

## 강건성을 고려한 모니터 장식패널 사출품의 휨 최소화

권오관\*, 박종천\*\*, 김경모\*\*\*

### Warpage Minimization in the Injection Molded Decorating Panel of Monitor by Considering Robustness

Kwon, O. K.\*, Park, J. C.\*\* and Kim, K. M.\*\*\*

#### ABSTRACT

An optimal robust design methodology has been developed to minimize the warpage in a decorating panel of monitor molded by the plastic injection. For the associated methodology, the Taguchi's Design Of Experiment (DOE) based on orthogonal arrays and Signal-to-Noise Ratio is combined with commercial simulation tools for injection molding. An optimal robust design solution is statistically resulted from the computational simulation. The related experiment was done for evaluations of the warpage in the decorating panel part of monitor. This research showed that the warpage under the applied optimal design conditions was comparatively reduced.

**Key words** : Plastic injection molding, Warpage, Robustness, DOE, Decorating panel

#### 1. 서 론

플라스틱 고분자 수지를 사용한 제품은 현재 전자, 자동차, 항공기, 의료정밀 등 다양한 공학제품 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 현재까지도 다양한 특성의 새로운 플라스틱 재료들이 속속 개발되어 기존의 금속 제품들을 빠른 속도로 대체해 나가고 있다. 플라스틱 사출성형(plastic injection molding)은 고온의 용융된 고분자 수지를 제품 형상에 해당하는 금형의 공동부내로 고압으로 사출하여 주입하고 냉각시켜 성형품을 얻는 제작 방법이다. 이 방법은 복잡한 형상의 제품뿐만 아니라 고정밀도의 제품까지도 비교적 쉽고 균일하게 성형할 수 있어서 생산성이 높은 장점을 가진다.

일반적으로 플라스틱 사출성형 공정에 의해 제작되는 제품의 품질 정도는 고분자 수지, 제품 형상 및 치수, 금형, 공정조건 등에 의해 결정된다. 그러나 성형 품질을 좌우하는 이러한 다차원적 변수들은 제품 품질에 대해 상호 매우 복잡한 미선형적 관계를 가지고

있어서 최상의 품질을 보장하는 최적의 설계조건을 얻기가 매우 어렵다<sup>[1]</sup>. 더구나 사출기에 의한 성형 공정은 기본적으로 공정조건의 변동이 심하고 이것을 제어하기가 매우 어려운 특성이 있다. 이것은 사출기에 의해 성형이 진행될 때 공정변수들이 초기에 설정한 설계값대로 일정하게 유지되기 어렵기 때문이다. 이러한 불가피한 공정의 변동으로 인해 제품의 성능 특성이 설계 목표값에서 벗어나 변동할 수밖에 없어서 고품질의 달성은 매우 어려워진다. 이것은 설계 단계에서 결정한 최적해가 실제 성형공정에서도 최적해가 된다는 것을 보장할 수 없음을 의미한다. 따라서 설계 최적화를 위해서는 하류에서의 재현성이 보장되는 강건설계(robust design)가 필요하다. 일반적으로 강건설계는 공정의 제어할 수 없는 성능변동원인에 대해서 성능 특성의 변동이 작은 해를 의미한다<sup>[2]</sup>.

최근 들어 CAE(Computer Aided Engineering)의 발달로 인해 실제로 금형을 제작하여 제품을 생산하기 전에 사출성형 해석 소프트웨어와 금형 설계시스템을 사용하여 설계 단계에서 성형불량들의 발생 여부를 예측하여 설계에 반영할 수 있게 되었다<sup>[3-13]</sup>. 그럼에도 불구하고 지금까지도 최적설계의 어려움은 지속되고 있다. 이것은 아직까지 현재의 사출성형 해석 소프트웨어가 많은 기능적 발전에도 불구하고, 위에서 설명한 공정변동과 같이 사출성형 공정에 내재된

\*LG전자(주) DID 연구실

\*\*충신화원, 금오공과대학교 기계공학부

\*\*\*금오공과대학교 신소재시스템공학부

- 논문투고일: 2004. 04. 27

- 심사완료일: 2004. 07. 22

문제점들을 만족시키는 최적 설계해를 사용자에게 직접적으로 제시해 주지 못하고 있는 등 한계가 있기 때문이다. 따라서 아직도 대부분의 설계자들은 상용 소프트웨어를 전통적인 설계 방식에 따라 사용하고 있는 실정이다. 즉 소프트웨어로 성형 과정을 시뮬레이션하고 그 결과를 평가한 후 설계변수들을 재설정하여 다시 시뮬레이션하는 일련의 과정을 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 단순 반복하는 방식에 의존하고 있다. 따라서 이러한 시행착오식 설계방법으로는 과도한 해석시간이 소요될 뿐만 아니라 최적 설계해를 얻기도 어렵다.

플라스틱 사출성형품의 품질을 좌우하는 성형불량에는 여러 가지가 존재한다<sup>14)</sup>. 이 중 휨(warpage)은 대부분의 사출 제품에서 발생하는 대표적 성형불량의 하나이다. 휨은 성형과정에서 불완전한 냉각이 원인이 되어 초래된 제품 내부의 불균일한 수축차이로 인해 제품의 형상이 뒤틀리거나 휘어지는 현상이며 치수 안정성이 요구되는 제품의 경우에는 매우 중요한 설계조건이 되고 있다.

본 연구에서는 영상기기의 화면표시장치인 모니터의 케이스 중 전면 하단부를 구성하는 장식용 패널(decorating panel)에 대해 발생하는 휨을 최소화하는 강건설계해(robust design solution)를 자동으로 결정하기 위한 설계 방법을 개발하고자 한다. 강건설계는 제어할 수 없는 공정상의 변동이 존재하더라도 설계 목표값으로부터 품질특성의 편차(deviation)가 작게 되도록 최적의 설계변수값을 찾는 것을 말한다. 따라서 강건설계는 심한 내재적 공정변동이 예상되는 사출성형 공정의 최적설계를 위해 대단히 유용한 설계방법으로 판단된다. 최적 강건설계를 위해 본 연구에서는 Taguchi<sup>2,15,16)</sup>의 직교배열(orthogonal arrays)에 의한 실험계획(Design Of Experiment; DOE)을 수립한 후 상용 사출성형 해석프로그램인 Moldflow의 시뮬레이션 툴(simulation tool)과 통합하여 전산실험을 실시하고 실험 데이터로부터 최적해를 통계적으로 추정하는 방법을 택하였다. 실험계획에서 설계해의 강건성을 확보하기 위해 내측배열(inner arrays)에 설계변수를 배치하고 외측배열(outer arrays)에 설계변수의 공정변동을 배치한 후, 이에 따라 상용 소프트웨어를 이용하여 교적(cross-product) 실험을 실시하고, 각 실험조건에서 얻어진 휨 결과값으로부터 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; S/N ratio)를 구해 설계평가척도로 사용하였다. S/N비를 최대화하는 공정조건을 구함으로써 공정변동이 존재하는 상황에서 휨이 안정적으로 최소가 되는 설계해를 구할 수 있었다.

끝으로 본 연구에서 모니터 장식패널 모델에 대해 최적설계 절차의 타당성을 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 실험 결과 모니터 장식패널의 평면부에 발생한 휨의 크기가 추정된 최적해의 휨의 크기에 비해 크게 벗어나지 않고 현재 생산 중인 제품의 휨에 비해서는 대폭 개선된 것으로 확인되었다. 본 연구에서 휨을 최소화하기 위해 적용한 최적설계방법은 휨 이외의 다른 형태의 성형불량을 최소화하는 설계문제에도 그 성형불량을 적절히 정량화할 수만 있다면 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 강건설계

### 2.1 강건설계개념

Taguchi가 제안한 강건설계법은 제품의 성능특성이 제어하기 힘든 품질변동의 원인(이하, 잡음)에 대해 둔감한 설계조건을 실험을 통해 구함으로써 제품이나 공정의 설계과정에서 품질을 확보하는 공학적 방법론이다. Taguchi는 제품 품질을 손실개념을 사용하여 평가하는 방법을 제안하였다. 손실은 주로 제품의 성능특성이 설계 목표치를 유지하지 못하고 산포함으로써 비롯되며, 이러한 손실이 최소로 되는 설계조건이 좋은 설계조건이 된다.

제품의 수명 주기동안에 발생하는 손실(loss)의 평균치 즉, 기대손실(expected loss)은 목표치가  $m$ 인 명목특성(nominal-the-best)인 경우 식 (1)과 같이 주어진다<sup>2,15)</sup>.

$$l = k[\sigma^2 + (\mu - m)^2] \quad (1)$$

여기에서  $k$ 는 성능특성에 따른 상수,  $\sigma^2$ 은 성능특성

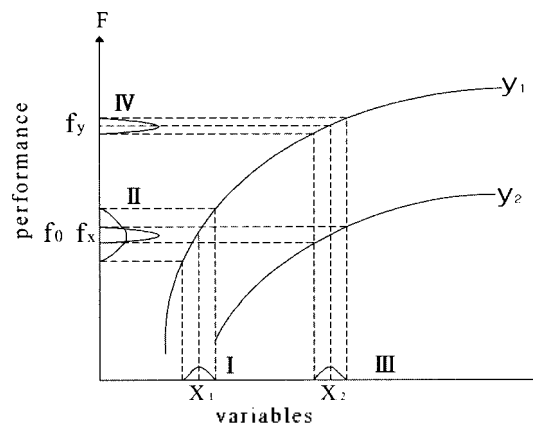


Fig. 1. Robust design concept.

의 분산(variance),  $\mu$ 는 성능특성의 평균치이다. 식 (1)에서 보듯이 기대손실을 최소화하기 위해서는 분산뿐만 아니라 평균치와 목표치간의 편차를 동시에 최소화하여야 한다.

Taguchi의 강건설계의 기본 원리는 Fig. 1을 통해 쉽게 설명할 수 있다. 성능특성 F가 변수 x, y에 의해서 결정된다고 하고 만일 x를  $x_1$ 으로, y를  $y_1$ 으로 설계하였다면 그때의 성능특성값은  $f_1$ 가 될 것이다. 그런데 실제 사용 중에는  $x_1$ 은 잡음인자에 의해서 I과 같은 산포를 가지게 될 것이고 따라서 y가  $y_1$ 으로 고정되었다고 가정할 때 성능특성 F는 II와 같은 산포를 가지게 될 것이다. 여기서 성능이 변수 x의 변동에 강건하게 하기 위해서 x에 대한 F의 기울기가 상대적으로 작은  $x_2$ 로 설계하였다면 성능특성은  $f_2$ 가 될 것이고 마찬가지로  $x_2$ 가 III과 같은 산포를 가질 때  $f_3$ 는 IV와 같은 산포를 가지게 될 것이다. 산포 II와 IV를 비교할 때 분산은 IV가 작음을 알 수 있다. 결과적으로 x를  $x_1$ 보다  $x_2$ 로 설계할 때 x의 변동에 대하여 성능특성 F의 변동이 작게 된다. 즉 x가 잡음 인자들에 의하여 변하더라도 성능특성 F가 좀더 강건하게 되는 것을 알 수 있다. 여기서 성능특성의 목표치가  $f_0$ 라면 다른 변수인 y를  $y_2$ 로 조절하여  $f_0$ 를 얻을 수 있으며, 결과적으로 F의 산포가 작고 F의 평균이 목표치  $f_0$ 에 일치하는 강건설계해를 얻을 수 있다.

2.2 신호대 잡음비

강건설계를 구현하기 위해서 Taguchi<sup>2,15,16</sup>는 직교 배열(orthogonal arrays)을 이용하여 데이터를 수집할 것과 그 데이터로부터 계산된 신호 대 잡음비, 즉 S/N비를 분석함으로써 최적 설계조건을 결정할 것을 제안하고 있다. S/N비는 설계대안의 잡음에 대한 영향력을 의미하는 것으로 클수록 잡음에 대해 영향력이 작음을 의미한다.

망목특성의 S/N비는 평균을 목표치로 조정할 경우의 기대손실을 log 함수로 선형 변환한 것으로서 단위는 데시벨(dB)이다. 설계평가에 많이 사용되는 성능특성은 망소 특성(smaller-the-better characteristic), 망대 특성(larger-the-better characteristic), 망목 특성(nominal-the-best characteristic)으로 분류할 수 있으며, 실험데이터로부터의 계산식은 다음과 같다<sup>2,15</sup>.

(a) 망대 특성:

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

(b) 망소 특성 :

$$S/N_{smaller} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (3)$$

(c) 망목 특성 :

$$S/N_{nominal} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - m)^2 \right] \quad (4)$$

위 식에서  $Y_i$ 는 공정변동에 대한 i번째 측정된 성능특성값을 나타낸다. n은 잡음조건 수이고, m는 성능특성의 설계목표치이다.

3. 실험계획

사출 공정은 내재적으로 공정 변동성을 가지고 있어서 초기에 설정한 공정 조건들이 공정이 진행되는 동안에 제한된 공차 범위내에서 유지되기 어려운 경우가 많다. 따라서 사출 성형품의 휨을 최소화하기 위한 최적설계는 가능한 작은 휨값을 가지면서 동시에 그 값에서 공정 변동, 즉 잡음으로 인한 휨값의 편차가 작게 되는 설계가 바람직하며 이는 곧 휨에 대한 강건설계가 요구됨을 의미한다. 휨의 최소화를 위한 최적설계 문제는 수학적으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Optimize } (f(x), \sigma(x; p)), x \in \Omega \text{ and } p \in \Lambda \quad (5)$$

여기에서 f는 목적함수, x는 설계변수 벡터,  $\sigma$ 는 분산, p는 잡음변수 벡터,  $\Omega$ 는 설계변수 공간,  $\Lambda$ 는 잡음변수 공간이다.

본 연구에서 최적설계를 위한 성능특성은 모니터의 장식패널에 발생하는 휨의 크기이다. 본 연구에서는 휨에 대한 최적설계를 구하기 위해 Taguchi의 직교 배열에 기초한 실험계획을 수립하고 최적해에 대한 평가 척도로서 S/N비를 사용한다. 직교 배열은 주어진 설계변수들로 한정된 횟수의 실험만을 수행하도록 고안된 일종의 실험 계획표에 해당한다. 본 연구에서는 최적설계를 구하기 위해 내측배열(inner arrays)과 외측배열(outer arrays)로 불리는 두 개의 독립된 배열이 서로 교차하는 형태로 배치되도록 교적 실험을 구성하였다. 여기에서 내측배열은 제어할 수 있는 설계변수(design factors)의 배열이고, 외측배열은 제어할 수 없는 잡음변수(noise factors)의 배열로서 잡음에 의한 공정 조건의 변화를 모델링하기 위한 것이다<sup>16</sup>. Table 1은 L<sub>9</sub>의 내측 배열과 L<sub>4</sub>의 외측 배열이 사용된 교적실험의 한 예를 보였다. 내측 배열에서 행

Table 1. DOE with cross product orthogonal arrays

Inner array					Outer array				S/N ratio
Exp.#	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	#	1	2	3	
1	1	1	1	1	N <sub>1</sub>	1	1	2	2
2	1	2	2	2	N <sub>2</sub>	1	2	1	2
3	1	3	3	3	N <sub>3</sub>	1	2	2	1
4	2	1	2	3					
5	2	2	3	1					
6	2	3	1	2					
7	3	1	3	2					
8	3	2	1	3					
9	3	3	2	1					

(row)은 설계변수의 서로 다른 수준 조합(level combinations)을 나타낸다. 외측 배열의 행에는 잡음 변수가 배치되고, 열(column)은 잡음변수의 서로 다른 수준 조합을 나타낸다. 실제 실험은 내측 배열의 각 행별로 수행되며, 행별 실험은 또한 외측 배열의 각 열에 대해 잡음변수의 정해진 수준대로 반복해서 실시한다. 가령 Table 1에서 9번 행의 두번째 단위의 실험은 설계변수 X<sub>1</sub>과 X<sub>2</sub>는 3 수준, X<sub>3</sub>은 2 수준, X<sub>4</sub>는 1 수준에 해당하는 인자값을 설계조건으로 하고, 잡음변수 N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>는 설계변수의 공칭값에 N<sub>1</sub>은 1 수준, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>는 2 수준에 해당하는 변동을 고려한 값을 잡음조건으로 하여 실험을 실시한다. 만약 여기서 잡음변수 N<sub>i</sub>과 설계변수 X<sub>j</sub>이 동일한 변수라면 실험에 사용될 설계변수 X<sub>j</sub>의 수준값은 X<sub>j</sub>의 3 수준값에 N<sub>i</sub>의 1 수준 변동량을 더한 값이 된다.

일단 실험계획에 의한 전산실험이 실시되면 최적 설계를 얻기 위해 각 설계대안을 Taguchi가 제안한 S/N비를 사용하여 평가한다. 앞서 설명한대로 망소특성의 S/N비는 성능특성의 평균과 분산을 동시에 평가하기 위한 척도이므로 휨에 대한 강건성을 구현하기 위한 평가 기준으로 적합하다. 본 문제에서 모니터 장식패널의 경우 최적화 특성이 휨이 되므로 망소형에 속한다. 망소형의 경우 S/N비는 다음 식 (3)으로 정의한 바 있다.

$$S/N_{smaller} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (6)$$

여기에서 n은 내측배열의 각 행에 대해 전산실험을 통해 얻은 휨 데이터의 개수이고, Y<sub>i</sub>는 i번째 휨 데이터이다. 망소형의 경우 특성값의 S/N비가 클수록 특성값의 평균과 분산은 동시에 작아진다. 이것은 S/N비가 큰 설계해가 곧 최적 강건해가 됨을 뜻한다. 따라서 식 (5)로 정의된 최적설계를 얻기 위해서는 휨에 대한 식 (6)의 S/N비가 큰 설계를 얻으면 된다.

### 4. 설계 최적화

#### 4.1 설계 모델

Fig. 2는 본 연구의 설계 최적화의 대상으로 선정된 영상 표시기기 모니터 케이스의 전면부 하단의 장식용 패널이다. 그림에서 A-B-C-D로 구분된 긴 평면 부위가 조립 후 모니터의 하단 전면에 보여질 부분으로 치수는 길이(AD)가 427 mm이고 높이(AB)가 24.4 mm이다. 모니터의 전체 형상과 미관을 위해 이 전면부는 휨이 없는 완전 평면 형상이 요구되나, 이처럼 폭이 좁고 길이가 긴 평면 형상 제품의 경우에 휨의 발생을 완전히 제어하기란 성형 특성상 극히 어렵다. 따라서 양산 중인 공정에서도 휨의 크기를 최소화하

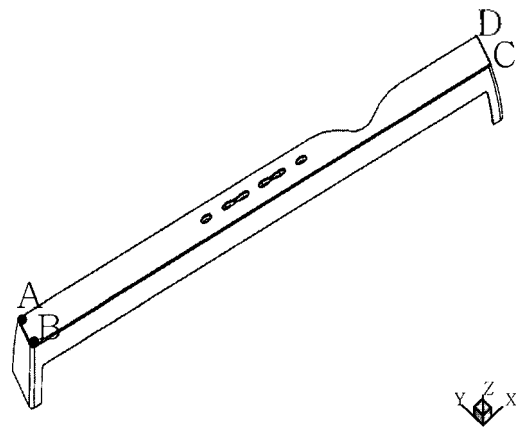


Fig. 2. 3-D view of decorating panel model.

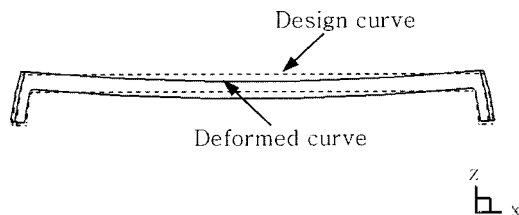


Fig. 3. Warpage due to differential cooling effect.

는 것이 현실적인 목표가 되고 있다. 사출성형에 있어 220°C의 용융된 수지가 금형내로 주입되어 일정한 형상을 이룬 뒤 수지의 냉각을 돕기 위하여 금형의 상, 하측에 일정수의 냉각라인을 배치시킨다. 여기에서 사출기의 노즐이 위치한 금형의 캐비티(cavity)측은 용융 수지가 주입되면서 전달되는 열과, 노즐(nozzle) 및 스크류(screw) 주변에 설치한 고온의 히터(heater)에 의한 열전도에 의하여 각종 기계장치가 위치한 코어(core)측 보다는 보통 5°C~10°C 정도 더 높은 온도를 유지하게 된다. 따라서 상하 금형을 각각 동일한 온도의 냉각수로 순환, 냉각시키면 Fig. 3에 나타난 것과 같이 캐비티 측과 코어 측 금형 간에는 냉각 온도차가 발생하게 되어 휨이 발생하게 된다.

현재의 양산 공정에서는 길이가 긴 모니터 장식패널에 있어서 이러한 금형의 캐비티와 코어 측의 온도차에 의한 휨 발생을 보상하기 위하여 인의로 사출품의 휨의 크기를 예측하여 휨 발생의 반대 방향, 즉 금형의 캐비티 측으로 약간 휘게 제품 형상을 수정 설계하고 이 형상대로 금형을 가공한 후 성형하고 있다. 하지만 사출성형의 특성상 사출품의 정확한 휨 예측이 불가능하고, 제품의 설계 형상을 강제로 변형시킬 경우 사출기 및 금형의 변동되는 조건에 의하여 발생하는 금형 온도차로 인한 수축으로 또 다른 강제 변형을 하다가 보니 결과적으로 휨의 발생을 제어하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 모니터 장식패널에 대해 이같은 제품 형상의 설계 변경을 통해 휨을 제어하는 기존의 공정 대신, 금형의 캐비티 측과 코어 측의 냉각수 온도를 상이하게 하는 방식으로 휨의 크기를 최소화하고자 한다.

이 모델에서 전면 평면부(A-B-C-D)의 휨의 크기를 변형 후 면의 근사적 편평도(flattness)로 정의하였다. 이 모델의 경우 평면부의 가운데 부위와 양쪽 가장자리 부위가 최대 처짐(deflection)이 발생하므로 본 연구에서는 평면부의 중심선에 위치한 절점들 중 가운데 절점과 좌측 및 우측 가장자리 절점간의 Z방향 최대수직변위량의 평균치로 측정하였다. 본 연구에서는 사출성형 해석 소프트웨어로 Moldflow(ver.4.0.1)<sup>11)</sup>를 사용하여 중립면(mid-plane) 생성 방식으로 제품을 모델링하고, 총 1875개의 메쉬(mesh)를 생성하여 진산 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 최적화 과정을 직용하기 전, 즉 설계 개선전의 공정조건에 대한 휨 해석결과를 보인 것이다. Table 2는 CAE 해석결과 데이터로부터 처짐이 가장 크게 나타나는 중심부와 좌, 우측 가장자리에 위치한 3개의 유한요소 절점들의 변형 후 처짐과 이로부터 휨

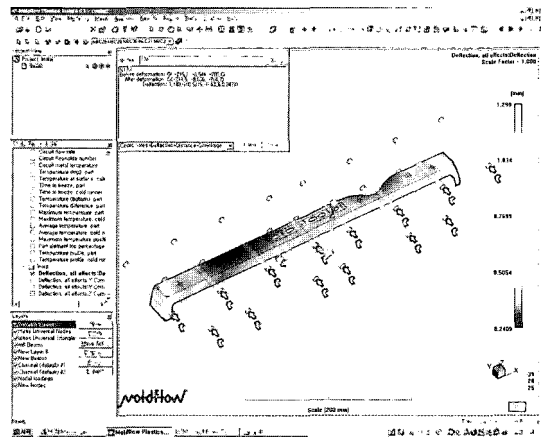


Fig. 4. Warpage analysis in the initial design.

Table 2. Warpage CAE data in the initial design

Node #	Deflection (mm)			Warpage (mm)
	X	Y	Z	
178	0.5815	-0.4926	0.8473	1.2993
52	0.0391	0.2780	-0.4108	
691	-0.6332	-0.5887	0.9297	

을 계산한 결과를 나타낸 것이다. CAE 해석결과 설계 개선전의 휨의 크기는 1.2993 mm였고, 동일 공정 조건에서 수행한 실제 실험치는 1.53 mm로 나타났다.

#### 4.2 전산실험

본 연구에서는 모니터 장식패널 평면의 휨을 최소화하기 위해 공정조건을 최적해 탐색 공간으로 고려하였다. 또한 제어하기 힘든 공장조건의 변동에 대해 강건한 설계해를 구하기 위해, 잡음인자를 외측매열에 배치한 고적실험을 사용하여 전산실험을 실시하였다. Taguchi가 제안한 강건설계법에서는 강건성에 영향력이 큰 소수의 핵심 제어인자들을 찾아 그 공칭값을 적절히 선택하는 것이 가장 중요하며, 이 때 제어인자는 기본적으로 관련 엔지니어들의 브레인스토밍(brainstorming)에 따른 선택을 권장한다. 실험에 허용되는 자원 등에 대한 현실적 고려를 통해 보통 7~8개 이내의 인자가 선택된다. 본 연구에서도 시간, 비용 및 요구 품질수준이라는 현실적인 제약 하에서 다수의 사출공정 설계자와 품질관련 엔지니어들에 의해 제어인자들이 선택되었다.

일반적으로 사출제품의 휨에 영향을 주는 변수는 그 수가 매우 많고 주로 금형, 온도, 압력, 냉각 등과 관련되나, 제품의 형상이나 수지유형 등에 따라 다양

**Table 3.** Design factors and their levels

Design factor	Level 1	Level 2	Level 3
VI2 (%)	4	6	8
VI3 (%)	50	60	70
VI4 (%)	37	45	53
PH1 (%)	40	45	50
PH3 (%)	34	38	42
CAT (°C)	10	15	20
COT (°C)	25	30	35

하게 변화한다. 본 연구에서는 고려할 수 있는 다수의 사출성형 설계변수들 중 경험적 판단에 근거하여 모니터 장치패널의 전면부의 휨에 많은 영향을 주는 것으로 추정되는 7개의 공정변수를 설계변수로 선정하였다. 즉 총 6 단계의 사출속도 중 3개의 사출속도, 즉 2단계 사출속도(VI2), 3단계 사출속도(VI3), 4단계 사출속도(VI4), 그리고 총 세 단계의 보압 중 2개 보압, 즉 1단계 보압(PH1)과 3단계 보압(PH3), 캐비티측 냉각수 온도(CAT), 코어측 냉각수 온도(COT) 등을 설계변수로 선정하였으며 각 설계변수에 3 수준값

**Table 4.** Noise factors and their levels

Noise factor	Level 1	Level 2
PH3 (%)	-5	+5
CAT (°C)	-10	+10
COT (°C)	-10	+10

을 부여하였다. Table 3은 최종 선정된 설계변수와 그 수준을 나타낸다. 여기에서 사출속도와 보압은 각각 사출기의 시간당 최대토출속도(최대토출량(cm<sup>3</sup>/sec)와 최대사출압에 대한 백분율(%)로 표기한다. 설계변수로 선택하지 않은 1단계 사출속도(VI1)와 2단계 보압(PH2)은 각각 8%와 45%로 설정하였다.

본 모델에 대해 사출속도를 휨의 강진설계를 위한 주요 설계변수로 선정한 것은 모델의 형상에 기초한 경험적 판단에 따른 것이다. 본 모델처럼 벽두께가 얇고 게이트(gate)를 기준으로 유동길이가 긴 장방향 형상인 경우에 사출속도가 직절히 빠르게 제어되지 않으면 제품의 외관 품질과 관련하여 플로우마크(flow mark), 버(burr), 흑줄(black streak) 등과 같은 불량률이 많이 발생하게 된다. 또한 큰 잔류응력(residual

**Table 5.** Result of DOE experiment

Exp.#	VI2	VI3	VI4	PH1	PH3	CAT	COT	#				S/N ratio
								1	2	3	4	
1	1	1	1	1	1	1	1	1.112	1.236	1.322	1.211	-1.745
2	1	2	2	2	2	2	2	0.792	0.917	0.914	1.100	0.563
3	1	3	3	3	3	3	3	0.706	0.887	1.092	0.650	1.399
4	2	1	1	2	2	3	3	1.073	1.236	1.437	1.511	-2.446
5	2	2	2	3	3	1	1	1.333	1.299	1.018	1.010	-1.400
6	2	3	3	1	1	2	2	1.119	1.015	1.101	0.941	-0.393
7	3	1	2	1	3	2	3	1.371	1.249	1.547	1.147	-2.521
8	3	2	3	2	1	3	1	0.862	0.964	1.154	1.337	-0.784
9	3	3	1	3	2	1	2	0.889	0.808	0.816	0.920	1.315
10	1	1	3	3	2	2	1	1.186	1.074	1.261	1.120	-1.308
11	1	2	1	1	3	3	2	1.303	0.948	1.228	0.866	-0.839
12	1	3	2	2	1	1	3	0.974	0.832	0.857	1.131	0.392
13	2	1	2	3	1	3	2	1.298	1.064	1.244	1.246	-1.700
14	2	2	3	1	2	1	3	1.189	0.984	1.225	0.979	-0.827
15	2	3	1	2	3	2	1	0.940	0.704	0.800	0.796	1.782
16	3	1	3	2	3	1	2	1.210	1.082	1.300	0.816	-0.961
17	3	2	1	3	1	2	3	1.070	0.721	0.986	0.927	0.585
18	3	3	2	1	2	3	1	1.162	1.115	1.272	0.987	-1.127

stress)이 발생하여 휨 발생의 원인이 되거나 수지가 금형내에 완전히 채워지기 전에 수지 일부가 응고되기 시작하여 제품 전체의 불균형 냉각을 초래하며<sup>18)</sup> 이후 보압도 제품에 불균일하게 작용하여 결과적으로 휨 발생 가능성이 매우 크다고 판단하였기 때문이다. 또한 본 모델에 대해 3단계 보압(PH3), 캐비티측 냉각수 온도(CAT), 코어측 냉각수 온도(COT) 등의 변동을 잡음변수로 선정하고 각 잡음변수에 2 수준값을 부여하였다. Table 4는 선정한 잡음변수와 수준값이다.

선정된 7개의 설계변수와 3개의 잡음변수에 의한 교적실험을 위해 내측 직교배열로  $L_{18}(3^7)$ 을, 외측 직교배열로  $L_4(2^1)$ 을 사용하였다. 내측배열의 각 행 별로 잡음배열에 정해진 잡음변수 수준으로 결정되는 변수값에 따라 전산실험을 실시하여 휨의 크기를 계산하고 이로부터 다시 S/N비를 계산하였다. Table 5는 총 72번의 전산실험으로부터 얻은 휨 값과 S/N비를 구한 결과이다.

4.3 최적해의 결정

Table 5의 실험치로부터 S/N비 분석<sup>19)</sup>을 통해 최적해를 결정하였다. Table 6은 S/N비에 대한 분산분석(Analysis of variance; ANOVA)표이다. 분산분석 결과 PH3를 제외한 모든 공정변수들이 휨의 강간성에 의미있는 영향을 주는 것으로 나타났다. 여기에서 본 모델의 경우 사출속도가 VI3, VI4, VI2의 순서로 휨에 미치는 영향이 큼을 F-검정값(F-value)으로부터 알 수 있으며, 이는 사출속도를 설계변수로 선정한 경험적 판단이 유의했음을 의미한다. Table 7은 S/N비에 대한 주효과 분석결과를 나타낸 것이다. Table 7로부터 평균분석<sup>19)</sup>에 의한 최적 공정조건은 (VI2)1, (VI3)3, (VI4)1, (PH1)3, (CAT)2, (COT)2로 나타났다. 또한 이때의 최소 휨 추정치는 0.76 mm였고 S/N비 추정치는 2.11 dB로 나타났다.

Table 6. ANOVA table

Response - S/N ratio				
Factor	SS	d.o.f	mean sq	F
VI3 (%)	16.59	2	8.29	65.3
PH1 (%)	4.20	2	2.10	16.5
VI4 (%)	1.66	2	0.83	6.5
CAT (°C)	1.47	2	0.74	5.8
VI2 (%)	0.98	2	0.49	3.9
COT (°C)	0.54	2	0.27	2.1
error	0.38	3	0.13	

Table 7. Factor effects

Factor	Level	Response (S/N)
VI2	1	-0.26
	2	-0.83
	3	-0.59
VI3	1	-1.78
	2	-0.45
	3	0.56
VI4	1	-0.23
	2	-0.96
	3	-0.48
PH1	1	-1.24
	2	-0.24
	3	-0.19
PH3	1	-0.60
	2	-0.64
	3	-0.43
CAT	1	-0.54
	2	-0.22
	3	-0.92
COT	1	-0.76
	2	-0.34
	3	-0.57

실험을 통한 검증에 앞서 실험계획법에 의해 추정된 최적설계해를 CAE 해석결과와 비교, 검증해 보았다. Fig. 5는 추정 최적설계해의 공정조건에 대한 휨의 CAE 해석결과를 보인 것이다. Table 8은 CAE 해석을 통해 휨를 계산한 결과이며, 이 때 휨의 크기는 0.9304 mm로 나타났다. Table 2와 Table 8의

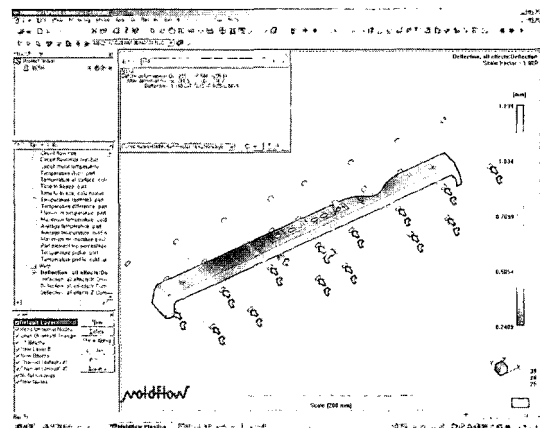


Fig. 5. Warpage analysis in the optimized design.

Table 8. Warpage CAE data in the optimized design

Node #	Deflection (mm)			Warpage (mm)
	X	Y	Z	
178	0.5753	-0.4497	0.5626	0.9304
52	0.0343	0.2378	-0.3090	
691	-0.6256	-0.5409	0.6801	

CAE 해석결과를 비교해 보면 설계 개선전의 휨(1.2993 mm)에 비해 최적 강건설계해의 휨(0.9304 mm)이 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

4.4 실험 검증

전산실험의 결과로부터 추정된 최적 설계해를 적용하여 실제 모니터 장식패널의 제품 제작을 위한 사출 성형 실험을 실시하였다. 사출성형에 사용된 수지는 GN-5008HF로 (PC+ABS)이며, 사출기는 LG 사출성형기(모델명 : LGE150, LG Cable co.) (최대토출속도 80 cm<sup>3</sup>/sec)를 사용하였다. 게이트는 한 점 사이드(side) 게이트를 사용하였으며, 금형 온도를 45°C로 하였다.

7개의 설계변수 중 사출기의 조작과 관련된 5개의 설계변수, 즉 2단계 사출속도(VI2), 3단계 사출속도(VI3), 4단계 사출속도(VI4), 1단계 보압(PH1), 3단계 보압(PH3)에 대해 조작부를 제어하여 각각 실험을 통해 결정한 최적값으로 설정하였다. 즉 VI2는 4%, VI3은 70%, VI4는 37%, PH1은 50%, PH3은 42%로 제어하였다. 또한 설계변수가 아닌 1단계 사출속도(VI1)와 2단계 보압(PH2)은 각각 공칭값인 8%와 45%로 설정하였다. 또한 사출속도의 전환시점은 노즐 끝에서부터 측정된 스크류 행정거리가 110 mm일 때 2속전환(VI1→VI2), 108 mm일 때 3속전환(VI2→VI3), 20 mm일 때 4속전환(VI3→VI4)로 하였고, 보압 전환시점은 10 mm로 설정하였다. 또 보압시간을 포함한 사출시간은 10초였고, 냉각시간은 25초로 하였다. 또 캐비티 냉각수 온도(CAT)와 코어 냉각수 온도(COT)는 별도로 설치되어 있는 온수기 및 냉각 타워에서 각각 15°C와 30°C로 조절하였다.

Fig. 6은 사출실험 결과 사출기로부터 취출된 스프루부, 런너부, 게이트부가 제거되지 않은 모니터 장식패널 제품이다. Fig. 7에서 석 정반과 하이트 게이지(height gage) 및 다이얼 게이지(dial gage)를 사용하여 제작된 모니터 패널 전면의 평면부에 발생한 휨의 크기를 측정해 보았다. 유한요소모델에서 휨을 계산한 부위와 동일한 위치의 가장자리와 중심부에서 변위를 측정한 결과 휨의 크기가 0.97 mm였다. 이 수

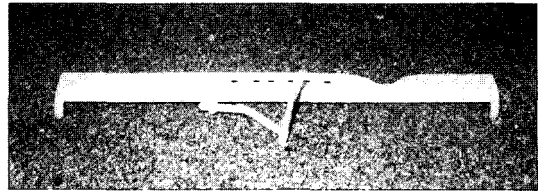


Fig. 6. Molded decorating panel with rigging parts.

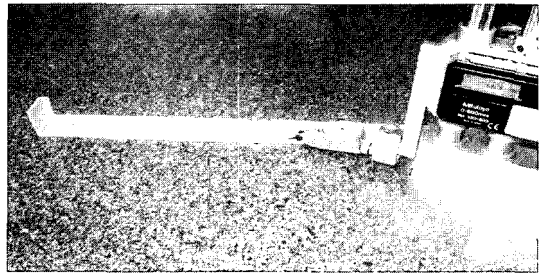


Fig. 7. Measurement of warpage.

치는 현재 양산중인 제품의 평균 휨 크기인 1.53 mm에 비해 휨의 크기가 약 36.6% 정도 개선된 것으로 나타났다.

5. 결 론

일반적으로 사출성형 공정은 다차원적이고 비선형적인 관계에 있는 다수의 설계변수들이 서로 복잡하게 작용할 뿐만 아니라 공정의 내재적이고 불가피한 변동성으로 인해 성형불량을 최소화하는 최적의 설계해를 얻기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 사출 성형에 의하여 제작되는 모니터의 장식용 장식패널의 평면부에 발생하는 휨을 강건성을 고려한 설계 최적화를 통해 최소화하고 실험을 통해 최적화 방법의 유용성을 확인해 보았다.

설계 최적화를 위해 Taguchi의 직교배열에 의한 실험계획을 수립하고 상용 사출성형 해석프로그램인 Moldflow의 시뮬레이션 툴과 통합하였다. 설계해의 강건성을 평가하기 위해 잡음변수로 구성된 외측 직교배열표에 따라 공정변동을 모델링하여 전산실험을 실시하였으며 그 결과값으로부터 신호 대 잡음비(S/N 비)를 계산한 후 평균분석에 의해 최적 설계해를 결정하였다. 본 연구에서는 제품 형상의 설계 변경을 통해 휨을 제어하는 기존의 공정 대신, 금형의 캐비티 측과 코어 측의 냉각수 온도를 상이하게 하는 방식으로 휨의 크기를 최소화하였다. 설계실험을 위해 7개의 설계변수(2, 3, 4단계 사출속도, 1, 3단계 보압, 캐비티



및 코어측 냉각수온도)와 3개의 잠음변수(3단계 보압, 캐비티 및 코어측 냉각수온도)를 선정하였다.

결정된 설계 최적해의 타당성을 확인하기 위해 실험을 실시하였다. 실험 결과 모니터의 장식패널의 평면부의 휨의 크기가 0.97 mm로 나타났고, 이것은 현재 생산 중인 제품의 휨(1.53 mm)에 비해 대폭 개선된 것으로 확인되었다.

본 연구에서 휨을 최소화하기 위해 개발한 최적설계 방법은 휨 이외의 다른 형태의 성형불량을 최소화하는 설계문제에도 그 성형불량을 적절히 정량화 할 수만 있다면 효과적으로 적용할 수 있을 것이며, 따라서 설계의 효율에 따른 생산성 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Yao, D., "Direct search-based automatic minimization of warpage and weldlines in injection molded parts," Masters Thesis, University of Massachusetts, MA, pp. 40-43, pp. 80-88, 1998.
2. Phadke, M. S., "Quality engineering using robust design," AT&T Bell Laboratories, pp. 113-140, 1992.
3. Pandelidis, I. and Zou, Q., "Optimization of injection molding design, part II: Molding condition optimization," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 883-892, 1990.
4. Choi, G. H., Lee, K. D., Chan, N. and Kim, S. K., "Optimization of process parameters of injection molding with neural network, application in a process simulation environment," *CIRP Annals*, Vol. 43, pp. 449-452, 1994.
5. 김석주, "유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 조건의 최적화," 석사학위 논문, 서울대학교, pp. 1-59, 1995.
6. 김영일, "유전 알고리즘을 이용한 사출 성형 설계의 자동화," 박사학위 논문, 서울대학교, pp. 1-135, 1995.
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. Dillman, S. H., Howc, D. and Robar, H., "Optimization of the injection molding process," *SPE ANTEC Tech. Papers*, Vol. 1, pp. 754-757, 1996.
9. Park, J. C. and Kim, B. H., "Automated molding design methodology to optimize multiple defects in injection molded parts," *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 133-145, 2000.
10. 박종천 외 2인, "TOPSIS와 콤플렉스법에 의한 사출성형품의 다속성 강건설계," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 12, pp. 116-123, 2001.
11. 김경모 외 2인, "직접탐색법을 이용한 사출성형품의 강건설계," 한국품질경영학회지, Vol. 29, No. 3, pp. 86-96, 2001.
12. Min, B. H., "A study on quality monitoring of injection-molded parts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, pp. 1-6, 2003.
13. 정종훈, 이건우, "사출금형을 위한 협업 설계 시스템의 개발," 한국CAD/CAM학회논문집, Vol. 5, No. 1, pp. 50-60, 2000.
14. Malloy, R. A., "Plastic part design for injection molding: An introduction," Hanser/Gardner Publishers, Inc., Cincinnati, pp. 63-87, 1994.
15. Schmidt, S. R. and Launsby, R. G., "Understanding industrial designed experiments," Air Academy Press, pp. 6-1-6-28, 1997.
16. Roy, R. K., "Design of experiments using the taguchi approach," John Wiley&Sons Inc., New York, pp. 336-363, 2001.
17. Moldflow Pty. Ltd., "MOLDFLOW TRAINING MANUAL," 2003.
18. 권태현 외 5인 역, "사출성형 CAE 설계지침," 문운당, pp. 125-128, pp. 138-151, 2001.
19. 이레테크, "MINITAB 실무완성," 2000.



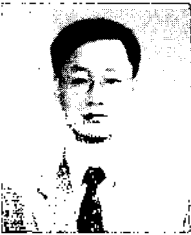
**권 오 관**

1996년 경일대학교 기계공학과 학사  
 2004년 금오공과대학교 테크노기계  
 공학과 석사  
 1996년~현재 LG전자 DID연구실 선임연  
 구원  
 관심분야: 플라스틱 사출성형, 사출기구  
 설계, 강건설계



**박 종 천**

1987년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1989년 서울대학교 기계설계학과 석사  
 1993년 서울대학교 기계설계학과 박사  
 1997년 Univ. of Massachusetts, Post  
 Doc.  
 1994년~현재 금오공과대학교 기계공학부  
 부교수  
 관심분야: Computational Geometry  
 Design, Plastic Injection Molding  
 Design, Robust Design Meth-  
 odology, Reverse Engineering



**김 경 모**

1985.3~1990.2 경상대학교 산업공학과  
 전임강사/조교수  
 1990.3~현재 금오공과대학교 산업시스템  
 공학전공 부교수/교수  
 1998.2~1999.2 University of Massa-  
 chusetts, Visiting Professor  
 관심분야: 실험적 설계법(Robust Design,  
 RSM), 다속성 설계론, DFSS