

카테터 튜빙 압출에서 다이의 형상에 따른 고분자 용융체의 흐름특성

조한수 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2017년 6월 5일 접수, 2017년 7월 5일 수정, 2017년 7월 20일 채택)

Flow Characteristics of Polymer Melt for Die Shapes for the Extrusion of Catheter Tubing

Han Su Cho and Min-Young Lyu[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received June 5, 2017; Revised July 5, 2017; Accepted July 20, 2017)

초록: 카테터의 플라스틱 튜빙은 압출 공정을 통해 제작된다. 본 연구에서는 카테터 튜빙 압출을 위한 두 가지 다이 즉 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이를 해석적으로 비교하고 분석하였다. 스트레이트 다이는 스파이더 레그를 통해 맨드릴이 지지되는 형태이며 압출기와 동일한 방향으로 다이가 장착된다. 크로스헤드 다이의 경우 나선 홈을 가진 맨드릴을 포함하고 있으며 압출기와 수직으로 장착된다. 컴퓨터 해석을 통하여 두 종류의 다이에서 압력, 속도, 유선, 전단응력, 그리고 체류시간 등을 비교 분석하였다. 해석결과 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 압력 강하는 유사하지만 튜빙의 크기를 결정짓는 다이 랜드 구간에서 속도차이가 컸다. 내부의 흐름이 복잡한 크로스헤드 다이에서 스트레이트 다이에 비해 체류시간이 세배 정도 길었다. 다이 랜드 벽면의 전단응력은 크로스헤드 다이에서 스트레이트 다이보다 낮게 분포되어 보다 안정된 압출이 예측되었다.

Abstract: The plastic tubing in catheter is manufactured by extrusion. In this study, computer simulation was performed and results were compared for two types of dies, specifically, straight die and crosshead die for the extrusion of catheter tubing. A spider leg supports the mandrel in the straight die and this die is attached to the extruder in the same line. For the crosshead die, mandrel contains helical grooves and the die is attached to the extruder at an angle of 90°. The pressure, velocity, streamline, wall shear stress, and residence time in the two types of dies were analyzed and compared through computer simulation. The velocity difference in the die land region where the size of catheter tubing is determined between the two types of dies was large whereas the pressure drops in the two dies were similar. A complex flow pattern was observed in the crosshead die and subsequently, the residence time in the crosshead die was three times longer than that of the straight die. Wall shear stress in the crosshead die was much smaller than that of the straight die. Thus, more stable extrusion of catheter tubing is expected for the crosshead die.

Keywords: catheter tubing, 2-lumen, computer simulation, straight die, crosshead die.

서 론

최소 침습 시술이란 몸 속에 관이 삽입될 수 있는 최소한의 부위만 절개하여 시술하는 방법으로 기존의 절개 수술 방법에 비해 환자에 미치는 고통과 부작용을 최소화하는 시술 방법이다.^{1,2} 최소 침습 시술의 이러한 장점 때문에 그 쓰임이 다양한 부분의 시술에 적용되고 있다. 최소 침습 시술에 사용되는 도구를 카테터(catheter)라고 부르며 카테터에 사용되

는 플라스틱 관을 튜빙(tubing)이라 부른다. 튜빙 내부에는 루멘(lumen)이라 불리는 여러 형상의 다중 홀(multi lumen)을 갖고 있는 것이 일반적이다.³⁻⁵ 이러한 일정한 단면을 가진 카테터 튜빙은 압출공정을 통해 제작되고 있다.⁵⁻⁷

카테터 튜빙의 제조를 위한 압출공정은 압출, 냉각 및 사이징, 인출, 그리고 절단의 순으로 이루어진다.⁵⁻⁷ 압출공정 중 카테터 튜빙의 형상에 영향을 주는 인자로는 압출속도, 다이 설계, 진공 사이징 탱크의 운전조건, 인출 속도 등이 있다.^{5,8,9} 압출 다이는 스크류 압출기와 압출 다이의 연결방향에 따라 두 종류로 구분된다. 스크류 압출기의 끝에 압출 다이의 입구부와 출구부가 직선상으로 연결된 형태가 스트레이트 다이(straight die)이다. 스크류 압출기 끝에 연결된 압출 다이의 입

[†]To whom correspondence should be addressed.
mylyu@seoultech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-7554-2072
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

구부와 출구부의 방향이 직교하는 형태가 크로스헤드 다이(crosshead die)이다.^{10,11} 압출 다이의 형상에 따라 압출품의 형상이 일차적으로 결정되기 때문에 압출 다이 디자인은 매우 중요하다. 다이 제작의 비용은 매우 고가이고 제작기간이 길어서 다이설계에서 시행착오를 줄이고 합리적인 설계를 위하여 컴퓨터해석이 활용되고 있다.¹²⁻¹⁵

다이설계를 위한 컴퓨터해석은 크게 다이 내의 흐름해석과 압출품의 형상을 예측하는 해석이다. 다이 내부의 흐름해석은 스크류 압출기로부터 다이에 들어온 수지가 다이 내부에서 균일하고 안정된 흐름을 보이는지 분석하는 목적으로 수행된다. 이러한 연구는 다이 내 수지의 유동 통로의 형상 최적화를 통해 수지 흐름의 균형 및 안정화를 시키는 연구가 주를 이룬다.¹⁶⁻²² 고분자 재료의 압출현상은 재료의 점탄성 특성에 의해 압출물이 다이 출구 면의 프로파일보다 크게 형성된다. 따라서 이에 관한 연구는 다이스웰을 포함한 점탄성 유동 연구가 많다.^{12,23-25} 최소 침습 시술이 널리 이용되면서 시술부위에 따라 카테터 튜빙의 지름크기는 다양하며 루멘 수도 증가하고 있다. 이렇게 요구조건이 다양화되고 벽 두께 및 외형치수의 정밀도가 요구됨에 따라 논리적이고 합리적인 다이 설계가 중요시 되고 있다.²⁶⁻²⁸

본 연구에서는 튜빙의 초기 형상을 결정짓는 압출다이의 내부 구조 즉, 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 수지 흐름을 해석적으로 연구하였다. 해석을 통해 다이 내부의 압력분포, 속도분포, 그리고 유선분포를 분석하였다. 그리고 다이 벽면의 전단속도(shear rate)와 전단응력(shear stress)을 예측하여 흐름의 안정성을 평가하고자 하였다. 이러한 연구결과는 카테터 튜빙 압출을 위한 압출다이 설계의 기초가 될 것으로 판단된다.

컴퓨터 모사

다이 모델. 본 연구에서는 카테터 튜빙 압출을 위해 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이를 사용하였다. Figure 1에 두 다이의 모델이 나타나 있다. 본 해석에 사용한 모델은 2-루멘 카테터 튜빙 압출을 위한 두 종류의 다이에서 다이 랜드의 길이(6 mm)와 랜드 부의 단면 형상을 동일하게 설계하여 해석에 사용하였다. Figure 2에 두 개의 홀을 갖는 2-루멘을 형성하기 위한 출구 형상이 나타나 있다. 두 다이의 출구 형상은 같으나 내부 구조가 다른 것이다.

스트레이트 다이의 경우 다이 내부에 루멘의 형상과 튜빙 내부치수를 결정하는 다이 부품인 맨드릴(mandrel)이 있다. 맨드릴은 스파이더 레그(spider leg)에 의해 다이 내부에 지지되고 있다. 크로스헤드 다이 경우 내부 루멘의 형상과 치수를 결정하는 다이 부품인 튜빙 팁(tubing tip)과 압출기로부터 다이로 유입된 재료의 흐름을 균일하게 만드는 맨드릴로 구성되어 있다. 맨드릴에는 Figure 1(b)에 나타난 것처럼

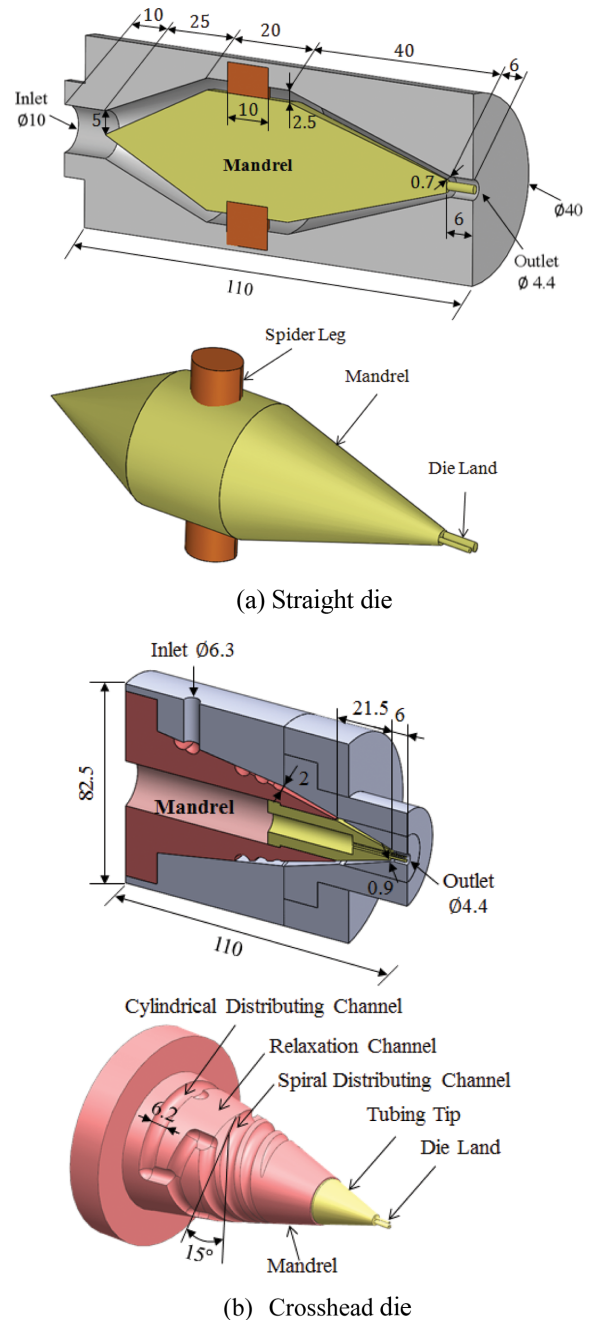


Figure 1. Straight die and crosshead die for 2-lumen catheter tubing used in this study.

cylindrical distributing channel, relaxation channel, 그리고 spiral distributing channel 등으로 구성되어 있다. 이러한 channel들은 흐름을 균일하게 하기 위해서 설계된 유동 통로이다.

재료. 본 연구에서 사용한 수지는 Arkema Inc.의 Pebax 7233 SA 01 MED이다. 이 그레이드는 나일론계 열가소성 엘라스토머로 의료용 카테터 튜빙 제품을 위한 재료로 사용되

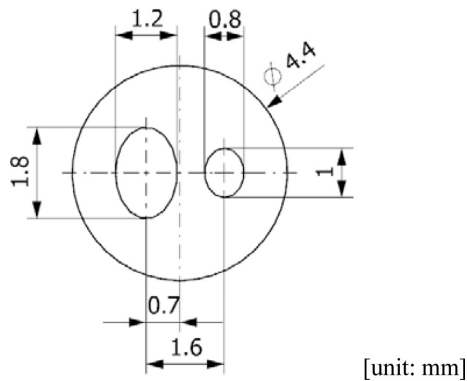


Figure 2. Geometry of die exit for the extrusion of 2-lumen catheter tubing.

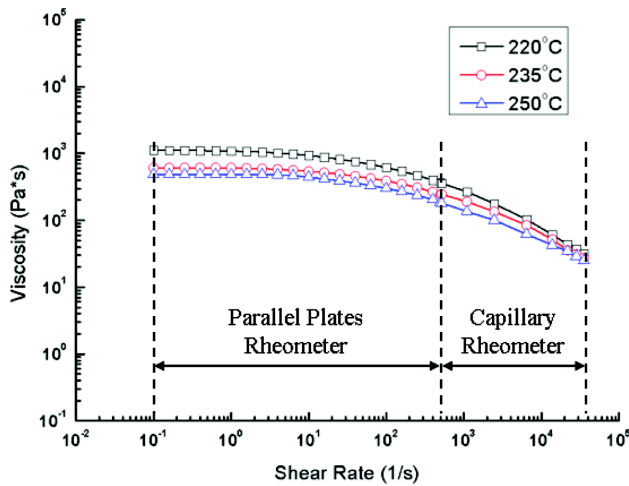


Figure 3. Shear viscosity curve for studied material.

고 있다. 소재의 유변물성은 두 가지의 장비를 이용하여 측정하였다. TA Instruments Inc.(USA)의 ARES-G2(parallel plates rheometer)를 이용하여 전단속도 $0.1 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 구간의 점도를 측정하였다. 그리고 Gottfert Inc.(Germany)의 Rheograph 6000(capillary rheometer)을 이용하여 전단속도 $500 \sim 40000 \text{ s}^{-1}$ 구간의 점도를 측정하였다. 측정된 전단점도는 Figure 3에 나타내었다.

지배방정식 및 구성방정식. 다이 내 고분자 용융체의 유동은 운동방정식(equation of motion)을 따르는데, 식 (1)은 직교 좌표계의 운동방정식을 나타내고 있다.²⁹⁻³¹

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

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

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

Table 1. Parameters in the Cross Law Model after Curve Fitting

η_0 (Pa·s)	λ (sec)	m (-)
0.612515×10^3	0.368397×10^{-2}	0.627136

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도이고 τ 는 extra stress로 총 응력(total stress, σ)과는 식 (2)와 같은 관계이다.

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

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

본 연구에서 사용한 유변학적 모델은 generalized Newtonian 모델인 Cross law 모델을 사용하였다. Generalized Newtonian 모델에서 extra stress는 식 (3)과 같이 표현된다.²⁹⁻³¹

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

여기서, D 는 변형률 텐서(deformation rate tensor)이며, $2D$ 는 전단속도에 해당된다. Cross law 모델에서 점도는 식 (4)와 같이 표현된다.³¹

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

여기서, η_0 는 초기 점도, λ 와 m 은 Cross law 모델의 파라미터, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도를 나타낸다. Figure 3의 측정된 점도를 이용한 커브피팅(curve fitting)에서 Cross law모델의 파라미터는 Table 1과 같다.

압출 공정의 해석. 다이 내의 고분자 유동체의 흐름은 지배방정식과 구성방정식을 이용하여 계산하게 되는데 본 해석에서는 상용 프로그램인 Ansys사의 polyflow를 사용하였다.

Figure 4는 해석을 위한 다이 내의 재료를 모델링한 것이며 경계조건이 부여되는 위치를 보인다. 스트레이트 다이(Figure 4(a))의 BC1인 inlet에는 스크류 압출기 끝의 압력(8.6 MPa)을 부여하였다. BC2와 BC3는 각각 다이 내부 벽면과 맨드릴 표면으로 모두 no slip 조건을 부여하였다. BC4는 다이 출구 면으로 outflow를 적용하였다. 크로스헤드 다이(Figure 4(b))도 스트레이트 다이와 마찬가지로 BC1인 inlet에 스크류 압출기 끝의 압력(8.6 MPa)을 부여하였으며, BC2인 다이 내부 벽면과 BC3인 맨드릴 표면 모두 no slip 조건을 주었다. BC4는 다이 출구면으로 outflow를 적용하였다.

Figure 5는 해석을 위해 생성한 메시를 보여주고 있다. 메시는 3차원 형상으로 육면체 형상과 사면체 형상으로 구성하였으며 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 각각 33891개와 483648개의 요소로 형성하였다.

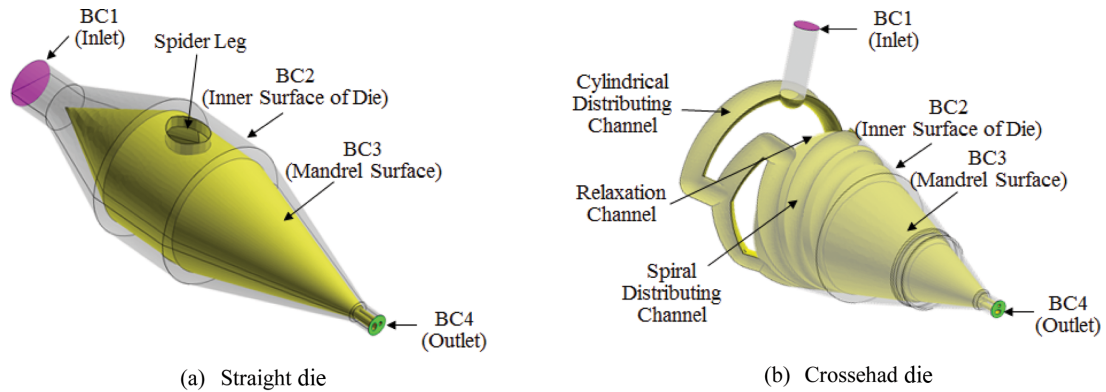


Figure 4. Boundary conditions in the straight die and crosshead die for computer simulation.

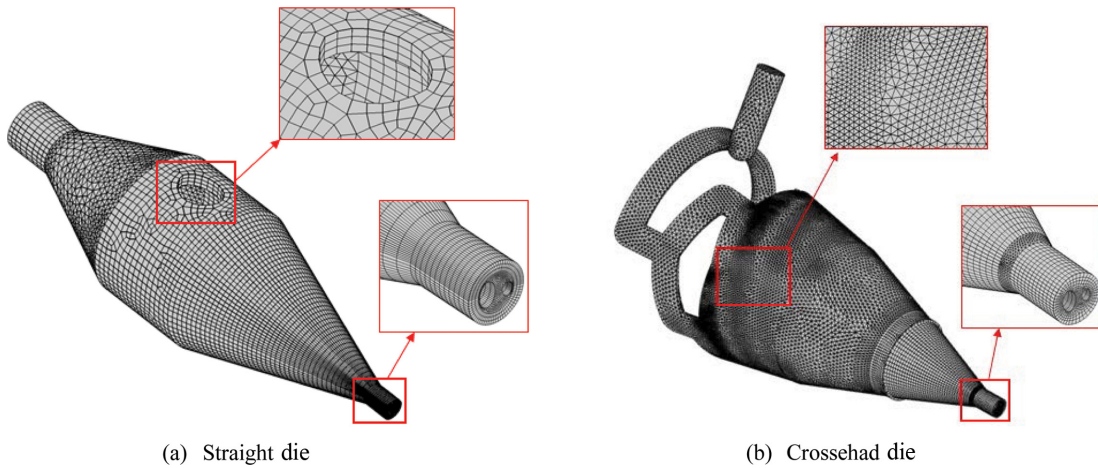


Figure 5. Mesh generation for computer simulation.

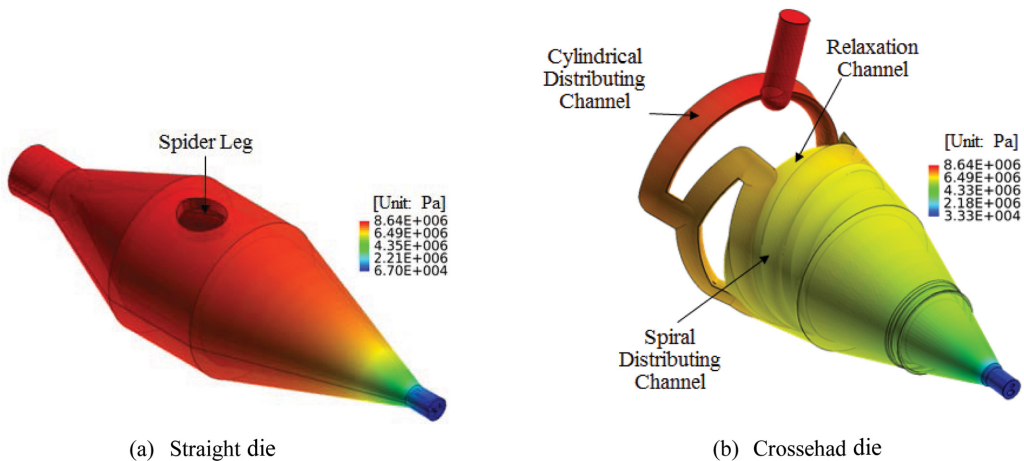


Figure 6. Predicted pressure distributions.

결과 및 토론

압력분포와 압력 프로파일. 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이 내부의 압력분포가 Figure 6에 나타나 있다. 스트레이트

다이에서는 다이 입구부분의 높은 압력분포가 다이 랜드까지 유지되다가 다이 끝 부분에서 급격히 감소한다. 그러나 크로스헤드 다이에서는 입구부인 cylindrical distributing channel 부분에서 압력이 높게 분포하고 relaxation channel과 spiral

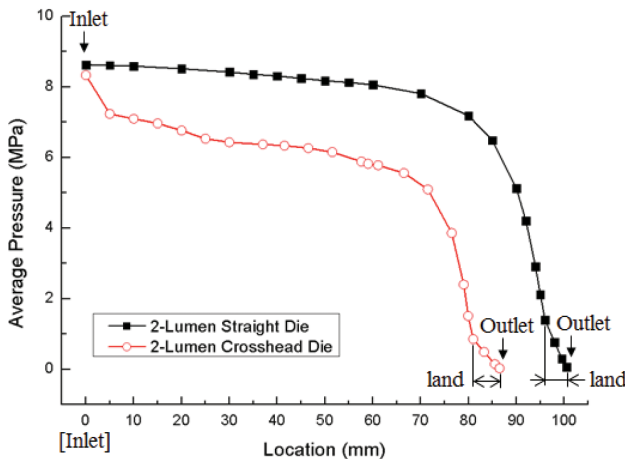
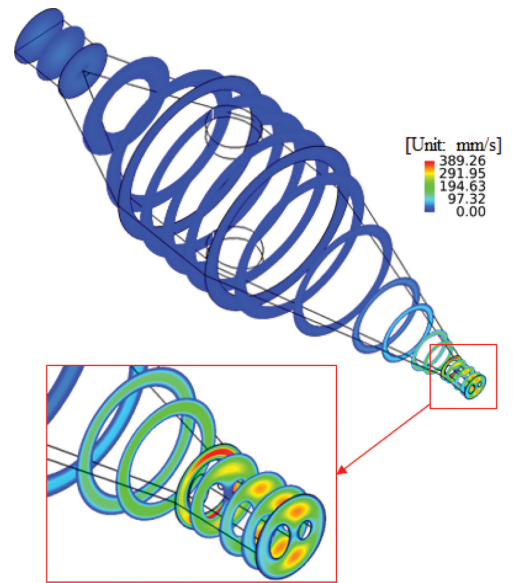


Figure 7. Predicted pressure profiles from die inlet to die exit in the die axial direction.

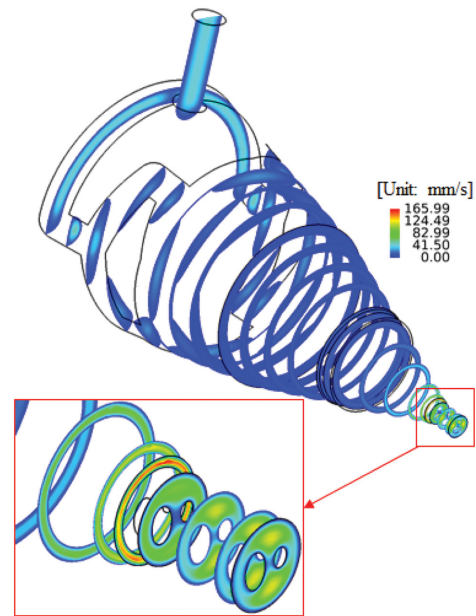
distributing channel에서는 압력이 서서히 낮게 분포하였다.

흐름방향으로 여러 단면에서의 평균압력 프로파일을 Figure 7에 나타내었는데 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 서로 다른 압력 프로파일을 보인다. 스트레이트 다이의 경우 압출 다이 내부에서 압력강하가 크지 않다가 다이 랜드부에 가까워지면서 압력강하가 크게 발생하였다. 크로스헤드 다이의 경우 다이 입구부터 cylindrical distributing channel을 지나면서 압력이 급격히 떨어지고 나서 서서히 감소하고 있다. Cylindrical distributing channel은 흐르는 다이 길이방향으로는 짧으나 맨드릴의 원주를 돌기 때문에 수지의 흐름길이는 길다. 따라서 다이 길이방향으로는 짧은 거리에 압력강하가 크게 일어났다. 그리고 다이 랜드 전까지 압력이 서서히 감소하다가 다이 랜드에서 압력이 크게 떨어졌다. 스트레이트 다이에서는 재료가 흐름 방향으로 직선적으로 흐르는데 크로스헤드 다이에서는 재료가 맨드릴 주위를 싸고 돌면서 다이 출구방향으로 진행된다. 결국은 재료의 흐름은 크로스헤드 다이에서 긴 흐름의 궤적을 갖기 때문에 다이 축 방향으로 맨드릴 내의 압력이 크게 감소하였다.

속도분포, 속도 프로파일, 유선 및 체류시간. Figure 8은 다이 축 방향으로 여러 단면에서 속도 분포를 보이고 있다. 다이의 내부 면에서 no slip 조건이므로 해석영역의 표면의 속도가 0이다. 따라서 해석결과의 외곽 표면은 속도가 모두 0으로 나타난다. 따라서 Figure 8에서는 다이의 여러 단면에서의 속도분포를 나타내었다. 두 다이에서 용융 수지가 다이 입구에서 출구로 갈수록 속도가 점차 증가하였고, 다이 랜드부에 유입되는 순간 최고 속도가 나타났다. 그리고 다이 랜드 구간에서 점차 일정하고 안정된 속도 분포를 갖는 것으로 나타났다. 스트레이트 다이에서 최고 속도(389.26 mm/s)는 크로스헤드 다이 최고 속도(165.99 mm/s)의 두 배 이상으로 나타났다. 랜드 부에서 좌우에 홀이 있어서 출구부 단면 상하



(a) Straight die



(b) Crosshead die

Figure 8. Predicted velocity distributions in the cross-section of die.

면에 재료흐름이 집중되어 속도가 크게 나타났다.

Figure 9는 다이 입구에서 압출되는 출구면까지 다이 축 방향으로 평균속도 프로파일을 보여주고 있다. 다이 내부 벽면과 맨드릴의 표면의 경우 no slip 조건으로 인해 속도가 0에 가깝기 때문에 표면적이 넓고 두께가 얇은 맨드릴 부분에서 평균속도는 매우 작게 나타났다. 다이 랜드부에서 평균속도는 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 각각 157.99, 53.94 mm/s로 나타났으며 이는 유량으로 환산하면 각각

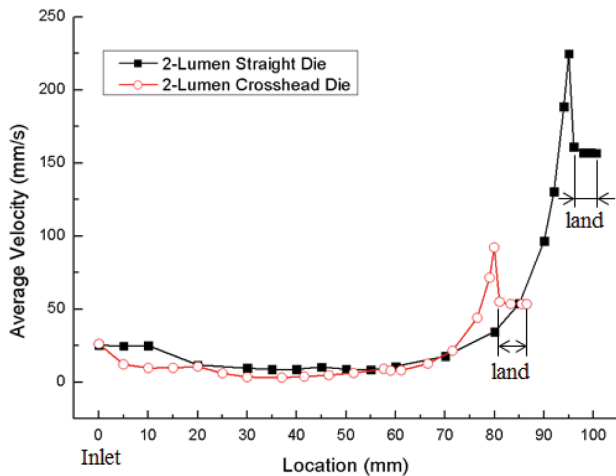
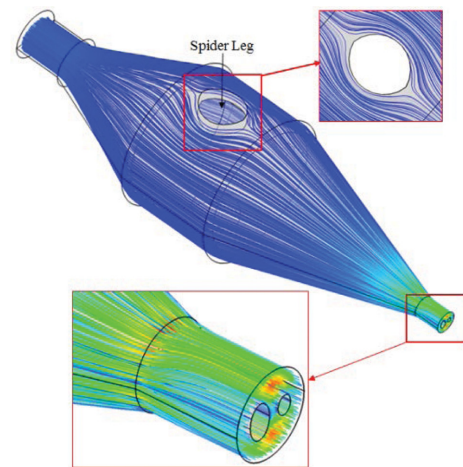


Figure 9. Predicted velocity profiles from die inlet to die exit in die axial direction.

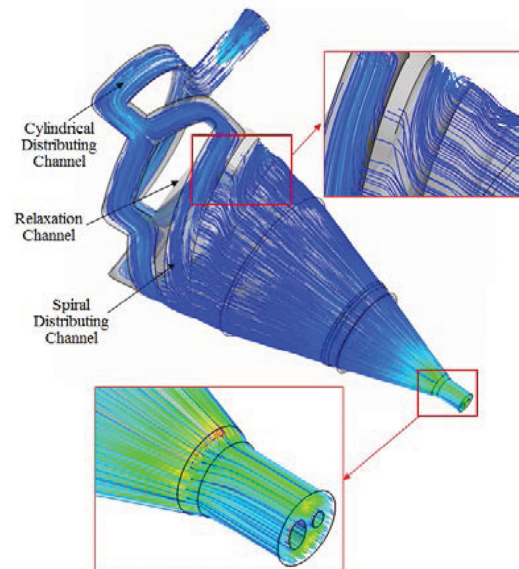
1960.66, 669.40 mm³/s이다. 다이 입구의 압력은 같고 다이 출구의 단면은 같지만 다이 내부의 압력이 다르기 때문에 유량이 다르게 나타났다.

유선(streamline)은 다이 내에서 수지가 흘러가는 궤적을 나타낸 것으로 Figure 10에서 이를 보여주고 있다. 스트레이트 다이의 경우 스파이더 레그를 지나면서 흐름이 나뉘지게 되는 것을 확인하였다. 스파이더 레그를 지난 후에는 흐름이 결합되어 흘러가는데 이때, 충분한 흐름이 유지되어야 재료의 재결합으로 인한 흐름 불균형 현상이 없어진다. 다이 랜드가 시작하는 지점에서 재료가 모이면서 유선이 물리는 현상이 발생되지만 다이랜드를 지나면서 안정된 흐름을 보이고 있다. 크로스헤드 다이의 경우 재료가 들어오면서 cylindrical distribution channel을 따라 원주방향으로 흐르고 relaxation channel로 유입된다. 그리고 spiral distributing channel을 따라 원주방향으로 흐르면서 또한 다이 축 방향으로 흐른다. 다이랜드에서는 원주방향으로의 흐름이 전혀 관찰되지 않고 다이 축 방향으로의 균일한 흐름이 관찰되었다.

Figure 11은 스트레이트 다이와 크로스 헤드 다이에서 재료가 다이 입구로 들어와 출구로 빠져 나갈 때까지 다이 내에서 체류하는 시간(residence time)을 보여주고 있다. 다이 입구에 임의로 10개의 입자를 선정하고 각 입자가 출구에서 빠져 나오는 시간을 계산하여 평균 체류시간 및 표준편차를 나타낸 것이다. 크로스헤드 다이의 경우 재료가 나선형의 spiral distributing channel에서 원주방향으로 흐르면서 축 방향으로 진행하기 때문에 체류시간이 스트레이트 다이에 비해 약 3배 정도 길다. 그리고 위치 별로 체류시간의 편차도 크로스헤드 다이에서 3배 이상으로 크게 나타났다. 이러한 결과로 보면 열 안정성이 좋지 않은 수지를 크로스 헤드 다이를 이용하여 압출하는 경우 긴 체류시간에 의해 재료가 열화될 가능성이 큰 것으로 판단된다. 반대로 스트레이트 다이는



(a) Straight die



(b) Crosshead die

Figure 10. Predicted streamline in the die.

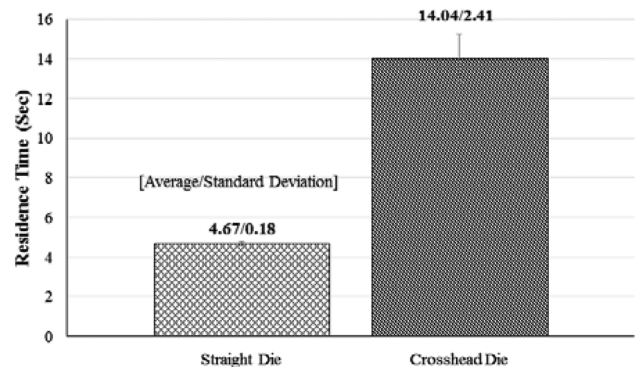
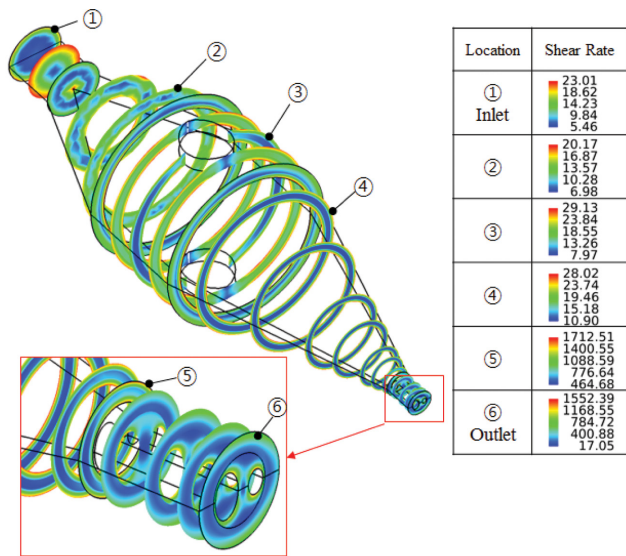


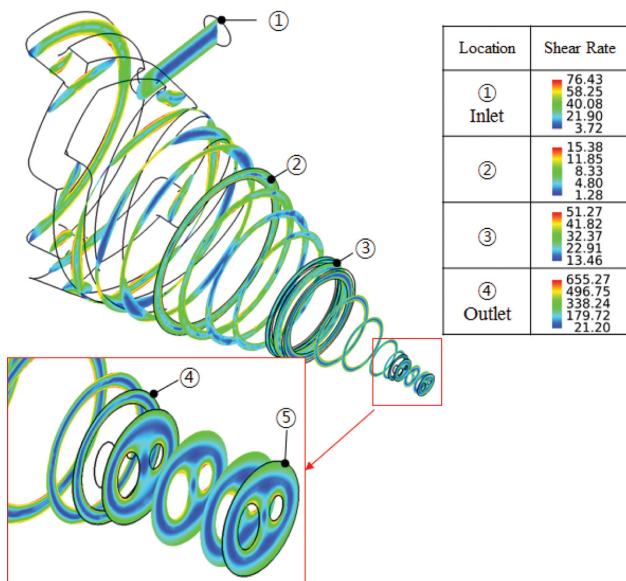
Figure 11. Predicted mean residence time and standard deviation in the straight die and crosshead die.

열에 민감한 재료의 압출에 유리하다고 판단된다.

전단속도와 전단응력 분포. Figure 12는 전단속도 분포를 보여주고 있다. 스트레이트 다이의 경우 다이 입구부터 다이 랜드 전까지 비교적 균일한 전단속도를 보이다가 다이 랜드에서 70배 이상(약 23 s^{-1} 에서 약 1552 s^{-1})으로 크게 증가하고 있다. 크로스헤드 다이의 경우 수지가 다이 입구로 유입되면서 spiral distributing channel의 홈을 타고 원주방향으로 흐르면서 다이 축 방향으로 흐르는 복잡한 흐름 때문에 전단속도는 작은 값이지만 요동치고 있다. 그리고 랜드부에서는 입구



(a) Straight die



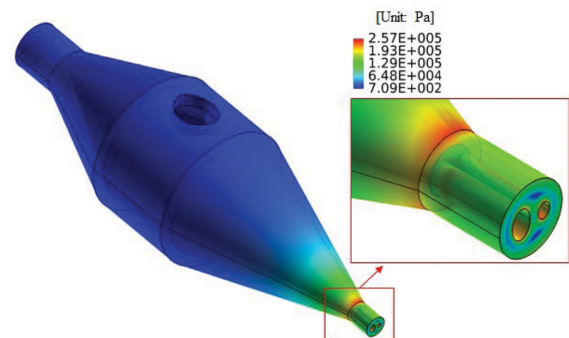
(b) Crosshead die

Figure 12. Predicted shear rate distributions.

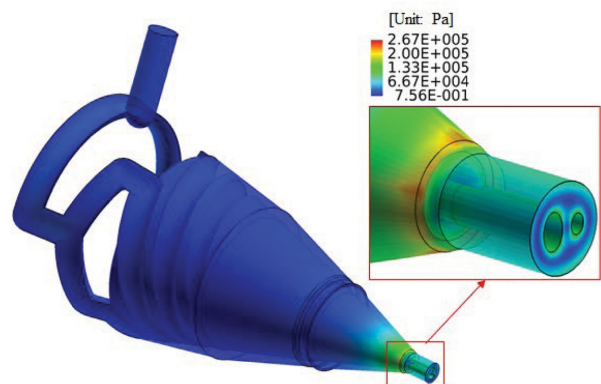
부에 비해 3배 이상의 큰 값을 보이고 있다. 크로스헤드 다이보다 유량이 큰 스트레이트 다이에서 전단속도가 매우 크게 나타났다.

Figure 13은 전단응력분포를 보여준다. 전단응력이 재료의 한계전단응력(critical shear stress)보다 큰 경우 흐름 불안정(flow instability)이 발생하고 표면불량 현상(melt fracture)이 나타나 압출품의 품질에 영향을 미치게 된다.^{32,33} 따라서 다이 출구 근처인 다이랜드 부분의 전단응력을 관찰하는 것은 매우 중요하다. 두 다이에서 다이 랜드가 시작되는 영역에서 전단응력이 높게 분포하다가 다이 랜드에서는 작고 균일한 값을 보이고 있다. 다이 랜드 부분에서는 크로스헤드 다이가 낮은 전단응력을 보이고 있다. 이는 크로스헤드 다이 랜드에서 낮은 전단속도를 갖는 것과 관련이 있다.

Figure 14는 다이 랜드의 벽면에서 전단응력(wall shear stress)의 프로파일이다. 본 연구에서 사용한 Pebax 7233 수지의 한계전단응력은 0.1 MPa 이다.^{22,33} 본 연구의 해석에서 압출압이 8.6 MPa 일 경우 스트레이트 다이의 벽면에서 전단응력은 모두 한계전단응력보다 커서 흐름의 불안정이 발생할 가능성이 높을 것으로 판단된다. 크로스헤드 다이의 벽면에



(a) Straight die



(b) Crosshead die

Figure 13. Predicted shear stress distributions.

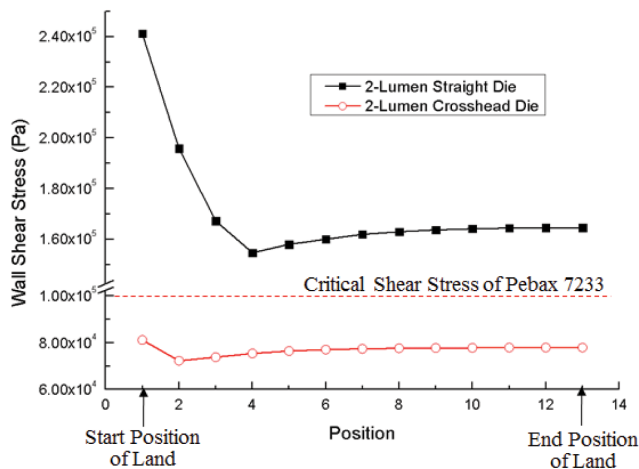


Figure 14. Predicted wall shear stresses at die land region.

서 전단응력은 한계전단응력보다 작으며 평균 약 0.07 MPa를 보여 안정된 흐름으로 양호한 압출이 예상된다.

결론

본 연구에서는 2-루멘을 카테터 튜빙 압출을 위한 두 가지 다이 즉, 스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 수치 흐름을 컴퓨터 해석을 통해 관찰하였다.

스트레이트 다이와 크로스헤드 다이의 다이 입구에서 출구까지 압력강하는 같으나 다이 내부의 압력분포는 큰 차이를 보였다. 스트레이트 다이에서는 입구영역에서 압력이 높다가 다이 랜드부에서 급격히 감소하고 있다. 크로스헤드 다이에서는 다이 입구 초기에 압력이 크게 감소하고 그 이후는 압력강하가 작고 비교적 균일한 압력분포를 보이고 있었다. 이러한 압력분포의 차이는 다이 내부 디자인의 차이에 의한 것으로 다이 내부 디자인의 중요성을 보인다.

스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 모두 다이 랜드가 시작되는 곳에서 속도가 집중적으로 높게 나타났으며 이어 다이 랜드부에서는 속도가 균일하게 안정적으로 나타났다. 스트레이트 다이의 경우 크로스헤드 다이보다 다이 랜드부의 평균속도가 약 3배 더 높게 나타났다. 다이 내부 유선을 확인한 결과 스트레이트 다이의 경우 스파이더 레그를 지나면서 흐름이 나뉘었다가 다시 만나게 됨을 확인하였다. 크로스헤드 다이의 경우 spiral distributing channel에서 흐름이 나선형상을 따라 다이 랜드까지 고르게 흐르는 것을 볼 수 있었다. 크로스헤드 다이의 이러한 복잡한 흐름으로 재료의 다이 내 체류시간이 스트레이트 다이보다 약 3배 더 길었다.

스트레이트 다이와 크로스헤드 다이에서 다이입구의 압력이 동일할 경우 스트레이트 다이의 경우 다이 랜드의 벽면에서 전단응력이 한계전단응력보다 높아 카테터 튜빙 압출 시 흐름 불안정이 발생할 수 있음을 예측하였다. 반면에 크로스

헤드 다이의 경우 다이 랜드의 벽면에서 전단응력이 한계전단응력보다 낮기 때문에 양호한 품질의 압출이 예측되었다.

감사의 글: 본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재 개발).

참고문헌

1. C. H. Park, *Korean J. Gastroenterol.*, **3**, 154 (2007).
2. J. K. Moon, S.-S. Park, E. G. Kim, and J.-W. Kim, *J. Korea Robot. Soc.*, **3**, 58 (2008).
3. J. H. Jeong, *J. Trauma Inj.*, **27**, 33 (2014).
4. H. Y. Yi, W. J. Jeong, W. S. Lee, I. S. You, S. H. Kim, S. Ryu, and J. Y. Lee, *J. Korean Soc. Emerg. Med.*, **19**, 192 (2008).
5. G. B. Jin, M. J. Wang, D. Y. Zhao, H. Q. Tian, and Y. F. Jin, *J. Mater. Process. Technol.*, **214**, 50 (2014).
6. J. H. Kim, J. S. Hong, S. H. Choi, H. J. Kim, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **46**, 54 (2011).
7. H. Y. Kim and M.-Y. Lyu, *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
8. K. G. Kovalenko, V. I. Sivetskii, and A. L. Sokoskii, *Chem. Pet. Eng.*, **49**, 675 (2008).
9. J. H. Kim and M.-Y. Lyu, *Polym. Eng. Sci.*, **54**, 2441 (2014).
10. R. Sikora, *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: podstawy logiczne, formalne i terminologiczne : praca zbiorowa*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2006.
11. W. Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hanser, Munich, 1992.
12. M. A. Lee and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **41**, 227 (2017).
13. R. Chris, *Polymer Extrusion*, 4th revised edition, Hanser, New York, pp 14-15 (2001).
14. E. S. Douglas and Q. Wang, *J. Manuf. Sci. Eng.*, **128**, 11 (2006).
15. W. S. Lee and H.-Y. Ho, *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 1085 (2000).
16. T. G. Choi, H. J. Lee, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **49**, 275 (2014).
17. L. Nadhir, S. fabrice, and P. Stephan, *J. Finite Elem. Anal. Des.*, **45**, 333 (2009).
18. J. M. Nobrega, O. S. Carneiro, P. J. Oliveira, and F. T. Pinho, *Conference Proceedings: ANTEC*, **61**, 310 (2003).
19. E. C. Brown, A. L. Kelly, and P. D. Coates, *Conference Proceedings: ANTEC*, **61**, 1464 (2003).
20. M. K. Alam, C. Tzoganakis, and J. Perdikoulis, *Conference Proceedings: ANTEC*, **1**, 76 (2005).
21. S. P. Lee and D. Y. Yang, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **66**, 1691 (2006).
22. M. A. Lee, M.-Y. Lyu, D. J. Shin, and T. K. Kim, *Trans. Mater. Process.*, **10**, 26 (2014).
23. E. Mitsoulis and S. G. Hatzikiriakos, *Rheol. Acta*, **42**, 309 (2003).
24. E. Mitsoulis, I. B. Kazatchkov, and S. G. Hatzikiriakos, *Rheol. Acta*, **44**, 418 (2005).
25. M. Ansari, A. Alabbas, E. Mitsoulis, and S. G. Hatzikiriakos, *Int.*

- Polym. Proc.*, **25**, 287 (2010).
26. R. A. Worth, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 551 (1980).
27. M. M. Kostic and L. G. Reifschneider, *Encycl. Chem. Process.*, **10**, 633 (2006).
28. K. G. Kovalenko, V. I. Sivetskii, and A. L. Sokol'skii., *Chem. Pet. Eng.*, **49**, 675 (2014).
29. J. L. White, *Principles of Polymer Engineering Rheology*, Wiley, New York, 1990.
30. M.-Y. Lyu and J. L. White, *Int. Polym. Proc.*, **10**, 305 (1995).
31. C. W. Macosko, *Rheology: Principles, Measurement, and Applications*, Wiley, New York, 1994.
32. E. Miller and J. P. Rothstein, *Rheol. Acta*, **44**, 160 (2004).
33. N. Zhang and M. D. Gilchrist, *Polym. Test.*, **31**, 748 (2012).