

쌍극자안테나 이론에 의한 가공 3상전력선 근방의 전자파 전자계 계산

박정은<sup>○</sup> 박상호<sup>〃</sup> 강대하<sup>\*\*\*</sup>

\*전기안전공사 \*\*울산기능대학 \*\*\*부경대학교

Calculation of Electromagnetic Fields near the 3-Phase Power Lines over the earth

Jung Eun Park<sup>\*</sup> Sang Ho Park<sup>\*\*</sup> Dae Ha Kang<sup>\*\*\*</sup>

\*KESCO \*\*Ulsan Polytechnic College \*\*\* Pukyong National University

**Abstract** -In this study electromagnetic wave fields under power lines are derived by dipole antenna theory and electromagnetic fields under 3 phase power lines with horizontal and vertical configuration are formulated. The calculation results by those formulas were consistent with the results of reference[11]. The formulas were applied to 345[Kv] and 765[Kv] transmission lines constructed in our country.

1. 서 론

1970년대 말 전력설비에 의해 발생하는 전계 및 자계가 인체에 영향을 줄 수 있다는 것을 최초로 지적한 이래 [1] 이 주제에 대한 연구가 여러 나라에서 폭넓게 진행되어 왔다. 최근에는 초고압 및 대전류 전력설비와 더불어 전력선로에 둘러 싸여 있는 전자 환경의 생체에 미치는 효과가 점차 중요한 과제로 대두되고 있다. [2-4]

초저주파(ELF: extremely low frequency) 전계 및 자계의 파장은 생체의 크기보다 훨씬 크므로 전계 및 자계를 각각 독립적으로 취급할 수 있다. 그러나 생체가 자계 및 전계에 동시에 노출될 때 생체내부의 유도전류는 전계 및 자계에 의한 유도전류를 결합하여 조사할 필요가 있다. 특히 인체가 고전압전력선으로부터 각기 다른 거리에 위치해 있을 때 인체내부의 전계와 자계 및 관련된 전류의 방향과 크기는 무엇인가가 중요한 해결과제로 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 첫 단계는 대기위에 가설된 전력선 근방의 모든 점에 대한 6개의 전자계 성분을 정확하게 산정하는 일이다. 한편 낮은 값의 자속밀도에서도 비디오 디스플레이(컴퓨터 모니터등)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 유도장해등의 영향을 줄 수도 있다. 이러한 전력주파수의 자계는 [5-11] 등의 수많은 문헌에서 분석된 바 있다. 그러나 국내에서는 전력선하의 전자계에 대한 심도 있는 연구가 아직 미미한 실정이다.

본 연구에서는 전력선의 전류에 의해서 발생하는 전자파 전자계 성분에 대한 식을 쌍극자 안테나 이론을 이용하여 유도하였으며, 수평전선배열 및 수직전선배열의 전력선로에 적용하여 전력선 근방의 전자파 전자계를 계산하였다. 이들의 전선배열에 대한 전자파 전자계의 식은 실제 전력선에 그대로 적용할 수 있도록 정식화하였다.

2. 전력선에 의한 전자파

그림 1과 같이 전력선이 지표상  $h_0$ 의 높이에 x방향으로 가설되어 있는 무한장 직선 도체로 가정하면 그 영상도선은 지하  $h_0$ 의 깊이 존재하는 것으로 된다. 그림 2.1 전력선과 직각 좌표계

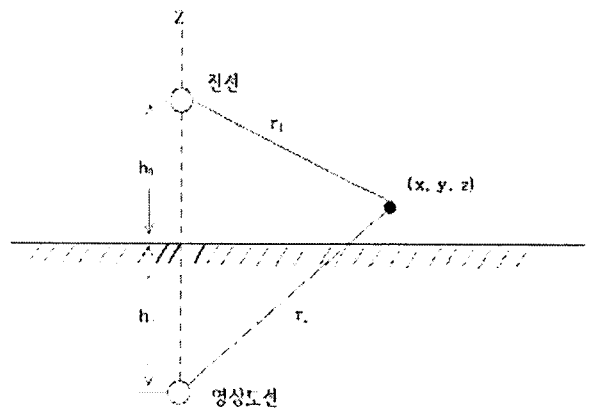


그림 1. 전력선과 직각좌표계

전력선의 전류를 정현파 교류라 하면 쌍극자 안테나 이론에 의한 벡터 포텐셜은 식 (2.1)과 같이 된다.

$$A = \frac{I}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_1} e^{j(\omega t - k r_1)} - \frac{1}{r_2} e^{j(\omega t - k r_2)} \right] \cdot \hat{x} \tag{2.1}$$

단,  $r_1 = (x^2 + y^2 + (z - h_0)^2)^{\frac{1}{2}}$ ,  $r_2 = (x^2 + y^2 + (z + h_0)^2)^{\frac{1}{2}}$  또한 자계 및 자속밀도는 식 (2.2) 및 식 (2.3)으로 된다.

$$H = \nabla \times A \tag{2.2}$$

$$B = \mu_0 H \tag{2.3}$$

맥스웰 필드방정식에 의해 전계 및 자계의 관계는 식 (2.4)로 주어진다.

$$j\omega \epsilon_0 E = \nabla \times H \tag{2.4}$$

대지내의 반사파를 고려하여 식 (2.1)-(2.4)로부터 단위 길이의 쌍극자 안테나에 대하여 전자계의 성분  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  및  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 를 구하면 식(2.5)-(2.10)과 같이 된다.

$$B_x = \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} e^{-j k_1 r} \left[ \frac{j k_0}{r_2^2} \left( \frac{j k_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) - \frac{k_0}{k_1} \frac{x(z+h_0)}{r_2^2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{6}{r_2} - \frac{j 5}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^5 k_0^2} \right) \right] \dots \tag{2.5}$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[ e^{-\beta_0 r_1} \frac{z-h_0}{r_1} \left( -\frac{j k_0}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - e^{-\beta_0 r_2} \frac{z+h_0}{r_2} \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{1}{r_2} \right) + e^{-\beta_0 r_2} \frac{2k_0}{k_1} \left\{ \left( \frac{z+h_0}{r_2} \right)^2 - \left( \frac{x}{r_2} \right)^2 \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) - \frac{k_0}{k_1} \frac{z+h_0}{r_2} \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{2}{r_2^2} + \frac{\beta}{r_2^3 k_0} + \frac{3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \right] \dots (2.6)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[ e^{-\beta_0 r_1} \frac{y}{r_1} \left( \frac{j k_0}{r_1} + \frac{1}{r_1} \right) - e^{-\beta_0 r_2} \frac{y}{r_2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{1}{r_2} \right) + e^{-\beta_0 r_2} \left[ \frac{2k_0}{k_1} \frac{z+h_0}{r_2} \frac{y}{r_2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) + \frac{k_0}{k_1} \left( \frac{y}{r_2} \left( -\frac{j k_0}{r_2} + \frac{5}{r_2^2} + \frac{j 2}{r_2^3 k_0} + \frac{12}{r_2^4 k_0^2} \right) + \left( \frac{y}{r_2} \right)^2 + \left( \frac{x}{r_2} \right)^2 \right) \frac{y}{r_2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j 5}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0} \right) \right] \right] \dots (2.7)$$

$$E_x = \frac{\alpha \mu_0 I}{4\pi k_0} \left[ e^{-\beta_0 r_1} \left( -\frac{j k_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} + \frac{j}{r_1^3 k_0} + \frac{x^2}{r_1} \left( \frac{j k_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} + \frac{\beta}{r_1^3 k_0} \right) \right) - e^{-\beta_0 r_2} \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} + \frac{x^2}{r_2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} + \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) \right) + e^{-\beta_0 r_2} \frac{2k_0}{k_1} \left( \frac{z+h_0}{r_2} \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} \right) - \frac{k_0}{k_1} \left( -\frac{j k_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} \right) + \left( \frac{y}{r_2} \right)^2 \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) \right) \right] \dots (2.8)$$

$$E_y = \frac{\alpha \mu_0 I}{4\pi k_0} \left[ e^{-\beta_0 r_1} \frac{xy}{r_1^2} \left( \frac{j k_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{\beta}{r_1^3 k_0} \right) - e^{-\beta_0 r_2} \frac{xy}{r_2^2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) + e^{-\beta_0 r_2} \frac{2k_0}{k_1} \frac{xy}{r_2^2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) \right] \dots (2.9)$$

$$E_z = \frac{\alpha \mu_0 I}{4\pi k_0} \left[ e^{-\beta_0 r_1} \frac{x(z-h_0)}{r_1^2} \left( \frac{j k_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{\beta}{r_1^3 k_0} \right) - e^{-\beta_0 r_2} \frac{x(z+h_0)}{r_2^2} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{\beta}{r_2^3 k_0} \right) + e^{-\beta_0 r_2} \frac{2k_0}{k_1} \left( \frac{j k_0}{r_2} + \frac{1}{r_2^2} \right) \right] \dots (2.10)$$

이상의 식을 무한장 직선도체인 전력선에 적용하면 전력선에 의한 전자계성분은 식(2.11) 및 (2.12)로 쓸 수 있다.

$$[B_s]_{x=0} = \int_{-\infty}^{\infty} B_y e^{-\beta_0 x} dx \dots (2.11)$$

$$[E_s]_{x=0} = \int_{-\infty}^{\infty} E_z e^{-\beta_0 x} dx \dots (2.12)$$

단, s=x, y, z

식(2.5)-(2.10)의 지배적 항만을 취하여 식(2.11) 및 (2.12)의 적분을 행하면 전체의 전력선에 의한 전자계 성분 식(2.13)-(2.18)을 구할 수 있다.

$$[B_x]_{x=0} = \frac{-2\mu_0 k_0 I}{\pi k_1^2} \frac{y(z+h_0)}{[y^2+(z+h_0)^2]^2} \dots (2.13)$$

$$[B_y]_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \frac{z-h_0}{y^2+(z-h_0)^2} + \frac{z+h_0}{y^2+(z+h_0)^2} + \frac{4(z+h_0)(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2+(z+h_0)^2]^2} \left( 1 - \frac{2[(z+h_0)^2-y^2]}{y^2+(z+h_0)^2} \right) \right] \dots (2.14)$$

$$[B_z]_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[ \frac{1}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{1}{y^2+(z+h_0)^2} + \frac{4(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2+(z+h_0)^2]^2} \left( 1 + \frac{2[(z+h_0)^2-y^2]}{y^2+(z+h_0)^2} \right) \right] \dots (2.15)$$

$$[E_x]_{x=0} = \frac{-j\alpha \mu_0 (k_0 h_0)}{\pi k_1^2} \left[ \frac{(z+h_0)^2-y^2}{(y^2+(z+h_0)^2)^2} \right] \dots (2.16)$$

$$[E_y]_{x=0} = \frac{\alpha \mu_0 I}{2\pi k_0} \left[ \frac{y}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{y}{y^2+(z+h_0)^2} \right] \dots (2.17)$$

$$[E_z]_{x=0} = \frac{\alpha \mu_0 I}{2\pi k_0} \left[ \frac{z-h_0}{y^2+(z-h_0)^2} - \frac{z+h_0}{y^2+(z+h_0)^2} \right] \dots (2.18)$$

한편 전력선의 전류를 평행 3상 전류라 가정하면 식(2.19)로 쓸 수 있다.

$$I_a = I \quad I_b = I e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad I_c = I e^{-j\frac{4\pi}{3}} \dots (2.19)$$

따라서 3상전력선로에 의한 전자계성분은 식(2.13)-(2.18)의 I대신에 식(2.19)의 각 상전류를 대입한 것의 화로써 구할 수 있다. 이 때 3상전력선이 수평전선배열이면 선간거리 L을 고려하여 각 식의 y대신에 b상의 경우는

y-L, c상의 경우는 y+L을 대입하면 된다. 또 수직전선배열의 경우로서 3상2회선이고 첩탑의 중심으로부터 각상전선까지의 거리를 L이라 하면, y대신에 좌측의 회선에 대하여 y+L, 우측의 회선에 대하여 y-L을 대입하고, 전선의 높이 h<sub>0</sub>대신에 좌우측 회선의 각상전선 높이를 고려하면 된다. 또한 각 전자계성분을 사용하여 합성전자계도 구할 수 있다.

### 3. 계 산 예

그림 2 및 그림 3은 수평전선배열의 경우에 대한 계산 예로서 합성전자계를 관측점의 높이 z를 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 이 경우 전선간격 L=10.8 [m], 지표상의 높이 h<sub>0</sub>=9 [m], 전류 I=1000 [A], 주파수 f=60 [Hz], 대지의 도전율 σ<sub>1</sub>=0.04 [S/m], 파장 λ=4π×10<sup>-7</sup>, k<sub>1</sub>=√jωμ<sub>0</sub>σ<sub>1</sub>을 사용하여 계산하였다.

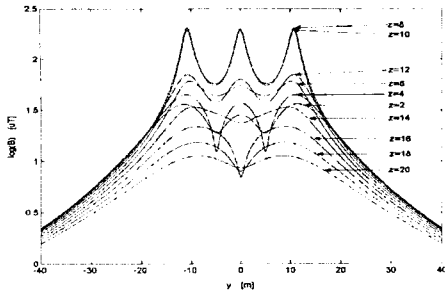


그림 2. 합성자기계(수평전선배열)

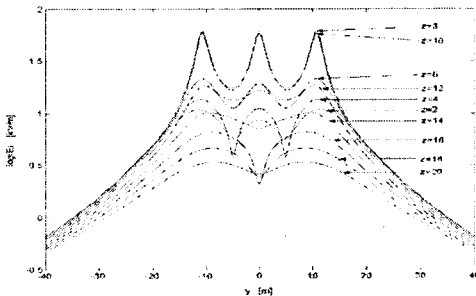


그림 3. 합성자기계(수평전선배열)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 쌍극자 안테나 이론에 의하여 전력선 근방의 전자파 전자계를 유도하고 3상 전력선로의 수평 배열 및 수직배열에 대한 전자계 식을 정식화하였다. 이 식의 타당성을 확인하기 위하여 기존의 문헌[11]에서 사용한 조건을 적용한 결과 그 데이터와 완전 일치하였다.

이상의 식을 실제의 수평전선배열 송전선에 적용하여 계산예로 제시하였다.

#### [참 고 문 헌]

[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

[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] Olsen R.G., Wong P.S., " Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines ", IEEE

Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.4, PP.2046-2055, 1992

[6] Dawalibi F., Selby A., "Electromagnetic fields of energized conductors ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, PP.1275-1284, 1993

[7] 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

[8] Deno D.W., " Transmission line fields", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.pas-95/5, PP.1600-1611, 1976

[9] Steward J.R., Dale S.J., Klein K.W., "Magnetic field reduction using high phase order lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.2, PP.628-636, 1993

[10] Ronald W.P.King, "The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region", J.Appl.Phys. Vol.89, No.12, PP.7987-7995, 1991

[11] 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

[12] 김문덕, "전력선 전자계에 대한 인체노출기준설정", 전기전자재료, 제8권, PP.313-317, 1998