

금형 내부 압력 최소화를 위한 자동차 인스트루먼트 패널의 게이트 위치 최적화

Gate Locations Optimization of an Automotive Instrument Panel for Minimizing Cavity Pressure

조성빈¹, 박창현¹, 표병기², 최동훈^{3,✉}
Sung-Bin Cho¹, Chang-Hyun Park¹, Byung-Gi Pyo², and Dong-Hoon Choi^{3,✉}

¹ 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

² (주)브이엠테크 (VMTech Co. Ltd.)

³ 한양대학교 최적설계신기술연구센터 (The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: dhchoi@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-0443

Manuscript received: 2011.12.20 / Accepted: 2012.2.9

Cavity pressure, an important factor in injection molding process, should be minimized to enhance injection molding quality. In this study, we decided the locations of valve gates to minimize the maximum cavity pressure. To solve this problem, we integrated MAPS-3D (Mold Analysis and Plastic Solution-3Dimension), a commercial injection molding analysis CAE tool, using the file parsing method of PIAO (Process Integration, Automation and Optimization) as a commercial process integration and design optimization tool. In order to reduce the computational time for obtaining the optimal design solution, we performed an approximate optimization using a meta-model that replaced expensive computer simulations. To generate the meta-model, computer simulations were performed at the design points selected using the optimal Latin hypercube design as an experimental design. Then, we used micro genetic algorithm equipped in PIAO to obtain the optimal design solution. Using the proposed design approach, the maximum cavity pressure was reduced by 17.3% compared to the initial one, which clearly showed the validity of the proposed design approach.

Key Words: Injection Molding (사출성형), Instrument Panel (인스트루먼트 패널), Valve Gate (밸브 게이트), Cavity Pressure (금형 내부 압력), Design of Experiments (실험계획법), Metamodel (메타모델), Micro Genetic Algorithm (마이크로 유전 알고리즘), Optimization (최적화)

기호설명

P_{\max} = maximum pressure

P_m = pressure of the m -th pressure drop point

1. 서론

대형 사출 금형은 사출공정 주기를 줄이기 위

해 다수의 밸브 게이트(valve gate)를 사용한다. 응용된 수지는 밸브 게이트를 통해 금형 공동부(cavity)로 충전되고, 밸브 게이트 위치에 따라 수지 충전 패턴(flow pattern)이 달라져 금형 내부 압력(cavity pressure)이 변하게 된다. 따라서 금형 내부 압력은 밸브 게이트 위치를 조절함으로써 제어 가능하다.

게이트 위치 변경을 통해 제어 가능한 금형 내

부 압력은 제품의 충격강도 및 형체력(clamping force)에 영향을 주는 주요 공정 조건이다. 금형 내부 압력의 감소는 금형의 형체력을 줄여 에너지 낭비를 막을 수 있고 형체력 감소는 금형의 과도한 변형을 예방하여 플래쉬(flash)와 같은 성형불량 요인을 방지하고 금형 내구수명 측면에서 유리하다.

기존연구에서 Spin 은 핫 런너 시스템에서 밸브 게이트 유무에 따른 압력 변화를 비교하였으며, Lee 등은 게이트 설계자의 지식과 경험을 논리화하고 CAE 프로그램을 통한 성형해석방법을 제시하였다. Lee 등은 러너와 게이트 위치 및 직경을 변화시켜 자동차 전면범퍼의 웰드라인 및 사출압력 감소에 대한 연구를 하였다. Cho 등은 사출성형 충전해석 절차를 자동화하고, 러너가 없는 2 점 게이트 위치 결정을 통해 웰드라인 발생을 제어하면서 사출압력을 최소화하는 최적설계를 수행하였다.¹⁴

본 연구에서는 기존 연구에서 수행되지 않았던 대형 사출성형품인 자동차용 인스트루먼트 패널(instrument panel)에 대해 밸브 게이트 위치 변경에 따른 런너 시스템 모델링을 자동화 하였으며, 생성된 해석모델을 이용하여 충전해석 절차를 자동화하였다. 또한 인스트루먼트 패널과 같이 긴 해석 시간이 요구되는 대형 사출성형품의 효율적인 설계를 위해 자동화된 해석 절차를 기반으로 근사화 기반 최적설계를 수행하여 이산화 변수로 정의된 게이트 위치를 최적화 알고리즘을 이용하여 결정하였다.

2. 사출성형 모델 및 해석

인스트루먼트 패널의 충전해석을 위해 상용 사출성형 해석프로그램인 MAPS-3D 를 이용하였다.⁵ 인스트루먼트 패널과 런너 시스템의 형상 및 7 개 밸브 게이트 초기 위치는 Fig. 1 과 같다. 제품의 충전시간(filling time)은 7 초이고, 금형의 온도는 32.5 °C이며, 수지의 용융온도는 215 °C이다. 수지는 PP/GS-Caltex Corporation/ MT62CP(20%TF) 를 사용하였다. 인스트루먼트 패널의 유한요소모델은 동일한 요소 크기를 지정하여 자동요소생성 기능을 통해 130 만개의 Tetra solid element 로 구성되며, 1 회 충전 해석 시간은 i7 2.8GHz CPU, 4GB RAM 사양의 컴퓨터에서 약 4 시간 4 분이 소요된다.

3. 설계문제 정의

3.1 설계요구사항

인스트루먼트 패널 해석모델은 Fig. 1 에서와 같이 7 개 밸브 게이트로부터 수지가 순차적으로 주입되면서 충전된다. 밸브 게이트 1번(G_1)을 시작으로 각 밸브 게이트의 수지 주입 시점은 게이트 2번(G_2)이 1.6 초, 게이트 3번(G_3)이 1.7 초, 게이트 4번(G_4)이 2.9 초, 게이트 5번(G_5)이 6.1 초, 게이트 6번(G_6)이 6.7 초, 게이트 7번(G_7)이 6.8 초이다. 충전과정 동안 발생하는 금형 내부 압력의 최대값의 변화를 Fig. 2 에 나타내었다. 밸브 게이트의 수지 주입 시점에서 압력강하(pressure drop)가 발생하며 G_2 - G_3 - G_4 - G_5 - G_6 - G_7 의 순차적 주입에 따른 압력 강하점에서의 최대압력을 P_2 - P_3 - P_4 - P_5 - P_6 - P_7 로 정의하였다. 따라서 본 연구에서는 금형 내부 압력을 줄이기 위해 Fig. 2 에서와 같이 6 개 압력 강하점에서의 압력 중 최대값을 최소화하도록 한다.

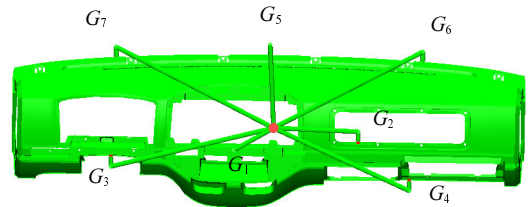


Fig. 1 Runner system and valve gate locations of an automotive instrument panel

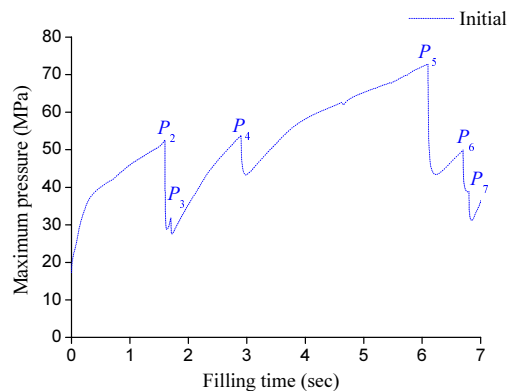


Fig. 2 Maximum pressure curve at the initial valve gate positions

여기서 각 밸브 게이트가 열리는 밸브 게이트 주입 시점은 MAPS-3D 의 자동 설정 기능을 사용하

었다. MAPS-3D 의 자동 설정 기능은 충전해석에서 주입된 수지가 밸브 게이트 입구에 도달하면 밸브 게이트가 열리게 함으로 수지 주입 시점을 결정하는 기능이다. 따라서 본 논문에서 새로운 밸브 게이트 위치를 결정된 후 결정된 밸브 게이트 위치에서 런너 시스템을 모델링하고 충전해석 과정에서 MAPS-3D 의 자동 설정 기능을 통해 각각의 수지 주입 시점이 결정된다.

3.2 설계변수

금형 내부 압력 최소화를 위해 7 개 밸브 게이트 위치를 설계변수로 선정하였으며, 해석모델에서 밸브 게이트는 절점(node)에만 위치 가능하다. 먼저 각각의 밸브 게이트가 위치 가능한 범위를 초기 위치를 기준으로 인스트루먼트 패널의 형상을 고려하여 게이트간의 겹침이 없도록 Fig. 3 과 같이 선정하였다. 그런 다음 해당 범위 내에서 밸브 게이트가 위치할 수 있는 후보절점들간의 간격이 최대한 서로 동일하도록 밸브 게이트 1 번에서부터 7 번까지 각각 11, 20, 11, 22, 16, 42, 42 개 절점을 후보절점으로 선정하였다. 설계변수의 초기값과 하한값, 상한값은 Table 1 과 같다.

3.3 설계문제 정식화

금형 내부 압력을 최소화하기 위한 설계문제를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && x_n, \quad n=1,2,3,\dots,7 \\
 & \text{to minimize} && \max[P_m], \quad m=2,3,4,\dots,7 \quad (1) \\
 & \text{subject to} && x_n^L \leq x_n \leq x_n^U
 \end{aligned}$$

4. 사출압력 최소화를 위한 최적설계

대형 사출성형품인 인스트루먼트 패널의 경우 1 회 충전해석에 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 설계를 위해 실험계획에 따라 전산실험을 수행하고 설계변수와 반응값과의 관계를 근사한 근사모델을 이용하여 금형 내부 압력을 최소화하기 위한 최적설계를 수행하였다.

4.1 해석절차 자동화

상용 PIDO (Progress Integration and Design Optimization) 툴인 PIA_{NO} (Process Integration, Automation and Optimization)의 파일 파싱(parsing)

기법을 이용하여 MAPS-3D 의 밸브 게이트 위치 변경에 따른 런너 시스템 모델링 및 충전해석 절차를 자동화 하였다.⁶

Table 1 Initial, lower and upper boundary values

Design variable	Lower bound	Initial	Upper bound
x_1 Gate1_node	1	6	11
x_2 Gate2_node	1	4	20
x_3 Gate3_node	1	6	11
x_4 Gate4_node	1	1	22
x_5 Gate5_node	1	10	16
x_6 Gate6_node	1	20	42
x_7 Gate7_node	1	23	42

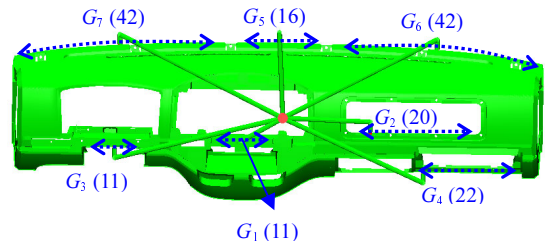


Fig. 3 Locatable areas of the valve gate and the number of candidates

4.2 실험계획법

실험계획법은 PIA_{NO} 에서 제공하는 실험계획법 중 하나인 최적라틴방격추출법(Optimal Latin Hypercube Design; OLHD)을 이용하였다.⁸ 최적라틴방격추출법은 최적성 조건을 사용하여 실험점을 고르게 분포시킴으로써 충전(space-filling) 성능을 좋게 하고 수준을 높게 하면서도 실험횟수를 유연하게 정할 수 있다. 실험횟수는 해석시간과 근사모델의 정확성을 고려하여 설계변수 개수의 10 배수인 70 회로 결정하였다.

4.3 근사모델 생성

근사모델은 1 회 해석에 많은 시간비용이 요구되는 실제 해석 모델을 대체하는 모델로서 해석시간에 대한 부담이 없어 많은 수의 해석을 필요로 하는 설계영역 탐색 및 최적설계에 적합하다. 본

연구에서는 PIA_{NO} 에서 제공하는 대표적인 보간 모델(interpolation model)인 크리깅(Kriging) 모델을 이용하였다. 크리깅 모델은 1951 년 채광학자인 Krige 의 연구를 바탕으로 Matheron, Sacks, Simpson 등에 연구 발전되었으며, 설계변수가 많고 비선형성이 강한 시스템에서 우수한 예측성능을 보인다고 알려져 있다. 따라서 전역모델과 국부편차의 합으로 이루어진 크리깅 모델은 밸브 게이트 위치 변경에 따라 수지 주입 시점이 달라지면서 비선형적인 경향의 금형 내부 압력 거동을 잘 근사화 할 수 있다고 판단된다.⁹⁻¹²

4.4 최적화기법

최적화기법으로는 PIA_{NO} 에서 제공하는 마이크로 유전 알고리즘(micro Genetic Algorithm; mGA) 을 선정하였다. 마이크로 유전 알고리즘은 일반 유전 알고리즘의 연산시간을 줄이기 위해 Krishnakumar 에 의해 제안되었다. 마이크로 유전 알고리즘은 Inner Loop 에서는 Crossover 를, Outer Loop 에서는 Random Creation 을 수행하고 일반 유전 알고리즘에 비해 적은 수의 개체군을 이용하여 진화 연산을 수행하기 때문에 비교적 적은 함수계산으로 최적해를 찾을 수 있는 장점이 있다. 또한 밸브 게이트 위치와 같은 이산변수를 다룰 수 있으며, 변수가 적은 설계문제에 적합하다고 알려져 있다.¹³

4.5 최적설계결과

크리깅 모델과 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 결과, 금형 내부 최대 압력은 Fig. 4 와 같이 초기값(72.8MPa) 대비 16.9% 감소한 60.5MPa 이었다. 또한 근사모델을 이용하여 도출한 최적 설계변수값을 실제 해석모델에 적용한 결과, 금형 내부 최대 압력은 초기값 대비 17.3% 감소한 60.2MPa 이었다. 이를 통해 근사모델의 정확성과 본 연구에서 적용한 최적화 방법의 유효성을 알 수 있다.

설계변수 초기값과 최적값에서의 금형 내부 압력 변화를 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다. 초기모델에서는 P₅ 에서 최대압력이 측정되었지만 최적모델에서는 수지 주입 시점이 초기모델보다 빨라지면서 P₂ 에서 최대압력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 최적설계를 통해 결정된 밸브 게이트 절점 번호를 초기값과 비교하여 Table 2 에 나타내었고 밸브

게이트의 실제 절점 번호를 포함한 런너 시스템 형상을 Fig. 6 에 비교하였다.

Table 2 Optimum design variable values along with the initial, lower, and upper boundary values

Design variable	Lower bound	Initial	Optimum	Upper bound
x_1	1	6	7	11
x_2	1	4	2	20
x_3	1	6	4	11
x_4	1	1	18	22
x_5	1	10	8	16
x_6	1	20	8	42
x_7	1	23	32	42

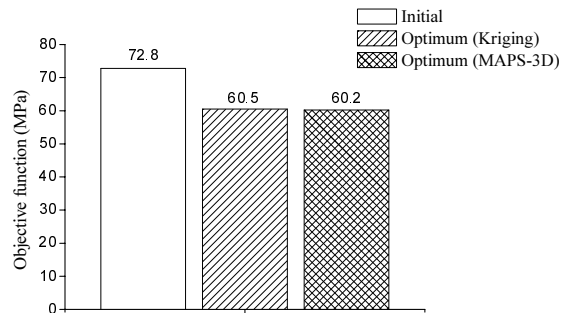


Fig. 4 Approximate and exact optimum values of the objective function compared to the initial objective

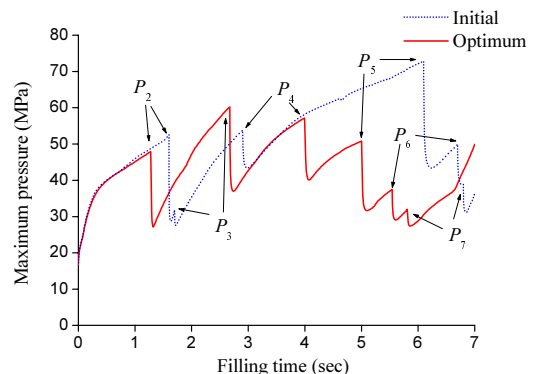


Fig. 5 Comparison of pressure curve of the initial and optimum designs

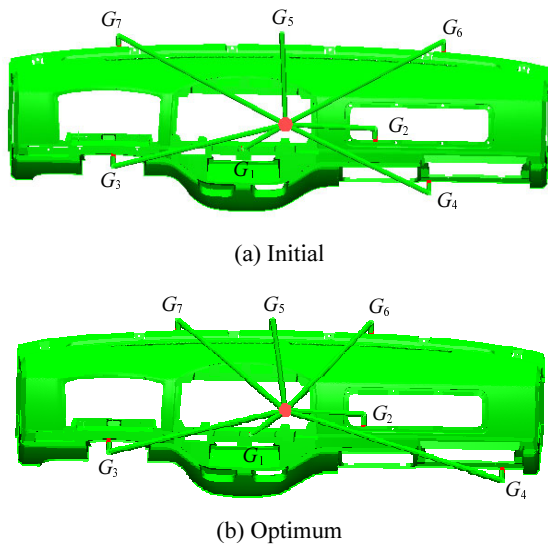


Fig. 6 Comparison of the valve gate locations between the initial and optimum designs

5. 결론

대형 사출성형품인 자동차용 인스트루먼트 패널의 금형 내부 압력을 최소화하기 위한 최적설계를 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1) 선정된 설계변수와 설계요구사항을 바탕으로 금형 내부 압력을 최소화할 수 있도록 설계문제를 정식화 하였다.

2) PIA^{no}의 파일 파싱 기법을 이용하여 밸브 게이트 위치 변경에 따른 인스트루먼트 패널의 런너 시스템 모델링과 충전해석 절차를 자동화 하였다.

3) 최적라틴방격추출법을 이용한 실험계획에 따라 전산실험을 수행하였으며, 설계변수와 반응값의 관계를 크리깅 모델을 이용하여 근사화하고, 크리깅 모델과 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

4) 금형 내부 최대 압력은 초기 대비 17.3% 감소한 60.2MPa 이었으며, 이를 통해 인스트루먼트 패널 금형 내부에 발생하는 최대 압력을 최소화할 수 있는 밸브 게이트 위치를 결정할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2011년도 두뇌한국 21 사업 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No.

2011-0016701)에 의해 지원되었으며, 이 연구를 위하여 PIDO 틀인 PIA^{no} 소프트웨어를 제공한 ㈜피도텍에 감사드립니다.

참고문헌

1. Spina, R., "Injection Moulding of Automotive Components: Comparison between Hot Systems for a Case Study," J. Mater. Process. Technol., Vol. 155-156, pp. 1497-1504, 2004.
2. Lee, C. W. and Hur, Y. J., "Intelligent Design System for Gate and Runner in Injection Molding," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 192-199, 2001.
3. Lee, H. S., Kim, Y. S., Lee, H. K., and Yang, G. E., "Injection Molding Analysis of Automobile Front Bumper Fascia Using CAE," Proc. of KSAE Autumn Conference, Vol. 3, pp. 1147-1152, 2004.
4. Cho, S. B., Park, C. H., Pyo, B. G., Rhee, B. O., and Choi, D. H., "Optimization of Gate Location in Injection Molding Parts using Micro GA," Proc. of KSAE Spring Conference, pp. 1946-1949, 2011.
5. MAPS-3D User's Manual, "Mold Analysis and Plastics Solution-3 Dimension," VMTech Co. Ltd., 2011.
6. "PIA^{no} (Process Integration, Automation and Optimization) User's Manual, Version 3.3," PIDOTECH Inc., 2011.
7. Mckay, M. H., Beckman, R. J., and Conover, W. J., "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output form a Computer Code," Technometrics, Vol. 21, No. 2, pp. 239-245, 1979.
8. Park, J. S., "Optimal Latin-hypercube Designs for Computer Experiments," J. Statist. Plann. Inference, Vol. 39, No. 1, pp. 95-111, 1994.
9. Krige, D. G., "A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand," J. of the Chem., Metaland Mining Soc. of South-Africa, Vol. 52, No. 6, pp. 119-139, 1951.
10. Metheron, G., "Principles of geostatistics economic geology," Economic Geology, Vol. 58, No. 8, pp. 1246-1266, 1963.
11. Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., and Wynn, H. P., "Design and analysis of computer experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409-423, 1989.

12. Simpson, T. W., Mauery, T. M., Korte, J. J., and Mistee, F., "Comparisons of response surface and kriging models for multidisciplinary design optimization," Proc. 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization, Paper No. AIAA-98-4755, 1998.
13. Krishnakumar, K., "Micro-Genetic Algorithms for stationary and non-stationary function optimization," Proc. SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol. 1196, pp. 289-296, 1989.
14. Nagaoka, S., Hirota, T., and Togawa, Y., "New method of designing runner system for injection mold using CAO technique," Proc. of The Society of Plastics Engineers - Annual Technical Conference, pp. 3438-3442, 2004.
15. Kim, J. H., Lee, J. S., Lee, H. J., and Koo, B. H., "Application of micro genetic algorithms to engineering design optimization," Trans. of KSME A, Vol. 27, No. 1, pp. 158-166, 2003.
16. Gokce, A., Hsiao, K. T., and Advani, S. G., "Branch and bound search to optimize injection gate location in liquid composite molding processes," Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, No. 9, pp. 1263-1272, 2002.