

무전해 니켈도금된 탄소섬유강화 에폭시기지 복합재료의 전자파 차폐특성

홍명선^{*,**} · 배경민^{***} · 이해성^{**,†} · 박수진^{***} · 안계혁^{*} · 강신재^{*,****} · 김병주^{*,†}

*전주기계탄소기술원 탄소밸리사업단, **전주대학교 나노신소재과, ***인하대학교 화학과, ****전북대학교 기계설계공학부
(2011년 8월 29일 접수, 2011년 9월 20일 심사, 2011년 10월 13일 채택)

Electromagnetic Interference Shielding Behaviors of Electroless Nickel-loaded Carbon Fibers-reinforced Epoxy Matrix Composites

Myung-Sun Hong^{*,**}, Kyong-Min Bae^{***}, Hae-Seong Lee^{**,†}, Soo-Jin Park^{***},
Kay-Hyeok An^{*}, Shin-Jae Kang^{*,****}, and Byung-Joo Kim^{*,†}

^{*}Carbon Valley R&D Division, Jeonju Institute of Machinery and Carbon Composites, Jeonju 561-844, Korea

^{**}Department of Nano Advanced Materials Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

^{***}Department of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

^{****}Department of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk University, Jeonju 561-756, Korea

(Received August 29, 2011; Revised September 20, 2011; Accepted October 13, 2011)

본 연구에서는 니켈 함량에 탄소섬유강화 에폭시 기지 복합재료의 전자파 차폐효과에 대해 고찰을 위해 탄소섬유 표면에 시간의 변수에 따른 무전해 도금을 실시하였다. 탄소섬유 표면의 특성은 주사전자현미경과 X-선광전자분광법으로 측정하였고 전기적 특성은 4단자법으로 분석을 진행하였다. 복합재료의 전자파 차폐효과는 흡수와 반사 두 가지 방법으로 분석을 진행하였다. 실험 결과로부터 전자파 차폐효과는 탄소섬유 표면에 코팅된 니켈 함량이 증가됨에 따라 순차적으로 증가되는 것이 확인되었으나, 고주파 영역에서는 과량의 니켈 도금이 더 이상의 전자파 차폐효율을 증가시키지 않는 것이 확인되었다. 결론적으로 니켈 함량이 탄소섬유 복합재료의 전자파 차폐효과를 결정하는 요소가 될 수 있다고 판단되나, 특정 주파수마다 최적화된 금속도입 함량에 대한 변수가 있을 수 있다고 판단된다.

In this work, carbon fibers were electrolessly Ni-plated in order to investigate the effect of metal plating on the electromagnetic shielding effectiveness (EMI-SE) of Ni-coated carbon fibers-reinforced epoxy matrix composites. The surfaces of carbon fibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). Electric resistance of the composites was tested using a 4-point-probe electric resistivity tester. The EMI-SE of the composites was evaluated by means of the reflection and adsorption methods. From the results, it was found that the EMI-SE of the composites enhanced with increasing Ni plating time and content. In high frequency region, the EMI-SE didn't show further increasing with high Ni content (Ni-CF 10 min) compared to the Ni-CF 5 min sample. In conclusion, Ni content on the carbon fibers can be a key factor to determine the EMI-SE of the composites, but there can be an optimized metal content at a specific electromagnetic frequency region in this system.

Keywords: carbon fibers, EMI, carbon fiber reinforced plastics

1. 서 론

최근 전기전자, 항공, 전자레인지, 핸드폰 통신, 정밀기기 제품 등의 사용이 급속히 증가하고 있다. 이러한 기기들은 우리에게 편의를 제공하지만 기기로부터 발생하는 전자파는 인체에 악영향을 미쳐 신경 예민, 두통, 어지러움, 생체리듬의 변화 등 여러 가지 질병들을 유발시킬 수 있다고 보고되고 있다[1,2]. 이들 전자파는 인체뿐만 아니라 특정한 주파수를 통해 작동시키는 기기들의 오작동을 유발하여 예기치 못한 사고 및 상황을 유발시킬 수 있다[3]. 현재 이와 같은 전자파 장

에 대한 위험성을 인식하고, 문제의 해결을 위해 전자파 차폐에 관한 많은 연구가 국내외 적으로 진행되고 있는 실정이다[4-6].

인체에 악영향을 주는 현상이나 전기전자 장비로부터 발생하는 불요 전자파가 통신이나 다른 기기에 전자기적 장애를 유발시키는 현상을 전자파 장애(electromagnetic interference, EMI)라 일컬으며, 이러한 EMI의 영향은 전기전자 및 통신 산업에 있어 치명적인 장애 요소로 대두되고 있다[7]. 전자파 장애현상을 방지하기 위해서는 물체에 전자파가 기준치 이상 누설되지 않도록 하는 것이 중요하며, 기기 측에서도 불요 전자파가 침입하지 않게 하는 것이 중요하다.

일반적으로 전자파 차폐 소재로는 금속계 소재가 주목 받아 왔다. 하지만 각종 경량화 추세 및 에너지 저감적 측면에서 금속 대비 경량

† 교신저자(e-mail: kimbj@jmc.re.kr, haeseong@jj.ac.kr)

인 고분자계 소재를 이용한 방법들에 대한 제시들이 이루어지고 있다 [5-7].

하지만 고분자계 소재의 경우 기본적으로 전자파 차폐의 효과가 없으며, 이러한 소재에 차폐능을 부여하기 위해, 전이금속인 Cu, Ag, Ni 등을 코팅시켜 전도성을 가지면서 전자파를 흡수할 수 있는 플라스틱 강화 복합재료를 제조하여 전자파를 차폐시키는 효과를 발휘할 수 있는 재료를 개발하고 있는 추세이다[8-12]. 각 전이금속을 도입시켰을 경우 전자파 차폐능을 향상시킬 수 있으나, Cu는 공기 중에서 쉽게 산화되어 Cu_xO_y 로 변성되어 그 특성을 상실하는 경우가 종종 있으며, Ag는 단가가 비싸기 때문에 비용적인 측면에서 불리하다. 반면 Ni는 비용적인 측면에서 유리하며, 표면산화가 적기 때문에 고분자 기반 전자파 차폐용 소재의 가공용으로 주목 받고 있다[13]. 고분자계 재료는 대부분의 전자파를 투과하는 특성을 가지고 있어 충전재를 함께 사용하는 것이 효과적이다. 지금까지 주로 사용된 전자파 차폐용 복합재료는 고분자 기지체에 각종 금속섬유나 세라믹 분말을 첨가하여 만들었다[14,15]. 복합재료 제작에 사용된 전형적인 기지재료는 에폭시 수지, 페놀수지, 실리콘 고무, 폴리에틸렌 등이 사용되었으며, 첨가재료는 전도성 손실재료로서 알루미늄, 은분말, 은도금 유리구, 흑연 분말 등이 널리 사용되어 왔다[16]. 또한, 자성손실 첨가재료로서 각종 페라이트 분말 및 카본닐 철 분말이 사용되고 있으며[17,18], 유전 손실재료로 lead magnesium niobate-PbTiO₃ (PMN-PT) 세라믹 또는 BaTiO₃ 등이 검토되고 있다[19].

최근 유전성 및 자성 손실을 함유한 복합성의 필러를 개발하고자 전도성 나노 소재인 탄소계 필러를 이용하는 방법이 검토되고 있다. 하지만 탄소계 필러 자체로는 자성 특성이 부족하기 때문에 이러한 약점을 강화하기 위한 방법이 앞서 언급한대로 금속과의 하이브리드를 통해 해결하려는 시도가 이루어지고 있다[20].

본 연구에서는, 대표적인 탄소계 필러소재인 탄소섬유에 Ni 도금을 진행하여 이에 따른 전기적 특성을 고찰하였으며 Ni 도금된 탄소섬유 강화 복합재료의 Ni 함량에 따른 전자파 차폐특성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

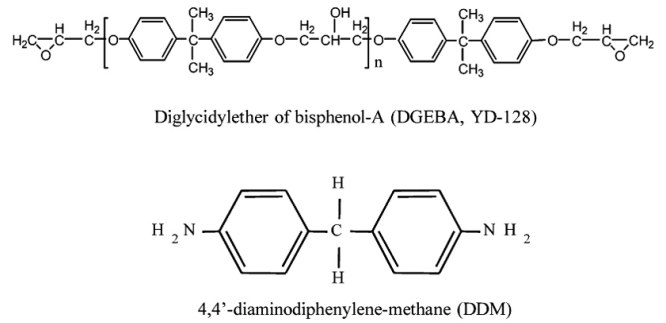
2.1. 재료

본 연구에서 강화재료 사용된 직조 탄소섬유는 TORAYCA[®]에서 생산된 T300 직조 탄소섬유 CO6644B (weight : 300 g/m²)를 사용하였으며, 기지로 사용한 에폭시 수지는 국도화학(주)의 이관능성 에폭시 올리고머인 diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA)계 YD-128 (e.e.w. : 184~190 g/eq, 점도 : 11500~13500 cps)을 사용하였다. 경화제는 TCI사 제품인 4,4'-diaminodiphenylmethane (DDM)을 사용하였으며, YD-128의 고점도를 낮추기 위해 methylethylketone (MEK)을 희석제로 사용하였다. 본 연구에 사용된 에폭시 수지 및 경화제의 화학적 구조는 Scheme 1에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 무전해 Ni 도금

Figure 1은 탄소섬유의 무전해 Ni 도금 과정을 간략히 나타낸 것이다. Figure 1에서와 같이 무전해 Ni 도금은 활성화 처리와 금속도금 과정으로 나누어 처리하였다. 먼저 0.1 M tin chloride (SnCl₂, Aldrich) 용액에서 30 min 동안 활성화시킨 후 세척하고 다시 0.0014 M palladium chloride (PdCl₂, Aldrich)를 이용하여 30 min 동안 활성화시켰다. 이 과정에서 탄소섬유 표면에 Sn/Pd 핵이 형성되며, 탄소섬유 표면에



Scheme 1. Chemical structures of DGEBA and DDM.

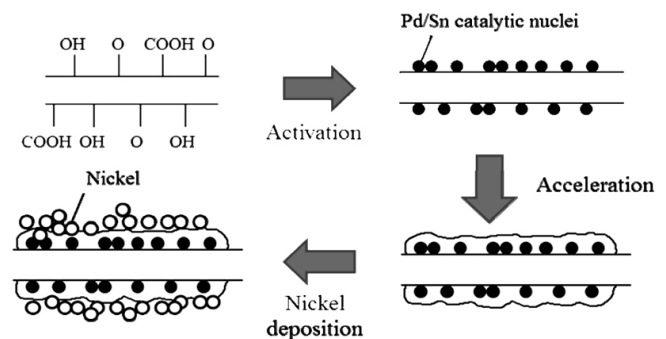


Figure 1. Electroless nickel-loaded processes for carbon fibers.

Table 1. Composition and Condition of Ni-loaded Baths

Compositon	Composition	
	NiCl ₂ · 6H ₂ O	30 g/L
NiSO ₄ · 6H ₂ O	10 g/L	
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ · 1.5H ₂ O	15 g/L	
NaH ₂ PO ₂ · 2H ₂ O	100 g/L	
NH ₄ CL	100 g/L	
PbNO ₃	2.5 g/L	
Condition	pH	8.25
	Temperature (°C)	90
	Time (min)	0.5~10

형성된 Sn/Pd 핵은 무전해 Ni 도금 시 금속도금을 촉진한다[21-23].

본 연구에서 사용된 무전해 Ni 도금욕은 Table 1에 나타내었다. 무전해 Ni 도금욕은 pH는 8.25, 온도는 90 °C의 조건에서 0, 0.5, 3, 5 min 동안 각각 도금 처리하였고, as-received, Ni-CF 0.5 min, Ni-CF 3 min, Ni-CF 5 min, Ni-CF 10 min로 명명하였다. 각 처리 시간에 따른 Ni 도금 양은 원자흡광분석기(atomic absorption spectrophotometer, AAS), (Varian, Australia)를 사용하여 확인하였다.

2.2.2. 시편 제조

에폭시 수지와 경화제 DDM을 당량비 1 : 1로 혼합하여 70 °C에서 녹이고, MEK를 에폭시 수지와 무게비 1 : 1로 첨가하여 희석시켰다. 무전해 Ni 도금 처리한 탄소섬유를 희석시킨 에폭시수지에 함침시킨 후, 탄소섬유를 3 plies로 균일하게 적층하고 hot press를 이용하여 150 °C에서 29.4 MPa의 압력으로 180 min 동안 경화시켜 두께 1.0 mm의 복합재료를 제조하였다. 비교샘플로 에폭시 수지만으로 1.0 mm 판을 제조하였다.

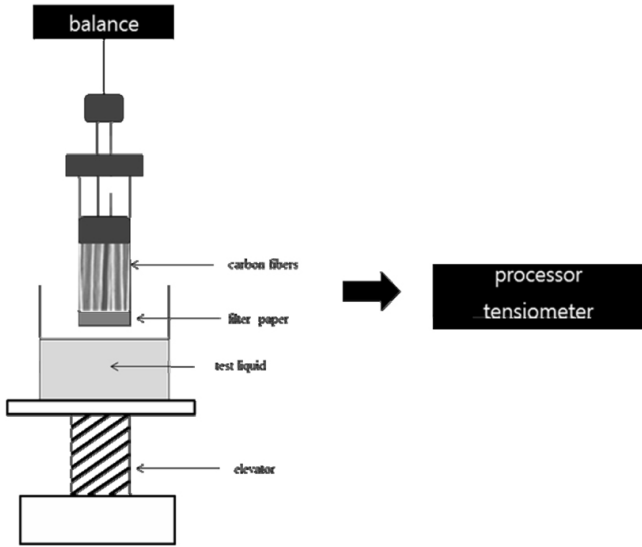


Figure 2. Schematic diagram of the principles of the capillary rise method.

2.2.3. 표면 특성

무전해 Ni 도금한 탄소섬유 표면을 관찰하기 위해 주사전자현미경-분광분석기(scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer, SEM-EDS), (Hitachi, Japan)로 측정하였고, 표면 결합에너지를 분석하기 위해 X-선 광전자분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS), (Thermo Scientific, Germany)를 이용하여 분석하였다. XPS 측정에 사용된 광원은 AlK_α를 사용하였으며, chamber 내의 압력은 10⁻⁸~10⁻⁹ torr로 조절하였다. 탄소섬유 표면의 도금처리에 따른 탄소섬유의 표면 자유에너지 변화는 표면장력계(surface tensiometer), (Krüss, Germany)를 이용하였다. 기기의 모식도는 Figure 2에 나타내었고, 접촉각 측정을 위하여 사용된 젖음액으로는 water와 diiodomethane, ethyleneglycol의 세 가지를 사용하였으며, 그 특성을 Table 4에 나타내었다. 접촉각은 Wicking 방법으로 각각의 젖음액에 대해서 분석하였다[24].

2.2.4. 전기전도도 측정

무전해 Ni 도금시간에 따라 제조 한 탄소섬유강화 에폭시 복합재료의 전기적 특성을 알아보기 위해 4단자법에 의한 면저항 측정기(4-point-probe, Mitsubishi Chemical Co., Japan)를 사용하여 측정하였으며, 섬유의 체적고유 저항치는 다음의 식에 의해 계산하였다.

$$P_v = \left(\frac{E}{I_v} \right) \left(\frac{A}{t} \right) = \frac{R_v A}{t} \tag{1}$$

여기서, E는 시편에 가해진 전압(V), I_v는 측정된 전류(A), R_v는 측정된 저항(R), t는 시편의 두께(cm), 그리고 A는 전극의 접촉 단면적(cm²)을 나타낸다.

체적저항의 측정은 탄소섬유 단섬유에 4단자의 프로브(probe) 직접 접촉시켜 저항값을 측정하였으며, 동일한 섬유에서 3점 이상을 시험하여 유사값에 대해서 평균값을 취하였다.

2.2.5. 전자기파 차폐특성

전자파 차폐 특성은 전자파 차폐 측정기(electromagnetic interference, EMI, AGILENT, USA)를 사용하여 ASTM D4935-89법으로 0.3~3 GHz의

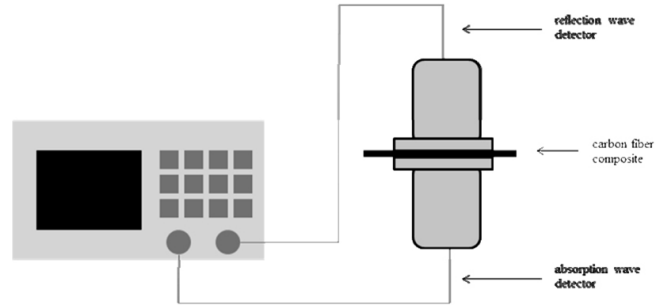


Figure 3. EMI shielding tester.

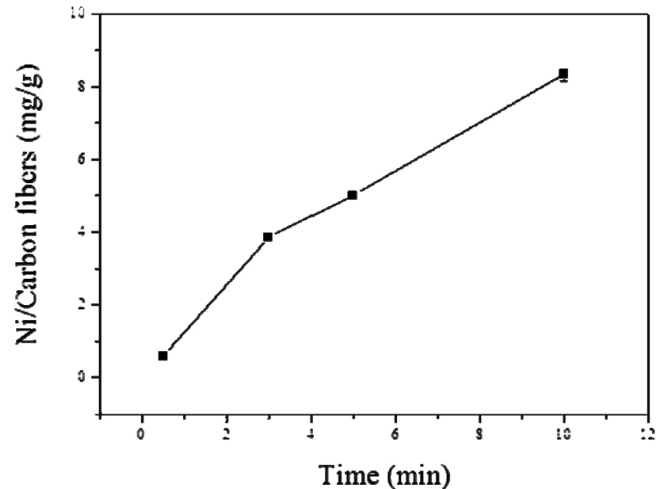


Figure 4. Ni quantification of the nickel-loaded carbon fibers measured by AAS.

주파수 영역에서 탄소섬유강화 복합재료를 분석하였다. 전자파차폐 측정기의 모식도는 Figure 3에 나타내었다. 차폐실험은 각각 전자파 반사 및 흡수 특성을 확인하였으며, 반사 특성을 S11, 흡수특성을 S12로 분리하여 실험을 진행하였다. 각 실험은 3회 반복실험을 통해 안정화가 되는 시점을 기준으로 데이터를 취하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 무전해 Ni 도금

Figure 4는 무전해 Ni 도금 처리로 인한 탄소섬유 표면에 도입된 Ni의 양을 AAS를 이용한 분석한 결과이다. Figure 4에서 보이는 바와 같이 도금처리 시간이 길어질수록 도금된 양이 점점 증가하는 현상이 나타나지만 도금시간 3 min을 기점으로 급격하게 도금이 진행되다가 전착속도가 완만하게 감소되었다. 이는 초기 Sn/Pd 핵을 중심으로 섬유 표면의 거친 면을 채우면서 도금이 진행되다가, 도금시간 3 min을 기점으로 Sn/Pd 핵을 완전히 Ni 층이 덮으면서 금속전착 가속요인이 사라져 완만한 속도로 선형적으로 도금량이 증가된 것으로 판단된다.

Figure 5는 무전해 Ni 도금처리 된 탄소섬유 표면을 SEM을 이용하여 관찰한 결과이다. 보는 바와 같이 미처리 샘플 Figure 5(a)의 경우 표면에 이물질 등이 보이지 않는 깨끗한 표면이 관찰되었다. 반면 무전해 도금을 한 (b)부터 표면에 Ni이 도입된 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 도금시간을 많이 한 (e)의 경우 과량의 Ni이 도입됨으로써 주위에 있는 다른 섬유들과 합사된 것을 관찰 할 수 있었다.

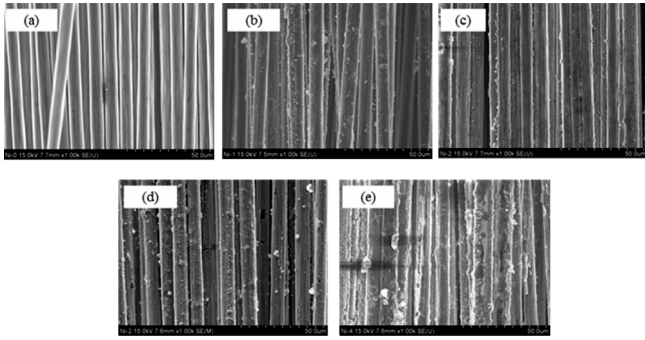


Figure 5. SEM micrographs of (a) as-received, (b) Ni-CF 0.5 min, (c) Ni-CF 3 min, (d) Ni-CF 5 min, and (e) Ni-CF 10 min.

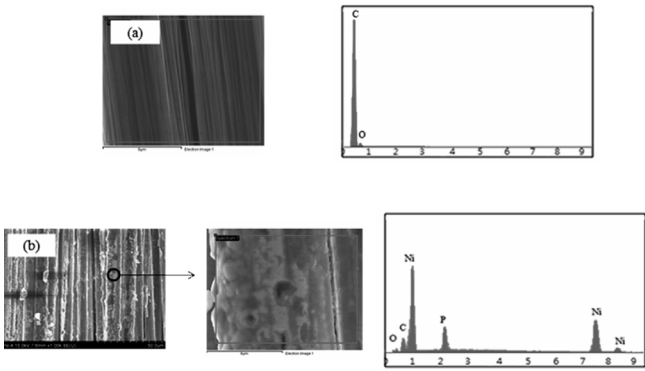


Figure 6. EDS micrographs of nickel-loaded carbon fibers as a function of plating time.

Figure 6은 미처리 탄소섬유 (a)와 10 min Ni 도금처리를 한 탄소섬유의 EDS 분석 (b)의 결과이다. Figure 6 (a)는 탄소와 산소가 관찰되었고, Figure 6 (b)에서는 탄소, 산소가 관찰될 뿐만 아니라 미처리 탄소섬유에 없던 Ni과 인이 관찰되었다. 이는 Table 1에서 만든 도금욕과 미처리된 탄소섬유와 반응하여 나온 생성물로 이것이 탄소섬유 표면에 도입된 것으로 판단된다.

3.2. 표면 특성

무전해 Ni 도금 처리를 한 탄소섬유 표면을 분석하기 위해 XPS를 이용하여 측정하였고, 탄소섬유 표면에 Ni 도금 처리에 관계없이 286.08와 532.08 eV 부근에서 각각 C_{1s}와 O_{1s}의 피크를 관찰할 수 있었다. 또한, 표면처리를 하지 않는 탄소섬유에 비해 탄소섬유 표면에 Ni 도금 처리를 한 것은 Ni_{2p} peak (binding energy, BE = 857 eV)와 P_{2p} peak (BE = 135 eV)가 생성된 것을 알 수 있었다.

무전해 Ni 도금처리에 따른 XPS 표면특성을 관찰하기 위해 미처리 탄소섬유 및 Ni-CF 5 min 샘플의 XPS survey 결과 및 화학적 조성분석결과를 Figure 7과 Table 2에 각각 나타내었다. Figure 7에서 탄소섬유 표면에 무전해 Ni 도금 처리를 하기 전과 후에 데이터를 비교하면 C_{1s} peak는 감소하고 O_{1s} peak는 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 탄소섬유 표면에 C=C 또는 C-H group들이 깨져 C=O 또는 COOH 같은 산소 관능기들이 새롭게 형성됨과 동시에 NiO가 도입되어 O_{1s} peak가 증가하였고, 이로 인해 O_{1s}/C_{1s}의 비가 증가한 것으로 판단된다.

탄소섬유 표면에서 O_{1s} 변화를 살펴보기 위해 sub-peak를 Figure 8에 나타내었다[25,26]. Figure 8(a)에서 보는 바와 같이 무전해 Ni 도금을 하지 않는 탄소섬유의 O_{1s} sub-peak는 COOH (BE = 531.17 eV),

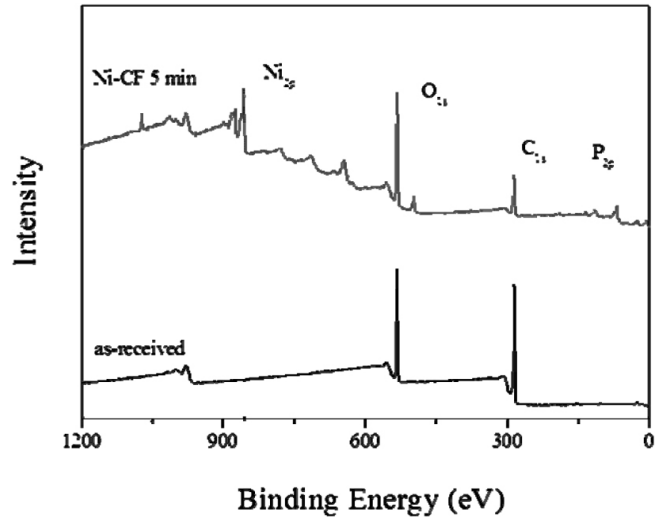


Figure 7. XPS spectra of nickel-loaded carbon fibers as a function of plating time.

Table 2. Elemental Compositions and O_{1s}/C_{1s} Ratio of As-received and Nickel-loaded Carbon Fibers

Time	Elemental compositions			O _{1s} /C _{1s} ratio	Ni _{2p} /C _{1s} ratio
	C _{1s} (%)	O _{1s} (%)	Ni _{2p}		
As-received	75.49	23.49	-	0.311	-
Ni-CF 5 min	43.14	39.60	8.640	0.917	0.200

C=O (BE = 532.55 eV), C-OH (BE = 533.82 eV)의 group들로 구성됨을 확인할 수 있었다[27,28]. 반면, Figure 8(b)에서는 NiO (BE = 530.49 eV), COOH (BE = 531.17 eV), C=O (BE = 532.55 eV), C-OH (BE = 533.82 eV)의 sub-peak가 존재하는 것을 확인할 수 있었다[29]. 상기의 결과에서 알 수 있듯이 Ni 도금처리 한 탄소섬유에서 C-OH, C=O 또는 COOH group은 도금 처리하지 않는 탄소섬유보다 산소 관능기가 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 탄소섬유 표면에 있는 C=C 또는 C-H group들이 무전해 Ni 도금처리로 인해 group이 깨지고 산소 관능기들이 붙었다고 판단된다. Ni 도금된 탄소섬유에서 NiO group이 생성된 것을 볼 수 있는데, 이는 공기 중에 노출됨으로써 Ni과 공기와 산화 반응하여 NiO가 생성되었기 때문인 것으로 판단된다[30].

3.3. 접촉각 측정

고체상에서 표면 및 계면특성은 서로 다른 조성 사이에서 발생하는 분자간의 인력성으로 이는 표면자유에너지라 정의된다. 이러한 계면에서의 결합은 분자간의 인력과 표면자유에너지의 관점에서 기술될 수 있으며, 고체의 표면자유에너지를 측정하는데 이용하는 방법 중 접촉각 측정방법은 여러 공정 중에 일어나는 고체의 흡착, 젖음, 및 접착 현상 등을 예측 가능하게 한다[13].

다음과 같은 식은 Washburn식을 기본으로 한 wicking방법은 면접촉각 측정기로 측정하기 어려운 분체 및 섬유와 같은 물질의 접촉각을 결정하는데 사용되는 방법이다[31-34].

$$\frac{m}{t} = \frac{c \cdot \rho^2 \cdot \gamma_L \cdot \cos \theta}{2\eta} \quad (2)$$

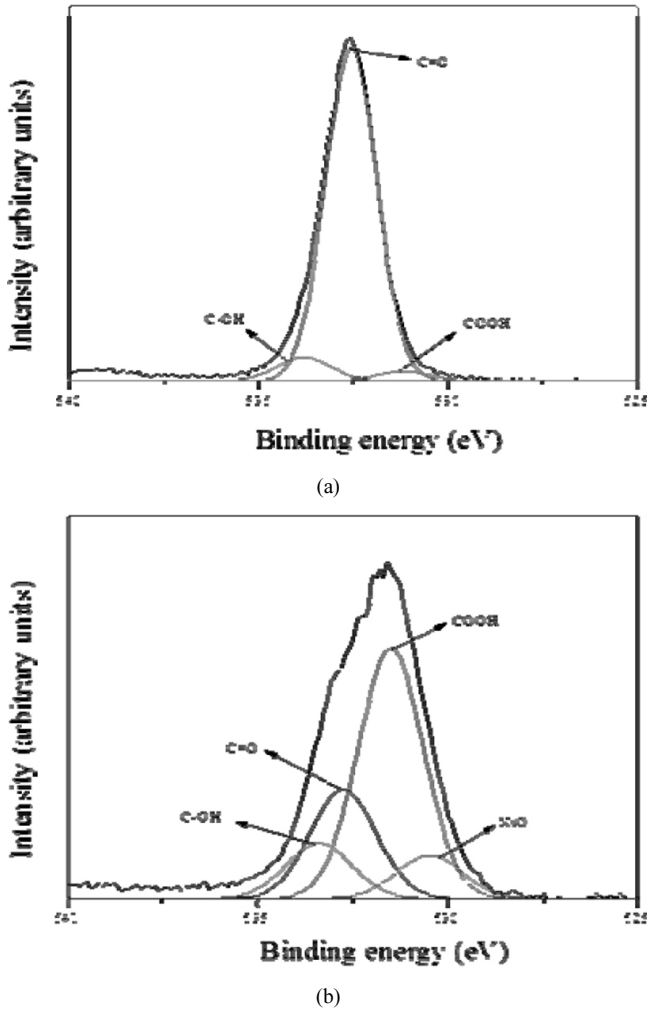


Figure 8. High resolution O_{1s} spectra of the Ni-loaded carbon fibers; (a) as-received and (b) Ni-CF 5 min.

여기서 m 은 시간 t 에 따라서 흡수를 적시는 액체의 질량, c 는 충전도, γ_L 은 액체의 표면 장력, θ 는 흡유와 액체의 접촉각, ρ 와 η 는 각각 액체의 밀도와 점도를 나타낸다.

무전해 Ni 도금 처리를 한 탄소섬유의 표면자유에너지는 water와 diiodomethane, 그리고 ethylene glycol의 젖음액으로부터 측정된 접촉각 결과로부터 Owens[35]와 Wendt[36] 사용하여 구하였으며, 그 식은 아래와 같이 나타내었다.

$$\gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_s^L \gamma_L^L)^{1/2} + 2(\gamma_s^{SP} \gamma_L^{SP})^{1/2} \quad (3)$$

위의 식으로부터 분석한 표면자유에너지를 Figure 9에 나타내었으며, as-received와 비교를 했을 때 Ni-CF 3 min부터 감소함을 볼 수 있었다. 초반 표면자유에너지가 증가했던 이유는 Ni이 탄소섬유 표면에 도입된 것으로 사료되며, 이후 탄소섬유 표면의 도금처리 한 것은 감소하였다. 이는 Figure 5에서 관찰한 결과 도금시간이 증가할수록 섬유간에 뭉침 현상으로 기인된 비극성 요소의 감소 때문으로 판단된다.

3.4. 전기전도도 측정

무전해 Ni 도금 처리를 한 탄소섬유 표면을 시간에 따라 체적저항

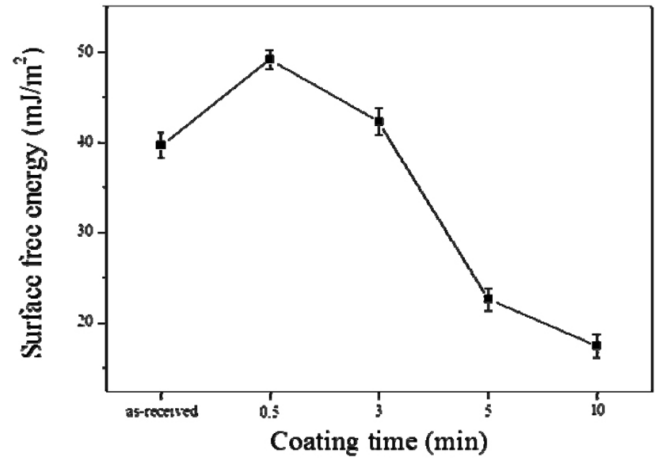


Figure 9. Surface free energy of nickel-loaded carbon fibers as a function of plating time.

Table 3. Volume Resistivity as to the Nickel-loaded Carbon Fibers

Time	Specific resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)
As-received	0.98×10^{-3}
Ni-CF 0.5 min	0.49×10^{-4}
Ni-CF 3 min	0.24×10^{-4}
Ni-CF 5 min	0.15×10^{-4}
Ni-CF 10 min	0.12×10^{-4}

을 알아보기 위해 먼저항 측정기를 사용하여 측정하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 나타난 것처럼, 도금시간이 증가함에 따라 체적 저항이 감소하는 것이 관찰되었다. 특이한 점은 미처리 샘플에 비해 Ni-CF 0.5 min 샘플에서 가장 급격하게 저항이 감소되었으며, 그 이후, 완만하게 저항이 감소되는 것이 관찰되었다. 일반적으로 금속이 도입됨에 있어 초기 형성된 Sn/Pd 핵을 중심으로 섬형(island-like)으로 도입되다가 그 크기가 커지면서 피막형태로 변환되는데 이 시점을 기점으로 표면전도성이 크게 증가된다[13]. 본 연구에서는 Ni-CF 0.5 min까지 저항이 크게 감소되며 그 이후로 완만하게 감소되는 것으로 보아 Ni-CF 0.5 min에서 Ni 피막이 형성되어 전기적 네트워크가 이루어져 결론적으로 저항이 크게 감소된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 앞서 Ni 함량에서 관찰된 것과 상관관계가 있는 것으로 사료된다.

3.5. 전자파 차폐

전자파 차폐는 외부의 전자기파를 실내용 시스템 내로 투과되지 않도록 금속재료에 의해 그 파를 흡수 혹은 반사시키는 것을 말하는데 물체에 입사된 전자기파를 얼마나 많이 감소시키는 것인가로 정의된다[37]. 이론적으로는 차폐면에 수직으로 입사하는 전자기파가 반사 또는 흡수되고, 투과하는 기구에 의해 결정되는데[38], 입사전력 P_1 에 대하여 재료를 통과해 수신되는 전력을 P_2 라 하면 재료의 SE는 다음 식과 같다[39].

$$SE(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (4)$$

재료의 두께와 전기적 특성을 고려한 계산식 (5)와 같이 유도된다 [40,41].

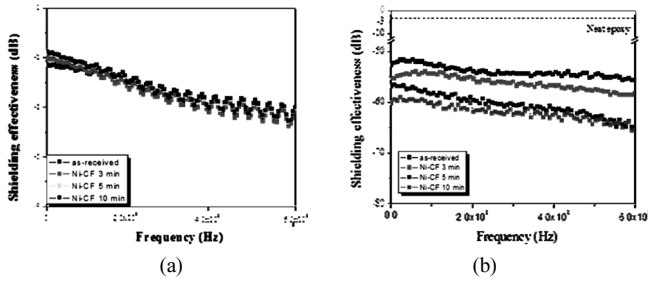


Figure 10. Electromagnetic Interference properties of nickel-loaded carbon fibers composites as a function of plating time. (a) reflection and (b) absorption.

Table 4. Characteristics of Wetting Liquids Used in This Work

Liquid	γ_L^L (mJ/m ²)	γ_L^{sp} (mJ/m ²)	γ_L (mJ/m ²)
Water	21.8	51.5	72.8
Diiodomethane	50.42	0.38	50.8
Ethylene glycol	31.0	16.7	47.7

$$SE(dB) = 20 \log \left[e^{\alpha t} \frac{(1+K)^2}{4K} \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2rt} \right\} \right] \quad (5)$$

$$= 20 \log(e^{\alpha t}) + 20 \log \left[\frac{(1+K)^2}{4K} \right] + 20 \log \left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2rt} \right] \quad (6)$$

이 식에서, K 는 전자파 임피던스(Z_w)와 차폐재료 임피던스(Z_m)의 비, t 는 재료의 두께, r 은 전자파의 전파상수($= a + jB$), α 는 전자파의 감소상수이다.

식 (6)에서 첫째 항을 흡수손실(adsorption loss, A)이라 하고, 두 번째 항을 반사손실(reflection loss, B)이라 하며, 세 번째 항을 다중반사에 의한 보정항(multi-reflection correction, M)이라 부른다. 따라서 전자파 차폐효과는 아래의 식 (7)에 나타난 것처럼 입사하는 전자파의 흡수와 반사, 그리고 매질의 경계면 사이에서의 다중반사의 힘으로 이루어지고, 차폐하고자 하는 전자파의 특성에 따라 이들 각각의 손실을 활용하여 효과적으로 전자파를 차폐시킬 수 있음을 알 수 있다 [42]

$$SE(dB) = A + R + M \quad (7)$$

즉, 전자파 에너지가 차폐재료에 도달하면 반사, 투과 및 흡수의 세 가지 형태로 전자기파의 경로가 분산된다. 여기서 시스템 내부의 기준을 두면 반사 및 흡수를 합해서 차폐란 의미로 쓰인다[43]

Figure 10은 무전해 Ni 도금 된 탄소섬유강화 에폭시 기지 복합재료의 전자파 차폐 결과이다. Figure 10(a)는 주파수영역에 따른 반사된 전자파를 나타낸 것이며 저주파에서 고주파로 갈수록 반사되는 전자파는 증가하는 것이 관찰되었으나 Ni 도입에 따른 차이를 관찰되지 않았다. Figure 10(b)는 주파수영역에 따른 흡수된 전자파를 나타낸 것이며, Ni 도금시간이 증가함에 따라 전자파 흡수효과도 증가함을 관찰할 수 있었다. 순수한 epoxy는 약 2 dB의 전자파 차폐 특성을 나타내었으며, Ni-CF content에 따른 탄소섬유강화 에폭시 기지 복합재료의 as-received는 약 55 dB의 전자파 특성이 관찰되었으며, Ni-CF 10 min은 약 62 dB으로 as-received보다 약 12%의 전자파 차폐 성능

이 향상됨이 관찰되었다. 저주파에서는 Ni 도금양이 증가할수록 전자파 차폐성능이 향상됨을 관찰할 수 있었으며, 고주파 영역에서는 Ni-CF 5 min과 Ni-CF 10 min의 전자파차폐성능은 비슷한 결과가 관찰되었다. 저주파에서는 탄소섬유표면에 과량의 Ni 함량으로 제조하고, 고주파에서는 적절한 금속함량으로 제조하는 것이 좋다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과를 향상시키기 위해 무전해 Ni 도금 표면처리를 하여 전자파 차폐에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다.

XPS 결과를 통해 표면특성을 살펴본 결과, 무전해 Ni 도금된 탄소섬유의 표면에 Ni 함량이 도금시간에 비례하여 증가되는 것이 관찰되었고, 이에 따라 Ni이 도금된 탄소섬유의 체적저항이 감소되는 것을 확인하였다. Ni 도금된 탄소섬유 강화복합재료의 전자파 차폐능은 탄소섬유의 도금시간이 증가됨에 따라 비례적으로 차폐효율이 증가되었으나, 고주파 영역에서는 Ni-CF 5 min 샘플과 Ni-CF 10 min 샘플의 전자파 차폐능에서 큰 차이가 발생되지 않은 것으로 보다 고주파수마다 적정량의 Ni를 도입하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 지식경제부 WPM (World Premier Materials)사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. B. R. Kim, H. K. Lee, S. H. Park, and H. K. Kim, *Thin Solid Films*, **519**, 3496 (2011).
2. A. A. Al-Ghamdi and F. E. Tantawy, *Comp. Part A : Appl. Sci. Manuf.*, **41**, 1693 (2010).
3. C. S. Chen, W. R. Chen, S. C. Chen, and R. D. Chien, *Int. Commun. Heat. Mass.*, **35**, 744 (2008).
4. C. Y. Huang, W. W. Mo, and M. L. Roan, *Surf. Coat. Tech.*, **184**, 123 (2004).
5. Y. Y. Kim, J. Yun, Y. S. Lee, and H. I. Kim, *Carbon Lett.*, **12**, 48 (2011).
6. B. O. Lee, W. J. Woo, H. S. Song, H. S. Park, H. S. Hahm, J. P. Wu, and M. S. Kim, *J. Ind. Eng. Chem.*, **7**, 305 (2011).
7. H. M. Musal and H. T. Hahn, *IEEE Trans. on Magn.*, **25**, 3851 (1989).
8. Q. Liu, D. Zhang, T. Fan, J. Gu, Y. Miyamoto, and Z. Chen, *Carbon*, **46**, 461 (2008).
9. Y. Huang, N. Li, Y. Ma, F. Du, F. Li, and X. He, *Carbon*, **45**, 1614 (2007).
10. Z. Liu, G. Bai, Y. Huang, Y. Ma, F. Li, and T. Guo, *Carbon*, **45**, 821 (2007).
11. S. Bhadra, N. K. Singha, and D. Khastgir, *Curr. Appl. Phys.*, **9**, 396 (2009).
12. M. S. Cao, W. L. Song, Z. L. Hou, B. Wen, and J. Yuan, *Carbon*, **48**, 796 (2010).
13. S. J. Park, M. H. Kim, J. R. Lee, and S. W. Choi, *J. Colloid Interface Sci.*, **228**, 287 (2000).
14. S. J. Park and M. S. Cho, *Carbon*, **38**, 1053 (2000).

15. J. G. Kim, C. H. Chung, and Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 143 (2011).
16. G. Y. Heo, M. K. Seo, S. Y. Oh, K. E. Choi, and S. J. Park, *Carbon Lett.*, **12**, 53 (2011).
17. K. Ishino, *Electro. Ceram.*, **19**, 22 (1988).
18. J. Yacubowicz, M. Narkis, and L. Benguigui, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 459 (1990).
19. K. T. Chung, A. Sabo, and A. P. Pica, *J. Appl. Phys.*, **53**, 6968 (1992).
20. K. Y. Park, J. H. Han, S. B. Lee, and J. W. Yi, *Comp. Part A : Appl. Sci. Manuf.*, **42**, 572 (2011).
21. S. J. Park and J. R. Lee, *J. Mater. Sci.*, **33**, 647 (1998).
22. S. J. Park, B. J. Kim, and J. M. Rhee, *Polymer (Korea)*, **27**, 52 (2003).
23. S. J. Park, Y. S. Jang, and J. R. Lee, *Polymer (Korea)*, **25**, 218 (2001).
24. J. Liu, Y. L. Tian, Y. J. Chen, and J. Y. Liang, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 6199 (2010).
25. F. Lantelme and A. Seghioer, *J. Appl. Electrochem.*, **28**, 907 (1998).
26. T. Kimura, A. Ishiguro, A. Andou, and K. Fujita, *J. Power Sources*, **85**, 149 (2000).
27. S. D. Gardner, C. S. K. Singamsetty, G. L. Booth, G. R. He, and C. U. Pittman, *Carbon*, **33**, 587 (1995).
28. N. M. D. Brown, J. A. Hewitt, and B. J. Meeanan, *Surf. Interface Anal.*, **18**, 187 (1992).
29. N. S. McIntyre and M. G. Gook, *Anal. Chem.*, **47**, 2208 (1975).
30. S. J. Park and Y. S. Jang, *J. Colloid Interface Sci.*, **263**, 170, (2003).
31. S. J. Park, J. S. Oh, and D. H. Suh, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 586 (2003).
32. S. B. Rho and M. A. Lim, *Polymer (Korea)*, **23**, 662 (1999).
33. S. J. Park, J. S. Oh, and D. H. Suh, *Korean J. Chem. Eng. Res.*, **42**, 102 (2004).
34. D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1741 (1969).
35. D. H. Kaeble, *J. Adhes.*, **2**, 66 (1970).
36. R. E. Haufler, *J. Phys. Chem.*, **94**, 8634 (1990).
37. Y. H. Chen, C. Y. Huang, F. D. Lai, M. L. Roan, K. N. Chen, and J. T. Yeh, *Thin Solid Films*, **517**, 4984 (2009).
38. R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **30**, 362 (1988).
39. C. Y. Huang and J. F. Pai, *Eur. Polym. J.*, **34**, 261 (1998).
40. S. S. Tzeng and F. Y. Chang, *Mater. Sci. Eng. A : Struct. Mater.*, **302**, 258 (2001).
41. C. S. Chen, W. R. Chen, S. C. Chen, and R. D. Chien, *Int. Commun. Heat. Mass.*, **35**, 744 (2008).
42. Z. P. Wu, M. M. Li, Y. Y. Hu, Y. S. Li, Z. X. Wang, Y. H. Yin, Y. S. Chen, and X. Zhou, *Scripta Mater.*, **64**, 809 (2011).
43. R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. on Magn.*, **30**, 362 (1988).
44. M. H. Al-Saleh, G. A. Gelves, and U. Sundararaj, *Comp. Part A : Appl. Sci. Manuf.*, **42**, 92 (2011).
45. S. Apollo, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **32**, 991 (1999).