

AF궤도회로에서 세라믹 코팅재에 의한 자계의 세기 변화에 대한 연구

A Study on the Variation of Magnetic Field Intensity by Ceramics Coating Material in AF Track Circuits

김민규[†] 김선동* 고영환** 김민석*** 이종우****
Kim, Min-Kyu Kim, Sun-Dong Ko, Young-Hwan Kim, Min-Seok Lee, Jong-Woo

ABSTRACT

Automatic train control systems are divided into ATC, ATP and ATS systems etc. The ATP and ATS systems offer discontinuous information for train control. While the ATC systems provide continuous information for train control. There is a method for offering continuous information by AF track circuits. Magnetic fields are formed by current through rails in the AF track circuit systems. So, the continuous information is received by the magnetic fields on a on-board antenna. Coating materials on rails are researched to decrease defects such as head check, shelling, corrugation, squats and so on in Germany. Currently, a coating method of rail construction is proposed by using the ceramics in Korea. When deciding physical characteristic of ceramics, researches are required about variation of flux density by the ceramics. In case that the flux density is much lower than existing value, the information for train control is not transmitted to the on-board antenna.

In this paper, inductance on rails is calculated and a model is presented about variation of the magnetic field intensity in the AF track circuit. Standard permeability of ceramics is proposed by analyzing the variation of magnetic field intensity. It is demonstrated by using Maxwell and Matlab program.

key words : AT track circuit(AF궤도회로), magnetic field intensity(자계세기), ceramics coating material(세라믹 코팅재), permeability(투자율), magnetic field(자기장)

1. 서 론

자동열차제어시스템은 ATC(Automatic Train Control), ATP(Automatic Train Protection), ATS(Automatic Train Stop)시스템 등으로 구분한다. ATP와 ATS시스템은 불연속 열차제어 정보를 제공하는 시스템이고 ATC는 열차제어 연속 정보를 제공하는 시스템이다.⁽¹⁾ 연속 정보를 제공하는 하나의 방법으로 AF(Audio Frequency)궤도회로를 이용한다. AF궤도회로 시스템은 레일에 전류를 흘려서 레일에 발생하는 자기장에 의해 차상 안테나가 이를 수신하여 연속 정보를 제공한다.⁽²⁾ 독일에서는 [그림 1]과 같이 차륜과 레일 사이에 발생하는 마모, 균열 등인 결함을 줄이기 위해 레일 위에 코팅재를 사용하려는 연구가 진행 중에 있다. 현재 국내에서는 세라믹을 이용하여 레일코팅 공법의 개발이 진행 중에 있다. 세라믹 코팅재의 물리적인 특성을 선정할 시에 AF궤도회로가 부설된 구간에서는 코팅재로 인한 자계의 세기에 대한 연구가 필요하다.

† 책임저자 : 정회원, 서울메트로, 선임
E-mail : mgkim79@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-0539 FAX : (02)6110-5489

* 비회원, 서울메트로, 신호팀, 대리

** 정회원, 서울메트로, 신호팀, 팀장

*** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 박사과정

**** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수



그림 1. 차륜과 레일의 인터페이스로 인한 결함(파상마모, 압좌, 표면박리)

본 논문에서는 AF케도회로에서 레일에 의해 발생하는 자계의 세기 및 외부유도용량을 계산하고, 세라믹 코팅재에 의해 자계의 세기 변화 모델을 제시하였다. 세라믹 코팅재의 상대투자율에 따른 자계의 세기 변화를 해석하여 세라믹 코팅재의 기준 상대투자율을 제시한다. 이를 Maxwell 및 Matlab 프로그램을 통하여 입증하였다.

2. 레일에서 발생하는 자계의 세기 및 외부유도용량

AF케도회로에서 레일에 흐르는 전류의 모델은 [그림 2]이다.⁽³⁾

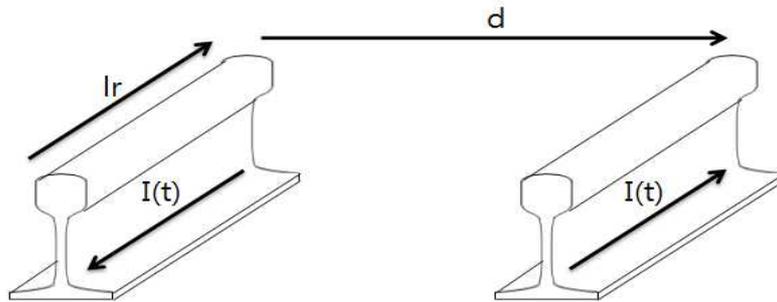


그림 2. 레일에 흐르는 전류의 방향

d 는 궤간이고, l_r 은 레일의 길이를 의미한다. 레일에서 발생하는 자속밀도를 구하기 위해서는 전류루프를 $z=0$ 인 평면상에서 [그림 3]과 같이 나타낸다.⁽⁴⁾

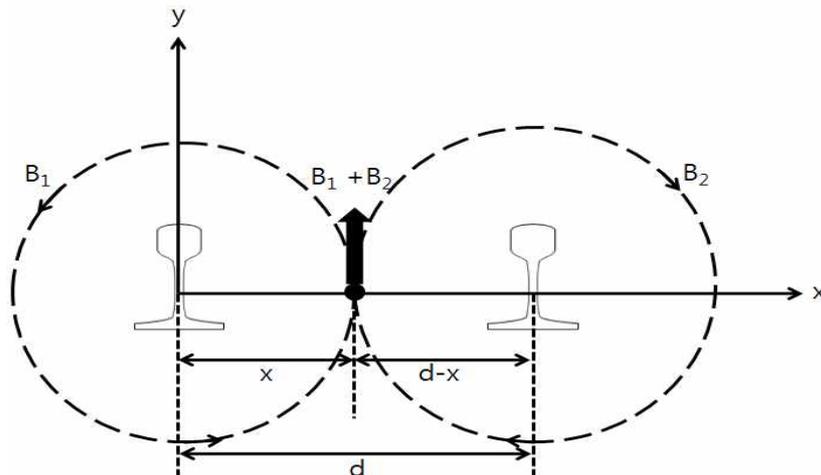


그림 3. 레일에 흐르는 전류에 의한 자계분포

원점에 있는 레일에 흐르는 전류에 의해 만들어지는 자계의 세기 H_1 은 Ampere 법칙으로 계산되며, $z=0$ 인 전류루프 상에서는 \hat{y} 성분으로 표시된다. [그림 3]의 루프 면상의 H_1 을 나타내면 식(1)이다.⁽⁵⁾

$$H_1 = \frac{I}{2\pi x} \hat{y} \quad (1)$$

식(1)을 기준으로 자속밀도를 계산하면 식(2)이다.

$$B_1 = \mu_0 H_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \hat{y} \quad (2)$$

μ_0 는 자유공간에서의 투자율을 의미하고, 반대쪽 레일에 흐르는 반대방향이 전류가 만드는 자속밀도 B_2 도 루프 면상에서는 식(3)이다.

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(d-x)} \hat{y} \quad (3)$$

따라서 단위길이당 전류루프를 채교하는 총 자속은 식(4)이다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_a^{d-a} (B_1 + B_2) \cdot dx \hat{y} \\ &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_a^{d-a} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right) dx \\ &= \frac{\mu_0 I}{\pi} \ln \left(\frac{d-a}{a} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

a 는 레일 단면적의 반지름을 의미하고, 식(4)을 이용하여 레일의 외부유도용량은 식(5)이다.⁽⁶⁾

$$L_e = \frac{\lambda}{I} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{d-a}{a} \right) \quad (5)$$

3. 세라믹 코팅재에 의한 자계의 세기 변화

레일위에 세라믹 코팅재는 레일 두부에 약 1.5[mm]로 도포된다. 레일의 저항률이 세라믹 코팅재보다 낮고, 또한 단면적도 약 10배 이상 커서 레일을 통해 전류가 흐른다. 세라믹 코팅재에 의한 자계의 세기 변화를 해석하기 위해 법선방향의 경계조건이 필요하다. 자기장의 경계법칙을 보면 레일에서 발생하는 자속밀도와 세라믹 코팅재에 의해 발생하는 자속밀도는 동일하다.⁽⁷⁾ 자속밀도가 동일하기 때문에 레일의 유도용량에는 변화가 일어나지 않는다. 자계의 세기에는 변화가 일어나므로 세라믹 코팅재의 상대 투자율의 특성이 중요하다. 상대투자율이 너무 높으면 자기장의 세기가 줄어들어 차상안테나에서 열차 제어 정보를 수신하지 못하게 된다. 식(2)과 식(3)을 참고하면 법선성분 벡터는 \hat{y} 가 되므로 식(6)을 만족한다.

$$B_{1y} = B_{2y} = \mu_0 H_{1y} = \mu_c \mu_0 H_{2y} \quad (6)$$

B_{1y} 은 한쪽 레일에서 발생하는 자속밀도이고, B_{2y} 은 세라믹 코팅재에서 발생하는 자속밀도이다. μ_c 는 세라믹 코팅재의 상대투자율을 의미한다. 식(6)을 이용하여 세라믹 코팅재에서의 자계의 세기를 계산하면 식(7)이다.

$$H_{2y} = \frac{1}{\mu_c} H_{1y} \quad (7)$$

H_{1y} 는 식(2)을 이용하면 식(8)과 같이 유도된다.

$$H_{1y} = \frac{B_1}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi x} \hat{y} \quad (8)$$

식(8)을 식(7)에 대입하여 세라믹 코팅재에서 발생하는 자계의 세기를 계산하면 식(9)이다.

$$H_{2y} = \frac{I}{\mu_c 2\pi x} \hat{y} \quad (9)$$

식(9)에서 보듯이 세라믹 코팅재의 상대투자율에 따라 자계의 세기가 선형적으로 변하게 된다. 식(6)에서와 같이 법선방향에서의 자속밀도는 세라믹 코팅재의 유무와 관계없이 동일하므로 레일의 외부유도용량은 변화가 일어나지 않는다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션 기준은 레일의 길이 및 세라믹 코팅재의 길이를 1[m]로 하고, 궤간은 표준궤간을 기준으로 하였다. 도시철도의 경우에는 궤도회로 길이가 짧기 때문에 최소 레일에 2[A] 이상이 흐른다. 본 논문에서는 1[m]의 레일에 흐르는 전류의 크기가 2[A]인 경우, 세라믹 코팅재의 상대투자율에 따라 레일 두부에서의 자계의 세기 및 외부유도용량을 해석하였다. 세라믹 코팅재의 두께는 1.5[mm]로 하였다. 기준 자계의 세기는 차상 안테나의 종류 및 AF궤도회로의 종류에 따라 다르다.⁽⁸⁾ 본 논문에서는 지멘스 AF궤도회로 시스템 기준으로 연속정보 차상안테나는 오른쪽 레일 위에 설치되며, 불연속정보 차상안테나는 왼쪽 레일위에 설치된다. 본 논문에서는 연속정보 차상안테나만 고려하므로 오른쪽 레일에 의해 발생하는 자기장의 세기가 레일과 차상안테나 사이의 높이에서 0.707[A/m] 이상인 경우로 해석하면 이를 기준으로 세라믹 코팅재의 기준 상대투자율을 제시하였다. AF궤도회로에서 전기적인 특성을 포함하는 시뮬레이션 기준은 [표 1]이다.⁽⁹⁾

표 1. 시뮬레이션 기준

구분	값
레일의 길이 및 세라믹 코팅재의 길이	1[m]
자유공간에서의 투자율	$4\pi \times 10^{-7} [H/m]$
궤간	1.435[m]
레일 단면적의 반지름	0.06[m]
레일과 차상안테나 사이의 높이	0.18[m]

4.1 레일의 자계의 세기 및 외부유도용량

식(2)과 식(3)을 이용하여 한쪽 레일과 차상안테나 사이의 높이에서 발생하는 자계의 세기를 계산하면 다음과 같다.

$$H = \frac{I}{2\pi x} \hat{y} = 1.7683 [A/m]$$

[그림 4]는 Maxwell 프로그램 결과이고, 결과 값은 약 1.6524[A/m]로 오차가 약 5[%]이내 이다.

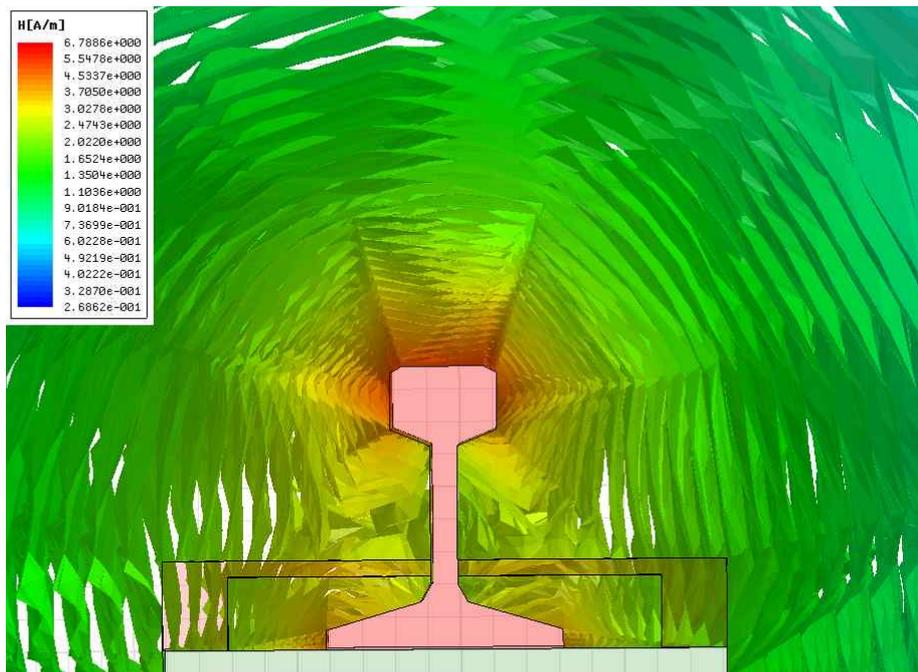


그림 4. 레일의 자계의 세기

식(5)을 이용하여 레일의 외부유도용량을 계산하면 다음과 같다.

$$L_e = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d-a}{a}\right) = 1.2527 [\mu H/m]$$

[그림 5]는 Maxwell 프로그램에서의 결과이고, 결과 값은 약 1.1750[μH/m]로 오차가 약 5[%]이내 이다.

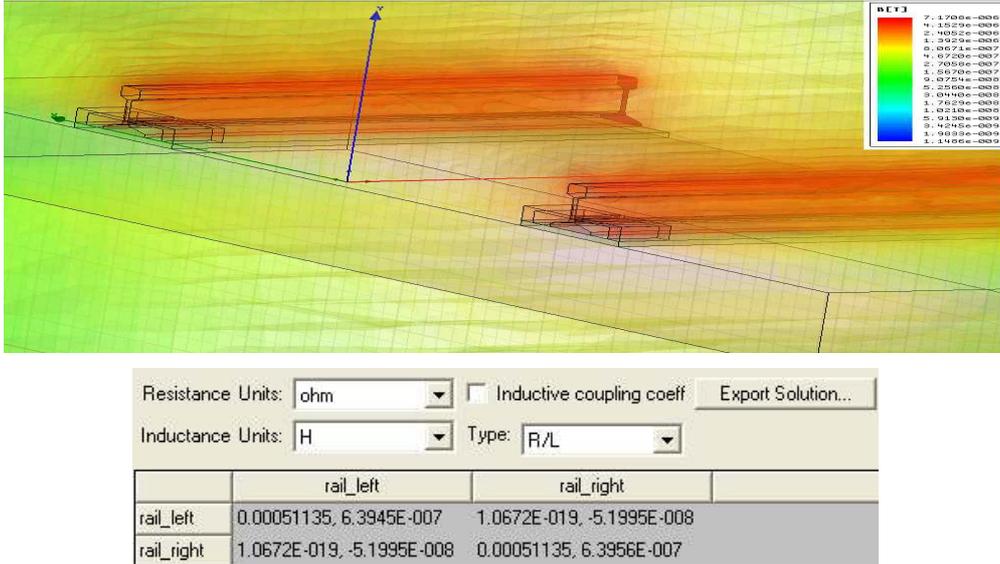


그림 5. 레일의 외부유도용량

4.2 세라믹 코팅재에 의한 자계세기의 변화

식(9)을 이용하여 세라믹 코팅재와 차상안테나 높이에서 발생하는 자계의 세기를 세라믹 코팅재의 상대투자율에 따라 계산하면 [그림 6]과 같다.

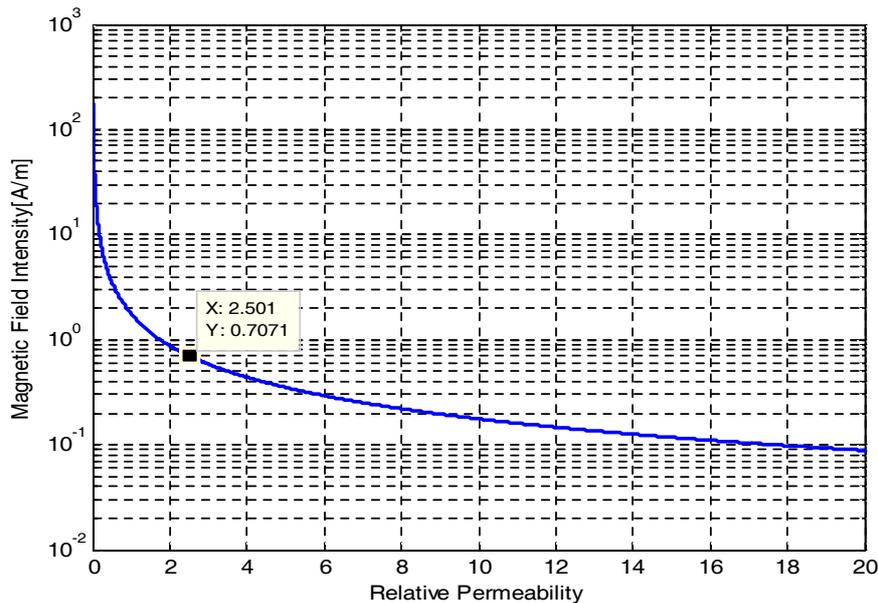


그림 6. 세라믹 코팅재의 상대투자율에 대한 자계의 세기

자계의 세기 해석 결과, 세라믹 코팅재의 상대투자율이 2.5이하인 경우에 자계의 세기의 기준치인 0.707[A/m]이상으로 해석되었다. 상대투자율이 2.5이하라는 것은 세라믹 코팅재가 반자성체 혹은 비자성체나 상자성체의 성질을 가지고 있어야 한다는 것이다. [그림 7]은 이를 입증하기 위해 Maxwell 프로그램 결과이고, 결과값은 0.7369[A/m]으로써 오차가 약 5[%]이내 이다. 또한 [그림 8]은 세라믹 코팅재에 의해 레일의 외부유도용량이 변하지 않는다는 것을 입증하는 Maxwell 프로그램 결과이다.

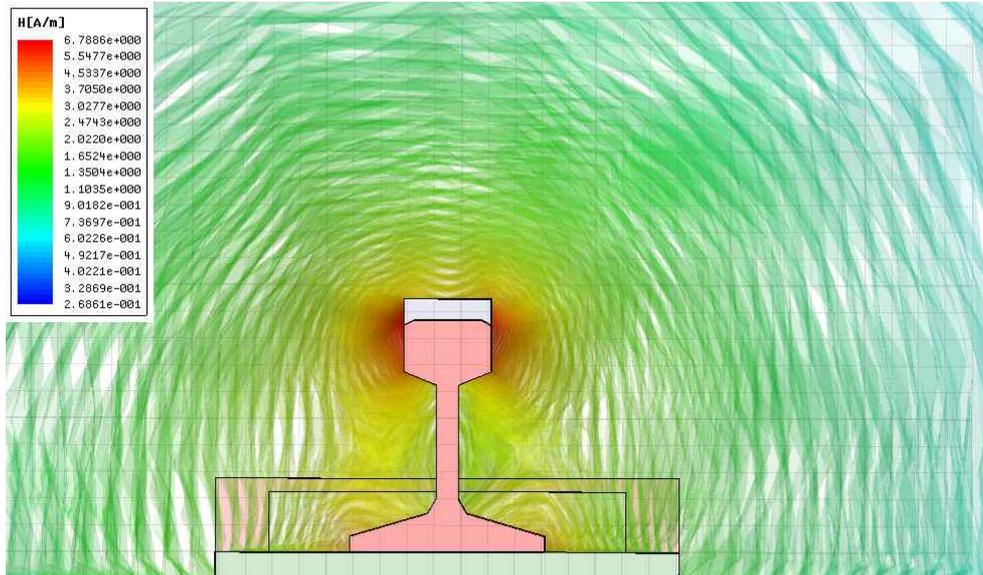
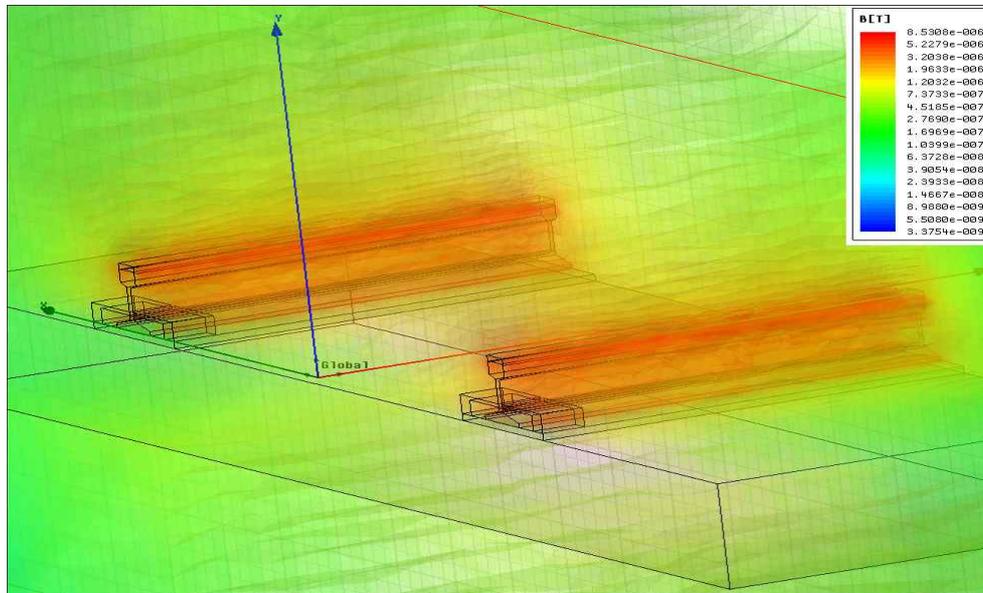


그림 7. 세라믹 코팅재에 의한 자계의 세기(상대투자율=2.5)



Resistance Units: ohm Inductive coupling coeff Export Solution...

Inductance Units: H Type: R/L

	rail_left	rail_right
rail_left	0.00051137, 6.5447E-007	-7.9273E-020, -5.5744E-008
rail_right	-7.9273E-020, -5.5744E-008	0.00051135, 6.5434E-007

그림 8. 세라믹 코팅재에 의한 레일의 외부유도용량

[그림 5]와 [그림 8]을 비교하여 시뮬레이션 오차를 감안하면 레일의 외부유도용량은 변하지 않는다는 것을 입증한다.

5. 결 론

본 논문에서는 AF궤도회로에서 레일에 의해 발생하는 외부유도용량을 계산하고, 세라믹 코팅재에 의해 자계의 세기의 변화를 제시하였다. 세라믹 코팅재의 상대투자율에 따른 자계 세기의 변화를 해석하여 특정 궤도회로 시스템에서의 세라믹 코팅재의 기준 상대투자율을 제시하였다.

세라믹 코팅재의 상대투자율이 높아짐에 따라 자계의 세기는 줄어든다. 세라믹 코팅재의 상대투자율에 대

한 자계의 세기는 상대투자율이 1인 것을 기준으로 1보다 작으면 급격하게 증가하고, 1보다 크면 서서히 감소하는 특성을 가지고 있다. 이는 반자성체와 상 및 강자성체와의 특성과 일치한다. 본 논문에서 특정 궤도 회로 시스템에서의 자계의 세기 기준치를 만족하는 세라믹 코팅재의 상대투자율은 2.5로 해석되었다. 이 값은 세라믹 코팅재가 반자성체 혹은 비자성체나 상자성체의 성질을 가지고 있어야 한다는 것이다. 세라믹 코팅재가 강자성체인 경우에는 자계의 세기가 급격하게 줄어들어 차상 안테나에서 정보를 수신하지 못할 수 있다. 또한 레일의 외부유도용량에는 자기장의 법선경계법칙에 의해 변화가 없는 것을 입증하였다.

본 연구는 향후 레일에 도포물질을 사용할 경우, 궤도회로 시스템의 자계의 세기를 기준으로 하여 도포물질의 기준 상대투자율을 선정할시 활용될 수 있다. 또한 차상안테나의 설계시에 자계의 세기의 기준치를 선정할 시에 활용될 수 있다.

참고문헌

1. Jae-Young, Park, "Railway Signalling Engineering", Dong-il Publisher, pp.53-60, 2006.
2. In-Kwon, Kang, "Electric Railway System Engineering", Sung-An-Dang, pp.105-110, 2007.
3. Daehwan, Kim, "A Study on the Impedance Calculation by Using Equivalent Model in Catenary System", in Proceeding of the Autumn Conference for Railway, The Korean Society for Railway, Korean, pp.1190-1200, 2009.
4. D.K. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics", Pearson Education, pp. 177, pp. 292-293, 2002.
5. A.G. Olabi, A. Grunwald, "Computation of Magnetic Field in an Actuator", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 16, Issue 10, pp.1728~1736, 2008.
6. R. Feynman, "Lecture on Physics", Seung-San, Vol.2, pp.17:12-17:14,2004.
7. Mathew N. O. Sadiku, "Elements of Electromagnetics", Oxford University Press, Second Edition, pp.278-281, 1998.
8. Min-Seok Kim, Jong-Woo Lee, "A Study on Electrical Separation Joint in the Slab Track", in Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, pp, 536-542, 2009.
9. Minseok Kim, "A Study on Coupling Coefficient between Rail and Reinforcing Bars in Concrete Slab Track," Journal of The Korean Society for Railway, Vol.12, No.3, pp.405-411, 2009.
10. Eun-Sil, Han, "Maxwell 3D", Ansoft-Korea, Inc, pp102~110, 2006.