

단축 스크류 압축기에서 계량화부와 다이를 동시에 고려한 열 및 유동해석

윤정배* · 곽동성* · 김우승**

Simulation of Heat and Fluid Flow in the Single Screw Extruder with Coupling of the Metering Section and Die

Jung-Bae Yoon, Dong-Seong Kwag and Woo-Seung Kim

Key Words: Metering Section(계량화부), Die(다이), Pressure Back Flow(역류), 준 3차원 다이모델 (quasi 3-Dimensional Die Model)

Abstract

In the present study, the analysis on heat and fluid flow in the single screw extruder is carried out by simultaneously considering the metering section and the die. The finite difference method and the finite volume method are applied to the metering section and the die, respectively. The zonal method is used to couple the metering section and the die. To investigate the effect of die on the characteristics of heat and fluid flow in the single screw extruder, the pressure back flow is included in the analysis. The screw-tip rotation is also considered by employing the quasi 3-dimensional die model. The present results are compared with the numerical and experimental data available in the literatures.

기호설명

<p>G : Griffith 수</p> <p>k : 열전도 계수</p> <p>m : 채널당 질량유량</p> <p>n : Power law index</p> <p>N : 스크류 회전수</p> <p>Pe : Peclet 수</p> <p>q_v : 채널당 무차원 체적유량</p> <p>r : 반경방향</p> <p>Re : Reynolds 수</p> <p>T : 온도</p> <p>u : z-방향 속도 (다이), x-방향 속도 (계량화부)</p> <p>v : r-방향 속도</p>	<p>w : θ-방향 속도 (다이), z-방향 속도 (계량화부)</p> <p>x : 스크류 날개에 수직한 방향</p> <p>y : 스크류에 수직한 방향</p> <p>z : 중심축 방향(다이), 스크류 채널 하류 방향(계량화부)</p> <p>그리스 문자</p> <p>γ : 변형률</p> <p>θ : 무차원 온도</p> <p>μ : 점도</p> <p>하첨자</p> <p>b : 배럴</p> <p>i : 입구</p>
---	--

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

1. 서론

압출성형은 고점성의 유체상태 재료로부터 얻

속적인 제품생산을 할 수 있는 제조공정으로서 의약품, 플라스틱, 식품 등의 생산에 널리 사용되고 있다. 단축스크류압출기는 일반적으로 원료공급부(feed section), 압축부(compression section), 계량화부(metering section)의 세 부분으로 이루어져 있다. 이 중에서 계량화부는 압출공정 제어의 핵심적인 부분으로 최적화된 압출공정을 이루기 위해서는 계량화부에서의 열 및 유동에 관한 연구가 필요하다. 또한 압출공정의 최종 제품에 직접적인 영향을 주는 다이에 관한 해석도 요구된다.

Karwe와 Jaluria⁽¹⁾는 열적으로 완전히 발달된 유동에 대해 역류가 없다고 가정하여 계량화부에 관한 에너지 방정식을 하류방향으로 진행(marching)시켜 해석하였다. Chiruvella⁽²⁾등은 역압력구배에 의한 계량화부 내의 역류를 타원형 폴리법과 포물선형 폴리법으로 해석하여 각각을 비교하였다. Kwon⁽³⁾등은 급축소관 내 비뉴턴유체의 압력강하를 계산할 수 있는 관계식을 개발하였으며 Chiruvella⁽⁴⁾등은 계량화부에 역류가 발생하지 않을 때 다이에서의 압력강하식⁽⁵⁾을 이용하여 다이의 영향을 고려한 계량화부를 해석하였다. Lin과 Jaluria⁽⁵⁾는 비뉴턴유체를 급축소 다이에서 압력에 대한 점성의 종속성을 고려하여 해석하였다. 지금까지의 연구결과를 살펴보면 대부분 계량화부와 다이를 분리하여 각각 해석하거나 다이의 영향을 고려하기 위해 계량화부 출구에서의 경계조건을 관계식을 이용하여 계산하였다.

본 연구에서는 계량화부와 다이의 상호작용을 고려하여 실제 공정에 보다 근접한 해석을 수행하기 위하여 계량화부와 다이를 동시에 해석하고자 한다. 또한 역류와 스크류팁 회전효과가 계량

화부와 다이의 열 및 유동에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

2. 본론

2.1 해석대상

본 연구에 사용된 압출기와 다이는 참고문헌⁽⁴⁾에서 사용한 모델을 사용하였고 Fig.1에 나타내었다.

Fig.1의 zone2와 zone3 사이에는 회전유동을 감소시키고 동시에 이물질을 여과하는 breaker 판이 위치한다. 각부의 치수는 Table 1과 같다.

2.2 지배방정식

2.2.1 계량화부

계량화부에서는 Chiruvella⁽²⁾등이 제안한 무차원화된 지배방정식을 사용하였다. 배럴과 스크류 벽면에 점착조건을 부여하였으며, 스크류는 단열로 취급하였다. 그리고 유동은 열적으로 완전발달되었다고 가정하였다. 계량화부 내의 연속방정식은 적분형으로 주어지며 다음과 같다.

$$\int_0^1 u dy = 0, \quad \int_0^1 w dy = a_v \quad (1)$$

그리고 운동량 방정식과 에너지 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

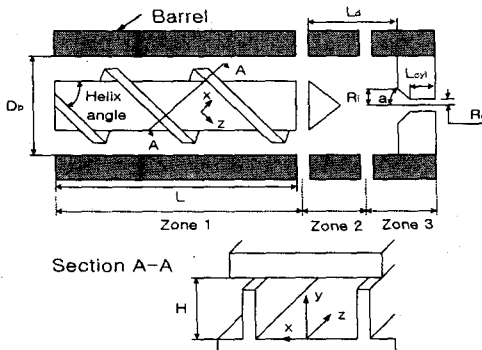


Fig. 1 Schematic diagram of metering section and die

Table 1 Dimensions of the Single Screw and Die Geometry

D_b [mm]	H [mm]	L [m]	Helix Angle [deg]	# of Starts
30.85	4.775	0.329	16.188	2
R_i [mm]	R_o [mm]	a [deg]	L_d [mm]	L_{cyl} [mm]
3.048	0.75	30	15	5

$$Pe \cdot w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + G\mu \quad (3)$$

$$\left[\gamma^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]$$

식(3)에서 γ 는 변형률이며 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

2.2.2 2차원 다이모델

본 연구에서 사용한 2차원 다이모델은 Lin과 Jaluria⁽³⁾가 제안한 무차원화된 지배방정식을 사용하였다. 2차원 다이모델에서는 다이 입구에서 breaker 판의 영향으로 유동의 반경방향 회전성분이 모두 소멸되었다고 가정한다. 2차원 다이모델에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (5)$$

r -방향과 z -방향에 대한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial r} + \mu \frac{v}{r^2} \right] \quad (6)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (7)$$

그리고 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$u \frac{\partial \theta}{\partial z} + v \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{Pe} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \right] + \phi \frac{E_c}{Re} \quad (8)$$

식(8)의 점성소산함수 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \mu \gamma^2 \quad (9)$$

여기서 변형률 γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma = \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

2.2.3 준 3차원 다이모델

기존 연구의 경우 2차원으로 다이 내의 유동을 해석하였기 때문에 스크류 팁의 회전이 고려되지 않았다. 본 연구에서는 스크류 팁의 회전이 다이 내 유동 및 온도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 준 3차원적 해석방법을 사용하였다. 즉 스크류 팁의 원주방향으로는 압력구배가 존재하지 않는다고 가정하고 원주방향의 속도를 독립적으로 계산하여 준 3차원적으로 해석하였다.

연속방정식, r -방향, z -방향 운동량 방정식과 에너지 방정식은 2차원 다이모델과 동일하다. 회전효과를 고려하기 위해 다음의 θ -방향 운동량 방정식을 추가하였다.

$$v \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{Re} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] + \frac{vw}{r} - u \frac{\partial w}{\partial z} \quad (11)$$

준 3차원 다이모델의 경우 점성소산 함수 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \mu \left[\gamma^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left\{ r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right\}^2 \right] \quad (12)$$

식(12)의 변형률 γ 는 식(10)과 같다.

2.3 점성 모델

본 연구에서 사용한 유체 중 LDPE(low density polystyrene)와 HCS(heavy corn cyrup)는 다음의 power law 근사 모델을 사용하여 점성을 계산하였다.

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} \cdot e^{-k(T-T_0)} \quad (13)$$

그리고 Viscasil-300M의 점성계산은 다음의 수정 Bird-Carreau 모델⁽⁶⁾을 사용하였다.

$$\mu = \frac{0.1A e^{B/T}}{1 + C(A \dot{\gamma} e^{B/T})^{1-n}} \quad (14)$$

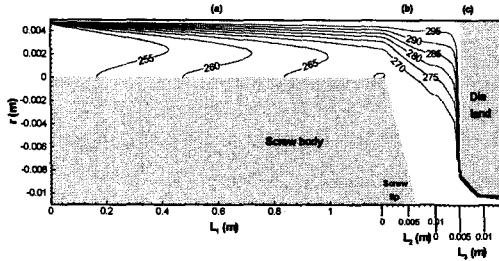


Fig. 2 Temperature contours at (a) Metering section; (b) Adaptive system, and (c) Die. (Fluid : LDPE, $\dot{m}=30\text{kg/h}$, $N=175\text{rpm}$, $T_f=250^\circ\text{C}$, and $T_b=300^\circ\text{C}$)

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 계량화부와 다이를 3개의 영역으로 나누어 동시에 각부의 유동 및 열해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 계량화부에 대해서는 유한차분법을 사용하였고 다이에 대해서는 유한체적법을 사용하였다. 그리고 다이랜드 및 스크류 팁에 해당하는 부분은 생성형 처리법을 이용하여 블록으로 처리하였다.

3.1 계량화부 출구에 역류가 존재하지 않는 경우

Fig.2에는 역류가 존재하지 않는 경우의 온도분포를 나타내었다. 다이랜드와 스크류 팁 사이의 하단부에서 $265^\circ\text{C} \sim 270^\circ\text{C}$ 인 비교적 균일한 온도장이 형성됨을 알 수 있다. 이는 다이와 스크류 팁 사이의 하단부에서 다이 출구 영향으로 인해 속도의 급상승이 이루어져 대류의 영향을 지배적

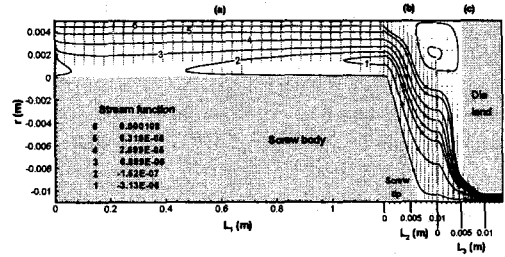


Fig. 4 Streamlines [part(a)] and particle trackings [part(b) and (c)] (Fluid : Viscasil-300M, $\dot{m}=8.21\text{kg/h}$, $N=80\text{rpm}$, $T_f=25^\circ\text{C}$, and $T_b=80^\circ\text{C}$)

으로 받게 되기 때문이다.

Fig.3에는 질량유량에 따른 계량화부 출구에서의 온도분포를 나타내었다. 그림에서 다이의 영향을 고려하지 않은 것은 계량화부만을 단독으로 계산한 결과이고, 다이의 영향을 고려한 것은 계량화부와 다이를 동시에 계산한 결과이다. 역류가 존재하지 않는 경우에는 기존의 연구와 본 연구의 결과가 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

3.2 계량화부 출구에 역류가 존재하는 경우

Fig.4에는 역류가 존재하는 경우의 유선과 입자 추적선을 나타내었다. 그림에서 (a)영역은 계량화부 부분이며, 유선을 나타내었다. 그리고 (b), (c) 영역은 다이에 해당하는 부분으로 유동의 흐름을 살펴보기 위해 입자추적선을 나타내었다. Fig.4의 (a)영역을 살펴보면 3번 유선 아래쪽에 역류가 발

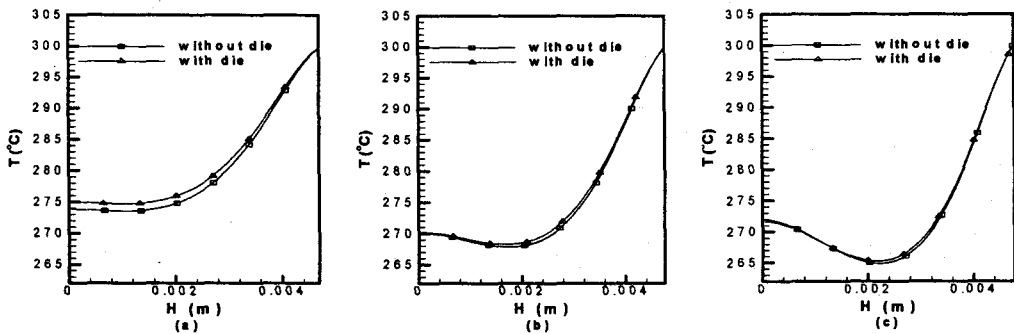


Fig. 3 Temperature distributions at metering section exit with die and without die, (a) $\dot{m}=20\text{kg/h}$, $N=146\text{rpm}$; (b) $\dot{m}=30\text{kg/hr}$, $N=175\text{rpm}$; (c) $\dot{m}=40\text{kg/h}$, $N=193\text{rpm}$. (Fluid : LDPE, $T_f=250^\circ\text{C}$, and $T_b=300^\circ\text{C}$)

생하였음을 알 수 있다. 이로 인해 계량화부만을 해석할 때 출구에서 미지의 경계조건이 생기게 된다. 그러나 이러한 문제를 극복하기 위해 이전의 연구자들은 계산 영역을 하류로 증가시켜 가상의 출구에서 확산이 없다고 가정하여 해석을 수행하였다.

Fig.5에는 질량유량에 따른 계량화부 출구에서의 온도분포를 나타내었다. 그림에서 다이의 영향을 고려하지 않은 것은 계량화부만을 단독으로 계산한 결과이고, 다이의 영향을 고려한 것은 계량화부와 다이를 동시에 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 다이의 영향을 고려하였을 때 스크류 부근에서의 온도분포가 고려하지 않았을 때보다 낮게 분포됨을 알 수 있다. 이는 계량화부 출구의 스크류 부근에서 역류가 존재하여 다이 입

구쪽 온도가 계량화부로 유입되기 때문이다. Chiruvella⁽⁴⁾등은 다이의 해석을 수행하지 않고 다이에 관한 압력강화식⁽³⁾을 이용하여 질량유량을 개선시키는 반복적 방법으로 계량화부만을 수치해석하여 실험 결과와 0.495%의 오차를 가지는 계량화부 출구에서의 평균온도를 얻었다. 그러나 이러한 방법은 다이에서의 압력강화를 계산하기 위해 많은 가정이 필요하며, 적용가능한 다이의 형상이 제한되어 있다. 본 연구의 경우 계량화부와 다이를 동시에 해석하므로 다이에 관한 제약이 없이 수치해석을 수행할 수 있으며, 같은 공정 조건으로 수치해석한 결과 0.45%의 오차를 가지는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 역류가 존재하는 경우 계량화부와 다이가 서로에 미치는 영향을 고려해야만 보다 정확한 결과를 얻을 수

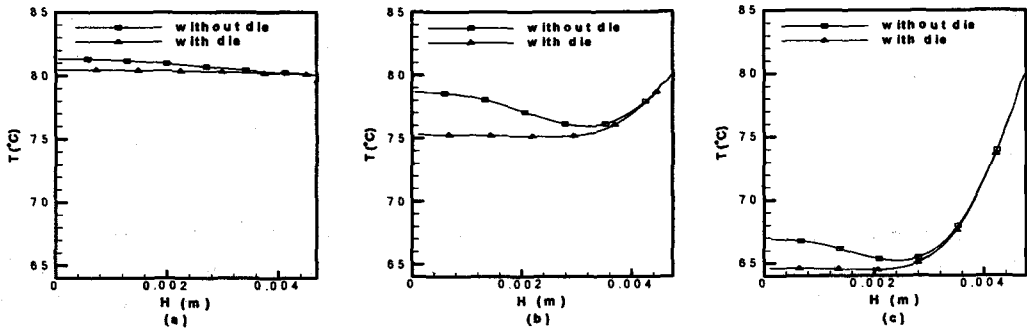


Fig. 5 Temperature distributions at metering section exit with die and without die, (a) $\dot{m}=3.13\text{kg/h}$, $N=40\text{rpm}$; (b) $\dot{m}=5.53\text{kg/h}$, $N=60\text{rpm}$; (c) $\dot{m}=8.21\text{kg/h}$, $N=80\text{rpm}$. (Fluid : Viscasil-300M, $T_i=25^\circ\text{C}$, and $T_b=80^\circ\text{C}$)

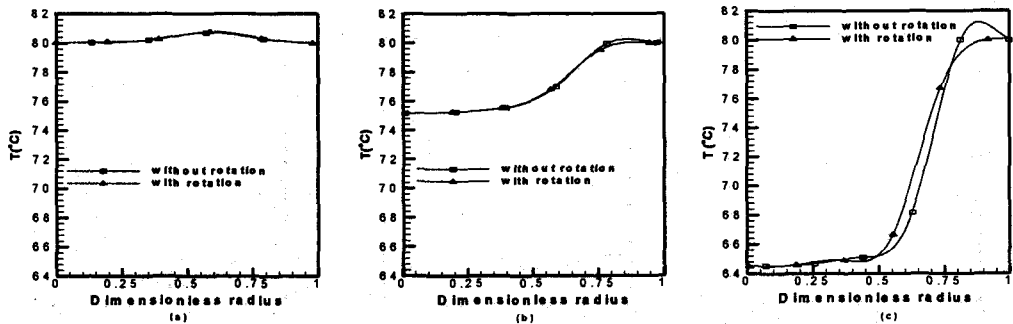


Fig. 6 Temperature distributions at die exit with screw-tip rotation and without rotation, (a) $\dot{m}=3.13\text{kg/h}$, $N=40\text{rpm}$; (b) $\dot{m}=5.53\text{kg/h}$, $N=60\text{rpm}$; (c) $\dot{m}=8.21\text{kg/h}$, $N=80\text{rpm}$. (Fluid : Viscasil-300M, $T_i=25^\circ\text{C}$, and $T_b=80^\circ\text{C}$)

있음을 알 수 있다.

3.3 회전효과의 영향

실제 공정에서 다이 입구의 속도 성분에는 스크류 팁의 회전성분이 포함되어 있다. Gupta⁽⁷⁾등은 유한요소법을 이용하여 다이의 유동 및 압력 강하를 스크류 팁의 회전효과를 고려하여 3차원으로 해석하였다. 그러나 Gupta⁽⁷⁾등의 연구에서는 열해석이 수행되지 않았고, 다이만의 유동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 앞서 언급한 준 3차원 다이모델을 적용하여 계량화부와 다이를 동시에 해석함으로써 회전효과가 공정에 미치는 영향을 연구하였다.

Fig.6에는 회전을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 질량유량에 따른 다이 출구에서의 온도분포를 나타내었다. 질량유량이 증가할수록 스크류 팁의 회전효과를 고려하지 않은 경우가 고려한 경우에 비해 다이 출구 벽면 부근에서 높은 온도분포를 나타냄을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압출성형 공정 중 계량화부에서부터 다이에 이르기까지의 과정을 통합적으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 역류가 존재하는 경우에는 다이의 영향을 고려한 경우의 계량화부 출구에서의 온도 분포가 고려하지 않은 경우 보다 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 역류가 존재하는 경우에는 계량화부와 다이가 계량화부와 다이를 동시에 고려한 해석이 수행되어야 한다.
2. 스크류 팁의 회전효과를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 다이 출구 벽면 부근에서 낮은 온도분포를 보였다.

참고문헌

- (1) Karwe M.V., Y. Jaluria, "Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single Screw Extruder for Non-Newtonian Fluids,"

Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 17, 167-90, 1990.

- (2) Chiruvella RV, Y. Jaluria, Esseghir M., Sernas V., "Extrusion of Non-Newtonian Fluids in a Single Screw Extruder with Pressure Back Flow," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 36, 358-67, 1996.
- (3) T.H. Kwon, S.F. Shen and K.K.Wang, "Pressure Drop of Polymeric Melts in a Conical Converging Flow: Experiments and Prediction," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 26, 214-24, 1989.
- (4) Raman V. Chiruvella, Y. Jaluria, A.H. Abib, "Numerical Simulation of Fluid and Heat Transfer in a Single-Screw Extruder With Different Dies," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 35, 261-73, 1995.
- (5) P. Lin and Y. Jaluria, "Numerical Approach to Model Heat Transfer in Polymer Melts Flowing in Constricted Channels," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 30, 103-123, 1996.
- (6) Z. Tadmor and C. Gogos, 1979, *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York.
- (7) Mahesh Gupta, Y. Jaluria, Valentinas Sernas and Mohamed Esseghir, "Numerical and Experimental Investigation of Three-Dimensional Flow in Extrusion Dies," *Polymer Engineering & Science*, Vol. 33, No. 7, 393-399, 1993.