

## 무전해 니켈 도금된 탄소나노튜브의 전자파 차폐 특성

김도영 · 윤국진 · 이영석<sup>†</sup>

충남대학교 바이오응용화학학과  
(2014년 3월 10일 접수, 2014년 4월 3일 심사, 2014년 4월 16일 채택)

### Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Electroless Nickel Plated Carbon Nanotubes

Do Young Kim, Kug Jin Yun, and Young-Seak Lee<sup>†</sup>

Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea  
(Received March 10, 2014; Revised April 3, 2014; Accepted April 16, 2014)

본 연구에서는 탄소나노튜브의 전자파 차폐 성능을 향상시키고자 무전해 도금법을 이용하여 다중벽 탄소나노튜브에 니켈을 도입하였다. 니켈 도금된 다중벽 탄소나노튜브의 물리적 특성은 고분해능주사전자현미경, 열중량분석기, 표면 저항측정기, 전자파 차폐능 분석기를 이용하여 분석하였다. 니켈 도금된 다중벽 탄소나노튜브의 전자파 차폐 효율은 800 MHz 영역에서 16 dB로 측정되었으며 활성화 처리된 다중벽 탄소나노튜브에 비하여 최대 1.6배 증가하였다. 또한, 평균 표면 저항 역시 70  $\Omega$ /sq로 활성화 처리된 다중벽 탄소나노튜브에 비하여 최대 56% 감소한 수치를 나타내었다. 이러한 결과는 니켈 도금 함량에 비하여 표면의 도금 형태가 전자파 차폐 효율에 더 많은 영향을 끼치기 때문인 것으로 판단된다.

In this study, multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were treated with nickel by electroless plating method for improving electromagnetic interference (EMI) shielding performance of MWCNT. The physical properties of electroless plated MWCNT were analyzed by using ultra-high resolution scanning electron microscope (UHR-SEM), thermogravimetry (TGA), sheet resistance analyzer and EMI shielding analyzer. EMI shielding efficiencies of nickel electroless plated MWCNT were measured to be 16 dB from 800 MHz band, which was 1.6 times increased compared to that of the activated MWCNT. Also, the average sheet resistance of nickel electroless plated MWCNT was measured to be 70  $\Omega$ /sq, which was 56% decreased compared to that of the activated MWCNT. This result could be attributed to the plating morphology on the surface of MWCNT. This result could be attributed to uniformity of plating morphology on the surface, which has more effect on EMI shielding efficiency than the amount of nickel plating.

**Keywords:** nickel; electroless plating; carbon nanotubes; electromagnetic interference shielding

### 1. 서 론

산업이 발달하면서 전자기기의 사용량이 증가하였으며, 이에 따라 전자파의 발생량 또한 함께 증가하고 있다. 전자파는 인체에 직접적인 영향을 미쳐 신체장애를 일으키거나, 산업 현장에서 이용되는 기계들의 오작동을 초래할 수 있다. 특히, 다른 일반적인 공해와는 달리 인간의 감각기관으로 확인이 어렵기 때문에 그 해가 더 심각하다[1-3]. 최근 전자파의 유해성이 널리 알려지면서 세계 각국의 전자파 허용 규제치가 엄격해지고 있으며, 이에 따라 고성능의 전자파 차폐재가 요구되고 있다. 현재 주로 이용되는 전자파 차폐재료는 높은 직류 전도도와 표면 반사율을 지닌 도전성 금속

재료(Ni, Cu, Al, Zn, Fe 등)가 있다. 그러나 금속재료는 가공이 어렵고 단가가 높으며, 공기 중의 산소로 인한 부식을 극복하기 어려운 문제가 있다[4]. 이러한 단점을 극복하기 위하여 전도성 고분자, 탄소재료 등 새로운 재료에 대한 연구가 진행되고 있다. 그중 탄소재료는 금속에 가까운 전기 전도도와 뛰어난 강성, 낮은 비중 등 여러 이점을 지니고 있으며, 대표적인 재료로 탄소나노튜브, 탄소섬유, 카본블랙 등이 있다. 상기 나열된 탄소재료 중 CNT는 고탄성, 고강도, 높은 내열 특성, 높은 열전도도, 높은 전기전도도 등의 잠재적 물성으로 나노 스케일의 전기·전자 디바이스, 나노 센서, 고기능 복합체 등의 다양한 분야에서 응용되고 있다[4-8]. CNT의 전기적 특성을 보다 향상시키기 위한 방법으로는 관능기 부여, 전해 도금, 무전해 도금 등의 표면 처리 기술이 있다. 표면 처리 기술은 기질 재료의 특성을 유지하면서 표면에 새로운 기능을 부여하는 기술로서 기능성 소자 혹은 기능성 박막 물질에 주로 이용되고 있다[9]. 대표적 표면 처리 기술 중 하나인 무전해 도금법은 환원제의 산화반응으로 방출되는 전자가 도금 용액 내의 금속 이온을 환원시키고, 도금 대상의 표면에 금속 피막을

<sup>†</sup> Corresponding Author: Chungnam National University, Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Daejeon 305-764, Korea  
Tel: +82-2-970-6602 e-mail: youngslee@cnu.ac.kr

Table 1. Preparation Conditions for Nickel Electroless Plated MWCNT

sample name	reaction temperature (°C)	pH	reaction time (min)
N1			1
N3			3
N5	60	9.0	5
N7			7
N9			9

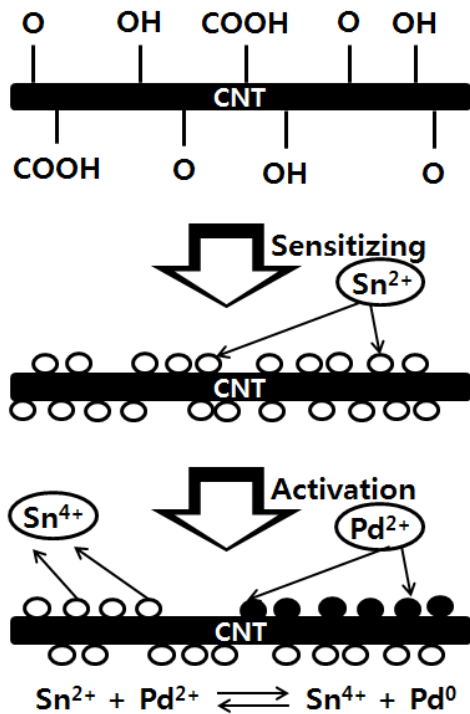


Figure 1. Suggested mechanism for sensitizing and activation of MWCNT.

석출시키는 방법이다. 무전해 도금법은 전해 도금법과는 달리 원하는 재료에 선택적으로 도금이 가능하며 복잡한 모양에도 균일한 도금이 가능하다. 또한 도금된 피막은 균일하고 치밀한 막을 가지며 내식성, 내마모성, 경도 등을 높일 수 있다는 장점이 있다[10-12].

본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)의 전자과 차폐 성능을 향상시키고자 무전해 도금법을 이용하여 MWCNT에 니켈을 도입하였다. 또한, 니켈 도금된 MWCNT의 전자과 차폐 특성 평가를 통하여 무전해 도금이 MWCNT의 전자과 차폐 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 무전해 니켈 도금을 위한 CNT의 표면 활성화 처리

MWCNT에 니켈을 도입하기 위한 표면 전처리 과정을 아래와 같이 3단계로 나누어 진행하였다. 첫 번째로, MWCNT (CM-350, Hanwhanano-tech, Korea)를 10 wt% nitric acid (60%, Samchun, Korea) 수용액에 넣고 초음파 수조(power sonic, Hwashin Instrument, Korea)를 이용하여

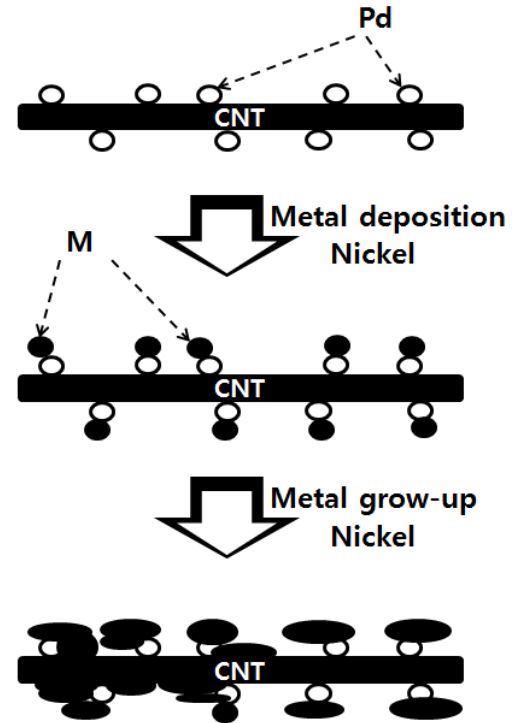


Figure 2. Suggested mechanism of nickel electroless plating.

1 h 동안 산 처리를 진행하였다. 그 후 산 처리된 MWCNT를 acetone (99.5%, Samchun, Korea)으로 세척한 뒤 70 °C로 설정된 오븐(ON-22GW, Jeio-tech, Korea)에서 1 h 동안 건조하였다. 두 번째로, 산 처리 후 건조된 CNT를 2 wt% tin (II) chloride dihydrate (95.0%, Junsei, Japan) 수용액에 넣고 초음파 수조를 이용하여 10 min 예민화 처리를 진행하였다. 세 번째로, 예민화 처리된 MWCNT를 0.1 wt% palladium (II) chloride (Aldrich, USA) 수용액에 넣고 초음파 수조에서 2 min 활성화 처리를 진행하였다. 활성화 처리가 끝난 MWCNT를 acetone으로 세척한 뒤 100 °C로 설정된 오븐에서 1 h 동안 건조하였다. 상기 예민화 처리와 활성화 처리의 반응 메커니즘을 Figure 1에 나타내었다.

### 2.2. 무전해 니켈 도금된 CNT 제조

상기 2.1절에서 활성화 처리된 MWCNT에 니켈을 도금하기 위하여 니켈 도금 용액을 다음과 같은 방법으로 제조하였다. 먼저 초순수 (ultrapure water)에 nickel (II) sulfate hexahydrate (Aldrich, USA)와 sodium hypophosphite monohydrate (Aldrich, USA), 그리고 sodium citrate dihydrate (Samchun, Korea)를 일정 성분비로 혼합하여 니켈 도금 용액을 제조하였다. 제조된 도금 용액에 sodium hydroxide (Samchun, Korea)를 drop by drop 방법으로 천천히 첨가하여 pH를 조절하였다. 무전해 니켈 도금 용액조의 온도는 60 °C로, pH는 9.0으로 설정하였으며, 도금 시간은 1, 3, 5, 7, 9 min으로 하였다. 도금조 내부의 시료 분산성을 확보하기 위하여 초음파 수조를 이용하였으며, 출력은 40 kHz로 하였다. 니켈 도금된 MWCNT는 도금 시간에 따라 각각 N1, N3, N5, N7 그리고 N9으로 명명하였으며, 활성화 처리까지 진행된 MWCNT를 R-CNT로 명명하였다. 무전해 니켈 도금된 CNT의 반응 조건과 반응 조건에 따른 이름을 Table 1에 정리하였으며, 무전해 니켈 도금의 반응 메커니즘을 Figure 2에 나타내었다.

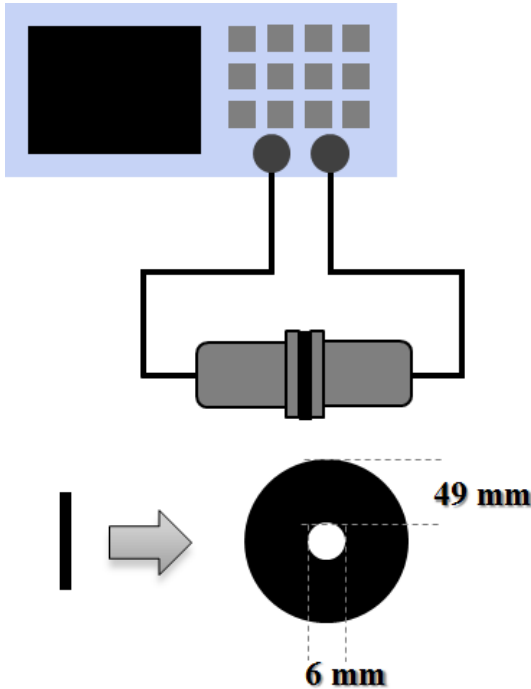


Figure 3. EMI shielding efficiency analysis apparatus[13].

2.3. 무전해 니켈 도금된 CNT 특성 평가

상기 2.1절과 2.2절에서 제조된 니켈 도금된 MWCNT의 전자파 차폐 분석을 위하여 MWCNT를 polyimide film (PI film, 40  $\mu$ m, Isoflex, Korea) 표면에 코팅하여 전자파 차폐 효율 분석 시편을 제조하였다. 전자파 차폐 효율 분석을 위한 시편은 페이스트 형태로 제조하였으며, 제조 과정은 다음과 같다. ethyl cellulose (Aldrich, USA)와  $\alpha$ -terpineol (98.5%, Samchun, Korea)을 1 : 10의 질량비로 혼합 및 교반하여 기초 페이스트를 만든 뒤, 1 wt%의 MWCNT를 혼합하였다. 제조된 MWCNT 혼합 페이스트를 PI film 표면에 210  $\mu$ m의 두께로 코팅한 뒤 건조하여 최종 시편을 완성하였다.

상기 2.1절과 2.2절에서 제조된 무전해 니켈 도금 MWCNT의 표면 특성은 고분해능 주사전자현미경(UHR-SEM, Hitachi, Japan, KBSi 전주센터)으로 확인하였으며, 니켈 도금 시간에 따른 MWCNT와 니켈의 함량비 및 열적 특성을 확인하고자 열중량분석(TGA, Mettler-toledo, Germany)을 실시하였다. 또한 니켈 도금된 MWCNT의 전자파 차폐 효율은 전자파 차폐 측정기(A333 Network Analyzer, Protek, USA)를 이용하여 확인하였으며, ASTM E 37 규격으로 0~1500 MHz 영역에서 분석하였다. 전자파 차폐 측정기의 모식도를 Figure 3에 나타내었다[13].

3. 결과 및 고찰

3.1. 무전해 니켈 도금된 CNT의 표면 특성

활성화 처리까지 진행된 R-CNT와 니켈 도금된 N1, N3, N5, N7 그리고 N9의 표면 형상을 확인하기 위하여 UHR-SEM 분석을 실시하였으며, 이를 Figures 4~6에 나타내었다. Figure 4(a)에 나타낸 CNT는 R-CNT로써 평균 직경이 30 nm로 확인되었다. Figure 4(b)~(f)는 무전해 니켈 도금된 N1, N3, N5, N7 그리고 N9을 나타낸 것이다. 니켈

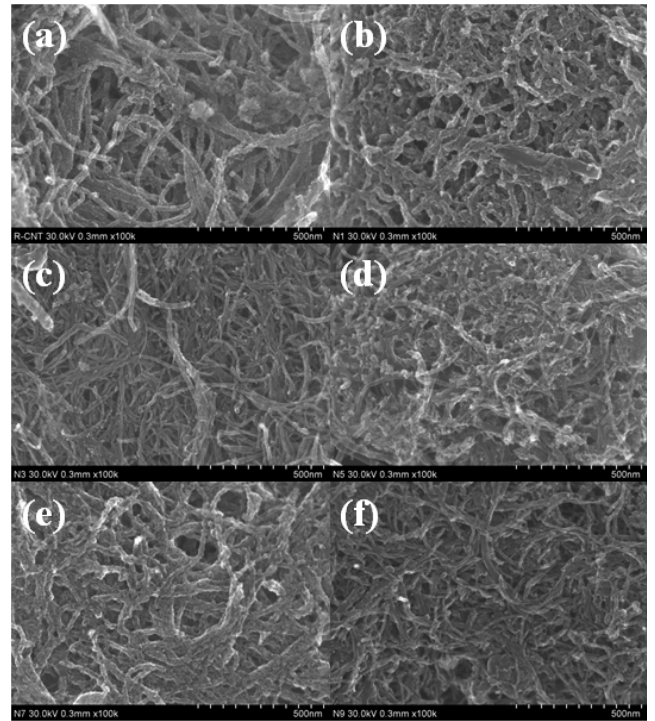


Figure 4. The surface images of the nickel plated MWCNT; (a) R-CNT, (b) N1, (c) N3, (d) N5, (e) N7, (f) N9.

도금된 MWCNT는 R-CNT에 비하여 보다 매끄러운 표면을 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 도금 시간이 증가할수록 MWCNT 간의 응집이 높아지고 단일 가닥의 구분이 더 어려운 것으로 확인되었다. 상기 현상은 MWCNT 표면에서 이루어지는 니켈 도금의 성장에 의하여 나타나는 것으로 생각된다. MWCNT 표면에 도금되는 니켈은 도금 시간이 증가함에 따라 표면에서 성장하며 그 층이 점점 두꺼워지며, 이때, 인접한 다른 MWCNT로부터 성장한 니켈과 접촉하고 연결됨으로써 MWCNT가 응집한 것과 같은 형상을 나타낸 것으로 판단된다. Figures 5와 6은 니켈 도금된 MWCNT 중 한 가닥에 초점을 맞추어 분석한 것이다. Figure 5는 단일 가닥의 표면 분석 이미지를 나타낸 것이며, Figure 6은 Figure 5의 투과 이미지를 나타낸 것이다. 상기 표면 분석 결과로부터 니켈 도금된 MWCNT는 도금 시간이 증가할수록 표면 형상이 보다 매끄러워지는 것을 확인할 수 있었으나, 도금 시간이 가장 길었던 N9의 경우 N1~N7과는 다르게 표면 균일성이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 상기 현상은 무전해 도금 시에 이용된 초음파에 의하여 나타난 것으로 판단된다. 초음파는 물속에서 전달될 때 공동화 현상을 일으키며, 이때 발생하는 마이크로사이즈의 버블이 생성되고 파괴되는 과정에서 물질 표면의 물리적인 파괴와 화학적인 파괴를 함께 일으킨다. 도금액 내의 MWCNT 분산성 향상을 위한 초음파 주사는 도금 특성에도 영향을 미칠 뿐만 아니라 MWCNT 표면 식각에도 기여한다고 생각된다. 상기 서술한 공동화 현상에 의하여 도금 시간이 길어질수록 표면의 불균일성이 함께 증대된 것으로 판단된다[14-15]. N1~N7의 경우 초음파가 지닌 특성인 평활성의 혜택을 받아 모재인 MWCNT 표면의 불순물이 제거되고 니켈이 균일하게 도금되었지만, N9은 과도한 초음파 노출로 인하여 불순물 이외에도 MWCNT 표면이 파괴됨으로써 무전해 도금의 특징인 균일 전착성이 저해되어 불균일성 도금이 이루어진 것으로 판단된다.

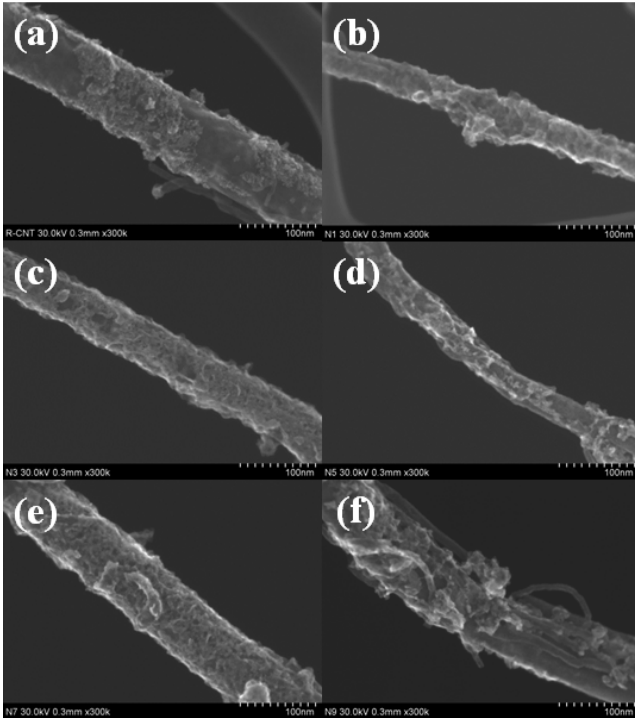


Figure 5. The surface images of the nickel plated MWCNT of one strand; (a) R-CNT, (b) N1, (c) N3, (d) N5, (e) N7, (f) N9.

3.2. 무전해 니켈 도금된 CNT의 열적 특성

니켈 도금된 N1, N3, N5, N7 그리고 N9의 열적 특성과 도금 시간 증가에 따른 니켈과 MWCNT의 함량비를 확인하기 위하여 TGA를 실시하였으며, 이를 Figure 7에 나타내었다. TGA는 산소 분위기에서 실시하였으며, 승온 속도는 5 °C/min, 온도 범위는 0~1000 °C로 하였다. 또한, 순수한 MWCNT에 대한 분석을 실시하고 이를 니켈 도금된 MWCNT와 비교함으로써, 니켈 도금이 MWCNT의 열 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 도금 시간에 따른 MWCNT와 니켈의 함량비 및 TGA 결과를 Table 2에 나타내었다. Figure 7에 나타낸 것과 같이, 순수한 MWCNT는 온도의 증가에 따라 표면 산화 반응이 일어났으며, 약 550 °C에서 열분해가 시작되어 약 650 °C에서 분해가 종료되었다. 니켈 도금된 MWCNT인 N1, N3, N5, N7 그리고 N9은 약 480 °C에서 열분해가 시작되어 약 600 °C에서 종료되었다. TGA 결과로부터 니켈과 MWCNT의 질량 비율을 확인하였으며, N1, N3, N5, N7 그리고 N9은 각각 1 : 0.85, 1 : 0.87, 1 : 0.87, 1 : 0.87 그리고 1 : 1.04으로 계산되었다. 순수한 MWCNT에 비하여 니켈 도금된 MWCNT가 더 낮은 온도에서 열분해가 시작된 것은, MWCNT 표면에 자리 잡은 니켈이 촉매작용을 일으켜 MWCNT의 연소를 촉진시킴으로써 나타난 현상으로 판단된다[16].

3.3. 무전해 니켈 도금된 CNT의 전자파 차폐 특성

전자파 차폐란 전도성 물질이나 자성체를 이용하여 전자기파의 확산을 제어하는 것으로, 차폐재 표면에서 전자기파를 흡수 및 반사시켜 전자파가 내·외부로 전이되는 것을 방지하는 것을 말한다[19]. 전자파 차폐 재료의 성능 분석은 일정 규격의 시편에 전자파를 방사하여 시편에서의 반사, 흡수, 투과량을 측정 및 계산하여 전자파 차폐 효율을 알아낸다[18,19]. 전자파 차폐 효율 계산식을 아래의 식 (1~3)에 나

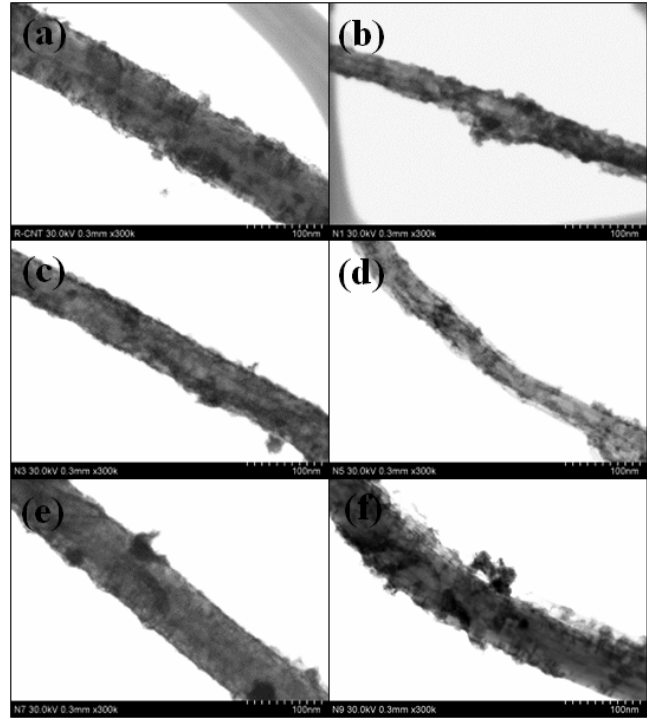


Figure 6. The transmission images of the nickel plated MWCNT of one strand; (a) R-CNT, (b) N1, (c) N3, (d) N5, (e) N7, (f) N9.

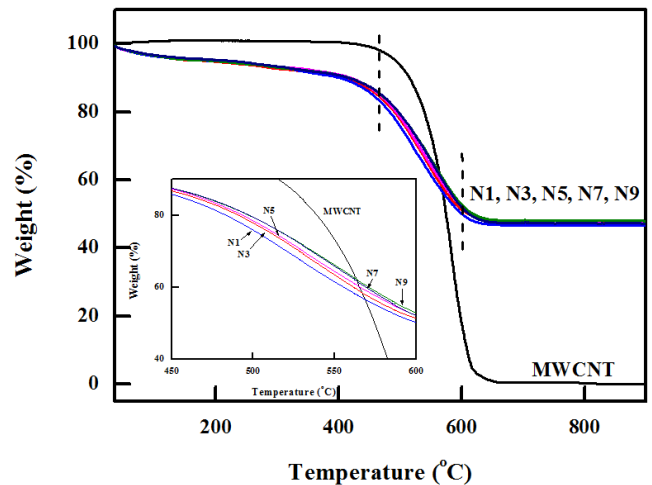


Figure 7. The thermogravimetry analysis of the nickel plated MWCNT; R-CNT, N1, N3, N5, N7, N9.

타내었으며, 전자파 차폐 효율은 데시벨(decibel; dB)로 표기한다.

$$T_R + R_e + A_b = 1 \tag{1}$$

상기 식 (1)의  $T_R$ ,  $R_e$ ,  $A_b$ 는 각각 투과도(transmittance), 반사도(reflectance), 흡수도(absorbance)를 나타내며, 투과도와 반사도를 측정 한 뒤 흡수도와 비교를 통하여 흡수 및 반사에 의한 상대적인 차폐 효율을 알 수 있다. 아래 식 (2)와 (3)에 투과도와 반사도에 대한 계산식을 나타내었다[20,21].

Table 2. TGA Results of the Nickel Plated MWCNT

	pyrolysis (°C)		final weight (%)	CNT : Ni (mass ratio)
	start	end		
CNT	550	650	0	1 : 0
N1			46.00	1 : 0.8553
N3			46.76	1 : 0.8778
N5	480	600	46.83	1 : 0.8815
N7			47.29	1 : 0.8963
N9			50.87	1 : 1.0371

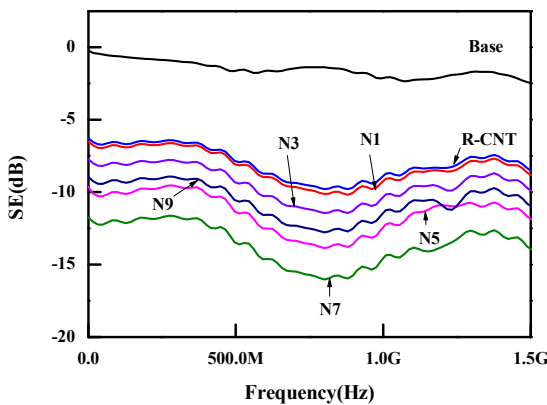


Figure 8. The EMI shielding efficiency measurement of the nickel plated MWCNT-polyimide film composite; R-CNT, N1, N3, N5, N7, N9.

$$T_R = \frac{E_T^2}{E_I^2} = |S_{21} \text{ (or } S_{12})|^2 \tag{2}$$

$$R_c = \frac{E_R^2}{E_I^2} = |S_{11} \text{ (or } S_{22})|^2 \tag{3}$$

상기 식 (2)와 (3)의  $E_I$ ,  $E_T$ ,  $E_R$ 은 각각 입사, 투과, 반사된 자기장의 세기이며,  $S_{21}$  (또는  $S_{12}$ )와  $S_{11}$  (또는  $S_{22}$ )는 각각 투과와 반사에 해당하는 S-parameter (scattering parameter)이다[21-22].

무전해 니켈 도금된 MWCNT의 전자파 차폐 특성을 확인하기 위하여 ASTM E 37 규격으로 전자파 차폐 효율을 측정하였으며, 일상생활에서 주로 이용되는 전자기기의 주파수 영역인 0~1500 MHz 영역을 기준으로 하였다. 활성화 처리된 MWCNT와 니켈 도금된 MWCNT의 전자파 차폐능을 분석하여 Figure 8에 나타내었으며, 폴리이미드 필름의 차폐 값을 Base로 명명하였다. 또한 전자파 차폐 효율 분석 시편의 표면 저항을 측정하여 Figure 9에 나타내었다. 표면 저항은 동일한 시편 내의 불특정 지점을 5회 선택하여 측정하고, 그 평균 값을 산출하였다. 니켈 도금된 MWCNT의 전자파 차폐 효율은 N7이 가장 우수한 값을 나타내었다. 반면 도금 시간이 가장 길었던 N9의 경우 N5보다 낮은 수치를 나타내었다. 니켈 도금된 MWCNT는 전체 주파수 영역 중 500~1000 MHz 영역에서 가장 뛰어난 성능을 보여주었으며, 다른 영역

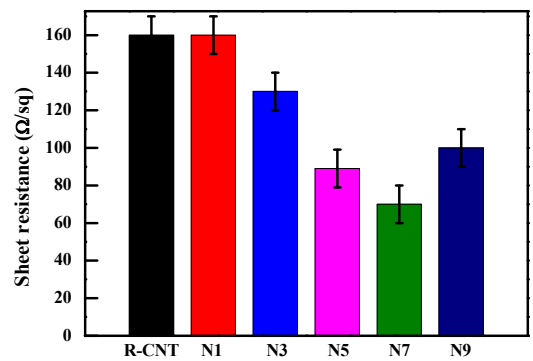


Figure 9. Sheet resistance of the nickel plated MWCNT-polyimide film composite; R-CNT, N1, N3, N5, N7, N9.

(500 MHz 이하, 1000 MHz 이상)에서는 낮은 성능을 나타내었다. 가장 뛰어난 성능을 나타낸 800 MHz 영역에서의 차폐 수치는 16 dB로 활성화 처리된 MWCNT에 비하여 최대 1.6배의 향상된 성능을 나타내었다. 또한 평균 표면 저항 역시 70 Ω/sq로 N7이 가장 낮은 값을 나타내었으며, 활성화 처리된 MWCNT에 비하여 최대 56% 감소하였다.

상기 3.2절의 TGA 결과로부터, N9에 가장 많은 니켈이 도금되었음을 확인하였다. 일반적으로 금속의 함량이 증가할수록 더 높은 전자파 차폐 효율을 나타내야 하지만, N9은 이러한 경향을 무시하고 N5에 가까운 차폐 효율을 나타내었다. 이러한 현상은 상기 3.1절에서 언급한 니켈 도금된 MWCNT의 표면 형상으로부터 파생된 것으로 판단된다. N1, N3, N5 그리고 N7은 막 형태로 도금이 이루어졌으나, N9의 경우 구형의 금속 입자들이 표면에서 다수 관찰되었다. 또한, TGA 결과에서 N3, N5, N7은 도금된 니켈 함량이 거의 차이가 나지 않았으나, N9에서는 도금 함량이 증가하였다. 도금시간이 증가할수록 CNT 표면에는 더 많은 니켈이 도금되며, CNT 표면에 도금된 니켈은 순수한 CNT에 비하여 전기전도도가 더 뛰어나기 때문에 표면저항은 감소한다. 일반적으로 금속 도금 함량이 늘어날수록 전기전도도가 향상되는 것으로 판단할 수 있으나, 표면에 도금된 니켈 금속 간에 연결성이 떨어지면 도금된 부분만 전기전도도가 향상되게 된다. CNT 표면에 도금된 니켈이 연속적으로 이어질수록 금속의 전자전도도가 용이하며, N9의 경우 N3~N7에 비하여 도금된 함량은 더 높지만 도금 균일성이 떨어지기 때문에 N3~N7에 비하여 높은 저항을 나타낸 것으로 판단된다. 균일한 형태의 금속 막은 표면에서의 전자 전도가 쉽게 이루어

저 전자파 차폐 효율 향상에 도움을 주지만, 부분적으로 집중된 도금 형태는 표면에서의 전자 전도가 좀더 어려울 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 MWCNT의 전자파 차폐성능을 향상시키고자 무전해 도금법을 이용하여 CNT 표면에 니켈을 도입하였다. 7 min 니켈 도금 처리된 MWCNT의 전자파 차폐 효율은 800 MHz 영역에서 최대 16 dB로 측정되었으며, 전처리 과정만 진행된 MWCNT에 비하여 약 1.6배 증가하였다. 7 min 도금 처리된 MWCNT의 평균 표면 저항은 최대 70  $\Omega/\text{sq}$ 로 전처리 과정만 진행된 MWCNT에 비하여 최대 56% 감소하였다. 표면 형상 분석결과(UHR-SEM)와 열중량분석(TGA) 결과로부터 니켈 도금량과 전자파 차폐율이 선형 비례하지 않음을 확인하였으며, 이로부터 MWCNT 표면에 도금된 금속이 균일한 막을 이룰수록 전자파 차폐 효율이 증가함을 확인하였다.

#### References

1. D. Ding, F. Luo, and W. Zhou, Effects of thermal oxidation on electromagnetic interference shielding properties of SiC/SiC composites, *Ceram. Int.*, **39**, 4281-4286 (2013).
2. W. K. Choi, B. J. Kim, and S. J. Park, Fiber surface and electrical conductivity of electroless Ni-plated PET ultra-fine fibers, *Carbon Lett.*, **14**, 243-246 (2013).
3. G. Y. Han, D. H. Song, and J. S. Bae, Electromagnetic interference shielding effectiveness of fiber reinforced composites hybrid conductive filler, *J. Ocean Eng. Technol.*, **23**, 35-39 (2009).
4. J. I. Lee and H. T. Jung, Technical status of carbon nanotubes composites, *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 7-14 (2008).
5. A. Hirsch, Functionalization of single-walled carbon nanotubes, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **41**, 1853-1859 (2002).
6. H. D. Wagner, O. Lourie, Y. Feldman, and R. Tenne, Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 188-190 (1998).
7. M. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, and J. M. Gibson, Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes, *Nature*, **381**, 678-680 (1996).
8. Y. I. Song, J. W. Lee, T. Y. Kim, H. J. Jung, Y. C. Jung, S. J. Suh, and C. M. Yang, Performance-determining factors in flexible transparent conducting single-wall carbon nanotube film, *Carbon Lett.*, **14**, 255-258 (2013).
9. S. J. Park, Y. S. Jang, and K. Y. Rhee, Interlaminar and ductile characteristics of carbon fibers-reinforced plastics produced by nanoscaled electroless nickel plating on carbon fiber surfaces, *J. Colloid Interface Sci.*, **245**, 383-390 (2002).
10. R. P. Tracy and G. J. Shawhan, Practical guide to using Ni-P electroless nickel coatings, *J. Mater. Perform.*, **29**, 65-70 (1990).
11. K. Y. Park, S. B. Lee, J. B. Kim, J. W. Yi, S. K. Lee, and J. H. Han, Fabrication and microstructure of metal-coated carbon nanofibers using electroless plating, *J. Korean Soc. Compos. Mater.*, **20**, 43-48 (2007).
12. G. O. Mallory and J. B. Hajdu, *Electroless Plating : fundamentals and applications*, 1-539, Cambridge University Press, Florida, USA (1990).
13. P. F. Wilson, M. T. Ma, and J. W. Adams, Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials : Part I : -Far-Field source simulation, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **30**, 239-250 (1988).
14. L. H. Thompson and L. K. Doraiswamy, Sonochemistry : Science and Engineering, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**, 1215-1249 (1999).
15. J. H. Cho, S. G. Ko, Y. K. Ahn, K. C. Song, and E. J. Choi, Synthesis of Monodisperse Magnetite Nanocrystallites Using Sonochemical Method, *J. Korean Magn. Soc.*, **16**, 163-167 (2006).
16. F. Tian, H. P. Li, N. Q. Zhao, and C. N. He, Catalyst effects of fabrication of carbon nanotubes synthesized by chemical vapor deposition, *Mater. Chem. Phys.*, **115**, 493-495 (2009).
17. T. S. Oh, Polymeric composite material for shielding of electromagnetic interference, *Polym. Sci. Technol.*, **2**, 179-190 (1991).
18. S. A. Schelkunoff, The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields, *Bell Syst. Tech. J.*, **13**, 532-579 (1934).
19. H. R. Kim, K. Fujimori, B. S. Kim, and I. S. Kim, Lightweight nanofibrous EMI shielding nanowebs prepared by electrospinning and metallization, *Compos. Sci. Technol.*, **72**, 1233-1239 (2012).
20. A. Gupta and V. Choudhary, Electromagnetic interference shielding behavior of poly(trimethylene terephthalate)/multi-walled carbon nanotube composites, *Compos. Sci. Technol.*, **71**, 1563-1568 (2011).
21. J. M. Thomassin, C. Jerome, T. Pardo, C. Bailly, I. Huyuen, and C. Detrembleur, Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Mat. Sci. Eng. R.*, **74**, 211-232 (2013).
22. X. Liu, X. Yin, L. Kong, Q. Li, Y. Liu, W. Duan, L. Zhang, and L. Cheng, Fabrication and electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanotube reinforced carbon fiber/pyrolytic carbon composites, *Carbon*, **68**, 501-510 (2014).