

# 구리/그래핀 복합재의 전기전도도에 미치는 그래핀 입자 및 체적분율의 영향

## Effect of Graphene Platelets and the Volume Fraction on Electrical Conductivity of Cu/Graphene Composites

박준석\* · 김송미\* · 박우림\*\* · 권오현\*\*\*†

Jun-Seok Park\*, Song-Mi Kim\*, Woo-Rim Park\*\* and Oh-Heon Kwon\*\*\*†

(Received 20 September 2022, Revision received 07 December 2022, Accepted 08 December 2022)

**Abstract :** Cu is most commonly used as a matrix in composites for high electrical and thermal conductivity. Recently, graphene has been researched to improve mechanical and electrical properties as reinforcing materials of composites owing to its excellent physical characteristics. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the effects in electrical conductivity according to the shape, structure, and the volume fraction of the graphene reinforcement for Cu/graphene composites. For the evaluation of the variation in electrical conductivity according to the shape and the volume fraction of graphene platelets, RVE was analyzed for models in the location and orientation of graphene which were randomly arranged or not. The change in electrical conductivity of the volume fraction and aspect ratio of graphene platelets was evaluated by using the ABAQUS program. Depending on the angle of graphene platelets, the electrical conductivity was the highest at 0°. In addition, in a relatively high volume fraction model, the electrical conductivity decreased quickly according to increase in the angle, and the variation was changed at angle 45° for the AR.

**Key Words :** Aspect Ratio, Electrical Conductivity, Graphene Platelet, RVE, Volume Fraction

### 1. 서 론

최근 산업의 고도화 및 산업기기의 발전으로 기존 재료가 가진 물성의 한계를 뛰어넘는 물질

에 대한 요구가 많아지고 있다. 나노 기술의 급격한 발전과 나노 구조에 대한 이해가 높아지며 저차원 탄소 동소체와 같은 신소재가 각광받고 있다. 저차원 탄소 동소체의 종류로는 탄소섬유, 탄

\*\*\*† 권오현(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4026-293X)

: 교수, 부경대학교 안전공학과

E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469

\*박준석(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7318-0418),

\*김송미(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2356-3776) : 대학원생, 부경대학교 안전공학과

\*\*박우림(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1639-3924) : 대리, 대한산업안전협회 안전교육본부

\*\*\*† Oh-Heon Kwon(ORCID: https:// orcid.org/ 0000- 0003-4026-293X)

: Professor, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469

\*Jun-Seok Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7318-0418),

\*Song-Mi Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2356-3776) : Graduate student, Department of Safety Engineering, Pukyong National University.

\*\*Woo-Rim Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1639-3924) : Assistant manager, Korea Industrial Safety Association, Safety Education Division

소나노튜브, 그래핀 등이 있다. 여기서 그래핀은 탄소가 원자 1개 두께의 나노 단위로 얇은 육각 벌집 모양으로 이루어진 신소재로서, 최대 1 TPa의 영률, 130 GPa의 인장 강도,  $5 \times 10^3$  W/mK의 열전도율 및  $1.5 \times 10^4$  cm<sup>2</sup>/Vs의 전하이동도를 가지며  $10^{-6}$  Ω·cm의 저항, 2,600 m<sup>2</sup>/g의 비표면적으로 기계적, 전기적, 열적으로 뛰어난 물성을 가지고 있다.<sup>1-3)</sup> 이와 같은 그래핀의 뛰어난 물리적 특성은 복합재료의 이상적인 보강재로 주목받고 있다.

복합재는 크게 금속 기지 기반 복합재, 폴리머 기지 기반 복합재, 세라믹 기지 기반 복합재로 나뉘는데, 높은 전기 및 열전도도가 요구되는 분야에서는 전도성 금속 복합재가 요구된다. 구리는 금속 기지 기반 복합재의 기지로서 가장 많이 사용되는 물질이며, 높은 전기 및 열전도도로 전극, 전기접점, 반도체, 자동차, 전자석, 마이크로칩 등 산업계와 공학 분야에 폭넓게 사용된다.

한편, 산업기기의 전기적 특성을 개선하기 위하여 뛰어난 물리적 특성을 가진 그래핀을 보강재로 사용하여 기계적, 전기적 물성을 개선하려는 연구가 많이 이루어지고 있다.

Jagannadham<sup>4)</sup>는 전기화학증착법으로 생성한 구리-그래핀 필름의 함량과 교반 여부에 따른 복합재료의 전기전도도 향상을 평가하였으며 최대 19%의 전기전도도 향상을 보여 주었다. 그러나 Dutkiewicz 등<sup>5)</sup>은 불 밀링과 진공 열압착을 통한 그래핀 재료의 거칠기에 따른 전기전도도가 최대 38%가 떨어졌음을 나타내었다. 이처럼 그래핀은 보강재로 사용하는 조건에 따라 복합재료의 전기전도도가 상이하게 나타난다. 이러한 현상은 그래핀이 액체 야금, 분말 야금, 화학기상증착법 등의 합성 기술에 따라 GO(Graphene Oxide), RGO(Reduced Graphene Oxide), GNP (Graphene Nano Plate) 등 다양한 종류가 존재하며, 물성에 있어 많은 차이가 나타나기 때문이다. 또한 결합의 정도와 그래핀의 크기, 층수에 따라 물성에 많은 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 복합재료에서 그래핀 보강재의 구조, 형태, 함량에 따른 물성의 변화에 관한 연구가 필요하지만, 그래핀은 입자의 크기가 나노 단위이기 때문에 실험적 방

법으로 그 영향의 정도를 평가하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 수치해석학적으로 평가하기 위하여 분자동역학과 유한요소법을 주로 사용한다. 분자동역학적 접근은 재료를 원자 단위로 관찰하여 재료의 거동에 대한 더 상세한 정보를 얻을 수 있고 유한요소법 기반 해석은 구조적으로 더 복잡한 해석에서 효율적인 계산이 가능하다.

Kim 등<sup>6)</sup>은 분자동역학 시뮬레이션으로 구리/그래핀 적층 형태의 모델의 초기 균열이 파괴 거동에 미치는 영향을 평가하였다. Manta 등<sup>7)</sup>은 그래핀 기반 폴리머 복합재를 단위 셀과 대표체적요소(Representative Volume Elements; 이하 RVE)로 모델링하여 그래핀의 체적분율, 종횡비, 터널링 거리에 따른 전기전도도와 침투 임계값(Percolation threshold)을 평가하였다.

Dai 등<sup>8)</sup>은 그래핀의 종횡비, 형상, 배향 등이 그래핀/폴리머 복합재료의 응력-변형률 곡선, 인장강도 및 탄성 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Hussein 등<sup>9)</sup>은 GNP와 RGO를 이용하여 그래핀/에폭시 복합재료 RVE를 모델링한 후 FEM을 이용하여 기계적 특성 및 손상 메커니즘을 평가하였다. 또한 Elmasry 등<sup>10)</sup>도 그래핀/폴리머 복합재료의 RVE를 사용하여 그래핀 보강재의 체적분율, 종횡비, 배향과 같은 구조적 변수가 탄성계수, 열팽창계수와 같은 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 이처럼 폴리머 기지 기반 그래핀 복합재료의 기계적, 전기적 특성 평가가 수행되어 왔으나 금속 기지 기반 그래핀 복합재료에 대한 전기전도도 평가는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 구리/그래핀 복합재료를 대상으로 그래핀 보강재의 형태, 구조, 함량에 따른 전기전도도의 변화양상을 수치해석적으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 해석모델 및 방법

### 2.1 해석모델

복합재료는 같은 재료 간의 결합이라 하더라도 보강재의 구조, 모양, 분율에 따라서 전체 재료의 성질은 크게 달라진다. 본 연구에서는 미시적 관

점에서 그래핀 보강재의 구조, 모양, 분율에 따른 전기전도도의 변화를 평가하기 위해 구리/그래핀 복합재료의 단위 셀과 RVE로 구분하여 모델링하였다. 단위 셀은 일정한 구조의 재료를 표현하는 가장 작은 체적 요소로 입자 각도를 중심으로 해석하였다. RVE는 복합재료에서 무작위로 분산된 입자 구조를 대표할 수 있는 체적 요소를 나타내며 주기적인 경계조건(Periodic boundary condition; 이하 PBC)을 이용하여 재료 전체의 거시적인 전기전도도를 계산하였다.

해석 모델은 Fig. 1에 나타낸 것처럼 단일 입자로 구성된 단위 셀과 Fig. 2와 같이 그래핀 보강재의 위치를 무작위로 배치한 RVE로 두 종류로 구분하였다. RVE는 위치와 배향을 무작위로 배치한 모델 및 위치는 무작위이고, 배향은 일정한 RVE 모델 두 종류로 다시 구분하였다. 모든 해석 모델의 그래핀 입자 모양은 선행 연구<sup>8-10)</sup>와 같이 얇은 원판 형태를 사용하였다.

Fig. 1(a)는 그래핀을 단일 입자로 구성한 경우를 나타내며, 단일 그래핀 입자 모델의 해석 케이스는 Fig. 1(b)에 나타낸 것처럼 입자의 각도를 XZ 평면에 대해 0도부터 90도까지 15도 간격으로 설정하여 모델링하였다. 그래핀 입자의 체적분율  $V_g$ 는 0.005, 0.01, 0.02로 설정하고, 각 체적분율마다 종횡비 AR(AR =  $d/t$  지름  $d$ 와 두께  $t$ 의 비율)는 5, 10, 20으로 설정하였다.

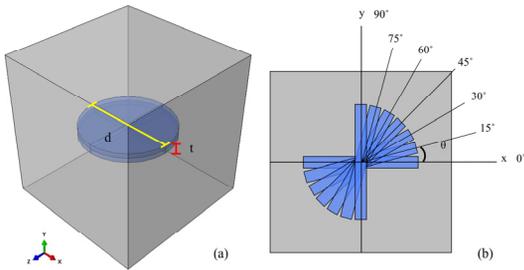


Fig. 1 (a) Model of single graphene platelet with AR = 10,  $V_g = 0.01$  (b) graphene platelet oriented at intervals of 15 degrees from 0 to 90 degree in XZ plane

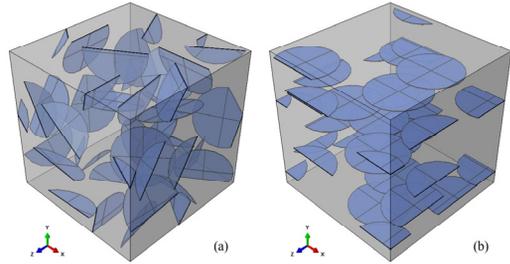


Fig. 2 The example of 3D RVE model with graphene platelets at AR = 100,  $V_g = 0.01$ , (a) randomly distributed and oriented (b) randomly distributed and constant oriented in Cu matrix

Fig. 2는 다수의 그래핀 입자로 이루어진 3D RVE 모델을 나타낸다. 모델링은 위치와 배향을 무작위로 배치한 경우와 위치는 무작위이고 배향은 일정한 구조를 가진 경우를 상정하였다. 그래핀 입자의  $V_g$ 는 0.005, 0.01, 0.02로 설정하고, 각 체적분율마다 종횡비 AR은 10, 20, 50, 100으로 설정하였다.

랜덤한 위치의 입자 좌표와 배향 각도는 Digimat-FE 프로그램<sup>11)</sup>을 사용하여 생성하였다. RVE 모델링 알고리즘은 다음과 같다. ① RVE 모델 내에 원점에 설정된 형태의 기본 입자를 배치한다. ② 입자의 크기를 조절한다. ③ 정의된 방향에 따라 입자를 회전한다. ④ 입자를 무작위 위치로 이동시킨다. ⑤ 인접 입자와 교차 여부를 확인하고 교차하는 경우 ③으로 회귀한다. ⑥ 배치된 입자들의 최소 거리 및 최소 부피를 확인한다. (메시 품질을 위한 조건) ⑦ 목표 체적 분율에 도달하지 않은 경우 ①부터 절차를 다시 시작한다.<sup>11)</sup> 해석에 사용된 요소의 개수와 종류는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Number of elements & element type

Model	Number of element	Element type
Single graphene	3,420~3,840	DC3D4E
Randomly oriented	363,067~657,325	
Constant oriented	385,827~570,774	

## 2.2 해석방법

다중 물리 해석에 강하며 각 변수가 복합재료의 물성에 미치는 영향을 효과적으로 평가 가능한 ABAQUS 유한요소해석 프로그램<sup>12)</sup>을 이용하여 단일 입자 모델과 RVE 모델에 함유된 그래핀 입자의 체적분율과 종횡비 및 입자 구조에 따라 전기전도도의 변화를 평가하였다.

구리 기지는  $5.8 \times 10^5$  S/cm의 전기전도도를 갖는 등방성 물질로 설정하였고, 그래핀 입자의 전기전도도는  $10^6$  S/cm로 설정하였다. Fig. 3에 구리/그래핀 복합재료 모델의 전기전도도를 구하기 위한 해석 경계조건과 방법을 나타내었다. 모델의 양단에 1 V의 전압을 가하여 각 요소의 전류밀도 값을 구한다. 식 (1)을 이용하여 모델의 끝 단에서 각 요소의 전류밀도와 넓이를 적분하여 전류를 구한다. 이후 전기전도도는 비저항의 역수이므로 비저항과 저항의 관계를 정리한 식 (2)를 이용하여 모델의 전기전도도를 계산한다. 아래 식 (1)과 (2)에서 I는 전류, ECD는 전류밀도, dS는 모델의 끝 단에서 각 요소의 면적,  $\sigma$ 는 전기전도도,  $\rho$ 는 비저항, R은 저항, A는 모델의 단면 넓이, L은 모델의 길이, V는 전압을 나타낸다.

$$I = \int ECD \cdot dS \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R \cdot A} = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (2)$$

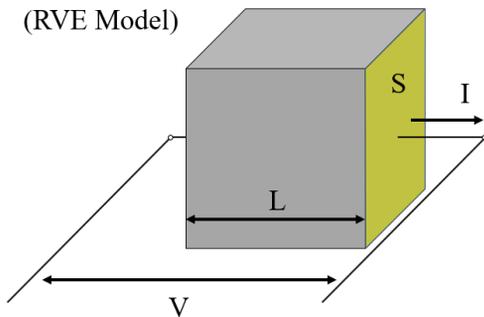


Fig. 3 The electrical conductivity of RVE model from equation (2)

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 단일 입자 모델 해석 결과

단일 입자 모델은 그래핀 입자의 각도, 종횡비, 체적분율에 따른 전기전도도의 변화를 평가하였다. Fig. 4에 입자의 각도에 따른 전기전도도를 모델별로 나타내었다.

체적분율을 기준으로  $V_g = 0.005$ 에서 전기전도도가 581,287 ~ 582,021 S/cm,  $V_g = 0.01$ 에서 582,577 ~ 584,072 S/cm,  $V_g = 0.02$ 에서 585,157 ~ 588,174 S/cm로 나타났다. 그래핀 입자의 종횡비와 각도에 비해 체적분율이 복합재료의 전기전도도에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 같은 체적분율과 종횡비  $V_g = 0.02$ , AR = 20에서 각도에 따른 전기전도도는  $0^\circ$ 에서 588,174 S/cm,  $45^\circ$ 에서 586,576 S/cm,  $90^\circ$ 에서 585,157 S/cm로 나타나며, 입자의 각도가  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 로 증가함에 따라 전기전도도는 감소하였고, 같은 체적분율과 종횡비를 가진 다른 모델에서도 같은 결과를 보여 주었다. 같은 체적분율  $V_g = 0.02$ 에서 AR = 20,  $0^\circ$ 일 때 588,174 S/cm, AR = 10,  $0^\circ$ 일 때 587,904 S/cm, AR = 5,  $0^\circ$ 일 때 587,593 S/cm, AR = 20,  $90^\circ$ 에서

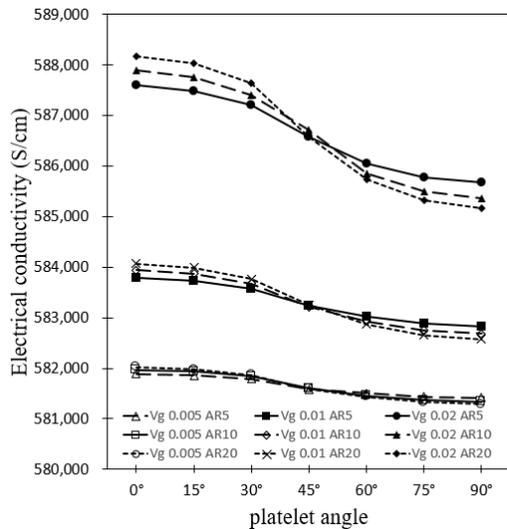


Fig. 4 Electrical conductivity by angle of single platelet model by volume fraction and aspect ratio

585,157 S/cm, AR = 10, 90°에서 585,360 S/cm, AR = 5, 90°에서 585,676 S/cm으로 종횡비가 커질수록 각도에 따라 전기전도도의 변화가 크게 나타났다. 따라서 체적분율과 종횡비가 크고 입자가 전기장과 이루는 각도가 0°에 가까울수록 복합재의 전기전도도가 높아진다. Table 2에서 각 변수에 따른 전기전도도의 값을 자세하게 나타내었다.

Table 2 Electrical conductivity by angle and aspect ratio of the single platelet model

Unit: (S/cm)	AR degree	5	10	20
V <sub>g</sub> =0.005	0°	581,891	581,964	582,021
	15°	581,860	581,935	581,978
	30°	581,788	581,837	581,868
	45°	581,577	581,598	581,588
	60°	581,504	581,453	581,434
	75°	581,438	581,370	581,329
	90°	581,411	581,336	581,287
V <sub>g</sub> =0.01	0°	583,784	583,940	584,072
	15°	583,733	583,873	583,989
	30°	583,581	583,680	583,769
	45°	583,243	583,211	583,257
	60°	583,018	582,929	582,869
	75°	582,884	582,748	582,655
	90°	582,832	582,68	582,578
V <sub>g</sub> =0.02	0°	587,593	587,904	588,174
	15°	587,486	587,766	588,031
	30°	587,200	587,414	587,635
	45°	586,588	586,717	586,576
	60°	586,045	585,856	585,739
	75°	585,778	585,498	585,320
	90°	585,676	585,360	585,157

### 3.2 RVE 모델 해석 결과

Fig. 5는 다수의 그래핀 입자를 전기장과 배향은 같고 위치만 무작위로 배치한 RVE 모델의 전기전도도 해석 결과이다. 단일 입자 모델의 결과와 마찬가지로 체적분율이 전기전도도에 지배적인 영향을 미친다. 체적분율별로 비교하여 V<sub>g</sub> = 0.02에서 종횡비에 따른 전기전도도는 AR = 100일 때 588,396 S/cm, AR = 10일 때 588,087 S/cm, V<sub>g</sub> = 0.01에서 AR = 100일 때 584,108 S/cm, AR

= 10일 때 583,874 S/cm, V<sub>g</sub> = 0.005에서 AR = 100일 때 582,065 S/cm, AR = 10일 때 581,827 S/cm로 나타났다. 모든 입자가 전기장과 같은 방향으로 배향되어 있기 때문에 종횡비가 높을수록 전기전도도가 높은 경향을 나타내었지만, 단일 입자 모델에 비해 차이가 적었다.

Fig. 6은 그래핀 입자를 무작위로 배향과 배치한 RVE 모델의 체적분율과 종횡비에 따른 전기전도도를 해석한 결과이다. 단일 입자 모델과 일정하게 배향된 RVE의 결과와 같이 체적분율이 전기전도도에 지배적인 영향을 미친다. V<sub>g</sub> = 0.005와 V<sub>g</sub> = 0.01에서는 전기전도도의 차이가 작고 입자 구조가 복잡하여 종횡비와 전기전도도 간의 뚜렷한 관계성이 보이지 않지만 같은 체적분율 V<sub>g</sub> = 0.02 내에서 AR = 100일 때 589,034 S/cm으로 가장 높았고, AR = 10일 때 586,851 S/cm으로 가장 낮게 나타났으며, 같은 체적분율과 종횡비를 가진 일정하게 배향된 RVE 모델과 비교하여 종횡비에 따른 전기전도도의 차이가 크게 나타났다. Table 3에는 각 경우에 대한 전기전도도의 값을 자세하게 나타내었다.

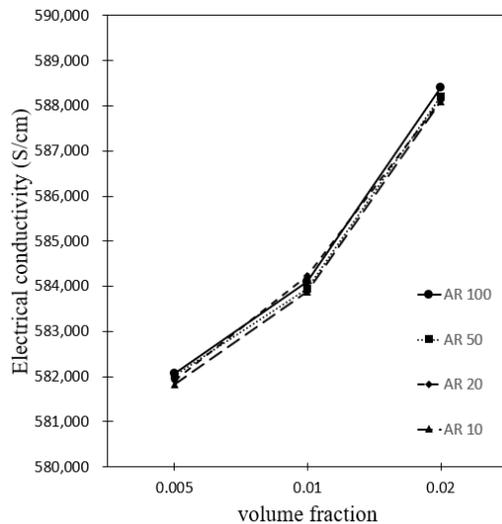


Fig. 5 Electrical conductivity according to the volume fraction and aspect ratio at randomly distributed & constant oriented graphene RVE model

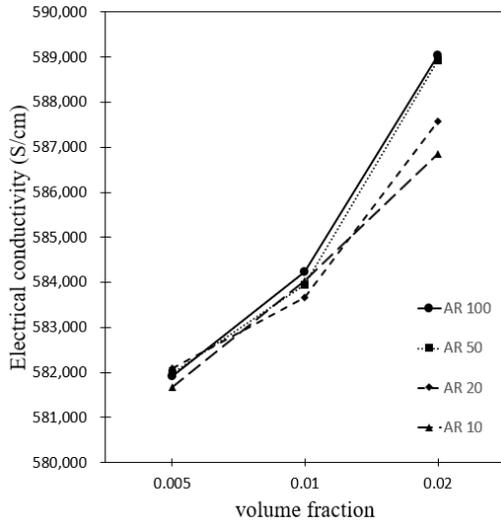


Fig. 6 Electrical conductivity according to the volume fraction and aspect ratio at randomly distributed & oriented graphene RVE model

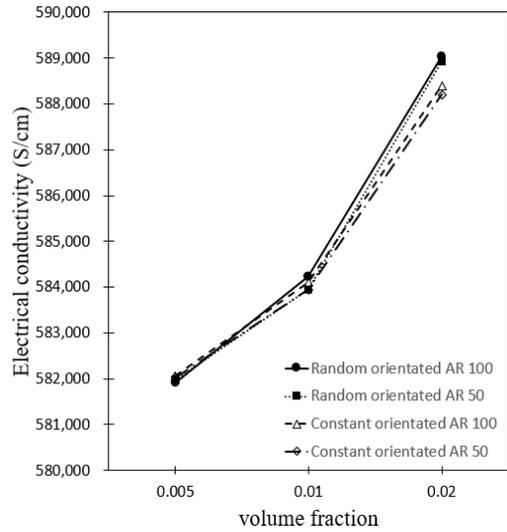


Fig. 7 Comparison of the electrical conductivity between randomly distributed & oriented model at AR 100, 50

Table 3 Electrical conductivity according to  $V_g$  and AR at randomly oriented and constant oriented model (unit: S/cm)

Randomly orientated model			
$V_g$ \ AR	0.005	0.01	0.02
10	581,676	584,034	586,851
20	582,098	583,674	587,576
50	581,978	583,942	588,930
100	581,917	584,224	589,034
Constant orientated model			
10	581,827	583,874	588,087
20	581,922	584,242	588,113
50	582,032	583,945	588,206
100	582,065	584,108	588,396

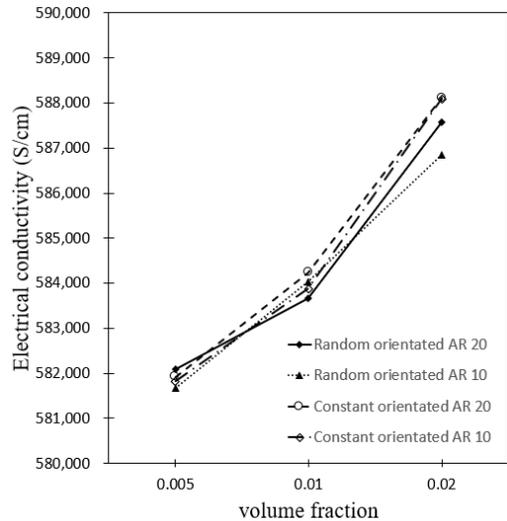


Fig. 8 Comparison of electrical conductivity between randomly distributed & oriented graphene RVE model at AR 10, 20

Fig. 7은 AR = 50과 100에서, Fig. 8은 AR = 10과 20에서 그래핀 입자를 무작위로 배치 및 배향한 모델과 전기장과 같은 방향으로 배향된 모델의 전기전도도를 비교한 그래프이다. 단일 입자 모델의 해석 결과에서 알 수 있듯이 복합재에서

그래핀 입자가 전기장과 같은 방향에 가깝게 배향될수록 전기전도도가 높게 나타난다. 따라서 다른 변수가 존재하지 않는다면 무작위로 배치 및

배향된 RVE 모델은 모든 입자가 전기장과 같은 방향으로 배향된 모델의 전기전도도보다 낮게 나타나야 하며 해석 결과가 뚜렷해지는 높은 체적분율과 종횡비에서 그 영향이 뚜렷해져야 한다.

하지만 낮은 체적분율  $V_g = 0.005$ 에서는 각 변수와 전기전도도 간의 관계성이 보이지 않지만 비교적 높은 체적분율  $V_g = 0.02$ 에서는 일정하게 배향된 모델에 비해 비교적 높은 종횡비  $AR = 50$ 과  $AR = 100$ 에서 전기전도도가 더 높게 나타났고, 비교적 작은 종횡비  $AR = 10$ 과  $AR = 20$ 에서 전기전도도가 더 낮게 나타났다. 이러한 결과는 높은 체적분율과 종횡비에서 전도성 네트워크의 형성과 같은 입자 간 구조에 관한 변수가 전기전도도의 향상에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

전도성 네트워크와 관련한 연구로 Li 등<sup>13)</sup>은 구리/그래핀 복합재료를 품질이 다른 RGO와 HQG(High Quality Graphene)를 사용하여 제작하여 각 복합재료에서 그래핀 질량분율이 전기전도도에 미치는 영향을 평가하였다. 전기전도도가 높은 HQG는 복합재료의 전기전도도 향상에 기여하였으나 결합이 많은 RGO는 전혀 기여하지 못했다. 또한 HQG의 질량분율이 1%까지는 증가함에 따라 전기전도도가 순수한 구리에 비해 8%까지 향상되었으나 이후 감소하였다. 그 이유로 그래핀 함량의 증가는 전도성 네트워크의 형성에 기여하여 전기전도도를 향상시키지만, 과도한 함량은 그래핀이 응집되어 골고루 분포되지 못하고 전도성 네트워크의 형성을 저해하며 다량의 공동을 형성하여 오히려 전기전도도가 감소하게 된다고 평가하였다. Manta 등<sup>7)</sup>은 절연체인 폴리머가 전도체인 그래핀의 첨가에 따라 전기전도도가 급격히 올라가는 침투 임계값이 전도성 네트워크가 형성되는 지점이며 전도성 네트워크의 형성은 체적분율과 종횡비가 높고 터널링 거리가 짧을수록 안정적으로 전도성 네트워크가 형성될 확률이 높아진다고 보고하였다.

따라서 본 연구와 비교하여 Fig. 7과 Fig. 8에서 나타난 결과는 체적분율과 종횡비가 증가함에 따라 전도성 네트워크가 더 잘 형성된 결과라 볼 수 있다. 본 연구는 그래핀 입자가 응집되지 않는 이

상적인 조건으로 해석하여 그래핀의 과도한 함량에 의한 전기전도도의 감소는 확인되지 않았으며, 전도성 재료인 구리 기지 기반 그래핀 복합재료의 해석으로 터널링 거리에 대한 조건은 고려되지 않았다.

## 4. 결 론

구리/그래핀 복합재료의 FEM 해석의 모든 종류의 모델에서 그래핀의 체적분율이 입자의 구조와 종횡비에 비해 전기전도도에 지배적인 영향을 주었다. 체적분율과 종횡비가 커질수록 각도에 따른 전기전도도의 변화가 크게 나타났으며, 같은 체적분율 내에서 종횡비가 커질수록 전기전도도의 차이가 더욱 커졌다. 단일 입자 모델의 해석 결과에서 입자가 전기장과 같은 방향에 가까울수록 전기전도도가 높게 나타나지만, 무작위로 배치 및 배향된 RVE 모델에서 비교적 높은 체적분율과 종횡비를 가진 모델은 모든 입자가 전기장과 같은 방향으로 배향된 모델보다 전기전도도보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 높은 체적분율과 종횡비에서 전도성 네트워크의 형성이 더 잘 이루어지며 전도성 네트워크의 형성이 복합재의 전기전도도의 향상에 크게 기여함을 알 수 있었다.

## Author contributions

O. H. Kwon; Project administration, supervision and conceptualization, W. R. Park; Writing-review & editing S. M. Kim; Editing & visualization. J. S. Park; Investigation, writing-original draft, data curation and visualization.

## References

1. P. H-Manrique, X. Lei, R. Xu, M. Zhou, I. Kinloch and R. Young, 2019, "Copper/graphene composites: a review", Journal of Materials Science, Vol. 54, pp. 12236-12289.

2. M. S. Cao, X. X. Wang, W. Q. Cao and J. Yuan, 2015, "Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding", *J. Mater. Chem. C*, Vol. 3, pp. 6589-6599.  
(<https://doi.org/10.1039/C5TC01354B>)
3. S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen and R. S. Ruoff, 2006, "Graphene-based composite materials", *Nature*, Vol. 442, pp. 282-286.  
(<https://doi.org/10.1038/nature04969>)
4. K. Jagannadham, 2013, "Volume Fraction of Graphene Platelets in Copper-Graphene Composites", *Metall. Mater. Trans A*, Vol. 44, pp. 552-559.  
(<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1387-y>)
5. J. Dutkiewicz, P. Ozga, W. Maziarz, J. Pstrus, B. Kania, P. Bobrowski, J. Stolarska, 2015, "Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 628, pp. 124-134.  
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.018>)
6. S. M. Kim, W. R. Park and O. H. Kwon, 2021, "The Effect of Cracks on Mechanical Performance and Fracture in Cu-based Graphene Nanocomposites", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 41-51.  
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.4.041>)
7. A. Manta, M. Gresil and C. Soutis, 2017, "Predictive Model of Graphene Based Polymer Nanocomposites: Electrical Performance", *Appl. Compos. Mater.*, Vol. 24, pp. 281-300.  
(<https://doi.org/10.1007/s10443-016-9557-5>)
8. G. Dai and L. Mishnaevsky, 2014, "Graphene Reinforced Nanocomposites: 3D Simulation of Damage and Fracture", *Computational Materials Science*, Vol. 95, pp. 684-692.  
(<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.08.011>)
9. A. Hussein and B. Kim, 2019, "Micromechanics based FEM study on the mechanical properties and damage of epoxy reinforced with graphene based nanoplatelets", *Composite Structures*, Vol. 215, pp. 266-277.  
(<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.059>)
10. A. Elmasry, W. Azoti, M. Elmarakbi and A. Elmarakbi, 2021, "Interaction modelling of the thermomechanical behaviour of spatially-oriented graphene platelets (GPLs) reinforced polymer matrix", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 232, 111183.  
(<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111183>)
11. HEXAGON, 2021, "DigimatSE user's manual", Digimat ver.
12. SIMULIA, "ABAQUS/CAE User's Guide", Abaqus ver. 2020.
13. W. Li, D. Li, Q. Fu and C. Pan, 2015, "Conductive enhancement of copper/graphene composites based on high-quality graphene", *Royal Society of Chemistry*, Vol. 5, pp. 80428-80433. (DOI:10.1039/C5RA15189A)