creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

생활과학석사 학위논문

폴리아마이드 6 혼합비율에 따른 폴리스타이렌 나노웹 소재의 성능

2014 년 02 월

서울대학교 대학원

의류학과

윤 재 원

폴리아마이드 6 혼합비율에 따른 폴리스타이렌 나노웹 소재의 성능

지도교수 박 정 희

이 논문을 생활과학석사 학위논문으로 제출함
2013 년 11 월

서울대학교 대학원
의류학과
윤 재 원

윤재원의 석사 학위논문을 인준함
2014 년 2 월

위 원 장 柳孝仙 (인)

부위원장 이 주 영 (인)

위 원 朴貞姬 (인)

국 문 초 록

본 연구에서는 기계적 강도가 향상된 전기방사 폴리스티렌(Polystyrene; PS)과 폴리아미드 6 (Polyamide 6; PA6) 웹을 다중젯(multi-jet) 전기방사법을 활용하여 제작하였다. PS는 공기에 비해 매우 낮은 열전도도를 갖고 값이 싼 장점에도 불구하고 낮은 기계적 강도에 의해 응용이 제한되었다. PS/PA6의 비율은 전기방사에 사용되는 주사기 수의 비를 조절하여 4:0, 3:1, 2:1, 2:2, 1:2, 1:3 그리고 0:4의 다양한 비를 활용하였다. 방출주사형 전자현미경(field emission scanning electron microscopy; FE-SEM)의 결과를 통해 잘 분산 된 마이크로 사이즈의 PS섬유와 나노 사이즈의 PA6 섬유를 확인할 수 있었다. PS 나노웹은 높은 습도에서 전기방사 했을 시 솜과 같은 외관을 지님을 확인하였다. PS/PA6의 기계적 강도는 PA6의 높은 기계적 강도에 의해, 웹에서 PA6의 비율의 증가함에 따라 강화되었다. 이와 동시에, PA6의 비율이 증가함에 따라 PA6 재료 자체의 높은 열전도도와 낮은 기공성으로 인한 함기율 저하로 열전도도의 증가와 열적 저항의 감소를 확인할 수 있었다. 투습도와 공기 투과도는 또한 웹의 의류용 직물로의 적용가능성을 알아보기 위해 평가한 결과, PA6의 비율이 높아짐에 따라 가는 PA6 섬유에 의해 기공이 감소하여 공기투과도가 감소하는 결과를 가져왔으며, 투습도도 감소하였으나 PA6 섬유의 친수성으로 인하여 다시 증가하는 양상을 보였다. PS/PA6의 물에 대한 접촉각(contanct angle)은 웹의 소수성을 평가하기 위해 측정되었으며 그 결과 PS의 높은 소수성과 폴리아마이드의 친수성으로 인해 PA6의 비율이 증가함에 따라 접

촉각이 감소하는 것을 확인하였다. 결론적으로, 상대적으로 약한 기계적 강도를 다중젯 전기방사를 통해 보완한 PS의 의류 적용가능성을 평가하였으나, 열적단열은 해결해야 할 과제로 남아있다.

주요어 : 폴리스타이렌, 폴리아마이드 6, 전기방사 나노웹, 열전도도, 열저항성
학 번 : 2012-21509

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1
1. 연구의 필요성 및 목적 ····· 1
2. 이론적 배경 ····· 4
2.1. 폴리스타이렌 ····· 4
2.2. 폴리아마이드 6 ····· 7
2.3. 의복의 열적 쾌적성 ····· 9
2.4. 전기방사 ····· 12

Ⅱ. 실험 ····· 17
1. 시료 ····· 17
1.1. 고분자 및 시약 ····· 17
1.2. 전기방사 웹의 제조 ····· 18
1.2.1. 전기방사 조건 선정 ····· 18
1.2.2. 혼합 전기방사 웹의 구성 ····· 19
2. 전기방사 웹의 구조적 및 외관 특성 ····· 22
2.1. 표면 특성 ····· 22
2.2. 외관 특성 ····· 22
2.3. 혼합 전기방사 웹의 구성 비율 ····· 22
2.3.1. 용해 시험 분석 ····· 22
2.3.2. 형광 현미경 이미지 분석 ····· 23
2.4. 기공 특성 ····· 24
3. 전기방사 웹의 성능 ····· 25
3.1. 물리적 성능 ····· 25
3.2. 공기 및 수분 투과 성능 ····· 25

3.2.1. 공기 투과 성능 ····· 25
3.2.2. 수분 투과 성능 ····· 26
3.3. 표면 친수성 ····· 26
3.4. 열 차단 성능 ····· 27
3.4.1. 열 전도성 ····· 27
3.4.2. 열 저항성 ····· 28
4. 통계적 분석 ····· 29

Ⅲ. 결과 및 고찰 ····· 30
1. 전기방사의 최적조건 ····· 30
2. 전기방사 웹의 구조적 및 외관 특성 ····· 36
2.1. 표면 특성 ····· 36
2.2. 외관 특성 ····· 43
2.3. 혼합 전기방사 웹의 구성 비율 ····· 45
2.3.1. 용해 시험 분석 ····· 46
2.3.2. 형광 현미경 이미지 분석 ····· 48
2.4. 기공 특성 ····· 51
3. 전기방사 웹의 성능 ····· 59
3.1. 물리적 성능 ····· 59
3.2. 공기 및 수분 투과 성능 ····· 65
3.2.1. 공기 투과 성능 ····· 65
3.2.2. 수분 투과 성능 ····· 68
3.3. 표면 친수성 ····· 71
3.4. 열 차단 성능 ····· 74
3.3.1. 열 전도성 ····· 74
3.3.2. 열 저항성 ····· 77
4. 통계적 분석 ····· 80

4.1. 구조적 특성과 공기투과도 ····· 80
4.2. 구조적 특성, 표면친수성과 투습도 ····· 83
4.3. 구조적 특성과 열 차단 성능 ····· 85

Ⅳ. 요약 및 결론 ····· 88
참고문헌 ····· 91
Abstract ····· 99

List of tables

Table 1. Specifications of polymers ····· 17
Table 2. Specifications of electrospun webs ····· 21
Table 3. Conditions of electrospinning ····· 32
Table 4. Fiber diameter of fibers ····· 36
Table 5. Properties of PS and PA solution ····· 47
Table 6. Speculated and real weight ratio of electrospun webs ····· 47
Table 7. Pixel ratio of polystrene and polyamide 6 in confocal laser scanning microscope images ····· 49
Table 8. The range of pore diameter distribution of electrospun webs ····· 53
Table 9. Total pore volume and porosity ····· 58
Table 10. Tensile stress and tensile strain of electrospun webs ····· 61
Table 11. Air permeability variations of electrospun webs (at 100 psi) ····· 67
Table 12. Correlation coefficient of structural properties and air permeability ····· 82
Table 13. Correlation coefficient of structural properties, surface hydrophile property and water vapor permeability ····· 84
Table 14. Correlation coefficient of structural properties,

thermal conductivity and thermal resistance
..... 87

List of figures

Figure 1. Styrene and polystyrene. ····· 4
Figure 2. Caprolactam and polyamide 6. ····· 7
Figure 3. Heat transfer from skin to environment through fabric. ····· 9
Figure 4. Schematic diagram of set up of electrospinning apparatus. ····· 12
Figure 5. Applications of electrospun fibers in different sectors. ····· 16
Figure 6. Schematic diagram of multi-jet electrospinning. ····· 21
Figure 7. FE-SEM images of polyamide 6 electrospun web at various concentrations and voltages. (flow rate 0.2ml/h) ····· 33
Figure 8. Optical microscope images of polystyrene electrospun webs at various concentrations and voltages. (feed rate 0.2ml/h) ····· 34
Figure 9. FE-SEM images of polystyrene electrospun web at various concentrations. (voltage 20kV, feed rate 0.2ml/h) ····· 35
Figure 10. FE-SEM images of electrospun web with various polystyrene/polyamide6 syringe ratio. ····· 39
Figure 11. Ternary phase diagram for three possible composition paths and schematic representation

of Vapor induced phase separation (VIPS). 41
Figure 12. FE-SEM images of polystrene fiber surface and schematic representation of Vapor-induced phase separation using DMF/THF solvent. 42
Figure 13. External appearance of polystyrene electrospun webs. 44
Figure 14. Confocal laser scanning microscope images of electrospun webs. 50
Figure 15. Average pore size of electrospun webs. 53
Figure 16. Pore size distribution of electrospun webs. 54
Figure 17. Total pore volume and porosity of electrospun webs. 58
Figure 18. Stress-strain curve of electrospun webs. 61
Figure 19. Tensile properties of electrospun webs. 64
Figure 20. Air permeability of electrospun webs. 67
Figure 21. Water vapor permeability of electrospun webs. 70
Figure 22. Contact angle of electrospun webs. 76
Figure 23. Contact angle variation with time. 79
Figure 24. Thermal conductivity of electrospun webs. 73

Figure 25. Thermal resistance of electrospun webs. 73

Ⅰ. 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

기능성 의류 소재 개발에서 의복의 쾌적성에 대한 요구를 충족시키기 위한 연구로 소재의 경량화와 투습방수 성능 향상 대한 연구가 많이 진행되어 왔다[1-3]. 투습방수 소재는 외부의 빗방울을 막아주고 인체에서 발산되는 수분이나 땀을 방출시켜 착용자의 쾌적성을 유지할 수 있도록 하는 소재이다. 하지만 이러한 투습방수 소재가 높은 투습성에 의해 땀의 증발을 촉진시켜 열적 쾌적성을 저하시킬 우려가 있어 최근 들어 투습방수 소재의 보온성 향상을 위한 연구들이 이루어지고 있다[4,5]. 또한 의복의 중요한 기능은 체온을 유지하고 외부의 온도변화에 대해 신체를 보호하는 데 있기 때문에 기능성 의류 소재를 개발하는 데 있어 소재를 통한 열과 수분의 이동은 의복의 쾌적성에 영향을 끼치는 주요한 인자이다[6]. 이에 열적 쾌적성은 직물 및 의류상태의 쾌적성을 평가하고 고부가가치 소재 개발에서 간과해서는 안 되는 평가 기술이라고 할 수 있다.

전기방사 웹은 나노에서 마이크로 사이즈의 직경을 지닌 섬유로 이루어진 웹으로, 매우 작은 기공 사이즈와 높은 기공성, 넓은 표면적을 가지고 있으며 매우 얇고 가벼운 특성을 지녀 새로운 고부가가치 소재로 다양한 분야에서 각광받고 있다[3]. 전기방사 웹이 지니는 우수한 투습성을 이용하여 의류소재로서의 평가 연구는 많이 이루어져 왔으나[1-5], 전기방사 웹의 보온 효과에 대한 연구는 아직 많이 이루어져 있지 않은 실정이다.

비록 양모나 새의 솜털 등과 같은 천연 재료들이 보온성 의류 소재로서 많이 애용되고 있으나, 이들은 보통 값이 매우 비싸며 공정에서 봉

합이 힘든 점과 조류 독감과 같은 질병, 동물 학대 등과 같은 문제점을 가지고 있다[7]. 폴리스타이렌의 경우, 재료가 풍부하여 값이 매우 싸고 가벼우며, 특히 공기에 가까울 정도로 낮은 열전도도를 지녀 건축자재나 포장재에서 단열재로 많이 사용되는 물질이다. 또한 폴리스타이렌은 재활용 가능한 소재로 경제적, 친환경적이다. 폴리스타이렌을 이용하여 전기방사한 연구들은 주로 전기방사 변수에 관한 연구[8,9], 전기방사 웹의 초소수화[10,11] 등이 있다. 폴리스타이렌을 전기방사하게 되면 다른 고분자를 전기방사 하여 만든 웹들에 비해 기공성 높은 구조를 만들 수 있다 [12]. 폴리스타이렌 전기방사 웹의 이러한 기공성 높은 구조적 특성에 의한 높은 함기율과 폴리스타이렌 재료 자체의 낮은 열전도도를 이용하면 얇으면서도 열전도율이 낮은 보온성 높은 소재를 구현해낼 수 있다. 하지만 폴리스타이렌 전기방사 웹의 보온성이나 의류소재로서의 성능을 살펴본 연구는 아직 미비하다.

폴리스타이렌 전기방사 웹의 매우 낮은 기계적 강도는 그 전기방사 웹의 실용성을 저해하는 큰 단점으로 작용한다[13]. 폴리아마이드계 고분자는 높은 기계적 강도를 지녀 [14,15], 폴리스타이렌과 같이 낮은 기계적 강도를 지니는 고분자와 혼합시켜 방사한 연구들이 많이 진행되어 왔다[16,17].

따라서 본 연구의 목적은 폴리아마이드 6와의 혼합 방사를 통하여 폴리스타이렌 전기방사 웹의 기계적 강도를 보완하고 폴리스타이렌 전기방사 웹의 열 및 수분 전달 관련 성능을 분석하여 보온성 소재로서 제시하고자 한다.

이를 위해 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6를 멀티 전기방사기를 통하여 다양한 비율로 혼합방사 하여 준비하여, 첫째로 폴리아마이드 6의 혼합 비율에 따른 폴리스타이렌 혼합 전기방사 웹의 기계적 강도를 평가하였으며, 둘째로 폴라이마이드 6의 혼합비율에 따른 폴리스타이렌 혼합

전기방사 웹의 열전달 특성을 측정하였고, 셋째로 폴리아마이드 6의 혼합비율에 따른 폴리스타이렌 혼합 나노웹의 수분 전달 특성을 평가하였다. 이를 통해서 폴리아마이드 6과 폴리스타이렌 혼합 전기방사 웹의 기계적 강도와 열 및 수분 전달 특성이 최적이 되는 비율을 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 폴리스타이렌

폴리스타이렌 (polystyrene) 또는 폴리스티롤 (polystyrol) 은 열가소성 플라스틱의 하나로 단분자인 스타이렌 (styrene)을 중합하여 만든 고분자이다. 폴리스타이렌은 단위 중량당 가격이 매우 싼 수지로 플라스틱 중 가장 많이 사용되는 고분자 중 하나로서, 경량성, 내충격성, 단열성, 방음성, 방수성, 부력성 등의 장점을 통해 내충격용 표장재, 용기, 뚜껑, 쟁반, 텀블러, 전기 절연체 등으로 응용되어 지고 있다.

폴리스타이렌은 1839년 Eduard Simon 이라는 독일의 약제사가 소합향 나무의 수지인 storax를 증류시켜 나온 물질을 styrol 이라 이름 붙이면서 처음 발견되었다. 이후 많은 연구자들에 의해서 styrol 의 중합 연구가 진행되었고, 1931년 독일의 화학 회사인 I. G. Farben 에 의해서 폴리스타이렌의 대량생산이 처음 이루어지게 되었다. 이후 1941년에 Dow Chemical에 의해 스티로폼 공정이 개발되면서 폴리스타이렌의 전성기를 맞게 된다.

Figure 1. Styrene and polystyrene.

폴리스타이렌은 스타이렌 (styrene)을 부가중합하여 만들어진 합성

방향족 고분자이며 구조적으로 연속된 하이드로카본 고리 두 개당 하나씩 페닐기가 붙어 있는 모습을 지녔다. 폴리스타이렌의 분자식은 $(C_8H_8)_n$으로 탄소와 수소로만 이루어진 물질이다. 폴리스타이렌의 분자 간 결합은 반데르발스 인력이 작용하나 하이드로카본 백본에 의한 강한 분자 내 결합에 비해 약해 매우 유연한 특성을 지녔다. 폴리스타이렌의 큰 단점인 약한 기계적 강도는 이러한 약한 분자 간 결합 때문이라고 할 수 있다.

폴리스타이렌이 기계적 강도가 다른 고분자들에 비해서 낮다는 단점을 지니고 있으나, 폴리스타이렌의 많은 장점들을 지녀 다양한 분야에서 응용되고 있다. 폴리스타이렌은 중량당 가격이 매우 저렴하여 비용 효율이 높으며, 탄소와 수소로만 이루어져 있어 표면장력이 낮아 소수성을 지닌다는 특성으로 인해 self-cleanig 연구로도 많이 연구되어 왔다[11,13,18]. 또한 폴리스타이렌의 열전도율는 0.033 W/(m · k) 로 공기의 열전도율 0.025 W/(m · k) 과 가까워 보온성 재료로도 많이 이용되고 있다.

폴리스타이렌의 좋은 성형성은 폴리스타이렌을 이용하여 전기방사할 때 다양한 방사 조건에서도 쉽게 방사가 이루어질 수 있게 한다. 이에 많은 연구들에서는 용매의 종류, 용매의 전도성, 공정 변수, 습도 등을 조절하였을 때 섬유구조가 어떻게 달라지는 지 보았다[8,9,19-21]. 특히 폴리스타이렌을 습도가 높은 환경에서 전기방사 했을 때 섬유 표면에 생기는 기공과 주름 등을 형성하여 섬유 표면의 거칠기가 높아져 초소수성 섬유를 구현해낼 수 있으며[11,13,16], 높은 전기전도도를 지니는 용매를 사용했을 경우 섬유들 사이의 전기적 반발력으로 인해 삼차원적인 구조로 솜과 같은 외관을 형성시켜 바이오소재, 수질오염 등 다양한 분야에서 응용될 수 있다[12,22]. 또한 전기방사를 통한 폴리스타이렌의 낮은 기계적 강도를 개선시키기 위한 연구로 Park 외의 연구[23]에서는 폴리스타이렌 용액에 Poly(butylacrylate) (PBA)수지 첨가한 후 열처리하여 point-bonded 구조를 형성시킴을 통해 폴리스타이렌 전

기방사 웹의 기계적 강도를 향상시켰다. 또한 폴리아크릴로니트릴 (polyacrylonitrile) 이나 폴리아마이드 6 (polyamide 6)를 폴리스타이렌과 혼합방사하여 순수한 폴리스타이렌 웹에 비해 3배 이상의 인장강도를 지닌 전기방사 웹을 개발한 연구가 진행되었다[13,16].

폴리스타이렌 재활용은 폴리스타이렌계 폐플라스틱을 감용화기술, 열분해기술, 증류기술 등을 통한 화학적 처리단계를 거쳐 열분해시킴으로써 스타이렌 모노머 (styrene monomer) 같은 화학물질로 회수하여 자원화시킬 수 있다[24]. 우리나라에서는 매년 30만 톤의 폐 폴리스타이렌이 발생되고 있으며 이러한 폐 폴리스타이렌은 주로 재생수지 제조, 경량 콘크리트 제조, 접착제 제조 등으로 재활용되어 그 재활용률이 60~80% 에 이른다. 폴리스타이렌 재활용품은 규정치 이상의 좋은 품질을 얻을 수 있으며, 재활용을 통해 업체측에서는 제품의 재료비 절감을 통하여 이익을 창출할 수 있고, 사회적 측면에서 또한 용적 밀도가 낮은 폴리스타이렌의 매립량 감소를 이룰 수 있어 폴리스타이렌의 재활용을 통해서 얻을 수 있는 이익이 많다[25]. 이처럼 폴리스타이렌은 범용 플라스틱 중 가장 전환수율이 높으며 가격측면에서도 경제성이 높아 친환경 소재로서 기대되는 소재라고 할 수 있다.

2.2. 폴리아마이드 6

폴리아마이드는 열가소성 수지이며 나일론 또는 폴리아마이드로 알려져 있다. 폴리아마이드 섬유는 아마이드 결합 (-CONH-)에 의해 단량체가 연결된 중합체로서, 폴리아마이드 중합체를 이루는 단량체의 탄소원자 수에 따라 종류가 다양하여 그 탄소 원자 수에 따라 폴리아마이드 6, 7, 9, 11, 12 혹은 66, 610, 612 등으로 표기하며 주로 폴리아마이드 6과 66가 가장 많이 알려져 있다. 폴리아마이드는 초기에 주로 섬유용으로 많이 사용되었으나, 1950년대 이후 플라스틱용으로 개발되어 폴리에스터 등과 더불어 5대 엔지니어링 플라스틱으로 그 수요가 증가하고 있다. 폴리아마이드의 주요한 성질의 하나는 큰 강도를 지녔으며 모든 섬유 중에서 가장 좋은 내마모성과 내굴곡성을 지녔다는 것이다. 보통 폴리아마이드 6의 강도가 4.8 ~ 6.4 gf/d, 폴리아마이드 66의 강도가 5.0 ~ 6.5 gf/d 이다. 또한 폴리아마이드는 탄성회복률이 매우 좋아 8%의 신장에서 100%의 회복률을 보이며 우수한 레질리언스를 지녀 좋은 내추성을 가졌다[26].

폴리아마이드 6 (polyamide 6), 나일론 6 (Nylon 6) 혹은 폴리카프로락탐 (polycaprolactam) 은 다른 폴리아마이드 종류들과 달리 축합중합을 통해 중합하지 않고 개환 중합 (ring-opening polymerization)

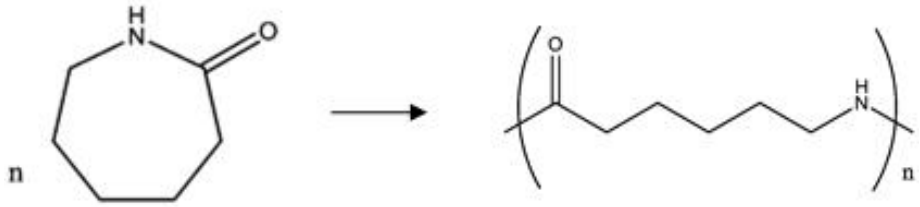


Figure 2. Caprolactam and polyamide 6.

을 통해 만들어지는 고분자이다. 폴리아마이드 6는 각각의 카프로락탐(caprolactam) 내의 펩타이드 결합 (peptide bond)가 깨어지면서 각 활성기가 양쪽으로 붙어 하나의 단분자로 다른 단분자와 새로운 결합을 형성하여 고분자의 back-bone을 형성한다(Figure 2). 폴리아마이드 6는 주쇄의 아마이드기에 의해 100%의 상대습도 대기에서 10%의 수분을 흡수하여 동일한 폴리아마이드계 섬유들이 적은 흡습성을 보이는데 비해 상대적으로 높은 흡습성을 나타내며 이에 따른 유리전이온도 감소가 나타난다[27]. 또한 폴리아마이드 6는 폴리아마이드 66에 비해서 융점과 연화점은 낮지만 높은 온도에서 안정하여 내열성이 요구되는 자동차 부품, 전기전자 소재, 가구 제품, 건축 내장재 등으로 많이 사용된다.

폴리아마이드 6 섬유 제조는 보통 용융, 습식, 건식 방사 등으로 방사할 수 있으며 스테이플, 토우, 모노필라멘트, 멀티필라멘트로 주로 방사된다. 폴리아마이드 6 전기방사로는 Mit-uppatham 외 [28]의 연구를 통해 전기방사 조건과 분자량에 따른 폴리아마이드 6 섬유의 형태와 섬유 직경의 차이를 살펴 볼 수 있다. 그 외에도 폴리아마이드 6를 이용한 전기방사 연구들은 폴리아마이드 6 웹을 통한 가스 이동 특성[29], 결정성의 변화[30], 기계적 강도 평가[31] 등이 있다. 특히 폴리아마이드 6 전기방사 웹은 Poly(methyl methacrylate) (PMMA), Poly(vinyl chloride) (PVC), Nylon 6,6 보다 높은 인장강도와 탄성계수를 지녔으며[14], 분자량을 높일수록 그 인장강도가 높아져 최대 52 MPa 까지 얻을 수 있다[15]. 높은 인장강도를 지녔다는 특성 때문에 섬유 방사 시 폴리아마이드 6를 첨가하여 기계적 강도를 개선시키는 것[17] 과 더불어 전기방사에서는 기계적 강도가 약한 다른 고분자와 혼합 방사하여 전기방사 웹의 인장강도를 개선시킨 연구들이 있어[16] 내구성이 부족한 전기방사 웹의 강도를 개선시킬 수 있는 재료로서 각광받고 있다.

2.3. 의복의 열적 쾌적성

의복의 열적 쾌적성이란, 의복을 착용함으로 인해 의복 내에 형성되는 미세기후, 온열 환경이 외부 환경기후 변화에도 바람직한 상태로 유지, 조절할 수 있는 능력으로 정의된다[32]. 의복의 열적 쾌적성은 섬유, 직물 자체의 열, 공기, 수분 등과 매우 밀접한 관계를 지니고 있으며 이 특성들에 따라 온열특성이 결정된다. 섬유, 직물의 열, 공기, 수분 특성에 영향을 미치는 인자들은 섬유, 실, 직물, 의복, 인간, 환경 등 매우 다양하고 그 인자들이 복합적으로 작용하여 열적 쾌적성을 결정시키기에 이를 규명하고자 하는 노력들이 시도되었다[6,33-35].

직물을 통한 피부와 외부환경 사이의 열전달은 크게 두 가지로 분류하여 건조 상태에서의 열전달과 수분에 의한 열전달로 구분 지을 수

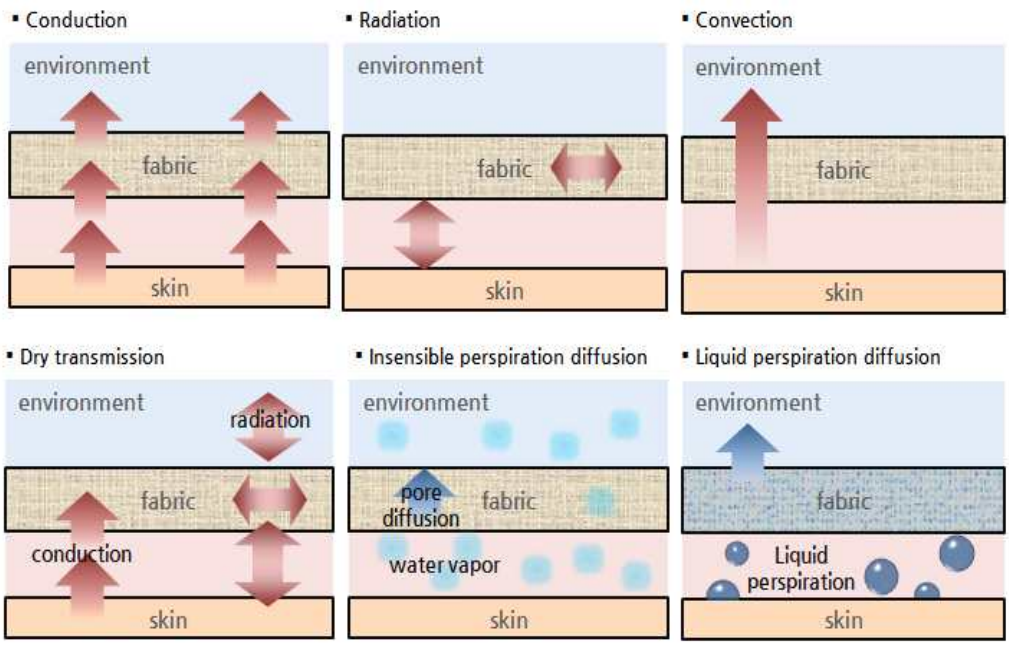


Figure 3. Heat transfer from skin to environment through fabric.

있다[36]. Figure 3은 이러한 열전달을 도식화하여 나타낸 그림이다.

건조 상태에서의 직물을 통한 열전달은 다시 세 가지로 분류하여 전도, 복사, 대류로 나타날 수 있다. 전도는 피부에서 나온 열이 피부와 직물 사이의 공기층으로 전도, 공기층에서 다시 직물로의 전도, 그리고 직물에서 외부의 공기층으로의 전도로 나타나며 섬유 고유의 열전도도(K)가 영향을 미치게 된다. 또한 복사는 피부와 직물 사이에서 반사되는 복사열, 외부 환경과 직물 사이에서 반사되는 복사열, 그리고 직물 내 섬유끼리의 복사열로 나타난다. 마지막으로 대류는 직물 내 기공을 통해 빠져나가는 열로 나타난다. 습윤 상태에서의 직물을 통한 열전달은 투습전달 (water vapor transport)과 액상 수분 전달 (liquid water transport)의 두 가지로 분류할 수 있다. 전자의 경우 발한 등의 수증기 형태의 수분이 직물의 기공을 통해서나 흡습 및 투습에 의해 배출되면서 열이 손실되는 것이며, 후자의 경우 피부에서부터 나온 액체 상태의 땀이 직물에 흡수되고 흡수된 땀이 증발하는 과정에서 열이 손실된다.

전도를 통한 열손실을 통제하기 위한 연구들로는 직물 내 함기량을 높이는 방법이 있다. Lagerská 외(2013) 의 연구에서는 다양한 섬도의 폴리에스터 이형단면 섬유를 이용하여 섬유의 섬도와 밀도에 따른 열전도성을 평가하여 본 결과, 직물의 밀도가 높아질수록 높은 열전도율을 보였으며 또한 섬유가 더 얇아질수록 밀도가 높아져 열전도율을 높아지는 역할을 하였다고 하였다[37]. 또한 Sabetzadeh 외(2012) 의 연구에서도 마찬가지로 각기 다른 밀도와 섬유 굵기를 가진 폴리아크릴로니트릴 전기방사 웹을 두 장의 폴리에틸렌 부직포 사이에 부착시켜 열전도율과 열차단 효율을 보아 섬도가 작을수록 밀도가 높을수록 더 높은 열전도율을 보임을 밝혔다[38].

복사열에 의한 열손실을 줄이기 위한 연구는 주로 금속산화물, 세라믹, 알루미늄 등과 같은 원적외선을 흡수 및 반사시켜 열효율을 높일 수 있는 보온재들을 코팅 혹은 첨가하는 방법을 통해 이루어져 왔다. 유해형 외(1993) 는 나일론 직물에 알루미늄, ZrC, 세라믹, ZrO_2 , TiO_2

를 코팅하여 단열 및 축열 특성을 조사한 결과, 세라믹이 원적외선 반사 특성에 의한 보온성에서 가장 큰 반사율을 보여 보온성에 크게 기여할 것이라고 하였다[39]. 이를 바탕으로 여숙영 외(1998) 의 연구에서는 세라믹 코팅 된 나일론 직물의 보온효과에 영향을 미치는 요인을 원적외선 방사율, 방사 강도 및 열적특성 등의 평가를 통해 알아보고자 하였다[40]. 실제 의복에 적용했을 경우의 복사열에 대한 연구로 김금서(2011)는 폴리에스터 직물 위에 알루미늄이 증착된 나노웹을 라미네이트하여 알루미늄 도포량에 따른 보온성을 살펴보았다[4]. 그 외, 대류에 의한 열 손실을 감소시키기 위한 방법으로는 섬유의 세섬도화나 중공화를 통해 공기를 세분화 시키거나 코팅이나 고밀도 직도를 이용하여 통기성을 저하시키는 방법이 있다.

2.4. 전기방사

‘전기방사 (electrospinning)’ 이라는 용어는 ‘전기적 방사 (electrostatic spinning)’ 에서 나온 용어로 섬유의 제조공정을 의미하는 방사 (spinning) 와 섬유를 형성하게 만드는데 사용되는 정전기력 (electrostatic force)을 결합시킨 용어이다[41]. 즉, 간단히 말하면 전기방사는 섬유를 형성할 수 있는 고분자 용액이나 융액에 정전기력을 가하여 섬유를 형성하게 하는 기술이라고 할 수 있다.

전기방사는 Figure 4의 도식화에서 볼 수 있듯이, 크게 고전압발생장치 (high voltage power supply), 방사용 분출구 (nozzle), 컬렉터 (collector) 로 구성되어 있다. 처음에 고분자 용액 및 융액이 내부 지름이 대략 100μm 인 노즐을 통해 나오게 된다. 이때 고분자 용액에 전압을 걸어주게 되면 고분자 용액 방울은 표면에 전하 또는 쌍극자 배향이 공기층과 용액의 계면에 유도되고 전하 또는 쌍극자의 반발로 인해 표면장력과 반대되는 힘을 발생시켜 상대 전극인 컬렉터 방향으로 원추 모양을 이루게 된다. 이때의 원추 모양의 방울을 ‘Taylor cone’ 이라고 하며, 여기서 더 높은 전압을 걸어주어 임계 전기장 세기에서 방울 표면에 형성되었던 반발 전기력이 용액의 표면장력을 극복하게 되면서

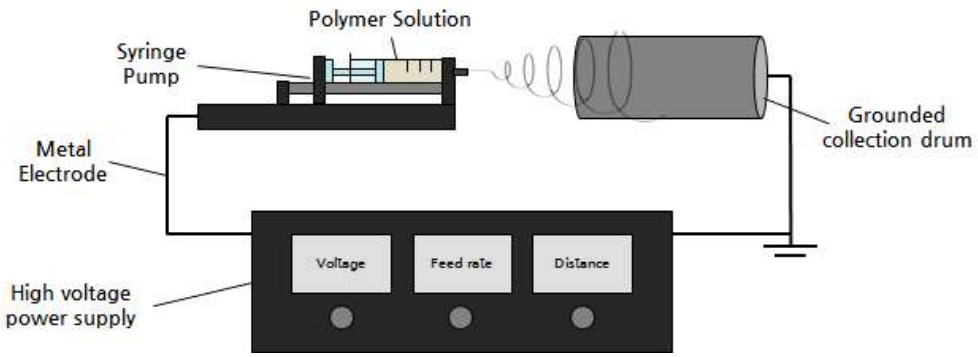


Figure 4. Schematic diagram of set up of electrospinning apparatus.

하전 된 고분자 용액의 jet가 분사되어 컬렉터에 받아지게 된다. 노즐에서 컬렉터로 분사되는 동안 신장 (stretching) 과 고전압에 의한 불안정적인 휘핑 (whipping)을 통해서 더 가늘어지게 되어 컬렉터에 받아진 섬유는 나노에서 마이크로 사이즈의 매우 가는 섬도를 지니게 된다. 또한 섬유가 형성됨과 동시에 용매가 휘발한다[42, 43].

전기방사로부터 받아진 섬유의 특성에 영향을 끼치는 인자로는 고분자 용액의 특성과 전기방사의 설정 조건, 방사의 외부 환경 조건으로 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 고분자 용액의 특성으로는 고분자 용액의 농도, 점도, 전기전도성, 표면장력, 용매의 휘발성 등이 섬유의 형태에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이 중 농도와 점도는 밀접한 관계를 지니고 있으며 점도는 고분자 사슬의 얽힘과 유동성을 나타내는 척도이기 때문에 점도가 높아질수록 섬유의 굵기가 굵어지며 분사되는 속도가 빨라지게 된다. 또한 농도가 너무 낮을 경우 정전기력에 비해 표면장력이 높아 jet이 붕괴되어 섬유의 형태가 아닌 미세방울의 형태를 나타내게 된다. 그렇기에 가는 섬유를 형성하기 위해서는 jet이 붕괴되지 않을 정도의 낮은 점도와 함께 섬유 고분자 사슬의 얽힘이 가능할 정도의 높은 점도를 지녀야한다. 이는 고분자 특성에 따라 달라지지만 0.5-50 poise 정도의 점도를 가질 경우엔 섬유를 형성하나, 점도가 너무 높거나 낮을 경우 섬유를 형성하지 못한다고 보고된 바 있다[44]. 고분자 용액의 전기전도성은 고분자 종류, 용매의 전기전도성, 이온화 가능한 전해질 첨가 여부 등이 영향을 미친다. 용액의 전기전도성이 높아질수록 형성된 섬유의 직경은 줄어들게 되며, 이와 달리 전기전도성이 낮아지면 정전기력에 의한 jet의 신장이 불충분하여 균일하지 못한 섬유를 얻게 된다[42].

전기방사 설정 조건으로는 방사 시 걸어준 전기장의 세기, 노즐과 컬렉터 사이의 거리 및 각도, 용액의 토출량 등으로 나눌 수 있다. 전기장의 세기를 증가시키면 고분자 용액과 공기층의 계면에 형성되는 전하밀도가 증가하게 되어 보다 더 가는 섬유를 얻을 수 있다. 하지만 용액

의 표면장력에 비해 낮은 전기장 세기를 걸어주게 되면 표면장력을 이기지 못하여 섬유를 형성하기보다 미세 방울 형태를 이룬다[43]. 노즐과 컬렉터 사이의 거리 또한 멀어질수록 고분자 용액의 농도와 관계없이 섬유의 미세 방울 형성을 감소시키는 결과를 가져온다.

외부 환경 조건의 경우, 전기방사 시 온도와 습도가 섬유의 형태를 변화시키는 영향인자이다. 온도와 습도의 경우 용매의 휘발에 직접적인 영향을 미치기 때문에 온도가 높을수록 습도가 낮을수록 용매의 휘발 속도를 높여 섬유의 고체화를 도우나 지나치게 높은 온도와 낮은 습도는 고분자 용액이 분사되기 전에 용매를 휘발시켜 노즐의 미세한 구멍을 막기 때문에 전기방사 시 적정한 온도와 습도를 유지하는 것이 중요하다. 특히 온도는 고분자 용액의 점도와 부적 상관관계를 지니고 있어 온도가 높아지면 용액의 점도를 낮추는 효과를 주게 되어 형성된 섬유가 가늘어지게 된다[28]. 고분자 용액 특성과 전기방사 설정 조건과 달리 습도는 주로 형성된 섬유의 표면과 단면 형태에 큰 영향을 끼친다. 습도가 높은 환경에서 분사시켰을 경우 수증기에 의한 상분리 (vapor-induced phase separation) 원리에 의해 섬유 표면에 미세한 기공을 형성시키게 된다는 연구들이 보고되고 있다[9,19]. 이에 습도를 조절하여 기공성이 높은 전기방사 웹을 개발 및 응용하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다[45].

전기방사는 위와 같이 다양한 방사 조건에 따라 수 마이크로 사이즈에서 수 나노 사이즈까지의 다양한 직경의 섬유를 형성시킬 수 있으며 특히 사람의 머리카락 보다 100배 이상 가는 나노 섬유를 만들 수 있다는 것이 가장 큰 장점이라고 할 수 있다. 또한 인장강도는 섬유가 가늘수록 강해진다는 이론을 바탕으로 전기방사 웹이 기존의 폼이나 필름에 비해 높은 인장강도를 보임을 확인할 수 있다[46,47]. 이 외에도 전기방사는 적은 양의 고분자 물질로도 웹을 형성시킬 수 있고 다양한 고분자 및 무기물로도 만들 수 있어 다재다능한 기술이며 형성된 웹은 기존 섬유에 비해 부피 대비 표면적 비가 높으며 공극률이 매우 높다는 장점

을 지니고 있어 필터, 박막 등의 고효율성 및 초기능성 소재 개발 분야는 물론이고 생의학 분야에도 많이 적용되고 있다[42]. 특히 전기방사 웹의 넓은 표면적과 높은 공극률로 인한 높은 투습성과 공기투과성 등의 호흡성(breathability), 나노 사이즈의 공극에 의한 미세입자 투과 저항성과 방수 및 방풍 효과, 높은 공기함량으로 인한 열차단성, 초경량성 등의 다양한 장점을 지녀 텍스타일 분야에서는 보호용 의복 소재로서 전기방사 웹의 가능성을 높이 보고 있다[48].

전기방사 웹의 열차단성을 통한 보온성 소재로서의 가능성은 많은 연구에서 언급되고 있으나 아직까지 실질적으로 전기방사 웹의 보온성을 평가한 논문은 소수에 지나지 않는다. Sabetzadeh 외(2012)는 폴리아크릴로니트릴 나노 웹을 두 장의 폴리에틸렌 부직포 사이에 넣어 열차단성 및 열전도율 실험을 실시하였고[38], Kim 외(2011)의 연구에서는 실크 벽지의 낮은 열차단성을 보완시키기 위해 TiO_2를 첨가한 폴리우레탄 나노 웹을 라미네이트한 실험을 통해 전기방사 웹의 보온성 소재로서의 가능성을 확인하였다 [49]. 하지만 아직까지 전기방사 웹 자체만의 보온성을 평가하고자 한 연구가 부족하나 전기방사에 대한 관심이 급증하면서부터 전기방사 웹 활용의 증대와 더불어 보온성 전기방사 웹에 대한 연구 또한 활성화될 것이라 예상된다.

최근 들어 신기술들을 응용한 다양한 방법의 전기방사법이 개발되어 새로운 기술이 필요한 분야에 접목되어 가고 있다. 가령 컬렉터의 모양이나 개수를 달리하거나 전극의 위치나 개수, 형태 등을 조절하여 다양한 형태의 전기방사 웹을 제조하며 노즐의 수를 늘려 방사 속도를 빨리하기도 한다. 또한 컬렉터가 빠른 속도로 회전할 수 있게끔 함으로 분사된 섬유가 신장 및 배향이 되도록 하여 웹의 강도를 개선시키는 방법 등이 있다[50]. 많은 신소재 개발 연구자들은 전기방사의 각기 다른 방법들을 이용하여 각자의 분야에 적합한 방법을 모색할 수 있다.

이처럼 전기방사는 기존 소재 생산 기술의 한계점을 극복할 수 있는 기술로서 전기방사로 만들어진 웹은 섬유, 전기, 전자, 의료, 환경 등 다

양한 산업 분야에 확대 및 적용될 수 있어 학문적, 산업적으로 기대되는 연구 수단이다(Figure 5).

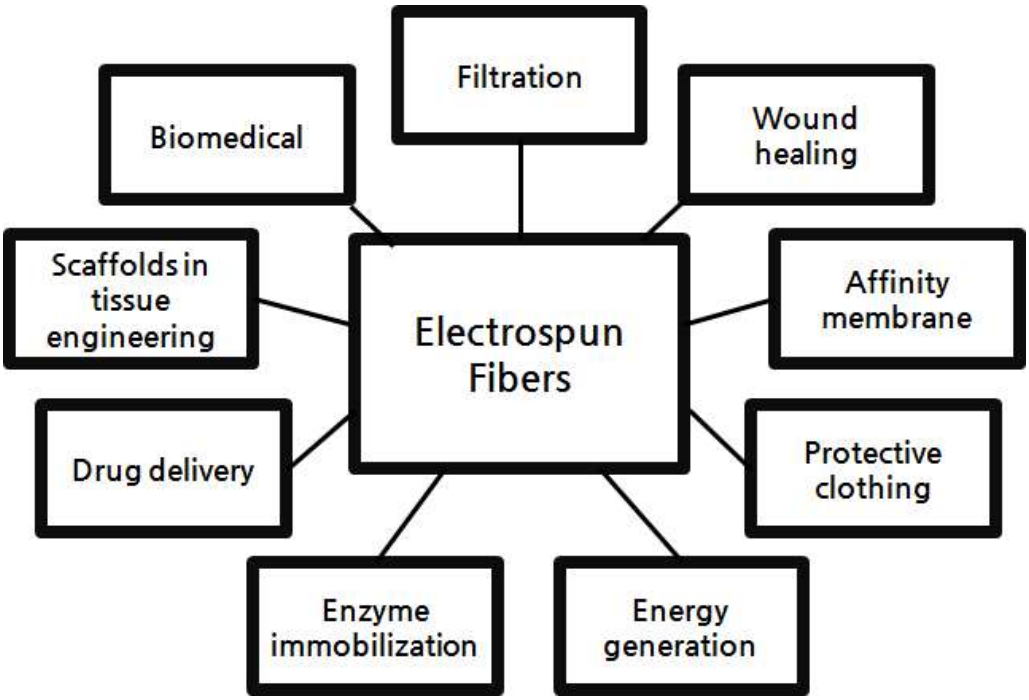


Figure 5. Applications of electrospun fibers in different sectors. [31]

Ⅱ. 실험

1. 시료

1.1. 고분자 및 시약

본 연구에서는 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6 의 전기방사를 위해 polystyrene pellet (PS pellet, M_w=350,000g/mol,Aldrich)와 Nylon 6 pellet (M_w=g/mol,Aldrich)을 준비하였다. 각 고분자의 물성 정보는 Sigma-Aldrich에서 받았으며 Table 1 에 나타내었다.

그리고 전기방사 웹을 제작하기에 앞서 고분자 용액을 제조하였다. 폴리스타이렌은 특급 시약 등급의 N,N-dimethylformamide (DMF, $HCON(CH_3)_2$=73.10, DAEJUNG)와 tetrahydrofuran (THF, C_4H_8O=72.11, DAEJUNG)를 용매로 사용하였고, 폴리아마이드 6는 특급 시약 등급의 formic acid (CH_2O_2=46.03, DAEJUNG)와 acetic acid (CH_3COOH=60.05, DAEJUNG)를 용매로 사용하였다.

Table 1. Specifications of polymers

polymer	M_n	M_W	T_m	T_g	Density (at 25℃)
PS	~ 170,000	~ 350,000	240℃	95℃	1.04g/mL
PA 6			228.5℃	62.5℃	1.084g/mL

1.2. 전기방사 웹의 제조

1.2.1. 전기방사 조건 선정

각 폴리스타이렌, 폴리아마이드 6 전기방사 웹의 최적 조건을 찾기 위해서 선행연구[21, 28]를 바탕으로 농도, 전압, 용액의 토출량의 범위를 설정하였다. 설정한 범위 내에서 농도, 전압, 용액의 토출량을 각기 달리한 후 방사된 섬유를 광학현미경을 통해 미세 방울 (beads) 없이 일정한 섬유를 형성하는지 확인하였고, 일정한 섬유를 형성시키는 조건에서 방사된 섬유들을 전계방출 주사전자 현미경을 통해서 섬유 직경이 균일한지 확인하여 최적의 방사 조건을 선별하였다.

(1)용액의 농도

폴리스타이렌 전기방사 용액을 제조하는데 사용한 용매로는 주로 DMF만을 사용하거나 DMF와 THF를 섞어서 사용한다. 폴리스타이렌의 용매로 DMF 와 THF 비율 3/1을 사용하였으며 그 농도는 10, 12, 14, 16, 18, 20 wt%로 하여 용액을 만들어 비교하여 최적 농도를 선정하였다.

폴리아마이드 6 용액은 formic acid 와 acetic acid를 용매로 사용하였다. Formic acid 와 acetic acid의 비율은 4:1로 조절하여 사용하였다. 폴리아마이드 6의 농도는 18, 20, 22, 24 wt%로 만들어 최적 농도 조건을 찾았다.

(2)전압

폴리스타이렌, 폴리아마이드 6 용액은 농도별로 15 ~ 20 kV의 전압 조건으로 방사하여 섬유가 균일하게 형성되는 최적 전압을

광학현미경을 통해 살펴 보았다.

(3)용액의 토출량

폴리스타이렌, 폴리아마이드 6 전기방사의 최적 농도 18wt%와 최적 전압 20kV로 선정하였으며, 선정한 농도 18wt%와 전압 20kV에서 용액의 토출량을 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 ml/h 의 값으로 조절하면서 섬유가 균일하게 형성되는 최적 토출량을 선별하였다.

1.2.2. 혼합 전기방사 웹의 구성

폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 혼합 전기방사 웹은 multi-electrospinning 기기 (eS-robot® Electrospinning/spray system, Nano NC, Korea)를 이용하여 방사하였다. 전기방사 기기의 대략적인 구조는 Figure 6에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 전기방사기에서 사용할 수 있는 주사기 수는 총 4개로 양쪽에 두 개씩 주사기 펌프 (syringe pump)에 고정하여 방사할 수 있게 설계되었다. 양쪽에 설치되어 있는 주사기 펌프는 수평으로 움직여 컬렉터 (collector)에 균일하게 방사할 수 있게끔 하였다. 사용된 주사기의 노즐 크기는 22G였으며 주사기로는 용량 10ml 에 직경 15.29mm인 주사기를 사용하였다. 알루미늄 호일로 싸여진 원통형 컬렉터는 100m/min 속도로 회전하여 양쪽에서 방사된 섬유들이 균등하게 받아지게끔 하였으며 회전으로 인한 섬유의 신장을 유도하였다. 받아진 전기방사 웹은 추후 성능 평가를 위하여 진공 오븐에서 24시간 동안 용매를 휘발시킨 후 알루미늄 호일에서 떼어내었다.

본 연구에선 다양한 비율의 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6 혼합 전기방사 웹을 제작하기 위해서 주사기 비율을 서로 달리하였다. 총

4개의 주사기에서 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 주사기 비율은 4/0, 3/1, 2/1, 2/2, 1/2, 1/3, 0/4 로 총 7가지 비율로 설정하였다. 또한 폴리스타이렌 나노웹의 경우 매우 약한 인장강도로 인해 두께가 60㎛ 미만일 때는 알루미늄 호일에서 분리시키는 과정에서 찢어지기 쉬워 60㎛ 이상으로 제작하였으며 전기방사 웹의 기공도, 인장강신도, 투습도, 공기투과도, 열 차단 성능 등의 다양한 성능들이 두께에 영향을 받으므로 각기 다른 비율로 방사된 혼합 전기방사 웹의 두께를 통일시켜 제조하였다. 하지만 나노웹의 두께 측정은 10장의 웹의 각기 다른 부분 10군데에서 5번씩 측정하여 평균하였다. 또한 각 웹의 무게 측정은 각 10장의 웹의 무게를 측정하여 평균하였다. 7가지 비율의 폴리스타이렌/폴리아마이드 6 혼합 전기방사 웹의 자세한 특성은 Table 2에 나타내었다.

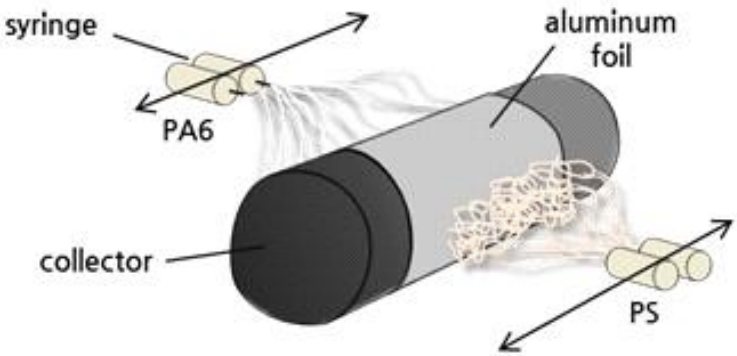


Figure 6. Schematic diagram of multi-jet electrospinning.

Table 2. Specifications of electrospun webs

Sample	Syringe proportion (PS : PA6)	Thickness (μm)	Weight (g/m2)
S4	4 : 0	60 ± 4	8.057 ± 0.381
S3A1	3 : 1	60 ± 3	8.674 ± 0.476
S2A1	2 : 1	60 ± 2	9.161 ± 0.519
S2A2	2 : 2	60 ± 4	9.458 ± 0.445
S1A2	1 : 2	60 ± 1	9.950 ± 0.731
S1A3	1 : 3	60 ± 2	10.135 ± 0.537
A4	0 : 4	60 ± 1	12.713 ± 0.499

2. 전기방사 웹의 구조적 및 외관적 특성 평가

2.1. 전기방사 웹의 표면 특성 관찰

다양한 주사기 비율로 방사한 혼합 전기방사 웹의 섬유 직경 및 형태를 관찰하며 주사기 비율에 따른 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 혼합 정도를 가시적으로 확인하기 위해 전계방출 주사전자 현미경 (AURIGA, Carl Zeiss, Germany)으로 살펴보았다. 방사된 섬유의 직경을 계산하기 위해 주사전자 현미경으로 촬영한 이미지를 사용하여 이미지 분석 소프트웨어 (Image J2x, USA)로 측정하였다.

2.2. 전기방사 웹의 외관 특성 관찰

폴리스타이렌 전기방사 웹의 경우 습도가 높은 환경에서 방사했을 경우, 독특한 외관을 보여준다는 선행연구를 고려하여 디지털 사진기 (EOS 650D, Canon, Japan)을 통해 전기방사 웹의 외관을 살펴보았다.

2.3. 혼합 전기방사 웹의 구성 비율 측정

2.3.1. 용해 시험 분석

주사기 비율에 따른 폴리스타이렌/폴리아마이드 6의 혼합 전기방사 웹의 중량 비율 분석을 위해 용해 시험 분석을 실시하였다. 용해 시험은 텍스타일 화학적 정량 분석 기준인 KS K ISO 1833을 기준으로

하였다. 용해 시험에 앞서 폴리아마이드 6는 DMF에 용해되지 않는지, 폴리스타이렌은 formic acid에 녹지 않는지 확인하기 위해 각 고분자 pellet을 소량의 formic acid와 DMF에 용해시켜 보았다. 폴리아마이드 6의 주사기 비율이 더 높은 혼합 전기방사 웹의 경우 폴리아마이드 6의 중량 비율을 알기 위해 Formic acid에 용해시켰다. 또한 폴리스타이렌 주사기 비율이 높은 혼합 전기방사 웹의 경우는 폴리스타이렌의 용매인 DMF에 용해시켰다. 용해한 후 용매, 뜨거운 물, 희석액, 차가운 물 순으로 세정한 뒤 건조하여 무게를 측정하였다. 무게 변화량을 식 (1)을 이용하여 결과를 계산하였다.

$$P = \frac{100 m_1 d}{m_0} \qquad (1)$$

P : 순수 불용 성분비 (%)

m_0 : 시험편의 질량

m_1 : 잔여분의 질량

d : 시약에 불용인 성분의 질량 변동에 대한 보정 계수 (1)

2.3.2. 현광 현미경 이미지 분석

주사기 비율에 따른 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 혼합 정도와 분포 비율을 단위 면적당의 비율로 분석하기 위해서 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6 용액에 각기 다른 색의 형광색소를 첨가한 후 방사하여 공초점 주사 현미경 (LSM 700, Carl Zeiss, Germany)을 통해서 관찰하였다. 형광 색소 (fluorescent dyes)로는 폴리스타이렌 용액에는 Rhodamin B (≥95% HPLC, Aldrich)를 5㎍/mL로 첨가하였고, 폴리아마이드 6 용액에는 Fluerescein isothiocyanate isomer I

(FITC, ~98% HPLC, Aldrich)를 5㎍/mL로 첨가한 후 방사하였다. 공초점 현미경을 통해 두께 60㎛에서 1㎛ 단위로 촬영한 전기방사 웹 이미지를 이미지 분석기 (Adobe Photoshop CS4)를 이용하여 전체 섬유 픽셀 수에 대한 각 폴리스타이렌 (빨강)과 폴리아마이드 6 (초록)의 픽셀 (pixel) 값을 계산하여 평균 하였다.

2.4. 기공 특성 측정

전기방사 웹의 기공 크기를 측정하기 위해서 Capillary pressure tester (CF-1500 Porometer, PMI, USA)를 사용하여 기공의 크기 및 분포를 측정하였다. 실험 조건은 최대 압력 200 psi, 최대 유속 25,000 cc/min으로 설정하였으며 dry test 와 wet test를 연속으로 실시하였다. Wet test는 표면장력이 작은 용액 (gal wick, 15.9 dynes/cm)을 사용하여 웹의 기공을 적신 후 용액을 밀어내는 기체의 압력과 기공크기의 상관관계를 확인한다. 실험은 각 웹 당 5회 반복 실시하였다.

또한 전기방사 웹의 총 기공 부피와 기공도를 측정으로는 수은 침투를 이용한 기공률 측정장치인 Automatic porosimeter (Micromeritics Autopore VI9500, PRO-TECH, Korea)를 이용하였다. 수은은 젖지 않는 액체로서 외부로부터 압력이 가해져야만 침투가 일어나며 기공의 크기가 작을수록 높은 압력이 요구된다. 수은의 침투결과는 기공반경 혹은 침투압력과 시편 질량당 침투된 누적부피로 나타나며 그 결과 압력 (혹은 기공 크기)에 따라 침투되는 수은의 누적 부피의 함수로 나타낼 수 있다.

3. 전기방사 웹의 성능 측정

3.1. 물리적 성능

폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 주사기 비율에 따른 전기방사 웹의 내구성을 평가하기 위해서 ASTM D 5035 스트립법에 의거하여 만능재료시험기 (Universal testing machine, Instron-5543, Instron, USA)로 인장강신도를 측정하였다. 전기방사 웹은 길이 40 mm x 너비 10mm x 두께 60 ㎛ 크기로 준비하였다. 실험은 상온에서 만능재료시험기에 장착된 시료가 인장되어 끊어질 때의 stress-strain curve를 구하며 이때 인장 속도는 10mm/min으로 설정하였다. 모든 시료는 각기 다른 부분으로 5회 반복 측정하여 평균하였다.

3.2. 공기 및 수분 투과 성능

3.2.1. 전기방사 웹의 공기 투과 성능

전기방사 웹의 공기투과도는 기공특성 측정장비인 Capillary flow porometer (CFP-1200, PMI, USA)를 사용하여 측정하였다[6]. 기공 측정기를 이용한 공기투과도는 설정된 최대 압력까지 압력이 높아질 때 각 초의 압력에서 시료 기공을 통과하는 공기량 (cc/sec)을 통해 나타낸다. 실험 조건은 최대압력 200psi, 최대 통과유량 25,000 cc/min으로 설정하였다. 실험은 5회 반복 실시하였다.

3.2.2. 전기방사 웹의 수분 투과 성능

수분 투과 성능은 투습도 실험법인 염화칼슘법 (ASTM E 96: KS K 0594)를 바탕으로 측정하였다. 투습도 측정을 위한 전기방사 웹은 지름 7cm의 원형으로 잘라서 준비하였다. 투습컵에 고체 형태의 염화칼슘을 웹과 5mm 정도 간격이 되게끔 채우고 웹을 덮어 고정시킨 후 40 ℃, 90 RH%로 설정해놓은 항온항습 챔버에 넣어 1시간 후의 무게와 2시간 후의 무게를 측정하여 1시간 동안의 무게 변화량을 측정하였다. 무게 변화량을 이용하여 투습량은 식(2)을 이용하여 24시간 동안의 단위 면적당 투습량으로 환산하였다. 실험은 5회 반복 측정하였다.

$$WVT = \frac{G}{t \times A} \times 24 \qquad (2)$$

WVT : rate of water vapor transmission (g/m^{2}24hrs)

G : Weight change (g)

t : time during which G occurred (hr)

A : area of measuring unit (m^2)

3.3. 표면 친수성

폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 주사기 비율에 따른 각기 다른 전기방사 웹의 표면 친수성 정도를 평가하기 위한 방법으로 접촉각 측정 장비 (Theta Lite, Attension, KSV Instrument, Finland)로 정적 접촉각 (Static contact angle)을 측정하였다. 웹은 정확한 접촉각 측정을 위해 공기에 닿는 웹 표면을 평편하게 만들어 슬라이드 글라스 위에 양면테이프를 이용하여 부착하여 실험을 하였다. 물방울과 웹의

표면이 잘 보이도록 실험 장비의 카메라 초점을 맞춘 후 증류수 3.5 ± 0.5 ㎕를 일정한 높이 위에서 웹 표면 위로 떨어뜨린 후 1초와 10초 단위로 60초간의 이미지를 얻었다. 그 후 각 이미지의 base line을 설정하여 물방울의 오른쪽과 왼쪽의 접촉각을 측정하여 그 평균값을 계산하였고 각 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 초의 접촉각을 비교하여 시간에 따른 접촉각 변화 정도를 분석하였다. 접촉각 실험은 각기 다른 부위로 선택하여 10번 반복 실험 하였다.

3.4. 열 차단 성능

3.4.1. 열 전도성

전기방사 웹의 열전도율은 가와바타 써머라보 2 (KES-F7, Kato Tech co., Japan)로 측정하였다. 열전도율 실험은 20℃, 65 RH%으로 조절되는 항온항습실에서 실시하며, 20℃의 water box와 30℃의 BT box 사이에 웹을 두고 두 box의 온도를 일정하게 유지시키는데 필요한 열량을 측정한다. 이 때 웹은 24시간 동안 실험 환경과 같은 20℃, 65 RH%에서의 컨디셔닝을 거친 후 실험을 실시하였으며, 5회 반복 실험하였다. 측정된 열량은 아래 식 (3)를 사용하여 계산한다.

$$K = Q_s \times \frac{d}{A \times \Delta T} \qquad (3)$$

K : thermal conductivity (W/cm℃)

Q_s : heatloss(watt)

ΔT : temperature difference
(between water and BT box, 10℃)

d : sample thickness

A : area of the measuring unit (55 cm^2)

3.4.2. 열 저항성

본 연구에서 열저항성은 ISO 11092(2009)를 기준으로 하였다. 항온항습 챔버 내의 열판 온도는 35℃로 설정하였으며 웹을 열판 위에 고정시키고 챔버 내 온습도가 안정화 된 후에 열판의 온도를 35℃로 유지시키기 위해 소비되는 전력량을 측정하였다. 항온항습 챔버 내 온습도는 표준상태 (20℃, 65 RH%, 기류 1m/s)로 하며 열판은 35℃로 설정하였다. 전기방사 웹은 30×30 cm로 준비하여 열판에 밀착시켜 고정하여 실험을 실시하였다. 실험 결과는 열판의 온도를 35℃로 유지하기 위해 소비되는 전력량을 식 (4)을 사용하여 열저항성을 측정하였다.

$$R_{ct} = \frac{(T_m - T_A) \times A}{H - \Delta H_c} - R_{ct0} \qquad (4)$$

R_{ct} : thermalresistance(m^2K/W)

$R_{ct,0}$: bareplateresistanceforthemeasurementofthermal resistance (m^2K/W)

T_m : temperatureofthemeasuringunit(℃)

T_a : airtemperatureinthetestenclosure(℃)

A : area of the measuring unit (m^2)

H : heating power supplied for measuring unit (W)

ΔH_c : correctiontermforheatingpowerforthe measurement of thermal resistance R_{ct}(W)

4. 통계적 분석

실험 결과들을 통해서 알 수 없는 상관성과 실험 결과들 사이의 상관성을 확인해보기 위해 SPSS 21을 사용하였다. 즉, 나노웹의 구조적 특성이나 화학적 특성이 나노웹의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 상관관계 분석을 실시하였다. 나노웹의 구조적 특성 인자들로는 기공 크기, 기공도, 섬유 직경 등으로 선정하였으며 나노웹의 성능은 공기투과도, 투습도, 열전도도, 열 저항성으로 선정하여 이들 간의 상관분석을 통하여 상관계수 (correlation coefficient)를 도출하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 전기방사의 최적 조건

본 연구에서는 용액의 농도를 변화시키면서 전기방사에 적합한 농도 범위를 찾았으며, 이 농도 범위에서 전압과 용액의 토출량을 조절하여 균일하고 일정한 섬유를 지닌 전기방사 웹을 형성하기 위한 최적의 방사 조건을 찾고자 하였다.

폴리아마이드 6를 매우 높은 유전율을 지닌 formic acid에 녹이면 용액 속에서 고분자 전해질을 형성하여 매우 얇은 직경의 섬유를 만들어 낼 수 있다. 하지만 용매로 formic acid 만을 사용한다면 용액의 점도가 너무 낮아 쉽게 방사할 수 없는 단점이 있다. 여기에 acetic acid를 첨가하면 용액의 점도를 높이며 formic acid만 사용했을 때보다 용매의 휘발성을 높일 수 있고 얻어진 웹의 섬유 또한 균일하다[52]. Acetic acid의 비율이 높으면 너무 높은 휘발성으로 인해 노즐이 막혀 방사가 되지 않는다. 이를 토대로 본 연구에서는 formic acid 와 acetic acid의 비율을 4:1로 조절하여 사용하였다.

폴리아마이드 6 용액의 농도는 폴리아마이드 6를 전기방사한 선행연구들[21, 32, 51]을 통하여 10~30wt%로 설정하여 전압을 달리하여 보았다. 15wt% 농도 이하에서는 16kV부터 방사가 가능했으나 용액의 점도가 너무 낮아서 jet이 전기장에 의해 Taylor cone을 형성하지 못하고 미세방울로 붕괴된다[43]. 16wt% 용액에서는 19kV, 18, 20, 22, 24 wt% 에선 각각 20, 21, 22, 23kV에서 방사가 시작되어, 용액의 농도가 높아질수록 방사가 시작되는 전압이 함께 상승하였다. 하지만 25wt% 이상의 농도에서는 방사가 되지 않았다.

이는 이 이상의 농도에서는 점도가 지나치게 높아져 방사가 되지 않는 것으로 보인다. 용액의 토출량은 0.1~1.0 ml/h 로 달리하여 방사해본 결과, 0.2 ml/h에서 방사가 시작됨을 확인하였다. 하지만 그 이상의 토출량에서는 용액의 토출량이 너무 많아 노즐 앞에 용액이 고이게 되는 것을 관찰할 수 있었다. 전압은 토출된 용액 표면에 전하 또는 쌍극자를 형성하여 전기적 반발로 용액의 표면장력과 반대되는 힘을 발생시켜 컬렉터에 가늘고 긴 섬유를 만들게 한다. 하지만 토출량이 많아지게 되면 토출된 용액 표면적이 커져서 표면에 형성되는 전하가 상대적으로 감소하여 용액의 표면장력을 이기지 못해 용액이 중력에 의해 흘러내리게 된다[43]. 정승은[47] 의 연구에 의하면 적정 전압에서 방사하여도 방사 용액의 토출량이 많아지면 토출된 용액이 모두 섬유상을 이루지 못하고 컬렉터에서 부분적으로 덩어리진 형태를 나타낸다고 하였다. 이에 본 연구에선 0.2ml/h를 적정 용액 토출량으로 선정하였다.

각 농도와 전압에서 방사한 전기방사 웹의 섬유 상태는 FE-SEM 이미지를 통해 확인하였다 (Figure 7). FE-SEM으로 10,000배, 20,000배 확대하여 관찰한 결과, 비드를 형성하지 않으며 가늘면서도 균일하고 일정한 섬유가 나타나는 조건으로 '농도 18wt%, 전압 20kV, 용액 토출량 0.2ml/h'를 최적 조건으로 선택하였다.

폴리스타이렌 전기방사 용액을 제조하는데 사용한 용매로는 주로 DMF만을 사용하거나 DMF와 THF를 섞어서 사용한다. 하지만 DMF를 단독으로 사용하면 DMF의 낮은 휘발성에 의해 동일한 조건에서 THF와 섞어서 사용했을 경우보다 컬렉터에 받아지는 섬유의 상태가 양호하지 못하다. 또한 THF 비율이 DMF 비율보다 높을 경우엔 THF의 높은 휘발성에 의해 노즐 구멍이 막혀 방사가 되지 않게 된다[8, 20]. 반면 DMF에 적당한 양의 THF를 섞어서 사용할 경우 적절한 휘발성으로 인해 보다 양질의 섬유를 얻을 수 있다. 이에 최근 많은 폴리스타이렌 전기방사 웹 연구는 용도에 따라서 DMF와 THF

비율을 다양하게 하여 사용하고 있다.

폴리스타이렌 용액의 농도는 폴리스타이렌 전기방사 선행연구들 [8, 9, 20]을 바탕으로 10~20 wt% 범위로 설정하였다. 각 농도별로 전압을 달리해보며 방사가 시작되는 전압을 찾았다. 10 wt% 에서는 13kV 였으며, 이후 12, 14, 16, 18, 20 wt% 에선 각기 15, 16, 18, 19, 20kV 로 방사가 시작되었음을 확인하였다. 전압은 multi-electrospinning 기계 설계 상 폴리아마이드 6와 같은 전압으로 설정해야하므로 폴리스타이렌 전기방사 조건에서도 20kV로 설정하였다. 방사 가능한 전압 이상에서는 섬유의 굵기가 얇아지나 크게 달라지지 않으므로 문제가 없음을 확인하였다. 또한 방사 토출량은 0.1~2ml/h 까지 방사가 문제없이 가능함을 확인하였으나, 폴리아마이드 6와 총 용액 방사량을 동일하게하기 위하여 0.2ml/h 로 설정하였다. 각 방사 조건에서의 비드를 형성하지 않는 조건을 선정하기 위해서 광학현미경을 통해 방사 한 웹의 섬유 형태를 확인하였다 (Figure 8). 광학현미경 관찰을 통해 비드가 형성되지 않는 농도 조건인 16, 18 wt%를 선택하였고, 이후 FE-SEM을 통하여 좀 더 가늘고 균일한 섬유 형태를 나타내는 조건을 찾아내었다 (Figure 9). 그 결과 '농도 16wt%, 전압 20kV, 용액 토출량 0.2ml/h'를 최적 조건으로 선정하였다. 최종 선정된 전기방사 조건은 Table 3에 기술하였다.

Table 3. Conditions of electrospinning

Voltage	Feed rate	Tip - to - collector distance	Needle gauge
20 kV	0.2 ml/h	20 cm	22 G
Collector velocity	Syringe speed	Temperature	Humidity
100 m/min	7 m/min	25 ± 5 ℃	40 ± 5 RH%

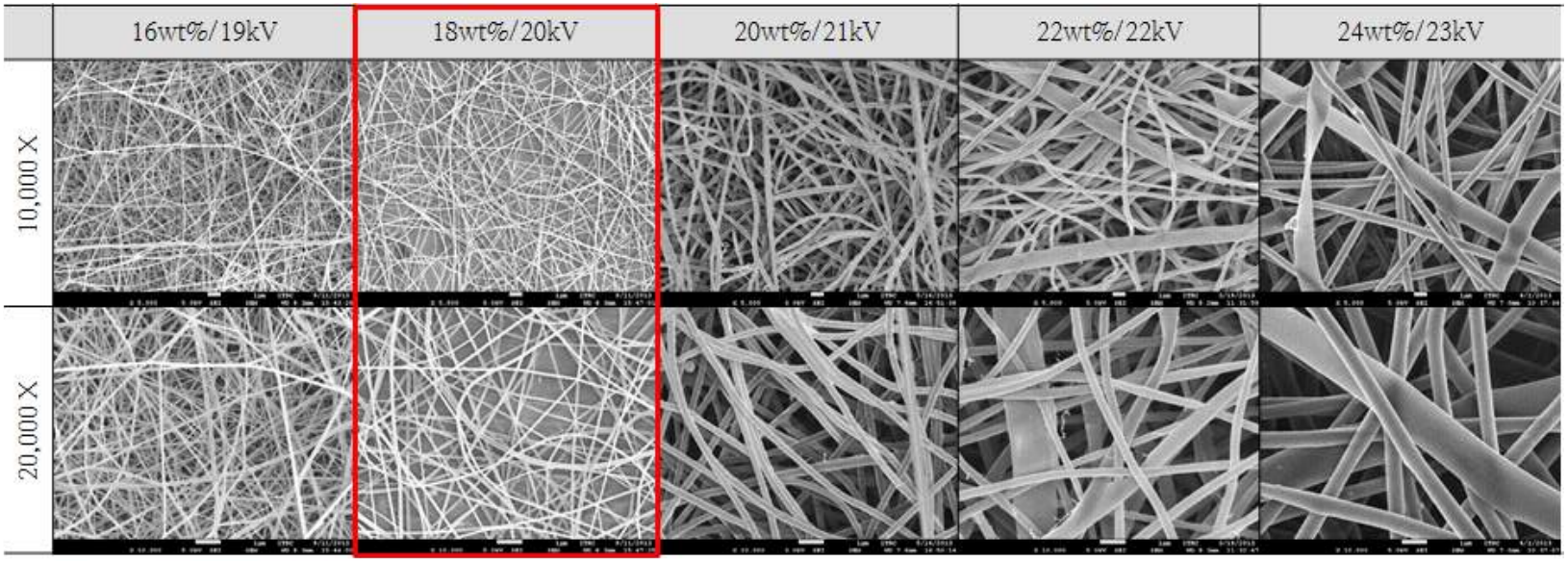


Figure 7. FE-SEM images of polyamide 6 electrospun web at various concentrations and voltages. (flow rate 0.2ml/h)

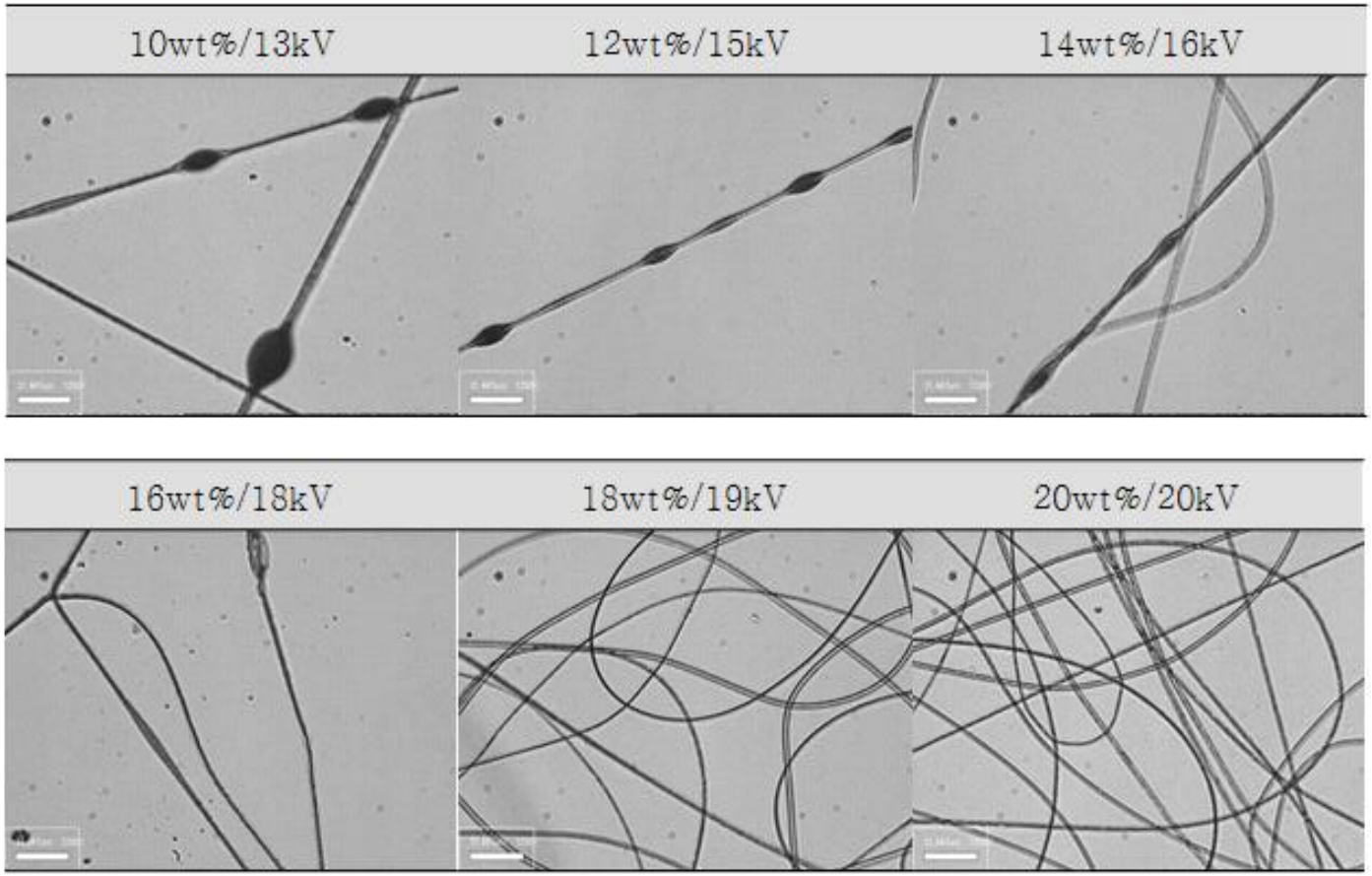


Figure 8. Optical microscope images of polystyrene electrospun web at various concentrations. (voltage 20kV, feed rate 0.2ml/h)

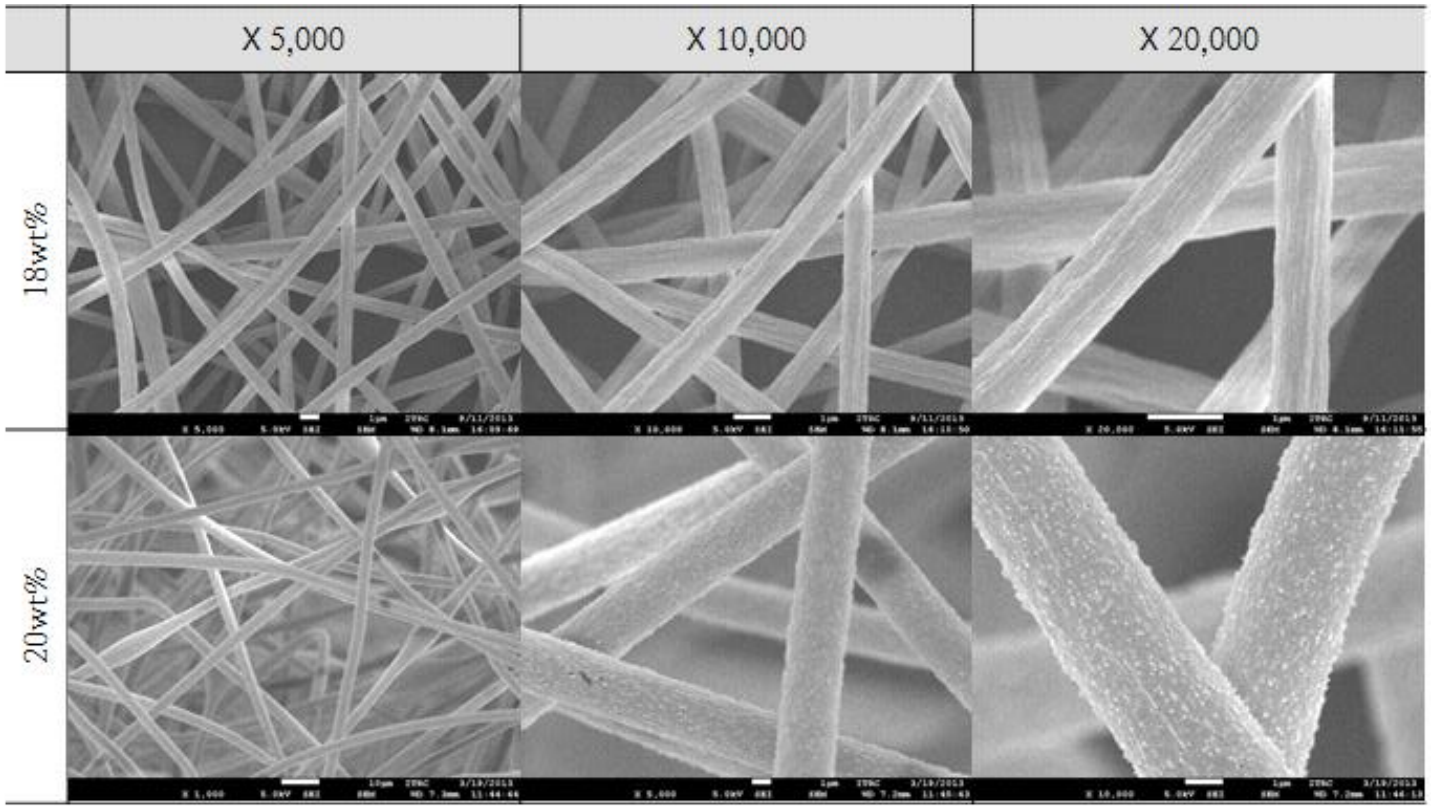


Figure 9. FE-SEM images of polystyrene electrospun web at various concentrations.
(voltage 20kV, feed rate 0.2ml/h)

2. 전기방사 웹의 구조적 및 외관 특성

2.1. 표면 특성

전기방사는 생물 고분자 (biopolymers), 생분해 고분자 (biodegradable polymers), 유기 고분자 (organic polymers) 등 다양한 고분자들을 사용하여 웹을 형성할 수 있으며 어떠한 고분자를 사용하느냐 혹은 어떠한 용매에 녹이냐에 따라서 섬유의 형태와 웹의 구조가 달라지게 된다 [52].

Figure 10는 농도 18wt%, 전압 20kV, 용액 토출량 0.2ml/h 의 조건에서 방사한 폴리스타이렌 / 폴리아마이드 6 전기방사 웹을 FE-SEM으로 촬영한 사진이다. Image J로 측정한 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유의 직경을 Table 4에 나타내었다. 폴리스타이렌 섬유의 직경은 범위 0.683 ~ 1.313 μm, 평균 0.903 μm 로 나타났으며 폴리아마이드 6 섬유는 최소 63 nm 에서 최대 170 nm, 평균 104 nm로 나노 규모의 직경을 지닌 섬유로 폴리스타이렌에 비해 1/10 정도 가는 섬유를 지님을 확인 하였다. 이는 폴리아마이드 6를 용해시키는데 사용한 formic acid 의 높은 전기전도도와 유전율로 인해 방사된 jet 전체에 전하밀도가 높아져 길고 가는 섬유를 얻을 수 있게 되기 때문이다 [51].

Table 4. Fiber diameter of fibers

Polymer	Min (㎛)	Max (㎛)	Average (㎛)	SD (㎛)
PS	0.683	1.313	0.903	0.194
PA 6	0.063	0.170	0.104	0.026

폴리스타이렌 섬유는 Figure 9의 50000배로 확대한 이미지를 보면 표면이 매끄럽고 균일한 폴리아마이드 섬유에 비해 주름이 많고 기공이 많은 표면 구조를 보인다. 이는 탄화수소로만 이루어진 폴리스타이렌과 용매의 소수성 특성으로 인한 기화 유도된 상분리 (vapor-induced phase separation, VIPS)와 용매로 사용한 DMF와 THF의 휘발성의 차이로 설명할 수 있다.

H. Fashandi 와 M. Karimi [19]의 연구에 의하면 폴리스타이렌을 습도가 높은 환경 (40 RH% 이상) 에서 방사했을 때는 고분자와 non-solvent(습도가 높은 환경에서의 수분), solvent (DMF와 THF)와 non-solvent 가 서로 섞이지 않는 상태로 상분리가 일어나게 된다고 한다. 이러한 기화 유도된 상분리를 삼각상도와 상분리 모형으로 설명할 수 있다 (Figure 11). 고분자 용액이 non-solvent인 수분과 만나게 되면 세 가지 경로로 상분리가 일어 날 수 있다. 첫 째로 homogeneous 한 부분으로 상분리를 하게 되면 안정한 상태로 고분자와 용매가 분리하게 된다. 하지만 수분의 농도가 짙어지게 되면 용액의 상분리는 binodal curve를 지나게 되고 이때는 두 번째 상분리인 metastable 한 상태가 된다. 이 상태에서는 nucleation and growth 메커니즘으로 상분리가 되는데 용매로 이루어진 핵이 여러 개 형성되는 모양을 나타낸다. 세 번째로 수분의 농도가 두 번째 상태보다 더 짙어지게 되면 상분리는 spinodal curve를 지나게 되어 unstable한 상태가 되어 spinodal decomposition 메커니즘으로 상분리를 진행하게 된다. 이 메커니즘은 두 번째 nucleation and growth 메커니즘의 핵이 점점 커지면서 인접한 핵들끼리 서로 연결된 형태를 띠게 된다.

폴리스타이렌과 용매인 DMF는 물과 서로 섞이지 않는 소수성 물질이기 때문에 습도가 높은 환경에서 매우 불안정한 상분리 형태를 나타내어 spinodal decompositon 메커니즘을 통해 섬유 내부에 DMF로 이루어진 큰 용매가 풍부한 상 (solvent-rich phase)을 형성하게 된다. DMF는 THF에 비해 증발 속도가 더뎌 섬유 표면으로 나오지

못하고 휘발 하여 섬유 내부에 큰 기공을 형성하게 되며 내부의 큰 기공으로 인한 좌굴 현상 (buckling)이 일어나 섬유 표면에 주름이 나타나 것으로 생각된다. 하지만 THF는 DMF에 비해 상대적으로 친수 성질을 지녀 상분리 시 metastable한 상태로 nucleation and growth 메커니즘의 상분리가 일어나며 높은 휘발성 물질로서 섬유 표면이 작은 기공들을 형성하게 되는 것으로 보인다 (Figure 12).

이러한 폴리스타이렌 섬유의 다공성이며 주름에 의한 거친 표면 구조로 인해서 폴리스타이렌 전기방사 웹은 넓은 표면적과 높은 기공성, 그리고 초소수성 성질을 지닌 다기능성의 소재로서 다양한 분야에 적용될 수 있다 [11, 12].

폴리스타이렌과 폴리아마이드 6 의 혼합방사 웹은 Figure 9을 통해서 각기 다른 주사기 비율에 따라 폴리스타이렌 섬유와 폴리아마이드 섬유가 적절히 혼방되어 있음을 확인 할 수 있다. S3A1에서 S1A3로 폴리아마이드의 주사기 비율이 높아짐에 따라 FE-SEM 이미지 상에서 나타나는 매우 가는 폴리아마이드 섬유의 비중이 증가하였다. 이를 통해 multi-electrospinning을 이용한 다양한 비율의 폴리스타이렌과 폴리아마이드 혼합방사 웹의 제조 가능성을 확인하였다. 또한 최적 조건으로 설정한 전기방사 조건에 의해 균일하고 일정한 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유를 얻을 수 있었음을 확인할 수 있다.

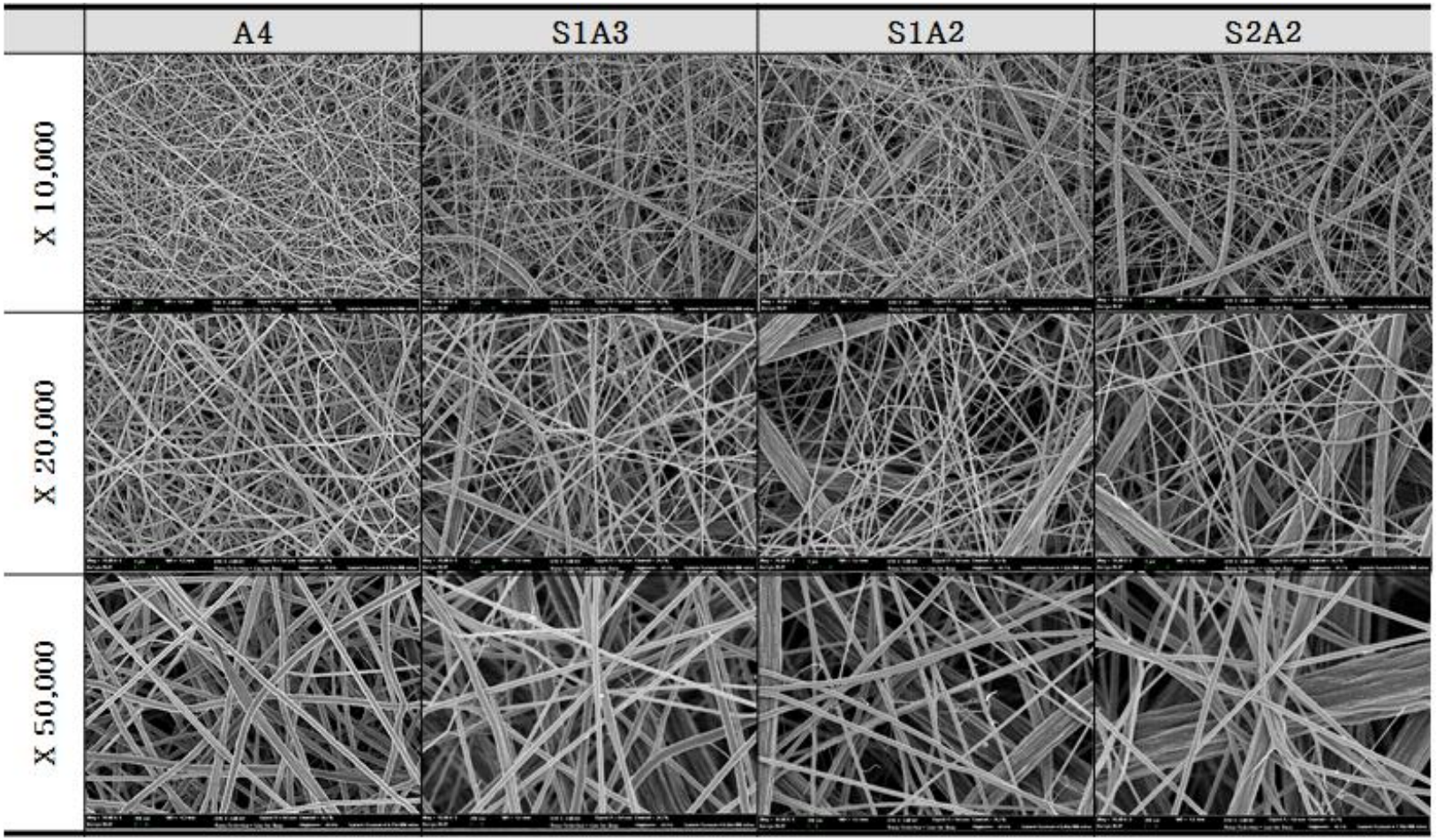


Figure 10. FE-SEM images of electrospun web.

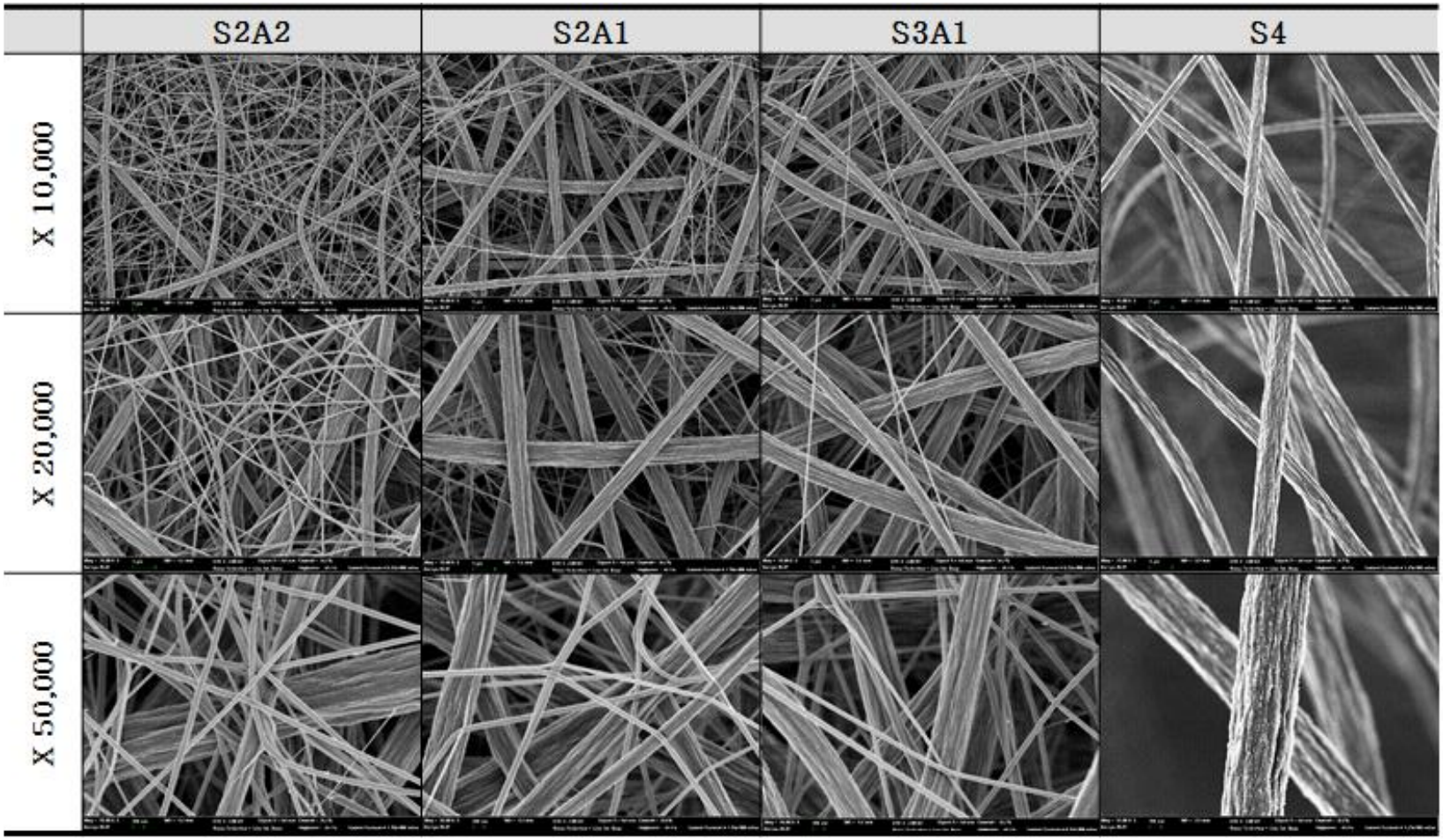


Figure 10. FE-SEM images of electrospun web (continued).

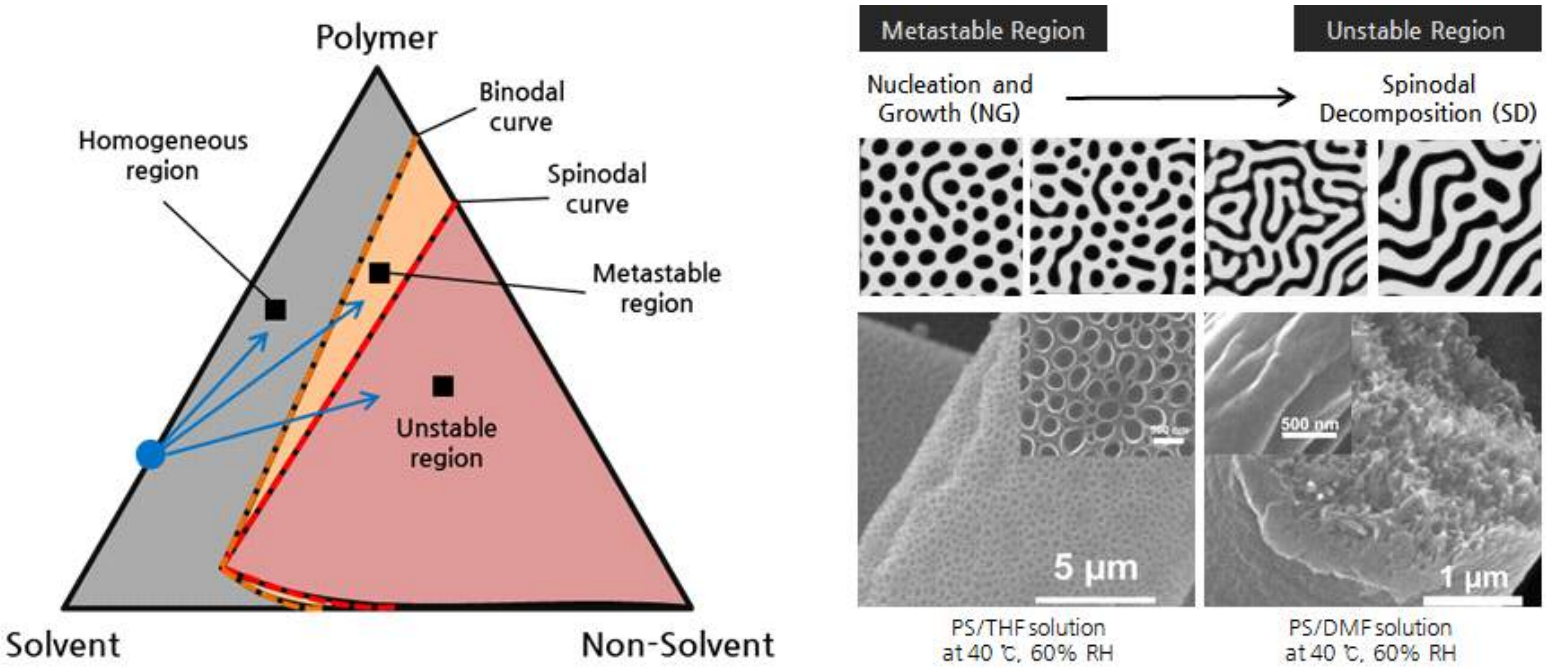


Figure 11. Ternary phase diagram for three possible composition path and schematic representation of Vapor induced phase separation (VIPS) [19].

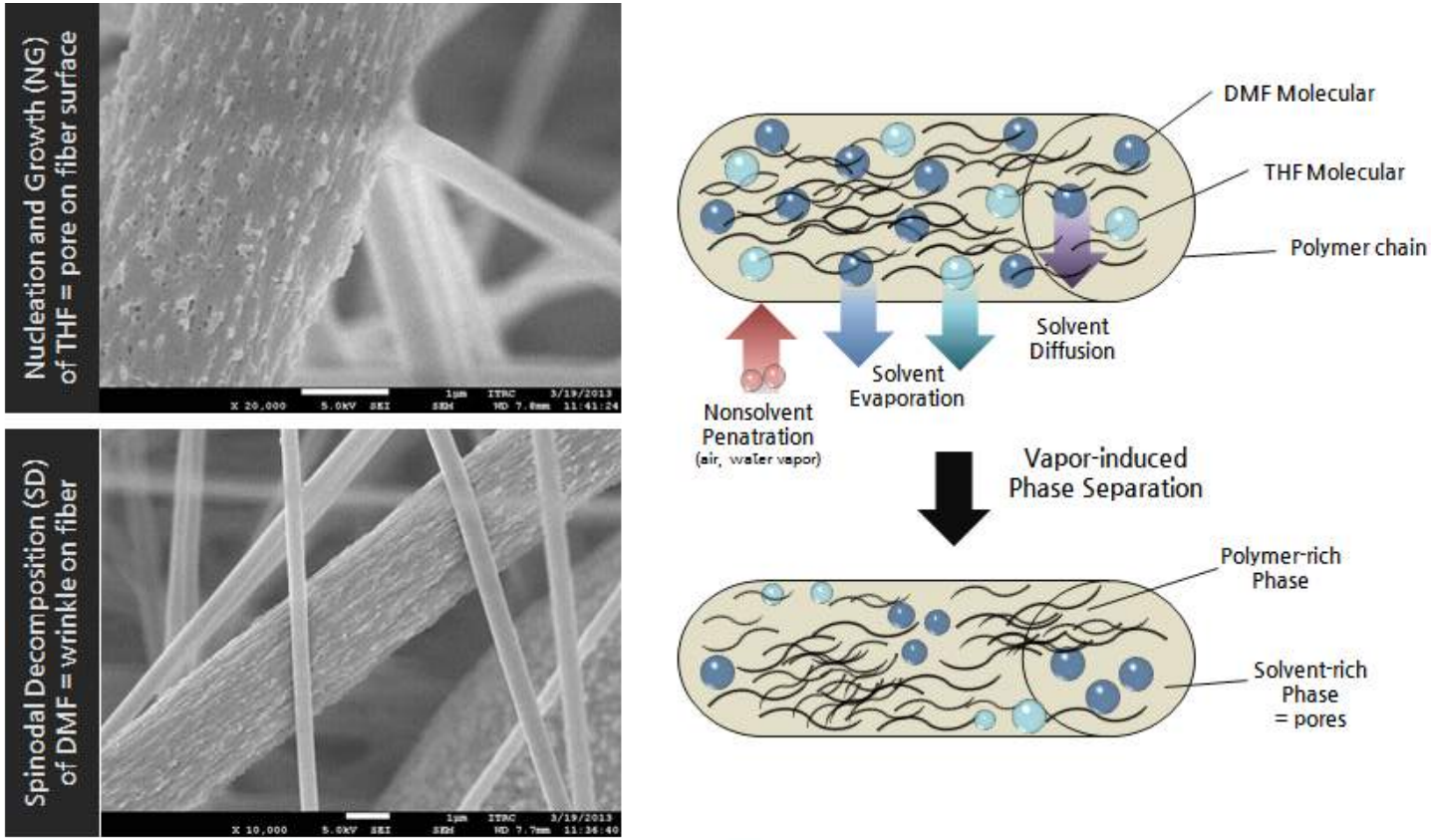


Figure 12. FE-SEM images of polystyrene fiber surface and schematic representation of Vapor-induced phase separation using DMF/THF solvent.

2.2. 외관 특성

전기방사 웹은 보통 편평한 외관을 지녔으나 다양한 방법들을 통해 솜과 같이 삼차원적인 웹을 형성시킬 수 있다. 그 방법들로는 방사 시간을 늘리거나 방사한 편평한 웹들을 적층시키는 등의 웹의 두께를 증가시키는 방법과 화학적 취입 성형 성분 (chemical blowing agent)나 전기전도성 물질을 용액에 넣어 방사시켜 삼차원적인 웹을 제작하는 등의 화학적 방법, 전기방사기의 컬렉터 모양을 변형시키거나 노즐과 컬렉터 사이에 전기기구를 설치하여 방사 된 섬유들이 삼차원적으로 쌓이도록 하는 등의 방법, 그리고 전기적 성질을 띠는 용액 속에서 방사시킨 후 용액을 증발 시켜 삼차원적인 웹을 형성시키는 방법 등으로 나누어 질 수 있다 [53-56].

Figure 13는 다양한 습도 환경에서 방사했을 때 폴리스타이렌 전기방사 웹의 외관을 촬영한 사진이다. 상대습도 10 RH%에서 방사했을 때는 다른 고분자들로 방사했을 때와 같이 편평한 외관을 보여주었으나, 상대 습도 20 RH% 이상에서 방사했을 때는 삼차원적인 솜과 같은 외관을 형성하는 것을 볼 수 있다. 특히 40 RH%에서 방사한 폴리스타이렌 전기방사 웹은 매우 보송보송한 외관을 나타내었다.

삼차원적인 전기방사 웹을 만드는 방법들 중, 전해질을 용액 내에 첨가하면 방사된 섬유들 사이에서 전기적 반발력을 일으킴에 의해 인접한 섬유들 사이의 간격을 넓혀 솜과 같은 삼차원적인 웹을 형성시킬 수 있다는 연구가 보고된 바 있다 [53]. 이 연구에 따르면 노즐에서 바로 사출된 용액의 jet 표면에는 노즐에 걸려 있는 (+) 전하가 전도되고 용액의 내부의 (−) 전하를 띠는 전해질은 표면에 있는 (+) 전하에 의해 jet 표면 가까이로 이동하게 된다. Jet 표면에 적층된 전해질에 의해 인접한 섬유들 사이엔 쿨롱 반발력 (Coulombic repulsion)이 발생하여 섬유들 사이가 멀어지게 되어 전체적으로

삼차원적인 웹을 형성하게 된다.

이를 적용시켜 습도가 높은 환경에서 방사한 폴리스타이렌 웹이 삼차원적인 외관을 나타나는 이유를 폴리스타이렌 섬유 표면에서 설명했던 기화 유도된 상분리 (VIPS)와 용매로 사용한 DMF의 높은 전기전도도로 유추할 수 있다. 폴리스타이렌 용액을 습도가 높은 환경에서 전기방사 했을 때 일어나는 상분리로 인해 섬유 내부에는 고분자가 풍부한 상 (polymer-rich phase)과 용매가 풍부한 상 (solvent-rich phase)으로 나누어지게 된다. 이때 용매가 풍부한 상은 다수의 DMF 분자로 이루어져 있게 된다. DMF는 전기 쌍극자 능률 (electric dipole moment)가 3.82 debye 이고 전기전도도가 10.90 μs/cm 로 다른 용매들에 비해 높아 삼차원 웹 형성 시 첨가하는 전해질과 같은 역할을 할 수 있게 된다. 이에 섬유 내부에 형성된 DMF가 풍부한 상은 섬유들로 하여금 인접한 섬유들과 전기적 반발력을 일으키게 만들어 웹의 전체적인 외관을 삼차원적으로 만들어 준다. 또한 이러한 현상은 폴리스타이렌 전기방사 웹의 삼차원적 외관 형성 경향을 연구한 논문을 통해 확인할 수 있다 [22].

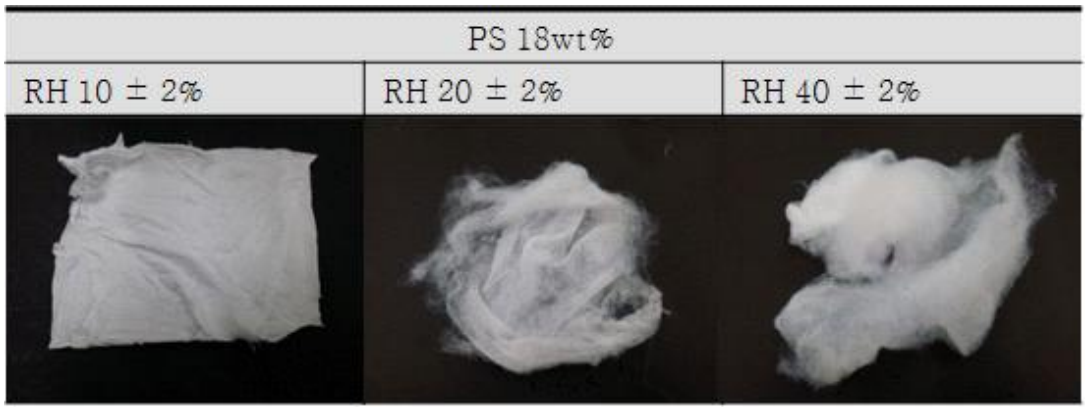


Figure 13. External appearance of polystyrene electrospun webs.

2.3. 혼합 전기방사 웹의 구성 비율

혼방 (blended spinning)은 성질이 다른 두 종류 이상의 섬유를 혼합 (blend)하여 방적 (spinning)하는 것이다. 혼합된 섬유들은 서로 각기 다른 성질을 지니고 있기 때문에 혼방을 통하여 의류 소재에 서로 다른 섬유들의 단점을 보완할 수 있으며 방적공정, 제직공정, 가공공정의 효율성을 증진시킬 수 있다.

Multi-jet electrospinning을 이용하여 서로 다른 고분자를 방사할 때 각기 다른 고분자들의 혼합 비율을 확인하기 위한 방법으로 여러 가지 방법이 존재한다. 첫 째로 일반 혼방, 혼섬, 교직된 직물에 쓰는 방법으로서 섬유마다 일정 화학 약품에 용해되는 성질을 이용한 섬유 감별 방법인 용해 시험법이 있다. 이는 두 가지 물질이 섞여있을 때 그 중 한 가지 물질을 용해시키는 용매에 녹여 없앤 후 남아있는 물질의 무게를 측정하여 용해시키기 전 무게와 비교함을 통해 각 물질의 중량 비율을 알 수 있는 방법이다 [57]. 둘째로 열중량 분석기 (Thermo Gravimetric Analyzer, TGA)를 이용하면 온도가 상승함에 따른 무게 변화를 볼 수 있어 분해 온도가 각기 다른 고분자들의 중량 비율을 알 수 있다. 이 방법은 용해 시험법에 비해 오차가 적어서 정확한 비율을 알 수 있다는 장점을 지닌다. 중량 비율을 측정하는 방법 외에 특정 면적에서의 각 물질의 비율을 측정하는 방법으로 형광 이미지 분석이 있다. 이는 각기 다른 색의 형광 염료를 서로 다른 용액에 함께 넣어 방사한 후 형광 현미경 이미지를 통해 혼합 된 물질을 구별할 수 있는 방법이다 [58]. 이를 응용하여 각기 다른 색의 비율을 면적 단위로 계산한다면 면적 당 각기 다른 색의 비율을 계산할 수 있다.

2.3.1 용해 시험 분석

Table 5는 본 연구에서 사용한 폴리스타이렌과 폴리아마이드 고분자의 비중과 각 고분자 용액의 전기전도도, 점도를 표현한 표이다. Table 6에는 각 혼합 나노웹의 주사기 비율과 예상 중량비, 실제 중량비를 나타내었다. 예상 중량비는 Table 5의 각 고분자의 비중과 주사기 비율을 통해 계산하였으며 실제 중량비는 용해 시험을 통해 용해되지 않고 남아 있는 웹의 무게를 통해서 계산한 값이다.

그 결과 예상 중량비와 실제 중량비 사이에 1~3%의 차이가 존재하였음을 확인하였다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 각기 다른 용액의 주사기를 함께 두고 방사했을 때 용액의 점도와 전기전도도 차이로 인해 각 방사된 용액에 걸리는 전류가 달라지기 때문이다. 이에 순수 고분자 나노웹과 달리 혼합 나노웹에서는 각 용액의 분당 배출량에 차이가 나타나게 된다 [57]. 또한 예상 중량비와 실제 중량비의 차이는 대부분 폴리스타이렌 섬유의 비율이 예상 중량비에 비해 더 높게 나와 생기는 차이로 나타났다. 실험 오차를 감안하더라도 폴리아마이드의 중량 비율이 일관성 있게 예상치보다 작게 나온 것으로 보아 폴리스타이렌에 비해 상당히 높은 폴리아마이드 점도가 영향을 미친 것으로 사료된다. 용액의 높은 점도는 전기방사 시 노즐 앞에 맺히는 방울의 표면장력이 높아지게 만들며 가해준 전압은 그에 비해 약해 탈락하는 방울들이 생기게 된다. 이에 똑같은 0.2mL/h의 용액 토출량이더라도 폴리아마이드 비율이 상대적으로 적어지게 되는 것으로 보인다.

Table 5. Properties of PS and PA solution [8, 28]

Sample	Density of polymer (g/mL)	Viscosity (cP)	Conductivity (mS/m)
PS	1.04	210	0.06
PA6	1.084	1920	210

Table 6. Speculated and real weight ratio of electrospun webs

Sample	No. ratio of jets (PS/PA6)	Calculated weight ratio (PS/PA6)	Measured weight ratio (PS/PA6)
S4	4/0	100/0	100/0
S3A1	3/1	74/26	76/24
S2A1	2/1	65/35	67/33
S2A2	2/2	49/51	51/49
S1A2	1/2	32/68	33/67
S1A3	1/3	23/77	24/76
A4	0/4	0/100	0/100

2.3.2 형광 현미경 이미지 분석

본 연구에서 제조한 폴리스타이렌/폴리아마이드 6 혼합 전기방사 웹은 형광 이미지를 통해서 폴리스타이렌과 폴리아마이드 6의 혼합 비율을 가시적으로 확인하였다.

두께 60㎛에서 1㎛ 단위로 촬영한 공초점 주사 현미경 이미지에서 전체 섬유 픽셀 수에 대한 각 형광색의 픽셀 수로 나누어 계산한 후 평균한 값을 Table 6에 나타내었다. Figure 14는 각기 다른 주사기 비율로 방사한 혼합 전기방사 웹의 공초점 주사 현미경으로 웹 표면에서 30 ㎛ 위치에서 촬영한 이미지이다.

혼합 방사로 인해 폴리아마이드 용액 주사기 비율이 증가할수록 폴리아마이드 6 섬유의 비율은 28.84 ~ 80.24%로 증가하였고, 폴리스타이렌 섬유는 71.16 ~ 19.76%로 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 폴리스타이렌 섬유는 같은 폴리아마이드 주사기 수로 방사했을 때에 비해 단위 면적 당 섬유의 비율이 상대적으로 작게 나타났다. 또한 용해시험 결과의 폴리스타이렌 섬유의 중량 비율보다 적게 나타나는 것을 볼 수 있다.

이러한 차이는 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유의 굵기 차이와 폴리스타이렌, 폴리아마이드 섬유 구조 차이 때문이라고 볼 수 있다. 폴리아마이드는 나노 수준의 매우 가는 섬유를 지녔기 때문에 표면적이 넓어져 단위 면적 당 섬유의 비율이 높아지게 된다. 또한 폴리아마이드 나노웹은 섬유 조직이 치밀하게 구성되어 있어 섬유들끼리 교차점 많아졌기 때문으로 보여진다. 이와 반대로 폴리스타이렌 섬유는 마이크로 수준으로 폴리아마이드 섬유에 비해 10배 가까이 두꺼워 표면적이 상대적으로 적기 때문에 단위면적 당 폴리스타이렌 섬유의 비율이 적게 나타난 것으로 보인다. 또한 폴리스타이렌 섬유들 사이 간격이 넓게 나타나 섬유들 사이의 교차점들이 적어진 것도 폴리스타이렌의 비율이 적게 나타난 이유 중 하나로 볼 수 있다.

Table 7. Pixel ratio of polystrene and polyamide 6 in confocal laser scanning microscope images

	S4	S3A1	S2A1	S2A2	S1A2	S1A3	A4
PS (Rho B)	100%	74.16%	63.96%	47.98%	33.90%	21.76%	0%
PA6 (FITC)	0%	25.84%	37.04%	53.02%	67.10%	79.24%	100%

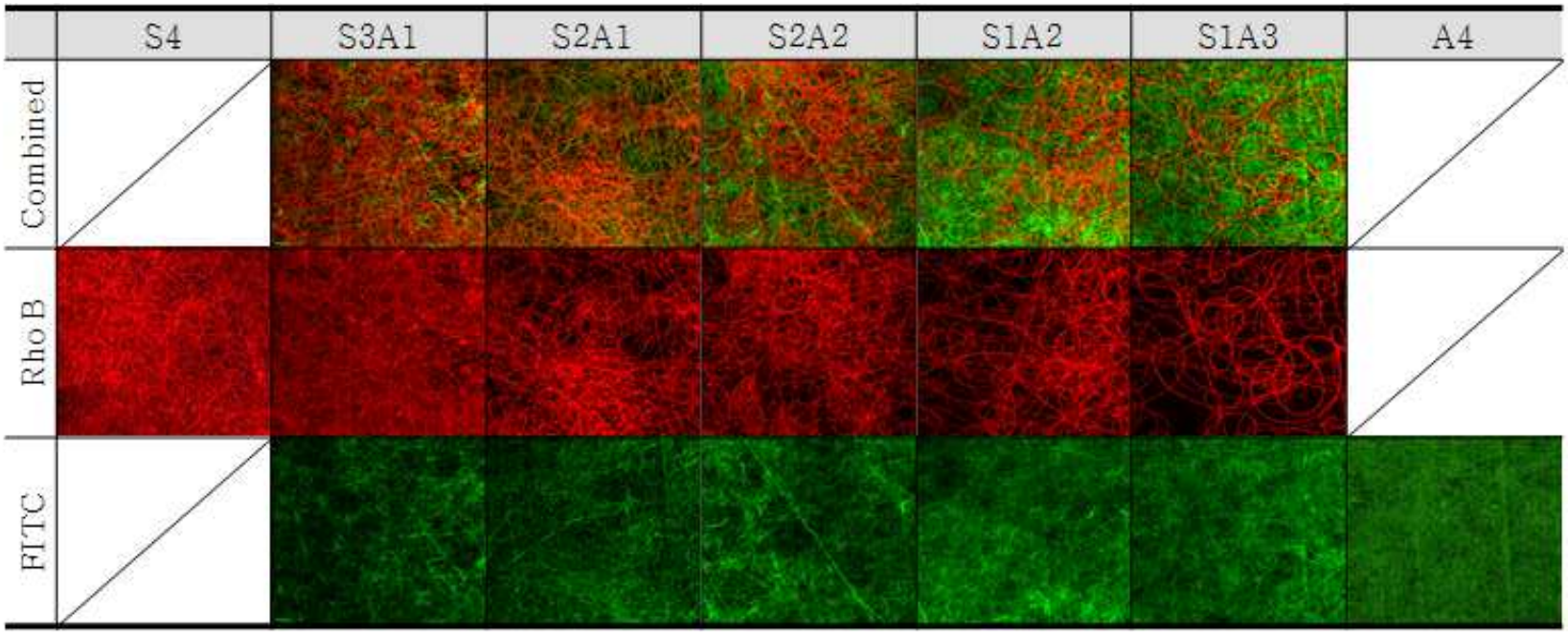


Figure 14. Confocal laser scanning microscope images of electrospun web.
(Z axis: 30 ㎛)

2.4. 기공 특성

전기방사 나노웹의 큰 장점은 작은 기공 크기와 높은 기공도, 넓은 표면적에 있다. 이러한 나노웹의 기공 특성은 공기 투과 성능과 수분 투과 성능, 열 차단 성능 등의 나노웹의 쾌적성에 영향을 미친다. 이론적 모델과 실험적 연구들을 통해서 섬유 직경이 기공의 크기와 큰 상관성이 존재한다고 알려져 있다[59]. 본 연구에서 제작한 전기방사 나노웹은 각기 다른 섬유 직경이 각기 다른 비율로 분포하기 때문에 기공 크기와 기공도가 달라질 것이라 예상하여 Capillary flow porometer로 나노웹의 기공 특성을 측정해보았다.

Figure 15는 각 나노웹의 평균 기공 크기를 나타낸 그래프이다. S4는 평균 기공 크기가 5.60 ㎛인 것에 비해 A4는 0.92 ㎛로 작게 나타났다. 평균 기공 크기가 작은 폴리아마이드 나노웹에 의해 혼합 나노웹에서도 마찬가지로 폴리아마이드 섬유의 비율이 증가할수록 평균 기공크기가 감소함을 확인할 수 있다. 섬유의 직경이 마이크로 수준인 폴리스타이렌 섬유에 비해 폴리아마이드 나노웹의 섬유는 나노 수준으로 매우 작아 웹 표면에 분포하는 나노 섬유의 비율이 상대적으로 높아 굉장히 작은 크기의 기공들이 존재하게 된다. 그에 비해 폴리스타이렌 섬유는 인접 섬유들 사이의 전기적 반발력에 의해 섬유 사이가 멀어져 기공을 더 크게 만드는 것으로 보인다.

혼합 나노웹에서의 기공 크기는 직경이 서로 다른 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유가 무작위로 서로 얽히면서 위치하여 다양한 크기의 기공을 지니게 된다. 이에 폴리아마이드 비율이 높은 혼합 나노웹에서는 폴리아마이드 섬유들에 의한 작은 기공이 평균에 영향을 미쳐 평균 기공 크기가 줄어드나, 폴리스타이렌 섬유의 비율이 높은 혼합 나노웹에서는 폴리스타이렌 섬유에 의한 큰 기공이 평균에 영향을 미쳐 평균 기공

크기가 증가하였음을 확인할 수 있다.

특히 S2A2 혼합 나노웹에서는 평균 기공크기가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 폴리아마이드 섬유의 비율이 50% 이상이 되면 폴리아마이드 섬유가 굉장히 가는 섬유이기 때문에 표면적이 넓어져 나노웹 전체를 거의 덮어 큰 기공을 막았기 때문으로 보인다. 이러한 경향은 기공 크기 분포와 비율을 본 그래프인 Figure 16을 봐도 알 수 있다. S4, S3A1, S2A1 나노웹에서는 큰 기공의 비율이 높게 나타난 것을 볼 수 있으나, S2A2 나노웹부터는 확연하게 작은 크기의 기공 비율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 가는 폴리아마이드 섬유로 인해 평균 기공 크기가 감소한 것과 같은 이유로 볼 수 있다.

또한 Table 8은 각 나노웹 내에 존재하는 기공의 크기 분포 범위를 나타낸 것이다. S4는 가장 넓은 기공 분포 범위를 보였으나 폴리리아마이드의 비율이 증가할수록 그 범위는 좁아져 A4에서는 가장 좁은 분포 범위가 나타났다. 또한 폴리스타이렌 나노웹 내에 폴리아마이드 섬유의 비율이 높아질수록 큰 기공의 비율이 감소하고 작은 크기의 기공 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그럼에도 불구하고 Figure 16의 그래프를 보면 폴리아마이드 비율이 높아질수록 막대그래프의 수가 더 많아 막대의 두께가 좁아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 좁은 범위 내에서 더 다양한 크기의 기공들이 존재함을 의미한다. 그에 비해 폴리스타이렌 나노웹과 폴리아마이드 나노웹에서는 막대 그래프의 두께가 상대적으로 두껍고 일정하여 대체적으로 균일한 크기의 기공을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 폴리아마이드 비율에 따라 평균 기공크기가 감소하는 것과 같은 이유로, FE-SEM 이미지 사진에서도 확인할 수 있듯이 폴리스타이렌 섬유들 사이의 넓은 크기의 기공에 가는 폴리아마이드 섬유가 섞여 들어가기 되면서 그 기공의 크기가 줄어들어 기공 크기 범위가 좁아지게 되는 것이며, 폴리아마이드 섬유가 무작위로 섞여 들어가게 되면서 기공 크기 또한 다양하게 나타나게 되는 것이라 사료된다.

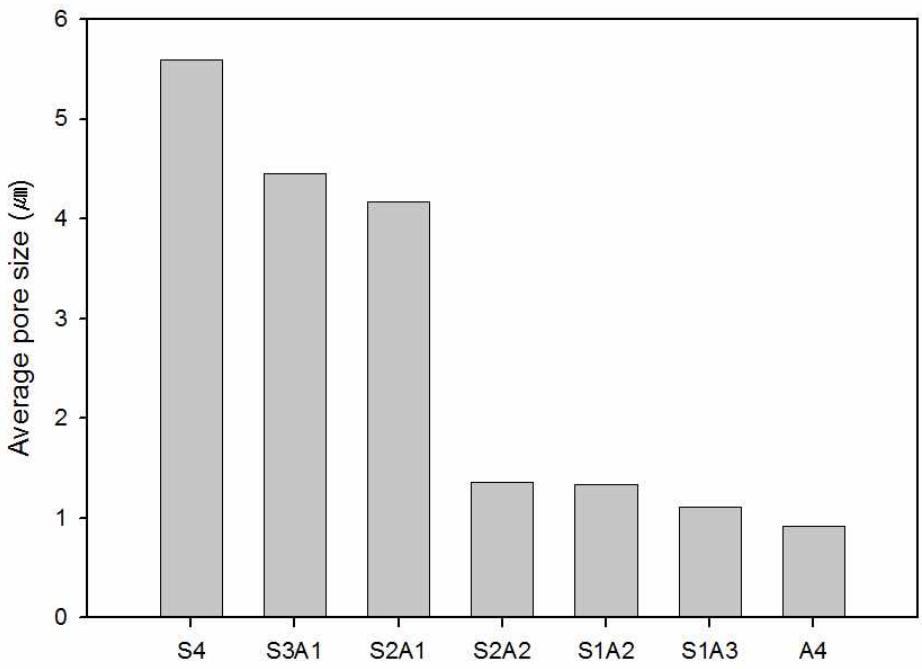


Figure 15. Average pore size of electrospun webs.

Table 8. The range of pore diameter distribution of electrospun webs

Sample	Pore diameter range (㎛)
S4	0.473 ~ 10.199
S3A1	0.110 ~ 9.951
S2A1	0.050 ~ 9.910
S2A2	0.030 ~ 7.232
S1A2	0.010 ~ 4.160
S1A3	0.010 ~ 5.184
A4	0.010 ~ 3.751

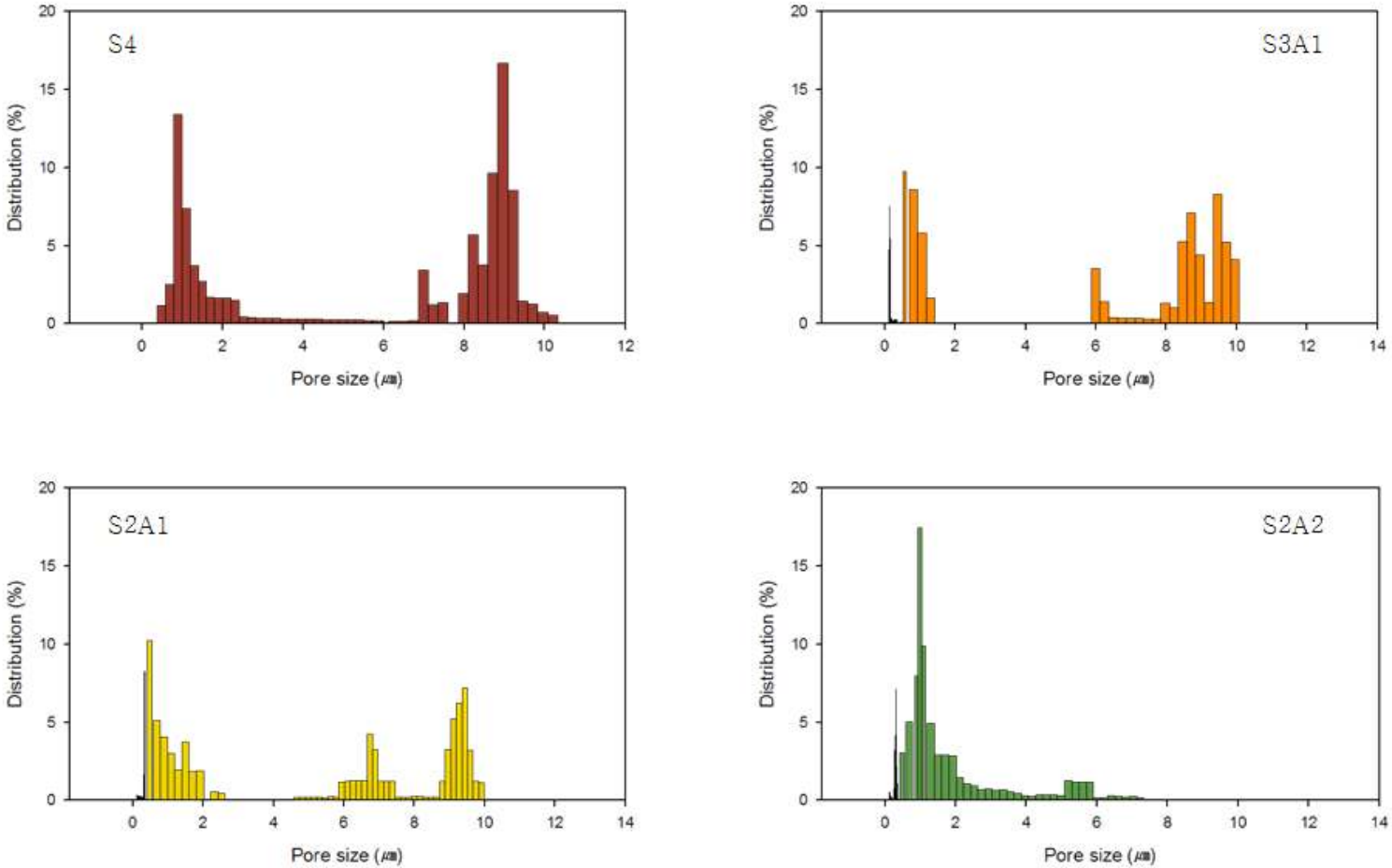


Figure 16. Pore size distribution of electrospun web.

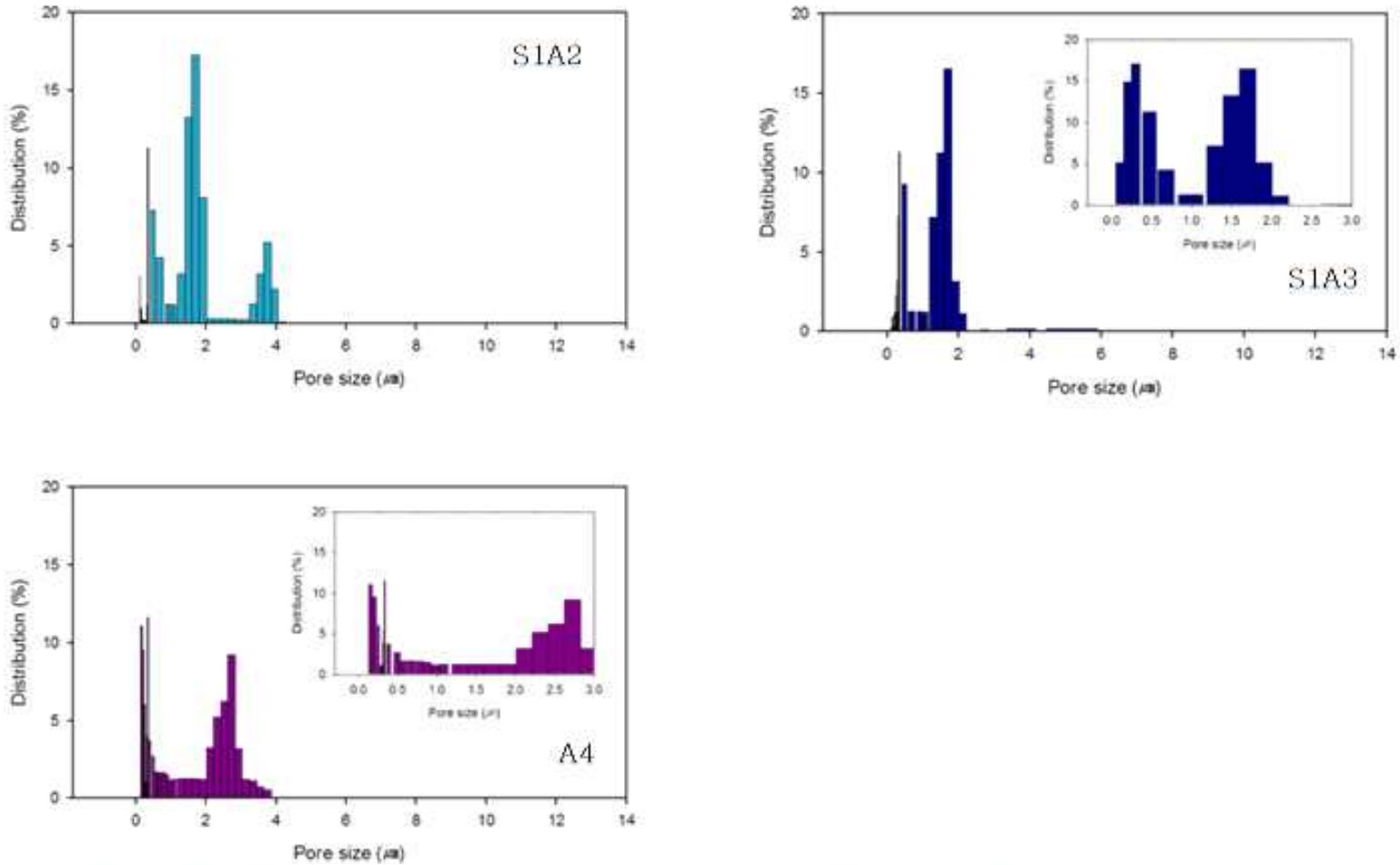


Figure 16. Pore size distribution of electrospun web (continued).

혼합 나노웹의 기공 크기에 따른 분포가 서로 다르게 나타나 총 기공 부피와 기공도가 다르게 나타날 것이라 생각되어 Automatic porosimeter로 나노웹 기공을 채우는 수은의 부피로 나노웹의 총 기공 부피와 기공도를 계산해 보았다. 그 결과는 Figure 17과 Table 8을 통해 나타내었다.

큰 기공의 비율이 높았던 S4는 총 기공 부피가 나노웹 중에서 가장 크게 나타났으며, 작은 기공의 비율이 높았던 A4는 총 기공 부피가 가장 작게 나타났다. 또한 나노웹에 폴리아마이드 섬유의 비율이 높아질수록 총 기공 부피가 감소함을 확인하였다. 이는 폴리스타이렌 나노웹의 큰 기공 부피는 나노웹의 겉보기 비중이 작고 섬유 간의 사이가 멀어서 bulky한 구조를 보였기 때문으로 보여진다. 또한 폴리아마이드 섬유의 비율이 증가하면서 조직이 치밀한 폴리아마이드 섬유들에 의해서 작은 크기의 기공이 증가하였기 때문에 폴리아마이드 비율이 증가할수록 총 기공 부피가 감소한 것으로 사료된다. 이러한 폴리스타이렌과 폴리아마이드 나노웹의 기공부피 차이는 같은 양의 굵은 섬유로 만든 웹의 기공부피가 가는 섬유로 만든 웹의 기공부피보다 크다는 것을 의미한다.

하지만 각 나노웹의 겉보기 비중과 총 기공 부피를 이용하여 계산한 기공도에선 폴리아마이드 섬유에 의해 감소하였던 총 기공 부피에 비해 더 적은 감소율을 나타내었다. 이는 폴리스타이렌 나노웹은 기공 크기가 큼에도 불구하고 폴리스타이렌 섬유가 마이크로 사이즈로 크게 나타나며 나노웹의 겉보기 비중이 작아 총 기공 부피가 다른 나노웹에 비해 상당히 큰 것에 비해 기공도가 크게 높지 않게 나왔다고 볼 수 있다. 이와 달리 폴리아마이드 섬유는 가늘어서 작은 기공이 많아지지만 표면적이 크므로 기공도가 커지는데 기여하였다고 볼 수 있다. 이러한 기공도의 차이는 폴리스타이렌의 굵은 섬유와 폴리아마이드의 얇은 섬유가 혼합 되면서 나노웹들 사이의 기공의 크기와 겉보기 비중의 차이를 만들어 각 나노웹의 기공도에 영향을 미치게 됨을 말해준다.

이상의 기공 크기와 분포도 실험과 기공 부피 및 기공도 실험을 통해서 혼합 전기방사를 통해 기공 크기와 분포 정도, 기공 부피 변화에 큰 영향을 주는 것을 확인 할 수 있었으며, 섬유 직경이 커짐에 따라서 기공 크기 또한 커진다는 선행연구 결과를 확인할 수 있다 [59].

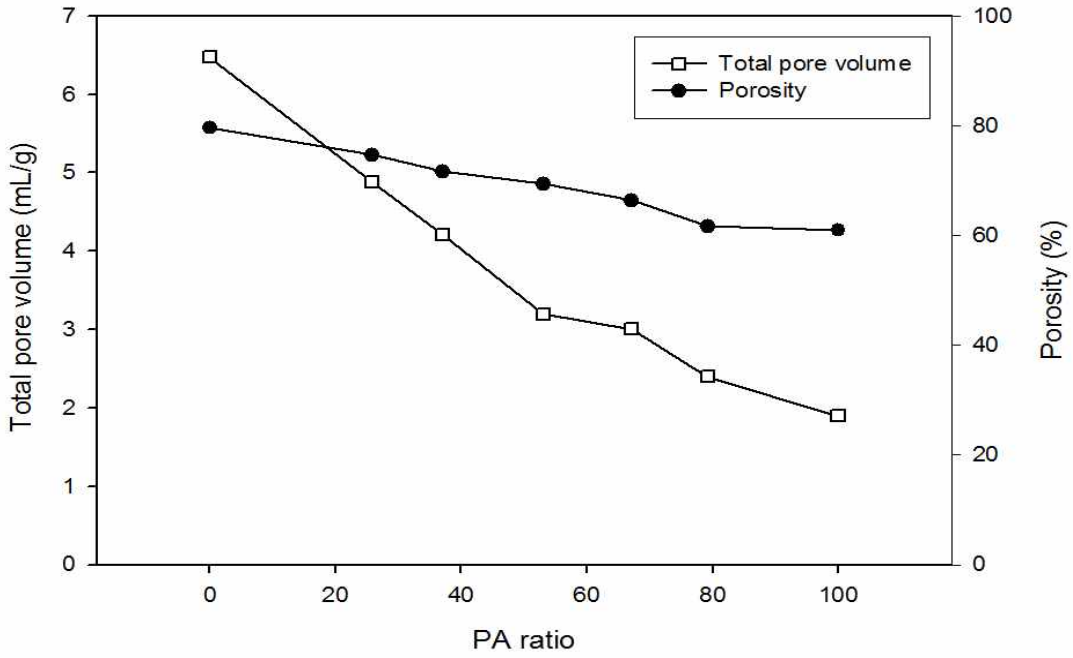


Figure 17. Total pore volume and porosity of electrospun web.

Table 9. Total pore volume and porosity

Sample	Sample density (g/cm^3)	Total pore volume (mL/g)	Porosity (%)
S4	0.123	6.473	79.62
S3A1	0.153	4.878	74.63
S2A1	0.170	4.214	71.63
S2A2	0.217	3.198	69.39
S1A2	0.221	3.001	66.33
S1A3	0.257	2.398	61.62
A4	0.321	1.898	60.92

* porosity = sample density × total pore volume × 100

3. 전기방사 웹의 성능

3.1. 물리적 성능

전기방사 나노웹의 기계적 특성에 영향을 끼치는 주요한 요인들로는 결정구조 및 배향성 등의 섬유의 내부 구조와 섬유들 사이의 배열이 있다. 섬유 내 결정화도가 높을수록 섬유 분자들이 섬유 축 방향으로 배향되어 있을수록, 섬유들이 더 촘촘한 구조로 혹은 평형하게 배열되어 있을수록 기계적 강도가 증가하나 신장율은 감소한다. 전기방사를 할 때에는 컬렉터의 회전 속도를 높이는 방법을 통해 섬유의 배향성을 향상시키거나 섬유의 배열에 변화를 줄 수 있다[60].

Figure 18은 각 전기방사 나노웹의 인장강신도 곡선을 표현한 그래프이며 Table 9에는 각 전기방사 나노웹의 인장강도와 신도 값을 기술해 놓았다.

폴리스타이렌 나노웹은 인장강도 0.40 MPa로 가장 낮은 강도를 보였으며 이는 폴리스타이렌 재료 자체의 약한 분자 간 결합 때문이다. 이와 달리 폴리아마이드 나노웹은 2.054 MPa 로 가장 높은 인장강도를 보여 폴리아마이드 섬유의 높은 강도를 확인할 수 있다. 폴리아마이드가 혼합 된 나노웹은 폴리아마이드 비율이 높아짐에 따라 인장강도가 증가하여 인장강신도 곡선의 기울기가 더 크게 나타났다. 이는 폴리아마이드 섬유가 폴리스타이렌 섬유와 얽혀 있어 하중이 가해졌을 때 폴리스타이렌 섬유에 가해지는 하중을 견딜 수 있게끔 하여 인장강도가 증가하였다고 할 수 있다.

폴리스타이렌은 약한 강도를 지녔으나 하이드로카본 백본에 의한 강한 분자내 결합으로 인해 유연한 성질을 지녔다. 이는 폴리아마이드 나노웹이 31.671%로 낮은 신도를 보인 것과 달리 폴리스타이렌

나노웹이 68.661%로 상대적으로 높은 신도를 보인 것과 폴리스타이렌의 비율이 증가함에 따라 신도 또한 증가하는 경향을 보인 것을 통해 확인할 수 있다. 인장강신도 곡선에서도 폴리스타이렌 섬유의 비율이 큰 혼합 나노웹들은 곡선의 기울기가 완만하게 올라가며 끊어지기 시작한 점 이후에도 완만한 기울기를 보이며 늘어나는 것을 볼 수 있다. 하지만 폴리아마이드의 비율이 더 높은 나노웹들의 강신도 곡선을 통해 나노웹이 끊어지기 시작한 점에서 크게 꺾여 나노웹 전체가 완전히 끊어짐을 보여준다. 이러한 폴리스타이렌 비율 증가에 따른 혼합 나노웹의 신도 증가는 폴리스타이렌 섬유의 유연한 특성 때문으로 보여진다.

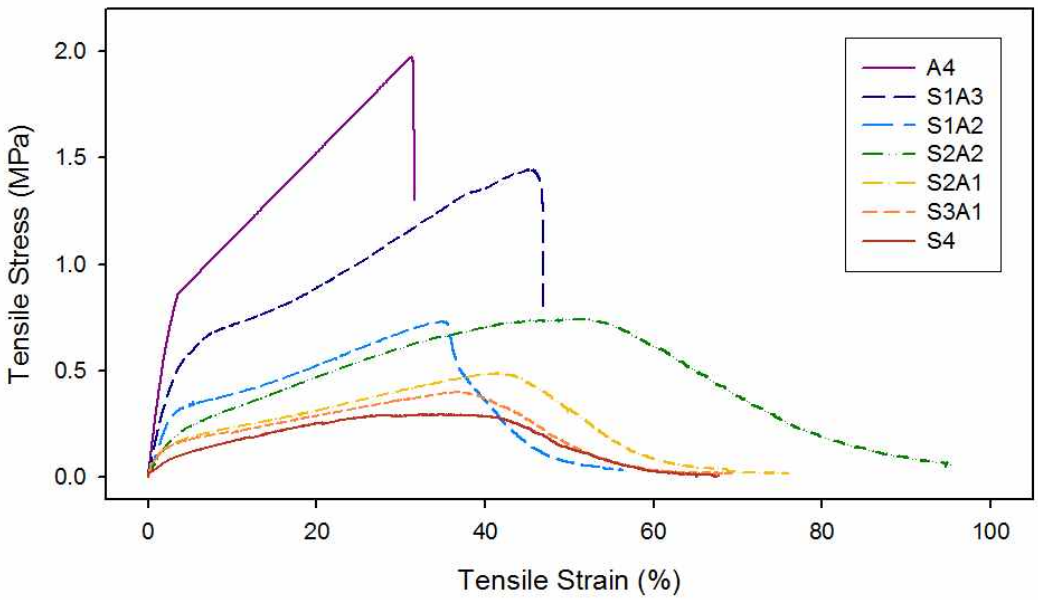


Figure 18. Stress-strain curve of electrospun webs.

Table 10. Tensile stress and tensile strain of electrospun webs

Sample	Tensile stress (MPa)	Tensile strain (%)
S4	0.400	68.611
S3A1	0.446	71.162
S2A1	0.476	71.827
S2A2	0.712	111.721
S1A2	0.782	54.118
S1A3	1.571	47.656
A4	2.054	31.671

나노웹 내의 폴리아마이드 비율에 따른 강도의 변화를 Figure 19 (a)에 그래프로 표현하였다.

폴리스타이렌 나노웹의 낮은 인장강도는 폴리아마이드 섬유를 혼합함에 따라 증가함을 보였으나, Figure 19에서 그 증가율을 보면 증가 그래프가 지수 그래프 형태를 띰을 확인 할 수 있다. 즉, 폴리아마이드 비율이 적을 때(S3A1, S2A1)는 그 증가가 미미하게 나타났으나, 폴리아마이드가 그 이상으로 혼합되어 있는 나노웹 (S1A2, S1A3)의 강도는 기하급수적으로 증가하였다.

이는 폴리아마이드 섬유가 나노 수준의 직경을 지녀 폴리스타이렌 섬유에 비해 매우 가늘어, 단위 면적 내에 존재하는 폴리아마이드 섬유의 비율이 상대적으로 작게 나타나 가해지는 하중이 기계적 강도가 약한 폴리스타이렌 섬유에 더 많이 부하되게 된다. 또한 이때 가해지는 하중을 가는 섬도를 지닌 폴리아마이드 섬유가 견디지 못하게 되어 쉽게 끊어지게 되어, 소량의 폴리아마이드 혼합으로는 혼합 나노웹의 인장강도를 크게 증진시키지 못하였다고 사료된다.

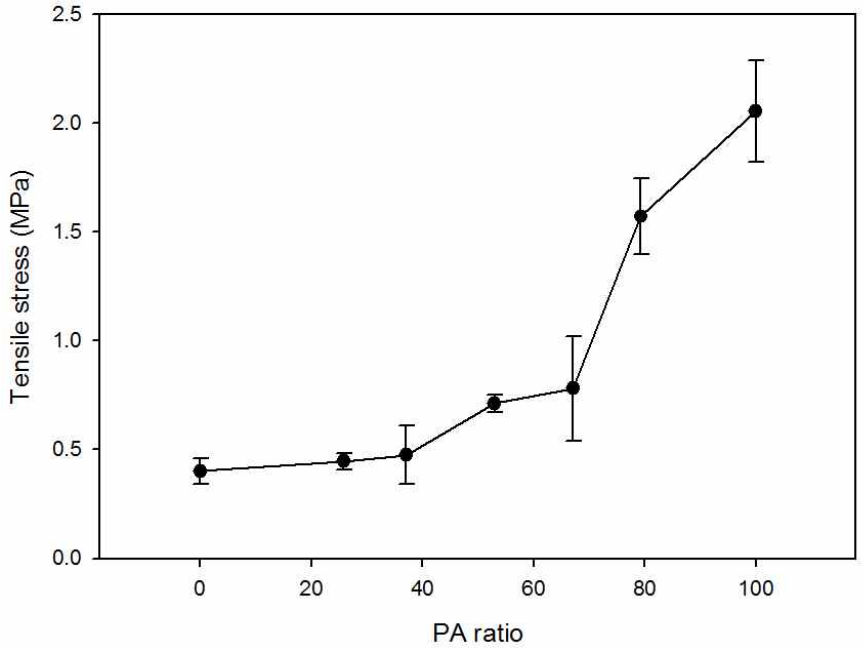
하지만 이와 반대로 폴리아마이드 혼합 비율을 증가시켜 단위 면적 내에 폴리아마이드 섬유 비율이 높아지면 상대적으로 약한 폴리스타이렌 섬유의 비율은 감소하게 되고 폴리스타이렌 섬유에 분배되어져 가해지는 하중이 감소하고 오히려 강한 폴리아마이드 섬유에 분배되는 하중이 커지게 된다. 또한 이때 폴리아마이드 섬유의 직경이 가늠에도 불구하고 큰 하중에도 견딜 수 있는 것은, 섬유가 가늘게 되면 단위 면적당 섬유의 수가 증가하게 되며 하중이 가해졌을 때 하중이 각 섬유들에 분산되어 섬유 한 가닥에 가해지는 하중은 단위 면적당 섬유의 수가 적은 것에 비해 감소하게 된다. 이에 폴리아마이드의 비율이 높은 나노웹일수록 단위 면적당 가는 폴리아마이드 섬유의 가닥수가 많아지게 되고 가해준 하중을 분산시켜 인장강도가 기하급수적으로 증가하게 된다.

나노웹 내의 폴리아마이드 비율에 따른 신도의 변화를 Figure 19 (b)에 그래프로 표현하였다.

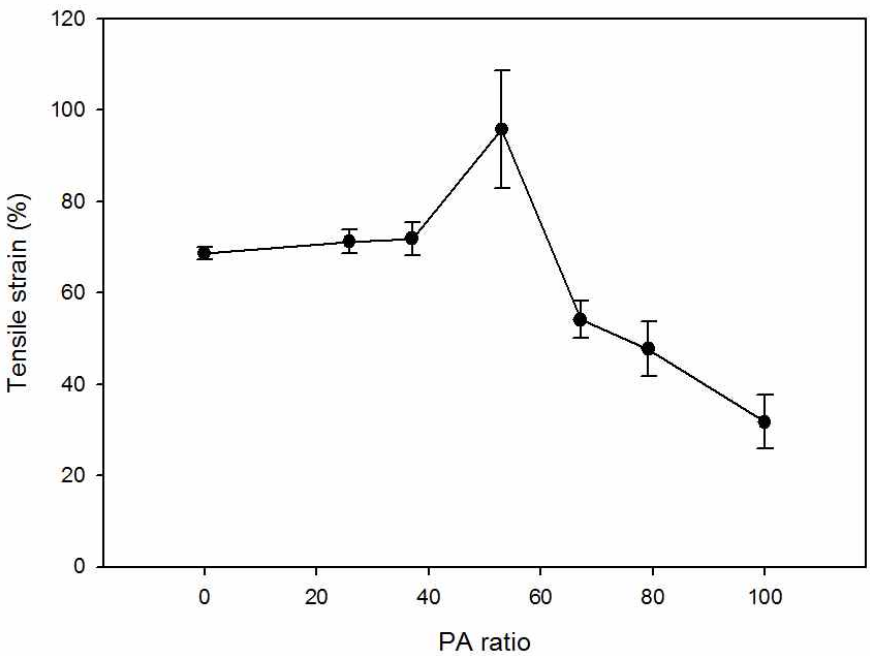
폴리스타이렌의 유연한 성질로 인해 폴리스타이렌 나노웹의 높은 신도는 상대적으로 강직한 폴리아마이드 섬유의 혼합으로 인해 혼합 나노웹의 신도는 69.5 ~ 78.9%로 감소하는 경향을 보인다. 하지만 이러한 경향은 폴리아마이드 섬유의 비율이 폴리스타이렌 섬유에 비해 높은 나노웹에서 나타났으나, 폴리아마이드 비율이 다소 적은 혼합 나노웹의 신도는 103.7 ~ 11.721%로 오히려 증가하는 것을 보였다.

특히 폴리아마이드 섬유와 폴리스타이렌 섬유가 50%씩 섞여 있는 S2A2 나노웹에서는 폴리스타이렌 나노웹의 111.721%로 상대적으로 큰 신도를 보였으며, S2A2의 인장강신도 곡선에서 확인 할 수 있듯이 S2A2 나노웹이 끊어지기 시작한 이후에 완전히 끊어질 때까지 서서히 늘어난다. 이렇게 S2A2에서 높은 신도를 보인 것은 약한 폴리스타이렌 섬유 일부가 먼저 끊어져 인장강신도 곡선이 꺾이지만 폴리스타이렌 섬유가 폴리아마이드 섬유와 얽혀져 있는 부분에서 폴리스타이렌 섬유에 가해지는 하중이 폴리아마이드 섬유에 분산되고, 동시에 폴리아마이드 섬유가 끊어지지 않고 남아 있는 폴리스타이렌 섬유를 고정시키고 있어 하중에 의해 미끄러져 끊어지는 것을 방해하여 나노웹이 완전히 끊어지지 못하고 계속 늘어나게 되는 것이다 [16].

하지만 S3A1, S2A1 혼합 나노웹의 경우 신도의 증가폭이 크지 않으며 S4와의 신도 차이가 오차 범위 내에 있다. 이는 인장강도 결과와 같이 폴리아마이드 섬유가 가늘어 단위 면적당 폴리아마이드 섬유의 비율이 적기에 혼합 나노웹의 신도에 미치는 영향이 크지 않으며 오히려 굵은 섬유를 지닌 폴리스타이렌의 영향이 크기 때문이라고 보여진다.



(a) Tensile stress variation



(b) Tensile strain variation

Figure 19. Tensile properties of electrospun web.

3.2. 공기 및 수분 투과 성능

3.2.1. 공기 투과 성능

공기 투과 성능은 의류소재의 쾌적성에 영향을 미치는 중요한 인자로서 직물의 기공을 통해 의복과 피부 사이의 공기와 수분을 의복 밖 환경으로 이동시킬 수 있는 특성이다. 이에 공기투과도가 증가할수록 의복 내 공기와 수분, 열의 이동을 촉진시켜 의류소재의 투습 성능과 보온성에 영향을 미친다[32, 52]. 공기투과도는 일정한 면적에서 일정 시간 동안 투과한 공기의 양을 측정할 수 있으며 섬유의 직경, 기공의 크기, 직물의 조직이나 두께, 또한 섬유의 친수성 정도 (화학적 구조)에 따라서 달라진다. 특히 전기방사 웹의 공기투과도는 섬유의 굵기나 웹 내의 기공 크기가 영향을 크게 받는다[1, 2, 5, 47]. 본 연구에서의 혼합 전기방사 웹의 공기 투과도는 폴리스타이렌의 약한 강도로 인해 기공률 측정 장비를 이용하여 특정 압력에서의 공기 투과량 (cc/sec)을 측정함으로 분석하였다.

Figure 20은 압력이 증가함에 따라 초당 나노웹을 통과하는 공기량을 측정한 것이다. 폴리스타이렌으로만 이루어진 나노웹이 100 psi의 압력에서 2526.3 cc/sec으로 가장 높은 공기투과도를 보였으며 나노웹 내에 폴리아마이드 6의 비율이 높아짐에 따라 공기 투과량이 감소하였다. 폴리아마이드 6 나노웹의 경우 100 psi 압력에서 773.4 cc/sec으로 다른 나노웹에 비해 상대적으로 가장 낮은 공기 투과량을 보였다. 또한 2000 cc/sec 의 공기 투과량을 보이기 위해서 S3A1, S2A1, S2A2, S1A2, S1A3 혼합 전기방사 나노웹이 각각 99.7, 106.8, 137.4, 126.2, 168.4, 209.8 psi의 압력이 필요했던 것에 비해 폴리스타이렌 나노웹은 78.3 psi 로 비교적 낮은 압력이 필요하여

상대적으로 공기 투과 성능이 좋았음을 확인 할 수 있다.

FE-SEM 이미지를 통해서나 기공도 실험 결과를 통해서도 확인할 수 있듯이 폴리스타이렌 섬유의 경우 인접한 섬유들 사이에 공간이 매우 커 공기를 투과할 수 있는 성능이 다른 나노웹들에 비해 뛰어나다. 이와 달리 폴리아마이드 섬유의 경우 표면이 매끄럽고 조직이 치밀하여 공기를 투과할 수 있는 기공이 매우 작기 때문에 낮은 공기 투과량을 보였다고 볼 수 있다.

Table 11은 100psi 에서 폴리스타이렌 나노웹 대비 혼합 전기방사 나노웹과 폴리아마이드 6 나노웹의 공기투과도 변화율을 나타낸 것이다. 앞선 기공도 실험 결과와 같이 폴리스타이렌 / 폴리아마이드 6 혼합 전기방사 나노웹은 폴리스타이렌 섬유들에 의한 큰 기공을 가늘고 촘촘하게 짜여진 폴리아마이드 6 섬유로 막아 공기투과율을 11.9 ~ 57.6% 감소시켰다. 또한 나노웹 내부에 폴리아마이드 6의 비율이 높을수록 그 감소율이 더 크게 나타나, 폴리아마이드 6 비율이 높은 나노웹일수록 그 기공이 더 작아짐을 확인할 수 있다. 특히 S3A1 나노웹의 경우 공기 투과량 감소폭이 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 혼합 방사에 의해 섬유들 사이의 간격이 큰 폴리스타이렌을 폴리아마이드 섬유가 서로 잡아 채워 주기 때문으로 보인다.

이와 같은 폴리아마이드 섬유의 혼합에 의한 혼합 전기방사 나노웹의 공기 투과량 감소는 나노웹의 기공 크기와 수가 감소하였기 때문이며, 이는 기공도가 같은 조건일 때 단위 면적 당 섬유가 차지하는 면적의 비율이 높을수록 나노웹 내부의 기공의 크기가 작을수록 공기 투과량이 감소한다는 선행연구 결과와 일치 한다 [61].

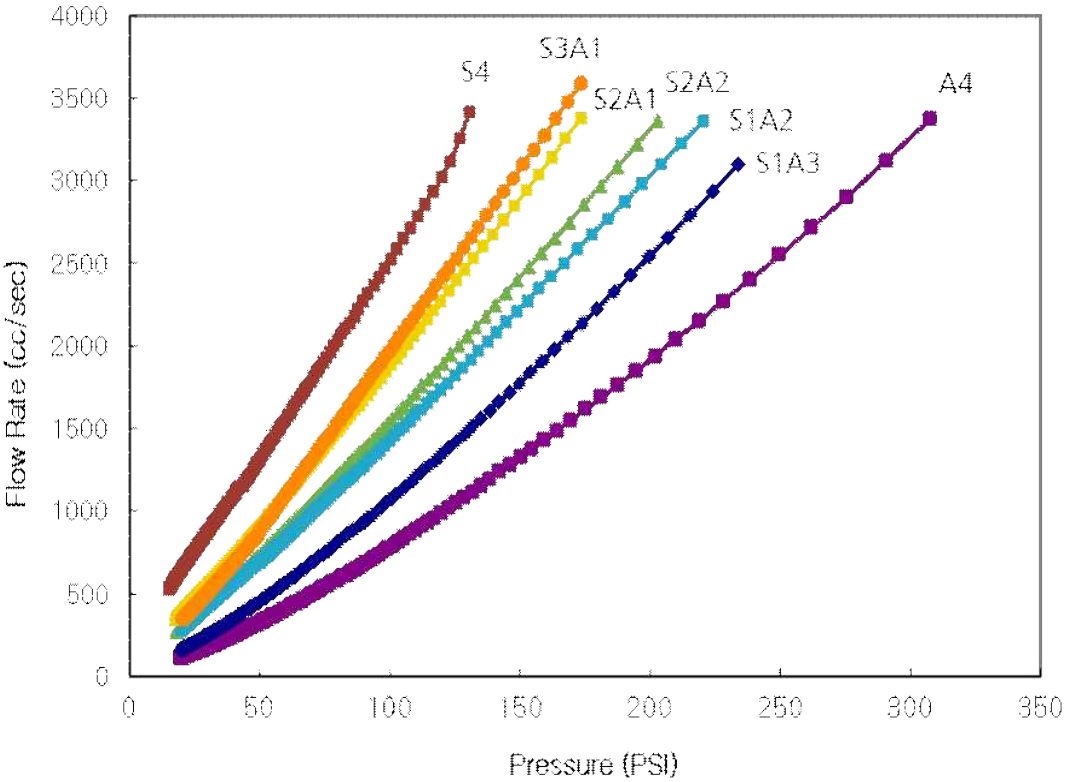


Figure 20. Air permeability of electrospun webs.

Table 11. Air permeability variations of electrospun webs at 100 psi.

Sample	S4	S3A1	S2A1	S2A2	S1A2	S1A3	A4
Air permeability (cc/sec)	2526.3	1972.3	1882.6	1560.4	1426.7	1071.1	773.4
Variation ratio	100%	78.1%	74.5%	61.8%	56.5%	42.4%	30.6%

3.2.2. 수분 투과 성능

수분 투과 성능은 인체로부터 발산되는 수증기를 통과시키는 성능 혹은 직물 내에 흡착한 수분이 직물 내부에서 확산하여 표면으로 방출시키는 성질을 말한다. 투습성이 좋으면 의복 내 습도가 올라가는 것을 방지할 수 있으며 추운 환경에선 의복 내 결로 현상을 최소화 시킬 수 있어 의복의 쾌적성과 관련하여 중요한 성능이다 [62]. 투습성은 직물을 구성하는 섬유의 종류, 겉보기 비중, 공기 투과성, 두께 등에 영향을 받는다. 투습도 측정 방법은 증발법, 흡습법, 투과법 등이 있어 연구 목표에 맞는 측정방법을 선택하여야 한다. 본 연구에서 제작한 전기방사 웹은 보온성을 목표로 하였기 때문에 의복 내 습도가 높은 상태이고 건조한 환경 하에서 투습도를 측정하는 방법인 흡습법을 선택하였다. 흡습법 측정 방법 중 염화칼슘법은 수분이 투습컵 밖에서 투습컵 안으로 이동하는 정도를 측정하는 것으로, 투습컵 밖의 환경은 의복 내의 환경, 투습컵 내부의 환경은 의복 외부의 환경을 묘사한 것이라고 볼 수 있다.

Figure 21에는 각 전기방사 나노웹의 투습도를 나타냈으며 Table 12에는 폴리스타이렌 나노웹의 투습도 대비 혼합 나노웹과 폴리아마이드 나노웹의 투습도 감소비율을 백분율로 나타냈다. S4는 8842.5 $g/m^2 \cdot 24$ 로 나노웹 가운데 가장 높은 수분 투과량을 보였으며 혼합 나노웹의 경우 폴리아마이드 6의 비율이 높아질수록 투습도가 점차 감소하는 경향을 보여 S1A2에서 6927.8 $g/m^2 \cdot 24$ 로 가장 낮은 수분 투과량을 보였다. 폴리스타이렌만으로 이루어진 나노웹의 큰 투습도 결과 값은 공기투과도 결과와 같이 큰 기공으로 인한 결과로 보여 진다. 또한 폴리아마이드의 비율 증가에 따른 수분 투과량 감소는 기공 크기의 감소에 의한 영향이라고 사료된다.

하지만 S1A2 이후 폴리아마이드의 비율이 높아질수록 수분 투과량은 다시 증가하는 형상을 보여 A4에서는 7713.8 $g/m^2 \cdot 24$ 의 투과량을 보였다. 이는 S1A2 까지는 기공의 크기가 작아져 투과량이 감소하였다고 볼 수 있으나, S1A2 이후에는 기공 크기가 더 작아졌음에도 투과량이 증가한 것으로 폴리아마이드 섬유가 탄화수소로만 이루어진 폴리스타이렌 섬유에 비해 친수성이 높기 때문이라고 사료된다. 폴리아마이드계 섬유들은 CONH 와 같은 비공유 전자쌍을 지니고 있어 극성을 띄기 때문에 다른 합성섬유들에 비해 친수성을 지니며, 특히 폴리아마이드 6의 경우, 다른 폴리아마이드계 섬유에 비해 상대적으로 짧은 탄소사슬을 지녀 친수성 정도가 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 이에 폴리아마이드 6 섬유의 친수기에 의해 수분이 확산되어 이동하게 되며 투습도가 높게 나온 것으로 보여진다.

투습도 측정 결과를 통해, 폴리아마이드 비율 증가에 따라 공기투과도는 크게 감소하였지만 투습도는 감소하다가 다시 증가함을 알 수 있다. 또한 S4, S3A1 이외의 나노웹들의 수분 투과량 차이가 오차 범위 안에서 나타난다. 이런 서로 다른 나노웹들 간의 미미한 차이는 기공 크기뿐만 아니라 섬유의 친수성 정도가 투습도에 영향을 미치기 때문이라고 볼 수 있다. 이를 통해 폴리아마이드 섬유 비율의 증가가 기공 크기와 범위는 감소시켰지만 친수성의 증가로 인해 수분 투과량에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

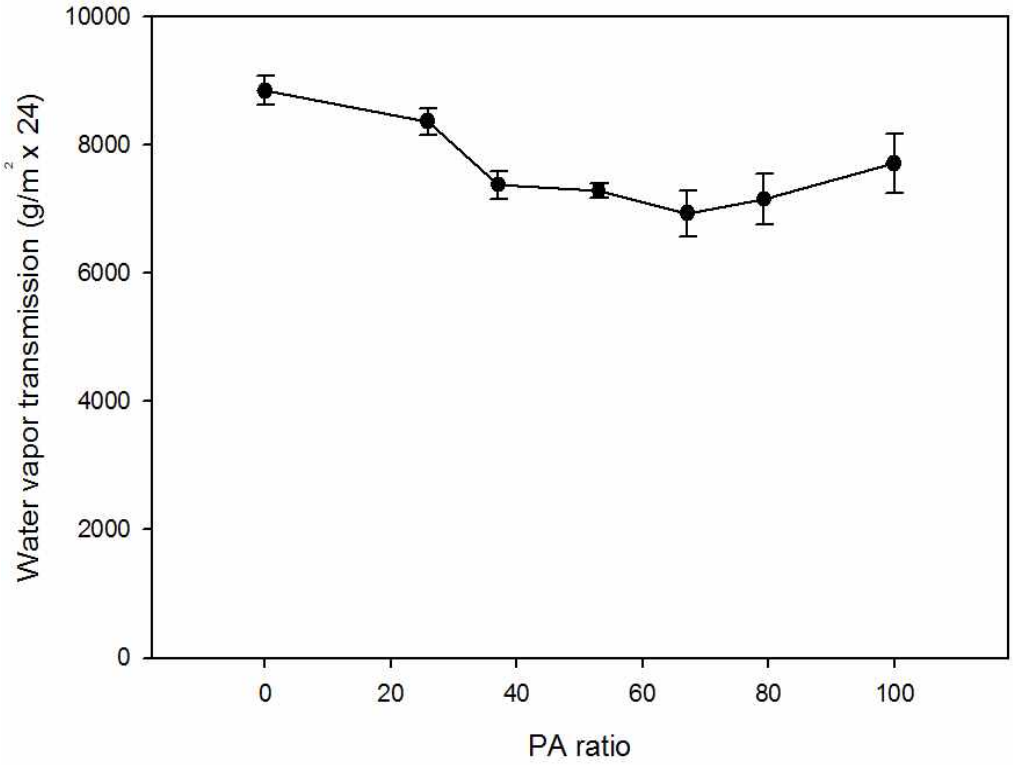


Figure 21. Water vapor permeability of electrospun webs.

3.3. 표면 친수성

소재의 표면 친수성은 소재의 표면에서 액체의 젖음 거동 (wetting behavior)을 통해 확인하며 이는 접촉각을 통해 정량적으로 분석할 수 있다. 접촉각이란 액체가 서로 섞이지 않는 물질과 접할 때 형성되는 경계면의 각을 말하며 제품 생산 시 시료의 접착성, 표면처리의 여부, 유기박막 및 고분자 물질의 표면 화학적 성질을 규명하는데 사용되는 매우 중요한 분석 기술이다[63]. 본 연구에서는 접촉각을 이용하여 나노웹의 친수성, 소수성에 따라 달라진 투습도 결과를 확인하며 폴리아마이드 비율에 따른 나노웹 표면의 친수성 정도를 구별하기 위하여 액체의 퍼짐성이나 나노웹의 흡습성을 측정하였다.

Figure 22는 각기 다른 비율로 방사된 혼합 나노웹에서의 접촉각 이미지이며 Figure 23은 60초 동안의 접촉각 변화를 나타낸 그래프이다. S4는 나노웹들 중 가장 높은 접촉각을 보였으며 초소수성의 기준이 150° 임을 고려한다면 S4의 접촉각은 149.6° 로 거의 초소수성에 가깝다고 볼 수 있다. 폴리아마이드 섬유와 혼방된 혼합 나노웹들은 폴리아마이드 비율이 증가할수록 접촉각이 각각 145.8°, 141.9°, 139.6°, 137.6°, 134.1°로 감소하여 나노웹의 표면이 친수화 되는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 A4는 123.2°로 다른 나노웹들에 비해 접촉각이 매우 낮게 나타났다.

이러한 접촉각 감소 경향은 시간에 따른 접촉각 변화에서도 나타나 폴리스타이렌 섬유가 혼합되어 있는 나노웹들에서는 시간이 지남에도 접촉각의 감소율이 거의 미미한 것에 비해 폴리아마이드 섬유로만 이루어져 있는 A4의 경우 시간이 지날수록 접촉각이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 폴리아마이드 섬유로 인해 혼합 나노웹 내에 폴리아마이드의 비율이 증가할수록 접촉각이 감소하였다는 것을 알

수 있으며 폴리스타이렌 섬유에 의해 접촉각이 상승하며 시간이 지남에도 불구하고 접촉각 감소율이 크지 않았음을 알 수 있다.

폴리스타이렌 나노웹의 높은 접촉각은 폴리스타이렌 재료 자체의 소수 특성과 전기방사로 인해 형성된 소수성 구조로 설명할 수 있다. 폴리스타이렌은 탄화수소로만 이루어져 있어 매우 소수성이며 분자 간 결합이 약해 표면장력이 낮다. 또한 FE-SEM 이미지를 통해 본 폴리스타이렌 섬유의 표면은 요철과 나노 수준의 기공들이 존재하여 섬유 표면에 표면 거칠기 (surface roughness)가 향상되며 이러한 폴리스타이렌 섬유의 기하학적인 구조로 인해 소수성을 구현할 수 있게 된다[18].

이와 달리 폴리아마이드 섬유으로 인해 접촉각이 감소하는 원인은 폴리아마이드 6의 상대적으로 높은 친수성과 균일하고 매끄러운 섬유 구조로 볼 수 있다. 투습도 결과에서 폴리아마이드 섬유의 비중이 높은 나노웹에서 수분 투과량이 증가한 것을 통해서도 볼 수 있듯이 폴리아마이드 섬유는 그 화학적 구조가 친수성인 $-NH_2$ 와 $-COOH$와 같은 작용기를 지녀 다른 합성섬유들에 비해서 친수성이라고 할 수 있다.

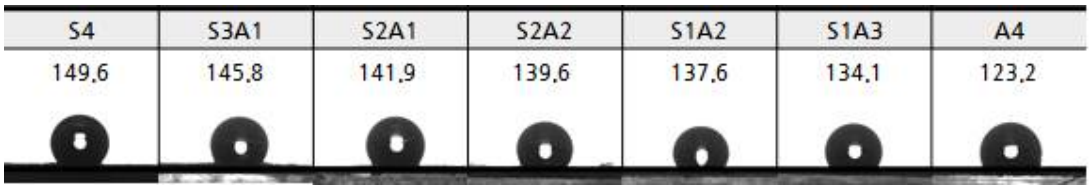


Figure 22. Contact angle of electrospun webs.

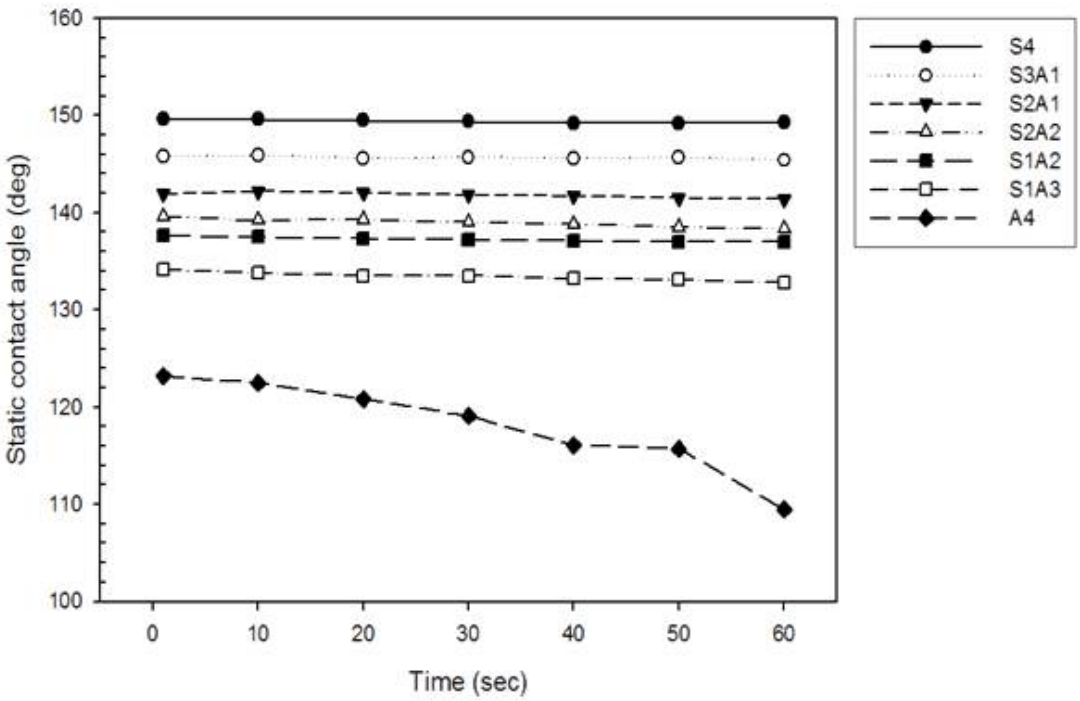


Figure 23. Contact angle variation with time.

3.4. 열 차단 성능

3.4.1. 열 전도성

직물을 통한 열의 이동은 열전도와 수분의 이동에 의한 열의 이동으로 설명할 수 있다. 열전도는 또다시 고체 섬유를 통한 전도와 섬유들 사이에 채워져 있는 공기를 통한 전도로 나눌 수 있다. 즉, 열전도는 섬유의 고유한 열전도율과 공기 함유량에 영향을 받게 된다. 여기서 공기는 열전도도가 0.025 W/mK로 일반적인 의류소재보다 절연성이 높다. 그렇기 때문에 의류 소재 내 정지 공기 함유량이 증가할수록 열을 차단하므로 열전도도가 낮아지게 된다.

Figure 24는 각 혼합 나노웹의 열전도율을 측정한 그래프이며 Table 13은 혼합 나노웹의 폴리스타이렌 나노웹 대비 열전도율 변화를 나타낸 것이다. S4는 열전도도가 가장 낮았으며 A4는 S4에 비해 217% 높은 값을 나타내어 나노웹들 중 가장 높게 나타났다. 또한 폴리아마이드 섬유의 용적비율이 높아질수록 열전도도가 상승하는 경향을 보였다.

폴리스타이렌 나노웹의 낮은 열전도도는 폴리스타이렌 재료 자체의 낮은 열전도도 (폼: 0.033 W/mK, 필름: 0.1~0.13 W/mK)와 더불어 밀도가 낮은 섬유 구조로 인한 높은 기공성에 의해 정지 공기 함유량이 높아 우수한 절연성을 보인 것이라고 생각 된다. 이와 달리 폴리아마이드 섬유는 폴리스타이렌에 비해 높은 열전도도 (필름: 0.19~0.24 W/mK)를 지녔으며 폴리스타이렌 나노웹에 비해 밀도가 높기 때문이라고 사료된다. 섬유의 밀도가 높아지면 섬유의 접촉부분이 많아 섬유의 접촉부 전도가 높아지며 고체전도도가 증가하여 열전도도가 높아지게 된다[6]. 또한 폴리아마이드의 비율을 증가시킬수록 나노

수준의 섬유 직경을 지닌 폴리아마이드 섬유의 용적비율이 증가하며 크기가 작은 기공 수가 증가하여 표면적이 넓어짐으로 인해 열전도도가 높아지는 것으로 사료된다.

이상을 통해 폴리스타이렌 전기방사 나노웹은 0.31 W/mK의 열전도도를 보여 폴리스타이렌이 필름 상태일 땐 0.169 W/mK를 보인 것[64]에 비해 열전도도가 크게 낮아 전기방사를 통한 열차던 성능이 뛰어남을 확인할 수 있으며 이는 폴리스타이렌 필름에는 기공이 거의 존재하지 않으나 폴리스타이렌 나노웹은 내부에 큰 기공과 높은 기공성을 지녔기 때문으로 보인다. 또한 비록 폴리아마이드의 비율을 높일수록 열전도도가 상대적으로 높게 나왔지만 혼합 나노웹들의 열전도도는 0.031 ~ 0.067 W/mK 수준으로 매우 낮게 나타났다. 이는 나노웹 자체의 높은 기공성과 넓은 표면적으로 인하여 함기율이 높아졌기 때문이라고 사료된다.

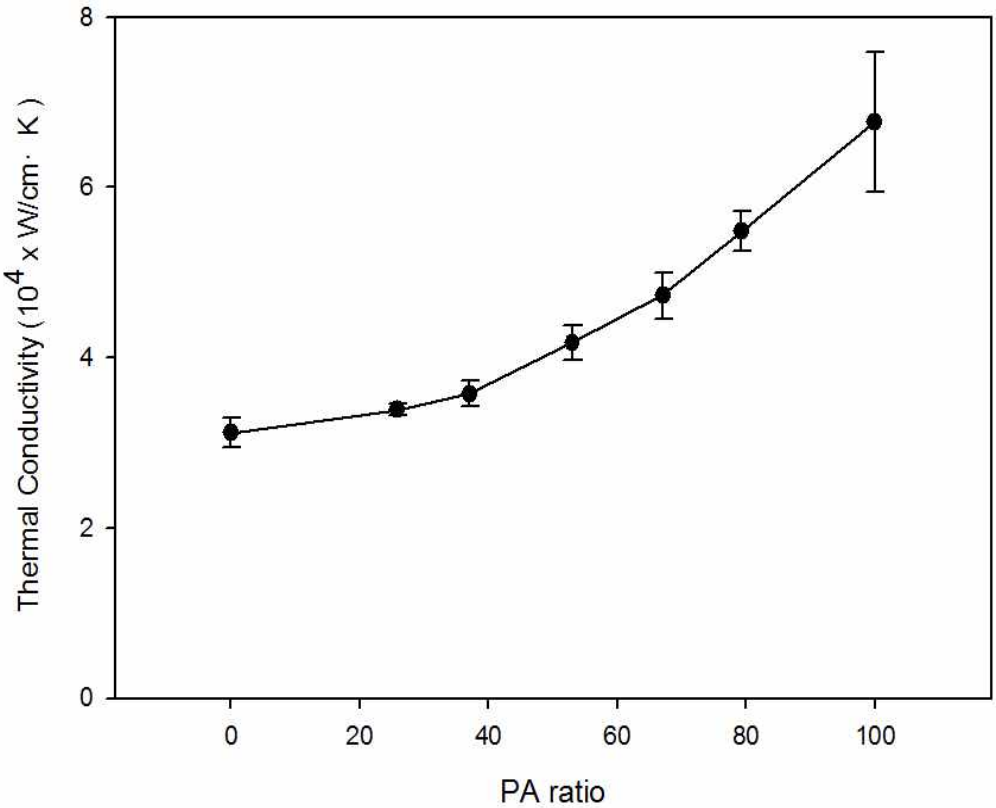


Figure 24. Thermal conductivity of electrospun webs.

3.4.2. 열 저항성

열 저항성 측정 방법은 시료에 대해 전도, 대류, 복사를 통한 전체의 열 전달량을 측정하는 방법으로 열판을 일정한 온도로 유지하기 위하여 소비된 에너지를 전력량을 단위 면적에 나누어준 값으로 계산하여 그 값이 클수록 보온성이 높다고 할 수 있다. 본 연구에서 실시한 열 저항 시험법은 수증기가 증발될 때의 증발열 손실을 측정하여 열과 수분의 동시 전달을 측정하는 투습저항법(R_{et})과 전도, 대류, 복사를 통한 건열 손실을 측정하는 열 저항법(R_{ct})이 있다. 본 연구에서는 전도, 대류, 복사 등을 통한 나노웹에서의 열손실을 보기 위해 투습저항을 제외한 열 저항만을 측정하였다.

각기 다른 혼합 나노웹의 열 저항 값은 Figure 25에 표현하였으며, 폴리아마이드의 용적비율에 따른 폴리스타이렌 나노웹 대비 열 저항 감소율을 Table 14에 표현하였다. 폴리스타이렌만으로 이루어진 나노웹인 S4에서는 열 저항 값이 0.134$m^2 \cdot K/W$로 나타났으며 폴리아마이드 비율이 증가할 수록 0.068 ~ 0.128$m^2 \cdot K/W$로 열 저항 값이 감소하였다.

폴리스타이렌 섬유로 인한 큰 열 저항 값은 폴리스타이렌 나노웹의 열전도도가 낮았으며 열전도도 실험 결과에서도 언급하였던 것과 같이 재료 자체의 낮은 열전도율과 높은 기공성 구조로 인한 높은 함기량 덕분이라고 사료된다. 또한 폴리아마이드 섬유의 비율이 증가할수록 나노웹의 기공성이 감소하고 밀도는 높아지는 등 열 손실에 취약한 구조를 형성하여 열 저항성이 감소하는 것으로 보인다.

또한 폴리스타이렌의 비율이 폴리아마이드 섬유에 비해 더 높은 나노웹들에선 0.100 $m^2 \cdot K/W$ 이상의 열 저항 값을 보여 우수한 열 차단 성능을 보였으며 열 저항성 값의 감소율도 크지 않았다. 이는

폴리아마이드 섬유의 상대적으로 높은 열전도도 때문에 열 저항 값이 감소하나 폴리아마이드 섬유가 가늘어 폴리스타이렌 섬유들 사이를 채우면서 대류를 통한 열 손실을 막아 열 저항 값이 큰 폭으로 감소하진 않은 것으로 보여 진다. 또한 폴리아마이드 섬유의 가는 직경으로 인하여 폴리아마이드 비율이 적을 때는 열전도도가 크게 떨어지지 않은 것과 마찬가지로 열 저항 값 역시 크게 영향을 받지 않은 것으로 사료된다.

하지만 폴리아마이드 비율이 높은 나노웹인 S1A2, S1A3에서는 열 저항 값이 큰 폭으로 감소하여 효율적으로 열을 차단하지 못하였다. 이는 단위 면적 내에 폴리아마이드 섬유의 비율이 상대적으로 크게 나타나 전도에 의한 열 손실을 크게 막지 못함과 더불어 나노웹 내부의 기공 크기와 기공도 또한 폴리스타이렌 비율이 높은 나노웹에 비해 작아 나노웹의 함기율이 감소하여 정지공기층으로 인한 열 차단 효과를 볼 수 없었던 것에 기인하여 열 저항 값이 크게 떨어지게 된 것이라 사료된다.

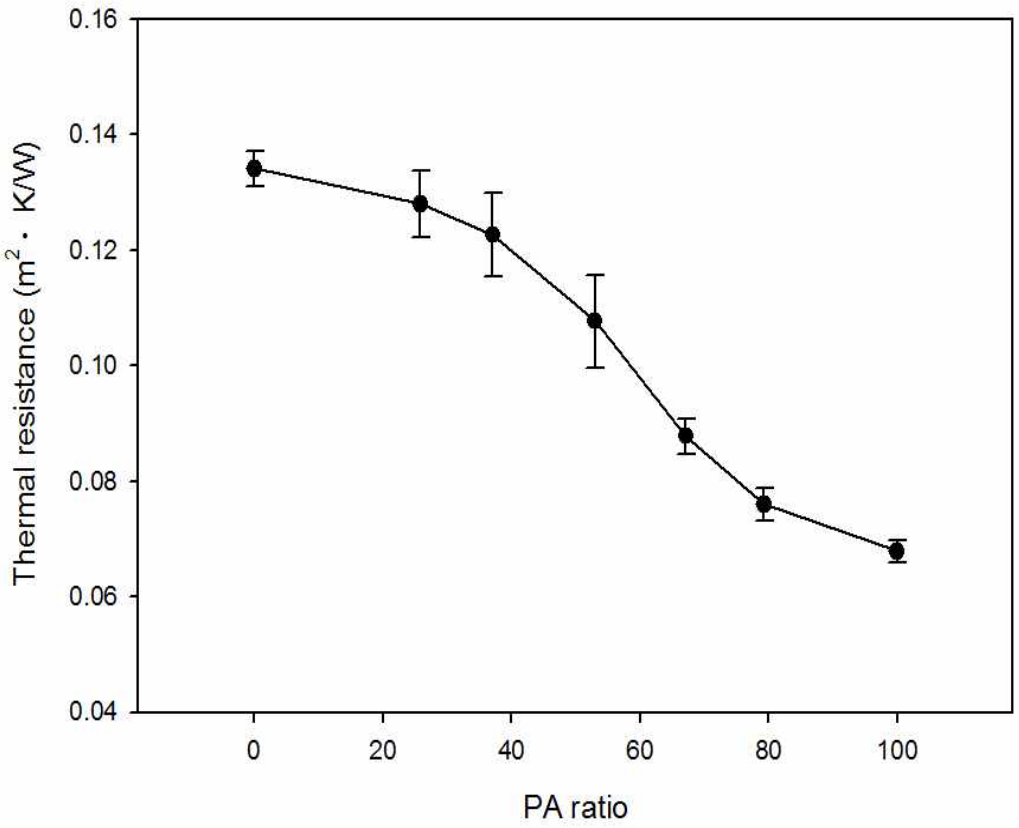


Figure 25. Thermal resistance of electrospun webs.

4. 통계적 분석

지금까지의 실험 결과들을 통해서 혼합 나노웹 내의 폴리아마이드 비율에 따라 나노웹의 성질이 변하는 것을 확인하였다. 폴리아마이드 섬유의 비율에 따라 나노웹의 성질이 변하는 것은 가는 폴리아마이드 섬유와 굵은 폴리스타이렌 섬유가 섞임으로 인해 나노웹의 구조가 변하기 때문으로 예상된다. 이에 각 혼합 나노웹의 기공크기, 총 기공 부피, 기공도 등의 구조적 특성이 공기투과도, 투습도, 열전도도, 열 저항성 등의 나노웹 성질 인자들에 미치는 영향을 통계학적으로 분석하기 위하여 상관관계 분석을 실시하였다.

4.1. 구조적 특성과 공기투과도

본 연구에서 혼합 나노웹의 공기투과도는 단위면적에서 압력에 의해 통과하는 시간당 공기의 양을 의미하며 압력이 100psi일 때 공기투과도를 기준으로 상관관계를 분석하였다. 그 결과 혼합 나노웹의 공기투과도는 773.42 ~ 2326.33 cc/sec 사이로 나타났으며, 평균 1511.7 cc/sec, 표준편차 476.5 cc/sec 으로 혼합 나노웹 별 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. Table 12는 기공크기, 기공도, 섬유 직경의 기술통계와 공기투과도와의 상관계수를 표현한 것이다.

(1) 기공 크기와 공기투과도

총 7가지 혼합 웹의 기공 사이즈는 0.9177 ~ 5.5957 ㎛ 사이에서 나타나며 평균 2.706 ㎛, 표준편차 1.956 ㎛ 범위로 나노웹 사이에 큰 편차를 보이고 있다. 이는 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유 조직 구성에 의한 것으로 공기투과도와 상관계수 0.955 ($p<.01$)로 높은

정적 상관을 보여 기공 크기가 클수록 공기투과도가 커지는 것을 알 수 있다.

(2) 기공도와 공기투과도

혼합 나노웹의 기공도는 60.92 ~ 79.62% 사이로 평균은 69.163%, 표준편차는 6.810% 이었다. 혼합 나노웹 내의 기공 비율과 혼합 나노웹의 공기투과도는 상관계수 0.956 ($p<.01$)로 나타나 높은 정상관성을 보여 혼합 나노웹 내부의 기공이 많을수록 공기투과도가 증가한다는 것을 보인다. 이는 나노웹의 기공도가 클수록 나노웹 내부에 공기 함량이 높아지기 때문에 더 많은 공기를 투과할 수 있는 내부적 구조를 지녔다는 것으로 볼 수 있다.

(3) 섬유 직경과 공기투과도

나노웹의 섬유 직경은 0.104 ~ 0.903 ㎛로 나타났으며 평균은 0.495㎛, 표준편차는 0.269㎛ 로 나노웹 간의 평균 섬유 직경의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 공기투과도와의 상관계수는 0.972 ($p<.01$)로 정적 상관관계를 지녔으며 가장 높은 상관관계를 보였다. 이는 섬유 직경이 작아 가늘수록 표면적이 넓어져 공기를 투과할 수 있는 기공을 막아 나노웹의 구조적 특성에 영향을 끼쳐 섬유의 굵기가 가늘수록 공기를 투과시킬 수 있는 기공이 감소함을 보여준다.

Table 12. Correlation coefficient of structural properties and air permeability (**P<.01)

Factors	Mean	S.D	Correlation coefficient
Air permeability (cc/sec)	1511.7	476.5	1
Pore size (㎛)	2.706	1.956	.955**
Porosity (%)	69.163	6.810	.956**
Fiber diameter (㎛)	0.495	0.269	.972**

4.2. 구조적 특성, 표면 친수성과 투습도

본 연구의 7가지 혼합 나노웹의 투습도는 6927.77 ~ 8842.53 $g/m^2 \cdot 24$ 사이로 평균 7665.1 $g/m^2 \cdot 24$, 표준편차 867.3 $g/m^2 \cdot 24$로 나타났다. Table 13은 투습도와 기공크기, 기공도, 섬유 직경, 접촉각 간의 상관계수를 표현한 표이다.

(1) 기공 크기와 투습도

기공 크기와 투습도의 상관계수는 0.767 ($p<.05$)로 정적 상관을 보였으며 인자들 가운데 가장 높은 상관성을 보였다. 이는 나노웹 구조적, 화학적 인자 중 구조적 특성인 기공 크기가 투습도에 가장 큰 영향을 끼친다는 것을 보여주며 수분이 기공을 통해서 나노웹 외부로 나가게 되므로 기공크기가 클수록 수분을 더 쉽게 투과시키기 때문으로 보인다.

(2) 기공도와 투습도

기공도는 나노웹 내부의 기공 비율을 나타내는 지표로 나노웹 내에 함유할 수 있는 공기 함량과 직결된다. 투습도와의 상관계수는 0.734로 나타났으며 상관관계가 유의하지 않는 결과를 보였다. 이러한 결과는 폴리스타이렌 나노웹의 경우 기공 크기가 크나 bulky한 구조를 지녔으며, 폴리아마이드 나노웹은 기공 크기가 작으나 compact한 구조를 지녀 혼합 나노웹 간의 기공도 차이가 크지 않기 때문으로 보인다. 또한 나노웹 내의 공기함량이 투습도에 큰 영향을 끼치지 않으며 기공 특성과 같은 구조적 특성 외에 섬유의 친수성 특성이 투습도에 영향을 끼치기 때문에 큰 상관성이 없게 보이는 것이다.

(3) 표면 친수성과 투습도

접촉각은 나노웹 표면의 친수성을 알 수 있게 하며 표면 친수성은 구성 섬유의 화학구조와 섬유 표면의 기하학적인 구조에 따라 달라진다. 혼합 나노웹의 접촉각은 123.2 ~ 149.6° 의 범위에서 나타나며 평균 137.6° , 표준편차 7.87° 였다. 투습도와 접촉각의 상관성은 상관계수 5.27 로 인자들 중 가장 낮은 상관관계가 존재함을 확인하였다. 이는 폴리아마이드가 친수성을 보이는 섬유이기 때문에 폴리아마이드 비율이 높은 나노웹에서만 친수성으로 인한 투습도 증가가 나타났기 때문이다.

이상의 투습도와 구조적, 화학적 특성과의 상관관계 분석을 통해서 투습도는 기공 크기와 같은 구조적 특성과 표면 친수성과 같은 화학적 특성도 함께 고려해야함을 보여준다.

Table 13. Correlation coefficient of structural properties, surface hydrophile property and water vapor permeability (*P<.05)

Factors	Mean	S.D	Correlation coefficient
Water vapor permeability ($g/m^2 \cdot 24$)	7665.1	867.3	1
Pore size (㎛)	2.706	1.956	.767*
Porosity (%)	69.163	6.810	.734
Water contact angle (°)	138.829	8.590	.527

4.3. 구조적 특성과 열 차단 성능

열전도도는 소재의 열전달 특성을 측정한 인자로 혼합 나노웹의 열전도도는 0.0311 ~ 0.0677 W/m·K 사이이며 평균 0.0446 W/m·K, 표준편차 0.0127 W/m·K 로 나타났다. Table 14에는 기공 크기, 기공도, 섬유 직경, 열 저항성과 열전도도와의 상관계수를 기술하였다.

(1) 기공 크기와 열전도도

기공크기와 열전도도는 상관계수 -0.812 ($p<.05$)로 부적 상관성을 보였으며 다른 인자들과의 상관관계들에 비해서 상대적으로 상관성이 적게 나왔다. 공기를 투과시킬 수 있는 기공 크기가 클수록 나노웹 내부의 공기 함유량이 높아져 열전도도가 낮은 정지 공기층을 형성하므로 열전도도는 낮아지게 된다.

(2) 기공도와 열전도도

기공도는 나노웹 내에 기공 비율을 의미하며 기공도가 높을수록 나노웹 내에 존재하는 공기 함량이 높다는 것을 나타낸다. 기공도와 열전도도와의 상관계수는 -0.929 ($p<.01$)로 매우 높은 부적 상관관계를 보였다. 이는 기공도가 높을수록 나노웹 내부의 정지 공기 함량이 높아져 열전도도가 감소하기 때문으로 보인다.

(3) 섬유 직경과 열전도도

섬유 직경과 열전도도는 상관계수 -0.958 ($p<.01$)로 매우 높은

상관관계를 보였으며 부적 상관성이 존재함을 알 수 있다. 섬유 직경이 큰 것은 그만큼 열을 전도시킬 수 있는 가능성은 크다고 볼 수 있으나 표면적이 작으며 폴리스타이렌 재료 자체의 낮은 열전도도로 인하여 폴리스타이렌의 비율이 높은 나노웹은 열전도도가 작게 나타난다. 폴리아마이드는 열전도도가 상대적으로 큰 섬유이며 섬유가 매우 가늘어 표면적이 넓기 때문에 상대적으로 열전도가 쉬워진다. 또한 섬유가 가늘수록 나노웹의 구조가 compact 해지며 내부의 공기 함량이 감소하기 때문에 열전도도가 더 낮아지는 것으로 보인다.

(4) 열 저항성과 열전도도

열 저항성은 열전도도와 반대로 인체로부터의 열 손실을 막을 수 있는 소재의 특성으로서 그 값이 클수록 보온성이 높다고 할 수 있다. 나노웹의 열 저항 값은 0.0678 ~ 0.1341 $m^2 \cdot K/W$ 사이로 평균 0.103 $m^2 \cdot K/W$, 표준편차 0.0264 $m^2 \cdot K/W$ 로 나타나 나노웹들 간의 차이가 존재함을 확인 할 수 있다. 열전도도와의 상관계수는 -0.965 ($p<.01$)로 가장 높은 부적 상관관계를 보였다. 열 손실은 전도와 대류에 의한 손실이 매우 크기 때문에 열전도가 클수록 열 저항 값이 감소하는 것으로 볼 수 있다. 이에 열전도도와 열 저항성은 큰 상관관계를 보이는 것으로 사료된다.

Table 14. Correlation coefficient of structural property and thermal insulating ($^{*}P<.05$, $^{**}P<.01$)

Factors	Mean	S.D	Correlation coefficient
Thermal conductivity (W/m · K)	0.0446	0.0127	1
Pore size (㎛)	2.706	1.956	-.812*
Porosity (%)	69.163	6.810	-.929**
Fiber diameter (㎛)	0.495	0.269	-.958**
Thermal resistance (m^2 · K/W)	0.103	0.026	-.965**

Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 폴리스타이렌과 폴리아마이드6를 이용하여 전기방사 나노웹을 제작하여 보온성 의류소재로서 제시하고자 하였다. 이를 위해 폴리스타이렌과 폴리아마이드의 비율을 달리하여 제작한 나노웹의 열차단 성능, 기계적 강도 및 다양한 의류 소재로서의 성능을 비교 평가하였다. 이를 통해 폴리스타이렌/폴리아마이드 전기방사 나노웹의 보온성 의류소재로서의 가능성을 확인하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

1. 주사전자현미경으로 각 폴리스타이렌, 폴리아마이드 나노웹과 혼합 나노웹을 관찰한 결과, 폴리스타이렌 나노웹은 마이크로 수준의 섬유와 표면에 수많은 기공과 주름으로 인한 거친 섬유 표면을 지니고 있었다. 그에 비해 폴리아마이드 나노웹은 나노 수준의 섬유와 매끈하고 균일한 섬유 표면을 지녔다. 또한 혼합 나노웹은 각 주사기 수 비율에 따라 단위 면적 내 각 폴리스타이렌, 폴리아마이드 섬유 수가 다르게 나타났다.

2. 나노웹의 외관을 관찰한 결과, 폴리스타이렌 나노웹은 습도가 높은 환경에서 방사하면 다공성의 솜과 같은 외관을 보였다. 그와 달리 폴리아마이드 나노웹은 습도와 상관없이 편평한 외관을 보였다.

3. 혼합 나노웹에서 폴리아마이드의 중량 비율은 폴리아마이드 용액의 소량 탈락으로 인해 예상비율에 비해 1~2% 낮게 나타났으나, 폴리아마이드 섬유는 나노 수준을 직경을 지녀 면적 비율은 예상비율에 비해 1~2% 높게 나왔다.

4. 폴리스타이렌 나노웹은 기공크기가 크며 기공 크기 범위도 넓게 나타났으나 폴리아마이드 나노웹은 평균 기공크기가 작으며 좁은 기공 크기 범위에서 더 다양한 크기의 기공들을 나타냈다. 혼합 나노웹에서는 폴리아마이드 비율이 높아짐에 의해 기공크기가 줄어드나 폴리스타이렌 비율이 높은 혼합 나노웹에 비해 더 다양한 크기의 기공들을 지녔다.

5. 폴리스타이렌 나노웹에서 가장 큰 기공 부피와 기공도를 보였으며 폴리아마이드 비율이 높아질수록 기공 부피와 기공도가 감소하였으나 각 나노웹의 밀도 차이로 인해 기공도의 차이는 크지 않았다.

6. 폴리스타이렌 나노웹에 소량의 폴리아마이드를 혼합함으로는 폴리아마이드 섬유가 나노 수준으로 가늘기 때문에 혼합 나노웹의 인장강도에 미치는 영향이 적어 강도 증가 효과는 크지 않았으나, 폴리스타이렌과 폴리아마이드 섬유의 비율이 같을 때는 큰 신도 증가 효과를 나타냈다.

7. 공기투과도는 폴리스타이렌 비율이 높은 웹에서 높은 공기투과도를 보였다. 폴리아마이드의 비율을 증가시킬수록 공기투과도는 감소하는 경향을 보였다.

8. 투습도는 나노웹들간에 거의 동등한 수준을 보였으나, 폴리아마이드 섬유에 의해 기공을 막아 감소하던 투습도가 그 비율이 더 높아지면 폴리아마이드의 친수성으로 인해 다시 증가하는 경향을 보였다.

9. 접촉각 측정결과, 폴리아마이드의 친수성으로 인해 폴리아마이드 비율이 높은 나노웹일수록 접촉각이 작게 나타났으며 시간에 따라 접촉각이 더 감소하는 경향을 보였다.

10. 폴리스타이렌 나노웹에선 가장 낮은 열전도율을 나타냈으며 폴리아마이드 비율을 높일수록 폴리아마이드 섬유의 가는 직경으로 인해 그 증가율이 크지 않았다. 하지만 폴리아마이드 비율이 반 이상일 때는 나노웹 내의 기공도가 감소하며 폴리아마이드 섬유가 차지하는 표면적이 넓어져 열전도도가 기하급수적으로 증가하였다.

11. 폴리스타이렌 나노웹은 가장 높은 열 저항성을 나타냈었으나 폴리아마이드 비율을 높일수록 감소하였다. 하지만 폴리아마이드 비율이 낮을 때는 폴리아마이드의 가는 직경과 높은 기공성으로 인한 높은 함기율로 열 저항 값의 감소율이 작게 나타났다.

12. 혼합 나노웹의 공기투과도에 영향을 끼치는 인자로는 기공 크기, 기공도, 섬유 직경이 있으며, 투습도는 기공 크기가 영향을 미치나 섬유의 친수성을 함께 고려해야한다.

13. 혼합 나노웹의 열 차단 성능은 기공 크기, 기공도, 섬유 직경에 영향을 받으며 열전도도와 열저항성은 높은 상관관계를 지닌다.

이상의 결과에서 폴리아마이드 섬유와의 혼합을 통해서는 가는 직경을 지닌 폴리아마이드 섬유로 인해 기대했던 큰 강도 증진 효과는 보이지 못했다. 하지만 열전도도가 높은 폴리아마이드와의 혼방에도 불구하고 혼합 나노웹의 높은 기공성으로 인한 함기율 증가로 열전도도와 열 저항성 모두 크게 감소하지 않아 폴리아마이드 섬유의 혼합이 열 차단 성능을 크게 저해하지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 각 섬유 고유의 특성으로 인하여 혼합 나노웹의 성능들이 섬유의 비율에 따라 달라짐을 확인하였다. 특히 높은 기공성과 각기 다른 표면 친수성으로 인해 폴리아마이드와 폴리스타이렌의 혼방이 나노웹의 큰

장점인 투습도를 크게 저하하지 않음을 확인할 수 있었다.

섬유 고유의 특성 외에도 폴리스타이렌 섬유와 폴리아마이드 섬유 두께가 크게 차이 남으로 인하여 폴리스타이렌과 폴리아마이드의 혼방은 단순한 혼방과 다른 성능의 변화를 확인할 수 있다. 폴리아마이드 섬유는 나노 수준으로 얇게 나타나기 때문에 상대적으로 굵은 섬유를 지닌 폴리스타이렌 나노웹의 강도에는 크게 영향을 끼치지 못해 인장강도 변화가 미미한 것으로 나타났으나 두 섬유가 같은 비율로 존재하는 나노웹에서는 두 섬유의 특성이 서로에게 영향을 미쳐 신도가 크게 증진되는 것을 확인 할 수 있다. 이와 더불어 폴리아마이드 섬유가 매우 가늘다는 특성으로 인해 폴리스타이렌 나노웹의 높은 기공도를 크게 감소시키지 않았으며, 이로 인해 폴리스타이렌 나노웹의 낮은 열전도도와 높은 열 저항 값엔 큰 변화를 주지 않아 폴리아마이드 섬유와의 혼방에도 폴리스타이렌 나노웹의 우수한 보온 성능을 유지시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 결과들을 통해서 굵기가 서로 다른 섬유의 혼방에선 굵은 섬유의 특성이 확연하게 나타나며 그 특성을 이용하여 나노웹의 성능을 변화시킬 수 있음을 발견할 수 있다.

또한 폴리스타이렌 전기방사 나노웹은 기존의 폴리스타이렌 필름에 비해 우수한 보온성을 지니며 높은 기공성으로 인하여 우수한 공기투과 성능과 투습성능을 보여 쾌적한 의복내 기후를 유지할 수 있다. 또한 폴리스타이렌 나노웹의 높은 표면 소수성으로 인하여 보온력이 향상된 투습방수 소재로써 이용을 확대 시킬 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 의류소재에 폴리스타이렌 나노웹의 적용을 확대하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] H. R. Han, S. E. Chung, and C. H. Park, "Shape memory and breathable waterproof properties of polyurethane nanowebs," *Textile Research Journal,* vol. 83, no. 1, pp. 76-82, January 1, 2013, 2013.

[2] 허미, "표면처리 전기방사 나노웹의 내구성과 투습방수 성능," 서울대학교 대학원, 서울, 2008.

[3] 윤보람, 이승신, "전기방사한 나노섬유 웹 처리소재와 상용 투습방수 소재의 역학적 특성 비교," *Comparison of Mechanical Properties of Electrospun Nanofiber Web Layered Systems and Conventional Breathable Waterproof Fabrics,* vol. 13, no. 2, pp. 391-402, 2010.

[4] K. S. Kim, and C. H. Park, "Thermal comfort and waterproof-breathable performance of aluminum-coated polyurethane nanowebs," *Textile Research Journal,* vol. 83, no. 17, pp. 1808-1820, October 1, 2013, 2013.

[5] Hae Wook Ahn, Chung Hee Park, and Seung Eun Chung, "Waterproof and breathable properties of nanoweb applied clothing," *Textile Research Journal,* vol. 81, no. 14, pp. 1438-1447, September 1, 2011, 2011.

[6] 전병익, 송민규, "섬유재료의 보온성에 영향을 주는 인자 및 측정방법," *韓國纖維工學會誌 = Textile science and engineering,* vol. 32, no. 3, pp. 212-221, 1995.

[7] H. Wu, J. Fan, and N. Du, "Thermal energy transport within porous polymer materials: Effects of fiber characteristics," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 106, no. 1, pp. 576-583, 2007.

[8] T. Jarusuwannapoom, W. Hongrojjanawiwat, S. Jitjaicham, L. Wannatong, M. Nithitanakul, C. Pattamaprom, P. Koombhongse,

R. Rangkupan, and P. Supaphol, "Effect of solvents on electro-spinnability of polystyrene solutions and morphological appearance of resulting electrospun polystyrene fibers," *European Polymer Journal,* vol. 41, no. 3, pp. 409-421, 3//, 2005.

[9] H. Fashandi, and M. Karimi, "Characterization of porosity of polystyrene fibers electrospun at humid atmosphere," *Thermochimica Acta,* vol. 547, no. 0, pp. 38-46, 11/10/, 2012.

[10] H. J. Wu, J. T. Fan, X. H. Qin, S. Mo, and J. P. Hinestroza, "Fabrication and characterization of a novel polypropylene/poly(vinyl alcohol)/aluminum hybrid layered assembly for high-performance fibrous insulation," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 110, no. 4, pp. 2525-2530, Nov, 2008.

[11] M. Kang, R. Jung, H.-S. Kim, and H.-J. Jin, "Preparation of superhydrophobic polystyrene membranes by electrospinning," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* vol. 313-314, no. 0, pp. 411-414, 2/1/, 2008.

[12] J. Y. Lin, B. Ding, J. M. Yang, J. Y. Yu, and G. Sun, "Subtle regulation of the micro- and nanostructures of electrospun polystyrene fibers and their application in oil absorption," *Nanoscale,* vol. 4, no. 1, pp. 176-182, 2012.

[13] M. Sun, X. Li, B. Ding, J. Yu, and G. Sun, "Mechanical and wettable behavior of polyacrylonitrile reinforced fibrous polystyrene mats," *Journal of Colloid and Interface Science,* vol. 347, no. 1, pp. 147-152, 7/1/, 2010.

[14] C. Carrizales, S. Pelfrey, R. Rincon, T. M. Eubanks, A. Kuang, M. J. McClure, G. L. Bowlin, and J. Macossay, "Thermal and mechanical properties of electrospun PMMA, PVC, Nylon 6, and Nylon 6,6," *Polymers for Advanced Technologies,* vol. 19, no. 2, pp. 124-130, 2008.

[15] S. S. Ojha, M. Afshari, R. Kotek, and R. E. Gorga, "Morphology of electrospun nylon-6 nanofibers as a function of molecular weight and processing parameters," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 108, no. 1, pp. 308-319, 2008.

[16] X. Li, B. Ding, J. Lin, J. Yu, and G. Sun, "Enhanced Mechanical Properties of Superhydrophobic Microfibrous Polystyrene Mats via Polyamide 6 Nanofibers," *The Journal of Physical Chemistry C,* vol. 113, no. 47, pp. 20452-20457, 2009/11/26, 2009.

[17] W. S. Chow, Z. A. M. Ishak, U. S. Ishiaku, J. Karger-Kocsis, and A. A. Apostolov, "The effect of organoclay on the mechanical properties and morphology of injection-molded polyamide 6/polypropylene nanocomposites," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 91, no. 1, pp. 175-189, 2004.

[18] Y. Miyauchi, B. Ding, and S. Shiratori, "Fabrication of a silver-ragwort-leaf-like super-hydrophobic micro/nanoporous fibrous mat surface by electrospinning," *Nanotechnology,* vol. 17, no. 20, pp. 5151, 2006.

[19] H. Fashandi, and M. Karimi, "Pore formation in polystyrene fiber by superimposing temperature and relative humidity of electrospinning atmosphere," *Polymer,* vol. 53, no. 25, pp. 5832-5849, 11/30/, 2012.

[20] L. Wannatong, A. Sirivat, and P. Supaphol, "Effects of solvents on electrospun polymeric fibers: preliminary study on polystyrene," *Polymer International,* vol. 53, no. 11, pp. 1851-1859, 2004.

[21] G. Eda, and S. Shivkumar, "Bead-to-fiber transition in electrospun polystyrene," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 106, no. 1, pp. 475-487, 2007.

[22] B. Sun, Y. Z. Long, F. Yu, M. M. Li, H. D. Zhang, W. J. Li, and T. X. Xu, "Self-assembly of a three-dimensional fibrous

polymer sponge by electrospinning," *Nanoscale,* vol. 4, no. 6, pp. 2134-2137, 2012.

[23] D.-K. Park, S.-J. Park, W.-I. Baek, M. A. Kanjwal, and H.-Y. Kim, "Point-bonded electrospun polystyrene fibrous mats fabricated via the addition of poly(butylacrylate) adhesive," *Polymer Engineering & Science,* vol. 51, no. 5, pp. 894-901, 2011.

[24] 최명재, 강경석, 한혜정, "기술자료(技術資料) : 특허로 본 폴리스티렌 화학적 재활용 기술 동향," *Technical Note : Trend on Chemical Recycling Technologies for Waste Polystyrene by the Patent Analysis,* vol. 24, no. 5, pp. 482-492, 2007.

[25] 이정호, "폐스티로폴 재활용에 따른 경제성 분석," 한밭대학교 산업대학원, 대전, 2013.

[26] 김성련, 김성련, *被服材料學*, 서울: 敎文社, 2009.

[27] 김성훈, "폴리케톤/폴리아마이드6/변성 말레산 처리된 고무 블렌드의 모폴로지 및 기계적 물성," 서울대학교 대학원, 서울, 2012.

[28] C. Mit-uppatham, M. Nithitanakul, and P. Supaphol, "Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter," *Macromolecular Chemistry and Physics,* vol. 205, no. 17, pp. 2327-2338, 2004.

[29] Y. J. Ryu, H. Y. Kim, K. H. Lee, H. C. Park, and D. R. Lee, "Transport properties of electrospun nylon 6 nonwoven mats," *European Polymer Journal,* vol. 39, no. 9, pp. 1883-1889, 9//, 2003.

[30] H. Fong, W. Liu, C.-S. Wang, and R. A. Vaia, "Generation of electrospun fibers of nylon 6 and nylon 6-montmorillonite nanocomposite," *Polymer,* vol. 43, no. 3, pp. 775-780, 2//, 2002.

[31] E. Marsano, L. Francis, and F. Giunco, "Polyamide 6 nanofibrous nonwovens via electrospinning," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 117, no. 3, pp. 1754-1765, 2010.

[32] 최정화, and 김명주, *의복과 건강*, 파주: 교문사, 2011.

[33] 송민규, and 권명숙, “겨울용 쾌적 보온성 의복의 온열특성에 관한 연구,” *A Study on the Thermal Characteristics of Comfortable Heat-Retaining Winter Clothing,* vol. 58, no. 6, pp. 24-34, 2008.

[34] 송민규, 권명숙, “풍속 존재 시 쾌적보온성 의복의 온열특성에 관한 연구,” *A Study on the Insulation of Thermal Clothing Under Dynamic Air Condition,* vol. 58, no. 9, pp. 29-37, 2008.

[35] K. Min, Y. Son, C. Kim, Y. Lee, and K. Hong, “Heat and moisture transfer from skin to environment through fabrics: A mathematical model,” *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 50, no. 25-26, pp. 5292-5304, 12//, 2007.

[36] J. O. Ukponmwan, “THE THERMAL-INSULATION PROPERTIES OF FABRICS,” *Textile Progress,* vol. 24, no. 4, pp. 1-54, 1993/12/01, 1993.

[37] J. Legerská, P. Lizák, A. Murárová, and S. C. Mojumdar, “Thermal analysis of the polyester profiled fiber,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 112, no. 2, pp. 1019-1023, 2013/05/01, 2013.

[38] N. Sabetzadeh, H. Bahrambeygi, A. Rabbi, and K. Nasouri, “Thermal conductivity of polyacrylonitrile nanofibre web in various nanofibre diameters and surface densities,” *Micro & Nano Letters,* vol. 7, no. 7, pp. 662-666, Jul, 2012.

[39] 유해형, 김영호, 조현태, 심현주, 이광배, “연구논문 : 투습방수코팅 나일론 직물의 보온성 향상,” *한국섬유공학회지,* vol. 30, no. 3, pp. 250-258, 1993.

[40] 여숙영, 이동화, 김은해, “보문 : 세라믹스 처리된 나일론 직물의 원적외선 방사성능과 보온효과,” *한국의류학회지,* vol. 22, no. 4, pp. 515-525, 1998.

[41] 천석원, “특집 : 최신 부직포 제조기술 ; 나노파이버 전기방사기술,” *섬유기술과 산업,* vol. 12, no. 2, pp. 96-105, 2008.

[42] N. Bhardwaj, and S. C. Kundu, "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique," *Biotechnology Advances,* vol. 28, no. 3, pp. 325-347, 5//, 2010.

[43] 김동복, 박정호, "전기방사에 의한 나노섬유 제조 및 응용," *전기의 세계,* vol. 52, no. 8, pp. 33-40, 2003.

[44] H. Fong, and D. H. Reneker, "Elastomeric nanofibers of styrene-butadiene-styrene triblock copolymer," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics,* vol. 37, no. 24, pp. 3488-3493, 1999.

[45] J. Y. Lin, Y. W. Shang, B. Ding, J. M. Yang, J. Y. Yu, and S. S. Al-Deyab, "Nanoporous polystyrene fibers for oil spill cleanup," *Marine Pollution Bulletin,* vol. 64, no. 2, pp. 347-352, Feb, 2012.

[46] S. E. Chung, and C. H. Park, "The thermoresponsive shape memory characteristics of polyurethane foam," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 117, no. 4, pp. 2265-2271, 2010.

[47] S. E. Chung, C. H. Park, W.-R. Yu, and T. J. Kang, "Thermoresponsive shape memory characteristics of polyurethane electrospun web," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 120, no. 1, pp. 492-500, 2011.

[48] Y. Kang, C. Park, J. Kim, and T. Kang, "Application of electrospun polyurethane web to breathable water-proof fabrics," *Fibers and Polymers,* vol. 8, no. 5, pp. 564-570, 2007/12/01, 2007.

[49] B. S. Kim, N. Kimura, H. K. Kim, K. Watanabe, and I. S. Kim, "Thermal Insulation, Antibacterial and Mold Properties of Breathable Nanofiber-Laminated Wallpapers," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology,* vol. 11, no. 6, pp. 4929-4933, Jun, 2011.

[50] W. E. Teo, and S. Ramakrishna, "A review on electrospinning design and nanofibre assemblies," *Nanotechnology,* vol. 17, no.

14, pp. R89, 2006.

[51] R. Nirmala, H. Panth, C. Yi, K. Nam, S.-J. Park, H. Kim, and R. Navamathavan, "Effect of solvents on high aspect ratio polyamide-6 nanofibers via electrospinning," *Macromolecular Research,* vol. 18, no. 8, pp. 759-765, 2010/08/01, 2010.

[52] A. Greiner, and J. H. Wendorff, "Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers," *Angewandte Chemie International Edition,* vol. 46, no. 30, pp. 5670-5703, 2007.

[53] C. A. Bonino, K. Efimenko, S. I. Jeong, M. D. Krebs, E. Alsberg, and S. A. Khan, "Three-Dimensional Electrospun Alginate Nanofiber Mats via Tailored Charge Repulsions," *Small,* vol. 8, no. 12, pp. 1928-1936, Jun, 2012.

[54] T. Kasuga, A. Obata, H. Maeda, Y. Ota, X. F. Yao, and K. Oribe, "Siloxane-poly(lactic acid)-vaterite composites with 3D cotton-like structure," *Journal of Materials Science-Materials in Medicine,* vol. 23, no. 10, pp. 2349-2357, Oct, 2012.

[55] B. A. Blakeney, A. Tambralli, J. M. Anderson, A. Andukuri, D.-J. Lim, D. R. Dean, and H.-W. Jun, "Cell infiltration and growth in a low density, uncompressed three-dimensional electrospun nanofibrous scaffold," *Biomaterials,* vol. 32, no. 6, pp. 1583-1590, 2//, 2011.

[56] P. Heikkila, and A. Harlin, "Electrospinning of polyacrylonitrile (PAN) solution: Effect of conductive additive and filler on the process," *Express Polymer Letters,* vol. 3, no. 7, pp. 437-445, Jul, 2009.

[57] B. Ding, E. Kimura, T. Sato, S. Fujita, and S. Shiratori, "Fabrication of blend biodegradable nanofibrous nonwoven mats via multi-jet electrospinning," *Polymer,* vol. 45, no. 6, pp. 1895-1902, 3//, 2004.

[58] M. W. Frey, and L. Li, "Electrospinning and Porosity

Measurements of Nylon-6/Poly(ethylene oxide) Blended Nonwovens," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics,* vol. 2, no. 1, pp. 31-37, 2007.

[59] H. Ma, C. Burger, B. S. Hsiao, and B. Chu, "Ultra-fine cellulose nanofibers: new nano-scale materials for water purification," *Journal of Materials Chemistry,* vol. 21, no. 21, pp. 7507-7510, 2011.

[60] F.-L. Zhou, and R.-H. Gong, "Manufacturing technologies of polymeric nanofibres and nanofibre yarns," *Polymer International,* vol. 57, no. 6, pp. 837-845, 2008.

[61] H. Schreuder-Gibson, P. Gibson, K. Senecal, M. Sennett, J. Walker, W. Yeomans, D. Ziegler, and P. P. Tsai, "Protective textile materials based on electrospun nanofibers," *Journal of Advanced Materials,* vol. 34, no. 3, pp. 44-55, Jul, 2002.

[62] 김은애, 유신정 "2004년도 추계총회 및 제78차 학술발표회 : 특집: 스포츠/레저용 섬유소재 ; 투습방수 소재 및 평가 기술," *섬유기술과 산업,* vol. 8, no. 3, pp. 271-285, 2004.

[63] 김영호, "지상강좌 : 접촉각 측정 및 표면 에너지," *Contact Angle & Surface Energy,* vol. 8, no. 3, pp. 82-93, 2005.

[64] H. Lee, "Rapid measurement of thermal conductivity of polymer films," *Review of Scientific Instruments,* vol. 53, no. 6, pp. 884-887, 1982.

Abstract

Characterization of polystyrene electrospun nanoweb depending on polyamide 6 ratio

Jae Won Yoon
Department of Clothing and Textiles
The Graduate School
Seoul National University

The application of polystyrene (PS) material, with its extremely low thermal conductivity similar to air and the low cost, has been limited due to its poor mechanical strength. In this study, mechanically enhanced electrospun web was fabricated by multi-jet electrospinning technique using PS and polyamide 6 (PA6), in an attempt to overcome this lack of poor mechanical property of PS. The ratio of PS/PA6 was controlled by varying the proportion of the number of the spinning syringes, which were 4:0, 3:1, 2:1, 2:2, 1:2, 1:3 and 0:4. From the results of field emission scanning electron microscopy

(FE-SEM), we could verify well-dispersed PS and PA6 of micro and nano scale electrospun web, respectively. The mechanical property of PS/PA6 web was enhanced when the ratio of PA6 increased, thanks to the high strength of PA6. At the same time, increase of thermal conductivity and decrease of thermal resistance were obtained as the proportion of PA6 was increased. Water vapor permeability and air permeability were further evaluated to determine the applicability of the web to the comfortable clothing fabrics characteristics. Water contact angle of PS/PA6 electrospun web was investigated to verify hydrophobicity aspect of web. As for the final outcome, we could ascertain the possibility of using PS for clothing applications by overcoming its relatively weak mechanical strength via multi-jet electrospinning, yet maintaining its thermal insulation.

Keywords : electrospinning, polystyrene, polyamide 6, thermal conductivity, thermal resistance,
Student Number : 2012-21509