한국소음진동공학회 2003년도 추계학술대회논문집, pp.170~176.

한국형 고속전철용 판토그라프의 거동 특성과 열차속도와의 상관관계와 경향

Relation and Variation Trend between the Behavior of the Pantograph vs. the Vehicle Running Speed in Korean High Speed Train

목진용*[1], 박춘수[1], 조용현[2], 최강윤[3], 김기환[1]

Jin-Yong Mok, Choon-Soo Park, Yong-Hyun Cho, Kang-Yoon Choi, Ki-Hwan, Kim

ABSTRACT

The pantograph for Korean High Speed Train was developed and had been evaluating by through "G7 - R&D for home grown high speed train technology". In this study, a relation in mechanical aspect between the train running speed and the current collecting performance of the pantograph is conducted. For this study, a measuring system for current collecting performance and mechanical characteristics is developed and installed on the prototype Korean High Speed Train, and measurement is conducted while the train runs on the test track. The measuring system is composed of video monitoring system and telemetry & data processing unit. It monitors whether the hazard behavior in the pantograph is occurs or not, and measures acceleration and vertical contact force between the pan head and catenary. Through this study, evaluation of a mechanical vibration characteristics and trend of the pantograph and a interface performance of pantograph - catenary up to 200km/h train speed are facilitated.

1. 서 론

한국형 고속전철 시제 개발열차는 지난 '96년부터 착수, 진행되어 온 G7 고속전철기술개발사업을 통해 6년 간의 기술개발 과정을 통해 완성되었고, 현재까지 경부고속철도 시험선 구간에서 최고속도 300km/h까지 시운전 시험을 성공적으로 진행 중에 있다[1]. 이 시제열차는 동력차 2량과 동력객차 2량, 객차 3량의 7량 1편성으로 편성되어 있으며, 가선으로부터 열차에 25kV의 전원을 공급하는 집전장치(pantograph)는 전·후부 동력차의 지붕에 각각 1조씩 설치되어 있다. 시제열차의 집전장치는 국내기술에 의해 개발된 Single Arm형 판토그라프로서, 시제품에 대한 수차례의 형식·성능시험을 거쳐 열차에 탑재되었다. 집전장치는 가선(catenary)으로부터 열차의 운행에 소요되는 교류 25kV의 전기에너지를 받아 공급하는 장치로서 집전(current collection)성능은 물론, 가선과의 기계·전기적인 인터페이스 성능이 차량시스템과 시설물의 안전성에 지대한 영향을 미치는 장치이다. 본 연구에서는 한국형 고속전철 시제열차에 적용된 집전장치의 집전 성능과 인터페이스 성능검증을 위해 개발한 계측시스템을 소개하고, 개발한 계측시스템을 이용하여 시제열차의 본선 시운전시험을 통해 측정한 집전장치의 성능특성과 0~200km/h 속도까지 열차 주행속도의 변화에 따른 집전장치의 거동 변화 경향의 분석을 통해 집전장치의 동적 특성을 평가하고 집전장치 설계요소인 양력계수와 열차속도에 따른 평균 접촉력 변화함수를 연구 결과로 제시하고자 한다.

2. 한국형 고속전철용 집전장치의 주요 성능

G7 한국형 고속전철기술개발 사업을 통해 순수 국내 기술진에 의해 개발되어 시제 개발열차에 탑재, 시험중인 집전장치의 주요 개발 목표성능은 Table 1과 같다[2].

[1] 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단
[2] 한국철도기술연구원 기획조정실
[3] 한국철도기술연구원 기존선 전철화 자문팀

Table 1 Major performance specifications for pantograph of Korean High Speed Train

항 목	성능 사양
조작 방식	동력차 운전실의 판토그라프 운전모드 선택 S/W 및 SCU 연동 제어
형식	Single Arm 방식
동작 방식	상승 : 주 스프링 반력
	하강 : Air Actuator (공압 실린더)
동작 공기압력	7~10 bar
수직 접촉력	상승 시 : 70 N (표준)
	평균접촉력 : 200 N
작용 높이	최저 : 100 mm (레일 선단으로부터 4,289 mm)
	최고 : 1,500 mm (Mounting면 기준)
	표준 : 1,092 mm (Mounting면 기준)
중량	282 Kg
사용전압 환경	AC 25 kV, 60 Hz
사용전류 환경	정격 : 1,000 A
	최대 : 1,200 A
이선율	열차 운행시간에 대해 1% 이하

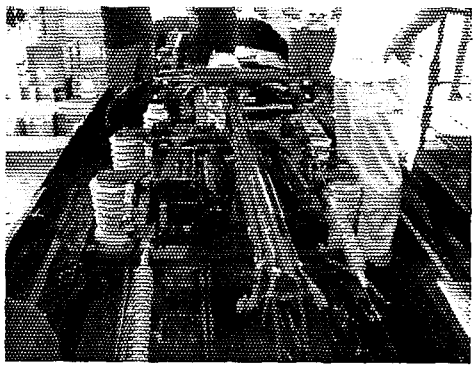


Fig. 1 Pantograph and Measuring system of Korean High Speed Train

3. 집전장치 성능계측 시스템의 구성

집전장치의 1차 성능목표는 가선으로부터 안정적으로 전력을 공급받아 열차에 제공하는 것이므로, 가선에 대한 안정적인 추종성과 연속 접촉성은 집전장치가 확보해야 할 가장 중요한 성능이며, 따라서 이러한 성능에 대해서는 과학적 방법을 통한 정확한 계측·검증이 필요하다.

또한 고속철도시스템에서는 열차 주행 시 안전성 측면에서 가선에 미치는 판토그라프의 운동 영향 즉, 가선에 대한 집전장치의 물리적인 거동 특성을 검증해 보이는 것이 필요하였다.

이러한 배경에서 한국형 고속전철 시제열차의 집전성능 계측·평가를 위해 전용 계측시스템을 개발하였으며, 그 구성을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 고전압 환경인 열차의 지붕에 설치한 계측기와 실내 데이터 처리부는 안전을 위해 Wireless Lan 방식의 무선데이터 송·수신 방식을 적용해, H/W 케이블이 격리되는 구조로 구성하였으며, 화상 모니터링 시스템과 물리량 계측시스템으로 구분하여 독립적으로 가동되면서 측정 환경 데이터인 열차속도 데이터 등은 공유할 수 있도록 구성하였다.

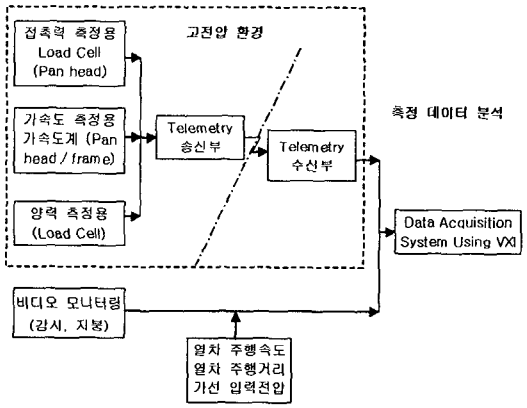


Fig. 2 Configuration of performance measuring system for pantograph

계측 시스템 중에 지붕에 탑재한 텔레메트리의 Sensing/송신부(a)와 수신부(b)의 데이터 전송·처리회로는 각각 아래 Fig. 3 (a), (b)와 같이 구성하였다.

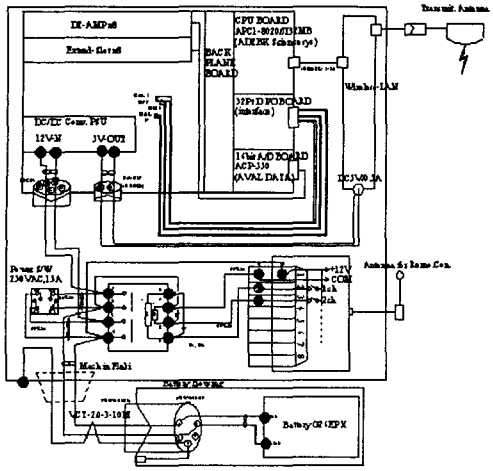


Fig. 3 (a) Circuit Diagram of Sensing & Transmitting part in roof Telemetry

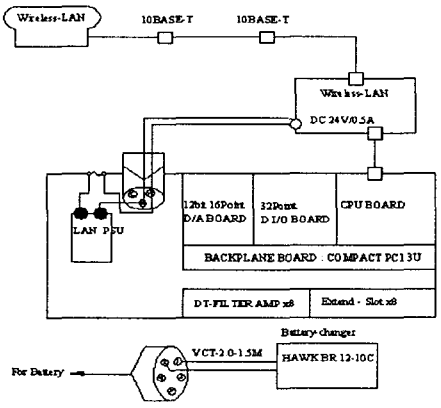


Fig. 3 (b) Circuit Diagram of sensing signal receiving part in data processing unit

3.1 화상 모니터링 시스템

판토그라프의 이선(가선과 접촉 중 분리되는 현상)과 아크 발생은 가선에 손상을 줄 수 있고, 열차에 공급되는 전력의 품질을 떨어뜨려 열차의 추진 · 전력계통에도 악영향을 미치므로 판토그라프의 특이한 거동 여부와 아크 발생에 대해서는 육안 확인 등 유효한 확인방법이 필요하였다. 따라서 가선에 대한 판토그라프의 추종성을 검증하고 실시간 거동 특성을 육안으로 확인하기 위하여 집전장치의 거동을 특정 주행시간/거리 대역에서 분석할 수 있도록 화상모니터링시스템을 구축하였다.

화상 모니터링 시스템은 Fig. 2, 4와 같이 열차 지붕 위에 설치한 카메라로 촬영한 화상 데이터와 차축으로부터 전송되는 열차의 주행속도 및 거리(Kilometer Post) 데이터를 VXI 시스템에서 수집, 가시화하면서 동시에 이 화상데이터를 비디오에 녹화할 수 있는 시스템이다.

Fig. 4는 실제 열차 지붕에 설치된 비디오 카메라와 야간 조명장치를, Fig. 5는 실내에 구축된 화상데이터 수집, 처리 및 저장용 화상모니터링 시스템을 보여준다.

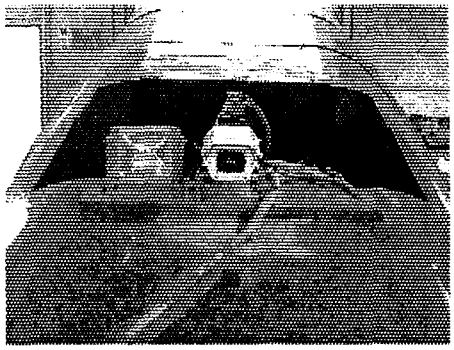


Fig. 4 Camera and light on the roof of motorized trailer car

Fig. 5 Graphic data processing system

3.2 물리량 계측 시스템

집전장치 물리량 계측 시스템을 통해 1차로 계측한 항목은 가선에 대한 집전판의 접촉력과 상하 가속도, 그리고 열차 주행 중의 공기유동에 의해 발생하는 양력 값이다. 판토그라프 집전판에 설치된 14개 항목의 센서를 통해 지붕에서 측정된 물리량 아날로그 신호들은 송신부 컴퓨터에서 디지털 신호로 A/D된 후, Fig. 6에 보이는 텔레메트리 송신부에서 무선전파 신호로 텔레메트리 수신부로 전달되고 LAN 케이블을 통해 Fig. 7에 보이는 데이터 수신/처리부에 전송되어 채널별 디지털 신호를 D/A 처리한 뒤, VXI 시스템에서 분석하였다.

3.2.1 집전판 가속도 계측

고속열차 주행 중 집전판의 가속도를 계측하기 위한

가속도계를 Fig. 8, 9와 같이 부착하고 집전판의 상·하 가속도 운동은 좌/우 - 빔(Cross Bar), 좌/우 - Al Bar 및 플런저 부 가속도 등의 5개 채널별 신호로 구분되어 텔레메트리를 통해 송·수신 처리하였으며, 물리량 계측에 사용한 가속도계(Acceleration Sensor)의 정격과 성능사양은 Table 2와 같았다.

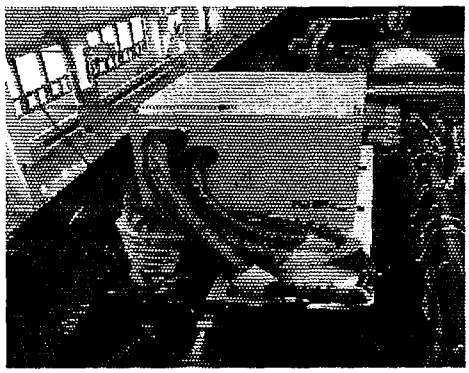


Fig. 6 telemetry of data transmitting part

Fig. 7 Signal receiving part of telemetry and VXI processing system

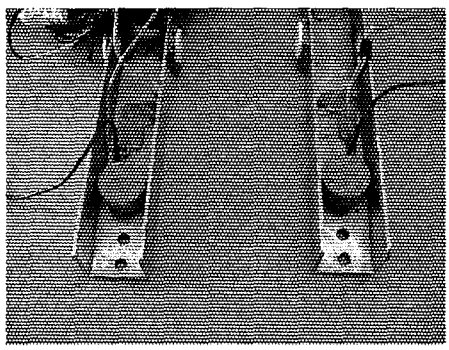


Fig. 8 Acceleration sensor in Pan Head

3.2.2 집전판 양력 계측

판토그라프의 집전판은 주 스프링의 반력에 의한 수직 방향의 정적 압상력과 고속 주행 시 열차 주위의 공기 유동으로 인해 형성되는 양력의 영향이 합해져 가선과 마찰, 접촉한다. 양력은 공기역학 분야에서 이미 연구된 바와 같이 통상 이동하는 열차의 속도에 따라 변화하며 물체를 부양 또는 하강시키는 외력으로서, 정적 압상력과 함께 집전판의 접촉력을 형성하며, 집전판과 가선간의 상호작용과 마찰력에 따른 마모 등에 영향을 미친다.

집전판의 양력 계측을 위해 Fig. 10과 같이 차체지붕에 설치된 인장력 로드셀에 Fig. 11과 같이 와이어 로프로 집전판을 전차선 아래 10cm 높이까지 상승되도록 구속하고, 열차의 고속 주행시 집전판에 부가되는 압상력을 와이어 로프를 통해 로드셀에 전달되도록 하였다.

본 측정에서는 열차가 0~200km/h의 속도로 주행하는 과정에서 열차 전/후 방향 주행 시, 전/후방 집전판에 별도로 연결한 와이어에 인가된 인장력 신호를 각각의 로드셀로 측정하여 분석에 이용하였으며, 인장 로드셀의 정격과 성능사양은 Table 2에 제시하였다.

전/후 동력차의 판토그라프를 동시에 상승시켜 와이어 로프로 구속하는 양력계측 시험은 큰 위험을 초래할 수 있는 비정상 운행모드의 시험이므로 1회 계측만을 수행하였다.

Table 2 Specifications of measuring sensors

Description	Acceleration Sensor	Load Cell
최대 정격	196.1 m/sec^2	980 N
정격 출력	1000 $\mu\varepsilon$	4000 $\mu\varepsilon$
AMP Unit Range	500 $\mu\varepsilon$	5000 $\mu\varepsilon$
Out put	4.9V	4.9V
Slope	20 m/sec^2/.9V	250 N/V

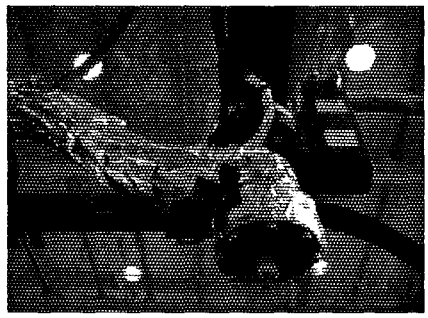


Fig. 9 Acceleration sensor and load cell for spring force measurement

3.2.3 접촉력 계측

판토그라프의 집전판과 가선의 접촉력은 Fig. 12의

개념도에서 다음의 평형식으로 구해진다[3].

$$F_i = -F_c + F_a + F_s \quad (1)$$

여기서, F_i = 관성력(inertia force)

F_c = 접촉력(contact force)

F_a = 양력(lifting force)

F_s = 스프링 반력(spring force) 압상력

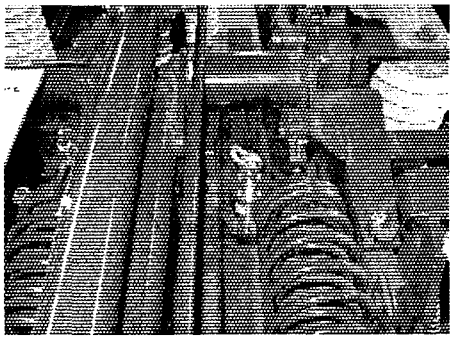


Fig. 10 Load cell for lifting force measurement

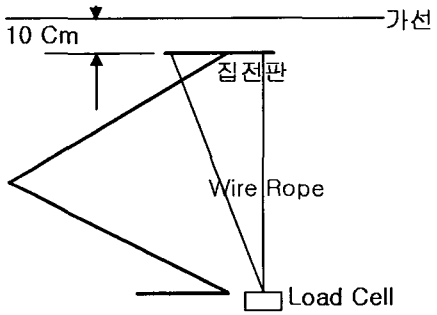


Fig. 11 Connection of Pan Head and lifting force load cell

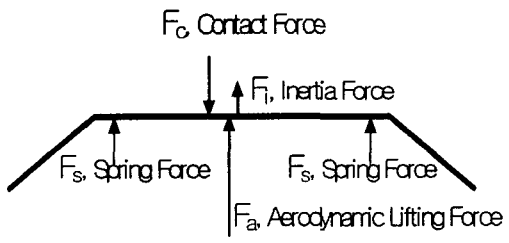


Fig. 12 Equilibrium condition of Pan Head

판토그라프 집전판의 가속도 운동에 따른 관성력은 평형 위치를 중심으로 상·하로 변화하므로 평균값은 결과적으로는 "0"으로 볼 수 있으므로 (1)식으로부터 평균 접촉력은 다음 식으로 표현할 수 있다[3][4].

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

여기서, $F_{c(mean)}$ = 집전판의 평균 접촉력

또한 열차의 고속주행 중에 집전판이 가선에 접촉하는 평균 접촉력은 스프링 반력과 공기유동 영향으로 인한 양력의 합으로 나타나는데, 속도에 따른 양력의 변화는 다음 식으로 표현되는 것으로 이미 연구된 바 있다[4].

$$F_a = kV^2 \ (\mathrm{N}) \quad (3)$$

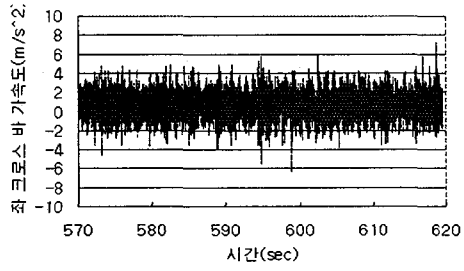
위 식 (3)에서, k는 양력계수로서 열차가 균일 속도로 주행할 때 집전판이 일정시간 동안 받는 평균 양력으로부터 계산된다.

본 연구에서는 한국형 고속전철 차량이 200km/h의 속도로 주행할 때의 양력을 계측해 실제 양력계수 k값을 찾아 제시하였고, 속도에 따른 전/후방 집전판의 양력이 평균접촉력에 대해 기여하는 경향을 분석할 수 있었다.

4. 집전장치의 성능계측 결과

4.1 집전판 가속도 계측 결과

한국형 고속전철 차량이 150km/h의 속도로 주행하는 중에 좌/우 빔(크로스바) 에서 계측한 가속도 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 대체적으로 좌우에서 상하방향 가속도 값이 유사한 경향을 보이고 있으나, 좌/우 빔에서 서로 다른 시점에서 Peak값을 갖는 거동을 보이기도 한다. 이는 가선의 Stagger(전차선 - 집전판간 고른 접촉을 위해 궤도중심을 기준으로 지그재그로 설치된 형식)에 따라, 집전판이 전차선에 접촉하는 점이 좌우로 판 위를 이동, 접촉하는 요인과 차량의 횡 방향 동요로부터 판토그라프 기저면에 전달되는 편심된 외력에 의한 크로스바의 좌/우 응답이 다소 다르게 나타난 때문이라 추정된다. 상하 방향의 가속도 크기는 전체적으로 +3.0 ~ -1.7 m/sec^2 범위로 매우 안정적인 거동을 보이며 상방향 가속도가 하방향 가속도에 비해 상대적으로 큰 값을 보이는 것은 판토그라프의 스프링 반력에 의한 정적 압상력이 상방향으로 작용하는 구조적 특성 때문인 것으로 판단되었다.



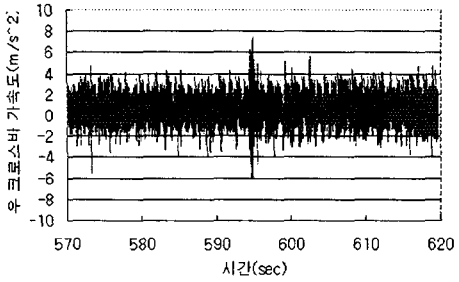


Fig. 13 Measured acceleration in Cross Bar

4.2 압상력 계측 결과

4.2.1 전/후방 집전판별 작용 압상력과 총 압상력

한국형 고속전철용 판토그라프의 집전판에 작용하는 양력에 대하여 앞 **3.2.2**절과 Fig. 10, 11에 설명된 방법으로 시험한 결과, 아래 Fig. 14 (a), (b)와 같은 양력측정 결과를 얻을 수 있었다.

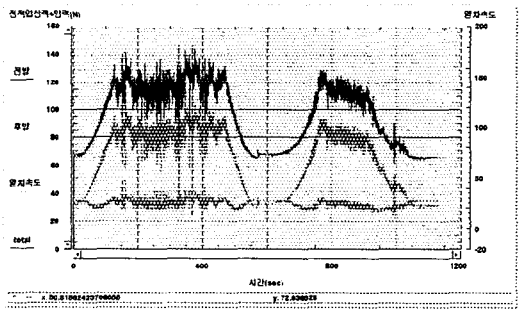


Fig. 14 (a) Measured Aerodynamic force in Pan Head during northward direction running

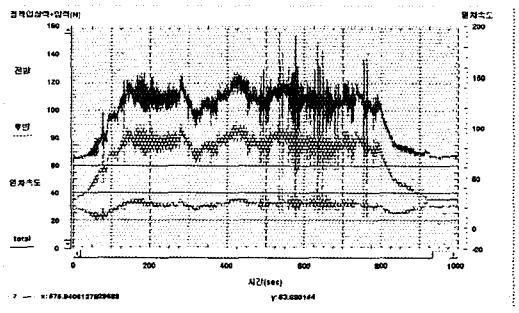


Fig. 14 (b) Measured Aerodynamic force in Pan Head during southward direction running

위의 Fig. 14 (a), (b) 각각의 결과에서 위쪽 총 압상력 파형(Red) 하단에 나타난 2개의 압상력 파형은 별도의 와이어 로프로 각 로드셀과 전/후방 집전판을 연결하고 각 집전판에 작용한 각각의 압상력을 측정해 구분 표시한 결과이며, 후방 집전판의 초기 압상력 값이 전방판에 비해 5~8N 차이로 측정이 시작된 것은 운행 전의 시험준비 과정에서 후방판을 묶은 와이어 로프가 전방보다 다소 느슨하게 로드셀에 연결된 때문으로 추정되었다. 그러나 총 압상력은 전/후방 집전판 헤드의 압상력을 합해 얻어지므로 본 연구의 측정결과는 큰 영향을 받지 않았다.

4.2.2 열차속도 변화에 따른 각 집전판별 거동특성과 양력에 대한 기여경향 분석

한국형 고속전철차량 집전장치는 Arm의 상부에 1쌍의 집전판이 가선과의 접촉력을 분담하는 구조로서, 일체형으로 된 전/후방 집전판 헤드는 핀 구조로 조립되어 일정한 범위까지는 회전 자유도를 가지며 부가되는 편중하중을 유연하게 완충, 분담하는 구조로 되어 있다.

본 시험 연구를 통해 얻은 Fig. 14 (a), (b)의 측정 결과로부터 한국형 고속전철 집전장치의 진동특성과 양력으로 인한 거동의 변화는 다음과 같은 일정 경향을 가지는 점에 주목하여 동적 특성을 분석하여 보았다.

양력측정 결과 위의 Fig. 14 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 열차가 북쪽방향으로 주행할 때(a), 전방 집전판의 거동 경향(Green파형)은 속도 200km/h에 도달할 때까지 열차속도에 관계없이 출발시의 초기 값(스프링에 의한 초기 정적 압상력) 35N을 기준으로 ±4N 이내의 미세한 변동폭은 보이지만, 거의 동일한 크기로 압상력의 변화가 없는 반면, 후방 집전판의 거동(Pink 파형)은 열차의 속도(Cyan 파형)가 증가함에 따라 속도변화에 일정한 추종관계를 가지며 압상력이 증가하는 경향을 가진다.

또한 집전장치에 인가되는 총 압상력의 크기와 변화 경향(Red 파형)은 후방 집전판 압상력의 크기와 변화 경향(Pink 파형)에만 절대적으로 영향을 받는 관계를 가지며, 이러한 특성은 공기역학 관점에서 풍동시험이나 공기유동장 해석 등을 통한 정확한 원인규명 등의 연구가 요구된다.

이러한 거동 특성은 시험열차의 주행방향을 바꾸어 위 (a) 조건과 집전판의 전/후 위치를 반대로 시험 측정한 결과 Fig. 14 (b)에서도 같은 경향이 측정되었음을 볼 때, 본 연구의 측정결과는 신뢰할 만한 실험 결과로 판단되며, 이 결과를 근거로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 한국형 고속전철 차량이 200km/h까지 고속주행 시, 열차속도 증가에 따라 공기유동으로 집전판에 유발되는 동적 압상력은 72~75% 이상의 힘이 열차 진행방향의 후방 집전판에 편중되어 작용하는 경향을 가진다.
2) 또한 이 압상력 변화 경향은 열차속도의 변화에 따라 양력도 포물선 형태의 2차 함수관계를 가지며 변화한다는 선행연구의 이론을 실제 주행하는 고속열차에서

실험적으로 확인하였으며, 고유 양력계수 값은 다르나 고속전철 집전장치에도 동일하게 적용할 수 있다[4]

3) 셋째로, 앞 **3.2.3**절의 이론식 (2), (3)에 근거할 때, 집전장치가 가선에 접촉하는 평균 접촉력은 ①스프링 반력에 의한 정적 압상력과, ②공기유동과 집전장치의 형상에 영향 받는 동적 압상력의 합력으로 표시될 수 있으며, 한국형 고속전철 차량이 200km/h까지 주행할 때 가지는 집전장치의 실제 고유 양력계수(k)값은 5.96×10^{-4} 인 것으로 규명되었다. 또한, 이 계수 값을 적용할 경우, 한국형 고속전철용 집전장치의 중요한 특성인 평균 접촉력과 변화 경향은 열차속도에 따라 아래와 같은 실험적 함수식으로 표시됨을 알 수 있었다.

$$F_C(mean) = F_S + 23.83(V/200)^2 \qquad (4)$$

여기서, $F_C(mean)$ = 평균 접촉력 (contact force) (N)

F_S = 정적 압상력 (spring force) (N)

V = 열차 주행속도 (0~250km/h대역) (km/h)

5. 결 론

본 연구에서는 고속전철용 집전장치의 성능 평가를 위해 G7 사업을 통해 자체 개발한 전용 계측시스템의 구성 내용과, 이를 이용하여 한국형 고속전철 차량의 고속본선 시운전 주행시험 과정에서 측정한 집전장치의 동적 특성을 평가하였으며, 측정 결과의 분석을 통해 집전장치의 설계요소인 양력계수와 열차의 속도변화에 따른 평균 접촉력 변화함수를 제시하였다.

그 내용으로서, G7 고속전철 기술개발사업을 통해서 국내 연구기관/산업계 기술진이 공동으로 자체 개발한 고속전철용 집전장치의 집전성능 측정과 평가를 위해 동적 거동에 대한 실시간 화상 모니터링과 14개 항목의 물리량 측정이 가능한 전용 계측시스템을 개발한 내용과 실제 가속도, 압상력 계측 방법을 보였으며, 실시간 화상 모니터링 및 물리량 계측이 가능한 계측시스템을 통해 고속열차 운행 중 판토그라프의 이선, 아크 발생 유무, 집전판 가속도, 양력 및 압상력 등을 측정, 분석하였고, 집전장치의 성능 및 가선과의 인터페이스 성능을 평가함으로서 본 집전장치 계측 시스템의 유용성을 입증할 수 있었다.

둘째로, 이러한 계측시스템을 이용해 측정한 고속열차 주행 중의 집전장치의 가속도 거동 특성, 열차속도의 변화에 따른 전/후방 집전판 및 총 압상력의 변화경향, 양력의 영향 등에 대한 평가의견을 제시하였다.

셋째로, 이 측정 데이터의 분석을 통해 얻은 결론으로, 한국형 고속전철용 집전장치에 있어서 동적 압상력에 가장 중요한 영향 인자로 작용하는 동 집전장치의 고유 양력계수(k)값을 규명, 제시하였고 이 계수를 적용한 경우 열차속도에 따른 집전장치의 평균 접촉력과 변화 경향을 나타낼 수 있는 실험적 함수식을 제시하였다.

본 실험연구의 결과는, 앞으로도 계속 진행될 한국형 고속전철시스템의 운행속도 350km/h 대역까지 고속본선에서 증속 시운전 주행시험과 개발시스템의 안정화 및 신뢰성 향상 연구에 활용될 수 있으며, 고속전철용 집전장치의 성능개선 연구와 고속열차용 신 모델·제품 집전장치의 설계 과정에 필요한 설계·성능관련 참고자료로 활용이 가능할 것으로 보인다.

앞으로도 본 연구의 결과에 연계하여, 속도 300km/h부터 350km/h속도 대역에서의 고속철도 시스템 집전장치의 진동·거동 특성과 변화 경향에 대하여 다양한 관점에서의 분석적 연구와 비교 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. "G7 고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발(Ⅰ,Ⅱ)" 연차보고서 (01-II-1-0-1), 한국철도기술연구원, 2002.
2. "G7 고속전철시스템 기본사양", 한국철도기술연구원, 1998.
3. "Study on the Method of Measuring the Contact Force between Pantograph and Contact Wire", M. Ikeda and T. Usuda, , RTRI Report Vol. 14, No. 6, 2000.
4. "Qualification Test Procedure Train - set Pantograph Test", Korea High Speed Rail, 2001.
5. "고속전철 집전장치의 성능계측 결과 및 분석" 서승일/목진용 외, 철도학회 춘계학술대회 논문집", 2003