

사출성형의 게이트 위치 최적화

임 원 길, 김 영 일, 설 권

LG생산기술원

ABSTRACT

In injection molding, location of gates have great influence on the quality of plastic parts. Usually, they are located by related trial and errors of experienced mold designers. In this topic we will present the numerical algorithm for finding the optimal gate locations. Optimization algorithm is divided into two stages. In the first stage, candidated optimal gate locations can be found by geometry of part only; whereas in the next step, more accurate gate locations are selected by iterative computation with optimization part and analysis part. So from the following study, we suggested the modified flow-volume method, which will define the optimal gate locations in injection mold design.

key word : Injection molding(사출성형), Gate location(게이트 위치), Automated gate design(자동 게이트 설계), Modified flow-volume method(변형유동체적법)

1. 서론

사출성형에서 제품 생산에 문제점을 해결하는 방법으로, 전통적으로 금형 설계자의 축적된 경험과 시행착오에 의존하였다. 이러한 경우 많은 시간과 비용을 필요로 하게 되며, 또한 제품의 형상이 복잡해지고 요구되는 품질 수준이 높아짐에 따라 최적의 결과를 얻기가 어려워졌다.

최근에는 MOLDFLOW™, C-MOLD™와 같은 상용 해석 프로그램의 이용을 통하여 시행착오를 줄이며, 짧은 시간에 금형을 제작할 수 있게 되었으며, 이를 통하여 많은 비용을 절감할 수 있게 되었다. MOLDFLOW™와 같은 상용 해석 프로그램을 사용할 때 설계자가 매 해석 후마다 결과를 분석하고, 새로운 안을 도출하여 다시 해석을 수행하는 식으로 최적화를 수행하였다. 이러한 과정을 컴퓨터를 이용하여 최적화 프로그램을 수행하도록 하면, 설계자의 일이 줄어들면서, 더 좋은 결과를 빠른 시간 내에 얻을 수 있게 된다.

사출성형에 있어서 런너나 스프루같은 주입수로, 공정 조건, 제품의 두께, 냉각 수로, 게이트의 위치 등이 최적

화의 주요한 대상이 된다. 이 가운데 가장 최적화하기 어려운 것은 게이트 위치로써, 게이트의 위치에 따라 수지의 유동 양상과 압력 분포 등이 달라지게 되어, 제팅(jetting), 뒤틀림(warpage), 수축(shrinkage), 잔류응력(residual stress)등에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 게이트의 위치는 금형 가공 후에는 수정에 제약을 갖게 되므로, 가공 전에 미리 최적의 값을 구하는 것이 중요하다.

Pandelidis 등[1][2]은 일련의 논문을 통하여 게이트의 위치와 공정 조건을 최적화하는 기법을 제안하였다. 이들은 유동 해석 후의 온도차, 과보압 상태의 요소 수, 마찰과열된 요소 수의 가중합(weighted sum)을 망소의 목적함수로 삼아 최적화를 수행하였다. Saxena 등[3]은 비다양체 기하형상 기반(Non-manifold-topology-based) CAE환경의 적용 사례로서 게이트 위치의 최적화를 제안하였다. 이들은 유동체적(flow volume)과 유동거리(flow length)를 정의하고, 이 것들을 조합하여 목적함수로 사용하였다. 그러나 이 방법은 일점 게이트를 사용할 때에는 유용하나, 다점 게이트(multi-gate)에 대한 선택법으로 제안한 최선우선법(best-first method) 및 최약우선법

(worst-first method)은 모두 안정된 결과를 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 컴퓨터를 이용하여 다음과 같은 방법으로 게이트 위치를 최적화하였다. 전체 모델은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는 사출품의 기하학적인 형상만을 고려하여 최적화를 수행하게 된다. 그러나 사출 성형의 수치 거동에서는 점도의 비선형성이 크게 나타나므로 기하학적인 형상만을 고려한 결과는 공정 조건, 수지의 물성치 등에 의하여 생기는 차이를 고려하지 못하게 된다. 이 과정에서 발생한 오차를 보정하기 위하여 사출 성형 해석 결과를 이용한다. 첫 번째 단계의 결과를 초기값으로하여 두 번째 단계에서는 최적의 게이트 위치를 상용 해석 프로그램과의 인터페이스를 통하여 구한다. 본 연구에서는 MOLDFLOWTM의 3차원 다층유동 해석(3D Laminated Filling)을 해석 프로그램으로 사용하였다. 여기에서는 일점 게이트의 최적화에 대하여 자세히 설명하도록 하며, 적용 사례로서 다점 게이트에 대한 예를 보이도록 하겠다.

2. 최적화의 개괄

Fig. 1은 게이트 위치 최적화의 전체 흐름을 나타내고 있다. 전체 알고리즘은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는 형상만을 이용하여 초기 게이트 위치를 선택하며, 두 번째 단계에서는 유동해석 결과와의 반복

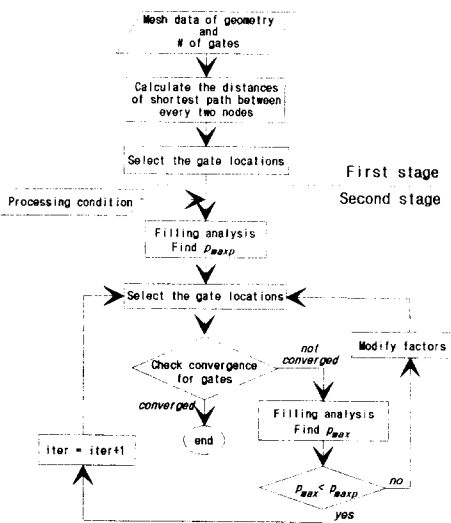


Fig. 1 Flow chart of gate location optimization

계산을 통하여 형상만을 고려함에 따라 발생하는 오차를 보정해 주었다.

첫 번째 단계에서는 변형유동체적값이 최대가 되게 하는 절점들을 후보 게이트 위치로 선정한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 선정된 게이트들을 초기값으로 하여 최적화를 수행하며, 압력을 주요한 변수로 사용한다. 이 때에는 변형된 유동체적을 사용하며 최대 압력을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

3. 기하학적 형상을 이용한 위치 최적화

첫 번째 단계에서는 기하학적인 형상만을 이용하여 최적화를 수행하며 유동체적(flow-volume)을 최대화하도록 하였다. 여기에서는 Saxena 등[3]이 제안한 유동체적을 변형하여 다음과 같이 제안한다.

$$fl_vol(P_i) = \sum_{j=1}^{nnode} A_d(i, j) vol(j) \quad (1)$$

$$A_d(i, j) = 1 - \beta_d \frac{dist(i, j)}{d_{max}} \quad (2)$$

$nnode$: 유한 요소 모델의 전체 절점수

d_{max} : 모든 절점쌍에 대한 최단거리의 최댓값

(Maximum length of shortest path)

여기서 P_i 는 게이트 후보 절점을 뜻한다. 또한 $dist(i, j)$ 는 i 절점과 j 절점 사이의 최단거리를 뜻하며, 이는 Dijkstra의 알고리즘[4]을 이용하여 구한다. β_d 는 게이트의 수 등을 고려하여 조절해 준다. Saxena 등은 요소를 기준으로 전개하였으나, 여기에서는 절점을 기준으로 하였다. $vol(j)$ 는 절점에 대한 체적이며 이는 다음과 같이 구하도록 한다.

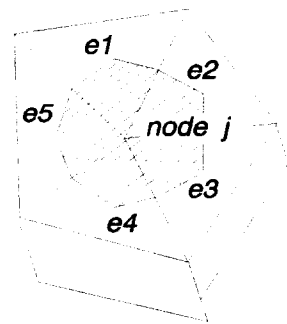


Fig. 2 Calculation of a nodal volume

$$vol(i) = \sum_{k=1}^{E_N} \frac{1}{3} vol_E(k) \quad (3)$$

N_E : 노드 i 에 인접하는 요소의 수

$vol_E(k)$: 인접 요소의 체적

절점을 기준으로 전개한 것은 대부분의 해석 프로그램에서 절점만이 게이트의 위치가 될 수 있게 한 것을 고려하기 위함이다. 유동체적의 값을 최대화 하는 절점 P_i 가 최적의 게이트로 선택된다. Saxena 등의 유동체적은 레벨(level)의 개념을 사용하였기 때문에 메쉬의 크기가 달라지거나, 보스 등의 요소를 고려하게 되면 오차가 생기게 된다. 본 연구에서는 이를 거리의 개념으로 대체하여 위와 같은 문제점을 보완하였다.

4. 유동 해석 결과의 고려

유동 해석 결과와의 반복 계산을 수행하는 두 번째 단계에서는, 유동 직후, 절점에서의 압력을 가중치와 함께 유동체적 항에 삽입하여 최적화를 수행하였다. 이러한 유동체적을 이용함으로써 압력 및 유동 선단을 고르게 분포시킬 수 있게 된다. 여기에서는 다음과 같이 변형된 유동체적을 사용하였다. $pres(j)$ 는 절점 j 에서의 압력값을 의미한다.

$$fl_vol_p(P_i) = \sum_{j=1}^{node} A_d(i, j) A_p(i, j) vol(j) \quad (4)$$

$$A_d(i, j) = 1 - \beta_d \frac{dist(i, j)}{d_{max}} \quad (5)$$

$$A_p(i, j) = 1 - \beta_p \frac{pres(j)}{p_{max}} \quad (6)$$

p_{max} : 절점에서의 최대압력

유동체적을 최적화에 사용하지만, 유동체적은 그 자체로 정량적인 의미를 갖지 않는다. 여기에서는 식(7)과 같이 유동 중의 최대 압력을 목적함수로 사용하였다.

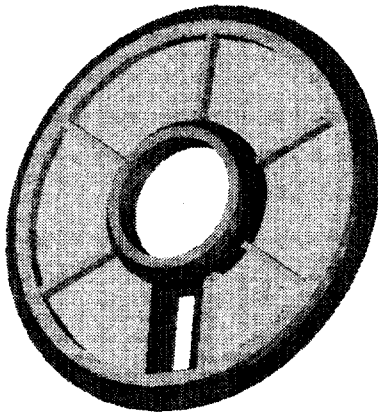
$$minimize; (p_{max})_{node} \quad (7)$$

5. 다점 게이트에 대한 위치 최적화

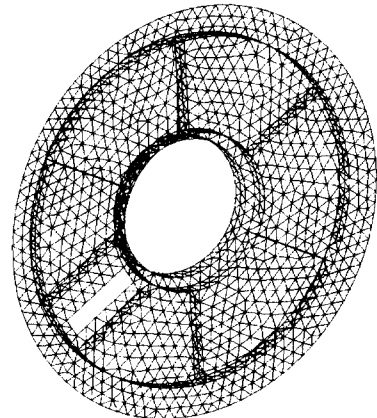
다점 게이트에 대한 위치 최적화를 수행하기 위해서 유동체적을 다점 게이트에 적합하도록 수정하였다. 또한 이를 실질적으로 적용하기 위해서는 효율적인 선택법이 필요하게 된다. 주어진 게이트 수에 대하여 모든 수의 조합을 고려하려 한다면, 게이트의 수가 많아질 경우 엄청난 계산 시간을 요구하게 될 것이다.

6. 적용 및 검토

다음의 Fig. 3은 적용 예로 선정된 부품의 형상을 나타낸다. 이 부품은 각 변위(angular displacement) 측정을 위한 회전판(turning plate)이며, 3점 게이트에 대한 최적화를 수행하였다. 충전 시간은 MOLDFLOW™에서 자동



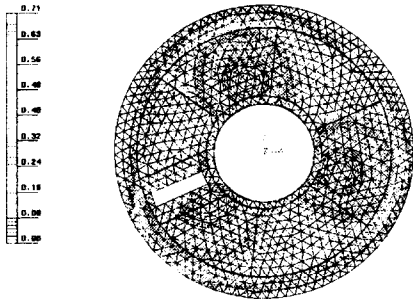
a) 3D Solid model of turning plate



b) Finite element mesh of turning plate

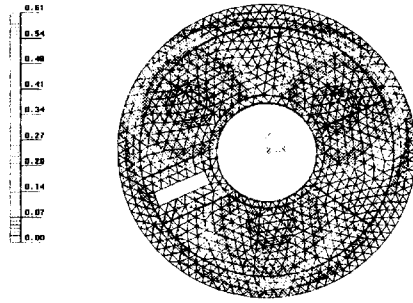
Fig. 3 The shape of the applied product

Model name :
Type : Melt Front Advancement
Unit : Sec.



a) The first stage for optimizing gate locations

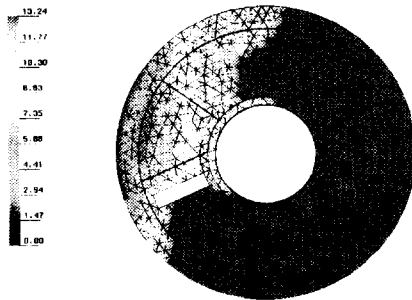
Model name :
Type : Melt Front Advancement
Unit : Sec.



b) The second stage for optimizing gate locations

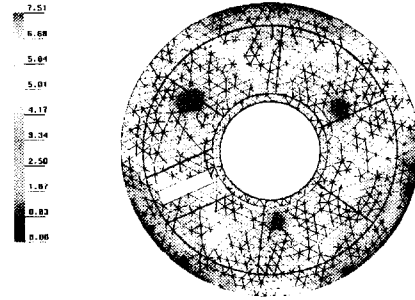
Fig. 4 Melt front for three gates selected automatically after flow simulation

Model name : L_plate1of1.LPW_2b
Type : Maximum Pressure Distribution
Unit : Mpa



a) The first stage for optimizing gate locations

Model name : L_plate1of1.LPW_2b
Type : Maximum Pressure Distribution
Unit : Mpa



b) The second stage for optimizing gate locations

Fig. 5 Pressure distribution for three gates selected automatically after flow simulation

으로 설정하도록 하였다. 요소의 수는 2,566개이며 절점의 수는 1,353개이다. 두께는 1mm에서 3mm의 값을 가지며, 외경은 100mm, 내경은 30mm인 제품이다. 총 계산 시간은 약 130분이며, 부분별 사용 시간은 다음의 Table 1과 같다. 사용한 시스템은 Silicon Graphics Indigo2로 R4400 CPU를 사용하고 있다. 유동 해석은 7회에 걸쳐 실행되었으며, 가장 시간이 많이 소요된 부분이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 기하학적인 형상만을 고려하였을 경우와 유동 해석 결과를 이용하여 최적화하였을 때에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. 해석결과를 이용하여 2차 최적화를 수행함에 따라 1차 최적화결과 보다 향상되었

음을 알 수 있다. 또한 유동 선단 및 압력 분포가 고르게 분포되어 과보압(over-packing) 현상이 일어나지 않고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Calculation time for each part

| 수행부분 | 소요시간 |
|---------|---------|
| 최단거리계산 | 30분 15초 |
| 게이트의 선택 | 5분 16초 |
| 유동해석 | 93분 31초 |
| 기타 | 0분 3초 |
| 계 | 129분 5초 |

7. 결론

본 연구에서는 사출 성형의 충전 과정에서 큰 영향을 미치는 압력을 적용할 수 있도록 고안하여, 게이트의 최적 위치를 자동으로 검출하도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 보다 정확한 해를 구하기 위하여 변형유동 체적법을 제안하였다. 향후 게이트의 위치 최적화는 공정 조건 및 주입 장치의 최적화와 함께 사출성형의 통합 최적화를 이루어 사출 성형품의 고품질, 단납기에 대응하도록 할 것이다.

참고문헌

1. I. Pandelidis and Q. Zou, "Optimization of Injection Molding Design. Part I : Gate Location Optimization," Polymer Engineering and Science, Vol.30, No. 15, pp.873-882, 1990
2. I. Pandelidis and Q. Zou, "Optimization of Injection Molding Design. Part II : Molding Condition Optimization," Polymer Engineering and Science, Vol.30, No. 15, pp.883-892, 1990
3. M. Saxena and R.K. Irani, "An Integrated NMT-Based CAE Environment - Part II : Applications to Automated Gating Plan Synthesis for Injection Molding," Engineering with Computers, No.9, pp 220-230, 1993
4. A.V. Aho, J.E. Hopcroft and J.D.Ullman, Data Structure and Algorithms, Addison-Wesley, 1983