

## 가스분말사출성형에서 공정조건 변화가 중공부 형성에 미치는 영향

김동한<sup>1,2</sup> · 박형필<sup>1,2</sup> · 이계환<sup>#</sup> · 차백순<sup>1</sup> · 최재혁<sup>2</sup> · 이병욱<sup>2</sup> · Jorge A. Tovar<sup>3</sup>

### The Effects of Processing Variables on Gas Penetration in Gas-Assisted Powder Injection Molding(GAPIM)

D. H. Kim, H. P. Park, K. H. Lee, B. S. Cha, J. H. Choi, B. O. Rhee, J. A. Tovar  
(Received November 25, 2011 / Revised January 19, 2012 / Accepted February 9, 2012)

#### Abstract

Gas-assisted injection molding(GAIM) produces parts with hollow internal sections. The technique offers benefits to powder injection molding(PIM), with lower material usage and reduced time for de-binding processes. In this study, the effects of processing parameters on gas penetration length of gas-assisted powder injection molding(GAPIM) were investigated for SUS316L stainless steel powder feedstock. Experiments were planned based on the Taguchi method, involving processing variables such as melt temperature, shot size, gas pressure, and gas delay time. The most significant parameters affecting gas penetration length were gas delay time and shot size, while the effects of melt temperature and gas pressure was relatively insignificant.

**Key Words** : Powder Injection Molding, Gas-Assisted Injection Molding, Gas Penetration

#### 1. 서 론

분말사출성형(Powder Injection Molding)은 금속이나 세라믹 부품을 제조하는 최신 Near-net Shaping 분말 성형기술로써, Fig. 1과 같이 금속분말과 바인더를 혼합하여 유동성을 가지는 피드스탁(Feedstock)의 제조를 위한 혼합공정(Mixing), 제품 형상을 제조하는 사출성형공정(Injection Molding), 바인더 제거를 위한 탈지공정(Debinding), 그리고 금속분말 간의 결합을 위한 소결공정(Sintering)으로 이루어져 있다[1, 2]. 그러나 분말사출성형 공정은 복잡한 형상의 부품들을 경제적으로 대량 생산할 수 있는 장점을 가진 반면에, 사용되는 분말이 고가이고

바인더 제거에 오랜 시간이 소요되기 때문에 경제성이 떨어져 소형부품 생산에 국한되어 사용되고 있는 실정이다.

최근 이러한 단점을 개선하기 위해서 후속의 플라스틱 제품 성형에 적용하던 가스사출성형(Gas-Assisted Injection Molding) 기술을 분말사출성형에 적용하기 위한 시도가 이뤄지고 있다[3~5].

가스사출성형은 일반사출성형과 비교하여 전체 충전량에 대비 약 40~80%의 수지를 Short-shot 형태로 사출한 후, 고압가스를 이용하여 제품을 중공형태로 성형하기 때문에 일반사출성형에 비해 재료를 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 보압공정을 고압가스로 수행하므로 제품 품질에 영향을

1. 한국생산기술연구원, 금형·성형연구그룹  
2. 아주대학교 기계공학과  
3. Dept. of Manufacturing Engineering, Univ. of Texas-Pan American  
# 교신저자: Dept. of Manufacturing Engineering, Univ. of Texas-Pan American, E-mail: khlee@utpa.edu

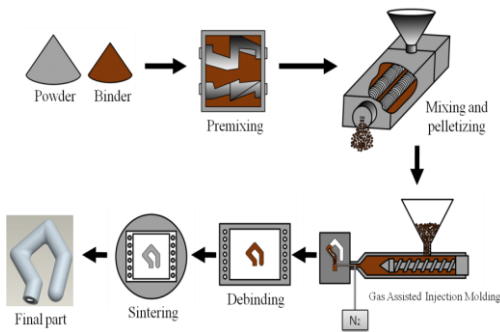


Fig. 1 Schematic diagram of GAPIM process

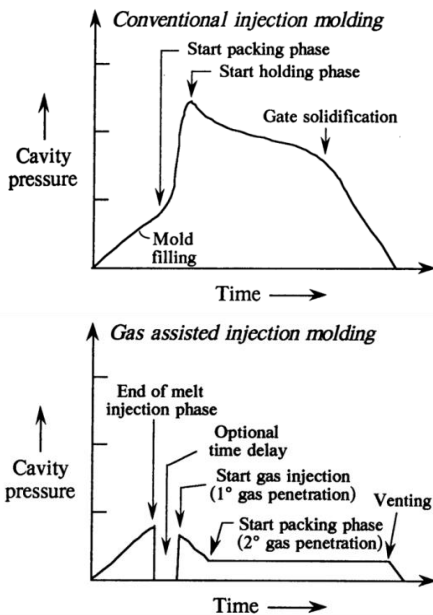
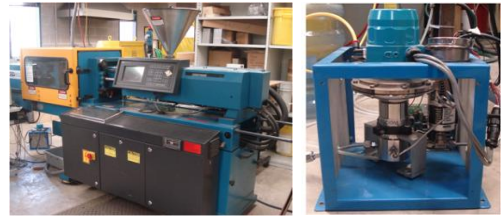


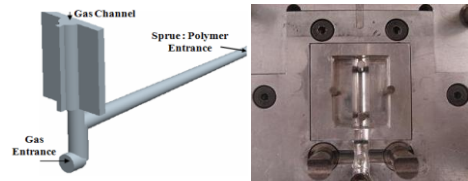
Fig. 2 Cavity pressure profile for an injection molding cycle [6]

미치는 썩크마크, 수축, 휨 등의 불량 현상들을 효과적으로 방지할 수 있다. 특히 Fig. 2 에 보듯이, 사출 형체력 및 사출압력을 감소시킬 수 있는 장점도 가지고 있다[6, 7].

이러한 가스사출성형의 장점들을 도입한 가스 분말사출성형(Gas-Assisted Powder Injection Molding)은 후속의 분말사출 제품 내부에 성형 중 가스를 주입하여 중공형상을 형성하므로 고가의 분말재료 소모를 줄여주어 재료비 절감, 주입된 가스를 통하여 충분한 압력을 제품 내부로 전달시켜 성형품의 고품질화, 그리고 탈지 및 소결 공정에 소요되는 공정 시간 등을 크게 줄일 수 있는 장점



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 3 Photo of (a) injection molding machine, (b) gas control unit, (c) 3D model & (d) mold insert

을 가지고 있다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 분말을 이용한 가스분말사출성형에 대한 연구가 미비하여 적용에 한계가 있는 실정이다. 따라서 후속의 가스 분말사출제품의 양산을 위해서는 공정조건 영향도 및 공정 최적화 방안에 대한 연구가 필요 시되고 있으며, 분말재료가 가진 특성들이 가스 중공부가 형성되는데 미치는 영향을 이해할 필요가 있다.

본 논문에서는 SUS316L 분말혼합체를 이용한 실험을 통하여 수지온도(Melt Temperature), Shot Size, 가스 압력(Gas Pressure), 가스지연시간(Gas Delay Time)과 같은 공정변수가 가스 중공부의 형성에 미치는 영향에 대하여 알아보았으며, CAE 해석을 통하여 가스분말사출성형 시 가스 중공부가 형성되는 현상을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 가스분말사출 장비 및 재료

본 실험에서는 Wax-polypropylene 바인더와 59 vol.%로 혼합된 SUS316L 분말혼합체(Cetatech, Korea)를 사용하였다. 사출성형기는 독일 Dr. Boy 사의 형체력 30ton, 95mm의 최대 스트로크, 37g의 최대 배럴 용량, 그리고 28mm의 스크루 직경을 가지고 있는 Boy30M(Fig. 3(a))을 사용하였으며, 성형품의 중공부 형성을 위해 주입되는 질소가스의 제어를 위해서 Tescom사의 ER3000(Fig. 3(b))을 이

**Table 1 Processing control factor and level**

Level	Melt temperature	Shot size	Gas pressure	Gas delay
1	150 °C	80%	6.21 MPa	0.0 s
2	155 °C	83%	6.55 MPa	0.2 s
3	160 °C	86%	6.89 MPa	0.4 s

**Table 2 DOE 3<sup>4</sup> factor L<sub>9</sub> orthogonal array**

Trial	Melt temperature	Shot size	Gas pressure	Gas delay
1	1 (Low)	1 (Low)	1 (Low)	1(Low)
2	1 (Low)	2 (Med.)	2 (Med.)	2(Med.)
3	1 (Low)	3 (High)	3 (High)	3(High)
4	2 (Med.)	1 (Low)	2 (Med.)	3(High)
5	2 (Med.)	2 (Med.)	3 (High)	1(Low)
6	2 (Med.)	3 (High)	1 (Low)	2(Med.)
7	3 (High)	1 (Low)	3 (High)	2(Med.)
8	3 (High)	2 (Med.)	1 (Low)	3(High)
9	3 (High)	3 (High)	2 (Med.)	1(Low)

용하였다.

Fig. 3 (c)와 (d)에 각각 3차원 제품도와 실험금형을 나타내고 있으며, 가스 채널부는 저항이 적은 곳으로 흐르는 가스침투의 특성을 고려하여 설계하였다.

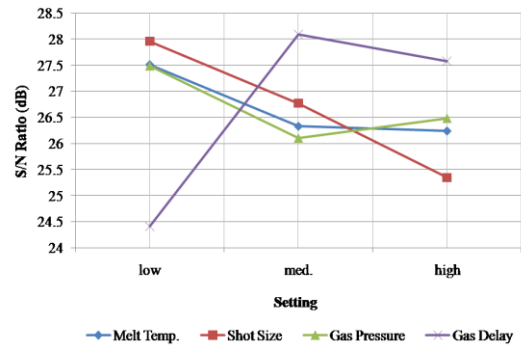
### 2.2 다구찌 실험계획법

일반 사출성형에 비해서 가스사출성형은 성형 특성에 영향을 미치는 일반적인 공정 변수와 더불어 가스 압력, 가스지연시간과 같은 가스조절에 관련된 공정변수들이 추가적으로 고려되어야 한다.

본 실험에서는 공정 변수의 영향도 평가를 위해서 다구찌 기법을 적용하였으며[8], 제어 인자로는 가장 영향도가 높은 공정변수들로 알려져 있는 수치온도, Shot Size, 가스압력, 가스지연시간 등 4개의 인자를 선정하였다. Table 1은 각각의 인자에 대한 수준을 나타내고 있으며, Table 2는 인자 수와 각 인자별 수준 수를 고려한 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 직교배열표를 나타내고 있다[9,10].

**Table 3 Process parameter rank of significance on gas penetration for experiment**

	Melt temperature	Shot size	Gas pressure	Gas delay
Portion	14%	29%	16%	41%
Rank	4	2	3	1



**Fig. 4 Main effect plot for experiment on gas penetration length**

## 3. 실험결과

### 3.1 가스분말사출성형 실험

가스분말사출성형 실험을 통하여 가스침투길이에 영향을 미치는 공정변수들에 대한 망대분석을 하였다.

Table 3에는 각각의 공정변수들이 가스침투길이에 미치는 영향도를 나타내고 있으며, 가스지연시간의 영향도가 41%로 가장 높은 것으로 나타났다.

일반적으로 가스지연시간이 낮으면 고화층이 충분히 형성되지 않은 상태에서 가스가 주입되기 때문에 가스 선단부의 저항이 증가하여 가스침투거리가 감소하게 된다. 반면 가스지연시간이 길어지게 되면, 고화층의 두께가 두꺼워진 상태에서 가스가 주입됨에 따라 상대적으로 가스 선단부에 저항이 감소하여 가스침투거리가 증가하게 된다.

본 실험에 사용된 SUS316L 분말혼합체의 경우 일반 플라스틱에 비해서 재료의 열전도가 높다. 따라서 가스지연시간의 경우 재료의 열전도도 영향에 민감하게 반응하기 때문에 본 실험에서 가스침투길이에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 각각의 인자에 대한 주효과도를 나타내고 있다. 가스지연시간은 중간 수준(0.2초) 일 때가 가스침투거리에 가장 큰 영향인자임을 확인

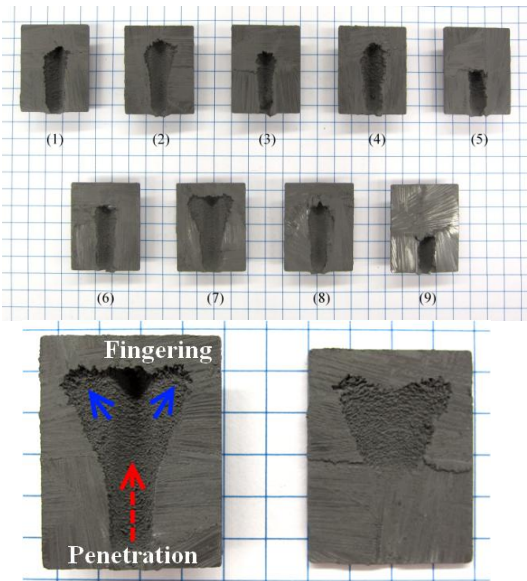
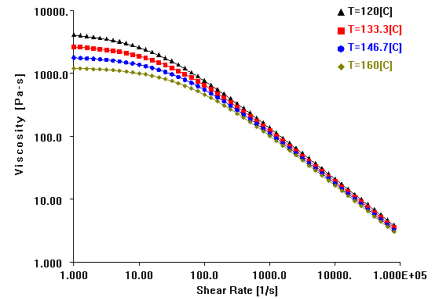


Fig. 5 Cross section of parts fabricated under each trial

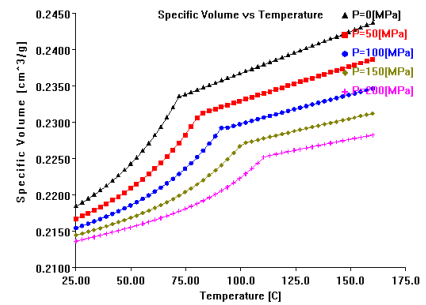
할 수 있으며, 일정 수준 이상으로 가스지연시간이 길어지게 될 경우 수지의 고화로 인해 가스침투거리가 줄어드는 결과를 얻었다. 또한 Short size가 증가함에 따라서 가스침투길이는 감소하였고 수지온도와 가스압력의 경우는 낮은 수준에서 가스침투길이가 길게 나타났으며, 수준이 높아질 경우는 영향이 미비함을 알 수 있었다.

SUS316L 분말혼합체의 가스침투길이에 대한 다구찌 실험의 망대분석을 통하여 가스지연시간 (Medium), Short size(Low), 수지온도(Low), 가스압력(Low)의 조건이 가스침투길이를 가장 길게 하는 최적의 조건임을 알 수 있었다.

Fig. 5에는 각각의 실험조건에서 성형된 제품의 가스 중공부 단면을 나타내고 있다. 0.2초의 가스지연시간을 가지는 2번과 7번 조건에서 Fingering이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 가스지연시간은 금형 외벽으로의 열전달에 의한 수지의 고화층 형성과 관련되어 있으며, 분말혼합체의 경우 일반적인 플라스틱 수지와 다르게 금속분말입자가 혼입되어 있기 때문에 높은 열전도도를 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 SUS316L 분말혼합체 실험에서 나타난 Fingering은 용융수지가 주입된 후 이뤄지는 가스지연시간 동안 캐비티 내부의 용융수지가 냉각되며 형성되는 고화층과 관련이 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Viscosity data and (b) PvT data of SUS316L feedstock

### 3.2 가스분말사출성형 해석

실험에서 발생된 Fingering 현상의 분석을 위해서 가스 중공부가 형성되는 현상을 분석하기 위해 Autodesk Moldflow Insight(AMI 2012) 소프트웨어를 이용하여 CAE 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료는 SUS316L 분말혼합체(Powder/Binder Mixture)를 사용하였으며, Fig. 6에 점도 데이터와 PvT 선도를 나타내고 있다.

CAE 해석을 통해서 실험결과와 마찬가지로 가스 충전말단부에 이르러 가스 채널부 이외의 Wall section으로 가스가 침투되는 Fingering 현상이 발생하는 결과를 확인할 수 있었다. Fig. 7은 SUS316L을 이용한 가스분말사출성형에서 Fingering이 발생된 해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 7 (a)는 가스가 주입되어 Fingering이 발생되기 전 온도분포 결과로써, 고압가스가 주입되며 유동선단부에 높은 온도가 형성된 것을 확인할 수 있다. 이는 고압의 가스에 의해서 분말재료의 충전이 이루어지며 높은 전단속도가 발생되어 나타나는 전단가열 현상으로 판단된다. Fig. 7 (b)는 가스가 주입되어 충전이 완료된 후의 가스 중공부 형상을 나타내고 있으며, 전단가열현상으로 낮아진 점도 영향으로 가

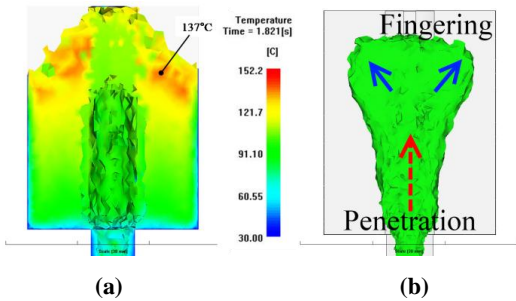


Fig. 7 (a) Temperature distribution during gas injection and (b) gas core after gas injection

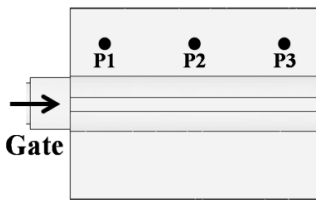


Fig. 8 Measurement points from P1 to P3

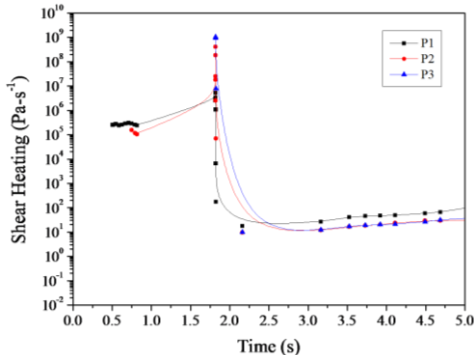


Fig. 9 Shear heating of wall section for simulation

스 채널부가 아닌 Wall section으로 가스가 침투하여 Fingering이 발생된 것을 확인할 수 있다.

가스가 침투되며 발생하는 전단가열 현상이 Fingering 발생에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Wall section의 코어부분에 3개의 측정 위치를 선정하여 전단가열현상을 분석하였다[Fig. 8].

일반적으로 전단가열은 점도와 전단속도 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다[11].

Fig. 9는 선정된 3개의 측정 위치에 대한 SUS316L 분말혼합체의 전단속도와 점도변화에 따른 전단가열을 나타내고 있다. 사출이 진행되는 충전 초기에는 낮은 점도와 전단속도의 영향으로 비교적 낮은 전단가열분포를 보인다. 반면에 고압가스가

주입되며 캐비티 충전이 완료되는 시점에는 수지 고화에 의한 높은 점도 영향과 고압가스 투입에 의한 높은 전단속도 영향으로 급격한 전단가열 상승이 발생됨을 확인할 수 있었다. 일반적인 플라스틱에서도 전단가열현상은 발생되지만, SUS316L 분말 혼합체는 플라스틱에 비해 낮은 비열, 낮은 유리전이 온도(130°C), 높은 열전도도(PP 대비 3.5 배)를 가지기 때문에 상대적으로 영향이 크게 나타난 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 가스분말사출성형 시 공정조건이 가스 중공부 형성에 미치는 영향을 실험 및 사출성형해석을 통하여 분석하였다. 실험에서 SUS316L 분말혼합체의 높은 열전도도로 인한 냉각효과로 가스지연시간이 가스침투거리에 가장 높은 영향도를 나타냈으며, 반면 수지온도와 가스 압력은 상대적으로 영향이 미비하였다.

CAE 해석을 통하여 가스채널부에 발생하는 Fingering 현상이 가스가 주입되며 발생하는 전단가열 현상에 의해 발생됨을 확인할 수 있었으며, Fingering의 거동이 실험결과와 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 기관고유임무형 사업과 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략 기술인력양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. M. German, A. Bose, 1997, Injection Molding of Metal and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, pp. 11~24.
- [2] P. J. Vervoort, R. Vetter, J. Duszczynk, 1996, Overview of Powder Injection Molding, Adv. Perform. Mater., Vol. 3, No. 2, pp. 121~151.
- [3] L. Qingfa, 2000, Gas-assisted PIM, SIMTech Technical Report, pp. 1~9.
- [4] W. Michaeli, C. Hopmann, 2000, New Perspectives for Ceramic Injection Molding with Gas Injection, Adv. Eng. Mater., Vol. 2, No. 12, pp. 827~832.

- [5] K. Lee, M. De Hoyos, S. Ahn, R. Nambiar, M. A. Gonzalez, S. J. Park, R. M. German, 2010, Gas-Assisted Powder Injection Molding: A Study on the Effect of Processing Variables on Gas Penetration, *Powder Technol.*, Vol. 200, No. 3, pp. 128~135.
- [6] R. Malloy, 1994, *Plastics product design for injection molding*, Hanser Publishers, New York, pp. 108~113.
- [7] M. A. Parvez, N. S. Ong, Y. C. Lam, S. B. Tor, 2002, Gas-assisted Injection Molding: The Effects of Process Variables and Gas Channel Geometry, *J. of Mater. Process. Technol.*, Vol. 21, No. 1, pp. 27~35.
- [8] R. Urval, S. Lee, S. V. Atre, S. J. Park, R. M. German, 2008, Optimisation of Process Conditions in Powder Injection Moulding of Microsystem Components using a Robust Design Method: Part I. Primary Design Parameters, *Powder Metall.*, Vol. 51, No. 2, pp. 133~142.
- [9] N. S. Ong, H. L. Lee, M. A. Parvez, 2001, Influence of Processing Conditions and Part Design on the Gas-Assisted Injection Molding Process, *Adv. Polym. Tech.*, Vol. 20, No. 4, pp. 270~280.
- [10] S. Y. Yang, C. T. Lin, J. H. Chang, 2003, Secondary Gas Penetrations in Ribs during Full-shot Gas-Assisted Injection Molding, *Adv. Polym. Tech.*, Vol. 22, No. 3, pp. 225~237.
- [11] J. P. Beaumont, J. H. Young, M. J. Jaworski, 1999, Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems, *J. Reinf. Plast. Compos.*, Vol. 18, No. 6, pp. 572~590.