콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근 사이의 결합계수에 대한 연구

A Study on Coupling Coefficient Between Rail and Reinforcing Bars in Concrete Slab Track

김민석* 이상혁** 권재욱** 이종우***

Kim, Min-Seok Lee, Sang-Hyeok Kwon, Jae-Wook Lee, Jong-Woo

ABSTRACT

The system of the railway signaling using the track transmits the approved speed to the location of a train and it. Referring to the way of transmitting train control information, there are the one transmitting it to the on-board system of a train using the direct track, the another transmitting it establishing an instrument, and the other transmitting an instrument by a railway track. The one is the method using the direct track as a conductor for composing the part of the track and attaining the information controlling a train by transmitting a signal to the track. It is used for the high-speed railway and the subway. The method using the track attains information by transmitting it to returned information, and the on-board system of a train attains it by magnetic coupling. Because many reinforcing bars on the concrete slab track are used, interaction between a rail and a reinforcing bar that is not produced on ballast track is made. Due to the interaction, the electric characteristic of rail is changed.

In the current paper, we numerically computed the coupling coefficient between the rail and the reinforcing bar based on the concrete slab track throughout the model related to the rail and the reinforcing bar using the concrete slab track that is used in the second interval of the Gyeongbu high-speed railway, and we defined the coupling coefficient not changed in the electric characteristic of rail in the condition that there is no interaction between the rail and the reinforcing bar.

key words : concrete slab track(콘크리트 슬래브궤도), coupling coefficient(결합계수), track circuit(궤도회로), mutual inductance(상호인덕턴스)

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. 열차의 속도가 증가되면 부가 윤중이 크게 되어 궤도에 미치는 영향이 커진다. 콘크리트 슬래브궤도는 속도향상을 위한 궤도강화 방법 중 하나이다. 콘크리트 슬래브궤도는 160[Km/h] 이상의 고속주행과 중량 화물, 그리고 적은 유지보수 비용과 시간이 요구되기 때문에 많이 개발되고 있다.

철도신호시스템은 열차의 간격과 진로를 제어한다. 철도신호시스템은 ATC, ATP, ATS 시스템 등을 이용하여 신호정보를 송신하여 열차위치와 열차에 허용속도를 전송한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 박사과정, 정회원

** 서울산업대학교 전자정보공학과 학부과정, 비회원

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 교수, 정회원

열차제어정보전송은 직접 궤도를 이용하여 차상에 전송하는 방식, 궤도상에 기기를 설치하여 전송하는 방식, 선로변에 기기를 전송하는 방식이 있다. ATC 시스템은 궤도를 이용하는 방식이고, ATP나 ATS 시스템은 선로변에 지상자를 설치하는 방식이다. 이는 신호등을 설치하거나 정보전송 안테나를 설치하여 열차에 정보를 전송하는 방식이다.

궤도회로를 사용하는 방식은 반송신호에 정보를 실어서 보내며, 차상장치는 자기결합에 의해서 정보를 획득한다. 콘크리트 슬래브궤도에서는 레일 하부에 많은 양의 철근이 필요하다. 그러므로 철근사이의 상호 간섭현상이 발생하여 레일의 전기적 특성이 변화한다.[1]

따라서 본 논문은 현재 경부고속철도 2단계 구간에서 사용될 콘크리트 슬래브궤도를 기반으로 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 결합계수의 수치를 적용하였다. 이는 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 수리적으로 나타내는 값으로써 아직 국내 콘크리트 슬래브궤도 규정에서 정의하고 있지 않다. 본 논문은 국내 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않는 결합계수를 수리적으로 해석함으로써 콘크리트 슬래브궤도 부설시 이를 고려하고 레일의 전기적 특성이 변하지 않는 방법을 제시하였다.

2. 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근의 모델링

콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근의 전기적 모델은 레일의 임피던스 측정 시험의 결과를 참고하여 제시하였다. 측정시험은 PANDROL 체결장치를 기준으로 하였고, 결과는 [표 1]과 같다. 저항 및 인덕턴스의 단위 길이당 기준은 0.3[m]로 하였다. 횡철근의 간격이 약 30[cm]이기 때문이다.[2]

표 1. 실측에 의한 레일의 전기적 특성

주파수 [Hz]	저항 [mΩ]	인덕턴스 [μH]
-	0.3066	0.3961
2040	0.6036	0.3717
2400	0.6855	0.3672
2760	0.7650	0.3636
3120	0.8430	0.3603

주파수에 따라서 레일의 저항과 자기인덕턴스가 변하였다. 레일의 저항과 자기인덕턴스가 주파수에 따라서 변하였다는 것은 철근에 의한 전자유도로 인해서 레일의 임피던스가 증가하였다고 볼 수 있다.

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]

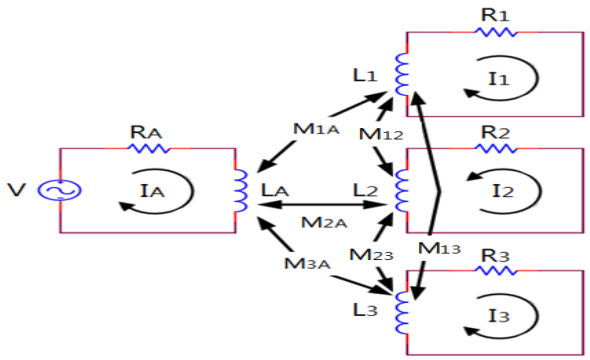

그림 1. 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근의 전기적 모델

R_A는 레일의 저항을 의미하고 L_A는 레일의 자기인덕턴스를 의미한다. R_1, R_3은 레일 외부에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L_1, L_3은 레일 외부에 위치한 철근의 자기 인덕턴스를 의미한다. R_2는 레일 사

이에 위치한 철근의 저항을 의미하고, L_2는 레일 사이에 위치한 철근의 자기인덕턴스를 의미한다. M_{1A}, M_{3A}는 레일 외부에 위치한 철근과 레일과의 상호인덕턴스를 의미하고, M_{2A}는 레일 사이에 위치한 철근과 레일과 상호인덕턴스를 의미한다. M_{12}와 M_{23}는 레일 외부에 위치한 철근과 레일 사이에 위치한 철근 사이의 상호인덕턴스를 의미하고, M_{13}는 레일 외부에 위치한 철근 사이의 상호인덕턴스를 의미한다.

2.1 레일의 저항

저항은 전류를 방해하는 성분으로 레일에서 단위 길이당 저항은 다음의 식(1)과 식(2)로 정의 된다.[4]

$$R_{1A} = R_{2A} = \frac{l_r}{\sigma_r S_r} \tag{1}$$

$$R_A = R_{1A} + R_{2A} \tag{2}$$

R_{1A}은 한쪽 레일의 저항, R_{2A}는 다른 한쪽의 레일의 저항을 의미한다. R_A는 레일의 총 저항을 의미하고, σ_c, ρ_c는 각각 레일의 도전율, 저항률을 의미한다. S는 레일의 단면적을 의미한다.

2.2 레일의 자기인덕턴스

인덕턴스란 자기 에너지를 저장할 수 있는 크기를 나타내는 파라미터다. 전기적으로 폐루프가 형성되면 인덕턴스가 존재하게 된다. 레일에서 단위 길이당 인덕턴스는 암페어 법칙을 이용하여 식(3)과 같이 정의된다.[5]

$$L_A = \frac{l_r \mu}{4\pi} + \frac{l_r \mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{a-r}{r}\right) \tag{3}$$

L_A는 레일의 자기인덕턴스를 의미한다. a는 레일 사이의 거리이고 r은 레일두께의 반지름을 나타낸다. μ은 레일의 투자율, μ_0는 자유공간에서의 투자율을 의미한다.

2.3 철근의 저항

철근의 저항은 격자 하나의 철근저항을 의미한다. 격자형태의 철근은 4개의 철근으로 이루어져 있다. 그러므로 횡방향, 종방향 저항으로 나눠 계산하여야 한다. 1개의 횡방향 철근에 대한 저항은 식(4)과 같다.[6]

$$R_{n1} = \frac{l_v}{\sigma_i S_i} \tag{4}$$

S_i는 철근의 단면적을 의미하고, σ_i는 철근의 도전율을 의미한다. l_v는 횡철근의 길이를 의미한다. 1개의 종방향 철근에 대한저항은 식(5)과 같다.

$$R_{n2} = \frac{l_h}{\sigma_i S_i} \tag{5}$$

l_h는 종방향 철근의 길이를 의미한다. 격자형태의 총 철근의 저항은 식(6)과 같다.

$$R_n = 2R_{n1} + 2R_{n2} \tag{6}$$

하나의 격자 형태에서 종방향 철근이 늘어남에 따라 병렬로 연결되어 저항이 줄어들고, 격자 형태의 철근이 레일과 같은 방향으로 늘어나면 철근의 저항은 증가한다.

2.4 철근의 자기인덕턴스

격자 형태에서 철근의 자기인덕턴스는 암페어 법칙을 이용하여 식(7)과 같다.[7]

$$L_n = \frac{\mu_c}{2\pi}\left[l_v \ln\left(\frac{l_h - d}{d}\right) + l_h \ln\left(\frac{l_v - d}{d}\right)\right] + \frac{l_v \mu_i}{4\pi} + \frac{l_h \mu_i}{4\pi} \tag{7}$$

μ_c는 콘크리트의 투자율을 의미하고, μ_i는 철근의 투자율을 의미한다. d는 철근두께의 반지름을 나타낸다. 종방향 철근을 증가시킴에 따라 철근을 통과하는 자속양이 줄어들어 철근의 자기 인덕턴스 값이

줄어든다. 격자형태의 철근이 레일과 같은 방향으로 늘어나면 철근의 자기인덕턴스도 증가한다.

2.5 레일과 철근 사이의 상호인덕턴스

상호인덕턴스는 $M_{mn} = M_{nm}$을 만족한다. 레일과 첫 번째(=세 번째) 격자형태의 철근 즉, 레일 외부에 위치한 철근사이의 단위길이 당 상호인덕턴스와 레일과 두 번째 격자형태의 철근 즉, 레일 내부에 위치한 철근사이의 단위길이 당 상호인덕턴스를 구하는 공식은 레일에서 발생한 자속밀도를 이용하여 계산하면 식(8), 식(9)과 같다.[8]

$$M_{1A} = M_{3A} = \frac{\lambda}{I_A} = \frac{\mu_c}{4\pi}\ln\left(\frac{(t+a)^2+4h^2}{(a-t)^2+4h^2}\times\frac{h^2}{a^2+h^2}\right) \tag{8}$$

$$M_{2A} = -\frac{\lambda}{I_A} = -\frac{\mu_c}{2\pi}\ln\left(\frac{a^2+h^2}{h^2}\right) \tag{9}$$

h는 격자와 레일간의 거리를 의미하고, t는 횡방향 철근의 총 길이를 의미한다.

2.6 철근 사이의 상호인덕턴스

격자형태의 철근들 사이의 상호인덕턴스는 Biot-Savart법칙을 이용하여 격자형태의 철근을 횡방향, 종방향으로 나눠 각 철근의 자계의 세기를 이용해서 계산한다.[8]

$$\begin{aligned} M_{21} = M_{23} = \frac{1}{I_1}\Bigg[&\int_d^{l_h}\int_{l_{v1}}^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p1}(r)dxdy + \int_d^{l_h}\int_d^{l_{v2}}\mu_c H_{p1}(r)dxdy \\ &+\int_d^{-l_h}\int_{l_{v1}}^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r)dxdy + \int_d^{l_h}\int_d^{l_{v2}+l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r)dxdy\Bigg] \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} M_{31} = \frac{1}{I_1}\Bigg[&\int_d^{l_h}\int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p1}(r)dxdy + \int_d^{l_h}\int_{l_{v2}}^{l_{v2}+2lv_1}\mu_c H_{p1}(r)dxdy \\ &+\int_d^{-l_h}\int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r)dxdy + \int_d^{l_h}\int_{l_{v2}+l_{v1}}^{l_{v2}+2l_{v1}} -\mu_c H_{p2}(r)dxdy\Bigg] \end{aligned} \tag{11}$$

$H_{p1}(r)$는 격자형태의 철근에서 종방향 철근의 흐르는 전류에 의한 자계의 세기를 나타내며, $H_{p2}(r)$는 횡방향 철근의 흐르는 전류에 의한 자계의 세기를 나타낸다. l_{v1}은 레일 외부의 격자형태의 철근의 횡방향 길이를 의미하고 l_{v2}는 레일사이에 위치한 격자형태의 철근의 횡방향 길이를 의미한다. 마이너스 부호는 자속의 방향에 따라 결정된다. 상호인덕턴스 구하는 식에서 보면 종방향 철근이 늘어남에 따라 철근들 사이의 자계의 세기가 줄어들어서 상호 인덕턴스는 줄어든다. 또한 격자형태의 철근의 층수가 늘어남에 따라 레일과 가장 먼 격자형태 철근까지의 거리로 구해야 한다. 자계의 세기는 거리제곱에 반비례하기 때문에 자계의 세기가 줄어들어서 철근사이의 상호 인덕턴스는 줄어든다.

2.7 레일의 전기적 특성 변화

콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근의 전기적 모델에서 키르히호프 법칙을 사용하여 궤도회로 주파수에 대한 레일의 전기적 특성 변화는 식(12), 식(13)이다.[9]

$$R_{total} = R_A + 2\frac{w^2 M_{1A}^2 R_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} + \frac{w^2 M_{2A}^2 R_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \tag{12}$$

$$L_{total} = L_A - 2\frac{w^2 M_{1A}^2 L_1}{R_1^2 + w^2 L_1^2} - \frac{w^2 M_{2A}^2 L_2}{R_2^2 + w^2 L_2^2} \tag{13}$$

식(12), 식(13)에서는 철근의 유도전류를 계산하는 것과 달리 철근 사이의 상호인덕턴스는 계산식에 포함시키지 않았다. 철근의 유도전류는 철근에 흐르는 전류를 계산해야하기 때문에 철근 사이의 상호인덕턴스가 필요하지만 궤도회로의 주파수에 대한 임피던스는 레일과 철근과의 관계를 나타내기 때문에 철근 사이의 상호인덕턴스를 포함시키지 않았다. 식(12), 식(13)에서 철근의 영향으로 인해서 레일의 저

항은 증가하게 되고, 자기인덕턴스는 줄어든다. 또한 주파수 제곱에 따라 저항 및 자기인덕턴스가 비례한다. 이는 [표 1]에서와 같이 주파수에 따라 저항이 증가하고, 자기인덕턴스가 감소하는 것과 같다.

3. 레일과 철근 사이의 결합계수

레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근 사이의 상호인덕턴스, 철근의 자기인덕턴스는 레일과 철근 사이의 결합계수 값을 이용하여 정의하여야 한다. 결합계수 값이란 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 나타내는 상수 값이다. 결합계수 k값은 $0 \le k \le 1$으로 0은 상호 작용이 일어나지 않는다는 것이고, 1은 상호 작용이 최고로 일어난다는 것을 의미한다. 즉, 결합계수 값이 적을수록 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상은 줄어든다고 볼 수 있다. 결합계수는 식(14)과 같이 구해진다.[9]

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{14}$$

레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 일어나지 않는 레일과 철근 사이의 결합계수를 구하려면 우선 레일과 철근 사이의 상호 간섭영향이 적은 레일과 철근의 상호인덕턴스 값을 구해서 그 때의 결합계수 값을 구한다. 그리고 그 결합계수 값을 이용해서 철근에 전기적인 루프를 형성한 경부고속철도 2단계 구간에서 사용될 콘크리트 슬래브궤도 형태에서 결합계수 값을 맞추기 위한 철근의 자기 인덕턴스를 구한다. 이렇게 해서 얻어진 레일과 철근 사이의 상호 인덕턴스와 철근의 자기 인덕턴스를 이용하여 최종 레일과 철근 사이의 상호작용이 발생하지 않는 결합계수를 구한다. 즉, 결합계수는 레일과 철근 사이의 상호인덕턴스와 철근의 자기 인덕턴스에 영향을 받기 때문에 각각의 값이 레일과 철근의 상호 간섭현상에 최소로 영향을 받는 파라미터 값을 구해서 최종 레일과 철근 사이의 결합계수를 구하는 것이다.

현재 경부고속철도 2단계 구간에서 사용될 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근 사이의 상호 인덕턴스가 거의 작용하지 않는 경우는 레일과 철근 사이의 거리가 약 0.8[m]인 경우이다.[10] 이 경우에 상호 인덕턴스를 이용하여 $M_{1A}|_{h=0.8}$에 대한 결합계수 값과 $M_{2A}|_{h=0.8}$에 대한 결합계수 값을 구하면 식(15), 식(16)과 같다.

$$k_{i1} = k_{i3} = \frac{|M_{1A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c1}}} = \frac{|M_{3A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c3}}} \tag{15}$$

$$k_{i2} = \frac{|M_{2A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c2}}} \tag{16}$$

k_{i1}, k_{i2}은 레일과 철근과의 거리가 약 0.8[m]인 경우에 레일과 철근과의 결합계수 값을 나타낸다. L_{c1}, L_{c2}은 철근의 자기 인덕턴스는 시험선 형태로 철근에 전기적인 루프를 형성시켰을 시의 값이다. 식(15), 식(16)의 결합계수 값은 레일과 철근 사이의 상호 인덕턴스가 거의 영향이 없는 경우의 레일과 철근 사이의 계수 값이고, 이 값을 이용하여 철근에 전기적인 루프를 형성한 경부고속철도 2단계 구간에서 사용될 콘크리트 슬래브궤도 형태에서 결합계수 값을 맞추기 위한 철근의 자기 인덕턴스를 구한다.

경부고속철도 2단계 구간에서 사용될 콘크리트 슬래브궤도에 적용하였던 레일과 철근과의 거리인 약 0.30[m]에서 상호 인덕턴스 값은 식(8), 식(9)을 이용한다. 레일과 철근과의 거리인 약 0.30[m]에서 구한 상호 인덕턴스 값을 가지고 위에서 정의한 레일과 철근 사이의 결합계수 값을 맞추려면 L_A 즉, 레일의 자기 인덕턴스는 정해져 있기 때문에 철근의 자기 인덕턴스 값을 변화해야 한다. 레일과 철근 사이의 결합계수 값을 맞추기 위한 철근의 자기 인덕턴스는 식(17), 식(18)과 같다.

$$L_1 = L_3 = \frac{M_{1A}^2|_{h=0.3}}{k_{i1}^2 \times L_A} = \frac{M_{3A}^2|_{h=0.3}}{k_{i3}^2 \times L_A} \tag{17}$$

$$L_2 = \frac{M_{2A}^2|_{h=0.3}}{k_{i2}^2 \times L_A} \tag{18}$$

식(15), 식(16), 식(17), 식(18)에서 정의된 레일과 철근 사이의 상호인덕턴스 값과 철근의 자기 인덕

턴스 값을 이용하여 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근과의 결합계수를 구하면 식(19), 식(20)과 같다.

$$k_1 = k_3 = \frac{|M_{1A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_1}} = \frac{|M_{3A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_3}} \tag{19}$$

$$k_2 = \frac{|M_{2A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_2}} \tag{20}$$

4. 시뮬레이션

레일의 기준은 RHEDA 2000으로 하였고, 궤도회로의 기준은 UM71 궤도회로를 기준으로 하였다. 철근의 형태는 현재 경부고속철도 2단계에서 사용될 시험선 형태를 기준으로 하였다. 시뮬레이션 도구로는 전기적 특성을 해석을 할 수 있는 Maxwell 프로그램을 이용하였다.[11] 또한 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근과의 결합계수를 계산하여 궤도회로 주파수에 따른 레일의 저항 및 인덕턴스를 계산하였다.

4.1 레일 및 철근의 전기적 특성

4.1.1 시험선 형태

경부고속철도 2단계에서의 시험선 형태에서는 레일과 철근 사이의 간격이 약 0.3[m]이다.

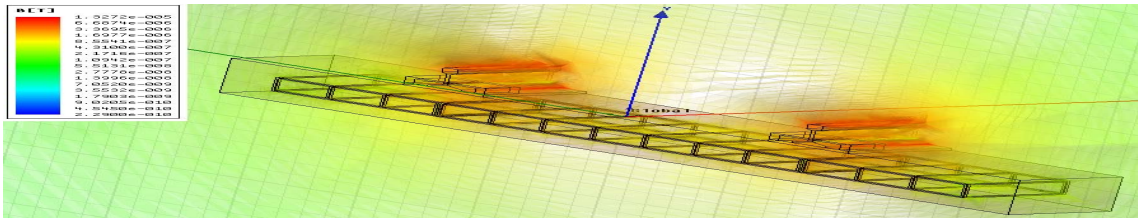

그림 2. 시험선 형태에서 레일과 철근 사이의 상호간섭 현상

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

Inductance Units: H | Type: R/L

	Current3	Current4	Current5	Current1	Current2
Current3	0.00015332, 2.3508E-007	5.2389E-020, -5.7929E-008	1.9937E-020, 3.9123E-009	2.3495E-022, -1.1859E-008	1.0159E-020, -1.4618E-008
Current4	5.2389E-020, -5.7929E-008	0.00015332, 2.3508E-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	-9.0806E-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, -1.4618E-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 3. 시험선 형태에 대한 시뮬레이션 결과(Maxwell)

표 2. 시험선 형태에 대한 전기적 특성

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

4.1.2 레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태

레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태는 레일과 철근 사이의 간격이 0.8[m]이다.

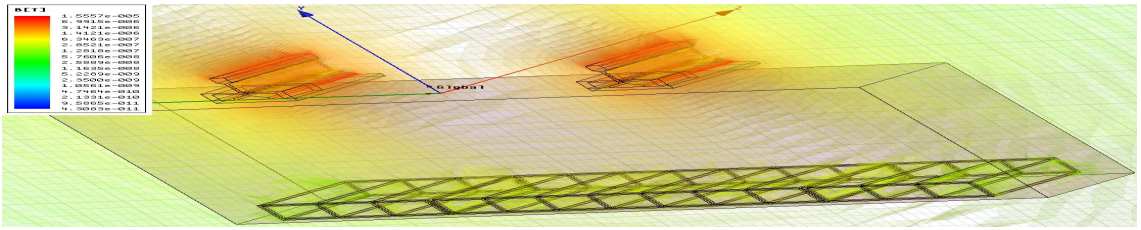

그림 4. 레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태에서 레일과 철근 사이의 상호간섭 현상

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

Inductance Units: H | Type: R/L

	Current3	Current4	Current5	Current1	Current2
Current3	0.00015332, 3.6484E-007	-3.8507E-020, -6.6247E-008	4.4814E-021, 3.6856E-009	-3.6173E-022, -5.8755E-009	-1.6617E-020, -2.0441E-009
Current4	-3.8507E-020, -6.6247E-008	0.00015332, 3.6477E-007	-1.2503E-020, -1.9902E-009	-8.0375E-021, -5.8425E-009	-5.5855E-021, 3.7303E-009
Current5	4.4814E-021, 3.6856E-009	-1.2503E-020, -1.9902E-009	0.00042888, 2.937E-008	1.2992E-020, 3.145E-009	-1.4432E-021, -4.441E-010
Current1	-3.6173E-022, -5.8755E-009	-8.0375E-021, -5.8425E-009	1.2992E-020, 3.145E-009	0.00039838, 2.1895E-008	1.0697E-020, 3.0772E-009
Current2	-1.6617E-020, -2.0441E-009	-5.5855E-021, 3.7303E-009	-1.4432E-021, -4.441E-010	1.0697E-020, 3.0772E-009	0.00043101, 2.9364E-008

그림 5. 레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태에 대한 시뮬레이션 결과(Maxwell)

표 3. 레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태에 대한 전기적 특성

구분	전기적 특성값
레일의 저항(R_A)	3.0664×10^{-4} [Ω]
레일의 자기인덕턴스(L_A)	3.6200×10^{-7} [H]
철근의 저항($R_1=R_3$)	0.00042888[Ω]
철근의 저항(R_2)	0.00039838 [Ω]
철근의 자기인덕턴스($L_1=L_3$)	2.9370×10^{-8} [H]
철근의 자기인덕턴스(L_2)	2.1895×10^{-8} [H]
레일과 철근 사이의 상호인덕턴스($M_{1A}=M_{3A}$)	-1.6221×10^{-9} [H]
레일과 철근 사이의 상호인덕턴스(M_{2A})	-1.0600×10^{-8} [H]
철근 사이의 상호인덕턴스($M_{21}=M_{23}$)	3.1450×10^{-9} [H]
철근 사이의 상호인덕턴스(M_{31})	-2.0660×10^{-10} [H]

시험선 형태와 레일과 철근 사이의 간격이 늘어난 형태에서 보면 레일과 철근 사이의 상호인덕턴스 부분만 제외하면 시뮬레이션 값이 거의 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 Maxwell 시뮬레이션 오차 값으로 볼 수 있다.

4.2 레일과 철근 사이의 결합계수

[표 2]와 [표 3]의 레일과 철근과의 전기적 특성 값을 이용하여 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근과의 결합계수를 구할 수 있다.

$$k_{i1}=k_{i3}=\frac{|M_{1A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c1}}}=\frac{|M_{3A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c3}}}=0.0157$$

$$k_{i2}=\frac{|M_{2A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_{c2}}}=0.1214$$

$$L_1=L_3=\frac{M_{1A}^2|_{h=0.3}}{k_{i1}^2\times L_A}=\frac{M_{3A}^2|_{h=0.3}}{k_{i3}^2\times L_A}=1.4111\times10^{-6}$$

$$L_2 = \frac{M_{2A}^2|_{h=0.3}}{k_{i2}^2 \times L_A} = 1.8702 \times 10^{-7}$$

위에서 정의된 레일과 철근 간의 상호인덕턴스 값과 철근의 자기 인덕턴스 값을 이용하여 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근과의 결합계수는 다음과 같다.

$$k_1 = k_3 = \frac{|M_{1A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_1}} = \frac{|M_{3A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_3}} = 0.0023$$

$$k_2 = \frac{|M_{2A}|_{h=0.8}|}{\sqrt{L_A L_2}} = 0.0407$$

4.3 궤도회로 주파수에 대한 레일의 전기적 특성

경부 고속철도 2단계에서 사용될 UM71 궤도회로 주파수는 2040[Hz], 2400[Hz], 2760[Hz], 3120[Hz]이다. 궤도회로 주파수에 대한 시험선 형태의 레일의 전기적 특성 변화와 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않게 하기 위한 레일과 철근 사이의 결합계수를 맞춘 형태의 레일의 전기적 특성 변화를 [표 4]에 나타내었다.

표 4. 궤도회로 주파수에 대한 레일의 전기적 특성

구분	주파수	저항	자기인덕턴스
시험선 형태	2040[Hz]	0.6429[mΩ]	0.3775[uH]
	2400[Hz]	0.7193[mΩ]	0.3733[uH]
	2760[Hz]	0.7892[mΩ]	0.3695[uH]
	3120[Hz]	0.8515[mΩ]	0.3661[uH]
레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않은 형태	2040[Hz]	0.3078[mΩ]	0.3955[uH]
	2400[Hz]	0.3078[mΩ]	0.3955[uH]
	2760[Hz]	0.3078[mΩ]	0.3955[uH]
	3120[Hz]	0.3078[mΩ]	0.3955[uH]

[표 4]에 보듯이 시험선 형태에서 시뮬레이션 값과 [표 1]에서의 실제 측정값과 유사한 것을 확인할 수 있다. 시험선 형태에서는 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상으로 인해 레일의 전기적 특성이 변화하는 반면에 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않은 형태에서는 레일의 전기적 특성 변화가 일어나지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 슬래브궤도에서 레일과 철근 사이의 전기적 모델에 의해 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 입증하였다. 또한 UM71 궤도회로를 기준으로 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 발생하지 않는 결합계수를 계산하였다.

경부고속철도 2단계 시험선 형태에서는 궤도회로 주파수에 대한 레일의 전기적 특성 변화가 크게 일어난다. 그러므로 궤도회로 길이를 줄여한다. 이에 대한 대책으로 철근을 전기적 절연시켜야 한다. 철근의 전기적인 루프를 제거함으로써 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상이 줄어든다. 이에 일환으로 프랑스에서도 본 논문에서 제시한 레일과 철근 사이의 결합계수를 맞추기 위해 레일과 철근 사이의 간섭영향을 줄이기 위해 철근을 전기적 절연을 시키고, 12[m]마다 철근의 절단 작업을 시행한다.

본 논문에서 제시한 레일과 철근 사이의 결합계수는 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 수리적으로 나타내는 값으로써 아직 국내 콘크리트 슬래브궤도 규정에서 정의하고 있지 않다. 결합계수를 정의함으로써 향후 호남고속철도 및 일반철도 콘크리트 슬래브궤도에서 궤도회로 부설시 레일과 철근 사이의 상호 간섭현상을 계산하여 선정할 경우에 활용될 수 있다.

참고문헌

1. 김민석, “콘크리트 슬래브궤도에서 ATP시스템 지상자의 주파수가 철근에 미치는 영향”, 추계철도학술대회, June 2008.
2. Alain Gros, "Hardware Architecture Guide Book:UM71", CSEE, 2003.
3. Jun-Seok, Ko, “The Study of Rail Impedance Calculation on the Slab Track", ICEE, Hong-Kong, July 2007.
4. Schelkunoff, S. A, “Transmission Theory of Plane Electromagnetic Waves,” IRE., vol. 25, pp. 1457-1492, November 1937.
5. D.K. Cheng, “Fundamentals of Engineering Electromagnetics”, Pearson Education, pp. 177, pp. 292-293, 2002.
6. E.C. Jordan and K. G. Balmain, “Electromagnetic Waves and Radiating Systems”, Prentice-Hall, Second Edition, 1968.
7. John D. Kraus, “Electromagnetics,” McGraw-Hill, Fourth Edition, 1991.
8. R. Feymman, "Lecture on Physics", 승산, Vol. 1, pp. 23:1~23:9, 2004.
9. William H. Hayt, "Engineering Circuit Analysis", McGraw-Hill, Sixth Edition, 2003.
10. “콘크리트궤도에서의 적정 신호장치 및 전철보호장비 설치방안 도출연구”, 한국철도기술연구원, 2007.
11. Eun-Sil, Han, “Maxwell 2D and 3D”, Ansoft-Korea, Inc., pp102~110, 2006.