

## 편측 분기형 러너 배열을 가진 다수 캐비티 사출금형에서의 충전 불균형도

강철민\* · 정영득#

(2004년 1월 6일 접수)

### The Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds with Unary Branch Type Runner Lay-out

C.M. Kang and Y.D. Jeong

#### Abstract

Almost all injection molds have multi-cavity runner system for productivity and are designed with geometrically balanced runner system in order to minimize filling imbalance between cavity to cavity during processing. However, filling imbalances have been observed though geometrically balanced runner lay-out. Generally, these filling imbalances are due to thermal unbalance, viscosity, characteristic of polymers and so on. These kinds of filling imbalances have already been reported by Beaumont since 1997, but his research has mainly focused on filling imbalance at binary runner. In this study, we conducted an experimental study about the filling imbalances in unary branch runner as well as binary branch runner and inquired into the causes of filling imbalances. The results could be summarized as following: Filling imbalances existed in multi-cavity mold with unary branch runner, it could be decreased by optimizing processing condition such as increasing injection rate, and it is almost proportion to each polymer's temperature sensibility.

**Key Word :** Filling Imbalance, Degree of Filling Imbalance, Temperature Sensibility, Unary Branch Type Runner, Shear Rate, Viscosity

#### 1. 서 론

다수 캐비티를 가진 사출금형에 의한 플라스틱 제품 성형시 제품의 생산성과 품질을 극대화하기 위해서는 캐비티간의 균형을 이룬 충전과 충전후 캐비티 간의 균일한 냉각들이 요구된다. 그러므로 이와 같은 조건의 충족을 위해 다수 캐비티를 가진 사출금형은 모두 기하학적으로 균형을 이룬 러너 구조를 가지고 있다. 그러나 기하학적으로

균형을 갖춘 러너 시스템<sup>(1)</sup>을 가진 다수 캐비티 사출금형이라 할지라도 충전시에는 각 캐비티간의 상당한 충전 불균형을 볼 수 있다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 충전 불균형에 관한 연구는 1997년 이전에는 구체적으로 밝혀진 바가 없으나, 그 이후에는 Beaumont<sup>(2-6)</sup>등에 의해 발표된 논문이 다수 있다. 발표된 Beaumont의 모든 논문에서는 H형 양측분기 러너 구조<sup>(3)</sup>에서 일어나는 충전 불균형에 대한 연구와 그 해결책 만이 발표되었을 뿐 편측 분기형

\* 부경대학교 기계공학부 대학원 설계생산자동화전공

# 교신저자: 부경대학교 기계공학부

러너에서 일어나는 충전불균형에 대한 연구결과는 볼 수 없었다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 스푼 형상 캐비티를 가지면서 기하학적으로 균형을 갖춘 편측 분기형 러너 구조를 가진 2매 구성형 다수 캐비티 금형에서 충전 불균형 현상을 범용 수치인 PP, GPPS, LDPE, ABS를 대상으로 실험 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 편측 분기형 러너 구조에서 일어나는 충전 불균형에 관하여 각 성형공정이 미치는 영향을 분석하고 고찰하였으며, 충전 불균형을 최소화 하는데 필요한 성형조건과 수치 조건을 제시하고자 한다.

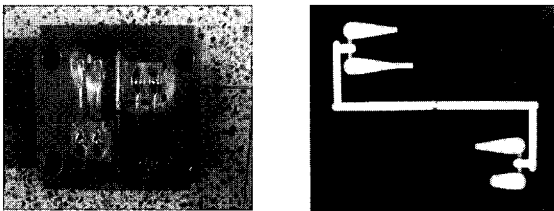


Fig. 1 The experimental plastic spoon mold and unary branch type runner lay-out

## 2. 이론적 배경

### 2.1 수치 유동시 점성 변화

플라스틱 재료인 수지는 유동시 온도와 전단속도에 따라 점성이 변하게 된다. 정상적인 성형 조건에서는 온도와 전단속도가 커지면 점성은 낮아지는 소위 전단 감소 (shear thinning) 현상을 나타낸다. 사출성형시 수치점도는 다음의 (1)식과 같은 수정 Cross 모델을 사용하여 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left( \frac{\eta_0 \times \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-n)}} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\gamma}$  : 전단율(shear rate)  
 $\tau^*$  : 경계역에서의 전단응력  
 $n$  : 비뉴턴 지수  
 $\eta_0$  : 제로 전단율에서의 점도

제로 전단율에서의 점도  $\eta_0$  는 또한 온도와 압력의 함수로써 (2)식 및 (3)식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[ - \frac{(A_1(T - T^*))}{(A_2 + (T - T^*))} \right] \quad (2)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p$$

$$\eta_0(T) = B \exp \left( \frac{T_b}{T} \right) \quad (3)$$

점도에 대한 온도 민감도(Temperature Sensibility)  $T_b$  는 (4)식을 사용하여 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$T_b = \frac{A_1(A_2 + D_1) \cdot T^2}{[A_2 + (T - D_2)]^2} \quad (4)$$

여기서,  $T^*$ : 점도가 무한대에 이르는 전이온도

$T$  : 성형온도

$A_1, A_2$ : WLF 식에서의 전위계수

$D_1$ : 제로 전단율에서의 기준 점도

$D_2$ : 제로 게이지압에서 유리전이온도

### 2.2 양측 분기형 러너와 편측 분기형 러너

#### 2.2.1 양측 분기형 러너

Fig. 2에서 보는 것과 같은 H 형 양측 분기형 러너(Binary branch type runner)에서 Cavity 1과 Cavity 2는 기하학적으로 균형을 이루는 위치에 있다. 그러나 이와 같이 동일한 유동거리를 갖는 러너에 의해 충전되어지며, 기하학적으로도 균형을 이루는 다수 캐비티는 실제로 불균형적으로 충전된다. 이와 같은 충전 불균형은 러너 중심부를 따라 흐르는 수지와 러너벽면의 고화층 아래를 따라 흐르는 수지 간의 불균일한 전단율 분포에 의해 발생한다. 러너벽면의 고화층 아래를 따라 흐르는 수지의 전단율( $\dot{\gamma}_r$ )은 중심부를 따라 흐르는 수지의 전단율( $\dot{\gamma}_c$ )보다는 크게 된다. 전단율이 크게 되면 (1)식에서 보는 것과 같이 점도는 감소하게 되므로, 수지의 유동을 빨라지게 하는 요인이 된다. 또한 전단율이 커짐에 따라 상대적으로 전단 마찰열 또한 증가하게 되므로, 이는 러너벽면의 고화층 바로 아래의 수지가 중심부보다 더 뜨거운 수지가 되어 점도와 유량상에 불균형을 이

루게 될 것이다. 따라서 러너 중심부보다는 러너의 벽면 외측 유로를 따라 흐르는 수지에 의해 충전되는 스프루(spurue)측에 가까운 캐비티(Cavity 1)이 러너 중심부의 수지에 의해 충전되는 (Cavity 2)보다 먼저 충전된다고 가정한다.<sup>(2)</sup>

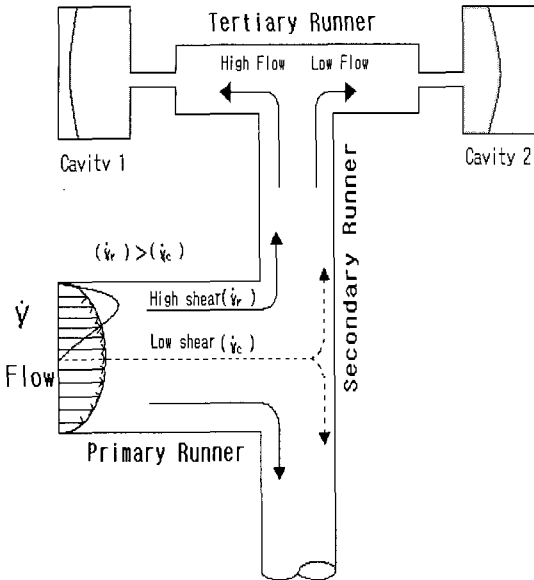


Fig. 2 The filling imbalance in binary branch type runner lay-out

### 2.2.2 편측 분기형 러너

편측 분기형 러너(unary branch type runner)에서의 충전 불균형 역시 양측 분기형 러너와 유사한 이유에 의해 주 러너 벽면 고화층 아래를 따라 흐르는 수지는 높은 전단율과 전단 마찰에 의해 중심부의 수지보다 더 뜨거운 수지상태가 된다. 그러나 양측 분기와 달리 편측 분기에서는 Fig. 3에서 보는 것과 같이 90° 방향전환이 이루어지는 콜드 슬러그 웰 (cold slug well)부분에서 러너 벽면 고화층 아래의 상대적으로 고온의 수지유동과 러너 중심부의 저온 수지유동의 혼합에 의해 발생하는 중간 유동 (medial flow)을 생각할 수 있다. 이와 같은 가정에 의해 내측 러너 벽면의 아무런 간섭 없이 흐르는 유동보다는 다소 느린 혼합된 새로운 유동이 발생하게 된다고 판단된다. 그 결과 내측 러너 벽면 근처를 흐르고 있는 고온의 유로에 접하게 되는 스프루에 가까운 내측 캐비티가 먼저 충전되어지는 것으로 생각된다. 위에서 기술한 편측 분기형 러너에서의 충전 불균형은

양측 분기형 러너에서의 충전 불균형과는 달리 수지간의 병합에 의한 중간 유동에 의해 발생된다. 그러므로 불균일한 전단율의 분포에 기인하여 서로간의 간섭 없이 흘러 러너 내외측 유동의 속도차에 의해서 발생하는 양측 분기형 러너에서의 불균형보다는 다소 개선되게 된다.

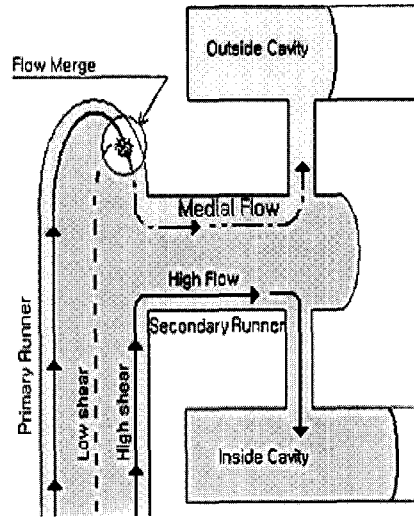


Fig. 3 The filling imbalance in unary branch type runner lay-out

### 3.1 해석 경계 조건

사출 성형 해석은 범용 사출 성형 프로그램인 CAPA<sup>(8)</sup> 와 Moldflow<sup>(9)</sup>를 사용하여 행해졌으며, 해석에 적용된 수지 재료는 BASF 사의 ABS 그레이드 GP22를 사용하였다. ABS를 해석 대상 재료로 선택한 이유는 기존의 연구에서 다른 수지에 비교하여 충전 불균형도가 크게 나타난 수지이기 때문이다. Table 1 은 성형 해석에 사용한 경계 조건들이다.

Table 1 The boundary conditions

| Analysis software | Mold Temp. | Melt Temp | Flow rate | Pressure |
|-------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| CAPA              | 60 °C      | 210 °C    | 50 cm/s   | 68 MPa   |
| MOLDFLOW          | 65 °C      | 215 °C    | 50 cm/s   | 75 MPa   |

### 3.2 성형 해석 결과

Fig. 4는 사출성형 해석 프로그램인 CAPA와 MOLDFLOW에서의 해석결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 실제 성형 시 일어나는 충전불균형 현상이 성형 해석상으로는 4개의 캐비티가 동시에 충전됨으로써 충전 불균형이 전혀 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 현재까지의 사출 성형 해석 프로그램에서 러너(runner)에 대한 메시(meshing)는 1차원 빔 엘리먼트(beam element)를 사용하는데 있다. 1차원 빔 엘리먼트는 실제 러너 내부를 흐르는 플라스틱 수지의 특성 즉, 전단율과 점도, 러너 벽면의 마찰력 등의 요인에 의해 생기는 러너 중심부와 러너벽면 고화층 아래의 흐름속도의 차이를 정의할 수 없다. 그 결과 사출 유동 해석상에서 같은 유동거리의 러너를 가진 캐비티는 충전불균형 없이 동시에 충전되는 결과를 나타내게 된다. 현재 이와 같은 해석상의 한계는 3차원 해석 프로그램에서 해결해야 할 과제로 남아 있다.

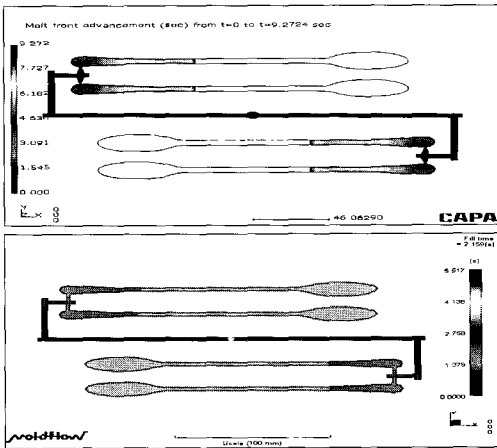


Fig. 4 The filling imbalances in flow analysis

## 4 성형 실험 및 결과 고찰

### 4.1 실험 조건 및 장비

본 실험에 사용된 금형은 4개의 캐비티를 갖는 2매 구성형 금형이며, 사출성형기는 LG기계에서 제작한 75톤 유압식 수평형 사출성형기이다. 수지 재료는 온도 민감도 ( $T_b$ )에서 상대적으로 많은 차이를 나타내는 ABS, GPPS와 PP, LDPE를 대상 수지로 정하였다. 실험 변수로는 사출속도와 러너의 형상의 변화를 선택하고 그 변수에 따르는 충전 불균형도를 (5)식에서와 같이 정의하여 측정하였다. DFI값을 구하기 위해서는 숏트 샷(short shot)성

형을 해야 하므로 본 연구는 숏트 샷 성형을 통한 충전 불균형에 관한 연구라 할 수 있다. 사출 속도는 사출성형기 최대 사출속도(injection rate)의 30%~70%로 5단계로 설정하였고, 러너의 형상은 Fig. 5에서와 같이 일반적인 러너 형상에서 변화를 주어 중심부와 외경부의 수지 흐름의 병합이 일어나는 부분으로 예상되는 콜드 슬러그 웰을 제거한 형상(None Cold slug well)과 유동 단면적을 줄임으로써 러너 내부의 흐름속도의 차를 줄이고자 하는 형상(Narrow runner)을 선택하였다.

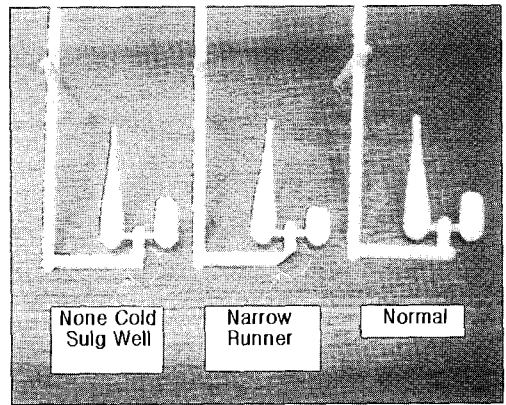


Fig. 5 The varieties of runner shapes

충전 불균형도(DFI)<sup>(10)</sup>

$$= \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

여기서,

$W_{in}$ : 내측 캐비티에서의 성형물 중량

$W_{out}$ : 외측 캐비티에서의 성형물 중량

### 4.2 실험 결과 및 고찰

#### 4.2.1 수지에 따른 충전 불균형도

Fig. 6는 대상 수지별 사출속도에 대한 충전 불균형도를 나타낸 것이다. 수지의 종류와 관계없이 사출 속도가 증가함에 따라 DFI값이 감소하는 경향을 보였다. 이는 일반적으로 사출속도를 증가시키면 점도는 높은 전단율에 의해 감소하는 경향을 보이다가 어느 구간 부터는 전단율에 관계 없이 일정한 경향을 보이게 된다. 그러므로 불균

일한 전단 분포에 기인하는 충전 불균형에서 사출속도를 더욱 빠르게 하는 것은 대상수지의 점도를 일정하게 되는 영역으로 유도할 수 있으므로, 결과적으로 충전불균형을 감소시키는 요인으로 작용한다고 생각된다. 각 수지별 DFI값은 ABS의 DFI값이 가장 크게 나타났음을 알 수 있다. 이는 ABS의 온도민감도  $T_b(12406 \text{ }^\circ\text{K})$  값이 타수지보다 상대적으로 큰 값을 갖기 때문으로 설명할 수 있다. 다른 대상 수지의 DFI값 역시 온도민감도  $T_b^{(6)}$ 의 크기와 비례하는 경향을 알 수 있다. Fig. 7은 수지별 DFI값과 온도 민감도의 관계를 나타낸 것이다.

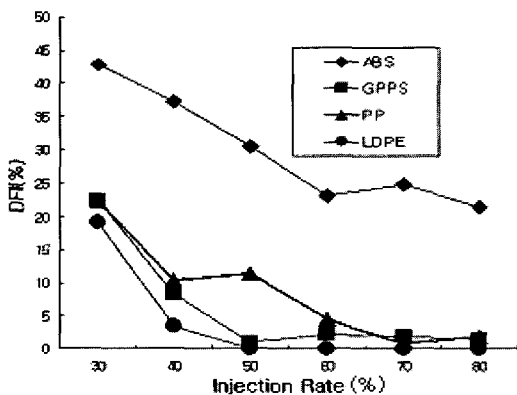


Fig. 6 DFI according to various polymers

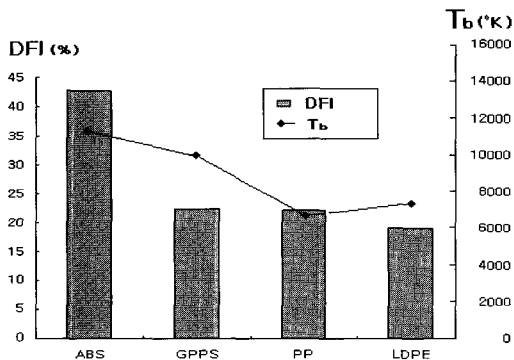


Fig. 7 The relationship between DFI and  $T_b$

#### 4.2.2 러너 형태에 따른 충전 불균형도

Fig. 8은 러너 형태의 변화에 따른 충전 불균형도를 나타낸 것이다. 러너 벽면 교화층 아래의 수

지유동과 중심부의 유동이 합쳐지는 지점인 콜드 슬러그 웰을 제거한 러너형태(Fig. 5의 None cold slug well)와 편측 분기점의 유동 단면적을 더욱 좁게한 러너형태(Fig. 5의 Narrow runner)를 대상으로 그에 따른 DFI값을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 콜드 슬러그 웰을 제거한 러너의 형상에서는 일반형상보다 다소 불균형도가 감소 하였으나 유동 단면적을 줄인 러너 형상에서는 오히려 불균형도가 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 전체적으로 일반형상의 러너와 변형된 형태의 러너들 사이의 충전 불균형도는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 수지 멜트의 유동 스트림(flow stream)은 층류 유동으로 유동선이 흐르게 되는 유로가 비록 좁아졌다고 하여도 서로 뒤섞이지 않고 흐르기 때문이라고 생각한다. 그러므로 러너 형태의 변화는 러너 내부의 각 유동선의 속도차를 줄임으로써 충전불균형도를 감소시키는데 있어서 크게 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

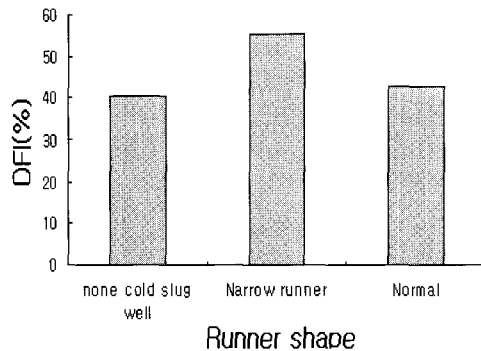


Fig. 8 DFI according to Different shape runner

### 5. 결론

본 연구에서는 기하학적으로 균형을 이루며 편측분기 러너를 갖는 사출금형에서의 수지 충전 불균형을 알아보기로 하자 범용수지인 ABS, GPPS, PP, LDPE 를 대상으로 실험연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 구조라 할지라도 플라스틱 수지의 유동특성에 의한 충전 불균형이 일어남이 확인되었으며, 이와 같은 충전 불균형은 양측 분기형 러너뿐만 아니라 편측분기형 러너에서도 발생함을 알 수 있었다.

(2) 수지에 따른 충전 불균형은 수지마다 가지고 있는 온도 민감도에 비례함을 알 수 있었다.

(3) 충전 불균형을 개선하기 위해서는 러너형태의 변경보다는 사출속도 증가와 같은 공정조건의 최적화가 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 Brain Korea 21 사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사에 말씀을 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 정영득, 박태원, 김현필 공역, 2003, 플라스틱 성형을 위한 알기쉬운 금형설계, 도서출판 인터비전, pp.224~227.
- (2) P. John. Beaumont and Jack H. Young, 1997, "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems", Journal of Injection Molding Technology, vol 1, no.3.
- (3) P. John Beaumont, Jack h. Young, and Matthew. J. Jawoski, 1998, "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds", Journal of Injection Molding Technology, Vol 2, No 2, pp. 47~58.
- (4) P. John Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, 2002, "Successful Injection Molding", pp.228~230, 304.
- (5) John Beaumont, John Ralston and Adam Shuttleworth, 1999, "Troubleshooting Cavity to Cavity Variations in Multi-Cavity Injection Mold" Journal of Injection Molding Technology, Vol 3, No 2, pp. 88~98.
- (6) P. John Beaumont and Kelvin Boell, 2001 "Controlled Balanced Molding through New Hot Runner Manifold Design", ANTEC 2001, pp. 932~936.
- (7) P. John Beaumont, 2001, "Revolutionizing Runner Design In Hot and Cold Runner Mold", ANTEC 2001, pp. 3680~3687.
- (8) ㈜브이엠테크, 2003. CAPA 사출성형 해석 시스템.
- (9) Moldflow Training Manual, 1996, MOLD-FLOW KOREA.
- (10) A. David Hoffman, P. John Beaumont, 2001 "Thermoset Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System" ANTEC, pp. 844~845.