

# 통합 만족도를 고려한 사출성형공정의 강건 설계

김경모<sup>\*,#</sup>, 박종천<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>금오공과대학교 산업공학부, <sup>\*\*</sup>금오공과대학교 기계공학과

## Robust Design of an Injection Molding Process Considering Integrated Desirability

Kyung-Mo Kim<sup>\*,#</sup>, Jong-Cheon Park<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>School of Industrial Engineering, KIT, <sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, KIT

(Received 23 July 2019; received in revised form 31 July 2019; accepted 5 August 2019)

### ABSTRACT

Warpage and weld line are two major cosmetic defects in the injection molding process. These defects are very sensitive to uncontrollable parameters within the process. The optimization of the design variables can be treated with the use of robust designs. Therefore, in order to minimize the warpage and weld line, a special design method to diminish defects is required. In this study, a new robust design method using designer preference to achieve the optimal robust design conditions in the injection molding process is proposed. The effectiveness of the proposed method is shown with an example of the part of warpage and weld line.

**Key Words** : Injection Molding(사출 성형), Integrated Desirability(통합 만족도), Robust Design(강건 설계), Designer Preference(설계자 선호도), Warpage(휨), Weld Line(웰드라인)

### 1. 서 론

사출성형공정은 유동 상태의 고분자 수지를 금형에 주입하여 금형의 캐비티 형상과 동일한 성형품을 만드는 가공공정이다<sup>[1]</sup>. 제품의 외관을 구성하는 다양한 사출성형품은 휨(warpage)과 웰드라인(weld line)이라는 설계특성이 매우 중요하며, 그간 이들에 대한 다양한 설계 방법이 연구되어 왔다<sup>[2,3]</sup>.

사출성형에서 설계 최적화를 위해서 휨 또는 웰드라인과 설계변수 사이의 수학적 관계를 규명하는 것은 매우 어렵다. 따라서 다양한 유형의 기계적 가공공정에서 실험에 기초한 설계 방법이 연구되어

왔다<sup>[4,5]</sup>. 설계 실험은 직접적 실험 외에 컴퓨터 소프트웨어를 이용한 실험도 존재한다. 특히 사출성형은 공정의 특성상 설계자가 통제할 수 없는 다양한 설계특성의 변동 원인이 존재한다. 이러한 설계특성의 변동 원인을 설계에서는 잡음(noises)이라고 부른다. 따라서 잡음에 대하여 설계자가 적절히 대응하지 않으면 설계특성의 산포라는 문제를 발생시킨다. 사출성형공정에서는 설계특성인 휨과 웰드라인 사이에 상충(conflict)이 발생하는 경우가 많다. 설계특성 사이에 상충이 발생하면 설계에서 절충(trade-off) 하는 과정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 설계자가 통제할 수 없는 잡음이 있고, 다수의 서로 상충하는 설계특성이 존재하는 경우에 사용가능한 실험적 설계 방법을 제안하고자 한다. 또한 제안된 설계 방법을 사례연구에 적용하여 그 유

# Corresponding Author : [kmkim@kumoh.ac.kr](mailto:kmkim@kumoh.ac.kr)

Tel: +82-54-478-7653, Fax: +82-54-478-7679

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용성을 검토하고자 한다.

## 2. 다수의 설계특성과 통합 만족도

설계 문제에는 다수의 서로 상충하는 설계특성이 존재한다. 상충하는 설계특성이 있을 때 하나의 설계특성이 개선된다고 해서, 다른 설계특성이 개선된다는 보장은 없다. 다수의 설계특성을 최적화하는 다양한 설계 방법이 개발되어 있으며, 그 중에서 설계특성에 대한 설계자 선호도(designer preference)를 평가하는 만족도(desirability)라는 지표가 있다. 만족도는 0과 1사이의 수치로서, 크기가 클수록 선호도가 높다는 것을 의미한다. 만족도는 단일한 설계특성에 대한 선호도이고, 통합 만족도(integrated desirability)는 다수의 설계특성에 대한 선호도이다<sup>[6]</sup>.

만약 설계특성  $y_i$ 의 최악의 결과 값(worst result)이  $y_i^0$  이고 최선의 결과 값(best result)이  $y_i^*$  이라면, 만족도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 실제로 공학적 설계에서 이러한 형태의 함수가 많이 사용되고 있다. 여기서  $r_i$ 는 설계특성  $i$ 의 만족도를 결정하는 상수이다.

$$d_i(y_i) = ((y_i^0 - y_i) / (y_i^0 - y_i^*))^{r_i} \quad (1)$$

만약  $n$  개의 설계특성  $y_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )에 대하여 최악의 결과 값이  $y_i^0$ 이고 최선의 결과 값이  $y_i^*$ 일 때, 이들에 대한 통합 만족도는 식(2)와 같다. 여기서  $k_i$ 는 설계특성  $y_i$ 의 상대적 중요도(relative importance)를 나타내는 상수로서, 이들의 합은 1이 된다.

$$d(y_1, y_2, \dots, y_n) = \prod_{i=1}^n k_i d_i(y_i) \quad (2)$$

본 연구 4절의 사례연구에서 사용되는 힙과 웰드라인에 대한 통합 만족도를 미리 구하여 본다. 설계자에 대한 질문을 통해서 힙  $y_1$ 에 대한 최악의 결과 값이  $y_1^0 = 0.5$ , 최선의 결과 값이  $y_1^* = 0.0$ , 만

족도 0.5를 갖는 힙  $y_1$ 이 0.1 즉  $d_1(y_1=0.1) = 0.5$  이면,  $r_1 = \ln(0.5) / \ln((0.5-0.1)/(0.5-0.0)) \approx 3.1063$  이 되고 만족도는 식(3)과 같이 된다.

$$d_1(y_1) = ((0.5 - y_1) / (0.5 - 0.0))^{3.1063} \quad (3)$$

웰드라인  $y_2$ 에 대한 최악의 결과 값이  $y_2^0 = 50$ , 최선의 결과 값이  $y_2^* = 0$ , 만족도 0.5를 갖는 웰드라인  $y_2$ 가 15 즉  $d_2(y_2=15) = 0.5$  이면,  $r_2 = \ln(0.5) / \ln((50-15)/(50-0)) \approx 1.9434$  이 되고 만족도는 식(4)와 같이 된다.

$$d_2(y_2) = ((50 - y_2) / (50 - 0))^{1.9434} \quad (4)$$

통합 만족도를 결정하기 위해서는 설계특성에 대한 상대적 중요도  $k_1$ 과  $k_2$ 를 결정하여야 한다. 여기서  $k_2 = 1 - k_1$  이므로 사실은 최적의  $k_1$  값을 결정하여야 한다. 만약 설계자가  $y_1$ 과  $y_2$ 의 상대적 중요도가 동일하다고 답변했다면,  $(k_1, k_2) = (0.5, 0.5)$ 가 되어 통합 만족도 함수는 식(5)와 같이 된다.

$$d(y_1, y_2) = 0.5 \times d_1(y_1) + 0.5 \times d_2(y_2) \quad (5)$$

사례연구에서 다양한  $k_1$ 과  $k_2$ 의 조합에 대해서 통합 만족도가 계산될 것이며, 아울러 최적의  $k_1$ (또는  $k_2$ )을 결정하는 방법도 자세히 설명할 예정이다.

## 3. 사출성형공정의 강건 설계

사출성형품에 외관 불량 발생하면 이를 보정하기 위한 추가적 비용이 발생한다. 사출성형의 대표적인 외관 불량은 힙과 웰드라인으로, 본 연구에서는 이에 대한 설계 최적화 방법을 다룬다. 사출성형은 공정의 특성상 기존에 설정된 공정 조건을 일정하게 유지하기가 힘들다. 또한 사출성형은 힙과 웰드라인과 같은 다수의 설계특성을 갖는다. 따라서 과거에는 잡음을 무시하고 최적 설계안 후보를 결정 한 후에, 후보에 대한 사후분석을 통하여 잡음이

문제를 발생시키는지 여부를 추가적으로 분석하는 방법을 주로 사용하였다.

실험계획법(DoE)에서는 잡음의 영향을 실험에서 제외한다. 이와는 반대로 강건 설계(robust design)에서는 잡음의 영향을 실험 데이터에 적극적으로 반영하여 최적 강건 설계안을 구한다. 휨과 웰드라인과 같은 망소 특성의 SN비(signal-to-noise ratio)는

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - 0)^2 \right] \text{ (dB)}$$

이다. 여기서,  $n$

은 관측 횟수이다. 즉 망소(smaller-the-better) 특성의 SN비는  $y$ 의 설계특성의 설계 목표치  $m=0$ 에서 측정된 MSD(mean squared deviation)의 크기에 반비례한다. 여기서 MSD는 “ $y$ 의 설계목표치  $m$ 에서 측정된  $y$ 의 산포”의 기대치  $E[(y-m)^2]$ 를 의미한다. 따라서 강건 설계에서 망소 특성 SN비를 최대화시키면, 휨과 웰드라인의 설계목표치  $m=0$ 에서의 산포가 최소화되고, 결과적으로 휨과 웰드라인을 최소화시킬 수 있다. 한편 만족도는 망대(larger-the-better) 특성으로 이는 망소 특성의 역수로 정의할 수 있다. 따라서 만족도에 대해서도 위에서 살펴본 망소 특성에 대한 분석과 유사한 설명이 가능할 것이다.

본 연구에서는 잡음이 있고 다수의 상충하는 설계특성이 있는 경우에 적용할 수 있는 강건 설계 방법을 제안하고자 한다. 제안된 강건 설계 방법은 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다. (단계1) 분석 모형의 결정, (단계2) 만족도 함수의 결정, (단계3) 설계 실험의 구성과 실행, (단계4) 실험 분석과 설계 최적화이다.

#### 4. 사출성형공정의 사례연구

사례의 모델은 Fig. 1의 capacitor can 이다. 모델은 한쪽 방향으로 열려 있는 뚜껑 형태의 모양으로 상측 면, 하측 면, 옆면으로 구성되어 있다. 제품의 폭은 39(mm), 길이는 33(mm), 높이는 11(mm), 게이트가 위치할 옆면 중심선의 직선 길이는 14(mm)이다. Fig. 2는 성형해석을 위해서 생성한 제품, 게이트, 러너, 스프루의 유한요소 모델로서, 사용할 수 있는 PC/Lupoy SC-1004A 이고 실험에 사용할 시물

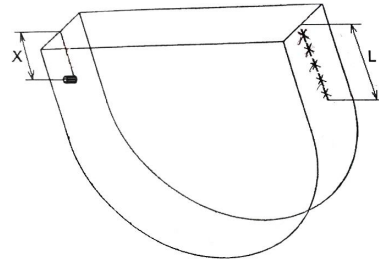


Fig. 1 3-D view of the capacitor can model<sup>[4]</sup>

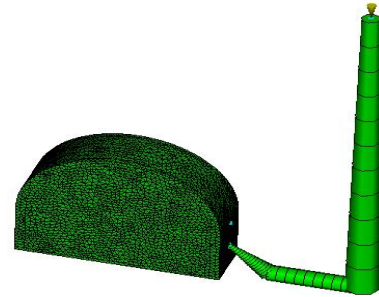


Fig. 2 Finite element model for analysis

레이터는 Moldflow 이다<sup>[7]</sup>.

최적화할 설계특성은 휨과 웰드라인이며, 제품의 3개 벽면의 두께, 게이트 위치, 공정 조건에 의해 이들이 결정된다. 측정을 위해서 휨과 웰드라인은 다음과 같이 정의한다. Fig. 3은 휨의 해석결과의 예로서, 유한요소 모델의 전체 절점들에 대한 성형 후 변위(deflection)의 분포를 보여준다. 본 연구에서 휨은 유한요소 절점들의 변위 중에서 최대 변위로 정의한다. 웰드라인은 게이트의 반대쪽 옆면에 발생될 수 있는데, 게이트 위치와 3개 벽면의 두께에 따른 유동선단의 전진 속도에 의해 결정된다. 유동선단이 동시에 만나면 웰드라인은 발생하지 않는다. Fig. 4는 웰드라인이 발생된 경우 해석결과의 예로서, (a)는 게이트 반대쪽 옆면에서 3개의 유동선단이 만나기 직전의 결과이고, (b)는 발생된 웰드라인을 나타낸다. 본 연구에서 웰드라인은 유동선단이 서로 만나는 유한요소 절점 사이의 길이의 합으로 정의한다.

사례의 설계변수는 Table 1과 같다. 게이트 위치

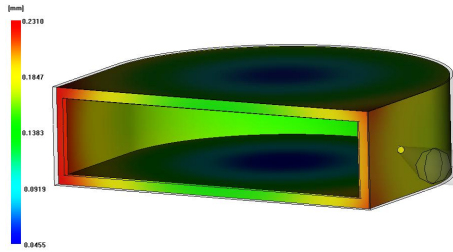
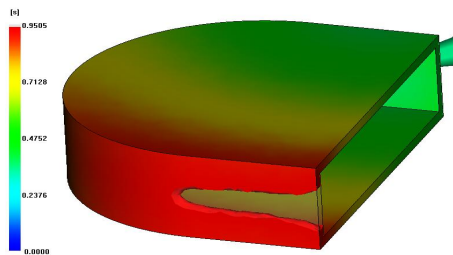
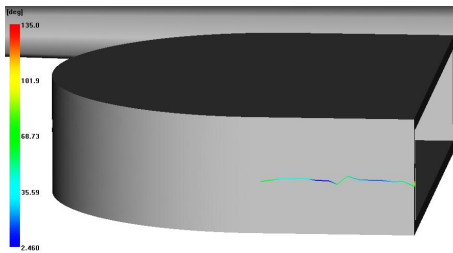


Fig. 3 Example of warpage analysis results



(a)



(b)

Fig. 4 Example of weld line analysis results

(X), 제품 상하면 두께(Y), 옆면 두께(Z), 사출 시간(A), 수지 온도(B), 금형 온도(C), 보압(D)이다. 또한 균일 냉각을 가정하여 냉각 해석은 별도로 시행하지 않고, 보압 시간은 4초 냉각 시간은 15초로 한다. 사례에서 잡음변수의 개수가 많으므로, 잡음변수를 결합하기 위한 잡음실험(noise factor experiment)을 실시한다. 설계변수 중에서 X, Y, Z는 현재로서는 가장 바람직하다고 판단되는 수준인 Table 1의 2수준으로 설정하고, 잡음변수  $\Delta A$ - $\Delta D$ 는 Table 1의 설계변수 A-D의 2수준을 기준으로 Table 2와 같이 설정한다. 잡음변수를  $L_{12}$ 의 1열에서 4열까지 배치하여 휨과 웰드라인을 계산하고, 이에 대한 평균분석을 Minitab으로 실시한다<sup>[8]</sup>. 평

균분석은 이미 잘 알려진 방법인 관계로 추가적 설명은 생략한다. 위와 같은 실험을 통하여 4개의 잡음변수를 2수준 조합잡음(N)으로 결합한다. 조합잡음 1수준은  $N_1 = \Delta A_1 \Delta B_1 \Delta C_2 \Delta D_2$ , 2수준은  $N_2 = \Delta A_2 \Delta B_2 \Delta C_1 \Delta D_1$  이 된다. 조합잡음으로 결합하는 과정은 참고문헌에 설명되어 있다<sup>[9]</sup>.

설계 실험은 다음의 2가지 방식으로 이루어진다. 제안된 방법(the proposed method)은 본 연구의 3절에서 제안된 강건 설계 방법을 의미하고, 전통적 방법(the traditional method)은 잡음을 무시한 설계 방법을 말한다. 위의 2가지 설계 방법의 차이는 제안된 방법은 잡음을 고려한 강건 설계 방법이고, 전통적 방법은 잡음을 고려하지 않는 실험계획에 기초한 설계 방법이다. 강건 설계 실험은 잡음 하에서 통합 만족도를 구한 후 이에 대한 SN비를 최대화시키는 최적 강건 설계안을 구하는 것이다. 전통적 실험은 잡음을 고려하지 않고, 실험으로부터 통합 만족도를 구한 후 이를 최대화시키는 최적 설계안을 구하는 것이다. 여기서 강건(robust)이 의미하는 것은 잡음을 최적화 실험에 고려한다는 것이다. 우선 제안된 방법으로 최적 강건 설계안을 구하고, 휨과 웰드라인을 추정한다. 다음에 전통적 방

Table 1 Design variables and levels

Design variables	Units	Level 1	Level 2	Level 3
X	mm	0	7	14
Y	mm	1.2	1.5	1.8
Z	mm	1.2	1.5	1.8
A	sec	0.5	1	1.5
B	$^{\circ}C$	270	290	310
C	$^{\circ}C$	50	70	90
D	%	50	70	90

Table 2 Noise variables and levels

Noise variables	Units	Level 1	Level 2
$\Delta A$	sec	0.9	1.1
$\Delta B$	$^{\circ}C$	282	298
$\Delta C$	$^{\circ}C$	65	75
$\Delta D$	%	60	80

**Table 3 Warpages and weld lines of experiment**

No	Warpages		Weld lines	
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
1	0.2105	0.2463	20.48	17.67
2	0.2153	0.2382	17.33	17.28
3	0.2315	0.2474	15.78	13.31
4	0.2308	0.2310	13.32	14.03
5	0.2442	0.2698	7.66	5.49
6	0.2323	0.2485	21.91	15.78
7	0.2226	0.2420	2.07	2.06
8	0.2525	0.2826	0.01	0.01
9	0.2419	0.2634	44.50	44.30
10	0.2071	0.2431	0.01	0.01
11	0.3420	0.3352	31.84	26.46
12	0.1738	0.2061	28.28	29.72
13	0.1822	0.2251	0.01	0.01
14	0.1993	0.2248	14.03	8.46
15	0.2653	0.2969	45.20	37.83
16	0.2307	0.2534	0.01	0.01
17	0.2009	0.2266	21.95	24.32
18	0.2720	0.2956	27.38	27.34

**Table 4 Desirability of warpages and weld lines**

No	D of warpage		D of weld line	
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
1	0.18	0.12	0.36	0.43
2	0.17	0.13	0.44	0.44
3	0.14	0.12	0.48	0.55
4	0.20	0.15	0.55	0.53
5	0.12	0.09	0.72	0.80
6	0.14	0.12	0.33	0.48
7	0.16	0.13	0.92	0.92
8	0.11	0.08	1.00	1.00
9	0.13	0.10	0.01	0.01
10	0.19	0.13	1.00	1.00
11	0.03	0.03	0.14	0.23
12	0.27	0.19	0.20	0.17
13	0.24	0.16	1.00	1.00
14	0.21	0.16	0.53	0.70
15	0.10	0.06	0.01	0.06
16	0.15	0.11	1.00	1.00
17	0.20	0.15	0.33	0.27
18	0.09	0.06	0.21	0.21

법으로 최적 설계안을 구하고, 휨과 웰드라인을 추정한다. 이러한 2가지 방법으로 추정한 휨과 웰드라인을 서로 비교하여, 제안된 방법이 더 좋은 설계 방법이라는 것을 확인하려고 한다.

제안된 방법의 실험은 아래와 같다. 설계변수는  $L_{18}$  의 2열에서 8열까지 내측배열에 배치하고, 조합 잡음은 외측배열에 배치한다. Table 3과 같이 휨과 웰드라인을 Moldflow 로 계산하고, 식(3)과 식(4)를 사용하여 Table 4의 만족도를 구한다. 여기에 식(5)를 사용하여 Table 5의 휨과 웰드라인에 대한 통합 만족도를 구한다. 통합 만족도의 SN비로부터 Table 6의 최적 강건 설계안을 결정한다. Table 6에서 P1은  $k_1=0.1$ , P2는  $k_1=0.5$ , P3은  $k_1=0.9$  인 상대적 중요도의 조건에서, 제안된 방법을 사용하여 실험을 실시했다는 것을 의미한다. 한편  $k_2=1-k_1$  이므로 본 연구에서는  $k_2$ 를 별도로 언급하지 않는다. P1에서 구한 최적 강건 설계안  $X_1Y_1Z_3A_1B_1C_3D_3$ 에 대해서, 휨은 0.1695(mm)과 0.2058(mm)으로 추정되고 웰드라인은  $N_1$ 과  $N_2$ 에서 모두 0(mm)으로 추정된다. 또한 Table 7에서  $k_1$ 이 0.1에서 0.9까

지 증가시키면, 휨은 작아지고 웰드라인은 모든 경우에 0(mm)이 된다. 여기서 웰드라인이 0(mm)이라는 추정 결과는 특별히 고려할 원인이 있다는 의미는 아니며, 모델이 자체적으로 가지고 있는 특성이다. 즉 웰드라인은 최적화가 용이한 설계특성이라고 할 수 있다.

전통적 방법의 실험은 아래와 같다. 설계변수는 내측배열  $L_{18}$  의 2열에서 8열에 배치한다. 잡음은 고려하지 않기 때문에 외측배열은 사용하지 않는다. 휨과 웰드라인을 Moldflow 로 계산하고, 식(3)과 식(4)를 사용하여 만족도를 구하고, 식(5)로 통합 만족도를 구한다. 통합 만족도로부터 최적 설계안을 Minitab 을 사용하여 결정한다. Table 8에서 T1은  $k_1=0.1$ , T2는  $k_1=0.5$ , T3은  $k_1=0.9$  인 상대적 중요도의 조건에서 실험한다는 것을 의미한다. T1에서 구한 최적 설계안  $X_3Y_1Z_3A_3B_1C_3D_3$ 에 대해서, 휨은 0.1851(mm)와 0.2173(mm)으로 추정되고 웰드라인은  $N_1$ 과  $N_2$ 에서 모두 0(mm)로 추정된다. 또한 Table 9에서  $k_1$ 이 0.1에서 0.9까지 증가시키면, 휨은 작아지고 웰드라인은 0(mm)이 된다.

**Table 5 Integrated desirability of the proposed method**

No	ID of P1		ID of P2		ID of P3	
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
1	0.34	0.40	0.27	0.28	0.20	0.15
2	0.41	0.41	0.31	0.29	0.20	0.16
3	0.45	0.51	0.31	0.33	0.18	0.16
4	0.51	0.49	0.37	0.34	0.23	0.18
5	0.66	0.73	0.42	0.44	0.18	0.16
6	0.31	0.44	0.23	0.30	0.16	0.15
7	0.85	0.84	0.54	0.52	0.24	0.21
8	0.91	0.91	0.56	0.54	0.20	0.17
9	0.03	0.02	0.07	0.06	0.12	0.09
10	0.92	0.91	0.59	0.56	0.27	0.21
11	0.13	0.21	0.08	0.13	0.04	0.05
12	0.20	0.18	0.23	0.18	0.26	0.19
13	0.92	0.92	0.62	0.58	0.32	0.24
14	0.50	0.64	0.37	0.43	0.24	0.21
15	0.02	0.06	0.05	0.06	0.09	0.06
16	0.91	0.91	0.57	0.56	0.23	0.20
17	0.31	0.26	0.26	0.21	0.21	0.17
18	0.20	0.20	0.15	0.14	0.10	0.08

**Table 6 Optimal designs for the proposed methods**

Design variables	Units	P1	P2	P3
$X$	mm	1	2	2
$Y$	mm	1	1	1
$Z$	mm	3	3	3
$A$	sec	1	3	3
$B$	$^{\circ}C$	1	1	1
$C$	$^{\circ}C$	3	3	1
$D$	%	3	3	3

**Table 7 Warpages and weld lines of optima designs for the proposed method**

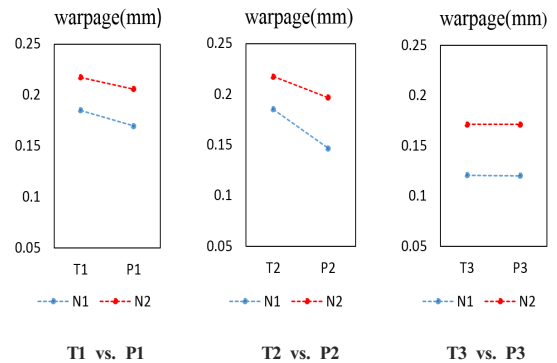
Optimal designs	Warpages		Weld lines	
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
P1 ( $k_1 = 0.1$ )	0.1695	0.2058	0.00	0.00
P2 ( $k_1 = 0.5$ )	0.1465	0.1967	0.00	0.00
P3 ( $k_1 = 0.9$ )	0.1203	0.1714	0.00	0.00

**Table 8 Optimal designs for the traditional methods**

Design variables	Units	T1	T2	T3
$X$	mm	3	3	2
$Y$	mm	1	1	1
$Z$	mm	3	3	3
$A$	sec	3	3	3
$B$	$^{\circ}C$	1	1	1
$C$	$^{\circ}C$	3	3	1
$D$	%	3	3	3

**Table 9 Warpages and weld lines of optimal designs for the traditional method**

Optimal designs	Warpages		Weld lines	
	$N_1$	$N_2$	$N_1$	$N_2$
T1 ( $k_1 = 0.1$ )	0.1851	0.2173	0.00	0.00
T2 ( $k_1 = 0.5$ )	0.1851	0.2173	0.00	0.00
T3 ( $k_1 = 0.9$ )	0.1207	0.1714	0.00	0.00



**Fig. 5 Comparison of warpages between the proposed method and the traditional method**

지금까지 2차례 실시한 설계 실험의 결과를 이용하여 제안된 방법과 전통적 방법을 비교해 보자. 만약 설계자가 휨과 웰드라인에 대한 상대적 중요도가 동일하다고 답변했다면,  $(k_1, k_2) = (0.5, 0.5)$  이 된다. Table 7과 Table 9의 결과로부터 Fig. 5를 작성하였다. 제안된 방법의 최적 강건 설계안은  $X_2 Y_1 Z_3 A_3 B_1 C_3 D_3$  이 되고, 이때의 휨은  $N_1$ 에서

0.1465(mm)  $N_2$ 에서 0.1967(mm) 이고 웰드라인은  $N_1$ 과  $N_2$ 에서 모두 0(mm)이다. 전통적 방법의 최적 설계안은  $X_3 Y_1 Z_3 A_3 B_1 C_3 D_3$  이고, 이때의 휨은  $N_1$ 에서 0.1851(mm)  $N_2$ 에서 0.2173(mm) 이고 웰드라인은  $N_1$ 과  $N_2$ 에서 모두 0(mm)이다. 휨의 경우를 Fig. 5에서 살펴보면, P2가 T2에 비해서 휨이 항상 더 작은 결과를 주는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 비교해 볼 때, 제안된 방법이 전통적 방법에 비해 더 좋은 설계 방법이라는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 설계특성에 대한 상대적 중요도  $k_1$ 의 최적화 방법을 생각해 보자. 만약  $k_1$ 의 최적치를 정확하게 구하기 위해서는 의사결정이론(decision making theory)의 방법을 사용하여야 한다<sup>[10]</sup>. 그러나 이러한 분야에 관심이 있다면 별도의 연구가 필요할 것이다. 본 연구에서는 다음과 같은 간단한 방법을 이용하여  $k_1$ 의 최적치를 결정한다. 우선 설계자가  $k_1$ 에 대한 최적의 수치  $k_1^*$ 을 설계자에 대한 질문을 통하여 결정한다. 그리고  $k_1^*$ 보다 작은 값  $k_1^L$ 과  $k_1^*$ 보다 큰 값  $k_1^R$ 을 추가로 선택한다. 여기서 간격을 0.1로 선택하면,  $k_1^L = k_1^* - 0.1$ 과  $k_1^R = k_1^* + 0.1$ 와 같이 된다. 만약 필요하다면 간격을 0.1보다 작게 또는 크게 결정할 수도 있다. 즉 간격은 설계 상황에 따라 설계자가 시행착오적으로 결정할 수 있다. 이렇게 선택된  $k_1^L$ ,  $k_1^*$ ,  $k_1^R$ 에 대해서 휨과 웰드라인을 계산하고, 이들을 비교하여 최적의  $k_1$  값을 결정한다. 이러한 방법은 설계 실험에서 이미 구해 놓은 자료에 약간의 수치 계산을 추가한 것으로, 최적의  $k_1$ 을 근사적으로 결정할 수 있게 해준다.

## 5. 결 론

사출성형공정의 외관 불량은 휨과 웰드라인이다. 본 연구에서는 잡음 하에서 이들 설계특성을 동시에 최소화할 수 있는 강건 설계 방법을 제안하였다. 휨과 웰드라인은 많은 경우에 상충하는 경우를 보이기 때문에, 설계 최적화가 어려운 설계특성이

었다. 본 연구에서는 사례연구를 통하여 이들을 동시에 최소화하는 설계 실험을 실시하였다. 이러한 실험을 통해서 설계특성의 상대적 중요도가 통합 선호도를 통하여 설계안의 평가에 적절히 반영되고, 결과적으로 과거의 설계 방법보다 더 좋은 결과를 주는 설계안도 구할 수 있게 해 주었다. 특히 사출성형공정은 잡음의 영향이 큰 공정이므로, 상대적 중요도의 절충 효과를 확실히 확인할 수 있었다.

설계 최적화에서 상대적 중요도와 설계특성간의 관계를 결정하는 것은 매우 중요한 사항이다. 특히 잡음이 있고 다수의 설계특성이 존재하는 경우에, 강건 설계 방법의 선택은 올바른 결정이 될 것이다. 또한 강건 설계를 사출성형 이외의 공정에 적용해 보는 것도 큰 의미를 가질 것이다. 강건 설계를 통해서 해당 공정의 작동원리를 더 정확히 고려함으로써, 더 좋은 최적 설계안을 구할 수 있을 것이다. 예를 들어, 박판성형에서 스프링백(springback)은 특정한 조건을 경계로 크기의 변동이 심하고 성형공정이 잡음의 영향을 많이 받기 때문에, 설계 최적화 과정에 강건 설계가 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다<sup>[11]</sup>.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다.

## REFERENCES

1. 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.
2. Park, J. C., et al., "Minimization of Warpage in Injection-Molded Parts by Optimal Design of U-Type Ribs," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,, Vol. 7, No. 1,

pp. 53-61, 2008.

3. Kim, K. M., and Park, J. C., "Minimization of Warpage of Injection Molded Parts using Dynamic Robust Design," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 44-50, 2015.
4. Park, J. C., and Kim, K. M., "Optimization of Injection Molding Design Using Two-Characteristic Value Function Methodology," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 36-43, 2015.
5. Yin, J. J., "Optimization of Sheet Metal Forming Process by Using Decision-Making Theory," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 125-136, 2012.
6. Derringer, G., and Suich, R., "Simultaneous Optimization of Several Response Variables," Journal of Quality Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 214-219, 1980.
7. Hwang, S. H., et al., Moldflow Basic Course, ED&C Inc., 2018.
8. Eretec, Quality Trainer, Eretec Inc., 2017.
9. Fowlkes, W. Y., and Creveling, C. M., Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 167-189, pp. 125-145, 1995.
10. Keeney, R. L., and Raiffa, H., Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs, Cambridge University Press, 1993.
11. Kim, K. M., and Yin, J. J., "Robust Design of Springback in Sheet Metal Forming," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 41-48, 2013.