

전철용 송전선로에서 발생하는
극저주파 자기장의 안전성에 관한 연구

Study on Safety Consideration of ELF Magnetic Fields Emanating from Power
Transmission Line for Electric Railways

임 용 배

Yong-Bae Lim

전기안전시험연구원
Electrical Safety Laboration Research Institute
☎ 0356-580-3015

전철용 송전선로에서 발생하는 극저주파 자기장의 안전성에 관한 연구

Study on Safety Consideration of ELF Magnetic Fields Emanating from Power
Transmission Line for Electric Railways

입 용 배
Yong-Bae Lim

Abstract

This paper shows that the configuration of power transmission lines currently in place is suitable on the basis of calculated magnetic field strengths. The magnetic fields were computed for typical current distributions on power transmission lines for electric railways, which are characterized by severe load fluctuations and phase distortions. The results of the numerical analysis are compared with the ELF guidelines of magnetic fields from several case studies. The final conclusion reached is that effects of the magnetic fields near power transmission lines for electric railways are not significant enough to cause a biological safety concern.

I. 서 론

산업혁명 이후 우리의 생활환경은 급속도로 변화되었다. 그중 가장 두드러진 변화는 전기의 사용에 의한 것이었고, 이 전기가 현대기술의 초석으로, 산업사회의 기초로서 주는 이득은 실로 막대하였다. 그러나, 전기 사용의 증가는 인간 생활의 편리성뿐만 아니라 전자기 spectrum에 대한 인간의 노출 환경 또한 급속도로 변화시켰다.

ELF 범위 중에서 가장 중요한 전자기장의 발생원은 60Hz의 장(fields)을 발생시키는 전력설비와 전기장비이다. 특히, 송전선로는 송전전압의 초고압화와 송전용량의 대용량화, 장거리 송전 등으로 일반 전력설비나 장비에 비해 전자기장의 영향을 광

범위한 범위까지 미칠 수 있다. 초창기 송전선로의 전자기장에 대한 인체 유해론은 송전전압의 초고압화와 함께 주로 전기장에 의해 주도되었지만, 최근에는 자기장의 영향에 집중되고 있다^[1].

따라서, 본 논문에서는 ELF 자기장 발생원 중에서 가장 광범위한 곳까지 영향을 미치는 송전선로, 특히 부하 변동과 위상 왜곡이 심하고 고조파 함유율이 큰 전철용 송전선로 중에서 불특정 장소의 전력을 분석하여 인이진 선로에 흐르는 전류와 고조파, 위상각 등을 이용하여 이에 의해 발생이 예상되는 자기장을 거리, 전류의 양, 고조파 함유율, 위상각 등에 따라 계산하겠다. 그리고, 계산 결과를 토대로 선로 배치 구조의 부하에 대한 자기장적 안정성을 알아봄으로써 대중 교통수단으로 급부상하

고 있는 전철의 전원 공급용 송전선로 주변의 자기장적 환경을 알아보겠다.

II 자기장의 계산

2.1 전자기장의 발생원과 정전자기장

전자기 방사파는 전자기원으로부터 원거리까지 영향을 미치고, 그 전자기원이 제거되어도 지속적으로 존재한다. 그러나, 전자기장은 전자기원의 근 거리에 존재하고, 그 전자기원이 제거되면 energy도 함께 소멸된다.

시불변일 경우 정전계는 정전하에 의해, 정자계는 일정속도를 갖는 전하의 흐름인 직류에 의해 발생될 뿐 서로 상호작용을 하지 않고 분리되어 존재한다.

하지만, 시변 자계는 전계를, 시변 전계는 자계를 발생시켜 동시에 존재하며, 서로 상호작용을 한다.

원거리 즉, $r \gg d = \frac{\lambda}{2\pi}$ (r : 선로로부터의 거리, d : 방사자계와 정자계, 유도자계가 비슷하게 되는 지점, λ : 파장),에서는 전계와 자계가

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \quad (1)$$

의 관계식을 갖는 상호작용을 일으키나, 근거리(near-field region)인 $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ 일 경우는 시변일지라도 전계와 자계가 식 (1)과 같은 관계식을 갖지 않고 한쪽으로 편중되게 된다.

따라서, 전력 주파수(60Hz)인 경우에는 파장이

$$\lambda = \frac{C}{f} \approx \frac{3 \times 10^8}{60} = 5 \times 10^6 [m]$$

로 매우 길고, d 가

$$d = \frac{\lambda}{2\pi} \approx \frac{5 \times 10^6}{2 \cdot \pi} \approx 8 \times 10^5 [m]$$

이기 때문에 전력선 주변은 근거리 범주에 들며, 또한 파장이 송전선 등의 방사체 길이에 비해 매우 길어 효율적인 방사체의 역할을 수행할 수 없기 때

문에 전력선 근처에서는 방사파가 거의 존재하지 않고 field만이 존재하여 준정전자기장으로 해석할 수 있다^[2].

2.2 선로에서의 자기장

2.2.1 와전류의 침투 깊이

대지에 유도된 와전류를 고려한 자기장을 계산하기 위해서는 우선 대부분이 비자성체로 이루어진 대지에서의 skin depth δ 를 알아야 한다.

skin depth를 구하기 위한 과동방정식의 전파상수 γ 는

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon} \approx \sqrt{j\omega\mu\sigma} \quad (2)$$

이고, $\sigma \gg \omega\epsilon$ 이므로

$$\gamma \approx (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = A + jB \quad (3)$$

이 된다. 여기서, A 는 감쇠 정수이고 $1/A$ 는 침투 깊이이다. 따라서 대지에서의 전류 침투 깊이 δ 는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_e\omega\sigma_e}} \quad (4)$$

이다. 그리고, skin depth에 의한 영상 전류까지의 complex depth α 는

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\mu_e\omega\sigma_e}} e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (5)$$

이다^{[3],[4]}.

2.2.2 전선로에서의 자기장

전선로에서의 ELF 자기장은 선로의 전류량을 알 경우 Biot Savart의 법칙을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 2에서 처럼 $(X, Y) = (0, h)$ 에 선로가 위치되어 있을 때 $(X, Y) = (X_p, Y_p)$ 위치의 자기장은 대지를 무한히 평평한 영전위로 보고, 전선로는 대지와 평행한 무한장 직선 선로로 가정할 경우 전선로에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장 B_1 과 영상전류에 의한 와전류에 의해 발생하는 자기장 B_2

는 식 (6), (7)와 같이 나타낼 수 있다.

(8a)

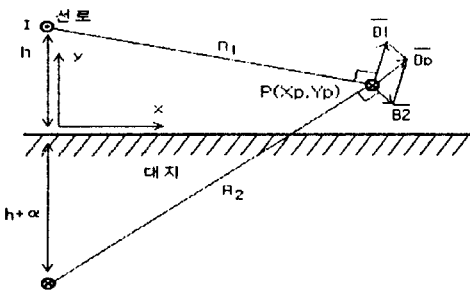


그림 1 전선로에서의 자기장

$$|B_1| = \frac{\mu I}{2\pi R_1} \quad (6)$$

여기서, $R_1 = \sqrt{X_p^2 + (Y_p - h)^2}$

선로의 전류에 의해 발생하는 수평방향의 자기장 B_{1x} 와 수직방향의 자기장 B_{1y} 는

$$B_{1x} = -|B_1| \frac{Y_p - h}{R_1} \quad (6a)$$

$$B_{1y} = |B_1| \frac{X_p}{R_1} \quad (6b)$$

이고, 대지에 유도된 와전류에 의한 자기장은

$$|B_2| = \frac{\mu I}{2\pi R_2} \quad (7)$$

여기서, $R_2 = \sqrt{X_p^2 + (h + \alpha + Y_p)^2}$

이다. 그리고, 대지에 유도된 와전류에 의한 수평방향의 자기장 B_{2x} 와 수직방향의 자기장 B_{2y} 는

$$B_{2x} = |B_2| \frac{Y_p + h + \alpha}{R_2} \quad (7a)$$

$$B_{2y} = -|B_2| \frac{X_p}{R_2} \quad (7b)$$

이며, 선로에 흐르는 전류와 대지에 유도된 전류에 의해 발생한 수평방향의 자기장 B_{px} 와 수직방향의 자기장 B_{py} 는

$$B_{px} = B_{1x} + B_{2x} = -\frac{\mu I}{2\pi} \left[\frac{Y_p - h}{R_1} - \frac{Y_p + h + \alpha}{R_2} \right]$$

$$B_{py} = B_{1y} + B_{2y} = \frac{\mu I}{2\pi} \left[\frac{X_p}{R_1} - \frac{X_p}{R_2} \right] \quad (8b)$$

이다. 따라서, 합성 자기장의 크기는

$$|B_p| = \sqrt{|B_{px}|^2 + |B_{py}|^2} \quad (9)$$

이 된다.

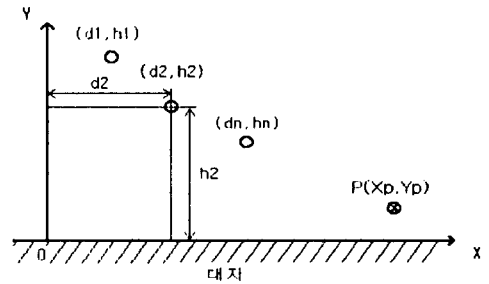


그림 2 다상 선로에서의 자기장

또, 그림 2에서 처럼 N개의 상을 갖는 전선로에서 $(X, Y) = (d_n, h_n)$ 에 선로가 위치되어 있을 경우 $(X, Y) = (X_p, Y_p)$ 에서의 자기장은

$$B = -2 \times \sum_{n=1}^N I_n \left\{ \left[\frac{Y_p - h_n}{R_{1n}^2} - \frac{Y_p + h_n + \alpha}{R_{2n}^2} \right] \hat{a}_x - \left[\frac{X_p - d_n}{R_{1n}^2} - \frac{X_p - d_n}{R_{2n}^2} \right] \hat{a}_y \right\} [mG] \quad (10)$$

여기서, $R_{1n} = \sqrt{(X_p - h_n)^2 + (Y_p - h_n)^2}$

$$R_{2n} = \sqrt{(X_p - d_n)^2 + (h_n + \alpha + Y_p)^2}$$

이다.^{[3][4]}

III Simulation 결과

3.1 전력분석 결과

전철용 송전선로에서 발생하는 자기장 계산을 위해, 분석된 각 상의 위상각과 전류, 고조파 함유율 등에 의한 임의의 전류(표 1)의 파형 중 '전류 II'의

것은 그림 3과 같다. '전류 I'은 24시간 중 최대 전류값이고, '전류 II'는 임의의 시간의 전류값이며, '전류 III'는 24시간 중 최소 전류값이다. 위상각 및 고조파 전류는 '전류 II'의 분석치를, 특히 고조파는 '전류 II'의 A상을 기준으로 동일한 비율로 설정하였다.

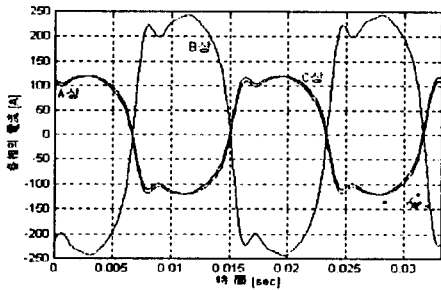


그림 3 Simulation을 위한 전류 파형

항목	차수 상	기분과				
		기본과	3고조	5고조	7고조	9고조
위상	A상	-53°	26°	73°	112°	139°
	B상	127°	206°	253°	292°	309°
	C상	-50°	29°	77°	115°	142°
전류 I [A]	A상	204.20	41.00	21.40	9.60	3.20
	B상	401.10	80.60	42.10	18.80	6.40
	C상	198.30	39.60	20.80	9.30	3.20
전류 II [A]	A상	96.69	19.43	10.14	4.55	1.50
	B상	194.60	39.10	20.43	9.12	3.10
	C상	97.40	19.45	10.22	4.57	1.57
전류 III [A]	A상	3.30	0.66	0.35	0.16	0.05
	B상	12.60	2.53	1.32	0.59	0.20
	C상	9.60	1.92	1.00	0.45	0.15

표 1 Simulation을 위한 각상의 전류와 위상각

3. 2 자기장 simulation 결과

선로 배치 구조는 자기장 발생에 있어서 가장 중요한 변수 중 하나이다. 이번 연구에 사용될 선로 배치 구조는

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_N & d_A & d_B & d_C \\ h_N & h_A & h_B & h_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d_N & d_A & d_B & d_C \\ h_N & h_A & h_B & h_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 4.00 & 7.05 & 5.15 \\ 30 & 25.00 & 20.10 & 16.20 \end{bmatrix}$$

[單位 : m]

으로, x 는 N상을 0(zero)점으로 하여 송전선로에

직각 방향을 양(+)의 방향으로 한 거리이고, y 는 대지표면을 0점으로 대지표면 위의 수직 방향을 양의 방향으로 한 높이이며, X_p 는 0에서 50m까지 고려하였고, Y_p 는 1m를 기준으로 하였다. 그리고, 예비선로 및 철탑의 영향은 무시하였고, 중성선과 대지로 흐르는 귀로 전류는 각철탑에 설치되어 있는 접지선을 통해 대지로 방류되는 경로와 대지를 통한 귀로 경로가 불확실하여 그림 7c의 경우를 제외하고는 포함시키지 않았다.

3. 2. 1 상별 위치 변화에 따른 변화

그림 4는 상별 위치 변화에 따른 자기장의 변화를 보여 주는 것으로 각상의 전류의 크기와 위상각이

$$\textcircled{1} \text{은 } \begin{pmatrix} A_1 & A'_1 \\ B_1 & B'_1 \\ C_1 & C_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 96.69A & -53^\circ \\ 194.60A & 127^\circ \\ 97.40A & -50^\circ \end{pmatrix} \text{일 때이고,}$$

$$\textcircled{2} \text{의 경우는 } \begin{pmatrix} A_2 & A'_2 \\ B_2 & B'_2 \\ C_2 & C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 194.60A & 127^\circ \\ 97.40A & -50^\circ \\ 96.69A & -53^\circ \end{pmatrix},$$

$$\textcircled{3} \text{은 } \begin{pmatrix} A_3 & A'_3 \\ B_3 & B'_3 \\ C_3 & C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 97.40A & -50^\circ \\ 96.69A & -53^\circ \\ 194.60A & 127^\circ \end{pmatrix} \text{일 때이다.}$$

현재 상회전 방향에 따른 상별 배치는 $\textcircled{1}$ 과 같은 형태이며, 이 경우에서 상별 위치에 따른 자기장 발생이 가장 작은 것으로 분석되었다. 따라서, 현상태의 상별 위치에는 자기장 환경적 측면에서 불매 문제가 없는 것으로 판단된다.

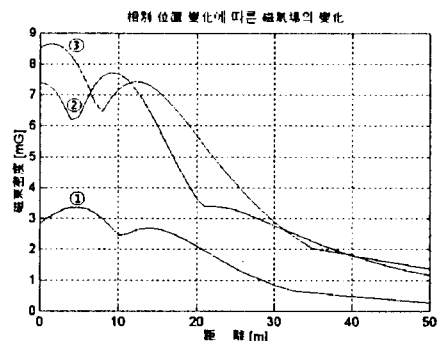


그림 4 A, B, C 상별 위치 변화에 따른 자기장의 변화

3. 2. 2 위상 및 전류의 변화에 따른 변화

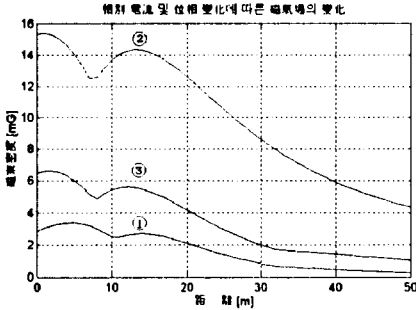


그림 5 위상 및 전류의 변화에 따른 자기장의 변화

그림 5는 전류의 크기 및 위상에 따른 자기장의 변화를 보인 것으로, 이때 ①과 ②의 A, B, C상 전류의 크기는 각각 96.69A, 194.6A, 97.4A이다. 여기서, ①은 상별 위상각이

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -53^\circ \\ 127^\circ \\ -50^\circ \end{pmatrix} \text{ 일 때}$$

이고, ②는 상별 위상각이 $\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0^\circ \\ 120^\circ \\ 240^\circ \end{pmatrix}$ 일 때

이며, ③은 상별 위상각 및 전류의 크기가

$$\begin{pmatrix} A_3 & A_3' \\ B_3 & B_3' \\ C_3 & C_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0^\circ & 96.69A \\ 120^\circ & 96.69A \\ 240^\circ & 96.69A \end{pmatrix} \text{ 일 때이다.}$$

①은 현재의 위상 및 전류 상태로, 자기장의 최대치가 가장 작게 산출되었다. ②는 ①과 같은 불평형 전류 상태에서 위상각만 120도의 상차로 왜곡이 없는 경우를 고려한 것으로, 자기장의 최대치가 15.5mG까지 이르는 큰 자기장이 발생되는 것으로 산출되었다. ③은 ②의 위상 상태에서 전류가 각상별로 같은 때를 고려한 것으로, 이 경우의 자기장은 각 상의 전류중 가장 작은 것을 선택하여 전류치를 책정했음에도 불구하고 ①의 경우보다 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 각 상별로 부하 분담이 일정하고 위상각 왜곡이 없는 이상적인 3상 전류일지라도 철탑의 선로 배치 구조에 따라서는 자

기장 발생량이 증가되는 것으로 분석되었다.

이번 연구에 사용된 model의 분석결과, 자기장 환경적 측면에서 본 부하 분담 상태는 안정적인 형태인 것으로 판단된다.

3. 2. 3 대지의 영향에 따른 변화

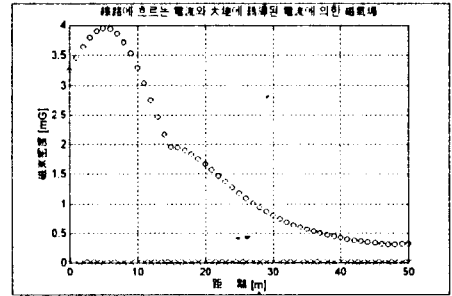


그림 6a 선로와 대지에 유도된 전류에 의한 자기장

○ : 선로에 흐르는 전류에 의한 자기장

× : 대지에 유도된 전류에 의한 자기장

대지의 구성 성분은 대부분 비자성체이고, 전기전도도가 낮기 때문에 와전류가 거의 유기되지 않으며, ELF 범위에서는 대지에서의 표피효과에 의한 침투깊이가 약 2×10^3 [m]로 대지에 대한 선로의 높이에 비하여 매우 깊기 때문에 그림 6a와 같이 대지에 유도된 전류에 의해서 발생하는 자기장은 거의 없다.

그림 6b는 송전선에 흐르는 실제 전류를 이용하여 대지의 영향을 고려한 자기장과 고려하지 않은 것을 분석한 결과로, 그림 6b의 선로에 흐르는 전류에 의해 발생한 자기장과 거의 일치한다.

구 분	높지대	습지대	건조지대	암반지대
전기 전도도	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}

표 2 대지의 지질별 전기전도도 [S/m]

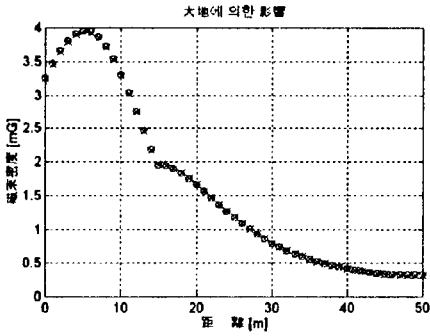


그림 6b 대지의 영향에 따른 자기장의 변화

○ : 대지의 영향을 고려한 자기장 분포

× : 대지의 영향을 고려하지 않은 자기장 분포

3. 2. 4 실제로 분석된 전류에 의한 자기장

그림 7a는 3.2.3의 결과에 따라 대지의 영향은 무시하였고, 고조파 전류(표 1)를 포함한 그림 3의 전류파형을 이용한 simulation 결과이다. 그리고, 그림 7b는 기본 주파수 60Hz의 전류에 의해서 발생하는 자기장이다. 그림 7a의 고조파를 포함시킨 전류에 의해 simulation된 자기장은 기본파 전류의 자기장에 비해 많이 발생하는 것으로 나타났다.

그러나, 이번 연구에서는 60Hz를 중심으로 인체에 대한 영향을 고려하기 때문에 자기장의 주파수별 발생은 변동이 없으므로 이 결과가 큰 의미를 갖지는 않는다.

그리고, 제 3, 6, 9, 12차 등 영상(zero sequence) 고조파와 부하 불평형에 의해 발생하는 상전류 방향과 반대로 흐르는 return current를 고려한 자기장은 그림 7c와 같이 return current에 의해 발생하는 크기만큼 상쇄되는 것으로 나타났다(중성선과 대지를 통한 return current는 경로에 따른 양을 정확하게 파악할 수 없어 이번 simulation에서는 중성선으로만 흐르는 것으로 가정한 것이다).

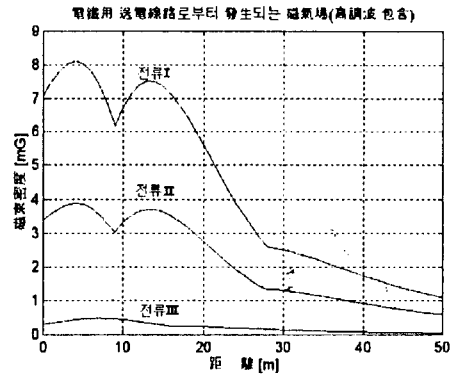


그림 7a 고조파를 고려한 전류에 의한 자기장

앞의 simulation 결과들을 분석해 보면, 고조파 함유율이 높거나, 위상각 왜곡이 심한 것, 또는 전류의 양이 많은 것 등에 의해 발생하는 자기장이 각각 그렇지 않은 것에 비해 자기장 발생이 매우 클 것으로 예상되었으나, 위상각의 경우에는 왜곡이 심한 현상태에서 오히려 자기장 발생이 감소하는 것으로 나타났고, 위상각과 관계없이 단지 전류가 많이 흐르는 것이 자기장 발생을 증가시키지는 않는 것으로 나타났다. 그러나, 고조파가 포함된 것은 그렇지 않은 것에 비해 자기장 발생의 증가가 있었다.

따라서, 단지 전류가 크거나, 위상각 왜곡이 심하다고 자기장 발생이 큰 것이 아니라, 선로 및 상 배치 구조와 부하 배치에 따른 불균형에 의해 많은 자기장이 발생하는 것으로 나타났다.

이번 연구에서 측정·분석된 3상 전류에 의해 현재의 선로 배치 구조에서 발생이 예상되는 자기장은 위상 왜곡이 전혀 없는 전류에 의해 발생하는 자기장에 비해 3.2.1과 3.2.2의 결과와 같이 상당히 작은 것으로 나타났다. 따라서, 자기장 발생 측면에서 본 선로 배치 구조는 부하 특성에 맞게 적당하게 구성되어 있는 것으로 판단된다.

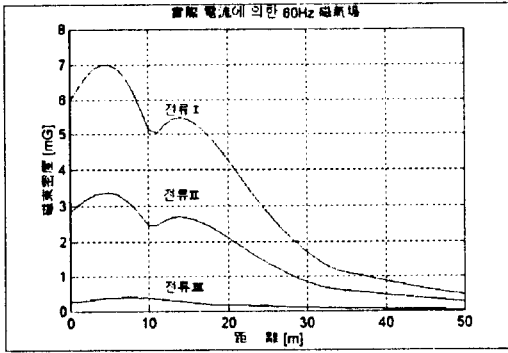


그림 7b 실제 분석된 60Hz 전류에 의한 자기장

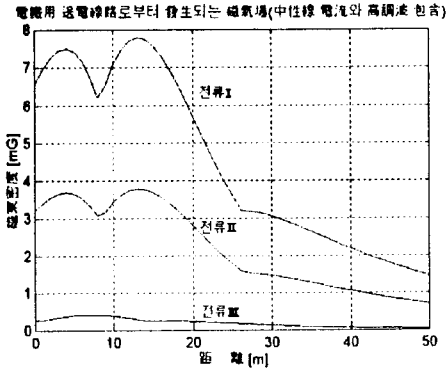


그림 7c Return current와 고조파를 포함한 전류에 의해 발생하는 자기장

IV 결론

본 논문에서는 대중 교통수단으로 급부상하고 있는 전철을 위한 전원 공급용 송전선로 주변의 ELF 자기장의 환경적 안전성을 알아보았다. 이를 위해 송전선로에 흐르는 전류를 이용하여 선로에서 발생이 예상되는 자기장을 계산하였고, 부하에 대한 선로 배치의 구조적 안정성을 알아보았다.

선택된 선로의 자기장을 여러 경우로 분류하여 simulation 해본 결과 부하 특성에 따른 선로 배치와 상 배치 구조에 문제가 없는 것으로 판단되었고, 과도하게 발생하는 고조파 전류도 자기장직 환

경요인의 변화에는 큰 작용이 없는 것으로 나타났다.

자기장의 차폐는 전기장과는 달리 차폐에 기술적인 어려움이 많아 이를 위해서는 많은 비용이 소모된다. 따라서, 자기장에 대한 노출량을 줄일 수 있는 가장 적절한 방법은 부하 특성에 따른 적절한 선로 배치 구조를 선택하는 방법과 자기장 발생원으로부터 이격거리를 충분히 주는 방법이 있다.

현재 여러 학자들에 의해 ELF 자기장의 안전성에 대하여 많은 연구가 행해졌고, 그에 따른 많은 추천제한치들도 남발되어 왔다. 그러나, 사회적이나 국가적으로 받아들일 수 있는 ELF 자기장의 규제치는 가능한 상호작용 mechanism이 존재하는지, 이런 작용이 인체의 생체 조직에 일관성 있게 생화학적 변화를 줄 수 있는지, 그리고 이런 생화학적 변화가 인체에 유해한지, 역학 연구에 의한 자료는 위험의 등급을 결정할 수 있을 만큼 의미 있는 것이고, 다른 환경적 요인 및 개인의 취향과 습성 등의 충분한 고려가 있었는지, 이런 ELF 자기장의 잠재된 위험성에 의한 사회적 이주 비용 상한치와 다른 위험 인자에 의한 이주 비용과의 비교 등에 의해 결정되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] M. Misakian, "ELF electric and magnetic field measurement methods", *IEEE EMC Symposium*, Aug. 9-13, 1993, pp. 150 - 155.
- [2] M. Blank, *Electromagnetic Fields : Biological Interactions and Mechanisms*, American Chemical Society, 1995.
- [3] R. G. Olsen et al., "Development and validation of software for predicting ELF magnetic fields near power lines", *IEEE*

Transactions on Power Delivery, Vol. 10,
No. 3, July 1995, pp. 1525 - 1533.

[4] R. G. Olsen, "Electromagnetic Fields
from Power Lines", *IEEE EMC Symposium*,
Aug. 9-13, 1993, pp. 138 - 143.