

Mahalanobis Taguchi System을 이용한 사출 공정의 최적설계

김경모*, 박종천**,#

*금오공과대학교 산업공학부, **금오공과대학교 기계공학과

Optimal Design of Injection Molding Process using the Mahalanobis Taguchi System

Kyung-Mo Kim*, Jong-Cheon Park**,#

*School of Industrial Engineering, KIT, **Department of Mechanical Engineering, KIT

(Received 20 October 2016; received in revised form 15 November 2016; accepted 23 November 2016)

ABSTRACT

Warping is a major defect frequently found in the injection molding process, and the reduction of warpage is a very challenging problem because of the uncontrollable factors, such as variations in the process parameters. Without any countermeasure against these noises, attempts to reduce the defects often lead to failure. In this research, a new robust design methodology, based on the Mahalanobis Taguchi System (MTS) to reduce warpage, is presented. The MTS performs the orthogonal array experiments and uses the signal-to-noise (SN) ratio of the Mahalanobis distance as a performance metric. The validity of the proposed method is illustrated through an optimal design of the injection molding process of a CPU base plate.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Mahalanobis Taguchi System(마하라노비스 다구찌 시스템), Robust Design(강건 설계), Warpage(휨)

1. 서 론

플라스틱 사출성형은 용융된 고분자 수지를 고압으로 금형에 주입하고 냉각시켜 제품을 생산한다. 이것은 복잡한 형상의 제품뿐만 아니라 고정밀도를 갖는 제품까지 저렴한 비용으로 가공할 수 있어서 다양한 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 사출제품의 속성은 사용한 고분자 수지, 제품 형상, 제품 치수, 금형, 사출 공정조건 등에 의해 결정되며, 휨(warping)은 사출성형에서 발생하는

대표적인 불량으로서 설계한도를 벗어나면 치수 정밀도에 문제가 발생한다^[1-3].

사출공정은 공정조건의 변동이 심하고 이를 제어하기가 쉽지 않다. 따라서 최초로 설정한 공정조건을 일정하게 유지하기가 어려우며, 이것은 휨의 변동이 커지는 결과를 발생시킨다. 따라서 이와 같은 설계자가 통제할 수 없는 공정변동(이하 잡음)에 대한 설계대응이 없으면 사출공정에서 작은 크기의 휨을 안정적으로 얻을 수 없다^[4].

최근에는 CAE 기술을 사용하여 사출제품의 설계 단계에서 불량률의 발생여부를 예측하고 이것을 설계에 반영한다^[5]. 즉 제품 모델에 대해 선택된 다수의 측정위치에서 해석소프트웨어를 사용하여 휨을 계산하고 이로부터 최적 성형조건을 결정한다

Corresponding Author : cadpark@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7297, Fax: +82-54-478-7319

다. 다수의 위치에서 측정된 힘은 제품 형상 등에 영향을 받아 이들 사이에 특정한 상관관계 (correlation)를 갖는다. 그러나 기존의 힘에 대한 연구들은 이러한 상관관계를 고려하지 않았기 때문에 측정치의 평가를 정확히 할 수 없는 한계를 가지고 있다^[6].

본 연구에서는 공정조건에 변동이 존재하는 상황에서 다수의 힘 사이에 존재하는 상관관계를 고려하여 힘을 안정적으로 최소화시킬 수 있는 강건 설계 방법을 제시하고자 한다. 또한 컴퓨터 중앙처리장치의 베이스 플레이트(CPU base plate) 성형을 위한 사출공정 설계문제에 적용하여 제시한 강건 설계 방법이 설계자의 설계 의도에 따라 특정한 위치의 힘을 통제할 수 있음을 보이고자 한다.

2. Mahalanobis Taguchi System(MTS)

MTS는 반도체 공정의 최적화 등 다양한 설계 최적화 문제에 사용되어 왔다^[4]. MTS에서는 정상 집단(normal group)으로부터 다차원의 기준 공간(Mahalanobis space)을 정의하고, 임의의 다변량 측정치가 기준 공간의 원점에서 얼마나 떨어져 있는가를 Mahalanobis 거리(이하 MD)로 나타낸다. MD는 다변량 데이터를 단일한 수치로 평가하는 수단으로서, 측정 항목간의 상관을 고려하기 때문에 그렇지 못한 Euclidean 거리(이하 ED)에 비해 다변량 측정치의 질적 수준을 보다 정확히 평가할 수 있다^[7]. 즉 측정 항목들이 서로 독립적이면 MD와 ED는 동일하나, 상관관계가 존재하는 다변량 데이터의 분석에서 이를 무시하고 거리를 구하게 되면 정확한 거리 평가를 할 수 없게 된다.

설계 최적화에서 정상집단은 정상적인 시스템에서 출력된 설계 속성값을 갖는 집단을 의미한다. 의학적인 진단 데이터와 같이 정상집단이 비교적 명확한 경우도 있으나, 공학설계의 설계속성 데이터와 같은 경우에는 현재로서는 정상집단을 결정하는 명확한 기준이 없으며 설계자의 주관적 판단에 의해 결정된다. 그러나 MTS를 통해 결정되는 최적 설계조건은 정상집단에 의해 큰 영향을 받기 때문에, 설계자의 설계 의도에 따라 결정되는 설

계속성의 상대적 중요도를 고려하여 정상집단을 결정하는 체계적 절차가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 정상집단의 생성 방법을 제안하고, 이러한 방법을 이용하여 사출성형 사례연구를 실시하였다.

실험적 설계 최적화에서는 설계공간을 대표하는 실험점을 선택하고, 각 실험점에서 다수의 설계속성들에 대해서 데이터를 측정한다. 강건 설계에서는 내측 및 외측배열로 구성된 직교배열의 실험점이 설계공간을 대표한다. 따라서 직교배열실험에서 얻은 전체 데이터는 설계공간에서 얻을 수 있는 설계속성 데이터를 대표하는 것으로 볼 수 있다. 설계속성 데이터와 각 설계속성의 목표치 간의 차이는 설계목표에서 벗어난 편차(deviation)를 나타내며, 강건 설계에서 설계자는 최적화 과정을 통해서 잡음 하에서 이러한 편차를 최소화시키는 설계조건을 찾는다^[4]. 본 연구에서는 정상집단의 설계속성은 설계 목표치를 중심으로 정규분포를 한다고 가정한다. 품질관리에서 제품 속성의 분포는 일반적으로 정규분포로 가정하는 것을 고려할 때 이러한 전제는 현실적인 것으로 판단된다. 난수(random number)를 이용하여 정상집단을 생성하기 위해서, 정규분포의 평균은 설계 목표치로 추정하고, 분산은 전체 설계실험에서 측정된 속성값의 MSD(mean squared deviation)로 추정한다. MSD는 측정된 속성(y)의 설계목표(m)에서 벗어난 편차제곱의 기대치($E[(y-m)^2]$)를 의미하며, 이것은 강건 설계에서 최적화하고자 하는 SN비에 반비례한다^[4]. 설계 목표치를 분포의 중심으로 사용하는 것은 정상집단의 의미를 볼 때 타당한 것이며, MSD를 산포의 척도로 사용하는 것은 설계를 통해 최소화 하고자 하는 편차가 설계 목표값을 기준으로 양 또는 음의 값을 가질 수 있으므로 양의 편차와 음의 편차를 동일하게 취급하기 위해서 채택된 수단이다. 이러한 전제 하에서 정상집단은 이와 같은 방법으로 모수가 결정된 정규분포에서 Fig. 1과 같이 평균(여기서 힘의 설계 목표값은 0 임)에서 좌우 대칭적으로 설계자가 미리 결정한 비율($w\%$) 안에 속한 속성값을 난수를 이용하여 생성한다. 상대적 중요도가 큰 설계속성은 w 를 작게 설정하고, 상대적 중요도가 작은 설계 속성

은 w 를 크게 설정한다. 여기서 w 는 해당 설계속성에 대해 정상적인 속성범위를 고려하여 설계자가 선택한다. 각 설계속성에 대해 30개(일반적인 통계분석에서 사용하는 데이터의 크기)의 데이터를 생성하여 정상집단을 결정한다.

강건 설계에 사용하기 위한 MD의 계산은 정상집단의 정규화, 측정 데이터의 정규화, 상관행렬의 계산, MD의 계산으로 이루어진다⁷⁾. 설계속성 i 에 대한 p 번째 생성된 정상집단 데이터를 x_{ip} 라고 하면, 이는 식(1)과 같이 정규화된다.

$$X_{ip} = (x_{ip} - m_i) / s_i \quad (i = 1, \dots, k, p = 1, \dots, P) \quad (1)$$

여기서, m_i 와 s_i 는 설계속성 i 의 정상집단 데이터의 평균과 표준편차이다. 주어진 설계조건에서, 잡음조건 j 에서 설계속성 i 의 측정치를 y_{ij} 라고 하면, 이는 식(2)와 같이 정규화 된다.

$$Z_{ij} = (y_{ij} - m_i) / s_i \quad (i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, J) \quad (2)$$

설계속성 u 와 v 사이의 상관계수는 식(3)과 같이 구한다. 그리고 상관행렬 $R = [r_{uv}]_{k \times k}$ 은 주대각원소의 값이 1인 대칭행렬이다.

$$r_{uv} = \frac{1}{P-1} \sum_{p=1}^P X_{up} X_{vp} \quad (u, v = 1, \dots, k) \quad (3)$$

주어진 설계조건에서, 잡음조건 j 에서 얻어진 k 개의 설계속성에 대한 MD는 식(4)와 같이 계산된다.

$$MD_j = \frac{1}{k} Z_j R^{-1} Z_j^T \quad (j = 1, \dots, J) \quad (4)$$

여기서, $Z_j = (Z_{1j}, \dots, Z_{kj})$ $j = 1, 2, \dots, J$ 이다. 본 연구 3절의 사례연구에서는 30개의 정상집단 데이터, 6개의 설계속성, 그리고 4개의 잡음조건을 사용하므로 $P=30$, $k=6$, $J=4$ 이다. 또한 힘은 망소특성이므로 주어진 설계조건에서의 MD에 대한 SN비는 식(5)와 같다.

$$SN = -10 \log \left(\sum_{j=1}^J MD_j / J \right) \quad (dB) \quad (5)$$

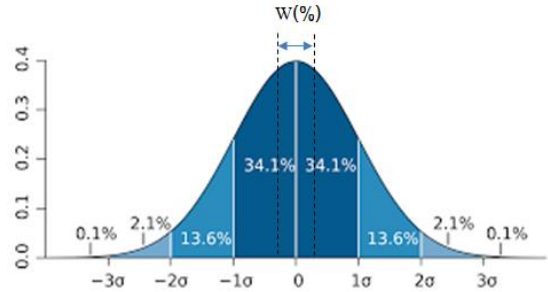


Fig. 1 Range for normal group generation

3. 사출공정의 강건 설계

사출성형에서 제품의 치수 정밀도를 높이기 위해서 힘을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 힘의 주된 원인은 수지의 불균일한 수축에 기인한 내부 응력이며, 힘을 최소화시키기 위해서는 수지의 수축에 영향을 미치는 공정변수들을 최적화하여야 한다⁸⁾. 일반적으로 수지의 수축은 수지유동, 보압, 냉각 및 결정화의 불균일성, 제품 형상 등에 기인한다고 알려져 있다⁹⁾. 또한 사출성형의 공정변수들은 초기에 설정된 값을 공정이 진행되는 과정 중에 정확하게 유지하기 힘들기 때문에, 설계과정에서 이러한 변동을 고려하는 것이 필요하다¹⁰⁾. 따라서 본 사례의 설계목표는 잡음이 존재하는 사출성형 공정에서 힘의 크기를 안정적으로 최소화시키는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 2에 제시된 컴퓨터 중앙처리장치의 베이스 플레이트를 제품 모델로 사용하였다. 이것을 최소화대 육면체(minmax box)로 근사화 하면 $209.6 \times 454.4 \times 19.1$ (mm)이다. 이 제품은 현행조건에서 불균일한 수축률 분포로 인해 두께 방향(Z축 방향)으로 힘이 크다는 문제를 가지고 있다.

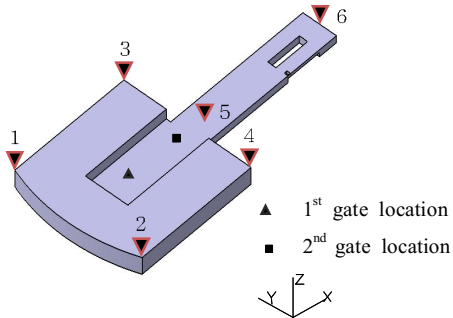


Fig. 2 3D CAD model of a CPU base plate

휨에 영향을 준다고 판단되는 사출공정의 설계 변수는 게이트 위치(A), 사출 시간(B), 수지 온도(C), 금형 온도(D), 보압(E), 보압 시간(F), 냉각 시간(G)이다. Table 1은 최적화 실험에 사용된 7개의 공정변수들의 수준값이다. 공정변수 중에서 변동이 큰 사출 시간(B), 수지 온도(C), 금형 온도(D)의 변동(Δ)을 잡음변수로 선택하였고, Table 2의 수준값으로 고려하였다. 잡음변수의 수준값은 공정변수의 초기 조건이 공정과정 중에 변동 가능한 최대 범위를 의미한다.

설계변수는 L_{18} 직교배열의 1~7열에 알파벳 순서로, 잡음변수는 L_4 직교배열의 1~3열에 알파벳 순서로 배치하였다. 내측배열 L_{18} 과 외측배열 L_4 를 이용한 교차실험에서 사출성형 해석소프트웨어인 Moldflow^[11]를 이용하여 휨의 크기를 계산하였다. 본 연구에서는 제품이 박막의 평판 형상임을 고려해서 중립면(mid-plane) 방식으로 메쉬 모델을 생성하여 휨 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 삼각형 요소의 개수는 763개이며 절점의 수는 417개이다.

공정조건 최적화 실험에 사용된 고분자 수지는 Generic ABS(Stylac ABS 121)이며, 냉각은 균일하게 이루어진다고 가정하였다. Table 3의 y_i ($i=1, 2, \dots, 6$)는 4가지 잡음조건 (N1~N4) 하에서 6개의 측정위치에서 계산된 휨 값으로, 편의상 소수점 2째 자리에서 반올림하였다. Fig. 2에 6개의 측정위치를 역삼각형으로 표시하였고, 각 측정점을 구별하기 위해 역삼각형에 1부터 6까지 번호를 표시하였다.

Table 1 Design factors and levels

Design factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	1st	2nd	
B(sec.)	1	1.5	2
C($^{\circ}$ C)	220	240	260
D($^{\circ}$ C)	40	60	80
E(%)	60	80	100
F(sec.)	3	5	7
G(sec.)	10	20	30

휨은 각 측정위치의 기하학적 조건에 따라 서로 영향을 주기 때문에 이들 간에는 특정한 상관관계가 존재하며, 본 연구의 2절에서 제안한 방법으로 정상집단을 구성하여 휨에 대한 MD를 계산할 수 있다. MD에 대한 SN비의 평균분석을 통해 잡음 하에서 휨을 안정적으로 최소화시키는 최적조건을 결정할 수 있다. 평균분석의 상세한 절차는 참고 문헌^[7]에 설명되어 있다.

4. 확인 실험 및 토의

본 연구에서 제안한 사출성형 공정조건에 대한 강건 설계 방법의 유용성을 보이기 위해 현행조건 $A_2B_3C_2D_2E_2F_2G_2$ 과 3가지 설계 의도를 반영하여 결정된 최적조건을 비교하였다. 설계자의 설계 의도는 Fig. 2에 표시된 각 측정위치에서의 휨에 대한 상대적 중요도를 부여하는 것으로써 반영된다. 즉 설계자의 설계 의도에 따라 부여된 w_i 를 이용하여 정상집단을 생성하고, 이로부터 휨에 대한 MD를 계산한다.

Table 2 Noise factors and levels

Noise factor	Level 1	Level 2
ΔB (sec.)	-0.1	0.1
ΔC ($^{\circ}$ C)	-7	7
ΔD ($^{\circ}$ C)	-5	5

Table 4에 각 설계 의도에 대하여 MD의 SN비를 최대화시키는 최적조건과 이러한 조건에서 Moldflow로 계산한 잡음조건 하에서의 휨 값 $y_1 \sim y_6$ 을 제시하였다. 또한 최적조건에서의 휨에 대한 SN비와 목표치로부터의 편차의 평균도 제시하였다. 정상집단이 최적조건에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Fig. 2의 1~4번 위치에서 측정된 휨 ($y_1 \sim y_4$)은 상대적 중요도가 작은 속성으로 간주하여 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 30\%$ 로 설정하고, Fig. 2의 5~6번 위치에서 측정된 휨(y_5 와 y_6)은 상대적 중요도가 큰 속성으로 간주하여 $w_5 = w_6 = 30\%$, $w_5 = w_6 = 20\%$, $w_5 = w_6 = 10\%$ 로 변경하면서 결과를 구하였다. Table 4 (a)의 현행조건과 (d)의 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 30, w_5 = w_6 = 10$ 인 경우에 대해 최적조건에서의 휨을 Fig. 3에 비교하였다. Table 5 (a)는 $w_5 = w_6 = 30$ 를 $w_5 = w_6 = 20$ 으로 변경한 경우에 최적조건에서 6개의 위치에서의 휨에 대한 개선(또는 악화)의 크기를 제시하였고, (b)는 $w_5 = w_6 = 20$ 를 $w_5 = w_6 = 10$ 으로 변경한 경우에 최적조건에서 6개의 위치에서의 휨에 대한 개선(또는 악화)의 크기를 제시하였다.

Table 4와 5로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다. 첫째, 사출공정의 설계에는 강건 설계가 유용하다. 현행조건의 휨에 대한 SN비와 MTS를 이용하여 구한 최적조건의 휨에 대한 SN비를 비교해보면, 강건 설계를 통하여 휨에 대한 강건성이 증가함을 확인할 수 있다. 둘째, w_i 가 작아지면, 최적조건에서의 휨에 대한 SN비는 커진다. 휨에 대한 요구가 엄격할수록 최적조건에서 휨에 대한 SN비는 커진다. 셋째, w_i 가 작아지면, 최적조건에서 해당 휨이 작아진다. w_5 와 w_6 가 30%, 20%, 10%로 작아질 때, y_5 와 y_6 가 작아짐을 알 수 있다. 이것은 특정 위치에서의 휨에 대한 설계 의도가 설계에 반영된 결과라고 해석할 수 있다. 넷째, 다수의 w_i 가 작아지면 해당 휨이 작아지나, 나머지 휨 중에서 일부는 설계자가 기대한 대로 커지거나 일부는 오히려 작아질 수도 있다. 이것은 작은 w_i 값으로 지정된 휨과 양의 상관관계가 있는 휨에서 이러한 상황이 발생할 수 있다. Table 5에서

Table 3 Warpages for the cross-product experiment

(continued)

No.		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
1	N1	1.4	1.5	-1.8	-1.8	-2.2	4.5
	N2	1.3	1.4	-1.8	-1.8	-2.0	4.2
	N3	1.3	1.4	-1.7	-1.7	-2.1	4.2
	N4	1.4	1.4	-1.8	-1.8	-2.1	4.3
2	N1	1.3	1.4	-1.7	-1.7	-2.2	4.4
	N2	1.3	1.4	-1.7	-1.7	-2.1	4.2
	N3	1.3	1.3	-1.6	-1.6	-2.0	4.2
	N4	1.3	1.4	-1.7	-1.7	-2.1	4.4
3	N1	1.2	1.2	-1.5	-1.5	-2.0	4.0
	N2	1.2	1.2	-1.5	-1.5	-1.9	3.9
	N3	1.1	1.2	-1.4	-1.4	-1.8	3.8
	N4	1.2	1.2	-1.5	-1.5	-2.0	4.0
4	N1	1.3	1.3	-1.5	-1.5	-2.2	4.5
	N2	1.3	1.4	-1.7	-1.7	-2.2	4.5
	N3	1.3	1.3	-1.5	-1.5	-2.2	4.3
	N4	1.3	1.4	-1.6	-1.6	-2.2	4.5
5	N1	1.1	1.2	-1.3	-1.3	-2.0	4.0
	N2	1.2	1.2	-1.4	-1.4	-2.0	4.0
	N3	1.1	1.1	-1.3	-1.3	-1.9	3.9
	N4	1.2	1.2	-1.4	-1.4	-2.0	4.1
6	N1	1.0	1.1	-1.5	-1.5	-1.7	3.5
	N2	0.9	1.0	-1.4	-1.4	-1.6	3.2
	N3	0.9	1.0	-1.4	-1.4	-1.6	3.3
	N4	1.0	1.0	-1.5	-1.5	-1.6	3.4
7	N1	0.9	1.0	-1.2	-1.2	-1.9	4.1
	N2	1.0	1.0	-1.1	-1.1	-1.9	3.8
	N3	0.8	0.9	-1.0	-1.0	-1.7	4.1
	N4	1.0	1.0	-1.2	-1.2	-2.0	3.9
8	N1	1.1	1.1	-1.6	-1.6	-1.8	3.6
	N2	1.0	1.0	-1.4	-1.5	-1.6	3.3
	N3	1.0	1.0	-1.4	-1.5	-1.7	3.4
	N4	1.0	1.1	-1.5	-1.5	-1.7	3.5
9	N1	1.4	1.4	-1.8	-1.8	-2.2	4.6
	N2	1.3	1.4	-1.8	-1.8	-2.2	4.4
	N3	1.3	1.3	-1.7	-1.7	-2.2	4.4
	N4	1.3	1.4	-1.8	-1.8	-2.2	4.5

No.		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
10	N1	1.1	1.5	-1.6	-1.6	-1.6	3.3
	N2	1.0	1.0	-1.5	-1.6	-1.5	2.9
	N3	1.0	1.0	-1.5	-1.5	-1.5	3.0
	N4	1.1	1.1	-1.6	-1.7	-1.6	3.2
11	N1	1.4	1.5	-2.1	-2.1	-2.0	4.1
	N2	1.3	1.4	-1.8	-1.9	-1.9	3.8
	N3	1.3	1.4	-1.9	-2.0	-1.9	3.9
	N4	1.4	1.5	-2.0	-2.1	-2.0	4.0
12	N1	1.1	1.1	-1.8	-1.8	-1.4	2.8
	N2	1.0	1.0	-1.7	-1.8	-1.3	2.5
	N3	1.0	1.0	-1.7	-1.8	-1.4	2.6
	N4	1.0	1.1	-1.8	-1.9	-1.4	2.7
13	N1	1.3	1.3	-1.8	-1.9	-1.8	3.6
	N2	1.1	1.2	-1.8	-1.8	-1.6	3.1
	N3	1.2	1.2	-1.8	-1.8	-1.7	3.4
	N4	1.2	1.3	-1.9	-1.9	-1.7	3.4
14	N1	1.1	1.1	-1.6	-1.7	-1.6	3.1
	N2	1.0	1.0	-1.6	-1.6	-1.4	2.7
	N3	1.0	1.0	-1.5	-1.6	-1.4	2.8
	N4	1.1	1.1	-1.6	-1.7	-1.5	3.0
15	N1	1.3	1.4	-1.8	-1.9	-2.0	3.9
	N2	1.3	1.3	-1.7	-1.8	-1.9	3.7
	N3	1.3	1.3	-1.7	-1.8	-1.9	3.7
	N4	1.3	1.4	-1.8	-1.9	-2.0	3.9
16	N1	1.0	1.1	-1.4	-1.4	-1.6	3.1
	N2	1.0	1.0	-1.4	-1.4	-1.5	2.9
	N3	0.9	1.0	-1.3	-1.3	-1.5	2.9
	N4	1.0	1.1	-1.4	-1.5	-1.6	3.1
17	N1	1.4	1.4	-2.1	-2.1	-2.0	3.8
	N2	1.3	1.3	-2.0	-2.0	-1.8	3.4
	N3	1.3	1.4	-2.1	-2.1	-1.9	3.7
	N4	1.3	1.3	-2.0	-2.0	-1.9	3.6
18	N1	1.2	1.3	-1.8	-1.9	-1.8	3.4
	N2	1.1	1.2	-1.8	-1.8	-1.6	3.1
	N3	1.2	1.2	-1.8	-1.8	-1.7	3.2
	N4	1.2	1.2	-1.8	-1.9	-1.7	3.3

Table 4 Comparisons between initial and optimal designs for 3 normal groups

(a) Current process condition

$$A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2 \quad SN=-6.11 \quad \text{mean}=1.88$$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	1.25	1.29	-1.76	-1.81	-1.83	3.62
N2	1.17	1.20	-1.76	-1.82	-1.67	3.29
N3	1.18	1.21	-1.71	-1.77	-1.72	3.39
N4	1.25	1.28	-1.82	-1.88	-1.80	3.53

(b) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = 30$

$$A_2B_3C_1D_3E_1F_3G_1 \quad SN=-4.79 \quad \text{mean}=1.60$$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	1.06	1.10	-1.51	-1.56	-1.65	3.19
N2	0.95	0.99	-1.37	-1.44	-1.48	2.87
N3	0.95	0.99	-1.36	-1.41	-1.50	2.90
N4	1.06	1.10	-1.53	-1.58	-1.62	3.15

(c) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 30, w_5 = w_6 = 20$

$$A_2B_3C_1D_3E_1F_1G_1 \quad SN=-4.62 \quad \text{mean}=1.59$$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	1.07	1.11	-1.58	-1.64	-1.59	3.02
N2	0.94	0.96	-1.52	-1.59	-1.35	2.57
N3	0.98	1.01	-1.51	-1.56	-1.46	2.77
N4	1.06	1.09	-1.66	-1.71	-1.53	2.90

(d) $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 30, w_5 = w_6 = 10$

$$A_2B_3C_3D_3E_1F_1G_1 \quad SN=-3.75 \quad \text{mean}=1.48$$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	0.98	0.99	-1.67	-1.74	-1.36	2.57
N2	0.83	0.84	-1.57	-1.64	-1.12	2.09
N3	0.89	0.90	-1.57	-1.64	-1.24	2.32
N4	0.93	0.93	-1.67	-1.73	-1.28	2.38

w_5 와 w_6 가 작아지면 y_5 와 y_6 는 작아지며, Table 5 (b)에서와 같이 y_5 와 y_6 가 작아지는 과정에서 커질 것으로 기대되는 y_1 과 y_2 가 y_5 나 y_6 와 양의 상관관계를 갖는 경우 오히려 작아질 수 있다. 이는 y_5 와 y_6 가 작아질 때 양의 상관을 갖는 y_1 과 y_2 가 따라서 작아지고 이에 따라 y_3 와 y_4 가 커지는 절충에 기인한다고 해석할 수 있다.

Table 5 Improvement of warpages by changing condition A to condition B(unit : %)

(a) condition A : $w_1 \sim w_4 = 30, w_5 = w_6 = 30$
 condition B : $w_1 \sim w_4 = 30, w_5 = w_6 = 20$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	-0.94	-0.91	-4.64	-5.13	3.64	5.33
N2	1.05	3.03	-11.0	-10.4	8.78	10.5
N3	-3.16	-2.02	-11.0	-10.6	2.67	4.48
N4	0.00	0.91	-8.50	-8.23	5.56	7.94

(b) condition A : $w_1 \sim w_4 = 30, w_5 = w_6 = 20$
 condition B : $w_1 \sim w_4 = 30, w_5 = w_6 = 10$

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
N1	8.41	10.8	-5.70	-6.10	14.5	14.9
N2	11.7	12.5	-3.29	-3.14	17.0	18.7
N3	9.18	10.9	-3.97	-5.13	15.1	16.3
N4	12.3	14.7	-0.60	-1.17	16.3	17.9

5. 결 론

사출성형에서 휨은 제품의 치수 정밀도를 결정하는 중요한 설계속성이다. 특히 정밀한 조립이나 외관이 요구되는 상황에서 그 중요성은 더욱 커진다. 사출성형은 공정조건의 변동이 심하기 때문에 이에 대한 설계대응이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 MTS를 사용한 사출성형 공정의 강건 설계 방법을 제시하고 그 유용성을 확인하였다.

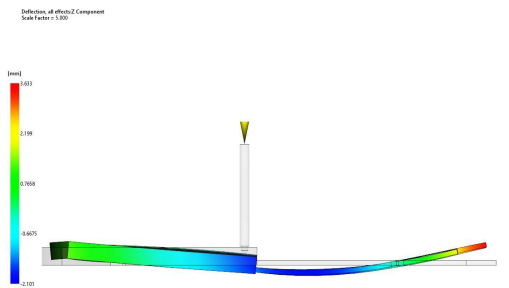
컴퓨터 중앙처리장치의 베이스 플레이트 사출성형 사례연구를 통하여 본 연구에서 제시한 정상집단 생성방법은 설계자의 설계 의도를 설계과정에 반영할 수 있는 수단이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 MTS의 설계평가에 사용하는 MD는 설계속성간의 상관관계를 고려하기 때문에 다변량 측정 데이터에 대한 정확한 평가가 가능하다. 따라서 다양한 기계 가공 공정에 대해 MTS를 이용한 설계 최적화 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

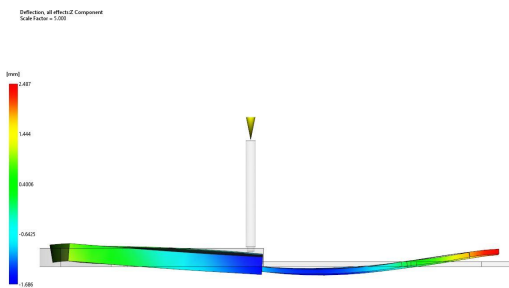
“이 논문은 2014년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Malloy, R. A., Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction, Hanser/Gardner Publishers Inc., Cincinnati, pp. 75-84, 1994.
2. Ni, S., "Reducing Shrinkage and Warpage for Printer Parts by Injection Molding Simulation Analysis," J. of Injection Molding Technology, Vol. 6, No. 3, pp. 177-186, 2002.
3. Subramanian, N. R., Tingyu, L. and Seng, Y. A., "Optimizing Warpage Analysis for an Optical Housing," Mechatronics, Vol. 15, Issue 1, pp. 111-127, 2005.
4. Taguchi. G., Chowdhury. S., and Wu. Y., TAGUCHI'S Quality Engineering HANDBOOK,



(a) Initial design $A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$



(b) Optimal design for 30%-10%

Fig. 3 Comparison of the warpages(scale factor : 5)

- Wiley, pp. 957-964, pp. 397-421, pp. 183-184 and pp. 318-339, 2004.
5. Min, B. H., "A Study on Quality Monitoring of Injection-Molded Parts," J. of Materials Processing Technology, Vol. 136, Issues 1-3, pp. 1-6, 2003.
 6. Hong, J. E. and Kwon, H. K., "Selecting Optimal Design Condition Based on Automobile Brake Feeling Using Mahalanobis Taguchi System," J. of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 41-47, 2007.
 7. Taguchi, G. and Jugulum, R., The Mahalanobis-Taguchi Strategy, Wiley, pp. 21-22 and pp. 33-39, 2002.
 8. Park, J. C., Kim, K. H., Kim, K. M., and Koo, B. H., "Minimization of Warpage in Injection-Molded Parts by Optimal Design of U-Type Ribs," J. of KSMPE, Vol. 7, No. 1, pp. 53-61, 2008.
 9. Lee, B. H. and Kim, B. H., "Optimization of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection-Molded Parts Based on The Modified Complex Method," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 793-811, 1995.
 10. Chen, R. S., Lee, H. H. and Yu, C. Y., "Application of Taguchi's Method on the Optimal Process Design of an Injection Molded PC/PBT Automobile Bumper," Composite Structures, Vol. 39, Nos 3-4, pp. 209-214, 1997.
 11. ED&C, Autodesk Moldflow Insight: The 4th edition of AMI Korean Manual, ED&C Inc., 2009.