

리브 형상과 공정조건의 최적설계에 의한 사출제품 휨의 안정적 최소화에 관한 연구

박종천#, 김경모*, 이종찬**, 구본흥***

A Study on the Robust Minimization of Warpage in Injection-Molded Part via the Optimal Design of Rib Geometry and Process Conditions

Jong-Cheon Park#, Kyung-Mo Kim*, Jong-Chan Lee**, Bon-Heung Koo***
(Received 8 July 2009; received in revised form 27 August 2009; accepted 31 August 2009)

ABSTRACT

In the study, a design methodology for robust minimization of a warpage in injection-molded part is presented. Taguchi's parameter design method is integrated with a computer simulation tool for injection molding to search for best design with robustness against the process variability by noises. The proposed methodology is based on a two-stage process: (1) reducing a warpage in the part by optimizing the part geometry including the layout and size of ribs, and (2) additionally minimizing the warpage by optimizing process conditions. An example is used to illustrate the usefulness of the design methodology.

Key Words : Plastic Injection Molding(플라스틱 사출성형), Warpage(휨), Robustness(강건성), 최적설계(Optimal Design), ANOVA(분산분석), Mean Analysis(평균분석)

1. 서 론

플라스틱 제품의 품질을 좌우하는 성형결함은 여러 가지 형태가 있다. 그 중에서 휨(warpage)은 성형과정을 통해 제품 내에 발생한 불균일한 잔류응력

분포가 원인이 되어 제품이 원래의 설계형상을 벗어나 변형되는 현상을 말한다¹⁻⁶. 휨 발생으로 인해 제품의 치수가 설계 허용오차범위를 벗어나는 경우에는 조립 부품이나 최종 제품으로서 기능을 상실하게 되므로 결국 재설계를 위한 시간과 비용 손실이 불가피해진다. 그러므로 사출성형 제품에서 높은 치수 정밀도를 확보하여 조립 적합성이나 제품 미관을 충족시키기 위해서는 휨의 크기를 최소화하는 것이 매우 중요해진다. 한편 사출성형은 공정변동이 불가피하게 발생하며, 이로 인해 제품의 품질 편차가 발생하는 공정 특성이 있다. 이것은 여러 가지 내재적

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : cadpark@kumoh.ac.kr

* 금오공과대학교 산업시스템공학부

** 금오공과대학교 기계공학부

*** (주)브이엠테크

원인으로 인해 초기에 사출기에 설정한 공정조건의 명목수준(nominal level)이 공정 진행 동안에 일정하게 유지되지 못하기 때문이다⁷⁾. 그런데 문제는 이러한 공정변동의 원인을 실질적으로 제어하기가 어렵다는데 있다. 따라서 이러한 기술적 배경으로부터 고품질의 제품을 균일하게 얻기 위해서는 공정의 변동에도 불구하고 휨을 안정적으로 최소화할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 공정변동에도 불구하고 휨의 크기를 최소화하기 위한 사출성형 설계방법을 제안하고자 한다. 또한 이를 박스형 제품 모델에 적용해 봄으로써 제안된 설계방법의 유용성을 보이고자 한다.

2. 휨의 안정적 최소화를 위한 설계방법

품질의 변동을 초래하는 제어가 곤란한 요인을 잡음변수(noise factor)라고 한다. Taguchi에 의한 강건설계는 품질특성을 잡음변수들의 영향에 둔감하게 함으로써 제품의 품질변동을 줄이기 위한 설계방법이다⁸⁻¹²⁾. 일반적으로 잡음을 제거하는 일은 기술적 또는 비용적 측면에서 어려운 경우가 많으므로 잡음을 제거하지 않고서도 품질특성을 안정적으로 얻을 수 있는 강건설계(robust design)는 현실적으로 매우 바람직한 설계방법이 된다.

Taguchi는 제품의 수명주기 동안 사회가 입는 손실로서 품질을 평가한다. 망소특성(smaller-the-better characteristic)의 경우, 사회적 손실의 기대치는 식 (1)과 같이 추정된다⁸⁻¹²⁾. 여기에서 k 는 품질특성에 따른 상수이고 μ 와 σ^2 은 각각 품질특성의 평균치와 분산이다. 따라서 기대손실을 최소화시키면 품질특성의 평균과 분산이 동시에 최소화된다.

$$L = k[\mu^2 + \sigma^2] \quad (1)$$

Taguchi는 설계대안이 잡음에 의해 영향을 받는 정도(강건성, robustness)를 신호 대 잡음비(S/N ratio)로 평가한다. 사출성형에 있어서 휨은 망소특성으로서 S/N비는 식 (2)와 같이 정의된다⁸⁻¹²⁾. 따라서 S/N비의 최대화(기대손실의 최소화)를 통해 휨의 평균과

분산이 최소화된다. 여기에서 N 은 직교배열의 각 행에서 얻은 실험 데이터의 수이고, Y_i 는 측정된 휨의 값이다.

$$S/N = -10 \log[L] \cong -10 \log \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right\} \quad (2)$$

설계대안의 강건성을 평가하기 위해서는 잡음에 의한 품질 변동을 모델링할 수단이 필요하며, Taguchi는 외측배열(outer array)을 이용하여 이를 구현한다. 즉 제어할 수 있는 설계변수(design factor)는 내측배열(inner array)에 배치하고, 제어할 수 없는 잡음변수는 외측배열에 배치한다.

유한요소법에 기반을 둔 사출성형해석 시뮬레이션에는 상당한 계산 노력이 요구된다. 또한 강건성의 평가를 위해 외측배열이 사용됨으로써 그 부담은 증가한다. 따라서 해석 시뮬레이션을 이용한 사출성형의 강건설계를 위해서는 실험 횟수를 줄이는 노력이 필요하다. 본 연구에서는 다수의 잡음변수를 통합한 복합잡음인자를 사용하고, 사출과정을 형상설계와 공정설계의 2단계 과정으로 이원화하여 접근하는 방법을 사용한다. 이원화된 설계는 일차적으로 주요 공정변수를 잡음변수로 두고 최적의 제품 형상정보를 얻고, 이차적으로 최적화된 제품형상을 기준으로 공정조건에 대한 강건설계를 수행하게 된다. 동시공학적인 관점에서 형상설계와 공정설계는 동시에 이루어지는 것이 효과적이거나, 이 경우 설계변수의 증가에 따라 실험 조건의 수가 기하급수적으로 증가하게 되므로 시간적 제약을 갖는 사출성형 엔지니어의 요구에 부응할 수 없게 된다. 특히 잡음변수를 고려해야 하는 강건설계에서는 실험 횟수를 줄이기 위한 노력이 매우 중요하며 Taguchi도 설계변수가 8개를 넘는 경우에는 설계대상을 하부계(subsystem)로 분리한 후 L_{18} 직교배열을 사용하기를 권장하고 있다.

3. 박스형 제품의 휨의 안정적 최소화

3.1 최적화 문제 정의

Fig.1에 최적화 모델로 선정된 벽두께가 2.5(mm)

인 박스형 사각형 제품과 그 치수를 보였다. 이 모델에 대한 설계목표는 모델의 각 벽면에 리브(rib)를 설계하여 제품의 강성을 기본적으로 유지하면서 동

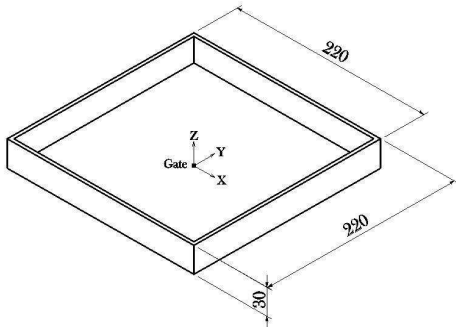
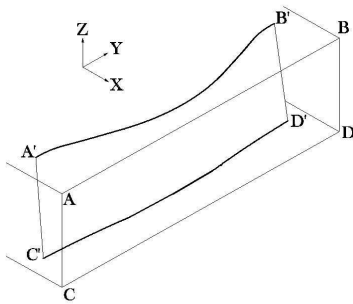
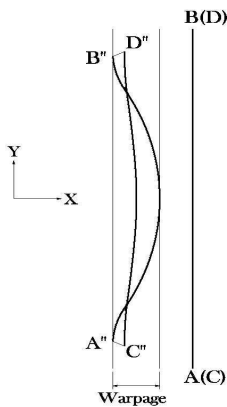


Fig. 1 Optimization model



(a)



(b)

Fig. 2 Definition of a warpage in the side wall of the model

시에 이 리브의 최적설계를 통해 네 벽면에 발생할 수 있는 휨의 크기를 최소화하는 것이다. 그러나 Fig.1의 최적화 모델의 경우에 냉각시스템을 통해 균일한 냉각이 이루어진다고 하더라도 제품(리브)과 공정조건에 대한 설계가 잘못될 경우에는 성형 후에 네 벽면은 필연적으로 휨이 발생하게 된다. 본 연구에서는 평면 형상인 벽면이 성형 후에 변형되어 평면 상태에서부터 또한 밀면과의 수직상태로부터 벗어난 정도를 벽면의 휨 크기로 정의하였다. 따라서 제품 수축에 따른 금형과의 치수 차이는 본 연구에서 다루고자 하는 휨의 정식화에 포함되지 않으며 휨이 최소화되고 난 후에 금형설계 과정에서 보정되는 것으로 가정하였다. Fig.2(a)에서 A-B-C-D는 벽면의 변형 전 프로파일(profile)이고, A'-B'-C'-D'는 변형 후의 프로파일을 다소 과장하여 나타낸 것이다. 휨 변형이 발생할 경우 A'-B'-C'-D'는 A-B-C-D와 일치하지 않을 것이기 때문에 A'-B'-C'-D'를 밀면, 즉 X-Y평면에 투영시킬 경우, Fig.2(b)에서처럼 A''-B''-C''-D''로 나타낼 수 있다. 따라서 벽면의 휨의 크기는 변형 전 벽면의 두께 방향(Fig.2(b)에서 X방향)으로 측정된 변형 후 프로파일(A''-B''-C''-D'')의 직직도(straightness)로 계산할 수 있다. 만약 벽면이 휨 변형 없이 이상적으로 성형된다면 벽면의 변형 후 프로파일은 하나의 직선으로 투영될 것이므로 이때의 직직도는 영(zero)이 된다.

본 연구에서는 Fig. 1의 모델에 대해 이원화된 최적화 단계를 통해 설계목표를 이루고자 하였다. 첫 번째 단계에서는 제품의 형상 최적화를 통해 제품의 강성을 확보하면서 동시에 휨을 일차적으로 줄이고, 두 번째 단계에서는 최적화된 제품형상에 대해 공정조건을 최적화함으로써 휨을 추가적으로 줄여 최소화한다. 먼저 본 연구에서는 제품형상 최적화를 위해 리브에 대한 최적설계를 수행하고자 하였다. 리브는 제품의 중요한 기하학적 구성 요소이다. 따라서 리브의 위치와 높이 및 두께의 변화에 따라 제품 전체에 대한 수지의 유동과 냉각 특성이 달라지고 이것은 잔류응력으로 인한 휨 발생에 원인으로 작용할 뿐만 아니라^[1,2] 제품의 구조적 강도도 변하게 된다. 본 연구에서는 리브에 대한 최적설계를 수행함에 있어 리브에 의한 제품 강도보다 휨의 안정적 최소화를 최우선 설계목표로 하였다. 따라서 제품 설

계자가 제품의 강성을 만족시킬 수 있는 리브 설계 변수들의 설계허용범위를 판단하여 설정하고, 이 설계허용범위 내에서 휨이 최소화되는 최적의 리브를 설계함으로써 제품 벽면의 휨 최소화와 제품 강도를 근사적으로 모두 만족하도록 하였다. 한편 바닥면을 포함한 제품면의 벽두께도 휨 발생에 영향을 미칠 수 있으나 여기에서는 벽두께에 대한 설계제한을 고려하고 문제를 단순화하기 위해 제품의 벽두께는 고정시키고 리브의 최적설계만을 고려하였다. 두 번째 단계에서는 최적화된 제품 형상에 대해 공정조건들을 최적화함으로써 휨의 크기를 추가적으로 줄여서 최소화하도록 하였다. 본 연구에서는 사출성형 시물 레이션을 위해 상용 소프트웨어인 CAPA^[13]를 사용하였으며 제품 수지는 PP(Poly Propylene)이다.

3.2 리브 형상의 최적설계

리브의 최적설계를 위해 Fig. 3에 보인 것처럼 동일한 형상과 크기의 리브 4개를 각 벽면에 수직한 방향으로 2개씩을 제품 중심에 대해 대칭 형상으로 배치하고, 리브의 위치(L_R), 높이(H_R) 및 두께(t_R)를 설계변수로 선택하였다. Table 1은 리브 설계변수들에 대해 설계자가 부여한 2수준값을 나타낸다. 이때 Table 1에 제시된 수준의 조합에 의해 결정되는 어떠한 리브 형상도 제품의 강성을 만족시킨다고 가정한다. 또한 잡음에 대해 안정적인, 즉 강건한 설계해를 얻기 위해 사출온도(T_{melt}), 금형온도(T_{mold}), 사출시간(t_{fill})을 잡음변수로 선택하였다. 이 공정조건들은 성형 싸이클의 불연속성과 사출기 제어의 불완전한 작동 등으로 인해 공정 중에 불가피하게 변

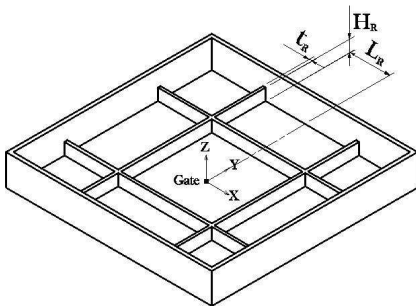


Fig. 3 Design factors selected for the part optimization

Table 1 Design factors and levels for part optimization

Design factor	Level 1	Level 2
L_R (mm)	30.0	70.0
H_R (mm)	7.0	23.0
t_R (mm)	1.0	1.4

Table 2 Noise factors and levels for part optimization

Noise factor	Level 1	Level 2
T_{melt} (°C)	205	245
T_{mold} (°C)	50	80
t_{fill} (sec)	0.5	2.5

Table 3 Composite noise factor for part optimization

Level 1		Level 2	
205	T_{melt} (°C)	245	
50	T_{mold} (°C)	80	
2.5	t_{fill} (sec)	0.5	

동이 일어날 수 있다^[7]. 이 세 가지 총진과 관련된 공정조건은 제품 품질의 일관성, 즉 품질 변동에 가장 큰 영향을 미치는 변수들로 알려져 있고^[14], 사출성형 강건설계를 위한 관련 연구들^[7,14,15]에서 잡음변수로 채택되어 왔다. 잡음변수와 수준을 Table 2에 나타내었다. 한편 잡음조건을 고려한 실험의 횟수를 줄여서 효과적으로 잡음에 대한 강건성을 측정하기 위해 복합잡음변수(composite noise factor)^[10]를 모델링하였다. Table 2의 잡음변수들로부터 새로운 복합잡음변수의 수준을 결정하기 위해 먼저 나머지 공정조건들은 명목수준값에 고정시키고 각 잡음변수의 1수준과 2수준 각각에서 실험을 실시하여 휨 값을 계산한다. 이어서 잡음변수들의 1, 2수준 중 휨 값이 작게 나오는 수준들의 조합을 복합잡음변수의 1수준으로 하고 휨 값이 크게 나오는 수준들의 조합을 2수준으로 결정한다. 이와 같은 절차에 따라 결정된 복합잡음변수의 수준조합을 Table 3에 보였다.

설계변수와 잡음변수(복합잡음변수)가 결정되면 리브 형상 최적화를 위해 설계변수가 3개뿐이고 모두 2수준인 점을 고려하여 2^3 형 완전요인설계(full factorial design)에 기초한 교적실험을 실시하였다. 따

라서 설계변수의 각 수준의 모든 조합, 즉 $8(=2^3)$ 개의 서로 다른 설계대안으로 내측배열을 구성하고, 외측배열로는 Table 3의 복합잡음변수의 1, 2수준을 사용하였다. 이때 실험을 위해 보압과 관련한 설계변수들은 명목수준값으로 고정시켰다. 설계자가 부여한 명목수준값은 보압시간은 3(sec), 보압 프로파일은 80(%), 후충전시간은 15(sec)이다. Table 4는 전체 실험을 수행하여 휨과 S/N비를 계산한 결과이다. 평가 결과 5번째 설계대안이 S/N비(=3.96)가 가장 큰 것으로 나타났으며, 따라서 이 설계대안이 리브 형상 최적화 단계에서 결정된 강건설계해가 된다. 이 강건설계해에 해당하는 리브의 위치(L_R)는 70(mm), 높이(H_R)는 7(mm)이고 두께(t_R)는 1(mm)이다. 또한 이 강건설계해에서 휨의 평균은 0.5791(mm)이고 표준편차는 0.3636(mm)로 나타났다.

3.3 공정조건의 최적설계

최적화된 제품 형상에 대해 공정조건을 최적화하기 위해 충전과정과 보압과정에 관련된 주요 공정조건들을 설계변수로 선정하였다. 본 연구에서는 불균일한 냉각분포에 의한 휨 발생은 고려하지 않았다. 따라서 냉각은 제품 전체에서 균일하게 이루어진다고 가정하고 냉각해석은 별도로 실시하지 않았다. 설계변수로 선택한 공정조건은 보압시간(t_{pack}), 보압 프로파일(%)(P_{pack}), 후충전시간($t_{post-fill}$), 사출시간(t_{fill}), 금형온도(T_{mold}), 사출온도(T_{melt})이다. Table 5는 선정된 설계변수와 3수준값을 나타낸다.

Table 4 DOE experiment result for part optimization

Run	Control factor			Composite noise factor		S/N ratio
	L_R	H_R	t_R	1	2	
1	30	7	1	0.6400	1.5019	-1.25
2	30	7	1.4	1.0012	1.2136	-0.93
3	30	23	1	0.5767	1.5749	-1.48
4	30	23	1.4	0.8427	1.1132	0.11
5	70	7	1	0.3220	0.8362	3.96
6	70	7	1.4	0.5588	0.7299	3.74
7	70	23	1	0.5260	1.6761	-1.88
8	70	23	1.4	0.8458	1.2378	-0.51

Table 5 Processing condition factors and levels

Design factor	Level 1	Level 2	Level 3
t_{pack} (sec)	1	3	5
P_{pack} (%)	60	80	100
$t_{post-fill}$ (sec)	10	15	20
t_{fill} (sec)	0.6	1.5	2.4
T_{mold} (°C)	55	65	75
T_{melt} (°C)	213	225	237

Table 6 Composite noise factor for process conditions optimization

Level 1		Level 2
-8	T_{melt} (°C)	+8
-5	T_{mold} (°C)	+5
+0.1	t_{fill} (sec)	-0.1

또한 공정조건 최적화 과정에서도 잡음에 대해 안정적인 설계해를 얻기위해 사출온도, 금형온도, 사출시간을 잡음변수로 선택하고 제품형상 최적화 단계에서와 동일한 방법으로 복합잡음변수를 모델링하였다. 다만 이 공정조건 최적화 단계에서는 잡음변수들이 동시에 설계변수가 되게 선택하였으므로 잡음변수의 1, 2수준을 기준값으로부터 일정한 값의 변동량으로 설정하였다. 모델링된 복합잡음변수의 수준조합을 Table 6에 보였다. 일단 설계변수와 잡음변수(복합잡음변수)가 결정되면 최적의 강건설계해를 탐색하는 과정이 필요하다. 제품형상 최적화 단계에서와 마찬가지로 최적해를 탐색하기위해 교적 직교배열 실험에 기초한 실험계획을 수립하였다. 이를 위해 내측배열로 Taguchi가 제안한 직교배열 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 을 선택하여 2열부터 7열까지 6개의 열에 Table 5의 설계변수들을 차례대로 배치하고, 외측배열로는 Table 6의 복합잡음변수의 1, 2수준을 사용하였다. Table 7은 실험계획에 따라 총 36번의 전산실험으로부터 얻은 휨 값과 S/N비를 구한 결과이다. Table 8은 Table 7에서 얻은 S/N비에 대한 분산분석(Analysis of Variance; ANOVA)^[8-12] 결과이다. F-검정 결과 후충전시간($t_{post-fill}$), 사출시간(t_{fill}), 사출온도(T_{melt}), 금형온도(T_{mold})의 순서로 휨에 미

Table 7 DOE experiment result for processing conditions optimization

Run	Control factor						Composite noise factor		S/N ratio
	t_{fill}	t_{pack}	$t_{post-fill}$	T_{mold}	T_{melt}	P_{pack}	N1	N2	
1	0.6	1	10	55	213	60	0.4219	0.4843	6.86
2	0.6	3	15	65	225	80	0.4294	0.4855	6.78
3	0.6	5	20	75	237	100	0.3343	0.4852	7.60
4	1.5	1	10	65	225	100	0.4846	0.5849	5.40
5	1.5	3	15	75	237	60	0.3279	0.4017	8.71
6	1.5	5	20	55	213	80	0.1641	0.1694	15.56
7	2.4	1	15	55	237	80	0.3117	0.3498	9.60
8	2.4	3	20	65	213	100	0.1777	0.1976	14.52
9	2.4	5	10	75	225	60	0.4606	0.5598	5.80
10	0.6	1	20	75	225	80	0.2866	0.3144	10.43
11	0.6	3	10	55	237	100	0.5702	0.6471	4.30
12	0.6	5	15	65	213	60	0.2807	0.3968	9.28
13	1.5	1	15	75	213	100	0.3306	0.3814	8.95
14	1.5	3	20	55	225	60	0.2311	0.2369	12.62
15	1.5	5	10	65	237	80	0.4234	0.5153	6.53
16	2.4	1	20	65	237	60	0.2597	0.2623	11.67
17	2.4	3	10	75	213	80	0.3631	0.4807	7.41
18	2.4	5	15	55	225	100	0.2088	0.2617	12.52

치는 영향이 큰 유의한(significant) 인자들임을 알 수 있었다. 한편 본 제품 모델의 경우에 보압시간(t_{pack})과 보압 프로파일(%)(P_{pack})은 다른 공정조건들에 비해 휨에 대해 유의하지 않은 것으로 분석되어 오차에 풀링(pooling)하였다. Table 9는 잡음 하에서 관측한 휨 결과치로부터 구한 S/N비와 평균에 대해 주효과(main effects)를 분석한 결과이다. 주효과 분석에서도 후충전시간($t_{post-fill}$), 사출시간(t_{fill}), 사출온도(T_{melt}) 및 금형온도(T_{mold})의 주효과는 비교적

큰 반면, 보압시간(t_{pack})과 보압 프로파일(%)(P_{pack})의 주효과는 매우 작게 나타나서 Table 8의 분산분석 결과와 동일한 유의성 판단을 내릴 수 있다. 평균분석^[8,12]에 의해 최적의 설계조건은 S/N비를 최대화시키는 인자들의 수준 조합으로 결정된다. 따라서

Table 8 ANOVA table

Factor	SS	d.o.f	mean sq	F
$t_{post-fill}$ (sec)	108.87	2	54.43	44.3
t_{fill} (sec)	24.20	2	12.10	9.8
T_{melt} (°C)	17.14	2	8.57	7.0
T_{mold} (°C)	13.17	2	6.58	5.3
t_{pack} (sec)	1.67	2	0.83	
P_{pack} (%)	0.76	2	0.38	
Error	6.16	3	2.05	
(Error)	(8.59)	(7)	(1.23)	

Table 9 Factor effects

Design factor	t_{fill}	t_{pack}	$t_{post-fill}$	T_{mold}	T_{melt}	P_{pack}
Level 1	7.54	8.82	6.05	10.24	10.43	9.16
Level 2	9.63	9.06	9.30	9.03	8.92	9.38
Level 3	10.25	9.55	12.07	8.15	8.07	8.88
△	2.71	0.73	6.02	2.09	2.36	0.5
Rank	2	5	1	4	3	6

Design factor	t_{fill}	t_{pack}	$t_{post-fill}$	T_{mold}	T_{melt}	P_{pack}
Level 1	0.43	0.37	0.50	0.34	0.32	0.36
Level 2	0.35	0.38	0.35	0.37	0.38	0.36
Level 3	0.32	0.36	0.26	0.39	0.41	0.39
△	0.11	0.02	0.24	0.05	0.09	0.03
Rank	2	6	1	4	3	5

최적조건은 Table 9에서 $(t_{fill})_3(t_{pack})_3(t_{post-fill})_3$
 $(T_{mold})_1(T_{melt})_1(P_{pack})_2$ 이 된다. 이 최적설계조
 건에 해당하는 공정조건은 $t_{fill}=2.4(\text{sec})$, t_{pack}
 $=5(\text{sec})$, $t_{post-fill}=20(\text{sec})$, $T_{mold}=55(^{\circ}\text{C})$, T_{melt}
 $=213(^{\circ}\text{C})$, $P_{pack}=80(\%)$ 이다. 최적설계조건에서 S/N
 비와 평균의 추정치는 각각 식 (3), 식 (4)와 같다.
 추정에는 해당 속성에 유의한 영향을 주는 인자의
 효과만을 사용한다.

$$\begin{aligned} \widehat{SN}((t_{fill})_3(t_{post-fill})_3(T_{mold})_1(T_{melt})_1) \\ = \overline{(t_{fill})_3} + \overline{(t_{post-fill})_3} + \overline{(T_{mold})_1} + \overline{(T_{melt})_1} - 3\bar{T} \quad (3) \\ = 10.25 + 12.07 + 10.24 + 10.43 - 3(9.14) \\ = 15.57 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\mu}((t_{fill})_3(t_{post-fill})_3(T_{mold})_1(T_{melt})_1) \\ = \overline{(t_{fill})_3} + \overline{(t_{post-fill})_3} + \overline{(T_{mold})_1} + \overline{(T_{melt})_1} - 3\bar{T} \quad (4) \\ = 0.32 + 0.26 + 0.34 + 0.32 - 3(0.37) \\ = 0.13 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

추정된 최적설계조건에 대해 확인실험을 실시하였
 다. 이때 추정에 사용되지 않은 보압시간(t_{pack})과 보
 압 프로파일(P_{pack})의 수준은 S/N비가 최대가 되
 는(또는 평균이 최소가 되는) 각각 3수준(5sec)과 2수
 준(80%)으로 선택하였다. Table 6의 실험과 동일한
 잡음조건으로 힘을 측정된 결과 0.1577(mm), 0.1737
 (mm)를 얻었으며, 이들의 평균은 0.1657(mm), 표준
 편차는 0.0113(mm)이고 S/N비는 15.60(dB)으로 나타
 났다. 최적설계조건에서 예측한 결과와 확인실험에
 서 얻은 데이터로부터 계산된 결과를 비교해 볼 때,
 평균은 0.0357(mm), S/N비는 0.03(dB)의 편차를 보였
 다. 한편 Taguchi가 제시한 경험적 기준^[6]에 의하면
 최적조건에서 S/N비의 편차가 이득, 즉 $(\Delta S/N =$
 $(\widehat{SN})_{optimal} - (\widehat{SN})_{current})$ 의 30% 또는 3(dB)
 보다 작으면 교호작용이 크지 않다고 판단할 수 있
 다. 따라서 본 최적설계에서는 S/N비가 불과
 0.03(dB)의 차이를 보이므로 교호작용의 크기가 미미
 해서 인자 효과의 하류 재현성이 있다고 할 수 있
 다. 그러므로 본 실험에서 예측한 $(t_{fill})_3(t_{pack})_3$

Table 10 Comparison of the two design solutions

Design	Mean (mm)	Standard Deviation (mm)	S/N ratio
Initial	1.4673	0.1905	-3.37
Optimal Robust	0.1657	0.0113	15.60

$(t_{post-fill})_3(T_{mold})_1(T_{melt})_1(P_{pack})_2$ 을 최적 강
 건설계해로 받아들일 수 있다. 이 최적 강건설계해
 를 제품형상 최적화 단계에서 얻은 강건설계해와 비
 교해 보면 공정조건 최적화를 통해 힘 평균은
 0.4134(=0.5791-0.1657)(mm)만큼 추가로 줄었고, 표준
 편차도 0.3523(=0.3636-0.0113)(mm) 만큼 추가로 개
 선되었음을 알 수 있다. S/N비는 11.64(=15.60-3.96)
 (dB)만큼 증가되었음을 알 수 있다. 이원화된 제품
 및 공정조건 최적화 단계를 통해 얻은 이 설계하는
 S/N비와 힘의 평균 및 표준편차를 볼 때 최적성과
 강건성을 충분히 갖춘 최적의 강건설계해로 판단되
 었으며 본 연구에서 목표로 삼은 힘의 안정적 최소
 화에 부합하는 설계해임을 알 수 있었다. 최적 강건
 설계해의 수치적 결과로 볼 때 예상되는 평균 힘 변
 형량이 0.1657(mm)로 매우 미미하여 사출성형 후에
 도 제품벽의 평면 상태가 거의 평면으로 유지될 수
 있을 것으로 기대된다. 한편 본 연구에서 얻은 최적
 강건설계해를 초기설계해와 비교하였다. 초기설계해
 는 설계변수의 명목수준값으로 조합된 설계해로서,
 리브 형상변수는 Table 1의 1수준과 2수준의 중간수
 준값, 공정조건변수는 Table 5의 2수준값으로 구성된
 다. Table 10은 두 설계해를 힘의 평균치와 표준편
 차, S/N비에 대해 비교한 것이다. 여기에서 초기설계
 해에 비해 최적 강건설계해는 힘의 평균과 표준편차
 가 모두 대폭 감소하여 강건성이 크게 개선되는 것
 을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 불가피한 공정변동이 존재하는 사
 출성형에서 리브의 기하학적 형상과 공정조건을 설
 계공간으로 고려하여 제품의 힘을 안정적으로 최소
 화할 수 있는 설계 방법을 제안하였다. 공정변동에

대한 휨의 안정적 최소화를 잡음에 대한 설계해의 강건성으로 평가하였으며 이를 위해 Taguchi의 직교배열에 기초한 교적 실험계획을 수립하고 신호 대 잡음비(S/N비)를 강건성 측도로 사용하였다. 또한 본 연구에서는 휨의 안정적 최소화를 위해 전체 최적화 과정을 리브를 포함하는 제품형상의 강건설계와 공정조건의 강건설계로 이원화하여 최적설계를 수행하였다. 본 연구에서는 제안한 최적설계 방법을 박스형 제품 모델에 적용하여 휨을 최소화할 수 있었다. 이원화된 휨 최적화 과정을 수행한 결과 단계별로 강건성이 개선되는 설계해를 얻을 수 있었다. 탐색된 최적설계해가 S/N비가 15.60(dB), 휨의 평균 0.1657(mm), 표준편차 0.0113(mm)로 나타나 최적성과 잡음에 대한 강건성을 충분히 갖춘 최적의 강건설계해로 판단되었으며 본 연구에서 목표로 삼은 휨의 안정적 최소화에 부합하는 설계해임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이원화된 강건설계를 통해 제품의 휨을 최소화하였으나 다른 형태의 사출결합의 최소화를 위한 최적설계 문제에 대해서도 목적함수를 적절히 정의할 경우에는 본 연구에서 제안한 설계 방법을 적용하여 최적화할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2007년도 구미전자정보기술원 「지역 밀착형 산학협동 기반 소재·부품·모듈 핵심기술 연구 개발 사업」 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

1. 권태헌 외 5인 역, 사출성형 CAE 설계지침, 문운당, pp.125-151, 2001.
2. Malloy, R.A., Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction, Hanser / Gardner Publishers, Inc., Cincinnati, pp.75-84, 1994.
3. 정영득, 구본홍 공역, 사출성형해석에 의한 제품 및 금형설계, 인터비전, pp.421-455, 2005.
4. 박중천 외 3인, "U자형 리브의 최적설계에 의한 사출제품의 휨 최소화," 한국기계가공학회지, 제7권, 제1호, pp.53-61, 2008.

5. Jacques, M.S., "An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat parts Due to Unbalanced Cooling," Polymer Eng. and Science, Vol.22, No.4, pp.241-247, 1982.
6. Erzurumlu, T. and Ozcelik, B., "Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method," Materials and Design, Vol.27, pp.853-861, 2006.
7. Lee, B.H. and Kim, B.H., "Optimization of Part Wall Thickness to Reduce Part Warpage Based on the Modified Complex Method," Polym.-Plast. Tech. Eng., Vol.34, No.5, pp.793-811, 1995.
8. Phadke, M.S., Quality Engineering using Robust Design, AT&T Bell Laboratories, pp.1-182, 1992.
9. Schmidt, S.R. and Launsby, R.G., Understanding Industrial Designed Experiments, Air Academy Press, pp.6-1-6-28, 1997.
10. Fowlkes, W.Y. and Creveling, C.M., Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp.29-62, pp.203-210, pp.230-231, pp.312-325, 1995
11. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, pp.377-433, pp.563-584, 2006
12. Park, S.H, Robust Design and Analysis for Quality Engineering, Chapman & Hall, pp.12-169, 1996
13. VM-Tech, CAPA Tutorial, 2004
14. Lee, B.H. and Kim, B.H., "Variation of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection-Molded Parts based on the Modified Complex Method," Polym.-Plast. Tech. Eng., Vol.36, No.5, pp.791-807, 1997
15. Yao, D., Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts, Masters Thesis, University of Massachusetts, MA., pp.1-135, 1998
16. 염봉진 역, 개발설계단계의 품질공학, 한국공업 표준협회, pp.148-149