

TPE-800L 튜브 성형성에 대한 단축 압출기의 제조공정에 관한 연구

윤주일*, 강상욱
한성대학교 기계전자공학부 기계시스템공학과

Study of Single Screw Extrusion Conditions on the Formability of TPE-800L Tube

Juil Yoon*, Sang-Wook Kang

Division of mechanical and electronics eng. Hansung University

요약 열가소성 탄성체 (Thermo-Plastic Elastomer-TPE)는 우수한 탄성을 지니면서도 보통의 열가소성 플라스틱과 동일한 성형성과 재생 가능성 때문에 산업계 전반에 걸쳐 사용이 증가하고 있다. 현재 열가소성 탄성체와 관련된 연구는 다양한 소재와의 결합에 의한 복합탄성체 개발이나 이를 구현하기 위한 장비 개발 등에 집중되고 있다. 반면 중소기업 등의 현장에서는 이러한 신소재의 적용뿐만 아니라 저렴한 일축 스크류 장비에서 열가소성 탄성체의 압출이 가능하게 하는 공정조건에 대한 연구가 필요하다. 열가소성 탄성체는 일반적으로 트윈 스크류 방식으로 압출을 하게 된다. 반면에 중소기업 등에서는 단축 스크류 방식의 압출기를 주로 보유하고 있는데 단축 스크류 방식의 압출기에서 압출이 가능하게 하려면 정교한 공정 제어를 통해 균일한 두께 유지가 중요하다. 본 논문에서는 열가소성 탄성체 TPE-800L 단축 압출가공에 있어서 압출공정 변수인 출력부 가공 온도가 튜브의 성형성에 미치는 영향을 연구하였다. 열가소성 탄성체 TPE-800L의 압출에서는 출력부 온도가 가장 중요한 요소이며 165-170도일 때 가장 우수한 성형성을 확인하였다.

Abstract Thermoplastic elastomers are being used increasingly throughout industry owing to their superior properties, such as superior elasticity, formability, and recoverability. Currently, research related to thermoplastic elastomers is focused on the development of composite elastomers by combining with various materials and the development of equipment. On the other hand, in the field of small and medium sized companies, it is necessary to study not only the application of these new materials, but also the process conditions that enable the extrusion of thermoplastic elastomers in inexpensive uniaxial screwing equipment. If extrusion is performed in a single screw extruder, it is important to maintain a uniform thickness through process control of the extruder. This study examined the effects of the processing temperature, which is an extrusion process variable, on the formability of a tube in the thermoplastic elastomer TPE-800L uniaxial extrusion process. The nozzle zone temperature is the most important factor in the extrusion of thermoplastic elastomer TPE-800L; the most excellent moldability was confirmed at 165-170 °C.

Keywords : Polymer extrusion, Single Extruder, Thermoplastic Elastomer, Formability, TPE-800L

1. 서론

열가소성 탄성체(Thermo-Plastic Elastomer-TPE)는

우수한 탄성을 지니면서도 보통의 열가소성 플라스틱과 동일한 성형성과 재생가능성, 우수한 기계적 물성 때문에 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 열가소성 탄성체

본 논문은 한성대학교 교내 학술연구비 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Juil Yoon(Hansung Univ.)

Tel: +82-2-760-8008 email: juilyoon@hansung.ac.kr

Received May 8, 2018

Revised (1st July 4, 2018, 2nd July 30, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

시장 규모는 2009년 기준으로 전 세계적으로는 16조원, 국내는 1.1조원 규모이며, 2020년에는 전 세계적으로 30조원에 달하는 거대 시장이 형성되리라 예상된다[1-3]. 열가소성 탄성체의 주요 적용 용도로는 자동차부품, 의료용품, 접착제/실란트/코팅제품, 전선케이블 자켓, 스포츠용품 등에 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 열가소성 탄성체는 소재에 따라 올레핀계, 스티렌계, 아미드계, 에스터계, 우레탄계, PVC계 등으로 나눌 수 있으며 이 중에서 스티렌계 및 올레핀계 열가소성 탄성체는 범용으로 널리 사용되고 있다.[1-3]

이러한 우수한 특성 때문에 중소기업을 포함한 다양한 산업현장에서는 PVC 등의 열가소성 소재를 엘라스토머 계열인 열가소성 탄성체로 바꾸려는 시도를 하고 있다. 반면 열가소성 탄성체와 관련된 연구는 다양한 소재와의 결합에 의한 복합탄성체 개발[4,5]이나 이를 구현하기 위한 장비 개발[6] 또는 공정변수가 압출품의 강도[7,8]에 미치는 영향 등에 집중되고 있다. 반면 중소기업 등의 현장에서는 이러한 신소재의 적용뿐만 아니라 저렴한 일축 스크류 장비에서 열가소성 탄성체의 압출이 가능하게 하는 공정조건에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 (주)하이워크와 산학연 협동사업의 일환으로 수행되었다. 하이워크는 PVC를 사용하여 원형튜브를 압출하여 왔으나 시장 다변화와 고부가가치 제품 개발을 위하여 열가소성 탄성체를 이용한 압출 원형 튜브 개발에 참여하게 되었다. 본 연구에서는 자체 개발한 일축 스크류를 이용하여 열가소성 탄성체(즉 엘라스토머)의 한 종류인 TPE-800L의 압출을 통하여 원형튜브를 제조하였다. 이 때 사용한 열가소성 탄성체는 (주)하이워크가 제공한 스티렌계 열가소성 수지로서 싱글 스크류 압출기에서의 성형성이 확보되는 최적화된 압출 온도를 찾기 위하여 성형성 테스트를 수행하였으며 최적의 압출 온도조건에 대한 연구를 수행하였다.

2. 열가소성 탄성체 튜브의 압출

열가소성 소재의 압출은 가열에 의해 열가소성 소재를 용융시키고 이를 연속적으로 압출하며 성형하는 방법을 통칭한다. 일반적인 압출설비로는 압출기, 다이 및 권취장치의 세 부분으로 구성된다. 압출기는 열가소성 소재를 용융하여 연속적으로 압출하는 역할을 하며, 다이

는 만들고자 하는 형태의 모양을 결정하는 요소이다. 마지막으로 권취장치는 압출되는 제품을 냉각하여 연신하는 역할을 한다. 열가소성 압출장비에서 가장 중요한 파트는 압출기이다. 압출기 내의 호퍼(Hopper)를 통하여 펠렛, 분말, 플레이크 등의 분말상의 고형 수지가 가열된 배럴 속으로 공급된다. 이 때 배럴과 회전 스크류(Screw)와의 상대 속도 차에 의해 연속적으로 이송, 압축, 용융이 이루어진다. 최종적으로 일정 형태의 다이를 통과한 후 압출되어 튜브, 필름, 시트 등으로 제조되는 공정으로 구성된다. 효율을 높이기 위해서는 스크류에 동력을 전달하는 구동 모터, 스크류 형상, 압출 유량이 중요하며 설계 시 중요한 변수가 된다. 압출장치 내의 스크류는 여러 기능을 수행하며 기능에 따라 보통 4부분으로 나누어지며 그림 1과 같다.

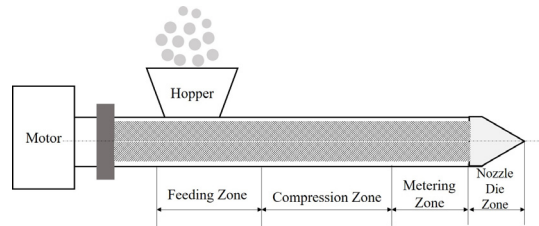


Fig. 1. Schematic of Basic structure of single screw extruder: 1) Feeding zone, 2) Compression zone, 3) Metering zone, 4) Nozzle-Die zone

원재료가 호퍼로부터 이동해 예열되는 1) 이송부(Feeding zone), 폴리머가 액상으로 변하고, 펠릿에 포함된 공기가 제거되며 압출되는 2) 압축부(Compression zone), 용융체가 균질해지고 다이 구멍으로 용융체를 밀어내기에 충분한 압력이 이루어지는 3) 계량부(Metering zone), 용융체가 다이와 노즐을 통과하면서 요구되는 형상에 따라 압출이 완료되는 4)출력부(Nozzle-Die zone)로 구성된다.

한편 압출기에는 단축스크류(Single screw) 식과 다축스크류(Multi screw) 식이 있다. 단축스크류 식은 스크류가 하나인 것으로서 현재 가장 널리 사용되고 있다. 반면 엘라스토머 계열 열가소성 탄성체의 압출은 일반적으로 다축 스크류를 통해서 압출이 가능하고 단축 스크류에서는 압출이 매우 힘들다고 알려져 있다. 이는 엘라스토머계열의 체인결합특성에 따라 충분한 정도의 교반이 이루어지지 않으면 스크류나 다이부분에서 Clogging 현상 등이 발생하기 때문이다. 따라서 중소산업계에서 사

용되는 일반적인 단축스크류를 통하여 엘라스토머계열의 압출튜브를 제조하기 위해서는 스크류의 정교한 설계와 압출온도조건 확립이 매우 중요하다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 실험재료

실험에 사용된 고분자 압출기는 열가소성 탄성체 압출을 가능하게 하기 위하여 별도로 제작된 장비로 그림 2와 같다. 압출기 형식은 단축 스크류 식이며, 주요 규격으로는 스크류길이가 600mm이고, L/D=20이며, 이송부의 길이는 120mm, 계량부의 길이는 180mm이다. 압출다이의 원형 오리피스의 직경은 7.6mm이다. 압출물이 냉각하는 동안 중공 형태를 유지하기 위하여 공기 채널이 포함된 맨드릴로 구성되어 있다. 또한 열가소성 탄성체의 경우 압축부에서 다른 열가소성 소재에 비하여 덩어리짐(Lumping) 현상에 의하여 엘라스토머 용융체가 뒤로 밀리는 현상이 빈번한데 이러한 현상을 방지하기 위하여 플라이트 공차(Flight clearance)는 0.03mm를 적용하였다.

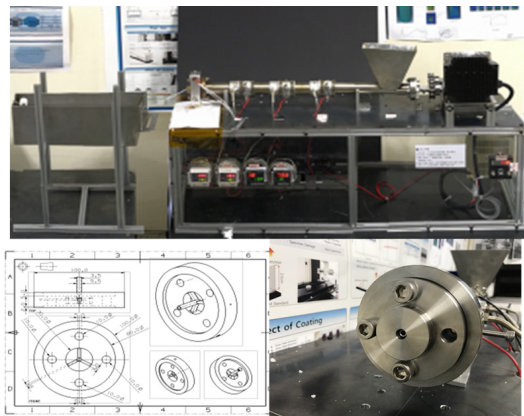


Fig. 2. Polymer extruding system and enlarged view of extrusion die.

이송부(Feeding Zone)의 온도 세팅을 180℃로 예열한 상태에서 호퍼 온도는 약 40~50℃이며 엘라스토머 투입에 문제가 없다고 판단하였고, 그 밖의 다른 온도(예: 185℃)에서 실험한 결과에서도 유의미한 차이를 보이지 않음으로 압축부(Compression Zone)과 이송부(Feeding Zone)의 온도를 각각 180℃로 세팅하였다. 또

한 계량부(Metering Zone)의 온도변화는 170℃와 175℃의 경우 성형성에 큰 차이를 나타냄을 확인하지 못하여서 이번 연구에서는 출력부의 온도를 변화하면서 압출품의 성형성을 평가하였다. 이 때 실험한 출력부의 온도는 155, 160, 165, 170℃ 이다.

Table 1. Various extrusion conditions - Die, Metering zone, melting zone, and Feeding zone temperature.

Case	Nozzle -Die	Metering	Compression	Feeding
1	155℃	170℃	180℃	180℃
2	160℃	170℃	180℃	180℃
3	165℃	170℃	180℃	180℃
4	170℃	170℃	180℃	180℃

본 실험에 사용된 열가소성 탄성체는 ㈜하이위크가 제공한 스티렌계 열가소성 수지인 TPE-800L이다. TPE-800L의 대표적 물성으로는 녹는점 170~180℃, 쇼어 경도 85, 밀도 0.96g/cc이다. 상용튜브로 사용하기에 적합하게 첨가제, 충전제 등을 혼합하여 컴파운드 상태로 공급받고 이를 시편 제조에 사용하였다.

3.2 시편 제조 및 실험방법

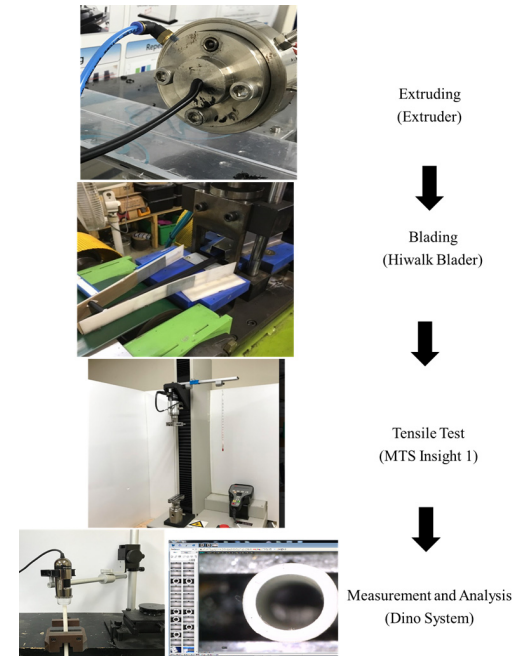


Fig. 3. Process of experiment: 1) Extruding, 2)Blading, 3) Tensile Test, 4) Measurement and Analysis.

주어진 4가지 온도조건에 따라서 4종류의 증공 튜브를 50m 이상씩 제작하였다. 4종류 모두 동일한 수냉조건에서 냉각이 수행되었으며 권취조건도 동일하다. 증공 튜브는 판매 제품사이즈(길이 20~25cm)에 맞게 하이워크의 블레이더(blader)를 이용하여 절단되었다. 이러한 시편은 온도조건마다 250개 이상씩 확보된다. 시편제조 의 과정 및 실험프로세스는 그림 3과 같다.

압출된 튜브의 인장강도를 측정하기 위해 사용된 계측 장비는 MTS사의 Model Insight 1(그림 3)이며 주요 규격은 1000 kg/max이다. 인장강도 측정은 각각의 조건별로 5개의 시편을 측정하여 평균값으로 인장강도를 평가하였다. 압출된 엘라스토머의 가공성(즉 동심정도, 튜브의 직진정도)을 평가하기 위해 단면의 외직경과 내직경을 광학현미경(Dino-Light Premier, AD7013)을 이용하여 측정하였다. 사용한 장비의 주요 스펙으로는 배율 100~200배, 해상도 5.0M pixel, 초당 Max 200 프레임이다. 사용된 시편은 길이는 20cm-25cm 내외이며, 출력부의 온도변화조건에 따라 각각 250개씩 준비되었다. 측정된 영상정보는 PC에 연결되어 영상분석 장비(Dino-Capture Software)를 이용하여 통계분석에 사용하였다. 통계분석을 위하여 압출공정으로 압출된 엘라스토머 튜브의 내외경을 250회 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 TPE-800L 인장강도

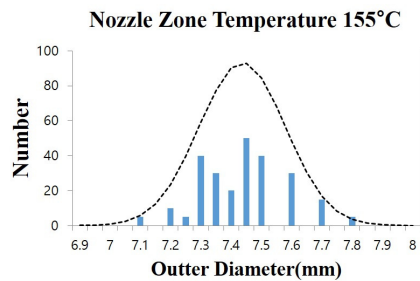
출력부의 4가지 온도조건에 따라 제작된 엘라스토머 튜브의 인장강도 평가를 수행하였다. 각 조건별로 5개의 시편을 제작하여 평균값은 표 2와 같다. 출력부의 온도 조건 차이에 의한 엘라스토머 인장강도의 차이는 크지 않았으며 평균적으로 9MPa내외의 인장강도 수치값을 나타내었다. 이는 (주)하이워크의 미끄럼방지매트에 사용하여야 하는 강도값의 설계기준치인 5MPa를 모두 초과하였다. 따라서 인장강도 설계기준치인 측면에서는 4조건의 출력이 모두 가능하며 성형성 측면의 평가를 통하여 최적 조건을 도출하고자 한다.

Table 2. Tensile strength of various extrusion conditions.

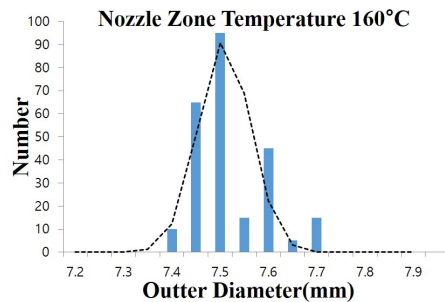
Case	1	2	3	4
Tensile Strength (MPa)	9.15	8.95	8.92	9.12

4.2 TPE-800L 외경 측정결과

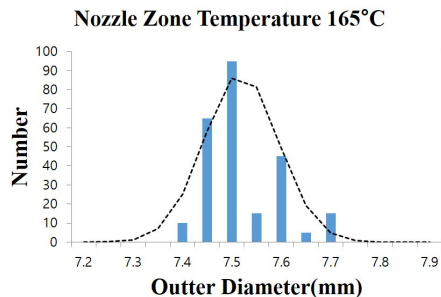
엘라스토머를 이용하여 제작된 튜브의 성형성을 평가하기 위하여 압출기 출력부의 온도를 155, 160, 165, 170℃ 변경하면서 튜브를 제작하였다. 각 경우에 대한 250회의 이미지 분석을 한 결과는 그림 4와 같다. TPE-800L의 경우 출력부에서의 온도가 155℃인 경우 외경은 7.1mm부터 7.8mm사이에 분포하였다. 출력부 온도가 상승함에 따라 분산정도가 작아졌다. 예를들어 170℃인 경우 외경은 7.35mm부터 7.2mm사이에 분포하였다. 175℃로 압출한 경우는 압출이 실패한 경우도 종종 있어서 그림4,5에서는 제외하였다.



(a) Nozzle zone 155°C, Metering zone 170°C



(b) Nozzle zone 160°C, Metering zone 170°C



(c) Nozzle zone 165°C, Metering zone 170°C

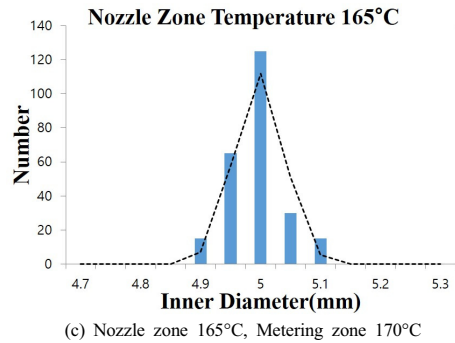
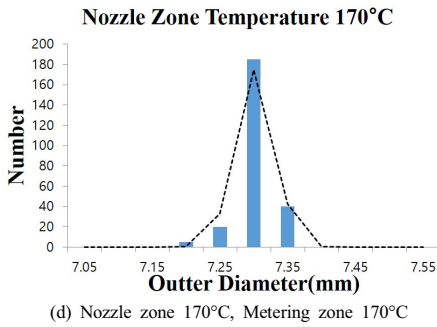


Fig. 4. Normal distribution of tube outer diameter where the die temperature is (a) 155°C, (b) 160°C, (c) 165°C, (d) 170°C.

4.3 TPE-800L 내경 측정결과

외경평가와 마찬가지로 압출기 출력부의 온도를 155, 160, 165, 170 °C로 바꾸어 가면서 각각 250회의 이미지 분석을 한 결과는 그림 5와 같다. 전체적인 경향은 외경 측정결과와 동일한 경향성을 보였다. 대표적으로 출력부에서의 온도가 155°C인 경우 내경은 5.0mm부터 5.65mm사이에 분포하였다. 출력부 온도가 상승함에 따라 외경에서와 마찬가지로 분산정도가 작아졌다.

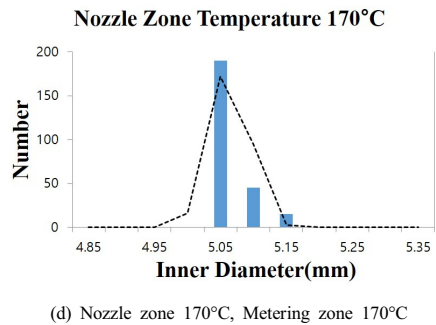
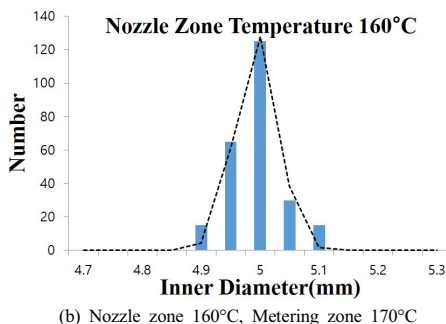
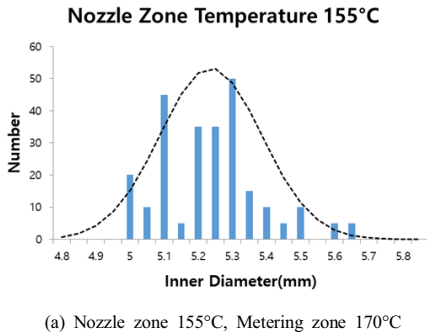


Fig. 5. Normal distribution of tube inner diameter where the die temperature is (a) 155°C, (b) 160°C, (c) 165°C, (d) 170°C.



4.4 정규분포 분석

실험에서 얻어진 각 조건별 튜브의 내직경과 외직경은 대체적으로 정규분포를 따랐다. 제조된 열가소성 탄성체의 내외경 평균직경은 그림 6에 보이는 바와 같이 출력부 온도에 따라 큰 차이 없이 대체적으로 일정하게 압출이 되었다. TPE-800L의 평균외직경은 7.45mm이고, 평균내직경은 5.05mm이었다.

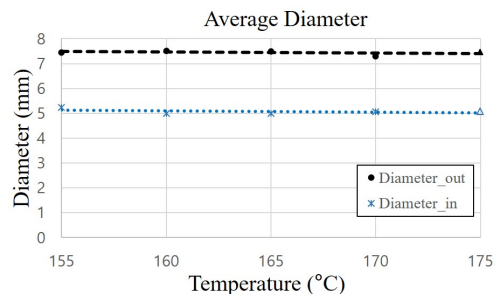


Fig. 6. Average inner diameter and outer diameter vs nozzle zone temperature

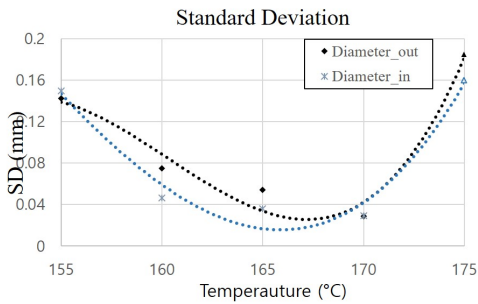


Fig. 7. Standard deviation of inner diameter and outer diameter vs nozzle zone temperature

반면에 출력부 온도에 따른 내직경과 외직경의 표준 편차는 그림 7에 나타난 바와 같이 출력부 온도에 민감하게 반응하였다. 155°C일 때 표준편차는 내외경 모두 0.14-0.15mm 정도였다. 압출온도가 증가함에 따라 표준 편차는 감소하며 170°C에서 외경 표준편차 0.02849, 내경 표준편차 0.02901로 최소값을 보였다. 온도를 175°C 까지 올려 출력을 하면 튜브의 압출이 간헐적으로 실패하기도 하였다. 데이터를 통한 추세분석을 하여 보면 TPE-800L의 튜브성형의 일정한 생산성을 위해서는 출력부(Nozzle Zone)온도를 165도에서 170도 사이에서 출력하는 경우 가장 우수한 성형성을 확인할 수 있었다. 출력부 온도가 너무 낮은 경우 튜브의 형상이 균질하게 성형이 되지 못하였으며 170도 이상이 되게 되면 튜브 내의 잔열이 냉각과정동안 충분히 빠져나가지 못하기 때문이다.

5. 결론

본 연구는 열가소성 탄성체 TPE-800L 단축 압출가공에 있어서 압출공정 변수인 가공온도가 튜브의 성형성에 미치는 영향을 통계적 방법에 분석한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 출력부(Nozzle Zone) 온도가 155도 인 경우, 내외 직경은 평균값은 다른 Nozzle 온도와 유사하였으나 표준편차는 상당히 큰 값을 나타내었다.
- (2) 반면 출력부 온도가 165-170도의 경우 대부분의 TPE-800L 튜브의 직경이 평균값에 이르고 통계적으로 표준 편차값은 0.02~0.03으로 가장 우수한 공정조건이었다.

(3) 출력부 온도가 170도를 상회하는 경우 표준 편차 값도 급격히 증가하였고, 이를 조절하기 위해서는 생산속도를 조절할 필요가 있다.

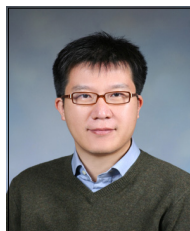
또한 일축 스크류의 설계변수에 대한 연구 및 계량부(Metering zone)온도와 냉각 성능 공정변수에 대한 추가적인 연구가 진행 중이며 향후 논문에서 제출할 예정이다.

References

- [1] D. H. Kim, H. J. Kim, and B. J. Lee, "Olefinic Thermoplastic Elastomer and Styrenic Thermoplastic Elastomer", *Elastomers and Composites*, Vol.45, No.3, pp. 152-155, 2010
- [2] E. J. Choi, J. W. Yoon, J. K. Jo, S. E. Shim, J. H. Yun, and I. Kim, "Present and Future of Thermoplastic Elastomers as Environmentally Friendly Organic Materials", *Elastomer and Composites*, Vol.45, No.3, pp. 170-187, 2010
- [3] Y. S. Lee, J. C. Jeong, J. M. Park, "A Trend of R&D in Environmental Thermoplastic Elastomer", *Elastomer and Composites*, Vol.45, No.4, pp 245-249, 2010
- [4] T. Villmow, P. Potschke, S. Pegel, L. Haussler, B. Kretschmar, "Influence of twin-screw extrusion conditions on the dispersion of multiwalled carbon nanotubes in a poly(lactic acid) matrix", *Polymer*, Vol.49, pp. 3500-3509, 2008
- [5] S. H. Park, S. G. Lee, S. H. Kim, "Isothermal crystallization behavior and mechanical properties of polylactide/carbon nanotube nanocomposites", *Composites: Part A*, Vol.46, pp. 11-18, 2013
- [6] R. J. Zdrahala, N. Popadiuk, G. Kalin, D. J. Lentz, "Extrusion Process for Manufacturing PTEE Products", *United States Patent*, No.5505887, 1994
- [7] M. S. Choi, "A Study on the Elongation of Polymer Extrusion Film", *Vol.15, No.2*, pp. 660-665, 2014

윤 주 일(Juil Yoon)

[정회원]



- 1996년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2005년 12월 : University of Alberta Mechanical Eng. (기계공학박사)
- 2006년 1월 ~ 2008년 8월 : Harvard University 연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 한성대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

Thin film mechanics, 생산제조, 적층제조, 신뢰성

강 상 욱(Juil Yoon)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한성대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

기계설계, 소음진동