

고효율 전자파 차폐를 위한 이종금속 코팅 탄소섬유 개발

문재정**** . 박옥경***† . 이종희***†

Development of Hybrid Metals Coated Carbon Fibers for High-Efficient Electromagnetic Interference Shielding

Jai Joung Moon****, Ok-Kyung Park***†, Joong Hee Lee***†

ABSTRACT: In this study, a hybrid metals such as copper (Cu) and nickel (Ni) coated carbon fibers (Ni-Cu/CFs) was prepared by wet laid method to develop a randomly oriented sheet material for high-efficiency electromagnetic interference shielding with the enhanced durability. The prepared sheet materials show a high electromagnetic interference shielding efficiency of 69.4 to 93.0 dB. In addition, the hybrid metals coated Ni-Cu/CFs sheets showed very high durability with harsh chemical/thermal environments due to the effective corrosive and mechanical resistances of Ni surface. In this context, the Ni-Cu/CF sheet possesses longer service life than the Cu/CF sheet, that is, 1.7 times longer.

초 록: 본 연구에서는 향상된 내구성을 가진 고효율 전자파차폐용 랜덤배향 시트 소재를 개발하기 위해 구리 (Copper: Cu)와 니켈 (Nickel: Ni)이 코팅된 탄소섬유(Carbon fiber: CF)와 같은 하이브리드 소재를 습식공정을 통해 제조 하였다. 제조된 시트 소재는 69.4~93.0 dB의 높은 전자파 차폐효율을 보여주었다. 또한 하이브리드 금속으로 코팅된 Ni-Cu/CFs 시트는 Ni표면의 유효한 부식저항성과 기계적 저항성 때문에 가혹한 화학적/열적 환경 하에서 매우 우수한 내구성을 보여주었다. 이와 관련하여 Ni-Cu/CF 시트는 Cu/CF 시트와 비교하여 1.7배 긴 수명을 가지는 것을 확인하였다.

Key Words: 전자파 차폐(Electromagnetic interference shielding), 탄소섬유(Carbon fiber), 금속코팅(Metal coating), 복합재료(Composite materials), 내구성(Durability)

1. 서 론

최근 전자, 통신, 운송, 우주항공, 군사장비와 같은 첨단 산업에서는 기존 소재의 한계를 초월하는 신소재 수요 증가와 고성능 소재 개발에 중요성이 증가함에 따라 기존 소재의 성능 한계를 초월한 고성능, 다기능성 소재의 개발 및

응용기술 개발이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 다양한 기능성 소재 중에서도 전기전도성이 부여된 기능성 복합소재는 전자파차폐용 소재(Electromagnetic interference shielding materials)로 주목 시 되고 있다[1-3]. 전자파 차폐 소재는 다양한 전자제품을 동시에 사용하는 현대사회에서 안정적인 제품 구동을 위해 갖추어야 하는 필수 요소로 고

Received 14 May 2020, received in revised from 8 July 2020, accepted 9 July 2020

*Advanced Materials Research Institute for BIN Convergence Technology & Department of BIN Convergence Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

**Department of Nanoconvergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

***Carbon Nano Convergence Technology Center for Next Generation Engineers (CNN), Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

****R&D Center, Clean & Science Co, Ltd., Seoul, Korea

†Corresponding authors: okpark@jbnu.ac.kr (O-K. Park) and jhl@jbnu.ac.kr (J.H. Lee)

려되고 있다. 전자 소자에서 발생하는 전자파 간섭현상은 장치들의 오작동을 일으킬 뿐만 아니라 인체에도 유해한 현상을 일으키는 등 여러 전자파 장애를 동시에 유발 시키고 있다[4,5]. 이와 같은 다양한 전자파 장애에 대한 대책으로 각종 엄격한 규제가 마련되어 전자파를 차폐할 수 있는 전자파 차폐용 소재의 개발은 전자, 우주항공, 군사산업 등 첨단 산업 분야에서 요구가 급증하였다. 특히 전자 장치들의 소형화, 고집적화, 고기능화는 전자파 간섭현상을 더 심각하게 만드는 요인이 되었으며 전자장치의 고 집적화에 의해 발생하는 열에 대해서 안정된 방열특성을 동시에 갖춘 고기능성 전자파 차폐 소재에 대한 시장의 요구가 커지고 있는 상황이다[6,7].

일반적으로 산업계에서는 고 균제성의 습식(Wet-laid) 공정을 통해 고분자 부직포를 제조한 후 Ni 또는 Cu와 같은 전자기 특성이 우수한 금속물질을 다양한 방법을 통해 복합화한 소재 및 고분자 또는 탄소 기지재 표면에 전도성소재(탄소나노튜브, 그래핀, 전도성 고분자, 금속 분말 등)를 혼합/코팅한 하이브리드 복합소재가 전자파 차폐소재로 사용되고 있다[7-11]. 고전도성 물질은 전자기파에 작용하여 유도전류를 생성할 수 있으며 Lenz's 법칙에 의하면 발생된 유도 전류는 전자파의 침투를 약화시키는 효과적인 요인으로 작용한다[6]. 하지만 고분자의 낮은 열안정성 및 금속 입자의 높은 밀도 및 부식특성은 소재의 구동 안정성을 감소시키는 주요 요인이 되며 경량화, 소형화, 슬림화 및 웨어러블화가 주목 시 되는 첨단 산업 분야로의 응용 측면에서 한계점을 가진다. 따라서 최근 상기의 요구 조건을 충족시키기 위한 고내열 박막형 전자파 차폐소재의 개발이 우주항공, 자동차/항공분야, 전자산업 및 군사산업 등의 다양한 첨단 산업분야에서 크게 주목되고 있다.

본 연구에서는 전도성 및 열안정성이 매우 우수한 탄소 섬유(Carbon fiber: CF) 표면에 무전해 내지 전해 연속공정을 통해 Cu와 Ni이 연속적으로 코팅된 하이브리드 소재를 개발하여 내구성 및 전자파 차폐 성능을 크게 향상시킨 전자파차폐용 랜덤배향 시트 소재를 개발하고자 하였다. 전자파 차폐는 반사, 흡수 및 다중반사에 의해서 손실에 의해 발생하며 전자파가 차폐체를 통과하는 동안 반사 및 흡수된 에너지 손실이 많을수록 높아진다. 높은 전기전도성을 가지는 Cu의 경우 도체내에서 자유전자의 이동에 의해 전자파를 반사하는 메카니즘을 통해 전자파를 차폐 하며, Ni과 같이 높은 투자율을 가지는 자성소재의 경우 자기쌍극자(Magnetic dipole)가 전자파의 자기장과 상호작용하여 입사된 에너지를 흡수하는 메카니즘에 의해 전자파를 차폐하게 된다[6,12]. 따라서 Ni-Cu 이중 코팅층을 형성한 CF의 경우 흡수 및 반사에 의한 전자파 차폐 효율이 증가하는 시너지 효과를 나타내어 결과적으로 Cu 단일 금속 코팅층을 형성한 경우와 비교하여 크게 향상된 전자파차폐 효율을 보여주었다. 또한 Ni-Cu 금속 이중 코팅층을 형성한 CFs는

별도의 전도성 입자의 추가적인 첨가 없이 Ni-Cu/CF의 함량 조절만으로도 도전성 조절이 가능하기 때문에 상하부 합지 공정 및 라미네이팅 방식으로 간단하게 전자파차폐 복합재료를 대량생산 할 수 있다는 이점을 나타낼 것으로 고려된다. 이는 전자파 차폐 관련 응용 분야뿐만 아니라 정전기 방지, 방열소재 및 전자사업 응용소재 분야 등에 다양하게 적용될 수 있을 것으로 고려된다.

2. 실험

2.1 Cu 또는 Cu-Ni이 코팅된 탄소섬유 제조

CF (PX35 grade, ZOLTECH, Japan) 표면에 Cu 또는 Ni-Cu 이중금속을 코팅하는 공정은 Fig. 1에서 보여지는 연속 12 Line을 통한 무전해 내지 전해 연속코팅 공정을 통해 수행 되었으며 0.55~1.1 m/min의 라인속도로 금속 코팅 반응을 수행 하였다. CF표면 Cu와 Ni이중 코팅 층을 형성하기 위해서 Cu는 4.5 g/L, Ni은 310 g/L의 용액 농도 하에서 코팅반응을 수행하였으며 각각의 코팅용액 제조 조건은 Table 1에서 보여진다. 코팅반응 수행공정에 있어서 Cu는 pH 12.5에서 37°C에서 6분간 무전해 Cu코팅반응을 수행하였으며, Ni의 경우는 7 V의 정전압을 인가하면서 55°C 온도 하에서 1분간 전해 Ni 도금 반응을 수행하였다. 이때 모든 공정의 와인딩 속도는 0.85 m/min으로 고정하

Table 1. Preparation condition of Cu and Ni coating solution

Division	Cu Coating solution		Ni Coating solution	
	Component	Content (g/L)	Component	Content (g/L)
Metal salt	Cu ion	1.0~5.0	Ni(NH ₂ SO ₃) ₂ /NiCl ₂	300~320/ 20
Complexing agent	EDTA	25	-	
Reducing agent	Formalin	2.5	-	
Stabilizer	TEA/ 2,2'-bipyridine	3/0.01	-	
pH Control agent	NaOH	12	H ₃ BO ₃	40



Fig. 1. Metal coating cylinder system: (a) Cu and (b) Ni coating system

여 진행하였다.

2.2 습식 (Wet-laid) 공정을 이용한 금속 코팅 탄소섬유 (MNP-CF) 시트 제작

Cu 또는 Ni-Cu이 도금된 CF (Cu/CF, Ni-Cu/CF) 시트를 제조하기 위해서 6 mm로 섬유를 절삭하였으며, 수용액 상에서 커팅된 금속 도금 탄소섬유의 분산성 향상을 위해 양친성분산제(Amphiphilic surfactant)인 폴리아크릴아마이드 (Polyacrylamide: PAM)/폴리에틸렌옥사이드(Polyethylene oxide: PEO) 점착제를 섬유 대비 0.3 wt% 첨가하여 3분간 분산 공정을 수행하여 Cu/CF, Ni-Cu/CF가 분산된 혼합물을 제조하였다. 제조된 혼합물에 유기 바인더 섬유인 폴리비닐알코올(Polyvinyl alcohol: PVA) 섬유와 저온 용융섬유인 폴리에틸렌테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate: PET)를 전체 금속코팅 탄소섬유 중량 대비 각각 약 20 wt%씩 첨가한 후 지그 표면에 도포한 후 120°C에서 열처리하면서 1.0 kg/cm²의 압력을 인가하여 MNP-CF 시트를 제작하였다.

2.3 평가 방법

제조된 MNP-CF 시트의 표면 형상은 FE-SEM을 통해 조사하였으며 도금 금속의 종류에 따른 표면저항의 변화는 4-point probe를 사용하여 조사하였으며, 샘플의 두께는 총 9개의 샘플을 조사하여 평균 두께를 측정해 분석에 사용하였다(CF: 92.1 ± 5.86 μm, Ni-CF: 117.6 ± 8.1 μm, Ni-Cu/CF: 135.6 ± 9.5 μm). 제조된 MNP-CF 시트의 전자파 차폐 특성은 ASTM D4935 규정에 따라 조사하였으며 식 (1)을 사용하여 차폐효율(Shielding effectiveness (SE))를 계산하였다.

$$SE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

여기서 P_1 와 V_1 는 샘플 로딩 후 측정된 전력과 전압, P_2 와 V_2 는 샘플로딩 전의 전력과 전압 값을 나타낸다. 상기 전자파 차폐소재의 내식성과 내습성 또한 본 연구를 통해서 조사하였으며 내식성은 KS D9520를 준용하여 Cu/CF 시트 또는 Ni-Cu/CF 시트에 6시간 동안 염수를 분사한 후 건조한 샘플을 사용하여 조사하였다. 내습성은 전지.전자분야의 내습성 시험 방법인 KS C IEC 60068-2-78에 따라 85°C상에 86시간 방치한 샘플을 제조하여 특성을 조사하였다. 또한 해당 소재의 예상수명을 계산하기 위해서 열화 가속시험을 수행하여 125°C, 155°C, 175°C상의 가속조건 하에서 차폐능 측정 영역의 중간지점인 800 MHz에서 차폐능이 50 dB이 되는 감소시간을 측정하였으며 (신뢰성 평가 기준 RS-KCL-0015) 수명분포를 와이블(Weibull) 분포를 적용하여 평균 고장시간을 산출하였다.

열화 가속조건 하에서의 계산된 수명을 실사용 조건인 25°C 하에서 사용 수명으로 전환하기 위해서 식 (2)에서 보여지는 Arrhenius 관계식을 적용하여 가속모델 및 가속계

산을 산출하였으며, 추세선 외삽을 통해 25°C에서 이론적 사용시간을 계산하였다.

$$\gamma = A \exp \left[\frac{E_a}{RT} \right] \quad (2)$$

식 (2)에서 r 은 속도 상수, E_a 는 활성화 에너지, R 은 기체 상수, T 는 절대온도, A 는 빈도계수를 의미한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 MNP-CF 시트의 표면 구조

CF 시트와 Cu 또는 Cu와 Ni의 이중 코팅 층을 형성한 CF로 제조한 시트의 표면 구조 및 단면형상을 FE-SEM을 통해서 조사하였다. Fig. 2의 (b)와 (c)에서 확인할 수 있듯이 균일한 두께의 CF가 고분자 바인더에 의해 연결된 구조를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Cu 또는 Ni-Cu 코팅 공정 후 CF 표면에 금속 코팅층의 형성 유무는 Fig. 2의 (f)와 (i)에서 확인하였다. Cu/CF의 단면사진(Fig. 2(f))에서 CF 표면을 따라 매우 균일한 두께로 Cu 코팅층이 형성된 것을 보여주며 Cu와 Ni을 연속적으로 코팅하여 이중 코팅층을 형성한 Ni-Cu/CF 또한 Cu층 위로 Ni 코팅층이 균일하게 형성된 것을 Fig. 2(i)에서 확인하였다. 이와 같은 결과를 통해 본 연구에서 제안한 연속 코팅 공정을 통해 균일한 이중층(Double layer)의 금속 코팅층이 형성된 것을 확인하였다.

3.2 MNP-CF 시트의 표면저항

금속 코팅층의 종류가 제조된 CF 시트의 표면저항에 미치는 영향을 확인하기 위해 4-point probe 장치를 통해 조사하였으며 측정된 표면저항 값은 Fig. 3과 Table 2에서 보여

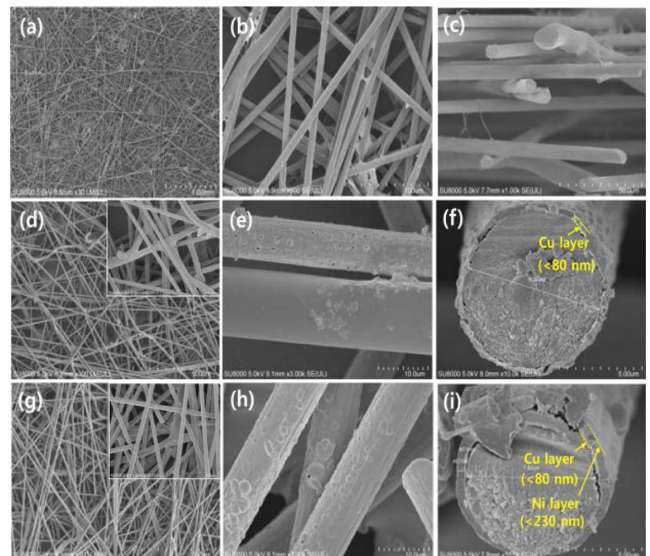


Fig. 2. FE-SEM image: (a-c) CF sheet, (d-f) Cu/CF sheet and (g-i) Ni-Cu/CF sheet

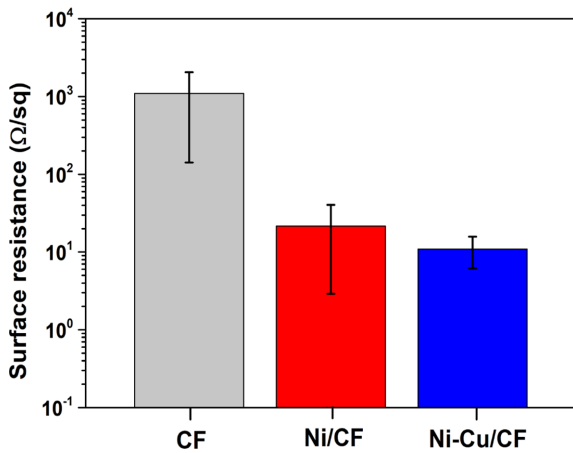


Fig. 3. Surface resistance of CF, Ni/CF and Ni-Cu/CF sheet

Table 2. Surface resistance of CF, Ni/CF and Ni-Cu/CF sheet

Sample	Surface resistance (Ω/sq)
CF	1100 ± 95.8
Ni/CF	21.67 ± 18.8
Ni-Cu/CF	10.96 ± 4.8

진다. Table 2의 결과에서 확인할 수 있듯이 CF 시트의 경우 약 1,100 Ω/sq의 표면저항 값을 나타낸 반면 금속 코팅층을 형성한 CF (Cu/CF, Ni-Cu/CF) 시트는 CF 시트와 비교하여 크게 감소한 표면저항 값을 나타내었다. Ni 단일층을 최 외각 표면 코팅 층으로 형성한 경우 CF 시트와 비교하여 약 53배 감소한 표면저항 값을 나타내었으며 Ni-Cu 이중 금속코팅 층을 형성한 경우는 동일한 Ni이 최외각 표면 코팅층을 형성함에도 불구하고 단일 금속층을 형성한 CF 시트와 비교하여 약 2배 감소한 표면저항 값을 나타내었다. 이는 내부 코팅층으로 형성시킨 Cu 코팅층의 높은 전기전도도 특성 때문인 것으로 고려된다[13].

3.3 전자파 차폐 효율

급격하게 감소된 표면저항이 전자파 차폐 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해서 Cu/CF, Ni-Cu/CF 시트의 전자파 차폐 성능을 조사하였으며(Fig. 4), 식 (1)을 통해 계산된 결과는 Table 3에서 보여진다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 단층의 Cu 코팅층을 형성한 Cu/CF는 53.4~58.8 dB의 전자파 차폐 성능을 보인 반면 Ni-Cu 이중 코팅층을 형성한 경우 69.4~93.0 dB의 우수한 전자파 차폐 성능을 나타내었다. 높은 전기전도성을 가지는 Cu의 경우 반사 손실 메커니즘을 통해 전자파를 주로 차폐 하며, Ni과 같이 높은 투자율을 가지는 도체의 경우 흡수 손실 메커니즘에 의해 전자파를 차폐한다[6,8]. 따라서 Ni-Cu 이중 코팅층을 형성한 CF의 경우 표면 Ni 코팅층에서 미처 흡수하지 못한 전자파를 내부 Cu 코팅층에서 2차적으로 차폐 및 반사하는 현상

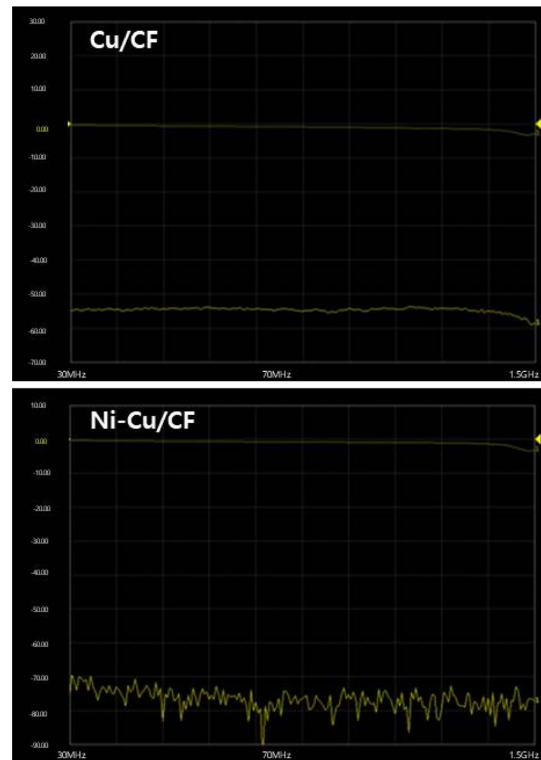


Fig. 4. Electromagnetic interference shielding effectiveness curve of Cu/CF and Ni-Cu/CF sheet (range: 30 MHz~1.5 GHz)

Table 3. Electromagnetic interference shielding effectiveness of Cu/CF and Ni-Cu/CF sheet

Sample	Division	Frequency (MHz)	Electromagnetic interference shielding effectiveness (dB)
Cu/CF	Maximum shielding effect	1500.00	58.8
	Minimum shielding effect	1095.75	53.4
Ni-Cu/CF	Maximum shielding effect	882.60	93.0
	Minimum shielding effect	30.00	69.4

과 랜덤 하게 배향된 Ni-Cu/CF에서 야기되는 산란현상으로 인해 다중반사 현상이 발생하여 결과적으로 Cu단일 금속 코팅층을 형성한 경우와 비교하여 복합적인 에너지 손실반응에 의해 크게 향상된 전자파차폐 효율을 나타낸 것으로 고려된다.

3.4 전자파 차폐소재의 내식성 및 내습성

금속소재는 높은 전기전도도를 가져 우수한 전자파 차

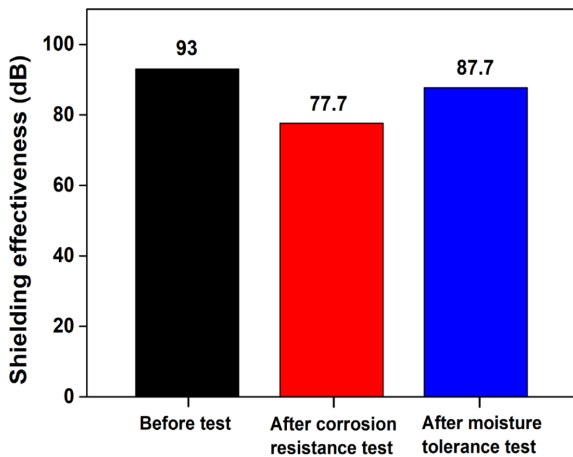


Fig. 5. Electromagnetic interference shielding effectiveness of Ni-Cu/CF sheet after corrosion resistance and moisture tolerance test

폐 효율을 나타내지만, 부식반응에 의해 형성되는 산화그룹 및 비절연성 염(Salt) 물질의 형성 때문에 전기전도도가 급격하게 감소하면서 전자파 차폐효율 또한 감소한다는 문제점을 가진다. 전자소재 및 소자 분야에서 우수한 내구성은 상업화 및 제품화를 위해 고려해야 할 중요한 요인이다. 따라서 본 연구에서는 Ni-Cu 이중 코팅 금속층을 형성한 전자파 소재의 내구성에 영향을 미치는 환경적 요인인 수분과 부식에 대한 개발소재의 안정성을 평가하기 위해서 내식성 평가와 내습성 평가를 각기 수행하였으며 측정된 결과는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. Ni-Cu/CF 시트를 염수에서 6시간 노출시킨 후 건조한 샘플의 전자파 차폐 효율을 재 측정한 결과 약 77.7 dB가 감소한 결과를 보였으며, 수증기상에 86시간 방치 후 건조한 샘플의 경우 약 87.7 dB로 각각 약 16%와 11%가 감소한 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과를 통해 CF 표면에 금속 코팅층을 형성하였음에도 불구하고 표면 Ni 코팅층이 높은 부식 저항성을 가지기 때문에 Ni-Cu/CF 시트가 우수한 내환경성을 가지는 것을 확인할 수 있었다[14-16].

3.5 열화 가속 시험 통한 수명 예측

전자장치의 기준 사용조건보다 높은 온도의 가혹조건하에서 Cu/CF 또는 Ni-Cu/CF 시트의 전자파 차폐효율이 50 dB가 되는 시간을 측정 및 분석하여 제품의 사용수명을 추정하기 위한 열화 가속시험을 수행하였다. 첨단 소자의 경우 소형화 및 고집적화에 의해 제품구동 시 열이 발생하게 되며, 이때 발생된 열은 회로의 파괴 및 재료의 열 변형 현상을 야기해 제품의 주요 고장 원인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 온도에 의한 전자파 차폐 소재의 열화거동을 Arrhenius 모델을 사용한 식 (2)의 관계식을 통해 가속모델 및 가수계산을 산출하여 열화 시험시간을 독립변수로, 전자파 차폐 효율을 종속 변수로 회귀분석식을 구하여 추세

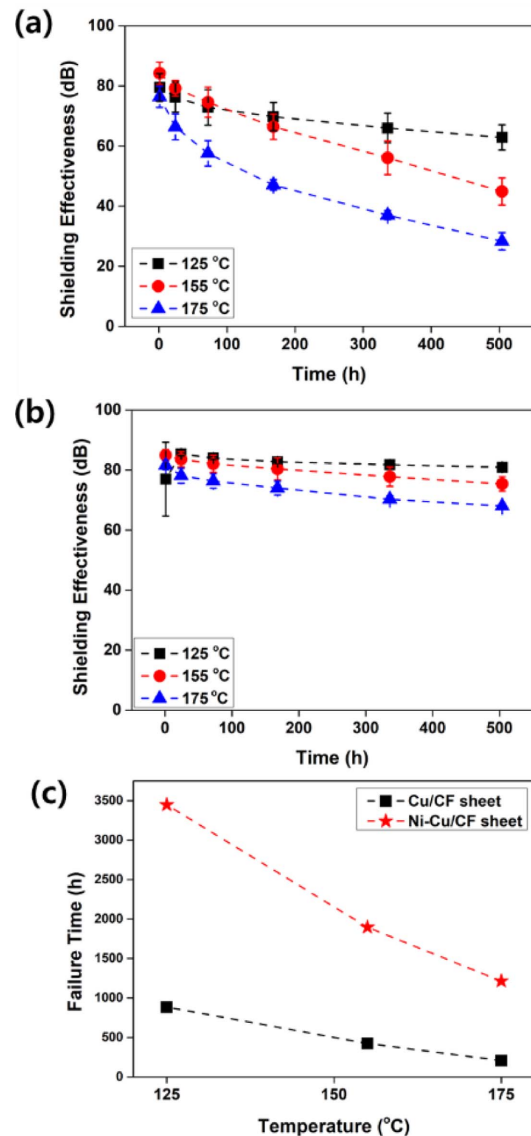


Fig. 6. Failure time of Cu/CF (a) and Ni-Cu/CF sheet (b) on the thermal degradation acceleration test and (c) expected failure time of Cu/CF and Ni-Cu/CF sheet

선 외삽을 통해 각각의 차폐 효율이 50 dB 이하로 감소하는 시간을 추정 하였으며 추정 고장 시간은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6(a)와 (b)는 125°C, 155°C, 175°C 상에서 시간에 따라 감소하는 전자파 차폐 효율을 측정하여 도식화한 결과를 보여준다.

Fig. 6(a)와 (b)의 결과에서 확인할 수 있듯이 각각의 온도 조건하에서 Cu/CF 시트와 비교하여 Ni-Cu/CF 시트의 차폐 효율 감소속도가 매우 낮은 것을 보여준다. 또한 이 결과를 토대로 계산한 고장시간 추정결과(Fig. 6(c)) 또한 Ni-Cu/CF 시트가 Cu/CF 시트와 비교하여 크게 향상된 내구성을 가지는 것을 확인하였다.

Fig. 6에서 도출된 고장시간의 수명분포를 와이블 분포

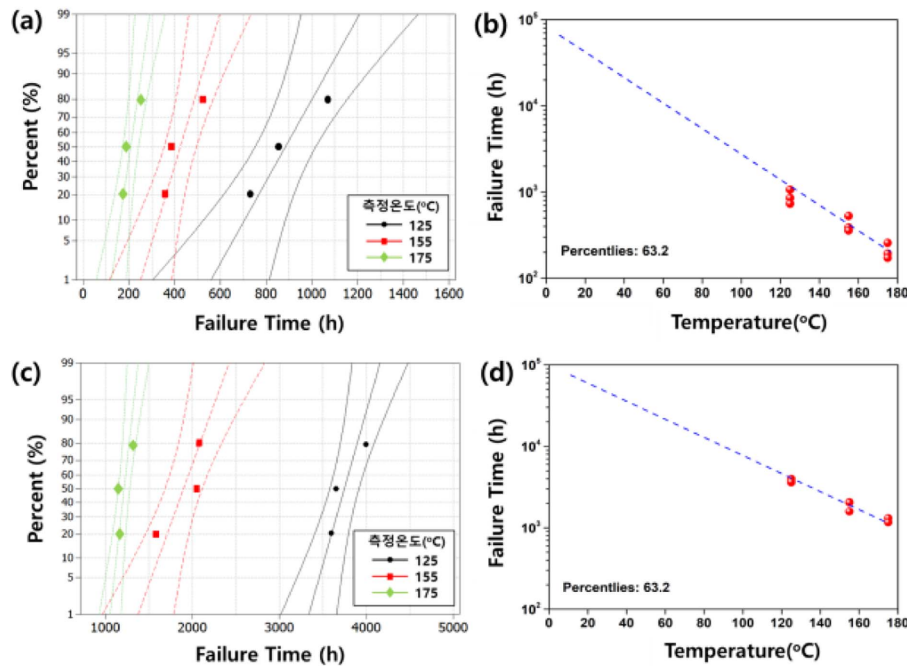


Fig. 7. Probability plot and relation plot (fitted Arrhenius) for failure time of Cu/CF (a, b) and Ni-Cu/CF sheet (c, d)

Table 4. Expected life-time of Cu/CF and Ni-Cu /CF sheet (Operating temperature: 25 °C)

Sample	Expected life-time (year), Reference condition (25°C)
Cu/CF	7.2
Ni-Cu/CF	12.2

를 적용하여 평균 고장시간을 산출하였으며, 가속조건하에서의 예상수명 결과값을 실사용 조건으로 전환하기 위해서 Arrhenius 관계식을 적용하여 추세선 외삽을 통해 25°C 온도 하에서 이론적 사용시간을 식 (2)를 통해 계산하였다. 계산된 Cu/CF와 Ni-Cu/CF 시트의 각각의 예상 수명시간 분포는 Fig. 7에서 보여지며, Fig. 7(b)와 (d)의 결과에 바탕을 둔 추세선 외삽을 통해 계산된 계산된 Cu/CF와 Ni-Cu/CF 시트의 예상 수명은 Table 4에서 보여진다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 25°C 하에서 Cu/CF 시트의 경우 약 7.2년의 예상 수명을 나타낸 반면 Ni-Cu/CF 습식부식포의 경우 약 1.7배 향상된 12.2년의 예상수명을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유(CF) 표면에 무전해 내지 전해 연속공정을 통해 Cu와 Ni이 연속적으로 코팅된 하이브리드 소재를 개발하여 내구성 및 전자파 차폐 성능을 크게 향상시킨 전자파차폐용 랜덤배향 시트 소재를 개발하고자 하였다. Cu 단일 금속 코팅층을 형성한 CF 시트와 비교하여

Ni-Cu을 동시에 코팅한 CF를 사용하여 제조한 시트가 2중 차단 효과로 인해 향상된 전자파 차폐 효율을 보여주었으며 69.4~93.0 dB 높은 전자파 차폐효율을 나타내었다. 또한 표면 코팅층으로 형성한 Ni 코팅층이 높은 부식 저항성을 가지기 때문에 부식환경하에서도 우수한 내환경성을 가지는 것을 확인하였으며 결과적으로 사용수명이 급격하게 향상된 결과를 보여주었다. 본 연구에서 개발된 Ni-Cu/CF 시트는 뛰어난 전자파 차폐 효율, 높은 열 안정성과 내화특성을 나타내므로 방열 특성과 전자파차폐 특성을 동시에 요하는 다양한 산업분야에서 그 응용가능성이 주목될 것으로 고려된다.

REFERENCES

- Lee, S.-H., and Oh, I.-K., "Hybrid Carbon Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding," *Composites Research*, Vol. 29, No. 4, 2016, pp. 138-144.
- Xing, D., Lu, L., The, K.S., Wan, A., Xie, Y., and Tang, Y., "Highly Flexible and Ultra-thin Ni-plated Carbon-Fabric/Polycarbonate Film for Enhanced Electromagnetic Interference Shielding," *Carbon*, Vol. 132, 2018, pp. 32-41.
- Lee, K., Lee, J., Jung, B.M., Lee, S.B., and Kim, T., "Dispersion Characteristics of Magnetic Particle/Graphene Hybrid Based on Dispersant and Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Composites," *Composites Research*, Vol. 31, No. 3, 2018, pp. 111-116.
- Choi, J.R., Jung, B.M., Choi, U.H., Cho, S.C., Park, K.H., Kim, W.-J., Lee, S.-K., and Lee, S.B., "Characterization of FeCo Mag-

- netic Metal Hollow Fiber/EPDM Composites for Electromagnetic Interference Shielding,” *Composites Research*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 333-339.
5. Singh, S., and Kappor, N., “Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs,” *Advances in Biology*, Vol. 2014, 2014, pp. 198609.
 6. Zhang, J., Li, J., Tan, G., Hu, R., Wang, J., Chang, C., and Wang, X., “Thin and Flexible Fe-Si-B/Ni-Cu-P Metallic Glass Multi-layer Composites for Efficient Electromagnetic Interference Shielding,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9, No. 48, 2017, pp. 42192-42199.
 7. Wang, L., Qiu, H., Liang, C., Song, P., Han, Y., Han, Y., Gu, J., Kong, J., Pan, D., and Guo, Z., “Electromagnetic Interference Shielding MWCNT-Fe₃O₄@Ag/Epoxy Nanocomposites with Satisfactory Thermal Conductivity and High Thermal Stability,” *Carbon*, Vol. 141, 2019, pp. 506-514.
 8. Ji, K., Zhao, H., Zhang, J., Chen, J., and Dai, Z., “Fabrication and Electromagnetic Interference Shielding Performance of Open-Cell Foam of a Cu-Ni Alloy integrated with CNTs,” *Applied Surface Science*, Vol. 311, 2014, pp. 351-356.
 9. Chen, Z., Xu, C., Ma, C., Ren, W., and Cheng, H.-M., “Light-weight and Flexible Graphene Foam Composites for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding,” *Advanced Materials*, Vol. 25, No. 9, 2013, pp. 1296-1300.
 10. Sankaran, S., Deshmukh, K., Ahamed, M.B., and Pasha, S.K.K., “Recent Advances in Electromagnetic Interference Shielding Properties of Metal and Carbon Filler reinforced Flexible Polymer Composites: A Review,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 114, 2018, pp. 49-71.
 11. Tzeng, S.-S., and Chang, F.-Y., “EMI Shielding Effectiveness of Metal-coated Carbon Fiber-reinforced ABS Composites,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 302, No. 2, 2001, pp. 258-267.
 12. Su, Y., Zhou, B., Liu, L., Lian, J., and Li, G., “Electromagnetic Shielding and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P and Ni-P-Cu Coating on Polymer/Carbon Fiber Composites,” *Polymer Composite*, Vol. 36, No. 5, 2015, pp. 923-930.
 13. Zheng, P.Y., Deng, R.P., and Gall, D., “Ni doping on Cu Surfaces: Reduced Copper Resistivity,” *Applied Physics Letters*, Vol. 105, 2014, pp. 131603.
 14. Zhang, W.X., Jing, Z.H., Li, G.Y., Jiang, Q., and Lain, J.S., “Electroless Ni-P/Ni-B Duplex Coating for Improving the Hardness and the Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy,” *Applied Surface Science*, Vol. 254, No. 16, 2008, pp. 4949-4955.
 15. Liu, Y., and Zhao, Q., “Study of Electroless Ni-Cu-P Coating and Their Anti-Corrosion Properties,” *Applied Surface Science*, Vol. 228, No. 1-4, 2004, pp. 57-62.
 16. Caranza, R.M., and Robríguez, M.A., “Crevice Corrosion of Nickel-based Alloys Considered as Engineering Barrier of Geological Repositories,” *npj Materials Degradation*, Vol. 1, 2017, pp. 9.