

전기철도 팬터그래프-전차선간 이선아크 검측 평가 기술 개발

논 문
60-11-26

Development of an Arc Detector Assessment System by Loss of Contact Between Pantograph and Contact Wire in Electric Railway

박 영* · 조 용 현** · 권 삼 영* · 이 기 원* · 유 원 희*
(Young Park · YongHyeon Cho · Sam-young Kwon · Kiwon Lee · WonHee You)

Abstract - The objective of this paper is to discuss technologies on assessing reliability of arc detectors by composing a system that generates and simulates occurrence of arc caused by loss of contact between pantographs and contact wires in a laboratory condition. In order to establish the arc simulator, a device that generates light having the bandwidth of arcs that occur between carbon-metal. The simulator was designed under conditions of EN 50317 and simulations were conducted using the developed device. According to the results, it was possible to conduct certification tests following regulations of international standards and the precision of the simulator was satisfactory. The proposed arc detector assessment system is expected to enhance precision of current collection quality performance assessment methods at high-speed lines and conventional lines while being referred as fundamental technologies for development of detectors suiting international conditions.

Key Words : Arc detector, Loss-of-contact, Current collection, Contact wire, Pantograph

1. 서 론

최근 고속철도 속도향상 필요에 따라 300 km/h의 속도를 넘어 350 km/h 이상의 증속 시험이 진행되고 있다. [1] 고속철도 속도증가에 따라 집전장치인 팬터그래프의 압상력이 상승되고 운행 중 전차선의 진동에 의한 파동에 의해 전차선과 팬터그래프 사이에는 이선이 발생 하게 된다. [2,3] 전기철도에서 이선은 전력 공급 장애, 아크의 발생, 전차선과 집전판의 이상마모, 전차파 발생 등의 원인이 된다. [4,5] 또한 전차선의 마모, 온도 및 전류변화와 시공, 보수작업중의 손상등이 발생되며 전차선의 집전 성능 저하에 원인이 된다. 전차선과 팬터그래프사이의 집전성능 평가는 검측장치를 전차선에 고정하고 열차의 통과 전후를 측정하는 선로변 측정 기술과 차량에 검측시스템을 구축하여 측정하는 차상 검측 시스템으로 나눌 수 있다. 선로변 측정기술은 전차선의 압상량, 변위, 진동 및 온도를 측정하는 기술이 대표적이며 차상 측정은 이선아크, 접촉력과 동편위등이 있다. [6,7] 이중 이선아크 측정 방법은 열차의 운행에 따라 전차선과 팬터그래프사이의 기계적 비접촉 상태일 때 발생하는 아크를 광학적 방법으로 측정하여 평가하는 기술로 일본, 프랑스등 에서 사용되고 있다. 이선아크 측정법은 국제 규격인 EN 50317에 특성평가를 위한 사양이 세부적으로 명시되어 있으며 신규

열차의 도입이나 전차선로 건설이후에 집전성능을 평가하는 필수적인 기술이다. 특히 이선아크는 집전성능에 영향을 주는 이선상황을 평가 할 뿐만 아니라 전차선과 집전판 등에 영향을 미치는 아크를 광학적 방법으로 직접 평가하므로 가장 효과적인 방법 일 수 있다. [8] 그러나 이선상황 중 팬터그래프와 전차선사이에서 발생하는 아크를 평가하기 위해서는 신뢰성 있는 광학적 평가시스템이 구축 되어야 하며 광학적 평가시스템을 인증하는 시스템과 기술 또한 필요하나 현재 국내에서는 신뢰성 평가가 이루어지지 않고 있다. 이러한 신뢰성 평가를 위해서는 전차선의 주재료인 구리와 팬터그래프 집전판의 주재료인 카본 사이에서 발생하는 특성 파장대역만을 측정하고 이를 신뢰성 있게 평가하는 시스템 구축이 현재 국내에 개발되지 않기 때문이다.

본 논문에서는 팬터그래프-전차선 이선아크 발생을 실험실에서 모의 할 수 있도록 시스템을 구성하고 이선아크 검측장치의 신뢰성 평가 기술에 관하여 기술하였다. 특히 팬터그래프-전차선간의 이선 아크 시험을 모의 할 수 있는 장치를 구현하기 위하여 탄소-금속간에 발생하는 아크의 파장대역을 발생시키는 모의 장치를 EN 50317에 의거하여 설계하고, 설계에 따른 제작 장치를 이용하여 모의시험을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 이선아크 검측장치의 평가시스템은 고속철도 및 기존선의 전차선로 건설 및 개량시 이선을 평가장치의 신뢰성을 높이고 국제규격에 합당한 검측기 개발에 활용될 것이다.

† 교신저자, 정희원 : 한국철도기술연구원 고속철도인터페이스 연구실

E-mail : ypark@krii.re.kr

* 정희원 : 한국철도기술연구원 고속철도인터페이스연구실

** 정희원 : 한국철도기술연구원 기술전략실

접수일자 : 2011년 9월 8일

최종완료 : 2011년 10월 7일

2. 본 론

2.1 전차선로 이선아크 시험 규격

본 논문에서 제안한 전차선로 이선아크 모의시험장치는

전차선과 팬터그래프 사이에서 이선상황에 발생하는 아크를 측정하기 위한 센서를 시험할 수 있는 시스템이다. 이선아크 모의시험은 팬터그래프와 전차선 모형을 이용하여 전류를 흘려 이선상황을 발생시켜 집전판 또는 전차선의 마모등 다양한 동역학 시험을 수행하는 시스템과는 다르다. 시험 장치는 전차선과 팬터그래프 사이에서 발생하는 아크 파장을 임의로 발생시키고 센서의 응답속도와 아크 파장대역 이외의 파장에서 동작여부를 판단하여 센서의 정밀도, 정확도, 에러율을 판단하고자 하는 시스템이다. 특히 국제 규격의 검측기준 여부를 시험할 수 있도록 구성하였다. 이선아크 검측을 위한 국제 규격은 유럽규격으로는 EN 50119:2009, EN 50317:2002, EN 50367:2006이 있으며 국제규격으로는 현재 규격화 중인 IEC 62486이 있다. [9,10] 이중 일반적으로 EN 50317에 세부사항이 표현되어 있으므로 표1에 EN 50317에 따른 아크검출기 성능 기준 주요 사항을 나타내었다.

표 1의 측정파장은 구리나 구리 합금 전차선로 에서 이선상황에서 발생하는 아크의 파장의 범위는 220 nm~225 nm 또는 323 nm~329 nm로 정의한 것으로 330 nm 이상인 가시광에는 둔감하도록 하였다. 민감도의 경우 팬터그래프와의 거리, 세로축, 차량 진행방향 기준으로 팬터그래프 뒤쪽에 검측장치를 고정하고 팬터그래프 작동범위 전체에 대하여 민감하도록 충분한 시야각을 요구하며 허용오차는 10% 미만으로 정의되고 있다. 반응속도는 100 us 미만으로 지속되는 아크에 해당하는 반응시간을 갖도록 하며 출력값은 태양광을 아크로 나타내지 않도록 최소레벨을 직사일광으로 정의하고 있다. 시스템 교정은 파워밀도 ($\mu W/cm^2$) 로 나타내며 아크의 발생지점과 센서의 거리가 차이가 있다면 교정하도록 하였다. 이와 같이 이선아크 검측은 세부적인 국제 규격이 나와 있으나 현재 국내에서는 센서 개발 이후 규격사항 시험을 수행하지 못하고 있다. 본 논문에서는 측정파장, 둔감파장, 민감도, 반응속도를 규격 사항에 따라 검증할 수 있는 장치를 구성하였다.

표 1 EN 50317에 따른 아크검출기 성능 기준 [10]

Table 1 The performance criteria of arc measurement system according to EN 50163 [10]

구분	내용
측정파장	220 nm~225 nm 또는 323 nm~329 nm
둔감파장	단 330 nm이상
민감도	10% 미만
시야각	가선 최저높이 4600 mm~가선 최고높이 5400 mm간의 좌우 800 mm (± 400 mm)
반응속도	아크반응속도 100 us 미만
출력값	입력 직사일광을 최소레벨로 설정
시스템교정	검측기의 응답 (V)을 파워밀도 ($\mu W/cm^2$) 로 교정
동작거리	동작거리에 따라 파워밀도를 d^2 의 법칙을 이용하여 교정

2.2 전차선로 이선아크 모의시험 장치 구성

본 논문에서 구성한 이선아크 검측 성능시험을 위한 모의 시험 장치는 크게 광원, 특정 파장대역의 광원 방출을 위한 필터, 광원을 검측센서에 집광하기 위한 Focusing 렌즈, 센서의 반응 속도를 판단하기 위한 초핑장치, 피시험체인 아크 측정용 광원센서장치로 총5가지로 구성하였다. 그림1에 전차선로 이선아크 모의시험 장치 구성 사진을 나타내었다. 전차선과 팬터그래프 사이에서 발생하는 이선아크의 파장대역은 전차선의 주재료인 구리의 아크발생 파장인 220~225 nm과 323~329 nm으로 보고되고 있다. 따라서 그림 1과 같이 광원은 EN 50317 시험기준인 DUV (Deep Ultra-violet) 파장대역에서 160 $\mu W/cm^2$ 의 150 W급 Xe Lamp를 사용하였다. 본 논문에서 구성한 광원의 파장은 185 - 2,000 nm 이므로 아크 파장대역 특성 평가를 위해 215~225nm, 321~331 nm, 380~420 nm, 430~470 nm, 480~520 nm 의 5종류의 BPF (Band Pass Filter) 파장대역의 필터를 각각 그림 1과 같이 구성하였다. 특히 아크검출기의 각 파장대별 광원의 세기에 따른 감도를 측정하기 위해 광원의 세기를 5단계 (10, 30, 50, 70, 100%) 조절하기 위한 ND (Neutral Density) 필터를 채용 광원의 민감도 조절 하였고 BPF 필터 앞단에 이중 휠 구조를 이용하여 구성하였다. 센서의 직경과 광원을 일치시킬 수 있도록 Focusing 렌즈와 이를 조절하기 위한 레일 시스템을 구현하였고 초핑시스템은 EN 50317 시험기준의 광원의 최소 샘플링시간인 100 usec이 가능하도록 10 kHz 이상의 고주파수를 나타내도록 하였다. 센서를 위치시킬 스테이지는 검출기의 위치 및 각도에 따른 검출능력을 평가가능도록 X-Z-Rotaion이 가능한 3-axis stage를 구성하였다.

2.3 성능시험 항목 및 방법

전차선로 이선아크 모의시험 장치를 이용한 이선아크 검측기의 성능검증 항목을 표2에 나타내었다. 시험항목은 EN 50317에 나타난 파장반응, 민감도, 광량세기, 응답속도 시험으로 총 4가지 항목이다. 파장반응의 경우 센서의 측정파장이 220 nm~225 nm 또는 323 nm~329 nm을 포함 하고 330 nm 이상인 가시광에는 반응여부를 BPS 필터를 이용하여

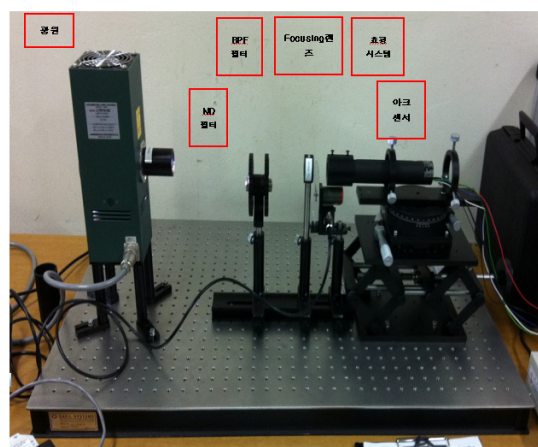


그림 1 전차선로 이선아크 모의시험 장치
Fig. 1 Arc detector assessment system between pantograph and contact wire

측정하였다. 민감도의 경우 시험장치 센서부의 광원의 입사각을 변화 시켜 그에 따른 감도변화 시험을 실시하였으며 슬릿 수가 2개인 블레이드를 사용하여 광원을 저속으로 단속시키면서 스테이지를 이동하여 변위각에 따른 응답특성을 확인하였다. 이때 각도는 0°에서 20°까지 변화 시키면서 출력을 측정하였다.

ND 필터를 이용한 광량의 세기에 따른 감도변화 시험도 슬릿 수가 2개인 블레이드를 사용하여 광원을 저속으로 단속시키면서 ND 필터를 가변하여 응답특성을 확인하였다. 응답속도시험은 Short term (싱글, 연속)과 Long term (싱글, 연속) 시험을 시행하였다. 싱글 시험은 25~250 usec 단시간 광원을 주사하였고 연속 펄스 시험은 33.3~500 usec 단시간 광원을 주사하였다.

표 2 EN 50317에 따른 아크검출기 요구사항 및 평가기준
Table 2 General requirements and adjustment of the arc measurement system according to EN 50163. [10]

항목	EN 50317 요구사항	평가기준
파장반응	220 nm~225 nm 또는 323 nm~329 nm 330 nm 이상 반응여부	파장영역 반응여부
민감도	팬터그래프 작동범위에 민감도 10% 미만	시야각 10도에서 10% 미만 민감도
반응속도	아크반응속도 100 us 미만	100 us 연속펄스 식별여부

2.4 시험결과

그림 2에 이선아크 센서의 측정 파장에 대한 선별적 반응 시험 결과를 나타내었다. 이선아크 센서는 광멀티플라이 튜브 (185~850 nm) 전단에 중심주파수 222 nm의 BPF를 이용하여 선별적으로 반응하도록 하였다. 시험 결과 그림2에서와 같이 220 nm 대역의 광파장에 대하여 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었고 이외에 영역에 대해서는 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 출력 대역 400 nm에서 다소 높은 민감도를 보이는 이유는 광멀티플라이센서의 최고 감도가

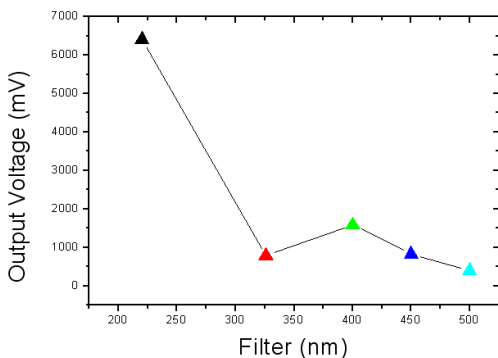


그림 2 이선아크 센서의 측정 파장에 대한 선별적 반응시험
Fig. 2 Results of spectral response test for arc detection sensor between pantograph and contact wire

420 nm 영역에서 나타나고 있기 때문이다. 그러나 본 논문에서 구성한 전차선로 이선아크 모의시험장치의 필터가 효과적으로 220 nm 대역에서 최고의 출력을 나타냄을 보여주고 있으며 평가시스템 구성이 만족됨을 알 수 있다.

팬터그래프 작동범위에 따른 민감도 측정시험 결과를 그림 3에 나타내었다. 민감도의 경우 시야각 10°C 이내에서 10% 미만의 감도변화를 시험 할 수 있어야 하므로 본 시험에서는 측정센서를 고정하여 정밀하게 측을 변화시켜 측정이 가능하다. 시험결과 10°C에서 5.55%의 민감도 변화가 나타나므로 본 시험에 적용한 센서는 규격사항에 적합한 것으로 나타났으며 시야각이 15°C 이상일 경우 11.76%의 감소율이 나타나는 것을 알 수 있다.

표 3에 단시간, 100 us이하, 연속 광출력 시험결과를 나타내었다. 여기서 이론시간은 초핑시스템에서 얻어진 주파수를 변환하여 얻은 시간이고 실측시간 (A) 는 반응 시작 시점에서 끝난 시점까지의 시간이다. 또한 실측시간 (B) 는 최대값 (또는 평균값) 의 3 dB (70.7%) 크기에서의 시간이다. 시험결과 이론시간대비 실측시간을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 본 시험에서 사용한 센서는 반응속도 50 us로 이론시간과 실측시간이 모두 만족해야 한다. 따라서 본 논문에서 제안한 이선아크 검출기 인증 시험이 만족함을 알 수 있다. 표 4에 장시간 (msec 대역) 연속 광출력 시험결과를 나타내었다. 시험결과 99%의 신뢰도를 보이고 있으므로 정확한 시험값을 얻는 것으로 판단된다.

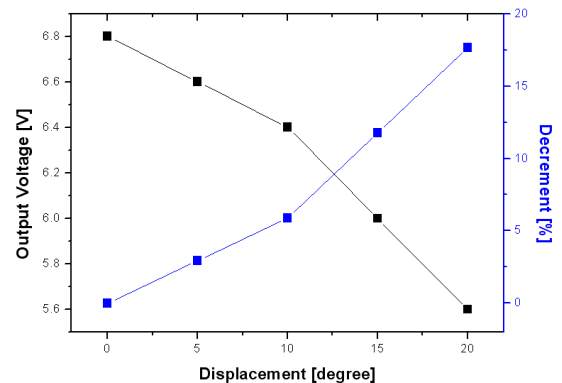


그림 3 수평변위에 따른 감도변화 시험결과 그래프
Fig. 3 Results of sensitivity according to the horizontal displacement of arc detection sensor

표 3 Short-term Arc 시험결과 (제어전압 0.275 V)
Table 3 Testing results of Short-term Arc on control voltage at 0.275 V

초핑주파수 [Hz]	이론시간 [μs]	실측시간(A) [μs]	실측시간(B) [μs]	오차율 (%)
10	250	750	250	0
20	125	350	125	0
25	100	300	100	0
50	50	150	50	0
80	31.25	100	31.25	0
100	25	75	25	0

표 4 Long-term Arc (싱글 및 연속) 시험결과 (제어전압 0.275 V)

Table 4 Testing results of Long-term Arc on control voltage at 0.275 V

초핑주파수 [Hz]	이론시간 [ms]	실측시간(A) [ms]	실측시간(B) [ms]	오차율 (%)
10	50	50	50	0
30	16.67	17	16.7	-0.2
50	10	10	10	0
100	5	5	5	0
150	3.33	3.4	3.3	1

3. 결 론

본 논문에서는 전기철도 집전설비의 이선아크를 측정할 수 있는 시스템의 검증 장치 구성에 대하여 기술하였다. 이선아크 검증 장치는 아크의 과장대역을 발생시키는 모의 장치를 EN 50317에 의거하여 설계하고, 설계에 따른 제작 장치를 이용하여 모의시험을 수행하였다. 이선아크 검증 성능 시험을 장치는 크게 광원, 아크의 조건을 만들 필터, 아크를 센서에 모아주기 위한 Focusing 렌즈, 센서의 반응 속도를 진단할 초핑시스템, 아크를 측정할 광원센서장치 5가지로 구성하였다. 과장반응 시험은 과장이 220 nm~225 nm와 323 nm~329 nm을 포함 하고 330 nm 이상인 가시광에는 반응 여부를 BPS 필터를 이용하여 구성하였다. 민감도의 경우 시험장치 센서부의 광원의 입사각을 변화 시킬 수 있도록 고정장치의 각도를 변화하도록 구성하여 변위각에 따른 응답 특성을 검증하도록 하였다. 응답속도시험은 Short term (싱글, 연속) 과 Long term (싱글, 연속) 시험을 초퍼를 이용하여 속도조절이 25~250 usec과 3.3~50 msec을 각각 광원을 주사할 수 있도록 구성하였다. 시험설비의 인증은 광멀티플라이 튜브를 이용하여 과장반응, 민감도 및 반응속도 시험을 각각 수행하였다. 시험결과 국제 규격에 따른 인증시험을 수행할 수 있었으며 정밀도가 비교적 높은 것으로 나타났다. 본 논문에서 제안한 이선아크 검증장치의 평가시스템은 고속철도 및 기존선의 전차선로 건설 및 개량시 이선용 평가장치의 신뢰성을 높이고 국제규격에 합당한 검증기 개발에 활용될 것이다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 "400km/h급 고속 철도 인프라 시범적용 기술개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 한봉석, "한국전기철도의 현황과 발전전략", 철도웹진, 56호, 2005.
 [2] 오석용, 박 영, 조용현, 이기원, 송준태, "전차선로 전기

적 특성 평가 시스템 구현", 전기전자재료학회논문지, 제 24권, 6호, pp. 497-503, 2011.
 [3] 박 영, 조용현, 이기원, 김형준, 김인철, "고속카메라를 이용한 전차선 압상량 검증 시스템 개발", 전기전자재료학회논문지, 제 22권, 10호, pp. 864-869, 2009.
 [4] 김재문, 이을재, 윤차중, 김양수, "철도차량내의 전력변환장치 출력전원 분석을 통한 스위칭 기법 추정", 대한전기학회논문지, 제59, 2호, pp.185-190, 2010.
 [5] 김재문, 윤차중, 이을재, "동력 집중식 철도차량의 전력 변환장치 전력품질 향상연구", 한국철도학회논문집, 제13권, 6호, pp.559-564, 2010.
 [6] 나해경, 박 영, 조용현, 이기원, 박현준, 오수영, 송준태, "실시간 계측시스템을 이용한 전차선로 특성 측정", 전기전자재료학회논문지, 제 20권, 3호, pp. 281-285, 2007.
 [7] 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.
 [8] O. Bruno, A. Landi, M. Papi, L. sani, "Phototube sensor for monitoring the quality of current collection on overhead electrified railways", Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 215, Part F, pp. 231-241, 2001.
 [9] EN 50119:2001, "The European Standard, Railway applications-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines", 2001.
 [10] 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.

저 자 소 개



박 영 (朴 映)

1973년 11월 3일생. 2000년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 현재 한국철도기술연구원
 Tel : 031-460-5424
 Fax : 031-460-5289
 E-mail : ypark@krii.re.kr



조 용 현 (趙 容 鉉)

1961년 8월 7일생. 1992년 한국과학기술원 기계공학석사. 2008년 서울대 기계공학 박사. 현재 한국철도기술연구원(책임연구원)
 Tel : 031-460-5112
 E-mail : yhcho@krii.re.kr



권삼영 (權三榮)

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2007년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 한국철도기술연구원(책임연구원)

Tel : 031-460-5425

E-mail : sylwond@krri.re.kr



이기원 (李基源)

1970년 9월 26일. 1997년 RIT(미) 기계공학 석사. 2009년 성균관대 기계 공학박사. 현재 한국철도기술연구원

Tel : 031-460-5422

E-mail : kenlee@krri.re.kr



유원희 (兪元熙)

1959년 2월 8일

1993년 8월 연세대 기계과 박사

현재 한국철도기술연구원

Tel : 031-460-5670

E-mail : whyou@krri.re.kr