

## 점탄성 특성을 고려한 환상 형상 압출의 해석적 연구

이민아 · 류민영<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과  
(2016년 8월 26일 접수, 2016년 10월 1일 수정, 2016년 10월 3일 채택)

### Computational Study on the Extrusion of Annular Shaped Product Considering Viscoelastic Characteristics

Min A Lee and Min-Young Lyu<sup>†</sup>

Dept. of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received August 26, 2016; Revised October 1, 2016; Accepted October 3, 2016)

**초록:** 고분자 용융체는 점탄성 특성을 가지고 있다. 점탄성 재료의 복잡한 흐름 거동을 파악하기 위해서 모세관 다이를 이용하여 다이 코너에서 나타나는 회전유동과 압출물의 팽창에 대한 연구가 많이 진행되었다. 본 연구는 이러한 연구의 확장으로 환상 형상의 다이에서 유변학적인 거동과 다이팽창에 대한 연구를 진행하였다. 실험을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션에 필요한 재료의 유변학적 물성을 측정하였으며, 이를 비선형 점탄성 모델과 generalized Newtonian 모델에 적용하여 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 다이 내의 압력과 속도분포를 파악하였다. 다이 출구에서는 속도 프로파일을 관찰하였고, 환상 형상 압출물의 형상을 예측하였다. 두 유변학적 모델에서 다이 내의 압력 분포와 속도 분포는 유사하게 나타났지만 다이 출구면에서의 속도 프로파일은 다르게 나타났다. 또한 유변학적 모델에 따라 환상 형상 압출물의 외경과 내경의 형상이 확연히 다르게 나타났다. 비선형 점탄성 모델로 사용한 PTT(Phan-Thien Tanner) 모델에서 이완시간에 따른 환상 형상 압출물의 팽창현상을 자세히 분석하였으며, 유량에 따른 외경과 내경 그리고 두께의 팽창량도 정량적으로 파악하였다.

**Abstract:** Polymer melts have viscoelastic characteristics. Many researches for the circulation flows at the corner of capillary die and die swell have been performed to investigate the complicated viscoelastic flow behaviors. This study is an extension of previous researches from the capillary die to an annular die. Flow behaviors and die swells in an annular die have been investigated in this study. Rheological properties required in computer simulation were measured through experiment. And then computer simulation of die extrusion has been performed using non-linear viscoelastic model and generalized Newtonian model. Pressure and velocity distributions inside of the annular die have been analyzed. Extruded profiles of annular shape have been predicted and analyzed. Inner and outer profiles of annular shaped extrudate were different according to the rheological models whereas pressure and velocity distributions inside of the annular die were similar. Detailed phenomena of die swell have been analyzed for various relaxation times in the PTT (Phan-Thien Tanner) model, which was used for the non-linear viscoelastic model. Swells of outer diameter, inner diameter, and thickness for diverse flow rate have been also analyzed quantitatively.

**Keywords:** annular shaped die, viscoelastic, computer simulation, die swell, velocity profile.

## 서 론

플라스틱과 고무는 점탄성 특성을 갖고있어 다이팽창(die swell)이나 단면 수축 부위에서 회전유동, 그리고 흐름 직각 방향의 힘, 수직응력(normal stress) 등의 복잡한 흐름 거동을

보인다.<sup>1-3</sup> 이러한 요인들로 인하여 점탄성 재료의 압출을 위한 다이 디자인은 쉽지 않아서 컴퓨터 시뮬레이션을 응용하는 경우가 많다.<sup>4-6</sup> 그리고 흐름 방향에 따른 압력강하 현상과 압력 프로파일 및 속도 프로파일의 예측은 다이 디자인을 위한 중요한 정보로 활용된다.

컴퓨터 시뮬레이션은 물리적인 거동을 이해하고 공학적인 문제를 풀기 위해 널리 사용되고 있다. 이러한 시뮬레이션의 정확성은 주어진 문제를 묘사하는 이론적인 모델과 수치 계산에 의해 결정된다. 점탄성 흐름의 시뮬레이션에 관한 연구

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr  
©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

는 대부분 elastic-viscous stress splitting과 유한요소 형성과 같은 computing method에 초점이 맞춰져 있다. Hulsen은 Galerkin 유한요소법(FEM, finite element method)를 이용한 점탄성 흐름 시뮬레이션으로 고무 컴파운드의 탄성과 연신 특성에 대해 연구했으며<sup>7</sup> Lee와 Park은 비등온 점탄성 흐름에 대해 연구하였다.<sup>8,9</sup> 그러나 이러한 연구들은 단순한 형상과 1개 또는 2개의 이완시간모드, 그리고 특정 점탄성 모델만 적용했다는 점이 제한적이다.<sup>10-14</sup> 압출물 형상 예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구도 진행되고 있으며<sup>15-17</sup> 점탄성 모델에서 파라미터의 영향에 대해 연구하는 시뮬레이션도 진행되고 있다.<sup>18,19</sup>

최근, 모세관 다이(capillary die)에서의 압출 연구는 대표적으로 Hatzikiriakos와 Mitsoulis가 진행하고 있으며<sup>20-25</sup> 이러한 연구는 다이 입구에서의 압력 강하와 회전유동, 다이팽창의 실험과 이론적인 방법을 포함하고 있다. 또한 고무 컴파운드 재료를 PTT(Phan-Thien Tanner) 모델에 적용하여 다양한 이완시간과 다이길이, 유량에 따른 다이 입구에서의 회전유동과 다이팽창을 예측하는 연구도 진행되고 있다.<sup>26-28</sup> Choi와 Lyu는 PTT 모델에서 이완시간과 모드 수에 따라 나타나는 유변 거동을 파악하고 모세관 다이에서 실험과 해석을 통해 다이팽창 양을 비교하였다.<sup>29</sup> 성형 조건의 파라미터 중 온도와 전단변형률은 다이팽창 현상에 주요한 영향을 미치고 있으며 레저버(reservoir)의 크기와 다이 길이 또한 영향을 주고 있다. 일반적으로 전단변형률 증가에 따라 다이팽창은 증가하며 온도 증가에 따라서는 감소한다.<sup>2,30,31</sup> 이러한 이유는 온도 증가에 따라 탄성 성질이 감소하기 때문이다.<sup>2,31-39</sup> 또한 다이가 길수록 재료의 흐름이 안정되기 때문에 다이 길이와 다이 직경비(L/D)가 증가할수록 다이팽창은 감소한다.<sup>3,31</sup> 그리고 레저버의 직경이 클수록 다이팽창도 커진다.<sup>2,35,36</sup> Kim과 Lyu는 다양한 비선형 점탄성 모델을 이용하여 모세관 다이에서 고무복합체의 압력강하와 흐름 거동의 특성에 대해서 연구하였으며 실험과 해석으로 다이팽창 경향을 확인하였다.<sup>6</sup> 앞서 언급한 다양한 파라미터들은 압출물에 영향을 주기 때문에 압출물의 형상 예측은 단순하지 않다. 그러므로 이러한 현상을 예측하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션의 역할이 매우 중요하다.<sup>15-17,37-40</sup> 지금까지 발표된 연구는 다이의 형상과 수치적인 설계에 대해 논의되고 있으며 결과 또한 다이 입구 주변의 회전유동과 다이팽창을 확인하는 것이 대부분이다. 이에 비해 환상 형상의 압출 다이에서 압력 강하 특성과 압력 및 속도 프로파일에 대한 연구는 부족한 실정어서 이의 연구가 필요하다. 최근 들어 의료분야에서 수술보다는 시술이 증가하면서 시술에 필요한 고분자 부품의 쓰임이 증대되고 있다.<sup>41,42</sup> 그 중의 하나가 카테터 튜빙으로 내부에 홀을 가지고 있는 원형형상의 압출물이다. 시술의 목적에 따라 내부 홀의 수는 다양하다. 이러한 현실적 요구로 환상형상 압출의 연구는 필요하다 하겠다.

본 연구는 이전에 수행한 모세관 다이에서 수행한 압출현상 해석을 환상 형상 압출 해석으로 확장한 것이다. 모세관 다이는 외관 지름만 고려하기 때문에 단순하나 환상 형상의 다이에서는 압출물의 내경과 외경을 고려해야 하기 때문에 보다 복잡하다. 본 해석에서는 비선형 점탄성 모델로 PTT 모델과 generalized Newtonian 모델인 Cross law 모델을 이용하여 환상 형상 압출현상을 해석하였다. 압출물 단면 형상과 유량에 따른 외경과 내경, 그리고 두께의 팽창량을 분석하였다.

### 컴퓨터 모사

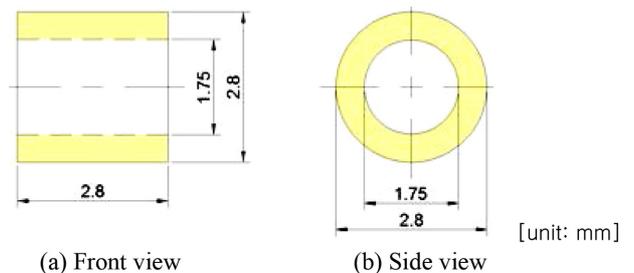
**연구 모델 및 재료.** Figure 1에 본 연구에서 압출하려고 하는 환상 형상을 위한 다이랜드(die land)가 나타나 있다. 다이랜드는 다이헤드(die head) 끝에 연결된 압출다이 끝부분이다. 다이헤드는 straight die와 cross-head die가 있다.<sup>43</sup> 환상형상의 외경은 2.8 mm이고 내경은 1.75 mm이며 다이랜드 길이는 2.8 mm이다.

본 연구에서 사용한 재료는 Arkema Inc.의 Pebax 7233 SA 01 MED이다. 이 재료는 나일론계 열가소성 엘라스토머로 의료용 카테터 튜빙 제품을 위한 재료로 사용되고 있다. 재료의 유변물성은 두 가지의 장비를 이용하여 측정하였다. TA Instruments Inc.(USA)의 ARES-G2(parallel plates rheometer)를 이용하여 전단변형률(shear rate) 0.1~500 rad/sec 구간의 점도와  $G'$ (저장탄성계수), 그리고  $G''$ (손실탄성계수)를 측정하였다. 측정시 strain은 20%로 하였다. 그리고 Gottfert Inc. (Germany)의 Rheograph 6000 (capillary rheometer)을 이용하여 전단변형률 500~40000 s<sup>-1</sup> 구간의 점도를 측정하였다. 측정된 물성은 Figure 2에 나타내었다.

**지배방정식 및 구성방정식.** 다이 내 고분자 용융체의 유동은 운동방정식(equation of motion)을 따르는데, 식 (1)은 직교좌표계의 운동방정식을 나타내고 있다.<sup>1,44,45</sup>

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{v}) = \left( -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho f_x \quad (1a)$$

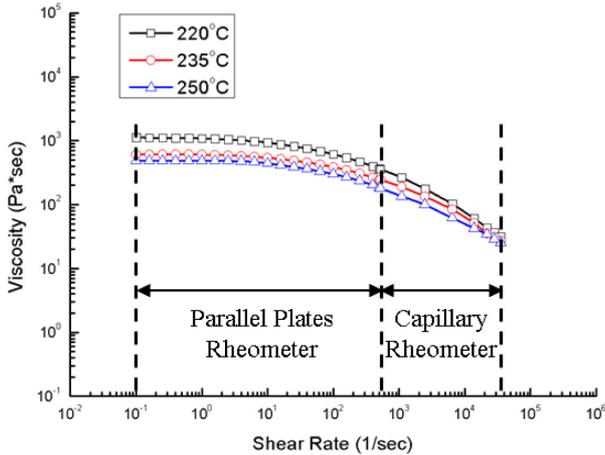
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{v}) = \left( -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho f_y \quad (1b)$$



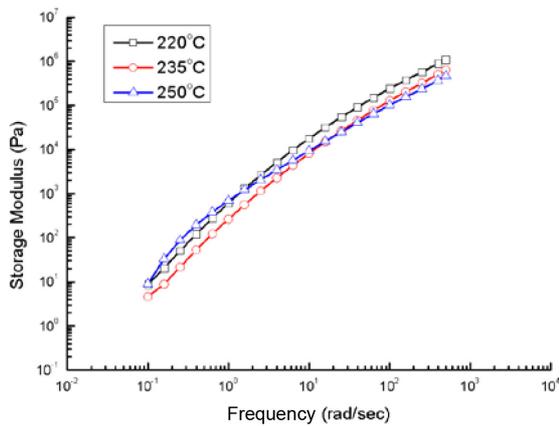
**Figure 1.** Geometry of die land for the extrusion of annular shaped product.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{v}) = \left( -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho f_z \quad (1c)$$

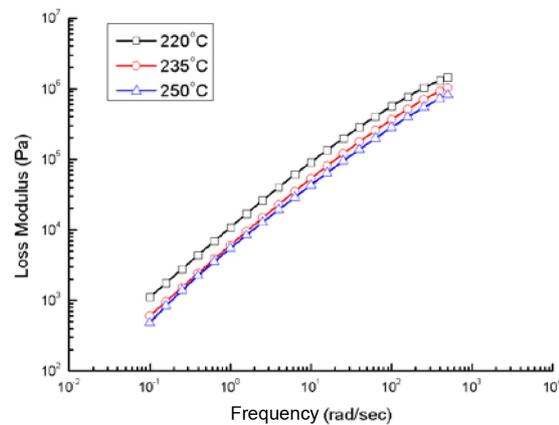
여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $f$ 는 체력이다. 그리고  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$



(a) Shear viscosity curve



(b) Storage modulus



(c) Loss modulus

Figure 2. Shear viscosity, storage and loss moduli for studied material.

$z$  방향의 속도이고  $\tau$ 는 extra stress로 총 응력(total stress,  $\sigma$ ) 과는 식 (2)와 같은 관계이다.

$$\sigma = -pI + \tau \quad (2)$$

$p$ 는 정수압(hydrostatic pressure) 그리고  $I$ 는 단위 텐서(unit tensor)이다.

본 연구에서 사용한 유변학적 모델은 generalized Newtonian 모델과 비선형 점탄성 모델인 PTT(Phan-Thien Tanner)이다. Generalized Newtonian 모델에서 extra stress는 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>1,44,45</sup>

$$\tau = 2\eta D \quad (3)$$

여기서,  $D$ 는 deformation rate tensor이며,  $2D$ 는 전단변형률 (shear rate)에 해당된다. 그리고 점도모델은 Cross law 모델을 사용하였으며 식 (4)와 같다.<sup>45</sup>

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^m] \quad (4)$$

여기서,  $\eta_0$ 는 초기 점도,  $\lambda$ 와  $m$ 은 Cross law 모델의 파라미터,  $\dot{\gamma}$ 은 전단변형률을 나타낸다.

PTT 모델은 식 (5)와 같이 표현된다.<sup>3,46</sup>

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (5a)$$

$$\tau_1 = \exp\left[\frac{\varepsilon \lambda}{\eta_1} \text{tr}(\tau_1)\right] \tau_1 + \lambda \left[ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \tau_1 + \frac{\xi}{2} \tau_1 \right] = 2\eta_1 D \quad (5b)$$

$$\tau_2 = 2\eta_2 D \quad (5c)$$

여기서,  $\tau$ 는 extra stress로  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 의 합으로 표현되며  $\tau_1$ 은 점탄성 요소,  $\tau_2$ 는 점성 요소이다.  $\eta_1$ 는 점탄성 부분의 전단점도 인자이며,  $\eta_2$ 는 점성 부분의 전단점도 인자이다.  $\varepsilon$ 는 재료의 인장유동조절 파라미터,  $\lambda$ 는 이완시간,  $\xi$ 는 전단점도의 조절 파라미터이다.

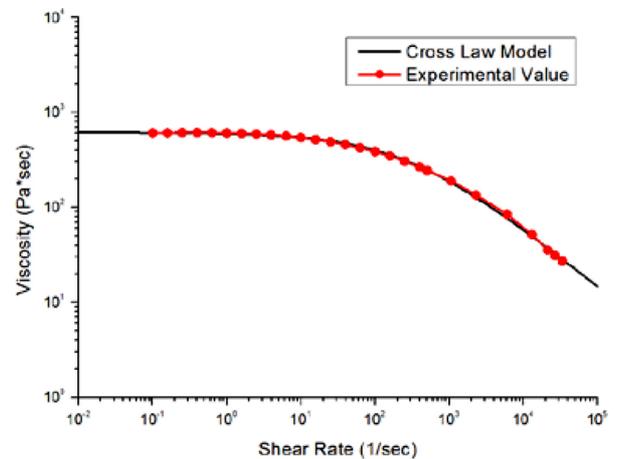


Figure 3. Curve fitting of shear viscosity using Cross law model.

Figure 3은 실험을 통해 얻은 전단변형률에 따른 점도를 Cross law 모델에 커브 피팅한 그래프이다. Figure 4는 전단 변형률에 따른 전단점도, 저장탄성계수, 손실탄성계수를 PTT 모델에 따라 이완시간 0.004 s에서 커브 피팅한 그래프이다.

본 연구에서 PTT 모델 적용 시 기준으로 잡은 이완시간은 0.001 s, 0.002 s, 그리고 0.004 s 등 세 가지이며, 커브 피팅을 통해 얻은 파라미터가 Table 1에 나타나 있다. PTT 모델을 이용한 점탄성 해석에서 이완시간을 3-mode로 하여 해석하였으며 각 기준 이완시간(basis)에서 1/3배와 3배를 하여 설정하였다.

**압출 공정의 해석.** 본 연구에서는 Ansys사의 Polyflow를

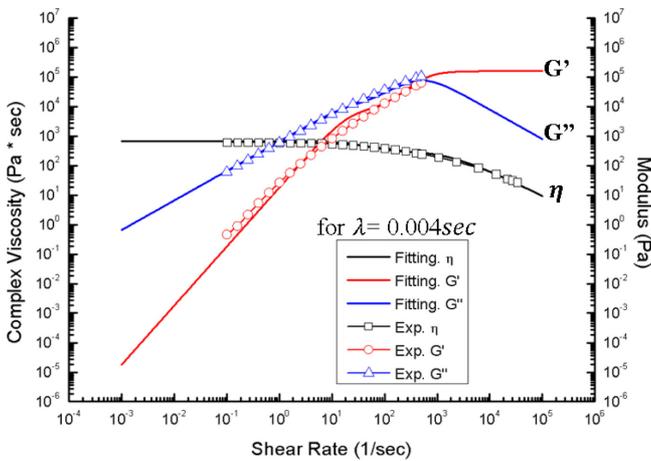


Figure 4. Curve fittings of complex viscosity, storage modulus( $G'$ ), and loss modulus( $G''$ ) using PTT model.

Table 1. Parameters in the Cross Law and PTT Models Used in This Study

Cross law	$\eta_0$ (Pa·s)	$\lambda$ (s)	$m$ (l)	
		0.612515E+3	0.368397E-2	0.627136E+0
PTT	1-Mode	2-Mode	3-Mode	
	$\lambda$	0.000333(Basis/3)	0.001(Basis)	0.003(Basis*3)
	$\eta$	0.337968E+3	0.648842E-2	0.945592E+3
	$\varepsilon$	0.532454E-1	0.413243E-2	0.896745E+0
	$\xi$	0.621925E-1	0.413358E-1	0.370004E-4
	$\lambda$	0.000667(Basis/3)	0.002(Basis)	0.006(Basis*3)
	$\eta$	0.144637E-1	0.712825E-1	0.832526E+3
	$\varepsilon$	0.645646E-2	0.123626E-1	0.146851E+0
	$\xi$	0.178176E+0	0.323463E-1	0.612615E-4
	$\lambda$	0.001333(Basis/3)	0.004(Basis)	0.012(Basis*3)
	$\eta$	0.150607E+3	0.126267E-1	0.641175E+3
	$\varepsilon$	0.128303E-1	0.162134E-1	0.171759E-1
	$\xi$	0.570144E-4	0.114810E+0	0.410818E+0

사용하여 해석을 수행하였다. 본 해석에 사용한 모델은 환상 형상을 압출하는 다이 랜드부와 환상 형상의 압출물을 포함하고 있으며, 형상을 예측한 압출물의 길이는 다이 랜드부 길이의 3배인 8.4 mm로 설정하였다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/4영역을 3차원으로 해석하였고 이는 Figure 5에 나타내었다.

Figure 6은 해석을 위한 경계조건을 보여주고 있다. BC 1인 inlet에는 유량 조건(1700 cm<sup>3</sup>/s)을 주었으며 BS 2인 압출다이 벽은 no slip 조건을 주었다. 그리고 대칭 표면인 BC 3에는 symmetry 조건을 주었고 압출물의 내측과 외측의 표면인 BC 4에는 free surface 조건을 부여하였다. 압출되는 영역은 free surface로 압출형상을 예측하기 위해 remeshing을 하면서 해석을 수행하였다. BC 5는 압출물 끝 단으로 normal and tangential force=0을 적용하였다.

해석에 사용한 메시는 3차원 육면체 형상으로 구성하였으

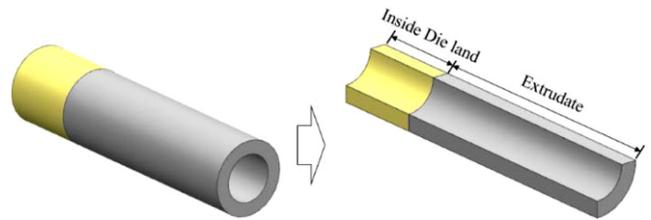


Figure 5. Die land and extrudate geometry for the extrusion simulation of annular shaped product.

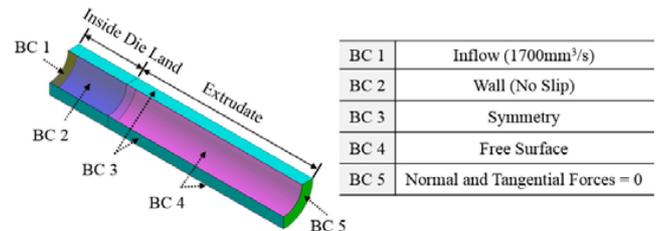


Figure 6. Boundary surfaces and boundary conditions in die land and extrudate for the computer simulation.

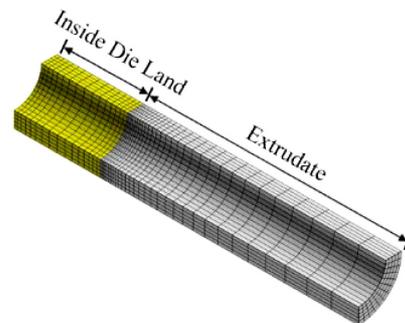
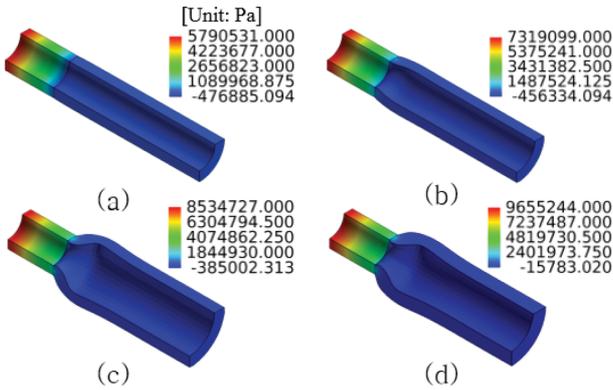


Figure 7. Mesh generation of inside die land and extrudate for the computer simulation.

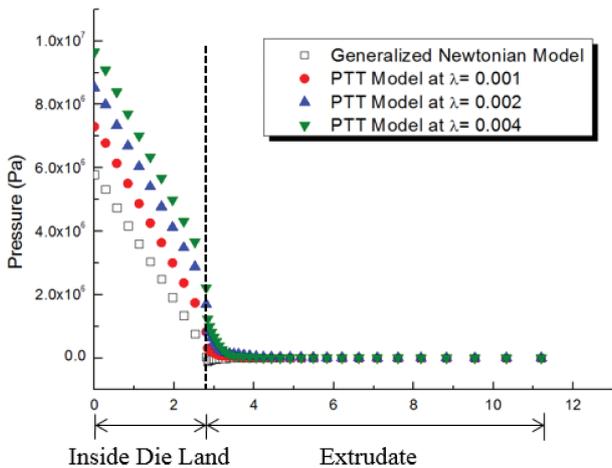
며 총 2160개로 형성하였다. Figure 7은 형성된 메시를 나타내고 있다. 다이팽창의 경향을 보다 자세히 분석하기 위해서 다이 출구 근처를 조밀하게 형성하였다.

**결과 및 토론**

**압력 분포와 압력 프로파일.** 다이 내부 압출물에서의 압력 분포가 Figure 8에 나타나있다. Generalized Newtonian 모델과 세가지 이완시간을 적용한 PTT 모델을 이용한 해석의 압력 분포이다. Inlet의 압력은 generalized Newtonian 모델에서 가장 낮게 나타났고 PTT 모델에서는 이완시간이 길수록 inlet의 압력도 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 압출 다이에서 다이 출구로 갈수록 압력이 감소하는 압력 강하 현상은 압출 연구에서 잘 알려져 있는 현상이다. 압출물 형상은 점탄성 해석에서 팽창이 크게 나타났는데 이 현상은 뒤에서 자세히 설



**Figure 8.** Predicted pressure distribution: (a) generalized Newtonian model; (b) PTT model for relaxation time at 0.001 s; (c) PTT model for relaxation time at 0.002 s; (d) PTT model for relaxation time at 0.004 s.



**Figure 9.** Predicted pressure profiles from die inlet to the extrudate in the flow direction.

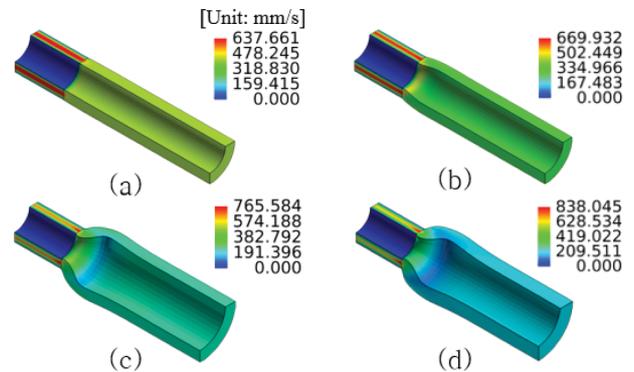
**Table 2. Predicted Driving Pressure at the Annular Die Land Inlet**

	Generalized Newtonian	PTT		
		$\lambda=0.001s$	$\lambda=0.002s$	$\lambda=0.004s$
$\Delta P$ (Pa)	5.749E+6	6.473E+6	6.829E+6	7.429E+6

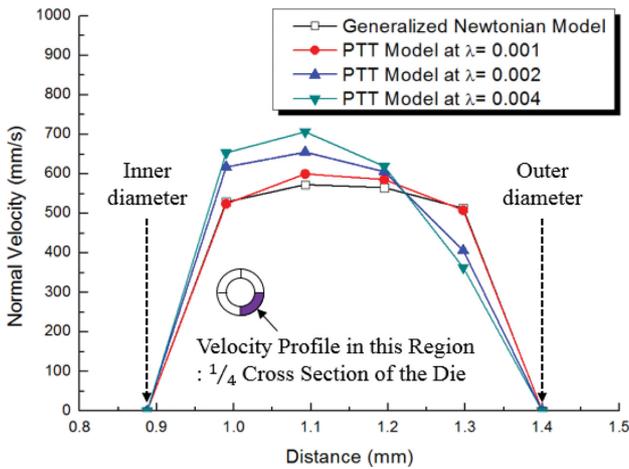
명하였다. 흐름 방향의 평균압력 프로파일을 Figure 9에 나타내었는데 generalized Newtonian 모델과 세 가지 이완시간의 PTT 모델에서 서로 다른 압력 프로파일을 보이고 있다. Generalized Newtonian 모델에서 가장 작은 압력 차(입구와 출구의 압력 차)가 발생하였다. PTT 모델에서는 이완 시간이 길수록 압력 차가 증가하였는데 이러한 현상은 이완시간이 길수록 상대적으로 점성의 성질이 커져서 흐름성이 낮아지기 때문이라고 판단된다. 다이랜드 입구에서 출구까지의 압력 차이가 Table 2에 나타내었다. 이 압력 차는 환상 현상의 압출물을 압출하기 위해서 다이랜드 입구에서 필요로 하는 압력으로 다이설계 및 압출기 선정에 중요한 정보로 활용된다.

**속도 분포와 속도 프로파일.** Figure 10은 이완시간에 따른 전체적인 속도 분포를 보여주고 있다. Generalized Newtonian 모델과 PTT 모델의 속도 분포는 유사하게 나타났다. PTT 모델에서 이완시간이 큰 경우(0.002 s와 0.004 s인 경우) 다이 입구에서 출구로 갈수록 환상 형상의 두께 중앙부에서의 속도가 점차 증가하였고 다이 출구근처에서 최고의 속도를 보였다. 이는 이완시간이 길수록 안정된 속도를 얻기 위한 다이랜드의 길이가 길어야 함을 의미한다. 압출물에서는 다이 출구에서 멀어질수록 안정된 속도 분포를 갖는 것으로 나타났다.

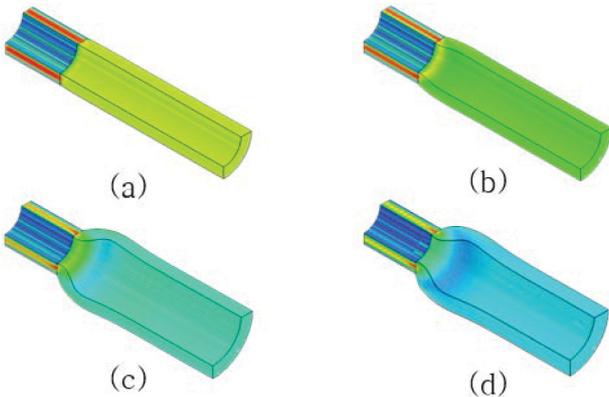
Figure 11은 다이 출구면에서 환상 형상의 두께에서의 속도 프로파일이다. Generalized Newtonian 모델의 속도 프로파일은 중앙부를 중심으로 거의 대칭으로 나타났다. 환상 형상의 두께 중앙부의 속도는 평평한 분포를 보이고 있으며 벽에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 반면, PTT 모델은 이



**Figure 10.** Predicted velocity distribution: (a) generalized Newtonian model; (b) PTT model for relaxation time at 0.001 s; (c) PTT model for relaxation time at 0.002 s; (d) PTT model for relaxation time at 0.004 s.



**Figure 11.** Predicted velocity profiles along the thickness direction of annular shaped die.

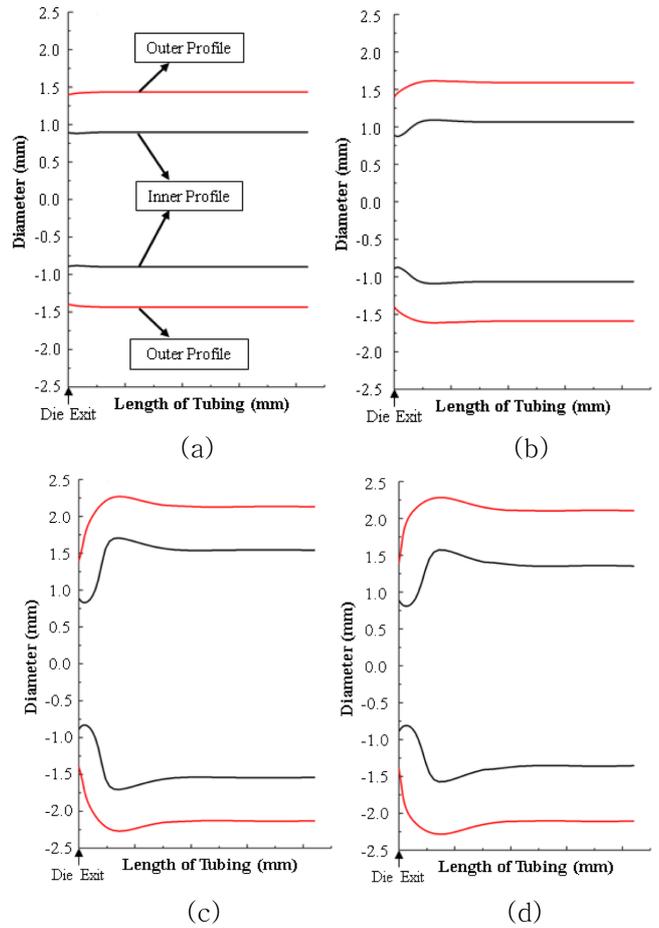


**Figure 12.** Predicted streamline: (a) generalized Newtonian model; (b) PTT model for relaxation time at 0.001 s; (c) PTT model for relaxation time at 0.002 s; (d) PTT model for relaxation time at 0.004 s.

와 다른 속도프로파일의 경향을 보이고 있으며 이완시간이 길수록 환상 형상의 안쪽 벽면의 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 속도 프로파일이 다르다는 것은 전단변형률이 다른 것을 의미한다. 본 연구에서 해석한 PTT 모델의 이완시간이 짧은 경우(0.001s)가 generalized Newtonian 모델에 가장 가깝게 접근하고 있다.

유선(streamline)은 다이 내에서 수지가 흘러가는 궤적을 나타낸 것으로 Figure 12에서 이를 보여주고 있다. 다이 출구 근처에서 회전유동은 보이지 않으며 불안정한 흐름도 관찰되지 않았다. Generalized Newtonian 모델과 PTT 모델의 유선은 유사하게 나타났다.

**압출물 형상 및 다이팽창.** Figure 13은 환상 형상의 외경과 내경의 변화를 보여주고 있다. Generalized Newtonian 모델과 PTT 모델은 서로 다른 다이팽창 경향을 보이고 있다. Generalized Newtonian 모델의 외경은 팽창 후 일정해졌으며



**Figure 13.** Extrudate profiles: (a) generalized Newtonian model; (b) PTT model for relaxation time at 0.001 s; (c) PTT model for relaxation time at 0.002 s; (d) PTT model for relaxation time at 0.004 s.

내경은 미세하게 수축하다가 다시 팽창 후 일정해졌다. 반면, PTT 모델의 외경은 팽창하다가 수축 후 일정한 직경을 가졌으며 내경은 초기에 짧은기간 수축하다가 팽창 후 다시 수축하다가 일정한 크기가 되었다. Generalized Newtonian은 점탄성을 표현할 수 없으며 여기서 나타난 치수의 변화는 관성에 의한 것이다. 압출물은 점탄성 때문에 다이 출구에서 팽창이 일어나 형상이 변하지만 이런 점탄성 때문에 변한 형상이 다시 본래의 형상으로 되돌아 가는 특성을 보인다.

안정된 상태의 다이팽창을 Figure 14처럼 다이팽창 비로 표현하여 유량에 따른 외경과 내경, 그리고 두께의 팽창량을 Figure 15에 나타내었다. Generalized Newtonian 모델과 PTT 모델의 유량에 따른 외경과 내경의 팽창량은 서로 다른 경향을 보였다. Generalized Newtonian 모델은 유량이 증가할수록 외경과 내경의 팽창량은 다소 감소하였다. 반면, PTT 모델은 유량이 작은 경우에는 내경과 외경 모두 증가하였으며 내경의 팽창량보다 외경의 팽창량이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 유량이 증가할수록 내경의 팽창량이 외경의 팽창량

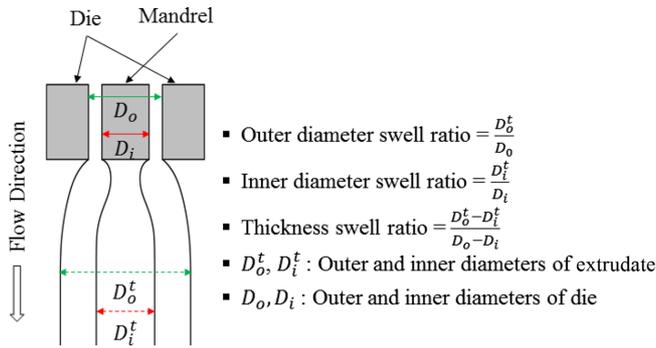


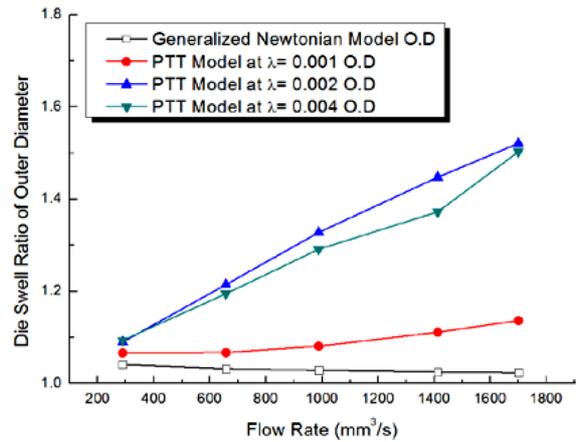
Figure 14. Schematic diagram of annular shaped extrusion die and extrudate profile.

보다 더 급격히 증가함을 알 수 있었다. 다이팽창은 전단변형률이 클수록 증가하게 되는데 Figure 11에서 보듯 다이 내경 쪽에 속도 구배가 커서 즉 전단변형률이 커서 팽창도 크게 나타났다고 판단된다. 또한 Figure 11의 속도프로파일에 서 이완시간 0.002 s와 0.004 s의 외벽 쪽의 속도프로파일이 교차하는 경향을 보인다. 즉, 외벽에서 이완시간 0.002 s일때가 이완시간 0.004 s보다 더 큰 속도변화를 보인다. 이러한 영향으로 Figure 15에서 이완시간 0.002 s때의 팽창량이 이완시간 0.004 s의 팽창량 보다 크게 타났다고 판단된다. 결과적으로 PTT 모델은 유량이 증가할수록 외경과 내경의 팽창량은 모두 증가하였다. 두께의 팽창량의 경우 PTT 모델의 이완시간 0.004 s를 제외하고 유량이 커질수록 감소하였다. 이는 유량이 커질수록 외경보다는 내경의 증가가 크기 때문이다.

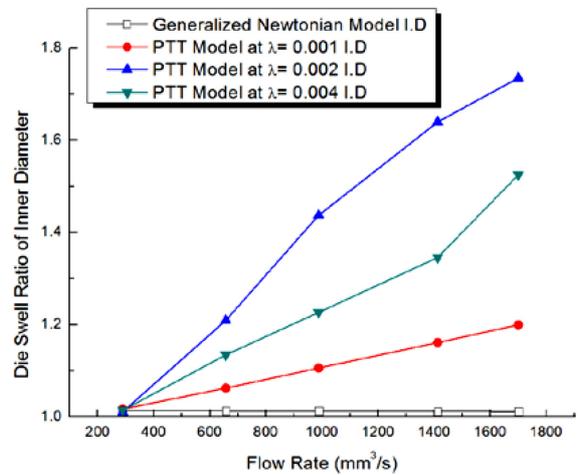
### 결론

본 연구에서는 환상 형상 압출현상을 비선형 점탄성 모델인 PTT 모델과 generalized Newtonian model(Cross law model)을 이용하여 해석적으로 연구하였다.

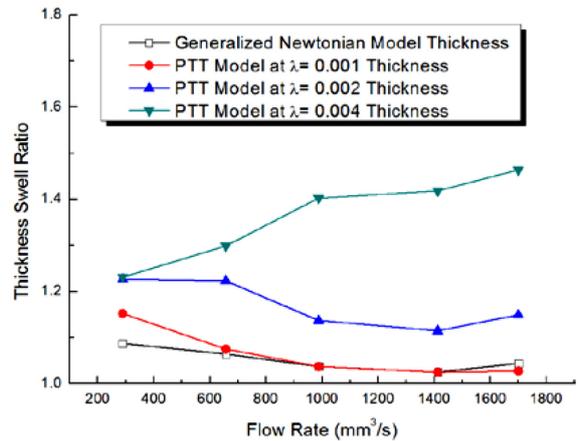
Generalized Newtonian 모델과 이완시간에 따른 PTT 모델의 전체적인 압력 분포는 유사한 경향을 보였다. 이완시간이 길수록 inlet에 걸리는 압력의 크기는 증가하였으며 다이 내의 압력강하도 큰 것으로 나타났다. 다이와 압출물의 전체적인 속도 분포 또한 유사하게 나타났다. 다이 출구로 갈수록 환상 형상의 두께 중앙부의 속도가 증가하여 출구근처에서 최고 속도를 보였다. 이는 이완시간이 길수록 다이 내의 안정된 속도를 얻기 위한 다이랜드의 길이가 길어야 함을 의미한다. 압출물은 출구에서 멀어질수록 안정된 속도 분포를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 PTT 모델과 generalized Newtonian 모델은 다이 출구면에서 속도 프로파일의 경향이 서로 다르게 나타났다. 환상 형상 두께에서 최고 속도의 위치가 generalized Newtonian일 때보다 PTT 모델에서 내경 쪽에 가깝게 나타났다. 그리고 PTT 모델에서 이완시간이 길수록 최고 속도는 안



(a)



(b)



(c)

Figure 15. Die swell ratio of annular shaped extrudate: (a) outer diameter swell ratio; (b) inner diameter swell ratio; (c) thickness swell ratio.

쪽 벽에 더 가까웠다.

PTT 모델에서 다이팽창의 경우 외경은 팽창하다가 수축 후

일정해지는 경향이 나타났으며 내경은 수축하다가 팽창 후 다시 수축하다가 일정해졌다. Generalized Newtonian 모델에서 형상 변화는 매우 미미하지만 외경은 팽창 후 일정해졌으며 내경은 수축하다가 팽창 후 일정해지는 경향을 보였다. 그리고 PTT 모델은 유량이 작을수록 외경의 팽창량이 내경의 팽창량보다 더 컸으며 유량이 증가할수록 내경의 팽창량이 외경의 팽창량보다 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

**감사의 글:** 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “메디칼몰드 R&BD 구축사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

1. J. L. White, *Principles of Polymer Engineering Rheology*, Wiley, NY (1990).
2. C. D. Han, *Rheology in Polymer Processing*, Academic Press, NY (1976).
3. R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids: Vol. 1*, Wiley, NY (1987).
4. J. H. Kim, J. H. Hong, S. H. Choi, H. J. Kim, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **46**, 54 (2011).
5. T. G. Choi, H. J. Lee, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **49**, 272 (2014).
6. J. H. Kim and M.-Y. Lyu, *Polym. Eng. Sci.*, **54**, 2441 (2014).
7. M. A. Hulsen, *Theor. Comp. Fluid Dyn.*, **5**, 33 (1993).
8. S. J. Park and S. J. Lee, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **87**, 197 (1999).
9. J. M. Kim, C. Chung, K. H. Ahn, and S. J. Lee, *Nihon Reoroji Gakkaishi*, **33**, 191 (2005).
10. R. Guenette and M. Fortin, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **60**, 27 (1995).
11. F. P. T. Baaijens, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **75**, 119 (1998).
12. H. Matallah, P. Townsend, and M. F. Webster, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **75**, 139 (1998).
13. M. Aboubacar and M. F. Webster, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **98**, 83 (2001).
14. F. Yurun and M. J. Crochet, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **57**, 283 (1995).
15. V. Ngamaramvaranggul and M. F. Webster, *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, **36**, 539 (2001).
16. J.-C. Huang and K.-S. Leong, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 1269 (2002).
17. H. W. Müllner, J. Eberhardsteiner, and K. Hofstetter, *Proc. Appl. Math. Mech.*, **6**, 575 (2006).
18. V. Ngamaramvaranggul and M. F. Webster, *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, **38**, 677 (2002).
19. Y. Kwon, *Polym. Korea*, **25**, 536 (2001).
20. S. G. Hatzikiriakos and E. Mitsoulis, *Rheol. Acta*, **35**, 545 (1996).
21. E. Mitsoulis, S. G. Hatzikiriakos, K. Christodoulou, and D. Vlassopoulos, *Rheol. Acta*, **37**, 438 (1998).
22. E. Mitsoulis and S.G. Hatzikiriakos, *Rheol. Acta*, **42**, 309 (2003).
23. E. Mitsoulis, I. B. Kazatchkov, and S. G. Hatzikiriakos, *Rheol. Acta*, **44**, 418 (2005).
24. M. Ansari, A. Alabbas, E. Mitsoulis, and S. G. Hatzikiriakos, *Intern. Polym. Proc.*, **25**, 287 (2010).
25. M. Ansari, E. Mitsoulis, and S. G. Hatzikiriakos, *Adv. Polym. Tech.*, **38**, 369 (2013).
26. S. H. Choi and M.-Y. Lyu, *Intern. Polym. Proc.*, **24**, 326 (2009).
27. J. H. Kim, J. S. Hong, S. H. Choi, H. J. Kim, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **46**, 54 (2011).
28. M.-Y. Lyu, D. Park, H. Kim, and J. Yoon, *Elast. Compos.*, **41**, 223 (2006).
29. S. H. Choi and M.-Y. Lyu, *Transact. Mater. Proc.*, **16**, 262 (2007).
30. P. K. Agarwal, E. B. Bagley, and C. T. Hill, *Polym. Eng. Sci.*, **18**, 282 (1978).
31. M. A. Huneault, P. G. Lafleur, and P. J. Carreau, *Plast. Eng.*, **18**, 39 (1989).
32. N. Sombatsompop and S. Sergsiri, *Polym. Adv. Technol.*, **15**, 472 (2004).
33. H. W. Müllner, J. Eberhardsteiner, and W. Fidi, *Polym. Test.*, **26**, 1041 (2007).
34. Y. Yang and L. J. Lee, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1088 (1987).
35. N. Sombatsompop and R. Dangtangee, *J. Appl. Polym. Sci.*, **86**, 1762 (2002).
36. N. Sombatsompop and R. Dangtangee, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 2525 (2001).
37. W. A. Gifford, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1167 (1998).
38. N. Tokita, *Rubber Chem. Technol.*, **54**, 439 (1981).
39. L. Gast and W. Ellingson, *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, **29**, 1 (1999).
40. S. Montes and J. L. White, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **49**, 277 (1993).
41. C. H. Park, *Korean J. Gastroenterol.*, **43**, 154 (2007).
42. M. A. Lee, M.-Y. Lyu, D. J. Shin, and T. G. Kim, *Trans. Mater. Process.*, **24**, 89 (2015).
43. W. Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hanser, Munich, 1992.
44. M.-Y. Lyu and J. L. White, *Intern. Polym. Proc.*, **10**, 305 (1995).
45. C. W. Macosko, *Rheology: Principles, Measurement, and Applications*, Wiley, NY, 1994.
46. N. Phan-Thien and R. I. Tanner, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **2**, 353 (1977).