

기하학적 균형을 갖춘 금형에서 발생하는 성형품의 충전 불균형에 관한 연구

한규택† · 구 양* · 김병택* · 정영득* · 한성렬**
(원고접수일 : 2004년 3월 3일, 심사완료일 : 2004년 8월 2일)

A Study on the Filling Imbalance in a Geometrically Balanced Injection Mold

Kyu-Taek Han† · Yang Goo* · Byung-Tak Kim* · Yeong-Deug Jeong* · Ryul-Seong Han**

Abstract : Simultaneous filling is a goal in plastic injection mold that has multi cavities. The moldings which have not been filled at the same time have undesired faults such as dimension inaccuracy, residual stress, low mechanical strength, etc. The best way to simultaneous fill is to be injected in a geometrically balanced runner system. In a general processing, however, in balanced runner system mold, filling imbalance would be observed in cavities. These phenomena result from molten polymer's characteristics and circumstances in balanced runner. In this study, the degree of filling imbalance (DFI) was defined for showing rate of filling imbalance in geometrically balanced injection mold that has 8 cavities. Before the main experiment, an injection molding simulation was conducted to know a pattern of filling imbalance with Moldflow software. There were somewhat differences between results of experiment and simulation about the filling imbalance. The reason for the difference was that the software have not concerned about a situation in a real flow channel. It was also investigated how the injection speed affected on filling imbalance in the experiment.

Key words : Injection molding(사출성형), Filling imbalance(불균형 충전), Degree of filling imbalance(충전 불균형도), Moldflow(몰드플로우), Injection speed(사출속도)

1. 서 론

플라스틱은 현재 광범위하게 다량으로 사용되고 있는 공업 재료 중의 하나이다. 과거에는 플라스

틱을 일용품 및 외장재로만 사용하였다. 그러나 산업기술이 발전하면서 플라스틱은 금속을 대체할 수 있는 재료로서 사용할 수 있다는 인식의 변화로 점차 기계요소용 재료로 사용되고 있다. 기

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : kthan@pknu.ac.kr, T : 051) 620-1535

* 부경대학교 기계공학부, E-mail : ydjung@pknu.ac.kr, kyang@pknu.ac.kr, btkim@pknu.ac.kr

** 부경대학교 기계공학부 대학원, E-mail : cozyhan@mail1.pknu.ac.kr

계요소용 재료로 사용됨에 따라 플라스틱제 부품의 정밀도를 요구하는 경우도 점차 증가되고 있다.

플라스틱 제품이 정밀한 부품으로 사용되기 위해서는 금형의 가공뿐만 아니라 사출성형 시 용융수지가 금형의 각 캐비티(cavity)에 균형적으로 충전되는 것이 요구된다. 만약, 캐비티에 균형적으로 충전되지 못하면 캐비티 내부의 오버 패킹(over packing)으로 기계적 강도(low mechanical strength)가 저하되고, 치수정밀도(dimension inaccuracy)가 부정확해지며, 잔류응력(residual stress)을 가지는 성형품이 생산된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 금형 설계 시 균형충전 되도록 기하학적으로 균형을 갖춘 러너(runner)로 설계^[1]하고 있다. 그러나 러너가 기하학적으로 균형을 갖추었다 하더라도 다수 캐비티를 가지는 금형으로 실제 성형을 실시하면, 성형품에 상당히 심한 불균형 충전(filling imbalance)이 발생하기도 한다^[2]. 이와 같은 실제 성형 시 발생하는 불균형 충전은 Beaumont^{[2]-[6]}에 의해서 처음으로 연구되기 시작하였다.

본 연구에서는 기하학적으로 균형 잡힌 러너 시스템을 갖춘 다수 캐비티 금형에서 발생하는 충전 불균형 현상에 대한 원인을 검토하였으며, 실제로 성형실험을 실시하기 전에 사출성형해석 소프트웨어를 이용하여 성형 시뮬레이션을 하여 다수 캐비티에 대한 충전 패턴을 미리 예측하여 보았다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 금형을 사용한 사출성형실험을 실시하였으며, 성형인자는 사출속도(injection speed)를 변경하면서 실험하였고, 채택한 성형 수지는 범용수지인 PP(polypropylene)와 ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene)이다.

2. 이론적 배경

2.1 수지 유동 시 점도 변화

플라스틱 용융수지는 유동 시 온도와 전단속도에 따라 점도가 변하게 된다. 정상적인 성형 조건에서는 온도가 상승하고 전단속도가 증가하면 점도는 감소하는 소위 전단 감소 (shear

thinning)현상을 나타낸다. 사출성형 시 수지의 점도는 다음의 (1)식과 같은 수정된 Cross 모델을 사용하여 나타낼 수 있다^[3].

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

여기서, η_0 : 제로 전단율에서의 점도

$\dot{\gamma}$: 전단율(shear rate)

τ^* : 경계역에서의 전단응력

n : 비뉴턴 지수

일반적으로 용융수지는 온도가 상승할수록 점도가 감소하는데 점도가 감소할수록 캐비티에 충전이 더 빠르게 일어난다. 따라서 실험에 사용된 PP와 ABS 수지의 충전 불균형도에 영향을 미치는 점도에 대한 각 수지별 온도 민감도(temperature sensibility) T_b 는 (2)식과 같은 WLF 식을 사용하여 나타낼 수 있다^[3]. T_b 값이 클수록 온도에 민감함으로 수지 온도가 높을수록 수지의 흐름이 빠르게 됨을 뜻한다.

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

여기서, T : 성형온도

A_1, A_2 : WLF식에서의 전위계수

D_1 : 제로 전단율에서의 기준 점도

D_2 : 제로 게이지압에서 유리전이온도

2.2 러너내의 전단율 변동에 의한 충전불균형

Fig. 1에서 1차 러너 내에 흐르는 수지의 유동 상태에서 러너 중심부에서의 전단율($\dot{\gamma}_c$)과 러너 반경부에서의 전단율($\dot{\gamma}_r$)은 상당한 차이가 있다. 이 전단율이 커지면 앞의 (1)식에서의 점도를 낮게 하므로 러너 반경부에서의 유동속도는 중심부에서의 유동속도보다 빨라져 유동의 불균형을 나타낸다. 따라서 Fig. 1에서 수지유동은 트랙효과(track effect)에 따라 내측 코스를 흐르는 유로에 접하는 캐비티에는 빨리 충전되게 된다^[10].

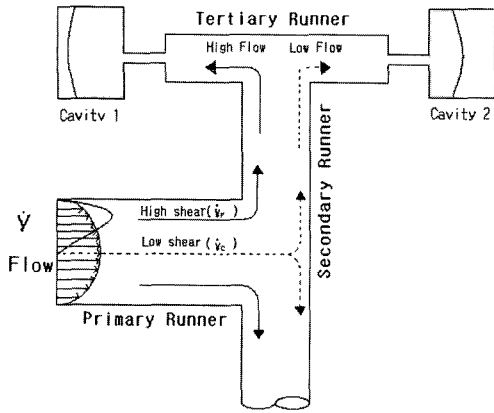


Fig. 1 Filling imbalance according to flow variation in runner

2매 구성형 금형에서 콜드러너 형식은 대개 Fig. 2에서처럼 (a)그룹과 같이 2차 분기가 없는 경우에는 흐름상의 균형충전을 가져올 수 있으며, (b)그룹과 같이 2차 분기가 있는 경우에는 트랙효과에 의해 어두운 부분이 먼저 충전하게 된다. 본 실험에서 사용한 금형은 Fig. 2의 (b)의 첫 번째에 해당하는 것이다.

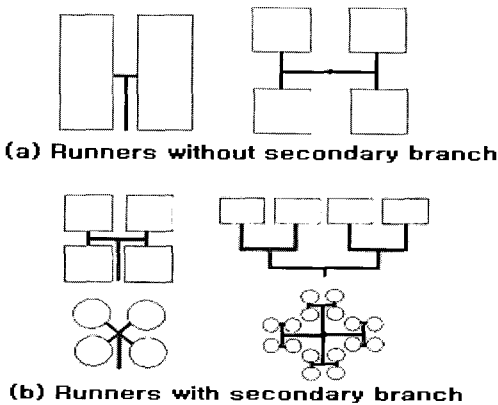


Fig. 2 Types of runner system

3. 사출성형 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 시험조건

실제 성형실험에 앞서 범용 사출성형해석 소프트웨어인 Moldflow MPI 4.1를 이용하여 성형해

석을 실시하여 충전 패턴을 예측하였다. 해석에 적용된 수지는 실험에서 사용될 재료와 동일하게 BASF사의 ABS HI-10와 LG Chemical의 PP M580을 대상으로 하였다. ABS와 PP를 대상재료로 선택한 이유는 기존의 연구^[11]에서 다른 수지에 비교하여 충전 불균형도의 차이가 큰 수지들이기 때문이다. 해석을 위한 성형온도는 각각의 수지에 대하여 동일하게 220℃로 하였고, 금형온도는 40℃로 하였다. 사출시간 1.5초, 보압시간 2초, 냉각시간 15초로 설정하였다.

3.2 시뮬레이션

Fig. 3은 사출 후 약 0.7초 후의 충전 상태를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에서 금형 충전시간은 ABS의 경우 1.059초, PP의 경우는 1.095초였다. 해석 결과를 살펴보면 두 성형품의 충전량은 다르지만 충전패턴은 모든 캐비티가 균형되게 충전됨을 알 수 있다.

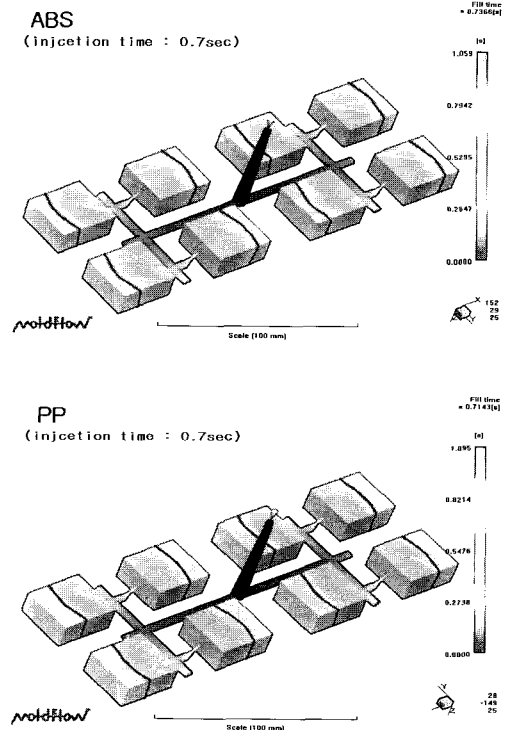


Fig. 3 Simulation results using Moldflow software

그러나 실제 성형을 하면 캐비티에 불균형 충전이 발생하는데 이와 같은 결과는 현재 상용되는 사출성형해석 프로그램의 한계인데, 그 원인은 금형의 러너와 게이트(gate)에 대한 메쉬(mesh)가 1차원 빔 요소(beam element)이기 때문이다. 즉, 이런 1차원 빔 요소는 실제 러너 내부를 흐르는 플라스틱 수지의 특성 중, 전단율(shear rate)과 점도(viscosity), 러너 벽면의 마찰력 등에 의하여 발생하는 러너 중심부와 러너 벽면을 따라 흐르는 바깥쪽의 외경부사이의 흐름속도 차이를 정의할 수 없기 때문이다. 따라서 사출성형 해석상에서 기하학적으로 균형이 잡힌 동일한 유동거리의 러너를 가진 금형에서의 캐비티는 불균형 충전현상이 없이 동시에 충전되는 결과를 나타내게 된다. 따라서 다수 캐비티의 불균형 충전은 실험결과에 따라 성형조건을 구하던지, 차후 3차원 시뮬레이션에서는 불균형 충전의 구현이 가능하리라 사료된다.

4. 사출성형실험

불균형 충전 실험에 사용된 금형은 Fig. 4와 같이 크기가 300×400×320이며, 2단 금형으로 터널 게이트(tunnel gate)^[12]를 가진, 레고 블럭을 생산하는 8캐비티 금형으로 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 형상을 갖추고 있다. 성형 실험에 사용된 수지는 ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene, HI-10, BASF)와 PP(polypropylene, M580, LG chemical)의 두 가지 수지를 사용하였다. 실험을 위한 수지의 용융온도는 두 수지에 모두 적용할 수 있는 온도 범위를 선택하여 220℃로 하였다. 금형의 온도는 40℃로 고정하였다. Fig. 5는 실험을 위하여 사용한 사출기는 LG기계의 140톤 사출성형기(LGH140N)를 나타낸 것이다.^[13]

실험방법은 미성형(short shot)과 완전성형(full shot)을 하여 생산된 제품의 무게를 측정하여 (3)식에 정의한 충전 불균형도(DFI)를 측정하였다. 기존의 연구 결과에서 다른 성형 변수는 영향도가 미미함을 알 수 있었기에^[10] 이번 실험에

사용된 성형 변수는 사출속도(injection speed)로 40~80% 까지 10%씩 4단계로 증가시켜 성형하였다. 각각의 성형 조건에 대하여 다섯번 성형한 후 첫 번째와 마지막 성형품을 버리고 나머지 세 개의 성형품의 무게를 평균 내어 충전 불균형도의 데이터로 삼았다.

충전 불균형도(DFI)

$$= \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \times 100(\%) \quad (3)$$

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

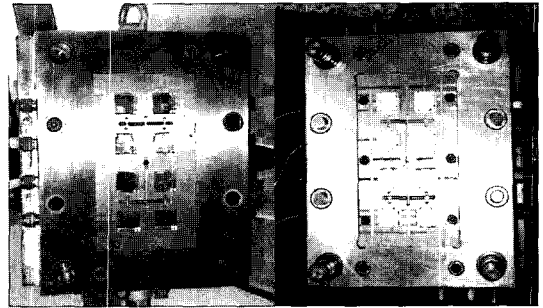


Fig. 4 The experiment mold

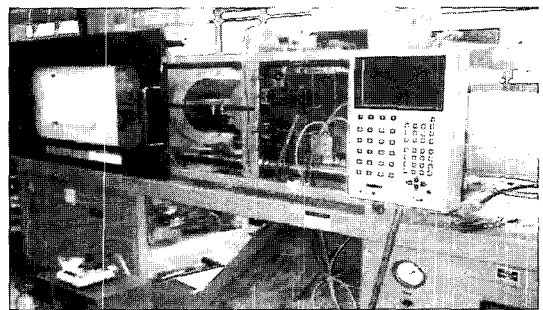


Fig. 5 Injection molding machine

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6는 사출속도 60%이며 0.7초 동안 사출한 후 미성형된 ABS제품을 나타낸 것이다. 그리고 동일한 사출조건에서 성형된 PP제품은 ABS와 유사한 경향을 보였다. 2.2절에서 설명한 것과

같이 유동속도가 빠른 쪽에 있는 2, 3, 6과 7 캐비티에서의 성형품이 더 많이 충전되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 7은 PP와 ABS를 대상으로 한 실험에서 측정한 DFI값을 나타낸 것으로서 미성형된 ABS수지의 DFI가 PP의 DFI 보다 약 2배 이상 크게 나타났으며, 이는 ABS의 온도민감도 T_b 값(10000K)이 PP의 T_b 값(5500K)보다 약 4500K가 더 값을 갖기 때문으로 설명할 수 있다⁽⁷⁾. 또한 DFI는 사출속도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며, 이런 현상은 사출 속도를 빠르게 하는 것이 수지의 온도변동의 기회를 적게 주어 충전 불균형도의 감소에 좋은 영향을 미친다고 생각할 수 있다. 이는 기존의 연구⁽⁸⁾와 잘 일치하였다. 이와 같은 현상은 충전 불균형의 차이는 게이트와 같이 아무리 좁은 곳이라 할지라도 유동수지가 가진 층(layer)이 그대로 유지되면서 캐비티에 충전되기 때문이다⁽⁹⁾.

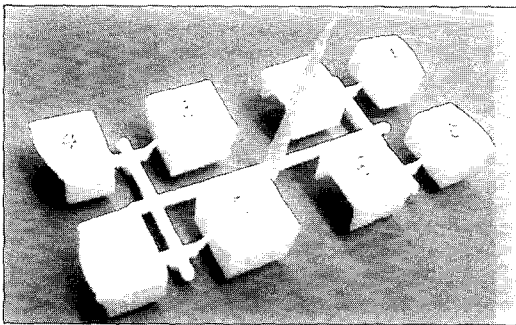


Fig. 6 A sample of injection molding (ABS)

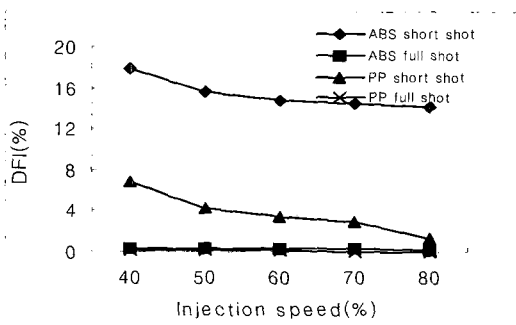


Fig. 7 PP and ABS molding's DFI

3.2절에서 기술한 성형 시뮬레이션과의 결과를

비교하면 실제 성형 실험에서의 미성형품 형상 (Fig. 6)과는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 실제 성형실험에서는 2, 3, 6과 7의 캐비티가 그 외의 캐비티 보다 더 많이 충전되어 불균형 충전이 발생하고 있으나, 사출성형 시뮬레이션의 결과에서는 동일한 시간에 모든 캐비티가 거의 비슷한 충전 패턴을 보이고 있다. 따라서 사출성형 시뮬레이션에 의한 성형 예측을 보다 정확하게 하기 위해서는 시뮬레이션 소프트웨어의 보완이 필요하다. 향후, 유동해석 소프트웨어 상에서의 위와 같은 차이를 감소시키기 위한 연구가 필요하다.

4. 결 론

기하학적으로 균형을 갖춘 러너를 가진 다수 캐비티 금형에서 PP와 ABS 수지를 대상으로 성형 실험하여 발생하는 충전 불균형 현상을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기하학적으로 균형 갖춘 러너를 가진 다수 캐비티 금형에서 성형을 하여도 용융수지 자체가 가진 여러 가지 유동특성으로 인하여 충전 불균형이 발생함을 알았다.
- 2) ABS의 온도 민감도(T_b)가 PP의 온도 민감도보다 약 2배로 크기 때문에 성형품의 충전 불균형이 더 많이 발생함을 알 수 있었다.
- 3) 다수 캐비티를 갖는 사출금형에서의 충전 불균형을 감소시키기 위한 성형조건으로 사출속도를 크게 함이 유효함을 알 수 있었다.

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환 경첨단에너지기계연구센터의 지원 (과제번호 : R12-2003-001-02005-0)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 정영득, 박태원, 김현필 공역, "플라스틱 성형을 위한 알기 쉬운 금형설계", 인터비전, pp. 224-227, 2003.

- [2] John P. Beaumont and Jack H. Young, "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol 1, No.3, pp. 133-143, 1997.
- [3] John P. Beaumont, Jack H. Young, and Matthew J. Jawoski, "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol 2, No. 2, pp. 47-58, 1998.
- [4] John P. Beaumont, John Ralston, and Adam Shuttle Worth, "Troubleshooting Cavity to Cavity Variations in Multi-Cavity Injection Mold", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol 3, No. 2, pp. 88-98, 1999.
- [5] John P. Beaumont and Kelvin Boell, "Controlled Balanced Molding through New Hot Runner Manifold Design", ANTEC 2001, pp. 932-936, 2001.
- [6] John P. Beaumont, "Revolutionizing Runner Design In Hot and Cold Runner Mold", ANTEC 2001, pp. 3680-3687, 2001.
- [7] Edited by Arraam I. Isayev, "Injection and Compression Molding Fundamental", Marcel Dekker, Inc. pp. 80-85, 1987.
- [8] Louis G. Reifschneider, "Documenting Flow Segregation in Geometrically Balanced Runner", ANTEC 2001, pp. 3356-3360, 2001.
- [9] John P. Beaumont, R. Nagel and R. Sherman, "Successful Injection Molding- Process, Design and Simulation", Hanser, Munich, pp. 30-34, 2003.
- [10] 제덕근, 정영득, "다수 캐비티를 갖는 3매 구 성형 사출성형에서의 충전 불균형", 한국정밀 공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 752-755, 2003.
- [11] D.K. Je and D.J. Jeong, "Filling Imbalance in 3 Plate Type Injection Molds with Multi-Cavity", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 117-121, 2004.
- [12] Georg Menges and Paul Mohren, "How to Make Injection Molding", Hanser, pp. 191-200, 1993.
- [13] LG전선 사출시스템사업부, "취급설명서 - LG사출성형기", 1999.

저 자 소 개



한규택 (韓圭澤)

1958년생. 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1984년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사), 1988년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2001년-2002년 미국 The University of Iowa 교환교수, 1988년-현재 부경대학교 기계공학부 교수



구 양 (具 佯)

1945년 생. 1973년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1981년 부산대학교 기계공학과 대학원(석사), 1990년 부산대학교 기계공학과 졸업(박사), 1979년-현재 부경대학교 기계공학부 교수.



김병탁 (金秉倬)

1960년 생. 1983년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사), 1988년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1992년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 2002년-2003년 미국 UNCC 교환교수, 1993년-현재 부경대학교 기계공학부 교수.



정영득 (鄭英得)

1945년 생. 1963년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1986년 부산대학교 산업대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1969년-1983년 LG전자 기계금형공장 기감보, 기계기술사(금형, 공정설계). 1983년-현재 부경대학교 기계공학부 교수



한성렬 (韓盛列)

1973년생. 1999년 부경대학교 정밀기계공학과 졸업(학사). 2001년 부경대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사). 2004년 부경대학교 기계공학과 대학원 박사과정 수료. 관심분야 : 사출금형 설계 및 CAE, 가스사출성형.