

콘크리트 슬래브궤도에서  
보상 커패시터의 위치 및 전기용량에 대한 연구  
A Study on the Location of Compensation Capacitor  
and Capacitance in the Concrete Slab Track

김민석†      이상혁\*      고준석\*\*      이종우\*\*\*      조수익\*\*\*\*      유진영\*\*\*\*\*  
Kim, Min-Seok    Lee, Sang-Hyeok    Ko, Jun-Seog    Lee, Jong-Woo    JO, Su-Ik    Yu, Jin-Young

ABSTRACT

Impedance of rails is increased by the magnetic coupling between rails and reinforcing bars in the concrete slab track. Currently, the current of track circuit has been compensated by installing the compensation capacitors on track circuit because of increasing the impedance of rails. In case of a rapid transit railway, the compensation capacitors are installed every 20[m] to compensate the current of track circuit in the concrete slab track. Because the interval of one block for a rapid transit railway is as long as 1500[m], the compensation capacitors are installed about the number of 70~75 on track circuit. However, in case the compensation capacitors are broken over the number of three, it is a problem that the amplitude of current is under standard amplitude of current which is 0.8[A].

In this paper, it was suggested installing a compensation capacitor by using resonance phenomenon on the concrete slab track. We represent the electrical model of track circuit and the four terminal network, calculate the parameters demanded for the electrical model in the concrete slab track. Also, we computed the position and capacitance of the compensation capacitor about 2040[Hz], 2400[Hz], 2760[Hz], 3120[Hz] which currently is the track circuit frequency in the Gyeongbu rapid transit railway and demonstrated the validity of it, using the Matlab and PSpice program.

key words : concrete slab track(콘크리트 슬래브궤도), compensation capacitor(보상 커패시터), track circuit (궤도회로), resonance(공진)

1. 서 론

철도차량의 최고속도는 곡선통과속도, 분기기 통과속도, 가감속도에 의해 결정되며, 이것은 차량, 선로, 전력, 신호 등 철도 시스템의 각 요소가 복잡하게 연관되어 있다. 속도향상에서 중요한 요소 중의 하나가 차량과 선로 관계에 의해 결정되는 주행안전성이다. 차량의 특성으로서 어떤 속도에 이르면 갑자기 좌우방향으로 사행동(자려진동)을 일으킨다. 사행동현상은 승차감 악화뿐만 아니라 궤도의 파손원인이 되고 탈선으로 연결된 위험성이 있다.

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

\* 비회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 석사과정

\*\* 비회원, 한국철도시설공단, KR연구원, 차장

\*\*\* 교신저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수

\*\*\*\* 비회원, 한국철도시설공단, KR연구원 신기술개발처, 시설연구팀장

\*\*\*\*\* 비회원, 한국철도시설공단, KR연구원 신기술개발처, 시설연구팀

열차의 속도가 증가되면 부가 윤증이 크게 되어 궤도에 미치는 영향이 커진다. 콘크리트 슬래브궤도는 속도향상을 위한 궤도강화 방법 중 하나이다. 이에 콘크리트 슬래브궤도가 많이 개발되고 있다.

콘크리트 슬래브궤도에서 열차검지를 하기 위해서 궤도회로를 이용한다. 열차는 궤도회로를 통해서 앞 열차와의 거리나 구간별 제한속도 등의 정보를 연속적으로 수신한다. 최근 콘크리트 슬래브궤도회로에서 궤도회로 최소 전류기준치인 0.8[A] 이상이 검지되지 않고 있다. 이에 한국철도공사에서 분석한 결과 보상커패시터의 고장에 의한 것으로 분석하였다. [그림 1]은 보상커패시터에 고장발생시 현장에서 전류측정값을 그래프로 나타낸 것이다.(1)

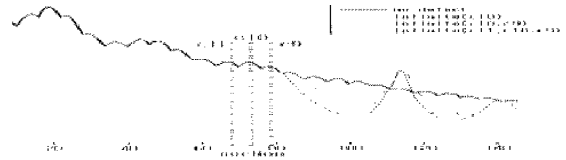


그림 1. 보상커패시터의 고장시 전류 측정

본 논문에서는 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도회로 주파수에 따라 공진현상을 이용하여 보상 커패시터를 하나만 설치하는 방법을 제시하였다. 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도회로의 전기적 모델과 4단자망을 이용한 모델을 제시하였고, 모델에 요구되는 값들을 수리적으로 계산하였다. 또한 모델로부터 현재 경부 고속철도 궤도회로 주파수인 2040[Hz], 2400[Hz], 2760[Hz], 3120[Hz]에 대해 보상 커패시터의 위치 및 전기용량을 계산하였고, 이를 Matlab 및 PSpice 프로그램으로 타당성을 입증하였다.

## 2. 콘크리트 슬래브궤도회로 모델

### 2.1 전기적 모델

레일과 철근사이의 전기적 모델은 레일의 임피던스 변화 측정 시험을 결과로부터 제시하였다. 콘크리트 슬래브 궤도에서 철근을 절연시키지 않은 상태에서 주파수에 따른 레일의 저항과 자기인덕턴스는 다음 [표 1]과 같다.(2)

표 1. 궤도회로 주파수에 의한 레일 임피던스 (실측치)

주파수 [Hz]	저항 [mΩ/m]	인덕턴스 [μH/m]
2040	2.012	1.239
2400	2.285	1.224
2760	2.550	1.212
3120	2.810	1.201

주파수에 따라서 레일의 저항과 자기인덕턴스가 변하였다. 레일의 저항과 자기인덕턴스가 주파수에 따라서 변하는 것은 철근에 의한 전자유도로 인해서 레일의 임피던스가 증가하였다는 것이다.

즉, 이 현상을 전기적 모델로 변환하는 방법으로는 변압기의 모델을 사용할 수 있다. 철근은 렌츠의 법칙에 의해서 레일에 의해서 철근에 유도되는 전류방향에 따라 3부분으로 나눌 수 있다.(3) 이를 이용하여 [그림 2]에서 레일과 철근간의 전기적 모델을 나타내었다.

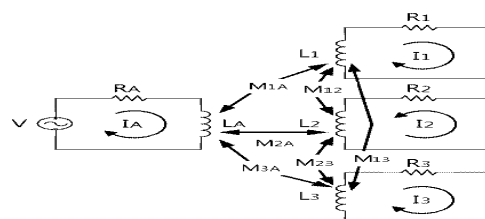


그림 2. 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근 사이의 전기적 모델

RA는 레일의 저항을 의미하고 LA는 레일의 자기인덕턴스를 의미한다. R1, R3은 레일 외부에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L1, L3은 레일 외부에 위치한 철근의 자기인덕턴스를 의미한다. R2는 레일 사이에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L2는 레일 사이에 위치한 철근의 자기인덕턴스를 의미한다. M1A, M3A는 레일 외부에 위치한 철근과 레일의 상호인덕턴스를 의미하고, M2A는 레일 사이에 위치한 철근과 레일의 상호인덕턴스를 의미한다. M12와 M23는 레일 외부에 위치한 철근과 레일 사이에 위치한 철근사이의 상호인덕턴스를 의미하고, M13는 레일 외부에 위치한 철근 사이의 상호인덕턴스를 의미한다.

[그림 3]는 콘크리트 슬래브궤도회로에서 보상커패시터를 1개 설치함에 따른 궤도회로 모델을 나타낸다.

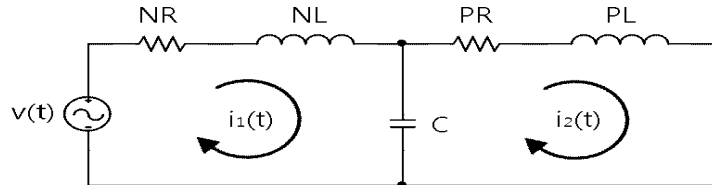


그림 3. 보상커패시터 1개를 설치한 콘크리트 슬래브궤도회로 모델

v(t)는 콘크리트 슬래브궤도회로의 전원을 의미하고, N은 궤도회로의 전압과 보상커패시터 사이의 거리를 의미한다. M은 보상커패시터와 궤도회로 끝단까지의 거리를 의미하고 C는 보상커패시터를 의미한다. R과 L은 콘크리트 슬래브궤도에서 철근의 영향을 고려한 레일의 저항 및 자기인덕턴스를 의미한다. i1(t)는 궤도회로 전원으로부터 보상커패시터까지의 루프에 흐르는 전류를 의미하고, i2(t)는 보상커패시터로부터 궤도회로 끝단까지의 루프에 흐르는 전류를 의미한다.

### 2.1.1 레일의 저항 및 자기인덕턴스

콘크리트 슬래브궤도에서 [그림 2]에서의 철근에 영향을 계산한 레일의 저항 및 자기인덕턴스는 다음의 식(1)과 식(2)으로 정의된다.(4)

$$R = R_A + 2 \frac{w^2 M_{1A}^2 R_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} + \frac{w^2 M_{2A}^2 R_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \quad (1)$$

$$L = L_A - 2 \frac{w^2 M_{1A}^2 L_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} - \frac{w^2 M_{2A}^2 L_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \quad (2)$$

$\omega$ 는 각주파수를 의미한다. [표 1]에서와 마찬가지로 궤도회로 주파수에 대해 저항은 증가하고 자기인덕턴스는 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.1.2 궤도회로 전원으로부터 보상커패시터를 통과한 열차의 위치까지 거리

보상커패시터를 통과한 열차의 위치까지 거리 값인 N은 열차의 위치에 따라 변한다. N의 최대값은 보상커패시터의 설치 위치에 관련되기 때문에 중요하다. N의 최대값은 열차가 보상커패시터를 지난 후에 i1(t)의 크기가 0.8[A]이 되는 지점이다. 0.8[A]는 궤도회로 전류기준치이기 때문이다. 즉, 보상커패시터를 통과 후에 열차가 수신하는 전류는 i1(t)이다. 그러므로 [그림 3]에서 보상커패시터를 제외하고 i1(t)에 대해서 키르히호프 전압법칙을 적용하면 (3)이다.(5)

$$v(t) = NRi_1(t) + NL \frac{di_1(t)}{dt} \quad (3)$$

식(3)의 미분방정식을 풀기 위해 v(t)와 i1(t)을 식(4)과 식(5)로 표현한다.(6)

$$v(t) = |V| e^{j(\omega t + \phi_v)} = \hat{V} e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$i_1(t) = |I_1| e^{j(\omega t + \phi_i)} = \hat{I}_1 e^{j\omega t} \quad (5)$$

$\phi$ 는 위상을 의미하고, 식(4)과 식(5)를 이용하여 식(3)에 대입하여 정리하면 식(6)이다.

$$\hat{V} = (NR + (j\omega NL)) \hat{I}_1 \quad (6)$$

식(6)을  $\hat{i}_1$ 에 대해 정리하고, 크기에 대한 식으로 변환하면 식(7)과 같다.

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{(NR)^2 + (\omega NL)^2}} V \quad (7)$$

식(7)에서  $\hat{V}$ 의 크기 즉, 궤도회로의 전압은 5[V]이고,  $\hat{i}_1$ 의 크기가 궤도회로 전류 기준치인 0.8[A]이 되기 위한 N값을 구하기 위해 식(7)의 분모의 크기를 구하여 풀면 식(8)이다.

$$I_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{1}{R^2 + L^2 \omega^2}} = 0.16 \quad (8)$$

식(8)은 N의 최대값을 나타낸다. 식(8)에 열차의 위치 조건을 대입하여 N에 대해 정리하면 식(9)이다.

$$N = \frac{1}{0.16} \sqrt{\frac{1}{R^2 + L^2 \omega^2}} \quad (K > N) \quad (9)$$

$$= K \quad (K \leq N)$$

K는 열차의 위치를 의미한다. 열차의 위치는 열차가 궤도회로를 진행함에 따라 계속 변한다. 또한 궤도회로가 열차에 의해서 페루프가 형성되므로 열차가 N보다 작은 구간에 위치하게 되면 N은 열차의 위치가 된다.

### 2.1.3 보상커패시터로부터 열차의 위치까지의 거리

열차의 위치조건을 고려하여 보상커패시터로부터 열차의 위치까지 거리는 식(10)이다.

$$P = K - N \quad (K > N) \quad (10)$$

$$= 0 \quad (K \leq N)$$

궤도회로가 열차에 의해서 페루프가 형성되므로 M의 값은 열차의 위치에 따라 변경된다. M의 최대 값은  $K=1500$ [m], 즉 열차가 궤도회로 끝단에 있는 경우이다. 고속철도의 경우 하나의 주파수에 대한 궤도회로 길이가 1500[m]이기 때문이다. 그러므로 열차가 N보다 같거나 작은 구간에 위치하면 P는 0이다.

## 2.2 4단자망 모델

[그림 3]을 이용하여 4단자망 모델을 나타내면 [그림 4]이다.(7)

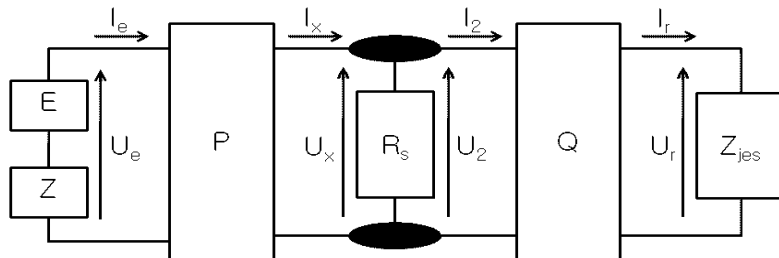


그림 4. 궤도회로 4단자망 모델

[그림 4]에서 4단자망을 이용한 입력과 출력과의 관계를 나타내면 식(11)이다.

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = [R_S] \begin{bmatrix} U_x \\ I_x \end{bmatrix} = [R_S][P] \begin{bmatrix} U_e \\ I_e \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R_s} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

[그림 4]에서 P와 Q의 4단자 정수 값은 열차의 위치가 보상커패시터를 통과한 후와 통과하기 전에 따라 달라진다.

$$[P] = \begin{cases} \begin{bmatrix} \cosh(\theta L) & Z_c \sinh(\theta L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\theta L) & \cosh(\theta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C1 \end{bmatrix}, & (K \geq S) \\ \begin{bmatrix} \cosh(\theta L) & Z_c \sinh(\theta L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\theta L) & \cosh(\theta L) \end{bmatrix}, & (K < S) \end{cases} \quad (13)$$

$$[Q] = \begin{cases} \begin{bmatrix} \cosh(\theta L) & Z_c \sinh(\theta L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\theta L) & \cosh(\theta L) \end{bmatrix}, & (K \geq S) \\ \begin{bmatrix} \cosh(\theta L) & Z_c \sinh(\theta L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\theta L) & \cosh(\theta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C1 \end{bmatrix}, & (K < S) \end{cases} \quad (14)$$

$$Z_c = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)} \quad (15)$$

$$\theta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (16)$$

S는 궤도회로 전원부로부터 보상커패시터 위치까지의 거리를 의미한다.

### 3. 보상커패시터의 위치 및 전기용량 계산

#### 3.1 보상커패시터의 위치

보상커패시터의 위치는 콘크리트 슬래브궤도회로의 전원부를 기준으로 한다. 궤도회로의 전원부로부터 보상커패시터 위치까지의 거리는 궤도회로에 보상커패시터 없이 최대로 궤도회로 허용전류치인 0.8[A]를 보낼 수 있도록 거리를 확보해야 함으로써 식(9)에서 ( $K > N$ )인 경우 N으로 계산한다. 식(17)은 보상커패시터의 위치를 정의한다.(8)

$$S = \frac{1}{0.16} \sqrt{\frac{1}{R^2 + L^2 \omega^2}} \quad (17)$$

#### 3.2 보상커패시터의 전기용량

보상커패시터의 전기용량은 열차가 궤도회로의 전원부로부터 가장 멀리 있는 경우에 레일의 임피던스의 크기가 가장 높아 [그림 3]에서 열차가 궤도회로 마지막 단에 있는 경우에서 공진현상을 이용하여 계산한다. 보상커패시터를 통과하기 전에 열차가 수신하는 전류는  $\hat{i}_2$ 이므로 N의 최대값과 P의 최대값을 이용한다. [그림 3]에서 키르히호프 전압법칙을 적용하면 식(18), 식(19)이다.(9)

$$v(t) = NRi_1(t) + NL \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1(t) dt - \frac{1}{C} \int i_2(t) dt \quad (18)$$

$$0 = PRi_2(t) + PL \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2(t) dt - \frac{1}{C} \int i_1(t) dt \quad (19)$$

식(18)과 식(19)의 미분방정식을 풀기 위해서 양변을 미분하고 연립한다. 연립한 방정식에서 차수를 줄이고,  $i_2(t)$ 에 대한 방정식으로 표현하면 식(20)이다.

$$v(t) = CNPL^2 \frac{d^3 i_2(t)}{dt^3} + 2CNPLR \frac{d^2 i_2(t)}{dt^2} + (L(N+P) + CNPR^2) \frac{di_2(t)}{dt} + R(N+P)i_2(t) \quad (20)$$

식(20)을 치환변수를 이용하여 정리하면 식(21)이고, 치환변수는 식(22)~식(25)이다.

$$v(t) = A \frac{d^3 i_2(t)}{dt^3} + B \frac{d^2 i_2(t)}{dt^2} + D \frac{di_2(t)}{dt} + E i_2(t) \quad (21)$$

$$A = CNPL^2 \quad (22)$$

$$B = 2CNPLR \quad (23)$$

$$D = (L(N+P) + CNPR^2) \quad (24)$$

$$E = R(N + P) \quad (25)$$

식(17)의 미분방정식을 풀기 위해  $i_2(t)$ 를 식(26)으로 변환한다.

$$i_2(t) = |I_2| e^{j(\omega t + \phi_i)} = \hat{I}_2 e^{j\omega t} \quad (26)$$

식(26)을 식(21)에 대입하여  $\hat{i}_2$ 에 대해서 정리하면 식(27)이다.

$$\hat{i}_2 = \frac{1}{(-j\omega^3 A - \omega^2 B + j\omega D + E)} \hat{v} \quad (27)$$

식(27)에서 공진현상을 이용하여  $\hat{i}_2$ 의 크기를 최대로 하는 주파수를 궤도회로 주파수로 적용하기 위한 보상커패시터의 전기용량을 계산한다.  $\hat{i}_2$ 에 대한 크기를 나타내면 식(28)이다.(10)

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{(-\omega^2 B + E)^2 + (-\omega^3 A + \omega D)^2}} V \quad (28)$$

식(28)에서 분모항은 각주파수에 대한 6차 방정식이다. 6차 방정식을 미분하여 0이 되는 주파수가 공진주파수이다. 식(28)을 미분하면 식(29)이다.

$$0 = 3A^2\omega^5 + 2(B^2 - 2AD)\omega^3 + (D^2 - 2BE)\omega \quad (29)$$

식(22)~식(25)을 식(29)에 대입하고, 보상커패시터의 전기용량에 대해 정리하면 식(30)이고, 각 치환 상수 값은 식(31)~식(33)이다.

$$0 = FC^2 + GC + H \quad (30)$$

$$F = (3N^2P^2L^4\omega^5 + 8N^2P^2L^2R^2\omega^3 - 4N^2P^2L^2R^2\omega^3 + N^2P^2R^4\omega) \quad (31)$$

$$G = (-4N^2PL^3\omega^3 - 4NP^2L^3\omega^3 + 2N^2PR^2L\omega + 2NP^2R^2L\omega - 4N^2PLR^2\omega - 4NP^2LR^2\omega) \quad (32)$$

$$H = (L^2N^2\omega + 2L^2NP\omega + L^2P^2\omega) \quad (33)$$

각주파수는 궤도회로 주파수별로 정해진다. 즉, 궤도회로 주파수를 공진주파수로 하기 위한 보상커패시터의 전기용량을 결정한다. 보상커패시터의 전기용량은 2차 방정식형태로 계산된다. 그러므로 보상커패시터의 전기용량은 2개의 값이 존재하는데 둘 중 큰 값은 공진주파수에서 최대 전류가 흐르고, 작은 값은 공진주파수에서 최소 전류가 흐르게 된다. 그러므로 2개의 값 중에 큰 값을 적용하면 식(34)이다.

$$C = \frac{-G + \sqrt{G^2 - 4FH}}{2F} \quad (34)$$

#### 4. 시뮬레이션

궤도회로 주파수인 2040[Hz], 2400[Hz], 2760[Hz], 3120[Hz]에 따라 보상커패시터의 전기용량을 각각 수리적으로 계산하여 해석하였다. 콘크리트 슬래브궤도에서 철근의 형태는 경부고속철도 2단계 시험선 형태로 하였다.(11) 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도의 전기적 특성 값인 레일의 저항 및 자기인덕턴스 값은 수리적인 계산과 현장측정값을 비교하여 입증하였다. 레일의 저항 및 자기인덕턴스 계산에 필요한 철근의 저항 및 자기인덕턴스, 레일과 철근사이의 상호인덕턴스 값은 Maxwell 프로그램을 이용하였다. 열차가 궤도를 따라 연속적으로 이동하기 때문에 열차의 위치가 계속적으로 변한다. 열차가 콘크리트 슬래브궤도회로의 전원부에 가까울수록 궤도회로 전류의 크기가 크기 때문에 열차의 위치조건은 3가지 조건으로 수행하였다. 열차의 위치가 1500[m], 700[m], 200[m]인 경우 모두 전류의 크기가 궤도회로 허용 기준치인 0.8[A]이상 되는 것을 Matlab 및 PSpice 프로그램을 이용하여 입증하였다.(12)(13) 열차에 의해 궤도회로에 페루프가 형성되므로 보상커패시터의 위치보다 열차가 궤도회로의 전원부로부터 멀리 있으면 I2에 영향을 받고, 보상커패시터의 위치보다 열차가 가까이 있으면 I1에 영향을 받기 때문에 시뮬레이션도 조건에 맞게 수행하였다. 궤도회로 전압은 5[V]로 계산하였다. 또한 4단자망을 이용하여 궤도회로 주파수 별로 열차가 0[m]~1500[m]까지의 전류의 크기를 해석하였다.

#### 4.1 콘크리트 슬래브케도의 전기적 특성

콘크리트 슬래브케도에서 전기적 특성인 레일의 저항 및 자기인덕턴스를 계산하는데 필요한 전기적 특성 값을 Maxwell 프로그램을 이용하여 계산하였다.

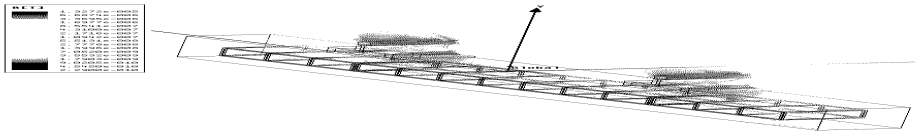


그림 5. 시험선에 적용하였던 철근의 형태에서 상호유도

Resistance Units: [ohm] Inductive coupling coeff: [ ] Export Solution: [ ]  
 Inductance Units: [H] Type: [R/L]

	Current3	Current4	Current5	Current1	Current2
Current3	0.00015332, 2.3506E-007	5.2366E-020, -5.7929E-008	1.9937E-020, 3.9123E-009	2.3495E-022, -1.1859E-008	1.0159E-020, -1.4619E-008
Current4	5.2366E-020, -5.7929E-008	0.00015332, 2.3506E-007	-9.6086E-020, -1.5133E-008	1.5775E-020, -1.7729E-008	-9.982E-020, 3.4239E-009
Current5	1.9937E-020, 3.9123E-009	-9.6086E-020, -1.5133E-008	0.00043098, 2.9392E-008	8.586E-021, 2.2236E-009	-8.0806E-022, -1.7567E-010
Current1	2.3495E-022, -1.3859E-008	1.5775E-020, -1.7729E-008	8.586E-021, 2.2236E-009	0.00039911, 2.1051E-008	-8.2972E-021, 2.2477E-009
Current2	1.0159E-020, -1.4619E-008	-9.982E-020, 3.4239E-009	-9.0806E-022, -1.7567E-010	-8.2972E-021, 2.2477E-009	0.00043396, 2.9455E-008

그림 6. 시험선에 적용하였던 철근의 형태에서 시뮬레이션 결과

표 2. 시험선에 적용하였던 철근의 형태에서 전기적 특성

구분	전기적 특성값
레일의 저항( $R_A$ )	$3.0664 \times 10^{-4} [\Omega]$
레일의 자기인덕턴스( $L_A$ )	$3.6200 \times 10^{-7} [H]$
철근의 저항( $R_1 = R_3$ )	$0.00043098 [\Omega]$
철근의 저항( $R_2$ )	$0.00039911 [\Omega]$
철근의 자기인덕턴스( $L_1 = L_3$ )	$2.9392 \times 10^{-8} [H]$
철근의 자기인덕턴스( $L_2$ )	$2.1051 \times 10^{-8} [H]$
레일과 철근간의 상호인덕턴스( $M_{1A} = M_{3A}$ )	$-1.1221 \times 10^{-8} [H]$
레일과 철근간의 상호인덕턴스( $M_{2A}$ )	$-3.1588 \times 10^{-8} [H]$
철근간의 상호인덕턴스( $M_{21} = M_{23}$ )	$2.2236 \times 10^{-9} [H]$
철근간의 상호인덕턴스( $M_{31}$ )	$-1.7560 \times 10^{-10} [H]$

[표 2]의 전기적 특성은 레일의 길이를 0.3[m]기준으로 계산하였기 때문에 실측치와의 비교를 위해 1[m]기준으로 변환하여 식(1)과 식(2)에 적용하여 계산하면 [표 3]이고, 실제측정 데이터인 [표 1]과 비교하였을 시, 오차가 7[%]이내로 해석되었다.(14)

표 3. 궤도회로 주파수에 의한 레일 임피던스 (시뮬레이션 결과)

주파수 [Hz]	저항 [mΩ/m]	인덕턴스 [ $\mu$ H/m]
2040	2.143	1.258
2400	2.397	1.244
2760	2.630	1.231
3120	2.838	1.220

#### 4.2 보상커패시터의 위치 및 전기용량

[표 1]과 [표 2]의 값을 사용하여 식(11)과 식(28)에 대입하여 보상커패시터의 위치 및 전기용량을 계산하면 [표 4]이다.

표 4. 궤도회로 주파수에 따른 보상커패시터의 위치 및 전기용량

주파수 [Hz]	위치 [m]	전기용량 [ $\mu\text{F}$ ]
2040	390.4280	16.7412
2400	336.0506	13.5701
2760	295.1993	11.4033
3120	263.5913	9.8320

### 4.3 궤도회로 전류

[표 1]과 [표 2]의 값을 사용하여 식(7)과 식(28)에 대입하여 궤도회로 주파수별로 열차가 1500[m], 700[m], 200[m]에 위치할 경우 궤도회로 전류를 계산하였다. 열차가 궤도회로 마지막 단인 1500 [m]에 위치한 경우에 공진현상이 발생함과 700[m], 200[m]에 위치한 경우 전류기준치인 0.8[A]이상 궤도회로에 전류가 흐르는 것을 입증하기 위해 Matlab 프로그램을 사용해 주파수응답곡선으로 나타내었다. 이를 PSpice 프로그램과 비교하여 5[%]의 오차 이내로 궤도회로 전류값을 입증하였다. 또한 4단자망을 이용한 모델에서도 궤도회로 전류의 크기가 0.8[A]이상으로 입증하였다.

#### 4.3.1 전기적 모델에 의한 계산

##### 4.3.1.1 열차가 1500[m]에 위치한 경우

식(28)을 이용하여 궤도회로 주파수별로 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 7]~[그림 10]이다. [표 1]과 [표 4]의 값을 이용하여 PSpice프로그램을 사용하여 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 11]~[그림 14]이다.

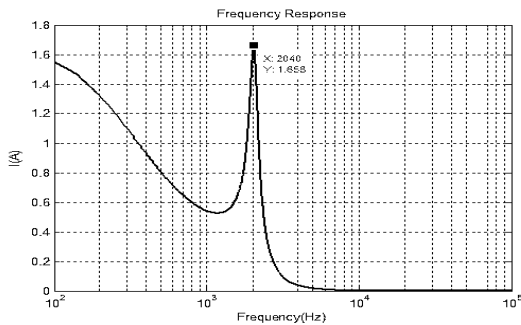


그림 7. f=2040인 경우 주파수 응답(Matlab)

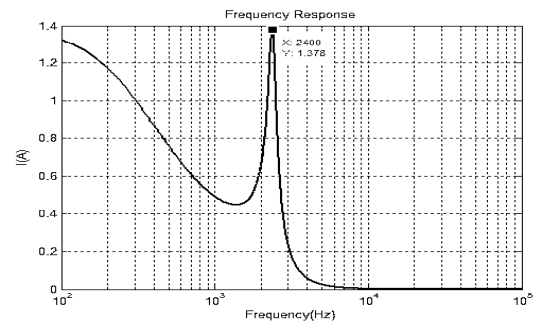


그림 8. f=2400인 경우 주파수 응답(Matlab)

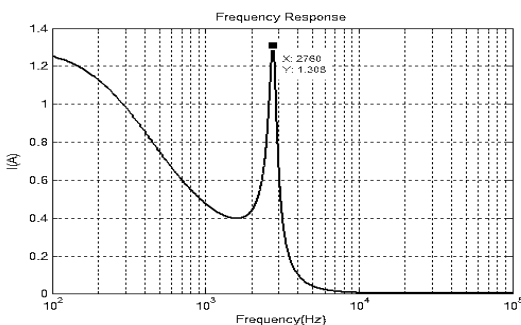


그림 9. f=2760인 경우 주파수 응답(Matlab)

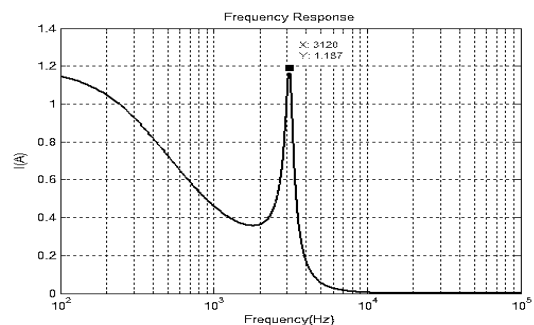


그림 10. f=3120인 경우 주파수 응답(Matlab)



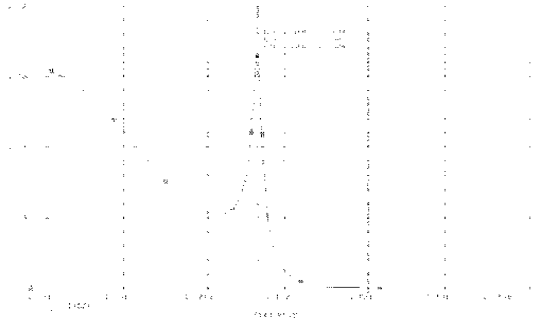


그림 11.  $f=2040$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

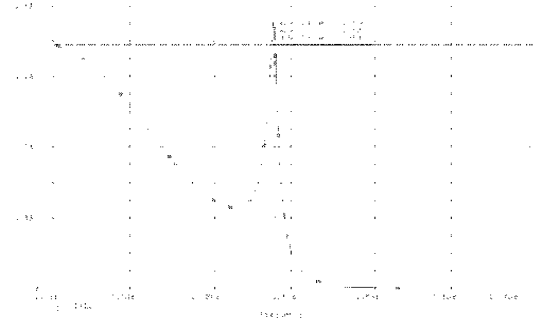


그림 12.  $f=2400$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

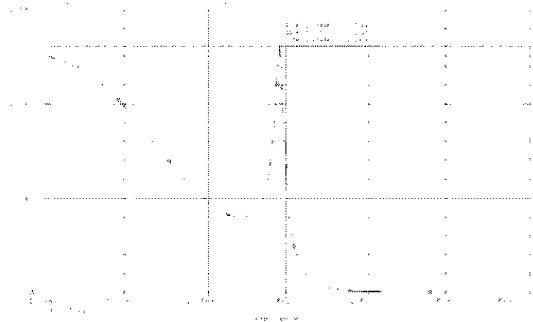


그림 13.  $f=2040$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

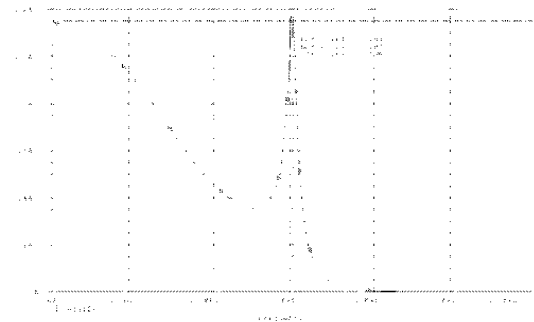


그림 14.  $f=2400$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

표 5. 열차가 1500[m]에 있는 경우 궤도회로전류

주파수 [Hz]	궤도회로전류 [A] (Matlab)	I궤도회로전류 [A] (PSpice)
2040	1.6567	1.6566
2400	1.3780	1.3789
2760	1.3071	1.3064
3120	1.1862	1.1646

#### 4.3.1.2 열차가 700[m]에 위치한 경우

식(28)을 이용하여 궤도회로 주파수별로 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 15]~[그림 18]이다. [표 1]과 [표 4]의 값을 이용하여 PSpice프로그램을 사용하여 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 19]~[그림 22]이다.

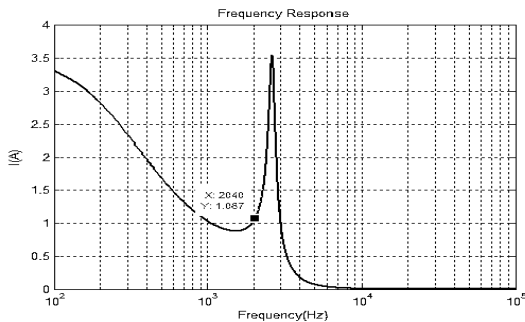


그림 15.  $f=2040$ 인 경우 주파수 응답(Matlab)

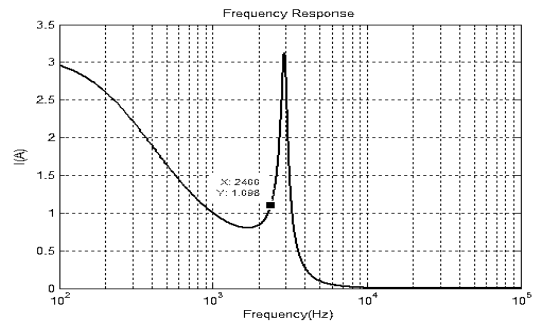


그림 16.  $f=2400$ 인 경우 주파수 응답(Matlab)

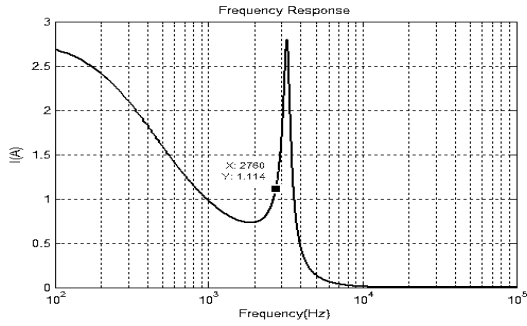


그림 17.  $f=2760$ 인 경우 주파수 응답(Matlab)

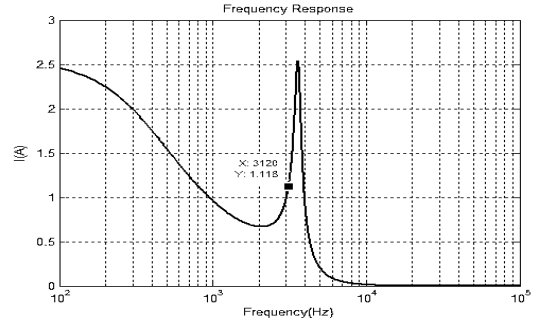


그림 18.  $f=3120$ 인 경우 주파수 응답(Matlab)

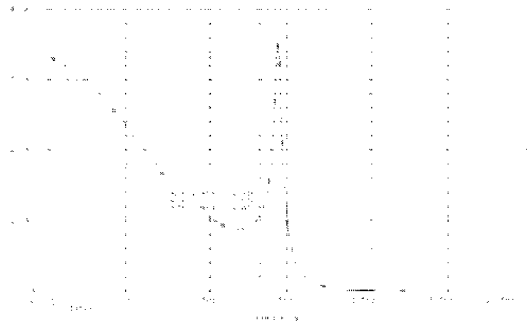


그림 19.  $f=2040$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

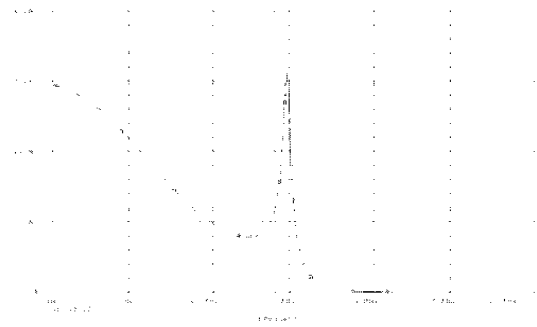


그림 20.  $f=2400$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

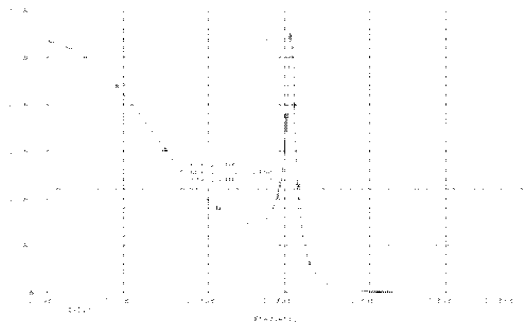


그림 21.  $f=2040$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

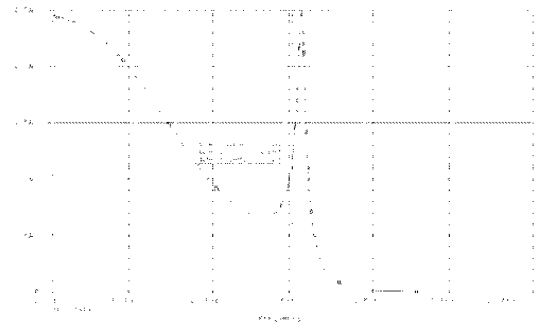


그림 22.  $f=2400$ 인 경우 주파수 응답(PSpice)

표 6. 열차가 700[m]에 있는 경우 궤도회로전류

주파수 [Hz]	궤도회로전류 [A] (Matlab)	I궤도회로전류 [A] (PSpice)
2040	1.0668	1.0684
2400	1.0980	1.1065
2760	1.1135	1.1157
3120	1.1182	1.1290

#### 4.3.1.3 열차가 200[m]에 위치한 경우

식(7)을 이용하여 궤도회로 주파수별로 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 23]~[그림 26]이다. [표 1]과 [표 4]의 값을 이용하여 PSpice프로그램을 사용하여 주파수응답을 계산한 결과는 [그림 27]~[그림 30]이다.

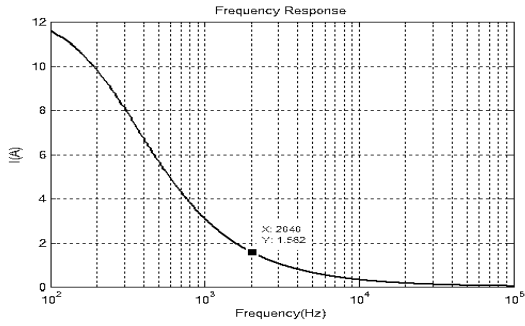


그림 23. f=2040인 경우 주파수 응답(Matlab)

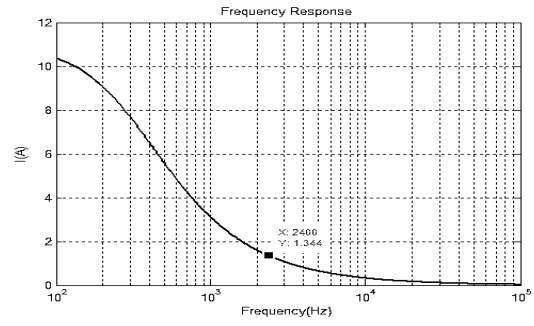


그림 24. f=2400인 경우 주파수 응답(Matlab)

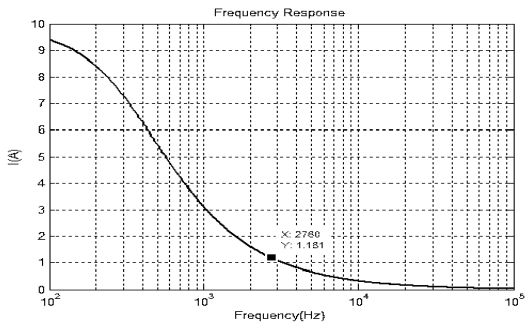


그림 25. f=2760인 경우 주파수 응답(Matlab)

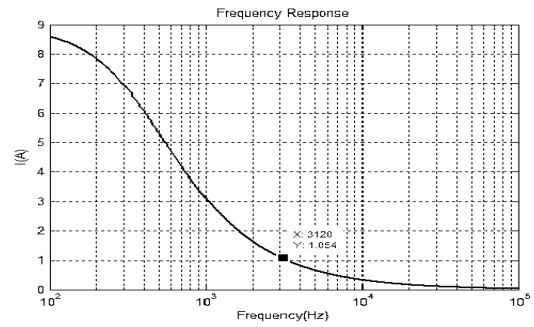


그림 26. f=3120인 경우 주파수 응답(Matlab)

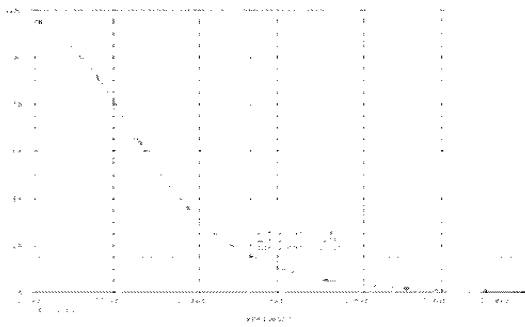


그림 27. f=2040인 경우 주파수 응답(PSpice)

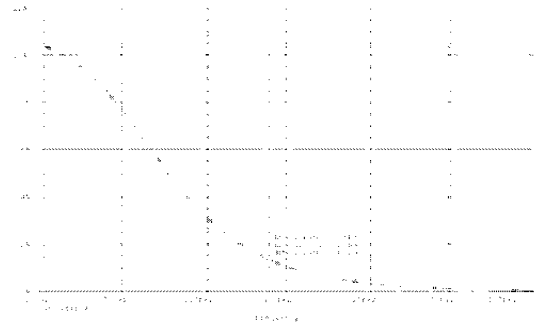


그림 28. f=2400인 경우 주파수 응답(PSpice)

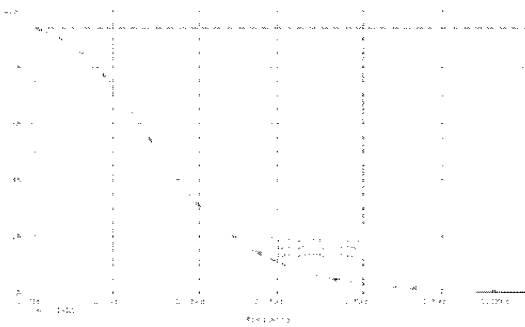


그림 29. f=2040인 경우 주파수 응답(PSpice)

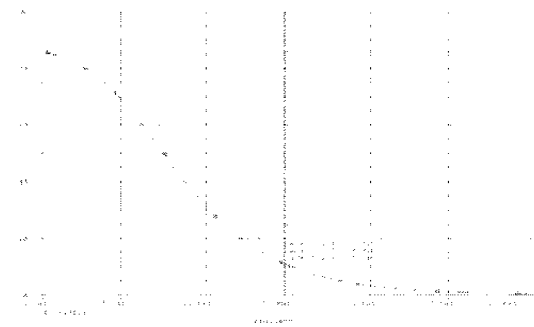


그림 30. f=2400인 경우 주파수 응답(PSpice)

표 7. 열차가 200[m]에 있는 경우 궤도회로전류

주파수 [Hz]	궤도회로전류 [A] (Matlab)	I궤도회로전류 [A] (PSpice)
2040	1.5617	1.5630
2400	1.3442	1.3405
2760	1.1808	1.1832
3120	1.0543	1.0528

### 4.3.2 4단자망에 의한 계산

식(11)을 사용하여 궤도회로 주파수별로 [표 1]과 [표 4]를 적용하여 열차가 0~1500[m]까지 움직이는 동안 궤도회로 전류의 크기를 해석하면 [그림 31]이다. 궤도회로 절연저항은 무한대로 고려하고, C값은 측정값인 0.28[nF]으로 하였다. 열차의 단락 저항은 0[Ω]으로 해석하고, 궤도회로 전원측 저항은 1[Ω]으로 전기적 절연 구간의 저항은 2[Ω]으로 하였다.

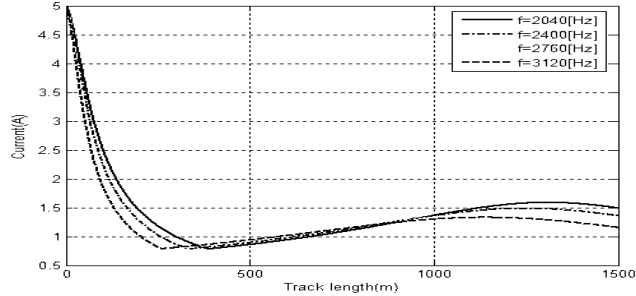


그림 31. 4단자 망을 이용한 궤도회로 주파수에 대한 궤도회로 전류

전기적 모델에서와 마찬가지로 0.8[A]이상 흐르는 것을 입증하였다. 궤도회로 전류의 크기도 전기적 모델에서와 5[%]이내의 오차가 발생하였다. 전기적 모델의 결과와 마찬가지로 궤도회로 주파수가 높아질수록 임피던스가 증가하여 궤도회로 마지막 단에서 전류의 크기가 작다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도회로 전기적 모델과 모델에 요구되는 전기적 특성값을 입증하였다. 또한 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도회로 주파수에 따라 공진현상을 이용하여 보상커패시터를 한개만 설치하여 궤도회로 전류 기준치이상 전류가 흐르는 것을 전기적 모델과 4단자망 해석으로 입증하였다. 본 논문의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 궤도회로 주파수인 2040[Hz], 2400[Hz], 2760[Hz], 3120[Hz]에 대해 보상커패시터의 위치를 계산한 결과, 궤도회로 주파수가 낮을수록 보상커패시터의 위치가 궤도회로 전원부로부터 거리가 멀고, 이는 궤도회로 주파수가 높아질수록 레일의 임피던스 증가로 인한 결과이다.

(2) 보상커패시터의 전기용량을 계산한 결과, 궤도회로 주파수가 높을수록 보상커패시터의 전기용량이 작고, 이는 궤도회로 주파수가 높아질수록 레일의 임피던스 증가로 인해 보상커패시터로부터 궤도회로 마지막 단까지의 거리가 증가한다. 이 결과 보상커패시터로부터 궤도회로 마지막 단까지의 거리가 증가한다. 이 결과 보상커패시터로부터 궤도회로 마지막 단까지의 궤도회로의 자기인덕턴스가 증가하여 궤도회로 주파수를 공진주파수로 맞추기 위한 보상커패시터의 전기용량이 줄어든 결과이다.

(3) 궤도회로 주파수 별로 열차의 위치를 1500[m], 700[m], 200[m]로 나누어 궤도회로 전류를 전기적 모델과 4단자망 해석 결과, 모든 위치에서 궤도회로 전류 기준치인 0.8[A]이상 흐르고, 궤도회로 주파수가 높아질수록 레일의 임피던스 증가로 궤도회로에 흐르는 전류가 작다.

본 연구는 향후 호남고속철도 및 일반철도 콘크리트 슬래브궤도에서 보상 커패시터를 20[m] 간격마다 설치할 필요 없이 레일의 저항 및 자기인덕턴스를 계산하여 열차가 궤도회로 마지막 단에 있는 경우로 공진주파수를 계산하여 보상 커패시터를 설치시 활용될 수 있다. 이는 경제적인 효과도 매우 크고, 보상 커패시터의 고장이 발생한 경우를 고려하여 보상 커패시터의 전기용량을 이중화로 계산하여 설치한다.

## 참고문헌

1. CSEE & Pfliederer, "Assembly for UM71 Track Circuit Measurement on Pfliederer RHEDA 2000 Test Track", 2005.
2. Min-Seok Kim, "The Influence of Frequency on Wayside Transmitter of ATP System upon Reinforcing Bars in Concrete Slab Track", The Korean Society for Railway, Vol. 11, No.6, pp, 536-542, 2008.
3. Jun-Seok, Ko, "A Study of Rail Impedance Calculation on the Slab Track", ICEE, Hong-Kong, July 2007.
4. R. John Hill, "Rail Track Distributed Transmission Line Impedance and Admittance: Theoretical Modeling and Experimental Results", IEEE, Vol. 42, No. 2, May 1993.
5. Schelkunoff, S. A, "Transmission Theory of Plane Electromagnetic Waves", IRE., vol. 25, pp. 1457-1492, November 1937.
6. R. Feynman, "Lecture on Physics", Seung-San, Vol.1, pp.23:1-23:9,2004.
7. Ki-Bum Park, "A Internal Signal Modeling for a Defect Diagnosis of Track Circuit on HSL", Proceeding of Korean Society, 2006.
8. E.C. Jordan and K. G. Balmain, "Electromagnetic Waves and Radiating Systems", Prentice-Hall, Second Edition, pp. 128-135, 1968.
9. D.K. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics", Pearson Education, pp. 23-25, 2002.
10. Korea Railroad Research Institute, "A Study on Installation Methods on Signaling System in Concrete Slab Track", 2007.
11. Alain Gros, "Hardware Architecture Guide Book:UM71", CSEE, pp. 58-59, 2003.
12. The Math Works Inc, "Matlab Reference Guide and User's Guide", 1997.
13. R. Raymond, S. Derek "PSpice simulation of power electronics circuits: an introductory guide", Chapman&Hall, England, pp187-264,1997.
14. CSEE, "Concrete Slab Track Characterization RHEDA 2000 Report", pp. 23-25, 2003.