

ATP시스템에서 열차속도에 따른 지상자에서 차상자로의 자계의 세기에 관한 연구

A Study on the Magnetic Intensity from Wayside Transmitter to On-board Transmitter about the Train Speed in ATP system

김민석[†] 고준석* 이상혁** 김민규*** 이종우****
Kim, Min-Seok Ko, Jun-Seog Lee, Sang-Hyeok Kim, Min-Kyu Lee, Jong-Woo

ABSTRACT

Electric railway system consist of rolling stock, track, signal and streetcar line system. ATP(Automatic Train Protection) system in railway signaling system is the important one grasping the position and velocity of a train. The wayside transmitter of ATP system is installed between rails. Recently, the research about increasing train speed has been developed in total departments of the railroad systems. The study on the information transmission between on-board transmitter and wayside transmitter is required for increasing the train speed in the ATP system. When the train speed is increased as to same transmission distance, the problem on information transmission occurs because the transmission time is decreased. In case that the transmission distance is extended, the transmission time is decreased with respect to the train speed. Therefore, we have to define the standard magnetic intensity as to the train speed in order to transmit correctly telegram.

In this paper, the transmission distance for the telegram is suggested on the basis of the train speed. Also, the standard magnetic intensity from the wayside transmitter to on-board transmitter is proposed by using transmission distance regarding the train speed in the ERTMS/ETCS system by using Matlab program.

key words : ATP system(ATP 시스템), magnetic intensity(자계의 세기), train speed(열차속도), transmission time(전송시간), transmission distance(전송거리)

1. 서 론

전기철도시스템은 차량, 궤도, 신호 및 전차선 시스템으로 구성되어 있다. 철도신호시스템은 열차의 간격과 진로를 제어한다. 철도신호시스템은 ATC, ATP, ATS 시스템 등을 이용하여 신호정보를 송신하여 열차위치와 열차에 허용속도를 전송한다.⁽¹⁾ 철도신호시스템인 ATP(Automatic Train Protection) 시스템은 열차의 위치 및 구간속도를 파악할 수 있는 중요한 시스템이다. ATP시스템은 열차에 운행 권한을 갖게 하고, 열차에 속도패턴과 구배 또는 속도 제한 등을 통일시킨다. 또한 각 열차의 차상에서 열차운행과 허용 속도 및 지상자로부터 수신되는 정보들을 이용하여 안전 운행을 확보한다.⁽²⁾ 기관사가 조작판넬 상에 표시되는 속도의 제한을 무시하면 차상 시스템은 자동적으로 열차의 운행을 통제한다.

† 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 박사과정
E-mail : kms0403@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6874 FAX : (02)978-6874

* 비회원, 한국철도시설공단, 신호팀, 차장

** 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 석사과정

*** 정희원, 서울메트로, 신호팀, 선임

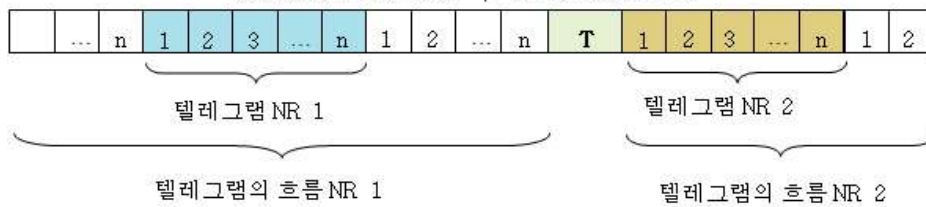
**** 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수

최근 전세계 철도의 모든 분야에서 열차속도가 500[km/h]이상 되도록 하는 연구개발이 진행 중에 있다. 현재 유럽에서 사용하고 있는 ATP시스템 중 ERTMS/ETCS 시스템의 유로발리스의 경우는 열차속도가 500[km/h]까지 사용이 가능하다. 하지만 열차속도가 300[km/h]까지는 표준 텔레그램을 한번에 전송할 수 있지만 열차속도가 300[km/h]~500[km/h]에서는 표준 텔레그램으로 전송이 이루어지지 않아서 단축 텔레그램을 이용하여 전송하여야 한다.⁽³⁾ 또한 열차속도가 500[km/h]이상이 되는 자기부상 열차나 혹은 차세대 고속열차에서는 ATP 시스템을 사용할 수 없게 된다. 이에 ATP시스템에서도 열차속도 증가에 대한 차상자와 지상자 사이의 정보전송에 대한 연구가 필요하다. 동일한 전송거리에 대해 열차속도가 증가하면 전송시간이 감소하여 정보전송에 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 열차속도에 대한 기준 자계의 세기를 정의하여 텔레그램 전송이 이루어질 수 있도록 해야 한다.

본 논문에서는 열차속도를 기준으로 요구되는 텔레그램 전송거리를 제시하였다. 또한 ATP시스템인 ERTMS/ETCS시스템에서의 열차속도에 대한 정해진 전송거리를 이용하여 지상자에서 차상자로의 판독 자계의 세기를 제시하였다. 이를 Matlab 프로그램으로 입증하였다. 그리고 이는 ATP시스템 설계 및 부설시 신호시스템 기준안을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 열차속도에 대한 전송시간 및 전송거리

차상자와 지상자 사이의 텔레그램 전송시간은 LEU(Line-side Electronic Unit : 선로변 제어 유니트)의 샘플링 시간에 영향을 받는다. 텔레그램은 LEU의 신호에 따라 전송이 되는데 LEU의 신호가 샘플링 시간 이후에 변하면 텔레그램은 전송되지만 샘플링 시간 이내에 변하게 되면 텔레그램은 전송이 되지 않는다. 본 논문에서는 오직 텔레그램 전송이 이루어지는 시간만 고려하므로 텔레그램 전송시간은 총 전송할 비트수와 전송속도에만 영향을 받는다. [그림 1]은 텔레그램의 흐름을 나타낸다.⁽⁴⁾



[그림 1] 텔레그램의 흐름

차상자와 지상자 사이의 텔레그램 전송시간은 식(1)과 같이 계산된다.⁽⁵⁾

$$T_r = \frac{l_t}{r_t} \quad (1)$$

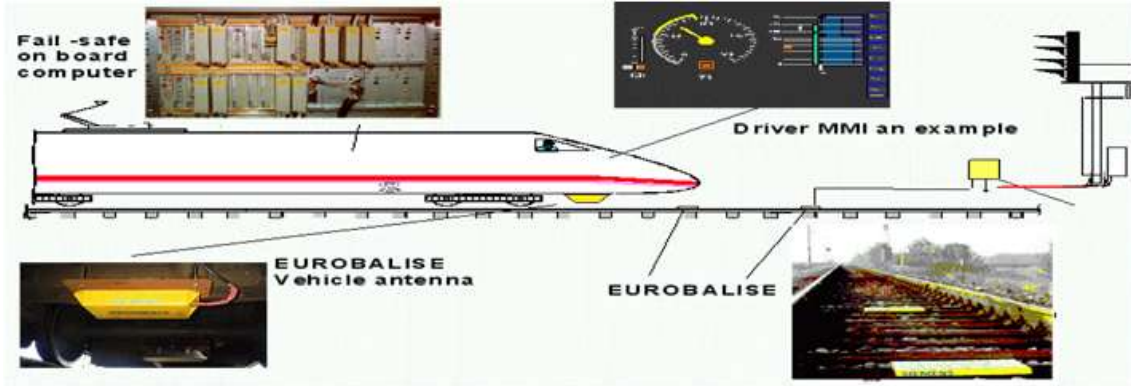
l_t 는 전송할 텔레그램의 비트수를 나타내며, r_t 는 전송속도를 의미한다. 식(1)을 이용하여 열차속도에 대한 응답이 확보되어야 할 전송거리를 계산하면 식(2)이다.

$$D_t = T_r \times V_s \quad (2)$$

V_s 는 열차속도를 의미한다.

3. 판독 자계의 세기 계산

ATP시스템 중에 ERTMS/ETCS시스템의 구성은 [그림 2]이다. 또한 ATP시스템은 RFID(Radio Frequency Identification)의 응용 시스템이므로 차상자와 지상자는 [그림 3]과 같이 차상자와 지상자의 자기결합에 의해 정보신호가 전송된다.⁽⁶⁾



[그림 2] ERTMS/ETCS시스템 구성



[그림 3] 차상자와 지상자의 자기결합

정보전송은 [그림 3]과 같이 차상자와 지상자의 자기결합에 영향을 받기 때문에 관측 자계의 세기가 중요하다. ATP시스템은 차상자와 지상자 모두 데이터를 송수신하게 되는데 본 논문에서는 ERTMS/ETCS시스템에서 표준 지상자에서 차상자로의 정보전송시에 자계의 세기 기준을 제시한다.

ERTMS/ETCS시스템에서 표준 지상자의 코일은 직사각형 형태의 loop로 구성되어 있다. 가로세로 길이가 a와 b인 직사각형 도체 루프의 관측 수평거리 x와 수직거리 y인 지점에서의 자계의 세기는 식(3)으로 계산된다.⁽⁷⁾

$$H(I_w) = \frac{N_w \times a \times b \times I_w}{4\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2 + y^2}} \left(\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2 + y^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2 + y^2} \right) \quad (3)$$

N_w 은 지상자 코일의 턴수를 의미하고, I_w 는 지상자에 흐르는 전류의 크기이다. 관측 자계의 세기를 계산하기 위해서는 차상자와 지상자의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 계산되어야 하므로 식(3)을 이용하여 지상자와 차상자의 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스는 식(4)과 식(5)으로 계산된다.⁽⁸⁾

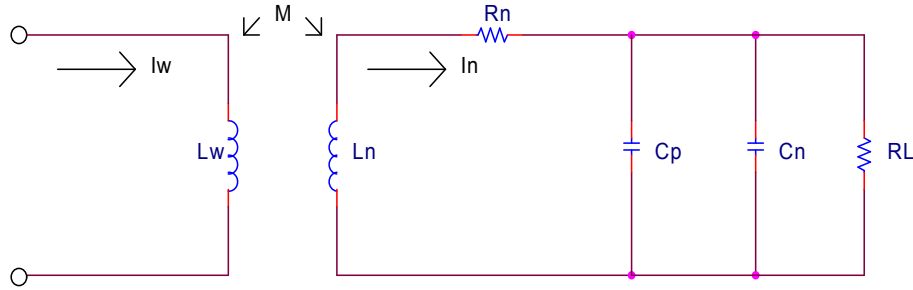
$$L_w = \frac{N_w \times \Phi_w}{I_w} = \frac{N_w \times \mu_0 \times H(I_w) \times a \times b}{I_w} \quad (4)$$

$$L_n = \frac{N_n \times \Phi_n}{I_n} = \frac{N_n \times \mu_0 \times H(I_n) \times c \times d}{I_n}$$

$$M = \frac{B_n(I_w) \times N_n \times c \times d}{I_w} = \frac{\mu_0 \times H(I_w) \times N_n \times c \times d}{I_w} \quad (5)$$

Φ_w 는 지상자를 통과하는 자속을 의미하고, μ_0 는 자유공간에서의 투자율을 의미한다. Φ_n 는 차상자를 통과하는 자속을 의미하고, c는 차상자의 가로길이를 의미하고 d는 세로길이를 의미한다. N_n 은 차상자 코일의 턴수를 의미하고, I_n 는 차상자에 흐르는 전류의 크기이다.

[그림 3]의 자기결합을 전기적 등가회로로 나타내면 [그림 4]이다.⁽⁹⁾



[그림 4] 차상자와 지상자의 자기결합에 대한 전기적 회로

R_n 은 차상자의 내부저항을 의미하고, C_p 는 기생 커패시터를 의미한다. R_L 은 차상자의 부하저항을 의미하고, C_n 은 동조 커패시터를 의미한다. [그림 4]를 이용하여 차상자에 유도된 기전력을 계산하면 식(6)이다.

$$u_n = \frac{j\omega M \times I_w}{1 + (j\omega L_n + R_n) \left(\frac{1}{R_L} + j\omega(C_p + C_n) \right)} = \frac{\omega \times k \times \sqrt{L_w L_n} \times I_w}{\sqrt{\left(\frac{\omega L_n}{R_L} + \omega R_n (C_p + C_n) \right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_n (C_p + C_n) + \frac{R_n}{R_L} \right)^2}} \quad (6)$$

ω 는 지상자의 각주파수를 의미하고, k 는 차상자와 지상자 사이의 결합 계수를 의미한다. 차상자의 판독 자계의 세기는 식(6)을 이용하여 계산하면 식(7)이다.

$$H_{min} = \frac{u_n \times \sqrt{\left(\frac{\omega L_n}{R_L} + \omega R_n (C_p + C_n) \right)^2 + \left(1 - \omega^2 L_n (C_p + C_n) + \frac{R_n}{R_L} \right)^2}}{\omega \times \mu_0 \times c \times d \times N_n} \quad (7)$$

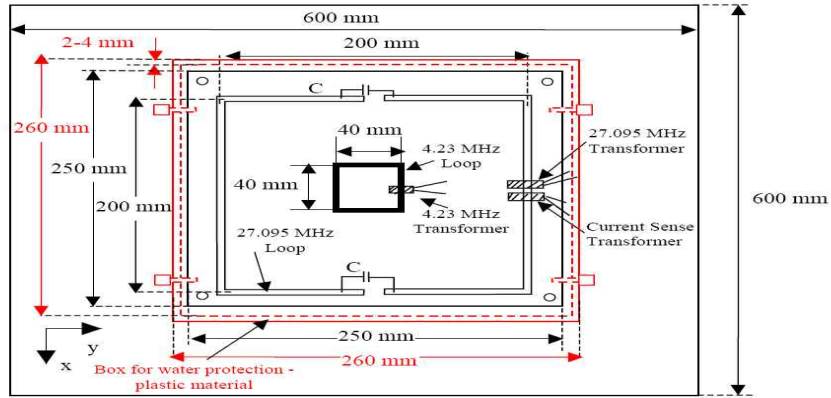
식(5)을 보면, 판독 자계의 세기는 차상자 코일의 면적과 턴수, 유도된 기전력, 공진주파수에 의존한다. 이는 차상자 공진회로의 공진주파수에서 유도된 기전력의 공진 증가를 결정했기 때문이다. 또한 판독 감도를 최적화하기 위하여 차상자의 공진주파수는 지상자의 전송 주파수에 정확히 정합되어야 한다.

4. 시뮬레이션

ATP시스템 중에서 ERTMS/ETCS 시스템의 전송속도 및 차상자 코일 및 표준형 지상자 코일 특성은 [표 1]이고, [그림 6]은 차상자 및 지상자의 안테나 구조를 나타낸다. 지상자의 경우에는 횡방향으로 설치한 경우로 한다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 차상자와 지상자의 수평거리는 열차속도에 따라 달라진다.

[표 1] ERTMS/ETCS시스템 차상자 및 지상자 특성

구분	값
지상자의 전송속도	564kbit/s
표준 텔레그램 길이	1023bit
차상자 코일의 가로 길이	40[mm]
차상자 코일의 세로 길이	40[mm]
차상자의 내부저항	0.3[Ω]
차상자의 부하저항	50[Ω]
기생커패시터+ 동조커패시터	1.474[nF]
차상자의 인덕턴스	960[nH]
차상자 코일의 턴수	7[turn]
지상자 코일의 가로 길이	40[mm]
지상자 코일의 세로 길이	40[mm]
지상자 코일 턴수	7[turn]
지상자의 인덕턴스	960[nH]
지상자의 전류크기	10[mA]
지상자의 전송주파수	4.23[MHz]
차상자와 지상자의 수직거리	200[mm]



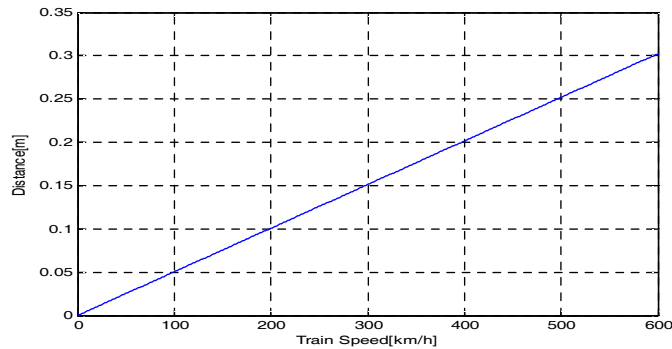
[그림 6] ERTMS/ETCS시스템의 안테나 구조

4.1 열차속도에 대한 전송시간 및 전송거리

[표 1]을 기준으로 식(1)에 대입하여 전송시간을 계산하면 다음과 같다.

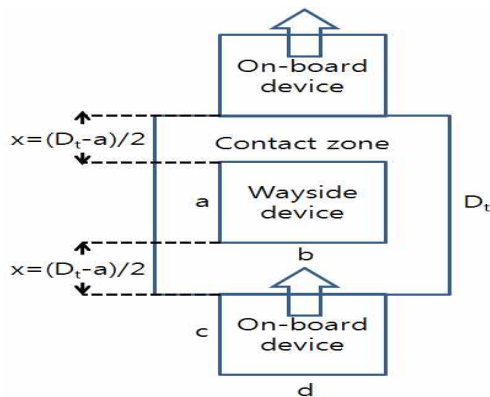
$$T_r = \frac{l_t}{r_t} = 1.8138 [ms]$$

식(2)을 이용하여 열차속도를 0~600[km/h]까지 변화함에 따라 위의 전송시간을 이용하여 확보되어야 할 전송거리는 [그림 7]이다.



[그림 7] 열차속도에 대한 확보되어야 할 전송거리

[그림 7]을 보면 전송시간은 일정한데 열차속도가 증가함에 따라 요구되는 전송거리가 증가된다. 열차속도가 100[km/h]인 경우 50.38[mm]이고, 600[km/h]인 경우 302.3[mm]까지 증가한다. [그림 8]을 이용하여 관독 자계의 세기를 계산하기 위한 직선구간에서 관독 수평거리를 100[km/h]마다 계산한 경우에 지상자와 차상자 사이의 수평거리는 지상자의 길이 40[mm]를 감안해서 [표 2]이다.



[그림 8] 차상자와 지상자의 관독 수평거리 기준

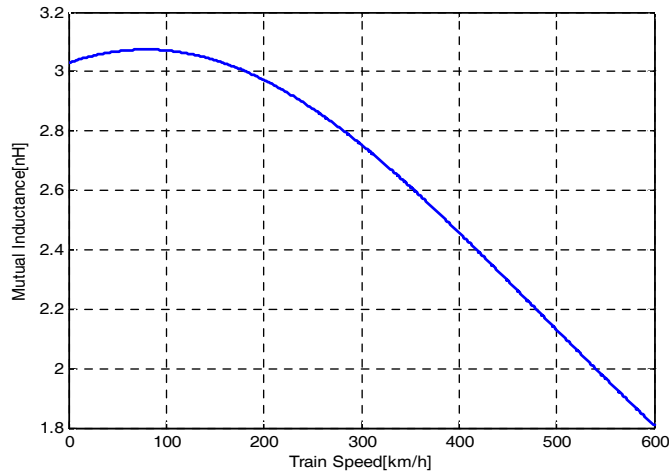
[표 2] 열차속도에 대한 관독 수평거리

열차속도	관독 수평거리
100[km/h]	5.19[mm]
200[km/h]	30.38[mm]
300[km/h]	55.58[mm]
400[km/h]	80.77[mm]
500[km/h]	106[mm]
600[km/h]	131.2[mm]

[표 2]를 보면, 전송시간은 일정하기 때문에 열차의 속도가 증가함에 따라 관독 수평거리가 증가한다.

4.2 차상자와 지상자 사이의 상호인덕턴스

차상자와 지상자 사이의 관독 수평거리에서의 상호인덕턴스는 식(3)과 식(5)을 이용하여 계산한다. [표 1]과 [표 2]를 기준으로 해서 열차속도에 대한 관독 수평거리에서의 상호인덕턴스를 계산하면 [그림 9]이고, 상호인덕턴스를 100[km/h]마다 계산하면 [표 3]이다.



[그림 9] 열차속도에 대한 관독 수평거리에서의 상호인덕턴스

[표 3] 열차속도에 대한 관독 수평거리에서의 상호인덕턴스

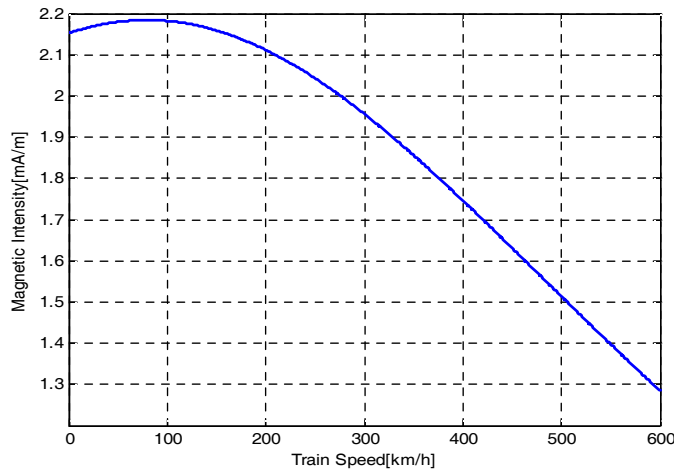
열차속도	상호인덕턴스
100[km/h]	3.0712[nH]
200[km/h]	2.9722[nH]
300[km/h]	2.7536[nH]
400[km/h]	2.4577[nH]
500[km/h]	2.1299[nH]
600[km/h]	1.8079[nH]

[그림 9] 및 [표 3]을 보면, 열차의 속도가 60[km/h]전까지는 열차의 속도가 증가함에 따라 상호인덕턴스가 약간 증가한다. 이는 관독 수평거리가 0이하의 값이 산출되어 열차속도가 증가하면 관독 수평거리가 증가하기 때문에 약간 증가되는 것이다. 열차속도가 증가함에 따라 관독 수평거리가 증가함으로 상호인덕턴스의 크기가 줄어든다. 차상자와 지상자의 직사각형 루프가 작아서 통과하는 자속량이 작기 때문에 상호인덕턴스의 크기가 작다.

4.3 관독 자계의 세기

[표 1], [표 2], [표 3]을 기준으로 차상자와 지상자 사이의 상호인덕턴스를 이용하여 열차속도에 대

한 판독 자계의 세기를 계산한다. 식(6)과 식(7)을 이용하여 열차속도에 대한 판독 자계의 세기를 해석하면 [그림 10]이고, 판독 자계의 세기를 100[km/h]마다 계산하면 [표 4]이다.



[그림 10] 열차속도에 대한 판독 자계의 세기

[표 4] 열차속도에 대한 판독자계의 세기

열차속도	판독 자계의 세기
100[km/h]	2.182[mA/m]
200[km/h]	2.112[mA/m]
300[km/h]	1.957[mA/m]
400[km/h]	1.746[mA/m]
500[km/h]	1.514[mA/m]
600[km/h]	1.285[mA/m]

[그림 10] 및 [표 4]를 보면, 판독자계의 세기가 상호인덕턴스와 비례적인 관계이므로 상호인덕턴스와 같은 형태로 나타난다. 열차속도가 증가함에 따라 판독 자계의 세기는 감소한다. 즉, 열차의 속도가 증가함에 따라 안테나의 판독 자계의 세기가 더 작은 범위에서 동작할 수 있어야 하거나 지상자의 전류의 크기나 지상자의 코일 턴수와 비례적인 관계이므로 전류의 크기를 높이거나 코일 턴수를 증가시키는 방법이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 정해진 텔레그램 전송시간을 기준으로 열차속도에 대한 텔레그램 전송거리를 계산하였다. 이를 이용하여 ATP시스템인 ERTMS/ETCS시스템에서의 차상자와 지상자 사이의 판독 자계의 세기를 제시하였다.

열차속도가 100[km/h]에서 600[km/h]로 증가함에 따라 전송거리가 50.38[mm]에서 302.3[mm]까지 증가하였다. 이에 대해 판독 수평거리도 열차속도가 증가함에 따라 증가되었다. 판독 수평거리가 증가함에 따라 상호인덕턴스가 감소한다. 판독 수평거리가 증가함에 따라 자속이 통과하는 양이 적어지기 때문이다. 판독 자계의 세기와 상호인덕턴스는 비례관계이므로 열차속도가 증가함에 따라 판독 자계의 세기가 감소하였다. 열차속도가 100[km/h]인 경우와 600[km/h]인 경우에 판독 자계의 세기가 약 1.8 배 차이가 난다. 열차속도가 증가함에 따라 표준 텔레그램 전송을 정상적으로 하기 위해 낮은 판독 자계의 세기를 감지할 수 있는 안테나를 제작한다. 다른 방법으로는 식(5)을 참고하여, 차상자와 지상자 코일의 턴수를 증가시키거나 직사각형 루프의 크기를 증가시킴으로써 차상자와 지상자 사이의 상호인덕턴스의 크기를 증가시킨다. 또는 지상자 전류의 크기를 증가시켜 판독 자계의 세기를 증가시킨다.

본 연구는 향후 고속열차 혹은 자기부상열차에 ATP시스템을 적용 시에 활용될 수 있으며, ATP시스

템 설계 및 부설시 신호시스템 기준안을 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 또한 곡선구간에서는 차상자와 지상자가 정확히 일치되지 않기 때문에 곡선구간에서의 관독 자계의 세기에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Minseok, Kim, "A Study on the Compensation Capacitor in Ballast Track Circuit," ICEMS, pp.4182-4187, Wuhan, October 2008.
2. Minseok Kim, "The Influence of Frequency on Wayside Transmitter of ATP System upon Reinforcing Bars in Concrete Slab Track," Journal of The Korean Society for Railway, Vol.11, No.6, pp.536-542, 2008.
3. UIC, "ERTMS Training Programme 2009:HANDBOOK", pp.342-367, 2009.
4. Alcatel, Alstom, Siemens, "ERTMS/ETCS-Class 1:System Requirements Specification Chapter 3 Principles", pp.138-145, 2002.
5. Morten Lisborg Jorgensen, "Analysis and Enhancement of Safety-Critical Communication for Railway Systems", AALBORG University, pp.46-47, 2008.
6. Alcatel, Alstom, Siemens, "ERTMS/ETCS-Class 1:Test Specification for Eurobalise FFFIS", pp.286-297, 2003.
7. W.H. Hayt, "Engineering Circuit Analysis," McGraw-Hill, Sixth Edition, pp.433-435, 2002.
8. Sadiku, "Elements of Electromagnetics", Second Edition, Oxford University Press, pp.354-359, 1995.
9. Klaus Finkenzeller, "RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards and identification", Second Edition, Wiley, pp.73-78, 2003.
10. Alcatel, Alstom, Siemens, "ERTMS/ETCS-Class 1:FFFIS for Eurobalise", pp.138-145, 2005.
11. Korea Rail Network Authority, "A Study on Improving the interface performance in the Concrete Slab Tracks", pp.153-160, 2008.