

# 귀선전류를 이용한 레일절손 검지에 관한 연구

## A Study on the Rail Rupture Detection by the Return Current

김 용 규<sup>†</sup> · 윤 용 기<sup>\*</sup> · 이 종 현<sup>\*\*</sup> · 곽 우 현<sup>\*\*</sup> · 이 광 희<sup>\*\*</sup>

(Yong-Kyu KIM · Yong-Ki YOON · Jong-Hyun LEE · Woo-Hyun KWAK · Kwang-Hee LEE)

**Abstract** - The track circuit carries out a train detection using a electrical closed loop, and incidentally it detects the rail rupture using the track circuit current flowing rail. However, in the case of the axle counter or the Radio based train control system, it requires a new way for detecting the rail rupture because of not using the track circuit. To solve this problem, it periodically checks non-steady state of rail by the track inspection car, but real-time detection of the rail rupture is impossible. Therefore, this paper analyzed feasibility to realize a real-time detection of rail rupture by using the return current.

**Key Words** : Electrical railway, Train control system, Track circuit, Return current, Rail rupture.

### 1. 서 론

열차는 선로에 설치된 레일 위에서 차륜을 구동하여 이동한다. 열차의 차륜과 직접 접촉하는 레일의 절손은 열차의 운행 장애뿐만 아니라, 열차 탈선까지 연계되는 대형 사고를 유발할 수 있다. 현재까지의 레일 절손 검지는 철도신호에서 사용하는 궤도회로를 통해 구현하였다[1]. 이러한 궤도회로는 사용형태 및 운영 선로에 따라 다양한 형태로 주어지며, 절연의 유무에 따라 유절연궤도회로와 무절연 궤도회로로 분류되며, 전철화 구간에는 주로 임펄스 궤도회로와 AF 궤도회로를 많이 사용한다. 궤도회로가 철도에 도입된 이후부터 대부분의 열차검지 및 레일절손 검지는 궤도회로를 활용하여 실시간 감시를 실시한다. 레일절손은 레일의 일부가 크게 파손되는 경우가 극히 예외적이며, 주로 육안으로 확인 불가능한 미소균열, 레일의 흠집, 패임으로부터 시작됨에 따라 이를 사전에 검지하여 대형사고를 예방하는 측면에서 실시간 사전 검지를 위한 방안으로 궤도회로에 의한 신호장애를 활용하여 선로변에 설치된 궤도회로 장애 발생시에는 궤도회로는 물론 궤도 절손 또는 선로변 이상으로 간주하고, 이에 따라 선로 순회, 인력탐상, 탐상차량 운행 등을 통해 레일의 이상을 조기에 찾을 수 있도록 하였다. 그러나 궤도회로는 선로변에 많은 설비를 설

치하고, 관련 정보를 신호기계실로 전송하기 위해 유선 케이블을 사용하며, 신호기계실은 궤도회로로 전류를 전송하기 위한 장비와 이를 수신하여 열차 및 레일 절손을 검지하기 위한 추가적인 설비로 구성된다. 이로 인해 과중한 운영 및 유지보수를 필요로 한다는 점이 가장 큰 단점으로 제시된다. 독일의 경우에는 궤도회로 대신 차축계수기를 사용하여 열차를 검지하고 있지만, 차축계수기는 레일절손의 검지가 불가능하며, 차축계수기 또한 신호기계실과의 연계를 위해 유선 케이블을 사용한다는 점에서 선로변 설비가 과중하게 주어지는 단점을 갖는다. 차축계수기를 사용하는 경우에는 레일절손을 검지하기 위해 주기적으로 검측차를 이용하여 레일을 검측 하는 것으로 조사되었다. 도시철도의 경우에는 일반철도 및 고속철도에서 사용하는 열차제어시스템에 자동 열차운행 기능이 추가된 ATC/ATO(Automatic Train Control/Automatic Train Operation)의 개념이 도입되었다. 이를 구현하는 방법은 기존과 같은 궤도회로를 사용하는 방법도 있지만, 2000년대 이후부터 급속도로 발달된 통신기반 열차제어시스템(CBTC : Communication Based Train Control)의 개념이 적용되며, 기존의 궤도회로는 IL(Induction Loop), 패턴 벨트, RF(Radio Frequency)로 대체하여 정보를 전송함으로써 열차의 안전한 운영을 구현한다[2]. 이러한 시스템은 무선을 이용하여 실시간 열차검지를 실현하는 반면, 대부분 궤도회로가 없기 때문에 레일절손을 검지하는 것은 불가능하며, 주로 주 1회 또는 월 1회와 같이 주기적인 검측차 운영 또는 검측설비를 활용한 유지보수를 통해 레일 절손을 검지한다[3]. 따라서 기술의 진보와 운영 및 유지보수의 효율성과 경제성을 고려하여 선로변에 설치하는 하드웨어 개념의 궤도회로를 사용하지 않는 경우가 점점 확대될 것으로 예상됨에 따라 실시간 레일절손을 검지하기 위한 방안은 미래철도의 중요한 문제점으로 제시되었다. 이를 해결하기 위해

<sup>†</sup> Corresponding Author : Signaling & Communication research team, Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail: ygkim1@krii.re.kr

<sup>\*</sup> Signaling & Communication research team, Korea Railroad Research Institute, Korea

<sup>\*\*</sup> Railroad Electrical system Engineering Dept. Woosong University, Korea.

Received : February 19, 2016; Accepted : June 2, 2016

서는 검측차를 이용하여 정기적으로 레일의 상태를 검측하는 것도 중요하지만, 기존의 궤도회로와 같이 실시간으로 레일의 상태를 감시하여 레일 절손에 의한 열차 사고의 위험을 사전에 예방하기 위한 방안이 요구되고 있다[4].

본 논문에서는 궤도회로를 사용하지 않거나 또는 궤도회로가 없는 선로에서 궤도회로를 대체한 실시간 레일 이상 유무를 검지하기 위한 방법으로 변전소로 귀환하는 귀선전류를 이용하여 레일절손을 검지할 수 있는 방안에 대해 분석하였다.

## 2. 궤도회로에 의한 레일 절손 검지분석

궤도회로는 선로에서 열차의 유무를 검지하기 위해 레일, 케이블 및 관련 전기 설비를 통해 선로에 전기적 폐회로를 구성하며, 송신기를 통해 레일에 전류를 전송한 후, 귀환하는 전류를 수신함으로써 열차 및 레일절손을 검지한다. 만약 회로가 단락된 경우에는 신호기계실로 전류가 귀환되지 않음으로서 선로를 열차가 점유한 것으로 판단하며, 이를 기반으로 열차의 안전한 운행을 위해 ATS(자동열차정지 : Automatic Train Stop), ATP(자동열차방호 : Automatic Train Protection), ATC(자동열차제어 : Automatic Train Control) 등과 같은 추가적인 설비를 설치하여 열차의 운행간격 및 속도를 제어한다. 궤도회로는 레일로 전류를 전송하기 위해 신호기계실에 전원장치와 신호기계실에서 레일로 전류를 전송하기 위한 전송장치(TX), 신호기계실에서 선로변까지 정보를 전송하기 위한 케이블, 레일의 이음매 부분의 전기 저항 감소를 위한 임피던스 본드(IB), 선로에는 인접 궤도회로와의 절연을 위한 절연 이음매, 궤도회로의 어느 한 곳으로부터 떨어진 동일 극성의 다른 레일 상호간을 접속시키는 점퍼선, 레일로부터 귀환하는 전류를 수신하기 위한 수신장치(RX), 궤도 계전기 등으로 아래 그림 1과 같이 구성된다[1].

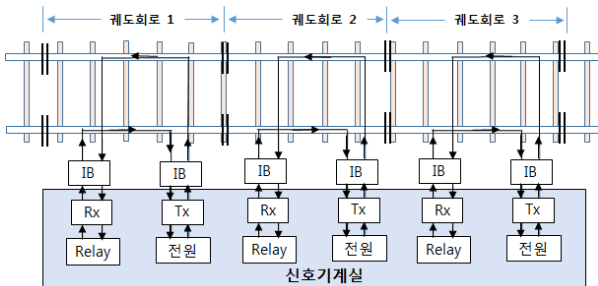


그림 1 궤도회로 구성  
Fig. 1 Track circuit configuration

궤도회로의 전류는 매우 낮으며, ATC의 경우에는 궤도회로를 통해 열차운행정보도 함께 전송함으로써 매우 복잡한 형태로 주어진다. 궤도회로의 길이는 운영 노선에 따라 다르며, 고속철도는 1300~1600m, 일반철도는 600~800m, 도시철도는 200~400m이며, 궤도회로와 궤도회로사이에는 이음매를 갖는다. 여기서 관련 이음매가 절연체로 주어지는 경우에는 유절연 궤도회로라 하

며, 절연체가 없는 경우에는 무절연 궤도회로라 한다.

궤도회로는 그림 2와 같이 선로에 열차가 없는 경우에는 레일, 케이블과 신호기계실에 연결된 전기설비가 전기적 폐회로를 구성하여 관련 전류는 연속적으로 흐르게 되며, 이러한 원리를 이용하여 레일의 절손을 검지하는 역할을 하게 된다. 그림 2a는 궤도회로 위에 열차가 없는 경우로, 신호기계실에서 전송된 전류는 그림에 표시된 번호 순서대로 신호기계실로 귀환하게 된다. 그림 2b는 궤도회로 위에 열차가 있는 경우로, 궤도회로 전류는 열차의 차축을 통해 신호기계실로 귀환하지만 수신장치에서는 전류가 검출되지 않는다. 이를 이용하여 궤도회로내에 열차가 있음을 검지한다. 그러나 그림 2c와 같이 레일에 이상이 있는 경우에는 신호기계실에서 전송된 전류가 레일을 통해 흐르지 않음으로서 신호기계실의 수신장치는 전류를 수신할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 레일의 이상으로 예측할 수 있다.

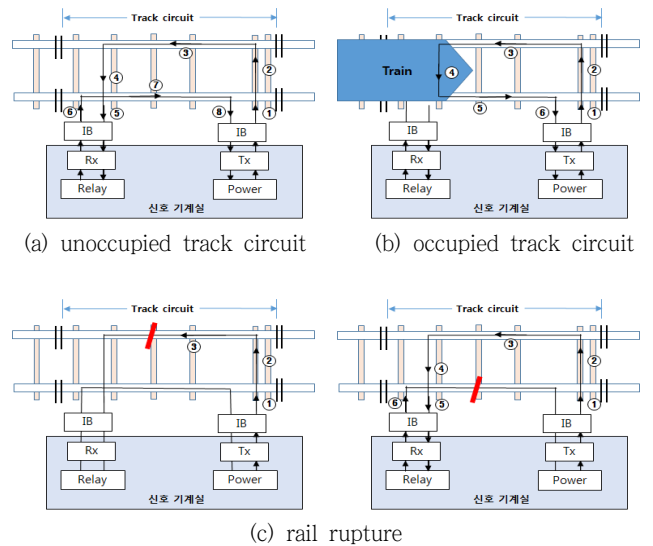


그림 2 궤도회로의 원리  
Fig. 2 Track circuit principle

위와 같은 원리를 사용하는 궤도회로는 그림 3과 같이 레일절손시 관제센터에 단순히 열차가 관련 궤도회로를 점유한 것으로만 표시함으로써 신호장애를 통보한다. 즉 운행 열차가 없음에도 불구하고 열차가 관련 궤도회로를 점유한 것으로 표시되면 관제에서는 유지보수 센터에 관련 사항을 통보하여 궤도점검을 요청하며, 이는 예방 유지보수 차원에서 실시간으로 신호시스템에서 레일 상태를 확인하는 것과 같은 역할을 한다.

그림 3은 현재 고속선에서 사용중인 레일의 이상 또는 궤도회로의 이상 발생을 표시하는 화면을 나타낸다. 여기서 숫자의 뒷부분에 표시된 "T"는 궤도회로를 의미하며, 적색으로 표시된 것은 열차가 관련 궤도회로를 점유하였다는 것을 나타낸다. 만약 운행하는 열차가 없음에도, 적색으로 표시되는 경우는 레일 이상에 의한 신호장애로 취급되며, 유지보수 센터에 통보하여 확인 및 보수를 요청한다. 이러한 방식은 정확한 궤도 관련 데이터보다는 고속선의 경우 약 1.5km 간격으로 설치된 궤도회로를 관리

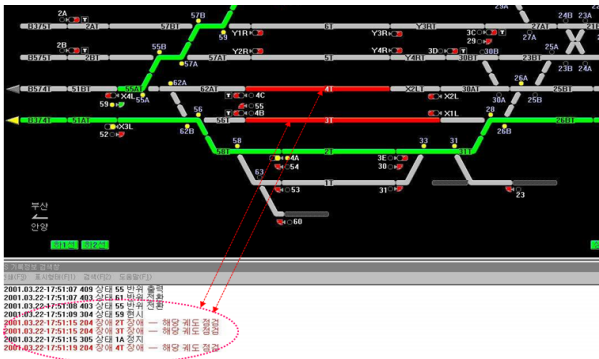


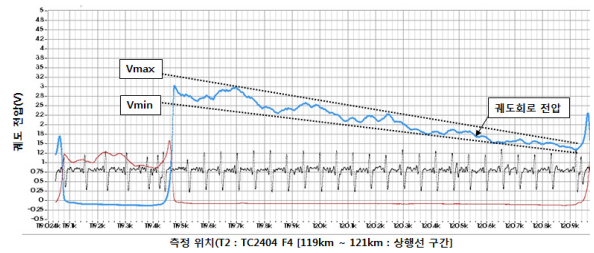
그림 3 궤도회로 표시 화면  
 Fig. 3 Screen display of track circuit

하기 위해 단지 표시 기능만을 가지며, 이러한 표시기능의 이상이 발생하면 그림의 하단부에 제시된 것처럼 해당 궤도의 이상을 표시, 통보함으로써 관련 궤도를 점검하는 형식으로 기본적인 실시간 레일 이상 유무를 감지한다.

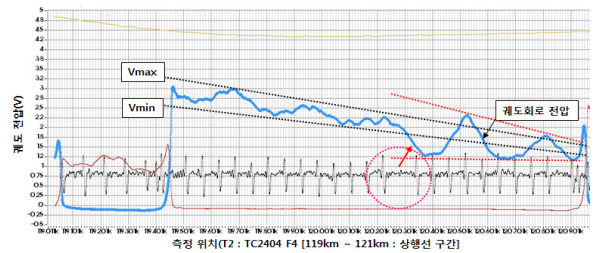
### 3. 귀선전류에 의한 레일 절손 검지 방안

궤도회로의 설치는 그림 1과 같은 구조로 약 10~15km 간격에 따라 설치한 신호기계실에 집중된 복잡한 전기설비로 구성되며, 관련 현장 설비는 현장 조건에 따라 수 km에 달하는 과도한 케이블을 통해 선로변에 설치된다. 이는 건설, 운영 및 유지보수에 있어서 비경제적이며, 특히 현장설비는 열차운행 장애의 중요한 고장 원인으로도 작용한다. 또한 위의 그림 3과 같이 레일절손의 정확한 진단보다는 궤도회로 화면에 표시된 신호장애를 활용하여 레일 이상 유무를 판단함으로써 육안으로 확인 불가능한 미소균열, 레일의 흠집, 패임에 따른 이상을 감지하는 것은 실제적으로 불가능한 것으로 확인되었다. 따라서 궤도회로의 경우에도 각각의 신호기계실에 궤도회로 전류를 검출할 수 있는 설비를 반드시 설치해야만 궤도회로에 대한 이상 유무를 정확하게 확인할 수 있다. 아래 그림은 궤도회로에 흐르는 전압을 정확하게 분석하기 위해 경부고속선에서 검측차를 이용하여 궤도회로 전압을 측정된 결과이다[5].

관련 궤도회로는 UM71 AF 궤도회로로 상행선 119~121km 구간에 설치된 TC 2404에 대한 궤도회로 전압 측정 결과이다. 그림 4a는 궤도회로가 정상적으로 동작하는 경우의 측정값으로 궤도회로의 전압 레벨은 UM71에서 주어진  $V_{max}$  와  $V_{min}$  범위내에 위치하며, 궤도회로의 종단으로 갈수록 전압 감쇄가 발생함을 보여준다. 그림 4b는 궤도회로 또는 궤도에 이상이 있는 경우를 나타낸다. 이상이 발생한 부분에서 측정값이 급격히 감소한 후, 관련 측정값은 비정상적으로 변화됨을 확인할 수 있다. 이는 검측차의 다른 파형 계측값에서도 이상이 발생되었음을 확인할 수 있으며, 이러한 종합적인 검토를 통해 궤도의 이상 유무를 조기에 실시간 자동으로 확인하는 것이 가능하다[6]. 이러한 원리를 이용하여 레일에 흐르는 귀선 전류를 유사한 방식으로 검출할 수



(a) normal state



(a) abnormal state

그림 4 검측차에 의한 측정값

Fig. 4 Measured value by track inspection car

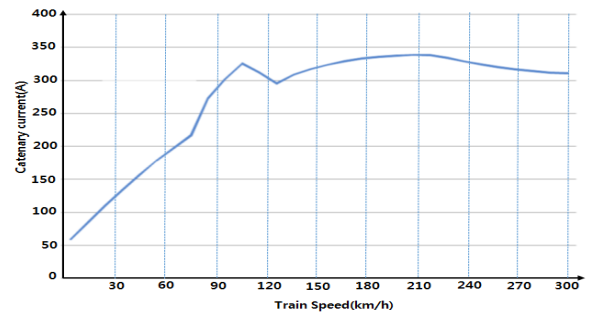


그림 5 고속선 전차선 전류

Fig. 5 Catenary current in high speed line

있다면 레일의 미세한 변화 및 선로변 전기환경의 분석도 가능한 것으로 예상된다.

본 논문에서는 궤도회로를 이용한 레일절손 실시간 감지 기능을 수행함에 있어 문제점으로 제시된 미세한 레일 변화에 대한 검지 방안으로 전기철도에서 레일을 통해 흐르는 귀선전류로 궤도회로를 대체하여 레일 절손을 감지하는 방안을 제시한다. 전기철도에 있어서 가장 간단한 방법은 변전소에서 전차선을 통해 열차에 공급되는 전차선 전류가 변전소로 귀환하는 원리를 이용하는 것으로, 열차 운행에 필요한 에너지원으로 전기에너지가 사용됨에 따라 전기에너지를 공급하는 변전소에서 전차선을 통해 전력을 열차로 전송하면 관련 전차선 전류( $I_c$ )는 열차가 이동하는 동안, 열차의 동력원을 통과하여 변전소로 귀환하게 된다. 여기서 귀환하는 전류는 레일을 통해 귀환하는 귀선전류( $I_R$ ), 접지망을 통해 귀환하는 접지전류( $I_E$ ), 그리고 (-)Feeder 등으로 분류되며 열차의 위치에 따라 측정값이 아래 그림과 같이 예상된다[7,8]. 그림 5는 경부고속선의 전차선 전류를 표시한다. 이는 열차 속도

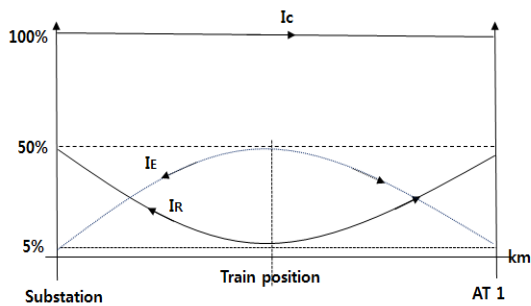


그림 6 IC, IR, IE의 관계  
Fig. 6 Relation of IC, IR, and IE

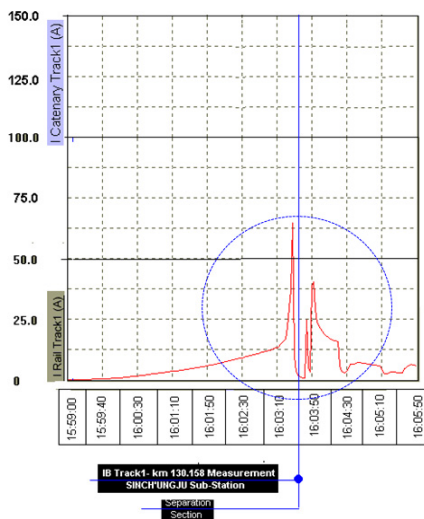


그림 7 변전소에서의 귀선 전류 측정값  
Fig. 7 Measured value of IR in substation

에 따라 일정하게 증가하다가 90~120 km/h 구간에서 급격한 변화를 보인 후, 속도 증가와 무관하게 포화상태를 형성한다. 이를 기반으로 한 전차선 전류, 귀선전류 및 접지 전류의 관계는 그림 6과 같다.

그림 6은 철도 환경에 따라 관련 전류에 대한 상관관계를 수식화 또는 도식화하는 것이 현재까지 불가능한 관계로 귀선전류와 접지전류의 관계를 그림 6과 같이 도식화하여 사용하고 있으며, 단지 귀선전류와 접지전류의 합이 전차선 전류의 50%를 초과하지 않아야 한다는 내용만을 제시하고, 50%를 초과하는 경우에는 각각의 경우에 대한 분석, 검토를 통해 전기철도의 안전 여부를 별도로 판단한다[9,10].

그림 6에서 열차의 위치가 변전소 또는 급전구분소에 근접하는 경우에는 귀선전류의 값이 최대가 되는 반면, 접지전류의 값은 최소가 됨으로서 변전소 또는 급전구분소에 근접한 구간의 레일 절손 또는 레일의 이상 유무를 귀선전류를 통해 쉽게 확인이 가능한 반면, 급전구분소 또는 변전소에서 먼 구간의 경우에는 귀선전류의 값이 감소함으로써 단지 전류의 흐름으로 레일의 이상 유무를 확인해야 한다. 이러한 현상을 보완하기 위해서는 귀

선전류와 함께 필요시 추가적으로 접지전류를 검측함으로써 변전소 또는 급전구분소에서 먼 구간의 레일에 대한 부분도 용이하게 분석, 검토할 수 있다. 아래 그림 7은 2002년 경부 고속선 시험선구간의 신청주변전소에서 측정한 귀선 전류를 나타낸다[11]. 관련 그림은 경부고속선 시험선 30km 구간에서 차량의 성능 시험 기간 동안에 변전소 및 차량에서 귀선전류와 전차선 전류를 측정한 결과로, 변전소를 중심으로 거리가 멀어질수록 귀선전류가 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 귀선전류를 이용한 레일절손 검지방법에 있어서 접지전류와 전차선 전류를 함께 검측, 분석함으로써 이러한 레일의 미세 변화를 궤도회로에 비해 좀 더 정확한 검측이 가능하며, 레일이 완전히 단절된 경우는 그림 7과 같이 귀선전류가 급격히 변화하는 형태로 예측된다.

이는 완전히 단락된 구간에서는 전류가 급격히 감소하지만 단락 구간을 통과한 후에는 반대편 선로를 통해 유입되는 전류로 인해 귀선전류는 일정한 값을 갖는 것을 측정을 통해 확인하였다.

열차가 운행하는 선로에서 레일에 이상이 없는 경우에는 귀선전류(IR)가 정상적인 상태로 변전소로 귀환하는 반면, 레일 절손 등 레일에 이상이 발생하는 경우에는 귀선전류(IR)는 흐르지 않거나 또는 비정상적인 상태로 변전소로 귀환하거나 또는 대부분 접지망 또는 (-)Feeder 등을 통해 변전소로 귀환하게 된다[12]. 이러한 귀선전류는 선로 환경, 접지망의 상태, 전력, 전차선, 신호, 레일의 특성에 따라 복잡한 시스템으로 구성되며, 귀선전류를 분석함으로써 선로 환경, 접지망의 상태, 전력, 전차선, 신호, 레일의 상태 등에 대한 운영 및 유지보수의 중요한 자료로도 활용할 수 있다. 따라서 귀선전류를 이용한 열차 검지 및 레일 이상 유

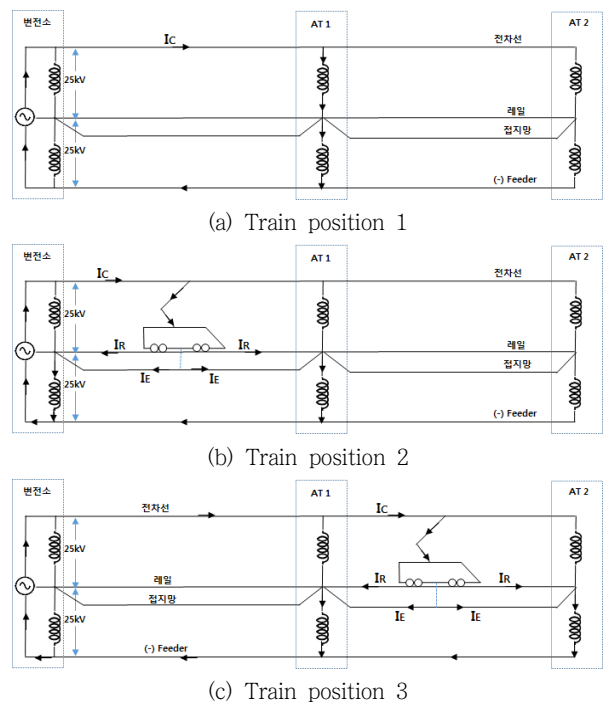


그림 8 열차의 위치에 따른 전류의 흐름  
Fig. 8 Flow of current in accordance with train position

무 검지 장치의 핵심은 귀선전류를 선별하여 측정, 분석하는 기술로, 전차선 전류( $I_c$ )와 접지전류( $I_g$ )와의 비교, 좌측레일과 우측레일의 귀선전류의 불평형 분석 기능 등을 통해 선로 전반의 전기 및 레일 환경에 대한 원격 실시간 감시 및 사고 예방을 구현할 수 있다. 이는 복잡한 궤도회로에 비해 귀선전류의 측정 및 전차선전류와 접지전류와의 비교를 위한 기능만을 필요로 한다. 그림 8은 열차 위치에 따른 귀선전류의 흐름도를 나타낸다[11].

그림 8a는 열차가 운행하지 않는 경우로, 전차선 전류( $I_c$ )는 AT1을 통하여 변전소로 귀환하며, 레일에는 전류가 흐르지 않는다. 따라서 선로에 열차가 없음을 검지할 수 있지만, 레일의 이상 여부는 확인할 수 없다. 그림 8b는 변전소와 단권변압기(AT : Auto Transformer) 구간 사이의 선로에 열차가 위치한 경우로 전차선 전류( $I_c$ )의 일부는 AT1 → (-) feeder를 경유하여 변전소로 귀환하고, 일부는 레일을 통하여 흐르는 귀선전류( $I_R$ )와 접지망을 통해 흐르는 접지전류( $I_g$ )로 분류되어 변전소로 귀환한다. 따라서 레일을 통해 흐르는 귀선 전류를 검출함으로써 변전소와 AT1 구간에 열차가 위치함을 검지할 수 있으며, 또한 관련 구간의 레일 이상 여부도 확인할 수 있다. 그림 8c는 AT1과 AT2 구간 사이의 선로에 열차가 위치한 경우로 전차선 전류( $I_c$ )의 일부는 AT1 → (-) feeder와 AT2 → (-) feeder를 통하여 변전소로 귀환하고, 일부는 레일을 통하여 흐르는 귀선전류( $I_R$ )와 접지망을 통해 흐르는 접지전류( $I_g$ )로 분류되어 변전소로 귀환한다. 따라서 레일을 통해 흐르는 귀선 전류를 검출함으로써 AT1과 AT2 구간에 열차가 위치함을 검지할 수 있으며, 또한 관련 구간의 레일 이상 여부도 확인할 수 있다.

#### 4. 귀선전류의 측정 및 분석

귀선전류를 이용한 열차위치 및 레일 이상 검지 기능을 확인하기 위해 경부선 밀양변전소와 청도 구분소에서 귀선전류에 대한 검측을 실시하였다[7]. 측정은 단지 궤도회로에 영향을 인가하는 귀선전류만을 측정하였으며, 밀양 변전소를 중심으로 미전과 청도 방향으로 흐르는 귀선전류의 특성을 확인하였다. 관련 측정 결과는 그림 9와 같으며, 고속선에서의 귀선전류 측정값과의 비교를 위해 고속열차가 관련 구간을 통과하는 순간에 측정하였다. 밀양 변전소에서의 상행선 측정값은 그림 9a로, 측정값은 최대 249.5A까지 확인되었다. 특히 귀선전류의 곡선은 시간에 대해 서서히 증가해야 함에도 불구하고 순간적으로 큰 귀선전류의 변화가 확인되었다. 두 번째 측정값은 그림 9b와 같으며 최대 귀선전류값이 173.2A로 확인됨으로서, 예측된 귀선전류 값의 범위를 크게 이탈하지 않았다.

그림 9c와 9d는 전력구분소에서의 귀선전류 영향을 분석하기 위해 밀양 변전소에서 약 22km 북쪽에 위치한 청도 구분소에서 귀선전류를 측정된 결과이다. 첫 번째 측정값은 그림 9c와 같으며, 최대치는 244.4A로 주어진 반면, 두 번째 측정값은 그림 9d와 같이 105.7A로 측정되었다.

호남선 구간의 경우에도 부용~김제 구간에서 고속열차가 운행되는 동안에 귀선전류를 측정하였다[7]. 첫 번째 측정값은 그림 10a와 같이

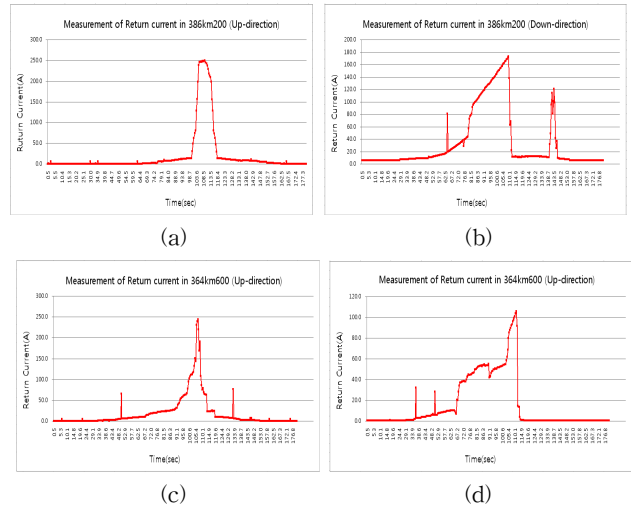


그림 9 경부선에서의 귀선 전류 측정  
Fig. 9 Measured value of IR in Gyeongbu line

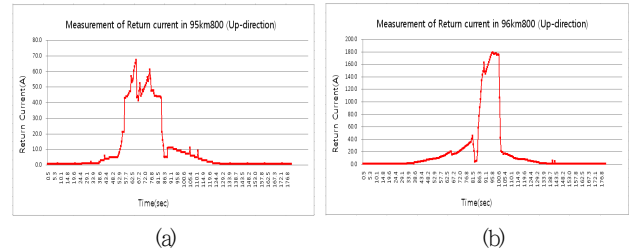


그림 10 호남선에서의 귀선 전류 측정  
Fig. 10 Measured value of IR in Honam line

최대치는 67.4A로 주어진 반면, 그림 10b의 두 번째 측정값은 최대치가 178.6A까지 상승하였다.

위의 그림 9와 그림 10은 공동접지망으로 구성된 경부선과 호남선에 고속열차가 운행되는 동안 단순히 귀선전류만 측정함으로써 열차가 관련 구간을 운행중이라는 것과 레일의 이상 유무가 없음을 판단하였지만, 동일한 조건에서 귀선전류의 크기가 호남선 보다는 경부선에서 더 큰 것으로 확인되었다. 이는 기관사의 운전 형태 및 주변에 운행중인 차량의 영향도 고려할 수 있지만 대체적으로 공동접지망의 구성이 호남선보다는 경부선에서 완전하지 않은 것으로 분석된다. 특히 선로변 환경을 위해서는 좌측과 우측의 귀선전류를 각각 측정하고, 이를 전차선 전류 및 접지전류와 비교, 분석해야만 전기철도의 선로변 환경 검토를 통해 전기철도의 실시간 운영 및 유지보수를 위한 새로운 방안을 제시할 수 있을 것으로 확인되었다. 따라서, 이러한 검토 결과를 반영한 귀선전류에 의한 정확한 레일절손 검지 방안은 그림 11과 같은 절차를 필요로 한다. 먼저 변전소 또는 급전 구분소에서 전차선전류, 접지전류, 및 좌, 우측 레일에 흐르는 귀선전류를 측정한다. 레일의 절손을 검지하기 위한 귀선전류 측정은 좌측레일과 우측레일에 모두 적용하여 귀선 전류가 좌측과 우측 모두에 흐르는지 확인한다. 단지 좌측과 우측의 귀선전류값의 크기가 10% 이상이 되는 경우에는 선로 환경 또는 관련 구간의 전기환경에

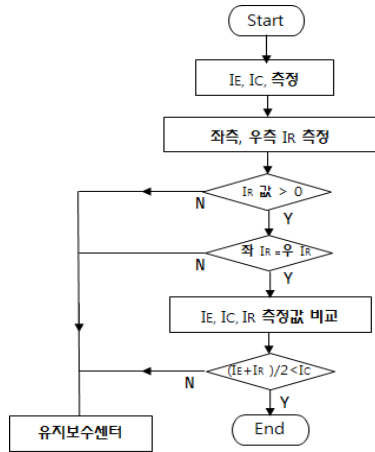
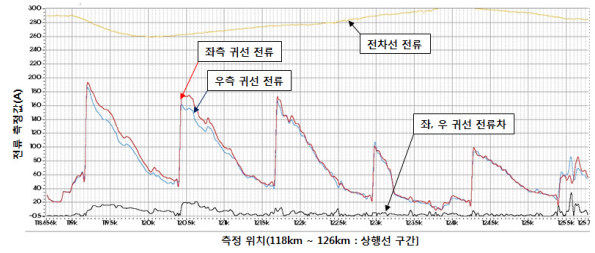


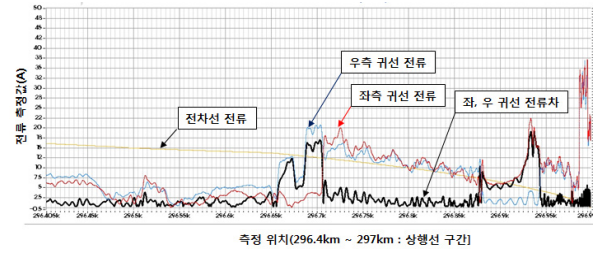
그림 11 귀선 전류 분석 절차  
 Fig. 11 Procedure for return current analysis

대한 검토를 필요로 하며, 특히 공동접지망을 이용하는 경우에는 귀선전류와 접지전류와의 관계는 전기철도의 선로변 환경 운영 및 유지보수에 많은 중요한 자료를 제공할 수 있다[13]. 열차가 운행되는 선로에 귀선전류가 없거나 검지할 수 없을 정도로 미세하게 흐르는 경우에는 유지보수 센터에 통보하여 접지망 또는 선로변 전기 시설물에 대한 검토를 할 수 있도록 한다. 그리고 좌측과 우측 레일의 귀선전류값의 차이를 분석한다. 좌측 귀선전류와 우측 귀선전류의 값이 규정에서 제시된 10% 이상의 차이를 갖는 경우에는 유지보수 센터에 통보하여 관련 구간의 점검을 실행할 수 있도록 한다. 이후 전차선 전류, 귀선전류 및 접지 전류의 값을 비교한다. 귀선전류와 접지전류의 합이 전차선 전류의 50% 이상인 경우에는 대부분 접지망의 문제점으로 고려될 수 있으며, 관련 내용은 유지보수 센터로 통보하여 분석을 요청한다. 이러한 절차를 통해 귀선전류에 의한 레일 절손은 물론 전기철도의 선로변 환경에 대한 검토도 부가적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 12는 그림 11에서 주어진 귀선전류 분석 절차를 적용하여 열차가 운영중인 한국철도공사의 영업선에서 검측차를 이용하여 귀선전류를 모두 측정, 분석하였다. 그림 12a는 경부고속선 상행선 구간 118~126km 구간에서 검측차를 이용한 귀선전류 측정값을 나타낸다. 그림 12b는 경부고속선과 연결되는 일반선 구간인 동대구역 진출 시점인 296.4~297km 구간에서 귀선전류를 측정하였다[13]. 그림 12a의 경우, 좌측 레일의 귀선전류가 우측 레일의 귀선전류보다 약간 크게 나타나지만 좌측과 우측의 귀선전류 차에 따른 귀선 전류 불평형은 기준치인 10% 미만으로 변화함으로써 귀선전류의 분포는 적절한 것으로 확인되었다[14]. 이러한 정상적인 귀선전류의 측정값이 존재한다는 것은 본 논문에서 제시한 것과 같이 좌, 우 레일의 절손이 없음을 쉽게 판단할 수 있다. 그림 12b의 경우, 196.7km 이후의 구간에서 귀선 전류의 값이 전차선 전류보다 크게 측정되었다. 이 구간에서는 상행선 뿐만 아니라, 하행선 및 인접 선로에서의 열차 이동이 수시로 주어짐으로서 타 열차에 의한 귀선 전류가 유입된 것으로 추정된다. 실제로 변전소와 급전구분소 사이에 여러 대의 열차가 위치할 경



(a) in the case of high speed line



(b) in the case of conventional line

그림 12 그림 11을 사용한 귀선전류 분석값  
 Fig. 12 Analysed value of return current using Fig. 11

우에는 각각의 열차를 통해 흐르는 귀선전류가 누적되어 동시에 변전소로 귀환하게 되며, 관련 귀선전류값은 열차의 소비전력과 연관되어 증가하게 된다[9,10]. 그림 12b의 경우에도 귀선전류의 측정값이 존재한다는 것은 고속선에서와 같이 이 구간에서도 레일의 절손이 없음을 쉽게 판단할 수 있다. 단지 좌측과 우측의 귀선전류 불평형이 기준치인 10% 이상으로 주어짐에 따라 관련 선로에 대한 전기적 환경 분석을 필요로 하며, 또한 귀선 전류의 측정값이 296.5km 지점 이후부터 급격하게 증가함에 따라 관련 구간의 공동접지망에 대한 검토를 필요로 한다. 결론적으로 변전소 또는 AT에서 귀선전류( $I_R$ )를 측정후, 전차선 전류( $I_C$ )와 접지전류( $I_E$ )를 비교, 분석함으로써 귀선전류를 이용하여 선로에서의 열차 검지는 물론 열차운행 선로에서의 레일 이상 유무를 확인할 수 있으며, 추가적으로 선로변 설비 전반에 영향을 줄 수 있는 선로 환경, 접지망의 상태, 전력, 전차선, 신호, 레일의 특성까지도 실시간 확인할 수 있다. 이는 운영 및 유지보수시의 안전과 연관되는 선로 전반의 접지 상태도 함께 확인됨으로서 전기철도 운영 구간의 안전도 함께 확보할 수 있는 장점을 갖는다.

### 5. 결 론

전기철도의 경우, 귀선 전류가 매우 크거나 좌우 레일의 귀선 전류 불평형이 발생하는 경우에는 선로변 운영 및 유지보수 요원의 인명 및 궤도회로 등과 같은 선로에 설치된 다양한 전기설비의 장애를 유발할 수 있는 주요 원인으로 작용한다. 본 논문에서는 이러한 귀선전류를 이용하여 레일의 이상 유무를 검지하는 방안 에 대해 제시하였다. 본 논문에서 제안된 귀선전류를 활용한 레일절손 검지 방법은 궤도회로를 사용하지 않거나 또는 궤도회

로가 없는 선로에서의 레일 절손을 확인할 수 있으며, 궤도회로를 사용하여 레일 절손을 검지하는 기존의 방식에 비해 변전소 또는 급전구분소에서 단지 전차선 전류, 귀선 전류, 및 접지 전류를 측정, 분석함으로써 설비의 구성이 매우 간단하며, 설치, 운영 및 유지보수 비용을 최소화할 수 있다. 또한 귀선전류를 검측함으로써 전기철도를 운영하는 선로변 피해를 실시간 예방 측면의 사전 조치가 가능한 부수적인 효과도 기대할 수 있으며, 운영 및 유지보수 측면에 있어서 선로변 설비 전반에 영향을 줄 수 있는 전기철도의 선로 환경, 접지망의 상태, 전력, 전차선, 신호, 레일의 특성을 실시간 확인할 수 있다. 향후 귀선전류와 열차위치간의 상관관계를 추가적으로 분석하여, 관련 연구가 고도화된다면 향후에는 신호기계설의 궤도회로를 대신하여 변전소 및 전력구분소에서 레일의 이상유무 검지는 물론, 열차의 위치 및 선로변 전기철도 환경 전반에 대한 실시간 예방 유지보수의 새로운 수단으로서도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 "KRTCS를 활용한 간선철도용 열차제어시스템 기술개발"의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] Y.K. Kim, J.H. Baek, C.K. RYU, "A study on the track circuit characteristic in electrified classical line", Journal of the summer conference 2004 of the Korean Institute of Electrical Engineers, Busan, pp. 1397-1399, 2004
- [2] Y.K. Yoon, Y.K. Kim, "Meeting of Wireless information communication technologies and train control technology and development of future train control system", Railway journal, Vol. 12, No. 4, pp 21-29. 2009
- [3] W.H. Kwak, Y.K. KIM, J.W. Lee, "A Study on the improvement of Track Circuit measurement equipment for High speed Line", Journal of the autumn conference 2006 of The Korean Society of Railway, Busan, pp. 22-27, 2006.
- [4] K.B. Park, S.H. Ryu, Y.K. Kim, "A Study on the On-Board Measuring System of Track Circuit for Improving of Maintenance Efficiency on HSL", Journal of the spring conference 2006 of The Korean Society of Railway, Daejeon, pp. 6-12, 2006.
- [5] Y.K. Kim, J.H. Baek, J.Y. Park, "Analysis of tuning unit characteristic for track circuit maintenance efficiency", Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Vol. 10, No. 12, pp. 3594-3599, 2009.
- [6] W.H. Kwak, "A study on the method to improve ATC signalling measurement equipment for high speed line", M.S thesis, Seoul national University of Technology, 2006.
- [7] Y.K. Kim, J.H. Baek, "Analysis of return current by common earth on electrical line of gyeongbu line", Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Vol. 10, No. 12, pp. 3594-3599, 2009.
- [8] J.H. Baek, Y.K. Kim, S.C. Oh, H.J. Cho, G.M. Lee, "Analysis on the return current according to the operation of rolling stock in the electric railway section", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 9, pp. 4112-4118, 2011.
- [9] SNCF, "Electrification en courant monophasé 25kV-50Hz", Paris, pp. 84-103, 1977.
- [10] SNCF, "Lignes aeriennes de traction électrique en courant monophasé 25kV-50Hz", Paris, pp. 173-249, 1979.
- [11] Y.K. Kim, C.G. Yoo, "Effect of return current according to the application of joint grounding network in the 2x25kV power supply method", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 51, No. 9, pp. 509-514, 2002.
- [12] J.H. Beak, Y.K. Kim, Y.K. Yoon, D.W. Jang, D.H. Shin, "Analysis of Return Current Effect for AF Non-insulated Track Circuit in ITX Vehicle Operation", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 4, pp. 584-590, 2013.
- [13] Y.K. Kim, D.C. Yang, M.S. Han, C.K. Ryu, "Estimation and Measurement of the traction return current on the electrified Gyeongbu line", 2001 Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeongju, pp. 1458-1461, 2001.
- [14] D.H. Shin, J.H. Baek, S.C. Oh, E.K. Che, S.H. Park, "A Study on the criteria of return current according to section of train operation in EMU-180 and KTX", KICS Summer conference 2013, Yongpyoung, pp. 899-902, 2013.

### 저 자 소 개



#### 김 용 규 (Yong-Kyu KIM)

1987년 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)  
 1993년 프랑스 로렌 국립공학원(INPL) 제어공학과 졸업(DEA)  
 1997년 프랑스 로렌 국립공학원(INPL) 제어공학과 졸업(박사)  
 현재 한국철도기술연구원 수석연구원  
 E-mail : ygkim1@krii.re.kr



**윤 용 기 (Yong-Ki YOON)**

1996년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사)  
2016년 한양대학교 전자전기제어계측공학부  
수료(박사)  
현재 한국철도기술연구원 책임연구원  
E-mail : ykyoon@krii.re.kr



**이 종 현 (Jong-Hyun LEE)**

2014년 우송대학교 대학원 철도시스템학과  
졸업(석사)  
2015년 우송대학교 대학원 철도시스템학과  
박사과정  
현재 (주) 세화 대표이사  
E-mail : 7n8@korea.com



**곽 우 현 (Woo-Hyun KWAK)**

2007년 서울과학기술대학교 철도대학원 전  
기철도신호공학과 졸업(석사)  
2014년 우송대학교 대학원 철도시스템학과  
박사과정  
현재 국토교통부 철도안전정책관실 안전감독관  
E-mail : kwau3716@korea.kr



**이 광 희 (Kwang-Hee LEE)**

2007년 한국항공대학교 산업대학원 졸업  
(석사)  
2014년 우송대학교 대학원 철도시스템학과  
박사과정  
현재 (주) 세화 부사장  
e-mail : kcablee@gmail.com