

핫러너 금형에서 다수 캐비티 사이에 발생하는 충전불균형에 관한 연구

한성렬**, 강철민**, 한규택*, 정영득#

A Study on the Filling Imbalances between Multi-Cavity in Hot-Runner Mold

Seong Ryeol Han**, Chul Min Kang**, Kyu Taek Han* and Yeong Deug Jeong #

ABSTRACT

Recently plastic parts are molded for the purpose of mass production in multi-cavity system. Therefore, designer is usually designing mold that has geometrically balanced runner lay-out for filling balance at each cavity. Although, mold is manufactured with geometrically balanced runner lay-out, there are actually filling imbalances in the cavities. These filling imbalances phenomenon are caused by complicated interaction between melt and mold. In this study, based on previous studies for filling imbalances in cold-runner mold, filling imbalances in hot-runner mold were investigated by CAE and injection molding experiments. ABS and PMMA as amorphous polymer, PA as crystalline polymer were used to compare the filling imbalances. There were different results of CAE and experiment. The filling imbalances decreased as injection rate increased without regard to kind of resins and were lower than the one of cold-runner.

Key Words : Filling imbalance(충전불균형), Multi-cavity Hot-runner(핫러너), Cold-runner(콜드러너), Amorphous polymer(비결정성 수지), Crystalline polymer(결정성 수지)

1. 서론

플라스틱 사출성형은 한번의 가공으로 후 가공이 필요치 않는 완제품을 대량으로 생산할 수 있는 장점을 가진 성형방법 중의 하나이다. 이렇듯 제품의 대량 생산을 위해서는 금형상에 다수 캐비티(multi-cavity) 시스템을 채택하여 성형하고 있다. 다수 캐비티 시스템을 적용할 때 설계자는 모든 캐비티에 동일한 충전을 발생시키기 위해서 기하

학적으로 균형잡힌 러너 시스템을 설계한다.

그러나 균형잡힌 러너시스템을 갖는 금형으로 실제 사출성형을 해보면 의도한 것과는 다르게 캐비티에 충전불균형이 이루어 지는 것을 볼 수 있다. 충전불균형 상태에서 성형 된 제품은 그 형태는 동일할 지라도 치수정밀도(dimension accuracy), 잔류응력(residual stress), 기계적 강도(mechanical strength) 등이 서로 다른 제품이 되며, 제품 불량 의 원인이 된다. 이러한 충전불균형 현상은 사출

*** 접수일: 2005년 4월 19일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

** 부경대학교 기계공학부 대학원

* 부경대학교 기계공학부

교신저자: 부경대학교 기계공학부

E-mail ydjung@pknu.ac.kr Tel. (051) 620-1534

성형시 러너를 흐르는 용융수지가 지닌 유동특성에 의해서 발생하는 현상으로 알려져 있다. 특히, 수지의 불균형충전은 사출성형시 수지와 금형의 상호작용에서 오는 여러 요인이 복합적으로 작용하여 생기는 현상이다. 이러한 현상에 대하여 처음으로 연구가 시작된 것은 1997년으로 Beaumont와 Young¹에 의한 것이 최초라 할 수 있다. 그들은 캐비티의 충전불균형은 수지가 유동하면서 금형의 러너내에서 일어나는 전단에 기인한 점도변화와 전단가열에서 오는 수지유동의 근원적인 문제로 규정하였다. 또한, Beaumont와 Boell²은 이러한 불균형 충전은 기하학적으로 균형 잡힌 콜드러너(cold-runner) 금형에서 뿐만 아니라 핫러너(hot-runner) 금형에서도 발생한다고 하였다. 그리고, 국내에서는 본 저자들의 연구^{3,4,5}에서 충전불균형에 대한 구체적인 실험연구와 그것을 방지하기 위한 금형구조 등에 관한 연구결과를 볼 수 있다.

본 연구에서는 저자들의 콜드 러너 금형과 3매 구성 금형에서의 충전불균형 연구결과들을 바탕으로 핫러너 금형에서 발생하는 충전불균형 현상에 대하여 고찰하였다. 연구를 위하여 사용된 수지는 충전불균형 정도가 가장 심하게 나타나는 비결정성 수지 중 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)와 PMMA(Poly Methyl Meta Acrylate)를 사용하였으며, 결정성 수지로서는 PA(Polyamid)를 대상으로 하여 비교실험하였다. 그리고 실제 성형실험에 앞서 핫러너 금형에서의 충전유동에 대한 특성을 알아보기 위하여 유동 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 충전불균형의 이론적 배경

2.1 수지 유동시 점도변화

플라스틱 수지는 용융상태로 러너내를 유동하게 되면 수지온도와 금형의 러너벽면과의 사이에 발생하는 전단율에 따라 점도가 변하게 되는데, 일반적인 성형에서는 수지온도와 전단율이 커지면 수지의 점성이 낮아지는 전단 감소(shear thinning)현상이 나타난다. 사출성형시 수지점도는 식(1)과 같은 Bird-Carreau 점도 모델을 이용하여 나타낼 수 있다.²

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

여기서, η : 점도
 η_{∞} : 뉴턴점도의 상한치
 $\dot{\gamma}$: 전단율(shear rate)
 n : 멱함수 지수
 η_0 : 제로 전단율에서의 점도
 λ : 시정수

또한, 제로 전단율에서의 점도 η_0 는 온도와 압력의 함수로써 아래와 같이 나타낼 수 있다.⁵

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

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

$$A_2 = A_2 + D_3 p$$

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

일반적으로 용융수지는 온도가 상승할수록 점도가 감소하는데 점도가 감소할수록 충전이 더 빠르게 일어난다. 따라서, 수지의 충전불균형에 영향을 미치는 점도에 대한 수지의 온도 민감도(temperature sensitivity) T_b 는 (4)식과 같은 WLF(Williams-Landel-Ferry)식을 사용하여 나타낼 수 있다.⁶ 여기서, T_b 값이 클수록 온도에 민감함을 뜻하므로 수지온도가 높을수록 캐비티 간의 충전 불균형 현상이 더욱 커지게 됨을 의미한다.

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

여기서, T^* : 점도가 무한대에 이르는 전이온도
 T : 성형온도
 A_1, A_2 : WLF 식에서의 전위계수
 D_1 : 제로 전단율에서의 기준 점도
 D_2 : 제로 게이지압에서의 유리전이온도

2.2 전단율 변화에 의한 충전불균형

Fig. 1에서 1차 러너(primary runner) 내에 흐르는 수지의 러너 중심부와 반경부의 유동상태는 불균일한 전단율 분포에 의해 다르게 나타난다. 러너 외경부의 고화층 아래를 따라 흐르는 수지의

전단율($\dot{\gamma}_r$)은 러너 중심부를 따라 흐르는 수지의 전단율($\dot{\gamma}_c$)보다는 크게 된다. 전단율이 크게 되면 식(1)에서 보는 것과 같이 점도는 감소하게 되므로 수지의 유동성을 증가시키는 요인이 된다. 또한 전단율이 커짐에 따라 상대적으로 전단 마찰열 또한 발생하게 되므로, 이는 러너벽면의 고화층 아래의 수지의 유동성을 더욱 크게 하여, 점도와 유동성에 불균형을 이루게 될 것이다. 따라서 러너의 외측반경부의 유로를 따라 흐르는 유동성이 좋은 수지에 의해 충전되어지는 캐비티 1은 중심부의 흐름에 의해 충전되는 캐비티 2보다 충전량이 커지게 된다.

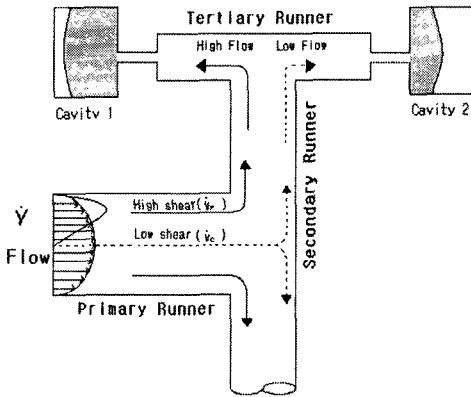


Fig. 1 Variation of shear rate in runner

콜드러너 금형에서 용융수지의 흐름 특성에 기인한 전단율 변화에 의해 발생하는 충전불균형 현상은 핫러너 금형에서는 상대적으로 그렇게 크게 발생하지 않는다. 이는 콜드 러너의 경우, 수지가 흐르는 동안 수지온도 보다 차가운 러너벽면에 의해 고화층이 형성되면서 러너 외경부와 중심부의 전단율 차이가 크게 나타나지만, 핫러너에서는 수지가 러너 내부에 항상 고화층이 생기지 않는 용융상태로 있으므로 수지 내부의 전단율 분포는 콜드 러너에 비해 적게 나타나기 때문이다. 또한 핫러너는 콜드 러너에 비해 큰 직경의 러너가 사용되므로, 더 큰 러너직경은 사출압력을 감소시킬 수 있으며, 이와 같은 사출압력의 감소는 전단율의 분포곡선의 기울기를 줄이게 되므로 핫러너에서는 충전불균형도가 콜드러너 보다는 작게 나타난다고

할 수 있다.⁷

Fig. 2는 본 연구에 사용된 핫러너와 캐비티의 배열을 간략하게 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 이론을 바탕으로 볼 때 더 많은 수지가 충전되는 캐비티는 스프루(sprue)와 가까운 1과 2가 될 것이다.

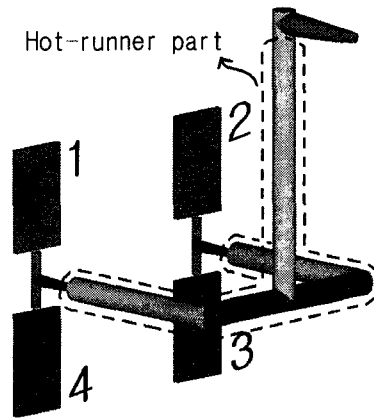


Fig. 2 Runner and cavity lay-out in experimental mold

3. 핫러너 금형의 충전 시뮬레이션

3.1 유동 시뮬레이션을 위한 성형조건

실제 성형실험에 앞서 범용 사출성형해석 소프트웨어인 Moldflow 5.0을 이용하여 유동성형 해석을 실시하여 충전불균형의 패턴을 미리 예측해 보았다. 성형해석에 사용한 대상 수지는 LG Chemical사의 ABS HI-121로 하였다. 성형해석에서 사용된 성형인자와 그에 해당하는 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Injection molding variables and value for filling analysis

Injection molding conditions	Unit	Value
Melt temperature	℃	240
Mold temperature	℃	60
Injection time	sec	1.8
Injection pressure	MPa	85
Cooling time	sec	12

3.2 유동 시뮬레이션 결과

Fig. 3 은 유동해석을 통하여 예측된 ABS 수지의 유동패턴 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3 은 사출시작 후 1.69 초 후의 캐비티 충전상태를 나타낸 것으로 모든 캐비티에서 고른 균형충전을 나타내고 있다.

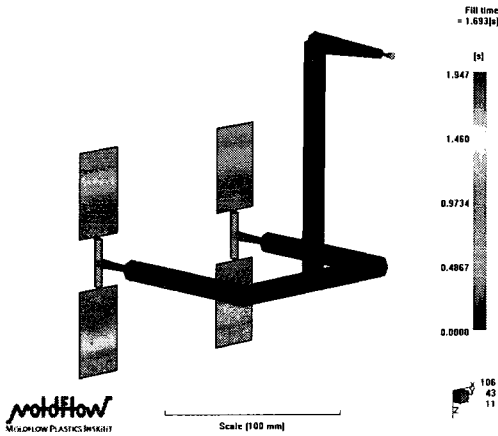


Fig. 3 Simulation result of ABS HI-121 at 1.69sec

이와 같은 유동해석결과는 실제 성형에서 일어나는 충전불균형 현상과는 많은 차이가 있다. 현재 사용되고 있는 사출성형해석 프로그램은 이와 같이 충전불균형을 예측하지 못하고 있는데, 이는 러너와 게이트에 대한 해석용 매쉬(mesh)가 1 차원 빔 요소(beam element)이기 때문이다. 1 차원 빔 요소는 수지의 러너 유동시 발생하는 전단율과 점도의 변화, 용융수지의 고화층과 유동수지 사이에서 발생하는 전단율로 인한 유동수지의 중심부와 러너 벽면을 따라 흐르는 외경부사이의 흐름속도 차이를 정의할 수 없기 때문이다.

4. 충전불균형 실험

충전불균형 실험에 사용된 금형은 Fig. 4 와 같이 크기가 440× 600× 400 이며, 핫러너(hot-runner)⁸ 와 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 배열이 이루어진 8 캐비티로 구성되어 있다. 성형 실험에 사용된 수지는 비결정성 수지 중 LG Chemical 사의 ABS HG-173 과 PMMA IH830 을 사용하였으며, 결정성 수지로서는 PA6(polyamid)로 모두 세 가지 수지를 사용하였다. 수지의 성형온도는 유동 시뮬레이션에

서 적용되었던 성형조건을 그대로 사용하였으며, 사용한 사출성형기는 LG 기계에서 제작한 140 톤 사출성형기(LGH140N)를 사용하였다.⁹ 그리고 Fig. 5 는 충전불균형 실험을 통하여 성형한 미충전 상태의 시편을 나타낸 것이다.

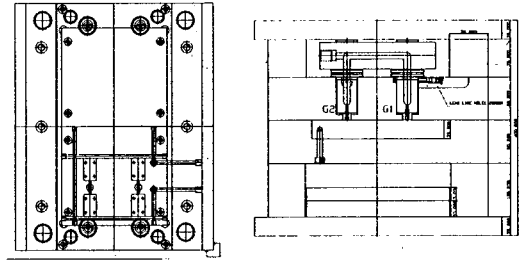


Fig. 4 Experimental mold

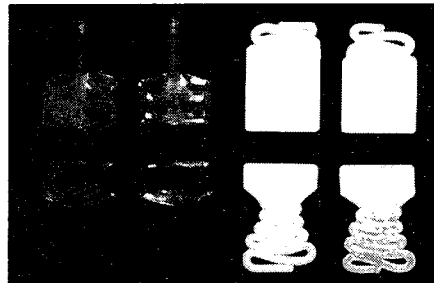


Fig. 5 Experimental specimens

핫러너 금형의 충전불균형 실험방법은 캐비티에 강제로 미성형(short shot)을 시켰을 때 성형품의 무게를 측정하여 (5)식에서 정의한 충전불균형도(degree of filling imbalance ; DFI)를 계산하였다. 충전불균형 실험에 고려한 성형인자는 사출속도와 성형온도로 정하였다. 사출속도는 충전불균형에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며,^{1,3,4,5} 사출성형기의 최대사출속도(maximum injection rate)의 20%에서 80%의 범위에서 20%씩 4 단계로 증가 시키면서 성형하였다. 또한, 성형온도는 220℃, 230℃, 240℃의 3 단계의 성형온도로 설정한 후 실험하였다. 각각의 성형 조건에 대하여 다섯 번씩 성형한 후 첫 번째와 마지막 성형품은 버리고 나머지 세 개의 성형품의 무게를 평균 내어 충전불균형도의 데이터로 정하였다.

충전불균형도(DFI)

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

여기서, W_{in} : 내측 캐비티에서의 성형품 중량
 W_{out} : 외측 캐비티에서의 성형품 중량

5. 실험결과

5.1 비결정성 수지의 충전불균형

5.1.1 ABS 수지의 충전불균형

Fig. 6 은 ABS 수지의 충전불균형도를 나타낸 그래프이다. 사출속도가 증가할수록 충전불균형도가 감소하는 경향을 보였다. 그리고 성형온도 또한 높을수록 충전불균형도가 감소하는 경향을 나타내었다. 성형조건 중 가장 빠른 사출속도에서는 오히려 Fig. 2 에 나타낸 스프루에서 먼쪽에 위치한 3, 4 번의 캐비티에 더 많은 양의 수지가 충전되는 현상도 나타났다. 이와 같은 결과는 콜드러너 금형에 대한 선행연구^{3,4,5}의 결과와 유사한 경향을 나타내었으며, 단지 그 데이터의 값만 다르게 나타났다.

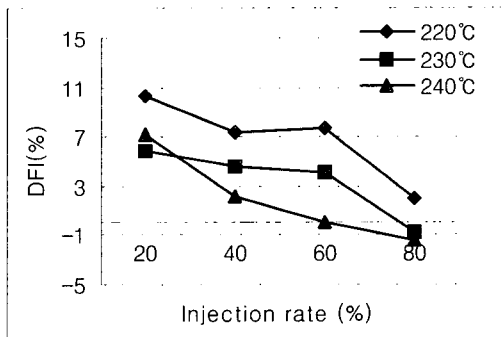


Fig. 6 DFI of ABS according to injection rate

5.1.2 PMMA 수지의 충전불균형

Fig. 7 은 PMMA 수지의 충전불균형도를 나타낸 그래프이다. ABS 수지와 같이 성형온도가 증가할수록 충전불균형이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 그리고 ABS 수지보다 충전불균형도의 변화 폭이 작았다. 그러나 전체적인 충전불균형도의 값은 ABS 보다 크게 나타났다. 이는 PMMA 수지의 온도민감

도(T_b)가 다른 수지와 비교하면 가장 높기 때문이라고 사료된다. 그러나 사출속도에 대하여 충전불균형도가 영향을 작게 받는 이유는 향후연구에서 다룰 과제로 할 것이다.

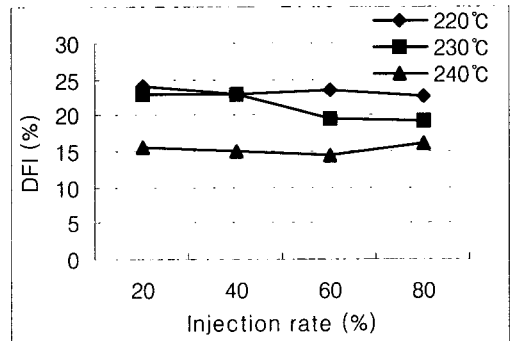


Fig. 7 DFI of PMMA according to injection rate

5.2 결정성 수지 PA 의 충전불균형

비결정성수지의 충전불균형도와 비교하기 위하여 결정성수지인 PA 를 대상으로 충전불균형실험을 하였다. Fig. 8 은 PA 수지의 충전불균형도를 나타낸 그래프로 비결정성수지인 ABS, PMMA 수지에 비하여 충전불균형도가 현저히 작게 나타났다. 그리고 각 성형온도별 수지의 충전불균형도의 폭도 아주 작게 나타났다. 이와 같은 현상은 PA 수지의 온도민감도가 ABS 및 PMMA 수지의 온도민감도 보다 낮은 값에서 오는 결과로 생각된다.⁷

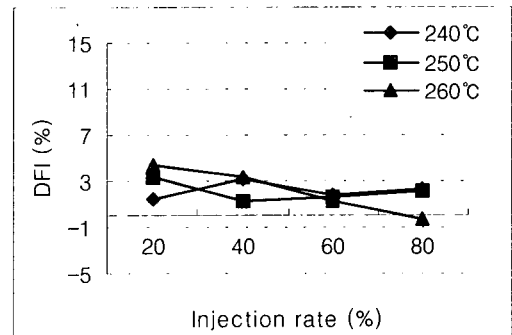


Fig. 8 DFI of PA according to injection rate

5.3 수지별 DFI 의 비교

이상의 세 가지 수지의 DFI 를 종합하여 Fig. 9 에 나타내었다. 수지 종류와는 상관없이 사출속도

가 증가할수록 DFI가 감소함을 알 수 있다.

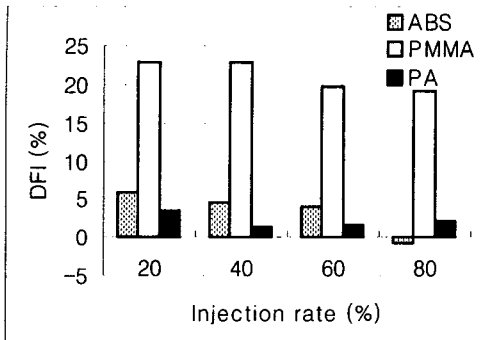


Fig. 9 Comparison of DFI in each resin

콜드러너 금형에서의 연구결과와 같이 핫러너 금형에서도 사출속도를 증가시키면 충전불균형도가 개선되는데 이는 사출속도를 빠르게 하면 수지의 온도 변화의 시간이 줄어들어 수지내부에서 발생하는 전단율의 변화도 감소되어 충전불균형도의 감소에 영향을 미친다고 사료된다. 그리고 DFI의 큰 값부터 나열하면 PMMA, ABS, PA 순으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 각각 수지의 온도 민감도의 크기와의 동일한 순서이다.⁷ 본 실험연구에 사용된 ABS 수지의 DFI 값을 앞선 콜드러너 금형에서의 충전불균형 연구³의 DFI와 비교하면 핫러너 금형에서의 DFI의 값이 약 10% 정도 낮은 것을 알 수 있었다.

6. 결론

기하학적으로 균형을 갖는 핫러너 금형에서 ABS, PMMA, PA 수지에 대하여 충전불균형 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기하학적으로 균형을 갖춘 핫러너 금형일지라도 용융수지가 가지는 자체의 유동 특성으로 충전불균형 현상이 발생하였다.
2. 충전불균형도는 온도민감도(T_b)의 값이 큰 순서인 PA, ABS, PMMA 순으로 증가하였다.
3. ABS 수지의 경우 사출속도가 20% 증가할수록 충전불균형도는 약 4% 씩 감소하였고, PMMA와 PA 수지의 경우 충전불균형도는 2% 미만의 감소를 나타내었다.

4. 실제 충전불균형 현상은 유동해석에서는 매쉬의 특성 때문에 균형충전으로 해석 되었다.
5. 핫러너 금형에서의 충전불균형도가 콜드러너 금형의 충전불균형도 보다 약 10% 정도 적게 발생하였다.

후 기

본 연구는 2005년도 부경대학교 BK21 사업의 일부 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Beaumont, J. P. and Young, J. H., "Mold filling imbalances in geometrically balanced runner systems," J. of injection molding technology, Vol. 1, No. 3, pp. 133-143, 1997.
2. Beaumont, J. P. and Boell, K., "Controlling balanced molding through new hot runner manifold designs," ANTEC 2001, pp. 932-936, 2001.
3. Han, K. T., Goo, T., Kim, B. T., Jeong, Y. D. and Han, S. R., "A study on the filling imbalance in a geometrically balance injection mold," J. of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 931-937, 2004.
4. Je, D. K. and Jeong, Y. D., "Filling imbalance in 3 plate type injection molds with multi-cavity," J. of the KSPE, Vol. 2, No. 6, pp. 117-121, 2004.
5. Kang, C. M. and Jeong, Y. D., "The filling imbalance in multi-cavity injection molds with unary branch type runner lay-out," Transactions of Material Processing, Vol. 13, No. 7, pp. 580-585, 2004.
6. Edited by A. I. Isayev, "Injection and compression molding fundamental," MARCEL DEKKER, INC., pp. 80-85, 1987.
7. Beaumont, J. P., Nagel, R. and Sherman, R., "Successful injection molding," Hanser, pp. 118-128, 2004.
8. Menger, G. and Mohren, P., "How to make injection molding," Hanser, pp. 208-245, 1993.
9. http://www.lsinjection.co.kr/kr/prod/sm3_n140_1.asp