

공리적 설계를 이용한 발포제 혼합재료의 MCPs 제품 및 공정 설계

이경수*(연세대 대학원 기계공학과), 차성운(연세대 기계공학부)

MCPs Product and Process Design of Mixed Materials Using Axiomatic Design

K. S. Lee(Mech. Eng. Dept., YSU), S. W. Cha(Mech. Eng. Dept., YSU)

ABSTRACT

In chemical forming process, mixed materials of LDPE, EVA and forming agent are used. However mechanical properties has been dropping remarkably through this forming process. In this study, Above materials(LDPE, EVA) were used in microcellular foaming injection process. And various effective factors in this process were selected by Axiomatic approach and systematically estimated by DOE(Design of Experiments). As a results, injection type and rate of mixing resins have more influence on forming rate than other factors.

Key Words : Axiomatic Design (공리적 설계), Microcellular Foaming Process (초미세 발포 공정), Foaming Agent (발포제), Injection Molding Process (사출 성형 공정), Design of Experiments (실험계획법)

1. 서론

플라스틱의 원료는 점점 고갈되어 가고 있는 석유자원을 사용하기 때문에 원료비가 60%를 차지하는 플라스틱 제품의 특성 상 앞으로 원료비의 부담이 더욱 가중될 전망이다. 이런 이유 때문에 점점 증가하는 플라스틱의 사용 양을 충족시키면서, 플라스틱의 원료비에 대한 부담을 해결하고, 기존의 플라스틱보다 더 뛰어난 기계적 성질을 지닌 플라스틱을 얻기 위해 많은 연구가 진행되고 있는데, 그 노력의 일환으로 발포 기술이 개발되었고 그 중에서도 초미세 발포공정은 최근 개발된 기술로 기존의 발포 기술을 보완하여 발포 제품의 단점인 충격 강도 및 인성과 같은 기계적 성질을 향상시킨다는 점에서 매우 높은 기술 경쟁력을 가지고 있다. 특히, 가스(CO₂, N₂ 등)를 이용하는 초미세 발포 사출 성형은 화학발포나 가교 발포성형에서 발생하는 환경의 문제나 공정 시간의 문제를 해결할 수 있으므로, 그에 대한 적용에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 공리적 설계를 통해 발포제 혼합재료

의 제품 및 공정설계를 시도하였다. 또 일반적으로 가교 발포성형과 화학적 발포로 제조되는 LDPE, EVA와 발포제 혼합재료의 초미세 발포 사출성형공정의 적용에 있어서 가장 중요한 반응변수인 발포율에 영향을 줄 수 있는 인자들인 가스주입량(사출 방식), 배럴온도, 발포제 함량과 재료 혼합비를 통해 각 인자 및 반응변수의 영향성을 실험계획법에 의한 실험과 통계적 분석을 통하여 평가하였다. 특히, 회귀모델 도출에 의해 나타난 각 인자의 영향성 평가의 결과를 통해서 공리적 설계의 공정설계에서 나타날 수 있는 다중의 공정변수 문제를 극복하고자 한다.

2. 이론

2.1 초미세 발포 사출 성형

초미세 발포의 원리는 플라스틱 재료 내부에 고압저온의 가스를 용해시킨 후 압력을 낮추거나 온도를 높여 열역학적 불안정 상태를 유발시킴으로써 용해도 차이에 의해 플라스틱 내부에 기포가 생성

되도록 하는 것이다. 이런 원리에 의해 만들어진 초미세 발포 플라스틱(Microcellular Plastics)은 재료 내부에 10 μ m 이하의 기포를 가지게 된다. 특히, 초미세 발포 플라스틱은 일반 플라스틱과 기존의 발포 플라스틱이 가지고 있는 장점을 극대화할 뿐만 아니라, 그 동안 단점으로 지적되었던 대표적 기계적 물성인 인성과 충격강도까지 좋아지게 하는 결과를 낳았다.

2.2 공리적 접근 설계 방법

‘공리적 접근 설계’란, 제품이나 공정설계를 수행하는 경우에 공리적 접근의 두 가지 공리인 ‘독립의 공리’와 ‘정보의 공리’를 이용하여 설계초기 시 나타날 수 있는 문제점을 발견하고, 이를 평가하는 설계방법이다. 이 공리적 설계방법의 가장 중요한 요소는 설계자의 경험과 지식에 의한 FRs와 DP_s의 적절한 선택이다. 특히, 공리적 설계는 설계 시 나타나는 인자들의 상호 연관성을 설계행렬을 통해 보여줌으로써 보다 올바른 설계과정이 이루어지도록 도와준다.

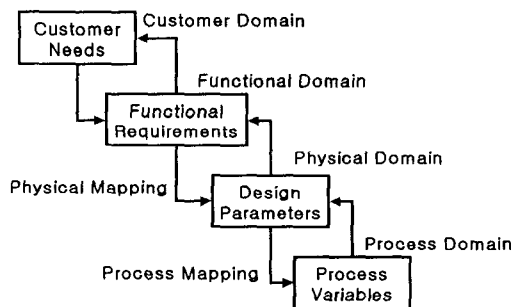


Fig. 1 Design Domains and Design Process Mapping in Axiomatic Design

3. 공리적 설계 방법의 적용

3.1 FRs, DP_s 선택에 의한 MCPs 제품설계

MCPs 제품설계를 위하여 공리적 접근 설계 방법을 적용하면, 제품설계에 대한 제약조건과 기능요구사항은 다음과 같다.

- C : 셀 크기는 10 μ m 이하를 유지해야 한다.
- FR₁: 무게의 감량
- FR₂: 물성의 향상
- FR₃: 표면품위의 유지

기능적 영역의 FRs에 대한 물리적 영역의 DP_s는 다음과 같다.

- DP₁: 셀의 개수 증가
- DP₂: 셀의 균일화
- DP₃: 금형 조건의 최적화

이 기능적 영역과 물리적 영역의 사상을 설계행렬을 통해서 나타내면 다음과 같은 설계방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & X \\ X & X & X \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에 주어진 설계행렬을 비연성화시키면, 식 (3)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_2 \\ FR_1 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ O & X & X \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_2 \\ DP_1 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

따라서 초미세 발포 플라스틱의 제품설계가 타당(비연성화설계)함을 알 수 있다.

3.2 공정설계를 위한 DP_s에 대한 PV_s의 선정

LDPE와 EVA의 혼합과 발포제를 첨가한 재료를 사용하는 사출공정의 적용에 있어서 공정설계에 대한 제약조건과 PVs를 선정하였다.

- C : 기존 초미세 발포사출기의 변경없이 제어 가능해야 한다.
- PV₁: 사출방식, 배럴온도, 재료 혼합비, 발포제 함량, 캐비티 형상, 금형 압력/온도
- PV₂: 사출방식, 배럴온도, 재료 혼합비, 발포제 함량
- PV₃: 사출방식, 발포제 함량, 금형 압력/온도, 냉각 채널의 형상, 러너의 모양

공정사상 단계에서 DP_s에 대한 많은 수의 PV_s가 도출되었다. 하지만, 올바른 설계의 평가를 위해서는 PV_s의 수를 최대한으로 줄여야 한다. 즉, 가장 영향성이 큰 인자들의 도출이 필요한 것이다. 하지만, 인자간의 상호 연관성 때문에 최적의 PV_s를 찾는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 다음 절에는 실험계획의 회귀모델을 통해 DP₁에 대한 PV₁의 도출 예를 보이고, 발포율에 대한 LDPE와 EVA의 혼합과 발포제를 첨가한 재료를 사용한 사출공정의 최적의 공정조건도 찾아내고자 한다.

4. 실험설계 및 결과

4.1 실험재료 및 금형

본 실험에서는 화학 발포 및 가교발포에 주로 사용되는 LDPE(Low Density Polyethylene), EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)와 발포제를 혼합하여 사용하였다. 이 때 사용된 금형의 형상은 외경 98mm, 내경 16mm, 두께 3mm 인 평면 디스크 형상이다.

4.2 실험설계 및 방법

공리적 설계에서 선택된 PV₁중 가장 영향성이 높을 것으로 보이는 4개의 요인(factors)을 선정하였으며, 각 요인별 수준(level)은 2 수준으로 결정하였다. 특히, 실험의 횟수를 줄이기 위하여 2 수준계 일부 요인 설계를 적용하여 직교배열표를 작성하여 실험을 하였다. 이 때, 사출기 및 주위 환경에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위하여 각각의 실험조건마다 10번의 실험을 하여 그의 평균값을 반응값(중속변수)으로 사용하였다.

4개의 요인은 사출방식(가스주입압력), 배럴의 온도, LDPE와 EVA 혼합비(50%:50%, 0%:100%) 그리고 발포제의 함량(5%, 10%)이고 수준은 모두 2수준으로 하였다. 이 때, 배럴의 온도는 재료의 용점(LDPE : 106℃, EVA : 84℃)을 고려하여 130℃ 140℃ 로 결정하였다. 이때, 8개의 반응조건에 의해 도출되는 반응변수는 발포율이다.

Table 1 Orthogonal Array & Response Values

Run	1	2	3	4	5	6	7	Weight(Y)
#1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	18.28
#2	-1	-1	-1	1	1	1	1	18.78
#3	-1	1	1	-1	-1	1	1	18.38
#4	-1	1	1	1	1	-1	-1	18.78
#5	1	-1	1	-1	1	-1	1	17.98
#6	1	-1	1	1	-1	1	-1	18.34
#7	1	1	-1	-1	1	1	-1	17.24
#8	1	1	-1	1	-1	-1	1	17.97
	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₃	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	
	X ₁	X ₂	X ₁ ×X ₂	X ₃	e	X ₁ ×X ₄	X ₁	

Table 1에서와 같이 직교배열표에 의한 실험계획(2⁴⁺¹ 일부요인설계)에 있어서 3차이상의 교호작용은 무시하였으며, 주효과로는 사출방식(X₁), 배럴온도(X₂), 혼합비(X₃), 발포제 함량(X₄)의 4가지, 교호작용으로는 X₁×X₂, X₁×X₄ 2가지로 모두 6개의 요인에 대해서 살펴보았으며, 나머지는 오차로 처리하였다.

4.3 실험결과

각 실험 조건마다 10번의 실험을 하였으며, 10번의 실험마다 취출된 시편의 무게의 평균을 반응값으로 하였다. Table 1에서 보면, 취출된 시편의 무게가 17.24g ≤ Y ≤ 18.78g 임을 알 수 있다. 이 때 가장 무거운 시편이 취출된 실험 #2와 #4의 시편의 무게 18.78g를 기준무게로 한다면 각 실험에 대한 시편의 발포율은 0%~8.20%이었다. 이 때 최대 발포 실험조건은 가스사출(가스공급), 배럴의 온도가 140℃ 혼합비가 50:50 그리고 발포제의 함량은 5% 이었다.

5. 실험고찰 및 결론

5.1 ANOVA 및 회귀분석

ANOVA를 통하여 유의수준 10%에서의 각 인자에 대한 영향성을 살펴보면, 주효과 X₁, X₃과 교호작용 X₁×X₂이 반응변수에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 사출방식과 LDPE와 EVA 혼합비 그리고 사출방식과 배럴의 온도가 발포율에 영향을 주는 것이다. 특히, 사출방식이 발포율에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

식 (4)는 주어진 실험에 대한 회귀모형이다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_1 X_3 + \beta_6 X_1 X_4 \quad (4)$$

Table 2 Coefficients for Regression Equations

Coefficient	Parameter Estimate	
	Estimate	P Values
β ₀	18.219	0.001*
β ₁	-0.336	0.045*
β ₂	-0.126	0.118**
β ₃	0.249	0.061*
β ₄	-0.034	0.390
β ₅	-0.151	0.099*
β ₆	-0.059	0.245
R-squre	0.997	

ANOVA를 통해 배럴의 온도, 발포제의 함량 그리고 사출방식과 발포제의 함량의 교호작용은 유의하지 않음을 알 수 있다. 이때 배럴의 온도는 유의수준 11.8%에서는 유의함을 알 수 있는데 다른 인자들에 비해 10%의 유의수준을 벗어나는 정도가 아주 작으므로 식 (4)를 변형시켜 각각의 계수의 값을 대입해 주면, 식 (5)와 같이 중선형 회귀모델을 도출할 수 있다. 특히, 주어진 인자에 의해 반응변수의 변동이 99.7%임을 알 수 있으므로, 식 (5)는

적합된 회귀모델임을 알 수 있다.

$$Y = 18.22 - 0.34 X_1 - 0.13 X_2 + 0.25 X_3 - 0.15 X_1 X_2 \quad (5)$$

5.2 최적의 발포율

주어진 최적 조건에 대해서 최적의 발포율을 얻기 위하여 제품의 형상이 유지되는 한도에서 계량을 줄이면서 실험을 하였다. 이 때의 계량량은 18mm, 22mm, 22mm이었고, 이 조건하에서 10회의 실험을 하여 그 평균값을 취하여 23.28%라는 발포율을 얻을 수 있었다. 기준값(18.47g)으로는 같은 배럴의 온도와 혼합비의 조건하에서 발포제를 첨가하지 않고 일반사출을 적용한 경우로 하였다.

Table 3 Maximum Foaming rate

	Foaming agent (0%)		Foaming agent (5%)	
	General Injection	Gas Injection	General Injection	Gas Injection
Weight(g)	18.47	17.57	16.38	14.17
Foaming rate(%)	0	4.87	11.32	23.28

5.3 공리적 설계에 의한 공정설계

본 실험에서 발포율에 가장 큰 영향을 주는 공정변수는 사출방식과 재료의 혼합비이다. 따라서 나머지 인자들인 배럴온도와 발포제 함량을 여분의 항에 포함시키면, PV_1 는 다음과 같다(정리 8).

$$PV_1 : \text{사출방식, 재료의 혼합비, } PV_1(\text{extra})$$

또, 초미세 발포 공정에 있어서 사출방식은 가스공급 방식으로 고정시킬 수 있으므로 주어진 DPs에 대한 PVs는 다음과 같다.

$$PV_1 : \text{재료 혼합비, } PV_1(\text{extra})$$

$$PV_2 : \text{재료 혼합비, 발포제 함량, } PV_2(\text{extra})$$

$$PV_3 : \text{발포제 함량, 금형 압력/온도, } PV_3(\text{extra})$$

따라서, 이에 따른 공정설계 방정식은 아래와 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{셀의 개수} \\ \text{셀의 균일화} \\ \text{금형조건} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} X & O & O \\ X & X & O \\ O & X & X \end{array} \right] \left. \begin{array}{l} \text{재료 혼합비} \\ \text{발포제 함량} \\ \text{금형 압력/온도} \end{array} \right\} \quad (6)$$

주어진 공정설계는 식 (6)에 의해 비연성화설계임을 알 수 있다. 그러므로 앞에서 시도한 공정설계는 제품설계와 마찬가지로 타당함을 알 수 있다. 즉,

식 (6)과 같이 실험계획법을 통하여 하나의 공정변수를 제외한 나머지 공정변수의 최적 조건을 찾아내고 각 인자의 영향성을 밝혀냄으로써 공리적 설계를 이용한 공정설계를 시도할 수가 있었다. 공정설계 결과로 설계의 해결 순서가 재료 혼합비 → 발포제 함량 → 금형 압력/온도 의 순서로 설계가 진행되어야 함을 알 수 있다.

5.4 고찰 및 결론

LDPE, EVA 그리고 발포제 혼합재료의 초미세 발포사출 성형의 도입을 위하여 공리적 설계를 이용한 제품 및 공정설계를 시도하였다. 새로운 공정의 초기 도입을 위해서 기존의 성형방식에 비하여 큰 발포율을 얻을 수 없었지만, 우선적으로 각 인자 즉 사출방식, 배럴의 온도, 재료혼합비, 발포제 함량의 영향성을 평가하여 발포율에 영향을 가장 많이 주는 인자들이 사출방식과 재료의 혼합비임을 알 수 있었다. 특히 이 결과를 바탕으로 LDPE, EVA 그리고 발포제 혼합재료의 공정설계가 비연성화 설계임을 도출하였다.

기존의 가교 발포성형이나 화학적 발포 성형에 비해 초미세 발포사출 성형이 발포율 면에서는 큰 장점을 지니고 있지 못하지만, 환경적 측면이나 대량생산 측면에 있어서 한번 검토해볼 만한 가치가 있을 것으로 보이며, 실험계획법을 통한 공리적 설계의 적용에 있어서도 보다 많은 적용사례를 통하여 일반화할 수 있는 체계화된 방법의 연구도 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

1. Nam P. Suh, "Axiomatic Design : Advances and Applications", The Oxford University Press, 2000.
2. 박대근, 차성운, "LDPE, EVA 및 발포제 혼합재료의 초미세발포공정 적용과 각 인자의 영향성 평가", 대한기계학회추계학술대회, pp.853-858, 2001.
3. 정대진, 차성운, 윤재동, "공리적 설계를 이용한 초미세 발포 공정설계", 한국정밀공학회지, 제 18권 제 1호, pp. 195-200, 2001.
4. 황윤동, 차성운, "발포배율의 향상을 위한 금형시스템의 공리적 설계", 대한기계학회논문집 A권, 제 25권 제 4호, pp. 637-644, 2001.
5. 황윤동, 차성운, "공초미세 발포 사출 성형공정에서 성형된 플라스틱의 수축률 측정에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 621-626, 2001.
6. Douglas C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", Wiley, 1997.
7. 박성현, "회귀분석", 민영사, 1998. "