

〈연구논문(학술)〉

저온 플라즈마 처리를 이용한 파라 아라미드 섬유 표면 개질 효과 및 역학적 특성

박성민[†] · 권일준 · 김명순 · 김삼수¹ · 최재영² · 염정현²

한국염색기술연구소, ¹영남대학교 융합섬유공학과, ²경북대학교 바이오섬유소재학과

Surface Modification Effect and Mechanical Property of *para*-Aramid Fiber by Low-temperature Plasma Treatment

Sung-min Park[†], Il-jun Kwon, Myung-soon Kim, Sam-soo Kim¹, Jae-young Choi² and Jeong-hyun Yeum²

Korea Dyeing Technology Center, Daegu, Korea

¹Department of Textile Engineering and Technology, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

²Department of Advanced Organic Materials Science & Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received: February 7, 2012/Revised: March 5, 2012/Accepted: April 27, 2012)

Abstract: *para*-Aramid fibers were treated by low-temperature plasma to improve the adhesion. The surface of *para*-aramid fibers were treated with gaseous plasma of several discharge power and treatment time in oxygen gas at 1Torr pressure. The treated fibers at low-temperature plasma were taken oxygen-containing functional groups and micro-crator on the surface. The modified fibers were measured by dynamic contact angle analyzer and XPS(X-ray photoelectron spectroscopy). The Interfacial adhesion properties of aramid fabric and polyurethane resin were determined by T-peel test. The surface of aramid fibers were observed by FE-SEM photographs. It was found that surface modification and chemical component ratio of the aramid fibers were improved wettability and adhesion characterization.

Keywords: surface modification, *para*-aramid fiber, plasma process, super fiber, surface adhesion

1. 서 론

아미드 결합이 85% 이상 차지하는 아라미드는 내열성과 기계적 성질 및 전기 특성, 내약품성이 뛰어나며 고강도와 고탄성과 같은 다양한 특성을 갖고 있어 건축자재, 선박의 선체, 헬멧, 타이어 등의 많은 분야에서 유용하게 사용되고 있다. 기존의 아라미드는 이러한 강한 성질을 이용, 산업용 분야에 널리 사용되고 있지만 섬유가 사용되는 본연의 분야인 의류에는 적용이 어렵고 매우 국소적인 부분에서만 사용되고 있다. 아라미드 섬유를 의류화 하기 위해서는 우선 섬유를 직물화 해야 하며, 이 직물을 염색, 발수 처리한 후 코팅을 하게 된다. 하지만 아라미드 섬유의 견고한 표면 특성은 염색, 발수, 코팅이 매우 어려우며 기능적인 면에서 발수와 코팅을 할 수 없다는 것은 의복으로써의 기본적인 요건인 쾌적감을 줄 수

없이 실용성이 떨어진다. 따라서 산업용 안전복이나 바이크복과 같이 극한의 강도를 필요로 하는 곳에서 아라미드 섬유를 사용하기 위해서는 우선 발수, 코팅성 문제의 해결이 시급하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 아라미드 섬유와 유제 및 코팅제 사이에 친화성을 늘려 주는 것이 중요하며, 이를 위해 저온 플라즈마가 사용되게 된다.

플라즈마를 이용한 표면처리법은 전기 방전을 이용하여 플라즈마를 발생 시키고, 이로 인해 섬유 표면의 활성화 에너지를 높여 표면 장력과 결합력을 증가시키게 한다. 이렇게 증가된 표면 장력과 결합력은 유제나 코팅액이 더 강하게 붙을 수 있도록 도와주어 기존의 아라미드 섬유가 갖는 여러 가지 단점을 보완할 수 있게 한다¹⁻¹⁰⁾.

본 연구에서는 저온 플라즈마를 이용한 아라미드 섬유의 표면 개질의 최적 조건을 찾고, 섬유 표면을 활성화하여 유제 및 코팅제 사이의 친화성을 증진시킴으로써, 아라미드 섬유가 의류용으로 사용이 가능

[†]Corresponding author: Sung-min Park (aububa@dyetec.or.kr)
Tel.: +82-53-350-3863 Fax.: +82-53-350-3869
©2012 KSDF 1229-0033/2012-06/131-137

할 수 있도록 내광, 내후성 증진기술과 연계하는 것에 요점을 두고 있다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 고강도 파라아라미드(*para-aramid*) 섬유 직물은 Heracron(HF200, KOLON, Korea) 3000 denier로 가연되지 않은 멀티 필라멘트사 평직물을 사용하였다(경사 : 15(per 1 inch), 위사 15(per 1 inch)). 제직시 발생한 오염물질을 제거하기 위한 정련과정으로 아세톤에 아라미드 섬유를 침지시킨 후, 5분간 초음파 처리를 하고, 수세하여 120°C에서 12시간 건조 하여 플라즈마 처리에 용이한 시편을 제작하였다.

2.2 아라미드 섬유의 플라즈마 처리

아라미드의 표면처리에 사용된 플라즈마 장치는 13.56MHz의 RF-generator(Max Power : 650W)가 장착된 glow-discharge etching system을 사용하였고, 기기에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

Contents	Subsection
Reactor capacity	0.3 m (130liter)
Electrode mode	Inside electrode
Reactor type	Cylindrical chamber
Electrode size	175 mm X 550 mm X 3 mm
Vacuum pump	200 liter/min

플라즈마 처리의 공정 변수로는 산소 분위기 하에서 처리 전력을 100W, 200W, 300W로 하였고, 처리 시간을 5분, 10분으로 하였다. 상부전극과 하부전극의 거리는 50 mm이며 사용된 산소 가스는 순도 99.99% 이상의 초고순도 공업용 가스를 이용하였다¹⁾.

2.3 섬유의 표면 특성 평가

산소 분위기 하에서 저온 플라즈마 처리 전후 섬유 표면의 물리적 형태 변화 및 조성 변화를 관찰하기 위해 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, Hitachi, S-4800)와 Fourier Transform Infrared Spectroscopy/Attenuated Total Reflectance(FT-IR/ATR, Perkin Elmer, SpectrumGX)를 이용하여 분석하였다. 표면 활성 상태를 알아보기 위해 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, ULVAC-PHI, Quantera SXM)를 이용한 원소 분석과 Dynamic contact angle analyzer (DCAA,

KRUSS, K100 Mk1)를 이용한 동적 접촉각을 측정하였다. 측정된 접촉각은 표면 장력을 구하는데 사용되었으며, 동적 접촉각 측정 시 사용된 용매로는 증류수 ($\gamma_l = 72.8 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_l^p = 46.8 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_l^d = 26 \text{ mJ/m}^2$)와 Ethylene glycol ($\gamma_l = 47.7 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_l^p = 21.3 \text{ mJ/m}^2$, $\gamma_l^d = 26.4 \text{ mJ/m}^2$)로 측정 속도는 2 mm/min으로 설정하였다.

2.4 플라즈마 처리된 섬유의 역학적 특성

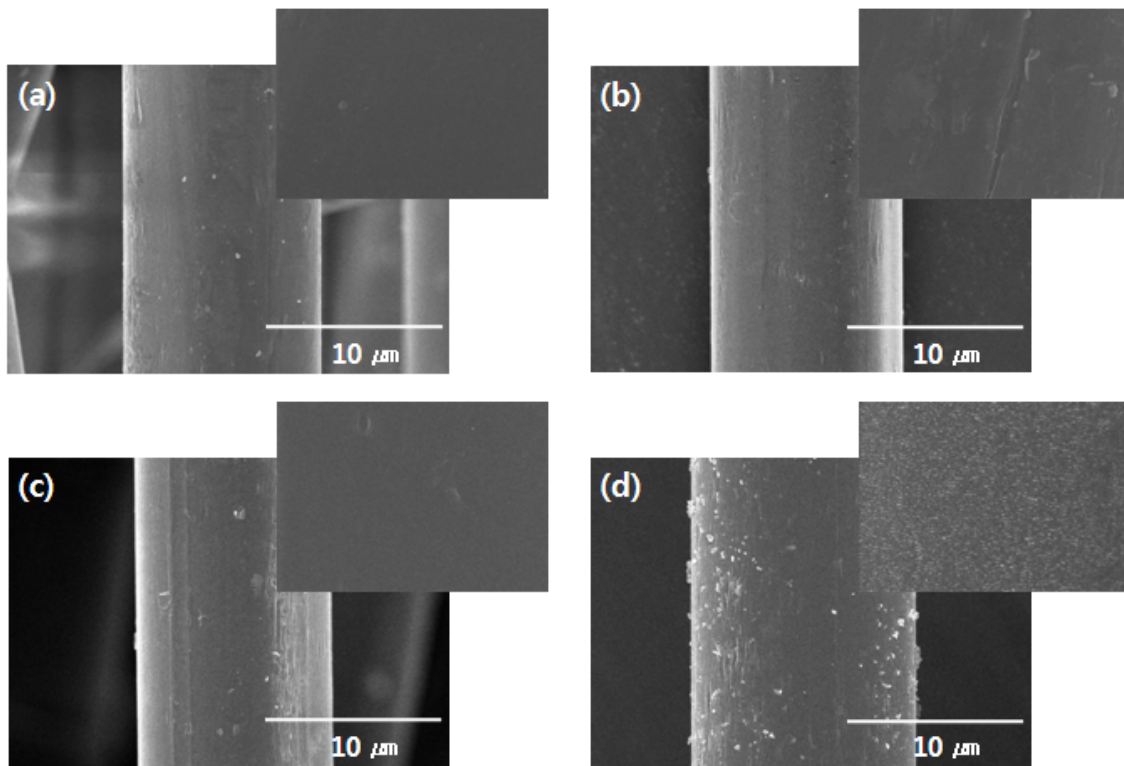
기계적 물성 변화를 측정하기 위해 Universal testing Machine(Zwick, Z005 with test control controller)를 이용하여 인장 강도 측정 및 박리 강도를 측정하였다. 인장 강도 측정은 ASTM D 3822를 인용하여 사용하였으며, 박리 강도는 KS K 0533 접착포의 박리 강도 시험 방법에 따라 측정하였다.

접착제는 시아노아크릴레이트 접착제로 직물에 균일하게 도포하여 polyurethane 수지가 코팅된 직물과 접합시킨 후 두개의 유리판 사이에서 4.5kg의 무게를 가하고 24시간 동안 건조시킨 후 측정하였다.

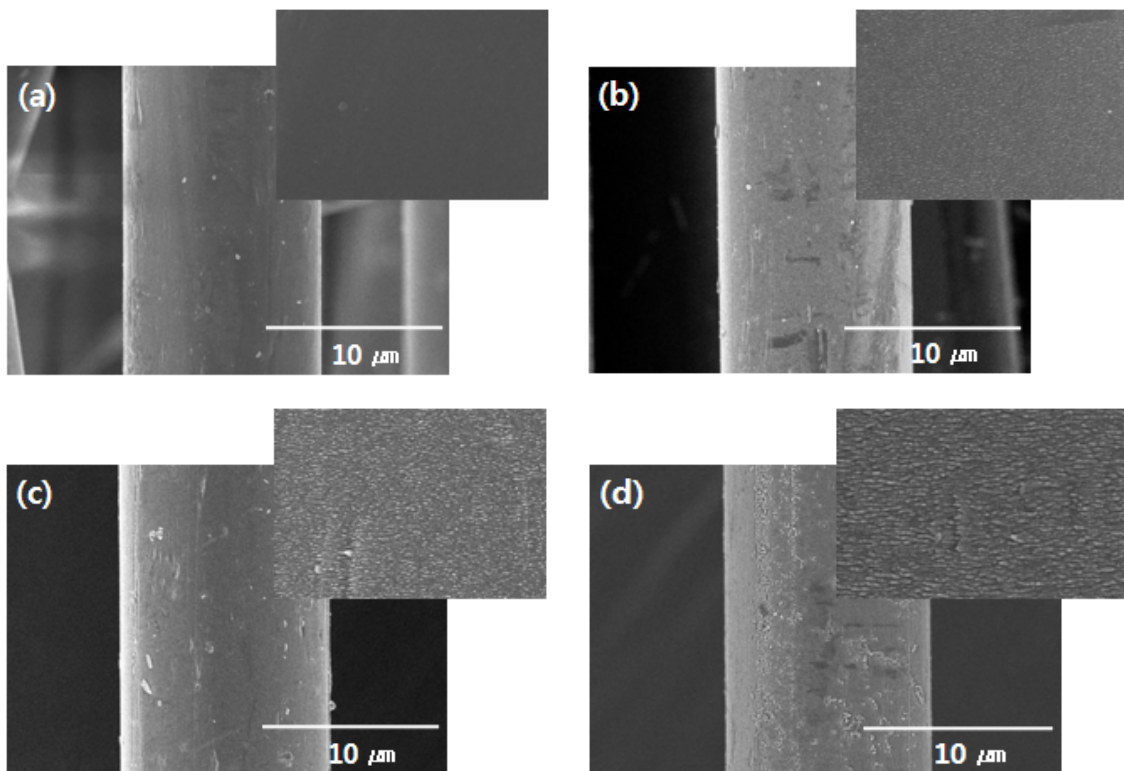
3. 결과 및 고찰

3.1 섬유 표면의 모폴로지

Figure 1은 아라미드 섬유를 각각의 조건으로 전극 간 거리를 50 mm로 설정하고, 산소 분위기 하에서 저온 플라즈마 처리하였을 때 섬유의 손상 정도를 알아보기 위해 FE-SEM 사진을 나타낸 것이다. 각각의 사진은 플라즈마 처리 시간을 5분, 10분으로 하고 처리 전력에 따른 섬유의 형태와 표면 상태를 관찰한 것이다. 5분간 플라즈마 처리한 섬유의 경우 비처리와 100W, 200W로 처리한 경우는 섬유의 형태변화가 없으며 표면 상태에도 변화가 없다. 하지만 300W로 플라즈마 처리한 경우 섬유의 형태가 거칠고, 표면에 micro-pit 또는 micro-crater로 불리는 요철이 생긴 것을 확인 할 수 있다. 또한 플라즈마 처리를 10분 한 경우 100W에서부터 섬유의 형태에 변화가 있으며 표면이 거칠고 요철이 발생한 것을 볼 수 있다. 이 요철은 플라즈마 처리 전력이 증가 할수록 더 커지는 것을 볼 수 있으며 300W의 경우 섬유의 형태가 거칠고 갈라진 부분을 볼 수 있다. 이러한 현상은 산소 분위기 하의 플라즈마가 섬유 표면에 작용하여 섬유 표면의 요철을 만들고, 그 처리 전력이 강할수록 더 크고 많은 요철을 만든다는 것을 알 수 있다. 또한 저온 플라즈마 처리 조건 중 200W, 5분에서는 표면의 요철이 크지 않지만 100W, 10분의 경우 표면의 요철이 육안으로 확인 될 수 있을 정도로 큰 차이를 보인다.



Plasma treatment time 5 min



Plasma treatment time 10 min

Figure 1. FE-SEM image of plasma treated aramid fibers and surface (plasma treatment power (a) nontreated, (b) 100W, (c) 200W, (d) 300W, inset: high magnification morphologies of related images).

이는 플라즈마 처리 전력이 증가하더라도 시간이 충분하지 않을 경우 섬유 표면에 요철을 만들 수 없으며 처리 시간 감소를 위해서는 더 강한 처리 전력을 필요로 한다. 실험에서 실시한 조건 중 300W의 경우 섬유의 요철은 충분하지만, 섬유에 균열이 일어나 섬유 자체의 강도나 물성을 떨어뜨릴 수 있어 최적 조건으로는 어려울 것으로 보인다.

3.2 섬유의 화학적 조성 변화

Figure 2는 미처리 섬유와 전극간 거리를 50 mm로 설정하고, 산소 분위기 하에서 저온 플라즈마 처리 시간과 처리 전력을 변화시키면서 플라즈마 처리한 섬유의 조성 변화를 알아보기 위해 FT-IR/ATR 분석한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 플라즈마 처리 시간과 처리 전력이 증가함에도 불구하고 3000 cm⁻¹ 이상에서 나타나는 주요 peak와 1800 cm⁻¹ 이하에서 나타나는 주요 peak의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 섬유 결합에 플라즈마 처리가 영향을 주지 않아 조성 변화로 인한 섬유의 물성 변화는 없을 것으로 보인다.

3.3 플라즈마 처리 아라미드 섬유의 인장 강도 변화

Figure 3은 전극간 거리를 50 mm로 설정하고, 산소 분위기 하에서의 저온 플라즈마 처리에 따른 아라미드 섬유의 물성 변화를 알아보기 위해 인장강도 시험을 실시하였으며, 측정 속도는 250 mm/min으로 설정하였다. 플라즈마 처리 전력과 시간이 증가함에 따라 인장 강도의 변화는 약간씩은 있지만, 오차 범위 안에서의 변동만 일어나고 있다. 하지만 FE-SEM에서 관찰 하였듯이 300W로 처리한 섬유의 경우 섬유 표면에 균열이 일어나 있었다. 이러한 결과로 볼 때 인장강도 측정 시 300W에서 처리한 섬유의 경우 다른 조건들에 비해 인장강도가 낮는데, 이는 플라즈마 처리 과잉으로 인한 균열들이 물성 변화에 영향을 주었음을 알 수 있다. 플라즈마 처리 전력과 처리 시간이 늘어날수록 연구에서 목표한 친화성들이 증가하게 되지만, 과처리 시 섬유의 물성이 낮아지게 되므로 플라즈마 처리 시 적정 조건이 필요하다.

3.4 섬유 표면의 화학적 조성 변화

전극간 거리를 50 mm로 설정하고, 산소 분위기 하에서의 저온 플라즈마 처리에 의한 아라미드 섬유 표면의 화학적 조성 변화를 알아보기 위해 XPS 분석을 실시하였다. 플라즈마 처리는 일반적으로 섬유 표면에 활성기를 부여하여 표면 에너지를 증가시키고, 이로 인해 다른 물질과의 결합력을 증가시키는 것으로 알려져 있다. Table 1에서 볼 수 있듯이 C의 조성비가

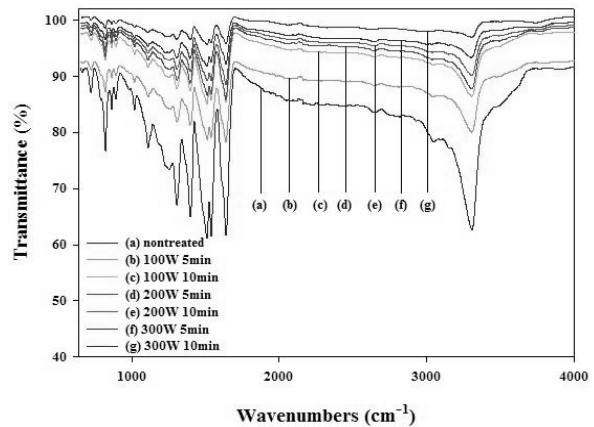


Figure 2. FT-IR/ATR spectra of plasma treated aramid fibers.

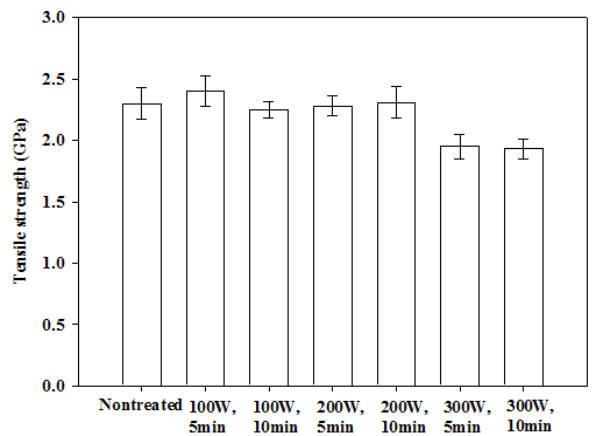


Figure 3. Tensile strength of the plasma treated aramid fibers.

Table 1. XPS surface element analysis of aramid fibers

Samples	Chemical composition[at.%]			Atomic ratio	
	C	O	N	O/C	N/C
Nontreated	85.63	11.43	1.20	0.13	0.01
100W	77.42	17.00	2.15	0.22	0.03
200W	73.28	19.49	2.92	0.27	0.04
300W	73.22	16.5	2.98	0.23	0.04

처리 전력이 증가함에 따라 감소하는 반면에 O의 조성비는 처리 전력이 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 섬유 표면이 활성화 되어 산소의 활성화 정도가 증가 한 것으로 볼 수 있다. 이렇게 활성화 된 C-O결합은 다른 코팅액이나 유제와의 결합을 증가시켜 더 큰 접착 강도를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 300W의 경우 200W에 비해 C의 비중이 소폭 감소했지만 O의 비중은 오히려 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 플라즈마 처리의 강도가 증가함에 따라 활성기가 무조건 증가하는 것이 아니며,

적정 조건에서 가장 높은 결합 에너지를 가질 수 있음을 나타낸다.

3.5 섬유 표면의 표면 에너지 변화

아라미드 섬유에 산소 분위기 하에서의 저온 플라즈마 처리를 전력과 처리 시간에 따른 표면 활성화를 측정하기 위해 동적 접촉각 측정기를 사용하여 각각에 따른 동적 접촉각을 측정하였다. 또한 측정된 각각의 접촉각은 다음 식에 의해 표면 장력으로 계산되었다.

$$\gamma_l(1 + \cos \Theta) = 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p} + 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d}$$

$$\gamma_{total} = \gamma_s^p + \gamma_s^d$$

γ_{total} 은 섬유의 전체 표면 자유 에너지의 합을 나타내며 γ_s^p 와 γ_s^d 는 섬유의 polar component와 dispersive component 부분의 표면장력을 나타낸 것이다. 또한 γ_l^p 와 γ_l^d 는 용매의 polar component와 dispersive component 부분의 표면장력을 나타낸 값이다¹²⁾.

플라즈마 처리 전력과 처리 시간을 증가시킴으로써 나타난 접촉각의 변화 값을 각각의 용매에 따라 나타낸 것이 Figure 4이다. 측정된 값은 물과 Ethylene glycol 용매가 비슷한 경향을 나타내고 있다. 비처리 아라미드 섬유에서부터 처리 전력이 증가할수록 접촉각이 감소하게 되는데 이것은 섬유 표면의 활성기가 증가하여 친수성이 강해지고 있음을 나타낸다. 하지만 감소하던 접촉각도 200W에서 300W로 가게 되면서 그 값이 조금 증가하게 된다. 이것은 플라즈마 처리 전력이 증가하지만 섬유 표면의 산소 결합이 더 이상 증가하지 않았기 때문으로 사료된다. 플라즈마 처리 시간에 따른 접촉각의 크기를 비교 하였을 때 5분 동안 처리한 섬유보다 10분 동안 처리한 것이 더 낮은 접촉각을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 플라즈마가 섬유의 표면 활성화를 나타낼 수 있도록

하는데 충분히 시간이 주어졌기 때문이며 그 경향성은 지금까지의 실험 결과와 일치하고 있다. 좀 더 구체적인 표면 활성화 에너지를 알아보기 위해 측정된 접촉각을 이용하여 표면 장력을 계산해 보았다. 섬유의 표면장력은 플라즈마 처리 전력과 처리 시간에 따라 그 값이 다양하게 나왔으며 그 값을 정리한 것이 Table 2이다.

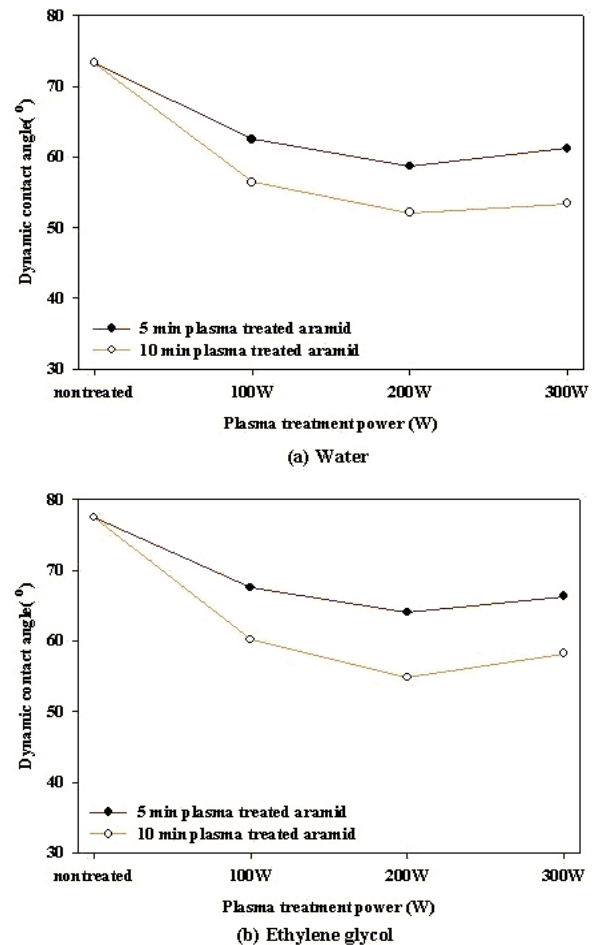


Figure 4. Dynamic contact angles of the plasma treated aramid fibers.

Table 2. Dynamic contact angles and surface free energy of Heracron fibers

Samples	Contact angle(θ)		Surface free energy(mJ/m ²)
	Water	Ethylene glycol	
nontreated	73.33	77.57	39.37
100W, 5 min	62.54	67.51	40.21
100W, 10 min	56.44	60.27	45.69
200W, 5 min	58.73	64.06	43.72
200W, 10 min	52.19	54.80	48.54
300W, 5 min	61.22	66.35	41.58
300W, 10 min	53.47	58.20	45.91

표면장력은 처리 전력과 처리 시간이 증가함에 따라 증가하게 된다. 처리 전력과 처리 시간에 따라 비교해 보았을 때 200W, 5분 보다 100W, 10분 처리한 표면장력이 더 강하고, 200W, 10분 처리한 것이 300W, 5분 처리한 섬유보다 표면장력이 더 강한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 FE-SEM 사진을 통해 표면 요철을 비교해 보았을 때 더 쉽게 알 수 있다. 산소 분위기 하에서 저온 플라즈마 처리를 200W, 5분 처리한 섬유의 경우 섬유 표면에 요철이 거의 일어나지 않았다. 하지만 100W에서 10분간 처리한 섬유의 경우 섬유 표면에 균일한 요철이 일어나 있으며, 이 요철을 통해 100W, 10분간 처리된 섬유가 더 많은 작용을 받아 더 높은 활성화 에너지를 얻었음을 알 수 있다. 여기서 처리 전력을 높이는 것 보다 처리 시간을 더 길게 해주는 것이 더 효율적임을 알 수 있다. 위에서의 자료를 통합하여 볼 때 아라미드 섬유의 저온 플라즈마 처리 조건은 200W의 처리 전력으로 처리 시간을 10분으로 하는 것이 가장 효율적인 것을 알 수 있다.

3.6 섬유의 계면 접착 강도 측정

산소 분위기 하에서의 저온 플라즈마 처리에 의한 섬유와 polyurethane 수지의 접착성 증가를 알아보기 위해 T-peel 테스트를 하였으며 그 결과 값을 Figure 5가 나타내고 있다. 미처리 아라미드 섬유의 경우 약 55 MPa의 박리 강도를 나타내었으며, 처리 전력이 증가할수록 그 값이 커져 200W일 때 그 값이 최대를 나타내고 있다. 처리 시간 또한 5분 처리 했을 때 보다 10분간 처리 했을 때가 더 높게 나오며 200W 10분 일 때 미처리 섬유 대비 약 23% 정도의 접착 강도 증가를 보이고 있다. 최대치뿐만 아니라 플라즈마 처리를 한 섬유의 경우, 미처리에 비해 평균 13% 정도의 접착력 상승을 가져왔다.

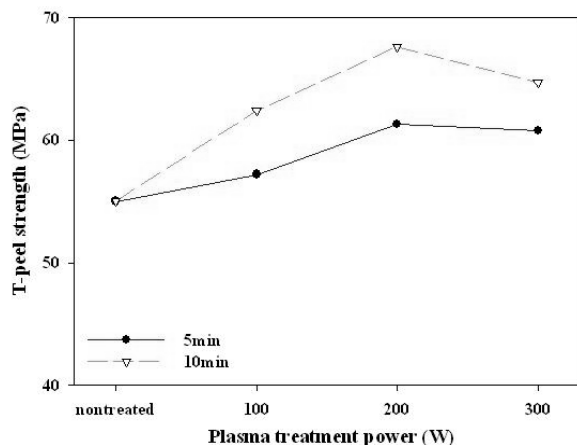


Figure 5. T-Peel strength of the plasma treated aramid fabric with polyurethane.

이것은 플라즈마 처리에 의한 아라미드 섬유 표면에 활성기가 증가하였고, 이로 인해 섬유와 코팅제 간의 결합력이 증가하여 나타난 결과로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 아라미드 섬유의 표면을 저온 플라즈마 처리 하여 개질하고, 표면 개질에 따른 코팅제 및 가공제와의 친화성을 평가 하였으며, 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다. 또한 아라미드 섬유의 표면개질과 관련하여 아라미드 섬유의 내광, 내후성 증진 기술과 연계하여 진행하겠다.

1. 아라미드 섬유를 산소 분위기 하에서 전극간 거리를 50 mm로 설정한 후, 저온 플라즈마 처리를 하였을 때 섬유 표면에 micro-pit 또는 micro-crater로 불리는 요철 현상이 일어났으며, 이 요철은 처리 전력과 시간이 증가함에 따라 더 크게 일어나 300W, 10분 일 때는 균열이 일어났다.
2. 산소 분위기 하에서 저온 플라즈마 처리 된 아라미드 섬유의 경우 처리 전력과 처리 시간의 효율을 FE-SEM사진과 표면에너지를 통해 비교해 보았을 때, 처리 전력을 증가시키는 것 보다 처리 시간을 증가시키는 것이 섬유에 더 큰 요철과 활성화 에너지를 부여할 수 있음을 알 수 있다.
3. XPS 분석을 통하여 처리 전력과 처리 시간이 증가함에 따라 섬유 표면의 산소의 조성비가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 아라미드 섬유의 표면 활성화 정도가 증가하는 것에 영향을 받았음을 알 수 있다.
4. 저온 플라즈마 처리 시 아라미드 섬유의 활성화가 가장 높으며 효율적인 조건은 처리 전력 200W, 처리 시간 10분일 때이며, 표면 에너지 값은 48.54 mJ/m²을 나타내었다.
5. 저온 플라즈마 처리에 의한 표면 에너지 및 표면 장력의 증가는 섬유와 가공제 및 코팅제와의 접착력을 향상 시켰으며, 최적 조건에서의 계면 접착강도는 미처리 아라미드 섬유 대비 23% 정도 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 슈퍼소재기반기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. T. S. Lee, B. S. Kim, H. N. Choi, K. Y. Lee and S. G. Lee, Interfacial Adhesion Properties of Plasma Treated Aramid Fiber with Chloroprene

- Rubber, *Textile Science and Engineering(J. Korean Fiber Society)*, **47**(3), 1(2010).
2. B. Park and K. Koo, Properties of Silicone-coated Fabric for Membrane Treated by Oxygen Low Temperature Plasma, *Textile Coloration and Finishing (J. Korean Soc. Dyers & Finishers)*, **23**(3), 195(2011).
 3. U. Plawky and M. Lonschien, Surface Modification of an Aramid Fibre Treated in a Low-Temperature Microwave Plasma, *J. Mater. Sci.*, **31**(22), 6043(1996).
 4. J. Hwang, Y. Qiu, C. Zhang, B. Jarrard, R. Stedeford, J. Tsai, Y. C. Park and M. Mccord, Effects of Atmospheric Pressure Helium/Air Plasma Treatment on Adhesion and Mechanical Properties of Aramid Fibers, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **17**(6), 847(2003).
 5. L. Liu, Q. Jiang, T. Zhu, X. Guo, Y. Sun, Y. Guan and Y. Qiu, Influence of Moisture Regain of Aramid Fibers on Effects of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on Improving Adhesion with Epoxy, *J. Appl. Polym. Sci.*, **102**(1), 242(2006).
 6. E. M. Kim and J. Jang, Surface Modification of Meta-aramid Films by UV/ozone Irradiation, *Fibers. Polym.*, **11**(5), 677(2010).
 7. J. Jang, S. I. Eom and Y. H. Kim, Continuous Surface Modification of PET Film via UV Irradiation, *Textile Science and Engineering(J. Korean Fiber Society)*, **39**(1), 100(2002).
 8. I. J. Kwon, S. M. Park, K. Koo, B. K. Song and J. W. Kim, Surface-Properties of Poly(Ethylene Terephthalate) Fabric by In-line Atmospheric Plasma Treatments, *Textile Coloration and Finishing(J. Korean Soc. Dyers & Finishers)*, **19**(4), 212(2007).
 9. D. W. Yun and J. Jang, Surface Modification of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Films by UV/ozone Irradiation, *Textile Coloration and Finishing(J. Korean Soc. Dyers & Finishers)*, **23**(2), 76(2011).
 10. G. S. Sheu and S. S. Shyu, Surface Properties and Interfacial Adhesion Studies of Aramid Fibres Modified By Gas Plasmas, *Comp. Sci. Technol.*, **52**(4), 489(1994).
 11. Y. M. Park, J. H. Hwang and K. Koo, Functional Improvement of Poly(Vinyl Alcohol) Polarized Film by O₂ Low Temperature Plasma Treatment, *Textile Coloration and Finishing(J. Korean Soc. Dyers & Finishers)*, **16**(3), 144(2004).
 12. C. Jia, P. Chen, W. Liu, B. Li and Q. Wang, Surface Treatment of Aramid Fiber by Air Dielectric Barrier Discharge Plasma at Atmospheric Pressure, *Appl. Surf. Sci.*, **257**(9), 4165(2011).