

# 초고속 용액 원심방사를 이용한 폴리비닐알코올/폴리프로필렌 나노필터 제조

## Preparation of Poly(vinyl alcohol)/polypropylene Nano-filter by High Speed Centrifugal Solution Spinning

### \*Corresponding author

Jeong Hyun Yeum  
(jhyeum@knu.ac.kr)

양성백, 이정언, 박재민, 정재훈<sup>1</sup>, 김태영, 김기영<sup>2</sup>, 이상준<sup>2</sup>, 염정현\*  
경북대학교 바이오섬유소재학과, <sup>1</sup>경북대학교 탄소복합섬유소재학과, <sup>2</sup>㈜아이제이에스

Seong Baek Yang, Jungeon Lee, Jae Min Park, Jae Hoon Jung<sup>1</sup>, Tae Young Kim, Ki Young Kim<sup>2</sup>, Sang Jun Lee<sup>2</sup>, and Jeong Hyun Yeum\*

Department of Biofibers and Biomaterials Science, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>1</sup>Department of Carbon Hybrid Fiber Science, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>2</sup>IJS Co., Ltd, Gyeongsan, Korea

Received\_February 18, 2022

Revised\_March 16, 2022

Accepted\_March 24, 2022

### Textile Coloration and Finishing

TCF 34-1/2022-03/20-26

© 2022 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Abstract** Centrifugal spinning is an emerging technique for fabricating micro-to-nano-fibers in recent years. To obtain fibers with the desired size and morphology, it is necessary to configure and optimize the parameters used in centrifugal spinning. In this study, it was controlled by changing the solution's concentration (7.5, 10, and 12.5 wt.%) and disk's rotational velocity (6,000, 8,000, and 10,000 rpm) to prepare centrifugal spun nano-filter. The morphological property, air permeability, and dust collection efficiency of the PVA/PP bi-layer nanoweb prepared by centrifugal spun PVA on the PP micron nonwoven substrate are studied using a field emission scanning electron microscope, an air permeability tester, and a filter tester equipment, and the analysis results indicate that it is suitable as a nano-filter when the concentration of PVA solution is 10 wt.% and the rotational velocity of the disk is 8,000 rpm. The resultant reduced diameter and uniform fibers also proved that an excellent dust collection efficiency filter could be made.

**Keywords** high speed centrifugal solution spinning, poly(vinyl alcohol), multi-layered filter, dust collection efficiency, nanofiber

## 1. 서 론

환경오염에 의한 미세먼지 및 각종 대기오염 물질이 증가함으로써 이를 효과적으로 여과할 수 있는 필터에 대한 필요성 및 관심이 급증하고 있다. 종래의 필터소재는 유리섬유를 이용하였으나 최근에는 대부분 고분자 소재를 필터로 사용하고 있으며, 주로 마이크로 섬유 부직포에 정전기적 인력을 부여하여 미세입자가 포집된다. 그러나 정전기 필터는 습기에 취약하여 물에 젖게 되면 정전기가 소실되어 필터의 성능이 저하되는 단

점을 가지고 있다<sup>1)</sup>.

과거에는 방사기술의 한계로 인하여 주로 마이크로 섬유 기반의 부직포가 필터에 많이 사용된 것에 반해 최근에는 나노 크기의 극세섬유를 제조할 수 있게 됨으로써 필터소재와 관련하여 나노섬유 부직포의 특성 연구가 활발히 이루어지고 있다. Kim 연구팀은 다층구조의 원심방사법으로 다성분 나노섬유 부직포를 제조하여 세탁 후 사용가능한 마스크 필터를 제조한 바 있다<sup>2)</sup>.

나노섬유는 비표면적이 크고, 높은 표면활성으로 흡착 및 접착 특성을 부여할 수 있다는 장점이 있고, 또한 나노섬유 부직

포는 마이크론 섬유 부직포 대비 넓은 비표면적을 가지는 장점이 있다<sup>3)</sup>. 그러나 나노섬유 부직포를 마스크 필터로 사용할 경우 나노 크기의 직경으로 인하여 기공이 아주 작아 미세입자 포집력은 우수하지만, 호흡에는 답답함을 느낄 수 있어 마이크론 섬유 부직포를 활용하여 이중 구조의 부직포를 형성하여 마스크 필터로 적용할 경우 기존 나노섬유 부직포보다 통기성을 높일 수 있는 장점이 있다<sup>4,5)</sup>.

나노섬유를 제조하는 방법에는 멜트블로운 (melt-blown), 플라쉬 방사법, 연신법, 형판 합성법, 전기방사법, 초고속 원심방사법 등 다양한 기술이 있으며<sup>6)</sup>, 최근에는 주로 전기방사법을 활용한다. 전기방사법은 전기전도성 고분자에 한정되며, 고전압으로 인한 안전성 문제 및 낮은 생산성 등 단점이 있다<sup>7,8)</sup>. 반면 초고속 원심방사의 경우 비전도성 고분자의 사용제한이 없고, 높은 생산성 및 경제성을 가지며 고전압의 위험이 없기 때문에 최근 각광받는 나노섬유 제조기술이다<sup>9,10)</sup>. 초고속 원심방사법은 일반적인 방사법과 마찬가지로 용액법과 용융법으로 구분되며, 용액법의 경우 방사용액의 점도, 농도, 표면장력이 변수로 작용하고, 설비적인 측면에서는 방사디스크의 회전속도 및 방사 노즐과 채집부의 거리가 변수로 작용한다<sup>11)</sup>.

폴리비닐알코올 (PVA)은 생체적합성, 비독성 및 생분해성 등을 특징으로 친환경성 재료로써 각광받고 있으며, 용매로 물을 사용한다는 점은 PVA의 큰 장점 중 하나이다. 또한 우수한 물성과 내화확성을 겸비하여 필터, 포장지, 시멘트 보강재 및 약물전달체 등 산업 전반적으로 광범위하게 적용되고 있다<sup>12)</sup>.

본 연구에서는 폴리프로필렌 (PP) 마이크론 부직포를 기재로 하고, 초고속 용액 원심방사법을 이용하여 상단에 방사함으로써 이중구조 PVA/PP 부직포를 제조하였다. 또한 나노섬유의 최적조건을 찾아 분진포집효율이 높은 마이크론/나노 융합필터 제조 및 그 특성 분석에 중점을 가지고 연구를 진행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시약 및 재료

본 연구에서 사용된 PVA (Polynol, OCI Co. Ltd., Korea)는 분말 형태이며, 사용 전까지 진공상태에서 건조, 보관하였다. PVA는 수평균중합도 (Pn)가 1,700인 제품을 별도의 정제 없이 사용하였으며, 모든 실험은 증류수를 사용하였다. 기재로 사용된 PP 마이크론 부직포는 (주)SK케미칼에서 구입한 펄릿을 사용하여 (주)한스인테크에서 제조한 것을 사용하였다.

### 2.2 원심방사

원심방사 장치는 (주)엔오엔그리드에서 제작한 장치를 사용하였고, 슬라이다크스 (Slide-AC, SD-3000, Daesung Electronics Co. Ltd., Korea)를 장착 후 모터의 회전속도를 조절하여 방사디스크의 회전속도를 조절하였다. 슬라이다크스 용량에 대한 상세 내용은 Table 1에 명시하였다.

방사디스크의 크기는 15 cm의 직경을 가지고, 방사디스크

Table 1. Specification of slide-AC

Contents	Subsection
Rated voltage	220 V
Rated capacity	3 kVA
Rated current	12 A
Rated frequency	60 Hz

의 높이는 10 cm이다. 채집부는 방사디스크 노즐 말단으로부터 15 cm 떨어진 곳에 설치 후, PP 부직포를 부착하여 방사를 진행하였다.

초고속 용액 원심방사 공정에서 방사용액의 농도 및 디스크 회전속도의 영향을 확인하기 위하여 8,000 rpm의 동일한 회전속도에서 PVA 용액의 농도를 7.5, 10 및 12.5 wt.%로 농도를 달리한 첫번째 조건과 방사용액의 농도를 10 wt.%로 고정하고 후 6,000, 8,000 및 10,000 rpm으로 디스크 회전속도를 변화한 두번째 조건으로 각각 방사를 진행하였다. 방사가 진행된 후 제조된 필터를 상온에서 24시간 동안 건조를 진행하였다.

### 2.3 섬유의 형태학적 특성 분석

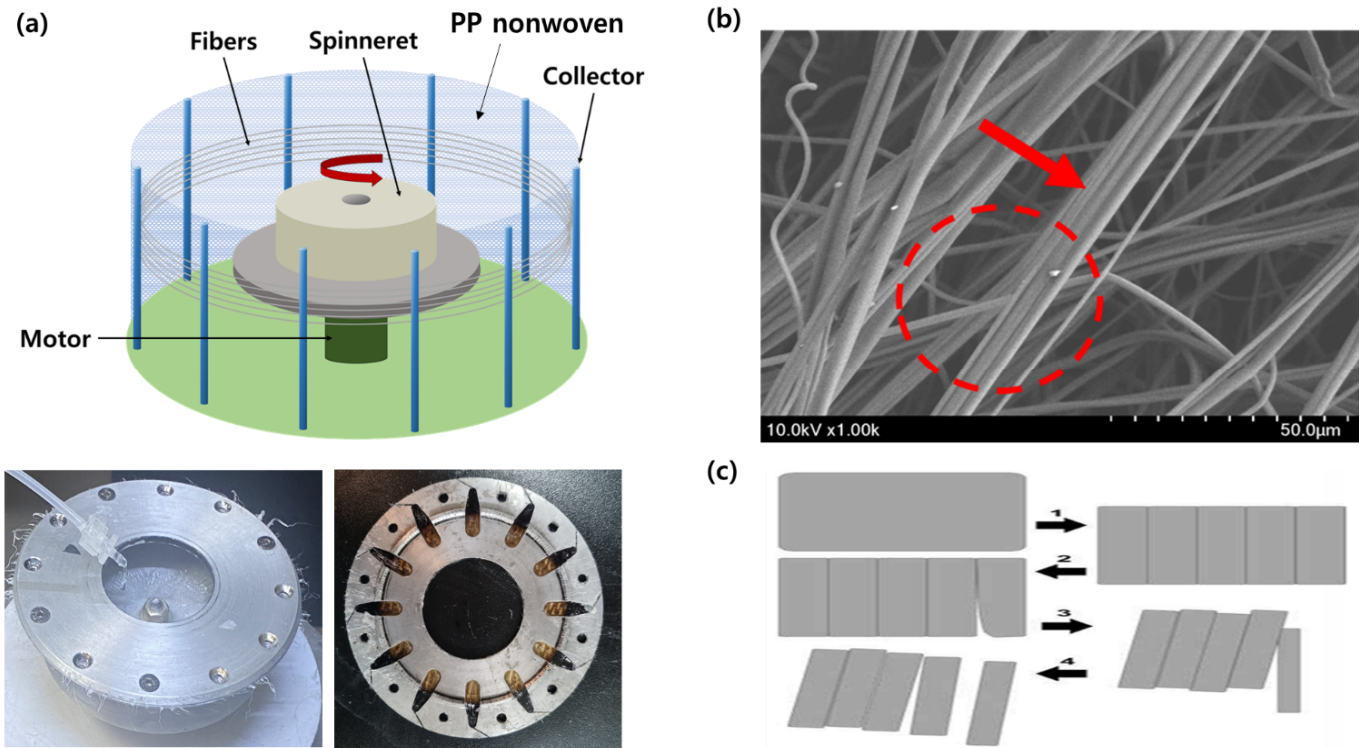
초고속 용액 원심방사에 의해 제조된 섬유의 형태를 관찰하기 위하여 주사전자현미경 (FE-SEM, Hitachi, S-4800, Japan)을 이용하여 분석하였다. 5×5 mm의 크기로 준비된 시료를 백금 코팅한 후 FE-SEM을 이용하여 표면을 관찰하였다. 섬유의 평균 직경 및 분포는 촬영된 섬유를 포토샵 프로그램을 이용하여 무작위로 채택하여 평균값으로 계산하였다.

### 2.4 공기투과도 측정

공기투과도 측정시험은 ASTM D 737 (Standard test method for air permeability of textile fabrics) 규격에 따라 평가하였다. 면적 20 cm<sup>2</sup>의 원판형 시료에 125 Pa의 압력으로 공기를 통과시켜 측정하였다. 모든 시료는 5회 반복 측정하여 평균값을 사용하였다.

### 2.5 분진포집효율 측정

분진포집효율 측정은 식약처에서 제시하는 보건용 마스크의 기준 규격 (안내서-0349-06)에 따라 평가를 진행하였다. NaCl 에어로졸과 파라핀 오일 에어로졸 방법을 사용하였으며, 온도 38±2.5 °C, 습도 85±5 %에서 24±1시간 동안 전처리한 필터를 검체로 사용하였다. NaCl 에어로졸의 유량 95 L/min, 농도 8±4 mg/m<sup>3</sup>으로 설정하였으며, 파라핀 오일 에어로졸은 유량 95 L/min, 농도 20±5 mg/m<sup>3</sup>에서 측정하였다. 모든 시료는 필터 통과 전·후의 농도를 시험 시작 후 3분에 30±3초간 측



**Figure 1.** (a) Schematic illustration of centrifugal solution spinning system and photographic images of spinning disk and nozzle formation, (b) FE-SEM image of centrifugal spun PVA nanofibers, and (c) diagram of fiber formation stage by centrifugal solution spinning.

정하여 얻어진 평균값을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 섬유형의 형태학적 특성

초고속 용액 원심방사의 최적 섬유형성 조건을 확인하기 위해 용액의 농도 및 방사디스크의 회전속도를 다양하게 조절하여 방사를 진행하였으며, 방사된 섬유의 형태를 분석한 결과 용액 원심방사를 통한 섬유형성 메커니즘과 유사한 경향을 보였다<sup>11)</sup>.

Figure 1(a)에서는 실험의 모식도를 제시하였고, Figure 2 ~ Figure 3에서는 용액법으로 제조된 PVA 나노섬유의 FE-SEM 사진과 섬유형성 메커니즘에 대하여 제시하였다. 방사디스크의 회전에 의해 고분자 용액이 방사구에서 토출되고, 고분자 jet에 원심력이 가해져 stretching이 일어나며, 마이크론 직경의 고분자 jet이 전단 응력에 의하여 jet에서 수백~수천 nm의 나노 섬유로 세세하게 분리됨과 동시에 용매의 휘발에 의해 고화되면서 채집부에 도달하게 된다[Figure 1(b-c)].

본 연구에서는 채집부에 PP 마이크론 부직포 상단에 PVA 나노섬유가 채집되면서 이중구조 PVA/PP 나노필터가 제조된

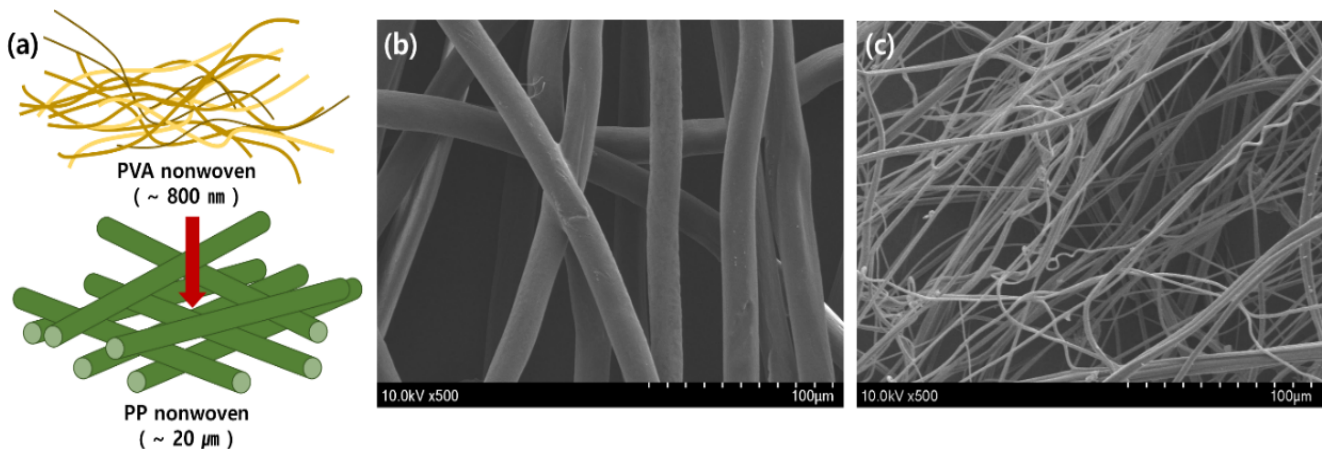
다. 이중구조 PVA/PP 나노필터의 제조 모식도와 PP 마이크론 부직포 및 PVA 나노섬유의 FE-SEM 이미지가 Figure 2에 제시되었다. PP 마이크론 부직포 상단에 PVA 나노섬유가 방사되며 이중구조를 이루며[Figure 2(a)], PP 마이크론 섬유[Figure 2(b)]는 균일한 섬유 형태를 가지는 반면, PVA 나노섬유[Figure 2(c)]는 다양한 형태를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 원심방사에 의한 섬유형성 원리에 의해 고분자 jet의 분리 및 연신이 일어나는 과정에서 원심력에 의한 전단응력이 임계점 이상으로 작용한 결과로 보인다.

#### 3.2 섬유 직경 및 분포

초고속 용액 원심방사의 제조조건 중 방사디스크의 회전속도 및 용액의 농도에 따른 섬유 직경 측정을 통해 변수에 따른 섬유 직경 분포 및 평균 직경 변화를 확인할 수 있었다.

Figure 3는 10 wt.%의 방사용액을 디스크의 회전속도를 변화시켜 방사한 나노섬유의 직경 분포를 나타낸 것으로써, 나노 섬유의 평균 직경은 각각  $628 \pm 48.84$  nm (6,000 rpm),  $421 \pm 32.67$  nm (8,000 rpm) 및  $400 \pm 29.08$  nm (10,000 rpm)로 회전속도가 증가함에 따라 섬유 직경이 감소하는 경향을 보인다.

Figure 1(c)의 원심방사에 의한 나노섬유 형성 기구에서 표현한 것과 같이 고분자 jet에 작용되는 전단력의 세기에 따라 섬유의 직경이 결정되며, 이를 통해 회전속도가 증가함에 따라



**Figure 2.** Schematic illustration of (a) PVA/PP bi-layered nonwoven and FE-SEM images of (b) PP micron nonwoven and (c) centrifugal spun PVA nanofibers.

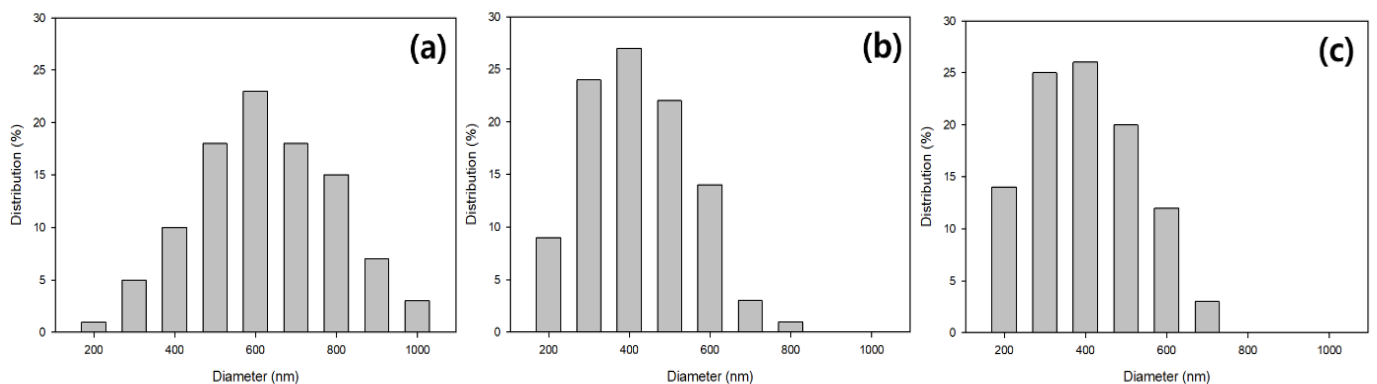
고분자 jet의 stretching이 증가하기 때문에 방사디스크 속도가 증가할수록 방사 시 나노 크기의 섬유가 감소됨을 알 수 있다. 또한 디스크의 회전속도가 증가할수록 섬유 직경 분포가 좁아지는 경향을 보이는데 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 고분자 jet에 강한 전단응력이 전체적으로 가해져 섬유의 직경이 균일해지는 것으로 생각된다. 회전속도가 낮을 때에는 고분자 jet가 임계점 근처에서 균일하게 분리되지 않았기 때문에 높은 전단응력이 발생하는 높은 회전 속도에서 섬유가 더욱 균일하게 형성되는 것으로 보인다.

디스크 회전속도가 8,000 rpm인 용액 원심방사의 방사용액의 농도에 따른 나노섬유의 평균 직경 분포를 Figure 4에 제시되었으며, 다양한 방사용액의 농도에 따른 평균 직경은  $428 \pm 32.74$  nm (7.5 wt.%),  $421 \pm 32.67$  nm (10 wt.%) 및  $694 \pm 41.63$  nm (12.5 wt.%)로 10 wt.% 이하의 농도에서 직경이 더 작고, 균일성은 낮은 것으로 확인되었다. 방사용액의 농도가

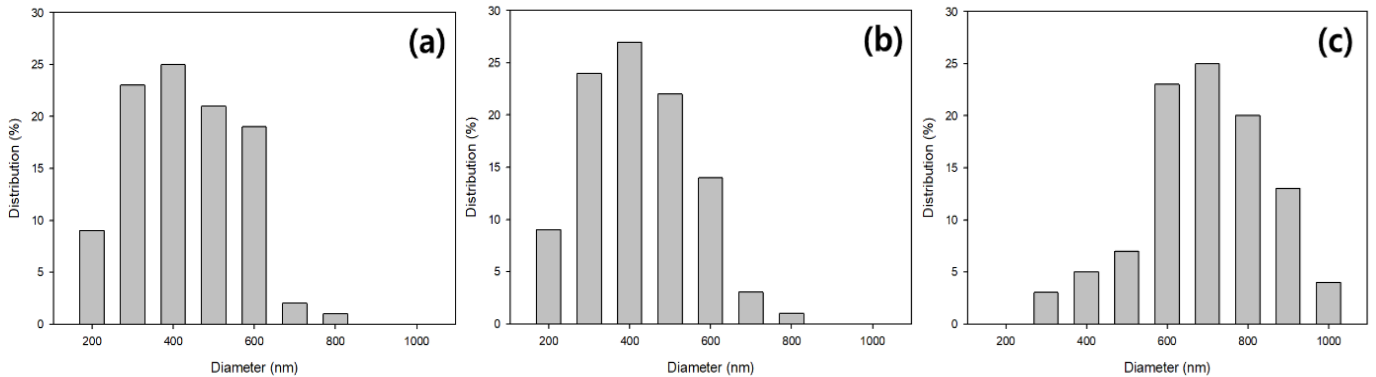
7.5 wt.%일 때 10 wt.%보다 평균섬유 직경이 다소 증가하는 경향을 보였으나, 통계 시료의 몇몇 섬유 중 600~800 nm 구간의 섬유 수 차이로 인한 결과인 것으로 생각되며, 섬유형성 과정 중 고분자 jet에서 stretching되는 전단 임계점이 7.5 wt.%와 10 wt.% 사이의 중간 지점으로 사료된다. 섬유의 평균 직경이 가장 큰 12.5 wt.%에서는 다른 농도와 유의미한 오차를 보였다. 이는 고농도 용액에서 전단 응력이 더 크기 때문에 고분자 jet을 형성하는데 있어서 stretching 및 용매 증발이 지연된 결과로 판단된다<sup>2)</sup>.

### 3.3 공기 투과도

Figure 5에서는 방사용액의 농도 및 디스크 회전속도에 따른 이중구조 PVA/PP 나노필터와 PP 단일 부직포의 공기투과도 결과가 제시되었다. 디스크의 회전속도를 8,000 rpm로 고정하고 방사용액의 농도에 따른 공기투과도를 확인했을 때, 10



**Figure 3.** Diameter distribution of centrifugal spun PVA nanofibers depend on various disk rotational velocities; (a) 6,000 rpm, (b) 8,000 rpm, and (c) 10,000 rpm (solution concentration = 10 wt.%).



**Figure 4.** Diameter distribution of centrifugal spun PVA nanofibers depend on various solution concentrations; (a) 7.5 wt.%, (b) 10 wt.%, and (c) 12.5 wt.% (disk's rotational velocity = 8,000 rpm).

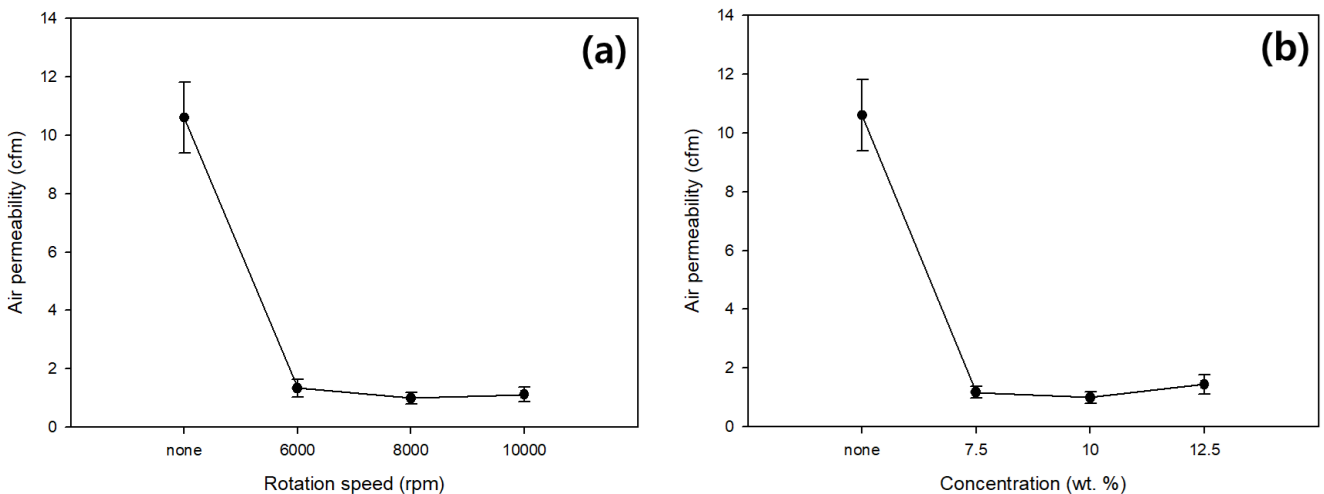
wt.%의 농도에서  $1.00 \pm 0.20$  %의 가장 낮은 값을 보였고, 7.5 wt.% ( $1.18 \pm 0.20$  %), 12.5 wt.% ( $1.45 \pm 0.33$  %), PP 부직포 ( $10.6 \pm 1.20$  %) 순으로 낮은 값을 보였으며, 방사용액의 농도를 10 wt.%로 고정하고, 디스크 회전속도 조건에 따른 공기투과도는 8,000 rpm ( $1.00 \pm 0.20$  %), 10,000 rpm ( $1.12 \pm 0.25$  %), 6,000 rpm ( $1.34 \pm 0.30$  %) 및 PP 부직포 ( $10.6 \pm 1.20$  %) 순으로 낮은 수치를 보였다. 방사용액 7.5 wt.% 조건에서 동일 회전속도에서 나노웹의 중량이 가장 낮고, 10 wt.%의 시편과 비슷한 직경이기 때문에 방사용액 7.5 wt.%의 조건에서 생성되는 부직포 내 기공 면적이 가장 클 것으로 예상되며, 12.5 wt.%의 경우 시편의 중량이 가장 무겁기 때문에 섬유 양이 가장 많지만, 섬유의 직경이 크기 때문에 부직포 내 섬유 간 기공이 감소하여 공기투과도가 낮아져야 하지만, 높은 회전력에 의한 강한 전단응력으로 사설이 많이 발생한 결과로 공기투과도가

다소 증가한 것으로 보인다.

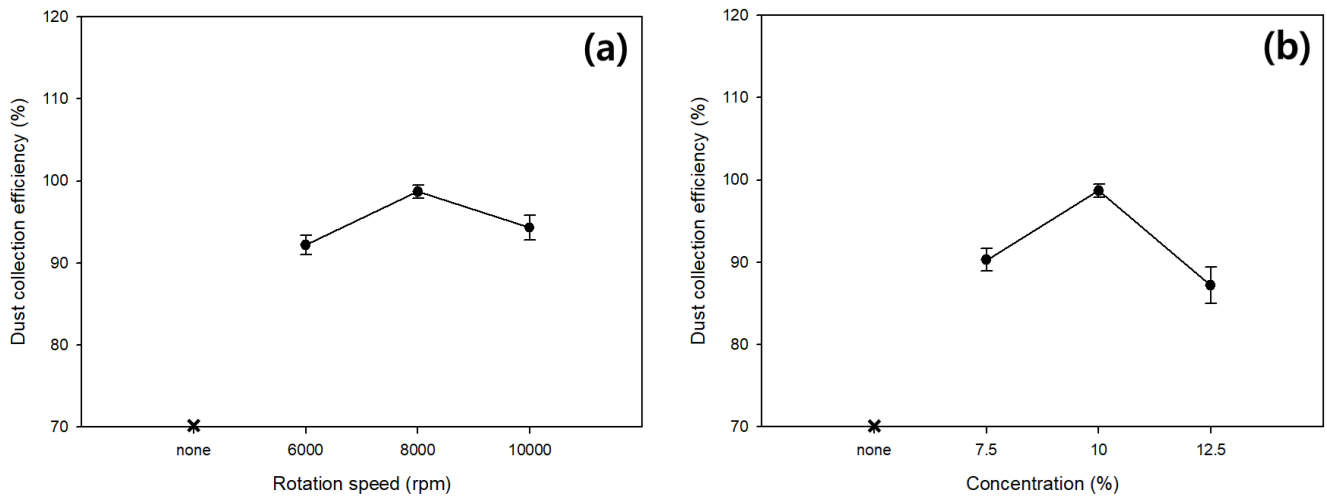
이는 위 조건에 따른 섬유 직경에서 보인 결과와 대체적으로 유사한 경향성을 보였다. 모든 조건에서 PP 단일 부직포보다 이중구조 PVA/PP 나노필터에서 낮은 효율의 공기투과도를 보였지만, 이중구조 PVA/PP 나노필터 내 조건들 간엔 유의미한 차이를 보이지 않았다.

### 3.4 분진포집효율

방사디스크 회전속도 및 용액 농도에 따른 분진포집효율 측정 결과가 Figure 6에 제시되었다. 방사용액의 농도를 10 wt.%로 고정하고, 다양한 회전속도 조건[Figure 6(a)]에서 제조했을 때 나노섬유의 분진포집효율은 각각  $92.2 \pm 1.20$  % (6,000 rpm),  $98.7 \pm 0.80$  % (8,000 rpm),  $94.3 \pm 1.50$  % (10,000 rpm)



**Figure 5.** Air permeability of PP nonwoven and PVA/PP nano-filter depend on (a) various rotational velocities (6,000, 8,000 and 10,000 rpm, concentration = 10 wt.%) and (b) various concentrations (7.5, 10 and 12.5 wt.%, rotational velocity = 8,000 rpm).



**Figure 6.** Dust collection efficiency of PP nonwoven and bi-layered PVA/PP nano-filter depend on (a) various rotational velocities (6,000, 8,000 and 10,000 rpm, concentration = 10 wt.%) and (b) various solution concentration (7.5, 10 and 12.5 wt.%, rotational velocity = 8,000 rpm).

로 나타났고, 특히 8,000 rpm에서 가장 높은 효율이 나타났다. 디스크 회전속도 조건이 10,000 rpm인 필터에서 분진포집효율이 감소하는 이유는 8,000 rpm 조건보다 평균 직경이 감소하지만, 높은 회전력에 의한 강한 전단응력으로 인한 사절이 많이 발생한 결과로 보인다. 사절에 의한 기공이 증가하기 때문에 10,000 rpm에서 제조된 나노섬유의 분진포집효율이 감소하는 것으로 생각된다. 디스크의 회전속도는 8,000 rpm으로 고정하고, 다양한 용액 농도 조건에서 나노섬유를 제조했을 때 분진포집효율[Figure 6(b)]은 10 wt.%가 98.7±0.80 %로 가장 높은 수치를 보였으며, 7.5 wt.%와 12.5 wt.%의 농도에서는 각각 90.3±1.40 %, 87.2±2.20 %의 결과를 보였다. 분진포집효율은 섬유의 비표면적과 나노웹 내부 기공의 총 면적과 관련이 있고, 기공의 총 면적은 공기투과도에서 확인되듯이 12.5 wt.%에서 방사된 시료가 가장 크고, 7.5 wt.%와 10 wt.%의 농도로 제조된 나노섬유의 기공의 총 면적은 비슷하다. 그러나 각 농도에 따라 제조된 시료마다 공기투과도는 비슷할 수 있으나 나노웹을 구성하고 있는 나노섬유의 비표면적이 다르기 때문에 기공의 비표면적이 큰 것이 분진포집효율이 더 크다고 볼 수 있다.

디스크 회전속도보다 용액의 농도 조건을 변화시킨 결과에서 최대값과 최소값의 격차가 크게 발생하였으며, 이를 통해 분진포집효율에 있어서 나노웹 제조조건 중 어떤 방사디스크의 회전속도 조건으로도 90 % 이상의 효율을 확보할 수 있기 때문에 용액의 농도 변수가 크게 작용함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초고속 용액 원심방사법을 이용하여 기성 PP

마이크론 부직포 상단에 PVA 나노섬유를 방사함으로써 이중구조의 PVA/PP 나노필터를 제조하였고, PVA/PP 나노필터의 최적 조건을 확립하였다. 다양한 용액의 농도 및 방사디스크 회전속도에 따른 초고속 용액 원심방사를 진행하였으며, 실험 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 초고속 용액 원심방사법에 의한 이중구조 PVA/PP 나노필터 제조 시, 다양한 PVA의 농도 및 방사디스크 회전속도에서 방사된 섬유의 형태를 비교함으로써 최적조건을 확립하였다. 디스크 회전속도는 증가할수록 더 가늘고 균일한 섬유의 형성을 확인할 수 있었다. 각 변수의 최적의 필터효율을 발현하는 방사조건은 농도 10 wt.%, 회전속도 8,000 rpm임을 확인할 수 있었다.
2. 용액의 농도 및 방사디스크 회전속도를 변화시켜 방사된 PVA 나노웹이 공기투과도에 미치는 영향을 확인하였다. 이중구조 PVA/PP 나노필터에서 단일 PP 부직포보다 낮은 공기투과도를 보이며, 용액 농도 및 디스크 회전속도에 따른 결과에선 거의 유사한 수치를 보였다.
3. 용액 농도 및 디스크 회전속도에 따른 분진포집효율 변화를 비교 분석하였다. 농도 10 wt.%, 회전속도 8,000 rpm에서 가장 높은 효율성을 보였으며, 그 외의 조건에선 감소하는 결과를 보였다. 두 변수 조건 중, 특히 용액의 농도가 분진포집효율에 더 큰 영향을 미치는 섬유 제조조건임을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.2016R1A2B4010329).

## References

1. P. M. Mao and G. Jiang, Filtration Efficiency Investigation of Mesh Fabrics by Polytetrafluoroethylene Filament with Surface Static Electricity, *The Journal of the Textile Institute*, **110**(3), 451(2019).
2. B. E. Kwak, H. J. Yoo, E. Lee, and D. H. Kim, Large-Scale Centrifugal Multispinning Production of Polymer Micro-and Nanofibers for Mask Filter Application with a Potential of Cospinning Mixed Multicomponent Fibers, *ACS Macro Letters*, **10**(3), 382(2021).
3. C. T. Lim, Nanofiber Technology: Current Status and Emerging Developments, *Progress in Polymer Science*, **70**, 1(2017).
4. M. Xing, W. Zhong, X. Xu, and D. Thomson, Adhesion Force Studies of Nanofibers and Nanoparticles, *Langmuir*, **26**(14), 11809(2010).
5. S. Choi, H. Jeon, M. Jang, H. Kim, G. Shin, J. M. Koo, and S. Y. Hwang, Biodegradable, Efficient, and Breathable Multi-use Face Mask Filter, *Advanced Science*, **8**(6), 2003155(2021).
6. R. Nayak, R. Padhye, I. L. Kyratzis, Y. B. Truong, and L. Arnold, Recent Advances in Nanofibre Fabrication Techniques, *Textile Research Journal*, **82**(2), 129(2012).
7. J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications, *Chemical Reviews*, **119**(8), 5298(2019).
8. P. Vass, E. Szabó, A. Domokos, E. Hirsch, D. Galata, B. Farkas, and Z. K. Nagy, Scale-up of Electrospinning Technology: Applications in the Pharmaceutical Industry, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, **12**(4), e1611(2020).
9. N. E. Zander, Formation of Melt and Solution Spun Polycaprolactone Fibers by Centrifugal Spinning, *Journal of Applied Polymer Science*, **132**(2), 41269(2015).
10. K. Sarkar, C. Gomez, S. Zambrano, M. Ramirez, E. D. Hoyos, H. Vasquez, and K. Lozano, Electrospinning to Forcespinning™, *Materials Today*, **13**(11), 12(2010).
11. S. B. Yang, J. Lee, B. C. Ji, N. S. Joo, and J. H. Yeum, Preparation of Polyethylene Micro-fibers by High Speed Centrifugal Melt Spinning, *Textile Coloration and Finishing*, **32**(4), 239(2020).
12. A. Koski, K. Yim, and S. J. M. L. Shivkumar, Effect of Molecular Weight on Fibrous PVA Produced by Electrospinning, *Materials Letters*, **58**(3-4), 493(2004).

## Authors

- 양성백** 경북대학교 바이오섬유소재학과 박사후 연구원  
**이정언** 경북대학교 바이오섬유소재학과 박사과정 학생  
**박재민** 경북대학교 바이오섬유소재학과 석사과정 학생  
**정재훈** 경북대학교 탄소복합섬유소재학과 석사과정 학생  
**김태영** 경북대학교 바이오섬유소재학과 석사과정 학생  
**김기영** ㈜아이제이에스 부장  
**이상준** ㈜아이제이에스 대리  
**염정현** 경북대학교 바이오섬유소재학과 교수