

## 전기방사한 나노섬유 웹 처리소재와 상용 투습방수소재의 역학적 특성 비교\*

### Comparison of Mechanical Properties of Electrospun Nanofiber Web Layered Systems and Conventional Breathable Waterproof Fabrics

윤보람\*\* · 이승신\*\*†

Boram Youn\*\* · Seungsin Lee\*\*†

연세대학교 생활과학대학 의류환경학과\*\*

Department of Clothing and Textiles, Yonsei University\*\*

#### Abstract

In this study, breathable waterproof materials were prepared by electrospinning. Five kinds of electrospun nanofiber web layered systems with different levels of nanofiber web density, as well as different substrates and layer structures were fabricated, and their mechanical properties (tensile, bending, shear, compression, surface, and thickness & weight) were measured by the KES-FB system and compared with those of conventional breathable waterproof fabrics (densely woven fabric, PTFE laminated fabric and PU coated fabric). The KES-FB measurements demonstrate that the lab-scale nanofiber web layered systems are more flexible and fuller than commercial nanofiber web layered systems, which have a more compact structure than the lab-scale nanofiber web layered systems. Densely woven fabrics and lab-scale nanofiber web layered systems showed lower values of tensile linearity (LT), bending stiffness (B), and shear stiffness (G) than those of PU coated and PTFE laminated fabric. These results indicate that they are more flexible and have less resistance to the shearing movement, corresponding to a more pliable material having a better drape, than PU coated fabrics and PTFE laminated fabrics.

**Keywords** : electrospinning, nanofiber web, breathable waterproof material, mechanical property, KES-FB system

#### 요약

전기방사한 나노섬유 웹은 가는 섬유직경과 수많은 미세공극 구조로 인해 우수한 투습성 및 차단 성능을 나타내며, 초박막초경량의 특성을 갖는다. 이러한 특성 때문에 새로운 투습방수 소재로서 전기방사한 나노섬유 웹을 이용하고자 하는 시도가 이루어지고 있으며, 본 연구에서는 나노섬유 웹 처리소재의 역학적 특성을 측정하고 이를 기존 투습방수 소재와 비교함으로써 기능적 성능과 더불어 감성적 성능을 만족시키는 새로운 투습방수 소재 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다. 실험실 제작(lab-scale) 나노섬유 웹과 대량생산(commercial) 나노섬유 웹을 이용하여 웹 밀도와 기반 직물, 적층 구조, 라미네이팅 여부 등에 차이를 두어 다양한 전기방사 나노섬유 웹 처리소재를 제작하였다. 이들 시료에 대해 KES-FB system을 이용하여 역학적 특성을 평가하고, 이를 기존 투습방수 소재인 고밀도 직물, PTFE 라미네이팅 직물, PU 코팅 직물의 역학적 특성치와 비교하였다. 연구 결과, 실험실에서 제작한 나노섬유 웹 처리소재는 부피감이 있으면서 유연하였고,

\* 이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.  
(KRF-2008-331-C00328).

† 교신저자 : 이승신 (연세대학교 의류환경학과)  
E-mail : SL158@yonsei.ac.kr  
TEL : 02-2123-3111

대량생산된 나노섬유 웹을 라미네이팅한 소재는 신장 변형이 적은, 치밀한 구조의 소재인 것으로 나타났다. 또한 고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재는 낮은 인장선형성과 굽힘강성, 전단강성으로 유사한 거동을 나타내어, 기존 PU 코팅이나 PTFE 라미네이팅 직물에 비해 뻣뻣함이 덜하면서 유연하고 부드러운 태를 가지는 것으로 해석되었다. 따라서 전기방사 나노섬유 웹 처리소재가 일정 수준의 방수성을 확보한다면 기능적 성능과 감성적 성능을 모두 충족시키는 새로운 투습방수 소재로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

**주제어 :** 전기방사, 나노섬유 웹, 투습방수 소재, 역학적 특성, KES-FB

## 1. 서론

주 5일 근무 시대가 정착됨에 따라 수상 레포츠 및 자전거, 인라인 스케이트, 마라톤 등의 레포츠를 즐기는 인구가 증가하였고 더불어 아웃도어 의류를 평상복으로 입는 ‘아웃트로(아웃도어+메트로) 패션’이 등장했다. 이는 곧 기능성 소재의 일상화를 의미하는 것으로, 활동하기 편리하고 쾌적한 의복환경을 구현하는 기능성 소재에 대한 소비자들의 관심과 수요가 크게 증가하고 있는 추세이다.

방풍, 흡한속건 또는 항균소취나 체온조절 소재와 같은 다양한 기능성 소재 중에서도 투습방수 소재는 특히 범용화 되어 있는 상태로, 소비자들의 욕구와 필요 또한 세분화되고 있다. 기존에는 고산지대에서의 폭우를 대비하거나 설상(雪上) 활동과 같은 극한 상황에서의 착용을 위한 고내수성의 소재가 주를 이루었다면, 이제는 도심에서의 일상생활이나 가벼운 운동을 위한 착용에 적합한 다양한 범위의 투습방수 소재가 필요하게 된 것이다.

투습방수 소재는 투습과 방수 성능을 동시에 발현하는 소재로서, 내부의 수증기나 땀은 배출시키고 외부의 물방울은 차단해 착용자의 체온조절을 돕고 쾌적감을 유지하도록 한다. 그러나 투습과 방수는 상반된 개념이므로, 일반적으로 투습도가 높으면 방수성이 떨어지고 방수가 잘 되면 투습 성능이 낮아 쾌적성이 떨어지게 된다. 투습방수 소재의 제작 원리는 크게 3가지로, 극세사를 이용한 고밀도 직물과, 미세다공막을 코팅 또는 라미네이팅한 소재, 친수성을 갖는 무공막을 코팅이나 라미네이팅한 것으로 나눌 수 있다(Mukhopadhyay & Midha, 2008). 이들 중 인체곡선과 융합성이 좋고 부드러워 편안한 태를 가지는 투습방수 소재는 고밀도 직물이지만, 아무리 조직이 치밀하더라도 코팅이나 라미네이팅 소재에 비해 높은 수준의 방수성을 가지기 어렵다는 한계점이 있다. 반면

방수성이 좋은 코팅, 라미네이팅 소재는 상대적으로 투습성과 공기투과도가 낮아 쾌적성이 떨어지며, 뻣뻣함(stiffness) (Jeong & An, 2002)으로 인한 불편이 있었다. 뿐만 아니라 투습방수 기능 부여를 위해 실시하는 코팅, 라미네이팅 가공으로 인해 소재의 중량이 상당히 증가하게 되는 경향이 있다(강연경, 2007). 경량성은 아웃도어 웨어에서는 무시할 수 없는 요소로, 실제로 등산복의 경우 기능성에 있어서 소비자들이 가장 중요하게 여기는 요소가 투습이나 방수성보다도 ‘경량성’이라는 연구 결과도 나온 바 있다(김찬호, 2005).

최근에는 직물에 투습방수 기능을 갖게 하는 새로운 소재로서 전기방사한 나노섬유 웹이 연구되고 있다(구영희, 2006; 허미, 2008; Kang et al., 2007). 전기방사는 수십에서 수백 나노미터 직경의 초극세 섬유를 제조하는 기술로, 다른 나노섬유 제조 방법에 비해 그 원리와 장비가 간단하고 적용이 쉬워 공업화에 가장 유리한 것으로 여겨지고 있다(Lee et al., 2002). 용융 또는 용매에 용해된 고분자 용액에 전기적인 힘을 가하면, 표면장력에 의해 방사구 끝에 맺혀있던 고분자 용액의 액체 표면으로 전하가 유도되고, 유도된 전하의 상호 반발력에 의한 힘이 표면장력과 반대방향으로 생기게 된다. 고분자 용액 방울의 표면장력을 넘어서는 임계전압 이상이 가해지면 전기적 반발력에 의해 전하를 띤 고분자 용액 젯(jet)이 방출되는데, 이 젯이 공기 중을 날아가는 동안 가늘게 찢어져 섬유화되고 용매는 휘발되어 콜렉터(collector) 상에는 초극세 섬유가 적층된 부직포 형태의 웹이 만들어진다(Buer et al., 2001). 이렇게 형성된 전기방사 웹은 수많은 미세공극 구조로 인해 호흡성(breathability)을 가질 수 있으며, 나노 범위 직경의 섬유 집합체로 이루어지므로 유연하고 초박막, 초경량이라는 특성을 갖는다.

그동안 전기방사된 나노섬유 웹의 제조에 영향을 미치는 다양한 변수와 그 적용에 관한 연구가 꾸준히

이루어져 왔고, 의류 분야에서는 군사용 방호복, 화학 방호복, 스포츠·레저 의류용으로의 사용이 주로 논의되었다(Gibson et al., 1998; Graham et al., 2004; Lee & Obendorf, 2007a; Lee & Obendorf, 2007b; Kang et al., 2007; 허미, 2008). 투습방수 소재로의 적용 가능성을 탐색한 Kang 등(2007)의 연구에서는 기존 코팅 투습방수 소재와의 비교를 통해 전기방사된 나노섬유 웹의 높은 투습성과 공기투과도, 보온 기능을 확인하였으므로, 방수 및 발수 성능이 발휘된다면 기존 소재보다 쾌적성이 우수한 투습방수 소재로 사용될 수 있을 것으로 기대되었다. 상대적으로 낮은 내수도와 내구성에 대한 보완 방안으로 나노섬유 웹과 기반직물 간 본딩 또는 나노섬유 웹에 코팅처리 등이 제안되었고, 이를 통해 어느 정도의 내수도 향상이 이루어졌다(구영희, 2006; 허미, 2008). 그러나 최종 직물로서 착용자의 쾌적감 및 심미성에 영향을 미칠 수 있는 감성적 성능에 관한 연구는 거의 이루어지지 않아, 나노섬유 웹을 이용한 투습방수 소재의 역학적 특성과 태에 관한 연구가 필요한 실정이다. 고부가가치 기능성 제품의 상품화 과정에서 감성적 성능 충족은 매우 중요한 요소로, 나노섬유 웹을 이용한 투습방수 소재가 상용화되기 위해서는 반드시 고려되어야 하는 문제이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 새로운 투습방수 소재로 개발 중인 전기방사 나노섬유 웹 처리소재에 대하여 Kawabata Evaluation System을 이용해 역학적 특성을 측정하고, 기존에 널리 쓰이고 있는 투습방수 소재인 고밀도 직물과 PTFE(Poly(tetrafluoro ethylene)) 멤브레인 라미네이팅 직물, PU(Polyurethane) 코팅 직물의 역학적 특성치와 비교 분석하고자 한다. 이 때, 연구자가 실험실에서 직접 웹 밀도를 달리하여 제작한 (lab-scale) 나노섬유 웹 처리소재와 기반 직물 및 적층 구조(layer structure)에 차이를 둔 대량생산(commercial) 웹 라미네이팅 소재 등으로 다양한 종류의 나노섬유 웹 처리소재를 제작하여 성능 평가를 실시함으로써, 각 변인이 역학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 이와 같은 전기방사 나노섬유 웹 처리소재와 기존 투습방수 소재들의 종합적인 비교를 통하여 보다 나은 투습방수 소재 개발을 위한 기초자료를 제시할 수 있을 것이다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 나노섬유 웹 처리소재의 제조

#### 2.1.1. 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재

의류용으로 사용될 수 있는 고분자 중 신축성과 탄성회복력이 우수한 폴리우레탄(PU)(Pellethane™, Dow Chemical Co., USA)을 선정하고, 이를 N, N-dimethylformamide (DMF) (Junsei Chemical Co., Ltd., Japan)에 용해하여 방사용액을 제조하였다.

전기방사장치는 크게, 방사 용액을 공급하는 토출부(Syringe), 전기장 형성을 위한 전압 발생 장치(High voltage supply), 나노섬유를 적층시키는 콜렉터(Collector)의 세 부분으로 구성된다(Figure 1). 본 연구에서는 균일한 나노섬유 웹을 형성시키기 위해 40cm 거리 내에서 왕복운동이 가능한 전기방사기(NNC-ESP200R2, NanoNC Co., Korea)를 사용하였고, multi-nozzle을 이용해 2-jet으로 방사하였다. 예비실험을 거쳐 PU 농도 13%, 전압 10kV, 방사 거리 11cm, 니들 게이지 26gauge (내경 0.23mm), 용액 공급 펌프 속도 0.2ml/hr의 최적 방사 조건을 설정하였다. 이 때 나노섬유 웹 자체는 매우 얇고 약하므로, 의류 소재로 사용되기 위해서는 직물 위에 적층시켜 강도를 보강해야 할 필요가 있다. 따라서 기반 직물로 100% 폴리에스터 고밀도 직물(Kolon fashion material Co., Korea)을 선정하였고, 응집성과 탄성이 있는 PU의 특성상 웹으로 쌓일수록 서로 당기는 힘에 의해 기반 직물과 밀착되지 않고 분리되므로, 임시 고정용 스프레이 접착제(3M Co.)를 사용하

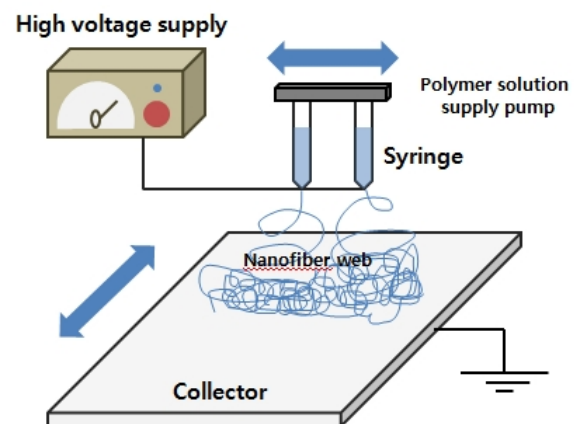


Figure 1. Schematic diagram of an electrospinning setup.

여 나노섬유 웹과 기반 직물이 접합되도록 하였다. 접착제를 약 1.6g/m<sup>2</sup>로 도포한 기반 직물 위에 나노섬유의 웹 밀도가 각각 5.6g/m<sup>2</sup>, 10.2g/m<sup>2</sup>이 되도록 방사하였다.

2.1.2. 대량생산 나노섬유 웹 처리소재

대량생산 나노섬유 웹은 국외 F社의 제품을 제공받았으며, 실험실 제작 시료와 유사하게 PU를 약 5.2g/m<sup>2</sup>의 웹 밀도로 전기방사한 것이다. 대량생산 나노섬유 웹을 기반직물에 라미네이팅 하였으며, 이 때 기반직물 및 적층 구조에 차이를 두어 제작하였다. PU 웹을 실험실 제작 나노섬유 웹과 동일한 고밀도 직물 위에 라미네이팅한 것과, 100% 폴리에스터 일반 직물에 라미네이팅한 것, 100% 폴리에스터 일반 직물과 나일론 트리코에 3-layer로 라미네이팅한 것의 3종이며, 나노섬유 웹의 미세다공 손상을 최소화할 수 있도록 mesh roller와 hot-melt PU 접착제가 라미네이팅에 사용되었다. 본 연구에서 제작한 나노섬유 웹 처리소재의 구성 조건과 모식도를 Table 1에 나타내었다.

2.2. 시료 구성

역학적 특성 측정에 사용된 시료는 총 8종으로, 새로운 투습방수 소재로 개발된 전기방사 나노섬유 웹 처리소재 5종과 기존 투습방수 소재 3종을 포함한다. 전기방사 나노섬유 웹 처리소재는 웹 밀도를 달리하여 실험실에서 직접 제작한 나노섬유 웹 처리소재 2종과, 기반 직물 및 적층 구조에 차이를 둔 대량생산 나노섬유 웹 처리소재 3종으로 구성하였으며 기존 투습방수 소재로는 고밀도 직물, 미세다공 PTFE 멤브레인 라미네이팅 직물, 친수무공 PU 코팅 직물의 3종을 선정하였다. 각 시료들의 특성을 Table 2과 Table 3에 나타내었다.

2.3. 역학적 특성 평가

투습방수 소재들의 역학적 성질은 KES-FB (Kawabata Evaluation System for Fabric, Kato Tech Co., Ltd., Japan) 를 사용하여 측정, 비교하였다. 인장, 굽힘, 전단, 표면, 압축, 두께 및 무게의 6가지 특성에 대해 총 17항목의 특성치를 측정하였으며, 각 항목은 3회 측정 후 평균한 값을 사용하였다. 시료들은 온도 20 (±2)°C, 상대습도 65(±2)%의 항온항습실에서 표준

Table 1. Fabric construction of electrospun nanofiber web layered systems.

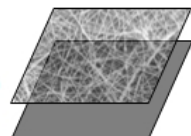
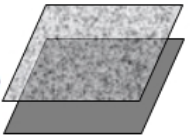
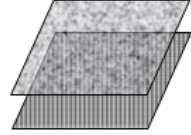
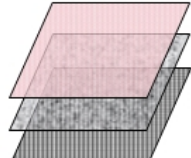
Specimen		Nanofiber web	Substrate	Fabric construction
Lab-scale nanofiber web layered system	2-layer	PU	Densely woven 100% polyester	PU nanofiber web Densely woven PET 
	2-layer		Densely woven 100% polyester	PU nanofiber web Densely woven PET 
Commercial nanofiber web layered system	2-layer	PU	100% polyester fabric	PU nanofiber web Regular woven PET 
	3-layer		100% polyester fabric, 100% nylon tricot	Nylon tricot PU nanofiber web Regular woven PET 

Table 2. Characteristics of nanofiber web layered systems.

Specimen	Sample code	Layer	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Nanofiber web density (g/m <sup>2</sup> )
Lab-scale nanofiber web layered system	L1	2-layer <sup>a</sup>	91.9	0.18	5.6
	L2	2-layer <sup>a</sup>	92.4	0.23	10.2
Commercial nanofiber web layered system	C1	2-layer <sup>a</sup>	97.9	0.17	5.2
	C2	2-layer <sup>b</sup>	120.0	0.21	5.2
	C3	3-layer <sup>c</sup>	187.9	0.46	5.2

<sup>a</sup> Nanofiber web + densely woven fabric

<sup>b</sup> Nanofiber web + regular woven fabric\*

<sup>c</sup> Regular woven fabric + Nanofiber web + knitted lining\*\*

\* 100% Polyester, plain weave, fabric weight 109g/m<sup>2</sup>, thickness 0.15mm, fabric count 93 × 93/inch

\*\* 100% Nylon tricot, fabric weight 69g/m<sup>2</sup>, thickness 0.25mm, fabric count 42 × 84/inch

Table 3. Characteristics of conventional breathable waterproof fabrics.

Specimen	Substrate	Weave construction	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Fabric count (warp × filling/inch)
Densely woven fabric	100% Polyester	Dobby	88.4	0.17	160×150
PU coated fabric	100% Polyester	Plain	101.3	0.13	136×84
PTFE membrane laminated fabric	100% Polyester	Dobby	101.9	0.20	179×119

조건으로 측정되었다.

## 2.4. 나노섬유 웹의 표면 관찰

투습방수 소재로 제작된 전기방사 나노섬유 웹 처리소재의 표면과 측면 상태를 알아보기 위해 나노섬유 웹에 Pt/Pd로 스퍼터 코팅 후, Scanning Electron Microscope(SEM)(HITACHI S-4200, Nissei Sangyo Co. Ltd., Japan)를 이용하여 각각 1000배, 300배의 배율로 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전기방사한 나노섬유 직경 및 웹의 표면 특성

Figure 2는 전기방사한 나노섬유 웹의 표면 특성을 살펴보기 위하여 주사전자 현미경으로 관찰한 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재와 대량생산 나노섬유 웹 처리소재의 표면(상단) 및 측면(하단) 사진이다.

각각 sample code 'L1'과 'C1' 시료로, 섬유 직경이

약 300~500nm인 비교적 균일한 나노섬유가 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 시료의 측면 사진을 보면, 각각 5.6g/m<sup>2</sup>(L1)와 5.2g/m<sup>2</sup>(C1)로, 유사한 웹 밀도 범위의 나노섬유 웹임에도 실험실 제작 시료와 대량생산 시료 간의 두께 차이가 있음을 알 수 있다. 실험실 제작 나노섬유 웹의 두께가 20μm 이상인 반면, 라미네이팅을 거친, 대량생산 나노섬유 웹은 약 10μm 두께로 훨씬 얇게 압축된 형태이다. 따라서 이러한 웹의 치밀함이 역학적 특성에 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 또한 기반 직물을 구성하고 있는 섬유와 전기방사한 나노섬유의 직경 차이가 두드러지게 나타난다. Figure 2에 제시한 시료의 기반 직물은 고밀도 직물로, 일반 직물에 비해 훨씬 가는 직경의 극세 섬유가 쓰였음에도 불구하고 전기방사한 나노섬유의 굵기와 큰 차이를 보였고, 이로 인해 기반 직물의 공극에 비해 매우 작은 수많은 미세공극들이 나노섬유 웹에 형성됨을 알 수 있다.

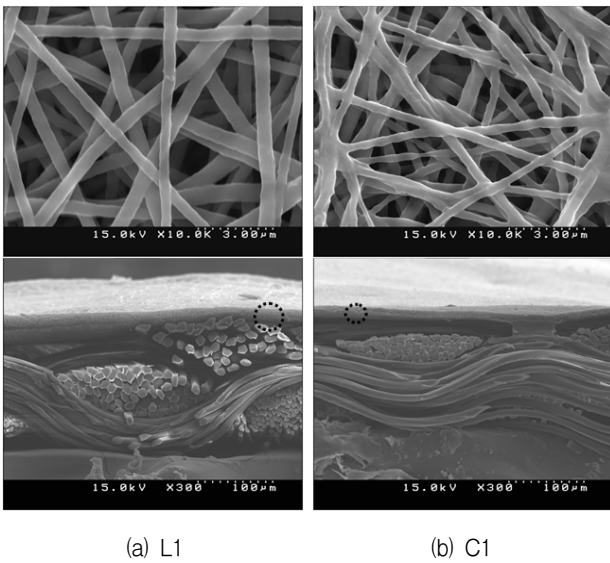


Figure 2. SEM micrographs of electrospun PU nanofiber web layered system : (a) Lab-scale nanofiber web layered system with 5.6g/m<sup>2</sup> web density (L1), (b) Commercial nanofiber web layered system with 5.2g/m<sup>2</sup> web density (C1).

### 3.2. 역학적 특성

새로운 투습방수 소재인 전기방사 나노섬유 웹 처리소재 5종과 기존 투습방수 소재인 고밀도 직물, 친수무공 PU 코팅 직물, PTFE 라미네이팅 직물의 총 8가지 시료의 역학적 특성을 KES-FB system을 이용해 측정하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

#### 3.2.1. 인장 특성

인장 특성은 직물에 한 방향으로 힘을 가해 인장시킬 때, 직물의 신장과 변형 및 회복성을 나타내는 특성이다. 인장 특성의 4가지 항목 중 인장선형성(LT)은 PTFE 라미네이팅 직물이 가장 큰 값을 나타냈고, 인장에너지(WT)와 인장회복성(RT), 최대 하중시(500 gf/cm)의 신장성을 나타내는 EM 값은 PU 코팅 직물의 값이 가장 큰 것으로 나타났다(Figure 3). 인장선형성이 크다는 것은 인장초기 신도저항이 커 신체 동작시 구속력이 증가함을 의미한다. PTFE 라미네이팅 직물의 경우 인장선형성은 가장 크면서 신장성 및 인장에너지가 가장 낮아 뻣뻣하고 잘 늘어나지 않을 것으로 예상되는데, 이는 라미네이팅이 신장성을 감소시

Table 4. Mechanical properties of breathable waterproof fabrics.

Mechanical properties		Specimens	Densely woven fabric	L1	L2	C1	C2	C3	PTFE laminated fabric	PU coated fabric
		Tensile	LT[-]	0.828	0.829	0.789	0.831	0.810	0.783	0.908
WT[gf · cm/cm <sup>2</sup> ]	6.67		6.76	6.50	6.07	5.87	5.20	4.13	7.57	
RT[%]	54.12		54.27	55.92	57.14	55.45	55.98	59.69	62.96	
EM[%]	3.23		3.27	3.29	2.92	2.94	2.70	1.82	3.39	
Bending	B[gf · cm/cm]	0.036	0.043	0.042	0.071	0.097	0.183	0.180	0.173	
	2HB[gf · cm/cm]	0.0383	0.0419	0.0413	0.0568	0.0774	0.1793	0.1100	0.0611	
Shear	G[gf/cm · degree]	1.85	2.18	2.28	4.93	3.78	4.39	6.82	4.97	
	2HG[gf/cm]	5.66	5.13	5.62	10.23	9.63	11.08	11.01	9.23	
	2HG5[gf/cm]	9.32	8.68	9.38	11.59	10.48	13.49	15.58	9.44	
Surface	MIU[-]	0.204	1.555	1.069	1.106	0.419	0.191	0.199	0.153	
	MMD[-]	0.0138	0.1051	0.0538	0.0422	0.0127	0.0184	0.0695	0.0157	
	SMD[μm]	3.89	8.94	4.55	5.50	2.09	10.65	4.85	2.28	
Compression	LC[-]	0.318	0.382	0.598	0.291	0.284	0.502	0.652	0.286	
	WC[gf · cm/cm <sup>2</sup> ]	0.041	0.044	0.075	0.032	0.030	0.053	0.031	0.021	
	RC[%]	40.68	49.49	68.29	43.43	49.43	44.91	46.93	39.68	
Thickness & Weight	T[mm]	0.171	0.184	0.234	0.169	0.211	0.460	0.206	0.133	
	W[mg/cm <sup>2</sup> ]	8.8425	9.1925	9.2358	9.7875	11.9975	18.7892	10.1900	10.1375	

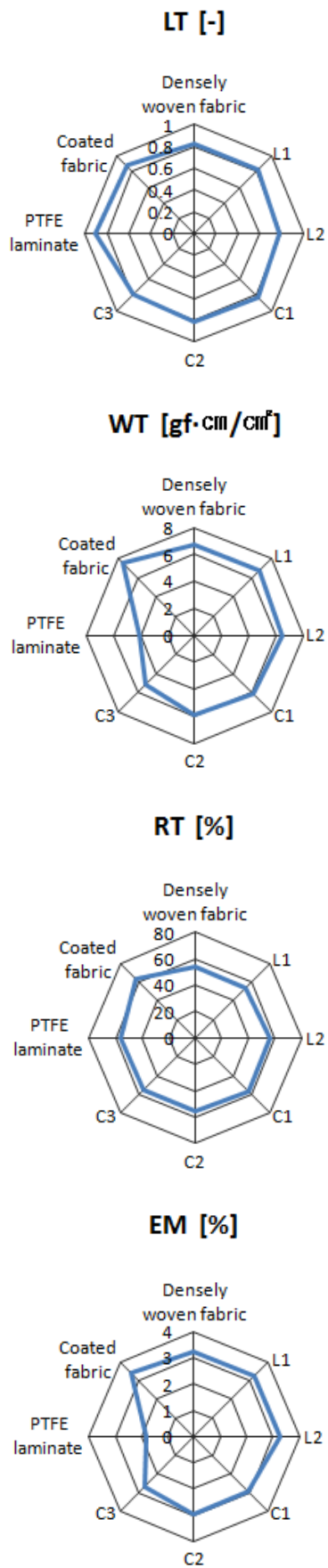


Figure 3. Tensile properties of breathable waterproof fabrics.

킨 때문으로 여겨진다(권명숙과 정기수, 2007). 코팅 직물은 신축성과 탄성이 좋은 PU를 수지로 사용했으므로 일단 신장된 후에는 회복이 잘 되고 치수안정성이 좋을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 인장선형성 역시 큰 편이므로 나노섬유 웹 처리소재에 비해 인장초기 신도저항이 증가하여 착용감은 다소 떨어질 수 있을 것이다.

반면 인장선형성 값이 낮은 고밀도 직물과 나노섬유 웹 처리소재는 인장 초기 신도저항이 적어 좀 더 나은 착용감을 가질 수 있을 것으로 예상된다. 고밀도 직물과 나노섬유 웹 처리소재가 대체로 유사한 경향을 보인 가운데, 특히 고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리 시료인 L1, L2가 매우 유사한 인장 거동을 나타내었다. 웹 밀도가 증가함에도 인장선형성이 낮아지고 인장회복성 및 신장성이 증가하는 경향을 보여, 본 실험실 조건 하에서 제작된 나노섬유 웹이 기반 직물의 태를 손상시키지 않는 유연한 멤브레인임을 확인할 수 있었다. 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재보다 대량생산 나노섬유 웹 처리소재들이 낮은 EM 값을 보이는 것은, PTFE 라미네이팅 직물과 마찬가지로 접착제를 이용한 라미네이팅 공정을 통해 섬유간, layer간 결속이 증가하였기 때문일 것으로 생각된다. 따라서 고밀도 직물과 매우 유사한 인장 거동을 나타낸 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재가 코팅, 라미네이팅 소재보다 유연하고 착용감이 우수할 것으로 사료된다.

### 3.2.2. 굽힘 특성

굽힘 특성은 직물의 구김이나 주름, 드레이프성, 직물을 쥐었을 때 느껴지는 촉감 등에 관련되어 태에 큰 영향을 미치는 성질로, 인체 곡선에 따른 직물의 실루엣 형성을 예측할 수 있는 특성이다. 굽힘강성(B)은 굽힘에 대한 저항성으로, 3-layer 소재인 C3, PTFE 라미네이팅 직물, 코팅 직물의 3개 시료가 다른 시료들에 비해 월등히 높은 값을 나타내었다(Figure 4). 이는 이들 소재가 고밀도 직물과 2-layer 나노섬유 웹 처리소재보다 뻣뻣해 굽힘이 어렵고, 유연하게 신체 곡선과 융합되기보다는 신체로부터 공간을 유지하는 성질이 강한 것으로 해석할 수 있다. C3와 PTFE 라미네이팅 직물의 경우 굽힘이력(2HB) 역시 더 크므로, 일단 주름이 생긴 후에는 굽힘 변형에서 벗어나더라도 회복되지 않는 변형의 정도도 더 클 것임을 알 수 있다.

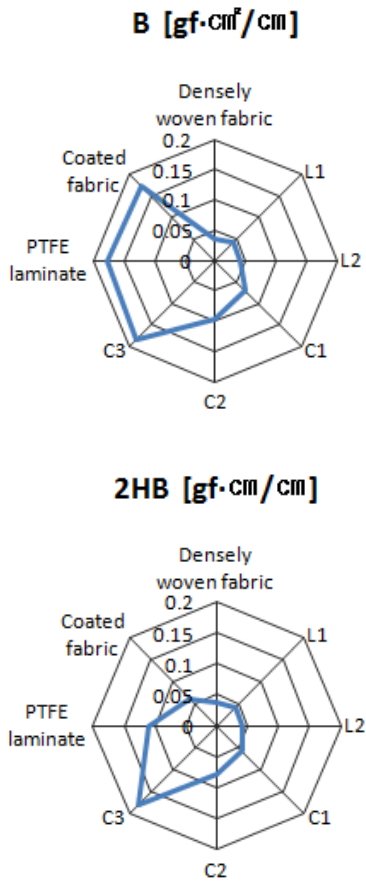


Figure 4. Bending properties of breathable waterproof fabrics.

반대로, 굽힘 특성 값이 낮은 고밀도 직물 - L2 - L1 - C1 - C2 시료의 순으로 직물이 잘 굽혀지고 뻣뻣함이 덜해 유연하며, 굽힘 변형으로 인한 주름 회복도 좋은 소재인 것을 확인할 수 있었다. 특히 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재의 경우 인장 특성에서와 마찬가지로, 웹 밀도가 10g/m<sup>2</sup>(L2)일 때에도 5g/m<sup>2</sup> 웹 밀도의 시료(L1)와 굽힘 특성의 큰 차이가 없었으며, 5g/m<sup>2</sup> 웹 밀도의 대량생산 나노섬유 웹 처리소재(C1)보다 훨씬 낮은 굽힘 특성 값을 나타내었다. 두께가 두꺼워졌음에도 불구하고 뻣뻣함을 의미하는 굽힘 특성에 영향을 미치지 않은 것은 인장 특성에서와 마찬가지로 실험실 제작 나노섬유 웹의 유연한 특성을 반영하는 것이라 볼 수 있을 것이다.

대량생산 나노섬유 웹 처리소재 3종(C1, C2, C3)을 비교하였을 때 나타나는 차이는 기반직물 및 적층 구조가 상이함에 따른 것으로 여겨진다. 동일한 나노섬유 웹과 라미네이팅 공정을 거쳤으나, C1 시료의 기반직물인 고밀도 직물보다 C2, C3 시료의 기반직물이 더 무거웠고, 구성하고 있는 실의 직경이 두꺼운 직물

이었다. 특히 C3 시료의 경우 3-layer 구조로 두께가 크게 증가하였고, 2회 라미네이팅에 따른 접착제의 도포량 증가 등이 굽힘 특성에 영향을 미친 것으로 사료된다.

### 3.2.3. 전단 특성

전단 특성은 시료의 한 쪽을 일정 하중으로 고정된 후 다른 한 쪽에 각도를 주면서 신장시킨 외력에 대한 변형으로, 굽힘 특성과 함께 동작 시 신체 곡면과의 융합성, 형태유지성, 드레이프성에 영향을 미치는 요소이다. 전단 특성의 3가지 항목(G, 2HG, 2HG5)들은 PTFE 라미네이팅 직물과 3-layer 구조인 C3 시료의 값들이 전반적으로 크게 나타나, 전단 변형이 어려울 뿐 아니라 변형에 따른 회복이 쉽지 않아 활동 시 압박감이 크고 움직임에 따른 구김이나 주름 발생이 많을 것으로 보인다(Figure 5).

대체로 “고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재들”, “대량생산 나노섬유 웹 처리소재들과 라미네이팅 및 코팅 직물들”이 각각 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 전단강성(G)과 전단이력(2HG, 2HG5) 값이 낮은 고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재가 대량생산 나노섬유 웹 처리소재나 코팅, 라미네이팅 직물에 비해 바이어스 방향으로 변형이 쉽게 된다. 이로 인해 의복으로 제조되었을 때 뒤틀림이나 형태변화가 있을 수 있지만, 전단 변형 후의 회복성 역시 더 좋으므로 불량한 회복성으로 인한 외관 특성 저해 등의 문제는 덜할 것으로 예상된다. 특히 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재(L1, L2)는 전단 이력에 있어 고밀도 직물과 거의 동일한 거동을 보여 동일 밀도의 대량생산 나노섬유 웹 처리시료(C1)보다 인체 곡선과의 융화성이 높고 전단 변형 후 회복성이 우수한 소재인 것으로 생각되었다. 동일한 고밀도 직물을 기반직물로 사용한 C1 시료가 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재(L1, L2)와 전단 특성에서 상당히 다른 거동을 보인 것은 라미네이팅 처리에 따른 결과로, 접착제가 섬유 사이와 실 사이에 부착됨으로써 전단 변형을 방해하고 전단 변형시 마찰의 증가를 가져오기 때문이며(최희, 1995), 이는 역학적 특성 중 라미네이팅에 의해 전단 특성이 가장 유의한 영향을 받는다는 선행 연구 결과(Jeong & An, 2002)와도 일치한다.



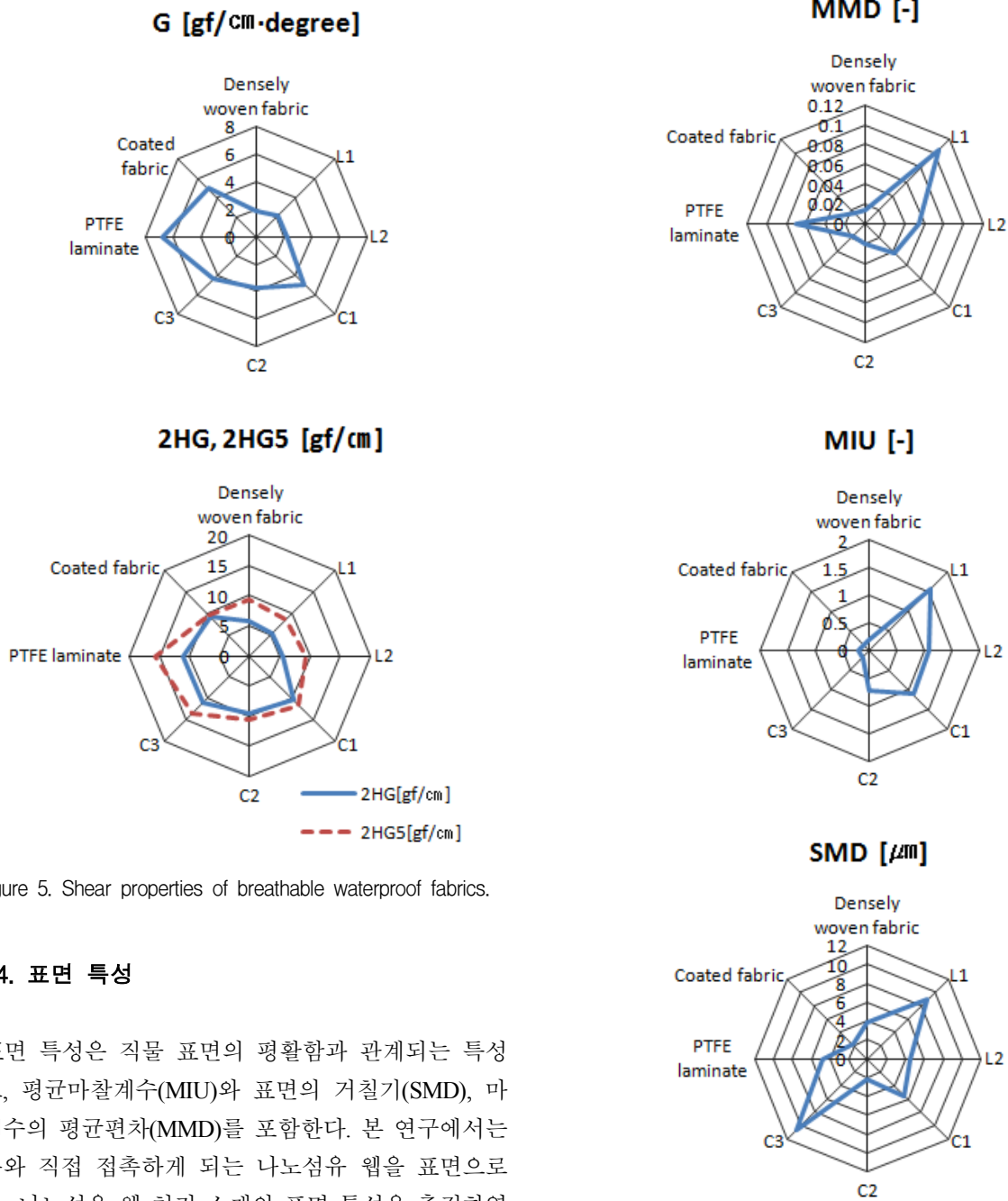


Figure 5. Shear properties of breathable waterproof fabrics.

### 3.2.4. 표면 특성

표면 특성은 직물 표면의 평활함과 관계되는 특성으로, 평균마찰계수(MIU)와 표면의 거칠기(SMD), 마찰계수의 평균편차(MMD)를 포함한다. 본 연구에서는 피부와 직접 접촉하게 되는 나노섬유 웹을 표면으로 하여, 나노섬유 웹 처리 소재의 표면 특성을 측정하였고 3-layer 구조인 C3 시료의 경우 나일론 트리코 원단이 표면으로 측정되었다. 코팅 직물과 PTFE 라미네이팅 직물은 PU 수지 코팅면과 PTFE 멤브레인의 표면 특성을 측정하였다.

Figure 6에 나타난 바와 같이 3가지 특성에서 기존 투습방수 소재보다 나노섬유 웹 처리소재가 대체로 높은 값을 보였는데, 이는 점착성이 있는 PU를 전기방사하여 제작한 나노섬유 웹 처리소재의 표면이, 미끄러짐에 대한 저항이 크고 표면이 거칠어 마찰력이 균일하지 못한 것으로 볼 수 있다. 코팅 직물의 경우에도 PU가 사용되었지만 semi-fluid 형태인 PU 수지가

Figure 6. Surface properties of breathable waterproof fabrics.

도포된 반면 나노섬유 웹 처리소재의 PU 웹은 섬유 형태로서 이에 따른 차이로 해석된다. 나노섬유 웹 처리소재 중에서도 5g/m<sup>2</sup>의 웹을 얹은 L1의 평균마찰계수(MIU)와 마찰계수의 평균편차(MMD)가 가장 컸으나, 웹 밀도가 10g/m<sup>2</sup>인 경우(L2) 두 값 모두 감소했을 뿐 아니라 표면의 기하학적 거칠기(SMD) 값 또한 크게 낮아져, 웹 밀도가 높아짐에 따라 나노섬유 웹의 균일도가 향상되는 것으로 생각되었다.

표면의 기하학적 거칠기, 즉 평활성은 직물의 조직과 깊은 상관성이 있는 특성으로 본 연구에서도 대량생산 나노섬유 웹 위에 트리코 조직의 나일론 원단을 라미네이팅한 C3의 표면 요철 변동이 가장 큰 것을 볼 수 있다. C2 시료의 SMD값이 고밀도 직물 및 다른 나노섬유 웹 처리소재(L1, L2, C1)보다 작은 것 역시 같은 맥락으로, 기반직물인 도비 조직과 평직 조직의 영향으로 해석해 볼 수 있다.

### 3.2.5. 압축 특성

압축 특성은 직물의 부피감, 두께와 관련 있으며 특히 직물의 풍만감, 부드러움, 안락감 그리고 보온성 등에 영향을 주는 역학적 특성이다. 압축선형성(LC)은 PTFE 라미네이팅 직물 - L2 - C3의 순으로 컷으며, 압축에너지(WC)와 압축레질리언스(RC)는 모두 10g/m<sup>2</sup>의 나노섬유 웹이 엮어진 L2 시료가 가장 큰 값을 보였다(Figure 7). 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재의 경우(L1, L2) 웹이 엮어진 상태에서 다른 압축 과정을 거치지 않았으므로 부피감이 있는 소재임을 확인할 수 있었다. L2 시료는 압축레질리언스 역시 높은 값을 나타내므로 폭신하고 볼륨감이 있으며 우수한 압축 회복성을 가지는 소재일 것으로 판단되었다. 반면 대량생산 나노섬유 웹 처리소재(C1, C2)와 코팅 시료는 LC, WC 값이 낮게 나타났다. 특히 압축 특성의 3가지 특성치가 모두 가장 낮은 코팅 소재는 부피감이 적은 비교적 딱딱한 소재라고 평가할 수 있을 것이다.

### 3.2.6. 두께 및 무게

두께와 무게는 의복의 실용 성능에 관여하는 특성치이다. 의류 소재의 무게는 의복의 착용감과 활동성에 영향을 미치며 드레이프성과의 관계가 깊다. 또한 두께는 소재의 역학적 성질 뿐 아니라 직물의 외관 및 보온성과 함기성 등 쾌적성에 영향을 주는 중요한 요소이기도 하다(전미선 등, 2006). 측정 결과, 시료의 두께와 무게는 3-layer 구조인 C3 시료가 각각 0.460mm, 187.89g/m<sup>2</sup>로 가장 두껍고 무거운 직물이었다. Figure 8에 따르면 2-layer 구조들만을 비교하였을 때, C2, 기존 투습방수 소재인 PTFE 라미네이팅 직물, 코팅 직물의 순으로 무거웠고 고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재(L1, L2), 대량생산 나노섬유 웹 처리소재(C1) 순으로 가벼웠다. 압축 특성에서

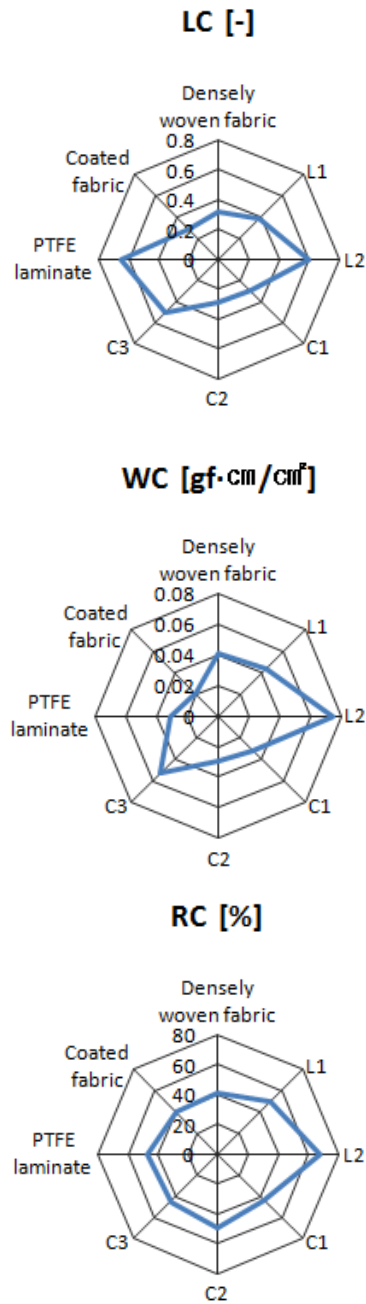


Figure 7. Compression properties of breathable waterproof fabrics.

가장 높은 WC와 RC 값을 보인 10g/m<sup>2</sup> 웹 밀도의 L2 시료의 경우, 3-layer 시료 다음으로 두꺼워 볼륨감이 크어도 불구하고 무게는 실험 시료 8종 중 3번째로 가벼운 경량 소재인 것을 확인할 수 있었다. 코팅 직물은 무게감이 있으나 두께는 가장 얇은 것으로 측정되었다. 이는 코팅 공정을 거치는 동안 직물 틈새들로 코팅 용액이 스며들고 채워져 두께가 감소한 것으로

(정원영과 안승국, 2001), 코팅 직물이 매우 치밀한 구조임을 의미한다.

한편 대량생산 나노섬유 웹 처리소재 중 C1은 처리전의 고밀도 직물보다 얇은 두께를 가진 것으로 측정되었다. 이는 SEM 촬영을 통해서도 확인하였듯이 roller를 통한 라미네이팅 과정 중에 압력을 받으면서 조밀하고 얇아졌기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

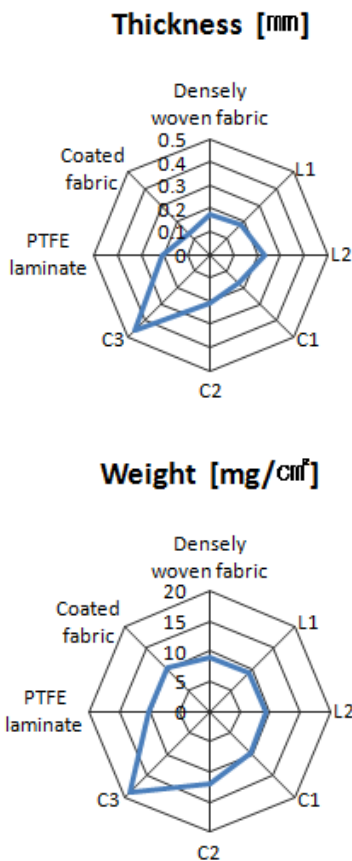


Figure 8. Thickness and weight of breathable waterproof fabrics.

#### 4. 결론

본 연구에서는 새로운 투습방수 소재로 개발 중인 전기방사 나노섬유 웹 처리소재 5종의 역학적 특성을 KES - FB system을 이용해 측정하였고, 이를 기존에 투습방수용으로 사용되고 있는 고밀도 직물 및 PTFE 라미네이팅, PU 코팅 직물과 비교·분석하였다. 기능적 성능과 감각적 성능을 모두 만족시키는 새로운 투습방수 소재 개발을 위한 기초자료로서 8종의 시료가 평가·비교되었으며 결과 요약 및 결론은 다음과 같다.

1. 전기방사 나노섬유 웹 처리소재 간에 제조 조건 및 라미네이팅 처리 유무에 따라 역학적 특성의 차이가 있었다. 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재들은 부피감이 있으면서 보다 유연한 것으로 나타났고, 라미네이팅 과정을 거친 대량생산 나노섬유 웹 처리소재들은 신장변형이 적은, 치밀한 구조의 소재인 것으로 판단되었다.
2. 대량생산 나노섬유 웹 처리소재들만을 비교하였을 때는, 기반 직물의 종류와 적층 구조에 따라 굽힘, 표면, 압축 및 두께와 무게 특성에서 차이가 두드러졌다. 특히 적층 구조의 영향이 커, 3-layer 구조로 만들어질 경우 초박막, 초경량이라는 나노섬유 웹의 장점이 최종 직물의 역학적 특성에 반영되기가 다소 어려울 것으로 판단되었으므로, 역학적 측면에서 2-layer 구조가 나노섬유 웹의 장점을 살리기에 적합한 것으로 사료된다.
3. 인장 및 굽힘, 전단 특성에서 대체로 고밀도 직물과 실험실 제작 나노섬유 웹 처리소재가 유사한 거동을 나타내어 낮은 인장선형성과 굽힘강성, 전단강성을 가지고 있었다. 따라서 기존 PTFE 라미네이팅과 코팅 직물에 비해 뽀뽀함이 덜해 유연하고 드레이프성이 있어 보다 나은 착용감을 가질 수 있을 것으로 해석되었다. 또한 굽힘이력 및 전단이력 값이 모두 낮으므로 신체 움직임에 따른 구김이나 주름에서의 회복이 좋으며 인체곡선과도 잘 융화되는 소재일 것이라 판단된다.

이상의 결과에서 고밀도 직물에 나노섬유 웹을 처리한 전기방사 나노섬유 웹 처리소재는 코팅이나 라미네이팅 소재의 뽀뽀함이 덜하면서 유연하고 부드러운 태를 가지는 것으로 나타났으므로, 일정 수준의 내수성과 방수성이 확보된다면 기능적 성능과 감각적 성능을 모두 충족시키는 새로운 투습방수 소재로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에 사용된 시료들의 투습방수 성능에 있어, 전기방사 나노섬유 웹 처리소재들은 PU 코팅, PTFE 라미네이팅 직물보다 높은 투습성을 보였고, 대량생산 나노섬유 웹 처리소재들의 경우 처리 조건에 따라 PU 코팅 직물과 비슷하거나 더 우수한 내수성을 나타

내었다. 현재 이를 바탕으로 시료의 투습방수 성능을 보여주는 내수도와 투습도, 공기투과도 및 역학적 특성을 종합적으로 분석하는 연구가 진행 중이며, 이를 통해 기존 소재와 차별화 되는 새로운 투습방수 소재를 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

### 참고문헌

- 강연경 (2007). 전기방사 폴리우레탄의 멤브레인 특성과 응용에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 구영희 (2006). 전기방사된 나노섬유 멤브레인 분당직물의 투습방수성. 단국대학교 대학원 석사학위 논문.
- 권명숙, 정기수 (2007). 실리콘이 라미네이팅 된 신축성 소재의 위생 및 안전성과 역학적 성능. *한국의 류학회지*, 31(1), 77-84.
- 김찬호 (2005). 등산객의 기능성 소재 등산복 구매행동. 중앙대학교 예술대학원 석사학위 논문.
- 전미선, 박기운, 고순영, 김미진, 정승령, 박명자 (2006). 리브편과 리브변화조직 편성물의 역학적 특성과 태 평가. *한국생활환경학회지*, 13(4), 336-347.
- 정원영, 안승국 (2001). 습건식 코팅법으로 제조한 투습방수직물의 물성 및 역학특성. *한국섬유공학회지*, 38(9), 460-467.
- 최희 (1995). 면직물의 DP가공에 따른 역학적 성질의 변화. 전남대학교 대학원 석사학위 논문.
- 허미 (2008). 표면처리 전기방사 나노웹의 내구성과 투습방수 성능. 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- Buer, A., Ugbohue, S. C., & Warner, S. B. (2001). Electrospinning and properties of some nanofibers, *Textile Research Journal*, 71(4), 323-328.
- Gibson, P., Schreuder-Gibson, H., & Pentheny, C. (1998). Electrospinning technology: Direct application of tailorable ultrathin membranes. *Journal of Coated Fabrics*, 28(7), 63-72.
- Graham, K., Gogins, M., & Schreuder-Gibson, H. (2004). Incorporation of electrospun nanofibers into functional structures. *International Nonwovens Journal, Summer*, 21-27.
- Jeong, W. Y., & An, S. K. (2002). A study on physical and mechanical properties of breathable waterproof fabrics manufactured with PTFE membrane-fabric composite. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 26(12), 1685-1693.
- Kang, Y. K., Park, C. H., Kim, J., & Kang, T. J. (2007). Application of electrospun polyurethane web to breathable water-proof fabrics. *Fibers and Polymers*, 8(5), 564-570.
- Lee, S., & Obendorf, S. K. (2007a). Transport properties of layered fabric systems based on electrospun nanofibers. *Fibers and Polymers*, 8(5), 501-506.
- Lee, S., & Obendorf, S. K. (2007b). Use of electrospun nanofiber web for protective textile materials as barriers to liquid penetration. *Textile Research Journal*, 77(9), 696-702.
- Lee, S. G., Choi, S. S., & Joo, C. W. (2002). Nanofiber formation of Poly(etherimide) under various electrospinning conditions. *Journal of the Korean Fiber Society*, 39(1), 1-13.
- Mukhopadhyay, A. & Midha, V. K. (2008). A review on designing the breathable waterproof fabrics part I: Fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 37(3), 224-262.

원고접수 : 10.05.24

수정접수 : 10.06.18

게재확정 : 10.06.22