

철근콘크리트 도상에서 AF 궤도회로 신호전류 저감방지대책에 관한 연구

A Study on the Method of preventing from Reduction of AF Track Circuit Signal Current on a Ferroconcrete Roadbed

홍효식[†] · 유광균¹ · 노성찬¹

Hyo-Sik Hong · Kwang-Kiun Yoo · Sung-Chan Rho

Abstract Until now, the track circuit with railroad which is a part of an electrical circuit was used only for the detection of the train location, but as train speed is up to be higher, in order to overcome the limits of ground signal system the railway signal system has changed from the ground signal system to a cab signal system. The power source of the track circuit has also changed from a direct current or a high voltage impulse to an alternating current with high frequency which is a part of the audio frequency. To improve the maintainability and according to the environment condition, the railway roadbed is rapidly changed to the ferroconcrete roadbed. In case of a track circuit to use an alternating current with high frequency as power source at a ferroconcrete roadbed, the characteristic of the track circuit is brought on a change from a loss of the magnetic combination instead of a leakage current from electric insulation which was caused by the reinforcing iron rod with lattice shape for durability. This paper is shown the influence and the loss of the signal current at AF track circuit on a ferroconcrete in the simulation sheets and presented a proposal for the preventive method from reduction of signal current.

Keywords : AF(Audio Frequency) track circuit, Ferroconcrete roadbed, Signal current.

초 록 지금까지 궤도회로는 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 열차의 위치 검지용으로만 사용하였으나 철도차량이 고속화 되면서, 지상신호의 한계를 극복하기 위하여 차상신호시스템의 사용이 일반화 되어가고 있다. 궤도회로의 전원은 직류나 고전압 임펄스를 사용하던 방식에서 가청주파수를 사용하는 고주파 교류궤도회로의 사용이 일반화 되고 있다. 철근도상도 환경과 궤도의 유지보수성 개선을 위하여 철근콘크리트 도상의 사용이 증대되고 있다. 철근 콘크리트 도상에서 고주파 교류궤도회로를 사용할 경우 도상의 내구성 향상을 위하여 사용되는 수많은 격자모양의 철근들로 인하여 전기적 절연에 의한 누설전류가 아닌 자기결합에 의한 손실로 인한 궤도정수의 변화를 초래할 수 있다. 본 논문은 철근콘크리트도상에서 AF(Audio Frequency)궤도회로를 사용하였을 경우 도상 철근에 의한 궤도회로신호의 영향과 손실을 시뮬레이션을 통하여 알아보고 이를 방지할 수 있는 방안을 제시하였다.

주요어 : AF궤도회로, 철근콘크리트 도상, 신호전류

1. 서 론

철도의 고속화를 달성하면서 철도신호에서는 열차의 위치를 파악하는 궤도회로의 변화가 많이 발생하였다.

지금까지 궤도회로는 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 열차의 위치를 검지하는 열차위치 파악에만 사용하였으나 철도차량이 고속화 되면서 지상신호의 한계를 극복하기 위한 차상신호 시스템의 사용이 일반화 되어 궤도회로도 열차의 제한속도를 차상에 전송하는 등 많은 변화를 가지고 왔다. 궤도회로의 전원은 직류나 고전압 임펄스를 사용하던 방식

에서 가청주파수를 사용하는 고주파 교류궤도회로의 사용이 일반화 되고 있다[1].

또한 철도의 도상은 기존의 자갈도상에서 콘크리트도상의 사용이 점차 증대되고 있으며, 콘크리트 도상은 균열 등을 방지하기 위하여 많은 철근을 사용하여 그 내구성을 향상시키고 있다.

철근 콘크리트도상에서 고주파 교류궤도회로의 사용은 철근콘크리트 도상 제작 시 사용되는 철근이 궤도회로의 회로정수에 영향을 미칠 수 있다[2].

이는 사용되는 궤도신호의 주파수 및 귀전전류의 고조파의 영향을 받으며 또한 궤도레일이 설치되어 있는 장소의 환경적인 요인으로부터도 영향을 받기 때문이다.

AF(Audio Frequency)궤도회로는 2kHz 대의 고주파 전원을 신호전원으로 사용함으로 콘크리트 도상이 가지고 있는

[†]교신저자 : 한국철도대학 철도전기제어과

E-mail : thirde@hankook.ac.kr

¹한국철도대학 철도전기제어과

많은 철근과 철근사이의 상호유도결합에 의한 간섭현상이 발생하여 궤도회로의 회로정수 변화를 초래하게 된다[3].

본 논문은 철근 콘크리트 도상에 설치된 AF궤도회로에서 궤도회로의 신호에 의한 철근콘크리트 도상의 상호 간섭에 의한 영향을 파악하고 이를 저감시킬 수 있는 방안을 제시하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 철근콘크리트 도상에서의 궤도정수

철근콘크리트 도상을 사용하는 AF궤도회로의 선로정수를 모델링하기 위해서는 자갈도상에서와는 다르게 콘크리트 도상에 사용된 철근과의 상호관계를 고려하여 모델을 작성하여야 한다. 따라서 레일의 고유 저항, 사리누설저항, 레일 상호간의 정전용량, 철근과 레일 사이의 상호인덕턴스 등을 고려한 모델링이 이루어져야 한다[4].

철근과 레일의 결합인덕턴스를 계산하기 위해서는 레일과 횡철근, 종철근, 레일에 흐르는 전류만을 고려하여 계산한다. 그림 1은 임의의 구간에서 레일에 흐르는 전류에 의한 자기장으로 발생하는 횡철근, 종철근내의 전류방향을 나타낸 것이다.

그림에서 보여주듯이 2kHz 정도의 고주파 전류가 레일을 통하여 흐르게 되면, 레일 하부에 있는 철근은 변압기와 같이 결합하게 된다. 횡철근과 종철근이 절연되지 않은 상태에서 격자구조를 이루고 있는 철근 내부에 순환전류가 발생하게 되고 이는 신호전류의 손실로 작용하게 된다. 따라서 1,500m의 궤도회로 길이는 이보다 짧아지게 된다.

이와 같은 구조의 레일과 도상의 선로정수를 계산하기 위하여 도상을 단면구조로 나타내면 다음과 같다.

그림 2에서 1, 2는 레일을 의미하고 3, 4, 5, N은 철근을 나타낸다. 각 도체는 반지름 r_i 와 도체의 조합에 의하여서만 특정 지어진다고 가정하며 각 도체에서의 표피효과를 갖는 것으로 고려한다.

이러한 가정 하에서 이를 수학적으로 계산하게 되면 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

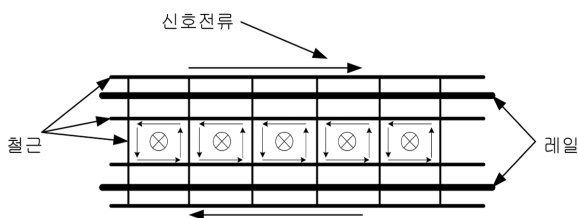


Fig. 1. Current flow of AF track circuit in ferroconcrete roadbed

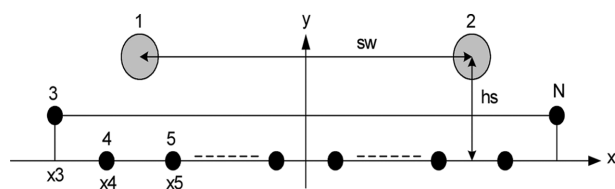


Fig. 2 Cross section structure of ferroconcrete roadbed

도체 i 의 자기인덕턴스는[5]

$$L_{i,i} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{a_i}{r_i} \right] \quad (1)$$

도체 i 와 j 간의 상호인덕턴스는

$$L_{i,j} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{a_i}{a_{i,j}} \right] \quad (2)$$

위 식으로부터 리액턴스는

$$X_{i,j} = 2\pi \cdot f \cdot L_{i,j} \quad (3)$$

도체 i 의 고유저항은[6]

$$R_i = \frac{\rho_i \cdot l}{2\pi \cdot r_i \cdot \delta_i} \quad (4)$$

여기서

r_i : 도체의 반지름

a_i : 기준도체에 대한 도체 i 의 거리

$a_{i,j}$: 도체 i 와 j 간의 거리

l : 궤도회로의 길이

ρ_i : 도체 i 의 고유저항

δ_i : 도체 i 의 투과깊이 $\rho_i = \sqrt{\rho_i / \pi \cdot f \cdot \mu_i}$

μ_i : 도체 i 의 투자율

f : 궤도회로의 주파수 이다.

따라서 도체의 전압과 전류 사이의 임피던스 매트릭스는

$$[Z] \cdot [I] = [V] \quad (5)$$

여기서 구조물 강화를 위한 가로철근에 의하여 철근의 끝부분이 병렬로 연결되어 있으므로 아래와 같은 가정이 성립한다.

$$[V_3] = \dots = [V_N] = [V_b] \quad (6)$$

이것은 레일에 인가된 전압 V_1 과 V_2 , 도체전류 $I_1 \dots I_N$ 에 의하여 유기된 전압 V_b 를 나타낸 것이다.

따라서 레일에 흐르는 전류, 철근에 흐르는 전류, 도상의 전기회로에 유기되는 전압은 키르히호프법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

레일에 흐르는 전류

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (7)$$

도상의 철근에 흐르는 전류

$$\sum_{i=3}^N I_i = 0 \quad (8)$$

궤도회로에 인가된 전압

$$V_q = V_1 - V_2 + I_1 \cdot (Z_i + Z_{end}) \quad (9)$$

여기서

Z_i : 전원공급회로의 내부임피던스

Z_{end} : 끝단의 임피던스

V_q : 공급전압이다.

이를 종합하여 방정식을 세우면

$$[Z^*] \cdot [I^*] = [V_q] \tag{10}$$

여기에 포함된 임피던스 행렬식은

$$Z^* = \begin{bmatrix} R_1 + jX_{11} & jX_{12} & jX_{13} & \dots & jX_{1N} & -1 & 0 & 0 \\ jX_{21} & R_2 + jX_{22} & jX_{23} & \dots & jX_{2N} & 0 & -1 & 0 \\ jX_{31} & jX_{32} & R_3 + jX_{33} & \dots & jX_{3N} & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ jX_{N1} & jX_{N2} & jX_{N3} & \dots & R_N + jX_{NN} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ Z_i + z_{end} & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

또한 전압과 전류 행렬식은 다음과 같다.

$$I^* = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_N \\ V_1 \\ V_2 \\ V_b \end{bmatrix} \quad V_q = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_q \end{bmatrix}$$

3. 시뮬레이션

철근 콘크리트도상에서 AF궤도회로의 신호가 레일에 흐를 때 레일과 철근사이의 자기장의 분포와 이로 인한 궤도회로의 전력손실을 알아보기 위하여 자기장 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하여 시뮬레이션을 시행 하였다[7].

시뮬레이션을 위하여 Maxwell 소프트웨어를 이용하여 3D 구조로 레일을 포함한 철근콘크리트 구조 도상을 작도하였다. 철근도상의 구조는 현재 시설되어 있는 도상의 철근 구조를 그대로 사용하였으며 레일과 철근사이의 간격, 철근과 철근사이의 간격도 현재 시설하고 있는 방식을 그대로 사용하였다. 또한 철근과 레일의 재질은 현재 사용하고 있는 레일과 철근의 재질과 가장 유사한 고유저항률을 갖는 재질을 선택하여 도상을 모델링하여 위에서 언급한 상호인덕턴스, 자기인덕턴스, 표피효과를 고려한 고유저항 등이 시뮬레이션에 반영될 수 있도록 작도하였다.

시뮬레이션은 PANDROL 체결장치를 기준으로 하였고, 저항 및 인덕턴스의 단위 길이당 기준은 0.3m로 하였다. 횡철근의 간격이 약 0.3m이기 때문이다. 또한 가로철근과 세로철근 연결부를 절연하지 않아 도상내의 철근으로 인한 폐회로가 구성되도록 하였다[8].

그림 3은 가로철근과 세로철근이 절연되지 않고 설치된 도

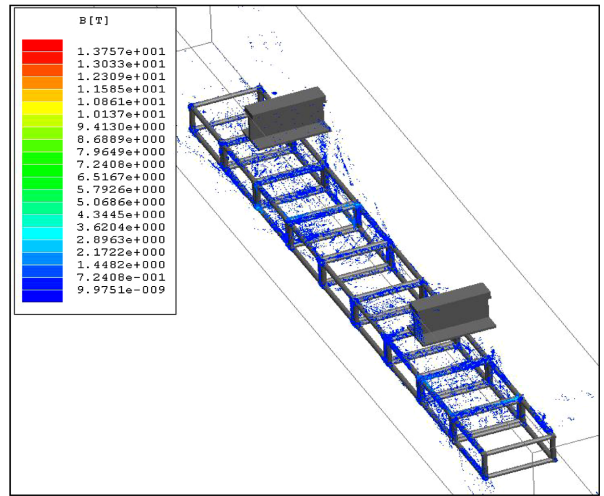


Fig. 3 Magnetic flux density of ferroconcrete roadbed which is not insulated

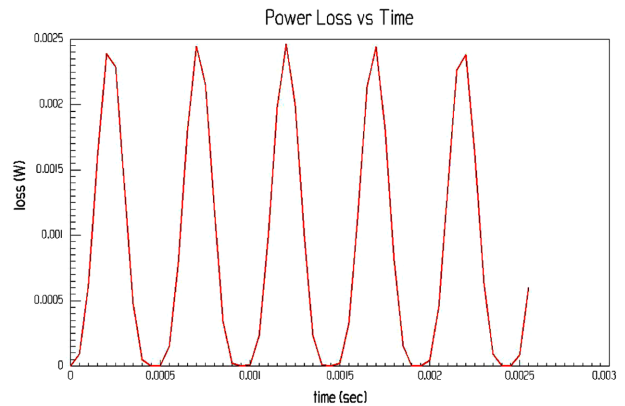


Fig. 4 Power loss of ferroconcrete roadbed which is not insulated

상 구조에서 신호전류에 의한 철근의 자속분포를 나타낸 것이다. 신호전류를 3mA로 설정하였을 때의 자속밀도는 최대 3.62T정도로 나타났으며 손실전력은 최대 0.3m당 2.5mW로 나타났다.

이와 같이 철근이 절연되지 않은 도상은 철근이 격자구조를 가지고 있어 레일에 흐르는 신호전류와 유도결합이 이루어져 손실이 발생한다. 이는 횡철근에 의한 외류로 발생하는 것으로 이를 방지하기 위하여 횡철근의 수를 최소화하거나, 횡철근을 상호 절연하여 철근상호간의 페루프를 제거한다면 도상철근에 의한 전력손실은 저감될 것으로 사료된다.

그림 5는 철근을 상호간에 절연하였을 경우 자속 분포를 나타낸 것이다.

그림 5에서 철근과 철근 사이를 절연하여 철근 사이의 페루프를 제거하도록 설치하고, 신호전류 3mA에서의 자기장의 분포와 전력손실을 시뮬레이션하여 보았다. 이 경우 레일에 흐르는 신호전류에 의한 자속밀도는 최대 8.8189×10⁻¹T 정도로 나타났다. 그림 6은 철근과 철근 사이를 절연한 경우 신호전류에 의한 에너지 손실을 나타낸 그래프이다. 철근과 철근 사이가 절연되어 자기장에 의하여 유도된 전압이

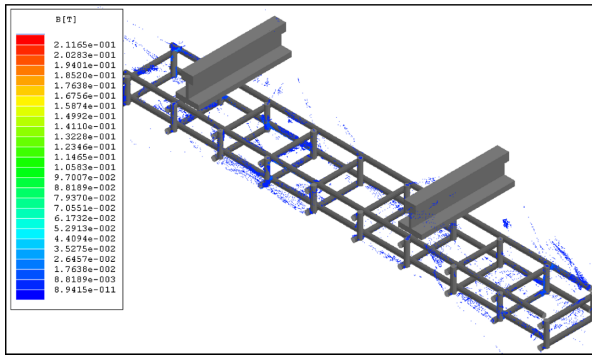


Fig. 5 Magnetic flux density of ferroconcrete roadbed which is insulated

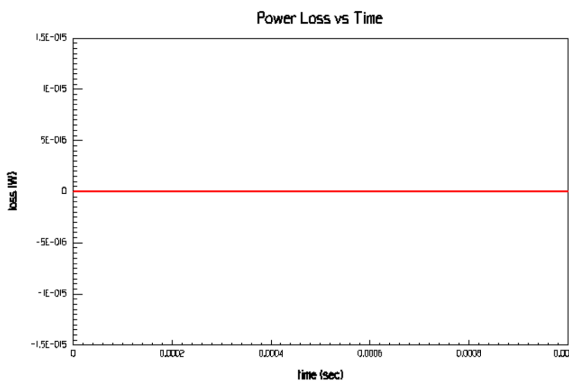


Fig. 6 Power loss of ferroconcrete roadbed which is insulated

폐루프를 형성할 수 없어 전류의 흐름이 발생되지 않아 신호전류의 손실 전력이 나타나지 않고 있다.

또한 철근사이의 전류가 사라지면서 철근에서 발생하는 자속이 없어지므로 발생하는 자속의 양도 감소된 것으로 나타났다. 철근의 절연환경우 레일과 철근에 의하여 발생하는 최대자속은 철근을 상호 절연하였을 때의 최대 자속에 비하여 약 2.436×10^{-11} 배 정도로 감소되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

차상신호를 사용하는 고속열차 시스템에서 AF궤도회로의 사용이 증가하고 있다. 또한 철근콘크리트 도상의 사용은 점차 증가하고 있다. 따라서 도상철근과 레일에 흐르는 신호전류와의 상호작용을 고려한 선로정수를 이용한 궤도정수의 설정이 필요하다. 신호전류가 2kHz대의 고주파 교류를 사용할 경우 레일에 흐르는 전류에 의하여 형성된 자기장이 도상의 철근과 결합하여 변압기와 같이 작용한다면 선로정수를 이루는 파라미터인 인덕턴스의 크기에 영향을 미칠 수 있으며, 인덕턴스의 증가는 AF궤도회로에 흐르는 신호전류의 손실을 증대시킨다.

신호전류의 손실이 증대되면 신호전류의 도달거리가 짧아지고, 이를 해소하기 위하여 신호전류의 크기를 증가시킨다면 유도결합에 의한 손실도 따라서 증가하게 된다.

이와 같이 도상에서 유도결합에 의한 손실이 발생하게 되면 궤도회로의 길이가 짧아질 수 있으며, 궤도회로의 길이가 짧아지는 것은 폐색구간의 수를 증가시켜, 건설비용의 증가를 가져올 수 있다.

본 논문은 도상의 철근과 레일신호전류와의 상호작용을 수학적으로 해석하는 방안을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 이를 증명하여 보았다. 도상내의 철근을 상호 절연하지 않고 철근이 폐루프를 형성하도록 하여 고주파 궤도신호를 흐르게 한 경우 철근이 유도결합하여 자기장 폐루프를 형성하므로 철근에 의한 전력손실이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 철근을 절연하지 않는 도상에 AF궤도회로를 사용할 경우에는 철근손실에 의한 전력을 감안할 수 있도록 궤도정수를 변화하여야 할 것으로 사료된다.

이와 같은 궤도정수가 변화하는 것을 막기 위하여 철근 상호간에 접합점이 없도록 절연하여 도상내에서 도상철근에 의한 폐루프를 제거하고 시뮬레이션을 시행하여 보았다. 이 경우에는 레일에 의한 자속은 발생되나 자기결합한 철근이 유기된 기전력을 흘릴 수 있는 폐루프가 존재하지 않아 순환 전류가 발생하지 않으므로, 유기된 기전력에 의한 전력손실이 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 자갈도상에서와 같은 누설전류와 레일의 인덕턴스 등 만을 고려하여 궤도회로의 선로정수 설정하여 궤도회로의 길이, 전송전력 등을 설정하면 될 것으로 사료된다.

연구결과 철근콘크리트 도상 설치 시 도상 철근 상호간의 절연을 시키는 일은 매우 중요하며 도상철근에 의한 선로정수의 변화를 최소화할 수 있는 방안임을 증명하였다.

참고문헌

- [1] Y.-T. Kim (2006) Railway Signal Control System, TechMedia, pp. 44-45.
- [2] M.-S. Kim (2009) A study on Coefficient Between Rail and Reinforcing Bars in Concrete Slab Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, Korean, 12(3), pp. 405-411.
- [3] K.-K. Yoo (2004) A Mathematical Model For The Track Circuit Of The Korea High Speed Line, in Proceeding of the Autumn Conference for Railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, Korean, pp. 2-13.
- [4] PFLEIDERER (2005) Study of the effectiveness of UM71 Track Circuits on Ballastless Track, PFLEIDERER, pp. 10.
- [5] William H, Hayt (1989) Engineering Electromagnetics, McGraw-Hill, Fourth Edition, pp. 299.
- [6] William H, Hayt (1989) Engineering Electromagnetics, McGraw-Hill, Fourth Edition, pp. 363.
- [7] E.-S. Han (2006) Maxwell 2D and 3D, Ansoft-Korea, Inc., pp. 102-110.
- [8] CSEE&Pfleiderer, Assembly for UM71 Track Circuit Measurement on Pfleiderer RHEDA 2000 Test Track, pp. 50-60.

접수일(2010년 4월 30일), 수정일(2010년 8월 13일),
게재확정일(2010년 9월 15일)