

## 에폭시 내부의 MWNT 응집 크기에 따른 복소유전율 변화의 해석적 관찰

신재환\* · 장홍규\*\* · 최원호\* · 송태훈\* · 김천곤\*\*\*† · 이우용\*\*\*\*

### Numerical Analysis of the Complex Permittivity of MWNT added Epoxy Depending on Agglomeration Size

Jae-Hwan Shin\*, Hong-Kyu Jang\*\*, Won-Ho Choi\*, Tae-Hoon Song\*,  
Chun-Gon Kim\*\*\*†, Woo-Yong Lee\*\*\*\*

**ABSTRACT:** This paper predicts the complex permittivity of MWNT added epoxy depending on agglomeration by numerical analysis. 1wt% MWNT added epoxy specimen is prepared using 3-roll-mill method and its complex permittivity is measured in X-band (8.2~12.4 GHz) using freespace measurement system. The analytic model is comprised of cube epoxy and perfect sphere agglomeration. The complex permittivity of the agglomeration model is predicted by complex permittivity mixing rule using the measured complex permittivity of epoxy and 1 wt% MWNT added epoxy. Commercial electromagnetic analysis software, CST, is used to obtain S-parameter of the analytic model and MATLAB code is used to calculate complex permittivity from the S-parameter. It is confirmed that the complex permittivity increases when the agglomeration size decreases.

**초 록:** 본 연구에서는 MWNT(Multi-walled carbon nanotube)의 응집크기와 복소유전율의 관계를 수치해석적인 방법을 통하여 접근하였다. 이를 위하여 3-roll-mill 장비를 사용하여 1 wt% MWNT가 첨가된 에폭시 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 X-band(8.2~12.4 GHz)에서 네트워크 분석기와 자유공간 측정 장비를 이용하여 복소유전율을 측정하였다. 측정된 복소유전율과 복소유전율 혼합 모델을 이용하여 에폭시와 MWNT 응집으로 이루어진 해석 모델의 유전율을 결정하였다. 해석 모델은 앞서 말한 것과 같이 에폭시와 MWNT의 응집으로 이루어져 있으며, 정육면체 에폭시 내에 구 형태의 MWNT 응집을 가정하였다. 이에 따라 에폭시와 MWNT의 부피비율은 고정되며, 변수는 응집의 크기로 한정하였다. 수치해석은 상용 전자기 해석프로그램인 CST를 사용하였다. CST로부터 모델의 S-parameter를 얻었고, 복소유전율은 Nicolson 방법을 사용하여 얻었다. MATLAB으로 코드를 만들어 S-parameter로부터 복소유전율을 얻었다. 수치해석 결과 응집의 크기가 작아질수록 복소유전율 값이 높아지는 모습을 살펴볼 수 있었으며, 이는 나노 입자의 이용에 있어서 분산도는 기계적인 특성뿐 아니라 전자기적 특성인 복소유전율에도 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 같은 나노 입자 함량에서 분산도가 좋을수록 높은 복소유전율을 기대할 수 있다.

**Key Words:** 복소유전율(Complex permittivity), 응집(Agglomeration), 수치해석(Numerical analysis), 다중벽탄소나노튜브(MWNT)

Received 14 August 2014, received in revised form 27 October 2014, accepted 29 October 2014

\*Department of Aerospace Engineering, KAIST

\*\*Composites Research Center, Korea Institute of Materials Science (KIMS)

\*\*\*†Department of Aerospace Engineering, KAIST, Corresponding author (E-mail: cgkim@kaist.ac.kr)

\*\*\*\*Agency for Defense Development (ADD)

## 1. 서 론

적의 접근을 파악하고, 적의 위치 및 거리를 가늠하게 하는 레이더는 제 2차 세계대전 중 전투기나 군함의 움직임을 추적할 목적으로 이용되면서 크게 발달하였다. 이후 지속적인 발전을 거듭하여, 현대 군 시설의 핵심요소로 자리 잡았다.

이처럼 레이더가 발달함에 따라 레이더를 회피하는 기술인 스텔스(Stealth) 역시 많은 발전을 이루었다. 사실 스텔스 기술이란 상대의 레이더, 적외선 탐지기, 음향탐지기 및 육안에 의한 탐지를 포함한 모든 탐지기능에 대항하는 은폐기술을 일컫는다. 그 중, 레이더에서 발생한 전자파(Electromagnetic Wave)를 흡수 또는 산란시켜 포착되지 않도록 하는 기술이 일반적으로 스텔스 기술 중 가장 중요한 핵심 기술로 뽑힌다. 스텔스 기술을 적용하게 되면 상대방에게 쉽게 노출되지 않을 뿐만 아니라, 노출된 경우라도 탐지된 신호가 축소 혹은 왜곡된 상태이기 때문에, 상대방으로 하여금 정확한 상황 판단을 어렵게 만들고, 추적, 사격 통제, 요격으로 이어지는 타격 순환의 각 단계를 모두 어렵게 함으로써 전장에서 생존 확률을 현저히 증가시키게 된다.

이런 이유로 레이더에서 발생한 전자파를 왜곡 또는 흡수하기 위해 연구자들은 다양한 방법으로 접근하였으며 알려진 방식 중 대표적인 것들은 다음과 같다. 입사하는 전자파를 레이더의 방향이 아닌 다른 방향으로 산란시키는 형상화 방법(Stealth Shaping Design)과 전자파를 흡수 또는 간섭을 통해 최소화시키는 전자파 흡수재료(Radar Absorbing Material, RAM) 및 전자파 흡수구조(Radar Absorbing Structure, RAS)가 있다. 이러한 방법을 이용하여 레이더의 입사파에 의해 발생하는 반사파를 줄일 수 있으며, 이는 곧 레이더 반사면적(Radar Cross Section, RCS)의 감소로 이어진다.

일반적으로 RAM 또는 RAS는 다양한 나노입자 손실재료를 이용하여 스텔스 성능을 구현하게 된다. 이러한 나노입자의 이용에 있어서 분산의 문제는 항상 나노입자의 이용을 방해하는 큰 걸림돌이었다[1-3]. 특히 낮은 분산도로 인한 나노입자들의 응집으로 인해 발생하는 기계적 물성의 저하는 큰 문제였다. 이를 해결하고 나노입자 본연의 뛰어난 기계적 물성을 이용하기 위하여 분산도를 높이기 위한 연구가 많이 진행되었다[4-10]. 현재 알려진 방법 중에서는 three-roll-mill 장비를 사용하여 분산하는 방법이 가장 높은 분산도를 보여주는 것으로 알려져 있다[11].

앞서 말한 것과 같이 분산과 기계적 물성에 관해서는 많은 연구가 이루어져 있지만, 전자기적 물성에 관해서는 분산과 전기전도도와 관련된 연구가 주를 이루고 있으며, 복소유전율에 관한 연구는 찾기가 힘들다. 복소유전율과 분산의 관계를 언급하고 있더라도 둘 사이의 정량적인 분석은 찾기가 어렵다[12]. 나노입자의 응집은 미시적으로 전자

기과의 필드 분포에 영향을 주기 때문에 기계적 물성뿐만 아니라 거시적인 전자기적 특성인 복소유전율에도 영향을 줄 것으로 예상된다. 나노입자를 같은 함량으로 혼합하였을 때, 분산도에 따라 복소유전율이 변화하게 되고, 분산도가 좋을수록 높은 복소유전율이 높아지는 경향이 나타난다면 더 낮은 함량에서 원하는 유전율을 구현하여 나노입자가 첨가된 복합재의 제작성을 높일 수 있다. 따라서 나노입자 응집 크기에 복소유전율 변화를 알아보는 본 연구는 스텔스 기술 구현을 위한 기초 연구 중 하나이다.

본 연구에서는 three-roll-mill을 사용하여 에폭시와 MWNT를 혼합한 시편을 제작하고, 이 시편의 X-band 유전율을 바탕으로 복소유전율 혼합 모델을 사용하여 MWNT 응집의 복소유전율을 추정하였다. 그리고 에폭시와 MWNT 응집으로 이루어진 복합재 모델을 만들어, 상용 전자기 해석프로그램인 CST를 사용하여 응집의 크기에 따른 복소유전율의 변화를 살펴보았다.

## 2. MWNT 첨가 에폭시

### 2.1 재료 선정

본 연구에서 시편 제작에 사용한 MWNT는 한화나노텍에서 제작한 CM-95제품이다. 이 제품은 화학 기상 증착법을 이용하여 제작되었으며, 직경은 10~15 nm이고 탄소 순도는 95% 이상이다. 기지로 사용한 에폭시는 국도화학의 YD-128로 접착력, 내화학성, 내열성 등이 우수하며 복합재료에서는 필라멘트 와인딩(Filament winding)이나 유리 섬유 강화 복합재의 기지로 쓰인다. 경화제는 국도화학의 TH-431제품을 사용하였으며 YD-128과 100:60의 비율로 혼합하여 사용하였다. 혼합된 에폭시와 경화제는 오븐을 이용하여 80°C에서 4시간 조건으로 경화하였다.

### 2.2 제작 과정

three-roll-mill은 반대로 회전하는 롤러 사이에서 발생하는 전단력을 이용하여 나노입자를 분산하는 장비이다. MWNT, 에폭시, 경화제를 동시에 혼합하여 분산을 수행하기 때문에 분산 시간 및 시편 제작 시간이 짧다. 하지만 기기의 한계로 인하여 동시에 많은 양을 제조하기에는 힘든 단점이 있다. 또한 분산 과정 중 눈에는 보이지 않는 작은 기포가 에폭시에 많이 생기므로 이것을 제거하기 위한 진공에서의 탈포 과정을 거쳐야 한다. 이런 단점에도 불구하고 three-roll-mill을 이용한 분산법은 화학적 처리를 거치지 않는 기계적 분산법 중 가장 우수하다고 알려져 있다[11]. 용매를 사용하지 않고, 기계의 크기를 키우면 대량으로도 제작이 가능하며, 일정한 전단력을 가할 수 있고, 쉽게 높은 탄소나노입자 함량을 가진 시편의 제작도 가능하다.

본 연구에서는 분산시 롤러의 간격을 조절해가며 7번의 작업을 수행하였다. 분산 횟수에 따른 롤러의 간격은 Table



Fig. 1. Three-roll-mill (dispersion equipment)

Table 1. Roller gap of three-roll-mill for each step

Roller gap	1	2	3	4	5	6	7
1 - 2 ( $\mu\text{m}$ )	55	30	5	5	5	5	5
2 - 3 ( $\mu\text{m}$ )	30	5	5	5	5	5	5

1과 같다. 본 연구에서 사용한 three-roll-mill은 Exakt 사의 80S 제품으로 최대 125  $\mu\text{m}$ 에서 최소 5  $\mu\text{m}$ 까지 간격 롤러 간격 조절이 가능하다. 에폭시 내 MWNT는 1 wt%의 함량으로 혼합하였다.

### 3. 배경 이론

#### 3.1 복소유전율 혼합 모델

본 연구에서 사용하기 적합한 유전율 혼합모델을 알아보기 위하여, MWNT가 1 wt% 분산된 에폭시와 그래핀이 1 wt% 분산된 에폭시를 이용하여 이들의 부피비를 조절해 가며 혼합하여 복소유전율의 변화를 살펴보았다. 제작된

Table 2. Volume ratio

Material	Volume ratio (vol%)				
MWNT 1 wt%	100	75	50	25	0
Graphene 1 wt%	0	25	50	75	100

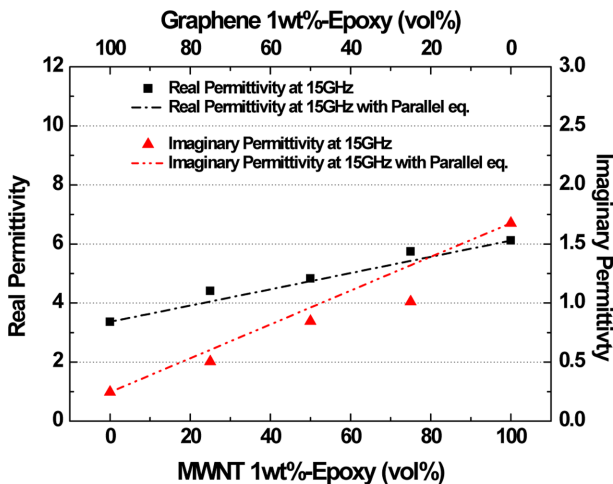


Fig. 2. Complex permittivity depending on volume ratio

시편의 부피비는 Table 2와 같으며 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 복소유전율은 Ku-band (12.4~18 GHz) 대역에서 측정되었으며, Fig. 2에는 15 GHz의 결과를 나타내었다.

Fig. 2에 나타나 있는 결과를 살펴보면, 혼합된 물질의 복소유전율은 각 재료의 부피비율 및 복소유전율의 선형조합으로 나타낼 수 있음을 보여준다. 이에 따라 본 연구에서는 식 (1), (2)와 같은 간단한 복소유전율 혼합 모델(Parallel equation)을 사용하였다.

$$\varepsilon' = \varepsilon_1'v_1 + \varepsilon_2'v_2 \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_1''v_1 + \varepsilon_2''v_2 \quad (2)$$

$\varepsilon'$  과  $\varepsilon''$  는 각각 혼합된 물질의 복소유전율 실수부 및 허수부를 나타내며, 혼합된 물질의 유전율은 혼합에 사용된 두 물질의 유전율  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  및 두 물질의 부피비(volume fraction)인  $v_1$ ,  $v_2$ 로 표현될 수 있다.

#### 3.2 복소유전율 계산

고주파대역(GHz)에서 어떠한 물질의 복소유전율을 곧바로 구해낼 수는 없다. 이에 따라 S-parameter 개념을 사용하여 구한다. 네트워크 분석기의 1번 포트에서 나온 신호를 다시 1번 포트에서 받은 S-parameter인  $S_{11}$ 과 1번 포트에서 나온 신호를 2번 포트에서 받은 S-parameter인  $S_{21}$ 의 크기와 위상으로 다음 식들과 같이 표현되는 Nicolson 방식을 이용하여 복소유전율을 계산할 수 있다[13].

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (3)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (4)$$

$$X = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} \quad (5)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} (|\Gamma| \leq 1) \quad (6)$$

$$z = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1 \Gamma} \quad (7)$$

$$\frac{\mu_r}{\varepsilon_r} = \left( \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^2 = c_1 \quad (8)$$

$$\mu_r \varepsilon_r = - \left\{ \frac{c}{\omega d} \ln \left( \frac{1}{z} \right) \right\} = c_2 \quad (9)$$

위 식에서  $\Gamma$ 는 반사계수(reflection coefficient)를 나타내며,  $z$ 는 전송계수(transmission coefficient)를 나타낸다.  $c$ 는 빛의 속도이며,  $w$ 는 측정주파수,  $d$ 는 측정 시편의 두께이다. 위의 식들로부터 상대유전율  $\varepsilon_r$ 과 상대투자율  $\mu_r$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_r = \sqrt{c_1 c_2}, \quad \varepsilon_r = \sqrt{\frac{c_2}{c_1}} \quad (10)$$

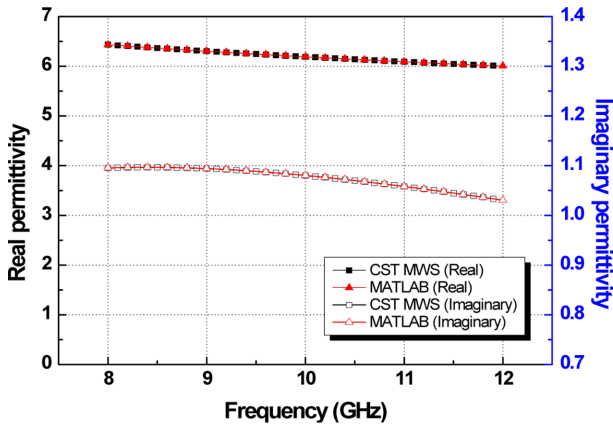


Fig. 3. MATLAB code verification

본 연구에서는 위 식들을 바탕으로 MATLAB을 사용하여  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 으로부터 복소유전율을 계산하는 코드를 구현하였다. 코드의 검증은 MWS CST 상용 전자기 해석 프로그램을 사용하여 진행하였다. CST를 사용하여 모델을 만들고 모델의 유전율 값을 임의로 넣어준 후 FDTD solver인 T-solver를 이용하여 S-parameter를 얻었다. 그리고 그 중  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 의 크기 및 위상을 사용하여 구현한 MATLAB 코드를 사용하여 처음 모델에 입력하였던 복소유전율 값과 비교하였다. 비교 결과는 Fig. 3과 같다.

위의 Fig. 3에서 알 수 있듯이 처음 모델에 넣어 주었던 복소유전율 값과 CST를 사용하여  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 얻고 이것을 사용하여 구한 복소유전율 값이 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 우리가 구현한 MATLAB 코드를 사용하여 S-parameter로부터 복소유전율 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

### 4. 모델링 및 해석

#### 4.1 모델링

본 연구에서는 MWNT 응집 크기에 따른 유전율의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 4와 같은 단위 구조(unit cell)를 가 정하였다.

한 변이  $d$ 의 길이를 갖는 정육면체 에폭시 내에  $0.9d$ 의 지름을 가지는 구 형태의 MWNT 응집이 정육면체 중앙에 존

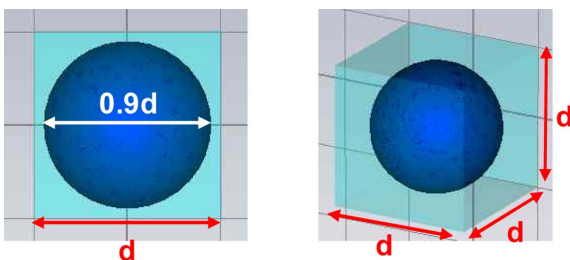


Fig. 4. Analysis model for complex permittivity calculation

재한다. 이와 같은 모델을 통하여 응집이 다른 응집과 연결 되는 것을 방지하였으며, 부피가 커지거나 응집의 크기, 즉  $d$ 의 크기가 바뀌더라도 전체 부피에서 응집과 에폭시의 부 피비는 그대로 유지할 수 있다. 따라서 응집의 크기에 상관 없이 첨가된 MWNT의 양이 동일하며, 응집 정도에 따른 복 소유전율의 변화를 살펴볼 수 있다.

S-parameter를 구하기에 앞서, 에폭시와 응집의 복소유전 율을 Table 3과 같이 정하였다. 에폭시와 MWNT 1 wt% 첨 가 에폭시의 유전율은 네트워크 분석기와 자유공간측정법 을 사용하여 측정된 데이터이며, 응집의 복소유전율은 3.1 장의 복소유전율 혼합모델인 식 (1), (2)를 사용하여 에폭 시와 응집을 혼합하여 MWNT 1wt% 첨가 에폭시의 복소 유 전율을 도출해 내는 응집의 복소유전율 값을 계산 후, 연구 에 사용하였다.

본 연구에서는 총 7개의 모델을 사용하였으며,  $d$ 의 크기 에 따라 2가지 종류로 나누었다. Type 1은 가로  $\times$  높이  $\times$  깊 이( $W \times H \times D$ )의 크기가  $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 이며 Type 2는  $d$ 가 작아짐에 따라 조금 더 작은 크기를 갖는다. 본 연구에서는 3.2장에서 언급한 바와 같이 CST 프로그램의 FDTD solver 를 사용하여 연구를 진행하였으며,  $d$ 의 크기가 작아짐에 따 라 해석을 위한 격자(mesh)의 크기도 함께 줄어들게 되어 해석 시간이 증가하였다. 이러한 이유로  $d$ 의 크기에 따라 해석 모델의 크기를 조절하였다.  $d$ 가 1mm인 조건에서 확 인하여 본 결과 해석 모델 크기에 따른 복소유전율의 차이 는 없었다. 각 모델의  $d$  및 크기는 다음 Table 3과 같다.  $d$ 의 최소 크기는 시편 제작 시 사용한 three-roll-mill의 최소 간 격인  $5 \mu\text{m}$ 를 사용하였다.

#### 4.2 해석결과

앞서 가정한 모델과 복소유전율을 사용하여 상용 전자

Table 3. Complex permittivity of materials (10 GHz)

Material	$\epsilon'$	$\epsilon''$
Epoxy	3	0.03
1wt% MWNT added Epoxy	6.19	1.08
Agglomeration(estimated value)	11.14	2.71

Table 4. Analysis model dimensions

Type	$d$ (mm)	$W \times H \times D$ (mm)
Type 1	2	$2 \times 2 \times 2$
	1	
	0.5	
	0.1	
Type 2	0.05	$2 \times 2 \times 0.5$
	0.01	$0.1 \times 0.1 \times 0.1$
	0.005	$0.08 \times 0.08 \times 0.025$

기 해석프로그램인 CST를 사용하여 각 모델에서의 S-parameter 크기 및 위상을 얻을 수 있었다. 주파수 대역은 X-band 대역으로서 해석에서는 8~12 GHz 구간을 사용하였다. S-parameter는 다시 MATLAB 코드를 사용하여 복소유전율로 변환 되었으며, d의 크기에 따른 복소유전율은 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다.

Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같이 복소유전율의 실수부 및 허수부 모두 d의 크기가 작아짐에 따라 증가하는 모습을 보여

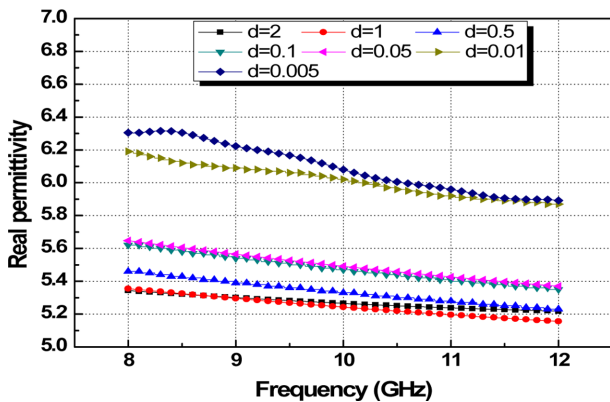


Fig. 5. Real permittivity (analysis results)

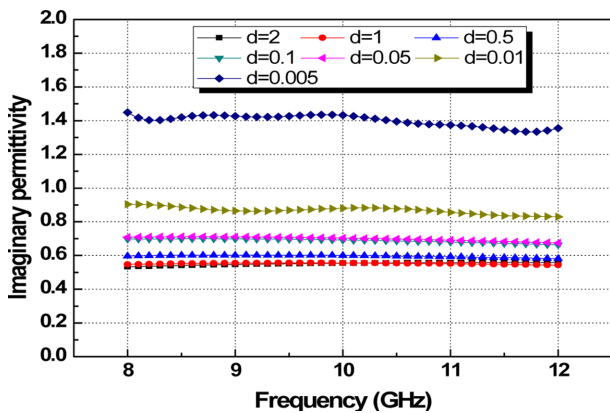


Fig. 6. Imaginary permittivity (analysis results)

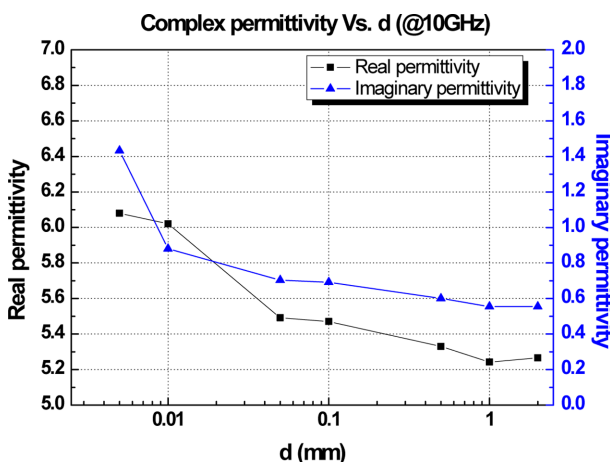


Fig. 7. Complex permittivity of the analysis results at 10 GHz

주었다. 이는 같은 양의 MWNT가 첨가되더라도 응집의 크기에 따라 복소유전율이 변화할 수 있음을 보여주고 있다. 그래프에서 d에 따른 복소유전율의 변화를 살펴보면 d = 0.05 mm에서 d = 0.01 mm로 감소할 때 복소유전율의 실수부에서 큰 증가가 나타나고, 허수부는 d = 0.01 mm에서 d = 0.005mm로 감소할 때 크게 증가하는 모습을 알 수 있다.

Fig. 7은 중심주파수인 10 GHz에서의 변화를 살펴본 그래프이다. 복소유전율의 실수부 및 허수부 모두 d가 감소함에 따라 증가하는 모습을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 MWNT 응집 크기에 따른 복소유전율의 변화를 알아보기 위하여 정육면체의 에폭시 내에 구의 형태로 응집되어 있는 MWNT 응집체를 가정하였다. MWNT 응집체의 복소유전율은 Three-roll-mill을 사용하여 제작한 MWNT 1wt% 함량의 에폭시 시편의 복소유전율을 측정 한 후 이 복소유전율을 사용하여 복소유전율 혼합 법칙을 사용하여 구하였다. 위의 모델을 상용전자기 해석프로그램인 CST MWS를 사용하여 응집의 크기를 달리한 모델의 S-parameter의 크기와 위상을 얻었다. 그리고 MATLAB을 사용하여 Nicolson 방식으로 S-parameter를 복소유전율로 환산하는 코드를 만들어 모델의 복소유전율을 계산하였다.

최종적으로 응집크기에 따른 복소유전율의 변화 결과는 응집의 크기가 작을수록 높은 복소유전율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 모든 모델에서 에폭시와 응집의 부피비는 같았다. 따라서 복소유전율의 변화는 응집의 크기에 따라 변화하였다고 생각할 수 있다. 즉, 나노 입자의 이용에 있어서 분산도는 기계적인 특성뿐 아니라 전자기적 특성인 복소유전율에도 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 같은 나노 입자 함량에서 분산도가 좋을수록 높은 복소유전율을 기대할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

1. Park, J.Y., and Kim, J.Y., "The Role of Nano-particles on the Material Properties of Epoxy/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-composites," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 30, No. 5, 2002, pp. 88-93.
2. Lee, S.E., Lee, W.J., and Kim, C.G., "A Study on Tensile Properties of Multi-Welld Carbon Nanotube/Epoxy Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17,

- No. 6, 2004, pp. 1-7
3. Kong, J.W., Chung, S.S., and Kim, T.W., "A Study on Mechanical Properties of Carbon Nanofiber/Epoxy Composites with Dispersion Methods," Proceeding of the Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials, Pohang, Korea, Apr. 2004, pp. 151-154.
  4. Sandler, J., Shaffer, M.S.P., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K., and Windle, A.H., "Development of a Dispersion Process for Carbon Nanotubes in an Epoxy Matrix and the Resulting Electrical Properties," *Polymer*, Vol. 40, 1999, pp. 5967-5971.
  5. Kim, H.C., Lee, S.E., Kim, C.G., and Lee, J.J., "A Study on the Dispersion of Multi-walled Nanotube of MWNT/PMMA Nanocomposites," Proceeding of the Fall Conference of the Korean Society for Composite Materials, Daejeon, Korea, Oct. 2003, pp. 29-32.
  6. Li, C.C., Lin, J.L., Huang, S.J., Lee, J.T., and Chen, C.H., "A New and Acid-exclusive Method for Dispersing Carbon Multi-walled Nanotubes in Aqueous Suspensions," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 297, No. 1, 2007, pp. 275-281.
  7. Ausman, K.D., Piner, R., Lourie, O., Ruoff, R.S., and Korobov, M., "Organic Solvent Dispersions of Single-walled Carbon Nanotubes: Toward Solutions of Pristine Nanotubes," *The Journal of Physical Chemistry B, Condensed Matter, Materials, Surfaces, Interfaces & Biophysical*, Vol. 103, No. 38, 2000, pp. 8911-8915.
  8. Patole, A.S., Patole, S.P., Kang, H., Yoo, J.B., Kim, T.H., and Ahn, J.H., "A Facile Approach to the Fabrication of Graphene/polystyrene Nanocomposite by in situ Microemulsion Polymerization," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 350, No. 2, 2010, pp. 530-537.
  9. Pang, H., Chen, T., Zhang, G., Zeng, B., and Li, Z.M., "An Electrically Conducting Polymer/graphene Composite with a very Low Percolation Threshold," *Materials Letters*, Vol. 64, No. 20, 2010, pp. 2226-2229.
  10. Shen, J., Li, N., Shi, M., Hu, Y., and Ye, M., "Covalent Synthesis of Organophilic Chemically Functionalized Graphene Sheets," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 348, 2010, pp. 377-383
  11. Rosca, I.D., and Hoa, S.V., "Highly Conductive Multiwall Carbon Nanotube and Epoxy Composites Produced by Three-roll Milling," *Carbon*, Vol. 47, No. 8, 2009, pp. 1958-1968.
  12. Lee, S.E., Park, K.Y., Kim, C.G., and Han, J.H., "A Study on Permittivity of Multi-walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 38-44.
  13. Nicolson, A.M., and Ross, G.F., "Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 19, No. 4, 1970, pp. 377-382.