

경계분할법을 이용한 고속철도 주변의 극저주파 전계 예측계산

명성호*, 이재복*, 김점식**, 김응식***, 이종우****
 *한국전기연구원, **해양대학교, ***호서대학교, ****한국철도기술연구원

ELF Electric Field Calculation of High Speed Railway Using Boundary Element Method

Myung Sung Ho*, Lee Jae Bok*, Kim Jeom Sik**, Kim Eung Sik***, Lee Jong Woo****
 KERI*, Hae Yang University**, Ho Seo University***, KRRI****

Abstract - 본 논문에서는 고속철도 주변의 상용주파수(60 Hz) 대역의 전계 해석에 초점을 두고 경계분할법의 일종인 전하중첩법과 표면전하법을 사용하여 선로 주변의 전계 계산을 수행하였다. 계산 결과 지상 1m 열차 플랫폼 주변에서의 전계값은 0.5kV/m 이하로써 국제비전리방사보호위원회(ICNIRP)의 권고기준인 4.167kV/m를 충분히 만족함을 알 수 있었으며 사용자 편의를 위해 전계 해석용 프로그램을 윈도우 환경하에서 MFC를 이용하여 개발하였다.

1. 서론

본 연구는 고속철도 주변의 전기환경평가라는 측면에서 상용주파수(60 Hz) 대역의 전계 환경 예측에 초점을 두고 있다. 전계 해석에는 여러 가지 방법이 있을 수 있지만 송전 급전 시스템이나 전기철도와 같이 해석영역이 크고 주변이 개영역인(Open Boundary) 경우에는 경계분할법의 일종인 전하중첩법과 표면전하법이 가장 효과적인 해석 방법이 된다. 경계요소법은 라플라스 방정식 $\nabla^2\phi = 0$ 을 만족시키는 부분해 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 의 합 ϕ 가 장의 경계 조건을 만족시키면 해의 유일성 정리에 의해서 전극표면의 전압을 일정하게 유지하는 가상전하를 전극이나 유전체의 표면에 배치시키고 이 가상전하의 전하량을 구함으로써 전체 시스템의 전위, 전계를 구할 수 있다. 이 경우 무한개의 가상전하를 사용하면 경계 전위를 정확히 만족시킬 수 있겠지만 무한개로 모의할 수 없으므로 적당한 수의 전하로 효율적인 근사해를 구한다.

고속철도 주변의 상용주파수(60 Hz) 대역의 전계 환경 예측을 전체의 급전선의 구조를 대상으로 철도 주변의 전계해석에 초점을 두어 경계분할법의 일종인 전하중첩법과 표면전하법을 이용하여 선로주변의 전계 해석 Profile을 구하였다.

또한, 사용자 편의를 위해 전계 해석용 프로그램을 윈도우 환경하에서 MFC를 이용하여 개발하였다. 입력창은 사용자가 원하는 데이터를 직접 작성하도록 구성되어 있고 또한 원하는 부분의 전계 계산값을 그래픽 화면으로 출력하도록 하였다.

2. 고속철도 급전계통에 의한 주변 전계 해석

2.1. 전계 해석을 위한 고속전철 급전계통의 모델링

그림 1은 고속철도 Auto Transformer 방식의 급전계통 도체 배치를 나타낸 것이며 표 1은 급전계통 도체별로 각각의 재료 및 크기 등 전계 계산에 필요한 입력 자료를 나타내었다.

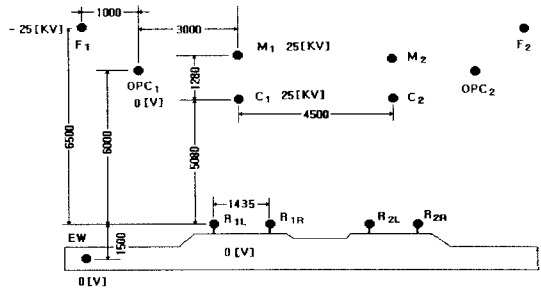


그림 1. 2x25[kV] 급전 계통의 도체배치

표 2. 급전 계통 도체별 데이터

	contact wire	messenger wire	feeder	overhead protection conductor	earth cable	rail
재질	hard drawn copper	tin bronze	Al./steel	Al./steel	Al./steel	steel
단면적 [mm ²]	150	65.49	288.35	93.3	93.3	60kg/m
직경 [mm]	13.60	10.50	22.05	12.50	12.50	

2.1. 전위 및 전계 해석식

전하밀도가 λ 인 무한장 선전하에 의한 전위 및 전계는 아래 식과 같이 구할 수 있다. 그림 2의 P(x,y)는 계산점이고 (X,Y)는 선전하의 위치를 나타낸다. 여기서 무한장 선전하는 z축과 평행이다.

$$\phi = \frac{\lambda}{4\pi \epsilon_0} \ln \frac{(x-X)^2 + (y+Y)^2}{(x-X)^2 + (y-Y)^2}$$

$$E_x = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} (x-X) \left\{ \frac{1}{(x-X)^2 + (y-Y)^2} - \frac{1}{(x-X)^2 + (y+Y)^2} \right\}$$

$$E_y = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \left\{ \frac{y-Y}{(x-X)^2 + (y-Y)^2} - \frac{y+Y}{(x-X)^2 + (y+Y)^2} \right\}$$

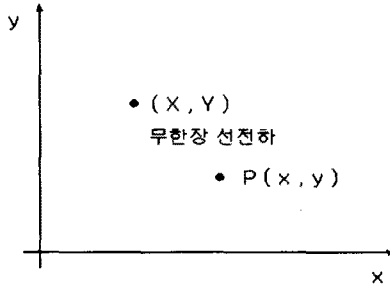


그림 2. 무한장 선전하

또한, 면전하밀도가 $\sigma(j)$ 이고 x 축에 평행인 무한 평판전하에 의한 전위 및 전계식은 아래와 같이 주어진다. 그림 3에서 $P(x,y)$ 는 계산점이고 X_1 과 X_2 는 평판전하의 시작과 끝을 나타낸다.

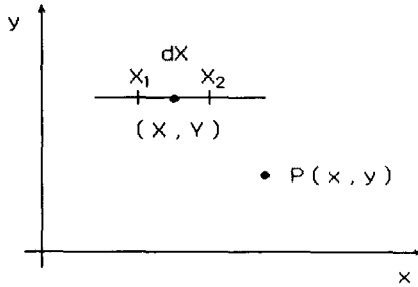


그림 3. 무한장 면전하

$$\begin{aligned} \phi_i &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \ln \frac{(x-X)^2 + (y+Y)^2}{(x-X)^2 + (y-Y)^2} dX \\ &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \left[2((y+Y) \tan^{-1} \frac{(x-X)}{y+Y} \right. \\ &\quad \left. - (y-Y) \tan^{-1} \frac{(x-X)}{y-Y} \right) \\ &\quad + (x-X) \log \frac{(y-Y)^2 + (x-X)^2}{(y+Y)^2 + (x-X)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \log \frac{(y-Y)^2 + (x-X)^2}{(y+Y)^2 + (x-X)^2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \left(\tan^{-1} \frac{x-X}{y-Y} - \tan^{-1} \frac{x-X}{y+Y} \right) \times 2 \end{aligned}$$

한편, 면전하밀도가 $\sigma(j)$ 이고 y 축에 평행인 무한 평판전하에 의한 전위는 아래와 같이 주어진다. 여기서 (x,y) 는 계산점이고 Y_1 과 Y_2 는 평판전하의 시작과 끝을 나타낸다. 여기서 ϕ 를 x 와 y 에 대하여 미분하면 전계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_i &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \int \log \frac{(x-X)^2 + (y+Y)^2}{(x-X)^2 + (y-Y)^2} dY \\ \phi_i &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \left[2(x-X) \left\{ \tan^{-1} \frac{y+Y}{x-X} - \tan^{-1} \frac{y-Y}{x-X} \right\} \right. \\ &\quad \left. + (y-Y) \log((x-X)^2 + (y-Y)^2) \right. \\ &\quad \left. + (y+Y) \log((x-X)^2 + (y+Y)^2) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial y} &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \log((x-X)^2 + (y-Y)^2) \\ &\quad + \log((x-X)^2 + (y+Y)^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} &= \frac{\sigma(j)}{4\pi\epsilon_0} \left[2 \left(-\tan^{-1} \frac{-(y-Y)}{x-X} \right) \right. \\ &\quad \left. + \tan^{-1} \frac{-(y+Y)}{x-X} \right] \end{aligned}$$

그림 1에는 12개의 도체가 있는데 전하중첩법으로 이를 모의하기 위하여 40여개의 선전하를 사용하였다. 또한 철도 위의 차량을 모의하기 위하여 무한 평판 전하를 40개 사용하였다.

2.2. 급전계통 주변의 전위 및 전계 해석 결과

그림 4는 열차가 지나가지 않을 경우의 전위분포를 나타낸 것이며, 그림 5는 전계 분포를 나타낸 것이다.

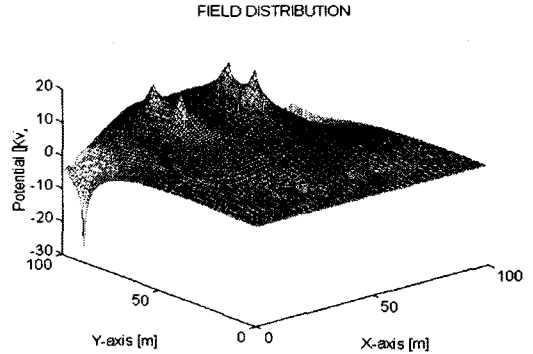


그림 4. 열차가 없을 때의 전위분포

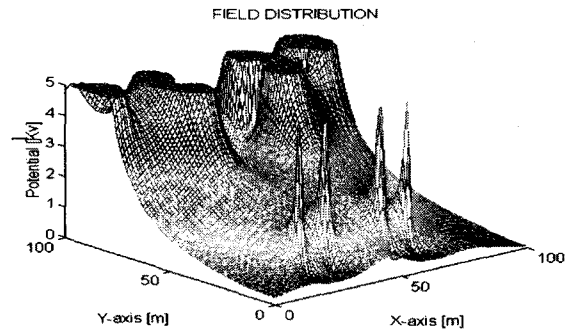


그림 5. 열차가 없을 때의 전계분포

그림 6과 그림 7은 열차가 1대 지나갈 경우의 전위 및 전계분포를 나타낸 것이다.

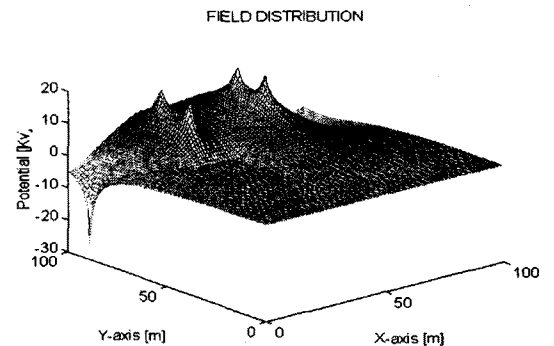


그림 6. 열차가 1대 있을 때의 전위분포

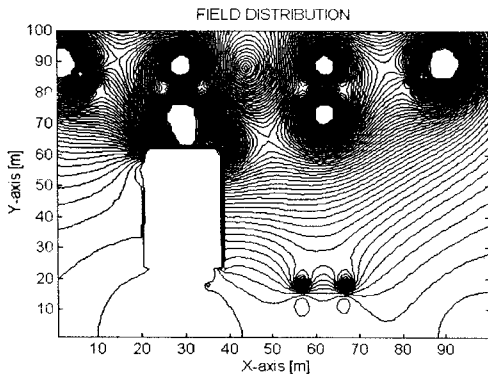
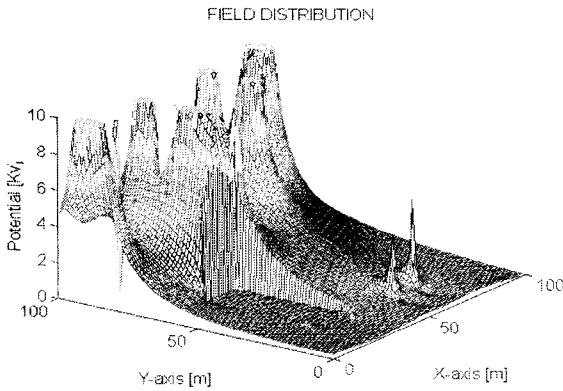


그림 7. 열차가 1대 있을 때의 전계 분포



2.3. 급전계통 주변의 전위 및 전계 해석 프로그램

앞에서 설명한 이론에 의해 사용자 편의를 위한 고속철도 주변 전계 해석용 프로그램을 윈도우 환경하에서 MFC를 이용하여 개발하였다. 입력창은 사용자가 원하는 데이터를 직접 작성하도록 구성되어 있고 또한 원하는 부분의 전계 계산값을 텍스트 및 그래프 화면으로 출력하도록 하였다. 다음 그림 8에 기본화면 창을 나타내었으며 그림 9와 그림 10에는 열차가 없는 경우의 전위 계산 결과 및 전계 계산 결과를 나타내었다.



그림 8. 전위 및 전계 해석 프로그램의 Main 화면창

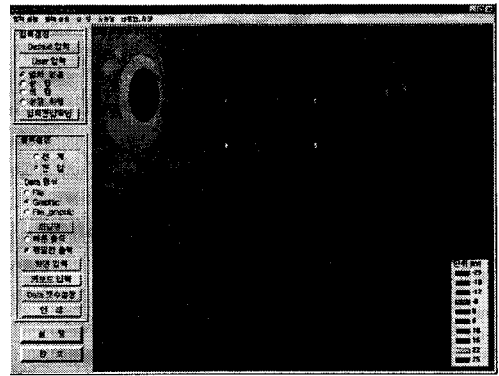


그림 9. 급전선 주변의 전위 계산 결과

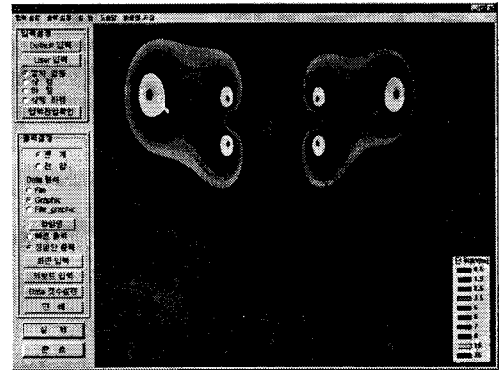


그림 10. 급전선 주변의 전계 계산 결과

3. 결 론

본 논문에서는 고속철도 주변의 상용주파수(60 Hz) 대역의 전계 환경 예측을 전체의 급전선의 구조를 대상으로 철도 주변의 전계 해석에 초점을 두어 경계분할법의 일종인 전하중첩법과 표면전하법을 사용하여 선로 주변의 전계 해석 Profile을 구하였다. 계산 결과 지상 1m 열차 플랫폼 주변에서의 전계값은 0.5kV/m 이하로써 국제비전리 방사보호위원회(ICNIRP)의 권고기준인 4.167kV/m를 충분히 만족함을 알 수 있었다. 또한, 사용자 편의를 위해 전계 해석용 프로그램을 윈도우 환경하에서 MFC를 이용하여 개발하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Roald K. "Electromagnetic Fields", WILEY
- [2] Robert G. Olsen, "Recent Developments in the ELF Electric and Magnetic Field Environment Issue", ISH'97 Proceeding Quebec, Canada
- [3] Matthew. N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press
- [4] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiß, "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Field," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, pp. 1660-1667, 1974.
- [5] 河野照哉, 宅間, 數値電界計算法, コロナ社, 東京, 1980.
- [6] B. Y. Lee, J. K.Park, S H. Myung, S. W. Min, E. S. Kim, "An Effective Modelling Method to Analyze Electric Field around Transmission Lines and Substation using a generalized Finite Line Charge." IEEE Trans.on PWRD, Vol.12 , No.3, pp.1143-1150, July, 1997