

공리적 접근을 사용한 초미세 발포 사출기용 가스공급장치의 설계

이정욱* · 차성운** · 김지현***

Design of Gas Supply System for Microcellular Foamed Injection Molding Using Axiomatic Approach

J.W.Lee, S.W.Cha, and J.H.Kim

Key Words : Microcellular Foaming, Axiomatic Approach, Gas Supply System

Abstract

Microcellular foamed plastic is a foaming technology that is safer to the environment and has no significant deterioration of mechanical properties compared to the conventional foamed plastic. Currently, the development of the injection-molding machine for microcellular plastic (MCP) is nearing completion. Currently, researches on the mass production system for the MCP injection-molding machine are under progress.

The purpose of this paper is to design the gas supply system suitable for microcellular foaming in the injection-molding machine. For the design process, Axiomatic Approach, a powerful tool for design, will be used.

1. 서론

초미세 발포 플라스틱(Microcellular Foamed Plastic : MCP)은 비활성 기체를 사용해서 열역학적 불안정성을 유발시켜 발포 시키는 발포 플라스틱이다. 기존의 발포 플라스틱은 대부분 CFC 같은 화학적 발포제를 사용해서 환경오염의 원인이 되었다. 반면 초미세 발포 플라스틱은 이산화탄소 같은 비활성 기체를 발포제로 사용해 기존의 발포 플라스틱보다 더 환경 친화적이다. 또 발포에 의해 기계적인 성질이 많이 떨어지는 경우가 많지만 초미세 발포 플라스틱은 기계적인 성질이 크게 떨어지지 않고 충격강도 같은 경우에는 오히려 원래 폴리머 재료를 사용하는 것보다 더 좋은 결과를 가진다는 연구결과도 발표됐다.

초미세 발포는 1980년대 초에 MIT에서 처음으로 개발되었고 지금은 압출기, 성형 등 산업분야에 많이 적용되어있다. 현재는 사출기에 초미세 발포를 적용하려는 연구가 미국, 일본, 한국 등 여러 곳에서 연구중이다. 초미세 발포 플라스틱을 사출기에 적용하는데 문제점이 되는 것 중에 하나가 원하는 양의 고압가스를 사출기에 주입시키는 것이다.

본 논문의 목적은 공리적 접근을 사용하여 초미세 발포용 사출기를 위한 가스 공급장치를 설계하는 것이다.

2. 이론

2.1 초미세 발포 플라스틱

* 연세대학교 정보저장공학 협동과정

** 연세대학교 기계공학과

*** LG 전자 생산기술원

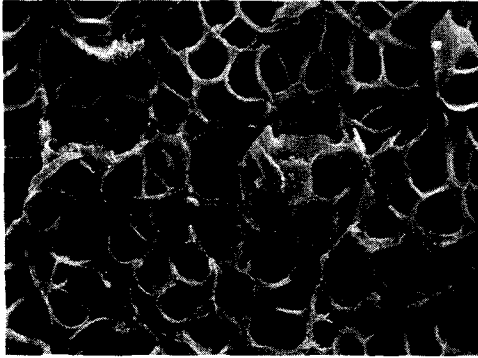


Fig. 1 Photo of Microcellular Foamed PC Seen under Scanning Electron Microscope

초미세 발포 플라스틱은 기포 밀도가 10^9 cells/cm³ 이고 완전히 성장한 기포의 크기가 10 μ m 보다 작은 발포 플라스틱이다. 초미세 발포 플라스틱의 생성에는 크게 세가지 단계로 이루어져 있다. 가스/폴리머의 용액을 만드는 첫번째 단계에서는 가스를 녹은 폴리머에 주입시키고 이것을 잘 섞어서 하나의 용액을 형성하도록 한다. 이 단계에서는 가스의 용해도를 높이기 위해서 고압, 저온에서 용액을 형성한다. 다음의 핵 생성 단계에서는 가스/폴리머 용액의 가스 용해도를 급격히 떨어트려서 가스가 석출되어 기포를 형성한다. 압력을 감소시키고 온도를 올려서 용해도를 떨어트릴 수 있다. 마지막 단계인 기포성장 단계에서는 핵 생성 단계에서 형성된 기포들이 주위에 남아있는 가스를 흡수해서 성장한다.

Fig. 1 은 초미세 발포된 폴리카보네이트의 구조를 전자 현미경으로 찍은 사진이다. 이 그림에서 초미세 발포 플라스틱의 기포 구조를 볼 수 있다.

2.2 설계의 계층구조적 특징

공리적 설계의 규칙에 따르면 설계과정의 본질은 계층구조(hierarchical structure)에 있다. 디자인의 상위단계에서부터 시작해서 점점 더 하위구조로 내려가면서 더 자세한 사항들을 검토한다. 따라서 Fig. 2 에서 보이는 것처럼 디자인의 기능적 요구사항과 이를 만족시키는 설계 요소들도 상위 단계에서 하위단계로 계층적 분해가 이루어져야만 한다.

상위단계에 있는 기능적 요구사항이 상위의 설계요소에 의해 만족되어야만 하위단계의 기능적 요구사항을 만족시킬 하위단계의 설계요소를 선택할 수 있다.

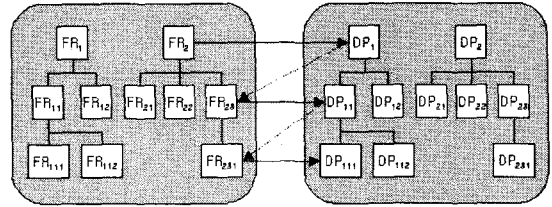


Fig. 2 The Hierarchical Structure of Design Process

3. 가스공급장치의 설계

초미세 발포용 사출을 할 때 사출기가 매 사이클마다 일정한 양의 가스 공급을 해주어야 한다. 이것을 만족하기 위해서는 설계요소로 가스 공급장치를 사용한다. 가스공급장치의 가장 상위 단계의 FR 들은 다음과 같다.

FR₁ : 일관성(consistency) 있게 가스를 공급하여야 한다

FR₂ : 안전하여야 한다 (safety)

FR₃ : 고부가가치이어야 한다 (high value)

3.1 일관성

가스공급장치가 일관성 있게 가스를 공급하기 위한 요구사항은 다음과 같은 설계요소로 만족시킬 수 있다.

DP₁ : 매 사이클 마다 일정한 양을 공급

가스의 주입량은 제품의 무게, 기포밀도, 강도 등의 특성에 영향을 미친다. 필요한 한도 내에서 가스를 최대한 많이 주입시키는 것도 중요하지만 대량생산에서는 정확하게 매 사이클 마다 일관성 있게 똑 같은 양을 주입하는 것도 매우 중요하다. 일관성 있게 주입하기 위해서는 다음과 같은 하위 FR 들이 만족되어야 한다.

FR₁₁ : 대량 생산용 가스량 제어가 가능하여야 한다

FR₁₂ : 여러 대의 사출기에 동시에 사용될 수 있도록 용량이 적합하여야 한다

FR₁₃ : 사출기 배럴내의 압력보다 높은 가스 압력을 가져야 한다

3.1.1 FR₁₁ : 가스량 제어

일관성 있게 가스를 주입시키기 위해서 가스량 제어는 필수적이다. 이 요구사항을 만족시키기 위해서 **유량계**를 설계요소로 설정할 수 있다 (DP₁₁). 유량계에 필요한 기능적 요구 사항들은 다음과 같

다.

- FR₁₁₁*: 일정량의 가스 측정
- FR₁₁₂*: 사이즈에 맞춰 가스 공급

사이즈에 맞춰 가스를 공급 (*FR₁₁₂*) 하기 위해서는 액츄에이터 니들 밸브 (*DP₁₁₂*)를 사용할 수 있다. 또, 일정량의 가스 측정 (*FR₁₁₁*)을 만족시키는 설계요소는 가스공급장치 시스템에서 가장 중요한 사항으로서 여러 업체에서 수배한 결과 해결책을 찾지 못해 새로운 방식을 적용하였다.

원래 가스의 흐르는 양을 감지해서 유량을 조절하는 것이 유량계라고 지금까지 생각했으나 이런 유량계는 초미세 발포 사출 실험에서 쓰이는 고압에서 견딜 수 있는 것이 없었다.

이 유량계를 실현하는 과정에 있어서 처음에는 틀린 방법으로 접근을 해서 해답을 얻지 못했다. 가스의 양을 측정하는 센서라는 하나의 설계요소에 국한되어 생각을 해서 처음에는 유량계를 설계하지 못했다. 그러나 기능적 요구사항을 다시 점검한 결과 다른 접근방법을 검토해보았다. 그 결과 *DP₁₁₁* 을 기체의 특성을 사용하는 것으로 설정하였다. 그 결과 다음과 같은 세부 FR 들을 정의하였다.

- FR₁₁₁₁*: 일정한 체적 형성
- FR₁₁₁₂*: 일정한 온도 형성
- FR₁₁₁₃*: 일정한 압력 형성

기존의 방식은 계속 가스의 흐르는 양을 제어하려 했으나 여기서 새로 제시하는 방법은 다음과 같다. 일단 가스를 용기 안에다 모아두고 이 때의 가스량을 측정한다. 그리고 사출기의 배럴 내로 가스를 방출한다. 사출기의 배럴내의 압력이 있기 때문에 용기 안에 모아둔 가스는 모두 다 들어가지 못하고 어느 정도 용기 안에 남아 있을 것이다. 가스의 처음 양과 주입이 끝났을 때 용기 안에 남아 있는 가스의 양을 측정 할 수 있으면 실제로 사출기의 배럴 안으로 주입된 가스의 양을 계산할 수 있다.

용기 안의 가스의 양을 측정하는 데는 다음과 같은 기본적인 원리를 사용한다.

- 가스의 양 $\propto PV/T$
- 여기서, P: 용기내의 가스 압력
- V: 용기의 체적(가스가 차지하는 체적)
- T: 가스의 온도

위 FR 들을 만족하기 위해서 정한 DP 들은 다

음과 같다.

- DP₁₁₁₁*: 가변체적 용기
- DP₁₁₁₂*: 온도조절 가능한 히터
- DP₁₁₁₃*: 압력 레귤레이터

DP₁₁₁₁ 의 가변체적 용기는 가스가 차지하는 공간을 제어할 수 있도록 길이가 늘어나는 압력 용기를 사용했다. 용기의 길이는 나선선이 있는 덮개를 사용해서 덮개를 회전시키면 나선선을 따라 길이를 조절할 수 있다.

DP₁₁₁₂ 의 온도 조절 가능한 히터는 가스의 온도를 조절하기 위해 사용되고 *DP₁₁₁₃* 의 압력 레귤레이터는 컴프레서에서 공급되는 고압의 가스를 원하는 압력으로 용기 내에 들어가도록 조절해주는 장치이다.

가스 주입시 배럴내의 압력은 일정하므로 그 압력에 적절하게 주입될 수 있도록 가스 주입 압력은 정해진다. 그리고 온도도 작업 조건에 맞게 일정하게 유지해준다. 이 두 변수가 고정된 상태에서 용기의 체적을 맞춰줘서 원하는 양을 조절한다. 이런 설계를 설계 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{1111} \\ FR_{1112} \\ FR_{1113} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & O \\ X & O & O \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1111} \\ DP_{1112} \\ DP_{1113} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

이 형태의 설계는 탈중복화된 설계로서 독립의 공리를 만족시킨다.

이렇게 해서 제작된 유량계는 Fig 2 와 같다. Fig 2 에서 용기 양 옆의 큰 원통은 *DP₁₁₂* 의 액츄에이터 니들 밸브이다.



Fig. 3 Picture of Gas Regulator

3.1.2 *FR₁₂*: 용량

여러 대의 사출기에 연결하여 대량생산하기 위

해서는 가스의 수요에 알맞게 용량이 충분하여야 한다. 따라서 이 FR의 DP는 저장소(DP₁₂)로 설정할 수 있다. 저장소에 대한 FR은 다음과 같다.

FR₁₂₁: 가스가 여러 대의 사출기로 빠져 나가지도 문제가 없어야 한다

원래 고압가스를 형성하는 컴프레서를 통해서 가스가 직접 사출기로 공급될 수도 있으나 그럴 때 문제는 압력이 일정하지 않다는 것이다. 따라서 가스가 공급되어도 그 가스량에 비해 상당히 크고 저장소가 있으면 가스가 빠져나가지도 큰 영향 없이 작동할 수 있다. 이 요구사항에는 적절한 용량을 가지는 가스 리시버를 DP로 설정할 수 있다.

3.1.3 FR₁₃: 높은 압력

FR₁₃₁: 고압사출기 배럴 내로 가스를 주입할 수 있어야 한다

먼저 FR₁₃의 고압가스 형성은 사출기 배럴 내의 압력이 높기 때문에 가스를 배럴 내의 압력보다 높은 압력으로 주입해야 한다.

초미세 발포용 사출기에서는 폴리머를 사출기의 배럴 내에서 스크루로 녹이고 녹인 수지에 가스를 주입하여 폴리머/가스 용액을 형성해야 한다. FR₁₁의 고압가스는 사출기 배럴 내부의 압력이 높기 때문에 가스를 주입하기 위해서는 가스의 압력이 배럴내부의 압력보다 높아야 한다. FR₁₂의 일정량의 가스 측정은 초미세 발포 사출 프로세스가 매 사이클마다 같은 양의 가스를 주입시키기 위해서 원하는 양의 가스를 측정할 수 있어야 한다.

사출 프로세스에는 매 사이클마다 크게 계량, 사출, 냉각과, 송출 단계로 이루어져 있다. 초미세 발포 사출을 위해 가스를 공급할 때, 사출기에 일정량의 가스를 측정하고 나서 FR₁₃에서 설명한 것처럼 매 사이클마다 원하는 단계에 가스를 주입하기 위해 가스를 원하는 사이클 타임에 가스를 방출하고 또 가스의 흐름을 정지할 수 있어야 한다.

사출기의 배럴 내로 공급된 가스는 스크루에 의해 수지와 섞여서 단일상의 폴리머/가스 용액을 형성한다. 가스 주입시점에서 사출하기까지는 매우 짧은 시간이 걸리므로 가스가 폴리머와 최대한 효율적으로 섞이도록 유도하여야 한다. 따라서 FR₁₄에서 설명한 것처럼 수지가 폴리머와 잘 혼합되는 것을 도와주도록 가스를 균일하게 골고루

공급하여야 한다.

이런 기능적 요구사항을 만족하기 위해서는 다음과 같은 설계 요소들을 정했다.

DP₁₁: 컴프레서

DP₁₄: 특수 주입구

고압 가스를 형성하기 위해 정한 설계 요소는 DP₁₁의 컴프레서로 발포제로 사용하는 가스를 고압으로 만들어준다. 가스를 주입하는 위치에서의 배럴 내의 압력은 70-150bar 이므로 컴프레서의 성능은 적어도 100-200bar 이상인 것으로 선택했다. Fig.2는 초미세 발포 사출 프로세스에 사용된 컴프레서이다.

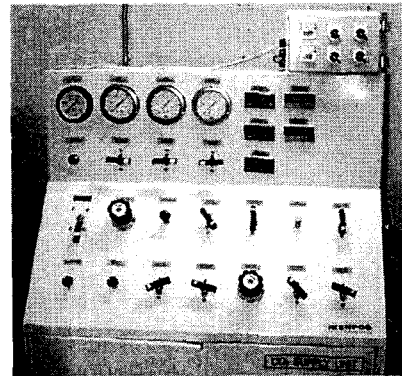


Fig. 4 Picture of the Compressor

가스공급장치가 다음으로 필요로 하는 기능은 FR₁₂의 일정량의 가스를 측정하는 것이다. 일정량의 가스를 측정하기 위해서는 DP₁₂의 유량계를 사용한다. 유량계에 대해서는 다음 절에서 더 자세히 설명하겠다.

초미세 발포 플라스틱이 압출기에 적용되었을 때는 압출기가 연속적인 프로세스로 진행되므로 가스를 일정한 압력으로 계속 주입시켰다. 그러나 사출기의 경우에는 연속적이지 않아서 매 사이클마다 각 과정에서 배럴 내의 압력이 틀리다. 따라서 초미세 발포용 사출기에서는 FR₁₃에서 설명한 것처럼 가스를 연속적으로 공급하지 않고 필요할 때 주입하고 필요 없을 때에는 공급을 멈출 수 있어야 한다. 이 기능적 요구사항을 만족시키기 위해서 설계요소로 DP₁₃의 밸브를 선택했다.

마지막으로 가스가 폴리머와 하나의 단상(one-phase) 용액을 이루기 위해서는 FR₁₄에서 설명한 것처럼 가스를 균일하게 공급할 수 있어야 한다. 이 설계 요소를 만족하기 위해서는 흐름을 잘게

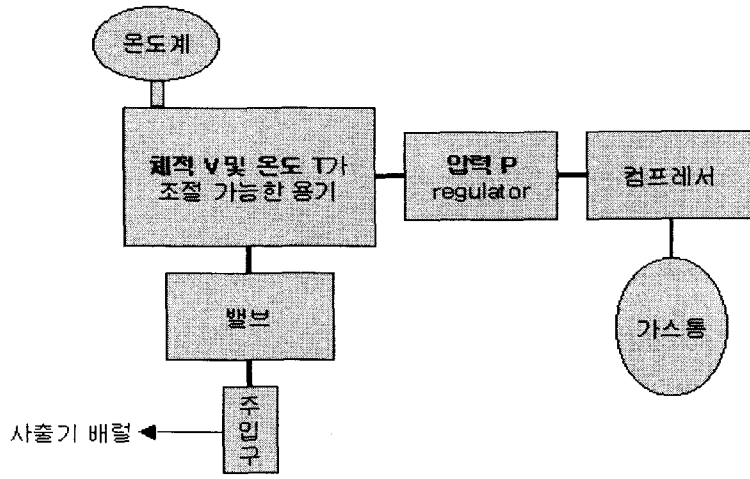


Fig.4 The Schematics of the Newly Designed Gas Supply System

분해 할 수 있는 DP_{14} 의 주입구를 사용하면 된다.

위에서 설명한 가스공급장치의 기능적 요구사항과 설계요소를 디자인 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O & O \\ O & X & O & O \\ O & O & X & O \\ O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \end{Bmatrix}$$

위에서 정한 FR 과 DP 들은 애초에 기능적 독립성을 고려해서 각 기능들에 대해 독립적인 설계요소를 설정하였다. 위 행렬은 가스공급장치의 디자인이 비중복화 설계임을 보여주고 모든 기능적 요구사항은 독립성을 유지한다. 본 단계에서의 기능적 요구 사항들과 설계 요소들이 문제없이 정의되었으므로 다음 단계의 설계를 시작할 수 있다. 다음절에서는 가스공급장치 시스템에서 가장 중요한 유량계의 다음 단계 FR 과 DP 들을 정의하겠다.

4. 유량계

본 논문에서는 공리적 설계를 사용해서 새로운 가스공급장치를 설계하였다. 위 요소들로 설계된 가스공급장치는 Fig. 4 와 같다.

5. 결론

본 논문에서는 공리적 접근을 사용해서 초미세 발포용 사출기에서 사용되는 가스공급장치를 설계하였다. 디자이너가 설계를 할 때 공리적 접근을 사용하면 하나의 제한된 설계요소 만에 국한되어 생각을 하는 것을 막을 수 있고, 실제로 무엇이 필요한지를 생각하게 함으로서 디자이너가 넓은 관점에서 문제를 접근하게 해준다. 또, 설계를 할 때 한꺼번에 너무 많은 것을 생각하지 않도록 문제를 각 단계별로 매우 세분화해서 설계 사항들을 모두 자세히 명확하게 검토할 수 있게 해준다. 가스공급장치를 설계하는데도 공리적 접근은 지금까지 풀리지 않은 유량계의 문제를 해결하였다.

본 논문에서 설계된 가스공급장치는 지금도 실험에 실제로 쓰이고 있고, 초미세 발포용 사출기 이외에도 고압가스를 다루는 다른 분야에서도 적용할 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

본 논문은 LG 전자 생산기술원 LMP 프로젝트의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 및 ㈜LG 전자 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chul Bum Park, "The Role of Polymer/Gas Solution in Continuous Processing of Microcellular Polymers", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1993
- (2) Nam P. Suh, "The Principles of Design", Oxford University Press, 1990
- (3) 정대진, 차성운, 윤재동, "질소 가스를 이용한 초미세 발포 고분자 재료의 무게변화," 정밀공학회지 17 권 9 호
- (4) Sung Woon Cha, "Creative Design Method," Engineering Design Class Note, Manufacturing and Process Lab, Yonsei University, 1999
- (5) 문용락, "공리적 접근을 이용한 설계평가 도구의 개발," 석사학위 논문, 연세대학교