

콘크리트 슬래브궤도에서 철근이 ATP시스템 지상자의 주파수에 미치는 영향

The Influence of Frequency on Wayside Transmitter of ATP System upon Reinforcing Bars in Concrete Slab Track

김민석* · 윤인모† · 고준석** · 이종우***

Min-Seok Kim · In-Mo Yoon · Jun-Seog Ko · Jong-Woo Lee

Abstract In concrete slab track, the signal current using wayside transmitter of ATP (Automatic Train Protection) system is influenced by reinforcing bars. The magnetic coupling between reinforcing bars and wayside transmitter of ATP system as a filter makes an input current distorted. So, it makes an alternating current signal with a desirable size not transmit to on-board system of a train. Way to decrease the distortion of an input current signal frequency is to avoid maximum induction current frequency. And the induction phenomenon between reinforcing bars insulated and wayside transmitter of ATP system does not occur. In this paper, we represent the model about wayside transmitter of ATP system and reinforcing bars on the concrete slab tracks, and calculated the parameters demanded for the model. Also, we demonstrated it through the Maxwell program. Furthermore, we calculated impedance on wayside transmitter used in KVB system and ERTMS/ETCS system which are a kind of ATP system, frequency response of induction current, using Matlab, and demonstrated the validity of it, using PSpice program.

Keywords : Concrete slab track, ATP frequency, induction current, impedance

요지 콘크리트 슬래브궤도에서 ATP시스템 지상자를 이용한 신호 전류는 철근에 의해 신호전류에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 콘크리트 슬래브궤도에서 ATP시스템 지상자와 철근의 자기적 결합은 하나의 필터로 작용하게 되어 입력전류신호의 왜곡을 주게 된다. 그리고 결국 왜곡된 신호에 의해서 열차의 차상자에 잘못된 신호가 전송될 수 있다. 입력전류신호의 왜곡을 줄이기 위한 방법으로 철근에 유도되는 전류와 주파수를 구하여 해당 주파수를 ATP시스템의 지상자 주파수로 사용하지 않거나, 철근을 절연시켜 철근과 ATP시스템 지상자간에 유도현상을 억제할 수 있다. 본 논문에서는 콘크리트 슬래브궤도에서 ATP시스템의 지상자와 철근의 모델을 전기적으로 표현하였고, 모델에 요구되는 값들을 Maxwell 프로그램을 이용하여 구하였다. 또한 모델로부터 ATP시스템인 KVB시스템, ERTMS/ETCS시스템에서 사용하고 있는 지상자의 주파수에 대한 지상자의 임피던스 및 철근의 유도전류를 계산하였다. 이를 Matlab 및 PSpice 프로그램으로 타당성을 입증하였다.

주요어 : 콘크리트 슬래브궤도, ATP 주파수, 유도전류, 임피던스

1. 서론

철도신호시스템은 열차의 간격과 진로를 제어한다. 철도

신호시스템은 ATC(Automatic Train Control), ATP(Auto-matic Train Protection), ATS(Automatic Train Stop) 장치 등을 이용하여 신호정보를 송신하여 열차위치와 열차 허용 속도를 전송한다. 열차제어정보전송은 직접 궤도회로를 이용하여 차상에 전송하는 방식, 궤도상에 기기를 설치하여 전송하는 방식이 있다.

ATC장치 등을 이용하여 열차위치 및 제한속도와 관련된 정보를 지상에서 차상으로 전송한다. 열차제어정보전송은 직접 궤도회로를 이용하여 지상에서 차상으로 전송하는 방식과

* 책임저자 : 정희원, 호남대학교 광산캠퍼스, 정보통신대학, 교수
E-mail : iyoon@honam.ac.kr
TEL : (062)940-5406 FAX : (062)940-5406
† 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 박사과정
** 정희원, 한국철도시설공단, KR연구소, 차장
*** 교신저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수

선로상에 지상자를 설치하여 전송하는 방식이 있다[1]. 국내고속선 ATC장치는 궤도회로를 이용하는 방식이고, 기존선의 ATP나 ATS장치는 선로변에 지상자를 설치하는 방식이다.

선로변에 지상자를 사용하는 방식은 지상자와 열차에 설치된 차상안테나와 전자결합에 의해서 정보를 획득하며, 선로변 지상자는 다양한 주파수를 사용하고 있다. 콘크리트 슬래브궤도는 레일 하부에 철근을 사용하기 때문에 철근에 전류가 유도되어 지상자의 신호에 왜곡이 발생하거나 지상자의 임피던스가 증가하여 차상 안테나로 신호정보가 전달되지 않을 가능성도 존재한다. 그러므로 콘크리트 슬래브궤도에서 선로변에 지상자를 설치 시 철근과의 영향을 고려해야한다.

본 논문에서는 선로변에 지상자를 설치하는 ATP장치인 지상자에 의해서 철근에 유도되는 전류, 지상자의 임피던스를 계산하여 지상자의 주파수에 따른 미치는 영향을 분석하였고, 이에 대한 대책을 제시하였다. 또한 본 논문에서 해석한 궤도회로는 UM71 궤도회로로써 현재 경부고속철도에 사용되고 있다.

2. ATP시스템 지상자와 철근사이의 모델

ATP시스템 지상자와 철근사이의 전기적 모델은 콘크리트 슬래브궤도에서 레일의 임피던스 측정 시험의 결과를 참고하여 제시하였다. 측정시험은 PANDROL 체결장치를 기준으로 하였고, 결과는 Table 1과 Table 2이다[2,3].

Table 1. Resistance and self-inductance of rail in site measurement

주파수 [Hz]	저항 [$\text{m}\Omega/\text{m}$]	인덕턴스 [$\mu\text{H}/\text{m}$]
-	1.022	1.320
2040	2.012	1.239
2400	2.285	1.224
2760	2.550	1.212
3120	2.810	1.201

Table 2. Conductance and capacitance of rail in site measurement

주파수 [Hz]	컨덕턴스 [$\mu\text{S}/\text{m}$]	커패시턴스 [nF/m]
2040	0.138	0.225
2400	0.155	0.225
2760	0.172	0.224
3120	0.189	0.223

주파수에 따라서 레일의 저항과 자기인덕턴스, 컨덕턴스, 커패시턴스가 변한다. 레일의 저항과 자기인덕턴스가 주파수에 따라 변한다는 것은 철근에 의한 전자유도현상이 일어난다는 것이다. 이 현상을 전기적 모델로 변환하는 방법

으로는 변압기의 모델을 사용할 수 있다. 철근은 렌즈에 법칙에 의해서 2개의 레일을 기준으로 철근에 유도되는 전류 방향에 따라 3부분으로 나누면 Fig. 1이다[4,5].

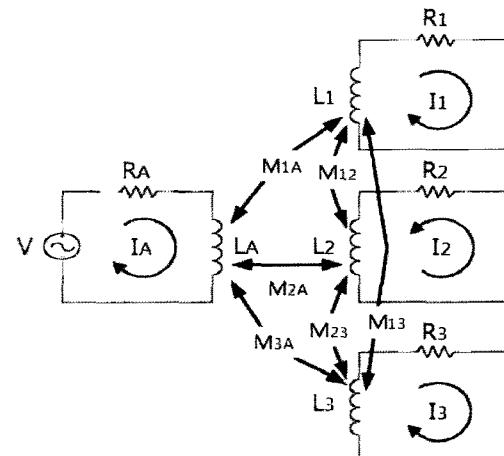


Fig. 1. Electric model between wayside transmitter and reinforcing bars in concrete slab track

R_A 는 ATP장치의 지상자 저항을 의미하고 L_A 는 ATP장치의 지상자 자기인덕턴스를 의미한다. 여기서 지상자의 저항과 자기 인덕턴스는 지상자의 내부 코일의 저항과 자기 인덕턴스를 의미하는 것이다. R_1 , R_3 은 레일 외부에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L_1 , L_3 은 레일 외부에 위치한 철근의 자기 인덕턴스를 의미한다. R_2 는 레일 사이에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L_2 는 레일 사이에 위치한 철근의 자기인덕턴스를 의미한다. M_{1A} , M_{3A} 는 레일 외부에 위치한 철근과 지상자와의 상호인덕턴스를 의미하고, M_{2A} 는 레일 사이에 위치한 철근과 지상자와의 상호인덕턴스를 의미한다. M_{12} 와 M_{23} 는 레일 외부에 위치한 철근과 레일 사이에 위치한 철근사이의 상호인덕턴스를 의미하고, M_{13} 는 레일 외부에 위치한 철근 사이의 상호인덕턴스를 의미한다.

2.1 ATP시스템 지상자의 저항 및 자기인덕턴스

2.1.1 KVB장치 지상자의 저항 및 자기인덕턴스

ATP시스템의 지상자 저항 및 자기 인덕턴스는 지상자마다 각각 다르지만 KVB장치의 지상자에 적용되는 저항 및 자기인덕턴스는 Table 3이다[6].

Table 3. Resistance and self-inductance of wayside transmitter in KVB system

구분	저항 [$\text{m}\Omega$]	자기인덕턴스 [nH]
표준형	0.2	620

2.1.2 ERTMS/ETCS장치 지상자의 저항 및 자기인덕턴스

ERTMS/ETCS장치에서 사용하고 있는 지상자는 Euro-

balise이다. Eurobalise의 저항 및 자기 인덕턴스는 축소형과 표준형에 따라 다르다. 각각의 저항 및 자기인덕턴스는 Table 4이다[7].

Table 4. Resistance and self-inductance of wayside transmitter in ERTMS/ETCS system

구분	저항 [mΩ]	자기인덕턴스 [nH]
축소형	0.2	540
표준형	0.3	960

2.2 철근의 저항 및 자기인덕턴스

철근의 형태는 4개의 철근으로 구성된 격자 형태이다. 그러므로 철근의 저항은 횡방향, 종방향으로 나눠서 계산하여야 한다. 하나의 격자 형태에 대한 철근의 저항은 식 (1)이다[8].

$$R_n = 2 \frac{l_v}{\sigma_i S_i} + 2 \frac{l_h}{\sigma_i S_i} \quad (1)$$

S_i 는 철근의 단면적을 의미하고, σ_i 는 철근의 도전율을 의미한다. l_v 는 횡철근의 길이를 의미하고, l_h 는 종방향 철근의 길이를 의미한다.

철근의 자기인덕턴스는 암페어법칙을 이용하면 식 (2)이다[6].

$$L_n = \frac{\mu_c}{2\pi} \left[l_v \ln \left(\frac{l_h - d}{d} \right) + l_h \ln \left(\frac{l_v - d}{d} \right) \right] + \frac{l_v \mu_i}{4\pi} + \frac{l_h \mu_i}{4\pi} \quad (2)$$

μ_c 는 콘크리트의 투자율을 의미하고, μ_i 는 철근의 투자율을 의미한다. d 는 철근두께의 반지름을 나타낸다.

2.3 ATP시스템의 지상자와 철근사이의 상호인덕턴스

레일 외부에 위치한 철근사이의 단위길이 당 상호인덕턴스와 레일 사이에 위치한 철근사이의 단위길이 당 상호인덕턴스를 구하는 공식은 레일에서 발생한 자속밀도를 이용해서 구하면 식 (3), 식 (4)이다[9,10].

$$M_{1A} = M_{3A} = \frac{\lambda}{I_A} = \frac{\mu_c}{4\pi} \ln \left(\frac{(k+a)^2 + 4h^2}{(a-k)^2 + 4h^2} \times \frac{h^2}{a^2 + h^2} \right) \quad (3)$$

$$M_{2A} = -\frac{\lambda}{I_A} = -\frac{\mu_c}{2\pi} \ln \left(\frac{a^2 + h^2}{h^2} \right) \quad (4)$$

h 는 지상자와 철근간의 거리를 의미하고, k 는 횡방향 철근의 총 길이를 의미한다. a 는 지상자의 횡방향 폭을 의미한다.

2.4 철근사이의 상호인덕턴스

격자형태의 철근들 사이의 상호인덕턴스는 Biot-Savart 법칙을 이용하여 격자형태의 철근을 횡방향, 종방향으로 나눠 각 철근의 자계의 세기를 이용해서 계산한다[7].

$$H_{p1}(r) = \int_0^{l_v} \frac{I_1 dl \times (\hat{r} - \hat{r}')}{4\pi(\hat{r} - \hat{r}')^2}, \quad \hat{r} = x\hat{x} + y\hat{y}, \quad \hat{r}' = x'\hat{x} + y'\hat{y}, \quad d\hat{l} = dx'\hat{y} \quad (5)$$

$$H_{p2}(r) = \int_0^{l_h} \frac{I_1 dl \times (\hat{r} - \hat{r}')}{4\pi(\hat{r} - \hat{r}')^2}, \quad \hat{r} = x\hat{x} + y\hat{y}, \quad \hat{r}' = x'\hat{y}, \quad d\hat{l} = dx'\hat{y} \quad (6)$$

\hat{r} 는 자계를 측정하는 지점을 나타내는 위치벡터이고, \hat{r}' 는 미소전류분포의 지점을 나타내는 위치벡터이다. $H_{p1}(r)$ 는 격자형태의 철근에서 종방향 철근의 흐르는 전류에 의한 자계의 세기를 나타내며, $H_{p2}(r)$ 는 횡방향 철근의 흐르는 전류에 의한 자계의 세기를 나타낸다. 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 철근 사이의 상호인덕턴스를 구하면 식 (7), 식 (8)이다.

$$M_{12} = M_{23} = \frac{1}{I_1} \left[\int_d^{l_h} \int_{l_{v1}}^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p1}(r) dx dy + \int_d^{l_h} \int_{l_{v2}}^{l_{v2}+l_{v1}} \mu_c H_{p1}(r) dx dy \right. \\ \left. + \int_d^{-l_h} \int_{l_{v1}}^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r) dx dy + \int_d^{-l_h} \int_{l_{v2}}^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r) dx dy \right] \quad (7)$$

$$M_{31} = \frac{1}{I_1} \left[\int_d^{l_h} \int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p1}(r) dx dy + \int_d^{l_h} \int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} \mu_c H_{p1}(r) dx dy \right. \\ \left. + \int_d^{-l_h} \int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r) dx dy + \int_d^{-l_h} \int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r) dx dy \right] \quad (8)$$

l_{v1} 은 레일 외부의 격자형태의 철근의 횡방향 길이를 의미하고 l_{v2} 는 레일사이에 위치한 격자형태의 철근의 횡방향 길이를 의미한다. 음의 부호는 자속의 방향에 따라 결정된다.

3. ATP시스템 지상자 주파수가 철근에 미치는 영향

3.1 철근에 유도되는 전류

Fig. 1의 모델로부터 철근에 유도되는 전류를 구하기 위해 키르히호프 전압 법칙을 적용하여 유도한 회로방정식은 식 (9)~(12)이다. 식 (9)은 지상자에 흐르는 전압에 대한 방정식이고, 식 (10), 식 (11)은 레일 외부에 위치한 철근의 전압에 대한 방정식이다. 식 (12)은 레일 사이에 위치한 철근의 전압에 대한 방정식이다[10].

$$v(t) = i_A(t) R_A + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + M_{1A} \frac{di_1(t)}{dt} + M_{A2} \frac{di_2(t)}{dt} + M_{A3} \frac{di_3(t)}{dt} \quad (9)$$

$$0 = i_1(t) R_1 + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M_{1A} \frac{di_A(t)}{dt} + M_{12} \frac{di_2(t)}{dt} + M_{13} \frac{di_3(t)}{dt} \quad (10)$$

$$0 = i_2(t) R_2 + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M_{2A} \frac{di_A(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_1(t)}{dt} + M_{23} \frac{di_3(t)}{dt} \quad (11)$$

$$0 = i_3(t) R_3 + L_3 \frac{di_3(t)}{dt} + M_{3A} \frac{di_A(t)}{dt} + M_{31} \frac{di_1(t)}{dt} + M_{32} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (12)$$

지상자는 레일사이의 중간에 설치되므로 레일 외부에 위치한 철근은 지상자에 대해 동일한 영향을 받고, 또한 철근의 구조도 동일하기 때문에 $R_1=R_3$, $L_1=L_3$, $M_{1A}=M_{3A}$, $M_{12}=M_{32}$ 을 만족한다. 그러므로 $i_1(t)=i_3(t)$ 이 만족하고, 식 (10)과 식 (12)은 같다. 우선 레일 외부에 위치한 철근의 유도전류 $i_1(t)$ 에 대해 구하기 위해서는 우선 식 (9), 식 (10), 식 (11) 뿐만 아니라 미분한 식, 식 (10), 식 (11)을 적분한

식을 이용한다. d/dt 를 ‘(Prime)’으로 표현하고 행렬로 식을 나타내면 식 (13)이다.

$$\begin{pmatrix} 0 & L_A & R_A & 0 & M_{24} & 0 & 0 \\ 0 & M_{1A} & 0 & 0 & M_{12} & 0 & 0 \\ L_A & R_A & 0 & M_{24} & 0 & 0 & 0 \\ M_{1A} & 0 & 0 & M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ M_{2A} & 0 & 0 & L_2 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{24} & 0 & 0 & L_2 & R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A''(t) \\ i_A'(t) \\ i_A \\ i_2''(t) \\ i_2'(t) \\ i_2 \\ \dot{i}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -2M_{1A} & 0 \\ 0 & 0 & -L_1 & -R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & -2M_{1A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_1 & -R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2M_{12} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v'(t) \\ v(t) \\ i_1''(t) \\ i_1(t) \\ i_1 \\ \dot{i}_1(t) \end{pmatrix} \quad (13)$$

식 (13)에서 $i_A(t)$ 와 $i_2(t)$ 을 $i_1(t)$ 과 $v(t)$ 에 대해 풀면 식 (14), 식 (15)이다.

$$i_A(t) = A v'(t) + B v(t) + C i_1''(t) + D i_1'(t) + E i_1(t) \quad (14)$$

$$i_2(t) = F v'(t) + G i_1''(t) + H i_1'(t) + K i_1(t) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{-(L_A M_{2A} M_{12}^2 - L_A L_2 M_{1A} M_{12} - M_{12} M_{2A}^2 M_{1A} + M_{2A}^2 L_2 M_{2A})}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ B &= \frac{1}{R_A} \\ C &= \frac{(L_2^2 M_{12}^2 + M_{2A}^2 L_A M_{12} + L_A M_{2A} L_2 M_{1A} - M_{1A} M_{2A}^2) (-L_1 - M_{13})}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad - \frac{2 M_{12} (L_2^2 M_{12}^2 - 2 M_{2A} M_{1A} L_A M_{12} + M_{12}^2 M_{1A}^2)}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ D &= \frac{-(R_2 M_{12} L_A^2 + R_A M_{2A}^2 M_{12} - R_A M_{2A} M_{1A} L_2 - M_{1A} R_2 M_{2A} L_A) (-L_1 - M_{13})}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad + \frac{2 M_{1A} (L_A M_{2A} M_{12}^2 - L_A L_2 M_{1A} M_{12} - M_{12} M_{2A}^2 M_{1A} + M_{12}^2 L_2 M_{2A})}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad - \frac{R_1 (-L_2 L_A^2 M_{12} + M_{2A}^2 L_A M_{12} + L_A M_{2A} L_2 M_{1A} - M_{1A} M_{2A}^2)}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ E &= \frac{-2 M_{1A} + R_1 (R_2 M_{12} L_A^2 + R_A M_{2A}^2 M_{12} - R_A M_{2A} M_{1A} L_2 - M_{1A} R_2 M_{2A} L_A)}{R_A (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad - (M_{2A}^2 M_{12}^2 - 2 M_{12} M_{2A} M_{1A} L_2 + L_2^2 M_{1A}^2) \\ F &= \frac{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ G &= \frac{(-M_{12} M_{2A} L_A L_2 + M_{2A}^2 M_{12} - M_{1A} L_2 M_{2A}^2 + L_2^2 M_{1A} L_A) (-L_1 - M_{13})}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad - \frac{2 M_{12} (L_A M_{2A} M_{12}^2 - L_A L_2 M_{1A} M_{12} - M_{12} M_{2A}^2 M_{1A} + M_{12}^2 L_2 M_{2A})}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ H &= \frac{-(L_2 R_A M_{12} M_{2A} + M_{2A} R_2 L_A M_{12} - M_{2A}^2 R_2 M_{1A} - L_2^2 R_A M_{1A}) (-L_1 - M_{13})}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ &\quad - \frac{2 M_{12}}{R_2} + \frac{2 M_{1A} (M_{2A}^2 M_{12}^2 - 2 M_{12} M_{2A} M_{1A} L_2 + L_2^2 M_{1A}^2)}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)} \\ K &= \frac{R_1 (L_2 R_A M_{12} M_{2A} + M_{2A} R_2 L_A M_{12} - M_{2A}^2 R_2 M_{1A} - L_2^2 R_A M_{1A})}{R_2 (-R_2 M_{1A}^2 M_{2A} + R_2 M_{12} M_{1A} L_A + R_A M_{12}^2 M_{2A} - R_A M_{12} M_{1A} L_2)}$$

식 (15)와 식 (16)을 식 (10)을 적분한 식인 식 (17)에 대입하고, $i_1(t)$ 에 대한 적분을 소거시키기 위해서 미분하면 식 (18)이다.

$$0 = R_1 \int i_1(t) dt + i_1(0) + L_1 i_1(t) + M_{1A} i_A(t) + M_{12} i_2(t) \quad (17)$$

적분의 초기치인 $i_1(0)$ 은 열차가 지상자 위를 통과할 때, 즉 지상자에 전류가 흐르기 시작할 시간에서의 철근에 흐르는 전류이기 때문에 0이다.

$$a_1 = i_1''(t) + b_1 i_1'(t) + c_1 i_1(t) + d_1 i_1(t) = e_1 v''(t) + f_1 v'(t) \quad (18)$$

$$a_1 = (M_{1A} C + M_{12} G), \quad b_1 = (M_{1A} D + M_{12} H)$$

$$c_1 = ((L_1 + M_{13}) + M_{1A} E + M_{12} K), \quad d_1 = R_1$$

$$e_1 = (-M_{1A} A - M_{12} F), \quad f_1 = -M_{1A} B$$

식 (18)의 미분방정식을 식 (19)과 식 (20)을 이용하여 푸다[10].

$$i_1(t) = |I_1| e^{j(wt + \phi_1)} = \hat{I}_1 e^{j\omega t} \quad (19)$$

$$v(t) = |V| e^{j(wt + \phi_2)} = \hat{V} e^{j\omega t} \quad (20)$$

ω 는 각주파수를 의미한다. ϕ_1 는 전류의 위상, ϕ_2 는 전압의 위상을 의미한다. 식 (19)과 식 (20)을 식 (18)에 대입해서 $\hat{I}_1(w)$ 에 대해 정리하면 식 (21)이다.

$$\hat{I}_1(w) = \frac{-e_1 w^2 + j f_1 w}{-j a_1 w^3 - b_1 w^2 + j c_1 w + d_1} \hat{V}(w) \quad (21)$$

$i_2(t)$ 도 $i_1(t)$ 와 동일한 방법을 이용하면 식 (22)이다.

$$a_2 i_2''(t) + b_2 i_2'(t) + c_2 i_2(t) + d_2 i_2(t) = e_2 v''(t) + f_2 v'(t) \quad (22)$$

$$a_2 = (M_{2A} C + 2M_{12} G), \quad b_2 = (M_{2A} D + 2M_{12} H)$$

$$c_2 = (L_2 + M_{2A} E + 2M_{12} K), \quad d_2 = R_2$$

$$e_2 = (-M_{2A} A - 2M_{12} F), \quad f_2 = -M_{2A} B$$

식 (22)을 $\hat{I}_2(w)$ 에 대해 정리하면 식 (23)이다.⁽¹³⁾

$$\hat{I}_2(w) = \frac{-e_2 w^2 + j f_2 w}{-j a_2 w^3 - b_2 w^2 + j c_2 w + d_2} \hat{V}(w) \quad (23)$$

3.2 ATP시스템 지상자의 임피던스

식 (9), 식 (10), 식 (11), 식 (12)을 연립해서 철근의 영향으로 인한 지상자의 임피던스를 구하면 식 (24)이다[11].

$$\frac{V_A}{I_A} = \left[R_A + 2 \frac{w^2 M_{1A}^2 R_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} + \frac{w^2 M_{2A}^2 R_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \right] + j w \left[L_A - 2 \frac{w^2 M_{1A}^2 L_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} - \frac{w^2 M_{2A}^2 L_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \right] \quad (24)$$

철근의 유도전류는 철근에 흐르는 전류를 계산해야하기 때문에 철근 사이의 상호인덕턴스가 필요하다. 그러나 지상자의 송, 수신주파수에 대한 임피던스는 지상자와 철근과의 관계를 나타내기 때문에 철근 사이의 상호인덕턴스를 포함시키지 않는다. 식 (24)에서 철근의 영향으로 인해서 ATP 장치의 지상자 저항은 증가하게 되고, 자기인덕턴스는 줄어든다. 또한 주파수 제곱에 따라 저항 및 자기인덕턴스가 비례한다. 이는 Table 1에서 주파수에 따라 저항이 증가하고, 자기인덕턴스가 감소하는 것과 일치한다.

4. 시뮬레이션

KVB장치의 지상자 규격은 Table 3의 기준으로 하였고,

ERTMS/ETCS장치의 지상자 규격은 Table 4의 기준으로 하였다. 철근의 형태는 현재 경부고속철도 2단계에서 사용될 시험선 형태를 기준으로 하였다. 시뮬레이션 도구로는 전기적 특성을 해석을 할 수 있는 Maxwell 프로그램, 철근에 유도되는 전류를 수리적 해석을 나타낼 수 있는 Matlab, 시뮬레이션 해석을 나타낼 수 있는 PSpice 프로그램을 이용하였다. PSpice 프로그램에서는 K_LINEAR 란 선형 변압기 모델을 이용하였다. 변압기 모델에 요구되는 커플링계수는 Maxwell 프로그램을 통해 넣어진 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 이용하였다. 또한 KVB 및 ERTMS/ETCS 시스템의 지상자 전압은 5V로 하였다. 프로그램의 해석 메모리의 차이 때문에 Matlab을 이용한 철근의 주파수응답에 대한 주파수 범위는 1~1MHz로 하였고, PSpice를 이용한 철근의 주파수응답에 대한 주파수 범위는 1~100MHz하였다. 이를 통해 각 시스템의 지상자 별로 철근에 유도되는 전류를 입증하였다. 또한 각 시스템 지상자별로 주파수에 따른 임피던스 변화를 계산하였다.



Fig. 2. Mutual induction between wayside transmitter and reinforcing bars

4.1 KVB장치

4.1.1 전기적 특성

KVB장치의 지상자 규격에 맞게 Maxwell 프로그램을 이용한 결과는 Fig. 3이고, 이를 정리하면 Table 5이다. 2장에서 제시한 KVB장치의 지상자 저항과 자기인덕턴스가 유사한 것을 확인하였다.

	Current2	Current3	Current4	Current1
Current2	7.000E-022 -3.500E-000	2.500E-020 -1.500E-000	1.396E-022 3.777E-003	
Current3	7.000E-022 1.500E-000	5.000E-020 1.750E-003	-1.400E-022 -1.000E-000	
Current4	2.000E-020 -1.000E-000	4.000E-020 1.750E-003	0.000390162 1.021E-003	7.794E-020 1.053E-003
Current1	5.000E-022 -1.500E-000	-1.500E-020 3.000E-010	7.747E-020 1.053E-009	0.0004305 2.632E-008

Fig. 3. Simulation result (Maxwell)

4.1.2 철근에 유도되는 전류

식 (21)과 식 (23)에 Table 4의 전기적 특성 값을 적용하면 Table 6이다.

식 (21)과 식 (23)을 이용하여 철근의 주파수응답을 나타

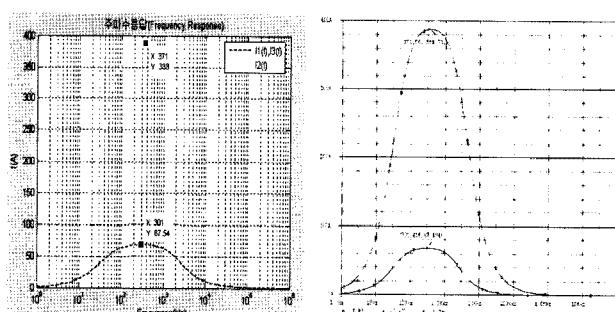
Table 5. Electric characteristic in KVB system

구 분	전기적 특성값
R_A	$0.17891 \times 10^{-9} [\Omega]$
L_A	$621.73 \times 10^{-9} [H]$
$R_1=R_3$	$0.00042677 [\Omega]$
R_2	$0.00039816 [\Omega]$
$L_1=L_3$	$2.5241 \times 10^{-8} [H]$
L_2	$2.1021 \times 10^{-8} [H]$
$M_{1A}=M_{3A}$	$-3.6581 \times 10^{-9} [H]$
M_{2A}	$-1.9578 \times 10^{-8} [H]$
$M_{12}=M_{23}$	$1.7657 \times 10^{-9} [H]$
M_{13}	$-3.8585 \times 10^{-10} [H]$

Table 6. Induction current on reinforcing bars in KVB system

구분	주파수 (MHz)	$I_1=I_3$ (mA)	I_2 (mA)
표준형 지상자	송신	3.9	27.320
		4.5	24.026
	수신	27	3.8815
			43.405

내어 최대로 철근이 유도되는 주파수를 Matlab 프로그램을 통해 나타내고, 이를 PSpice 프로그램을 통해 나타내면 Fig. 4이다.



(a) Simulation result (Matlab) (b) Simulation result (PSpice)

Fig. 4. Frequency response in KVB system

레일 사이에 있는 철근에 최대로 유도되는 주파수는 371Hz로 해석되었고, 레일 외부에 있는 철근에 최대로 유도되는 주파수는 301Hz로 해석되었다.

4.1.3 지상자 임피던스

KVB장치의 지상자 송, 수신주파수에 대한 임피던스는 식 (24)에 전기적 특성 데이터 값을 적용하면 Table 7이다.

4.2 ERTMS/ETCS장치

4.2.1 전기적 특성

ERTMS/ETCS 지상자의 축소형, 표준형 규격에 맞게 Maxwell 프로그램을 이용한 결과는 Fig. 5, Fig. 6이고, 이

Table 7. Impedance on wayside transmitter in KVB system

구분	주파수(MHz)	저항(mΩ)	자기인덕턴(nH)	임피던스
표준형 지상자	-	0.1789	621.73	0.179 (mΩ)
	3.9	0.5620	602.82	14.771 (Ω)
	4.5	0.5622	602.81	17.044 (Ω)
	수신	27	0.5804	602.75
				102.254 (Ω)

를 정리하면 Table 8과 Table 9이다. 2장에서 제시한 ERTMS/ETCS장치의 지상자 저항과 자기인덕턴스가 유사한 것을 확인하였다.

Resistance Units: [ohm] <input checked="" type="checkbox"/> Inductive coupling coeff <input type="checkbox"/> Export Solution...
Inductance Units: [H] <input checked="" type="checkbox"/> Type: RL <input type="checkbox"/>
Current2 0.00016665, 5.367E-007 -5.991E-022, -1.4399E-009 1.8598E-021, 7.3398E-009 1.304E-021, 1.4505E-009
Current3 -5.991E-022, -1.4399E-009 0.00042573, 2.6243E-008 8.9704E-022, -1.7130E-009 -2.6222E-022, -3.8167E-010
Current4 1.8598E-021, -7.3398E-009 8.9704E-022, 1.7130E-009 0.00039393, 2.1457E-008 1.205E-021, 1.7227E-009
Current1 1.304E-021, 1.4505E-009 -2.6222E-022, -3.8167E-010 1.205E-021, 1.7227E-009 0.00042998, 2.8505E-009

Fig. 5. Simulation result in reduced type (Maxwell)**Table 8.** Electric characteristic on reduced type in ERTMS/ETCS system

구 분	전기적 특성값
R_A	0.18658×10^{-3} [Ω]
L_A	536.76×10^{-9} [H]
$R_1=R_3$	0.00042573 [Ω]
R_2	0.00039935 [Ω]
$L_1=L_3$	2.6243×10^{-8} [H]
L_2	2.1467×10^{-8} [H]
$M_{1A}=M_{3A}$	-1.4399×10^{-9} [H]
M_{2A}	-7.3388×10^{-8} [H]
$M_{12}=M_{23}$	1.7130×10^{-9} [H]
M_{13}	-3.8167×10^{-10} [H]

Resistance Units: [ohm] <input checked="" type="checkbox"/> Inductive coupling coeff <input type="checkbox"/> Export Solution...
Inductance Units: [H] <input checked="" type="checkbox"/> Type: RL <input type="checkbox"/>
Current2 0.00029845, 9.5741E-007 -3.9963E-022, -3.0248E-009 6.6598E-021, -1.3687E-008 5.8499E-022, -3.0045E-009
Current3 -3.9963E-022, -3.0248E-009 0.00042611, 2.6097E-008 1.9858E-021, 1.7475E-009 -2.4947E-022, -3.8135E-010
Current4 6.6598E-021, -1.3687E-008 1.9858E-021, 1.7475E-009 0.00039393, 2.1249E-008 5.0698E-021, 1.7502E-009
Current1 5.8499E-022, -3.0045E-009 -2.4947E-022, -3.8135E-010 5.0698E-021, 1.7502E-009 0.00043085, 2.6392E-008

Fig. 6. Simulation result in standard type (Maxwell)

4.2.2 철근에 유도되는 전류

식 (21)과 식 (23)에 Table 7, Table 8의 전기적 특성값을 적용하면 Table 10이다.

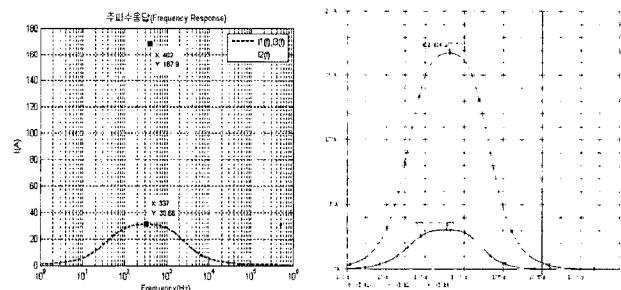
식 (21)과 식 (23)을 이용하여 철근의 주파수응답을 나타내어 최대로 철근이 유도되는 주파수를 Matlab 프로그램을 통해 나타내고, 이를 PSpice 프로그램을 통해 나타내면 Fig. 7, Fig. 8이다.

Table 9. Electric characteristic on standard type in ERTMS/ETCS system

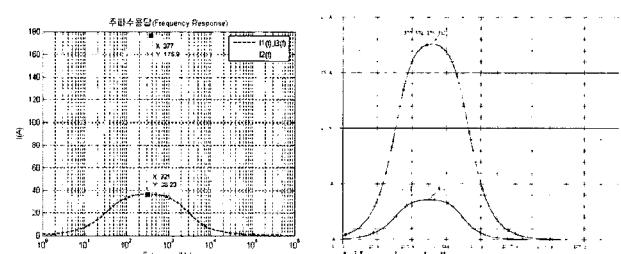
구 분	전기적 특성값
R_A	0.29845×10^{-3} [Ω]
L_A	957.41×10^{-9} [H]
$R_1=R_3$	0.00042611 [Ω]
R_2	0.00039935 [Ω]
$L_1=L_3$	2.6097×10^{-8} [H]
L_2	2.1249×10^{-8} [H]
$M_{1A}=M_{3A}$	-3.0248×10^{-9} [H]
M_{2A}	-1.3687×10^{-8} [H]
$M_{12}=M_{23}$	1.7475×10^{-9} [H]
M_{13}	-3.8135×10^{-10} [H]

Table 10. Induction current on reinforcing bars in ERTMS/ETCS system

구분	주파수 (MHz)	$I_1=I_3$ (mA)	I_2 (mA)
축소형 지상자	3.9	11.970	129.494
	4.5	10.794	111.860
표준형 지상자	27	1.7997	18.650
	3.9	15.091	136.220
	4.5	13.053	117.826
수신	27	2.1464	19.644



(a) Simulation result (Matlab) (b) Simulation result (PSpice)
Fig. 7. Frequency response on reduced type in ERTMS/ETCS system



(a) Simulation result (Matlab) (b) Simulation result (PSpice)
Fig. 8. Frequency response on standard type in ERTMS/ETCS system

레일 사이에 있는 철근에 최대로 유도되는 주파수는 402Hz로 해석되었고, 레일 외부에 있는 철근에 최대로 유

도되는 주파수는 337Hz로 해석되었다.

레일 사이에 있는 철근에 최대로 유도되는 주파수는 377Hz로 해석되었고, 레일 외부에 있는 철근에 최대로 유도되는 주파수는 321Hz로 해석되었다.

4.2.3 지상자 임피던스

ERTMS/ETCS장치의 지상자 송, 수신주파수에 대한 임피던스는 식 (24)에 전기적 특성 데이터 값을 적용하면 Table 11이다.

Table 11. Impedance on wayside transmitter in ERTMS/ETCS system

구분	주파수 (MHz)	저항(mΩ)	자기인덕턴스 (nH)	임피던스
축소형 지상자	-	0.1868	536.76	0.186 (mΩ)
	송신	3.9	0.2352	529.13
		4.5	0.2355	529.12
	수신	27	0.2436	89.7597 (Ω)
표준형 지상자	-	0.2984	957.41	0.298 (mΩ)
	송신	3.9	0.4753	943.94
		4.5	0.4755	943.93
	수신	27	0.4829	160.127 (Ω)

5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 슬래브궤도에서 ATP장치의 지상자와 철근 사이의 전기적 모델에 의해 철근에 유도되는 전류의 크기는 지상자의 송, 수신주파수에 영향을 받는 것을 입증하였다. 또한 UM71 궤도회로를 기준으로 KVB과 ERTMS/ETCS장치의 지상자 송, 수신주파수 별로 철근에 유도된 전류와 철근에 최대유도전류가 발생하는 주파수를 계산하였고, 주파수별로 지상자의 저항 및 자기인덕턴스를 계산하였다.

KVB장치의 지상자가 ERTMS/ETCS장치의 지상자 보다 철근에 유도되는 전류의 세기가 높다. 철근에 최대유도전류가 발생하는 주파수는 KVB장치와 ERTMS/ETCS장치 모두 낮게 해석되어서 큰 문제는 없다. 그러나 ATP장치의 주파수에 대한 저항 및 자기인덕턴스 변화는 KVB장치의 지상자가 ERTMS/ETCS장치의 지상자보다 변화율이 크게 해석되었다. 임피던스의 크기가 가장 큰 지상자는 지상자의 자기인덕턴스가 가장 높은 ERTMS/ETCS장치의 표준형 지상자이고, 2가지 종류인 ATP장치의 지상자 모두 임피던스가 증가해 신호 전류의 세기가 작아지고, 자기인덕턴스의 변화로 인해 공진주파수에 문제가 발생되는 것으로 해석되었다.

이에 대한 대책으로 철근을 횡, 종방향 모두 절연시켜야 한다. 철근의 전기적인 루프를 제거함으로써 철근에 유도전류가 발생하지 않는다. 또한 ATP장치의 지상자와 철근 사이의 상호인력탄스도 존재하지 않으므로 저항 및 자기인력탄스의 변화도 없다. 이에 일환으로 프랑스에서도 신호시스템들과 철근 사이의 영향을 줄이기 위해 궤도환경에 맞게 철근을 전기적 절연을 시키고, 철근의 절단 작업을 시행함으로써 철근에 유도전류를 발생시키지 않는다.

본 논문은 향후 호남고속철도 및 일반철도 콘크리트 슬래브궤도에서 ATP장치를 부설시 지상자의 주파수와 철근 사이의 상호유도관계를 계산하여 선정할 경우에 활용될 수 있다. 지상자 송, 수신주파수에 의해 철근에 유도되는 전류의 크기 및 철근에 최대로 유도되는 주파수를 계산하고, 지상자의 임피던스 변화를 계산하여 신호전류의 세기에 영향과 공진주파수에 미치는 정도를 해석한다. 해석결과 신호전류의 세기와 공진주파수에 영향이 있으면 철근을 전기적 절연시킨다.

참 고 문 헌

1. 박재영 (2006). “철도신호공학”, 동일출판사, pp. 12-40.
2. Alain Gros (2003). “Hardware Architecture Guide Book:UM71”, CSEE.
3. 장석각, 이창영, 권성태 (2007). “무절연 가칭주파수(AF) 궤도 회로 시험기준 고찰”, 한국철도학회 춘계학술발표대회논문집, 한국철도학회, pp. 52-57.
4. Min-Seok Kim (2007). “A Study on Resonance Frequency Between Rail and Reinforcing Bar in Slab Tracks”, ICEMS, Seoul, October.
5. 엄정규, 이왕희, 조용기, 유광균 (2004). “한국 고속 전철 궤도 회로의 수학적 모델링”, 한국철도학회 춘계학술발표대회논문집, 한국철도학회, pp. 7-13.
6. 한국철도기술연구원 (2007). “콘크리트궤도에서의 적정 신호장치 및 전침보호장비 설치방안 도출연구”, 궤도토목연구팀, pp. 82-90.
7. David K. Cheng (2002). “Fundamentals of engineering electromagnetics”, Pearson Education, pp. 174-178, pp. 292-294, pp. 231-241.
8. R. Feynman (2004). “Lecture on Physics”, 승산, Vol. 2, pp. 17:12 -17:14.
9. Jun-Seog Ko (2007). “A Study of Rail Impedance Calculation on the Slab Track”, ICEE, Hong-Kong, July.
10. R. Feynman (2004). “Lecture on Physics”, 승산, Vol. 1, pp. 23:1-23:9.
11. W. H. Hayt (2002). “Engineering Circuit Analysis”, McGraw-Hill, Sixth Edition, pp. 433-435.