

차세대 고속철도의 집전성능 예측 및 향상 방안에 관한 연구

A Study on the Estimation and Improvement of the Current Collection Performance for the Next Generation High-Speed Train (HEMU-430X)

이진희 · 박태원*

Jin-Hee Lee · Tae-Won Park

Abstract The HEMU-430X is a world-class railway vehicle which aimed the maximum speed of 430km/h and the operation speed of 370km/h. To maintain high-speed operation condition over 300km/h, various requirements for satisfy exist. However, one of the most important things is a reliable supply of electricity. Especially, the dynamic interaction between the pantograph and overhead contact line at high-speed is a significant matter to pre-evaluate. In this paper, using the dynamic interaction analysis program, current collection performance of the HEMU-430X was investigated. Firstly, based on the international standard, performance of the original specifications was evaluated. In addition, through study on changes in tension and span length, improvement of the performance was considered.

Keywords : HEMU-430X, Current collection performance, Catenary, Pantograph, Contact force

초 록 차세대 고속철도(HEMU-430X)는 최고 속도 430km/h, 운영 속도 370km/h를 목표로 개발 중인 세계적 수준의 철도 차량이다. 시속 300km 이상의 운영 속도를 유지하기 위하여 충족해야 할 요건들은 다양하지만 주행 중 안정적인 전력 공급 여부는 상용화를 결정짓는 핵심기술 중 하나이다. 따라서 고속에서의 가선과 판토티그래프의 동적 상호작용은 사전 평가를 통하여 충분히 검토되어야 한다. 본 논문에서는 다물체 동역학 해석 기법을 기반으로 한 집전성능 해석 프로그램을 이용하여 차세대 고속철도의 집전성능을 평가하였다. 국제 규정을 기반으로 기존 사양에 대한 성능 평가를 실시하고, 추가적으로 장력 및 경간 길이 변화에 따른 평가 결과를 토대로 집전성능 향상 방안에 대하여 고찰하였다.

주요어 : 차세대 고속철도, 집전성능, 가선계, 판토티그래프, 접촉력

1. 서 론

고속철도에 대한 요구사항은 많은 인원을 안전하게 그리고 보다 빠르게 이동시키는 것이다. 이러한 요구사항을 만족하기 위하여 각국의 철도 선진국들은 최고 속도 향상을 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 최근에는 철도차량이 동력 집중방식에서 동력 분산방식으로 전환됨에 따라 견인력, 가속력 등이 비약적으로 향상되었고, 국내에서도 이를 도입하면서, 시속 300km 이상의 운영속도를 보유한 차량이 현재는 보편화되어 있다. 하지만, 최고시속을 갱신하기 위한 기술개발이 각국의 철도 선진국들을 필두로 현재에도 진행형이며, 이에 발맞추어 국내에서도 최고속도 430km/h, 운영속도 370km/h를 목표로 하는 차세대 고속철도(HEMU-430X)가 개발 완료될 눈앞에 두고 있다.

이러한 고속철도는 현재 대부분이 전기 철도차량으로 운영속도 유지와 최고시속 달성을 동시에 만족하기 위해서는 1차적으로 구동을 위한 안정적인 전력 공급이 뒷받침 되어

야 한다. 철도차량의 전력공급은 케이블로 이루어진 가선으로부터 차량 지붕에 장착된 판토티그래프가 주행 중 접촉이라는 상호작용을 하여 이루어지며, 여기에 판토티그래프에 작용하는 압상력, 가선의 진동, 파동전파, 바람의 영향 등 각종 외력이 작용하게 된다. 이러한 외력의 영향에 관계없이 안정적인 집전성능을 유지하는 것이야말로 고속철도가 충족해야 하는 필수적인 요건이라 할 수 있다. 특히, 시속 300km 이상의 고속에서는 가선의 설계 제원, 주행 환경 등에 의하여 차량의 속도가 가선의 파동전파 속도보다 커질 수 있게 된다[1]. 이러한 현상의 발생 시, 가선은 강제와 같은 거동을 하게 되며, 이는 접촉력의 과도한 증가와 동시에 이전을 야기시켜 시스템에 매우 심각한 전기, 기계적 손상을 입힐 수 있다. 따라서, 흔히 집전기술은 고속철도의 핵심기술이며, 최고 시속을 결정짓는 요소이기도 하다. 그러므로 집전성능 예측 및 성능 입증은 반드시 수행 되어야 한다.

본 논문에서는 차세대 고속철도를 대상으로 집전성능 해석 프로그램을 이용하여 고속에서의 가선과 판토티그래프의 동적 상호작용을 평가하고자 한다. 가선과 판토티그래프 모델은 실제 시험선의 가선과 차량에 탑재될 판토티그래프의 제원을 적용하였다. 본 논문에서 사용된 집전성능 해석 프로그램은 유연 다물체 동역학 해석 기법을 기반으로 개발되었으며, 가

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-219-2952, E-mail : park@ajou.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.429>

선의 대변형 특성을 고려하기 위하여 절대절점좌표를 도입하였다. 해석프로그램은 국제 규정인 EN 50318과 실제 시험 데이터를 근거로 신뢰성을 입증하였으며, 검증된 프로그램을 이용하여 목표 최고 속도까지의 고속 영역에서의 집전 성능을 평가하였다. 나아가 가선의 장력 증가에 따른 성능 개선 여부를 고찰하였다.

2. 집전성능 해석 프로그램

2.1 유연체 동역학

본 논문에서 사용된 집전성능 해석 프로그램은 탄성 대변형 거동을 보이는 전차선로의 거동을 표현하기 위하여 Shabana가 제안한 절대절점좌표계를 사용하였다[2]. 절대절점좌표계는 비선형 탄성력을 효과적으로 구현할 수 있으며, 강체와 이들 간의 구속조건을 모두 고려할 수 있는 이점이 있다. Fig. 1은 대변형 탄성체 i 를 구성하는 빔 요소 j 의 관성좌표계에 대한 절대절점을 나타낸다. 하나의 빔 요소는 양 끝의 두 개의 절점(Node)으로 구성되어 있으며, 각 절점은 각 좌표계에 대한 위치(Position)와 기울기(Slope) 정보를 갖고 있다. 따라서, 절대절점좌표 벡터는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{e}^{ij} = [\mathbf{e}_A^{ij T} \ \mathbf{e}_B^{ij T}]^T = [e_1^{ij} e_2^{ij} e_3^{ij} e_4^{ij} e_5^{ij} e_6^{ij} e_7^{ij} e_8^{ij}]^T \quad (1)$$

탄성체를 구성하는 빔 요소내의 임의의 위치는 식 (2)와 같이 형상함수(Shape Function)와 절대절점좌표로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}^{ij} = [r_X^{ij} \ r_Y^{ij}]^T = \mathbf{S}^{ij}(x) \mathbf{e}^{ij}(t) \quad (2)$$

탄성체 i 에 대한 빔 요소 j 의 운동에너지는 식 (3)의 변위 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T^{ij} &= \frac{1}{2} \int_{V^{ij}} \rho^{ij} \mathbf{r}^{ij T} \dot{\mathbf{r}}^{ij} dV^{ij} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{e}^{ij T} \left(m^{ij} \int_0^l \mathbf{S}^{ij T} \mathbf{S}^{ij} dx \right) \dot{\mathbf{e}}^{ij} \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^{ij T} \mathbf{M}_a^{ij} \dot{\mathbf{e}}^{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

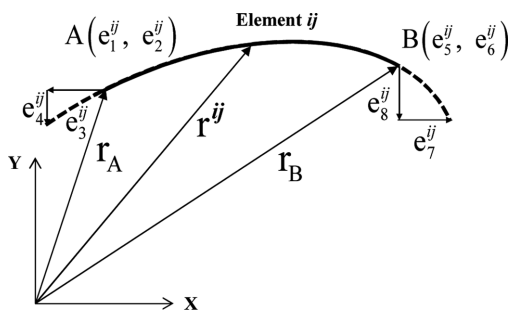


Fig. 1 The absolute nodal coordinates on a beam element j on the large deformable body i

식 (3)에서 ρ^{ij} 및 V^{ij} 는 각각 빔 요소의 밀도와 부피이고 \mathbf{M}_a^{ij} 은 빔 요소에 대한 질량행렬(Mass Matrix)이다. 이 질량행렬은 시불변 특성을 가지는 형상함수와 빔 요소의 길이, 질량 m^{ij} 에 대한 함수이다. 빔 요소에 대한 변형 에너지(Strain Energy)는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} U^{ij} &= \frac{1}{2} \int_0^l \left(Ea \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + EI \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 \right) dx \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}^{ij T} \mathbf{K}_a^{ij} \dot{\mathbf{e}}^{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, E 는 종탄성계수, a 는 축의 단면적, I 는 빔 요소의 2차 관성모멘트를 나타낸다. 또한 \mathbf{K}_a^{ij} 는 요소의 강성행렬(Stiffness Matrix)로 절대절점좌표에 대한 비선형 함수로 표현된다. 탄성력(Elastic Force)은 식 (5)와 같이 전체 변형에너지를 일반좌표(Generalized Coordinates)로 편미분 해서 얻을 수 있다.

$$\mathbf{Q}_k^{ij} = - \left(\frac{\partial U^{ij}}{\partial \mathbf{e}^{ij}} \right)^T \quad (5)$$

2.2 EN 50318에 의한 프로그램 검증

EN 50318은 전차선로와 판토품그래프 상호작용 시뮬레이션 해석 모델 및 방법의 검증에 대한 내용이 수록된 국제규정이다[3]. 본 논문에서 사용된 집전성능 해석 프로그램은 EN 50318에서 제시하는 참고모델(Reference model)의 제원과 시뮬레이션 조건을 적용하여 프로그램의 신뢰성을 1차적으로 검증하였다. 규정에서는 참고모델인 2자유도 판토품그래프와 1경간의 길이가 60m인 전차선로 10경간을 250km/h와 300km/h의 주행 속도로 해석하여 평균 접촉력(F_m), 접촉력의 표준편차(σ), 지지점에서의 압상량, 이선율 등을 산출하고 규정에 제시된 결과 범위의 만족여부를 판단하도록 제시되어 있다. Fig. 2와 Table 1은 각각 주행 해석을 통하여 얻은 접촉력 계형과 결과를 규정과 비교한 표이다. 해석결과가 제시하는 범위내에 모두 포함되는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 본 프로그램이 집전성능을 해석적으로 예측하는 데 있어 1차적인 신뢰성이 있음을 의미한다. 본 프로그램에 사용된 이

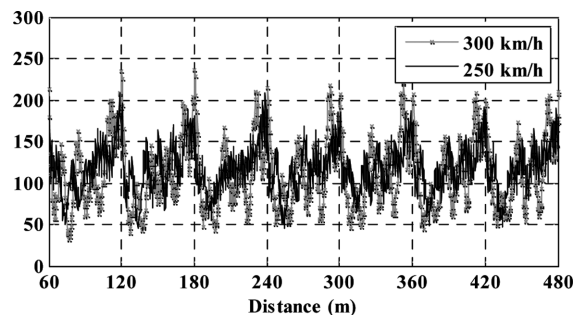


Fig. 2 Contact force between catenary and pantograph (EN reference model)

Table 1 Simulation results and verification with EN 50318

Speed (km/h)	250		300	
	EN standard	Simulation	EN standard	Simulation
Category				
F_m (N)	110 ~ 120	113.54	110 ~ 120	115.15
σ (N)	26 ~ 31	27.32	32 ~ 40	37.84
Statistical maximum of contact force(N)	190 ~ 210	195.51	210 ~ 230	224.68
Statistical minimum of contact force (N)	20 ~ 40	31.57	-5 ~ 20	-2.37
Actual maximum of contact force (N)	175 ~ 210	187.73	190 ~ 225	220.19
Actual minimum of contact force (N)	50 ~ 75	50.69	30 ~ 55	45.06
Maximum uplift at support (mm)	48 ~ 55	51.7/51.4/51.7	55 ~ 65	60.2/59.5/59.9
Percentage of loss of contact (%)	0	0	0	0

론적 배경 및 기타 검증 절차는 참고문헌[4]에 보다 자세히 수록되어 있으므로 본 논문에서는 추가적인 내용은 생략한다.

3. 해석 모델

3.1 가선계(Catenary) 모델

본 논문에서는 현재 개발 중인 철도차량에 대한 성능평가가 목적이기 때문에 실제 경부고속선로에 설치된 가선계를 대상으로 해석 모델을 생성하였으며, 그 중 설치 빈도수가 비교적 높은 가선 형식인 s50(50m)을 중심으로 s40(40m), s59.5(59.5m)를 대상으로 성능 평가를 수행하였다. 가선의 형태는 모두 기본적인 형식인 단순 카테너리(Simple catenary)이며, 크게 접촉선(Contact wire)과 조가선(Messenger wire) 그리고 이들을 연결하는 행거선(Dropper)으로 구성되어 있다. 경간에서는 가동 브라켓이 조가선을 지지하고 곡선당김 금구가 접촉선에 편위를 가하며, 이들은 모두 일정한 탄성 계수를 갖는 탄성체로 간주하였다. 가선의 양단에는 일정한 장력이 주어지며, 현재 경부고속선로의 접촉선과 조가선에 적용되어 있는 20kN과 14kN의 수치를 각각 반영하였다. Fig. 3은 경간형식 s50 가선을 보여주고 있으며, Table 2와 Table 3은 각 경간형식에 대한 행거선 간 간격과 가선의 기계적 물성치를 각각 나타내고 있다. 해석 모델에는 앞서 제시한 가선을 설계하는 데에 고려되는 일반적인 사항들이 모두 반영되었다.

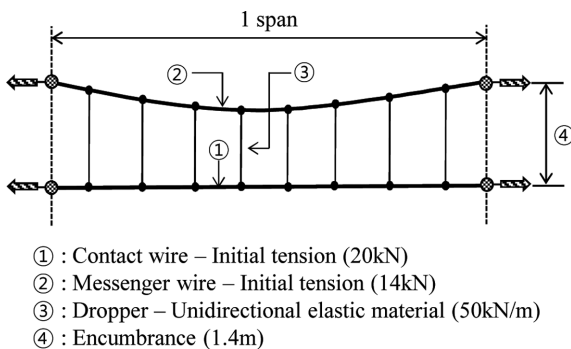


Fig. 3 Description of the catenary model (s50)

Table 2 Specification of catenaries (s40, s50, s59.5)

Span type	Dropper number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Distance between dropper (m)									
s40	4.5	6.75	6.5	4.5	6.5	6.75	4.5	-	-	-
s50	4.5	6.75	6.75	4.75	4.5	4.75	6.75	6.75	4.5	-
s59.5	4.5	6.75	6.75	6.75	5	5	6.75	6.75	6.75	4.5

Table 3 Mechanical properties of catenary wires

Component	Sectional area (mm ²)	Elastic modulus (GN/m ²)	Line density (kg/m)	Structure damping (-)
Messenger wire	65.49	110	0.605	0.05
Contact wire	150	180	1.334	0.01

3.2 판토히레프(Pantograph) 모델

판토히레프는 복잡한 기구학적 형상을 갖는 실제 시스템을 Fig. 4와 같이 수직방향의 병진 자유도를 갖는 2자유도 이산질량 모델로 가정 되었다. 해석 모델의 제원을 확보하기 위하여 실제 판토히레프의 동적 보정시험을 통하여 얻어낸 수직방향 진동특성 결과를 이용하였다. 동적 보정시험은 판토히레프 모델에 일정 주파수를 갖는 주기 함수 형태의 가진을 입력하고 그에 따른 변위 응답을 파악하는 방식으로 수행되었고, 이 결과를 이용하여 얻어낸 리셉턴스(Receptance)로 시스템의 응답 특성을 정의하였다. 여기서, 리셉턴스는 시스템에 입력되는 가진 힘에 대한 변위 응답의 비를 의미하는 것으로 판토히레프와 같이 저주파수 범위의 진동에 관심이 있는 동적 시스템에 관하여 특성을 파악할 때 활용된다. 동적 보정시험을 포함한 판토히레프 각 부품의 특성시험을 통하여 질량, 강성, 댐핑계수 및 쿨롱 마찰계수를 추정하여 Table 4의 제원을 최종적으로 확보하였다. 모델에서 질량 M_2 에는 70N의 정적 압상력이 인가된다. 주행 시에 발생하는 공력은 일반적으로 속도의 제곱에 비례하는 항으로 표현할 수 있는데, 개활지, 일반모드(Open knee)를 기준으로 주행 속도 V 에 대하여 $F_a=0.000467*V^2$ 의 값이 사용되었다. 본 수

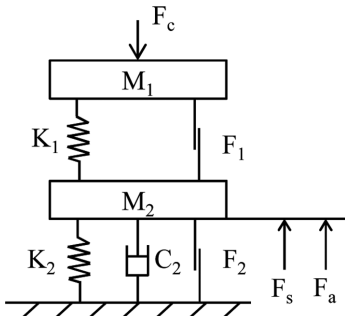


Fig. 4 2 DOF pantograph model

Table 4 Mechanical properties of a 2 DOF pantograph

	Mass (kg)	Stiffness (N/m)	Damping (Ns/m)	Coulomb friction (N)
Upper	7.5	5,813 (0~34mm) 12,340 (34~53mm) ∞ (53~mm)	0	3
Lower	17.5	10	200 (descent) 0 (ascent)	7

식은 HEMU-430X 시운전 시 별도의 공력시험을 통하여 획득한 것이며, 앞서 제시한 모든 제원은 한국철도기술연구원으로부터 제공받았다.

4. 집전성능 해석 모델 및 시험적 검증

4.1 동적 상호작용 해석 모델

Fig. 5은 앞서 언급한 가선과 판토틀래프로 구성된 집전성능 해석 모델이다. 판토틀래프는 2자유도 강체 모델로 구현되었으며, 이들은 스프링, 댐퍼 힘 요소로 연결되어 있다. 가선은 절대절점좌표 기반의 빔 요소를 이용하여 구현하였으며, 접촉선은 각 행거선 사이마다 3개의 요소를 조가선은 2개의 요소를 사용하여 모델링 하였다. 가선의 양 끝단에는 일정한 장력이 인가되었으며, 경간 이음부에 위치한 가동브라켓과 곡선당김금구는 해당 절점에 각각 병진 조인트와 스프링 요소를 이용하여 구현하여 주었다. 행거선은 본래의 비선형 특성을 고려하여 인장 시에만 탄성력이 작용하도록 구현하였다. 집전성능 예측에 있어 가장 중요한 부분이 가선

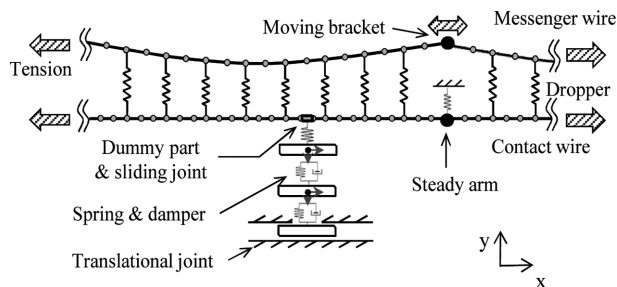


Fig. 5 The interactive model of a catenary and pantograph

과 판토틀래프 집전판의 접촉현상의 구현인데, 본 프로그램에서는 접촉점 탐색을 위하여 슬라이딩 조인트(Sliding joint)와 강체 더미 파트(Dummy part)를 이용하였고[5], 접촉력 산출은 스프링 요소와 페널티 방법(Penalty method)을 적용하여 각각 구현하였다[6]. 강체 더미 파트는 탄성 대변형체인 전차선로와 슬라이딩 조인트로 구속되어 판토틀래프의 진행방향과 동일한 위치에서 전차선로를 따라 움직이며 접촉점의 위치를 제공한다. 접촉력은 접촉점과 집전판 M1의 수직방향 변위로부터 접촉 여부 판단하여 접촉이 발생하지 않은 경우 0, 접촉이 발생한 경우는 침투량에 따라 페널티 요소(Penalty factor)를 가하여 최종적으로 식 (6)과 같이 계산한다.

$$F_c = \begin{cases} 0, & \text{if } y_d > y_{M1} \\ k_c((y_d - y_{M1}) - y_0), & \text{if } y_d \leq y_{M1} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, F_c 는 접촉력이며, y_d 는 접촉점의 수직방향 위치, y_{M1} 은 M1의 수직방향 위치, y_0 는 두 물체간의 초기 변위이고, k_c 는 페널티 요소이다. 해석 모델은 총 10경간(s40: 400m, s50: 500m, s59.5: 595m)이 구현되었다.

4.2 집전성능 해석 및 결과 검증

앞서 언급한 해석모델을 이용하여 집전성능을 예측하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 가선과 판토틀래프가 분리된 상태에서 변형되지 않은 가선에 장력과 중력을 인가하여 사전이도(Pre-sag)를 얻는다. 가선의 중력 처짐에 의한 변형은 지역적인 접촉력 변동을 야기시키기 때문에 이를 구현하는 것은 현실을 반영하는 데에 있어 매우 중요하다. 일정 사전이도 비율(Pre-sag ratio)을 얻기 위해선 각 행거선의 길이를 다르게 적용하여야 하는데 이는 가선의 수학적 모델을 이용하여 산출하였다[7]. 다음으로는 판토틀래프가 정지된 상태에서 Fig. 4에서 나타낸 2자유도 모델의 M2에 수직방향의 압상력을 인가하여 가선과 최초로 접촉하게 한다. 판토틀래프의 수직력으로 인하여 가선이 변형되지만 압상력과 가선의 탄성력이 평형을 이루는 지점에서 정적인 상태를 얻게 되고 접촉력은 인가된 압상력과 동일한 크기까지 증가하게 된다. 마지막으로 판토틀래프를 고속으로 주행시켜 10경간을 주행하는 동안의 접촉력을 얻게 된다. 주행 해석을 거쳐 얻은 접촉력 결과는 국제 규정 EN 50318에 제시된 방법을 근거로 처리하게 된다. 총 10경간 중 관심구간인 5, 6경간에서의 접촉력 데이터를 0~20Hz의 저역 통과 필터(Low pass filter)로 처리를 하고 평균 접촉력(Mean contact force, F_m), 접촉력의 표준편차(Standard deviation, σ), 통계적 최대, 최소 접촉력(Statistical max./min. contact force, $F_m \pm 3\sigma$) 등을 산출해 성능을 평가하게 된다. 본 연구에서는 해석 프로그램의 신뢰성을 검증하고자 시속 300km의 주행 해석 결과와 동일한 조건에서의 시험선 계측 결과를 비교하였다. 계측 데이터는 현재 HEMU-430X가 시험 운행 중인 경부고속선 2단계 구간(동대구-부산)에서의 주행시험을 통하여 획득하였으며 개활지이며, 평균시속 300km를 만족하는 약 1.6km 구간

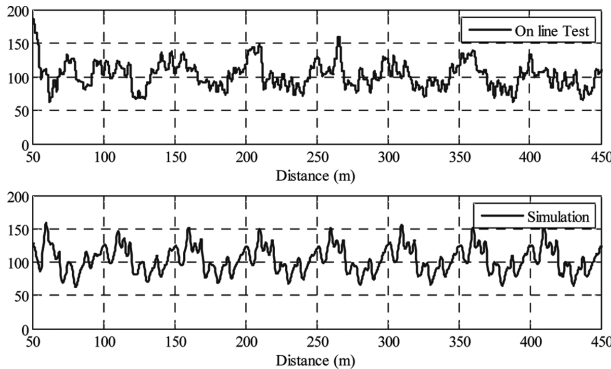


Fig. 6 Contact force of the simulation and on-line test results(V = 300km/h)

Table 5 Statistical results of the simulation and test

	Simulation	Test	Error (%)
Mean contact force (N)	103.35	100.43	2.9
Standard deviation (N)	19.28	19.21	0.3
Statistical maximum Contact force (N)	161.19	158.05	1.99
Statistical minimum Contact force (N)	45.51	42.79	6.36

을 선정하여 접촉력 데이터를 획득하고 통계처리 하였다. HEMU-430X 시운전 결과는 한국철도기술연구원으로부터 제공받았다. Fig. 6은 0~20Hz 저역통과 필터로 필터링된 10경간의 시운전과 해석 모델의 접촉력 계형이며, Table 5는 이를 통계처리한 결과이다. 접촉력의 지역적인 계형은 계측 시 발생하는 여러 외력 및 계측과정에서 발생한 외란에 의하여 시뮬레이션 결과와 다소 차이를 보이지만, 한 경간의 끝 단에서 접촉력이 증가하고 경간 중심부에서 감소하는 주기적인 거동을 보이는 경향은 유사하다. 이를 통계 처리한 결과에서도 각 평가 기준에 대하여 해석과 시험 결과 간의 수치가 7%의 오차범위 이내의 값을 만족하는 것으로 보아 해석 모델이 실제 시스템을 잘 반영한다고 판단할 수 있다.

5. 집전성능 평가 및 경향성 분석

5.1 평가 대상 및 기준

앞 장에서 검증된 가선계-판토타그래프 동적 상호작용 해석 모델을 이용하여 고속 영역인 시속 300km부터 차세대 고속철도의 최고 시속인 시속 430km까지 집전성능을 해석하였다. 평가 대상이 된 가선의 경간형식은 2장에서 언급한 s40과 s50, s59.5이다. 가선계와 판토타그래프 간의 동적 상호작용에 영향을 미치는 요인은 매우 다양하지만 저속에서는 주로 가선의 강성이, 고속에서는 파동전파 속도와 가장 밀접한 관련이 있다[8]. 가선의 강성은 사선이도와 관계가 있으며, 적절한 사선이도는 주행 시 접촉력 변동을 보상하는 역할을 하여 성능을 향상에 도움을 준다. 하지만 고속에서

는 사선이도가 접촉력 변동을 과잉 보상하는 경향을 보이게 되고 이때부터는 파동전파 속도가 더욱 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 가선의 파동전파 속도를 증가시키는 것이 고속에서의 성능향상에 도움을 준다. 철도 차량의 운행에 관한 국제 규정인 UIC 799 OR에서는 가선의 파동전파속도를 다음과 같이 정의하고 있다[9].

$$C = \sqrt{\frac{T_m + T_c}{\rho_m + \rho_c}} \quad (7)$$

식 (7)에서 T 는 가선에 인가된 장력을, ρ 는 선밀도를 각각 의미하며 소첨자 m 은 조가선을 c 는 접촉선을 의미한다. 즉, 가선의 파동전파속도를 증가시키기 위해서는 장력을 증가시키거나 혹은 선밀도를 감소시켜야 한다는 의미이다. 하지만 가선의 밀도를 감소시키는 것은 실제로 가선을 교체한다는 것이기 때문에 많은 비용과 시간이 필요하여 현실적으로 불가능하므로 가선의 장력을 증가시킴으로써 파동전파속도의 증가와 더불어 고속에서의 성능향상을 기대할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 접촉선에 대하여 기존선에 인가된 장력인 20kN에 대하여 평가를 수행하고 장력을 증가하여 25kN에서의 성능을 예측하였다. 시뮬레이션 Case에 대한 정보는 Table 6에 나타나 있다.

Table 6 Six types of simulation

		Tension of contact wire	
		20kN	25kN
Span type	s40 (40m)	Case 1	Case 2
	s50 (50m)	Case 3	Case 4
	s59.5 (59.5m)	Case 5	Case 6
Vehicle speed (km/h)		300, 340, 370, 400, 430	

5.2 집전성능 해석 및 결과 검증

집전성능 해석은 Table 6에서 도시하는 바와 같이 가선형식 s40, s50과 s59.5에 대하여 각각 장력 20kN과 25kN의 총 6가지 경우에 대하여 주행속도를 300km/h, 340km/h, 370km/h, 400km/h, 430km/h 순으로 증가시키며 총 30회의 해석을 수행하였다. 공력의 영향은 3.2절에서 제시한 수식을 이용하여 주행속도 별로 적용하여 주었다. 차세대 고속철도의 집전성능을 평가하기 위하여 전체 해석결과에 대하여 관심 구간인 5, 6경간의 데이터를 0~20Hz 저역 통과 필터링을 수행하고 결과를 통계처리 하였다. 데이터 필터링은 Matlab에서 제공하는 Butterworth filter를 이용하여 처리하였다. Fig. 7은 각 해석 Case와 속도에 대하여 (a)평균 접촉력, (b)접촉력의 표준편차, (c)통계적 최대 접촉력, (d)통계적 최소 접촉력을 각각 보여주고 있다.

통계 처리한 해석결과를 보면 Fig. 7(a)의 평균 접촉력(F_m)은 s59.5의 경우 상대적으로 다른 결과보다 작은 값을 보이지만 주행속도에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 평균 접촉력에 영향을 미치는 주요 인자가 압상력(정적 압상

력+공력)인 만큼 충분히 예상되는 결과라 할 수 있다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 접촉력의 표준편차(σ)의 경우는 가선형식과 장력의 크기에 무관하게 대체적으로 속도가 증가할수록 커지는 경향을 보이며, 세부적으로는 경간의 길이가 길수록, 장력이 작을수록 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 접촉력의 표준편차는 클수록 접촉력의 변동폭이 크다는 의미이기 때문에 안정적인 집전성을 확보하는 데에 불리하므로 이를 최소화하는 것이 매우 중요하다. 장력의 증가와 관련해서는 앞서 파동전파속도를 정의하는 식 (7)을 통하여 예상하였듯이 증가할수록 보다 안정적인 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)와 (d)에 각각 나타난 통

계적 최대, 최소 접촉력($F_m \pm 3\sigma$)의 경우도 평균 접촉력 및 접촉력의 표준편차에 의해 산술적으로 계산되는 결과이기 때문에 접촉력의 표준편차가 커질수록 최대값은 커지고 최소값은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 전체 평가결과가 속도의 증가나 경간 형식에 대하여 일정하게 비례하지 않는 것은 전체 시스템이 큰 비선형 거동을 보이며 일부 영역에서 가선의 수직방향 진동과 판토품의 움직임이 서로 상쇄하기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 차량의 속도가 전차선로의 파동전파속도에 근접한 경우에는 판토품이 가선을 밀고 나아가는 현상을 보이는데, 이로 인하여 접촉력이 과다하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 주행속도

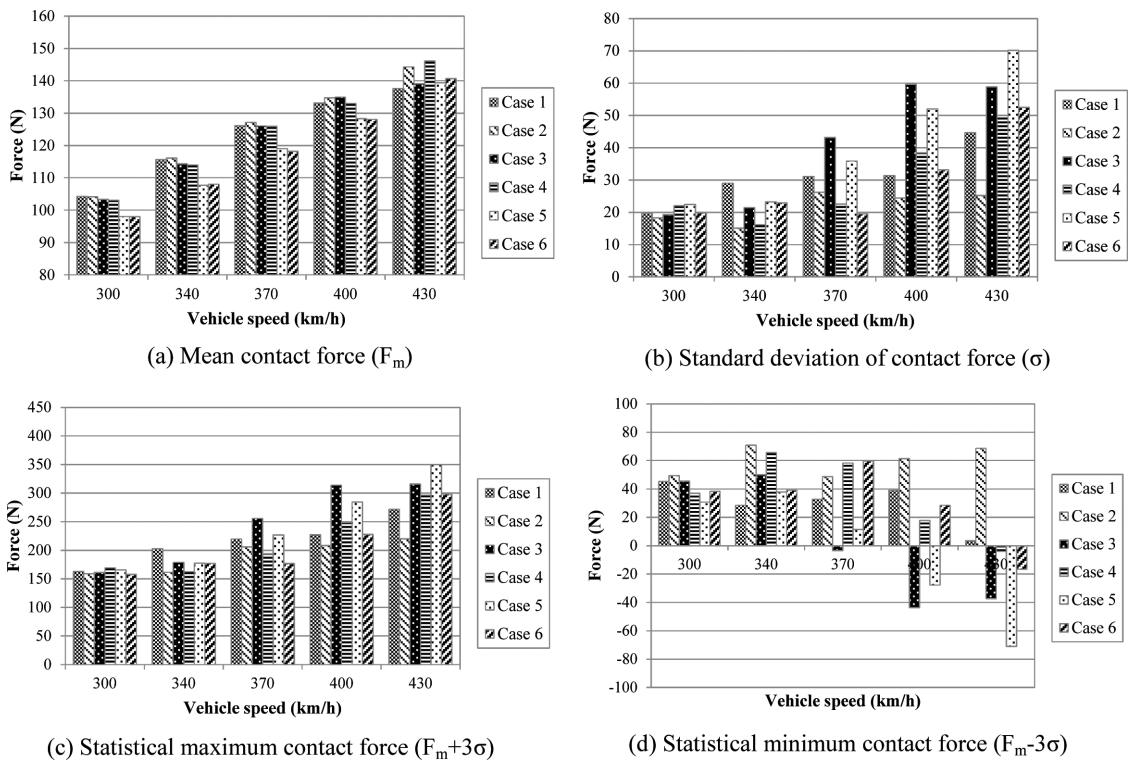


Fig. 7 Estimation of current collection performance of HEMU-430X

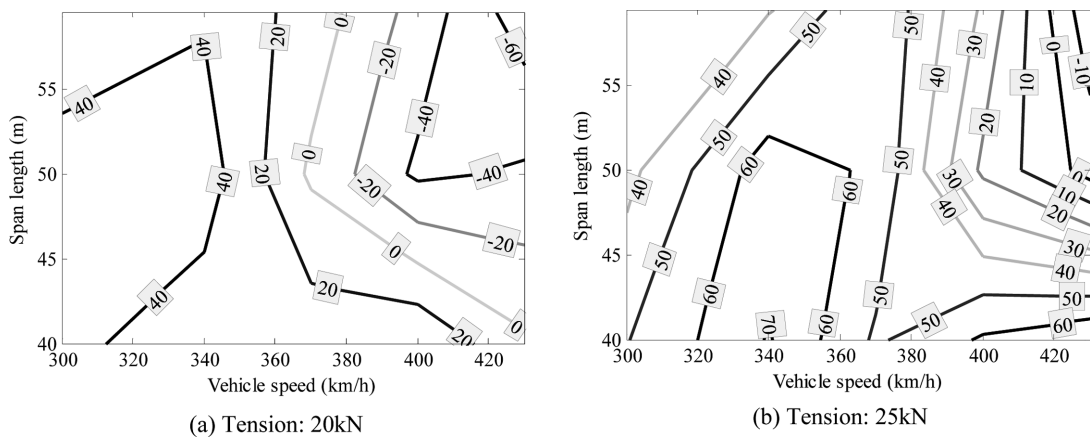


Fig. 8 Reasonable operating range

350km/h 이상에서의 시운전 결과의 분석 및 구체적인 이론적 접근을 통하여 보다 명확하게 파악할 필요가 있다.

2001년도에 제정된 철도차량 운영에 관한 국제 규정인 EN 50119에서는 철도 차량의 속도가 시속 200km이상일 때에, 평균 접촉력은 200N 미만, 통계적 최대 접촉력은 350N 미만 그리고 통계적 최소 접촉력은 0N 초과가 될 것을 권고하고 있다[10]. 그 규정에 따르면 장력이 작고 경간 길이가 길며, 주행속도가 높은 일부 Case에서 기준에 미달하는 결과를 보인다. Fig. 8은 통계적 최소 접촉력에 대하여 EN 50119에서 제시하는 기준에 근거하여 장력이 (a)20kN과 (b)25kN일 때, 경간길이와 주행속도에 대하여 안전 운행 영역을 도시한 그림이다. 각 그래프에서 통계적 최소 접촉력이 음의 값을 갖는 영역이 이선이 발생할 확률이 높은 영역이며, 주로 주행속도가 높고 경간의 길이가 긴 영역이 이에 해당하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 고속주행 집전성능확보와 관련하여 예상되는 문제점을 해소하기 위해선 판토티그래프 물성치의 최적화 및 전체 압상력 반동동 제어의 적용을 통한 고속영역에서의 집전성능 향상이 병행되어야 할 것으로 예상된다. 마지막으로, 본 논문에서 현재 적용된 총 압상력의 크기는 국제 규정 EN 50367에서 제시한 목표 평균 접촉력($F_m=0.00097 \cdot V^2+70N$)에 미달하는 수치이므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다[11].

6. 결 론

본 연구에서는 유연 다물체 동역학 기반 집전성능 해석 프로그램을 이용하여 현재 개발 중인 차세대 고속철도를 대상으로 한 모델을 개발하고, 가선계와 판토티그래프의 동적 상호작용을 해석 및 평가하였다. 가선과 판토티그래프 모델은 각각 현재 구축된 시험선 및 개발 모델을 반영하였고, 해석 모델의 신뢰성은 실제 시험선 계측 데이터와의 비교를 토대로 확보할 수 있었다. 검증된 해석 모델을 이용하여 실제 가선 형식인 s40, s50과 s59.5에 대하여 집전성능 해석을 수행하였으며, 현재 구축된 가선에 대하여 속도 향상 방안으로 장력을 증가 시킨 가선에 대하여도 동일한 성능 평가를 수행하였다. 해석 결과는 국제 규정에 근거하여 운영 적합성 여부를 판단하였고, 경간의 길이가 짧을수록 안정적인 집전성능을 보이며, 장력을 증가시킬수록 성능이 향상 됨을 확인하였다. 하지만, 최고 시속 430km에서 보다 안정적인 집전성능의 확보를 위해서는 판토티그래프의 물성치를 최적화하거나 반동동 제어 적용 등을 통하여 추가적인 성능개선이 필요함을 판단할 수 있었다. 본 논문의 결과가 차세대 고속철도의 성능향상 및 차후 개발될 고속철도의 집전시스템을 설계하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] S.K. Lee, S.M. Kim (1996) Wave propagation characteristics along a simple catenary with arbitrary impedance conditions, *Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers A*, 20(11), pp. 3463-3473.
- [2] A.A. Shabana (2005) *Dynamics of Multibody Systems*, 3rd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 309-323.
- [3] EN 50318 (2002) *Railway applications - current collection systems - validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line*, BS EN.
- [4] J.H. Lee, T.W. Park (2012) Development and verification of the dynamic analysis model for the current collection performance of the high-speed train using absolute nodal coordinate formulation, *Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36(3), pp. 245-353.
- [5] J.W. Seo, T.W. Park (2005) Dynamic analysis of a pantograph-catenary system for high-speed train, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 22(1), pp. 152-159.
- [6] N. Zhou, W. Zhang (2011) Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, pp. 288-295.
- [7] Y.S. Kim, H.C. Yoo (2008) *Electric Railway*, Dongil Press, South Korea, pp. 484-490.
- [8] Y.H. Cho, K.W. Lee (2010) Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, pp. 1471-1490.
- [9] UIC Code 799 OR (2002) *Characteristics of a.c. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds of over 200 km/h*, International Union of Railway.
- [10] EN 50119 (2001) *Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact line*, BS EN.
- [11] EN 50367 (2006) *Railway applications - Current collection systems - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line*, BS EN.

접수일(2012년 6월 22일), 수정일(2012년 8월 20일),
게재확정일(2012년 8월 27일)

Jin Hee Lee : ljh1227@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Tae Won Park : park@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea