

# 다구찌 방법을 이용한 폴리아미드 성형품의 충전 불균형에 관한 연구

한규택<sup>#</sup>, 정영득\*, 구 양\*, 김병탁\*, 김형제\*\*, 한성렬\*\*

## A Study on the Filling Imbalance of Polyamide Molding by Taguchi Method

Kyu-Taek Han<sup>#</sup>, Yeong-Deug Jeong\*, Yang Goo\*, Byung-Tak Kim\*, Hyung-Je Kim\*\*, Seong-Ryul Han\*\*

### ABSTRACT

Plastics is used to produce precise parts with an inclusion of a reinforcement material such as glass fiber or carbon fiber to improve the dimension accuracy. The plastic goods can be produced with inaccurate dimensions, low mechanical strength, or residual stress due to the over packing of cavity inside, if the filling balance of melt resin is not accomplished. To overcome this problem, it is necessary to design the runner system with the geometrical balance at the mold design stage. However, even if the balanced runner system is achieved, a severe filling imbalance is observed practically in a multi-cavity mold. In this study, experiments were performed with Taguchi method to achieve the filling balance in multi-cavity mold with a symmetric runner system, by the use of pure PA and PA with glass fiber 33%. The experimental results were investigated to understand the effect of related molding factors on the filling imbalance for two resins.

**Key Words :** Taguchi Method(다구찌 방법), Polyamide(폴리아미드), Glass Fiber(유리섬유), Short Shot(미성형), Filling Imbalance(충전 불균형)

### 1. 서 론

플라스틱 재료는 일상생활의 광범위한 분야에서 사용되고 있으며, 특히 우수한 강도와 탁월한 성형성 때문에 자동차, 선박, 항공 분야에서 금속을 대체할 수 있는 재료로서 사용되고 있다. 또한 산업기술이

고도화와 전문화되면서 기계용 재료로 사용되고 있는 플라스틱은 제품의 치수정밀도를 향상시키기 위해서 유리섬유, 탄소섬유 등과 같은 보강재를 첨가시켜 좀더 정밀한 부품을 만드는데 사용되고 있다. 보강재를 첨가하여 사용되는 수지로는 PA, PC, POM 등이 대표적으로 많이 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 플라스틱 제품은 사출 성형시 용융수지가 금형의 각 캐비티(cavity)에 균형적으로 충전되지 못하면 캐비티 내부의 오버 패킹(over packing)으로 부정확한 치수정밀도, 낮은 기계적 강도, 잔류응력을 가진 성형품이 생

# 교신저자 : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : kthan@pknu.ac.kr

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학부

산될 수 있기 때문에 금형 설계시 균형적인 충전이 되도록 기하학적으로 균형을 갖춘 러너(runner)를 설계하여 이러한 문제를 극복하고 있다. 그러나 러너가 기하학적으로 균형을 갖추었다 하더라도 실제 성형시 다수개 캐비티를 가진 금형에서는 매우 심한 충전 불균형(filling imbalance)이 발생하는 것을 관찰할 수 있다<sup>[2-3]</sup>.

따라서 본 연구에서는 기하학적으로 대칭 러너시스템을 가진 다수개 캐비티 금형에서 균형 충전을 얻기 위한 장치의 개발과 사출성형의 최적조건의 탐색과 목적으로 범용수지인 PA (polyamide)와 PA에 보강재인 G/F(glass fiber) 33%를 첨가한 수지를 대상으로 실험을 실시하였다. 그리고 실험의 체계화와 관련인자(factor)의 영향을 분석하기 위하여 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용하여 두 수지에 대한 실험결과를 검토하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1 전단 점도(shear viscosity)의 변화

플라스틱 용융수지의 점도는 전단속도에 따라서 증가 또는 감소하는 소위 비뉴턴(non-Newtonian) 현상을 보이는데, 일반적으로 정상적인 성형 조건에서는 전단속도와 온도가 커지면 점도가 낮아지는 전단감소(shear thinning) 거동을 나타낸다. 이러한 거동은 유동저항이 낮아지고, 금형 가열과 잔류응력의 원인으로 작용할 수 있다. 사출성형시 용융수지의 점도는 다음 식과 같은 Cross-WLF 모델을 사용하여 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

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

여기서,  $\eta_0$ 는 전단율 제로(Zero)에서의 점도,  $\dot{\gamma}$ 는 전단율,  $\tau^*$ 는 경계영역에서의 전단응력,  $n$ 는 비뉴턴 지수를 나타낸다.

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

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (3)$$

여기서,  $D_1$ 는 전단율이 없을 경우의 기준 점도,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 전위계수,  $T^*$ 는 압력에 의존하는 유리 전이온도(glass transition temperature),  $D_2$ 는 저압에서의 유리 전이온도,  $D_3$ 는  $T^*$ 가 압력에 의해서 변하는 정도를 나타내고 있다. 식 (1), (2), (3)에서 알 수 있듯이 수지의 유동시 점도는 전단율, 성형온도 및 압력에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

### 2.2 러너 내부의 전단율 변화에 의한 충전 불균형

Fig. 1에서 알 수 있듯이 1차 러너(primary runner) 내부에 흐르는 수지의 유동상태에서 러너 중심부에서의 전단율( $\dot{\gamma}_c$ )과 러너 반경부에서의 전단율( $\dot{\gamma}_r$ )는 상당한 차이가 있다. 또한 앞서 상술한 식(1)에서 전단율이 커지면 점도가 작아지게 되고 상대적으로 러너 반경부에서 전단 마찰열이 크게 발생하여 수지 온도가 높아짐으로 러너 중심부보다는 러너 반경부에서 유동속도가 더 빠르게 흐르는 요인이 된다. 따라서 수지유동은 트랙효과(track effect)에 따라 내측코스를 흐르는 유로에 접하는 캐비티가 더 빨리 충전된다<sup>[5]</sup>.

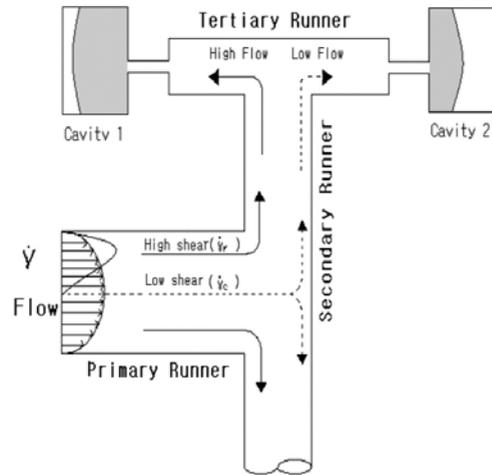


Fig. 1 Filling imbalance by shear rate variation in runners

이러한 요인들에 의해서 용융수지가 금형의 각 캐비티에 균형적으로 충전되지 못하는 현상이 나타나게 된다. 즉, 스프루에 가까운 캐비티에 먼저 충전되는 충전 불균형 현상이 발생된다.

### 2.3 다구찌 방법

다구찌 방법은 기존의 실험 계획법과는 달리 어떤 실험의 최적 조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 나타내었으며, 특성치의 산포가 가장 적은 실험 조건을 최적 조건으로 결정하였다. 특성치의 산포는 제어가 어려운 잡음인자에 의해 발생되며 SN(Signal & Noise)비에 의해 산포의 정도를 알 수 있다. SN비는 특성치의 성질에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>6)</sup>.

· 망목특성인 경우

$$SN = 10 \log \left( -\frac{(\bar{y})^2}{s^2} \right) \quad (4)$$

· 망소특성인 경우

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

· 망대특성인 경우

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

여기서,  $\bar{y}$ 는 데이터 평균,  $s$ 는 표준편차,  $y_i$ 는 실험에서 얻어진 데이터, 그리고  $n$ 은 실험 회수이다. 따라서 본 연구에서는 특성치가 작은 것을 목표로 하고 있기 때문에 망소특성을 사용하였다.

## 3. 사출성형실험

### 3.1 실험장치 및 재료

Fig. 2는 불균형 충전 실험에 사용된 금형으로서, 크기는 300×400×320이며, 2단 금형으로 터널 게이트(tunnel gate)를 가진 레고 블록을 생산하는 8 캐비티

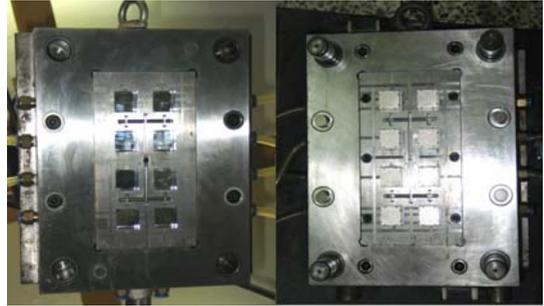


Fig. 2 Two plate molds

금형으로 기하학적으로 균형을 갖춘 러너 시스템으로 구성되어 있다. 성형실험에 사용된 사출기는 LG사의 140톤 사출성형기(LGH140N)를 사용하였다. 사용된 수지는 PA(8202B NP, BASF)와 PA에 보강제인 G/F(8233G NP, BASF) 33%가 첨가된 수지를 사용하여 실험하였다.

### 3.2 성형실험방법

본 실험에서는 성형품의 불균형 충전 경향을 파악하기 위하여 관련인자를 금형온도, 수지온도, 사출속도로 설정하였다. 각 인자의 적정한 수준은 5단계로 변화시켰으며, Table 1은 관련인자와 각각의 수준값을 나타낸 것이다. 사용된 인자 중에서 사출속도는 사출금형에서 최대 사출유량을 말하며, 실험에 사용된 사출기의 최대 사출유량은 206cm<sup>3</sup>/sec이다. 따라서 최소 40%에서 최대 80%의 사출속도로 실험을 실시하였다.

실험방법은 각 캐비티에 미성형(short shot)을 만들어 성형된 제품의 무게를 측정하였으며, 3회 측정한다.

Table 1 Factors and levels used in the experiment

Factors		Levels				
		1	2	3	4	5
A. Mold temp.(°C)	PA	30	35	40	45	50
	G/F33	60	65	70	75	80
B. Melt temp.(°C)	PA	260	265	270	275	280
	G/F33	270	275	280	285	290
C. Injection speed(%)		40	50	60	70	80

값의 평균을 식(7)으로 정의된 충전 불균형도(DFI ; degree of filling imbalance)를 계산하였다. 다구찌 방법은 잡음에 강한 인자를 찾아서 그 인자들의 최적조건을 공정에 반영하는 것이지만, 본 연구에서는 계산된 DFI 값을 통계분석 프로그램인 MINTAB을 사용하여 인자별 영향력만을 파악한 후, 충전 불균형에 미치는 영향을 분석하였다.

$$DFI = \frac{W_{\in} - W_{out}}{W_{\in}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서,  $W_{\in}$ 과  $W_{out}$ 은 내·외측 캐비티에서의 성형품의 무게를 나타내고 있다.

## 4. 성형실험 결과

### 4.1 PA 성형품

Fig. 3은 표준 직교배열표에 따라 계산된 충전 불균형도값을 가지고 각 관련인자가 PA 성형품에 미치는 영향도를 나타낸 것이다. 영향을 크게 주는 순서는 사출속도(C), 금형온도(A), 수지온도(B)의 순으로 발생하였다.

Fig. 4는 사출속도에 따른 PA 성형품의 충전 불균형도를 그래프로 도시하였다. 사출속도가 증가할수록 충전 불균형도가 감소하는 경향을 나타내었다. 사출속도가 증가할수록 유동수지와 러너 사이가 마찰되는데 그 마찰로 인하여 발생하는 마찰열이 더욱 증가한다. 이로 인하여 용융 수지의 점도가 감소하기 때문이라고 사료된다.

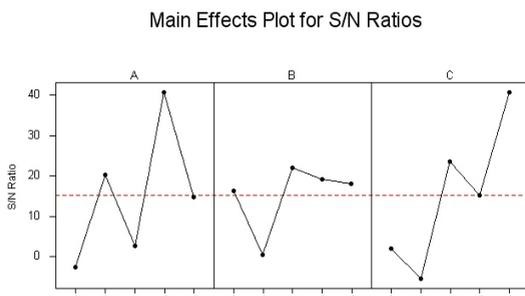


Fig. 3 Effects of factors on DFI of PA molding

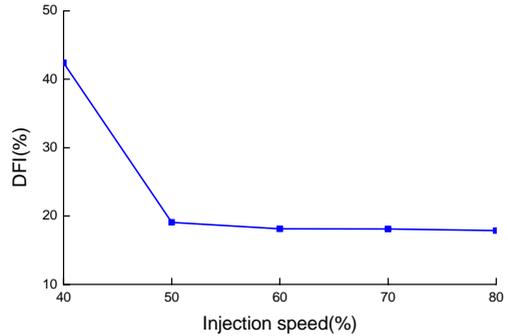


Fig. 4 DFI of PA molding with respect to the injection speed

### 4.2 G/F 33 성형품

범용수지 PA에 보강재인 G/F 33%를 첨가한 수지를 대상으로 사출 성형실험을 실시하여 구한 충전 불균형도를 가지고 각 관련인자가 성형품에 미치는 영향도를 Fig. 5에 그래프로 도시하였다.

순수 PA 성형품과는 다르게 사출속도(C), 수지온도(B), 금형온도(A)의 순으로 나타났다. 가장 큰 영향을 미치는 것은 사출속도로 순수 PA성형품과 같지만, 수지온도와 금형온도는 반대로 나타나는 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 순수 PA보다 G/F 33%가 포함된 보강수지는 성형조건상 금형온도 및 수지온도가 Table 1에서 알 수 있듯이 순수 PA보다 높게 설정하였으므로, 온도에 의한 영향으로 Fig. 3과 다른 결과가 나온 것으로 사료된다.

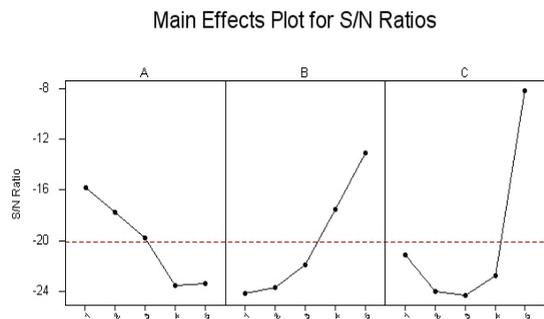


Fig. 5 Effects of factors on DFI in G/F 33 molding

Fig. 6은 사출속도에 따른 G/F 33 성형품의 충전 불균형도를 도시한 것으로 순수 PA 성형품과 마찬가지로 사출속도가 증가할수록 충전 불균형도가 감소하는 경향을 나타내었다.

범용수지 PA와 보강재인 G/F 33%가 첨가된 수지로 제작된 성형품 모두 사출속도가 증가할수록 충전 불균형도가 감소하는 경향을 보이지만, G/F 33 성형품이 순수 PA 성형품보다 감소폭이 작으면서 균일하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 보강재인 G/F 33%가 첨가됨으로서 러너의 중심부보다 외경부의 전단율이 감소하는 동시에 유동성이 떨어지기 때문이라고 생각되어진다.

Fig. 7은 순수 PA수지와 보강재인 G/F 33% 수지에 대한 충전 불균형도값을 비교한 그래프로써 순수 PA수지는 20.95%이고, G/F 33 수지는 13.13%로서 순수 PA수지보다 충전 불균형도값이 낮게 나타남으로서 각 캐비티에 균형적으로 충전됨을 알 수가 있었다.

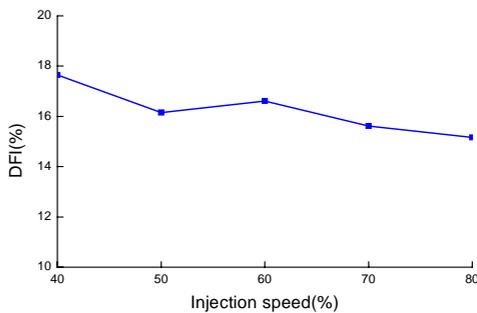


Fig. 6 DFI of G/F 33 molding with respect to the injection speed

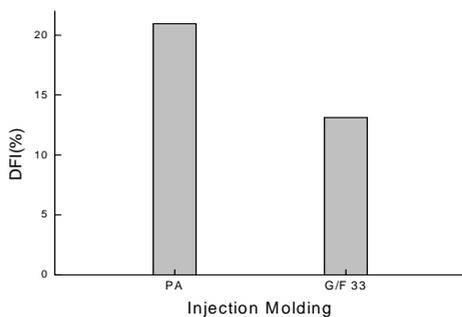


Fig. 7 Comparison for DFI of each injection moldings

## 5. 결 론

본 연구에서는 기하학적으로 대칭 러너 시스템을 가진 다수개 캐비티 금형에서 발생하는 충전 불균형 경향을 파악하기 위하여 범용수지인 PA와 PA에 보강재인 G/F 33%를 첨가한 수지를 대상으로 다구찌 방법을 이용하여 실험을 실시하였다.

1. 두 수지 모두 충전 불균형에 가장 영향력이 큰 성형인자는 사출속도로 나타났다.
2. PA수지의 경우 초기 사출속도의 증가시에는 급격한 DFI값의 감소가 있었으며 50% 이상에서는 거의 균일하게 감소하는 경향을 나타내었다.
3. 순수 PA에 비해 G/F 33% 보강수지는 약 7.82%의 DFI값이 감소함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지 기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003-001-02005-0)에 의해 연구가 수행되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김영수, 김인관, “사출성형공정에서 유리섬유함유량이 인장강도에 미치는 영향,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제5호, pp. 63-69, 2000.
2. Beaumont, J. P. and Young, J. H. “Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems,” Journal of Injection Molding Technology, Vol. 1, No. 3, 1997.
3. Beaumont, J. P., Young, J. H. and Jawoski, M. J. “Solving Mold Filling Imbalances in Multi-Cavity Injection Molds,” Journal of Injection Molding Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 47-58, 1998.
4. Isayev, A. I. “Injection and Compression Molding Fundamental,” Marcel Dekker, INC, pp. 2-19, 1987.
5. 제덕근, 정영득, “다수 캐비티를 갖는 3매 구성 사출금형에서의 충전 불균형,” 한국정밀공학회지, 제

21권, 제6호, pp. 117-121, 2004.

6. 장정식, 김상우, “다구찌 실험 계획법을 이용한 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 물성 최적화 연구,” 한국복합재료학회지, 제6권, 제2호, pp. 44-51, 1993.