전자기 유도를 이용한 철도 레일 간 공극 측정

Inductive sensor for the measurement of the rail joint gap

*박종민 [1], #백윤수 [1], 최종현 [1]

*J. M. Park[1], # Y. S. Beak(ysbaek@yonsei.ac.kr)[1] , J. H. Choi[1]

[1]연세대학교 기계공학과

Key words : railway, inductive sensor, rail joint gap

1. 서론

철도 차량의 안정적인 운행을 위해서는 레일의 지속적인 이상 관리 및 탈선 방지가 필요하다. 과거에는 이를 인력으로 검사하였으나, 검사 인력의 사고 위험이 있고, 시간이 오래 걸려 처리 능력이 제한적이며, 인건비 등의 비용이 많이 든다. [1]

선로를 건설 시 기온에 따른 철의 신축성을 고려하여 25m 의 레일의 경우 이음매 틈새(Rail Joint Gap)를 40℃에서 1mm, 0℃에서 13mm, 기온변화가 심하지 않는 터널에서는 일정하게 2mm 정도의 간격을 두게 된다. [2]

Mizuno 등은 공진 회로를 겸비한 와전류 센서로 레일의 유간을 검지하였다. [3]

본 연구에서는 시변 전류가 흐르는 입력 코일과 검출 코일간의 전자기 유도를 이용하여 철도 레일 간 공극을 측정하는 자기 센서를 제안하였다. 전기와 자기의 상사 특성을 이용하여 두 개의 코일과 레일, 코어와 레일 간의 공극 그리고 철도 레일 간 공극 이루어진 상사 자기 회로 모델을 구성하여, 이론적으로 해석하였으며, 또한 유한 요소 해석을 통해 철도 레일 간 공극에 의해 검출 코일에 발생하는 신호를 해석하였다.

2. 설계 및 해석

2.1 시스템 설계

센서는 두 개의 코일과 코어로 구성되며, 그림 1 과 같이 레일 위에 설치된다. 1 차 코일에 시변 전류가 인가되면, 시변 자기장이 생성된다. 1 차 코일에 인가되는 시변 자기장에 의해 2 차 코일에 유도되는 전압의 크기는 철도 레일 간 공극 변위에 영향을 받으므로 2 차 코일에 유도된 전압의 Peak 값을 측정해 변위를 추정할 수 있다.

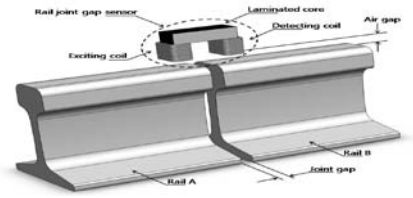

Fig. 1 Structure of rail joint sensor

2.2 모델링

코어에 코일을 N 턴(turn) 감았을 때, 도선에 걸린 전류 밀도 J 와 H 의 관계는 아래와 같이 기술된다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} \qquad (1)$$

식 (1)의 양 변을 Stoke's law 를 적용하면, 1 차측에 흐르는 시변 전류에 의해 생기는 기전력은 아래와 같이 정리된다

$$\Im_{total} = N_1 I_1 \qquad (2)$$

주어진 자기회로로부터 총 자속(Total Flux)는 Ohm's Law 에 의해, 아래와 같이 정리된다.

$$\Phi_{total} = \frac{\Im_{total}}{\Re_{total}} \qquad (1)$$

패러데이의 법칙에 Stokes's law 를 적용하여 정리하면 N_2 턴 감긴 코일에 유도되는 전압은 아래와 같이 정리된다.

$$V_2 = -N_2 \frac{\partial}{\partial t}(\int \vec{B} \cdot d\vec{S}) = -N_2 \frac{\partial \Phi_{Total}}{\partial t} = -\frac{N_1 N_2}{\Re_{Total}} \frac{\partial i}{\partial t} \quad (4)$$

철의 투자율은 무한하다고 가정하면, 레일과 코어의 자기 저항은 $\Re_{Rail} \simeq 0$ 및 $\Re_{Core} \simeq 0$ 으로 무시할 수 있다. 따라서 자기 회로의 총 자기 저항은 식(5)에 따라 달라진다.

$$\begin{aligned} \Re_{\mathrm{Total}} &= 2\Re_{\mathrm{Airgap}} + \Re(g)_{\mathrm{Railjointgap}} + \Re_{\mathrm{Core}} + \Re_{\mathrm{Rail}} \\ &\simeq 2\Re_{\mathrm{Airgap}} + \Re(g)_{\mathrm{Railjointgap}} \end{aligned} \qquad (5)$$

그러므로, 누설 자속이 없다고 가정하고 1 차측 코일에 $V_1 = V\sin(2\pi ft)$ 의 전류를 인가하면 2 차측에 유도되는 전압은 아래와 같다.

$$V_2 = -\frac{N_1 N_2}{R_1 \Re_{Total}} \frac{\partial}{\partial t}(V_1) = -\frac{2\pi f N_1 N_2 V}{R_1 \Re_{Total}} \cos(2\pi ft) \quad (6)$$

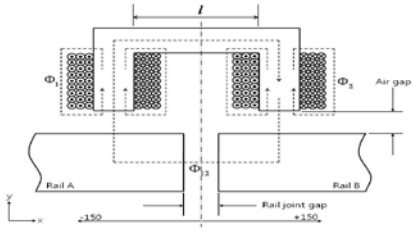

Fig. 2 Flux flow through the system

3. 유한요소해석

1 차측에 시변 전류를 인가하고 철도 레일 간의 공극의 중심을 기준으로 -150㎜~150㎜ 이동이 발생하였을 때, 2 차측에 유도되는 전압 peak 값을 Ansoft 사의 전자기 유한요소 해석 프로그램 Maxwell 을 이용하여 분석하였다. 1 차측과 2 차측에 각각 200 턴, 600 턴의 코일을 감고, 실험적 방법으로 찾은 시스템 공진 주파수 100kHz, AC10V 를 1 차측에 인가하였다.

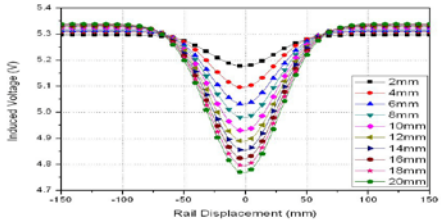

Fig. 3 Induced voltage from detecting coil; Effect of rail joint gap

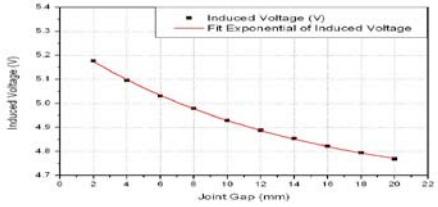

Fig. 4 Peak induced voltage from detecting coil; Effect of rail joint gap

해석한 결과를 Fig.3 에서 보여준다. Fig.4 에서 보여주는 것과 같이 철도 레일 간 공극의 길이에 따라 2 차측 코일에 검출되는 전압의 peak 값을 지수함수의 형태로 curve fitting 하였다. Fig. 5 은 curve fitting 한 이후의 error 를 보여준다.

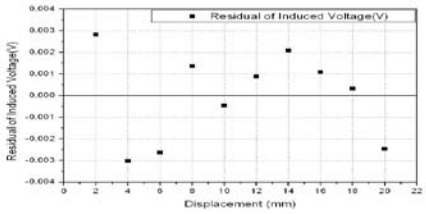

Fig. 5 Error of induced voltage

4. 결론

본 연구에서는 철도 레일 간 공극의 길이 변화에 의해 야기되는 자기 저항의 변화가 2 차측 코일에 유도되는 전압의 크기를 변화시킨다는 것을 확인할 수 있다. 2 차측 코일의 전압의 Peak 값은 -150㎜~150㎜ 의 범위에서 철도 레일 간 공극의 길이와 지수함수의 관계로 curve fitting 되었으며, error 는 -3㎷ 에서 +3㎷ 로 미세함을 확인할 수 있었다. 또한 레일의 공극이 되는 1㎜~13㎜ 구간의 해석을 2㎜ 간격으로 하였고 증폭비에 따라 더욱 정밀한 측정이 가능할 것이다. 따라서 2 차측에 유도되는 전압의 크기를 확인함으로써 철도 레일 간 공극의 거리를 정밀하게 측정할 수 있다.

참고문헌

1. M.Uchida, 2008, "鉄道のメンテナンスに関する研究開発の現状と展望", 第 20 回鉄道総研講演会 講演集, pp.13~22
2. Kores Railroad Research Institute., 2007, “Railway running by science technology”, Q-line.
3. T.Mizuno, S.Kawasaki, D.Mochizuki, S.Watanabe, S.Enoki, H.Yamada, 2002, “Rail Joint Gap Sensor with Two Detecting Coils across to Exciting Coil having Embarkation Possible Lift-off for Track Inspection Car,” 日本応用磁気学会誌 Vol. 26, pp.547~550,
4. Jung Jai Hyun, 2009, Inductive sensor for the measurement of a lateral rail displacement, Proceedings of the KSME 2009 Fall Annual Meeting, pp.1020~1023