

고점도 유동장이 사출-압축 성형에 미치는 영향

박균명[†] · 김청균^{*‡}

한국생산기술연구원

*홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

Numerical Study on The Injection-Compression Molding Characteristic of High Viscosity Plastic Fluids

Gyun Myoung Park[†] and Chung Kyun Kim[†]

Korea Institute of Industrial Technology

*Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University

Abstract – Recently, as the development of manufacturing technique on SMC(sheet molding compound), various numerical and experimental approaches to injection and compression molding have been investigated. Injection and compression molding, however, has so various cases with complicated boundary condition that it is difficult to analyze mold characteristics precisely. In addition, since a slight change in process variables can significantly change the resulting mold thickness, a proper design is important to compression molding process. Therefore, in this study, the effects of various parameters on compression molding process have been investigated using FEM(finite element method) to formulate the melt front advancement during the mold filling process. To verify the results of present analysis, they are compared with those of reference. The results show a strong effect of initial charge volume, injection time and pressure as a result of variations in the rectangular charge shape.

Key words – compression molding, fixed grid method, VOF equation, FEM.

1. 서 론

사출과 압축이 혼합된 사출-압축 복합성형은 일반적으로 사출-압축성형법으로 알려져 있다. 사출-압축성형은 플라스틱 수지의 가공방법의 하나로서 최근 들어 제품의 대형화, 경량화, 강도를 요구하는 제조기술 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 사출-압축성형공정(Compression Molding Process)에 대한 해석은 최근 몇년 전까지만 하여도 자동화가 용이한 사출성형(Injection Molding)의 그늘에 가려 이에 대한 연구가 중요하게 인식되지 않았지만, 현재 급속한 복합재료와 SMC(Sheet Molding Compound)의 제조기술의 발전에 힘입어 사출-압축성형에 대한 관심이 높아지게 되었다.

사출-압축성형에 대한 연구로서, Owen과 Thomas¹는

충진과정의 예측을 위해 경험적인 법칙을 제안하였으나, 주로 그래픽에 의한 방법으로서 최대압력의 위치를 사용자의 직관으로 알아야 하는 한계성을 가지고 있었다. Silva-Nato등²은 등온의 뉴턴유체(Newtonian Fluid)로 가정하고 유한차분법으로 해석하였으나, 유체의 전진면(Melt Front)이 몰드의 벽면에 도달했을 때의 경계조건을 고려할 수 없어서 완전히 충전된 상태로부터 역으로 전진면을 전진시키는 방법을 사용했다. Hieber와 Shen³은 두께방향의 유동을 무시한 일반화된 헬리쇼우 유동(Generalized Hele-Shaw Flow; GHS Flow)의 유한요소 모델을 도입하였는데 이 모델은 복잡한 형상에도 적용이 가능하고 기본적인 충전과정이 사출-압축성형과정과 비슷하기 때문에 이 모델을 중심으로 많은 연구가 행해져 왔다. Tucker와 Folgar⁴는 유한요소법으로 등온의 뉴턴유체의 충전과정을 해석하여 두께가 아주 얇을 경우, 벨트전진면이 그들의 실험치와 거의 일치하는 결과를 얻었다. Osswald와 Tucker⁵⁻⁶는 각각

[†]주저자 : pgmy@kitech.re.kr

[‡]책임저자 : ckkim@wow.hongik.ac.kr

경계요소법(Boundary Element Method)과 유한요소/검사체적법(Finite Element/Control Volume Method)을 사용하여 실험치에 보다 근접하는 결과를 보여주고 있다.

이와 같이 사출-압축성형에 관한 많은 연구가 있어 왔지만, 사출-압축성형의 해석과정은 일반적인 사출성형과는 달리, 경계조건(Boundary Condition)의 복잡성과 재료의 이방성(Anisotropy)으로 인하여 수치적인 해석에 있어서 아직까지도 많은 어려움이 남아 있다. 또한, 지금까지의 연구들은 대부분 해석적인 해가 가능한 타원(Ellipsoid)의 경우로 여전히 몰드형상(Mold Geometry)의 한계를 나타내고 있으며, 플라스틱 수치들의 다양한 점도에 의한 영향을 고려하지 못하여 실제 사출-압축성형공정에 적용하기에는 무리가 있다.

따라서, 본 연구에서는 지금까지의 연구들을 바탕으로 사출-압축에 대한 유동선단의 추적알고리즘을 통하여 충전과정시 소요되는 압력분포와 유동선단의 진행방향에 대한 정확한 예측 및 다양한 플라스틱 수치들에 대한 사출-압축공정의 성형특성을 알아보고자 한다.

2. 해 석

사출-압축성형의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있으며, 사출-압축성형의 수치해석에 있어서 중요한 점은 유동선단의 진행에 대한 추적(Tracking) 알고리즘에 있다. 따라서, 본 연구에서는 확장성을 가진 VOF(Volume-of-Fluid)방정식을 사용하여 유동선단의 진행에 대한 결과를 도출하였다. 이 VOF 방정식의 사용은 자유로운 수렴범위(Courant Criterion)에서 시간항을 쉽게 해결할 수 있게 한다[7].

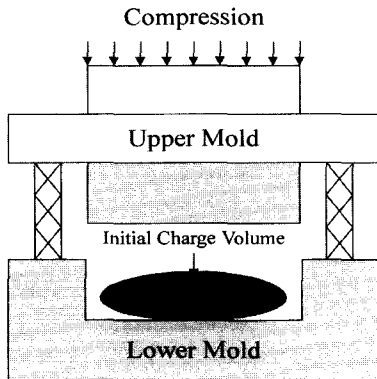


Fig. 1. Schematic diagram of the injection-compression molding.

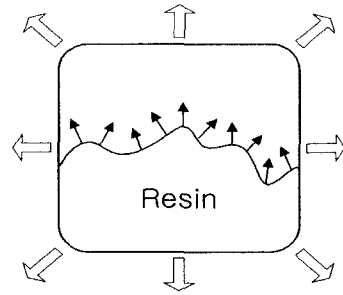


Fig. 2. An arbitrarily deforming control volume under-going filling.

2-1. 지배방정식

충진과정시 변형되는 검사체적을 Fig. 2에 제시하였다. 플라스틱 수지를 압축성 유체(Compressible Fluid)로 가정하고, 수지의 유동거동에 대하여 유체역학적 보존법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V(t)} \phi dV = \int_{S(t)} \phi(v-u) \cdot n dS \tag{1}$$

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{if the space is filled} \\ 0 & \text{if the space is empty} \end{cases} \tag{2}$$

여기서 ϕ 는 충전상태를 나타내는 변수이고, u 와 v 는 각각 플라스틱 수지의 유동속도와 검사체적의 속도를 나타낸다. 충전과정 중 임의의 시간에서 충전된 플라스틱 수지의 체적분율(Volume Fraction)을 표현하면 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{V} \int \phi dV \tag{3}$$

여기서 F 가 나타내는 것은 검사체적 $V(t)$ 에 대한 충전변수 ϕ 의 평균 체적을 의미한다. 수지의 유동거동을 헬리쇼우 유동모델(Hele-Shaw Flow Model)로 근사하고 두께방향 유동속도를 무시하면 다음과 같은 유동속도식을 구할 수 있다[8].

$$u = -\frac{k}{\mu} \nabla P \tag{4}$$

식 (3)과 식 (4)를 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (VF) = \int_{S(t)} \phi \left(v + \frac{k}{\mu} \nabla P \right) \cdot n dS \tag{5}$$

충진과정 중 임의의 시간 $h(t)$ 에서 성형두께(Mold

Thickness)를 균일하다고 가정하면,

$$V = hA \tag{6}$$

이다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 사출-압축성형의 충전과정에 대한 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(hAF) = \int_{S(t)} \phi v \cdot n \, h dS + \int_{S(t)} \frac{k}{\mu} \nabla P \cdot n \, h dS \tag{7}$$

2-2. 고정격자해법(Fixed Grid Method)

본 연구에서의 해석과정에서는 고정격자계(Fixed Grid Scheme)를 사용하였다. 고정된 수지의 표면속도 v 를 0으로 가정하면[7], 식 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$A \frac{\partial}{\partial t}(hF) = \int_{S(t)} \frac{k}{\mu} \nabla P \cdot n \, h dS \tag{8}$$

해석모델인 검사체적에 대한 삼각형 요소와 절점은 Fig. 3에 제시하였다. 선형 삼각형 요소로 분할된 격자계에 따른 압력을 선형 형상함수를 이용하여 표현하게 되면 다음과 같이 근사화할 수 있다[9].

$$P^e = N_1^e P_1 + N_2^e P_2 + N_3^e P_3 \tag{9}$$

여기서 하첨자 1, 2, 3은 요소에 대한 각각의 절점을 나타내고, N 은 각 절점에서의 선형 형상함수를 나타낸다. 식 (8)을 시간적분에 의한 이산화 형태로 표기

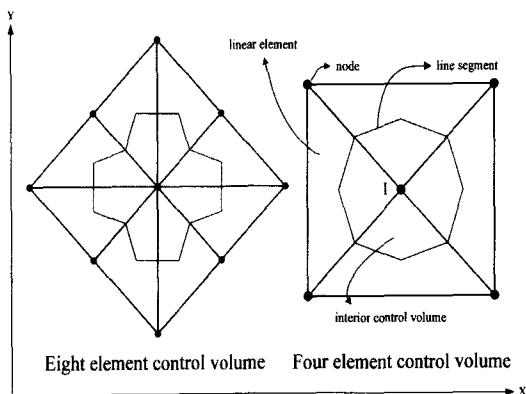


Fig. 3. Finite element mesh, showing four and eight element control volumes.

하면 다음과 같다.

$$A_i h F_i = A_i h^{old} F_i^{old} + h \Delta t \sum_{j=1}^m \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \Delta y_j - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Delta x_j \right) \tag{10}$$

여기서 Δt 는 시간 간격을 나타내고, 상첨자 old 는 이전 시간에서의 계산값을 의미한다. 그리고 Δx_i 와 Δy_i 는 절점 I 주위의 반시계방향으로 설정되는 j 번째 선 요소(Line Segment)의 x, y 방향 길이성분이며 h 는 성형두께를 나타낸다. 식 (9)를 식 (10)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$a_i P_i = \sum a_{nb} P_{nb} + h^{old} F_i^{old} - h F_i \tag{11}$$

여기서 a 는 유도과정에 의해 생성된 계수이고, \sum 는 절점 I 주위의 절점들에 대한 총 합이다. 위 식들은 Voller[10]에 의해 제안된 고체-액체 상변화 구조와 유사하며, 이를 바탕으로 Voller와 Peng[7]에 의해 유도되었다. 본 연구에서는 위의 식들에 대하여 제어체적에 기초를 둔 유한요소법을 적용하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 제어체적에 기초를 둔 유한요소 모델을 사용하여 유동선단의 진행방향 및 압력의 분포로부터 사출-압축의 성형특성을 살펴보았다. 해석에 사용된 모델은 사각형에 국한하였으며, 유한요소법으로 해석하였다. 그리고 해석의 신뢰성을 검증하기 위하여 Chen

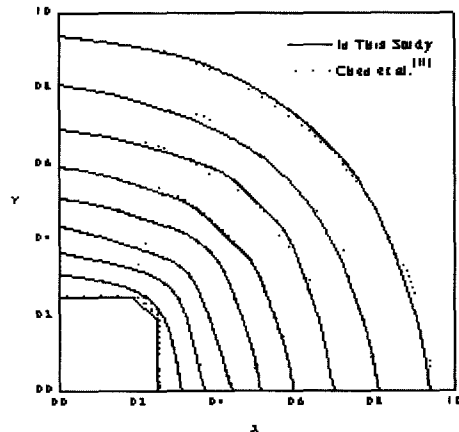


Fig. 4. Comparison of filling front for the square charge shape.

등[11]에 의하여 연구된 해석결과와 본 연구의 해석결과를 비교하였으며 Fig. 4에 제시하였다. 그림에서 점선은 Chen등[11]에 의한 해석결과를, 실선은 본 연구의 해석결과를 나타낸다. 결과에서 보듯이, 충전과정에서 시간의 변화에 따른 유동선단의 진행방향이 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 충전과정시 유동선단의 거동을 잘 표현하고 있다. 그러므로, 이러한 해석결과와 신뢰성을 바탕으로 여러 인자의 변화에 따른 유동선단의 거동을 조직적으로 살펴보았다.

Fig. 5는 y 방향 면적비가 두 배인 직사각형 모델에 대한 유동선단의 거동을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이, 유동선단의 거동은 y 방향으로 갈수록 빠르게 진전되고 있으며, 성형말기 부위에서는 반대곡선을 그리며 진행됨을 알 수 있는데, 이는 유동이 우측 상단으로 진행할수록 유동의 진행방향으로 단면적이 감소하기 때문에 압력의 역구배에 의한 유동저항이 작용하기

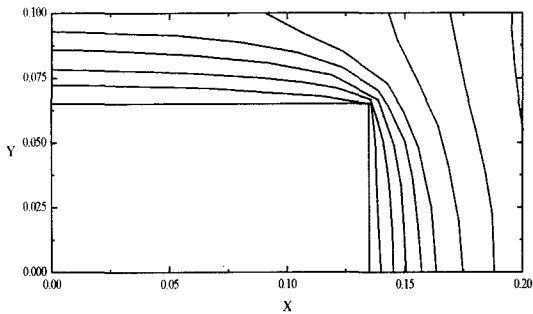


Fig. 5. Comparison of filling front for the rectangular charge shape.

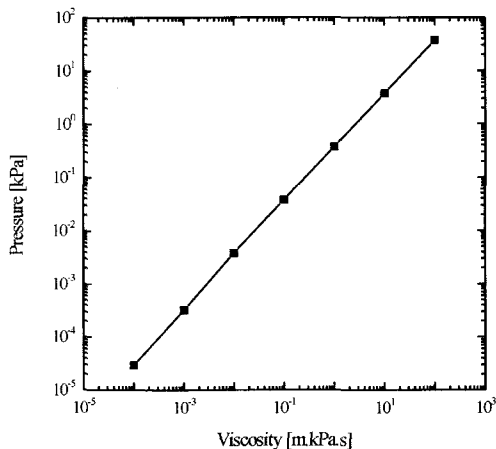


Fig. 6. Effect of the viscosity variation on average pressure after the mold filling.

때문이다.

다양한 점도의 플라스틱에 대한 사출-압축 성형시 충전과정에 소요되는 압력의 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 플라스틱의 점도와소요압력은 선형적으로 비례하는 특성을 보이고 있으며, 점성에 의한 몰드표면과 플라스틱 수지의 마찰효과가 커질수록 소요압력은 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 사각형 모델의 형상비(Asspect Ratio)의 변화에 따른 플라스틱 수지의 충전시간에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 형상비가 클수록, 주입되는 수지의 양이 감소할수록 충전과정이 완료되기까지 소요되는 시간은 크게 증가됨을 알 수 있다. 특히,

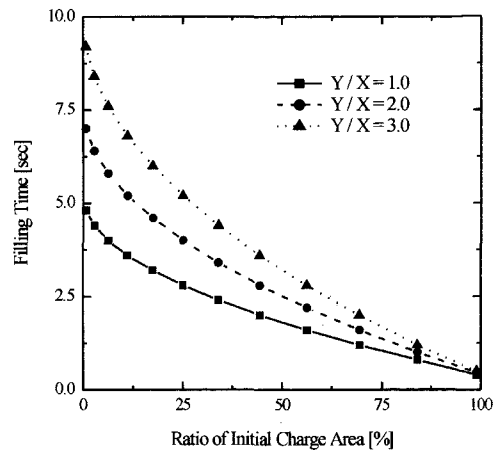


Fig. 7. Effects of aspect ratio and initial charge volume with filling time.

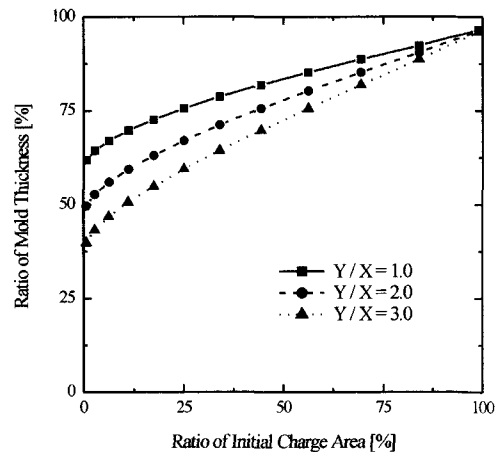


Fig. 8. Effects of aspect ratio and initial charge volume with mold thickness.

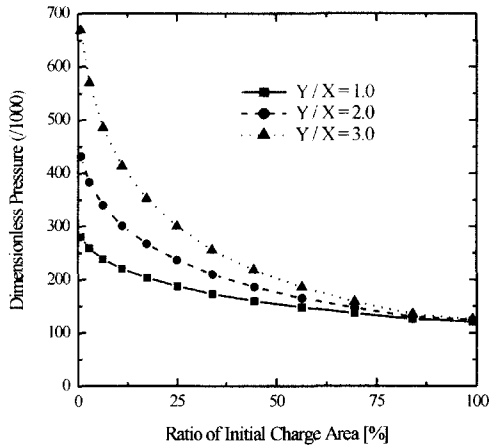


Fig. 9. Effects of aspect ratio and initial charge volume with mold pressure.

주입되는 수지의 양이 최종 성형품에 근접할 수록 형상비에 관계없이 일정한 충전시간으로 수렴되는 경향을 나타내고 있다. 또한, 성형이 완료된 후의 성형두께 (Mold Thickness)에 대하여 주입된 수지의 양과 형상비가 미치는 영향을 Fig. 8에 제시하였다. 성형두께는 초기 주입된 수지의 두께를 기준으로 성형이 완료된 후의 두께에 대하여 무차원화 하여 나타내었다. 성형 두께는 주입되는 수지의 양이 증가할 수록 증가하며, 형상비가 클수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 지나친 수지의 주입량은 성형품의 두께를 증가시켜 재료의 절감차원에서 바람직하지 못하며, 주입량이 적을 경우에는 사출압을 증가시키고 사출시간을 길게하여 미 성형을 발생시키는 원인이 될 수도 있다. 그러므로, 최적 두께의 성형품을 충전하기 위해서는 형상비에 관계하는 적절한 수지량을 결정하여야 한다.

마지막으로, 충전과정이 완료되기까지 소요되는 압력의 변화를 Fig. 9에서 보여주고 있으며, 이때의 압력값은 충전이 완료된 후의 평균압력을 성형두께와 유동속도에 의하여 무차원화 하였다. 소요압력은 형상비가 증가할수록 급격히 증가하는 경향을 보이며, 수지의 주입량이 늘어날수록 형상비에 관계없이 임의의 값으로 수렴되는 특징을 나타내고 있다. 이러한 결과는 주입되는 수지의 양이 증가하게 되면 충전시간의 단축으로 인하여 사출기의 압력전달 시간이 짧아지게 되어 사출압이 제대로 전달되지 못하기 때문이다. 따라서, 사출시간을 단축시키기 위하여 수지의 주입량을 크게 증가시키는 것은 성형두께 측면으로 볼 때 바람직하지 못하다.

4. 결 론

본 연구에서는 사출-압축성형법을 대표적으로 적용하고 있는 중대형 플라스틱 성형품을 중심으로 이루어졌으며 사출-압축성형의 충전과정에서 여러 성형변수들이 미치는 영향을 고점도 플라스틱 수지, 성형시간, 성형품두께, 성형압력등을 통하여 살펴보았다. 유동선단의 진행방향에 대한 정확한 예측 및 소요되는 압력과 충전시간 등의 성형특성 결과로부터 실제 사출-압축성형공정에 활용할 수 있는 효율적인 해석방법을 제시하였다. 시간에 따라 변형되는 검사체적에 대한 유한요소해석 결과로부터 유동선단의 진행방향에 대한 정확한 예측이 가능함을 제시하였다. 또한, 성형품의 형상비가 증가할 수록 충전시간과 소요압력은 크게 증가함을 알 수 있고 상대적으로 성형품의 성형두께는 감소함을 정량적으로 알 수 있었다. 그리고, 초기 주입되는 수지의 양이 증가할 수록 성형특성이 한점으로 수렴됨을 알 수 있었다. 따라서, 사출-압축성형은 이러한 수지의 주입량에 따라 성형특성이 변화되기 때문에 사출시간과 압력에 대한 속도 및 크기를 항상 고려해야 함을 알 수 있다.

참고문헌

1. M. J. Owen, D. A. Thomas and M. S. Found "Flow Fiber Orientation and Mechanical Property Relationships in Polyester DMC," *Proc. 33rd SPI Reinforced Plastics/Composite Institute*, paper 20-B, 1978.
2. R. J. Silva-Nietto, B. C. Fisher and A. W. Birley *Polymer Composite*, Vol. 1, No. 14, 1980.
3. C. A. Hieber and S. F. Shen "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process," *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 1-32, 1980
4. C. L. Tucker and F. Folgar "A Model of Compression Mold Filling," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 23, No. 2, pp. 69-73, 1983.
5. T. A. Osswald and C. L. Tucker "A Boundary Element Simulation of Compression Mold Filling," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 28, No. 7, pp. 413-420, 1988.
6. T. A. Osswald and C. L. Tucker "Compression Mold Filling Simulation for Non-Planar Parts," *Int. Polym. Processing*, Vol. 5, No. 2, pp. 79-87, 1990.
7. V. R. Voller and S. Peng *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 35, pp. 1758, 1995.
8. C. C. Lee, F. Folgar and C. L. Tucker *J. Eng. Indust.*, Vol. 106, pp. 102, 1984.

9. O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor "The Finite Element Method, 4th Ed.," McGraw-Hill, London, 1989.
10. V. R. Voller *Numerical Heat Transfer*, Vol. 17, pp. 155, 1990.
11. Y. F. Chen, V. R. Voller and K. A. Stelson "Time-Implicit Fixed and Deforming Grid Solutions for Compression Mold Filling," *Polym. Comp.*, Vol. 17, No. 3, 1996.

기호설명

A = plane area
 F = volume average
 h = time-varying mold thickness

k = pseudo-permeability
 n = outward normal component
 N = shape function
 P = pressure
 S = surface area
 t = time
 u = velocity of the polymer
 v = velocity of the control volume surface
 V = volume
 ϕ = microscopic phase marker
 μ = viscosity
 Δt = time step size