



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 원저작자를 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 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2017年

2月

碩士學位論文

전기철도

고속화에

대응한

가선구조

최적화에

관한 연구

李

周

憲

2017年 2月
碩士學位論文

전기철도 고속화에 대응한 가선구조 최적화에 관한 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 周 憲

전기철도 고속화에 대응한 가선구조 최적화에 관한 연구

A Study Optimization of Catenary System
for Electric Railway Acceleration

2017 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 周 憲

전기철도 고속화에 대응한 가선구조 최적화에 관한 연구

指導教授 曹 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

李 周 憲

李周憲의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 李 愚 宣 印

委 員 朝鮮大學校 教授 崔 孝 祥 印

委 員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	3
A. 전차선로의 시스템과 가선방식	3
1. 가공 전차선로	3
a. 전차선로의 구성	3
b. 고속철도 전차선로의 가선방식	6
c. 커티너리(Catenary) 조가방식의 종류	7
d. 가공 전차선 조가방식의 속도	10
2. 차량의 팬터그래프	12
a. 팬터그래프의 특징	12
b. 팬터그래프의 형식 및 종류	13
3. 전기철도 가선구조의 집전특성	14
a. 팬터그래프-전차선로 상호관계	14
b. 전차선로의 정적현상	15
c. 전차선로의 동적현상	18
III. 실험 및 결과고찰	20
A. 전차선·팬터그래프간의 동역학 검토	20
1. EN 50318:2002의 모델 시뮬레이션 비교	20
2. 인터페이스 차상측 검토	22
a. 전차선간과 팬터그래프의 접촉력	23
b. 전차선간과 팬터그래프의 접촉점 수직 변위	24
IV. 결론	27
Reference	

표목차

표 1 각종 커티너리 조가방식의 속도 성능 비교표	11
표 2 국가별 파동 전파속도 비교표	18
표 3 전차선과 조가선의 장력과 선밀도	21
표 4 시뮬레이션 결과표	22
표 5 전차선,팬터그래프 인터페이스 차상 접촉력 측정 항목	22

도목차

그림 1 가공전차선로 System	4
그림 2 전차선로 구성도	5
그림 3 심플 커티너리 조가방식	7
그림 4 변 Y형 심플 커티너리 조가방식	8
그림 5 트윈-심플 커티너리 조가방식	8
그림 6 헤비 심플 커티너리 조가방식	9
그림 7 콤파운드 커티너리 조가방식	9
그림 8 합성 콤파운드 커티너리 조가방식	10
그림 9 팬터그래프 구성도	12
그림 10 유럽의 팬터그래프 타입	14
그림 11 과동전과속도와 전차선로의 상호관계	15
그림 12 경간중앙 부근의 압상	15
그림 13 지지점하의 압상	17
그림 14 전차선로 참고모델(EN 50318:2002)	20
그림 15 접촉력의 시간 이력	21
그림 16 전차선 수직 변위의 시간 이력	21
그림 17 접촉력 측정 장치 구성도	23
그림 18 접촉력 측정장비 설치	23
그림 19 접촉점 수직 변위 측정을 고속화상카메라 시스템	24

그림 20 장력 2.2[TON], 속도 330km/h 접촉력 측정	25
그림 21 장력 2.2[TON], 속도 340km/h 접촉력 측정	25
그림 22 장력 2.2[TON], 속도 350km/h 접촉력 측정	25
그림 23 장력 상승과 접촉력 측정 결과	26

ABSTRACT

A Study Optimization of Catenary System for Electric Railway Acceleration

Lee Ju Heon

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Electrical Engineering Technology
Convergence

Industrial Technology Convergence

Graduate School of Chosun University

Railway is a high-traffic area with high publicity. Railway advanced countries use electric railway as electric power as high as train frequency is high. In addition, the speed improvement of electric railway has developed remarkably in long-distance inter-city transportation. With the development of technology due to the increase in the speed of the electric railway, the importance of the reliability of the facilities is increasing due to the diversification of the structures and functions of the facilities. It is possible to operate the system suitable for the demand from the light railroad to the super high speed magnetic levitation train, It is an eco-friendly means of transportation that is used as a power source. A tilting train is being developed to improve speed while using existing lines. With the opening of the high-speed railway in the domestic electric

railway, the electric power plan is planned to be completed by 92% in 2020 according to the comprehensive national land plan. Therefore, due to increase of electric power facilities and change of operating environment, there is an increase in electrical and mechanical instability factors to the electric cable, and a social wavelength is large when a fault occurs, and there is a problem that recovery takes a long time. In order to maintain the horizontal line of the catenary line in the line structure of the catenary line, a hanger or a dropper is used to support the catenary line in the form of a curved line keeping the shape of the curved line. Such a hanger or dropper is a constant line The spacing is maintained and the train speed is improved by the number of installations. herefore, when the existing dropper type is changed and applied to the catenary line, the change of the vibration coefficient in the mechanical aspect is examined and the simulation of the catenary vibration characteristic is performed by using the program to predict the change of the vibration of the catenary line. But the vibration characteristics were improved. In this paper, we have investigated the contents.

I. 서 론

철도는 공공성이 높은 교통 분야로서 철도 선진국들은 열차 운행 횟수가 높은 만큼 전기를 동력원으로 사용하는 전기철도를 원칙으로 하고 있다. 또한 전기철도의 속도 향상이 장거리 도시 간 수송에서도 비약적으로 발전하였다. 전기철도의 속도 증가에 따른 기술의 발전으로 시설물의 구조 및 기능의 다변화를 통한 시설물의 신뢰도에 대한 중요성이 높아지고 있으며, 경전철에서부터 초고속 자기부상열차에 이르기까지 수요에 맞는 시스템을 운영할 수 있고, 전기를 동력원으로 사용하는 친환경 교통수단으로 속도 및 수송능력의 향상으로 다른 교통수단과의 경쟁력을 갖추어 나가고 있다[1-2]

우리나라 전기철도는 수도권 전철화를 시작으로 기존선인 경부선, 호남선, 충북선의 전철화 및 프랑스 TGV 기술을 도입하여 경부고속철도를 개통하였으며, 이후 독자 기술로 350km/h의 고속열차를 개발하였다[3]. 현재 400km/h의 고속열차를 개발중에 있으며[4-6], 기존선로를 사용하면서 속도 증가를 위한 틸팅열차 운영을 위한 개량 전차선로의 개량방안에 대한 연구가 진행 중이다[7]. 국내 전기철도에서는 고속철도 개통과 함께 국토종합계획에 따라 2020년 92%까지 전철화를 계획하고 있다[8]. 따라서 전력설비의 증가 및 운영 환경의 변화로 인하여 전차선로의 전기적, 기계적 불안전요소의 증가와 장애발생시 사회적 파장이 클 수 밖에 없으며 복구에 시간이 많이 소요되는 문제점이 있다[9-10].

전차선로의 가선구조에서 전차선이 궤도면에 대해 수평을 유지하기 위해서 커티너리 곡선의 형태를 유지하는 조가선에 행거나 드롭퍼를 사용하여 전차선을 지지하고 있으며, 이러한 행거나 드롭퍼는 전차선로 경간에 대해 일정한 간격을 유지하여 설치되고 있으며 설치수량에 따라 열차의 속도가 향상되는 것이 실증을 통하여 증명 되었으며 현재 열차속도가 300km/h 까지 운행되고 있다. 전차선로 가선구조에서 이외에 다양한 설비가 설치되어 있으며,

전차선로에서는 200~300m 마다 균압선을 사용하여 전차선과 조가선을 연결하여 등전위접지망을 이루도록 하고 있다. 수도권에서는 균압구간을 1/2 이하로 단축하여 설치하며 전기차가 상시 출발하는 장소에는 반드시 균압 설비를 설치해야 한다. 이에 따라 드롭퍼 형태를 개선하여 균압선의 역할 및 드롭퍼의 역할을 동시에 할 수 있는 드롭퍼가 선로에 설치된다면 전차선로의 전체 무게를 절감하여 상대적으로 파동전파속도를 증가 시킬 수 있다[11].

따라서 기존 드롭퍼 형상을 변경하여 전차선로에 설치하였을 경우 기계적인 측면에서 진동계수의 변화를 검토하여 전차선로의 진동변화를 예측하고자 프로그램을 이용하여 전차선 진동 특성 시뮬레이션을 실시하여 시뮬레이션 결과 Y형태의 드롭퍼도 I형 드롭퍼에 비해 진동특성은 크게 차이가 없었으며 오히려 작으나마 진동 특성이 개선되는 현상을 나타내었다[12]. 본 논문에서는 펜터그래프와 전차선간의 상호작용에 의한 동적 성능을 요구하는 상호 유기적인 조건을 파악하기 위하여 연구를 시작하였으며, 전차선 시스템의 적용 가능 여부를 실구간에서 측정하여 차량속도 상승 여부를 고찰하고자 하였다.

Ⅱ. 이론적 고찰

A. 전차선로의 시스템과 가선방식

전기철도의 고속화를 위한 경우 기술적 문제점은 차량, 선로, 전차선로 등의 인터페이스와 연관되어 있다. 철도를 이용하는 운송방식에서 전기를 동력원으로 사용하는 전기차에 전기를 공급하는 방식에 따라 분류하고 있으며 선로의 조건에 의해 전차선을 여러가지 형태로 분리 된다. 선로의 조건 변화에 의해 전차선을 여러가지 형태로 가설하고 있으며, 전차선로는 집전 장치와 주행 상태에서 접촉하므로 급전시 항상 양호한 상태를 유지해야 한다. 지상구간의 가설 방식으로는 직접가선, Catenary 가선 방식이 있으며, 지하구간은 강체 가선방식 및 특수방식으로 제3궤조 방식이 있다.

본 장에서는 전차선로 시스템의 기본적인 사항 및 팬터그래프와 고속 전차선로의 상관관계를 바탕으로하여 속도 향상에 필요한 매개변수를 설명하고자 한다.

1. 가공 전차선로

a. 전차선로의 구성

가공 전차선로는 그림 1과 같이 이동하는 팬터그래프가 직접 접촉하면서 열차에 전력을 공급하는 전차선, 드롭퍼를 통하여 전차선을 현수하는 조가선, 조가선을 지지하는 가동 브래킷, 비절연 보호선, 급전선 및 가동브래킷 등을 지지하는 지지물로 구성되어 있다.

수평으로 유지하기 위해 전차선을 조가선에 현수하는 장치를 드롭퍼라하며, 전차선은 팬터그래프와의 직접적으로 접촉하며 인터페이스를 담당하는 케이블이다. 전기적인 전력 공급 능력과 함께 기계적인 동 특성 및 마모 특성 등

을 고려하여 재질 및 크기가 결정된다. 전차선에는 레일부터 일정 높이를 유지하도록 드롭퍼 길이를 조절하여 설치되나 속도에 따른 미소한 경사도를 인정하고 있다[12].

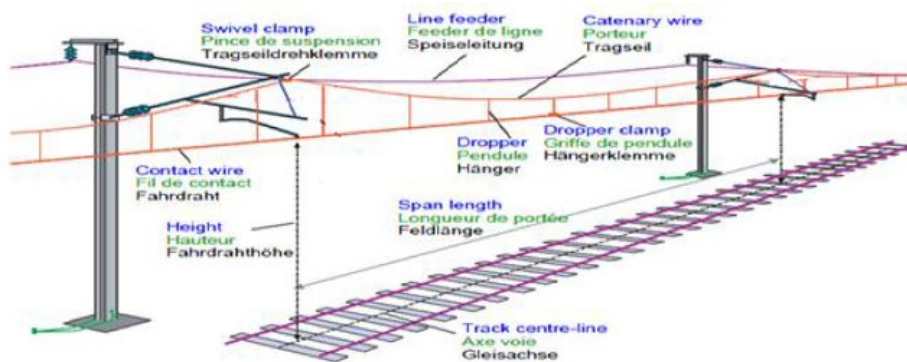


그림 1 가공전차선로 System

조가선은 전위의 도체 및 전차선 현수의 역할을 수행하며 온도 변화에 따라 수축 팽창에 대비해 같은 방향으로 움직임이 허용되어 진다. 열차가 고속으로 운용될 수 있도록 계절 변화에 따라 전차선의 장력 변동률이 작은 장력 조정 장치가 필요하다.

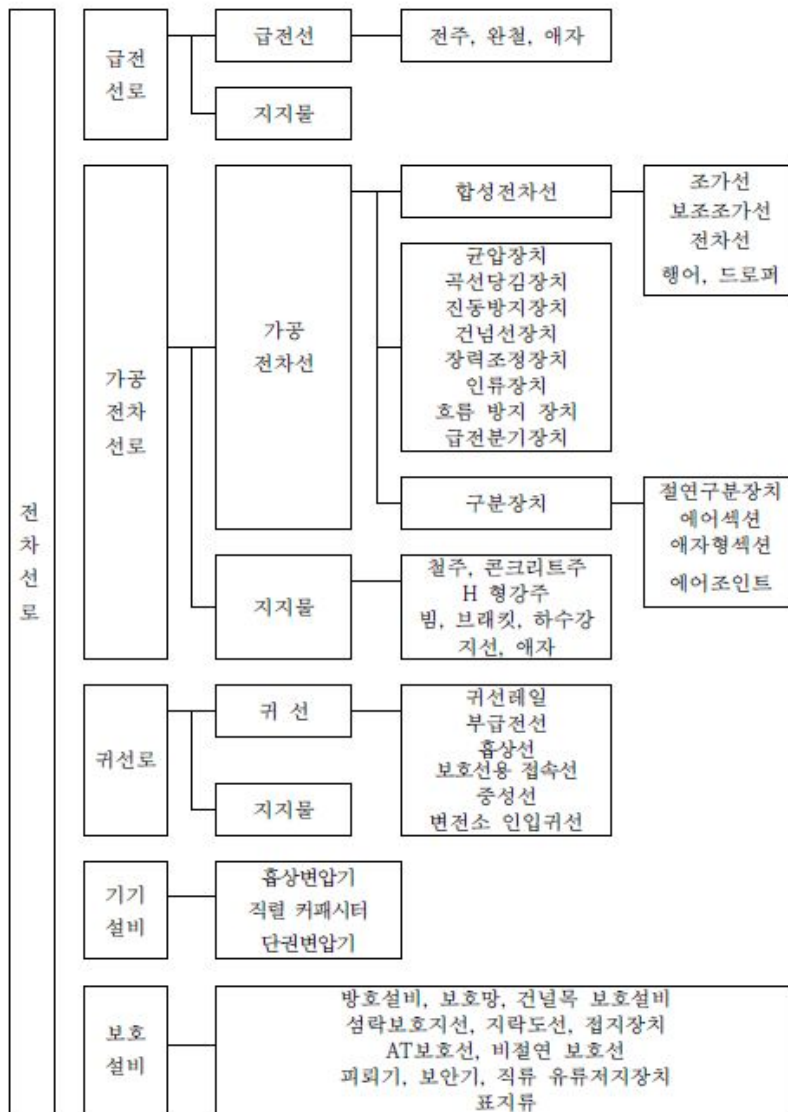


그림 2 전차선로 구성도

b. 고속철도 전차선로의 가선방식

전기차의 팬터그래프와 접촉하여 전력을 공급하기 위한 전기차 등의 가선 설비와 이에 부속하는 설비를 통틀어 전차선로라 정의할 수 있다. 이와 같이 전차선로는 전기철도 시스템에 의해 여러 형태로 적용되어지고 있다. 고속철도 전차선로는 전기철도 설비의 주체가 되며 전기차에 전력을 직접 공급하는 역할을 담당한다. 최근 전기차의 대용량화, 고속화, 대량 운전화가 됨에 따라 전차선로의 성능 및 신뢰도 향상, 보안의 필요성이 요구 되고 있다. 전차선로는 전기차량에 고품질의 전력을 공급하고 전기차량의 집전 장치를 통해 전력 공급을 안정적으로 집전하기 위하여 집전 성능을 갖추는 것이 전차선로의 설치 목적일 것이다. 또한 집전을 안정적으로 하기 위해 적절한 압상력을 갖도록 하며, 보안 측면에서도 전기차의 진동·강풍시에도 집전 장치에 지장이 없도록 충분히 기계적 이력을 유지하며 동시에 진동과 동요가 없도록 할 필요가 있다[13-14].

전기차에 전기를 공급하는 방식에는 전기를 급전하는 방식에 따라 분류되며 가선하고자 하는 선로조건에 의해 전차선을 여러가지 조가하는 방식이 있으나 고속선에서 주로 사용하는 대표적인 가선방식을 소개하고자 한다[15]. 전기차의 속도 향상을 위하여 전차선의 이선율을 작게하고 동시에 경간을 크게 하기 위하여 전차선 위에 기계적으로 조가선을 가선하며 일정한 간격으로 드롭퍼 및 행거를 매달아 궤도면에 대해 일정한 높이를 유지하도록 하는 방식이다. 이러한 경우 조가선이 커티너리 곡선을 형성하기 때문에 이 방식을 커티너리 조가 방식이라고 한다. 또한, 지상 구간에서 주로 사용되는 Simple Catenary 가선 방식은 현수의 구조에 따라 변 Y형 커티너리와 컴파운드 커티너리 등이 있으며 여건에 따라 필요한 형태로 개발 및 발전되어 왔다[16].

c. 커티너리(Catenary) 조가방식의 종류

커티너리(Catenary) 조가방식은 가동 브래킷에 조가선을 설치하며, 드롭퍼로 전차선을 조가선에 매달아 전차선을 레일면상에 일정한 높이로 유지하여 열차의 고속운전에 적합한 가선방식이다. 커티너리 가선방식에는 열차의 속도 증가 및 부하 특성의 구조와 기능에 따라 여러 조가방식으로 분류된다.

1) 심플 커티너리(Simple Catenary) 조가방식

심플 커티너리(Simple Catenary) 조가방식은 그림 3과 같이 전차선과 조가선으로 구성되어 있으며, 조가선에서 드롭퍼 또는 행거에 의해 전차선의 궤도면에서 평행을 유지하도록 조가된 가선 방식이다. 커티너리 조가방식의 가장 대표적인 것으로 통상적으로 110km/h 정도로 국내의 지상 전철구간의 사용중인 전차선 방식은 심플 커티너리 조가방식을 사용하고 있다. 이 방식은 드롭퍼의 간격 조정 및 장력을 크게 하여 설비를 일부 개량하여 약 300km/h 정도까지 운전이 가능하게 되었다.

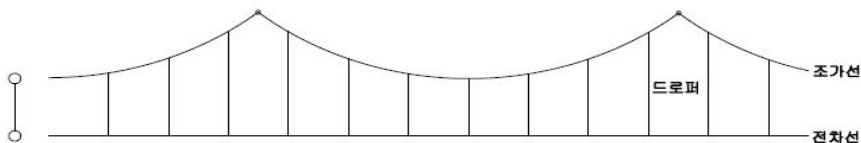


그림 3 심플 커티너리(Simple Catenary) 조가방식

2) 변 Y형 심플 커티너리 조가방식

아래 그림 4는 변 Y형 심플 커티너리 조가방식의 구성도이다. 속도 성능의 향상을 위하여 심플 커티너리 지지점 부근에 조가선과 15m 정도의 전선을 가설하여 전차선을 조가한 구조이다. 이 Y선은 지지점 부근의 압상량을 높게 하여 양지지점 밑의 팬터그래프 통과에 대한 경점을 경감시켜 경간 중앙부의 압상량의 차이를 적게하고 아크 발생을 적게하여 특성을 향상시킨 가선방식이다. Y선의 장력 조정이 어려우며 가선의 압상량이 큰 것 등이 문제이나 이

방식에 있어 가선의 장력을 증가시켜 결점을 보완하여 독일의 ICE 고속철도에 사용하고 있다.

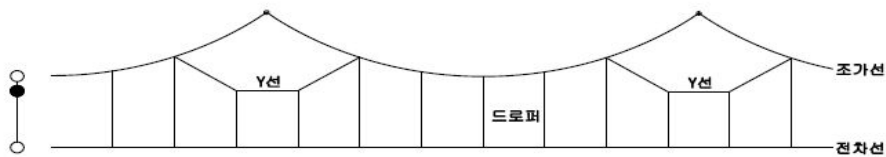


그림 4 변 Y형 심플 커티너리 조가방식

3) 트윈-심플 커티너리 조가방식

기존에 사용 중인 심플 커티너리 구간을 변경하지 않고 고속 집전 성능을 향상 시킬 수 있도록 개발된 방식으로 트윈-심플 커티너리 조가방식은 그림 5와 같이 조가선 2개를 일정한 간격으로 병행하여 가설한 구조이며, 심플 커티너리식에 비해 시공시 비용이 높고 구조가 복잡하지만 이 방식은 4가닥의 선으로 구성되어 있어 팬터그래프에 의한 가선의 상·하 변위가 적으며 전차선의 압상 특성이 좋다. 전차선이 2개로 구성 되어 있어 집전 전류 용량이 커서 고속 운전 구간, 운전 밀도가 높은 구간 및 대도시 출퇴근 수송의 중부하 구간에 주로 사용된다.

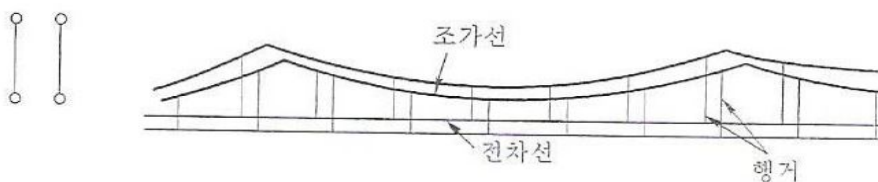


그림 5 트윈-심플 커티너리 조가방식

4) 헤비 심플 커티너리 조가방식

심플 커티너리 가선에서 선의 장력을 크게 하였으며 그림 6과 같이 헤비 심플 커티너리 조가방식은 장력이 크기 때문에 경간 중앙부의 전차선의 압상

량을 적게 하여 등고성을 향상시켜 집전 성능 향상 및 풍압에 따른 편위의 증가를 통제함으로써 안전도 및 집전 성능을 향상 시켰다. 따라서 직류구간 및 전차선의 마모량이 많은 곳에서는 전차선을 170mm로 주로 사용하고 있다.

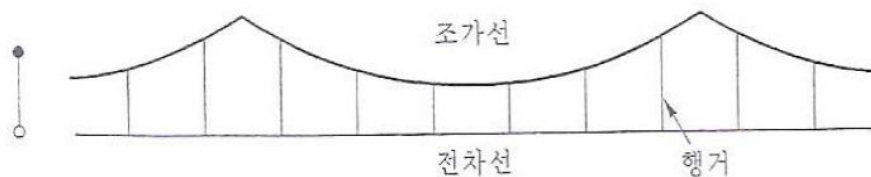


그림 6 해비 심플 커티너리 조가방식

5) 콤파운드 커티너리(Compound Catenary) 조가방식

심플 커티너리 방식의 조가선과 전차선에 보조 조가선을 설치하여 조가선에 드롭퍼로 보조 조가선을 매달아 보조 조가선에서 행거로 전차선을 조가한 구조 방식이다. 콤파운드 커티너리 조가방식은 그림 7과 같이 보조 조가선으로 전선은 경동연선 100mm를 사용하였으며, 가선의 집전 전류 용량이 높으며 팬터그래프에 의한 가선의 압상량이 비교적 일정하므로 속도 성능 및 고속운전, 중부하 구간에 적합하다.

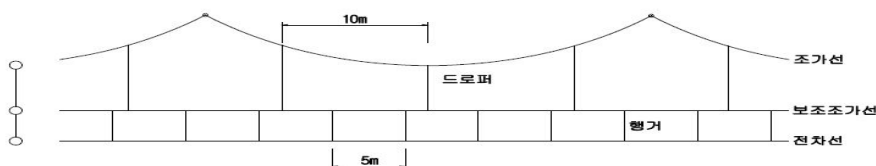


그림 7 콤파운드 커티너리(Compound Catenary) 조가방식

6) 합성 콤파운드 커티너리(Compound Catenary) 조가방식

콤파운드 커티너리식의 드롭퍼에 공기 댐퍼 및 스프링을 사용한 방식으로 합성 콤파운드 커티너리 조가방식은 그림 8과 같이 합성 소자에 의해 지지점 부근의 경점을 경감하며 전차선의 압상 특성을 항상 일정하게 하여 이선과

아크의 발생을 방지하여 속도 성능을 증가시킨 방식이다.

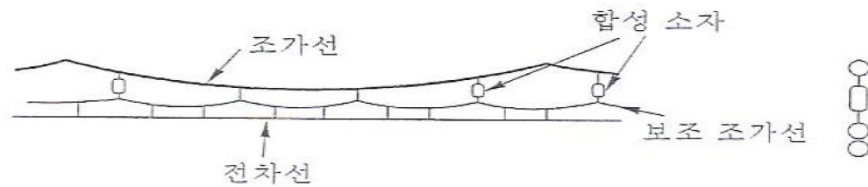


그림 8 합성 콤파운드 커티너리(Compound Catenary) 조가방식

d. 가공 전차선 조가방식의 속도

심플 커티너리 조가방식은 경부고속철도의 전 구간을 300km/h 속도로 주행하고 있다. 다음 표 1은 조가방식의 종류에 따른 속도 성능을 보여주고 있다. 경부 고속철도의 운영기법을 적용하여 차세대 고속철도 시장에 고속화를 이룰 수 있도록 집전 해석을 실구간에 적용하여 측정 및 검토하여 전차선로 시스템의 속도 향상에 따른 적용 여부도 함께 검토하였으며, 최근 초고속 차세대 철도의 구간에는 400km/h로 운영 할 계획에 있으며 고속철도 시장의 새로운 변화가 시작 될 것이다.

표 1 각종 커티너리 조가방식의 속도 성능 비교표

조가 방식	표 준 선 종(mm ²)			가선계 장력 (kgf)	속도 성능	적용 구간
	조가선	보조 조가선	트로 리선			
Simple Catenary	CdCu 70mm ² BZ 65mm ²		GT 110mm ² CU 110mm ²	2,000	100 km/h 이상 (350 km/h)	수도권산업선 및 KTX, 호남선
변 Y형 Simple Catenary	St 90mm ²	(Y선) St 55mm ²	GT 110mm ²	2,000	160 km/h 이상	ICE, 신간선
Twin Simple Catenary	St 90mm ²		GT 110mm ²	4,000	140 km/h 이상	
Heavy Simple Catenary	CdCu 80mm ² BZ 65mm ²		GT 170mm ² CU 150mm ²	3,000	110-130 km/h 이하	경부선 서울-구로 구로-수원간
Comopound Catenary	St 135mm ²	Cu 100mm ²	GT 110mm ²	3,260	160 km/h 이상	일본 동해도선
합성 Comopound Catenary	CdCu 80mm ²	CdCu 60mm ²	GT 110mm ²	3,000	160 km/h 이상	본선구간 (일본동해도선) (WPS:417km/h)
Heavy Comopound Catenary	St 180mm ²	PH 100mm ²	GT 170mm ²	5,500	160 km/h 이상	본선구간 (일본 동경) (WPS:405km/h)

※ GT(Grooved Trolley wire), WPS : Wave Propagation Speed

2. 차량의 팬터그래프

a. 팬터그래프의 특징

열차의 속도 향상에 직접적인 연관이 있는 집전 시스템은 가공 전차선 방식의 동력원 공급 계통의 방법으로 전차선로 시스템 및 집전 장치인 팬터그래프로 이루어져 있으며 전차선에 공급된 전력을 팬터그래프의 집전판을 거쳐 구동시스템에 연속적으로 공급하는 기능을 하고 있다.

팬터그래프의 집전판이 전차선에서 분리되는 이선 현상이 고속 집전시 발생하는 가장 중요한 기술적 문제이다. 이선이 발생하면 연속적으로 전력을 공급하는게 불가능하여 열차의 안정된 운영을 보장할 수 없으며 아크 방전에 의한 전차선 마모 증가 및 통신 유도장해 발생을 일으킬 수 있다. 이선의 원인으로 전차선의 탄성 불균일 드롭퍼 연결 지점의 강성 변화에 따른 전차선 접촉면의 연결용 금구류 부위의 질량변화, 차량의 진동 및 외부 풍압의 변화가 있다. 이러한 상황에 안정적이고 원활한 전력공급을 하기 위해서는 전차선의 특성 변화에 신속히 대응 할 수 있는 성능이 우수한 팬터그래프를 사용하는 것이다.



그림 9 팬터그래프 구성도

팬터그래프의 프레임 및 펜헤드를 연결하는 스프링 및 댐퍼러 모델링 되는데 성능을 향상시키기 위해 전체 등가 질량을 가능한 적게하여 관성력을 줄이고 복원력은 적절히 높게 하기 위해 등가스프링 계수를 크게 하는 것이 좋다. 또한 각 부품의 연결 부위의 마찰은 감소되도록 설계되어야 하며, 특히 집전판의 추종성능을 높여 이선을 미연에 방지하고 전차선과의 과도한 접촉을 피해 전차선의 마모와 집전판의 수명을 향상시킬 수 있어야 한다. 집전판은 전류용량이 큰 재질을 사용하며 마모율을 적게 하여야 한다.

집전장치인 팬터그래프는 그림 9와 같이 동력차량의 지붕 위에 설치되며 전차선과 직접 접촉을 통해 전차선으로부터 전력을 공급받아 동력차량에 전달하며, 전차선과 팬터그래프의 밀착된 상태를 유지시켜 전차선에 흐르는 전력을 효율적으로 전달하며 각 동력차량에는 Single Arm 타입의 GPU 25[KV]용 팬터그래프가 설치되어 운용 중에 있다.[18]

b. 팬터그래프의 형식 및 종류

전기철도 시스템에 사용되고 있는 팬터그래프의 종류는 싱글암과 다이아몬드의 크로싱암으로 나누어진다. 크로싱암 형식은 전박적으로 150km/h 이하의 저속으로 지하철 및 수도권 전철에 운용되고 있다. 싱글암 형식은 200km/h 이상의 고속철 시스템이나 고속용 전기 기관차량에 운용되며 추종성이 매우 우수하다. 또한 유럽에서의 팬터그래프의 종류는 허용전류[A]와 속도[km/h]에 의해 그림 10과 같이 구분하며, CX는 프랑스에서 250km/h~350km/h까지 사용하는 팬터그래프이다. CX는 300km/h의 KTX에 사용되는 GPU보다 소형 경량이고 고속 운전시 풍력에 견딜 수 있는 2단 프레임으로 이루어져 있어 350km/h 이상에서 고속 운행이 가능하도록 설계되었다.[18]

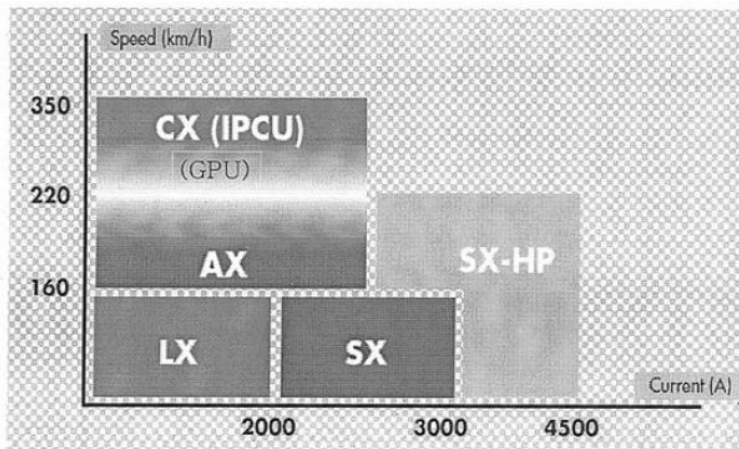


그림 10 유럽의 팬터그래프 타입

3. 전기철도 가선구조의 집전특성

전기철도의 전력 공급은 궤도면 위 일정 높이에 가설된 전차선과 전기차량의 집전 장치를 통해 전기를 공급하게 되는데 전차선과 팬터그래프 사이의 기계적 특성에 매우 민감하며 이러한 접촉력 패턴은 열차운행에 있어 가장 중요한 요인이다. 집전 특성을 판단하는 방법은 다음과 같다.

a. 팬터그래프-전차선로 상호관계

팬터그래프의 주행속도가 파동 전파속도에 근접하면 이선에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 11과 같이 팬터그래프가 저속·고속시 파동 전파속도로 운행하는 경우에 대해 확인하고자 한다. 팬터그래프가 저속으로 운행하는 경우 팬터그래프에 의해 전차선에 미치는 영향이 전·후방으로 퍼져 전차선의 변위는 팬터그래프를 중심으로 대칭이 되나 고속으로 운행하여 파동전파속도에 근접하는 경우는 팬터그래프에 의한 외적 작용이 전방보다는 후방에 전달되어 후방에 위치한 전차선의 변위가 전방에 위치한 전차선의 변위보다 크게 되어 팬터그래프의 위치에서 전차선이 음의 구배를 가지게 된다.

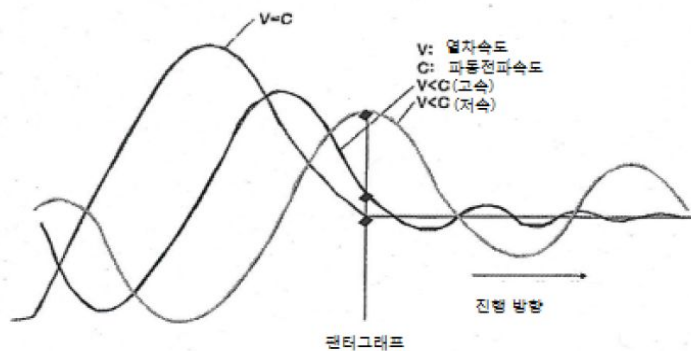


그림 11 파동전파속도와 전차선로의 상호관계

b. 전차선로의 정적현상

1) 경간 중앙에서의 전차선로의 압상량

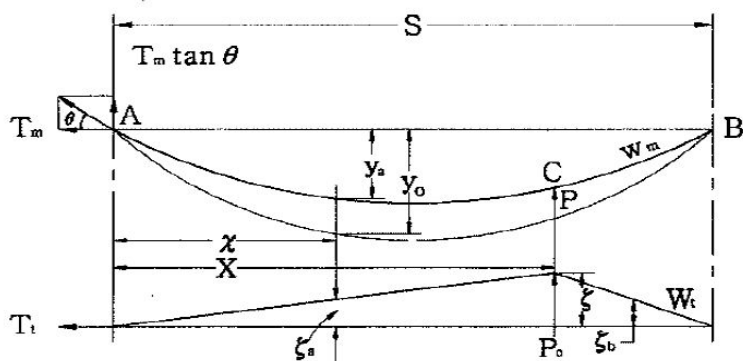


그림 12 경간중앙 부근의 압상

커티너리 가선방식의 가선의 평형조건에서 모멘트법에 의한 다음 식은

$$-T_m \cdot y + T_m \cdot x \cdot \tan \theta - (X - x)P - \frac{(W_m + W_t)}{2}x^2 = 0$$

위 식에서 $x = S$ 일 때 $y = 0$ 이 되므로

$$T_m \cdot S \tan \theta - (X - S)P - \frac{(W_m + W_t)}{2} \cdot S^2 = 0$$

$$\therefore \tan \theta = \frac{(W_m + W_t)}{2 T_m} \cdot S - \frac{(S - X)}{S T_m} \cdot P$$

팬터그래프가 작용할 경우 전차선 변위는 AC 및 CB 구간은 다음과 같다.

$$\text{Catenary AC 구간 } \zeta_a = y_0 - y_a = \frac{(S - X)x}{S T_m} \cdot P \quad (1)$$

$$\text{Catenary BC 구간 } \zeta_b = y_0 - y_b = \frac{X(S - x)}{S T_m} \cdot P$$

따라서, 팬터그래프 작용점의 전차선 변위, 압상량은

$$\zeta = \frac{X(S - X)}{S T_m} \cdot P \quad (2)$$

가 된다. 전차선이 압상되면 전차선 장력에 의해 반력 P' 가 작용점에 작용하는데 이 P'는 다음 식과 같다.

$$P' = T_t = T_t \left(\frac{d\zeta_a}{dx} \right) - \left(\frac{d\zeta_b}{dx} \right) = T_t \frac{(S - X)}{S T_m} P + \frac{X}{S T_m} P = \frac{T_t}{T_m} P$$

따라서,

$$P_0 = P + P' = P + \frac{T_t}{T_m} P \quad (3)$$

$$\therefore = \frac{P_0}{1 + \frac{T_t}{T_m}}$$

팬터그래프 압상량 P₀는 조가선에 작용하지 않고 $1/(1 + \frac{T_t}{T_m})$ 만큼 작아지며 팬터그래프가 경간 중앙에 있을 시 정압상량은 다음 식과 같이 최대치로 나타난다.

$$\zeta_{\max} = \frac{SP}{4(T_m + t_m)} \quad (4)$$

2) 지지점하의 전차선 압상량

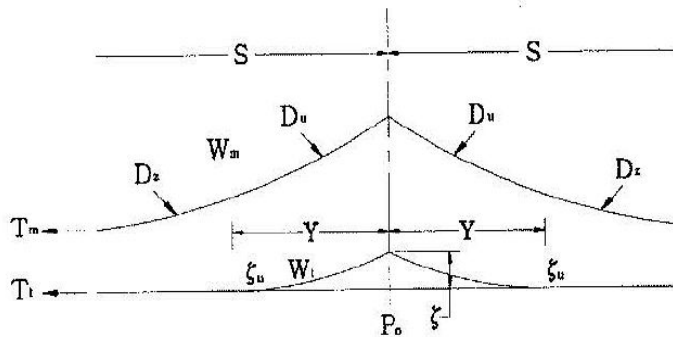


그림 13 지지점하의 압상

지지점 직하에서 팬터그래프 1개에 의해 전차선이 P_0 로 압상되었을시 압상량을 유도하면 다음과 같은 식으로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dD_u}{dx}\right)y &= \left(\frac{dD_z}{dx}\right)s - y' & \left(\frac{dD_u}{dx}\right)y &= \left(\frac{dD_z}{dx}\right)s - y \\ P_0 &= 2W_t Y + 2T_t \left(\frac{d\zeta_u}{dx}\right), & W_m(S_u - 2Y) &= (W_m + W_t)S_z - 2(S - Y) \\ P_0 &= 2W_t Y + \frac{W_m W_t}{T_m}(S - S_z) = 2W_t Y + \frac{W_t Y^2 T_t}{ST_m} \end{aligned}$$

이것을 Y 에 대하여 정리하면

$$\begin{aligned} Y^2 + \frac{2ST_m}{T_t} Y - \frac{ST_m P_0}{W_t T_t} &= 0, & Y &= \frac{ST}{T} \sqrt{1 + \frac{T_t P_0}{W_t ST_m}} - 1 \approx \frac{P_0}{2W_t} \\ \zeta &= \frac{W_t Y^2}{2} \left(\frac{1}{T_m} + \frac{1}{T_t}\right) \approx \frac{P_0^2}{8W_t} \left(\frac{1}{T_m} + \frac{1}{T_t}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

c. 전차선로의 동적현상

1) 파동전파속도

전차선에 상하로 발생하는 진동이 열차 운행 방향으로 이동 전파하는 속도를 파동전파속도라 하며 열차 속도가 가선의 파동전파속도에 근접하면 팬터 그래프의 전차선의 압상점이 꺾여 휘어지며 열차 통과 후 진동 진폭이 크게 되므로 최고속도는 파동전파속도의 70% 정도의 집전 속도를 권하고 있다. 따라서 전차선로의 속도 향상을 위해서는 기술적으로 전차선로의 파동전파속도 및 강성 변화등도 고려해야 한다. 전차선과 조가선의 선밀도와 장력은 파동 전파와 연관이 있으며, 집전성능의 향상을 위해 파동 전파속도는 클수록 유리하다.

표 2 국가별 파동 전파속도 비교표

구분 설비	프랑스 TGV CU 150mm ²	일본 신간선 CU 170mm ²	한국 경부KTX CU 150mm ²
전차선 질량[kg/m]	1.334	1.511	1.334
전차선 장량[KN]	20	19.7	20
파동전파속도[km/h]	440	411	440
최대집전속도[km/h]	308	287	308

2) 반사계수

반사계수 r는 전차선로의 데이터에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{\sqrt{T_m \rho_m}}{\sqrt{T_m \rho_m} + \sqrt{T_c \rho_c}}$$

(6)

3) 도플러 계수

주행속도에 따라 달라지는 전차선로의 동적 작용은 도플러 계수를 통해 알 수 있다.

4) 탄성률

전차선로는 한 경간마다 지점을 갖게 되므로 장소에 따라 탄성이 균일하지 않으며, 한 경간마다 주기적으로 탄성이 변화는 성질을 갖는다. 한 경간 내의 위치에 따른 탄성을 구하는 방법에는 해석적으로 구하는 방법과 실험적으로 구하는 방법이 있다. 해석적 방법인 유한요소법은 정확도의 탄성해석 결과를 지원하는 것으로 알려지면서 유한요소법은 전차선로 탄성을 구하는 데에도 사용되고 있다. 전차선로는 일정부분 탄성을 가지고 있어 고속운행을 위해서는 탄성을 가능한 낮추어야 한다.

5) 사전이도

전차선의 가선허성은 등고, 등요 및 등장력에 있다. 등고는 레일과 전차선 간의 일정한 높이를 의미하는데 열차가 진행하는 상태에서는 팬터그래프의 압상력 등으로 변동하여 등고가 되지 않는다. 지지점과 경간의 탄성율의 값이 틀려 비균일한 특성을 나타냈다. 따라서 비균일률이 낮으면서 동적인 상태에서도 가능한 등고를 유지하려는 가선허 방법중 하나가 사전이도라 할 수 있다. 사전이도는 경간과 경간사이에 전차선의 높이를 등고로 가설하지 않으며 설계부터 어느 정도 이도를 주어 전차선이 처진 상태의 구조를 말한다.

III. 실험 및 결과고찰

A. 전차선·팬터그래프간의 동역학 검토

전차선·팬터그래프간의 동역학의 인터페이스를 EN 50318:2002의 모델 시뮬레이션 검증과 경부고속철도의 구간에서 집전 성능을 차상측과 지상측에서 측정하였으며, 국내외 기준값에 만족하는지를 검토한다.

1. EN 50318:2002의 모델 시뮬레이션 비교

유럽 규격 EN 50318:2002[17]는 2단계의 시뮬레이션 프로그램의 검증을 요구한다. 첫 번째 단계의 검증은 참고 모델에 대한 시뮬레이션 결과가 범위 내에 있는지를 살펴 보았으며, 시뮬레이션 결과가 유럽 규격에 명시된 범위 내의 조건값을 만족해야만 다음 단계인 본선 시험과 비교하여 시뮬레이션 프로그램을 검증할 수 있다.[18] 참조 모델의 시뮬레이션은 한 대의 팬터그래프가 전차선로를 주행속도 300km/h로 지나는 조건에서 수행하였다. 전차선로 모델의 양단 부근에서는 결과가 파동 반사에 의해 영향을 받게 되므로 검증을 위한 시뮬레이션 결과는 지지점 6과 7를 적용하였다. 그림 14는 전차선로 참고모델의 기본 모델을 제시하였다.

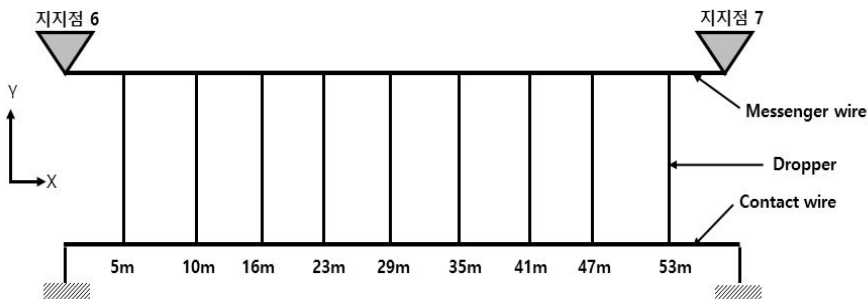


그림 14 전차선로 참고모델(EN 50318:2002)

전차선과 조가선에 작용하는 장력은 동일한 것으로 가정하고 드롭퍼 및 기타 크램프의 질량을 “0” 이라고 가정한다. 또한 전차선로의 감쇠를 “0” 이라고 한다.

표 3 전차선과 조가선의 장력과 선밀도

Kind of wire	Tension[N]	Mass per unit length[kg/m]
Messenger wire	16,000	1.07
Contact wire	20,000	1.35

속도가 300km/h일때 시뮬레이션 결과가 표 4에서 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과는 EN 50318:2002의 허용 범위를 만족하였으며, 접촉력의 시간 이력은 그림 15에서 보여주고 있으며, 300m 위치에서 전차선 수직 변위의 시간 이력은 그림 16에 나와 있다. 접촉력의 시간 이력에서 점선으로 표현된 부분은 팬터그래프가 경간 6과 7을 통과 할때의 해석 결과이다.

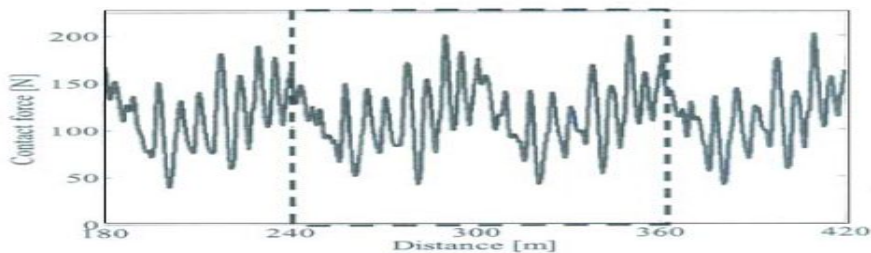


그림 15 접촉력의 시간 이력

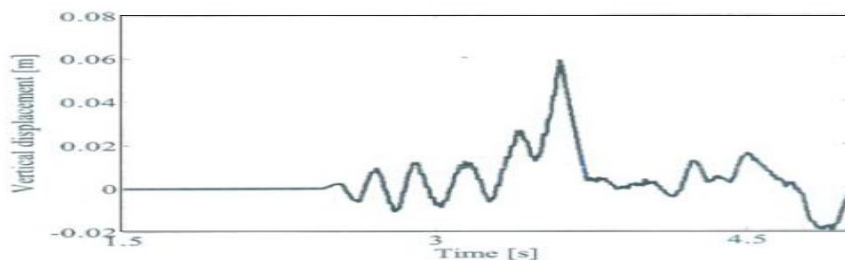


그림 16 전차선 수직 변위의 시간 이력

표 4 시뮬레이션 결과표

비교항목	허용범위[N]	Simuiation[N]
최대 진동방지 압상	55~65	56.7/58.7/57.5
접촉력 손실[%]	0	0
실제 최대 접촉력[N]	190~225	201.5
실제 최소 접촉력[N]	30~55	43.2
최소 접촉력[N]	110~120	113.4
접촉력 편차[N]	32~40	32.5
평균 최대 접촉력[N]	210~230	213.5
평균 최소 접촉력[N]	-5~20	14.2

2. 인터페이스 차상측 검토

속도 증속시험 시 차량 전차선간 동적 인터페이스 성능을 최적화 하기 위해 차상 측정을 실시하였으며, 장력 증가에 따른 속도 상승시 접촉력과 수직 변위를 측정하는 데 목적이 있다. 표 5는 차상 접촉력과 수직변위에 대한 시험 항목을 나타내고 있다.

표 5 전차선,팬터그래프 인터페이스 차상 접촉력 측정 항목

번 호	시험항목	판단기준
1	팬터그래프와 전차선간 접촉력	팬터그래프와 전차선 사이의 집전성능 평가
2	팬터그래프와 전차선 접촉점 수직변위	전차선로 강성 및 팬터그래프 접촉력 변화에 따른 팬터그래프 수직높이 변화 분석

통계값의 신뢰성을 확보하기 위해 일정 속도 대역에서 100초 이상의 운행 계측이 요구되고 있으나 본 시험 특성상 가능한 운행 시간으로 분석하였으며, 또한 터널 주행 시의 계측은 제외한다.

a. 전차선간과 팬터그래프의 접촉력

실외 계측 시스템은 팬터그래프에 직접 장착되어 있는 시스템으로 힘센서, 관성력 보정용 가속도계, 계측 컨트롤러 및 전원 배터리로 구성되어 있으며, 실내 계측 시스템은 계측된 신호를 무선으로 수신하여 차량정보 및 계측시스템과 연동하여 통합 기록한다. 측정장비는 그림 17, 18과 같다.

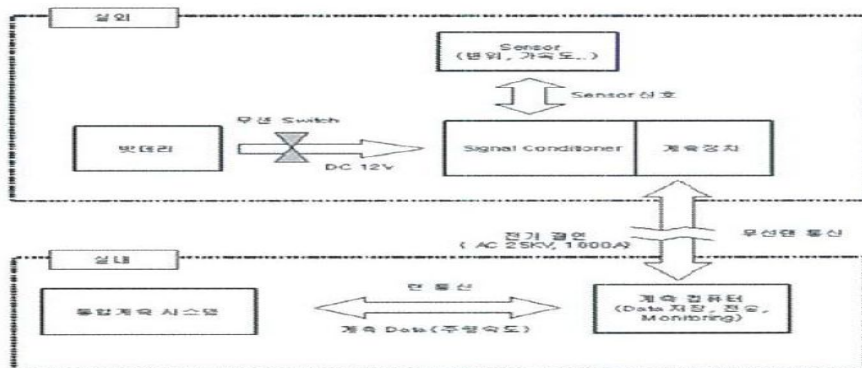


그림 17 접촉력 측정 장치 구성도



그림 18 접촉력 측정장비 설치

b. 전차선간과 팬티그래프의 접촉점 수직 변위

실외 계측 시스템은 할로겐 램프 조명 및 고속카메라를 보호함에 넣어 차량 지붕에 설치하였으며 전원 및 영상신호 케이블을 실내 계측 시스템에 연결하였으며, 실내 계측 시스템은 측정된 영상신호를 유선으로 수신하여 저장하는 컴퓨터와 실외 계측시스템에 전원을 공급하는 무정전 전원 장치로 구성되어 있다.



그림 19 접촉점 수직 변위 측정을 고속화상카메라 시스템

밑에 그래프들은 시험 구간에서 합성 전차선의 기존 장력 2[TON]을 증속 장력 2.2[TON]으로 변경 후 열차속도 증가에 따른 접촉력과 Total 압상력 측정 결과이며, X축은 열차 속도의 시간 변화에 따른 값이며, Y축은 접촉력 변화의 이동 편차를 나타낸다. 여기서 최대 최소의 평균값을 구하게 되며, 아래 그림은 압상력의 X축은 열차 이동 시간, Y축은 열차속도를 나타낸다. 그래프의 실선은 열차 가속 그래프 추이를 보여주며, 접촉력과 압상력을 동시에 나타낸 그래프이다.

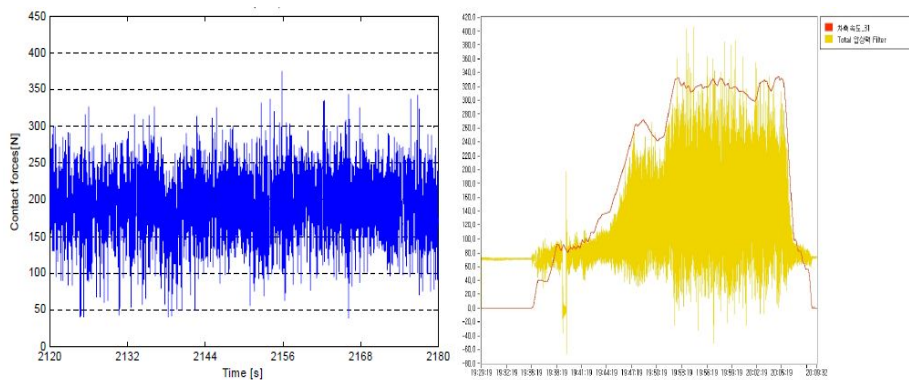


그림 20 장력 2.2[TON], 속도 330km/h 접촉력 측정

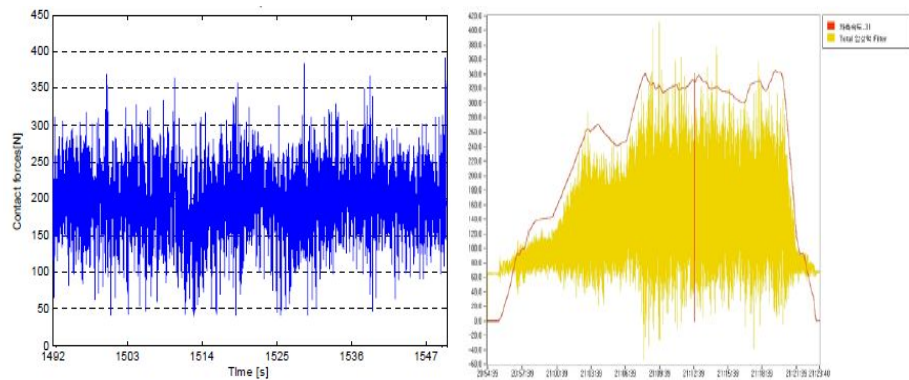


그림 21 장력 2.2[TON], 속도 340km/h 접촉력 측정

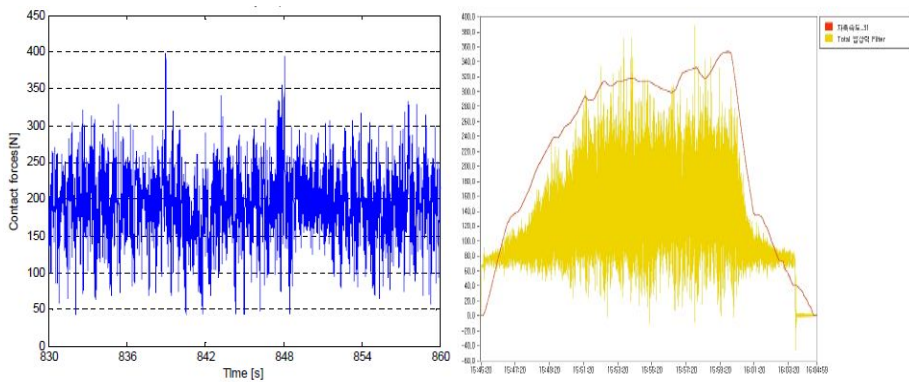


그림 22 장력 2.2[TON], 속도 350km/h 접촉력 측정

장력 2.2[TON]에서 열차속도 330km/h, 340km/h, 350km/h 가속과 접촉력 시험(上)과 그래프의 Total 압상력(下)을 측정한 결과이다.

그림 23과 같이 장력을 증가할 경우 속도는 비례하므로 2톤의 경우 300km/h, 2.3톤으로 장력을 조정했을시 효과는 열차속도 350km/h까지 상승시킬 수 있었다. 장력 증가 시 접촉력 측정 국내외 기준값을 만족한 것으로 분석되었다. 이와관련해 장력 상승으로 열차속도 증가를 위한 전차선 시스템을 적용 가능하다고 판단된다.

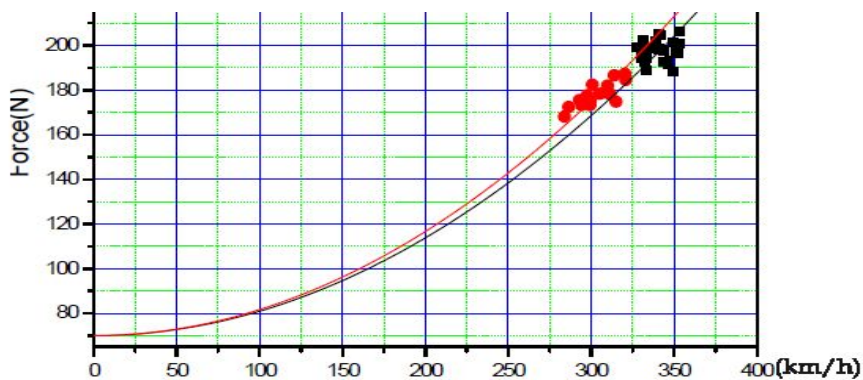


그림 23 장력 상승과 접촉력 측정 결과

IV. 결론

본 논문에서는 전기철도 고속화를 위한 가선구조로의 장력을 증가시켜 전차선과 펜더그래프와의 집전성능을 경부고속철도 구간에서 모델을 제시하였다. 제시된 기준 값 및 실측정치를 통하여 비교 검토 하였다.

시험 측정을 통하여 분석한 결과 모델에 제시한 측정값은 가선 장력 변화 및 속도를 300~350km/h로 증가시켰을 경우 다음과 같이 측정 되었다. 동적 상태에서 평균접촉력 및 최대 접촉력은 196[N]과 338[N]으로 측정되었으며, 최소 평균접촉력은 2.2톤에서 27[N] 측정되었다. 수직변위는 일반 구간에서 최대 수직변위는 61.8mm로 허용 기준인 80mm보다 낮으므로 양호한 집전성능을 예상할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시된 모델이 적정하다고 판단되며 몇 가지 성능 개선 방향을 도출하였다.

전차선로 장력 상승 요인을 전차선 측면에서 보면 가선구간 및 탄성 변형율과 압상력 변화에 따른 접촉력 향상에 있어 매우 유효한 것으로 판단 된다. 또한 탄성으로 경점을 제거하여 충격에 의한 이선을 제거한다. 커티너리의 처짐 변형량을 균일화시켜 펜더그래프의 심한 변화를 줄이며, 커티너리 가선의 주된 원인 중 하나는 이선은 펜더그래프의 표면 접촉력에 의한 충격을 흡수해 줄 수 있는 가선 장력 상승 및 개발은 고속화, 집전특성의 개선대책이 되는 것을 확인하였다. 속도 향상을 위해서는 장력 및 가선시스템의 개발 및 보완이 요구되며 이와 관련하여 접촉력, 이선, 수직변위 대해 검토가 필요하다. 본 연구 검토를 통해 경부 고속철도 구간의 가선 시스템에서 각 유형별로 검토한바와 같이 고속화 향상에 기여를 할 것으로 본다. 향후 전차선의 동역학적 특성 분석의 기본 자료로 전차선의 개선을 통한 전기철도 고속화에 기여하리라 사료되며 앞으로도 속도 향상을 위해 전차선 금구류의 개발 및 차량 펜더그래프의 연관성에 대해 지속적인 연구가 요구되리라 사료된다.

Reference

- [1] 김양수, 유해출, “전기철도공학”, 동일출판사, p. 55, 1999.
- [2] 김양수, “광센서를 이용한 전차선로전류측정기법에 관한 연구”,
고려대학교 대학원 박사학위논문, 2003.
- [3] “기술개발자료집 : 고속전철기술개발사업”, 한국철도기술연구원, 2003.
- [4] “차세대고속철도 기술개발사업 기획보고서 : 최고속도 400km/h
고속열차 (HEMU-400X)개발”, 한국철도기술연구원, 2006
- [5] “속도 향상에 따른 가선설비 개량방안 연구”, 건설교통부, 2007.
- [6] “속도 향상에 따른 가선설비 개량방안 연구”, 건설교통부, 2008.
- [7] Kiwon Lee,Yong Hyeon Cho,Young Park, Sam young Kwon,”
Improvements of Existing Overhead Lines fir 180km/h operation of
the Tilting Train”, the 8th World Congress on Railway Research,
2008.
- [8] Yong Hyeon Cho,“The influence of the pre-sag of a railway
contact wire on the pantograph-catenary dynamics”, The 2nd
conference on Advanced Nondestructive Evaluation, 2007.
- [9] 한봉석, “한국전기철도의 현황과 발전전략”, 철도웹진, No. 56, 2005.
- [10] 한영재, 양도철, 장호성, 최종선, 김정수, “고속철도차량용 전기장치의
온도 특성에 관한 연구”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 16, No. 12,
p. 1210, 2003.
- [11] 권삼영, “전자계(電磁系)와 기계계(機械系) 해석에 의한 초고속(超高
速) 전차선로 시험 시스템 개발에 관한 연구(研究)”, 2007

- [12] 창상훈, “가선시스템 설계요소기술 최적화 방안”, “한국철도기술연구소”, P.39~41, P. 127~130.
- [13] 정연택, 이덕출, “신편 전기철도”, “동명사, P. 35~42
- [14] “전기철도설계 편람”, P. 13-100~13-108, P. 13-233, P 13-165~166
- [15] 창상훈, “고속화에 대응한 가선구조의 특성 최적화방안”, 한국철도기술원 2000.
- [16] 철도청, “고속철도 설비시설도 및 부품도”, 철도청
- [17] 강인권, “최신전기철도개론”, 도서출판 의제 P. 193~238. 1999.
- [18] 이기천, “속도향상을 위한 고속전차선로 드롭퍼의 기계적 피로도 분석에 관한 연구”, P. 15~19, P. 29~41, P. 57~60. 2012.

감사의 글

배움의 갈증이 절실할 때 조선대학교 산업대학원에 입학하여 많은 부분을 배우고 느끼게 되어 좋았습니다.

이번 기회를 통해 학업에 많은 도움을 주신 교수님께 감사의 인사를 올리고 자 합니다. 먼저, 대학원 석사논문 지도교수이신 존경하는 조금배 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 또한, 석사과정 중 많은 가르침을 주신 이우선 교수님, 조금배 교수님, 최효상 교수님, 서길모 교수님, 김철준 교수님, 정현숙 선생님 지금은 외국에 계신 김남훈 교수님께도 감사드립니다.

아울러, 대학원과정을 수학 할 수 있도록 길을 열어주신 박채욱 교수님께 마음깊이 감사드립니다.

마지막으로 오늘까지 저를 믿고 따라준 가족들과 영광을 나누고 싶습니다. 많은 가르침을 주신 모든 분들 항상 건강과 행복을 기원합니다.