

## 궤도회로 모델링을 이용한 KTX 궤도결함 진단 프로그램 개발

(Development of KTX Track Error Diagnosis Program using Track Circuit Modeling Methods)

안동준\* · 이병곤 · 남현도\*\*

(Dong-Jun Ahn · Byeong-Gon Lee · Hyun-Do Nam)

### Abstract

The purpose of this study is development of the diagnosis system to preventative maintenance in the on-board measuring systems for in-cab electric inspection systems of high speed railway. The on-board measuring systems can inspect precisely whether ground signal system operate stably. In this paper, we recognize characteristics of the track circuits and confirm whether the wave of current matches the on-board measuring data through the electric modeling method for high speed railway. it is necessary to develop GUI visual programs that can simulate abnormalities of the on-board measuring data in many ways, and the visual program is designed to diagnosis in the case of track circuit equipment's function decreased in advance.

Key Words : On-Board Measuring Systems, Track Circuits, Diagnosis Visual Program

### 1. 서 론

고속선의 KTX 열차는 지상에서 전송하는 연속·불연속정보 메시지를 차상안테나가 수신하여 현장의 이상유무를 검지하고, 신호시퀀스에 맞는 속도를 차상에 표시하는 차상신호시스템인 열차자동제어장치(ATC :

Automatic Train Control)에 의해 운행되고 있다. 이와 같이 차상신호시스템과 지상의 정보전송시스템이 원활히 이루어지기 위해서는 연속정보를 전송하는 매체인 궤도회로의 기능이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 우리나라 고속선에는 CSEE에서 개발한 UM71C 무절연 궤도회로가 사용되고 있으며, 이것은 4개의 반송주파수를 이용하여 신호정보를 변조하여 레일을 통해 열차로 전송하게 된다. 따라서 반송주파수의 특성에 따라 두 궤도를 전기적으로 분리시키기 위해 회로의 공진특성을 이용하는데, 이 공진회로를 구성하기 위한 요소로서는 공심유도자(SVAC), 동조유닛(BU) 및 양극자 블록장치(DB)등이 존재한다. 이와 함께 매체(레일, 도상 등)의 임피던스 성분에 의해 레일에 흐르는 전류의 양이 감쇠하게 되는데, 이를 보상하기 위해 60~80m 간격으로 보상콘덴서가 설치되어 있

---

\* 주저자 : 아주자동차대학 자동차계열  
\*\* 교신저자 : 단국대학교 전자전기공학부  
\* Main author : Department of Automotive Engineering, Ajou Motor College  
\*\* Corresponding author : Department of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University  
Tel : 031-8005-3603, Fax : 031-8021-7219  
E-mail : hdnam@dankook.ac.kr  
접수일자 : 2012년 6월 11일  
1차심사 : 2012년 7월 11일, 2차심사 : 2012년 8월 14일  
심사완료 : 2012년 9월 21일

다. 이 보상 커패시터의 역할은 궤도회로에 흐르는 연속정보의 전류레벨을 보상시켜 수신기의 수신레벨이 떨어지지 않도록 하는데 있다. 따라서 궤도회로의 수신레벨을 보상시켜주는 보상커패시터의 역할은 열차 운행 측면에서 대단히 중요하다고 할 수 있다. 특히 현장에 설치되어 있어서 열악한 환경에 노출됨으로 인해 성능저하 혹은 파손 등의 우려가 항상 존재한다. 그러나 보상커패시터의 이상유무 측정은 년 2회 유지보수가 직접 하도록 규정되어 있으며, 이러한 방법에 의한 유지보수는 비효율적일 수 밖에 없다. 본 연구의 목적은 고속선 궤도 결함 진단 시스템을 개발하기 위하여 차상검측을 통해 궤도 결함진단 분석기준을 수립하는 것이다. 궤도 결함 진단의 목적은 지상신호시스템의 안정적인 작동여부를 고속선 차상에서 정확하게 검측, 진단하는 것으로, 궤도회로 특성분석을 기반으로 한 시뮬레이션 데이터와 실제 차상검측 데이터를 비교함으로써 이루어질 수 있다. 이를 구현하기 위하여 궤도회로의 전기회로 모델링, 시뮬레이션 데이터 추출 등이 수행된 바 있다[1-2]. KTX 고속선에서 선로이상 진단 시스템에 요구되는 고장 진단 기능이 이 효율적으로 수행되려면, 선로정수 데이터로 단락 전류를 시뮬레이션하는 기능을 내장하고, 차상계측 시스템으로부터 실시간으로 측정되는 측정데이터와 비교하여 고장 유무를 신속하게 진단하는 고장진단 프로그램이 필요하다. 본 연구에서는 시뮬레이션 알고리즘을 내장한 궤도결함 진단 프로그램을 개발하고자 하였으며, 기존의 수행된 연구들의 주요 정보 및 진단 요구조건을 궤도결함 진단 프로그램에 반영하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 KTX36호 차상검측 시스템

현재 영업운영 중인 KTX 36호에는 고속선 UM71C 궤도회로의 이상 유무를 검측하여 운영 및 유지보수의 효율화를 구현하고자 300km/h 속도에서 측정이 가능한 차상검측시스템이 구축되어 있다. 그림 1은 KTX 36호에 설치된 신호검측 시스템을 보인 것으로, 고속선 궤도회로의 상태를 모니터링할 수 있는 기

을 갖고 있으며, 종합검측차(ROGER 1,000K)에서 측정할 수 없는 귀선전류 불평형 레벨과 연속신호 측선 레벨 검측이 가능하다.

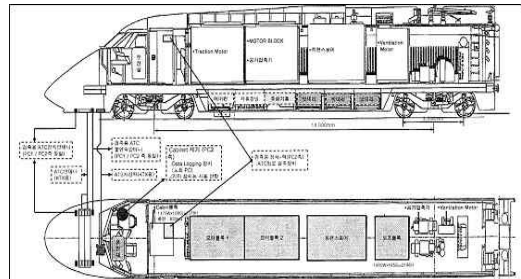


그림 1. KTX 차상 검측 시스템  
Fig. 1. In-cab electric inspection systems for KTX

### 2.2 UM71C 궤도회로

프랑스 CSEE사에서 제작하여 국내 고속선에 설치된 UM71C 궤도회로는 비 전철구간, AC 전철구간, DC 전철구간 등 모든 궤도구간에서 사용할 수 있는 ATC 용 궤도회로로 궤도구간의 구분 시에 무절연 방식을 채택하여 좀 더 기능적이고 열차의 진동을 방지할 수 있는 시스템으로 설계되어 있다. 궤도구간의 구분 시에 사용되는 전기적 절연접속(ESJ: Electrical Separation Joint)은 인접 궤도구간과의 중첩을 유도하여 열차검지를 연속적으로 제한하며, 크게 실내설비와 선로변 설비로 구분된다. 그림 2는 UM71C 무절연 AF궤도회로의 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

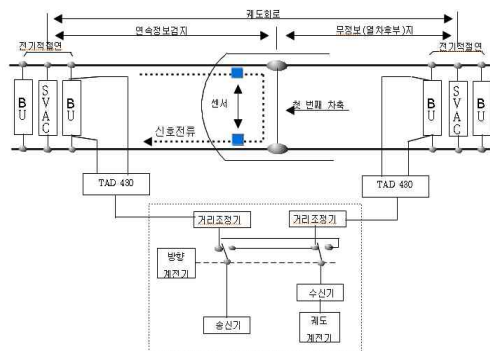


그림 2. UM71C 궤도회로 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block Diagram of UM71C electrical separation joint AF track circuit

궤도레일은 신호의 전송을 위한 매체로서의 역할을 담당하고 있으며, 통신을 위한 매체로서의 기능을 수행하는 궤도 레일의 전기적 특성들을 선로정수로 해석하기 위하여 궤도레일을 모델링하여야 한다.

일반적인 전력전송이나 통신을 위한 전송매체와는 달리 궤도 레일은 독특한 선로정수 특성을 가지고 있는데, 그 이유는 궤도레일이 누설특성을 지닌 도체이면서, 대지위에 직접 설치되어 있는 매체이기 때문이다. 이것은 대지가 완전한 절연체로서의 역할을 다하지 못하며, 또한 환경에 의하여 도전성 등과 같은 특성이 변화하는 것에 기인한다.

신호는 궤도레일을 통하여 전송하기 때문에 신호는 송신부에서 수신부로 전달되는 동안 궤도 레일위에서 상당한 감쇠가 일어나게 되며, 이에 대한 보상이 이루어져야 한다. 이러한 신호의 감쇠를 보상하기 위해 60~80m간격으로 보상 커패시터가 설치되어 있다.

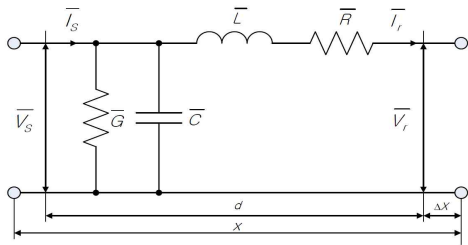


그림 3. 궤도회로의 등가회로  
Fig. 3. Equivalent circuit of track circuit

표 1. 주요 변수 정의  
Table 1. Definition of variables

변수명	정의
x	레일의 길이
$\bar{V}(x)$	레일의 길이 x에서의 상 전압
$\bar{I}(x)$	레일의 길이 x에서의 상 전류
$\bar{Z}(= \bar{R} + jw\bar{L})$	단위 길이당 직렬 임피던스
$\bar{Y}(= \bar{G} + jw\bar{C})$	단위 길이당 누설 어드미턴스
$\bar{V}_s(= \bar{V}(d))$	송신부측의 전압
$\bar{V}_r(= \bar{V}(0))$	수신부측의 전압
$\bar{I}_s(= \bar{I}(d))$	송신부측의 전류
$\bar{I}_r(= \bar{I}(0))$	수신부측의 전류
d	궤도구간의 길이

궤도회로의 전송선로는 분포정수회로상의 4단자 등가회로로 구성이 가능한데, 이는 선로와 평행한 부분에는 저항(R) 성분과 인덕턴스(L) 성분이 존재하며, 선로와 수직인 부분에는 누설컨덕턴스(G)와 캐패시턴스 성분(C)이 존재하게 된다. 이것을 등가회로로 구성하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3에서, 4단자망의 형식으로 입출력 신호를 정의하면 표 1과 같다.

단위 길이 당 직렬 임피던스로 인해 일어나는 전압 강하는 식 (1)과 같고,

$$\bar{V}(x + \Delta x) = \bar{V}(x) + \bar{Z} \Delta x \bar{I}(x) \tag{1}$$

여기서 전압과 전류는 거리와 시간의 함수이므로 이것을 정리하여 미분 방정식을 세우면 식 (2)와 같다.

$$\frac{d\bar{V}(x)}{dx} = \bar{Z}\bar{I}(x) \tag{2}$$

식 (2)에서 단위길이 당 누설 어드미턴스로 인한 전류의 변화량은

$$\bar{I}(x + \Delta x) = \bar{I}(x) + \bar{Y}\Delta x \bar{V}(x + \Delta x) \tag{3}$$

식 (1)~(3)을 정리하여 미분 방정식을 세우면

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = \bar{Y}\bar{V}(x) \tag{4}$$

식 (2)와 (4)를 거리(x)에 대하여 미분하면,

$$\frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} = \bar{Z}\frac{d\bar{I}(x)}{dx} \tag{5}$$

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} = \bar{Y}\frac{d\bar{V}(x)}{dx} \tag{6}$$

식 (5)에 식 (2)를, 식 (6)에 식 (4)를 대입하면,

$$\frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} = \bar{Z}\bar{Y}\bar{V}(x) \tag{7}$$

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} = \bar{Z}\bar{Y}\bar{I}(x) \tag{8}$$

전파 상수(Propagation Constant)는

$$\bar{\theta} = \sqrt{\bar{ZY}} = \alpha + j\beta \quad (9)$$

여기서  $\alpha$ 는 감쇠 상수,  $\beta$ 는 위상 상수이다.

식 (7)과 식 (8)의 미분 방정식을 연립하여 풀면,

$$\bar{V}(x) = \bar{V}^+ e^{\bar{\theta}x} + \bar{V}^- e^{-\bar{\theta}x} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (2)에 대입하면,

$$\frac{\bar{Z}}{\bar{\theta}} \bar{I}(x) = \bar{V}^+ e^{\bar{\theta}x} - \bar{V}^- e^{-\bar{\theta}x} \quad (11)$$

선로의 특성 임피던스는,

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad (12)$$

식 (12)에서 계수  $\frac{\bar{Z}}{\bar{\theta}}$  는

$$\frac{\bar{Z}}{\bar{\theta}} = \frac{\bar{Z}}{\sqrt{\bar{ZY}}} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} = \bar{Z}_c \quad (13)$$

이므로 식 (11)은

$$\bar{Z}_c \bar{I}(x) = \bar{V}^+ e^{\bar{\theta}x} - \bar{V}^- e^{-\bar{\theta}x} \quad (14)$$

식 (10)과 (14)에 초기 값( $x=0$ )을 대입하면,

$$\bar{V}(x) = \left(\frac{e^{\bar{\theta}x} + e^{-\bar{\theta}x}}{2}\right) \bar{V}_r + \left(\frac{e^{\bar{\theta}x} - e^{-\bar{\theta}x}}{2}\right) \bar{Z}_c \bar{I}_r \quad (15)$$

$$\bar{Z}_c \bar{I}(x) = \left(\frac{e^{\bar{\theta}x} - e^{-\bar{\theta}x}}{2}\right) \bar{V}_r + \left(\frac{e^{\bar{\theta}x} + e^{-\bar{\theta}x}}{2}\right) \bar{Z}_c \bar{I}_r \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 Hyperbolic 함수로 변환하면,

$$\bar{V}_s = \cosh \bar{\theta} d \bar{V}_r + \bar{Z}_c \sinh \bar{\theta} d \bar{I}_r \quad (17)$$

$$\bar{I}_s = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh \bar{\theta} d \bar{V}_r + \cosh \bar{\theta} d \bar{I}_r \quad (18)$$

### 2.3 궤도회로의 단락전류 및 고장 검출

차상검측시스템에서 통신선로는 비교적 누설 컨덕턴스가 적어서 손실이 적은 반면에 궤도 레일은 누설컨덕턴스 성분이 커서 누설이 크며, 대지의 특성에 따라 선로정수의 특성에 영향을 끼친다는 특징을 가지고 있다. 고속선 궤도회로의 상태를 측정할 수 있는 항목은 여러 가지가 있는데, 연속레벨, 연속메시지, 불연속레벨, 불연속메시지, 귀선전류레벨, 측선궤도회로 연속레벨, 보상커패시터 및 양극자블력장치(DB), 동조유닛(BU)의 유무 등이다. 궤도회로 신호는 송신부에서 수신부로 전달되는 동안 상당한 감쇠가 일어나며, 이에 대한 보상을 위해 보상 커패시터가 60~80m 간격으로 설치되어 있다. 여기서 보상 커패시터 기능저하의 경우 정보전송이 불량하게 되므로 이에 대한 대책 및 진단이 중요하다[3-4].

현재 고속선에 설치된 UM71C 궤도회로의 차상검측 방법은 프랑스 SNCF가 사용하고 있는 단락전류(I<sub>cc</sub>)의 활용 방법 외에는 별 다른 방법이 없는 것으로 알려져 있다.

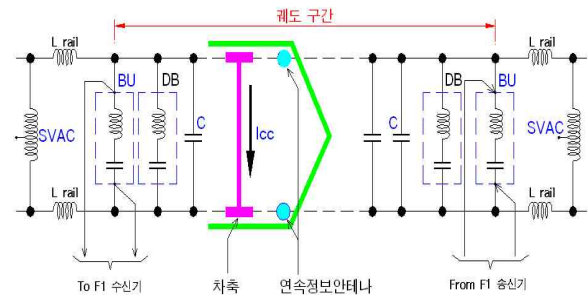


그림 4. 궤도회로의 정보전송 개념  
Fig. 4. Data transfer concept of track circuit

UM71C 궤도회로는 송신부에서 수신부 방향으로 차상에서 필요한 정보를 반송주파수에 포함시켜 레일을 통해 전송한다. 이때 고속열차가 궤도회로에 진입할 경우 해당구간의 정보를 수신 시스템을 통해 전송

받게 되는데, 이것을 전방 궤도회로 조건에 따라 변화가 있는 연속적인 정보라고 한다. 즉 첫 번째 차축에 의해 단락되는 신호전류를 연속정보 안테나가 취득하는 원리로 전송된다(그림 4).

연속정보 안테나에서의 정보 취득은 레일에 흐르는 신호전류의 방향에 따라 발생하는 자계의 세기를 유도코일에서 검출하는 방식으로 획득한다(그림 5).

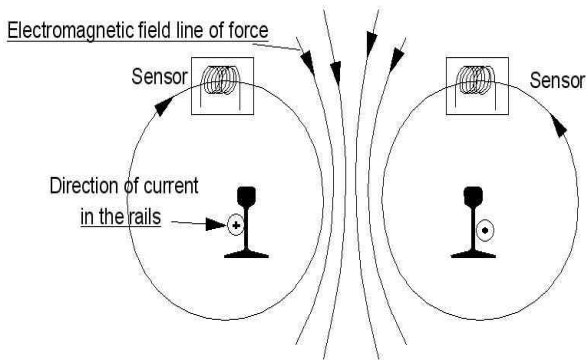


그림 5. 궤도회로의 정보취득  
Fig. 5. Data acquisition of track circuit

이와 같이 궤도신호는 UM71C 궤도회로의 단락전류를 통해 확보되며, 그림 6과 같이 차량이 진행함에 따라 전류 파동이 발생하게 되고, 진행파와 반사파가 서로 간섭하여 동위상이 이루어지는 경우 파동이 정지하는 정재파가 발생한다.

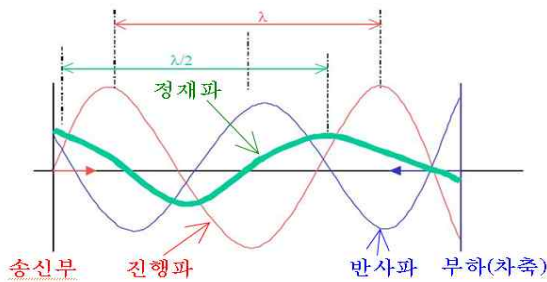


그림 6. 전송선로의 정재파형  
Fig. 6. Standing waveform of transmission line

그림 6에서 전송선로의 파동 방정식에 의하여 정재파 파장(λ/2)은 레일 구간의 식 (19), (20)과 같이 특성

임피던스( $Z_c$ )와 전파 상수( $\theta$ )로 결정된다.

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \quad (19)$$

$$\theta = \sqrt{(R + j2\pi fL)(G + j2\pi fL)} \quad (20)$$

궤도회로는 전기적 절연구간과 전송라인으로 구분할 수 있으며, 특정구간에 대해 세부적으로 전송라인과 보상 커패시터로 구분하여 4단자 정수를 계산할 수 있으며, 궤도회로의 전기적 절연구간과 전송라인 구분은 그림 7과 같고, 그림 8은 고속선 오송~천안아산 간(TC2402궤도) 전송라인에서의 등가회로를 보인 것이다.

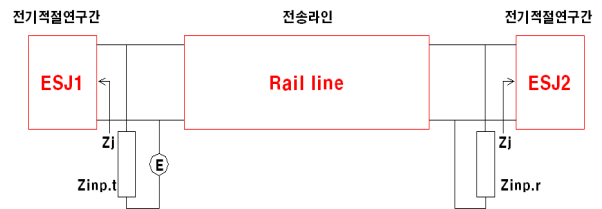


그림 7. 궤도회로의 전기적 절연구간 및 전송선로의 분리  
Fig. 7. Separation electric isolation section & transmission line of track circuit

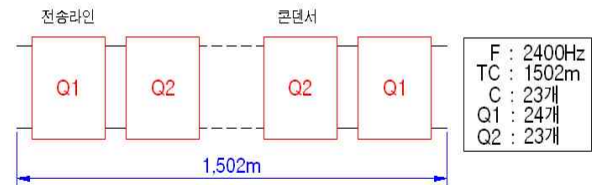


그림 8. TC2402 궤도회로의 등가회로  
Fig. 8. Equivalent circuits of TC2402 track circuit

전송라인 행렬  $Q_1$ 과 보상 커패시터 행렬  $Q_2$ 는 전송라인 이론에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \cosh(\theta L) & -Z_c \sinh(\theta L) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\theta L) & \cosh(\theta L) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -j2\pi f \times 25\mu F & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$



본 연구에서 개발된 PC기반 비주얼 프로그램은 현 장이나 차상에서 실시간으로 데이터를 취득하고 분석 하여 궤도회로의 상태를 자동으로 진단할 수 있도록 하였으며, 궤도회로를 구성하는 각종 파라미터 정보 들은 국내 고속선의 설계 및 시공 시 정해지거나 측정된 데이터를 축적하였다. 이러한 정보를 토대로 시뮬레 이션으로 생성된 구간별 단락전류 데이터와 차상 측 정치의 비교를 통하여 결함을 진단할 수 있으며, 주요 기능은 다음과 같이 설계되었다.

- 1) 궤도회로 구성 파라미터 입력 및 계산
- 2) 궤도회로 단락전류 시뮬레이션
- 3) 궤도회로 단락전류 시뮬레이션 파형 분석 및 고 장 자동진단
- 4) 단락전류 시뮬레이션 데이터 저장
- 5) 단락전류 저장 데이터 로드
- 6) 현장 또는 차상 측정 단락전류 데이터 로드
- 7) 각종 로드 데이터 분석 및 자동 진단

그림 13은 언급한 기능을 구현한 비주얼 프로그램 을 보인 것이다. 프로그램에서 간단한 표형태의 입력 창으로 개소별 파라미터를 설정할 수 있으며 궤도회 로의 길이와 보상 커패시터의 간격에 따라 자동으로 보상 커패시터의 수와 용량이 설정되도록 하였다(그 림 14 참조). 보상 커패시터(CC)와 등가 정전 용량 (CJES)은 개별적으로 설정이 가능하도록 하여 개소 마다 별도의 파라미터를 입력할 수 있도록 설계하였 다.

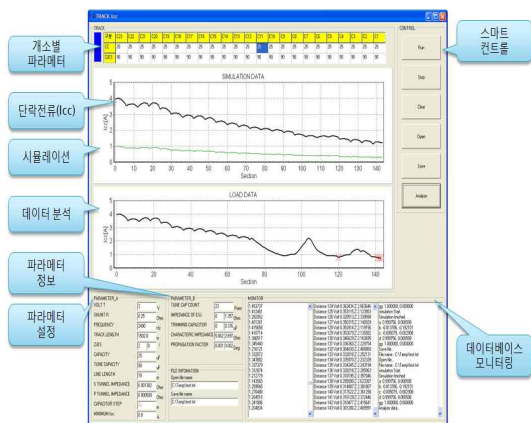


그림 13. 설계된 고장진단 소프트웨어  
Fig. 13. Diagnostic software for fault detection

구분	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
CC	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
CJES	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

그림 14. 특정 위치 파라미터 입력방식  
Fig. 14. parameter entering function for local site

결함 진단 프로그램은 시뮬레이션 파형을 출력하는 화면과 저장된 데이터를 출력하는 화면으로 구성된다. 시뮬레이션 파형은 궤도회로 구성 파라미터를 사용하여 예상 단락전류를 모의할 수 있으며, CSEE에서 규정하는 TVM430의 정보전송을 위한 최소 단락전류를 설정하여 이상을 자동으로 진단할 수 있다.

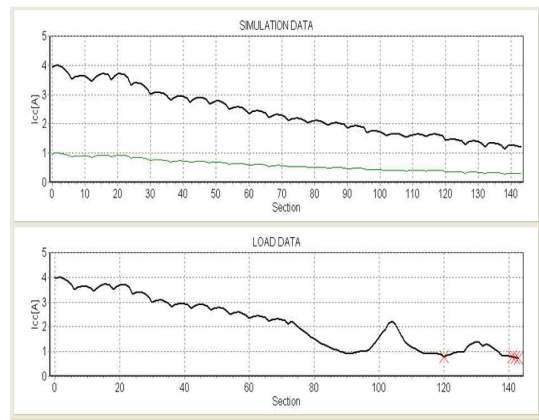


그림 15. 고장 진단 결과  
Fig. 15. fault detection results

또한 시뮬레이션 파형 데이터를 파일로 저장하는 기능 을 내장하여 차상이나 현장 측정 데이터와 같이 분 석 및 진단할 수 있도록 하였다. 그림 15는 시뮬레 이션 및 측정된 단락전류가 최소 단락전류 이하로 분석, 진단되어 자동으로 이상 유무를 나타낸 결과를 보이 고 있다.

### 3. 결 론

고속선 궤도 결함 진단 시스템은 고속선의 차상검측 을 통해 궤도 결함진단을 하는 것이 중요하다. 궤도 결함 진단의 목적은 지상신호시스템의 안정적인 작동 여부를 고속선 차상에서 정확하게 검측, 진단하는 것

으로, 이를 위하여 궤도회로 특성분석을 기반으로 한 시뮬레이션 데이터와 실제 차상검측 데이터를 실시간 비교할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이를 구현하기 위하여 궤도회로의 전기회로 모델링 시뮬레이션 알고리즘이 내장되고, 실제 차상검측 데이터를 실시간비교하여 결함진단이 가능한 고장진단 프로그램을 개발하고자 하였다.

설계된 고장 진단프로그램으로 궤도회로의 주요 결함요인 중의 하나인 보상 커패시터 결함에 따른 시뮬레이션 데이터와 현장측정 데이터와의 차이로 자동 진단할 수 있음을 보였으며, 추후 차상 검측 시스템에 탑재하여 다양한 환경에서 운영하여 신뢰도 및 안정성을 향상시킬 계획이다.

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원 (과제번호 10PRTD-C056173-01-000000)에 의해 수행되었습니다.

### References

- [1] K. B. Park , T. H. Lee, G. C. Lee, "A study on the improvement for a detect diagnosis of track circuit on HSL", Korean Society for Railway, Spring Conference, 2007.
- [2] K. B. Park , T. H. Lee, "A internal signal modeling for a detect diagnosis of track circuit on HSL", Korean Society for Railway, Spring Conference, 2006.
- [3] N.Nedelchev, "Jointless track circuit length ", IEE Proc., Electr. Power Appl, Vol. 146, Issue 1, pp. 69 - 74, January, 1999.
- [4] H. D. Nam, J. I. Choi, S. N. Oh, C. H. Kim, B. G. Lee, "Development of KTX track circuit simulation algorithm", KIEE, CICS 2011, 2011.

### ◆ 저자소개 ◆



#### 안동준 (安東俊)

1964년 1월 2일생. 1986년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1995년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 아주자동차대학 자동차계열 부교수.  
Tel : (041)939-3081  
Fax : (041)939-3001  
E-mail : ahndj@motor.ac.kr



#### 이병곤 (李炳坤)

1968년 10월 25일생. 2001년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2012년 충남대학교 대학원 전기공학과 재학중. 2012년 현재 한국철도공사 연구원 차장.  
Tel : (042)615-4711  
Fax : (02)361-8542  
E-mail : yeun0714@korail.com



#### 남현도 (南炫道)

1956년 3월 27일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1992년 Visiting fellow, ISVR, England. 1982년~현재 단국대학교 전자전기공학부 교수. 1988년~현재 단국대학교 부설 산업기술 연구소장.  
Tel : (031)8005-3603  
Fax : (031)8005-3622  
E-mail: hdnam@dankook.ac.kr