

공리적 설계를 이용한 초미세 발포 공정 설계

정대진*, 차성운**, 윤재동*

Design for Microcellular Plastics using Axiomatic Approach

Dae Jin Jeong*, Sung Woon Cha**, Jae Dong Yoon*

ABSTRACT

There is a great demand for reducing the amount of material used in mass-produced plastics parts, for material cost constitutes up to 75% of the total production cost. Plastics do not easily decay which causes environmental problems. Furthermore, material reduction therefore decreases the amount of oil needed for the manufacture of plastics and thus help conserve this natural resource. Therefore, microcellular foamed plastics(MCPs) was developed at MIT to solve these problems alternation 1980's.

Until now, however, microcellular foaming process not designed systematically because the key factors governing the process were not clear. The goal of this research is to obtain the optimal design of the microcellular plastics by using axiomatic approach.

Key Words : Axiomatic approach(공리적 접근), Microcellular plastics(MCPs 초미세 발포)

1. 서론

플라스틱이라고 불리는 고분자 재료(polymer)는 자동차용 범퍼, 프레임, 인스트루먼트 패널(Instrument Panel) 등 자동차의 내·외장재와 모니터, TV, 가전 제품 등의 모든 산업에서 사용되고 있다. 고분자 재료는 금속계 재료와 비교하여 값이 싸면서도 그와 비슷하거나 또는 더 좋은 기계적 성질을 보유하면서도, 가볍고 성형이 쉽다는 장점을 갖고 있기 때문이다. 그러나 고분자 재료는 성형품 자체의 가격은 저렴한 반면에 제품비 중 재료비의 비중이 75%정도로 많은 부분을 차지하기 때문에 고분자의 재료가 되는 원유의 가격에 많은 영향을

받는다. 또한 원유 매장량의 한계로 인하여 차후에 고분자 재료의 가격 인상으로 인한 플라스틱 제품의 가격이 오를 것은 분명한 일이라고 할 수 있다.

이와 같은 미래의 경제, 환경적 문제에 대처하기 위해 1980년대에 초미세 발포 플라스틱(MCPs: MicroCellular Plastics)이 개발되었다. 초미세 발포 공법을 사용하면 플라스틱 제품의 재료가 되는 고분자 재료를 감량시키면서 기계적 물성을 향상시킬 수 있다는 장점을 갖게 된다. 본 연구에서는 초미세 발포 공법에 영향을 주는 주된 인자들간의 관계를 공리적 접근 방법을 통하여 정리하고 최적화된 초미세 발포 공법의 설계를 얻어보고자 한다. 본 논문은 기 발표된 "공리적 접근을 이용한 DVD용

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

초미세 발포 방진재 개발(정필중, 차성운, 정밀공학회지 17권 12호)“과 배경이 되는 이론적인 내용은 같으나 본 논문은 초미세 발포 공정을 공리적 설계를 이용하여 설계한 것이고 기 발표된 논문은 초미세 발포 공정을 이용하여 DVD 방진재를 개발하되 공리적 접근 방법을 이용한 것에 차이가 있다고 하겠다.

2. 이론

2.1 초미세 발포 공법

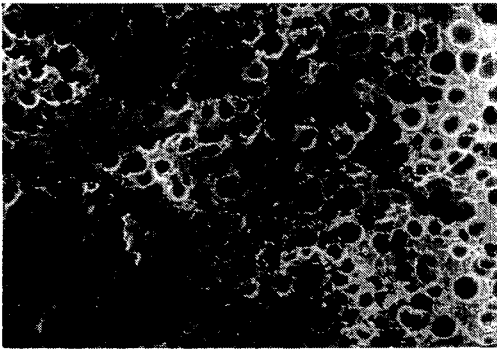


Fig. 1 Scanning electronic microscope(SEM) micrography of microcellular foamed ABS

초미세 발포 플라스틱이란 이산화탄소나 질소 헬륨 같은 불활성 기체를 고분자 재료 내부로 용해시켜 하나의 상(1-phase)을 이룬 후에 열역학적 불안정을 유발하여 재료 내에서 발포를 시킨 고분자 재료를 말한다. 이 때에 재료 내부에 생기는 기포의 크기가 마이크로미터(μm) 단위이기 때문에 초미세라고 불린다.

초미세 발포 플라스틱은 가스가 들어가 발포가 된 만큼 재료가 절감되는 장점뿐만 아니라 기존 발포의 단점으로 지적되던 충격 강도와 인장 강도 등 기계적 성질이 개선된다는 장점도 지닌다.

또한 초미세 발포 플라스틱의 경우에 단위 체적당 (cm^3) $10^9 \sim 10^{15}$ 개 정도의 기포가 생성되어 외부에서 가해지는 에너지를 흡수하기 때문에 매우 높은 충격 흡수력을 가지게 된다.

Fig. 2는 초미세 발포 사출성형 장치로써 기존

의 사출기에 가스 공급 장치와 특별히 고안된 스크루와 핵생성 장치 등이 추가되었다.

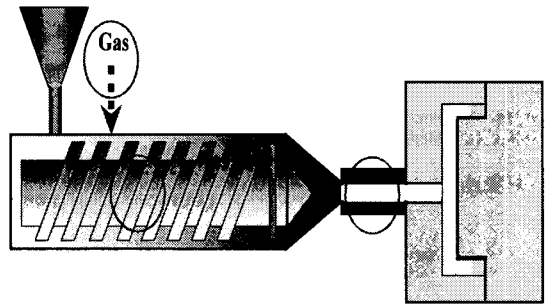


Fig. 2 Schematic diagram of the test device for microcellular foamed plastics

3. 공리적 설계의 적용

초미세 발포 플라스틱의 최적화된 설계를 위하여 공리적 접근 방법을 이용하였다. 기능적 요구 사항은 아래와 같다.

FR₁ : 플라스틱 제품의 무게 감량

이러한 기능적 요구를 세분화하여 하위개념으로 계층구조를 나눌 수 있다. 이러한 계층구조는 설계를 좀 더 용이하게 하고 최적의 설계를 도출하게 하는 공리적 접근방법의 특징이다. 다음은 위의 기능적 요구에 대한 하위개념의 기능적 요구사항이다.

FR₁₁ : 무게 감량이 최대가 되어야 한다.

FR₁₂ : 사이클 타임이 안정화되어야 한다

FR₁₃ : 사이클 타임이 감소되어야 한다

FR₁₁은 초미세 발포 성형을 할 때 항상 최대의 무게 감량을 이루어야 하기 때문에 선정되었다. FR₁₂는 초미세 발포를 이룰 때 가스의 공급으로 인한 사이클 타임의 불안정화가 이루어지지 않아야 하기 때문에 선정되었다. FR₁₃은 초미세 발포 성형이 급형에 적은 양을 사출하기 때문에 이로 인한 사이클 타임이 감소되어야 한다는 것이다.

FR₁₁₁ : 20%이상 무게 감량이 이루어져야 한다

FR₁₂₁ : 가스가 뒤로 새지 말아야 한다

FR₁₂₂ : 가스의 주입량이 사이클마다 일정

FR₁₁₁은 최대의 무게 감량이 이루어지지 적어도 20% 이상을 연속적으로 이루어야 하기 때문에 선

정되었고 FR₁₂₁은 사이클의 안정화가 이루어지기 위하여 가스가 호퍼(hopper)로 새 나가는 것을 막아야 하기 때문에 선택되었으며 마찬가지로 가스 주입양이 매 사이클마다 일정해야 하기 때문에 FR₁₂₂가 선택되었다.

설계 요소는 기능적 요구와 가장 관계가 깊은 것으로 다음과 같다.

DP₁ : 가스를 최대로 주입할 수 있는 가스 공급 장치 사용

DP₁₁ : 가스 주입양을 최대로 한다

DP₁₂ : 가스 주입 시간과 위치를 최적화 한다

DP₁₃ : 냉각 시간을 감소한다

무게 감량이라는 기능적 요구 사항의 하위 개념들과 가장 관계가 깊은 DP₁₁은 가스의 주입양이 최대가 될 때 무게 감량이 최대로 이루어지기 때문에 설계요소로 선택하였다. DP₁₂는 사이클 타임을 안정화하기 위하여 시간과 주입 위치를 최적화해야 하기 때문에 선택되었고 마지막으로 DP₁₃는 사이클 타임을 줄이는 것에 냉각 시간의 감소가 들어가기 때문에 선택되었다.

DP₁₁₁ : 가스 주입양을 최대로 한다

DP₁₂₁ : 가스 주입 위치를 결정하여야 한다

DP₁₂₂ : 가스를 기계식으로 주입하여야 한다

위의 DP₁₁₁이 DP₁₁과 같은 이유는 최대의 무게 감량이 이루어지기 위해서는 가스 주입양이 최대로 되어야 하기 때문에 같은 것이다. DP₁₂₁은 가스가 뒤로 새어 나가지 않기 위해서는 배럴의 위치에 따라 틀려지기 때문에 선택되었으며 주입양을 일정하게 하기 위해서는 가스를 기계적으로 모아서 주입하는 방식이 선택되었다.

FR₂ : 기계적 물성이 향상되어야 한다

마찬가지로 FR₂는 초미세 발포가 되어 무게가 감량되면서 충격 강도, 인장 강도 등이 발포시키지 않은 제품보다 떨어지지 않고 충격의 경우 증가해야 하기 때문에 기능적 요구로 선택되었다. 이에 대한 하위의 기능적 요구는 다음과 같다.

FR₂₁ : Cell size가 균일해야 한다

FR₂₂ : Cell의 배열이 균일해야 한다

FR₂₃ : 최대의 무게 감량이 이루어져야 한다

기계적 물성의 향상이라는 기능적 요구를 만족시키기 위하여 셀 크기를 작고 균일하게 하며 그 배치를 균일하게 하여 외부에서 가해지는 힘을 고르게 흡수할 수 있도록 한다. 그리고 이것은 최대의 무게 감량이 이루어진 상태에서 만족되어야 한

다. 이 단계를 만족시키는 보다 하위의 기능적 요구는 아래와 같다.

FR₂₁₁ : Cell size가 10 μ m이하여야 한다

FR₂₁₂ : Cell의 개수가 단위 체적당 10⁹개 이상이어야 한다

FR₂₂₁ : Cell간의 거리가 일정해야 한다

FR₂₂₂ : Cell의 형상이 원형이어야 한다

Cell크기와 배열이 균일하면서도 그 크기와 형상이라는 측면에서는 cell의 크기가 10 μ m 이하를 만족시키면서 그 개수가 10⁹개 이상이어야 하기 때문에 하위 단위의 기능적 요구로 선정되었고 cell의 배열이 균일하기 위하여 원형을 이룬 cell간의 거리가 일정해야 한다는 기능적 요구들이 선정되었다. 물성 향상에 대한 설계 요소는 다음과 같다.

DP₂ : Cell morphology를 크게 한다

DP₂₁ : 압력 강하율이 일정하도록 성형한다

DP₂₂ : 주위의 cell들과 항상 일정하게 결합하도록 한다

DP₂₃ : 가스 주입양을 최대로 한다

DP₂₁은 균일한 cell 크기를 이루기 위해 cell이 만들어 질 때 가장 중요한 요소인 압력 강하율을 일정하게 한다는 것이고 DP₂₂는 생성된 핵(cell이 생성된 단계)이 주위의 핵들과 합쳐져서 cell이 될 때 항상 일정하게 결합하도록 한다는 것이다. 이에 대한 하위의 설계 변수는 다음과 같다

DP₂₁₁ : 핵 성장이 작게 일어나도록 압력을 가한다

DP₂₁₂ : 압력 강하율이 높은 핵생성 장치 사용

DP₂₂₁ : Cell 간의 결합이 cell 주위에서만 일어날 수 있도록 사출과 금형 조건 결정

DP₂₂₂ : 길이와 두께 방향으로 핵 성장이 일어나도록 한다

DP₂₁₁은 핵 성장이 어느 한도 이상 일어나지 못하도록 하는 것이고 압력 강하율이 높은 핵 생성장치(노즐)를 이용하여 cell의 개수가 많도록 하는 것이다. Cell의 거리가 일정하기 위해서는 cell 성장이 주위의 일정하게 정해진 핵들과 반응할 수 있도록 조건을 결정해야하며 cell이 원형을 이루기 위해서 기존의 길이 방향으로의 발포 뿐만 아니라 두께 방향으로도 발포가 이루어지도록 해야한다.

FR₃ : 표면 품위가 향상되어야 한다

이전의 다른 기능적 요구들과 같이 초미세 발포를 이룬 제품의 표면이 발포시키지 않은 제품과 비교하여 비슷한 정도가 되어야 외장재 등 좋은 표면

을 요구하는 제품에 사용될 수 있기 때문에 기능적 요구로 선정되었다. 이것에 대한 하위의 기능적 요구로는 다음과 같은 것이 있다.

FR₃₁ : 표면은 발포가 일어나지 않아야 한다

FR₃₂ : 표면에 흐름 자국이 없어야 한다

FR₃₃ : 최대의 무게 감량이 이루어져야 한다

위의 기능적 요구들은 표면 품질이 향상되기 위하여 하위 단계로 선정된 것이다. 먼저 고품위 표면을 얻기 위하여 표면은 발포가 이루어지지 않아야 하며 발포가 되어 나온 가스가 표면에 남지 않도록 즉 가스로 인한 흐름 자국이 제품 표면에 없어야 하고 마찬가지로 이것은 최대의 무게 감량이 이루어진 상태에서 되어야 한다.

위의 기능적 요구들을 만족시키기 위하여 설계 요소를 선택하면 다음과 같다.

DP₃ : 발포가 제품의 두께 내에서만 일어나도록 금형의 조건을 최적화 한다

이것에 대한 하위 설계 요소는 다음과 같다.

DP₃₁ : 금형의 냉각과 압력 조건 등을 결정하여 sandwich foaming이 일어나도록 한다

DP₃₂ : Air-vent를 설치하여 발포되어 나오는 가스를 제거한다

DP₃₂ : 가스 주입양을 최대로 한다

표면에서 발포가 이루어지지 않으려면 제품 내부(두께)에서 모든 발포를 이루어야 한다. 그러기 위해서 제품 표면에서는 발포가 이루어지지 않는 sandwich foaming을 할 수 있는데 이것은 금형 조건에 따라 결정될 수 있다. 다음으로 발포되어 농도차에 기인하여 고분자 재료 밖으로 나온 가스가 고분자 표면에 붙어서 흐름 자국이 생기도록 하는데 이것을 금형 밖으로 빼내기 위하여 금형 캐비티(cavity) 곳곳에 에어 벤트(air-venr)를 설치한다.

위의 기능적 요구 사항들과 설계 요소들 간의 관계를 설계 행렬(design matrix)을 이용하여 나타낼 수 있다. 이러한 설계 행렬을 이용하게 되면 각 단계들 간의 관계를 정량적으로 나타낼 수 있기 때문에 최적의 설계를 쉽게 도출해 낼 수 있게된다. 다음은 FR's와 DP's간의 설계행렬이다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{121} \\ FR_{122} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{121} \\ DP_{122} \end{Bmatrix}$$

FR₁₁₁과 DP₁₁₁은 항이 하나밖에 없으므로 uncoupled design이다. 위의 FR₁₂와 DP₁₂의 설계 행렬은 uncoupled design임을 나타낸다. 따라서 공리 1

인 독립의 공리를 만족하기 때문에 최적의 설계를 얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{211} \\ FR_{212} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{211} \\ DP_{212} \end{Bmatrix}$$

마찬가지로 FR₂₁과 DP₂₁의 설계 행렬은 uncoupled design이다. 이것 또한 독립의 공리를 만족하기 때문에 최적의 설계를 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{221} \\ FR_{222} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{221} \\ DP_{222} \end{Bmatrix}$$

FR₂₂와 DP₂₂는 decoupled design이다. 이것은 uncoupled design처럼 가장 이상적인 경우는 아니지만 독립의 공리를 만족하기 때문에 최적의 설계를 얻을 수 있게 되는 관계이다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{311} \\ FR_{312} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{311} \\ DP_{312} \end{Bmatrix}$$

더 상위 단계의 기능적 요구들과 설계 요소들 간의 관계를 이루는 설계 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ O & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \end{Bmatrix}$$

위의 FR₁과 DP₁ 간의 설계 행렬은 decoupled design임을 나타낸다. 이것은 최적의 설계가 얻어질 수 있다는 것을 나타낸다. 다음으로 FR₂와 DP₂간의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \end{Bmatrix}$$

위의 관계에 의하면 FR₂와 DP₂는 decoupled design임을 알 수 있다. 마찬가지로 최적의 설계가 얻어진다. 마지막으로 FR₃과 DP₃과의 관계를 보면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \end{Bmatrix}$$

위와 같이 FR₃과 DP₃은 decoupled design이므로 최적의 설계를 얻을 수 있다.

4. 실험

실험은 위에서 정한 FR's와 DP's로 이루어지는 설계 행렬(design matrix)을 기반으로 하여 이루어졌다. 우선 FR₁₂₁과 FR₁₂₂의 관계를 보자. 가스가 뒤로 새는 것을 막기 위하여 가스 주입 위치를 조절하고

가스 주입을 기계식으로 해야한다는 것인데 실제로 실험을 가스 위치를 아래 그림과 같이 바꾸어서 행하였다.

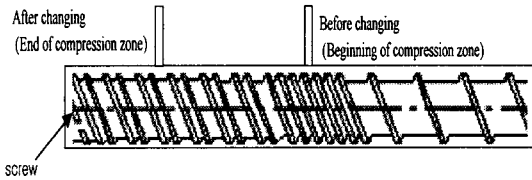


Fig. 3 Schematic diagram of the gas supply position

가스 공급 위치를 바꾸어서 실험한 결과 기존에 호퍼부를 통하여 새어 나오던 가스의 양이 현저하게 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

다음으로 FR₂₁₁과 FR₂₁₂의 관계를 살펴보면 cell의 개수와 크기를 조절하기 위하여 보압을 가하고 압력 강하율이 큰 핵생성 장치를 이용하였다. 먼저 보압의 세기를 크게 하였을 경우 cell의 크기 보다는 발포가 cavity 끝까지 진행되는 결과를 얻을 수 있었다. 핵 생성장치의 경우 압력 차가 10GPa/s와 7, 5를 사용하여 실험을 해 보았지만 많이 개선된 효과를 볼 수는 없었다.

기존의 일괄처리 공정(Batch process)에 따르면 발포된 제품의 충격 강도가 적게는 수 배에서 많게는 수십 배 정도 증가한다고 알려져 있다.⁽⁴⁾ 그러나 초미세 발포 공법을 연속 공정인 사출 성형에 적용하였을 경우에는 충격 강도가 낮아지는 경향을 보였다. 이것이 FR₂에 나타난 기계적 물성의 향상 측면이다. DP₂를 발포 배율을 크게 한다고 잡았다. 이러한 DP₂로 실험을 행했을 때 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 아래 그림은 충격 강도 시편으로써 사용 재료는 ABS 380이고 성형 온도는 180℃이며 사용된 가스는 이산화탄소 gas와 질소 gas이다.

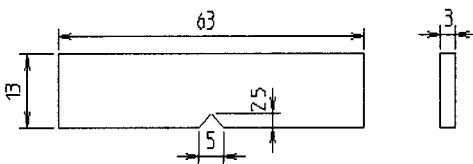


Fig. 4 Schematic diagram of mold cavity for Microcellular foamed plastics.

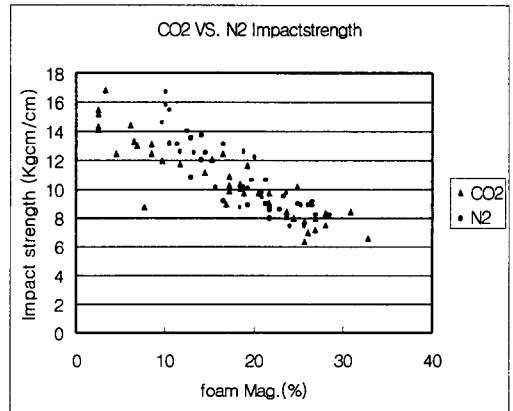


Fig. 5 Compare of impact strength sample of MCPs by using nitrogen gas with by using carbon-dioxide gas

위의 Fig. 5를 살펴보면 가스가 들어가지 않았을 경우에 충격 강도가 14kgcm/cm정도이나 무게가 10%정도 감량된 시편의 경우 비슷하거나 더 좋은 충격 강도의 값이 나오는 것을 알 수 있다. 이 시편의 SEM(Scanning Electric Microscope)를 살펴보면 cell morphology(발포배율)이 커졌기 때문에 충격 강도 값이 증가했음을 알 수 있다.

다음으로 좋은 표면을 얻기 위한 조건인 FR₃과 DP₃과의 관계를 알아보기 위해서 금형의 냉각 조건을 조사하였다. 표면이 발포되지 않은 제품을 얻

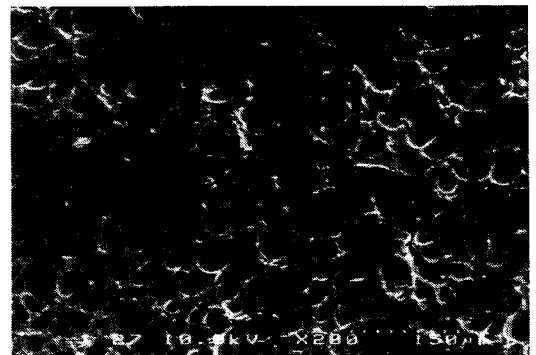


Fig. 6 Scanning electronic microscope(SEM) micrography of microcellular foamed ABS with N₂.

기 위해서는 금형의 온도를 높여야 한다. 금형의 온도를 높이면 물론 제품의 냉각 시간이 증가하기

때문에 사이클 타임이 늘어나지만 이것은 미충진 후 발포로 인한 냉각과 사이클 타임의 감소로서 충분히 만회할 수 있는 것이다. 냉각 온도를 높여서 실험을 했을 때 온도가 높을수록 표면이 점차로 좋아지는 경향을 보인다는 것을 알 수는 있었으나 그 경향의 폭이 적었다.

5. 결론 및 고찰

지금까지의 내용들을 살펴보면 설계 행렬에서 나타난 바와 같이 기능적 요구들의 독립성을 유지하면서 최적화된 설계를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 초미세 발포 공법을 이루기 위한 기능적 요구들 중 가장 중요한 것이 최대 무게 감량인데 이것은 가스의 공급을 고분자 재료 속에 넣을 수 있는 최대의 양을 넣어 무게 감량과 동시에 사이클 안정화와 사이클 타임의 감소도 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 기존의 발포 성형은 충격 강도와 인장 강도가 떨어지는 경향을 보였었는데 이러한 단점을 개선하기 위하여 초미세 발포에서는 cell의 크기와 배열을 조정하여 얻을 수 있다는 것을 실험적으로 검증하였다. 다음으로 발포 성형은 표면 품질이 매우 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 재료 내부에서 뿐만 아니라 재료 외부에서도 발포가 일어나서 생기는 것인데 이것은 금형의 조건(냉각 조건, 압력 조건)을 조절하여 얻은 sandwich foaming으로 해결할 수 있다. Sandwich foaming은 표면의 내부만 발포시키고 외부는 발포가 되지 않은 것으로써 이것으로 인해 고품위 표면을 얻을 수 있다. 또한 초미세 발포 성형시 고분자 재료가 금형 내 캐비티로 진행할 때 고분자 재료로부터 발포되어 나온 가스가 캐비티 내에서 고분자 표면에 붙음으로써 표면에 흐름 자국이 남게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 금형 내에 에어 벤트를 설치하면 가스를 금형 밖으로 빼낼 수 있게 되어 위에서 지적한 표면에 흐름 자국을 없앨 수 있게 된다.

본 연구는 최적화된 초미세 발포 공법의 설계와 주된 영향을 요소들을 공리적 접근을 이용하여 도출해 보았고 이것을 실험적으로 증명해 보이려 한 것이다. 공리적 접근을 사용해 본 결과 설계된 초미세 발포 공법은 coupled된 design이 아니고 decoupled된 design임을 알 수 있었다. 즉 coupled된

design이 아니기 때문에 실제 초미세 발포 공정을 시행할 때에 중요 인자들을 고려하여 성형할 수 있는 기틀을 제시했다는 것에 본 연구의 의의가 있다.

후기

본 연구는 LG 생산기술원과 한국과학재단 지정 정보 저장 기기 연구센터(과제번호 : 2000G0100)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. S. W. Cha, "A Microcellular Foaming/Forming Process Performed at Ambient Temperature and a Super Microcellular Foaming Process," M.I.T., pp. 12-15, 1994.
2. Nam P. Suh, "The Principles of Design," Oxford University PressFont, pp. 15-20, 1990.
3. 문용락, "공리적 접근을 이용한 설계평가 도구의 개발," 석사학위논문, 연세대학교, pp. 5-22, 1999.
4. 윤재동, "가스의 용해량에 따른 고분자의 유리전이 온도 및 점도," 석사 학위 논문, 연세대학교, pp. 9-21, 1998.
5. 정대진, 차성운, 윤재동, "질소 가스를 이용한 초미세 발포 고분자 재료의 무게변화," 정밀공학회지 17권 9호 pp. 196-201, 2000.