



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2016년 2월

2016年 2月
碩士學位論文

碩士學位論文

전기철도 급전선의 이선 아크
특성에 관한 연구

金 指 註

전기철도 급전선의 이선 아크 특성에 관한 연구

朝鮮大學校 產業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 指 註

전기철도 급전선의 이선 아크 특성 연구

A study on the Contact Loss Arc Property of
Railway Power Reeding System

2016年 2月 25日

朝鮮大學校 產業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 挿 註

전기철도 급전선의 이선 아크 특성 연구

指導教授 李 愚 宣

이) 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2015年 10月

朝鮮大學校 產業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 挿 註

金揮註의 碩士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授

金南勲



委 員 朝鮮大學校 教授

徐吉模



委 員 朝鮮大學校 教授

李愚宣



2015年 11月

朝鮮大學校 產業技術融合大學院

목 차

ABSTRACT	V
I. 서 론	1
II. 연구 현황 및 이론적 고찰	2
A. 연구 현황	2
1. 기술개발 현황	2
B. 전차선과 펜터그래프 간의 이선율	5
1. 이선율 판단 기준	5
2. 이선의 측정법	7
3. 아크의 전기적 특성	10
4. 아크의 발생원인	11
5. 아크의 영향	13
III. 검측 시스템	14
A. 전기철도 급전계통	14
1. 급전계통 모델	14
2. 전원등가 모델	15
3. 스콧변압기 모델	15
4. AT 모델	16
B. 전차선과 펜터그래프 간의 이선 아크 검측	17

1. 전기철도 이선 검측 장치 요구사항	17
2. 전기철도 이선 아크 검측 장비 분석	18
3. 검측 시스템 구성	21
4. 펜터그래프의 높이 측정	23
C. 실증 결과 및 고찰	24
1. 아크 측정 데이터 비교 분석	24
IV. 결 론	26

그림 목차

그림 2-1. 철도시설 성능검증 시행지침	4
그림 2-2. 분압식 측정법	7
그림 2-3. 전류식 측정법	8
그림 2-4. 광학식 측정법	9
그림 2-5. 아크 반주기 동안의 사이클로그램	11
그림 2-6. 연결부 변형에 따른 아크 생성	12
그림 3-1. 급전계통 모델	14
그림 3-2. 스콧 결선도와 벡터도	15
그림 3-3. AT 모델 구조	16
그림 3-4. AT 모델 등가 회로	17
그림 3-5. 전차선과 팬터그래프의 이선 아크 검측 프로그램	19
그림 3-6. 전차선과 팬터그래프의 이선아크 검측 센서 구성도	20
그림 3-7. 전차선로 전기적 특성 검측 시스템	21
그림 3-8. 팬터그래프 높이 측정 방법	23
그림 4-1. 아크 측정 데이터 (1)	24
그림 4-2. 아크 측정 데이터 (2)	25
그림 4-3. 아크 측정 데이터 (3)	25

표 목차

표 2-1. 전차선로 자재 국산화 개발 현황	3
표 3-1. 전원 등가 모델 변수	15
표 3-2. 스콧 변압기 변수	16
표 3-3. 전차선과 팬터그래프 아크특성 검증센터 요구사항	18
표 4-1. 아크 측정위치 및 전차 속도(1)	24
표 4-2. 아크 측정위치 및 전차 속도(2)	26
표 4-3. 아크 측정위치 및 전차 속도(3)	28

ABSTRACT

A study on the Contact Loss Arc Property of Railway Power Feeding System

Kim, Hwi - Joo

Advisor : Prof. Lee Woo-Sun, Ph.D.

Department of Electrical Technology Convergence Engineering,
Graduate School of Industry Technology Convergence,
Chosun University

Electric railways are currently developing the technology continues to greener public transport due to logistical capacity enhancement and energy costs savings. Electrification rate of the domestic has also increased significantly. But these electric railway is a situation that needs attention is more extreme cases lead to an accident due to a large tragedy for the purpose of mass transit. Such scrutiny shall be made on the electrical risk factor in operating a railway. A catenary system in the electric railway is an important key technology to determine the speed of the train as a plant for supplying power to the train.

In this paper, the arc generated in the electric railway and analyzed the effects of an electric railway system circuit. In the case of arc extinction in a very short time, but due to the large stand intellect current EMI, thereby causing EMC problems. The impact of this arc can critically affect the entire electrical and control systems continue to accumulate if the railway meeting. By analyzing the effects on the arcs of the catenary system to such high-speed solves the problem of the present system and increase the arc current collecting performance conducted a study in order to take advantage of the construction and performance verification to the new catenary.

I. 서 론

현재의 전기철도는 물류 수송력 증강 및 동력비 절감효과로 인하여 친환경적인 대중교통 수단으로 그 기술이 꾸준히 발전하고 있다. 국내에서의 전철화 비율도 크게 증가하고 있다. 하지만 이러한 전기철도는 대량수송을 목적으로 하기 때문에 사고시 대형 참사로 이어지는 경우가 많아 주의가 각별히 필요한 실정이다. 이러한 전기철도를 운영하는데 있어서 위험 요소들에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다.

전기철도에 있어서 전차선로 시스템은 열차에 전력을 공급하기 위한 설비로써 열차의 속도를 결정하는 중요한 핵심 기술이다. 전기철도의 열차 속도가 높아지면 집전장치인 팬터그래프의 압상력(upliftforce)이 증가한다. 또한, 정해진 압상력으로 주행하여 진동에 의한 파동이 발생하였을 경우 이 파동에 따라 전자선과 팬터선 사이에는 다른 선로가 발생하게 된다. 이는 전력 공급 장애, 전차선(contactwire) 및 습동판(contactstrip)의 이상마멸, 아크의 발생, 전자파 발생환경변화(전류변화, 온도, 마모)와 외력(금구의 춰부, 보수작업 중의 손상, 시공)에 따라 작은 변화가 발생하며 전차선 가선구조의 기능에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하고 안정성을 향상시켜야만 전기철도의 대중화를 유도할 수 있다[14]. 특히, 기존 디젤로 구동되던 열차에서는 보이지 않았던 전력품질 문제는 반드시 해결되어야 하는 문제이다.

본 논문에서는 전기철도에서 발생하는 아크가 전기철도 회로 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 아크의 경우 매우 짧은 시간에 소멸하지만 큰 서지성 전류로 인하여 EMI, EMC 문제를 야기 시킨다. 이러한 아크의 영향이 지속적으로 누적되면 전기철도 주회로 및 제어 시스템 전체에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 고속 전차선로 시스템의 아크에 대한 영향을 분석하고 검토하여 현 시스템의 문제를 해결하고 아크집전 성능을 향상시켜 신규 전차선로 건설 및 성능검증에 활용하고자 한다.

II. 연구현황 및 이론적 고찰

A. 연구현황

1. 기술개발 현황

1972년 우리나라의 전기철도는 태백선 중산에서 고한간 시험선을 원시으로 건설되었다. 기존선 180km/h급 전차선로 개발, 그리고 기존선을 고속화하기 위해 200km/h급 전차선로 표준화에 대한 연구가 진행되어 설계표준과 일부 자재에 대한 국산화가 진행되어 현장시험을 통해 실용화 되었다.

경부고속철도 전차선로 시스템은 2004년에 개통되어 현재 운용되고 있다. 프랑스 TGV-북선 시스템을 도입하여 건설되었고, 차량 및 신호분야와 함께 코어시스템으로 분류된 전차선로 분야는 프랑스 설계기술을 도입하여 건설이 이루어졌다 [1]. 이후 350km/h급 전차선로 시스템을 독자 기술로 개발하여 호남고속철도에 건설 및 개통 완료하였고 현재 수도권고속철도도 350km/h급으로 건설 중이다. 또한 400km/h 급 전차선로시스템을 국가R&D과제로 개발 완료하여 호남고속철도 시험선에 설치 및 시험 완료하였다[2-3].

2004년 4월 경부고속철도가 개통되면서 국내에도 고속철도 시대를 시작하게 되었으며 프랑스 TGV시스템을 도입하게 되었다. 프랑스와 우리나라간의 계약 당시 전차선로는 차량 및 신호와 더불어 코어(Core)계약으로 체결되어 국산화 품목과 수입 품목, 기술이전 품목으로 구분되었다. 기술이전 품목으로는 홈 브레이크 전차선(Pre-worn타입 Cu150mm²)이 당시 국내 전선회사에 기술이전이 된 품목이다. 경부고속철도는 대구를 중심으로 1, 2단계구간으로 나누어 1단계(2004년 개통)구간(시흥직결선~대구 신동)에는 3개 구간(Phase A, Test- Track, Phase B)으로, 2단계(2010년 개통) 구간에는 동대구~부산구간으로 시간차를 두고 시공하였다.

1단계구간에는 주종 선종인 급전선, 보호선, 전차선, 조가선 및 단품위주의 지지물과 주조부품 및 소형 강제부품을 국산화하여 제작 납품되었다. 그러나, 2004. 4 월 경부고속철도 서울~동대구간 개통 이후 2단계(동대구~부산)까지 7년여의 공백으로 기존 국산화 업체가 도산되거나 생산설비 등이 와해되어, 동대구~부산간

건설 시에는 1단계에 국내 생산된 주조부품 등을 오히려 프랑스 등 외국으로부터 수입되어 시공되었다.

호남고속철도 건설을 시작으로 2011. 3월부터 한국철도시설공단에서는 350km/h급 고속철도 전체 자재의 국산화를 목표로 공개경쟁에 의한 업체를 선정하여 전차선로 자체 국산화를 완료하였으며 국산화현황은 다음과 같다[9].

표 2-1. 전차선로 자체 국산화 현황

대상품목	담당부서	참여업체	완료일정
금구류(120) 장력조정장치(1)	한국철도시설공단 전기사업단	-(주)디투엔지니어링 -세명전기공업(주) -제룡산업(주)	2012.10월 완료
볼트/너트류(20)		-(주)임진에스티 -(주)대우볼트	
전선류(3) 크램프류(11)	한국철도기술연구원 KR연구원	-한국철도기술연구원 외 2개사	2011.10월 완료

전차선로 모니터링 시스템의 경우 고속철도뿐만 아니라 기존 철도에도 적용가능함. 특히 유지관리 구역이 넓거나 관리구역 내 취약개소가 있는 경우에 운영자는 전차선로 유지관리에 어려움을 겪고 있음. 본 과제에서 개발한 모니터링 시스템을 도입하는 경우 유지보수의 효율성 및 안전도를 향상할 수 있음. 기존선 전차선로에서의 추가적인 사업화를 위하여 기존선 테스트베드를 구축하여 모니터링시스템 도입에 따른 유지보수 효율성 향상을 검증해야만 하는 상황이다.

2. 전차선로 성능평가 기술 개발

철도에 사용되는 자재 또는 시스템에 대한 성능검증은 국토교통부의 관련법령에 의해 철도용품품질인증기관의 품질인증 절차에 따라 성능을 평가하는 경우와, 한국철도의 시설관리자인 한국철도시설공단이 ‘철도시설 성능검증지침’에 의해 성능을 평가하는 절차를 볼 수 있다. 다음은 두 기관의 성능검증에 대한 절차로 기본적으로 현장설치시험을 마치는 과정까지를 포함하고 있다[6].

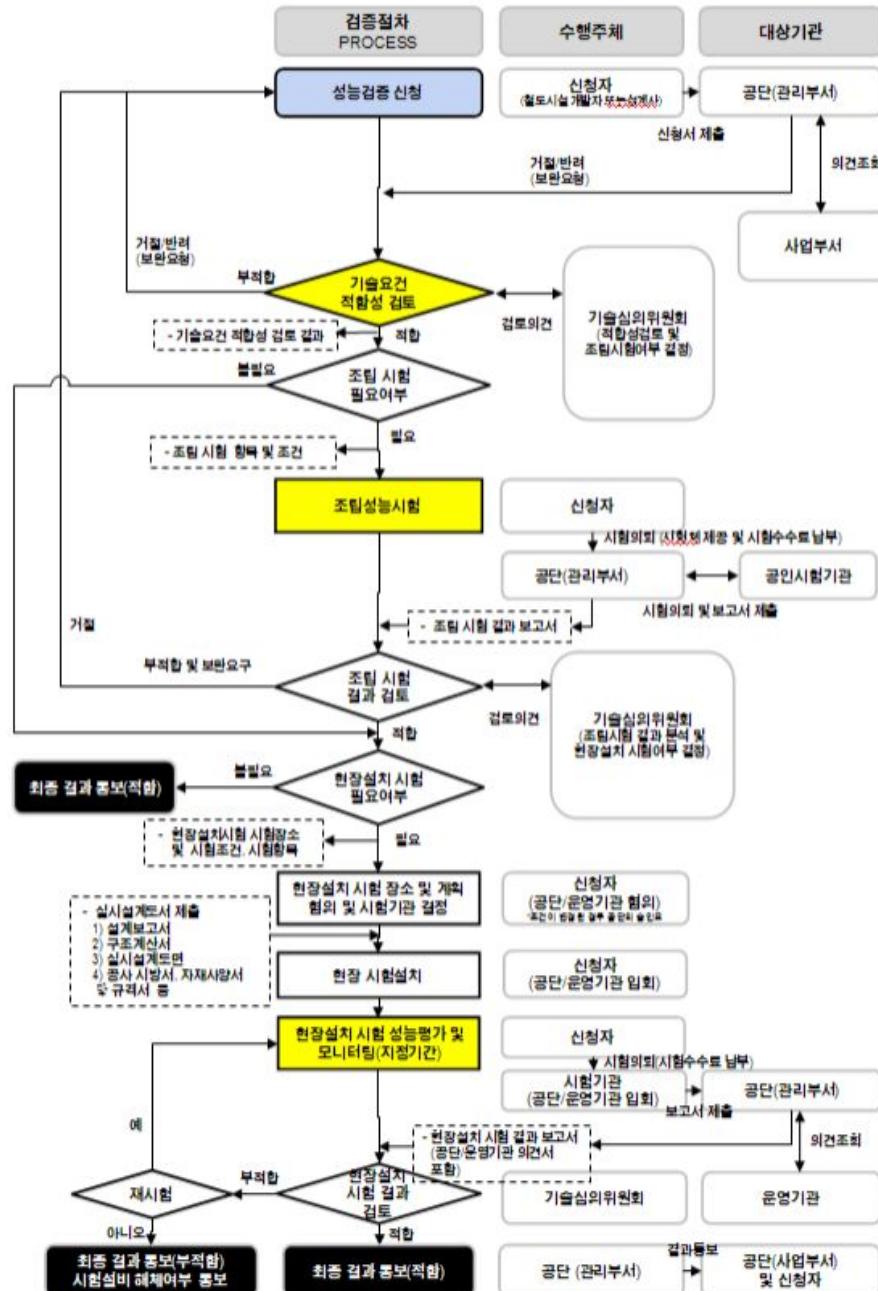


그림 2-1. 철도시설 성능검증 시행지침

B. 전차선과 팬터그래프 간의 이선율

1. 이선율 판단 기준

전기철도의 집전시스템은 전기를 공급하는 전차선과 전력을 급전하는 팬터그래프로 이루어진다. 팬터그래프는 전력을 전차선으로부터 철도차량에 공급하는 설비로서 전차의 상부에 설치된다. 이러한 팬터그래프는 다양한 조건하에서 지속적이고 안정적인 양의 전력을 차량에 공급하는 것이 목적이다[10-13]. 전기철도의 운전 중 전차선과 팬터그래프 사이가 이선될 경우 동력 전달이 중단될 뿐만 아니라, 이선시 발생하는 아크로 인하여 철도차량 및 전차선에 악영향을 줄 수 있다[14-18]. 이러한 이유로 이선율을 줄이고 이선이 될 경우 아크에 대한 영향 평가가 반드시 이루어져야 한다.

이선율은 속도대역에 따라 팬터그래프와 전차선간의 집전성능 판단 기준값이 다르다[9]. EN50367, IEC62486, EN50317, EN50119은 이선율을 판단하기 위한 규격이다. 이 때 이선율은 식 (1)과 같다.

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

여기서, t_{arc} 는 5msec 이상의 아크 이속시간,

t_{total} 는 차량 정력전류의 30% 이상의 측정 값

최소아크 기준시간은 5 ms이며, 팬터그래프와 전차선간에 발생되는 아크는 전차선과 팬터그래프 집전판의 급격한 마모 및 차량의 동력계에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 아크의 물리량은 광 밀도 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)가 사용되고 있지만 광 밀도의 크기는 최소응답 기준으로만 활용된다[19, 20]. 따라서 식 (1)과 같이 이선율에서 최소 아크기준 시간에 따른 차이가 발생되므로 팬터그래프와 전차선간 아크발생 시간이 5 ms 이상만이 문제시된다고 가정하여 설정된 것으로 판단된다. 하지만 현재의 규격에서 이선율을 판단할 경우 운행시간에 따른 최소아크 발생시간의 총 합이다. 따라서 5 ms 이상의 아크 중 최대 및 최소아크에 대한 규정이 없는 전체 이선율 (%)만을 판단하게 된다. 이와같은 규정은 이선아크 발생의 원인이 철도차량과 전

차선간의 기계적 비접촉에 의해 발생되었다. 하지만 인증시험을 위해 차량과 전차선간의 상호 운영에 대한 적합한 기준만 설정되었을 뿐이다. 또한, 차량의 집전장치 또는 전차선의 변형 및 결함에 대해서는 판단하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 표 1은 속도에 따른 이선율 판단기준을 나타낸다. 250 km/h 이하에서는 0.1%, 250 km/h 이상의 속도에서는 0.2% 이하의 이선율이 기준 값이다. 최고 0.5%를 넘어서는 안 된다. 인증을 위해서는 열차 또는 선로 최고속도 대응을 위해 ± 10 km/h 속도대역에서의 최소 아크기준시간 이상의 전체 합을 구하여 식 (1)을 이용해 이선율을 계산한다. 이 때 기준거리를 통계적으로 신뢰성을 가지기 위해 10 km 이상으로 설정하고 있다.

식 (2)는 이선율 기준 값을 보여준다. 식 (2)는 국내의 경부고속철도 계약서와 일반(고속화)·고속철도 등 철도종합시험 4.3항목에 이선율 기준이 있다.

$$NQ(\text{이선율}\%) = \frac{\sum \text{이선시간(최소아크지속시간} > 10\text{msec)}}{\text{총검측시간}} < 0.01 \quad (2)$$

이때 최소 아크기준은 식 (2)와 같이 10 msec 이상을 기준으로 두고 있다. 국내외 모두 EN 50317의 세부 규격에 따라 이선율을 검증한다. 검증을 위한 시험방법은 보고된 바 있다.[21,22]. 이선율 기준은 1% 이하이지만 100m 이내에서 한개 이상의 10msec가 초과된 아크가 발생될 경우와 시험중 25 msec 이상의 아크가 생겨 성능 인증 기준을 추가로 명시하고 있다. 25 msec 이상의 아크에 관한 성능 인증 기준은 별도로 정의한다. 이는 전체 시험구간에 대해 25 msec 이상의 아크는 전차선과 팬터그래프의 집전판에 심각한 손상이 발생될 수 있기 때문이다.

2. 이선의 측정법

다른 선로는 전차선과 팬터그래프 간의 아크를 감시하여 간접 측정이 가능하다. 다음과 같은 3가지 측정법이 사용된다.

첫 번째는 분압식 측정방법이다. 팬터그래프를 주 회로에서 삭제하고, $1.5M\Omega$ 정도의 저항 분압기를 끼워 접지시킨다. 그 다음 가선전압을 약 $1/20$ 으로 감소시켜 측정한다. 즉, 전차선의 이선의 발생은 팬터그래프에 가선전압이 부하되는지 아닌지의 여부에 따라 판단하는 것이다. 이 방법의 특징은 역행, 타행 등의 운전조건에 좌우되지 않고, 정밀도가 높다. 하지만 팬터그래프를 무부하로 해야 하고 1개의 팬터그래프 전기 철도차에는 적용할 수 없다는 문제점이 있다.

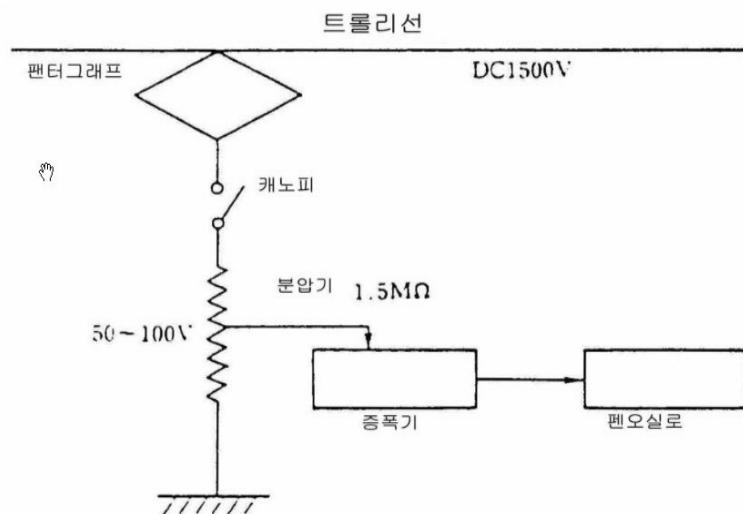
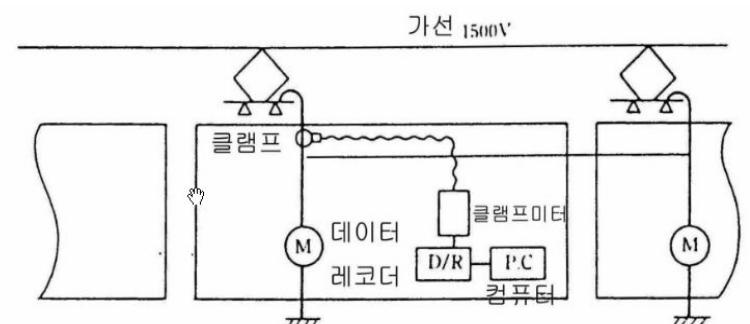
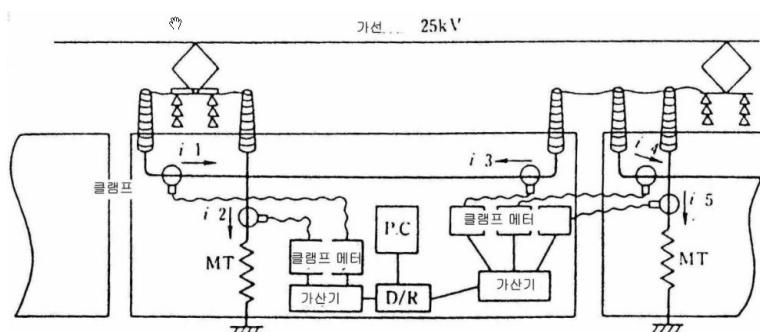


그림 2-2. 분압식 측정법

두 번째는 전류식 측정방법이다. 다수의 팬터그래프가 고압 모션으로 접속되었을 때 전기철도차량에서는 어떤 팬터그래프가 이선하면 집전전류는 순간적으로 0이 된다. 이때 서로 맞닿아 있는 다른 팬터그래프의 집전전류가 증가한다. 전류식 측정 방법은 이와 같은 현상을 이용해 이선을 판단한다. 클램프 미터(ClampMeter)로 팬터그래프의 집전 전류를 측정할 수 있다. 전류 측정 과정은 컴퓨터에 의해 처리되어 이선율, 이선의 횟수, 이선의 유지시간, 그 분포 등의 통계량을 얻을 수 있다. 이 방법은 측정이 쉽지만 집전 전류가 큰 때 이선이 발생하더라도 전류가 0이 되기 어렵다. 그렇기 때문에 이선의 발생이 검출되지 않을 수 있다.



(a) 직류



(b) 교류

그림 2-3. 전류식 측정법

마지막으로 광학식 측정방법이 있다. 집전하고 있는 펜터그래프에서 이선이 나타나면, 그것에 따른 아크-광이 일어난다. 따라서 이 광의 강도를 광전변환소자에 의해 전기신호로 변화하며 아크를 알아내는 것이다. 광전변환소자로서는 silicon, gallium, arsenic, phosphorus 계의 photo-diode나 광전자증배관이 이용되고 있다. 이 방법은 전압 및 전류의 변화를 측정한다. 또한, 이선을 측정하는 것에 비해 이선에 따른 아크를 검출하여 이선을 측정하는 점이 특징이다. 운전조건 또는 주위 밝기에 영향을 받지만 비접촉식 측정이고 측정 방법이 매우 간단하여 상대비교를 하는 경우 등에 많이 사용된다. 또한 임의의 차량에 취부하여 측정하기 용이하다는 장점을 갖는다[23-25].

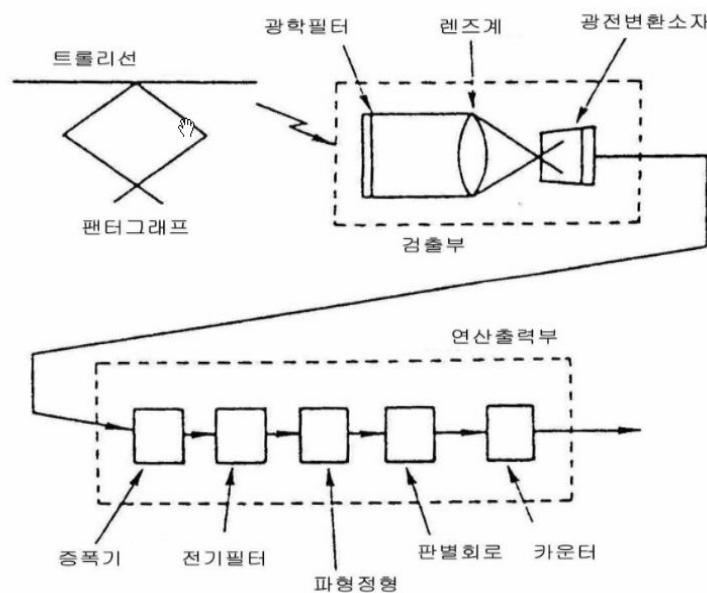


그림 2-4. 광학식 측정법

3. 아크의 전기적 특성

아크(Arc)란 두 전극 사이에서 공기 중의 절연내력을 넘어서게 되면 절연이 파괴되어 전기적으로 방전 전류가 흐르는 것을 말한다. 이 방전전류에 의해 두 전극 사이에는 고온의 열을 빛을 방사한다. 이 때 발생하는 주울열은 I^2Rt 의 식으로서 표현이 가능하다. 아크전류에 의해 발생되는 방전에너지(e)는 방전전류 (I_a)와 아크 전압(V_a)의 곱의 적분값으로 표현이 가능하다 여기서 반주기 사이에 발생하는 일회성 아크인 t_1 을 아크 개시시간, t_2 를 아크 종료시간으로 하면 아크전류에 의한 방전 에너지(e)는 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$e_a = \int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot I_a dt \quad (3)$$

또한, 아크는 전기 도선의 종류, 단면적, 전압 및 전류의 크기에 따라 온도와 기하학적 특성이 변하며, 전기적 특성과 금속의 성질에 따라 다르게 나타난다.

아크 저항은 일정하지 않기 때문에 전류 영점인 부근에서 아크 저항을 계산하기 위하여 과도 아크 전압 및 전류를 이용한 미분방정식 형태의 수학적 모델로 표현이 가능하다. 한 주기 동안의 아크 저항은 식 (4)와 같다.

$$R_{arc}(t) = \frac{75I_p^{0.4}}{0.18I_p} l(t) K(t) \quad (4)$$

4. 아크의 발생원인

전기철도 급전 시스템의 전차선과 팬터그래프 간에 아크가 일어나는 것은 팬터그래프와 전차선 사이가 다른 선로가 되는 경우와 타행 운전 상태가 아닌 역행 운전 상태에서 전기철도차량이 절연구간을 지나치는 두 가지 원인으로 나눌 수 있다[6,7].

그림 2-5는 아크 반주기 동안의 사이클로그램을 나타낸다.

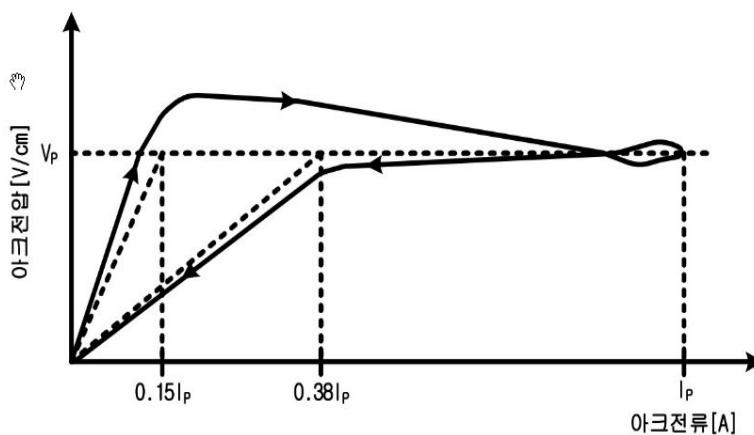


그림 2-5. 아크 반주기 동안의 사이클로그램

먼저, 팬터그래프와 전차선 사이의 이선은 소, 중, 대 이선으로 구분하여 분류할 수 있다. 소이선은 팬터그래프 습동판의 미세 진동에 따라 발생한다. 이선시간은 수십 분의 1초 정도이다. 중이선은 팬터그래프가 전차선의 경첩에 의해 충격을 받아 발생한다. 이선시간은 수 분의 1초 정도이다. 대이선은 전차선의 지지점 통과 직후 팬터그래프 전체가 상승하여 발생하고, 이선시간은 1~2초에 이른다. 전기철도차 진행시 이선이 나타나면 이선 개소의 맨 처음 및 맨끝은 아크 및 충격에 따라 국부적으로 전차선의 마모가 촉진된다. 결과적으로는 단선 가능성이 높아진다. 또한 이선 시간동안 운전용 전력의 집전이 멈춰 무선 잡음 장해가 발생한다. 최악의 경우 전기철도차의 주전동기나 보호기기류가 섬락에 의해 파손되기 쉽다 [26-29].

두 번째는 절연구간의 통과이다. 절연구간은 사구간 또는 데드 섹션이라고도 한다. 또한 이웃한 2개 급전 구간 사이 경계점의 접속개소에 설치되어 두 구간을 전기적으로 절연시킨다. 따라서 절연구간은 크게 교류/교류, 교류/직류 절연구간으로 분류한다.

원칙적으로 전기철도차가 절연구간을 지나갈 때, 전기철도차량은 전압을 끊은 상태에서 절연구간을 통과하여야 한다. 하지만, 예기치 못한 상황에 의해 전압이 완전히 차단되지 않은 상태에서 절연구간을 통과하게 되었을 때 전기철도 차량의 팬터그래프는 가압구간에서 무가압 구간으로 어떠한 보호 절차 없이 진입하게 된다. 이 때 전기철도 차량의 팬터그래프와 전차선 간에 아크 발생 소지가 높다. 또한 절연구간을 벗어날 때에도 무가압 구간에서 바로 가압구간으로 진입하게 되므로 아크가 일어날 확률이 높다[23].

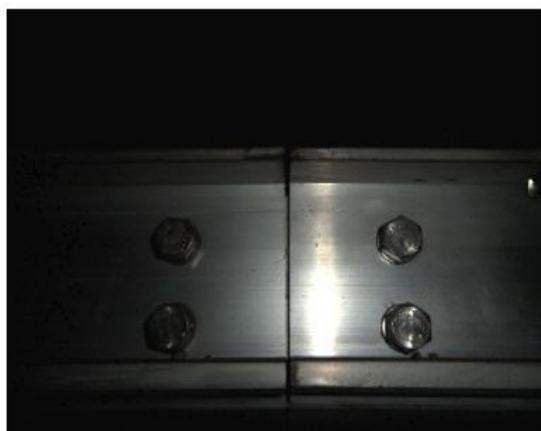


그림 2-6. 연결부 변형에 따른 아크 생성

5. 아크의 영향

전기철도 급전 선로에서 발생하는 아크는 급전 시스템에 영향을 주어 차량 내부 기기의 수명 저하, 고조파 및 전자파 등을 발생시켜 설비의 안정성을 저하시키게 된다.

a. 전기철도 수명저하

아크는 시간에 따른 전압의 변화량이 큰 서지(surge)의 형태를 띠게 된다. 전차의 주변환 장치는 인버터, 컨버터 등의 전력변환 장치로 구성되어 있어 전력 품질에 민감하게 반응한다. 이러한 장비에 아크로 인한 서지의 침입은 전력 반도체 소자들의 절연 내력에 영향을 줄 수 있으며 특히 반복적으로 발생할 경우 소자가 견디지 못하는 심각한 영향을 초래할 수 있다.

b. 고조파 발생

아크로 인하여 급전 시스템에 고조파가 들어오게 되면 우선 부하 손실이 증가하게 되어 기존 설비의 용량 설정시 충분한 검토를 요하게 된다. 또한 포설방법 및 고조파 전류에 의한 유도장해 문제를 일으키게 되어 전선의 허용전류 보정도 필요하게 되고, 철도 신호 시스템에 노이즈가 발생할 수 있어 그 문제는 심각하다.

c. 전자파 발생

전기철도 급전 차량은 판토그래프를 이용하여 전차선과 연동하면서 전력을 공급 받고, 다양한 전력변환 설비를 이용하기 때문에 전자파에 대한 오작동의 우려가 존재한다. 전기철도에서 전자파는 전력변환설비의 스위칭 서지, 코로나, 아크 등에 의해 발생되며, 이중 전자계 간섭을 일으키는 주 원인은 전차선과 판토그래프 사이의 이선에 의한 아크를 들 수 있다[21].

III. 검측 시스템

A. 전기철도 급전계통

1. 급전계통 모델

전기철도 급전 시스템은 그림과 같이 전원 등가모델, 스콧 변압기 모델, AT(Auto Transformer) 모델, 선로 모델로 구성되어 있다[30, 31].

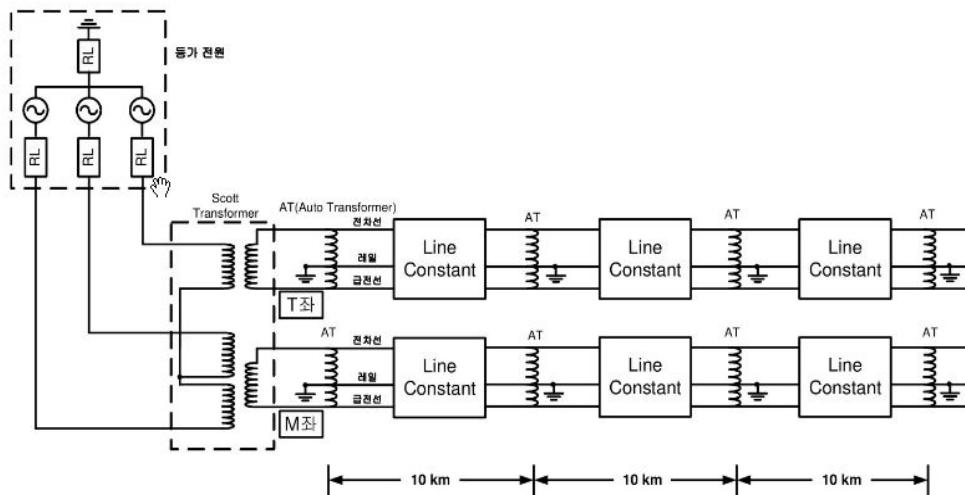


그림 3-1. 급전계통 모델

2. 전원 등가 모델

전기철도 급전 시스템은 154[kV] 3상을 수전하여 스콧변압기에 50[kV] 단상으로 강압하여 사용한다. 표 3-1의 변수들은 기준 용량은 100[MVA]를 기준으로 나타내었다.

표 3-1. 전원 등가 모델 변수

기준용량[MVA]	100
정격전압[kV]	154
기본 주파수[Hz]	60
정상 임피던스[%]	$1.57+j7.88$
영상 임피던스[%]	$4.07+j19.19$

3. 스콧 변압기 모델

3상 교류 전력을 2상으로 변환하는 방법에는 스콧 결선, 메이어 결선, 우드브리지 결선 방식 등이 사용되지만, 현재 국내 전기철도의 경우 스콧 결선 방식을 채택하여 사용하고 있다. 그림 3-2는 스콧 결선 변압기의 결선도와 전압 벡터를 보여준다. 스콧 변압기의 입력 변수는 표 3-2에 나타내었다.

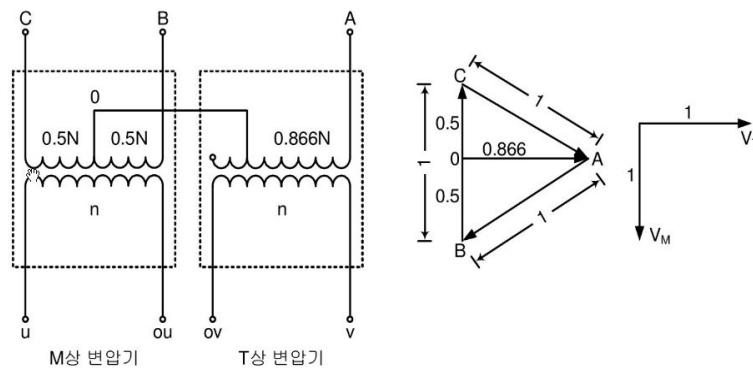


그림 3-2. 스콧 결선도와 전압 벡터도

표 3-2. 스콧 변압기 변수

T좌	자기용량[MVA]	45
	전압비 [kV]	154/55
	임피던스[%]	16
M좌	자기용량[MVA]	45
	전압비 [kV]	154/55
	임피던스[%]	16

4. AT(Auto Transformer) 모델

전차선 급전계통에 사용되는 AT는 1차 권선과 2차 권선으로 구성된 단상 2권선 변압기와 달리, 공동 철심을 사용하여 두 코일을 권선하고 이를 직렬로 접속하여 1, 2차 단자를 인출한다. 이로써 2권선 변압기와 동일한 변압비를 얻을 수 있다. 분로권선은 1:1의 권수비를 가지며, 두 권선이 접속되는 지점에 선로의 레일을 연결하게 된다.

그림 3-4의 등가회로를 통하여 변압기 자기용량과 부하용량의 관계는 식과 같다.

$$\frac{\text{자기용량}}{\text{부하용량}} = \frac{(E_2 - E_1)}{E_2 \times I_2} \quad (5)$$

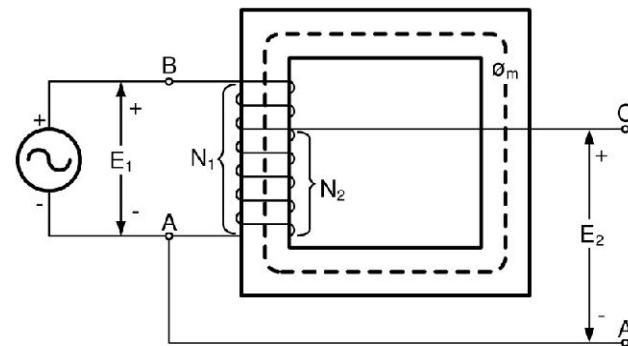


그림 3-3. AT 모델 구조

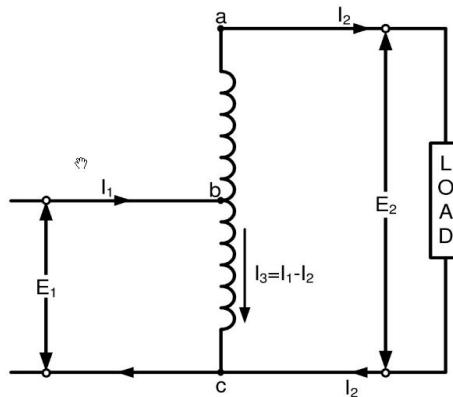


그림 3-4. AT 모델 등가 회로

B. 전차선과 팬터그래프 간의 이선 아크 검측

1. 전기철도 이선검측 장치 요구사항

이선검측장치는 팬터그래프와 전차선간 이선 중 발생하는 아크를 검측한 후 이를 전기적 신호로 바꾸어 물리적 양을 측정하는 것이다. 이선아크 검증을 위한 일반적인 요구사항은 빠른 반응 속도로 이선 시간이 수백 s이하도 판별할 수 있어야 한다. 또한, 팬터그래프 작동범위에 반응하도록 충분한 시간을 갖도록 하여야 하는 것이다[6]. 특히 전차선과 팬터그래프 간의 이선아크는 구리합금에서 발생하는 아크의 파장범위를 측정, 판독한다. 이는 열차 주행 시에 측정 되며 시험 장치는 차량상부에 검측센서 등을 설치한다. 실내에서 검측하며 시험기준은 EN 50317 등이 이용된다[6]. 최근 국내에서도 검측시스템이 EN 규격사항 등에 적합한지를 시험하기 위한 인증 시험 장치를 보고한바 있다. 하지만 이선을 검측장치의 신뢰성 분석은 구체적으로 알려지지 않았다[8]. 검측시스템의 일반적인 요구사항은 파장범위, 가시광선에 따른 비 반응, 민감도, 반응속도, 출력값의 교정이다. 다음은 센서 등이 포함된 계측시스템의 신뢰성 확보를 위한 4가지 사항이다. 측정 파장 범위시험, 센서 응답과 파워밀도 시험, 최소아크 응답속도 시험, 팬터그래프 작동 범위에 의한 민감도 시험을 각각 예비 성능시험을 실행하도록 되어있다. 측정 파장 범위 시험은 전차선의 재료인 구리류에서 발생하는 아크의 파장을 220 ~ 225 nm, 323 ~ 329 nm로 규정하여 이에 합당한지를 분석하는 시험이다. 이때 330

nm이상의 가시광선에서는 발생하지 않도록 한다. 팬터그래프 작동범위에 의한 민감도 시험은 전차선 편위에 따른 팬터그래프 전체 접전영역에서 발생하는 아크를 검출 한다. 시험을 통한 허용오차는 10% 미만이다. 센서 응답 V 과 파워밀도 W cm 시험은 시험장비의 교정사항에 대한 것으로 출력을 파워밀도로 표시하도록 하다. 파워밀도 교정은 $1/d^2$ 법칙을 이용하여 교정 하도록 하는 것이며, 팬터그래프와 검출기간 거리에 따른다. 최소 아크 응답속도 시험은 100 μs 미만의 아크에 적합한 조건으로 반응하도록 센서를 교정하는 것을 말한다. 총 4 개에 대하여 추가로 시험기를 제작하였고, 이선아크 검출장치를 고안하여 관련 내용을 보고한 바 있다 [8].

표 3-3. 전차선과 팬터그래프의 이선아크 검출센서

항 목	요구 사항	평가기준
측정 파장	220 nm ~ 225 nm	323 nm ~ 329 nm
오차	10%	팬터그래프 동작범위 내
반응 속도	100 μs	최소반응속도
태양광 반응 여부	330 nm	가시광선 영역 반응여부

2. 전기철도 이선아크 검출장비 분석

이선아크 검출장치는 구체적이고 정확한 방법으로 팬터그래프와 전차선간의 상호작용에 대한 접전성능을 평가할 수 있다. 특히 접촉력 등과 다르게 터널 안에서 측정이 용이하다. 또한, 아크 발생개소를 정확하게 변별하여 실시간 유지보수에 적용이 가능하다. 현재는 일본, 중국 등에서 개발하여 사용 중에 있다.

그림 3-6은 팬터그래프와 전차선간 이선아크 검출 순서도이다. 이선율은 이선아크 검출시스템의 최종 결과이다. 이는 선로조건인 속도와 센서조건인 파장등에 따라 다르므로 이선아크 검출순서와 이에 따른 규격을 판단하여야 한다. 또한 센서는 제작 이후에 파장범위, 태양광 반응형, 팬터그래프 동작 범위 시험과 아크 반응

속도시험을 수행하여야 한다. 이후 센서를 케리브레이션하여 파워밀도로 나타내게 하고 차량상부의 계측시스템과 차량 내부의 계측시스템을 구축 및 설비하여야 한다.

마지막으로 현장시험을 이행하여 이선율을 계측 한다. 최종적으로 요구사항에 적절한지를 판별하여 분석 하게 된다. 이선아크 검측을 위한 프로그램은 이선율, 이선시간 등을 집전성능 인증을 위해 실시간으로 분석 처리하여야 한다. 유지보수를 위해서는 이선아크의 발생 개소, 이선시간을 정확하게 분석하여 한다.

그림 3-5는 이선검측장치의 프로그램의 모니터링 화면을 나타낸다. 그림 3-5와 같이 자동차 속도, 아크 발생 횟수, 이선시간, 최대 아크 발생시간, 총 측정시간, 검측시스템 총 운영시간, 이선율 (%)를 실시간으로 표시하였다. 아크 발생 시 신뢰성 있는 데이터를 확보를 위해 별도의 비디오 측정결과를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 프로그램을 구축하였다. 또한 분석 프로그램을 구성한후 이선아크 검측시험을 수행하였다. 그 다음 아크발생 개소 등을 자동적으로 편집이 가능하게 하여 유지보수에 적극 이용할 수 있도록 구성하였다.

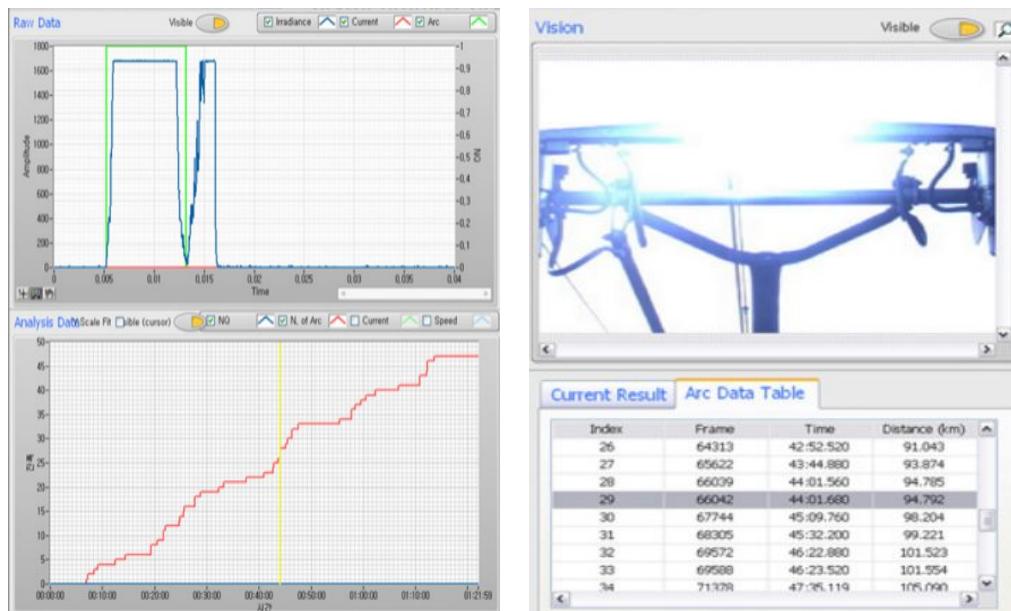


그림 3-5. 전차선과 팬타그래프의 이선아크 검측 프로그램

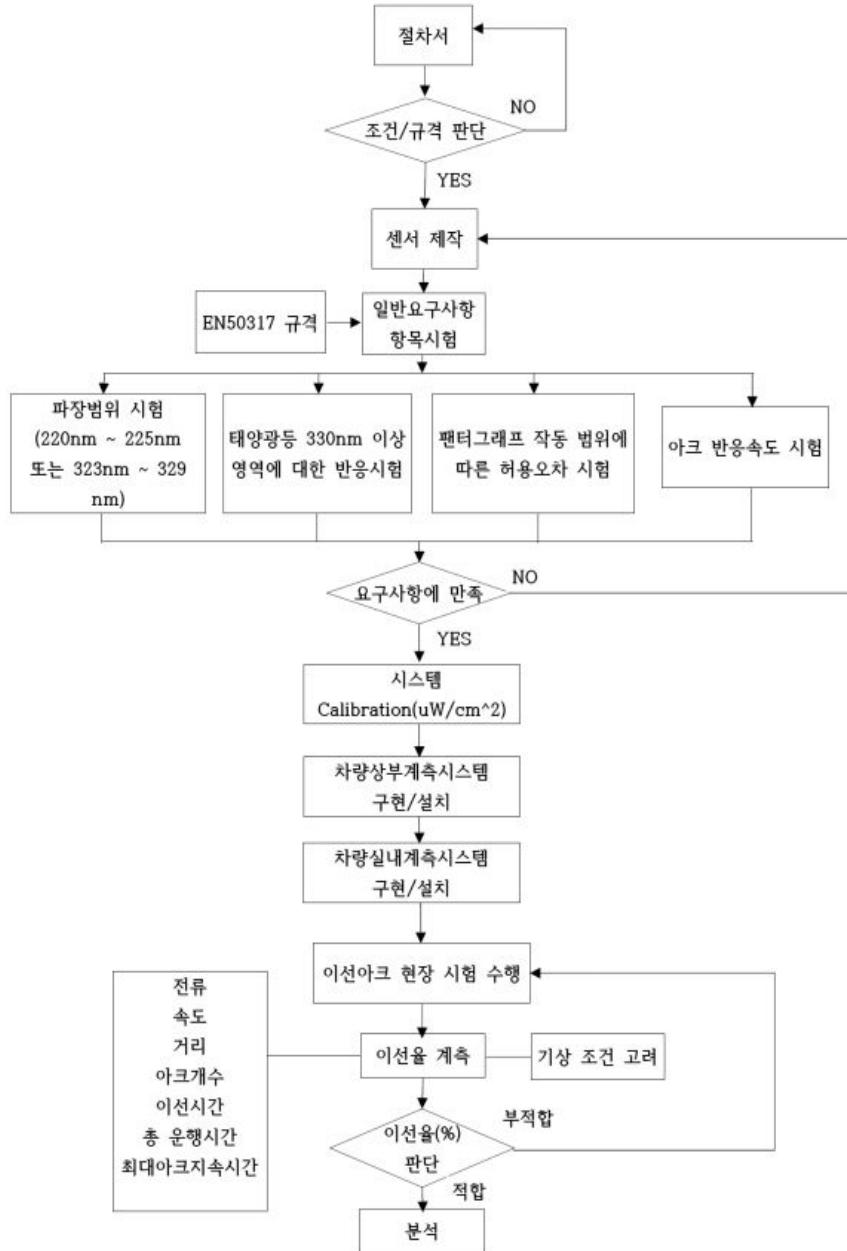


그림 3-6. 전차선과 팬타그래프의 이션아크 검측센서 흐름도

3. 검측 시스템 구성

그림 3-7과 같이 전차선로 전기적 특성 검측시스템을 구성하였다. 이 시스템은 2008년 한국철도기술연구원에서 고속선 현장시험을 수행하여 그 안정성을 검증하고 이를 ‘전력시스템 성능향상 기술개발’ 과제를 통해 알려진 바 있는 전차선로 실시간으로 상태를 모니터링 할 수 있는 시스템을 변환하여 개발하였다 [6].

이러한 검측시스템은 전차선로의 물리량을 실시간으로 얻어내어 지상부에서 무선으로 에너지를 보내는 장치로 센서부, 데이터 송수신부, 계측부, 지상신호처리부 및 전원부로 이루어진 구조이다.

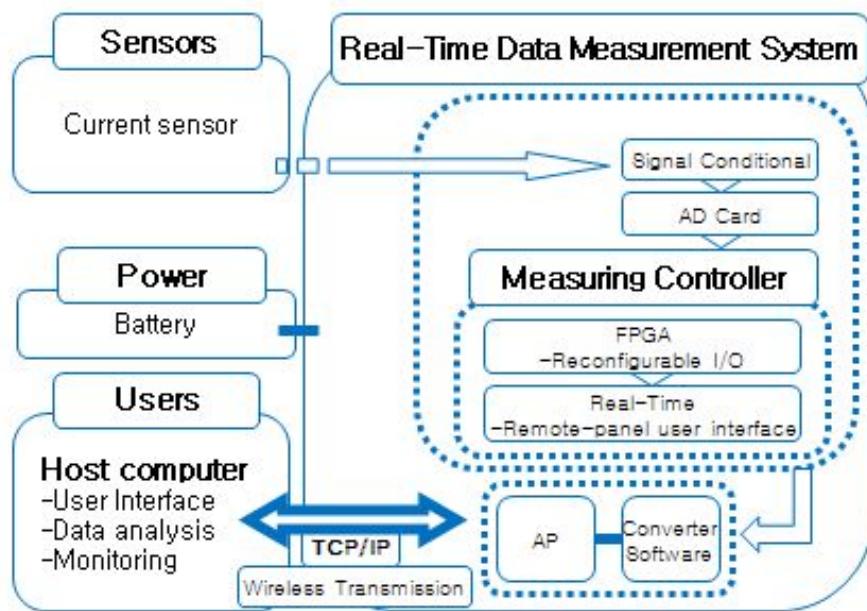


그림 3-7. 전차선로 전기적 특성 검측 시스템

실시간 계측 제어기를 장착하여 계측부는 센서의 인풋을 받아 증폭, 지상에 송신하여 별도로 계측이 가능하게 하였다. 16 비트 분해능으로 채널당 2,000 sample/초 이상의 측정 속도이며 16채널 확장 가능한 A/D와 제어기의 구조이다.

센서는 제어기에 연결되어 출력을 증폭하여 A/D 컨버터로 보내져 증폭신호를 디지털화하여 CPU에 전송하고 다시 무선랜을 통해 지상으로 측정 데이터를 전송한다.

주요사양은 사용주파수 2.4 GHz, 전송속도 54 Mbps를 지원하는 IEEE 802.11 b/g를 지원하며 TCP/IP protocol을 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: \pm 12 V, rated current : \pm 250 A 사양의 HCS-24-250APCLS 분할형 홀전류 CT센서를 사용하였다. 실시간 모니터링을 위해 데이터 측정 및 분석 표현에 적절하도록 labview 프로그램을 사용하였다. 프로그램 구성은 초기화 및 calibration, 파일저장 정보 구성을 하고 유무선 통신 설정과 센서신호의 물리량 변화 후 그래픽 로딩 및 저장설정을 하였다.

4. 팬터그래프의 높이 측정 방법

전차선로 팬터그래프의 높이는 반사경을 통하여 그림 3-8과 같이 레이저로 활용하여 측정하였다. 대상 물체에 반사되는 반사파의 시간을 거리로 환산하여 인지하도록 구성되었다. 레이저로 측정된 거리는 식 3. 2를 통하여 계산된다[16].

$$H = \frac{1}{2} C \times \Delta t \quad (6)$$

여기서 C 는 광속을 의미하고 Δt 는 시간 변화량을 의미한다.

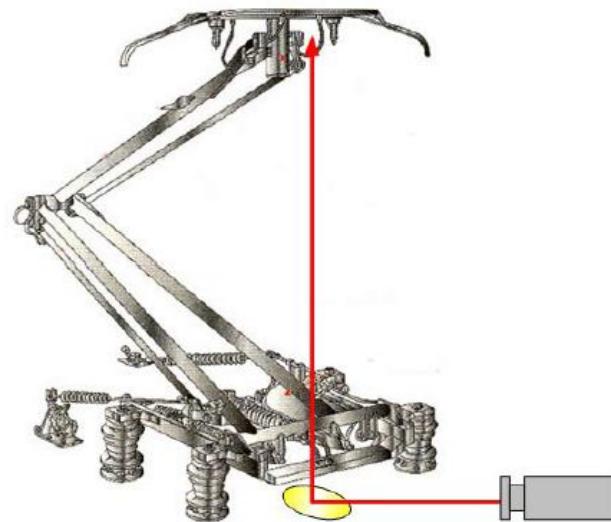


그림 3-8. 팬터그래프 높이 측정 방법

C. 실증 결과 및 고찰

1. 아크 측정 데이터 비교 분석

전류 이상상태 모니터링 시스템 시제품 설치 후 전차선 및 조가선의 전류 데이터를 실시간 측정, 전송하고 측정한 데이터를 통해 전류의 이상상태 데이터를 취득하였다.

a. 상행 14:01:46 ~ 14:22:03 측정 Data 비교

- 아크측정기 Data 측정 위치 124.07K 위치는 14:10:55초 위치이고, 전류이상상태 측정위치는 14:13:11이다.

- 검토의견 : 노란색 라인부분이 아크 겹출 부분인데 현재 위치에서는 전류 데이터가 취득되지 않아서 겹출이 되지 않았다.

표. 4-1. 아크 측정위치 및 전차 속도(1)

구분	내용
KP[km]	124.07
Train Speed[km/h]	351.53

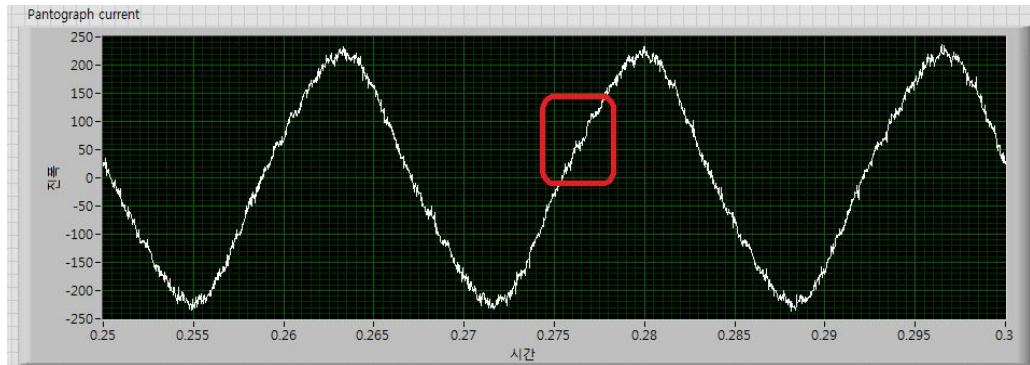


그림 4-1. 아크 측정 데이터(상행 14:01:46 ~ 14:22:03)

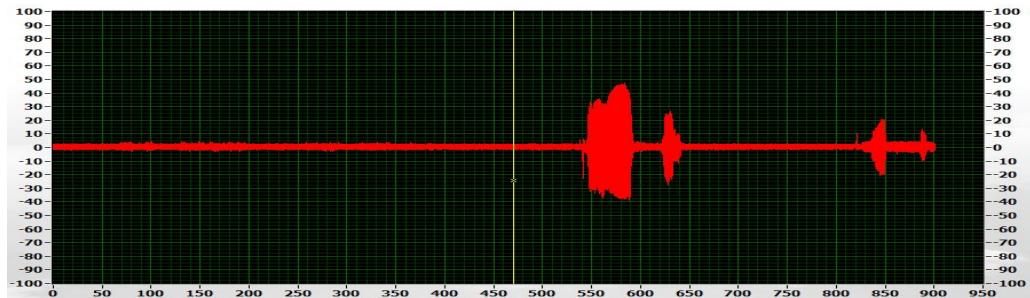


그림 4-2. 이상 전류 측정 데이터(1) (상행 14:01:46 ~ 14:22:03)

나. 상행 15:42:59 ~ 15:49:01 측정 Data 비교

- Data 측정 위치 125.81K 위치는 15:32:35초, 125.01K 위치는 15:32:43초, 124.71K 위치는 15:32:46초 위치이고, 전류이상상태 측정 위치는 14:34:42 이다.
- 검토의견 : 노란색 부분이 아크 겹출 부분인데 현재 위치에서는 전류 데이터가 취득되지 않아서 겹출이 되지 않았다.

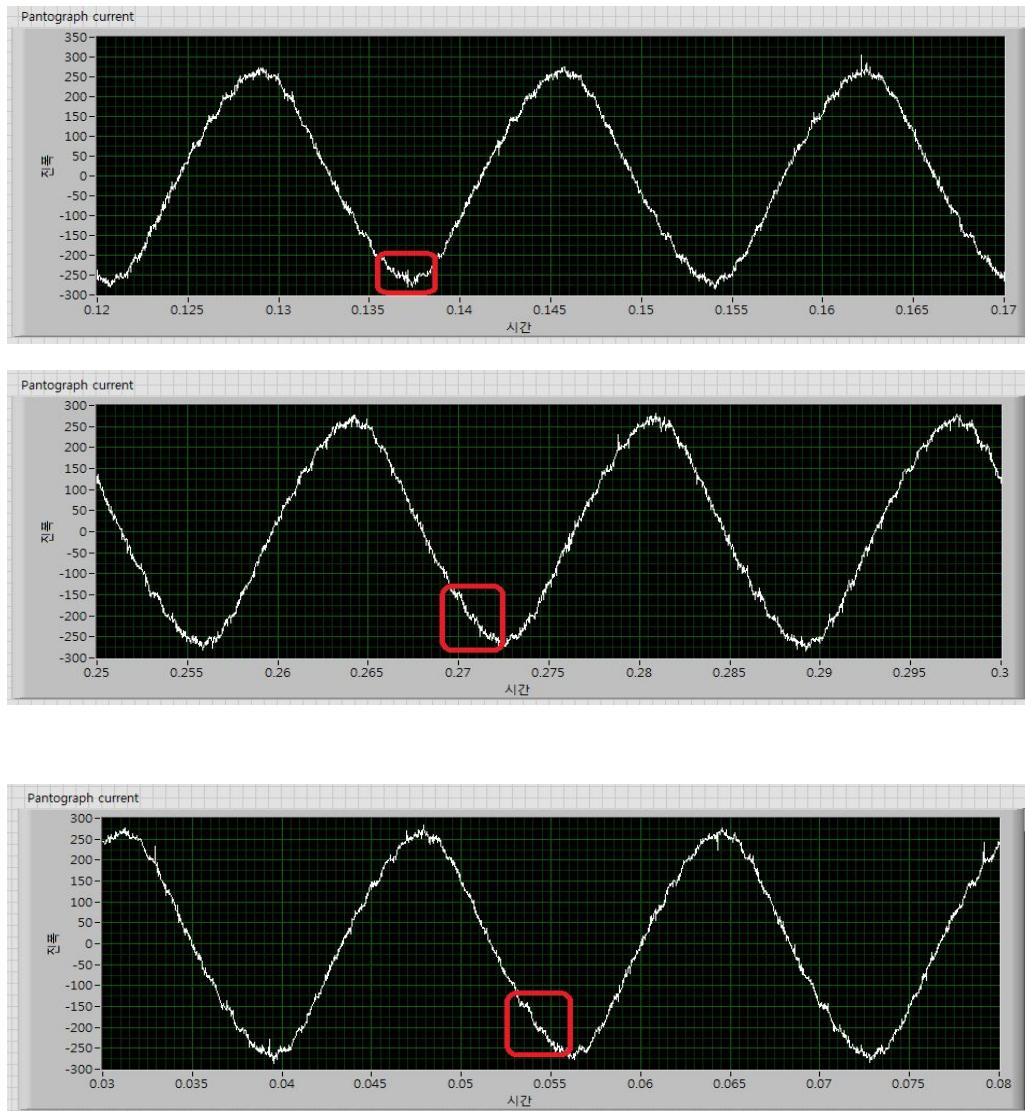


그림 4-3. 아크 측정 데이터(2) (상행 15:42:59 ~ 15:49:01)

표. 4-2. 아크 측정위치 및 전차 속도(2)

구분	내용		
KP[km]	125.81,	125.01,	124.71
Train Speed[km/h]	356.5,	357.64,	357.49

다. 상행 16:48:04 ~ 17:00:56 측정 Data 비교

- Data 측정 위치 114.15K 위치는 17:00:02초, 112.35K 위치는 17:00:19초, 111.48K 위치는 17:00:28초 위치이고, 전류이상상태 측정 위치는 17:00:11 이다.
- 아크측정기 Data

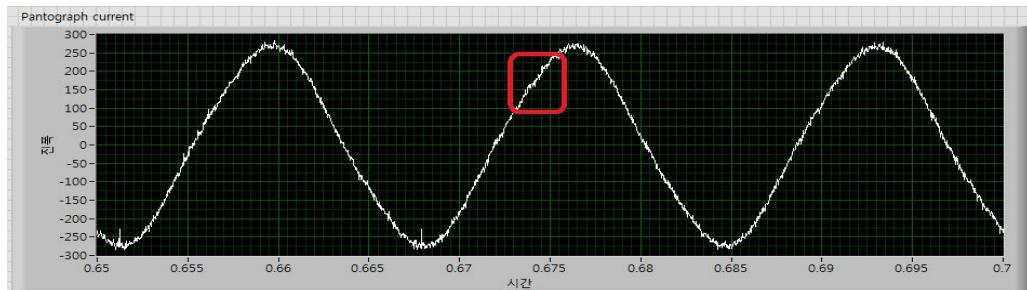
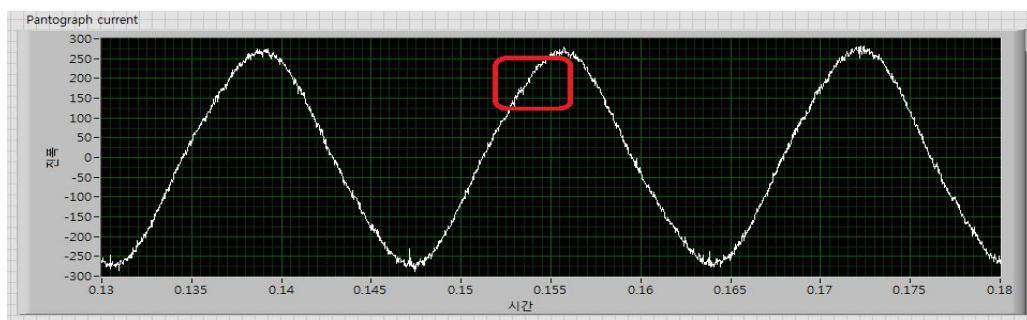
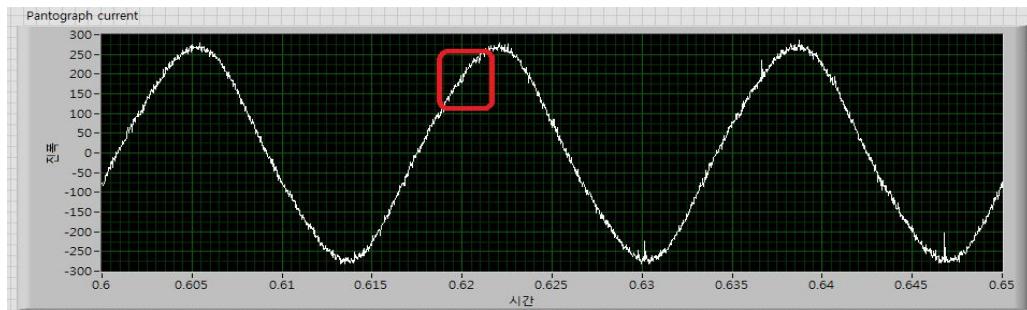


그림 4-3. 아크 측정 데이터(3) (상행 16:48:04 ~ 17:00:56)

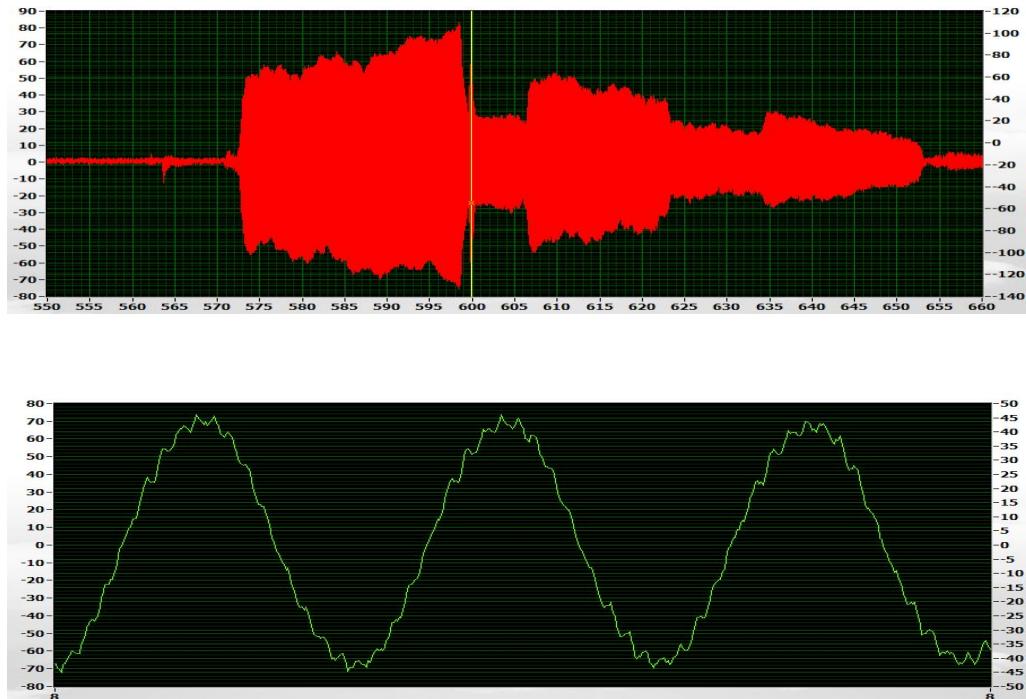


그림 4-4. 이상 전류 측정 데이터(상행 16:48:04 ~ 17:00:56)

표. 4-3. 아크 측정위치 및 전차 속도(3)

구분	내용
KP[km]	114.15, 112.35, 111.48
Train Speed[km/h]	356.5, 357.64, 357.49

- 검토의견 : 아크 측정 데이터와 비교해도 이상상태를 확인할 수 없었다.
뿐만 아니라 전류 데이터의 값의 양이 작게 들어오는 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

전기철도의 안정적인 운행을 위해서는 전기철도 시스템의 최적 조건을 유지하는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 전차선과 팬터그래프간의 과도 상태에 대한 연구는 필수적이다.

전기철도의 경우 속도가 상승함에 따라서 집전설비인 팬터그래프의 압상력(upliftforce)이 상승하고 이러한 증가된 압상력으로 운행함으로써 진동에 따른 파동이 발생한다. 이러한 영향으로 인하여 전차선과 팬터그래프 사이에는 이선이 발생되는데 이는 전력 공급 장애, 아크의 발생, 전차선 및 습동판의 열화를 초래하게 된다. 또한 주변의 전자파 발생 원인이 되기도 한다. 이러한 전기철도 시스템의 최적 조건을 찾기 위해서는 전차선과 팬터그래프 동작특성에 대한 연구가 중요하다. 특히, 전기철도 운전 중 이선이 발생하거나 절연된 구간을 전압이 인가된 상태에서 통과할 경우 팬터그래프와 전차선 사이에 아크가 발생하게 된다. 이렇게 발생된 아크는 전기철도 집전 설비 및 차량 전체에 치명적인 영향을 미치게 되고 전기철도의 고장 및 사고의 원인이 되기도 한다.

본 논문에서는 이러한 아크가 전기철도 집전설비에 미치는 영향을 검증하고 분석하였다.

전차선의 아크 검증 설비는 아크 발생 개소, 가선된 전선의 전압전류, 아크 발생량, 팬터그래프의 높이 등을 영상과 함께 측정 및 저장이 가능하다.

전차선의 아크 검증을 통해 얻을 데이터를 바탕으로 체계적인 유지 보수가 가능할 것으로 판단되고, 향후 전기철도의 집전설비 설계에도 응용될 것으로 사료된다.

앞으로 아크 검증 시스템을 이용한 다양한 구간에 대한 지속적인 검증이 수행되게 되면 실제 철도 운영현장에 활용하여 국제 규격간의 명확한 이선 판정 기준도 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김양수, 유해출, “전기철도공학”, 동일출판사, p.55, 1999.
- [2] “기술개발자료집 :고속전철기술개발사업”, 한국철도기술연구원, 2003.
- [3] “차세대고속철도 기술개발사업 기획보고서: 최고속도 400km/h 고속열차 (HEMU-400X)개발”, 한국철도기술연구원, 2006
- [4] 한봉석, “한국전기철도의 현황과 발전전략”, 철도웹진, No.56, 2005.
- [5] 한국철도시설공단 KR연구원, “전차선로 지상부 성능검사 연구보고서”, 2015.
- [6] 한국철도시설공단, “철도시설 성능검증지침”, 2015.
- [7] 한국철도시설공단, “철도건설 주요자재 국산화 및 신제품 개발사업 관리지침”, 2015.
- [8] 한국철도시설공단 KR연구원, “전차선로 지상부 성능검사 연구보고서”, 2015.
- [9] 한국철도시설공단 KR연구원, “핵심부품 사양 및 본선 Test-bed 성능평가 1차년도 연구보고서”, 2011.
- [10] 한국철도기술연구원, “가선시스템 설계요소기술 최적화방안”, 2001.
- [11] 나해경, 박영, 조용현, 이기원, 박현준, 오수영, 송준태, “실시간 계측시스템을 이용한 전차선로 특성 측정”, 전기전자재료학회논문지, 20권, 3호, p.281, 2007.
- [12] 오석용, 박영, 조용현, 이기원, 송준태, “전차선로 전기적 특성 평가 시스템 구현”, 전기전자재료학회논문지, 제24권, 6호, pp. 497-503, 2011.
- [13] 박영, 조용현, 이기원, 김형준, 김인철, “고속카메라를 이용한 전차선 압상량 측정 시스템 개발”, 전기전자재료학회논문지, 제22권, 10호, pp. 864-869, 2009.
- [14] 오석용 “고속철도 성능향상을 위한 전차선로 설비 특성 측정에 관한 연구” 성균관대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사학위논문, 2010.
- [15] EN 50119:2001, “The European Standard, Railway applications-Fixed installations- Electric traction overhead contact lines”, 2001.
- [16] 송성근, 이택희, 송재열, 박성모 (2008), “레이저를 이용한 전차선 편위 및 높이 측정 시스템 개발,” 한국철도학회논문집, 제 11권, 제 6호, pp. 569-574.
- [17] 김진우, 박인기, 장진희, 왕영용, 한창수 (2003), “고속 전철용가선-팬터그래프

시스템의 모델링 및 접촉력 해석,” 한국소음진동공학회논문집, 제 13권, 제 6호, pp. 474-483.

[18] 한형석 (1998), 고속용 판토그래프의 기술현황, 기계와 재료.

[19] 김양수 · 유해출 (2008), 전기철도공학, 도서출판 동일.

[20] 길경석, 지홍기, 박대원, 김일권, 류길수, 송재용 (2008), “직렬아크신호의 검출방법,” 한국철도학회논문집, 제 11권, 제 5호, pp. 477-481.

[21] 김재문, 김양수, 장진영, 김윤명 (2008), “고속전철 주행시 이선에 따른 전원외란 현상 모델링 및 시뮬레이션 구현,” 한국철도 학회춘계학술대회논문집, pp. 1123-1128.

[22] 김백 (2005), 전철전력공학, 도서출판 지다리.

[23] 이봉이, 김재철, 한성호, 이수길 (2005), “판토그래프와 전차선 사이에서 발생되는 아크 특성에 관한 연구,” 한국 · 조명전기설비학회 추계학술대회논문집.

[24] 창상훈 (2001), 가선시스템 설계요소기술 최적화방안, 한국철도기술연구원.

[25] 오석용, 박상현, 박영, 조용현, 송준태 (2009), “전차선로 동적 · 전기적 특성평가 시스템 구현 기술 분석,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1174-1179.

[26] EN 50119 (2002), Railway applications-fixed installations electric traction overhead contact lines, British Standard.

[27] 목진용 (2005), 차량분야 집전 특성 시험, 한국철도기술.

[28] 추장우, 박지영, 김호원, 박정철, 임성재, 구본기(2007), 3차원 복원기술동향, 전자통신동향분석.

[29] 조형식, 김성삼, 손홍규, 윤공현 (2008), “대상체의 반사 특성에 따른 지상레이저 스캐너의 정확도 분석,” 한국GIS학회 추계학술대회 논문집.

[30] 한국고속철도 건설공단, “고속철도 연구 보고서(전기분야)”, 1996.02

[31] 한국전기연구소, “급전시스템 해석기술 개발”, 1999. 10

감사의 글

먼저 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어 주신 이우선 교수님께 진심으로 감사드립니다.

지난 2년간의 대학원 기간 동안 배운 지식과 경험은 직장 업무에 큰 도움이 될 것으로 확신하며, 석사과정을 마쳤지만 앞으로 더욱 발전할 수 있도록 노력하겠습니다.

김 휘 주 드림