Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 11 pp. 350-356, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.350
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

고속열차 팬터그래프 동특성 측정 및 동역학 해석을 통한 최적 전차선 장력 예측

오혁근[1], 유근준[2], 박태원[3*]
[1]한국철도기술연구원 고속철도연구팀, [2]이에이트 주식회사 솔루션 연구팀, [3]아주대학교 기계공학과

Prediction of Optimal Catenary Tension by Dynamic Characteristic Measurement and Dynamic Analysis of Pantograph in High-Speed Train

Hyuck Keun Oh[1], Geun-Jun Yoo[2], Tae-Won Park[3*]
[1]High Speed Railway Research Team, Korea Railroad Research Institute
[2]Solution Research Team, E8ight Co., Ltd
[3]Department of Mechanical Engineering, Ajou University

요 약 팬터그래프(Pantograph)와 전차선간의 동적 상호작용인 접촉력(contact force)은 차량에 대한 안정적 전원공급 특성인 집전성능을 평가하는 중요한 지표이다. 본 연구에서는 동력분산형 고속열차 시험차량인 HEMU-430X(High-speed Electric Multiple Unit – 430km/h eXperiment) 차량의 팬터그래프 동적 접촉력 특성을 전차선 장력에 따라 분석하였고, 이를 팬터그래프-전차선 동적 상호작용 모델을 이용한 해석결과와 비교하였다. 시험결과와 해석결과를 비교한 결과, 주요 동적접촉력 특성인 평균접촉력 및 접촉력 표준편차가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 해석모델을 이용하여 전차선 장력과 접촉력과의 상관관계를 차량 운행속도에 따라 제시하였으며, 이를 이용하여 각 운영속도별 최적 전차선 장력을 제시하였고 이를 국제규격과 비교하였다. 그 결과 해석을 통해 도출된 결과와 국제 규격에서 권장하는 전차선 장력이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Abstract The contact force, which is the dynamic interaction between the pantograph and the catenary, is an important indicator for evaluating the current collecting quality, which is a stable power supply characteristic to the vehicle. In this study, dynamic contact force characteristics of pantograph of HEMU-430X vehicle, which is a power-distributed high-speed train test vehicle, were analyzed according to the catenary tension and compared with the analytical results using the pantograph-catenary interaction model. As a result of comparing the test results with the analytical results, it was confirmed that the average contact force and the standard deviation of the contact force, which are the main dynamic contact force characteristics, coincide relatively well. Using the analytical model, the relationship between the catenary tension and the contact force is presented according to the vehicle speed, and the optimal catenary tension for each operation speed is presented and compared with the international standard. As a result, it was found that the results obtained from the analysis are comparable to those recommended by international standards.

Keywords : Catenary Tension, Current Collection Quality, Dynamic Contact Force, High speed Train, Pantograph

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음
*Corresponding Author : Tae-Won Park(Ajou Univ.)
Tel: +82-031-219-2524 email: park@ajou.ac.kr
Received August 22, 2018 Revised October 11, 2018
Accepted November 2, 2018 Published November 30, 2018

1. 서론

현재 전 세계적으로 고속열차는 대부분이 전기 철도 차량이며, 전기철도차량은 케이블로 이루어진 전차선과 차량 지붕에 장착된 팬터그래프(집전장치)의 상호 접촉을 통해 전력을 공급받는다. 그러므로 고속철도 차량의 운행 중 일정한 접촉력 특성(집전성능)을 유지하는 것이 매우 중요하며, 이는 전차선과 팬터그래프 사이에 작용하는 동적 접촉력 특성으로 평가된다[1]. 전차선과 팬터그래프의 상호 접촉 시 팬터그래프에 공급되는 압상력 외에도 가선의 진동, 공력 특성 등 각종 외력이 지속적으로 작용하여 이러한 외란에 강건한 집전성능을 유지하기 위해서는 팬터그래프의 설계뿐 아니라 전차선 시스템의 강건설계도 매우 중요하다[2]. 특히 시속 300km/h 이상의 고속에서는 전차선의 변형 및 이선을 야기할 수 있는 문제가 생길 수 있으며 이는 시스템에 매우 심각한 전기, 기계적, 손상을 입힐 수도 있기에 집전성능의 정확한 예측 및 적절한 전차선 시스템의 선정이 매우 중요하다.

집전성능 예측에 대한 기존 연구 동향을 분석해보면 다음과 같다. 과거에는 전차선 시스템과 팬터그래프 결합시스템의 단일 자유도 운동방정식을 풀어 접촉력 변동이 전차선의 시변강성에 기여하는 사실을 나타낸 연구[3]와 가선을 스프링으로 가정하여 모델링하고 스프링의 거동변화를 분석함과 동시에 모델 안정성에 대한 전체적인 경향성을 제안한 연구[4], 유연 다 물체 동역학 해석 기법을 적용하여 가선과 팬터그래프 사이의 상호작용을 절대 절점 좌표계를 이용한 유한요소 모델을 형성하여 해석하고 강체 동역학 시스템 모델을 제시한 연구[5] 등이 있다.

또한 최근에는 실험과 시뮬레이션 해석을 병행하는 연구가 수행되고 있다. 기존 영업 고속선에서 속도에 따른 실차시험을 통한 집전성능을 계측하고, 이를 유연 다 물체 동역학 해석결과와 비교하여, 해석모델의 적절성 검증 및 신규 건설 고속선에서의 집전성능을 예측한 연구가 최근에 수행되었다.[6] 그러나 이 연구에서는 현차 시험 데이터는 오직 한가지 장력에 대해서만 측정을 수행하고, 그 측정결과를 바탕으로 해석모델을 검증하였다는 한계가 있다.

또한 최근에는 집전 향상을 위해 해석적인 결과를 토대로 전차선과 팬터그래프의 주요 설계 인자들을 도출하고 분석하는 연구가 수행되었다[2]. 해당 연구에서는 집전성능에 영향을 미치는 인자를 설계변수로 설정하고 200km/h 및 300km/h 속도에서 해석을 수행하였다. 그 결과 전차선 장력 등 설계변수 변경에 따라 이선발생 등 집전성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 그러나 이 역시 400km/h까지의 고속영역에 대한 현차 시험 결과 등은 반영되어 있지 못한 한계가 있다. 특히 전차선 시스템의 설계변수 중 열차의 운행속도와 관계된 집전성능에 큰 영향을 주는 요소는 전차선 장력특성으로 알려져 있다[1,2]. 따라서 본 연구에서는 동력분산형 고속열차 시험차량인 HEMU-430X 차량의 판토그래프 동적 접촉력 특성을 3가지 전차선 장력에 따라 측정하였고 이를 분석하여 전차선 장력에 따른 속도별 집전성능 특성을 분석하였다. 또한 판토그래프-전차선 동적 상호작용 모델을 이용한 해석결과와 측정결과를 비교하여 해석모델의 적정성을 다양한 전차선 장력에 대하여 검증하였으며, 이 해석모델을 이용하여 전차선 장력과 접촉력과의 상관관계를 정량적으로 제시하였다. 또한 이를 이용하여 각 운영속도별 최적 전차선 장력을 제시하였고, 이를 국제규격과 비교하였다.

2. 본론

2.1 팬터그래프 동적 접촉력 측정

2.1.1 동적접촉력 계측 시스템

본 연구에서는 국내 유일의 시험용 고속열차인 HEMU-430X에 탑재된 팬터그래프에 접촉력 시스템을 구성하여 본선 시운전 시험 및 접촉력 특성을 계측하였다.

팬터그래프는 전차선으로부터 25kV의 고압을 인가받으므로, 차량과는 전기적으로 절연이 되어있어야 한다. 따라서 팬터그래프에서 계측된 접촉력은 무선데이터 통신을 통하여 열차 내부의 계측시스템으로 연결이 되어야 한다. 팬터그래프 계측을 위한 시스템은 기본적으로 실외 계측 시스템과 실내 계측 시스템으로 구분되며, 실외 계측 시스템은 고전압 환경에서 안전을 고려하여 절연 애자 상부의 팬터그래프 프레임에 설치된다. 각종 물리량 계측을 위한 센서는 국제규격인 EN50317[7]에 따라 작용력 측정을 위한 로드셀과 관성력 측정을 위한 가속도계로 구성되며, 실외 데이터 수집 및 변환장치에 연결된다. 또한 실내 계측시스템으로 무선으로 계측신호를 송신하여야 하므로 무선 송수신 장치가 설치되어 있다.

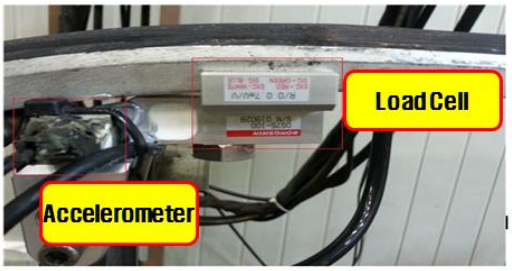

Fig. 1. Installation of Load cell and Accelerometer

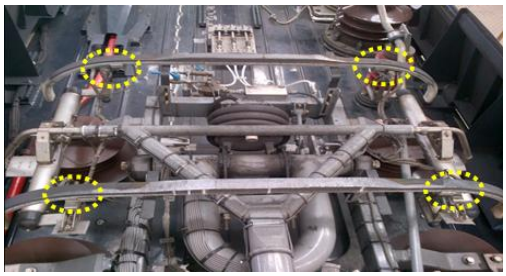

Fig. 2. The locations of sensor installation

또한 실내 계측 시스템은 실외 팬터그래프 측정 신호와 시운전 상황을 동기화하는데 필요한 차량 속도, 견인 상태 등을 차량 배전반으로부터 인출하여 실내 계측 시스템에 연결하여 통합 계측토록 하였다. 전원은 실외의 경우 12V 배터리를 별도로 설치하여 공급하고, 실내는 차량 공급 220V전원을 UPS를 통하여 사용토록 하였다. 다음의 Fig. 1은 팬터그래프 동적 접촉력 측정을 위하여 사용된 로드셀 및 가속도 센서의 장착 후 사진이다.

또한 상기의 가속도 센서 및 로드셀은 팬터그래프 집전판에 가해지는 접촉력을 측정하기 위하여, Fig. 2와 같이 집전판을 지지하는 4곳의 지점에 설치되었으며, 국제규격인 EN 50317에 따라 0.5~20Hz 범위에 대하여 정현파 가진 시험을 통한 동적보정을 실시하였고, 그 결과는 EN50137에서 요구하는 정밀도를 만족하도록 하였다. 이에 대한 상세한 내용은 참고문헌[1]을 참고한다.

2.1.2 본선 시운전 시험조건 및 분석방법

국내에 부설된 경부고속선과 호남고속선에서 HEMU-430X 시험차량을 이용한 실차 주행시험을 수행하였으며, 이를 통해 계측된 팬터그래프의 접촉력 데이터를 수집하여 분석하였다. Table 1은 본선시운전 시험을 수행한 구간의 전차선 장력 등을 요약하여 나타내는 시험조건이며, 총 3가지의 전차선 장력(20, 26, 34kN)에

Table 1. Test Condition

Condition	Gyeongbu High Speed Line	Honam High Speed Line
Running Section	From Busan to Gwangmyeong	From Iksan to Gwangju Songjeong
Track design speed	Top Speed: 300km/h	Top Speed: 350km/h (Test Bed: 400km/h)
Catenary Tension	20kN	26kN /34kN
Type of Catenary	Simple Catenary System	Simple Catenary System
Measurement Section	Open area	Open area
etc	Make an exception of Neutral section, Curve section, Tunnel, Railroad turnout	

따라 시험이 수행되었음을 알 수 있다. 특히 호남고속선 Test Bed 구간은 장력 34kN 구간으로서 (지점: KP 128.4~100.2 , 약 28.2km) 최고속도 400km/h로 주행하였고 Test Bed구간을 제외한 나머지 구간은 26kN의 전차선 장력이 설계되어 최고속도 350km/h이내에서 시험을 실시하였다. 또한 경부고속선의 경우는 전차선 장력 20kN으로서 최대속도 300km/h까지 주행시험을 실시하였다.

한편 측정방법은 차량 주행 전 팬터그래프에 공기압을 투입하여 상승시킨 뒤 전차선과 최초 접촉을 통해 측정된 접촉력이 정상적인 압상력 범위인 95N 이상 100N 이하 인지 확인 후 주행하였다. 다음은 차량 주행과 함께 접촉력을 측정하는데 이때 팬터그래프의 동적접촉력을 차량 주행속도와 KP(Kilo Post)가 실시간 측정 및 데이터 동기화 되도록 저장을 하였다. 마지막으로 전체 주행구간에서 분석할 데이터를 선정하여 임베디드 컨트롤 장비에서 20Hz 저역필터(Low Pass Filter)를 적용하여 측정된 접촉력 값과 공력계수를 합산하여 최종 접촉력을

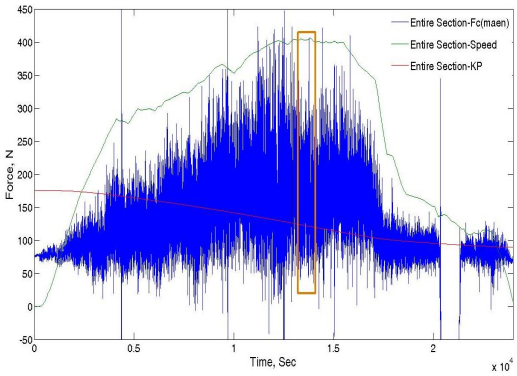

Fig. 3. Contact Force Measurement results of full operation region

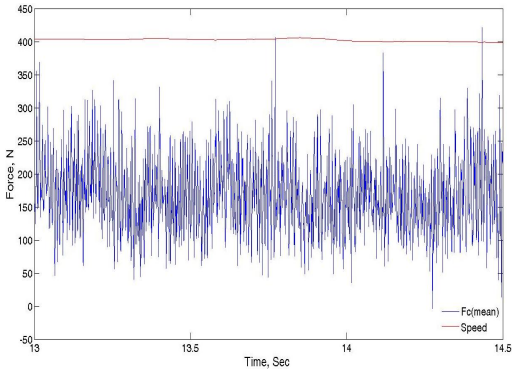

Fig. 4. Data extraction for Contact force analysis

도출하였다[1]. 또한 데이터 추출방법은 Fig. 3 의 전체 구간에서 속도대역 별로 구간을 선정하고, Fig. 4 와 같이 분석구간의 접촉력 측정결과를 바탕으로 평균접촉력 및 접촉력 표준편차를 도출하여 분석하였다.

2.1.3 팬터그래프 동적 접촉력 측정결과

Fig. 5는 경부고속선 및 호남고속선에서 주행시험을 통해 팬터그래프의 평균접촉력을 측정한 결과를 종합하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보이는 바와 같이 주행 속도 증가에 따라 함께 평균접촉력이 포물선 형태로 증가하는데, 이는 평균접촉력이 팬터그래프 공력특성의 영향을 받아 속도의 제곱에 따라 증가하기 때문이다[8]. 또한 결과에서 20, 26, 34kN의 250 km/h ~ 300km/h 구간 평균접촉력과 26, 34kN의 330 km/h~350km/h는 평균접촉력이 거의 동일선상에 나타나고 있는데 이것은 국제규격인 UIC-Code 794-O[9]에 근거하여 평균접촉력이 최대 200N을 넘지 않기 위해서 주행속도에 따라 팬터그래프에 공급되는 공기압력을 제어하여 유사한 평균접촉력이 나오게 하였기 때문이다.

한편 Fig. 6은 평균접촉력에 대한 접촉력의 표준편차(σ) 결과를 산출하여 나타낸 결과이다. 앞서 평균접촉력 결과와 같이 주행 속도가 증가하듯이 접촉력 표준편차도 속도에 대해 민감하게 반응하여 증가하는 경향을 보인다. 특히 동일한 속도대역인 250~300km/h구간에서 20, 26, 34kN의 장력에 따른 접촉력 표준편차를 비교해보면 장력이 클수록 더 작은 값을 나타내었고 반대로 장력이 작을수록 더 높은 접촉력 표준편차를 나타내고 있다. 이는 300~350km/h속도 구간에서 장력 26, 34kN의 결과를 비교해도 동일한 경향을 보여줌을 알 수 있다. 또한 장력이 증가함에 따라 속도증가에 따른 접촉력 표준편차의

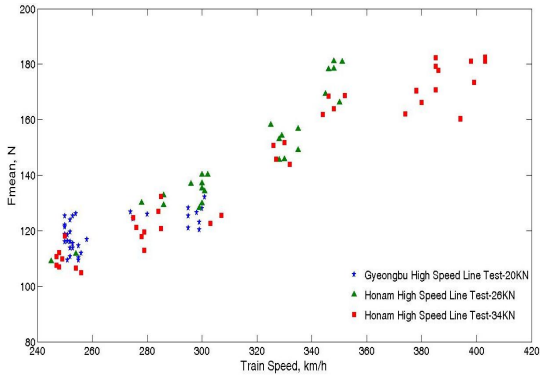

Fig. 5. experimental results : the mean contact force depending on the train speed

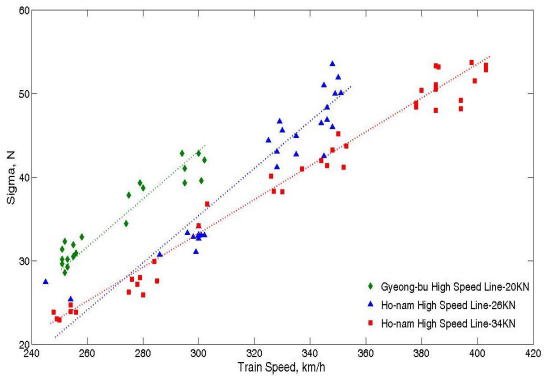

Fig. 6. experimental results : the standard deviation of contact force depending on the train speed

증가율도 감소함을 알 수 있다. 또한 일반적으로 접촉력의 표준편차가 작으면 작을수록 안정적인 집전성능을 확보할 수 있으며[1], 전차선의 장력이 증가함에 따라 차량의 운행속도 역시 증가시킬 수 있음도 확인할 수 있다.

2.2 팬터그래프 동적 접촉력 해석

2.2.1 해석모델

팬터그래프의 집전성능은 전차선시스템(가선계)와 팬터그래프 사이의 동적 상호작용의 결과물이다. 따라서 본 연구에서는 팬터그래프의 동특성을 예측하기 위하여 Fig. 7의 가선계-팬터그래프의 동적 상호작용 모델[6]을 이용하여 해석을 수행하였으며, 가선계는 대변형 탄성 다물체시스템 동력학이 적용되어 해석의 신뢰성을 확보하였다. Fig. 7의 모델 중 가선계는 크게 접촉선(contact wire)과 조가선(messenger wire), 다수의 행거선(dropper)로 구성되어 있다. 전차선은 팬터그래프와 접촉이라는 직접

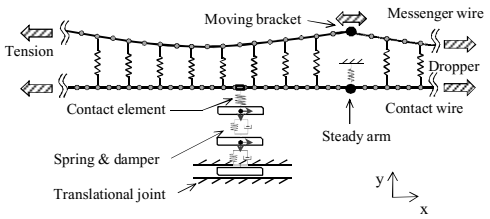

Fig. 7. Dynamic interaction model for the catenary and pantograph

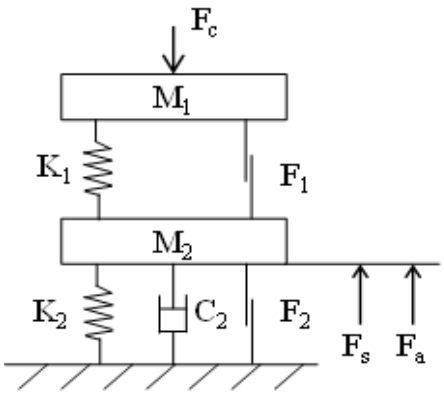

Fig. 8. Two D.O.F model of HEMU Pantograph

적인 상호작용을 통하여 철도차량에 전력을 공급하는 역할을 하고 있으며, 행거선는 전차선과 조가선을 상하로 연결시켜 접촉선의 하중을 조가선에 분산 전달하는 역할을 한다. 곡선지지금구의 경우 실제 선로에서 가선의 편위(stagger)를 주는 역할을 하여 수직 방향으로는 저항력이 작기 때문에 강성이 상대적으로 작은 스프링으로 모델링할 수 있으며, 가동 브라켓의 경우 가선 전체를 지지하는 역할을 하기 때문에 강성이 매우 큰 요소로 고려할 수 있다. 가선은 절대절점좌표 기반의 빔 요소를 이용하여 구현하였으며, 본 연구에서는 해석의 용이성을 위하여 가선의 편위, 팬터그래프의 집전판 roll motion 등의 횡방향 거동을 제외하고 종 방향(주행 방향)과 수직 방향(중력 방향)의 거동만 고려한 2차원 요소를 사용하였다. 전체 동적 상호작용 해석 모델에서 탄성 대변형 요소는 접촉선과 조가선으로 나눠지는데 접촉선은 각 행거선 사이마다 3개의 유한요소를 사용하였고, 조가선은 해석의 효율성을 감안하여 2개의 요소를 사용하여 모델링 하였다. 동적 상호작용을 예측에 있어 가장 중요한 부분이 접촉선과 팬터그래프 집전판의 접촉현상이다. 본 해석 모델에서는 접촉점 탐색을 위하여 접촉점이 항상 집전판과 동일한 진행 방향에 위치해 있다는 가정 하에 해당 지점의 대변형체 수직 변위를 접촉점으로 간주하였다. 접촉력 산출은 강체-대변형 체 간의 접촉 요소와 페널티 방법(penalty method)을 적용하여 각각 구현하였다. 또한 팬터그래프는 Fig. 8과 같이 2자유도 질량-스프링-댐퍼 시스템 모델로 구성하였다. Table 2는 해당 팬터그래프의 해석을 위한 기계적 물성치이다.

Table 2. Mechanical Properties of HEMU Pantograph

Properties	Stiffness (N/m)	Damping (Ns/m)	Coulomb Friction (N)
Pan head (5.9kg)	5,813	-	3
Arm (17.5kg)	10	200 (descent) 0 (ascent)	7

2.2.2 해석결과 및 시험결과 비교

주요 집전성능 지표 중 평균접촉력 특성은 시험결과를 해석모델의 입력값으로 사용하였고, 접촉력 표준편차 특성을 시험결과와 해석결과간 상호 비교를 수행하였다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 전반적으로 각각의 속도별로 시험 결과와 해석 결과가 경향적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있어 해석모델이 적정함을 확인하였으며, 또한 동일한 속도 영역에서 전차선 장력 값이 클수록 접촉력 표준편차가 감소하여 우수한 집전성능을 확보할 수 있음을 해석적으로 확인할 수 있다.

2.3 운영속도별 최적 전차선 장력 선정

2.3.1 전차선 장력에 따른 접촉력 특성 해석

시험 및 해석결과에 따라 전차선 장력이 증가할수록 접촉력 표준편차 값이 감소되는 것을 확인하였으며, 그 결과가 상호 잘 일치함을 알 수 있었다.

기존 연구결과[1]에 따르면 팬터그래프 집전판 질량

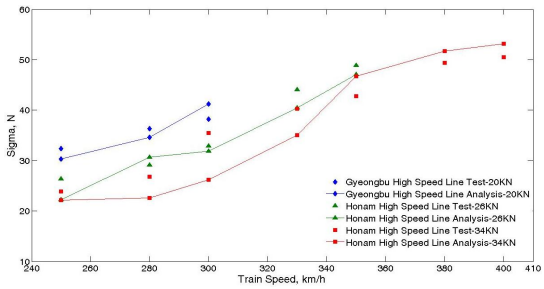

Fig. 9. Comparison between test results and dynamic analysis for standard deviation of contact force

감소보다는 상대적으로 장력 증가로 인한 접촉력 표준편차의 감소가 크다고 제시하고 있다. 따라서 기존 연구보다 속도대역 및 다양한 전차선 장력별로 상세히 분류하고 정량적으로 분석하기 위해 실제 주행시험 조건에서 배제되었던 23kN과 30kN을 추가하여 동일한 경간 길이 50m 및 60m에 대하여 해석을 진행하였다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 경간 50m와 60m에서 각 속도대역별 전차선 장력에 따른 접촉력 표준편차 특성을 나타내는 해석결과 그래프이다. 각 속도 대역을 살펴보면 전반적으로 장력이 높을수록 접촉력 표준편차의 감소세가 두드러지게 나타나고 있으며 대표적으로 가장 낮은 20kN과 가장 높은 34kN을 비교하였을 때도 장력에 중요성을 알 수 있다. 특히, 고속대역으로 진입할수록 장력 증가 효과가 뚜렷하게 나타난다.

아울러 관심 가져야 할 부분은 30kN과 34kN의 고 장력 해석결과 부분이다. 해당 전차선 장력의 고속대역에서 4kN의 장력차이로 인해 표준편차 감소가 다소 둔화

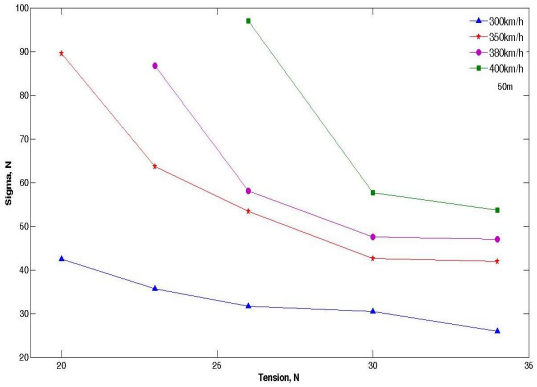

Fig. 10. Analytical prediction depending on the tension of the catenary (Span length : 50m)

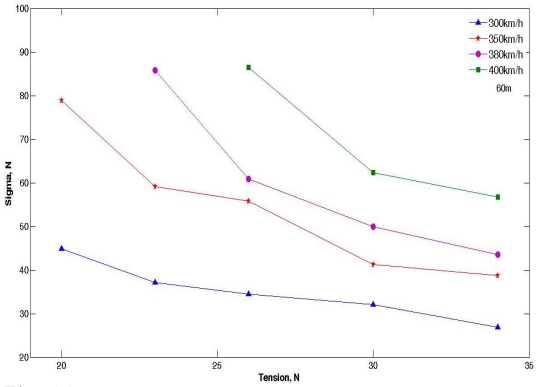

Fig. 11. Analytical prediction depending on the tension of the catenary (Span length : 60m)

Table 3. Optimal Tension of Catenary

Speed	Analysis Results	EN50119
350km/h	26kN	26kN
380km/h	28kN	30kN
400km/h	34kN	34kN

EN50119
- Recommended speed = 70% of wave propagation speed ($\sqrt{\frac{T}{\rho}}$) T: catenary tension, ρ: density

되는 결과를 볼 수 있다. 즉 접촉력 표준편차와 전차선 장력 간에는 반비례 관계가 있으며, 각 운영속도별 최적의 전차선 장력이 존재한다고 판단할 수 있다.

2.3.2 운영속도별 최적 전차선 장력 선정

국내 고속철도에서 팬터그래프와 전차선간의 동적 접촉력 특성에 대한 규격은 문헌[1]에 나타난 바와 같이 평균접촉력(F_{mean}) 200N 이하, 통계적 최소 접촉력(F_{mean}-3σ)은 0N 이상, 통계적 최대접촉력(F_{mean}+3σ)은 350N 이하가 되도록 하고 있다. 따라서 허용 가능한 접촉력 표준편차는 대략 55N이하여야 한다. 따라서 고속 전차선 경간 중 대표길이인 50m에 대한 해석결과인 Fig. 10을 이용하여 각 속도대역별 접촉력 표준편차가 55N이 되는 전차선 장력을 찾으면 그 값이 해당 운영속도에서의 최적 전차선 장력임을 알 수 있다. 또한 전차선 장력과 권장 운영속도에 관련된 규격인 EN50119[10]에 의해서도 각 운영속도별 최적 전차선 장력을 구할 수 있다. Table 3은 본 연구를 통하여 도출된 최적 전차선 장력과 EN50119에 의하여 계산된 전차선 장력을 비교한 결과이다. 결과에서 보이는 바와 같이 해석을 통해 도출된 결과와 EN50119에서 권장하는 전차선 장력이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 해석결과가 완벽한 팬터그래프-가선계 시스템의 모사를 하는 것은 무리가 있으나 전차선 장력에 따른 경향성을 파악하는 데 있어서 대략적인 가이드라인의 제시는 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 해석결과는 향후 신규 고속선 건설 시 최적 전차선 장력을 선정하는 데 활용이 될 수 있다고 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 다양한 속도대역 및 전차선 장력 상황에서 HEMU-430X 시험열차를 이용하여 동적 접촉력 시험을 수행하였으며, 이를 팬터그래프-전차선 동적 상

호작용 모델을 이용한 해석결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 팬터그래프 동적 접촉력 특성에 대하여 시험결과와 해석결과를 비교한 결과, 접촉력 표준편차 특성이 다양한 속도대역 및 전차선 장력 상황에서 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였고 이를 통하여 해석모델의 적절성을 검증하였다.
2) 해석결과를 통하여 접촉력 표준편차와 전차선 장력 간에는 반비례 관계가 있으며, 각 운영속도별 최적의 전차선 장력이 존재한다고 판단할 수 있다.
3) 해석결과를 이용하여 각 운영속도대역별 최적 전차선 장력을 제시하였으며 그 결과는 국제규격에서 권장하는 전차선 장력과 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

References

[1] Oh, H. K., Ji, H. M., Kim, Y. G. and Kim, S. ,Analysis of the Current Collection Quality for Next Generation High-Speed Trains with Measurements of the Dynamic Contact Force, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 3, pp. 157~164, 2014.

[2] Cho, Y. H., 2014, Analysis of the Major Design Parameters of a Pantograph-Railway Catenary System for Improving the Current Collection Quality, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 1, pp. 7~13, 2014.

[3] G. Gilbert, H. E. H Davies, Pantograph Motion On a Neraly Uniform Railway Overhead Line, Proc. IEEE, 113(3), pp.485-492, 1996.

[4] G. Poetsch, J. Evans, Pantograph/Catenary Dynamics and Control, Vehicle System Dynamics, 28, pp.159-195, 1977.

[5] A. A. Shabana. Computer Implementation of the Absolute Nodal Coordinate Formulation for Flexible Multibody Dynamics, Journal of the Nonlinear Dynamics, 16, pp.293-306, 1998.

[6] Lee, J. H., Park, T. W., Oh, H. K. and Kim, Y. G., Analysis of dynamic interaction between catenary and pantograph with experimental verification and performance evaluation in new high speed line," Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility , Vol. 53, No. 8, pp. 1117~1134, 2015.

[7] EN 50317:(2002) Railway applications - Current collection systems - Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.

[8] Oh, H. K., Kim, S., Cho, Y-h., Kwak, M. and Kwon, S. Y. ,Analysis of Effect of Pantograph Cover on the Current Collection Quality of High Speed Train using Real Train Experiment, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 19, No. 4, pp. 409~416, 2016.

[9] UIC 794-O (1996) Pantograph-Overhead Line Interaction on the European High-Speed Network, 1st Edition.

[10] EN 50119:(2001) Railway application-Fixed installations-Electric traction overhead contact lines, September 2001.

오 혁 근(Hyuck Keun Oh) [정회원]

- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계항공공학 학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계공학 석사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (기계공학 박사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
고속철도 차량 동역학(집전, 제동), 열전달

유 근 준(Geun-Jun Yoo) [정회원]

- 2013년 2월 : 한국산업기술대학교 기계공학부 (기계공학 학사)
- 2016년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2016년 7월 ~ 2017년 11월 : NVH Korea 연구원
- 2017년 12월 ~ 현재 : 이에이트 주식회사 솔루션연구팀 연구원

<관심분야>
SPH, 동역학

박 태 원(Tae-Won Park) [정회원]

- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계설계 학사)
- 1982년 12월 : University of Iowa 기계공학과 (기계공학 석사)
- 1985년 12월 : University of Iowa 기계공학과 (기계공학 박사)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
자동차 및 철도차량 동역학, 전산 응용 역학