



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](#)

工學碩士 學位論文

그래핀 기반 플렉시블 전송선로의
손실 특성에 관한 연구

A Study on RF Loss Characteristics of Graphene-Based
Flexible Transmission Line



指導教授 1945 尹 榮

2018 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

吳 炫 樹

本 論 文 을 吳 炫 樹 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 鄭 智 元 (印)

委 員 : 工 學 博 士 金 基 萬 (印)

委 員 : 工 學 博 士 尹 榮 (印)



2018年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

List of Figure	ii
List of Table	iii
Nomenclature	iv
Abstract	vi
제 1 장 연구 배경 및 목적	1
제 2 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특성	3
2.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로 및 gold 기반의 플렉시블 전송선로	3
2.1.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로	3
2.1.2 Gold 기반의 플렉시블 전송선로	5
2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 RF Loss 특성	6
2.2.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 삽입손실	6
2.2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 감쇠정수	9
제 3 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전기적 특성	11
3.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전기전도성	11
3.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 표피효과	17
제 4 장 그래핀의 전기 전도성을 높이는 방안	22
4.1 전이금속도핑	22
4.2 은나노 와이어 첨가	23
4.3 전기 전도도 개선을 통한 시뮬레이션 결과	24
제 5 장 결 론	27
참고문헌	29

그림 목 차

그림 2.1	그래핀 페이스트, 그래핀 페이스트의 FE-SEM 사진, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 사진	4
그림 2.2	Gold 기반 플렉시블 전송선로의 사진	5
그림 2.3	그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 삼입 손실	6
그림 2.4	그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 Gold 기반 플렉시블 전송선로와의 1 mm 당 삼입 손실 비교	7
그림 2.5	그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 Gold 기반 플렉시블 전송선로와의 손실 특성 비교	9
그림 3.1	그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 등가 회로	11
그림 3.2	그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 3D 형태 그림과 그것을 Y-Y 방향으로 자른 단면도	14
그림 3.3	그래핀과 Gold의 1 m당 전기 전도율 비교	16
그림 3.4	불완전 도체에서의 표피 효과	19
그림 3.5	그래핀과 Gold의 표피 두께 비교	20
그림 4.1	그래핀 페이스트의 한 층을 확대하여 나타낸 그림	22
그림 4.2	은나노와이어의 SEM 사진	23
그림 4.3	시뮬레이션으로 나타낸 그래핀의 1 m 당 전기 전도율 개선 효과	24
그림 4.3	시뮬레이션으로 나타낸 그래핀의 표피 두께 개선 효과	25

표 목 차

표 1 다양한 그래핀 기반 전송선로의 삽입 손실 비교.....7



Nomenclature

α	:	Attenuation constant
β	:	Phase constant
C	:	Capacitance
f	:	Frequency
G	:	Conductance
L	:	Inductance
L_G	:	Length of ground plane
L_S	:	Length of signal line
L_P	:	Length of patch
R	:	Resistance
γ	:	Propagation constant
S_{21}	:	Insertion loss
ω	:	Angular velocity
W_G	:	Width of ground plane
W_S	:	Width of signal line
W_P	:	Width of patch
W_{GAP}	:	Gap between signal line and ground plane
t	:	Thickness of conductor
Z_0	:	Characteristic impedance

- l : Length of the transmission line
 σ : Conductivity
 δ_s : Skin depth
 μ : Permeability
 ϵ : Permittivity
 v_p : Phase velocity
 λ : Wavelength



A Study on RF Loss Characteristics of Graphene-Based Flexible Transmission Line

Hyun-Soo Oh

Department of Radio Communication Engineering

Abstract

In this thesis, the coplanar waveguide employing chemically modified graphene was fabricated on PET(polyethylene terephthalate) substrate, and its RF loss characteristics were investigated. The fabricated coplanar waveguide showed much lower loss characteristics in comparison with conventional graphene-based transmission line. Concretely, the insertion loss of conventional graphene/Si structure was -24 [dB] ~ -33 [dB] at 1 GHz, but graphene/PET structure showed only -0.773 [dB] at same frequency. But, it still showed a comparatively higher loss in comparison with gold-Ti/PES structure. The higher loss of the graphene/PET structure originates from a comparatively lower conductance. According to these results, it was found that the proposed graphene/PET structure has a sufficient potential for application to flexible RF device.

KEY WORDS: RF (radio frequency), loss, coplanar waveguide, graphene, flexible substrate

그래핀 기반 전송선로의 손실 특성에 관한 연구

오 현수

Department of Radio Communication Engineering

Abstract

본 논문에서는 PET(polyethylene terephthalate)기판 위에 화학적으로 처리한 그래핀을 이용하여 전송선로를 만들고, 전송선로의 RF 손실 특성을 연구하였다. 결과에 따르면, 본 논문에서 제안하는 전송선로는 다른 그래핀 기반 전송선로에 비해 손실이 적었다. 구체적으로 그래핀/실리콘 구조는 1 GHz에서 -24 [dB] ~ -33 [dB]의 삽입손실을 보인 반면, 본 논문에서 제안하는 그래핀/PET 구조는 같은 주파수에서 -0.773 [dB]에 불과했다. 하지만 gold-Ti/PES 구조에 비교하면 손실이 큰 편으로 나타났다. Gold-Ti/PES 구조에 비하여 손실이 큰 이유를 연구한 결과 그래핀의 전도율이 gold에 비해 낮은 것으로 나타났다. 하지만 결과를 종합하면, 그래핀/PET 구조는 플렉시블 RF 소자에 쓰일 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 알 수 있다.

KEY WORDS: RF (radio frequency), 손실, 전송선로, 그래핀, 플렉시블 기판

제 1 장 연구 배경 및 목적

인간이 삶을 영위함에 있어 궁극적인 목적은 안락하고 양질의 삶을 사는 것이라 할 수 있다. 이에 따라 여러 가지 기술이 그동안 발전해왔으며, 특히 무선 통신 기술의 발달로 인해 인간은 보다 편리한 삶을 살게 되었다. 21세기에 접어들어 무선 통신 기술의 발달은 단순히 사람과 사람간의 정보교류 및 상호 소통뿐만이 아닌, 사람과 사물, 사물과 사물간의 네트워크망을 형성하기에 이르렀다. 무선 통신만을 위해 개발되었던 초기의 이동식 단말기는 이제 인터넷, 카메라 등 여러 기능을 할 수 있게 되었으며, 그와 동시에 소형화도 이루어졌다. 단말기 안에 다양한 기능을 수행 할 수 있는 소자들을 담기 위해 RF 소자의 소형화에 관하여 여러 가지 연구가 진행되었으며, 이는 소비자들의 다양한 요구 및 취향을 충족하게 되었다. 무선 통신 기술의 발달은 나아가 단말기의 기능의 다양성과 소형화에 그치지 않고, 일상생활에서 자연스럽게 접할 수 있는 웨어러블 디바이스로 이어졌으며, 이에 관하여 소비자들의 수요가 증가하고 있다. 웨어러블 디바이스를 개발하기 위해서는 디바이스 안의 RF 소자들 또한 구부러질 필요가 있으며, 이에 대한 선행 연구로서 gold 기반의 플렉시블 전송선로를 개발하였다[1-3]. Gold 기반의 플렉시블 전송선로는 우수한 전송특성 및 손실특성을 가지고 있었지만, 반복해서 구부러질 경우 선로에 균열이 생기는 문제점을 가지고 있다[1].

이에 본 논문에서는 gold 기반의 플렉시블 전송선로의 문제점을 해결하기 위해 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 개발하였다. 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로는 gold 기반의 플렉시블 전송선로와는 달리 반복해서 구부러도 선로에 균열이 생기지는

않았지만, gold 기반의 플렉시블 전송선로보다 비교적 높은 손실특성을 보였다. 이에, 본 논문에서는 gold 기반의 플렉시블 전송선로의 손실 특성과 단점에 관하여 서술하고, 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 손실특성에 관하여 서술하고자 한다. 구체적으로 삽입손실, 감쇠 상수 α , 전기전도율 σ , 표피 깊이 δ_s 에 대하여 서술할 것이며, 나아가 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 손실이 어디에서 기인하는지에 대하여 검토하였다.



제 2 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특성

2.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로 및 gold 기반의 플렉시블 전송선로

2.1.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로

그래핀은 잘 알려진 것처럼, 우수한 유연성을 지녔지만 특유의 높은 저항성으로 인해 도체의 재료로는 성공적으로 사용되지 못했다[4-8]. 하지만 그래핀에 관련하여 여러 연구가 진행되었으며, 그래핀을 화학적으로 처리하여 우수한 전기전도도를 가지는 페이스트 형태로 개발이 되었다[9]. 본 논문에서 제안하는 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로 제작에 사용된 그래핀 페이스트는 한국 전기연구원 (Korea Electrotechnology Research Institute)에서 개발한 것이다. 그래핀의 원료인 흑연을 산화시켜서 산화 그래핀(Graphene Oxide)을 만들고 산화 그래핀의 산소를 환원시켜 rGO 페이스트를 만들었다[5,9]. 이렇게 만들어진 rGO 페이스트는 높은 분산 안정성과 우수한 전기전도도를 나타내었으며, 이를 이용하여 프린트 공정으로 전자 디바이스 응용이 가능하다. rGO 페이스트는 점성이 높은 액상형태로 개발되어 스프레이, 스크린 인쇄 및 포토리소그래피 공정에 이용할 수 있으며, 본 논문에서 제안하는 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로는 포토리소그래피 공정으로 만들어졌다.

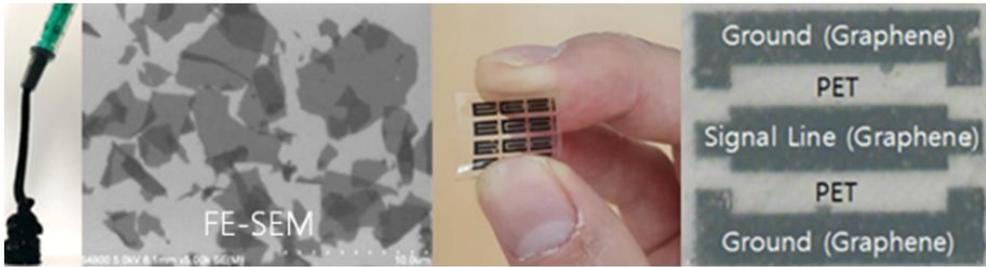


그림 2.1 그래핀 페이스트, 그래핀 페이스트의 FE-SEM 사진, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 사진

그림 2.1은 그래핀 페이스트, 그래핀 페이스트의 FE-SEM 사진 및 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 나타내고 있다. 현재 플렉시블 디바이스 개발에 PET(Polyethylene terephthalate) 기판은 특유의 유연성 및 투명성으로 인해 각광받고 있으며[10], 본 연구에서 제안하는 전송선로의 유전체로 사용하였다. PET 기판의 두께는 200 μm 이며, 유전율은 3.7이다. 선로와 그라운드층은 그래핀으로 이루어져 있으며, 코프레너 선로의 형태를 취하고 있다. 측정에 사용한 GSG 프로브의 크기에 맞추기 위해 신호선과 그라운드에 각각 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 크기의 정사각형과 $80 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$ 크기의 직사각형 모양의 선로를 추가하였다. 측정을 위한 패치를 제외한 신호선의 길이 L_s 는 500 μm 이며 너비 W_s 는 150 μm 이다. 그라운드의 길이 L_g 는 500 μm , 너비는 120 μm 이다. 그라운드와 신호선의 간격 W_{gap} 은 100 μm 이다.

2.1.2 Gold 기반의 플렉시블 전송선로

지금까지는 플렉시블 기판을 이용한 그래핀 기반의 전송선로에 대하여 연구가 수행되지 않았기 때문에, 선행연구로 수행된 gold 기반의 플렉시블 전송선로와 비교하려고 한다.

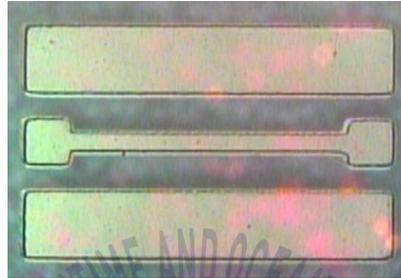


그림 2.2 Gold 기반 플렉시블 전송선로의 사진

그림 2.2는 PES(Polyether sulfone) 기판 상에 제작한 gold 기반의 플렉시블 전송선로이다. PES 기판 역시 유연성 및 투명성으로 인해, 플렉시블 디바이스 개발에 자주 쓰이는 기판 중 하나이다[10]. 유전체 PES 기판의 두께는 200 μm 이며 유전율은 3.9이다. 신호선 및 그라운드를 구성하는 물질은 Au/Ti을 사용하여 전사하였으며 두께는 2 μm 이다. 신호선의 길이 L_s 는 500 μm 이며 너비 W_s 는 30 μm 이다. 그라운드의 길이 L_g 는 500 μm , 너비는 120 μm 이다. 그라운드와 신호선의 간격 W_{gap} 은 80 μm 이다.

2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 RF loss 특성

2.2.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 삽입손실

그림 2.3은 본 논문에서 제작한 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 삽입손실을 나타내고 있으며, 표 1은 본 논문에서 제안하는 전송선로와 참고논문[5,11]의 전송선로의 삽입손실을 비교한 것이다. 표 1에 제시된 바와 같이, 본 논문에서 제안하는 전송선로는 우수한 전기적 절연 특성으로 인해 실리콘 기판에서 제작된 그래핀 전송선로에 비해 삽입손실이 훨씬 낮은 것을 알 수 있다. 구체적으로, 그래핀/실리콘 전송선로는 1 GHz에서 각각 -24 dB, -33 dB인 반면, 본 논문에서 제안한 전송선로는 동일한 주파수에서 -0.773 dB로 손실이 더 적은 것을 알 수 있다.

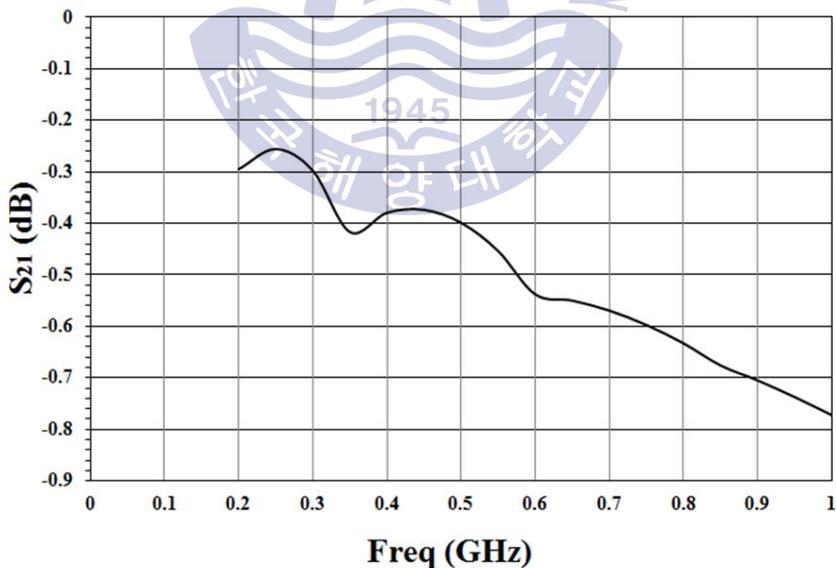


그림 2.3 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 삽입 손실

Table 1 다양한 그래핀 기반 전송선로의 삽입 손실 비교

Structure	S_{21} [dB]	
	0.5 GHz	1 GHz
This work Graphene/PET	-0.399	-0.773
Reference[5] Graphene/Silicon	-26	-24
Reference[11] Graphene/Silicon	-32	-33

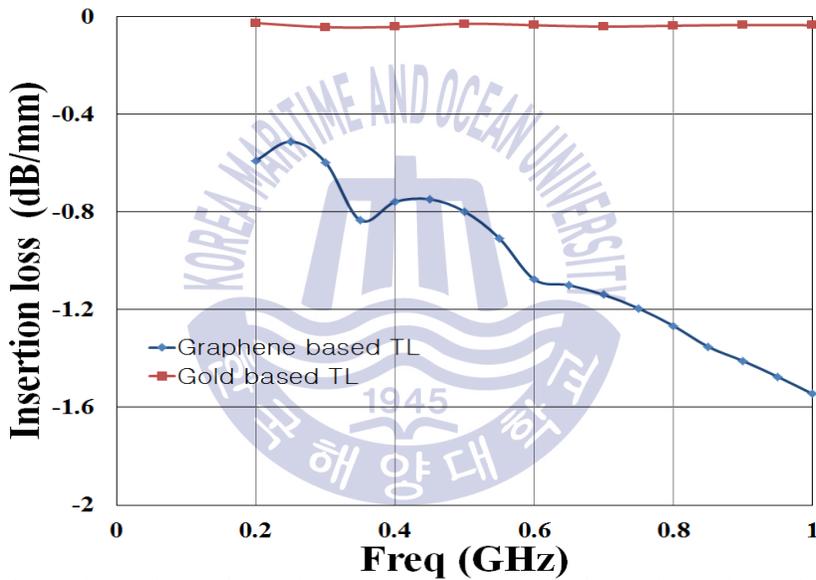


그림 2.4 그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 Gold 기반 플렉시블 전송선로간의 1 mm 당 삽입손실 비교

그림 2.4는 그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 gold 기반 플렉시블 전송선로의 1 mm 당 측정된 삽입 손실이다. 삽입손실은 50Ω 포트 임피던스로 측정되었으며, 전송선로의 특성 임피던스로 변환하여 나타낸 값이다. Gold 기반 플렉시블 전송선로와 비교하였을 때 본 논문에서 제안한 전송선로는 비교적 더 큰 삽입손실을 나타내고

있다. 구체적으로 0.2 GHz에서 1 GHz 주파수 범위에서 gold 기반 플렉시블 전송선로의 삽입손실은 -0.043 dB/mm에 불과하지만, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 삽입손실은 동일한 주파수 범위에서 -1.545 dB/mm이다. 하지만 그래핀 기반 플렉시블 전송선로는 1 GHz 까지 -1.6 dB/mm이하의 삽입손실을 보임으로서, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로는 웨어러블 디바이스 구현에 적용할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 의미하고 있다.



2.2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 감쇠정수

감쇠정수 α 는 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다[12].

$$\alpha = -0.5 \ln [10^{0.1 \times S_{21}(dB)}] / l \quad (Np/mm) \quad (1)$$

위의 식(1)에서 l 은 전송선로의 길이를 뜻하며, 전송선로의 단위 길이 당 전파가 감쇠되는 비율을 뜻한다.

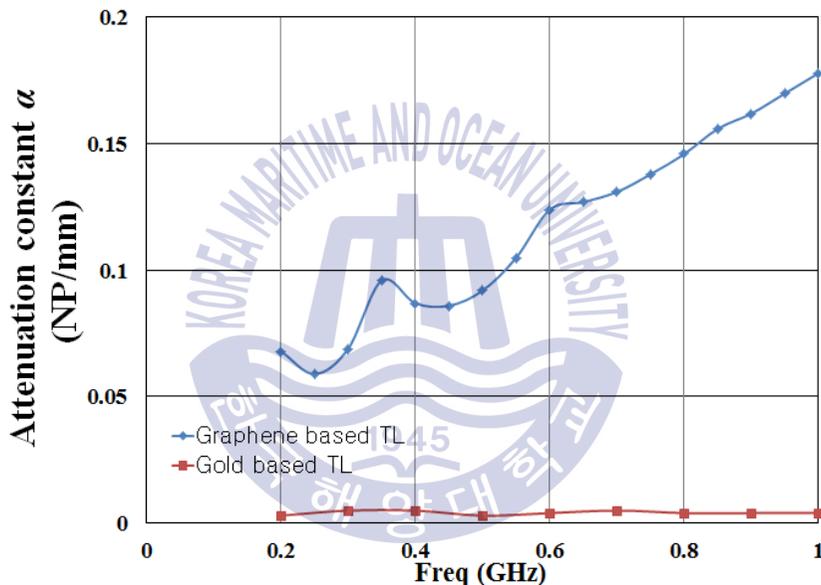


그림 2.5 그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 Gold 기반 플렉시블 전송선로간의 손실 특성 비교

그림 2.5는 식(1)을 이용하여 그래핀 기반 플렉시블 전송선로와 gold 기반 플렉시블 전송선로의 감쇠정수 α 를 나타낸 값이다. 그림 2.5에서 알 수 있듯이 그래핀 기반 플렉시블 전송선로는 Gold 기반 플렉시블 전송선로보다 손실이 비교적 더 큰 것을 볼 수 있다. 구체적으로 0.1 GHz ~ 1 GHz 주파수 범위 안에서 gold 기반

플렉시블 전송선로의 감쇠정수 α 는 0.005 Np/mm 이지만, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 감쇠정수 α 는 동일한 주파수 범위 내에서 0.178 Np/mm 이다. 식(1)에 의해 감쇠정수 α 는 삽입 손실과 서로 비례하는 관계를 가지고 있으며, 본 논문에서 제안하는 전송선로의 삽입손실이 gold 기반의 플렉시블 전송선로보다 크기 때문에 감쇠정수 α 역시 상대적으로 높은 값을 보였다. 다음 장에서는 왜 그래핀 기반 플렉시블 전송선로가 gold 기반의 플렉시블 전송선로보다 높은 손실을 갖는지, 무엇이 상대적으로 높은 손실을 유발하는지에 대하여 알아볼 것 이다.



제 3 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전기적 특성

앞선 장을 통해 본 논문에서 제안하는 전송선로는 gold 기반의 플렉시블 전송선로보다 상대적으로 높은 삽입손실과 감쇠정수를 가지는 것을 알 수 있었다. 본 장에서는 무엇이 본 논문에서 제안하는 전송선로의 손실을 유발하는지에 대하여 연구하였다.

3.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전기전도율

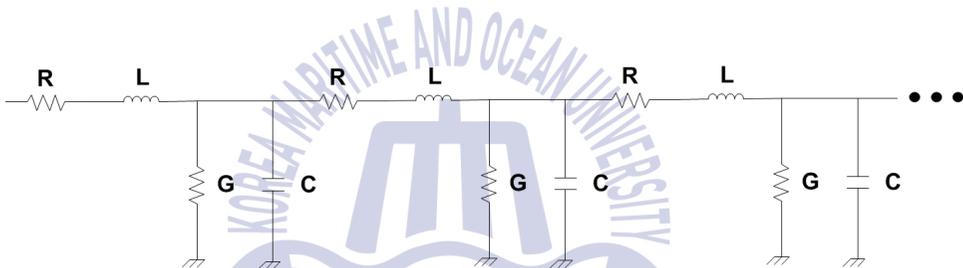


그림 3.1 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 등가 회로

그림 3.1은 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 등가회로를 나타내었다. 앞선 장에서 본 논문에서 제안하는 그래핀 기반 플렉시블 전송선로는 저손실 전송선로라고 할 수 있다. 저손실인 경우 일반적인 전송선로 파라미터인 $\gamma = \alpha + j\beta$ 에 대한 표현을 간단하게 하는 근사화를 할 수 있다. 그림 3.1을 이용하여 그래핀 기반 플렉시블 전송선로에 대한 해석을 하면, 복소전파상수 γ 에 대하여 다음과 같이 표현 할 수 있다[13].

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

식(2)를 다음과 같이 재정리하면 식(3)과 같은 형태로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Y &= \sqrt{(j\omega L)(j\omega C)\left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right)\left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)} \quad (3) \\ &= j\omega\sqrt{LC}\sqrt{1 - j\left(\frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C}\right) - \frac{RG}{\omega^2 LC}} \end{aligned}$$

전송선로가 저 손실 전송선로일 경우 $R \ll \omega L$ 이면 $G \ll \omega C$ 로 가정할 수 있으며, 이는 도체 손실과 유전체 손실이 적다는 것을 의미한다. 따라서 $RG \ll \omega^2 LC$ 가 되므로 식(3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = j\omega\sqrt{LC}\sqrt{1 - j\left(\frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C}\right)} \quad (4)$$

식(4)에서 $\left(\frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C}\right)$ 항을 0으로 가정한다면, 복소 전파상수 $Y = j\omega\sqrt{LC}$ 가 되어 무손실 전송선로가 되므로, Y 에 대한 첫 번째 고차 실수항을 얻어내기 위하여 $\sqrt{1+x} \sim 1 + \frac{x}{2} + \dots$ 에 대한 Taylor 급수의 앞의 두 항을 대신 사용하였다. Taylor 급수를 전개하여 식(4)를 정리하면,

$$Y \approx j\omega\sqrt{LC}\left[1 - \frac{j}{2}\left(\frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega C}\right)\right] \quad (5)$$

식(5)의 형태로 나타낼 수 있다. 이를 감쇠정수 α 에 대하여

나타내면,

$$\alpha \approx \frac{1}{2} \left(R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{Z_0} + GZ_0 \right) \quad (6)$$

식(6)의 형태로 정리할 수 있다. 이 때 단위 길이당 병렬 컨덕턴스 G 는 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 기판인 PET가 완전 절연체에 가까우므로 $G \approx 0$ 라고 할 수 있다. 이를 식(6)에 대입하여 다시 정리하면

$$\alpha \approx \frac{R}{2Z_0} \quad (7)$$

감쇠정수 α 에 대하여 식(7)을 얻을 수 있으며, 이를 전송선로의 단위 길이당 직렬 저항 R 에 대하여 정리하면

$$R \approx 2\alpha Z_0 \quad [\Omega/\text{mm}] \quad (8)$$

라고 할 수 있다. 반면 단위 길이당 직렬 저항 R 은 도체 길이에 비례하고, 단면적에 반비례하는 관계를 가지고 있으며, 이는 식(8)을 다시 정리할 수 있음을 뜻한다.

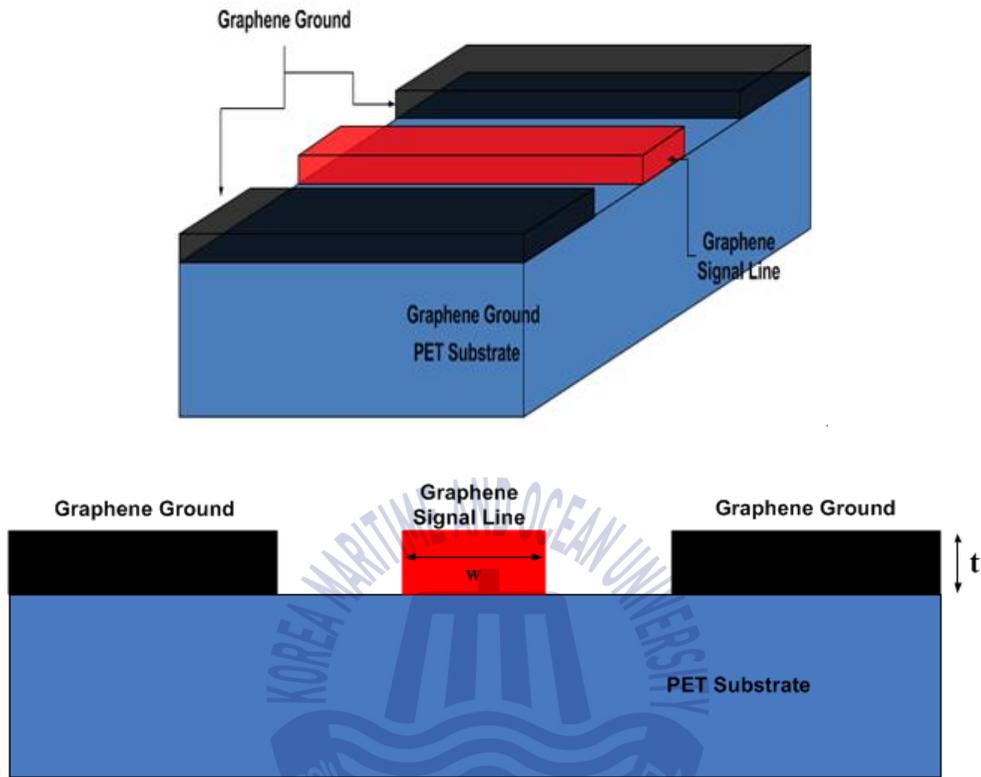


그림 3.2 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 3D 형태 그림과 그것을 Y-Y 방향으로 자른 단면도

그림 3.2는 그래핀 기반 플렉시블 전송선로를 3D 형태로 나타내어 이를 Y-Y 방향으로 자른 단면도이다. 앞서 말한 단위 길이당 직렬 저항 R 은 도체 길이에 비례하고 단면적에 반비례하는 관계를 가지고 있다고 하였으며, 신호선의 너비를 w , 그래핀의 두께를 t 로 표현하였다. 이를 이용하여 식(9)처럼 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{1}{wt} \cdot \frac{1}{\sigma} [\Omega/\text{mm}] \quad (9)$$

도체 길이는 1 mm로 하여 식(9)를 나타내었으며, 식(8)과 식(9)를 이용하면 전기전도율 σ 에 관하여 식(10)을 얻을 수 있다.

$$\sigma = \frac{1}{2\alpha Z_0 w t} \quad [\text{S/m}] \quad (10)$$

전기전도율 σ 에 관한 식(10)을 통하여 앞선 장에서 구한 감쇠정수 α , 특성임피던스 Z_0 , 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 신호선의 너비 w , 그래핀의 두께 t 는 모두 다 알고 있는 값이므로 그래핀과 gold에 관하여 전기전도율을 서로 비교할 수 있게 된다.

그림 3.3은 식(10)을 이용하여 계산한 1 m 당 전기전도율 σ 이다. 그림 3.3에서 알 수 있듯이 그래핀의 전기전도율은 gold에 비해 매우 낮은 것을 알 수 있다. 구체적으로 그래핀은 1 GHz에서 4928 S/m의 값을 보이지만, gold는 같은 주파수에서 2.08×10^7 S/m의 값을 나타내며 둘의 차이는 약 4천배에 달한다. 도체의 전도성 손실은 저항을 야기하며, 이는 전송선로 상의 전자기파의 일부가 불완전한 도체인 그래핀의 내부로 침투하는 것을 뜻한다. 이는 전기전도율이 높은 gold의 경우 크게 신경 쓰지 않았던 표피효과를 그래핀의 경우 고려해야 한다는 것을 뜻하며, 다음 절에서는 표피효과에 의해 전자기파가 그래핀에 얼마만큼 침투하는지에 대하여 알아볼 것이다.

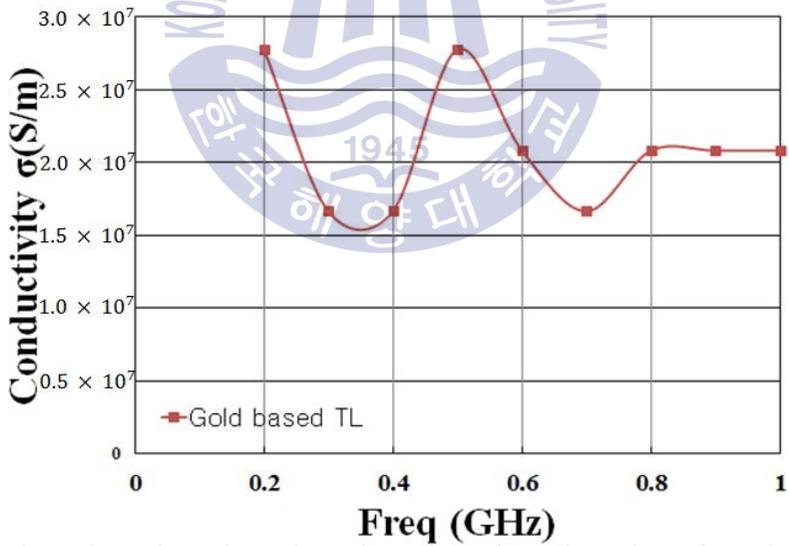
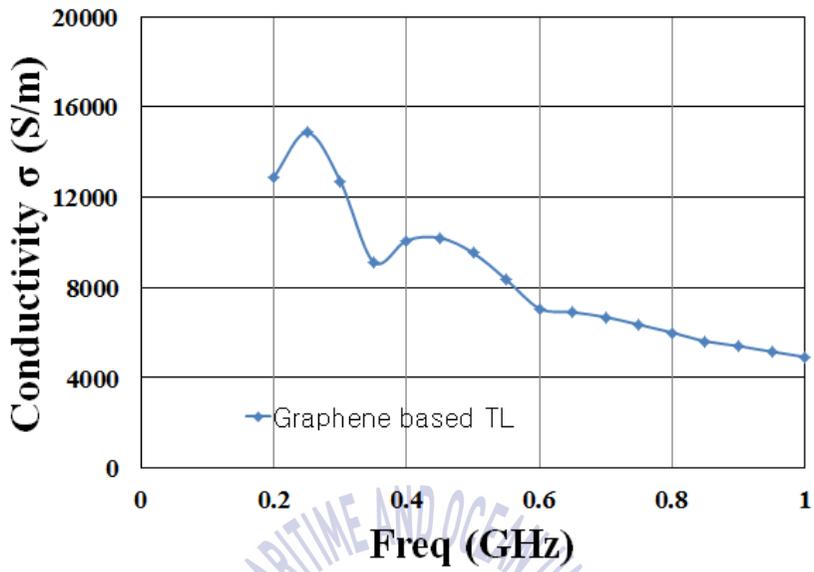


그림 3.3 그래핀과 Gold의 1 m 당 전기 전도율 비교

3.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 표피효과

본 절에서는 앞선 절에서 구한 전기전도율 σ 을 토대로 표피효과에 대하여 연구하였다. 본 논문에서 제안하는 전송선로에 전자기파가 흐를 때, 얼마나 그래핀 내부로 전자기파가 침투를 하여 손실을 유발하는지에 대하여 알아볼 것이다.

전기전도율 σ 을 갖는 도체인 경우, Maxwell의 회전방정식은 다음과 같이 정의 할 수 있다[13].

$$\begin{aligned}\nabla \times \bar{E} &= -j\omega\mu\bar{H} \\ \nabla \times \bar{H} &= j\omega\epsilon\bar{E} + \sigma\bar{E}\end{aligned}\quad (11)$$

\bar{E} 에 대한 파동방정식은 식(12)로 표현할 수 있다.

$$\nabla^2 \bar{E} + w^2\mu\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{w\epsilon}\right)\bar{E} = 0 \quad (12)$$

여기에서 매질에 대한 복소전파상수 Υ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Upsilon = \alpha + j\beta = jw\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - j\frac{\sigma}{w\epsilon}} \quad (13)$$

x 와 y 방향에서 일정하고, \hat{x} 성분만을 갖는 전계를 가정하면, 식(12)의 파동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \Upsilon^2 E_x = 0 \quad (14)$$

식(14)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$E_x(z) = E^+ e^{-\Upsilon z} + E^- e^{\Upsilon z} \quad (15)$$

따라서 $+z$ 방향으로 전파하는 파가 갖는 전파상수의 형태는 식(16)과 같이 된다.

$$e^{-\Upsilon z} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (16)$$

이를 시간영역에서 나타내면

$$e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (17)$$

가 되며 이는 위상속도 $v_p = \frac{\omega}{\beta}$, 파장 $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ 와 지수함수 형태로 감쇠하고 $+z$ 방향으로 진행하는 파를 나타냄을 뜻한다. 이때 거리에 따른 감쇠율은 감쇠상수 α 가 되며, 감쇠상수 α 를 식(13)과 파동방정식 식(15)에 관해 정리하면

$$\alpha = w \sqrt{\mu\epsilon \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\epsilon} \right)^2} - 1 \right)} \approx w \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{w\epsilon} \right)} = \sqrt{\frac{w\mu\sigma}{2}} \quad (18)$$

과 같이 정리할 수 있다.

따라서, 표피두께 δ_s 는 식(17)과 식(18)을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (19)$$

즉, 표피두께 δ_s 란 $e^{-\alpha z} = e^{-\alpha\delta_s} = e^{-1}$ 이므로 전자기파가 도체를 타고 흐를 때, 도체의 표피에서 전류밀도의 크기가 36.78 % 까지 감소하는 깊이를 말한다.

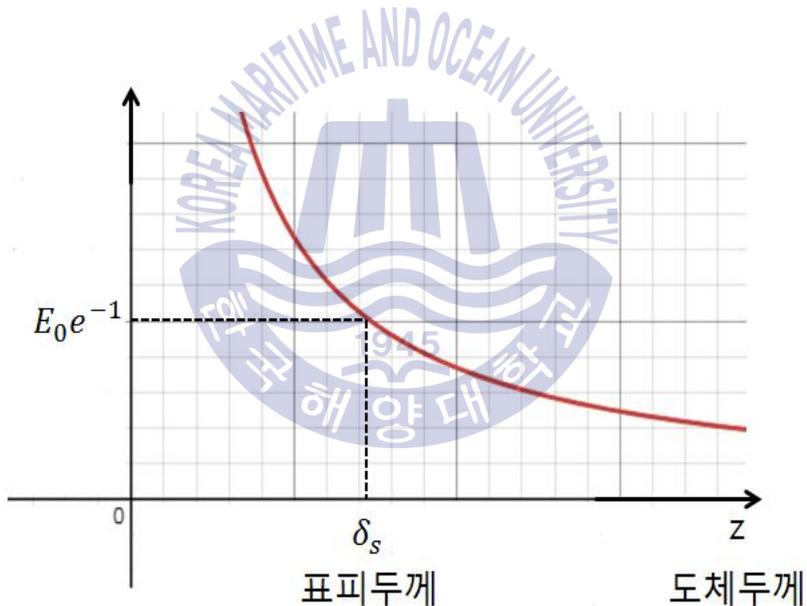


그림 3.4 불완전 도체에서의 표피 효과

그림 3.4는 식(19)를 이용하여 도체에서 전자기파가 도체의 표면을 타고 흐를 때의 표피효과를 나타내었다.

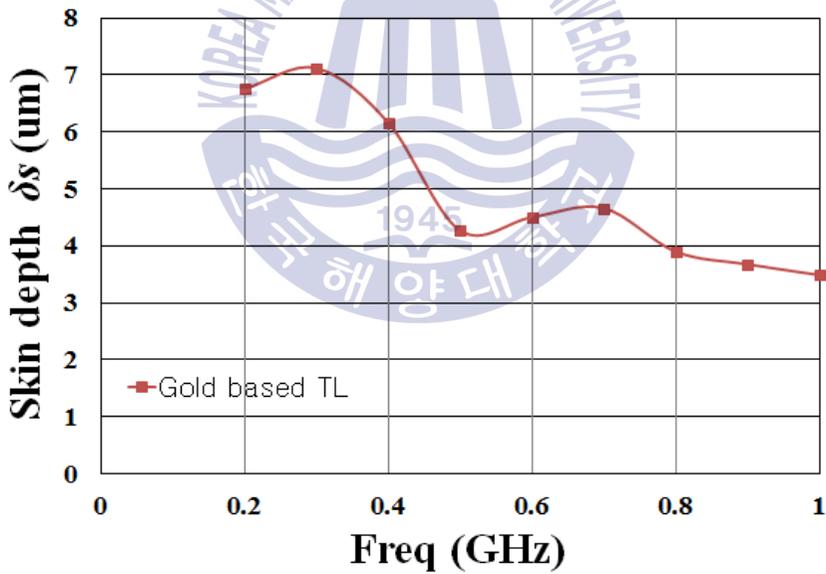
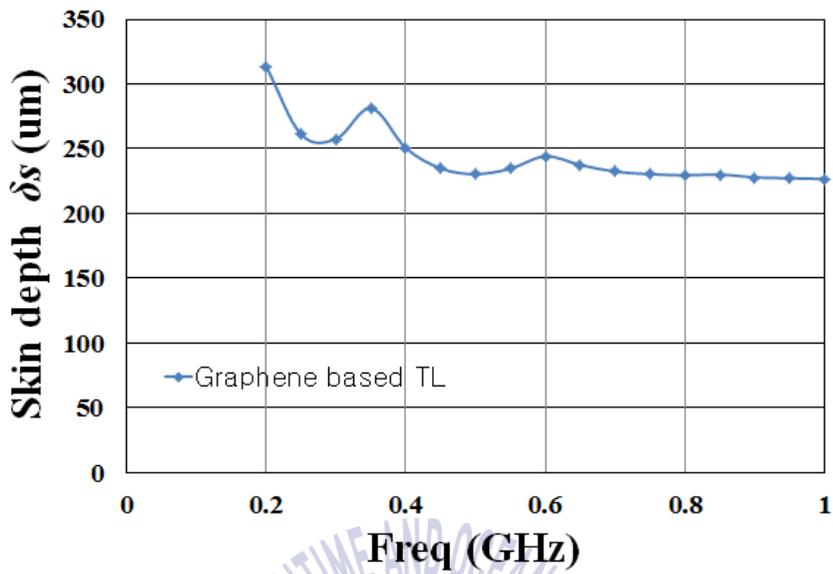


그림 3.5 그래핀과 Gold의 표피 깊이 비교

그림 3.5는 앞선 절에서 구한 전기전도율 σ 와 식(19)를 이용하여 그래핀과 gold의 표피 두께를 나타낸 것이다. 그림 3.5에 나와 있는

것처럼 gold의 경우 gold의 높은 전기전도도로 인하여 전자기파가 거의 gold의 표면에 흐른다는 것을 알 수 있다. 하지만 그래핀의 경우 전자기파는 그래핀의 낮은 전기전도도로 인해, 그래핀 내부로 침투하여 손실을 유발함을 알 수 있다. 구체적으로 그래핀은 1 GHz에서 227 μm 의 표피 두께를 보였으나 gold의 경우 같은 주파수에서 3.49 μm 의 표피 두께를 보였다. 상기의 결과를 토대로 그래핀의 낮은 전기전도도는 높은 표피 두께로 이어졌으며, 이는 전자기파가 전송선로를 타고 흐르는 동안 gold보다 높은 손실을 유발하게 되었음을 알 수 있다.



제 4 장 그래핀의 전기전도도를 높이는 방안

앞선 장에서 그래핀의 낮은 전기전도도가 높은 표피두께를 야기 하였으며, 이는 본 논문에서 제안하는 전송선로의 손실로 이어졌음을 확인할 수 있었다. 본 장에서는 그래핀의 전기전도도를 높일 수 있는 방안을 연구하였으며, 높아진 전기전도도를 통하여 전송선로의 손실이 얼마나 개선이 가능할지 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

4.1 전이금속 도핑

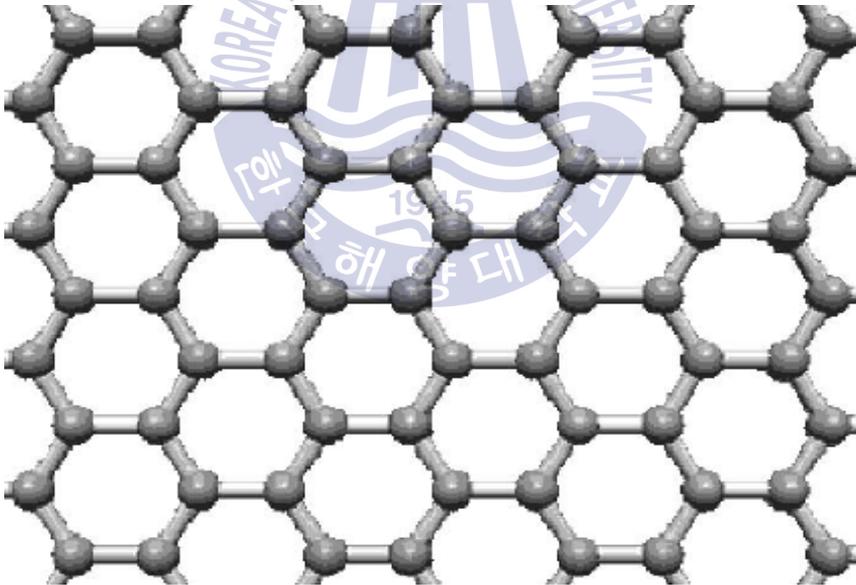


그림 4.1 그래핀 페이스트의 한 층을 확대하여 나타낸 그림

그림 4.1은 본 논문에서 제안하는 전송선로를 구성하는 물질인

그래핀의 하나의 층을 나타내었다. 팔라듐, 은 등의 전기전도도가 높은 전이금속을 그래핀 페이스트에 도핑하면 전기전도도가 올라 결과적으로 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 손실을 줄일 수 있을 것이다[14].

4.2 은나노 와이어 첨가

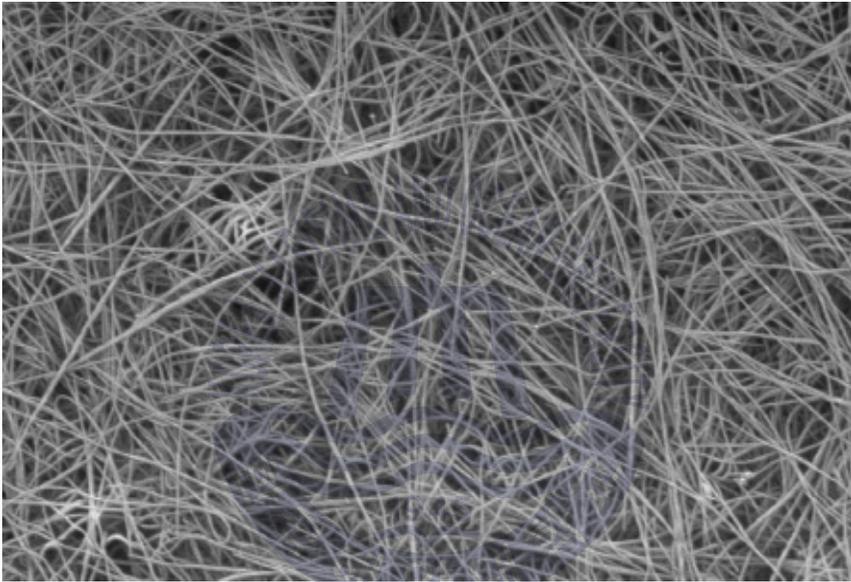


그림 4.2 은나노와이어의 SEM 사진

그림 4.2는 은나노 와이어를 그래핀 페이스트에 첨가한 것을 나타낸 것이다. 은나노 와이어는 높은 전기 전도성을 가지고 있으며, 그래핀 페이스트에 첨가하면 전기전도도가 증가하여 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 손실을 줄일 수 있을 것이다[15]. 또한 은나노 와이어 또한 높은 유연성을 가지고 있어 플렉시블 소재로 충분히 사용이 가능하다.

4.3 전기전도도 개선을 통한 시뮬레이션 결과

앞선 절에서 그래핀의 낮은 전기전도도를 높일 수 있는 여러 가지 방안을 살펴보았으며, 본 절에서는 시뮬레이션을 이용하여 그래핀의 전기전도도가 향상되었을 때 표피두께가 어떻게 변화하는지에 대해 알아볼 것이다.

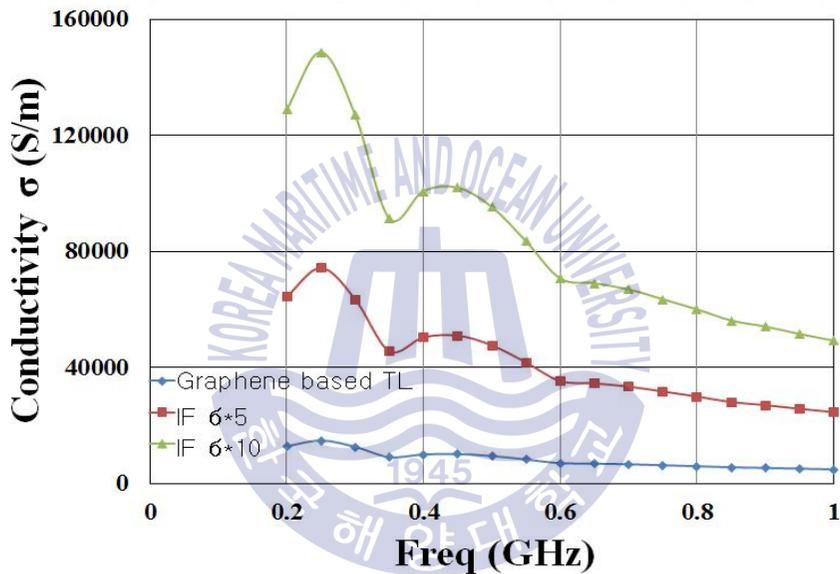


그림 4.3 시뮬레이션으로 나타낸 그래핀의 1 m 당 전기 전도율 개선 효과

그림 4.3은 1 m당 그래핀의 전기전도도와 시뮬레이션을 통하여 그래핀의 전기전도도의 각각 5배, 10배를 하였을 때의 값을 나타낸 것이다. 앞선 장에서 설명한 전기전도도를 구하는 식(10)을 다시 쓰면,

$$\sigma = \frac{1}{2\alpha Z_0 w t} \quad [\text{S/m}] \quad (10)$$

이는 앞선 절에서 설명한 전이금속 도핑이나 은나노 와이어를 첨가 하였을 때, 감쇠정수 α 와 특성임피던스 Z_0 가 낮아짐을 의미한다.

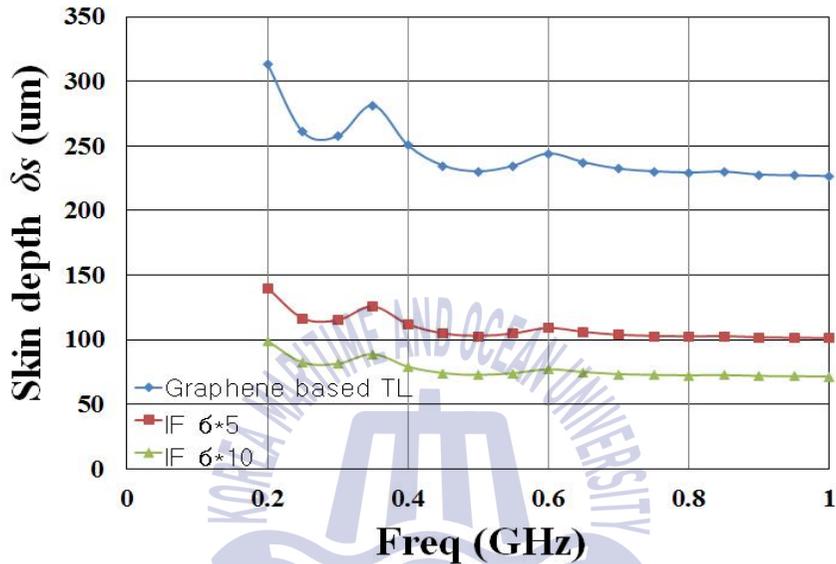


그림 4.4 시뮬레이션으로 나타낸 그래핀의 표피 두께 개선 효과

그림 4.4는 그래핀의 표피두께와 시뮬레이션을 통하여 그래핀의 전기전도도의 각각 5배, 10배를 하였을 때의 표피두께를 나타낸 것이다. 앞선 장에서 표피두께를 구하는 식인 식(19)를 이용하여 나타내었으며, 전기전도도를 올리면 표피두께가 효과적으로 감소함을 알 수 있다. 구체적으로 1 GHz에서 그래핀의 표피두께는 227 um였으며, 전기전도도를 5배 향상시켰을 경우의 표피두께는 101 um, 전기전도도를 10배 향상시켰을 경우의 표피두께는 72 um 이다. 표피두께가 각각 55.5%, 68% 향상되었음을 알 수 있으며, 이는 본 논문에서 제안하는 전송선로의 문제점인 비교적 큰 손실을 효과적으로 개선할 수 있음을 뜻한다. 물론 앞선 절에서 설명한 전기전도도

를 높이는 방법이 그림 4.3 만큼의 전기전도도 개선효과가 없을 수도 있으나, 그림 4.4에 나타난 것처럼 전기전도도 개선을 통해 전송 선로의 손실을 개선할 수 있음을 알 수 있다.



제 5 장 결 론

21세기 들어 무선 통신 기술의 급격한 발달로 인하여 인간은 전에 없던 편리한 삶을 살고 있다. 무선 통신 기술의 발달은 무선 통신 기기의 다양한 기능 및 소형화에서 그치지 않고, 일상생활에 자연스럽게 접할 수 있는 웨어러블 디바이스 및 플렉시블 디바이스로 이어졌다. 이에 웨어러블 디바이스에 적용시키기 위한 gold 기반의 플렉시블 전송선로를 선행 연구하였다. 하지만 gold 기반의 플렉시블 전송선로는 우수한 전송특성과 손실특성에도 불구하고, 반복해서 구부릴 경우 선로에 균열이 생기는 문제점을 갖고 있었다.

본 논문에서는 상기 문제점을 해결하기 위하여 PET 유전체 위에 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 연구하였다. 본 논문에서 제안하는 전송선로는 실리콘 기판 상에서 제작한 그래핀 전송선로보다 훨씬 낮은 삽입손실을 가지고 있었으나, gold 기반의 플렉시블 전송선로보다는 비교적 큰 손실을 가지고 있었다. 이에 본 논문에서 제안하는 전송선로가 왜 gold 기반의 플렉시블 전송선로보다 비교적 높은 손실을 가지고 있는지에 대해 알아보았으며, 그래핀과 gold의 전기전도도와 표피두께에 관하여 고찰하였다. 또 본 논문에서 제안하는 전송선로의 손실을 줄이기 위하여 전기전도도를 높이는 방안에 대하여 알아보았으며, 시뮬레이션을 이용하여 전기전도도를 높였을 때 표피두께가 효과적으로 줄어드는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 전송선로는 다른 연구그룹이 개발한 실리콘 기판 상에서의 그래핀 전송선로보다는 낮은 손실을 가지고

있었지만, 상용화하여 웨어러블 및 플렉시블 디바이스에 적용하기에는 기존의 사용하던 재료인 금속에 비하여 비교적 손실이 높아 쓰기 어렵다고 할 수 있다. 하지만 플렉시블 RF 디바이스에 관한 연구는 아직 초기 단계임을 생각해 보았을 때 의미있는 결과라고 생각되며, 플렉시블 디바이스에 적용시킬 RF 소자로서의 잠재성은 있다고 생각된다. 현재의 비교적 높은 손실을 줄이기 위하여 전이금속 도핑 및 은나노 와이어 첨가에 대하여 추후 연구할 계획이다.



참 고 문 헌

- [1] Y.Yun et al., “Study on characteristics of various RF transmission line structures on PES substrate for application to flexible MMIC.” , ETRI Journal., vol. 36, no. 1, Feb. 2014, pp. 106-115.
- [2] Y.Yun et al., “A study on RF characteristics of polyether sulfone substrate for application to flexible mobile communication device.” Asia-Pacific Microw. Conf., Seoul, Rep. of Korea, Nov. 2013, pp. 881-883.
- [3] Y.Yun et al., “RF characteristics of coplanar waveguide fabricated on flexible PES.” Microw.J., vol.56, no.2, Feb. 2013, pp. 90-100.
- [4] Luiz G. P.Martins et al., “Direct transfer of graphene onto flexible substrates.” PNAS., vol.110, no.44, Oct.2013, pp. 17762-17767
- [5] Hee-Jo Lee et al., “RF transmission properties of graphene monolayers with width variation.” Phys. Status Solidi RRL 6., no.1, 2012, pp. 19-21.
- [6] Tejendra K. Gupta et al., “MnO₂ decorated graphene nanoribbons with superior permittivity and excellent microwave shielding properties” ,Journal of Materials Chemistry, 2 , 2014 ,pp.4256-4263.

- [7] Jiahua Zhu et al., “Magnetic graphene nanocomposites: electron conduction, giant magnetoresistance and tunable negative permittivity.” *Journal of Materials Chemistry.*, 22, 2012.,pp. 835-844.
- [8] Jinhong Yu et al., “Permittivity, Thermal conductivity and thermal stability of poly(vinylidene fluoride)/graphene nanocomposites.” *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation.*, vol. 18, no. 2, April. 2012, pp. 478-484.
- [9] Seung Yol Jeong et al. “Highly concentrated and conductive reduced graphene oxide nanosheets by monovalent cation- π interaction : Toward printed electronics.” *Adv.Func.Mater.*,vol. 22.,April. 2012. pp. 3304-3314.
- [10] Ved Prakash Verma et al., “Large-area graphene on polymer film for flexible and transparent anode in field emission device.” *Appl .Phys. Lett.*, 96., 203108, 2010.
- [11] Liang Zhang et al., “RF transmission properties of graphene with coplanar waveguide structure.” , *ECS Transactions.*, vol. 60,no.1,2014,pp. 1087-1092.
- [12] 윤영, 2005, *RF 능동회로 설계이론 및 실무*, 홍릉과학 출판사.
- [13] D.M. Pozar, 2005, *Microwave engineering*, 3rd ed., Addison-wesley.
- [14] Xiaochen Dong et al.,“Doping single layer graphene with aromatic molecules.” ,*small.*,vol 5., June. 2009, pp 1422-1426.

[15] Jian Zhi et al., “Highly Conductive ordered mesoporous carbon based electrodes decorated by 3D graphene and 1D silver nanowire for flexible supercapacitor.” , Adv.Func.Mater.,vol 24., April. 2014, pp 2013-2019.



감사의 글

제가 대학에 입학한 후 벌써 석사과정을 마무리하는 시점이 되었습니다. 2년간 많은 일들이 있었고, 혼자 힘으로는 할 수 없는 일들도 많았습니다. 그동안 도와주신 분들께 이 작은 면을 빌어 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

먼저 지금의 제가 있기까지 저를 그동안 지도해주신 운영 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 책임감을 가지시고 저를 챙겨주신 고마움을 잊지 않고 교수님의 은혜에 보답하는 자랑스런 제자가 되도록 노력하겠습니다. 학부생 시절부터 많은 가르침을 주신 김동일 교수님, 조형래 교수님, 정지원 교수님, 김기만 교수님, 민경식 교수님께도 감사드립니다.

또, 학부 연구생 시절부터 도움을 주신 장현이형, 기준이형, 정훈이형, 그리고 제가 믿고 의지하였던 수정이형과 병국이가 있어서 무사히 졸업을 하게 되었습니다. 또 대학원생활 내 많은 도움을 주신 창욱이형, 그리고 저와 함께 석사 과정을 졸업한 동기 택익이와 세림이 덕분에 무사히 졸업 할 수 있었습니다.

마지막으로 항상 뒤에서 아낌없는 사랑과 믿음을 보여주시는 사랑하는 아버지, 어머니, 현석이 항상 감사하고 죄송합니다. 앞으로 열심히 살면서 모든 것을 보답하겠습니다.

더욱 열심히 노력하겠습니다.