

균형충전을 위한 HR3P 금형 구조에서의 공정의 최적화

Optimization of Processing on Filling Balance of the HR3P Mold Structure

권윤숙¹, 정영득^{2,✉}
Youn Suk Kwon¹ and Yeong Deug Jeong^{2,✉}

¹ 부경대학교 기계공학과 (Graduated School of Department of Mechanical Engineering, Pukyung Univ.)

² 부경대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pukyung Univ.)

✉ ydjung@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6133

Manuscript received: 2008.7.3 / Revised: 2008.12.26 / Accepted: 2008.12.30

Almost all injection molds have multi-cavity runner system for mass production, which are designed with geometrically balanced runner system in order to accomplish filling balance between cavity to cavity during processing. However, even though geometrically balanced runner is used, filling imbalance has been observed. Filling imbalance could be decreased by modifying processing conditions such as injections rate, mold temperature, injection pressure, melt temperature that are related to shear, viscosity. In this study, a series of experiment was conducted to investigate filling imbalance variation when modifying runner layout and polymer and to determine which processing condition influences as the primary cause of filling imbalance in geometrically balanced runner system. The filling imbalance was decreased up to result range of $3 \leq DFI \leq 8(\%)$ by using a new runner system for balanced filling.

Key Words: DFI (충전불균형도), Shear Thinning (전단감소), HR3P (하터너 삼단 금형), Design of Experiments (실험계획법), SN ratio (신호 대 잡음 비)

1. 서론

다수 캐비티 사출금형에 발생하는 충전 불균형 현상은 각 캐비티에서 성형되는 성형품의 치수 정밀도, 외관품질, 강도 등에 좋지 않은 영향을 미친다. 산업현장에서는 각 캐비티에 발생하는 충전 불균형을 해소 하기 위해 게이트 크기를 조정하거나, 내측 및 외측 캐비티 중 한쪽 캐비티의 유로를 막아 일부 캐비티만을 사용하기도 한다. 그러나 게이트 크기를 조정하여 각 캐비티의 용융수지의 충전량을 동일하게 하더라도, 각 캐비티의 성형품에 작용하는 압력과 수지 밀도는 달라지게 되어 여전히 충전 불균형 현상은 일어나게 된다. 또한, 한쪽 캐비티의 유로를 막을 경우, 불균형이 일

어난 캐비티 측의 생산량은 절반으로 감소하게 되어 생산성에 손실을 가져온다.

다수 캐비티 사출금형의 충전불균형에 관련된 연구는 Beaumont¹ 에 의해 발표된 것을 시작으로, 최근까지 다수의 연구 결과가 발표되고 있다. 충전불균형 현상의 이론적 해석과 기초 실험에 관한 연구는 Kumar 와 Grald² 등이 충전공정을 수치 해석적인 방법을 통해 충전불균형 현상을 실제 실험 결과와 비교하였고, Young³ 은 사출공정조건 중 용융수지 전단율에 가장 큰 영향을 미치는 성형인자에 관한 논문을 발표하였다.

본 논문에서는 Fig. 1 과 같이 하나의 캐비티 내에 3 개의 게이트를 갖는 사출금형의 캐비티 내에서 발생하는 충전 불균형 현상의 원인에 대한 연

구로서 다점 게이트에서의 충전 불균형도(Degree of Filling Imbalance : DFI)을 알아보고 충전 불균형을 최소화 할 수 있는 금형 구조인 HR3P(hot runner three plates) 금형에서 어떤 성형조건이 충전 불균형에 가장 많은 영향을 미치는지 다구짜 실험 계획법으로 분석하고 이를 사출성형 공정조건 설정시 적용시키고자 한다.

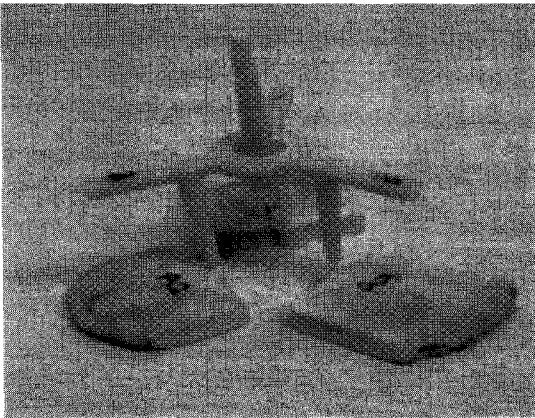


Fig. 1 Intra-cavity with 3 pin-point gate

동성이 좋아지게 되고, 유동성이 좋은 외경부의 흐름에 지배되어 충전되어진다.⁵ 스프루를 통해 들어온 용융수지는 러너를 따라 흐르게 되는데 이때 러너중심부에서 러너 벽면까지 전단물의 분포는 비대칭을 이루게 되어, 러너 벽면부의 온도가 러너 중심부의 온도보다 상대적으로 더 높게 된다. 이러한 현상으로 인해 다점 게이트를 가지는 사출 금형의 성형품에서도 Fig. 2 와 같이 캐비티 A 가 캐비티 B, C 보다 먼저 충전되어 충전 불균형이 일어나게 된다.

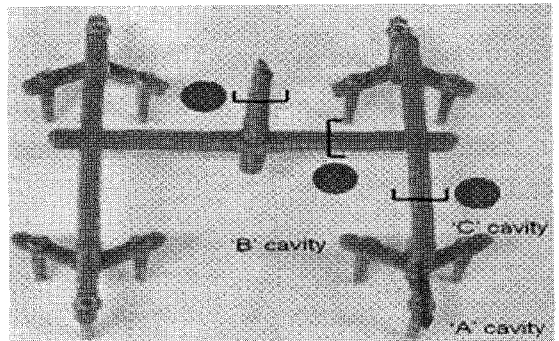


Fig. 2 The filling imbalance on the cold runner mold

2. 이론적 배경

2.1 수지 유동시 점성 변화

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

- 여기서, $\dot{\gamma}$: 전단율(shear rate)
- τ^* : 경계구역에서의 전단응력
- n : 비뉴턴 지수
- η_0 : 체로 전단율에서의 점도

성형공정 중 금형내 수지 유동시수지의 점성은 온도와 전단속도에 의해 직접적인 영향을 받게 된다. 전단감소(shear thinning)⁴는 정상적인 성형 조건에서 온도와 전단속도가 커질 때 점성이 낮아지는 현상을 말한다. 사출성형 공정중 수지에 관한 Cross 점도 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

충전 불균형은 Fig. 2 와 같이 러너의 외경부를 따라 흐르는 수지의 흐름은 중심부의 흐름보다 유

3. 실험 장치 및 조건

3.1 실험재료

실험에 적용된 수지는 PA46 으로 고내열성 폴리아미드 수지이다. PA46 수지는 주로 자동차 및 전기, 전자 산업에 널리 사용되고 있으며, 높은 결정화도와 빠른 결정화 속도는 사출구조의 대칭성에 기인한다. 이러한 특성은 다른 엔지니어링 플라스틱에 비해 내열성, 승온하의 기계적 강도, 내마모성 등이 우수하며, 공정시간 단축으로 인한 경제적인 공정 등 기술적인 면에서도 여러 가지 장점을 가진다.

Stanyl PA46 은 결정성 수지로 고내열성 폴리아미드 수지로 기계적 강도를 높이기 위해 보강 단섬유를 40% 첨가한 수지를 사용하였다.

3.2 실험용 HR3P(hot runner 3plates) 및 사출기

사출성형기는 형체력 220 톤 직압식 사출기를 사용하였다. 실험금형은 Fig. 3 과 같이 기하학적 균형을 갖춘 러너시스템에 12 개의 캐비티를 갖는 3매 구성형으로 금형의 크기는 520 x 420 mm이다.

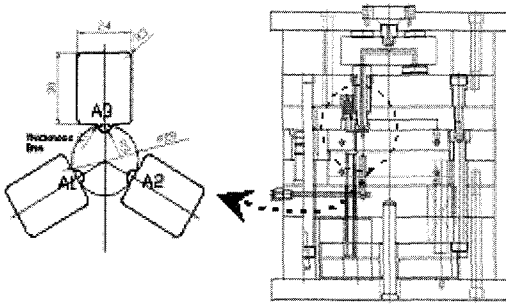


Fig. 3 A schematic drawing for experimented mold with hot runner

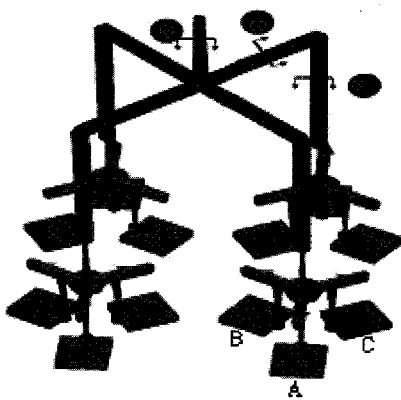


Fig. 4 The filling imbalance on the hot runner mold

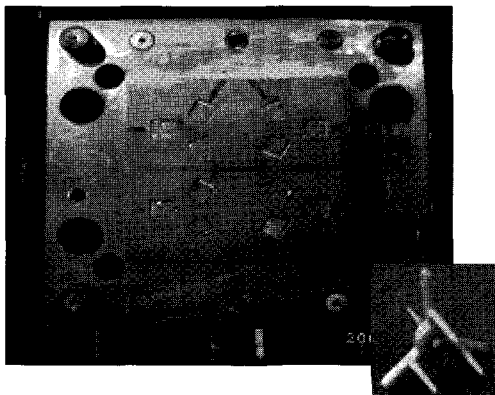


Fig. 5 Experimental mold

유동의 균형충전 실험을 위해, Fig. 2 의 H 형 콜드러너(cold runner) 3 단급형 시스템을 본 연구를 위해 Fig. 4 와 같이 X(cross)형 핫 러너(hot runner) 3 단급형 시스템으로 재설계하여 HR3P(hot-runner three plates)형 금형이라 호칭하기로 하였다. Fig. 5 는 제작된 HR3P 금형의 캐비티 사진이다. 새로운

금형 구조인 HR3P 금형을 적용하여 캐비티 내의 충전 불균형을 알아보기 위해 쇼트 샷(short shot) 성형을 실시하여, 각 시편의 중량(weight)을 측정하였다.

4. 성형해석 및 실험조건

4.1 성형해석

PA46 수지는 우수한 기계적 특성과 성형 유동성과 열적 성질이 우수하며, 강도를 보강하기 위해 단섬유(short glass fiber) 40%를 포함하고 있다. 사출시 섬유보강제로 인한 결정화도가 높아 빠른 시간에 고화 되는 특성으로 인해 사출시간과 사출압력을 예측하기 위해 시뮬레이션 소프트웨어인 Moldflow™를 이용하여 선정조건에 대하여 해석하였다. Fig. 6, Fig. 7 의 시뮬레이션 결과를 통해 사출시간을 1 초 일 때가 2 초일 때 보다 충전 불균형이 작게 나타나 섬유보강제가 함유된 수지를 사출 성형시에는 빠른 사출시간을 짧게 하는 것이 유동의 균형을 이룬다는 것을 예측할 수 있었다. 이리

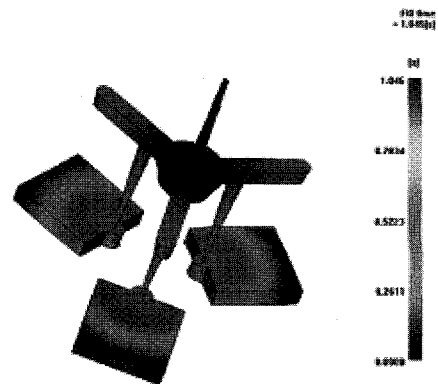


Fig. 6 The filling-time at 1sec for parts

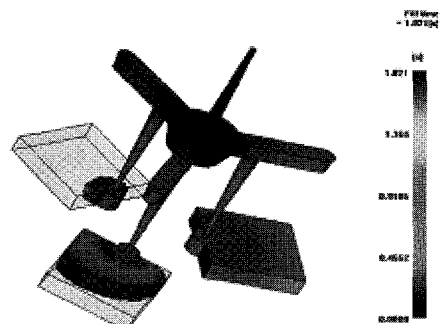


Fig. 7 The filling-time at 2sec for parts

한 해석 결과를 다구찌 실험계획의 인자로 사용하여 실제 실험의 성형범위의 한계를 설정하였다.

4.2 실험조건

본 연구에서는 주어진 조건에서 최적의 성형조건을 선정하기 위해 다구찌 실험계획법을 사용하였다. 품질특성치가 충전 불균형으로 충전 불균형의 값은 적으면 적을수록 좋으므로, 망소특성에 해당되며 SN 비는 식(2)에 의해서 계산된다.⁶⁻⁸

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

성형품의 품질에 대한 특성치에는 치수, 강도 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 시료의 DFI(Degree of Filling Imbalance)를 다구찌 실험의 데이터로 사용하였다. 실험 시편은 사출성형공정 3회 부터 2 개의 시편을 선정하여 중량(weight)을 측정하였고, 충전 불균형도를 측정하기 위해 식 (3)을 이용하였다. 또한, 측정 중량을 실험계획법의 SN 비를 구하기 위한 특성치로 하였다. 충전 불균형에 영향을 미치는 성형조건은 Table 1 과 같이 금형온도, 수지온도, 사출압력, 사출속도를 선정하였으며, 각 인자에 대한 수준(level)은 재료의 물성치를 바탕으로 요구되는 성형범위 한계 내에서 금형온도는 2 수준으로 하고, 수지온도, 사출압력, 사출속도는 각각 3 수준으로 정하였다. 성형조건들을 배치하기 위한 직교표는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 표로 선정하여 성형조건을 할당하였다.

$$DFI = \left(\frac{W_{large} - W_{average}}{W_{average}} \right) \times 100(\%) \quad (3)$$

W_{large} : 캐비티내에서 성형물 큰 중량(g)
 $W_{average}$: 캐비티내에서 성형물 평균 중량(g)

Table 1 Control factors and level

factors	level	unit	1	2	3
Mold temperature (A)	℃		70	80	
Melt temperature (B)	℃		300	310	320
Injection pressure (C)	MPa		65	72	80
Injection speed (D)	%		20	35	50

5. 분석 및 고찰

각 실험에서 SN 비에 대한 수준별 평균값과 기여량을 구한 결과를 Table 2 에서 나타내었으며, 이에 대한 요인 효과도는 Fig. 8 과 같다.

Fig. 7 에서 충전불균형도 작은 최적 공정은 A_2, B_1, C_2, D_3 즉, 금형온도 80℃ 수지온도 300℃ 사출압력 72MPa 사출속도 50% 임을 알 수 있다. 분산분석표에서 제어인자의 기여율을 고려해 볼 때 용융수지온도(B)가 가장 많은 영향을 미치고, 사출압력(C)의 영향은 작음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 가장 많은 영향을 미치는 제어인자인 수지온도(A)를 고정하고, 다른 인자들을 변화시켜 실제 사출성형 실험을 하였다.

Table 2 Analysis of variance of SN Ratio

Source	DF	SS	MS	F	P
A	1	2.477	2.477	2.27	0.163
B	2	36.101	18.051	16.56	0.001
C	2	0.633	0.316	0.29	0.745
D	2	1.657	0.829	0.76	0.493
Error	10	10.9	1.09		
Total	17				

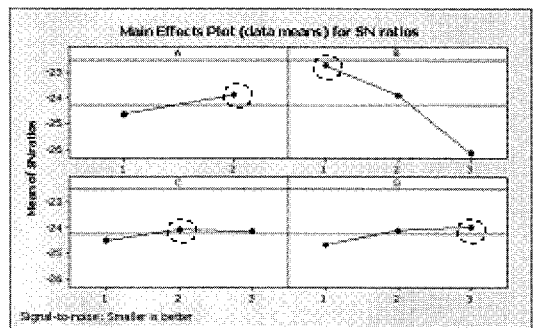


Fig. 8 Main effects plot for SN ratios

위의 재현성 실험을 위한 직교표는 $L_9(3^4)$ 을 적용하였으며, 실험결과 Table 3 과 같이 DFI 값의 범위가 $3 \leq DFI \leq 8(\%)$ 이내로 나타났다. 이러한 결과를 통해 기존의 H 형 콜드러너 금형보다 개선된 HR3P 금형에서 DFI 값이 50%까지 감소되는 것을 알 수 있다.

Table 3 Comparative DFI value

DFI of conventional mold	DFI of HR3P mold
6.61-12.96	3.85-8.22

8. Park, S. H., "Design and Analysis of Experiments," Minyoungsa, p. 423, 2002.

6. 결론

본 연구에서는 기하학적 균형을 갖춘 새로운 HR3P 금형에서 PA46/GF40 수지에 대한 충전 불균형에 대한 실험연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충전 불균형을 최소화 하기 위한 성형조건은 금형온도 80℃, 수지온도 300℃, 사출압력 72MPa, 사출속도 50%로 나타났다.

(2) HR3P 금형에서 사출성형된 시편의 DFI 값은 $3 \leq \text{DFI} \leq 8(\%)$ 이내로 나타났다.

(3) HR3P 금형의 적용결과 H 형 콜드러너를 갖춘 다점게이트 금형보다 DFI 값이 50%까지 감소하였다.

참고문헌

1. Beaumont, J. P., Young, J. H. and Jaworski, M. J., "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molding," Journal of Injection Molding Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 47-58, 1998.
2. Casaldi, H. E. and Michel, T., "Process Window as Effected by Shear Induced Flow Imbalance in Multi-cavity Molds," ANTEC 2001, pp. 3112-3115, 2001.
3. Young, J. H. and Beaumont, J. P., "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System," Journal of Injection Molding Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 133-134, 1997.
4. Beaumont, J. P., Nagel, R. and Sherman, R., "Successful Injection Molding," Hanser, pp. 58-71, 2002.
5. Han, D. Y. and Jeong, Y. D., "Filling Imbalance of Elastomer TPVs in Injection Mold with Unary Branch Type Runner System," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 47-52, 2008.
6. Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments," John Wiley & Sons, pp. 218-246, 2001.
7. Lee, S. H., "Engineering statistics data analysis by using Minitab," Eretec Inc., pp. 727-775, 2006.