

## 사출금형 설계 최적화를 위한 반응표면 분석법의 적용

류미라\*(동아대학교 대학원), 이권희, 김영희, 박홍식(동아대 기계공학과)

Application of Response Surface Method for Injection mold Design Optimization

M. R. Ryu (Mech. Eng. Dept., DAU), K. H. Lee, Y. H. Kim, 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. In this study, the surrogate models based on the RSM is used in lieu of the original models, facilitating design optimization.

**Key Words** : Optimization(최적설계), Injection Mold (사출금형), Electron Microwave Oven(전자오븐), RSM(반응표면 분석법)

### 1. 서론

플라스틱 사출 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측하기 가장 어려운 현상중의 하나는 사출성형 후 발생할 수 있는 제품의 수축(Shrinkage)정도이다. 이 현상은 제품 자체의 허용공차를 초과할 수도 있으며, 제품의 품질을 저하시키고 조립시 많은 문제점을 유발하며, 심한 경우 기능상 사용이 불가능하게 할 수도 있다. 이러한 이유 때문에 플라스틱 사출 성형품의 수축을 최소화하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 수축의 근본 원인을 이해하는 것이 필요하다. 일반적으로 사출성형과정에서 발생하는 제품내부의 잔류응력이 제품의 구조적인 본래의 형태를 변형시킬 만큼 충분히 강하다면 제품의 취출시 변형되게 된다. 대표적으로 고온의 성형제품이 냉각과정에서 불균일한 수축차를 겪게 되면 발생되며, 플라스틱 재료, 제품 설계, 금형설계 (tooling) 그리고 공정 조건들의 변화가 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 CAE 기법을 활용한 도구로서 MoldFlow를 사용하여 사출조건에 따른 주입부의 게이트, 러너, 스프루 형상과 보압과 보압시간을 결정하였고, 수치 유동에 따른 수축률을 구하

고자 하였다. 또한 CAE 프로그램을 사용할 때 설계자가 매 해석 후 마다 결과를 분석하고, 새로운 안을 도출하여 다시 해석을 수행하는 식으로 최적화를 수행하게 된다. 그러나 최적의 설계 조건을 얻기 위해서는 많은 횟수의 반복계산이 필요하고 이에 따른 긴 탐색시간으로 인하여 설계의 효율이 크게 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 설계의 효율성을 위하여 가능한 한 최소의 실험횟수로 최적의 조건을 찾을 수 있는 보다 새로운 설계 방안이 요구된다고 하겠다.

지금까지 초기단계에서 신속한 설계를 하려면 2차 다항식을 사용한 RSM (Response Surface Method)으로 근사적 최적화를 이용한 최적 설계를 제안하고 있고, 가장 적은수의 실험으로 가장 좋은 정도를 주는 실험계획법이 무엇인가를 고찰하고, 데이터 분석을 통하여 추정되는 적합한 반응표면의 통계적인 성질을 규명할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상 결정에 필요한 인자들을 직교 배열표를 사용하여 MoldFlow 유동해석 횟수를 줄이고 반응표면 분석법을 통하여 최적의 설계조건을 찾고자 하였다.

## 2. 금형설계 과정

### 2.1 수축률

플라스틱 사출 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측하기 가장 어려운 현상중의 하나는 사출성형 후 발생할 수 있는 제품의 수축률이다.

성형수축은 사출원재료가 용융되었다가 식으면서 체적이 줄어드는 것을 말한다. 성형 수축률은 사출재료의 수축되는 양을 감안하여 성형품을 생산하는 금형의 캐비티 및 코어의 치수를 산출하는데 쓰이는 인자로서 중요하다.

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  $S$ 는 식(1)과 같다.

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

여기서  $L'$ 은 금형의 선형길이이고,  $L$ 은 일정한 표준 온도와 압력 하에서 성형된 플라스틱의 선형길이이다. 만약  $S_{shrinkage}$ 가 모든 차원에 대해 0이라면, 그 물질은 금형의 크기와 완전히 일치된다. 만약  $S_{shrinkage}$ 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 반응표면 분석법

반응표면 분석법은 다수의 설계변수  $X_1, X_2, \dots, X_k$ 가 복합적인 작용을 하여 특정한 반응  $y$ 에 영향을 줄 때, 설계변수와 반응간의 근사적 함수 관계를 규

명하고, 동시에 반응을 최적화하는 설계변수 조건을 구하는 것과 관련된 통계적 분석 방법이다. 여기서 설계변수는 독립변수이고 반응은 종속변수이다. 실험점  $i$ 의 독립 변수값  $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$ 와 종속변수 값  $y_i$ 와의 관계는 식(2)와 같이 표시된다.

$$y_i = f(X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}) + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_i$ 는 실험점  $i$ 에서 관측된 오차이다. 본 연구에서는 제품, 금형, 공정조건에 속하는 설계변수들이 독립변수이고 종속변수는 수축률이다. 이와 같은 반응표면함수로 많이 사용되는 모형은  $k$ 개의 독립변수에 대한 다항회귀모형으로서 독립변수의 관심 영역에서 독립변수들과 종속변수간의 관계를 근사화한다.

반응표면분석법에서는 독립변수  $X_1, X_2, \dots, X_k$ 를 다음 식 (3)과 같이 선형 변환하여 분석한다.

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{c_i} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

식 (3)에서  $X_{0i}$ 는 보통  $X_i$ 의 평균치로 취하고  $c_i$ 는  $x_i$ 를 (-1, +1) 범위의 값으로 변화하기 위한 상수이다. 그러면 변환된 변수(coded variable)  $x_i$ 에 대한 회귀함수를 관측치로부터 추정할 수 있다. 회귀모형으로는 1차 또는 2차 모형이 주로 사용된다. 1차 모형은 종속변수가 독립변수들의 선형함수로 표현되는 경우이다. 그러나 대부분의 공학적 문제에서는 2차 모형이 주로 사용되고 있으며, 3차 이상의 고차 모형은 그 복잡성으로 인해 잘 사용되지 않는다. 사출성형 공정의 경우에는 설계변수와 성능 특성간에 비선형적 함수관계가 예상되므로 본 연구에서는 2차 모형을 사용하였다. 2차 모형은 종속변수  $y$ 와 독립변수  $x$ 간의 함수관계가 곡면으로 표현된 것이라고 예상될 때 사용되며 식(4)와 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 회귀계수(regression coefficients)로서 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력을 나타내며  $\epsilon$ 은 오차를 나타낸다. 2차 모형의 회귀계수를 추정하기 위한 실험계획으로는 중심합성계획(central composite design; CCI)이 주로 사용된다. 중심합성계획은  $2^k$ 요인실험이나  $2^{k-1}$  일수 실시법의 실험점에 중심점과 축점(axial points)을 추가시킨 형태의 실험계획이다. 관측된 실험 데이터로부터 2차 반응표면함수가 결정되면 이 함수를 이용하여 최적 강건설계해를 구한다.

### 3. 해석 조건 및 방법

#### 3.1 해석 모델

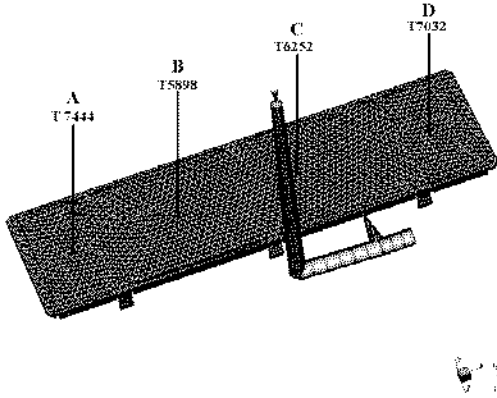


Fig. 1 Solid modeling of window

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, 수축률을 구하는 각각의 요소 T7444는 A, T5898은 B, T6252는 C, T7032는 D로 나타내었다. 보통 사출금형 해석에서는 해석 결과의 평균 수축률을 나타내어 결과를 분석하는데 본 연구에서는 제품의 수축률이 금형보다 크거나 (+ %) 금형보다 작게(- %) 나타나는 경우가 있어서 평균을 구하지 않고 각각 A, B, C, D의 요소의 수축률을 비교하였다. 이 모델을 바탕으로 수지가 금형에 들어가는 충전, 충전된 상태에서 다시 압력을 주는 보압, 단계를 거쳐서 수축에 대한 해석을 수행하였다.

#### 3.2 해석 조건

각각의 성형 조건은 사출해석 프로그램에서의 입력 조건을 근거로 게이트 직경, 러너 직경, 스프루 직경, 보압, 보압 시간을 선정하였다. 입력인자는 사용된 재료의 물성치를 바탕으로 요구되는 성형범위 한계 내에서 설정하였다. 본 연구에서 사용된 수지 소재는 PC(Poly carbonate) 인 열가소성 수지로 최대 특징은 기계적 특성이 우수하고 특히 가장 충격에 강하다. 그밖에 저온특성, 내열성, 전기특성 치수 안정성 등 구조부품에 요구되는 성능을 거의 모두 갖추고 있다. 결정은 자외선에 약하고 알카리 방향족계 용제, 염소화 탄화수소에 조금 약하며 성형성이

Table 1 Control factors and level

	1	2	3	4	5
Gate Size (mm)	0.5	0.6915	0.883	1.0745	1.266
Runner Size (mm)	5.8	6.9	8	9.1	10.2
Sprue Size (mm)	4	4.55	5.1	5.65	6.2
Packing Pressure (Mpa)	180	191	202	213	224
Packing Time (sec)	18	18.55	19.1	19.65	20.2

나빠서 고압에 의한 스트레스 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 5인자 5수준을 포함하는  $L_{25}(5^5)$  사출 해석에 필요한 변수들은 비선형성이 매우 크므로, 많은 표본점이 필요하다. 게다가 설계변수인 직교 배열표를 사용하였다. 본 시뮬레이션의 목적에 부합되며 상세한 실험조건은 Table 1과 같다.

### 4. 결과

반응표면 분석법을 계산하기 위한 예측치  $y$ 은 식(5)와 같이 나타나고, 반응표면 분석법은 실험 데이터와 식(5)에서 구한 값의 차를 제공한 것으로 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 y = & 0.18415 - 0.760545x_1 - 0.758937x_2 - 0.303344x_3 \\
 & - 1.4858x_4 - 0.120724x_5 + 0.403316x_1^2 + 0.332322x_2^2 \\
 & + 0.331978x_3^2 + 0.184201x_4^2 + 0.091352x_5^2 + 0.489069x_1x_2 \\
 & + 0.088156x_1x_4 - 0.165034x_2x_3 + 0.090871x_2x_4 \\
 & + 0.027897x_2x_5 - 0.162156x_3x_4 - 0.006983x_4x_5 \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$RSM = (T - y)^2 \quad (6)$$

여기서,  $T$ 는 실험 데이터이다.

각각의 요소의 최적 실험 조건에서 실험 데이터와 예측치를 구하여 반응 표면 분석법으로 계산한 결과는 Table 2인데 반응표면 분석법으로 계산한 결과 거의 0에 가까운 것을 알 수 있는 것으로 보아 실험한 결과와 예측치가 같다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Result comparison of RSM

	predict opt. (%)	real value (%)	RMS
A	-1.78714	-1.72007	0.004498
B	-2.32544	-2.45837	0.017670
C	-2.54368	-2.50301	0.001654
D	-1.10399	-0.855403	0.061795

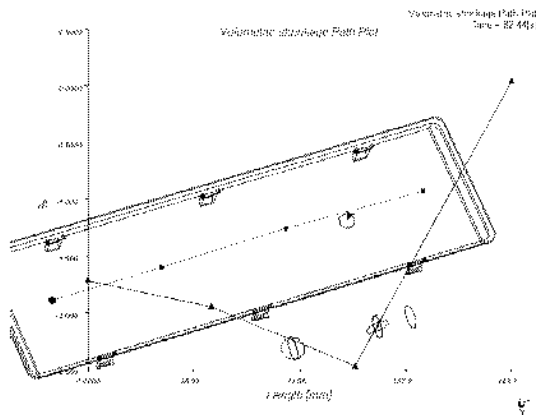


Fig 2. Shrinkage Result of optimization

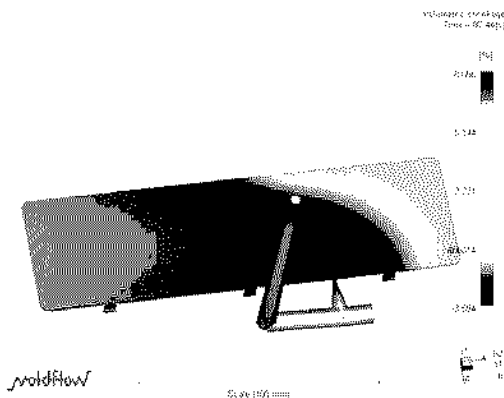


Fig 3. Shrinkage rate of optimization

Fig 2는 최적조건인 수축률을 나타내고 있는 그래프이고, Fig 3은 수축률 해석 결과를 나타내고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상을 결정에 필요한 선정된 독립변수들에 대한 인자들을 직교 배열표를 사용하여 실험횟수를 줄이고 반응표면 분석법을 통하여 최적의 설계조건을 찾고자 하였다. CAE 프로그램을 통하여 수축해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻

었다.

- (1) 실험에 의한 결과와 반응표면 분석법에 의한 예측치의 결과 비교를 통해서 최적화 과정의 타당성을 검증하였다.
- (2) 반응표면 분석법을 통하여 최적실험조건인 결과 데이터와 예측치가 거의 0에 가깝게 나타나는 것을 볼 수 있다.
- (3) 본 연구의 방법은 다른 전자제품의 부품에도 적용할 수 있고, 초기 설계단계에서 개선된 설계를 하는데 유용할 것이다.

### 참고문헌

1. Deceneiere et al., "Applications of Kriging to Image Sequence Cooling," Signal Processing; Image Communication, Vol. 13, pp.227-249, 1998.
2. Simpson, et al., "Comparison fo Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," American Institute of Aeronautics and Astronautics, ALLAA-98-47755, pp. 381-391, 1998.
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. Je-Seon Ryu, Min-Soo Kim, Kyung-Joon Cha, Tae-Hee Lee, Dong-Hoon Choi, "Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE Model," KSME International Journal, Vol.16, pp.619-632, 2002.