

미세역학적 실험법에 의한 금속섬유의 플라즈마 처리효과에 관한 연구

권미연¹ · 이승구^{2†}

¹한국생산기술연구원 소재부품융합연구부

²충남대학교 유기재료공학과

(2022년 08월 25일 접수, 2022년 09월 20일 수정, 2022년 11월 15일 채택)

A Study on the Plasma Treatment Effect of Metal Fibers using Micromechanical Technique

MiYeon Kwon¹, Seung Goo Lee^{2†}

¹Materials & Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,
143, Hanggaul-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Republic of Korea

²Department of Organic Materials Engineering, Chungnam National University, 99, Daehak-ro,
Yuseong-gu, Daejeon-si 34134, Korea Republic of Korea

(Received August 25, 2022, Revised September 20, 2022; Accepted November 15, 2022)

요약: 본 연구에서는 산소 플라즈마 처리시간을 실험 변수로 하여 금속섬유를 처리한 후 섬유표면에 산소함유 기능성 관능기를 도입하여 금속섬유의 친수성을 향상시키기 위한 연구로 플라즈마 처리 전, 후의 표면 특성 변화를 scanning electron microscope (SEM)과 x-ray photoelectron spectroscopy (XPS)를 사용하여 관찰하였다. 또한 플라즈마 처리시간이 금속섬유의 표면에 미치는 영향을 관찰하기 위해 극성 용매와 비극성 용매에 대한 금속섬유의 접촉각 변화를 측정하였다. 측정된 접촉각을 이용해 표면 자유에너지 변화를 계산한 후 산소 플라즈마 처리 전, 후의 금속섬유에 대한 접촉각과 표면 자유 에너지를 비교하였으며 접촉일과의 상관관계도 고찰하였다. 이런 금속섬유의 표면 변화가 다른 소재와의 복합 시 계면에서의 전단강도 향상에 미치는 영향을 알아보기 위해 microdroplet 시편을 제조하여 계면 전단강도를 측정하였으며 접촉일과의 상관관계도 함께 파악하였다. 따라서, 금속섬유의 산소 플라즈마 처리는 섬유표면에 물리적인 표면적 증가로 인한 수지와 접착면의 증가와 표면의 산소함유 기능성 관능기의 도입에 따른 접촉각, 표면 에너지의 변화에 따른 표면 친수화로 고분자 수지와 계면 전단강도를 향상시켜주는 결과를 얻었다.

Abstract: In this study, the hydrophilicity of the metal fiber is improved by introducing an oxygen-containing functional group to the fiber surface after treatment of the metal fiber using the oxygen plasma treatment time as an experimental variable. For the surface modification of metal fibers, changes in surface properties before and after plasma treatment were observed using SEM and x-ray photoelectron spectroscopy (XPS). In order to observe the effect of the plasma treatment time on the surface of the metal fiber, the change in contact angle of the metal fiber with respect to a polar solvent and a non-polar solvent was measured. After calculating the change in surface free energy using the measured contact angle, the contact angle and the surface free energy for metal fibers before and after oxygen plasma treatment were compared, and the correlation with the adhesion work was also considered. The microdroplet specimens were prepared to investigate the effect of surface changes of these metal fibers on the improvement of shear strength at the interface when combined with other materials and the interfacial shear strength was measured, and the correlation with the adhesion work was also identified. Therefore, the oxygen plasma treatment of the metal fiber results in an increase in the physical surface area on the fiber surface and a change in contact angle and surface energy according to the introduction of the oxygen-containing functional group on the surface. This surface hydrophilization resulted in improving the interfacial shear strength with the polymer resin.

Keywords: Plasma treatment, Metal fiber, Surface treatment, Interface adhesion, Micromechanical technique

† Corresponding author: Seung Goo Lee (lsgoo@cnu.ac.kr)

1. 서론

지능형 전자섬유 기반의 웨어러블 디바이스 기술 분야는 스마트 웨어, 스포츠·피트니스, 홈·가구·인테리어 등 매우 다양한 영역에 적용되고 있으며 새로운 시장을 창출하고 있는 실정이다. 특히 신체와 직접 접촉하는 제품분야에서 생체신호정보를 주기적으로 측정하고, 주변 환경정보를 실시간으로 모니터링 하여 최적의 생활환경을 제공하는 기술 분야는 제품의 기능 측면에서 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 또한 테크 패션(tech fashion)이라 일컬어지는 스마트 웨어 분야와 감성조명과 터치 인터페이스(tangible textural interface) 등 스마트 카, 테크 퍼니싱(tech furnishing) 등의 미래 스마트마켓은 새로운 감성·기술 시장의 창출을 예고하고 있다. 그러나 현재까지 전자산업과 섬유산업간의 기술장벽으로 융합이 쉽게 이루지지 못하고 있는 실정으로 원천소재에 대한 연구개발 부족과 생산기술에 대한 기술부족으로 현재 국내에서도 산업이 자리를 잡고 있지 못하고 있는 상황이다[1-3].

섬유처럼 유연성을 가지면서 금속 고유의 전기 전도도 및 우수한 기계적 특성을 가지는 금속섬유는 섬유자체로 활용되기도 하지만 최근 전자섬유 산업분야에서 응용소재로 꾸준히 연구개발이 시도되고 있는 추세이다[4-6]. 그러나 금속섬유의 표면은 주로 매끄럽고 평탄하면서 불활성으로 다른 매트릭스 수지나 바인더와의 접착이 쉽지 않아 다른 소재와의 복합화가 쉽지 않은 소재이다[7,8]. 이런 금속섬유의 소수성의 표면 특성을 개질하기 위해 주로 산처리와 플라즈마 처리를 이용하여 금속섬유의 표면에 표면적을 늘리거나 화학적 활성기를 증가시켜 주는 방법이 있다[9-11]. 표면 개질을 통한 물리, 화학적 표면 개질은 복합화하고자 하는 다른 소재와의 계면성질에 따라 표면의 특성을 변화시켜 계면 접착력에 영향을 주어 다른 소재와의 특성을 맞춰 그 물성을 변화시킬 수 있다. 즉 금속섬유의 표면 개질은 다른 소재와의 계면 접착력을 향상시켜 주어 결국 복합재료의 기계적 물성을 향상시켜주는 효과를 가져온다[12-15]. 특히 플라즈마를 이용한 표면 처리는 기존의 공정에 영향을 주지 않으면서 제품의 부가가치를 높일 수 있는 가공법으로, 처리하고자 하는 소재의 표면에 세정이나 환원반응 등의 효과를 줄 수 있는 플라즈마 처리공정과 플라즈마에서 발생된 에너지로 처리하고자 하는 소재나 고분자에 라디칼을 형성시켜 중합 및 그라프트 반응을 촉진시켜주는 플라즈마 중합법이 있다[16-20]. 따라서 본 연구에서는 금속섬유의 표면 개질 방법으로 산소 플라즈마 방법을 이용하여 물리적으로 표면의 접촉면을 증가시켜주면서 화학적으로 친수성 관능기를 도입시켜 금속섬유의 표면을 개질하고자 하

였다. 금속섬유의 표면이 매끈하고 소수성이며 비활성인 상태로 산소 가스를 이용한 플라즈마 처리로 금속섬유의 표면을 친수성으로 개질하여 전자섬유로의 응용을 위해 섬유와 고분자 수지와와의 계면 접착력을 향상시켜주고자 하였다. 즉 금속섬유의 표면 개질 효과는 플라즈마 처리 전, 후의 섬유표면의 변화(SEM)와 표면의 O1s 피크를 분석(XPS)하였으며, 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유의 표면 개질 정도를 관찰하기 위해 극성용매와 비극성 용매에 대한 금속섬유의 접촉각을 측정 한 후 표면 자유에너지를 계산하였다. 이런 금속섬유의 표면 개질이 고분자 수지와와의 계면 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 낮은 점도로 미세성형이 가능하면서 열경화성 수지인 에폭시 수지를 이용하여 섬유와 수지간의 계면 전단강도를 microdroplet 시험법으로 측정하였으며 접촉각과의 상관관계도 함께 고찰하여 향후 복합재료 제조 시 두 소재간의 접착력을 파악하고자 하였다[21-24].

2. 실험

2.1. 실험재료 및 표면처리

본 연구에서 사용된 금속섬유는 스테인리스 스틸 섬유(SUS, Nippon Seisen)로 직경이 30 μm 인 원형 단면의 필라멘트 섬유를 사용하였다. 금속섬유의 표면 개질을 위해 산소 플라즈마 처리를 하였으며, 플라즈마 처리장치는 13.56 MHz의 고주파(radio frequency) 전원장치로 수평전극(parallel electrode) 사이에서 플라즈마를 방전시켜 실험하였다(Fig. 1). 이때 사용된 캐리어 가스(carrier gas)로는 99.9% 고순도 산소로 유량을 10 sccm으로 고정 한 후 챔버 내의 진공도가 10^{-2} torr가 되도록 유지하였으며 20 W의 플라즈마 세기로 처리시간을 변수(1, 5, 10, 20분)로 금속섬유의 표면을 처리하였다. 산소 플라즈마 처리를 통한 금속섬유의 표면 변화를 알아보기 위해 처리시간에 따른 금속섬유의 접촉각 측정용매로 비극성 용매인 증류수(deionized water)와 극성용매인 메틸렌요오드(diiodomethane, Sigma Aldrich)를 사용하였다. 또한 산소 플라즈마 표면 개질이 고분자 매트릭스 수지와와의 계면 접착력에 미치는 영향을 관찰하기 위해 비스페놀 A계 에폭시(국도화학)를 사용하여 금속섬유와 에폭시 수지간의 계면 접착력을 측정하였다.

2.2. 표면 특성 평가

플라즈마 처리를 통한 금속섬유의 표면 변화를 관찰하기 위해 디지털 현미경(Video microscope system equipment, Somatech)과 주사전자현미경(Scanning electron microscope, HITACHI)을 이용하여 금속섬유 표면의 모폴로지(X700, X3500)를 관찰하였다. 또한 금속섬유 표

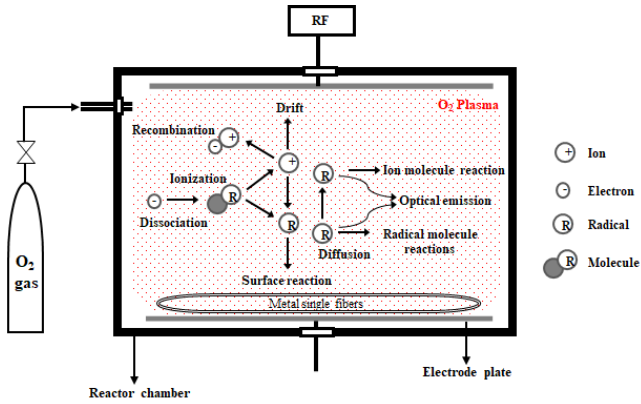


Figure 1. Reaction mechanism with carrier gas and fibers in the plasma chamber.

면의 화학적 조성변화를 알아보기 위해 엑스선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, KRATOS)를 이용하여 플라즈마 처리 전, 후의 탄소(C1s spectra)와 산소(O1s spectra)에 대한 변화를 비교하였다. 이때 XPS 분석은 Al Kα X-ray를 사용하여 225W의 조건에서 가속 전압 15 KeV로 측정하였다. 또한 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유 표면의 개질정도를 알아보기 위해 2종의 용매에 대한 접촉각을 측정하고 표면 에너지를 계산하였다. 접촉각 측정은 접촉각 측정기(Contact angle analyzer, Kruss)를 이용하여 극성용매인 증류수와 비극성 용매인 메틸렌요드(CH₂I₂)에 대해 2mm함침하였을 때의 접촉각을 5회 측정 후 그 평균값을 사용하였다. 표면 에너지 계산은 극성과 비극성 성분으로 표현되는 Owens-Wendt 식에 의해 아래와 같이 계산하여 비교하였다[2].

$$1 + \cos \theta = 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + 2\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} \quad (1)$$

여기서, θ 는 접촉각, γ_L 는 액체(γ_L)의 자유에너지, γ_S 는 고체(γ_S)표면의 자유에너지를 나타내고 γ^d 와 γ^p 는 액체(γ_L)와 고체(γ_S)의 극성에너지 값, γ^d 와 γ^p 는 액체(γ_L)와 고체(γ_S)의 분산 에너지 값이다.

2.3. 계면 접착 특성 평가

플라즈마 처리에 따른 금속섬유의 표면 개질 효과가 금속섬유의 계면 전단강도(Interfacial shear strength)에 미치는 영향을 알아보기 위해 에폭시 수지와와의 계면 접착력을 측정하였다. 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유와 에폭시 수지간의 계면에서 일어나는 미세 파괴 거동에 의한 계면 전단강도의 변화를 알아보기 위해 단섬유 풀 아웃(fiber pull-out) 시험을 진행하였다(Fig. 2). 실험에 사용된 방법은 microdroplet debonding 시험법으로

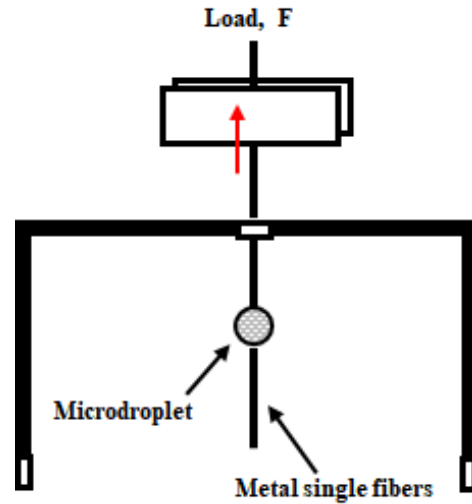


Figure 2. Schematic of the microdroplet debonding test.

금속섬유의 양끝을 고정된 상태에서 마이크로 사이즈의 에폭시 수지 방울(micro-droplet)을 금속섬유의 중앙에 위치하게 시험편을 제조하였다. 이때 에폭시 수지에 embedded된 섬유의 길이는 약 0.74mm이었다. 이렇게 제조된 시험편은 120°C의 오븐에서 2시간 경화시킨 후 섬유와 수지의 접착부위를 미세 바이스(microvise) 아래에 배치한 후 인장시험기(universal testing machine, Instron)를 사용하여 1 mm/min의 실험속도로 섬유 축 방향으로 인장하면서 섬유와 수지 간의 계면에서 발생된 전단응력을 측정하였으며 이때 측정된 하중 값으로부터 아래와 같은 식을 이용하여 계면 전단강도를 계산하였다[12,25].

$$IFSS = \frac{F}{2\pi rL} \quad (2)$$

여기서, F 는 측정된 전단응력이고, r 은 섬유의 반지름, L 은 수지가 부착된 섬유길이이다.

또한 서로 다른 재료 사이의 분자 간 상호작용 정도를 나타내는 접착일(Work of adhesion, W_a)은 두 재료가 서로 분리되는데 필요한 에너지를 의미하는 값으로 아래 식을 이용하여 계산하였으며 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유와 에폭시 수지와와의 계면 전단강도 및 표면 자유에너지, 접촉각과의 상관관계를 알아보았다 [26,27].

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + 2\sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 표면 특성변화

산소 플라즈마 처리에 의한 금속섬유의 표면 조성 변화를 분석하기 위해 XPS를 이용하여 표면의 C1s 피크와 O1s 피크를 관찰하였으며 O1s/C1s의 비를 계산하기 위해 고분해능(high resolution)으로 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 C1s 피크(284.8 eV)는 플라즈마 처리로 인해 30.8에서 16.2로 피크가 상대적으로 감소하였으며, 그에 비해 O1s 피크(532 eV 부근)는 4.4에서 13.2로 피크가 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 플라즈마 처리로 인해 금속섬유의 표면에 산소 함유기들이 도입되어 섬유 표면에 산소 함량비가 증가된 것으로 플라즈마 처리 전 시료의 경우 O1s/C1s의 비가 0.14인 것에 비해 플라즈마 처리 후 O1s/C1s의 비 0.81로 약 5.7 배 증가한 것을 확인할 수 있었다.

또한 소수성인 금속섬유의 표면을 친수화하기 위해

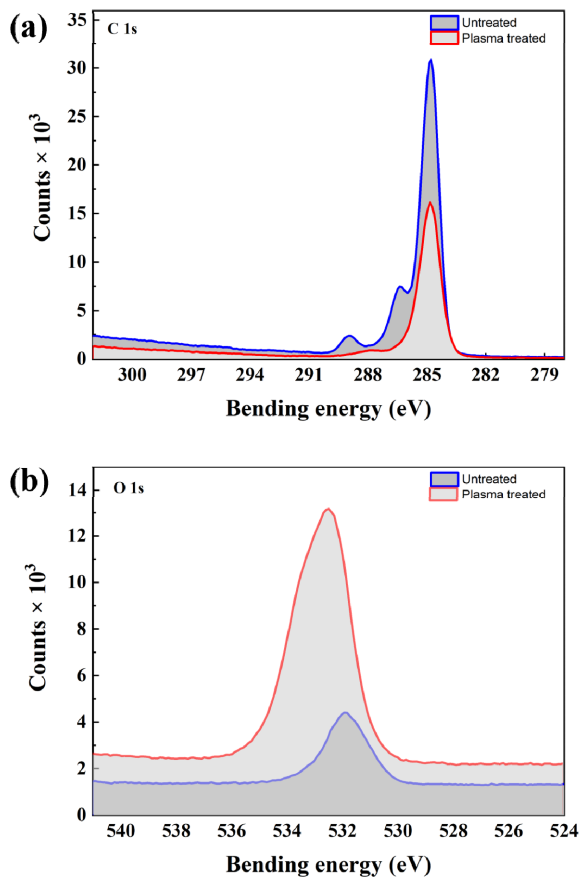


Figure 3. XPS spectra on metal fiber after plasma treatment of high resolution XPS peak of (a) C1s and (b) O1s.

산소 플라즈마를 이용하여 표면을 개질한 후 표면의 모폴로지를 디지털 현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 플라즈마 처리 전 상태의 금속섬유의 모폴로지로서 표면이 매끄러운 상태로 섬유제조 과정에서 생성된 미세한 주름이 섬유 길이방향으로 형성된 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 4(b)의 경우에는 10분간 플라즈마 처리한 모폴로지로서 주름이 있는 금속섬유의 표면 주위에 에칭이나 크랙 등의 물리적인 미세요철이 주로 형성된 것을 관찰할 수 있었다.

3.2. 접촉각 및 표면 에너지 특성변화

XPS 결과로부터 산소 플라즈마 처리 후 금속섬유의 표면에 산소 함유기들이 도입되었음을 확인하였으며 플라즈마 처리시간에 따른 표면 특성 차이를 알아보기 위해 비극성 용매와 극성 용매를 이용하여 금속섬유에 대한 접촉각을 측정하고 표면 에너지를 계산하였다. Fig. 5는 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유의 접촉각 변화를 나타낸 것으로 극성 용매인 물에 대한 접촉각의 변화는 비교적 짧은 1분의 처리시간에도 접촉각이 약 4°가 낮아진 78°로 미처리 대비 약 5%의 접촉각 변화를 보였다. 또한 산소 플라즈마 처리시간이 증가함에 따라 물에 대한 접촉각이 점점 낮아지는 경향을 보이다가 처리시간 10분에서는 미처리 대비 10%로 낮아진 값을 보이다가 그 이상의 처리시간에서는 접촉각의 감소가 미비하게 관찰되었다. 비극성 용매인 메틸

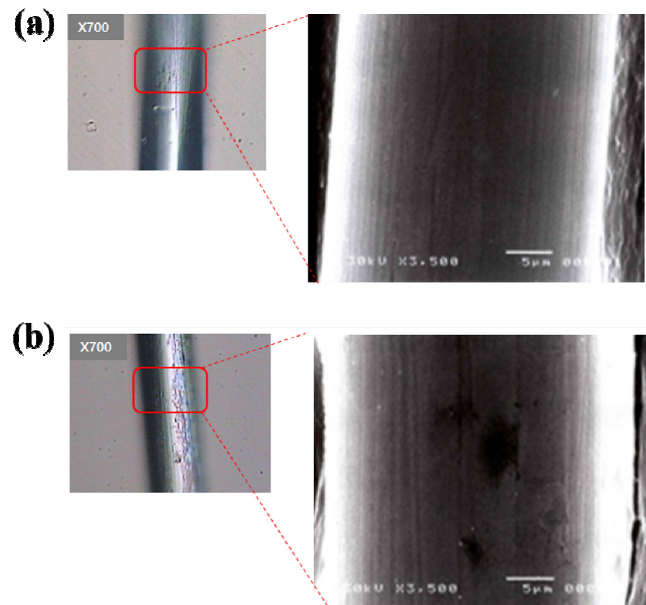


Figure 4. Surface morphology of (a) untreated metal fiber and (b) plasma treated metal fiber.

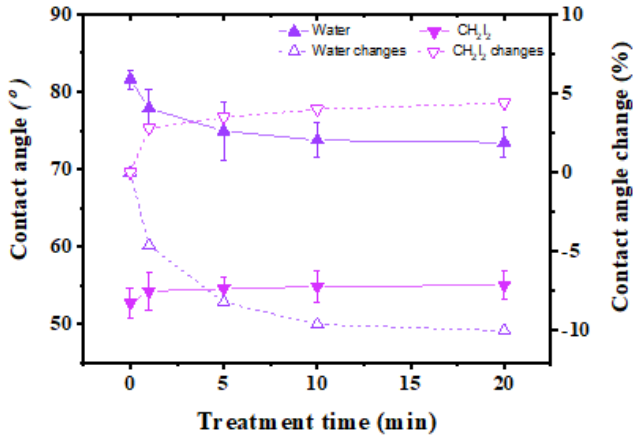


Figure 5. Contact angle of metal fiber by plasma treatment time.

렌요오드에 대한 금속섬유의 접촉각 변화는 1분간의 비교적 짧은 처리시간에서는 극성 용매보다 다소 낮은 약 3 %의 접촉각 변화를 보였으며 처리시간이 증가함에 따라 접촉각의 변화는 비교적 미비하게 증가하였다. 이런 처리시간에 따른 접촉각의 변화량은 비극성 용매가 극성 용매의 변화량보다는 낮은 약 4 %의 증가율을 보였으며 이는 산소 플라즈마 처리로 인해 금속섬유 표면에 산소 함유 극성기가 도입되면서 표면이 친수성으로 개질되어 극성 용매에 대한 접촉각의 변화량이 큰 것을 알 수 있었다.

이런 극성 용매와 비극성 용매에 대한 접촉각 측정값과 식 (1)에 의해 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유의 표면 에너지 변화를 산출하기 실험에 사용된 2종의 용매에 대한 표면 에너지 값(Table 1)을 사용하여 금속섬유의 표면 에너지를 계산하였다(Fig. 6). 전체적으로 금속섬유의 표면 에너지는 서서히 증가하여 처리시간 20분일 때 미처리 대비 약 6 %의 증가를 보였으며 이때 플라즈마 처리 전 금속섬유의 극성 에너지는 5.3 mJ/m², 분산 에너지는 29.2 mJ/m²로 플라즈마 처리 후 섬유 표면의 극성 에너지 변화율은 비교적 짧은 처리시간에도 크게 증가하여 최대 10.2 mJ/m²으로 그 변화율이 약 2 배 증가하였다. 그에 비해 분산 에너지의 경우에는 플라즈마 처리시간에 따른 변화율이 극성 에

Table 1. Surface energy components of wetting liquids.

Liquid	Surface energy (mJ/m ²)		
	Total energy	Dispersive component	Polar component
Water	72.8	22.5	50.3
Diiodomethane	50.8	50.42	0.38

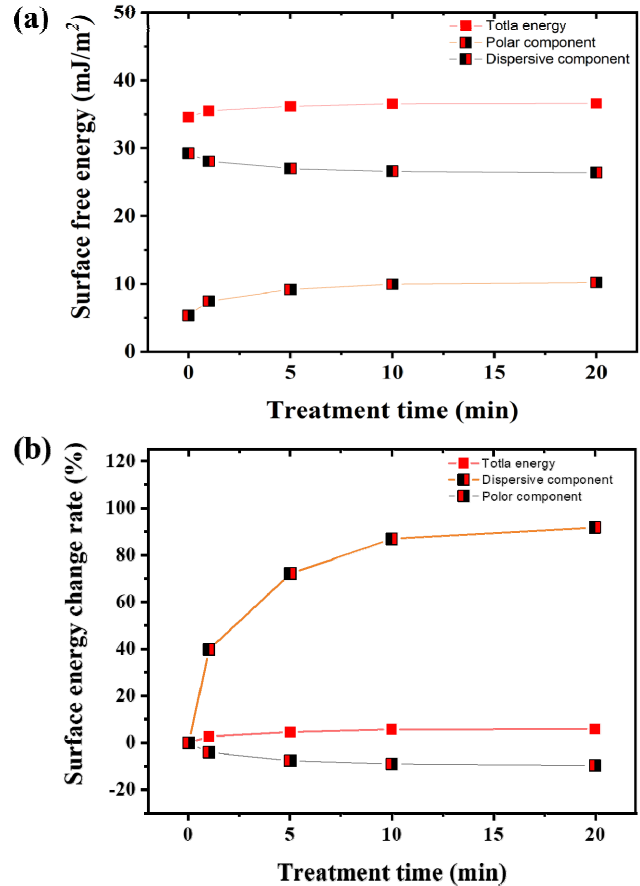


Figure 6. Surface free energy of metal fiber by plasma treatment time (a) surface free energy and (b) change rate of surface energy.

너지처럼 크게 변화하진 않았지만 미처리 대비 약 10 %의 에너지 변화량을 보여 26.4 mJ/m²를 나타내었다. 결과적으로 산소 플라즈마 처리에 의한 금속섬유의 표면 에너지 변화는 비극성 에너지의 증가보다는 극성 에너지의 감소에 따른 영향이 크며 이는 극성 용매에 대한 접촉각이 감소하는 것으로 금속섬유의 표면에 친수성 관능기가 도입되었음을 다시 한번 확인할 수 있었다(Fig. 7).

3.3. 계면 접촉 및 접촉일 특성변화

산소 플라즈마 처리로 표면 개질된 금속섬유의 친수성이 고분자 수지와의 접촉력에 미치는 영향을 알아보기 위해 플라즈마 시간에 따른 계면 전단강도를 측정하였다. 실험에 사용된 고분자 수지는 금속섬유와 주로 사용되는 있는 에폭시 수지로 microdroplet 시험방법에 따라 미세 바이스 사이에서 섬유가 수직 상승되면서 고정된 수지와 섬유계면사이 발생하는 전단응력을 측정하여 식 (2)에 의해 계산하였다. 그 결과 Fig.

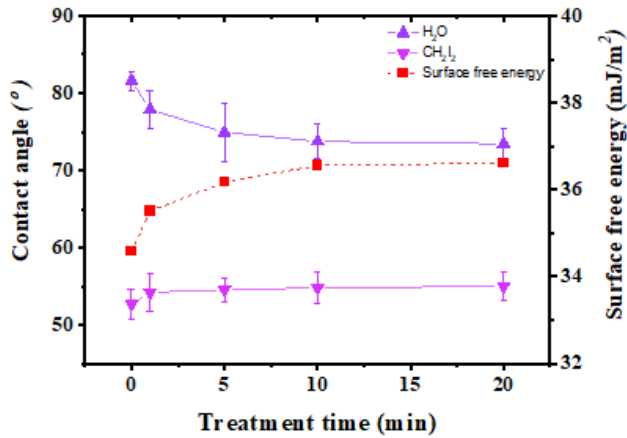


Figure 7. Contact angle and surface free energy of metal fiber by plasma treatment time.

8에서 보는 것과 같이 1분간의 짧은 처리시간에도 금속섬유와 수지간의 전단응력이 약 13 % 증가되었으며 플라즈마 처리시간이 증가함에 따라 계면 전단응력은 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 접착력 향상 효과는 앞에서 살펴본 접촉각의 변화와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 즉 비교적 짧은 처리시간인 1분간의 산소 플라즈마 처리에도 섬유의 접촉각이 크게 감소하는 것과 같이 계면 접착력도 그 값이 크게 증가하였으며, 처리시간이 증가함에 따라 접촉각과 전단응력의 변화가 서서히 변화하는 것을 알 수 있었다. 즉 산소 플라즈마 처리로 금속섬유의 표면에 친수성 관능기가 도입되어 극성 용매에 대한 접촉각이 낮아지는 효과와 미세요철에 의한 물리적인 표면 변화로 접촉면적이 증가되어 금속섬유에 비해 비교적

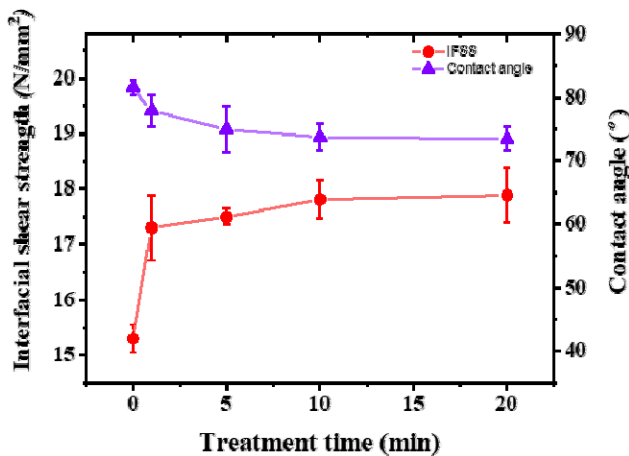


Figure 8. Interfacial shear strength and contact angle of metal fiber by plasma treatment time.

친수성인 에폭시와의 계면에 접착력이 향상되었다고 판단하였다.

Fig. 9는 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유의 표면 개질에 따른 변화를 접착일 측면에서 식 (3)에 의해 계산한 것으로 플라즈마 처리시간이 증가함에 따른 금속섬유의 친수성이 향상되어 금속섬유 계면에서의 접착일도 증가하는 것을 알 수 있었으며 이때 계산에 사용된 에폭시 수지에 대한 표면 에너지는 Table 2에서 나타내었다. 또한 산소 플라즈마 처리시간에 따른 에폭시 수지에 대한 금속섬유의 접착일과 계면 전단강도, 표면 에너지, 접촉각의 구체적인 상관관계를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)은 접착일과 계면 전단강도와의 상관관계를 나타낸 것으로 처리시간이 증가함에 따라 접착일과 계면 전단강도가 유사하게 증가하는 결과로 금속섬유의 표면 친수화로 에폭시 수지와 접착력이 증가하여 접착일도 증가되었음을 확인하였다. 즉 금속섬유 계면 전단강도 증가는 금속섬유의 표면 에너지에 영향을 받아 증가되는 값으로 Fig. 10(b)에 접착일과 표면 에너지와의 상관관계를 나타내었으며 표면 에너지가 증가함에 따라 에폭시 수지와 접착일도 증가하는 비례관계임을 확인하였다. 이런 표면 에너지의 증가는 산소 플라즈마 처리된 금속섬유의 극성용매에 대한 접촉각의 변화에 영향을 받기 때문에

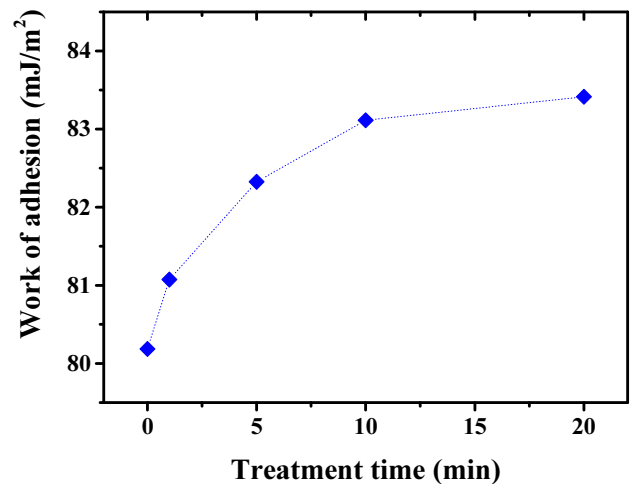


Figure 9. Work of adhesion of metal fiber by plasma treatment time.

Table 2. Contact angle and surface energy of epoxy resin.

Resin	Surface energy (mJ/m ²)		
	Total energy	Dispersive component	Polar component
Epoxy	46.5	20.33	26.17

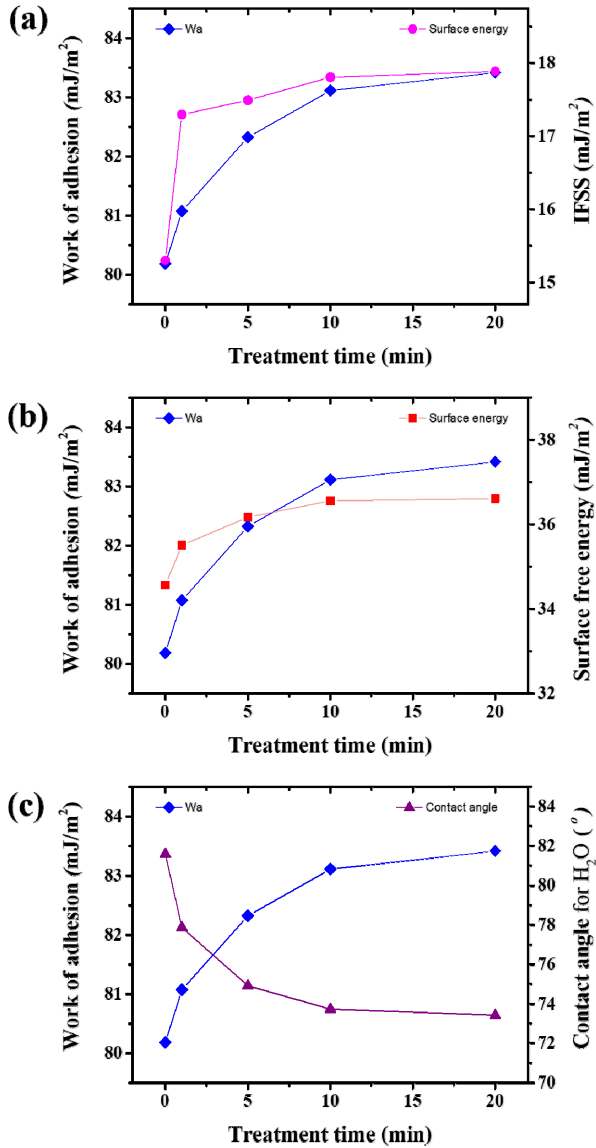


Figure 10. Relationship between work of adhesion and plasma treatment time for metal fibers (a) interfacial shear strength, (b) surface free energy and (c) contact angle.

처리시간에 따른 금속섬유의 물에 대한 접촉각 변화와 접촉일간의 상관관계를 Fig. 10(c)에 나타내었으며, 그래프에서 보는 것과 같이 극성 용매에 대한 접촉각과 접촉일은 반비례 관계인 것을 확인하였다. 즉 에폭시 수지와 금속섬유와의 접촉일은 산소 플라즈마 처리에 따른 금속섬유의 표면 개질로 극성용매에 대한 접촉각과는 반비례관계이면서 표면의 친수성기 도입에 따른 표면 에너지 증가 및 계면 전단강도 증가로 접촉일과 비례하는 관계를 보였다.

결과적으로 산소 플라즈마 처리에 의한 금속섬유의 표면은 물리적으로 미세요철이 발생하여 표면적이 증가되어 수지와와의 접촉면적이 증가되면서 산소 함유기의 도입으로 극성용매에 대한 접촉각이 낮아지고 금속섬유 표면에 극성기 증가에 따른 표면 에너지 증가로 화학적으로도 에폭시 수지와와의 결합력 증가 효과를 가져와 금속섬유와 에폭시 수지간의 계면 접촉력이 증가되는 결과를 나타낸 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구는 금속섬유를 전자섬유 분야에 응용하기 위한 기초연구의 일환으로 금속섬유의 표면 개질을 위해 방법으로 플라즈마 처리를 사용하였으며 소수성의 금속섬유 표면을 친수성으로 개질하고자 산소 가스를 이용하여 산소함유 기능성 관능기를 금속섬유의 표면에 도입하고자 하였다. 산소 플라즈마를 이용한 금속섬유의 표면 개질은 표면 모폴로지를 관찰한 SEM과 C1s 피크와 O1s 피크를 관찰한 XPS 분석결과 섬유표면이 플라즈마 효과에 의해 개질되었음을 확인하였다. 또한 산소 플라즈마 처리시간에 따른 금속섬유의 표면 개질 정도를 알아보기 위해 관찰한 접촉각 측정 결과에서도 수분간의 짧은 처리시간에서도 극성용매에 대한 접촉각이 최대 10% 낮아지는 것을 확인하였으며 Owens-Wendt 식에 산출된 표면 자유에너지도 처리시간이 증가함에 따라 증가되어 미처리 대비 최대 6%의 증가된 것을 보여주었다. 이는 금속섬유의 표면 개질로 고분자 수지와와의 상호 결합력이 향상되었을 것으로 예측하였으며 microdroplet 시험을 통해 금속섬유와 고분자 수지간의 계면 전단강도를 관찰 한 결과 미처리 대비 최대 17%의 계면 접촉력이 증가한 것을 확인하였다. 측정하였다. 따라서 본 실험결과가 추후 금속섬유를 웨어러블 디바이스로 응용하기 위한 금속섬유의 표면 개질에 관한 연구로 다른 고분자 수지와와의 복합응용 시 산소 플라즈마 처리를 통한 금속섬유의 친수화 표면 개질 효과와 에칭효과에 의한 물리적 요철발생으로 다른 수지와와의 접촉면의 증가되는 효과를 가져와 두 소재간의 계면 접촉력 향상에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “미래 스마트웨어 제조를 위한 마이크로팩토리 기반기술 개발(kitech EH-22-0003)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

References

1. Y. H. Kim, J. G. Son, T. H. Hwang and D. S. Kim, *Communications of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, **31**, 78 (2013).
2. H. W. Park, *Fashion information and technology*, **11**, 11 (2014).
3. E. S. Kim, H. C. Yang and M. Jang, *Korea Evaluation Institute of Industrial Technology*, **11**, 43 (2014).
4. Y. Miyahara and K. Kako, *Denryoku Chuou Kenkyusho Hokoku*, **42**, 1 (2010).
5. L. J. Chen, M. Chen, H. D. Zhou and J. M. Chen, *Applied Surface Science*, **255**, 3459 (2008).
6. R. Niemi, A. Mahiout, J. Siivinen, R. Mahlberg, J. Likonen, J. Nikkola, J. Mannila, T. Vuorio, L. S. Johansson, O. Söderberg and S. P. Hannula, *Surface and Coatings Technology*, **204**, 2424 (2010).
7. M. Y. Kwon, D. Y. Lim and S. G. Lee, *Textile Coloration and Finishing*, **34**, 101 (2022).
8. M. H. Park, J. Y. Yun, Y. D. Hahn and Y. S. Song, *Journal of Powder Materials*, **19**, 458 (2012).
9. C. W. Joo and H. H. Choi, *Textile Science and Engineering*, **38**, 342 (2001).
10. M. Y. Kwon, D. Y. Lim and S. G. Lee, *Journal of the Korean fiber society*, **58**, 161 (2021).
11. M. Y. Kwon and S. G. Lee, *Surfaces*, **53**, 594 (2020).
12. M. J. Choi, D. H. Kim and G. N. Kim, *Journal of Adhesion and Interface*, **9**, 9 (2008).
13. Z. F. Li and A. N. Netravali, *Journal of Applied Polymer Science*, **44**, 333 (2003).
14. I. J. Kwon, J. M. Park, D. W. Shin, S. H. Yoo and J. H. Yeum, *Journal of the Korean fiber society*, **53**, 264 (2016).
15. Y. Chen and P. Liu, *Journal of Applied Polymer Science*, **95**, 201 (2004).
16. Y. E. Lee and C. W. Joo, *Textile Coloration and Finishing*, **18**, 20 (2006).
17. C. Friedrich, P. Kritzen, N. Boukis, G. Franz and E. Dinjus, *Journal of Materials Science*, **34**, 3137 (1999).
18. N. Dilsiz and J. P. Wightman, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **164**, 325 (2000).
19. M. Y. Kwon, S. S. Choi, K. J. Kim, S. G. Lee, J. K. Park and C. W. Joo, *Journal of the Korean fiber society*, **40**, 431 (2003).
20. J. P. Craven, R. Cripps and C. Viney, *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, **31**, 653 (2000).
21. B. W. Kim, J. A. Nairn, *Journal of Composite Materials*, **36**, 1825 (2002).
22. A. C. Johnson, S. A. Hayes and F. Jones, *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43**, 65 (2012).
23. N. Graupner, J. Rößler, G. Ziegmann and J. Müssig, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **63**, 133 (2014).
24. A. Awal, G. Cescutti, S. B. Ghosh and J. Müssig, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **242**, 50 (2011).
25. J. H. Kim, D. J. Kwon and J. M. Park, *Composite Research*, **34**, 305 (2021).
26. P. G. Kim, J. H. Jang, J. M. Park and B. S. Hwang, *Journal of Adhesion and Interface*, **8**, 9 (2007).
27. H. W. Park, J. H. Kim and J. M. Park, *Journal of Adhesion and Interface*, **23**, 1 (2022).