

슈퍼엔지니어링 플라스틱 기반 난연성 가발사 제조

Preparation of Flammability Artificial Hair based on Super Engineering Plastic

*Corresponding author

Sang Young Yeo
(miracle@kitech.re.kr)

최현정, 공다정^{1,2}, 윤철민¹, 여상영^{1*}

(주)피앤씨랩스 섬유과학중앙연구소, ¹한국생산기술연구원 융합기술연구소 섬유융합연구부, ²단국대학교 고분자시스템공학부 섬유융합소재공학전공

Hyun-Jung Choi, Da Jeong Gong^{1,2}, Chulmin Youn¹ and Sang Young Yeo^{1*}

PNC Labs Inc., Osan, Korea

¹Korea Institute of Industrial Technology, Ansan, Korea

²Department of Fiber System Engineering, Dankook University, Yongin, Korea

Received_June 08, 2020

Revised_June 22, 2020

Accepted_June 23, 2020

Abstract Super engineering plastic(SEP) are applied to high performance and high value industries due to their excellent mechanical properties and high continuous operating temperature. Among them, PES and PEI are amorphous SEPs, and have the advantages of high flexibility, mechanical properties, transparency, and thermal stability. In this study, polyethersulfone(PES) and polyetherimide(PEI) fibers were manufactured to produce flame retardant artificial hair. PES and PEI fibers prepared through a melt-spinning process at a high temperature of 360 to 420°C. They are compared with commercial artificial hair by thermal gravimetric analysis(TGA), linear density, tenacity, and limited oxygen index(LOI) analysis. PES and PEI fibers have similar linear density and tenacity to commercial artificial hair, while their thermal stability and flame retardant are excellent. In particular, flame retardant was analyzed through LOI value and PES was 35.1%, which is superior to commercial artificial hair PET/Br(28.2%) and PET/P(20.2%). Therefore, PES and PEI are suitable as artificial hair for flame retardant.

Textile Coloration and Finishing

TCF 32-2/2020-6/103-110

© 2020 The Korean Society of Dyers and Finishers

Keywords super engineering plastic, artificial hair, flame retardant, melt-spinning, polyethersulfone, polyetherimide

1. 서 론

가발용 섬유로 사용되는 인공모발은 선명한 색상, 가벼움, 내열성, 부드러운 촉감과 유연성, 컬 형성성 및 컬 유지성과 더불어 난연성과 내열성이 필수적으로 요구된다¹⁾. 여기서 난연성이란 인공모발을 이루는 섬유의 자기소화성과 용융고분자의 내드립성으로 설명된다. 내열성과 난연성은 인모 기능을 대체하는 인공모발섬유가 갖추어야 할 가장 중요한 특성이다. 인공모발은 두피 혹은 가발 착용자의 머리카락과 연결되어 사용되므로

화염 접촉시 가발 착용자를 화상으로부터 보호하기 위하여 난연성을 부여해 주어야 한다. 난연성을 부여하기 위해 브롬계 난연성 첨가제가 많이 사용되며²⁾, 브롬계 난연성 첨가제는 인체 및 환경에 유해한 것으로 알려져 있다³⁾. 또한 별도의 난연제를 첨가하는 경우에는 방사시간이 경과함에 따라 열 분해된 탄화물의 발생으로 인해 노즐 홀이 막히거나 용융수지가 토출되는 노즐 홀 주변에 열 분해된 탄화물이 쌓이게 되어 곡사 현상으로 인해 사절이 발생하여 연속적인 생산이 어렵게 될 수 있다. 이러한 문제점을 배제하기 위해서는 사용할 수 있는 난연제가 한정되며, 난연제의 열 분해로 인한 섬유 제조 공정

서 사절 발생, 노즐 홀 주변 청소, 노즐 교체 등으로 생산성을 저하시킬 수 있고, 고분자 수지와 난연제의 용융 흐름성에 차이가 클 경우에는 균일한 품질의 가발 원사를 제조하기 어렵고 장기간의 연속 생산이 제한될 수 있다. 또한 가발용 합성섬유는 polyethylene terephthalate(PET)^{4,5)}, polyvinylchloride (PVC)^{6,7)} 등의 열가소성 섬유가 많이 사용된다. 이 섬유는 모두 소수성 섬유이며, 정전기가 발생하기 쉬운 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 폴리에스테르계 중에서 열변형 온도가 비교적 높은 수지를 주성분으로 하는 인공모발이 사용되고 있다. 폴리에스테르계 인공모발로 사용되는 수지에는 polybutylene terephthalate(PBT), polypropylene terephthalate(PPT), poly(ethylene 2,6-naphthalate)(PEN) 등이 있다⁸⁾. 이들 폴리에스테르계 수지는 내열성은 비교적 우수하나 불에 잘 타기 쉽고 화염 접촉시 고온의 용융고분자가 낙하하는 성질을 갖는 이연성 수지이므로 인공모발로 사용되기 위해서는 난연성을 부여해 주어야 한다.

슈퍼 엔지니어링 플라스틱(Super engineering plastic; SEP)은 연속사용온도가 150°C 이상에서 열 안정성, 금속의 강도 및 내열성이 기존의 플라스틱에 비해 매우 우수한 특성을 지녔다⁹⁾. SEP 중에서 결정성 고분자는 유연성이 낮아 깨지기 쉽지만 불투명하고 높은 내화학성이 특징이고 비결정성 고분자는 유연성이 높으며 화학적으로 불안정한 반면 투명한 특징을 지녔다. 대표적인 SEP 수지로 결정성 고분자는 polyphthalamide(PPA)¹⁰⁾와 polyphenylene sulfide(PPS)¹¹⁾가 있으며 비결정성 고분자에는 polyethylene sulfone(PES)¹²⁾와 polyethylene imide(PEI)¹³⁾가 있다. PES와 PEI는 높은 유리전이온도를 가지며 고온에서도 탁월한 물리적 및 기계적 물성을 발휘하고 고강도와 고탄성률을 지닌 고분자이다. 뿐만 아니라, PES와 PEI는 성형성이 우수하고 난연성을 지니고 있는 고기능성 고분자로 각광받고 있다.

따라서 본 연구에서는 난연제를 첨가하지 않고 난연성이 우수한 SEP 섬유를 방사 장치 및 방사 조건 제어를 통해 난연성이 부여된 가발사를 제조하고, 상용화된 가발 원사와 비교 분석하여 원사의 특징을 고찰하여 난연성이 우수한 SEP를 가발사에 적용하기 위한 연구를 진행하였다.

2. 실험

2.1 시료 및 시약

PES은 BASF社의 Ultrason[®]E2010 UNQ26제품을 사용하였고, PEI는 SABIC社의 ULTEM[™]Resin 1000을 사용하였다. 상용가발사는 우노엔컴퍼니社의 PET/Br, PVA/Br 난연 가발사와 하이모社의 PET/P 난연 가발사를 사용하였다. 사용한 PES와 PEI의 물성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 PES와 PEI 섬유의 제조

본 연구에서는 스크류 직경이 11 mm 인 이축 압출기(BA-11, Bautek Co., Korea)를 사용하였으며 길이 대 직경 비(L/D)가 3.64

Table 1. The characteristics of PES and PEI

Sample	PES	PEI
Melt volume-flow rate, (g/10min)	70	-
Density (g/cm ³)	1.37	1.27
Softening point (°C)	330-390	350-400

인 3 mm 노즐을 사용하여 SEP 가발사를 제조하였다. SEP는 PES와 PEI가 사용되었고, 방사하기 전 모든 수지는 120°C에서 4시간 이상 건조하여 수분을 제거한 후 방사하였다. 압출하는 동안 온도, 스크류 회전 속도 및 공급 속도는 Figure 1과 Table 2에 자세히 나타내었다. 방사 온도는 PES가 360°C와 380°C에서 방사하였고, PEI는 400°C와 420°C에서 방사하였다. 시편의 이름은 수지 이름과 방사 온도를 혼합하여 작성하여, 예를 들면 360°C에서 방사한 PES 가발사는 PES360이라 명명하였다.

2.3 측정

2.3.1 PES와 PEI 섬유 물성 분석

섬유의 직경 및 표면 형상을 확인하기 위해 Field emission-scanning electron microscopy(FE-SEM, SU8000, Hitachi Ltd., Japan)을 이용해 측정하였고, 가발사의 인장강도는 Instron[®]-3343(Instron, USA) 장치를 이용해 100 N의 로드셀(Loa

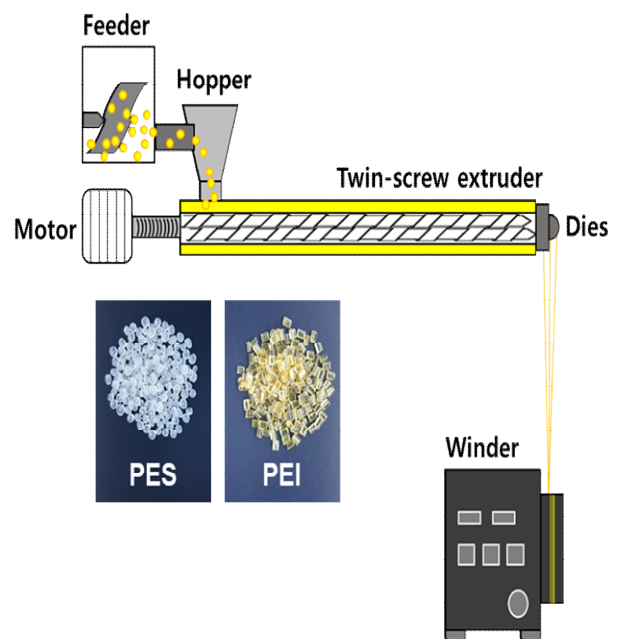


Figure 1. Schematic diagram for the preparation of PES and PEI based artificial hair.

Table 2. Conditions of melt spinning process

SEP	Temperature (°C)						Screw speed (RPM)	Feeder speed (RPM)	Winder speed (MPM)
	Zone #1	Zone #2	Zone #3	Zone #4	Zone #5	Zone #6			
PES360	250	300	360	360	360	360	90	0.5	500-3000
PES380	270	320	380	380	380	380	100	0.8	500-3000
PEI400	400	400	400	400	400	400	150	0.9	500-3000
PEI420	420	420	420	420	420	420	150	1.3	500-3000

d cell)을 장착하여 측정 게이지 길이는 50 mm, 크로스헤드 스피드(cross-head speed)는 12.5 mm/min의 속도로 측정하였다. 이때 시편의 크기는 가로 100 mm와 세로 25 mm의 크기로 측정하였고, 각각의 시료에 대해 10회 반복 실험으로 얻어진 값의 평균값을 사용하였다.

PES와 PEI 가발사의 가열 온도에 따른 시료의 변화를 분석하기 위해 질소와 공기 분위기 중에서 시료의 가열 속도를 분당 10°C로 설정하여 800°C까지 상승시키면서 시료의 무게 감량비를 측정하였다(Q500, TA Instrument, USA). 섬유 표면의 형상은 FE-SEM으로 10가닥을 측정하여 평균값을 사용하였으며, 다음 식(1)에 의해 denier(den)로 계산하였다¹⁴⁾.

$$d = f \left(\frac{D}{SG} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow D = SG \left(\frac{d}{12} \right)^2 \quad (1)$$

where,

d : Equivalent diameter

f : 12 for d in μm

D : Fiber denier

SG : Fiber specific gravity

2.3.2 PES와 PEI 가발사 특성 분석

한계산소지수(Limited oxygen index: LOI): PES와 PEI 가발사는 KS M 3032(산소 지수법에 의한 고분자 재료의 연소 시험방법) 규격에 따라 섬유 소재의 측정 방법 중 A-2법에 따라 시료를 준비하고 LOI를 측정하였다. 시험을 하고 다음의 식(2)에 의하여 산소지수를 구하였다. 시험 횟수는 3회로 하며, 그 평균치를 소수점 이하 첫 번째 자리까지 구하였다¹⁵⁾.

$$L.O.I = \frac{O_2}{O_2 + N_2} \times 100 \quad (2)$$

난연성: PES와 PEI 가발사 160 가닥을 15 cm로 자른 후 화염 길이 2 cm로 조정할 화염을 5초간 접촉시킨 후 화염을 제

거하여 소화되는 시간을 측정하여 판정하였다(◎: 소염소요시간 1초 이내, ○: 소염소요시간 3초 이내, △: 소염소요시간 5초 이내, ×: 소염소요시간 6초 이상).

용융드립성: PES와 PEI 가발사 다발에 불꽃을 접촉시켜 인화되는 과정에서 용융된 수지가 낙하하는 현상을 측정하였다. 용융드립성은 드립되는 용융수지 드립 갯수를 측정하였다. PES와 PEI 가발사 160 가닥으로 집속한 섬유 다발을 수직으로 늘어뜨린 다음 30 mm 불꽃을 접근시켜 100 mm를 연소시키면서 드립 횟수를 측정하였다(◎: 드립수 0, ○: 드립수 1~2, △: 드립수 3~4, ×: 드립수 4회 초과).

내열성: PES와 PEI 가발사 160 가닥을 10개를 모아 집속한 후 집속된 사를 손으로 잡고 230°C로 가열한 가용용 전기 헤어 아이언 사이에 끼우고 10초간 가열하여 수축에 의한 섬유 변형 상태, 융착에 의한 변형 등을 육안으로 판별하였다. 열처리 후 변형이 없으면 내열성이 양호하다고 판단하였고, 변형이 발생하면 불량으로 판단하였다(◎: 전혀 변형이 없음, ○: 경미한 수축 변형이 있으나 외관을 손상시키지 않는 수준임, △: 수축 변형 발생하여 외관이 손상됨, ×: 수축 변형 및 융착이 발생함).

3. 결과 및 고찰

3.1 PES와 PEI 가발사의 열 안정성

제조된 PES와 PEI 가발사 섬유의 열 안정성 분석을 위해 열 중량분석(Thermal gravimetric analysis; TGA)을 실시하였다(Figure 2a). 섬유의 경우 2종 모두 난연제를 첨가하지 않았음에도 높은 열 안정성이 나타났고 질소 분위기일 때 100°C에서 PES는 1.3%, PEI는 0.8% 중량 감소가 발생하였고, 250°C에서 PES는 2.2%, PEI는 1.4%의 중량 감소비가 나타났다(Figure 2b). 상용 가발사 제품 사용 온도인 100~250°C 사이에서도 중량 감소가 크게 일어나지 않는 것으로 보아, 제품 사용에 이용할 것으로 여겨진다.

PES 및 PEI 섬유는 고내열성, 고강도 등 수지의 고유 특성이 있으며, TGA 분석을 통하여 섬유의 열 안정성을 확인하였

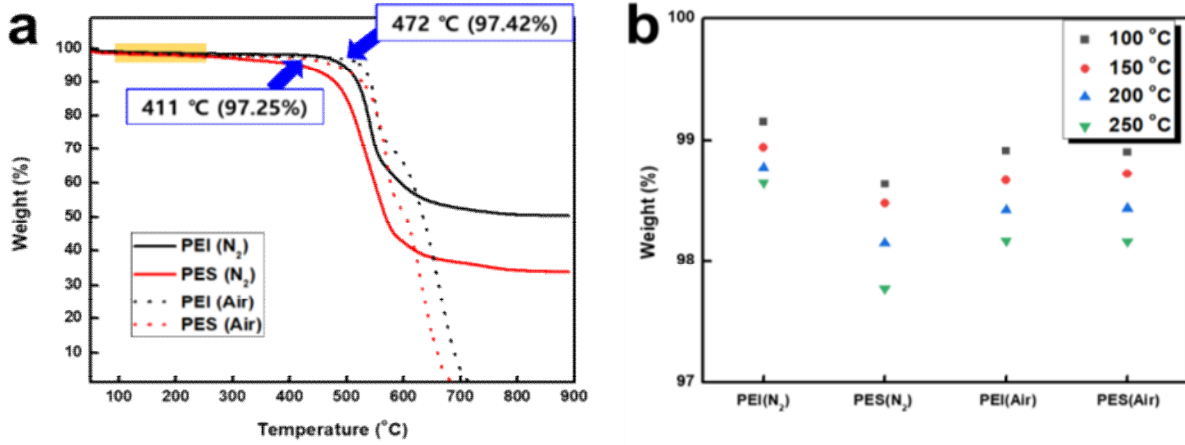


Figure 2. TGA analysis of the PES and PEI based artificial hair using a heating rate of 10°C/min in N₂ and air.

다. PES는 약 411°C, PEI는 약 47 °C 부근에서 중량 감소가 시작되었고, 섬유 모두 질소와 산소 분위기에서도 높은 열 안

정성을 나타내는 것으로 PES와 PEI 가발사가 고온의 헤어아이론에서 사용이 적합한 것으로 사료된다.

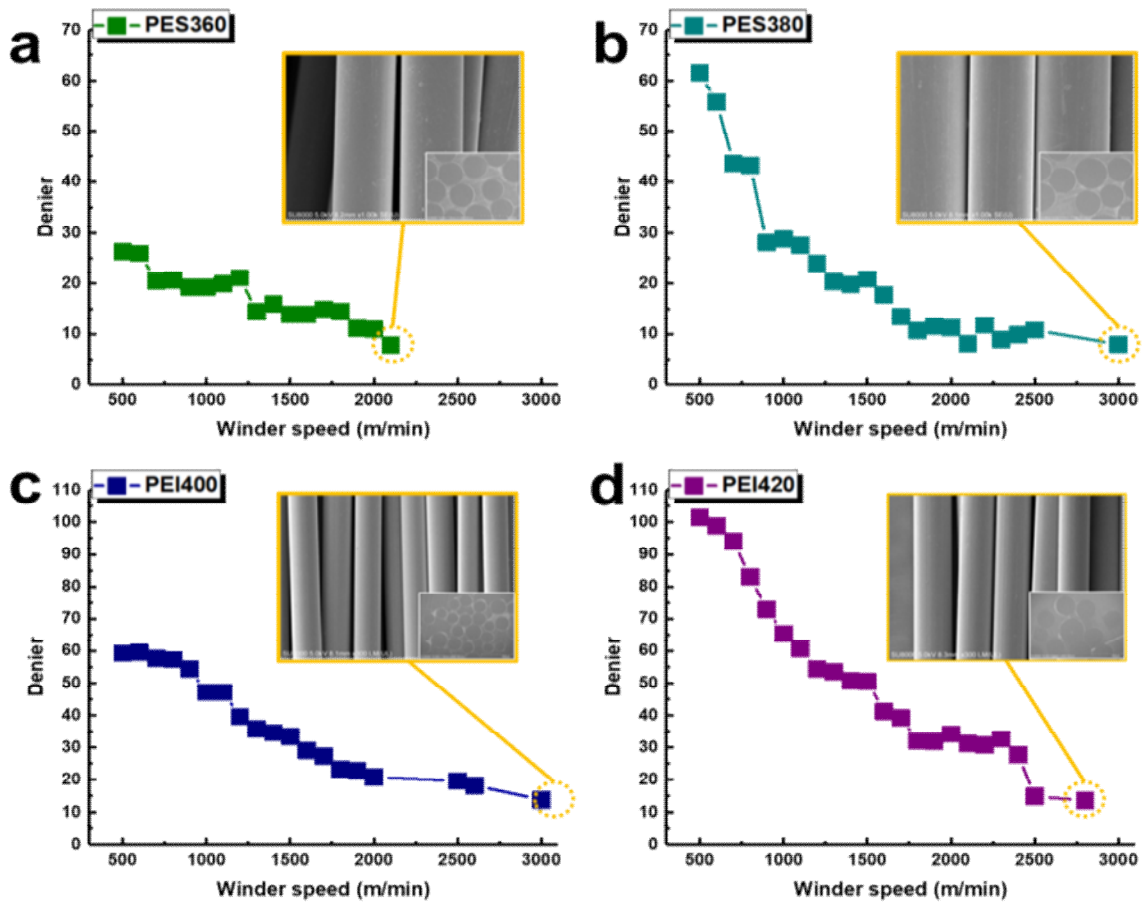


Figure 3. Fineness of PES and PEI based artificial hair. Inset images; SEM images of PES and PEI based artificial hair at highest winder speed.

3.2 PES와 PEI 가발사의 권취속도에 따른 섬도

용융방사 공정은 동일하고, 권취속도에 변화를 주어 물성 변화를 확인하였다. 권취속도는 최저 500 m/min에서 최대 3,000 m/min까지 다양하게 변화하였다. 권취속도가 증가할수록 섬유의 직경은 감소하였으며, 인장강도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 용융방사 온도 조건에 따라 섬유 물성이 변화하는 것을 확인하였다.

PES 섬유의 경우 낮은 권취속도에서는 방사온도 및 조건 변화의 영향을 받는 것으로 판단할 수 있었고, 500~1,000 m/min에서 온도 변화에 따라 직경 차이가 약 3배 이상인 것을 확인하였고, 권취속도가 1,700 m/min 이상에서 큰 차이를 보이지 않았다. PES 섬유의 경우 360°C에서 방사 시 8 ~ 26 denier 범위에서 다양한 직경 값을 보였으며(Figure 3a), 380°C에서는 8~62 denier 수준으로 더 넓은 범위에서 직경 값이 측정되었다(Figure 3b). 특히 360°C에서 권취한 섬유의 SEM 단면 사진을 보면 섬유가 거의 일정한 반면, 380°C에서는 섬유의 직경 차이가 확연하게 관찰할 수 있었다. 이는 방사 공정 조건의 온도가 380°C보다 360°C에서 더 균일한 섬유를 제조할 수 있는 공정 조건임을 확인할 수 있었다.

PEI 섬유는 낮은 권취속도에서는 방사온도에 따라 큰 차이를 보이고, 2,500 m/min 이상의 속도에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 500~2,500 m/min 사이에서는 방사 공정 변화에 따른 직경 차이가 약 3배 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Figure 3 c와 d를 통해서 PEI 섬유의 섬도는 400°C에서 13~59 denier, 420°C에서 13~101 denier 범위로 관찰되었다. 이러한 결과는 PES와 비슷한 경향성을 나타냈으며, 400°C에서 균일한 섬유를 제조할 수 있는 조건임을 확인하였다.

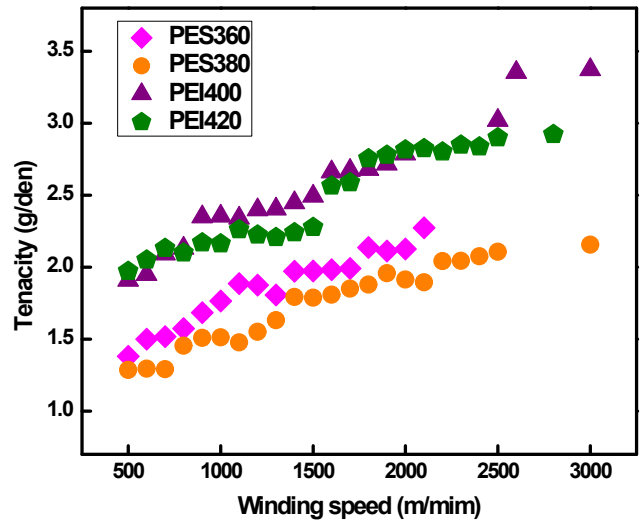


Figure 4. Mechanical strengths of PES and PEI based artificial hair.

3.3 PES와 PEI 가발사의 권취속도에 따른 강도

인장강도 실험은 시료의 양쪽 끝에서 시료가 절단될 때까지 당기는 힘으로 힘을 증가시키면서 인장시켜 인장 길이와 절단 하는데 필요한 힘을 측정하는 방법이다. PES와 PEI 가발사의 권취 속도에 따른 섬도와 인장강도의 관계를 확인하기 위해 인장강도를 측정하였다(Figure 4). 그 결과 PES360은 1.4 - 2.2 g/den, PES380은 1.3 - 3.4 g/den, PEI400은 1.9 - 2.9 g/den,

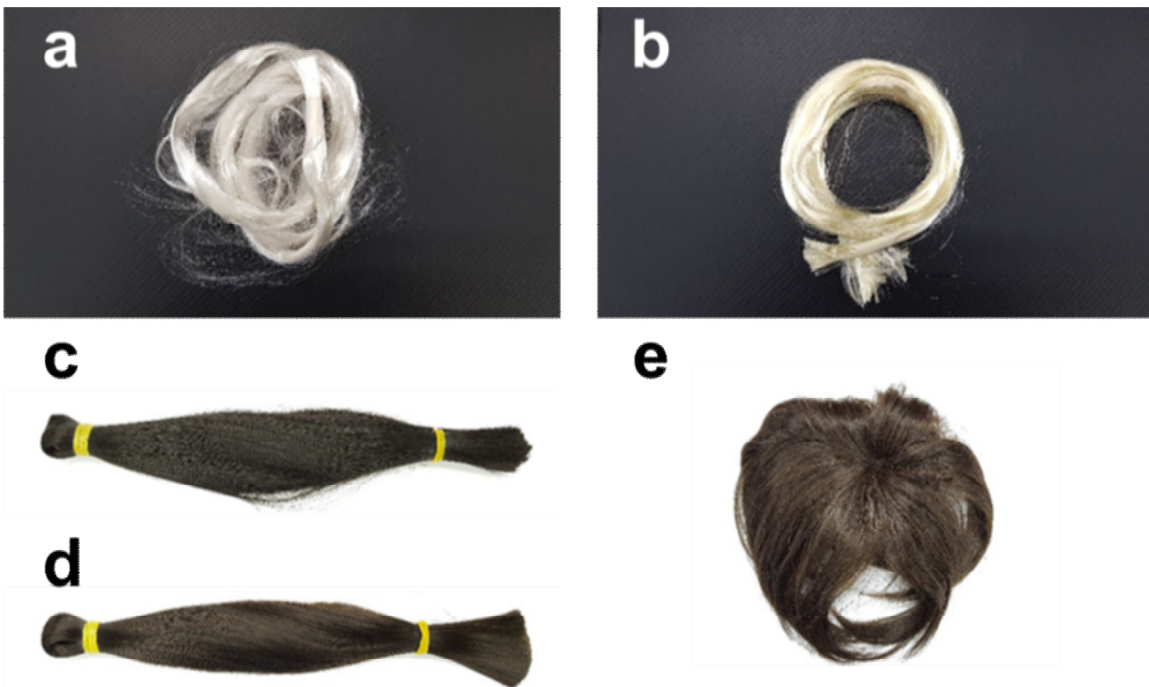


Figure 5. Artificial hair; a) PES, b) PEI, c) PVC/Br, d) PET/Br and e) PET/P.

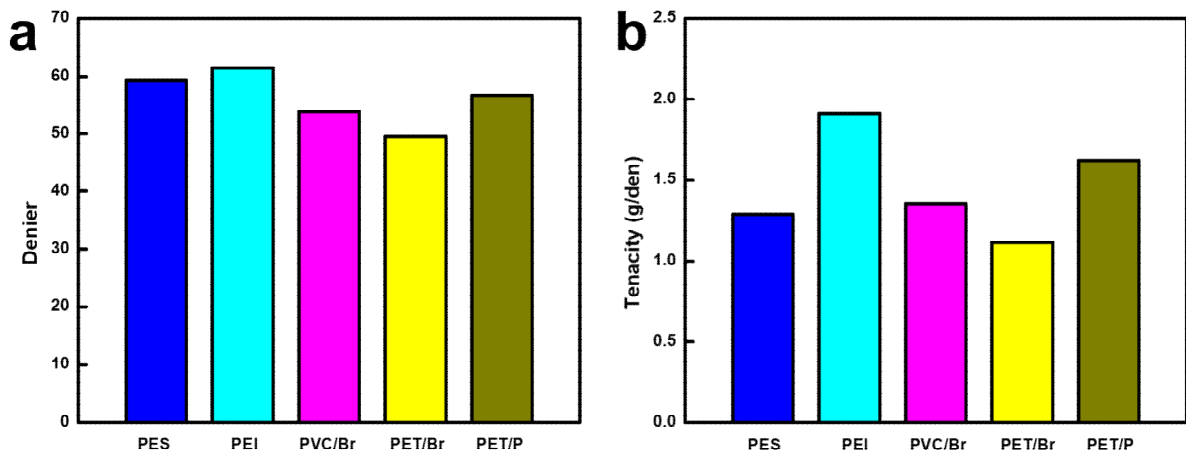


Figure 6. (a) Diameter and (b) mechanical properties of artificial hair.

PEI420은 2.0 - 2.3 g/den의 범위에서 인장강도 값을 나타내는 것을 확인하였다. 이것은 권취속도가 빨라질수록 가발사의 점도가 가늘어지고, 굵기가 가는 가발사가 인장강도가 높게 나타났으며, Figure 2에서 나타난 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

PES와 PEI 섬유를 가발사로 응용하기에 적합한지 판단하기 위해 본 실험에서 제조된 PES와 PEI 가발사를 현재 상용화되고 있는 난연 가발사 3종(PVC/Br, PET/Br, PET/P)의 난연성 및 내열성, 용융드립성을 비교 분석을 실시하였고, 가발사의 직경과 강도 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 가발사의 사진은 Figure 5에 나타내었다.

PES와 PEI 가발사의 점도를 확인하기 위해 SEM 분석을 진행하였고, 가발사 10 가닥을 측정하여 평균값을 식(1)에 의해 denier로 계산하였다. 섬유의 직경을 분석한 결과 본 연구에서 제조한 PES 가발사는 59.3 denier, PEI 가발사는 61.5 denier를 나타내었고, 상용가발사인 PVC/Br 가발사는 53.8 denier,

PET/Br 가발사는 49.6 denier, PET/P 가발사는 56.7 denier를 나타내었다(Figure 6a).

모발의 점도는 인종별로 유럽은 25 - 45 denier, 인도는 45 - 50 denier, 중국은 55 - 60 denier, 한국과 일본은 50 - 55 denier 범위의 모발 두께를 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 본 연구를 통해 개발된 PES와 PEI 가발사의 경우 49 - 62 denier 범위의 점도를 나타내었고, 방사공정 및 권취속도 제어에 따라 다양한 직경을 갖는 섬유를 제조할 수 있기 때문에 대륙별 가발 제조에 용이할 것으로 판단된다. 또한 섬유별 강도는 PES 가발사가 1.3 g/den, PEI 가발사가 1.9 g/den의 강도를 나타내었다. 이 값은 상용 가발사인 PVC/Br(1.4 g/den), PET/Br(1.1 g/den), PET/P(1.6 g/den)와 유사하거나 혹은 더 우수한 강도를 나타내는 것을 확인할 수 있다(Figure 6b). 상용가발사와 유사한 점도 및 강도인 PES와 PEI 가발사는 난연 가발사 시장에 난연제를 첨가하지 않는 난연 가발사로 대체 가능할 것으로 사료된다.

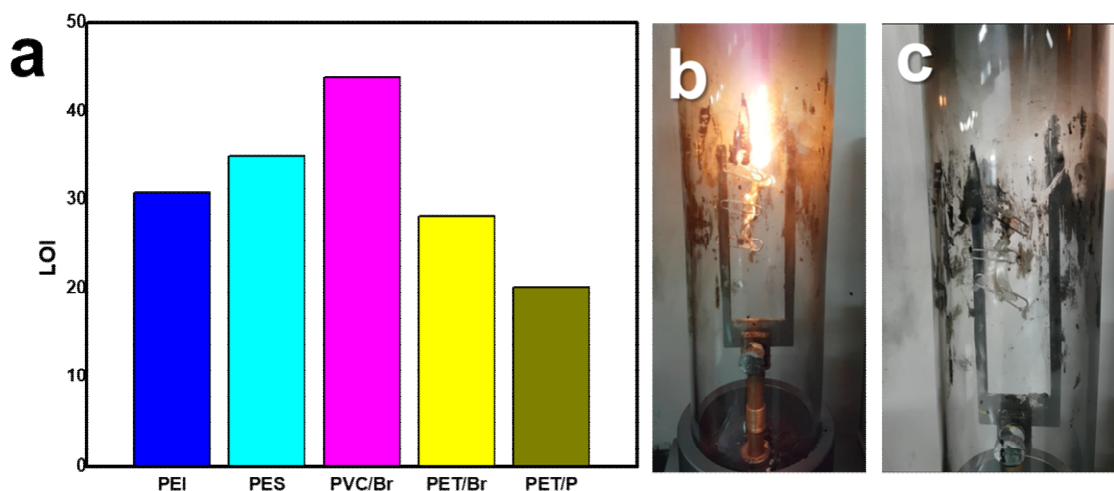


Figure 7. (a) LOI of PES, PEI and commercial artificial hair, (b) LOI test process and (c) after LOI test.

3.4 PES와 PEI 가발사의 난연성

LOI 지수는 난연성을 평가하기 위한 지표의 하나로 산소와 질소를 혼합한 기류 중에서 점화된 시료가 계속적으로 연소하는데 필요한 산소의 최저농도(용량%)로서 한계 산소 지수로 한다¹⁶⁾. 이 값이 21%보다 커질수록 공기 중에서 연소되기 어렵다는 것을 나타내고, 28% 이상이면 난연성이 우수한 것으로 판단된다. 난연성 특성을 확인하기 위해 LOI 측정을 진행하였고, 그 결과 Figure 7에 나타내었다.

시료에 불을 붙이기 위해서 필요한 대기중의 최소 산소함량이 PES 가발사는 35.1%, PEI 가발사는 30.7%의 값을 나타내었고, PVC/Br을 제외한 상용 가발사 2종과 비교하여 더욱 우수한 LOI 값을 나타내는 것을 확인하였다. 이것은 PES와 PEI 가발사는 난연제를 포함하지 않았지만 난연제인 브롬, 인이 포함된 PET 기반 상용 가발사보다 우수한 난연성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 PES 가발사는 산소 및 질소유량 조절 밸브를 열고 연소원통 내에 약 30초간 가스를 방출한 후 시험편의 상단상 점화(Figure 7b) 후 연소시간 3분을 초과했을 때 LOI 테스트 후 용융/용착 없이 처음의 상태를 잘 유지하는 것을 확인할 수 있었다(Figure 7c).

이 결과로 보아 PES와 PEI 가발사는 난연제를 첨가하지 않고도 난연성이 매우 우수함을 확인할 수 있었고, 난연제를 첨가하지 않기 때문에 공정이 간단하고, 친환경적인 장점도 지니고 있으며, 난연 가발사 시장에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

PES와 PEI 섬유 내열성을 테스트하기 위해 230°C로 가열한 헤어아이언 제품 사이에 각 시편을 끼운 후, 약 10초간 가열하여 수축 및 용착에 의한 섬유 변형 상태를 확인하였다. PES와 PEI 가발사는 헤어아이언 제품으로 가열 후에도 전혀 변형이 없었고, PVC/Br 가발사의 경우 수축과 용착이 발생하였고, 완전히 녹는 현상이 발생하였다. PET/Br 가발사는 경미한 수축 변형이 있었으나 외관을 손상시키지 않는 수준이었고, PET/P 가발사는 경미한 수축 발생과 함께 그을음과 연기가 발생하였다.

내열성 테스트를 통해 PES와 PEI 가발사가 상용 가발사보다 우수한 내열성을 지니고 있는 것을 Table 3에 확인하였다. 또

한 용융드립성을 확인하기 위해 섬유 다발을 수직으로 늘어뜨린 다음 30 mm 불꽃을 접근하여 100 mm를 연소시켰을 때, 드립 횟수를 측정하였다. PES, PEI 가발사는 드립수 0으로 수축되며, 불꽃 제거시 바로 불이 꺼지는 현상이 지속되었고, PVC/Br 가발사는 드립수 0에 녹으면서 수축되는 현상이 발생되었다. 반면 PET/Br은 드립수 6으로 불이 붙고 연소되었으며, PET/P는 드립수 4에 불이 붙는 현상이 발생되었다. PES, PEI 가발사는 PET 기반의 난연 가발사와 비교하여 우수한 용융드립성을 나타내는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 슈퍼엔지니어링 플라스틱인 PES와 PEI를 용융방사하여 가발사를 제조하였다. PES는 약 411°C, PEI는 약 472°C 부근에서 중량 감소가 시작되었고 고온의 헤어아이론을 사용하기에 적합한 우수한 열 안정성을 지닌 것을 확인하였다. 또한 내열성 테스트 결과 PES와 PEI 가발사는 고온의 헤어아이언 사용에도 수축/용착 등의 변화 없이 매우 안정적인 형태를 유지하였으며 우수한 용융드립성이 나타났다. PES 섬유의 LOI 수치는 35.1%로써 상용가발사인 PET/Br(28.2%)와 PET/P(20.2%)보다 우수한 난연성이 나타났다. 이렇게 제조된 PES와 PEI 가발사는 기존 상용 가발사와 유사한 섬도 및 강도를 지니며 난연제를 첨가하지 않아 공정의 간소화 및 친환경적이라는 장점을 통해 난연가발사 시장에서 대체제로 활용이 가능하다. 뿐만 아니라, 방사공정 및 권취속도 제어에 따라 다양한 직경을 갖는 섬유를 제조할 수 있기 때문에 인종에 따른 인도의 특성을 재현하는데 적합하다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 10070150).

Table 3. Properties of PES, PEI and commercial artificial hair

Sample	Diameter (den)	Tenacity (g/den)	LOI	Melt dripping	Thermal resistance
PES	61.52	1.29	35.10	◎	◎
PEI	59.26	1.97	30.70	◎	◎
PVC/Br	58.82	1.35	43.90	◎	×
PET/Br	49.56	1.12	28.20	×	○
PET/P	56.68	1.62	20.20	△	△

References

1. L. Yang, J. Guo, S. Zhang, and Y. Gong, Preparation and Characterization of Novel Super-artificial Hair Fiber based on Biomass Materials, *International Journal of Biological Macromolecules*, **99**, 166(2017).
2. B. A. Howell and E. A. Ostrander, Frame-retardant Compounds for Polymeric Materials from an Abundantly Available, Renewable Biosource, *Castor Oil, Fire and Materials*, **44**, 242(2020).
3. M. H. Kwon, K. B. Song, Y. R. Kang, S. R. Hwang, S. K. Shin, K. H. Kim, J. S. Park, S. J. Kim, S. Y. Lee, D. H. Kim, and K. Y. Jung, Current Status of Brominated Flame Retardants(BFR) and Polybrominated Dibenzo-p-dioxins and Furans(PBDDs/PBDFs), *Analytical Science and Technology*, **21**, 443(2008).
4. H. C. Kim, D. H. Kim, J. Park, J. C. Lim, and Y. W. Park, Miscibility of Flame Retardant Epoxy Resin with pPoly(ethylene terephthalate), *Fibers and Polymers*, **10**, 594(2009).
5. Y. J. Tao, Y. X. Pan, Z. S. Zhang, and K. C. Mai, Non-isothermal Crystallization, Melting Behaviour and Polymorphism of Polypropylene In-nucleated Polypropylen/recycled Poly(ethylene terephthalate) Blends, *European Polymer Journal*, **44**, 1165(2008).
6. I. S. Kim, H. M. Cho, J. Koh, and J. P. Kim, Low-temperature Carrier Dyeing of Poly(vinyl chloride) Fibers with Disperse Dyes, *Journal of Applied Polymer Science*, **90**, 3896(2003).
7. H. Lee, S. H. Park, J. Y. Lee, Y. Park, H. Jeong, K. H. Jhee, and D. Bang, Flame Retardancy and Thermal Properties of PVC/ATH Composites Prepared by a Modular Intermeshing co-Rotating twin Screw Extruder, *Elastomers and Composites*, **51**, 147(2016).
8. J. C. Kim, S. M. Oh, and C. Y. Kim, US9267221B2(2016).
9. S. A. Park, Y. Jeon, H. Kim, S. H. Shin, S. Choy, D. S. Hwang, J. M. Koo, J. Jegal, S. Y. Hwang, J. Park, and D. X. Oh, Sustainable and Recyclable Super Engineering Thermoplastic from Biorenewable Monomer, *Nature Communications*, **10**, 2601(2019).
10. S. Ryu, H. Oh, and J. Kim, Facile Liquid-exfoliation Process of Boron Nitride Nanosheets for Thermal Conductive Polyphthalamide Composite, *Polymers*, **11**, 1628(2019).
11. K. Kim, J. Lee, S. Ryu, and J. Kim, Laser Direct Structuring and Electroless Plating Applicable Super-engineering Plastic PPS based Thermal Conductive Composite with Particle Surface Modification, *RSC Advances*, **8**, 9933(2018).
12. S. Zhang, S. Yin, C. Rong, P. Huo, Z. Jiang, and G. Wang, Synergistic Effects of Functionalized Graphene and Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes on the Electrical and Mechanical Properties of Poly(ether sulfone) Composites, *European Polymer Journal*, **49**, 3125(2013).
13. I. Echerverria, P. C. Su, S. L. Simon, and D. J. Plazek, Physical Aging of a Polyetherimide: Creep and DSC Measurements, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, **33**, 2457(1995).
14. M. J. Matterson and C. Orr, "Filtration: Principles and Practices", 2nd Ed., Marcel Dekker Inc., New York, p.302, 1987.
15. Korea Standards Association, KS M 3032:2002 Testing Method for Flammability of Polymeric Materials using the Oxygen Index Method, Korea Standards Association, Seoul, 2002.
16. G. Koronis and A. Silva "Green Composites for Automotive Applications", 1st Ed., Woodhead Publishing, Series in Composites Science and Engineering, Cambridge, pp.43-58, 2018.

Authors

최현정 (주)피앤씨랩스 팀장

공다정 한국생산기술연구원 연구원
단국대학교 고분자시스템공학부 석사과정 학생

윤철민 한국생산기술연구원 연구원

여상영 한국생산기술연구원 수석연구원