

실험계획법과 유한요소해석을 연계한

사출성형 공정의 최적설계

박 근* · 안종호* · 최상련*

Optimal Design for Injection Molding Processes using Design of Experiments and Finite Element Analysis

K. Park, J.H. Ahn, and S.R. Choi

Abstract

The present work concerns optimal design for the injection molding process of a deflection yoke (coil separator). The optimal design for the injection molding process is developed using design of experiments and finite element analysis. Two design of experiments approaches are applied such as: the design of experiment for mold design and the design of experiments for determination of process parameters. Finite element analyses have been carried out as a design of experiments for mold design: runner system and cooling channel. In order to determine optimal process parameters, experiments have been performed for various process conditions with the design of experiments scheduling.

Key Words : 사출성형(Injection Molding), 유한요소해석(Finite Element Analysis), 실험계획법(Design of Experiment), 최적설계(Optimal Design), 분산분석(Analysis of Variance).

1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자제품을 제작하는 생산기술로서, 품질과 신속한 납기가 요구된다. 이를 위해서는 게이트의 위치 및 크기, 러너의 배열, 냉각 회로의 구성 등의 금형설계 조건과 사출압, 사출온도, 금형온도, 냉각시간 등의 성형조건을 모두 고려해 주어야 한다. 이러한 여러 가지 인자들은 각각 독립적인 요소로서만이 아니라, 여러 인자들간의 상호 복합적인 작용으로 제품의 품질 및 생산성에 영향을 미치

게 된다. 따라서 상기의 모든 인자에 대한 영향을 분석하여 최적의 공정조건을 도출하기에는 많은 시간과 노력이 소요되며, 기존에는 여러번의 시행착오를 거쳐 최적의 금형설계 및 그에 따른 가공조건을 설정해 왔고, 결과적으로 많은 시간과 비용이 추가적으로 소모되어왔다.

이러한 시간과 비용을 줄이기 위하여 컴퓨터 원용 수치해석(Computer Aided Engineering; CAE)기법이 사출성형 분야에도 적용되었다.⁽¹⁾ 컴퓨터 원용 수치해석은 실제 물리현상을 수치적으로 모사하여 컴퓨터를

* 삼성전기(주) 금형개발실

사용하여 계산함으로써 결과를 예측하는 컴퓨터 시뮬레이션 기술로서, 사출성형 분야에서도 제품설계, 금형설계 및 성형조건의 분석 등 다양한 목적으로 활용되고 있다.^(2,3) 실험계획법(Design of Experiments; DOE)은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 체계적으로 조사하기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법으로, 사출성형 분야에 있어서도 최적 공정변수를 도출하기 위한 방안으로서 적용되어 왔다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 실험계획법과 유한요소해석을 병행하여 최적의 사출금형설계 및 성형조건을 도출하기 위한 연구를 진행하였다. 실험계획법은 크게 2단계로 구분되어진다. 우선 금형설계 조건의 선정 과정에서 유한요소해석을 통해 접근하였다. 해석으로부터 얻어진 결과를 분석하여 최적의 금형설계 변수를 도출한 뒤, 이를 토대로 금형을 제작하였다. 사출성형 조건은 제작된 금형을 사용하여 실험을 수행함으로써 그 결과를 측정하여 DOE 분석을 수행하였다.

2. 사출금형 최적설계를 위한 실험계획

2.1 입력 변수의 선정

Fig. 1에 편향코일의 제품형상 및 러너시스템의 구성을 3차원적으로 도시하였다. 게이트는 3개의 핀포인트 게이트를 사용하였으며, 곡면부에 1개의 주게이트와 스크린부에 2개의 보조게이트로 구성되어 있다. 여기서 각각의 게이트와 러너의 설계에 따라 제품의 유동패턴이 차이가 발생하며, 이는 결과적으로 제품의 성형성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 각각에 대한 러너직경과 게이트의 위치를 실험계획법을 위한 입력변수로 선정하였다.

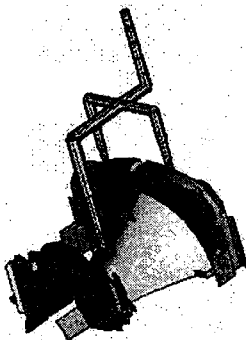


Fig. 1 Three-dimensional shape of a coil separator

한편 제품의 치수정밀도 측면에서 볼 때 적절한 냉각회로의 구성에 대해서도 고려해주어야 한다. 이는 제품의 냉각효과를 증대시켜 냉각시간을 단축시킴으로써 결과적으로 제품의 생산성을 제고할 수 있다. 반면에 냉각이 너무 지나치면 금형의 온도를 저하시켜 수지의 점성이 증가됨으로써 유동성이 저하된다. 따라서 냉각회로의 설계는 단순히 냉각효율 제고만을 위함이 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. 2의 (a)는 현재 사용되고 있는 냉각회로의 구성을 나타내고, (b)와 (c)에 이를 개선하여 고온부를 집중적으로 냉각할 수 있도록 수정된 2개의 냉각회로 구조를 도시하였다.

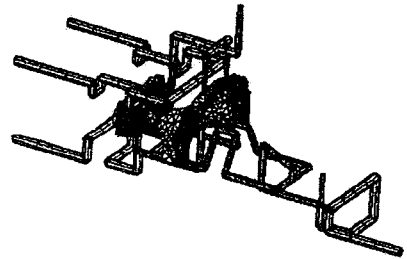


Fig. 2(a) Configuration of cooling channel 1

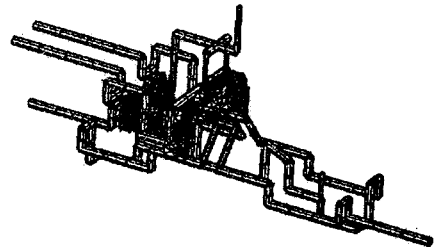


Fig. 2(b) Configuration of cooling channel 2

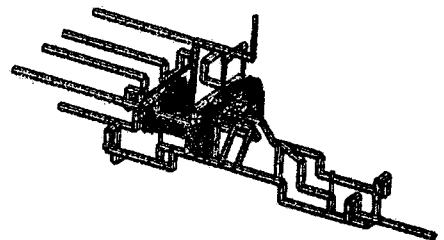


Fig. 2(c) Configuration of cooling channel 3

22 사출금형의 최적설계

본 연구에서는 편향코일 사출공정의 최적화를 위해 우선 실험계획법을 통한 최적의 사출금형 설계조건을 도출하였다. 이를 위해 금형설계 변수와 관련하여 선정된 입력변수, 즉 러너와 게이트, 냉각회로 등의 설계사양의 다양한 조합으로 실험계획법을 실시하였다. 이를 위해 C-MOLD를 사용한 유한요소해석을 수행하였다. 이때 최적의 금형설계 변수를 얻기 위한 목표는 성형성 향상, 유동의 균형, 냉각효율 향상의 3가지로 설정하였다.

이러한 목적 달성을 위해 앞절에서 언급한 총 5개의 변수에 대해서 유한요소해석을 통한 실험계획법을 실시하였다. 우선적으로 냉각회로는 제외한 상태에서 러너와 게이트에 관련된 4개의 변수(A, B, C, D)에 대해 2개의 수준으로 Table 1과 같이 실험계획을 수립하여 총 16번의 유한요소해석을 수행하였다.

Table 1 Design for the first screening DOE

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

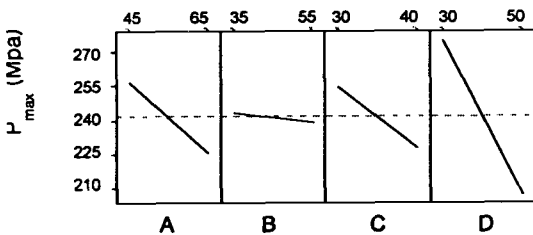


Fig. 3(a) Main effect plot for injection pressure

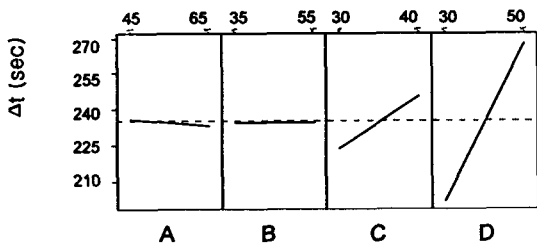


Fig. 3(b) Main effect plot for flow balance

Fig. 3의 (a), (b)에 각각 최대사출압과 충전시간차에 대한 4개의 인자의 주효과(main effect)를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 보조러너의 직경(B)은 최대사출압과 충전시간차 모두에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판명되었다. 따라서 보조러너의 직경을 2가지 수준의 중간값인 4.5mm로 고정시키고, 보조게이트의 위치(D)를 40mm로 고정함으로써 설계변수에서 제외시켜주었다. 최종적으로 남은 인자는 A와 C이며, 여기에 Fig. 2에서 도시한 3가지 냉각회로 구조(E)를 추가적인 인자로 설정하여 최종 실험계획을 Table 2와 같이 수립하였다. Table 3에 각각의 경우에 대해 최대사출압과 제품의 최대온도를 비교하였다.

Table 2 Design of the final DOE for mold design

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A	5.5mm	6.0mm	-
C	30mm	40mm	-
E	Type 1	Type 2	Type 3

Table 3 Result of the final DOE for mold design

No	A	C	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	127.9	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 2가지 측면에서 볼 때 10번의 결과가 가장 우수한 것으로 판명되었으며, 이러한 결과를 토대로 최적의 금형설계 변수를 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

3. 성형조건 최적화를 위한 실험계획

3.1 입력 변수의 선정

사출품의 품질은 앞장에서 언급한 금형설계 조건 뿐만 아니라 사출성형시의 성형조건에도 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 특정 인자만을 고려해서는 최적의 조건을 도출하기가 어렵다. 즉 인자의 독립적인 영향뿐 아니라 상호간의 교호작용까지도 고려하여 공정을 설계해야 한다. 본 연구에서는 사출압, 1차사출속도, 2차사출속도, 사출시간, 스크류 위치, 보압, 보압속도, 보압시간의 총 8개 인자를 설정하였다.

3.2 사출성형 조건의 최적화

최적의 성형조건의 선정은 실험적인 방법으로 접근하였다. 우선 전술한 일련의 과정을 거쳐 설계된 금형을 제작하고, 이를 사용하여 성형실험을 수행하였다. 역시 실험계획법을 적용하여 Table 4에 도시한 바와 같이 8개의 변수에 대해 2 수준으로 설정하여 총 32번의 실험을 수행하였다. 이러한 과정을 거쳐 최종 선정된 성형조건은 아래와 같다.

Table 4 DOE for optimal process condition

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

- Injection pressure: 90 kg/mm²
- Packing pressure: 50 kg/mm²
- Injection speed (1): 60 %
- Injection speed (2): 30 %
- Packing speed: 40 %
- Screw position: 22 mm
- Injection time: 1.5 mm
- Packing time: 1.5 mm

실제 개선된 금형을 적용해본 결과 냉각시간을 기존 대비 50%를 절감할 수 있었다. 또한 개선된 러너 시스템에 의한 성형성 향상으로 인해 사출압 역시 기존대비 30%정도로 절감되었는데, 이는 제품의 불량률이나 이형시의 문제 발생 빈도를 감소시킴으로써 결과적으로 생산성을 증대시키는 효과를 유발한다. 이와 같은 효과로 인해 기존의 경우 하나의 제품을 생산하는데 총 26초의 시간이 소요된 반면, 개선된 금형은 16초로 절감하여 생산성을 향상시킬 수 있었다.

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 최적의 사출금형 및 성형 공정 설계를 위해 실험계획법과 유한요소해석을 적용하였다. 금형설계 과정에서는 유한요소법과 실험계획법을 병행하여 성형성과 냉각효율의 향상을 위한 러너시스템 및 냉각회로의 구조를 선정하였다. 또한 제작된 금형을 사용하여 여러가지 성형조건에 따른 성형실험을 역시 체계적인 실험계획에 의거하여 수행함으로써 제품의 품질 안정을 위한 최적의 성형조건을 도출하였다. 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.

참고 문헌

- (1) Harry, D. H. and Parrott, R. G., 1970, Numerical simulation of injection mold filling, Polym. Engng. and Sci., Vol. 10, pp. 209.
- (2) Heiber, C. A. and Shen, S. F., 1980, "A finite element/ finite difference simulation of the injection molding filling process", J. Non-Newton. Fluid Mech. Vol. 7, p. 1.
- (3) Wang, V. W., Heiber, C. A., and Wang, K. K., 1987, "C-Flow: A CAE package with high-level interactive graphics, Appl. Comp. Aided Engng. In Injection Molding, p. 230.
- (4) Zou, Q., Ari, G., and Hess, R., 1996, "Using DOE techniques on molding simulation to improve injection molded part quality", ANTEC '96, p. 736.