한국기계가공학회지, 제9권, 제6호, pp.21～28 (2010. 12)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9 No. 6, pp.21～28 (2010. 12)

사출성형 설계에서 캐비티 충전 균형을 위한 수지 주입구의 최적 위치 결정에 관한 연구

박종천#, 성영규*

A Study on Determining Optimal Gate Positions for Cavity Fill-Uniformity in Injection Molding Design

Jong-Cheon Park#, Yeong-Kyu Seong*

(Received 8 October 2010; received in revised form 3 November 2010; accepted 18 November 2010)

ABSTRACT

This study shows an optimization procedure for an automatic determination on the gate position to ensure the fill-uniformity within a part cavity by using the injection molding simulation. For an optimization, the maximum pressure-difference within a part cavity induced at the stage of filling is used to evaluate degree of fill-uniformity. In addition, a direct search scheme based on the reduction of design space is developed and applied in the optimization problem. This corresponding proposed methodology was applied in the optimization on the gate location for a CD-tray molding, as a result, showed the improvement of the fill-uniformity within the cavity.

Key Words : Fill-uniformity(충전 균형), Gate Position(수지 주입구 위치), Injection Molding Simulation(사출성형 시뮬레이션), Search Algorithm(탐색 알고리듬)

1. 서 론

사출성형 공정(injection molding process)은 충전 과정, 보압 과정, 냉각 과정 및 취출 과정으로 이루어진다[1]. 충전 과정은 용융 수지를 스프루, 러너, 수지 주입구를 통해 제품 캐비티(cavity)에 채우는 과정이며 이 과정에서 결정되는 성형특성들(forming characteristics)은 이어지는 보압 과정과 냉각 과정의 입력 조건으로 작용하고 결국 최종 품질에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 품질에 영향을 줄 수 있는 충전 과정의 주요 성형특성들은 설계 의도를 만족시킬 수 있도록 충전 과정에서 최적화되는 것이 중요하다. 본 연구에서는 충전 과정의 성형특성들 중에서 제품 캐비티의 충전 균형을 최적화하고자 한다. 충전 균형(fill-uniformity)[2-6]은 수지 주입구(gate)의 위치에 의해 지배적으로 결정되는 성형특성으로서 유동 선단들(melt fronts)이 제품 캐비티의 말단

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : cadpark@kumoh.ac.kr
* 금오공과대학교 기계공학부 학부

영역들(extremities)을 동시에 균형적으로 채우는 것을 말한다. 충전 균형성은 제품의 수축률 분포와 휨 발생과 같은 제품의 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 충전 과정에서 최적화되어야 하는 중요한 성형특성이다.

본 연구에서는 수지 주입구의 위치를 설계변수로 하고 충전 후 제품 캐비티 내의 압력편차를 평가 지표로 설정하여 충전 균형 최적화를 수행하였다. 최적화를 위해 탐색 알고리듬으로 순차탐색법을 제시하고 최적설계에 적용하였다. 순차탐색법은 설계 영역을 소수의 대표적인 탐색점들로 이산화하고 평가 결과 최적해 후보로 간주되는 탐색점을 중심으로 설계 영역을 순차적으로 축소시켜가면서 최적해를 찾아가는 체계적인 탐색법이다. 본 연구에서는 설계 적용 예로서 CD-tray 모델을 선정하고 Moldflow[7]의 충전 해석 모듈을 사용하여 충전 균형을 위한 수지 주입구의 위치 최적설계를 수행하였다. 최적화 결과 총 8회의 순차적 반복 탐색실험을 통해 최적해를 안정적으로 탐색할 수 있었다. 최적해를 초기 설계해와 비교해 본 결과 평가 지표로 설정한 충전 후 압력편차의 최소화를 통해 제품 캐비티의 충전 균형성을 크게 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 캐비티 압력 편차에 의한 충전 균형 평가

사출성형에서 충전과정을 통해 최적화되어야 하는 중요한 설계목표 중의 하나가 제품 캐비티의 충전 균형이다. 충전 균형은 유동 선단이 제품 캐비티의 특정한 영역을 먼저 채우지 않고 제품의 말단 영역들에 동시에 도달하는 것을 말한다[2-6]. 만약 유동 선단의 일부가 제품 말단 영역들 중의 일부를 먼저 채우는 즉, 충전 불균형이 발생하는 경우를 고려해 보자. 이 경우에는 유동 선단이 미충전된 나머지 말단 영역들을 완전히 채우는 동안에도 이미 수지가 채워진 영역은 계속해서 수지 유입을 겪게 된다. 수지의 계속되는 유입으로 이 영역은 매우 높은 압력, 즉 과압(overpack)을 받게 되어 수지 밀도가 크게 높아진다. 반면에 캐비티 내에서 마지막으로 채워지는 영역에서는 수지에 의한 압력이 상대적으로 매우 낮게 형성되어 수지 밀도가 낮아진다.

한편 제품 캐비티 내의 수지의 밀도 분포는 수축률 분포를 결정하고 수축률 분포는 휨 발생의 원인으로 작용한다. 일반적으로 수지의 밀도가 커지면 수축이 작아지고, 반대로 밀도가 작으면 수축이 커진다. 제품 영역에서 나타나는 수축의 편차(differential shrinkage)가 클수록 내부 응력으로 인해 휨이 크게 발생하게 된다. 그러므로 충전과정에서 제품 캐비티의 충전 균형은 매우 중요한 설계목표가 되어야 하며 충전 균형의 직접적이고 궁극적인 목표는 수지 충전에 의한 캐비티 내의 압력 분포의 편차를 최대한 작게 하는 것이라고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 제품 캐비티의 수지 충전의 균형성을 평가하기 위한 목적함수를 다음 식과 같이 수지 충전 후 제품 캐비티 내의 압력 분포의 편차로 설정한다.

$$F(\boldsymbol{D}) = P_{\max} - P_{\min}, \quad \boldsymbol{D} \in \Omega \qquad (1)$$

위 식에서 $\boldsymbol{D}$는 설계변수로서 게이트 위치이고 Ω는 게이트 탐색 영역이다. $P_{\max}$와 $P_{\min}$은 각각 충전 후 제품 유한요소 절점에 작용하는 최대 압력과 최소 압력이다. 본 연구에서는 계산의 편의를 위해서 제품 유한요소들 중에서 소수의 센서절점들을 선택하고 센서절점들에서 측정한 최대 압력($P_{\max}$)과 최소 압력($P_{\min}$)의 차이를 목적함수로 설정하였다. 센서절점들은 과압 발생이 판단되는 지점으로서 게이트로부터 유동선단이 금형 벽면에 도달하여 만나는 지점과 유동선단들 끼리 서로 만나게 되는 지점 그리고 수지가 마지막으로 채워지는 지점에 해당하는 제품상의 유한요소 절점들로 구성된다. 충전 후 캐비티 내의 수지 압력 분포를 결정하는 지배적 인자는 게이트 위치이므로 본 연구에서는 게이트의 위치를 설계변수로 선정하였으며 공정조건은 명목값으로 설정하였다. 충전 균형을 위해서는 게이트 위치를 최적화하여 식 (1)의 목적함수 값을 최소화하는 것이 필요하다.

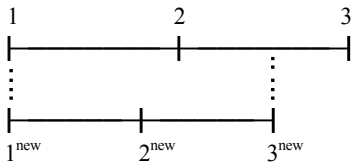
3. 순차 탐색 알고리듬

사출성형에서 품질특성과 품질특성에 영향을 미치는 다수의 설계변수들은 상호간에 비선형적이고 복잡한 관계를 갖고 있어서 품질특성과 설계변수들과의 함수 관계를 해석적으로 표현하기가 매우 어렵다. 따라서 품질특성에 관한 목적함수를 최소화 또는 최대화하는 설계변수들을 찾는 과정은 목적함수의 값만으로 최적해를 직접 탐색할 수 있는 알고리듬이 효과적이다[8]. 본 연구에서는 사출성형 설계에서 수지 주입구들의 최적 위치를 결정하기 위한 순차적 탐색법(Sequential Search Algoritm)[9]을 제시하였다.

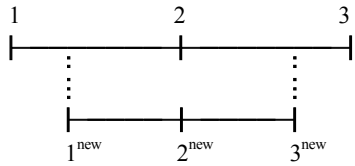
제안한 순차탐색법은 수지 주입구의 현재 탐색범위에서 최적해 후보로 결정된 수준의 탐색점을 기준으로 탐색범위를 일정한 비율로 축소 변경하여 새로운 탐색범위와 탐색 수준점들을 얻고 이 탐색범위에 대해 새로운 최적해 후보를 찾는 과정을 순차적으로 반복해 가면서 최종 최적해를 탐색한다. 본 연구에서는 순차탐색법을 적용하여 제품 캐비티의 압력편차를 최소화하는 수지 주입구의 최적 위치를 다음과 같이 결정한다. 한편 본 연구에서는 수지 주입구 위치 탐색영역이 일차원적으로, 즉 선분으로 정의되는 경우로 제한한다. 수지 주입구 탐색영역이 일차원적으로 주어지는 경우는 제품 형상의 대칭선 상에 수지 주입구를 위치시키거나 또는 비대칭 제품 형상이더라도 제품의 직선 또는 곡선 모서리에 수지 주입구를 위치시켜야하는 경우에 해당한다.

1. 수지 주입구의 개수를 결정한다.
2. 각각의 수지 주입구에 대해 탐색영역에 해당하는 선분의 양 끝점을 지정하여 탐색범위를 지정한다.
3. 선분의 양 끝점을 포함한 선분의 내부에 일정한 간격으로 유한요소 절점들을 생성한다. 이 유한요소 절점들은 탐색실험에서 최적의 수지 주입구 위치를 결정하기위한 후보 위치들이 된다.
4. 수지 주입구별로 균등 간격을 갖는 3 수준(levels)의 탐색점들을 지정한다. 탐색범위의 시작 절점과 끝 절점을 각각 1 수준 탐색점과 3 수준 탐색점으로 부여한다. 2 수준 탐색점은 탐색범위의 가운데에 위치한 절점으로 한다.
5. 완전요인실험(full factorial experiments)[10]으로 전체 실험점들에 대해 탐색실험을 실시하고 식 (1)의 목적함수 값을 계산한다. 수지 주입구가 n개이고 수지 주입구마다 3 수준의 탐색점들이 적용될 때 탐색실험을 위한 실험점의 총 수는 3^n이다. 개별 실험점에 대해 각 수지 주입구의 해당 수준인 유한요소 절점에 수지 주입구와 러너 및 스프루를 모델링한 다음 충전 시뮬레이션을 실시한다.
6. 전체 실험점들 중에서 목적함수 값이 최소인 실험점에 해당하는 수지 주입구의 수준 조합을 최적해 후보로 선정한다.
7. 최적해 후보의 각 수지 주입구 수준을 중심으로 현재 탐색범위를 축소한다. 축소율이 $r\ (0 < r < 1)$인 경우에 축소된 새로운 탐색범위의 크기(S^{new})는 다음과 같이 계산된다.

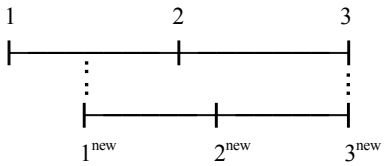
$$S^{new} = (1-r)S^{old} = (1-r) \cdot |(level3)^{old} - (level1)^{old}| \quad (2)$$



(a) case when level 1 is best



(b) case when level 2 is best



(c) case when level 3 is best

Fig. 1 Adjustment of search range and levels

여기서 S^{old}는 현재 탐색범위의 크기이다.

8. 새로운 탐색범위에 대해 3 수준 탐색점들을 재조정한다. Fig. 1의 (a)는 최적해 후보의 i(i=1, 2, ..., n) 번째 수지 주입구의 최적 수준이 1 수준인 경우, (b)는 2 수준, (c)는 3 수준인 경우에 축소된 탐색범위와 새로운 3 수준 탐색점들을 재조정하는 과정이다.

9. 새로운 3^n개의 실험점들에 대해 탐색실험을 다시 실시하고 각 실험점에 대해 목적함수 값을 계산한다.

10. 탐색 종료조건을 만족시킬 때까지 단계 6에서 단계 9까지를 반복해서 수행한다. 본 알고리듬에서는 전체 탐색실험이 설계자가 지정한 최대 반복 횟수에 도달하거나 그 전에 모든 게이트 탐색 영역이 더 이상 축소될 수 없을 때에 탐색이 종료된다. 탐색이 종료되면 마지막 탐색실험에서 목적함수 값이 최소인 최적해 후보를 최종 최적해로 결정한다.

4. CD-tray 설계 적용 예

Fig. 2는 최적 설계의 예로 선정한 CD-tray 모델과 수지 주입 시스템(feeding system)이며 제품 캐비티 내부로 3개의 수지 주입구를 설계하는 경우이다. 이 모델의 치수는 길이가 170.0(mm), 폭이 127.0(mm)이고 두께는 1.0 (mm)이다. Fig.2의 CD-tray는 상하 대칭 형상이어서 3개 수지 주입구의 탐색범위와 3 수준 탐색점들을 Fig. 3과 같이 설정하였다. 수지 주입구 1과 주입구 2, 3의 탐색범위 내부에 각각 2.0(mm), 2.7(mm)의 간격으로 탐색 후보점에 해당하는 유한요소 절점들을 생성하였다. Table 1은 각 수지 주입구

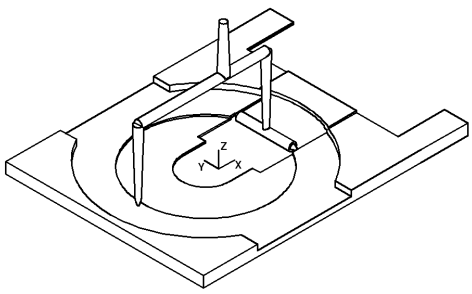


Fig. 2 CD-tray with feeding system

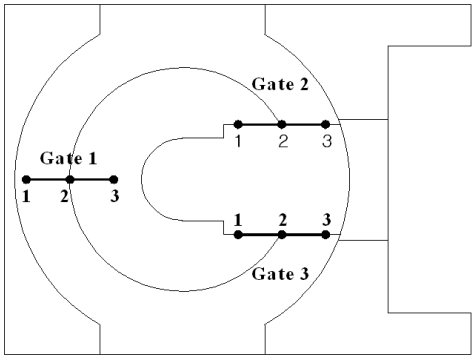


Fig. 3 Assignment of the three gates' level search ranges and their three levels

Table 1 Three levels of the gates

Gate #	Level 1	Level 2	Level 3
Gate 1	-58.2, 0, 3.5	-41, 0, 3.5	-24.4, 0, 2.5
Gate 2	23.0, 20, 2.5	39.1, 20, 3.5	55.6, 20, 3.5
Gate 3	23.0, -20, 2.5	39.1, -20, 3.5	55.6, -20, 3.5

의 탐색범위와 3 수준 탐색점들의 좌표값이다. 한편 본 모델에서 수지 주입구 2와 3은 제품 형상의 특징상 상하 대칭의 위치를 갖도록 제한한다. 즉 탐색 과정에서 수지 주입구 2와 3의 탐색점은 항상 동일한 수준을 갖도록 한다. 따라서 실제 수지 주입구는 3개이지만 최적해 탐색에 필요한 설계변수로서 수지 주입구를 2개로 간주할 수 있으며, 이 경우에 매 탐색실험에 필요한 실험점의 수는 $3^2 (= 9)$이다.

본 모델에 대해 최적해 탐색 알고리듬을 적용하여 총 8회의 반복 탐색실험을 수행하였다. 탐색범위의 축소율(r)로 0.25를 적용하였다. 충전 시뮬레이션을위해 CD-tray 모델에 대해 총 21,572개의 유한요소를 생성하였다. 사용 수지는 Lupoy GN-5001RFA : LG Chemical이고, 수지온도는 265.0(℃), 금형온도는 65.0(℃), 사출시간은 1.0(sec)이다. 캐비티 압력 편차를 계산하기 위해 충전패턴으로부터 캐비티 내부에서 총 11개의 센서절점들을 추출하고, 이 센서절점들에서 압력의 크기를 측정하였다. Fig. 4는 총 8회의 순차 탐색실험을 통해 최적해 후보가 변화되어 가는 거동을 보인 것이다. 반복 탐색실험이 진행되면서 최적해 후

보에 해당하는 설계에서 제품 캐비티의 센서절점들의 최대 압력편차가 점진적으로 개선되어가는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 탐색실험이 반복되면서 최적해 후보의 수지 주입구 1과 수지 주입구 2와 3의 수준 조합이 탐색범위 축소에 따라 변화되는 양상을 보인 것이다. Table 2는 각 탐색실험에서 얻은 최적해 후보에서 수지 주입구들의 위치 좌표값 및 캐비티 센서절점들의 최대 압력편차($\triangle P$)이다. 탐색 알고리듬에 따라 마지막 8번째 탐색실험에서 구한 최적해 후보를 최종 최적해로 결정하였다. 최적해는 마지막 탐색범위의 탐색점 수준 조합에서 수지 주입구 1은 2 수준이고 위치 좌표값 (x, y, z) = (-32.6, 0, 2.5), 수지 주입구 2와 3은 2 수준이고 위치 좌표값은 각각 (39.1, 20, 3.5)와 (39.1, -20, 3.5)로 결정되었다. 최적해에서 캐비티 센서절점들의 최대 압력편차는 64.8(MPa)로 나타났다.

Table 3은 최적해를 초기 설계해와 비교한 것이다. 초기 설계해에 비해 최적해가 센서절점들의 최대 압력편차가 35.8(MPa)(= 100.6 - 64.8)만큼 개선되는 것으로 나타났다(개선율 35.8%). 최적화 의도대로 제품

Fig. 4 Improvement of best candidate of optimal solution during the optimization

Fig. 5 Level combinations of best candidates of optimal solution during optimization

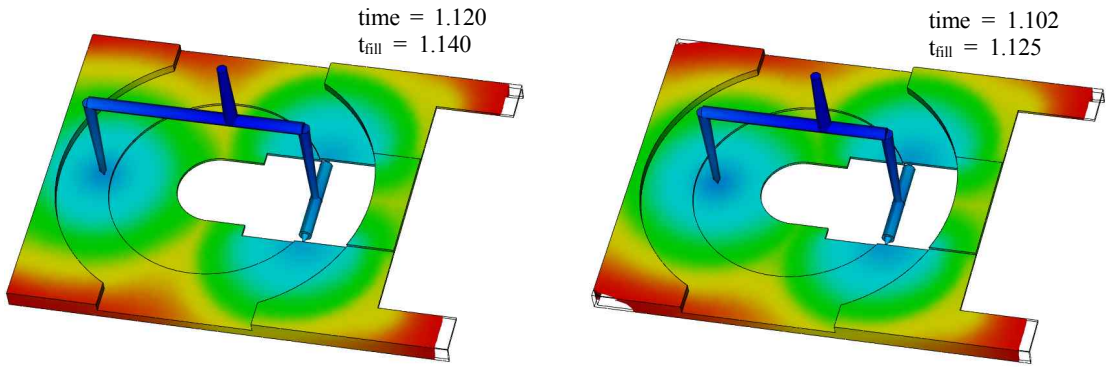
Table 2 Result of iterations

Iteration	Gate locations (mm)			ΔP (MPa)
	Gate 1	Gate 2	Gate 3	
1	-24.4, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	69.4
2	-24.4, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	69.4
3	-35.8, 0, 2.5	44.6, 20, 3.5	44.6, -20, 3.5	68.7
4	-26.2, 0, 2.5	35.8, 20, 3.5	35.8, -20, 3.5	67.8
5	-30.1, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	66.9
6	-30.1, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	66.9
7	-34.2, 0, 2.5	41.9, 20, 3.5	41.9, -20, 3.5	66.5
8	-32.6, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	64.8

캐비티의 최대 압력편차가 개선됨으로써 충전 균형성이 개선되는 것을 충전패턴을 통해 확인할 수 있었다. Fig. 6에 두 설계해에 대한 충전패턴을 보였다. 초기 설계해(Fig. 6(a))에서는 유동선단이 제품 캐비티의 왼쪽 말단 부위들을 먼저 채운 상태이지만 오른쪽 끝 부분은 아직 충전되지 못하고 있는 충전 불균형 상태임을 알 수 있다. 반면에 최적해(Fig. 6(b))에서는 제품 캐비티 말단의 네 군데 코너 부위들이 동시에 충전되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 초기 설계해와 최적해에서 충전 후 얻은 제품의 압력분포이다.

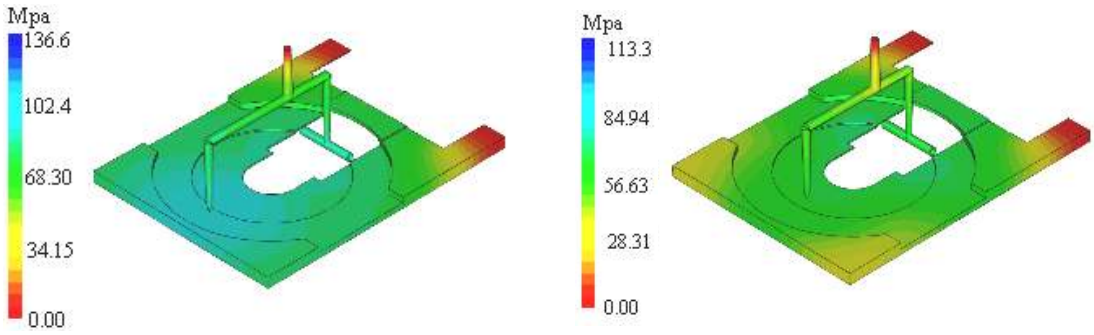
Table 3 Comparison of the two solutions, initial and optimal

Design	Gate locations (mm)			ΔP (MPa)	Max. Injection Pressure (MPa)	Clamp Force (ton)
	Gate 1	Gate 2	Gate 3			
Initial	-44.2, 0, 3.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	100.6	136.5	139.5
Optimal	-32.6, 0, 2.5	39.1, 20, 3.5	39.1, -20, 3.5	64.8	113.3	93.3



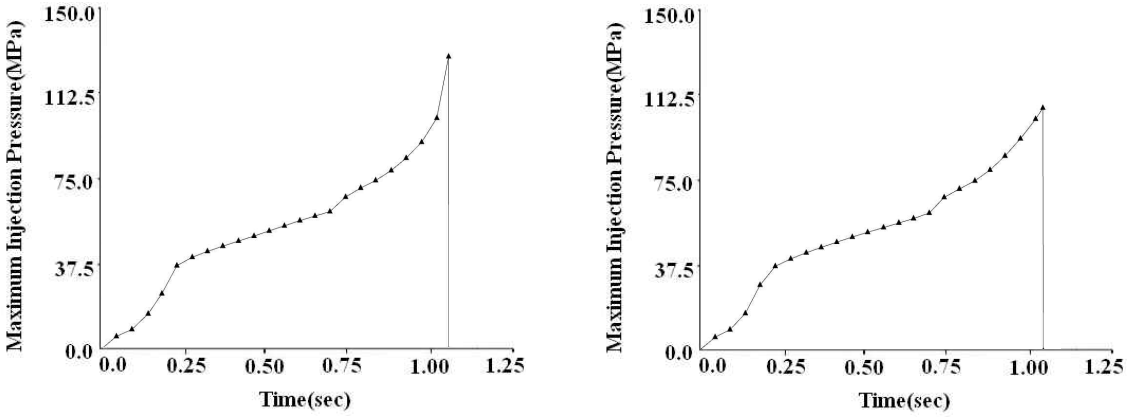
(a) initial (b) optimal

Fig. 6 Filling pattern of the two solutions, initial and optimal



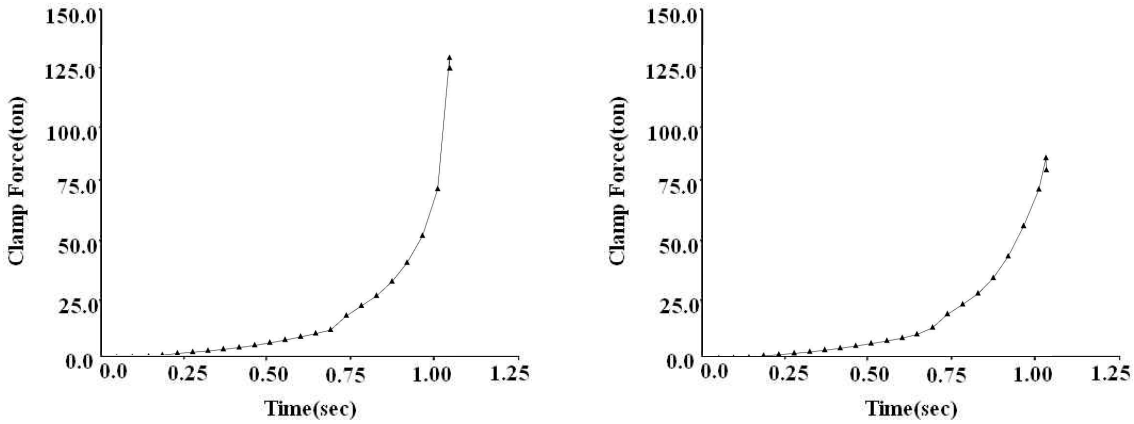
(a) initial (b) optimal

Fig. 7 Pressure distribution of the two solutions, initial and optimal



(a) initial (b) optimal

Fig. 8 Maximum injection pressure of the two solutions, initial and optimal



(a) initial (b) optimal

Fig. 9 Clamp force of the two solutions, initial and optimal

균형 충전에 의해 최적해에서 제품면 전체의 압력 분포가 크게 개선됨을 알 수 있었다. 압력분포의 평균은 최적해와 초기 설계해에서 각각 49.3(MPa), 77.3(MPa)이었고, 표준편차는 각각 15.4(MPa), 22.4(MPa)이었다. 또한 충전 균형성이 개선됨으로써 사출기 노즐에 작용하는 최대 사출압력과 형체결력(clamp force)도 개선되는 것을 확인하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 두 설계해의 최대 사출압력과 형체결력의 결과를 보인 것이다. 최대 사출압력은 23.2(MPa) (= 136.5 - 113.3)만큼 개선되었고(개선율 17.0%), 형체결력도 46.2(ton) (= 139.5 - 93.3)만큼 개선되는 것으로 나타났다(개선율 33.1%).

5. 결 론

본 연구를 통해 수행한 연구 내용과 결론은 다음과 같다.

(1) 제품 캐비티의 충전 균형성 평가를 위한 목적함수로 충전 후 제품 캐비티의 센서절점들의 최대 압력

편차를 설정하고 수지 주입구의 위치를 최적화하였다.

(2) 수지 주입구들의 탐색범위의 3 수준 탐색점들에 의한 완전요인실험에 기초하고 최적해 후보의 수준 탐색점을 중심으로 탐색범위를 일정 비율로 축소 조정하는 과정을 반복하여 최적해를 체계적으로 탐색하는 순차 탐색 알고리듬을 제시하여 적용하였다.

(3) 대칭 형상을 갖는 CD-tray 모델에 대해 최적설계를 수행하였다. 총 8회의 순차 탐색실험을 통해 최적해를 안정적으로 얻을 수 있었다. 최적해를 초기 설계해와 비교한 결과 제품 캐비티의 충전 균형성과 압력분포가 개선되는 것을 확인하였다.

(4) 비대칭 형상의 제품을 포함하여 수지 주입구의 설계공간이 이차원적으로 주어지는 경우에 대해 최적 위치를 효과적으로 탐색할 수 있는 새로운 순차적 탐색법이 개발될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정영득, 구본홍, 사출성형 해석에 의한 제품 및 금형설계, pp.67-88, 인터비전, 1994.
2. Zhai, M. et al., “Automated Selection of Gate Location for Plastic Injection Molding Processing," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol.44, pp.229-242, 2005.
3. Shen, C. Y. et al., "Gate Location Optimization in Injection Molding By Using Modified Hill-Climbing Algorithm," Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol.43, No.3, pp.649-659, 2004.
4. Lee, B. H. and Kim, B. H., "Automated Selection of Gate Location Based On Desired Quality of Injection-Molded Part," Polymer -Plastics Technology and Engineering, Vol.35, No.2, pp.253-269, 1996.
5. 김종헌, 이종수, 이형주, 구본홍, "마이크 유전 알고리듬의 최적설계 응용에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), Vol.27, No.1, pp.158-166, 2003.
6. Malloy, R. A., Plastic Part Design for Injection Molding, pp.40-43, Hanser, 2003.
7. ED&C, Autodesk Moldflow Insight: The 4th edition of AMI Korean Manual, 2009.
8. Yao, D., Direct Search-Based Automatic Minimization of Warpage and Weldlines in Injection Molded Parts, Masters Thesis, Univ. of Massachusetts, MA., 1998.
9. 박종천, Kim, B. H., "사출 성형품의 휨과 웰드라인을 최적화하기 위한 자동 금형설계 방법," 한국소성가공학회지, Vol.9, No.5, pp.512-525, 2000.
10. Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., Engineering Methods for Robust Product Design, pp.129-130, Addison Wesley, 1995.