

이형단면 다이를 이용한 미세압출성형 연구

Study on Micro-extrusion Process using Non-circular Dies

#박성제 (#Sung Jea Park)

Advanced Technology Research Center & School of Mechanical Engineering
Korea University of Technology and Education

#psj7517@koreatech.ac.kr

요약

본 연구에서는 X-ray lithography공정으로 개발된 금속재질의 이형단면 다이를 이용하여 생분해성 고분자인 polycaprolactone의 미세압출공정을 개발하였다. 다양한 미세압출공정조건 별 압출 필라멘트의 단면 형상을 평가하고 이를 기반으로 최적의 공정조건을 도출하였다. 단면형상의 평가를 위해 shape-ability라는 평가요소를 도입하고, 이에 따라 평가를 수행하였다. 더불어 필라멘트의 단면왜곡 예측을 위한 수치해석을 진행하여 공정 상 단면왜곡에 대해 영향을 미치는 변수인 고분자용융체의 표면장력을 도출해 냄으로써 공정의 신뢰도를 높일 수 있었다.

키워드: micro-extrusion, shaped filaments, non-circular dies

Abstract

In present study, we developed micro-extrusion process using metallic non-circular dies, which fabricated by X-ray lithography, for polycaprolacton filaments. The cross-sectional shape of extruded filaments was evaluated under various extrusion process conditions, and the process conditions are optimized to produce high-equality filaments. To evaluate the cross-sectional shape of filaments, new measurement factor, namely shape-ability was introduced. In addition, numerical analysis was conducted for the prediction of cross-sectional distortion of extruded filaments. Through the numerical analysis, the surface tension of polymer melt was determined as a dominant factor affecting the cross-sectional shape, so reliability of extrusion process was improved.

Key words: micro-extrusion, shaped filament, non-circular dies

1. 서론

이형단면 방사구(spinneret) 혹은 다이(die)를 이용하여 화이버 혹은 필라멘트를 제작하는 것은 섬유산업에서 기능성 섬유의 제작에 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 와이어 방전가공을 중심으로 다이를 제작하기 때문에 제작형상의 한계가 있고, 정밀도 또한 높지 않다. 이를 극복하기 위해 다양한 가공방법이 제시되고 있으나 정밀도의 한계, 형상자유도의 부족, 높은 가공비 등으로 인해 활용되지 못하고 있는 것이 실정이다. 또한 필라멘트를 제작하는 공정에 대해서도 경험 위주의 접근 방법이 주를 이루며, 체계적인 접근 방법이 미흡한 실정이다[1,2].

본 연구에서는 X-ray lithography과 니켈 전주도금을 이용하여 제작된 판상의 다이[3]를 이용하여 생분해성 재질의 이형단면 필라멘트(shaped filament)를 제작할 수 있는 공정을 개발하였다. 이를 위해 판상 다이에 적합한 장비를 개발하였으며, 압출된 필라멘트의 단면형상의 왜곡정도를 평가하는 수 있는 기법을 도입하여 최적공정 조건을 도출하였다. 더불어 공정신뢰도를 높이기 위해 Polyflow를 이용한 수치해석 기법을 도입하였다.

2. 미세압출공정/시스템 개발

X-ray lithography와 니켈 전주도금을 통해 제작된 압출다이를 이용한 미세압출을 시행하기 위해 해당 다이의 형상(판상형태)에 적합한 압출시스템을 개발하였다. 열가소성인 생분해성 고분자(biodegradable polymer)를 압출하기 위해서 미세압출시스템은 가열과 가압이 가능하도록 설계/제작하였다. 설계된 압출시스템은 고분자의 가소화를 위해 가열/가압이 가능한 챔버(chamber)부, 제작된 압출다이를 부착하는 다이부, 순간적으로 압출된 고분자를 고형화시키는 냉각부로 분류할 수 있다. (Fig.1(a) and (b))

챔버부는 가열을 위해 세 개의 카트리지 히터(150 W)를 포함하고 있으며, 고분자로의 원활한 열전달을

위해 알루미늄 합금으로 제작하였다. 압출 시 목적하는 온도를 유지하기 위해 열전대(thermocouple)와 온도조절기(NX2, Hanyoung)를 설치하였고, 압출되는 온도를 정확히 파악하기 위해 열전대는 다이부와 가장 가까운 위치에 배치하였다. 공압(pneumatic pressure)을 사용하여 챔버 내부를 가압하였으며, 공기 및 용융 고분자의 누설을 방지하기 위해 챔버리드(chamber lid) 및 다이부에 오링(O-ring)을 적용하였다. (Fig.1(c)) 다이부는 하단에 판상형태의 압출다이가 미세볼트를 통해 조립되며, 다이부는 챔버부와 결합하여 압출을 수행한다. 압출되는 고분자는 표면장력 및 다이팽윤현상(die swelling)에 의해 이형단면의 형상이 왜곡되기 때문에, 이를 최소화하기 위해 압출되는 다이하단에 저온 냉각수($\sim 1^{\circ}\text{C}$)를 위치시켜 압출물이 직접적으로 냉각수에 접촉하도록 설계/제작하였다. 개발된 미세압출시스템은 압출온도는 약 200°C 까지 허용하며, 압출압력은 1 MPa까지 구현이 가능하도록 설계/제작하였다.

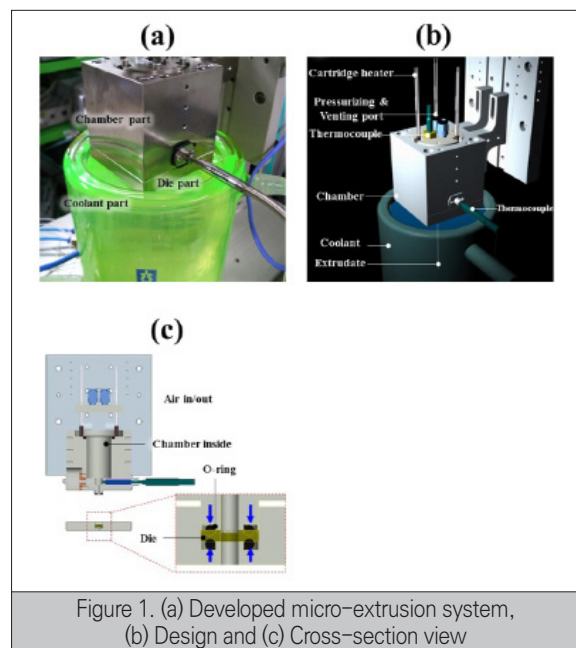


Figure 1. (a) Developed micro-extrusion system, (b) Design and (c) Cross-section view

3. 공정조건 별 압출결과

상기 개발한 미세압출시스템 및 기 개발된 원형, 삼각형, 십자형의 구멍(aperture)을 가진 금속 다이를

이용하여, 생분해성 고분자(biodegradable polymer)인 Polycaprolactone(PCL)의 미세압출을 시행하였다. (Fig.2) 본 공정에서 조절할 수 있는 공정조건은 압출압력, 압출온도, 냉각수의 온도, 다이 종류, PCL의 분자량 등이 있다. 냉각수의 온도의 경우, 사전테스트를 통해 5°C 이하에서는 필라멘트의 단면왜곡이 급격하게 줄어드는 것을 확인하였으며, 추가 냉각을 시행하여도 단면왜곡의 방지되는 향상효과는 없었음을 확인하였다. PCL의 분자량은 Mw 80,000, Mw 45,000, Mw 20,000으로 실험을 진행하였으며, 분자량이 큰 PCL(Mw 80,000)은 점도가 매우 커 압출되지 않으며 다이 끝단(Die end)에 맺히는 것을 확인하였다. 저 분자량의 PCL (Mw 20,000)은 압출된 필라멘트의 강도가 매우 낮아활용이 어려울 것으로 판단되었기 때문에, 최종적으로 Mw 45,000의 PCL을 사용하였다.

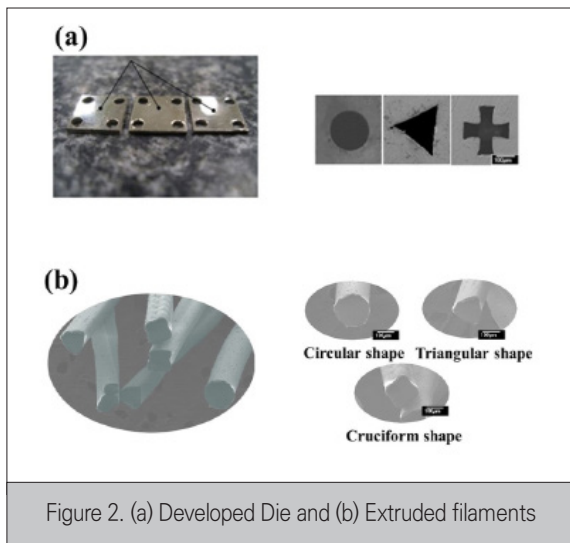


Figure 2. (a) Developed Die and (b) Extruded filaments

압출온도는 PCL의 용융온도(60°C)보다 높게, 65°C, 80°C, 100°C로 선정하였고 압출압력은 300 KPa, 500kPa, 700kPa로 설정하여, 온도 및 압력에 대한 필라멘트 단면의 형상 변화에 대해 관찰을 수행하였다. 다이종류는 원형, 삼각형, 십자형을 모두 사용하였으며, 압출되는 필라멘트에 냉각을 수행하였지만, 용융고분자의 표면장력 및 다이팽윤으로 인해 다이 구멍의 형상과 다르게 단면왜곡이 발생하였다. 낮은 압출온도인 65°C와 저압력 300 kPa일 때 원형을 제

외하고 삼각형, 십자형 필라멘트는 압출되지 않았으며, 십자형 다이를 사용한 100°C 및 300 kPa의 공정에서는 용융된 PCL이 다이표면에 붙으며 압출이 안정적으로 수행되지 않았다. 이외 조건에서는 안정적으로 압출이 진행되었으며, 육안 상, 압출온도가 낮을수록 그리고 압출압력이 높을수록 단면의 왜곡이 적어지는 것을 확인하였다. 상기의 실험을 통해, 압출시 압출온도 및 압출압력이 조절 가능한 주요공정 조건이라는 것을 확정하였다.

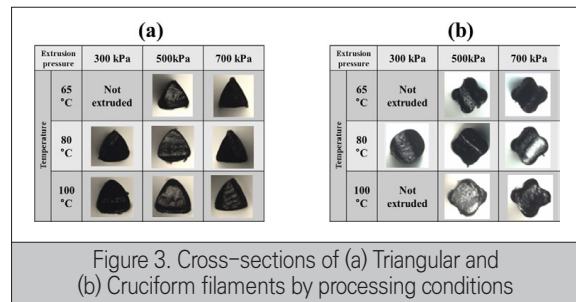


Figure 3. Cross-sections of (a) Triangular and (b) Cruciform filaments by processing conditions

4. 단면왜곡 예측을 위한 수치해석

표면장력과 다이팽윤에 의한 단면왜곡을 예측하기 위해 ANSYS사의 Polyflow를 이용하여 해석을 수행하였다. 제작된 다이의 두께 즉, 다이구멍의 길이(1 mm)와 동일하게 모델링을 진행하였으며, 자유표면(free surface)로 진입하는 압출물 길이는 3 mm로 경계조건을 설정하였다. (Fig. 4(a)) 실제 공정에서는 압출물을 냉각수에 바로 진입시키기 위해, 다이와 냉각수는 맞닿아 있다. 이로 인해 다이와 접촉한 냉각수 부분이 가열되어 압출물 단면의 왜곡이 최소화되지 않았으며, 이를 해결하기 위해 냉각수에 유동을 유발하여 가열된 냉각수의 교환을 유발하였다. 상기의 실험내용을 반영하기 위해 해석에서도 마찬가지로 유동유발 유/무에 따른 냉각수의 열분포를 파악하여 경계조건으로 적용하였다.(Fig. 4(b)) 더불어 PCL에 대해 Rheometer를 통해 유변학적 특성을 측정하였고, 측정값과 가장 유사한 Cross-law를 PCL의 점도모델로 선정하여 해석에 반영하였다. (Fig. 4(c))

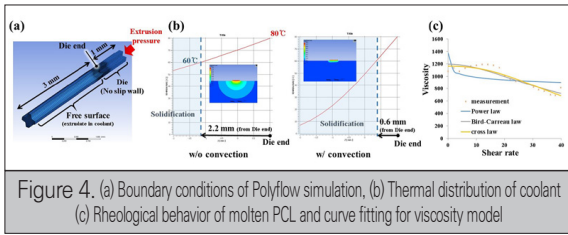


Figure 4. (a) Boundary conditions of Polyflow simulation, (b) Thermal distribution of coolant (c) Rheological behavior of molten PCL and curve fitting for viscosity model

더불어 용융 PCL의 표면장력(~50 mN/m) 유무에 따라 단면형상을 예측하였으며, 표면장력에 크기에 따라 왜곡정도의 차이 큰 것을 확인하였다. (Fig. 5) 해당 해석결과를 통해, 이형단면필라멘트를 위한 미세 압출성형 시 용융재질 자체의 표면장력이 단면형상 왜곡에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 해석된 결과와 다이구멍의 형상, 실제 압출물의 단면을 비교 하였으며, 해석결과는 실제 압출물과 매우 유사함을 확인할 수 있었다. (Fig. 6)

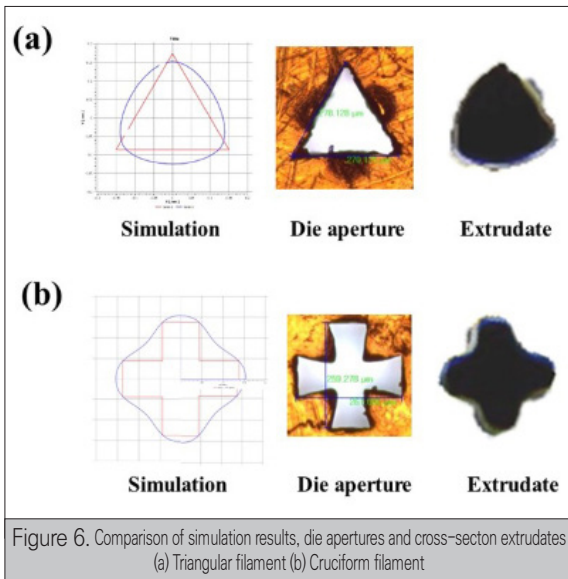


Figure 6. Comparison of simulation results, die apertures and cross-section extrudates (a) Triangular filament (b) Cruciform filament

5. 단면 성형성 평가지표 설정 및 최적화

단면의 성형성 즉, 표면장력 및 다이팽윤에 의해 압출물의 단면이 왜곡되는 정도를 정량화하기 위해 Shape-ability 라는 지표를 도입하여, 제작된 이형 필라멘트에 대한 평가를 진행하였다.(Fig.7(a)) 압출물의 왜곡이 심화될수록 다이의 구멍형상에서 원형으로

변형된다는 점에 착안하였으며, 진원도(circularity)를 이용하여 다이 구멍의 형상과 압출물 단면의 상대적 차이를 정량화할 수 있었다. 즉, 압출물의 단면이 다이구멍과 일치하면, Shape-ability가 1이 되며, 압출물의 단면이 원형일 때는 그 값이 0이 된다. Shape-ability는 다음과 같이 기술 될 수 있다.

$$\frac{1 - \text{circularity of extrudate}}{1 - \text{circularity of die aperture}} = \text{shape - ability}$$

where, circularity = $\frac{4\pi \times \text{area}}{\text{perimeter}^2}$

상기의 Shape-ability를 이용하여 공정조건 별 단면 성형성을 평가하였다. (Fig.7 (b) and (c)) 압출온도가 낮을수록 단면 성형성을 증가하는 것으로 관찰되었으며, 그 이유는 낮은 온도로 인해 점도가 높기 때문에 단면의 왜곡이 적을 것이라고 분석되었다. 그러나 높은 점도로 인해 생산성이 감소하는 경향을 보인다. 또한 압출압력이 높을수록 단면 성형성은 향상되는 것으로 평가되었다. 높은 압출압력으로 인해 압출 속도가 빨라짐으로써 압출되는 필라멘트가 냉각수의 차가운 영역에 빨리 도달되기 때문이라고 추정할 수 있다. 평가결과를 통해 조절할 수 있는 공정변수 중 가장 큰 영향을 미치는 것은 압출압력, 압출온도, 냉각온도 순으로 분석되었다.

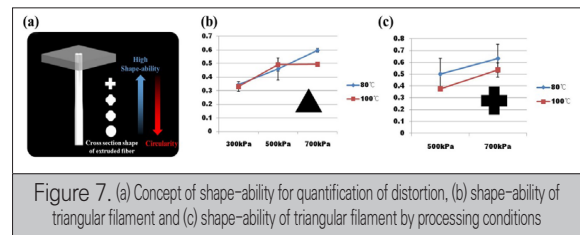


Figure 7. (a) Concept of shape-ability for quantification of distortion, (b) shape-ability of triangular filament and (c) shape-ability of triangular filament by processing conditions

6. 결론

본 연구에서는 기 제작된 판상의 다이를 이용하여 효과적으로 생분해성 고분자의 미세압출을 수행할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 해당 시스템과 다이를 이용하여 고분자의 압출을 시행하고 평가함으로써 공정의 특성을 파악할 뿐만 아니라 필라멘트의 단면 형상 측면에서의 공정최적화를 구현하였다. 또

한 수치해석을 통해 필라멘트 단면형상에 영향을 미치는 용융고분자의 표면장력에 대한 중요성을 확인하였다. 이러한 접근방법은 이형단면 섬유의 제작, 이형단면 생분해성 고분자를 활용하는 조직공학 등에서 활용이 가능할 것이라 사료된다[4,5].

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. 2018R1A6A1A03025526).

참고 문헌

- [1] Jung I, Kim SY, Oh TH. Effects of spinning conditions on shape changes of trilobal-shaped fibers. *Textile Research Journal* 80 (2010):12-8.
- [2] <http://www.directindustry.com/>
- [3] Kim, Dong Sung et al, " Melt-spun shaped fibers with enhanced surface effects: fiber fabrication, characterization and application to woven scaffolds", *Acta biomaterialia* 9 (2013):7719-26
- [4] Saltzman, W. Mark. *Tissue engineering: engineering principles for the design of replacement organs and tissues*. Oxford university press, 2004.
- [5] Williamson, Matthew Richard, Eric F. Adams, and Allan GA Coombes. "Gravity spun polycaprolactone fibres for soft tissue engineering: interaction with fibroblasts and myoblasts in cell culture." *Biomaterials* 27.7 (2006): 1019-1026.