

TLM 방법을 이용한 한국형 고속열차내의 전자계 해석

Numerical analysis of electromagnetic fields in Korean High Speed Train by transmission line matrix method

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

ABSTRACT

As the industry develops, they are interested in the fault of electric machines and the effect on human beings by electromagnetic fields and waves which generate through much use of electric machines and appliances. In foreign country, they confirmed the standard about electromagnetic interference and compatibility(EMI/EMC) of electromagnetic fields and waves generating electricity transmission/distribution equipments and electric appliance. In Korea, such criteria are applied too.

Before EMI/EMC standard is applied, it is important to prepare the plan to predict and reduce electromagnetic fields and waves which generate in the inner and the outer part of electric machinery. To solve such a problem, they calculated Maxwell's equations by finite element method(FEM) and finite difference method(FDM) in most papers. However, these methods have the disadvantage that mathematical expansions are complex and need much memory allocations for grid and mesh generations

In this paper, we introduce transmission line matrix(TLM) method that media of which trains consists are regarded as transmission lines for electromagnetic field calculation in Korean High Speed Train, calculate the electric and magnetic field, and analyze the results.

1. 서론

산업이 발달함에 따라, 전력의 수요가 증가하게 되고 증가하는 전력 수요에 맞추어 발전, 송전, 배전 설비의 전압과 전류 레벨도 증가하고 있으며 휴대폰, PDA, 컴퓨터 등이 일반 가정에 널리 보급되어, 많은 전기·전자 설비들이 삶의 질을 높여주고 있다. 그러나, 많은 전기·전자 제품에 의해 발생하는 전자계와 전자파로 인한 기계의 오동작, 인체에의 영향, 소음 문제 등이 문제가 되고 있다. 전자계는 보통 시간에 따른 변화가 거의 없는 정적인 상태의 전기장과 자기장을 뜻하며, 전기장과 자기장의 각각의 변화가 서로 영향을 미치지 않는다. 전자파는 시간에 따른 변화가 큰 동적인 상태의 전기장과 자기장에 의한 서로 간의 영향을 통해 에너지가 전달되는 형태를 가진다. 전자계는 주파수가 낮아 파장이 길기 때문에, skin-depth가 매질보다 긴 경우를 띄어 침투를 하고, 전자파는 주파수가 높기 때문에 skin-depth가 매질의 크기보다 훨씬 작은 경우를 띄어 보통 표면에 존재하게 된다. 전자파는 보통 표면에 존재하게 되어, 매질 안에서 열전달의 형태로 에너지를 전달한다. 전자계와 전자파는 소스가 되는 전하와 전류 성분이 크면 클수록 비례하여 발생한다. 고속열차의 경우에는 속도를 증가시키기 위하여, 내부의 모터 블록,

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

보조 블록 등에 많은 전류가 흐르게 되어, 이로 인해 발생하는 전자계와 전자파를 수치모사를 통해 예측, 계산하는 것이 필요하다. 전자계를 수치적으로 계산하는 대표적인 방법으로는 유한요소법(Finite element method)과 유한차분법(Finite difference method)가 있다. 그러나, 본 논문에서는 매질을 임피던스 네트워크로 회로모델링을 하여 계산하는 TLM(Transmission line matrix method)을 이용하여 전자기장을 계산하고자 한다. 특히 요즈음 문제가 되고 있는 극저주파(Extremely Low Frequency)자기장에 대하여 모의 계산을 하였다. 극저주파 자기장에 대해서는 ICRNIP 등의 기관에서 833[mG]의 자기장을 기준으로 삼고 있으며, 현명한 회피(Prudent Avoidance)라 하여 가급적 자기장의 환경에 노출되지 않도록 권고하고 있다. 본 모델에서는 간소화한 모델을 사용하여, 상부의 전차선 아래 객차가 있고, 그 아래에 모터블럭과 보조블럭의 영향은 배제하도록 한다. 2차원 무한장에 대하여 문제를 도식화하여 계산을 하였다.

2. 정식화

전자기장이 만족해야 하는 Maxwell's equation은 아래 식 (1)~(4)와 같다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

전기장(Electric Field)과 자기장(Magnetic Field)가 sinusoidal field일 때, Maxwell's equation은 phasor형태로 도식화된다. Phasor형태로 도식화된 식을 다시 나타내면 아래 식 (5)~(8)과 같다.

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (5)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + j\omega \epsilon E \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \quad (7)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (8)$$

위의 식 (5)~(8)에서 전기장과 자기장이 극저주파(Extremely Low Frequency) 대역이므로, 주파수가 포함된 항은 소거된다. 따라서, 아래 식 (9)~(12)로 표현된다.

$$\nabla \times E = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \times H = \sigma E \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \quad (11)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (12)$$

식 (12)에 curl을 취하면, 아래 식 (13), (14)와 같이 표현된다.

$$\nabla \times \nabla \times H = \sigma \nabla \times E = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times \nabla \times H = \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = -\nabla^2 H = 0 (\because \nabla \cdot B = 0) \quad (14)$$

식 (14)와 같이 Laplace equation을 만족하게 된다.

H 가 vector이므로, 2차원에 대해서는 x, y축에 대해서 각각의 component별로 식 (15), (16)과 같이 만족해야 한다.

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

전기장과 자기장의 duality를 보기 위해, 식 (17)과 같은 연속 방정식을 살펴보도록 한다.

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

각 위치에 따른 시간의 전하변화량이 0이므로, 식 (17)은 아래 식 (18)과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = \nabla \cdot (\sigma - \nabla \phi) = 0 \quad (18)$$

유전율이 같은 경우에, potential ϕ 는 전기전도도에 의존하는 값으로 나타난다. 마찬가지로, 자기장도 전기장에 관련된 식 (18)처럼 식(19)로 표현된다.

$$\nabla^2 H = \nabla \cdot (\nabla H) = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\mu \nabla H) = 0 \quad (19)$$

전기장에 대해서는 potential ϕ 에 대해서 resistance를 $\frac{l}{\sigma S}$ 를 갖는 network로 표현이 되고, 자기장에 대해서는 magnetic field intensity H 에 대해서 reluctance $\frac{l}{\mu S}$ 를 갖는 network로 표현된다. 경계조건의 magnetic field intensity를 알면, 내부의 H 는 임피던스 network로 계산할 수 있음을 의미한다.

3. 사례 연구

아래 그림 1은 한국형 고속열차의 객차의 단면이다. 객차의 외부를 둘러싸고 있는 부분은 주철(Mild Steel)이라 가정하였고, 내부에 대해서는 공기라는 매질로 하여, simulation을 수행하였다. 전차선에 흐르는 전류는 600[A]로 하여 계산하였다.

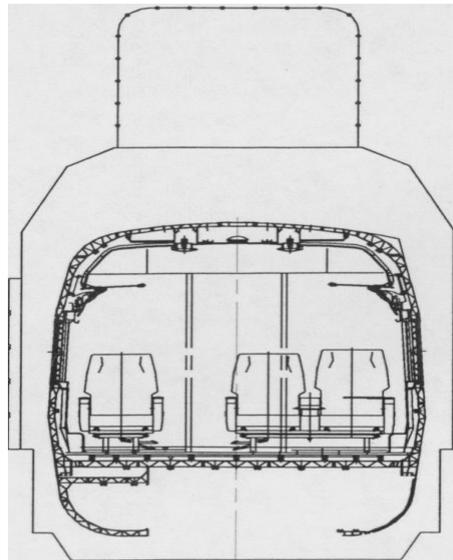


그림 1. 한국형 고속열차 객차 단면

전차선이 이도를 갖지 않고, 전류가 무한대의 길이로 흐른다고 가정하였다. 무한대의 길이로 전류가 흐른다고 가정하면, 거리에 따른 magnetic field intensity는 Ampere's law에 의해 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\oint_c H \cdot dl = I \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi r} [A/m] \quad (20)$$

식 (20)에서 구한 전차선의 전류에 의한 자기장을 경계 조건으로 하여, 각 부분별 reluctance를 구하여, 내부의 자기장을 구하였다.

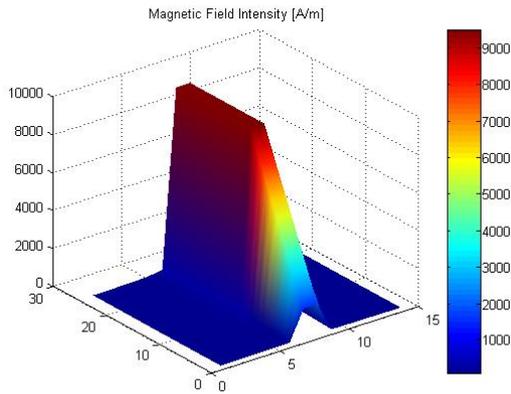


그림 2. 자기장의 level surface

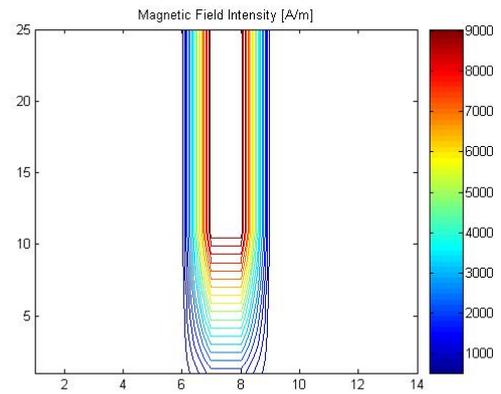


그림 3. 자기장의 contour

그림 2, 3과 같이 자기장의 크기가 전차선 아래의 투자율이 높은 부분에서 전반적으로 높게 나타남을 알 수가 있다. 최대값은 약 9000[A/m]로 나타났다. 객실로 갈수록, 투자율이 높은 차체가 차폐를 하고 있고, 전차선에서 거리가 멀어지므로, 자기장이 낮아짐을 알 수가 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 저주파 자기장의 계산을 매질을 reluctance network로 모델링하여 수행하였다. 전차선에 의한 자기장 값을 경계 조건(Boundary Condition)으로 하여, 내부의 자기장을 TLM(Transmission Line Matrix Method)를 이용하여 수치 계산하였다. 본 모델은 전차선에 의한 자기장을 계산하였으나, 앞으로의 연구에서는 모터 블록과 보조 블록에서 발생하는 전자기장에 의한 수치해석과 3차원으로 확장하여 수치해석을 수행하는 것이 필요하다고 생각하는 바이다.

참고문헌

- [1] John David Jackson, *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