

# 패밀리금형에서의 수지 유변학적 특성에 따른 가변러너의 성능 분석

최권일<sup>†</sup> · 박형필 · 차백순 · 이병옥 · 구분홍

(주)브이엠테크 · 한국생산기술연구원 정밀금형팀 · 아주대학교 기계공학부  
(2008. 7. 21. 접수 / 2008. 11. 21. 채택)

## Performance analysis of variable runner according to materials rheological characteristics in family mold

Kwon-Il Choi<sup>†</sup> · Hyung-Pil Park · Baek-Soon Cha · Byung-Ok Lee · Bon-Heung Gu

KITECH, VMTech Co, Department of Mechanical Engineering Ajou University  
(Received July 21, 2008 / Accepted November 21, 2008)

**Abstract :** It is well known that the family-mold has an advantage to reduce the cost for production and mold. However, defects are frequently occurred by over packing the smaller volume cavity during molding, especially when the family-mold has a volumetric difference between two cavities. In this study, the cavity-filling imbalance was confirmed by the temperature and the pressure sensors, and a variable-runner system was developed for balancing the cavity-filling. Experiments of balancing the cavity filling was carried out in the family-mold with the variable-runner system, and balancing the cavity-filling was confirmed by changing the cross-sectional area of a runner in the variable-runner system with the temperature and pressure sensors. The influence of the injection speed to the balancing-capability of the variable-runner system was also examined in the experiment.

**Key Words :** Mold-filling, FEM, Core-shift, Wire welding, Over molding, Reverse engineering

### 1. 서 론

금형은 제품 배치 및 방식에 따라 단수 캐비티(single cavity), 복수 캐비티(multi cavity), 패밀리(family) 방식으로 나뉜다. 요즘과 같이 소비자 성향에 따른 제품의 변화 주기가 빠른 시장에서는 제품 생산을 위한 여러 벌의 금형을 만드는 것은 제품 단가의 상승 요인이 되기 때문에 형상과 크기가 다른 캐비티가 한 금형에 배치되는 패밀리 방식의 금형이 필요하다. 하지만 이 방식은 제품의 형상 및 크기가 다르기 때문에, 제품 성형 시 플라스틱 수지의 불균일한 충전으로 인하여 각각의 캐비티로 균일한 압력이 전달되지 않고, 상대적으로 체적이 작은 캐비티로 먼저 충전이 이루어진다. 이로 인하여 먼저 충전된 캐비티에는 높은 압력이 발생하여 제품에 많은 문제를 발생시킨다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 사출성형 해석을 이용하여 충전 불균형을 예측하고, 캐비티의 충전균형을 위한 각각의 러너(Runner) 및 게이트(Gate) 크기를 계산하여 금형 설

계 및 제작에 반영하고 있으나, 이를 실제로 금형설계에 정확히 반영하기에는 많은 어려운 점들이 있다[1].

캐비티 내부의 현상을 규명하기 위한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔지만 충전 불균형에 관한 연구는 1990년대 후반부터 연구가 진행되었다. Beaumont는 멀티 캐비티 금형에서 러너 시스템을 흐르는 수지가 각각의 캐비티로 분기되면서 발생하는 전단불균형(Shear imbalance) 효과로 충전불균형이 발생한다는 것을 규명하였으며, 이를 해결하기 위한 방법으로 Melt Flipper<sup>TM</sup> 장치를 개발하여 불균형을 해소를 위한 연구를 하였다[2]. Coulter 등은 러너에 밸브 시스템을 적용하여 실시간으로 캐비티 압력, 온도, 충전시간 등을 측정하고, 멀티 캐비티 내부의 충전 제어 및 제품 품질 향상에 관한 연구를 수행하였다[3]. 그러나, 지금까지의 연구에서의 충전 균형해결을 위한 장치들은 사용에 제약이 있으며 복잡한 장비 구성으로 인하여 현장에서는 사용하기 어려운 부분이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 박형필 등은 캐비티의 충전 불균형 해결을 위하여 장치의 사용에 제약이 적고, 금형구조가 비교적 간단한 가변러너장치(Variable runner system)을 개발하였다[4]. 이 장치는 상대적으로 충전이 먼저 되는 캐비티의 러너측에 나사산을 이용하여 높이가 조절됨으로써 러너 단면적이 조절되는 가변러너 조절핀을 설치하여, 국부적으로 러너의 단면적을 감소시켜 충전 균형을 이루는 장치이다. 이 방법은 회전에 따른 직선운동 거리를 쉽게 제어하기 때문에 러너의 단면조절을 수월하게 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 이러한 가변러너시스템을 토대로 유연학적으로 각기 다른 특성을 가진 3개의 수지를 선정하여, 수지별로 가변러너의 단면적이 변화함에 따라 전단가열(Shear heating), 전단박화(Shear thinning) 현상이 충전균형과 어떠한 상관관계를 지니는지를 기존에 진행하였던 실험결과와 사출성형 해석결과, 그리고 간단한 모델을 통한 수치해석 결과를 비교하고 분석하였다.

## 2. 실험결과

Fig. 1에 기존실험에 사용되었던 체적이 큰 제품(1.78cm<sup>3</sup>)과 작은 제품(2.47cm<sup>3</sup>) 두 개의 캐비티 형상을 나타내었다. 내부에 충전되는 수지흐름을 제어하기 위하여 체적이 작은 캐비티의 러너 측에 가변러너 시스템을 설치하였다. 가변러너 조절핀에는 피치(Pitch) 0.6mm의 나사산을 가공하여 러너의 단면적을 조절하였다.

실험에 사용된 성형재료는 각기 유연학적 특성이 다른 LDPE, ABS, 그리고, PA6,6 총 3개의 수지를 선정하였다. LDPE는 Hanhwa사의 LDPE-737, ABS는 LG Chemical사의 HI-121, 그리고 PA6,6는 DuPont사의 ZYTEL-101F를 사용하였다. 이 3가지 수지에 대해 각 성형온도에 대하여 전단율에 따른 점도의 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. ABS의 경우 전단율이 발전함에 따라 전단박화 현상이 바로 나타나고, PA6,6의 경우, 전단율이 충분히 발전해야 만이 전단박화 현상이 나타나며, LDPE는 ABS와 PA6,6의 중간 형태를 보이고 있다. 또한 전단율이 발전함에 따라 점도가 감소되는 기울기가 PA6,6에 비해 LDPE와 ABS가 급하다는 것을 알 수 있다.

각 수지별 충전시간을 큰 제품 측 캐비티와 작은

제품 측 캐비티를 구분하여 측정된 결과, LDPE의 경우 가변러너 조절핀이 3.5회, ABS는 3회, 그리고 PA6,6는 2회 회전하였을 경우에 충전밸런스를 이루었다[4]. 즉, PA6,6의 경우, 가변러너 단면적 변화에 매우 민감하다는 것을 알 수 있었다.

## 3. 3D 사출성형 해석결과

본 연구에서는 수지별로 사출성형 해석을 진행한 후, 충전과정중의 압력과 온도를 시간에 따라 도출하였다. 압력은 수지주입구와 가변러너 앞뒤에서, 온도는 단면에서의 평균값을 계산하였다.

수지가 ABS일 때, 가변러너 조절핀의 회전수에 따라 시간에 따른 가변러너 뒤쪽 단면에서의 평균 온도를 Fig. 3에 나타내었다. 이 결과로 미루어 볼 때, 가변러너 조절핀의 회전수에 상관없이 시간에 따라 평균온도가 상승하는 형태를 보이고 있지만 그 양이 무시할 만큼 작고, 온도 변화가 최대 3도 이하의 작은 차이를 보이므로 본 연구에서 실험한 제품에 대해서는 전단가열(Shear heating)에 따른 점도변화 역시 작을 것으로 판단하였다.

수지주입구에서의 압력은 점도가 비교적 높은 ABS의 경우가 가장 높고, 상대적으로 점도가 낮은 PA6,6가 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 압력의 결과와 충전밸런스와의 관계를 이끌어내기는 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이 압력강하비(Pressure drop ratio)를 도입하였다 [3].

$$P_r = \frac{P_1 - P_2}{P_E - P_2} \quad (1)$$

$P_1$ 은 수지가 가변러너를 통과하기 전의 압력,  $P_2$ 는 가변러너를 통과한 후의 압력을 나타내며,  $P_E$ 는 수지주입구에서의 압력을 나타낸다. 즉, 압력강하비는 수지주입구에서 가변러너 뒤의 압력강하와 가변러너의 앞뒤 압력강하의 비이다. 일반적으로 충전과정 중에 압력은 계속해서 상승하지만, 일정한 위치 사이의 압력강하는 시간에 따라 큰 변화가 없으므로 본 연구에서는 압력강하비를 시간에 대한 평균값을 구하였다. 압력강하비는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 수지별로 가변러너에서의 압력강하를 가변러너 조절핀의 회전수에 따라 상대적으로 비교할 수

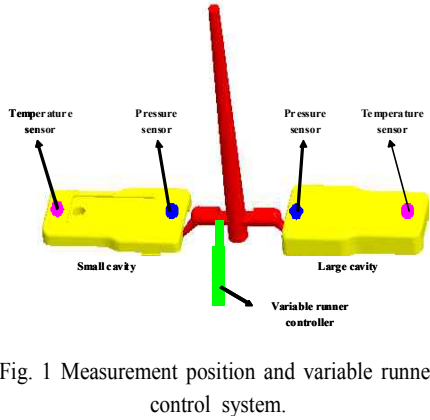


Fig. 1 Measurement position and variable runner control system.

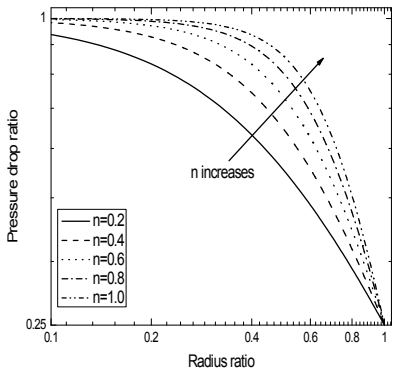


Fig. 5 Pressure drop ratio for various power index as a function of radius ratio.

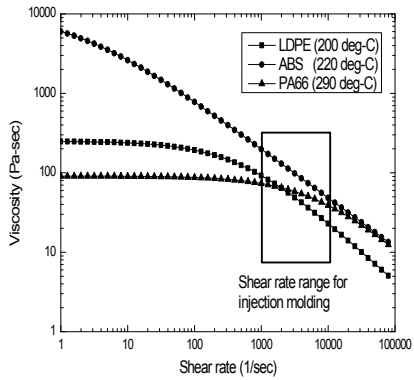


Fig. 2 Viscosity as a function of shear rate for LDPE/ABS/PA66.

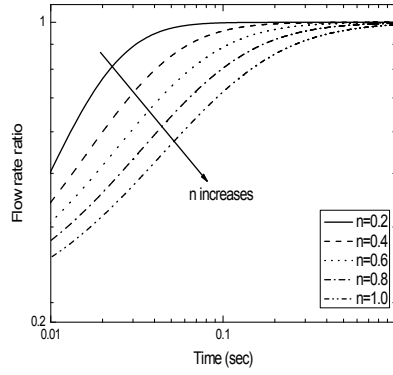


Fig. 6 Flow rate ratio for various power index as a function of radius ratio.

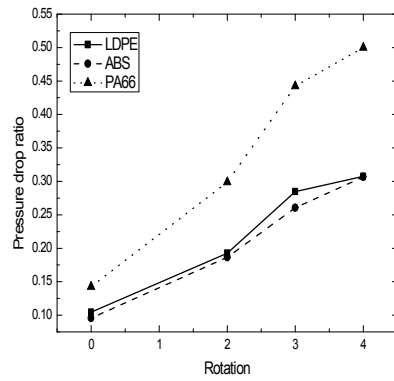


Fig. 3 Pressure drop ratio for LDPE/ABS/PA66 as a function of rotation of variable runner control pin.

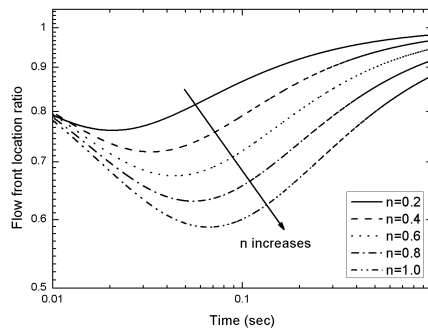


Fig. 7 Flow front location ratio for various power index as a function of radius ratio.

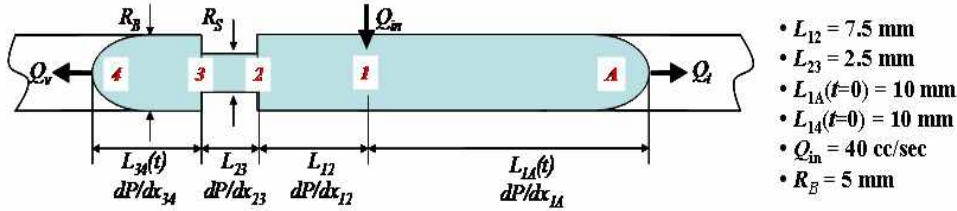


Fig. 4 Simple circular runner model.

있다. PA6,6의 경우, 가변러너 조절핀의 회전수가 증가하면서 상대적으로 압력강하비의 증가가 다른 수지에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 이는 가변러너 조절핀의 회전수에 따라 압력강하가 다른 수지에 비해 크기 때문에 그만큼 가변러너축의 유동저항이 크다고 할 수 있으며, 따라서 유동단면적이 감소할수록 유량이 급격히 감소하게 된다. 반면에 LDPE와 ABS는 회전수에 따라 압력강하비가 PA6,6에 비해 상대적으로 작기 때문에 유량의 변화 역시 작다고 할 수 있다.

#### 4. 수치해석 결과

3개 수지의 유변학적 특성에 의한 영향을 보다 자세히 알아보기 위해서 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 간단한 모델을 선정하여 수치적으로 압력강하가 유량과 유동선단위치에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하고자 하였다. 그림에서 수지는 1번 포인트로 유입되고 각각 좌측과 우측으로 유출되는 형태를 하고 있다. 특히 2번과 3번 포인트 사이에 위치한 러너의 직경을 변화시켜가면서 유동특성을 파악하였고, 러너는 무한히 길다고 가정하였으며, 비압축성, 등온과정으로 계산하였다. 러너시스템으로 유입되는 유량은 40 cc/sec,  $L_{12}$ 는 7.5 mm,  $L_{23}$ 는 2.5 mm, 그리고 러너의 직경은 5 mm로 설정하였다. 또한 최초 유동선단의 위치는 1번 포인트에서 각 방향으로 10 mm로 설정하였다.

수지의 점도는 다음식과 같이 멱수법칙모델(Power-law model)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta = m \dot{\gamma}^{1-n} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 견실도(consistency),  $n$ 은 멱수법칙지수,  $\eta$ 는 점도이며  $\dot{\gamma}$ 는 전단율이다. 일반적으로 사

출성형에서 전단율의 범위는 1,000 ~ 10,000이므로,

본 연구에서는 곡선적합(Curve fitting)을 통해 각 수지의 지수를 계산하였다. 그 결과, LDPE와 ABS는 0.39, PA6,6는 0.72라는 것을 알 수 있었다.

러너시스템 내의 유동은 Poiseuille 유동으로 근사할 수 있으며, 유량은 다음과 같이 정의된다.[5]

$$Q = \left( \frac{R}{2m} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{dP}{dx} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{n\pi R^3}{1+3n} \right) \quad (3)$$

본 연구에서는 가변러너 축과 일반러너 축의 유량의 비를 알아보기 위하여 유량비, 즉, 가변러너축의 유량과 일반러너축의 유량의 비를 다음과 같이 정의하였다.

$$Q_r = \frac{Q_v}{Q_t} = \left( \frac{L_{1A}}{L_{12} + L_{23}/(R_r)^{1+3n} + L_{34}} \right) \quad (4)$$

여기서  $R_r$ 은 가변러너의 반지름과 일반러너의 반지름 비이다. 유량비는  $L_{1A}$ 와  $L_{34}$ 가 시간에 따라 계속 변화하기 때문에 시간의 함수이다. 압력강하비는 다음 식과 같이 식(1)과 동일한 형태로 정의하였다.

$$P_r = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_3} = \frac{L_{23}}{L_{12}R_r^{1+3n} + L_{23}} \quad (5)$$

압력강하비는 유동선단의 위치에 상관없이 시간에 무관한 값이다. 유동선단의 위치는 식(6)과 같이 미분방정식을 수치적으로 적분하여 계산하였으며,

$$\frac{dL_{34}(t)}{dt} = \frac{Q_v}{\pi R_B^2}, \quad \frac{dL_{1A}(t)}{dt} = \frac{Q_t}{\pi R_B^2} \quad (6)$$

유동선단 위치비는 식(6)에서 수치적분한 값을 이용하여 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$L_r = \frac{L_{34}(t)}{L_{1A}(t)} \quad (7)$$

위 3개의 정의된 수식으로 반지름비와 먹수법칙 지수(n)을 변화시켜가면서 유동특성을 파악하였다. Fig. 5에 압력강하비를 먹수법칙지수에 따라 반지름비의 함수로 나타내었다. 먹수법칙지수가 커질수록 가변러너에서의 압력강하는 증가한다는 것을 알 수 있다. 가변러너에서의 압력강하가 증가할수록 가변러너를 제외한 일반러너 측의 압력강하와 일반러너 측의 압력강하는 큰 차이를 보이게 된다.

Fig. 6에 유량비를 먹수법칙지수에 따라 시간의 함수로 나타내었다. 유량비가 커진다는 것은 가변러너 측의 유량이 일반러너 측의 유량에 가깝게 된다는 것을 의미한다. 최초 유동이 시작될 때, 먹수법칙지수가 클수록 유량비가 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 먹수법칙지수가 클수록 가변러너에서의 압력강하가 증가하기 때문이다. 하지만 시간이 흐를수록 유량비는 점차 증가하게 되며, 일정시간에 도달하면, 유량비는 1이 된다. 즉, 최초 유동이 시작될 때에는 가변러너 측과 일반러너 측의 압력강하가 큰 차이를 보이지만, 시간이 지날수록 압력강하의 차이가 작아지게 되어 양측의 유량이 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 7에 유동선단 위치비를 먹수법칙지수에 따라 시간의 함수로 나타내었다. 유동선단 위치비가 증가한다는 것은 가변러너 측의 유동선단 길이가 일반러너 측의 유동선단에 가깝게 된다는 것을 의미한다. 최초 유동이 시작될 시에는 유동선단비가 시간이 경과함에 따라 점차 감소한다. 즉, 유동선단의 차이가 시간이 경과함에 따라 점점 커진다는 것을 의미한다. 그러나 어느 시점을 넘어서게 되면 다시 유동선단비가 점차 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 PA6,6와 같이 먹수법칙지수가 큰 수지일수록 시간이 경과함에 따라 유동선단 위치의 차이가 극심해지고, 유동선단비가 증가하게 되는 시점도 늦으며, 가변러너 측과 일반러너 측의 유동선단 위치가

거의 동등해지는 시점도 지연된다는 것을 알 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 각기 유변학적 특성이 다른 3개의 수지를 선별하여 기존에 실험한 가변러너시스템을 3차원 사출성형 해석과 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수지의 온도는 가변러너 조절핀의 회전수에 따른 러너의 단면적 변화에 따라 크게 변화하지 않는다.
- (2) 수지가 PA6,6와 같이 먹수법칙지수가 1.0에 가까와 선형 유체(Newtonian fluid)와 비슷한 거동을 보일수록 유량의 변화는 가변러너 조절핀의 회전수에 따른 러너의 단면적 변화에 민감한 형태를 보인다.

## 참고문헌

- [1] 정영득, 구본홍, 2005, 사출성형해석에 의한 제품 및 금형설계, 인터비전
- [2] J. Beaumont & J. Young, 1997, Mold filling imbalances in geometrically balanced runner systems, *Journal of Injection Molding Technology*, Vol.1, No.3, pp. 133~135.
- [3] J. P. Coulter, 2003, Cavity specific control of melt flow during injection molding processes, *Conference proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, D.C., Vol. 3.*
- [4] 박형필, 차백순, 강중근, 이병욱, 2006, 가변러너시스템에서 LDPE/ABS/PA66 수지의 충전균형, *한국소성가공학회지*, 제15권, 9호, pp. 641~647
- [5] F. A. Morrison, *Understanding Rheology*, Oxford University Press, (2001), New York, Oxford.