동적 접촉력 측정을 통한 차세대 고속열차의 집전성능 분석

Analysis of the Current Collection Quality for Next Generation High-Speed Trains with Measurements of the Dynamic Contact Force

오혁근* · 지형민 · 김영국 · 김석원

Hyuck Keun Oh · Hyung Min Ji · Young Guk Kim · Seogwon Kim

Abstract The contact force between the pantograph and the catenary is a key factor determining the current collection quality, as they can ensure stable electrical power to the train. In this study, we analyzed the dynamic contact force for HEMU-430X depending on the train speed. It was confirmed through the results that the standard deviation of the contact force increases with an increase in the train speed. It was also verified that the span of the catenary system is a very important factor with regard to the contact force when analyzed with frequency analysis. To secure stable power in speed that exceeds 400km/h, the statistical variation of the contact force should be minimized. To realize this, the catenary tension was increased and the mass of the pan-head was decreased. The ensuing effects were then quantitatively analyzed in terms of the contact force. In addition, the differences in the contact force between a tunnel and an open field were analyzed based on a frequency analysis.

Keywords : High speed train, Pantograph, Contact force, Current collection quality

초 록 판토티그래프와 전차선간의 접촉력 특성은 차량에 대한 안정적 전원공급 특성인 집전성능을 평가하는 중요한 지표이다. 본 연구에서는 HEMU-430X 판토티그래프의 동적 접촉력 특성을 속도에 따라 분석하였다. 그 결과 판토티그래프의 접촉력 표준편차가 속도에 따라 증가함을 확인하였고, 주파수 분석을 통하여 전차선의 경간이 접촉력에 매우 큰 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. 또한 400km/h 이상의 속도에서 안정적인 집전특성을 확보하려면 판토티그래프와 가선간의 접촉력 표준편차가 작아져야 한다. 이를 위하여 전차선 장력증가, 판토티그래프 집전판 경량화 등의 방안을 적용하였으며, 이에 대한 접촉력 측면에서의 효과를 정량적으로 분석하였다. 또한 개활지와 터널에서의 접촉력 특성의 차이에 대하여서도 주파수 분석을 통해서 분석하였다.

주요어 : 고속철도, 판토티그래프, 접촉력, 집전성능

1. 서 론

최근 친환경 기반 기술 발전의 방향에 가장 부합하는 대표적인 지상 교통수단의 하나가 철도이다. 철도는 안전성과 정시성이 매우 뛰어나 예전부터 승객과 화물의 중장거리 운송에 큰 역할을 담당하여 왔으며, 특히 더 많은 인적 및 물적 자원을 수송하고자 하는 최근의 필요는 고속철도의 빠른 성장을 불러왔다.

지금까지 전 세계적으로 300km/h 이상의 속도로 주행할 수 있는 고속철도가 제작 및 운행 되어 왔으며 최근에는 철도 선진국들을 필두로 이보다 더 빠른 고속철도를 만들기 위한 노력이 지속 되고 있다.

국내에서도 이런 세계적인 추세에 뒤처지지 않고자 최고 속도 430km/h, 운영속도 370km/h를 목표로 하는 동력 분산식 차세대고속열차(HEMU-430X)가 제작되었다. 개발차량은

증속시험을 통하여 2013년 3월에 421.4km/h의 최고속도를 달성하였고, 현재 진행중인 시스템 및 부품의 안정화 시험을 통하여 2015년 누적 주행거리 10만 km를 달성할 예정이다.

전 세계적으로 고속열차는 대부분이 전기 철도차량으로 운행 되며 철도 차량의 전력공급은 케이블로 이루어진 가선과 차량 지붕에 장착된 판토티그래프(집전장치)의 상호 접촉을 통해 이루어진다. 가선과 판토티그래프의 상호 접촉 시 판토티그래프에 작용하는 압상력, 가선의 진동, 파동전파, 바람의 영향 등 각종 외력이 작용하여 지는데 이러한 외력의 영향에 관계없이 안정적인 집전성능을 유지할 수 있어야 안정적인 운영속도 유지 및 최고속도를 달성 할 수 있다[1]. 특히 시속 300km/h 이상의 고속에서는 접촉력의 과도한 증가와 동시에 이전을 야기시킬 수 있는 문제가 생길 수 있으며 이는 시스템에 매우 심각한 전기, 기계적, 손상을 입힐 수도 있기에 집전성능의 정확한 검증은 필수이다.

본 논문에서는 1. 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 집전성능(접촉력, 이선율)이 증속에 따라 어떻게 변하는지 동적 접촉력 측정 시험을 통해 알아 보고 2. 안정적인 집전성능

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5216, E-mail : hkoh@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.157

을 확보하기 위한 방안의 적용효과에 대하여 정량적으로 비교 분석하였다. 3. 마지막으로 터널에서의 접촉력 특성 변화의 원인을 주파수 분석을 통하여 확인하였다.

2. 집전 성능 평가

2.1 관련규격 검토 및 평가기준 선정

판토그래프 시험과 관련된 각종 관련 시험규격은 UIC 794-O [2], BS EN 50119 [3], BS EN 50367 [4] 등이 있는데, 각각의 시험규격을 요약하면 다음과 같다.

UIC 794-O는 유럽 고속선에서 적용되는 규정으로서 300km/h 이상의 판토그래프 접촉력과 관련한 내용에서는 최고속도에서 공력에 의한 평균접촉력(F_{mean})이 120N 또는 200N 이하로 규제하고 있으며, F_{mean} (평균접촉력) - 3σ (표준편차의 3배)가 0N 이상 또는 스페인이나 프랑스의 경우에는 40N 이상을 제한값으로 제시하고 있다.

EN 50119에서는 200km/h 이상의 속도에서 이선과 관련하여 $F_{mean} - 3\sigma > 0$ 로 규정하고 있고, 통계적 최대 접촉력($F_{mean} + 3\sigma$)은 350N으로 제한하고 있다. 또한 본 규격에서는 기계적인 접촉력 계 측이 불가능 한 경우 이선율로 판단토록 하고 있으며, 이는 아크의 지속시간으로 결정되고 있다.

EN 50367의 경우 역시 접촉력과 아크 문제로 인해 가선과 판토그래프 사이의 상호작용에 대한 특성을 제한하고 있으며, 평균 접촉력에 대하여 속도에 따른 목표치를 제시하고 있다.

또한 KTX 도입 및 경부고속선 건설 시 적용된 기준에서는 평균접촉력은 200N 이하, 최대 전차선 압상량은 200mm 이하가 되도록 규정하고 있다.

본 논문에서는 상기의 규정들을 바탕으로 Table 1과 같이 집전성능에 대한 평가기준들을 마련하였고, 동적 접촉력 측정 시험을 통하여 차세대 고속열차(HEMU-430X)의 집전성능을 분석 하였다.

Table 1 Criteria for current collection quality

List	Criteria	Remarks
Mean contact force (F_{mean})	Less than 200N	KTX QT
Statistical minimum contact force ($F_{mean} - 3\sigma$)	More than 0N	UIC 794-O [2]
Statistical maximum contact force ($F_{mean} + 3\sigma$)	Less than 350N	EN 50119 [3]
Uplift	200mm	Gyeongbu high speed line requirements

2.2 동적 접촉력 측정시험

2.2.1 측정시험 방법의 원리

판토그래프가 가선과 접촉할 때 작용하는 접촉력($F_{contact}$)

Fig. 1 The force equilibrium state of the current collector plate and the catenary

은 판토그래프를 위로 밀어 올려 가선에 접촉시키는 정적압상력(F_{static})과 열차속도의 제곱에 비례하여 증가하는 공기양력(F_{aero}) 그리고 가속도에 의한 관성력($F_{inertia}$)의 합력으로 이루어지고 식 (1)과 같이 계산이 된다. 따라서 Fig. 1과 같이 열차의 운행 중 측정된 집전판 하부에 설치된 하중센서의 작용력과 가속도계를 이용하여 측정한 관성력 그리고 별도의 공력특성시험 결과를 통하여 측정된 양력값의 합으로 접촉력으로 판단한다[5].

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

또한 평균접촉력은 측정된 접촉력의 산술평균을 통해서 측정하고, 다음의 식 (2)와 같이 계산한다.

$$F_{c(mean)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_c \quad (2)$$

여기서 $F_{c(mean)}$ 은 집전판과 전차선 간 평균 접촉력이다.

2.2.2 시험방법 및 분석방법

가) 열차 출발 전 정차상태에서 집전장치를 상승시켜 전차선에 접촉시키고 계측된 접촉력이 정적압상력 범위 이내 인지 확인한 후 주행시험을 시작한다.

나) 접촉력 측정 시작시점부터 전차선과 접촉하는 집전판 하부의 Force Sensor 4개소의 작용력과 가속도를 측정하여 열차의 주행속도 측정값과 동기화시켜 저장한다.

다) 전 구간 측정 데이터에서 개활지 주행 구간 데이터를 추출하고 20Hz 저역통과 필터를 적용하여 측정된 접촉력에 공력특성시험 결과를 추가하여 전체 접촉력을 산출한다.

2.2.3 계측 센서 동적 보정 시험

입력접촉력 대비 측정접촉력이 잘 일치하도록 접촉력 계측센서의 동적 보정을 국제규격인 EN 50317[6]에 근거하여 실시 하였다. 이 때 사용된 계측센서는 작용력을 측정할 수 있는 스트레인게이지 내장형 하중센서[7]와 관성력을 측정할 수 있는 가속도 센서이며 각각 4곳의 집전판 지지점에 설치하였다. 동적보정을 위하여 Fig. 2 처럼 한국철도기술원 구원 MTS 장비를 이용하여 0.5~20Hz까지 평균 압상력 150N으로 정현파 가진을 실시하였고, 가진 위치는 집전판 중앙지점 그리고 전차선 편위를 고려하여 좌,우 편측 200mm 지점으로 하여 시험을 실시하였다. 이 때 입력접촉력의 정확한 측정을 위하여 MTS 장비의 액츄에이터 접촉부에 로드셀 2개를 각각의 집전판 위치에 설치하였다. 센서의 동적

Fig. 2 Dynamic calibration test of a pantograph sensor using MTS equipment

보정은 가진시험 결과를 분석하여 입력접촉력 대비 측정접촉력이 전 주파수 대역에서 잘 일치하도록 각각의 로드셀 및 가속도센서에 공급할 수 있는 적절한 계수를 찾아내는 과정을 거친다. 그 결과 동적보정 전에는 Fig. 3(a) 처럼 입력접촉력 대비 측정접촉력의 차이가 발생 하였으나, 동적 보정을 실시 한 후는 Fig. 3(b)와 Table 2와 같이 EN50317에서 요구하는 정밀도를 만족하는 것을 알 수 있다.

2.3 HEMU-430X 집전성능 분석 결과

2.3.1 속도에 따른 접촉력 분석

판토크래프의 속도별 접촉력 측정은 HEMU-430X의 증속 시험 시에 수행이 되었으며, 상세 측정방법 및 분석방법은

Table 2 The dynamic calibration results based on EN50317

Position	Parameter	Accuracy (%)	
		Test results	Limit
Center	0-10Hz	Mean force	92.902
		Standard deviation	93.381
	0-20Hz	Mean force	90.869
		Standard deviation	93.898
Left	0-10Hz	Mean force	92.872
		Standard deviation	92.405
	0-20Hz	Mean force	93.158
		Standard deviation	92.750
Right	0-10Hz	Mean force	94.505
		Standard deviation	93.404
	0-20Hz	Mean force	93.841
		Standard deviation	94.380

2.2.2절에 설명된 바와 같다. 증속시험 구간은 경부고속철도 2단계 구간 중 울산(KP365)-고모(KP295) 구간에서 수행되었으며, 매 증속시험마다 Fig. 4(a)와 같이 전체 구간에 대한 접촉력을 측정 한 후, 최고속도 구간에 해당하는 부분만을 Fig. 4(b)처럼 추출하여 상세분석(평균접촉력, 최대/최소 접촉력)을 수행하였다. Fig. 4(b)는 시속 421.4km/h 최고속

Fig. 3 (a) Before calibration, 10Hz, center, (b) after calibration, 10Hz, center

Fig. 4 (a) Contact force characteristic of the overall test section, (b) contact force characteristic of the specific section

Fig. 5 Variation of the contact force characteristics depending on the train speed

도 달성 시 해당속도 구간의 접촉력 측정결과이다. Fig 5는 Fig. 4(b)와 같은 최고 속도구간의 접촉력 특성을 각 속도대역 별로 정리하여 나타낸 결과이다. 전반적으로 속도가 증가함에 따라 평균접촉력 및 최대, 최소 접촉력이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 평균접촉력이 속도가 증가함에 따라 수렴하는 경향을 보이고 있는데, 이는 평균접촉력이 규정을 넘지 않도록 정적 압상력을 조정한 영향이다. 360km/h~420km/h까지의 측정결과를 종합해 보면 평균 접촉력(F_{mean})은 접촉력 평가기준인(200N 이하)을 잘 만족하지만 통계적 최대 접촉력($F_{mean}+3\sigma$)과, 통계적 최소 접촉력($F_{mean} - 3\sigma$)은 한계치에 거의 근접함을 볼 수 있다. 이는 바꿔 말하면 평균 접촉력(F_{mean})은 양호하나 접촉력 표준편차(σ)가 속도가 증가함에 따라 커진다고 볼 수 있으며, HEMU-430X 차량의 안정적인 집전성능을 유지하기 위해서는 접촉력 표준편차의 감소가 매우 중요하였다.

아래의 Fig. 6은 속도가 증가 할 때 접촉력 표준편차의 변화를 나타낸 그래프이며, 접촉력 표준편차가 속도에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 HEMU-430X의 접촉력 표준편차 특성을 현재 영업중인 KTX-산천과 비교하기 위하여 동일 장력(23kN)에서 시험을 실시하였다. 기존에 20kN으로 설치된 경부고속선의 장력을 증속 시험을 위하여 23kN으로 증가 시켜 시험을 실시 하였는데 장력 증가 부분에 대한 설명은 뒤의 '3.1 집전성능 향상 방안' 부분에서 다룬다. 비교 결과 Fig. 6에서와 같이 HEMU-430X의 접촉력 표준편차가

Fig. 6 Statistical variation of the contact force for HEMU-430X and its comparison with KTX Sancheon

Fig. 7 Velocity profile of the test section depending on KP

산천 대비 약 3N정도 개선효과를 보임을 알 수 있다.

한편 Fig. 6을 살펴보면 360km/h~385km/h 속도 대역에서의 접촉력 표준편차가 속도에 비하여 비교적 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서 보여지듯이 증속에 따라 최고속도지점의 KP가 변하였고, 이로 인하여 해당 속도지점의 전차선 경간이 다르기 때문이라고 판단하였다. 일반적으로 전차선 경간이 길수록 전차선의 동적 강성이 약해지며[8] 이로 인하여 접촉력의 변동이 커질 수 있다. 또한 실제로 360km/h~385km/h 최고속도 구간의 경간은 63m였으며, 400km/h 이상 지점에서는 45m로 상대적으로 짧았다. 그러나 실제로 경간에 의한 영향이 주요한지 확인하기 위하여 각각의 속도대역 별 접촉력에 대한 주파수 분석을 다음 절에서 수행하였고 그 결과를 해당구간의 경간데이터와 비교하였다. 한편 평균접촉력의 경우는 열차속도에 따른 공기역학적 양력과 판토틀그래프에 작용하는 정적압상력의 영향을 강하게 받기 때문에 경간에 의한 영향은 계측된 결과상에서는 미미하였다.

2.3.2 접촉력 주파수 분석

판토틀그래프 접촉력 표준편차의 증가원인을 알아보기 위하여 판토틀그래프의 접촉력에 대하여 주파수(FFT) 분석을 수행하였다. Fig. 8(a)는 300km/h 주행 시 접촉력의 0~100Hz까지의 주파수분석 결과이며 Fig. 8(b)는 이를 바탕으로 0~20Hz까지 좀 더 상세하게 분석한 결과이다. 300km/h 개

Fig. 8 (a) FFT result of the contact force (300km/h), (b) enlarged view of the FFT results (0~20Hz)

활지 주행 데이터를 이용하여 분석 한 결과 1.35Hz에서 가장 큰 진동성분이 나오며, 5.5Hz, 7.5Hz, 12Hz의 진동들이 접촉력에 기여하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 보이는 60Hz는 전원 노이즈이다. 전차선의 경간(63m)과 열차속도(300km/h→83m/s)를 고려하였을 때 경간에 의한 진동주파수는 1.3Hz 정도이다. 따라서 판토틀그래프 접촉력 진동의 가장 큰 성분인 1.35Hz 진동은 경간에 의한 영향이라고 판단된다. 이는 또한 Fig. 6의 접촉력 표준편차가 속도에 따라서 선형적으로 증가한다는 것 역시 경간에 의한 영향이 매우 큼을 설명할 수 있는 부분이다. 또한 주파수 분석에서 주

요한 기여도를 보이는 12Hz 성분은 드로퍼를 통과하면서 생기는 진동 성분이라 판단되는데, 이는 63m 경간에서 드로퍼간의 간격이 6.75m로 300km/h 주행 시 주파수로 환산하면 12.3Hz이기 때문이다. 나머지 주파수 성분들(5.5Hz, 7.5Hz)은 동적보정시험을 통하여 확인된 Fig. 9의 리셉턴스 분석결과와 비교해보면 판토틀그래프의 고유진동수 성분으로 추정된다. Fig. 10은 410km/h 및 380km/h 주행시 접촉력 특성에 대한 주파수 분석결과이다. 410km/h 주행 시 주파수 분석결과(Fig. 10(a))를 살펴보면 2.52Hz에서 가장 큰 진동성분을 가지고 있음을 알 수 있는데, 열차속도(410km/h→114m/s)와 경간(45m)을 고려한 주파수가 2.53Hz로서 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 63m 경간구간에서 최고속도를 기록했던 380km/h 주행 시 접촉력 주파수 분석결과(Fig. 10(b))를 살펴보면 최대 진동성분이 1.71Hz에서 발생함을 알 수 있고 이는 열차속도(380km/h→106m/s)와 경간길이(63m) 반영 시 주파수인 1.67Hz와 역시 잘 일치한다. 따라서 Fig. 6에서 보이는 400km/h 이상 속도대역에서 접촉력 표준편차 증가 경향의 둔화현상은 경간 감소의 영향임을 다시 한번 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10(a)의 두번째 피크주파수 16.1Hz와 Fig. 10(b)의 15.0Hz는 드로퍼 간격(6.75m)에 의한 주파수 성분인 16.8Hz(410km/h)와 15.6Hz(380km/h)와 비교적 잘 일치한다는 점에서 드로퍼에 의한 전차선 강성 변화의 영향임을 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 9 Receptance analysis of the pantograph

Fig. 10 (a) FFT result of the contact force (410km/h, span 45m), (b) FFT result of the contact force (380km/h, span 63m)

3. 집전성능 향상을 위한 방안 및 효과분석

3.1 집전성능 향상 방안

집전성능 분석결과에서 언급 하였듯이 고속에서 안정적인 집전성능 확보를 위해서는 접촉력 표준편차 감소가 필수적이다. 접촉력 표준편차의 증가 원인을 생각해 보면 고속으로 주행함에 따라 판토타그래프의 이동속도(차량의 이동속도)가 전차선의 파동 전파속도에 근접하게 되고, 그 결과 판토타그래프가 전차선의 진동에 더 민감하게 반응하게 되면서 접촉력 표준편차가 증가하게 된다고 볼 수 있다[3]. 이로 인하여 일반적으로 차량의 운영속도는 Table 3과 같이 파동전파속도의 70% 이하로 운행하는 것이 권장된다[3,9].

경부고속선의 20kN 장력상태에서 파동전파속도는 441km/h로서, 400km/h 이상 운행 시 파동전파속도의 90%이상에 이르게 되어 심각한 이선의 발생이 우려되었다. 또한 전차선 장력 20kN에서 350km/h로 시운전한 결과 최소접촉력 7N, 최대접촉력 340N으로 한계에 근접하였다. 따라서 400km/h 이상의 증속 시 안정적인 집전성능 확보를 위하여 전차선 장력증가 및 집전판 경량화를 수행하였다.

3.1.1 전차선 파동전파 속도 증가: 전차선 장력조정

앞서 언급한 바와 같이 차량의 운영속도는 파동전파속도의 70% 이하로 운행하는 것이 권장된다. 따라서 현재 경부고속선 기준으로 400km/h 이상에서 접촉력의 표준편차를 개선하기 위해서는 전차선의 장력을 높일 필요가 있었다. 파동전파속도 분석을 통하여 Table 3과 같이 350km/h 운행을 위해서는 23kN의 장력인가를, 400km/h 주행을 위해서는 34kN의 장력인가가 필요함을 확인하였다. 그러나 현재 경부고속선 전차선 재질의 한계로 인하여 차세대 고속철도는 경부 고속철도 2단계 전차선로의 일부 구간 장력을 기존

Table 3 Wave propagation speed of the catenary system and recommended operation speed of the train

Specification of catenary system	Wave propagation speed (Recommended speed)		Speed ratio(β)
	UIC 799-OR	EN50119	
CdCU 20kN 1.334kg/m	441km/h		350/441 = 0.79
	297km/h	308.7km/h	400/441 = 0.91
CuMg 23kN 1.334kg/m	473km/h		350/473 = 0.74
	329 km/h	331.1km/h	400/473 = 0.85
CuSn 26kN 1.334kg/m	503km/h		350/503 = 0.70
	359 km/h	352.1km/h	400/503 = 0.80
34kN 1.334kg/m	575 km/h		350/575 = 0.61
	431 km/h	402.5km/h	400/575 = 0.70

Fig. 11 Adjustment of the catenary tension and its test section (20kN→23kN)

20kN에서 23kN으로 증가시켜서 파동전파속도의 향상 및 이선을 최소화하고자 하였다. 경부고속선의 전차선 장력조정 구간은 Fig. 11과 같이 KP 320.9~KP 301.5의 19km 구간이며, 신경주역 분기기 통과속도 상향(350km/h)에 따라서 2차레에 걸쳐서 조정이 수행되었다.

3.1.2 전차선 추종 능력 향상: 집전판 경량화

판토타그래프의 전차선 추종 능력 향상은 시스템의 질량을 감소시킴으로써 달성하였다. 시스템의 질량 감소는 관성력 감소로 이어지고 이는 가선시스템의 변화에 빠르게 반응시켜 판토타그래프의 전차선 추종 능력을 향상 시켜 줄 것이라 판단하였다. 차세대고속열차에서는 Fig. 12와 같이 1.6kg 경량화된 집전판을 M4 판토타그래프에 적용하였다. 판토타그래프 집전판의 질량이 변하면 전체적인 동적 응답 특성 또한 변하므로 '2.2.3 계측센서 동적 보정실험'에서 했던 것처럼 계측센서 동적보정(Dynamic Calibration) 실험을 한번 더 해주어 입력접촉력 대비 측정접촉력이 EN50317 규격을 만족하도록 센서값을 보정해 주었다.

Fig. 12 (a) Previous pan-head (6.4kg), (b) light-weight pan-head (4.8kg)

3.2 접촉력 개선방안 효과분석

Fig. 13은 300km/h~370km/h까지의 전차선 장력 조정 및 집전판 경량화 효과를 접촉력 표준편차에 대하여 분석한 결과이다. 이를 통하여 집전판 경량화 효과는 약 1N 수준으로 매우 미미하며, 전차선 장력조정을 통한 표준편차 개선은 약 10N 정도로서, 전차선의 장력이 접촉력 표준편차 개선에 매우 중요함을 알 수 있었다.

Fig. 14는 전차선 장력조정(20kN→23kN)의 효과를 개활지와 터널로 구분하여 분석한 결과이며 두 곳(개활지, 터널) 모두 비슷한 크기(10N)의 감소 경향을 보였다. 따라서 전차

Fig. 13 The effects of a tension adjustment and the mass of the pan-head

Fig. 14 The differences in the contact force between an open field and a tunnel

선 장력조정은 집전성능을 향상시키는 매우 중요한 방안임을 알 수 있다. 그러나 전차선 장력조정은 상당한 비용투입을 수반하기 때문에 향후 집전시스템 설계변수의 최적화를 통한 집전성능 개선 연구가 필요하다고 판단된다

4. 터널에서의 판토틀레프 접촉력 특성

4.1 개요 및 목적

Fig. 14에서 보여진 바와 같이 접촉력의 표준편차는 속도에 대하여 증가하며 특히 터널구간에서 큰 폭(~10N)으로 증가 하였다. 터널구간에서는 개활지 대비 판토틀레프에 미치는 주유동의 속도가 분명하게 높고 전차선시스템의 구성은 개활지와 동일하므로, 터널에서의 접촉력 표준편차의 증가는 유속의 증가에 따른 공력의 영향이라고 추정되나 좀 더 명확한 원인을 파악할 필요가 있다.

4.2 터널에서의 접촉력 주파수 분석

Fig. 15(a)는 터널구간에서 300km/h 주행 시 접촉력 주파수 분석결과이다. 해당구간 경간(50m)길이에 대응하는 1.65Hz

Fig. 15 (a) FFT result of the contact force in a tunnel (300km/h), (b) FFT result of the contact force in a tunnel (340km/h)

진동이 주성분이며, 개활지 대비 6.5Hz 부근에서 큰 진동이 발생하고 있음을 알 수 있고 또 다른 진동인 11.5Hz 성분은 드로퍼 통과 시 발생하는 성분으로 추정된다.

6.5Hz 진동 특성은 판토틀레프의 고유주파수 영역에도 해당이 되나 개활지 대비 그 영향이 커졌다는 점에서 6.5Hz 주파수에 해당하는 유동특성이 터널에서 나타나고 있다고 추정하였다. 이를 확인하기 위하여 동일터널에서 340km/h 주행 시 접촉력의 주파수 특성을 Fig. 15(b)에 나타내었다. Fig. 15(b)를 살펴보면 경간과 속도(340km/h→94m/s)에 대응하는 1.9Hz 진동이 주성분을 알 수 있으며, 300km/h에 나타난 6.5Hz 성분이 없어지고 9.3Hz와 13.5Hz에서 새로운 주파수 성분이 나타남을 알 수 있다. 특히 9.3Hz 주파수는 터널에서의 공력에 의한 영향으로 추정되는 데 그 이유는 13.5Hz 성분은 드로퍼에 의한 주파수 특성(14.0Hz)이기 때문이다. 따라서 300km/h에서의 6.5Hz 특성은 터널통과 시 유동특성에 의한 영향이라고 판단이 되나, 향후 유동특성을 고려한 추가적인 분석이 필요하다. 한편 HEMU-430X 판토틀레프 팬헤드의 공력에 의한 vortex shedding 주파수는 풍동 시험결과에서 약 125Hz 정도로 평가되고 있기 때문에 팬헤드 주위의 vortex shedding이 접촉력 표준편차 증가의 원인은 아닐 것으로 판단된다. 따라서 향후 터널에서의 접촉력 특성의 상세한 분석을 위해서는 터널 내 유동특성에 대한 해석 및 실험이 필요하며, 해당 유동특성의 판토틀레프 동특성에 미치는 영향에 대해서도 추후 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 차세대 한국형 고속열차(HEMU-430X)를 대상으로 수행한 접촉력 시험 결과를 이용하여 판토틀래프와 전차선간의 동적 접촉력 특성을 평가 및 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 동적 접촉력 시험방법을 통해 알아본 HEMU-430X의 집전성능(평균접촉력, 통계적 최대 접촉력, 통계적 최소 접촉력)은 속도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보였지만 421.4km/h에 도달한 현재까지 주어진 규격(Table 1)을 모두 만족 하였다.

2) 판토틀래프 동적 접촉력의 주파수 분석을 통해 접촉력 표준편차의 주요 증가 원인이 전차선 경간의 영향이라는 것을 확인하였다. 또한 집전판 경량화를 통한 시스템 질량 감소(1N 감소)보다는 전차선 장력 조정을 통한 전차선 파동속도 증가(10N 감소) 방법이 접촉력 표준편차의 감소에 더 효율적이라는 것을 실험을 통해 확인하였다.

3) 개활지와 터널의 판토틀래프 동적 접촉력의 주파수 비교 분석을 통해 300km/h 주행 시 6.5Hz주파수에 해당하는 유동특성이 터널에서 작용하고 있음을 확인하였고 이 특성이 개활지 대비 터널에서 접촉력 표준편차의 크기가 10N 증가하는 원인이라고 추정 하였다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술개발사업 중 430km/h급 고속열차(HEMU-430X) 기술개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] J.Y. Mok (2005) Performance Test and Dynamic Analysis of the Pantograph for the High-speed Train, *Ph.D Thesis*, Seoul National University of Technology.
- [2] UIC 794-O (1996) Pantograph-Overhead line interaction on the European high-speed network, 1st edition, 1.1.1996.
- [3] EN 50119 (2001) Railway application-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines, September 2001.
- [4] EN 50367 (2012) Railway applications-Current collection systems-Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access). May 2012.
- [5] C.K. Park, Y.G. Kim, K.H. Kim, J.S. Paik (2010) Study on the Test of Dynamic Performance of Pantograph for High-speed Train, *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Conference*, Spring 2010, Jeju, pp.1481-1482
- [6] EN 50317 (2002) Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.
- [7] C.K. Park, Y.G. Kim, Y.H. Cho, J.S. Paik (2010) Development of Force Sensor to Measure Contact Force of Pantograph for High-speed Train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(5), pp.488-492.
- [8] T. Park, C. Han, J. Jang (2003) Dynamic Sensitivity Analysis of the Pantograph of a High-speed Rail Vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, 266, pp.235-260.
- [9] UIC 799-OR (2002) Characteristic of A.C. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds of over 200km/h, 1st edition, March 2002.

접수일(2014년 4월 14일), 수정일(2014년 5월 18일),
게재확정일(2014년 6월 3일)

Hyuck Keun Oh: hkoh@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea

Hyung Min Ji: hmji@krri.re.kr

Railway system engineering, University of science technology, 217 Gajungro, Yuseong-gu, Dae-jeon, 305-350 Korea

Young Guk Kim: ygkim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea

Seogwon Kim: swkim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea