

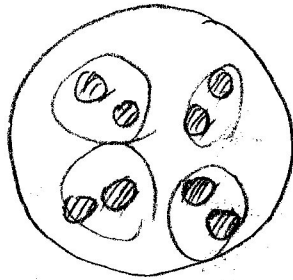
제 2장 - Part II. 전송선로

2.1 개요

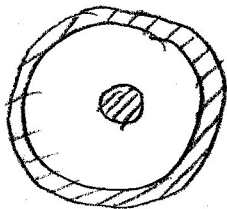
○ 전송선로 (transmission line): 신호를 운반하는 도선

○ 전송선로 종류

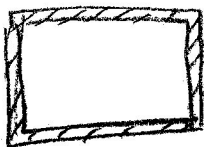
LAN선: 1GHz 이하에서 사용, CAT5e UTP, TEM 모드



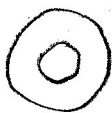
동축선: < 100GHz, TEM 모드



사각도파관: < 1THz, TE 모드, TM 모드



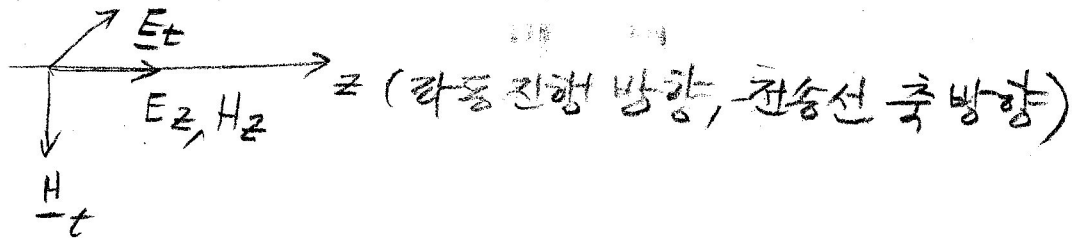
광섬유: 0.65, 0.85, 1.3, 1.5 μm , HE 모드



$$v_p = f\lambda$$

v_p : 위상속도 (동일 위상점의 이동속도), f : 주파수, λ : 파장

0. 전송선의 전파모드



$$E_t = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} : \text{전기장 횡방향 성분}$$

$$E_z : \text{전기장 축방향 성분}$$

$$H_t = H_x \hat{x} + H_y \hat{y} : \text{자기장 횡방향 성분}$$

$$H_z : \text{자기장 축방향 성분}$$

TEM (transverse electromagnetic) 모드 :

$$E_z = H_z = 0, \text{ 차단주파수} = 0$$

TE (transverse electric) 모드 :

$$E_z = 0, \text{ 차단주파수} > 0$$

TM (transverse magnetic) 모드 :

$$H_z = 0, \text{ 차단주파수} > 0$$

HE 모드 = Hybrid 모드 :

$$E_z \neq 0 \text{ and } H_z \neq 0, \text{ 차단주파수} > 0$$

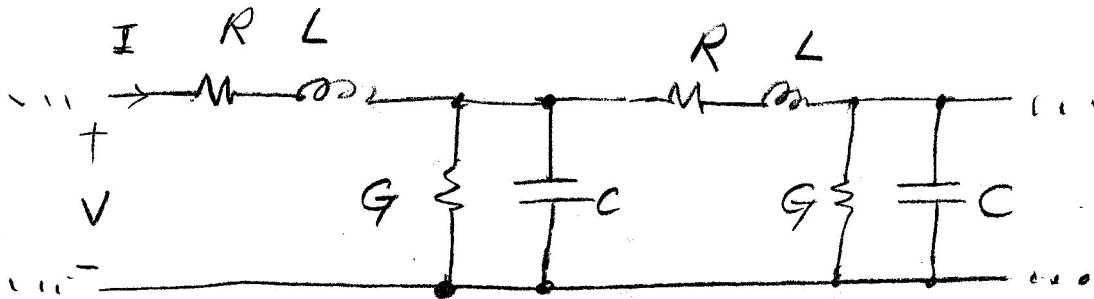
전송선의 전파모드에 따라 사용 주파수 범위와 전송선 통과시 신호의 왜곡이 영향을 받는다.

2.2 전송선 집중소자 모델

o. 집중소자 (lumped element) : 회로소자가 한 점에 위치
회로소자 크기 $\ll$ 라장

o. 분포소자 (distributed element) : 회로소자가 전송선
상에 펼쳐져서 분포, 회로소자 크기 $\sim$ 라장

o. 전송선의 집중소자 모델 : 모든 전송선을 아래와 같은 회로로 표현가능



R, L, G, C : 전송선의 레지미터

$R (\Omega/m)$: 단위 길이당 저항

$L (H/m)$: 단위 길이당 인덕턴스

$G (S/m)$: 단위 길이당 컨덕턴스

$C (F/m)$: 단위 길이당 캐패시턴스

V : 전압 (voltage) = 전하를 운반해서 전류가 흐르게 하는 기전력

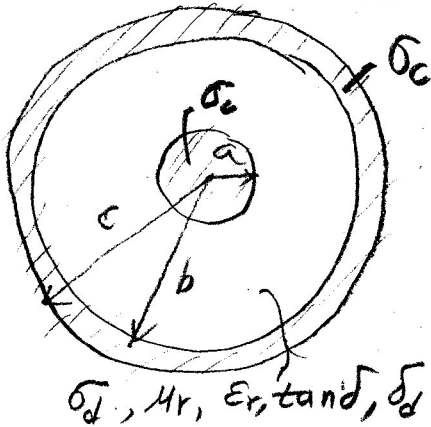
정현파 전압 (sinusoidal voltage) = 전압이 시간에 따라
삼각함수 형태로 변화, 단위: V (볼트)

I : 전류 (current) = $\frac{dq}{dt}$ = 단위 시간당 도체 단면을 통과하여

이동한 전하량, 단위: 암페어 (A)

0. 동축선 (coaxial cable)

각 파라미터 R, L, G, C (저항, 인덕턴스, 컨덕턴스, 커패시턴스)



$$R_s = \frac{r_s}{2\pi a} + \frac{r_s}{2\pi b}, \quad r_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma_c}}$$

$$L_\infty = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b}{a}}, \quad G_0 = \frac{\sigma}{\epsilon} C_0$$

동축선은 가장 기본적인 전송선으로서 다른 전송선을 이해하는 기초이다.

$\mu = \mu_0 \mu_r$: 투자율

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$: 진공의 투자율

μ_r : 상대 투자율

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$: 유전율

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$: 진공의 유전율

ϵ_r : 상대 유전율 (유전상수)

$\omega = 2\pi f$: 각속도, f : 주파수

$\tan \delta$: 유전체의 손실 탄젠트

$\sigma_c \text{ (S/m)}$: 도체의 전도도, $\sigma_d \text{ (S/m)}$: 유전체의 전도도 (직류)

다음 식을 이용하여 DC - THz 주파수까지 동축선의 특성 계산 가능

$$R(f) = R_0 + R_s$$

R_s : 교류저항

$$L(f) = L_\infty + \frac{R_s}{2\pi f}$$

$$G(f) = G_0 + (\omega \tan \delta) C_0$$

$$C(f) = C_0$$

Ref: Zhang (2010, IEEE)

$$R_0 = \frac{1}{\sigma_c \pi a^2} + \frac{1}{\sigma_c \pi (c^2 - b^2)} \quad (\text{DC 저항})$$

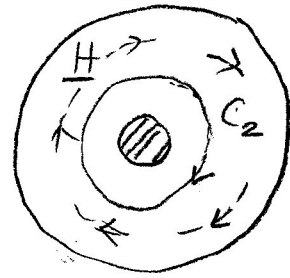
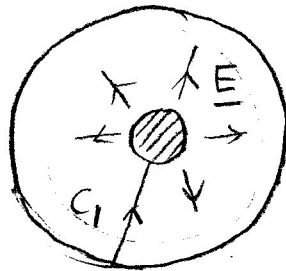
$$G_0 = \frac{\sigma_d}{\epsilon} C_0 \quad (\text{DC 컨덕턴스})$$

2.3 전송선로 방정식

0. 전송선의 전기장과 자기장을 전압(V), 전류(I)에 대응시킴

$$V = - \int_G \underline{E} \cdot d\underline{L}$$

$$I = \oint_{C_2} \underline{H} \cdot d\underline{L}$$



$\underline{E} \times \underline{H} : \hat{z}$ (라의 진행 방향)

0. V 와 I 에 관한 미분방정식

$$\frac{d^2 V}{dz^2} - \gamma^2 V = 0 \quad ; \quad \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0 \quad (1)$$

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

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{복소전파 상수}) \quad \alpha: \text{감쇠계수 (Np/m)}, \quad \beta: \text{위상계수 (rad/m)}$$

(1)의 해:

$$\begin{aligned} V(z) &= V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (V_0^+, V_0^- \text{ 상수}) \\ I(z) &= I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (I_0^+, I_0^- \text{ 상수}) \end{aligned} \quad (2)$$

$V_0^+ e^{-\gamma z}, I_0^+ e^{-\gamma z}$: $+z$ 방향으로 진행하는 라동

$V_0^- e^{\gamma z}, I_0^- e^{\gamma z}$: $-z$ 방향으로 진행하는 라동

$$\frac{V_0^+}{I_0^+} = - \frac{V_0^-}{I_0^-} = Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} : \text{전송선의 특성 임피던스}$$

$$V_0^+ = |V_0^+| e^{j\phi^+}, \quad V_0^- = |V_0^-| e^{j\phi^-}$$

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

$$e^{-\alpha z}: \text{진폭 감쇠}$$

$$e^{-1} = \frac{1}{2.718} = 0.368 = 1 \text{ Np}$$

$$1 \text{ Np/m} = -20 \log_{10} 0.368 = 8.686 \text{ (dB/m)}$$

$$\alpha \text{ (dB/m)} = 8.686 \alpha \text{ (Np/m)}$$

$$-\beta z = -\frac{2\pi}{\lambda} z : \text{위상 지연}$$

$$\lambda : 360^\circ, \quad \frac{\lambda}{2} : 180^\circ, \quad \frac{\lambda}{4} : 90^\circ, \quad \frac{\lambda}{8} : 45^\circ, \quad \frac{\lambda}{16} : 22.5^\circ$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \text{무손실 선로}, R=0, G=0$$

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 LC} = j\omega \sqrt{LC} = j\beta$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

0. 무손실 동축선

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}, \quad C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b}{a}}$$

$$\gamma = j\beta = j\omega \sqrt{\mu\epsilon} = j\omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0} \sqrt{\mu_r\epsilon_r} = j \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \beta = \beta_0 \sqrt{\mu_r\epsilon_r}$$

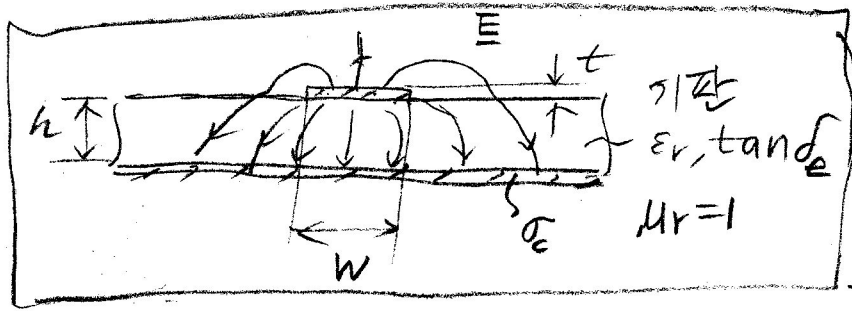
$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a} \rightarrow Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}$$

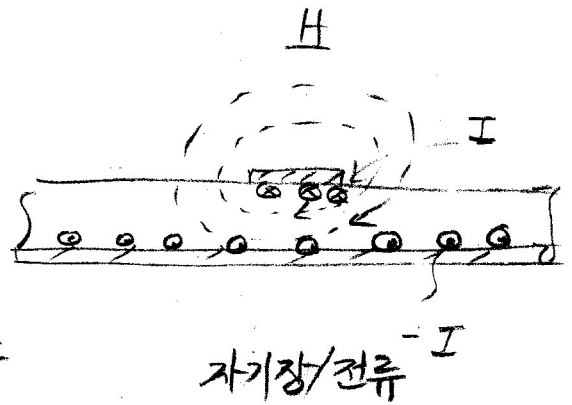
$$\lambda_0 = \frac{3 \times 10^8}{f} : \text{진공에서의 파장}$$

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

2.5 마이크로 스트립 선로 (Microstrip Line)



구조



$t=0$: thin strip approximation

$\sigma_c = \infty$ (완전도체), $\tan \delta = 0$ (무손실 유전체) : lossless condition

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \beta_0 \sqrt{\epsilon_{re}}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

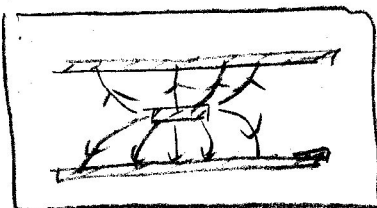
$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{w/h}}} \quad (\text{유효유전상수})$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left(\frac{8}{w/h} + \frac{w/h}{4} \right) & , w/h \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.444)} & , w/h \geq 1 \end{cases}$$

$E_z \sim 0, H_z \sim 0$: quasi-TEM mode

특성임피던스

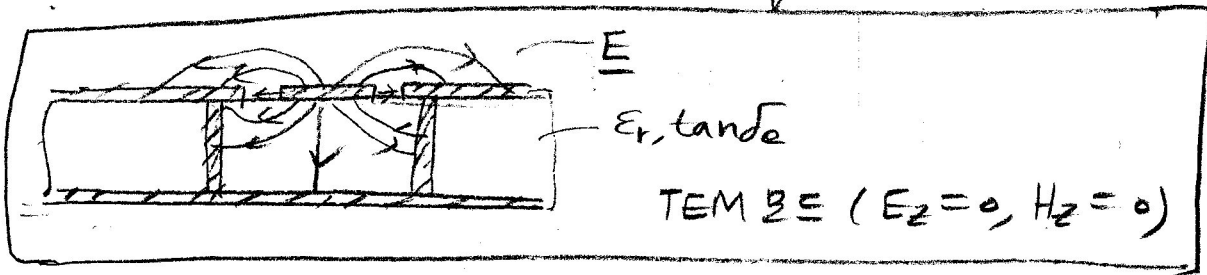
• 스트립 선로 (Stripline)



구조

$$E_z = 0, H_z = 0 : \text{TEM 모드}$$

- GCPW (Ground coplanar waveguide)



- 마이크로스트립, 스트립 선로, GCPW 선로는 커주라미셔부터 구조라까지의 전자제품 인쇄회로기판 (PCB) 에 널리 사용됨.

• 스마트폰에는 6-10 층의 회로기판이 사용됨.

- 회사에서 제품 개발시 인쇄회로 레이아웃 (PCB layout) 이 중요한 전문기술임.

• PCB (printed circuit board) : 인쇄회로기판

연습문제 (2.1-2.5)

1. 다음 권송선의 단면도시. (a) LAN선, (b) 동축선, (c) 사각도관
2. 다음 중 차폐 주파수가 0인 모드는? (a) TEM, (b) TE, (c) TM, (e) HE
3. μ_0 와 ϵ_0 의 값 제시
4. 권송선의 R, L, G, C 가 주어진 경우 γ 와 Z_0 를 다음의 경우에 구하라.
(a) 유손실
(b) 무손실
5. RG-250 동축선: $2a = 1.6 \text{ mm}$, $2b = 5.4 \text{ mm}$, $2c = 6.4 \text{ mm}$,
 $\epsilon_r = 2.08$, $\tan \delta = 5 \times 10^{-4}$, $\sigma_c = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, $L = 1 \text{ m}$ (권송선 길이)
 $\sigma_d = 0$, $\mu_r = 1$
(a) $R_0 =$
(b) $L_0 =$
(c) $G_0 =$
(d) $C_0 =$
6. 마이크로스트립선로: $w = 2 \text{ mm}$, $h = 0.5 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 2.5$
(a) $\epsilon_{re} =$
(b) $Z_0 =$

실습 (2.1-2.5) Python

Part 1

PLab-02: 마이크로스트립 선로 임피던스 계산

입력: $w(\text{mm}), h(\text{mm}), \epsilon_r, f(\text{Hz}) =$ (각 줄에 모두 입력)

출력: 1줄에 1개 출력

RUN =

$\epsilon_{re} =$

$Z_0(\text{ohm}) =$

$\lambda(\text{m}) =$

(값은 명칭으로 spell out)

확변데이터: $w, h, \epsilon_r, f = 2 \ 1 \ 2 \ 10e9$

PLab-02b: 동축선 선로 임피던스 계산

입력: 아래 적시각 줄별 입력

$f(\text{Hz}) =$

$1e3$ 과 $10e9$

$2a, 2b, 2c(\text{mm}) =$

$1.6 \ 5.4 \ 6.4$

$\sigma_c(\text{S/m}) =$

$5.8e7$

$\mu_r, \epsilon_r, \tan \delta, \sigma_e(\text{S/m}) =$

$1.0 \ 2.08 \ 0.0005 \ 0.0$

출력:

RUN =

$f(\text{Hz}) =$

$R(f)(\text{ohm/m}), L(f)(\text{H/m}) =$

$G(f)(\text{S/m}), C(f)(\text{F/m}) =$

$\alpha(\text{Np/m}), \beta(\text{rad/m}) =$

$\lambda(\text{m}) =$

$Z_0(\text{ohm}) =$

(요구사항) f 값 바꿀면서 반복 계산하다가 f 에 음수를 입력하면
처음부터 다시 시작하도록 프로그램 설계

실습(2.1~2.5절) : GLab-02

Microstrip 선로 유전상수, 특성임피던스 분석

$$y = \frac{d+1}{2} + \frac{d-1}{2} \frac{1}{\sqrt{1+12/x}} : \text{유효 유전상수 } (x=w/h, d=\epsilon_r) \quad (\epsilon_{re})$$

$$y = \frac{1}{10} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{8}{x} + \frac{x}{4}\right) : \text{특성임피던스 } (Z_0) \quad (0 \leq x \leq 1 \text{ 일때 라랑})$$

(10으로 나누고)

$$y = \frac{1}{10} \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{x+1.393+0.667 \ln(x+1.444)}$$

2 : 특성임피던스(Z_0), 10으로 나누고 ($1 \leq x < \infty$ 일때 라랑)

$d=5$ ($1 \leq d \leq 10$) : 기판의 유전상수(ϵ_r)

$x=5$ ($1 \leq x \leq 10$) : 그래프 값 관측용 수직선

축범위 : $-5 \leq x \leq 20, -5 \leq y \leq 15$

1. 'Graph Plotter'를 이용하여 위 그래프 도시 ($d=5, x=5$ 일때)

2. 다음 표 작성

ϵ_r	w/h	ϵ_{re}	$Z_0(\text{ohm})$
2	2		
3	1		
4	6		
6	1		
9	5		
10	3		