

미세형상/대면적 충전을 동시에 고려한 해석 및 응용 기술 개발 Multi-Scale Simulation of Molding Process to Achieve Micro Features on the Large Surfaces

*김승모¹, 박시환¹, #이우일¹

*S. M. Kim(memories@snu.ac.kr)¹, S. H. Park(keepingyou@snu.ac.kr)¹, #W. I. Lee(wile@snu.ac.kr)¹
¹ 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Injection Molding, Micro Features, Large Surface, Free Surface, Volume of Fluid method

1. Introduction

IT, BT, NT 가 새로운 산업으로 떠오르고 있는 현대 부품 산업에서는 고분자 소재가 큰 각광을 받고 있다. 광학적 특성이 중요한 IT, BT, NT 산업에서 전통적인 금속소재는 상대적으로 불투명한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 마이크로 성형 공정으로 가공하기에는 많은 어려움이 따르므로 광학적 특성이 좋고 가공성이 좋은 고분자 소재가 널리 쓰이고 있다. 특히 고분자 소재의 경우 대량 생산에 매우 적합하고 경량화에 유리하여 이를 적용한 제품이나 공정이 빠르게 증가하고 있으며, 이는 첨단 고분자 소재의 지속적인 개발과 병행하여 향후 그 적용 범위의 확대가 가속화 될 것으로 판단된다. 이러한 고분자 소재로 이루어지는 제품 생산의 대표적인 공정으로 사출 성형을 제시할 수 있다. 사출 성형은 효율적이고 빠른 process 로 인해 현재 널리 쓰이는 대표적인 고분자 소재의 생산 공정이다. 근래 이러한 사출 성형은 전통적인 사출성형을 뛰어넘어 수십 마이크로의 미세 패턴이 표면에 다량으로 형성되어 있는 대면적 제품을 성형하기 위한 방법으로 주목을 받고 있다. 이러한 공정을 통해 현재 사용되는 고비용 저효율의 마이크로 패터닝 방법에 비해 고효율 저비용의 공정을 구현할 수 있을 것으로 예측된다.

2. Simulation Procedure

사출 성형은 free surface 를 가지는 대표적인 유동 문제 중 하나이다. 이러한 사출 성형의 해석을 위한 유체의 지배방정식으로 아래와 같이 세 방정식을 고려하였다.

Continuity equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Navier-stokes equation:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ji}(u) + \rho f_i$$

Energy equation:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = (kT_{,i})_{,i} + Q + \Phi$$

continuity 식과 Navier-stokes 식은 Penalty method [1]를 이용하여 FEM 해석을 수행하였으며, non-isothermal 상태를 고려하기 위해 energy 식을 FEM 을 통하여 해석하였다. 또한 유동의 자유표면을 구현하기 위해서 VOF method [2-3]를 이용하였다. 또한 고분자의 rheological 거동을 구현하기 위해 Cross-WLF 모델을 이용하였다.

3. Global Analysis

마이크로 패턴이 존재하는 대면적 mold 의 사출 성형을 해석하기 위해서는 multi-scale 의 해석이 필요하다. 즉, Fig. 1 과 같이 마이크로 패턴을 고려하지 않은 Global analysis 와 마이크로 패턴에서의 local analysis 를 통해 전체적인 공정에

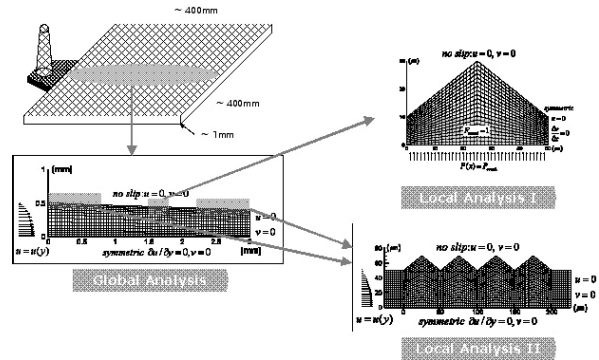


Fig. 1 Schematic Diagram of Analysis

대한 해석을 수행하였다. 전체 패턴을 모두 고려한 대면적의 해석을 수행하는 것이 적절하나, 제한된 계산용량과 시간으로 인해 전체적인 해석은 용이하지 않기 때문에 그림과 같이 두 분류의 해석을 수행하였다. Global analysis 의 결과를 통해 local 한 영역의 경계조건을 적절히 정하고 이를 통한 local analysis 를 수행하여 패턴의 전사성을 예측하였다.

실제로, 마이크로 패턴의 local 영역을 모두 포함한 작은 길이의 몰드를 가정하여 해석을 수행한 결과, local 영역을 제외하여 해석한 경우와 global 한 유동의 모습은 거의 일정하였다. 이를 통하여 local 영역의 해석은 global 영역의 해석에 영향을 받지만 그 반대의 영향은 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 두 분류의 해석적 접근 방법이 공정 해석에 타당함을 알 수 있었다.

Global 해석은 Fig. 1 과 같이 끝으로 갈수록 높이가 줄어드는 mold 를 설정하였다. 이러한 높이의 차는 마이크로 패턴에서의 압력 develop 을 위한 것으로 보다 향상된 충전 패턴을 얻기 위해 고려하였다.

Fig. 2 에서 속도장의 경계조건과 온도장의 경계조건을 각각 나타내었다. 또한 inlet 속도 경계조건으로 fully developed 된 속도분포를 고려하였다[4]. mold 온도(T_w)는 100°C , 입구 온도(T_i)는 200°C 를 고려하였다. Fig. 3 과 같이 각각의 위치에 따른 압력의 develop 은 위치에 따라 그리고 입구의 속도에 따라 차이를 보인다. 다양한 변수에 따른 압력 develop 관찰을 통해 마이크로 패턴의 충전 정도를 예측할 수 있을 것이다.

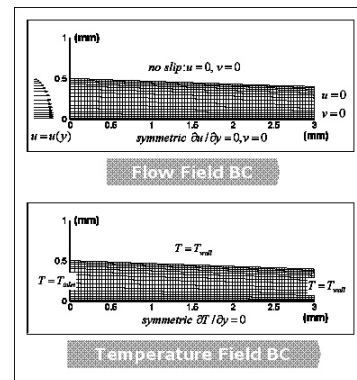


Fig. 2 Global Analysis – Boundary Condition

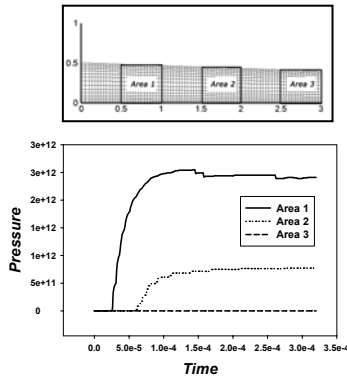


Fig. 3 Global Analysis – Results

이와 같이 global analysis 를 통해 얻은 압력 값을 바탕으로 실제 마이크로 패턴에서의 전사성을 예측하기 위한 해석의 경계조건을 도출할 수 있다.

3. Local Analysis

Global analysis 에서 관찰한 압력의 영향이 마이크로 패턴의 충전과정에 미치는 영향을 해석을 통해 살펴보았다. Fig. 4 와 같은 유동장과 온도장의 경계조건에서 V 자 모양의 2D cavity 를 고려하여 해석을 수행하였다. V 자 모양의 cavity 아래에는 특정 압력을 경계조건으로 부여하였으며, 이 때의 cavity 의 충전 정도를 파악하였다.

Fig. 5 에 mold 온도(T_w)와 압력에 따른 충전 정도를 나타내었다. 마이크로 패턴 내의 충전 정도를 파악하기 위해 cavity area 에 filled area 가 차지하는 비율을 Degree of filling 으로 정의하였다. 해석 결과를 통해, 기본적으로 압력과 mold 온도(T_w), inlet 온도(T_i)가 클 경우에 충전이 잘 일어난다는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 압력이 클 수록 충전은 maximum 까지 빠르게 일어났으며, mold 온도(T_w)와 inlet 온도(T_i) 모두, 그 값이 높을수록 기본적으로 충전이 잘 되는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 또한, mold 온도(T_w)를 일정 수준 높이는 경우보다 inlet 의 온도(T_i)를 일정 수준 높이는 경우가 충전이 더 잘되는 것을 관찰할 수 있었다.

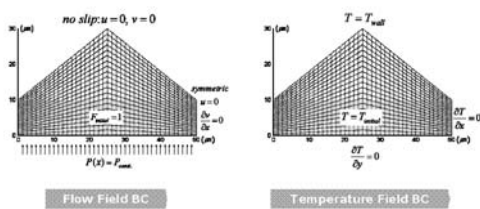


Fig. 4 Local Analysis – Boundary Condition

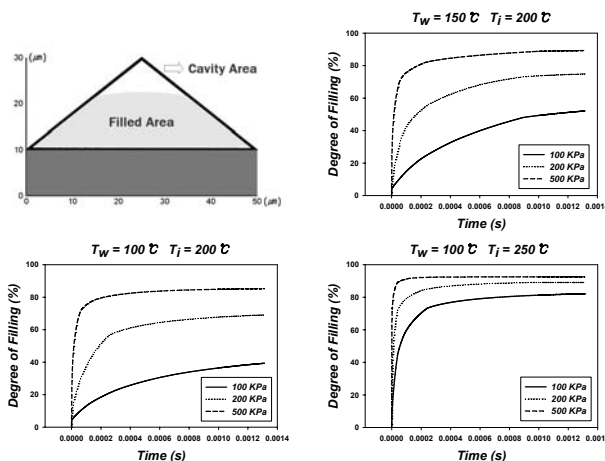


Fig. 5 Local Analysis – Results

4. Conclusion

마이크로 패턴이 형성된 대면적 사출 성형 공정을 해석하였다. 제한된 계산용량과 계산시간으로 인해, 해석의 편의를 위하여 Global / Local 의 두 분류의 해석을 수행하였다. Global / Local 각각의 parametric study 를 통해 온도와 속도 및 압력과 같은 공정변수에 따른 패턴의 충전 정도를 예측하였다. 대면적에서 이루어지는 공정이기 때문에 넓은 면적의 각각의 위치에 따라 유동의 압력과 온도 등, 마이크로 패턴의 충전에 영향을 주는 변수들이 다양한 값들을 보이며 이러한 차이로 인해 실제 마이크로 패턴의 전사성도 차이가 나는 것을 관찰할 수 있었다. 전통적인 사출 성형 해석모듈과는 달리, 마이크로 패턴을 포함한 사출성형 패턴의 최종 전사성을 예측할 수 있는 해석 모듈을 개발하였다.

후기

본 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대 핵심 연구개발사업의 일환인 대면적 미세형상의 초정밀 진화가공원천 기술 개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. J.N. Reddy and D.K. Gartling, "The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics", CRC Press, 1994.
2. Hirt C W and Nichols B D, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", Journal of computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
3. Park J S, Kim S M, Kim M S and Lee W I, "Finite element analysis of flow and heat transfer with moving free surface using fixed grid system", International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 19, pp. 263-276, 2005.
4. H.S. Lee, Polym. Eng. Sci., 37, 559, 1997.
5. M.M. Cross, J. Colloid Sci., 20, 417, 1965.
6. H.A. Barnes, J.F. Hutton, and K. Walters, An Introduction to Rheology, Chapter 2, Elsevier, New York, 1989.
7. M.J. Crochet, A.R. Davies, and K. Walters, Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow, Chapter 9, Elsevier, New York, 1984.
8. Sung Yong Kang, Seung Mo Kim, Woo Il Lee, "Finite element analysis for wavelike flow marks in injection molding", Polym. Eng. Sci., Vol 47, 6, 922-933, 2007.