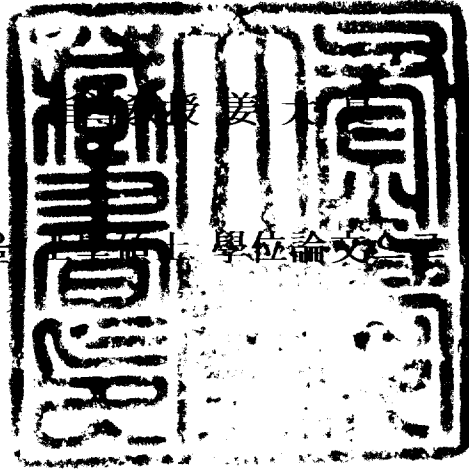


工學碩士 學位論文

직선으로 가설되어 있는 3상 전력선에 3상
분기선로가 있는 경우의 전자파 전자계



이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2005 年 8 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金 釜 圭

이 論文을 金釜圭의 工學碩士 學位
論文으로 認准함.

2005 年 6 月

主 審 工學博士 洪 淳 一 (印)

委 員 工學博士 金 榮 學 (印)

委 員 工學博士 姜 大 夏 (印)

목 차

제 1장 서 론	1
제 2장 쌍극자 방사	3
2.1 불구속 공간에서의 전자파	3
2.2 쌍극자 안테나	7
제 3장 전력선하의 전자파	12
3.1 쌍극자 안테나 이론에 의한 전력선하의 전자파	12
3.2 분기전선에 의한 전자파 전자계	16
3.2.1 반무한직선도체에 의한 전자파 전자계	16
3.2.2 분기전선에 의한 전자파 전자계	22
제 4장 3상 분기전력선하의 전자파 전자계	25
4.1 전자계 정식화	25
4.1.1 자계	25
4.1.2 전계	35
4.2 계산 예	42
4.2.1 자계	43
4.2.2 전계	65
제 5장 결 론	86
References	87
Abstract	88

그림 목차

Fig. 2.1. Right-hand co-ordinate system for traveling TEM wave	6
Fig. 2.2 Equivalence of alternating dipole and dipole antenna	7
Fig. 2.3 Spherical coordinates	11
Fig. 3.1 Rectangular coordinates	12
Fig. 3.2 Infinite line conductor of x' direction	16
Fig. 3.3 Power line with branch line and $x' - y$ rectangular coordinates	22
Fig. 3.4 Branch line part and new rectangular $x'_a - y_a$ coordinates	22
Fig. 3.5 Components of magnetic field by branch line part	23
Fig. 4.1 Horizontal configuration of 3 wires in 3 phase 1 circuit power line	25
Fig. 4.2 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha=0$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	44
Fig. 4.3 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	45
Fig. 4.4 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha=\frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	47
Fig. 4.5 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha=\frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	48
Fig. 4.6 Magnetic fields B_{y0}, B_{y1} and B_y in $\alpha=0$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	50
Fig. 4.7 Magnetic fields B_{y0}, B_{y1} and B_y in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	51
Fig. 4.8 Magnetic fields B_{y0}, B_{y1} and B_y in $\alpha=\frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	53
Fig. 4.9 Magnetic fields B_{y0}, B_{y1} and B_y in $\alpha=\frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	54

Fig. 4.10 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha=0$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	56
Fig. 4.11 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	57
Fig. 4.12 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha=\frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	58
Fig. 4.13 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha=\frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$	59
Fig. 4.14 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=0$ in case of $z=2[m]$	61
Fig. 4.15 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of $z=2[m]$	61
Fig. 4.16 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{\pi}{2}$ in case of $z=2[m]$	62
Fig. 4.17 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{2}{3}\pi$ in case of $z=2[m]$	62
Fig. 4.18 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=0$ in case of $z=13[m]$	63
Fig. 4.19 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of $z=13[m]$	63
Fig. 4.20 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{\pi}{2}$ in case of $z=13[m]$	64
Fig. 4.21 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in $\alpha=\frac{2}{3}\pi$ in case of $z=13[m]$	64
Fig. 4.22 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha=0$ in case of (a) $z=2[m]$ and	

(b) $z = 13[m]$	66
Fig. 4.23 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	67
Fig. 4.24 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	68
Fig. 4.25 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	69
Fig. 4.26 Electric fields E_{y0}, E_{y1} and E_y in $\alpha = 0$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	71
Fig. 4.27 Electric fields E_{y0}, E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	73
Fig. 4.28 Electric fields E_{y0}, E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	74
Fig. 4.29 Electric fields E_{y0}, E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	75
Fig. 4.30 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = 0$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	77
Fig. 4.31 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	78
Fig. 4.32 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	79
Fig. 4.33 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of (a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$	80
Fig. 4.34 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = 0$ in case of $z = 2[m]$	82

Fig. 4.35 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of $z = 2[m]$	82
Fig. 4.36 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 2[m]$	83
Fig. 4.37 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 2[m]$	83
Fig. 4.38 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = 0$ in case of $z = 13[m]$	84
Fig. 4.39 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of $z = 13[m]$	84
Fig. 4.40 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 13[m]$	85
Fig. 4.41 Electric fields E_x, E_y, E_z and E in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 13[m]$	85

제 1장 서 론

전기는 물과 공기처럼 우리생활에 없어서는 안될 소중한 것이며 생활수준이 향상될수록 전기사용량은 증가하고 사용범위는 더욱 넓어질 것이다. 그러나 전기의 생산, 수송, 소비 과정에서 설비나 기기 근처에 사람이 접근하게 되고 직업인이나 일반인을 막론하고 전자기장에 노출될 수밖에 없다. 최근 들어 전자파, 특히 핸드폰, 모니터 등에서 발생하는 높은 주파수의 전자파는 수질오염, 대기오염, 소음공해에 이어 제 4의 공해로 인식되고 있으며, 일반대중들은 송배전선로에서 발생하는 극저주파의 전자계에 대해서도 불안감을 나타내고 있다. 이와 함께 전자 환경이 인체에 미치는 효과가 중요한 과제로 대두되고 있다.[1~4]

국내에서도 경제성장에 따라 생활여건이 나아지면서 고급 청정에너지인 전력에너지의 급격한 수요증가로 전자기장에 노출되는 정도나 빈도가 늘고 있어, 좋은 물 좋은 환경을 찾는 것과 같이 전자파의 공해로부터 피하려는 노력이 기울여지고 있다.

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 저 수준의 자계라 할지라도 감도가 좋은 측정장비(예 전자현미경)나 의료용 장비에 유도장해 등의 영향을 줄 수도 있다. 이러한 전력주파수의 자계는 [5~11]등의 수많은 문헌에서 분석된 바 있다.

송배전선로 등 전력설비로부터 발생하는 전자파 전자계의 이론적인 근거를 마련하기 위해서는 전자파 전자계의 정확한 계산이 필요하며 이를 고려한 설계 및 건설이 이루어져야 할 것이다.

본 연구의 목적은 전력선 주변에 발생하는 전자파 문제를 해결하기 위해 전력선하의 전자계에 대한 이론식을 도출하여 정식화 하는 것이다.

본 연구에서는 전력선의 전류에 의해 발생하는 전자파 전자계 성분에 대한 식을 쌍극자 안테나 이론을 이용하여 유도하였으며 직선으로 가설되어 있는 3상 전력선에 3상 분기선로가 있는 경우의 전자파 전자계 식을 유도하여 이를 정식화 하였다.

본 논문의 구성은 제 1장에서는 연구배경과 이와 관련된 최근의 현황을 소개하였고 제 2장에서는 본 연구와 관련되는 이론으로 불구속 공간에서의 전자파에 대한 전기장 E 와 자기장 H 의 식을 소개하였다. 제 3장과 제4장에서는 쌍극자 이론을 이용하여 전력선하의 전자파 전자계 성분을 유도하였으며, 이를 토대로 하여 분기전력선이 있는 경우의 전자파 전자계 식을 정식화 하였다. 또 분기전력선에 의한 전자파 전자계를 계산예를 통하여 분석하였다. 제5장 결론에서는 이상의 연구에서 얻어진 결과 및 결론을 정리하였다.

제 2장 쌍극자 방사

2.1. 불구속 공간에서의 전자파

일반적으로 정현파 전자파에 대하여는 식 (2.1) 및 (2.2)와 같은 미분형의 맥스웰 필드 방정식을 이용한다.

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \epsilon^* \frac{\partial \dot{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -\mu^* \frac{\partial \dot{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (2.2)$$

또 계가 진전하를 포함하지 않으면

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.3)$$

진자극을 포함하지 않으면

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.4)$$

로 된다. 이러한 필드 방정식을 해석함에 첫 단계로서 필드벡터 $\dot{\mathbf{E}}$ 와 $\dot{\mathbf{H}}$ 의 분리가 필요하다. 이것은 위의 방정식들을 시간에 관하여 미분하고 한 방정식을 다른 방정식에 대입함으로써 분리할 수 있다. 따라서 식 (2.1)로부터 식 (2.5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \dot{\mathbf{H}}) = \nabla \times \frac{\partial \dot{\mathbf{H}}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu^*} \nabla \times (\nabla \times \dot{\mathbf{E}}) = \epsilon^* \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

또 벡터 연산을 행하면 식 (2.6)이 구해진다.

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} = \epsilon^* \mu^* \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

같은 방법으로 식 (2.2)를 미분함으로써 식(2.6)에 완전히 대칭적인 자계에 관한 관계식(2.7)을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{H}} = \epsilon^* \mu^* \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{H}}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

식 (2.6) 및 (2.7)은 전자계의 파방정식이다. 필드벡터 $\dot{\mathbf{E}}$ 및 $\dot{\mathbf{H}}$ 가 x 및 시간 t 에만 의존한다고 가정하면 이 방정식들은 더욱 간략화 된다. 즉

$$\frac{\partial \dot{E}}{\partial y} = \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} = \frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = \frac{\partial \dot{H}}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

이 되며 이러한 특수한 경우로부터 일반해로 쉽게 되돌아 올 수 있다. 따라서 파방정식은 식(2.9)로 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial x^2} &= \epsilon^* \mu^* \frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial x^2} &= \epsilon^* \mu^* \frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

여기서 관심의 대상이 되는 이 미분방정식의 해는 식(2.10)과 같은 평면파로 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= E_0 e^{j\omega t - \gamma x} \\ \dot{H} &= H_0 e^{j\omega t - \gamma x} \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서 γ 는 복소전파정수로서 식(2.11)로 주어진다.

$$\gamma = j\omega \sqrt{\epsilon^* \mu^*} = \alpha + j\beta \quad (2.11)$$

α 는 파의 감쇄 정수, β 는 위상 정수를 나타낸다. 따라서 주파수 $\nu = \omega/2\pi$ 에 대하여 식 (2.12)를 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{E} &= E_0 e^{-\alpha t} e^{j2\pi(\nu t - \beta x/2\pi)} \\ \dot{H} &= H_0 e^{-\alpha t} e^{j2\pi(\nu t - \beta x/2\pi)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

이 파는 식 (2.13) 및 (2.14)로 주어지는 시간주기 T 및 공간주기 λ 를 갖는다.

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.14)$$

일정 위상의 경우는 식 (2.15)를 쓸 수 있다.

$$\nu_t = \frac{x}{\lambda} = \text{일정} \quad (2.15)$$

따라서 식 (2.16)의 위상속도를 갖고 전파한다.

$$\frac{dx}{dt} = v = \nu\lambda = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.16)$$

무손실 유전체 ($\epsilon^* = \epsilon'$, $\mu^* = \mu'$)에 대하여 무손실 불구속 매질의 위상속도가

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon'\mu'}} \quad (2.17)$$

이 되도록 함으로써 식 (2.11)로 부터 식 (2.18)의 위상정수를 구할 수 있다.

$$\beta = \omega\sqrt{\epsilon'\mu'} \quad (2.18)$$

벡터 $\vec{E}$ 및 $\vec{H}$ 사이의 결합에 대하여 알기 위해서는 필드방정식으로 돌아가 그 요소를 알아야 한다. 식 (2.8)의 조건 때문에 x 에 관한 미분만이 남게 되며 식(2.19)의 방정식을 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 &= \epsilon^* \frac{\partial E_x}{\partial t} & 0 &= -\mu^* \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ -\frac{\partial H_z}{\partial x} &= \epsilon^* \frac{\partial E_y}{\partial t} & -\frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\mu^* \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \epsilon^* \frac{\partial E_z}{\partial t} & \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\mu^* \frac{\partial H_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.19)$$

식 (2.19)의 성분 방정식은 다음과 같은 3가지 의미를 포함하고 있다.

- (1) 필드벡터의 x 요소, 즉, 전자파의 종요소는 공간과 시간에 독립적이므로 0으로 간주할 수 있다. 평면파는 횡전자파 즉 TEM(Transverse Electromagnetic)파이다
- (2) E 와 H 파의 결합 횡요소는 그림 2.1 과 같이 서로 직각이며 $x \rightarrow E_y \rightarrow H_z$ 의 우수계를 갖는 전파 방향을 형성한다. 이것은 $\vec{E}$ 와 $\vec{H}$ 벡터에 대한 해를 요소방정식 중의 하나에 대입하면 분명해진다. 예로서

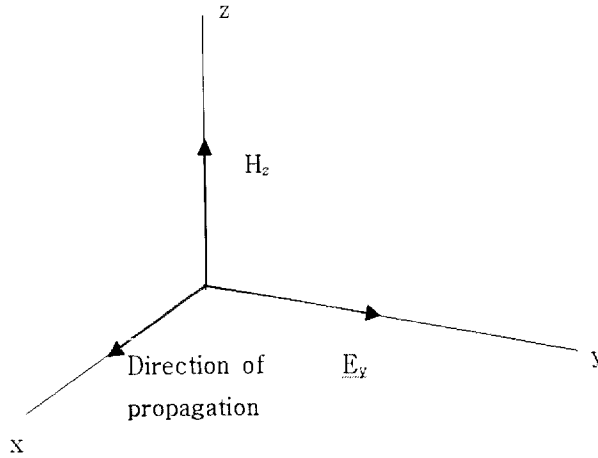


그림 2.1 우수계를 갖는 횡전자파(TEM파)
Fig. 2.1. Right-hand co-ordinate system for traveling TEM wave

관계식

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon^* \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.20)$$

을 택하면

$$\gamma H_z = j\omega \epsilon^* E_y \quad (2.21)$$

을 얻는다. 따라서 전계의 E_y 요소는 자계의 H_z 요소와 결합되어 있다.

(3) 결합된 전계와 자계 벡터의 비는 식 (2.22)로 된다.

$$\frac{|\dot{\mathbf{E}}|}{|\dot{\mathbf{H}}|} = \frac{\gamma}{j\omega \epsilon^*} \equiv Z \quad (2.22)$$

이 Z 를 유전체의 특성 임피던스(intrinsic impedance)라 하며 식(2.23)에 의해 3가지 중 하나를 쓸 수 있다.

$$Z = \frac{\gamma}{j\omega \epsilon^*} = \sqrt{\frac{\mu^*}{\epsilon^*}} = \frac{j\omega \mu^*}{\gamma} \quad (2.23)$$

2.2. 쌍극자 안테나

분극과 자화의 이론은 쌍극자의 개념에 기초를 두고 있다. 보통 쌍극자에 의한 전계는 영구쌍극자 능률 μ 를 갖는 정적 쌍극자 주위의 전계로서 유도된다. 그러나 이러한 영구 쌍극자 능률을 취급하는 대신 식 (2.24)과 같이 외부 전계에 의해 유도되고 주기적함수로서 변화하는 쌍극자 능률을 취급하는 일이 자주 있다.

$$\mu(t) = Qde^{j\omega t} = \tilde{\mu}_0 e^{j\omega t} \quad (2.24)$$

유도 쌍극자 능률 $\mu(t)$ 는 일정 길이 d 의 쌍극자를 구성하는 전하가 (+ -) 및 (- +) 군 사이에 주기적으로 변화할 때의 쌍극자 능률이다. 이러한 쌍극자는 교류에 의해 횡단하는 길이 d 의 선형 쌍극자와 동가이다. 그림 2.2 는 교번 쌍극자와 쌍극자 안테나의 동가성을 나타낸 것이다. 쌍극자 안테나의 전류를 $I(t)$ 라 하면 식 (2.24)로부터 식 (2.25)를 쓸 수 있다.

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{d} \cdot \frac{d|\mu(t)|}{dt} \quad (2.25)$$

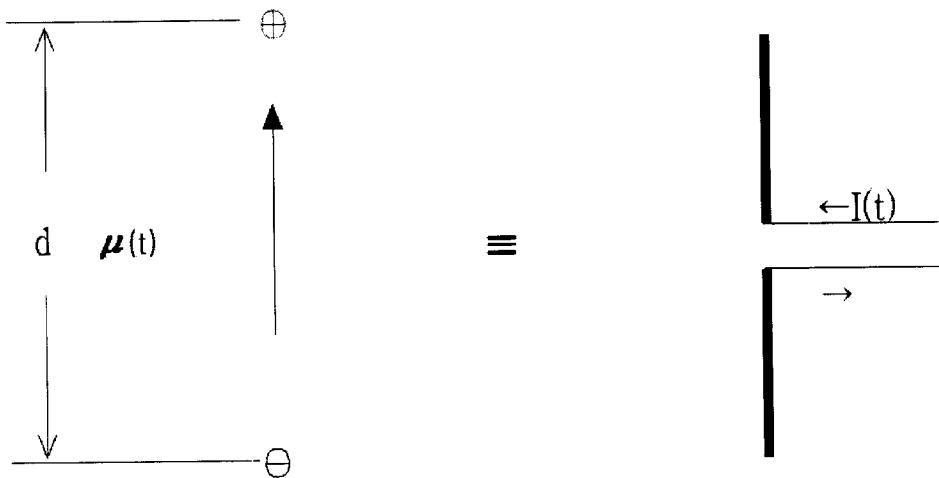


그림 2.2 교번 쌍극자와 쌍극자 안테나의 동가성

Fig. 2.2 Equivalence of alternating dipole and dipole antenna

쌍극자 안테나는 가장 간단한 분극방사의 원천이다. 실제로 맥스웰의 전파방정식은

Hertz가 이 방사를 계산하여 실험적으로 그 존재를 증명함으로써 확인되었다. 따라서 교변 쌍극자의 전자계는 분자이론 뿐만 아니라 거시적 이론에 매우 중요하다.

장벡터 $\dot{\mathbf{E}}$ 와 $\dot{\mathbf{H}}$ 는 맥스웰 방정식과 파방정식을 만족해야 한다. 쌍극자가 무손실, 등방성 매질에 둘러싸여 있다고 가정하면 맥스웰 방정식은 식 (2.26)으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} &= \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \dot{\mathbf{H}} &= \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{H}}}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (2.26)$$

여기서 v 는 유전체내 전자파의 위상속도이다. 파방정식은 발산조건 식 (2.27) 및 (2.28)이 이행될 때 성립한다.

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.27)$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.28)$$

따라서 이 방정식들은 전하 및 적절한 쌍극자 전류소 (dipole current element)의 위치를 제외한 모든 공간에서 식 (2.2)에 따라 길이 d 의 식 (2.29)와 같이 비오사바르 (Biot Savart) 법칙에 의해 설명할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi r^2} (d \times \hat{\mathbf{r}}) = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{d |\dot{\mu}(t)|}{dt} \frac{d \times \hat{\mathbf{r}}}{d} \quad (2.29)$$

그러므로 파방정식이 성립하고 쌍극자에서 비오사바르 방정식에 이르게 되는 자계 강도 $\dot{\mathbf{H}}$ 를 구해보기로 한다. 적절한 해는 다음사항을 고려함으로써 짐작 할 수 있다. 비오사바르 법칙은 벡터 포텐셜 $\mathbf{O}$ 를 도입하여 curl 연산을 행함으로써 구할 수 있다. 이 벡터포텐셜이 구대칭이라 하면 식 (2.24) 및 (2.25)로 표현되는 쌍극자 안테나에 대하여 식 (2.30)을 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{O}} = \frac{I \cdot d}{4\pi r} = \frac{1}{4\pi r} \frac{d \dot{\mu}(t)}{dt} = \frac{j\omega}{4\pi r} \dot{\mu}_0 e^{j\omega t} \quad (2.30)$$

쌍극자 안테나에 의해 발생하는 전자계는 위상속도 v 로서 외부로 나올 것이므로 현재의 위상만큼 지연되어 식 (2.31)과 같이 안테나로부터의 거리 r 에서 나타나야 한다.

$$e^{-j\omega\frac{r}{v}} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r} \quad (2.31)$$

비오사바르 법칙의 벡터 포텐셜 O 는 교번 쌍극자의 자계를 구하기 위하여 식 (2.32)와 같이 지연 인수의 도입에 의해 수정하는 것이 가장 간단하다.

$$\dot{O} = \frac{j\omega}{4\pi r} \dot{\mu}_0 e^{j\omega(t-\frac{r}{v})} \quad (2.32)$$

이 벡터 포텐셜 O 의 curl 연산에 의해 필드방정식 (2.33), (2.34), (2.35), 및 (2.36)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \nabla \times O \\ &= \frac{|\mu_0|v}{4\pi} e^{j\omega(t-\frac{r}{v})} \left[-\frac{\omega^2}{rv^2} + j\frac{\omega}{r^2v} \right] \frac{d \times \hat{r}}{d} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$H_r = 0 \quad (2.34)$$

$$H_\theta = 0 \quad (2.35)$$

$$H_\phi = \frac{|\mu(t)|v}{4\pi} e^{-j\omega\frac{r}{v}} \left[-\frac{\omega^2}{rv^2} + j\frac{\omega}{r^2v} \right] \sin \theta \quad (2.36)$$

이 식들에서 알 수 있는 바와 같이 자계는 쌍극자 안테나의 근방영역 ($r \ll \lambda$)에서 $\frac{1}{r^2}$ 의 항이 지배적이며 자계는 위상인수를 제외하면 식 (2.6)의 비오사바르 자계와 같게 된다. 쌍극자 안테나로부터의 거리가 큰 영역 ($r \gg \lambda$)에서는 $\frac{1}{r}$ 과 함께 변화하는 항만 남는다.

전계를 계산하기 위해서는 식 (2.23)의 $\dot{H}$ 에 대한 식을 무손실 유전매질에 대한 맥스웰의 제 1필드방정식 (2.37)에 도입함으로써 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \dot{H} = \epsilon' \frac{\partial \dot{E}}{\partial t} \quad (2.37)$$

curl 연산에 의해 각 전계요소를 구하면 식 (2.38), (2.39) 및 (2.40)과 같다.

$$E_r = \frac{|\mu(t)|}{4\pi\epsilon'} e^{-j\omega \frac{r}{v}} \left(\frac{2}{r^3} + j \frac{2\omega}{r^2 v} \right) \cos \theta \quad (2.38)$$

$$E_\theta = \frac{|\mu(t)|}{4\pi\epsilon'} e^{-j\omega \frac{r}{v}} \left(\frac{1}{r^3} + j \frac{\omega}{r^2 v} - \frac{w^2}{rv^2} \right) \sin \theta \quad (2.39)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.40)$$

이상에서 알 수 있는 바와 같이 전계는 쌍극자 근방의 영역 ($r \ll \lambda$)에서 $\frac{1}{r^3}$ 의 항이 지배적이며 전계 강도는 식 (2.41) 및 (2.42)로 된다.

$$E_r = \frac{|\mu(t)| \cos \theta}{2\pi\epsilon' r^3} e^{-j\omega \cdot \frac{r}{v}} \quad (2.41)$$

$$E_\theta = \frac{|\mu(t)| \sin \theta}{4\pi\epsilon' r^3} e^{-j\omega \cdot \frac{r}{v}} \quad (2.42)$$

식 (2.41) 및 (2.42)는 쌍극자능률이 주기 함수이고 위상지연인수 $e^{-j\omega \frac{r}{v}}$ 이 나타나는 것 외에는 정전 쌍극자의 전계와 일치한다. 따라서 쌍극자 근방영역에서 교변쌍극자 또는 선형 쌍극자 안테나의 전자계는 식 (2.43)과 같은 성분으로 구성된다.

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{|\mu(t)| \cos \theta}{2\pi\epsilon' r^3} e^{-j\omega \cdot \frac{r}{v}} \\ E_\theta &= \frac{|\mu(t)| \sin \theta}{4\pi\epsilon' r^3} e^{-j\omega \cdot \frac{r}{v}} \\ H_\phi &= \frac{d|\mu(t)|}{dt} \cdot \frac{\sin \theta}{4\pi r^2} e^{-j\omega \frac{r}{v}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

즉, 쌍극자전계는 반경 방향요소 E_r 및 분극구의 경도 원에 대한 접선방향요소 E_θ 로 구성되어 있으며, 분극구의 위도 원에 접선방향으로 발생하는 쌍극자 안테나 전류의 자계 H_ϕ 가 중첩된다. 원거리 영역 ($r \gg \lambda$)에서는 $\frac{1}{r}$ 과 함께 변화하는 항만 남게 되어 전자계는 식 (2.44)와 같이 접선방향 성분만으로 구성된다.

$$E_\theta = \frac{d^2 |\mu(t)|}{dt^2} \cdot \frac{\sin \theta}{4\pi\epsilon' r v^2} e^{-j\omega \frac{r}{v}}$$

$$E_{\phi} = \frac{d^2 |\mu(t)|}{dt^2} \cdot \frac{\sin \theta}{4\pi r v} e^{-j\omega \frac{r}{v}} \quad (2.44)$$

이 전자파 전자계는 쌍극자 안테나로부터 매우 먼 거리에서는 방사상으로 전파하는 TEM파를 형성한다.

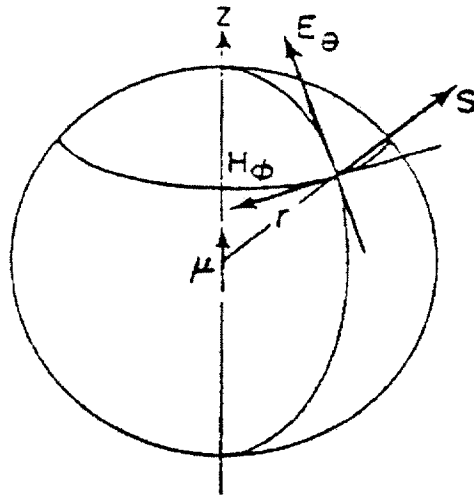


그림 2. 3 구 좌표계

Fig. 2.3 Spherical coordinates

제 3장 전력선하의 전자파

3.1 쌍극자 안테나 이론에 의한 전력선하의 전자파

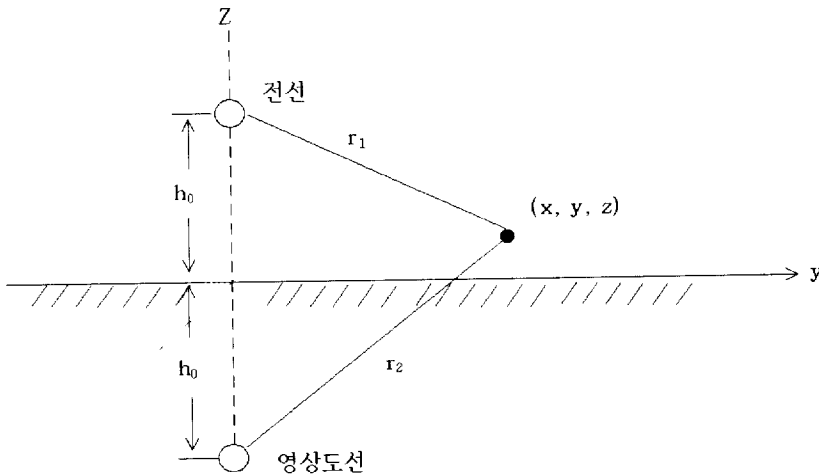


그림 3.1 직각좌표계

Fig. 3.1 Rectangular coordinates

그림 3.1 과 같이 평면대지상의 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. 전력선을 무한장 직선도체라 하고 전류는 식 (3.1)의 정현파 전류를 가정하며 대지의 깊이 $-h_0$ 에 흐르는 전류영상을 고려하기로 한다.

$$i(t) = I e^{j\omega t} \quad (3.1)$$

이 전력선을 쌍극자 안테나에 대비시키면 미소길이 dx' 에 대한 쌍극자 능률은 $i(t) \cdot dx'$ 로 주어지며 단위길이에 대한 벡터포텐셜은 식 (3.2)로 쓸 수 있다.

$$\vec{A} = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1} e^{j(\omega t - k_0 r_1)} - \frac{1}{r_2} e^{j(\omega t - k_0 r_2)} \right] \cdot \hat{x} \quad (3.2)$$

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

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

여기서 k_o 는 공기의 파정수로서 식 (2.31)에서 알 수 있는 바와 같이 $\frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c}$ 에 해당되며 $\hat{x}$ 는 x 방향의 단위벡터이다. 따라서 자계 $\dot{H}$ 및 자속밀도 $\dot{B}$ 는 식 (3.3) 및 (3.4)로 주어진다.

$$\begin{aligned}\dot{H} &= \dot{A} \\ &= \frac{I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ [e^{-jk_0 r_1} (-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3})(z-h_o) - e^{-jk_0 r_2} (-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3})(z+h_o)] \hat{y} \right. \\ &\quad \left. + [e^{-jk_0 r_1} (\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3}) - e^{-jk_0 r_2} (\frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3})] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} \\ &= H_y \hat{y} + H_z \hat{z}\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}\dot{B} &= \frac{\dot{\mu}_o I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ [e^{-jk_0 r_1} (-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3})(z-h_o)] - e^{-jk_0 r_2} (-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3})(z+h_o)] \hat{y} \right. \\ &\quad \left. + [e^{-jk_0 r_1} (\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3}) + e^{-jk_0 r_2} (\frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3})] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} \\ &= B_y \hat{y} + B_z \hat{z}\end{aligned}\quad (3.4)$$

여기서 $\hat{y}$ 및 $\hat{z}$ 는 각각 y 방향 및 z 방향의 단위 벡터이다. 한편 전계와 자계의 관계는 맥스웰 필드 방정식 (2.1)로 주어지므로 정현파의 경우는 식 (3.5)로 된다.

$$j\omega \epsilon_0 \dot{E} = \nabla \times \dot{H} \quad (3.5)$$

따라서 $\frac{\omega \mu_o}{k_o} = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}}$ 를 고려하여 단위길이당 쌍극자 전류에 의한 전계 E 의 각성분 E_x , E_y 및 E_z 를 구하면 식 (3.6), (3.7) 및 (3.8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}E_x &= \frac{\omega \mu_o I}{4\pi k_o} e^{j\omega t} \\ &\quad \left\{ e^{-jk_0 r_1} \left[-\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} + \frac{j}{r_1^3 k_o} + \frac{x^2}{r_1^2} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_o} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - e^{-jk_0 r_2} \left[-\frac{jk_o}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_o} + \frac{x^2}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_o} \right) \right] \right\}\end{aligned}\quad (3.6)$$

$$E_y = \frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} e^{j\omega t} \cdot \left\{ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{xy}{r_1^2} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\ \left. - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \quad (3.7)$$

$$E_z = \frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} e^{j\omega t} \cdot \left\{ e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{zx}{r_1^2} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\ \left. - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{zx}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \quad (3.8)$$

한편, 대지내부에서의 반사파도 고려해야 하므로 전자파의 자속밀도 및 전계에 반사파 [10]를 고려하여 페이저 (Phasor)로서 취급하면 식 (3.9)~(3.14)가 구해진다. 이를 식에서의 반사파에 대한 조건은 $\left| \frac{k_0}{k_1} \right| \ll 1$ 이다.

$$B_x = \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} e^{-jk_0 r_2} \left[\frac{xy}{r_2^2} \cdot \left(-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right. \\ \left. - \frac{k_0}{k_1} \cdot \frac{xy(z+h_0)}{r_2^3} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{z-h_0}{r_1} \left(-\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} \right) - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{z+h_0}{r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \right. \\ \left. + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left[\left(\left(\frac{z+h_0}{r_2} \right)^2 - \left(\frac{x}{r_2} \right)^2 \right) \left(-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right. \right. \\ \left. - \frac{k_0}{k_1} \left\{ \frac{z+h_0}{r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{2}{r_2^2} + \frac{j3}{r_2^3 k_0} + \frac{3}{r_2^4 k_0^2} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{y}{r_2} \right)^2 \cdot \frac{z+h_0}{r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right\} \right] \right] \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
B_z = & \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{y}{r_1} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{1}{r_1} \right) - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{y}{r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{1}{r_2} \right) \right. \\
& + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left[\frac{z+h_0}{r_2} \cdot \frac{y}{r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right. \\
& + \frac{k_0}{k_1} \left\{ \frac{y}{r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2} + \frac{5}{r_2^2} + \frac{j12}{r_2^3 k_0} + \frac{12}{r_2^4 k_0^2} \right) \right. \\
& \left. \left. + \left(\left(\frac{y}{r_2} \right)^2 + \left(\frac{x}{r_2} \right)^2 \right) \frac{y}{r_2} \cdot \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{6}{r_2^2} - \frac{j15}{r_2^3 k_0} - \frac{15}{r_2^4 k_0^2} \right) \right\} \right] \quad (3.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_x = & \frac{\omega\mu_0 \mathbf{i}}{4\pi k_0} \left[e^{-jk_0 r_1} \left\{ -\frac{jk_0}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} + \frac{j}{r_1^3 k_0} + \frac{x^2}{r_1} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right\} \right. \\
& - e^{-jk_0 r_2} \left\{ -\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} + \frac{x^2}{r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right\} \\
& + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \left\{ \frac{z+h_0}{r_2} \cdot \left(-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \right. \\
& \left. \left. - \frac{k_0}{k_1} \left[-\frac{jk_0}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} + \frac{j}{r_2^3 k_0} + \left(\frac{y}{r_2} \right)^2 \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \right\} \right] \quad (3.12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_y = & \frac{\omega\mu_0 \mathbf{i}}{4\pi k_0} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{xy}{r_1^2} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\
& - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \\
& \left. + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0^2}{k_1^2} \cdot \frac{xy}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \right] \quad (3.13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_z = & \frac{\omega\mu_0 \mathbf{i}}{4\pi k_0} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{x(z-h_0)}{r_1^2} \left(\frac{jk_0}{r_1} + \frac{3}{r_1^2} - \frac{j3}{r_1^3 k_0} \right) \right. \\
& - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{x(z+h_0)}{r_2^2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{3}{r_2^2} - \frac{j3}{r_2^3 k_0} \right) \\
& \left. + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0}{k_1} \cdot \frac{x}{r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2} + \frac{1}{r_2^2} \right) \right] \quad (3.14)
\end{aligned}$$

여기서 k_1 은 대지의 파정수를 나타낸다.

3.2 분기전선에 의한 전자파 전자계

3.2.1 반무한직선도체에 의한 전자파 전자계

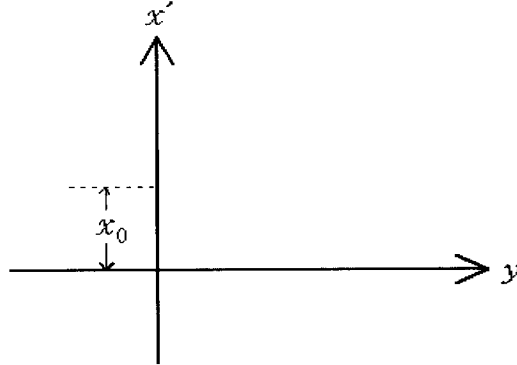


그림 3.2 x' 방향의 무한장 직선도체

Fig. 3.2 Infinite line conductor of x' direction

먼저 그림 3.2와 같이 x_0 로부터 x' 의 무한대 방향으로 전류 I 가 흐르는 반무한직선도체에 의한 전자파 전자계를 고려하기로 한다. 여기서 x' 축은 x 축의 반대 방향이다.

식 (3.9)~(3.14)의 전자계는 전류 I 가 흐르는 단위길이당의 쌍극자에 의한 전자파이므로 전 전선에 대한 전자파는 이 식들을 x' 방향에 대하여 적분하여야 한다. 그 점에서 x' 의 방향은 x 의 반대 방향이므로 적분시 이 식들내의 x 대신에 $x-x'$ 를 대입하고, 전선과 직각방향 즉 y 축상의 전자파 전자계를 고려하면 다음과 같은 식들을 쓸 수 있다.

$$[B_s]^+_{x=0} = \int_{x_0}^{\infty} B_s e^{-jk_0 x'} dx' \quad (3.15)$$

$$[B_s]^-_{x=0} = \int_{-\infty}^{x_0} B_s e^{-jk_0 x'} dx' \quad (3.16)$$

$$[E_s]^+_{x=0} = \int_{x_0}^{\infty} E_i e^{-jk_0 x'} dx' \quad (3.17)$$

$$[E_s]^-_{x=0} = \int_{-\infty}^{x_0} E_i e^{-jk_0 x'} dx' \quad (3.18)$$

단, $s = x, y, z$

이때 $[B_s]^+_{x=0} + [B_s]^-_{x=0}$ 및 $[E_s]^+_{x=0} + [E_s]^-_{x=0}$ 는 x' 방향 무한장 직선도체에 의한 전자파의 자계 및 전기장의 크기가 된다.

이상의 적분을 수행하기 위하여 각 자계 성분 중 지배적 항 만을 취하면 [], 다음과 같은 적분식을 쓸 수 있다.

$$[B_x]^+_{x=0} \doteq \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 r_2} \cdot e^{-jk_0 x'} \cdot \frac{k_0}{\tilde{k}_1} \left[-\frac{15x'y(z+h_0)}{r_2^7 k_0^2} \right] dx' \quad (3.19)$$

$$[B_y]^+_{x=0} \doteq \frac{\mu_0 I}{4\pi \tilde{k}_1} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 x'} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{-(z-h_0)}{r_1^3} + e^{-jk_0 r_2} \frac{z+h_0}{r_2^3} - e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0^2}{\tilde{k}_1^2} \left\{ \frac{3(z+h_0)}{r_2^5 + k_0^2} - \frac{15y^2(z+h_0)}{r_2^7 k_0^2} \right\} \right] dx' \quad (3.20)$$

$$[B_z]^+_{x=0} \doteq \frac{\mu_0 I}{4\pi \tilde{k}_1} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 x'} \left[e^{-jk_0 r_1} \cdot \frac{y}{r_1^3} - e^{-jk_0 r_2} \frac{y}{r_2^3} + e^{-jk_0 r_2} \cdot \frac{2k_0^2}{\tilde{k}_1^2} \left\{ \frac{12y}{r_2^5 k_0^2} + \left\langle \left(\frac{y}{r_2} \right)^2 + \left(\frac{x'}{r_2} \right)^2 \right\rangle \cdot \frac{15y}{r_2^7 k_0^2} \right\} \right] dx' \quad (3.21)$$

전선의 경우에 대하여는 식 (3.19)~(3.21)에서 적분의 하한 및 상한을 $-\infty$ 및 x_0 로 바꾸면 된다. 실제로 60Hz에서 $k_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 으로 매우 작은 값이므로 $e^{-jk_0 r_1} \doteq e^{-jk_0 r_2} \doteq 1$ 로 하고 $e^{-jk_0 x'} = \cos k_0 x' - jsink_{0x'} \doteq 1 - jk_{0x}$ 을 취하여 이상의 식을 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[B_x]^+_{x=0} = -\frac{j\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \cdot \frac{(yz+h) \left\{ -2 \left[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} + 5y^2 x_0^3 + 5(z+h_0)^2 x_0^3 + 2x_0^5 \right\}}{\left[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} \cdot \left[y^2 + (z+h_0)^2 \right]} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
[B_y]^+_{x=0} = & \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{-(z-h_0) \left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& + \frac{(z-h_0) \left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \left. + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) (z+h_0) \right. \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ -2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0 y^2 + 3x_0 (z+h_0)^2 + 2x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& - \frac{y^2 \left\{ -8[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 15x_0 y^2 + 30x_0 (z-h_0)^2 \right.}{+ 15x_0 (z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5 \left. \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \left. \right] \quad (3.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[B_z]^+_{x=0} = & \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{y \left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& - \frac{y \left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \left. + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) y \right. \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ -2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0 y^2 + 3x_0 (z+h_0)^2 + 2x_0^3 \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} - \right. \\
& - \frac{(z+h_0)^2 \left\{ -8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 15x_0 y^2 + 30x_0 (z+h_0)^2 \right.}{+ 15x_0 (z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5 \left. \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \left. \right] \quad (3.24)
\end{aligned}$$

$$[B_x]^-_{x=0} = \frac{j\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \cdot y(z+h_0) \cdot \left[\frac{\left\{ 5x_0^3 y^2 + 5x_0^3 (z+h_0)^2 + 2x_0^5 + 2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]^2} \right] \quad (3.25)$$

$$[B_y]^-_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{-(z-h_0) \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\ \left. + \frac{(z-h_0) \left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] + \frac{\mu_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} (k_0 h_0) (z+h_0) \\ \cdot \left[\frac{-\left\{ 3x_0^3 y^2 + 3x_0^3 (z+h_0)^2 + 2x_0^5 + 2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} + \right. \\ \left. y^2 \left\{ 15x_0 y^2 + 30x_0 y^2 (z-h_0)^2 + 15x_0 (z-h_0)^4 + 20x_0^3 y^2 \right. \right. \\ \left. \left. + 20x_0^3 (z+h_0)^4 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \right\} \right] \\ \left. \frac{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (3.26)$$

$$[B_z]^-_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{y \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\ \left. - \frac{y \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\ + \frac{\mu_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} (k_0 \cdot h_0) y \\ \cdot \left[\frac{\left\{ -3x_0 y^2 + 3x_0 (z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} + \right.$$

$$\left. \frac{(z+h_0)^2 \left\{ 15x_0y^4 + 30x_0y^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^2 + 20x_0^3 + 20(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2+y^2+(z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \right\}}{[y^2+(z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2+y^2+(z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \right| \quad (3.27)$$

전계에 대하여도 지배적인 항을 취하여 같은 방법으로 적분하면 식 (3.28)~(3.33)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [E_x]^+_{x=0} &= \frac{jw\mu_0 I}{2\pi \dot{k}_1^2} \cdot (k_0 h_0) \cdot \left[\frac{\left\{ -x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\ &\quad \left. - \frac{y^2 \left\{ -2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0y^3 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3.28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [E_y]^+_{x=0} &= \frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \left[\frac{y \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z-h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{y \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\ &\quad + \frac{w\mu_0 I}{2\pi \dot{k}_1^2} \cdot \frac{y \left\{ (z-h_0)[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.29) \end{aligned}$$

$$[E_z]^+_{x=0} = \frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \left[\frac{(z-h_0) \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z-h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right.$$

$$- \frac{(z + h_0) \cdot \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z + h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \Bigg] \quad (3.30)$$

$$[E_x]^-_{x=0} = \frac{jw\mu_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \cdot (k_0 h_0) \cdot \left[\frac{-\left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z + h_0)^2]} \right. \\ \left. + \frac{y^2 \left\{ 3x_0 y^3 + 3x_0 (z + h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z + h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3.31)$$

$$[E_y]^-_{x=0} = \frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \cdot y \left[\frac{\left\{ [x_0^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z - h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\ \left. - \frac{\left\{ x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z + h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\ - \frac{jw\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \cdot \frac{y \left\{ x_0^3 + (z - h_0)[x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z + h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.32)$$

$$[E_z]^-_{x=0} = \frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \left[\frac{(z - h_0) \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z - h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\ \left. - \frac{(z + h_0) \cdot \left\{ [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + x_0^3 \right\}}{[y^2 + (z + h_0)^2] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (3.33)$$

3.2.2 분기전선에 의한 전자파 전자계

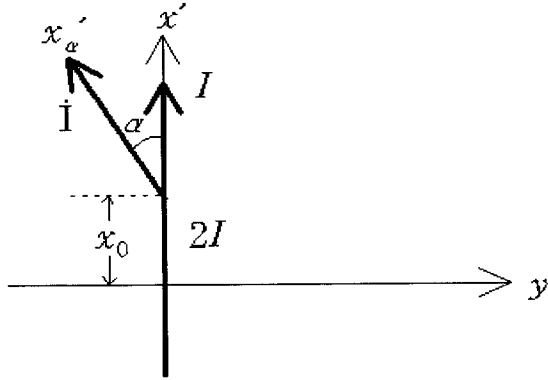


그림 3.3 무한장 직선도체와 $x' - y$ 좌표계

Fig. 3.3 Power line with branch line and $x' - y$ rectangular coordinates

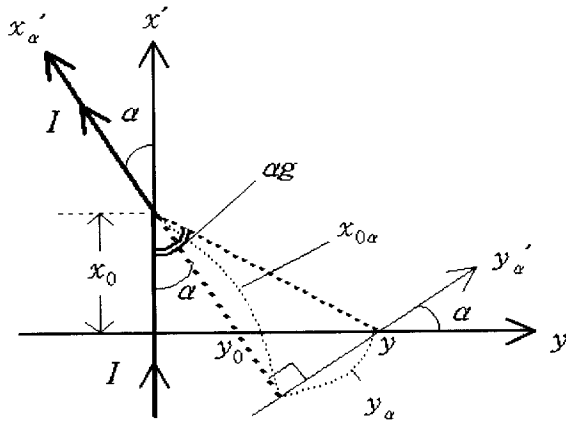


그림 3.4 분기전선부에 의한 전자계의 $x'_\alpha - y_\alpha$ 좌표계

Fig. 3.4 Branch line part and new rectangular $x'_\alpha - y_\alpha$ coordinates

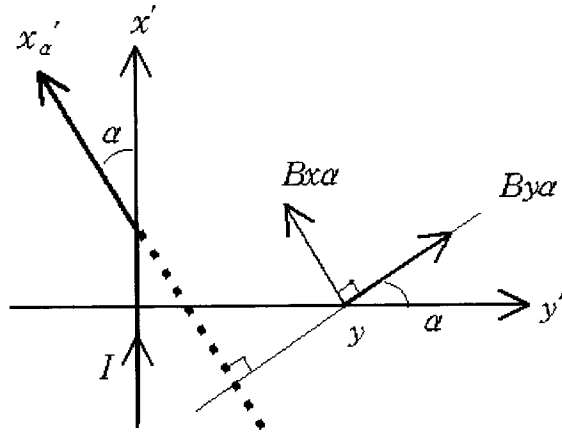


그림 3.5 분기전선부에 의한 자계성분

Fig. 3.5 Components of magnetic field by branch line part

분기전선은 그림 3.3과 같이 x' 방향의 무한장 직선도체로부터 $x' = x_0$ 점에서 일정한 각도를 가지고 분기되어 있는 경우에 해당된다. 이와 같이 분기전선이 있는 경우의 전자계를 해석하기 위해서는 먼저 그림 3.4와 같이 $x' = x_0$ 인 점에서 x' 축으로부터 각 α 만큼 기울어져 있는 경우를 해석해야 한다.

그림 3.4에서 분기전선 부분은 x_0 점에서 전류 I 가 x_a' 축의 무한대 방향으로 향하는 전선이며 이를 “분기전선부”, x' 축상에서 $-\infty$ 로부터 x_0 까지 전류 I 가 흐르는 전선 부분을 “기준전선부”라 하기로 한다.

분기전선부에 의한 전자계는 $x' - y$ 좌표계를 시계방향으로 각 α 만큼 회전시키는 새로운 좌표계 즉 $x_a' - y_a$ 좌표계를 고려해야 하며 식 (3.22)~(3.24) 및 식 (3.28)~(3.30)의 x_0 및 y 대신에 x_a 및 y_a 를 대입시키면 된다. 여기서 x_a 및 y_a 를 $x - y - z$ 좌표계로 환산하면 다음과 같이 된다.

$$x_{a0} = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (3.34)$$

$$y_0 = x_0 \tan \alpha \quad (3.35)$$

$$y_a = y \cos \alpha - x_0 \sin \alpha \quad (3.36)$$

그림 3.4의 y 점에서의 자계성분 $[B_{xa}]_{xa=0}$ 및 $[B_{ya}]_{xa=0}$ 은 그림 4와 같은 방향이며, 이것을 $x - y - z$ 좌표계로 환산하면 식 (3.37) 및 (3.38)로 주어진다.

$$[B_x]_{x=0}^a = [B_{xa}]_{xa=0} \cos \alpha + [B_{ya}]_{xa=0} \sin \alpha \quad (3.37)$$

$$[B_y]_{x=0}^a = -[B_{xa}]_{xa=0} \sin \alpha + [B_{ya}]_{xa=0} \cos \alpha \quad (3.38)$$

또 z_a 방향은 $x-y-z$ 좌표계의 방향과 동일하므로 z 방향성분 $[B_z]_{x=0}^a$ 는 식 (3.39)으로 주어진다.

$$[B_z]_{x=0}^a = [B_{za}]_{xa=0} \quad (3.39)$$

전계에 대하여도 동일한 방법을 적용하여 식 (3.40)~(3.42)을 얻을 수 있다.

$$[E_x]_{x=0}^a = [E_{xa}]_{xa=0} \cos \alpha + [E_{ya}]_{xa=0} \sin \alpha \quad (3.40)$$

$$[E_y]_{x=0}^a = -[E_{xa}]_{xa=0} \sin \alpha + [E_{ya}]_{xa=0} \cos \alpha \quad (3.41)$$

$$[E_z]_{x=0}^a = [E_{za}]_{xa=0} \quad (3.42)$$

한편 기준전선부에 의한 전자계는 $x-y-z$ 좌표계의 값을 그대로 적용하면 된다. 따라서 기준전선부에 의한 전자계는 식 (3.43) 및 (3.44)로 주어진다.

$$[B_s]_{x=0}^r = [B_s]_{x=0}^- \quad (3.43)$$

$$[E_s]_{x=0}^r = [E_s]_{x=0}^- \quad (3.44)$$

단, $s = x, y, z$

실제적으로 그림3.3과 같이 x_0 점에서 분기되어 있는 전력선의 경우에 있어서 전자파 전자계는 식 (3.45) 및 (3.46)에 의해 계산할 수 있다.

$$[B_s]_{x=0}^{a \cdot r} = [B_s]_{x=0}^+ + [B_s]_{x=0}^- + [B_s]_{x=0}^r + [B_s]_{x=0}^a \quad (3.45)$$

$$[E_s]_{x=0}^{a \cdot r} = [E_s]_{x=0}^+ + [E_s]_{x=0}^- + [E_s]_{x=0}^r + [E_s]_{x=0}^a \quad (3.46)$$

제 4장 3상 분기전력선하의 전자파 전자계

4.1 전자계의 정식화

그림 4.1 과 같은 수평배열 전력선에 그림 3.2 와 같은 분기전력선이 있는 경우의 전자계를 고려하고 이를 정식화하기로 한다.

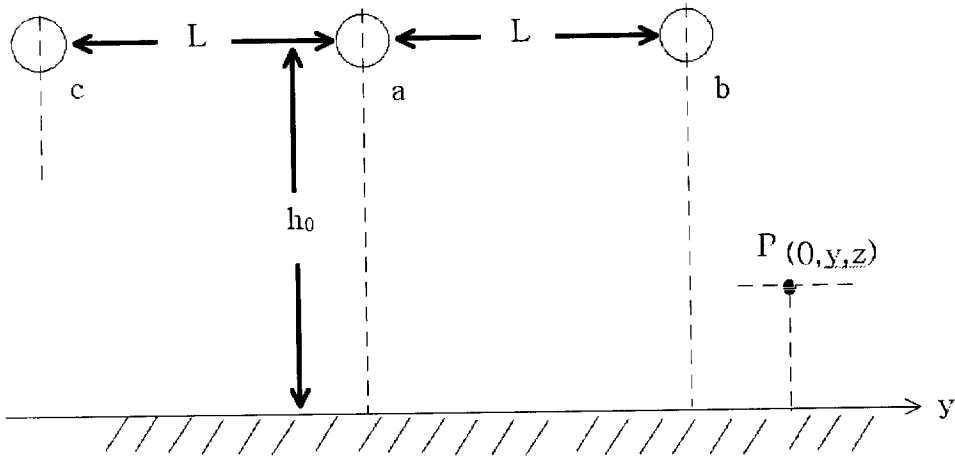


그림 4.1 3상 1회선 수평전선 배열

Fig. 4.1 Horizontal configuration of 3 wires in 3 phase 1 circuit power line

4.1.1 자계

3상 전력선로의 전류를 평형 3상 정현파 전류로 가정하면 각상의 전류는 식 (4.1)~(4.3)으로 주어진다.

$$\dot{I}_a = I \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_b = I e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (4.2)$$

$$\dot{I}_c = I e^{-j\frac{4}{3}\pi} \quad (4.3)$$

대지에 대한 파정수 k_1 에 대하여 $k_1 = j\omega\mu_0\sigma_1 = jk_1^2$ 을 고려하면 분기전선부 및 기준전선부의 전자파 자계는 식 (4.4)~(4.9)로 주어진다.

$$\begin{aligned}
[B_{\alpha\alpha}]_{\alpha=0} &= -\frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \\
&\cdot \left[-\frac{y_\alpha(z+h_0) \left\{ -2 [x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 5 y_\alpha^2 x_{\alpha 0}^3 + 5 (z+h_0)^2 x_{\alpha 0}^3 + 2 x_{\alpha 0}^5 \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^2} \right. \\
&+ e^{-j\frac{2}{3}\pi} (y_\alpha - L)(z+h_0) \\
&\cdot \frac{\left\{ -2 [x_{\alpha 0}^2 + (y_\alpha - L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 5 (y_\alpha - L)^2 x_{\alpha 0}^3 + 5 (z+h_0)^2 x_{\alpha 0}^3 + 2 x_{\alpha 0}^5 \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + (y_\alpha - L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [(y_\alpha - L)^2 + (z+h_0)^2]^2} \\
&+ e^{-j\frac{4}{3}\pi} (y_\alpha + L)(z+h_0) \\
&\cdot \left. \frac{\left\{ -2 [x_{\alpha 0}^2 + (y_\alpha + L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 5 (y_\alpha + L)^2 x_{\alpha 0}^3 + 5 (z+h_0)^2 x_{\alpha 0}^3 + 2 x_{\alpha 0}^5 \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + (y_\alpha + L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [(y_\alpha + L)^2 + (z+h_0)^2]^2} \right] \quad (4.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[B_{y\alpha}]_{\alpha=0} &= \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{-(z-h_0) \cdot \left\{ -x_{\alpha 0} + [x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y_\alpha^2 + (z-h_0)^2]} \right. \right. \right. \\
&+ \left. \frac{(z+h_0) \cdot \left\{ -x_{\alpha 0} + [x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
&- \frac{j\mu_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z+h_0) \\
&\cdot \left[\frac{\left\{ -2 [x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3 x_{\alpha 0} y_\alpha^2 + 3 x_{\alpha 0} (z+h_0)^2 + 2 x_{\alpha 0}^3 \right\}}{[x_{\alpha 0}^2 + y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [y_\alpha^2 + (z+h_0)^2]^2} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{y_a^2 \left\{ -8 \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} + 15 x_{a0} y_a^4 + 30 x_{a0} y_a^2 (z + h_0)^2 \right.}{\left. + 15 x_{a0} (z + h_0)^4 + 20 y_a^2 x_{a0}^3 + 20 (z + h_0)^2 x_{a0}^3 + 8 x_{a0}^5 \right\}}{\left[y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^3 \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j \frac{2}{3} \pi} \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{-(z - h_0) \cdot \left\{ x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]} \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(z + h_0) \cdot \left\{ -x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]} \right] \right. \\
& \quad \left. - \frac{j \mu_0 I}{2\pi \vec{k}_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z + h_0) \right. \\
& \quad \cdot \left[\frac{\left\{ -2 \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + 3 x_{a0} (y_a - L)^2 + 3 x_{a0} (z + h_0)^2 + 2 x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^2 \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \quad \left. - (y_a - L)^2 \cdot \right. \\
& \quad \left. \frac{\left\{ -8 \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} + 15 x_{a0} (y_a - L)^4 + 15 x_{a0} (z + h_0)^4 \right.}{\left. + 30 x_{a0} (y_a - L)^2 (z + h_0)^2 + 20 (y_a - L) x_{a0}^3 + 20 (z + h_0)^2 x_{a0}^3 + 8 x_{a0}^5 \right\}}{\left[(y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^3 \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j \frac{4}{3} \pi} \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{-(z - h_0) \cdot \left\{ x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y_a + L)^2 + (z - h_0)^2 \right]} \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \frac{(z + h_0) \cdot \left\{ -x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]} \right] \right. \\
& \quad \left. - \frac{j \mu_0 I}{2\pi \vec{k}_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z + h_0) \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \left[\frac{\left\{ -2 \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + 3x_{a0}(y_a + L)^2 + 3x_{a0}(z + h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^2 \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - (y_a + L)^2 \cdot \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \frac{\left\{ -8 \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} + 15x_{a0}(y_a + L)^4 + 15x_{a0}(z + h_0)^4 \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 30x_{a0}(y_a + L)^2(z + h_0)^2 + 20(y_a + L)x_{a0}^3 + 20(z + h_0)^2x_{a0}^3 + 8x_{a0}^5 \right\}}{\left[(y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^3 \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& \hspace{15cm} (4.5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[B_{za}]_{xa=0} &= \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{y_a \left\{ -x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[y_a^2 + (z - h_0)^2 \right]} \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - \frac{y_a \left\{ -x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]} \right] \right. \\
& \quad \left. - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) y_a \right. \\
& \quad \cdot \left[\frac{\left\{ -2 \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + 3x_a y_a^2 + 3x_a (z + h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{\left[y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^2 \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \quad \left. - \frac{(z + h_0)^2 \left\{ -8 \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}} + 30x_{a0} y_a^2 (z + h_0)^2 \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 15x_{a0} y_a^4 + 15x_{a0} (z + h_0)^4 + 20y_a^2 x_{a0}^3 + 20(z + h_0)^2 x_{a0}^3 + 8x_{a0}^5 \right\}}{\left[y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^3 \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{(y_a - L) \cdot \left\{ -x_{a0} + \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}}{\left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]} \right. \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(y_a - L) \cdot \left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]} \Bigg| \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0)(y_a - L) \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ -2[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_a(y_a - L)^2 + 3x_a(z + h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a^2 - L)^2 + (z + h_0)^2]^2 \cdot [x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z + h_0)^2 \left\{ -8[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 30x_{a0}(y_a - L)^2(z + h_0)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + 15x_{a0}(y_a - L)^4 + 15x_{a0}(z + h_0)^4 + 20(y_a - L)^2 x_{a0}^3 + 20(z + h_0)^2 x_{a0}^3 + 8x_{a0}^5 \right\}}{[y_a^2 + (z + h_0)^2]^3 \cdot [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{(y_a + L) \cdot \left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y_a + L)^2 + (z - h_0)^2]} \right. \right. \\
& \left. - \frac{(y_a + L) \cdot \left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]} \right] \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0)(y_a + L) \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ -2[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_a(y_a + L)^2 + 3x_a(z + h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a^2 + L)^2 + (z + h_0)^2]^2 \cdot [x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z + h_0)^2 \left\{ -8[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 30x_{a0}(y_a + L)^2(z + h_0)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + 15x_{a0}(y_a + L)^4 + 15x_{a0}(z + h_0)^4 + 20(y_a + L)^2 x_{a0}^3 + 20(z + h_0)^2 x_{a0}^3 + 8x_{a0}^5 \right\}}{[y_a^2 + (z + h_0)^2]^3 \cdot [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
[B_x]_{x=0}^r &= \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} \\
&\cdot \left[\frac{y(z+h_0) \left\{ 5x_0^3 y^2 + 5x_0 (z+h_0)^2 + 2x_0^5 + 2 [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]^2} \right. \\
&+ e^{-j\frac{2}{3}\pi} (y-L)(z+h_0) \\
&\cdot \frac{\left\{ 5x_0^3 (y-L)^2 + 5x_0^3 (z+h_0)^2 + 2x_0^5 + 2 [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^2} \\
&+ e^{-j\frac{4}{3}\pi} (y+L)(z+h_0) \\
&\cdot \frac{\left\{ 5x_0^3 (y+L)^2 + 5x_0^3 (z+h_0)^2 + 2x_0^5 + 2 [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^2} \Bigg] \quad (4.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[B_y]_{x=0}^r &= \left\| \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{-(z-h_0) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \right. \right. \\
&+ \left. \frac{(z+h_0) \cdot \left\{ x_0^2 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
&- \frac{j\mu_0 I}{2\pi \tilde{k}_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z+h_0) \\
&\cdot \left[\frac{\left\{ 3x_0 y^2 + 3x_0 (z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2 [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \right. \\
&\cdot \left. \frac{y^2 \{ 15x_0 y^4 + 30x_0 y^2 (z+h_0)^2 + 15x_0 (z+h_0)^4 + 20x_0^3 y^2 \right.}{+ \frac{+ 20x_0^3 (z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8 [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}} \left. \right] \Bigg\| \Bigg\|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left\| \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right. \right. \\
& \cdot \left[\frac{-(z-h_0) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y-L)^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& + \left. \frac{(z+h_0) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y-L)^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z+h_0) \\
& \cdot \left[\frac{-\left\{ 3x_0(y-L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \quad \left. (y-L)^2 \cdot \{ 15x_0(y-L)^4 + 30x_0(y-L)^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 \right. \\
& + \left. \frac{+ 20x_0^3(y-L)^2 + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \}}{[(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \right] \Bigg\| \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left\| \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right. \right. \\
& \cdot \left[\frac{-(z-h_0) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& + \left. \frac{(z+h_0) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0)(z+h_0) \\
& \cdot \left[\frac{-\left\{ 3x_0(y+L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left. \left. \begin{aligned} & (y+L)^2 \cdot \{15x_0(y+L)^4 + 30x_0(y+L)^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 \\ & + 20x_0^3(y+L)^2 + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}\} \\ & + \frac{+ 20x_0^3(y+L)^2 + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \right| \right| \right| \\
& \hspace{15cm} (4.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[B_z]_{x=0}^r = & \left| \left| \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \left[\frac{y \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \right. \right. \right. \\
& - \left. \frac{y_a \left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) y \\
& \cdot \left[\frac{- \left\{ 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. \left. \left. \begin{aligned} & (z+h_0)^2 \{ 15y^4 + 30x_0 y^2 (z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 + 20x_0^3 y^2 \\ & + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} \} \\ & + \frac{+ 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[y^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \right| \right] \right| \right| \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left| \left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right. \right. \\
& \cdot \left[\frac{(y-L) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y-L)^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& - \frac{j\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0)(y-L) \\
& \cdot \left. \left. \left. \begin{aligned} & - \left\{ 3x_0(y-L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\} \\ & \left. \left. \left. \begin{aligned} & [(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \right| \right] \right] \right|
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left. \left. \begin{aligned} & (z+h_0)^2 \cdot \{15x_0(y-L)^4 + 30x_0(y-L)^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 \\ & + 20x_0^3(y-L)^2 + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}\} \\ & + \frac{[(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \right] \right] \right] \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\left[\frac{\mu_0 I}{4\pi} \right. \right. \\
& \cdot \left[\frac{(y+L) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
& \left. \left. - \frac{(y+L) \cdot \left\{ x_0 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z+h_0)^2]} \right] \right. \\
& \left. - \frac{j\mu_0 I}{2\pi\tilde{k}_1^2} (\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{h}_0)(y+L) \right. \\
& \cdot \left[\frac{-\left\{ 3x_0(y+L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. \left. \left. \begin{aligned} & (z+h_0)^2 \cdot \{15x_0(y+L)^4 + 30x_0(y+L)^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 \\ & + 20x_0^3(y+L)^2 + 20x_0^3(z+h_0)^2 + 8x_0^5 + 8[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}\} \\ & + \frac{[(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}} \end{aligned} \right] \right] \right] \\
& \left. \right] \quad (4.9)
\end{aligned}$$

따라서 분기전선부의 각 자계성분을 식(3.38)~(3.40)에 의해 $x-y-z$ 좌표계로 환산하여 $[B_x]_{x=0}^{ar}$, $[B_y]_{x=0}^{ar}$ 및 $[B_z]_{x=0}^{ar}$ 를 구하고 기준전선부의 각 자계성분을 식(4.10)~(4.12)와 같이 더하면 그림 3.3과 같은 전선의 경우에 대한 자계성분을 각각 얻을 수 있다. 또한 이 값들은 모두 복소량으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
[B_x]_{x=0}^{ar} &= [B_x]_{x=0}^a + [B_x]_{x=0}^r \\
&= B_{xarr} + jB_{xari} \\
&= B_{xar} \angle \theta_{bxar}
\end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\text{단, } B_{xar} = (B_{xarr}^2 + B_{xari}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{bxar} = \tan^{-1} \frac{B_{xari}}{B_{xarr}}$$

$$\begin{aligned} [B_y]_{x=0}^{ar} &= [B_y]_{x=0}^a + [B_y]_{x=0}^r \\ &= B_{yarr} + jB_{yari} \\ &= B_{yar} \angle \theta_{byar} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\text{단, } B_{yar} = (B_{yarr}^2 + B_{yari}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{byar} = \tan^{-1} \frac{B_{yari}}{B_{yarr}}$$

$$\begin{aligned} [B_z]_{x=0}^{ar} &= [B_z]_{x=0}^a + [B_z]_{x=0}^r \\ &= B_{zarr} + jB_{zari} \\ &= B_{zar} \angle \theta_{bzar} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\text{단, } B_{zar} = (B_{zarr}^2 + B_{zari}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{bzar} = \tan^{-1} \frac{B_{zari}}{B_{zarr}}$$

또 각 자계성분을 합성하여 그 합성자계의 크기 및 위상각을 구하면 식(4.13) 및 (4.14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} B_{ar} &= \left[\{ B_{xar}^2 \cos(2\theta_{bxar}) + B_{yar}^2 \cos(2\theta_{byar}) + B_{zar}^2 \cos(2\theta_{bzar}) \}^2 \right. \\ &\quad \left. + \{ B_{xar}^2 \sin(2\theta_{bxar}) + B_{yar}^2 \sin(2\theta_{byar}) + B_{zar}^2 \sin(2\theta_{bzar}) \}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\theta_{bar} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B_{xar}^2 \sin(2\theta_{bxar}) + B_{yar}^2 \sin(2\theta_{byar}) + B_{zar}^2 \sin(2\theta_{bzar})}{B_{xar}^2 \cos(2\theta_{bxar}) + B_{yar}^2 \cos(2\theta_{byar}) + B_{zar}^2 \cos(2\theta_{bzar})} \quad (4.14)$$

3상 무한장 직선도체의 경우는 $[B_s]_{x=0}^\infty$ $s = (x, y, z)$ 에서 $\alpha = \infty$ 인 분기전선부의 각 자계성분을 기준전선부 자계성분 $[B_s]_{x=0}^r$ 에 더한 식 (4.15)로 된다.

$$[B_s]_{x=0}^{\infty} = [B_s]_{x=0}^{\alpha=0} + [B_s]_{x=0}^r \quad (4.15)$$

따라서 실제의 경우 무한장 직선도체의 전력선에 α 의 각으로 분기되어 분기전력선이 있는 경우의 전력선에 의한 전자파 자계성분은 식 (4.10)~(4.12)에 식 (4.15)를 더한 식 (4.16)으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} [B_s]_{x=0}^{re} &= [B_s]_{x=0}^{ar} + [B_y]_{x=0}^{\infty} \\ &= B_{str} + jB_{sti} \\ &= B_{st} \angle \theta_{bst} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } B_{st} &= (B_{str}^2 + B_{sti}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \theta_{bst} &= \tan^{-1} \frac{B_{sti}}{B_{str}} \\ s &= x, y, z \end{aligned}$$

또 그 합성자계 및 위상각은 식 (4.17) 및 식 (4.18)로 주어진다.

$$\begin{aligned} B_{re} &= \left[\{ B_{xt}^2 \cos(2\theta_{bxt}) + B_{yt}^2 \cos(2\theta_{byt}) + B_{zt}^2 \cos(2\theta_{bzt}) \}^2 \right. \\ &\quad \left. + \{ B_{xt}^2 \sin(2\theta_{bxt}) + B_{yt}^2 \sin(2\theta_{byt}) + B_{zt}^2 \sin(2\theta_{bzt}) \}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\theta_{re} = \tan^{-1} \frac{B_{xt}^2 \sin(2\theta_{xt}) + B_{yt}^2 \sin(2\theta_{yt}) + B_{zt}^2 \sin(2\theta_{zt})}{B_{xt}^2 \cos(2\theta_{xt}) + B_{yt}^2 \cos(2\theta_{yt}) + B_{zt}^2 \cos(2\theta_{zt})} \quad (4.18)$$

4.1.2 전계

식 (4.1)~(4.3)의 평형 3상 전류와 대지에 대하여 $k_1 = jw\mu_0\sigma_1 = jk_1^2$ 의 파정수를 고려하면 분기전선부 및 기준전선부의 전자파 전계는 식 (4.19)~(4.24)로 주어진다.

$$\begin{aligned}
[E_{xa}]_{xa=0} = & -\frac{\omega\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) \\
& \cdot \left[\left[\frac{\left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y_a^2 + (z+h_0)^2]} \right. \right. \\
& - \frac{y_a^2 \left\{ -2[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 2x_{a0}y_a^2 + 3x_{a0}(z+h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \cdot [y_a^2 + (z+h_0)^2]^2} \left. \right] \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\frac{\left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
& - \frac{(y_a-L)^2 \cdot \left\{ -2[x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_{a0}(y_a-L)^2 + 3x_{a0}(z+h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \left. \right] \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{\left\{ -x_{a0} + [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
& - \frac{(y_a+L)^2 \cdot \left\{ -2[x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_{a0}(y_a+L)^2 + 3x_{a0}(z+h_0)^2 + 2x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]^2 \cdot [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \left. \right] \Bigg] \quad (4.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[E_{ya}]_{xa=0} = & \left[\frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} \right. \\
& \cdot \left[\frac{y_a \left\{ [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[y_a^2 + (z-h_0)^2] \cdot [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{y_a \left\{ \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[y_a^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \Bigg| \\
& - \frac{jw\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} \left[\frac{y_a \left\{ \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[y_a^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \left[\frac{(y_a - L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a - L)^2 + (z - h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{(y_a - L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a - L)^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \right. \\
& \left. - \frac{jw\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} \left[\frac{(y_a - L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a - L)^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a - L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \right] \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \left[\frac{(y_a + L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a + L)^2 + (z - h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{(y_a + L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a + L)^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \right. \\
& \left. - \frac{jw\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} \left[\frac{(y_a + L) \left\{ \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[(y_a + L)^2 + (z + h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + (y_a + L)^2 + (z + h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \right] \Bigg| \Bigg| \Bigg| \\
& \hspace{15cm} (4.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[E_{za}]_{za=0} &= \left| \left[\frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} \right. \right. \\
&\cdot \left. \left[\frac{(z - h_0) \left\{ \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{\left[y_a^2 + (z - h_0^2) \right] \cdot \left[x_{a0}^2 + y_a^2 + (z - h_0)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(z+h_0) \left\{ [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[y_a^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_{a0}^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\frac{(z-h_0) \left\{ [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a-L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z+h_0) \left\{ [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a-L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_{a0}^2 + (y_a-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{(z-h_0) \left\{ [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a+L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z+h_0) \left\{ [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} - x_{a0}^3 \right\}}{[(y_a+L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_{a0}^2 + (y_a+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\
& \hspace{15cm} (4.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[E_x]_{x=0}^r &= -\frac{\omega\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 \cdot h_0) \\
& \cdot \left[\left[\frac{-\left\{ x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{y^2 \left\{ 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 + 2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \cdot [y^2 + (z+h_0)^2]^3} \right] \right. \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\frac{-\left\{ x_{a0} + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}}{[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y-L)^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
& \left. + \frac{(y-L)^2 \cdot \left\{ 2[x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0(y-L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3 \right\}}{[(y-L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{-\left\{x_0^2 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}\right\}}{[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot [(y+L)^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
& \left. + \frac{(y+L)^2 \cdot \left\{2[x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0(y+L)^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3\right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0)^2]^3 \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\
\end{aligned} \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned}
[E_y]_{x=0}^r &= \left| \left[\frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} \cdot y \right. \right. \\
&\cdot \left[\frac{\left\{x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}\right\}}{[y^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
&- \left. \left. \frac{\left\{x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}\right\}}{[y^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \right| \\
&- \frac{\omega\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} \left| \left[\frac{\left\{x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}\right\}}{[y^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \right| \\
&+ e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left| \left[\frac{\omega\mu_0 I}{4\pi k_0} (y-L) \right. \right. \\
&\cdot \left[\frac{\left\{x_0^3 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}\right\}}{[(y-L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
&- \left. \left. \frac{\left\{x_0^3 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}\right\}}{[(y-L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \right| \\
&- \frac{\omega\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} (y_a - L)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \left[\frac{\left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y-L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} (y+L) \right. \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{\left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\
& \left. - \frac{w\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1^2} (y_a+L) \right. \\
& \cdot \left[\frac{\left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \Bigg| \Bigg| \\
& \hspace{15cm} (4.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[E_z]_{x=0}^r &= \left[\frac{w\mu_0 I}{4\pi k_0} \right. \\
& \cdot \left[\frac{(z-h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y_a^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + y_a^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z+h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[y^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + y_a^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right] \\
& + e^{-j\frac{2}{3}\pi} \left[\frac{(z-h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y-L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(z+h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y-L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y-L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \Bigg] \\
& + e^{-j\frac{4}{3}\pi} \left[\frac{(z-h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z-h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right. \\
& \left. - \frac{(z+h_0) \left\{ x_0^3 + [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} \right\}}{[(y+L)^2 + (z+h_0^2)] \cdot [x_0^2 + (y+L)^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right]
\end{aligned} \tag{4.24}$$

분기전서부의 각 전계성분 $[E_{sa}]_{xa=0}$ ($s=x, y, z$)를 식 (3.41)~(3.43)에 의해 $x-y-z$ 좌표계로 환산하여 $[E_x]_{x=0}^a$, $[E_y]_{x=0}^a$ 및 $[E_z]_{x=0}^a$ 를 구하고 기준전선부의 각 전계성분 $[E_s]_{x=0}^a$ 을 식(4.25)~(4.27)과 같이 더하면 그림 3.3과 같은 전선의 경우에 대한 전계성분을 각각 얻을 수 있으며 이 값들은 모두 복소량으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
[E_x]_{x=0}^{ar} &= [E_x]_{x=0}^a + [E_x]_{x=0}^r \\
&= E_{xarr} + E_{xari} \\
&= E_{xar} \angle \theta_{exar}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
\text{단, } E_{xar} &= (E_{xarr}^2 + E_{xari}^2)^{\frac{1}{2}} \\
\theta_{exar} &= \tan^{-1} \frac{E_{xari}}{E_{xarr}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[E_y]_{x=0}^{ar} &= [E_y]_{x=0}^a + [E_y]_{x=0}^r \\
&= E_{yarr} + E_{yari} \\
&= E_{yar} \angle \theta_{eyar}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

$$\text{단, } E_{yar} = (E_{yarr}^2 + E_{yari}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{eyar} = \tan^{-1} \frac{E_{yari}}{E_{yarr}}$$

$$\begin{aligned} [E_z]_{x=0}^{ar} &= [E_z]_{x=0}^a + [E_z]_{x=0}^r \\ &= E_{zarr} + E_{zari} \\ &= E_{zar} \angle \theta_{ezar} \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\text{단, } E_{zar} = (E_{zarr}^2 + E_{zari}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_{ezar} = \tan^{-1} \frac{E_{zari}}{E_{zarr}}$$

또 각 전계성분을 합성하여 그 합성자계의 크기 및 위상각을 구하면 식(4.28) 및 (4.29)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} E &= \left[\{ E_{xar}^2 \cos(2\theta_{bxar}) + E_{yar}^2 \cos(2\theta_{byar}) + E_{zar}^2 \cos(2\theta_{bzar}) \}^2 \right. \\ &\quad \left. + \{ E_{xar}^2 \sin(2\theta_{bxar}) + E_{yar}^2 \sin(2\theta_{byar}) + E_{zar}^2 \sin(2\theta_{bzar}) \}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\theta_{ear} = \tan^{-1} \frac{E_{xar}^2 \sin(2\theta_{bxar}) + E_{yar}^2 \sin(2\theta_{byar}) + E_{zar}^2 \sin(2\theta_{bzar})}{E_{xar}^2 \cos(2\theta_{bxar}) + E_{yar}^2 \cos(2\theta_{byar}) + E_{zar}^2 \cos(2\theta_{bzar})} \quad (4.29)$$

4.2 계산 예

그림 4.1 과 같은 수평전선 배열에서 기준전선부의 지표상 높이를 $h_{10} = 15 [m]$, 분기전선부의 지표상 높이를 $h_{20} = 13 [m]$ 로 한 그림 3.3의 경우, 즉 기준전선부 및 분기전선부만 있는 경우에 대하여 각 전자파 전자계의 성분을 검토하기로 한다.

분기각 α 와 관측점의 높이 z 가 미치는 영향을 분석하기 위하여 분기각 (z) 0 , $\frac{\pi}{3}$, $\frac{\pi}{2}$, $\frac{2}{3}\pi$ 및 관측점의 높이 (z) $2 [m]$, $13 [m]$ 의 경우에 대하여 검토하였다.

4.2.1 자계

그림 4.2 ~ 4.13의 (a) 및 (b)는 각 자계성분에 있어서 $z=2[m]$ 및 $z=13[m]$ 의 경우에 대하여 기준전선부의 전류에 의해 발생하는 자계성분 $B_{i0}(i=x, y, z)$ 와 분기전선부의 전류에 의해 발생하는 자계성분 $B_{i1}(i=x, y, z)$ 을 이들의 합성인 $B_i(i=x, y, z)$ 와 함께 도시한 것이다.

(1) B_x

(a) $\alpha=0$

$z=2[m]$ 의 경우 (그림4.2(a)) B_{x0}, B_{x1}, B_x 는 모두 작은 값을 가지고 있다. 이것은 $\alpha=0$ 인 경우가 x' 방향의 무한장 직선도체의 전류이므로 이 전류에 의한 x 방향성분의 직접 자계는 존재하지 않고, 반사파에 의한 자계성분만이 존재하기 때문이다.

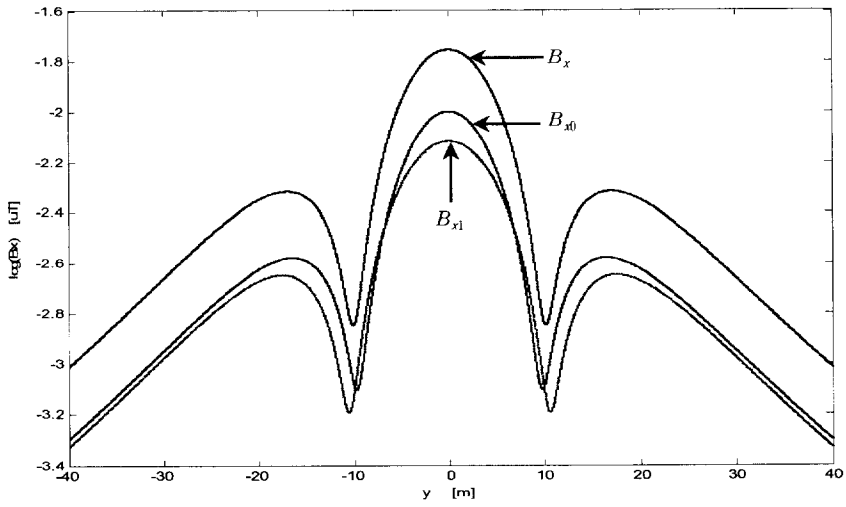
B_{x0}, B_{x1} 및 B_x 모두 3개의 피크를 나타내고 있다. 여기서 B_{x0} 는 분기각 α 에 의존하지 않으므로 이후 B_{x1} 에 주목하여 검토하기로 한다.

$z=13[m]$ 의 경우 (그림4.2(b)) B_{x0}, B_{x1} 및 B_x 가 $z=2[m]$ 인 경우와 거의 같은 변화 양상을 나타내지만 그 값은 더 작다. 이것은 x 성분의 자계가 대지에 대한 반사파에 의한 것으로서 대지로부터 먼 거리 일수록 그 값이 작아지기 때문이다.

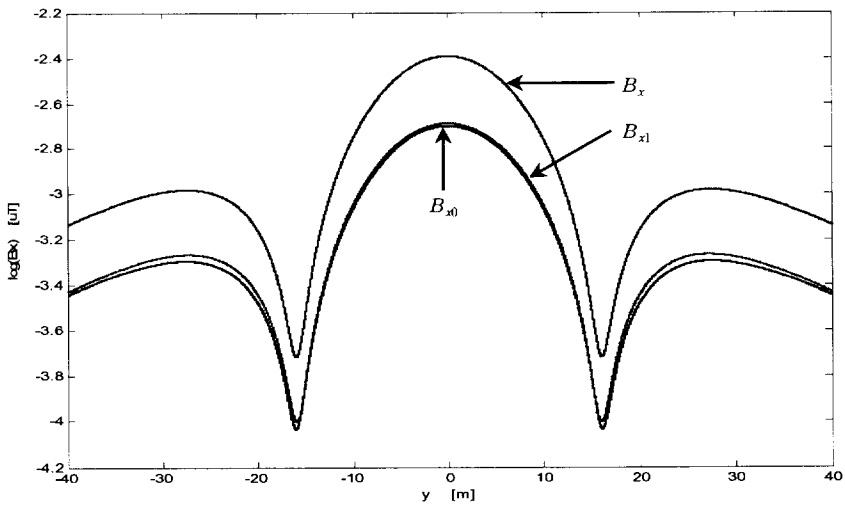
(b) $\alpha=\frac{\pi}{3}$

$z=2[m]$ 의 경우 (그림4.3(a)) B_{x1} 은 $-10[m]$ 근방에서 넓은 피크를 나타내며 y 의 $+x$ 측 $y_0=x_0 \tan \alpha$ 에서 극소값을 나타낸 후 다시 증가하여 작은 피크를 나타낸다. 또 그 값은 $\alpha=0$ 의 $z=2[m]$ 의 경우보다 크다. 이것은 분기전선부에 의한 직접자계의 영향이 나타나기 때문이다. B_x 는 B_{x1} 이 지배적이다

$z=13[m]$ 의 경우 (그림4.3(b)) B_{x1} 은 y 의 $-x$ 측에서 서서히 증가하여 일정한 값을 나타내며 $y=x_0 \tan \alpha$ 에서 극소값을 나타낸 후 약간 증가하여 포화특성을 보인다. 이 경우도 B_x 가 거의 B_{x1} 에 의존하며 그 값이 $z=2[m]$ 의 경우보다 작다.



(a)

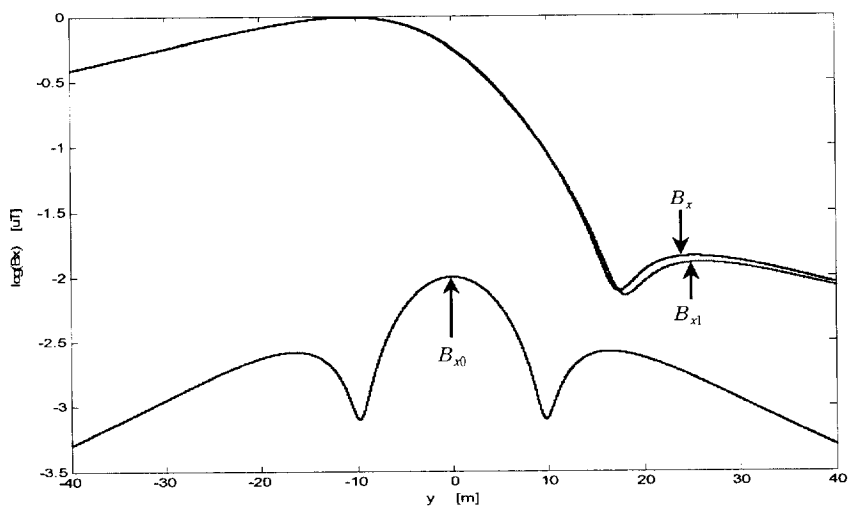


(b)

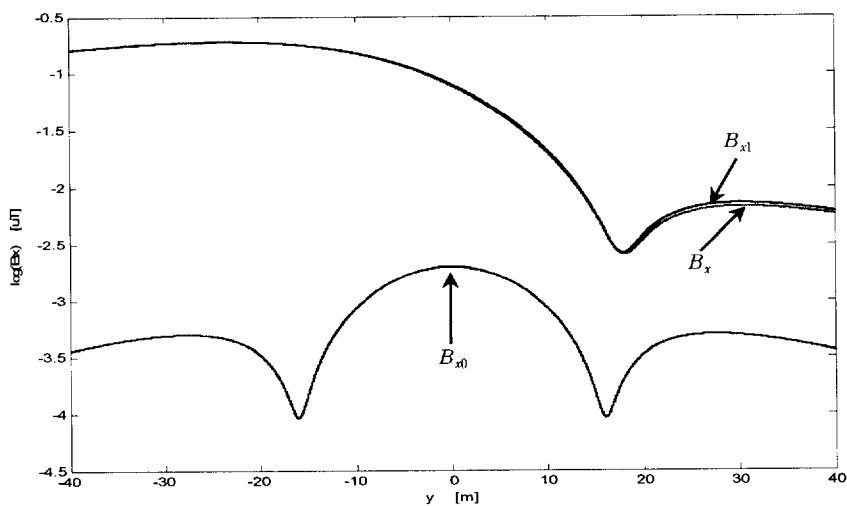
그림 4.2 $\alpha=0$ 인 경우의 x 방향 자기성분 B_{x0}, B_{x1}, B_x

Fig. 4.2 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha=0$ in case of

(a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$



(a)



(b)

그림 4.3 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 x 방향 자계성분 B_{x0}, B_{x1}, B_x

Fig. 4.3 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

$$(c) \alpha = \frac{\pi}{2}$$

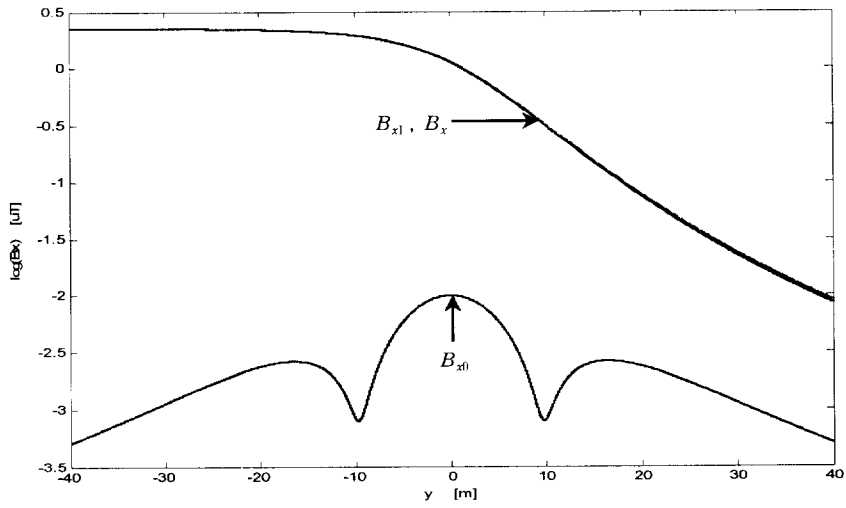
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.4(a)) B_{x1} 은 y 의 $-$ 측에서 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, y 의 $+$ 측에서는 단순 감소를 보인다. y 의 $-$ 측에서 B_{x1} 이 일정한 값을 나타내는 것은 분기전선의 위치가 y 의 $-$ 측과 평행하므로 y 축과의 거리가 x_0 로서 일정하기 때문이다. 이 경우도 B_x 는 B_{x1} 에 지배된다

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.4(b)) B_{x1} 은 $z = 2[m]$ 의 경우와 마찬가지로 y 의 $-$ 측에서 일정한 값을 나타내며, y 의 $+$ 측에서는 단순 감소를 나타낸다. 또한 B_x 는 B_{x1} 에 지배되며 이 경우도 $z = 2[m]$ 의 경우보다 그 값이 작다.

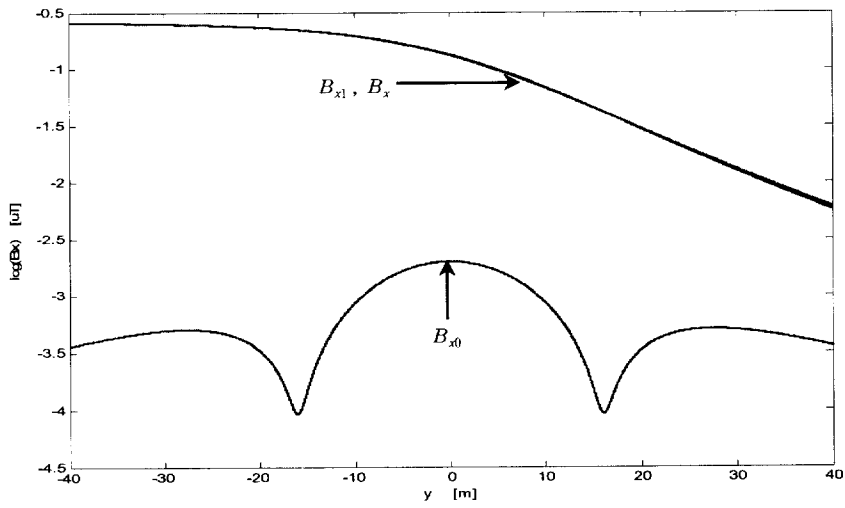
$$(d) \alpha = \frac{2}{3} \pi$$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.5(a)) $y = 0$ 의 $-$ 측에서 2개의 피크를 나타내며 $+$ 측에서는 y 의 증가에 따라 단순 감소를 나타낸다.

$z = 13[m]$ 의 경우(그림4.5(b))도 B_{x1} 이 $z = 2[m]$ 의 경우와 거의 같은 변화양상을 보이나, 그 값은 $z = 2[m]$ 의 경우보다 작다. 또한 B_x 는 두가지 경우 모두 B_{x1} 이 지배적이다.



(a)

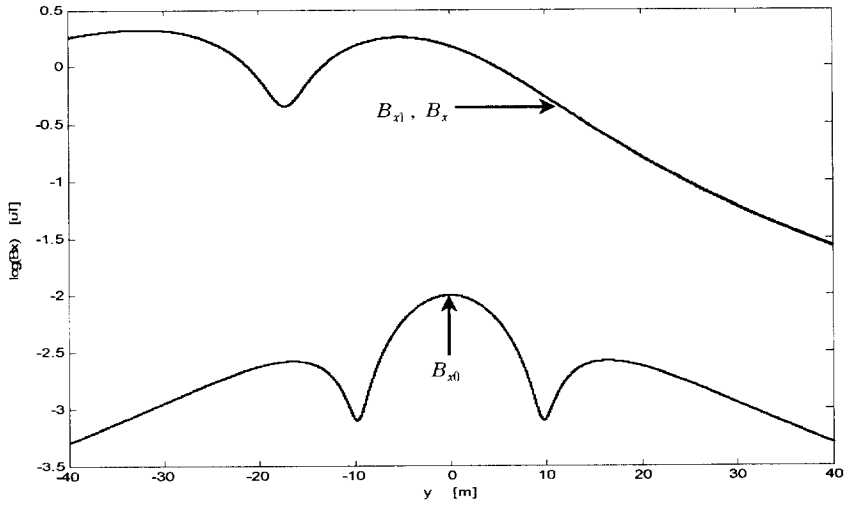


(b)

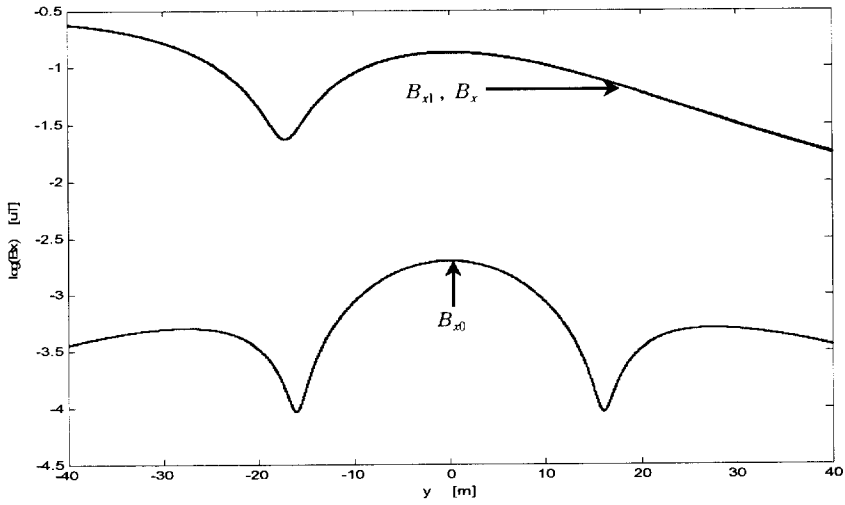
그림 4.4 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 x 방향 자계 성분 B_{x0}, B_{x1}, B_x

Fig. 4.4 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$



(a)



(b)

그림 4.5 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 x 방향 자계성분 B_{x0}, B_{x1}, B_x

Fig. 4.5 Magnetic fields B_{x0}, B_{x1} and B_x in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

(2) B_y

(a) $\alpha = 0$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.6(a)) 기준전선부의 y 방향 자계성분 B_{y0} 분기전선부의 y 방향 자계성분 B_{y1} 및 이들의 합성인 B_y 는 $y=0$ 을 중심으로 2개의 피크를 나타내고 있다. B_{y0} 가 B_{y1} 보다 크며 B_y 는 B_{y0} 의 영향이 큼을 알 수 있다. 또 B_{y0} 는 α 의 변화에 영향을 받지 않는다.

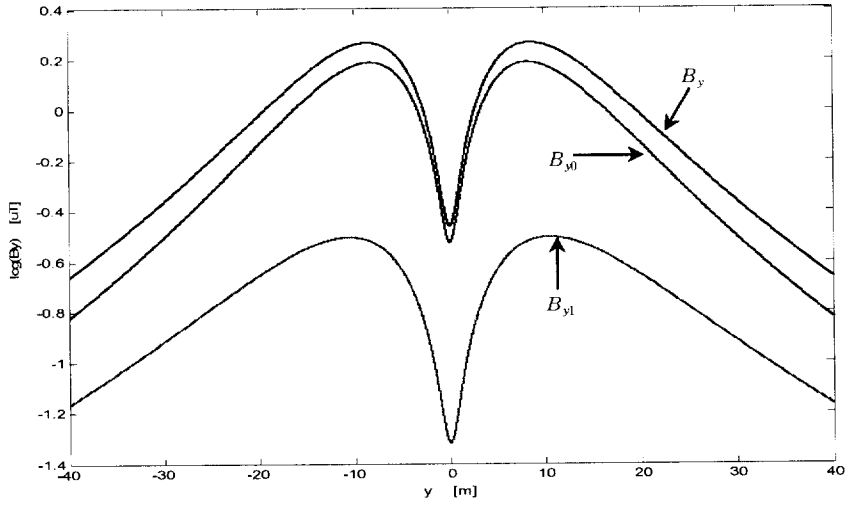
$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.6(b)) B_{y1} 은 $y=0$ 을 중심으로 2개의 피크를 나타내고 있으며 B_{y0} 은 3상의 각 전선 위치에 3개의 피크를 나타낸다. $y=0$ 의 부근에서는 B_{y0} 의 값이 B_{y1} 보다 훨씬 커서 B_y 는 B_{y0} 가 지배적이나 $y=0$ 에서 먼 경우에는 B_{y1} 의 영향이 B_y 에 미치고 있음을 알 수 있다. 또 $z=2[m]$ 의 경우보다 B_{y0} , B_{y1} 및 B_y 가 훨씬 크다. 이것은 기준전선부 및 분기전선부에 의한 직접자계의 영향이 크고 관측점이 각 부의 전선위치와 가깝기 때문이다.

(b) $\alpha = \frac{\pi}{3}$

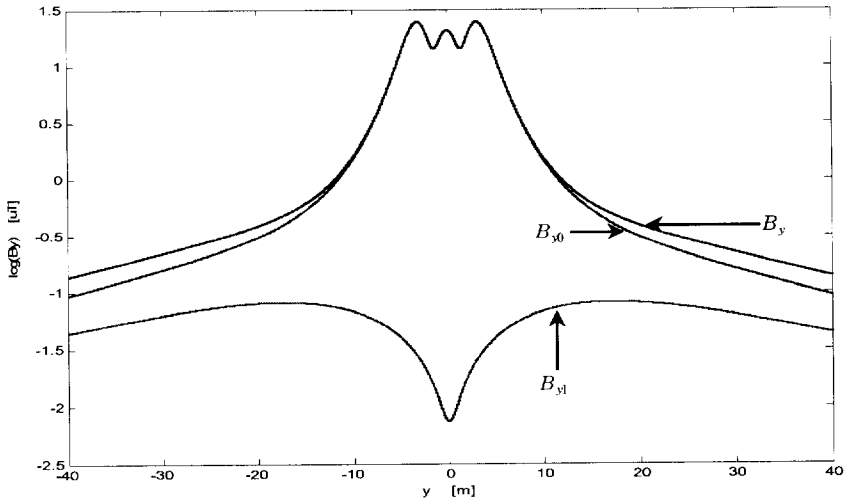
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.7(a)) B_{y1} 은 2개의 넓은 비대칭 피크를 나타내며 분기전선부가 위치해 있는 y 의 $-$ 측 피크가 훨씬 크다. B_y 는 $\alpha=0$, $z=2[m]$ 의 경우보다 B_{y1} 의 영향이 크다. y 의 $+$ 측에서는 B_{y0} 가 지배적이다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.7(b)) B_{y1} 은 $z=2[m]$ 의 경우와 거의 같은 변화양상을 보이나 그 값은 더 작다. 이것은 B_{y1} 의 구성요소 중 $B_{xa} \sin \alpha$ 에서 B_{xa} 가 반사파에 의한 자계로서 주어지며 따라서 대지로부터의 거리가 먼 쪽이 B_{xa} 가 작기 때문이다.

B_y 는 $y=0$ 의 근방과 y 의 $+$ 측에서는 B_{y0} 가 지배적이다.



(a)

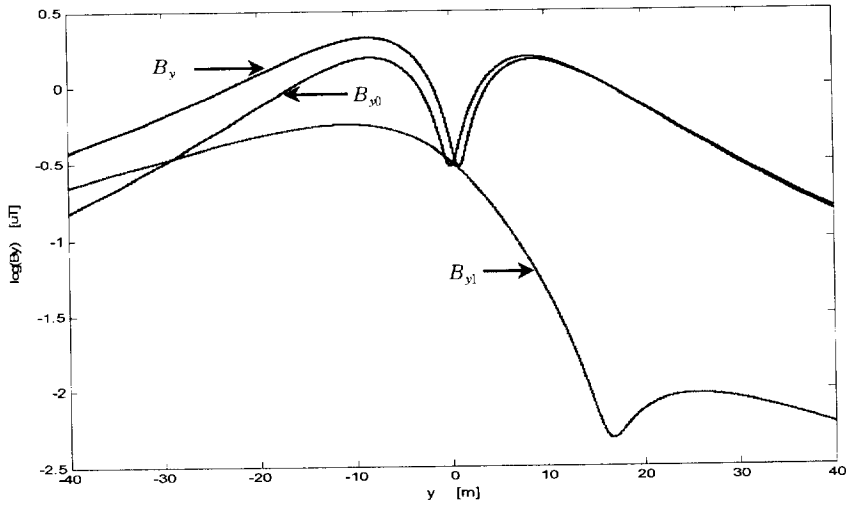


(b)

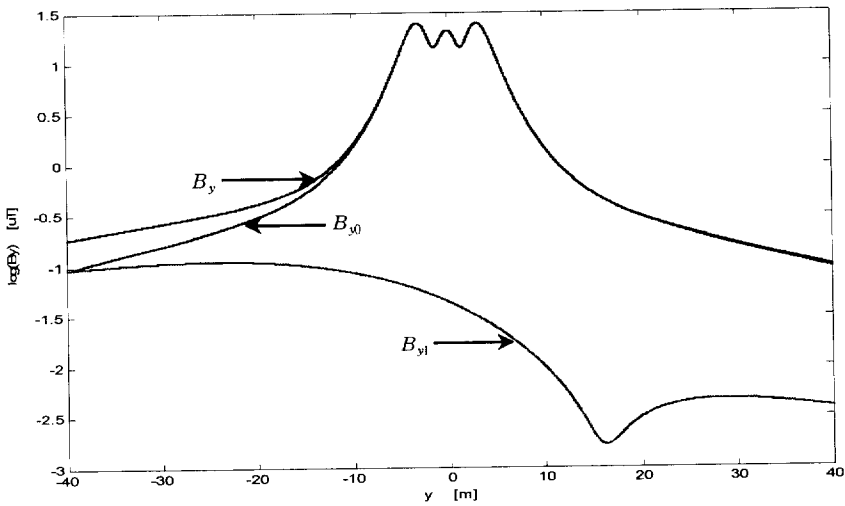
그림 4.6 $\alpha = 0$ 인 경우의 y 방향 자계성분 B_{y0} , B_{y1} , B_y

Fig. 4.6 Magnetic fields B_{y0} , B_{y1} and B_y in $\alpha = 0$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)



(b)

그림 4.7 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 y 방향 자계성분 B_{y0} , B_{y1} , B_y

Fig. 4.7 Magnetic fields B_{y0} , B_{y1} and B_y in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$

$$(c) \alpha = \frac{\pi}{2}$$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.8(a)) B_{y1} 은 그 구성요소 중 하나인 $B_{y\alpha} \cos \alpha$ 에서 직접 자체 요소가 주류인 $B_{y\alpha}$ 에 $\cos \frac{\pi}{2} = 0$ 이 곱해지므로 이 요소는 0이 되고 $B_{x\alpha} \cdot \sin \frac{\pi}{2} = B_x$ 만 남아 반사파 요소만 존재하여 그 값이 매우 작다. 따라서 B_y 는 y 의 전 구간에 걸쳐 B_{y0} 가 지배적이다.

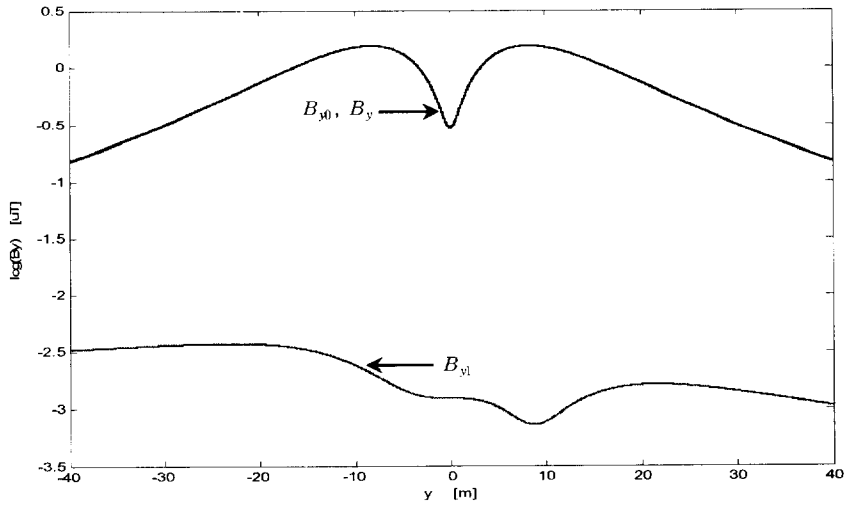
$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.8(b)) B_{y1} 은 $z = 2[m]$ 의 경우와 같은 이유로 그 값이 매우 작으며 B_y 는 B_{y0} 에 의해 지배된다.

$$(d) \alpha = \frac{2}{3} \pi$$

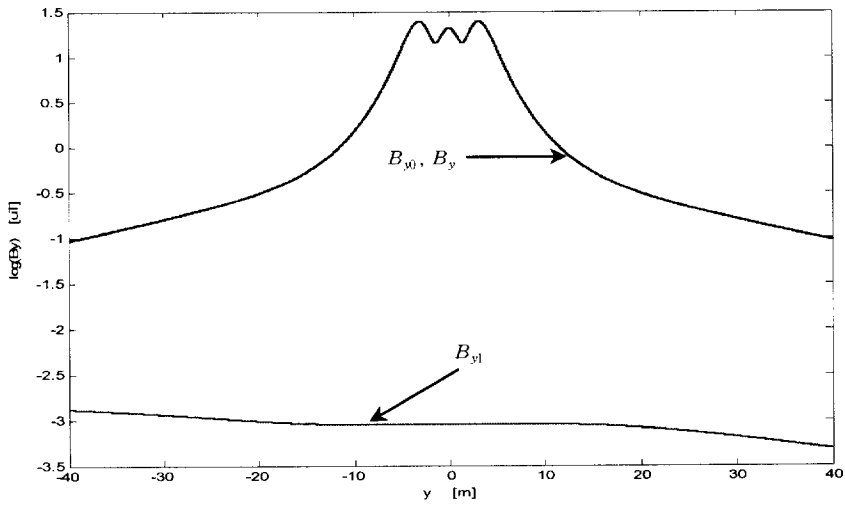
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.9(a)) B_{y1} 은 y 의 $-$ 측에서 2개의 피크를 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 단순감소를 나타낸다. B_y 는 약 $-13 < y < 0$ 범위에서 B_{y0} 와 B_{y1} 의 상쇄에 의해 결정되며 그 외의 구간에서는 B_{y0} 와 B_{y1} 의 회로서 주어짐을 알 수 있다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.9(b)) B_{y1} 은 $z = 2[m]$ 와 같은 변화 영향을 나타내나 그 값은 더 작다. B_y 는 $y = 0$ 의 근방과 y 의 $+$ 구간에서 B_{y0} 의 영향을 크게 받는다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 전자파 전자계의 y 성분 B_y 는 관측점의 높이 z 가 낮으면 분기전선부에 의한 영향을 크게 받으나 z 가 높아서 전선 가선높이에 근접하면 분기전선부의 영향은 작아지고 기준전선부의 영향이 크게 작용한다.



(a)

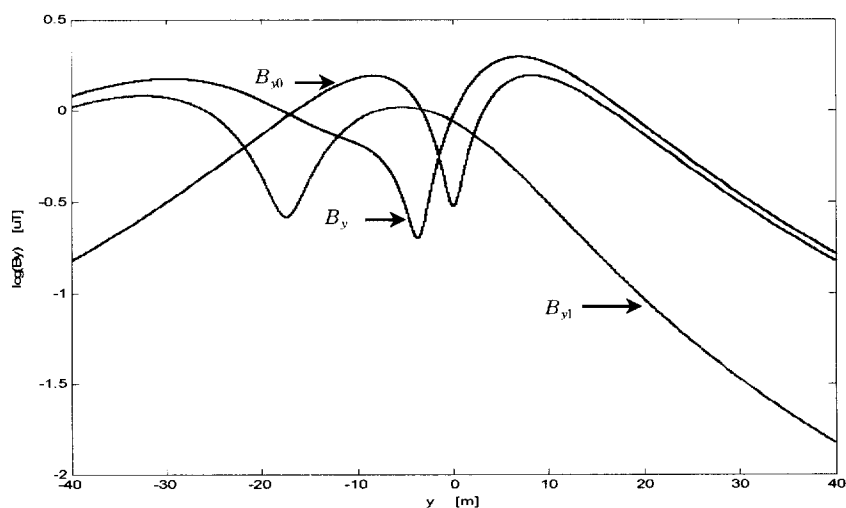


(b)

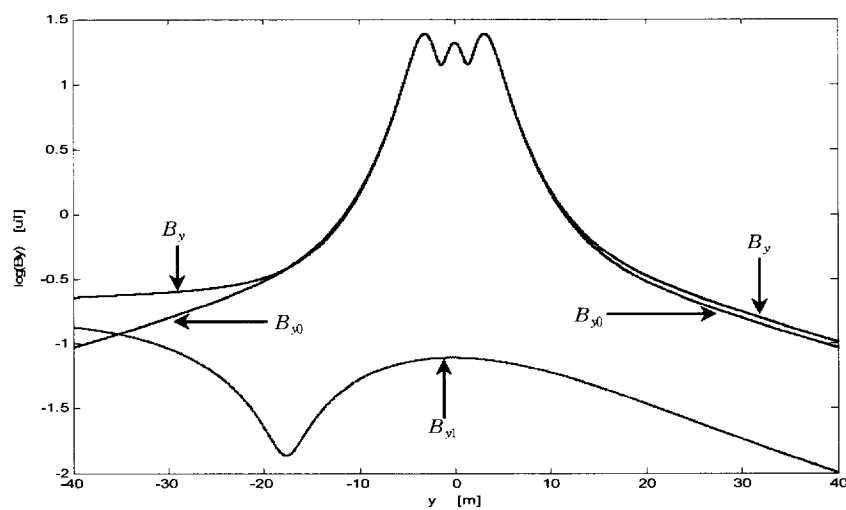
그림 4.8 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 y 방향 자계성분 B_{y0} , B_{y1} , B_y

Fig. 4.8 Magnetic fields B_{y0} , B_{y1} and B_y in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2$ [m] and (b) $z = 13$ [m]



(a)



(b)

그림 4.9 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 y 방향 자계성분 B_{y0} , B_{y1} , B_y

Fig. 4.9 Magnetic fields B_{y0} , B_{y1} and B_y in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

(3) B_z

(a) $\alpha = 0$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.10(a)) 기준전선부의 z 방향 자계성분 B_{z0} 분기전선부의 z 방향 자계성분 B_{z1} 및 이들의 합성인 B_z 는 모두 $y=0$ 의 중앙에 한 개의 큰 피크 그 좌우에 2개의 작은 피크를 나타내고 있다. B_z 는 B_{z0} 의 영향이 크게 작용한다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.10(b)) B_{y1} 은 $y=0$ 의 중앙에 큰 피크, 그 좌우에 2개의 작은 피크를 나타내며, B_{z0} 는 $y=0$ 의 좌우측에 크고 작은 2개씩의 피크를 나타내며 α 의 영향을 받지 않는다. B_z 는 $y=0$ 의 부근에서 B_{z0} 가 지배적이다.

(b) $\alpha = \frac{\pi}{3}$

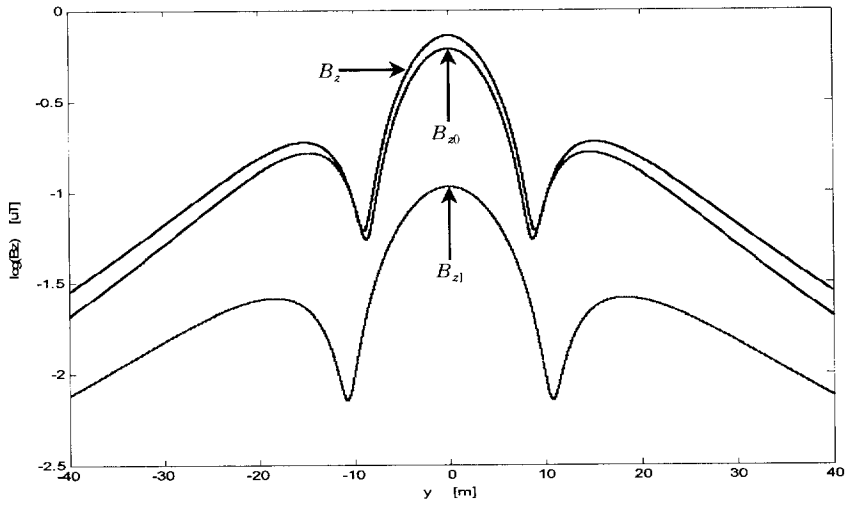
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.11(a)) B_{z1} 은 y 의 $-$ 측에 큰 피크, y 의 $+$ 측에 작은 피크를 나타내며 $-$ 측의 값이 $+$ 측의 값보다 훨씬 크다. B_z 는 y 의 $-$ 측에서는 B_{z1} 의 영향이 크고 $+$ 측에서는 B_{z0} 의 영향이 크다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.11(b)) B_{z1} 의 변화 양상은 $z = 2[m]$ 의 경우와 같으며 B_z 는 y 의 $-$ 측에서 B_{z1} 의 영향이 크며 y 의 $+$ 측에서는 B_{z0} 가 지배적이다.

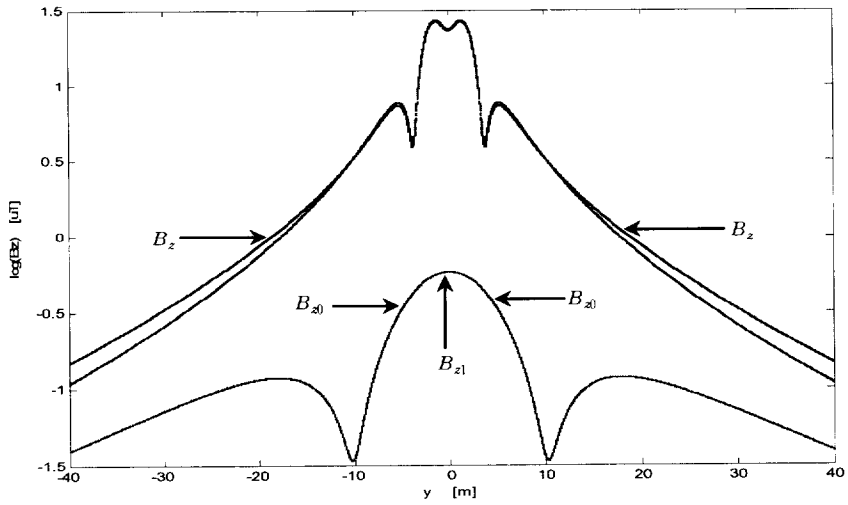
(c) $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.12(a)) B_{z1} 은 y 의 $-$ 측에서 거의 일정값을 나타내고 있으며 B_z 는 B_{z1} 의 영향을 받아 y 의 $-$ 측 값이 크며 y 의 $+$ 측의 B_z 는 B_{z0} 가 지배적이다.

$z = 13[m]$ 의 경우도 (그림4.12(b)) B_{z1} 의 변화 양상은 $z = 2[m]$ 의 경우와 같으며 B_z 도 y 의 $-$ 측에서 B_{z1} 의 영향이 크며 y 의 $+$ 측에서는 B_{z0} 가 지배적이다.

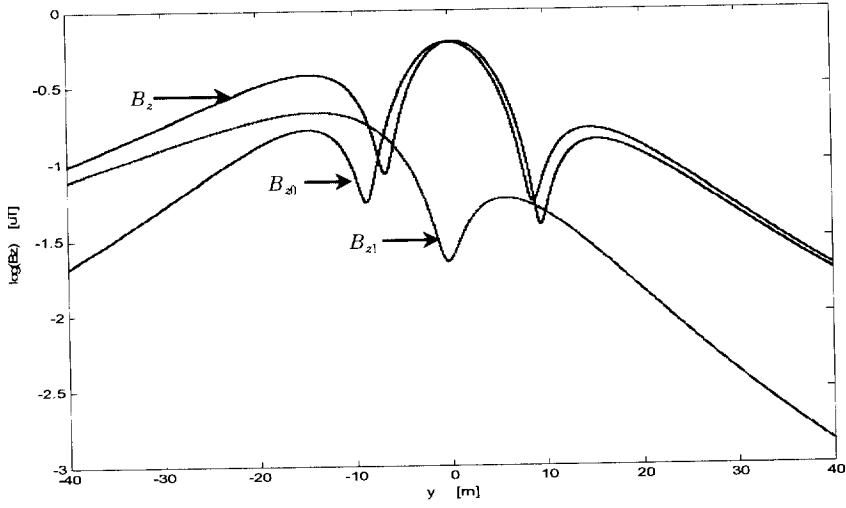


(a)

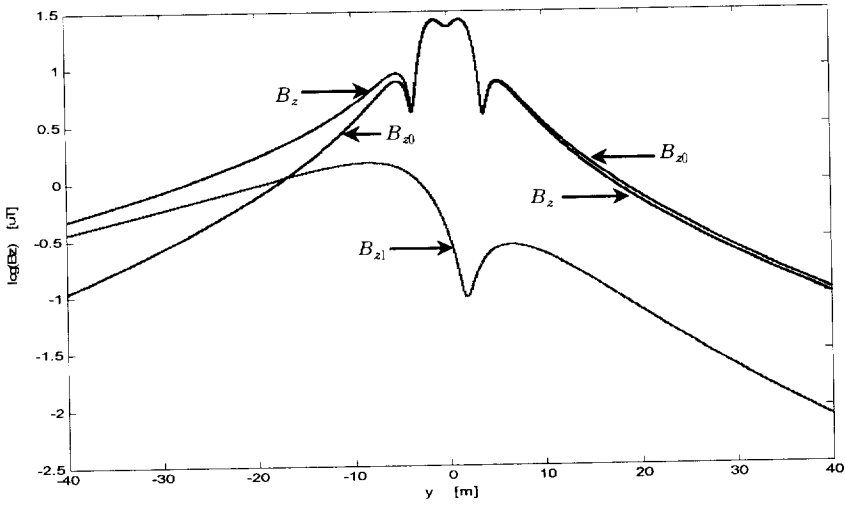


(b)

그림 4.10 분기각 $\alpha=0$ 일 때 z 방향 자계성분 B_{z0}, B_{z1}, B_z
 Fig. 4.10 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha=0$ in case of
 (a) $z=2$ [m] and (b) $z=13$ [m]



(a)

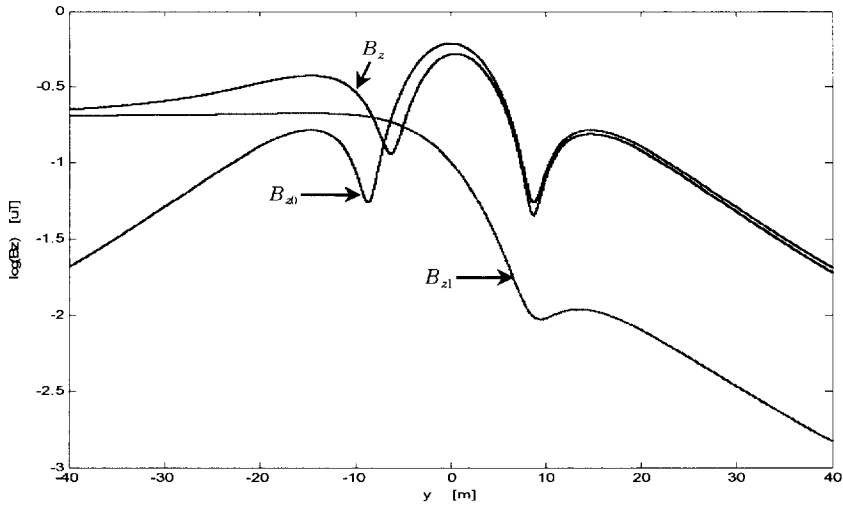


(b)

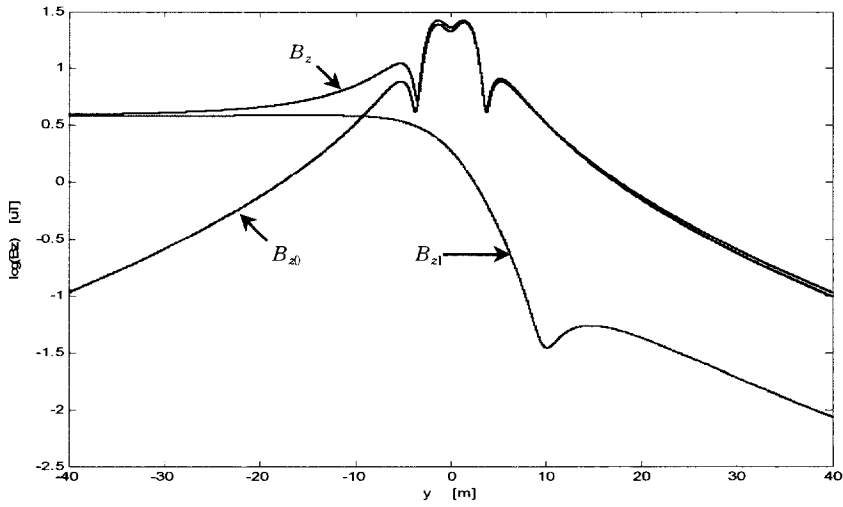
그림 4.11 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 z 방향 자계성분 B_{z0}, B_{z1}, B_z

Fig. 4.11 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$



(a)

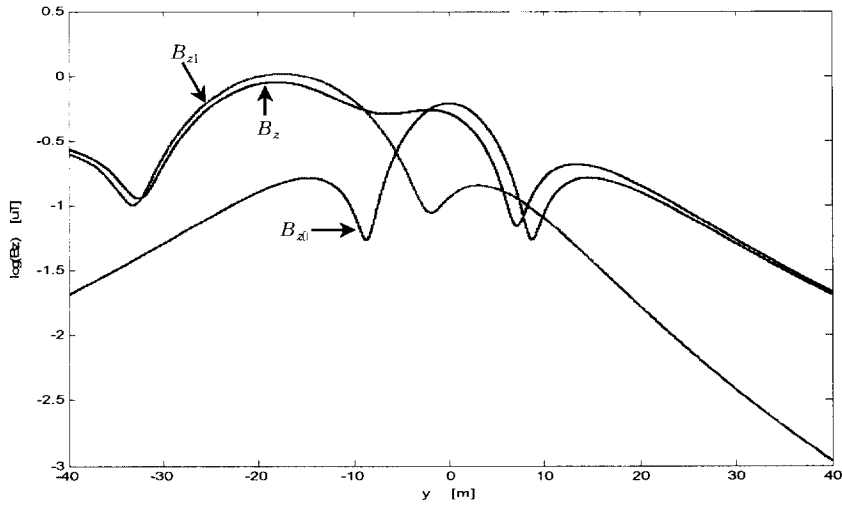


(b)

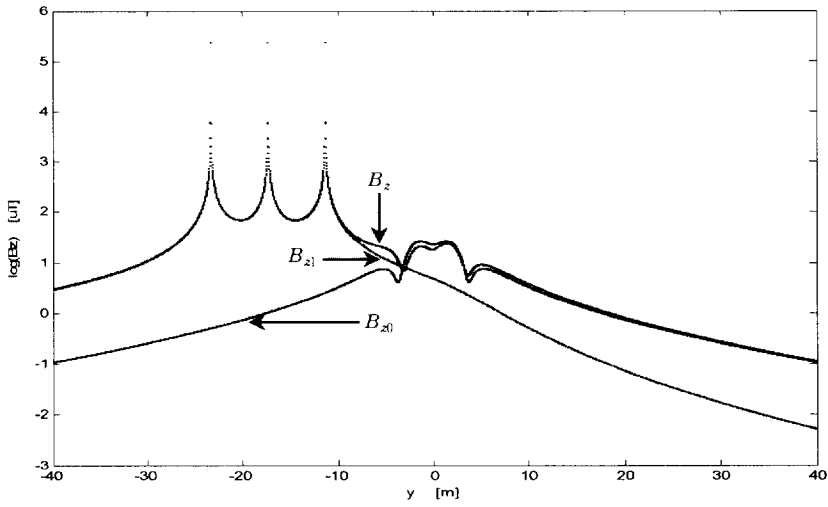
그림 4.12 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 z 방향 자계성분 B_{z0}, B_{z1}, B_z

Fig. 4.12 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)



(b)

그림 4.13 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 z 방향 자계 성분 B_{z0}, B_{z1}, B_z

Fig. 4.13 Magnetic fields B_{z0}, B_{z1} and B_z in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$

(d) $\alpha = \frac{2}{3} \pi$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.13(a)) B_{z1} 은 y 의 $-$ 측 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 의 위치에서 최대 피크를 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 작은 피크를 나타낸 후 단순 감소한다. B_z 는 y 의 $-$ 측에서 B_{z1} 의 영향이 크다.

$z = 13[m]$ 의 경우도 (그림4.13(b)) B_{z1} 은 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 에 해당하는 위치에서 3개의 피크를 나타내고 있다. 이것은 y_0 가 분기전선부의 전선이 y 축과 교차하는 위치이며 관측점의 위치가 전선 표면에 위치하기 때문이다. B_z 는 y 의 $-$ 측에서 B_{z1} 이 지배적이며 y 의 $+$ 측에서는 B_{z0} 가 영향이 크다.

이상의 B_x, B_y, B_z 및 분기전선부의 자계성분 B_{x1}, B_{y1}, B_{z1} 은 $y=0$ 에 대하여 $\alpha = \frac{\pi}{3} \pi$ 와 $\alpha = \frac{5}{3} \pi$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 와 $\alpha = \frac{3}{2} \pi$ 및 $\alpha = \frac{2}{3} \pi$ 와 $\alpha = \frac{4}{3} \pi$ 의 경우가 완전 대칭이다.

(4) 합성자계 B

그림 4.14~4.17은 $z = 2[m]$ 에 있어서 각 분기각에 대하여 B_x, B_y, B_z 및 합성자계 B 를 함께 도시한 것이다. $\alpha = 0$ 의 경우 합성자계 B 는 y 의 전 구간에 걸쳐 B_y 가 지배적이나 α 가 커짐에 따라 y 의 $-$ 측에서 B_x 의 영향이 커져 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 합성자계 B 에 가장 큰 영향을 미친다. $\alpha = \frac{2}{3} \pi$ 의 경우에도 B_x 의 영향이 가장 크다.

그림 4.18~4.21은 $z = 13[m]$ 에 있어서 B_x, B_y, B_z 및 합성자계 B 를 각 분기각에 대하여 도시한 것이다. $\alpha = 0$ 의 경우 합성자계 B 는 y 의 전 구간에 걸쳐 B_z 가 지배적이다. 이 B_z 는 분기각 α 가 커짐에 따라 y 의 $-$ 측에서 더욱 큰 값이 되며 $\alpha = \frac{2}{3} \pi$ 인 경우에는 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 의 위치에서 3개의 매우 큰 피크를 나타낸다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 합성자계 B 는 관측점의 위치가 낮으면 분기전선 위치에서 B_x 의 영향이 크며 관측점의 위치가 높아서 전선의 높이에 이르게 하면 B_z 가 지배적이다.

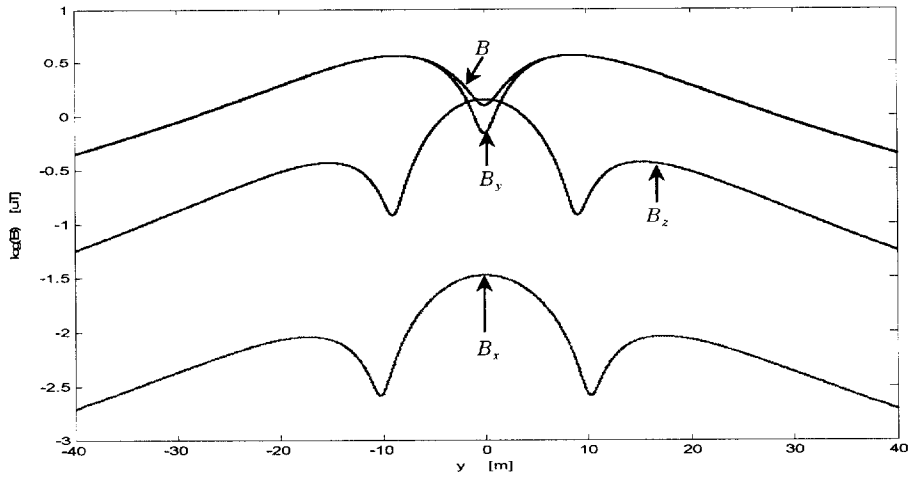


그림 4.14 $\alpha = 0$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.14 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = 0$ in case of $z = 2[m]$

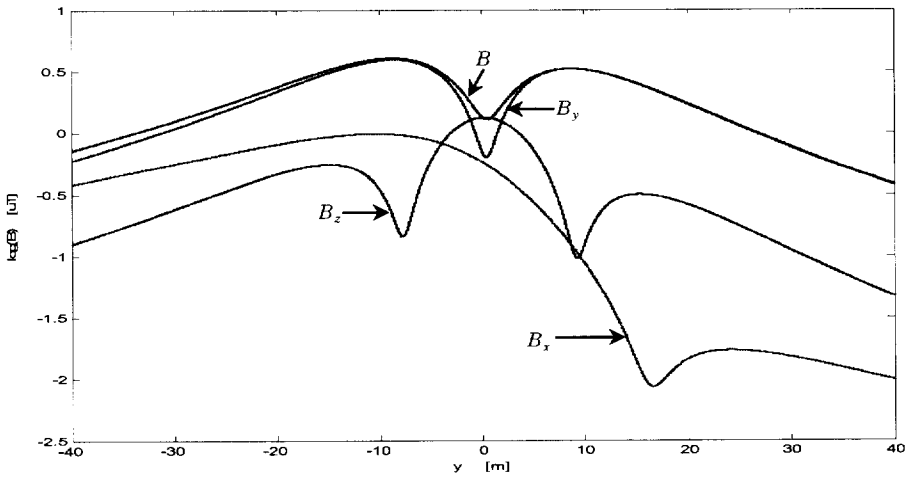


그림 4.15 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.15 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of $z = 2[m]$

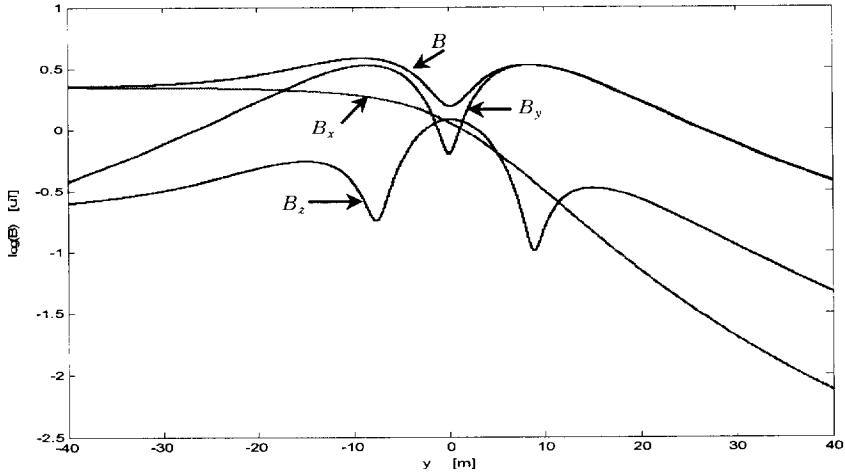


그림 4.16 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.16 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 2[m]$

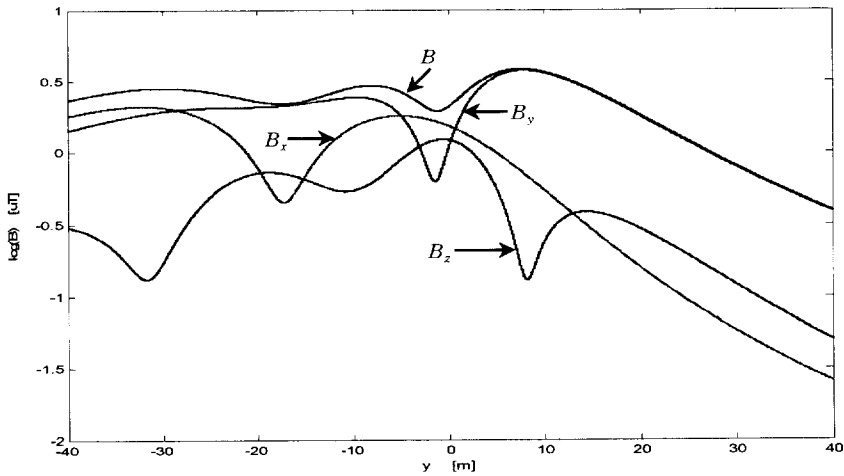


그림 4.17 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.17 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 2[m]$

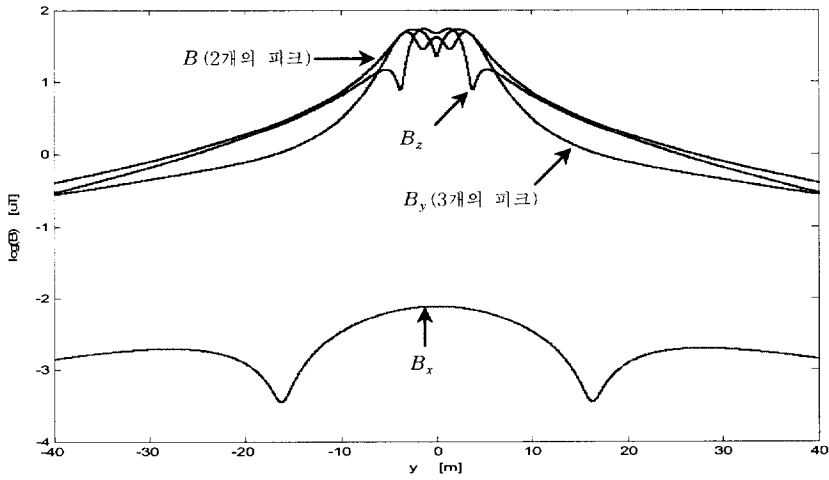


그림 4.18 $\alpha=0$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.18 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha=0$ in case of $z=13[m]$

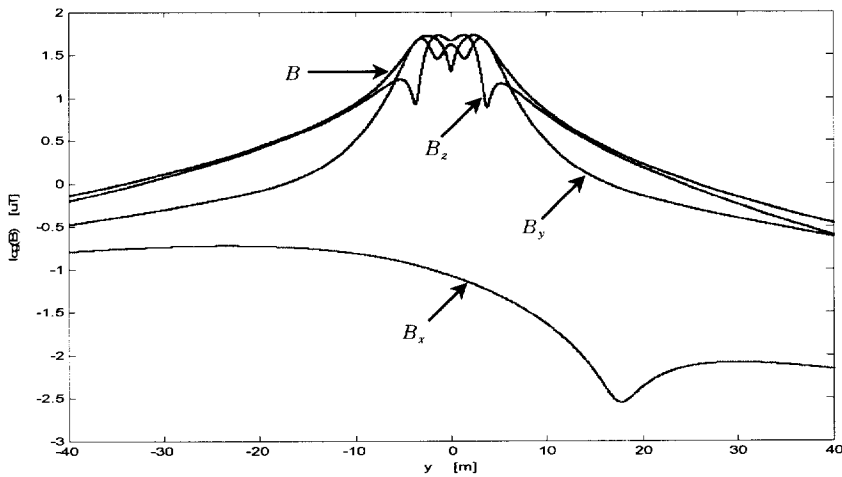


그림 4.19 $\alpha=\frac{\pi}{3}$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.19 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of $z=13[m]$

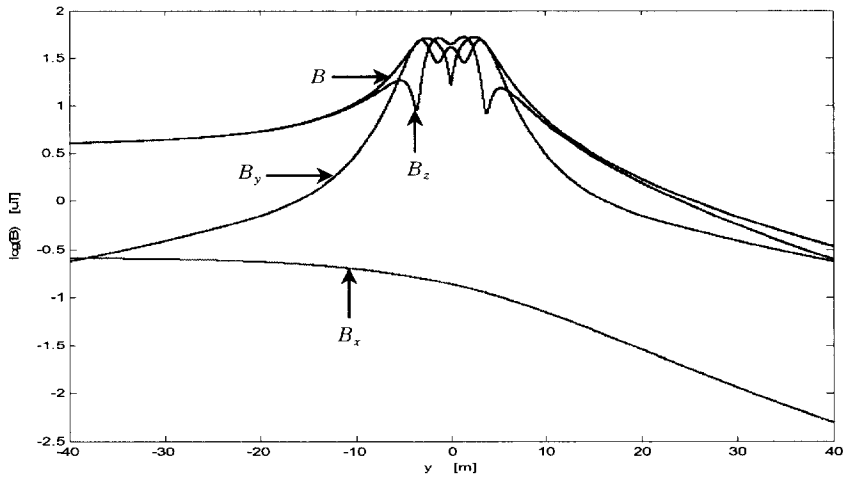


그림 4.20 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.20 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 13[m]$

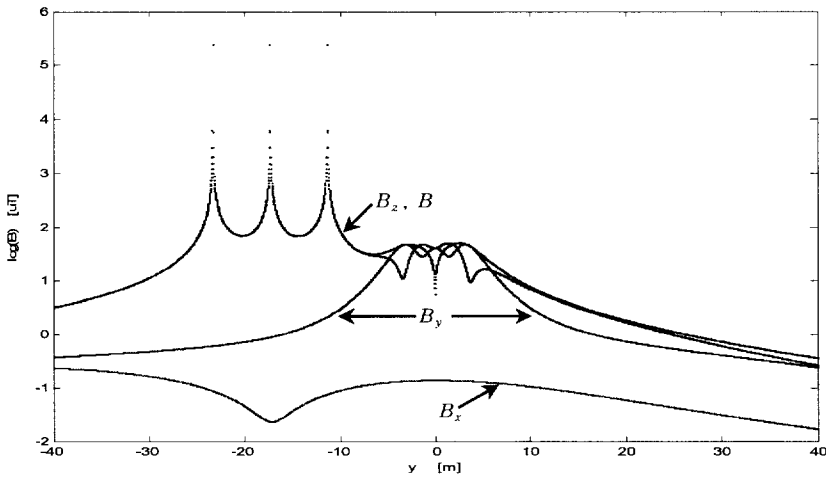


그림 4.21 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 자계성분 B_x , B_y , B_z and B

Fig. 4.21 Magnetic fields B_x , B_y , B_z and B

in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 13[m]$

4.2.2 전계

그림 4.22~4.33의 (a) 및 (b)는 각 전계성분에 있어서 $z=2[m]$ 및 $z=13[m]$ 의 경우에 대하여 기준전선부의 전류에 의해 발생하는 전계성분 $E_{i0}(i=x, y, z)$ 와 분기전선부의 전류에 의해 발생하는 자계성분 $E_{i1}(i=x, y, z)$ 을 이들의 합성인 $E_i(i=x, y, z)$ 와 함께 도시한 것이다.

(1) E_x

(a) $\alpha=0$

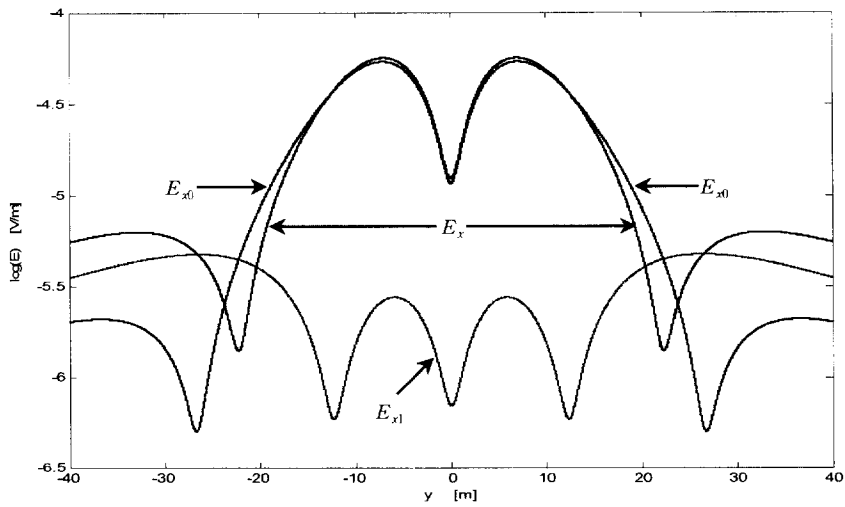
$z=2[m]$ 의 경우 (그림4.22(a)) E_{x0} 및 E_{x1} 은 매우 작은 값으로서 4개의 피크를 나타내며, E_{x0} 는 중앙의 2개의 피크가 E_{x1} 의 피크보다 커서 E_x 에 지배적이다. E_x 는 y 의 전 구간에서 걸쳐 매우 작은 값을 내며 이것은 $\alpha=0$ 의 경우 E_x 는 반사파에 의한 전계이기 때문이다.

$z=13[m]$ 의 경우 (그림4.22(b)) E_{x0} 및 E_{x1} 은 $z=2[m]$ 의 경우와 같은 변화양상을 보이며, E_x 도 마찬가지이다. E_x 의 값은 $z=2[m]$ 의 경우보다 작으며, 반사파 전계에 의한 E_x 는 관측점이 높을수록 지상으로부터의 거리가 멀어지므로 작아진다. E_{x0} 는 분기각 α 의 변화에 무관하다.

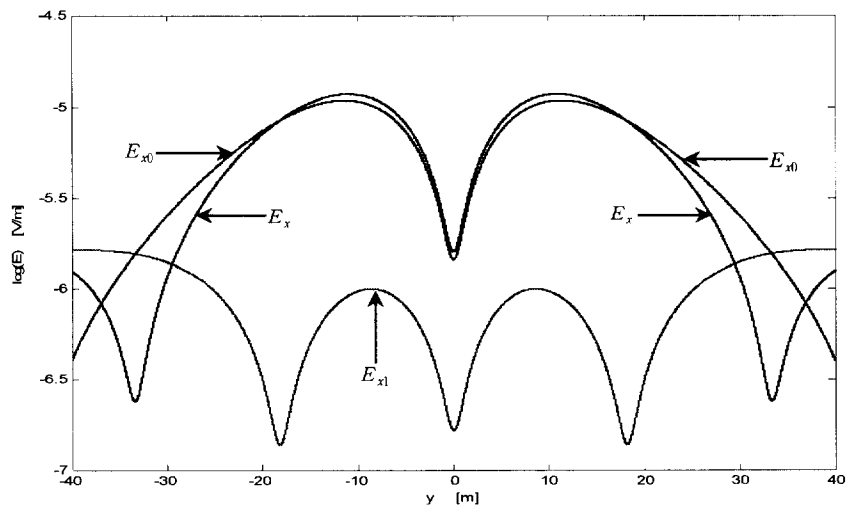
(b) $\alpha=\frac{\pi}{3}$

$z=2[m]$ 의 경우 (그림4.23(a)) E_{x1} 은 $\alpha=0$ 의 경우에 비해 훨씬 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 분기전선부의 전류에 의한 직접전계가 작용하기 때문이다. E_x 는 y 의 전 구간에서 E_{x1} 이 지배적이다.

$z=13[m]$ 의 경우 (그림4.23(b)) E_{x1} 은 $z=2[m]$ 의 경우와 동일한 변화양상을 보이나, 그 값은 더 크다. E_x 는 y 의 전 구간에서 걸쳐 E_{x1} 이 지배적이다.



(a)

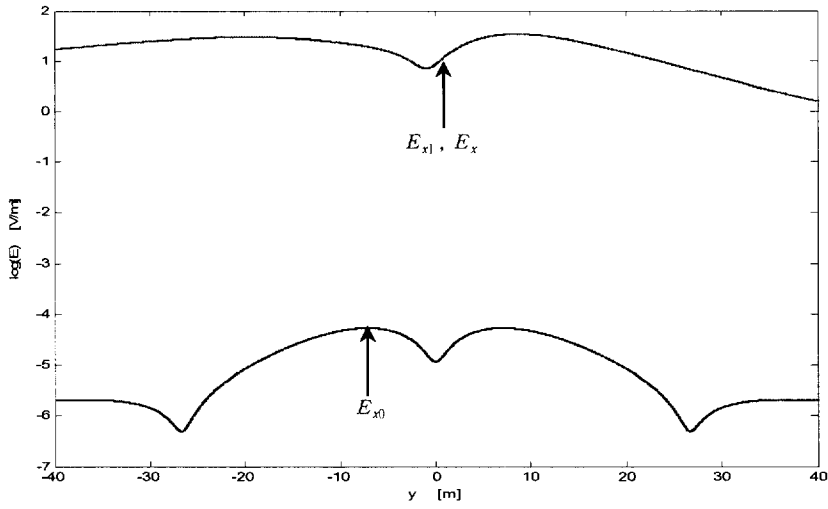


(b)

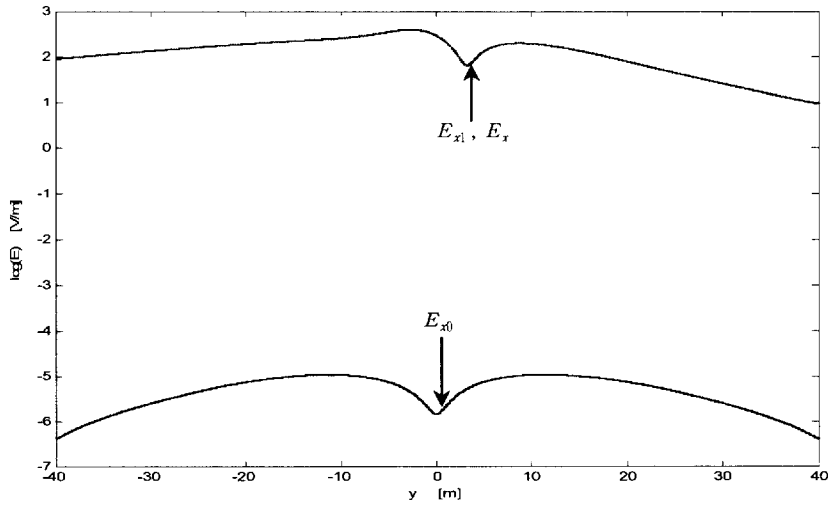
그림 4.22 $\alpha=0$ 인 경우의 x 방향 전계성분 E_{x0} , E_{x1} , E_x

Fig. 4.22 Electric fields E_{x0} , E_{x1} and E_x in $\alpha=0$ in case of

(a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$



(a)

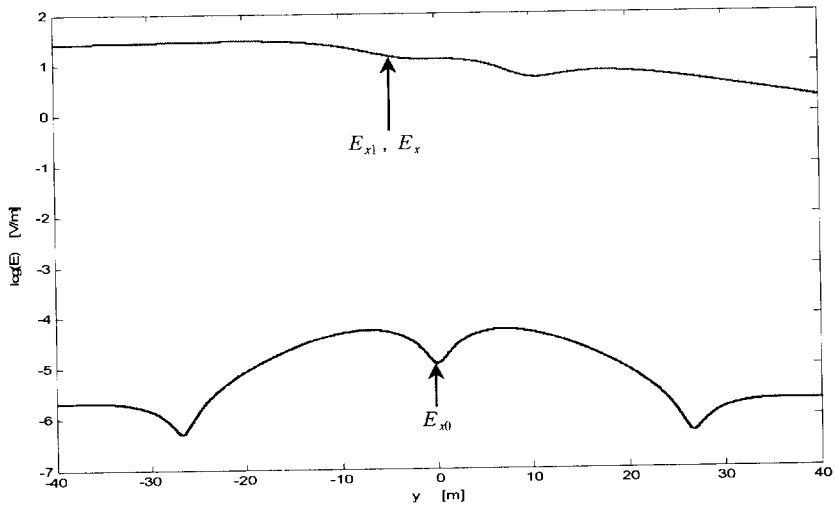


(b)

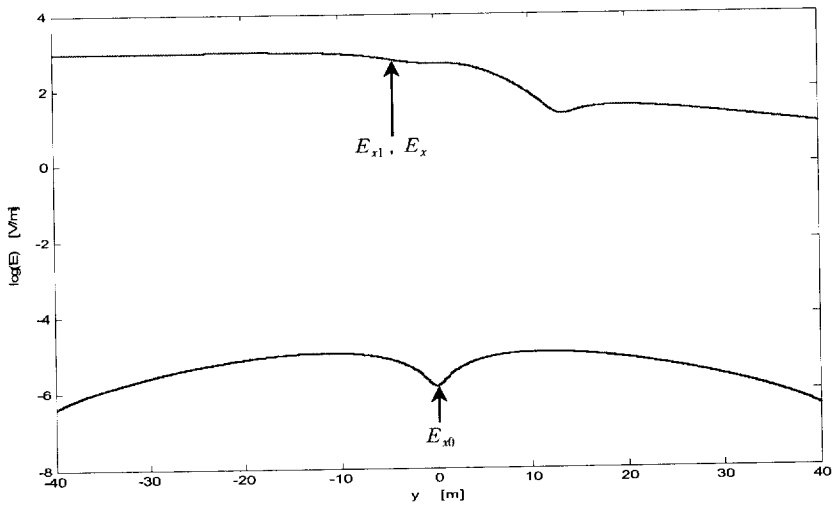
그림 4.23 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 x 방향 전계성분 E_{x0} , E_{x1} , E_x

Fig. 4.23 Electric fields E_{x0} , E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)

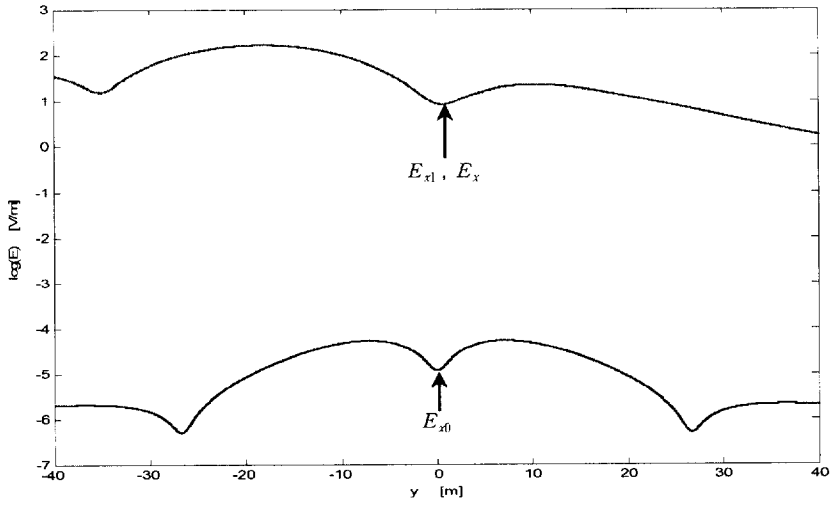


(b)

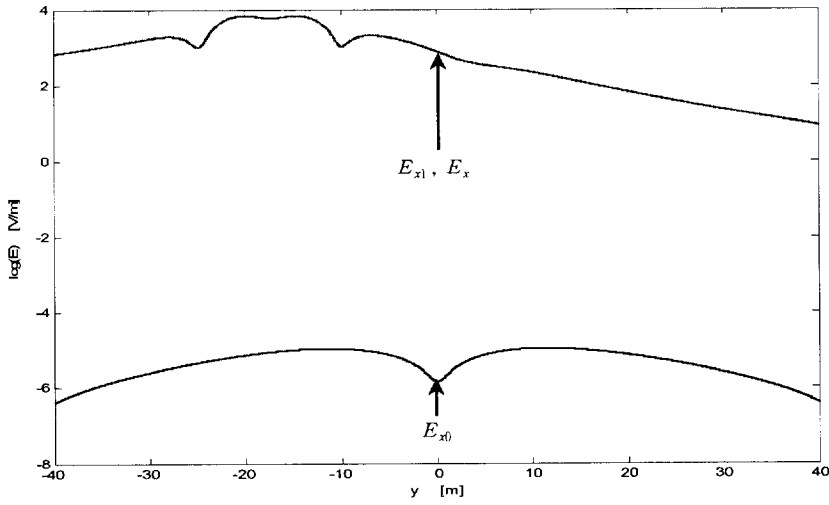
그림 4.24 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 x 방향 전계성분 E_{x0}, E_{x1}, E_x

Fig. 4.24 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)



(b)

그림 4.25 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 x 방향 전계성분 E_{x0}, E_{x1}, E_x

Fig. 4.25 Electric fields E_{x0}, E_{x1} and E_x in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

(c) $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.24(a)) E_{x1} 은 y 의 $-$ 측에서 거의 일정한 값을 나타낸다. 이것은 분기전선이 y 축과 평행하므로 분기전선과 관측점간의 거리 ($x_0^2 + z^2$)가 항상 일정하기 때문이다. 이 E_{x1} 은 E_{x0} 보다 훨씬 커서 E_x 는 y 의 전구간에 걸쳐 E_{x1} 이 지배적이다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.24(b)) E_{x1} 는 $z = 2[m]$ 의 경우와 같은 변화양상을 보인다. E_x 도 E_{x1} 이 지배적이며 그 값은 $z = 2[m]$ 의 경우보다 크다.

(d) $\alpha = \frac{2}{3}\pi$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.25(a)) E_{x1} 은 $y = 0$ 의 좌우측에 비대칭 피크를 나타내고 있으며 좌측의 피크가 더 크다. E_x 는 E_{x1} 이 지배적이다.

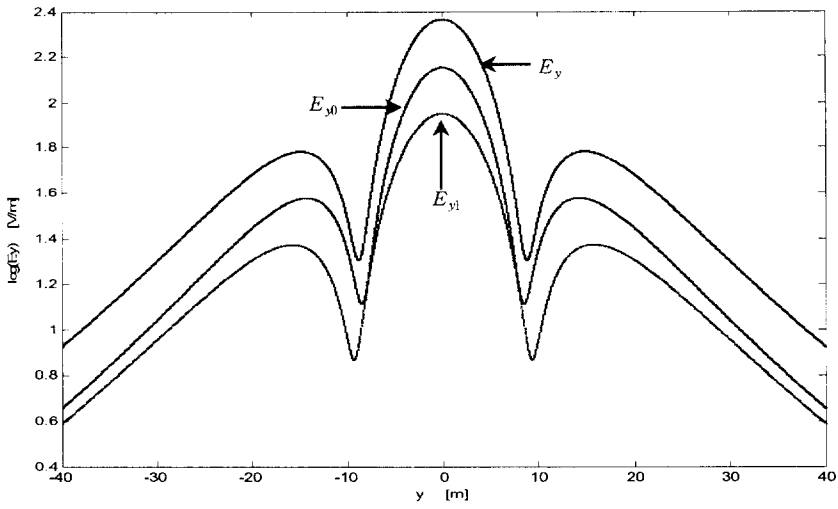
$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.25(b)) E_{x1} 은 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 근방에서 최대값을 나타낸다. 이것은 y_0 점에서 분기전선이 y 축과 교차하여 관측점이 분기전선의 표면이 되기 때문이다. E_x 은 E_{x1} 이 지배적이며 그 값은 $z = 2[m]$ 의 경우보다 크다.

(2) E_y

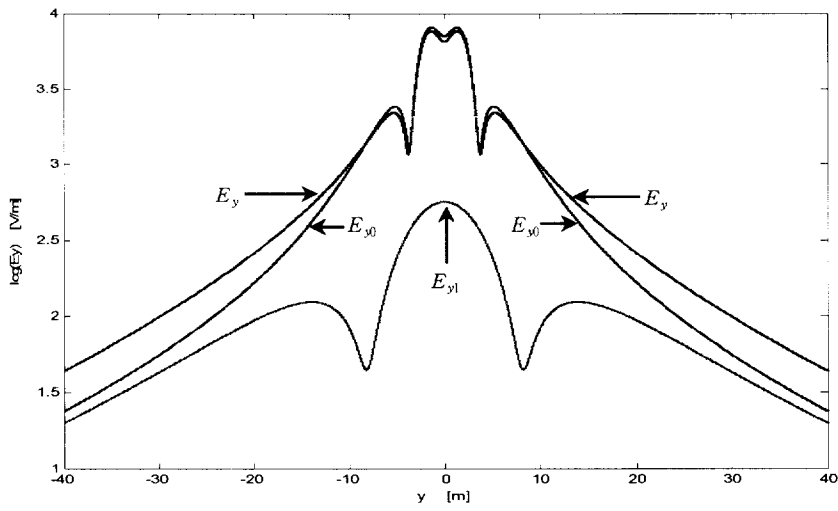
(a) $\alpha = 0$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.26(a)) E_{y0} , E_{y1} 및 E_y 는 $y = 0$ 인 중앙에 큰 피크, 그 좌우에 두개의 작은 피크를 나타낸다. E_{y0} 가 E_{y1} 보다 크며 E_{y0} 와 E_{y1} 의 합성인 E_y 가 가장 크다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.26(b)) E_{y1} 는 $y = 0$ 인 중앙에 큰 피크와 그 좌우에 작은 피크를 나타내며 E_{y0} 는 $y = 0$ 의 좌우에 2개의 큰 피크, 그 좌우에 2개의 작은 피크를 나타낸다. E_{y0} 는 E_{y1} 보다 전반적으로 크다. E_y 는 $y = 0$ 근방에서 E_{y0} 가 지배적이며 $y = 0$ 로부터 멀어지면 E_{y1} 의 영향이 커진다.



(a)



(b)

그림 4.26 $\alpha=0$ 인 경우의 y 방향 전계성분 E_{y0} , E_{y1} , E_y
 Fig. 4.26 Electric fields E_{y0} , E_{y1} and E_y in $\alpha=0$ in case of
 (a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$

$$(b) \alpha = \frac{\pi}{3}$$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.27(a)) E_{y1} 은 $y=0$ 의 우측에 하나의 피크와 좌측에 넓은 피크를 나타내며 그 값은 $\alpha=0$ 의 경우보다 작다. 이것은 E_{y1} 에 미치는 직접 전계의 영향이 점차 줄어들기 때문이다. E_y 는 $y=0$ 근방에서 E_{y0} 의 영향이 크며 y 의 $-$ 측에서는 E_{y1} 의 영향이 증대된다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.27(b)) E_{y1} 는 $y=0$ 부근에서 크기가 다른 2개의 비대칭 피크를 나타낸다. E_y 는 $y=0$ 부근에서 E_{y0} 가 지배적이며 y 의 $-$ 측에서는 E_{y1} 의 영향이 크다.

$$(c) \alpha = \frac{\pi}{2}$$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.28(a)) 분기전선이 y 축과 평행하므로 E_{y1} 은 반사판만의 전계가 되며 그림과 같이 매우 작은 값이 된다. E_y 는 y 의 전 구간에 E_{y0} 가 지배적이다.

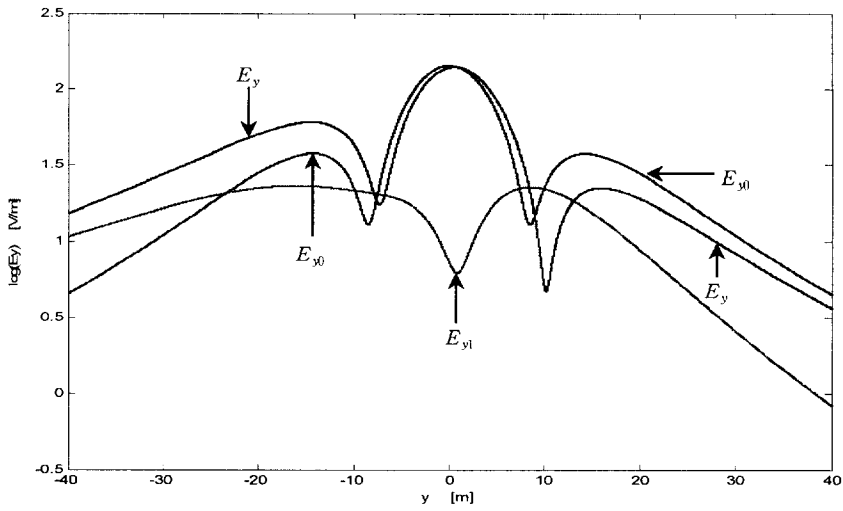
$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.28(b)) $z = 2[m]$ 의 경우와 마찬가지로 E_{y1} 은 매우 작은 값을 나타내며 E_y 는 E_{y0} 에 의존한다.

$$(c) \alpha = \frac{2}{3} \pi$$

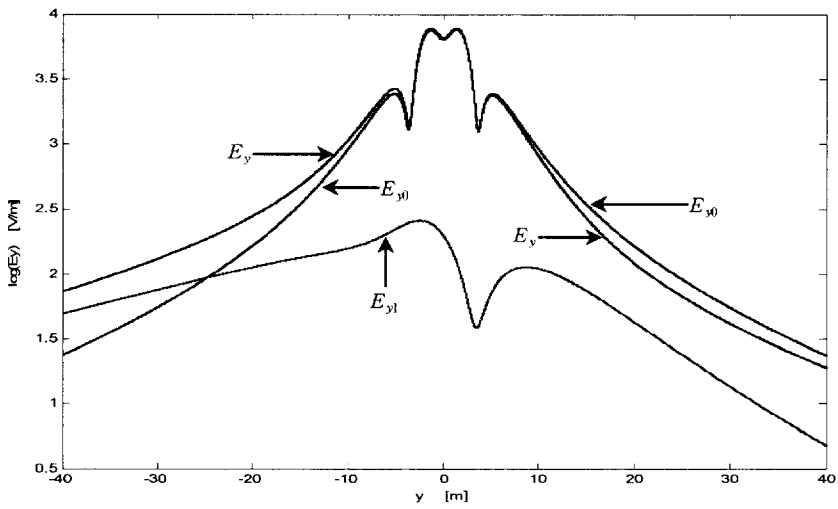
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.29(a)) 분기전선이 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 의 위치에서 y 축과 교차하므로 E_{y1} 은 y_0 에서 최대 피크를 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 작은 피크를 나타낸 후 단순 감소를 나타낸다. E_y 는 y 의 $-$ 측에서 E_{y1} 이 지배적이다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.29(b)) E_{y1} 은 y_0 부근에서 3개의 매우 크고 날카로운 피크를 나타낸다. 이것은 y 축 상의 관측점이 각상의 전선 위치에 해당하기 때문이다.

E_y 는 y 의 $-$ 측에서 E_{y1} 이 지배적이며 y 의 $+$ 측에서는 E_{y0} 가 지배적이다.



(a)

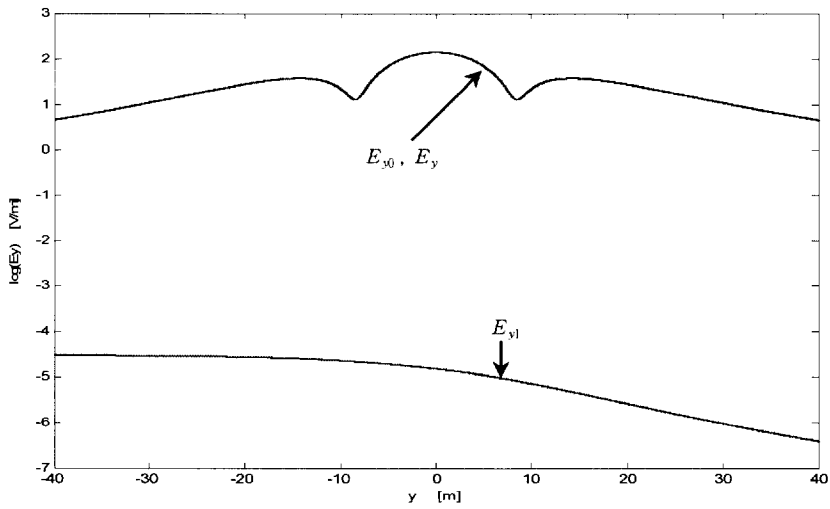


(b)

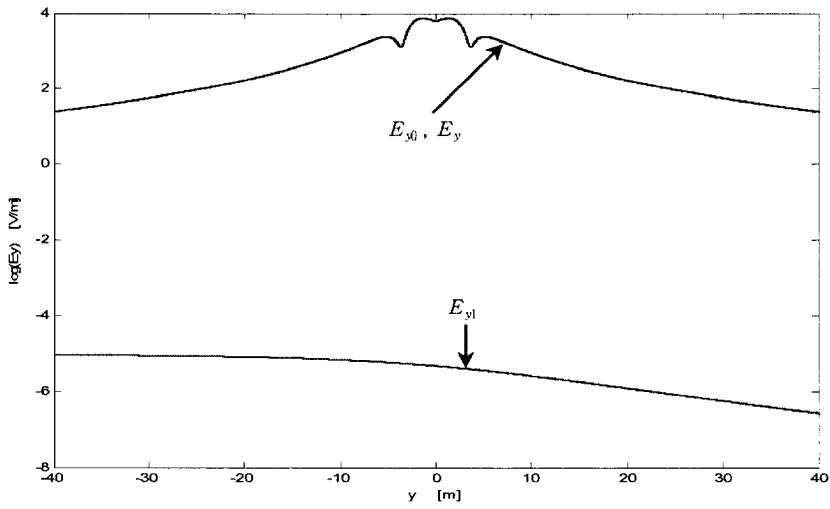
그림 4.27 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 y 방향 전계성분 E_{y0} , E_{y1} , E_y

Fig. 4.27 Electric fields E_{y0} , E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)

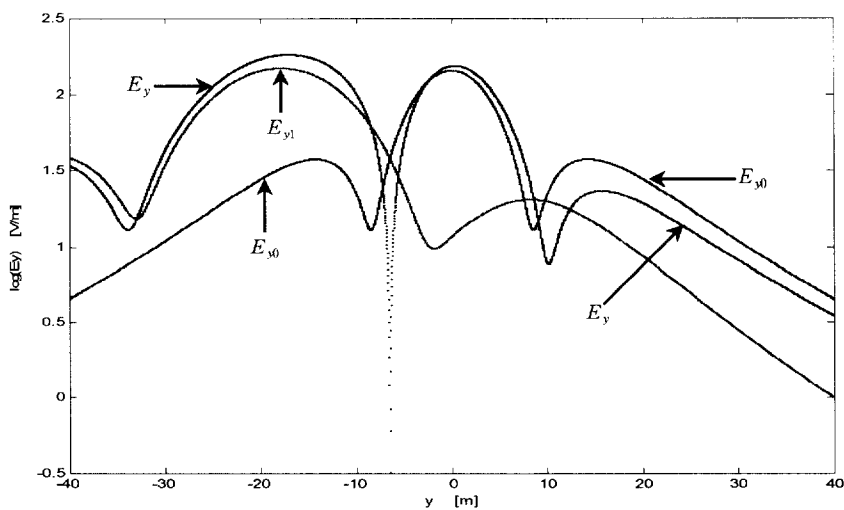


(b)

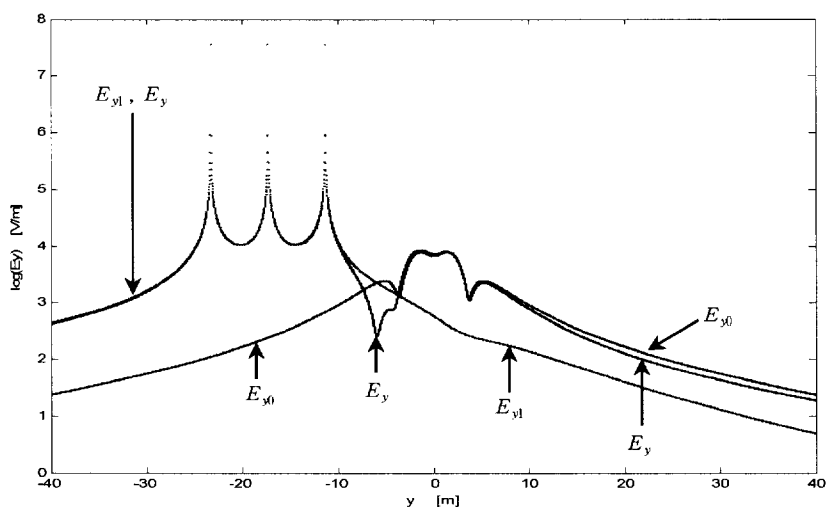
그림 4.28 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 y 방향 전계 성분 E_{y0} , E_{y1} , E_y

Fig. 4.28 Electric fields E_{y0} , E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)



(b)

그림 4.29 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 y 방향 전계성분 E_{y0}, E_{y1}, E_y

Fig. 4.29 Electric fields E_{y0}, E_{y1} and E_y in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

(3) E_z

(a) $\alpha = 0$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.30(a)) E_{z0} , E_{z1} 및 E_z 는 $y=0$ 의 좌우로 2개의 대칭 피크를 나타내며 그 크기는 $E_z > E_{z0} > E_z$ 의 순이다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.30(b)) E_{z1} 은 $y=0$ 의 좌우로 2개의 대칭 피크를 나타내며 E_{z0} 는 $y=0$ 의 인근의 각 전선 근방에서 3개의 피크를 나타낸다. E_z 는 $y=0$ 근방에서 E_{z0} 가 지배적이며 먼 곳에서는 점차 E_{z1} 의 영향이 커진다.

(b) $\alpha = \frac{\pi}{3}$

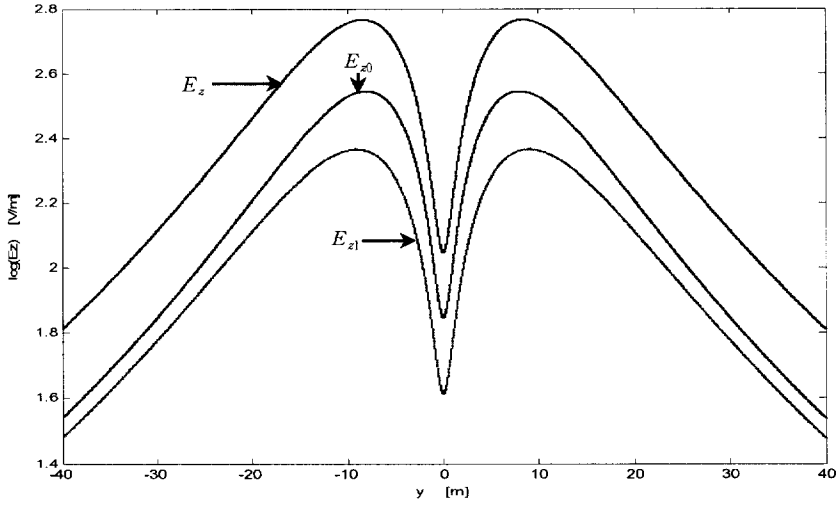
$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.31(a)) E_{z1} 은 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 의 위치에서 극소를 나타낸 후 그 우측에 작은 피크를 나타내며 $y=0$ 근방에서 큰 피크를 나타낸다. E_z 는 y 의 $-$ 측에서 E_{z1} 의 영향이 크며 y 의 $+$ 측에서는 E_{z0} 의 영향이 크다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.31(b)) E_{z1} 은 y_0 의 좌측에서 증가하여 일정값에 이르는 포화현상을 나타내며 우측에서도 그 값은 작지만 포화특성을 보인다. E_z 는 $y=0$ 근방에서 E_{z0} 가 지배적이며 $y=0$ 에서 $-$ 측으로 멀어지면 E_{z1} 의 영향이 커진다.

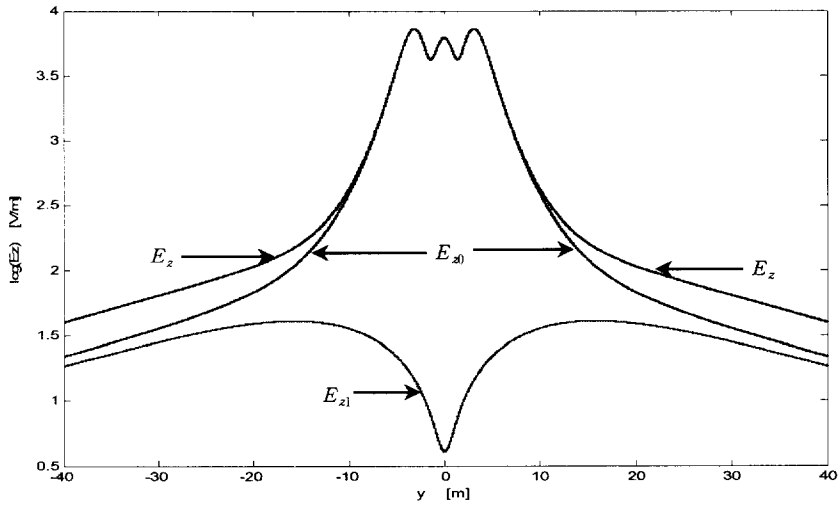
(c) $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.32(a)) E_{z1} 은 y 의 $-$ 측에서 증가하여 일정값에 이르는 포화특성을 보이며 그 우측에서는 쇼울더(shoulder) 현상을 보인 후 급감하고 있다. E_z 는 y 의 $-$ 측에서 거의 일정값을 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 급격하게 감소하여 극소를 보인 후 다시 하나의 피크를 수반한다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.32(b)) E_{z1} 은 y_0 의 $-$ 측에서 서서히 증가하며 y 의 $+$ 측에서는 서서히 감소한다. E_z 는 $y=0$ 근방에서 E_{z0} 가 지배적으로 작용하며 $y=0$ 로부터 먼 곳에서 E_{z1} 의 영향이 나타난다.



(a)

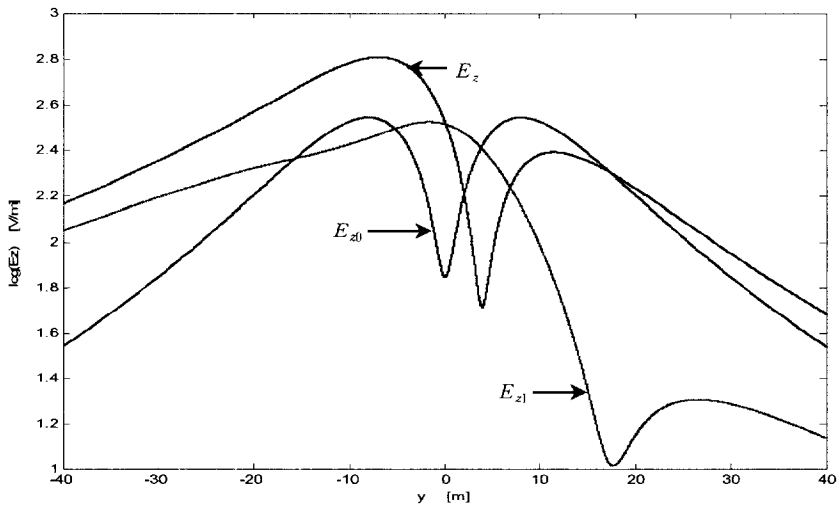


(b)

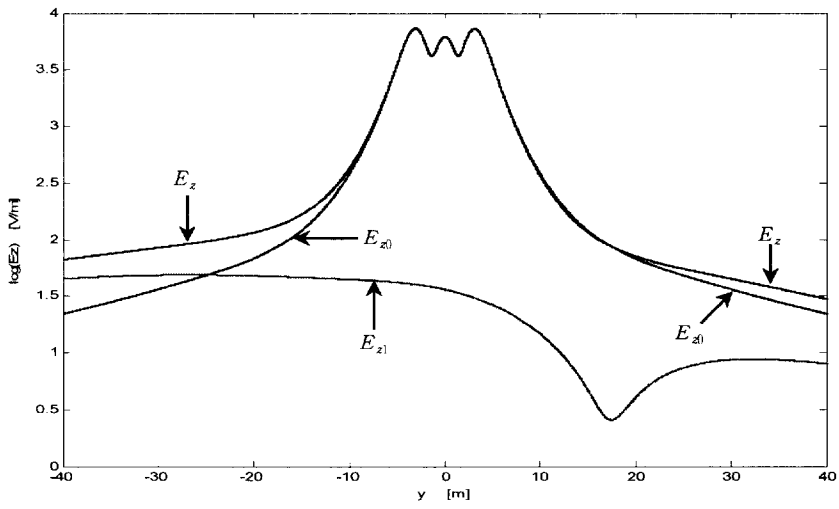
그림 4.30 $\alpha=0$ 인 경우의 z 방향 전계성분 E_{z0}, E_{z1}, E_z

Fig. 4.30 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha=0$ in case of

(a) $z=2[m]$ and (b) $z=13[m]$



(a)

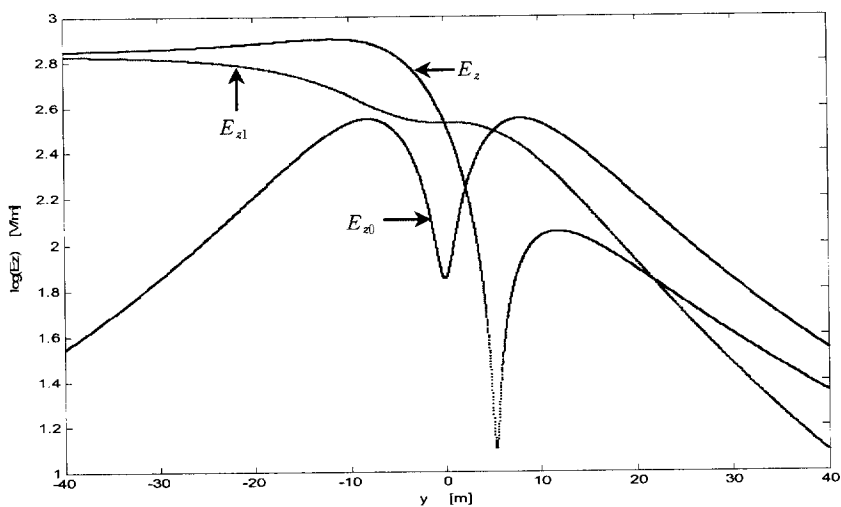


(b)

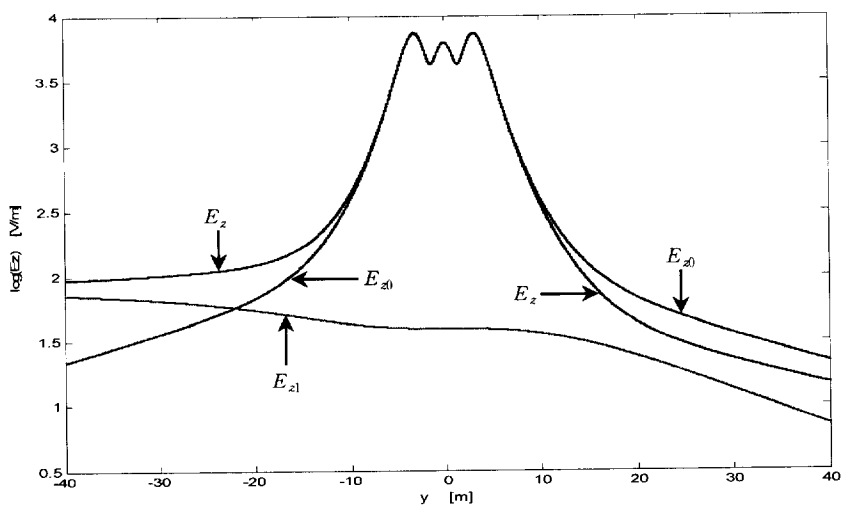
그림 4.31 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 인 경우의 z 방향 전계성분 E_{z0} , E_{z1} , E_z

Fig. 4.31 Electric fields E_{z0} , E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{\pi}{3}$ in case of

(a) $z = 2 [m]$ and (b) $z = 13 [m]$



(a)

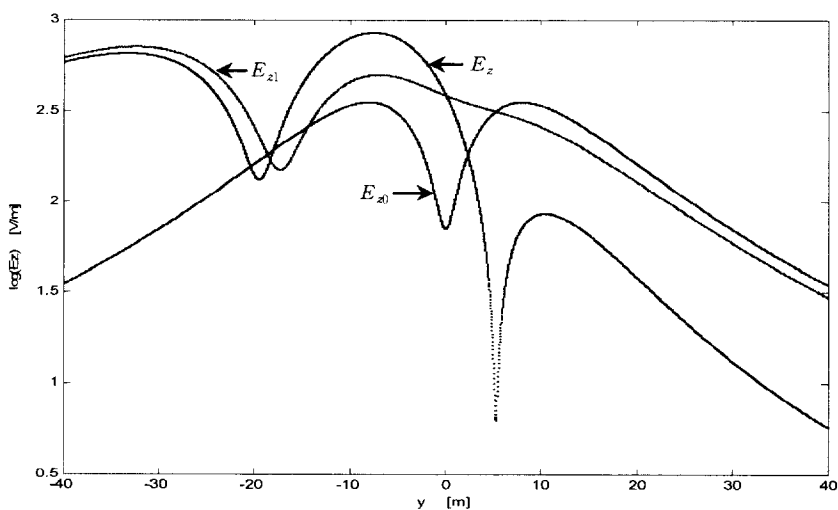


(b)

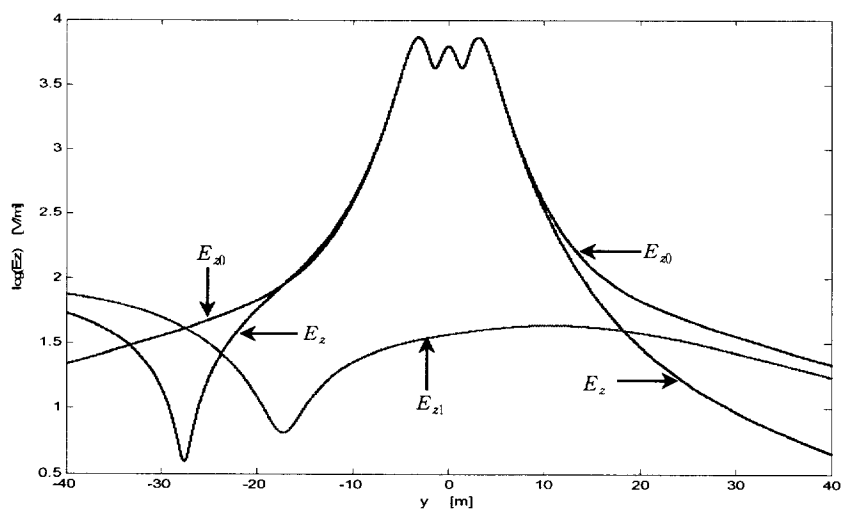
그림 4.32 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 z 방향 전계성분 E_{z0}, E_{z1}, E_z

Fig. 4.32 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$



(a)



(b)

그림 4.33 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 z 방향 전계성분 E_{z0}, E_{z1}, E_z

Fig. 4.33 Electric fields E_{z0}, E_{z1} and E_z in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of

(a) $z = 2[m]$ and (b) $z = 13[m]$

(d) $\alpha = \frac{2}{3} \pi$

$z = 2[m]$ 의 경우 (그림4.33(a)) E_{z1} 은 y 의 $-$ 측에서 2개의 피크를 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 약간의 굴곡과 함께 서서히 감소한다. E_z 는 y 의 $-$ 측에서 E_{z1} 의 영향을 크게 받아 2개의 피크를 나타내며 y 의 $+$ 측에서는 급격하게 감소하여 극소를 나타낸 후 하나의 피크를 수반한다.

$z = 13[m]$ 의 경우 (그림4.33(b)) E_{z1} 은 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 에서 극소를 나타내며 전반적으로 E_{z0} 보다 작은 값을 나타낸다. E_z 는 약 $-10 < y < 10[m]$ 범위 내에서 E_{z0} 가 지배적이며 그 이외의 범위에서는 E_{z1} 이 E_{z0} 에 대하여 감소하는 쪽으로 작용한다.

이상의 E_x, E_y, E_z 및 분기전선부의 전계성분 E_{x1}, E_{y1}, E_{z1} 은 $y=0$ 에서 $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 와 $\alpha = \frac{5}{3} \pi$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 와 $\alpha = \frac{3}{2} \pi$ 및 $\alpha = \frac{2}{3} \pi$ 와 $\alpha = \frac{4}{3} \pi$ 의 경우가 완전대칭이다.

(4) 합성전계 E

그림 4.34~4.37은 $z = 2[m]$ 에 있어서 각 분기각에 대하여 E_x, E_y, E_z 및 합성전계 E 를 함께 도시한 것이다. 합성전계 E 는 거의 y 의 전 구간에 걸쳐 α 의 변화에 의한 E_z 에 의존한다.

그림 4.38~4.41은 $z = 13[m]$ 에 있어서 E_x, E_y, E_z 및 합성전계 E 를 각 분기각에 대하여 도시한 것이다. $\alpha = 0$ 의 경우 합성전계 E 는 거의 y 의 전 구간에 걸쳐 E_y 가 지배적이다. 분기각 α 가 커짐에 따라 E_x 의 영향이 커져 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 y 의 $-$ 측에서 E 가 일정값으로서 E_x 가 지배적 역할을 한다. 그러나 $\alpha = \frac{2}{3} \pi$ 의 경우에는 다시 y 의 전 구간에 걸쳐 E_y 가 지배적 역할을 하며 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 에서 E 는 매우 크고 날카로운 3개의 피크를 나타낸다.

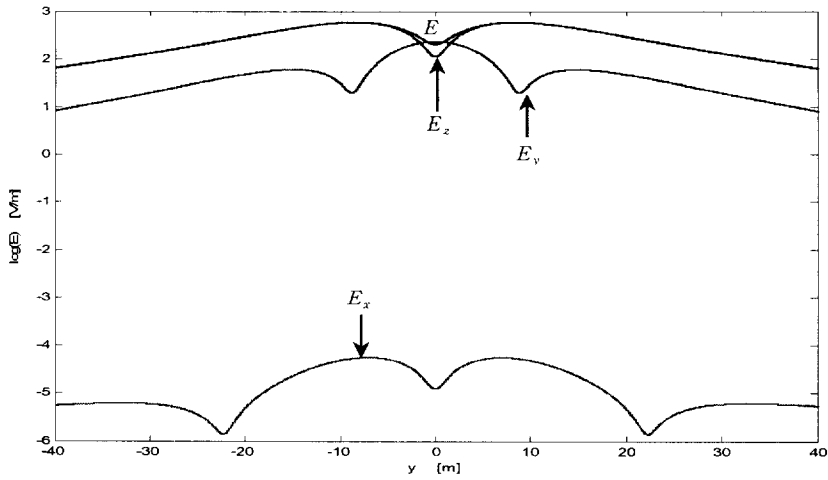


그림 4.34 $\alpha = 0$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.34 Electric fields E_x , E_y , E_z and E
in $\alpha = 0$ in case of $z = 2[m]$

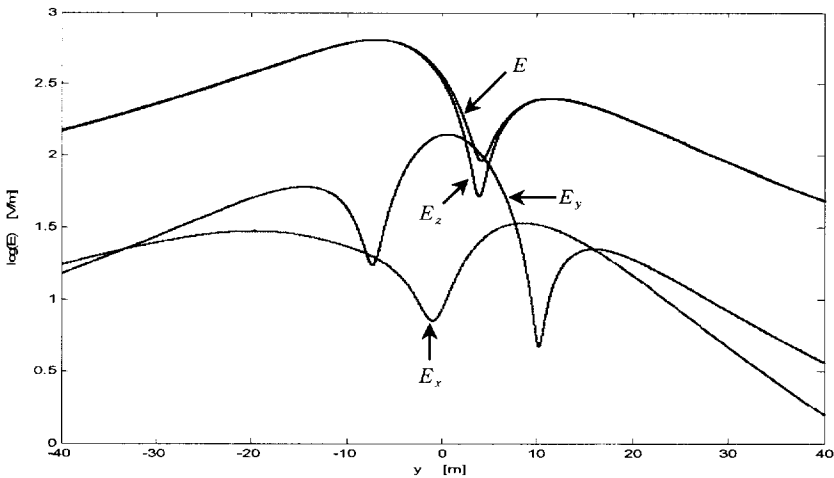


그림 4.35 $\alpha = -\frac{\pi}{3}$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.35 Electric fields E_x , E_y , E_z and E

in $\alpha = -\frac{\pi}{3}$ in case of $z = 2[m]$

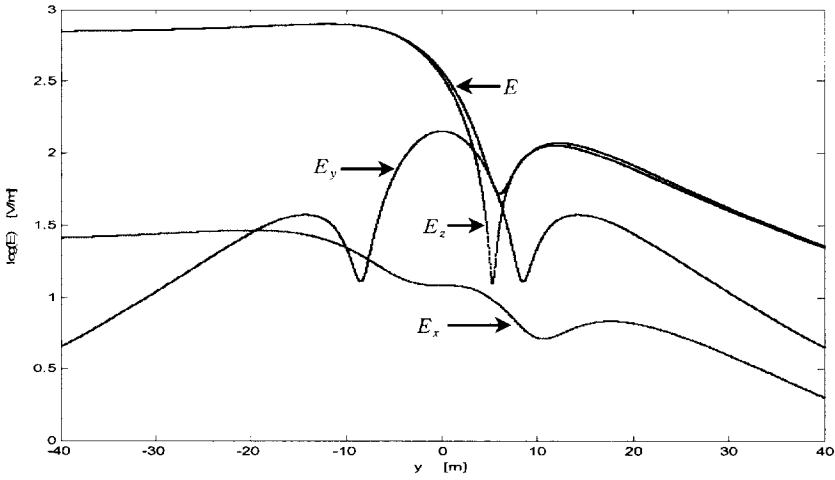


그림 4.36 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.36 Electric fields E_x , E_y , E_z and E

in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 2[m]$

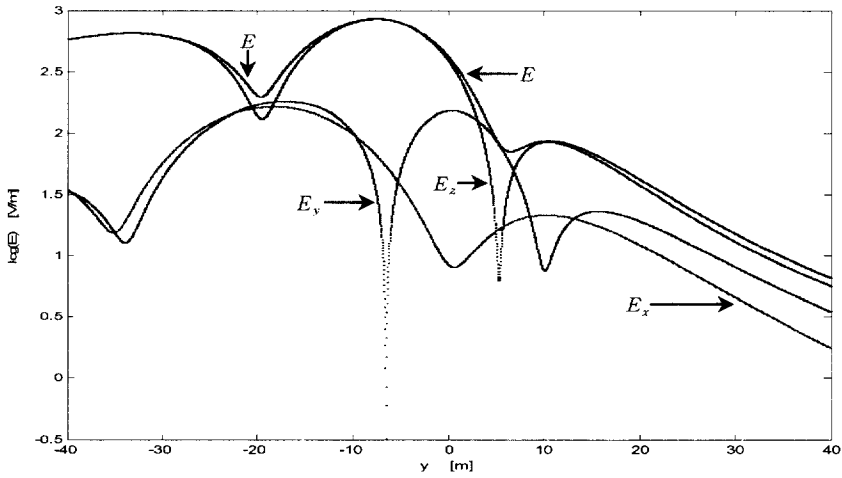


그림 4.37 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.37 Electric fields E_x , E_y , E_z and E

in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 2[m]$

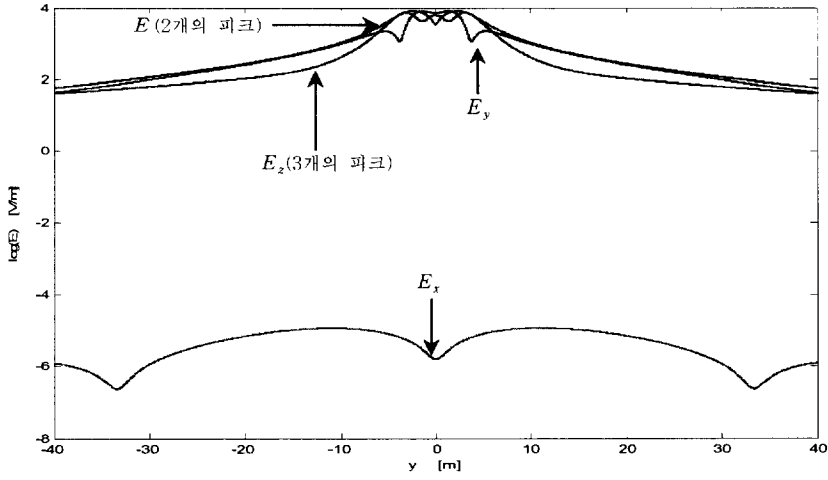


그림 4.38 $\alpha=0$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.38 Electric fields E_x , E_y , E_z and E
in $\alpha=0$ in case of $z=13[m]$

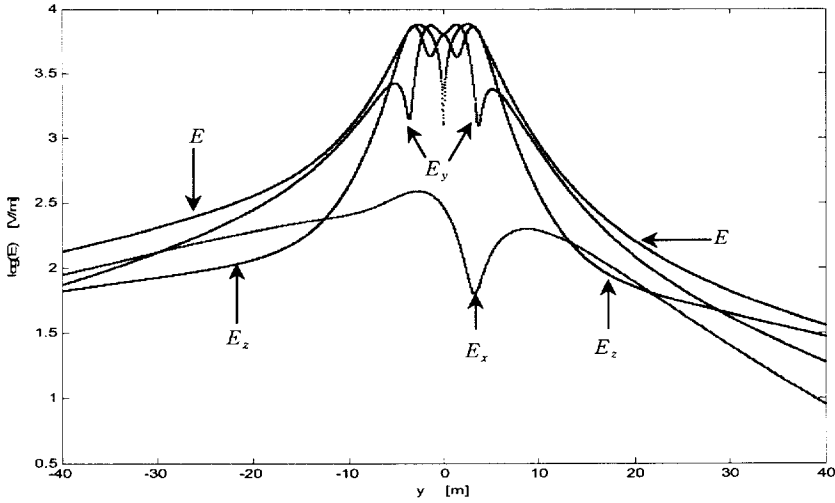


그림 4.39 $\alpha=\frac{\pi}{3}$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.39 Electric fields E_x , E_y , E_z and E
in $\alpha=\frac{\pi}{3}$ in case of $z=13[m]$

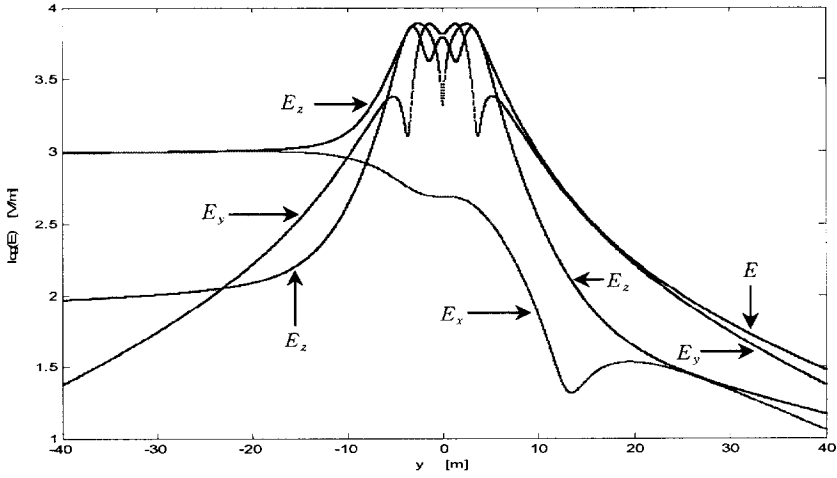


그림 4.40 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.40 Electric fields E_x , E_y , E_z and E

in $\alpha = \frac{\pi}{2}$ in case of $z = 13[m]$

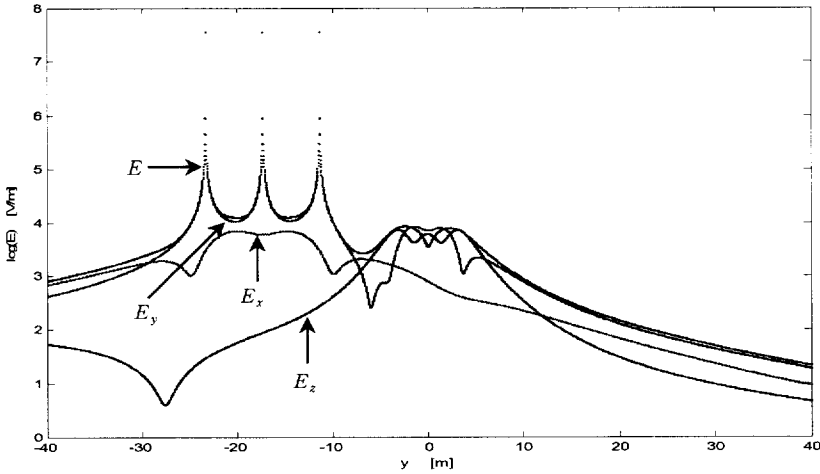


그림 4.41 $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 인 경우의 전계성분 E_x , E_y , E_z and E

Fig. 4.41 Electric fields E_x , E_y , E_z and E

in $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ in case of $z = 13[m]$

제 5장 결 론

본 연구에서는 전자파 전자계의 계산에 있어서 실제적 상황에 근접한 분기 선로가 있는 전력선을 고려하여 전자파 전자계 식을 정식화 하였다. 직각좌표계에 있어서 전자계 성분 B_x, B_y, B_z 및 E_x, E_y, E_z 에 대하여 분기 선로의 분기각이 미치는 영향을 분석한 결과 각 전자계 성분에 관한 식들이 임의의 분기각에 대하여 잘 대응할 수 있다는 결론을 얻었다. 또 합성전자계 B 및 E 에 대하여도 검토하였으며 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 합성자계 B 는 관측점의 높이가 낮은 경우 분기각 α 가 작으면 y 의 전 구간에 걸쳐 B_y 성분이 지배적이나, α 가 점점 커져 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 에 이르게 되면 B_x 의 영향을 가장 크게 받는다. 또 관측점의 높이가 커서 전선의 높이에 근접하면 합성자계 B 는 B_z 가 지배적이며 이 B_z 는 α 가 커짐에 따라 분기선로가 존재하는 y 의 위치에서 더욱 큰 값으로 된다.
- 2) 합성전계 E 는 관측점의 높이가 낮으면 y 의 전 구간에 걸쳐 α 의 변화에 따르는 E_z 에 의존한다. 또 관측점의 높이가 전력선의 높이에 근접하여 분기각 α 가 작은 경우 합성전계 E 는 y 의 전 구간에 걸쳐 E_y 성분이 지배적이나, α 가 커져 $\frac{\pi}{2}$ 에 근접하면 분기전선이 존재하는 쪽의 y 의 위치에서 E_x 가 지배적으로 영향을 미친다.

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
- [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

**Electromagnetic fields under 3 phase power lines
with branch lines**

Kim, Bu-Kyu

*Department of Electrical Engineering
Graduate School Industry
Pukyong National University*

Abstract

In this study electromagnetic fields near the 3 phase power lines with 3 phase branch lines were formulated. In rectangular coordinates dependence of the branch angle α on electromagnetic field components B_x, B_y, B_z and E_x, E_y, E_z were analyzed. The resultant electromagnetic fields B and E were discussed and the results are as follows.

- 1) In case of low observation points if branch angle α is small, the resultant magnetic field B is directed by B_y , but if α become larger and reaches at $\frac{\pi}{2}$, B is affected by B_x greatly. In case of high observation points (near the power lines), B is directed by B_z and this B_z become larger at the position of y where branch lines exist.
- 2) In case of low observation points if branch angle α is small, the resultant electric field depends on E_z following the variation of α . In case of high observation points, if branch angle α is small. E is directed by E_y , but if α become larger and reaches at $\frac{\pi}{2}$, E depends on E_x at the position of y where branch lines exist.

감사의 글

늘 부족한 제가 대학원 석사과정을 마치도록 도움을 주신 모든 분께 머리 숙여 감사드립니다.

본 논문이 완성되기까지 바쁜 일정 속에서도 철저한 지도와 아낌없는 격려를 해주신 강대하 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 또한 세심한 심사와 조언을 통해서 논문이 완성되도록 지도해 주신 홍순일 교수님, 김영학 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

아울러 그동안 많이 지원과 도움을 주신 전기재료 및 고전압실험실 여러 선후배님께도 감사를 드리며 논문완성에 도움을 준 정승환 후배님에게도 감사를 드립니다.

직장생활 속에서도 학위과정에 열중할 수 있도록 아낌없이 격려해 주시고 물심양면으로 도와주신 한국전력공사 부산지사 직원분들께 진심으로 감사드리며 앞으로 더욱더 열심히 노력할 것을 약속드립니다.

또 많이 이해해주시고 도와주신 러브라인 동호회 여러분들께도 앞으로 더욱 열심히 활동함을 약속드립니다.

마지막으로 정성과 사랑으로 아낌없이 성원해주신 어머니와 가족들에게 감사드리며 항상 건강하시길 기원합니다.

마지막은 항상 또 다른 시작입니다. 앞으로 생활함에 항상 바르고 성실한 자세로 열심히 살아갈 수 있도록 노력할 것을 약속드립니다.

2005년 7월
김부규 올림