

사출성형의 3 차원 충전공정 해석

최권일¹·구본홍¹·차백순²·박형필²·이병욱³.

Analysis of Three Dimensional Mold-Filling Process in Injection Molding

K. I. Choi, B. H. Koo, B. S. Cha, H. P. Park, and B. O. Rhee

Abstract

For the three decades, the mold-filling of injection molding process was modeled as Hele-Shaw model. However, this model can not consider the 3D effect. In this paper, numerical simulations of three dimensional mold-filling during the filling phase were performed. The governing equations were discretized by segregated finite element method, which used equal order interpolation for pressure and velocity fields. The iterative linear equation solver (JCG, SOR) was employed for the solution of the momentum and pressure equations. Volume of Fluid (VOF) was employed for the melt front advancement. To check the validity of the numerical results, the results were compared with the experimental ones. The agreements between the experiment and the numerical results were found to be satisfactory.

Key Words : mold-filling, segregated finite element method, SOR, JCG, VOF

1. 서 론

최근 30 여년 동안 사출성형의 충전공정에 대한 해석패키지는 유한요소법으로 압력을 계산하고 유한차분법으로 온도를 계산하는 이른바 Hele-Shaw⁽¹⁾ 근사법을 기반으로 개발되었다. 이는 유동의 두께방향으로의 변화를 무시하여 실제 3 차원유동을 2 차원으로 근사화한 방법이다. 그러나 이러한 이유로 게이트 주위에서의 압력강하, 유로의 확대 및 축소, 와류 등의 이른바 2 차 유동에 의한 영향⁽²⁾은 전혀 고려가 되지 않고 있다. 또한 많은 경우에 있어서 중립면(Midplane)의 정의가 모호하거나 불가능한 경우가 많고 수작업으로 모델링을 함으로 인해 모델링의 소요시간이 많은 것이 사실이다. 또한 3D CAD의 등장으로 Solid Modeling을 통해 자동유한요소생성(Auto Mesh Generation)이 가능해지고

근래에 CPU의 성능이 나날이 발전하고 있으므로 3 차원 사출성형 유동해석 기법의 개발은 매우 필수적이라고 할 수 있다.

전통적인 유한요소방법에서는 속도와 압력을 동시에 계산하는데, 풀어야 할 방정식의 수가 매우 많아지기 때문에 메모리 소모량이 매우 많아지고 계산시간도 많이 소요된다. 본 연구에서는 이러한 비효율적인 방법을 피하기 위해 속도와 압력을 분리하여 순차적으로 반복 계산하는 방법(Segregated Method)을 도입하였다. 이러한 방법은 Pressure correction⁽³⁾, Pressure update⁽⁴⁾, Pressure projection⁽³⁾등 3 가지로 나눌 수 있다. 일반적으로 일반적인 유체유동의 해석과는 달리 사출성형해석은 주입구에서의 속도를 알고 있는 것이 아니라 각 주입구에서의 유량의 합만을 알고 있으므로 본 연구에서는 그에 적합한 방법인 Rice⁽⁴⁾등과 Toit⁽⁵⁾가 제안한 Pressure update 방법을

1. ㈜ 바이오테크 pot527@vmtech.co.kr
2. 한국생산기술연구원 부천디지털융합센터
3. 아주대학교 기계공학과

채택하였다. 이러한 반복계산법은 경계조건의 적용이 수월하고, 3 차원 유동해석처럼 일반적으로 요소수가 50,000 개 이상의 경우에 매우 탁월한 성능을 나타낸다고 알려져 있으며, 사면체, 육면체 등 요소의 형상에도 결과에 크게 영향을 주지 않는 등의 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 알고리즘의 검증에 위하여 실험결과와 3 차원 유동해석 결과를 비교, 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

비압축성, 비탄성, 비뉴우튼 유체에 대한 기본 가정과 관련된 연속방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

여기서 \mathbf{u} 는 속도 벡터이고, p 는 압력이며, η 는 점성계수를 나타낸다. 운동량 방정식에서는 관성력과 체적력은 무시하였다.

2.2 지배방정식의 유한요소 정식화

요소방정식을 유도하기 위하여 운동량방정식에 Galerkin method 를 적용하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{a}_{ij} \mathbf{u}_j = \mathbf{f}_j^u + \mathbf{f}_j^p \quad (4)$$

여기서 \mathbf{f}_j^u 와 \mathbf{f}_j^p 는 각각 속도와 압력의 항을 의미하며, 압력 방정식을 유도하기 위해서 다음과 같이 의사속도(Pseudo velocity)를 정의한다.

$$\hat{\mathbf{u}}_i = \frac{-\sum_j \mathbf{a}_{ij} \mathbf{u}_j + \mathbf{f}_i^u}{\mathbf{a}_{ii}} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 조합하면, 각 절점의 속도는 의사속도와 압력의 항으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_i = \hat{\mathbf{u}}_i - \mathbf{K}_p \nabla p \quad (6)$$

여기서 \mathbf{K}_p 는 압력-속도 결합계수 (Pressure-Velocity Coupling Coefficient)이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{K}_p = \frac{1}{\mathbf{a}_{ii}} \left[\int_{\Omega} \phi \, d\Omega \right] \quad (7)$$

식 (6)을 식(1)에 대입하여 적분하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \nabla \phi \cdot (\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{K}_p \nabla p) \, d\Omega = \int_{\Gamma} \phi \mathbf{u} \, d\Gamma \quad (8)$$

벽면에 위치하고 있는 절점과 같이 속도를 알고 있는 경계조건인 경우에 있어서 의사속도는 압력과 완전히 분리가 되므로, 절점의 속도와 동일하게 놓아야 하며, 아울러 압력-속도 결합계수 \mathbf{K}_p 를 0으로 두어야만 식(8)을 만족하게 된다.

2.3 경계조건

식 (4)와 (8)은 다음과 같은 경계조건을 만족하여야 한다.

- ✓ 유동선단에서는 압력이 0 이어야 한다.
- ✓ 수지입구에서는 압력 또는 유량이 정의되어야 한다.
- ✓ 수지가 금형과 만나는 벽면에서 속도는 0 이어야 한다.

2.4 수치해석

본 연구에서는 유한요소 공식화와 적분계산이 비교적 용이한 사면체 요소(tetrahedral element)를 채택하였으며, 여기서 속도장 및 온도장의 행렬계산은 Jacobi Conjugate Gradient 법 (JCG)을 사용하였고, 압력장의 행렬계산은 Successive Over-Relaxation 법 (SOR)을 사용하였다.

Segregated FEM 을 도입한 3 차원 유동해석의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 속도와 압력을 가정하고, 속도를 이용하여 전단율을 구한 후, Cross-WLF 점도모델을 이용하여 점성계수를 구한다. 그 다음으로 식(4)에서 속도를 구한다. 속도를 구하면, 식(5), (7)에서 의사속도와 속도-압력 연결계수를 함께 구하고, 식(8)을 이용하여 압력을 구한다. 그리고 식(6)을 이용하여 속도를 갱신한다. 속도와

압력이 수렴하면, 온도장을 계산하는데, 온도장 계산은 CVFEM(Contour Volume Finite Element Method)방법을 이용하였다. 온도장 계산이 완료되면, VOF 방법을 이용하여 캐비티가 완전히 충전될 때까지 유동을 진전시킨다.

3. 결과 및 토의

3.1 해석모델

알고리즘을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 금형의 형상은 압력센서의 위치와 함께 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 2는 이에 대한 유한요소 모델을 나타낸다. 러너는 $\phi 7$ 이고, 게이트부는 팬게이트형상과 오버랩게이트로 이루어져 있다. 평판부위의 치수는 200 mm x 40 mm이며, 두께는 2 mm이다. 해석모델의 유한요소수는 120, 248 개이고, 절점수는 23,895 개이다. 수지는 각각 제일모직의 HIPS (Strarex HF1690H), LG 화학의 ABS(HI-121H), 그리고 GE Plastics의 PC(Lexan 121R)을 이용하여 실험을 수행하였다. 해석시간은 CPU 2.2GHz 장비로 약 35 분이 소요되었으며, 미성형과 압력센서에서 0.01 초마다 감지된 압력을 해석결과와 비교하였다.

3.2 유동패턴

Fig. 3에서는 실험결과와 해석결과의 충전패턴을 단계적으로 비교하였다. 러너와 제품의 충전패턴은 예측하기 쉬우므로 배제하였으며, 3 차원 유동으로 근사할 수 있는 게이트 주변의 충전패턴을 나타내었다. 두번째 단계에서 실험결과와 해석결과의 충전패턴이 조금 차이를 보이고 있지만 대체적으로 유사한 결과를 보이고 있다.

3.3 압력결과

각 수지에 대해 각 센서에서 시간에 따라 측정된 압력과 해석결과를 비교하였다. Sensor #4는 수지가 가장 늦게 충전되는 부분이어서 제대로 압력이 감지가 되지 않았기 때문에 압력센서의 반응속도가 상대적으로 느려서 배제하였다.

Fig. 4에 수지가 HIPS 일 경우, 압력센서의 결과와 해석결과를 비교하였다. 수지온도는 215 도, 금형온도는 63 도이며, 유량은 24.5 cm³/sec 이다.

Fig. 5에 수지가 ABS 일 경우, 압력센서의 결과와 해석결과를 비교하였다. 수지온도는 240 도, 금형온도는 60 도이며, 유량은 24.5 cm³/sec 이다.

Fig. 6에 수지가 PC 일 경우, 압력센서의 결과와

해석결과를 비교하였다. 수지온도는 290 도, 금형온도는 83 도이며, 유량은 30.0 cm³/sec 이다.

해석결과와 압력센서에서 측정된 결과는 일부 구간에서 차이를 보이고 있으나, 비교적 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5의 경우, Sensor #1에서의 압력은 매우 비슷한 경향을 보이고 있지만, Sensor #2에서의 압력은 조금 높게 예측되었으며, Sensor #3에서의 압력은 낮게 예측되었다. Fig. 6의 경우, Sensor #2에서의 압력은 해석결과와 비교적 일치되는 결과를 보이고 있으나, Sensor #1과 #3에서 압력이 다소 높게 예측되었다.

4. 결론

본 연구에서는 지금까지 사출성형의 충전해석에 있어 지배적이었던 Hele-Shaw 근사법으로는 불가능했던 2차 유동에 의한 예측과 모델링 소요시간의 단축 등을 위하여 3차원 충전공정해석의 알고리즘을 제시하였다. 속도와 압력을 순차적으로 반복 계산하는 Segregated Scheme을 적용하여 전통적인 방법보다 훨씬 효율적이고 유용한 결과를 볼 수 있었다. 또한 해석결과와 실험결과를 비교하였을 때 거의 일치하는 결과를 보여 알고리즘을 검증할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] C. A. Hieber and S. F. Shen, "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 7, 1-32, 1980
- [2] Batch, G., 1994, "3D Effects in Injection Molding Simulation", *ANTEC 94*, Vol. 1, pp. 547-553.
- [3] Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill, New York.
- [4] J. G. Rice and R. I. Schnipke, "An Equal-Order Velocity-Pressure Formulation That does not exhibit Spurious Pressure Modes", *Comput. Meths. Appl. Mech. Eng.*, 58, 135-149, 1986.
- [5] Toit, C. G., 1998, "Finite element of the Navier-Stokes equations for incompressible flow using a segregated algorithm", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 151, pp131-141.
- [6] K. I. Choi and B. H. Koo, "Analysis of the Three Dimensional Mold-Filling Process in Injection Molding", *ANTEC*, 2003

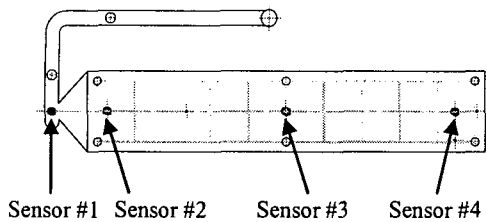


Fig. 1 Mold geometry and pressure sensor positions

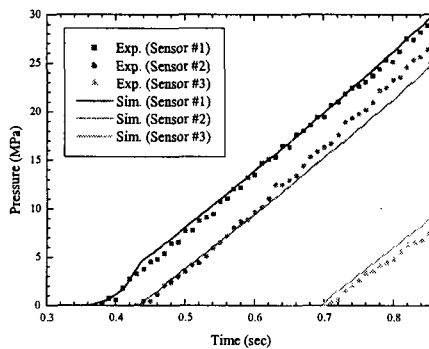


Fig. 4 Comparison of predicted pressure traces vs. experimental observations for HIPS.

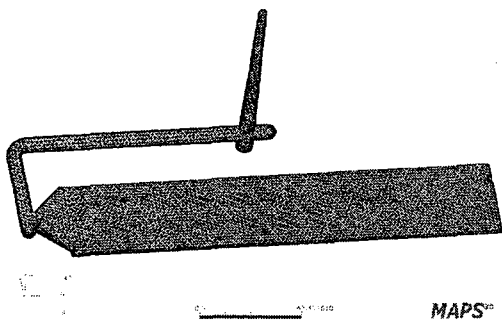


Fig. 2 Finite element model

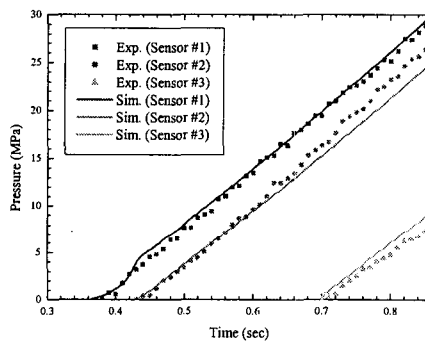


Fig. 5 Comparison of predicted pressure traces vs. experimental observations for ABS.

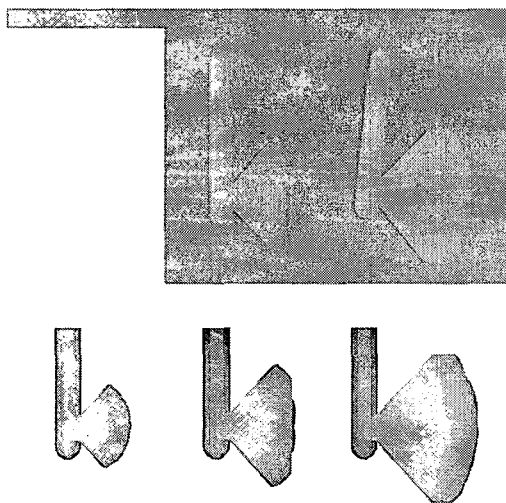


Fig. 3 Comparison of filling pattern of experiment and numerical result

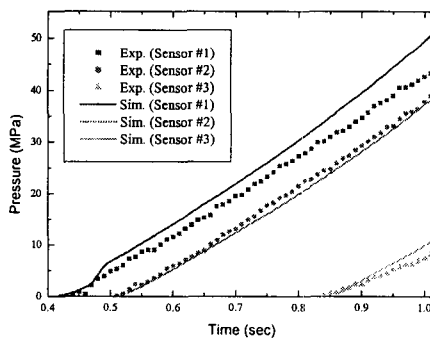


Fig. 6 Comparison of predicted pressure traces vs. experimental observations for PC.