한국정밀공학회지 제20권 제11호 (2003년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 11, November 2003.

런너밸런스 알고리즘을 이용한 멀티캐비티 최적성형에 관한 연구

박균명#, 김청균*

A Study on The Optimum Design of Multi-Cavity Molding Parts Using The Runner Balance Algorithm

Gyun Myoung Park#, Chung Kyun Kim*

ABSTRACT

The objective of this paper is to present a methodology for automatically balancing multi-cavity injection molds with the aid of flow simulation. After the runner and cavity layout has been designed, the methodology adjusts runner and gate sizes iteratively based on the outputs of flow analysis. This methodology also ensures that the runner sizes in the final design are machinable. To illustrate this methodology, an example is used wherein a 3-cavity mold is modeled and filling of all the cavities at the same time is achieved. Based on the proposed methodology, a multicavity mold with identical cavities is balanced to minimize overall unfilled volume among various cavities at discrete time steps of the molding cycle. The example indicates that the described methodology can be used effectively to balance runner systems for multi-cavity molds.

Key Words : Flow Simulation(충전모사), Injection Molding(사출성형), Multi-Cavity(멀티캐비티), Runner Balance(런너밸런스)

1. 서론

사출성형에서 수지는 런너(runner), 스프루(sprue), 그리고 게이트(gate)를 통해서 각 캐비티(cavity)로 유입된다. 런너시스템의 설계는 제품의 품질과 제조원가에 큰 영향을 미치므로 매우 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 게이트의 위치가 결정되면 반드시 각 캐비티에 거의 동시에 충전이 이루어지고 비슷한 압력으로 균형을 이루도록 런너시스템이 설계되어야 한다. Fig. 1과 Fig. 2는 균형잡힌 런너시스템 및 불균형 런너시스템의 예를 나타내는 그림이다. 균형 잡힌 런너 시스템에서는 모든 캐비티에서 같은 유동패턴을 나타내게 되며 따라서 비슷한 시간에 충전이 완료된다. 그러나 균형이 잡히지 않은 경우에는 각 캐비티는 같은 시간에 충전되지 않으며, 균일하지 않은 품질과 중량의 제품이 생산될 가능성이 크다. 따라서 런너밸런스는 금형설계에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

균형잡힌 런너에 있어서 런너와 게이트의크기 결정은 크게 어려움이 없다. 그러나 캐비티의 형상

접수일: 2002년 10월 8일; 게재승인일: 2003년 8월 14일
교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀
E-mail: pgmy@kitech.re.kr, Tel: (032) 570-7173 FAX: (032) 581-1121
* 홍익대학교 기계공학과

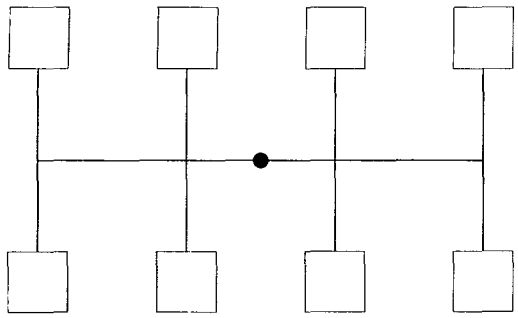

Fig. 1 Naturally unbalanced runner systems

이 복잡하고 금형을 적당한 크기로 제작하기 위해서는 균형이 잡히지 않은 런너시스템은 불가피하다. 또한 금형내의 캐비티의 형상이 각각 다른 경우가 많아지고,제품의 품질과 생산을 보다 향상시키기 위해서 균형이 잡히지 않은 런너시스템의 제작은 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 뿐만 아니라 시행착오를 통해서는 더 이상 최적의 금형설계를 이룰 수 없고, 충전패턴은 런너와 게이트의 크기에 매우 민감하기 때문에 금형을 다시 제작하고 테스트하는 비효율적인 작업을 반복할 수 밖에 없다.

그러나 사출성형 충전모사(flow simulation) 프로그램의 출현과 함께 실제로 금형을 제작하지 않더라도 런너시스템의 성능을 미리 예측할수 있게 되었다. 하지만 설계자는 만족할만한 결과가 나올때까지 반복적으로 초기 런너의 지름과 게이트의 크기등을 조정하면서 해석해야 하는 단점이 있었다. 따라서 최소한의 반복계산으로 자동으로 런너밸런스를 제공하는 시스템의 개발은 필수적이라고 할 수 있다.

이론적인 런너밸런스를 최초로 시도한 Wang[1] 등은 등온조건으로 power-law 점성모델을 적용하여 런너배치의 최적설계를 시도하였다. 그러나 비등온조건이 아니였기 때문에 결과의 신빙성은 없었다.

Jong과 Wang[2]은 최적설계 이론을 충전모사를 통해 소개하였다. 충전이 완료되는 시점에서 각 캐비티 입구압력차를 최소화하는 효율적인 목적함수를 도입하였으나, 계산시간이 매우 오래 걸린 단점이 있었다.

Lee[3] 등은 보압해석을 통하여 자동적으로 런너시스템의 설계를 시도하였다. 러너 밸런스는 같은 성형조건하에서 유동거리 및 성형품 형상에 따라 러너의 크기를 달리하여 러너 밸런스를 이루는 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 충전모사 프로그램을 통해 다중캐비티에 대한 런너밸런스 알고리즘을 제시하고자 한다. 어느 한 캐비티가 완전히 충전되었을 때 나머지 충전되지 않은 캐비티의 체적을 최소화 하면서 런너의 크기를 계산하였다.

2. 유동해석

금형내 용융된 플라스틱 수지의 유동거동은 일반적으로 Hele-Shaw 유동[4,5,6]모델로 표현되며, 등온(isothermal), 비탄성(inelastic), 비뉴톤(non- newtonian) 유체에 대한 기본 가정과 관련된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z}\right)$$

여기서 플라스틱 수지는 비압축성 유체(Incompressible Fluid)로 가정하였으며, 식(1)은 질량보존 방정식이고, 식(2)는 운동량 보존방정식이다. 두 식을 연립하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial y}\right) = 0 \tag{3}$$

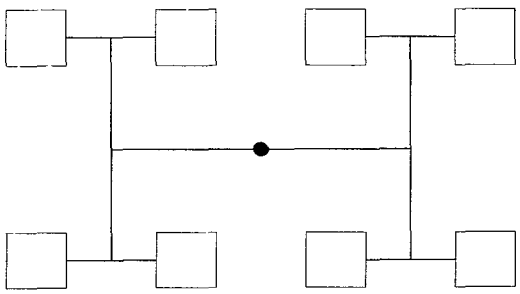

Fig. 2 Naturally balanced runner systems

여기서 S는 유동성(Fluidity)이고, 클수록 유동은 원활히 이루어짐을 뜻하며, 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S=\int_0^h \frac{z^2}{\eta}\,dz \tag{4}$$

본 연구에서는 비선형방정식인 식(3)을 유한요소화하고, Newton-Raphson방법을 이용하여 각 절점에서의 압력을 계산하였다. 또한 유동선단의 전진은 Tadmor[7] 등이 제안한 FAN(Flow Analysis Network) 방법에 검사체적(Control Volume)개념을 도입하여 유동방정식을 계산하였다. 여기서는 계산된 유량을 이용하여 요소가 채워진 정도(Volume Fraction)를 구하여 선단의 위치를 결정하였다.

3. 런너밸런스 알고리즘

본 연구에서는 Kim 등[8]이 제안한 알고리즘을 적용하였다. 이 알고리즘은 충전모사 프로그램을 이용해 총괄미충전체적(Over-all Unfilled Volume)을 최소화하는 반복적인 계산을 통해 다중캐비티 금형의 부런너의 직경을 결정하고 있다. 계산순서는 다음과 같다.

(a) 초기 런너의 직경결정은 Pye[9]가 제안한 제품의 중량과 런너의 길이의 함수인 식을 도입하였다. 제품의 중량은 단순히 제품의 체적과 플라스틱 수지의 밀도의 곱으로 간단히 계산할 수 있다.

$$D=\frac{\sqrt{W}\times\sqrt[4]{L}}{3.7} \tag{5}$$

여기서 D(mm)는 런너직경이고, W(mg)는 제품의 중량이며, L(mm)은 런너의 길이이다. 일반적으로 런너직경은 2-10 mm이내이어야 하고, 계산된 런너의 직경은 초기런너의 직경보다 25% 이내로 증가 또는 감소하여야 한다.

(b) 충전모사 프로그램을 이용하여 어느 한 캐비티가 최초로 충전이 완료되는 시점에서 나머지 캐비티의 충전되지 않은 체적을 계산한다.

$$U_t=\sum_{i=1}^{n} u_{i,t} \tag{6}$$

여기서 U_t는 총괄미충전체적이고 $u_{i,t}$는 t번째 반복에서 i번째 캐비티의 미충전체적이며 n은 캐비티의 개수이다.

(c) 런너의 단면적변화율은 다음식과 같이 총괄미충전체적을 총괄캐비티체적으로 나눈 값으로 정의한다.

$$P_t=\frac{U_t}{V} \tag{7}$$

여기서 P_t는 각 런너의 단면적변화율이며 V는 총괄캐비티체적이다.

(d) 런너의 단면적변화율을 이용하여 단면적변화량을 계산한다.

$$dA_{i,t}=P_t\times A_{i,t} \tag{8}$$

$dA_{i,t}$는 각 런너의 단면적변화량이고, V는 각 캐비티의 체적의 합이며, $A_{i,t}$는 각 런너의 단면적이다.

(e) $dA_{i,t}$중에서 가장 작은 값을 선택하여 각런너의 단면적을 새로이 계산한다.

$$T=n\times L_{i,t}\times s \tag{9}$$

여기서 T는 런너의 총괄단면적변화량이며, $L_{i,t}$는 $dA_{i,t}$중에서 가장 작은 값이다. 본 연구에서는 반복계산할 때, 수렴의 안정성을 위한 인자 s를 도입하였다. 최초 계산시에는 s=1로 지정한다. 총괄미충전체적은 반복계산하면서 점차 감소하게 되지만 증가하는 경우 에는 수렴하면서 진동이 발생하는 것을 의미한다. 이런 경우에는 s=0.5로 하여 다음 반복계산시에 이용하게 되며, 계속해서 진동이 발생하게 되면 s=0.25, 0.125 등으로 지정하여 계산하게 된다.

(f) 각 런너의 단면적은 다음과 같은 식으로 새로이 갱신된다.

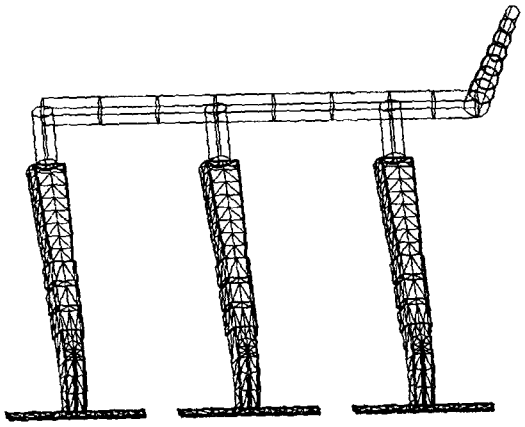

Fig. 3 Geometry for the 3-cavity mold

$$dA_{i,t} = dA_{i,t-1} - L_{i,t} \times s + \frac{u_{i,t}}{U_t} \times T \qquad (10)$$

(g) 총괄미충전체적에 대한 총괄캐비티체적의 비가 허용오차범위 내에 들 때까지 (b)에서 (f)순으로 반복계산하게 된다.

(h) step size가 감소하고 총괄미충전체적이 이전반복계산시보다 크면 계산을 종료하고, 런너의 직경을 결정한다. 만약 최대압력이 사출기허용압력보다 높으면 초기설정하였던 런너의 직경을 다시 지정하여 계산하여야 한다.

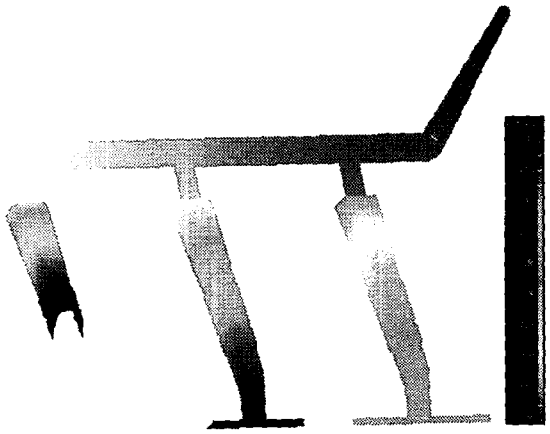

Fig. 4 Filling pattern of the initial unbalanced runner layout for the 3-cavity mold

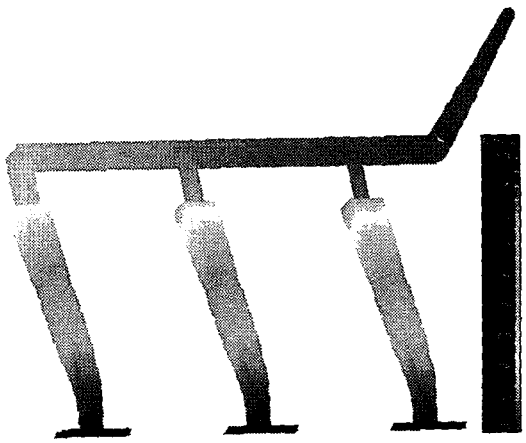

Fig. 5 Filling pattern of the balanced runner layout for the 3-cavity mold

4. 결과 및 토의

런너를 포함한 일회용 면도기 유한요소모델을 Fig. 3에 나타내었으며, 캐비티와 런너의 경우 각각 삼각형요소와 선요소를 도입하였다. 수지는 오른쪽 상단에 위치하고 있는 스프루로 유입되어 런너를 통해 각 캐비티로 유입된다. 사출성형 조건을 Table 1에 나타내었다.

런너밸런스가 이루어지지 않았을 때의 충전패턴을 Fig. 4에 나타내었다. 스프루와 가까운 캐비티의 경우 충전이 다른 캐비티에 비해 일찍 완료되어 과도압(overpack)이 이루어 지게 되고, 냉각시간 역시 다른 캐비티에 비해 빨리 이루어 지게 된다. 따라서 균일한 품질의 제품을 기대하기 어려울 뿐만 아니라 불량률이 현저히 높아지게 된다. 반면에 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 런너밸런스가 이루어졌을

Table 1 Material and processing conditions for the examples

Material	Polypropylene(PP)
Manufacturer	Amoco
Injection temperature	210 ℃
Mold temperature	40 ℃
Fill time	3 sec

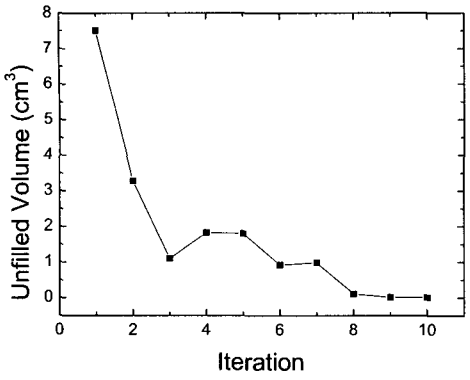

Fig. 6 Overall unfilled volume as a function of iterations

경우 충전이 거의 비슷한 시간에 완료가 되기 때문에 품질이 균일하고 불량률이 거의 없는 제품을 기대할 수 있다.

반복횟수에 따른 총괄 미충전체적을 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 반복횟수가 증가할수록 총괄미충전체적은 감소한다. 그러나 증가하게 되는 경우에는 본론에서 언급한 바와 같이 s에 0.5를 곱하여야 안정적으로 수렴하게 된다.

Table 2 Initial and optimal dimensions of sprue, main runner and sub-runners

	Length (mm)	Diameter(mm)	
		initial	optimal
Sprue	100	2→4	-
Main Runner	125	4	-
1st Sub-Runner	17.9	2	2.2
2nd Sub-Runner	17.9	2	2.8
3rd Sub-Runner	17.9	2	3.8

Table 2에는 스프루, 주런너, 그리고 부런너의 제원(길이, 초기직경, 그리고 계산된 최적직경)을 나타내었다.

5. 결론

런너밸런스는 충전모사의 결과를 토대로 하여 모든 캐비티가 동시에 충전이 되도록 부런너의 직경을 결정한다. 따라서 미충전(short shot)이나 과도압을 피하여 고품질의 제품양산을 기대할 수 있다.

그러나 엄격한 의미에서 모든 제품이 동일한 품질을 기대하기는 어렵다. 왜냐하면 사출성형은 연속적인 공정이고 또한 수지는 압축성 유체이기 때문에 캐비티가 완전히 충전이 되어있을지라도 보압과정에서 수지는 계속해서 캐비티로 유입되기 때문이다. 따라서 각 제품의 수지의 밀도차가 발생하게 되며 이는 각 제품이 변형의 차이를 유발하게 된다.

따라서 일반 사출성형시 충전뿐 아니라 보압과정 역시 런너밸런스에 매우 중요한 공정임을 확인하고 이에 대한 연구의 필요성이 요구되었다.

참고문헌

1. Wang, V. W., Wang, K. K., Hieber, C., ANTEC '83, SPE Conference, pp. 663, 1983.
2. Jong, W. R. and Wang, K. K. ANTEC '90, SPE Conference, pp. 385-389, 1990.
3. Lee, B. H. and Kim, B. H., "Automated Design for the Runner System of Injection Molds Based on Packing Simulation," Polymer Plastic Technology & Engineering Journal, 35(1), pp. 147-168, 1996.
4. Hieber, C. A. and Shen, S. F., "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of The Injection-molding Filling Process," J. Non-Newtonian Fluid Mech., 7, pp. 1, 1980.
5. Lee, C. C., Folgar, F. and Tucker, C. L., J. Eng. Industry, 106, pp. 114, 1984.
6. Broyer, E., Tadmor, Z. and Gutfinger, C., "Filling of a Rectangular Channel with a Newtonian Fluid," Israel J. of Technology, Vol. 11, pp. 189-193, 1973.
7. Tadmor, Z., Broyer, E. and Gutfinger, C., "Flow Analysis Network(FAN) - A Method for Solving Flow Problems in Polymer Processing," Polym. Eng. and Sci., Vol. 14, pp. 660-665, 1974.
8. Kim, B. H. and Ramesh, M. C., "Automatic Runner Balancing of Injecting Molds Using Flow Simulation," ASME J. Eng. Ind., Vol. 117, No. 4, pp. 508-515, 1995.
9. Pye, R. G. W., Injection Mould Design, 4th ed.,

Longman Scientific & Technical copublished with
Wiley & Sons, New York, 1989.