

실험계획법과 수치해석을 연계한 정밀 전자부품 사출성형 공정의 최적설계

박 근[†] · 안종호* · 최상련*

(2001년 10월 18일 접수, 2002년 3월 29일 심사완료)

Application of Design of Experiments and Numerical Analysis to Optimal Design for Injection Molding Processes of Electrical Parts

Keun Park, Jong-Ho Ahn and Sang-Ryun Choi

Key Words : Injection Molding(사출성형), Numerical Analysis(수치해석), Design of Experiment(실험
계획법), Optimal Design(최적설계), Interaction(교호작용)

Abstract

The present work concerns the optimal design for injection molding processes by using the design of experiments (DOE) and numerical analysis. The DOE approaches is planned to be able to consider two-way interaction, and have been applied progressively for both mold design and process design. Numerical analyses have been carried out as a design of experiments for mold parameters such as runner specifications and cooling channel configurations. In order to determine optimal process parameters, experiments have been performed for various process conditions with the DOE scheduling. As a result, the quality and productivity of the product have been improved, and the proposed approach can be successfully reflected on the industrial injection molding process of precision electronics parts.

기호설명

- n : 점성모델 지수
- τ^* : 전단 전이응력
- η_0 : 전단력이 작용하지 않을때의 점성계수
- T_b : 온도 민감도(temperature sensitivity)
- β : 압력 계수
- N, k : 실험 회수 및 인자의 수
- n_b, m : 실험수준 및 반복회수
- E_j : j -번째 인자의 주효과
- I_{jk} : j -번째 인자와 k -번째 인자의 교호작용

1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자제품을 제작

하는 생산기술로서 높은 품질과 신속한 납기가 요구된다. 이를 위해서는 게이트의 위치 및 크기, 러너의 배열, 냉각회로의 구성 등의 금형설계 조건과 사출압, 사출온도, 금형온도, 냉각시간 등의 성형조건을 모두 고려해주어야 한다. 이러한 여러 가지 인자들은 각각 독립적인 요소로서만이 아니라 여러 인자들간의 상호 복합적인 작용으로 제품의 품질 및 생산성에 영향을 미치게 된다. 따라서 상기의 모든 인자에 대한 영향을 분석하여 최적의 공정조건을 도출하기에는 많은 시간과 노력이 소요된다. 특히 러너시스템이나 냉각회로의 구성 등 금형설계 변수를 결정하기 위해 기존에는 여러번의 시행착오를 거쳐 최적의 금형설계 및 그에 따른 가공조건을 설정해왔고, 결과적으로 많은 시간과 비용이 추가적으로 소모되어 왔다.

이러한 시간과 비용을 줄이기 위하여 컴퓨터 원용 수치해석(Computer Aided Engineering; CAE)기법이 사출성형 분야에도 제품설계, 금형설계 및 성형조건 분석 등 다양한 목적으로 활용되고 있다.¹⁾²⁾ 그러나 CAE 해석의 경우에도 금형설계 변수와 사출성형 조건 모두를 고려한 최적의 사출조

[†] 책임지자, 회원, 삼성전기(주) 생산기술연구소

E-mail : brolin@samsung.co.kr

TEL : (031)210-5778 FAX : (031)210-5429

* 삼성전기(주) 생산기술연구소

건을 도출하기 위해서는 많은 시간과 노력이 소요된다.

최적의 사출조건을 도출하기 위해 여러가지 최적화 기법을 도입한 연구가 진행되어왔다.⁽⁴⁻⁸⁾ 이 중 특히 사출성형에 널리 적용되는 기법이 실험계획법(Design of Experiments: DOE)이다. 실험계획법은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하고 이들간의 관계를 체계적으로 설정하기 위한 실험을 실시하고, 그 결과를 분석함으로써 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법이다. 실험계획법은 사출성형 분야에 있어서도 최적 공정변수를 도출하기 위한 방안으로서 활용되어 왔으며, 특히 다구찌 방법을 사용한 실험계획 기법이 많이 적용되었다.^(6,7) 다구찌 방법은 신호인자의 효과를 유지하면서 잡음인자의 종합적 영향을 최소화할 수 있도록 설계변수를 설정해주는 방법으로, 강건설계(Robust design)의 중요한 도구로서 사용된다. 그러나 다구찌 방법은 일반적으로 신호인자에 따른 주효과(main effect)에 대해서는 분석이 가능하나 인자간의 교호작용(interaction)이 고려되지 못하는 단점이 있다.

일반적으로 사출성형과 관련된 인자간에는 교호작용이 존재한다. 예를 들어 러너지시스템의 설계와 냉각회로의 구성이 상호간에 영향을 미친다면, 이를 효과적으로 고려할 수 있도록 위한 실험계획을 수립해야 한다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 교호작용을 고려하기 위한 실험계획을 수립하고, 수치해석을 병행하여 최적의 사출금형설계 및 성형조건을 보다 경제적으로 도출하기 위한 연구를 진행하였다. 대상 제품으로는 정밀 전자부품인 편향코일(deflection yoke)을 선정하였다. 편향코일은 TV 나 컴퓨터용 모니터의 브라운관에 장착되는 부품으로, 전자총에서 방사되는 전자빔을 편향시켜 스크린에 투영시키는 역할을 수행한다. 여기서 코일은 사출품의 곡면상에 권선되며, 곡면형상의 정밀도가 최종 제품의 품질에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 고품질의 제품을 얻기 위해서는 적절한 금형설계사양 및 사출성형 조건을 설정해주어야 한다.

본 연구에서 진행된 실험계획법은 크게 2 단계로 구분되어진다. 우선 금형설계 조건의 선정 과정에서 여러 설계사양에 대해 금형을 제작하는 것은 현실적으로 어려우므로 수치해석을 통해 접근하였다. 해석으로부터 얻어진 결과를 분석하여 최적의 금형설계 변수를 도출한 뒤, 이를 토대로 금형을 제작하였다. 반면에 사출성형 조건의 경우는

제작된 금형을 사용하여 반복실험을 수행함으로써 그 결과를 측정하여 분석을 수행하고, 이를 바탕으로 안정된 제품을 얻을 수 있는 사출성형 조건을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사출성형의 수치해석

본 연구에서는 사출성형 공정의 예측을 위해 컴퓨터를 사용한 수치해석 기법을 적용하였다. 해석 소프트웨어는 C-MOLD⁽⁹⁾를 사용하였으며, 이때의 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁾

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_i)_i = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + \tau_{i,j} + \rho f_i \tag{2}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j T_{,j} \right) = T_{,i,i} + \tau_{i,j} + \eta \dot{\gamma}^2 \tag{3}$$

이때 점성계수(η)는 5 개의 재료상수(n, τ^*, B, T_b, β)를 갖는 수정된 Cross-exp 점성모델을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^n} \tag{4}$$

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 다음과 같다.

$$\eta_0(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \tag{5}$$

이때 T_b 는 온도 민감도(temperature sensitivity)이고, β 는 압력 계수(pressure coefficient)이다.

2.2 교호작용을 고려한 실험계획

실험계획법은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하고 인자간의 관계를 체계적으로 조사하기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법이다.⁽¹⁾ 제품을 제작한다는 관점에서 볼 때 실험계획법은 제품에 영향을 미치는 인자를 체계적으로 분석함으로써 제품의 품질

과 신뢰성, 생산성 및 가격의 향상에 기여하고 있다. 이러한 실험계획법은 크게 완전요인(full factorial)에 대한 실험계획과 부분요인(fractional factorial)에 대한 실험계획으로 구분될 수 있다. 완전요인 실험은 모든 인자의 주효과 및 인자간의 교호작용을 고려할 수 있다는 장점이 있으나, 인자의 모든 조합에 대해 실험을 실시해야 하므로 실험의 수가 증가하는 단점이 있다. 인자의 수를 k , 실험수준을 n_i , 반복회수를 m 이라고 하면 완전요인 실험의 수는 다음과 같다.

$$N_{full} = m(n_i)^k \quad (6)$$

반면에 부분요인 실험은 완전요인 실험의 일부를 실행하여 주요요인을 선별하기 위해 사용되는 방법으로, 고차원 교호작용의 효과는 무시할 수 있을 정도로 희박하다는 '효과와 희박성의 원리(The sparsity of effects principle)'에 기초하여 주효과 및 저차원 교호작용에 의한 영향만을 고려하는 방법이다. 부분화의 정도를 q 라고 할 때 필요한 실험의 수는 다음과 같이 감소된다.⁽¹⁰⁾

$$N_{fractional} = m(n_i)^{k-q} \quad (7)$$

식 (7)에서 유추할 수 있듯이 q 를 증가시킬수록 실험회수는 감소하게 된다. 그러나 q 를 지나치게 증가시키면 실험의 분석도(resolution)가 감소하여 실험결과의 신뢰성이 저하된다. Table 1 에 실험수준이 2 일 경우 인자의 수(k)에 대한 실험회수(N) 및 그에 따른 분석도를 도시하였는데, 일반적으로 주효과와 2 차원 교호작용의 영향을 고려하기 위해서는 분석도 IV이상의 실험이 필요하다.⁽¹¹⁾

실험계획법에 의거하여 실시된 결과를 분석하기 위해서는 각각의 인자에 대한 주효과 및 2 차원 교호작용의 영향을 비교해주어야 한다. j -번째 인자의 주효과와 인자와 k -번째 인자간의 교호작용은 각각 다음과 같이 계산된다.⁽¹²⁾

$$E_j = \sum_{i=1}^N (I_{ij} \times R_i) / \sum_{i=1}^N R_i \quad (8)$$

$$I_{jk} = \sum_{i=1}^N [(I_{ij} \times I_{ik}) \times R_i] / \sum_{i=1}^N R_i \quad (9)$$

여기서 R_i 는 i -번째 실험에 대한 결과치, E_j 는 j -번째 요인에 대한 주효과, I_{jk} 는 j -번째 인자와 k -번째 인자와의 교호작용의 효과를 의미하며, I_{ij} 는 j -번째 인자의 수준을 -1 과 1 사이에서 정규화시킨 값으로, 다음과 같은 직교성이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^N I_{ij} = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

3. 사출금형 최적설계를 위한 실험계획

3.1 입력 변수의 선정

본 연구에서 개선하고자 하는 편향코일은 사출성형에 의해 제작되며, 2 개취의 금형으로 설계하고자 한다. 수지는 GE Plastics 의 Noryl PX9406 을 사용하였다. Fig. 1 에 편향코일의 제품형상 및 러너시스템의 구성을 도시하였다. 게이트는 3 개의 핀포인트 게이트를 사용하였으며, 곡면부에 1 개의 주게이트, 스크린부에 2 개의 보조게이트로 구성되어 있다. 여기서 주게이트와 보조게이트, 주러너와 보조러너의 설계에 따라 제품의 유동패턴이 차이가 발생하며, 이는 결과적으로 제품의 성형성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 주러너와 보조러너에 대해 각각 러너의 직경과 게이트의 위치를 실험계획법을 위한 입력변수로 선정하였다(Fig. 2 참조).

한편 제품의 생산성 향상 측면에서 볼 때 적절

Table 1 Available factorial design with resolution (F denotes full factorial design)

| N \ k | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|---|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| 4 | F | III | | | | | | | |
| 8 | | F | IV | III | III | III | | | |
| 16 | | | F | V | IV | IV | IV | III | III |
| 32 | | | | F | VI | IV | IV | IV | IV |
| 64 | | | | | F | VII | V | IV | IV |

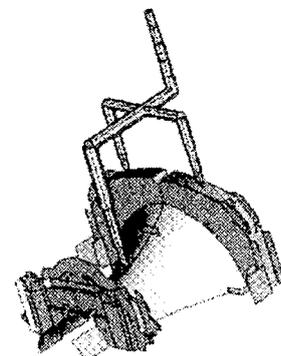


Fig. 1 Three-dimensional shape of a coil separator

한 냉각회로의 구성에 대해서도 고려해주어야 한다. 적절한 냉각회로의 설계는 제품의 냉각효과를 증대시켜 냉각시간을 단축시킴으로써 결과적으로 제품의 생산성을 제고할 수 있다. 반면에 냉각이 너무 지나치게 이루어지면 금형의 온도를 저하시켜 수지의 점성을 높임으로써 결과적으로 유동성을 저하가 초래된다. 따라서 냉각회로의 설계는 단순히 냉각효율을 높이기 위한 관점에서만이 아니라 제품의 유동 특성도 함께 고려해주어야 한다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 냉각회로의 구성 역시 입력변수로 선정하여 러너/게이트의 설계와 함께 최적의 금형설계를 위한 인자로 활용하였다.

Fig. 3의 (a)는 현재 사용되고 있는 냉각회로의 구성을 나타내고, (b)에 이때의 최종 온도분포를 도시하였다. 이때 냉각시간은 7.0 초, 수지 용융온도 및 냉각수 온도는 각각 310℃와 20℃로 설정하였다. Fig. 3의 (b)에서 제품의 뒤쪽(neck 부)에서 온도가 높게 발생함을 알 수 있는데, 냉각시간을 줄이기 위해서는 해당 부분을 집중적으로 냉각할

수 있도록 냉각회로를 설계해야 한다. Fig. 4에 고온부를 집중적으로 냉각할 수 있도록 수정된 2개의 냉각회로 구조를 도시하였다.

3.2 사출금형의 최적설계

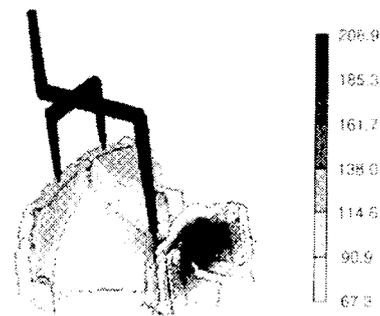
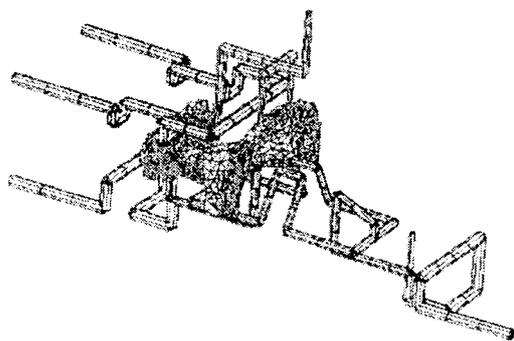
본 연구에서는 편향코일 사출공정의 최적화를 위해 우선 실험계획법을 통한 최적의 사출금형 설계조건을 도출하였다. 이를 위해 금형설계와 관련하여 선정된 입력변수, 즉 러너와 게이트, 냉각회로 등의 설계사양의 다양한 조합으로 실험계획을 실시하였으며, 이를 위해 C-MOLD를 사용한 수치해석을 수행하였다. 이때 최적의 금형설계 변수를 얻기 위한 특성치는 다음과 같이 설정하였다.

- 성형성 향상: 사출압이 적을수록 성형성이 우수하다고 볼 수 있으므로 최종단계에서의 사출압 (P_{max})의 크기로서 정의하였다.
- 유동의 균형: 스크린부와 네크부에 수지가 균형있게 충전되는지 여부의 판단을 위해 각 부분에서 최종 충전되는 절집간의 충전시간차 (Δt)로서 정의하였다.
- 냉각효율 향상: 고온부의 냉각효과를 비교하기 위해 해당 부분의 최대온도로서 정의하였다.

이러한 목적 달성을 위해 러너와 게이트에 관련된 4개의 변수(A, B, C, D)와 냉각회로 사양(E)의 총 5개 변수에 대해서 수치해석을 통한 실험계획법을 실시하였다. 그러나 모든 변수의 조합에 대해 실험을 실시하려면 많은 실험횟수가 요구되므로 이러한 노력을 효율적으로 절감하기 위해 여러 단계를 거쳐 실험변수를 줄여나가는(screening) 방법을 적용하였다. 우선적으로 냉각회로는 제외된 상태에서 러너와 게이트에 관련된 4개의 변수에 대해 2개의 수준으로 Table 2와 같이 완전요인 실험계획을 수립하여 총 16번의 해석을 수행하였다.



Fig. 2 Input variables for design of runner system



(a) Cooling channel 1

(b) Temperature distribution

Fig. 3 Configuration of the original cooling system

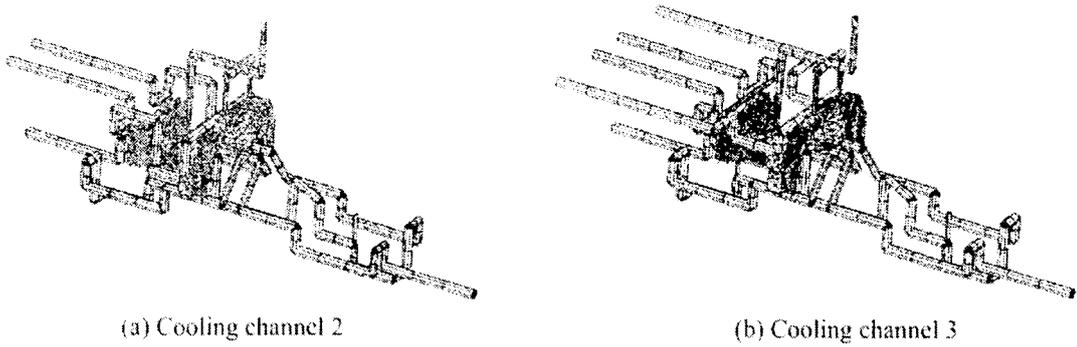
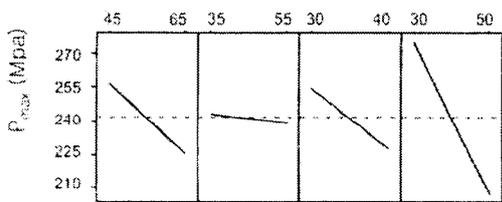


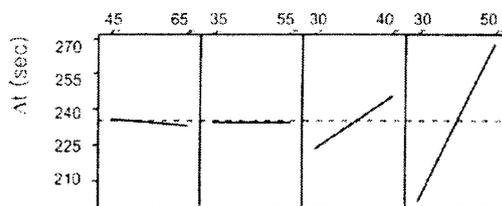
Fig. 4 Configuration of the modified cooling system

Table 2 Design for the first screening DOE (unit: mm)

| Factor | Description | Level 1 | Level 2 |
|--------|----------------------|---------|---------|
| A | Main runner diameter | 4.5 | 6.5 |
| B | Sub runner diameter | 3.5 | 5.5 |
| C | Main gate position | 30 | 40 |
| D | Sub gate position | 30 | 50 |



(a) Main effect of P_{max}



(b) Main effect of Δt

Fig. 5 Main effect plots for the first screening DOE

첫번째 실험계획에서는 러너 및 게이트의 영향만을 고려하였으므로, 결과치도 이에 관련된 성형성 및 유동균형의 2 가지 측면에서 고찰하였다. Fig. 5의 (a), (b)에 각각 최대사출압과 충전시간차에 대한 4 개의 인자의 주효과를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 보조러너의 직경(B)은 최대사출압과 충전시간차 모두에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. Fig. 6과 Fig. 7에 각각 최대사출압과 충전시간차에 대한 인자간의 상호작용

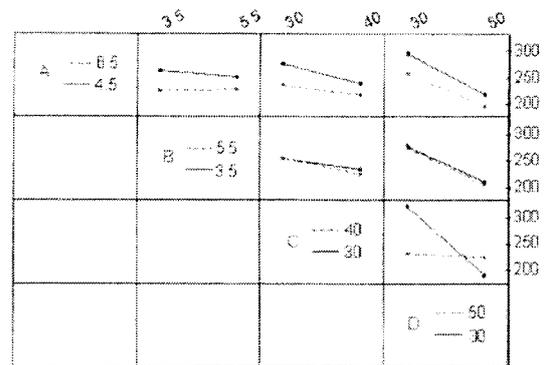


Fig. 6 Interaction plot for P_{max}

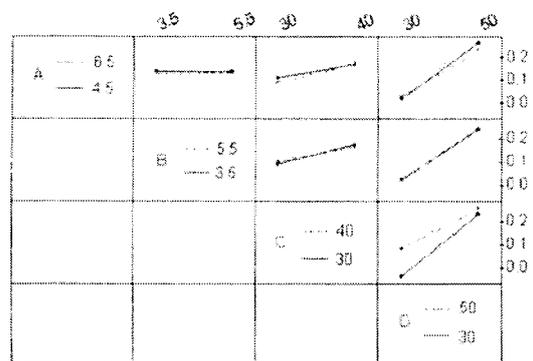


Fig. 7 Interaction plot of Δt

그래프를 도시하였다. 여기서 2 개의 직선그래프의 기울기가 차이가 클수록 상호작용이 크게 작용하는 것으로 해석할 수 있으며, C와 D 간에 상호작용이 발생함을 알 수 있다. 또한 보조러너의 직경(B)의 경우는 다른 어떤 인자와도 상호작용이 작용하지 않는 것으로 판명되어 실험인자에서 제거할 수 있다. Table 3에 분산분석을 통해 얻어진 인자별 주효과 및 주요 상호작용에 대한 기여율을 비교하였다.

Table 3. Comparison of contribution ratio for each single factor and interaction

| Effect | Description | Contribution for P_{max} (%) | Contribution for Δt (%) |
|--------|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| A | Main effect | 9.05 | 0.13 |
| B | Main effect | 0.19 | 0.01 |
| C | Main effect | 6.86 | 9.26 |
| D | Main effect | 44.39 | 85.24 |
| AC | 2-way interaction | 0.89 | 0.22 |
| AD | 2-way interaction | 0.59 | 0.71 |
| CD | 2-way interaction | 35.68 | 3.96 |

Table 4 Design for the second screening DOE (unit:mm)

| Factor | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|--------|---------|---------|---------|
| A | 4.5 | 5.5 | 6.5 |
| C | 30 | 35 | 40 |
| D | 30 | 40 | 50 |

Table 5 Selected candidates and corresponding results

| No. | A(mm) | C(mm) | D(mm) | P(MPa) | Δt (sec.) |
|-----|-------|-------|-------|--------|-------------------|
| 1 | 6.5 | 35 | 40 | 147.8 | 0.85 |
| 2 | 5.5 | 35 | 40 | 152.0 | 0.70 |
| 3 | 6.5 | 30 | 40 | 154.1 | 0.98 |
| 4 | 6.5 | 40 | 40 | 154.2 | 0.73 |
| 5 | 5.5 | 40 | 40 | 150.4 | 0.37 |

이러한 결과로부터 인자 자체의 주효과 및 교호작용에 대해서도 유의하지 않은 B 를 2 가지 수준의 중간값인 4.5mm 로 고정시키고, 이를 제외한 나머지 변수(A, C, D)를 대상으로 다음 단계의 실험계획을 실시하였다. 2 번째 실험계획에서는 각 인자의 영향을 보다 심도있게 고찰하기 위해 Table 4 에 요약한 바와 같이 3 가지 변수에 대해 3 수준으로 접근하여 완전요인 실험으로 총 27 번의 해석을 수행하였다.

이러한 실험계획에 따른 해석결과중 최적의 변수를 선정하기 위해 27 개의 결과중 사출압이 200Mpa 이하이며 충전시간차가 0.1 초 이하인 경우를 선택하였다. 상기의 2 가지 조건을 모두 만족시키는 경우는 총 5 가지 경우에 해당되었으며, Table 5 에 해당 결과를 요약하였다. 선택된 5 가지 경우에 대해 살펴보면 보조게이트의 위치(D)가 모두 40mm 로 동일함을 알 수 있다. 따라서 이는 40mm 로 고정함으로써 설계변수에서 제외시킬 수 있었다. 최종적으로 남은 인자는 A 와 C 이며, 여기에 Fig. 3 과 Fig. 4 에서 도시한 3 가지 냉각회로 구조(E)를 추가적인 인자로 설정하여 최종 실험계획을 수립하였고, Table 6 에 각각의 경우에 대해 최대사출압과 제품의 최대온도를 비교하였다.

Table 6 Results of the final DOE for mold design

| No | A(mm) | C(mm) | E | P(MPa) | T(°C) |
|----|-------|-------|---|--------|-------|
| 1 | 5.5 | 35 | 1 | 152.1 | 153.7 |
| 2 | 5.5 | 40 | 1 | 150.4 | 153.8 |
| 3 | 6.0 | 35 | 1 | 152.7 | 153.9 |
| 4 | 6.0 | 40 | 1 | 157.9 | 155.0 |
| 5 | 5.5 | 35 | 2 | 154.8 | 146.7 |
| 6 | 5.5 | 40 | 2 | 153.0 | 146.7 |
| 7 | 6.0 | 35 | 2 | 155.3 | 146.9 |
| 8 | 6.0 | 40 | 2 | 158.3 | 147.8 |
| 9 | 5.5 | 35 | 3 | 155.3 | 136.0 |
| 10 | 5.5 | 40 | 3 | 154.2 | 136.0 |
| 11 | 6.0 | 35 | 3 | 155.9 | 136.2 |
| 12 | 6.0 | 40 | 3 | 158.6 | 136.7 |

위의 결과중 성형성과 냉각효율의 2 가지 측면에서 볼 때 10 번의 결과가 가장 우수한 것으로 판명되었으며, 이러한 결과를 토대로 최적의 금형 설계변수를 다음과 같이 도출하였다.

- **Main runner diameter:** 5.5 mm
- **Sub runner diameter:** 4.5 mm
- **Main gate position:** 40 mm
- **Sub gate position:** 40 mm
- **Cooling circuit type:** type 3

4. 성형조건 최적화를 위한 실험계획

4.1 입력변수의 선정

사출품의 품질은 앞장에서 언급한 금형설계 조건뿐만 아니라 사출성형 조건에도 많은 영향을 받는다. 이러한 성형조건으로는 사출 및 보압과정에서의 압력, 속도 및 시간, 수지와 금형의 온도 등 많은 변수들이 존재하며, 상기 인자들은 상호간에 서로 연관되어 있는 경우가 많아 인자의 독립적인 영향뿐만 아니라 상호간의 교호작용까지도 고려하여 공정을 설계해야 한다. 본 연구에서는 사출압, 1, 2 차사출속도, 사출시간, 스크류 위치, 보압, 보압속도, 보압시간의 총 8 개의 인자를 선정하였다.

4.2 사출성형 조건의 최적화

최적의 성형조건의 선정은 실험적인 방법으로 접근하였다. 본 실험계획의 목적은 미성형이나 플래시가 발생하지 않는 안정된 품질을 얻기 위한 조건을 설정하는 것으로, 이를 계수화하기 위해 최종 성형된 제품의 무게를 측정하여 비교하였다. 이 경우에도 역시 실험횟수를 줄이기 위해 2 단계 실험계획법을 적용하였다. 우선 Table 7 에 도시한 바와 같이 8 개의 변수에 대해 2 수준으로 설정하

Table 7 Design of screening DOE for process conditions

| Factor | Description | Level 1 | Level 2 |
|--------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| F | Injection pres. | 105 kgf/mm ² | 110 kgf/mm ² |
| G | Packing pres. | 30 kgf/mm ² | 50 kgf/mm ² |
| H | Injection speed (1) | 50 % | 58 % |
| I | Injection speed (2) | 50 % | 70 % |
| J | Packing speed | 26 % | 40 % |
| K | Screw position | 22mm | 26mm |
| L | Injection time | 1.3sec | 1.5sec |
| M | Packing time | 0.5 | 2.0 |

Table 8 Design of the final DOE for process conditions

| Factor | Description | Level 1 | Level 2 |
|--------|---------------------|------------------------|------------------------|
| F | Injection pressure | 85 kgf/mm ² | 90 kgf/mm ² |
| G | Packing pressure | 40 kgf/mm ² | 50 kgf/mm ² |
| H | Injection speed (1) | 58 % | 62 % |
| I | Injection speed (2) | 30 % | 58 % |
| L | Injection time | 1.5 sec | 1.6sec |
| M | Packing time | 1.0sec | 1.5sec |

여 총 32 번의 부분요인 실험을 실시하였다. 각 경우에 대해 5 번씩 실험을 수행하였으며, 이들의 평균값을 사용하여 결과를 분석하였다.

Fig. 8 에 제품의 무게에 대한 주효과 및 교호작용의 영향을 행렬 형태로 도시하였다. 이때 각 인자의 유의성은 3.2 절에서와 마찬가지로 주효과 및 기여율을 비교 분석함으로써 도출할 수 있었다. 결과를 살펴보면 8 개의 인자중 보압속도(J)와 스크류위치(K)의 2 가지 인자는 상대적으로 주효과 및 교호작용이 적음을 알 수 있었다. 따라서 보압속도와 스크류 위치를 각각 40%와 22mm 로 고정시키고 나머지 6 개의 인자에 대해서 2 수준으로 Table 8 과 같이 최종 실험계획을 수립하였다. 이때 1 차 실험결과를 토대로 각 인자들의 범위를 재조정하였다. 역시 총 32 번의 실험을 수행하였으며, Table 9 에 최종 결과를 정리하였다.

이상적인 편향 코일의 무게는 28.3g 이며, Table 9 의 측정결과를 보면 제품의 무게는 27.26g 과 28.63g 의 사이에 존재함을 알 수 있다. 성형품을 육안검사에 의해 평가한 결과 경우에 따라 플래시와 미성형이 발견되었다. 이때 불량 여부와 성형품 무게와의 상관관계를 분석한 결과, 미성형의 경우는 제품의 무게가 28.1g 이하일 경우와, 플래시의 경우는 28.6g 이상일 경우와 강한 상관관계를 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 제품의 주요 부위 형상을 측정된 결과 무게가 28.30±0.02g 의 범위에 존재할 때 안정된 품질이 얻어짐을 확인할 수 있었고, 이 범위 내에서 분산이 가장 적

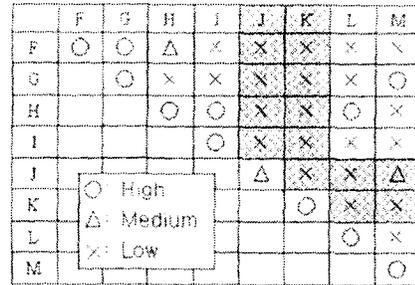
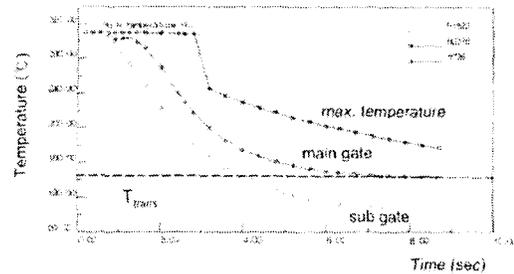
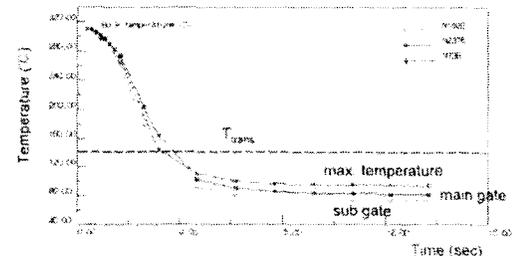


Fig. 8 Main effects and interactions for the part weight



(a) Temperature variations for the original design



(b) Temperature variations for the improved design

Fig. 9 Comparison of the temperature variations

은 조건을 찾아 다음과 같이 최적의 성형조건을 산출하였다.

- Injection pressure: 90 kg/mm²
- Packing pressure: 50 kg/mm²
- Injection speed (1): 62 %
- Injection speed (2): 30 %
- Packing speed: 40 %
- Screw position: 22 mm
- Injection time: 1.5 sec
- Packing time: 1.5 sec

4.3 결과 분석

한편 개선된 냉각회로의 냉각효과를 고찰하기 위해 각각의 경우에 대해 여러 위치에서의 시간에 따른 온도변화를 비교하였다. Fig. 9 에 수치해석 결과로부터 얻어진 주게이트, 보조게이트, 네크부상의 최대온도 발생점에서의 온도변화를 도시하였

Table 9 Results of the final DOE for process parameters

| Exp. no. | F | G | H | I | L | M | Weight (g) | |
|----------|----|----|----|----|-----|-----|------------|-------------------------------|
| | | | | | | | Mean | Variance ($\times 10^{-3}$) |
| 1 | 85 | 40 | 58 | 58 | 1.6 | 1.5 | 28.07 | 1.048 |
| 2 | 90 | 50 | 62 | 30 | 1.5 | 1.0 | 28.41 | 1.030 |
| 3 | 85 | 50 | 58 | 30 | 1.5 | 1.0 | 27.75 | 44.677 |
| 4 | 85 | 50 | 62 | 58 | 1.6 | 1.5 | 28.42 | 6.978 |
| 5 | 85 | 50 | 62 | 30 | 1.5 | 1.5 | 28.30 | 3.771 |
| 6 | 90 | 50 | 58 | 30 | 1.5 | 1.5 | 28.32 | 0.403 |
| 7 | 90 | 50 | 62 | 30 | 1.6 | 1.5 | 28.63 | 0.483 |
| 8 | 90 | 40 | 58 | 58 | 1.6 | 1.0 | 28.28 | 1.057 |
| 9 | 85 | 50 | 62 | 58 | 1.5 | 1.0 | 28.14 | 1.859 |
| 10 | 85 | 40 | 58 | 30 | 1.6 | 1.0 | 28.00 | 0.540 |
| 11 | 90 | 50 | 62 | 58 | 1.6 | 1.0 | 28.53 | 0.684 |
| 12 | 85 | 50 | 62 | 30 | 1.6 | 1.0 | 28.35 | 4.651 |
| 13 | 90 | 40 | 62 | 30 | 1.5 | 1.5 | 28.36 | 1.121 |
| 14 | 90 | 40 | 58 | 58 | 1.5 | 1.5 | 26.16 | 3.800 |
| 15 | 85 | 50 | 58 | 30 | 1.6 | 1.5 | 28.31 | 7.073 |
| 16 | 85 | 50 | 58 | 58 | 1.6 | 1.0 | 28.15 | 1.255 |
| 17 | 90 | 50 | 62 | 58 | 1.5 | 1.5 | 28.49 | 2.850 |
| 18 | 90 | 40 | 58 | 30 | 1.6 | 1.5 | 28.36 | 6.457 |
| 19 | 90 | 40 | 62 | 30 | 1.6 | 1.0 | 28.49 | 1.247 |
| 20 | 85 | 40 | 58 | 58 | 1.5 | 1.0 | 27.26 | 22.073 |
| 21 | 90 | 40 | 62 | 58 | 1.6 | 1.5 | 28.53 | 2.343 |
| 22 | 90 | 40 | 58 | 30 | 1.5 | 1.0 | 27.98 | 1.283 |
| 23 | 90 | 50 | 58 | 58 | 1.5 | 1.0 | 28.18 | 0.915 |
| 24 | 90 | 50 | 58 | 58 | 1.6 | 1.5 | 28.47 | 4.099 |
| 25 | 85 | 40 | 58 | 30 | 1.5 | 1.5 | 27.26 | 8.404 |
| 26 | 90 | 50 | 58 | 30 | 1.6 | 1.0 | 28.38 | 2.695 |
| 27 | 85 | 40 | 62 | 30 | 1.5 | 1.0 | 27.98 | 0.947 |
| 28 | 90 | 40 | 62 | 58 | 1.5 | 1.0 | 28.28 | 3.554 |
| 29 | 85 | 40 | 62 | 30 | 1.6 | 1.5 | 28.29 | 0.382 |
| 30 | 85 | 40 | 62 | 58 | 1.5 | 1.5 | 28.12 | 1.828 |
| 31 | 85 | 50 | 58 | 58 | 1.5 | 1.5 | 27.92 | 14.96 |
| 32 | 85 | 40 | 62 | 58 | 1.6 | 1.0 | 28.20 | 0.577 |

다. 초기 설계안(회로 1)의 경우 냉각 후의 최대온도가 수지의 고화온도(145°C)보다 커 수지가 완전히 고화되지 않았음을 알 수 있다(Fig. 9 (a)). 실제로 초기 설계안의 경우 제품의 완전한 고화가 발생할 때까지 12 초의 냉각시간이 소요된 반면에 Fig. 9의 (b)를 보면 개선된 냉각회로(회로 3)의 경우 제품의 최대온도가 4 초정도 지나면 고화온도 이하로 낮아짐을 알 수 있다. 실제 개선된 금형을 적용해본 결과 제품의 완전한 고화가 발생할 때까지 6 초의 냉각시간이면 충분한 것으로 판명되어 기존 대비 50% 정도를 절감할 수 있었다. 또한 개선된 러너지시스템에 의한 성형성 향상으로 인해 사출압 역시 기존대비 30%정도로 절감되었는데, 이러한 성형성의 향상은 제품의 불량률이나 이형시의 문제 발생 빈도를 감소시킴으로써 결과적으로 생산성을 증대시키는 효과를 발생시킨다. 이와

같은 효과로 인해 기존의 경우 하나의 제품을 생산하는데 총 26 초의 이상의 시간이 소요된 반면, 개선된 금형은 16 초로 절감하여 결과적으로 생산성을 38% 정도 향상시킬 수 있었다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 최적의 사출성형금형 및 성형공정 설계를 위해 실험계획법과 수치해석을 적용하였다. 이러한 결과를 종합적으로 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 사출품의 품질 향상을 위해 사출품을 제작하는 일련의 공정을 크게 금형설계 과정과 성형조건 설정의 2 단계로 구분하고, 각각에 대해 실험계획법을 적용하여 최적의 금형설계조건 및 성형조건을 도출하기 위한 제반 연구를 수행하였다.

(2) 금형설계 과정에서는 유한요소법과 실험계획법을 병행하여 성형성과 냉각효율의 향상을 위한 러너시스템 및 냉각회로의 구조를 선정하였다. 또한 이러한 과정에서 보다 효율적인 해석을 위해 여러 설계변수에 대해 주효과 및 교호작용을 분석하여 다단계로 인자를 줄여나가는 접근방법을 사용하였다.

(3) 제작된 금형을 사용하여 여러 성형조건에 따른 성형실험을 역시 체계적인 실험계획에 의거하여 수행함으로써 제품의 품질 안정을 위한 최적의 성형조건을 도출하였다.

상기의 결과를 편향코일의 사출성형 공정에 적용하여 제품 품질의 안정성과 생산성의 향상을 도모할 수 있었다. 이러한 접근방법은 기존의 공학적인 접근방법에 통계적인 분석기법을 접목시킴으로써 보다 체계적인 연구결과를 도출할 수 있는 방법으로, 향후 사출성형 공정에 의해 생산되는 유사 제품은 물론 타 공정에 대해서도 확장이 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

- (1) Harry, D. H. and Parrott, R. G., 1970, "Numerical Simulation of Injection Mold Filling," *Polym. Engng. and Sci.*, Vol. 10, p. 209.
- (2) Heiber, C. A. and Shen, S. F., 1980, "A Finite Element/ Finite Difference Simulation of the Injection Molding Filling Process," *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 1~32.
- (3) Chiang, H. H., Heiber, C. A., and Wang, K. K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I: Formulation," *Polym. Engng. and Sci.*, Vol. 31, pp. 116~124.
- (4) Zou, Q., Ari, G., and Hess, R., 1996, "Using DOE Techniques on Molding Simulation to Improve Injection Molded Part Quality," *ANTEC '96*, pp. 736~743.
- (5) Park, S. J. and Kwon, T. H., 1997, "Optimum Design of Injection Molding Cooling System via Boundary Element Method," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 21, pp. 1773~1785.
- (6) Zu, Y. S. and Lin, S. T., 1997, "Optimizing the Mechanical Properties of Injection Molded W-4.9% Ni-2.1% Fe in Debinding," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 71, pp. 337~342.
- (7) Chen, R. S., Lee, H. H., and Yu, C. Y., 1997, "Application of Taguchi's Method on the Optimal Process Design of an Injection Molded PC/PBT Automobile Bumper," *Composite Structures*, Vol. 39, pp. 209~214.
- (8) Choi, W. J., Sin, H. C., and Kawk, S. W., 2000, "Optimization of Processing Conditions in Injection Molding using Genetic Algorithm" *Trans. of the KSME, A*, Vol. 24, pp. 2543~2551
- (9) AC Technology, 1995, *C-mold: Reference Manual*, Ithaca, New York.
- (10) Krottmaier, J., 1993, *Optimizing Engineering Designs*, McGraw-Hill, New York.
- (11) Schmidt, S. R., Launsby, R. G., 1997, *Understanding Industrial Designed Experiments*, Air Academy Press, Colorado.
- (12) Lu, X. and Khim, L. S., 2001, "A Statistical Experimental Study of the Injection Molding of Optical Lenses," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 189~195.
- (13) Lee, J. and Kim, S., 2001, "Application of Soft Computing Techniques in Response Surface Based Approximate Optimization," *KSME Int'l. J.*, Vol. 15, pp. 1132~1142.