고속철도내 자기장에 의한 인체 모델에서의 유도 전류 계산
Induced Current Calculation in a Human Body Model due to Magnetic field in High Speed Railway

한인수* 이태형* 박춘수* 김기환*
Han, In-Su Lee, Tae-Hyung Park, Choon Soo Kim, Ki Hwan

ABSTRACT

In recent society, the quality of human life has improved due to the use of electric appliances and the high powered electrical equipments. However, lots of electric appliances and equipments generate the electromagnetic field hazard. Many studies have been made about the wrong behavior of machines due to electromagnetic fields, the interferences in communication equipments, the possibility of the electromagnetic field hazard in human body, etc. There exist international standards about the RF equipments (ex. mobile phone, antenna, etc.). But, many researchers involved in power frequency electric and magnetic field only propose the prudential avoidance.

In this paper, induced currents in a human body model due to magnetic fields in high speed railway are calculated by two dimensional impedance method. Power frequency(60Hz) magnetic fields are calculated and induced currents are simulated by Faraday's law. Induced currents are simulated with induced voltage, human body model impedances due to Ohm's law, magnetic fields derived from Biot-Savart's law and Transmission Line Method in high speed railway.

---

1. 서 론

전력시스템은 인류가 창조한 거대한 시스템 중 하나이다. 현대의 여러 장비 및 제품들은 전력시스템에 연계되어 사용되고 있으며, 현대 사회에서 전기의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다. 전기의 사용의 증가로 인해, 송변전 설비 등의 건설이 많아지고 있으나, 이로 인한 전자파 장해로 인해, 전기 제품의 오동작, 인체에의 전자파 유해성 등이 대두되고 있는 실정이다. 철도시스템도 예외가 아니어서, 철도시스템 내에서의 전자파 EN 규격 등이 규정되었다. 그러나, 전자파 EN 규격 중에 인체에의 영향 등은 정확한 분석이 미미한 입장이고, 전자파가 인체에 영향을 주는 메커니즘은 인체의 복합성으로 인해 확실히 정립되어 있지 않은 실정이다. 전자파의 경우 고주파 대역에서는 EMI(Electromagnetic Interference)/EMC(Electromagnetic Compatibility)에 대한 권고치가 마련되어 있으나, 일반적인 전력 주파수(60Hz)에 대해서는 현명한 회피(Prudent Avoidance)라는 정도의 대책만이 마련되어 있다. 물론, 835[mG]라는 권고치를 내세우고 있지만, 권고치에 대한 명확한 근거 자료가 미미한 실정이다. 전자파란 말 그대로 Electromagnetic Wave를 의미하며, 파동을 나타내는 Wave는 고주파 상에서의 용어이다. 실

---

* 한인수, 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단
E-mail : ishan@krri.re.kr
TEL : (031)460-5626 FAX : (031)460-5649

제 전력주파수 대역에서는 전자파란 용어가 옳지 않으며, 전자기장이란 표현이 올바른 용어이다. 전자기장에 의한 인체에의 유도 전류는 실제 메커니즘이 복잡하며, 근래의 연구는 전압 소스이기도 한 심장 박동과 전자기장의 Coupling에 대해서 이루어지고 있다. 본 논문에서는, 한국형 고속철도 내에서의 인체의 장기 모델을 임피던스 방법을 사용하여, 내부에 흐르는 유도 전류를 계산한다. 전력 주파수 상에서 고속철도 내에 있는 인체의 장기 모델을 집중 정수 회로로 모델링하여, Biot-Savart's law, Faraday's law 및 Transmission Line Method를 이용하여 근사적으로 유도 전류 밀도를 계산하는 방법을 소개한다.

2. Impedance Method

임피던스 방법은 인체의 조직을 집중 정수 회로의 방식으로 모델링하여 계산하는 방법으로서, Transmission Line Method(TLM)의 일종이다. 인가되는 전기장 및 자기장에 대해서, Poisson Equation과 Faraday's law를 이용하여 내부의 전압 및 전류를 계산하는 방법이다. 2절에서는 임피던스 방법의 소개와 수치 모사의 정확성에 대해서 논한다.

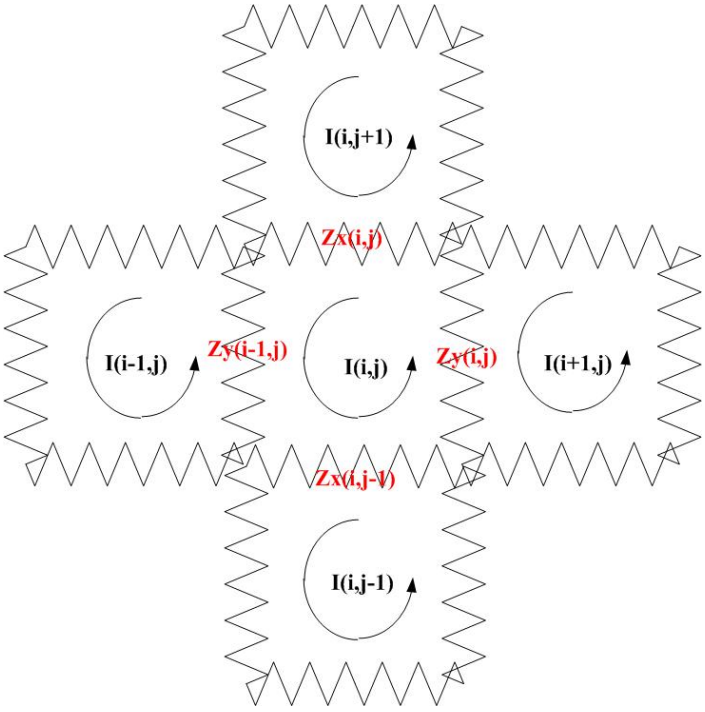

그림 1. 2차원 임피던스 네트워크

Fig. 1. Two dimensional impedance network

그림 1은 임피던스 네트워크를 나타낸다. 각각의 전류 성분은 임피던스 네트워크상의 와전류를 나타낸다. 각 Cell의 전류는 인가되는 자기장에 의해 유도되어 흐르고, 시간에 따라 변하는 자기장에 의한 기전력이 전압 소스가 된다. 이를 나타내면, 아래 식 (1), (2)와 같다.

$$EMF_{i,j} = Z_x(i,j-1)(I(i,j)-I(i,j-1)) + Z_y(i,j)(I(i,j)-I(i+1,j)) + Z_x(i,j)(I(i,j)-I(i,j+1)) + Z_y(i-1,j)(I(i,j)-I(i-1,j)) \quad (1)$$

$$EMF_{i,j} = -j\omega \int_{S_{(i,j)}} B \cdot ds \quad (2)$$

각 Cell에 대한 전류를 행렬의 형태로 계산하기 어려우므로, Successive Over Relaxation(SOR)을 이용하여, 계산을 한다.

SOR을 이용한 계산은 아래 식 (3)~(6)과 같다.

$$Numerator_{i,j} = -j\omega B(i,j)S + Z_x(i,j-1)I(i,j-1) + Z_x(i,j)I(i,j+1) \quad (3)$$
$$Z_y(i,j)I(i+1,j) + Z_y(i-1,j)I(i-1,j)$$

$$Denominator_{i,j} = Z_x(i,j-1) + Z_x(i,j) + Z_y(i,j) + Z_y(i-1,j) \quad (4)$$

$$R_{i,j} = \frac{Numerator_{i,j}}{Denominator_{i,j}} \quad (5)$$

$$I(i,j)_{n+1} = \alpha R_{i,j} + (1-\alpha)I(i,j)_n \quad (6)$$

α는 가속펙터이고, 0과 2사이의 값을 갖는다. 초기값을 임의로 입력을 해도, 와전류값은 각 스텝을 거쳐 수렴한다. 일반적인 행렬식을 이용하여 역행렬을 구한 후, 와전류값을 계산하는 것도 가능하지만, 정식화가 복잡하기 때문에 SOR을 이용하여 계산하는 것이 훨씬 효과적이다.
다음은 임피던스 방법의 정확성을 검토하고자 한다.

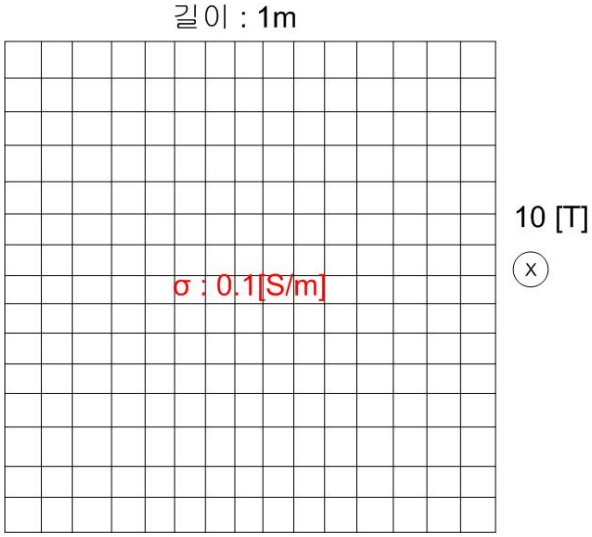

그림 2. 검증을 위한 매질
Fig. 2. The material for the validation

그림 2는 임피던스 방법의 검증을 위한 매질을 나타낸다. 전도도는 0.1[S/m]이고, 길이는 1m인 매질을 나타낸다. 위에서 10[T]의 자기장이 조사되었을 때, 전류 밀도에 대한 해석식과 수치해석 결과를 비교하도록 한다. 해석식은 아래 식 (7)~(9)와 같이 나타난다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7)$$

$$EMF = -j\omega B\pi R^2 = IZ = JSZ = JS\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon}\frac{2\pi R}{S} = J\frac{2\pi R}{\sigma + j\omega\epsilon} \quad (8)$$

$$\therefore J_\theta = \frac{-j\omega BR(\sigma + j\omega\epsilon)}{2} = \frac{-j\omega BR\sigma}{2} \text{ (for low frequency)} \quad (9)$$

최종적으로 식 (9)에서 구한 전류 밀도와 위에서 언급한 SOR을 통한 수치 해석 결과를 비교한다.

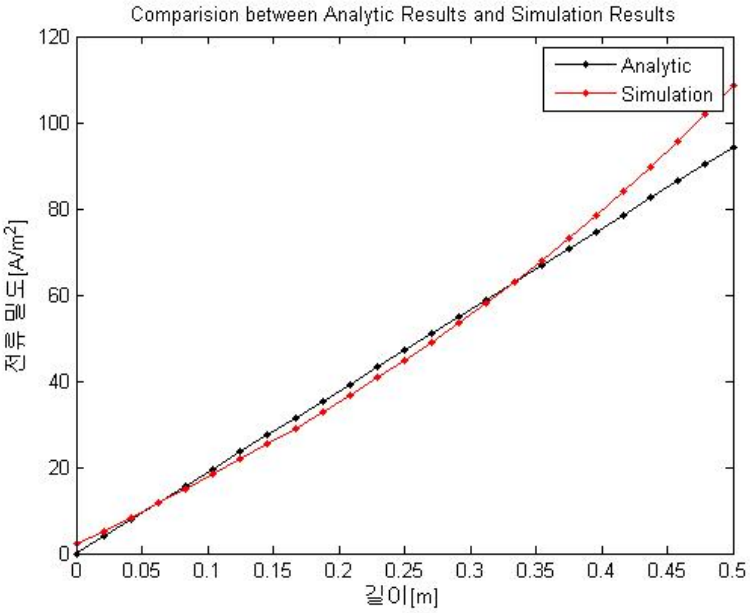

그림 3. 해석식과 수치해석 결과의 비교
Fig. 3. Comparison between analytic results and simulation results

그림 3과 같이 거의 일치함을 보이고, 끝점에서는 약간의 불일치가 일어남을 알 수 있다. 이는 격자의 크기와 전류 밀도를 구할 때의 면적의 보정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 위의 결과를 통해, 임피던스 방법은 정확한 전류 밀도를 계산할 수 있으며, 3절에서는 Biot-Savart's law와 Transmission Line Method를 이용하여 자기장을 구한 후, Impedance method로 계산한 결과를 나타낸다.

3. 사례 연구

아래 그림 4는 한국형 고속 열차의 단면을 나타낸다. 객차 외부는 주철로 구성되어 있고, 객차 내부는 공기의 매질로 구성되어 있다. 전차선에 흐르는 전류는 600[A]로 하여 계산하였다.

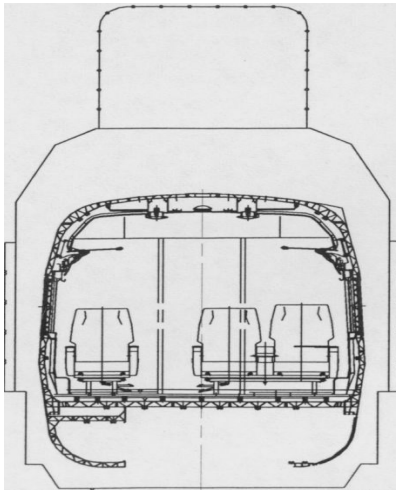

그림 4. 한국형 고속 열차 단면
Fig. 4. The section of Korean high speed train

객차 내부에서 사람의 복부 부분의 장기를 그림 5와 같이 간략히 모델링하여, 임피던스 방법을 적용한다.

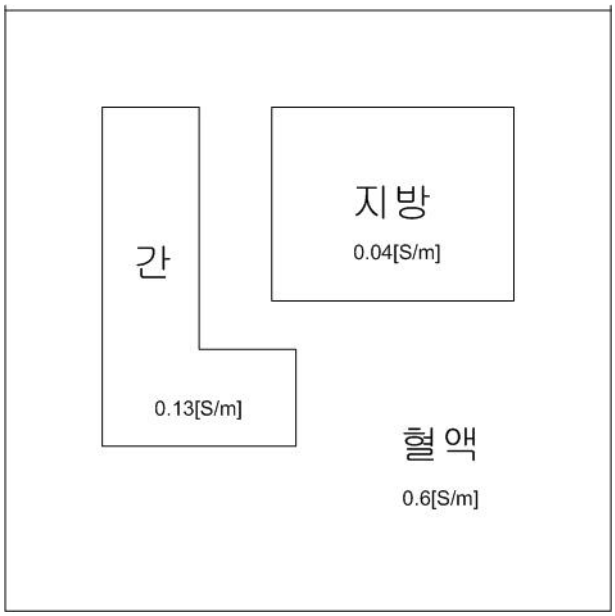

그림 5. 간단한 장기 모델
Fig. 5. Simplified organ model

복부 부분이 약 열차 객실 내 바닥으로부터 1m 정도 위에 있다고 가정한 후, 계산을 하였다. 실제로 셀마다 자기장이 균일하지는 않으나, 실제 장기 모델이 상당히 작기 때문에 셀 상의 자기장의 유의차는 거의 없다고 할 수 있다. 그림 4의 한국형 고속 열차에 의해 구한 자기장이 0.003[T]이므로, 0.003[T]가 인가되었을 때의 간단한 장기 모델에서의 유도 전류를 계산한다.

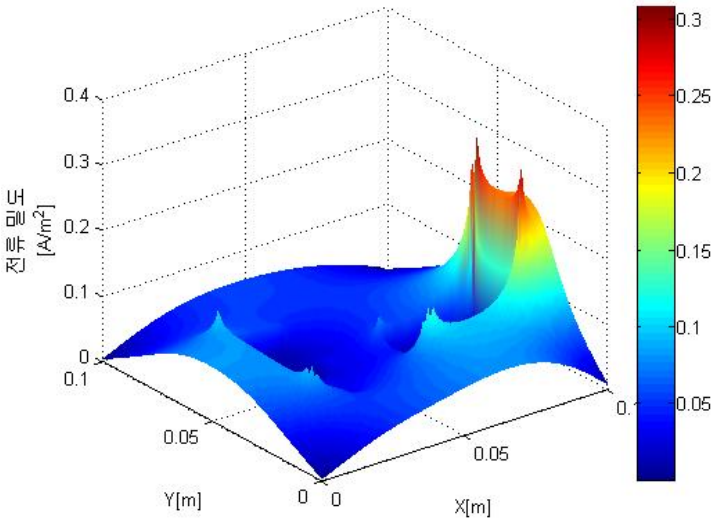

그림 6. 위치에 따른 전류 밀도
Fig. 6. Current density according to the position

그림 6에서 보듯이, 지방과 혈액의 경계면 부분에서 즉, 전도도의 차이가 심한 부분에서 전류 밀도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 전도도의 급격한 차이가 자기장의 크기뿐만 아니라, 전류 밀도에 영향을 미침을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는, 한국형 고속 열차 내의 자기장에 의한 간략화한 인체 모델에서의 전류 밀도를 계산하였다. 해석식과 수치해석 결과를 비교하여, 수치 해석 결과의 정확성을 입증하였고, 입증된 수치해석 방법을 간략화된 인체 모델에 적용하였다. 그러나, 수치 해석의 빠른 수렴성과 정확한 인체 데이터 및 임피던스 데이터를 손쉽게 행렬화할 수 있는 방법이 앞으로 연구해야할 과제이며, 우리나라에서는 수행되지 않은 3차원 임피던스 방법을 적용하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

[1] John David Jackon, *Classical Electrodynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
[2] Concettina Bucella, "Quasi-Stationary Analysis of the Electric Field in Anisotropic Laminated Composites", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 6, Nov. 1999.
[3] E. I. King, "Equivalent Circuits for Two-Dimensional Magnetic Fields: Ⅱ-The Sinusoidally Time-Varying Field", IEEE Trans. on PAS, No.9, Sep. 1966.
[4] K. S. Kunz and R. J. Lubbers, *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1992.
[5] N. Orcutt and O. P. Gandhi, "A 3-D Impedance Method to Calculate Power Deposition in Biological Bodies Subjected to Time Varying Magnetic Fields", IEEE Trans. on BME, No. 8. Aug. 1988.
[6] J. F. Deford and O. P. Gandhi, "An Impedance Method to Calculate Currents Induced in Biological Bodies Exposed to Quasi-Static Electromagnetic Fields', IEEE Trans. on EMC, No. 3, Aug. 1985.