

사출금형 설계에서 강건성을 고려한 게이트 위치의 결정

박종천*, 김경모**,#

*금오공과대학교 기계공학과, **금오공과대학교 산업공학부

Determination of Gate Position Considering Robustness in Injection Mold Design

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

*Department of Mechanical Engineering, KIT, **School of Industrial Engineering, KIT
(Received 12 July 2017; received in revised form 7 August 2017; accepted 23 August 2017)

ABSTRACT

In this paper, we propose a design procedure for determining the gate position robust to changes and inherent fluctuations in the process conditions during injection molding. To evaluate the robustness of the gate position, the signal-to-noise ratio is used, and noise conditions are implemented using orthogonal arrays, where the process variables are considered as noise factors and possible process fluctuations are set as the levels of the noise factors. To show the usefulness of the proposed robust design procedure, we apply it to a computer CPU baseplate. As a result, it is shown that a robust gate position can be determined that reduces the average warpage deflection by 2.4% and 1.7%, and the variance by 3.4% and 5.1%, compared to the two initial gate positions.

Key Words : Gate Position(게이트 위치), Robust Design(강건 설계), Injection Molding(사출 성형)

1. 서 론

사출금형에서 게이트(gate)는 용융 수지가 스프루(sprue)와 러너(runner)를 거쳐 캐비티(cavity) 안으로 충전되는 주입구의 역할을 한다. 게이트의 위치는 충전 후에 제품 캐비티 안의 수지 온도와 압력 분포를 실질적으로 결정하므로 사출압력과 워프, 웰드라인 등과 같은 성형특성에 지대한 영향을 미친다. 이러한 배경에 따라 최근까지 게이트 설계와 관련한 연구들이 수행되어 왔다^[1-7].

이러한 중요성에도 불구하고, 현실적으로 대부분의 금형설계자는 자신의 경험이나 최소한의 사출 해석 결과로부터 게이트의 위치를 결정하고 있다. 그러나 경험에 의해 선택된 게이트 위치에서 최선의 품질을 기대하기가 어려운 경우가 많다. 또한 제품 생산 중에 원천적으로 제어가 불가능한 다수의 원인들로 인한 불량 발생으로 공정조건을 변경하거나, 경우에 따라서는 게이트의 위치 수정을 위해 금형을 다시 제작하는 경우도 발생하게 된다. 이러한 전통적인 게이트 설계 및 금형제작의 절차에 비추어, 게이트의 위치는 사전에 공정조건 의 변경과 내재적 변동 가능성을 고려하여 설계하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이러한 배경에 따라서, 이 연구에서는 사출금형

Corresponding Author : kmkim@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7653, Fax: +82-54-478-7679

설계에서 공정조건의 변경과 변동에 대해 강건한 게이트 위치를 결정하는 설계 절차를 제시한다. 그 효율성을 보이기 위해 강건설계 절차를 컴퓨터 CPU 베이스 플레이트에 적용하였다. 그 결과 적은 횟수의 탐색실험으로 초기 설계에 비해 횡 변형의 평균과 산포가 감소되는 강건한 게이트 위치를 결정할 수 있었다. 제시하는 강건설계 절차는 단순하고 적용 절차가 쉬워서 실용적일 뿐만 아니라, 금형 설계와 제작 측면에서 높은 신뢰성과 효율성을 기대할 수 있을 것이다.

2. 게이트 위치의 강건설계

2.1 게이트 위치의 강건성

일반적으로 사출성형 설계는 크게 두 단계, 즉 제품설계와 금형설계로 이루어진다. 제품설계 단계에서 제품의 형상과 치수에 대한 설계가 완성되면, 금형설계 단계에서는 제품설계를 검토한 후 먼저 게이트의 위치를 결정한다. 게이트 위치가 결정되면 게이트의 형상과 치수를 설계하고, 이어서 러너(runner), 스프루(sprue), 냉각채널(cooling channel)과 금형개폐 및 제품 취출을 위한 금형 구성요소들을 설계한다. 금형설계가 끝나면 금형을 제작하여 성형기에 장착한 후, 시험사출을 통해 공정조건을 결정하고 제품생산을 시작하게 된다. 일단 제품생산이 시작되면 생산 중간에도 주기적으로 품질을 평가하고, 그 결과에 따라 현재의 공정조건을 변경하고 작업을 계속한다. 그러나 이러한 과정들을 통해서도 원하는 품질을 얻기 어려운 경우에는, 불가피하게 게이트 위치와 금형을 수정한 다음 위 과정을 다시 수행하게 된다. 이러한 게이트와 관련한 금형설계, 제작 및 생산 과정이 다소 불합리하다고 여겨지는 것은 크게 두 가지 기술적 배경이 있다고 판단된다. 첫째, 일단 게이트 위치가 잘못 정해진 상태에서 하류 단계인 공정조건을 최적화하여 원하는 품질을 얻는 데에는 한계가 있다^[8]. 둘째, 사출공정의 경우에는 실제로 품질에 영향을 미치지 않지만 제어가 불가능한 무수한 원인 인자들과 인자간의 복잡한 관계가 존재하기 때문에, 실제 사출을 통해서도 최적의 공정조건을

찾기가 매우 어렵다. 또한 사출기에 설정한 명목 공정조건도 공정이 진행되면서 내재적으로 변동이 발생한다. 이것은 성형 사이클의 불연속, 사출기 제어의 불완전, 실린더 내의 수지 혼합의 불완전 등으로 인해, 명목 공정조건이 일정하게 유지되기 어렵기 때문이다^[9]. 그러나 이러한 배경에도 불구하고, 현실적으로 대부분의 금형설계 엔지니어는 자신의 경험에 의해 또는 단편적인 사출해석을 통해 게이트의 위치를 결정하고 있다.

따라서 이러한 점들을 고려하여 게이트의 위치를 설계할 때에는, 명목 공정조건의 변경 가능성과 내재적 변동을 사전에 고려하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 게이트 위치 설계과정에서 가능한 공정범위(process range) 안에서 공정조건의 변경과 자체 변동, 즉 ‘공정변수의 변동’을 일종의 잡음(noise)으로 간주하고, 이러한 잡음의 영향에도 불구하고 잡음에 대해 강건한(robust), 즉 품질특성이 평균적으로 우수하면서도 산포가 작아지는 게이트 위치를 결정한다.

2.2 강건성 평가: SN 비

이 연구에서는 게이트 위치의 강건성 정도로 Taguchi가 제안한 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; SN비)^[10]를 사용한다. SN비는 잡음으로 인한 품질특성값의 변동에 대해, 평균과 산포를 통합적으로 평가하는 척도이다^[10,11]. 변형과 같은 망소형(smaller-the-better type) 특성의 경우, SN비는 기대손실(품질특성 y 가 설계목표 0에 대한 편차제곱에 비례함)에 기초하여 다음과 같이 정의된다^[10].

$$SN = -10 \log(\sigma^2 + \bar{y}^2) \quad (1)$$

$$= -10 \log\left\{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2\right\} \quad (dB)$$

여기서 \bar{y} 와 σ^2 은 각각 품질특성의 평균과 분산이다. n 은 잡음조건의 개수이고, y_j 는 j 번째 ($j=1,2,\dots,n$) 잡음조건에서 측정된 품질특성값이다. 망소형의 경우에, SN비가 클수록 품질특성값의 평균과 품질특성의 목표값에서의 편차가 전체적으로 작아진다^[10]. 따라서 강건한 게이트 위치를 찾는 문제

는 SN비가 최대인 위치를 찾는 문제가 된다.

SN비로 게이트 위치의 강건성을 계산하기 위해, 설계자가 선택하는 공정변수들의 변동을 잡음으로 간주한다. 잡음조건들은 직교배열^[10]을 통해 생성한다.

3. 강건설계 절차

강건한 게이트 위치를 결정하기 위해 설계구간 축소알고리즘^[11,12]에 기초하는 직접탐색법을 사용한다. 이 탐색법은 현재 설계구간에서 설정한 후보 게이트 위치들 중에서, 가장 강건한 위치를 중심으로 설계구간을 축소해 가는 과정을 반복 수행하여 최적해를 찾는다. 최적해 탐색 절차는 다음과 같다.

1. 게이트가 위치할 설계구간과 구간 내 게이트 위치 수준을 지정한다. 설계구간의 하한을 1수준, 상한을 3수준, 가운데 지점을 2수준으로 한다.
2. 잡음인자에 해당하는 공정변수와 가능한 공정범위를 지정한다. 공정범위의 하한과 상한을 각각 잡음인자의 1수준과 2수준으로 정한다.
3. 2수준 직교배열을 선택하고 잡음인자를 직교배열에 배치한다.
4. 설계구간의 각 게이트 위치(1, 2, 3 수준)에 게이트를 설계하고, 잡음조건별로 실험을 실시하여 품질특성의 데이터를 얻는다.
5. 게이트 위치별로 품질특성의 SN비를 계산한다.
6. SN비가 최대인 게이트 위치를 중심으로 현재 설계구간을 일정 비율로 축소한다. 축소된 설계구간에 맞춰, 게이트 위치의 수준을 새로 조정하고 단계 4로 간다.
7. 현재 설계구간의 간격이 충분히 좁혀져서 더 이상의 반복탐색이 의미가 없다고 판단될 때까지 단계 4에서 6을 반복 수행한다. 마지막 설계구간에서 최대 SN비를 갖는 위치를 최적의 게이트 위치로 선택한다.

4. 설계 적용: CPU 베이스 플레이트

강건설계 적용을 위해 Fig. 1에 보인 컴퓨터 중

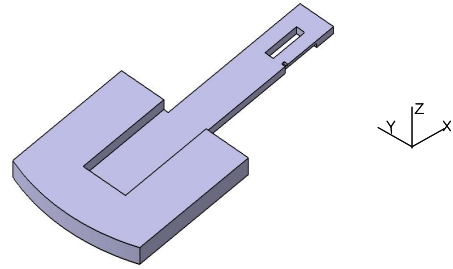


Fig. 1 CPU base plate model^[13]

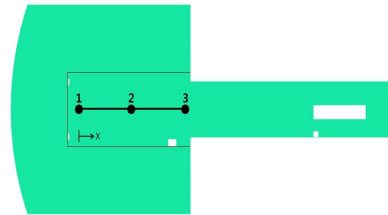


Fig. 2 Specified gate design interval

앙처리장치(CPU)의 베이스 플레이트^[13]를 해석모델로 선택하였다. 이 제품을 둘러싸는 최소박스(enclosing box)의 치수는 길이×폭×높이가 $209.6 \times 454.4 \times 19.1(mm)$ 이며, 제품의 살두께 분포는 최소 1.7 mm, 최대 3.6 mm이다. 이 모델은 형상적 특징으로 인해 불균일한 수축률 분포가 나타나고, 이로 인해 Z축 방향으로 휨 변형이 발생하는 문제가 있어서 휨 변형을 품질특성으로 선정하였다. 휨 변형량은 Z축 방향으로 최대 변형이 일어나는 모델의 양쪽 끝과 가운데 지점의 절점들에서 각각 측정된 변형량들의 최대 편차로 계산하였다.

이 모델에서 게이트 위치의 초기 설계구간을, Fig. 2와 같이 모델 내부에 직선 구간으로 지정하였다. 점 1, 2, 3은 탐색을 위한 게이트 위치의 수준이며, (x, y, z)(mm) 좌표는 각각 (-96.95, 0, -1.59), (-36.95, 0, -1.59), (23.05, 0, -1.59)이다. 탐색구간의 게이트 위치 좌표(X)는 원점인 점 1로부터 게이트 위치까지 직선 길이로 정의한다. 초기 설계구간의 X 범위는 $[0, 120](mm)$ 이다. 유동시스템으로 핫러너(hot runner) 시스템을 사용하였다. 핫러너의 직경은 9.5 mm, 길이는 102 mm이다. 게이트의 상부직경은 9.5 mm, 하부직경은 2.2

mm, 길이는 11.3 mm이고, 게이트 탭(tab)의 길이는 3 mm이다.

잡음인자에 해당하는 공정변수로 사출시간, 수지온도, 금형온도, 보압, 보압시간, 냉각시간을 선택하였다. 이 설계 예에서는 제품의 균일한 냉각을 가정하여 별도의 냉각해석은 수행하지 않았다. Table 1은 잡음인자로 선정된 공정변수의 변동 범위를 잡음인자의 2 수준값으로 지정한 결과이다. Table 2는 잡음조건을 생성하기 위해 $L_8(2^7)$ 직교배열에 잡음인자를 배치한 것이다.

Table 1 Noise factors and their two levels

Factor	Description	Unit	Level 1	Level 2
t_{fill}	Filling time	sec	1	3
T_{melt}	Melt temperature	°C	210	250
T_{mold}	Mold temperature	°C	40	80
P_{pack}	Packing pressure	%	60	100
t_{pack}	Packing time	sec	6	15
t_{cool}	Cooling time	sec	10	30

Table 2 L_8 orthogonal array for noise conditions generation

Exp. #	t_{fill}	T_{melt}	T_{mold}	P_{pack}	t_{pack}	t_{cool}
1	1	210	40	60	6	10
2	1	210	40	100	15	30
3	1	250	80	60	6	30
4	1	250	80	100	15	10
5	3	210	80	60	15	10
6	3	210	80	100	6	30
7	3	250	40	60	15	30
8	3	250	40	100	6	10

Table 3 Material properties of Stylac ABS 121

Property	Unit	Value
Elastic modulus	MPa	2,240
Shear modulus	MPa	805
Poisson's ratio	-	0.392
Thermal conductivity	W/m-C	0.1685
Melt density	g/cm^3	0.93724
Transition temperature	°C	99

초기 설계구간의 각 게이트 위치에 대해 Table 2와 같이 잡음조건을 설정하였다. 각 실험조건에 대해 휨 변형량을 측정하고 SN비를 계산한 다음, 강건설계 절차에 따라 최적의 게이트 위치를 탐색하였다. 시뮬레이션 해석을 위해 Moldflow^[13]를 사용하였으며, 중립면 형식(midplane type)으로 총 1,960개의 삼각형 유한요소를 생성하였다. 사용 수지는 Generic ABS (Stylac ABS 121)이며, Table 3에 수지의 기본적 물성을 나타내었다. 이 모델에 대해서는 탐색 알고리즘에 의해 50%의 축소율로, 총 6회의 반복탐색을 수행하였다. 탐색의 종료조건은 마지막 설계구간의 간격이 초기 설계구간 간격의 5% 이하가 되는 경우로 정하였다.

Fig. 3은 전체 반복탐색을 통해 탐색한 게이트들의 위치(X)와 SN비를 표시한 것이다. 또한 Fig. 4는 반복탐색에 따라, 각 설계구간에 대해 계산한 평균 SN비의 변화 추이를 보인 것으로, 반복탐색이 진행됨에 따라 게이트 위치가 강건한 설계구간으로 점차 수렴되어 가는 것을 알 수 있다. Fig. 5에 각 반복탐색에서 얻은 최적해의 변화를 나타내었다. 탐색 종료조건에 의해 마지막 반복탐색에서 선택한 최적의 게이트 위치는, $X = 69.375$ mm, 공간좌표는 (-27.57, 0, -1.59) (mm), SN비는 -14.74 dB로 나타났다. Table 4는 선택한 최적해를 설계자가 초기에 지정한 두 설계해와 비교한 결과이다. 최적해에서 SN비는 초기해-1과 초기해-2에 비해 모두 증가되어 개선되었다. 공정변수의 변동 하에서, 최적해는 초기해들과 비교해서 휨 변형량의 평균과 표준편차가

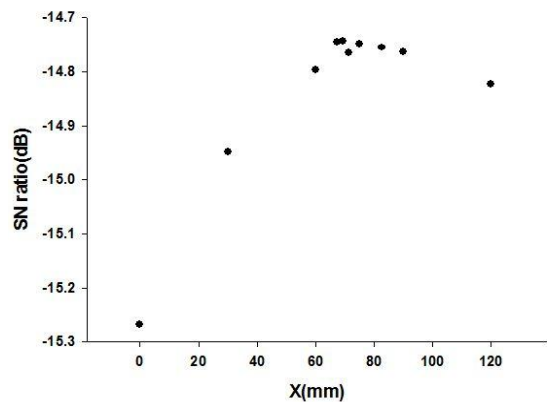


Fig. 3 Gate positions searched via iterations

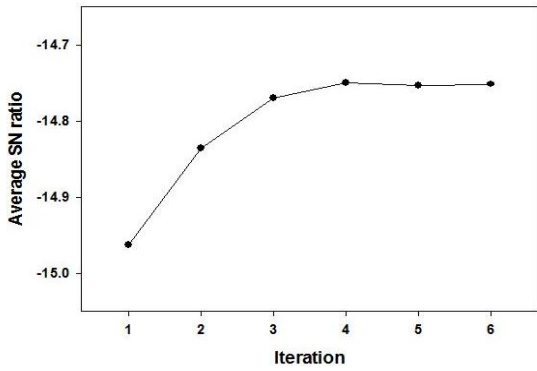


Fig. 4 Average SN ratios vs. iterations

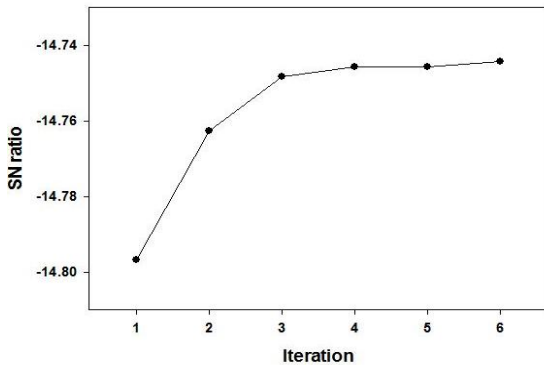


Fig. 5 Best SN ratios vs. iterations

Table 4 A comparison between two initial designs and the optimal design

Design	X (mm)	SN ratio (dB)	Warpage (mm)	
			Mean	Std. Dev.
Initial-1	40	-14.91	5.32	1.73
Initial-2	100	-14.86	5.28	1.76
Optimal	69.375	-14.74	5.19	1.67

모두 감소하는 것으로 나타났다. 최적해에서 휨 변형량의 평균(=5.19 mm)은, 초기해-1에 비해서 2.4%, 초기해-2에 비해서는 1.7%가 개선되었다. 또한 표준 편차(=1.67 mm)는 초기해-1에 비해서 3.4%, 초기해-2에 비해서는 5.1%가 개선되어, 산포의 개선 정도가 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 탐색된 최적의 게이트 위치는 초기 게이트 위치들에 비해서 공정 변수의 변동에 대해 휨 변형의 평균이 작으면서 산포도 작아지는, 즉 강건한 위치임을 확인할 수 있다. Fig. 6은 초기해와 최적해의 각 게이트 위치에

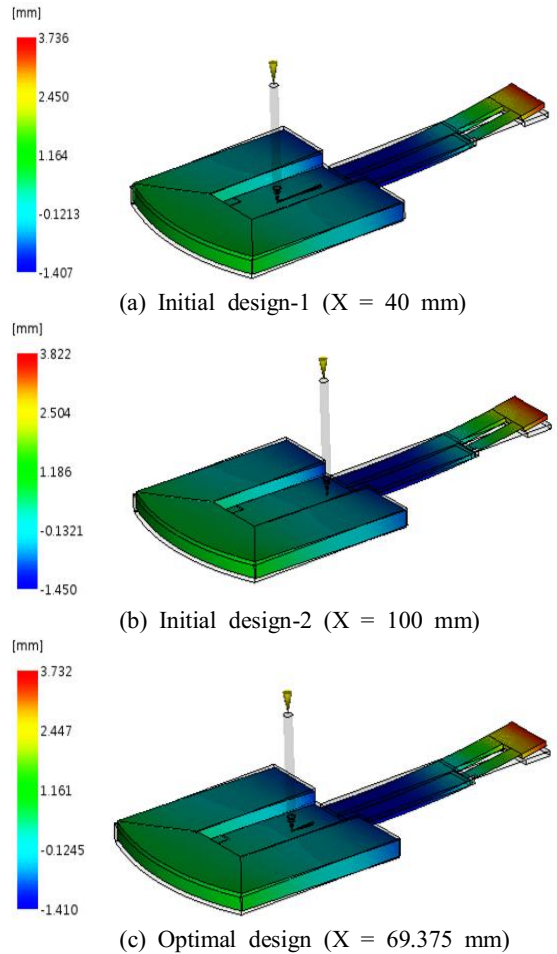


Fig. 6 Results of warpage simulation for initial designs and optimal design (scale factor: 3)

대해 휨 변형을 해석한 결과이다. 여기서는 Table 1의 각 공정변수 범위에서 가운데 명목 조건값을 해석조건으로 사용하였다.

5. 결 론

이 연구의 수행 내용과 결론은 다음과 같다.

1. 사출금형 설계에서 공정조건의 변경과 변동에 강건한 게이트 위치를 결정하는 최적설계 절차를 제시하고 그 유용성을 확인하였다.
2. 게이트 위치의 강건성을 평가하기 위해 공정변

수를 잡음인자로, 공정변수의 변동을 잡음인자의 수준으로 설정하여, 직교배열표로 잡음조건을 구현하였으며 평가지표로 SN비를 사용하였다.

3. 제시한 강건설계 방법을 컴퓨터 CPU 베이스 플랫폼에 적용하였다. 게이트 설계구간에 대해 설계구간축소법을 사용하여, 6번의 반복탐색으로 최적의 게이트 위치를 결정하였다. 최적해를 두 초기해와 비교한 결과, 휨 변형량의 평균이 각각 2.4%, 1.7%가 감소하고, 산포는 각각 3.4%, 5.1%가 감소하는 강건한 위치임을 확인하였다.
4. 제시한 설계 절차는 알고리즘 구조가 단순하고 구현이 용이해서 실제 금형설계 과정에 쉽게 적용할 수 있고, 공정의 변경과 변동에 대해 강건한 게이트 설계가 가능해 금형설계와 제작상의 높은 효율성과 신뢰성을 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.

REFERENCES

1. Zhai, M. et al., "Automated Selection of Gate Location for Plastic Injection Molding Processing," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 44, pp. 229-242, 2005.
2. Lee, J. and Kim, J., "Micro Genetic Algorithm Based Optimal Gate Positioning in Injection Molding Design," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 789-798, 2007.
3. Zhai, M. and Xie, Y., "A Study of Gate Location Optimization of Plastic Injection Molding Using Sequential Linear Programming," *Int'l J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 1, pp. 97-103, 2010.
4. Cho, S. B. et al., "Determination of Valve Gate Open Timing for Minimizing Injection Pressure of an Automotive Instrument Panel," *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 4, pp. 46-51, 2012.
5. Yamanoi, M. et al., "Application of Birefringence CAE in Mould Design of Optic Lens Injection Molding Process," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 1-6, 2012.
6. Park, J. C. et al., "Optimization of Gate Location for Melt Flow Balancing in Injection Mold Cavity By Using Recursive Design Area Reduction Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 114-122, 2013.
7. Wang, J., Simacek, P., Advani, S. G., "Use of Centroidal Voronoi Diagram to Find Optimal Gate Locations to Minimize Mold Filling Time in Resin Transfer Molding," *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, pp. 243-255, 2016.
8. Steinbichler, G., "Trends in Process Optimization," *Kunststoffe German Plastics*, Vol. 82, No. 10, pp. 13-17, 1992.
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. Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Product Design*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 29-92, pp. 125-145, 1995.
11. Park, J. C. et al., "Minimization of Warpage in Injection-Molded Parts by Optimal Design of U-Type Ribs," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 53-61, 2008.
12. Kota, S. and Chiou, S. J., "Use of Orthogonal Arrays in Mechanical Synthesis," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 28, No. 6, pp. 777-794, 1993.
13. ED&C, *Autodesk Simulation Moldflow Insight: The 6th edition of ASMI Korean Manual*, ED&C Inc., 2012.