

Hele-Shaw Cell에서 가스 사출의 흐름 특성

조은수(정), 최창균(중), 윤도영(정)*
서울대학교 화학공학과, 광운대학교 화학공학과*

Fluid Flow Characteristics of Gas-Injection Molding in a Hele-Shaw Cell

Eun Su Cho, Chang Kyun Choi, Do-Young Yoon*
Department of Chemical Engineering, Seoul National University,
Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*

서론

대형 플라스틱 사출제품을 성형하는 가공공정에서는 기존의 일반적인 사출법으로는 해결하기 어려운 많은 문제점이 야기되고 있다. 특히 대형 사출품의 경우 용융 플라스틱이 금형으로부터 이탈되어 냉각되는 과정에서 수축 등으로 인하여 성형품이 뒤틀리거나 휘는 현상이 종종 발생한다. 이러한 문제를 해결 할 수 있는 방법 중 하나로 가스사출 성형법이 고안되었다. 이러한 가스사출 성형법은 용융 플라스틱의 양을 미리 조정할 수 있고, 가스의 유량을 조정하여 가공성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 공정의 단순화를 모색하여 전체적인 생산비 절감의 효과를 가져온다. 그러나, 용융 플라스틱과 가스 간의 상호작용으로 인한 불안정성 요인이 잠재되어 있었으나, 문제의 복잡성으로 인해 학문적인 접근이 그리 많지 않았다. 따라서 적절한 실험 및 모델링을 통하여 제품의 정밀성 및 균질성에 필요한 조업조건과 설계방안이 구축되어야 할 것이다.

본 연구에서는 가스사출 성형공정에서 수반되는 2상 간의 유동특성을 규명하고자 한다. 대부분의 사출 성형품들은 얇고 넓은 표면적을 가지는 경우가 많다. 따라서 복잡한 3차원적 유동의 형태를 해석이 비교적 용이한 2차원 흐름으로 전환시켜 계를 단순화하고자 한다. 이러한 2차원 유동을 연구하는 방법으로는 1898년에 제안된 Hele-Shaw cell을 이용한 유동 해석법이 적절하다. 이 방법에서는 두 판 사이의 얇은 공간에서 유체흐름을 발생시켜 관련된 물리적 함수들을 결정하는 것이 용이하다. 특히, 유동의 가시화와 포텐셜 장의 묘사에 적합한 것으로 알려졌다. 또한 점도에 기인한 불안정성 해석에 도움을 준다. 이에 본 연구에서도 Hele-Shaw cell을 기본계로 사용하였다.

이론

Hele-Shaw cell에서의 흐름특성은 다공매질의 흐름특성인 Darcy의 법칙을 따르는 것으로 알려져 있다. 특히 2차원의 유동을 해석하는데 유용한 장치이다. Hele-Shaw cell 내에 점도와 밀도가 다른 두개의 유체층이 자유경계면(free surface)을 이루고 있으면서 경계면이 일정한 속도로 이동하고 있다. 이때의 지배 방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\nabla P = \mu \nabla^2 \cdot u$$

$$\nabla \cdot u = 0$$

경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n \cdot u &= 0 \\ t \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot n &= 0 \\ n \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot n &= \gamma (\nabla \cdot n) \end{aligned}$$

여기서 P , u , n , t , σ , γ 는 각각 압력, 속도, unit normal vector, unit tangent vector, total pressure, 표면장력이다. 한편 이때의 유동에서의 속도 포텐셜은 다음과 같이 Laplace 식을 만족하게 된다.

$$\nabla^2 \phi = 0$$

이 식을 통하여 Saffman 과 Taylor는 위에 나타난 경계조건을 사용하여 close form을 갖는 finger의 엄밀해를 다음과 같이 제시하였다.

$$x + iy = \frac{\phi + i\psi}{V} + \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{V}{U}\right) \ln \frac{1}{2} \left(1 + \exp\left[-\frac{\pi(\phi + i\psi)}{V}\right]\right)$$

여기서 정상상태의 finger의 모양을 나타내는 식은 위 식의 real part에서 구할 수 있다.

$$x = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{V}{U}\right) \ln \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{Uy}{V}\right)$$

여기서 x , y 는 평면에서의 좌표계이고, 또한 U , V 는 각각 finger의 속도와 finger로부터 무한히 떨어진 영역에서의 유체층의 평균속도를 나타낸다. 이 식을 바탕으로하여 finger의 모양을 비교하고 또한 시간에 따르는 유체층 선단에서의 자유경계면의 모양을 이론식과 실험을 비교하였다.

실험

본 실험에서 사용된 Hele-Shaw cell은 유효면적이 100×200 mm 이고, 깊이는 각각 1 mm 와 3 mm 의 두가지로 제작되었다. Cell의 아래판은 두께의 균질성을 위하여 표면처리된 강철로, 위판은 유동의 가시화를 위하여 두께가 20 mm인 아크릴 판으로 제작되었다. 사용된 유체로는 점도가 여러 가지인 실리콘 오일을 사용하였다. 유체의 구동과 그 양은 실린지 펌프를 사용하여 조절하였으며, 가시화되는 유동현상은 비디오 사진기로 촬영하였다. 촬영된 현상들은 컴퓨터에서 화상처리되어 유속을 비롯한 각종 자료들이 산출되었다. 또한 실험은도에서 밀도, 점도와 표면장력을 각각 측정하였다. 밀도는 간단한 비중계를 이용하여 측정하였으며, 점도는 RMS 점도계를 사용

하여 측정하였다. 또한 표면장력은 환형계면장력계를 이용하여 측정하였다.

결 과

실험의 영역은 Ca의 값에 따라 크게 두 영역으로 구분할 수 있었다. 그 중 하나는 정상상태로 finger가 자라나는 것이고, 다른 하나는 finger의 자유경계면이 Ca의 값이 커짐에 따라서 불안정해져서 finger의 끝이 갈라지는 것이었다. 우선 finger가 정상상태의 영역에서 이론적으로 예측한 finger의 모양과 실험으로부터 얻은 결과와 비교하였다. 정상상태에서도 현상적으로 실험의 범위를 Ca 값에 따라서 크게 두가지로 분류할 수 있었다. Ca의 값이 아주 작을 경우, 즉 finger의 속도가 작을 경우와 Ca가 이 보다 큰 경우로 구분 할 수 있었다. 이를 Fig. 1에 나타내 보았다. 속도가 작을 경우인 (a)에서는 실험에서의 finger의 모양이 Saffman 과 Taylor가 제안하였던 이론식과 잘 일치하였다. 그러나 상대적으로 속도가 큰 (b)의 경우에는 이론으로 예측한 finger의 모양보다 실험에서 나타난 finger의 폭이 더욱 벌어져 있는 것으로 나타났다. Ca의 값이 커질수록 이러한 벌어짐의 정도가 심해짐을 확인하였다. 이러한 현상이 나타난 이유로는 Ca의 값이 작을 경우에는 자유경계면이 이동하는 선단의 속도보다 표면장력에 의해 구형의 finger로 형성되는 시간이 상대적으로 크기 때문일 것으로 생각된다. 즉, 이 경우에는 곡률반경이 Ca의 값이 클 때보다 크게 나타난다. 이와 같은 결과는 Ca의 값이 큰 경우의 실험에서 명백히 나타난다.

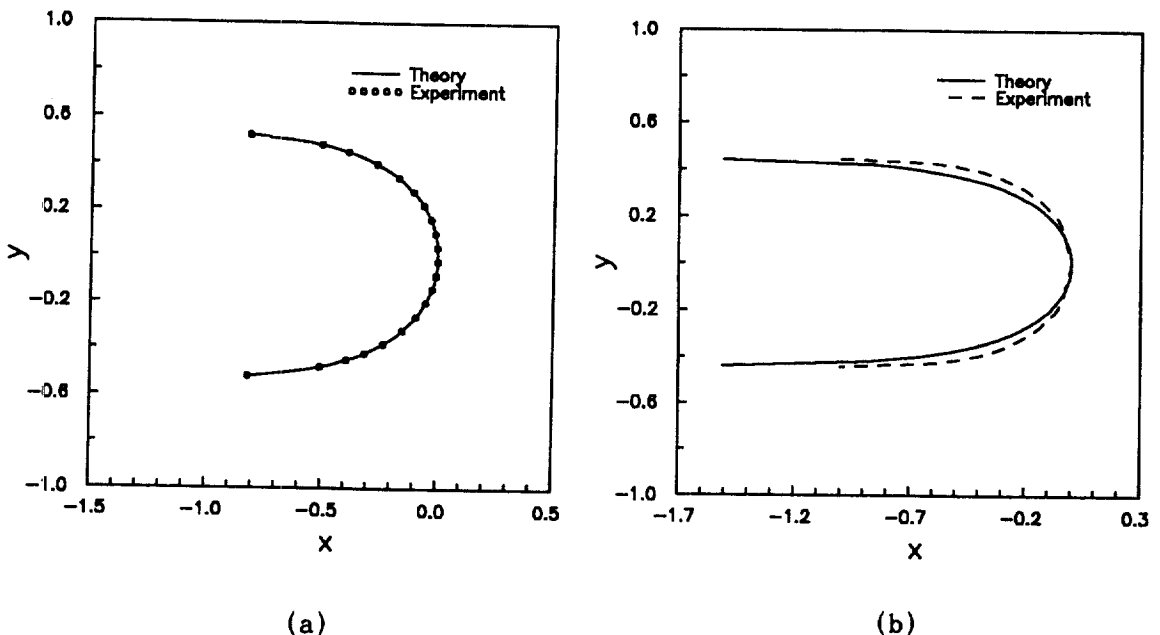


Fig. 1 Bubble cap comparison theory with experiment
(a) $\lambda = 0.5411$ (b) $\lambda = 0.444$

Ca 값이 커지게 되면 표면장력의 영향이 $U\mu$ 에 비하여 상대적으로 작기 때문에 계면이 빠르게 움직이는 동안에 $U\mu$ 값이 평형에 도달하게될 수 있는 시간이 충분하지 못하다. 이를 고려하면, 어떤 Ca 수에 도달하면 finger의 유속이 갑자기 변화할 수 있는 임계조건이 본 실험계에 잠재하고 있음을 보여주고 있다고 말할 수 있다. 이와 같은 메카니즘을 정량화하기 위하여, finger에 의해 구동되는 유체의 평균 유속 $\langle U \rangle$ 와 finger의 속도 U 와의 비를 Ca 값에 대해 Fig. 2에서 나타내었다.

낮은 Ca 값에서 $U/\langle V \rangle$ 가 급격한 상승을 보이고 있다. Ca 값이 커짐에 따라 $U/\langle V \rangle$ 의 증가가 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이것은 $U/\langle V \rangle$ 작을 경우 finger가 오일을 많이 밀어내는 경우이고 반대로 $U/\langle V \rangle$ 이 클 경우 finger가 유체 사이를 뚫고 들어가는 것이 큰 것이다. 따라서 finger가 오일을 밀어내는 역할이 줄어드는 것이다. 즉 $U/\langle V \rangle$ 값이 커질 경우 finger가 오일을 뚫고 나가서 터지는 "blow through" 현상이 발생할 수도 있다. $U/\langle V \rangle$ 값이 작은 경우에 즉 Ca 값이 작을 때에는 finger의 모양이 이론과 실험이 잘 일치한다.

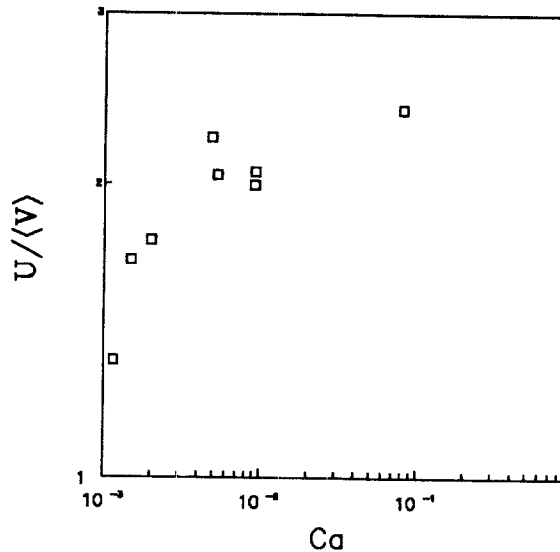


Fig. 2 $U / \langle V \rangle$ vs. capillary number

참고문헌

1. Hele Shaw, H. S.: *Trans. Int. Nav. Archit., Land.*, **40**, 21(1898).
2. Saffman, P. G. and Taylor, G. I.: *Proc. Roy. Soc.* A245, 312(1958).
3. Bretherton, F. P.: *J. Fluid Mech.*, **10**, 166(1961).
4. McLean, J. W. and Saffman, P. G.: *J. Fluid Mech.*, **102**, 455(1981).
5. Tabeling, P. Z. and Libchabar, A.: *J. Fluid Mech.*, **177**, 67(1987).