

# 선로조건 및 운전패턴에 따른 한국형 고속열차 판토품의 접촉력 특성 분석

목진용<sup>†</sup> · 김영국 · 이희성\*

## Analysis of contact force of pantograph for Korean-high speed train according to track conditions and driving patterns

Jin Yong, Mok<sup>†</sup>, Young Guk Kim and Hi Sung Lee\*

### Abstract

In this paper, we introduce the on-line test of the current collection characteristics for HSR 350x(Korea High Speed Train project) that have been performed in the Kyoung-bu high-speed line since 2002. Through the analysis of measured data during on-line test, the variation trends of contact force between pantograph and catenary according to the track conditions and driving patterns are reviewed. This study shows that the track conditions do not affect on the dynamic performance between pantograph and the driving patterns are important factors in determining the good interaction of them.

**Key Words** : Korean high speed train(HSR 350x), pantographe, catenary system, on-line test, contact force, driving pattern, track condition

## 1. 서 론

세계적으로 20세기 말에 300 km/h 이상의 고속철도가 개발되어 영업운전을 함에 따라 한동안 다른 교통수단에 비해 선호도가 낮았던 철도가 다시 르네상스를 맞이하고 있다. 이와 함께 100년 이상의 역사를 갖고 있는 한국철도에 2004년 4월 경부고속철도의 개통은 한국철도 역사를 새롭게 써야할 만큼 철도기술의 변혁과 철도교통 서비스의 혁신을 이루는 중대한 계기가 되었다. 또한, 고속철도 핵심기술의 자립을 목표로 추진해 온 G7 고속전철기술개발사업의 결과인 한국형 고속열차(HSR 350x)가 2004년 12월 6일 350 km/h의 최고 목표속도 이상을 성공적으로주행하였다. 이 한국형 고속열차는 2005년 8월까지 230여 차량의 시운전시험을 통한 110,000 km의 주행실적으로 신뢰성이 확보됨에 따라 우리나라도 프랑스, 독일, 일본 등 G7 선진 고속철도 기술 보유국 수준까지 독자적인 고속철도 기

을 확보하게 되었다<sup>[1,2]</sup>.

국내외에서 상업 운전되고 있는 고속열차는 가선계에서 받은 전기에너지를 동력원으로 이용하여 주행하기 때문에 열차에 설치된 판토품이 가선계와 접촉할 때 얼마나 안정적으로 전차선을 추종하면서 집전하는가에 따라 견인 · 제동 등 주행 성능이 좌우된다<sup>[2,3]</sup>. 특히 80~120 km/h로 운행하는 전동차에 비해 250~350 km/h까지 고속 주행하는 고속열차에 있어서 집전특성은 열차의 주행 성능에 더 큰 영향을 준다.

본 논문에서는 3년여에 걸친 시운전 시험을 통해 획득한 한국형 고속열차의 판토품과 전차선에 대한 계측 데이터를 분석하여 선로조건 및 운전패턴의 변화에 따른 한국형 고속열차의 판토품과 전차선의 상호 작용에 대한 관계를 규명하고자 한다.

## 2. 집전시스템의 개요

집전시스템은 전기 차량의 동력원 공급계통으로서 열차에 장착된 판토품과 선로를 따라 설치된 가선계로 구성된다.

한국철도기술연구원 (Korea Railroad Research Institute)  
\*서울산업대학교 (Seoul National University of Technology)

<sup>†</sup>Corresponding author: jymok@krii.re.kr

(Received : September 8, 2005, Accepted : November 16, 2005)

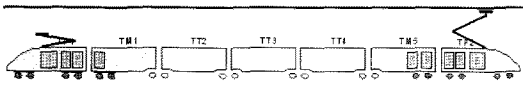


그림 1. 한국형 고속열차의 최고속도 변화  
Fig. 1. Arrangement of pantograph in HSR350x train set.

2.1. 한국형 고속열차의 판토품라

판토품라는 고속전철의 주행 중에 가선계로부터 전력을 받아들이는 장치로서 가선계의 접촉선과 기계 및 전기적인 인터페이스가 차량시스템과 시설물의 안정성에 중요한 영향을 미치며, 고속주행 중에는 항력, 양력, 접촉에 의한 마찰력 등 다양한 외력을 받게 된다. 따라서 고속전철에 안정적인 전력을 공급시키기 위해서는 가선계와의 상호작용을 고려한 기구적, 구조적인 설계가 필요하다.

그림 1과 같이 한국형 고속열차는 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량 등 총 7량 편성 열차로서 가선계 전차선으로부터 25 kV의 전원을 공급받는 판토품라(pantograph)가 전·후부 동력차 지붕에 각 1조씩 2조가 설치되어 있으며, 정상적으로 운행할 때 열차 진행 방향의 후부 동력차 판토품라 1조만을 상승시켜 전차선에 접촉시킴으로서 주행 중 필요한 전력을 집전하는 방식을 적용하고 있다<sup>[14]</sup>.

그림 2는 한국형 고속전철에 적용되어 있는 싱글암형 판토품라를 보이고 있다. 판토품라의 구조는 대부분의 연결부가 핀 이음으로 이루어져 있으며 집전판(pan head)과 크로스바(cross bar) 사이에는 고주파 진동을 흡수하기 위한 1차 현가스프링이 있고, 크로스바와 플런저(plunger) 사이에는 저주파 진동을

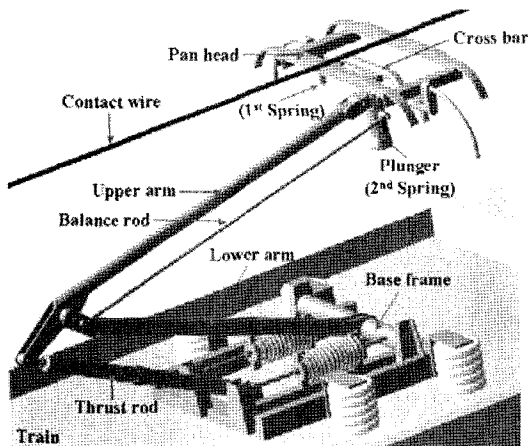


그림 2. 한국형 고속열차의 싱글암형 판토품라  
Fig. 2. Single arm type pantograph for for HSR 350x.

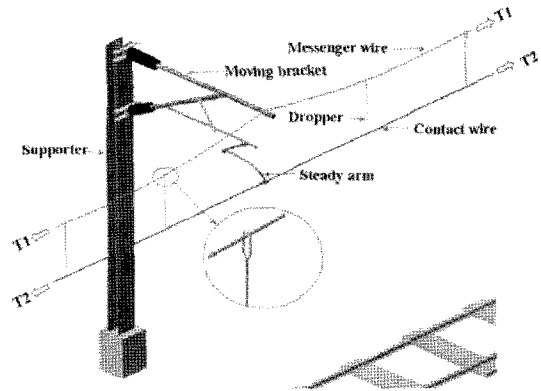


그림 3. 고속열차용 가선계  
Fig. 3. Catenary system for high-speed train.

흡수하기 위한 2차 현가스프링이 설치되어 있다<sup>[15]</sup>.

2.2. 가선계

그림 3은 KTX가 운행되고 있는 경부고속철도에 이용되는 가선계의 구조이다. 일반적인 가선계는 크게 접촉선(contact wire)과 조가선(messenger wire)으로 구성되며, 이를 지지하기 위한 부수적인 구조물로서 지지대(supporter), 행거선(dropper), 가동 브라켓(moving bracket), 곡선당김 금구(steady arm)등을 갖고 있다<sup>[16]</sup>.

동선(Cu)으로 이루어진 접촉선은 판토품라와 직접적인 접촉을 통해 전력을 공급하는 부분이며, 청동으로 구성된 조가선은 접촉선의 하중에 의한 처짐을 방지하는 케이블로서 두 선은 모두 일정한 장력을 받고 있다. 행거선은 접촉선과 조가선을 상하로 연결시켜 인장 시에만 접촉선의 하중을 조가선에 분산 전달시키는 케이블이다. 곡선당김 금구는 접촉선과 판토품라의 집중적인 접촉에 의한 편마모를 방지하기 위해 접촉선을 수평으로 지그재그 상태(staggering)가 되도록 당겨주는 장치이다.

이러한 가선계는 접촉선과 조가선의 장력, 지지대 사이의 거리(공간), 행거의 간격 및 개수 등에 의해 수직방향의 강성이 변하게 되며, 이는 결국 판토품라와의 상호작용에 의한 전체 가선시스템의 성능인 이선율, 접촉력, 마모특성 등에 결정적인 영향을 미친다.

3. 집전시스템의 접촉력 평가

3.1. 집전시스템의 접촉력 측정

3.1.1. 집전시스템의 접촉력 측정시스템

한국형 고속열차에는 판토품라의 거동특성을 계측

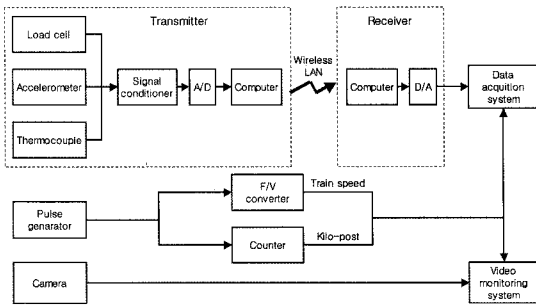


그림 4. 판토티그래프용 계측시스템 구성도  
Fig. 4. Schematic diagram of measuring system for pantograph.

하기 위해 팬헤드 접촉력, 가속도, 온도 등 물리량을 측정하는 계측시스템이 구축되어 있으며, 그 구성도는 그림 4와 같다. 전차선-집전판 간 팬헤드 접촉력을 측정하는 로드셀(load cell)은 팬헤드와 크로스바가 연결되는 좌/우 1차 스프링 지지부에, 판토티그래프의 각 부품의 진동을 측정하는 가속도계는 팬헤드를 연결하는 좌/우 빔 아래와 플런저 상부에, 집전판의 온도를 측정하는 써머커플(thermo-couple)은 집전판 하단에 각각 설치되어 있다.

그림 4에 보인 바와 같이 데이터 수집·전송부(transmitter)는 판토티그래프에 설치한 센서에서 측정된 아날로그 신호(analog signal)를 디지털 신호(digital signal)로 변환하여 무선 랜 통신 장치를 통해 차내에 설치된 수신부(receiver) 컴퓨터까지 송신하며, 수신부 컴퓨터는 수신한 디지털 신호를 다시 아날로그 신호로 변환하여 최종 저장 모듈에 측정된 물리량을 저장시킨다. 또한 차축의 펄스 발생기로부터 받은 차축회전 펄스는 열차속도와 주행거리를 연산하는 데 이용할 수 있도록 데이터 저장모듈로 보내져 측정된 물리량과 함께 저장된다<sup>[6,7]</sup>.

3.1.2. 판토티그래프-가선 간 접촉력 측정방법

그림 5는 전차선과 판토티그래프 집전판 사이의 힘의

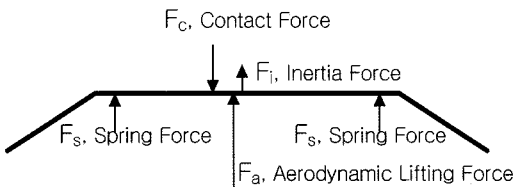


그림 5. 팬헤드와 가선계의 평형상태  
Fig. 5. Equilibrium condition between pan head and catenary.

평형상태를 나타낸 것이며, 그림에서 보이는 바와 같이 작용력들은 아래 식 (1)과 (2)로 표현된다. 집전판과 가선에 작용하는 접촉력은 측정된 좌·우빔 전단력과 별도의 양력실험을 통해 획득된 양력을 이용하여 아래 식 (2)의 평형식을 통해 구할 수 있다.

$$F_i = -F_c + F_a + F_s \tag{1}$$

여기서,  $F_i$ : 관성력[N],  $F_c$ : 접촉력[N],  
 $F_a$ : 양력[N],  $F_s$ : 압상력[N]

식 (1)에서 판토티그래프 집전판의 가속도 운동에 따른 관성력은 평형 위치를 기준으로 상·하 변화하므로 평균값은 “0”으로 간주하면 식 (1)은 평균 접촉력으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다<sup>[3,8]</sup>.

$$F_{c(mean)} = F_a + F_s \tag{2}$$

여기서,  $F_{c(mean)}$ : 집전판과 가선의 평균 접촉력

식 (1)과 (2)에서 양력  $F_a$ 는 열차의 주행속도와 관련되며, 한국형 고속열차에 대한 양력 계산식은 고속선로에서의 주행시험을 통해 구해진 식 (3)과 같은 실험적 관계식을 이용하였다<sup>[1]</sup>.

$$F_a = K_a \times \left( \frac{V}{200} \right)^2 \tag{3}$$

여기서,  $V$ : 열차의 주행속도[km/h]  
 $K_a$ : 공력상수, [(N/(km/h))<sup>2</sup>]

3.2. 선로조건 및 주행패턴에 따른 접촉력 특성 분석

한국형 고속열차에 대한 선로조건 및 운전패턴에 따른 집전시스템의 동특성을 분석하기 위해 KTX와 한국형 고속열차가 운행 중인 경부고속철도 선로의 광명역 남쪽 KP(kilo-post) 24 km 지점에서 KP 125 km(오송역) 지점까지의 주행시험을 통한 획득된 측정 데이터를 분석하였다.

3.2.1. 선로조건 및 주행패턴 분석

동특성 분석에 사용된 고속선로 구간은 그림 6에서 보는 바와 같이 개활지와 터널로 구성되어 있으며, 이들은 직선선로, 곡선선로 및 완화곡선으로 이루어져 있다. 그림 6의 상단 그래프에서 터널은 ‘0’, 개활지는 ‘1’로 구분되며, 하단 그래프에서 직선선로는 ‘0’, 곡선선로는 ‘2 또는 -2’, 완화곡선은 ‘1 또는 -1’로 구분되어 있다. 또한, 곡선선로와 완화곡선에서 ‘+’는 시계방향의 곡선을, ‘-’는 반시계방향의 곡선을 의미한다. 표 1은 분석 대상인 고속선로 구간에 대한 개활지와 터널, 직선선로, 곡선선로 및 완화곡선의 길이와 비율을 나타

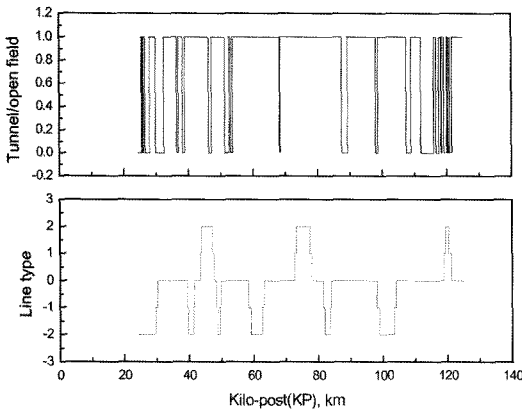


그림 6. 분석구간의 터널 및 선로조건 데이터  
Fig. 6. Data of tunnel/open field and line type in KP 24.2 - KP 125 range.

표 1. 분석구간의 터널 및 선로조건 데이터  
Table 1. Ratios of tunnel/open field and line types

	Cumulative distance, km	Percentage, %
Tunnel	21	20.9
Open field	79.7	79.1
Total distance	100.8	100
Straight line	66.1	65.6
Curved line	26.2	26.1
Transition curve	8.4	8.3
Total distance	100.8	100

낸 것이다. 분석에 사용된 고속선로 구간은 79.1%의 개활지와 20.9%의 터널로 구성되어 있고, 선로형태별로는 65.6%의 직선선로, 26.1%의 곡선선로 및 8.3%의 완화곡선으로 이루어져 있다.

그림 7은 고속열차가 광명-대전까지 운행되는 전형적인 운전패턴의 한 예로 견인조건은 견인신호(traction signal)가, 제동조건은 제동신호(braking signal)가 작동하는 상태이며, 타행조건은 견인/제동 신호가 작동하지 않는 상태를 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 고속열차는 광명에서 출발하여 초기 KP 37인 지점까지 견인조건(PWM 75%)으로 운전되어지며, 기존선에 가까운 대전 근처인 KP 143지점부터 제동조건으로 운전을 함을 알 수 있다. 또한, KP 37-KP 143 사이고속선 구간에서 견인조건과 타행조건으로 반복적인 운전이 진행된다. 이 전형적인 운전패턴을 분석하면 광명-대전 구간의 고속열차 주행시간은 약 40분이 걸리며, 운전조건은 타행 36.5%(14.6분), 견인 55.5%(22.2분), 제동 8%(3.2분)의 비율로 구성되어 있다. 따라서 이 전

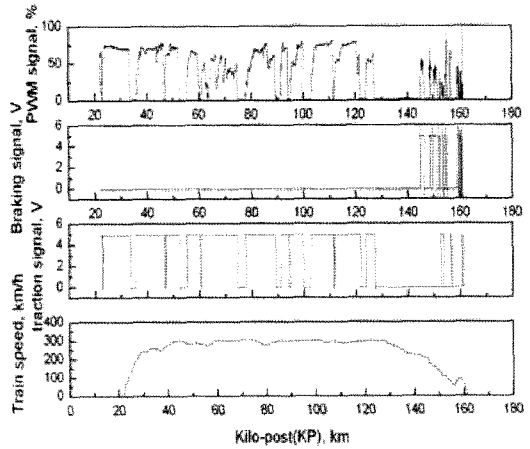


그림 7. 고속선(광명-대전) 구간에서의 전형적인 운전선도  
Fig. 7. Typical running diagram of high-speed train from Kwang-myeong to Dae-jeon.

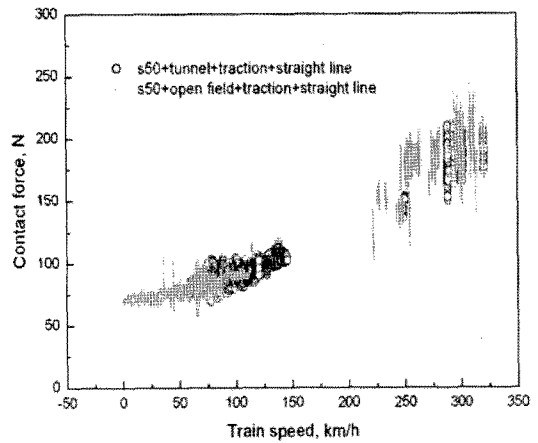


그림 8. 터널 및 개활지에서의 접촉력  
Fig. 8. Contact forces in tunnel and open field.

형적인 운전패턴의 분석 결과로 볼 때 운전조건에 따른 집전특성은 견인, 타행 및 제동조건으로 구분하여 검토가 필요하다고 판단된다.

### 3.2.2. 선로조건 및 주행패턴에 따른 접촉력 특성 분석

그림 8은 경간형식 s50(경간 간격 50 m), 열차 운행조건이 견인인 경우에 개활지와 터널에서의 접촉력을 비교한 것으로 개활지와 터널에 대해 동일한 공력계수가 적용된 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우에 대해 시험조건의 한계 때문에 열차의 모든 주행속도에서의 접촉력의 확보가 불가능했음에도 불구하고 열차의 주행속도의 변화에 대해 개활지와 터널에서 측정된 접촉력은 거의 동일한 크기와 경향을 가짐을 알

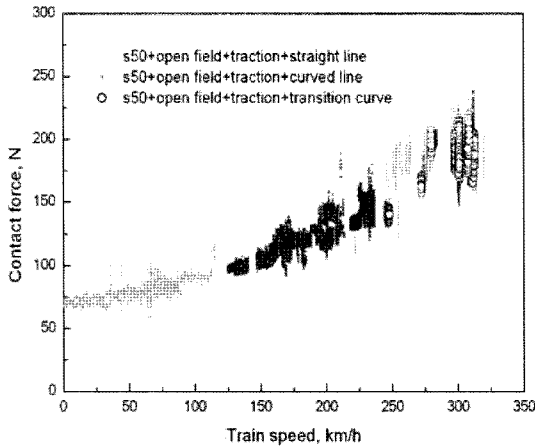


그림 9. 선로조건에 따른 접촉력 변화  
Fig. 9. Contact forces according to track condition.

수 있다.

그림 9는 경간형식 s50, 운행조건이 견인인 경우에 직선선로, 곡선선로 및 완화곡선에서 측정된 접촉력을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 3가지 구간의 경우에 접촉력 측정 데이터가 전체 열차 주행속도 대역에 대해 균등하게 분포되지는 못했지만 이 측정 데이터만으로 판단한 열차 주행속도의 변화에 대한 직선선로, 곡선선로 및 완화곡선에서의 접촉력은 거의 동일함을 알 수 있다.

따라서, 가장 많이 배치된 s50 경간만 대상으로 접촉력을 검토하면 그림 8과 그림 9와 같이 판토품과 전차선의 접촉력은 터널 유무와 선로조건에 따른 영향은 거의 없거나 매우 작은 차이를 가짐을 확인할 수 있다.

그러나 위 그림 8에 나타난 것처럼 일부 열차 속도에서는 s50 데이터만으로는 불충분하여 전체 속도대역에서 접촉력을 분석하기에는 불충분하므로 s50 경간(간격 50 m)과 간격과 구조가 거의 같은 n4(간격 49.5 m) 경간 데이터를 같은 경간특성을 갖는 데이터로서 판단하고 s50경간과 동일시하여 접촉력 분석에 함께 이용하였다. 그림 10은 열차 운전조건에 따른 경간형식 s50+n4(경간거리 49.5 m)의 경우 열차 속도에 따른 접촉력경향을 분석한 결과이다. 고속선의 경간 배치와 운전조건에 대한 제약으로 열차의 전체 주행속도 대역에서 접촉력 데이터를 얻기 어려우므로 측정 데이터의 회귀곡선을 구하여 운전조건에 대한 전체 속도대역별 접촉력을 분석하였다. 또한 본 연구는 고속열차에 쓰이는 판토품의 접촉력 분석에 목적이 있으므로 열차 속도 200 km/h 이상대역에서 측정된 접촉력 데이터만 회

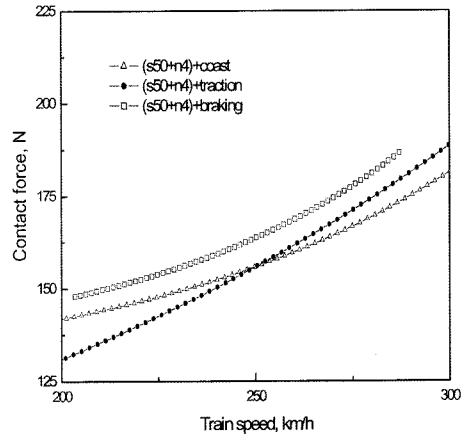


그림 10. 열차의 운전조건에 따른 접촉력 경향  
Fig. 10. Contact forces according to driving conditions.

귀곡선을 구하는 데 사용하였다. 그림에 보인 바와 같이 열차의 운전조건이 제동인 경우에 판토품의 접촉력은 견인과 타행인 경우보다 크다. 열차의 운전조건에 따라 견인조건인 경우는 열차 주행속도가 약 250 km/h 이하에서는 접촉력의 크기가 타행일 때보다 작으나 250 km/h 보다 크면 250 km/h 속도대역을 분기점으로 하여 타행보다 큰 접촉력 경향을 가짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 판토품과 가선계 전차선 사이의 접촉력은 터널 유무와 선로조건에 따른 영향은 거의 없거나 매우 작은 차이를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 비록 터널의 유무와 선로조건은 다르지만 사용된 가선계가 거의 유사한 경간형식을 사용하기 때문이라 판단된다.

(2) 고속열차의 운전패턴이 접촉력에 중대한 영향을 주는 것을 알 수 있다. 운전패턴에 따라 제동인 경우가 견인과 타행인 경우보다 열차의 주행속도가 300 km/h에서 약 15.8 N(8.5%) 크다. 고속열차가 견인조건인 경우에는 열차 주행속도가 약 250 km/h 이하에서는 접촉력의 크기가 타행일 때보다 작으나 250 km/h 보다 크면 타행보다 큰 (300 km/h에서 5.5 N) 경향을 가진다.

(3) 실제 주행데이터를 사용하여 운전패턴에 따른 접촉력을 분석한 결과 통상 열차의 일정한 속도 조건에서 판토품과 가선계의 동역학적 접촉특성을 해석하는 기존 해석방법으로는 고속열차 집전시스템의 실제적인 동특성을 정확하게 해석하는데 한계가 있는 것

으로 보인다<sup>[9]</sup>.

따라서, 앞으로도 고속열차용 집전장치의 설계 및 성능 해석기법은 열차의 운전조건을 고려한 연구가 심도 있게 진행되어야 한다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 고속열차의 본선시운전 시험을 지원해 주신 관계자 분들에게 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 목진용, 이희성, "350 km/h 본선 주행시험을 통한 한국형 고속열차 판토품의 접촉력 특성 평가 연구", 한국철도학회논문집, 제8권, 제4호, pp. 342-347, 한국철도학회, 2005.
- [2] 김영국, 목진용, 김석원, 박찬경, 김기환, "시운전시험을 통한 한국형 고속열차 승차감 변화추세에 관한 연구", 센서학회지, 제14권, 제3호, pp. 144-149, 한국센서학회, 2005.
- [3] K. Manabe, "High-speed contact performance of a catenary-pantograph system", *JSME Int'l Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 31-40, 1989.
- [4] 한국철도기술연구원, G7 고속전철 시제차량 기본 사양, 1998.
- [5] 서중휘, 목진용, 정일호, 박태원, 김영국, 김석원, "고속전철 집전시스템의 동역학 해석에 관한 연구(I. 가선계의 모델링 및 해석)", 한국정밀공학회지, 제22권, 제1호, pp. 152-160, 한국정밀공학회, 2005.
- [6] 한국철도기술연구원, "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발", 최종보고서, 2002.
- [7] 목진용, 박춘수, 김기환, "열차의 운행패턴과 속도에 따른 한국형 고속전철용 판토품의 접촉력특성과 가속도 거동의 변화 경향", 소음진동공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 200-205, 2004.
- [8] M. Ikeda and T. Usuda., "Study on the method of measuring the contact force between pantograph and contact wire", *RTRI Report*, vol. 14, no. 6, pp. 7-12, 2000.
- [9] RTRI, "Gasendo-S1 Manual", 1994.

## 목진용

- 『센서학회지 제14권 제3호』 pp. 149 참조
- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 2000년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업(공학석사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원
- 주관심분야 : 판토품 동역학 해석 및 시험평가, 철도차량 시험평가, 각종 센서 및 인터페이스

## 김영국

- 『센서학회지 제13권 제3호』 pp. 251 참조
- 1984년 2월 아주대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 1986년 8월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(공학석사)
- 2003년 8월 아주대학교 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현 한국철도기술연구원 책임연구원



## 이희성

- 1981년 2월 한양대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 1983년 2월 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학석사)
- 1991년 8월 Georgia Institute of Technology, U.S.A.(기계공학 박사)
- 현 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과 조교수