

1 축형스크류압출기에서 비뉴톤류체의 류동특성결정을 위한 수값모의방법

김 철 석

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《오늘 과학과 기술은 매우 빠른 속도로 발전하고있으며 사회발전에서 과학기술이 노는 역할은 더욱더 커지고있습니다. 현시대의 요구에 맞게 과학기술을 빨리 발전시켜야 우리의 자립적민족경제의 위력을 강화하고 사회주의건설을 더욱 다그칠수 있으며 사회주의의 우월성을 전면적으로 높이 발양시킬수 있습니다.》(《김정일선집》 증보판 제18권 441페이지)

압출기내부에서 반죽물이나 용융물의 류동특성을 명백히 밝히는것은 생산과 경영활동을 과학화하기 위한 필수적요구이다.

선행연구[1]에서는 스크류안에서 저밀도폴리에틸렌과 고밀도폴리에틸렌의 류동학적특성량들을 공학공식을 리용하여 계산하였다. 또한 단일스크류 및 쌍스크류에서 빙함류체와 유리알갱이가 섞인 실리콘의 류동특성을 나비에벽미끄럼결수를 도입하여 유한요소법으로 수값계산하였다.[2, 3]

선행연구[4]에서는 유전알고리즘을 리용하여 단일스크류를 최량설계하였다.

본문에서는 1축형압출기의 스크류에서 비뉴톤류체의 류동특성량들을 계산하는 수값모의방법론을 확립하고 제기한 수값모의방법의 타당성을 립증하였으며 원통벽의 온도와 스크류를 통과하는 비뉴톤류체의 온도사이의 정량적인 관계를 구하고 입출구압력차에 따르는 압출량과 출구온도분포특성을 밝혔다.

1. 공학적방법

일반적으로 스크류압출기의 특성계산에는 압력과 저항, 실제압출흐름량에 대한 공식이 적용된다.

압력에 대한 흐름량을 구하는 공식은 $\dot{m}_p = 30 \cdot \rho \cdot \frac{-\pi \cdot D_b \cdot H^3 (1-e/s) \cdot \sin^2 \phi \cdot \Delta p}{\mu_a \cdot L}$ 와 같

다. 여기서 D_b 는 압출기원통의 내경이고 H 는 스크류안쪽면에서 압출기원통안쪽면까지의 높이이다. ϕ 는 스크류라선의 전진각이고 e 는 전개된 라선면에 수직인 방향에서 라선자름면의 너비이며 s 는 스크류축선방향피치, Δp 는 입출구압력차, L 는 스크류의 전체길이이다. 그리고 ρ , μ_a 는 중합체의 밀도와 점성계수이다.

저항에 의한 흐름량공식은 $\dot{m}_d = 3 \times 10^{-5} \cdot \rho \cdot \pi^2 \cdot D_b \cdot n \cdot H^3 (1-e/s) \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi$ 와 같다. 여기서 n 는 스크류의 분당회전수이다.

실제압출흐름량공식은 $\dot{m} = 3 \times 10^{-5} \cdot \rho \cdot \pi^2 \cdot D_b^2 \cdot n \cdot H (1-e/s) \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot (1-a-J)$ 와 같다.

여기서 $a = -\dot{m}_p / \dot{m}_d$ 이고 $J = \delta / H$ 인데 δ 는 스크류날개끝면에서 원통아낙면까지의 높이 즉 스크류와 원통사이의 틈이다.

용융물의 온도를 계산하는 공식은 아래와 같다.

$$\Delta T = (T_{\text{out}} - T_m) = \frac{3600(N_c + N_{\text{FLT}} + N_H)}{\dot{m} \cdot c_{pm}}, \quad N_H = \frac{\alpha_{sz} \cdot \pi \cdot D_{\text{FLT}} \cdot (T_{\text{in}} - T_b)}{10^6 \cdot \cos \phi}, \quad D_{\text{FLT}} = D_b - 2 \cdot \delta$$

여기서 N_c 와 N_{FLT} 는 스크류의 기본통로에서 소비되는 동력 및 틈으로 손실되는 동력이며 α_{sz} 는 열전도계수이다. T_{in} , T_b , T_m , T_{out} 는 각각 스크류의 입구에서 온도, 원통면의 온도, 가소물의 용융온도, 출구온도이다. \dot{m} 와 c_{pm} 은 압출량과 수지의 열용량이다.

다음으로 저밀도폴리에틸렌의 점성계산식을 논의하자.

뉴턴류체에서는 점성계수가 온도만의 함수로 표시되지만 비뉴턴류체의 점성계수는 온도와 자름속도에 의존한다. 물론 점성계수는 압력에도 의존하지만 그 변화율이 작으므로 우리의 경우에는 무시한다.

이외에도 밀도나 열용량, 열전도계수들도 온도와 압력에 관계되지만 변화범위가 작으므로 그 영향이 점성에 비하여 작다고 볼수 있기때문에 여기서는 상수로 본다.[3]

뮤엔스테트의 점성계수계산공식은 다음과 같다.[1]

$$\lg \mu_a = \lg a_T + A_0 + A_1 \lg(a_T \dot{\gamma}_a) + A_2 [\lg(a_T \dot{\gamma}_a)]^2 + A_3 [\lg(a_T \dot{\gamma}_a)]^3 + A_4 [\lg(a_T \dot{\gamma}_a)]^4$$

$$a_T = b_1(T_0) \exp(b_2 / T_m), \quad \dot{\gamma}_a = \pi \cdot D_b \cdot n / (60 \cdot H)$$

여기서 $A_i, i = \overline{0, 4}$, b_1, b_2 는 중합체에 관계되는 상수, $\dot{\gamma}_a$ 는 자름변형속도, T_0 은 기준온도.

2. 수값모의방법

기본방정식 압출기에서 비뉴턴류체흐름은 정상층류로 취급된다.

이때 기본방정식들은 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$, $\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \rho F - \nabla p + \nabla \cdot \sigma$, $\sigma = 2\mu \dot{S} - 2\mu(\nabla \cdot \vec{V})/3$ 와 같다. 여기서 \vec{V} 는 류동속도이고 ρ 는 물질의 밀도, p 는 압력, μ 는 동력학적점성계수, \dot{S} 는 변형속도텐소르, F 는 질량힘의 세기이다.

경계조건 입구와 출구에 각각 압력조건을 주었으며 원통벽에는 비미끄럼조건(부착조건)을, 스크류면에는 완전미끄럼조건을 주었다.[2]

계산방법 먼저 흐름해석구역을 25만개정도의 6면체그물로 분할하였다. 이 요소수이상에서의 계산결과는 일정하였다.

다음 수값계산에서 점성에 의하여 열이 발생하는 층류모형과 응고/용융모형, 1계풍상리산화도식에 기초한 SIMPLE방법을 리용하였다. 류체구역은 다중기준계모형을 리용하여 회전시키고 스크류벽도 같이 돌아가도록 하였으며 원통벽은 류체구역 및 스크류벽과 반대방향으로 돌렸다.

이렇게 함으로써 우리가 논의하는 문제를 정상계산문제로 근사화하였다.

다음으로 LDPE의 점성계수에 관한 udf화일을 Fluent에 적재하고 콤파일한다.

그러면 물질속성창의 점성계수칸에 사용자가 정의한 함수가 나타난다.

이 항목을 선택하면 용융물흐름구역의 모든 요소에서 순환하면서 필요한 량들을 호출하여 사용자정의함수에 의하여 계산하고 풀이기에 그 값을 반환한다.

3. 계산결과와 분석

우리가 논의한 1축형스크류압출기의 기하학적형태는 그림 1과 같고 기하학적크기들은 다음과 같다.

$$D_b = 60\text{mm}, H = 3\text{mm}, e = 6\text{mm}$$

$$s = 60\text{mm}, \delta = 0.1\text{mm}, L = 600\text{mm}$$

$$\phi = 17.66^\circ, w_{FLT} = 5.057\text{mm}, W = 43.13\text{mm}$$

LDPE의 물성값자료는 $k = 0.283\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,

$$\rho = 700\text{kg}/\text{m}^3, h_m = 130\text{kJ}/\text{kg}, T_s = 95^\circ\text{C},$$

$$c_{pm} = 2140\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}), T_m = 110^\circ\text{C} \text{ 와 같다. 여기서 } T_s \text{ 는 응고온도이다.}$$

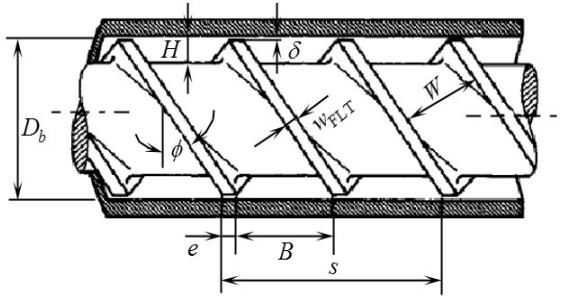


그림 1. 스크류의 기하학적형태

압력차가 $30.3\text{MPa}(300\text{atm})$ 이고 회전수가 $80\text{r}/\text{min}$, 압출기의 원통면에 열을 주지 않은 상태에서의 스크류결면에서 온도분포는 그림 2와 같다.

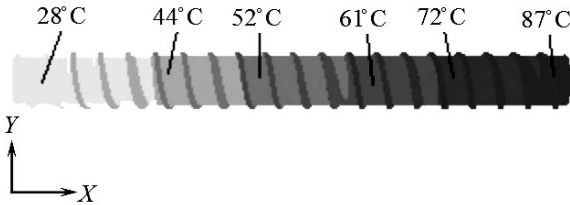


그림 2. 스크류면에서 온도분포

경우에 수지원료가 녹지 못한다는것을 알수 있다.

입출구압력차에 따르는 압출량은 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 입출구압력차가 증가할수록 압출량은 증가하며 공학공식을 리용한 계산결과와의 상대오차는 4%정도이다.

입출구압력차에 따르는 출구온도는 그림 4와 같다.

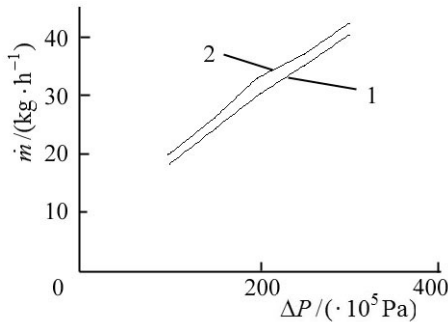


그림 3. 압력차에 따르는 압출량
1-CFD방법, 2-공학계산공식

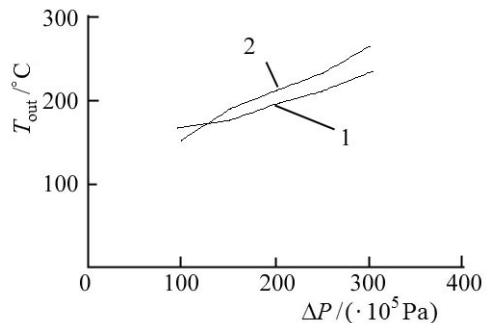


그림 4. 압력차에 따르는 출구온도
1-CFD방법, 2-공학계산공식

이때 원통벽에는 150°C 의 온도조건을 주었다.

결과들을 대비해보면 $15.0\text{MPa}(150\text{atm})$ 까지는 CFD해석결과와 공학적결과가 거의 일치하지만 압력이 증가함에 따라 출구온도차도 증가한다는것을 알수 있다. 그것은 압력이 올라가면 온도와 자름변형속도가 증가하여 점성계수가 작아지기때문이다. 즉 점성이 작아지

면 용융물과 스크류사이의 쓸림에 의하여 발생하는 열이 적어지므로 온도가 낮아진다.

이상에서 본바와 같이 이 수값해석방법을 여러가지 형태를 가진 스크류압출기의 해석 및 설계에 리용할수 있다.

맺 는 말

1축형스크류압출기에서 3차원층류마당에 대한 수값모의를 위하여 류체구역에 대해서는 MRF모형, 구조화그물을 리용하면서 요소수를 25만개이상으로 보장하고 1계풍상리산화도식에 기초한 SIMPLE방법을 리용하는것이 필요하다. 또한 스크류벽도 같이 돌아가도록 하여야 하며 원통벽은 류체구역 및 스크류벽과 반대방향으로 돌려야 한다.

수값계산을 통하여 입출구압력차가 30.3MPa(300atm)이고 회전수가 80r/min 인 상태에서 스크류압출기의 원통면에 반드시 150°C 이상의 온도를 주어야 저밀도폴리에틸렌이 녹아서 출구로 나온다는것을 확증하였으며 압력차에 따르는 압출량과 출구온도를 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. R. Natti et al.; Design Formulas for Plastics Engineers, Hanser Publisher, 105~132, 2004.
- [2] T. Oniszcuk et al.; Food Research International, 47, 291, 2012.
- [3] D. M. Kalyon et al.; Polymer Engineering and Science, 39, 6, 1999.
- [4] J. L. White et al.; Society of Plastics Engineers, 10, 1002, 2011.

주체104(2015)년 4월 5일 원고접수

A Numerical Simulation Method for Determining Floating Characteristics of Non-Newtonian Fluid in a Single Screw Extruder

Kim Chol Sok

We have studied an analysis method of flow field inside the single screw by modelling the viscosity expression of non-Newtonian fluid (low density polyethylene) as an user defined function of the Fluent6.3 and compared the numerical results with ones by design calculation formula used in engineering practice and found the quantitative relation between their floating characteristics.

Key words: non-Newtonian fluid, screw extruder, solidification/melt model