

크리깅을 이용한 전자오븐 윈도우 부품용 사출금형의 최적설계

류미라[†] · 김영희* · 이권희* · 박흥식*

Optimization of an Electric Microwave Oven Window Using the Kriging Based Approximation Model

M. R. Ryu[†], Y. H. Kim*, K. H. Lee*, H. S. Park*

Key Words: Optimization(최적설계), Injection Mold (사출금형), Kriging(크리깅), DACE (Design and Analysis of Computer Experiments), Electron Microwave Oven(전자오븐)

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 DACE is used in lieu of the original models, facilitating design optimization.

1. 서론

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

다.

일반적으로 사출성형과정에서 발생하는 제품 내부의 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 결정하고자 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 반복 계산이 필요하고 이에 따른 긴 탐색시간으로 인하여 설계의 효율이 크게 떨어지는 문제점을 가지고

[†] 동아대학교 대학원

E-mail : roriem @ empal.com

TEL : (051)200-6996 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교

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 제안했다. 그러나, 이 접근법은 국부적 최적해를 가지지만, 본 모델이 많은 국부적 최적해를 가진 문제에서는 정확하지 않다. 일부 연구자들은 직교 배열표를 이용하는 방법을 이용하였으나, 그 방법은 특정 값 중 하나를 고르는 것으로 한정되어 있다. 그러므로 실제 최적해는 얻을 수 없다. 본 연구에서는 전자 오븐 부품의 최적 설계 방법으로 예상 모델은 DACE 방법을 근거로 구성을 한다⁽¹⁾. Sacks의 연구에 따르면, DACE로 알려진 크리깅은 컴퓨터 실험으로 결정되는 통계적으로 더 정확하고 일관된 근사화 방법 중 하나이다. RSM은 근사화 모델을 구성하기 전, 다항식의 차수를 가정해야 하지만 크리깅은 이 과정이 필요 없다⁽²⁾.

따라서 본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상 결정에 필요한 인자들을 직교 배열표를 사용하여 MoldFlow 유동 해석 횟수를 줄이고 DACE 방법을 통하여 최적의 설계조건을 찾고자 하였다.

2. 전자오븐 윈도우 부품의 금형설계 과정

2.1 사출 설계

사출 설계는 생산하고자 하는 성형제품의 사양을 만족시킬 수 있는 금형을 설계하는데 필요한 지식을 말하며, 금형의 설계이론과 실제 금형을 설계자를 이용하여 제도하거나 컴퓨터를 이용하여 설계 제도할 수 있는 CAD기술 및 금형의 강도와 수명을 유지할 수 있도록 적절한 금형재료를 선택하고 적절한 열처리 방법을 선정하는 기술이 중요하다. 플라스틱 사출 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측하기 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 상태에

서 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 사출압력을 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 $S_{shrinkage}$ 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 선형 길이이다. 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 DACE 모델

DACE 모델에서, 다음과 같은 전역적 근사화 모델을 나타내었다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (2)$$

$f(x)$ 는 x 의 함수이고, $z(x)$ 는 가우스 분포를 따르는 0점 평균과 편차를 가지는 확률론적인 방법을 이용한다. 대부분의 연구에서는 $f(x)$ 를 사수 β 처럼 둔다. 그러므로, 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$y(x) = \beta + z(x) \quad (3)$$

$y(\widehat{x})$ 를 근사 모델이라고 하자. $y(x)$ 와 $y(\widehat{x})$ 사이의 불편분산의 에러가 최소화될 때 $y(\widehat{x})$ 는 다음과 같이 된다.

$$y(\widehat{x}) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}f) \tag{4}$$

$\hat{\beta}$ 는 β 의 추정치이고, R^{-1} 는 상관행렬 R 의 역수이다. r 은 상관벡터이고, y 는 n_s 샘플 데이터를 가진 관측 데이터이다. f 는 이것들의 n_s 성분을 포함하는 벡터이다. 상관벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$R(x^j, x^k) = \text{Exp}\left[-\sum_{i=0}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2\right] \tag{5}$$

n 은 설계변수의 수이고, θ_i 는 i 번째 설계변수에 상응하는 i 번째 매개변수이다. 하나의 상관 매개변수는 몇몇 경우에 좋은 결과를 나타낸 보고가 있다. 본 연구에서는 하나의 매개변수를 다섯 개의 매개변수들을 수학적 문제에 사용한다. 그러므로 상관벡터는 다음과 같이 된다.

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(n_s)})]^T \tag{6}$$

n_s 는 표본점의 수이다. 우도함수 L 은 다음과 같이 정의된다.

$$L(y, \theta, \beta, \sigma^2) = -\frac{(2\pi\sigma^2)^{n_s/2}}{\sqrt{|R|}} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{(y - \beta f)^T R^{-1}(y - \beta f)}{2\sigma^2}\right] \tag{7}$$

미분한 로그 우도함수는 β 와 σ 가 포함된 식(6)으로부터 정의되고, 그들을 0과 같게 둔다. β 와 σ^2 의 최대 우도치는 식 (8)과 (9)에 정의되어 있다.

$$\hat{\beta} = (f^T R^{-1} f)^{-1} f^T R^{-1} y \tag{8}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(y - \hat{\beta}f)^T R^{-1}(y - \hat{\beta}f)}{n_s} \tag{9}$$

상관행렬 $\hat{\beta}$ 와 상관 벡터 $\hat{\sigma}^2$ 은 매개변수의 함수

이다. 매개변수가 결정되었을 때, 근사화 모델은 구성된다. $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 의 알 수 없는 매개변수들은 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$\text{maximize} -\frac{[n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|R|]}{2} \tag{10}$$

$$\theta_i (i = 1, 2, \dots, n) > 0$$

본 연구에서는 근사모델에서 오차제곱의 평균과 최대 오차는 설계영역을 초과한 근사 모델로 정의 한다. RMSE (Root Mean Squared Error)와 MAXAE (Maximum Absolute Error)는 다음과 같이 정의된다.

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{11}$$

$$MAXAE = \text{MAX}[|y_i - \hat{y}_i|, i = 1, 2, \dots, n_t] \tag{12}$$

n_t 는 수학적 문제와 전자제품 부품설계에서 근사모델을 확인하는 시험 점들이다.

2.3 설계과정

본 연구에서의 전자 오븐 윈도우 부품 사출 금형 설계과정은 다음과 같다. 열의 전체 수준이 같은 횡수씩 나타나도록 구성되어 있는 직교배열표

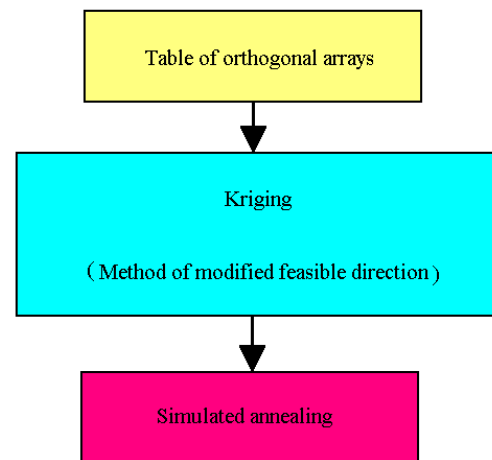


Fig. 1 Flow chart

를 사용하여 사출유동 해석조건을 정해서 유동 해석을 수행한다. 크리깅 방법에서 θ 를 구하는 방법은 수정 유용 방향법(method of modified feasible direction)을 사용하여 전자 오븐 윈도우 부품의 사출 유동 해석의 최적조건을 구한다. 또 사출 유동 해석시 설계변수와 온도 등의 불확실성이 실제 상황에서 존재하기 때문에 결정론적 방법에 의한 반응치의 예측은 오류를 범할 가능성이 크다. 그러므로 확률론적 예측을 강력히 추천한다. 그러므로 불확실성을 고려하여 반응치를 예측하는 방법인 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)을 수행하여 전자 오븐 윈도우 부품의 사출 유동 해석결과와 예측치를 비교 분석한다. Fig. 2는 설계과정을 플로우 차트를 나타내고 있다.

3. 해석조건 및 방법

3.1 해석 모델

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. 보통 금형에서는 평균 수축률을 나타내는데 본 연구에서는 수축률이 +나-%가 나오므로 평균을 구하지 않고 각각 A,

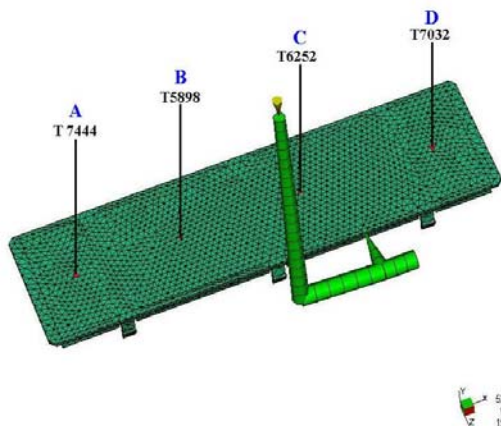


Fig. 2 Solid modeling of window

B, C, D의 요소를 나타내어 수축률을 비교하였다. 이모델을 바탕으로 충전, 보압, 냉각 단계를 거쳐 수축에 대한 해석을 수행하였다.

3.2 해석 조건

각각의 성형 조건은 MoldFlow에서의 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 수지소재는 PC(poly carbonate) 로 최대특징은 기계적 특성이 우수하고 특히 가장 충격에 강하다. 그밖에저온특성, 내열성, 전기특성 치수 안정성 등 구조 부품에 요구되는 성능을 거의 모두 갖추고 있는 소재이다. 본 해석에서 5인자 5수준을 포함하는 $L_{25}(5^5)$ 직교 배열표를 사용하였다. 본 시뮬레이션의 목적에 부합되며 상세한 실험조건은 Table 1과 같다.

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 |

4. 결과

사출 해석에 필요한 변수들은 비선형성이 매우 크므로, 많은 표본점이 필요하다. 게다가 설계변수의 수가 증가할 때는 더 많은 표본점이 추가된다.

본 연구는 직교 배열표를 이용하여 MoldFlow 유동 해석을 수행하였다. 그 중 요소 A, B, C, D의 수축률을 비교하였다. Table 2는 직교 배열표와 각 요소의 수축률을 나타낸 것이다. 각 요소의 수축률을 제공하여 합한 결과 S 는 식(13)으로 DACE 기법을 통해 구한 예측치 SS 와 비교하여 그 오차

Table 2 Arrange table and Shrinking rate ($L_{25}(5^5)$)

| No. | Gate Size | Runner Size | Sprue Size | Packing Pressure | Packing Time | shrinkage (T7444) | shrinkage (T5898) | shrinkage (T6252) | shrinkage (T7032) |
|-----|-----------|-------------|------------|------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.5 | 5.8 | 4 | 180 | 18 | 0.00176 | -0.3923 | -1.4287 | 1.53202 |
| 2 | 0.5 | 6.9 | 4.55 | 191 | 18.55 | -0.5349 | -0.8756 | -1.7102 | 1.32079 |
| 3 | 0.5 | 8 | 5.1 | 202 | 19.1 | -0.9766 | -1.2947 | -1.9598 | 0.87211 |
| 4 | 0.5 | 9.1 | 5.65 | 213 | 19.65 | -1.3624 | -1.6269 | -2.1968 | 0.18242 |
| 5 | 0.5 | 10.2 | 6.2 | 224 | 20.2 | -1.6922 | -1.9306 | -2.4312 | -0.631 |
| 6 | 0.6915 | 5.8 | 4.55 | 202 | 19.65 | -0.8553 | -1.1650 | -1.9695 | 1.41768 |
| 7 | 0.6915 | 6.9 | 5.1 | 213 | 20.2 | -1.3012 | -1.5715 | -2.2203 | 1.10448 |
| 8 | 0.6915 | 8 | 5.65 | 224 | 18 | -1.6682 | -1.9060 | -2.4531 | 0.46332 |
| 9 | 0.6915 | 9.1 | 6.2 | 180 | 18.55 | -0.3432 | -0.6647 | -1.4322 | 0.60968 |
| 10 | 0.6915 | 10.2 | 4 | 191 | 19.1 | -0.6965 | -1.0058 | -1.6920 | 0.29611 |
| 11 | 0.883 | 5.8 | 5.1 | 224 | 18.55 | -1.5887 | -1.8249 | -2.4703 | 1.28171 |
| 12 | 0.883 | 6.9 | 5.65 | 180 | 19.1 | -0.2791 | -0.6055 | -1.4665 | 1.1769 |
| 13 | 0.883 | 8 | 6.2 | 191 | 19.65 | -0.6732 | 0.98310 | -1.7083 | 0.75466 |
| 14 | 0.883 | 9.1 | 4 | 202 | 20.2 | -1.0319 | -1.3296 | -1.9626 | 0.51730 |
| 15 | 0.883 | 10.2 | 4.55 | 213 | 18 | -1.3842 | -1.6415 | -2.1954 | -0.1756 |
| 16 | 1.0745 | 5.8 | 5.65 | 191 | 20.2 | -0.5858 | -0.8942 | -1.7345 | 1.27683 |
| 17 | 1.0745 | 6.9 | 6.2 | 202 | 18 | -1.0017 | -1.2980 | -1.9760 | 0.94084 |
| 18 | 1.0745 | 8 | 4 | 213 | 18.55 | -1.3630 | -1.6138 | -2.2252 | 0.76400 |
| 19 | 1.0745 | 9.1 | 4.55 | 224 | 19.1 | -1.6935 | -1.9254 | -2.4516 | 0.112 |
| 20 | 1.0745 | 10.2 | 5.1 | 180 | 19.65 | -0.3564 | -0.6780 | -1.4262 | 0.34443 |
| 21 | 1.226 | 5.8 | 6.2 | 213 | 19.1 | -1.3200 | -1.5700 | -2.2330 | 1.14595 |
| 22 | 1.226 | 6.9 | 4 | 224 | 19.65 | -1.6501 | -1.8804 | -2.4806 | 1.03592 |
| 23 | 1.226 | 8 | 4.55 | 180 | 20.2 | -0.3356 | -0.6413 | -1.4663 | 0.96982 |
| 24 | 1.226 | 9.1 | 5.1 | 191 | 18 | -0.6970 | -1.0021 | -1.7040 | 0.49550 |
| 25 | 1.226 | 10.2 | 5.65 | 202 | 18.55 | -1.0426 | -1.3465 | -1.9426 | -0.1447 |

Table 3 Comparison of test and prediction ($L_{144}(12^5)$)

| No. | shrinkage (T7444) | | shrinkage (T5898) | | shrinkage (T6252) | | shrinkage (7032) | |
|-----|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|------------------|---------|
| | Test | Predic. | Test | Predic. | Test | Predic. | Test | Predic. |
| 001 | 0.002 | 0.002 | -0.392 | -0.392 | -1.429 | -1.429 | 1.532 | 1.532 |
| 005 | -0.738 | -0.753 | -1.077 | -1.089 | -1.826 | -1.839 | 1.161 | 1.143 |
| 010 | -1.457 | -1.467 | -1.712 | -1.722 | -2.261 | -2.273 | -0.030 | -0.046 |
| 020 | -1.440 | -1.497 | -1.695 | -1.598 | -2.276 | -2.196 | 0.542 | 0.545 |
| 050 | -0.713 | -0.742 | -1.033 | -0.503 | -1.840 | -1.828 | 1.313 | 1.350 |
| 075 | -0.258 | -0.274 | -0.590 | -0.644 | -1.469 | -1.468 | 1.235 | 1.239 |
| 100 | -0.807 | -0.797 | -1.117 | -0.521 | -1.837 | -1.846 | 0.962 | 0.958 |
| 120 | -0.855 | -0.834 | -1.165 | -1.047 | -1.809 | -1.816 | 0.142 | 0.145 |
| 144 | -1.233 | -1.202 | -1.510 | -1.572 | -2.083 | -2.100 | -0.138 | -0.131 |

Table 4 Error of test and prediction ($L_{144}(12^5)$)

| No. | Test calculation (S^2) | Prediction calculation (SS^2) | Error (E_{Error}) |
|-----|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 001 | 4.542 | 4.542 | 0.000 |
| 005 | 6.388 | 6.441 | 0.003 |
| 010 | 10.168 | 10.286 | 0.014 |
| 020 | 10.420 | 9.912 | 0.258 |
| 050 | 6.686 | 5.968 | 0.515 |
| 075 | 4.096 | 4.181 | 0.007 |
| 100 | 6.200 | 5.231 | 0.938 |
| 120 | 5.380 | 5.109 | 0.073 |
| 144 | 8.159 | 8.343 | 0.034 |

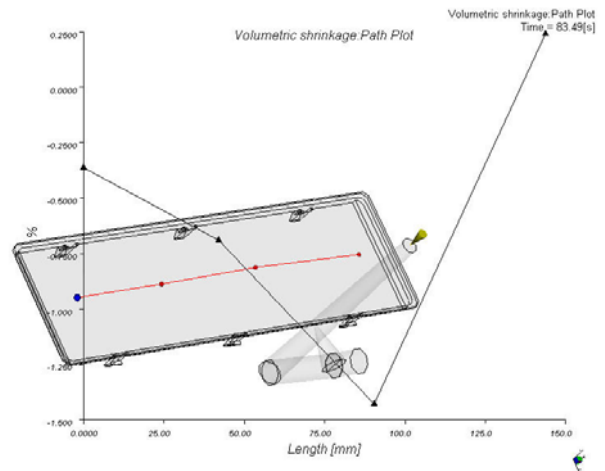


Fig 3. Shrinkage Result of optimization

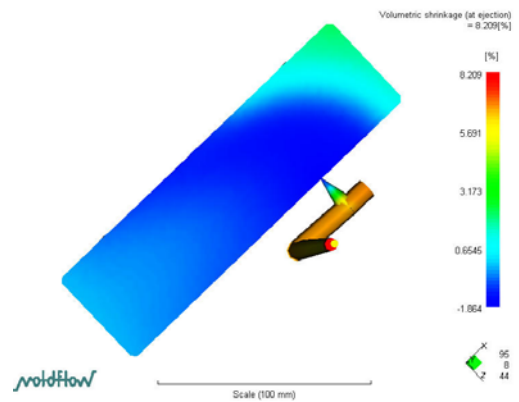


Fig 4. Shrinkage rate of optimization

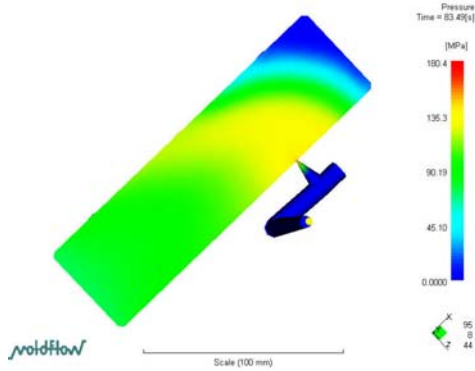


Fig 5. Pressure of optimization

E_{error} 는 식(14)로 나타내었다.

$$S^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2 \quad (13)$$

$$E_{error} = (S^2 - SS^2)^2 \quad (14)$$

실험횟수 25번의 결과를 통해서 실험횟수 144 번의 결과를 DACE방법으로 예측할 수 있는데 그 중 9조건의 예측치와 실험 결과를 Table 3과 같이 나타내었고, 실험한 결과와 식 (13)과 같이 계산하여 예측한 결과를 비교하여 Table 4와 같이 나타내었다.

또, DACE방법을 통하여 최적조건은 게이트 크기 0.85154mm, 러너 크기 10.2mm, 스프루 크기 6.0906mm, 보압 180.38 Mpa , 보압 시간 20.2sec 와 같고 각 요소의 수축률 결과는 A는 -0.3633%, B는 -0.6899%, C는 -1.4282%, D는 0.2409%로 나타났다. CAE 프로그램을 통하여 해석한 결과는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 실험결과와 예측결과의 오차를 구하기 위하여 식 (13)을 이용하면 실험 결과 계산 S^2 은 2.7056이고, 예측결과 계산 SS^2 은 2.3697이다. 식 (14)를 통한 오차는 0.1128 으로 나타났다. Fig 3은 최적 결과 각 요소에 대한 수축률 그래프이고, Fig. 4는 수축률의 분포도 이고 Fig. 5 는 압력분포도이다.

5. 결 론

본 연구에서는 전자 오븐 부품 금형 설계를 위하여 사출조건에 따른 형상을 결정에 필요한 선정된 독립변수들에 대한 인자들을 직교 배열표를 사

용하여 실험횟수를 줄이고 DACE 방법을 통하여 최적의 설계조건을 찾고자 하였다. CAE 프로그램을 통하여 수축해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험에 의한 결과와 DACE 방법에 의한 예측치의 결과 비교를 통해서 최적화 과정의 타당성을 검증하였다.
- (2) DACE 방법을 통하여 전자 오븐 부품 금형 설계를 위한 최적 조건은 게이트 크기 0.85154mm, 러너 크기 10.2mm, 스프루 크기 6.0906mm, 보압 180.38 Mpa , 보압 시간 20.2sec이다.
- (3) 실험에 의한 결과와 DACE 방법에 의한 예측치의 결과의 오차는 식 (14)에 의해서 0.1128%로 나타났다.
- (4) 본 연구의 방법은 다른 전자제품의 부품에도 적용할 수 있고, 초기 설계단계에서 개선된 설계를 하는데 유용할 것이다.

참고문헌

1. Dubrule, O., 1983, "Two Methods with Different Objections, Splines and Kriging," Mathematical Geology, Vol. 15, pp.245-257.
2. Cressie, N., 1986, "Kriging Nonstationary Data," Journal of the American Statistical Association, Vol.8, pp.625-634
3. Chung, H. S. and Alons, J. J., 1995, "Comparison of Approximation Models with Merit Functions for Design Optimization," American Institute of Aeronautics and Astronautics, 8th AIAA/SUAF /NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Optimization, Hampton, March 13-16, VA, SIAM, pp.315-329.
4. Bacchi, B. and Kottegoda, N. T., 1995, "Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns of Rain Fall," Journal of Hydrology, Vol.165, pp. 311-348.
5. Mardia et al., 1996, "Kriging and Splines with Derivative Information," Boimetrica, Vol. 83, pp. 207-221.