creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000278878

2020 년 2 월

석사학위 논문

3차원 그래핀으로 강화한 구리복합체의 전기전도도 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단소재공학과

조 예 진

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3차원 그래핀으로 강화한 구리복합체의 전기전도도 연구

Electric Conductivity Study of Cu Composite Reinforced by 3-dimensional Graphene

2020년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단소재공학과

조 예 진

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3차원 그래핀으로 강화한 구리복합체의 전기전도도 연구

지도교수 이 창 훈

이 논문을 공학석사학위 신청논문으로 제출함

2019년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단소재공학과

조 예 진

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

조예진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 최 병 상 (인)

위 원 조선대학교 교 수 이 정 수 (인)

위 원 조선대학교 교 수 이 창 훈 (인)

2019년 11월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ····· vii
LIST OF FIGURES ····· viii
ABSTRACT ····· x

제 1장 서론 ····· 1
1.1 전기 전도체 ····· 1
1.2 본 연구의 목적 ····· 1
제 2장 실험 ····· 4
2.1 시료의 합성 ····· 4
2.1.1 Cu 분말의 압축성형 ····· 4
2.1.2 3DiGn-Cu composite ····· 5
2.1.2.1. CVD(Chemical Vapor Deposition) ····· 5
2.2 실험 측정기기 ····· 8
2.3 전기전도도 측정 ····· 8
2.3.1 재료의 4-probe contact ····· 9
2.3.2 DC 전기전도도 측정방법 (I-V) ····· 9
2.3.3 DC 전기전도도 측정방법 (온도 의존성) ····· 10

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 결과 및 고찰 ····· 16
3.1 RRR(Residual Resistance Ratio) ····· 16
3.1.1 OFHC Cu(Oxygen Free-High Conductivity Copper) 16
3.1.2 3DiGn-Cu composite ····· 20
3.1.3 3DiGn-Cu composite ····· 27
3.1.4 3D-Graphene network ····· 29
3.1.5 Cu powder ····· 31
제 4장 결론 ····· 35

참고문헌 ····· 38

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1. 1. Electric conductivity and resistance of metals. ····· 3

Table 3. 1. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of OFHC Cu. ····· 16

Table 3. 2. The RRR of OFHC Cu. ····· 16

Table 3. 3. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3DiGn-Cu composite. 20

Table 3. 4. The RRR values obtained from 4 different parts of the same 3DiGn-Cu composites. ····· 22

Table 3. 5. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3DiGn-Cu composite. 27

Table 3. 6. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3D-Graphene network. ····· 30

Table 3. 7. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of Cu powder. ····· 32

Table 3. 8. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of OFHC Cu, 3DiGn-Cu composite, 3D-Graphene network, Cu powder. ····· 36

Table 3. 9. Ratio of resistivity to standard copper. ····· 37

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 2. 1. (a) Mold, (b) Cu disk. ····· 4

Fig. 2. 2. Schematic diagram for the synthesis of 3DiGn-Cu composite. ····· 5

Fig. 2. 3. Raman spectrum of graphene after obtained by removing Cu network part from 3DiGn-Cu composite. ····· 7

Fig. 2. 4. Schematic diagram of the closed cycle refrigerator used for controlling temperature. ····· 11

Fig. 2. 5. (a) Indication of width and height of sample, (b) Schematic diagram of 4-probe contact, (c) Soldering connection image between the sample with 4-probe contact and the circuit board. ····· 12

Fig. 2. 6. (a) The main window when the resistivity program is running, (b) The additional window with setting parameters for resistivity measurement. ····· 13

Fig. 2. 7. (a) The screen snapshot image with temperature control parameters, (b) The window indicating temperature sequence. ····· 14

Fig. 2. 8. DC Electric Conductivity Measuring Instruments, (a) open valve state, (b) lock valve state. ····· 15

Fig. 3. 1. I-V graph obtained for OFHC Cu at room temperature. ····· 18

Fig. 3. 2. Temperature dependence of resistivity in OFHC Cu. ····· 19

Fig. 3. 3. I-V graph in the 3DiGn-Cu composite. ····· 20

Fig. 3. 4. Temperature dependence of resistivities obtained for 4 different parts of the same 3DiGn-Cu composite. ····· 21

Fig. 3. 5. (a) SEM image of 3DiGn-Cu composite, (b) SEM image of 3D-Graphene network after removed Cu metal completely from the 3DiGn-Cu composite. ····· 24

Fig. 3. 6. Schematic illustration of Parallel circuit model. Here, it is assumed that the current injected by current source can independently flow through 3D-Graphene network and 3D-Cu network channels. ····· 25

Fig. 3. 7. Diagrammatic illustration of Graphene network and 3DiGn-Cu composite

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

parts with half to half ration. ····· 26

Fig. 3. 8. I-V graph measured for the 3DiGn-Cu composite part. ····· 27

Fig. 3. 9. Temperature dependence of resistivity measured at the 3DiGn-Cu composite part. ····· 28

Fig. 3. 10. I-V graph for the 3D-Graphene network channel alone. ····· 29

Fig. 3. 11. Temperature dependence of resistivity in the 3D-Graphene network. ····· 30

Fig. 3. 12. I-V graph of Cu powder. ····· 31

Fig. 3. 13. Temperature dependence of resistivity in Cu powder. ····· 32

Fig. 3. 14. Comparison of the temperature dependence of resistivity in 3D-Cu network with Cu powder. ····· 34

Fig. 3. 15. The conductivities of OFHC Cu, 3DiGn-Cu composite, 3D-Cu network, 3D-Graphene network, Cu powder. ····· 35

Fig. 3. 16. Schematic picture presenting a possible current flow between the Graphene-Cu interface. ····· 37

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Electric Conductivity Study of Cu Composite Reinforced by 3-dimensional Graphene

Cho YeJin
Advisor : Prof. Lee Chang-hoon, Ph. D.
Department of Advanced Materials Engineering,
Graduate School of Chosun University

Abstract A 3-dimensional graphene-copper composite (3DiGn-Cu) was synthesised by reinforcing Cu particles by graphene network via chemical vapor deposition (CVD). In comparison with oxygen-free high conductivity copper (OFHC Cu), the 3DiGn-Cu show a very close resistivity value at room temperature. The temperature dependence of resistivity is proportional to temperature as well. To explain these properties, it is considered a parallel circuit model consisting of a graphene network channel and a Cu network channel. It is found that in the graphene network channel, a semi-conductive conduction mechanism is operated, but a metallic conductivity is dominated in the Cu network channel. A role of interface between copper and graphene is also discussed to understand the overall conductivity mechanism. As a result, it is shown that the pure Cu powder can be reinforced by the 3-dimensional graphene network as well as be improved in electrical conductivity up to that of OFHC Cu.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1장 서론

1.1 전기전도체

Graphene은 흑연을 얇게 한 겹으로 떼어낸 탄소 원자들이 모여 있는 2차원 평면구조를 가진 나노소재 인데 이 물질은 비금속임에도 전기전도성이 좋다[1]. 탄소는 4 배위(sp^3)가 가능한 원소이다. 4 개중 3 개만 공유결합에 참여하게 되면 공유결합에 참여하지 않는 궤도 전자는 π결합을 통해 자유롭게 돌아다닐 수 있게 된다. 매우 높은 전기전도도를 갖는 이유이다. 또한, 이 탄소 원자들은 각각 육각형의 모양(honeycomb structure)을 이루고 있는데 이로 인하여 우수한 기계적 물성을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 전기전도도가 좋은 구리보다도 100배 이상으로 알려져 있다. 더불어 강도, 열전도도, 탄성 등등이 뛰어나므로 Graphene은 다양한 분야에서 각광받고 있는 꿈의 나노물질이라고 불려진다.

전기전도체 혹은 도체는 전도도가 높은 물질들을 일컫는다. 대부분의 금속들은 전기전도체이다. Table 1. 1.은 대표적인 금속들의 전기전도도와 저항, 그리고 구리를 기준으로 하여 구리에 대한 비저항의 비를 나타낸다. 단면적 $1mm^2$, 길이 1m의 풀림 처리된 순동(pure coper)을 20℃에서 측정한 비저항이 1.7241μΩ·cm을 나타낼 때의 구리의 전도도를 100%로 하여 다른 금속의 전기전도율을 구리에 대한 상대적 비로 정리한 것이다. 은의 경우는 구리보다 전기전도도가 좋지만 알루미늄의 경우는 구리 전기전도도의 1/2정도임을 알 수 있다. 전기전도도가 좋을수록 동일한 전류를 보다 작은 체적의 도체를 사용하여 흘려보낼 수 있으므로 공간과 비용이 절약된다. 또한 구리는 열전도성, 내구성 및 내식성, 연성 등의 장점을 가지고 있어, 성형성이 좋으면서도 물성이 좋아 많은 분야에서 사용 되고 있다[2-7].

이러한 뛰어난 물성을 가진 Graphene을 이용하여 기존의 구리의 특성 중 최대장점인 전기전도도를 더 강화시키면서도 다른 특성을 간단하게 보강 할 수만 있다면 이것의 실용성은 한층 더 발전할 것이다.

1.2 연구 목적

Cu는 현재 선이나 판제 작에 흔히 사용하는 재료이다. 하지만, OFHC Cu(Oxygen-Free High-Conductivity Copper)와 같은 재료보다는 전기전도도나 물리적 특성이 좋지 않다. 또한, OFHC Cu의 비용은 비싸지만, 상대적으로 Cu 분말의 값은

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

훨씬 저렴하다. 따라서 Cu 분말을 분말 야금을 이용하여 성형한 후 전기전도도 및 열전도도가 구리보다 뛰어난 그래핀을 이용하여 기계적으로 보강한다면 구리가 갖는 전기전도도와 열전도도를 뛰어 넘는 구리선이나 판을 만들 수 있을 것이다.

본 연구는 구리 분말을 3차원 그래핀으로 보강하여 제작된 3-Dimension Cu-graphene composite에 대하여 전기전도도를 온도의 함수로 측정하고 OFHC Cu와 비교하는 것이다. 온도에 따른 전기전도도 실험을 통해 각각의 물질들을 서로 비교하였을 때, 그래핀으로 Cu를 강화시켜 만든 재료가 OFHC Cu 만큼 전기전도도가 향상되는지, 각 물질들 사이에는 얼마나 전도율에 차이가 있는지, 수치적으로 어떤 차이가 있는지 알아보고 궁극적으로 Cu-graphene 복합체가 단순히 그래핀으로 Cu를 강화한 것이지만 그것만으로 충분히 의미 있는 향상된 치수적인 차이를 확인 할 수 있다면 Cu의 활용성과 실용성이 더 향상되고 경제적인 면에서 가치가 있을 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1. 1. Electric conductivity and resistance of metals.

금속 종류	도전율(% IACS)	비저항(μΩ·cm)	표준구리에 대한 저항률의 비
구리	100	1.7241	1.00
은	106	1.62	0.94
금	71.8	2.4	1.39
알루미늄	62.7	2.72	1.60
텅스텐	31.3	5.5	3.19
아연	29.2	5.9	3.42
니켈	23.8	7.24	4.20
백금	16.3	10.6	6.15
납	8.3	20.77	12.05
황동	24.6~34.5	5~7	2.90~4.06

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 실험

2.1 시료의 합성

2.1.1 Cu 분말의 압축성형

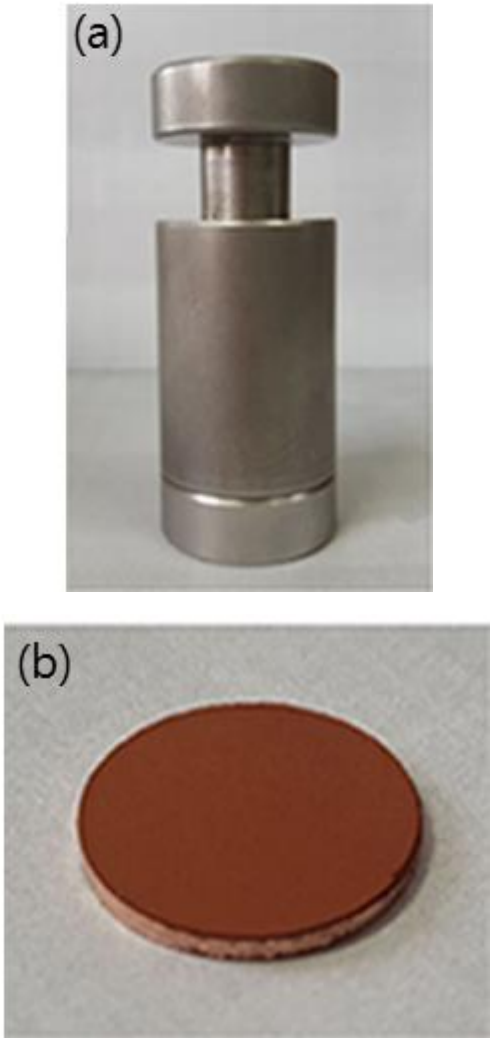


Fig. 2. 1. (a) Mold, (b) Cu disk.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실험에서 사용된 Cu 분말은 Sigma-Aldrich로부터 구입한 것을 그대로 사용한 것으로 14μm~15μm 크기의 타원형의 순도 99% 이었다. 1g~1.5g 정도의 Cu 분말을 Fig. 2. 1. (a)의 금형에 넣고 1.5톤의 압력으로 압축성형 하여 Fig. 2. 1. (b)의 Cu 디스크를 얻을 수 있었다[8].

2.1.2 3DiGn-Cu composite

2.1.2.1 CVD(Chemical Vapor Deposition)

3-Dimension Cu-Graphene composite은 Fig. 2. 2. 에 나타낸 과정과 조건에 따라 CVD(Chemical Vapor Deposition, 화학적 기상 증착)으로 합성되었다[1,8~11]. 3D Graphene 합성의 환경제어를 위해 H_2(99.999%)와 CH_4(99.995%)를 이용하였다.

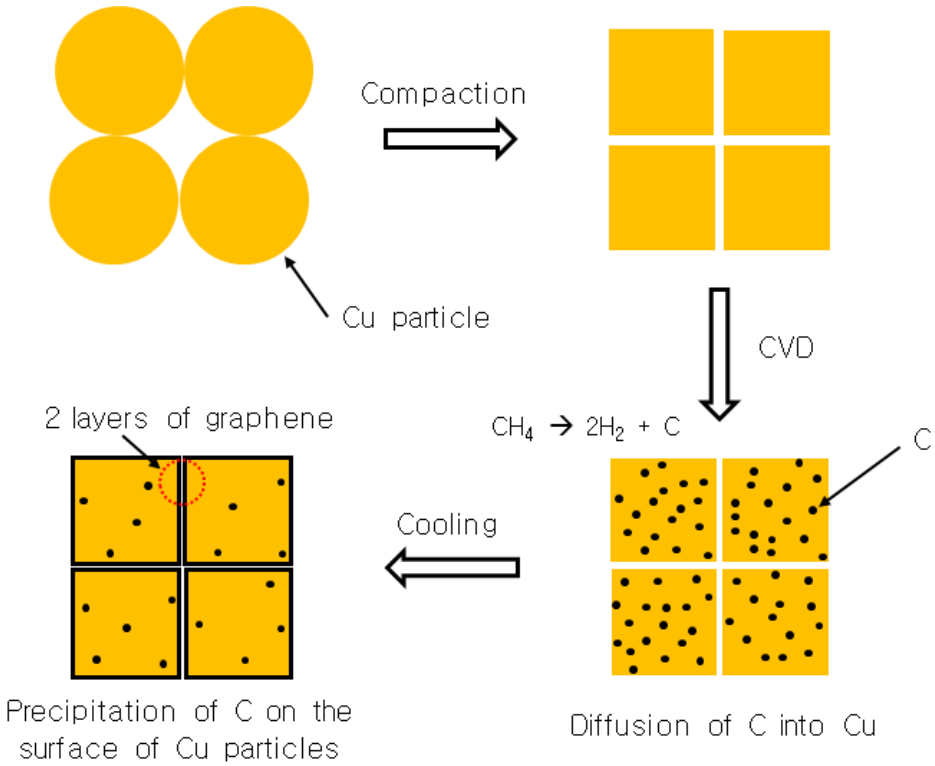


Fig. 2. 2. Schematic diagram for the synthesis of 3DiGn-Cu composite.

냉각 속도는 약 200°C/min인 상태에서 시료를 실온에서 전기로로부터 꺼내었다. 그리고 3D-Graphene network를 보여주기 위해 Cu composite 내의 Cu metal을 etchant와 함께 제거했다. 그에 따라 만들어진 3D-Graphene network 시료는 Fig. 2. 4. (c)이

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다.

Fig. 2. 3.은 CVD시스템에 의해 만들어진 3DiGn-Cu composite에서 Cu-metal을 제거하고 Graphene만 존재함을 확인하기 위해 라만 스펙트럼(Raman spectrum)으로 나타낸 것이다. 라만 스펙트럼에서 그래핀은 G피크(약 1580~1585cm^{-1}부근 관찰), 2D피크(약 2680cm^{-1}부근 관찰), D피크(약 1350cm^{-1}부근 관찰) 이 3가지 종류의 피크가 발견된다. 그래핀의 연구에 있어서 라만 분광분석은 그래핀의 D, G, 2D 및 2D/G 피크 세기의 비율과 같은 정보를 이용하여 그래핀의 층수를 판별하고, 단일층 그래핀을 확인하는 중요한 분석도구로 활용될 뿐만 아니라, 구조적 결함 정도의 확인, 그래핀의 기계적, 전자적, 광학적 특성을 조사하는 도구로서도 중요한 역할을 하여, 필수적으로 사용되는 분석방법이다[12~20].

D피크는 결손, 치환이 많이 된 구조물일수록 피크의 강도가 크게 나타난다. 또한, 탄성산란이 관여하기 때문에 결손, 치환지점뿐만 아니라 그래핀의 가장자리에서도 나타난다. 따라서 편광된 빛을 이용하면 그래핀의 가장자리 모양도 알 수 있다. 다층 그래핀의 경우 에너지밴드 수가 증가하기 때문에 다양한 산란과정이 발생되고 이로 인해서 2D피크의 수가 증가하게 된다. 2D피크의 모양을 통해서 그래핀의 장수를 측정할 수 있다. G피크는 통상 그래핀이 n겹 적층 되어 있는 물질을 nL(n-layer)그래핀 이라고 부른다. 1L~3L 그래핀의 라만 스펙트럼은 G피크의 세기(l_G)가 두께에 비례하고, 2D피크의 선형 또한 두께에 따라 크게 변한다.

2D/G=1.00을 통해 Graphite가 아니라 Multi layered graphene인 것을 증명할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

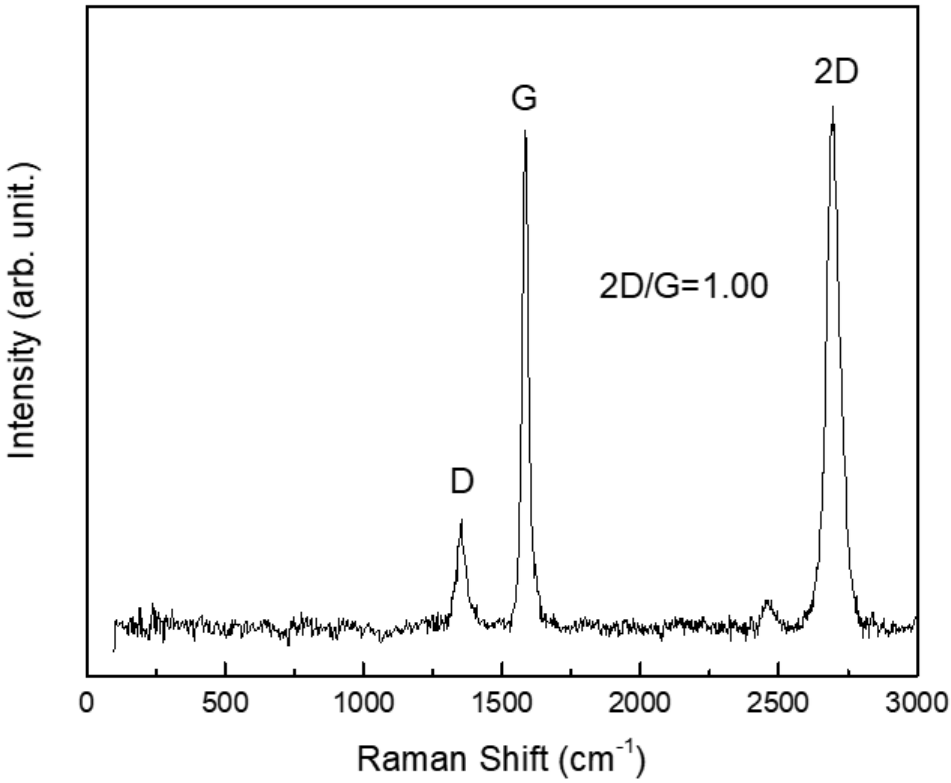


Fig. 2. 3. Raman spectrum of graphene after obtained by removing Cu network part from 3DiGn-Cu composite.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 실험 측정기기

본 연구의 실험과 특성조사를 위해 사용된 기기는 다음과 같다.

NANOVOLTMETER : 2182A (KEITHLEY)
SourceMeter : 2400 (KEITHLEY)
Temperature Controller : 331 (KEITHLEY)
DC Electric Conductivity Measuring Instrument : (Seongwoo Instruments)
Vacuum pump : TS75W2001 (EDWARDS)
Compressor : HC-2D-1 (APD Cryogenics Inc.)

2.3 전기전도도 측정

도체에서 비저항(resistivity, ρ)과 저항(resistance) R 사이의 관계는 다음과 같은 방정식 1로 정의된다[21].

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \qquad 1)$$

여기서 R은 저항(Resistance, Ω), ρ는 비저항(Resistivity, Ω·cm), ℓ은 두 전극간의 거리(length, cm), A는 단면적(Area, cm^2)을 뜻한다. 방정식 1을 비저항에 대하여 정리하면 방정식 2가 된다. 또한 전기전도도 σ는 고유저항 ρ에 역수를 취한 것으로 나타낼 수 있다(방정식 3).

$$\rho = R \frac{A}{\ell} \qquad 2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{\ell}{R \cdot A} \qquad 3)$$

$$V = IR \qquad 4)$$

$$R = \frac{V}{I} \qquad 5)$$

전기전도도를 구하기 위해 이를 이용하면 저항 R은 전류에 대한 전압이므로, 그래프

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

로 나타내 기울기=R로부터, R값을 구할 수 있고, 샘플의 dimension을 통해 각각의 값을 구하여, 공식에 대입해주면 전기전도도를 계산해 볼 수 있다.

2.3.1 재료의 4-probe contact

전기전도도를 측정하기 위해서 4-probe contact 방법을 사용하였다. 우선 측정하고자 하는 샘플의 단면적을 구해주기 위해 넓이 w와 높이 h를 vernier calipers를 사용하여 길이를 측정하여 준다(Fig. 2. 5. (a)). 단위는 cm를 기준으로 하여 두 값을 곱한 단면적 A또한 구해준다. 그 다음 Fig. 2. 5. (b)의 모식도와 같이 4-probe contact인, 전류를 흘려주고 전압을 측정할 회로 라인을 만들어 주기 위해 얇은 와이어 4개를 준비하여 곧게 펴 준비한다. 곧게 편 와이어는 샘플 윗면에 일렬로 나열하여 도전성 접착제인 silver epoxy를 적당량을 취한 후, 샘플과 와이어를 부착해 회로 연결을 해준다. 이때 저항은 전극간의 길이가 길수록, 단면적이 작을수록 저항이 커지기 때문에 와이어들에 접착한 silver epoxy가 서로 묻지 않게 주의하되 가운데 두 와이어의 거리는 최대한 길게 나올 수 있도록 접촉을 시켜준다. Epoxy로 와이어의 위치가 잘 고정되었으면 자리를 잘 잡을 수 있도록 30분에서 1시간정도의 건조할 수 있는 휴지시간을 준다. 마지막으로 와이어를 점착한 샘플을 hot plate에 150℃에서 30분 동안 가열하여 silver epoxy를 완전히 경화 시켜 와이어를 단단히 고정한다.

다음으로 회로판 위에 와이어를 붙인 샘플을 Fig. 2. 5. (c)의 회로판 위에 올리는데, 회로판과 샘플사이의 표면이 잘 접촉되도록 높은 진공그리스인 N grease를 칩 위에 얇게 펴 바르고 샘플을 올려놓도록 한다. 그 다음, 양 바깥쪽의 두 선은 전류가 흘러들어 오는 회로에 연결하고, 안쪽 두 와이어는 Voltage를 측정하는 회로에 연결하여 납땜으로 고정시켜준다. 이 고정된 상태에서 전극간의 거리 ℓ의 길이를 재주도록 한다. 구한 모든 dimension값을 가지고 샘플의 전류에 대한 전압과 온도 의존성 실험을 진행하여준다.

2.3.2 DC 전기전도도 측정방법 (I-V)

4-probe contact이 끝난 샘플을 DC 전기전도도 측정기기 sample holder의 칩이 닿을 부분에 N grease를 아주 얇게 도포해주고, 기기와 연결된 sample holder에 글씨방향과 맞춰 needle을 장착해 주고 덮개를 덮어준다. 기기의 실험조건은 실온 295K으로 맞춰주고 프로그램에 앞서 측정한 샘플의 부분별 치수와 측정시간을 약 60초로 입력한 후, -1A부터 +1A까지 0.1A간격으로 전류를 흘려주어 전압을 측정하여 준다. 전류는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

샘플에 따라 유동적으로 조절하여 측정해준다.

2.3.3 DC 전기전도도 측정방법 (온도 의존성)

I-V측정법과 마찬가지로 샘플을 DC 전기전도도 측정기기의 Sample holder에 칩이 닿을 부분에 N Grease를 아주 얇게 도포해주고, 기기와 연결된 Sample holder에 방향과 needle을 맞춰 칩을 장착해 주고 커버를 덮어준다. 그리고 Fig. 2. 8.과 같이 기기의 밸브를 세로에서 가로로 잠근 후, 진공 펌프를 작동시켜 공기를 빼준다. 이때 충분히 안정화 될 수 있도록 약 10분에서 15분정도 진공 펌프를 작동시키고 기다려준다.

전기전도도 측정 프로그램 resistivity에서는 sequence file을 만들어주고 sample의 측정한 치수 값과 흘려주고 싶은 전류를 입력해 주기위해 세팅을 한다. 먼저 Sequence file은 프로그램을 실행하고, MONITOR창의 Sequence를 클릭 후, Sequence를 짤 수 있는 Menu창에서 Temperature Scan을 선택하고 Execute를 눌러 Scan Temperature를 입력한다. 본 실험은 상온에서 저온까지 낮춰가며 온도실험을 할 것 이기 때문에 Initial Temperature에는 297K을, Final Temperature에는 12K을 입력하고, 온도 측정 간격 Increments에는 5K씩 낮춰가며 찍을 것이기 때문에 -5K이라고 입력한다. 그리고, Rate는 3, Twindow는 0.2, Tdev은 0.1을 입력해주고 Accept버튼을 눌러주면 Sequence 설계를 한 것이 쭉 입력된다. 마지막으로 Shutdown을 선택하고 Execute를 실행해줘야 다음과 같이 실행순서 마지막 단계에 Shutdown명령어가 입력된다(Fig. 2. 6., Fig. 2. 7.).

Sequence를 설계할 때는 꼭 이 Shutdown명령어 까지 입력해줘야 전기전도도를 측정할 때 기기가 마지막온도까지 측정하고 정상적으로 꺼질 수 있게 된다. 그리고 난후, CLOSE를 누르면 파일로 저장하는 창이 나오고 텍스트파일의 형태로 Sequence파일을 저장해주면 측정하기에 앞서 프로그램 준비 작업이 끝나게 된다.

마지막으로 처음 프로그램 시작화면 중 상단에 SETTING에 가서 맨 처음 샘플을 컨택 하면서 쟀던 전극간의 길이 Length(cm), 단면적 Area(cm^2) 값을 입력해주고, 측정할 때 정확한 결과 값이 나올 수 있도록 충분히 Override(s) 시간을 480초~600초 정도로 입력해주고 Moving Average는 5 Measurement Average는 3으로 입력해준다. 그리고 오른쪽에 Sequence File부분에 아까 만들었던 Sequence 텍스트 파일을 불러와주고 새로운 텍스트파일 하나를 샘플명이나 날짜 등을 파일명으로, 내용 없이 저장하여 file path(dialog if empty)에 불러와준다. 창 하단에 2400 SOIURCEMETER 칸의 Output Level에는 흘려줄 전류를 입력해주고, Compliance Level에는 걸어줄 전압을 입

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

력해준다(Fig. 2. 6. (b)).

프로그램의 측정 준비 후, Compressor에 연결된 호스에서 물이 나올 수 있도록 밸브를 열고 Compressor를 작동시켜준다. 그런 후, Temperature Controller를 보면 Sample의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이때 resistivity 프로그램의 MONITOR 창으로 돌아와서 RUN을 누르면 본인이 짰던 Sequence대로 297K부터 5K씩 감소하며 특정온도마다 Voltage가 측정된다. 전체적인 온도조절을 위해 사용된 closed cycle refrigerator의 모식도는 다음과 같다(Fig. 2. 4.).

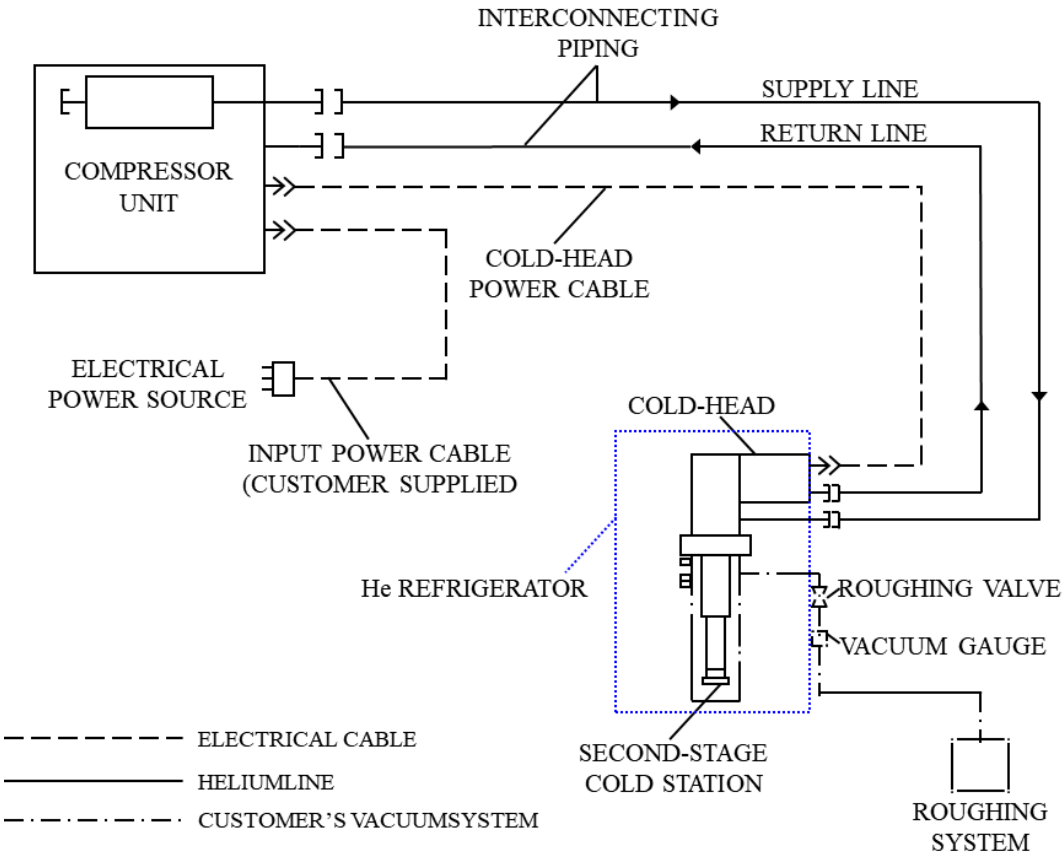


Fig. 2. 4. Schematic diagram of the closed cycle refrigerator used for controlling temperature.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

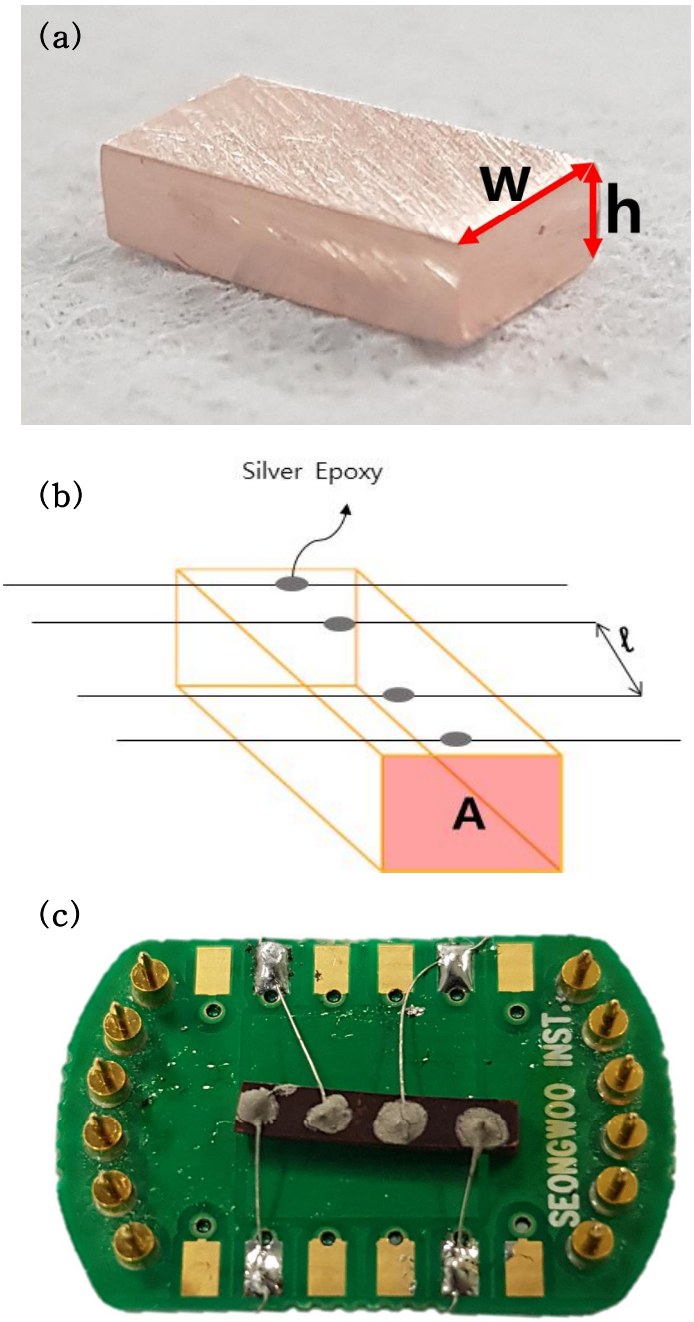
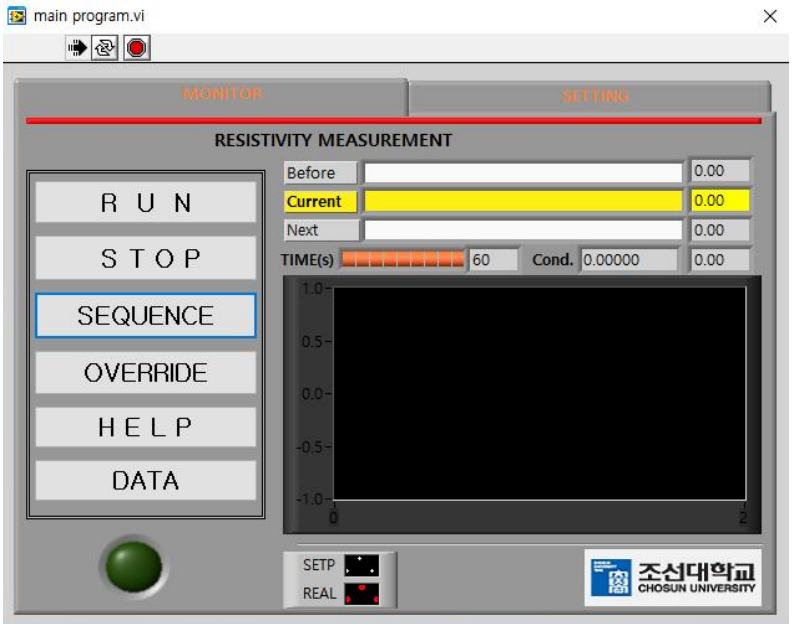


Fig. 2. 5. (a) Indication of width and height of sample, (b) Schematic diagram of 4-probe contact, (c) Soldering connection image between the sample with 4-probe contact and the circuit board.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)



(b)

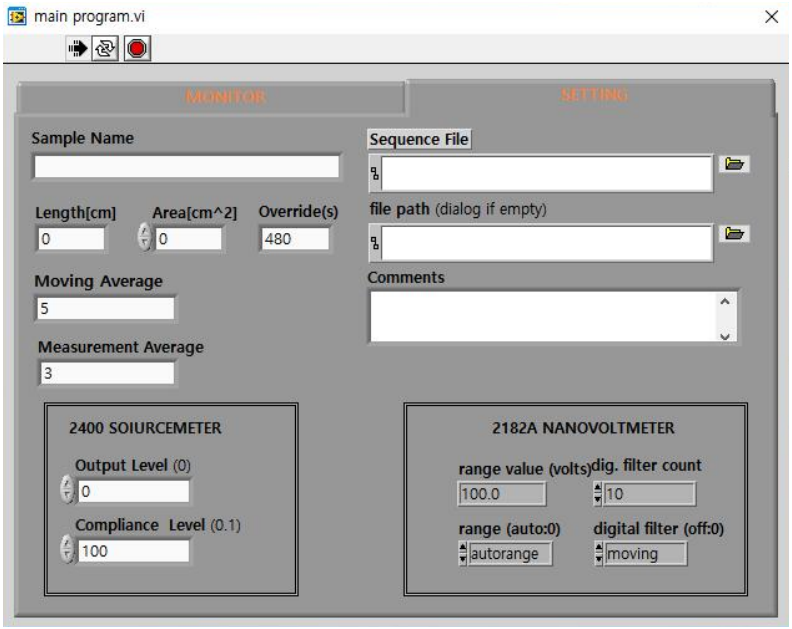
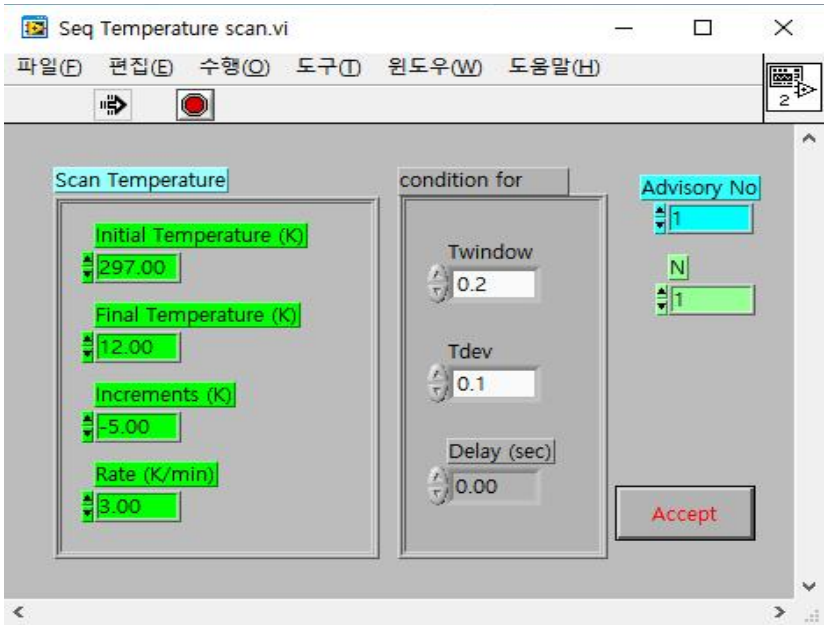


Fig. 2. 6. (a) The main window when the resistivity program is running, (b) The additional window with setting parameters for resistivity measurement.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)



(b)

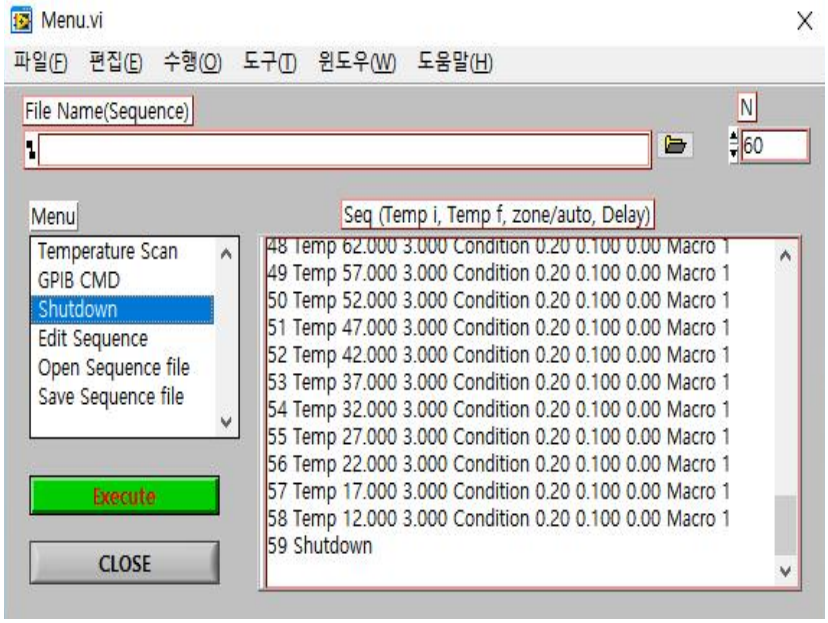


Fig. 2. 7. (a) The screen snapshot image with temperature control parameters, (b) The window indicating temperature sequence.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

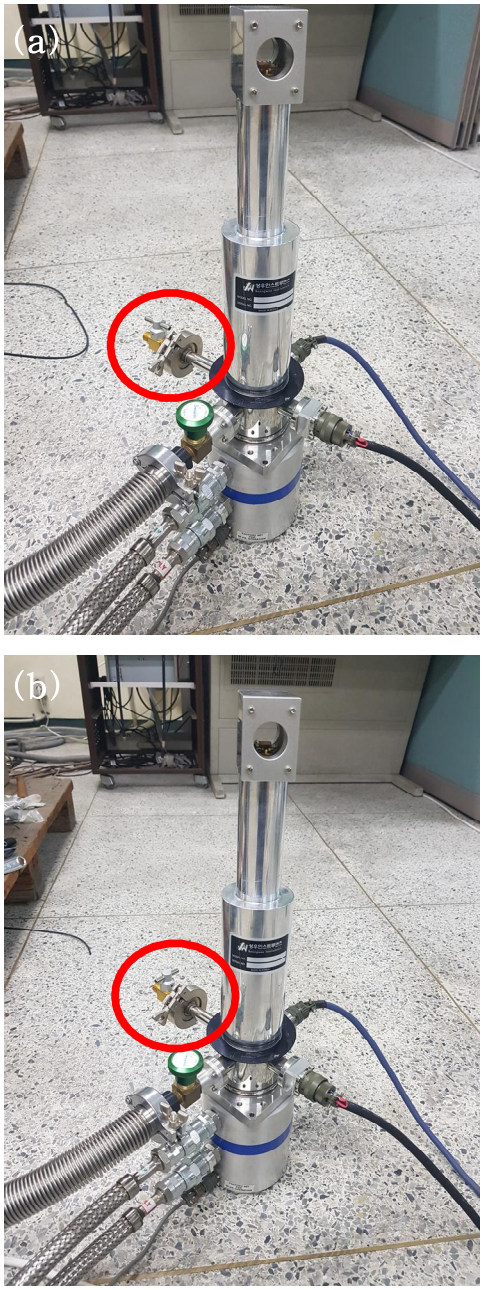


Fig. 2. 8. DC Electric Conductivity Measuring Instruments, (a) open valve state, (b) lock valve state.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 결과 및 고찰

3.1 RRR(Residual Resistivity Ratio)

3.1.1 OFHC Cu(Oxygen Free-High Conductivity Copper)

RRR은 Residual Resistivity Ratio의 약자로 잔류 저항비 라고도 하며 보통 실온 및 0K에서 재료의 저항률이 비율로 정의되는 것을 말한다. 이때 0K은 실제로 도달 할 수 없는 값이기 때문에 보통 일부 추정하여 계산하도록 한다. 본 연구에서는 12K에서의 값을 이용하였다. 또한, RRR은 샘플의 순도와 불순물 함량과 같은 전체 품질의 대략적인 지표로 사용되며 RRR값이 클수록 불순물 함량이 높아지고 작을수록 불순물 함량이 적다는 것을 나타낸다[22].

$$RRR = \frac{\rho(293K)}{\rho(0K)} \qquad 6)$$

다음 Fig. 3. 1.은 OFHC Cu의 IV를 측정한 것으로 그래프가 Linear하게 직선으로 나왔다는 것은 금속의 Metalic한 성질을 확인 할 수 있고 도체임을 증명 할 수 있다. 이 그래프의 기울기를 통해 R값을 구할 수 있으며 비저항과 전기전도도를 구할 수 있다.

Table. 3. 1. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of OFHC Cu.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
OFHC Cu	5.40252×10^{-5}	2.251	444237

또한 방정식 6과 Fig. 3. 2.를 바탕으로 OFHC Cu의 RRR 값을 구해보면 293K에서의 비저항 2.256042×10^{-6}Ω·cm과 12K에서의 비저항 1.23611×10^{-7}Ω·cm로 인해 RRR은 18.3이 나오게 된다(Table. 3. 2.).

Table. 3. 2. The RRR of OFHC Cu.

Sample	RRR=ρ(293K)/ρ(12K)
OFHC Cu	18.3

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

OFHC Cu의 12K부터 297K까지의 온도의존성에 의한 비저항을 보면 온도가 증가할수록 비저항도 증가하는 것을 보아 전형적인 금속의 성질을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 저온에서 0으로 수렴하는 것을 통해 RRR을 이용할 수 있다[21], (Fig. 3. 2.).

온도의존성 실험을 온도에 대한 Resistivity로 나타낸 이유는 Resistance는 단면적에 의해 영향을 받기 때문에 같은 샘플일지라도 값이 다를 수 있다. 하지만, Resistivity는 영향을 받지 않는 고유한 특성이기 때문에 Resistivity로 나타내었다.

또한, Table. 1. 1.과 상온 I-V의 기울기 R값으로부터 얻은 비저항을 통해 표준구리에 대한 저항률의 비를 구하여 보았을 때,(Table. 3. 1.) 다음과 같이 나타낼 수 있고, 표준구리보다 비저항이 1.3배 높아 비교적 좋지 않은 OFHC Cu 샘플이라고 할 수 있다.

$$\text{표준구리에 대한 저항률의 비} = \frac{OFHC\,Cu\,\text{비저항}}{\text{표준구리의 비저항}} = \frac{2.251\mu\Omega\cdot\ cm}{1.7241\mu\Omega\cdot\ cm} = 1.3 \qquad 7)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

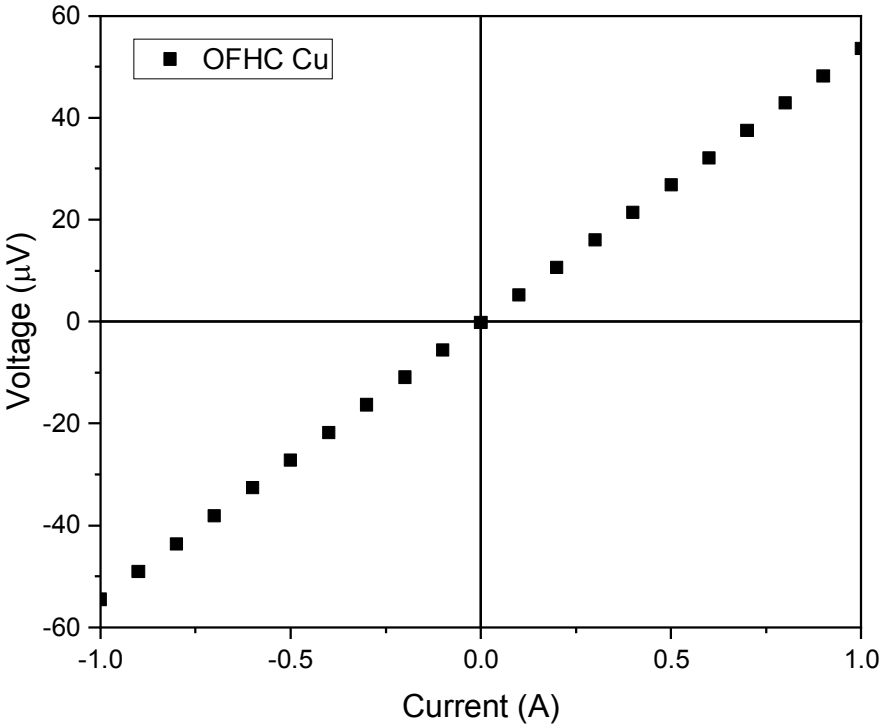


Fig. 3. 1. I-V graph obtained for the OFHC Cu at room temperature.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

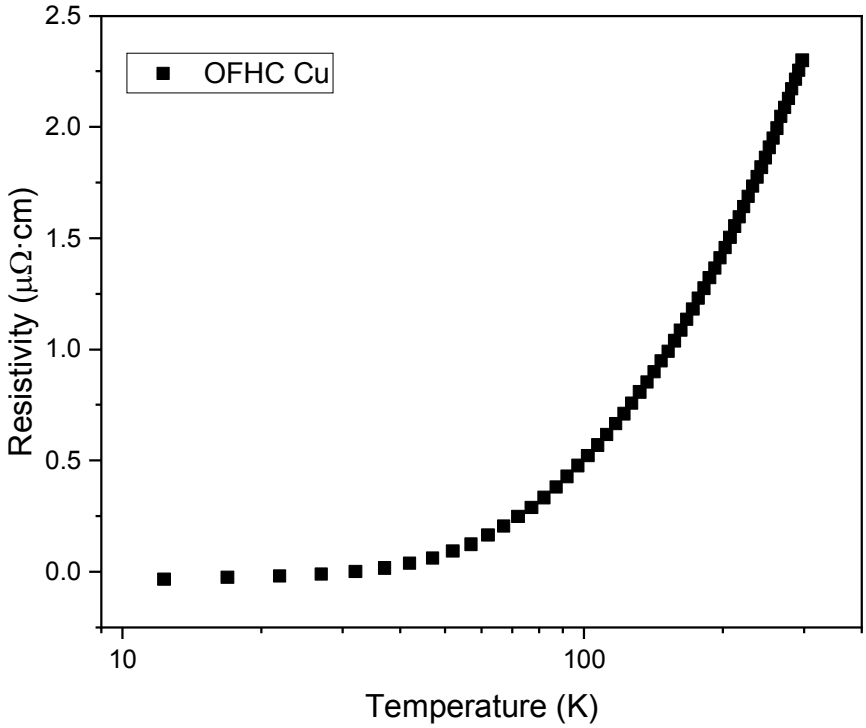


Fig. 3. 2. Temperature dependence of resistivity in the OFHC Cu.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.2 3DiGn-Cu composite

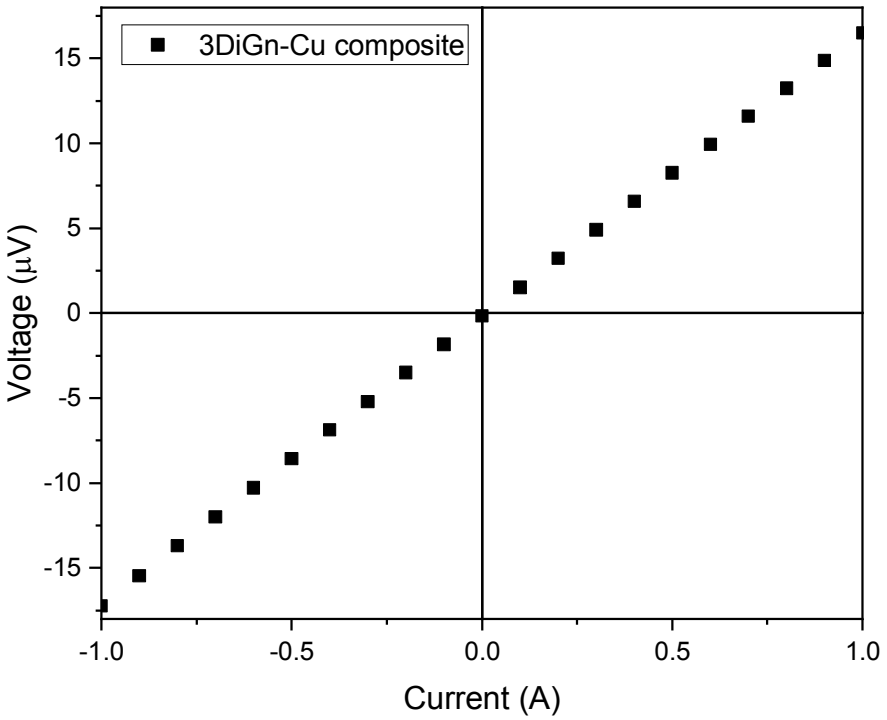


Fig. 3. 3. I-V graph in the 3DiGn-Cu composite.

Table. 3. 3. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3DiGn-Cu composite.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
3DiGn-Cu composite	1.685141×10^{-5}	2.996	333799

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

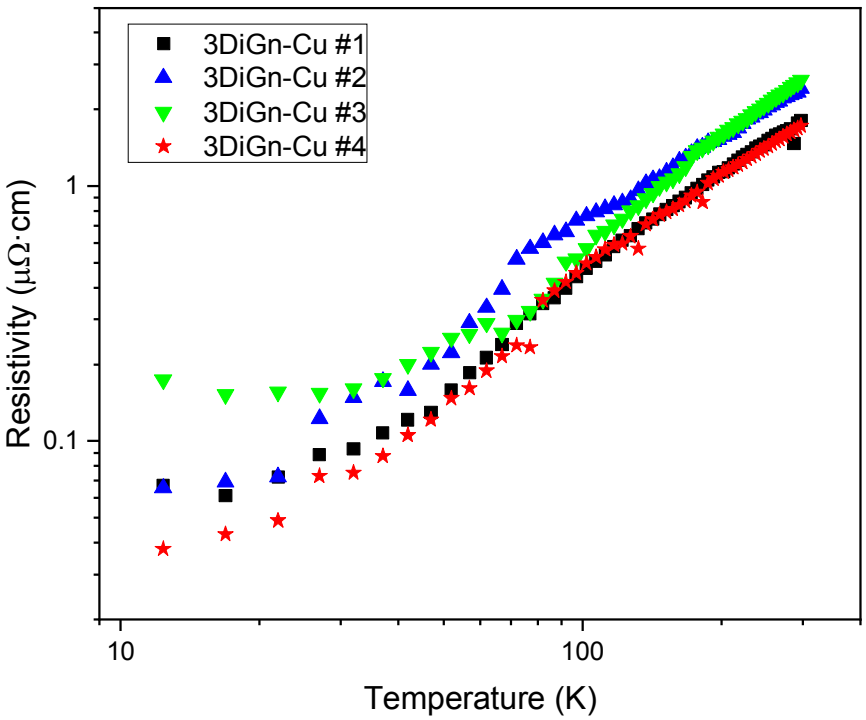


Fig. 3. 4. Temperature dependence of resistivities obtained for 4 different parts of the same 3DiGn-Cu composite.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3DiGn-Cu composite 또한 IV를 측정하여 그래프를 통해 저항, 비저항, 전기전도도를 각각 구할 수 있다(Table. 3. 3.).

Fig. 3. 4.는 하나의 3DiGn-Cu composite 판을 4조각으로 나눈 것을 가지고, 각각 온도실험을 하여 RRR값의 평균값을 산출해주었다. 따라서 Cu-Graphene의 RRR은 약 30.4로 한다(Table. 3. 4.).

Table. 3. 4. The RRR values obtained from 4 different parts of the same 3DiGn-Cu composites.

Sample	RRR=ρ(293K)/ρ(12K)
3DiGn-Cu #1	26.3
3DiGn-Cu #2	35.8
3DiGn-Cu #3	14.6
3DiGn-Cu #4	44.8
Average	30.4(±11.1)

이 샘플들은 하나의 3DiGn-Cu composite판을 여러 개로 조각내어 측정한 것이고, I-V는 대략적으로 한 개의 샘플만 나타내어 그린 것이다(Fig. 3. 3.). OFHC Cu와 마찬가지로 I-V가 거의 Linear하게 직선으로 나왔고, 온도의존성 실험도 온도증가에 따라 비저항이 증가하는 것을 보아 Metalic한 성질을 가지는걸 알 수 있다. 하지만, I-V의 그래프를 자세히 보면, Current -1.0~0.0까지는 위로 살짝 볼록하고, 0.0~+1.0까지는 아래로 약간 오목하다. 또한 I-V그래프의 기울기로부터 얻은 R값을 통해 비저항을 구해보았을 때, 2.996μΩ·cm가 나왔고, 이를 통해 표준구리에 대한 저항률의 비를 구해보면 1.7이 나오게 된다(방정식 8). 이는 표준구리보다 비저항이 1.7배 높아 OFHC Cu와 마찬가지로 전기전도도가 그다지 좋지 않음을 알 수 있다.

$$\text{표준구리에 대한 저항률의 비} = \frac{3DiGn-Cu\,\text{비저항}}{\text{표준구리의 비저항}} = \frac{2.996\mu\Omega\cdot\ cm}{1.7241\mu\Omega\cdot\ cm} = 1.7 \qquad 8)$$

위 설명처럼 I-V의 그래프 거동이나 지금까지의 OFHC Cu와 3DiGn-Cu composite을 봤을 때, 별로 차이가 없어, 이러한 이유를 알아보기 위해서는 3DiGn-Cu composite의 전기전도도메커니즘을 이해해야 한다고 판단했고, 그렇다면 3DiGn-Cu

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

composite의 구조를 알아볼 필요가 있다고 생각하여, SEM 사진을 찍어보았다(Fig. 3. 5.).

본 글의 2.1.2.의 내용을 보면 3DiGn-Cu composite은 입체적으로 연결된 그래핀들 사이로 Cu powder가 들어가 만들어지는 복합체이다(Fig. 2. 3.). 이 복합체는 Fig. 3. 5.의 (a)에서 확인할 수 있듯이, 3차원적인 Graphene 그물망(graphene network)에 마찬가지로 Cu network가 3차원적으로 엉겨 붙어 있는 것을 확인할 수 있었고, 이를 보고 3DiGn-Cu composite에 전류를 흘려준다면 전류가 3D Graphene그물망 부분으로도 흐르고, 그 사이사이의 Cu network부분에서도 각각 흐르겠다고 생각하여, 각 부분을 측정해 보기로 결정하였다. 실험을 진행하기 위해 3DiGn-Cu composite에서 Graphene 부분만 제거하는 것은 어려우므로, Cu metal을 제거하여 한 샘플의 반절은 Cu metal을 제거하고 Graphene network만 남겨두고 반은 Cu-Graphene composite의 상태로 준비하였다. Fig. 3. 5.의 (b)는 Cu metal을 제거한 Graphene network의 모습이다.

가정한대로 전류가 각각의 network에 따로 흐른다면 병렬회로 구조연결로 이 가정을 설명할 수 있을 거라 생각하여, Graphene network와 Cu network의 병렬회로 연결도를 그려보았다. 다음 Fig. 3. 6. 은 Graphene network와 Cu network의 병렬 회로도를 그린 것이다.

Fig. 3. 7. 은 앞서 말했던 병렬회로 가정을 증명하기 위해 반은 3DiGn-Cu composite이고, 반은 3DiGn-Cu composite에서 Cu metal만 제거하여 Graphene network만 남겨둔 것을 각각 측정하기 위한 샘플로 도해로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 위, 아래를 각각 4-probe contact 하여 측정할 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

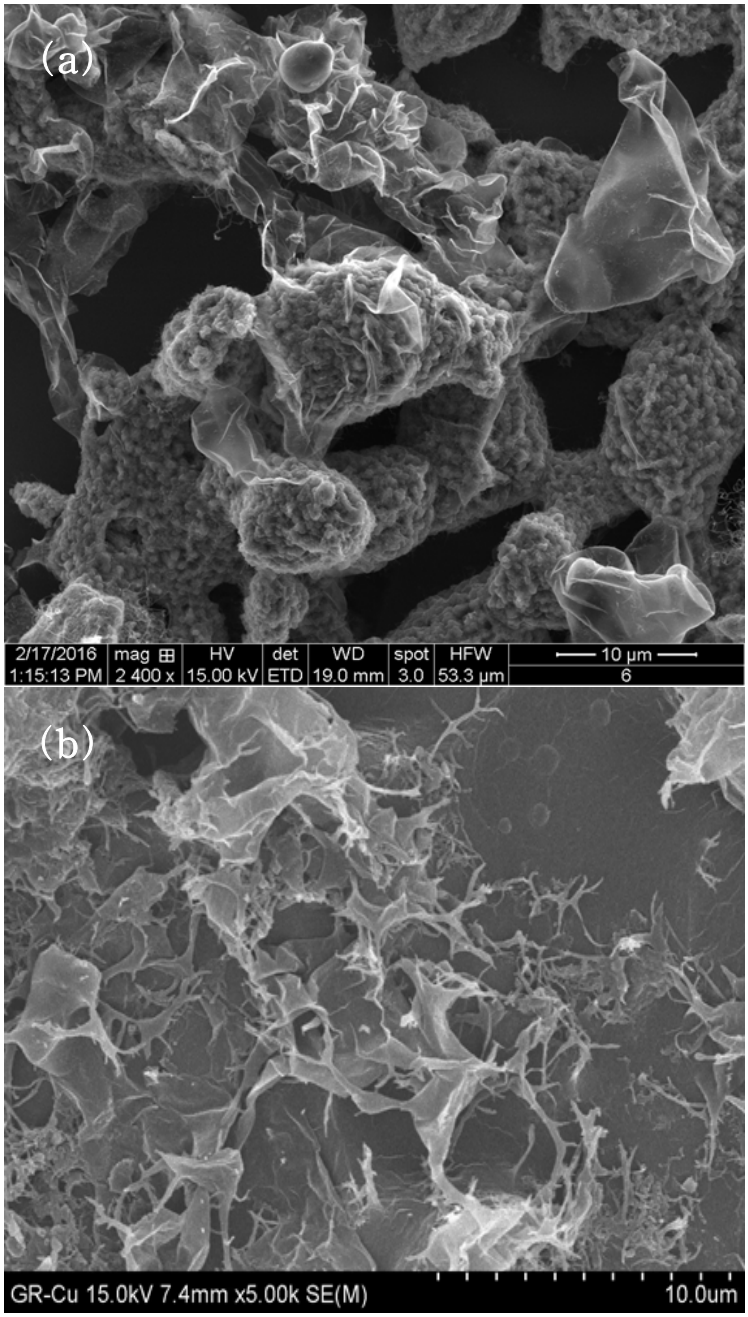


Fig. 3. 5. (a) SEM image of 3DiGn-Cu composite. (b) SEM image of 3D Graphene network after removed Cu metal completely from the 3DiGn-Cu composite.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

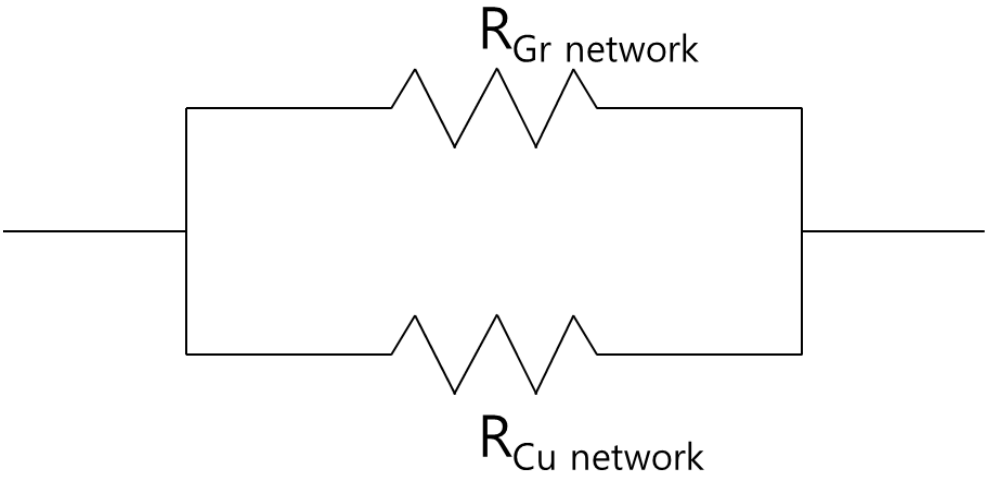


Fig. 3. 6. Schematic illustration of Parallel circuit model. Here, it is assumed that the current injected by current source can independently flow through 3D-Graphene network and 3D-Cu network channels.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

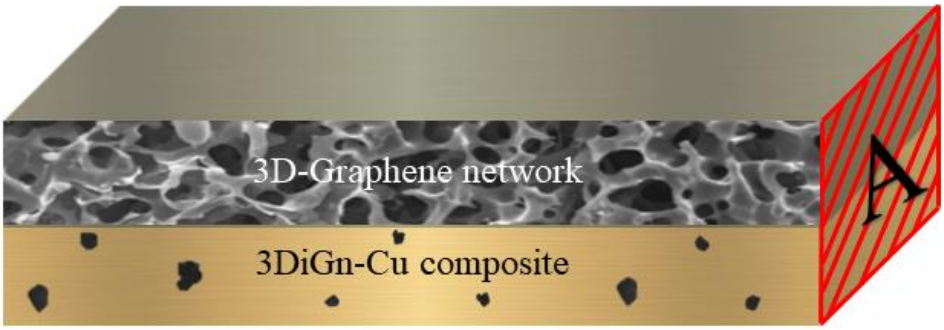


Fig. 3. 7. Diagrammatic illustration of Graphene network and 3DiGn-Cu composite parts with half to half ratio.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.3 3DiGn-Cu composite

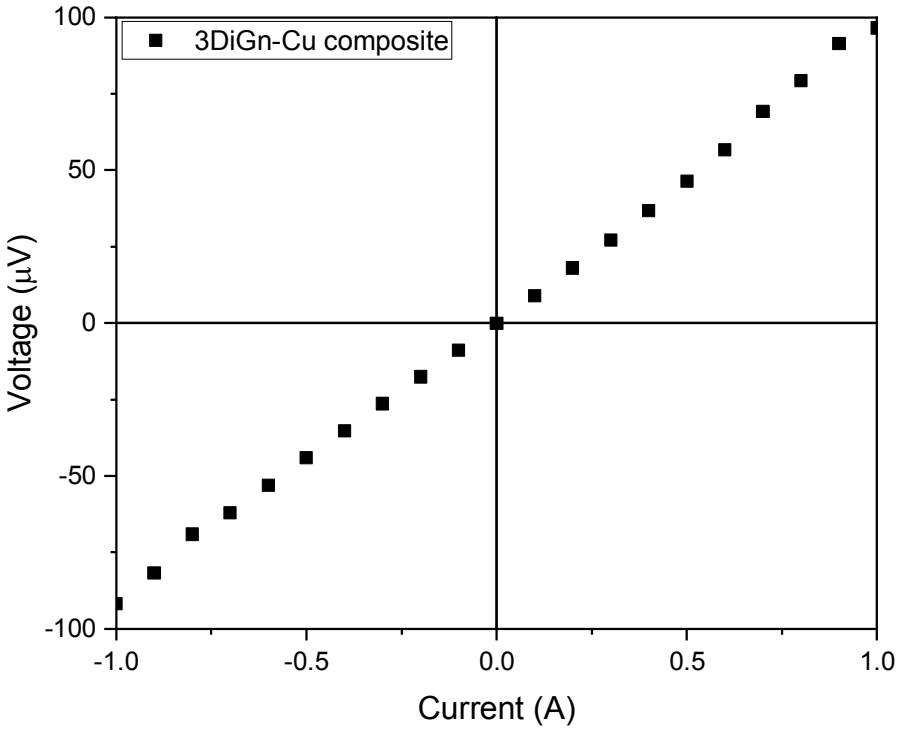


Fig. 3. 8. I-V graph measured for the 3DiGn-Cu composite part.

Table. 3. 5. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3DiGn-Cu composite.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
3DiGn-Cu composite	9.34541×10^{-5}	4.506	221935

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

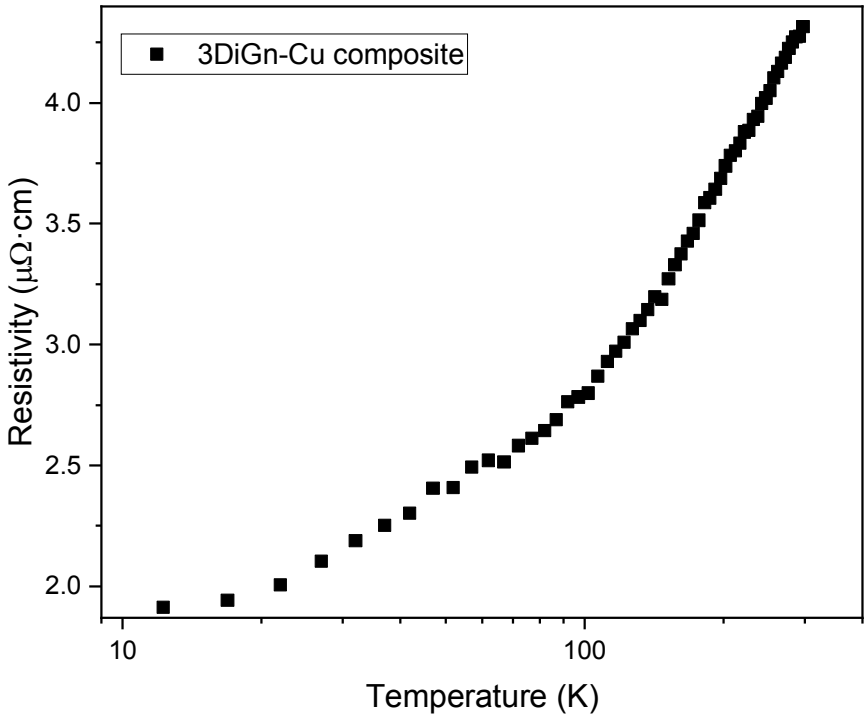


Fig. 3. 9. Temperature dependence of resistivity measured for the 3DiGn-Cu composite part.

Fig. 3. 8.과 Fig. 3. 9.는 Fig. 3. 7.의 샘플의 3DiGn-Cu composite부분에만 4-probe contact 하여 측정한 것이다. Fig. 3. 8.의 3DiGn-Cu comspotie의 I-V를 보면 Linear하지만, 0~+1.0 부근에서 살짝 휘어있는 것을 관찰할 수 있다. 온도의존성 실험그래프는 깔끔하지는 않으나, OFHC와 유사한 거동을 보이고 있다. 또한 3.1.2와 같은 방법으로 만든 3DiGn-Cu composite이지만 비저항이 2배 이상 크게 온 것을 확인 할 수 있다 (Table. 3. 5., 방정식 9).

이를 보고 3DiGn-Cu composite내의 어떠한 메커니즘 때문에 이런 치수가 나왔다고 판단했다.

$$\text{표준구리에 대한 저항률의 비} = \frac{3DiGn-Cu\text{비저항}}{\text{표준구리의 비저항}} = \frac{4.506\mu\Omega\cdot\ cm}{1.7241\mu\Omega\cdot\ cm} = 2.6 \qquad 9)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.4 3D-Graphene network

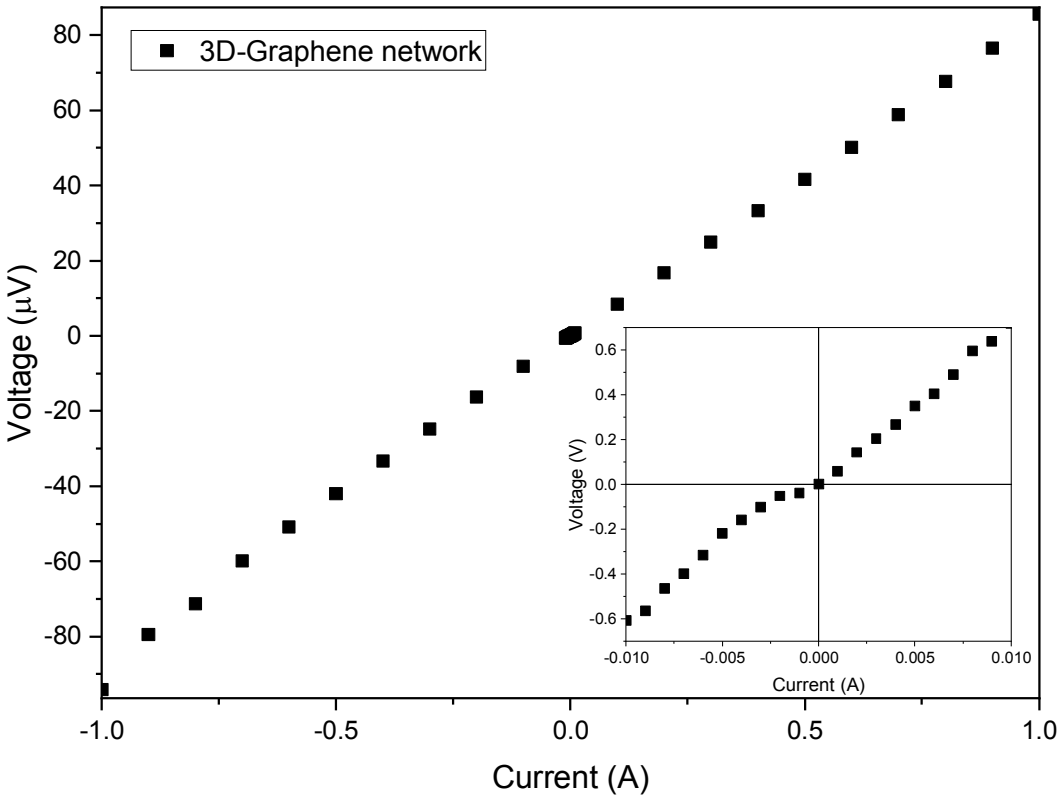


Fig. 3. 10. I-V graph for the 3D-Graphene network channel alone.

Fig. 3. 10.과 Fig. 3. 11.은 Fig. 3. 7.에서 3D-Graphene network부분에만 4-probe contact 하여 실험한 것을 나타낸 것이다.

Fig. 3. 10.은 3D-Graphene network의 -1.0A에서 +1.0A까지의 전류에 대한 전압을 측정하고, Current -0.01A에서 +0.01A까지 부분만 확대해서 한번 더 측정한 IV를 그린 것이다. 이때 전체적으로 봤을 때는 Metalic한 성질을 가지고 있으면서도, 확대된 부분에서는 Linear하지 않은 그래프의 모습과, 온도실험에서 온도가 올라갈수록 비저항이 감소하는 것을 보아, 전형적인 반도체적 성질 또한 가지고 있음을 보여주고 있다 [21], (Fig. 3. 11.). 또한, 이러한 I-V에서의 휘어있는 그래프모양이 3DiGn-Cu composite 에서도 미미하게 보이는 것은 Graphene의 성질이 3DiGn-Cu composite에 나타난 것으로 보여 진다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

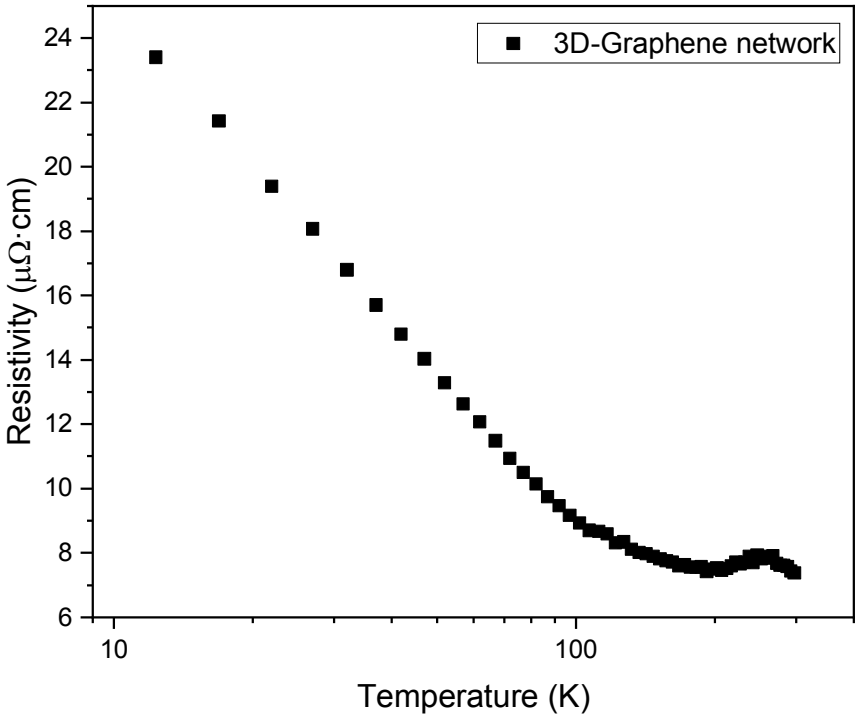


Fig. 3. 11. Temperature dependence of resistivity in the 3D-Graphene network.

3D-Graphene network의 저항, 비저항, 전기전도도는 각각 Table. 3. 6.과 같다.

Table. 3. 6. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of 3D-Graphene network.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
3D-Graphene network	8.65772×10^{-5}	5.195	192506

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.5 Cu powder

직접 측정할 수 없기 때문에 나중에 계산을 통해 구해줄 3D-Cu network와, 비교하기 위한 기존의 그냥 Cu powder도 전기전도도 실험을 진행하였다.

Fig. 3. 12.를 보아 Cu powder는 Metalic한 성질을 가지고 있음을 알 수 있다. 온도의존성 실험은 3D-Graphene network와 유사하게 온도가 증가할수록 비저항이 감소하는 반도체적 성질을 띠는 것을 볼 수 있다. Current가 0일 때, 전압이 걸려있는 것은 샘플 내에서 대전현상(Electrification 또는 Charging)이 일어난 것으로 보인다.

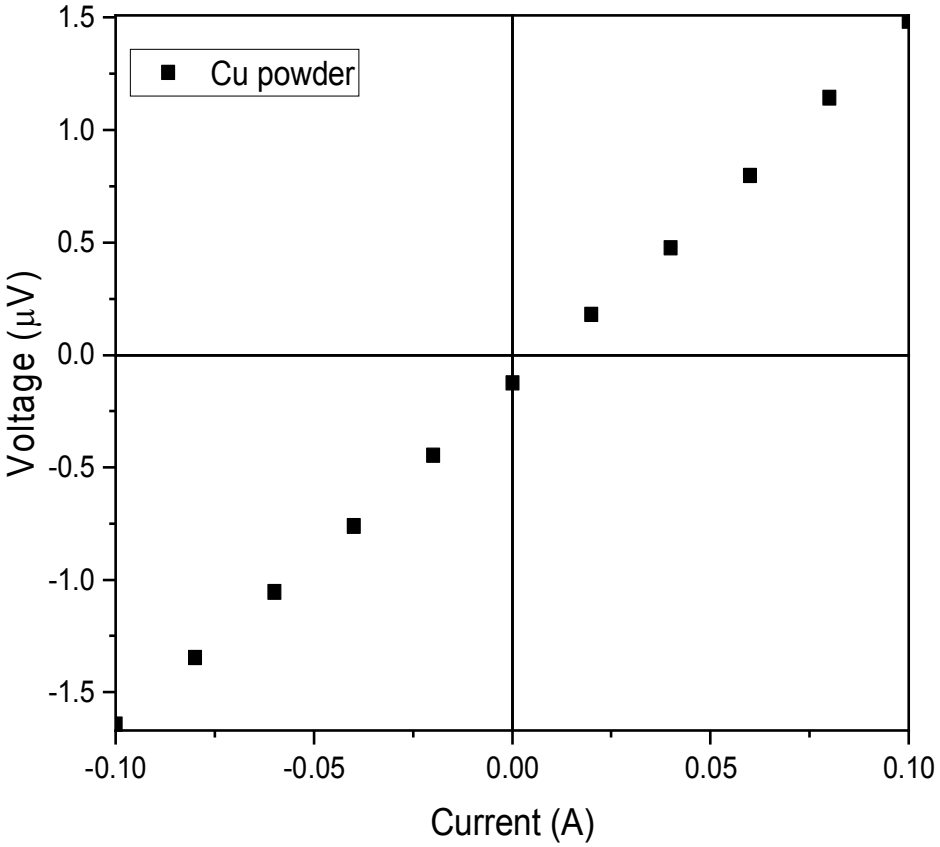


Fig. 3. 12. I-V graph of Cu powder.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

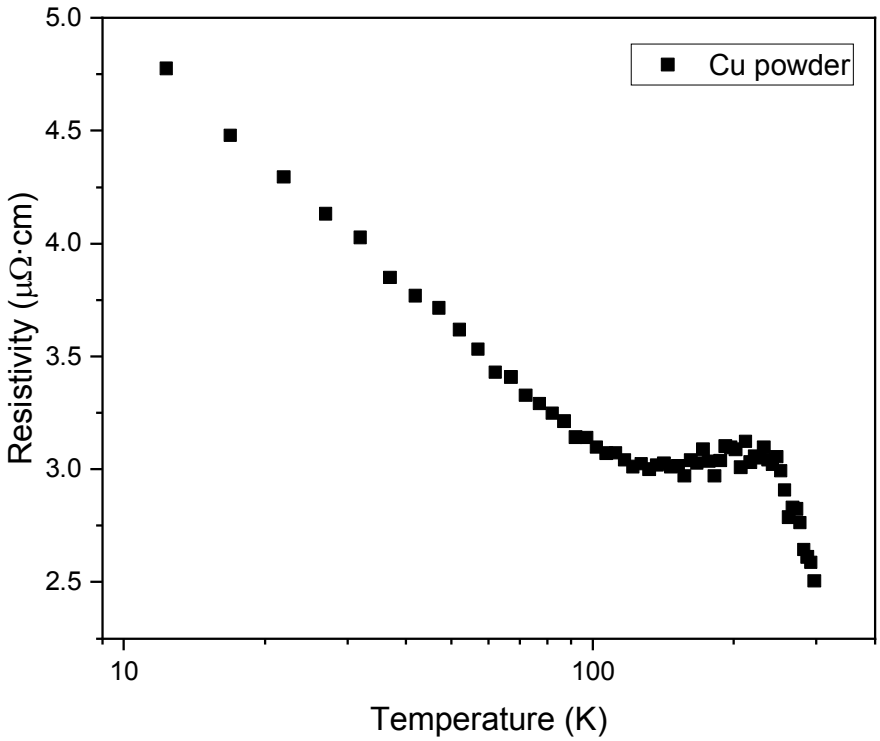


Fig. 3. 13. Temperature dependence of resistivity in Cu powder.

Table. 3. 7. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of Cu powder.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
Cu powder	1.55643×10^{-5}	2.373	421390

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위의 실험들을 통해 직접 측정할 수 없었던 3D-Cu network 부분은 앞서 세웠던 3D-Graphene network와 3D-Cu network는 병렬저항의 구조를 이루고 있을 것 이라는 가정을 통해, 병렬저항 계산식을 가지고 3D-Cu network를 도출해 낼 수 있다. 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{R_{\tau o \tau}} = \frac{1}{R_{Cu}} + \frac{1}{R_{Gr}} = \frac{1}{R_{Cu-Gr}} \qquad 10)$$

$$\frac{1}{R_{Cu-Gr}} = \frac{1}{R_{Cu}} + \frac{1}{R_{Gr}} \qquad 11)$$

$$\therefore \frac{1}{R_{Cu}} = \frac{1}{R_{Cu-Gr}} - \frac{1}{R_{Gr}} \qquad 12)$$

위의 식들은 2장의 방정식 2를 이용해서 R_{Cu}를 계산해볼 수 있다.

$$R_{\tau o \tau} = \frac{\ell_{\tau o \tau}\rho_{\tau o \tau}}{A_{\tau o \tau}} \qquad 13)$$

$$\frac{A_{\tau o \tau}}{\ell_{\tau o \tau}\rho_{\tau o \tau}} = \frac{A_{Cu}}{\ell_{Cu}\rho_{Cu}} + \frac{A_{Gr}}{\ell_{Gr}\rho_{Gr}} \qquad 14)$$

Fig. 3. 7.은 같은 크기의 한 샘플이기 때문에, 단면적A와 전극간의 거리 ℓ이 동일하다고 보아, $A_{\tau o \tau} = A_{Cu} = A_{Gr}$, $\ell_{\tau o \tau} = \ell_{Cu} = \ell_{Gr}$ 이라하면, A와 ℓ을 약분시켜주고 계산 하여 주어, 다음과 같이 3D-Cu network에 대한 값을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_{\tau o \tau}} = \frac{1}{\rho_{Cu}} + \frac{1}{\rho_{Gr}} = \frac{1}{\rho_{Cu-Gr}} \qquad 15)$$

$$\therefore \frac{1}{\rho_{Cu}} = \frac{1}{\rho_{Cu-Gr}} - \frac{1}{\rho_{Gr}} \propto \frac{1}{R_{Cu}} \qquad 16)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

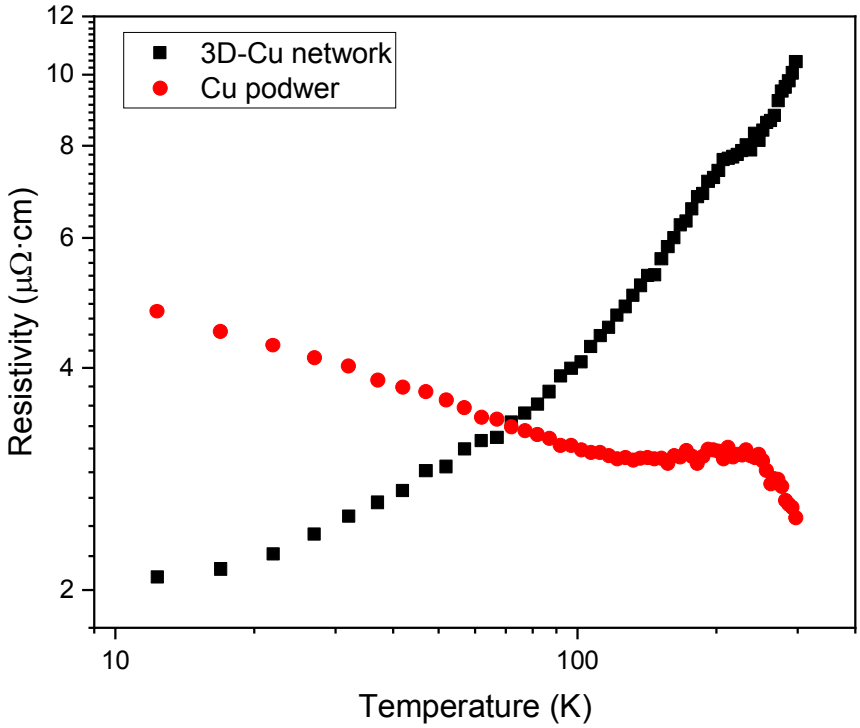


Fig. 3. 14. Comparison of the temperature dependence of resistivity in 3D-Cu network with Cu powder.

Fig. 3. 14.는 방정식 16으로 구한 3D-Cu network의 값을 Cu powder와 함께 온도 의존성에대한 비저항으로 나타낸 그래프이다. 3D-Cu network에서는 온도가 증가할수록 비저항이 증가하는 금속의 Metalic한 거동을 보여주고 있고, 순수한 Cu powder에서는 온도가 증가할수록 비저항이 감소하는 반도체적 성향을 보이고 있다. 이점을 통해 3D-Cu network 부분과 3D-Graphene network부분 사이의 전기전도도 메커니즘이 일어났기 때문에 3D-Cu network가 영향을 받아 도체의 그래프를 나타낸다고 생각하였다. 또한, 3D-Cu network에서 곡선으로 증가하다가 약 207K 부근부터 약간 꺾여서 증가하는 것과 Cu powder에서는 점차 감소하다가 207K부근에서 꺾여서 급격히 더 감소하는 것도 영향을 미치는 관계를 보여주는 것이라고 판단하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 결론

위 실험들을 통해 나온 OFHC Cu, 3DiGn-Cu composite, 3D-Graphene network, Cu powder와 앞서 병렬회로 계산식을 통해 구한 3D-Cu network와 비교를 해보았다(Fig. 3. 15., Table. 3. 9.).

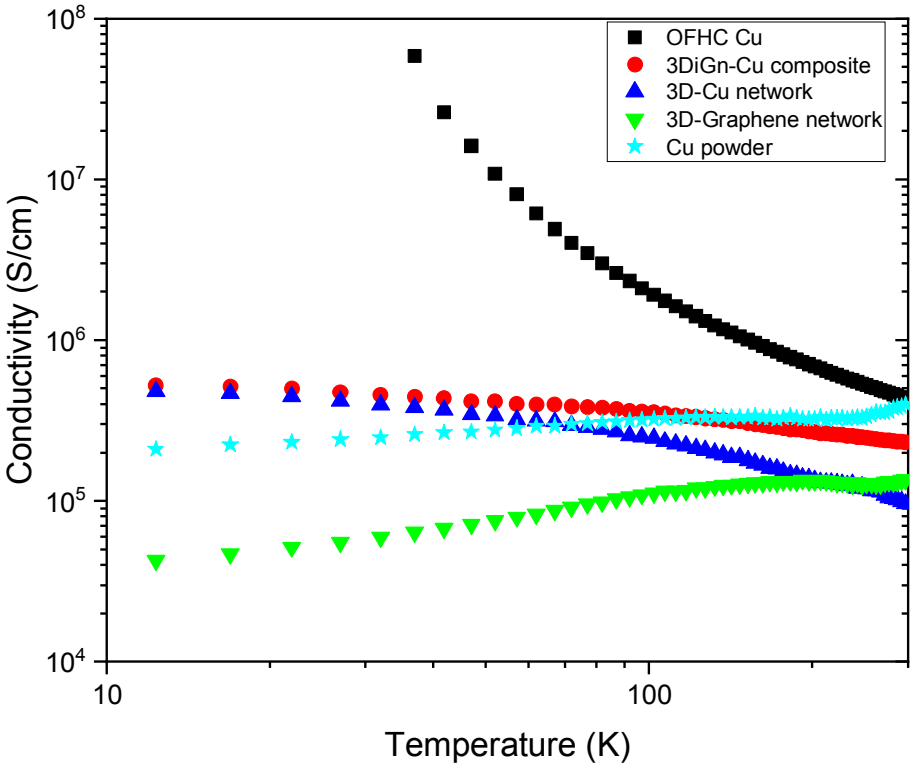


Fig. 3. 15. The conductivity of OFHC Cu, 3DiGn-Cu composite, 3D-Cu network, 3D-Graphene network, Cu powder.

Fig. 3. 15.는 앞서 실험한 샘플들을 12 K부터 297 K까지 plot하여 전기전도도에 대하여 나타낸 것이다. 그래프에 보여 지는 것처럼 상온에서 OFHC Cu와 Cu powder의 전기전도도는 매우 비슷한 값을 가지나, 온도가 감소할수록 OFHC Cu는 증가하므로 저온에서도 전기전도도가 좋지만, Cu powder는 감소하는 것으로 보아 저온에서의 전기전도도는 다소 떨어짐을 알 수 있다. Cu powder와 3DiGn-Cu composite을 통해 구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한 3D-Cu network의 그래프는 서로 다른 거동을 보인다. 이는 Graphene과 Cu사이에 어떠한 상호작용이 있다는 것을 알 수 있다. 덧붙여, 3D-Graphene network와 3D-Cu network가 병렬회로로 전류가 각각 흐른다는 가정 하에 실험한 것도 이 가정이 맞다면, 3D-Graphene network부분으로 4-probe contact하여 실험하였을 때 와 3DiGn-Cu composite부분으로 contact하였을 때의 결론적 값은 둘이 같아야한다.

하지만 서로의 값은 같지 않았다. 이 또한, 3D-Graphene network와 3D-Cu network 사이의 어떤 interface가 있다는 말이 되며(Fig. 3. 16.), Fig. 3. 15.의 OFHC Cu와 3DiGn-Cu composite의 그래프나, Table 3. 8.의 전기전도도에서 보듯이, 본 연구에서의 3DiGn-Cu composite은 OFHC Cu만큼의 좋은 전기적 특성은 가지지 못했지만 Graphene으로 Cu를 강화하는 것이 충분히 유의미하다는 것을 알 수 있다.

마지막으로, Graphene network와 Cu powder는 반도체적인 거동을 보여주고 있는 있는데, Cu powder의 경우 상온에서 전기전도도는 OFHC Cu 만큼 높으나(Table. 3. 8.), 반도체적인 성질을 보여주는 것이 의문점이다. 이는 Cu powder를 이용해 만들어진 이 샘플의 특성이거나, Cu powder자체의 특성 혹은, Fig. 3. 12.에서 언급한 것처럼 샘플사이의 연결로 인해 SCLC(Space Charge Limited Conduction; 공간 전하 제한 전도)에 의한 것이라고 판단된다.

Table. 3. 8. Resistance, Resistivity and Electric conductivity of OFHC Cu, 3DiGn-Cu composite, 3D-Graphene network, Cu powder.

	R(Ω)	ρ(μΩ·cm)	σ(S/cm)
OFHC Cu	5.40252×10^{-5}	2.251	444237
3DiGn-Cu composite(half)	9.34541×10^{-5}	4.506	221935
3D-Graphene network	8.65772×10^{-5}	5.195	192506
Cu powder	1.55643×10^{-5}	2.373	421390

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

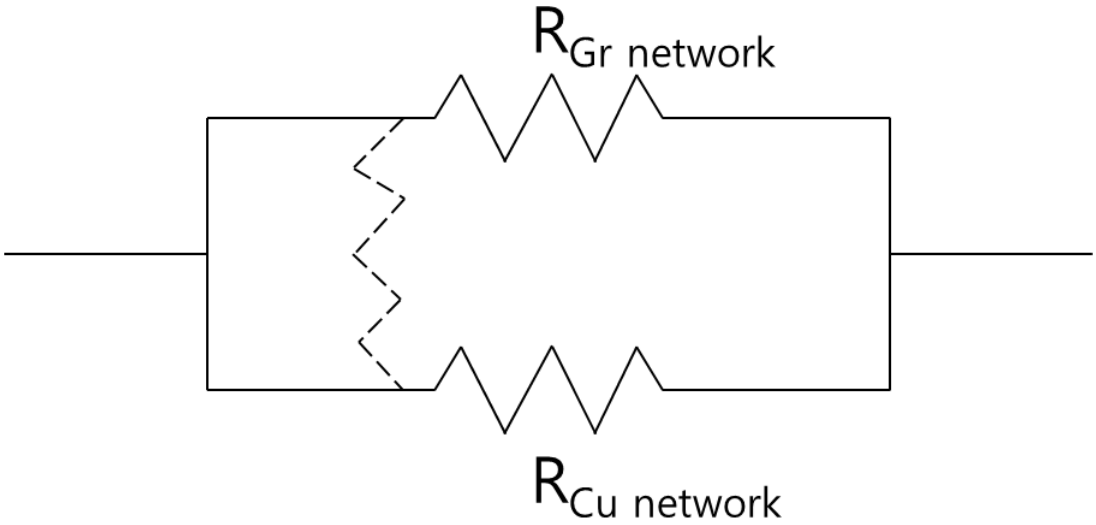


Fig. 3. 16. Schematic picture presenting a possible current flow between the Graphene-Cu interface.

Table. 3. 9. Ratio of resistivity to standard copper.

금속 종류	비저항(μΩ·cm)	표준구리에 대한 저항률의 비
구리	1.7241	1.00
OFHC Cu	2.251	1.31
3DiGn-Cu composite	2.996	1.74
3DiGn-Cu composite(half)	4.506	2.61
Graphene network	5.195	3.01
Cu powder	2.373	1.38

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] 우정훈. “The synthesis and evaluation of thermal conductivity material of using Graphene”. (2018), pp.1-3.

[2] K. Lu. *Science* 328, 319 (2010).

[3] W. Wu, SH. Brongersma, M. Van Hove, & K. Maex. *Appl. Phys. Lett.* 84, 2838 (2004)

[4] M. W. Park, J. K. Im, M. K. Shin, Y. H. Min, J. Y. Park, H. S. Cho, S. J. Park, M. B. Shim, S. H. Jeon, D-Y. Chung, J. H. Bae, J. J. Park, U. Y. Jeong & K. N. Kim. *Nature Nanotech.* 7, 803 (2012)

[5] L. Lu, Y. Shen, X. Chen, L. Qian, & K. Lu. *Science* 304, 422 (2004).

[6] Y. Sakai, & H. -J. Schneider-Muntau. *Acta Mater*. 45, 1017 (1997).

[7] P. J. Wang, J. S. Kim, & C. C. Lee. *J. Electron. Packag.* 130, 045001-1-4 (2008).

[8] Yongdeok Jo, Xue Li, Dongmin Cho, Byung-Sang Choi. “Tensile properties of three-dimensionally interconnected graphene-networked Cu composite and changes in its microstructure in relation to heat treatment temperature”. *J. of Advanced. Engineering. and Tech.nology,* Vol.12, No.2, pp.091～095 (2019)

[9] A. L. Walter, S. Nie, A. Bostwick, K. S. Kim, L. Moreschini, Y. J. Chang, D. Innocenti, K. Horn, K. F. McCarty, & E. Rotenberg. *Phys. Rev. B* 84, 195443 (2011).

[10] Sae-Rom Kawk, Terry A. Ring, Byung-Sang Choi. “A simple two-step fabrication route for Cu composite reinforced by three-dimensional graphene network”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 70, 484～488 (2019).

[11] Xue Li, Terry Arthur Ring, Byung-Sang Choi. “Thermal Conductivity of Three-Dimensionally Interconnected Graphene-Networked Cu Composite Fabricated by a Simple Two-Step Process”. *대한금속·재료학회지(Korean J. Met. Mater.),* Vol.57, No.8 pp.529～534 (2019).

[12] 윤두희, 정현식. “그래핀의 라만분광분석(Raman Spectroscopic Study of Graphene)”. *새물리* Vol.60, No.3, pp.261-272 (2010)

[13] P. R. Wallace. *Phys. Rev.* 71, 622 (1947).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[14] K. S. Novoselov 외 7 명. “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films”. (2004)

[15] C. Berger, Z. Song, T. Li, X. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, and P. N. First. *J. Phys. Chem. Lett. B,* 108, 19912 (2004).

[16] Reina, A. 외 7 명. “Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition”. (2009)

[17] Li X, Cai W, An J, Kim S, Nah J, Yang D, Piner R, Velamakanni A, Jung I, Tutuc E, Banerjee SK, Colombo L, Ruoff RS. “Large-area synthesis of high quality and uniform graphene films on copper foils”. *Science,* 324, 1312 (2009).

[18] R. R. Nair 외 7 명. “Fine Structure Constant Defines Visual Tranparency of Graphene” (2008).

[19] J. Maultzsch, S. Reich, C. Thomsen, H. Requardt and P. Ordejon. *Phys. Rev. Lett. 92, 075501* (2004).

[20] Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J.-H., Kim, P., Choi, J.-Y., Hong, B. H. *Nature* 457, 706 (2009).

[21] 김지영, “The study on the electrical conductivity of metal bulk crystals and metal thin films”, pp1-10, (2014).

[22] W. D. Callister Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction.* 5th ed., Wiley (2000).