

## 研究論文

## 직접탐색법을 이용한 사출성형품의 강건설계

김경모\* · 박종천\*\* · 안홍일\*\*\*

\* 금오공과대학교 신소재시스템공학부, \*\* 금오공과대학교 기계공학부, \*\*\* 금오공과대학교 대학원

## Direct Search-Based Robust Design of Warpage in Injection Molded Parts

Kyung Mo Kim\* · Jong Cheon Park\*\*, and Heung Il Ahn\*\*\*

\* Professor, School of Advanced Materials and Systems Engineering, K.N.U.T.

\*\* Associate Professor, School of Mechanical Engineering, K.N.U.T.

\*\*\* Graduate Student, K.N.U.T.

Keywords: Robust Design, Plastic Injection Molding, Modified Complex Method, Moldflow

## Abstract

The objective of this research is to develop a robust design methodology for plastic injection molded parts wherein warpage will be minimized by a complex method which is a kind of a simple direct search method. The design space considered for optimization is divided into two sub-design space : mold and process conditions. Warpage is quantified using the Moldflow injection molding simulation software. The design methodology was applied to an actual part of a fax machine, the Guide-ASF model, through two different design policies. The significance of this study is the synthesis of a computer simulation of injection molding process and optimization technique to determine the optimal robust design solution.

## 1. 서론

플라스틱 사출성형은 용융된 고분자 수지를 금형 캐비티(mold cavity) 안으로 주입한 후 냉각시켜 제품을 만드는 가공공정으로서 사용된 고분자 수지, 금형형상, 공정조건 등과 관련된 설계변수들에 의해 품질이 결정되며, 성형불량이 최소화된 고품질의 제품을

얻기 위해서는 설계변수들에 대한 최적설계가 요구된다. 그러나 사출물의 품질특성과 사출성형의 설계변수간에 열적, 유변학적, 유동적으로 매우 복잡한 비선형적 관계가 존재하여 최적 설계해의 결정은 매우 어렵다[3]. 특히 사출 성형공정은 기본적으로 공정조건의 변동(process variation)이 매우 심한 관계로 성형가공이 진행되는 동안 공정조건을

일정하게 유지시키기가 매우 어렵다. 이러한 공정조건의 변동으로 인해 사출물의 품질특성이 이상적 설계 목표치로부터 벗어나게 되므로 최적설계의 어려움은 더욱 커진다.

최근 컴퓨터에 의한 사출성형 해석기술의 발달로 상용 소프트웨어를 이용한 최적설계에 관한 연구가 다양하게 수행되어 왔다 [1,2,7-10]. 그러나 아직도 대부분의 설계자들은 설계(design), 평가(evaluation), 재설계(redesign)라는 전통적 설계과정에 해석용 소프트웨어를 시행착오방식으로 사용하는 것을 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 시행착오적 설계방법으로는 최적 설계해를 얻기 어려울 뿐만 아니라 과도한 해석시간이 소요되어 설계활동의 효율이 크게 떨어질 수밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 공정조건의 변동 하에서 대표적 사출 성형불량인 휨(warpage)을 최소화하는 금형형상 및 공정조건을 결정하기 위한 설계방법을 개발하고자 한다. 공정설계에 있어 강건 설계(robust design)는 제어할 수 없는 공정변동이 존재할 때 품질특성이 설계목표에 최대한 근접하는 설계조건을 찾는 방법으로서, 심한 내재적 공정변동이 예상되는 사출성형 공정의 설계에 대단히 유용한 설계방법으로 판단된다. 공정에 내재하는 공정변동은 직교배열(orthogonal arrays)을 이용하여 반영할 수 있다. 즉, 내측 배열(inner array)에 설계변수를 배치하고 외측 배열(outer array)에 공정변동이 큰 설계변수를 배치하여 시뮬레이션을 실시한 후 각 실험조건에서 얻어진 휨으로부터 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio : SN ratio)를 구해 설계평가척도로 사용한다. 품질특성과 설계변수간에 비선형적 관계가 존재하는 설계공간에서 최적 설계해를 탐색하는 과정은

직접탐색법인 콤플렉스법(complex method)을 사출성형 설계 문제에 적합하도록 수정하여 사용한다. 콤플렉스법[6]은 품질특성과 설계변수간의 관계가 정확히 알려져 있지 않은 실험적 설계에 많이 활용되어 왔다. 제안된 강건 설계방법을 팩스머신의 주요부품인 Guide-ASF에 대해 두 가지 설계방안 하에서 유용성을 확인해 보았다. 첫째, 기존 설계형상(topology)의 변경이 없이 나머지 설계조건에 대한 최적 설계조건을 결정함으로써 공정변동 하에서 제품의 벽두께와 휨의 크기를 동시에 줄일 수 있었다. 둘째, 기존의 금형형상 중 rib의 수와 위치를 변경할 수 있을 때 최적 설계조건을 구하였다. 제안된 강건 설계방법을 제품 및 금형 설계에 적용할 경우 설계 효율성 및 제품 생산성에 큰 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 강건 설계(Robust Design)

품질특성의 변동을 초래하는 제어 불가능한 요인들을 잡음인자(noise factors)라 한다면, 강건 설계(robust design)는 이러한 잡음인자의 영향력이 최소가 되는 설계조건을 실험적으로 결정함으로써 잡음 하에서도 안정된 품질특성을 얻게 해주는 설계방법이다. 강건 설계과정에서 고려되는 각 설계대안의 잡음에 대한 안정성(robustness)은 다구찌에 의해 제안된 SN비(신호 대 잡음비)에 의하여 평가된다. 사출성형물의 주요한 성형불량인 휨은 망소특성(smaller-the-better characteristic)으로  $i$  째 설계대안에 대한 SN비는 다음과 같다[5].

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

여기서  $y_{ij}$  는  $i$  째 설계대안에 대해  $j$  째 잡음조건 ( $j=1, 2, \dots, n$ )에서 관측된 힘의 크기이다. 최적 강건 설계해는 최대의 SN비를 갖는 설계해로서, 힘의 평균치가 최소화됨과 동시에 힘의 이상치(ideal value) 0 으로부터의 편차가 최소가 되는 설계조건이 된다.

### 3. 수정된 콤플렉스법 (Modified Complex Method)

최적 강건 설계조건을 실험적으로 결정하기 위해서는 설계영역(design space) 내에서 최대의 SN비를 주는 설계대안을 효율적으로 탐색하는 절차가 필요하다. 전통적 최적화 절차는 gradient 방법과 직접탐색법(the direct search method)으로 분류할 수 있으며, 설계특성과 설계변수간의 수학적 관계가 알려지지 않은 경우에는 직접탐색법이 유용하다. Box[6] 에 의해 제안된 콤플렉스법은 직접탐색법의 일종으로 적용상의 편의성에 의해 많은 공학적 최적화 과정에 채택되고 있다[2,10]. 최적해 탐색과정에서 반복적 탐색이 발생하므로, 사출성형해석과 같이 시뮬레이터(simulator) 실험에 시간이 많이 걸리는 경우 과도한 탐색노력이 발생하지 않도록 기존의 콤플렉스법을 수정할 필요가 있다. 콤플렉스법은 설계변수가  $n$  개일 때 임의로 생성된  $2n$  개의 초기 후보해를 꼭지점으로 하는 다각형(simplex)을 생성시켜, 이 중 평가치(강건 설계에서는 SN비가 됨)가 가장

나쁜 꼭지점을 그 점에서 나머지 점들의 무게중심(centroid) 방향으로 일정한 거리만큼 연장하여 얻은 새로운 후보해로 교체하는 절차를 반복함으로써 최적해를 얻는다. 본 연구에서는 다음과 같은 최적해 탐색과정을 사용한다. 여기서 \*표 한 과정은 과도한 탐색을 방지하기 위해 Box 의 절차를 수정한 내용이다.

**[단계1]** 설계변수와 실험수준, 잡음변수와 잡음수준을 결정한다. 이 때 설계변수수준은 전체 탐색공간을 생성한다.

**[단계2]** 탐색공간 내에서  $2n$  개의 초기 후보해  $C_i$  ( $i=1, 2, \dots, 2n$ ) 를 임의로 생성한다. 여기서,  $n$  은 설계변수의 개수이다.

**[단계3]**  $2n$  개의 후보해에 대해서, 외측배열에 설정된 잡음조건하에서 힘의 값을 시뮬레이션을 통해 구하고 이로부터 SN비를 계산한다(SN비는 각 후보해의 평가치  $F_i$  ( $i=1, 2, \dots, 2n$ ) 가 됨).

**[단계4]**  $2n$  개의 후보해 중 가장 작은 평가치  $F_m$  을 갖는 후보해  $C_m$  을 나머지  $2n-1$  개의 후보해들의 무게중심인  $C_c$  방향으로 투사하여 새로운 후보해  $C_r$  을 생성한다. 여기서 새로운 후보해의 평가치  $F_r$  은  $C_c + \alpha(C_c - C_m)$  이 된다. 투사율  $\alpha$  는 Box[6] 가 추천한  $\alpha=1.3$  을 사용한다.

**(a)\*** 만약  $C_r$  이 탐색공간에 속하고  $F_r < F_m$  이면,  $C_r$  을 무게중심  $C_c$  쪽으로  $\overline{C_c C_r}$  의  $1/2$  만큼 후퇴시키고, 그 점에서 새로운 평

가치  $F_r$  을 계산한다. 후퇴는  $F_r > F_m$  이 만족될 때까지 반복하며, 탐색효율을 위해 본 연구에서는 최대 4회까지의 후퇴를 허용한다. 4회 후퇴에서도  $F_r < F_m$  이면  $C_r = C_m$  ( $F_r = F_m$ ) 로 설정한다.

(b) 만약  $C_r$  이 탐색공간에 속하고  $F_r > F_m$  이면,  $C_r = C_m$  ( $F_r = F_m$ ) 로 설정한다.

(c)\* 만약  $C_r$  이 탐색공간에 속하지 않으면, 속할 때까지  $\alpha$  값을 5%씩 줄여서  $C_r$  을  $C_c$  방향으로 반복적으로 후퇴시켜 나간다.

[단계5] 탐색 종료조건을 검토하여 종료조건이 만족되면 탐색을 중단하고, 그렇지 않다면 [단계4]로 가서 탐색을 반복한다. 본 연구에서는 탐색 종료조건으로 과도한 탐색시간을 방지하기 위해 탐색횟수에 상한을 부여하였다.

<표 1> Guide-ASF 의 기존 설계안

인자	기존 설계
게이트 위치 (X)	80.0 mm
옆면1 벽두께 ( $Th_{side1}$ )	1.6 mm
옆면2 벽두께 ( $Th_{side2}$ )	2.0 mm
윗면 벽두께 ( $Th_{top}$ )	1.8 mm
Rib 두께	1.0 mm
Rib 갯수	6 개

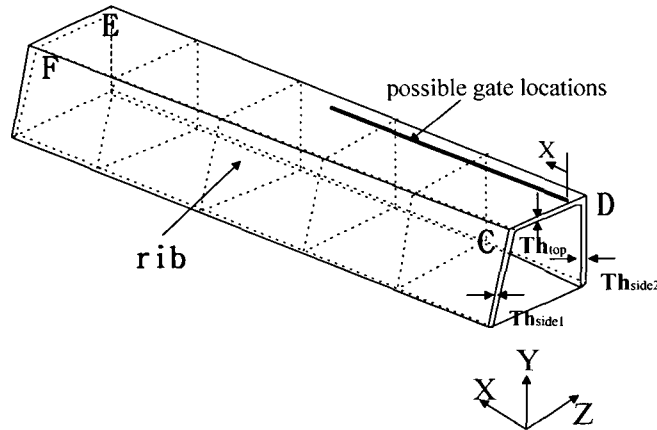
## 4. 사례 연구

### 4.1 설계문제

<그림 1>의 팩시밀리 부품 Guide-ASF 에 대한 최적 강건 설계를 수행하였다. 사용한 고분자 수지는 GEUSA/GE1913 폴리카보네이트이고, 사출성형 해석용 S/W로는 Moldflow [4] 를 사용하였다. Guide-ASF 는 인쇄된 종이의 이송을 보조하는 부품으로서, 원활한 이송을 위해서는 윗면의 휨이 작아야 한다. 휨이 크면 인쇄된 종이가 롤러에 밀착되어 나올 때 원활하게 빠져 나오지 못하고 용지 걸림 현상이 초래된다. 휨의 크기는 윗면의 유한요소 절점(node)들에 대한 “변형 후 상대적 최대 수직 변위”로부터 계산하였다. 기존 설계형상에서는 휨을 줄이기 위해서 6개의 rib 를 제품 내에 등 간격으로 배치하고 벽 두께를 두겹게 하여 0.2 mm 의 휨을 얻었다. 그러나, 많은 수의 rib 와 두꺼운 벽두께로 인해 생산원가의 상승과 다양한 유형의 성형불량이 발생하여 이에 대한 설계 개선이 요구되었다.

### 4.2 설계형상의 변경이 불가능한 경우

기업 내외부적 요인에 의해 기존 설계형상 (topology)을 변경할 수 없는 경우에 대한 최적 강건 설계의 수행결과는 다음과 같다. 설계공간으로 금형 형상과 사출성형 공정조건을 고려하기 위해 게이트 위치(X), 옆면 벽두께( $Th_{side1}$ ,  $Th_{side2}$ ), 윗면 벽두께( $Th_{top}$ ), 충전시간( $t_{fill}$ ), 보압시간( $t_{pack}$ ), 냉각시간( $t_{cool}$ ), 수지온도( $T_{melt}$ ), 금형온도( $T_{mold}$ ), 보압( $P_{pack}$ ) 을 실험인자의 후보로 선정하였다.  $L_{12}$  직교 배열을 이용한 screening 실험을 실시한다. 휨의 크기에 대한 분산분석과 설계 엔지니어의 공학적 판단에 근거하여, 컴퓨터 모의실험에 사용할 최종 실험인자와 실험수준을



<그림 1> Guide-ASF 의 기존 설계형상

<표 2>와 같이 결정하였다. 사출성형에서 힘에 영향을 주는 변수 중 설계자가 제어할 수 없는 잡음인자와 이들의 공정에서의 변동 범위는 <표 3> 과 같이 평가되었다.

<표 2> 실험인자와 실험수준

실험인자	1수준	2수준
게이트 위치 (mm)	0	100
옆면1 벽두께 (mm)	1.2	1.6
옆면2 벽두께 (mm)	1.2	2.0
윗면 벽두께 (mm)	1.2	1.8
충진시간 (sec)	1.2	1.5
보압시간 (sec)	2	6
수지온도 (°C)	260	300

분산분석결과 힘에 대한 영향력이 유의하지 않은 것으로 나타난 냉각시간, 금형온도, 보압은 screening 실험에서 사용한 실험수준의 평균치를 설계실험에서 사용한다. 최적해 탐색공간은 최종 실험인자와 실험범위에 의

해 결정된다. 최적 강건 설계 조건은 수정된 콤플렉스법에 의한 탐색으로부터 결정되며, 탐색공간 내에서 12(=2\*6)개의 초기 후보해 집합을 임의로 생성하고, 3장에서 제시한 탐색과정을 수행한다. 각 후보해에 대해  $L_8$ 에 의해 결정되는 잡음조건 하에서 Moldflow 시뮬레이션을 통해 힘 값을 얻고, 이로부터 각 후보해에 대한 SN비를 계산한다. 12개의 후보해 중 가장 작은 SN비를 갖는 해를 후보해 집합에서 탈락시키고, 수정된 콤플렉스법의 새로운 후보해 결정규칙을 적용하여 새로운 후보해를 결정한다.

<그림 2>는 시뮬레이션 과정에서 탐색된 총 37개의 후보해에 대한 SN비를 나타내며, 여기서 run number 는 생성순서를 나타낸다. 초기 12개는 임의로 생성되었고, 13째부터는 수정된 콤플렉스법의 탐색절차에 따라 1개씩 생성된 후보해이다. 새로운 후보해에서 SN비의 개선이 거의 없는 경우 탐색을 중지할 수도 있으나, 본 사례에서는 탐색횟수의 상한을 40회로 하였다. 탐색결과 5번째

로 생성된 후보해가 최대의 SN비를 갖는 최적 강건 설계조건으로 결정되었다. 최적 강건 설계조건은 <표 4>와 같으며, SN비는 22.264(dB)이며 휨 평균은 0.073mm이다. 따라서 제안된 강건 설계법을 이용하면 기존 설계조건보다 제품의 벽 두께를 줄이면서도 휨을 크게 줄일 수 있음이 확인되었다.

<표 3> 잡음인자와 실험수준(수준값은 정격값에서의 변동을 의미함)

잡음인자	1수준	2수준
충진시간변동 (sec)	-0.1	+0.1
수지온도변동 (℃)	-5	+5
금형온도변동 (℃)	-5	+5
냉각시간변동 (sec)	-1.0	+1.0
보압시간변동 (sec)	-1.0	+1.0
보압변동 (Mpa)	-10	10

<표 4> 기존 설계형상에서의 최적 강건 설계 조건(강건 설계해)

실험 인자	최적 조건	
게이트 위치 (mm)	10.0	
옆면1 벽두께 (mm)	1.2	
옆면2 벽두께 (mm)	1.2	
윗면 벽두께 (mm)	1.2	
충진시간 (sec)	0.69	
보압시간 (sec)	2.02	
휨 (mm)	평균	0.073
	표준편차	0.0254
SN비	22.264	

<표 5> 전통적 설계절차에 의한 최적 설계조건 (비강건 설계해)

후보해	1번	13번	24번	34번	
게이트 위치(mm)	0	0	0	0	
옆면1 벽두께(mm)	1.21	1.2	1.2	1.2	
옆면2 벽두께(mm)	1.21	1.2	1.2	1.2	
윗면1 벽두께(mm)	1.21	1.2	1.2	1.2	
충진시간(sec)	0.76	0.739	0.51	0.623	
보압시간(sec)	2.065	2.002	2.013	2.014	
휨 (mm)	평균	0.107	0.089	0.107	0.101
	표준편차	0.0111	0.0152	0.0311	0.0232
SN비	19.381	20.915	19.056	20.131	

한편 잡음을 고려하지 않는 전통적 최적 설계조건(비강건 설계해)과 잡음의 영향을 고려한 최적 설계조건(강건 설계해)을 비교하기 위하여, 비강건 설계해를 수정된 콤플렉스법을 이용하여 탐색하였다. 탐색을 위한 초기 후보해 집합은 본 사례에서 생성했던 초기 후보해를 그대로 사용하였다. <그림 3>으로부터 전통적 설계절차에서 최적 설계해로 인정할 수 있는 4개의 후보해를 결정하고, 이들에 대해 본 사례에서 적용한 잡음조건하에서의 휨 크기를 모의실험으로 구한 후 SN비를 평가한 결과가 <표 5>에 제시되어 있다. 이로부터 강건 설계해가 비강건 설계해에 비해 더 큰 SN비를 가져 잡음에 강한 설계해임을 알 수 있다.

### 4.3 설계형상의 변경이 가능한 경우

사출성형에서 rib 는 주로 휨 방지나 강도 보강을 위해 사용되나, 과다하게 사용될 경

우 수지의 원활한 유동을 방해하여 또 다른 형불량의 원인이 되며 또한 투입 수지량의 증가에 따라 제조원가의 상승을 초래한다. 사례의 Guide-ASF 부품은 현재 6개의 rib가 윗면의 휨을 줄이기 위하여 사용되고 있으나, 여기서 rib 수는 설계자가 경험적으로 설정한 것이었다. 따라서 휨에 대한 최적 설계조건을 찾는 과정에서, 기존의 설계형상(topology)을 변경할 수 있다면 rib 수와 위치를 최적화 함으로써 더욱 강건한 설계조건을 얻을 수 있다.

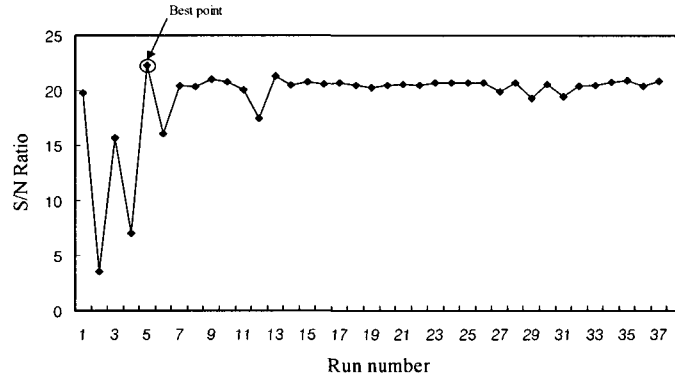
Rib 수와 위치를 최적화하기 위해서는 이들을 실험인자에 포함시켜 설계실험을 실시하여야 하나, 이 경우 많은 실험노력이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 과도한 추가노력이 없으면서 이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 2단계 최적화 과정을 사용한다. 단계1에서는 기존의 설계형상에서 rib를 모두 제거한 후 3장에 제시한 절차를 이용하여 최적 설계조건을 찾은 후, 단계2에서는 단계1에서 결정된 설계조건에 대해 rib 수와 위치에 대한 최적 조건을 결정한다. <그림 4>는 단계 1의 탐색결과를 나타낸 것으로 13번째 후보해를 최적해로 결정하였다. <표 6>의 case 1은 단계 1의 최적 설계조건과 그때의 휨의 평균과 표준편차, 그리고 SN비를 나타낸 것이다. 단계 1에서 rib가 제거된 설계형상에 대한 최적 설계조건을 구한 후, 단계 2에서 단계 1의 최적조건에 rib를 한 개씩 추가해 가면서 휨 크기가 최소화되도록 rib의 위치를 결정한다.

본 사례에서는 일단 rib 수를 2개까지만 고려하였다. Rib 수가 1개인 경우에는 모델이 좌우 대칭인 점을 고려하여 <그림 5>의 중앙선에 위치하며, rib가 2개인 경우에는 중앙선을 기준으로 좌우로 동일한 거리(D)에

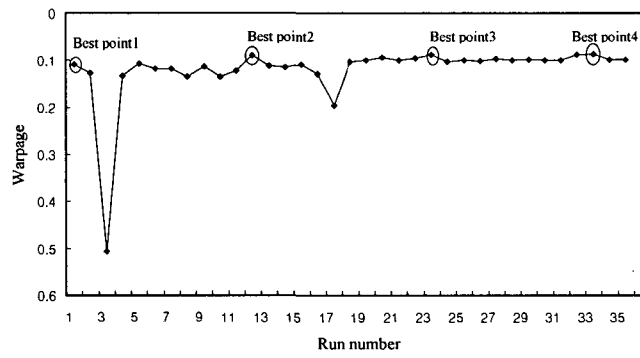
위치하도록 하되 계산상의 효율을 고려하여 중앙선에서 10mm씩 증가시켜 가면서 최적화를 수행하였다. 이때 rib의 두께는 기존 설계형상과 동일한 1mm로 하였다. <그림 6>은 rib 수가 2개일 때의 최적화 결과로서, 중앙선에서부터 한 쪽 rib까지의 거리(D)가 70mm일 때 최대 SN비를 준다. <표 6>의 case 2는 1개의 rib를 가운데에 위치시킨 경우, 그리고 case 3은 중심선을 기준으로 2개의 rib를 140mm 간격으로 배치한 경우의 결과이다. <표 6>의 최적 설계조건을 기존 설계조건과 비교하여 볼 때, 제품 벽두께와 휨 크기를 동시에 대폭적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 case 3의 결과를 기존 설계형상에 대해 최적화 한 <표 4>의 결과와 비교해 볼 때, 단지 2개의 rib를 적정한 위치에 설치하면 6개의 rib를 설치한 경우보다 더 좋은 설계해가 됨을 알 수 있다. 따라서 다수의 rib를 포함하는 제품의 경우에 이와 같은 설계 최적화 과정을 통해 획기적인 설계개선효과를 기대할 수 있을 것이다.

<표 6> Rib 수에 따른 최적 설계조건

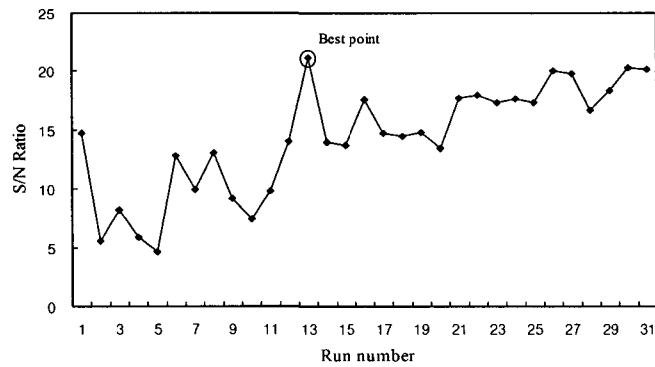
Rib 수		0(case 1)	1(case 2)	2(case 3)
게이트 위치(mm)		0	0	0
옆면1 벽두께(mm)		1.2	1.2	1.2
옆면2 벽두께(mm)		1.2	1.2	1.2
윗면 벽두께(mm)		1.21	1.21	1.21
충진시간(sec)		0.51	0.51	0.51
보압시간(sec)		2.03	2.033	2.03
휨 (mm)	평균	0.087	0.085	0.052
	표준편차	0.0116	0.0112	0.0194
SN비		21.132	21.30	25.167



<그림 2> 각 후보해에 대한 SN비

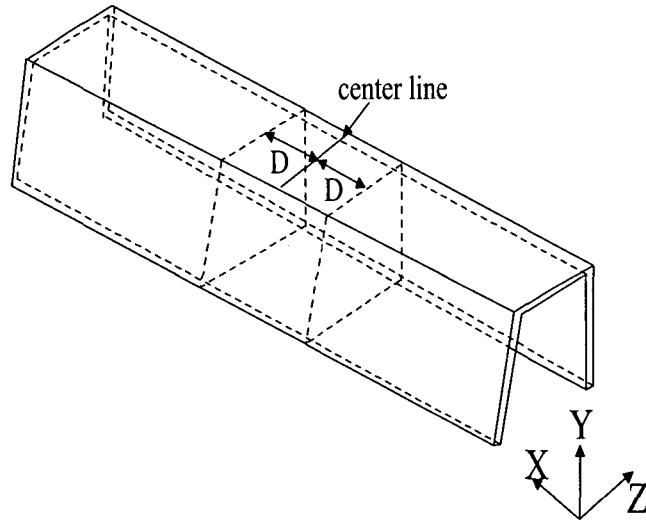


<그림 3> 전통적 설계절차에서 후보해의 휨

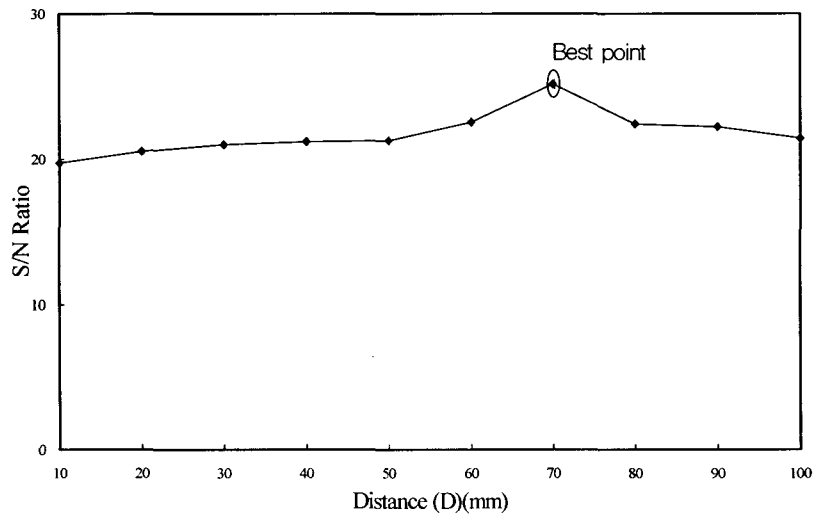


<그림 4> Rib가 없는 경우 후보해의 SN비





<그림 5> Rib 가 2개인 경우의 위치



<그림 6> Rib 의 위치에 따른 SN비

## 5. 결론

본 연구에서는 설계공간으로 금형형상과 성형조건을 고려하여 변동요인이 내재하는 사출성형 제품에 대한 최적 강건 설계조건을 결정하는 방법을 제시하였다. 즉, 직접탐색절차인 콤플렉스법을 수정하여 사출성형 해석용 시뮬레이션 도구와 통합하여 탐색공간 내에서 최적 강건 설계조건을 결정할 수 있도록 하였다. 제안된 절차의 유용성을 보이기 위해 팩시밀리 Guide-ASF 부품에 대하여 두 가지 설계방안 하에서 제안된 설계 절차를 적용해 보았다. 첫째, 기존 설계형상(6개의 rib 가 설치됨)을 유지하면서 제품 벽두께, 게이트 위치, 성형조건을 최적화 하였다. 그 결과 제품 벽두께와 힘의 크기를 동시에 줄일 수 있었다. 둘째, 기존 설계형상의 변경을 허용한 경우에 대해 최적 강건 설계조건을 구하였다. 최적설계 결과 2개의 rib 만으로도 기존의 6개의 rib 를 설치한 경우보다 제품 벽두께와 힘의 크기를 현저히 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 강건 설계 방법을 사출성형 공정설계에 적용할 경우 설계 효율성과 제조 생산성에 대한 획기적 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 힘 이외의 성형불량에 대해서도 본 연구에서 제안된 설계절차가 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 1999년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임

## 참고문헌

- [1] 김영일(1995), 유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 설계의 자동화, 박사학위논문, 서울대학교.
- [2] 박종천, B. H. Kim(2000), "사출성형품의 휨과 웰드라인을 최적화하기 위한 자동 금형설계방법", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No. 5, pp. 512~525.
- [3] Bernhardt, E. C. (1983), CAE-Computer Aided Engineering for Injection Molding, Hanser Publishers, NY.
- [4] Moldflow Pty. Ltd.(1996), Moldflow User's Manual.
- [5] Phadke, M. S.(1989), Quality Eng. Using Robust Design, Prentice Hall.
- [6] Reklatis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M.(1983), Engineering Optimization Methods and Applications, John Wiley & Sons Inc., NY, pp. 268~277.
- [7] Choi, G. H., Lee, K. D., Chan, N., and Kim, S. K.(1994), "Optimization of Process Parameters of Injection Molding with Neural Network Application in a Process Simulation Environment", CIRP Annals, Vol. 43, pp. 449~452.
- [8] Jacques, M. S.(1982), "An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat parts Due to Unbalanced Cooling", Polymer Eng. and Sci., Vol. 22, No. 4, pp. 241~247.
- [9] Pandelidis, I. and Zou, Q. (1990), "Optimization of Injection Molding Design, Part II : Molding Condition Optimization", Polymer Eng. and Sci., Vol. 30, No. 15, pp. 883~892.
- [10] Park, J. C. and Kim, B. H. Kim(2000),

“Automated Molding Design Methodology to Optimize Multiple Defects in Injection Molded Parts,” Int’l J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 133~145.