

극저주파 시스템에서 전자장 차폐효과 해석 및 개선 방안

김상훈, 최홍순, 박일한  
성균관대학교 정보통신공학부

Analysis and Improvement of Shielding Effect of  
Electromagnetic Field in Extremely Low Frequency System

Sang-hon Kim, Hong-Soon Choi, Il-Han Park  
School of Information & Communications Engineering University of Sungkyunkwan

**Abstract** - Recently, Peoples are exposed the ELF(Extremely Low Frequency) magnetic fields in the vicinity of underground transmission lines, and there are the generally accepted opinion that the magnetic fields affect the human body and there are possibility of the disease. Also in relation to this problem, technical solution methods and research are advanced for reducing the magnetic fields. In this paper, to practically understand the magnetic fields underground transmission lines, We analyze the electromagnetic field distribution in the underground transmission lines by means of FEM(Finite Element Methods) and present that improvement of the effective shielding methods by applying cable arrangements and shielding materials, eddy current problem to the underground transmission lines by means of the numerical analysis Tool.

1. 서 론

현대 생활을 지탱하는 과학 기술은, 인류에게 삶의 편리를 가져다 준다는 긍정적인 면도 있지만, 한편으로는 인간 생활을 간섭하는 환경 문제를 일으키기도 한다.[2]

대표적인 예로, 최근에 송변전 설비에서 발생하는 자계에 의한 인체에의 영향이 주목 받고 있다. 현재 송전선로 케이블에서 발생하는 극저주파 자계에 사람들이 노출되면서 자계가 인체의 영향 및 백혈병이나 암 등의 질병 발생 가능성이 있다는 주장이 여러 분야에서 논의 되어져 왔고, 더불어 이 문제들과 관련해 자계 절감을 위한 과학 기술적 대책과 연구를 많이 진행하고 있다.

본 논문에서는 자계를 해석 대상물간의 전자기적 영향을 직접 field equation으로부터 계산하는 유한 요소법을 이용해 극저주파 자계를 수치계산 하였다. 그러나 송전선로 모델 형상이 간단한 경우는 해석적으로 풀 수 있으나 복잡한 경우는 FEM 상용 프로그램 Tool을 사용해 수치적 풀어야 한다.[1] 그래서 Tool를 사용해 송전선로에 케이블 배열, 재질 특성, 두께, 그리고 2차원에서의 와전류 문제 등을 적용한 자계 분포 해석하였다.

2. 본 론

2.1 시스템의 수치해석 이론

본 논문에서는 Grad-Phi 항을 고려한 교류 정상상태 자계해석 이론을 전개 하였다. 모든 거시적인 전자기적 현상은 맥스웰방정식을 이용하여 표현 할 수 있다.

전원의 주파수가 상용주파수인 경우에 변위전류 (Displacement currents)는 전도전류(Conduction currents)에 비하여 무시할 있으며 이러한 시스템을 준정적시스템(Quasi-Static System)이라 한다. 준정적시스템에서 맥스웰방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_i \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_i = 0 \tag{5}$$

(4)식으로부터 다음과 같이 자기벡터포텐셜을 정의한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{6}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{7}$$

(6)식과 (7)식을 (2)식에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_i \tag{8}$$

여기서, 총 전류밀도는 전류원에 의한 전류밀도와 도체 내의 자유전자 전계와 관련되어 발생하는 전류로 구분되며 다음과 같다.

$$\vec{J}_i = \vec{J}_s + \vec{J}_e \tag{9}$$

도체에 유기되는 와전류는 (1), (6)식 및 (9)식으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) = \nabla \times \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \tag{10}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \tag{11}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \tag{12}$$

결과적으로 (5), (8)식 및 (9)식으로부터 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = \vec{J}_s \tag{13}$$

여기서 극저주파의 자계를 고려하면  $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$  로 표현할 수 있고,[1]

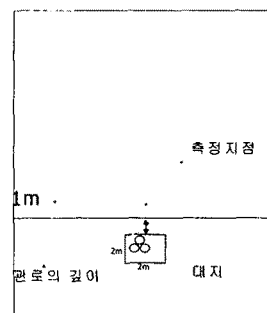
해석 모델을 2차원으로 가정하면, 자기벡터포텐셜은 축방향성분만 존재하기 때문에, 자기 지배방정식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.[3],[4]

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega \sigma \vec{A} + \sigma \phi_z \hat{z} = \vec{J}_s \tag{14}$$

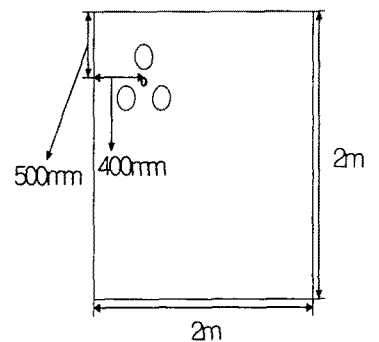
이상의 방정식은 송전선로 모델 형상이 간단한 경우는 해석적으로 풀 수 있으나 복잡한 경우는 FEM 상용 프로그램 Tool을 사용해 수치적 풀어야 한다.

2.2 해석 모델 정의 및 특성

2.2.1 2차원 해석 모델

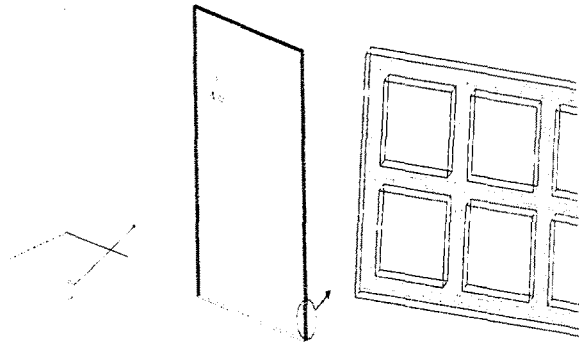


<그림 1> 2차원 해석 모델



<그림 2> 케이블의 위치

## 2.2.2 3차원 해석 모델



〈그림 3〉 3차원 해석 모델

케이블 3상은 좌측 벽으로부터 400[mm], 위로부터 500[mm] 떨어진 위치에 케이블을 놓았다. 케이블 상의 전류 크기는 A상이 100 [A], B상이 -50+86.6j [A] 그리고 C상이 -50-86.6j [A]이다. 그 외 부수적인 사항으로, 관로의 깊이 1.5m, 대지의 도전율 Soil ( $\sigma = 1 \times 10^{-5}$  [S/m]) 등을 고려하였다. 본 논문에서 모델 해석을 위해 사용된 차폐재의 특성은 표 1과 같다.

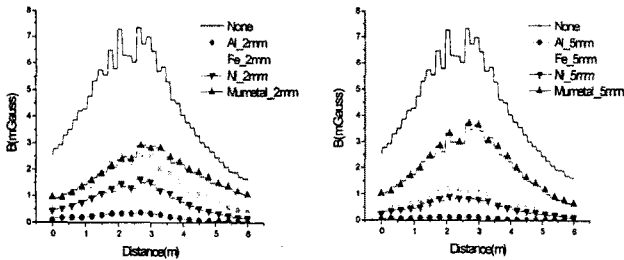
〈표 1〉 차폐재의 비유전율, 비투자율 및 도전율

	Fe	Ni	Al	Mumetal
Relative Permittivity	1	1	1	1
Relative Permeability	1400	250	1	100000
Conductivity	$1.124 \times 10^7$ [S/m]	$1.45 \times 10^7$ [S/m]	$3.8 \times 10^7$ [S/m]	$1.61 \times 10^6$ [S/m]

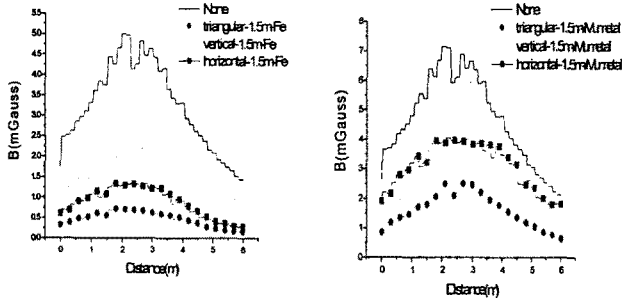
\*Mumetal는 76% Ni + 17% Fe+ 5% Cu + 2% Cr 등을 포함한 합금이다

## 2.3 해석 모델의 수치 해석 결과

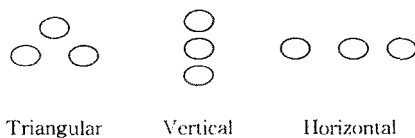
그림 4는 차폐재에 따른 자속밀도 분포를 나타낸 것으로 도전율이 높은 Al 차폐재가 차폐효과가 좋았고, 투자율이 높은 Mumetal 차폐재는 낮은 차폐효과를 보였다.



〈그림 4〉 차폐재에 따른 자속밀도 변화 (두께 2mm, 5mm)



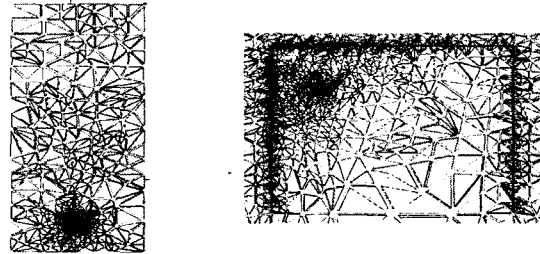
〈그림 5〉 케이블 배열에 따른 자속밀도 변화 (관로의 깊이 1.5m)



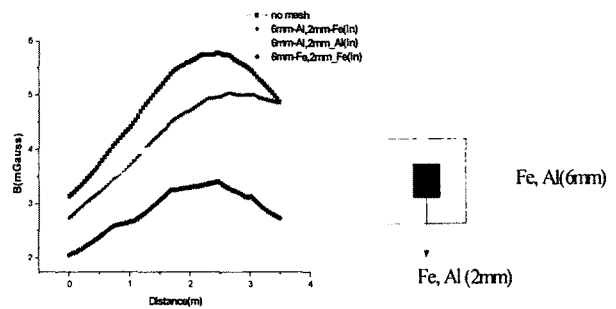
〈그림 6〉 케이블 배열

그림 5는 그림 6 같은 케이블 배열을 조건으로 했을 때 케이블 배열에 따른 자속밀도 분포를 나타내고 있다. triangular배열일 때 대체적으로 차폐효과가 좋음을 알 수 있었다.

그림 7, 8은 3차원 망 모델의 해석 결과를 나타낸 것이다. 대지로부터 지상으로 2m 지점을 자계 측정지점으로 정했고, 망의 재질에 따른 효과를 보기 위해서, 바깥쪽 차폐재는 두께 6mm, 안쪽 차폐재 두께는 2mm로 된 알루미늄망, 철망, 그리고 알루미늄 안에 철이 들어 있는 형태의 망을 각각 3D로 시뮬레이션 하여 각각 비교해 보았다. 해석결과는 철망 구조가 좋은 차폐효과를 나타냄을 알 수 있었다.



〈그림 7〉 3차원 모델의 mesh 상태



〈그림 8〉 망의 재질에 따른 자속밀도 변화

## 3. 결 론

본 논문에서는 2차원, 3차원 망 모델을 FEM Tool 사용해 송전선로 주위의 자계 차폐효과를 해석해 보았다. 논문 결과는 다음과 같다.

흔히, 자계 차폐재로 도전율 및 투자율이 높은 물질을 사용한 선로들이 있는데, 본 논문에서는 도전율이 높은 Al과 투자율이 높은 Mumetal 물질 외 Fe, Ni 더 추가해 해석해 보았다. 그 결과, 2차원에서는 도전율이 높은 Al 차폐재가 차폐효과가 좋았고, 투자율이 높은 Mumetal 차폐재는 낮은 차폐효과를 보였다. 3차원 망 형태의 모델 해석에서는 철망 구조가 알루미늄망, 알루미늄 안에 철이 들어 있는 형태의 망 보다 자계 차폐 효과가 좋았다.

또한, 케이블 배열에 따른 자속밀도 분포 해석을 통한 결과는 대체적으로 triangular배열일 때 차폐효과가 좋음을 알 수 있었다.

이상의 연구 결과를 고려할 때, 실제 송전 선로를 설계할 때 무엇보다도 경제성을 고려한 Fe를 차폐재로 사용해 송전선로 시스템을 설계하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Suk-Won Min, Ki-Hyun Song "Investigation of Shielding Effects of High Conductivity of High Permeability Materials on 60Hz ELF Magnetic Fields", 대한 전기학회지, 제54권4호, pp.166-171, 2005
- [2] Suk-Won Min, Ki-Hyun Song "Analysis on Induced Current Density inside Human Body by 60 Hz ELF Magnetic Fields", 대한 전기학회지, pp.581-583, 2004
- [3] S. J. Salon "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, Inc., 1995
- [4] Melvin J. Maron, Robert J. Lopez, "Numerical Analysis", KALA, pp.447-478, 1991