

◆특집◆ 나노/마이크로 하이브리드 패턴 가공 및 응용기술
가스 용해를 고려한 금형내압제어 사출성형공정의
마이크로패턴 충전 해석

박성호*, 유형민*, 이우일#
(#, * 서울대학교 기계항공공학부)

Numerical Analysis of Micro-pattern Filling with Gas Dissolution
by Injection Molding Process

Sung Ho Park*, Hyeong Min Yoo*, Woo Il Lee#
(Received 25 July 2014; accepted 29 August 2014)

ABSTRACT

The injection molding process has several advantages enabling it to produce large quantities of molded plastic products using a repetitive process. In recent years, it has been necessary to develop an injection molding process with micro/nano-sized patterns for application to the semiconductor industry and to the bio/nano manufacturing industry. In this study, we apply gas pressure to the inside of a mold and consider the gas dissolution phenomenon for a resin filling into a micro pattern with a line structure. Using numerical analysis, we calculate the filling ratio with respect to time for various internal gas pressures and various aspect ratios of the micro-patterns.

Key Words : Micro Pattern(마이크로 패턴), Injection Molding Process(사출 성형), Gas Dissolution(가스 용해), Numerical Analysis(수치 해석)

1. 서 론

사출성형 공정은 고분자 수지와 금형을 이용하여 반복적인 공정을 통해 대량으로 생산할 수 있

는 장점이 있다^[1]. 최근 마이크로/나노 사이즈의 패턴을 가지는 성형품의 수요가 증가함에 따라, 사출성형 공정을 활용하여 대량 생산하기 위한 연구가 활발하다.

본 연구에 적용한 금형내압제어 사출성형 공정은 기존의 사출성형 공정과 달리 금형 내부에 가압 장치를 사용하여 특정 분위기 압력 조건하에 성형이 이루어지는 공정이다. 금형내압제어 사출성형은 비건조 소재의 사용이 가능하여 기존의 사출성형 대비 시스템의 에너지 소비를 줄일 수 있

* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

Corresponding Author :
Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University
E-mail : wilee@snu.ac.kr

다. 또한 건조 과정 없이 기존 사출성형 공정 대비 동일한 성형품의 물성을 구현할 수 있으며, 가압 환경으로 인하여 성형품의 표면개선이 이루어진다^[2].

본 연구에서는 금형내압제어 사출성형 공정을 적용하여 마이크로 사이즈의 패턴을 갖는 제품 성형 시, 가압 가스 환경이 패턴의 전사성에 미치는 영향에 대하여 수치 해석적인 방법을 이용하여 살펴보았다.

2. 해석 방법 및 조건

2.1 지배방정식

유한요소법(FEM)을 기반으로 패널티 방법(penalty method)을 사용하여 계산하였다. 지배 방정식은 아래의 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 사용하였다.

Conservation of Mass

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Conservation of momentum

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{S}$$

유체가 벽면의 영향으로 생기는 접촉각으로 인한 표면 장력의 변화는 다음의 식을 통하여 normal 방향을 구할 수 있다^[3].

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta_{eq} + \mathbf{n}_t \sin \theta_{eq}$$

서로 다른 유체 사이의 계면에서는 Intermolecular Force에 의한 표면 장력의 영향을 받는다. 계면 사이에 압력 차이는 다음과 같은 라플라스 방정식(Laplace Equation)으로 살펴볼 수 있다.

$$(P_1 - P_2 + \sigma \kappa) n_i = (\tau_{1ik} - \tau_{2ik}) n_k$$

Volume of Fluid(VOF) Method에서 위와 같은

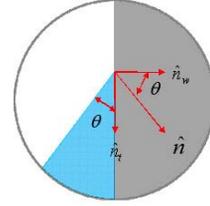


Fig. 1 Boundary condition of wall adhesion

표면 장력 효과를 모델링하기 위해서 Brackbill's Continuum Surface Force Model을 사용하였다^[4]. 위 모델은 서로 다른 유체 사이에 일정한 두께를 가지는 영역을 설정하고, 그러한 영역 위에서 언급한 표면 장력 효과가 아래 식과 같은 체적력의 형태로 작용한다고 가정한다^[5].

$$\mathbf{f} = \frac{\sigma}{[C]} \kappa \nabla C$$

n은 표면에서의 수직 방향 성분으로서 다음과 같이 계산 된다.

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla C}{|\nabla C|}$$

본 연구에서는 표면 장력을 점성 응력 텐서의 발산(Divergence)으로 표현한 아래와 같은 식을 이용하였다^[6].

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= -\frac{\sigma}{[C]} \frac{1}{|\nabla C|} \left(\frac{\partial C}{\partial x_i} \frac{\partial C}{\partial x_j} - \delta_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_k} \frac{\partial C}{\partial x_k} \right) \\ &= -\frac{\sigma}{[C]} \left(\frac{1}{|\nabla C|} \frac{\partial C}{\partial x_i} \frac{\partial C}{\partial x_j} - \delta_{ij} |\nabla C| \right) \end{aligned}$$

그리고 계면에 적용하는 Body Force의 효과는 아래와 같이 작용 한다.

$$f_i = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

2.3 가스 용해 해석

가스의 용해를 표현하기 위하여 기체와 액체에 존재하는 가스의 몰농도를 계산하고, 확산 함수 및 헨리의 법칙을 이용하여 몰농도의 변화를 구하였다. 기체에서 액체로 가스가 용해됨에 따라 마이크로 패턴 형상에 갇힌 가스의 압력 감소가 발생한다. 따라서 선단 압력은 용해되기 전보다 낮아지며, 패턴 내부로 충전되는 수지의 압력 구배가 변화하게 된다. 따라서 그림과 같은 전제조건 하에서 계산을 수행하였으며, 전체적인 해석 알고리즘은 그림에 나타내었다.

$$n_R = C_h P_g, \quad n_i = x C_h P_l$$

n_R 은 기체와 액체 경계면의 몰농도, n_i 는 초기 몰농도, C_h 는 헨리 상수, P_g 와 P_l 은 각각 기체와 액체의 압력을 나타낸다. 기체와 액체 경계면의 몰농도는 시간에 무관하게 일정하게 유지되며, 기체의 몰농도는 초기의 몰농도를 유지하도록 경계조건을 설정하였다. 확산 함수를 적용하여 액체 내부로의 기체 확산 현상에 적용하였다.

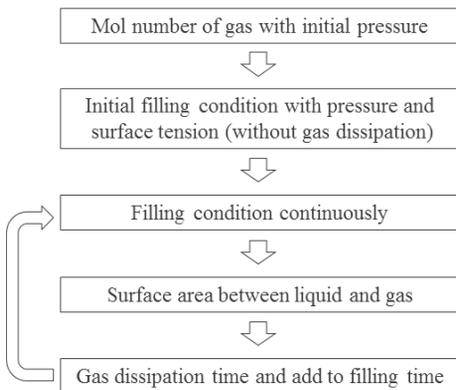


Fig. 2 Flow chart for dissolved gas analysis method.

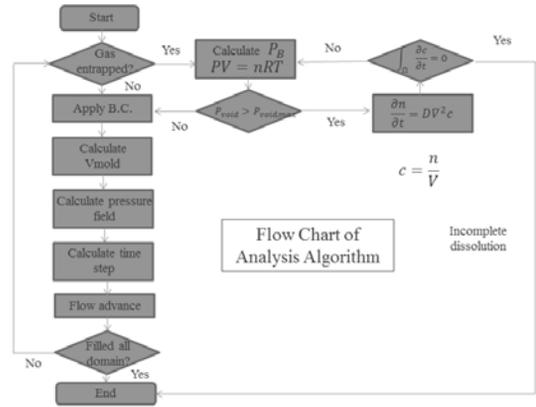


Fig. 3 Flow Chart of Analysis Algorithm.

Table 2 Parameters for numerical analysis.

Parameters	Value
Gas pressure (MPa)	1,2,3
Surface tension (Nm-1)	0.0447
Contact angles	81
Injection pressure (MPa)	20~60
Henry's constant (mol m3/Pa)	3x10E-3
Diffusion coefficient (m2/s)	2x10E-10
Pattern width(μm)	35
Pattern height (μm)	35,52.5,70
Layer thickness (μm)	62

$$n(r > R, t = 0) = n_i$$

$$n(r = R, t) = n_R$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} n(r, t) = n_i$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = DV^2n - \nabla \cdot (n\vec{v})$$

2.4 해석 방법

마이크로 패턴이 존재하는 사출 성형 공정은 전체 성형 면적에 비교하였을 때 패턴의 사이즈와의 스케일 차이가 존재한다. 이러한 공정에 관하여 수치 해석적 접근을 할 경우 해석 시간에서의

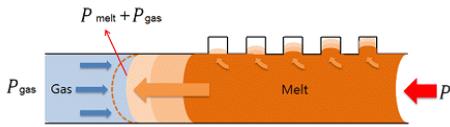


Fig. 4 Schematic of flow front with internal pressure.

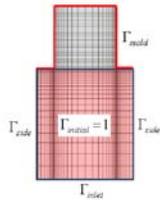


Fig. 5 Micro Pattern Analysis Model

비효율성이 있다. 따라서 본 연구에서는 패턴이 존재하지 않는 전체 충전에 대한 전체 해석과 패턴 내부 충전에 관한 부분 해석을 각각 연계 해석하는 Two Step Method를 적용하여 패턴 충전 성형을 살펴보았다^[7].

금형내압제어 사출성형은 기존의 사출성형 공정과 달리 금형 내부에 일정한 압력의 분위기 가스가 존재한다. 따라서 고분자 수지 충전 과정에서 금형 내부압력의 영향으로 Fig.4에서 나타낸 것처럼 선단의 압력이 증가하고 유동 특성이 변화한다.

마이크로 패턴 충전 해석 영역은 Fig.5에서처럼 빨간 영역의 가스가 채워진 금형 부분이 존재하고, 아래 유동 채널 영역은 초기 수지가 충전되어진 영역으로 설정하였다. 패턴의 형상은 라인 패턴으로 선정하였으며, 이에 따라 수지의 왼쪽과 오른쪽 측면은 2차원 대칭 경계조건을 설정하였다. 아래쪽 부분에 글로벌 해석을 통해 나온 압력, 온도, 전단 속도 경계조건을 부여하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 패턴 형상 결과

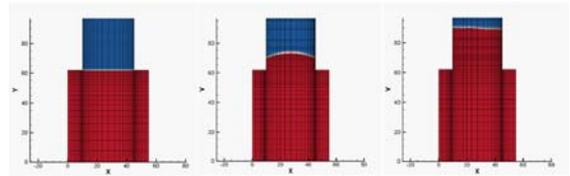


Fig. 6 change of flow front shape

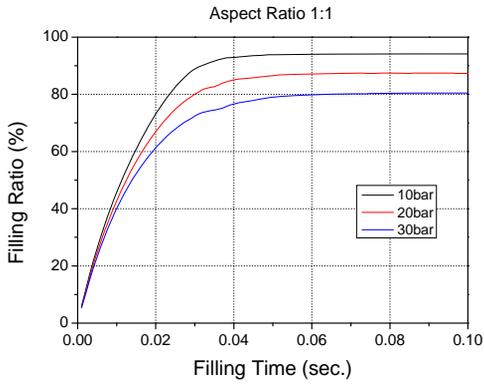
Fig. 6은 마이크로 사이즈의 패턴 내부에 붉은색 영역인 수지가 충전하는 형상을 시간에 따라 모사한 해석 결과이다. 충전 초기 영역에서는 사출성형에 사용하는 수지와 비슷한 양상인 위로 볼록한 선단 형상을 나타낸다. 하지만 사출성형 공정에서는 가스의 용해도에 비해서 충전하는 속도가 빠르게 나타나기 때문에 충전이 일어남에 따라 금형 내부의 가스 압축 현상이 일어난다. 이에 따라서 선단의 형상은 평평하게 변화하게 되며 최종적으로 Fig.6과 같이 성형된다.

3.2 종횡비에 따른 패턴 충전도

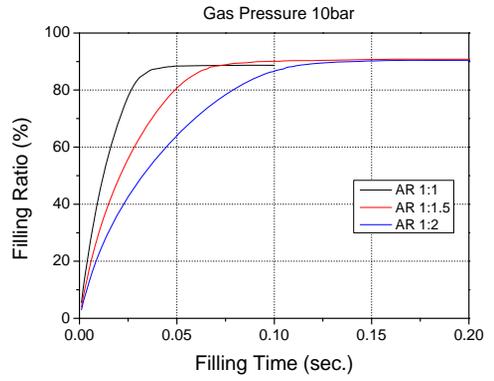
다양한 종횡비(1:1, 1:1.5, 1:2)에 대하여 수치해석을 수행하였다. 각 종횡비에 대하여 금형 내부의 압력은 10, 20, 30bar으로 다양하게 적용하였다. Fig.7은 충전 시간에 따른 충전정도 결과이며, 충전 정도는 마이크로 패턴 금형의 크기와 충전된 영역의 부피비를 계산하여 나타내었다. 금형 내부의 압력이 증가함에 따라 충전 정도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 충전이 진행될수록 공기의 압축 효과로 인한 충전도 저하가 발생한다. 금형 내부의 잉여 가스 용해에는 사출 성형 공정에서 고려하기에는 더욱 오랜 시간이 소요되며, 사출 성형에서 더욱 크게 작용하는 것은 가스의 압축 현상으로 인한 영향이 더 큰 것으로 보인다.

금형 내부 압력이 10,20,30bar 일 경우의 각각에 대하여 종횡비에 따른 충전 정도를 나타내 보았다. 최종적인 충전 정도는 비슷하게 나타나지만, 최대 충전 정도에 도달하는 시간을 비교하면 종횡비가 작을수록 빠르게 도달함을 알 수 있었다.

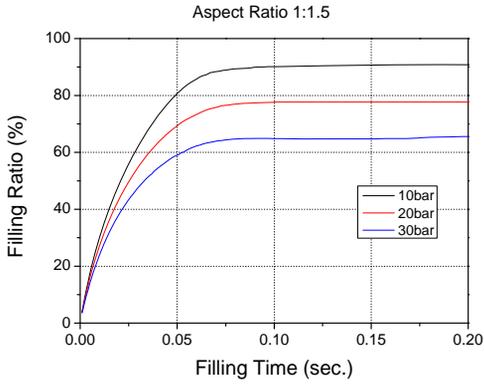
금형 내부의 압력을 30bar로 고정하고 사출 압력을 증가할 경우(사출 압력은 시간에 따라 달라



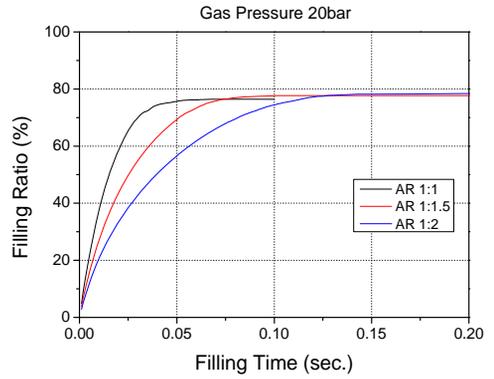
(a) Aspect ratio 1:1



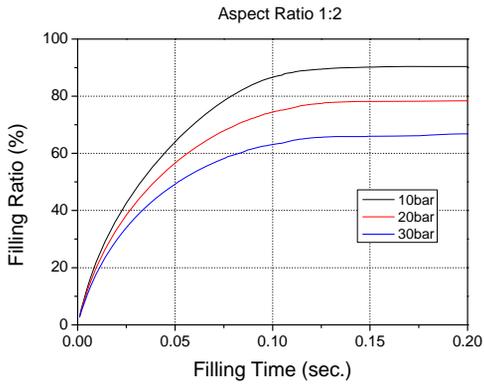
(a) Gas pressure 10bar



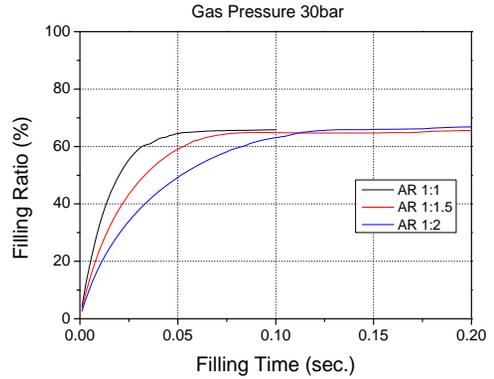
(b) Aspect ratio 1:1.5



(b) Gas pressure 20bar



(c) Aspect ratio 1:2



(c) Gas pressure 30bar

Fig. 7 Filling time vs. filling ratio of various aspect ratio.

Fig. 8 Filling time vs. filling ratio of various aspect ratio.

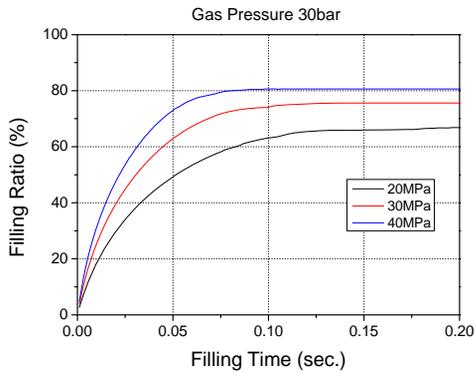


Fig. 9 Filling time vs. filling ratio of various injection pressure

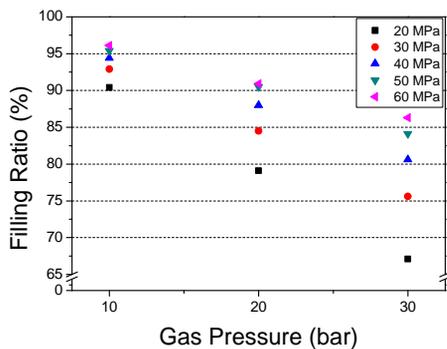


Fig. 10 Optimization for pattern filling with various parameters

하지만 편의상 최대값을 표시) 충전 정도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 하지만 충전도 향상은 사출 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하지는 않으며, 한계점에 수렴함을 확인할 수 있었다.

다양한 금형 내부 가스 압력, 사출 압력에 대하여 해석을 수행하여 보았다. 금형 내부의 압력이 증가할수록 충전 정도는 떨어짐을 확인할 수 있다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 금형 내부의 각각 압력에 따라 사출 압력을 증가시켜도 충전 정도는 특정 값에 수렴함을 확인할 수 있다.

4. 결론

금형내압제어 사출성형 공정에 대하여 다양한 내압, 패턴 중횡비, 사출 압력에 따라 수치해석 기법을 활용하여 해석을 수행하였다. 일반적인 사출 성형에서 고려하지 않는 금형 내부의 분위기 가스의 압축 및 용해 현상을 고려하였다.

금형 내부의 압력을 증가시킬 경우 마이크로 패턴 내부에 갇힌 가스의 압력 또한 증가하므로, 최종적인 패턴 성형성이 감소한다. 하지만 압축가스에 의한 선단 형상 변화에 따라 마이크로 패턴의 형상이 평평하게 변화함을 관찰할 수 있었다. 또한 금형 내압 조건에 따라 사출 압력을 증가시키더라도 충전도가 특정 값으로 수렴함을 확인할 수 있었다. 이는 마이크로 패턴 충전이 일어남에 따라 가스의 압축이 일어나지만, 압축가스 전체가 용해되기에는 성형 공정 시간이 극단적으로 짧아서 나타나는 현상이라 생각한다.

본 논문에서 구현한 해석 방법을 토대로, 라인 패턴을 갖는 금형내압 적용 사출성형 공정에서 형상 및 중횡비에 따른 내압 및 사출압력 설정을 예측할 수 있으리라 생각한다. 또한 앞서 설정한 해석 조건들에 관하여 다양한 패턴 크기에 따른 성형 공정 최적화를 구현할 수 있으며, 추후 실험을 통한 비교 연구가 필요하리라 본다.

후 기

“본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업(No.10042797, 100nm~100 μ m 나노복합구조물 응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 10% 절감 성형시스템 개발)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.”

REFERENCES

- (1) Lee D. M. et al., “Injection Mold with Cavity Pressure/Temperature Sensors for Standard Tensile Test Specimen”, J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24 No.11, pp. 84-90, 2007.
- (2) Woo S. W. et al., “Estimation of Mechanical

Properties of Thermoplastics Injection Molded with the Pressurized Cavity”, Korean Society for Precision Engineering, pp. 493-494, 2011.

- (3) Bender, M. et al., “Multiple Imprinting in UV-based Nanoimprint Lithography Related Material Issues”, Microelectronics Eng., Vol. 61-62, pp. 407-413, 2002.
- (4) TJR Hughes, WK Liu, A Brooks, 1979, “Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by the Penalty Function Formulation”, J. of Comput. Phys., Vol. 30 (1), pp. 1~60.
- (5) Seung Mo Kim, 2007, Ph. D. Thesis, “Finite Element Analysis of Micro Scale Flow Using Fixed Grid System”, Seoul National University.
- (6) Kim S. M, et al., “Numerical Simulation of UV-NIL Process Based on Continuum Hypothesis”, KSME, pp. 91~96. 2007.
- (7) Park S. H. et al., “Multi-scale Simulation of Injection Mold Filling with Micro Featured Parts”, Korean Society for Precision Engineering, pp.741~742, 2008.