편측 분기형 러너시스템을 가진 사출금형에서 엘라스토머 TPV의 충전 불균형

한동엽† · 박태원 · 정영득

부경대학교 설계생산자동화공학 · 한국폴리텍Ⅶ 창원대학 · 부경대학교 기계공학부

(2008. 4. 28. 접수 / 2008. 6. 26. 채택)

Filling imbalance of elastomer TPVs in injection mold with unary branch type runner system

Yeop-Dong Han† · Tae-Won Park · Yeong-Deug Jeong

Pukyung national university · Tea sung precision · pukyung national university

(Received April 21, 2007 / Accepted June 27, 2007)

Abstract : Recently, the study for filling imbalance in thermoplastic polymer has gradually been increased. However, it is hard to find the researches for filling imbalance of thermoplastic elastomer(TPE). The experiment of filling imbalance was conducted for the three kinds of thermoplastic vulcanizes(TPVs) and PP polymer in the mold with geometrically balanced runner system(Unary Branch Type Runner System). In this experiment, the effects of the melt temperature, injection pressure and injection speed on the filling imbalance were investigated. There was also the imbalance in TPV injection molding process as well as in conventional injection molding with plastics. The tendency of filling imbalance in TPV injection molding specially decreased by taking place the hesitation of TPV melt.

Key Words : Filling imbalance, Thermoplastic elastiomer, TPV, Shear thinning, Frozen layer

1. 서 론

열가소성 엘라스토머(thermoplastic elastomer, TPE) 는 1960년대부터 개발되어 주로 신발류에 적용되어 왔으나, 1990년대 이후에는 자동차 부품과 고무의 대체품목으로서 그 용도의 변화가 일어나고 있다. 열가소성 엘라스토머는 일반고분자 플라스틱과 비교해 빠르게 수요가 증가하면서 다양한 제품으로 개발되고 있으며, 각종 고무제품들의 재생 및 스크랩의 재생이 가능하고 저비중의 생산성이 우수한 TPE 소재로의 전환이 이루어지고 있다. TPE의 특징 중 하나는 범용플라스틱과 같이 성형가공이 용이하다는 점이다. TPE 중의 하나인 열가소성 가황물(thermoplastic vulcanizate, TPV)은 열경화성 고무물성과 열가소성 플라스틱의 가공성을 갖춘 가장 유용한 엘라스토머 성질의 혼합물이다.[1, 2, 3]

최근 범용수지를 대상으로 한 충전 불균형에 관한 연구는 점진적으로 이루어지고 있으나, 고무와 엘라스토머 중에 최근 대단히 발전을 이루고 있는 TPE를 대상으로 한 충전 불균형에 관한 국내 연구결과는 극소수에 불과하다. 본 논문에서는 기하학적 균형을 갖춘 편측분기형 러너시스템[4]이 있는 다수 캐비티 금형에서의 충전 불균형 현상을 열가소성 엘라스토머 중 3가지 TPV 소재와 범용수지인 PP 소재를 대상으로 실험하여 그 결과에 대해 고찰하였다. 실험변수인 수지온도, 사출압력, 사출속도의 변화에 따라 충전 불균형에 미치는 효과에 대해 실험을 수행하였다. 또한, 충전과정에서 캐비티 단면적이 급격히 감소하는 지점에서 발생하는 유동정체 현상과 역충전 불균형 현상에 대해서도 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 수지 유동시 점성 변화

사출 공정중 금형내 수지 유동시 수지의 점성은 온도와 전단속도에 의해 직접적인 영향을 받게 된다. 전단박하(Shear thinning)[5]는 정상적인 성형 조건에서 온도와 전단속도가 커질 때 점성이 낮아지는 현상을 말한다. 사출성형 공정중 수지의 점도는 다음의 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 양측 분기형 러너

Fig. 1에서 보는 것과 같이 내측 캐비티와 외측 캐비티는 기하학적으로 균형을 이루고 있으나 실제 사출공정시 캐비티 간에 충전 불균형이 일어나게 된다. 이러한 현상은 러너의 분기가 2회 이상 발생되는 경우 러너 중심부의 전단율과 러너 벽면의 전단율 차이에 의해 발생된다고 알려져 있다. 러너 벽면 영역에서는 전단율이 가장 높아지게 되고, 수지의 비뉴턴(non-Newtonian)특성과 마찰열에 의해서 점도가 낮아지게 되어 수지의 유동은 러너 중심부보다 더욱 빨라지게 된다. 이런 상태로 1차 분기된 수지의 유동은 2차 러너의 좌측 및 우측의 흐름 특성을 변화시켜 캐비티간 충전 불균형을 일으키게 된다.[6, 7]

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

여기서, $\dot{\gamma}$: 전단율(shear rate)
τ^* : 경계구역에서의 전단응력
n : 비뉴턴 지수
η_o : 제로 전단율에서의 점도

2.3 편측 분기형 러너

Fig. 2와 같이 편측 분기형 러너(unary branch type runner)[8] 또한 양측 분기형 러너에서 일어나는 충전 불균형과 유사하게 러너부 전단율 차이에 의해 러너 벽면의 수지는 중심부의 수지보다 점도가 낮게 되어 유동성이 좋아지게 된다. 그러나 주러너에서 2차 러너로 방향전환이 이루어지는 콜드 슬러그 웰(cold slug well) 부분에서 러너 좌측벽면의 고온수지와 러너 중심부 저온수지간 혼합으로 2차 러너 외측에서는 러너 내측 수지의 유동보다 다소 느린 중간유동층(medial flow layer)이 발생한다고 판단된다. 그 결과 중간유동층에 의해 충전되는 외측 캐비티(outside cavity)에 비해 고온의 유동층을 접하게 되는 내측 캐비티(inner cavity)가 먼저 충전되는 효과를 가져오게 된다.

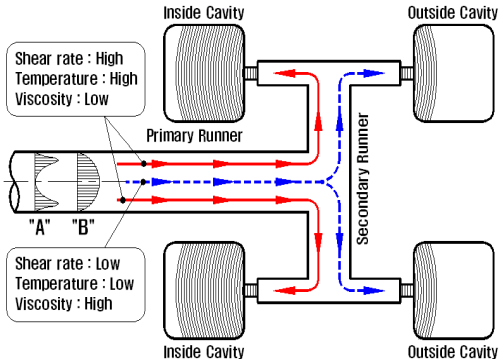

Fig. 1 The filling imbalance in binary branch type runner lay-out

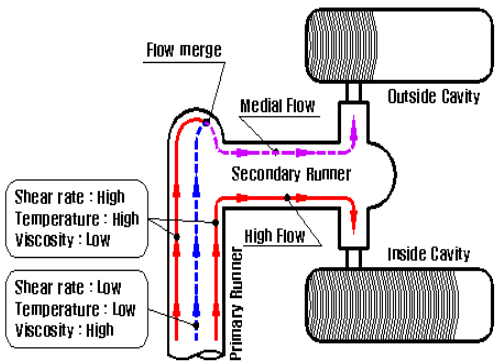

Fig. 2 The filling imbalance in unary branch type runner lay-out

2.4 사출성형 해석

Fig. 3은 사출성형 해석 프로그램인 MOLDFLOW™를 이용하여 기하학적 균형을 갖춘 캐비티를 대상으로 충전해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 성형해석상으로 4개의 캐비티가 동시에 충전됨으로써 충전 불균형 현상은 일어나지 않는 것으로 나타난다. 이는 MOLDFLOW를 포함한 대부분의 사출성형 프로그램이 러너시스템에 대해서 1차원 빔

메쉬(beam mesh)로 해석하기 때문이다.[9]

3. 실험 및 실험장치

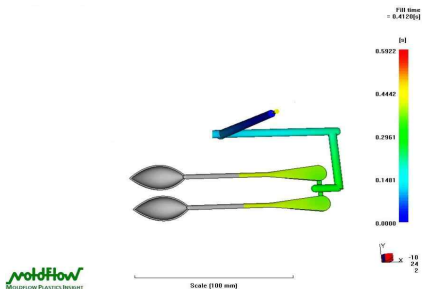

Fig. 3 The filling balances in flow analysis

3.1 실험재료

TPE에는 스티렌계(SBC), 올레핀계(TPO), 우레탄계(TPU), 아미드계(TPAE), 폴리에스테르계(TPEE) 등으로 구분되는데, 본 연구에서는 올레핀계 TPE 중의 하나인 TPV를 사용하였다. TPV는 폴리프로필렌(polypropylene; PP)과 에틸렌프로필렌고무(ethylene propylene rubber; EPDM)를 혼합하여 사용하고 있는 재료이다. 실험을 위해 Table 1과 같이 (주)화승 R&A에서 제조한 PP와 EPDM의 비율이 각기 다른 3종의 TPV를 사용하였으며, 일반 범용수지와 충전 특성을 비교하기 위해 GS Caltex사에서 제조한 PP 100%의 M540 범용수지를 사용하였다.

3.2 실험조건

본 연구에서는 성형조건의 변화에 따라 캐비티내 충전 불균형에 어떤 영향을 미치는가에 대해 실험하였다. 실험을 위한 성형변수는 수지온도, 사출압력, 사출속도로 하였다. 그 외의 사출조건은 사출시간 3초, 냉각시간 10초로 고정하였다. Table 2는 성형조건과 범위를 나타낸 것으로 각각의 조건을 4단계로 나누어 실험하였다.

3.3 실험장치

실험에 사용된 사출성형기는 Fig. 3과 같이 LG기계의 75ton IDE-75EN으로 직압식 수평형 타입이다. 실험용 금형은 Fig. 4와 같이 250×250×220㎜ 크기의 2캐비티 구조의 금형으로 스푼(spoon) 형상 캐비티를 가지면서 기하학적으로 균형을 갖춘 편측분기형 러너구조를 가진 2매 구성형 다수캐비티 금형으로 제작되었다.

Table 1 Experimental materials

Materials	EPDM(%)	PP(%)
L2K75BKS	71	29
B70I	78	22
B55I	86	14
M540	0	100

Table 2 Experimental conditions

Variables	Unit	Range
Melt temperature	℃	180, 185, 190, 195
Injection pressure	MPa	46, 50, 54, 58
Injection speed	㎤/sec	11, 16, 21, 26

Fig. 4 Injection molding machine used for experiment

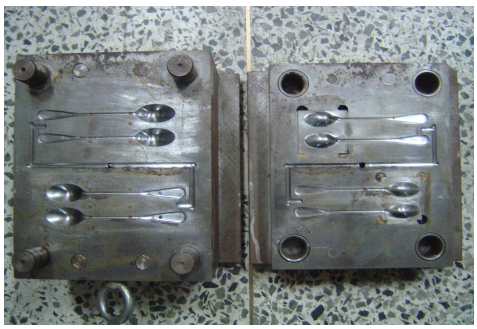

Fig. 5 Experimental mold

3.4 시편측정

실험조건에 따른 내측 캐비티와 외측 캐비티 사이의 충전 불균형을 측정하기 위한 충전 불균형도(Degree of Filling Imbalance; DFI)를 다음과 같이 정의하였다.

$$DFI = (\frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}}) \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서

W_{in} 내측 캐비티에서의 성형물 중량(g)

W_{out} 외측 캐비티에서의 성형물 중량(g)

DFI 값을 구하기 위해 숏트 샷(short shot) 성형을 실시하였고, Fig. 6은 완전 충전된 시편으로 보여주고 있으며, 내측 캐비티와 외측 캐비티의 위치를 나타내고 있다.

Fig. 6 Experimental specimen

4. 실험결과 및 고찰

TPV수지의 실험은 수지온도, 사출압력, 사출속도 3가지 성형변수를 4단계로 변화를 주어 실시하였다. 수지온도는 180℃에서 195℃까지 5℃ 씩, 사출압력은 46MPa에서 58MPa까지 4MPa 씩 변화를 주었고, 사출속도는 11㎤/sec에서 26㎤/sec까지 5㎤/sec 씩 변화를 주었다.

4.1 성형조건에 따른 충전 불균형(DFI)

Fig. 7은 수지온도에 따른 DFI 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 수지온도가 180℃ 일때 DFI 값은 PP 72%, L2K75BKS 65%, B70I 28%, B55I 21% 순으로 크게 나타났다. 이후 수지온도 195℃까지 비례적으로 감소하였다.

Fig. 8은 사출압력에 따른 DFI 값의 변화를 나타낸 그래프로 Fig. 7과 비슷한 결과를 나타내었다. 사출압력이 46MPa일때 DFI 값은 PP 77%, L2K75BKS 73%, B70I 34%, B55I 31% 순으로 크게 나타났고, 사출압력 58MPa까지 비례적으로 감소하였다.

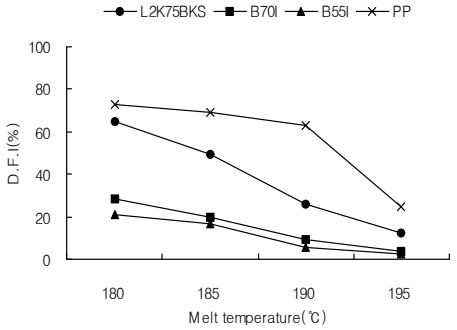

Fig. 7 DFI according to melt temperature

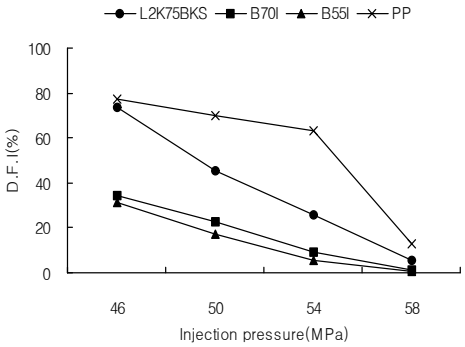

Fig. 8 DFI according to injection pressure

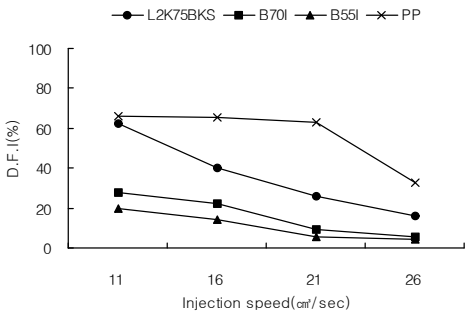

Fig. 9 DFI according to injection speed

Fig. 9는 사출속도에 따른 DFI 값의 변화를 나타낸 그래프로 수지온도 및 사출압력의 변화와 비슷한 결과를 나타내었다. 사출속도 11㎤/sec일때 DFI 값은 PP 66%, L2K75BKS 62%, B70I 27%, B55I 19% 순으로 크게 나타났고, 사출속도 26㎤/sec까지 비례적으로 감소하였다. 결과적으로 Fig. 7 , Fig. 8 , Fig. 9 그래프 기울기를 비교해 볼 때 DFI 값에 영향을 주는 인자는 사출압력, 수지온도, 사출속도의 순서로 나타남을 알 수 있다.

또한, EPDM의 함량(0~86%)에 따라 그래프의 기울기가 일정한 변화를 보였고, EPDM 함량이 많을수록 DFI 값은 B55I, B70I, L2K75BKS, PP수지의 순으로 작게 나타났다. 이러한 결과는 PP보다 EPDM의 유동성이 더 좋으므로 수지온도 상승시 EPDM이 증가 할수록 DFI 값을 더 많이 감소시킨다고 생각한다.

4.2 사출성형중 유동정체

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 그래프에서 충전이 진행됨에 따라 공통적으로 기울기가 감소되었고, 이후의 충전상태를 알아보기 위해 충전완료 단계까지 진행시킨 결과 일정단계에서 DFI가 음(-)의 값을 가지는 역충전 불균형 현상이 나타났다. 이러한 결과는 내측 캐비티보다 외측 캐비티의 충전율이 높은 것을 의미하며, 기존에 거론된 이론과는 일치하지 않는다. 이런 현상은 유동 수지의 정체현상(hesitation)으로 인한 결과로 예측할 수 있다. Fig. 10의 (a)와 같이 러너부의 전단박하에 의한 비뉴턴 특성으로 내측 캐비티 입구의 전단부에 먼저 수지의 충전이 이루어지지만 면적이 급격히 줄어드는 내측 캐비티의 목(neck)부위 지점에서 수지의 유동정체 현상을 일으켜 수지의 체류시간이 길어지게 된다. 이것은 국부적인 유동저항을 증가시켜 유동이 일시적으로 정지되는 현상을 가져오게 될 것이다. 유동정체 구간에서는 점도가 감소되어 비뉴턴 유체의 전단박하(shear thinning) 특성을 상실할 뿐만 아니라 마찰열 감소로 인한 수지온도의 감소를 초래하게 된다. 유동정체는 고화층(frozen layer)의 급속한 증가를 발생시켜 부분적인 유동저항을 일으킬 것이다. 이러한 사실로 볼 때 기하학적으로 균형을 가진 내측 및 외측 캐비티의 목부위를 통과하기 위한 용융수지의 임의의 초기압력은 같으나 내측 캐비티 목단부의 유동정체 현상으로 외측 캐비티 목단부 보다 외측 캐비티 목단부가 더 큰 압력을 필요로 하게 된다. 따라서 수지의 충전이 진행되면서 Fig. 9의 (c)와 같이 유동정체의 영향을 받지 않는 외측 캐비티가 먼저 충전되는 효과를 가진다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 편측 분기형 러너시스템을 갖는 사출금형에서 엘라스토머 TPV 수지와 PP 수지의 충전 불균형을 알아보기 위한 실험적 연구로서 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

1. TPV 및 PP 수지에서 충전 불균형에 영향을 미치는 인자는 사출압력, 수지온도, 사출속도 순으로 나타났다. 그러나, PP수지는 각 조건에서 전이점(transition point)이 존재 하였다.
2. TPV 수지에서 EPDM 함량이 클수록 균형충전의 정도가 향상된다.
3. 캐비티 내부에서 수지의 유동정체가 일어날 수 있는 경우에는 유동선단이 유동정체부 이전까지에만 충전 불균형을 고려해야 한다.

참고문헌

1. Kang, J.S., Seo, H.S., “TPE of characteristic and tread of development”, Journal of the Rubber Society of Korea, Vol. 5, No. 1, pp. 16-30, 2004.
2. Do, I.H., Kim, B.K., “Thermoplastic Vulcanizate”, Journal of the Rubber Society of Korea, Vol. 29, No. 1, pp. 48-49, 1994.
3. Lee, S.J., Lee, K.J., “TPV of characteristic and application”, Journal of the Rubber Society of Korea, Vol. 29, No. 4, pp. 305-308, 1994.
4. Jeong, Y.D., Park, T.W., Kong, H.P., “Easy mold design for plastic injection molding”, INTERVISION, pp. 224-227, 2003.
5. John. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman

"Successful Injection Molding", HANSER, pp. 58, 63, 71, 2002.
6. John. P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman "Successful Injection Molding", HANSER, pp. 58, 63, 71, 2002.
7. Patrick Auell, Michael Bailey "Effect Thermoplastic Material Properties on Mold Filling Imbalances", ANTEC, pp. 3495-3499, 2002.
8. Kang, C.M., “Effect of Processing Conditions on the Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Mold", Department of Mechanical Engineering Graduate School of Pukyong National University, pp. 31-34, 2005.
9. Je, D.K., “A Study on the Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds," Department of Mechanical Engineering Graduate School of Pukyong National University, pp. 34, 73, 82, 2006.