

임피던스 측정을 통한 레일절손 검지에 관한 연구

Study on Detection of Broken Rail Using Impedance Measurement

김재희* · 안치형

Jae Hee Kim · Chi-Hyung Ahn

Abstract This paper proposes a method to detect rail broken through impedance measurement. In general, broken rails are detected in real time using the track circuit, but the proposed method not only detects the broken rails but also estimates positions of broken areas by measuring the rail impedance. To electrically insulate one side of the rail, parallel resonance is made by adding a capacitor; then, the impedance of the other rail is measured. If the measured impedance has an inductive value, there is no broken area of rail. However if the measured impedance has a capacitive value, the rail is broken. The proposed method is modeled using a transmission line; it is shown that the modeling can estimate the position of the broken rail according to the impedance value. The rail impedance is measured by the proposed method for a 60m simple rail model, and it is verified that the presence of a broken rail changes the rail impedance.

Keywords : Rail broken, Impedance, Detection

초 록 본 논문에서는 임피던스 측정을 통한 레일절손을 검지하는 방법에 대해서 제시하도록 한다. 일반적으로 레일절손은 궤도회로를 통해 실시간으로 판단을 하나 궤도회로를 사용하지 않고 레일의 임피던스를 측정함으로써 인해서 절손유무와 절손위치를 추정하였다. 레일의 한쪽에 병렬공진을 발생시켜 전기적으로 절연을 함으로써 다른쪽 레일의 임피던스가 측정되도록하였다. 측정된 임피던스가 인덕티브 성분을 가지면 레일의 절손이 존재하지 않으며, 캐패시티브 성분을 가지면 레일의 절손이 발생하게된다. 전송선로모델을 이용하여 제시한 구조를 모델링하였으며, 모델링을 통해 임피던스 값에 따라 절손위치가 추정가능함을 보였다. 실제 60m 레일 모형에 대해서 제안한 방법으로 임피던스를 측정하였으며, 임피던스 값에 따라 절손유무가 판단이 되는 것을 확인하였다.

주요어 : 레일절손, 임피던스, 검지

1. 서 론

CBTC(Communication Based Train Control, 무선통신기반 열차제어) 시스템은 열차제어를 위하여 무선통신을 이용하여 지상과 차상간의 통신을 하는 시스템을 말하며, 열차의 위치는 지상에 설치된 트랜스 폰더를 이용하여 인식한다[1]. 이러한 CBTC 시스템은 기존의 궤도회로를 사용하지 않는 장점을 가지고 있어, 효율성과 유지보수성이 좋은 장점이 있는 반면에 실시간으로 레일의 절손을 감지 할 수 없다는 단점이 있어 열차운행중 레일의 절손이 발생하게 되면 열차의 탈선사고등이 발생할 우려가 있다. 따라서 CBTC 시스템을 사용하더라도 레일절손을 검지할 수 있는 시스템이 필요하다. 궤도회로를 사용하지 않고 절손을 검지하는 방법으로는 열차의 미운행시간에 검측차를 이용하여 레일을 검사하는 방법과 광케이블을 레일에 부착하여 실시간으로 검지하는 방법 등이 있다[2]. 검측차를 이용하는 방법은 실시간으로 절손을 검지할수 없는 단점이 있고 광케이블을 이용하는 방법은 인프라에 부착되는 구조물이 많기 때문에 활용성이 높지 않다. 궤도회로를 사용하여 레일절손을 판단하게되면 절손의 정확한 위치 추정이 어려우며, 정확한 위치추정을 위해서는 일정구간마다 다수의 궤도회로를 설치해야 하기 때문에 설치비용과 유지보수비용이 많이 드는 단점이 있다[3]. 검측차, 광케이블, 궤도회로 등의 각 방법에 대한 개요도를 그림 1에 도시하였다. 본 논문에서는 기존의 레일절손검지 방법이 아닌 선로의 임피던스 측정을 통한 레일절손을 검지하는 방법에 대해서 제시하고자 한다.

*Corresponding author. E-mail: jaehee@krrri.re.kr.

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.190>

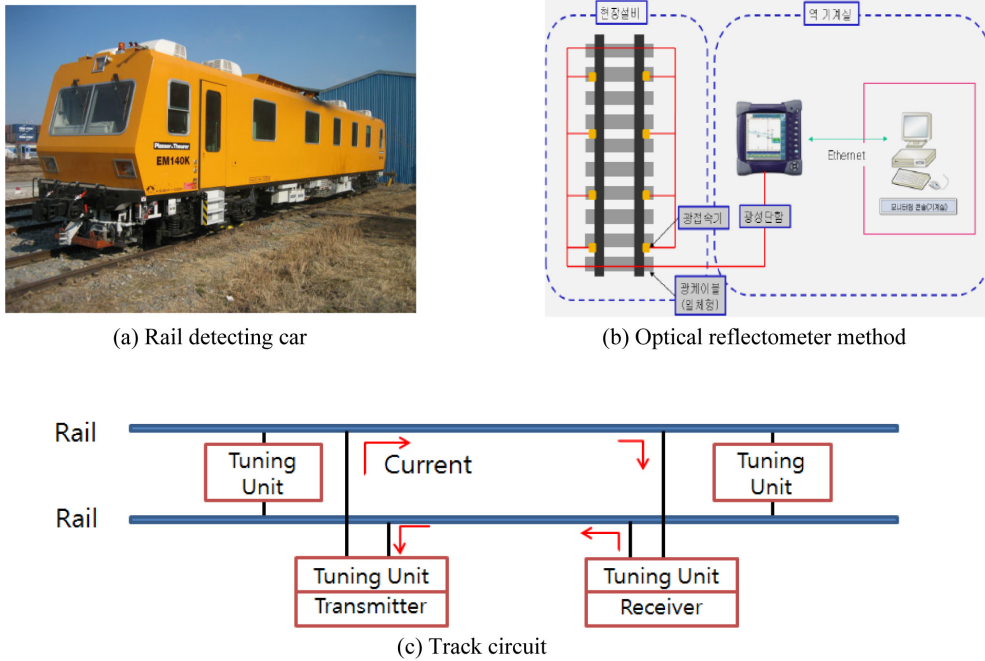


Fig. 1. Conventional methods for detection of broken rails.

2. 레일절손 검지 장치

2.1 기본구조

그림 2는 본 논문에서 제시하고자 하는 레일 절손 검지장치의 기본구조를 나타내고 있다. 레일의 임피던스를 측정하여 레일 절손의 유무를 검지하는 방법이다. 일반적으로 도시철도의 선로는 절연이 없는 무절연 궤도이다. 따라서 구간을 지정해 주기 위하여 레일의 양쪽은 서로 연결해 주어야 한다. 레일의 임피던스를 측정하려면 측정지점이 선로의 한쪽 끝이 전기적으로 절연이 되어 있어야 한다. 따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 레일을 전기적으로 절연해 주기 위하여 병렬로 공진 커패시터를 연결하였다. 임피던스 측정 지점을 기준으로 왼쪽이 전기적으로 절연이 되면 측정되는 레일의 임피던스는 오른쪽이다. 그림 3은 그림

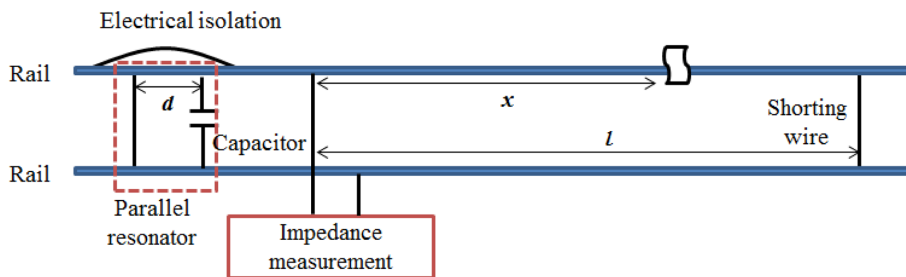


Fig. 2. Proposed structure for measurement of broken rails.

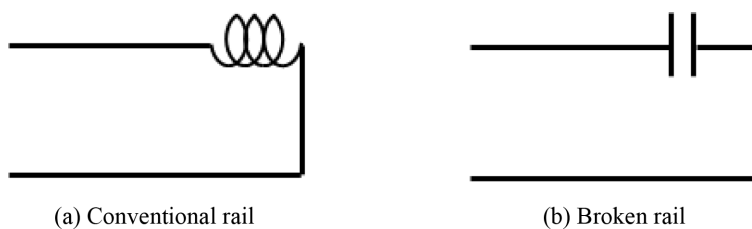


Fig. 3. Equivalent circuit model.

2의 회로에 대해서 등가회로를 도식한 것이다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 레일의 절손이 발생하지 않았을 경우는 등가회로는 인덕터가 연결된 것과 같으며, 만약 레일에 절손이 발생하게 되면 (b)와 같이 캐패시터가 연결된 것으로 볼 수 있다. 따라서 임피던스 측정을 통해 구간내 레일절손 유무를 판단할 수 있다.

2.2 등가회로 모델

그림 2의 제안된 구조는 그림 4와 같이 등가회로 모델을 만들 수 있다. 레일의 경우 두개의 도체가 나란히 배열이 되기 때문에 분산형 등가회로모델인 전송선로 모델의 적용이 가능하다[4]. 임피던스 측정지점을 기준으로 왼쪽은 짧은 전송선로, 오른쪽은 절손이 존재하는 전송선로로 모델링이 가능하며 왼쪽은 병렬공진회로를 형성하게 되며 공진할 때 open으로 보이기 때문에 레일이 전기적으로 끊겨있는 것과 동일한 효과를 갖는다. 전송선로의 임피던스는 레일이 끊긴지점 x에 따라서 값이 변해간다. 따라서 임피던스 측정을 통해 절손위치 추정도 가능하다. 다만 전송선로가 자체공진을 할 수 있는 길이가 되면 안되기 때문에 전송선로의 최대 길이 l은 측정주파수의 파장/4 보다 작아야 한다.

등가회로 모델을 사용하여 레일 절손위치에 따른 임피던스를 시뮬레이션 하였다. 우선 레일절손을 검지하는 길이를 설정하였다. 도시철도의 역간거리는 평균적으로 1km 정도의 길이를 가지므로 측정 레일의 길이는 1km로 산정을 하였다. 본 장치를 사용하기 위해서는 주파수를 설정해야하며, 파장/4가 1km가 되는 주파수는 75kHz이다. 따라서 레일의 길이가 파장/4보다 충분히 작게 하기 위하여 측정주파수를 40kHz로 선정을 하였다. 레일은 두개의 도선으로 구성되어 있으며 두 도선의 전송선로 모델의 특성 임피던스는 다음의 수식으로 계산이 될 수 있다[5].

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\frac{\mu \cosh^{-1}(D/2a)}{\pi}}}{\sqrt{\frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(D/2a)}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu \cosh^{-1}(D/2a)}{\epsilon}} \quad (1)$$

위의 수식에서 레일은 공기중에 노출되어 있으므로 μ 는 공기중의 투자율, ϵ 은 공기중의 유전율, D 는 레일 사이의 간격, a 는 한 개 레일의 도체 반경을 나타낸다. 따라서 표준궤간인 1,435mm를 사용하고 레일의 단면의 반경을 40mm라 가정을 하면 전송선로의 특성임피던스는 513Ω이 계산이 된다. 시뮬레이션을 진행하기 위해서 그림 2의 임피던스 측정지점과 왼쪽 끝단은 단락지점의 거리 $d = 10m$ 로 선정을 하였다. 이 경우 공진을 형성하기 위한 캐패시터의 값은 930nF으로 선정을 하였다. 레일이 절손되었을 경우 절손된 지점의 캐패시터는 상당히 작게된다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 절손 캐패시터를 0.1pF으로 가정을 하였다. 또한 현실적으로는 레일의 저항성분과 레일 주변의 손실 매질에 의해 한 성분이 고려되어야 하나, 본 등가회로 모델에서는 손실부분은 무시를 하였다. 레일 절손이 없을 경우 레일의 길이 $l = 1km$ 에 대해서 시뮬레이션된 임피던스는 $j1,432\Omega$ 이 되어 인덕턴스 성분으로 측정이 되었다. 레일이 절손이 되면 캐패시터 값으로 측정이 되었으며, 절손위치에 따른 임피던스의 값이 달라졌다. 절손위치에 따른 레일의 임피던스를 그림 5에 도식하였다. 이의 결과로부터 임피던스 측정을 통해 레일절손을 감지할 수 있을 뿐더러 절손위치를 추정하는 것이 가능하다. 그림 5의 결과를 보면 절손지점이 측정지점과 가까우면 임피던스의 허수 값이 커져 open에 가깝게 되고 절손지점이 멀어지면 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 레일에 대해서 절손 지점에 따른 임피던스 값을 도표화 한다면 측정값을 기준으로 절손지점을 유추할 수 있다. 임피던스의 측정 정확도에 따라서 절

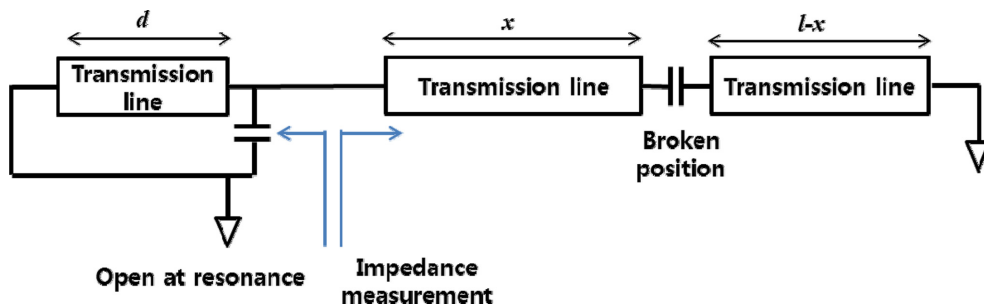


Fig. 4. Transmission line model for the proposed design.

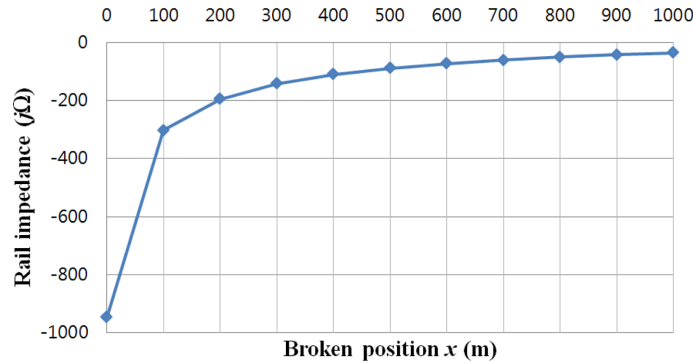


Fig. 5. Simulated rail impedance for different positions of broken rails.

손지점 유추의 정확도가 결정이 될 수 있으며 등가회로 모델 결과로는 약 100m 단위에서 값이 차이가 잘 드러나기 때문에 100m 정도의 오차로 절손위치 추정이 가능할 것으로 판단이 된다.

2.3 실험을 통한 성능검증

본 논문에서 제안하는 레일절손 검지장치에 대해서 성능검증을 위하여 간이실험을 수행하였다. 실제 궤도에서 실험하기에는 절손구현의 어려움이 있어 전기적으로 유사한 상황인 두께가 1.78mm인 전선을 사용하여 궤도를 구성하여 실험하였다. 레일의 임피던스는 네트워크 분석기를 사용하여 측정을 진행하였다. 그림 6은 실험사진을 보여주고 있다. 실험은 실내복도 공간에서 수행을 하였으며, 임피던스를 측정하는 위치와 레일의 왼쪽끝간 거리 $d=10\text{m}$, 그리고 임피던스 측정지점으로 절손검지를 위한 레일 길이는 공간을 제약을 고려해 $l=60\text{m}$ 로 선정을 하였다. 레일 왼쪽 끝과 병렬공진을 형성하기 위하여 캐패시터는 470nF 2개를 병렬로 연결하여 940nF를 만들어 사용하였다. 공진이 일어나는 주파수는 31.854kHz였으며 이를 임피던스 측정 주파수로 사용을 하였다. 임피던스는 60m간 레일이 있을 경우의 임피던스와 10m 단위로 레일을 절손하였을때의 임피던스 값을 측정하였다. 측정된 임피던스는 표 1에 도시하였다. 60m 길이에 대해서 레일이 끊기지 않았을 경우 레일의 임피던스는 허수값이 $+j24.6\Omega$ 이 되어 인덕턴스 성분을 갖는다. 그리고 레일의 끊김이 발생할 경우 임피던스의 허수값이 캐패시터 성분을 갖는다. 임피던스의 실수값은 약 60Ω 정도로 측정이 되었으며 만약 레일의 손실이 거의 없다면 0에 가까운 값이 되어야 한다. 60Ω 정도의 실수값이 가진이유는 캐패시터에 의한 손실, 레일로 가정한 케이블에 의한 손실 뿐만아니라 바닥면에 근접함으로써 인해서 측정주파수에서의 주변환경에 의한 손실로 추정이 된다. 레일이 끊길 경우와 끊기지 않는 경우는 명확하게 임피던스의 허수성분이 구분이 되며, 다만 끊긴 위치에 따라서 임피던스의 허수성분은 거의 동일한 것을 확인할 있다. 본 실험에서 끊긴 위치에 따

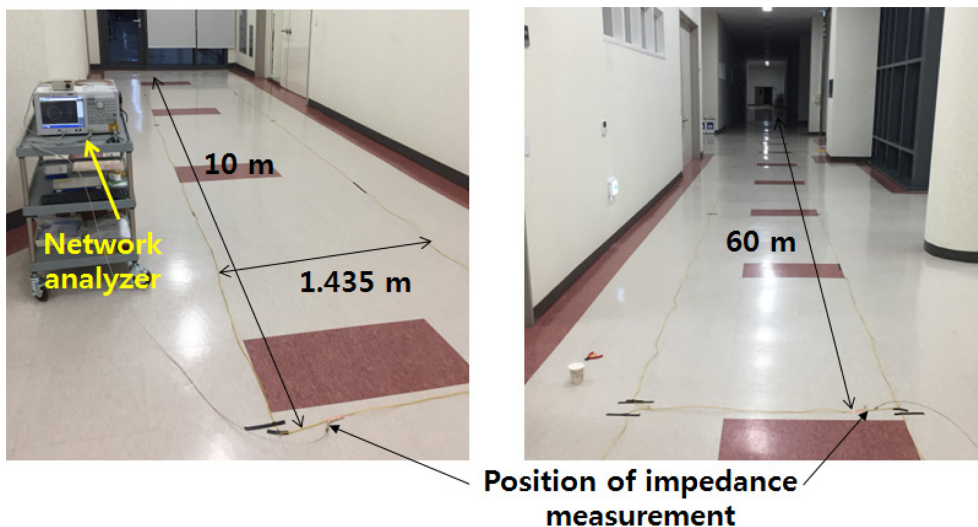


Fig. 6. Experimental environment for broken rail detection.

Table 1. Measured impedance for different broken rail positions.

Broken position (x)	Measured impedance (Simulated impedance)	Broken position (x)	Measured impedance (Simulated impedance)
No broken	$14.33 + j24.6\Omega$ ($13.1 + j25.3\Omega$)	$x = 30\text{m}$	$61.5 - j7.9\Omega$ ($60.9 - j8.15\Omega$)
$x = 0\text{m}$	$62.4 - j7.8\Omega$ ($60.9 - j8.0\Omega$)	$x = 40\text{m}$	$61.5 - j7.9\Omega$ ($60.9 - j8.2\Omega$)
$x = 10\text{m}$	$61.9 - j7.8\Omega$ ($60.9 - j8.1\Omega$)	$x = 50\text{m}$	$61.6 - j8.1\Omega$ ($60.9 - j8.2\Omega$)
$x = 20\text{m}$	$61.7 - j7.9\Omega$ ($60.9 - j8.15\Omega$)	$x = 60\text{m}$	$60.5 - j9.1\Omega$ ($60.9 - j8.25\Omega$)

라 임피던스의 허수성분이 큰 변화를 보이지 않는 것은 사용하는 주파수에 비해 레일의 길이가 전기적으로 짧기 때문이다. 60m 길이에 대한 레일절손에 따른 측정된 임피던스의 허수값은 측정오차 수준을 값을 갖는다. 만약 측정레일의 길이가 약 1km 수준으로 충분히 길다면 측정된 임피던스의 캐패시터 값을 이용하여 절손의 위치도 추정이 가능할 것으로 판단이 된다. 레일이 절손되었을 때 임피던스의 실수값과 레일의 절손이 없을 때 임피던스의 실수 값이 차이를 보이는 것은 레일이 전송선로로 모델링이 되었기 때문이다. 전송선로는 임피던스의 위상이 변화하게되면 실수값과 허수값이 모두 변화하게된다. 등가회로모델의 정확도를 확인하기 위하여 표 1에 시뮬레이션 결과도 같이 도시하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 전송선로의 특성임피던스값은 식(1)에 의해 800Ω 로 설정을 하였으며, 주파수는 측정과 동일하게 사용을 하였다. 캐패시터에 의한 손실은 62Ω 로 가정을 하였고 이는 등가회로 모델상에서 임피던스 측정지점의 왼쪽에 병렬로 62Ω 의 저항을 연결한 것과 같다. 캐패시터의 저항이 큰 이유는 실험을 할 때 소자의 특성에 비해 사용주파수가 높기 때문이다. 그림 4의 등가회로 모델에 대해서 시뮬레이션 결과를 표 1의 측정결과 아래에 괄호 안에 표시를 하였으며 측정결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 방법으로 레일 절손을 실시간으로 파악하고 절손위치를 추정하는 것이 가능하다는 것을 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 레일절손을 검지하기 위하여 궤도회로를 사용하지 않고 레일의 임피던스를 측정하는 방법에 대해서 제시를 하였다. 일반적으로 무선통신기반의 열차제어시스템의 경우 궤도회로를 사용하지 않기 때문에 레일절손을 실시간으로 측정하는 방법이 필요하다. 무절연 레일에 대해서 절손에 따른 임피던스 변화를 유발하기 위하여 레일을 전기적으로 절연시켰다. 캐패시터를 이용하여 측정주파수대역에서 레일간 병렬로 연결하여 공진이 발생하도록 하였다. 이 경우 전기적으로 open이기 때문에 캐패시터가 연결되지 않는 반대쪽 레일의 임피던스를 측정하게된다. 레일이 연결되어 있으면 인덕턴스 성분이 측정이 되며, 레일이 끊기면 캐패시턴스 성분이 측정이 된다. 또한 캐패시턴스 값에 따라 절손위치가 변화하기 때문에 절손위치 추정이 가능하다. 60m의 모의 궤도를 구성하여 31.854kHz에서 궤도의 임피던스를 측정한 결과 절손에 따른 임피던스 변화가 측정이 되었다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] J.Y. Song, S.K. Ryou, S.H. Oh, K.S. Kim, S.H. Lee (2012) A study on function realization of RF-CBTC manless system, *Annual Conference of the Korean society for railway(Autumn)*, Gyeongju, pp. 1443-1452.
- [2] R.H. Cho, C.Y. Park, H.S. Lee (2010) The technology development on monitoring system of the broken rail using optical time domain reflectometer, *Technical note of Daewoo Engineering*, 26(1), pp. 70-89.
- [3] D.H. Park, S.C. Rho, K.K. Yoo (2015) A study on characteristics of AF track circuit using the S-BOND, *Annual Conference of the Korean Society for Railway(Spring)*, Mokpo, pp. 1573-1578.

- [4] David M. Pozar (2005) *Microwave Engineering 3rd ed.*, Chap. 2, Wiley, NY, USA, pp. 49-90.
[5] David K. Cheng (1989) *Field and Wave Electromagnetics.*, Chap. 9, Addison-Wesley, USA, p. 447.

(Received 13 February 2017; Revised 28 February 2017; Accepted 13 March 2017)

Jae Hee Kim: jahee@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwanro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea

Chi-Hyung Ahn: chahn@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwanro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea