

사출금형의 균일 냉각을 위한 냉각회로의 다중목적함수 최적설계

박 창 현¹⁾ · 박 정 민¹⁾ · 최 재 혁²⁾ · 이 병 옥³⁾ · 최 동 훈^{*4)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 아주대학교 대학원 기계공학과²⁾ · 아주대학교 기계공학과³⁾ ·
한양대학교 최적설계신기술연구센터⁴⁾

Multi-objective Optimization of an Injection Mold Cooling Circuit for Uniform Cooling

Chang-Hyun Park¹⁾ · Jung-Min Park¹⁾ · Jae-Hyuk Choi²⁾ · Byung-Ohk Rhee³⁾ · Dong-Hoon Choi^{*4)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

⁴⁾The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 24 March 2011 / Revised 7 June 2011 / Accepted 27 June 2011)

Abstract : An injection mold cooling circuit for an automotive front bumper was optimally designed in order to simultaneously minimize the average of the standard deviations of the temperature and the difference in mean temperatures of the upper and lower molds for uniform cooling. The temperature distribution for a specified design was evaluated by Moldflow Insight 2010, a commercial injection molding analysis tool. For efficient design, PIA_{NO} (Process Integration, Automation and Optimization), a commercial PIDO tool, was used to integrate and automate injection molding analysis procedure. The weighted-sum method was used to handle the multi-objective optimization problem and PQRS_M, a function-based sequential approximate optimizer equipped in PIA_{NO}, to handle numerically noisy responses with respect to the variation of design variables. The optimal average of the standard deviations and difference in mean temperatures were found to be reduced by 9.2% and 56.52%, respectively, compared to the initial ones.

Key words : Injection mold(사출금형), Cooling circuit(냉각회로), Pareto optimum(파레토 최적해), Pareto frontier(파레토 프론티어), Multi-objective optimization(다중 목적함수 최적설계)

Nomenclature

x : design variable, mm
 σ : standard deviation
 μ : mean temperature, K
 ω : weight factor

Subscripts

U, L : upper mold, lower mold

1. 서론

사출성형공정 중 수지가 금형 내에서 상변화를 겪는 과정은 충전, 보압 및 냉각과정으로 구분할 수 있다. 충전과정은 용융된 수지를 금형 내에 주입하는 과정이며, 보압과정은 용융된 수지가 냉각이 되면서 수축될 때 수축 방지를 위하여 추가적으로 수지를 주입하는 과정이다. 냉각과정은 그 다음 과정으로 수지가 금형 내에서 고화 되어 취출 직전까지의 과정이며 가장 긴 공정시간을 차지한다. 그러나 충전과정에서 용융상태에 있는 고온의 수지는 상대

*Corresponding author, E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

적으로 낮은 온도의 금형벽면과 접촉하는 즉시 고화되므로 수지의 냉각은 충전, 보압 및 냉각 과정 모두에서 진행된다고 볼 수 있다.

사출성형품에서 싱크마크(sink mark)와 후변형(warpage)은 사출성형공정 중 냉각과정에서의 문제로 인해 발생하는 결함이다. 싱크마크는 제품의 살두께가 두꺼운 부분이 얇은 부분에 비해 상대적으로 늦게 냉각되면서 제품 표면이 함몰되는 결함이며, 후변형은 불균일한 냉각에 의해 발생하는 국부적인 온도 차이에 의한 잔류응력이 주된 원인이다.

따라서 냉각과정은 사출성형공정에서 매우 중요한 과정으로 설계 단계부터 세심한 주의를 기울여야 한다. 일반적으로 충전, 보압 및 변형해석 등을 통해 사출성형품의 설계가 이루어지고 성형품 설계 도면이 완료된 후 금형설계 단계에서 냉각회로(cooling circuit)가 결정된다. 하지만 냉각회로에 대한 고려 없이 수행되는 변형해석은 성형품의 변형 특성을 사전에 예측하기 힘들고 금형의 제작이 시작된 상태에서 냉각회로의 수정 또한 어려운 것이 현실이다.

이러한 문제점 해결을 위해 금형의 냉각회로를 자동으로 배치하여 최적화 하려는 연구가 이루어졌다.^{1,2)} 특히 선행연구³⁾에서는 초기 설계된 성형품에 대해 균일한 냉각을 보장해주는 냉각회로를 자동 설치하도록 냉각관(cooling channel) 간격과 배플관(baffle tube) 간격, 냉각관 깊이, 배플관 깊이를 설계변수로 선정하고 제품표면온도의 편차를 최소화하기 위한 냉각회로 최적화를 진행하였다. 하지만 선행연구에서는 두 가지 사항이 고려되지 않았다.

첫 번째는 냉각회로 배치와 관련된 설계변수 선정에 대한 것으로서, 설계변수는 상부금형과 하부금형으로 각각 구분되어야 한다. 그 이유는 제품의 곡률이 큰 경우 금형 상면과 하면에서 단위 면적 당 흡수하는 열전달량이 서로 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 선행연구에서와 같이 설계변수를 상부금형과 하부금형의 구분 없이 선정할 경우 냉각의 균일성을 보장하지 못하는 단점이 있을 수 있다.

두 번째는 목적함수 선정에 대한 것으로서, 선행연구에서는 제품의 균일한 냉각을 위해 목적함수를 CAE 해석 결과인 제품표면의 온도편차로 정의하였다. 하지만 실제 현장에서는 제품의 표면온도를 측

정할 수 있는 적합한 방법이 없기 때문에 주로 금형의 온도를 측정하여 냉각회로의 성능을 평가한다. 따라서 목적함수를 현장에서 사용하기에 적합한 방식으로 수정할 필요가 있다.

본 연구에서는 대형사출성형품 중 하나인 자동차 전면 범퍼(front bumper) 금형의 균일한 냉각을 위해 냉각회로 배치와 관련된 설계변수를 상부금형과 하부금형으로 구분하여 선정하였으며, 목적함수를 상부 및 하부금형의 온도표준편차 평균과 평균온도차를 동시에 최소화하는 다중 목적함수로 정의하여 냉각회로 최적화를 수행하였다.

2. 설계대상

2.1 유한요소모델

설계대상인 전면 범퍼 해석모델은 Fig. 1과 같이 1800 × 600 (mm)의 크기에 26,000개의 유한요소로 구성된다. 제품의 두께는 2mm이며 사용되는 재료는 PP (Poly Propylene)이다. 전면 범퍼는 제품의 크기가 크기 때문에 불균일한 온도분포가 제품 품질에 미치는 영향이 크며, 형상이 지나치게 복잡하지 않아서 많은 수의 냉각관이 충분히 설치될 수 있다.



Fig. 1 Finite element model of the front bumper

2.2 냉각회로 설치방법

본 연구에서는 냉각회로의 냉각효율을 높이기 위해 냉각관은 Fig. 2에서와 같이 제품표면에서 일정 거리로 오프셋(offset) 시킨 프로파일(profile)을 따라 일정 간격으로 설치되고, 배플관은 냉각관을 따라 일정 간격으로 설치된다. 실제 현장에서 보편적으로 사용되는 치수를 참조하여 냉각관의 직경은 20mm, 배플관의 직경은 30mm로 정하였다.

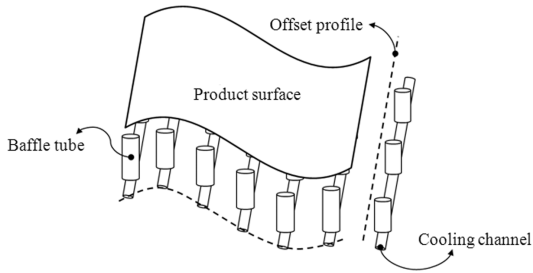


Fig. 2 Arrangement of cooling channels and baffle tubes using the offset profile method

3. 설계문제 정식화

3.1 설계 요구사항

금형의 균일한 냉각을 위해 요구되는 설계 요구사항은 다음과 같다.

3.1.1 금형의 온도편차 최소화

싱크마크와 후변형과 같은 결함의 발생을 방지하기 위해 금형의 온도편차는 최소화 되어야 한다. 따라서 상부 및 하부금형의 온도 분포를 동시에 균일하게 하기 위해 두 금형의 온도편차 평균을 최소화 하도록 하였다. 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\text{Minimize } \frac{\sigma_U + \sigma_L}{2}, \tag{1}$$

여기서, σ_U 와 σ_L 은 각각 상부 및 하부 금형의 온도 표준편차이며, 이 목적함수를 f_1 이라고 표기한다.

3.1.2 금형간의 평균온도차 최소화

후변형은 상부 및 하부 금형 간의 온도차에 의해서도 발생할 수 있다. 따라서 상부 및 하부 금형 간의 온도차를 최소화하기 위해 두 금형간의 평균온도차를 최소화 하도록 하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\text{Minimize } \mu_U - \mu_L, \tag{2}$$

여기서, μ_U 와 μ_L 은 각각 상부 및 하부 금형의 평균 온도이며, 이 목적함수를 f_2 라고 표기한다.

3.2 설계변수

금형의 균일한 냉각을 위해 Fig. 3에서와 같이 냉

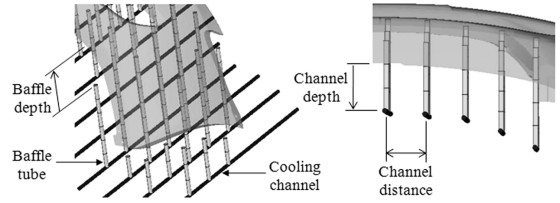


Fig. 3 Design variables for the injection mold cooling circuit

Table 1 Initial value and upper and lower limit values of the design variables

(Unit: mm)

| No. | Design variable | Lower | Initial | Upper |
|-------|------------------------|-------|---------|-------|
| x_1 | Upper channel distance | 45 | 90 | 130 |
| x_2 | Lower channel distance | 45 | 90 | 130 |
| x_3 | Upper baffle depth | 30 | 60 | 100 |
| x_4 | Lower baffle depth | 30 | 60 | 100 |
| x_5 | Upper channel depth | 30 | 60 | 100 |
| x_6 | Lower channel depth | 30 | 60 | 100 |

각회로 배치와 관련된 냉각관 간격(channel distance)과 배플관 깊이(baffle depth), 그리고 냉각관 깊이(channel depth)를 설계인자로 선정하였다.

설계변수는 상부 및 하부 금형의 냉각회로와 관련된 설계인자들로, Table 1과 같이 상부금형 냉각관 간격(x_1)과 하부금형 냉각관 간격(x_2), 상부금형 배플관 깊이(x_3), 하부금형 배플관의 깊이(x_4), 상부금형 냉각관 깊이(x_5), 하부금형 냉각관 깊이(x_6)로 총 6개를 선정하였다. 설계변수의 초기값은 실제 금형제작에 사용되고 있는 값이며, 상한값은 대형 금형에서 일반적으로 사용되는 최대범위로 선정되었고, 하한값은 냉각관과 배플관 직경을 고려하여 금형 가공 시 물리적인 문제가 발생하지 않는 범위에서 선정하였다.

3.3 설계문제 정식화

선정된 설계 요구사항과 설계변수를 사용하여 최적설계 문제를 정식화하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} \quad x_i, \quad i=1,2,3,\dots,6 \\
 & \text{to minimize} \quad \omega_1 \frac{f_1}{s_1} + \omega_2 \frac{f_2}{s_2}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, x_i 는 i 번째 설계변수이고, ω 는 가중치 (weight factor)이며, s 는 보정계수(scale factor)로서 각 목적함수의 초기값을 사용한다.

상부 및 하부 금형의 온도표준편차 평균과 평균 온도차를 동시에 최소화하는 다중 목적함수를 위해 가중치법(weighted sum method)⁴⁾을 사용하였다. 가중치 ω_1 과 ω_2 를 Table 2와 같이 변경시켜 다섯 가지 설계문제(Case1~5)에 대해 최적설계를 수행하고, 각 설계문제에서 얻은 목적함수의 최적해를 목적함수 공간에 배열하면 파레토 최적해(pareto optimum)⁴⁾를 얻을 수 있다. Fig. 4와 같이 목적함수 f_1 과 f_2 를 최소화하는 설계문제에서 임의의 목적함수 값을 개선하기 위해 한 개 이상의 다른 목적함수 값을 희생하여야만 할 때 이 설계점을 파레토 최적해라고 하며, 파레토 최적해의 집합을 나타내는 곡선을 파레토 프론티어(pareto frontier)⁴⁾라고 한다.

Table 2 Design cases by weighted sum method

| weight | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 | Case5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ω_1 | 1 | 0.75 | 0.5 | 0.25 | 0 |
| ω_2 | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 |

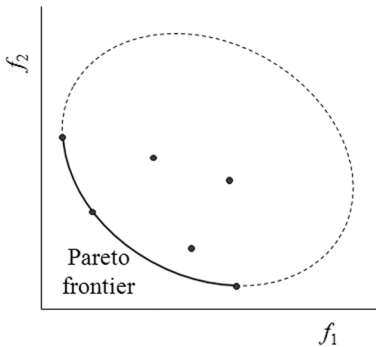


Fig. 4 Pareto frontier: A Set of pareto optimum points

4. 냉각회로의 최적설계

4.1 해석절차 자동화

본 논문에서는 상용 사출성형 해석 프로그램인 Moldflow Insight 2010을 이용하여 전면 범퍼 금형의

냉각해석을 수행하였다. 또한 최적설계를 위해 상용 PIDO (Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIAAnO (Process Integration, Automation and Optimization)⁵⁾를 이용하여 Moldflow MPI의 냉각해석 절차를 자동화 하였다.

4.2 파라메트릭 스터디 및 최적화기법 선정

최적설계에 앞서 성능지수에 많은 영향을 미치는 설계변수를 선정하고, 설계변수의 변화에 따른 응답의 경향성을 파악하기 위해 파라메트릭 스터디 (parametric study) 기법을 이용하였다.

상부 및 하부 금형의 온도표준편차 평균(f_1)에 대한 파라메트릭 스터디 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 평균온도차(f_2)에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 영향도 분석 결과, 6개 설계변수 모두가 성능지수에 영향을 주는 것으로 판단되어 최적설계에서 설계변수로 사용하였다. 특히 하부금형 배플관의 깊이(x_4)의 경우 설계변수값이 하한값 방향으로 이

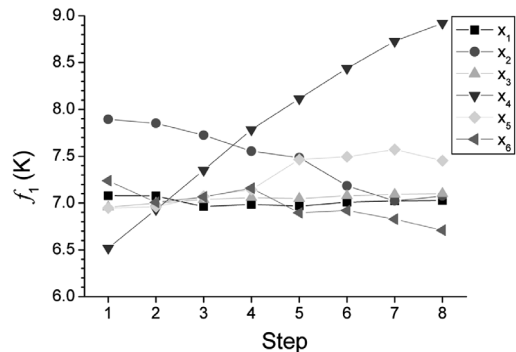


Fig. 5 Parametric study results of the objective function f_1

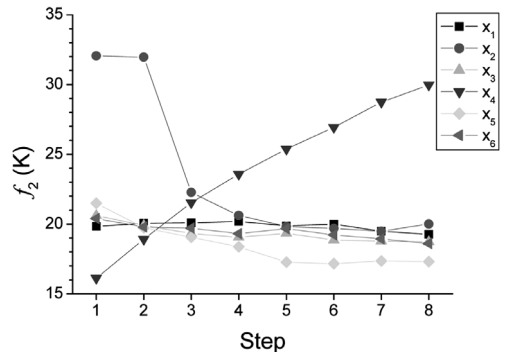


Fig. 6 Parametric study results of the objective function f_2

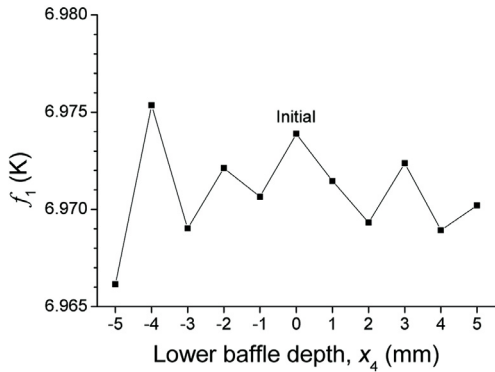


Fig. 7 Variation of the objective value (f_1) with respect to the lower baffle depth (x_4) with 0.1% perturbation around the initial value

동 할수록 온도표준편차 평균(f_1)과 평균온도차(f_2)가 모두 감소하여 급형을 균일하게 냉각시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편 설계변수의 변화에 따른 성능지수의 수치적 노이즈 존재 여부를 조사하기 위해, 유한차분법 적용 때 주로 사용하는 0.1% 섭동량을 사용하여 설계변수 초기값 앞뒤로 5점 씩 파라메트릭 스텐디를 수행하였다. 이 중 상부 및 하부 급형의 온도표준편차 평균(f_1)에 대한 하부급형 배플관 깊이(x_4)의 분석 결과를 Fig. 7에 나타내었으며, 전반적으로 응답(f_1)이 비평활함을 볼 수 있다. 이와 같이 수치적 노이즈 (numerical noise)^{6,7)}가 존재할 경우, 설계 민감도 기반 최적화 알고리즘으로는 목적함수의 기울기 값을 구하는데 어려움이 있어 최적해를 찾지 못할 수도 있다. 따라서 최적설계 수행에 있어 목적함수의 기울기 정보를 사용하지 않고, 평활(smoothing) 효과가 있는 점진적이차반응표면방법(Progress Quadratic Response Surface Method; PQRSM)⁸⁾을 최적화기법으로 선정하였다. PQRSM은 PIANO에 탑재된 최적화 기법으로서 설계 공간 내에서 목적함수와 구속조건을 2차 함수로 근사화하고 신뢰영역 근사모델 관리 기법이 정한 설계구역에서 근사 최적설계를 점진적으로 수행하는 기법이다.

4.3 다중목적함수 최적설계 결과

가중치법에 따른 다섯 가지 설계문제에 대해 PQRSM을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적

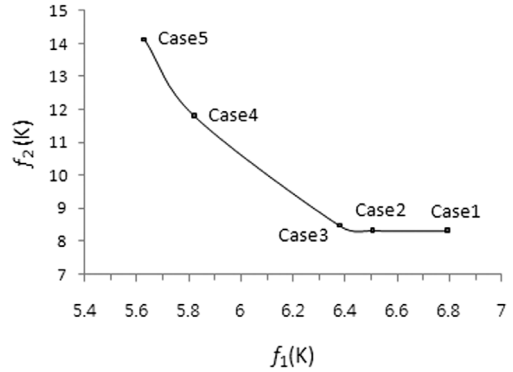


Fig. 8 Pareto optima for five cases in Table 2

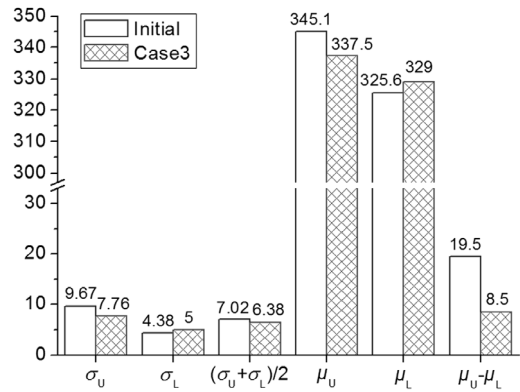


Fig. 9 Optimal objective function values of Case 3 compared to those of the initial design

설계 결과, Fig. 8과 같이 다섯 개의 파레토 최적해를 구할 수 있었으며, 이들을 연결하여 파레토 프론티어를 생성하였다. Case5의 경우 온도편차 평균(f_1)은 가장 작지만 평균온도차(f_2)는 가장 큰 값을 가진다. 반면 Case1과 2, 3의 경우 평균온도차(f_2)는 서로 유사하지만 온도편차 평균(f_1)은 Case3의 경우가 가장 작음을 볼 수 있다. 따라서 Case3이 두 목적함수를 동시에 최소화 할 수 있는 최선의 결과로 판단되었다. 초기모델과 최적모델(Case3)의 두 목적함수값을 Fig. 9에 비교하였다. 그 결과, 온도편차 평균(f_1)의 최적값은 6.38K로서 초기값인 7.02K 대비 9.1% 감소하였고, 평균온도차(f_2)의 최적값은 8.5K로서 초기값인 19.5K 대비 56.4% 감소하였다. 초기 설계변수값과 Case3 최적설계를 통해 결정된 설계변수값을 Table 3에 비교하였다.

Table 3 Optimal design variable values compared to those of the initial ones

(Unit: mm)

| No. | Design variable | Lower | Initial | Case3 | Upper |
|-------|------------------------|-------|---------|-------|-------|
| x_1 | Upper channel distance | 45 | 90 | 109 | 130 |
| x_2 | Lower channel distance | 45 | 90 | 101 | 130 |
| x_3 | Upper baffle depth | 30 | 60 | 99 | 100 |
| x_4 | Lower baffle depth | 30 | 60 | 30 | 100 |
| x_5 | Upper channel depth | 30 | 60 | 99 | 100 |
| x_6 | Lower channel depth | 30 | 60 | 96 | 100 |

5. 결론

자동차 전면 범퍼 금형의 균일한 냉각을 위한 냉각회로 최적설계의 결론은 다음과 같다.

- 1) 금형의 균일한 냉각을 위해 상부 및 하부 금형의 온도표준편차 평균과 평균온도차를 동시에 최소화하는 다중목적함수 최적화문제를 정식화 하였다.
- 2) 오프셋 프로파일을 이용하여 금형의 냉각회로를 배치하고 냉각해석 절차를 자동화하였다. 또한 파라메트릭 스테디를 통해 설계변수의 영향도를 분석하였으며, 수치적 노이즈 존재 여부 분석을 통해 본 문제에 적합한 최적화기법을 선정하였다.
- 3) 가중치법과 점진적이차반응표면방법을 이용한 최적설계를 수행하여 파레토 최적해를 도출하였다. 다중목적함수 최적설계 결과, 상부 및 하부 금형의 온도표준편차 평균(f_1)은 6.38K, 평균온도차(f_2)는 8.5K로서 초기값 대비 각각 9.1%와 56.4% 감소시킬 수 있었다. 이때의 상부금형 냉각관 간격(x_1)은 109mm, 하부금형 냉각관 간격(x_2)은 101mm, 상부금형 배플관 깊이(x_3)는 99mm, 하부금형 배플관의 깊이(x_4)는 30mm, 상부금형 냉각관 깊이(x_5)는 99mm, 하부금형 냉각관 깊이(x_6)는 96mm로 결정되었다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 설계방법의 유효성을 보였다.
- 4) 최적설계 시간을 최소화하기 위해 처음부터 국부적으로 다른 열용량을 가지는 구역을 위한 최

적설계를 실행하지 않고 전체적인 평균 개념을 적용하였으며, 결과로서 국부적으로 높거나 낮은 온도 영역이 발생하는 구역을 별도로 선정하여 해당 구역에 대한 별도 최적화를 진행하는 방식으로 개발하였다. 따라서 두께 편차가 균일한 제품에서는 1차 최적화만으로도 충분한 결과를 얻지만 균일하지 않은 두께 편차를 가지는 제품에서는 2차 또는 3차 최적화 단계가 적용되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 2011년도 두뇌한국 21사업, 지식경제부-한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0016701)에 의해 지원되었으며, 이 연구를 위하여 PIAO 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) B. O. Rhee, C. S. Park, H. K. Chang, H. W. Jung and Y. J. Lee, "Automatic Generation of Optimum Cooling Circuit for Large Injection Molded Parts," Int. J. Precision Eng. and Manufacturing, Vol.11, pp.439-444, 2010.
- 2) H. Koresawa and H. Suzuki, "Autonomous Arrangement of Cooling Channels Layout in Injection Molding," Proceedings of 1999 Annual Technological Conference of Society of Plastics Engineers, pp.1073-1077, 1999.
- 3) J. H. Choi, D. H. Park, C. H. Park, B. O. Rhee and D. H. Choi, "Design Optimization of Injection Mold for Minimizing Temperature Deviation," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.2566-2572, 2009.
- 4) R. T. Marler and J. S. Arora, "Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering," Struct. Multidisc. Optim., Vol.26, pp.369-395, 2004.
- 5) Process Integration, Automation and Optimization - PIAO User's Manual, FRAMAX Inc., 2010.

- 6) C. H. Park, S. R. Kim, D. H. Choi and B. G. Pyo, "Design Optimization for Minimizing Warpage in Injection Molding Parts with Numerical Noise," Proceedings of KSME(A), Vol.29, No.11, pp.1445-1454, 2005.
- 7) C. H. Park, B. G. Pyo, D. H. Choi and M. S. Koo, "Design Optimization of an Automotive Injection Molded Part for Minimizing Injection Pressure and Preventing Weldlines," Transactions of KSAE, Vol.19, No.1, pp.66-72, 2011.
- 8) K. J. Hong, D. H. Choi and M. S. Kim, "Progressive Quadratic Approximation Method for Effective Constructing the Second-order Response Surface Models in the Large Scaled System Design," Proceedings of KSME(A), Vol.24, No.12, pp.3040-3052, 2000.