

SWCNT의 차폐효과 측정을 위한 샘플 준비 방법 및 동축 지그 개발

Development of a Sample Preparation Method and Coaxial Jigs to Measure the Shielding Effectiveness of SWCNTs

이한희^{*,**} · 윤상욱^{*} · 이해성^{***} · 김정수^{***} · 이재욱^{**}

Han-Hee Lee^{***} · Sang-Wook Yoon^{*} · Haeseong Lee^{***} · Jung Soo Kim^{***} · Jae-Wook Lee^{**}

요 약

본 논문에서는 전도성 소재로 주목을 받고 있는 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)의 차폐효과(SE) 측정 기반을 구축하기 위해 수행되었다. 이를 위해 단일벽 탄소나노튜브를 측정용 시료로 준비하는 방법과 동축 지그(Jig) 설계에 대해 연구하였다. 단일벽 탄소나노튜브의 차폐효과를 측정하기 위해서는 분말 형태로 생산되는 단일벽 탄소나노튜브를 평판형 구조로 제작해야 하므로 단일벽 탄소나노튜브를 평판형 시료로 제작하는 방법을 제시한다. 또한, 현재 널리 사용되는 소재의 차폐효과 측정 방법인 ASTM D4935 표준의 최대 동작 주파수 1.5 GHz 한계를 극복하기 위해 최대 동작 주파수가 8 GHz인 동축 지그를 설계 및 검증하였다. 동축 지그를 설계하기 위하여 3D 전자파 시뮬레이션을 사용하였고 ASTM D4935 표준과의 비교 시험을 수행하여 제안하는 측정 지그의 유효성을 확인하였다. 단일벽 탄소나노튜브의 분말 종류에 따라 측정 시료를 제작하고 제안하는 측정 지그를 사용하여 단일벽 탄소나노튜브의 차폐효과를 측정하였다.

Abstract

In this study, we measured the shielding effectiveness (SE) of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), which have attracted interest as potential conductive materials. We studied the preparation of SWCNTs in the form of a film for measurement and the design of coaxial jigs. In addition, coaxial jigs with a maximum operating frequency of 8 GHz were designed and verified to overcome the maximum operating frequency limit of 1.5 GHz in the ASTM D4935 standard. A 3D electromagnetic simulation was used to design the coaxial jigs and a comparative test with the ASTM D4935 standard was performed to verify the proposed measurement jigs. Measurement samples were prepared for each SWCNT powder type, and the SE of the SWCNTs was measured using the proposed measurement jigs.

Key words: Shielding Effectiveness, ASTM D4935, SWCNT, Coaxial Transmission Line, Impedance Matching

「이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원의 나노제품 성능안전 평가기술개발 및 기업지원사업의 일환으로 수행된 연구임(20015892, 나노 소재 및 나노복합소재의 전자기파 차폐흡수 성능 평가법 개발).」

*한국산업기술시험원 디지털산업본부 전파응용기술센터(RF Application Technology Center, S.M.A.R.T. Industry Division, Korea Testing Laboratory)

**한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics, Telecommunication and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

***전주대학교 탄소나노신소재공학과(Department of Carbon-Nanomaterials Engineering, Jeonju University)

· Manuscript received October 4, 2023 ; Revised October 19, 2023 ; Accepted November 1, 2023. (ID No. 20231004-080)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

I. 서 론

혁신적 기술의 발전에 따라 5G/6G 통신, 자율주행수송 장비, UAM(urban air mobility) 등을 포함한 여러 분야의 패러다임이 변화하고 있다. 각 기술 분야는 더 고도화되면서도 다른 분야의 기술들과의 융합을 시도하고 있다. 이에 따라 각 기술 분야에서 요구되어온 전통적인 성능보다 훨씬 더 높은 성능 및 새로운 특성들이 추가로 요구되고 있다.

예를 들면 웨어러블 기기의 경우 전자기기를 생체에 접촉시켜 생체에서 발생하는 다양한 생화학적 신호를 전기적인 신호로 바꾸어 처리하는 새로운 융합기기이다. 따라서 기존의 전자기기에 필요한 안전성 기준 외에도 바이오 제품에서 요구되는 인체보호 기준을 만족하여야 한다. 또 다른 예로 드론이나 UAM과 같은 미래 모빌리티와 관련된 제품군들이 있다. 이들 제품을 구동하는 에너지원은 2차 전지로 제한되는데 현재 에너지 용량을 제품의 수요에 맞출 수 없는 한계가 존재한다. 이에 대한 해결책으로 미래 모빌리티의 중량을 줄임으로써 이송 거리를 확대하는 연구가 진행되고 있다. 따라서 이와 같은 제품이 필요로 하는 사양을 맞추기 위해서는 경량소재의 활용이 필수적이며, 추가적으로 운용의 안전성을 위해 전자기파 차폐성능도 필요하다.

기존의 소재 기술로는 구현이 어려운 다양한 기능을 갖는 소재 개발은 소재 기술과 나노 기술의 융합으로 가시화되었다. 특히 1991년 일본 NEC 연구진에 의해 발견된 탄소나노튜브(CNT: carbon nanotube)는 전기적인 특성이 구리와 비슷하고, 철의 밀도보다도 1/4 정도인 우수한 전도성 경량소재이며, 경량성에도 불구하고 기계적 특성도 철보다 100배 우수하므로 다기능성 소재로서 각광을 받고 있다^[1]. 탄소나노튜브는 구조적 분리법에 의해 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT: single-walled nanotube) 및 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT: multi-walled nanotube)로 나뉜다. 단일벽 탄소나노튜브는 그래핀이 말려져서 원통형을 이루고 있는 튜브 형태의 1차원 소재이고, 다중벽 탄소나노튜브는 여러 장의 그래핀이 동심원을 이루면서 말려진 소재이다. SWCNT는 분산성이 우수하고 소량으로도 MWCNT보다 고기능성을 구현할 수 있으므로 전도성 소

재로 널리 활용되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 SWCNT를 대상으로 연구를 수행하며 SWCNT에 대한 전자기파 차폐효과(SE: shielding effectiveness)를 측정하는 방법에 대해 연구하고자 한다.

현재 소재의 전자기파 차폐효과를 측정할 수 있는 공인된 측정 방법 및 지그(Jig)는 ASTM D4935^[2] 표준이 유일하다. ASTM D4935 표준은 측정 주파수 영역이 30 MHz~1.5 GHz이고 동작 주파수에 맞춰 설계된 동축 구조의 지그를 사용하여 평판형 소재의 차폐효과를 측정한다. 이 표준은 전 세계적으로 널리 사용되고 있으며 측정 반복성 및 정확성도 뛰어나다. 그러나 이 표준은 현재 산업계가 요구하는 주파수 영역(~28 GHz)보다 현저히 낮고 시료의 크기도 14 cm 이상을 요구하고 있기 때문에 SWCNT와 같은 나노소재의 차폐효과 측정을 위해 사용되기에는 한계점이 명확하다.

그러므로 본 논문에서는 SWCNT와 같은 나노소재의 시료 제작 및 시료의 크기와 형태에 적절한 차폐효과 측정 지그에 대한 연구를 수행하고자 한다. 아울러 현재 이동통신 및 자율주행자동차 등의 산업계의 수요를 고려하여 최대 8 GHz까지 SWCNT의 차폐효과 측정을 목표로 하였다. 본 논문은 총 5장으로 이루어져 있으며, II장에서는 동축선로 설계 이론과 제작 및 검증에 대해 논하고 III장에서는 SWCNT의 측정 시료 제작 및 크기 정의에 대해 다룬다. IV장에서는 실제로 제작된 측정 지그를 사용하여 차폐효과 측정을 수행하며, V장에서는 본 논문을 정리한다.

II. 동축선로 설계 및 제작·검증

2-1 차폐효과 측정 지그 설계 이론

ASTM D4935 표준의 한계를 극복하기 위해, 저손실 동축선로 설계법 및 전자파 이론 해석 연구^{[3]~[5]}, 1.5 GHz 이상의 주파수 대역에서도 소재의 전자기파 차폐효과를 측정할 수 있는 동축선로 개발 연구^{[6][7]} 등의 연구가 수행되었다. 그러나 SWCNT는 일정 크기 이상으로 크거나 작으면 물리적 강도가 매우 약해지는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인하여 ASTM D4935에서 제안하는 측정 시료의 크기 및 형태로 SWCNT를 제작 및 재단하기에 어려

움이 있다. 또한, 참고문헌 [6] 및 참고문헌 [7]에서 제안하는 측정 시료의 크기는 매우 작아 해당 모양으로 재단하기에 한계가 있고 측정 지그에 대한 검증 및 제작 방식에 대해 명확히 제시하고 있지 않고 있다. 즉 SWCNT의 차폐효과를 측정하기 위해서는 측정 시료 제작의 경제성 및 물리적 특성, 측정 시료 제작법의 편이성 등과 같은 소재공학적 관점과 측정 주파수 대역에 최적화된 측정 지그 개발 및 지그의 전기적 성능 검증 등의 전자공학적 관점을 모두 고려해야한다. 본 논문에서는 최대 8 GHz까지 측정 가능한 동축 형태의 측정 지그를 설계 및 제작하고 3D 전자파 시뮬레이션(CST)을 사용하여 검증하였다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 ASTM D4935 표준에서는 TEM(transverse electromagnetic mode) 모드를 형성하여 평판형 소재의 원거리장 차폐효과를 측정할 수 있는 동축 구조의 측정 지그를 제시하고 있다. 이 측정 지그의 단면은 그림 1과 같다. 이 측정 지그는 기본적으로 내심 도체와 외심 도체로 구성된 동축 구조이며, 계측기와 연결되는 동축 지역(coaxial region 1), 한 쌍의 동축선로가 연결되는 동축 지역(coaxial region 2), 두 동축 사이에 존재하며, 임피던스 매칭 역할을 수행하는 원뿔 지역(conical region), 내심 도체를 지지해주는 지지대 지역(fixture region)이 차례대로 연결되어 있는 구조이다.

동축 지역은 외부 도체와 내부 도체로 구성되며, 두 도체 사이가 공기로 채워져 있을 경우의 원형 동축 선로의 특성 임피던스 Z_{cox} 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다^[8]. 식 (1)에서 η_0 는 자유공간의 특성 임피던스이다.

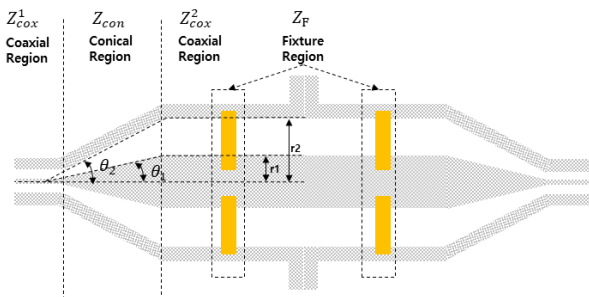


그림 1. ASTM D4935 동축선로 단면

Fig. 1. The cross section of the Coaxial transmission line in the ASTM D4935 standard.

$$Z_{cox} = \frac{\eta_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

지지대 지역의 특성 임피던스 Z_F 는 식 (1)을 변형하여 계산할 수 있으며, 자유 공간이 아닌 사용된 지지대의 유전율을 매질로 하는 특성 임피던스를 고려해야한다. 해당 지지대 지역에서 변경된 내·외심의 물리적 크기와 유전율을 고려하여 지지대 지역의 특성 임피던스를 구할 수 있다.

r_1 과 r_2 는 각각 내심 도체의 반경과 동축선로의 중심에서 외심 도체 내부의 반경이다. 원형 동축선로의 특성 임피던스를 고려하여 결정된 r_1 과 r_2 에 따라 식 (2)와 같이 동축선로의 상한 주파수 f_{max} 가 결정된다.

$$f_{max} = \frac{c_0}{\pi(r_1 + r_2)} \quad (2)$$

원뿔 지역의 특성 임피던스 Z_{con} 는 해당 지역의 전위 V 를 구 좌표계에서 각도 θ 만의 함수로 나타낸 뒤 가우스 법칙을 통하여 구한 커패시턴스 C 와 원뿔의 총 자속을 계산하여 인덕턴스 L 를 계산하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^{[4],[5]}.

$$Z_{con} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\eta_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\tan(\theta_2/2)}{\tan(\theta_1/2)}\right) \quad (3)$$

위에서 소개한 4가지 지역의 특성 임피던스가 50 Ω로 일정할 때 해당 동축선로는 가장 낮은 반사 특성을 보이며, 가장 이상적인 전기적 성능을 보일 것이다. 그러나 원뿔형 지역에서는 θ_1 과 θ_2 같을 수 없고 지지대 지역은 내심 도체를 지지하는 물체의 유전율 및 지지대 지역의 물리적 크기에 따라 특성 임피던스가 달라지므로 모든 지역의 특성 임피던스를 50 Ω로 일정하게 설계할 수 없다. 그러므로 적절한 내·외심 도체의 반경, 각도, 유전율 및 지지대의 물리적 크기를 설정하여 물리적으로 동축 구조가 안정적이면서도 낮은 반사 손실을 갖도록 설계해야한다.

2-2 측정 지그 설계·제작 및 검증

ASTM D4935에서 제시하고 있는 동축 구조의 측정 지

그를 참고하여 최대 8 GHz까지 동작이 가능한 측정 지그를 제안한다. 측정 지그의 목표 전기적 성능은 상대적으로 고주파임을 고려하여 1.5 이하의 전압정재파비(VSWR)와 -15 dB 이하의 반사특성(S_{11})으로 설정하였다.

ASTM D4935에서 제시한 동축 구조의 물리적 크기를 줄이는 것이 제안하는 측정 지그의 기본적인 설계 개념이지만 단순히 물리적 크기를 줄이는 것만으로는 만족스러운 전기적 성능을 갖는 측정 지그를 설계 및 제작하기에 어려움이 있다. 그리하여 본 논문에서는 그림 2와 같이 2종류의 동축 구조로 측정 지그를 설계하였다. Type I과 Type II 지그의 설계 및 제작 시 발생할 수 있는 주요한 오차 발생요인 중 첫 번째는 지지대 지역의 특성 임피던스이며, 두 번째는 RF 커넥터와 동축을 연결하는 부위이다. Type I 지그에서는 내심 도체를 지탱하는 지지대가 동축선로 안쪽에 위치하기 때문에 내심과 외심에 홈(G_1 , G_2)을 파서 지지대를 장착하였다. 이때 지지대가 장착된 지역의 내·외심 반경의 크기는 해당 지역의 특성 임피던스와 유전율을 고려하여 결정된다. 제작 시 이 지역은

지지대의 존재로 인하여 연속적인 동축선로가 아닌 두 부분으로 나뉘어 제작될 수 밖에 없기 때문에 $1\ \mu\text{m}$ 급 이하의 고정밀한 제작을 요한다. Type II 지그는 지지대가 동축의 맨 끝에 존재하기 때문에 연속된 동축 구조로 제작할 수 있다. 이 지그의 지지대는 외심 도체에 홈(G_3)을 파서 장착되었으며 특성 임피던스를 고려하여 홈의 크기를 결정하였다. RF 커넥터와 동축 내·외심의 연결 부위는 빈틈없이 밀착되어야 하며, 케이블 연결 시 흔들리지 않도록 잘 고정되어야 한다. 이러한 요차 요인을 고려하면서 동축의 내·외심 반경 등의 물리적 크기를 조절하였고 최대 8 GHz까지 목표 전기적 성능을 만족하는 측정 지그를 설계하였다. 본 논문에서는 제안하는 Type I과 Type II 지그의 치수는 표 1과 같이 정하였다. 제시된 치수에 따라 계산된 측정 지그의 각 지역별 특성 임피던스는 표 2와 같으며, 제작된 측정 지그는 그림 3에서 볼 수 있다.

제안하는 동축 구조의 외부적인 특징 중 하나는 기존의 측정 지그와는 다르게 플랜지(flange)가 시료가 장착되는 부분이 아닌 동축의 중간에 있는 것이다. 두 가지 이유로 이러한 구조를 설계하였다. 첫 번째는 측정 시료의 크

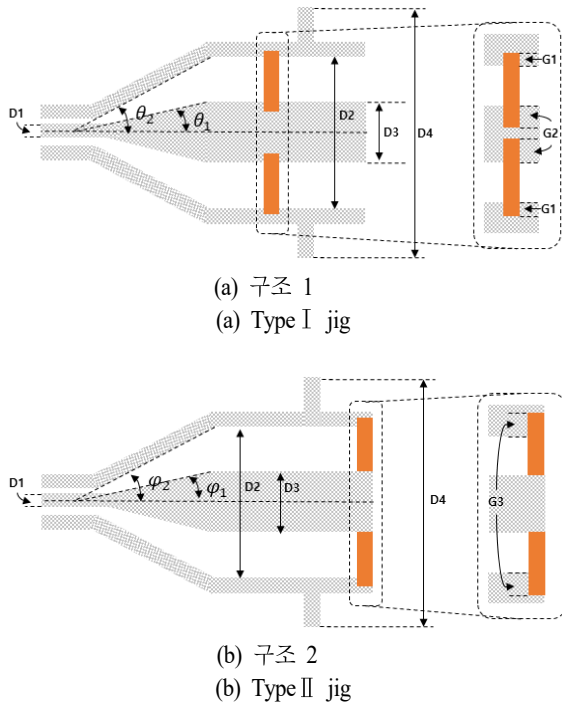


그림 2. 2 종류의 동축 구조

Fig. 2. Design of the proposed coaxial structure types.

표 1. 제안하는 측정 지그의 치수

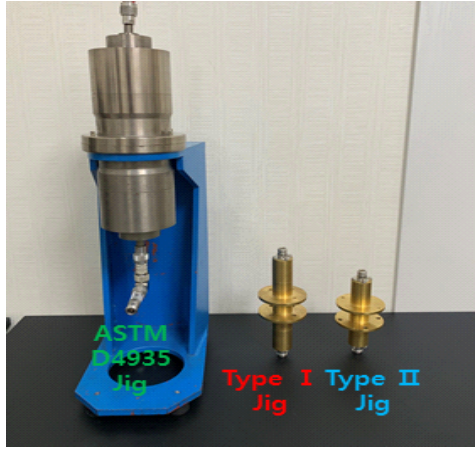
Table 1. Dimension of the proposed jigs.

D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]
4	16	7	76
θ_1 [°]	θ_2 [°]	ψ_1 [°]	ψ_2 [°]
4.29	9.62	6.34	14.31
G_1 [mm]	G_2 [mm]	G_3 [mm]	
1	1	3.6	

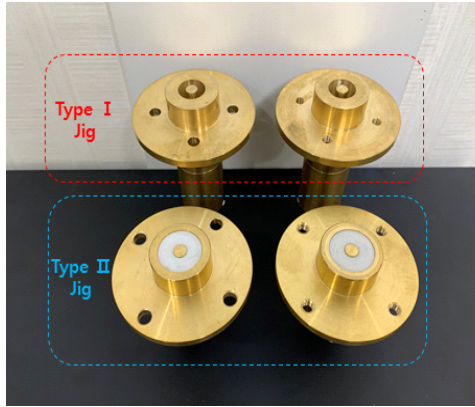
표 2. 이론적 동축선로의 지역별 특성 임피던스

Table 2. Calculated characteristic impedance of the proposed jigs.

Z_{coax}^1 [Ω]	Z_{coax}^2 [Ω]	Z_{con} [Ω]	Z_F [Ω]
Type I Jig			
50.0679	49.5641	48.5308	52.9966
Type II Jig			
50.0679	49.5641	49.0603	49.5753



(a)



(b)

그림 3. 제작된 고주파 동축선로
Fig. 3. The proposed jigs.

기에 대한 고려이며 두 번째는 측정 시료 제작 편의성 때문이다. 측정 주파수와 측정 시료의 경제성 및 물리적 특성을 고려하여 그림 3 및 표 3과 같은 형태와 크기로 정하였다. 이에 따라 해당 동축의 내·외심 크기 또한 측정 시료의 크기에 맞게 정하였다. 이때 플랜지가 시료 장착 부분에 있다면 동축의 외심이 끝나는 부위에서 도체판이 평행하게 있는 구조가 되므로 플랜지 부위에서 TEM 모드가 형성될 수 있어 측정 결과에 영향을 줄 수 있다. 또한 ASTM D4935에서 제시하는 측정 시료 도면을 보면 부하시료와 기준시료 모두 직경 7.112 mm의 구멍을 4곳에 뚫어야만 동축에 시료를 체결할 수 있다. 레이저 가공기 및 특수 절단기 등과 같은 정밀가공이 가능한 장비가 없

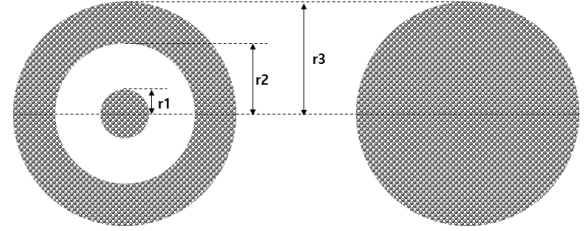


그림 4. 측정 시료 도면
Fig. 4. Design of the measurement sample.

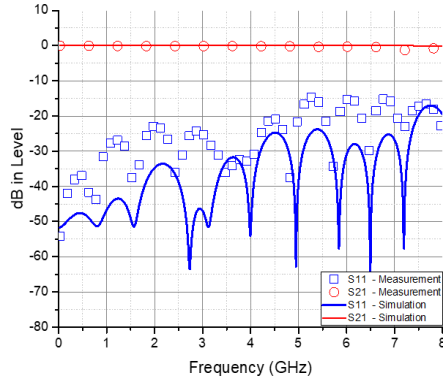
표 3. 지그별 측정 시료의 치수

Table 3. Dimension of the samples of Type I and Type II.

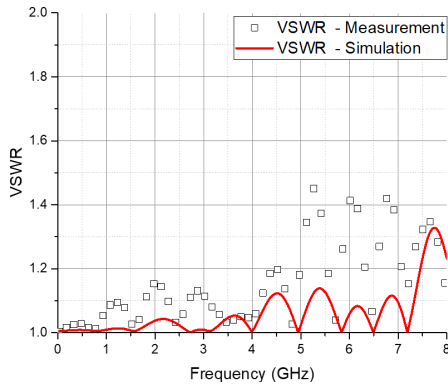
r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 [mm]
Type I jig		
3.5	8	16
Type II jig		
3.5	11.65	16

다면 측정하고자 하는 정확한 위치에 구멍을 뚫는 것이 어렵고 시료의 물리적 강도가 매우 강하거나 또는 약하다면 측정 시료 재단에 큰 어려움이 있다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 측정 지그는 플랜지의 위치를 이동시켜 측정 시료의 크기와 측정 시료 제작 및 재단 편의성을 고려하여 설계 및 제작되었다.

그림 3과 같이 제작된 측정 지그의 전기적 성능을 검증하기 위하여, 상용 3D 시뮬레이션 툴의 결과와 측정 결과를 비교하였다. 그림 5 및 그림 6에서 Type I과 Type II 지그의 전기적 성능을 비교하였다. 표 4에서는 각 지그의 전기적 성능 지표 중 가장 좋지 않은 전기적 성능을 정리하였다. Type I 지그의 경우, 5.26 GHz에서 가장 높은 반사 특성(-14.71 dB)을 보이며, 목표 반사 특성과는 -0.29 dB의 차이를 보인다. 전압정재파비의 경우에는 주파수 대역에서 모두 1.5 이하의 전기적 성능을 보이는 것을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Type I 지그의 동축 구조와 관련이 있다. Type I 지그는 내심 도체를 지지하기 위한 지지대가 동축 내부에 존재하여 동축 지역을 연속적으로 제작하지 못한다. 여기서 발생하는 불연속성이 Type I 지그의 전기적 성능에 영향을 준다. 그러므로 그림 5와 같이 측정 결과가 시뮬레이션의 결과보다 높은 반사특성을 보인다. 반면 동축 지역이 연속적으



(a) 산란계수
(a) S-parameter



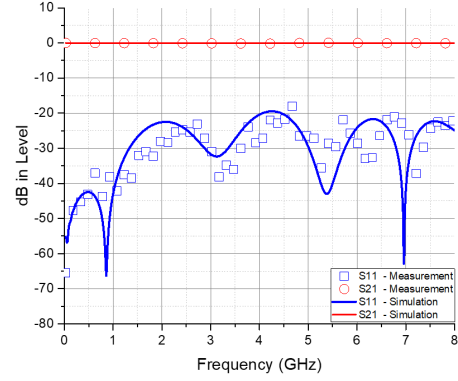
(b) VSWR
(b) VSWR

그림 5. Type I jig의 전기적 성능 비교
Fig. 5. Electrical performance of the Type I jig.

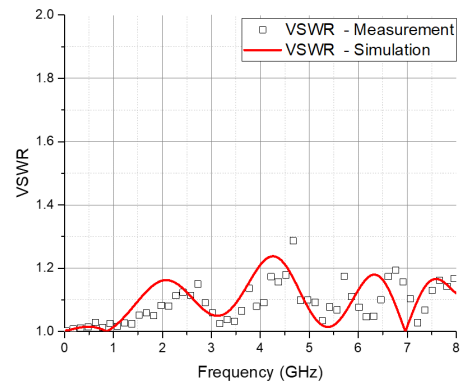
로 제작된 Type II 지그 전기적 성능은 그림 6과 같이 측정 결과와 시뮬레이션의 결과가 거의 유사하며 목표로 하는 전기적 성능을 만족한다. 4.66 GHz에서 가장 높은 반사특성(-18.02 dB)을 보이며, 전압정재파비 역시 모든 동작 주파수 범위에서 목표 성능을 만족하고 있다.

III. SWCNT 시료 제작 연구

본 논문에서는 최대 8 GHz까지 측정 가능한 동축 구조의 측정 지그를 사용하기 때문에 SWCNT를 균질한 평판형 시료로 제조할 수 있어야 한다. 이를 위해 버키페이퍼(buckypaper) 제조 방식을 채택하였다. 버키페이퍼 제조 방식은 상온·상압에서 수행되므로 SWCNT의 화학적 특



(a) 산란계수
(a) S-parameter



(b) VSWR
(b) VSWR

그림 6. Type II jig의 전기적 성능 비교
Fig. 6. Electrical performance of the Type II jig.

표 4. 지그별 가장 나쁜 전기적 성능 결과 비교
Table 4. The worst performance of the Type I and Type II jig.

Max S_{11} [dB]	Min S_{21} [dB]	Max VSWR
Type I jig		
-14.71 (@ 5.26 GHz)	-2.00 (@ 7.42 GHz)	1.45 (@ 5.26 GHz)
Type II jig		
-18.02 (@ 4.66 GHz)	-0.18 (@ 4.25 GHz)	1.28 (@ 4.66 GHz)

성에 영향을 주지 않으면서도 비교적 넓은 면적의 평판형 시료 제작이 가능하다.

SWCNT은 그림 7과 같이 분말 형태로 존재하므로 다

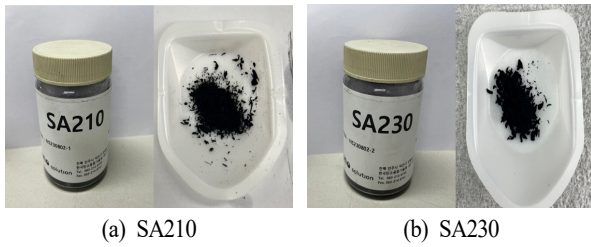


그림 7. 분말 형태의 SWCNTs
Fig. 7. SWCNTs powder.

음과정을 거쳐 종이 형태의 버키페이퍼로 제작된다. 버키페이퍼를 제작하기 위해 먼저 용매에 분말 형태의 SWCNT를 초음파 처리를 통해 분산시킨 후 멤브레인(membrane) 필터를 통해 분산액을 여과한다. 멤브레인 필터 위에 SWCNT의 박막이 형성되며 충분한 두께의 박막이 제조되면 이를 건조시켜 SWCNT 버키페이퍼가 제조된다.

버키페이퍼 제조 시 중요한 점은 분말형 SWCNT를 분산시킬 수 있는 용매선정과 SWCNT에 적절한 여과용 멤브레인 필터의 선정이다. 일반적으로 SWCNT를 분산시키기 위해서는 에탄올, 1,2-DCE(1,2-dichloroethane), DMF(dimethylformamide), THF(Tetrahydrofuran)과 같은 용매를 사용하는데, 이들 중 THF를 SWCNT 버키페이퍼를 제작을 위한 분산용매로 사용하였다. THF는 다른 분산용매들보다 SWCNT를 균일하게 분산시킬 수 있었으며 초음파 분산과정에서 표면의 손상을 최소화할 수 있다. 또한, 감압을 통해 분산액을 필터에 여과시킨 후 제작된 SWCNT 버키페이퍼로부터 용매의 증발 및 건조 시간이 빠르다는 장점이 있다. 이때 순도 99.8 % 이상의 분광 분석급 THF를 사용해야 한다.

THF에 SWCNT를 분산시킨 분산액 여과에 적절한 멤브레인 필터는 분산액과의 화학적 특성과 표면 구조를 고려하여 선정되어야 한다. 적절한 멤브레인 필터를 선정하기 위하여 다양한 멤브레인 필터를 사용하여 그림 8과 같이 버키페이퍼를 제작하여 그 결과를 살펴보았다. 사용한 필터는 PVDF 멤브레인 필터 1종과 패턴 유무에 따른 PTFE 멤브레인 필터 2종이다.

멤브레인 필터의 표면 특성에 따른 SWCNT 버키페이퍼 제작 상태를 보기위해 PVDF과 PTFE 멤브레인 필터를

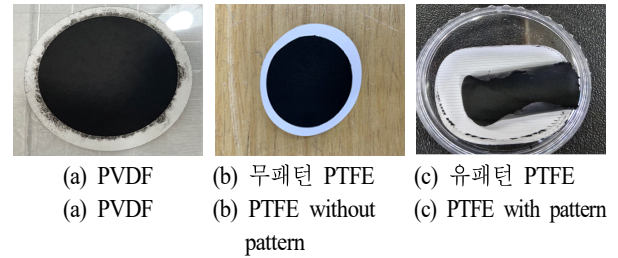


그림 8. 다양한 멤브레인 필터로 제작된 SWCNT 버키페이퍼
Fig. 8. SWCNT buckypaper with various membrane filters.

사용하여 각각 버키페이퍼를 제작하여 비교하였다. PVDF 멤브레인 필터를 사용한 버키페이퍼는 그림 8(a)와 같이 SWCNT가 고르게 분산되지 못하였다. 반면, 그림 8(b)와 같이 PTFE를 멤브레인 필터로 사용한 경우에는 SWCNT가 고르게 분산되어 균질한 버키페이퍼가 만들어졌다. 멤브레인 필터는 표면 특성에 따라 친수성과 소수성으로 분류되는데 분산용매로 사용한 THF가 유기용매이므로 표면 특성이 소수성인 PTFE 멤브레인 필터와 적절한 화학적 특성을 갖기 때문에 이와 같은 제작 결과를 보인다. 표면 구조에는 요철형 패턴이 있는 것과 없는 평면형 2종류가 있는데 버키페이퍼 건조 시 멤브레인 필터의 표면 구조에 따라 시료의 형태가 달라지는 것을 관찰하였다. 그림 8(c)와 같이 요철형 패턴이 있는 필터의 경우 건조된 버키페이퍼가 튜브 형태로 말리는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 감압하는 과정에서 패턴의 요철로 인하여 발생하는 압력 차이 및 해당 필터와 SWCNT의 표면 에너지 차이로 인하여 발생한 것으로 보인다.

위와 같이 제작된 SWCNT 버키페이퍼의 두께에 대한 균일도를 그림 9와 같이 주사형 전자현미경(scanning electron microscope: SEM)을 통해 분석하였다. 2종류의 SWCNT

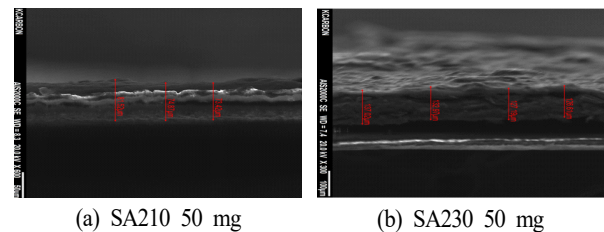


그림 9. SWCNT 버키페이퍼의 SEM 사진
Fig. 9. SEM images of the SWCNT buckypapers.

표 5. SWCNT 버키페이퍼의 두께

Table 5. Thickness of the buckypapers of SWCNTs.

Point	SWCNT-SA210 [μm]	SWCNT-SA230 [μm]
1	81.52	132.97
2	74.87	129.19
3	73.42	126.61
Average	76.60	129.59
Standard deviation	4.319	3.199

분말에 대한 버키페이퍼의 두께를 분석하였다. 분석 결과를 살펴보면 SA210 SWCNT는 평균 $76.60 \mu\text{m}$ 두께를 가지며 표준편차는 4.319이며, SA230 SWCNT는 평균 $129.59 \mu\text{m}$ 두께를 가지며 표준편차는 3.119이다. 버키페이퍼당 3곳의 두께를 측정하였으며, 관련 결과는 표 5에 정리하였다.

IV. 차폐효과 측정

4-1 측정 지그의 유효성 확인

제안하는 두 측정 지그에 대한 유효성을 확인하기 위해 이미 구축되어 사용되고 있는 ASTM D4935 표준에 기반한 차폐효과 시스템과 제안하는 두 측정 지그의 비교 시험을 수행하였다. 비교시험에서 사용한 시료는 시중에서 흔히 구매할 수 있는 차폐용 소재이다.

그림 10과 같이 ASTM D4935 표준 및 본 논문에서 제

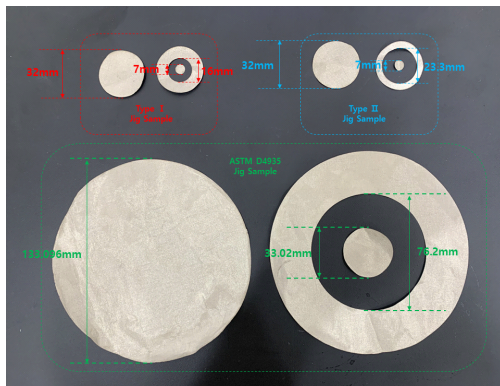
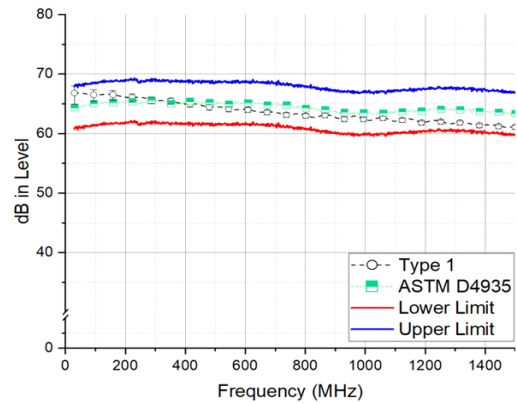


그림 10. 검증용 측정 시료

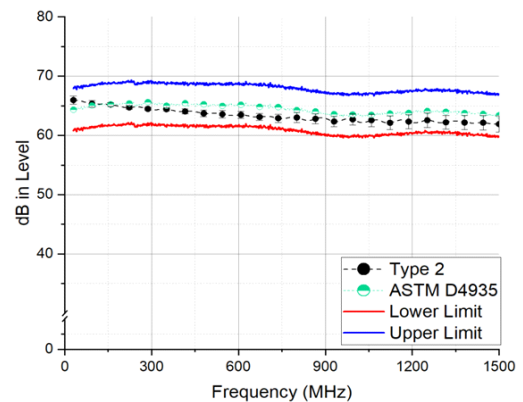
Fig. 10. Samples for verification.

시하는 소재의 형태 및 크기로 소재를 각각 재단하고 ASTM D4935의 동작 주파수인 30 MHz~1.5 GHz에서 비교시험을 수행하였다. 이미 구축된 ASTM D4935 표준 기반의 측정 시스템은 3.56 dB(신뢰구간 95 %, k=2)의 확장 불확도(expanded uncertainty)를 가지고 있으며, 동일한 시료에 대해서 이미 구축된 ASTM D4935 표준 기반 측정 시스템의 측정불확도 범위에 제안하는 두 측정 지그의 측정 결과값이 포함되는지 여부를 살펴보았다. 제안하는 두 측정 지그를 사용하여 총 5회씩 차폐효과 측정을 수행하였으며, 측정된 결과의 평균값, 최대값, 최소값을 그림 11과 같이 나타내었다.

그림 11의 비교 시험 결과를 살펴보면, 두 측정 지그의



(a) Type I



(b) Type II

그림 11. 기존 표준과 제안하는 지그의 측정 결과 비교

Fig. 11. Results of comparing the ASTM D4935 standard with proposed jigs.

측정 결과값 모두 ASTM D4935 기반 측정 시스템의 측정 불확도 범위 안에 포함하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 Type I 과 Type II 지그의 유효성을 확인하였다.

4-2 SWCNT의 차폐효과 측정

III장에서 제시한 SWCNT 시료 제작 방법으로 분말 형태로 존재하는 SWCNT를 그림 12와 같이 측정 시료로 제작하여 Type I 과 Type II 지그로 SWCNT의 차폐효과를 측정하였다.

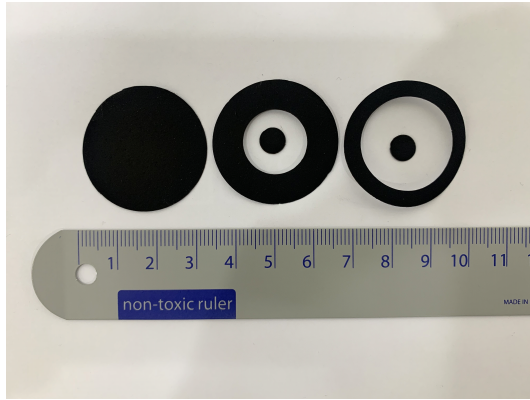
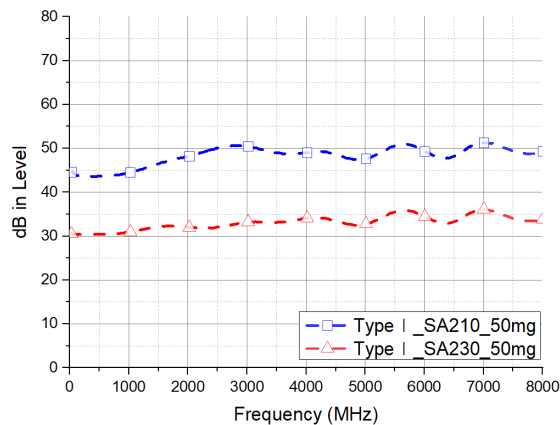
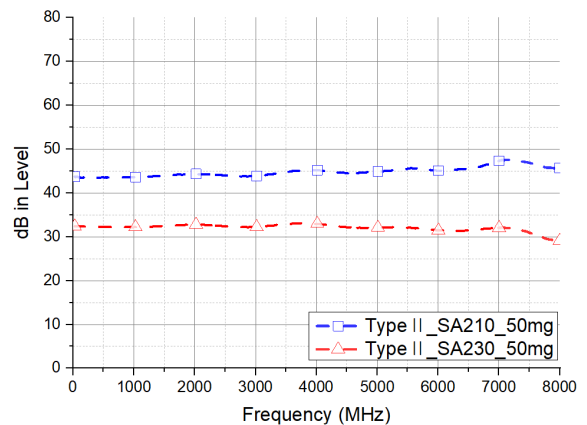


그림 12. SWCNT 차폐효과 측정용 시료
Fig. 12. Test samples for SE of the SWCNT.



(a) Type I 지그
(a) Type I jig



(b) Type II 지그
(b) Type II jig

그림 13. SWCNT 종류에 따른 차폐효과 측정 결과
Fig. 13. SE results by the types of SWCNTs.

두 종류의 SWCNT 분말을 측정 시료로 제작하였는데, 한 종류는 순도가 20~30 wt%인 SWCNT(SA210)이고, 다른 종류는 순도가 95 wt% 이상인 SWCNT(SA230)이다. 여기서 순도는 SWCNT 분말 중 SWCNT가 차지하는 정도를 의미하며, 순도가 높을수록 금속 함량이 낮고 SWCNT 함량이 높은 것을 의미한다. 사용된 SWCNT 분말의 특성은 제조사에서 제공하며 표 6과 같다. 두 종류의 SWCNT 모두 50 mg의 함량으로 측정 시료를 제작 후 차폐효과를 측정하였다.

그림 13은 SWCNT 분말 종류별 50 mg의 측정 시료의 차폐효과를 측정한 결과이다. 측정 결과를 살펴보면 Type I 과 Type II 지그의 측정 결과가 유사한 것을 볼 수 있으며, SA210 SWCNT가 SA230 SWCNT보다 높은 차폐 성능을 보인다. 이러한 결과는 SA210 SWCNT의 순도가 SA230 SWCNT 보다 낮기 때문이다. 즉, 금속 성분이 더

표 6. 사용된 분말 형태의 SWCNT 특성
Table 6. Properties of the used SWCNT powders.

Type	SA210	SA230
Diameter [nm]	1.4~1.7	1.4~1.7
Legnth [μ m]	5~20	5~20
Purity [wt%]	20~30	> 95
Tap density [g/cc]	0.04	0.02

많이 함유된 SA210 SWCNT가 더 높은 차폐 성능을 보이는 것이다. 그림 13의 결과 중 Type I 지그로 측정한 결과를 살펴보면 5 GHz 이상에서 다소 ripple이 발생하는 현상이 보인다. 이러한 결과는 그림 5에서 볼 수 있는 Type I 지그의 전기적 특성에 따른 결과로 다소 높은 반사특성 때문에 나타나는 결과로 해석할 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 최신 기술 발전에 따라 광범위하게 활용되고 있는 나노소재 중 대표적인 소재인 단일벽 탄소나노튜브의 전자기파 차폐효과 측정을 위한 방법을 제시하였다.

기존에 소재의 차폐효과 측정에 널리 사용되고 있는 동축 구조의 측정 지그를 사용한 측정 방법을 선정함에 따라 단일벽 탄소나노튜브를 경제적이고 비교적 손쉽게 평판형 측정 시료로 제작할 수 있는 방법에 대해 연구하여 측정 시료의 형태 및 크기를 정의하였다. 정의된 측정 시료의 물리적 특성을 고려하여 최대 8 GHz의 동작 주파수를 갖는 2종류의 동축 지그를 3D 전자파 시뮬레이션을 통해 설계하고 제작하였다. 현재 널리 사용되고 있는 ASTM D4935 표준 측정법과의 비교 시험을 통하여 제안하는 측정 지그의 유효성을 확인하였다.

SWCNT의 차폐성능을 파악하기 위해 2종류의 SWCNT 분말을 선정하여 SWCNT 측정 시료의 차폐효과를 측정하였다. 측정 결과를 통해 SWCNT의 분말 종류의 특성에 따라 차폐효과가 달라지는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 소재공학적 관점과 전자공학적 관점을 모두 고려하여 SWCNT의 차폐효과를 측정하기 위한 측정 시료, 측정 방법 및 지그에 대해 연구를 수행하였고 ASTM D4935 표준보다 높은 동작 주파수에서 나노소재인 SWCNT의 차폐효과를 측정할 수 있는 기반을 마련하였다.

References

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [2] *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, ASTM International, ASTM D4935-10, 2010.
- [3] C. J. Lee, H. H. Park, "Design of an ASTM D4935 jig with a low reflection loss," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 6, pp. 567-570, Jun. 2020.
- [4] H. H. Park, "Design of compact transition from conical to coaxial transmission lines with a low return loss," *International Journal of Electronics*, vol. 108, no. 8, pp. 1426-1438, Jan. 2021.
- [5] H. H. Park, "Electromagnetic shielding analysis of planar materials using ASTM D4935 standard fixture," *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 5, pp. 1767-1778, Oct. 2022.
- [6] A. Tamburrano, D. Desideri, A. Maschio, and M. S. Sarto, "Coaxial waveguide methods for shielding effectiveness measurement of planar materials up to 18 GHz," *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1386-1395, Dec. 2014.
- [7] A. Amaro, A. Suarez, A. Tamburrano, J. Torres, F. Marra, and P. A. Martinez, et al., "EMI shielding effectiveness study for innovative carbon nanotube materials in the 5G frequency region," *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 1, pp. 177-185, Feb. 2023.
- [8] M. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 6th ed. New York, NY, Oxford University Press, 2014.

이 한 희 [한국산업기술시험원/주임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8515-971X>



2018년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공
전자공학과 (공학사)
2018년 2월~2022년 2월: 한국항공대학교
항공전자정보공학과 (공학석사)
2019년 12월~현재: 한국산업기술시험원
전파응용기술센터 주임연구원
2023~현재: 한국항공대학교 항공전자정

보공학과 박사과정

[주 관심분야] EMI/EMC/EMP, 소재의 특성 및 물성 등

김 정 수 [전주대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0009-0006-8190-829X>



1995년 2월: 홍익대학교 공업화학과 (공학
사)
1998년 2월: 홍익대학교 공업화학과 (공학
석사)
2023년 8월: 전북대학교 유연인쇄전자공
학과 (공학박사)
[주관심분야] 나노소재, 분산기술, 광산

란, EMC 등

윤 상 옥 [한국산업기술시험원/센터장]

<https://orcid.org/0009-0008-3382-8548>



2001년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학
부 (공학사)
2009년 8월: 한양대학교 전자공학과 (공학
석사)
2001년 1월~현재: 한국산업기술시험원
전파응용기술센터 센터장
[주 관심분야] EMC, EMF, EMP 등

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학
사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)
1998년 3월~2004년 2월: 한국전자통신연

구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, 능, 수동 소자 해석
및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테
나 설계, 위성 통신 안테나, 전자장 수치 해석

이 해 성 [전주대학교/교수]

<https://orcid.org/0009-0003-2264-5651>



1983년 2월: 서울대학교 화학과 (이학+사)
1985년 2월: 서울대학교 화학과 (이학석사)
1996년 8월: 미국 Johns Hopkins University
화학과 (이학박사)
2007년 3월~현재: 전주대학교 탄소나노
신소재공학과 교수
[주 관심분야] 나노소재 및 복합소재, 소
재분석, 탄소소재, EMC 등