

사출압력 최소화와 웰드라인 방지를 위한 자동차용 사출성형 부품의 최적설계

박 창 현¹⁾ · 표 병 기²⁾ · 최 동 훈^{*3)} · 구 만 서⁴⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 브이엠테크²⁾ · 한양대학교 최적설계신기술연구센터³⁾ · CAETECH⁴⁾

Design Optimization of an Automotive Injection Molded Part for Minimizing Injection Pressure and Preventing Weldlines

Chang-Hyun Park¹⁾ · Byung-Gi Pyo²⁾ · Dong-Hoon Choi^{*3)} · Man-Seo Koo⁴⁾

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

²⁾VMTech, #7, KyungHee Lespia Bldg., 1024-15 Yeongtong-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 443-813, Korea

³⁾The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

⁴⁾CAETECH, #1634, Investel Bldg., 1123-2 Sanbon-dong, Gunpo-si, Gyeonggi 435-040, Korea

(Received 15 January 2010 / Accepted 5 August 2010)

Abstract : Injection pressure is an important factor in filling procedure for injection molded parts. In addition, weldlines should be avoided to successfully produce injection molded parts. In this study, we optimally obtained injection molding process parameters that minimize injection pressure. Then, we determined the thickness of the part to avoid weldlines. To solve the optimization problem proposed, we employed MAPS-3D (Mold Analysis and Plastics Solution-3 Dimension), a commercial CAE tool for injection molding analysis, and PIA_{NO} (Process Integration, Automation, and Optimization) as a commercial PIDO (Process Integration and Design Optimization) tool. We integrated MAPS-3D into PIA_{NO}, automated the analysis and design procedure, and performed optimization by employing PQRS_M (Progressive Quadratic Response Surface Method) equipped in PIA_{NO}. We successfully obtained optimization results, which demonstrates the effectiveness of our design method.

Key words : Injection molding(사출성형), Injection pressure(사출압력), Weldline(웰드라인), Design optimization(최적설계), PQRS_M(점진적이차반응표면방법), PIA_{NO}(Process Integration, Automation and Optimization)

Nomenclature

- P : injection pressure, MPa
- x : design variable
- n : number of design variable
- OBJ : objective function
- g : constraints

1. 서론

사출성형(injection molding)이란 가소성 물질을 사출성형기의 실린더 내부에서 가열하여 용융시키고 이를 사출금형(injection mold) 속에 압입하는 성형법이다. 사출성형공정은 자동화가 쉽고 생산성과 성형성이 우수하기 때문에 다양한 제품의 생산에 이용된다.

과거에는 사출성형 공정 파라미터 결정을 작업자의 경험과 직관에 의존하였으나, 최근 사출성형 해석기술의 발달로 인해 유한요소법과 같은 수치해석

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

기법이 적용된 상용 해석 프로그램을 이용함으로써 설계조건이나 공정조건에 따라 달라지는 복잡한 현상을 예측하고 해석 할 수 있게 되었다.

발전된 해석기술을 기반으로 제품의 설계요구사항을 만족하면서 원가 및 개발 비용의 절감을 위해 최적의 사출성형 공정 파라미터를 찾으려는 노력과 함께 성형불량 요인을 방지하기 위한 노력이 이루어졌다. 특히, 유전알고리즘(Genetic Algorithm; GA)과 실험계획법(Design of Experiments; DOE), 공리설계(axiomatic design), 순차적근사최적설계(Sequential Approximate Optimization; SAO) 등의 기법을 이용한 다양한 최적설계(design optimization) 연구가 이루어졌다.¹⁻⁶⁾

본 논문에서는 충전과정에서 발생하는 사출압력을 최소화하고 성형불량요인인 웰드라인(weldline)의 발생을 방지하고자 한다.

충전과정에서 사출압력은 제품의 충격강도와 휨, 형체력 등에 영향을 주는 주요 공정 조건이다. 따라서 제품 충전 시 사출속도(injection speed)와 충전시간(filling time) 등의 공정 파라미터를 제어하여 사출압력을 되도록 낮게 만드는 공정기술이 필요하다.

또한 사출성형품에서 발생하는 대표적인 성형불량요인인 웰드라인은 수지의 흐름이 만나서 생기는 가는 선을 의미하며, 이러한 웰드라인의 노치형상은 사출성형품의 외관불량과 함께 응력 집중을 유발하여 제품의 기계적 강도에 좋지 않은 영향을 줄 수 있기 때문에 웰드라인이 발생하지 않도록 하는 설계 기술이 요구된다.

사출압력의 경우 공정 파라미터의 제어를 통해 그 값을 낮출 수 있지만, 웰드라인의 경우 제품의 유동경로 개선을 통해 그 발생을 방지할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 설계 절차를 두 단계로 나누어 수행하였다. 먼저 사이클 타임을 최소화 할 수 있는 수지와 비평활한 반응값을 보이는 문제에 적합한 최적화 기법을 이용하여 사출압력을 최소화하는 최적설계를 수행하였으며, 도출된 최적의 설계변수값이 적용된 해석 모델을 기반으로 해석 모델 관심부위에 단계별로 두께감소율을 적용하여 웰드라인이 발생하지 않도록 2차 설계를 수행하였다.

2. 사출성형품의 충전해석과 사출압력

본 논문에서는 차량의 안개등 후면부에 설치되는 사출성형품(fog blank cover)을 설계 대상으로 하였으며, 사출성형품의 충전해석을 위해 상용 사출성형 해석 프로그램인 MAPS-3D (Mold Analysis and Plastics Solutions-3 Dimension)를 이용하였다.⁷⁾

실제 제품 생산에 사용된 수지는 PP(Polypropylene)이다. 하지만 Fig. 1과 같이 PP 수지의 경우 낮은 사출압력을 위해서는 충전시간이 길어져야 하며, 충전시간이 길 경우 생산성 문제가 발생한다. 반대로 충전시간을 짧게 설정할 경우 사출압력이 높아지게 되므로 사출압력을 최소화하는 설계문제에 PP를 수지로 사용하게 되면 최적의 충전시간을 찾는 데 어려움이 발생한다.

하지만 Fig. 1에서 보이듯이 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지의 경우 사출압력은 전반적으로 PP 수지보다 높지만 충전시간이 짧을수록 낮은 사출압력을 보이는 특성이 있다. 따라서 사이클 타임을 줄이면서 사출압력을 최소화하는 설계문제에 ABS 수지가 적합하기 때문에 사용 수지를 PP에서 ABS로 변경하였다. 단, ABS 수지를 사용하여 도출한 최적설계값을 PP를 사용한 해석 모델에 입력하여 해석을 수행하고, 그에 따른 사출압력의 감소를 비교하도록 한다.

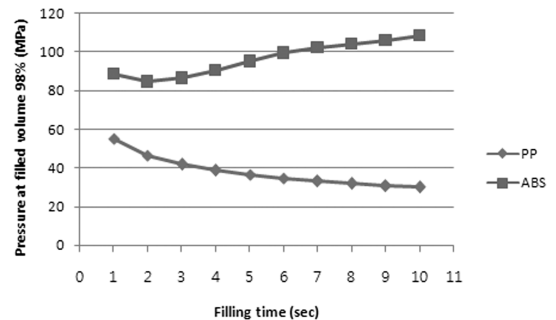


Fig. 1 Comparison of pressures at filled volume 98% between PP and ABS

수지에 따른 온도 관련 공정 파라미터는 Table 1과 같고, 해석 모델의 수지 유동 형태는 Fig. 2와 같다.

Table 1 Temperature conditions with respect to resins used

	PP	ABS
Mold temperature	25°C	60°C
Melt temperature	210°C	210°C



Fig. 2 Flow pattern of the simulation model

3. 사출압력 최소화를 위한 최적설계

3.1 설계 문제 정의

3.1.1 설계요구사항

제품의 기계적 특성 향상을 위해 제품 충전 시 사출압력은 최소화 되어야 하며, 충전해석이 끝나는 부분에서 사출압력이 비정상적으로 급격하게 상승하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 안정적인 사출압력 계산을 위해 완전 충전시점에 근접할 것으로 판단되는 98% 충전시점을 사출압력 측정 시점으로 결정한다. 또한 수지유동선단면적에 비례하도록 사출속도 프로파일은 위로 볼록한 포물선 형태여야 한다.

이상의 설계요구사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 충전율이 98%일 때의 사출압력이 최소화되어야 함.
- 2) 다단사출에 있어서 중간 단계의 사출속도들은 첫 번째와 마지막 사출속도보다 커야 함.

3.1.2 설계변수

사출압력에 영향을 주는 공정 변수로는 금형온도(mold temperature)와 수지온도(melt temperature), 사출속도 프로파일(injection speed profile), 충전시간(filling time) 등이 있다. 여기서 금형온도와 수지온도는 그 값이 증가함에 따라 사출압력이 감소하기 때문에 본 논문에서는 온도와 관련된 두 인자를 설계변수에서 제외하였다. 따라서 설계변수로는 수지

유동 선단면적에 비례한 6단계 사출속도 프로파일에서의 각 사출속도와 충전율 100%일 때의 충전시간을 선정하였다. 6단계 사출속도 프로파일에서의 각 단계별 충전율은 Fig. 3과 같다.

설계변수의 초기값과 하한값, 상한값은 Table 2와 같다. 단, 실제 사출공정에서 사출속도를 100%로 설정할 경우 사출성형기 과부하 문제와 제품 표면에 성형 불량 요인인 플로우 마크(flow mark) 등이 발생할 수 있기 때문에 사출속도의 최대값을 80%로 설정하였다.

Table 2 Baseline, lower and upper bound of design variables

Design variable	Lower bound	Baseline	Upper bound	Unit
x_1 : Injection speed 1	16	80	80	%
x_2 : Injection speed 2	40	80	80	%
x_3 : Injection speed 3	40	80	80	%
x_4 : Injection speed 4	40	80	80	%
x_5 : Injection speed 5	40	80	80	%
x_6 : Injection speed 6	16	80	80	%
x_7 : Filling time	1	3	10	sec

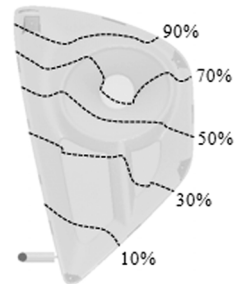


Fig. 3 Filled volume percentages with respect to injection speeds

3.1.3 설계문제 정식화

설계요구사항을 바탕으로 설계문제를 정식화하면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && x_n \quad \text{where } n = 1, 2, 3, \dots, 7 \\
 & \text{minimize} && P \\
 & \text{subject to} && x_2 \geq \max[x_1, x_6] \\
 & && x_3 \geq \max[x_1, x_6] \\
 & && x_4 \geq \max[x_1, x_6] \\
 & && x_5 \geq \max[x_1, x_6]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, P는 충전율 98%일 때의 사출압력을 의미한다.

3.2 해석 절차 통합 및 설계 자동화

최적설계를 수행하기 위해 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO (Process Integration, Automation, and Optimization)를 이용하였다. PIANO를 이용하여 상용 사출성형 해석 프로그램인 MAPS-3D의 해석 절차와 웰드라인을 평가하는 계산 절차를 통합하였으며, 해석 및 설계 절차를 자동화하였다.^{8,9)}

3.3 파라메트릭 스테디

최적설계를 수행하기에 앞서 성능지수에 지배적인 설계변수를 선정(screening)하고, 설계변수에 대한 응답의 경향성을 파악하기 위해 PIANO에서 제공하는 파라메트릭 스테디(parametric study) 기법을 이용하였다. 그 결과, 설계변수 x_1 (1단계 사출속도)과 x_3 (3단계 사출속도)가 사출압력에 미치는 영향이 적은 것으로 확인 되었다. 하지만 이 두 설계변수는 사출속도 프로파일을 구성하는 설계변수이므로 최적설계를 위한 설계변수에 모두 포함하였다.

설계변수의 설계민감도 해석을 위해 PIANO에서 제공하는 파라메트릭 스테디 기법을 이용하였다. 이를 위해 DOT(Design Optimization Tools)에서 기울기 정보를 구하기 위해 전방차분법을 적용할 때 사용하는 설계변수의 섭동량(perturbation of finite difference step size)인 현 설계변수들의 0.1%를 변동량으로 설정하여 파라메트릭 스테디를 수행하였다.¹⁰⁾

설계변수 x_7 (충전시간)의 초기값에서 0.1%의 상대유한차분값을 적용한 파라메트릭 스테디 결과는 Fig. 4와 같다. 전반적으로 목적함수의 반응값(사출압력)이 비평활하여 이로 인해 설계 민감도 기반 최적화 알고리즘으로는 목적함수의 기울기 값을 구하는데 어려움이 있을 수 있으며, 국부 최적점으로 수렴할 가능성이 있어 최적해를 찾지 못할 경우도 있을 수 있다.⁴⁾ 이러한 이유로 최적설계를 위해 목적함수의 기울기 정보를 사용하지 않고 평활(smoothing) 효과가 있는 점진적이차반응표면방법을 최적화기법으로 선정하였다.

3.4 점진적이차반응표면방법

최적화 기법으로는 PIANO에 탑재된 점진적이차반응표면방법(Progressive Quadratic Response Surface Method; PQRS)을 사용하였다.¹¹⁾

점진적이차반응표면방법은 순차적으로 $2n+1$ (n: 설계변수의 개수)번의 실험계획을 수행하고, 2차함수 형태의 반응표면모델을 생성하여 최적설계를 수행하는 순차적 근사 최적설계 기법으로, 근사모델의 질을 개선하는 지능적인 Hessian Update Rule과 설계영역을 효과적으로 조절하는 신뢰구간 알고리즘을 적용하여 수렴의 강건성과 효율성을 동시에 확보할 수 있는 장점이 있다.

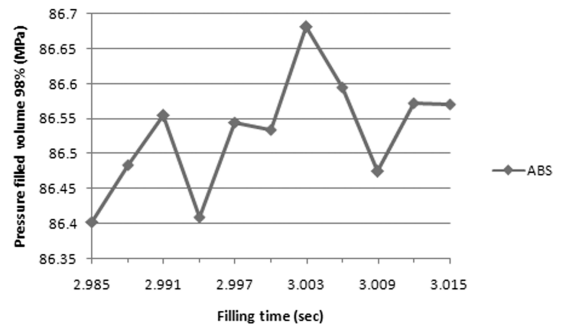


Fig. 4 Variation of the objective value with respect to the filling time with the perturbation of finite difference step size($x_0 \times 0.001$)

3.5 최적설계 결과

최적설계 결과, 네 번째 반복과정(iteration)을 통해 구속조건을 모두 만족하면서 목적함수인 사출압력이 16.9% 감소하였고, 전체 해석 횟수(total number of function call)는 61회였으며, 1회 해석시간은 50분(Quad Core 2.4GHz)이다.

설계변수의 초기값과 최적값은 Table 3과 같다. 충전시간에 따른 사출압력의 변화를 보인 Fig. 1에서는 충전시간 2초에서 ABS 수지의 사출압력이 가장 낮았으며, 실제 공정에서도 약 2~3초의 충전시간을 사용하고 있다. 하지만 최적설계에서는 사출시간이 1초로 결정되었으며, 충전시간이 짧을 경우 실제 공정에서 플로우 마크 등이 발생할 수 있다.

최적설계에서 결정된 사출속도와 Fig. 1에서의 최소 사출압력을 보이는 사출속도의 경우 서로 사

Table 3 Comparison of the design variables between baseline and optimal

Design variable	Baseline	Optimal	Unit
x_1 : Injection speed 1	80	16	%
x_2 : Injection speed 2	80	80	%
x_3 : Injection speed 3	80	80	%
x_4 : Injection speed 4	80	80	%
x_5 : Injection speed 5	80	80	%
x_6 : Injection speed 6	80	16	%
x_7 : Filling time	3	1	sec

출속도 프로파일이 다르기 때문에 최소 사출압력이 발생하는 충전시간을 비교하는 것은 문제가 있다. 만약 플로우 마크와 같은 성형불량이 수치화 되어 설계문제에 포함된다면 최적의 충전시간은 현재의 최적설계 결과와 다르게 결정될 수 있을 것이다.

ABS를 수치로 사용한 최적설계값을 PP를 수치로 사용한 모델에 넣어 해석한 결과를 Fig. 5에 비교하였다. PP를 수치로 사용한 경우에도 ABS와 유사하게 사출압력이 초기 모델 대비 17% 감소함을 볼 수 있다. 두 수치간의 유사한 사출압력 감소율로 미

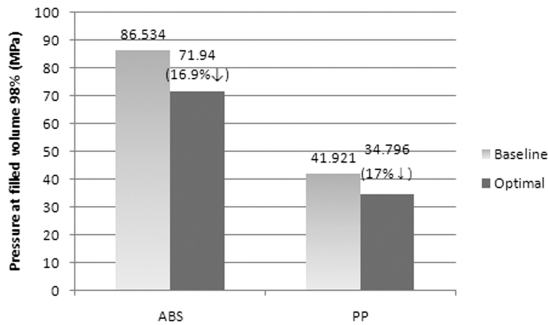


Fig. 5 Comparison of the objective values between baseline and optimal with respect to resin used

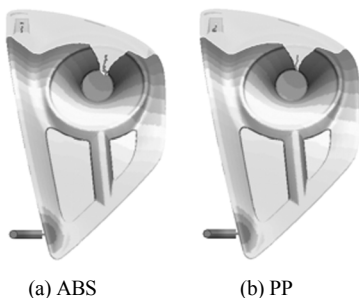


Fig. 6 Weldline simulation results at optimal designs

루어 보아 최적의 충전시간을 찾기 위해 PP 대신 ABS를 사용한 근거의 타당성을 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 5에서와 같이 두 수지의 경우 최적설계값에서 사출압력이 서로 유사하게 감소되었다고 하더라도 Fig. 6과 같이 성형불량요인인 웰드라인이 동일하게 발생하였고, 이를 방지하기 위한 2차 설계가 요구된다.

4. 웰드라인 방지를 위한 설계

4.1 해석 모델의 두께 변경

최적설계를 통해 사출압력을 최소화하는 최적의 설계변수값을 도출하였으나 성형불량요인인 웰드라인이 발생하였다.

성형품에 웰드라인이 발생하는 것은 성형과정에서 필연적으로 나타나는 현상이다. 하지만 웰드라인이 근본적으로 발생되어서는 안 될 위치에 발생했다면, 금형의 수정과 게이트의 위치변경, 성형품의 두께 변경 등을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 웰드라인 방지를 위해 성형품의 두께 감소율을 적용한 두께 변경 방법을 선정하였다.

본 연구에서 웰드라인 발생을 방지하기 위한 관심 부위는 Fig. 7에서와 같이 제품의 중앙부에 위치한 원형 부분으로 아래로 파인 형상이다. 원형부분의 경우 시작점 P1에서부터 충전되는 수지가 유로 F1과 F2를 거쳐 도착점 P2에 도달하게 된다. 형상 특성 상 F2의 유동거리가 F1보다 짧아서 F2를 흐르는 수지가 F1의 수지보다 도착점 P2에 먼저 도달하게 되므로 웰드라인이 발생하게 된다.

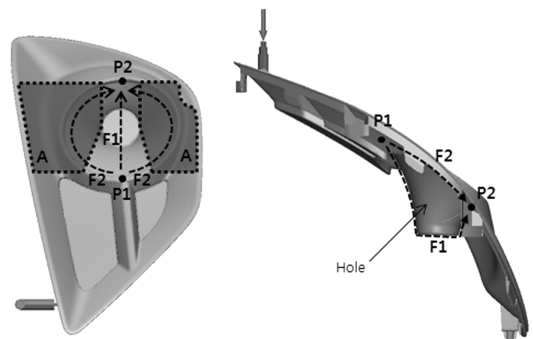


Fig. 7 Flow routes (F1, F2) and thickness modification areas (A)

웰드라인 발생을 방지하기 위해서는 관심 부위에 대한 유동경로의 개선이 필요하며, 이를 위해 비교적 두께 변경이 용이한 원형 부분의 좌우 측면 영역(A)에 대한 두께를 8%와 17%, 25% 감소시킨 해석 모델을 생성하였다. 이 부분의 두께를 감소시킨 이유는 두께 감소를 통해 유동 저항을 증가시켜 유로 F2의 유동선단 속도를 늦춤으로써 도착점 P2에서의 수지합류각(weld angle)을 증가시키기 위함이다.

4.2 두께 변경 모델의 해석 결과

ABS 수지를 사용하여 도출한 최적설계값과 PP 수지 정보를 세 가지의 두께 변경 모델에 입력하여 해석을 수행하였다.

기존 모델(Model_Org)과 세 가지 두께 변경 모델(Model_8%, Model_17%, Model_25%)에 대한 웰드라인 발생 여부를 Fig. 8에 비교하였다. 비교 결과, 두께 감소율이 증가 할수록 도착점 P2에서의 수지합류각이 커지는 것을 볼 수 있으며, 25% 두께 변경 모델의 수지합류각이 가장 크면서 웰드라인이 발생하지 않음을 볼 수 있다. 따라서 웰드라인을 방지할 수 있는 최상의 두께 감소율은 25%임을 알 수 있다.

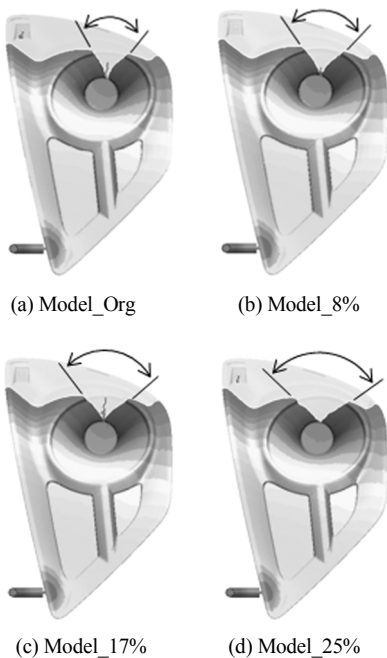


Fig. 8 Comparison of weldlines and weld angles with respect to the thickness modification using PP resin

4.3 실험을 통한 웰드라인 발생 검증

웰드라인이 발생하지 않은 25% 두께 변경 모델의 해석 결과를 검증하기 위해 실제 금형을 수정하여 시사출을 수행하였고, 이를 해석 결과와 비교하였다. 비교 결과, Fig. 9과 같이 실험과 해석의 유동 형태가 서로 유사함을 알 수 있고, 제품의 관심 부분인 원형 부분에 웰드라인이 발생하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 웰드라인을 방지하기 위한 두께 변경 방법의 타당성을 확인할 수 있다.

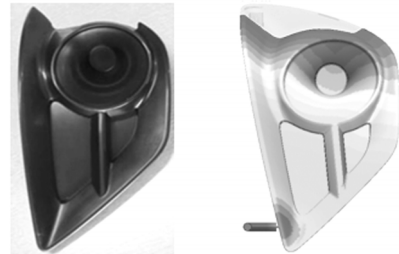


Fig. 9 Comparison of flow patterns between experiment and simulation (Model_25%) results

5. 결론

사출성형품의 실제적인 품질향상을 위해 사출압력 최소화과 웰드라인 방지를 주요 목적으로 하여 설계절차를 두 단계로 나누었으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 사출압력을 최소화를 위한 설계문제를 정식화하였으며, 설계민감도 분석을 통해 반응값의 비평활함을 확인하여 이러한 문제에 적합한 최적화기법을 선정하였다. 최적설계 결과, 사출압력을 최소화하는 최적의 공정 파라미터값을 도출하여 정립된 최적설계 절차의 유효성을 보였다.
- 2) 실제 사용 수지의 경우 사출압력이 감소할수록 사이클 타임이 증가하는 문제점에 대해 사이클 타임을 줄이면서 동시에 사출압력이 감소되도록 사용 수지를 변경하였으며, 최적설계값에서 두 수지의 경우 서로 동일한 사출압력 감소율을 보임으로서 최적의 충전시간을 찾기 위한 수지 변경의 타당성을 보였다.
- 3) 웰드라인의 방지를 위해 두께 변경 모델을 생성하였으며, 웰드라인이 발생하지 않는 최상의 두께 감소율을 확인할 수 있었다. 또한 최상의 두께

감소율이 적용된 금형을 제작하였으며, 실제 시 사출을 통해 웰드라인이 발생하지 않음을 확인 함으로써 해석 모델의 검증과 함께 두께 변경 방 법의 타당성을 보였다.

이러한 결과들로 미루어 보아 본 논문에서 제안 한 설계 절차가 다양한 사출성형품에도 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 향후에 해석 모델의 두께 감 소를 자동화 하여 사출압력을 최소화 하는 설계문 제와 통합할 경우 결과의 정확성과 설계 절차의 효 율성이 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 ‘c-MES 설계지원 플랫폼 기술 개발’ 과제(10033162-2009-11) 및 ‘자동차기반 기술개발사업’의 지원과 2010년도 2단계 두뇌한국 21사업, (주)브이엠테크, 한양대학교 최적설계신기 술연구센터 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) W. J. Choi, H. C. Sin and S. W. Kwak, “Optimization of Processing Conditions in Injection Molding Using Genetic Algorithm,” The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.24, No.10, pp.2543-2551, 2000.
- 2) K. Park, J. H. Ahn and S. R. Choi, “Application of Design of Experiments and Numerical Analysis to Optimal Design for Injection Molding processes of Electrical Parts,” The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.26, No.7, pp.1348-1356, 2002.
- 3) J. H. Kim, J. S. Lee and S. W. Cha, “The Optimization of Injection Molding System Using Axiomatic Approach,” The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.27, No.6, pp.1020-1027, 2003.
- 4) C. H. Park, S. Y. Kim, D. H. Choi and B. G. Pyo, “Design Optimization for Minimizing Warpage in Injection Molding Parts with Numerical Noise,” The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.29, No.11, pp.1445-1454, 2005.
- 5) J. H. Yoo and H. S. Kim, “A Study on Cavity Pressure and Tensile Strength of Injection Molding,” Transactions of KSAE, Vol.2, No.6, pp.110-116, 1994.
- 6) D. J. Choi and H. S. Park, “Optimization of Multi-component Injection Molding Process Based on Core-back System,” Transactions of KSAE, Vol.17, No.2, pp.67-74, 2009.
- 7) Mold Analysis and Plastics Solution-3D Dimension - MAPS-3D User's Manual, VMTech Co. Ltd., 2009.
- 8) Progress Integration, Automation and Optimization - PIAO User's Manual, FRAMAX Inc., 2009.
- 9) Progress Integration, Automation and Optimization - PIAO Tutorial, FRAMAX Inc., 2009.
- 10) G. N. Vanderplaats, DOT-Design Optimization Tools Users Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc., 1999.
- 11) K. J. Hong, M. S. Kim and D. H. Choi, “Efficient Approximation Method for Constructing Quadratic Response Surface Model,” KSME International Journal, Vol.15, No.7, pp.876-888, 2001.