

각진 두 도선으로 구성된 비균일 전송선의 외부 전자파 결합

Coupling of External Electromagnetic Fields to the Nonuniform Transmission Line Consisting of Two Angled Wires

홍성용* · 김세윤** · 나정웅***

Sung-Yong Hong* · Se Yun Kim** · Jung Woong Ra***

요 약

임의의 평면파가 각진 두 도선에 입사시 관계변수들이 양단부하에 유기되는 전압에 미치는 영향을 조사하였다. 전송선 양단의 임피던스가 정합되고 입사파의 방향이 방위각과 고도각이 같을 때 유기전압이 최소가 됨을 알 수 있었다. 또한, 도선의 반경이나 도선간의 경사각이 변할 때 도표상에서 유기전압을 계산할 수 있는 방안도 제시하였다.

Abstract

The effects of involved parameters to the voltages induced at both ends of an angled two-wire transmission line are investigated for the incidence of an arbitrary plane wave. The minimum level of the induced voltages is found in case that both ends of the transmission line are terminated by the matching loads and the azimuth angle of the incident wave is equal to the elevation angle. A graphical technique is also developed to estimate the induced voltages at the change of the wire radius or tilt angle between two wires.

I. 서 론

최근 외부로부터 임의의 평면파가 각진 두 도선으로 구성된 비균일 전송선에 입사시 전송선 단말부하에 유기되는 전압을 기존의 회로개념¹⁾을 써서 수치계산으로 구하였다²⁾. 또한 동일한 문제를 각진 두 평판 형태의 등가전송선 모형으로 바꾸고, 이 경우에 해당되는 원통형(cylindrical) 전송선 방정식을 해석적인 방법으로 풀어서 단말부하의 유기전압을 구하는 새로운 기법을 제안한 바 있다³⁾. 이미 새

로운 해석기법으로 구한 결과가 기존의 회로개념을 이용하여 구한 값과 잘 일치함을 보였으며⁴⁾, 실제 측정 실험으로도 새로운 해석기법의 타당성을 입증하였다⁵⁾. 본 논문에서는 각진 두 도선으로 구성된 비균일 전송선의 구조변수들과 여기에 입사되는 전자파의 입사방향, 편파, 주파수에 의한 단말부하에 유기되는 전압의 영향을 살펴 보았다. 특히 특정한 입사방향과 편파에 대해 유기전압이 민감하게 변함을 보였으며, 이 경우 양단 부하의 임피던스 변화에 대해서도 유기전압의 변화가 심함을 알 수 있었다. 이와 같이 유기전압의 변동이 심한 경우 전송선 구

* 한국쌍선전기(주)

** 한국과학기술원(KAIST) 정보전자연구부

*** 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과

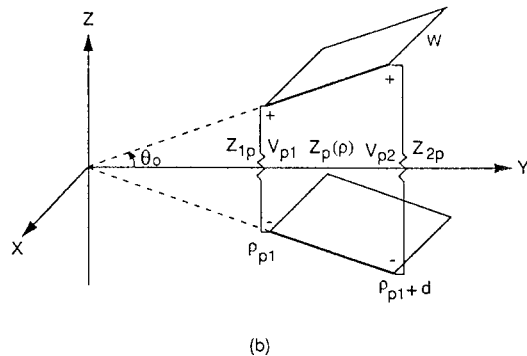
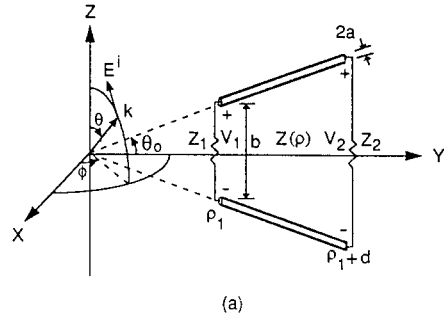
조 변수들의 변화에 의한 영향을 단말부하의 임피던스 변화에 의한 값으로 바꾸어 보다 쉽게 구할 수 있음을 보였다.

II. 전송선 양단 부하의 유기전압

본 논문에서 다루고자 하는 비균일 전송선의 구조와 등가구조를 [그림 1]에 나타내었다. 이때 반경 a , 길이 d 인 두 도선이 $2\theta_0$ 의 경사를 이루며 $y-z$ 평면에 있으며, 도선 양단이 $\rho=\rho_1$ 과 ρ_2 에 각각 임피던스 Z_1, Z_2 의 부하가 달려 있다고 한다. 이러한 비균일 전송선에 주파수 f 를 갖는 평면파가 ϕ, θ 방향으로 입사해 올 경우 양단부하에 유기되는 전압을 구하고자 한다. 이때 입사전계가 θ 성분만 있는 경우를 E-편파(polarization), 입사전계가 θ 성분만 있는 경우를 H-편파라 정의한다. 그리고, 등가구조는 폭이 w 이고, 길이가 d 인 두 평판이 $2\theta_0$ 의 경사를 이루며, $\rho=\rho_{p1}$ 과 $\rho=\rho_{p2}$ 에 부하 Z_{1p} 와 Z_{2p} 가 달려 있다고 한다.

[그림 1]과 같은 전자파 결합문제에 대해서는 이미 발표된 논문⁴⁾에서 자세히 기술하였으므로, 본 논문에서는 양단 부하 Z_1 과 Z_2 에 각각 유기되는 전압 V_1 과 V_2 의 최종 결과식만을 아래와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 V_1 = & -\frac{Z_{1p} Z_p(\rho_{p2})}{Q} \sqrt{\frac{\rho_{p1}}{\rho_{p2}}} \left[\int_{\rho_{p1}}^{\rho_{p2}} \frac{\Omega(\rho, \rho_{p1})}{\Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1})} \right. \\
 & T(\rho) d\rho - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} E_{\theta}(\rho_2, \theta) \rho_2 d\theta \left. \right] \\
 & + \frac{Z_{1p} Z_{2p} \Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1}) - jZ_{1p} Z_p(\rho_{p2}) A(\rho_{p1}, \rho_{p2})}{Q} \\
 & \left[\int_{\rho_{p1}}^{\rho_{p2}} \frac{\Omega(\rho, \rho_{p2})}{\Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1})} T(\rho) d\rho - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} E_{\theta}^i(\rho_1, \theta) \right. \\
 & \left. \rho_1 d\theta \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$



[그림 1] 외부 전자파에 노출된 비균일 전송선

- (a) 각진 두 도선으로 된 전송선
- (b) 각진 두 평판으로 된 전송선

[Fig. 1] Nonuniform transmission line illuminated by an external electromagnetic field.

- (a) Angled two wire transmission line.
- (b) Angled two plate transmission line.

$$\begin{aligned}
 V_2 = & -\frac{Z_p(\rho_{p1}) Z_{2p}}{Q} \sqrt{\frac{\rho_{p2}}{\rho_{p1}}} \left[\int_{\rho_{p1}}^{\rho_{p2}} \frac{\Omega(\rho, \rho_{p2})}{\Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1})} \right. \\
 & T(\rho) d\rho - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} E_{\theta}^i(\rho_1, \theta) \rho_1 d\theta \left. \right] + \\
 & \frac{Z_{1p} Z_{2p} \Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1}) - jZ_p(\rho_{p1}) Z_{2p} A(\rho_{p2}, \rho_{p1})}{Q}
 \end{aligned}$$

각진 두 도선으로 구성된 비균일 전송선의 외부 전자파 결합

성 임피던스로 다음과 같다.

$$Z(\rho) = 120 \ln \frac{2\rho \sin \theta_0}{a} \quad (10)$$

$$Z_r(\rho) = 377 \frac{2\rho \theta_0}{w} \quad (11)$$

Ⅲ. 수치계산 결과

본 논문에서 취한 기본구조는 [그림 1]에서 도선 반경 $a=2\text{cm}$, 도선간의 폭 $b=1\text{m}$, 도선길이 $d=40\text{m}$, 도선간의 경사각 $\theta_0=2^\circ$, $Z_1=469\Omega$, $Z_2=629\Omega$ 인 비균일 전송선으로, 여기에 주파수 $f=10\text{MHz}$, 전계세기 $|E|=1\text{V/m}$ 인 평면파가 입사할 경우에 대해 단말부하에 유기되는 전압 V_1 과 V_2 를 식 (1), (2)를 이용하여 계산하였다. 먼저 [그림 2]는 E-편파된 평면파가 임의의 방향각 ϕ , 고도 각 θ 인 방향으로 비균일 전송선에 입사할 경우 V_1 과 V_2 를 그린 것이다.

[그림 2]에서 흥미로운 것은 유기전압 V_1 은 입사 방향이 $\phi+\theta=0^\circ$ 를 만족하는 방향일 때 그 크기가 급격히 줄어들음 [그림 2](a)에서 볼 수 있다. 그러나 반대로 [그림 2](b)에 보인 바와 같이 유기전압 V_2 는 $\phi\pm\theta=0^\circ$ 를 만족하는 방향에서 급격히 감소하는 현상이 발생하였다. 이러한 특정 입사방향에 대한 유기전압의 감소는 평행 도선일 경우를 살펴보면 쉽게 알 수 있다. [그림 1]에서 $\theta_0=0^\circ$ 이며, $Z_1=Z_2=Z_c$ 인 경우 V_1 과 V_2 는 다음과 같이 표현된다⁶⁾.

$$V_1 = \frac{1}{2} \frac{(e^{-jk \cos \theta_0} - 1)[1 - e^{-jk(1 + \sin \theta \sin \phi)d}]}{jk \cos \theta(1 + \sin \theta \sin \phi)} \cdot [\sin \theta + \sin \phi] \quad (12)$$

$$\left[\int_{\rho_{p1}}^{\rho_{p2}} \frac{\Omega(\rho, \rho_{p1})}{\Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1})} T(\rho) d\rho - \int_{-\theta_0}^{\theta_0} E_{\theta}^i(\rho_2, \theta) \rho_2 d\theta \right] \quad (2)$$

여기서 $T(\rho)$, Q , $\Omega(\rho_1, \rho_2)$, $A(\rho_1, \rho_2)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$T(\rho) = E_{\rho}^i(\rho, \theta_0) - E_{\rho}^i(\rho, -\theta_0) \quad (3)$$

$$Q = \left[Z_{1p} Z_{2p} \Omega(\rho_{p2}, \rho_{p2}) - Z_p(\rho_{p1}) Z_p(\rho_{p2}) \frac{A(\rho_{p1}, \rho_{p2}) A(\rho_{p2}, \rho_{p1}) + 1}{\Omega(\rho_{p2}, \rho_{p1})} \right] - j[Z_p(\rho_{p1}) Z_{2p} A(\rho_{p2}, \rho_{p1}) + Z_{1p} Z_p(\rho_{p2}) A(\rho_{p1}, \rho_{p2})] \quad (4)$$

$$\Omega(\rho_1, \rho_2) = \frac{\pi k \sqrt{\rho_{p1} \rho_{p2}}}{4} [H_0^{(1)}(k\rho_1) H_0^{(2)}(k\rho_2) - H_0^{(2)}(k\rho_1) H_0^{(1)}(k\rho_2)] \quad (5)$$

$$A(\rho_1, \rho_2) = \frac{\pi k \sqrt{\rho_{p1} \rho_{p2}}}{4} [H_0^{(1)}(k\rho_1) H_1^{(2)}(k\rho_2) - H_0^{(2)}(k\rho_1) H_1^{(1)}(k\rho_2)] \quad (6)$$

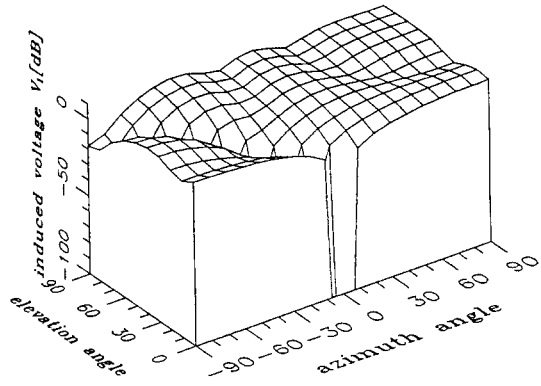
이 때 $H_m^{(n)}$ 은 제 n 종의 m 차 Hankel 함수이다. 그리고 ρ_{p1} , Z_{1p} , Z_{2p} 는 등가구조의 좌표와 부하 임피던스로 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\rho_{p1} = \frac{d Z(\rho_1)}{Z(\rho_1 + d) - Z(\rho_1)} \quad (7)$$

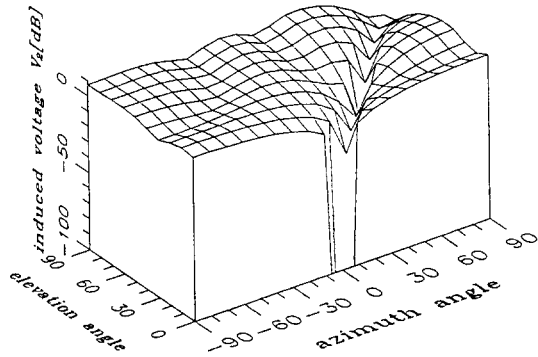
$$Z_{1p} = Z_1 \frac{Z_p(\rho_{p1})}{Z(\rho_1)} \quad (8)$$

$$Z_{2p} = Z_2 \frac{Z_p(\rho_{p1} + d)}{Z(\rho_1 + d)} \quad (9)$$

이때 $Z(\rho)$ 와 $Z_r(\rho)$ 는 원 구조와 등가구조의 특



(a)



(b)

[그림 2] 수평 편파된 입사파의 입사방향에 대한 유기 전압 패턴

[Fig. 2] Induced voltage pattern according to the incident angle for E-polarization.

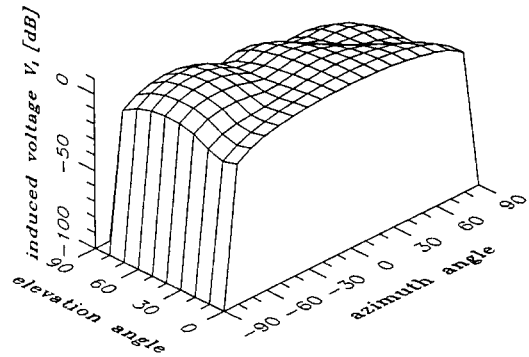
(a) V_1 .

(b) V_2 .

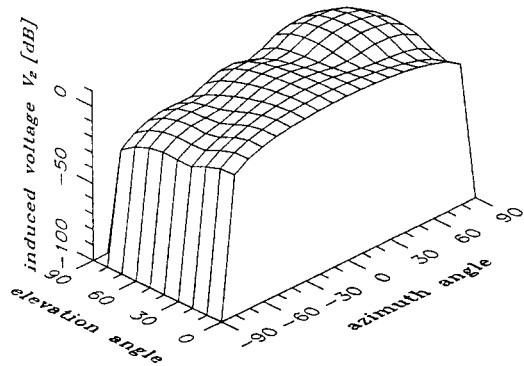
$$V_2 = \frac{1}{2} \frac{e^{-jk \cos \theta_p} - 1}{e^{-jkd}} \frac{[1 - e^{-jk(1 + \sin \theta \sin \phi)d}]}{jk \cos \theta (1 - \sin \theta \sin \phi)} \cdot [\sin \theta - \sin \phi] \quad (13)$$

따라서 양단부하가 임피던스 정합된 평행 도선에 E-편파된 평면파가 입사시 입사방향이 $\theta + \phi$ 인 경우 $V_1 = 0$ 이고 $\theta - \phi = 0$ 인 경우 $V_2 = 0$ 임을 알 수

있다. [그림 2]의 경우도 그와 유사한 결과를 얻을 수 있다. [그림 3]은 H-편파된 평면파가 입사시 V_1 과 V_2 를 그린 것인데, θ 또는 ϕ 가 $\pm 90^\circ$ 에 근접할 경우 강한 감쇠가 일어남을 볼 수 있다. 이는 $\phi = \pm 90^\circ$ 인 경우 전송선의 종단면의 직교하는 자계 성분이 없으며 z 방향의 입사전계 성분이 없으므로 부하에 유기되는 전압이 영이 되며, $\theta = 90^\circ$ 인 경우 입사전계에 z 방향 성분이 없고, 두 도선에 유기되는 전류는 크기와 방향이 같게 되어 부하에 흐르는



(a)



(b)

[그림 3] 수직 편파된 입사파의 입사방향에 대한 유기 전압 패턴

[Fig. 3] Induced voltage pattern according to the incident angle for H-polarization.

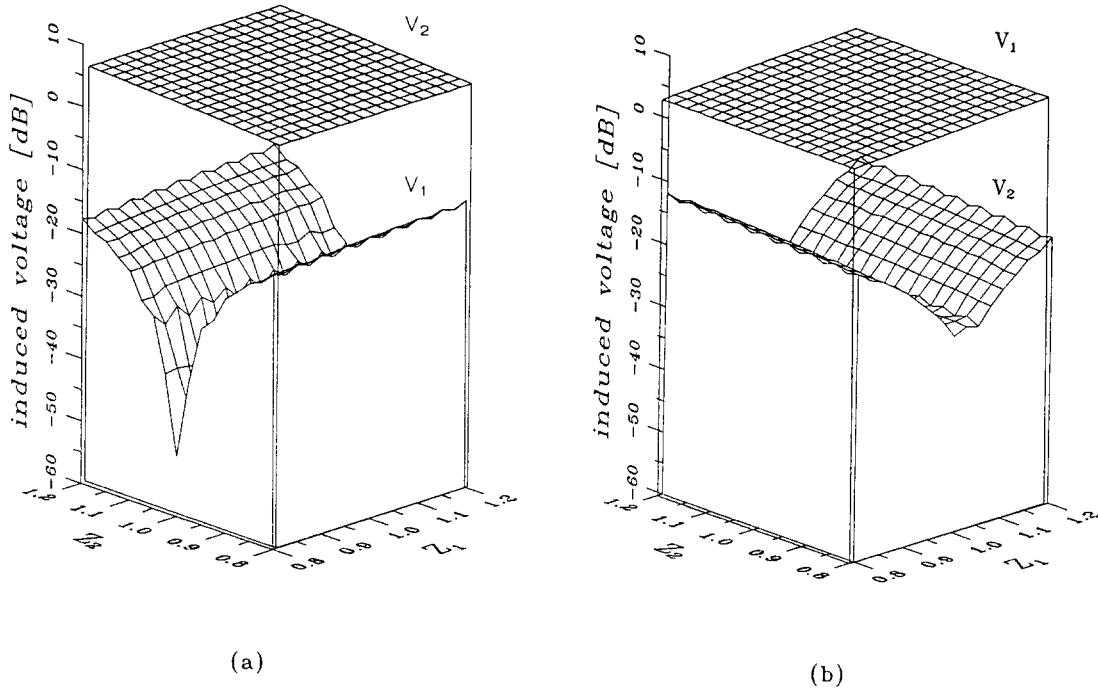
(a) V_1 .

(b) V_2 .

전류가 영이 되기 때문이다.

다음은 부하의 임피던스가 변할 경우 유기전압 V_1 과 V_2 에 미치는 영향을 살펴 보았다. [그림 2]에서 보인 바와 같이 E-편파시 입사방향이 $\theta = \pm\phi$ 인 근방에서 유기전압이 급격히 감소하므로 부하 임피던스의 영향을 보다 잘 살펴보기 위하여 E-편파된 입사파의 기본방향을 $\phi = -30^\circ$, $\theta = 30^\circ$ 와 $\phi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$ 의 두 경우로 취하였다. 편의상 왼편 단말부하 Z_1 을 $\rho = \rho_1$ 에서의 특성 임피던스 $Z(\rho_1)$ 로 나눈 정규화된 임피던스 z_1 과 오른편 단말부하 z_2 를 $\rho = \rho_2$ 에서의 특성 임피던스 $Z(\rho_2)$ 로 나눈 정규화된 임

피던스 z_2 를 0.8에서 1.2까지 변화시킬 경우를 계산하였다. 먼저 [그림 4](a)는 입사방향 $\phi = -30^\circ$, $\theta = 30^\circ$ 인 경우 V_1 과 V_2 를 그린 것으로, V_2 는 Z_1 과 Z_2 의 변화에 관계없이 거의 일정한 유기전압을 갖는데 비하여 V_1 은 유기전압 자체가 V_2 에 비해 매우 낮다. 이는 [그림 2](a)와 (b)로부터도 알 수 있다. 특히 V_1 은 Z_1 의 변화에 대해서는 거의 차이가 나타나지 않으나, Z_2 에 대해서는 30dB이상의 급격한 유기전압 변동을 일으킴을 알 수 있다. 이러한 현상은 E-편파된 평면파가 평행한 두 도선으로 구성된 균일 전송선에 입사할 경우 쉽게 설명된다.



[그림 4] 수평 편파된 입사파일 경우 부하 임피던스 변화에 따른 유기전압 패턴

(a) 입사각도 $\phi = -30^\circ$, $\theta = 30^\circ$

(b) 입사각도 $\phi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$

[Fig. 4] Induced voltage pattern according to the load impedance for E-polarization.

(a) Incident angle with $\phi = -30^\circ$, $\theta = 30^\circ$.

(b) Incident angle with $\phi = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$.

[그림 1]에서 $\theta=0^\circ$ 인 경우 V_1 과 V_2 에 대한 정확한 해가 알려져 있다[7]. 따라서 편의상 V_1 을 Z_1 과 Z_2 의 함수로 보아, 각각의 도함수를 구하면 다음과 같다.

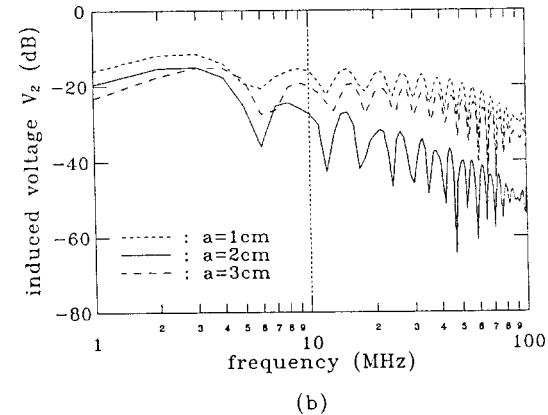
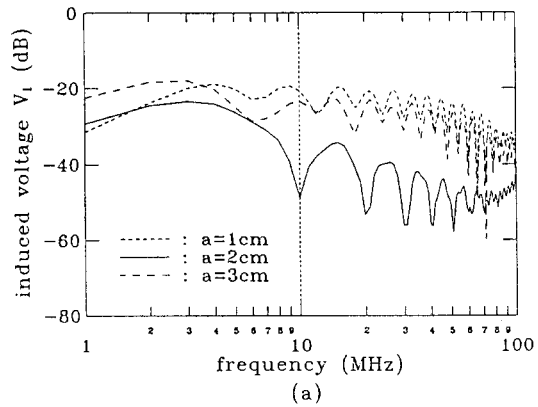
$$\frac{\partial V_1}{\partial Z_1} = \frac{Z_c}{(Z_1+Z_c)^2} \frac{e^{-jk \cos \theta} - 1}{[1 - e^{-jk(1+\sin \phi \sin \theta)d}](\sin \phi + \sin \theta)} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial Z_2} = \frac{Z_c}{(Z_2+Z_c)^2} \frac{e^{-jk \cos \theta} - 1}{[e^{-jk d}(\sin \theta - \sin \phi) + e^{-jk d(1+\sin \theta \sin \phi)}(\sin \theta + \sin \phi \cos 2\theta)]} \quad (15)$$

여기서 Z_c 는 균일 전송선의 특성 임피던스이며, 식 (14)인 경우는 $Z_2=Z_c$, 식(15)의 경우는 $Z_1=Z_c$ 라고 두고 유도한 결과이다. 그러므로 입사방향이 $\phi+\theta=0$ 인 경우에는 $\frac{\partial V_1}{\partial Z_1}$ 가 영이 되어 Z_1 은 Z_1 에 변화하지 않지만, $\frac{\partial V_1}{\partial Z_2}$ 는 영이 되지 않으므로 V_1 은 Z_2 에 대해 변함을 알 수 있다. $\theta=2^\circ$ 인 비균일 전송선에서의 유도전압은 균일 전송선의 경우와 매우 유사하므로 [그림 4](a)의 V_1 의 변화 특성과 잘 일치함을 알 수 있다. [그림 4](b)는 입사방향이 $\phi=30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 인 E-편파의 경우로, 여기서 V_1 은 거의 일정하며, V_2 만 Z_1 의 값에 따라 크게 변함을 보인다. 이는 [그림 4](a)와는 반대 현상인데 $\phi=-30^\circ$ 와 $\theta=30^\circ$ 는 Z_1 과 Z_2 축에 대해 대칭적인 입사방향을 이루므로, 결과적으로 [그림 4](b)와 같은 경향을 갖게 된다.

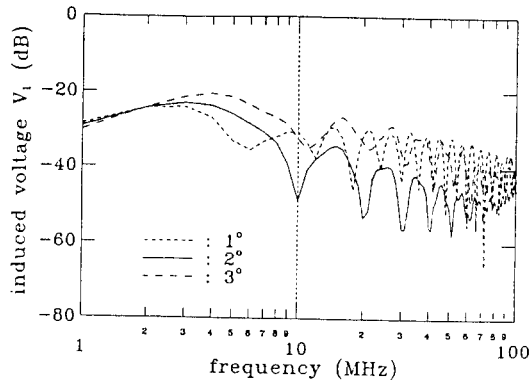
[그림 5](a)는 E-편파된 평면파가 $\phi=-30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 의 방향으로 [그림 1]과 같은 비균일 전송선에 입사시 도선의 반경만 기본 값인 $a=2\text{cm}$ 에서 1cm로 줄거나 또는 3cm로 늘어날 경우 유기전압 V_1 의 주파수 반응 특성을 보여준다. 그림 5(a)에서 흥미로운 점은 대체로 $a=2\text{cm}$ 일때 V_1 이 낮다는 것이다. 예를 들어 주파수 $f=10\text{MHz}$ 일 경우 $a=$

1cm 또는 3cm에 비해 $a=2\text{cm}$ 일때 V_1 은 약 20dB 정도 감쇠함을 알 수 있다. 이러한 현상은 [그림 4](a)를 이용해서 설명할 수 있다. 먼저 [그림 5](a)에서 $a=2\text{cm}$ 일때의 결과는 두 부하 임피던스 Z_1 과 Z_2 를 각각 접속된 전송선 양단의 특성 임피던스 $Z(\rho_1)=469\Omega$ 과 $Z(\rho_2)=629\Omega$ 과 각각 같도록 두고 계산하였다. 그런데 도선 반경 a 가 변하면 식 (10)에서 보인 바와 같이 $Z(\rho_1)$ 와 $Z(\rho_2)$ 가 모두 변하게 된다. 예를 들어 일 $a=1\text{cm}$ 경우 $Z(\rho_1)=552$.

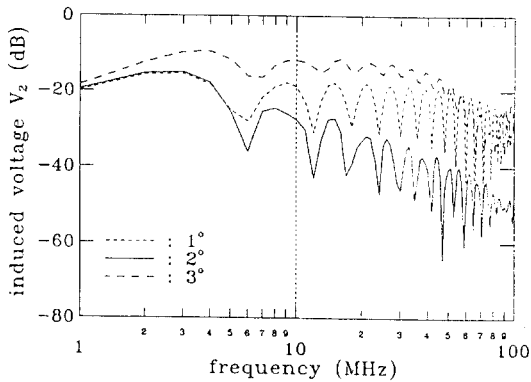


[그림 5] 도선반경에 따른 유기전압의 변화
[Fig. 5] Induced voltage according to the wire radius.
(a) V_1 .
(b) V_2 .

6Ω 와 $Z(\rho_2)=712.6\Omega$ 으로 증가한다. 그런데 Z_1 과 Z_2 가 일정한데 $Z(\rho_1)$ 와 $Z(\rho_2)$ 가 증가하면, $Z_1/Z(\rho_1)$ 과 $Z_2/Z(\rho_2)$ 가 모두 1보다 줄어들므로 [그림 4](a)로부터 V_1 이 증가하게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 E-편파된 평면파가 $\phi=30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 방향으로 입사시 도선 반경 a 에 대한 오른쪽 부하 Z_2 에 유기되는 전압 V_2 를 계산한 [그림 5](b)에서도 발견할 수 있다. 이 경우는 [그림 4](b)의 결과로부터 쉽게 알아낼 수 있다.



(a)



(b)

[그림 6] 벌어진 각도에 따른 유기전압의 변화
[Fig. 6] Induced voltage according to the intersection angle.

- (a) V_1 .
- (b) V_2 .

[그림 6](a)는 입사방향 $\phi=-30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 인 E-편파된 평면파가 입사시 두 도선의 경사각 θ_0 와 최단거리의 폭 b 를 기본 값으로 부터 변화시킬 경우 유기전압 V_1 에 미치는 영향을 계산한 결과이다. 이때 b 는 θ_0 가 변해도 두 도선과 양단 부하에 의해 둘러싸인 면적이 일정하도록 조정한다. 대체적으로 $\theta_0=2^\circ$ 일때 V_1 이 가장 낮으며 $\theta_0=1^\circ$ 또는 3° 일때는 유기전압이 늘어남을 볼 수 있다. 이러한 경향도 [그림 5](a)에서와 마찬가지로의 과정으로 설명된다. θ_0 가 변하면 b 가 변하므로, 양단의 위치 ρ_1 과 ρ_2 가 변한다. 따라서 식(10)에서 $Z(\rho_1)$ 와 $Z(\rho_2)$ 가 변함을 알 수 있다. 이는 [그림 4](a)에서 두 변수 $Z_1/Z(\rho_1)$ 과 $Z_2/Z(\rho_2)$ 가 각각 1에서 부터 벗어나기 때문에 V_1 이 증가하게 됨을 알 수 있다. [그림 6](b)는 [그림 6](a)의 경우에서 입사방향을 ϕ 를 -30° 에서 30° 로 바꾸었을때 오른쪽 부하 Z_2 에 유기되는 전압 V_2 의 주파수 반응 특성을 보인 것으로, 두 도선의 경사각 θ_0 를 기준값인 2° 에서 늘이거나 줄이면 V_2 가 커지는 현상을 볼 수 있다.

앞에서 보여 준 [그림 5]와 [그림 6]은 식 (1), (2)를 이용하여 구한 것인데, 이미 설명한 바와 같이 전송선의 구조변수들인 도선반경 a , 경사각 θ_0 , 도선간의 폭 b 가 변할 때 이를 단말부하인 Z_1 과 Z_2 의 변화로 바꾸어서 보면 [그림 4]의 결과로부터 V_1 과 V_2 를 쉽게 구할 수 있다. 즉 전송선 구조변수가 변하여 $Z(\rho_1)$ 과 $Z(\rho_2)$ 가 바뀐 것을 역으로 Z_1 과 Z_2 를 조정하여 $Z_1/Z(\rho_1)$ 과 $Z_2/Z(\rho_2)$ 가 각각 같도록 한다면, 전송선 구조변수들의 영향은 마치 부하 임피던스의 영향으로 바꾸어 볼 수 있다. <표 1>에서 (a)는 도선반경이나 경사각이 기준 값에서 변할 때 전송선 양단인 $\rho=\rho_1$ 과 $\rho=\rho_2$ 에서의 특성 임피던스 값을 보여준다. <표 1>의 (b)는 $Z(\rho_1)$ 과 $Z(\rho_2)$ 를 기본 값과 같게 두는 대신, 구조변수가 바뀌었을 때의 $Z_1/Z(\rho_1)$ 과 $Z_2/Z(\rho_2)$ 가 되도록 하는 Z_1 과 Z_2 의 값을 보였다.

본 논문에서는 [그림 5]와 [그림 6]의 결과를 식 (1), (2)에서 직접 계산하는 대신 [그림 4]로부터 구하는 방안을 제시한다. E-편파된 평면파가 $\phi=$

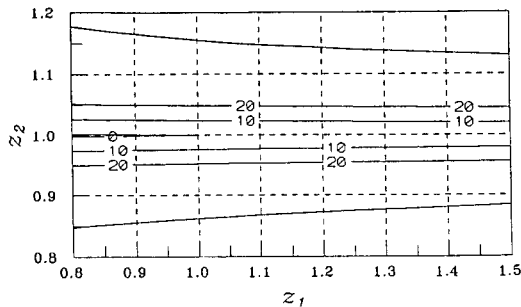
〈표 1〉 유기전압을 구하기 위한 변수
(a) 특성 임피던스

$\theta_0=2^\circ$	$a=1\text{cm}$	$a=2\text{cm}$	$a=3\text{cm}$
$Z(\rho_1)$	553	469	421
$Z(\rho_2)$	713	629	581
$a=2\text{cm}$	$\theta_0=1^\circ$	$\theta_0=2^\circ$	$\theta_0=3^\circ$
$Z(\rho_1)$	532	469	326
$Z(\rho_2)$	604	629	649

(b) 등가 부하 임피던스

$\theta_0=2^\circ$	$a=1\text{cm}$	$a=2\text{cm}$	$a=3\text{cm}$
Z_1	398	469	522
Z_2	555	629	681
$a=2\text{cm}$	$\theta_0=1^\circ$	$\theta_0=2^\circ$	$\theta_0=3^\circ$
Z_1	413	469	522
Z_2	655	629	681

-30°, $\theta=30^\circ$ 방향으로 입사시 구조변수 a 나 θ_0 가 변할 때 〈표 1〉(a)의 자료를 쓰는 대신, 등가적으로 부하 임피던스 변화를 나타낸 〈표 1〉(b)의 자료를 [그림 7]과 같은 V_1 의 부하 임피던스 변화 특성 도표에 나타냄으로써 구조변수가 변할 때 V_1 의 값을 [그림 7]로부터 직접 읽어낼 수 있다.



〔그림 7〕 입사파의 입사각도가 $\phi=-30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 일 경우 정규화된 임피던스에 따른 유기전압 도표
〔Fig. 7〕 Induced voltage chart according to the normalized impedance for incident angle with $\phi=-30^\circ$, $\theta=30^\circ$.

〈표 2〉 입사각도가 $\phi=-30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 일 경우 계산식으로 구한 유기전압과 도표로 구한 유기전압의 비교

(a) 도선 반경의 변화

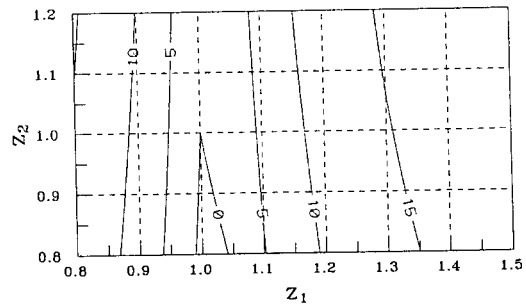
Wire radius	Exact		Chart	
	V_1	V_2	V_1	V_2
1cm	-20.6	4.8	-20.9	4.8
2cm	-48.8	5.4	-48.8	5.4
3cm	-23.4	5.7	-23.3	5.7

(b) 벌어진 각도의 변화

Angle	Exact		Chart	
	V_1	V_2	V_1	V_2
1°	-30.6	4.9	-30.2	5.2
2°	-48.8	5.4	-48.8	5.4
3°	-32.6	6.0	-31.8	5.6

도선 반경이 2cm에서 1cm로 줄거나 3cm로 늘 경우 식 (1), (2)로부터 직접 계산된 V_1 과 V_2 의 값들과 [그림 7]에서 근사적으로 뽑아낸 값들이 거의 같음을 표 2(a)로부터 알 수 있다.

〈표 2〉(b)는 경사각 θ_0 가 바뀔때의 V_1 과 V_2 를 앞에서 언급한 두 가지 방법으로 계산한 값으로 [그



〔그림 8〕 입사파의 입사각도가 $\phi=30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 일 경우 정규화된 임피던스에 따른 유기전압 도표
〔Fig. 8〕 Induced voltage chart according to the normalized impedance for incident angle with $\phi=30^\circ$, $\theta=30^\circ$.

〈표 3〉 입사각도가 $\phi=30^\circ, \theta=30^\circ$ 일 경우 계산식으로 구한 유기전압과 도표로 구한 유기전압의 비교
(a) 도선 반경의 변화

Wire radius	Exact		Chart	
	V_1	V_2	V_1	V_2
1cm	3.5	-16.1	3.5	-16.1
2cm	4.1	-27.5	4.1	-27.5
3cm	4.5	-20.2	4.5	-20.2

(b) 벌어진 각도의 변화

Angle	Exact		Chart	
	V_1	V_2	V_1	V_2
1°	3.6	-18.8	3.5	-17.2
2°	4.1	-27.5	4.1	-27.5
3°	4.7	-11.9	5.5	-10.9

림 7)의 도표로 부터 추출한 V_1 과 V_2 는 원래의 값들과 매우 유사함을 알 수 있다.

[그림 8]은 E-편파된 평면파가 $\phi=30^\circ, \theta=30^\circ$ 방향으로 입사시 전송선의 도선반경 a 와 경사각 θ_0 가 기준값에서 변할 때 양단부하의 유기전압 V_2 를 표시한 것이며, 이때의 V_2 와 정확한 방법으로 계산된 V_2 를 비교한 결과는 〈표 3〉에서 보였다.

〈표 2〉의 경우와 마찬가지로 〈표 3〉에서도 구조변수의 영향을 부하 임피던스 변화로 바꾼 뒤 [그림 8]과 같은 도표(chart)로 부터 근사적으로 구한 V_1 과 V_2 가 원래의 값들과 매우 근접해 있음을 보여 준다.

IV. 결 론

각진 두 도선으로 된 비균일 전송선에 임의의 방향으로 평면파가 입사시 양단 부하에 유기되는 전압을 입사파의 주파수, 편파, 입사방향 및 전송선의 반경, 경사각, 도선간의 폭, 부하 임피던스에 대해 살펴 보았다. 일반적으로 전송선 양단은 임피던스 정합시키는데, 이때 E-편파된 평면파가 방위각

과 고도각이 같은 방향으로 전송선에 입사시 유기전압이 최소가 됨을 알 수 있었다. 또한 양단부하가 전송선과 임피던스 정합이 안될 수록 양단 유기전압이 증가하는데, 반대편 쪽 부하 임피던스에 따라 유기전압이 크게 변함을 알 수 있었다. 특히 전송선의 구조변수들인 도선 반경, 도선간의 경사각 등이 변할 경우 유기전압은 부하의 임피던스가 변하는 문제로 등가화 하여 구할 수 있음을 확인하였다. 또한 모의계산 결과로부터 발견한 흥미로운 사실은 외부전자파의 입사방향에 대해 특정한 위치로 전송선을 배치할 수 있다면 특별한 차폐수단을 가하지 않더라도 외부 전자파에 의한 전자기기의 전자파 간섭을 강하게 억제할 수 있다는 점이다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Kami and R. Sato, "Circuit-concept approach to externally excited transmission lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-27, pp. 177-183, Nov. 1988.
- [2] 홍성용, 김세윤, 나정웅, "비균일 전송선의 전자기적 결합, I: 원통형 전송선 방정식의 해석," *전자공학회 논문지*, vol. 29-A, no. 12, pp. 1132-1139, 1992.
- [3] S. Y. Hong, J. W. Ra, and S. Y. Kim, "Electromagnetic coupling to the nonuniform transmission line consisting of two angled wires", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 5, no. 14, pp. 736-739, 1992.
- [4] 홍성용, 김세윤, 나정웅, "비균일 전송선의 전자기적 결합, II: 원통형 TEM 모드 해의 수정," *전자공학회 논문지*, vol. 31-A, no. 2, 1993.
- [5] 홍성용, 하태숙, 김세윤, 나정웅, 강찬구, "접지면과 각을 이루는 도선의 전자기적 결합에 관한 측정", *전자공학회 논문지*, vol. 29-A, no. 12, pp. 1140-1146, 1992.

- [6] 홍성용, 각진 두 도선으로 된 전송선의 해석과 전자파 유도현상에의 응용, KAIST 박사학위 논문, 1994.
- [7] C. D Taylor, R. S. Satterwhite, and C. W. Harrison, Jr., "The response of a ter-

minated two-wire transmission line excited by an electromagnetic field", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-13, pp. 987-989, Nov. 1965.

홍 성 용



1985년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업

1988년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사)

1994년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사)

1996년 현재 : 한국쌍신전기(주) 연구소장

나 정 응

한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 교수

김 세 윤

한국과학기술연구원(KIST) 정보전자연구부 책임연구원