

# LDPE, EVA 및 발포제 혼합재료의 초미세 발포 공정 적용과 각 인자의 영향성 평가

박대근\* · 차성운\*\* · 황운동\*\*\*

## Application of a Microcellular Foaming Process of Mixed Materials of LDPE, EVA and Foaming Agent and Estimation of Influence of Each Factor

Dae Keun Park, Sung Woon Cha and Yun Dong Hwang

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

### Abstract

Generally, mixed materials of LDPE, EVA and foaming agent are manufactured by crosslinking foaming or chemical foaming process. Above materials were used in a microcellular foaming injection molding process. Influence of each factor such as injection type, temperature of barrel, rate of mixed materials and contents of foaming agent was estimated by DOE(Design of Experiments). As a result of experiments, injection type and rate of LDPE, EVA have an influence on foaming rate. This data can be used in field of application of LDPE and EVA.

#### 기호설명

LDPE : Low Density Polyethylene

(저밀도 폴리에틸렌)

EVA : Ethylene-Vinyl Acetate

(에틸렌 비닐 아세테이트)

MI : Melt Index (용융지수)

DOE : Design of Experiments (실험계획법)

### 1. 서론

플라스틱 제품은 현대 사회에서 가장 널리 사용되고 있는 재료 중의 하나이다. 이렇듯 그 사

용량이 계속해서 증가하고 있는 것은 플라스틱 재료만이 갖는 장점 즉 가볍고 성형이 용이하여 대량생산이 가능하다는 점 때문이다. 특히 기존의 발포 기술이 가지고 있는 우수한 단열성능, 비열연성 등으로 인해 각종 발포 제품이 현재 여러 분야에서 사용되고 있다. 하지만 기존의 제조 공정은 대량생산, 인력, 자동화, 악취 등의 많은 문제점이 있다. 또한 큰 기포크기로 인한 기계적 강성의 저하와 화학적 발포제의 사용은 가연성과 환경오염이라는 부수적인 문제를 안고 있었다.

이러한 한계를 극복하기 위해 미국 MIT에서 초미세 발포 공정이 개발되었다. 기포의 크기가 미세하기 때문에 충격강도 및 인성 등이 향상(최고 4배)된다고 보고되고 있다. 또한 발포 물질로 이산화탄소, 질소 등과 같은 불활성 기체를 사용하기 때문에 환경친화적인 기술이라 할 수 있다. 이공정의 원리를 플라스틱 성형 방법인 사출성형에 적용한 것이 초미세 발포 사출 성형이다.

\* 회원, 연세대학교 기계공학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계전자공학부

\*\*\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

이번 연구에서는 일반적으로 가교 발포성형과 화학적 발포로 제조되는 LDPE, EVA, 발포제 혼합재료의 발포율 측정을 위해 실험계획법에 의한 실험과 통계적 분석에 의한 DATA 처리로 발포제 함량과 가스주입량 등의 인자의 영향성을 평가하고자 한다. 그리고 대량생산 공정인 사출공정에 적용하는데 큰 의의를 두겠다.

## 2. 이론

### 2.1 초미세 발포 사출 성형

초미세 발포 플라스틱(Microcellular Plastics)이란 미세한 기포를 갖는 플라스틱이란 뜻이다. 이 초미세 발포 플라스틱은 기존의 발포 플라스틱이 가지고 있는 부피에 대한 제품의 무게 감소와 단열 성능, 비절연성 등으로 인해 널리 사용되고 있으나 기계적 강성이 저하되기 때문에 구조물과 같이 힘을 요구하는 곳에는 단독으로 사용될 수 없었다. 이러한 단점을 해결하기 위해 1980년대 초 미국 MIT에서 초미세 발포 공정이 개발되었다.

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 가하여 초임계 상태로 만들고 이를 사출성형기의 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. 1 에 나타내었다.

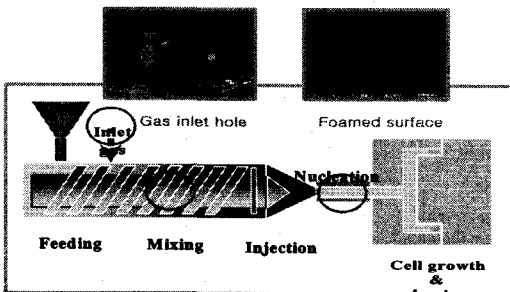


Fig. 1 Schematic diagram of microcellular foaming injection molding process

이러한 초미세 기포 구조의 발포 플라스틱 성형품은 일반 발포 플라스틱 성형품보다 밀도가 낮고, 더 높은 기계적 강도를 갖는다. 이 밖에도 잔류응력, 싱크마크(Sink Mark), 변형 및 수축을 감소시킬 수 있는데 수지 점도의 감소는 금형 내 충진을 향상시킬 뿐만 아니라 잔류응력과 방향성을 감소시킨다.

### 2.2 실험계획법

실험계획법(Design of Experiments)은 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로서 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고 DATA를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 DATA를 분석하면 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다.

따라서 하나의 실험계획법을 수립했다는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자(Factor)를 선정하고 실험방법을 택하였으며 실험순서를 정하고 실험 후 얻어지는 DATA에 대한 최적분석 방법을 선택하였다는 의미이다.

실험계획법의 순서는 다음과 같다.

실험목적의 설정 → 특성치 선택 → 인자와 인자 수준의 선택 → 실험의 배치와 실험 → 순서의 랜덤화 → 실험실시 → DATA분석 → 분석결과 의 해석과 조치 순이다.

실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 수립할 수 있도록 만들어 놓은 것이 직교배열표이다.

가장 일반적이고 간단한 형태의 직교배열표는

$$L_{2^m} (2^{2^m-1}) \quad (1)$$

식(1)로 표시할 수 있으며 여기서 m은 2이상의 정수이고  $2^m$ 은 실험의 크기이며, 2는 2수준계를 나타내는 숫자이고  $2^m - 1$ 은 열의 수를 나타낸다. 즉,  $2^m$ 형의 실험을 주로 2수준계의 직교배열표에서 사용하고 배치가능한 인자의 최대수는 열의 수  $2^m - 1$ 이다. 따라서 직교배열표를 사용하면 최대로  $2^m - 1$ 개의 인자를  $2^m$ 회의 실험횟수로 가능하다.

### 3. 실험

LDPE, EVA, 발포제 혼합소재에서의 발포제의 영향성을 평가하기 위하여 실험계획법에 의한 실험과 평균분석에 의하여 DATA를 처리하였다.

#### 3.1 실험재료

본 실험에서는 LDPE, EVA 및 발포제 혼합재료를 사용하였다.

LDPE(Low Density Polyethylene)는 고압 라디칼 중합방식에 의해 제조되고 내충격성, 내저온취하성, 유연성, 가공성, 필름의 투명성, 내화학성, 내수성, 전기절연성 등의 특성을 갖는다.

EVA(Ethylene-Vinyl Acetate)는 고압법 폴리에틸렌 중합장치로부터 제조되는 폴리에틸렌계 수지의 일종으로 다른 종류의 폴리에틸렌계 수지에 비하여 상온상태에서의 유연성이 탁월하고 탄력성이 우수하여 고무와 가장 유사한 성질을 나타낸다.

실험용 LDPE, EVA의 물성치는 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1 Property of LDPE

구분	수 지 물 성					
	물성	MI	밀도 (D)	융점	인장강도	
	방법	D1238	D1505	HPC	D638	D638
	단위	g/10min	g/cm <sup>3</sup>	℃	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
사출	XJ 610	6.0	0.919	106	91	107

Table 2 Property of EVA

구분	수 지 물 성					
	물성	MI	VA 함량	밀도 (D)	융점	인장강도
	방법	D1238	HPC	D1505	HPC	D638
	단위	g/10min	wt.%	g/cm <sup>3</sup>	℃	kg/cm <sup>2</sup>
신발 발포	VS 430	2.5	19	0.939	84	220

#### 3.2 실험방법

직교배열표(Orthogonal Array)를 이용하여 실험 횟수를 증가시키지 않고 실험을 하였다. 실험의

특성치(Target Value)로는 최대 발포율로 정하였다. 이는 제품의 무게 감소량과 상응하는 값이 된다. 실험인자(Factor)로는 사출방식 (일반사출, 초미세발포사출), 배럴의 온도, LDPE와 EVA혼합소재의 비율, 발포제함량으로 정하였다. 그리고 각 인자의 수준은 2수준으로 하였다.

각 인자와 수준을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Level of Factors

인 자	수 준	
	1	2
사출방식	일반사출 (1)	가스사출 (G) (2)
배럴의 온도	130℃ (3)	140℃ (4)
LDPE와 EVA 혼합비	50:50 (5)	EVA 100% (10)
발포제 함량	5% (5)	10% (10)

위의 Table3에 기초하여 직교배열표를 작성하고 실험을 하여 전자저울로 시편의 무게를 측정한다. 그 후 발포율을 측정하고 평균분석에 의하여 각각의 인자의 영향성을 평가한다. 사출기의 정밀성이 낮은 관계로 각각의 실험에 대하여 10번의 실험을 하고 평균값을 실험결과에 기입하였다. 최적의 실험조건을 찾은 다음 반복실험을 하여 최대 발포율의 최적값을 찾는다.

실험에 사용된 금형은 외경 98mm 내경 16mm 두께 3mm 인 평면 디스크 형상을 사용하였다.

### 4. 실험결과

실험에 앞서 발포율 측정을 위하여 기준 값이 필요하다. 기준 값으로 LDPE와 EVA를 50:50으로 섞은 혼합소재를 사출하여 얻은 제품의 무게로 정하였다.

위 조건으로 10번 반복실험하여 얻은 평균 무게는 18.47g 이다. 이 측정값을 기준으로 하여 직교배열표를 작성하고 각각의 실험을 수행하였다.

본 실험에 적용할 직교배열표는 L8(2<sup>7</sup>)으로 실험 횟수가 8회, 인자의 수준이 2수준, 인자의 수

가 8인 직교 배열표이다. 하지만 실험에서 인자의 수준이 2수준이고 인자의 수가 4이다. 직교성을 위배하지 않으면 Column을 사용하지 않아도 무방하므로 실험에 적용하였다. 본 실험에 적용할 직교배열표를 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Orthogonal Array

인자 실험	사출방식	배럴온도		혼합비			발포제함량	무게 (Y)
#1	I	3	1	5	1	1	5	18.28
#2	I	3	1	10	2	2	10	18.78
#3	I	4	2	5	1	2	10	18.38
#4	I	4	2	10	2	1	5	18.78
#5	G	3	2	5	2	1	10	17.98
#6	G	3	2	10	1	2	5	18.34
#7	G	4	1	5	2	2	5	17.24
#8	G	4	1	10	1	1	10	17.97

기준값(18.47 g)을 적용하여 각각의 실험에서 측정된 무게로 발포율을 Table 5 에 나타내었다. 기준값 보다 무게가 큰 경우는 편의상 발포율을 0으로 하였다.

Table 5 Foaming Rate

실험	발포율 (%)
#1	1.03
#2	0
#3	0.49
#4	0
#5	2.65
#6	0.49
#7	6.66
#8	2.71

<가장 적은 무게>

사출방식 : 가스사출

배럴의 온도 : 140 ℃

재료 혼합비 : LDPE : EVA = 50:50

발포제 함량 : 5%

실험 : #7

또한 각각의 인자에 대하여 평균을 구하였다.

$$\bar{y} (\text{사출방식-일반사출}) = 18.56 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{사출방식-가스사출}) = 17.88 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{배럴온도-130}^\circ\text{C}) = 18.35 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{배럴온도-140}^\circ\text{C}) = 18.09 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{재료혼합비-50:50}) = 17.97 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{재료혼합비-EVA 100\%}) = 18.47 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{발포제함량-5\%}) = 18.16 \text{ g}$$

$$\bar{y} (\text{발포제함량-10\%}) = 18.28 \text{ g}$$

$$\text{Overall Average } \bar{y} = 18.21 \text{ g}$$

발포제 함량과 배럴의 온도는 발포율에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 발포제 함량과 배럴의 온도를 실험조건에서 제외하였다. 따라서 사출방식과 재료혼합비의 인자로 Via Predictive Model을 설정하였다.

Via Predictive Model

$$\begin{aligned} \text{제품의 무게} &= \bar{y} + ( \bar{y}_{\text{사출방식(가스)}} - \bar{y} ) \\ &\quad + ( \bar{y}_{\text{혼합비(50:50)}} - \bar{y} ) \\ &= 18.21 + ( 17.88 - 18.21 ) \\ &\quad + ( 17.97 - 18.21 ) \\ &= 17.64 \text{ (g)} \end{aligned}$$

위의 Predictive Model을 일반화하기 위하여 최적의 조건을 5회 반복 실험을 하였다.

(17.30, 17.26, 17.41, 17.30, 17.17)

... 평균 = 17.29

... 표준편차 = 0.008

- Predictive Model = 17.64
- Verification = ( 17.29, 0.008 )
- Run #7 = 17.24

위의 최적의 조건(실험 #7)에서의 발포율이 기대치만큼 도달하지 않았으므로 같은 조건에서 제품의 형상이 유지되는 한도에서 계량을 줄이면서 10회 반복 실험을 하였다. 그 결과 최대 발포율을 측정할 수 있었다. 결과를 Table 6 에 나타내었다.

Table 6 Maximum Foaming Rate

	발포제 (0%)		발포제 (5%)	
	일반 사출	가스 사출	일반 사출	가스 사출
무게(g)	18.47	17.57	16.38	14.17
발포율(%)	0	4.92	10.35	23.32

## 5. 결론 및 고찰

본 연구는 기존의 가교 발포성형이나 화학적 발포 공정으로 제조되는 LDPE, EVA, 발포제 혼합재료를 일반사출이나 최신의 초미세 발포 사출 성형에 도입하는데 큰 의의를 두었다. 처음 시도하는 실험이라 발포율을 측정하는데 연연하지 않고 우선적으로 각 인자 즉 사출방식, 베럴의 온도, 재료혼합비, 발포제 함량의 영향성을 평가하였다. 실험한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 위의 직교배열표에서 보는 바와 같이 베럴의 온도나 발포제 함량은 발포율에 큰 영향을 끼치지 않았다. 기존의 발포성형에서는 발포제 함량을 2~7% 값으로 한다. 발포제 함량이 10%에서 거의 효과가 없다는 것은 당연한 결과라고 할 수 있다. 또한 베럴의 온도의 경우 재료의 용점보다 30~40℃ 높은 온도에서 사출을 하였는데 이는 그 이하의 온도에서 재료가 녹지 않은데서 기인한다.

(2) 사출방식의 경우 일반사출보다 가스사출에서 평균적으로 3.66%의 발포효과가 있었다. 폴리프로필렌, ABS 수지의 경우 보통 20~30%의 효과가 있는 것에 비해 적은 수치가 나왔다. 일반적으로 유연성인 좋은 수지의 경우 가스 발포율이 적게 나온다는 경향을 확인할 수 있었다.

(3) 재료의 혼합비에서는 LDPE, EVA를 50:50

으로 섞은 재료에서 발포효과가 크게 나왔다. 이는 재료의 밀도에 의한 것이다. EVA의 경우 0.939 g/cm<sup>3</sup> 로 LDPE보다 0.020 크므로 무게가 더 크게 된다. EVA 100%의 경우를 따로 비교하면 일반사출의 경우 발포제 함량에 상관없이 같은 값이 나왔지만 가스사출의 경우는 오히려 발포제 함량이 10%일 때 더 높은 발포율이 나왔다.

(4) 이번 연구에서의 최적값은 가스사출, 재료 혼합비가 50:50 일 때 최대의 발포율을 얻을 수 있었다.

(5) 직교배열표에 의한 실험은 사출기의 계량을 일정한 값으로 사출하였다. 따라서 기대만큼의 발포효율을 얻을 수 없었다. 제품의 형상이 유지되는 한도에서 계량을 줄이고 그만큼의 양을 가스를 용해시켜 사출한 결과 최적의 조건에서 23.32%의 발포율을 얻을 수 있었다. 이 결과에서는 가스사출에 의한 것보다 발포제가 발포율에 조금 더 큰 영향을 주었다.

기존의 성형방식에 비하여 큰 발포율을 얻을 수 없었지만 대량생산과 인력감소효과, 환경적 측면에서 초미세 발포 사출 성형 방식을 도입하는 것도 좋은 결과가 나올 것 같다.

본 연구에서는 각 인자의 경향을 파악하였지만 재료의 혼합비와 발포제 함량의 최적의 값을 얻지 못하였다. 다음 실험에서는 이 실험결과를 바탕으로 재료의 혼합비, 발포제 함량 등의 최적값을 찾고 유연성, 표면품위, 수축률 등의 다른 물성치의 실험으로 실제 산업 적용의 타당성 여부를 검토하는 방향으로 진행하려고 한다.

## 후 기

본 연구는 연세대학교 기계공학과 신소재 및 제품개발 연구실과 한국 과학재단 지정 정보저장기기 연구센터(CISD)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 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) Phil Jung Jeong, 2000, "Hardness Change of Microcellular Foamed Elastomer by Using Experimental Design and Development of Vibration Isolator," Department of Mechanical Engineering Yonsei University, pp. 7~18
- (3) 2001, "LG 생산기술," LG 생산기술원, 제4권, 제1호, pp. 17~18.
- (4) Nam P. Suh, 1990, "The Principles of Design," The Oxford University Press, pp.25~154.
- (5) 박동규, 1999, "최신실험계획법," 기전연구소, pp 35~70.
- (6) 조용희, 1999, "다재 사출 성형품 및 금형 설계를 위한 전문가 시스템 개발에 관한 연구," 연세대학교 대학원 기계공학과, pp. 20~54.
- (7) 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.
- (8) 문용락, 차성운, 강영주, 1999, "정보의 공리를 이용한 사출기 정보량 측정," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집 A권, pp. 1134~1138.
- (9) 황윤동, 차성운, 2001, "발포 배율의 향상을 위한 금형 시스템의 공리적 설계," 대학기계학회 논문지 A권, 제 25권, 제 4호, pp. 637~644.