

## 전력선로 근방의 전자파 전자계 계산

(Calculation of the Electromagnetic Wave Fields Near Electric Power Lines)

이영식 · 박정은 · 강대하\*

(Young-Sik Lee · Jung-Eun Park · Dae-Ha Kang)

### 요 약

본 연구에서는 전력선 근방의 전자파 전자계를 쌍극자 안테나 이론에 의해 도출하였으며 수직 전선배열의 3상전력선 근방의 전자계를 정식화함으로써 전자계 계산을 쉽게 할 수 있도록 하였다. 이 계산식들은 송전선로 및 배전선로의 설계시 전자파 전자계의 검토에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 이와 같이 정식화한 각 전자계 성분요소의 식들을 송전선로 모델에 적용하였으며 매텔랩 프로그램을 작성하여 계산하였다. 이 계산 결과를 요약하면 다음과 같다. 전자계의  $x$ 성분  $B_x$  및  $E_x$ 는 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 나타내며 대지내의 반사파에 의한 영향만을 반영한다. 수평거리 변화에 대하여  $E_y$ 와  $B_z$ 의 윤곽이 같으며,  $B_y$ 와  $E_z$ 의 윤곽도 같다. 이와 같은 사실은 전자파 전계와 자계의 결합요소가 서로 직각으로서  $x \rightarrow E_y \rightarrow B_z$ 와 같은 우수계의 전파방향을 갖고 있음을 의미한다. 합성전계  $E$ 는  $E_y$ 요소가 지배적이며 합성자계  $B$ 는  $B_z$ 요소가 지배적이다.

### Abstract

In this study electromagnetic fields near electric power lines were derived by dipole antenna theory and electromagnetic fields near 3 phase power lines with vertical configurations were formulated and could be computed easily using these formula. It seems that those formula could be applicable to the consideration of electromagnetic fields during the design of transmission and distribution lines. Those formulated equations on elements of electromagnetic fields were applied to the model of a transmission-line system and were calculated by Matlab programs. The calculation results are follows. For variation of horizontal distance profiles of  $E_y$  and  $B_z$  are same each other, and also those of  $B_y$  and  $E_z$  are same each other. This means that coupled elements of  $E$  and  $B$  are perpendicular each other and have the propagation direction of the right-hand system such as  $x \rightarrow E_y \rightarrow B_z$ . Resultant electric field  $E$  is dominated by the element  $E_y$  and resultant magnetic field  $B$  is dominated by the element  $B_z$ .

Key Words : Electromagnetic Fields, Electric Power Lines, Dipole Antenna Theory, Electric Field, Magnetic Field, Right-Hand System

\* 주저자 : 부경대학교 전기제어공학부 교수

Tel : 051-629-6311, Fax : 051-629-6305, E-mail : daeha@pknu.ac.kr

접수일자 : 2008년 3월 27일, 1차심사 : 2008년 4월 2일, 2차심사 : 2008년 5월 19일, 심사완료 : 2008년 5월 27일

## 1. 서 론

1970년대 말 전력설비에 의해 발생하는 전계 및 자계가 인체에 영향을 줄 수 있다는 것이 최초로 지적된 이래[1] 이 주제에 대한 연구가 여러 나라에서 폭넓게 진행되어 왔다. 최근에는 초고압 및 대전류 전력설비와 더불어 전력선로에 둘러 싸여 있는 전자 환경이 생체에 미치는 효과가 점차 중요한 과제로 대두되고 있다[2-7]. 극저주파(ELF: extremely low frequency) 전계 및 자계의 파장은 생체의 크기보다 훨씬 크므로 전계 및 자계를 각각 독립적으로 취급할 수 있다. 그러나 생체가 전계 및 자계에 동시에 노출될 때 생체내부의 유도전류는 전계 및 자계에 의한 유도전류를 결합하여 조사할 필요가 있다. 특히 인체가 고전압 전력선으로부터 각기 다른 거리에 위치해 있을 때 인체내부의 전계와 자계 및 이와 관련된 전류의 방향과 크기는 중요한 해결과제로 된다. 한편 낮은 값의 자속밀도에서도 비디오 디스플레이(컴퓨터 모니터 등)와 같은 설비에 저주파 자계가 교란을 일으킨다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 특히 CAD워크스테이션의 대형 디스플레이 장치는 이러한 국면에 매우 민감하다. 또한 저수준의 자계라 할지라도 감도가 좋은 측정장비(예 전자현미경)나 의료용 장비에 유도장해 등의 영향을 줄 수도 있다. 이상과 같이 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 사회적 관심의 고조와 전자파에 의한 정밀기기 등의 유도장해 문제의 대두로 전력선에 의한 전자파 전자계 계산문제가 현실화되어 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 먼저 실제의 송전선로 및 배전선로 등의 전선배열에 대한 전자파 전자계를 어떻게 계산하는가가 선결과제이다. 이 문제가 해결되면 송전선로 및 배전선로의 설계초기부터 전자파 저감을 위한 전선배치 및 이격거리 등을 고려할 수 있을 것이다. 이 문제를 해결하기 위한 첫 단계는 대지위에 가설된 전력선 근방의 모든 점에 대한 6개의 전자계 성분을 정확하게 산정하는 일이다. 이러한 전력주파수의 전자계에 대해서는 수많은 문헌에서 분석된 바 있다[8-16]. 그러나 국내에서는 전력선하의 전자계에 대한 심도 있는 연구가 아직 미미한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 이러한 전력선에

의한 전자파 전자계를 이론적으로 해석하여 정확하게 계산할 수 있는 식을 도출하는 것이다.

본 연구에서는 전력선의 전류에 의해서 발생하는 전자파 전자계 성분에 대한 식을 쌍극자 안테나 이론을 이용하여 유도하였으며, 수직 전선배열의 전력선로에 적용하여 전력선 근방의 전자파 전자계를 계산하는 식을 도출함으로써 실제 전력선에 용이하게 적용할 수 있도록 정식화하였다. 이와 같이 정식화된 식은 송전선로 및 배전선로의 설계 시 전자파 전자계의 검토에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 쌍극자 안테나 이론에 의한 전력선하의 전자파 전자계 계산

### 2.1 전력선하의 전자파 전자계

그림 2.1과 같이 평면대지 상의 높이  $h_0$ 에 전력선이 가설되어 있는 경우로서 전선의 방향을  $x$ 방향으로 한 직각 좌표계를 고려하여 지상의 임의점  $(x, y, z)$ 에서의 전자파 전자계를 구해보기로 한다.

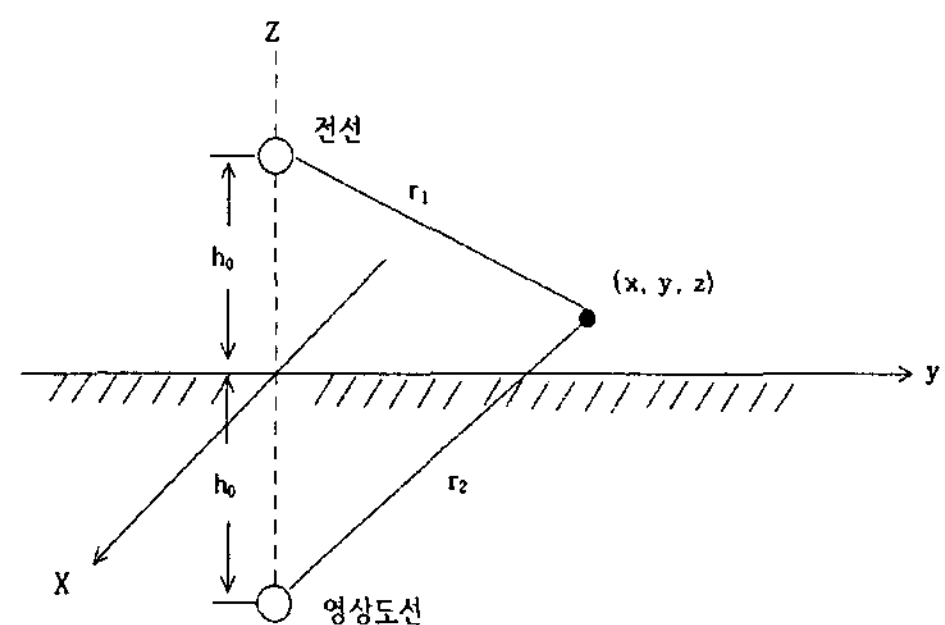


그림 2.1 직각좌표계  
Fig. 2.1 Rectangular coordinates

전력선을 무한장 직선도체라 하고 전류는 식 (2.1)의 정현파 전류를 가정하며 대지의 깊이  $-h_0$ 에 흐르는 전류영상을 고려하기로 한다.

$$i(t) = I e^{j\omega t} \quad (2.1)$$

이 전력선을 쌍극자 안테나에 대비시키면 미소길이  $dx'$ 에 대한 쌍극자 능률은  $i(t) \cdot dx'$ 로 주어지며

단위길이에 대한 벡터포텐셜은 식 (2.2)로 쓸 수 있다.

$$A = \frac{I}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_1} e^{j(\omega t - k_0 r_1)} - \frac{1}{r_2} e^{j(\omega t - k_0 r_2)} \right] \cdot \hat{x} \quad (2.2)$$

$$\text{단, } r_1 = [x^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$r_2 = [x^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

여기서  $k_0$ 는 공기의 파정수이며  $\hat{x}$ 는  $x$ 방향의 단위벡터이다. 따라서 자계  $H$  및 자속밀도  $B$ 는 식 (2.3) 및 (2.4)로 주어진다.

$$\begin{aligned} H &= \nabla \times A \\ &= \frac{I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ \left[ e^{-jk_0 r_1} \left( -\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) (z - h_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - e^{-jk_0 r_2} \left( -\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3} \right) (z + h_0) \right] \hat{y} \right. \\ &\quad \left. + \left[ e^{-jk_0 r_1} \left( \frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) - e^{-jk_0 r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3} \right) \right] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} \\ &= H_y \hat{y} + H_z \hat{z} \quad (2.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ \left[ e^{-jk_0 r_1} \left( -\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) (z - h_0) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - e^{-jk_0 r_2} \left( -\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3} \right) (z + h_0) \right] \hat{y} \right. \\ &\quad \left. + \left[ e^{-jk_0 r_1} \left( \frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) - e^{-jk_0 r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3} \right) \right] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} \\ &= B_y \hat{y} + B_z \hat{z} \quad (2.4) \end{aligned}$$

여기서  $\hat{y}$  및  $\hat{z}$ 는 각각  $y$  방향 및  $z$  방향의 단위 벡터이다.

한편 전계와 자계의 관계는 맥스웰 필드 방정식으로 주어지며 정현파의 경우는 식 (2.5)로 된다.

$$j\omega \epsilon_0 E = \nabla \times H \quad (2.5)$$

따라서 공기의 투자율  $\mu_0$  및 유전율  $\epsilon_0$ 에 대하여  $\frac{\omega \mu_0}{k_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ 를 고려하고 전계  $E$ 의 각 성분  $E_x$ ,  $E_y$  및  $E_z$ 를 구하면 식 (2.6), (2.7) 및 (2.8)을

얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{\omega \mu_0 I}{4\pi k_0} e^{j\omega t} \\ &\cdot \left\{ e^{-jk_0 r_1} \left[ -\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} + \frac{j}{r_1^3 k_0} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x^2}{r_1^2} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - e^{-jk_0 r_2} \left[ -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x^2}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \right\} \quad (2.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{\omega \mu_0 I}{4\pi k_0} e^{j\omega t} \\ &\left\{ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{xy}{r_1^2} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\ &\quad \left. - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \quad (2.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{\omega \mu_0 I}{4\pi k_0} e^{j\omega t} \\ &\left\{ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{zx}{r_1^2} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\ &\quad \left. - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{zx}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \quad (2.8) \end{aligned}$$

한편 대지내부에서의 반사파도 고려해야 하므로 전자파의 자속밀도 및 전계에 반사파[16]를 고려하여 페이저 (Phasor)로서 취급하면 식 (2.9)~(2.14)가 구해진다. 이들 식에서의 반사파에 대한 조건은

$$\left| \frac{k_0}{k_1} \right| \ll 1 \text{이다.}$$

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} e^{-jk_0 r_2} \left[ \frac{xy}{r_2^2} \cdot \left( -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{k_0}{k_1} \cdot \frac{xy(z+h_0)}{r_2^3} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right] \quad (2.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_y &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{z-h_0}{r_1} \left( -\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{z+h_0}{r_2} \left( -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left[ \left( \frac{z+h_0}{r_2} \right)^2 - \left( \frac{x}{r_2} \right)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \left( -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \end{aligned}$$

전력선로 근방의 전자파 전자계 계산

$$-\frac{k_0}{k_1} \left\{ \frac{z+h_0}{r_2} \left( -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{2}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} + \frac{3}{r_2^4 k_0^2} \right) + \left( \frac{y}{r_2} \right)^2 \cdot \frac{z+h_0}{r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right\} \quad (2.10)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{y}{r_1} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{1}{r_1} \right) - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{y}{r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{1}{r_2} \right) + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left[ \frac{z+h_0}{r_2} \cdot \frac{y}{r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) + \frac{k_0}{k_1} \left\{ \frac{y}{r_2} \left( -\frac{jk_0}{r_2} + \frac{5}{r_2^2} + \frac{j12}{r_2^3 k_0} + \frac{12}{r_2^4 k_0^2} \right) + \left\langle \left( \frac{y}{r_2} \right)^2 + \left( \frac{x}{r_2} \right)^2 \right\rangle \frac{y}{r_2} \cdot \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right\} \right] \quad (2.11)$$

$$\dot{E}_x = \frac{\omega \mu_0 \dot{I}}{4\pi k_0} \left[ e^{-jk_0 r_1} \left\{ -\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} + \frac{j}{r_1^3 k_0} + \frac{x^2}{r_1} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right\} - e^{-jk_0 r_2} \left\{ -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} + \frac{x^2}{r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left\{ \frac{z+h_0}{r_2} \cdot \left( -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} \right) - \frac{k_0}{k_1} \left[ -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} + \left( \frac{y}{r_2} \right)^2 \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \right\} \right] \quad (2.12)$$

$$\dot{E}_y = \frac{\omega \mu_0 \dot{I}}{4\pi k_0} \left[ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{xy}{r_1^2} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0^2}{k_1^2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \quad (2.13)$$

$$\dot{E}_z = \frac{\omega \mu_0 \dot{I}}{4\pi k_0} \left[ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{x(z-h_0)}{r_1^2} \left( \frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{x(z+h_0)}{r_2^2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \cdot \frac{x}{r_2} \left( \frac{jk_0}{r_2} + \frac{1}{r_2^2} \right) \right] \quad (2.14)$$

여기서  $k_1$ 은 대지의 파정수를 나타낸다.

2.2 전자파 전자계의 근사식

전력선이  $i = I_0 e^{-jk_0 x}$ 의 전송파를 유지할 때 전력선에 의한 자속밀도 [B] 및 전계 [E]는  $x$ 대신에  $x-x'$ 를 대입한 식 (2.9)~(2.14)로부터 구할 수 있으며  $x=0$ 인 평면에서의 자속밀도 및 전계는 식 (2.15) 및 (2.16)에 의해 구해진다.

$$[B_i]_{x=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{B}_i e^{-jk_0 x'} dx' \quad (2.15)$$

$$[E_i]_{x=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}_i e^{-jk_0 x'} dx' \quad (2.16)$$

단  $i = x, y, z$

이상의 식에서 공기 및 대지의 파정수  $k_0$  및  $k_1$ 은 일반적으로 다음식으로 주어진다[16].

$$k_0 = \frac{\omega}{C}$$

$$k_1^2 \approx E(j\omega \mu_0 \sigma_1)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

단  $C$ : 광속도

주파수 60[Hz]인 전력선의 낮은 주파수, 대지의 도전율  $\sigma_1$  및 비유전율  $\epsilon_{1r}$ 에 대하여  $\sigma_1/\omega\epsilon_{1r}\epsilon_0 \gg 1$  이므로  $k_1$ 은 식 (2.17)의 형태로 주어진다. 주파수 60[Hz]에서  $k_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 이며,  $\sigma_1 = 0.04[S/m]$ 인 대지에 대하여  $k_1 = 4.35 \times 10^{-3} e^{j\frac{\pi}{4}}$ 로서  $\left| \frac{k_0}{k_1} \right| \ll 1$ 이다. 따라서 식

(2.9)~(2.14)로 구성되어 있는 식 (2.15) 및 (2.16)은 공기와 대지로 이루어져 있는 계의 완전 전자계라 할 수 있다. 전력선으로부터 관측점까지의 거리가 먼 경우에는 전자파 전자계는 0에 가까울 만큼 매우 작다. 일반적으로  $k_0 r_1 \ll 1$  및  $k_0 r_2 \ll 1$  이므로, 전력선으로부터의 거리가 가까운 관측점에서는  $\frac{1}{r_1^3}$

및  $\frac{1}{r_2^3}$ 의 항이 지배적이다. 식 (2.15) 및 (2.16)의 적분산정에 있어서 지배적인 항만을 고려하는 해석

적 방법을 이용 하여  $[B_x]_{x=0}$  및  $[E_x]_{x=0}$  을 구하면 식 (2.18)~(2.23)이 얻어진다.

$$[B_x]_{x=0} = \frac{-j\mu_0 k_0 \dot{I}}{2\pi k_1^2} \cdot \frac{y(z+h_0)}{[y^2+(z+h_0)^2]^2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{15 \tan \theta \cdot d\theta}{(1+\tan^2 \theta)^{\frac{5}{2}}}$$

$$= \frac{-j2\mu_0 k_0 \dot{I}}{\pi k_1^2} \cdot \frac{y(z+h_0)}{[y^2+(z+h_0)^2]^2} \quad (2.18)$$

$$[B_y]_{x=0} = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} \left[ -\frac{z-h_0}{y^2+(z-h_0)^2} + \frac{z+h_0}{y^2+(z+h_0)^2} \right. \\ \left. + \frac{4(z+d)(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2+(z+h_0)^2]^2} \left( 1 - \frac{2[(z+h_0)^2-y^2]}{y^2+(z+h_0)^2} \right) \right] \quad (2.19)$$

여기서 인수  $(k_0 h_0)$ 는 보정계수이다.

$$[B_z]_{x=0} = \frac{\mu_0 \dot{I}}{2\pi} y \left[ \frac{1}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{1}{y^2+(z+h_0)^2} \right. \\ \left. + \frac{4(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2+(z+h_0)^2]^2} \left( 1 + \frac{2[(z+h_0)^2-y^2]}{y^2+(z+h_0)^2} \right) \right] \quad (2.20)$$

$$[E_x]_{x=0} = \frac{-j\omega\mu_0 \dot{I}(k_0 h_0)}{\pi k_1^2} \left[ \frac{(z+h_0)^2-y^2}{\{y^2+(z+h_0)^2\}^2} \right] \quad (2.21)$$

$$[E_y]_{x=0} = \frac{\omega\mu_0 \dot{I}}{2\pi k_0} \left[ \frac{y}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{y(1-\frac{2k_0^2}{k_1^2})}{y^2+(z+h_0)^2} \right] \quad (2.22)$$

$$[E_z]_{x=0} = \frac{\omega\mu_0 \dot{I}}{2\pi k_0} \left[ \frac{z-h_0}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{z+h_0}{y^2+(z+h_0)^2} \right] \quad (2.23)$$

### 3. 3상 전력선 근방의 전자계

#### 3.1 전자계의 정식화

3상 전력선 근방의 전자파 전자계를 계산하기 위하여 수직전선 배열에 대한 전자계를 정식화하기로 한다. 전력선로의 전류를 평행 3상 정현파 전류로 가정하면 각 상의 전류는 식 (3.1)~(3.3)으로 주어진다.

$$\dot{I}_a = I \quad (3.1)$$

$$\dot{I}_b = I e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_c = I e^{-j\frac{4}{3}\pi} \quad (3.3)$$

그림 3.1는 3상 2회선 수직전선배열의 전력선을 나타낸 것이다.

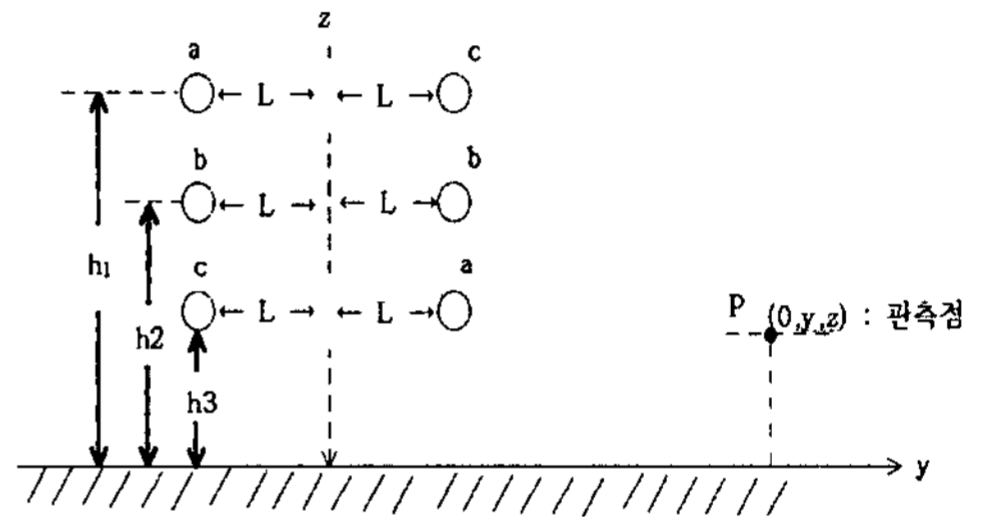


그림 3.1. 3상 2회선 수직 전선배열  
Fig. 3.1. Vertical configuration of 3 wires in 3 phase 2 circuits power line

이 수직전선배열의 경우, 전자파 전자계는 식 (3.4)~(3.9)로 주어진다.

$$[B_x]_{x=0} = -\frac{2\mu_0 k_0 I}{\pi k_1^2} \left[ \frac{(y+L)(z+h_1)}{[(y+L)^2+(z+h_1)^2]^2} + \frac{(y-L)(z+h_3)}{[(y-L)^2+(z+h_3)^2]^2} \right. \\ \left. + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ \frac{(y+L)(z+h_2)}{[(y+L)^2+(z+h_2)^2]^2} + \frac{(y-L)(z+h_2)}{[(y-L)^2+(z+h_2)^2]^2} \right\} \right. \\ \left. + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ \frac{(y+L)(z+h_3)}{[(y+L)^2+(z+h_3)^2]^2} + \frac{(y-L)(z+h_1)}{[(y-L)^2+(z+h_1)^2]^2} \right\} \right] \\ = B_{xx} + jB_{\xi} \quad (3.4)$$

$$[B_y]_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ -\frac{z-h_1}{(y+L)^2+(z-h_1)^2} - \frac{z-h_3}{(y-L)^2+(z-h_3)^2} \right. \\ \left. + \frac{z+h_1}{(y+L)^2+(z+h_1)^2} + \frac{z+h_3}{(y-L)^2+(z+h_3)^2} \right. \\ \left. - \frac{4(z+h_1)(k_0 h_1)}{k_1^2 [(y+L)^2+(z+h_1)^2]^2} \left( 1 - \frac{2[(z+h_1)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_1)^2} \right) \right. \\ \left. - \frac{4(z+h_3)(k_0 h_3)}{k_1^2 [(y-L)^2+(z+h_3)^2]^2} \left( 1 - \frac{2[(z+h_3)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_3)^2} \right) \right. \\ \left. + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ -\frac{z-h_2}{(y+L)^2+(z-h_2)^2} - \frac{z-h_2}{(y-L)^2+(z-h_2)^2} \right\} \right]$$

전력선로 근방의 전자파 전자기 계산

$$\begin{aligned}
 & + \frac{z+h_2}{(y+L)^2+(z+h_2)^2} + \frac{z+h_2}{(y-L)^2+(z+h_2)^2} \\
 & - \frac{4(z+h_2)(k_0h_2)}{k_1^2[(y+L)^2+(z+h_2)^2]^2} \left(1 - \frac{2[(z+h_2)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_2)^2}\right) \\
 & - \frac{4(z+h_2)(k_0h_2)}{k_1^2[(y-L)^2+(z+h_2)^2]^2} \left(1 - \frac{2[(z+h_2)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_2)^2}\right) \Big\} \\
 & + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ -\frac{z-h_3}{(y+L)^2+(z-h_3)^2} - \frac{z-h_1}{(y-L)^2+(z-h_1)^2} \right. \\
 & + \frac{z+h_3}{(y+L)^2+(z+h_3)^2} + \frac{z+h_1}{(y-L)^2+(z+h_1)^2} \\
 & - \frac{4(z+h_3)(k_0h_3)}{k_1^2[(y+L)^2+(z+h_3)^2]^2} \left(1 - \frac{2[(z+h_3)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_3)^2}\right) \\
 & \left. - \frac{4(z+h_1)(k_0h_1)}{k_1^2[(y-L)^2+(z+h_1)^2]^2} \left(1 - \frac{2[(z+h_1)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_1)^2}\right) \right\} \\
 & = B_{yr} + jB_{yi} \tag{35}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [B_z]_{x=0} &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_1)^2} + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_3)^2} \right. \\
 & - \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_1)^2} - \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_3)^2} \\
 & - \frac{4(k_0h_1)}{k_1^2} \left( \frac{y+L}{[(y+L)^2+(z+h_1)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_1)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_1)^2}\right) \right) \\
 & - \frac{4(k_0h_3)}{k_1^2} \left( \frac{y-L}{[(y-L)^2+(z+h_3)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_3)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_3)^2}\right) \right) \\
 & + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_2)^2} + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_2)^2} \right. \\
 & - \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_2)^2} - \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_2)^2} \\
 & - \frac{4(k_0h_2)}{k_1^2} \left( \frac{y+L}{[(y+L)^2+(z+h_2)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_2)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_2)^2}\right) \right) \\
 & \left. - \frac{4(k_0h_2)}{k_1^2} \left( \frac{y-L}{[(y-L)^2+(z+h_2)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_2)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_2)^2}\right) \right) \right\} \\
 & + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_3)^2} + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_1)^2} \right. \\
 & - \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_3)^2} - \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_1)^2} \\
 & - \frac{4(k_0h_3)}{k_1^2} \left( \frac{y+L}{[(y+L)^2+(z+h_3)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_3)^2-(y+L)^2]}{(y+L)^2+(z+h_3)^2}\right) \right) \\
 & \left. - \frac{4(k_0h_1)}{k_1^2} \left( \frac{y-L}{[(y-L)^2+(z+h_1)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z+h_1)^2-(y-L)^2]}{(y-L)^2+(z+h_1)^2}\right) \right) \right\} \\
 & = B_{zx} + jB_{zi} \tag{36}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [E_x]_{x=0} &= -\frac{\omega\mu_0 I}{\pi k_1^2} \left[ (k_0h_1) \frac{(z+h_1)^2-(y+L)^2}{[(y+L)^2+(z+h_1)^2]^2} \right. \\
 & + (k_0h_3) \frac{(z+h_3)^2-(y-L)^2}{[(y-L)^2+(z+h_3)^2]^2} \\
 & + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ (k_0h_2) \cdot \frac{(z+h_2)^2-(y+L)^2}{[(y+L)^2+(z+h_2)^2]^2} \right. \\
 & \left. + (k_0h_0) \frac{(z+h_2)^2-(y-L)^2}{[(y-L)^2+(z+h_2)^2]^2} \right\} \\
 & + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ (k_0h_3) \frac{(z+h_3)^2-(y+L)^2}{[(y+L)^2+(z+h_3)^2]^2} \right. \\
 & \left. + (k_0h_1) \frac{(z+h_1)^2-(y-L)^2}{[(y-L)^2+(z+h_1)^2]^2} \right\} \\
 & = E_{xr} + jE_{xi} \tag{37}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [E_y]_{x=0} &= \frac{\omega\mu_0 I}{2\pi k_0} \left[ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_1)^2} \right. \\
 & \left. - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_1)^2} \right. \\
 & + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_3)^2} - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_3)^2} \\
 & + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_2)^2} \right. \\
 & \left. - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_2)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_2)^2} - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_2)^2} \right\} \\
 & + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ \frac{y+L}{(y+L)^2+(z-h_3)^2} \right. \\
 & \left. - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y+L}{(y+L)^2+(z+h_3)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{y-L}{(y-L)^2+(z-h_1)^2} - (1+j\frac{2k_0^2}{k_1^2}) \frac{y-L}{(y-L)^2+(z+h_1)^2} \right\} \\
 & = E_{yr} + jE_{yi} \tag{38}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [E_z]_{x=0} &= \frac{\omega\mu_0 I}{2\pi k_0} \left[ \frac{z-h_1}{(y+L)^2+(z-h_1)^2} - \frac{z+h_1}{(y+L)^2+(z+h_1)^2} \right. \\
 & + \frac{z-h_3}{(y-L)^2+(z-h_3)^2} - \frac{z+h_3}{(y-L)^2+(z+h_3)^2} \\
 & + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\{ \frac{z-h_2}{(y+L)^2+(z-h_2)^2} - \frac{z+h_2}{(y+L)^2+(z+h_2)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{z-h_2}{(y-L)^2+(z-h_2)^2} - \frac{z+h_2}{(y-L)^2+(z+h_2)^2} \right\} \\
 & + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\{ \frac{z-h_3}{(y+L)^2+(z-h_3)^2} - \frac{z+h_3}{(y+L)^2+(z+h_3)^2} \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \left. \left. \frac{z-h_1}{(y-L)^2+(z-h_1)^2} - \frac{z+h_1}{(y-L)^2+(z+h_1)^2} \right\} \right\} \\ = E_{xr} + jE_{zi} \quad (3.9)$$

이상과 같은 전자파 전자계의  $B_x, B_y, B_z$  및  $E_x, E_y, E_z$  의 위상각을  $\theta_{Bx}, \theta_{By}, \theta_{Bz}$  및  $\theta_{Ex}, \theta_{Ey}, \theta_{Ez}$  라 하면 식 (3.10), (3.11) 및 (3.12), (3.13)으로 나타낼 수 있다.

$$B_p = (B_{pr}^2 + B_{pi}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

$$\theta_{Bp} = \tan^{-1} \frac{B_{pi}}{B_{pr}} \quad (3.11)$$

$$E_p = (E_{pr}^2 + E_{pi}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

$$\theta_{Ep} = \tan^{-1} \frac{E_{pi}}{E_{pr}} \quad (3.13)$$

단,  $p = x, y, z$

또, 전자계의 합성요소 및 그 위상각은 식 (3.14), (3.15) 및 (3.16), (3.17)이 된다.

$$B = \left[ \{ B_x^2 \cos(2\theta_{Bx}) + B_y^2 \cos(2\theta_{By}) + B_z^2 \cos(2\theta_{Bz}) \}^2 + \{ B_x^2 \sin(2\theta_{Bx}) + B_y^2 \sin(2\theta_{By}) + B_z^2 \sin(2\theta_{Bz}) \}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.14)$$

$$\theta_B = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B_x^2 \sin(2\theta_{Bx}) + B_y^2 \sin(2\theta_{By}) + B_z^2 \sin(2\theta_{Bz})}{B_x^2 \cos(2\theta_{Bx}) + B_y^2 \cos(2\theta_{By}) + B_z^2 \cos(2\theta_{Bz})} \quad (3.15)$$

$$E = \left[ \{ E_x^2 \cos(2\theta_{Ex}) + E_y^2 \cos(2\theta_{Ey}) + E_z^2 \cos(2\theta_{Ez}) \}^2 + \{ E_x^2 \sin(2\theta_{Ex}) + E_y^2 \sin(2\theta_{Ey}) + E_z^2 \sin(2\theta_{Ez}) \}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.16)$$

$$\theta_E = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{E_x^2 \sin(2\theta_{Ex}) + E_y^2 \sin(2\theta_{Ey}) + E_z^2 \sin(2\theta_{Ez})}{E_x^2 \cos(2\theta_{Ex}) + E_y^2 \cos(2\theta_{Ey}) + E_z^2 \cos(2\theta_{Ez})} \quad (3.17)$$

식 (3.11), (3.13) 및 (3.17)에서 알 수 있는 바와 같이 전자파 전자계의 각 요소 및 합성 요소는 위상각을 갖게 되며 이 위상각들은 합성요소의 크기에 영

향을 주게 된다. 또 이 위상각들은 관측점의 위치에 따라 다르다.

### 3.2 계산예

그림 3.2~그림 3.9는  $L=5.2[m]$ ,  $h_1=55.58[m]$ ,  $h_2=42.79[m]$ ,  $h_3=30[m]$ , 전류  $I=1000[A]$  인 수직 전선 배열 전력선의 전자파 전자계 성분을 나타낸 것이다. 전자계의 계산 프로그램은 매텔랩(버전 6.5)에 의해 직접 작성하였다. 전자계의  $B_x$  및  $E_x$  성분은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 쌍극자에 의한 벡터 포텐셜이 전선방향 즉  $x$  방향이므로 직접 전자계는 0이 되고 대지 내에서의 반사파의 영향만이 반영되기 때문이다. 또한 이  $B_x$  및  $E_x$  성분은 관측점이 대지로부터 멀어질수록 더욱 작아진다. 그림 3.3과 그림 3.7 및 그림 3.4와 그림 3.6에서 알 수 있는 바와 같이  $B_y$ 와  $E_z$ , 또  $E_y$ 와  $B_z$ 의 윤곽이 거의 같다. 이것은 전계와 자계의 결합형 요소가 서로 직각으로서  $x \rightarrow E_y \rightarrow B_z$ 와 같은 우수계의 전파 방향을 형성하고 전자파의 요소  $E_y$ 와  $B_z$ , 또  $E_z$ 와  $B_y$ 가 서로 결합되어 있어서 각각 대응하는 전계 및 자계의 윤곽이 같기 때문이라 할 수 있다. 이와 같은 경우 합성전계  $E$ 와 합성자속 밀도  $B$ 의 윤곽도 그림 3.2 및 그림 3.7에서 알 수 있는 바와 같이 거의 같다.

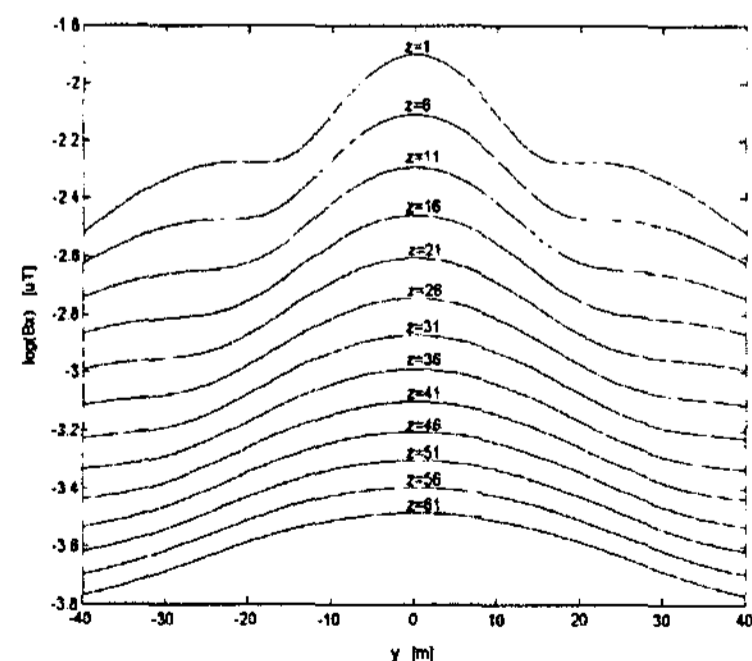


그림 3.2. 수직 전선배열 전력선 근방의  $B_x$   
Fig. 3.2.  $B_x$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)



전력선로 근방의 전자파 전자계 계산

또 합성자속 밀도  $B$  및 합성전계  $E$ 는 전선위치에 가까울수록 커지며, 그림 3.8~3.9에서 알 수 있는 바와 같이 전선위치에서 매우 큰 값을 나타낸다. 또 이 경우 합성자속밀도  $B$ 는  $B_z$ 요소가 지배적이며 합성전계  $E$ 는  $E_y$ 요소가 지배적이다.

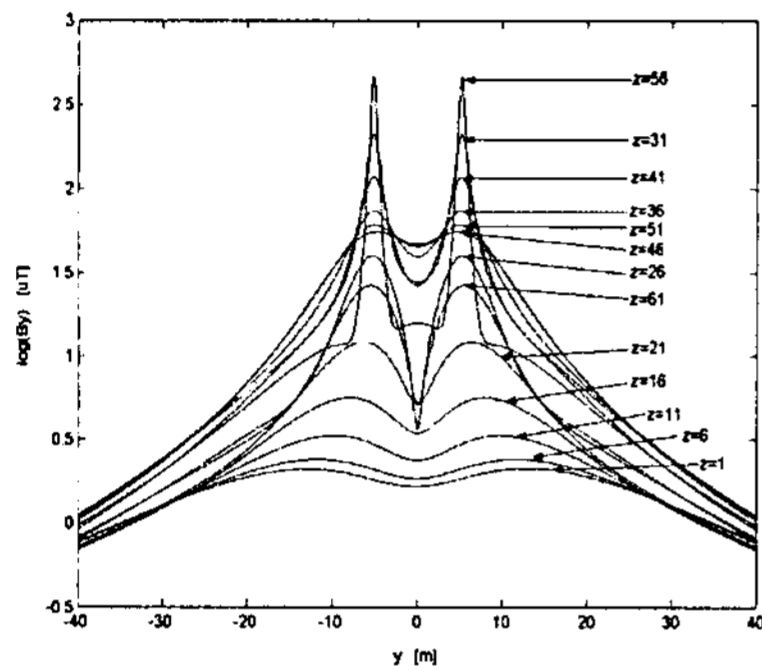


그림 3.3. 수직 전선 배열 전력선 근방의  $B_y$   
Fig. 3.3.  $B_y$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)

도체 방식의 송전선로에 적용하였으나 실제로는 345[kV] 송전선로는 4도체 방식, 765[kV] 송전선로는 6도체 방식을 채용하고 있으므로 이러한 다도체 방식에 대한 적용이 추후의 연구과제이다. 또한 여러 각도로 교차하고 있는 다선로 전력선의 경우에 있어도 적용이 가능하리라 생각된다.

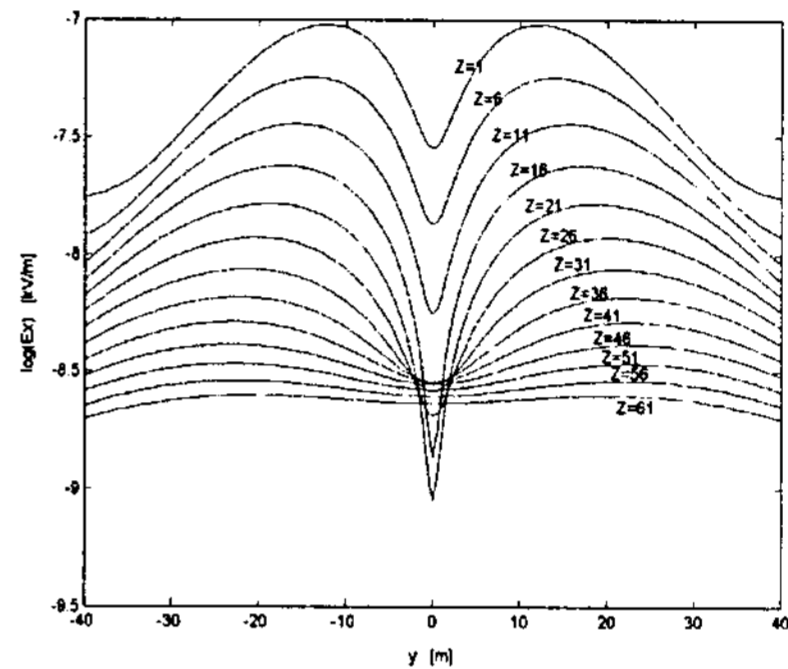


그림 3.5. 수직 전선배열 전력선 근방의  $E_x$   
Fig. 3.5.  $E_x$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)

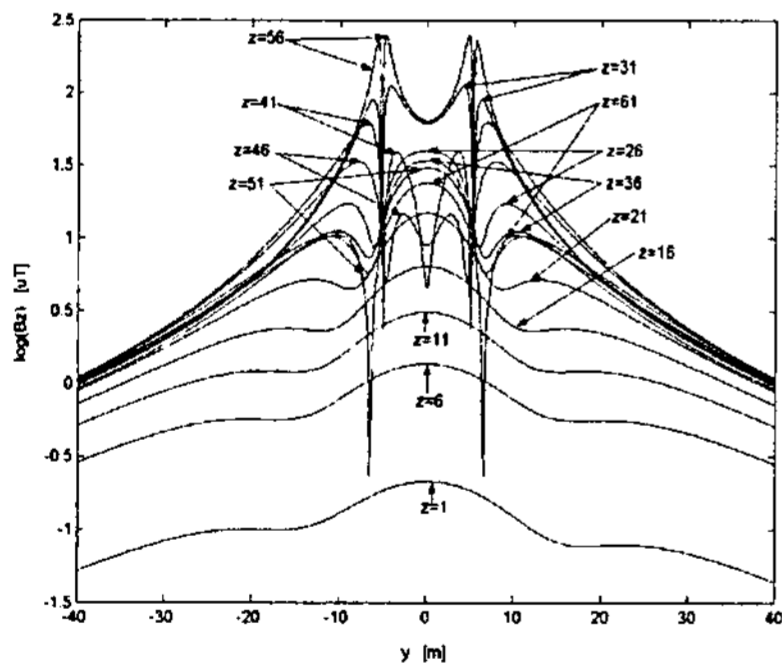


그림 3.4. 수직 전선배열 전력선 근방의  $B_z$   
Fig. 3.4.  $B_z$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)

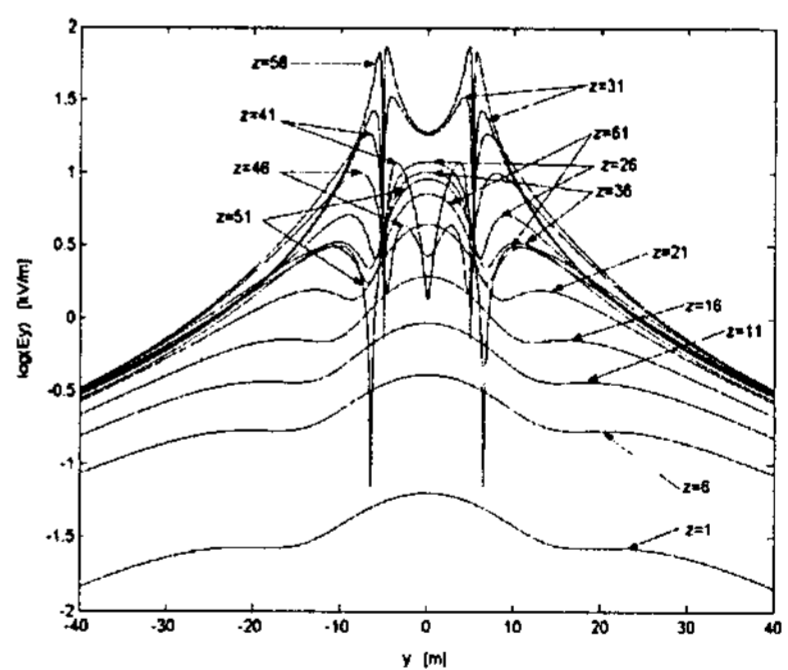


그림 3.6. 수직 전선배열 전력선 근방의  $E_y$   
Fig. 3.6.  $E_y$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)

이상과 같이 전력선에 의한 전자파 전자계에 관한 식을 유도하여 수직배열의 3상 전력선에 적용하여 보았다. 이 전자파 전자계의 식들은 대지의 영향을 고려한 완전해라고 할 수 있으며 전자파의 인체에 대한 노출량 및 각종 통신기기에 대한 유도장해의 해석에 도움이 될 것으로 기대된다. 계산 예로서 단



### 4. 결 론

본 연구에서는 쌍극자 안테나 이론에 의하여 전력선 근방의 전자파 전자계를 유도하고 3상 전력선로에 대한 전자계의 식을 정식화 하여 전자계 계산을 쉽게 할 수 있도록 하였다. 이 계산식들은 송전선로 및 배전선로의 설계 시 전자파 전자계의 검토에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 이상의 식을 수직 전선배열 전력선에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 전선 방향을  $x$ 축으로 한 직각 좌표계에서 전자계의  $x$  방향성분 즉,  $B_x$  및  $E_x$ 는 무시할 수 있을 정도의 작은 값을 나타냈으며 대지내의 반사파에 의한 영향만을 반영한다. 전자계의 성분  $E_y$ 와  $B_z$  및  $B_y$ 와  $E_z$ 의 수평거리 변화에 대한 윤곽이 거의 같으며 합성전계  $E$  및 합성자속밀도  $B$ 의 윤곽도 거의 같다. 이와 같은 사실은 전계와 자계의 결합요소가 서로 직각으로서  $x \rightarrow E_y \rightarrow B_z$ 와 같은 우수계의 전파 방향을 반영하고 있음을 의미한다. 합성전자계  $E$  및  $B$ 는 각 상의 전선위치에서 최대가 되며, 합성전계  $E$ 는  $E_y$ 의 요소가 지배적이고 합성자속밀도  $B$ 는  $B_z$ 의 요소가 지배적으로 영향을 미친다.

이 논문은 2007학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임. 과제번호: pk2007-039

### References

- [1] N.W.Wertheimer, E.Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", Am.J.Epidemiology, Vol. 109, pp. 273~284, 1979.
- [2] Isaka K.etal, "ELF electric and magnetic fields with human body", Proc.1988 U.S- Japan Seminar on Eletromagnetic-Interference in Highly Advanced Social Systems(Modeling, Characterization, Evaluation and Protection), No. 7, pp. 21~30, Hawaii, 1998.
- [3] Xi W., Stuchly MA, Gandhi OP., "High resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency electric fields", IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol. 41, pp. 1018~1023, 1994.
- [4] Dawson TW., Caputa K., Stuchly MA., "Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60Hz magnetic fields", Bioelectromagnetics, Vol. 18, pp. 478~490, 1997.
- [5] Feng Liu, Huawei Zhao and Stuart Crozier, "Calculation of electric fields induced by body and head motion in

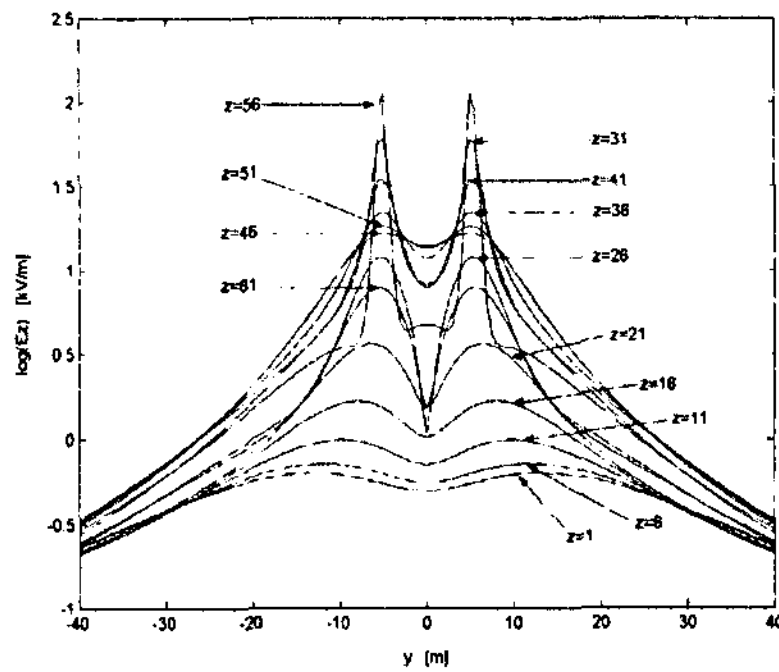


그림 3.7. 수직 전선배열 전력선 근방의  $E_z$   
 Fig. 3.7.  $E_z$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires (2 circuits)

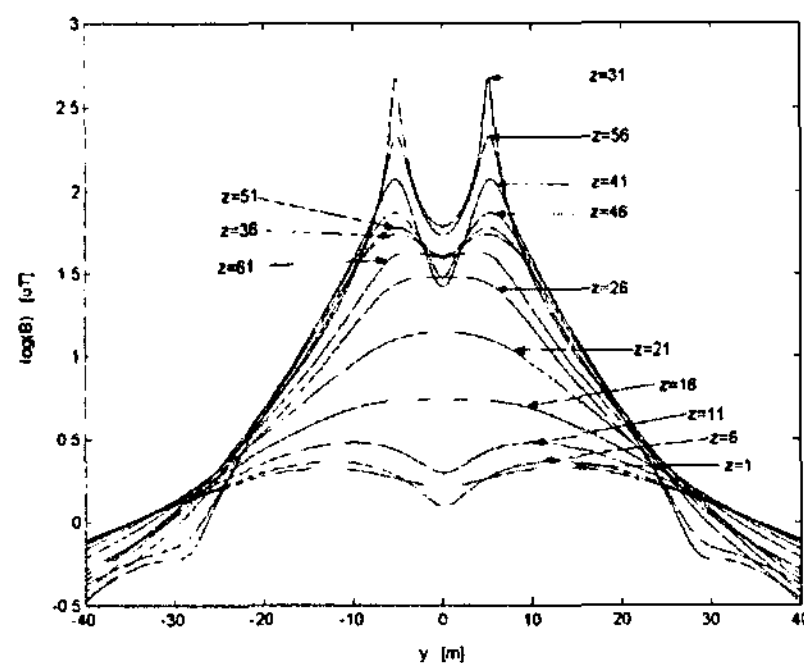


그림 3.8. 수직 전선배열 전력선 근방의 합성자속밀도  $B$   
 Fig. 3.8. Resultant magnetic flux density  $B$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires(2 circuits)

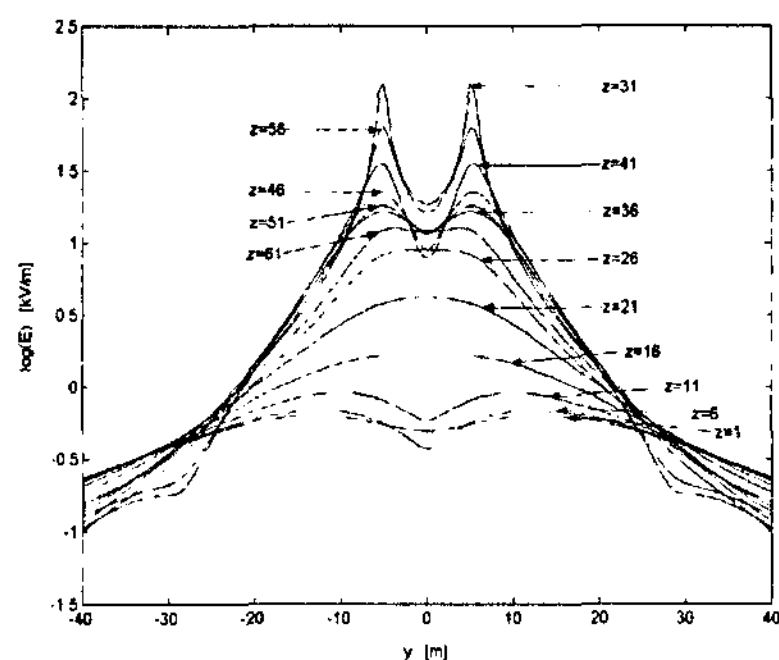


그림 3.9. 수직 전선배열 전력선 근방의 합성전계  $E$   
 Fig. 3.9. Resultant electric field  $E$  near 3-phase power line with a vertical configuration of three wires(2 circuits)

- high-field MRI”, Journal of Magnetic Resonance, Vol. 161, Issue 1, pp. 99~107, 2003.
- [6] Dragan Poljak, Andres Peratta and Carlos A. Brebbia, “The boundary element electromagnetic-thermal analysis of human exposure to base station antennas radiation”, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 28, Issue 7, pp. 763~770, 2004.
- [7] Yu-nan Han, Ying-hua LV and Hong-xin Zhang, “Compute extremely low-frequency electromagnetic field exposure by 3-D impedance method”, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Vol. 14, Issue 3, pp. 113~116, 2007.
- [8] Sarma Maruvada P., “Characterization of power frequency magnetic fields in different environments”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 598~605, 1993.
- [9] Dragon Poljak, Youssef F. Rashed, “The boundary element modeling of human body exposed to the ELF electromagnetic fields,” Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 27, pp. 871-875, 2002.
- [10] Dragon Poljak, Vicko Doric, Damir Vucicic, C.A Brebbia, “boundary element modeling of radio base station antennas,” Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 30, pp. 419-425, 2006.
- [11] Han Yu-nan LV Ying-hua, Zhang Hong-xin, “Compute extremely low-frequency electromagnetic field exposure by 3-D impedance method,” the Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Vol. 14, Issue 3, pp. 113-116, 2007.
- [12] A.S. Frag, M.M. Dawoud, T.C. Cheng, Jason S. Cheng, “Occupational exposure assesment for power frequency electromagnetic fields,” Electric Power Systems Research, Vol. 48, pp. 151-175, 1999.
- [13] V. Doric, D. Poljak, V. Roje, “Transient analysis of the grounding electrode based on the wire antenna theory,” Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 28, pp. 801-807, 2004.
- [14] Dragon Poljak, Snisa Antonijevic, Carlos A. Brebbia, “Time domain modeling of thin wire arrays in the presence of a two media configuration using the boundary element analysis,” Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 31, pp. 706-712, 2007.
- [15] Ronald W.P. King, Tai T. Wu, “ The complete electromagnetic field of a three-phase transmission line over the earth and its interaction with the human body”, J.Appl.Phys. Vol. 78, No. 2, pp. 668~683, 1995.
- [16] Ronald W.P.King, “The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region”, J.Appl.Phys. Vol. 69, No. 12, pp. 7987~7995, 1991.

◇ 저자소개 ◇

**이영식 (李永植)**

1962년 7월 31일생. 1994년 부경대학교 공대 전기공학과 졸업. 2003년 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 부경대학교 대학원 전기공학과(박사과정).

Tel : (051)610-0525

Fax : (051)610-0505

E-mail : leeys731@hanmail.net

**박정은 (朴正恩)**

1975년 1월 15일생. 2000년 부경대학교 공대 전기공학과 졸업. 2004년 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : (051)610-0525

Fax : (051)610-0505

E-mail : jhungeun@kesco.or.kr

**강대하 (姜大夏)**

1948년 12월 17일생. 1975년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1990년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1980년~현재 부경대학교 전기제어공학부 교수.

Tel : (051)629-6311

Fax : (051)629-6305

E-mail : daeha@pknu.ac.kr