10G09

수직 단면 수치해석에 의한 이형 압출 다이 내의 삼차원 유동해석에 관한 연구

서동진, 윤재륜

서울대학교 섬유고분자공학과

1. 서론

압출은 파이프, 필름, 섬유, 프로파일, 전선과 케이블 등 여러 가지 다양한 형태의 제품을 연속적으로 생산하는 열가소성 고분자 물질의 성형 과정 중의 하나이다. 스크류 헤드에서 전달된 고분자 용융액은 압출 다이를 통과하면서 원하는 형태로 만들어진다. 특히 이형 압출 다이는 일정한 형태가 있는 것이 아니라 제품에 따라서 단면의 형태가 달라진다.

다이의 역할은 고분자 용융액을 유연하게 흐르도록 하는 것과 위치에 관계없이 일정한 속도를 유지하도록 하는 것이다. 이러한 역할을 제대로 수행하는 다이를 설계하기 위해서 지금까지는 많은 시간과 돈이 들어가는 경험적인 방법을 사용하였다. 더 나은 다이 디자인을 위해서는 다이 내의 속도와 온도 분포를 정확히 예측할 필요가 있다. 이를 위해서 3차원 수치해석이 사용되기도 했으나 여러 가지 문제점으로 인하여 2차원 해석도 많이 수행되었다. Hurez[1]등이 완전히 발달된(fully developed) 유동이라는 가정을 통해 등온 조건에서 유체의 흐름 방향에 수직인 단면에 대해 수치해석을 하였다.

본 연구에서는 유체 흐름 방향에 수직인 단면에 대해 2차원 수치해석을 수행함에 있어서 유체 흐름 방향에 따른 수직 단면의 변화와 온도장 변화를 고려하였다. 일반적으로 온도장은 다이 내에서 서서히 변화하지만 온도에 따른 영향이 크기 때문에 온도장을 고려할 필요가 있다[3]. 끝으로 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하여 보았다.

2. 이론

이형 압출시 다이 내의 유동 및 열유동 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

첫째, 유체는 GNF(Generalized Newtonian Fluid)이고 비압축성이다.

둘째, creeping flow 이다.

셋째, steady state flow 이다.

넷째, 단면에 수직인 방향의 속도만을 고려하고 다른 속도 성분은 무시하며 압력은 단면에 대해서 일정하다.

위와 같은 가정하에서 속도장과 온도장을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\eta\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\eta\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z} \qquad (1)$$

$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) = \eta\left(\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)^2 + \eta\left(\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2 \qquad (2)$$

온도장의 경계조건을 알기 위해 다이의 온도 분포를 알 필요가 있다. 다이의 온도 조절이 제대로 잘 된다면 다이의 온도를 쉽게 알 수 있지만 일반적으로는 정확한 온도 분포를 알기 힘들다. 여기서는 다이가 유동 방향에 대해서 실린더 형태라고 가정하여 2차원 열전달 문제로 바꾸어 해석하였다. 그리고 다이에 들어오는 유체의 온도를 정확하게 알 수 없기 때문에 압출 헤드를 포함하여 다음의 식으로 온도장을 계산하였다.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0 \qquad (3)$$

(3)식에서 나온 결과를 바탕으로 (1), (2)식을 동시에 계산하였다. 계산 시 유동방향 즉, z 방향으로 한 단계씩 증가시켜 단면을 계산하였다. 다이가 유동방향으로 계속 변하기 때문에 이를 처리하는 방법이 필요하다. Hurez[1]등은 가상 도메인 방법(fictitious domain method)를 사용하였지만, 본 연구에서는 더욱 정확한 해를 얻기 위하여 유동방향에 대해서 각각의 위치마다 단면의 모양을 계산하였다.

3. 실험 및 수치해석

위의 식들을 다음과 같은 순서의 루틴을 포함하는 유한요소 수치해석 방법[5]을 이용하여 수치모사 하였다.

1) 기준이 되는 수직단면 데이터와 유동방향의 step size 입력
2) 기준이 되는 수직단면 데이터를 이용한 각각의 위치에서의 단면모양 계산
3) 각각의 단면에 대해 주어진 Q를 유지하기 위한 속도장 계산(secant method[6]를 사용)
4) 온도장 계산
5) 이전의 데이터를 가지고 유동방향으로 한 step 증가시켜 동일한 계산을 수행

실험은 실제 상용 폴리프로필렌을 가지고 그림 1과 같은 모양의 다이를 제작하여 다음과 같은 다양한 조건으로 하였다. 다이의 온도 조건을 180°C, 200°C, 220°C로 하였고, 스크류의 속도를 30, 60, 90rpm으로 하였다. 다이에 온도와 압력 센서를 설치하여 운행시의 온도와 압력을 측정하였다.

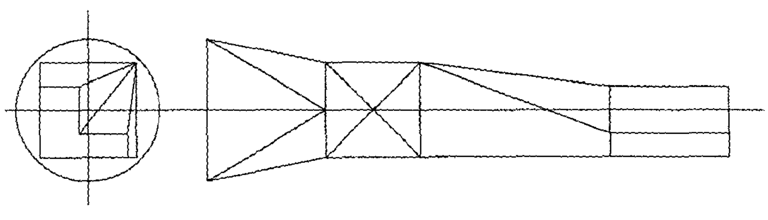

Fig. 1. 실험에서 사용한 L자 이형 압출 다이.

4. 결과 및 토론

수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 Hurez[1]등의 논문과 같은 조건에 대해 수치모사를 해 보았다. 다이의 모양과 결과를 각각 그림 2 와 표 1 에 나타내었다. 본 연구의 결과가 가상 도메인 방법보다 더 정확한 예측을 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 3 에는 압출 헤드와 다이의 온도장을 계산하여 유체의 경계에서의 온도를 유동 방향에 대해서 나타내었다. 실험 결과는 다이와 유체의 경계에서 측정한 값이다. 실험 조건중 60rpm, 200°C 인 경우에 대하여 그림 3 에 나타난 온도분포를 경계조건으로 주고 수치모사한 결과를 그림 4 에 나타내었다. 점성 데이터는 5-constant Model[4]을 이용하여 모델링을 하였으며 수치해석의 결과와 실험한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

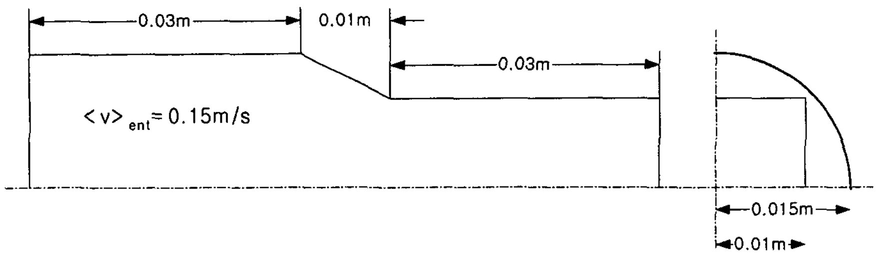

Fig. 2. 수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위한 다이.

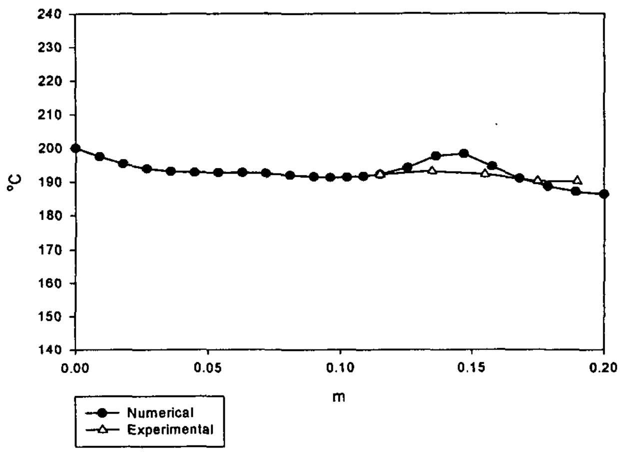

Fig. 3. 60rpm, 200°C 에서의 유체와 다이 경계의 온도.

Table 1. Comparison of the pressure drop for different numerical methods.

$m=10^5 Pa \cdot s^n$	n = 1.0 ΔP (Pa)	n = 0.4 ΔP (Pa)
Fictitious domain method[1]	8.2260×10^7	6.8947×10^6
proposed method	$\mathbf{8.5591 \times 10^7}$	$\mathbf{7.1040 \times 10^6}$
3-D numerical result[1] (1920 elements)	8.6649×10^7	7.3463×10^6

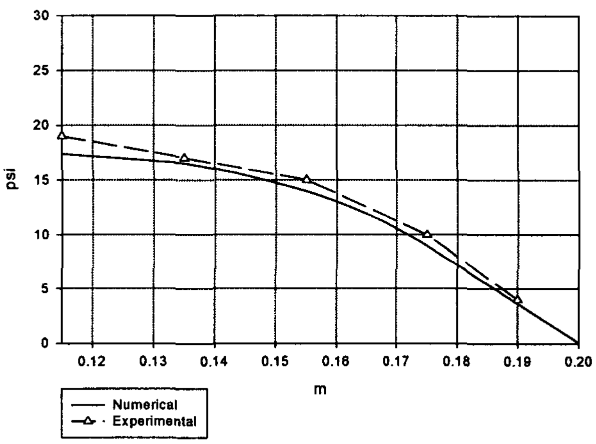

Fig. 4. 다이 내에서의 유동 방향에 대한 압력 분포.

참고문헌

1. P. Hurez and P. A. Tanguy, Polymer Engineering and Science, **33(15)**, 971 (1993).
2. Z. Tadmor and C. G. Gogos, in *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York (1979).
3. C. Rauwendaal, in *Polymer Extrusion*, Hanser Publishers, New York (1986).
4. K. K. Wang, et al, *CIMP Progress report* No. 14, Cornell Univ. New York (1988)
5. D. S. Burnett, in *Finite Element Analysis*, Addison-Wesley, USA (1987)
6. William H. Press, et al, in *Numerical Recipes in C*, 2nd ed. Campridge Univ. USA (1992)