



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  
RF 특성에 관한 연구

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



指導教授 尹 榮

2017 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

金 洙 碇

本 論 文 을 金 洙 碇 의  
工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 金 基 萬 (印)

委 員 : 工 學 博 士 鄭 智 元 (印)

委 員 : 工 學 博 士 尹 榮 (印)



2017年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

金 洙 碇

# 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 기존 플렉시블 선로의 RF 특성 .....	3
2.1 Gold 기반의 플렉시블 선로.....	3
2.1.1 Gold 기반의 플렉시블 선로의 RF 특성.....	3
2.1.2 Gold 기반의 플렉시블 선로의 문제점.....	12
2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로.....	12
제 3 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 제작 과정 .....	15
제 4 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 RF 특성 .....	21
4.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 손실특성.....	21
4.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전송특성.....	24
4.3 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특성 임피던스.....	25
제 5 장 결 론 .....	27
참고문헌 .....	29

## 그림 목 차

그림 2.1 Gold-based flexible transmission line on PES substrate .....	3
그림 2.2 (a) Transmission line .....	4
그림 2.2 (b) Equivalent circuit of transmission line .....	4
그림 2.3 Attenuation constant of gold-based flexible transmission line on PES substrate .....	10
그림 2.4 Phase constant of gold-based flexible transmission line on PES substrate .....	11
그림 2.5 Molecular structure of graphene .....	13
그림 3.1 Layout of graphene-based flexible transmission line on PES substrate .....	16
그림 3.2 Optical image of developed substrate .....	18
그림 3.3 Graphene-based flexible transmission line on PES substrate .....	20
그림 4.1 Insertion loss of various transmission line .....	22
그림 4.2 Attenuation constant of various transmission line .....	23
그림 4.3 Phase constant of graphene-based transmission line on PES substrate .....	25

## 표 목 차

표 2.1 Characteristics of various substrate .....	14
표 4.1 Impedance of graphene-based transmission line on PES substrate .....	26



## Nomenclature

$\alpha$	:	Attenuation constant
$\beta$	:	Phase constant
$C$	:	Capacitance
$\varepsilon$	:	Permittivity
$\varepsilon_e$	:	Effective permittivity
$f$	:	Frequency
$G$	:	Conductance
$i$	:	Current
$L$	:	Inductance
$L_G$	:	Length of ground plane
$L_S$	:	Length of signal line
$L_P$	:	Length of patch
$\lambda$	:	Wavelength
$\lambda_g$	:	Guided-wavelength
$R$	:	Resistance
$R_s$	:	Guided-wavelength
$\gamma$	:	Propagation constant
$S_{21}$	:	Insertion loss
$v$	:	Voltage
$v_p$	:	Phase velocity
$\omega$	:	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  
 $Z_0$  : Characteristic impedance



# A Study on RF Characteristics of Graphene-based Flexible Transmission Line

Soo-Jeong Kim

Department of Radio Communication Engineering

## Abstract

This thesis deals with RF characteristics of graphene-based flexible transmission line on PET substrate and studied about making-process of graphene-based flexible transmission line. To make graphene-based flexible transmission line, we use photolithography process and rGO(reduced Graphene Oxide) paste. PET Substrate's thickness was 200  $\mu\text{m}$ , permittivity was 3.7. According to measured results, graphene-based flexible transmission line showed higher attenuation constant  $\alpha$  than conventional one. And its phase constant  $\beta$  showed similar to conventional one. And graphene-based flexible transmission line's impedance was 270  $\Omega$ .

**KEY WORDS:** Graphene Transmission Line; Flexible Transmission Line; PET Substrate

## 제 1 장 연구 배경 및 목적

21세기 들어 정보 통신 및 무선 통신의 급격한 발달로 인하여 인류는 전에 없던 편리한 삶을 영위하고 있다. 무선 통신 기술의 발달로 인해 하나의 단말기로 전화뿐만 아니라 인터넷, 카메라 등 다양한 기능들을 수행하고 있다. 초기의 단말기에 비해서, 하나의 단말기 안에 다양한 기능의 소자들을 담기 위해 RF 소자의 소형화에 관한 연구가 꾸준히 진행되었으며, 그로 인해 단말기의 소형화와 기능의 다양성은 소비자들의 요구를 충족하게 되었다. 단말기의 소형화에서 나아가 구부리거나 접히는 플렉시블 단말기, 일상생활에 자연스럽게 입을 수 있는 웨어러블 디바이스에 대한 소비자들의 요구가 많아지고 있다[1-9]. 이에 본 논문에서는 플렉시블 디바이스에 적용시키기 위한 gold 기반의 플렉시블 선로를 개발하였다[1-4]. gold 기반의 플렉시블 선로는 우수한 전송특성과 유연성을 가지고 있지만, 반복해서 구부릴 경우 선로와 유전체가 분리되는 문제점을 갖고 있었다[1-4].

본 논문에서는 상기 문제점을 해결하기 위하여 PET 유전체 위에 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 연구하였다. 그래핀을 사용한 플렉시블 선로는 기존의 gold 기반의 플렉시블 선로와 같은 유연성을 가지면서 선로와 유전체 사이의 접착력이 우수하고 제작 단가가 낮기 때문에 RF 전송선로로 사용하기 적합하다고 할 수 있다. 이에, 본 논문에서는 gold 기반의 플렉시블 전송선로의 RF 특성 및 단점에 대해서 서술하고, 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특징 및 만드는 방법에 대해서 구체적으로 서술하고자 한다. 또한 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 RF 특성, 구체적으로

감쇠 상수  $\alpha$ , 위상 상수  $\beta$ , 임피던스에 관하여 고찰 및 Si기관 위에 만들어진 그래핀 전송선로와의 비교를 통해 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 실용성에 대하여 검토하였다.



## 제 2 장 기존 플렉시블 선로의 RF 특성

### 2.1 Gold 기반의 플렉시블 선로

그림 2.1은 PES 기판위에 제작한 플렉시블 선로를 나타내고 있다[3]. 제작에 사용된 PES(Polyether sulfone) 기판의 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이며 유전율은 3.9이다. 선로는 Au/Ti를 사용하여 전사하였고 Au/Ti의 두께는 2  $\mu\text{m}$ 이다. 1~3번 CPW(Coplanar Waveguide) 선로의 신호선의 두께는 각각 30  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ 이며 접지면의 두께는 120  $\mu\text{m}$ 이다. 신호선 및 접지면의 길이는 500  $\mu\text{m}$ 이며, 신호선과 접지면 사이의 길이는 80  $\mu\text{m}$ 이다[3].



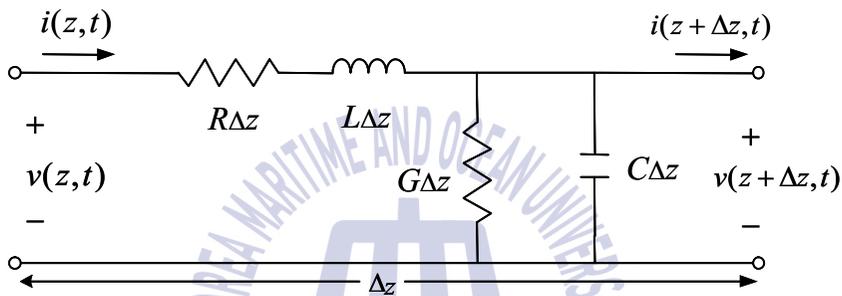
그림 2.1 Gold-based flexible transmission line on PES substrate.

#### 2.1.1 Gold 기반의 플렉시블 선로의 RF 특성

그림 2.2 (a), (b)는 일반적인 전송선로 및 전송선로의 등가회로를 나타내고 있다. 전송선로의 RF 특성을 연구하기 위해서 먼저 RF파라미터에 관하여 고찰하였다[10-12].



(a)



(b)

그림 2.2 (a) Transmission line, (b) Equivalent circuit of transmission line.

초고주파 신호가 전송되는 전송선로를 해석하기 위해서 별도의 해석법이 필요하다. 전송선로는 분포정수 회로이며, 전송선로에서의 위치에 따라 전압 및 전류의 크기와 위상이 변화한다. 전송 선로는 그림 2.2 (a)와 같이 두 개의 평행한 도체로 구성되어 있기 때문에 두 개의 도선으로 표현할 수 있다. 전송선로는 단위 길이  $\Delta z$ 에 대하여 그림 2.2 (b)와 같이 집중 정수 소자 등가회로로 표현될 수 있다[11-12]. 여기서  $R$ ,  $L$ 은 각각 단위 길이당 저항과 인덕턴스 값이며,  $G$ ,  $C$ 는 각각 단위 길이당 병렬 컨덕턴스와 병렬용량

값이다. 직렬 인덕턴스  $L$ 은 두 도체 사이의 자기 인덕턴스의 합이며, 병렬용량  $C$ 는 두 도체가 근접하게 놓일 때 발생한다.  $R$ 과  $G$ 는 손실을 의미하며, 그림 2.2 (b)로부터 키르히호프의 전압법칙과 전류법칙을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다[10-12].

$$v(z,t) - v(z + \Delta z,t) = R\Delta z i(z,t) + L\Delta z \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$i(z,t) - i(z + \Delta z,t) = G\Delta z v(z + \Delta z,t) + C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z,t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

식 2.1과 2.2를  $\Delta z$ 로 나누고,  $\Delta z \rightarrow 0$ 의 극한을 취하면 전송선로의 전압 및 전류에 대한 다음의 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{v(z + \Delta z,t) - v(z,t)}{\Delta z} = \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{i(z + \Delta z,t) - i(z,t)}{\Delta z} = \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

이 식들은 전송선로에 대한 시간영역 형태 방정식 또는 전신 방정식이라고 한다. 만일 전송선로상의 신호가 정현파인 경우에는 식 2.3과 2.4는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (2.5)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (2.6)$$

전송선로를 해석하는 경우에는, 대부분은 정상상태의 정현파를 신호만을 고려하므로, 식 2.5와 2.6을 이용하면 대부분의 전송선로 문제를 해석할 수 있다.

식 2.5와 2.6에서  $I(z)$ 를 소거하면  $V(z)$ 에 대한 단일 파동 방정식 2.7을 얻으며,  $V(z)$ 를 소거하면  $I(z)$ 에 대한 단일 파동 방정식 2.8을 얻는다.

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0 \quad (2.8)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.9)$$

여기서,  $\gamma$ 는 복소 전파 상수이다. 복소 전파 상수의 허수부  $\beta$ 를 위상 상수라고 부르며 이는 전자파가 전송로선상을 진행하는 동안에 발생하는 위상변화와 관계있다. 복소 전파 상수의 실수부  $\alpha$ 를 감쇠 상수라 부르며, 이는 전자파가 전송선로상을 진행하는 동안에 발생하는 손실과 관계있다. 전파 상수는 일반적으로 주파수의 함수가 된다. 식 2.7, 2.8의 진행파에 대한 해는 다음과 같다.

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (2.10)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (2.11)$$

식 2.5를 2.10의 전압에 대한 식에 대입하면 전송선로 상의 전류에 대한 다음 식을 얻는다.

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} [V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}] \quad (2.12)$$

식 2.13와 같이 특성 임피던스가 정의된다면  $I(z)$ 는 식 2.14와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.13)$$

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-\gamma z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{\gamma z} \quad (2.14)$$

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = Z_0 = \frac{-V_0^-}{I_0^-} \quad (2.15)$$

식 2.10에 시간 영역의 위상을 추가하면 식 2.16를 얻을 수 있다.

$$v(z,t) = |V_0^+| \cos(\omega t - \beta z + \Phi^+) e^{-\alpha z} + |V_0^-| \cos(\omega t + \beta z + \Phi^-) e^{\alpha z} \quad (2.16)$$

여기서  $\Phi^\pm$ 는 복소전압  $V^\pm$ 의 위상각이다. 진행파의 파장은 한 시각에 동위상이 되는 인접한 두 점간의 거리로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.17)$$

파의 위상속도는 전송선로 상의 위상점이 이동하는 속도로 정의되며  $w = 2\pi f$  이므로 다음과 같다.

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{w}{\beta} = \lambda f \quad (2.18)$$

대부분의 전송선로는 손실이 매우 작아 무시할 수 있으나, 본문에서는 손실이 0이 아닌 선로를 고찰하고자 R, G를 0이 아닌 실수로 생각하여 감쇠 상수  $\alpha$ 를 다시 적으면 식 2.19와 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \left( R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{Z_0} + G Z_0 \right) \quad (2.19)$$

dB 스케일로 표현된  $S_{21}$ 의 이론적인 정의는 식 2.20과 같으며,  $|e^{-j\beta l}|^2$ 는 1 이므로 식 2.20은 식 2.21로 표현할 수 있다.

$$S_{21}(dB) = 10\log|e^{-\alpha l}|^2|e^{-j\beta l}|^2 \quad (2.20)$$

$$S_{21}(dB) = 10\log|e^{-\alpha l}|^2 \quad \because |e^{-j\beta l}|^2 = 1 \quad (2.21)$$

식 2.21을 정리하면 식 2.22와 같이 쓸 수 있으며, 식 2.22를 정리하면 최종적으로 감쇠 상수  $\alpha$ 는 식 2.23이 된다[10-12].

$$\log|e^{-\alpha l}|^2 = \log e^{-2\alpha l} = 0.1S_{21}(dB) \quad (2.22)$$

$$\alpha = -0.5 \ln [10^{0.1 \times S_{21}(dB)}] / l \quad (Np/mm) \quad (2.23)$$

상기 식들을 바탕으로 제작한 플렉시블 선로의 RF 특성을 고찰하고자 한다.

그림 2.3은 본 논문에서 제작한 Gold 기반의 플렉시블 전송선로의 감쇠 상수  $\alpha$ 값을 나타내고 있으며, 삽입손실  $S_{21}$  측정값을 이용하여 식 2.23에 대입한 값이다. 신호선의 두께  $W$ 를 각각 30 um, 50 um, 70 um로 변화시키고, 선로의 나머지 부분은 모두 동일한 3개의 선로의  $\alpha$ 값을 비교해 보면, 세 개의 선로 모두 0.002에서 0.008 Np/mm 사이의 매우 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 선로의 구성을 Gold로 하였기 때문이다. Gold는 높은 전기 전도율을 가지고 있어 손실이 매우 낮고 삽입 손실  $S_{21}$  값 역시 매우 낮은 값을 가진다. 삽입 손실이 낮기 때문에 식 2.23에 의하여 감쇠 상수 역시 0 ~ 5 GHz 범위에서 0.001 ~ 0.008 Np/mm의

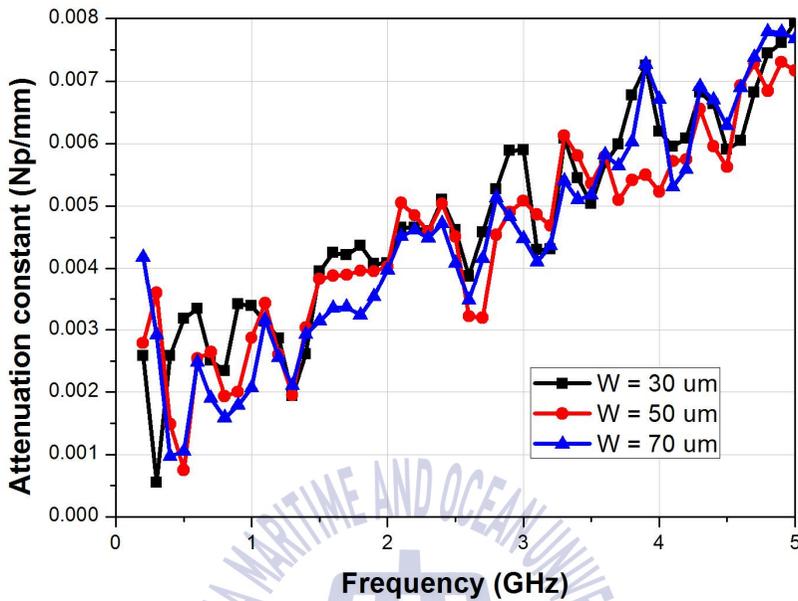


그림 2.3 Attenuation constant of gold-based flexible transmission line on PES substrate.

값을 보임을 알 수 있다. PES 위에 제작된 기존의 마이크로 스트립 선로에 대한 정확한 수치가 없기 때문에 비교하기 힘든 값이지만, 일반적인 Si 기판에서의 마이크로 스트립 선로의 감쇠 상수  $\alpha$  값이 동일 주파수 범위에서 약 0.1 Np/mm 임을 감안하면[9,10] 0.008 Np/mm는 낮은 값이라고 할 수 있다. 다만 측정 주파수 범위에서 삽입 손실  $S_{21}$  값이 선로 1,2,3번이 차이가 크지 않아 감쇠 상수  $\alpha$  또한 선로의 두께와 무관한 결과를 보였다.

위상 상수  $\beta$ 는 식 2.17로부터 식 2.24와 같이 정의 된다.

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.24)$$

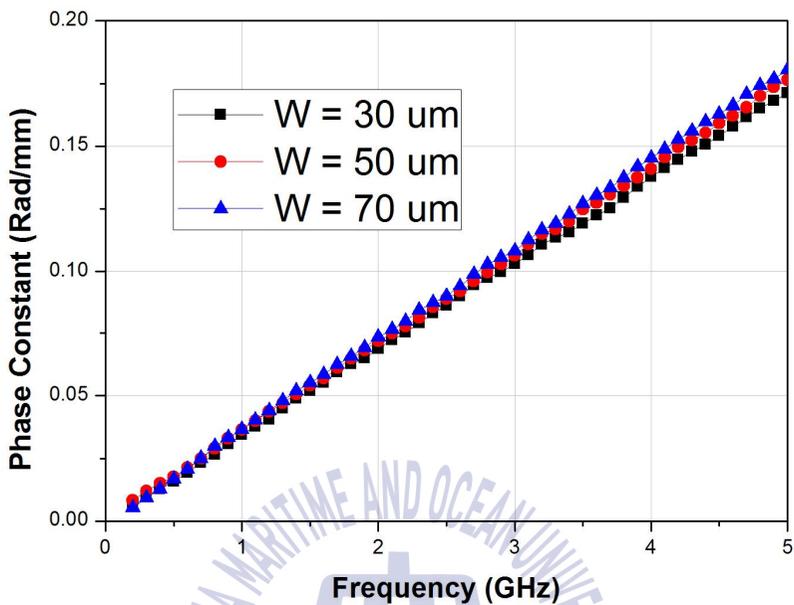


그림 2.4 Phase constant of gold-based flexible transmission line on PES substrate.

그림 2.4는 동일 선로의 위상 상수 측정값  $\beta$ 를 나타내고 있다. 0 ~ 5 GHz 범위에서 0 ~ 0.2 Rad/mm사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 선로 1,2,3은 신호선의 길이  $l$ 이 500 um로 동일하기 때문에 식 2.24에 의해서 위상 상수 값이 차이가 나지 않으며, 두께  $W$ 에 무관함을 알 수 있다. 위상 상수  $\beta$ 역시 Si 기판 전송선로의 경우 동일 주파수 범위에서 0 ~ 0.5 Rad/mm사이의 값을 가진다[9,10]. Gold 기반의 플렉시블 선로의 위상 상수 값이 종래의 전송선로보다 낮음을 알 수 있다.

## 2.1.2 Gold 기반의 플렉시블 선로의 문제점

지금까지 Gold 기반의 플렉시블 선로의 RF 특성에 대하여 살펴보았다. 일반적인 마이크로 스트립 선로에 비해서 Gold 기반의 플렉시블 선로가 우수한 RF 특성을 보임을 알 수 있었다. 이는 Gold의 높은 전기 전도율 때문이다. 하지만 Gold를 사용한 플렉시블 선로는 한계가 있다. PES 기판 자체는 유연성을 가지고 있지만 선로로 사용되는 Gold는 금속이기 때문에 유연성에 한계가 있다. 처음에는 문제가 없지만 반복해서 선로를 구부릴 경우에 신호선 및 그라운드에 금이 가거나 선로와 기판이 박리 되는 등 플렉시블 선로로서의 기능을 상실하는 문제가 발생하였다[3,4]. 이에 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 PET 유전체 위에 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 연구하였다.

## 2.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로

그림 2.5는 그래핀의 분자구조를 나타내고 있다. 그래핀이란 탄소 원자가 벌집 모양의 육각형 형태로 연결된 2차원 평면 구조 물질로써, 흑연인 ‘그래파이트 (Graphite)’ 탄소이중결합을 가진 분자를 뜻하는 접미사 ‘-ene’ 를 결합하여 만든 용어이다. 탄소 원자가 한층만 쌓인 형태로써 두께가 약 0.34 nm로 얇고 투명하며, 화학적 안정성과 전기 전도성이 뛰어나다. gold와 다르게 신축성이 좋고 접었을 때 전기 전도성을 잃지 않으며, 기판과의 접합력이 뛰어나 플렉시블 선로의 재료로써 적합하다고 할 수 있다.

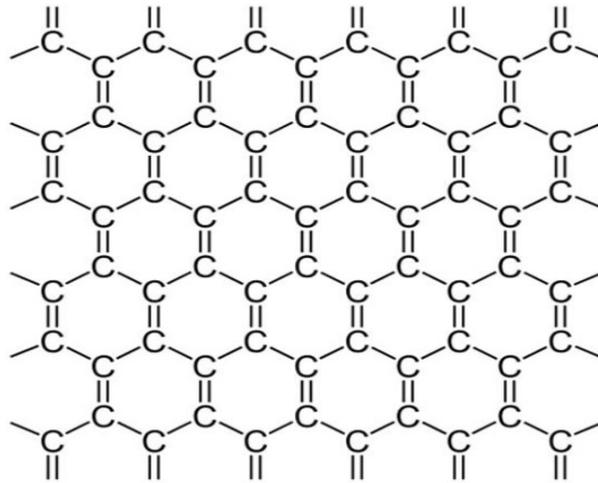


그림 2.5 Molecular structure of graphene

이론적으로 기판위에 그래핀 한 층이 쌓일 때 마다 2 % 씩 투명도가 떨어지게 된다. 때문에 정밀하게 제작된 그래핀 선로는 플렉시블 선로로 활용 할 수 있을 뿐 아니라 나아가 투명 플렉시블 선로의 개발까지 할 수 있다고 사료된다.

표 2.1은 여러 가지 플렉시블 기판의 특성을 나타내고 있다. 본 논문에서는 Gold를 이용해서 선로를 제작할 때는 PES 기판을 이용하였다. PES기판을 사용한 이유는 PES의 열 변형 온도가 약 230 °C이기 때문에, 90 °C ~ 110 °C 환경에서 진행되는 Baking 공정이 가능하고, 투명하기 때문에 선택 하였다.

그러나 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로는 제작 공정에 아세톤, 현상액 등의 화학 약품에 담그는 과정이 많은데, PES는 아세톤과 반응하여 화학적 변형을 일으켜 불투명해지거나 균열이 가기 때문에 PES기판으로 제작하는데 어려움이 있다. 때문에 본 논문에서는 PET기판으로 대체하였다. PET는 열 변형 온도가 120 °C 이므로

Baking 공정이 가능하며, 아세톤과 반응하지 않아 리프트 오프 도중에 기판이 깨지는 것을 방지할 수 있어 그래핀 선로를 만드는데 적합하다고 할 수 있다. PET유전체 위에 제작된 그래핀의 면저항, 투명도 같은 특성들은 연구가 된 바 있지만, 그래핀을 전송선로로 활용한 연구는 아직 진행되지 않아 본 논문에서 PET 유전체 위에 제작된 그래핀 기반의 전송선로의 RF특성에 관해 고찰하고자 한다.

표 2.1 Characteristics of various substrate.

Use Temperature	Material	Characteristics
900 °C	Steel	Opaque, moderate CTE, moderate chemical resistance
275 °C	Polyimide (Kapton)	Orange color, high CTE, good chemical resistance
250 °C	Polyetherether ketone (KEEP)	Amber color, good chemical resistance
230 °C	Polyether sulfone (PES)	Clear, poor solvent resistance
200 °C	Polyetherimide (PEI)	Strong, brittle, hazy/colored
155 °C	Polycarbonate (PC)	Clear, poor CTE
150 °C	Polyethylene naphthalate (PEN)	Clear, moderate CTE, good chemical resistance
120 °C	Polyethylene phthalate (PET)	Clear, moderate CTE, good chemical resistance, inexpensive

### 제 3 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 제작 과정

그래핀을 제조하는 방법에는 크게 4가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 기계적 박리법(Mechanical Cleavage)이 있다. 기계적 박리법은 다층으로 구성된 흑연 결정에서 기계적인 힘으로 한 층을 벗겨내어 그래핀을 만드는 방법으로, 테이프로 떼어내어 방법이 대표적이다. 기계적 박리법은 크기와 형태를 제어할 수 없어 소자나 전송선로로 사용하기 어렵다.

두 번째 방법으로는 에피텍셜 합성법(Epitaxial Growth)이 있다. 에피텍셜 합성법은 탄소가 포함된 재료를 고온에서 열처리하여 형성하는 방법으로, 단가가 비싸고 공정이 어렵다는 단점이 있다.

세 번째로 메탄과 수소 등과 탄소의 반응을 이용한 화학 증착법(Chemical Vapor Deposition)이 있으며, 이는 Ni, Cu 등과 같은 금속을 촉매로 하여 수소기체 내에서 고온을 가하여 환원시켜 그래핀을 만드는 방법이다. 화학 증착법은 그래핀을 만든 후에 전사공정이 필요하기 때문에 복잡한 RF 회로를 만드는데 어려움이 있다.

마지막으로 네 번째 방법으로 화학적 박리법이 있다. 화학적 박리법이란 흑연의 산화-환원 특성을 활용한 방법으로, 흑연을 산화제나 강산 등으로 산화시켜 산화 흑연을 제작한 후, 초음파를 이용해 박리시키는 방법이다. 페이스트 형식으로 만들어 사용하기 용이하고, 전사공정이 따로 필요하지 않아 복잡한 패턴의 선로를 만드는데 적합하고 공정 비용이 상대적으로 저렴하다는 이점이 있다.

본 논문에서는 화학적 박리법을 이용하여 그래핀 선로를 제작하였으며, 한국 전기 연구원(Korea Electrotechnology Research Institute)에서 개발한 rGO(reduced Graphene Oxide) 페이스트를 이용하였다. 흑연을 산화 시켜서 산화그래핀(Graphene Oxide)를 만들고 환원시켜서 산소를 제거하여 rGO를 얻을 수 있다. 유전체는 PET(Polyethylene Terephthalate)를 사용하였으며, 유전체의 두께는 200  $\mu\text{m}$ , 유전율은 3.7 이다.

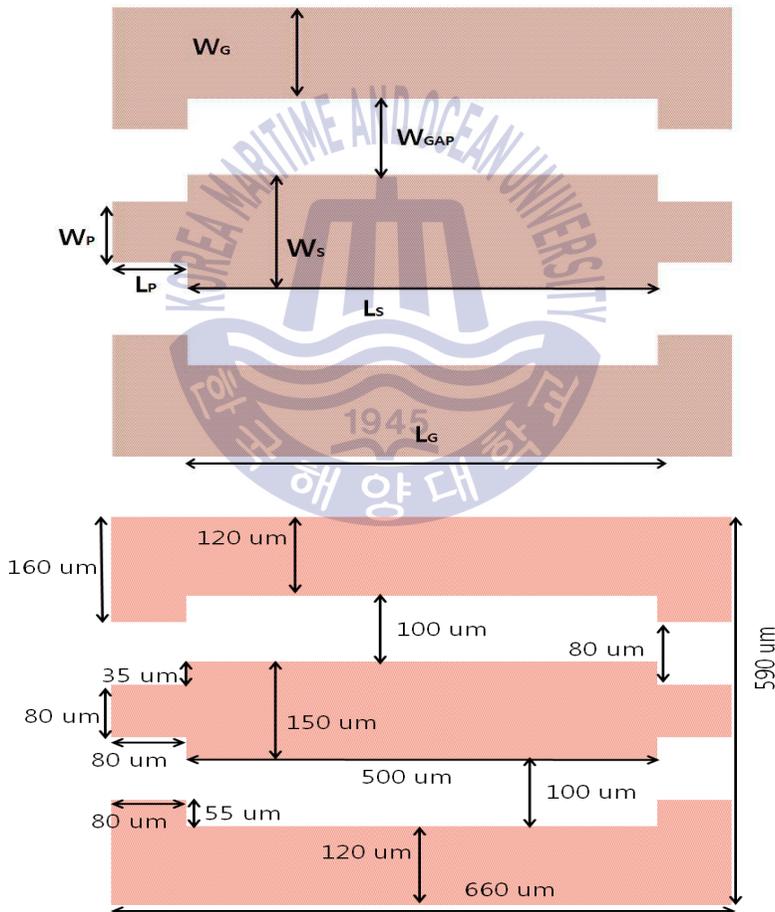


그림 3.1 Layout of graphene-based flexible transmission line on PES substrate

그림 3.1은 본 논문에서 제작한 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 레이아웃을 나타내고 있다. 플렉시블 기판에 제작된 그래핀의 RF 특성이 연구된 적이 없어, 가장 이상적인 금속인 gold와 비교하기 위해 2장에 서술한 gold 기반의 플렉시블 선로와 동일한 크기의 선로를 제작 하였다.

측정에 사용한 프로브의 크기에 맞추기 위해 프로브의 피치 간격이 150  $\mu\text{m}$ 인 프로브를 사용하기 위해서 신호선과 그라운드에 각각 80  $\mu\text{m}$  크기의 정사각형과 80  $\mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$  크기의 직사각형 모양의 선로를 추가 했다. 측정을 위한 패치를 제외한 신호선의 길이  $L_s$ 는 500  $\mu\text{m}$  이며 두께  $W_s$ 는 150  $\mu\text{m}$ 이다. 그라운드의 길이  $L_g$ 는 500  $\mu\text{m}$ , 두께는 120  $\mu\text{m}$ 이다. 그라운드와 신호선의 간격  $W_{gap}$ 은 100  $\mu\text{m}$ 이다.

그래핀 기반의 플렉시블 전송선로는 포토리소그래피 방식으로 제작 하였다. 포토리소그래피 공정은 마스크 상에 설계된 소자의 패턴을 기판상에 구현하는 기술로, 그 공정은 세정, 감광액 도포, 소프트 베이크, 노광, 현상, 하드 베이크 순서로 진행된다.

본 장에서는 공정 순서대로 자세한 과정을 나열 및 설명하고자 한다. 본 논문에서는 포지티브 포토리소그래피 과정을 거쳐 전송선로를 제작하였으며, 공정에 관한 자세한 순서는 다음과 같다.

제작하고자 하는 기판을 아세톤 및 증류수를 사용하여 세척한다. 본 논문에서는 증류수와 소니케이터(Sonicator)를 사용하여 세척하였다. 증류수에 충분히 기판을 잠기게 한 뒤 소니케이터를 이용하여 1분간 세척 하였다. PES기판은 PET기판보다 경도가 낮아 소니케이터로 세척하는 과정에 기판이 찢어지거나 뒤틀리는 등의

문제가 있었으며, 이에 본 논문에서는 PET기판을 이용하여 선로를 제작하였다.

세척 공정 다음으로 스핀코터(Spin Coater)를 이용하여 포토레지스트(Photo Resist) 용액 코팅 공정을 하였다. 포토레지스트 용액은 UV광선에 노출되면 내부 구조가 바뀌는 특성을 가지고 있으며 패턴 이외의 부분에 그래핀이 증착되지 않도록 하기 위해 사용된다. 포토레지스트 용액은 AZ5214를 사용하였으며, 코팅 조건은 500 rpm의 속도로 20초간 코팅 하였다. 상기 조건으로 코팅 하는 경우 약 1.4  $\mu\text{m}$ 의 두께로 포토레지스트 용액이 코팅된다.

코팅을 마친 기판은 포토레지스트 용액을 굳게 만들기 위해서 소프트 베이킹 공정을 하였다. 90°C 조건에서 10분간 베이킹 공정을 하였으며, 이 조건이 지켜지지 않으면 문제가 발생할 수 있다. 10분보다 짧게 굽게되면 포토레지스트 용액의 용제(Solvent)가 남아있게 되어 다음 공정인 UV 노광시 포토레지스트 용액의 화학반응이 방해받을 수 있고, 너무 오래 굽게되면 할 경우에는 현상(Development)이 제대로 되지 않을 수 있다.



그림 3.2 Optical image of developed substrate.

소프트 베이킹 공정 후에는 UV 노광 과정을 거치게 된다. 포토레지스트 용액이 단단하게 굳은 것을 확인 한 후에 노광기에 기판 및 마스크를 넣어 UV에 기판을 노출 시킨다. 기판이 UV에 노출되는 시간은 16.4초이다. 그림 3.1에 도시된 레이아웃을 바탕으로 크롬 마스크를 제작 하였으며, 마스크의 두께는 약 200 um이다.

다음 과정은 현상 과정으로, UV에 노출된 부분만 포토레지스트 용액을 제거하여 기판에 패턴을 만드는 과정이다. 현상용액은 AZ351B를 사용하였으며 현상 시간은 1분 30초 이다. 그림 3.2는 현상 단계를 마친 기판의 광학 사진을 나타내고 있다. 전송선로부분은 UV에 노출 된 후에 현상 용액과 포토레지스트 코팅이 반응하여 제거되었고 나머지 선로 외 부분은 포토레지스트 코팅이 남아 있게 된다. 현상 단계까지 마친 기판에 rGO 페이스트를 골고루 펴 바르면 전송선로가 되는 패턴부분에는 기판 위에 rGO 페이스트가 증착되지만 선로 외 부분에는 코팅이 남아있기 때문에 기판에는 그래핀이 증착되지 않으며, 리프트-오프 공정을 거치면 그림 3.3과 같이 기판위에 증착된 그래핀 전송선로만 남게 된다.



그림 3.3 Graphene-based flexible transmission line on PES substrate.

## 제 4 장 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 RF 특성

본 장에서는 제작한 선로의 RF 특성 측정 결과분석 및 gold 기반 플렉시블 전송선로, Si기판위에 제작된 그래핀 전송선로와 RF 특성을 비교하였다. 그래핀의 RF 특성이 정확하게 알려져 있지 않기 때문에 특정 주파수를 목표로 하여 측정한 것이 아닌, 통신기기에서 많이 이용되는 S밴드(2~4 GHz)를 포함하는 0.5~5 GHz 주파수 대역에서 측정하여, gold를 이용한 전송선로와의 비교를 통해 본 논문에서 제안한 전송선로가 전송선로로써 사용 할 수 있는지 고찰 하였다.

### 4.1 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 손실특성

그림 4.1은 본 논문에서 제안한 전송선로 및 gold 기반의 플렉시블 전송선로, Si기판위의 그래핀 전송선로의 삽입손실을 비교한 그래프이다. 본 논문에서 제안한 전송선로의 삽입손실  $S_{21}$ 은 0.5 ~ 5 GHz의 주파수 범위에서 약 -2.1 ~ -3.0 dB값을 보임을 알 수 있다.

PET 유전체 위에 다른 금속이나 물질을 사용하여 전송선로를 제작하는 것이 지금까지 일반적으로 사용되는 방법이 아니므로 삽입손실을 비교할 데이터가 없지만, 이상적인 금속에 가까운 gold기반의 플렉시블 전송선로의 경우 약 -0.1 dB로 본 논문에서 제안하는 전송선로는 다소 높은 삽입 손실 값을 보임을 알 수 있다. 하지만, Si기판위에 제작된 그래핀 전송선로의 삽입 손실은 약 -25 dB로[13], 매우 큰 값을 가진다. 이에 본 논문에서 제안하는 전송

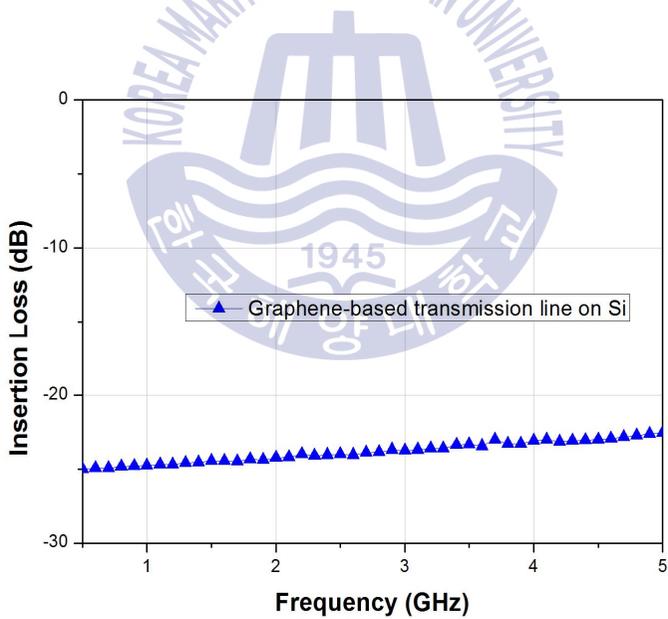
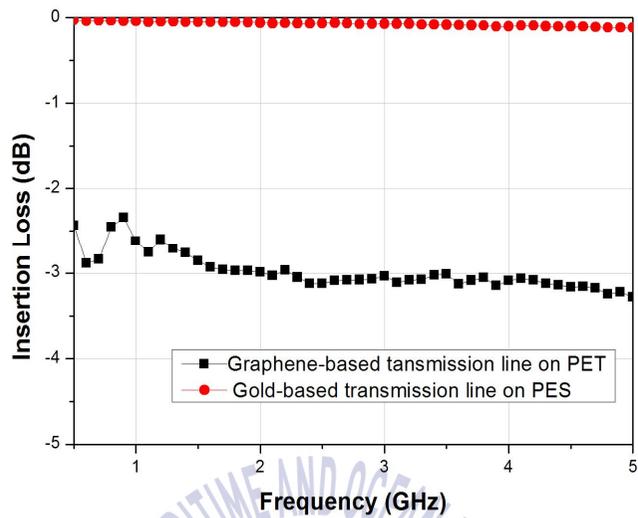


그림 4.1 Insertion loss of various transmission line.

선로는 아직까지 상용화는 힘들지만 삽입손실을 크게 줄인데 의의가 있다. 이는 CVD를 이용하여 만든 그래핀과 달리 rGO 페이스트를

이용하여 만들었기 때문에 단일 그래핀 층이 아닌 다중 층으로 선로가 이루어져 있기 때문이라고 사료된다[14,15].

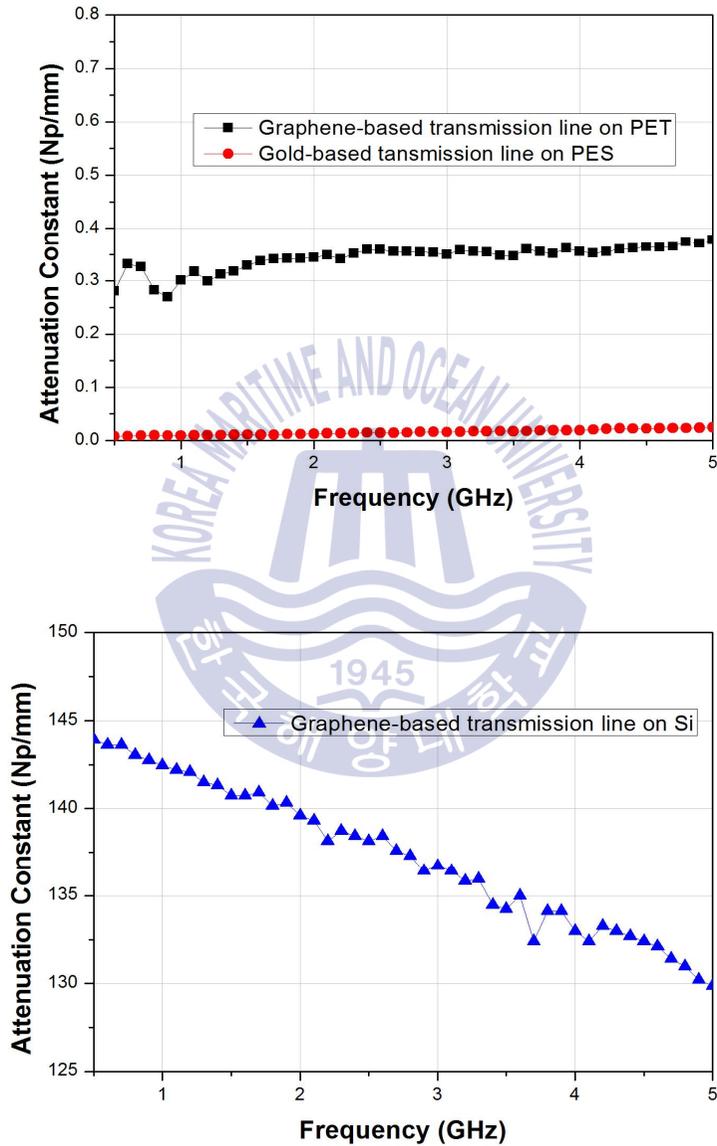


그림 4.2 Attenuation constant of various transmission line

그림 4.2는 식 2.23 및 측정된 삽입손실 값을 이용하여 계산한 감쇠 상수  $\alpha$ 를 나타낸 그래프 이다. 감쇠 상수  $\alpha$ 는 0 ~ 5 GHz 주파수 범위에서 약 0.23 ~ 0.35 Np/mm로 나타났다. 2장에서 소개한 Gold 기반의 플렉시블 전송선로의 감쇠 상수가 0.002 ~ 0.008 Np/mm이고, Si 기판의 그래핀 전송선로의 감쇠 상수가 약 135 Np/mm이다[13]. Si 기판의 그래핀 전송선로의 경우 참고문헌[13]의 제원 및 삽입손실을 참조하여 계산한 값이다. 식 2.23에 의해 감쇠 상수  $\alpha$ 는 삽입 손실과 관계있으며, 본 논문에서 제안하는 전송선로의 삽입 손실이 gold기반의 플렉시블 전송선로의 삽입 손실보다 크므로 감쇠 상수  $\alpha$ 역시 상대적으로 높은 값을 보인다. 다만, Si기판위에 제작된 그래핀 전송선로의 감쇠 상수  $\alpha$ 비교하면 감쇠 상수  $\alpha$ 역시 크게 줄었다.

#### 4.2 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 전송특성

그림 4.3은 식2.24를 이용하여 PET 유전체 위에 제작된 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로와 gold기반의 전송선로의 전송 상수  $\beta$ 를 비교한 그래프이다. 전송 상수  $\beta$ 는 gold기반의 전송선로가 0.5 ~ 5 GHz에서 0.03 ~ 0.15 Rad/mm, 그래핀 기반의 전송선로가 0.05 ~ 0.4 Rad/mm값을 보였다.

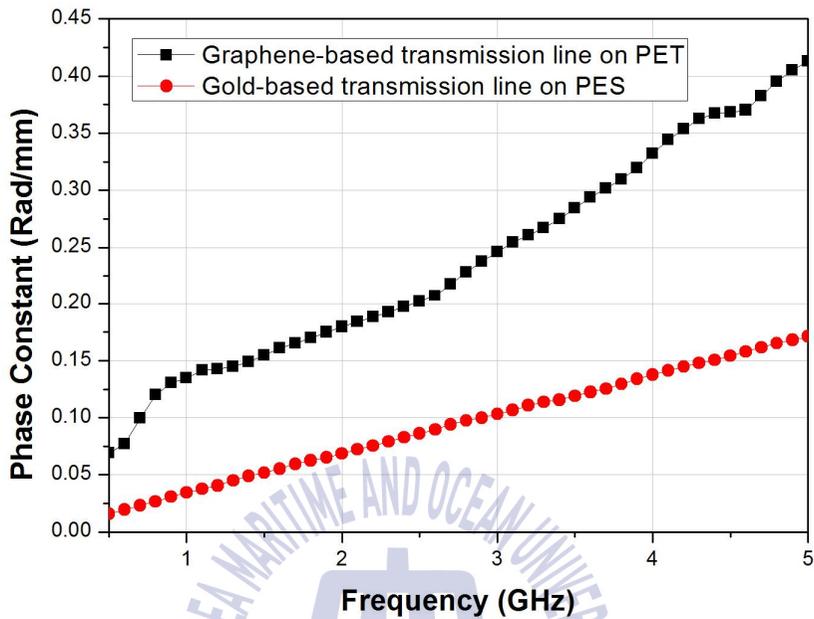


그림 4.3 Phase constant of graphene-based transmission line on PES substrate.

#### 4.3 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특성 임피던스

표 4.1은 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 임피던스 측정값을 나타내고 있다. 0.5 ~ 5 GHz 주파수 범위에서 실수부 270  $\Omega$ 의 값을 가짐을 알 수 있다. 임피던스 측정값을 바탕으로 하여 신호선에 두께와 임피던스에 관한 실험 및 측정을 하면, 본 논문에서 제안한 커플러 및 필터의 제작 또한 가능 할 것으로 사료된다.

☞ 4.1 Impedance of graphene-based transmission line on PES substrate.

Frequency (GHz)	Impedance ( $\Omega$ )
0.5	269.87-j1415.8i
1	334.26-j920.65
1.5	299.78-j599.96
2	293.43-j436.39
2.5	249.91-j377.05
3	262.54-j307.18
3.5	262.72-j256.42
4	261.97-j239.48
4.5	263.55-j213.71
5	269.33-j188.79

## 제 5 장 결 론

21세기 들어 정보 통신 및 무선 통신의 급격한 발달로 인하여 인류는 전에 없던 편리한 삶을 영위하고 있으며, 일상생활에 자연스럽게 입을 수 있는 웨어러블 디바이스 및 플렉시블 디바이스에 대한 소비자들의 요구가 많아지고 있다. 이에 본 연구그룹에서는 플렉시블 디바이스에 적용시키기 위한 Gold 기반의 플렉시블 선로를 개발하였으나 우수한 전송특성과 유연성에도 불구하고, 반복해서 구부릴 경우 선로와 유전체가 분리되는 문제점을 갖고 있었다.

본 논문에서는 상기 문제점을 해결하기 위하여 PET 유전체 위에 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로를 연구하였다. 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로의 특징 및 만드는 방법에 대해서 구체적으로 알아보았으며, 그래핀 기반 플렉시블 전송선로의 RF 특성에 관해서 고찰 해보았다. 감쇠 상수  $\alpha$ 는 0.5 ~ 5 GHz 주파수 대역에서 약 0.23 ~ 0.35 Np/mm의 값을 가졌는데 이는 gold기반의 플렉시블 선로보다 큰 값으로, 상용화하기엔 큰 값이지만 Si기판의 그래핀 선로의 감쇠 상수  $\alpha$ 가 동일 주파수 대역에서 140 Np/mm임을 감안했을 때 감쇠 상수를 많이 줄였다는 점에서 의의가 있다. 위상 상수  $\beta$ 의 경우 동일 주파수에서 0.05 ~ 0.4 Rad/mm로 측정 되었다. 위상 상수  $\beta$ 는 기존의 전송선로와 비교해서 큰 차이를 보이지 않았다. 임피던스는 계산 결과 약 270  $\Omega$ 인 것을 알 수 있었다.

삽입손실 및 감쇠 상수가 기존의 전송선로보다 2배 가까이 크기 때문에 실제 선로로 사용하기에는 아직 어려운 수준이라고 할 수 있지만, 연구 초기 단계에서 개선의 여지가 있는 의미 있는 결과

값이라고 생각되며, 실제로 손실을 줄이기 위해서 금속 전자를 도핑하거나, 순수 그래핀 뿐만 아닌 은나노 와이어가 섞인 페이스트를 이용하는 등 방법을 추후 연구할 필요가 있다. 그래핀 기반의 플렉시블 전송선로는 여러번 구부리더라도 선로가 망가지거나 떨어지는 등의 단점은 없지만, 선로를 휘었을 때 RF 특성이 어떻게 변화하는지에 대한 연구 및 측정이 계속되어야 할 필요가 있다.



## 참 고 문 헌

- [1] Y. Yun, J.H. Jeong, H.S. Kim, and N.W. Jang, “Basic RF Characteristics of Fishbone-type Transmission Line Employing Comb-type Ground Plane (FTLCGP) on PES substrate for Application to Flexible Passive Circuit” , ETRI Journal, vol.37, No.1, pp.128-137, 2015.
- [2] Y. Yun, J.H. Jeong, H.S. Kim, and N.W. Jang, “RF Characteristics of Open Stubs on PES Substrate for Application to Capacitive Matching Components on Flexible MMIC” , Transactions on Electrical and Electronic Materials, vol.16, No.3, pp.142-145, 2015.
- [3] Y. Yun, H.S. Kim, and N.W. Jang, “Study on Characteristics of Various RF Transmission Line Structures on PES Substrate for Application to Flexible MMIC” , ETRI Journal, vol.36, No.1, pp.106-115, 2014.
- [4] J.H Kim, J.H. Jeong, K.J. Son, and Y. Yun, “Study on Flexible RF circuits for application to rollable and foldable mobile communication devices” , IEICE Technical Report, vol.114, No.120, pp.77-79, 2014.
- [5] S.Z. Sajal, B.D. Braaten, “A Microstrip Patch Antenna Manufactured with Flexible Graphene-Based Conducting Material” , 2015 IEEE International Symposium, pp.2415-2416,

2015.

[6]. J.S. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier., “A Transmission Line Model for Plasmon Propagation on a Graphene Strip” , 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.1-3, 2013.

[7]. L. Zhang, Z. Wei, Y. Jia, L. Ren, Z. Shi, Y. Fu, R. Huang, X. Zhang, “RF Transmission Properties of Graphene with Coplanar Waveguide Structure” , ECS Transactions, vol.60, No.1, pp.1087-1092, 2014.

[8] J.H. Jeong, K.J. Son and Y. Yun “Basic Study on RF Characteristics of Thin-Film Transmission Line Employing ML/CPW Composite Structure on Silicon Substrate and Its Application to a Highly Miniaturized Impedance Transformer” ,Transactions on Electrical and Electronic Materials, vol.16, No.1, pp.10-15, 2015.

[9] K.J. Son, J.H. Jeong, S.J. Han, and Y. Yun, “A Short Wavelength and Low Loss Thin-Film Transmission Line Employing ML/CPW Composite Structure on Silicon Substrate” , Applied Mechanics and Materials, Vol.442, pp.138-141, 2014.

[10] 정장현, 2015, *MMIC상에서 주기적으로 배열된 다이오드를 이용한 전압 제어형 전송선로에 관한 연구*, 박사학위논문, 부산: 한국해양대학교.

- [11] 윤영, 2005, *RF 능동회로 설계이론 및 실무*, 홍릉과학 출판사.
- [12] D.M. Pozar, 2005, *Microwave engineering*, 3rd ed., Addison-wesley.
- [13] S.Y. Jeong, S.H. Kim, J.T. Han, H.J. Jeong, S.H. Yang, G.W. Lee, “High-Performance Transparent Conductive Films Using Rheologically Derived Reduced Graphene Oxide”, *ACS Nano*, Vol.5, No.2, pp.870-878, 2011.
- [14] S.Y. Jeong, S.H. Kim, J.T. Han, H.J. Jeong, S.Y. Jeong, G.W. Lee, “Highly Concentrated and Conductive Reduced Graphene Oxide Nanosheets by Monovalent Cation- $\pi$  Interaction: Toward Printed Electronics”, *Advanced Functional Materials*, Vol.22, No.15, pp.3307-3314, 2012.
- [15] H.J. Lee, E.K. Kim, W.J. Lee, J.W. Jang, “RF transmission properties of graphene monolayers with width variation”, *Phys. Status Solidi RRL* 6, No.1, pp.19-21, 2012.

## 감사의 글

2년간의 석사과정을 주위의 많은 도움으로 무사히 마무리하게 되었습니다. 2년간 많은 일이 있었고 혼자 힘으로는 마무리 할 수 없었을 것입니다. 먼저 2년 동안 항상 웃으면서 저를 도와주신 윤영 교수님께 감사드립니다. 윤영 교수님이 미국에 계실 때 지도교수 역할을 해주신 김동일, 그리고 논문의 미비한 점을 보완하여 충실한 내용이 될 수 있도록 해주신 김기만 교수님, 정지원 교수님께도 감사드리며 학부생 시절부터 많은 가르침을 주신 강인호 교수님, 민경식 교수님, 조형래 교수님께도 감사드립니다.

교수님이 없을 때 학문적인 것 뿐 아니라 일상생활에도 도움을 준 장현이형, 말은 많이 없지만 항상 저를 도와주신 기준이형과 형수님, 항상 장난을 받아주고 모르는 거 많이 가르쳐 줬던 정훈이형, 실험실 곳은 일 다 맡아서 한 현수랑 막내 병국이 까지 모두 곁에 있어서 행복한 2년 이었습니다. 실험실 외적으로 멘탈을 돌봐준 경혜, 은옥이, 현하, 은혜, 동영이와 하리에 있는 모든 술집 단골로 만들어준 세훈이, 하현이, 건웅이, 태석이, 매 주 출사나가고 토론하며 술 마셔준 창현이형 덕분에 살은 좀 췌지만, 순두부 멘탈 붙잡고 무사히 졸업 할 수 있었습니다.

마지막으로 항상 뒤에서 아낌없는 사랑과 믿음을 보여주시는 사랑하는 어머니, 아버지, 연수 항상 감사하고 죄송합니다. 앞으로 살아가면서 모든 것을 보답하겠습니다.

더욱 열심히 노력하겠습니다.