커다란 파급 효과를 가져왔다. 이러한 성공에도 불구하고 발포 성형이 갖고 있는 본래의 특성 때문에 그 적용에는 많은 제약이 있었다. 그 중 가장 큰 단점이 큰 기포 크기(Cell Size)였다. 이러한 큰 기포로 이루어진 발포 성형품은 기계적 특성(강도, 경도, 피로 한도)의 약화를 초래하여 구조물에 적용하기에는 문제가 있어 적용에 한계가 있었다. 또한 화학 발포제의 사용은 가연성과 환경 오염이라는 부수적인 문제도 안고 있었다.

이러한 한계를 돌파하기 위해서 개발된 것이 MIT 에서 개발된 초미세 발포 성형이다. 이 기술은 기존의 발포 공정에서 기포 생성율(Cell Nucleation Rate)을 증가시켜 5~100 μm 의 미세한

기포를 고르게 분포하게 발포 시킴으로써 기계적 특성을 향상시킨 것이다.

이 공정원리를 일반적인 플라스틱 성형 방법인 사출 성형에 적용한 것이 초미세 발포 사출 성형 기술이다. 이번 논문에서는 초미세 발포 사출 성형품의 단열 특성 및 기계적 강도의 향상 정도를 일반 사출 성형품과 비교한다.

2. 이 론

2.1 초미세 발포 사출 성형

초미세 발포 플라스틱(Microcellular Plastics)이란 글자 그대로 해석하면 미세한 기포를 갖는 플라스틱이란 뜻이다. 이 초미세 발포 플라스틱은 기존의 발포 기술이 부피에 대한 제품의 무게가 감소하고 또한 단열 성능, 비열연성(dielectric constant) 등이 우수하여 현재 널리 사용되고 있으나 기계적 강성이 저하되기 때문에 구조물과 같이 힘을 요하는 곳에는 단독으로 사용될 수 없는 단점을 해결하기 위해서 1980년대 초 미국 MIT에서 개발된 발포 플라스틱 제조 공정이다.

이 새로운 Process 를 일반적인 플라스틱 성형 기술인 사출 성형에 적용한 기술이 초미세 발포

* LG 전자 생산기술원

사출 성형 기술이며 개념도는 Figure 1 과 같다.

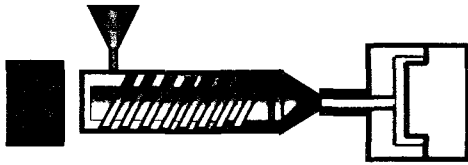


Figure 1. The scheme of MCPs injection molding

플라스틱 수지가 용융되는 실린더 안에서 MCPs 의 발포제로 사용되는 CO₂, N₂ 등의 불활성 가스와 플라스틱의 단상(Single Phase)의 혼합 용액을 만들어야 한다. 여기서 발포제로 사용되는 CO₂, N₂ 등의 불활성 가스는 특별히 고안된 가스 공급 장치에 의해서 초임계 상태로 실린더에 주입된다. CO₂, N₂ 등의 불활성 가스가 초임계 상태가 되어야 더 많은 양이 더 빠르게 용융 수지로 확산되어질 수 있으므로, 가스공급 장치는 350kgf/cm² 까지 가스를 압축시키며, 이렇게 압축되어 초임계 상태가 된 가스는 Figure 2 와 같이 사출기 실린더에 장착된 가스 주입구를 통해 실린더 안으로 주입되는 것이다.

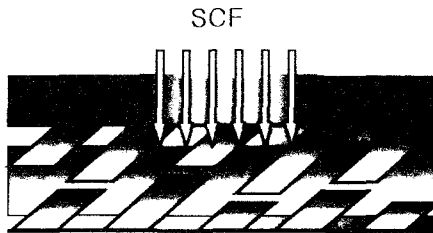


Figure 2. The scheme of gas injector

가스 주입구는 사출 성형 과정 중 계량 과정 동안 짧은 시간에 효과적으로 수지에 가스가 혼합될 수 있도록 설계되어져 있으며 주입되는 가스의 양을 조절하는 역할을 한다. 이렇게 주입된 가스의 양과 수지의 온도 및 압력은 성형품 내의 기포(Cell) 크기를 결정하는 중요한 인자가 된다. 한편 용해되어지는 가스의 양은 플라스틱 수지의 종류에 따라 달라지게 된다.

이렇게 주입된 가스와 플라스틱은 Figure 3 의 단계와 같이 서로 다른 두 가지 상태 하에서 MCPs 용으로 설계된 스크류(Screw)에 의해 혼합되어 하나의 새로운 상태의 혼합 용액이 된다. 이 혼합 용액을 금형에 사출하면 압력이 급격히 떨어지면

서 다시 가스와 수지의 두개의 상으로 분리되고, 이들이 금형 내로 충전되면 가스가 팽창하면서 기포를 생성, 발포가 이루어지며 성형품이 만들어지게 된다.

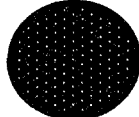
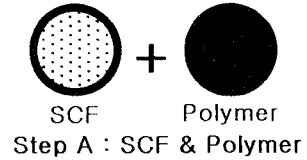


Figure 3. The phase change of SCF and polymer

이렇게 성형된 초미세 발포 사출 성형품과 일반 사출 성형품의 단면을 비교한 것이 Figure 4 에 나와 있다. 일반 사출 성형품은 하나의 상을 이루는 일정한 단면 형상이며, 초미세 사출 성형품의 단면은 일반 발포 성형품과 그 형상이 비슷하게 단면에 미세한 기포들이 존재하지만 그 크기는 수십 μm대로 10 배 이상 작다.

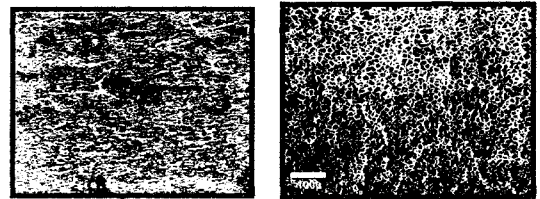


Figure 4. The comparison of section between injection molding product and MCPs product.

이러한 초미세 발포 사출 성형품은 본래 목적인 경량화 외에 다른 많은 장점들이 있다.

이 기술은 초임계 상태의 유체와 점성 유체가 혼합되므로 점도(Viscosity)가 낮아진다. 한 연구 결과에 의하면 점도가 50%까지도 낮아진다는 실험 결과가 있다. 그러므로 사출 압력이 감소하고,

금형 내 충전성이 향상되며, 형체력이 감소된다. 사출 압력의 감소는 같은 형체력 하에서 금형 캐비티(Cavity) 수를 늘릴 수 있으며, 더 큰 금형을 작은 사출기에서 성형할 수 있게 되어 생산성의 향상에 기여하게 된다.

또한 불활성 가스가 플라스틱 고분자에 용해될 수록 유리 전이 온도가 낮아져 실제 성형 온도를 낮추는 결과로 이어지고, 발포에 의한 보압 시간의 생략에 의해 전체 사이클 타임(Cycle Time)이 줄어들게 된다.

또 다른 장점으로 발포라는 특성은 성형품의 Sink Mark 를 제거하고 후변형을 감소시킨다. 일반 사출에 비해 MCPs 사출 성형은 용융 수지의 점도가 낮고, 사출 압력이 낮기 때문에 잔류 응력이 적어 후 변형이 적어지는 것이다.

2.2 열전도의 개념

한 물체 안에 온도 구배가 존재한다면 고온부분에서 저온부분으로 에너지가 전달된다. 이 때 열은 전도에 의해서 전달되고, 단위 면적 당 열전달율은 면적에 수직인 방향의 온도 구배에 비례한다.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

여기서 q 는 열전달율이고 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 는 열이 전달되는 방향으로의 온도 구배이다. 상수 k 를 물질의 열전도 계수(Thermal Conductivity)라고 부르고 음의 부호는 열역학 제 2 법칙을 만족시키기 위하여 붙여준 것이다. 위의 식을 Fourier 의 열전도 법칙이라 부르며 열전도 계수를 정의하는 공식이다.

2.3 열전도 계수

Fourier 법칙으로부터 열전도 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{q^n \Delta x}{\Delta T}$$

일반적으로 고체의 열전도 계수는 액체의 열전도 계수 보다 크고, 액체의 열전도 계수는 기체의 그것보다 훨씬 더 크다. 이 경향은 주로 두 상태에 대한 분자간의 간격 차이에 기인한다.

3. 실험

3.1 실험 방법

LG 75 톤 초미세 발포 사출 성형기를 이용하여

Figure 3 과 같은 Disk 시편을 제작하였고, 이를 이용하여 단일 특성을 측정하였다. 또한 이 시편을 충격 강도 측정을 위하여 Figure 5 와 같이 충격 강도 시편 형태로 가공하여 충격 강도를 측정하였다.

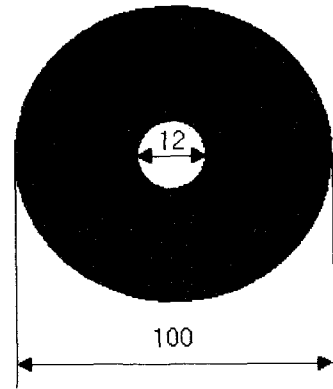


Figure 5. Disk type specimen

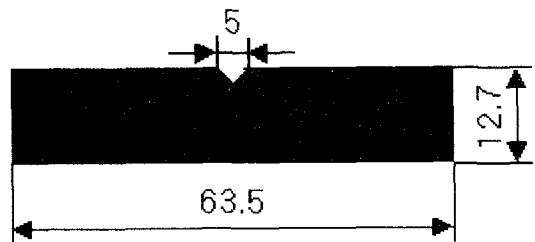


Figure 6. The specimen for impact strength

Figure 5 와 같은 Disk 시편을 표 1 과 같은 성형 조건에 의해 성형하여 시편을 제작하였다.

표 1. 일반 사출 및 초미세 발포 사출 성형 조건

No.	수지 온도	사출 속도	가스 압력
1	200℃	15mm/sec	×
2	200℃	15mm/sec	2000psi
3	200℃	15mm/sec	1700psi
4	200℃	15mm/sec	1300psi

1 번 조건 하에서 일반 사출 성형 Disk 시편을 성형하고 2,3,4 조건 하에서 초미세 발포 성형을 하여 Disk 시편을 제작하였다.

3.2 충격 강도 측정

표 1 과 같은 조건으로 만들어진 시편을 Figure 6 과 같이 충격 강도 측정 시편으로 가공하여 충격 강도를 측정하였다. 일반 사출 시편을 측정하여 기준으로 삼고, 초미세 발포 사출 시편의 충격 강도를 측정하여 충격 강도의 변화를 관찰하였다.

3.3 단열 특성 측정

본 시편의 단열 특성을 측정하기 위하여 다양한 시편의 열전도도, 열확산을, 단위체적당 열용량을 전담 분석할 수 있는 Hot Disk Method 를 적용하였다.

물질의 열확산을 $a[m^2/s]$ 또는 전도율 $k[W/(mK)]$ 등의 열 물성의 정확한 계측은 열공학의 중요한 연구 과제 중의 하나이고, 그 중요도는 공학의 발전에 수반하여 점점 증가하고 있다. 스웨덴에서 개발된 이래 몇몇 연구 기관에서 이미 사용되고 있는 과도열 조판법(Transient Hot Strip, THS)은 열확산을 및 열전도율 계측의 한 방법이다.

이 방법은 몇 가지의 우수한 이점이 있는 반면, 노이즈 및 측정환산에 의한 오차가 크다고 하는 문제점을 갖고 있다. 그러나 전압 측정의 고정도화와 컴퓨터에 의한 오차 수정 계산의 간이화 및 열원반법(Hot Disk Method)이라고 불리는 개량된 센서를 통해 위의 문제점들을 해결했다.

열원반법의 센서는 니켈이나 동 등의 얇은 금속박(0.01mm) 원반을 2 중 나선상에 에칭제거 가공하여, 그 상이 및 원반 상하를 캡톤이나 운모라고 하는 절연체를 끼워 넣은 샌드위치 구조로 되어있다. 이 원반을 고체의 경우 아래의 그림과 같이 끼워 넣고, 분체나 액체의 경우에는 시험체의 가운데에 밀착시킨 후에 전기 가열하고, 회로의 전압 상승을 기록한다. 즉 이 나선상의 저항열선은 열원과 온도 계측의 양 방향으로 기능하고 있다. 전압 상승은 원반의 전기저항 온도계수에 존재하고 또한 열전도 방정식을 해석적 또는 수식적으로 푸는 것에 의해, 열확산 계수와 열전도율을 동시에 구할 수 있다.

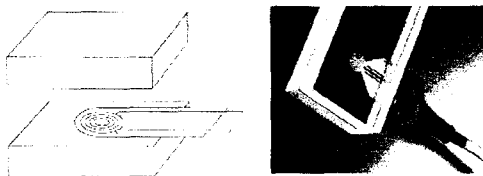


Figure 7. Hot Disk Method

4. 결과 및 고찰

4.1 발포 효과에 따른 무게 변화

표 1 의 4 가지 조건 하에서 성형을 하여 시편을 만든 결과 각 조건에 따른 무게 변화는 Figure 8 과 같다.

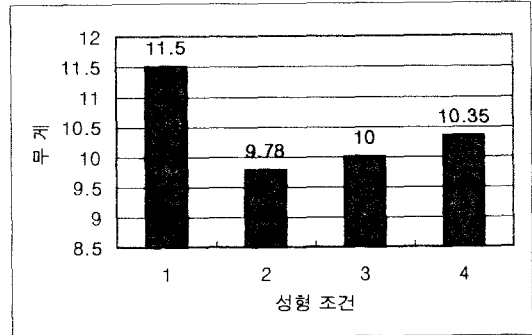


Figure 8. The weights for process conditions.

Figure 8 에서 알 수 있듯이 성형 인자 중 하나인 가스 주입 압력에 의해서 발포 효율에 차이가 난다. 가스 주입 압력이 2000psi 인 경우 15%의 발포율을 나타냈고, 1300psi 인 경우 10%의 발포율을 나타내었다. 이는 주입되는 가스 압력이 높아지면서 플라스틱 수지에 용해되어지는 용해량이 증가하여 발포 효과가 커지기 때문이다.

Figure 9 는 발포율 15% 시편의 단면 사진으로 평균 20 μm 크기의 기포들이 균일하게 분포되어 있다. 이러한 기포들의 크기와 개수, 분포에 따라 발포율이 달라지게 된다.

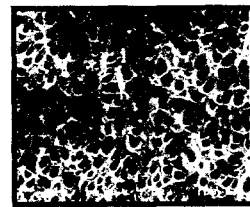


Figure 9. The photograph for section of MCPs product.

하지만 무조건 가스 주입 압력을 높인다고 해서 발포율이 증가되는 것은 아니다. 주입된 양이 과다하면 플라스틱 수지의 계량을 불안정하게 하고 가스가 호퍼쪽으로 방출되는 등 사출기 실린더 안에서 스크류가 충분히 섞어주지 못해서 생기는 현상들이 발생한다.

4.2 발포 효과에 따른 충격 강도 변화

일반적인 발포 성형의 경우 강도가 크게 약화되어 구조물에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 개발된 것이 초미세 발포 성형법이다. Figure 10은 표 1의 성형 조건에 의해 만들어진 시편에 대하여 충격 강도를 테스트한 결과이다.

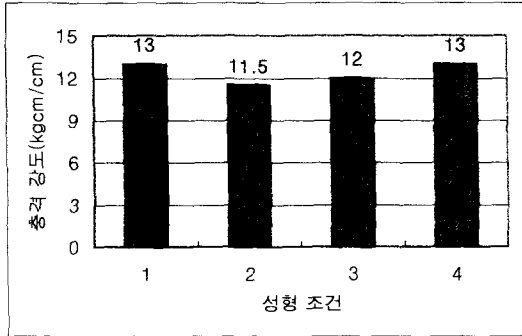


Figure 10. The impact strength for process conditions.

Figure 10에서 발포율이 증가하면 충격강도는 약간 감소되나 그 폭은 약 10%에 지나지 않는다. 이러한 결과를 바탕으로 발포의 단점이던 강도의 약화를 개선할 수 있게 되었다.

4.3 단열 특성

표 2는 일반 사출 시편과 발포에 의해서 15% 감량된 성형 조건 2의 샘플을 Hot Disk Method를 이용하여 열전도 계수를 측정된 결과이다.

표 2. 일반 사출과 초미세 발포 시편의 열전도계수

No.	일반 사출 시편	15% 발포 시편
1	0.2256 W/mK	0.1183 W/mK
2	0.2203 W/mK	0.1180 W/mK
3	0.2189 W/mK	0.1172 W/mK
4	0.2179 W/mK	0.1104 W/mK
5	0.2140 W/mK	0.1110 W/mK
평균	0.2193 W/mK	0.1150 W/mK

측정 편차 및 Hot Disk Method의 신뢰도를 높이기 위하여 각 5개의 샘플에 대한 열전도 계수를

나타내었다.

일반 사출의 경우 열전도 계수 k 는 0.2193 W/mK이고, 15% 경량화된 초미세 발포 성형품은 열전도 계수 k 가 0.1150 W/mK으로 50% 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 단열 성능이 2배가 향상된다는 것을 의미한다.

이러한 결과는 냉장고와 같이 단열 특성이 중요한 제품에 아주 좋은 효과를 나타낼 수 있는 것이다.

Figure 11은 발포율에 따른 무게에 대한 열전도 계수의 변화를 나타낸 결과이다.

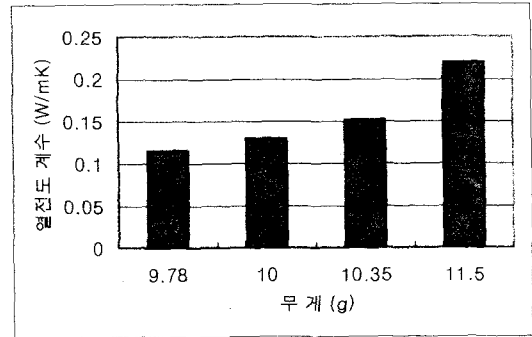


Figure 11. The coefficient of heat conductivity for the weight of products.

그림에서 알 수 있듯이 발포율이 증가하면서 무게가 감소할수록 열전도 계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 플라스틱 내부에 미세한 기포들이 생성됨으로써 공기층이 생겨 단열 효과가 증가하기 때문이다.

그러므로 이와 같은 현상을 이용하면 성형 조건을 조절하여 열전도 계수를 임의로 조절할 수 있게 된다.

5. 결론

초미세 발포 공법을 기존의 사출 성형 공정에 적용하여 초미세 발포 사출 성형이라는 새로운 성형 공법을 개발하였고, 이를 이용하여 성형품 내부의 기포 크기를 미세화하고 계수를 늘림으로써 기존 발포의 단점이던 강도의 약화를 방지할 수 있었다.

15% 발포율의 성형품에 대해서 약 10%의 강도 약화에 그쳤으며, 내부의 기포 구조에 의해 열전도 계수가 약 50% 정도 작아져 단열 성능을 2배 향상시킬 수 있었다. 이러한 사실은 고강도 단열 플라스틱 제품의 실현을 가능하게 하는 것이다.

한편 본 공법으로 일반 사출 성형을 대체한다면 발포에 의한 경량화 및 환경 문제로 대두되고 있는 플라스틱 사용량 감소라는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. C. B. Park: The Role of Polymer/Gas Solution in Continuous Processing of Microcellular Polymers, 1993
2. J. E. Martini: The Production and Analysis of Microcellular Foam, 1981
3. Jae. D. Yoon: Change of Glass Transition Temperature of Polymers Containing Gas, 2001
4. F.D. Baldwin: "Microcellular Polymer Processing and the Design of a Continuous Sheet Processing System," *Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering*, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
5. S.W. Cha: "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, 1994.
6. V. Kumar: "Process Synthesis for Manufacturing Microcellular Thermoplastic Parts: A Case Study in Axiomatic Design," *Ph. D. Thesis in Mechanical Engineering*, Massachusetts Institute of Technology, 1988.
7. T.S. Chow: "Molecular Interpretation of the Glass Transition Temperature of Polymer-Diluents systems," *Macromolecules*, Vol. 13, p.362, 1980.
8. V. Kumar and N.P. Suh: "A Process for Making Microcellular Thermoplastic Parts," *Polymer Engineering and Society*, Vol. 30, pp. 1323-1329, 1990.
9. J.E. Martini, N.P. Suh: Waldman, F.A., "Microcellular Closed Cell Foams and Their Method of Manufacture," *U.S. Patent 4473665*, 1984.
10. C.B. Park and N.P. Suh: "Extrusion of Microcellular Polymers Using a Rapid Pressure Drop Device," *Society of Plastic Engineers Technical Papers*, Vol. 39, 1993.