

송전선에서 발생하는 자계에 의한 유도장해 해석

최세용, 나완수, 최명준, 이세희, 김동수, 박일한, 신명철  
성균관 대학교 전기전자 컴퓨터공학부

Analysis of the influence of magnetic field generated from power transmissio  
on the inductance interference

Seyong Choi, Wansoo Nah, Myungjun Choi, Se-Hee Lee, Dong-Su Kim, Il-han Park, Myung-cl  
Sungkyunkwan University, Dept. of Electrical and Computer Engineering

**Abstract** - In this paper, we calculate the magnetic field and analyze the inductive interference in conductive material around power transmission line. To compute induced eddy currents as well as magnetic fields, finite element method(FEM) is used for numerical calculation. The characteristics, transmission line height, conductive earth and mitigation wire are taken account of FEM analysis. This research also shows that mitigation wire reduces amount of eddy current in buried pipe line.

1. 서 론

전력 수요의 증가에 따라서 전력 계통은 점점 고전압 대 전류로 운전되고 있으며, 대 용량의 전력 설비들에 의한 전기 환경의 문제는 간과 할 수 없는 사회 문제로 대두 되고 있다. 특히 최근에는 이들로로부터 발생하는 전자기장이 주변의 설비들에 오동작을 일으키거나 인체에 유해한 영향을 미치는 등의 논란을 일으키고 있고, 전자기장의 노출량에 관해서 사회적, 법적인 규제가 강화되는 현재 전자기 량을 정확히 계산할 제반 사항이 부족한 실정이며 실제 현상을 과학적인 근거로 해석해야 할 필요성이 절실하다.

여러 전력용 설비들 중에서 고전압 대 전류로 운전되는 전력용 송전선은 그 주위에 전자기장을 발생시키고, 이 전자기장은 주위의 여러 설비들에 영향을 미친다. 특히 송전선에서 발생하는 자계는 주변에 도체로 된 구조물이 있을 때 유도 전류가 유기 됴므로써 사람이나 가축에는 감전 사고를 유발시킬 수 있으며, 특히 송전선 주위에 매설된 가스관이나 송유관 등에 부식 등을 일으켜서 간섭을 받은 구조물 자체에 치명적인 손상을 입힐 수도 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 요소법(Finite Element Methods: FEM)을 채택했다. 유한법의 해석 결과로 구해지는 자기 벡터 포텐셜(Magneti Vector Potential)로부터 자계 분포가 해석 되었고, 이 바탕으로 유도되는 장해의 수준을 계산했다.[1]

본 논문에서는 송전선으로부터 발생하는 자계를 계산하고, 이들이 주위의 설비들에 미치는 유도장해에 관하여 기술하였다. 유도 장해의 해석 대상으로는 송전선 주위에 도전율을 가지는 대지에 묻힌 도체들이며, 특히 매설된 배관에 유기되는 전류를 수치적으로 계산하였다. 그리고 전류가 유도되는 도체부에 차폐대책을 적용함으로써 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 시변 자계는 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.[2]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{1}$$

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

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

$\vec{H}$  : 자계의 세기 [A/m]

$\vec{B}$  : 자계의 밀도 [wb/m<sup>2</sup>]

$\vec{J}$  : 전류 밀도 [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ,  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 의 관계로부터 다음 식들이 성립한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \tag{2}$$

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

식 (2), (3)에서 벡터 관계식인 식 (4)를 적용하면,

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

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

와 같은 식으로 정형화 시킬 수 있다.

자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 도입하고 해석 대상 모델에서 시스템의 전류 밀도  $\vec{J}$ 가 z 축만의 방향으로만 존재 한다면  $\vec{J}_z$ 이며, 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 전개 시키면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

이 때 유도되는 와전류 밀도  $\vec{J}_e$ 는

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E}_e \tag{7}$$

의 관계를 갖으며,  $\vec{E}_e$ 는 와전류를 유도하는 원인이고 다음 식에 의해 정의된다.

$$\vec{E}_e = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{8}$$

그러므로 식 (7)과 (8)로부터

$$\vec{J}_e = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{9}$$

과 같은 식이 유도된다. 따라서 자계에 의해서 유도된

전류식은 식 (9)와 같고 해석영역의 2차원 지배 방정식

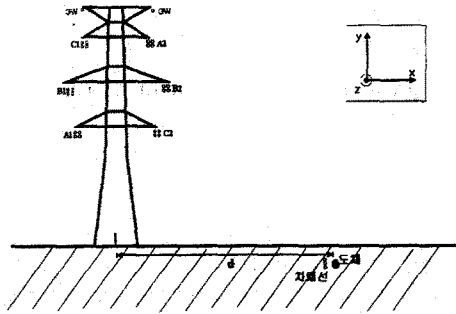


그림 1 해석 대상 영역의 단면도

은 식 (10)과 같이 정형화 될 수 있다.

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} \right] - j\omega \sigma A_x + J_{sz} = 0 \quad (10)$$

### 2.2 해석 영역의 정의

본 논문에서는 345 kV 송전선의 부하 전류에 의해 발생하는 자계를 송전선의 높이와 대지부의 도전율에 따라 계산하였고, 이에 의해서 주위의 도체부에 유기되는 와전류의 분포를 해석하고자 한다. 본 절에서는 다음과 같은 성질을 갖는 해석 대상 영역들의 특징에 대해서 기술하였다.

해석 송전선의 주위에 존재하여 전류가 유기 될 수 있는 도체들은 상·하수관, 가스 파이프 라인, 송유관, 전력관, 통신 케이블 등이 있다. 발생하는 자계에 의해서 유도 전류는 부식으로 인해 부식 방식등의 문제를 일으켜서 피해를 입힐 수 있으며, 이런 문제들로 인해 송유관이나 가스 파이프 라인의 경우는 큰 사고로 이어질 수도 있다. 본 연구에서는 도체판이 송전선을 따라서 평행하게 매설된 경우를 상정하여 해석을 수행하였다. 이들에 유도될 와전류를 해석하기 위한 과정에는 수식적인 원리 이외에도 대상에 대한 정보들이 필요하다. 특히 각 설치물들의 설비 형식이나 배열 방식, 그리고 각각의 물성을 필요로 한다. 그리고 이 유도 장해가 일어나게 될 도체들은 해석 시 발생하는 최대 자계 값에 포화되지 않도록 계산과정에서 비 선형 해석은 고려되지 않는다.

그림 1에서는 해석 대상 영역의 단면도를 보이고 있다. 전형적인 형태로 가설된 345 kV 송전선을 따라서 일정 거리(d) 만큼 떨어져 송전선에 평행하게 매설된 매설 배관이 존재하는 경우이다. 그림 2에서는 2회선 4도체의 345 kV 송전선의 설치도를 보이고 있다. 그림 2에서의 송전선은 2회선 4도체로 구성된 345 kV 송전 시스템의 경우이며 각 도체들의 크기와 소도체 사이의 간격 및 설치 규격은 그림 2에서 보이는 바와 같이 실제 345 kV 계통에 사용되는 경우의 자료를 참고로 하였다. [3] 여기서 선로의 높이는 가설된 경우마다 다르므로 확실적으로 결정할 수는 없으나, 실제로 설치된 송전선의 선로 높이에 적용시켰다.

전류가 유기되는 배관은 선로의 철탑 중심으로부터 25 [m]의 거리만큼 떨어져서 매설되어 있다. 매설된 배관은 금속부의 배관에 전기적으로 절연된 코팅부로부터 둘러 쌓여져 있어 이로부터 도체 배관의 부식을 막는 역할을 한다. 대지는 수없이 많은 물질들로 이루어져 있으며 이들 또한 각각 전기 전도도를 가지므로 비 균질적인 특성을 지니고 있다. 이런 상황을 고려하여 해석에 적용하기 어려운 문제이므로, 문제에 가장 적절한 일반적인 상황을 고려하기 위해서 토양의 종류별로 일반적으로 나타나는 일정한 비저항을 계산과정에 적용하였다. 대지의 깊

이는 해석 영역의 결과에 미칠 영향을 고려하여 30 [m]

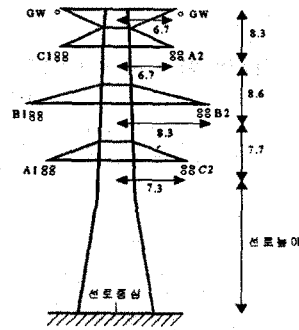


그림 2. 2회선 4도체 345kV 송전 시스템의 설치도

의 깊이로 정의하였다.

### 3. 해석 사례

전 절에서 논의한 바와 같이 제안된 대상에 관한 수치적인 계산이 유한 요소법을 통하여 수행되었다. 광범위한 해석 대상영역에 비해 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. 자계의 해석에 있어서 살펴야 할 영역은 유도 전류가 생기는 부분일 것이다. 그러므로 매설된 도체들이 존재하는 지중 1.5[m]와 특히, 지상에 존재하는 대상물들에 영향을 미치지 쉬운 범위인 지상고 1[m]에서의 자계 분포를 나타냈다.

#### 3.1 선로의 높이에 따른 해석

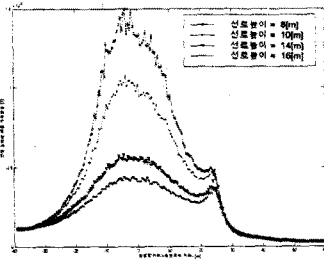
일반적으로 국내 345 kV 송전선로의 지상고 기준은 일반 평지, 도로를 지날 때, 농경지에서는 14 [m]이며 산악지의 경우는 10 [m], 철도에서는 14 [m]를 기준으로 하고 있다. [3] 본 논문에서는 선로의 높이가 8, 10, 14 그리고 16 [m]인 송전선로의 형상에 대해서 해석을 수행하였고 해석결과를 그림 3에 나타내었다. 전술한 이유와 같이 그림 3에서는 해석 영역중 철탑의 중심을 원점으로 지상고 1[m]-그림 (a) 와 지중 1.5[m]-그림(b) 에서 횡방향으로 자계의 변화를 계산한 결과이다. 그림 (b)에서와 보는 바와 같이 매설된 배관이 위치하는 부분인 원점으로부터 25[m] 떨어진 부분에서의 자계는 지중에 매설된 배관의 금속부로부터 인해서 큰 자계 값이 나타났다. 표 1에서는 해석된 결과들을 바탕으로 매설 배관에 유기 될 수 있는 유도 전류의 크기를 나타내었다.

표. 1 선로의 지상고에 따라 매설 배관에 유도된 전류

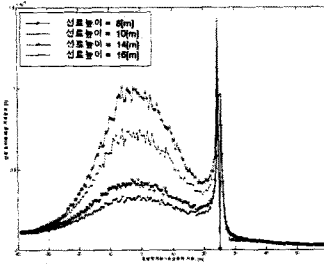
선로의 높이	8 [m]	10 [m]	14 [m]	16 [m]
유도 전류 [A]	38.5	34.1	26.8	22.7

#### 3.2 대지의 종류에 따른 해석

도전율을 가지는 대지는 토양의 종류에 따라서 각각 다른 도전율을 보인다. 전 절에서 언급 한 것처럼 대지의 도전율이 토양에 따라 다르며 같은 부분이라도 수분 함유여부 등에 따라서 매 시가 달라 질 수 있으므로 어려움이 있다. 또한 토양 역시 한가지 종류로 존재하는 것은 아니므로 대지부에 대한 정밀한 모델링이 필요하지



(a)



(b)

그림 3. 송전선로의 높이에 따른 자계 분포

(a) 지상 1[m]에서의 자계분포, (b) 지하 1.5[m]에서의 자계분포

만 본 논문에서는 주위에 존재하는 일반적인 토양의 도전율을 적용하여 계산하였고, 이에 따른 자계의 변화와 토양의 종류에 따른 유도 전류의 크기를 계산하였다. 표 2에서는 계산에 적용된 대지부의 도전율을 나타내었다.[4]

표. 2 토양의 종류에 따른 도전율

토양의 형태	습성 부식토	물결토양 (농경지)	사질 점토	사질 습토	건성 사질토	암반질 토양	암석층
도전율 [ $\Omega m$ ] <sup>-1</sup>	30	100	150	300	1000	3000	$10e+4$

해석 결과 토양의 도전율이 변화에 따라서 아주 부분적이고 적은 양의 자장 값이 바뀌었고 이에 의해서 유도 전류의 크기는 도전율의 차이에 따라 아주 근소한 차이만 보였을 뿐 그다지 큰 영향을 미치는 못하였다. 대지에 대한 좀더 정확한 모델링을 통해 도전율을 적용한 해석이 필요하며 이는 추후에 수행될 계획이다.

### 3.3 차폐선의 유무에 따른 해석

세 번째로 매설 배관의 주위에 자계를 차폐할 수 있는 자성체를 차폐제로 설치하였을 때의 자계 분포와 유도 전류를 계산하였다. 예측한 바와 같이 자성체는 자계를 끌어들이 뒤쪽에 존재하는 배관에 자계가 쇄교하는 것을 어느 정도 막을 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 경우에는 배관의 1 [m] 전방에 250의 투자율을 갖는 자성체를 설치하고 자계 분포를 살펴보면 각각 1개와 3개의 차폐제가 놓였을 때 배관 주위에서의 자계의 차이를 그림 4와 같이 확인할 수 있었고, 그림에서와 같이 차폐의 효과가 현저히 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 유도

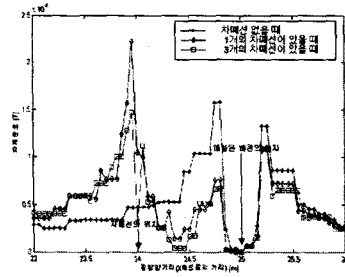


그림 4. 차폐제의 유무에 따른 배관 주위의 자계 분포

표 3. 매설된 배관에 유기된 와전류

차폐선의 수	유도 전류 [A]
없을 때	20.3
1개 있을 때	13.9
3개 있을 때	13

전류 값(표 3)에서도 알 수 있듯이 차폐로 인해서 아무런 대책이 없었을 때에 비해 적은 값의 전류가 유기됨과 차폐 효과를 확인할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 가설된 345 kV 송전선의 형태를 바탕으로 송전선에서 발생하는 자계를 유한요소법을 이용하여 수치적인 방법으로 해석하고 이를 바탕으로 주위에 존재하는 도체부에 유기되는 유도 전류를 해석하였다. 본문에서와 같이 송전선의 선로 높이가 낮을수록 유도 장애의 효과가 큰 것을 확인할 수 있었으며 가설된 송전선의 대지도 그 크기에 미약하나마 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 장애가 예측되는 부분에 간단한 차폐대책으로도 장애 수준을 낮출 수 있음을 나타내었다. 본 논문에서 제시된 결과들은 송전선의 부하전류의 크기와 선로의 지상고에 비례하여 계산되었으므로, 제안된 방법들은 어떤 송전선로의 부하 전류나 선로의 형태에도 쉽게 적용될 수 있다.

하지만 대지 모델의 선정에서 균일한 도전율을 가지는 경우에는 다소 부적합한 결과를 낼 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 있어서도 좀 더 다양한 종류의 유도 장애 대상의 선경과 효과적인 차폐 대책 역시 수행되어야 할 것이다.

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

### (참 고 문 헌)

- [1] K.J. Sattisios, "Finite Element Computation of Eddy Currents of a system ...", IEEE Transaction Power Delivery, Vol13., No3, pp 876-882, July 1998
- [2] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986
- [3] 전력연구원, "송전선로 전자기 영향 연구(I) 최종보고서 1999
- [4] UniLap GEO X Manual pp45