

전기방사법을 이용한 바이오매스 유래 polyethylene furoate 나노섬유 제조에 관한 연구

최현진¹, 김선희², 김백진², 김상범^{2*}

¹한국생산기술연구원 고온에너지시스템연구실용화그룹

²한국생산기술연구원 그린공정소재연구실용화그룹

Fabrication of Biomass Based Polyethylene Furoate Nanofiber by Electrospinning

Hyun-Jin Choi¹, Sun Hee Kim², Beak-Jin Kim², Sang Bum Kim^{2*}

¹Thermochemical Energy System R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology.

²Green Process and Material R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology.

요약 나노섬유의 경우 넓은 비표면적과 높은 공기투과도 등으로 인해 여러 분야에 폭넓게 활용될 것으로 기대되고 있다. 또한 석유화학 기반 고분자의 경우 가재연수 제한문제와 이산화탄소 배출에 의한 온실가스 유발문제로 인해 바이오매스 유래 고분자로의 패러다임의 전환이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 목질계 셀룰로오스로부터 유래된 플랫폼 화합물 중 퓨란계 유도체인 2,5-furandicarboxylic acid와 ethylene glycol을 이용하여 이를 중합한 바이오매스 유래 PEF(polyethylene furoate)를 제조 및 이를 활용하여 전기방사법을 통해 나노섬유를 제조하고자 하였으며, 또한 전기방사 과정에서 사용된 용매와 고분자 용액의 농도, 전기장의 세기 등의 변수들이 섬유형상에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하고자 하였다. 결론적으로, PEF 15 wt%의 농도로 HFIP를 용매로 제조한 고분자 용액을 이용하여 약 200~700 nm의 나노섬유의 제조가 가능하였으며, 섬유의 직경은 인가된 전기장의 세기가 증가할수록 증가하였다.

Abstract Nanofibers have attracted significant interest in many industrial fields because their high surface area and porosity. In addition, the continued use of petrochemical based polymers has caused the depletion of oil resources and accelerated the greenhouse effect by the emission of carbon dioxide. Therefore, biomass-based polymer has become a very important environmentally friendly alternative. In this study, nanofibers were fabricated by an electrospinning process using biomass based PEF(polyethylene furoate) prepared by the polymerization of 2,5-furandicarboxylic acid and ethylene glycol. Furthermore, the electrospun nanofiber was strongly affected by various parameters, such as the solvent, polymer concentration and electric field. In conclusion, nanofibers with an average fiber diameters of 200 - 700 nm could be prepared at polymer concentration of 15 wt% using HFIP, and their fiber diameter increased with increasing electric field.

Key Words : Biomass, Electrospinning, Nanofiber, Polyethylene Furoate

1. 서론

섬유상 필터는 구조가 간단하고 높은 경제성으로 인하여 클린룸, 입자 샘플링, 산업용 집진 등에 다양하게 적

용되고 있다[1]. 이러한 섬유상 필터의 일반적인 집진 메커니즘으로는 확산, 차단, 관성력, 중력침강 등이 있으며 섬유경이 작을수록 더욱 크게 작용하여 높은 집진효율을 확보할 수 있다[2]. 따라서 섬유경을 보다 작게 만들기 위

본 논문은 한국생산기술연구원 기관고유임무형사업으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sang Bum Kim(Korea Institute of Industrial Technology)

Tel: +82-41-589-8673 email: sbkim@kitech.re.kr

Received February 5, 2014

Revised (1st March 11, 2014, 2nd March 13, 2014)

Accepted June 12, 2014

한 많은 연구가 진행 중이며, 대표적으로는 나노섬유를 들 수 있다. 나노섬유는 넓은 비표면적과 높은 공기투과도 등의 장점으로 인해 필터뿐만 아니라 조직공학, 센서, 촉매의 지지체로써 폭넓게 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다[3-5].

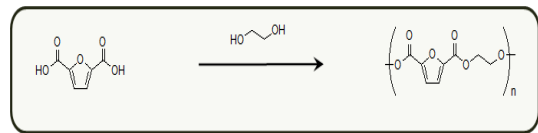
나노섬유를 제조하는 다양한 방법 중 전기방사법은 그 효율성과 간편성 그리고 다양한 고분자의 적용이 가능하므로 가장 널리 유용하게 사용되고 있으며[6,7], 이를 통해 그 동안 PU[8], PEO[9], PVA[10] 등의 다양한 고분자들을 이용한 나노섬유 제조의 관한 연구가 꾸준히 보고되어 왔다. 그러나 이러한 석유화학 기반 고분자의 지속적인 사용은 원료인 석유의 가채연수 제한문제와 이산화탄소 배출에 의한 온실가스 유발문제 등으로 기존 석유화학기반 고분자산업으로부터 바이오매스 유래 고분자로의 패러다임의 전환이 절실히 요구되고 있는 실정이다 [11]. 실제로 바이오 고분자의 경우 기존 석유기반 고분자에 비해 제조 및 사용과정에서 이산화탄소 발생량이 50% 이하로 감소된다는 결과가 보고되었으며 또한 기존 석유화학 기반 고분자를 이용하여 제조한 필터의 경우 사용 후 폐기 시 문제점이 발생하기 때문에 필터 제조에 있어서 생분해성 소재를 이용한 필터의 개발이야말로 녹색성장 및 자원순환적인 관점에서 바람직하다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 목질계 셀룰로오스로부터 유래되는 플랫폼 화합물 중 퓨란계 유도체인 2,5-furandicarboxylic acid와 ethylene glycol를 이용, 이를 중합한 바이오매스 유래 PEF(Polyethylene furoate)를 활용하여 이를 전기방사하여 나노섬유를 제조하고자 하였다. 이는 석유 유래 물질인 TPA(Terephthalic acid)로 중합한 고분자인 PET(Polyethylene terephthalate)와 구조적으로 유사하며 열적거동이 비슷하고 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g)는 PET보다 높다는 장점이 있다[12,13]. 따라서 본 연구에서는 이러한 PEF를 전기방사하여 나노섬유필터의 제조가능성을 타진하고자 하였다. 또한 전기방사 과정에서 사용된 용매와 고분자의 농도, 전기장의 세기 등이 섬유형상에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1 PEF의 제조

그림과 같은 반응경로를 통해 바이오 폴리에스터인 PEF를 제조하였다. 또한 중합에 사용한 단량체로는 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) (Alfa-aesar) 10 g(0.064 mol)과 ethylene glycol(Sigma aldrich) 7.7 ml(0.128 mol)을 혼합한 후 반응속도의 활성화 및 부산물 생성을 제어하기 위하여 중합 촉매인 LiOH를 사용하였으며, 두 단계로 나눠 중합을 진행하였다. 에스테르화 단계에서는 180 °C에서 질소를 흘려주며 2.5시간 교반하였다. 축합단계에서는 240 °C까지 승온 시킨 후, 진공펌프를 이용하여 -0.1 MPa로 감압한 후 다시 2.5시간 진행하였다.



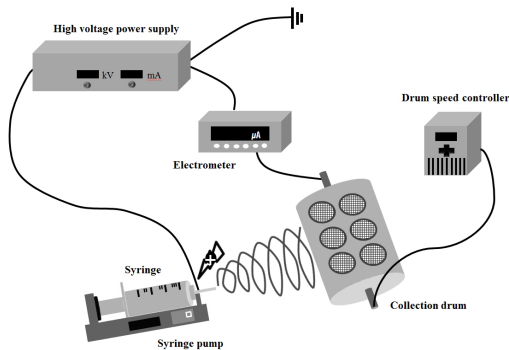
[Fig. 1] Polymerization scheme of bio-polyester using FDCA and EG as monomer.

교반 후 온도를 상온까지 내려준 후 얻어진 생성물을 1,1,2,2-tetrachloroethane (TCE)와 폐놀 1:1로 혼합된 용액 100 ml에 녹여 methanol 재침전을 거친 후 이를 -0.1 MPa의 압력에서 48시간 건조시켜 PEF를 확보하였다. 고분자의 전체 구조를 확인하기 위해 $^1\text{H-NMR}$ (Nuclear Magnetic Resonance) (500Hz, Bruker) 분석을 이용하여 확보한 생성물의 구조를 측정하였으며, 측정 시 사용된 용매는 trifluoroacetic acid-d(CF_3COOD)이다. DSC (Differential Scanning Calorimetry), (PDSC8000, Pelkin-Elmer)분석을 통해 PEF의 유리전이온도와 용융온도(Melting temperature, T_m)를 관찰하였다. 또한 고분자의 수평균분자량과 무게평균분자량은 GPC(High Temperature Gel Permeation Chromatography), (PL-GPC 220, PolyLab. Inc)를 통해 분석하였다. 컬럼은 2XPLgel 10 μm MIXED-B, 300X7.5mm를 사용하였으며 Standard는 polystyrene을, 용매는 m-cresol을 사용하였다.

2.2 전기방사 장치 및 실험방법

본 연구에서는 전기방사법을 통해 바이오매스 유래

PEF를 이용하여 나노섬유를 제조하고자 하였으며 사용한 PEF 용액은 PEF를 m-cresol(Sigma aldrich)과 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol (HFIP) (Sigma aldrich)에 10, 15, 20 wt%의 농도로 녹여 제조하였다. 나노섬유 제조에 사용된 전기방사 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 장치의 기본구성으로는 고분자용액을 일정한 속도로 공급하는 용액 공급부, 고전압을 용액 상에 인가하게 되는 전압 인가부, 방사된 나노섬유를 포집하는 드럼형태의 집지된 콜렉터로 이루어진 포집부가 주요 구성이다. 용매에 녹인 PEF용액을 5 ml 용량의 실린지에 주입하여 실린지 펌프(PHD 2000, Havard Apparatus Inc.)를 통해 0.05 ml/min의 속도로 일정하게 공급하였으며, 이때 사용된 노즐의 직경은 440 μm , 노즐과 콜렉터의 거리는 7 cm로 고정하여 실험을 수행하였다. 콜렉터의 회전수는 90 rpm으로 유지하였으며, 콜렉터 표면에 스테인레스 필름을 부착하여 방사된 섬유가 부착되도록 하였다. 전기장의 세기는 high voltage supply(Korea switching)를 사용하여 1.07, 1.43 kV/cm로 인가하였으며, 방전용 양전극을 노즐에 연결하고 콜렉터는 접지하였다. 안정적인 실험을 위해 모든 실험은 챔버 내에서 수행되었으며, 이때 상대 습도는 50% 이하를 유지하였다. 섬유의 포집이 끝난 후, 스테인레스 필름은 콜렉터에서 분리하여 항습 캐비닛에서 24시간 건조하여 섬유상에 남아있는 용매가 완전히 증발될 수 있도록 하였다. 제조된 섬유의 특성은 FE-SEM(JSM-6701F, JEOL LTD.)를 통해 관찰하였으며, 섬유의 직경 또한 FE-SEM 상의 이미지를 통하여 200개 이상의 섬유를 측정하여 그 값을 확보하였다.

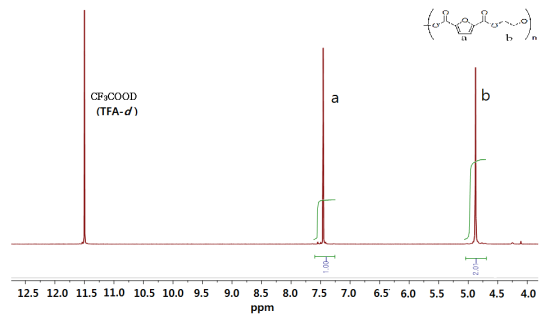


[Fig. 2] Schematic diagram of electrospinning equipment [8].

3. 결과

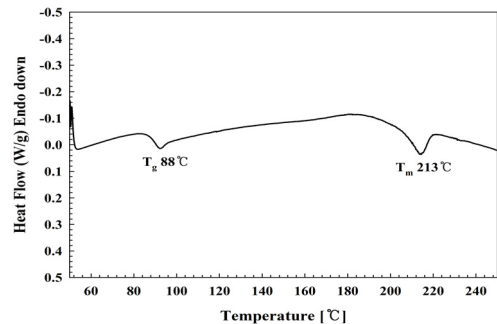
3.1 PEF의 특성분석

제조된 PEF의 $^1\text{H-NMR}$ 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다. 7.5 ppm에서는 furan ring에서의 프로톤(2H)을 또한 4.8 ppm에서는 ethylene unit에서의 프로톤 (4H) 을 확인하였으며 이는 얻어진 생성물의 구조가 poly(ethylene furanoate)임을 의미한다[14].



[Fig. 3] $^1\text{H-NMR}$ analysis of fabricated PEF.

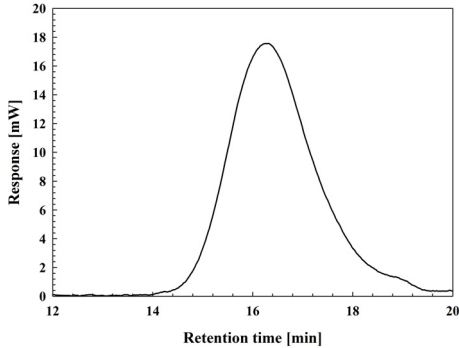
고분자의 유리전이온도 및 용융온도 등과 같은 열특성 분석을 위해 시차주사 열량계(DSC)를 이용하였으며, Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 분석을 위해 질소분위기 하에서 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서 250 $^{\circ}\text{C}$ 까지 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 승온 하였으며, 첫 번째 승온 후 100 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 30 $^{\circ}\text{C}$ 까지 급냉 후 다시 승온단계를 반복하였다. 분석결과 제조된 PEF의 유리전이온도는 88 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 형성되었으며 용융온도는 213 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 형성됨을 확인할 수 있었다.



[Fig. 4] DSC thermogram of PEF.

또한 중합이 완료된 바이오 폴리에스터의 수평균분자량 및 무게평균 분자량을 측정하기 위하여, 겔침투 크로마토그래피(GPC) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig.

5에 나타내었다. 이 때, 시료의 농도는 2 mg/mL로 준비하였으며, 1.0 mL/min 유속으로 100 °C조건에서 분석이 이루어졌다.



[Fig. 5] GPC results of bio-polyester

상기 GPC 결과로부터 무게 평균 분자량은 41,500g/mol, 수 평균 분자량은 22,800 g/mol, 분자량 분포는 1.8을 확인하였다.

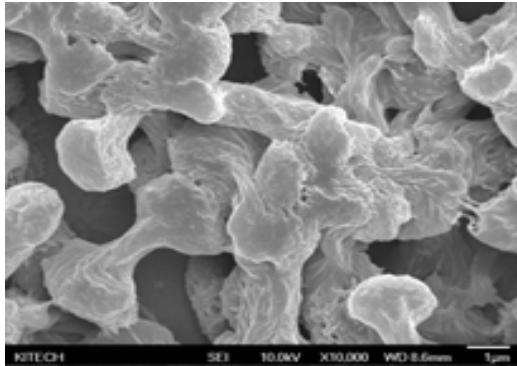
3.2 PEF를 이용한 나노섬유의 제조

전기방사법을 이용해 제조된 나노섬유는 농도, 점도 및 용매와 같은 고분자 용액의 특성, 인가전압과 공급유속 등과 같은 운전조건, 습도와 온도 등의 주변 환경과 같이 다양한 요소들이 프로세스의 변수로서 작용하여 영향을 받게 되며, 이에 따라 다양한 형태학적 특성을 갖게 된다. 많은 연구자들이 이러한 운전변수(고분자 용액의 농도, 전기장의 세기 등)가 나노섬유 형상에 미치는 영향에 대해 고찰하였으며[3,10], 본 연구에서도 이를 기반으로 언급된 변수들이 PEF 용액을 이용한 나노섬유의 제조 시 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다. 또한 전기방사법을 이용한 나노섬유 제조에 있어 사용된 용매는 제조과정에서의 방적성에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 용매의 휘발성, 끓는점, 증기압 및 안정성 등이 고려된 적절한 용매의 선택은 매우 중요하다고 할 수 있으며, 무엇보다도 사용된 고분자가 용매에 완전히 용해되어야 한다[5]. 따라서 본 연구에서는 제조된 PEF의 완전한 용해가 가능한 적정 용매의 선정을 위해 전기방사에 쓰이는 다양한 고분자 용매(DMF, DMSO, acetone, ethanol, chloroform, m-cresol, HFIP)들을 이용하여 PEF의 용해 여부를 우선적으로 관찰하였으며, 그 결과 m-cresol과 HFIP를 선정하였다.

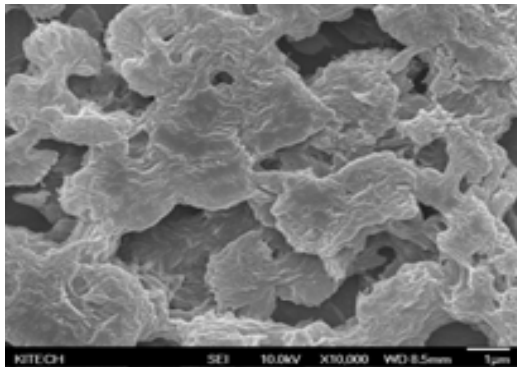
Fig. 6은 LiOH 중합 촉매를 사용하여 얻어진 PEF (Mw: 41,500 g/mol, Mn: 22,800 g/mol)를 10, 20 wt%의 농도로 m-cresol에 녹여 제조한 용액을 전기장의 세기 1.07, 1.43 kV/cm의 조건에서 전기방사한 결과를 FE-SEM을 이용하여 관찰한 결과이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯, 콜렉터 표면에 섬유가 형성되지 못하고 고분자간의 응집현상이 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 용매의 미휘발로 인한 섬유의 연신이 안정적으로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 전기방사 과정에 있어 사용된 용매의 급속한 휘발에 의한 고분자의 상 분리 및 섬유의 연신은 섬유의 미세화에 영향을 미치며, 나노섬유 형성에 매우 중요한 역할을 하게 된다[5]. 그러나 용매로 사용된 m-cresol(bp: 202.2 °C, V_p : 0.013 kPa at 20°C)의 경우 상대적으로 낮은 증기압과 높은 끓는점으로 인해 전기방사 과정에서 용매의 휘발이 원활이 이루어지지 않았으며, 이로 인한 콜렉터 상에서의 고분자들의 응집현상의 발생으로 인해 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 사료된다. 또한, 다양한 농도의 PEF 용액을 사용하여, 전기장의 세기를 변화시켜주어 실험을 수행하였으나, 섬유는 형성되지 않았으며 실험과정에서 방사형태 및 섬유의 포집 또한 안정적이지 못하였다.

Fig. 6의 결과를 통해 m-cresol을 용매로 이용하였을 시 나노섬유의 제조가 용이하지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 m-cresol 대신하여 HFIP(bp: 58.2 °C, V_p : 16 kPa at 20°C)를 이용하여 10, 15, 20 wt%의 농도로 PEF 용액을 제조하였으며, 이때 전기장의 세기는 앞 절의 조건과 동일하게 1.07 kv/cm로 고정하여 실험을 수행하였다. Fig. 7은 이를 전기방사한 결과를 FE-SEM을 통하여 관찰한 결과이다. Fig. 7(a)의 10 wt% 용액의 경우 상대적으로 낮은 농도에 의한 낮은 점도로 인하여 나노섬유가 형성되지 못하고 비드만이 형성된 것을 알 수 있다[8]. Fig 7(b)는 15 wt% 용액을 전기방사한 결과로써 약 200~700 nm의 나노섬유가 안정적인 형태로 형성된 것을 관찰할 수 있으며 제조된 섬유직경분포를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 반면 Fig. 7(c)의 20 wt% 용액의 경우 고농도로 인하여 전기방사 과정에서 섬유의 연신이 원활이 이루어지지 않아 고분자의 형태가 섬유의 형태가 아닌 불규칙한 형태로 콜렉터 상에 포집된 것을 확인할 수 있다. Doshi 등 [15]은 고분자 용액의 농도가 너무 높을 경우, 높은 점도로 인한 노즐에서의 용매의 증발로 인하여 섬유형성이 어려움을 보고한바 있다. 따라서 본 연

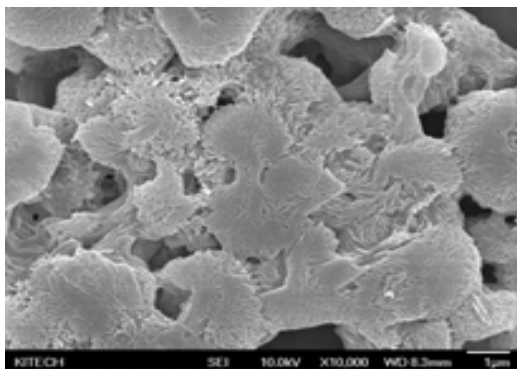
구에서는 나노섬유제조를 위한 PEF 용액의 적정 농도를 15 wt%로 선정하였으며, 이를 이용하여 인가된 전기장의 세기가 섬유형상에 미치는 영향을 고찰하였다.



(a) PEF 10 wt%/m-cresol, 1.07 kV/cm

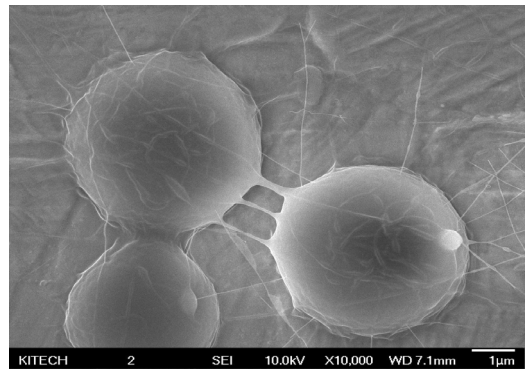


(b) PEF 10wt%/m-cresol, 1.43 kV/cm

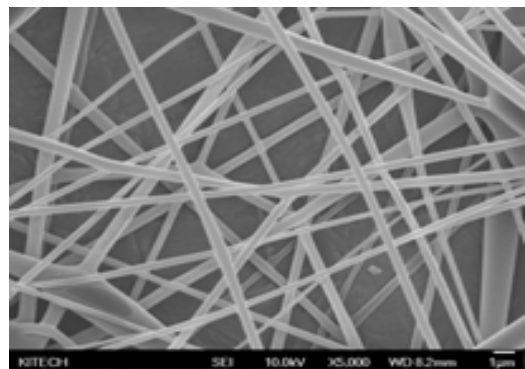


(c) PEF 20 wt%/m-cresol, 1.07 kV/cm

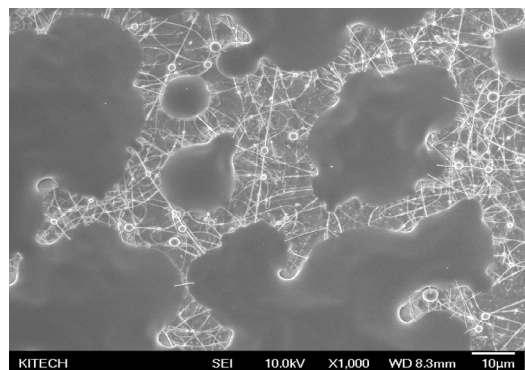
[Fig. 6] FE-SEM images of electrospun PEF dissolved in m-cresol.



(a) PEF 10 wt%/HFIP, 1.07 kV/cm



(b) PEF 15 wt%/HFIP, 1.07 kV/cm

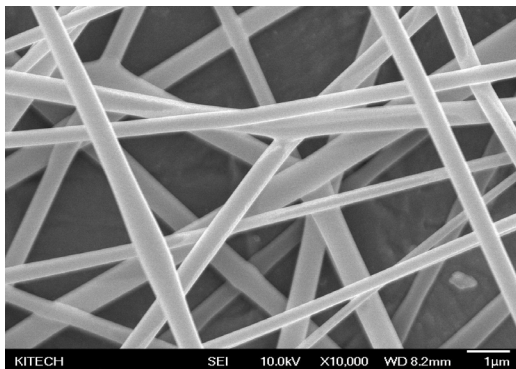


(c) PEF 20 wt%/HFIP, 1.07 kV/cm

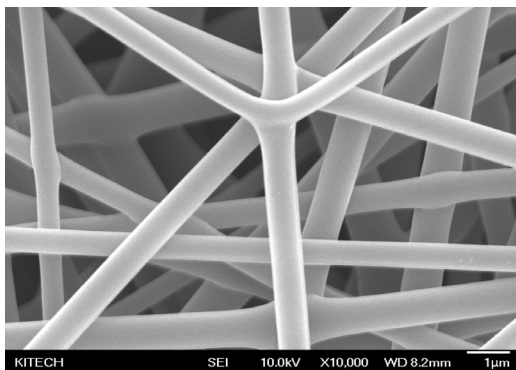
[Fig. 7] FE-SEM images of electrospun PEF nanofibers with various concentration.

전기장의 세기가 나노섬유 형성에 미치는 영향에 관하여 현재까지 많은 연구자들이 다양한 결과를 보고하고 있다. Bhardwaj와 Kundu[5]는 전기장의 세기의 증가에 따른 정전기적 반발력과 급속한 용매의 증발에 의해 전기장의 세기가 증가할수록 형성된 섬유의 직경은 감소한다고 보고하였으며 반면, Zhang [16] 등은 높은 전기장

하에서 실린지로부터 토출되는 고분자용액의 공급유량 증가로 인해 섬유직경이 증가한다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 전기장의 세기가 PEF 나노섬유 제조에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하고자 하였다. HFIP 용매에 녹인 PEF 15 wt% 용액을 0.71, 1.07, 1.43 kV/cm의 전기장의 세기에서 전기방사하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 0.71 kV/cm의 경우 전기장의 세기가 용액의 표면장력을 극복하지 못해 테일러콘의 형성 및 섬유의 방사가 이루어지지 않았다[8]. 반면 1.07, 1.43 kV/cm의 경우 안정적인 방사 및 섬유의 형성이 이루어졌으며, 전기장의 세기가 증가할수록 섬유의 직경분포 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 형성된 섬유의 섬유직경 분포를 각각 Fig. 9에 나타내었다. 이러한 섬유직경의 증가현상은 높은 전기장에서의 고분자 용액의 높은 하전율(charging ratio)에 의한 것으로 판단되며 많은 기존 연구들이 이와 같은 결과를 보고하고 있다[3,8,16].

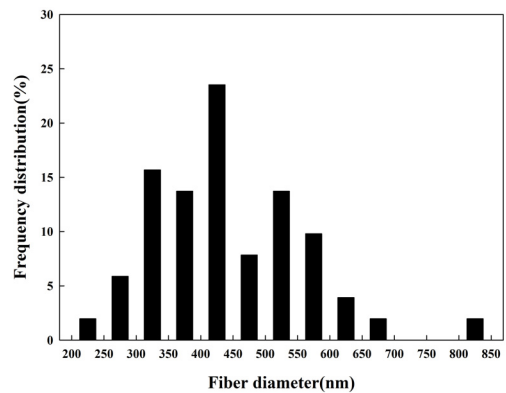


(a) PEF 15 wt%/HFIP, 1.07 kV/cm

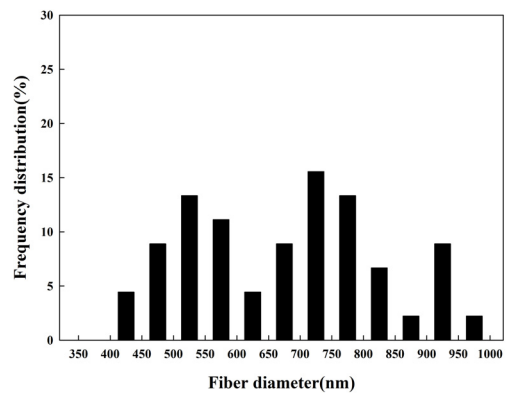


(b) PEF 15 wt%/HFIP, 1.43 kV/cm

[Fig. 8] FE-SEM images of electrospun PEF nanofibers with various electric field.



(a) PEF 15 wt%/HFIP, 1.07 kV/cm



(b) PEF 15 wt%/HFIP, 1.43 kV/cm

[Fig. 9] Fiber diameter distribution of electrospun nanofiber.

4. 결론

본 연구에서는 목질계 셀룰로오즈로부터 유래되는 플랫폼 화합물 중 퓨란계 유도체인 2,5-furandicarboxylic acid와 ethylene glycol 단량체를 이용하여 40,000g/mol 이상의 무게 평균 분자량을 확보하였으며, 이를 전기방사하여 나노섬유의 제조가능성을 타진하였다. 또한 전기방사 과정에서 용매의 종류, 용액의 농도, 전기장의 세기 등이 섬유형상에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과 m-cresol을 이용하여 제조한 PEF 용액의 경우, 용매의 미휘발로 인한 섬유 연신의 미발생 및 콜렉터상의 응집현상으로 안정적인 섬유의 방사 및 나노섬유의 제조가 이루어지지 않았으며, HFIP용액을 이용하였을 시 안정적으로 나노섬유를 제조할 수 있었다. 또한 15 wt% 농도의 PEF 용액을 이용하였을 때 우수한 형태의 섬유를 확

보할 수 있었으며 전기장의 세기가 증가할수록 섬유직경은 증가하는 경향을 나타내었다. 추후 이를 활용한 나노 섬유필터의 제조 및 필터특성에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되며, 화학적 기반 고분자를 이용한 나노 섬유 필터와의 생분해도 비교 관련 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] W. Sambaer, M. Zatloukal, D. Kimmer, "3D modeling of filtration process via polyurethane nanofiber based nonwoven filters prepared by electrospinning process", *Chem Eng. Sci.* vol. 66, pp. 613-623, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2010.10.035>
- [2] Hinds, WC. *Aerosol Technology*. p.200-203. John Wiley&Sons, Inc, 1999.
- [3] M. M. Demir, I. Yilgor, E. Yilgor, B. Erman, "Electrospinning of polyurethane fibers", *Polymer*, vol. 44, pp. 3303-3309, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00136-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00136-2)
- [4] J. Wang, S. -C. Kim, D. Y. H. Pui, "Figure of merit of composite filters with micrometer and nanometer fibers", *Aerosol Sci. Technol.* vol 42, pp. 722-728, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820802249133>
- [5] N. Bhardwaj, S. C. Kundu, "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique", *Biotechnol.*, vol. 28, pp. 325-347, 2010.
- [6] P. Gibson, H. Schreuder-Gibson, D. Rivin, "Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers", *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 187-188, pp. 469-481, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00616-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00616-1)
- [7] K. M. Yun, C. J. Hogan, Y. Matsubayashi, M. Kawabe, F. Iskandar, K. Okuyama, "Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers", *Chem Eng. Sci.*, vol. 62, pp. 4751-4759, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2007.06.007>
- [8] H. -J. Choi, S. B. Kim, S. H. Kim, M. -H. Lee, "Preparation of electrospun polyurethane filter media and their collection mechanisms for ultrafine particles", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 64, pp. 322-329, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2013.858652>
- [9] J. M. Deitzel, J. D. Kleinmeyer, J. K. Hirvonen, N. C. Beck. Tan, "Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers", *Polymer*, vol. 42, pp. 8163-8170, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00336-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00336-6)
- [10] J. S. Lee, K. H. Choi, H. D. Ghim, S. S. Kim, D. H. Chun, H. Y. Kim, W. S. Lyoo, "Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol)(PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 93, pp. 1638-1646, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/app.20602>
- [11] W. -K. Lee, "Carbon Dioxide-reducible Biodegradable Polymers", *Clean Technol.*, vol. 17, pp. 191-200, 2011
- [12] Gomes M., Gandini A., Silvestre A.J.D., Reis B., "Synthesis and Characterization of Poly(2,5-furan dicarboxylate)s Based on a Variety of Diols", *J. Polym. Sci. Pol. Chem.*, vol. 49, pp.3759-3768, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pola.24812>
- [13] Jiang M., Liu Q., Zhang Q., Ye C., Zhou G., "A Series of Furan-Aromatic Polyesters Synthesized via Direct Esterification Method Based on Renewable Resources", *J. Polym. Sci. Pol. Chem.*, vol. 50, pp.1026-1036, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pola.25859>
- [14] A. F. Sousa, M. Matos, C. S. R. Freire, A. J. D. Silvestre, J. F. J. Coelho, "New copolyester derived from terephthalic and 2,5-furandicarboxylic acids: A step forward in the development of biobased polyesters" *Polymer* vol. 54, pp. 513-519, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2012.11.081>
- [15] J. Doshi, D. H. Reneker, "Electrospinning process and application of electrospun fibers" *J. Electrostat.* vol. 35, pp. 151-160, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8)
- [16] C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, J. Sheng, "Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats", *Eur. Polym. J.* vol. 41, pp. 423-432, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.027>

최 현 진(Hyun-Jin Choi)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경기대학교 환경 공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 경기대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 화공생명공학과 (박사 수료)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>
대기환경, 에어로졸

김 선 희(SunHee Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충북대학교 화학과 (이학사)
- 2011년 2월 : 충북대학교 화학과 (이학석사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

바이오매스, 고분자합성

김 백 진(Beak-jin Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 홍익대학교 화학공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 연세대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 서울대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1992년 7월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

바이오매스, 고분자합성

김 상 범(Sang Bum Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

대기환경, 에어로졸