

웨이브리 몰드 성형에서 러너밸런스 결정을 위한 유동해석

김현필*, 김용조**

Flow Analysis to Determine Runner Balance in Family Injection Molding

Hyun-Pil Kim*, Yohng-Jo Kim**

Abstract

Family injection molding of plastic is widely used to enhance productivity. Runners for molded products in family injection molding have to be balanced so that each of the products is filled completely at the same time. In this study computer simulations were performed to determine balanced circular section runners in family injection molding with two cavities, where each of the cavity shapes is like a case. It was found from the computer simulations that runner balance could be fulfilled only by modifying runner diameters. But in order to get more quality molded products, other process factors such as flow length, flow resistance, shapes of products, and etc. should be taken into consideration for the design of a family injection molding process.

Key Words : Injection molding(사출성형), Family mold(웨이브리 몰드), Flow analysis(유동해석), Frozen layer(고화층), Runner balance(러너 밸런스), Multi-cavity(다수개 캐비티), Over packing pressure(과압)

1. 서론

사출성형에 있어 제품생산 방법은 매우 다양하여 대량 생산을 위해서는 금형설계 단계에서부터 캐비티(cavity) 수를 결정하는 것이 중요하다. 플라스틱을 원료로 하는 사출성형의 가장 큰 특징으로는 1회 사출(one shot)로 제품을 얻을 수 있기 때문에 생산을 증가시키는 방법으로 한 금형내에 다수개 캐비티(multi-cavity)방식을 많이 사용

하고 있다.^(1,2) 제품의 형상이 큰 경우 전체 금형이 커져서 이 방식을 사용할 수 없는 경우가 많으나 소형의 제품에서는 매우 효과적인 방법으로 이용되어 지고 있으며, 제품 생산비용절감 측면에서도 매우 바람직 하다. 2개이상의 제품을 한 금형내에서 취출하는 금형을 다수개 빼기 금형으로 정의하고 특히 제품의 형상이 다른 다수개 빼기 금형을 웨이브리 몰드(family mold)로 칭한다. 다수개 빼기 금형에서는 모든 캐비티에 균질하고 동일시간에 각 캐비티

* 창원기능대학 금형기술과
 ** 경남대학교 기계공학부

에 충전되도록 게이트 밸런스(gate balance) 또는 러너 밸런스(runner balance)를 유지하는 것이 무엇보다도 중요하다.⁽³⁻⁴⁾

수지가 스프루(sprue)에서 캐비티 끝에 도달하는 사이 압력강하는 유동거리에 비례하므로 조건이 같은 경우 먼 캐비티로 갈수록 전달 압력은 작아진다. 따라서, 어느 캐비티가 늦게 충전되는지를 실제 사출에서 충전시간대별로 테스트 쇼트(test shot)를 실시하고 비교하여 게이트 및 러너를 수정하는 방법으로 러너밸런스를 잡고 있다. 이 경우 금형의 온도 및 사출성형 조건이 양산시의 상태로 테스트 성형되어야 하고 여러 번 반복되어 많은 어려움을 초래한다. 따라서 다수개 캐비티 방식에서는 캐비티 수를 결정 한 후 수지의 유동거리를 판단하여 동시에 충전되어질 수 있게 각 캐비티 및 러너를 배치하여야 하며 배치 자체로서 밸런스를 취할 수도 있다.⁽⁵⁾ 그러나 금형의 형식과 성형품의 제작적 조건으로 인해 각 캐비티가 유동거리에 차이가 있는 배치 및 웨일리 몰드의 경우는 동시 충전을 위한 게이트 및 러너 밸런스 작업이 필연적으로 이루어져야 한다.

2. 러너 밸런스를 위한 캐비티 배치

유동거리를 고려한 캐비티 배치 방법으로는 직선배치, H배치, 원형배치, 기타 이들을 응용한 다양한 배치방법이 이용되고 있으며, 다수개 캐비티 방식에서 동시충전을 고려한 일부형태를 Fig.1에 나타내었다.

Fig. 1은 각 성형품까지 유동거리가 같도록 고려된 캐비티 배치방법을 보여주고 있으며 Figs. 1(a), 1(c),

1(d)는 러너 밸런스를 취하고 있으나 Fig. 1(b)의 경우는 중앙 스프루에서 성형품까지의 각각 거리에 차이를 가지고 있어 금형제작 시 러너 밸런스를 이루어야 한다. 러너밸런스가 맞지 않으면 각각의 성형품에 동시충전이 불가능하다.⁽⁶⁾ 따라서 사출성형변수가 각각 달리 성형품에 작용되어져 같은 제품이라도 균질한 성형품을 얻을 수 없게 된다. 본 연구는 이러한 관점에서 유동기구(flow mechanism)인 러너가 성형품에 미치는 영향에 관해 설계단계서부터 유동해석을 실시하고 문제점을 제시하여 금형 설계에 반영하고자 한다.

3. 이론적 배경

수지의 사출성형에서 용융수지의 유동은 압축성이며 비뉴턴 유체(non-newtonian fluid)이고, 유동시 금형으로 열전달이 발생하고 금형 쪽에서는 용융수지가 고화층(frozen layer)을 형성하면서 유동하게 된다. 또한 용융수지의 유동선단에서 분수효과(fountain effect)가 있다는 실험적 연구결과^(6,7)에 의하면 유동시 용융수지는 뉴턴 유체(newtonian fluid)의 특성과는 차이가 있다. 러너 단면형상은 원형, 반원, 사다리꼴형상 등 다양하나 유동성을 고려하여 원형 러너를 많이 사용하고 있으므로 본 유동해석에서도 원형 러너(runner)를 택하였다. 용융수지의 캐비티 충전단계에서 러너의 유동에 대한 지배방정식의 수식화 과정은 문헌^(6,7)에 상세히 소개되어 있으므로 여기에서는 간략히 언급한다. 러너 내에서 온도 및 유동장은 러너의 길이방향 축에 대하여 대칭이라고 가정한다.

• 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

또는

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + v_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

• 운동량 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \quad (2)$$

• 에너지 방정식

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta T \frac{\partial p}{\partial t} + \eta r^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (3)$$

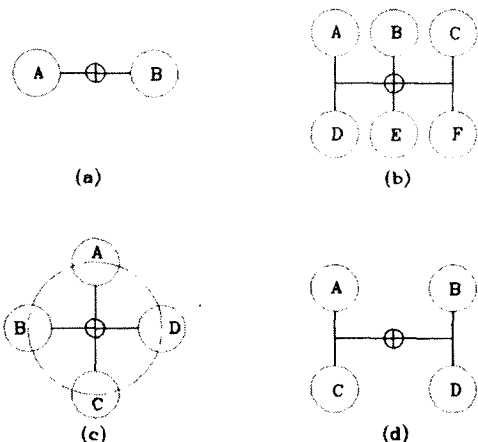


Fig. 1 Examples of runner types for multi-cavities

여기서, 첨자 (x, r)는 좌표축을 나타내고, p 는 압력, η 는 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도(shear rate), ρ 는 밀도, c_p 는 정압비열, T 는 온도, k 는 열전도계수, β 는 체적팽창계수(volume expansion coefficient)이며 다음 식과 같다.

$$\beta = \frac{1}{v_s} \left(\frac{\partial v_s}{\partial T} \right)_p \quad (4)$$

여기서, v_s 는 비체적(specific volume)이다.

식(2)의 둘째식을 적분하고 러너의 축 중심에서는 전단응력 및 전단변형률이 0가 되는 조건을 사용하면

$$\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} r^2 = r\eta \frac{\partial v_x}{\partial r} \quad (5)$$

관의 길이방향에서 속도는 식(6)와 같이 표시된다.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^r \xi d\xi = v_x(r) - v_x(0) \quad (6)$$

고화층에서 속도는 0이기 때문에 러너 중심부의 속도(velocity) $v_x(0)$ 는 고화층의 거리를 $r=r'$ 라 할 때 다음식과 같다.

$$v_x(0) = -\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^{r'} \xi d\xi \quad (7)$$

결국, $v_x(r)$ 에 대한 일반식은 다음 식으로 주어진다.

$$v_x(r) = -\frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \int_r^{r'} \xi d\xi \quad (8)$$

전단 변형률 속도(shear rate) $\dot{\gamma}$ 는 식 (9)과 같다.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial r} = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{r}{\eta} \quad (9)$$

4. 러너 밸런스의 응용

Fig. 2는 Fig. 1에서 표시된 다수개 캐비티(multi-cavity)방식에 대한 스프루, 러너, 게이트, 유동기구(flow mechanism)를 보여주고 있으며, Fig. 2(a)의 경우 성형품 A, B가 동일 성형품으로 스프루에서 성형품까지 유동거리에 차이가 있다. 게이트 크기가 같고 분기너러(sub-runner)의 반경이 $R_1=R_2$ 라면 같은 사출성형조건 하에서 B가 A보다 빨리 충전되어질 것이며 $R_2 > R_1$ 이어야 러너밸런스가 맞게된다. 또한 Fig. 2(b)와 같이 성형

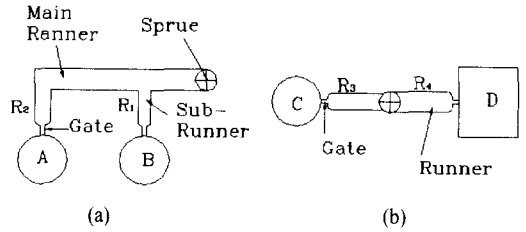


Fig. 2 Multi-cavity and flow mechanism in the family injection molding

품 C, D형상과 체적이 다른 웨일리 몰드(family mold) 경우, 러너가 $R_3=R_4$ 일 때 성형품 형상이 단순한쪽으로, 또한 유동저항이 적고 체적이 적은 성형품의 쪽으로 먼저 충전되어 러너 밸런스가 맞지 않게 된다. 따라서, 러너 밸런스⁽⁹⁾는 같은 성형조건하에서 유동거리 및 성형품 형상에 따라 러너의 크기를 각각 달리하여 러너밸런스를 이루게 한다.

5. 러너밸런스를 위한 유동해석조건

웨일리 몰드의 러너 밸런스 결정을 위해 유한요소해석을 위하여 전문해석 프로그램인 MOLD FLOW를 사용하였다. 본 연구에서는 2개의 캐비티를 갖는 웨일리 몰드 성형품 해석을 위해 MDT (Mechanical Desk Top)에서 IGES 포맷으로 CAD 데이터를 변환하고 유한요소 모델을 완성하였다. 모델링은 곡면모델링(surface model) 방법을 사용하였고, 모델의 격자분할(mesh division)은 여러 번 실시하여 코너부 등이 잘 표현되는 최적격자분할(mesh division = 8)을 결정하고⁽⁸⁾, 모델의 곡면부, 게이트 주위 및 리브(rib)등은 격자수를 좀 더 증가시켜 해석에 영향을 끼치지 않도록 고려하였으며, 요소수3842개, 절점수 2033개 정도로 유한요소 모델링 하였다. 게이트의 위치 및 크기는 성형품에 영향을 끼치지 않도록 성형품 파팅라인(parting line)에 설치하였다. 크기는 폭 1.5mm, 높이 1mm로 각각 성형품에 게이트크기를 같게 하여 게이트 자국이 성형품 외관에 미치는 영향을 최소화 하였다. 러너의 크기는 최초 직경을 6mm로 설정하고 러너밸런스를 위해 각각 캐비티에 동시 충전될 수 있도록 변경하면서 반복해석을 실시하였으며 웨일리 몰드(family mold) 특성상 안정된 성형품을 얻기 위해 유동해석과 보압해석(packing analysis)을 동시에 실시하였다. 본 해석에 사용된 수치(PP)의 물성치는 Table 1과 같으며 금

Table 1 Thermal properties of the plastic (PP: LK301)

Melt density	748.09 kg/cu.m
Specific heat	2577.0 J/kg/°C
Generic shear stress (Max.)	0.25Pa
Generic shear rate (Max.)	100000 1/s
Min. melt temperature /Max.	195 °C / 235 °C
No flow temperature	138 °C
Viscosity (temperature 235 °C)	231.6 Pa.s
Parallel shrinkage	1.240200e-001
Perpendicular shrinkage	1.261600e-001

형의 온도는 PP수지에 대한 추천온도인 50°C로 설정하였고, 사출시간(injection time)은 1초(sec), 수지온도를 215°C로 설정하여 해석하였다.

6. 해석결과 및 고찰

유동해석의 모델은 상하 조립케이스로 한 금형 내에 배치된 각각 형태가 다른 웨일리 몰드이다. 유동해석(multi laminate filling)과 보압해석(packing analysis)을 동시에 실시한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3은 좌우 러너 b 및 c의 직경을 6mm로 같게하여 유동해석한 결과이며 사출 후 1.09초에 완전히 충전되었으 며, 사이드 게이트 타입의 전형적 유동패턴을 보여주고 있으며, 좌우 케이스 가장자리 쪽에서 충전이 완료되고 있음을 나타내고 있다. 좌측 케이스는 형태가 단순하여 원활한 충전을 보이고 있으나 내부형상이 복잡한 우측은 유동의 왜곡이 심하게 나타나고 있다. Fig. 4는 사출 후 1.03초에서 캐비티 충전진행상태를 나타낸 것이며, 좌측 캐비티가 먼저 충전되고 우측 캐비티의 하단부 A에서 아직 미충전(short shot)상태로 남아있어 좌우 캐비티의 충전상태가 불일치함을 보여주고 있다.

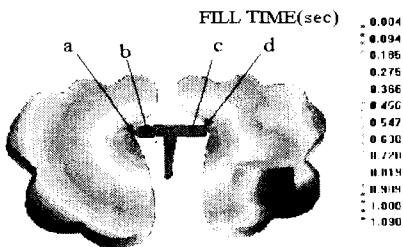


Fig. 3 Cavity filling patterns in the injection molding of the family mold type with two cavities

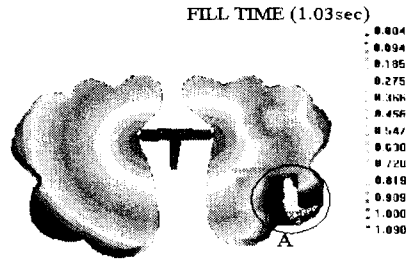


Fig. 4 Cavity filling patterns in the injection molding of the family mold type with two cavities at filling time of 1.03 sec

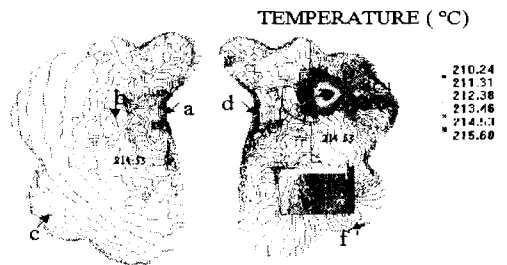


Fig. 5 Simulation result by the temperature flow analysis

Fig. 5는 사출 후 용융수지가 캐비티 충전 중의 온도분포를 나타내고 있다. 온도는 모두 210.2~215.6°C정도로 분포되어 좌우 캐비티에서 편차가 적다. 그러나 우측 캐비티에서 내부형상의 복잡성에 의하여 유동성이 다소 불량해져 상부에 유동정체(hesitation)현상이 생겨 급격히 온도가 떨어져 있음을 확인할 수 있고, 이 부분에서 용융수지는 다른 부분 보다 빨리 고화되어 성형 후 제품의 변형이 발생할 수 있다. 따라서 중앙부의 세로방향으로 변형을 억제하기 위해 리브(rib)를 설치하고 두께는 1.5mm, 높이를 2mm로 하여 다시 시뮬레이션 하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig.5에서 표시한 왼쪽 캐비티가 성형되어지는 동안 게이트부, 중앙부, 최종 충전완료 하단부의 해석된 유동순서대로 성형품에 미치는 온도 및 압력의 변화를 나타내고 있다. 모두 게이트부를 제외하고는 온도와 압력의 편차가 적어 양호한 상태의 유동패턴을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9은 Fig.5에서 표시한 오른쪽 캐비티에 있어서 온도영향 및 압력영향의 유동해석 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9은 Fig. 6과 Fig. 7과 비교하면 보다 온도와

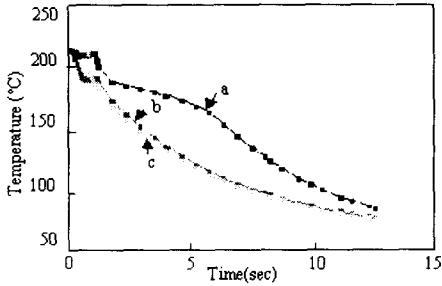


Fig. 6 Change in injection temperature in the left cavity during the cavity filling process

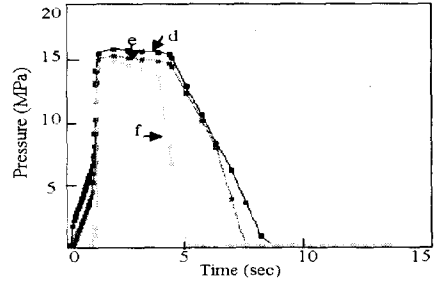


Fig. 9 Change in injection pressure in the right cavity during the cavity filling process

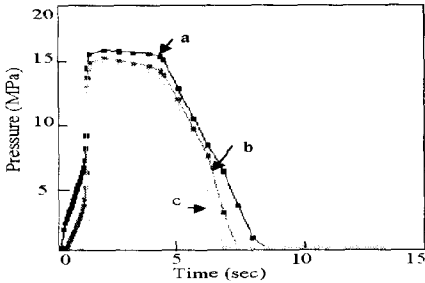


Fig. 7 Change in injection pressure in the left cavity during the cavity filling process

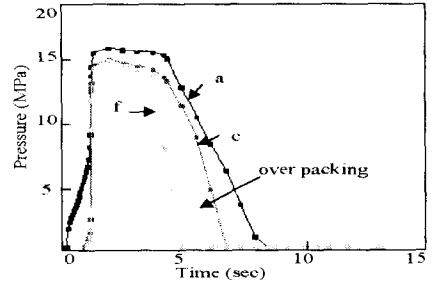


Fig. 10 Change in relation injection pressure in the left and right cavities during the injection molding process

압력 차가 크게 나타나 있다. 따라서 웨일리 몰드에서 각각의 캐비티 형상에 따라 수지가 유동하기 쉬운 캐비티 쪽으로 온도 및 압력이 균일해지고 충전이 빨리 되어 지지며 형상이 복잡하거나 각각의 캐비티 크기 차이가 심하면 유동 길이가 증대되어 유동저항이 증가하고 온도 및 압력 편차가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10은 좌우 캐비티 충전완료시 특정 위치의 압력편차를 비교하였다. 편차를 비교하기 위하여 좌측 캐비티 최

종 충전완료 위치인 c와 우측 캐비티 최종 충전위치인 f에서 성형되어지는 동안 압력을 나타내었다. Fig. 10에서 c 및 f는 충전이 완료되는 시간 1.09초에 큰 압력 차를 나타내지 않았으나, 고화 시에 발생하는 체적수축(volume shrinkage)을 보상하기 위한 보압(packing pressure) 공정단계에서 좌우 캐비티에 압력 편차가 발생되었음을 알 수 있다. 따라서 성형이 완료될 때까지 좌측 캐비티 c는 우측 캐비티 f보다 계속해서 더 많은 과압(over

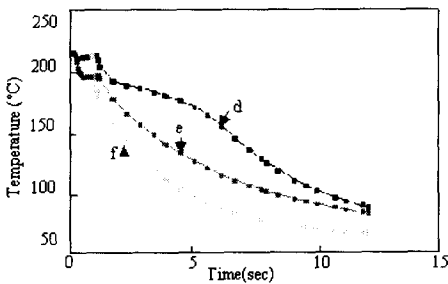


Fig. 8 Change in injection temperature in the right cavity during the cavity filling process

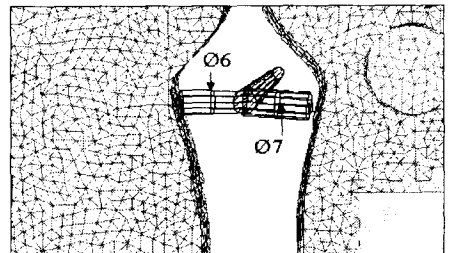


Fig. 11 Balanced runners in the injection molding with two cavities

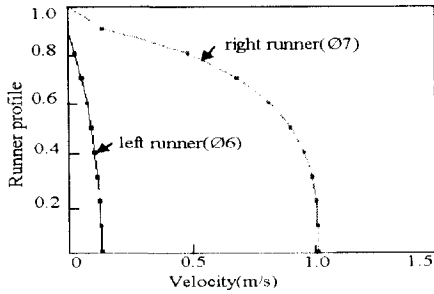


Fig. 12 Flow velocity distributions in the left and right runners

packing pressure)을 받게 되는 것을 확인할 수 있다. 어느 한쪽이 과압을 받게되면 성형완료후 변형과 치수 정도 그리고 성형품의 기계적, 물리적 성질이 다르게 나타난다.⁽¹⁰⁾ 그러므로 다수개 캐비티 방식을 이용하여 품질이 우수한 성형품을 얻기 위해서는 각 성형품이 동시에 충전될 수 있도록 급형설계에서 고려되어야 한다.

Fig. 11는 성형품의 러너 밸런스를 유지하기 위해 좌우 캐비티를 동시에 충전완료 될 수 있도록 러너 크기를 각각 달리하여 재해석을 실시한 경우의 러너 모양을 나타낸다. 이미 Fig. 5에서 고찰한바와 같이 좌우 러너의 직경을 6mm로 같게 했을 때 우측 캐비티가 늦게 충전되었기 때문에 우측러너를 크게 하면서 양쪽 캐비티에 동시에 충전되는 러너의 직경을 구했다. 좌측의 러너 직경이 6mm이었을 때 우측의 러너 직경은 7mm이었다.

좌우 캐비티가 동시에 충전완료되는 좌우 러너의 직경이 각각 6mm 및 7mm이었을 때 유동해석에서 얻은 러너중심에서 러너반경까지의 러너단면(runner profile)에 대한 유동속도(flow velocity)를 Fig. 12에 나타내었다. 우측러너의 유동속도가 좌측보다 매우 높음을 확인할 수 있다. 이것은 스프루(sprue)를 거친 용융수지가 충전시간

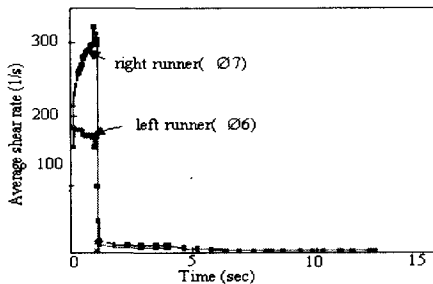


Fig. 13 Average shear strain rates in the left and right runners (with different runner diameters)

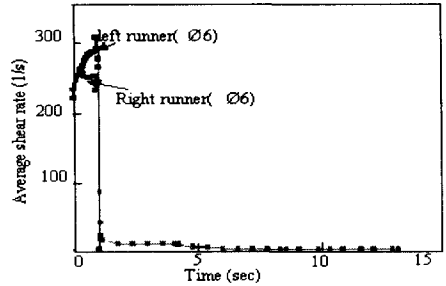


Fig. 14 Average shear rates in the left and right runners (with the same runner diameters of 6mm)

에 따라 압력이 증가되면서 단면이 큰 러너 쪽으로 유입되는 체적유량(volumetric flow rate) \dot{V} 가 증가되고 있음을 알 수 있다.

유동속도에 따른 양쪽 러너 전단변형률속도(shear rate) $\dot{\gamma}$ 를 Fig. 13에서 비교하여 나타내었으며 러너직경이 크고 러너 유동속도 u_r 가 큰 쪽이 전단변형률 속도가 높음을 확인할 수 있다. Fig. 14는 양쪽 러너의 크기를 같게 한 경우 단순한 형상의 좌측 캐비티에서는 유동저항이 적어 유입되는 체적유량 \dot{V} 가 증가되기 때문에 좌측 러너의 전단 변형률 속도가 우측러너보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 러너를 통과한 유동수지는 단면이 매우 작은 게이트를 통과하면서 유동속도 증가에 비례하여 급격히 전단 변형률 속도는 증가되어질 것이다. 이와 같이 전단 변형률 속도와 유동속도 및 체적유량 사이에는 함수관계를 갖고 있으며 전단 변형률 속도는 유동속도 및 체적유량과 비례함을 알 수 있다. 따라서 웨일리 몰드방식에서 러너의 직경만을 변경하여도 같은 성형조건하에서 $\dot{\gamma}$, u_r , \dot{V} 등에 변화를 줄 수 있어 러너 밸런스를 달성할 수 있다.

Fig. 15 및 Fig. 16은 러너 밸런스를 유지했을 때(Fig.

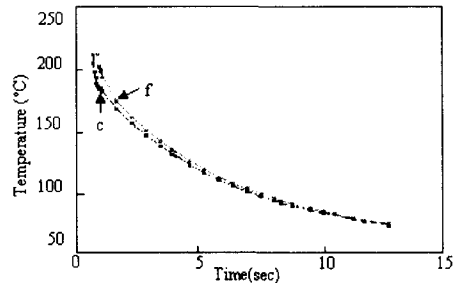


Fig. 15 Relation injection temperatures in the left and right cavities in the family injection molding with two balanced runners

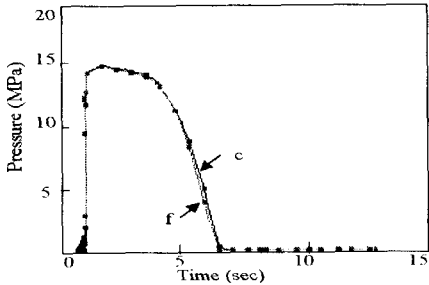


Fig. 16 Relation injection pressures in the left and right cavities in the family injection molding with two balanced runners

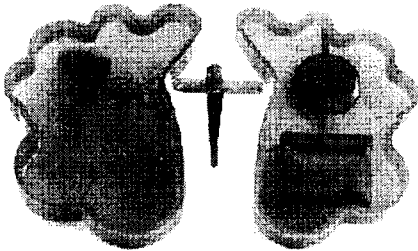


Fig. 17 A product molded by the injection molding process of the family mold type with two balanced runners

11 참조) 좌우 캐비티 충전완료위치의 온도 및 압력 변화 상태를 나타내고 있다. 러너 밸런스를 유지했을 때 Fig. 15에 나타낸 온도분포를 러너밸런스를 유지하지 않았을 때의 결과를 나타낸 Fig. 6 및 Fig. 8와 비교하면 온도 편차가 매우 적어졌음을 알 수 있다. 또한 Fig. 16에서 압력분포도 역시 러너밸런스를 유지하지 않은 Fig. 7 및 Fig. 9에 비해 압력편차가 매우 적어 졌다. 따라서 웨일리 몰드의 경우 각각의 캐비티에 작용되는 성형변수에 차이가 발생되어지므로 동일한 충전조건하에서 성형되어질 수 있도록 러너밸런스를 유지해야 한다. Fig. 11과 같이 러너밸런스를 유지하여 만족한 결과를 보여주는 해석 조건을 적용하여 실제 사출성형된 제품을 Fig. 17에 나타내었다.

7. 결 론

한 쌍의 상하 케이스 제품을 하나의 금형 내에 설치한 웨일리 몰드에서 러너 밸런스의 설계를 위하여 유동해석

을 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 웨일리 몰드방식은 각각의 성형품이 동시에 충전완료 되어야 하며 성형변수인 온도 및 압력편차가 적고 각각의 성형품에 동일하게 작용되어야 성형제품의 트러블을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 성형품의 형상 및 크기, 유동길이, 유동저항을 고려하여 러너를 설계하여야 하나, 본 연구에서는 원형러너의 직경만을 수정함으로써 성형품에 영향을 미치는 전단변형률 속도 ($\dot{\gamma}$), 유동속도 (u), 체적 유량 \dot{V} 등을 콘트롤하여 러너 밸런스를 달성할 수 있었다.
- (3) 웨일리 몰드방식에서 러너 밸런스 결정에 성형변수가 되는 러너부의 평균전단변형률속도는 유동속도와 통과되는 체적유량에 비례함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Menges Mohren, "Spritzgiß Werkzeuge", Carl Hanser Verlag Munchen Wien, pp. 136~154, 1991.
- (2) Klaus Stoeckert, "Mold-Making Handbook", Carl Hanser Verlag Munchen Wien, pp. 23~35, 1983.
- (3) Gastrow, "Injection Molds", Carl Hanser Verlag Munich, pp. 4~16, 1993.
- (4) 일본금형공업회, "프라스틱사출성형용금형설계기준", 기전연구사, pp. 55~64, 1988.
- (5) 일본프라스틱가공기술협회, "사출금형기본과 응용", 기전연구사, pp. 47~48, 81~96, 1985.
- (6) Perter Kennedy, "Flow Analysis Reference Manual", Moldflow Pty. Ltd., pp.81~90, 1993.
- (7) Ulrich Lichius, Leopold Schmidt, "Rechnerge-stuetztes Konstruieren von Spritzgiß Werkzeuge", Vogel-Buchverlag Wurzburg, pp. 15~20, 1986.
- (8) Moldflow Korea, "Moldflow Training Manual", Moldflow Pty. Ltd., pp. unit 8, 1996.
- (9) B. H. Lee, B. H. Kim, "Automated design for the runner system of injection molds based on packing simulation", ANTEC 96, PP. 708~713, 1996.
- (10) 국립공업시험연구원, "프라스틱 금형부품 및 작업기준", 국립공업시험연구원, pp. 491~558, 1991.