

〈연구논문〉

싱글-스크류 압출공정에서의 비등온 유동의 유한요소 해석

권 태 현

포항공과대학 기계공학과
(1991년 4월 13일 접수)

Finite Element Analysis of Nonisothermal Flows in Single-Screw Extruders

Tai Hun Kwon

Department of Mechanical Engineering, Pohang Institute of Science and Technology, Pohang, Korea
(Received April 13, 1991)

요 약

압출공정에서 발생하는 전달현상을 이해하기 위하여, 싱글-스크류 압출기에서의 비뉴턴성 유체의 비등온유동에 대한 수치해석을 위한 유한요소법(FEM)을 개발하였다. FEM은 준-3차원 물리적 모델(quasi-three-dimensional physical model)을 기본으로 하였고 온도분포 해석을 위하여 전진방법(marching scheme)을 도입하였다. 본 연구에서 도입한 수치해석적 모델과 더 간단한 준-2차원 모델을 온도분포의 예측에 관하여 초점을 맞추어서 비교하였다. 압출기의 내부채널에서 순환유동(circulating flow)이 온도분포에 미치는 영향의 중요성이 강조되었다. 순환유동의 효과를 파악하기 위하여 유한요소식에서 순환과 관련된 대류항을 빼도록 유한요소 프로그램을 개조하였고, 개발된 원래의 프로그램과 개조된 프로그램의 해석을 수행한 후 해석결과 중에서 특히 온도분포에 있어서의 차이점을 비교하였다. 이로부터 간단한 준-2차원 모델은 순환효과를 무시했기 때문에 속도분포의 예측에서는 별 문제가 없으나 온도분포의 예측에 있어서는 크게 잘못될 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract—In order to understand the transport phenomena underlying the extrusion process, a finite element method (FEM) has been developed for numerical analyses of nonisothermal flows of non-Newtonian viscous fluids in single screw extruders. The FEM was based on a quasi-three dimensional physical modeling with a marching scheme employed for analyzing temperature distribution. The present numerical modeling for the extruder channel flows is compared with a simpler two-dimensional modeling especially in terms of predictability of the temperature distribution. Emphasis is made on the effect of a circulating flow on the temperature distribution in an extruder channel. In order to find the effect of the circulating flow, a modification in the FEM was made by dropping convective terms associated with the circulation in the finite element formulation and subsequently comparison was made between results from the original FEM and those from the modified FEM with respect to the temperature distribution. It is found that the temperature predicted by the simpler quasi-2D model can be quite erroneous due to the negligence of the circulating effect even though velocity field can be predicted without a significant error.

Keywords: Single-Screw Extruder, Nonisothermal Flow, Non-Newtonian Fluids, Finite Element Method, Circulating Flow, Quasi-3D Model, Quasi-2D Model

1. 서 론

압출공정은 플라스틱재료, 의약품재료, 식료품재료 등을 위시하여 최근에는 고분자 복합재료, 철 및 세라믹 분말재료 등과 같이 다양한 재료의 가공 및 성형 공정으로서 점점 더 많이 이용되고 있다. 압출성형 공정 등에 일어나는 재료의 유동과 열전달 효과, 또 경우에 따라 화학반응현상 등으로 압출 후 재료는 형태적, 물리 화학적 변화를 거쳐 원하는 성형물질로 가공된다. 동시에 압출기는 혼합기로서의 기능도 갖고 있어서 여러 가지 재료가 흠퍼로 들어가면 다리로 나올 때까지 잘 혼합될 수 있다. 이러한 변화과정은 대단히 복잡해서 압출성형 공정의 각종 공정조건은 주로 실험적 시행착오법으로 결정되고 있는 실정이다. 최근에 와서 각종 신소재의 출현과 더불어서 이들을 위한 가공공법으로서 압출공정이 이용되면서 새로운 가공재료에 적절한 스크류의 설계 및 공정조건의 과학적결정의 필요성이 더욱 중요하게 되었다. 이러한 압출성형 공정조건의 과학적 결정을 위해서는 압출기의 내부에서 일어나는 복잡한 각종의 전달현상을 이해하여야만 하고 이를 위해서 이론적, 실험적, 수치해석적 연구가 많이 행해져 왔다. 압출공정의 과학적 설계와 공정의 생산성을 높이기 위해 특히 수치해석기법의 개발이 중요하여 본 연구논문에서는 압출공정의 수치해석 모델에 관하여 논하고자 한다.

스크류 압출기는 종류가 다양하여 single screw extruder, twin screw extruder로 대별되고 스크류의 형상에 따라 self-wiping screw, rectangular screw 등으로 구별되고 특히 twin screw extruder는 co-rotating과 counter-rotating, intermeshing과 partially intermeshing 등으로 구별된다[1].

Single screw extruder는 비교적 기하학적 형상이 단순하여 twin screw extruder에 비하여서 많은 연구가 실험적, 수치해석적으로 행해졌다[2-6]. Griffith[7]는 무한대의 길이와 폭을 가진 스크류 압출기에서의 비압축성 유체의 속도 및 온도분포를 해석하였고 Zamodits and Pearson[8]은 무한대의 폭을 가진 직사각형 스크류 채널에서의 비뉴턴성, 이차원, 등온의 완전 발전유동(fully developed flow)을 수치해석하였다. Tadmor와 Gogos[2]와

Fenner[3, 9]는 압출기의 여러 부위에서의 폴리머의 유동에 관한 해석을 하였다. Fenner[9], Karwe, Jaluria와 Kwon[5]은 스크류채널의 유동방향을 따라 발전되어 가는 온도의 변화를 유한차분법으로 해석하였다. Gopalakrishna 등[6]은 Extrusion Cooking의 전달현상 해석을 시도하여 온도분포 뿐만 아니라 수분의 확산현상에 대한 시뮬레이션 결과를 보고하였다. Sastrohartono와 Kwon[10]은 임의의 형상을 가진 스크류 압출기 채널 내부에서 비뉴턴성 유체의 등온(isothermal)이며 완전발전된 유동현상을 해석하기 위해 유한요소법을 이용하였고, 해석 결과로 구해진 속도장으로부터 채널내에서의 순환 유동(circulating flow) 및 분산혼합(distributive mixing)을 기술하였다.

Twin screw extruder는 형상의 복잡성 때문에 연구발전에 있어서 single screw extruder에 비해 훨씬 늦고 문헌에 발표된 논문도 적다. Janssen[11]은 c-shaped chamber를 가진 fully intermeshing counter-rotating twin-screw extruder의 유동특성에 관해 집중적으로 논하였다. Secor[12]는 co-rotating twin-screw extruder의 수치해석을 실험결과와 비교하였다. 좀 더 정확한 모델로 유한요소법을 이용하여 Denson과 Hwang[13, 14]은 self-wiping twin-screw의 성능에 대한 연구를 행하였다. Bigio와 Zerafati[15]는 non-intermeshing counter-rotating twin-screw extruder의 혼합구역에서의 유동현상을 수치해석 하였다. Twin-screw extruder에서의 유동현상을 해석하기 위하여 Sastrohartono와 Kwon[10], Kwon 등[16]은 천이구역과 혼합구역으로 분리하여 각각 유한차분법(FDM)과 유한요소법(FEM)으로 해석하여 결합하는 방식을 제안하여 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

위에 예시한 것 같이 압출공정 해석모델은 그 엄밀성에 따라 여러 가지가 존재하는데 간단히 정리하면 아래와 같다: Developing Nonisothermal Quasi-2D, Isothermal Quasi-3D[10], Fully-developed Nonisothermal Quasi-3D, Developing Nonisothermal Quasi-3D, Isothermal 3D[18], Nonisothermal 3D.

일반적으로 엄밀한 모델은 간단한 모델에 비해 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 반면에 해석에 더

많은 노력과 경비가 들게 되는 불리한 점이 있는 것은 자명한 일이다. 따라서 해석에 있어서 요구되는 정확도에 따라 모델을 선정하게 된다. 그러나 간단한 모델이 전혀 다른 해석결과를 줄 경우도 있을 수가 있고 이를 경계해야만 한다. 본 논문에서는 주로 Developing Nonisothermal Quasi-3D 모델에 의한 FEM 해석에서 순환유동이 미치는 온도분포에 대한 영향에 관하여 논하고자 한다. 한편 간단한 Developing Nonisothermal Quasi-2D FDM 해석은 속도 해석에 있어서 비교적 정확한 결과를 주는 반면에 순환유동을 고려하지 못하는 사실 때문에 잘못된 온도분포를 줄 수 있는 점을 주목하였다.

2. 수치 모델

Single screw extruder의 간단화된 형상과 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. 해석의 용이성을 위해서 스크류가 회전하고 베렐이 고정되어 있는 시스템 대신 스크류는 고정되어 있고 베렐이 같은 상대속도로 회전하는 시스템으로 대체한다. 이 경우에 스크류와 베렐이 만드는 나선형의 유동영역을 평면에 펴놓은 형상에서 Fig. 1과 같은 좌표계를 설정한다. 다음에 Developing Nonisothermal Quasi-2D 모델과 Developing Nonisothermal Quasi-3D 모델을 기술하고 후자의 경우에 대한 유한요소 해석방법을 기술한다.

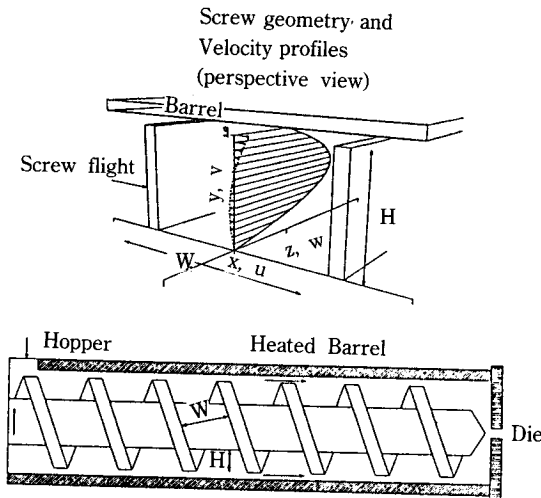


Fig. 1. Schematic diagram of extruder channel with a coordinate system.

2.1 Developing Nonisothermal Quasi-2D 모델

Quasi-2D 모델은 스크류의 단면형상이 직사각형이고 스크류 채널이 깊이(Fig. 1의 y-방향 길이)보다 폭(Fig. 1의 x-방향 길이)이 훨씬 큰 경우에 잘 적용할 수 있는 것으로서 가장 간단한 모델이다. 이 모델에서는 Fig. 1에서 보여준 y-방향의 속도를 고려하지 않고, 폭이 깊이에 비해 훨씬 크므로 x-방향에 대한 속도 변화를 무시하며, 또한 스크류 채널의 유동방향 즉 z-방향으로는 속도구배가 적다고 가정한다. 이러한 경우에 다음과 같은 Quasi-2D 속도분포를 도입한다.

$$\vec{V} = u(y)\vec{i} + w(y)\vec{k} \tag{1}$$

따라서 스크류 채널 안에서의 비뉴턴성 유체의 정상상태 크리핑 유동에 대한 운동방정식과 에너지방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \tag{3}$$

$$\rho C_p \left(w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q} \tag{4}$$

식 (1)로 표현된 속도장은 연속방정식을 자동적으로 만족시킨다. 위에 보여준 모델에 대한 수치해석방법은 y-z 평면에서 격자를 만들어서, 주어진 z에서 FDM을 사용하여 식 (2)와 (3)으로부터 u(y), w(y)를 구하고 다음의 z로 진전시켜(marching) 식 (4)를 이용하여 온도분포를 구하면서 속도분포와 온도분포를 계속적으로 구해나간다. 자세한 방법은 참고문헌을 참조하기 바란다[2-6].

2.2 Developing Nonisothermal Quasi-3D 모델

스크류의 단면형상이 직사각형이 아니거나 직사각형이라도 스크류 채널의 깊이보다 폭이 훨씬 크지 않을 경우에 위의 Quasi-2D 모델이 적용될 수 없고 이런 경우에는 아래와 같은 모델을 적용해야 한다. 이러한 경우에도 스크류 채널의 유동방향(즉, z 방향)을 따라 속도분포의 변화가 적다는 것을 가

정한다. 따라서 z-방향의 속도구배는 다른 방향들, 즉 x-방향과 y-방향에 대한 속도구배보다 훨씬 적다고 가정할 수 있다. 즉 $\partial \vec{V} / \partial z \ll \partial \vec{V} / \partial x$ or $\partial \vec{V} / \partial y$ 이므로 다음과 같은 quasi-3D 속도분포를 도입할 수 있다.

$$\vec{V} = u(x, y)\vec{i} + v(x, y)\vec{j} + w(x, y)\vec{k} \quad (5)$$

정상상태의 크리핑 유동(creeping flow)에 대한 연속방정식, 모멘텀방정식 그리고 에너지방정식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [2\mu(\frac{\partial u}{\partial x})] \\ + \frac{\partial}{\partial y} [\mu(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} [\mu(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \\ + \frac{\partial}{\partial y} [2\mu(\frac{\partial v}{\partial y})] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} [\mu(\frac{\partial w}{\partial x})] \\ + \frac{\partial}{\partial y} [\mu(\frac{\partial w}{\partial y})] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \dot{Q} \end{aligned} \quad (10)$$

위의 에너지방정식에서 z-방향의 열전도항도 무시되었다. 한편 에너지방정식 (10)은 x와 y 좌표방향으로는 elliptic성질을 갖고 z 방향으로는 parabolic 성질을 갖고 있다. 따라서 x-y면에서 식 (4-9)로부터 유동해석을 하고 z-방향, 즉 down channel 방향으로 이른바 marching을 하면서 식 (10)으로부터 온도 분포 해석을 해나가면 스크류 채널의 3차원 공간에서의 3차원 해석을 할 수 있다. 본 모델을 Quasi-

3D 모델이라고 명명한 이유는 속도성분은 3차원이지만 그들은 주어진 z-위치에서 (x, y) 2차원에서 정의되기 때문이다.

본 논문에서는 폴리머를 그 탄성효과를 무시하고 전단변형률의 함수인 점성계수를 갖는 비뉴턴성 점성유체로 취급하여 아래에 표현된 power-law 모델을 구성방정식으로 도입하였다.

$$\mu = K(T) \dot{\gamma}^{n-1} \quad (11)$$

위에서 K(T)는 온도의 함수이고 n은 power-law index이며 $\dot{\gamma}$ 은 다음과 같이 정의되는 일반전단변형률 (generalized shear rate)을 뜻한다.

$$\dot{\gamma} = (2D_{ij}D_{ij})^{1/2} \quad (12)$$

K(T)는 다음과 같이 나타낸다.

$$K(T) = A \exp(T_a/T)$$

위의 식들을 살펴보면 식 (6)-(8)들은 2차원 유동장에서의 지배방정식과 같아서 (u, v) 속도분포를 Inplane Flow라고 이름붙였고, 식 (9)는 w 속도분포의 지배방정식으로서 위의 식과 독립된 듯이 보이고 w 속도분포를 Axial Flow라고 일컬을 수 있다 [10]. 뉴턴성 유체의 경우에는 inplane flow와 axial flow는 독립되어 있다. 그러나 압출기에서 실제 사용되는 가공재료는 고분자재료들이 대부분이고 이 경우 식 (6)-(9)는 점성관계식 (11), (12)로 인하여서 비뉴턴성유체의 경우에는 상호연계되어 있다.

3. 유한요소법 및 해석방법

지배방정식 (6)-(12)를 FEM을 이용하여 풀기 위하여 inplane flow에 대해서 variational principle, axial flow와 에너지방정식에 관해서는 Galerkin's Weighted Residual Method를 사용하면 다음과 같은 비선형 algebraic equation들을 만들 수 있다 [19, 10].

inplane flow로부터

$$\begin{aligned} [K]\{uv\} - [G]^T\{p\} &= \{F\} \\ [G]\{uv\} &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

axial flow로부터

$$[H]\{w\} = \{F_w\} \quad (14)$$

에너지방지식으로부터

$$\begin{aligned} & [2[B] + [C]\Delta z]\{T\}_{z+\Delta z} \\ & = [2[B] - [C]\Delta z]\{T\}_z - 2\Delta z\{F_T\}_{z+\Delta z} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 행렬식들은 비선형으로서 상호연계되어 있으므로 iteration이 필수적이고 그에 대한 효율적인 방식이 요구된다. 본 연구에서 도입된 해석방법에 사용된 iteration 및 marching 방식을 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 첫번째에는 등은, 뉴턴성 유동의 해를 식 (13), (14)로부터 구한다.

2. 식 (13)을 Newton-Rapson 방법으로 (u, v), p의 분포의 수렴해를 구한다.

3. 식 (14)로부터 w 속도분포를 구한 후 2-단계로 가서 단계 2-3을 loop로 속도와 압력의 수렴해를 구한다.

4. 식 (15)로부터 Δz 만큼 유동방향을 진행하여 그 위치에서의 온도분포를 구한다.

5. 새로운 위치에서의 온도분포를 가지고 2-단계로 가서 단계 2-5를 loop로하여 반복계산하여 채널끝까지 진행한다.

위와 같은 iteration중에 stiffness matrix [K], [H], [B], [C]들의 update 방식에 따라 효율이 크게 변하므로 효율적인 iteration 방식을 찾는 것이 중요하다.

4. 수치해석 예 및 토의

위에 기술된 방법에 의해 FORTRAN 프로그램을 개발하여 여러 가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 그 중 한 경우를 예로 하여 해석결과를 논하고자 한다. 본 예에서 사용된 직사각형 단면을 가진 스크류의 기하학적 형상은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= 4.7 \text{ mm}, W = 11.52 \text{ mm}, \text{pitch angle} \\ \phi &= 16.19 \text{ degree} \end{aligned}$$

수치해석에 사용된 물질은 저밀도 폴리에틸렌 (LDPE)으로서 다음과 같은 물질상수를 갖고 있다.

$$\begin{aligned} A &= 30.76 \text{ poise sec}^{n-1}, T_a = 2900^\circ\text{K}, \\ \rho &= 0.77 \text{ gm/cm}^3, C_p = 3.4 \times 10^7 \text{ erg/(gm}^\circ\text{K)}, \\ k &= 3.1 \times 10^4 \text{ erg/(sec cm}^\circ\text{K)} \end{aligned}$$

한편 압출기의 공정조건은 아래와 같다.

$$N = 100 \text{ rpm}, q_b = 0.5,$$

여기서 N은 스크류의 회전속도를 뜻하고, q_b 는 아래와 같이 정의된 유량(Q)을 나타내는 무차원수이다.

$$q_b = (Q/W)/V_z, V_z = (\pi DN \cos\phi) \quad (16)$$

Fig. 2는 본 해석에 사용된 FEM의 유한요소 및 여러 가지 해석결과들을 보여주고 있다. 유한요소 해석을 위한 경계조건은 다음과 같다. 속도에 관한 경계조건으로 상부의 베렐표면(S4)에는 $V_x = (\pi DN \sin\phi)$, 나머지 스크류 flight 표면(S1, S2, S3)에는 비미끄럼(nonslip)조건을 부여하였고, 열적 경계조건은 Fig. 2에 표시되어 있다. 해석결과로서 흡퍼로부터 유동채널 길이방향으로 진행하여 $z = 125.65 H$ 인 위치에서 inplane flow속도인 u-v 벡터 플롯, axial flow속도인 w의 contours, 압력과 온도의 contours를 보여주고 있다. Fig. 2 하단에는 center line을 따라 u, w 및 T의 y-방향 분포가 표시되어 있다. Fig. 2에서 *는 무차원화된 변수들로서 아래와 같이 정의된다.

$$y^* = y/H, z^* = z/H,$$

$$u^* = u/V_z, w^* = w/V_z,$$

$$T^* = \frac{T - T_c}{T_b - T_c} \quad (17)$$

Fig. 2에서 보여준 것 같이 inplane flow는 순환(circulation)현상을 보여주고 있고 axial flow와 함께 3차원 유동을 관찰하면 spiral motion을 하면서 채널을 유동함을 알 수 있다[10]. 이러한 spiral motion에 의한 혼합효과는 Sastrohartono와 Kwon[10]에서 논의되었다. 본 해석의 경우에는 w속도가 전부 양수이므로 backflow 현상은 이 경우 없다. 한편 베렐표면과 스크류 flight 표면이 만나는 2개의 점에서 경계조건의 변화로 인하여 압력분포에 singularity가 나타남을 볼 수 있다. 여기서 주목할 점은

At $z^* = 125.65$

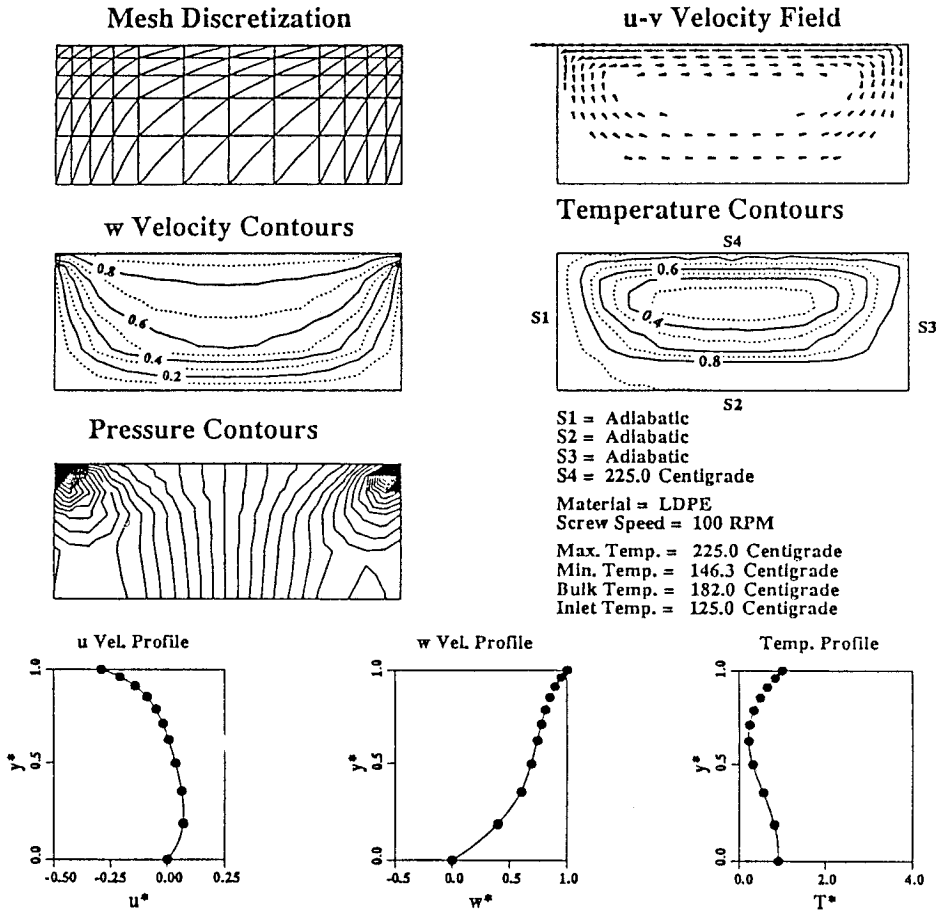


Fig. 2. Results of finite element analysis at a channel location of $z=125.65$ H.

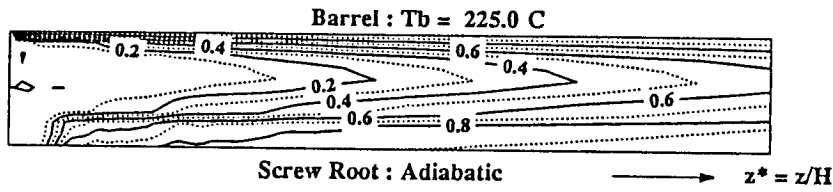
온도분포로서 그 contour들이 inplane circulation motion의 영향으로 inplane flow의 streamline과 유사함을 알 수 있다. 이로부터 inplane flow에서의 대류효과에 의해 온도분포가 큰 영향을 받았음을 추론할 수 있다.

Fig. 3에서는 채널의 중양을 따른 단면도(즉, y-z평면)에 그려진 온도분포를 나타내는 contour 그림이다. 이와 함께 채널 유동방향을 따라 5군데의 z 위치에서의 온도분포를 나타내었는데, 채널을 따라 유동하면서 재료의 온도가 높아져가는 양상을 잘 보여주고 있다. Fig. 2에서 설명된 것처럼 베렐표면 근방과 스크류표면 근방의 온도가 높은 것은 circulation motion에 의한 대류효과 때문임을 알 수 있다.

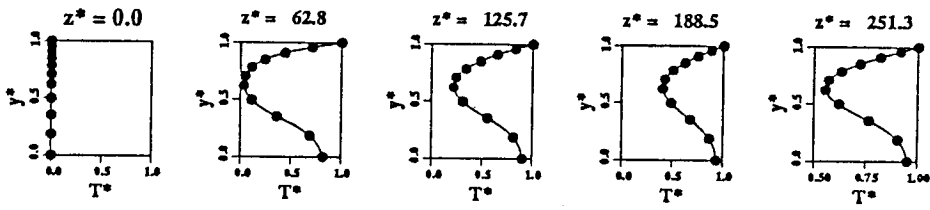
이 결과는 순환적 대류를 고려할 수 없는 좀 더 간단한 Quasi-2D 모델의 수치해석 결과와 상이함을 주목해야 한다[예 : 5, 16]. Karwe 등[5], Fenner[3, 9]는 v속도를 무시했기 때문에 circulatory motion을 고려할 수 없고 따라서 그러한 모델은 폭(W)이 높이(H)보다 훨씬 큰 경우에 합당한 모델이고 이 경우와 같이 $W/H=2.5$ 인 경우에는 부적합함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 채널의 중양을 따른 단면도(y-z평면)에 그려진 w 속도분포를 나타내는 contour 그림이다. 이와 함께 채널 유동방향을 따라 5군데의 z 위치에서의 w 속도분포를 보여주고 있다. axial flow를 나타내는 w속도는 z방향을 따라 큰 변화가 없음을

Temp. Contours at the Center of the Channel



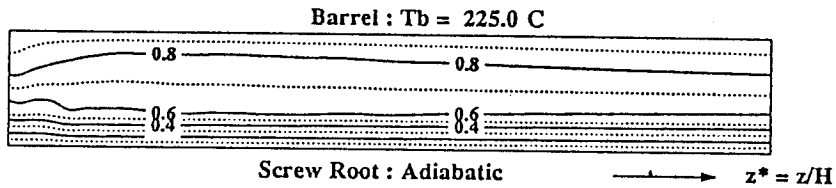
(a)



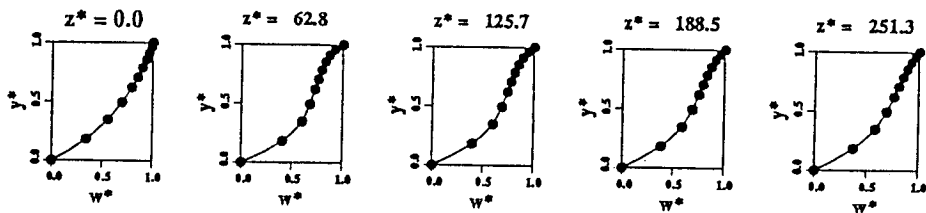
(b)

Fig. 3. (a) Temperature contours at the center plane (i.e. y-z plane) and (b) temperature distributions as a function of a depth coordinate at five locations along the down-channel direction.

w^* Vel. Contours at the Center of the Channel



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Contours of w velocity component at the center plane (i.e. y-z plane) and (b) w velocity distributions as a function of a depth coordinate at five locations along the down-channel direction.

알 수 있고 이는 바로 본 연구에서 도입한 가정이 올바름을 확인해주는 것이다.

Fig. 5와 6은 스크류 채널을 따른 압력, 압력구배 및 bulk 온도의 변화를 보여주고 있다. 압력과 온도는 단조 증가함을 보여주고 있다. 흡퍼부근에서 압력구배가 상당히 큰 것은 그 부근에서 온도가 비교적 낮은 재료가 들어와서 갑자기 온도의 증가를 겪게 되기 때문으로 생각된다.

앞에서 설명된 것처럼 본 유한요소 해석결과는 circulation motion에 의한 대류 효과때문에 v속도를 무시한 모델을 바탕으로 한 결과와 다른 온도분포를 갖는다. 이러한 온도분포에 대한 순환유동의 효과를 확인하기 위하여 본 연구에서는 에너지방정식을 해석하기 위한 유한요소법에서 식 (10)의 u, v에 의한 convection항을 제외하도록 FEM 프로그램을 개조한 후 똑같은 문제를 해석하였다. 그 해석결과를 앞의 해석결과들인 Fig. 2부터 6까지와 대비하기 위하여 Fig. 7부터 11까지를 보여준다. 이들을 비교하면 압력과 u, v 속도는 거의 서로 같아도 온도분포는 크게 달라졌음을 알 수 있다. 즉 Fig. 3과 8의 온도 contour가 크게 다름에 주목해야 한다. 특기할 점은 대류를 무시한 결과인 Fig. 8은 참고문헌[5,6]에서 보여준 준-2차원 모델의 온도 contour와 모양이 일

치함을 지적할 수 있다. 또 한편으로는 Fig. 10에서 압력구배가 달라져 있음을 알 수 있다. 이는 온도의 차이가 점성의 차이를 유도하여 압력구배 역시 변한 것으로 당연한 것이다. 또한 Fig. 6과 Fig. 11을 비교하여 보면 대류를 무시한 경우에 bulk 온도가 훨씬 낮게 예측되는 것을 알 수 있다. 이로부터 우리는 대류를 무시한 좀 더 간단한 모델인 준-2차원 모델의 온도 해석결과는 치명적 문제점이 있음을 실감할 수 있다. 즉 열경화성 고분자재료와 같이 압출도중에 화학변화를 일으키는 재료에 있어서 그 화학변화가 온도의 함수인 경우에 이와 같은 온도의 해석에 발생하는 오차는 화학변화를 제대로 해석할 수 없는 치명적 결함이 있다. 따라서 본 연구와 같은 준-3차원 모델을 바탕으로한 유한요소해석법의 필요성 및 유용성을 확인하게 된다.

5. 결 론

최근에 와서 각종 신소재의 출현과 더불어서 이들을 위한 가공공법으로서 압출공정이 이용되면서 새로운 가공재료에 적절한 스크류의 설계 및 공정 조건의 과학적 결정의 필요성이 더욱 중요하게 되었다. 이러한 압출성형 공정조건의 과학적 결정을

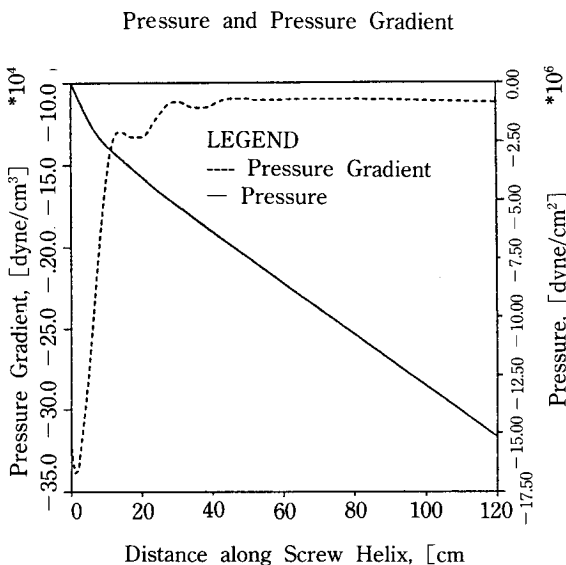


Fig. 5. Pressure and pressure gradient as functions of the down-channel direction z.

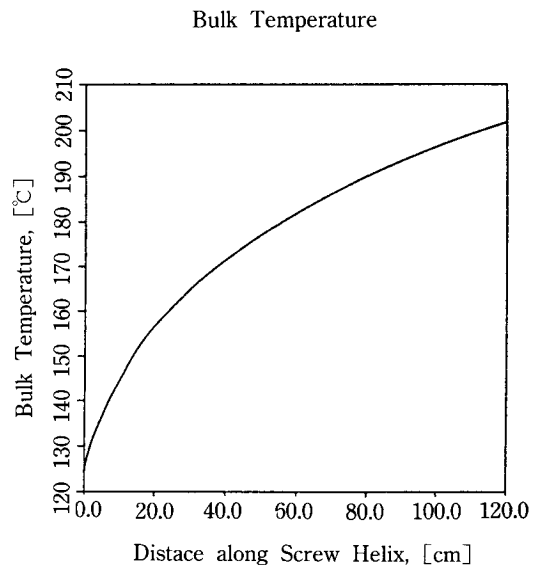


Fig. 6. Bulk temperature as a function of the down-channel direction z.

At $z^* = 125.65$

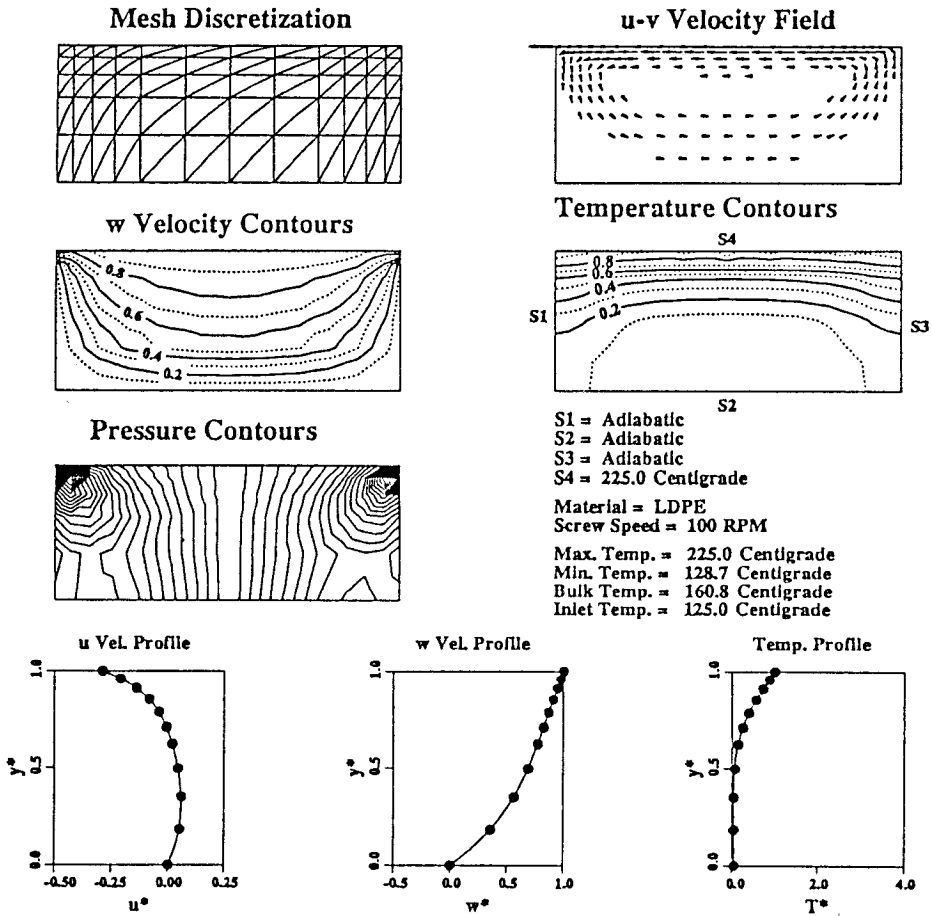


Fig. 7. Results of a modified finite element analysis at a channel location of $z=125.65$ H. (All of Figs. 7-11 are results of a modified finite element analysis by dropping the convection terms in x and y directions and are corresponding to Figs. 2-6 obtained from an original finite element analysis, respectively)

위해서는 압출기의 내부에서 일어나는 복잡한 각종의 전달현상을 이해하여야만 한다. 이를 위하여 싱글-스크류 압출기에서의 비뉴턴성 유체의 비등온 유동에 대한 수치해석을 위한 유한요소법(FEM)을 개발하였다. FEM은 준-3차원 물리적 모델(quasi-three-dimensional model)을 기본으로 하였고 온도 분포해석을 위하여 전진방법(marching scheme)을 도입하였다. 한 가지 수치해석 예를 통하여 압출기의 내부체널에서 순환유동(circulation flow)이 온도분포에 미치는 영향의 중요성이 강조되었다. 순환유동의 효과를 파악하기 위하여 유한요소식에서 순환

과 관련된 대류항을 빼도록 유한요소 프로그램을 개조하였고, 개발된 원래의 프로그램과 개조된 프로그램의 해석을 수행한 후 해석결과 중에서 특히 온도분포에 있어서의 차이점을 비교하였다. 이로부터 간단한 준-2차원 모델(quasi-2D model)은 순환 효과를 무시했기 때문에 속도분포의 예측에서는 별 문제가 없으나 온도분포의 예측에 있어서는 크게 잘못될 수 있음을 알 수 있었다. 예를 들면 열경화성 고분자재료, 식료품재료와 같이 화학적 변화를 통해 화학구조가 변화되는 curing process 등의 해석에 있어서 준-2차원 모델로부터는 정확한 예측성을 기

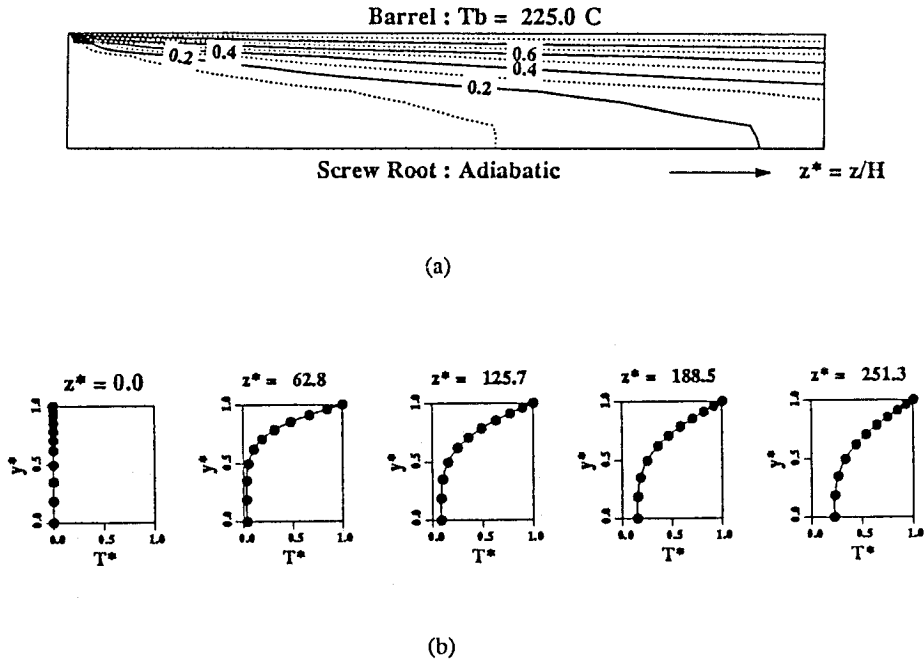


Fig. 8. (a) Temperature contours at the center plane (i.e. y - z plane) and (b) temperature distributions as a function of a depth coordinate at five locations along the down-channel direction.

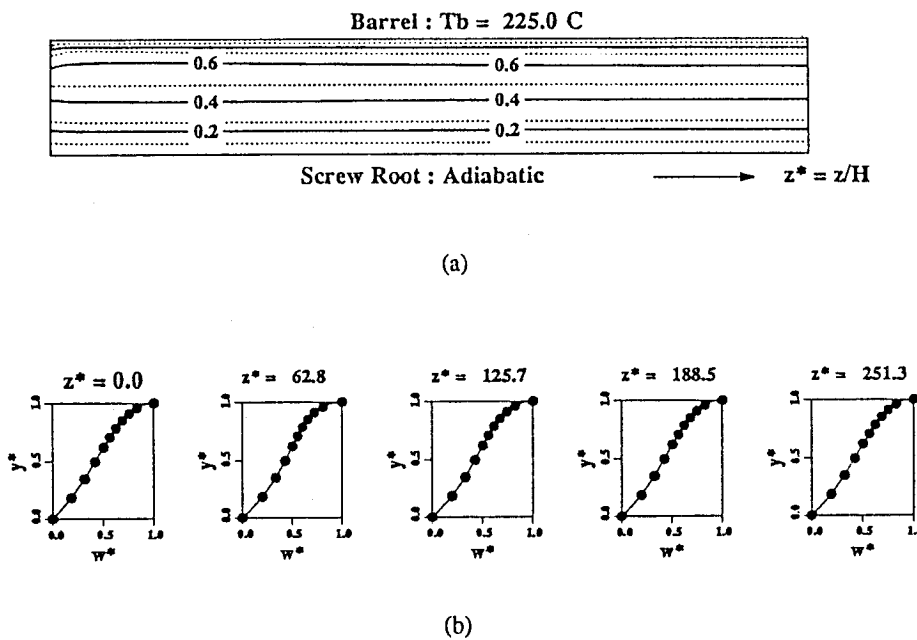


Fig. 9. (a) Contours of w velocity component at the center plane (i.e. y - z plane) and (b) w velocity distributions as a function of a depth coordinate at five locations along the down-channel direction.

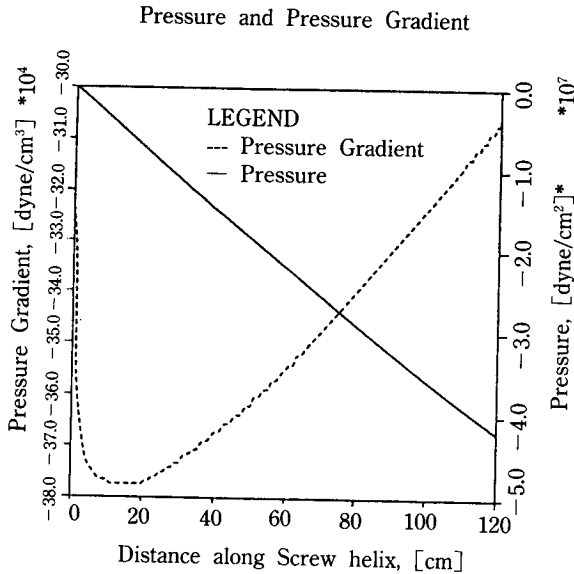


Fig. 10. Pressure and pressure gradient as functions of the down-channel direction z.

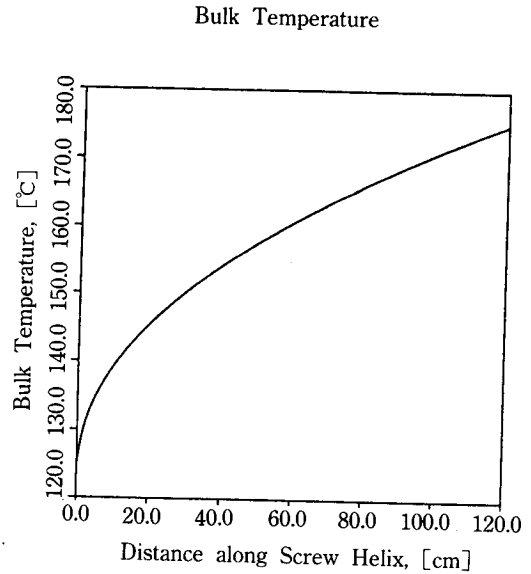


Fig. 11. Bulk temperature as a function of the down-channel direction z.

대하기 힘들고 적어도 준-3차원 모델을 기본으로 채택해야 함을 지적할 수 있다.

감 사

본 연구는 한국과학재단과 포항공대의 연구비를 받아 이루어진 연구결과입니다. 연구비의 지원에 감사드립니다.

기 호

- x, y, z : Coordinate System
- \vec{v} : Velocity vector
- u, v, w : Velocity components
- p : Pressure
- C_p : Specific heat
- T : Temperature
- T_b : Barrel temperature
- T_e : Temperature of material at the entrance
- \dot{Q} : Heat source per unit volume
- k : Thermal conductivity
- D_{ij} : Components of rate of deformation tensor, $\tilde{D} = 1/2(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)$

- n : Power law index
- H : Depth of screw channel
- W : Width of screw channel
- D : Screw Diameter
- N : Screw rotational speed
- Q : Flow rate of material
- q_0 : Nondimensionalized flow rate
- y^*, z^* : Nondimensionalized coordinates
- u^*, w^* : Nondimensionalized temperature
- T^* : Nondimensionalized temperature
- ρ : Density
- μ : Viscosity
- $\dot{\gamma}$: Generalized shear rate
- ϕ : Pitch angle

참고문헌

1. K. Eise, H. Hermann, H. Werner, and U. Burkhardt, *Adv. Plast. Technol.*, **1**, 1 (1981).
2. Z. Tadmor and C. Gogos, "Principles of Polymer Processing", John Wiley & Sons, New York, 1979.
3. R.T. Fenner, "Principles of Polymer Processing", Chemical Publishing, New York, 1979.
4. Z. Tadmor and I. Klein, "Engineering Principles

- of Plasticating Extrusion”, Krieger Publishing Co., Florida, 1978.
5. M.V. Karwe, Y. Jaluria and T.H. Kwon, “Computational Methods in Flow Analysis”, ed. by H. Niki and M. Kawahara, Vol. II, Okayama University of Science, 1988, p. 1085.
 6. S. Gopalakrishna, M.V. Karwe and Y. Jaluria, “Numerical Methods in Industrial Forming Processes”, ed. by E.G. Thompson *et al.*, Balkema, Rotterdam, 1989, p. 265.
 7. R.M. Griffith, *I & E Fundamentals*, **1**, 1 (1962).
 8. H.J. Zamodits and J.R.A. Pearson, *Tran. of Society of Rheology*, **13**, 3 (1969).
 9. R.T. Fenner, *Polymer*, **18**, (1977).
 10. T. Sastrohartono and T.H. Kwon, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **30**, 1369 (1990).
 11. L.P.B.M. Janssen, “Twin screw extrusion”, Elsevier Scientific Publishing, Amsterdam, 1978.
 12. R.M. Secor, *Polym. Eng. Sci.* **26**, 647 (1986).
 13. C.D. Denson and B.K. Hwang, *SPE ANTEC Tech. Paper*, **26**, 107 (1980).
 14. C.D. Denson and B.K. Hwang, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 965 (1980).
 15. D. Bigio and S. Zerafati, *SPE ANTEC Tech. Paper*, **34**, 85 (1988).
 16. T.H. Kwon, Y. Jaluria and M.V. Karwe, “Progress in Polymer Processing”, ed. by A.I. Isayev, Hanser Publisher, 1991, p. 77.
 17. T. Sastrohartono, M. Esseghir, T.H. Kwon and V. Sernas, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 1392 (1990).
 18. M. Gupta and T.H. Kwon, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 1420 (1990).
 19. O.C. Zienkiewicz, “The Finite element method”, 3rd ed., McGraw Hill, New York, 1977.