

전차선의 집전상태 판단 알고리즘 구현

On the Implementation of an Advanced Judgement Algorithm for Contact Loss of Catenary System

박 영* · 정 호 성** · 윤 일 권*** · 김 원 하†
(Young Park · Ho-Sung Jung · Il-kwon Yun · Wonha Kim)

Abstract - Analyzing dynamic performance between pantograph and contact wire depends on mechanical and electrical conditions such as contact force, currents, aerodynamics of pantograph and tension of overhead contact wire. For the characteristic of dynamic performance between pantograph and overhead contact wire, various evaluation systems are used to measuring of the interaction of the contact line and the pantograph. Among the various methods, the contact force and percentage of arcing are intended to prove the safety and the quality of the current collection system on the train. However, these methods are only capable of measuring on the train which are installed measurement systems. Therefore in this paper, a track-side monitoring system was implemented to measure electrical characteristics from active overhead contact wire systems in order to constantly estimate current collection performance of railway operation. In addition, a method to analyze loss of contact phenomena was proposed. According to simulation results, the proposed system was capable of measuring abnormal electrical behavior of pantograph and contact wires on the track-side. The advantage of the proposed system is possible to detect loss of contact or any other electrical abnormalities of all types of trains within sections from sub to sub without the need to install any on-board equipment on trains.

Key Words : Contact loss of catenary, Percentage of arcing, Track-side monitoring of catenary

1. 서 론

최근 고속철도의 속도향상에 따라 430 km/h급 고속철도 차량 기술개발이 이루어지고 있다[1]. 고속철도 차량의 속도 증가는 궤도, 신호 및 전차선과의 인터페이스 특성을 향상 시켜야 하며 이 중 차량과 전차선간의 인터페이스 향상을 위해 다양한 연구가 수행되고 있다[2-4]. 차량과 전차선간 인터페이스 성능향상을 위해 팬터그래프의 성능향상과 전차선의 장력 향상이 일반적으로 보고되고 있다[5]. 또한 팬터그래프와 전차선간의 집전 중 발생하는 다양한 특성 검측과 분석 기술이 다양화 되고 시험기준도 명확해 지고 있다[6,7]. 집전성능은 팬터그래프의 접촉력, 팬터그래프와 전차선간의 이선아크 및 전차선 압상량이 일반적이지만 팬터그래프의 접촉상태를 판단하는 접촉률, 전차선 변형률, 전차선 동편위, 집전판의 상태 등 다양한 검측기술이 보고되고 있다[5,8]. 전차선과 차량과의 집전성능 평가는 차상과 지상으로 구분되며 차상검측은 1개의 차량에 다양한 검측기를 설치하여 측정하므로 차량 속도에 따른 다양한 특성 검측이 가능하다.

지상검측은 전차선로 1개 지점에서 검측하기 때문에 검측차량이 검측개소 통과시의 값만을 알 수 있으나 검측개소를 통과하는 열차의 특성을 모두 평가할 수 있는 장점이 있다. 특히 선로변 검측은 차량에 별도의 검측기를 설치할 필요가 없기 때문에 검측차량이 아닌 일반차량의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있어 유럽 등 다양한 나라에서 활용되고 있다. 최근 프랑스의 경우 8개소 정도의 검측소를 지상에 설치하여 자국의 전차선로에 운행되는 다양한 국가의 차량의 특성을 파악하고 있다[9]. 그러나 지상에서의 성능평가는 팬터그래프가 전차선 지지점을 통과할 때의 압상량 값을 판단하므로 특성 파악에 제한이 있어 차량 종류, 정비 상태의 비교 판단에 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 지상에서 전차선의 전류를 검측하고 이를 분석하여 집전상태를 파악하는 방법이 제안되었다[10]. 전차선의 전류를 검측하여 집전상태를 판단하는 기술은 전차선의 전류 값을 실시간으로 모니터링 하는 방법을 제안한 것으로 검측된 전류의 분석 기술에 대해서는 나타나지 않았다. 그러나 전차선의 전류를 분석하는 기술은 팬터그래프와 전차선간의 인터페이스 특성을 검출하기 위한 것이므로 아크 발생에 따른 전류 분석 기술이 명확히 필요하다.

본 논문에서는 전차선의 전류 값을 이용하여 집전상태를 판단하는 분석 기술에 대하여 기술하였다. 특히 아크가 발생될 때의 다양한 전류 값을 모의하여 아크 발생에 따른 전류 변화를 실험하였다. 또한 다양한 조건에서 발생된 아크 전류 값을 정확하게 모니터링하기 위해 최적화된 주파수 범위를 판단하였다. 본 논문에서 제안한 아크 발생에 따른 전차선 전류 변화 값과 이를 분석하기 위한 최소 전류 획득

* High-speed Railroad Infrastructure System Research Team, KRRI, Republic of Korea

** Intermodal Transfer Systems Research Team, KRRI, Republic of Korea

*** DHCNI, Republic of Korea

† Corresponding Author : Department of Electronics and Radio Engineering, KHU, Republic of Korea

E-mail : wonha@khu.ac.kr

Received : April 1, 2014; Accepted : April 24, 2014

시간은 지상부에서 집전상태를 모니터링 하는 검측기술에 활용될 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 집전상태 알고리즘 구현을 위한 전류획득 시험방법

집전상태는 전차선과 팬터그래프간의 상호운영에 따른 성능의 지표로 이선율 (Percentage of arcing)을 식 1에 따라 계산하여 나타내는 것이 일반적이다[7,11]. 식 1에서 나타난 바와 같이 이선율은 이선아크의 측정시간과 유효이선시간의 총합에 따라 달라지므로 검출된 파장의 이선 시간에 따라 민감하게 된다. 이 때 이선 시간은 아크 발생에 따른 최소 응답특성 값인 $160 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 과 최소아크 지속시간인 5 ms에 민감하게 반응된다. 또한 최소한의 응답기준을 설정하여 신뢰성 있는 이선율 값을 획득하도록 규정되어 있다.

$$\text{이선율}(\%) = \frac{\sum t_{\text{arc}}}{t_{\text{total}}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 t_{arc} 는 이선시간, t_{total} 은 측정시간이다.

집전상태를 수치화하기 위해 응답특성, 최소지속시간, 검측기의 반응속도를 정량화가 필요하다. 이선율은 EN 50137에 검측기의 기준과 이선율을 획득하기 위한 다양한 조건이 명시되어 있으나 전류를 이용한 접촉성능 검측에 대해서는 나타나 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 전차선로 전류값을 이용한 집전상태 알고리즘 구현을 위해 이선 조건에서의 다양한 전류값을 획득하여 검측기의 응답속도, 아크 전류의 응답시간을 분석하였다. 그림 1에 집전상태 알고리즘 구현을 위한 전류획득 시험기 사진을 나타내었다. 본 시험기의 세부구성과 회로구성은 보고된바 있다[12]. 시험기의 전류 측정위치는 전차선로의 전류를 모의할 수 있는 입력 전원에서 측정하였으며 최적의 응답특성 모의를 위해 샘플링 주파수를 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz 및 50 kHz 로 각각 증가시키면 시험하였다. 전류 검측을 위한 CT는 모의 시험기의 최대

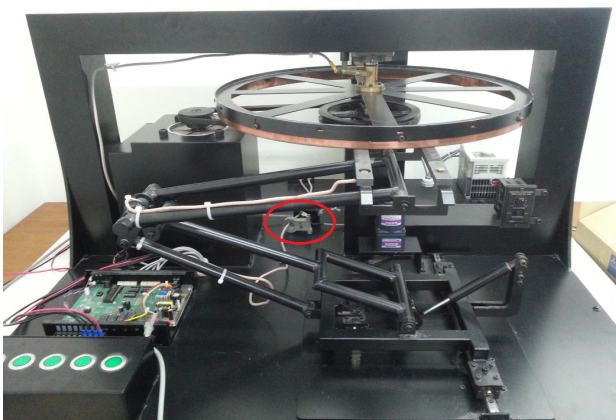


그림 1 집전상태 알고리즘 구현을 위한 전류획득 시험기 [12]

Fig. 1 Picture of current collection simulator for contact loss

전류치가 30 A이므로 최대 40 A의 클램프 타입 CT (순시치, 정밀도 $\pm 3\%$, Sampling : 40 k/sec)를 사용하였다.

2.1 집전상태 알고리즘 구현을 위한 전류획득 시험방법

집전상태 판단을 위한 전류 측정은 25 kV의 고전압 전차선로에 전류계를 이용하여 검출한다. 전류계의 검측 값은 전차선로 지지점인 가동브라켓에 설치한 검측장치를 디지털화 하여 비 가압구간으로 2.4 GHz의 무선공유기를 이용하여 사용자에게 전송된다[10]. 본 논문에서 제안한 집전상태 판단알고리즘은 팬터그래프와 전차선간 비 접촉에 따른 전류 파형을 분석하게 되므로 전류계의 응답 속도가 이선상황에서의 주파수 변화에 충분히 민감한 특성이 나타나도록 하여야 한다.

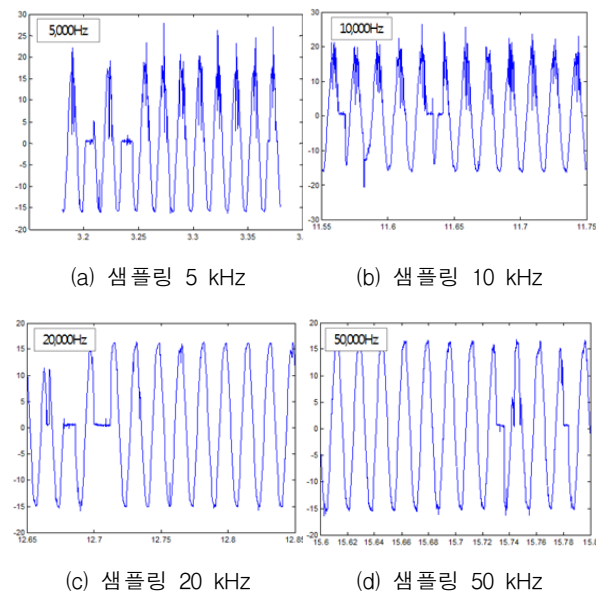


그림 2 이선아크 전류 응답 속도에 따른 전류파형
Fig. 2 Current waveform for contact loss as a function of responses time

특히 응답속도 특성 분석은 전차선 전류값의 신호의 특성을 충분히 포함하여 시간에 따른 이선전류의 신호분석이 정밀하게 이루어져야한다.

현재까지는 광학적 계측기를 이용한 비접촉에 따른 이선율의 최소 응답속도가 100 us로 보고되고 있다[11]. 따라서 본 논문에서는 검측 되는 전류값의 최소 응답속도를 선택하기 위해 응답속도 변화에 따른 전류 신호의 주파수 특성인 스펙트럼을 관찰하여 앨리어싱 (Aliasing)이 발생되지 않는 최소 주파수 범위를 분석하였다. 그림 2에 이선상황에서 전류 응답 속도에 따른 이선아크 발생 시의 주파수 응답 특성을 나타내었다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 전류 응답속도인 주파수 낮을수록 파형에 노이즈와 같은 이선신호가 발생되고 있으며 여기서 X축은 시간이며 Y축은 전류량이다. 그림 1의 모의 장치는 입력전류는 일정하나 모의시험을 위한 진동특성에 의해 아크의 주파수 특성이 비 규칙적으로 나타나므로 동일한 특성 획득이 어렵다. 따라서 팬터그래프

와 전차선간의 이선아크는 주파수의 범위가 비주기적으로 발생되기 때문에 단순한 전류파형의 노이즈 특성만으로는 최적의 샘플링 주파수응답을 찾기 어렵다. 그림 3에 샘플링 주파수에 따른 이선신호의 분석을 Discrete Fourier Transform (DFT)를 이용하여 분석하였다. DFT한 신호의 안정된 프로파일을 얻기 위하여 Least mean square 방법을 적용하여 6차 다항식으로 배열 (fitting)하였다. 그림 3에 샘플링 주파수에 따른 DFT 신호의 프로파일을 나타내었다. 샘플링 주파수에 따른 채널추정이후에 엘리어싱 (Aliasing) 분석을 위해 고주파 주파수 π 주변의 신호 세기와 DC주변의 신호세기를 각각 비교하였다. 각 신호의 세기를 구하기 위한 대역폭은 0.4π 로 설정하였으며 Aliasing degree는 식 2와 같이 정의 하였다.

$$Aliasing\ degree = \frac{Power\ at\ [0\ 0.4\pi]}{Power\ at\ [0.6\pi\ \pi]} = \frac{P_{\pi}}{P_{DC}} \quad (2)$$

그림 4에 Aliasing degree를 측정하기 위한 구간을 그림으로 나타내었다. 그림에서와 같이 5 kHz와 10 kHz의 샘플링 주파수에서는 엘리어싱이 아닌 노이즈에 의해 고주파 영역에서 비교적 높은 값을 나타내는 것으로 사료된다. 아크의 고주파 영역 노이즈는 아크 발생조건에 따라 달라지기 때문에 연속적인 실험을 통하여 고주파 영역에서의 노이즈가 발생되지 않는 신호를 추출하여 분석하였고 고주파 노이즈가 없이 아크가 발생된 구간의 전류를 분석하여 실험한 결과 10 kHz에서 잡음 없이 aliasing degree가 거의 포화됨을 알 수 있었다. 따라서 전류를 이용한 아크 분석 최적 샘플링 주파수는 5 kHz에서 10 kHz사이의 값이 되며 현재 분석된 값으로는 10 kHz가 최적일 것을 알 수 있다. 전류를 이용한 집전상태 분석을 위한 최적 샘플링 분석은 팬더그래프와 전차선간의 이선아크 분석에서의 집전상태를 분석하기 위한 것이다. 따라서 이선아크의 노이즈 여부에 관계없이 집전상태를 분석하기 위한 최적의 주파수를 분석하는 것이므로 그림 3과 그림 4의 결과에 따라 Sampling Frequency에서 5 kHz가 최적일 것으로 예상된다. 따라서 집전상태 분석은 5 kHz 이상의 샘플링 주파수가 최적으로 사료된다. 이때 주파수 분석을 위해서는 필터 없이 분석하게 되므로 순시치 파형에 대해 나타낸 것이다.

2.3 전류를 이용한 집전상태 판단 알고리즘

팬더그래프와 전차선간의 이선아크는 상호 작용에 따라 발생된다. 특히 팬더그래프와 전차선간의 비접촉에 따라 강한 아크가 발생되며 이때 전류 값은 0에 근접하게 된다. 전차선로는 60 Hz의 단상 정형파가 흐르므로 일정시간 이상 전류 값이 0에 근접하면 아크발생 시간으로 볼 수 있다. 그러나 그림 5에서와 같이 전류 값이 0으로 접근하기 이전에 다양한 전류 변화가 발생되며 이는 이선아크에 영향으로 볼 수 있다[12].

본 논문에서는 이선 아크 전류 값이 0이외에 전류의 변곡점 측정 알고리즘을 나타냈다. 그림 5와 같이 변곡점은 이선 발생 판단 시 전류신호 곡선에서 오목한 모양이 바뀌는 점으로 미분 가능한 함수에서 1차 미분 값의 부호가 바뀌는

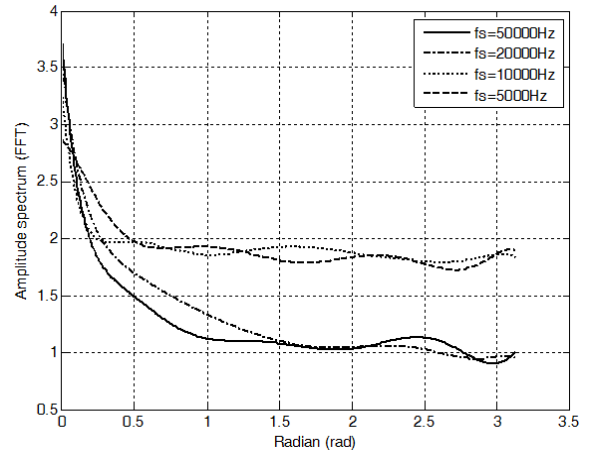


그림 3 샘플링 주파수에 따른 FFT 신호의 프로파일
Fig. 3 Results for sampling frequency analysis using Fast Fourier Transform (FFT)

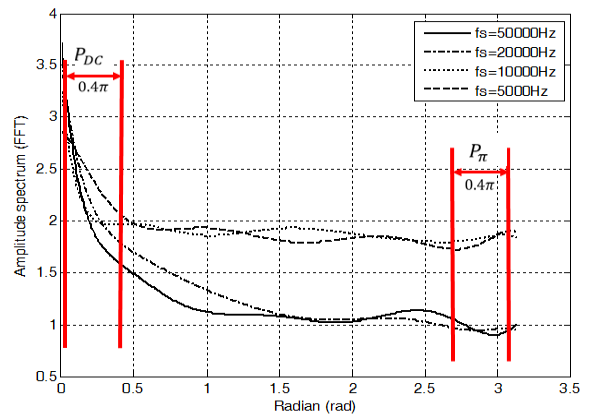
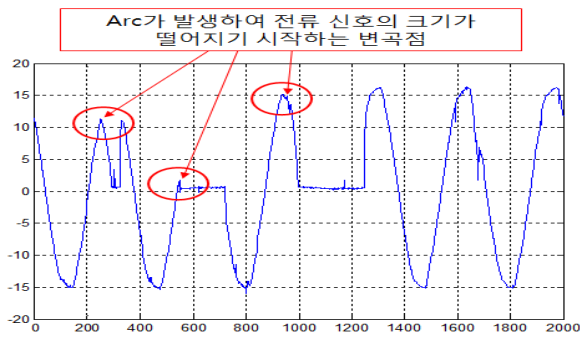
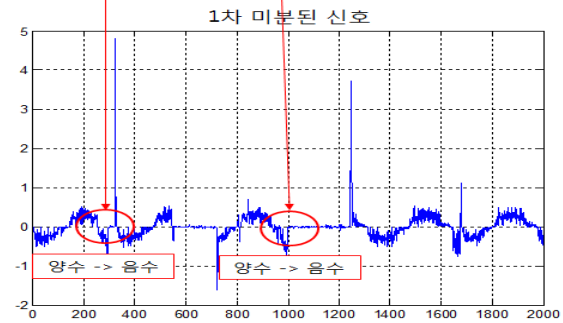
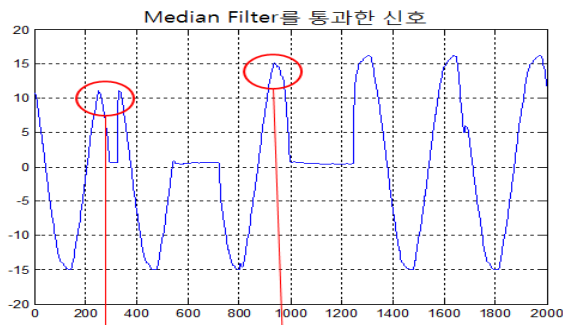


그림 4 Aliasing degree 측정구간
Fig. 4 Results for aliasing degree over frequency

점이다. 팬더그래프와 전차선이 정상 접촉 상태일 때 전류 값은 정상파형을 유지 하며 아크 발생 시 정상파형에서 전류의 크기가 거의 '0'으로 떨어진다[12]. 전류의 크기가 떨어지기 시작하는 지점은 변곡점이고 변곡점부터 아크가 발생한 것이므로 정확한 구간을 측정하기 위해서는 신호의 크기가 떨어지기 시작하는 변곡점을 측정해야 한다. 이선아크 발생 시 신호의 변곡점을 검출하기 위하여 신호의 1차 미분 값의 변화를 비교하여 1차 미분 값이 음수에서 양수 또는 양수에서 음수로 변하는 점을 변곡점으로 정의하였다. 알고리즘은 전류 값이 0으로 유지되는 지점을 검출하면 처음 검출된 전류 지점 뒤로 가서 변곡점을 인식하도록 하였다. Variance값에 의해 이선아크를 검출되었을 경우에 전차선 신호에 변곡점을 결정하는 과정을 나타낸다. 신호를 미분하면 신호에 잡음이 증가되어 나타난다. 이러한 미분 신호의 잡음에 의한 변곡점 오인식을 방지하기 위해 1차 미분 값의 n개의 평균을 비교하여 해결할 수 있었다. 현재 위치 중심으로 뒤로 n개의 평균과 앞으로 n개의 평균이 양수에서 음수로 또는 음수에서 양수로 변하는 점이 변곡점으로 정의할 수 있기 때문이다. 개발된 알고리즘 검증에 위해 변곡점 알



(a) 이선 전류



(b) 이선전류 변곡점 분석

그림 5 이선아크 전류의 파형 분석에 따른 결과 그래프
Fig. 5 Result for analysing process of contact loss current

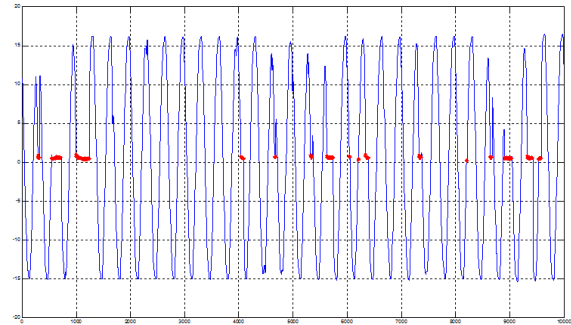
고리즘을 적용 전·후의 집전율을 비교하였다. 집전율은 식 (3)에 따라 구하였으며 전류 값이 0 근처에서의 변화만을 미분하여 적용하였을 경우는 집전율이 10.44% 이며 본 논문에서 제안한 변곡점 알고리즘을 이용하였을 경우에는 17.93%로 나타났다.

$$\text{접촉률(\%)} = \frac{\sum t_{\text{arc}}}{t_{\text{total}}} \times 100 \quad (3)$$

여기서 t_{arc} 는 이선전류의 시간, t_{total} 은 측정시간이다.

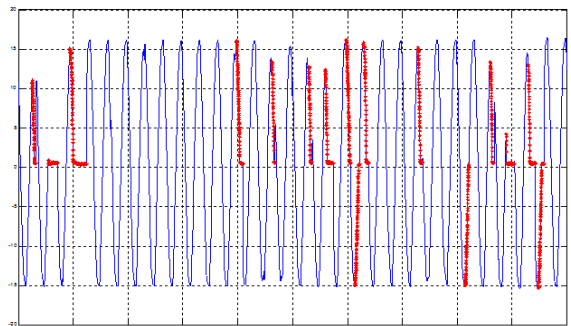
3. 결 론

본 논문은 전차선의 전류 값을 이용하여 집전상태를 판단하는 분석 기술 중 아크 전류를 모의하여 최적화된 주파수 샘플링을 제안하였다. 최소 샘플링 주파수를 선택하기 위하



Arc 검출률 : 10.44

(a) 이선아크 전류 정상 분석결과



Arc 검출률 : 17.93

(b) 변곡점 알고리즘 적용 결과

그림 6 전차선 전류값을 이용한 접촉률 분석결과

Fig. 6 Result for contact ratio using current of catenary wire

여 집전상태 분석을 위해 에일리어싱 (Aliasing)이 발생되지 않는 최소의 샘플링 주파수를 분석결과 5 kHz 이상의 샘플링 주파수를 획득할 경우 집전상태 분석이 가능 할 것으로 분석되었다. 또한 이선아크 발생 시 전류 값의 변곡점 측정 알고리즘에 대해서 기술하였으며 이를 통해 집전상태를 분석하였다. 향후 연구로는 아크 발생 시에 다양한 노이즈 패턴을 구분하여 전류를 이용한 집전상태 분석 기술이 필요할 것으로 사료되며 본 논문에서 제안한 아크 발생에 따른 전차선 전류 변화 값과 이를 분석하여 집전상태를 모니터링 하는 검측기술에 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] "Fundamental Research on Maximum Speed Improvement of HEMU-430X", KRRRI research report, 2013.

[2] "Development of interface technology on vehicle/track and pantograph/catenary for high speed train", KRRRI research report, 2010.

[3] K. Y. Um, Y. G. Park, S. H. Lee, "Development of Test-bed and Infra Technologies for 400 km/h High Speed Railway", Railway Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 55-60, 2012. 8.

[4] I. K. Kang, "Contact Lines for Electric Railways", Sungandang, p. 5, 2006.

[5] K. Lee, "A Experimental Study on Train Speed and Wave Propagation Speed of Contact Wire according to the Speed-up", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 12, pp. 1820-1823, 2013.

[6] Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, H. S. Jung, H. Kim, S. Y. Kwon, H. J. Park, "Development of an FPGA-based Online Condition Monitoring System for Railway Catenary Application", WCRR 2008, I.2.1.1, 2008.

[7] IEC 62486:2010, "International Standard, Railway applications-Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line", 2010.

[8] H. J. Kim, Y. Park, Y. H. Cho, C. J. Cho, I. C. Kim, "Development of Image Processing Technology for Interaction between Pantograph and Overhead Contact Wire", Journal of the Korean institute of electronic material engineers, Vol. 22, pp. 1084-1088, 2009.

[9] A. Bobillot, L. M. Cléon, A. Collina, O. Mohamed, R. Ghidorzi, "Pantograph-catenary: A high-speed European couple", UIC, 2008.

[10] S. Y. Oh, Y. Park, Y. H. Cho, K. Lee, J. T. Song, "Implementation of Electrical Property Assessment System for Overhead Contact Lines", Journal of the Korean institute of electronic material engineers, Vol. 24, pp.497-503, 2011.

[11] EN 50317:2001, "The European Standard, Railway applications-Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", 2001.

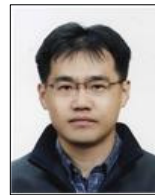
[12] Y. Park, S. Y. Kwon, J. M. Kim, "Analysis of Arcing Measurement System Between Pantograph and Catenary", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 8., pp. 1216-1220, 2012.

저 자 소 개



박 영 (朴 暎)

2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 2004년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원



정 호 성 (鄭 滯 聖)

1998년 성균관대 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사), 2002년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원



윤 일 권 (尹 一 權)

1992년 아주대 기계공학과 졸업(공학석사), 1992년~1999년 대우자동차 중앙시험팀 근무, 2004년~현재 ㈜다현씨엔아이 대표이사



김 원 하 (金 元 河)

1988년 Univ. of Wisconsin-Madison, 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학석사), 1997년 동대학원 동학과 졸업 (공학박사) 현재 경희대학교 전자전파공 학과, 정교수