

## 회귀분석을 이용한 사출금형 설계 최적화

류미라\*(동아대학교 대학원), 김영희(동아대 신소재공학과)이상재, 이권희, 박흥식(동아대 기계공학과)

### Injection mold Design Optimization using Regression Analysis

M. R. Ryu\* (Mech. Eng. Dept., DAU), Y. H. Kim, S. J. LEE, K. H. Lee, H. S. Park (DAU)

#### ABSTRACT

It is not easy to predict the shrinkage rate of a plastic injection mold in its design process. The shrinkage rate should be considered as one of the important performances to produce the reliable products. The shrinkage rate can be determined by using the CAE tools in the design process. However, since the analysis can take minutes to hours, the high computational costs of performing the analysis limit their use in design optimization. Therefore this study was carried out to presume for mutual relation of analysis condition to get the optimum average shrinkage by regression analysis. The results shown that coefficient of determination of regression equation has a fine reliability over 88.3% and regression equation of average shrinkage is made by regression analysis.

**Key Words** : Optimization(최적설계), Injection Mold (사출금형), Electron Microwave Oven(전자오븐), regression analysis(회귀분석)

#### 1. 서론

플라스틱 사출성형은 가볍고 외형이 아름다우며 녹이 슬지 않을 뿐만 아니라 인간생활의 향상에 지대한 역할을 할 수 있는 무한한 가능성을 갖고 있으며 복잡한 형상을 한 최종제품을 쉽게 성형할 수 있는 점과 에너지 소비를 적게 할 수 있다는 점에서 많이 사용하고 있다. 그 중 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측하기 가장 어려운 현상 중 하나는 사출성형 후 발생할 수 있는 제품의 수축정도이다. 이 현상은 제품 자체의 허용공차를 초과할 수도 있으며, 제품의 품질을 저하시키고 심한 경우 기능상 사용이 불가능하게 할 수도 있다. 이러한 이유 때문에 플라스틱 사출 성형품의 수축의 근본원인을 찾아내는 것과 최소화하는 것이 필요하다. 일반적으로 사출성형 과정에서 발생하는 제품내부의 잔류응력이 제품의 구조적인 본래의 형태를 변형시킬 만큼 충분히 강하다면 제품의 취출시 변형되게 된다. 또한 열에 의한 수축, 탄성회복에 의한 팽창, 결정화에 의한 수축, 분자배향의 완화에 의한 수축으로 인해서 사출성형의 수축률에 영향을 주는 경우도 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 CAE 기법을 활용한 도구로서 MoldFlow를 사용하여 사출설계 조건에 따

른 주입부의 게이트, 러너, 스프루 형상을 결정하였고, 수지 유동에 따른 수축률을 구하고자 하였다. 이러한 최적 설계 조건을 얻기 위해서는 많은 횟수의 반복계산이 필요하고 이에 따른 많은 탐색시간으로 인하여 설계의 효율이 크게 떨어짐, 또한 해석결과에 대한 정확한 검증결과의 신뢰성이 없다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 설계의 효율성을 위하여 가능한 한 최소의 실험횟수로 최적의 조건을 찾을 수 있는 보다 새로운 설계 방안이 요구된다고 하겠다.

그래서 현재 다양한 분야에 적용되고 있는 다구찌 기법과 추정된 모형을 사용하여 필요한 예측을 할수 있는 회귀분석법의 도입이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상 결정에 필요한 인자들을 직교 배열표를 사용하여 MoldFlow를 이용하여 실험하였고 회귀분석법을 통하여 수축률에 미치는 설계조건들의 정량적인 상호관계를 추정하는 것을 목적으로 하였다.

#### 2. 금형설계 과정

##### 2.1 수축률

플라스틱 사출 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측

하기 가장 어려운 현상중의 하나는 사출성형 후 발생할 수 있는 제품의 수축률이다.

열가소성 플라스틱 성형에 있어서 재료는 열을 받아서 흐름이 액체로 되어 여기에 압력을 가하여 사출 압입되어 캐비티(cavity)에 채워진 후 게이트(gate)부분이 냉각되면서 밀폐되고, 밀폐된 상태에서 상온으로 냉각이 일어난 부피변화가 생기게 되는데, 이 부피의 감소된 정도를 수축률로 나타낸다. 수축률은 사출성형, 압출성형 등에서 금형이나 다이의 크기보다 성형된 제품의 크기가 작아지는 현상을 측정하는 항목으로서 금형이나 다이의 초기 설계에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 수지의 흐름방향의 수축이 흐름의 직각방향보다 크게 된다. 또한 사출 압력을 높이면 성형수축률은 작게 되며 비용적 변화에 대해서는 수지온도, 금형온도, 충전속도 등을 내리면 충전된 수지의 평균온도를 내리는 것으로 되어 용융물의 비용적을 작게 하며 금형 속의 수지 수축률을 작게 하는 것이다. 본 논문에서 수축률은 성형품과 금형의 캐비티 치수사이의 차이로서 정의하였다. 허용오차를 정밀하게 하면서 복잡한 성형을 하려면 실제 수축 값과 휨성에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 수축률 S는 식(1)과 같다.

$$S_h = \frac{L' - L}{L} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서  $L'$ 은 금형의 선형길이이고,  $L$ 은 일정한 표준 온도와 압력 하에서 성형된 플라스틱의 선형길이이다. 만약  $S_h$ 가 모든 차원에 대해 0이라면, 그 물질은 금형의 크기와 완전히 일치된다. 만약  $S_h$ 가 모든 차원에 대해 같은 값을 갖는다면, 그 물질은 금형과 기하학적으로 비슷할 것이다. 수축은 아주 간단한 기하학적 모양으로 계산될 수 있는데, 그것은 재료의 여러 부분에서의 냉각속도에 의존하기 때문이다.

## 2.2 회귀분석법

회귀분석법은 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법이다.

그 중 중회귀분석은 어떤 종속변수의 변화는 두 개 이상의 독립변수에 의하여 영향을 받으며, 독립변수  $k$ 를 여러 개 잘 선택하여 이들의 함수로서 종속변수의 변화하는 특성을 설명할 수 있을 경우에 단순회귀에 비하여 보다 신뢰성 좋은 예측을 할 수 있다. 개선하고자 하는 특성치를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 준다고 생각되는 여러 독립변수들을 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 규명하

려는 통계적 분석방법이다. 이 방법은 정량적인 함수관계를 파악할 수 있으며, 종속변수의 변화를 설명하기 위하여  $k$ 개 ( $k \geq 2$ )의 독립변수가 사용되어 각 독립변수의 특성치에 관하여 종속변수와의 관계가 선형으로 가정되는 회귀모형이라 할 수 있다

이 모형은  $n$ 개의 데이터에 대하여 식(2)와 같이

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \quad (2)$$

이 되며, 여기서  $i = 1, 2, \dots, n$ 이며, 미지의 모수  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 를  $i$  번째의 관찰점 벡터로 표시하고,  $n$ 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬표현식은 식(3)과 같다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

일반적으로 추정된 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로는 분산분석표에 의한  $F$ -검정, 결정계수  $R^2$ , 잔차평균제곱  $MSE$ ,  $\hat{\beta}_i$ 과  $\hat{y}$ 의 분산이 많이 쓰이고 있다. 먼저 중회귀모형의 분산분석에 의한 정도의 측정은 총변동  $SST$ 로, 회귀에 의하여 설명되는 회귀변동은  $SSR$ 로 나머지 잔차변동은  $SSE$ 로 나타낸다. 그 계산방법은 식(4), (5), (6)과 같다.

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum \hat{y}_i^2 - n(\bar{y})^2 = y'y - n(\bar{y})^2 \quad (4)$$

$$SSR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \sum (y_i)^2 - n(\bar{y})^2 = \hat{y}'\hat{y} - n(\bar{y})^2 \quad (5)$$

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = SST - SSR - y'y - \hat{\beta}'X'y \quad (6)$$

이를 종합하여 분산분석표로 작성하면 Table 1과 같다. 잔차 평균제곱은  $MSE$ 를 사용하기도 하며,  $MSE$ 는  $\sigma^2$ 의 불편 추정값이며, 데이터들이 회귀식 주위에 어떻게 산포되어 있는가를 말해주는 측도가 된다.  $MSE$ 가 작을수록 회귀방정식의 정밀도가 좋고, 데이터의 산포가 작아진다.

회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination)로서  $R^2$ 의 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 같은 것인데 식(7)에 나타나 있다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (7)$$

Table 1 ANOVA of multiple regression

Factor	S	$\phi$	V	$F_0$	$F(\alpha)$
Regression	SSR	$k$	MSR	$\frac{MSR}{MSE}$	$F(k, n-k-1; \alpha)$
Residual	SSE	$n-k-1$	MSE		
Total	SST	$n-1$			

### 3. 해석 조건 및 방법

수지유동 해석은 CAE 프로그램을 이용하여 수행한다. 본 연구에 사용되는 모델은 전자오븐 윈도우 제품에 대한 수지 유동에 대한 수축률을 나타내기 위해 캐비티, 러너(runner), 게이트, 스프루(sprue)로 구성되어 있으며 해석을 수행하였다. Fig.1은 Pro-Engineer 프로그램을 사용하여 3차원으로 모델링한 후 해석을 하기 위해 CAE 프로그램에서 메쉬(mesh)를 한 것이다. 그리고 수축률은 각 요소 수축률의 평균을 구하였다. 이 모델을 바탕으로 수지가 금형에 들어가는 충전, 충전된 상태에서 다시 압력을 주는 보압, 단계를 거쳐서 수축에 대한 해석을 수행하였다.

각각의 성형 조건은 사출해석 프로그램에서의 입력 조건을 근거로 게이트 직경, 러너 직경, 스프루 직경을 선정하였다. 입력인자는 사용된 수지의 물성치를 바탕으로 요구되는 성형범위 한계 내에서 설정하였는데 금형온도 95℃, 수지온도 300℃, 보압 250 MPa, 보압시간 18 sec, 사출시간 3sec로 선정하였다. 본 연구에서 사용된 수지 소재는 PC(Poly carbonate)인 열가소성 수지로 최대특징은 기계적 특성이 우수하고 특히 가장 충격에 강하다. 그밖에 저온특성, 내열성, 전기특성 치수 안정성 등 구조부품에 요구되는 성능을 거의 모두 갖추고 있다. 결정은 자외선에 약하고 알칼리 방향족계 용제, 염소화 탄화수소에 조금 약하며 성형성이 나빠서 고압에 의한 스트레스

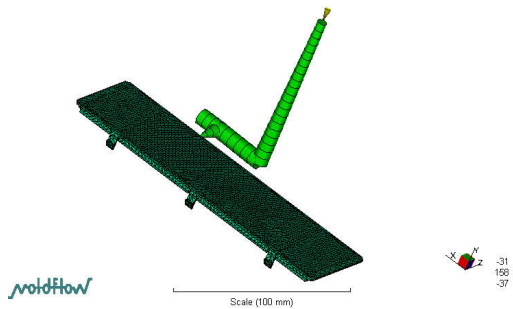


Fig. 1 Solid modeling of window

Table 2 Control factors and level

	1	2	3
Gate Size (mm)	0.50	0.75	1.00
Runner Size (mm)	6.00	8.00	10.00
Sprue Size (mm)	4.00	5.00	6.00

크랙킹이 발생하기 쉬운 소재이다. 그래서 기계적 특성을 살린 기계부품, 내열성을 살린 의료기구, 전기 기기부품, 육아기구, 가정용 용품 등에 사용하여 흡수성이 작아 치수 안정성이 좋다.

본 해석에서 3인자 3수준을 포함하는  $L_9(3^3)$  사출 해석에 필요한 변수들은 비선형성이 매우 크므로, 많은 표본점이 필요하다. 게다가 설계변수인 직교 배열표를 사용하였다. 본 시뮬레이션의 목적에 부합되며 상세한 실험조건은 Table 2와 같다.

### 4. 회귀분석을 통한 수학적 모형 추정

전자오븐 윈도우 금형 부품의 수지 유동 해석의 인자와 수준변화에 따른 수축률의 결과는 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2는 인자에 따른 영향을 수축률에 대한 각 인자의 수준별 평균과 95% 신뢰구간을 점과 구간으로 표시하고 있다. (a)의 그림에서 게이트의 직경은 수준변화에 따라 특성치의 신뢰구간 0.50mm, 0.75mm, 1.00mm의 수준간의 차에 따라 신뢰구간이 중복되고 있는 것과 수준간의 차가 크지 않다는 것을 나타내고 있다. (b)의 그림에서 러너의 직경은 수준변화에 따라 6mm, 8mm의 수준간의 차에 따라 신뢰구간이 중복되고 수준간의 차가 크지않은 것을 알 수 있지만 10mm에서는 신뢰구간의 차가 뚜렷하게 나타나고 있으며 특성치에 미치는 영향도 크다는 것을 알 수 있고 (c)의 그림에서는 스프루 직경 4mm, 5mm, 6mm의 수준간의 차가 신뢰구간이 중복되는 부분이 없고 특성치에 미치는 영향도 크다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2는 전자오븐 윈도우 금형 부품의 수지 유동 해석 후 특성치에 대한 잔차 분석을 나타내고 있으며 정규성 그래프에서 잔차의 분포상태는 정규분포를 하고 있으며 잔차의 I차트에서는 변동의 특별한

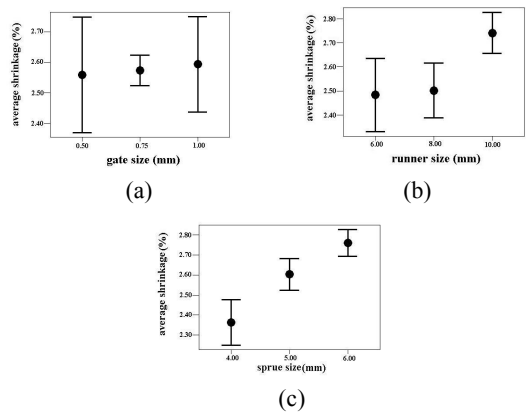


Fig. 2 Interval plot for shrinkage of working condition

Table 3 Arrange table and Shrinking rate ( $L_9(3^9)$ )

Standard order	Grate size (mm)	Runner size (mm)	Sprue size (mm)	shrinkage (%)
1	0.500	6.000	4.000	2.221
2	0.500	8.000	5.000	2.574
3	0.500	10.000	6.000	2.882
4	0.750	6.000	5.000	2.481
5	0.750	8.000	6.000	2.652
6	0.750	10.000	4.000	2.588
7	1.000	6.000	6.000	2.748
8	1.000	8.000	4.000	2.279
9	1.000	10.000	5.000	2.754

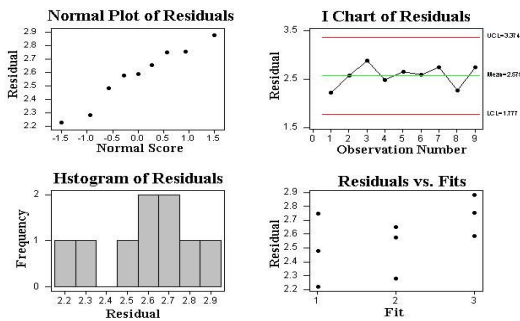


Fig.2 Residual model diagnostics for shrinkage

Table 4 ANOVA of Multiple linear regression model for shrinkage

Factor	S	$\phi$	V	$F_0$	P
Regression	0.33925	3	0.11308	12.61000	0.00900
Residual Error	0.04483	5	0.00897		
Total	0.38408	8			

이상이 없음을 나타내고 있고 히스토그램에서는 하나의 정점과 대칭적 종모양이 양호하나 그렇지 못한 것을 알 수 있다. 잔차 대 적합값의 그래프에서는 선형적 또는 일정한 규칙성이 발견되어서 정규적인 분포를 나타내고 있지 않음을 알 수 있었다. 전자오븐 윈도우 금형 부품의 중회귀분석을 통한 수학적 모형은 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$S_h = 1.88 + 0.0173x_1 + 0.129x_2 + 0.199x_3 \quad (8)$$

Table 4는 전자오븐 윈도우금형의 수축률에 대한 중회귀의 분산분석을 나타낸 것으로 추정된 회귀방정식 P-검정에서 수축률에 대해서 충분히 설명할 수 있다고 할 수 있으며 결정계수  $R^2$ 은 88.3%의 정도를 나타내고,  $MSE$ 가 0.00897로 데이터의 산포는 신뢰성이 양호하다고 할 수 있다.

따라서 사출 수지 유동 해석에 있어서의 해석인

자, 즉 게이트 직경, 러너 직경, 스프루 직경의 변화에 따른 수축률은 회귀방정식으로 나타낼 수 있으며, 이 결과를 적용하게 되면 해석조건의 변화에 따른 수축률에 대한 예측과 안정적인 해석조건의 선정이 가능할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상 결정에 필요한 인자들을 직교 배열표를 사용하여 MoldFlow를 이용하여 실험하였고 회귀분석법을 통하여 수축률에 미치는 설계조건들의 정량적인 상호관계를 추정하는 것을 목적으로 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험계획법을 통한 사출금형 수지 유동 해석에 있어서 많은 영향을 미치고 있는 인자에 대한 정량적인 통계적 분석이 가능하였다.

(2) 회귀분석을 통하여 수축률에 대한 수학적 모형인 회귀방정식을 구축하였으며 수축률에 대한 회귀식 결정계수는 88.3%로 설정한 가공인자와 수준에 대한 특성을 충분히 설명하였다.

(3) 본 연구 방법은 다른 전자제품의 부품에도 적용할 수 있고, 초기 설계단계에서 개선된 설계를 하는데 유용할 것이다.

## 참고문헌

1. Sang-Jae Lee, Hyo-Jun Bae, Young-Baek Seo, Heung-Sik Park, Tae-Ok Jun, " Application of Design of Experiment Optimum Working Condition in Flat Eng-Milling," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 2, No. 3, pp. 20-25, 2003.
2. M. R. Ryu, K. H. Lee, Y. H. Kim, H. S. Park, " Optimization of an Electron Microwave Oven Window Injection Mold Using Kriging Based Approximation Model," KSPE Vol. 22, No. 7, pp. 177-184, 2005.
3. Choi, D.S. and Im, Y.T., "Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding," Composite Structures, Vol. 47, pp. 655-665, 1999.
4. Georg Menges, Walter Michaeli, and Paul Mohren, "How to Make Injection Molds," Hanser Gardner Publications, Inc. 2001.
5. Park, T. W., Jea, D. G., Jung, Y. D., "Injection mold of Through Plate Type for Recycling," KSPE, Vol 20., pp. 123-129, 2003.