ISSN(Print) 1229-0033
ISSN(Online) 2234-036X
http://dx.doi.org/10.5764/TCF.2015.27.1.18
Textile Coloration and Finishing Vol.27,No.1

〈연구논문(학술)〉

저온 플라즈마 처리를 이용한 파라 아라미드 섬유의 표면 개질 효과 및 역학적 특성(2)

박성민† · 손현식 · 심지현 · 김주용[1]· 김태경[2] · 배진석[2]

DYETEC연구원, [1]숭실대학교 유기소재·파이버공학과, [2]경북대학교 섬유시스템공학과

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

Sung-min Park†, Hyun-sik Son, Ji-hyun Sim, Joo-young Kim[1], Taekyeong Kim[2] and Jin-Seok Bae[2]

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute, Daegu, Korea
[1]Department of Organic Materials and Fiber Engineering, Soongsil University, Seoul, Korea
[2]Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received: November 27, 2014 / Revised: January 6, 2015 / Accepted: March 6, 2015)

Abstract: *para*-aramid fibers were treated by atmosphere air plasma to improve the interfacial adhesion. The wettability of plasma-treated aramid fiber was observed by means of dynamic contact angle surface free energy measurement. Surface roughness were investigated with the help of scanning electron microscopy and atomic force microscopy. The tensile test of aramid fiber roving was carried out to determine the effect of plasma surface treatments on the mechanical properties of the fibers. A pull-out force test was carried out to observe the interfacial adhesion effect with matrix material. It was found that surface modification and a chemical component ratio of the aramid fibers improved wettability and adhesion characterization. After oxygen plasma, it was indicated that modified the surface roughness of aramid fiber increased mechanical interlocking between the fiber surface and vinylester resin. Consequently the oxygen plasma treatment is able to improve fiber-matrix adhesion through excited functional group and etching effect on fiber surface.

Keywords: *surface modification, wetting behavior, para-aramid fiber, atmosphere air plasma, interfacial adhesion*

1. 서 론

고성능 복합재료 산업에 있어서 아라미드 섬유는 아라미드 섬유가 가진 우수한 기계적 물성으로 인하여 가장 중요한 강화재료 중 하나로 알려져 있다. 아라미드 섬유는 강철보다 가볍지만 강한 재료로써, 낮은 비중으로 인하여 높은 비강도와 탄성률을 가지며, 또한 우수한 열적 안정성과 내화학성, 낮은 전기 전도성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인하여 우수한 고분자 복합재료의 강화재료로 널리 사용되고 있다[1,2]. 섬유강화 복합재료의 우수한 기계적 물성은 섬유와 매트릭스간의 상호작용에 의존한다.

아라미드 섬유 표면의 높은 결정화도와 아라미드 고분자 사슬 내 극성 작용기의 부족으로 인하여 아라미드 섬유의 표면은 화학적으로 불활성이며, 매끄럽기 때문에 아라미드 섬유와 매트릭스 간의 계면 접착력은 매우 약하게 나타난다[3,4].

따라서 섬유와 매트릭스 사이의 계면 접착력을 최적화하기 위해서는 섬유의 젖음성을 향상시켜 섬유와 매트릭스간의 결합력을 극대화시켜야 한다. 매트릭스가 섬유표면에 쉽게 젖을 수 있도록 하는 표면 개질 가공기술은 미세기공 형성 또는 섬유표면을 거칠게 하여 섬유표면의 접촉면적을 증가시키고 계면간의 결합을 제공할 수 있으며, 복합재료에서 섬유와 매트릭스 간의 결합력을 최적화하기 위

†Corresponding author: Sung-min Park (maxwell02@dyetec.or.kr)
Tel.: +82-53-350-3864 Fax.: +82-53-350-3899
ⓒ2015 KSDF 1229-0033/2015-3/18-26

하여 기계적, 화학적 개질 및 플라즈마 처리와 같은 표면 개질 기술들이 연구되어 왔다[6].

일반적으로 섬유의 직경은 마이크로미터로 기계적인 방법으로 섬유 표면을 개질 한다는 것은 불가능하다. 기존에 물과 유기용매를 사용한 화학적 개질 방법은 내부식성을 가진 기계장비 사용과 더불어 섬유표면에 잔류하는 용매들의 제거 어려움으로 인해서 사용하는데 한계가 있다[7]. 또한 높은 에너지 사용률과 많은 양의 물과 시간이 소비되고, 폐수처리문제, 유기용매의 재활용, 환경오염 등의 문제와 함께 대부분의 경우 화학적 처리는 아라미드 섬유의 기계적 물성 저하를 초래한다. 반면 플라즈마 표면개질 기술은 매우 간단하고, 가격 면에서도 효율적이며, 실온에서도 작동할 수 있는 장점을 가지고 있다. 플라즈마 표면개질 기술은 독성화학물질이나 용매를 필요로 하지 않는다.

따라서 이 기술은 친환경적인 공정이며, 섬유의 물성에 영향을 거의 미치지 않는다. 또한 대기압 플라즈마는 아라미드 섬유의 표면을 개질하는데에 있어서 진공장치나 크기가 큰 기계장치와 같은 연속처리생산 라인을 필요로 하지 않는다.

플라즈마를 처리하는 동안 탄소원자와 인접해 있는 산소 원자가 반응을 통하여, 고분자표면이 에칭(etching)된다. 또한 섬유표면에서 플라즈마의 활성화 부분과 표면 원자 사이의 반응을 통해 C-OH, C=O, -COOH와 같은 산소를 포함한 극성 작용기가 형성되며, 이를 통하여 섬유표면에너지를 증가시켜 섬유의 젖음성을 향상시킨다. 일부 연구에서는 활성 라디칼들은 상호결합하여 플라즈마 처리된 아라미드 섬유의 인장강도를 증가시킨다는 연구도 보고되고 있다[3-5](Figure 1).

앞선 연구에서는 저온 플라즈마를 이용한 아라미드 섬유의 표면 개질 조건을 찾고, 유제 및 코팅제 사이의 친화성을 증진시킴으로써[8], 의류산업에 적용하고자 하였다면, 본 연구에서는 실용화가 가능한 remote 방식의 플라즈마 장비를 이용하여 산업용 복합재료에 적용하기 위한 열경화성 수지와의 친화성을 증진시키고, 섬유-수지간 계면 접착특성 및 층간 전단강도 변화를 고찰하고자 하였다.

2. 실 험

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 고강도 파라 아라미드 섬유 직

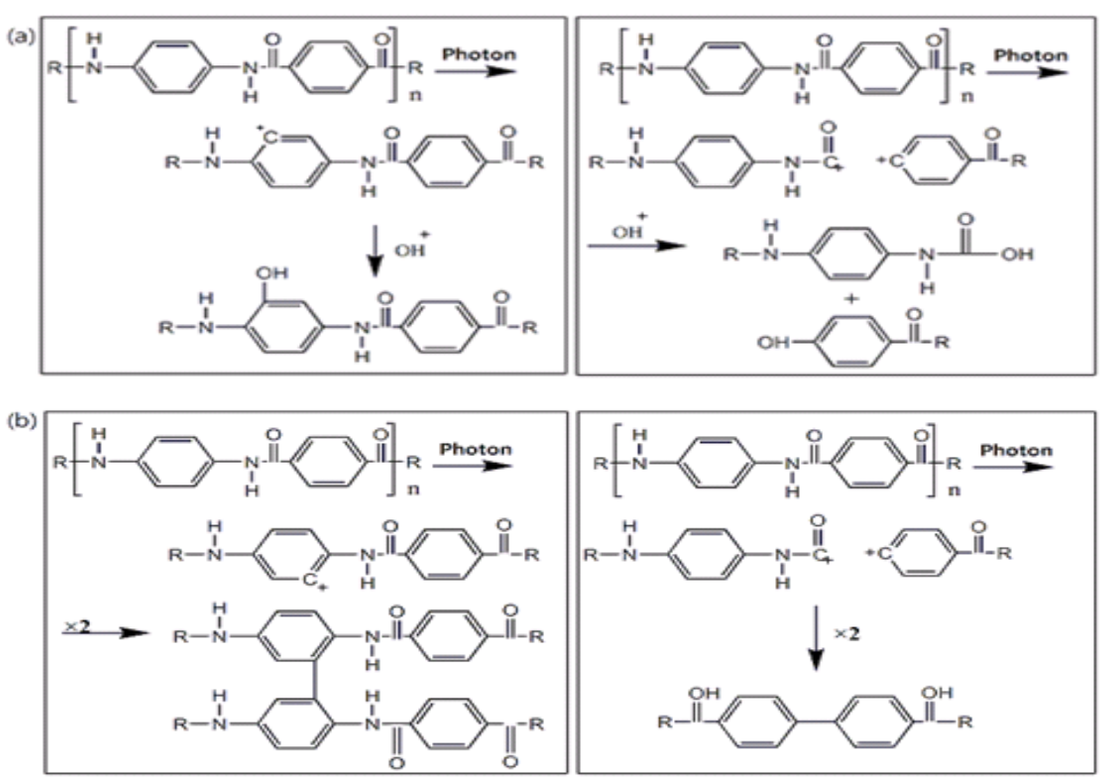


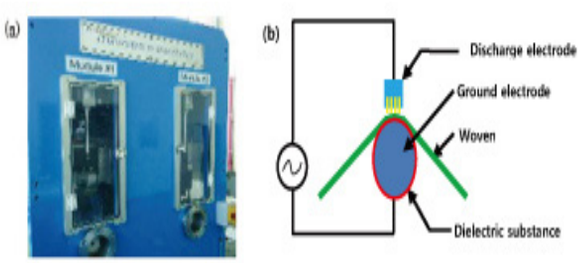
Figure 1. (a) The possible mechanism of induced polar funcrional group(C-OH, -COOH) at the fiber surfaces and (b) active radicals cross-linking mechanism in the fiber[5].

물은 Heracron®(HF200, KOLON, Korea) 1500 denier로 가연되지 않은 멀티 필라멘트사로 평직물(경사 15/inch, 위사 15/inch)을 사용하였다.

아라미드 직물에 대한 대기압 플라즈마 표면처리 및 계면접착력 실험을 위해 생지원단의 전처리 공정을 진행하였으며, 일반 PET 호발·정련 공정의 조건(정련제(ss-30) 3g/L, 호발제(sclean 606) 6g/L, 수산화나트륨 1g/L, 100℃/30min)으로 냉수세와 열수세를 통하여, 방사 및 제직공정 시에 발생될 수 있는 오염물질을 제거하였다. 또한 아라미드 섬유의 계면전단강도 및 층간전단거동을 관찰하기 위해 열경화성 매트릭스를 사용하였다. 열경화성 수지는 비닐에스테르(RF-2000SEL, CCP compsites, France)를 사용하였으며, 경화제(MEKP55)를 100:1.5로 혼합하여 6시간 동안 상온에서 경화시켰다. 복합재료의 층간전단강도 시험 시편은 아라미드 섬유직물 6ply를 적층하여 VARIM(Vaccum-assisted resin infusion molding)성형공법을 사용하였다.

2.2 아라미드 섬유의 플라즈마 처리

본 연구에서 사용한 저온 대기압 플라즈마 처리장치는 제4기 한국에서 제조한 글로우 방전 영역의 remote 방식인 플라즈마 장치(처리용량 : 6kW)를 사용하였으며 장비에 대한 제원은 Figure 2와 같다.



Discharge power	3kW
Gas	N_2 : O_2 = 60 : 1
Temperature	Room temperature
Treated speed	1/min
Frequency	20-60kHz
Gap of the electrodes	3 mm
Time	1 to 5 min

Figure 2. (a) Actural setting of atmosphere plasma treatment at DYETEC institute, (b) Parameter of the plasma treatment.

아라미드 섬유 직물은 방전 갭을 통하여 접지롤러에 감겨있고 섬유의 표면은 플라즈마 반응으로 인하여 산화된다. 혼합가스의 산소는 이 산화반응을 위한 물질로 사용되고, 이 반응은 방전 갭에 존재하는 높은 에너지의 전자에 의해 개시되며, 이는 아라미드 섬유 표면의 결합을 해리시키는 역할을 한다.

산화반응을 통하여 산소를 포함한 극성 그룹이 섬유의 표면에 생성되며, 그 결과 섬유표면의 젖음성이 개선되는 결과를 가져올 것으로 기대된다.

Remote 방식의 플라즈마 처리장치를 이용한 실험조건으로는 처리 전력 3kW, 질소와 산소가스의 유입량을 60:1로 조절하여 안정적인 플라즈마 생성 조건으로 결정하였으며, 처리시간을 1, 3, 5분으로 변화시켰다.

2.3 섬유의 표면 특성 평가

대기압 플라즈마 처리를 통한 아라미드 섬유표면의 물리적 형태 변화를 관찰하기 위해서 FE-SEM (Hitachi, SU-70)과 AFM(DI Instruments, NanoScope Ⅲ A)분석을 실시하였으며, 아라미드 원사의 물성변화를 측정하기 위해 만능인장시험기(Zwick Z 005)를 이용하였으며, ASTM D 7269를 준용하여 실시하였다.

실험은 로드셀(Load cell) 5kN, 정속인장속도(CRE cross-head speed) 250mm/min의 속도로 실시하였고, 시험편의 공칭 게이지 길이(nominal gage length) 250mm로 시험편 및 미처리 시험편을 각각 5개씩 선정하여 평균값을 계산하였다. 또한 실험 과정에서 지그(jig)와의 미끄러짐 현상(slip) 발생을 억제하기 위해 캡스턴 타입(Capstan type) 지그를 사용하였다.

아라미드섬유 표면의 원소 조성비 변화를 알아보기 위해 X-ray photoelectron spectroscopy(ULVAC-PHI, Quantera SXM) 분석을 실시하였다. 또한 플라즈마 처리 전후의 아라미드 섬유의 표면에너지 변화를 측정하기 위해 Dynamic Contact angle analyzer(KRUSS, K100 Mk1)을 이용한 동적 접촉각(Wilhermy technique)을 측정하였으며, 측정시 증류수(Υ_l=72.3mN/m)와 Diiodomethane(Υ_l=50.8mN/m)을 사용하였고, 속도는 2mm/min으로 측정하였다.

표면에너지는 Owens, Wendt, Rabel, Kaelble 법에 따라 아래의 식(1), 식(2)을 통하여 계산하였다[2].

$$\Upsilon_l(1+\cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^{\vartheta}\gamma_l^{\vartheta}} + 2\sqrt{\gamma_s^{d}\gamma_l^{d}} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$\Upsilon_{total} = \gamma^{\vartheta}_{S} + \gamma^{d}_{S} \quad (2)$$

γ_{total} 은 섬유의 전체 표면 자유 에너지의 합을 나타내며, Υ^{ϑ}_{S}와 Υ^{d}_{S}는 섬유의 극성항과 분산항의 표면장력을 나타낸 것이다. 두 액체의 극성항과 분산항을 알고 있는 Υ^{ϑ}_{l}와 Υ^{d}_{l}을 이용하여 표면에너지를 구하였다.

2.4 플라즈마 처리된 섬유의 역학적 특성

섬유의 표면처리에 의한 열경화성 수지와의 계면 접착력을 시험하기 위하여 풀-아웃(pull-out)시험 중 한 가지 방법인 microdroplet debonding 시험을 실시하여 계면전단강도를 측정하였다. cross-head speed는 2mm/min으로 하였으며, 계면전단강도(IFSS: Interfacial shear strength)를 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{IFSS} = \frac{w_{max}}{s} \quad (3)$$

where w_{max} : Maximum load (to debond the fibre from the matrix)

S : Fibre embedded area

아라미드와 열경화성 수지와의 층간 전단강도(ILSS: Interlaminated shear strength) 측정은 ASTM D 2344에 의거하여 실시하였으며, cross-head speed는 1mm/min로 하여 식(4)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{ILSS} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (4)$$

where P_m : Maximum load observed during the test

b : Measured specimen width

h : Measured specimen thickness

3. 결과 및 고찰

3.1 섬유표면 형태 및 물성변화

아라미드 섬유 표면의 FE-SEM 이미지를 Figure 3에 나타내었다. 플라즈마 처리 전의 아라미드 섬유의 표면은 매끄럽고 균일한 형상을 나타내는데 반하여, 플라즈마 처리 후 섬유표면은 미세기공과 몇 개의 홈이 생성되었다.

AFM 분석결과를 Figure 4에 나타냈으며, 플라즈마 처리에 따라 아라미드 섬유의 표면조도(root mean square(RMS) roughness) 값이 18nm, 38nm, 43nm로 처리시간이 길어질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 FE-SEM분석의 결과와 마찬가지로 플라즈마 처리에 의해 섬유표면에 에칭현상이 나타나고 표면에

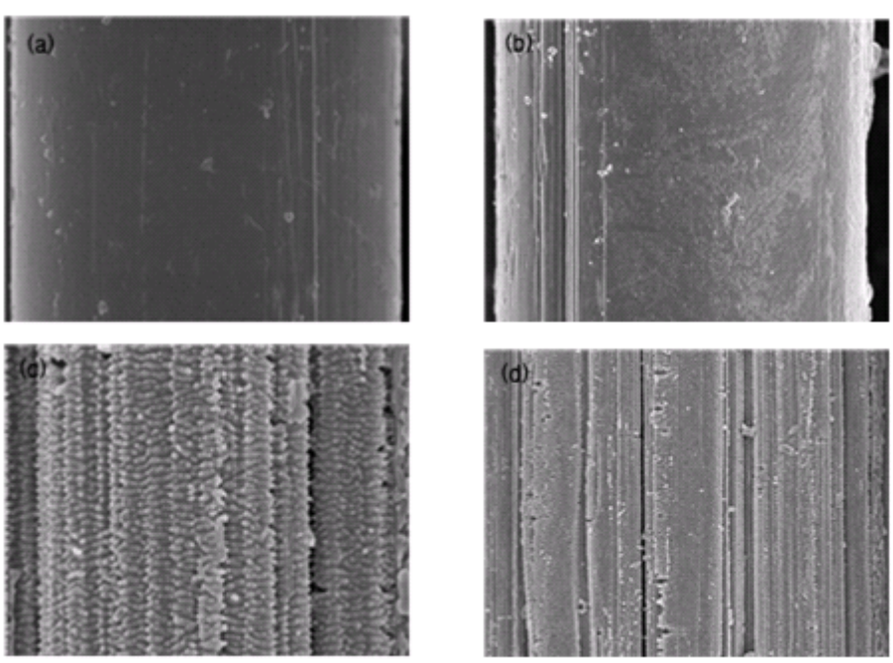


Figure 3. FE-SEM image of atmosphere air plasma treated aramid fiber surface; (a) Control, (b) 1 min plasma-treated, (c) 3 min plasma-treated, (d) 5 min plasma-treated.

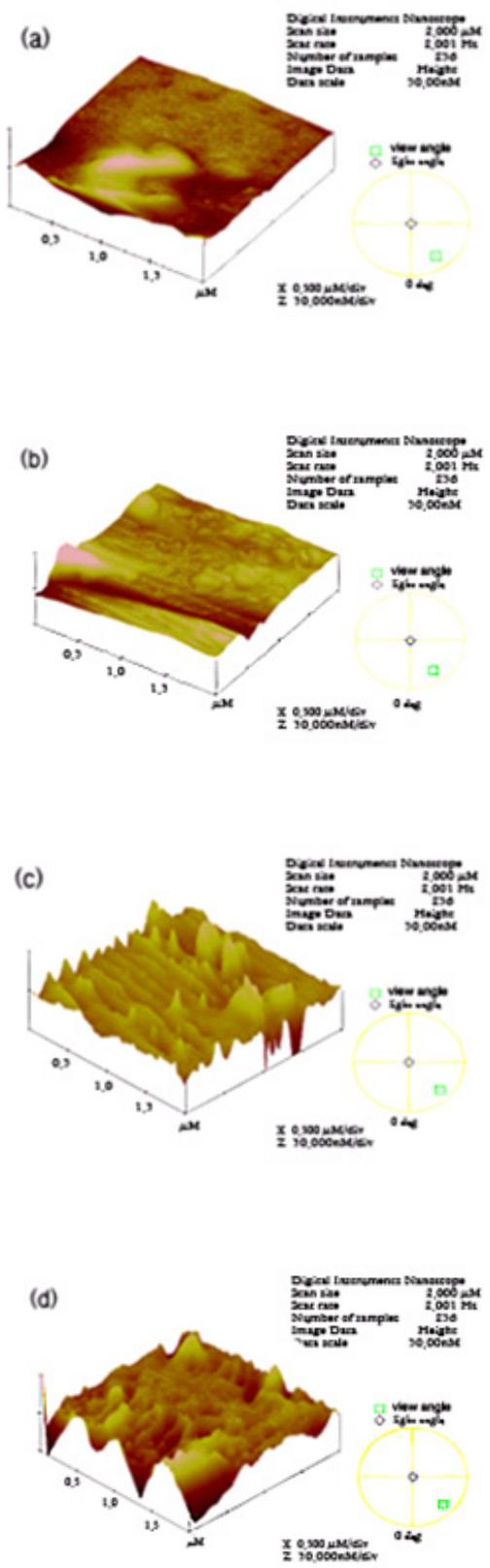


Figure 4. AFM image of atmosphere air plasma treated aramid fiber surface; (a) Control, (b) 1 min plasma-treated, (c) 3 min plasma-treated, (d) 5 min plasma-treated.

micro-pit 또는 micro-crater로 불리는 요철이 생성된 것을 볼 수 있었다.

특히 Figure 4(C)는 3분 동안 플라즈마 처리된 아라미드 섬유의 SEM 이미지 보여주는데, 작은 요철들로 인하여 표면조도가 가장 거칠게 나타났으며, 처리시간 5분의 결과는 부분적으로 함몰이 일어나서 처리시간 3분 보다 불균일하게 에칭효과가 나타나서 처리시간 3분이 가장 효율적인 결과를 보였다.

결론적으로 플라즈마 처리 시간이 증가할수록 표면의 거칠기는 증가하며, 이러한 변화의 주요 원인은 플라즈마 공정에 의한 에칭효과와 플라즈마의 산화반응에 기인한 것으로 생각된다. 또한 표면처리 기술은 강화제로 사용되는 섬유의 물성저하를 일으키지 않고 수지와의 결합력을 향상시키는데 목적이 있으므로, 비교적 섬유의 물성저하를 최소화로 할 수 있는 범위를 보기 위해 플라즈마 처리 전후의 아라미드 섬유 인장강도 변화를 Figure 5에 나타내었다. 처리시간 1분의 경우 플라즈마 처리에 따른 활성 라디칼에 의해 아라미드 섬유 표면 층에서 잔여 고분자 사슬간의 가교결합으로 인장강도가 2646.9MPa에서 2663.2MPa로 증가하는 현상이 나타났다. 플라즈마 처리 전후의 아라미드의 인장강도는 5% 미만, 탄성률은 10% 미만으로 측정되어 플라즈마 처리에 따른 물성저하 현상은 크게 나타나지 않았다.

3.2 섬유표면 화학조성 변화

Table 1은 아라미드 섬유 표면의 화학 조성변화 및

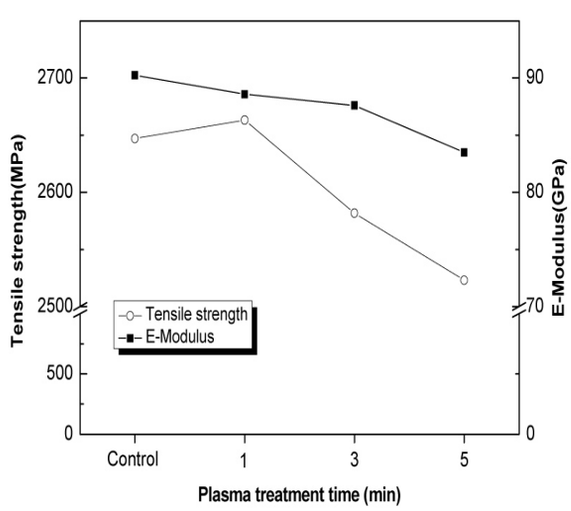


Figure 5. Tensile properties of different plasma-treated aramid fiber.

Table 1. XPS surface element analysis of different plasma-treated aramid fiber

Plasma treatment time	C_{1S}(%)	O_{1S}(%)	N_{1S}(%)	O_{1S}/C_{1S}(%)	N_{1S}/C_{1S}(%)
Control	85.1	11.4	2.9	13.4	3.4
1min	80.3	16.5	2.2	20.5	2.7
3min	79.4	17	1.7	21.4	2.1
5min	78.3	17.5	1.7	22.3	2.2

Table 2. Contact angle and surface free energy of different plasma-treated aramid fiber

Plasma treatment time	Contact angle(θ°)		Surface free energy(mN/m)		
	Water	Diiodomethane	γ_{total}	γ^d	γ^p
Control	60.9	55.1	51.5	14.9	36.6
1min	62.2	59.5	25.4	15.6	36.8
3min	48.8	50.4	62.7	24.9	37.8
5min	46.8	51.4	61.9	24.5	37.4

플라즈마 처리시간 증가에 따른 변화를 나타낸 것이다. 산소/질소 혼합가스 플라즈마 처리에 따른 섬유 표면의 화학조성의 변화를 분석한 결과, 아라미드 섬유표면에 산소 함유기들이 생성되었음을 확인할 수 있었다. 또한 플라즈마 처리에 의해 섬유 표면의 활성화와 이로 인한 라디칼의 발생이 일어나며 라디칼이 산소 분위기와 결합하여 표면에 하이드록실, 카르복실 등의 산소 함유기들이 생성되기 때문으로 판단된다.

Figure 6은 플라즈마 처리에 따른 아라미드 섬유표면의 C_{1s} peak fitting 결과를 나타낸 것이다. 산소함유기에 대한 분석을 피크에 의해 살펴본 결과, C-O 결합과 더불어 C=O 및 O=C-O 등 여러 가지 형태의 산소 함유기들이 표면에 생성되었음을 알 수 있었으며, 이러한 결과로부터 대기압 플라즈마 처리에 의하여 산소 함유기가 아라미드 섬유 표면에 생성되어 표면의 친수화가 이루어졌을 것으로 생각된다[2,9].

3.3 접촉각 및 표면에너지 변화

플라즈마 처리에 따른 증류수와 diiodomethane의 접촉각 평균값과 표면자유에너지를 Table 2에 나타내었다.

플라즈마 처리에 따라 증류수에 대한 접촉각은 60.9°에서 46.8°로 급격하게 감소하였으며, 극성 영역의 표면자유에너지는 14.9에서 24.5mN/m로 증가하였고, 전체 표면자유에너지는 51.5에서 61.9mN/m로 현저하게 증가하였다. 이는 플라즈마 처리에 의한 형태학적 변화 및 섬유표면의 화학조성 변화의 결과와 마찬가지로 아라미드 섬유표면에 친수기가 형성되어 섬유의 젖음 특성이 향상된 결과이다.

3.4 계면전단강도(IFSS) 및 층간전단강도(ILSS) 변화

Figure 7은 플라즈마 처리 시간에 따른 아라미드 섬유-vinylester resin의 Pull-out시험에 의한 계면전단강도를 나타낸 것이다. 아라미드 섬유와 vinylester resin과의 계면전단강도는 21.4MPa로 측정되었지만, 처리시간 1분에서 5분으로 증가할수록 각각 23.8, 24.9, 25.1MPa로 향상되었다.

Figure 8은 플라즈마 처리 공정변수에 따른 아라미드 섬유보강 복합재료의 층간 전단강도 load-displacement 곡선을 나타내었다. 층간 전단강도 역시 계면전단강도와 마찬가지로 플라즈마 처리에 따라 2.8MPa에서 4.7MPa으로 향상되었으며, 플라즈마 처리에 따라 층간 결합력이 약 15%에서 40%까지 증가하였다.

Load-displacement 곡선에서 미처리의 경우에는 아라미드 섬유의 매끈한 표면에 의해 복합재료의 층간 결합력이 약하게 나타나서 층과 층 사이에서 발생한 최초 균열 지점을 시작으로 지속적으로 균열이 성장하는 현상이 나타났다. 하지만 플라즈마 처리한 섬유에서는 플라즈마 처리에 의해 층간 결합력이 미처리 비해 증가하면서 최초 균열지점 이후에도 균열지점

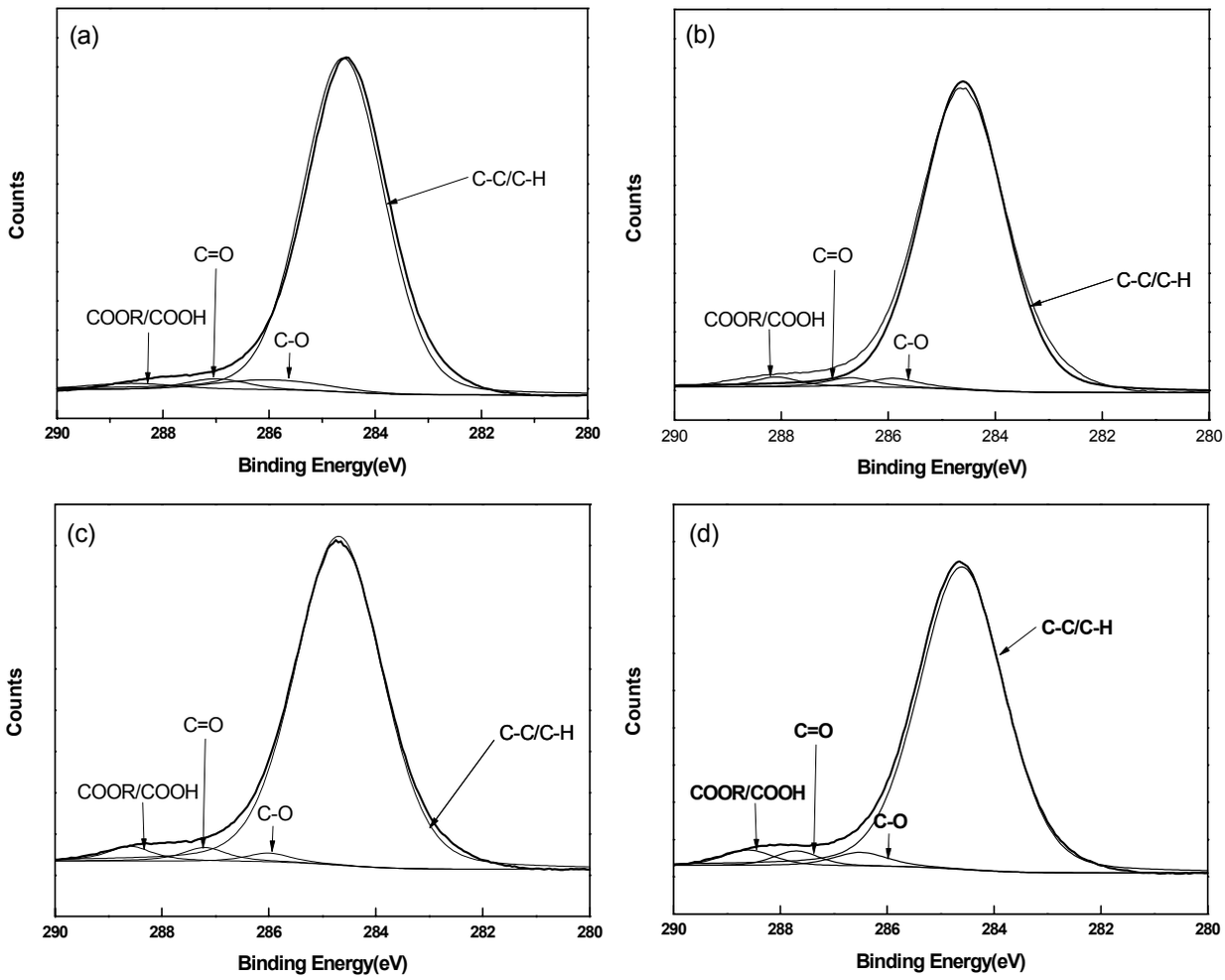


Figure 6. C_{1s} peak of different plasma-treated aramid fiber.

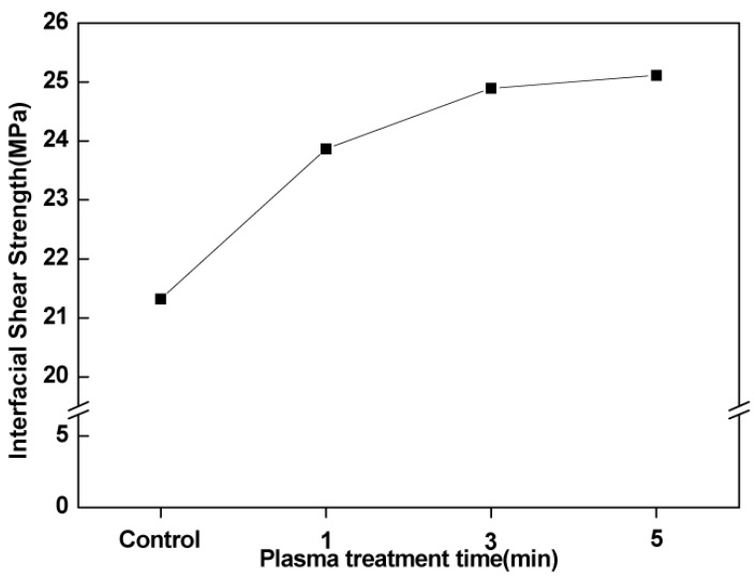


Figure 7. Interfacial shear strength(IFSS) of different plasma-treated aramid fiber with vinylester resin.

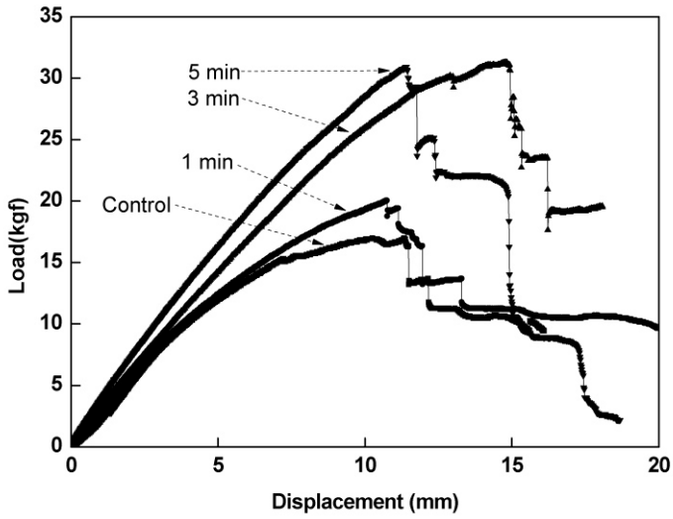


Figure 8. Interlaminated shear strength(ILSS) load-displacement curve of different plasma-treated aramid fiber with vinylester resin.

이 다변화하는 현상이 관찰되었다. 이것은 표면에너지 측정 결과와 표면형태 관찰에서 확인할 수 있듯이 아라미드 섬유표면의 화학적 조성의 변화와 표면에너지의 증가 및 표면요철 발생으로 인하여 섬유와 수지간의 접착력이 증가했기 때문이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 아라미드 섬유의 표면을 remote방식의 대기압 플라즈마 처리를 통하여 개질하고, 표면개질에 따른 vinylester 수지와의 계면접착 및 층간 전단특성에 대해 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 플라즈마 처리에 의해 아라미드 섬유 표면에 micro-pit 또는 micro-crater로 불리는 요철 현상이 일어났으며, 이 요철은 처리시간 3분에서부터 형태학적으로 뚜렷하게 나타났다.
2. XPS 분석을 통하여 플라즈마 처리에 의해 아라미드 섬유의 표면에 C-N/C-O와 -COO 조성이 변화되어 산소함유가 증가한 것을 확인할 수 있었으며, FE-SEM과 AFM분석 결과와 비교해 보았을 때, 처리 시간이 증가할수록 에칭효과와 함께 섬유 표면의 화학적 조성 변화를 확인하였다.
3. 대기압 플라즈마 처리에 따른 물리적 특성을 관찰하기 위해 동적 접촉각 실험을 통하여 섬유표면의 형태학적 변화와 화학적 조성변화에 기인하여 섬유의 젖음성이 향상되었음을 확인하였다. 또한 이를 이용하여 아라미드 섬유의 표면에너지를 계산한 결과, 플라즈마 처리에 의해 표면에너지가 51.5mN/m에서 61.9mN/m로 증가하였다.
4. 플라즈마 처리에 의하여 아라미드 섬유 표면에는 산소함유기의 증가와 표면에너지의 증가 및 표면요철의 발생으로 인하여 vinylester resin과의 계면전단강도가 21.3에서 25.1MPa으로, 약 15% 향상된 것을 알 수 있었다. 또한 VARTM 성형공법을 이용한 복합재료의 층간 전단강도 실험결과 플라즈마 처리에 의해 층간 전단강도가 약 15% 증가하는 결과를 얻었으며, 처리시간에 따라 약 40%까지 층간 전단강도가 향상되는 결과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 슈퍼소재제품화사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

References

1. K. Tanaka, K. Minoshima, T. Oya, and K. Komai, Influences of Stress Waveform and Wet Environment on Fatigue Fracture Behavior of Aramid Single Fiber, *Comp. Sci. and Tech.*, **64**, 1531(2004).
2. 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).

3. N. Inagaki, S. Tasaka, and H. Kawai, Surface Modification of Aromatic Polyamide Film by Oxygen Plasma, *J. Polym. Sci. Part A Plym. Chem.*, **33**, 2001(1995).
4. S. Wu, J. Xing, and C. Zheng, Plasma Modification of Aromatic Polyamide Reverse Osmosis Composite Membrane Surface, *J. Appl. Polym. Sci.*, **64**, 1923(1997).
5. M. K. Biswas, M. A. Shayed, R. D. Hund, and C. Cherif, Surface Modification of Twaron Aramid Fiber by the Atmosphere Air Plasma Technique, *Textile Research of J.,* **83**(4), 406(2013).
6. G. A. Wade, W. J. Cantwell, and R. C. Pond, Plasma Surface Modification of Glass Fiber-reinforced Nylon-1.1: Thermoplastic Composites for Improved Adhesive Bonding, *Interface Sci.,* **8**, 363(2008).
7. M. Xi, Y. L. Li, and S. Y. Shang, Surface Modification of Aramid Fiber by Air DBD Plasma at Atmospheric Pressure with Continuous On-line Processing, *Surf. Coat. Technol.,* **202**, 6029(2008).
8. S. M. Park, I. J. Kwon, J. Y. Kim, and J. H. Yeum, Surface Modified Characterization and Mechanical Property of para-aramid Fiber by Low-temperature Plasma Treatment, *Textile Coloration and Finishing,* **24**(2), 131(2012).
9. U. Plawky, M. Londschien, and M. Michaeli, Modification of an Aramid Fibre Treated in a Low-Temperature Microwave Plasma, *J. Mater. Sci.,* **31**(22), 6043(1996).
10. B. Park and K. Koo, Properties of Silicone-coated Fabric for Membrane Treated by Oxygen Low Temperature Plasma, *Textile Coloration and Finishing,* **23**(3), 195(2011).
11. Y. Kondo, K. Miyazaki, Y. Yamaguchi, T. Sasaki, S. Irie, and K. Sakurai, Mechanical Properties of Fiber Reinforced Styrene-Butadiene Rubbers Using Surface-Modified UHMWPE Fibers under EB Irradiation, *European Polym. J.*, **42**, 1008(2006).
12. J. Jang, S. I. Eom, and Y. H. Kim, Continuous Surface Modification of PET Film via UV Irradiation, *Text. Sci. Eng.,* **39**(1), 100(2002).
13. 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,* **19**(4), 212(2007).
14. 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).