

단축압출기 고체수송부에서의 비등온 열전달 현상에 관한 수치 해석

안영철[†]

경남대학교 화학공학부

(2005년 2월 18일 접수, 2005년 11월 2일 채택)

Numerical Analysis of the Non-Isothermal Heat Transfer in Solids Conveying Zone of a Single Screw Extruder

Young-Cheol Ahn[†]

Division of Chemical Engineering,

Kyungnam University, Masan, Gyungnam 631-701, Korea

(Received February 18, 2005; accepted November 2, 2005)

초록 : 단축압출기의 압출공정에서 고체수송부의 열전달 현상에 미치는 무차원수의 효과를 수치 해석적인 방법으로 연구하였다. 스크루의 기하학적 구조 및 특성에 따른 압출기 내에서의 고체 흐름 상태에 대한 이해를 바탕으로 고체수송부에 대하여 열 수치 방정식을 세우고 무차원화하였다. 이에 유한체적법과 맥(離) 법칙 도식을 적용하여 이산화 방정식을 유도한 다음 반복 대입법과 완화법으로 해를 구하였다. 고체수송부의 열전달 특성을 규정하는 무차원수인 Biot 수와 Peclet 수가 수치 공급부의 온도와 고체수송부의 길이에 끼치는 영향을 조사하였다. Biot 수가 증가하면 냉각에 의한 열 손실이 지배하여 배럴의 온도는 급격히 감소하지만 고체층의 온도와 고체수송부의 길이에 미치는 영향은 적으며, Peclet 수가 증가하면 대류 항이 지배하여 고체층의 온도가 감소하고 고체수송부의 길이가 증가한다.

Abstract: Effects of the dimensionless variables on the heat transport phenomena in the extrusion process of a single screw extruder have been studied numerically. Based on the understanding of the solids conveying related to the geometrical structure and characteristics of the screw, the heat balance equation for the solids conveying zone was established and normalized. The finite volume method and power-law scheme were applied to derive a discretized equation and the equation was solved using the alternating direction iterative method with relaxation. Effects of the dimensionless parameters, Biot and Peclet numbers, that define the heat transfer characteristics of the solids conveying zone have been investigated with respect to the temperature of the feeding zone and the length of the solids conveying zone. As the Biot number is increased, the heat loss by cooling dominates to decrease the temperature of the barrel but it has little effects on the temperature of the solids bed and the length of the solids conveying zone. On the other hand, if the Peclet number is increased, the convection term dominates to decrease the temperature of the solids bed and it results in an increase in the length of the solids conveying zone.

Keywords: extruder, solids conveying zone, heat transfer, numerical analysis, dimensionless numbers.

1. 서론

압출공정이란 펠렛 또는 분말 상태의 고형 수지가 호퍼를 통하여 압출기 내부로 공급된 후 가열된 배럴에 의한 열전달 및 배럴과 수지의 마찰열에 의해 용융되면서 임의 형태의 다이를 통과한 후 냉각되어 필름, 평판, 파이프 등을 제조하는 공정으로 압출기의 내부 공정은 일반적으로 고체수송부, 용융부, 계량부로 나누어진다. 압출공정의 고체수송부에 대한 과학적이고 체계적인 연구는 Damell과 Mol¹에 의하여 처음 시도되었다. 이들은 단축압출기 내부의 고체층(Solids bed)에 막대 흐름을 가정한 뒤 고체 수송량을 표현하는 방정식을 유도하였고, 이후 Tadmor와 Klein²에 의하여 그 이론이 더욱 확장, 발전되었다. Tadmor와 Broyer^{3,4} 고체수송부에 대한 보다 현실적인 접근을 위하여 스크루와 배럴에서의 마찰계수를 각각 정의하였고 수치

의 밀도가 압력에 의존하며 고체층에 작용하는 압력이 비등방성인 것을 고려하였다. 이들은 Damell과 Mol의¹ 이론을 유로의 깊이가 일정하지 않은 경우에까지 발전시켜 적용하였을 뿐만 아니라 고체수송부 분석 시 온도 효과를 고려한 비등온 모델을 제안하기도 하였다. Tadmor와 Kacir⁵ 정상 상태의 용융 메커니즘이 작동되기 전에 고체수송부 끝 부분에서 지연 구역(delay zone)이 형성된다고 주장하였다. Lovegrove와 Williams⁶ 고체수송부에서 초기 압력을 계산할 때 앞의 연구들에서 무시되었던 체적력을 고려하여 초기 압력에 대한 개념을 확장하였다. Zhu와 Chen⁷ 유리로 만든 배럴을 가진 압출기를 고안하여 압출 과정에서의 고체층 구조에 대한 실험적인 관찰을 하였다. Campbell과 Dontula⁸ 고체층에 작용하는 미지의 추가 수직력을 배럴 표면과 고체층간의 마찰력과 같다고 가정하여 새로운 모델을 창안하였다. 이러한 이론과 모델들을 바탕으로 Ahn과 Kim^{9,10} 고체수송부에서 스크루와 배럴의 기하학적 관계를 이용한 힘의 수치식으로부터 수치 내부의 압력을 스크루 유로 길이의 함수로

[†]To whom correspondence should be addressed. E-mail: ycahn@kyungnam.ac.kr

표현하고 유량을 측정하여 압력 분포를 구하였고, 수지의 구조와 물성 등을 비교해 봄으로써 폴리카보네이트의 압출가공 특성을 규명하였다.

압출기 내부의 압력은 고체 수지와 배럴, 스크루 등과의 마찰, 그리고 스크루와 수지의 속도 등에 의하여 형성되며 스크루를 움직이는데 필요한 압출기의 동력에 지대한 영향을 끼치는 변수이다. 단축 압출기의 고체수송부에서의 압력은 유로의 길이에 따라서 지수 함수적으로 증가하므로 고체수송부의 길이는 압출기 내부의 최종 발달 압력을 결정짓는 중요한 인자이다. 고체수송부의 길이는 고체층과 배럴의 계면에서의 온도가 융점에 도달하는 위치에서 결정되므로 그 위치를 찾아내는 것이 필요한데 고체수송부에 대한 비등온 수식 모델링과 수치 해석을 이용한 해법을 통하여 배럴 내부의 온도 분포를 계산하면 그 위치를 정확하게 알 수 있다. 본 연구에서는 고체수송부에 대한 열 수치 방정식을 세우고 수치 해법을 통하여 그에 대한 해를 구함으로써 열전달 특성을 나타내는 무차원수가 고체수송부에서의 열전달 현상 및 온도 분포, 그리고 압력 분포 등에 끼치는 영향에 대하여 조사함으로써 압출기의 성능을 이해하는데 필요한 토대를 마련하고자 하였다.

2. 실험

2.1 수식 모델링

압출 공정에서 호퍼를 통해 압출기 내부로 공급된 고형 수지는 스크루와 배럴 사이의 유로에서 스크루 회전에 의해 나선형의 움직임을 보이면서 일정한 속도로 다이 쪽으로 이동되며, 이때 고체층은 배럴에 설치된 가열대로부터 공급된 열과 고체층과 배럴 사이의 마찰에 의한 열에 의해 가열된다. 따라서, 압출기 내부의 공급부는 배럴과 스크루 및 고체층의 세 가지 영역이 존재하는 열전달 문제로 해석될 수 있다. 모델을 간단하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입하였다. 즉, 압출은 정상 상태로 이루어지고, 고체층의 용융은 가열대로부터 공급되어 배럴을 통해 전도되는 열에 의해서만 이루어지며, 배럴에 의한 열전도는 스크루를 중심으로 축 대칭을 이룬다. 그러면, 원통 좌표계에서 각도 방향으로의 온도 변화는 무시되므로 나선형으로 이동하는 고체층의 축 방향 속도 성분만이 온도 변화에 기여하게 된다. 이러한 열전달 문제의 해석을 위하여 관심 영역을 고형 수지가 공급되는 호퍼의 중심 위치로부터 배럴의 첫 번째 가열대까지로 설정하였다. 관심 영역에서의 지배 방정식은 이산화 방정식 유도 시의 편의를 고려하여 반경 방향의 대류 항을 포함해 정리하면 다음과 같다.

$$v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

여기에서 $\alpha = k / \rho C_p$ 는 열 확산 계수이고, 마찰에 의한 열 발생 항은 두 번째 가정에 의하여 무시하였다. 단, 배럴 및 스크루 영역에서는 유속이 없으므로 위 지배 방정식은 대류 항이 없는 라플라스 방정식이 된다. 관심 영역에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

(경계 조건)

$$\text{At } z=0, \quad 0 \leq r \leq R : T = T_C \quad (2)$$

$$\text{At } z=Z, \quad 0 \leq r < R : \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\text{At } r=0, \quad 0 < z < Z : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\text{At } r=r_1, \quad 0 < z < Z : -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_s = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{sb} \quad (5)$$

$$\text{At } r=r_2, \quad 0 < z < Z : -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{sb} = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_b \quad (6)$$

$$\text{At } r=R, \quad 0 < z < z_1 : -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_b = h(T - T_\infty) \quad (7)$$

$$\text{At } r=R, \quad z_1 \leq z \leq Z : T = T_H \quad (8)$$

여기서, R 은 스크루의 중심에서 배럴 외부 표면까지의 거리, Z 는 관심 영역의 하류 쪽 경계 면의 거리, T_C 는 펠렛의 온도, T_H 는 가열대의 온도, T_∞ 는 대기의 온도, k 는 열전도도, h 는 열전달 계수이다. 스크루 입구 쪽 호퍼 아래 경계 면에서의 온도는 펠렛의 온도를 적용하였고, 관심 영역의 하류 쪽 경계 면에서는 반경 방향의 열전도가 지배하기 때문에 축 방향의 열전도는 무시하였으며, 스크루 중심축에서는 축 대칭 조건을 적용하였다. 고체층과 스크루 사이의 경계 면($r=r_1$)과 배럴과 고체층 사이의 경계 면($r=r_2$)에서는 열속이 평형을 이루고, 배럴의 외부 표면이 대기와 맞닿은 부분에서는 배럴의 열전도 속도와 대기의 열대류 속도가 같은 것으로 보았으며, 배럴에 가열대가 부착된 부분에서는 가열대의 온도를 적용하였다.

위 지배방정식과 경계 조건의 여러 변수들은 제각각 열전달에 영향을 미치지만 실질적으로는 다른 변수의 값에 따라서 상호 조합된 효과로 열전달에 영향을 미치게 되므로 차원 해석을 통하여 여러 변수들의 조합으로 된 무차원수를 구하면 변수의 수를 크게 줄일 수 있다. 따라서 많은 변수의 영향을 일일이 조사하지 않아도 몇 개의 무차원 수들만의 영향을 조사하는 것으로 충분하게 되므로 더욱 효율적이다. 위 지배 방정식의 변수들은 다음과 같은 무차원 변수들을 도입하면 무차원화된다.

$$z^* = \frac{z}{R}, \quad r^* = \frac{r}{R}, \quad v_z^* = \frac{v_z}{V}, \quad v_r^* = \frac{v_r}{V}, \quad T^* = \frac{T - T_\infty}{T_H - T_\infty} \quad (9)$$

여기서 V 는 고체층의 축 방향 속도이다. 이 무차원 변수들을 사용하면 지배 방정식과 경계 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\left[v_r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + v_z^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \right] = \frac{1}{Pe} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}} \right] \quad (10)$$

(경계 조건)

$$\text{At } z^*=0, \quad 0 \leq r^* \leq 1 : T^* = T_C^* \quad (11)$$

$$\text{At } z^*=Z^*, \quad 0 \leq r^* < 1 : \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = 0 \quad (12)$$

$$\text{At } r^*=0, \quad 0 < z^* < Z^* : \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0 \quad (13)$$

$$\text{At } r^* = r_1^*, \quad 0 < z^* < Z^* : \quad \left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_s = \beta \left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_{sb} \quad (14)$$

$$\text{At } r^* = r_2^*, \quad 0 < z^* < Z^* : \quad \left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_{sb} = \varepsilon \left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_b \quad (15)$$

$$\text{At } r^* = 1, \quad 0 < z^* < z_1^* : \quad \left. \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right|_b = Bi T^* \quad (16)$$

$$\text{At } r^* = 1, \quad z_1^* \leq z^* \leq Z^* : \quad T^* = 1 \quad (17)$$

여기에서 Pe 는 VR/α 로 정의되는 Peclet 수로서 대류에 의한 열 전달과 열전도에 의한 열전달의 비를 뜻한다. Bi 는 hR/k_b 로 정의되는 Biot 수로서 배럴 표면에서의 무차원 온도의 기울기를 뜻한다. β 와 ε 은 각각 고체층과 스크루, 배럴과 고체층의 열전도도의 비를 나타낸다. 단, 앞에서 언급한 바와 같이 배럴과 스크루 영역에서는 속도가 없으므로 위 지배 방정식은 라플라스 방정식이 된다. 이와 같이 무차원화된 변수와 경계 조건을 이용하여 관심 영역인 고체수송부를 Figure 1에 도시하였다. 여기에서 모델링에 적용된 압출기 배럴의 바깥반경 R 은 0.058 m ($R^*=1$)이고 안반경 r_2 는 0.025 m ($r_2^* = 0.431$), 스크루 축의 반경 r_1 은 0.0175 m ($r_1^* = 0.302$)이다.

2.2 이산화 방정식

유한체적법(finite volume method=FVM)은 열전달 및 유체 유동 과정 등을 예측하기 위한 수치 해석법의 하나이다. 각 절점에서 종속변수들의 값들에 대한 이산화 방정식은 각각의 절점을 둘러싸고 있는 부분 영역들에 걸쳐서 지배 방정식을 적분함으로써 유도된다. 계산 영역에서의 제어 체적과 절점을 Figure 2에 나타내었다. 본 연구에서는 관심 영역의 내부에 있는 절점들에 대해서 Patankar 가^{11,12} 제안한 유한체적법과 멱법칙(power-law) 도식을 적용하여 이산화 방정식을 유도하였다. 수식 유도 과정 시의 편의를 위하여 무차원 식에서 위 첨자 *를 생략하고 정리하면 내부 절점들에 대한 최종적인 이산화 방정식은 다음과 같이 된다.

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S \quad (18)$$

여기서

$$a_E = D_e \left[0, \left(1 - \frac{0.1|F_e|}{D_e} \right)^5 \right] + [0, -F_e]$$

$$a_W = D_w \left[0, \left(1 - \frac{0.1|F_w|}{D_w} \right)^5 \right] + [0, F_w]$$

$$a_N = D_n \left[0, \left(1 - \frac{0.1|F_n|}{D_n} \right)^5 \right] + [0, -F_n]$$

$$a_S = D_s \left[0, \left(1 - \frac{0.1|F_s|}{D_s} \right)^5 \right] + [0, F_s]$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + F_e - F_w + F_n - F_s$$

이고

$$F_e = (rv_z)_e (\Delta r)_p, \quad D_e = \frac{r_e (\Delta r)_p}{Pe (\delta z)_e}$$

$$F_w = (rv_z)_w (\Delta r)_p, \quad D_w = \frac{r_w (\Delta r)_p}{Pe (\delta z)_w}$$

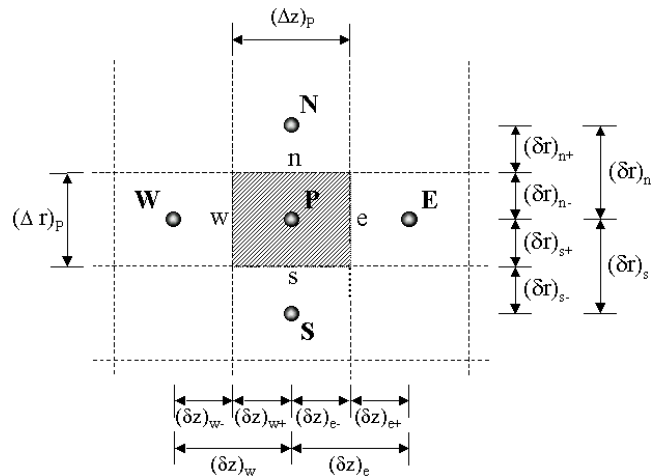


Figure 2. Meshes and nodes of the finite volume method.

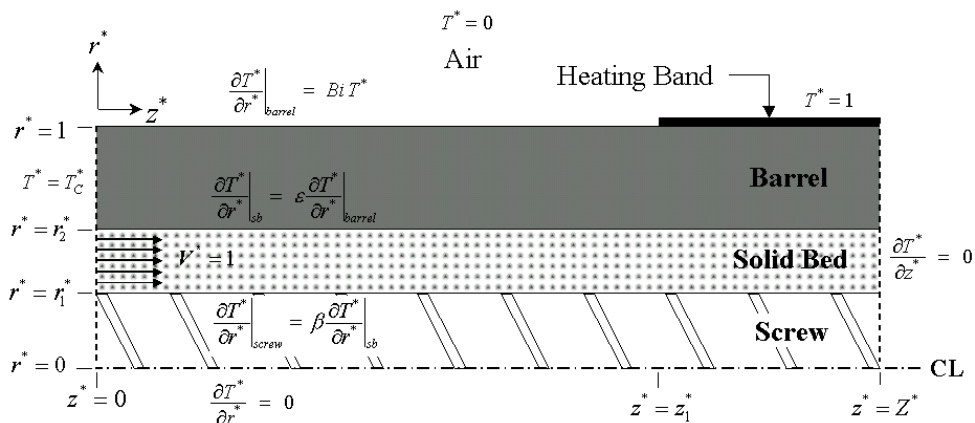


Figure 1. Schematic diagram of the computational domain with boundary conditions shown for the solids conveying zone.

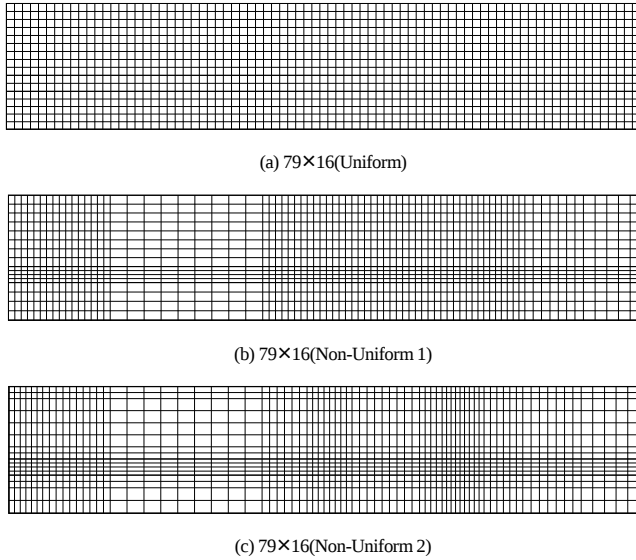


Figure 3. 79×16 meshes selected for testing computational efficiency.

$$F_n = (rv_r)_n (\Delta z)_p, \quad D_n = \frac{r_n}{Pe} \frac{(\Delta z)_p}{(\delta r)_n}$$

$$F_s = (rv_r)_s (\Delta z)_p, \quad D_s = \frac{r_s}{Pe} \frac{(\Delta z)_p}{(\delta r)_s}$$

이다. 연속 방정식에 의하면 $F_e - F_w + F_n - F_s$ 항은 0과 같다. 기호 $\llbracket A, B \rrbracket$ 는 A 와 B 중에서 큰 값을 선택함을 의미한다. 배럴과 스크루에서는 속도가 없으므로 유량 F 는 0이 된다. 위와 같은 이산화 방정식을 축 방향과 반경 방향의 절점들에 대하여 각각 적용하여 삼대각 행렬의 계수 행렬로 표현되는 연립 방정식을 얻었으며 이를 Thomas 알고리즘으로 풀어 해를 구하였다.¹³

2.3 체논의 선정

수치 해석할 때 계산의 정밀도와 경제성을 고려한 최적의 체논을 선정하기 위해서 39×9, 79×16, 117×27, 316×64, 474×96, 632×128, 711×144의 규칙적 체논과 79×16 체논의 밀도 분포를 변화시킨 불규칙적 체논을 적용하여 계산을 수행하였다. 여러 형태의 체논 중 79×16의 규칙적 체논과 불규칙적 체논을 Figure 3에 나타내었다. 하류의 경계 면에서 스크루 중심의 온도(T_{NL})와 스크루와 고체층 경계의 온도(T_{NK}), 고체층과 배럴 경계의 온도(T_{NL})를 비교하였다. Figures 4~6은 세 지점의 온도를 나타낸 것으로서 그림에서 U는 규칙적 체논을 나타내며 N1과 N2는 각각 Figure 3의 (b)와 (c)에 도시된 불규칙적 체논을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 계산한 값이 해에 충분히 수렴하기 위해서는 규칙적 체논의 경우 632×128 이상의 조밀도가 필요한데 두 번째 불규칙적 체논의 경우 76×16의 조밀도 만으로도 해에 더욱 가까이 수렴하는 결과를 얻었으므로 최적의 체논으로 76×16의 두 번째 불규칙적 체논을 선정하였다.

3. 결과 및 토론

스크루의 유로에 대한 힘의 수치식으로부터 유로 길이에 따른

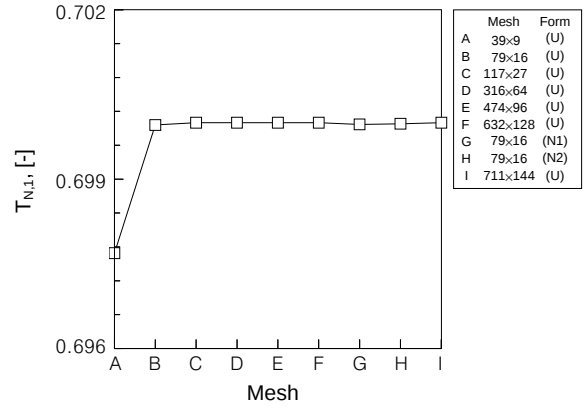


Figure 4. Convergence of the temperature at the center of the screw on the downstream boundary shown as the meshes are refined in the computational domain.

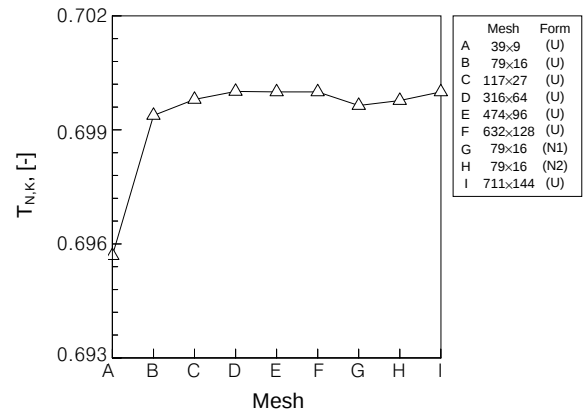


Figure 5. Convergence of the interfacial temperature between the screw and the solids bed on the downstream boundary shown as the meshes are refined in the computational domain.

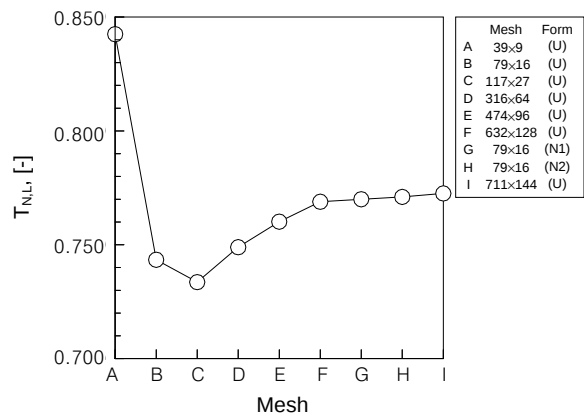


Figure 6. Convergence of the interfacial temperature between the solids bed and the barrel on the downstream boundary shown as the meshes are refined in the computational domain.

압력 분포를 구하면 압출기의 내부 압력은 고체수송부의 길이에 대하여 지수 함수적으로 증가하는 것으로 나타난다.¹⁰ 따라서, 압출기 내부에서 발달하는 압력의 크기를 제대로 예측하기 위해서

는 고체수송부의 길이를 정확하게 알아야 한다. 고체수송부의 길이는 호퍼 중앙 하단으로부터 고체층과 배럴의 계면에서 처음으로 용융이 일어나는 위치까지의 거리로 정의할 수 있는데 이 용융 위치는 고체층과 배럴 계면의 온도 분포로부터 정해진다. 본 연구에서는 앞에서 세운 열 수치 방정식에 대하여 Ahn과 Kim^{9,10} 폴리카보네이트의 압출 실험에 사용한 공정 조건을 적용하여 수치 해법으로 풀어 온도 분포를 구하였다. 가열대의 온도(T_H)는 290 °C ($T_H^* = 1$)이고 호퍼를 통해서 공급되는 고분자 수지의 온도(T_C)는 80 °C ($T_C^* = 0.2075$)이며 대기의 온도(T_∞)는 25 °C ($T_\infty^* = 0$)이다. 배럴과 스크루, 고체층의 열전도도, 밀도, 비열 등에 대하여 사용된 값은 Table 1에 정리하였다. 여기에서 배럴과 스크루에 대해서는 질화강의 데이터를, 고체층에 대해서는 폴리카보네이트의 데이터를 인용하였다. Biot 수는 질화강의 열전도도 $k_b = 50.21 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 배럴의 바깥반경 $R = 0.058 \text{ m}$, 배럴과 대기의 접촉면에서의 열전달계수 $h = 6.97 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 를 적용하면 0.008이 되는데 여기서 열전달계수는 냉각 팬의 속도에 따라 증가될 수 있음을 가정하여 $Bi = 0.01, 0.1, 1$ 로 설정하였다. Peclet 수는 고체층의 평균 속도와 열확산 계수, 배럴의 바깥반경으로 결정되는데, Table 1에 의한 폴리카보네이트의 열확산 계수 $\alpha = 1.351 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, 배럴의 바깥반경 $R = 0.058 \text{ m}$, 스크루의 회전

속도(10~25 rpm)에 따른 고체층의 평균 속도 $V = 0.002 \sim 0.006 \text{ m/sec}$ 를 적용하여 $Pe = 1000 \sim 2500$ 의 값을 적용하였다. 폴리카보네이트의 열전도도와 질화강의 열전도도를 이용하면 β 는 0.0038, ε 은 264.26의 값을 갖는다.

Figures 7~11은 무차원수의 값에 따른 고체수송부에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 온도 표시 창의 왼쪽에는 무차원 온도를, 오른쪽에는 무차원 온도에 대응하는 섭씨온도($^\circ\text{C}$)를 표시하였다. 일반적으로 고체수송부의 길이는 고체층과 배럴 계면의 온도가 융점에 도달하는 위치로 결정되지만 폴리카보네이트와 같은 비결정성 고분자의 경우에는 결정성 고분자와 달리 융점을 갖지 않으므로 그에 상응하는 유리전이온도($T_g = 146 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^* = 0.4566$)를 사용하였다. 고분자는 유리전이온도에 도달하면 탄성률이 급속하게 떨어지고 변형률이 늘어나는 등 물성에 있어서 큰 변화를 가져온다. 이

Table 1. Physical Properties Used for the Barrel, Screw and the Solids Bed

	k [W/m · °C]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg · °C]
Barrel & Screw	50.21	7830	816
Solids bed	0.19	1200	1172

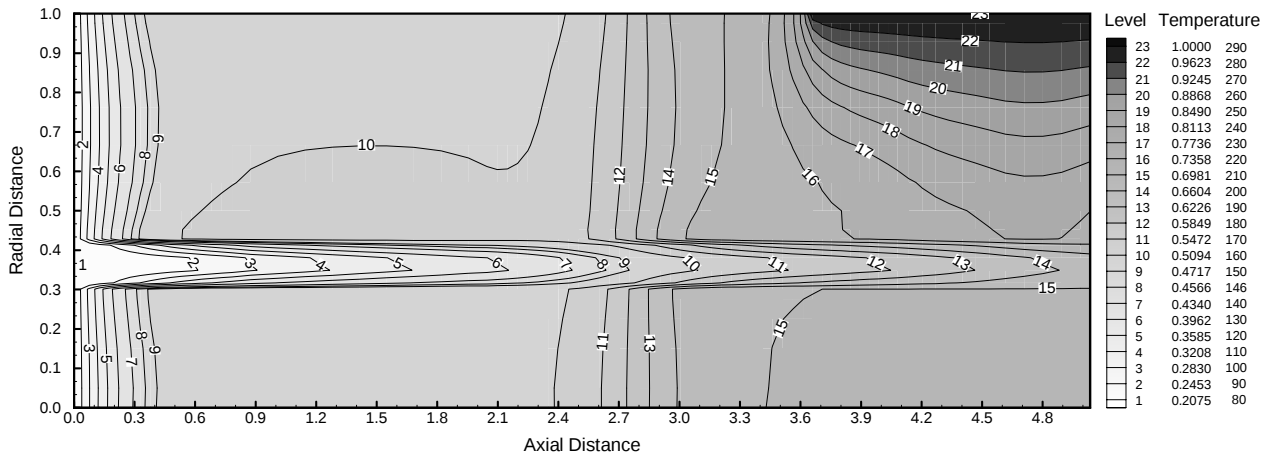


Figure 7. Temperature distribution in the solids conveying zone when $Bi = 0.01$, $Pe = 1000$.

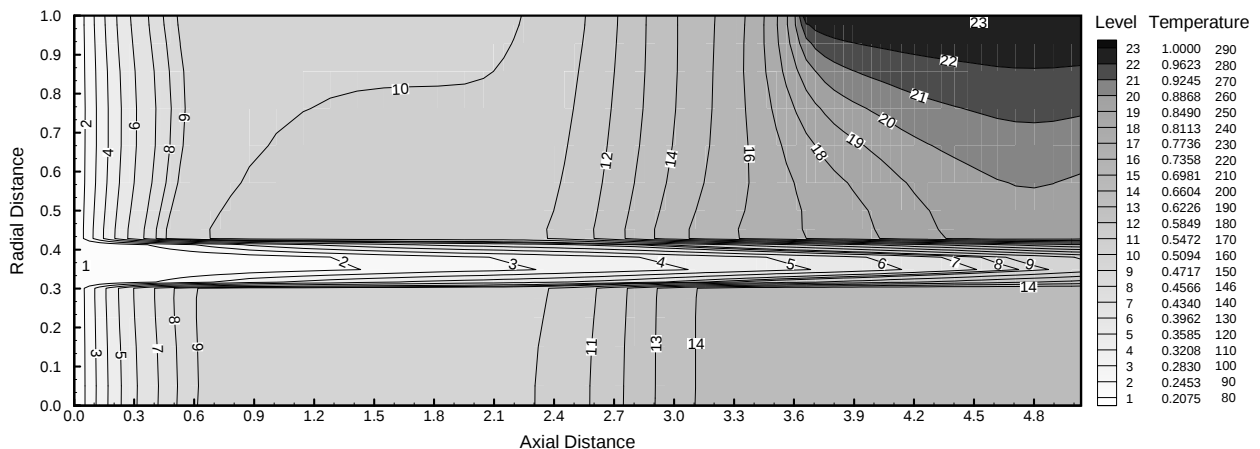


Figure 8. Temperature distribution in the solids conveying zone when $Bi = 0.01$, $Pe = 2500$.

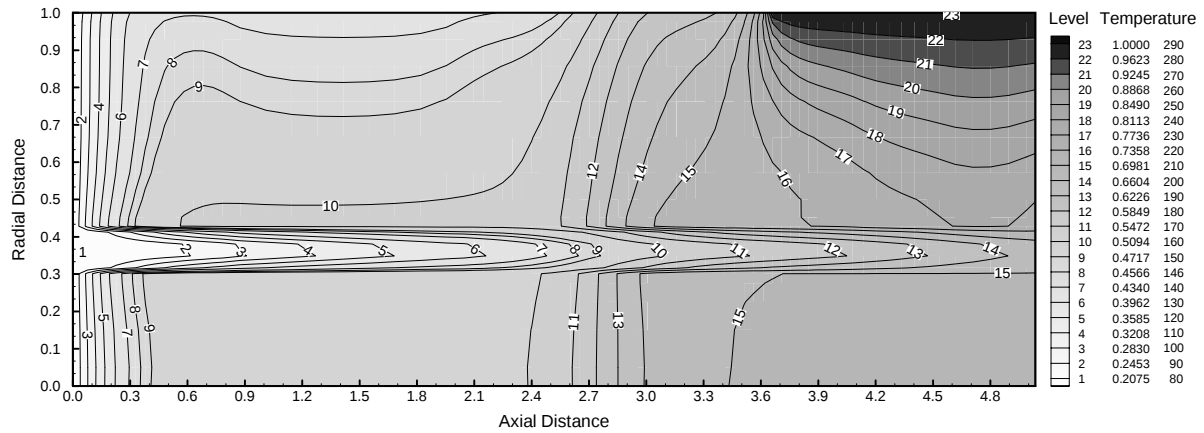


Figure 9. Temperature distribution in the solids conveying zone when $Bi = 1$, $Pe = 1000$.

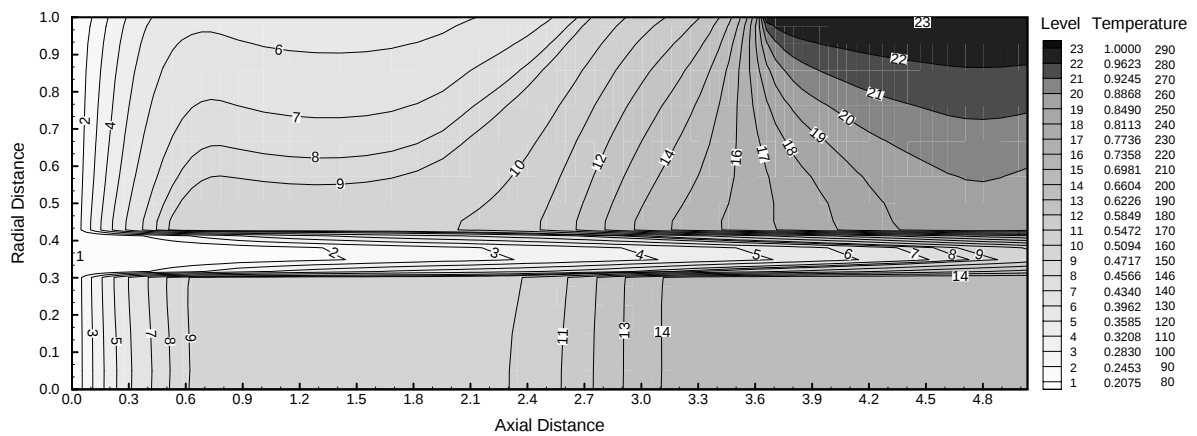


Figure 10. Temperature distribution in the solids conveying zone when $Bi = 1$, $Pe = 2500$.

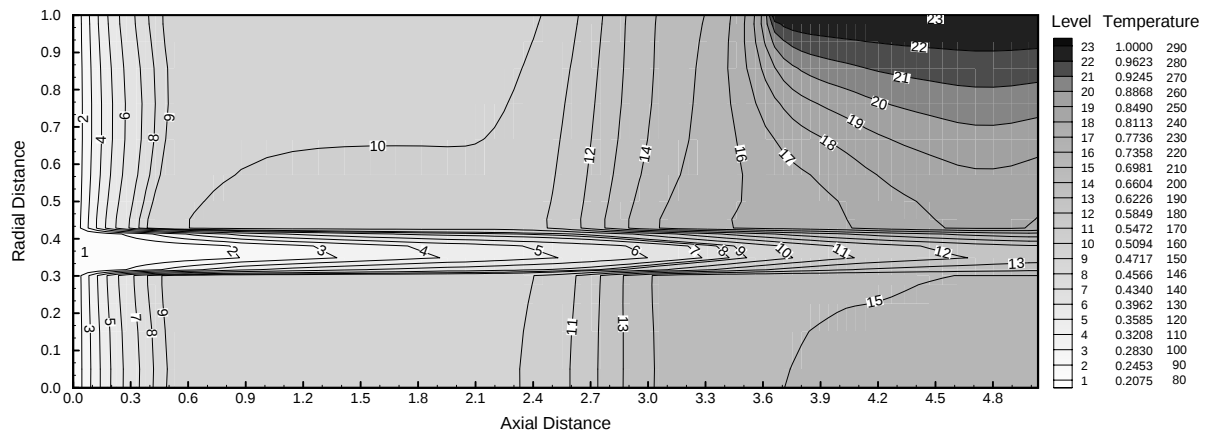


Figure 11. Temperature distribution in the solids conveying zone when $Bi = 0.1$, $Pe = 1500$.

러한 분자역학적인 변화들은 고체수송부에서 고체층과 배럴의 마찰력을 감소시킴으로써 지속적인 압력 상승을 저해하는 요소로서 작용하기에 충분하다. 따라서, 본 연구에서는 고체층과 배럴의 계면에서 고분자의 유리전이온도에 도달하는 등온선의 위치를 기준으로 고체수송부의 길이를 결정하였다. 유리전이온도는 폴리카보네이트의 등급에 따라 다르지만 본 연구에서는 $146\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였

다. 그림에서 고체층과 배럴 계면의 온도는 입구 온도로부터 유리전이온도에 도달하는 지점까지 매우 급격하게 상승하여 모든 경우에 있어서 고체수송부의 길이가 아주 짧게 나타난다. 반대로 고체층 내부의 온도는 상대적으로 낮은 열전도도로 인하여 느리게 상승한다. 고체층에서의 열전달은 전도에 의한 것과 대류에 의한 것으로 나뉘는데 이들의 특성은 Peclet 수로 함축된다. Peclet 수는 열전도

속도에 대한 열대류 속도의 비로 정의되는 무차원수이다. Figures 7~8은 이러한 Peclet 수의 효과를 관찰하기 위하여 Peclet 수에 따른 온도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 스크루 회전 속도가 증가하면 고체의 이동 속도가 증가하므로 대류 항의 영향이 커지므로 Peclet 수가 증가하게 된다. Biot 수가 0.01로 일정할 때 Peclet 수가 1000에서 2500으로 커지면 대류 항의 지배를 받아 고체층의 온도가 전반적으로 낮아지고 유리전이온도에 도달하는 거리는 멀어진다. 한편, 가열대로부터 가해진 열은 배럴을 타고 전달되다가 호퍼에 가까워지면서 호퍼로부터 공급되는 낮은 온도의 수지의 영향을 받아 유리전이온도에 도달할 즈음부터 축 방향으로 온도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 배럴 표면에서의 온도 기울기를 나타내

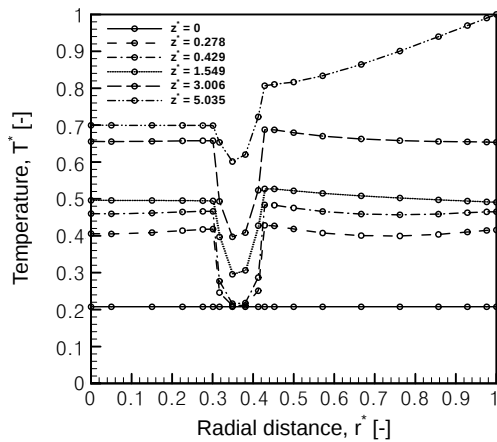


Figure 12. Temperature profiles drawn as functions of radial distance in cross-sections at typical axial positions for the case of $Bi=0.1$ and $Pe=1500$.

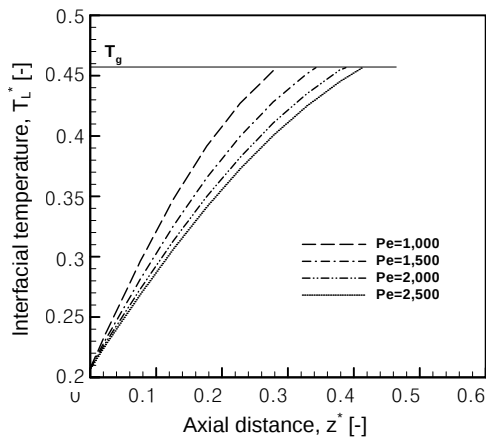


Figure 13. Temperature distributions on the interface between the solids bed and the barrel when $Bi=0.1$, showing the effects of Peclet number on the length of the solids conveying zone.

Table 2. Effects of the Dimensionless Numbers on the Length of the Solids Conveying Zone

$Bi \backslash Pe$	1000	1500	2000	2500
0.01	0.283	0.341	0.382	0.409
0.1	0.284	0.342	0.388	0.412
1	0.286	0.352	0.406	0.444

는 Biot 수가 작아서 배럴 표면에서의 열대류에 의한 에너지 방출이 매우 적어 고온의 열이 호퍼 가까이까지 전달되기 때문이다. Biot 수를 1로 증가시켰을 때 Peclet 수가 각각 1000과 2500인 경우의 온도 분포를 Figures 9~10에 도시하였다. 여기서 Biot 수의 영향으로 배럴의 온도가 반경 방향으로 급속하게 낮아지는 것이 관찰된다. 이것은 Biot 수가 커짐에 따라 온도의 기울기가 커진 것을 의미하므로 Biot 수의 정의와 일치한다. Figures 7과 9, Figures 8과 10을 비교하였을 때 Biot 수를 증가시키면서도 불구하고 고체층의 온도 분포는 별로 달라지지 않는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 고체층을 이루는 수지의 열전도도가 작아서 열전도 항보다 열대류 항의 영향이 더욱 크다는 것을 의미하는 것이다. Figure 11에는 Biot 수를 0.1, Peclet 수를 1500으로 하였을 때의 온도 분포를 도시하였다. 이 경우 배럴의 온도 분포에 미치는 Biot 수의 영향은 Biot 수가 0.01일 때에 비하여 두드러지지 않지만 고체층의 온도 분포에 미치는 Peclet 수의 영향은 Peclet 수가 1000일 때에 비하여 비례적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 같은 경우에 대하여 반경 방향의 온도 분포를 관찰하기 위하여 몇 개의 대표적인 축 방향 위치에서의 단면의 온도 분포를 Figure 12에 도시하였다. 이 그림에 의하면 고체층의 온도 분포는 비대칭을 이룸을 알 수 있고 유리전이온도 ($T_g^*=0.4566$)를 기준으로 고체층의 온도 분포가 모두 유리전이온도 이하인 영역과 유리전이온도 이상과 이하가 모두 존재하는 영역, 그리고 모두 유리전이온도 이상인 영역이 공존한다. 이 중에서 고체층의 온도 분포가 모두 유리전이온도 이하인 영역만이 고체만 존재하는 순수한 고체수송부라고 할 수 있으므로 이 경우 고체수송부의 길이는 매우 짧고 관심 영역에서 용융부와 용액흐름부가 모두 존재한다는 것을 말한다. 따라서 공급부에서 고체수송부의 길이를 더 길게 하기 위해 스크루 회전수를 올려도 큰 무리가 없다는 것을 말해 주며 이것은 토출량의 증가를 가져오게 되어 Peclet 수의 증가로 나타난다. Figure 13은 Biot 수가 0.1일 때 Peclet 수의 변화에 따른 고체층과 배럴 경계 면에서의 온도 분포의 변화를 도시한 것이다. Peclet 수가 증가함에 따라 경계 면의 온도가 낮아지면서 유리전이온도에 도달하는 거리 즉, 고체수송부의 길이가 증가한다. 이 그림에서 고체수송부의 길이는 Peclet 수가 증가함에 따라 그 증가폭이 줄어들음을 관찰할 수 있는데 이것은 곧 스크루 회전 속도가 커질수록 고체수송부 길이의 증가에 미치는 회전 속도의 영향은 작아진다는 것을 뜻한다. 고체수송부의 길이에 미치는 Biot 수와 Peclet 수의 영향을 알아보기 위하여 이들의 관계를 Table 2에 정리하였다. 여기서 고체수송부의 길이에 대한 Biot 수의 영향은 거의 없고 Peclet 수의 영향이 상대적으로 매우 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

단축압출기의 고체수송부에서 스크루 회전 속도와 유로의 하류 방향 거리에 따른 압력에 대한 실험 데이터를 보정하는 데에 필요한 인자인 고체수송부의 길이를 구하기 위하여 압출공정에 대하여 열 수치 방정식을 세워 수치 해를 구하였다. 수지가 투입되는 호퍼를 기점으로 하여 첫 번째 가열대가 있는 위치까지의 영역에 대하여 열 수치 방정식을 세우고, 이를 유한체적법으로 풀어 Biot 수와 Peclet 수 등이 온도 분포와 고체수송부의 길이에 미치는 영향을 조사하였다. Peclet 수가 1000에서 2500으로 증가할수록 대류

항이 지배하게 되면서 수지의 온도가 전반적으로 낮아지며 유리 전이온도에 도달하는 거리가 늘어남을 보였다. Biot 수가 0.01일 때에는 호퍼에 가까운 곳에서 축 방향으로 배럴 온도의 급격한 변화가 관찰되었고, 1일 때에는 반경 방향으로 배럴 온도의 변화가 커지는 것이 관찰되었다. 수지의 열전도도가 작아 고체층의 온도에 미치는 Biot 수의 영향은 아주 적었으며 이 경우 대류 항의 효과가 크므로 대류 항의 크기를 결정하는 Peclet 수가 고체층의 온도에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 결과적으로 고체수송부의 길이는 Biot 수의 영향을 거의 받지 않고 Peclet 수에 매우 크게 영향 받는다.

사용 기호

a : coefficients of the discretized equation
 Bi : Biot number, hR/k_b
 C_p : Specific heat, $[J/kg \cdot ^\circ C]$
 D : diffusion conductance
 F : strength of the convection or flow
 h : heat transfer coefficient between the barrel and the surroundings, $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
 k : thermal conductivity, $[W/m \cdot ^\circ C]$
 Pe : Peclet number, VR/α
 r : radial coordinate, $[m]$
 R : outside radius of the barrel, $[m]$
 T : temperature, $[^\circ C]$
 T_C : temperature at the upstream boundary, $[^\circ C]$
 T_g : glass transition temperature, $[^\circ C]$
 T_H : temperature of the heating band, $[^\circ C]$
 T_∞ : temperature of the surroundings, $[^\circ C]$
 T_L : interfacial temperature between the solids bed and the barrel, $[^\circ C]$
 $T_{N,1}$: temperature of the center of the screw on the downstream boundary, $[^\circ C]$
 $T_{N,K}$: interfacial temperature between the screw and the solids bed on the downstream boundary, $[^\circ C]$
 $T_{N,L}$: interfacial temperature between the solids bed and the barrel on the downstream boundary, $[^\circ C]$
 v : velocity, $[m/s]$
 V : axial velocity of the solids bed, $[m/s]$
 z : axial coordinate, $[m]$
 z_1 : axial coordinate of the heating band, $[m]$
 Z : axial coordinate of the downstream boundary, $[m]$

위 첨자

* : dimensionless variable

아래 첨자

b : barrel
e, E : east face or node of the mesh
n, N : north face or node of the mesh
P : center node of the mesh
s, S : south face or node of the mesh, screw
w, W : west face or node of the mesh
r : radial direction
sb : solids bed
z : axial direction

그리스 문자

α : thermal diffusivity, $[m^2/s]$
 β : ratio of the thermal conductivities of the screw and the solids bed
 ε : ratio of the thermal conductivities of the solids bed and the barrel
 δ : difference between nodes of the mesh
 Δ : difference between faces of the mesh
 ρ : density, $[kg/m^3]$

감사의 글 : 본 논문은 2001년도 경남대학교 학술연구조성비의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. W. H. Darnell and E. A. Mol, *SPE Journal*, **12**, 20 (1956).
2. Z. Tadmor and I. Klein, *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1970.
3. Z. Tadmor and E. Broyer, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 12 (1972).
4. Z. Tadmor and E. Broyer, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 378 (1972).
5. Z. Tadmor and L. Kacir, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 387 (1972).
6. J. G. A. Lovegrove and J. G. Williams, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 589 (1974).
7. F. Zhu and L. Chen, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 1113 (1991).
8. G. A. Campbell and N. Dontula, *Inter. Polym. Proc.*, **X**, 30 (1995).
9. Y.-C. Ahn and H.-J. Kim, *Theor. & Appl. Chem. Eng.*, **4**, 1313 (1998).
10. Y.-C. Ahn and H.-J. Kim, *J. Appl. Polym. Sci.*, **86**, 2921 (2002).
11. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, U.S.A., 1980.
12. S. V. Patankar, *Numer. Heat Trans.*, **4**, 409 (1981).
13. D. A. Anderson, J. C. Tannehill, and R. H. Pletcher, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Hemisphere, U.S.A., 1984.