

궤도회로의 단자망 모델링 및 목침목 저항 특성 해석

Network Modeling on Track Circuit and Analysis of Resistance Characteristic on Wood Sleeper

윤인모¹ · 김민석[†] · 고영환² · 이종우³

In-Mo Yoon · Min-Seok Kim · Young-Hwan Ko · Jong-Woo Lee

Abstract Sleepers perform bearing rails and are underneath rails. Therefore, the current and voltage of rails are related to the resistance of sleepers. In case that the resistance of sleepers are low, operation problems of relays in track circuits are occur because of flowing leakage current through sleepers. So the condition that the track circuit is always occupied by a train is kept. Currently, the creosote has been used in wood sleepers due to prevention against putrefaction. After a long time, the material is changeable to the chemistry material bases on carbon dioxide or carbon. So, the insulation resistance of wood sleepers is lower than the initial insulation resistance. In case of effecting wood sleepers as conductors, amplitude of the current and voltage on rails is decreased. This phenomenon causes that a train does not receive signals. In this paper, four-network model on the track circuit including the insulation resistance of sleepers is suggested. Also, the standard value of the resistance in straight section is proposed in the wood sleeper.

Keywords : Wood sleeper, Track circuit, Short current, Receive voltage, Four-network model

초 록 레일 밑에 놓이는 침목은 레일을 지지해 주는 역할을 한다. 침목의 저항은 레일의 전류 및 전압과 밀접한 관계가 있다. 침목의 저항이 낮으면 레일 사이에 침목을 통해 폐회로가 형성되어 레일의 전류 및 전압이 감소한다. 이로 인해 궤도 계전기 동작에 문제가 발생하여 열차가 항상 궤도를 점유하게 된 상태로 유지된다. 현재 도시철도 및 광역철도에서 사용하고 있는 목침목은 산화작용을 방지하기 위해 방부제를 사용한다. 방부제 성분 중에 크레오소트가 있는데 이 물질은 탄소를 기저로 하는 화학물질로 변화된다. 도체적인 성질을 가지고 있는 탄소는 목침목의 저항에 영향을 미친다. 크레오소트의 화학작용에 의해 발생한 탄소를 인해 목침목이 도체로써 작용하면 침목 간격마다 레일 사이에 폐회로가 형성되어 열차의 단락 전류 및 궤도회로 종단의 전압이 감소하여 궤도 계전기가 오동작이 발생한다. 본 논문에서는 목침목의 저항을 포함하는 궤도회로 4단자망 모델을 제시하였다. 또한 직선구간에서 목침목의 기준 저항 값을 제시하였다.

주요어 : 목침목, 궤도회로, 단락전류, 수신전압, 4단자모델

1. 서 론

궤도회로 시스템은 철도신호시스템으로써 열차의 위치를 검지하는 중요한 시스템이다. 궤도회로 종류에는 크게 AF(Audio Frequency)궤도회로와 PF(Power Frequency)궤도회로가 있다.

AF궤도회로 시스템은 궤도를 일정부분으로 나누어 전기적으로 절연시킨다. 분리된 궤도에 반송 주파수를 사용하여 차량 속도 제어에 필요한 정보를 차상으로 전송한다. 전송 방법은 레일에 전류를 흘려서 자계를 형성하여 차량의 전두부 아래에 설치되어 있는 자계센서를 통해 차상 제어 안테나가 정보를 수신한다. 전류의 형태로 레일을 통해 정보를

전송하기 위해서는 궤도회로 전 구간에 걸쳐 자계센서가 수신 가능한 전류의 레벨을 유지하는 것이 중요하다[1].

PF궤도회로는 레일에 수신되는 전압에 의해 궤도 계전기가 동작하여 열차유무를 판단한다[2].

Fig. 1과 같이 목침목은 보통 자갈도상 궤도회로에 사용하고 있는 도시철도나 광역철도에 사용된다. 침목의 저항은 궤도회로의 전류 및 전압에 영향을 미친다. 침목의 저항이 높으면 전류는 오로지 레일을 통해 흐르지만 침목의 저항이 낮으면 전류는 레일 및 침목을 통해 흐르게 되어 궤도회로 동작에 문제가 발생한다.

현재 목침목은 산화작용 방지 및 수명연장을 위해 방부제를 사용한다. 방부제 물질 중에 크레오소트가 있는데 이 물질은 이산화탄소나 탄소를 기저로 하는 화학물질로 변화된다[3]. 도체적인 성질을 가진 탄소는 목침목을 도체로써 작용하게 한다. Fig. 2는 목침목에서 레일이 놓이는 위치 사이의 저항을 측정된 결과로써 목침목의 저항이 약 200Ω이다. 목침목의 저항이란 레일이 놓이는 위치 사이에서 목침목의

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과
E-mail : kms0403@seoultech.ac.kr

¹호남대학교 광산캠퍼스 정보통신대학

²서울메트로 신호팀

³서울과학기술대학교 철도전기신호공학과

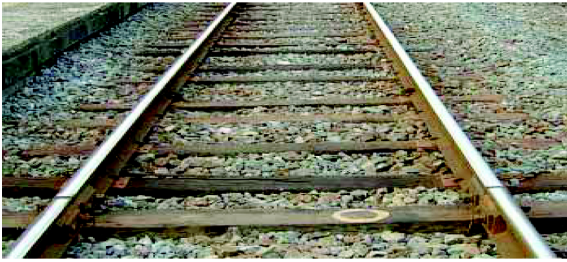


Fig. 1 Installed wood sleepers

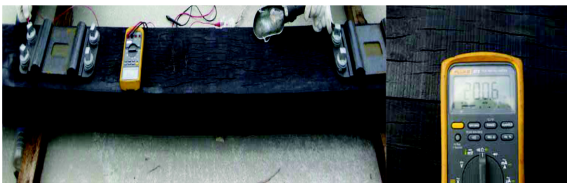


Fig. 2 Resistance of wood sleeper

전기적 저항을 의미한다. 목침목의 저항이 200Ω이하인 경우에 목침목 간격마다 누설전류가 발생하여 단락전류 및 궤도회로 종단의 전압이 감소하여 열차가 정보를 수신하지 못한다.

본 논문에서는 목침목의 저항을 포함하는 궤도회로 모델을 4단자망에서 Thevenin 등가회로를 이용하여 제안하였다. 제안한 모델을 이용하여 AF궤도회로의 단락 전류 및 PF궤도회로의 수신 전압의 크기를 해석하였다. 단락 전류 및 수신 전압의 크기를 기준으로 직선구간에서 목침목의 기준 저항을 제시하였다.

2. 목침목의 저항을 포함한 4단자 모델

궤도회로의 임피던스 본드나 공심코어 등 인덕티브 커패시터의 공진회로를 제외하고, 목침목을 포함한 4단자 모델은 목침목의 저항을 포함하는 단자와 전송선 단자로 나눌 수 있으며, 단자 정수 값은 식(1) 및 식(2)와 같다[4-6].

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_w} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \cosh(\theta l) & Z_c \sinh(\theta l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\theta l) & \cosh(\theta l) \end{bmatrix} \quad (2)$$

R_w 는 침목의 저항이고, θ 는 전파정수이다. Z_c 는 특성 임피던스이고, l 은 전송선 단자의 길이이다. 특성임피던스는 식(3)과 같고, 전파정수는 식(4)와 같다[7-9].

$$Z_c = \sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)} \quad (3)$$

$$\theta = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} \quad (4)$$

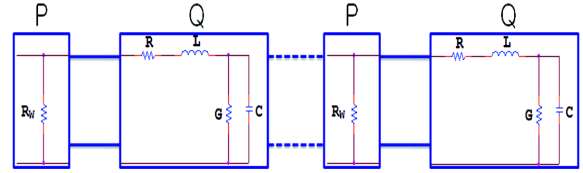


Fig. 3 Four-network model including resistance of wood sleeper

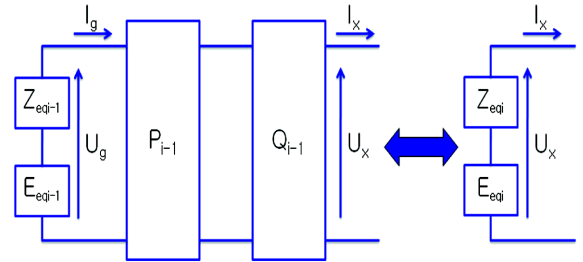


Fig. 4 Thevenin equivalent model

R 은 레일의 저항이고, L 은 레일의 인덕턴스이다. G 는 레일 사이의 컨덕턴스이고, C 는 레일 사이의 커패시턴스이다.

Fig. 3의 4단자 모델에서 P 와 Q 단자는 연속적으로 연결되어 있으므로 하나의 Thevenin 등가회로를 이용하여 모델을 나타내면 Fig. 4이다.

Fig. 4와 같이 i 번째 P 와 Q 단자에서 전압 및 전류는 $i-1$ 번째 단자까지의 전압과 임피던스를 이용해서 계산한다. Thevenin 등가회로를 이용한 입출력 전압 및 전류 관계를 나타내면 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_x \end{bmatrix} = P_{i-1} Q_{i-1} \begin{bmatrix} U_g \\ I_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

Fig. 4를 이용하여 입·출력 전압에 대해 정리하면 식(6) 및 식(7)과 같다.

$$U_g = E_{eqi-1} - Z_{eqi-1} I_g \quad (6)$$

$$U_x = E_{eqi} - Z_{eqi} I_x \quad (7)$$

식(6)을 식(5)에 대입하면 식(8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_x \end{bmatrix} = P_{i-1} Q_{i-1} \begin{bmatrix} -Z_{eqi-1} \\ 1 \end{bmatrix} + P_{i-1} Q_{i-1} \begin{bmatrix} E_{eqi-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서 임피던스에 관련된 첫 번째 항을 치환하면 식(9)와 같고, i 번째 단자의 임피던스는 식(10)과 같다.

$$M_i = P_{i-1} Q_{i-1} \begin{bmatrix} -Z_{eqi-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Z_{eqi} = \frac{m_1}{m_2} \quad (10)$$

식(8)에서 $i-1$ 번째의 P 와 Q 단자의 값을 치환하면 식(11)과 같고, i 번째 단자의 전압을 계산하면 식(12)와 같다.

$$M_i = P_{i-1} Q_{i-1} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$E_{eqi} = \left(h_{11} - \frac{m_1 h_{21}}{m_2} \right) E_{eqi-1} \quad (12)$$

3. 궤도회로의 전류 및 전압

궤도회로의 임피던스 본드나 공심코어 등 인덕터 및 커패시터의 공진회로 및 목침목을 포함하는 궤도회로 모델을 송신 전압, 전류 및 수신 전압, 전류를 나타내면 4단자망으로 나타내면 Fig. 5이다[10-13].

E 는 궤도회로의 송신 전압이고, R_s 는 열차 단락저항이다. Z 는 송신측 임피던스이고, Z_{jes} 는 수신측 임피던스이다. 송신측 및 수신측 임피던스는 저항, 인덕터 및 커패시터를 포함하는 공진회로의 임피던스를 의미한다. I_{cc} 는 단락전류이다.

F 단자는 열차가 지나가기 전의 단자를 의미하고, B 단자는 열차가 지나간 후의 단자를 의미하므로 열차가 궤도회로를 진행함에 따라 연속적으로 값이 변한다.

F 단자와 B 단자는 P 단자와 Q 단자를 Fig. 3과 같이 연속적으로 포함하고 있는 단자이다. 열차 단락저항에 의해 궤도회로의 단락전류를 계산하기 위해 Fig. 5에서의 Kirchhoff 전류법칙과 Ohm 법칙을 적용하면 식(13) 및 식(14)와 같다.

$$I_{cc} = I_x - I_2 \quad (13)$$

$$U_x = R_s I_{cc} \quad (14)$$

Fig. 5의 F 단자를 이용한 식(15)과 식(16)을 이용하여 I_x 는 식(17)과 같다.

$$N = F \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_1} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$I_x = \frac{n_2}{n_1} U_x - \frac{E}{Z} \left(\frac{n_2}{n_1} f_{12} - f_{22} \right) \quad (17)$$

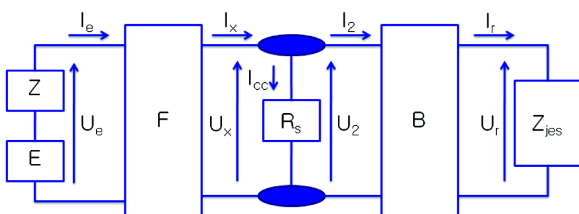


Fig. 5 Four-network model in track circuit

Fig. 5의 B 단자를 이용한 식(18)을 이용하여 I_2 는 식(19)와 같다.

$$K = B^{-1} \begin{bmatrix} Z_{jes} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$I_2 = \frac{k_2}{k_1} U_x \quad (19)$$

식(14), 식(17) 및 식(19)을 식(13)에 대입하여 단락전류를 계산하면 식(20)과 같다.

$$I_{cc} = \frac{\left(f_{22} - \frac{n_2}{n_1} f_{12} \right) \frac{E}{Z}}{1 - R_s \left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{k_2}{k_1} \right)} \quad (20)$$

궤도회로의 수신측 전압 및 전류는 식(14), 식(19) 및 식(20)을 이용하여 식(21)과 같다.

$$\begin{bmatrix} U_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

4. 시뮬레이션

궤도회로 4단자망을 기본으로 하여 목침목의 저항을 10 Ω ~10k Ω 으로 변화함에 따라 AF궤도회로의 단락전류 및 PF궤도회로의 수신 전압을 Matlab 프로그램을 이용하여 해석하였다.

직선구간에서 도시철도 목침목 시설 규정에 따라 목침목은 10m당 17개를 설치하였다. 궤도회로 길이는 폐색구간을 고려한다. 직선구간에서 도시철도의 최대 폐색구간의 길이는 최대 약 300m이므로 AF 및 PF궤도회로의 길이를 0~300m로 변화함에 따라 단락 전류 및 전압을 해석하였다. 자갈도상 궤도회로를 기반으로 하는 목침목이기 때문에 1km당 궤도회로의 절연저항은 3 Ω 을 적용하였다[2].

4.1 AF궤도회로의 단락전류

AF궤도회로의 단락전류를 계산하기 위한 시뮬레이션 조건은 Table 1이다[14].

Table 1을 기준으로 목침목의 기준 저항을 계산하기 위해서 궤도회로 길이를 0~300m로 변화함에 따라 AF궤도회로의 단락전류를 해석하면 Fig. 6이다.

AF궤도회로에서 목침목의 저항에 따른 단락전류를 해석한 결과, 목침목의 저항 변화에 대한 기준 단락전류 1A를 만족하는 최대 궤도회로의 길이는 Table 2이다.

Table 2와 같이 목침목의 저항이 감소함에 따라 누설전류가 발생하여 최대 궤도회로의 길이가 짧아진다. 직선구간에서의 최대 궤도회로 길이인 300m에서 기준 단락전류 1A를 만족하기 위해서는 목침목의 저항이 10k Ω 이상이 되어야 한다.

Table 1 Electrical parameter in AF track circuit

Parameter	Value
Transmission voltage (V)	5
Standard short current (A)	1
Short resistance (Ω)	0.01
Resistance of rail ($m\Omega/m$)	1.1
Inductance of rail ($\mu H/m$)	1.33
Capacitance of rail (nF/m)	0.280
Frequency (Hz)	1600
Impedance of transmitter (Ω)	2
Impedance of receiver (Ω)	2

Table 3 Electrical parameter in PF track circuit

Parameter	Value
Transmission voltage (V)	9
Standard receive voltage (V)	6.5
Short resistance (Ω)	0.01
Resistance of rail ($m\Omega/m$)	0.276
Inductance of rail ($\mu H/m$)	1.5
Capacitance of rail (nF/m)	0.950
Frequency (Hz)	60
Impedance of transmitter (Ω)	2
Impedance of receiver (Ω)	2

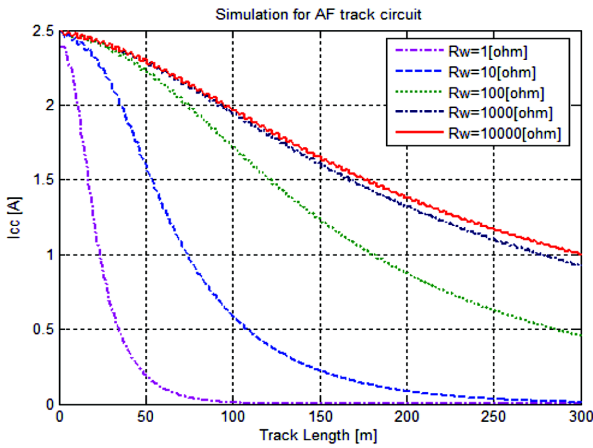


Fig. 6 Short current through track length in AF track circuit

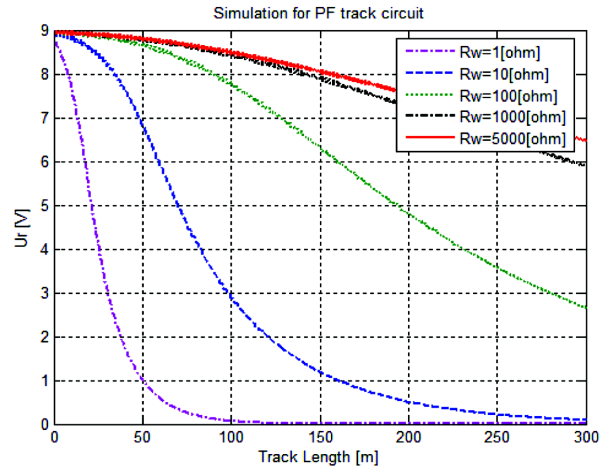


Fig. 7 Voltage through track length in PF track circuit

Table 2 Length of track circuit in AF track circuit

Resistance of wood sleeper (Ω)	Length of track circuit (m)
1	25
10	75
100	180
1000	270
10000	300

Table 4 Length of track circuit in PF track circuit

Resistance of wood sleeper (Ω)	Length of track circuit (m)
1	15
10	60
100	140
1000	250
5000	300

4.2 PF궤도회로의 수신전압

Table 3은 PF궤도회로의 수신전압을 계산하기 위한 시뮬레이션 기준이다[15].

Table 2를 기준으로 목침목의 기준 저항을 계산하기 위해서 궤도회로길이를 0~300m로 변화함에 따라 PF궤도회로의 단락전류를 해석하면 Fig. 7이다.

PF궤도회로에서 목침목의 저항에 따른 수신전압을 해석한 결과, 목침목의 저항 변화에 대한 기준 수신전압 6.5V를 만족하는 최대 궤도회로의 길이는 Table 4이다.

Table 4와 같이 목침목의 저항이 감소함에 따라 누설전류에 의한 전압강하가 발생하여 최대 궤도회로의 길이가 짧아진다. 직선구간에서의 최대 궤도회로 길이인 300m에서 기

준 수신전압 6.5V를 만족하기 위해서는 목침목의 저항이 5k Ω 이상이 되어야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 목침목의 저항을 포함하는 궤도회로를 Thevenin 등가모델을 이용하여 4단자망을 이용하여 제시하였다. 궤도회로 모델을 이용하여 AF궤도회로의 단락전류 및 PF궤도회로의 수신 전압의 크기를 해석하였다.

AF궤도회로의 단락전류는 목침목의 저항이 증가함에 따라 높아진다. 이는 저항이 증가함에 따라 목침목을 통해 흐르는 누설전류의 크기가 줄어들어 단락전류가 증가한다. AF

궤도회로의 기준 단락전류를 만족하는 목침목의 저항은 $10k\Omega$ 이상으로 해석되었다.

PF궤도회로의 수신전압은 목침목의 전기적 저항이 증가함에 따라 높아진다. 이는 목침목의 전압강하가 줄어들어 수신전압이 증가한다. PF궤도회로의 기준 수신전압을 만족하는 목침목의 저항은 $5k\Omega$ 이상으로 해석되었다. 기준 저항 값을 만족하기 위한 방법 중 하나는 침목 밑에 절연패드를 설치하는 것이다. 절연패드를 설치함으로써 목침목의 저항을 증가시켜 목침목을 통해 흐르는 전류가 감소한다.

AF궤도회로의 단락전류 및 PF궤도회로의 수신 전압의 크기를 기준으로 목침목에서 요구되는 기준 저항을 해석한 결과, AF궤도회로에서 PF궤도회로보다 약 2배 높게 해석되었다. 그러므로 목침목 저항의 영향은 PF궤도회로 보다 AF궤도회로에 더 크게 작용한다.

본 연구는 향후 AF궤도회로의 기준 단락전류 및 PF궤도회로의 기준 수신전압을 만족하는 목침목의 기준 저항을 산출할 경우에 활용될 수 있다. 또한 목침목을 사용하는 광역철도 및 도시철도에서 유지보수 항목 작성시에 목침목의 저항도 고려해야 한다.

참고문헌

- [1] M.S. Kim (2009) A Study on Coupling Coefficient between Rail and Reinforcing Bars in Concrete Slab Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 405-411.
- [2] S.C. Suh (2009) Review and Analysis in PF Track Circuit, *Seoul Metropolitan Rapid Transit Cooperation*, pp. 5-8.
- [3] D.H. Lee (2005) Prevention of Splitting of Wood Sleepers and Its Reuse, *Korea Forest Research Institute*, pp. 22-25.
- [4] R. John Hill (1993) Rail Track Distributed Transmission Line Impedance and Admittance: Theoretical Modeling and Experimental Results, *IEEE Trans*, 42(2), pp. 225-241.
- [5] K.B. Park (2006) A Internal Signal Modeling for a Defect Diagnosis of Track Circuit on HSL, in Proceedings of the 2006 Autumn Conference for Railway, *Journal of the Korea Society of Railway*, pp. 32-38.
- [6] S.A. Schelkunoff (1937) Transmission Theory of Plane Electromagnetic Waves, *IRE.*, 25, pp. 1457-1492.
- [7] J.K. Um (2004) A Mathematical Model for the Track Circuit of the Korea High Speed Line, in Proceedings of the 2004 Spring Conference for Railway, *Journal of the Korea Society of Railway*, pp. 7-13.
- [8] W.H. Hayt (2002) Engineering Circuit Analysis, McGraw-Hill, Sixth Edition, pp. 621-635.
- [9] D.K. Cheng (2002) Fundamentals of Engineering Electromagnetics, *Pearson Education*, pp. 315-319.
- [10] M.S. Kim (2009) A Study on the Location of Compensation Capacitor and Capacitance in the Concrete Slab Track, in Proceedings of the 2009 Autumn Conference for Railway, *Journal of the Korea Society of Railway*, pp. 879-891.
- [11] W.H. Kwak (2006) A Study on the Improvement of Track Circuit Measurement Equipment for High Speed Line, in Proceedings of the 2006 Autumn Conference for Railway, *Journal of the Korea Society of Railway*, pp. 22-27.
- [12] James W. Nilsson (2007) Electric Circuits, *Prentice Hall*, pp. 810-813.
- [13] K.B. Park (2007) A Study on the Improvement for a Defect Diagnosis of Track Circuit on HSL, in Proceedings of the 2007 Autumn Conference for Railway, *Journal of the Korea Society of Railway*, pp. 1656-1664.
- [14] Siemens (2005) Assembly for Track Circuit Measurement Test Track, pp. 63-70.
- [15] Seoul Metro (2009) Test Results for PF Track Circuit, pp. 5-6.

접수일(2010년 9월 10일), 수정일(2010년 11월 17일),
게재확정일(2010년 11월 25일)