

# 반응표면분석법에 의한 사출공정 및 품질 모니터링에 관한 연구

민병현\*, 이경돈\*\*, 구병길\*\*\*

## A Study on Injection Molding Process and Quality Monitoring by Response Surface Analysis

Byeong-Hyeon Min · Kyung-Do Lee · Byung-Kil Yu

### (Abstract)

Quality of injection molded parts is dependent on both mold design and processing conditions. From the mold design point of view, an optimal shrinkage should be used to compensate the shrinkage of molded parts. From the processing point of view, it is important to analyze the priority of processing conditions because a number of processing conditions affect the quality of molded parts. Processing analysis employing the design of experiment was performed, and the shrinkage of molded part was considered as a characteristic parameter to improve the quality. As the result of the analysis of variance on SN ratio of a characteristic value, injection speed and holding pressure were selected as two effective process parameters. Regression analysis on shrinkage and processing conditions was carried out, and an optimal processing condition was obtained by the response surface analysis. Shrinkage at the optimal condition could be used to reduce the number of try-cut at the step of mold making. The ranges of indirect control parameters, such as maximum cavity pressure or weight, measured at the optimal processing condition were used for monitoring the quality of molded parts in process.

### 1. 서론

사출 공정은 저렴한 비용으로 다양하고 복잡한 플라스틱 성형품을 생산하는 것으로 잘 알려져 있으며 높은 정도의 품질을 얻기 위해서는 많은 공정변수들을 조정할 필요가 있다. 사출 성형품의 품질에 영향을 주는 인자는 Ishakawa의 Fish Bone 그림에서 설명된 바와 같이 사출기 성능, 재료 특성, 금형설계 및 공

정조건 등 크게 4부분으로 구성되며 각 부분별 인자들을 모두 포함하면 20내지 30가지로 나열된다[16]. 이들의 영향을 모두 해석 하는 데는 현실적으로 무리가 있어 지금까지의 문헌들에서 주요인자로 고려되는 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간 등의 제어 인자에 대해 보다 체계적으로 그 영향도를 분석할 필요가 있다[11].

성형품의 품질을 정의 하는 데는 외관, 치수, 강도 등

\* 동의대학교 공과대학 산업공학과

\*\* 고동기술연구원 생산기술연구소

\*\*\* 동의대학교 공과대학 산업공학과

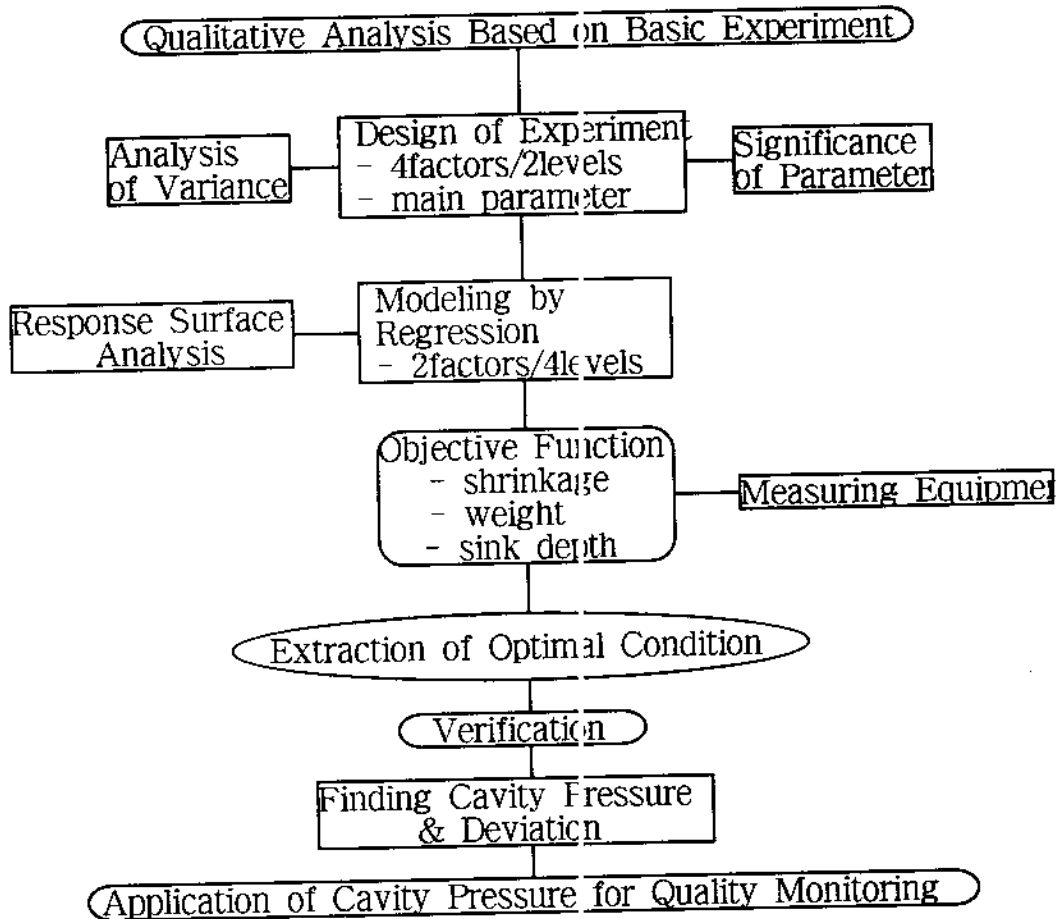
여러가지가 있으나 조립시 주요 인자인 치수관리에 초점을 맞추어 본 논문에서는 성형품의 수축율을 특성치로 규정 하였다. 수축율은 본 논문에서 측정 결과 동일 조건에서도 성형품의 부위별로 값의 차이가 커, 어떻게 규정해야 하는가는 주요한 문제가 된다. 제어 인자들중 성형품의 특성치에 영향을 주는 주요 인자를 선정하기 위한 실험이 필요한데 성형품의 품질 특성은 제어 인자인 공정조건 한 가지 만의 변화에 의존하지 않고 여러 제어 인자들이 복합적으로 영향을 끼치므로, 이들 인자들에 몇개의 수준을 정의하여 실험을 수행하면 (인자수)<sup>(수준수)</sup> 만큼의 실험이 수행되어야 한다. 하지만 시간이나 실험 비용등이 문제가 되고 또한 인자들의 교호작용이 있는 경우 이에 대한 고려가 불가하므로 이러한 단점을 보완하기 위해 다구제의 실험계획법을 이용함이 유리하다[12]. 이는 인자들중 주 효과와 2 인자간 주요 교호작용을 검출하고 기술적으로 영향이 없는 2 인자 교호작용 및 고차의 교호작용을 희생시켜 실험 회수를 적게할 수 있는 직교배열표를 이용하는 것이다. 이러한 직교배열표는 실험 회수를 줄이면서도 모든 인자를 포함한 일부 실시법을 수행하여 하나의 인자 효과를 볼 때 다른 인자의 영향에 치우침이 없고 분산분석표의 작성이 쉽다는 장점들을 지니고 있다.

파라미터 설계나 허용차 설계에서는 실험계획법에 의해 실시된 조건들 중에서 최적조건을 유도하는 방법으로 최적화가 이루어지나[5], 각종 인자와 특성치간의 관계에 대해 수학적 모형을 가정하고 이 모형을 측정 데이터로 부터 추정하는 통계적 기법인 회귀분석을 이용하면 실험계획법에 의해 주어지지 않은 조건도 고려하여 최적조건이 도출될 수 있다. 회귀모형에는 선형 회귀모형과 비선형 회귀모형이 있으며, 선형 회귀모형에서는 최소제곱법에 의해 회귀 계수가 결정되고, 비선형 회귀모형에서는 선형화법, 최대경사법 및 심플렉스 탐사법등에 의해 회귀 계수가 결정된다[1]. Approximate Feasible Molding Space(AFMS)와 Iterative Search 방법을 사용한 사출 공정의 최적화[10], 유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 조건의 최적화[13]등 새로운 기법들이 사출 공정의 최적화에 적용되고 있고, 최근에는 사출 성형품의 품질 특성이

다수인 점을 고려하여 다수목적(Multiobjective) 함수들을 최소화하고 이를 사출기 제어에 활용 하려는 연구도 진행되고 있다[3].

본 논문에서는 1차적으로 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간등 네 인자에 대해 두 수준을 택해 다구제 방법에 의한 실험계획법을 적용하고[9], 측정된 각 부위별 수축을 편차를 잡음인자로 고려하여 이를 줄이는데 기여하는 공정조건을 선별함이 중요하다고 판단 하여, 특성치에 대한 제어인자의 영향을 신호대 잡음비값인 SN비(Signal-to-Noise Ratio)에 대한 분산분석으로 부터 특성치에 유의한 두 인자를 택한다. 특성치와 제어 인자간 모델식은 반응표면분석을 이용 도출하기 위해 중심합성계획에 의한 2차 실험을 1차 실험에서 선정된 두 인자의 수준을 증가시켜 수행하고 특성치에 대한 회귀방정식을 구성 하였다. 특성치인 회귀방정식의 정상점(Stationary Point)을 찾아서 최적화 목적인 사출 성형품의 각 부위별 수축을 편차의 최소화이 부합 되는지를 확인하여 최적 조건이 얻어졌으며, 최적 조건을 수축율에 대한 모델식에 적용하여 최적 수축율을 구하였다. 이때 최적 조건이 제한조건을 만족하는지가 검증 되어야 하는데 본 논문에서는 싱크마크가 발생하지 않고 또한 충전시 오우버 팩킹이나 보압 후 성형품 내에 잔류응력이 발생하지 않는 범위 내에서 측정된 압력 프로파일이 얻어 지는지를 확인한 후 최적 조건으로 선정한다[4]. 최적 조건에서 구해진 수축율과 편차는 최적조건을 이용한 검증 실험을 통해 확인되며, 검증된 최적 수축율을 급형설계시 적용하면 치수로 인한 수정 회수를 줄이는데 기여할 것으로 판단된다[6, 8].

한편, 사출기에서 입력되어 성형품의 품질을 제어하는 공정조건인 직접 제어 인자와 구분하여 중량, 노즐 및 키비티압은 성형 중 또는 성형 후 측정된 값이므로 품질에 대한 간접 제어 인자로 구분하여[14], 실제 양산 과정에서 품질관리의 일환으로 위의 결과를 on-line하에서 이용하기 위한 활용 가능성을 모색 하였다[7] 즉 중량 및 측정된 압력과 특정 부위의 수축율 간의 상관관계를 통하여 이들의 상관관계가 높다는 것이 입증 되었으며, 최적 조건하에서 수행된 검증 실험시 간접 제어 인자의 범위를 도출한 후 이들



(그림 1) 공정 최적화 및 품질 모니터링을 위한 개념도

결과를 on-line하에서 측정된 값들과 비교하여 성형품 품질의 양호 및 불량 상태를 판단할 수 있다. 위의 개념들을 실현하기 위해 본 논문에서는 시험용 박스형 성형품을 생산할 수 있는 금형을 제작 하였고, 각종 센서류를 부착하고 데이터 수집 시스템을 통해 측정값들을 수집 및 가공 하였으며, 금형 및 성형품의 치수를 측정하여 수축율을 도출하였다. 본 논문의 수행 과정 및 적용 개념도가 <그림 1>에 보여진다.

위해 반응표면분석이 채택 되었다[2]. 이는 2 - 4 개의 제어 인자와 특성치 간의 함수 관계로 나타나는 반응표면을 통계적 방법으로 분석하는 것으로, 함수 관계가 2차 다항 회귀모형인 경우에 많이 사용 하는데 본 논문의 적용 예에서는 제어 인자가 2 개(k=2)인 경우로 모델식은 다음식으로 나타난다[15].

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1^2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \epsilon \quad (1)$$

## 2. 회귀방정식의 도출 및 최적화

여기서 최소제곱법을 적용하면 추정된 회귀계수들이 다음과 같이 구해진다.

본 논문에서는 공정 변수인 제어 인자와 단일 목적 함수인 품질 특성 간의 회귀방정식 도출 및 최적화를

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{12} \end{pmatrix} = (X^T \bar{X})^{-1} X^T \hat{y} \quad (2)$$

여기에서,

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & x_{11}x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & x_{12}x_{22} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & x_{1n}x_{2n} \end{pmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

따라서 식(2)에 의해 얻어지는 추정방정식은

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4)$$

독립변수가 2개인 경우에는 반드시 식(1)과 같은 모형을 가정하고, 2원 배치에 준하는 실험계획에 의하여 종속변수  $y$ 의 데이터를 수집하고 분석하여  $x_1$ ,  $x_2$ 의 최적 조건을 찾아야 한다.

도출된 회귀모형으로 부터 최적 조건을 찾기 위해 회귀모형의 각종 제어 인자에 대한 편미분으로부터 구성된 아래의 연립방정식

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \beta_1 + 2\beta_{11} x_{10} + \beta_{12} x_{20} = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \beta_2 + 2\beta_{22} x_{20} + \beta_{12} x_{10} = 0$$

을 풀면 정상점이 얻어 지는데, 이때 정상점의 좌표  $(x_{10}, x_{20})$ 는

$$\vec{x}_0 = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \end{pmatrix} = -B^{-1} \vec{b} \quad (5)$$

로 나타난다. 여기서

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{12} & \beta_{22} \end{pmatrix} / 2, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}$$

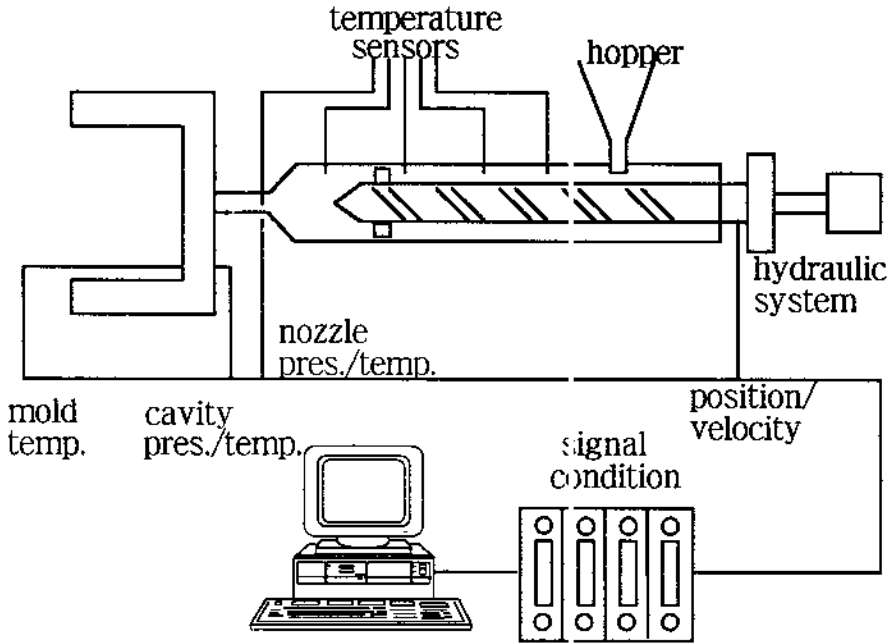
하지만 이렇게 구해진 정상점은 추정값  $\hat{y}$ 가 최대가

되거나, 최소가 되거나 또는 최대도 아니고 최소도 아닌  $x$ 의 안부점(saddle point)이 될 수 있으므로 최적화의 요구에 부응하는 값 인지를 조사하여야 한다[1]. 본 논문에서는 목적함수가 한 개, 입력 변수가 두 개인 간단한 경우이므로 목적함수의 2차 미분 값인 Hessian 항들을 고려하지 않고 2차원 그림 결과를 통해 판단 하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험품 및 실험장치

성형류는 두께 3mm, 가로 160mm, 세로 200mm, 높이가 6mm이고 중앙 상단에 120X120mm의 구멍이 있으며 게이트는 장축 방향에 두 개가 사용 되었다. 실험 장비의 구성은 <그림 2>에서와 같이 사출기, 금형 및 측정 시스템으로 크게 구성되며 사출기는 형체력이 20Tton, 사출속도와 보압이 10단까지 제어 가능한 Eng1사 제품이 사용 되었다. 스크류의 이송거리는 포텐시옴터를 이용 하였으며 그때 스크류의 속도가 계산에 의해 구해졌다. 성형동안 캐비티압 측정을 위해 게이트로 부터 거리가 15mm, 150mm 되는 곳에, 노즐 압력의 측정을 위해 노즐 후단부에 스트레인게이지 형태의 센서(Dynisco사)를 부착 하였고, 금형 온도는 상측과 하측 각 코너부 8 곳에 제품면에서 1mm 깊이 지점에 K-type 열전대를 사용하여 측정 하였다. 각종 센서로 부터의 신호는 시그널 콘디셔닝(Signal conditioning) 모듈을 통해 외부잡음으로부터 차단 및 증폭 과정을 거쳐 컴퓨터에 부착된 A/D 보드를 통해 하드 디스크에 저장된다. 수축율은 금형 치수와 성형품 치수를 3 차원 측정기로 측정한 후 길이의 차로 부터 계산 되었다. 금형의 경우는 기준축을 잡아 중심점을 잡기가 쉬우나 성형품인 경우는 선형 수축과 더불어 변형 및 뒤틀림까지 수반하기 때문에 금형 치수와 동일한 위치에서 성형품의 치수를 얻기는 어려운 일이다. 본 연구에서는 성형품의 크기에 비해 두께가 두꺼워 쿨타임이 2도 이내로 실제 치수에 0.06%의 증가 효과를 가져오나, 계산될 수축율에는 이 값의 1/100 정도 영향을 끼치므로 측정 오차 내에 포함할 수 있



〈그림 2〉 실험장치 가락도

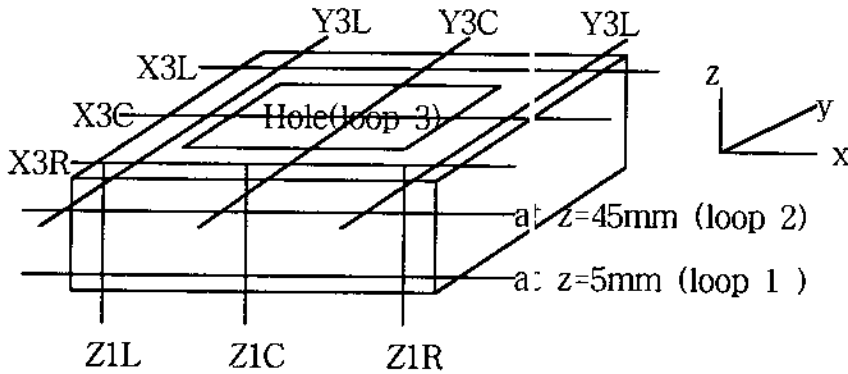
어 변형이나 뒤틀림 효과는 무시 한다고 가정하여 수축을 값을 구하였다. 수축을 측정부위는 〈그림 3〉에 보여진다. 성형품의 중심선(x, y 방향)을 측정 방향으로 일치시켜 놓고 측정자가 측정 방향을 바라볼 때 측정자 위치의 왼쪽(L로 표기), 중심(C로 표기), 오른쪽(R로 표기)의 3 곳에서 측정 하였으며, 성형품의 높이에 따른 아래 쪽(기준면에서 5mm 높이 지점: 1로 표기), 위 쪽(기준면에서 45mm 높이 지점: 2로 표기), 구멍(기준면에서 60mm 높이 지점: 3으로 표기) 부분에서 x 방향으로 9 군데(X1L, X1C, X1R, X2L, X2C, X2R, X3L, X3C, X3R), y 방향으로 9 군데(Y1L, Y1C, Y1R, Y2L, Y2C, Y2R, Y3L, Y3C, Y3R) 및 높이 방향 6 군데(Z1L, Z1C, Z1R, Z2L, Z2C, Z2R) 모두 24 부위에서 측정 되었다.

### 3.2 실험조건

사출기에서 입력 조건으로 주어지는 조건들 중 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간을 주요 제어 인

자로 하여 수행될 실험 조건은 크게 2 가지 형태로 나누어 진다.

첫째, 제어 인자로 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간을 구성하고 수준을 2 수준으로 한 직교배열에 의한 실험계획표가 〈표 1〉에 보여진다. 여기서  $V_i$ 는 사출속도로 스트로크별 구간이 10%, 70% 및 20%의 3 단계로 나누어져 있으며, 수준 구분은 0 수준이  $10/70/20\% = 20/24/20\text{mm/s}$ , 1 수준이  $10/70/20\% = 70/81/70\text{mm/s}$ 이다.  $H_p$ 는 보압으로 보압시간을 40%, 30% 20% 및 10% 의 4 단계로 나누어 보압이 주어지며 수준구분은 0 수준이  $40/30/20/10\% = 50/40/30/20\text{bar}$ , 1 수준이  $40/30/20/10\% = 80/70/60/50\text{bar}$ 이다.  $H_t$ 는 보압시간으로 0 수준이 4초, 1 수준이 12초이며,  $C_t$ 는 냉각시간으로 0 수준이 10초, 1수준이 30초 이다. 수준 선정은 성형이 가능한 최소 및 최대 범위를 포함하도록 노력 하였으며 8 가지 실험 조건은 측정된 사하측 급형 온도를 통해 정상상태 도달을 확인한 후, 실험순서를 랜덤하게 배치하여 각 조건에서 5회 반복 수행되었다.



(그림 3) 시편박스의 수축률 측정부위

(표 1) 직교배열표에 의한 실험조건

factors	Vi	Hp	Ht	Ct
1	0	0	0	0
2	0	0	0	1
3	0	1	1	0
4	0	1	1	1
5	1	0	1	0
6	1	0	1	1
7	1	1	0	0
8	1	1	0	1

(표 2) 중심합성계획법에 의한 실험조건

factors	Vi	Hp	Ht(sec)	Ct(sec)
1	-1	1	8	20
2	-1	-1	8	20
3	1	1	8	20
4	1	-1	8	20
5	0	0	8	20
6	0	0	8	20
7	0	0	8	20
8	-1.5	0	8	20
9	1.5	0	8	20
10	0	-1.5	8	20
11	0	1.5	8	20

둘째, 첫째 실험에서 선정된 주요 인자의 특성치에 대한 함수 관계를 유도하기 위해, 반응표면분석을 위

한 실험에 많이 사용되는 중심합성계획에 의거  $\alpha=1.5$ 로 하여 11개 실험 조건이 <표 2>에 보여지며, 사출 속도는 수준 -1.5에서  $10/70/20\% = 20/30/20\text{mm/s}$ , -1에서  $10/70/20\% = 27/40/27\text{mm/s}$ , 0에서  $10/70/20\% = 40/60/40\text{mm/s}$ , +1에서  $10/70/20\% = 53/80/53\text{mm/s}$ , +1.5에서  $10/70/20\% = 60/90/60\text{mm/s}$ 의 속도분포를 가지며, 보압은 수준 -1.5에서  $40/30/20/10\% = 40/30/20/10\text{bar}$ , 수준 -1에서  $40/30/20/10\% = 47/37/27/17\text{bar}$ , 수준 0에서  $40/30/20/10\% = 60/50/40/30\text{bar}$ , 수준 +1에서  $40/30/20/10\% = 73/63/53/43\text{bar}$ , 수준 +1.5에서  $40/30/20/10\% = 80/70/60/50\text{bar}$ 의 보압 분포를 가지며 실험은 각 조건에서 정상상태 도달 후 5회 반복 수행되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 특성 인자에 대한 제어 인자 영향도 분석

특성 인자인 수축율에 대한 제어 인자로 지정된 사출속도, 보압, 보압시간 및 냉각시간의 영향도를 분산 분석을 통해 실시 하였다. 사출 성형품의 수축율 특성은 금형의 부위(기하학적 조건)에 따라 <그림 4>에서와 같이 값의 차이가 뚜렷한데 이를 해석함에 있어서 다음의 세가지 방향이 제안된다. 첫째, 전체 부위별 수축율 편차를 성형품의 품질에 대한 잡음 인자로 정의 하고 부위별 수축율 편차 값의 SN비에 대한 분산분석을 행하여 부위별 수축율 편차를 줄이는 목적

으로 해석을 진행할 수 있다. 둘째, 수축율 평균값이 공정조건 변화에 얼마나 민감한 지를 근거로 하여 영향도가 큰 조건을 선별할 수 있다. 셋째, 특정 관리 포인트에서의 수축율 값을 지정하여 반복 측정된 데이터에 대한 SN비나 민감도에 대한 분산분석을 통해 영향도를 해석할 수 있다. 이때 특정 관리 포인트에서의 수축율과 다른 부위에서의 수축율 간의 상관관계를 구하면 한 부위에 대한 해석으로 다른 부위에서의 수축율 특성도 알 수 있는 방안이 있다.

〈표 4〉 측정된 수축율 값의 민감도에 대한 유의성 분석

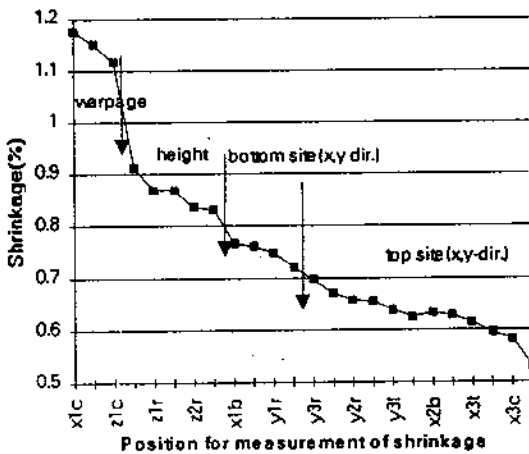
Parameter	SS	Φ	Variance	Fo	F(005)	F(001)
1	0.77	1	0.77	2.1789	10.13	34.12
2	2.44	1	2.44	6.8589	10.13	34.12
3	3.77	1	3.77	10.6134	10.13	34.12
4	2.35	1	2.35	6.6277	10.13	34.12
Error	1.06	3	0.35			
Total	10.40	7				

〈표 5〉 X1L 부위 수축율 값의 민감도에 대한 유의성 분석

Parameter	SS	Φ	Variance	Fo	F(005)	F(001)
2	3.854	1	3.854	5.889	7.71	21.2
3	2.773	1	2.773	4.238	7.71	21.2
4	3.066	1	3.066	4.684	7.71	21.2
Error	2.618	4	0.654			
Total	12.311	7				

〈표 6〉 X1L과 타 부위 수축율 값의 상관관계

Item	X1L	X2L	Y1R	Y2R	Z1R	Z2R
1	0.8506	0.7212	0.8374	0.6998	1.096	1.0658
2	0.7915	0.6034	0.7408	0.6084	1.0766	1.0724
3	0.6558	0.5814	0.637	0.578	0.6366	0.6826
4	0.5186	0.498	0.5732	0.5134	0.5888	0.572
5	0.7632	0.6172	0.796	0.6712	0.9214	0.8696
6	0.7548	0.5932	0.7782	0.6498	0.8824	0.8708
7	0.8026	0.7564	0.8582	0.6818	0.8916	0.9022
8	0.6835	0.5655	0.6923	0.5665	0.7255	0.705
Correlation	X1L	X2L	Y1R	Y2R	Z1R	Z2R
X1L	1	0.8333	0.9347	0.9146	0.9113	0.9256



〈그림 4〉 사출 성형품의 각 부위별 수축율 특성

〈표 3〉 측정된 수축율 값의 SN비에 대한 유의성 분석

Parameter	SS	Φ	Variance	Fo	F(005)	F(001)
1	15.95	1	15.95	4.3263	6.61	16.3
3	28.95	1	28.95	7.8545	6.61	16.3
Error	18.43	5	3.69			
Total	63.33	7				

유의 인자의 판별은 F-검증을 통해 이루어 지는데 어떤 인자의 Fo 값이 F(0.01)보다 크면 매우 유의한 인자가되고, F(0.05)보다 크면 유의한 인자, F(0.10)보다 작으면 오차 항에 풀링 시키며, F 값이 2보다 크면 약간의 유의성이 있다고 판단 하였다. 첫째, 전체 부위에서 수축율 값의 SN비에 대한 분산분석 결과가 〈표 3〉에 보여지는데 사출속도와 보압시간이 유의한

인자로 판별 된다. 둘째, 전체부위에서 민감도에 대한 분산분석 결과가 〈표 4〉에 나타나는데 보압, 보압시간이 유의한 인자로 드러난다. 셋째 경우는 특정 관리 부위로서 X1L, X2L, Y1R, Y2R, Z1R, Z2R 등 6개소로 축소시켜 이들에대한 반복 측정값의 SN비에 대한 분산분석표를 작성하고 그들 간의 상관관계를 알아 보는 것이다. SN비에 대한 각 부위에서의 분산 분석표를 여기서 보여 주지는 않지만 결과를 살펴보

면, 고려된 4 가지 조건은 지정 부위의 반복 편차와 거의 유의성을 가지지 않는 것으로 판단 된다. 따라서 SN비에 영향을 주는 공정인자 보다는, 각 부위에서 수축을 값에 대한 공정 조건의 유의성을 민감도의 분산분석을 통해 살펴보면 <표 5>에서 보여주는 바와 같이 XII은 보압이 유의한 인자로 사료된다. XII을 기준으로 다른 부위와의 상관관계를 살펴보면 <표 6>으로 부터 XII과 선정된 부위 간의 상관관계가 높음을 알 수 있으며, 보압이 유의인자가 될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 여러 부위를 동시에 측정하지 않고 특정한 한곳을 지정하여 관리하면 다른 부위의 수축을 특성도 관계식을 이용하여 추정, 관리할 수 있음을 의미한다.

위의 분산분석 결과를 정리하면 부위별 산포를 줄이는 목적에 부합되는 조건은 사출속도, 공정조건별 민감도 영향을 고려하는 두 인자로는 보압과 보압시간이 지배적이고, 특정 부위에서의 민감도 해석에서는 보압이 지배적이므로 사출속도, 보압, 보압시간 등 세 인자 모두 택해 모델식 유도를 위한 실험에 사용될 수 있다. 그러나 보압시간은 게이트 실링 시점과 연계하여 택할 수 있기 때문에 사출속도 및 보압 두 인자만 2차 실험에서 사용하기로 한다.

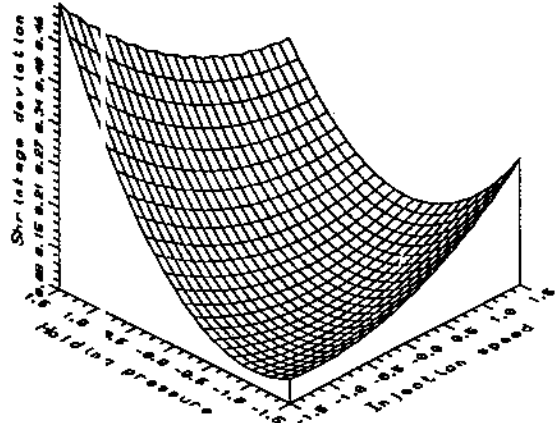
#### 4.2 모델식 유도 및 공정조건의 최적화

4.1절에서 선정된 사출속도, 보압 등 2 개 독립 변수의 조합으로 구성된 중심합성법에 의한 실험에서 얻어진 샘플로부터 중량 및 치수가 측정 되었다. 2 개의 측정값 중 품질 특성치로 샘플의 각 부위에서 얻어진 수축율을 선택하기로 한다. 물론 중량의 산포를 줄이는 것도 제품 품질의 신뢰성을 높인다는 점에서 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 조립과 관련한 치수의 정도와 안정성에 보다 더 비중을 두기 때문에 수축율을 이용하여 품질 관리의 목적에 부합하는 최적 조건을 도출 하고자 한다. 치수 측정부위는 앞서 3.1절에서 설명된 부위와 동일하며, 치수 관리의 방향을 수축을 값 자체의 최소화 보다는 부위별 수축율 편차를 줄이는 측면에서 모델식을 유도 하였다. 이는 성형품의 치수가 공정조건이나 수치, 외기상태, 사출기

상태등의 변화에 따라 한 부위에서만 변하는 것이 아니라 다른 부위의 수축율에도 서로 영향을 주기 때문에, 측정된 24개 전 부위에서의 산포를 줄이는 목적에 초점을 맞추어 모델식을 유도하고 최적 조건을 도출한 뒤 이 조건을 조립상 주요한 부위의 수축율이나 편차를 예측하는데 사용함이 타당 하리라고 생각 된다. 각 부위에서 5회 반복해서 측정된 수축율 평균값과 부위별 편차값들 중 편차(STD)를 공정 조건인 사출속도와 보압의 함수로 반응표면분석을 통해 모델식을 도출 하였다. 모델식은

$$STD = 0.102541 - 0.01238V_i + 0.068142H_p + 0.022716V_i^2 + 0.065764H_p^2 - 0.04335V_i H_p \quad (6)$$

과 같으며, 2절에서 설명된 과정을 이용하면 정상점이 사출속도가  $-0.322(53.56\text{mm/s})$ , 보압이  $-1.39(41.89\text{ba})$ 인 조건이 되고, 이는 <그림 5>에서보는바와 같이 부위별 수축율 편차를 최소화하는 최적 공정 조건이 된다.



<그림 5> 부위별 수축율 편차를 최소화 하는 공정조건 도출

한편, 도출된 최적 조건에서 조립과 직접 연관되는 부위의 다양한 조합에 의한 수축율 및 수축율 편차의 예측이 가능 하도록 모델식을 도출함이 필요하다. 여기서 첫 번째 그룹(G1)은 타 부위와 형합되는 가로 부위인 XII, 둘째 그룹(G2)은 타 부위와 형합되는 가로 및 세로 부위 XII, Y1L, 셋째 그룹(G3)에서는 타 부위와 형합되는 가로 및 세로 부위 4 곳인 XII, X1R,



Y1L, Y1R, 넷째 그룹(G4)에서는 샘플의 정면 부위인 X2L, X2R, Y2L, Y2R, 다섯째 그룹(G5)은 샘플의 높이 방향에서의 데이터를 근간으로 편차(STD) 및 수축율(SH)에 대한 모델식들이 아래에서와 같이 구해졌다.

G1 그룹:

$$STD = 0.012955 - 0.0013V_i + 0.007209H_p \tag{7}$$

$$+ 0.002107V_i^2 + 0.007491H_p^2 - 0.00356V_i H_p$$

$$SH = 0.564278 - 0.12547V_i + 0.347105H_p \tag{8}$$

$$+ 0.071732V_i^2 + 0.320012H_p^2 - 0.28879V_i H_p$$

G2 그룹:

$$STD = 0.006457 + 0.00724V_i - 0.00213H_p \tag{9}$$

$$+ 0.010208V_i^2 + 0.009039H_p^2 - 0.00784V_i H_p$$

$$SH = 0.568844 - 0.12035V_i + 0.345599H_p \tag{10}$$

$$+ 0.07895V_i^2 + 0.326403H_p^2 - 0.29433V_i H_p$$

G3 그룹:

$$STD = 0.01244 - 0.006035V_i + 0.010456H_p \tag{11}$$

$$+ 0.006242V_i^2 + 0.012036H_p^2 - 0.00734V_i H_p$$

$$SH = 0.562393 - 0.12085V_i + 0.337409H_p \tag{12}$$

$$+ 0.07742V_i^2 + 0.320278H_p^2 - 0.2924V_i H_p$$

G4 그룹:

$$STD = 0.024426 - 0.0048V_i + 0.014901H_p \tag{13}$$

$$+ 0.003074V_i^2 + 0.015734H_p^2 - 0.01346V_i H_p$$

$$SH = 0.484455 - 0.10366V_i + 0.291126H_p \tag{14}$$

$$+ 0.066708V_i^2 + 0.27341H_p^2 - 0.25274V_i H_p$$

G5 그룹:

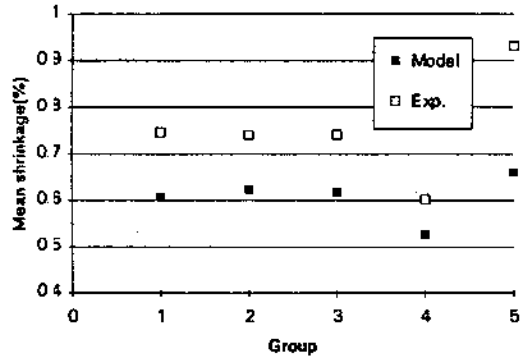
$$STD = 0.037369 - 0.003227V_i + 0.037672H_p \tag{15}$$

$$+ 0.014003V_i^2 + 0.033008H_p^2 - 0.00986V_i H_p$$

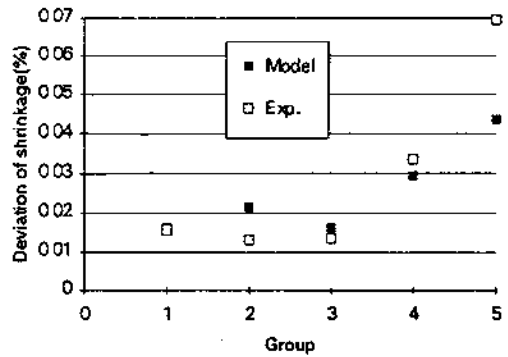
$$SH = 0.597713 - 0.0948V_i + 0.385918H_p \tag{16}$$

$$+ 0.105813V_i^2 + 0.365056H_p^2 - 0.30178V_i H_p$$

반응표면분석에 의해 구한 최적 조건의 결과를 검증하는 실험이 행해졌으며 20개 샘플이 채취 되었다. 20개 샘플에 대해 위에서 언급한 그룹별 수축율 및 수



〈그림 6〉 모델식에 의한 예측 및 측정된 수축율 값 비교



〈그림 7〉 모델식에 의한 예측 및 측정된 수축율 편차값 비교

축율 편차의 예측값과 실측값을 〈그림 6〉 및 〈그림 7〉에 나타낸다. 여기서 실측치는 20개 샘플에서 측정된 값들의 평균값 및 편차값을 사용 하였다. 모델식의 적용율을 (예측치/실측치)로 단순히 계산하였을때 G5가 0.71%를 제외하고는 G1,G2,G3,G4 그룹은 0.8 이상으로 모델식이 물리적으로 타당성을 지님을 알 수 있다. 또한 기하학적 구속 조건이 많은 G4 그룹의 적용율이 0.87로 가장 높은 것으로 보아 모델식의 예측이 기하학적 구속 조건이 많은 경우에는 여타 경우 보다 안정적임을 알 수 있다.

본 연구의 샘플이 가전 제품 하우징중 프란트 마스크의 모형임을 고려하여 백 카바가 조립된다고 가정 하면 성형품의 조립과 관련한 관리 치수로는 X1L, X1R, Y1L, Y1R을 포함하는 G3 그룹의 치수관리가 주요하다고 생각 된다. 즉 금형설계시 G3에서 구해진 수축율 값이 적용될 수 있으며, 그때 예측된 평균값 및 편차로부터 99.7%내 허용범위가 (평균값 ± 3

σ) 임을 감안하여 예측치에 기준한 이값이 관리 허용 공차내에 속하는 지를 판단하여, 위의 결과들이 최적 공정 조건의 도출 뿐 아니라 금형설계에도 적용될 수 있음을 알 수 있다. 즉 예를 들어 500mm 기준으로 허용공차가 ±0.8mm인 성형품에 대해 G3에서 예측된 편차 결과를 이용하면 3σ의 값이 0.48mm로 관리범위 내에 들므로 예측된 수축율이 금형설계시 적용되고, 도출된 최적 조건이 사용된다면 조립에 지장이 없는 성형품이 얻어짐을 의미한다.

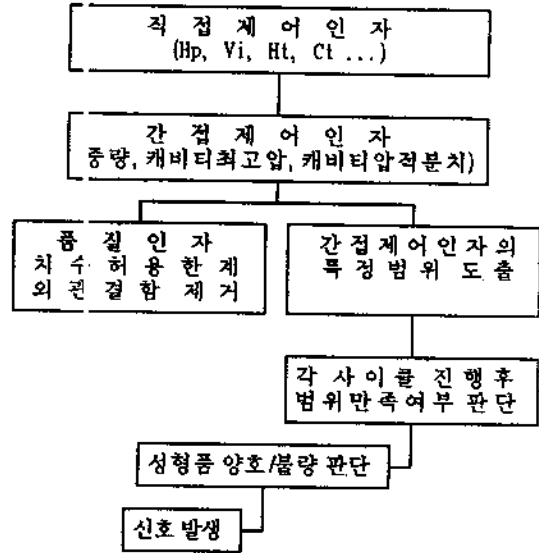
성형품의 치수를 관리할 수 있다.

(표 7) 그룹 수축율 값과 간접 제어 인자의 상관관계

Group	G1	G2	G3	G4	G5
Weight	0.91737	0.96623	0.96517	0.92105	0.96221
Pcp	0.83715	0.87612	0.87772	0.75191	0.99069
Pch	0.84611	0.91153	0.90533	0.77953	0.87678
Pnp	0.58024	0.56368	0.57768	0.26295	0.74153

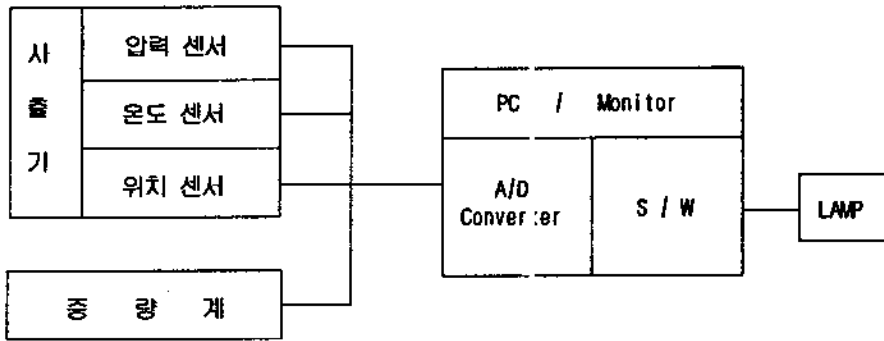
### 4.3 간접 제어인자에 의한 품질관리

성형품의 품질은 그 목적에 따라 외관의 무결함이나 치수의 정도등에 의해 양호 또는 불량 상태를 판단할 수 있는데 이를 위해서는 검사나 측정 시간이 많이 걸린다는 점에서 실제 양산 중 on-line하에서 적용하기 현실적으로 어렵다. 물론 외관은 작업자에 의해 검사 되고 치수는 성형품의 치수를 삽입하여 판단할 수 있는 지그나 픽스처를 사용할 수 있지만 짧은 시간 내에 정확하게 판단하는 데는 한계가 있을 듯하다. 이러한 관점에서 사출기에 입력되는 공정 조건인 직접 제어 인자와 달리 중량, 노즐 및 캐비티 압력은 성형 중 또는 성형 후 측정된 값이므로 <그림 8>에서와 같이 품질에 대한 간접 제어 인자로 구분하여, 실제 양산 과정에서 품질 관리의 일환으로 간접 제어 인자의 활용 가능성을 모색 하였다. 즉 on-line 하에서도 측정하기 쉬운 중량이나 노즐 또는 캐비티 압력을 이용할 수 있다면 성형품의 품질 관리에 많은 도움이 될 것이다. 이를 위해서 측정된 중량 및 압력과 수축율 간의 상관 관계가 높다는 것이 확인 되어야 하고, 최적 조건 하에서 측정된 간접 제어 인자의 상하 범위를 도출한 후 이들 결과를 on-line 하에서 측정된 간접 제어 인자 값들과 비교하여 성형품의 양호 및 불량 상태를 판단할 수 있다. <표 7>에 나타난 그룹 G1, G2, G3, G4, G5의 평균 수축율 값과 중량(weight), 노즐 최고압(Pnp), 캐비티 최고압(Pcp) 및 보압 후 캐비티압(Pch)과의 상관관계로 부터 수축율은 중량, 캐비티 최고압 및 보압 후 캐비티압과 상관관계가 높으므로 간접적으로 중량이나 캐비티압을 관리함으로써



<그림 8> 간접 제어 인자에 의한 품질 모니터링 S/W 기능

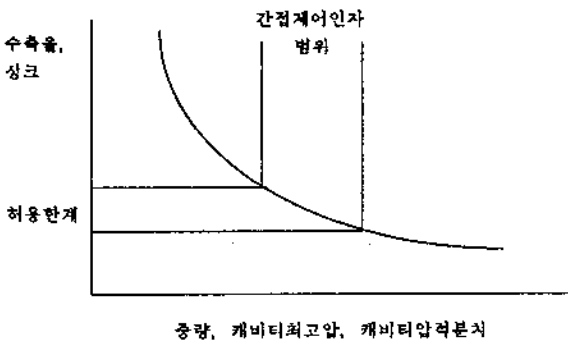
실제 양산 과정에서 사용된 품질 모니터링 시스템이 <그림 9>에 보여지며, 품질 관리의 일환으로 위의 결과를 적용하기 위해 최적 조건하에서 수행된 20개 샘플로 부터 측정된 중량, 캐비티 최고압 및 보압 후 캐비티압의 최대 및 최소 값 범위가 <표 8>에서와 같이 얻어졌다. 중량(weight)은 155.3255g에서 155.7215g의 범위를 가지며 그때 편차는 0.066g이고, 캐비티 최고압(Pcp)은 123.89bar에서 131.18bar의 범위를 가지며 그때 편차는 1.975bar이고, 보압 후 캐비티압(Pch)은 9.72bar에서 4.86bar의 범위를 가지고 그때 편차는 1.34bar도. 이들을 판단 기준으로하여, <그림 10>에서와 같이 on-line하에서 측정된 간접 제어 인자의 범위가 품질 특성치의 허용한계 내로 유지되는 최적 범위



〈그림 9〉 On-line하의 품질 모니터링 시스템

〈표 8〉 최적 조건하에서 측정된 간접 제어 인자 범위

Item	Min value	Max value
Pcp(bar)	123.89	131.18
Pch(bar)	4.86	9.72
Weight(g)	155.3255	155.7215



〈그림 10〉 품질 특성치의 허용 한계를 만족하는 판정인자 범위 도출

에 들면 양호한 성형품, 최적 범위에 들지 못하면 불량한 성형품임을 분간할 수 있다.

### 5. 결론

사출 성형 공정의 최적화를 위해 통계적 분석방법이 적용 되었으며, 이는 제품의 특성치에 끼치는 각 인자들의 영향도를 체계적으로 분석하고 그로 부터

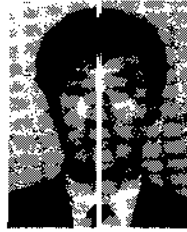
최적 조건을 도출할 수 있어 생산 현장에 적용시 효과를 볼 것으로 기대된다. 사출 성형품의 품질에 영향을 끼치는 많은 요인들 중 특히 공정변수와 관련된 제어 인자들이 분산분석을 통해 해석된 결과, 특성인자인 부위별 수축율 편차 및 수축율에 끼치는 영향이 보일, 사출속도 순으로 지배적임이 밝혀졌다. 반응표면분석을 통한 모델식 및 최적 공정 조건 유도를 위해 이들 두 인자에 대한 중심합성계획 실험이 수행되었다. 유도된 모델식의 검증이 분산분석을 통해 실시되었으며 부위별 수축율 편차를 줄이려는 제어목적에 맞는 최적 조건은 사출속도 = 53.56mm/sec, 보압 = 41.8bar 였다. 최적 조건 하에서 얻어진 최적 수축율은 금형설계시 적용되고, 중량이나 캐비티 최고압은 수축율과 상관관계가 높아 이들을 간접 제어 인자로 규정하여 품질의 모니터링을 위해 on-line하에서 사용할 수 있는 기준을 제공 하였다. 따라서 통계적 기법에 기초한 실험계획법과 분산분석의 결과는 향후 사출공정 뿐 아니라 여타 생산 공정의 최적화를 결정하기 위한 하나의 방법으로 사용될 수 있음을 보여 주었다.

### 〔참고문헌〕

[1] Arora, J.S., Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, New York, 1989.  
 [2] Box, G.E.P., and Draper, N.R., Empirical Model Building and Respons Surfaces, John Wiley & Sons,

New York, 1987.

- [3] Chris, M.S., Alan, A.D., and George, F.L., "Multiobjective Optimization of a Plastic Injection Molding Process," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 2, No. 3, pp.157-168, 1994.
- [4] Darlington, M.W., Scott, A.J., and Smith, A.C., "Pressure Losses in the Packing Stage of Injection Molding," Polymer Engineering and Science, Vol. 26, No.18, pp.1282-1289, 1986.
- [5] Madhav, S.P., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- [6] Menges, G., and Mohren, P., How to Make Injection Molds, 2nd ed, Hanser Publishers, Munich, 1993.
- [7] Michaeli, W., and Lauterbach, M., "Quality Control for the Packing Pressure," Advances in Polymer Technology, Vol.19, No.4, pp.337-343, 1989.
- [8] Miller, B., "Predicting Part Shrinkage is a Three-Way Street," Plastics World, Dec., pp.48-52, 1989.
- [9] Nelson, L.S., "Analysis of Two-Level Factorial Experiments," Journal of Quality Technology, Vol. 14, No.2, pp.95-98, 1982.
- [10] Pandelidis, I., and Zou, Q., "Optimization of Injection Molding Design," Polymer Engineering and Science, Vol. 30, pp.873-882, 1990.
- [11] Philip, J.B., and Patrick, J.M., "Applying Design of Experiment Analysis Techniques to the Injection Molding Process," ANTEC 94, pp.729-732, 1994.
- [12] Taguchi, G., Introduction to Quality Engineering, American Supplier Institute, Michigan, 1987.
- [13] 김석주, 이건우, 김영일, 이호상, "유전 알고리즘을 이용한 플라스틱 사출 성형 조건의 최적화," 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 학술대회 논문집, pp.63-67, 1994.
- [14] 민병현, 유병길, 이경돈, 장낙영, "노즐 및 캐비티압을 이용한 사출공정 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.434-439, 1994.
- [15] 박성현, 응용실험계획법, 영지문화사, 서울, 1994.
- [16] 홍명용, 사출성형기술 I, 기전연구소, 서울, 1992.



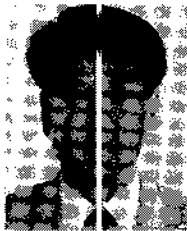
민병현

1983년 부산대학교 기계공학과 졸업 (학사)  
 1985년 부산대학교 기계공학과 졸업 (석사)  
 1986-87년 포항종합제철(주)  
 1987-89년 산업과학기술연구소  
 1992년 노스웨스턴대학교 기계공학과 졸업(박사)  
 1993-95년 고등기술연구원  
 1995-현재 동의대학교 산업공학과 전임강사  
 관심분야: 사출성형 및 금형, CAD/CAM



이경돈

1980년 서울대 기계설계학 학사  
 1982년 서울대 기계설계학 석사  
 1982년 1984년 KIST 연구원  
 1989년 미국 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute) Mech. Eng. 박사  
 1989년 1992년 (주)럭키 중앙연구소 선임연구원  
 1993년-현재 고등기술연구원(IAE) 생산기술연구실 수석연구원  
 아주대학교 시스템공학과 협동교수  
 관심분야: Forming Technology, 차체 경량화, 품질관리



유병길

1987년 연세대 금속공학 학사  
 1991년 서울대 금속공학 석사  
 1991년 1992년 (주)럭키금속 연구원  
 1993년-현재 고등기술연구원(IAE) 생산기술연구실 주임연구원  
 아주대학교 시스템공학과 박사과정  
 관심분야: 금속가공의 공정관리 및 최적화