

# 고속철도의 가선전류에 의한 고속열차내의 자기장 유도에 대한 연구

## Investigations on the Induced Magnetic Fields in High Speed Train due to the Current in the High Speed Railroad Catenary Wire

한인수†      이태형\*      박춘수\*      김기환\*\*  
In-Su Han      Lee Tae-Hyung      ChoonSoo Park      KiHwan Kim

### ABSTRACT

In recent society, the electricity is so essential for the human lives. Lots of modern people take many cultural benefits owing to the development of the power systems, the cell phone, the electrical appliances, and etc. However, the problems related to the electromagnetic field generate as the side effects. Examples are the fault in the electric machinery due to the electromagnetic coupling, the fault in the communication devices due to the electromagnetic field around the power line equipments, and the effect upon the human beings due to the electromagnetic field, and etc.

In this paper, we induce the vector equation about the magnetic field based on Biot-Savart law. We calculate the magnetic field at the surface of the high speed train with this induced equation and the current in the high speed railroad catenary wire. Finally, we calculate the magnetic field in the high speed train considering the material property like the permeability, the conductivity, and so on.

### 1. 서 론

현대인은 전기, 전자 제품의 발달과 전력시스템의 고압화로 인하여 문명의 혜택을 누리고 있다. 그러나, 이러한 전기, 전자 분야의 발달로 인해, 소위 전자파 장애라는 문제가 발생하고 있다. 가령 예를 들면, 전자파 장애로 인한 전기 제품의 오동작, 통신 기기의 오동작, 인체에의 전자파 유해성 등이 대두되고 있는 실정이다. 철도시스템도 예외가 아니어서, 철도시스템 내에서의 전자파 EN 규격 등이 규정되었다. 전자파의 경우 고주파 대역에서는 EMI/EMC(Electromagnetic Field Interference/Electromagnetic Compatibility) 등에 대한 자세한 권고치가 마련되어 있으나, 일반적인 극저주파 60[Hz] 영역에서는 833[mG]를 넘지 않는 조건만이 나타나고 있다. 기기에의 영향 및 인체에의 영향을 계산하고 구하는 것에 앞서, 열차 내부의 객실에서의 자기장을 계산하고 예측하는 것이 중요하다.

본 논문에서는, 고속열차의 가선 전류에 의한 자기장의 영향을 예측하고자 한다. 일단 무한 길이의 가선 전류에 대한 자기장을 계산하고, 그 다음 유한 길이의 가선 전류에 대한 자기장에 대한 해석식을 유도한다. 가선 전류에 의한 열차 표면에서의 자기장을 구한 후, 구한 자기장을 바탕으로 경계 조건을 취하여 상용 코드를 이용하여, 열차 내부의 자기장을 구하게 된다. 실제 열차에서는 가선 전류 뿐만 아니라 내부의 전기기기 및 장치 등을 통하여도 자기장이 발생할 수 있으나, 그에 따른 해석은 상당히 복잡

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단, 선임연구원  
E-mail : ishan@krri.re.kr

TEL : (031)460-5626 FAX : (031)460-5649

\* 정회원, 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단, 선임연구원

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단, 책임연구원

\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단, 수석연구원

하므로, 향후 연구로 남겨두고 본 논문에서는 가선 전류에 의한 자기장의 영향을 구한다. 모델은 한국형 고속열차를 선택하였고 자세한 기하학적인 모양은 다루지 않고 단순화하여 자기장을 계산하였다.

## 2. 해석식 유도

고주파 영역에서는 전기장과 자기장이 Coupling 되어 계산이 되나, 전력주파수인 60[Hz] 영역에서는 전기장과 자기장을 나누어서 계산할 수 있다. 먼저 자기장의 계산에 관련된 맥스웰 방정식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 저주파 영역에서는 변위 전류(Displacement Current)항이 소거될 수 있으므로, 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

식 (2)를 통하여, 우리는 Ampere's law를 유도할 수 있다. Ampere's law를 통하여 magnetic field density를 구하면 아래 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\oint_c H \cdot dl = \int J \cdot ds = I \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi r} [A/m] \quad (3)$$

식 (3)은 무한 도선에 관련된 식이다. 도선이 상당히 긴 경우에는 간단히 계산할 수 있으나, 도선이 무한히 길지 않거나, 두 도선이 교차되어 있는 경우에는 자기장을 구하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 유한 도선에 관련된 자기장의 식을 Biot-Savart law를 이용하여 유도하였다. Biot-Savart law를 표현하면 아래의 식 (4)와 같다.

$$H = \frac{1}{4\pi} \int \frac{I \times i_{rr'}}{|r - r'|^2} dl \quad (4)$$

식 (4)는 적분을 포함한 식이다. 이 식을 본 논문에서는 벡터 대수식으로 표현하고자 한다.

먼저 길이가 z축 방향으로 -z1에서 z2로 이루어진 전류 I가 흐르는 유한도선이 있다고 가정한다.

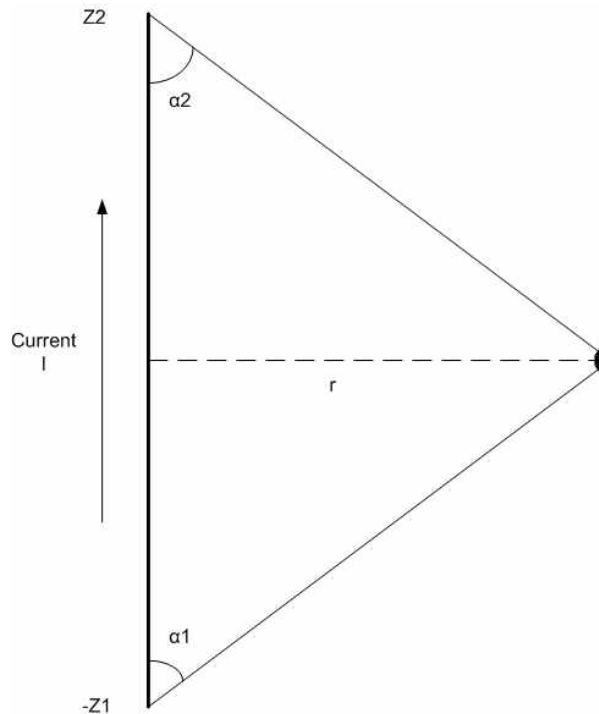


그림 1. 전류 I가 흐르는 유한 도선

그림 1과 식 (4)의 변수를 가지고, 적분값을 유도할 수가 있다.

그림 1을 극좌표계(Polar Coordinate)로 유도하면, 아래와 같이 표현할 수 있다.

$r' = z \vec{z}$ ,  $r = r \vec{r}$ ,  $I = I \vec{z}$ 로 표현하여 적분식을 구할 수 있다. 따라서, 적분식을 간단히 표현하면 아래 식 (5)와 같다.

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_{-z_1}^{z_2} \frac{r}{(z^2 + r^2)^{3/2}} dz \quad (5)$$

식 (5)에서  $z = r \tan \theta$ 로 치환하여 계산하면, 최종적으로 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$H = \frac{I}{4\pi r} [\sin(\pi/2 - \alpha_2) + \sin(\pi/2 - \alpha_1)] \quad (6)$$

식 (6)에서 보듯이, 무한 도선일 경우에는  $\alpha_1, \alpha_2$ 가 0이 되어 식 (3)과 동일한 결과가 나타난다. 따라서, 일반적인 도선의 경우를 위의 해석식을 통하여 표현할 수가 있다.

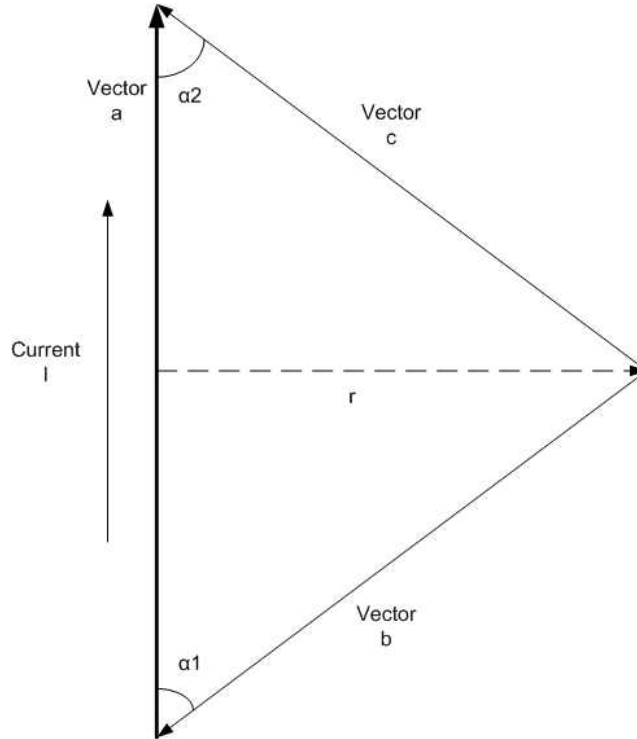


그림 2. 일반적인 유한 도선

그림 2에서 보듯이, 식 (6)의 항이 결정된다.

$r = \frac{|\vec{b} \times \vec{c}|}{|a|}$ ,  $\sin(\pi/2 - \alpha_2) = \cos(\alpha_2) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{c}}{|\vec{a}||\vec{c}|}$ ,  $\sin(\pi/2 - \alpha_1) = \cos(\alpha_1) = -\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}||\vec{b}|}$  식으로 나타나고, 이를 식 (6)에 대입하면, 식 (7)과 같이 나타난다.

$$H = \frac{I}{4\pi |\vec{b} \times \vec{c}|} \left( \frac{\vec{a} \cdot \vec{c}}{|\vec{c}|} - \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{b}|} \right) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여, 고속열차 외부의 표면의 자기장을 계산한 후, 고속열차 내부의 자기장을 계산하도록 한다.

### 3. 사례 연구

아래 그림 3은 한국형 고속열차의 객차의 단면이다. 객차의 외부를 둘러싸고 있는 부분은 주철(Mild Steel)이라 가정하였고, 내부의 매질은 공기로 정하여, simulation을 수행하였다. 전차선에 흐르는 전류는 600[A]로 하여 계산하였다. 주철의 도전율은  $10^7$ [S/m], 비투자율은 4000으로 산정하여 계산하였다.

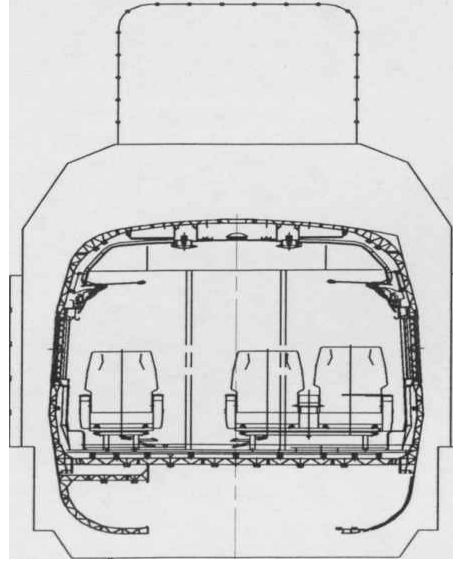


그림 3. 한국형 고속열차 객차 단면

식 (7)을 이용하여, 객차 외부의 표면의 자기장을 경계 조건으로 하여, Simulation을 수행하였다.

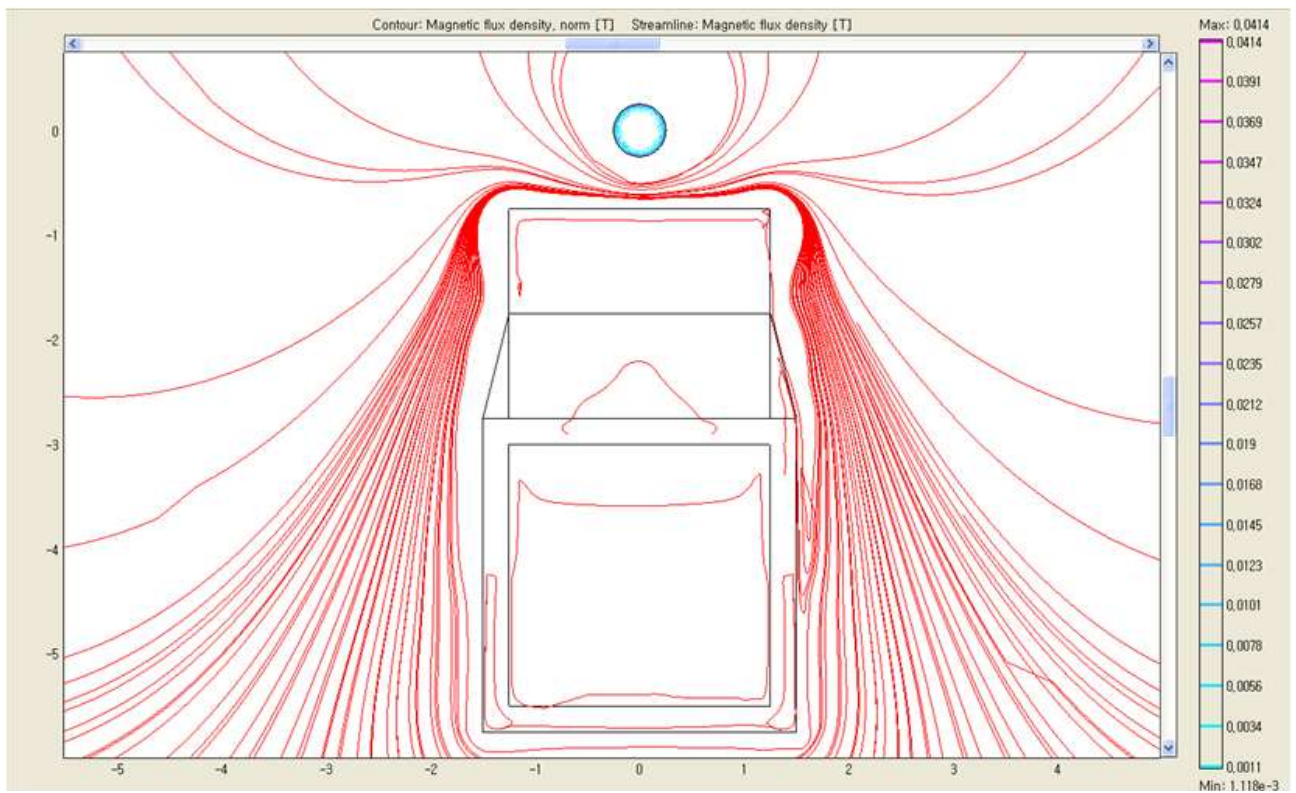


그림 4. 수치 해석 결과

그림 4와 같이 수치해석 결과가 나타났다. Magnetic flux density는  $5.81 \times 10^{-14}$  [T]로서, 상당히 작은 값으로 나타났다. 이는 가선 전류에 의한 자기장의 영향이 상당히 작은 것을 알 수 있으며, 자세한 계산은 향후에 정확한 기하학적인 정보의 입력과 내부의 기기 배치 및 운전 상황 등을 고려하여 이루어질 것이다.

## 참고문헌

1. John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
2. E. I. King, "Equivalent Circuits for Two-Dimensional Magnetic Fields: II-The Sinusoidally Time-Varying Field", IEEE Trans. on PAS, No. 9, Sep. 1996.
3. K. S. Kunz and R. J. Lubbers, *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1992.