

동특성 강건 설계를 이용한 사출품의 휨 최소화

김경모*, 박종천**,#

*금오공과대학교 산업공학부, **금오공과대학교 기계공학과

Minimization of Warpage of Injection Molded Parts using Dynamic Robust Design

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

*School of Industrial Eng., Kumoh Natl. Inst. of Tech., **Dept. of Mechanical Eng., Kumoh Natl. Inst. of Tech.
(Received 5 December 2014; received in revised form 26 January 2015; accepted 10 February 2015)

ABSTRACT

This paper presents a heuristic process-optimization procedure for minimizing warpage in injection-molded parts based on the dynamic robust design methodology. The injection molding process is known to have intrinsic variations of its process conditions due to various factors, including incomplete process control facilities. The aim of the robust design methodology advocated by Taguchi is to determine the optimum design variables in a system which is robust to variations in uncontrollable factors. The proposed procedure can determine the optimal robust conditions of injection molding processes at a minimum cost through a trade-off strategy between the degree of warpage and the packing time.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Dynamic Robust Design(동특성 강건 설계), Optimization(최적화)

1. 서 론

사출성형은 두께가 얇고 복잡한 형상을 가진 제품을 대량으로 신속하게 생산할 수 있는 기계가공 방법으로, 용융 수지를 고속, 고압으로 금형에 주입한 후 냉각시킴으로써 원하는 형상의 제품을 만든다. 휨(warpage)은 부적절한 설계에 의해서 사출품의 원래 형상과 치수에서 벗어나 변형되는 대표적인 성형불량이다. 휨의 크기가 설계 공차를 벗어나면 조립성이 떨어지고 미관상의 문제가 발생한다^[1,2]. 휨은 주로 부적절한 충전, 보압, 냉각 과정에 의한 제품 내부의 불균일한 수축으로 인하여 발생한다. 즉, 성형과정에서 제품 내부의 온도와 압력

의 이력에 의하여 국부적으로 발생하는 체적 수축의 편차가 내부응력을 증가시켜 휨이 발생된다^[3].

강건 설계에서는 제품의 성능특성이 설계자가 제어할 수 없는 변동원인(이하, 잡음)에 대해 둔감하도록 설계변수의 값을 결정한다. 설계자는 강건 설계를 통하여 잡음이 존재하더라도 안정된 성능 특성을 얻을 수 있다. 사출성형에 영향을 미치는 공정변수는 다양하며 변동이 심한 경우가 많다. 따라서 사출공정에서 휨을 안정적으로 최소화하기 위해서 강건 설계가 유용하게 사용될 수 있다^[4].

최근 컴퓨터를 이용한 해석(CAE) 기술의 발달로 시뮬레이션에 의한 성형성 평가에 기반을 둔 설계가 보편화되고 있다^[5-11]. 대량 생산을 하는 사출 성형에서 공정조건의 최적화는 품질(즉, 휨)뿐만 아니라 원가(즉, 공정시간) 경쟁력의 핵심 과제가 된다. 또한 고객의 요구에 따라서 같은 사출품에 대해서도 품질을 조금 희생하더라도 원가를 상당히

Corresponding Author : cadpark@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7297, Fax: +82-54-478-7319

줄여야 하는 경우도 발생하고, 또 그 반대의 경우도 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강건 설계를 이용하여 품질에 대한 고객요구를 만족시키면서 원가를 줄일 수 있는 사출공정 최적화 절차를 제시하고자 한다.

2. 동특성 강건 설계

강건 설계는 설계 대상 시스템을 2가지로 대별한다. 시스템의 출력반응(y)이 통제 가능한 설계변수(X's)와 통제 불가능한 잡음인자(N's)에 의해서 결정되는 정특성 시스템과 여기에 출력반응의 목표를 조정하는 신호인자(M)가 추가적으로 존재하는 동특성 시스템이 있다(Fig. 1).

다구찌는 개발설계단계에서 시스템의 기본기능의 에너지 변환과 직접 관련된 특성을 이용한 동특성 설계연구를 적극적으로 권장하고 있으나, 현재 기계가공분야에서 대부분의 연구들은 소비자의 평가특성을 정특성으로 최적화를 추구하는 단계에 머물러 있다^[9-13]. 자동차 브레이크 시스템은 전형적인 동특성 시스템으로 출력반응인 제동력의 목표를 신호인자인 밟는 힘으로 조정한다(Fig. 2).

동특성 강건 설계의 실험계획은 Table 1과 같으며, 조정의 편의성을 위해서 일반적으로 Fig. 3 과 같은 직선적 관계 $y = \beta M$ 를 갖도록 설계한다.

다구찌는 성능특성이 목표값에서의 편차제곱에 비례한 손실이 발생한다고 가정하고, 조정인자를 이용하여 설계특성을 목표값으로 조정한 후 설계를 평가하는 것이 타당하다고 생각하였다. 한편, 사출 성형에 있어서 힘은 조정인자를 사용하여 설계자가 원하는 대로 크기를 조정할 수 없는 설계특성이다.

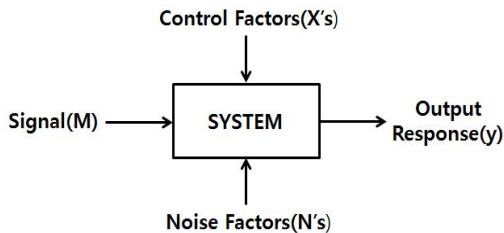


Fig. 1 Dynamic System

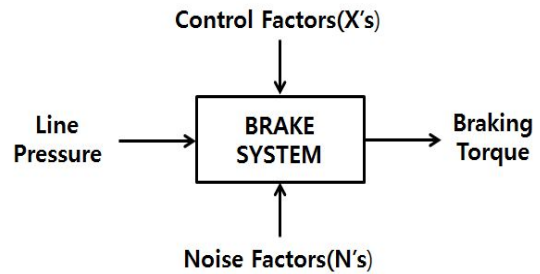


Fig. 2 Brake System for Automobile

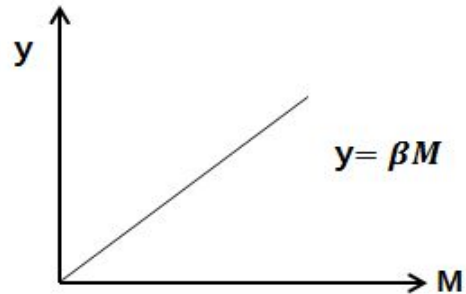


Fig. 3 Typical Ideal Function for Dynamic System

따라서 이상적 관계가 $y = \beta M$ 이라고 할 때, 조정 전 평균 손실(Q)은 식(1)과 같고 SN비는 식(2)와 같이 정의할 수 있다^[14]. 여기서, y_{ij} 는 신호수준 i ($i=1,2,\dots,m$, m 은 신호인자의 수준수)와 잡음수준 j ($j=1,2,\dots,n$, n 은 잡음인자의 수준수)에서 측정된 시스템의 출력반응이다.

$$Q = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \beta M_i)^2 \quad (1)$$

$$SN = -10 \log_{10} [Q] \quad (2)$$

Table 1 Design Matrix for the Dynamic Parameter Optimization Experiment

L_{18}	1	2	3	4	5	6	7	8	M1		M2		M3		SN	β
									N1	N2	N1	N2	N1	N2		
1	1	1	1	1	1	1	1	1								
2	1	1	2	2	2	2	2	2								
3	1	1	3	3	3	3	3	3								
4	1	2	1	1	2	2	3	3								
5	1	2	2	2	3	3	1	1								
6	1	2	3	3	1	1	2	2								
7	1	3	1	2	1	3	2	3								
8	1	3	2	3	2	1	3	1								
9	1	3	3	1	3	2	1	2								
10	2	1	1	3	3	2	2	1								
11	2	1	2	1	1	3	3	2								
12	2	1	3	2	2	1	1	3								
13	2	2	1	2	3	1	3	2								
14	2	2	2	3	1	2	1	3								
15	2	2	3	1	2	3	2	1								
16	2	3	1	3	2	3	1	2								
17	2	3	2	1	3	1	2	3								
18	2	3	3	2	1	2	3	1								

3. 사출 공정의 동특성 강건 설계

사출품은 성형과정에서 휨이 발생되며, 휨은 사출품의 외관을 결정하는 주요한 성능특성이다. 사출공정은 제어기술의 불완전성 등 여러 가지 원인에 의해 공정조건의 변동이 심하게 발생한다. 또한 대량으로 생산되는 사출품은 동일한 제품에 대해서도 고객요구에 따라서 A급 또는 B급을 생산하여야 하는 경우가 발생한다. 여기서 A급은 원가가 높더라도(즉, 공정시간이 길더라도) 품질이 좋은(즉, 휨이 작은) 사출품을 의미하고, B급은 원가를 줄이기 위해 품질을 희생한 사출품을 의미한다. 즉, 원가와 품질간의 균형을 잡아야 하는 문제를 해결하여야 한다. 본 연구에서는 Fig. 4에 제시된 컴퓨터 부품을 이용하여 공정조건이 심하게 변동하는 문제와 원가와 품질간의 균형을 잡아야 하는 문제를 동시에 해결할 수 있는 최적 사출조건 결정절차를 제시하고자 한다. 사례의 모형은 최소최대 육면체로 근사화한 경우 폭×길이×높이가 209.6×454.4×19.1이고 벽

두께는 최소 1.6 에서 최대 3.1 범위이다(단위 : mm).

본 연구에서 휨의 크기는 성형해석 결과로 얻어지는 유한요소 절점들의 변형량(deflection) 중에서 최대 변형량으로 정의하였다. 시뮬레이션에서는 주어진 사출조건에 대하여, 해석 모형의 유한요소 절점들에서 최대 변위량을 휨의 크기로 평가한다. 사출성형 시뮬레이션은 Moldflow^[15]를 사용하여 충전(fill)-보압(pack)-변형(warp) 해석을 수행한다. 휨을 최소화하기 위해서 휨 발생에 영향을 줄 수 있는 충전과 보압과정의 공정변수들을 설계변수로 선택

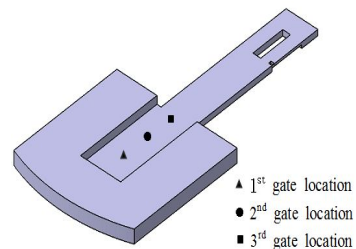


Fig. 4 3D CAD of the case problem

하였다. 설계변수는 사출시간(A), 수지온도(B), 금형온도(C), 보압크기(D), 보압전환(E), 게이트 위치(F)이다. 설계변수의 3수준 실험값은 Table 2와 같으며, 게이트의 수준별 위치는 Fig. 4에 나타나 있다. 잡음인자로써는 사출시간변동(U), 수지온도변동(V) 및 금형온도변동(W)을 선택하였다. 잡음인자는 성형 cycle의 불연속, 사출기의 불완전한 제어, 수지의 불완전한 혼합 등으로 인하여 성형공정이 진행되는 과정에 심하게 변동하며, 성능특성의 변동을 일으키는 주요한 원인^[4,16,17]이다. 잡음인자의 실험수준은 Table 3과 같다. 동특성 실험의 실험횟수를 줄이기 위하여 예비실험을 통하여 확인된 휨에 대한 잡음인자의 경향성을 고려하여 Table 4와 같이 잡음인자를 2수준의 조합잡음(compound noise factor) N으로 통합하였다. 조합잡음으로 통합하기 위한 잡음실험 및 조합잡음의 수준결정방법은 Fowlkes and Creveling^[18]에 자세히 설명되어 있다. 대부분의 사출성형에서 공정시간은 냉각시간과 보압시간에 의해 결정된다. 한편 냉각해석은 실험의 복잡성과 해석의 난해함이라는 문제가 있으므로, 본 연구에서는 냉각이 제품 전체에서 균일하게 이루어진다고 가정함으로써 불균일한 냉각에 의한 휨은 배제하였다. 따라서 공정시간은 주로 보압시간에 의해 결정되므로 보압시간을 신호인자로 선택하였다. 시뮬레이션에 사용된 수지는 Generic ABS (Stylac ABS 121)이다. 한편 설계특성인 휨은 조정인자로 크기를 조정할 수 없는 특성인 관계로 기울기 조정을 포함하는 일반적 동특성 강건 설계 절차를 적용할 수 없다.

Table 2 Design Factors and Levels

Factor	Description	level1	level2	level3
A	filling time(sec.)	1	2	3
B	melt temp.(°C)	210	235	260
C	mold temp.(°C)	40	60	80
D	packing press.(%)	70	85	100
E	velocity/pressure switch-over(%)	95	97	99
F	gate location	1 st	2 nd	3 rd

Table 3 Noise Factors and Levels

Factor	Description	level 1	level 2
U	variation of filling time (sec)	nominal - 0.1	nominal + 0.1
V	variation of melt temperature (°C)	nominal - 7	nominal + 7
W	variation of mold temperature (°C)	nominal - 5	nominal + 5

Table 4 Compound Noise Factor and Levels

Factor	level 1	level 2
N	$U_2 V_1 W_1$	$U_1 V_2 W_2$

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 휴리스틱 강건 설계 절차(heuristic robust design procedure)를 제안한다.

[단계1] 내측배열에 설계변수를 배치하고, 3수준 이상의 신호와 2수준의 조합잡음 하에서 출력반응을 측정한다.

[단계2] 단계1에서 가장 바람직한 출력반응을 주는 설계조건으로부터 출력반응과 신호인자간의 이상적 관계 $y = \alpha + \beta M$ 를 단순회귀분석으로 구한다.

[단계3] 변수 변환을 통하여 단계2의 이상적 관계를 원점을 지나는 직선적 관계 $y' = \beta M'$ 로 변경한다. 여기서, y' 와 M' 는 변수 변환된 출력반응과 신호인자이다.

[단계4] 식(2)의 SN비를 최대화하는 최적조건을 결정한다.

[단계5] 최적조건에 대해 확인실험을 실시한다.

[단계6] 단계5의 확인실험 결과로부터 직선적 관계 $y = \alpha + \beta M$ 를 단순회귀분석으로 구한다. 변수 변환을 통하여 이상적 관계를 $y' = \beta M'$ 로 변경한다.

본 연구에서 제안된 휴리스틱 절차를 Fig. 4의 사례 모형에 적용하면 다음과 같다.

[단계1] L_{18} 직교배열에 A, B, C, D, E, F 를 Table 5와 같이 배치한다. M을 8, 10, 12, 14(sec.)로 하고, Table 3의 조합잡음 하에서 휨을 구한다.

[단계2] Table 5에서 휨의 평균이 가장 작은 10번 실험으로부터 이상적 관계 $y = 6.2 - 0.321M$ 를 minitab^[19]으로 구한다.

[단계3] $y' = 6.2 - y$, $M' = M$ 으로 변수 변환하고, $y' = 0.321M$ 를 minitab으로 구한다.

[단계4] 식(2)의 SN비를 최대화 하는 수준으로 최적조건 $A_3B_1C_3D_3E_3F_2$ 을 결정한다.

[단계5] 단계4에서 구한 최적조건에 대해 Moldflow로 Table 6의 휨을 계산한다. 여기서, 제안된 절차로 구한 최적조건에서 초기조건보다 작은 휨이 얻어짐을 확인할 수 있다.

[단계6] 단계5의 측정치로부터 직선적 관계 $y = 5.25 - 0.257M$ 을 구한다. 원점을 지나는 직선적 관계를 얻기 위해 $y' = 5.25 - y$, $M' = M$ 으로 변수 변환하여 $y' = 0.257M$ 를 구한다. 만약, A급의 휨 목표가 $y = 2(\text{mm})$ 이라면 보압 시간은 $M = (5.25 - 2)/0.257 = 12.65$ (sec.) 가 된다. 그리고 B급의 휨 목표가 $y = 3(\text{mm})$ 이라면 보압 시간은 $M = (5.25 - 3)/0.257 = 8.75$ (sec.) 가 된다. 따라서 사출품 1개당 보압시간이 31% 절감되며, 이는 대량 생산을 하는 사출공정의 특성 상 매우 큰 원가절감의 기회라고 할 수 있다. 앞에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다. 제안된 절차에 의해 결정된 최적 사출조건은 $A_3B_1C_3D_3E_3F_2$ 이며, 현행조건은 $A_2B_2C_2D_2E_2F_2$ 이다. 최적조건에 대한 확인실험을 실시하여 Table 6의 휨을 얻었다. 또한 현행조건에 대해서 Table 7의 휨을 구하였다.

Table 5 Experimental design, warpages, and SN ratio for the case problem

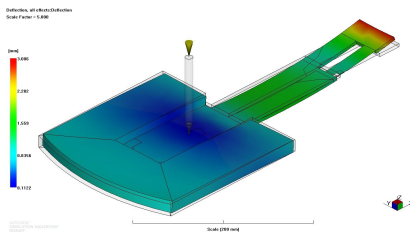
L_{18}	A	B	C	D	E	F	M ₁ = 8		M ₂ = 10		M ₃ = 12		M ₄ = 14		SN
							N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	
1	1	1	1	1	1	1	4.494	4.547	4.459	4.072	4.427	3.811	4.711	3.831	-4.823
2	1	2	2	2	2	2	4.395	4.561	3.609	3.952	2.945	3.203	2.581	2.579	1.732
3	1	3	3	3	3	3	4.665	4.708	4.196	4.320	3.646	3.875	3.003	3.422	-2.459
4	2	1	1	2	2	3	4.451	4.621	3.988	4.060	3.698	3.724	3.374	3.425	-2.189
5	2	2	2	3	3	1	3.902	4.252	3.012	3.502	2.468	2.688	2.321	2.194	7.369
6	2	3	3	1	1	2	4.395	4.401	3.996	4.039	3.603	3.648	3.222	3.688	-2.034
7	3	1	2	1	3	2	3.876	4.045	3.381	3.510	3.183	3.047	3.196	2.774	1.871
8	3	2	3	2	1	3	4.437	4.432	4.065	4.101	3.624	3.778	3.185	3.436	-1.949
9	3	3	1	3	2	1	4.103	4.362	3.414	3.649	2.990	3.056	2.951	2.720	2.164
10	1	1	3	3	2	2	3.520	4.017	2.444	3.288	2.008	2.374	1.826	1.880	10.527
11	1	2	1	1	3	3	4.836	4.988	4.209	4.408	3.788	3.807	3.539	3.459	-3.380
12	1	3	2	2	1	1	4.696	4.775	4.102	4.260	3.444	3.659	3.001	3.044	-1.642
13	2	1	2	3	1	3	4.163	4.426	3.584	3.875	3.141	3.288	2.935	2.906	0.894
14	2	2	3	1	2	1	4.226	4.271	3.827	3.866	3.423	3.473	3.118	3.135	-0.357
15	2	3	1	2	3	2	4.423	4.625	3.667	3.935	3.167	3.234	2.839	2.784	0.665
16	3	1	3	2	3	1	3.430	3.741	2.741	3.187	2.366	2.610	2.293	2.200	9.940
17	3	2	1	3	1	2	3.862	4.165	3.276	3.439	2.858	2.909	2.900	2.607	3.675
18	3	3	2	1	2	3	4.852	4.812	4.415	4.493	3.984	4.146	3.700	3.793	-4.276

Table 6 Warpages for the optimal condition

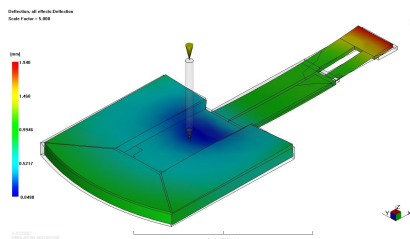
M	N_1	N_2
8	3.005	3.658
10	2.179	2.903
12	1.893	2.147
14	1.808	1.778

Table 7 Warpages for the initial condition

M	N_1	N_2
8	4.161	4.372
10	3.479	3.809
12	2.947	3.164
14	2.599	2.648



(a) Current design



(b) Optimal design

Fig. 5 Comparison of warpages between current design and optimal design

이로부터 최적조건은 현행조건에 비해 휨의 크기에 있어서 평균적으로 3.40(mm)에서 2.42(mm)로 29%의 개선을 이루었음을 확인할 수 있다. 여기서, Fig. 5는 보압 시간이 12(sec.)인 경우에 현행조건과

최적조건에 대한 휨의 Moldflow 그래픽 출력이다. 여기서, 제안된 절차를 이용하면 휨이 상당히 개선됨을 시각적으로 확인할 수 있다. 그래픽 출력에서 최적조건에서의 휨은 1.940 이고 현행조건에서의 휨은 3.006 로서, 35%의 개선을 나타내고 있다.

4. 결론

사출성형공정을 대상으로 동특성 강건 설계를 이용하여 새로운 공정최적화 절차를 제안하였다. 제안된 휴리스틱 절차를 통하여 휨을 안정적으로 줄일 수 있었으며, 품질(휨)과 원가(공정시간) 간의 균형을 잡을 수 있었다. 동특성 강건 설계는 공정조건을 결정함에 있어서 설계자의 의도를 잘 반영할 수 있는 수단으로써, 다양한 기계가공공정의 최적화에 매우 유용할 것으로 기대된다. 본 연구에서 설계특성으로 선택된 휨은 조정이 불가능한 특성이므로, 잡음의 영향력을 최소화시키는 강건 설계의 목표를 충분히 달성하지 못하였다. 따라서 조정 가능한 출력반응을 이용한 휨의 동특성 강건 설계를 추후 과제로 다룰 필요가 있는 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Ni. S., "Reducing Shrinkage and Warpage for Printer Parts by Injection Molding Simulation Analysis", Journal of Injection Molding Technology, Vol. 6 No. 3, pp. 177-186, 2002.
2. Subramanian. N. R., Tingyu. L. and Seng. Y. A., "Optimizing Warpage Analysis for an Optical Housing", Mechatronics, Vol. 15, pp. 111-127, 2005.
3. 신남호, 오희성, 강승규, CAE를 응용한 사출성

- 형 최적화, 대광서림, pp. 319-326, 2007.
4. Yao. D., 1998, Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage And Weldlines in Injection Molded Parts, Master's Thesis, U. of Massachusetts, USA.
 5. Park. J. C., Kim. K. M., Yin. J. J., and Lee. J. H., "Molding Design Factors for Maximizing Shrinkage Uniformity of Injection Molded Part using Design of Experiment", J. of KSMPE, Vol. 10 No. 6, pp. 70-76, 2011.
 6. Deng. Y. M., Zheng. D., Sun. B. S. and Zhong. H. D., "Injection Molding Optimization for Minimizing the Defects of Weld Lines", Polym.-Plast. Tech. Eng., Vol. 47, pp. 943-952, 2008.
 7. Altan. M., "Reducing Shrinkage in Injection Moldings via the Taguchi, ANOVA and Neural Network Methods", Materials and Design, Vol. 31, pp. 599-604, 2010.
 8. Choi. J. H., Choi. S. H., Park. D., Park. C. H., Rhee. B. O., and Choi. D. H., "Design Optimization of an Injection Mold for Minimization Temperature Deviation", International Journal of Automotive Technology, Vol. 13 No. 2, pp. 273-277, 2012.
 9. Akbarzadeh. A., and Sadeghi. M., "Optimization of Shrinkage in Plastic Injection Molding Process using Statistical Methods and SA Algorithm", Applied Mechanics and Materials, Vol. 110-116, pp. 4227-4233, 2012.
 10. Park. J. C., and Shin. S. M., "A Simulation-Based Optimization of Design Parameters for Cooling System of Injection Mold by using ANOVA with Orthogonal Array", J. of KSMPE, Vol. 11 No. 5, pp. 121-128, 2012.
 11. Park. J. C., Lee. K. S., Choi. S. I., and Kang. J. H., "Optimization of Gate Location for Melt Flow Balancing in Injection Mold Cavity by using Recursive Design Area Reduction Method", J. of KSMPE, Vol. 12 No. 4, pp. 114-122, 2013.
 12. Strano. M., "Robustness Evaluation and Tolerance Prediction for a Stamping Process with Springback Calculation by the FEM", Numisheet, pp. 266-271, 2005.
 13. Kim. K. M., and Yin. J. J., "Optimization of Sheet Metal Forming Process by using Decision-Making Theory", J. of KSMPE, Vol. 11 No. 2, pp. 125-136, 2012.
 14. Phadke. M. S., Quality Engineering using Robust Design, AT&T Bell Laboratories, pp 114~116, 1989.
 15. ED&C, Autodesk Moldflow Insight: The 4th ed. of AMI Korean Manual, 2009.
 16. 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.
 17. 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.
 18. Fowlkes. W. Y., and Creveling. C. M., Engineering Method for Robust Product Design, Addison Wesley, pp 230~232, 1995.
 19. 이승훈, Minitab을 이용한 공학통계 자료분석, 이레테크, pp. 181~202, 2008.