

# 판토히라프 접촉력 측정을 위한 스트레인 게이지 내장형 센서 개발

## Development of Load Cell to Measure Contact Force of Pantograph

박찬경†      백진성\*      김영국\*\*      김기환\*\*\*  
Chan-Kyoung Park      Jin-Sung Paik      Young-Guk Kim      Ki-Hwan Kim

### ABSTRACT

The KTX-Sancheon has been commercially operating on the high-speed line since March. 2. In order to verify the performance of high-speed train and core equipments such as current collection system, sophisticated tests and evaluating procedures should have been considering. In this paper, the load cell with a built-in strain-gauge which developed to improve measuring method of contact force between the pantograph and catenary system is introduced. The static test results of the load cell shows that its design is very suitable and applicable for the dynamic test and on-line test. After the test and evaluation of load cell's dynamic calibration with pantograph, we will be applied to test interaction characteristics between the pantograph and catenary system on the high-speed line.

### 1. 서 론

가선에서 전기에너지를 받아 동력원으로 이용하는 전기 철도시스템은 열차가 주행하며 판토히라프가 전차선과 접촉할 때 얼마나 안정적으로 가선을 추종하며 집전하는가에 따라 견인·제동 등 주행성능이 좌우되며, 특히 80-120 km/h로 운행하는 전동차에 비해 250 km/h 이상 고속 주행하는 열차에 있어서 집전특성은 열차의 주행성능에 더 큰 영향을 준다. 판토히라프의 집전특성을 평가하기 위한 주요 항목인 이선과 관련하여 여러 관련 규격(UIC794-O, EN50119, EN50367 등)을 검토해 보면, 기계적 계측을 통한 접촉력을 평가하는 방법과 아크 측정을 통하여 이선율(시험시간 대비 아크 크기, 지속시간의 비)을 평가하는 방법 등이 있다. 국내에서는 일부 전동차 및 KTX에 아크 검측기를 개발하여 아크 측정평가 [1]를 수행한 바 있으며, 한국형 고속열차의 경우 기계적 방법을 통해 접촉력을 평가[2]하여 왔다.

KTX-산천의 경우, 고정부에 부착된 4곳의 Torsional spring에 집전장치가 장착된 구조로서 기계적 접촉 특성시험을 위해 본 연구에서는 판토히라프의 접촉력을 직접 측정함에 있어 집전판을 떠받치고 있는 Fixing Bracket의 구조를 활용한 스트레인 게이지 내장형 센서를 개발하였으며 향후, 고속열차용 판토히라프의 더욱 안정적인 집전특성 평가를 위한 시스템의 일부로 활용하고자 한다.

### 2. 판토히라프 구조 및 측정시스템 구성

KTX-산천 차량의 판토히라프는 25 kVac의 강체 가선(지하) 및 심플 카테너리선(지상) 구간에서 원활한 집전이 가능한 구조로 전차선 전원을 차량으로 받아들이는 집전장치이다. 이 장치는 양쪽 동력차의 지붕에 한 개씩 설치되어 있으며, 열차가 운행할 때는 한 개의 판토히라프만이 상승되어 열차에 필요한 전원을 공급한다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 책임연구원  
E-mail : ckpark@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5613 FAX : (031)460-5649

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 선임연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 책임연구원

\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 수석연구원

## 2.1 판토틀라프 구조

그림1과 같이 판토틀라프의 구조는 크게 13개의 요소로 구분할 수 있으며, 가선에 접촉하여 집전을 유도하는 집전 펜헤드 조립체, 상승 및 하강동작을 수행하는 상부 및 하부 암 조립체, 그리고 기초 프레임 조립체로 구분된다. 집전 펜헤드는 상부 암 끝 상단에 조립되며, 4점지지를 통해 가선에 대한 주습판의 추종특성을 극대화할 수 있도록 설계되었으며, 전차선이 교차되는 부위를 지날 때 가선과 집전 헤드가 엉키는 것을 방지하기 위하여 집전 헤드 양 측면에는 프로텍터와 가이드 혼이 조립되었다. 상부 암은 경량화 및 추종성 향상을 위하여 알루미늄 구조물로 제작되었으며, 기초 프레임은 차량 지붕의 절연 지지애자에 조립할 수 있는 구조를 가졌다. 압상력은 70 N으로 설정되며, 판토틀라프 작용 높이가 변화하더라도 거의 일정한 값을 유지할 수 있도록 설계되었다.

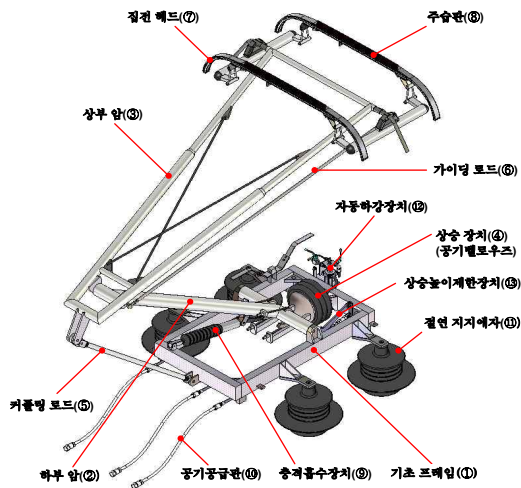


그림1. 판토틀라프 구조



그림2. 집전 펜헤드 구조

## 2.2 판토틀라프 측정시스템 구성 및 센서 개발의 필요성

집전장치가 가선과 접촉할 때 작용하는 평균 접촉력( $F_{mean}$ )은 집전장치를 위로 밀어 올려 가선에 접촉시키는 정적 압상력( $F_{static}$ )과 열차속도의 제곱에 비례하여 증가하는 공기양력 힘 즉, 양력( $F_{aero}$ )의 합력으로 이루어진다. 아래와 같이 열차의 운행 중 양력을 포함하여 집전판의 4개소 스프링 부위에서 측정된 전단력의 합력 계산 값을 평균 접촉력으로 판단한다.[3]  $F_s$ 는 70 N으로 기 정의되며, 공력에 의한 압상력은 공력특성 시험에 의해 도출할 수 있다.

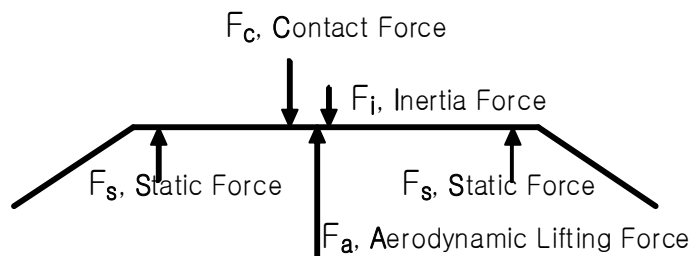


그림3. 집전장치 집전판-가선 간 작용력 평형상태

$$F_i = -F_c + F_a + F_s$$

$$F_i = \text{관성력 (inertia force),}$$

$$F_c = \text{접촉력 (contact force)}$$

$$F_a = \text{양력 (Aerodynamic lifting force), } F_s = \text{정적 압상력 (static force)}$$

KTX-산천의 경우, 집전 펜헤드 고정부에 부착된 4곳의 Torsional Spring에 집전장치가 장착된 구조로 그림4와 같이 각도센서를 통한 Torsion각의 측정으로 집전판의 접촉력  $F_c$ 를 측정하였으며 전차선의

위치에 따라 4곳의 위치가 별도로 움직이며 접촉력을 발생하므로 관성력 측정을 위하여 그림5와 같이 가속도 센서를 장착하였다.

그러나, spring이 가지는 기본적인 히스테리시스 특성과 4점 지지에 따른 팬헤드의 자유로운 거동(차량주행 및 횡방향)에 의하여 현가특성을 명확히 정의하는데 어려워 접촉력에 따른 스프링의 변화를 측정하는 간접적인 측정보다는 팬헤드가 받는 직접적인 접촉력 측정 방법이 요구되었으며, 이에 집전판을 직접 떠 받치고 있는 요소인 Fixing bracket를 활용한 센서 개발을 하게 되었다.

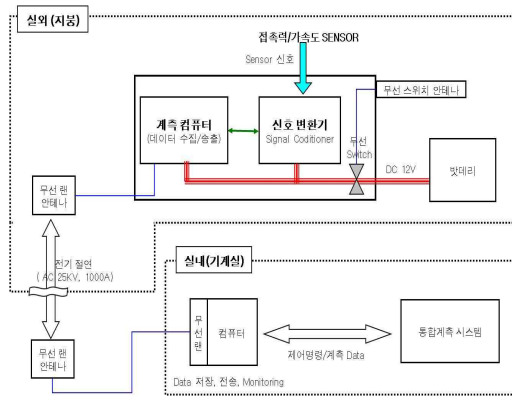


그림4. 집전시험 장비의 구성 다이어그램

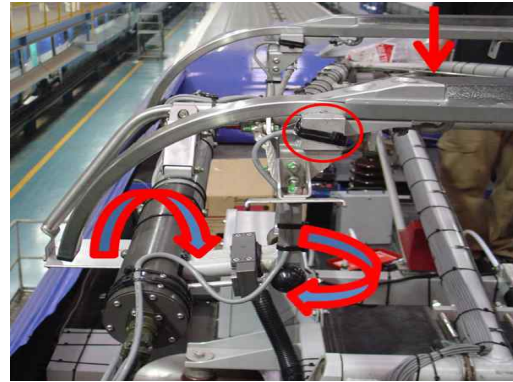


그림5. 각도 및 가속도 센서

### 3. 접촉력 측정 센서의 개발

#### 3.1 Fixing bracket 구조적 특성 분석

그림6에 보이는 바와 같이, Fixing bracket은 스테인레스 재질의 소재로 집전판을 직접 떠 받치는 구조로 집전판이 받는 하중을 하부 링크구조를 통해 Torsional spring에 전달하는 요소이며, 물성치는 표1과 같다. 본 요소를 센서로서 활용하기 위하여 구조적 특성 분석이 필요하였으며 아래와 같이 구조 및 진동해석을 수행하였다.

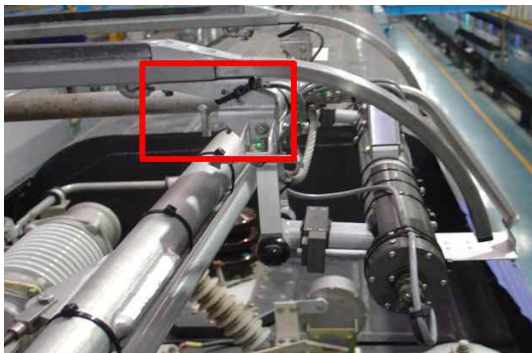


그림6. Fixing bracket 설치 모습

항목	구조 물성치
Young's Modulus	$2 * E11 \text{ N/m}^2$
Poisson Ratio	0.266
Density	$7,980 \text{ kg/m}^3$
Yield Strength	$2.5 * E8 \text{ N/m}^2$
Weight	0.174 kg

표1. Fixing bracket의 물성치

#### 3.2.1 Fixing bracket의 진동해석

본 요소의 진동해석을 위해 상용 유한요소 프로그램인 SAMCEF Field V6.2를 사용(Pre/Post Processing)하여 유한요소로 모델링(Mesh는 1 mm 단위의 Tetra 형상 구현) 하였다. 구속조건은 하단부의 4개 홀에 대해서는 6자유도 고정지지, 상단부에는 Harmonic function으로 적용하여 분포하중 200 N (최대 평균접촉력 평가기준)을 가하였다. Critical Damping은 2%를 적용하였다.

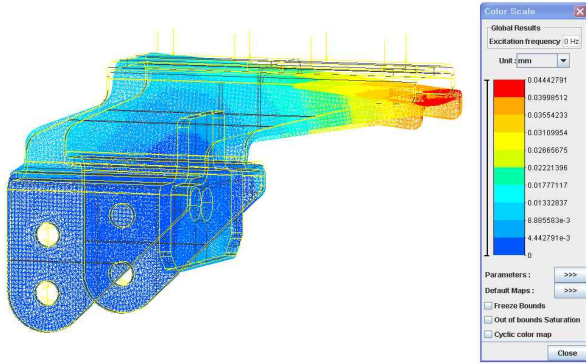


그림7. Fixing Bracket의 진동해석 결과

Frequency Nbr. 1	1,421.2 (Hz)
Frequency Nbr. 2	1,536.7 (Hz)
Frequency Nbr. 3	1,850.8 (Hz)
Frequency Nbr. 4	3,805.5 (Hz)

표2. Fixing bracket의 주요 모드 주파수

해석 결과, Fixing bracket의 주요 모드를 나타내는 주파수는 표2와 같으며, 모드 범위에서의 최대 변위는 0.27 mm를 나타내었다. 판토틀로그프 집진특성에 영향을 미치는 측정 관심 주파수인 0-20 Hz[4] 대역을 훨씬 벗어난 결과(공진대역 회피)를 얻을 수 있었으며 거의 Rigid body의 특성을 나타내는 요소임을 알 수 있었다.

### 3.2.2 Fixing Bracket의 구조해석

본 요소의 구조해석시 구속조건은 진동해석과 동일하며 상단부에는 안전율 2.5를 고려하여 분포하중 500 N을 적용하였다. 그림8의 결과에 따르면, 항복강도 250 MPa 대비 최대응력은 67.91 MPa (최대 변위 0.11 mm)로 항복 강도 이내의 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다.

상기 진동 및 구조해석의 결과를 통해 Fixing bracket의 구조적 특성을 얻었으며, 이를 기반으로 하여 개발하고자 하는 센서의 구조적 목표 특성을 결정하였다.

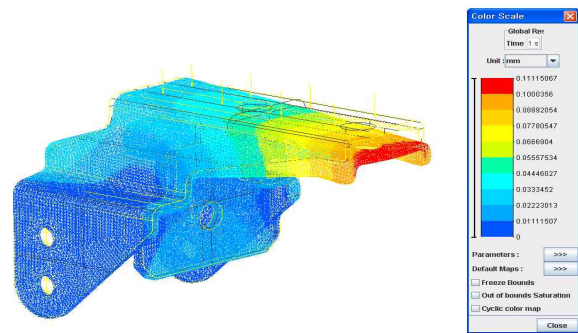


그림8. Fixing Bracket의 진동해석 결과

## 3.2 접촉력 측정 센서 개발

### 3.2.1 접촉력 측정 센서의 설계

Fixing bracket의 진동 및 구조해석을 통해 판토틀로그프의 집진특성에 큰 영향을 미치지 않으면서 접촉력을 직접적으로 측정이 가능한 요소라고 판단하였고, 이에 따라 본 요소를 활용하여 저중량/고강도이며 공력특성이 우수한 스트레인 게이지가 내장된 접촉력 측정 센서를 설계하였다.

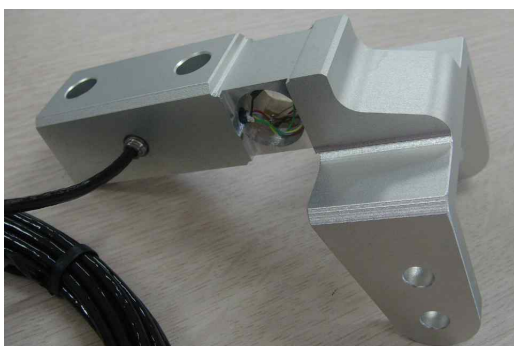


그림10. 접촉력 측정 센서의 외형

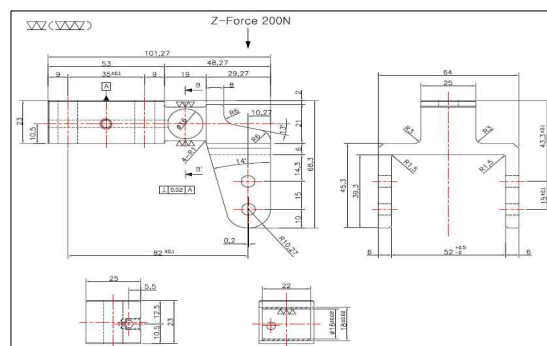


그림11. 접촉력 측정 센서의 설계도면

개발된 센서는 집전판이 받는 수직하중에 대하여 인장과 압축을 감지하는 1 분력계의 특성을 가지며 중앙 원형부위의 공간을 활용하여 그림9와 같은 6-wire full bridge 회로를 구성하였으며 주요 사양은 표3과 같다.

Rated Capacity	Fz 200 N
Rated Output	Approx. 1.0 mV/V
Non-Linearity	0.1% of F.S
Hysteresis	0.1% of F.S
Creep	0.05% of F.S/30 min
Allowable overload	200% of F.S
Material	AL 또는 SUS
Weight	0.190 kg 이하
Cable length	∅3.5 Meter
Recommended input voltage	10 VDC (max. 20 V)

표3. 접촉력 측정 센서의 주요 사양

개발된 접촉력 측정 센서와 Fixing bracket의 구조적 특성을 비교하기 위하여 구조 및 진동해석을 상기 해석 조건과 동일하게 아래와 같이 수행하였다.

### 3.2.2 접촉력 측정 센서의 진동해석

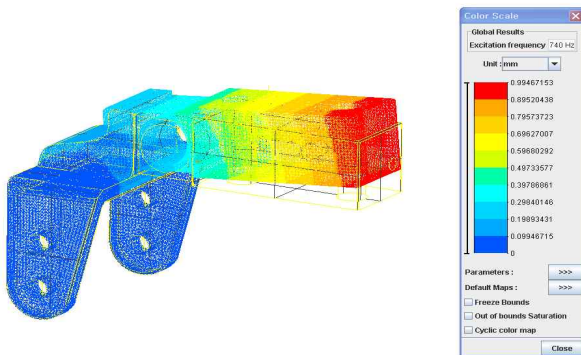


그림11. 접촉력 측정 센서의 진동해석 결과

Frequency Nbr. 1	713.1 (Hz)
Frequency Nbr. 2	1,240.5 (Hz)
Frequency Nbr. 3	3,560.8 (Hz)
Frequency Nbr. 4	4,278.2 (Hz)

표4. 접촉력 측정 센서의 주요 모드 주파수

해석 결과, 접촉력 측정 센서의 주요 모드를 나타내는 주파수는 표4와 같으며, Fixing bracket의 경우와 마찬가지로 판토히도그래프 집전특성에 영향을 미치는 측정 관심 주파수인 0-20 Hz[4] 대역을 훨씬 벗어난 결과(공진대역 회피)를 얻을 수 있었다.

### 3.2.3 접촉력 측정 센서의 구조해석

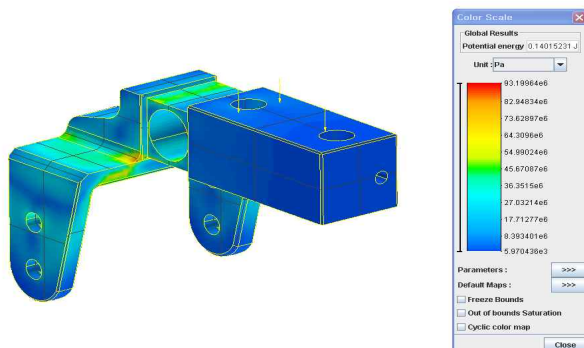


그림12. 접촉력 측정 센서의 구조해석 결과

항목	구조 물성치
Young's Modulus	7.1 * E10 N/m <sup>2</sup>
Poisson Ratio	0.33
Density	2,796 kg/m <sup>3</sup>
Yield Strength	4.8 * E11 N/m <sup>2</sup>
Weight	0.160 kg

표5. 접촉력 측정 센서의 물성치



본 요소의 구조해석시 구속조건은 진동해석과 동일하며 상단부에는 안전율을 고려하여 분포하중 500 N을 적용하였다. 그림12의 결과에 따르면, 항복강도 480 MPa 대비 최대응력은 93.19 MPa로 항복 강도 이내의 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다.

### 3.2.4 접촉력 측정 센서의 특성 분석

개발된 센서 5개의 표3의 주요 사양을 검증하기 위하여 Static Calibration을 수행하였다. 그림13에 보이는 바와 같이 Calibration 지그를 제작하여 센서를 고정하고 분동에 의한 출력전압을 측정하였으며 그 결과를 그림14에 나타내었다. 하중의 Loading/Unloading에 따른 선형성과 재현성이 우수한 결과를 나타내고 있다.



그림13. Static calibration 모습

LOAD Newton	Average output mV/V		Standard mV/V	Deviation mV/V		Measuring result		
	Load	Unload		Load	Unload			
0	0.00000	0.00014	0.00000	0.00000	0.00014	Full scale	0.69182	mV/V
40	0.13826	0.13858	0.13836	-0.00010	0.00022	Non-linearity	-0.019	% of FS
80	0.27660	0.27678	0.27673	-0.00013	0.00005	Hysteresis	-0.032	% of FS
120	0.41496	0.41518	0.41509	-0.00013	0.00009	Repeatability	0.011	% of FS
160	0.55340	0.55350	0.55346	-0.00006	0.00004	Initial zero	0.01064	mV/V
200	0.69182	-	0.69182	0.00000	0.00000	Output Resis.	353	Ω
						Input Resis.	352	Ω
						Insulation	20	kMΩ

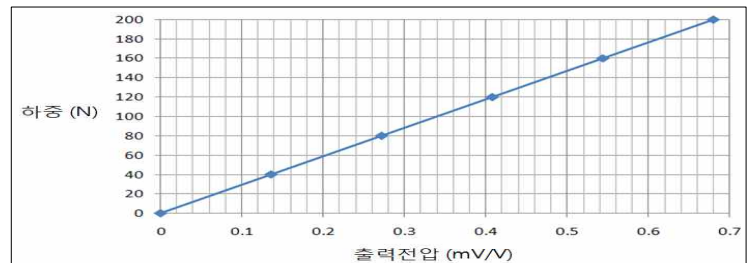


그림14. 접촉력 측정 센서의 Static calibration Results

## 4. 결 론

KTX-산천용 판토품의 경우, Torsional spring이 가지는 기본적인 히스테리시스 특성과 4점 지지에 따른 팬헤드의 자유로운 거동(차량주행 및 횡방향)에 의하여 현가특성을 명확히 정의하는데 어려움을 갖게 되어 접촉력에 따른 스프링의 변화를 측정하는 간접적인 측정보다는 팬헤드의 집전판이 받는 직접적인 접촉력을 측정하는 방법이 요구되었다.

본 연구에서는 판토품의 기계적 접촉 특성시험을 위해 접촉력을 직접 측정함에 있어 집전판을 떠받치고 있는 Fixing Bracket의 구조를 활용한 저중량/고강도이며 공력특성이 우수한 스트레인 게이지 내장형 센서를 개발하였다.

개발된 센서는 현가스프링의 특성에 따른 히스테리시스가 없어 적용 하중에 따른 출력전압의 선형성 및 재현성이 매우 강하다는 특징을 가지고 있어 접촉력 측정방법의 개선안으로 충분히 부합할 것으로 기대되며, KTX-산천용 판토품에 설치하여 기존의 시운전을 통해 얻어진 접촉력 측정결과와 비교 분석할 것이다.

향후, 다방향의 하중 측정이 가능한 센서로 설계보완하여 고속열차용 판토품의 더욱 안정적인 집전특성 평가를 위한 시스템의 일부로 활용하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 차세대고속철도기술개발사업 ‘분산형 고속철도 시스템 통합 및 총괄’과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 송성근, 이택희, 조성재, 문철이, 박성모, “전차선 아크 검측 시스템 개발”, 한국철도학회 논문집, 제13권 제1호 2010년 pp37-43
2. 목진용, “고속철도 집전장치의 성능시험 및 동특성 해석”, 박사학위논문, 서울산업대학교, 2005
3. 김기환, 박찬경 등, “KTX-II 형식시험을 위한 계측기 구축” 용역 과제보고서, 2009. 12
4. BS EN 50317:2002, “Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line”
5. UIC 794-O, “Pantograph - Overhead line interaction on the European high-speed network” (1st edition, 1.1.96)
6. BS EN 50119:2001, “Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines”
7. BS EN 50367:2006, “Railway applications - Current collection systems - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)
8. 조용현, “드롭퍼 비선형과 전차선 초기 처짐을 고려한 철도 팬터그래프-전차선로 동역학 수치 시뮬레이션”, 박사학위논문, 서울대학교, 2008.
9. Y. H. Cho, “Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper”, Journal of Sound and vibration, 315 (2008) 433-454