

송전선로 주위의 도체에 미치는 유도장해 해석

최세웅, 나완수, 최명준, 이세희, 김동훈, 박일한, 신명철  
 성균관 대학교 전기전자 컴퓨터공학부, LG전자

Analysis of the inductive interference on the conductor around power system

Seyong CHOI, Wansoo Nah, Myungjun Choi, Se-Hee Lee, Dong-hun Kim, Il-han Park, Myung-chul Shin  
 Sungkyunkwan University, Dept. of Electrical and Computer Engineering, LG Electronics

**Abstract** - In this paper, we analyze the inductive interference in conductive material around power transmission line. To compute induced eddy currents as well as electromagnetic fields, finite element method(FEM) is used for numerical calculation. The characteristics of conductive material such as gas pipeline, overhead guide wires, conducting earth and so on are taken account of FEM analysis. This rearch also shows that mitigation wire reduces amount of eddy current in buried gas pipe line.

1. 서 론

생활 수준의 향상과 산업의 발전으로 인해서 전력 수요는 점점 증가되고 있다. 하지만 이러한 요구에도 불구하고 전기 설비들의 설치 면적은 점점 협소해지고 있으며 대 용량의 설비들에 의한 전기 환경의 문제는 이제 간과할 수 없는 사회 문제로 대두되고 있으며 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 문제시 되고 있는 전기 설비들에 의해 발생하는 전자기장의 노출량에 관해서 사회적 법적인 규제가 강화 되는 현재 전자기 량을 정확히 계산할 제반 사항이 부족한 실정이며 실제 현상을 과학적인 근거로 해석해야 할 필요성이 절실하다.

여러 전기 설비들중에서 고전압의 전력 송전선은 그 주위에 전자기장을 발생시키고, 이 전자기장은 주위의 여러 설비들에 영향을 미친다. 특히 송전선에서 발생하는 자계는 주변에 도체로 된 구조물이 있을 때 유도 전류가 유기됨으로써 사람이나 가축에는 감전 사고를 유발시킬 수 있으며, 간섭을 받은 구조물 자체에 치명적인 손상을 입힐수도 있다.

자계나 이에 의한 유도 장해의 원리는 수식적으로 잘 구현되어 있고 분석적으로 쉽게 이해될 수 있으나, 실제의 현상에 적용시켜 효과를 살피는 데는 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 자계를 계산하는 방법은 유한 요소법을 채택했다. 유한요소법의 해석 결과로 구해지는 자기 벡터 포텐셜(Magnetic Vector Potential)로부터 자계 분포 해석 되었고, 이를 바탕으로 유도되는 와전류 분포를 계산했다.

본 연구에서는 송전선에서 발생하는, 특히 사고시 송전선에서 발생하는 자계가 주위의 설비들에 미치는 유도장해에 관하여 기술하였다. 유도 장해의 해석 대상으로는 송전선 주위에 도전율을 가지는 대지에 묻힌 도체를 이며, 특히 매설된 파이프 라인에 유기되는 와전류를 수치적으로 계산하였다. 그리고 와전류가 유도되는 도체에 차폐대책을 수립함으로써 차폐 유무에 따른 유도 장해의 수준을 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 지배 방정식의 공식화

시간적으로 변하는 전류밀도  $J_0$ 에 의하여 공간적으로 분포하는 시변자계는 도체부분에 와전류  $J_e$  를 유도시킨다. 자계를 구하기 위하여 접근하는 방법으로 포텐셜을 이용해 구하는 방법이 널리 쓰인다. 이런 방법을 통해서 구해진 자기 벡터 포텐셜로부터 자계 밀도  $B$ 를 구할 수 있다. 전자기장을 지배하는 이런 일련의 식들은 맥스웰 방정식으로부터 기인한다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{J}$ 는 각각 다음과 같다.

$\vec{H}$  : 자계의 세기(Magnetic Field Intensity) [A/m]  
 $\vec{B}$  : 자계의 밀도(Magnetic Flux Density) [wb/m]  
 $\vec{J}$  : 전 전류 밀도(Total Current Density) [A/m<sup>2</sup>]  
 자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 정의하고,  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ,  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 의 관계로부터 다음 식들이 성립한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \quad (2)$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (3)$$

식 (2), (3)에서 벡터 관계식인 식 (4)를 적용하면,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{F}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) - \nabla^2 \vec{F} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = -\vec{J} \quad (5)$$

와 같은 식으로 정형화시킬 수 있다.

해석 대상 모델에서 시스템의 전 전류 밀도  $\vec{J}$ 가 z 축만의 방향으로만 존재 한다면  $\vec{J}_z$ , 자기 벡터 포텐셜 역시 z 축만의 요소  $\vec{A}_z$ 를 갖고, 이 때 전체 시스템은 2차원의 전자장 문제로 축소될 수 있다. 즉 식 (5)를 2차원의 영역에서 전개시키면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right] + \vec{J}_z = 0 \quad (6)$$

식 (1)로부터 전류밀도를 전원 전류 와 유도 전류분으로 나타내면,

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}_s + \vec{J}_e \\ \vec{J} &= \vec{J}_s + \vec{J}_e \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)과 같이 되며 각각은 다음과 같다.

$\vec{J}_s$ : 전원 전류 밀도(Source Current Density) [ $A/m^2$ ]

$\vec{J}_e$ : 유도 와전류 밀도(Eddy Current Density) [ $A/m^2$ ]

이 때 유도 되는 와전류 밀도  $\vec{J}_e$ 는

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E}_e \quad (8)$$

의 관계를 갖으며,  $\vec{E}_e$ 는 와전류를 흐르게 하는 원인이 되고 다음 식에 의해 정의 된다.

$$\vec{E}_e = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (9)$$

그러므로 식 (8)과 (9)로부터

$$\vec{J}_e = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (10)$$

과 같은 식이 유도 된다.

따라서 해석 영역의 전류 밀도 식은

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \vec{J}_{sz} + \vec{J}_e \\ &= \vec{J}_{sz} + (-j\omega\sigma\vec{A}_z) \end{aligned} \quad (11)$$

와 같고, 해석 영역의 2차원 지배방정식은 식 (12)와 같이 정형화 될 수 있다.

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right] - j\omega\sigma A_z + J_{sz} = 0 \quad (12)$$

## 2.2 해석 영역의 정의

본 연구에서는 송전선의 사고시, 사고전류에 의해 발생하는 자계와 이에 의해서 유기되는 와전류의 분포를 해석하고자 한다. 송전선의 주위에 존재하여 유도 전류가 발생될 도체들은 상·하수관, 가스 파이프 라인, 송유관, 전력관, 통신 케이블 등이 있으며, 이중 유도 전류에 의한 피해가 가장 클 수 있는 가스 파이프 라인이 송전선을 따라서 평행하게 매설된 경우를 상정하여 연구하였다.

그림 1에서는 해석 대상 영역의 단면도를 보이고 있다. 전형적으로 가설된 송전선을 따라서 d 만큼 떨어진 거리에 송전선을 따라서 평행하게 매설된 가스 파이프 라인이 존재하는 경우이다. 그림 1에서의 송전선은 2회선 4도체로 구성된 345 kV 송전 시스템의 경우이며 표 1에 각 도체들의 설치규격을 나타내었다.

그림 2에서는 2회선 4도체의 345 kV 송전선의 설치도를 보이고 있다. 여기서 선로의 높이는 14 [m]이며, 유도

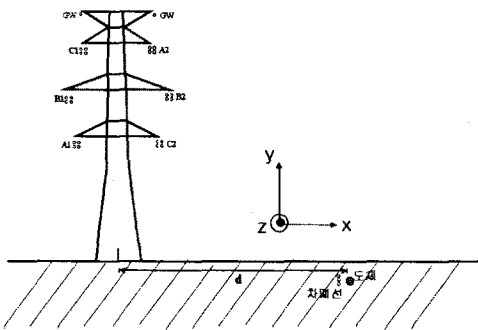


그림 1 해석 대상 영역의 단면도

표 1 표준 송전 선로의 사양

구분	가공지선		도체			선로높이 (m)
	개수	직경 (mm)	개수	직경 (mm)	소도체 간격 (mm)	
2회선 4도체 345kV	2	9.779	4	29.61	400	14

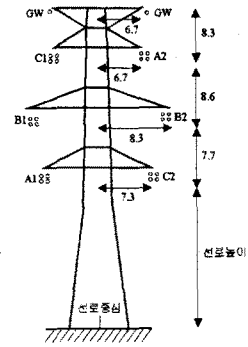


그림 2. 2회선 4도체 345kV 송전 시스템의 설치도

전류가 유기되는 가스 파이프 라인은 선로의 중심으로부터 25 [m]의 거리만큼 떨어져서 매설되어 있다.

그림 3과 표 2에서는 매설된 가스 파이프 라인의 단면도와 사양에 대해서 나타내고 있다. 가스 파이프 라인은 전기적으로 절연된 코팅으로 둘러 쌓여져 있어 이로 부터 도체 배관의 부식을 막는 역할을 한다.

송전선이 정상상태로 운전될 때에는 매우 적은 자계가 발생된다. 실제로 지상고 1m의 높이에서 한국 전력 공사가 측정한 자계 분포 자료를 살펴 보면, 345 kV 송전선의 자계 값은 측정 장소나, 측정 당시의 부하 전류에 따라 차이는 있지만 모두 최대 66 [mG] 이하로 보고되고 있고, 최대치들의 통계적인 수치도 22.3의 표준편차를 가질 때 평균 19.7 [mG]의 자계 분포를 보이고 있다. 이런 정상상태에서 유도되는 와전류는 매우 미세한 값을 가지므로 본 연구에서는 송전선의 한 상에서 사고가 발생한 경우를 가정하여 해석을 하였고, 이때의 사고전류  $I_p=1000$  [A]가 60 [Hz]의 표준 전력 주파수에서 생길 때를 상정하였다.

계산이 수행 될 영역에서, 사고가 발생한 송전선에 의한 자계로 인해서 유도 전류가 생길 수 있는 도체부분은 지중에 매설된 가스 파이프 라인, 송전선로 상의 가공지선, 전기 전도도를 갖는 대지, 가스 파이프 라인의 자계를 줄이는 역할을 하는 차폐선이다. 이들에 유도될 와전류를 해석하기 위한 과정에는 수식적인 원리 이외에도 대상에 대한 정보들이 필요하다. 특히 각 설치물들의 설비 형식이나 배열 방식, 그리고 각각의 물성 특성을 필요로 한다. 각 대상물들의 물질 특성을 살펴보면, 매설된 파이프 라인과 가공지선은 각각  $7.0E+06$  [S/m]의 전기 전도도를 갖고, 비투자율은 250의 값을 갖는다. 그리고 이 도체들은 해석시 발생하는 최대 자계값에 포화되지 않으므로 계산과정에서 비선형 해석은 고려되지 않는다.

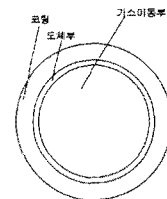


그림 3. 매설된 가스 파이프 라인의 단면도

표 2. 매설된 가스 파이프 라인의 사양

배관의 내경 (mm)	배관의 외경 (mm)	코팅의 두께 (mm)	도체 배관의 두께 (mm)
188.5	200	100	11.5

파이프 라인의 코팅재는 폴리 에틸렌 계의 피복재로  $1.0E-13$  [S/m]의 전도도를 갖고 1의 비투자율을 갖는다. 파이프 라인은 철탑의 중심으로부터 25 [m]의 거리만큼 떨어져 매설되어 있으며, 차폐제로 사용되는 금속선은 나선으로 된 알루미늄 재질로써  $3.82E+07$  [S/m]의 전도도를 갖고, 매설된 파이프 라인으로부터 왼쪽으로 1 (m)의 거리에 위치한다. 대지 역시 전기 전도도를 갖는 것으로 고려했다. 사실 대지는 수없이 많은 물질들로 이루어져 있으며 이들 또한 각각 전기 전도도를 가지므로 비균질적인 특징을 지니고 있다. 이런 상황을 고려하여 해석에 적용하기 어려운 문제이므로, 문제에 가장 적절한 일반적인 상황을 고려하기 위해서 롬질의 점토 토양인 농토를 가정하여  $100$  [ $\Omega$ m]의 비저항을 갖음을 적용했다. 대지의 깊이는 해석 영역의 결과에 미칠 영향을 고려하여 30 [m]의 깊이로 정의하였다.

### 3. 해석 사례

2절에서 논의한 바와 같이 제안된 대상에 관한 수치적인 계산이 유한요소법을 통하여 수행되었다. 해석 대상영역은 매우 광범위 한데 반해서 효과를 살펴야 할 대상물들은 극도로 작은 영역을 차지하고 있다. 유한 요소법을 이용하여 가장 효과적인 계산 결과를 도출하기 위해서는 많은 수의 요소들로 영역을 분할하고, 특히 관심의 영역에서는 이런 사실들이 더 세밀하게 적용되어야 한다. 자체의 해석에 있어서 살펴야 할 영역은 유도 전류가 생기는 부분일 것이다. 그러므로 매설된 도체들이 존재하는 지중 1.5[m]에서와 일반적으로 지상에서 대상물들에 영향을 미치기 쉬운 범위인 지상고 1[m]에서의 자체분포를 아래의 그림들에 나타냈다. 물론 송전선 주위의 자체 해석도 의미가 있으나 송전선에서 발생하는 자체에 의한 영향 평가가 더 절실히 요구되는 문제이므로, 유도 장애의 측면에서 두 부분의 자체 분포를 나타냈다. 본 절에서 언급될 세 가지의 해석 사례는 차폐선이 없는 경우와, 매설된 파이프 라인의 중심으로부터 1[m]의 거리에 떨어진 부분에 1개의 차폐선이 존재할 때, 같은 위치에서 3개의 차폐선이 존재 할 때에 관해서 자체 분포 및 유도 전류의 분포를 보였다.

#### 3.1 차폐선이 없는 경우

그림 4는 해석 결과에 의한 등포텐셜 분포이다. 그림 5와 그림 6은 차폐선이 없는 경우 자체의 분포와 매설된 파이프 라인 부근의 자체분포를 나타낸 그림이다. 그림 4에서는 x 축은 해석 영역중 철탑의 중심을 원점으로 지상고 1[m]와 지중 1.5[m]에서 횡방향으로 자체의 변화를 계산한 결과이다. x축을 기준으로 할 때 원점으로부터 약간 왼쪽 부분에서 큰 자체의 값을 나타내는데 이부분은 사고가 일어난 송전선의 부근이므로 비교적 큰 자체값을 나타내고, 원점으로부터 25[m] 떨어진 부분의 자체는 지중에 매설된 파이프라인의 영향으로 큰 자체값이 나타났다.

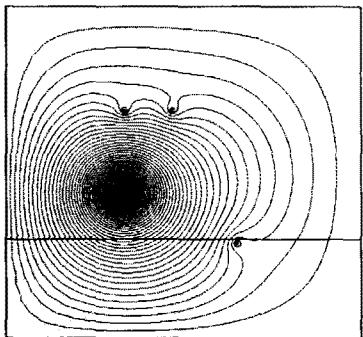


그림 4. 차폐선이 없을때의 해석 결과.

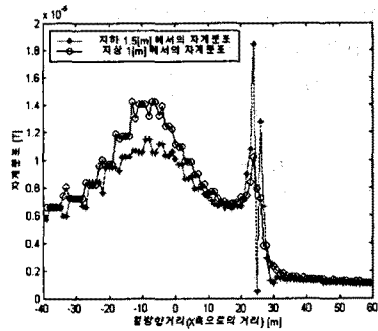


그림 5. 차폐선이 없을때의 자체 분포

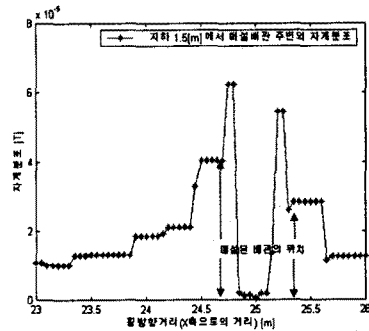


그림 6. 차폐선이 없을 때 파이프 라인 주변의 자체분포

이 때 각 도체부에서 유도되는 전류를 계산해 보면, 관심 영역인 매설된 가스 파이프 라인의 도체부에서 308.35[A]의 전류가 유기됨을 알 수 있었다.

#### 3.2 1개의 차폐선이 있는 경우

그림 7은 차폐선의 효과를 고려했을 때의 해석결과이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 그림 4와 비교해 볼 때 차폐선의 영향으로 인해 매설된 도체부를 중심으로 자속선들을 왼쪽으로 밀어내고 있음을 알 수 있다. 그림 8과 9에서는 각각 1개의 차폐선이 존재하는 경우의 자체 분포를 보이고 있다. 그림 8에서 나타나듯이 차폐선의 존재로 인해 차폐선 근처의 자체값이 커졌지만, 보호 영역인 파이프 라인에서의 자체값이 작아졌음을 확인할 수 있다.

이 경우에 파이프 라인에 유도된 전류는 226.92 [A]로 차폐선이 없는 경우에 비해 약 70 %의 수준으로 감소되었음을 알 수 있었다. 또한 이를 통해 차폐선의 존재에 의한 차폐 대책의 효과가 확인 되었다.

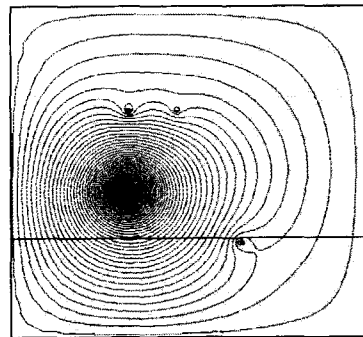


그림 7. 차폐선이 1개 존재할 때의 해석 결과

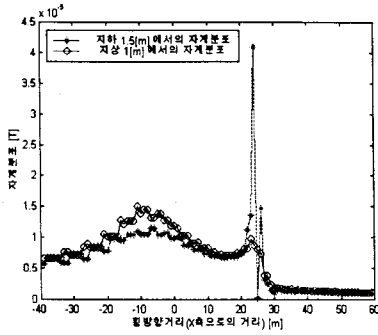


그림 8. 1개의 차폐선이 존재 할 때의 자기 분포

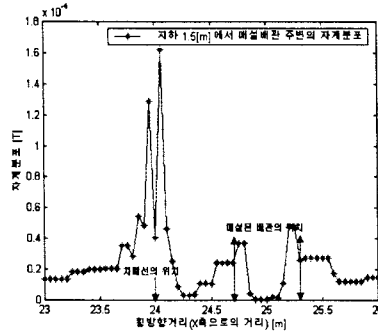


그림 9. 1개의 차폐선이 있을때 파이프 라인 주변의 자기 분포

### 3.3 3개의 차폐선이 있는 경우

이전의 결과와 마찬가지로 그림 10, 11, 12에서 유한요소법에 의한 해석 결과를 보이고 있다.

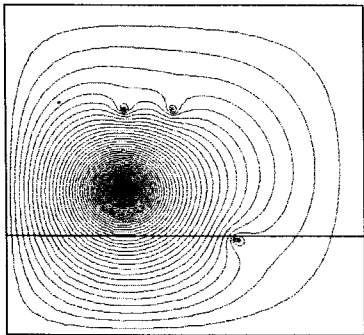


그림 10. 차폐선이 1개 존재할 때의 해석 결과

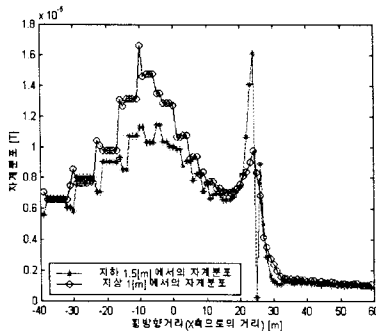


그림 11. 3개의 차폐선이 존재 할 때의 자기 분포

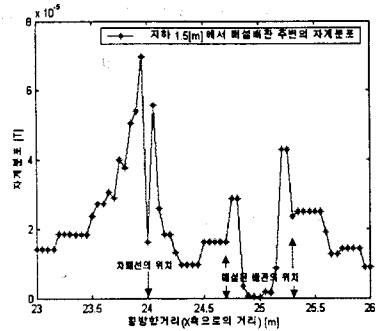


그림 12. 3개의 차폐선이 있을때 파이프 라인 주변의 자기 분포

3개의 차폐선이 존재하는 경우 파이프 라인에서의 와전류는 198.6 [A]를 갖는 것으로 계산되었고, 기존의 경우에 비해 가장 낮은 유도 장해의 수준을 갖는 것이 확인 됐다. 표 3에서는 차폐선수에 따른 유도된 와전류의 분포를 나타내고 있다.

표 3. 매설된 파이프라인에 유기된 와전류

차폐선의 수	매설된 배관에 유기되는 와 전류 [A]
없을 때	308.35
1개 있을 때	226.92
3개 있을 때	198.6

위의 세가지 경우에서 살펴본 유도 전류의 분포는 사고전류를 기반으로 하여 해석된 것이다. 여기서 해석된 결과들은 사고전류의 크기에 비례하므로 어떤 전류의 형태에도 쉽게 적용될 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 대지에 묻힌 도체의 존재하에 송전선의 전자기장의 문제를 유한요소법을 이용하여 수치적으로 해석하였다. 2차원적으로 평행하게 드러난 단면에서의 자기 벡터 포텐셜의 분포와 이에 의해 유도되는 와전류를 타당한 가정하에서 계산할 수 있었다. 하지만 대지 모델의 선정에서 균질한 비저항을 가지는 경우는 부적합한 결과를 낳을 수 있는 소지가 있다. 추후의 연구에서는 대지의 비균질한 지층 특성을 좀더 실제 상황에 적합하도록 고려하고, 해석영역에 적합한 깊이의 대지모델을 선정하여 연구를 추진할 것이다. 그리고 와전류가 유도되는 영역에 있어서 좀더 다양한 종류의 모형의 선정과 효과적인 차폐 대책 역시 추후에 수행되어야 할 것이다.

본 연구는 기초전력공학 공동연구소의 지원에 의해 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J.R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", Bell System Technical Journal, Vol5, pp 539-554, Oct 1926
- [2] K.J. Sattisios, "Finite Element Computation of Field and Eddy Currents of a system ...", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol13., No3, pp 876-882, July 1998
- [3] 전력연구원, "송전선로 전자계 영향 연구(I) 최종보고서", 1999