

전차선로 전기적 특성 평가 시스템 구현

오석용¹, 박 영², 조용현², 이기원², 송준태^{1,a}

¹ 성균관대학교 정보통신공학부

² 한국철도기술연구원 전철전력연구실

Implementation of Electrical Property Assessment System for Overhead Contact Lines

Seok Yong Oh¹, Young Park², Yong Hyeon Cho², Kiwon Lee², and Joon-Tae Song^{1,a}

¹ Department of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

² Electric Power Supply Research Division, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

(Received October 6, 2010; Revised October 18, 2010; Accepted April 26, 2011)

Abstract: Currently in Korea, the simple catenary type overhead contact line system is being applied to both conventional lines and high speed lines of electric railway, and circulation current flowing into the catenary system frequently bring undesirable consequences. Namely, the connector wire has many problems according to a flow of excessive circulation current and arc current on catenary when an electric train runs at high speed. This paper presents the development and application of a real-time data acquisition system designed to measure the electrical characteristics of an overhead catenary system in electric railways. The developed system is capable of storing data of a 25 kV power source in a live wire state through a telemetry environment. The field test results show that the proposed technique and the developed system can be practically applied to measure characteristics of current of an overhead catenary system.

Keywords: Electric railway, Catenary system, Circulation current, Arc, Real-time data acquisition system

1. 서 론

현재 우리나라에서 전기철도는 21세기 국가 철도망 구축계획에 따라 2005년 약 50%의 전철화 구간에서 2010년까지 70%의 전철화를 목표로 하고 건설 중에 있다 [1]. 또한 전철전력설비가 급격히 증가하고 있으며 차량의 고속화로 전차선로의 전기적, 기계적 이상 발생 시 사회적 파장이 크다 [2]. 국내의 경우 전기철도는 DC 1,500 V, AC 25 kV로 전차선로의 전차선과 열차의 집전장치인 팬터그래프의 접촉을 통해 급전되

며 전차선로는 커티너리 구조의 전기회로망을 형성하고 있어 열차의 운행상태에 따른 전기적 특성은 중요한 자료로 활용된다. 전차선로의 커티너리 전기회로망의 전차선과 조가선은 일정 거리마다 균압선으로 연결되어 있고 또 약 5 m 마다 드로퍼 (dropper)로 연결되어 있으므로 마치 가공송전선로의 복도체와 같은 동일 전위의 도체로 취급할 수 있으며 전류와 전압은 전기차의 운행에 직접적으로 영향을 미친다. 이러한 커티너리 구조에서 순환전류가 발생으로 인한 전차선과 조가선의 전류비율은 전차선로의 각종 부품 결정, 설계 변수 등에 중요한 영향으로 작용하는데

a. Corresponding author: joontsong@ece.skku.ac.kr

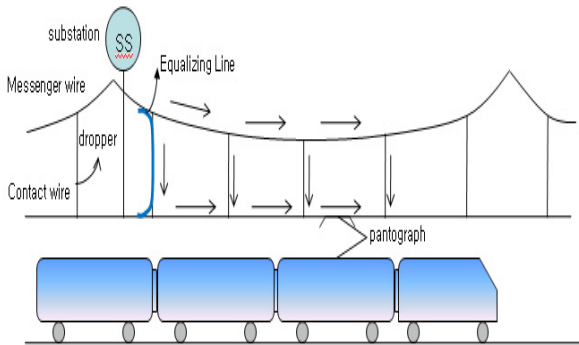


Fig. 1. Circulation current of overhead catenary system in AC electric railway.

부적절한 전류비율은 전차선로의 균압상태 이상, 전차선의 마모, 가선설비들의 불완전 접속 등에 의한 원인을 판단할 수 있다 [3]. 열차 운행 시 전차선로 (catenary)의 순환전류 발생을 그림 1에 도식적으로 표현하였다. 이러한 순환전류 이상발생 억제를 위해 전차선로의 균압은 매우 중요하다. 따라서 전류비 측정을 통해 전차선로의 순환전류 이상 발생을 예측하여 전선, 가선금구의 불완전 접속으로 이중 금속 간 전위차에 의한 아크 열에 의한 용해 및 연화 등을 파악하여 전차선로 전기회로 구성상 순환전류에 의한 손상을 받지 않도록 균압선의 설치 형태 및 절연방식을 통해 완전한 전류 회로가 되도록 할 수 있다.

전차선과 조가선의 전류비는 통상적으로 6 : 4 또는 7 : 3으로 설계되며 열차 운행에 따라 전차선과 조가선에 흐르는 전류량이 변화되므로 이를 측정하여 전차선로 순환전류의 영향 및 열차의 전력소모 등 다양한 진단이 가능하게 된다 [4,5]. 또한 열차통과 시 팬터그래프와 전차선의 이선으로 인한 전위차로 아크가 발생하여 열차의 전력공급저하와 팬터그래프와 전차선의 손상이 발생되는데 전차선의 전류신호에서 아크 발생을 결정할 수 있다. 그러나 전차선로의 실시간 전류 측정은 현재까지 수행된바 없고 전차선과 조가선의 저항에 따른 전류비만을 예측하고 있다. 이러한 이유는 검측시스템의 경우 전차선이 차량의 팬터그래프와 접촉하여 센서를 취부하기가 어렵고 전차선로의 전류를 실시간으로 측정하는 검측시스템의 개발이 이루어지지 않았기 때문이다.

본 논문에서는 전차선로 실시간 전류 상태 모니터링을 위하여 무선 기반의 전기적 특성 검측시스템을

개발하여 팬터그래프와 전차선간의 접촉 및 열차운행에 따른 안전성 등을 검증하기 위하여 기존선 무안-함평 상행 160 km/h 구간 25 kV 의 활선상태에서 전차선과 조가선의 전류를 실시간으로 측정하여 그 결과에 대하여 기술하였다.

2. 실험 방법

2.1 검측시스템의 구성

그림 2와 같이 전차선로 전기적 특성 검측시스템 구성하였다. 이 시스템은 한국철도기술연구원에서 2008년도에 고속선 현장시험을 수행하여 그 안정성을 평가하고 이를 ‘전력시스템 성능향상 기술개발’ 과제를 통해 보고된 바 있는 전차선로 실시간 상태모니터링 시스템을 변형하여 개발하였다 [6].

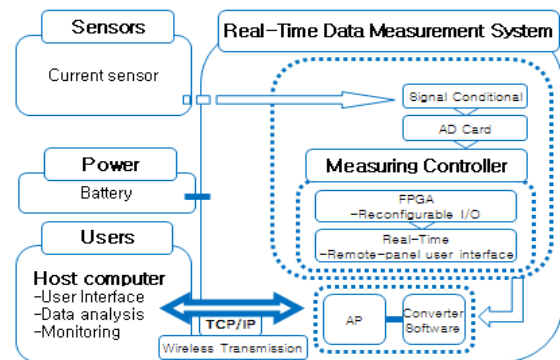


Fig. 2. Configuration of the electrical measurement system for an overhead catenary system.

이러한 검측시스템은 전차선로의 물리량을 획득하여 지상부에 무선으로 실시간 보내는 장치로 센서부, 계측부, 데이터 송수신부, 지상신호처리부 및 전원부로 구성된다. 계측부는 센서의 입력을 받아 증폭, 지상에 송신하여 독립적으로 계측이 가능한 구조의 실시간 계측 제어기를 장착하였고 16 bit 분해능으로 채널당 2,000 sample/초 이상의 측정 속도, 16채널 확장 가능한 A/D와 제어기로 구성되며 센서는 제어기에 연결되어 출력을 증폭하여 A/D 컨버터로 보내져 증폭신호를 디지털화하여 CPU에 전송하고 다시 무선랜을 통해 지상으로 측정 데이터를 전송한다. 주요 사양은 사용주파수 2.4 GHz, 전송속도 54 Mbps를 지

원하는 IEEE 802.11 b/g를 지원하며 TCP/IP protocol 을 사용하고 FPGA (field programmable gate array) 를 활용하여 센서에 따라 다양한 배열, 데이터 수집 및 동기화가 가능하다. 센서는 dimensions(mm): 34 W × 64 H × 45 t, hole dia.(mm): 24 pi, control P/S: ±12 V, rated current : ±250 A 사양의 HCS-24-250APCLS 분할형 홀전류 CT센서를 사용하였다. 그리고 실시간 모니터링을 위해 데이터 측정 및 분석 표현에 적절하도록 labview 프로그램을 사용하였으며 프로그램 구성은 초기화 및 calibration, 파일저장 정보 구성을 하고 유무선 통신 설정과 센서신호의 물리량 변화 후 그래픽 로딩 및 저장설정을 하였다.

2.2 현장평가

전차선로 전기적 특성 검측시스템은 KTX (Korean train express) 호남선 상행 함평-무안 교량구간에 설치하여 특성을 평가하였다. 현장시험은 전차선과 조가선 전류를 측정하고 160 km/h 속도의 KTX를 대상으로 측정하였다. 시스템 설치는 전차선 유지보수 차량을 이용하여 단전 이후 검측장치와 검측장치 전원공급을 위한 배터리, 송신안테나를 가동브라켓에 설치하고 센서는 전차선과 조가선에 각각 설치하여 측정된 신호를 지상에 무선으로 전송하여 실시간 모니터링을 할 수 있게 하였다. 1번 항목은 전류센서로부터 신호를 증폭하여 디지털화하는 검측장치로서 계측부에 해당하고 2번 항목은 전원공급 배터리로서 검측장치와 연결되어 있고 3번 항목은 검측장치에 연결되어 측정값을 무선으로 송신하기 위한 안테나이다. 또한 4번 항목은 전차선과 조가선의 전류측정센서이며 5번은 배터리와 계측부 검측장치 시스템을 가동브라켓에 고정을 위한 설치용 앵글이다. 정상적인 송수신과 안정적 신호를 받기 위해서 계측부, 배터리는 케이스와 절연하고 배터리 케이스, 계측부 케이스, 설치용 앵글, 전차선로 서로 간 접지케이블을 통해 전차선로와 신호처리부 각 구성요소 사이에 등전위가 되게 하였으며 전류센서의 케이블은 교차실드 처리된 케이블 사용으로 계측부 입력단까지 최대한 짧게하고 계측부 내의 접지단에 연결하였으며 labview 프로그램에서 저역통과필터 (low pass filter) 20 Hz를 적용하여 노이즈 신호를 제거하였다. 전차선로 전기적 특성 검측시스템은 무선으로 측정값을 지상으로 전송하기 위해 지상부 수신안테나를 통해 무선통신하고 측정위치까지는 유선으로 연결하여 안전한 지상부에서 실시간으로 모니터링 하였다.

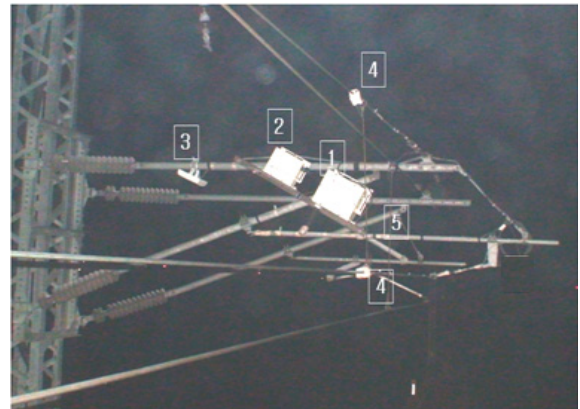


Fig. 3. Field installation of the measurement system.

3. 결과 및 고찰

전차선의 전류 측정기술은 전차선로의 특성과 전동차의 견인능력 및 팬터그래프와 전차선간의 이선 현상을 판단할 수 있는 구체적인 평가기술이지만 현재까지 실시간으로 전류를 측정하여 그 특성을 평가한 바는 보고되지 않고 있다. 이러한 이유는 전차선로 자체의 전류를 실시간으로 측정하는 시스템의 부재가 원인이므로 본 논문에서는 전차선로 전류 검측시스템을 이용한 진단 등 특성평가보다는 검측시스템의 안전성과 검측여부를 평가하였다. 그림 4부터 그림 7에 KTX 및 무궁화호 운행에 따른 전류량 특성을 나타내었다. KTX 운행은 측정 지점에 다양한 차량이 상업운행하고 있으므로 측정 시간에 따른 그래프를 나타낸 것이다. 측정시간에 따라 전류량이 다소 다른 것은 KTX 및 무궁화호 등 차량의 견인능력 차이와 운전 특성이 상이하여 나타낸 특성으로 운전자의 운전 특성에 따라 전류량이 다른 것으로 판단된다.

전차선의 전류는 현재까지는 온도에 의한 방법으로 간접적으로 측정되었으나 그림 4에 나타난 바와 같이 전류특성이 시간에 따라 실시간으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 4의 측정위치 표시에서와 같이 검측기기의 저항과 전류, 온도센서 등의 저항으로 미소한 전류량 증가가 나타나고 있으며 이후 속도 KTX 차량의 견인력에 따른 전류증가를 볼 수 있다. 또한, 속도 감소구간 등에서는 전류량이 증가하지 않은 것으로 보이며 이는 KTX 운전 특성을 그대로 나타낸 것으로 보인다.

열차의 종류와 측정 시간에 따른 전차선, 조가선

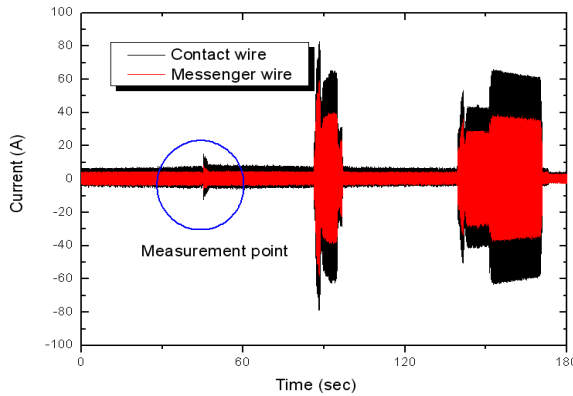


Fig. 4. Current measurement results of contact wire and messenger wire during KTX operation at 08:40.

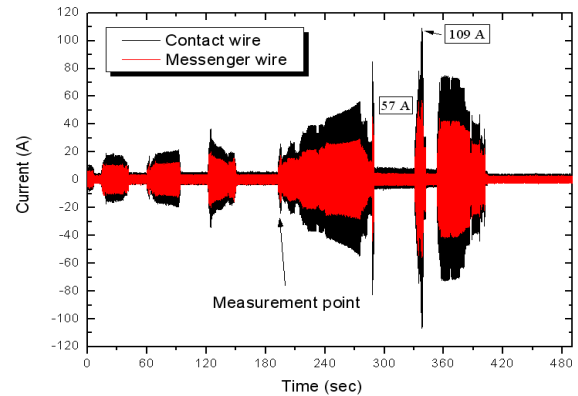


Fig. 6. Current measurement results of contact wire and messenger wire during KTX operation at 19:00.

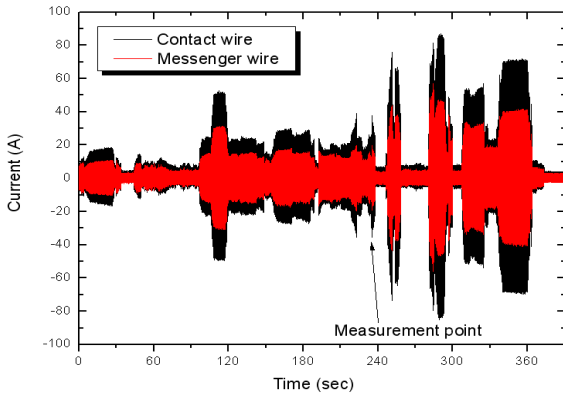


Fig. 5. Current measurement results of contact wire and messenger wire during KTX operation at 16:50.

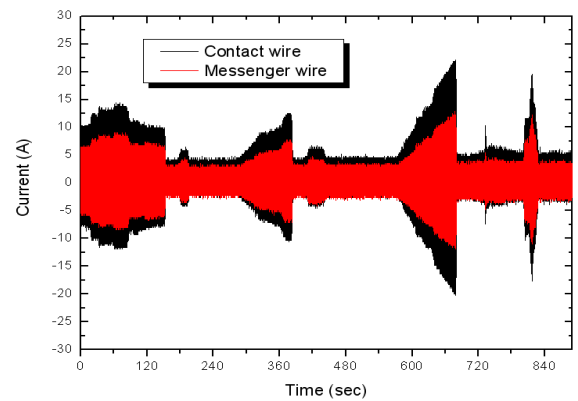


Fig. 7. Current measurement results of contact wire and messenger wire during Mugunghwa-ho train operation at 19:20.

전류신호를 일정시간에서의 평균값을 계산한 전류비와 측정시간 동안의 최대전류는 표 1과 같다. KTX 160 km/h 통과 시 검측된 전차선과 조가선의 전류비는 6.5 : 3.5이고 무궁화의 경우 약 120 km/h의 속도에서 약 6.3 : 3.7의 전류 분포비를 보여 통상의 6 : 4 ~ 7 : 3의 전류 분포비에 해당되고 있음을 확인할 수 있었다. 이상과 같이 전류비가 전류량에 따라 틀린 이유는 전류값에 따라 임피던스 변화가 나타난 결과로 판단된다 [7]. 또한 열차 통과 시 측정 포인트에서 약간의 전류량 증가가 보이며 이후 최대 전류는 각각 109 A 와 57 A 인 것으로 나타났다. 측정된 최대전류가 전차선과 조가선의 허용범위에 내에서 적정함을 판단하기 위해 시간을 고려한 열평형방정식을 이용하여 허용전류 계산을 식 (1)과 같이 수식화하여

Table 1. Current measurement with type of train and time.

Train	current ratio (contact wire : messenger wire)	contact wire peak current (A)	messenger wire peak (A)
KTX (08:40)	65.22 : 34.78	82.66	59.18
KTX (16:45)	65.36 : 34.64	86.84	56.93
KTX (19:00)	65.58 : 34.42	109.04	56.93
Mugunghwa (08:40)	62.86 : 37.14	22.17	12.85

측정된 최대전류값과 비교 하였다. 수식에 포함된 변수 및 상수는 IEEE의 가공선의 온도-전류관계 표준 계산식을 참조하였다 [8,9].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{A^2 \sigma_c} [I^2 \rho_{20} + \alpha(T-20)\beta_a + A\alpha\eta H - AUh_c(T-T_a) - AU\eta\sigma(T+273)^4 - (T_a+273)^4] \quad (1)$$

각 전선의 특성 및 제원은 표 2와 같다. 이때 주위의 대기온도는 최악의 상황인 40℃부터 임계온도의 경우 전선들의 기계적 강도가 저하되지 않는 90℃로

Table 2. Specifications of contact wire and messenger wire in conventional lines.

Factor	Contact wire	Contact wire 25% wear	Messenger wire	Unit
cross section (A)	1.11E-04	8.22E-5	6.55E-05	m ²
specific gravity(s)	8,950	8,950	9,238	kg/m ³
specific heat(c)	386	386	353	J/kg℃
specific resistance(r)	1.7E-08	1.7E-08	2.87E-08	Ω · m
temperature coefficient of Resistance (α)	0.00383	0.00383	0.004	
diameter(d)	0.01234	0.0085	0.0105	m
blackbody coefficient (η)	0.5	0.9	0.9	
insolation (H)	1,000	1,000	1,000	W/m ²
circumference length (U)	0.040123	0.0251298	0.0329	m
ambient temperature (T _a)	40	40	40	℃
boltzmann constant (σ)	5.67E-08	5.67E-08	5.67E-08	W/m ² · K ⁴
wind speed(v)	0.5	0.5	0.5	m/s

설정하였고 풍속은 전차선이 레일에서 5~6 m의 위치에 있으므로 바람이 없는 날에도 지표로부터 상승

Table 3. Allowable current of contact wire and messenger wire.

Wire type	Allowable Current
new contact wire Cu 110 mm ²	460 A
contact wire 25% wear	360 A
messenger wire Bz 65.49 mm ²	290 A

기류가 항상 있다고 가정하여 0.5 m/s로 계산하였다.

계산된 전차선과 조가선의 허용전류는 표 3에 나타내었다. 호남선 기존선 전철화 구간에서 변전소 고장시의 연장급전을 고려한 부하전류의 최대전류값은 약 320 A로 전차선 110 mm²의 펜터그래프와 전차선의 접촉으로 인한 일반적인 마모 한계치인 25% 마모 시 360 A임을 감안할 때 충분히 감당해 낼 수 있다고 판단되는데 검측한 전차선의 최대전류값은 160 km/h 열차속도에서 109 A로 허용전류 이내로 적당한 값이지만 호남선의 교량 구간으로 견인력이 최대로 나타나지 않았으며 각 열차간의 운전시격이 커서 1대의 차량의 전류값만으로 인해 작은 부하와 전차선의 온도상승이 낮아 측정된 전차선 최대전류는 다소 작은 값으로 보인다.

열차의 이동 중 펜터그래프와 전차선간의 접촉과 이션 현상이 동반하여 아크가 발생하는데 전류신호에서 시간영역의 지연현상이나 주파수 영역에서의 고조파 성분의 크기 변화를 통해 아크 발생 유무를 결정할 수 있다 [10]. 시간영역의 순간적인 지연현상은 왜곡이 심해 분간하기 힘들기 때문에 주파수 영역에서 명확한 특징을 찾을 수 있다. 전류 신호의 주파수 분석 결과를 그림 8에 나타냈다. 주파수는 60 Hz의 교류 전력이어서 홀수 배의 고조파 성분(60 n Hz, n=3,5,7,...16)이 나타나있다. 그림 8에서 (a)는 전류값이 낮은 상태로 페턴이 일정한 부분의 주파수대역이며 (b)는 전류값이 완만하게 증가하거나 증가된 상태로 일정한 페턴의 주파수대역 (c)는 전류값의 급격히 상승했을 때의 주파수대역을 나타내었다. (a)는 3, 5고조파가 포함되어 기본주파수와 크기비율은 1/5정도로 나타났으며 이러한 전류파형의 페턴은 열차가 더 이상 가속하지 않고 가속의 타력으로 운전하는 타행 운전상태이고 (b)는 기본주파수가 대부분차지하고 타행운전보다 크기는 17배 증가하였다. 이것은 열차의 가속 운전상태에서 큰 부하전류가 흐르기 때문에 고조파 전류에 의한 왜곡이 적게 나타난 것이다.

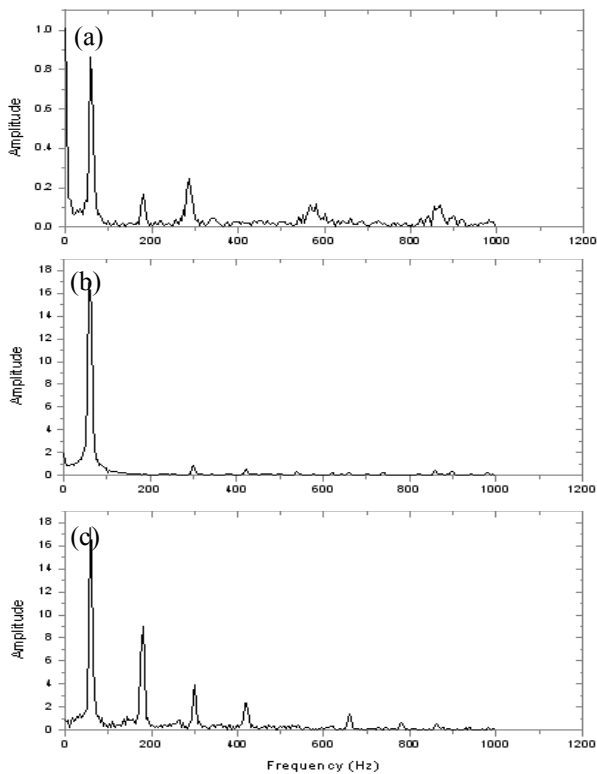


Fig. 8. Frequency analysis of contact wire current.

(c)는 (b)에 비해 기본주파수의 크기는 비슷하나 3, 5, 7, 11, 13 고조파 등이 많이 포함되어 열차의 가속 상태에서 전차선과 팬터그래프의 이선에 의한 아크로 판단된다. 전기철도에서 전차선과 팬터그래프의 미세한 아크는 무시하고 10 kHz의 샘플링으로도 아크 판별을 할 수 있어 60 Hz의 기본주파수 외 고조파 크기들의 합산한 값을 계산하여 비를 구하면 아크 발생의 기준을 결정할 수 있을 것이다. 따라서 아크 발생 시점이 정확한 현장 평가를 통한 비교가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 고속열차 운행에 따른 인터페이스 기술 향상을 위하여 전차선로 전기적 검측시스템을 무선기반 실시간 모니터링 기술을 기반으로 전차선로 전기적 검측시스템을 구현하여 호남선 최고 속도 구간인 함평-무안 교량구간 KTX 운행구간에서 현장 시험을

통해 평가하였다. 이 검측시스템은 개발과 수정이 용이하고 호완성과 확장성이 우수한 labview 프로그램을 사용함으로써 구성을 데이터의 측정 및 분석표현에 적절하도록 고안하였고 짧은 시간에 프로그램 처리시간 측면에서 효율적이었으며 FPGA를 사용함으로써 세밀하고 원하는 대로 제어할 수 있는 고성능과 기호에 맞게 reconfigurable I/O를 구현하여 성능의 저하 없이 검측시스템을 구현할 수 있었다. 또한 데이터 전송을 원활히 하기 위하여 TCP/IP와 무선랜을 사용하여 전차선로의 특성 검측 시 현장의 위험성, 이동의 제약성, 확장의 어려움 등을 해결하여 무선으로 지상에서 전차선과 조가선의 전류 데이터를 실시간으로 안정적인 모니터링을 통해 25 kV 활선상태 전차선로의 전기적 특성을 실시간으로 효율적인 데이터를 수집할 수 있었다.

측정 결과 측정지점에서 검측기와 센서의 저항, 전류에 의한 것으로 판단되는 미소의 전류량이 증가되었고 이후 차량의 견인력에 따른 전류증가와 속도 감소구간에서의 전류량 감소 패턴은 KTX의 운전 특성을 그대로 나타냈으며 6.5 : 3.5의 전류비를 통해 전차선로 커티너리 구조의 적절한 균압과 허용전류 이내의 안정적 전류량, 아크 발생으로 인한 전류 신호의 고조파 크기 증가를 확인하였다.

측정된 전류값은 전차선과 조가선의 전류분담, 고속열차의 운전패턴, 전류소모량 뿐만 아니라 고조파, 전류의 주파수 특성, 견인전동기의 특성, 팬터그래프와 전차선간의 이선에 따른 아크 특성, 전력설비 시뮬레이션 자료 등 다양하게 사용이 가능하며 전차선로 전기적 검측시스템의 개발은 전차선로 설계, 열차 속도향상, 에너지 효율 향상 등 전기적 특성 검측이 필요한 다양한 분야에 적용 할 수 있으리라 사료된다.

REFERENCES

- [1] B. S. Han, B. J. Choo, J. H. Chung, and N. H. Chae, *Korean Rail Technology*, **4**, 14 (2005).
- [2] J. Y. Han, D. C. Yang, H. S. Chang, J. S. Choi, and J. S. Kim, *J. KIEEME*, **16**, 1210 (2003).
- [3] H. S. Han and K. Y. Min, *J. Korean Society For Railway*, **816**, **13** (2007).
- [4] S. Y. Gwon, Y. Park, H. S. Jung, and H. J. Park, *J. Korean Society For Railway*, **12** (2005).
- [5] F. Ladislav, *Rail International*, **16**, 5 (1985).

- [6] H. K. Na, Y. Park, Y. H. Cho, K. W. Lee, H. J. Park, S. Y. Oh, and J. T. Song, *J. KIEEME*, **20**, 281 (2007).
- [7] H. S. Jung, S. Y. Kwon, and Y. Park, *J. Korean Society For Railway*, **9**, 237 (2006).
- [8] *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, IEEE std 738-1993.
- [9] J. R. Kim, S. Y. Kwon, K. W. Lee, and S. H. Chang (*KIEE, Electrical Machinery and Energy Conversion Systems*, 1st ed 2001) p. 401.
- [10] J. K. Hwang, *J. Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **23**, 7 (2009).