

# 차세대고속전철용 판토틀라프에 대한 성능 검증 Verification about the HEMU Pantograph Performance of the Dynamics Behaviors

김기남†      조용현\*      고태환\*\*      장현목\*\*\*  
Ki-Nam Kim   Yong-Hyeon Cho   Tae-Hwan Ko   Hyeon-mog Jang

## ABSTRACT

The pantograph on HEMU400 perform the simulation of following characteristics for pantograph's performance prediction and confirming the EN50119's requirement. To meet the performance requirements for the input data are proposed. Simulation result of the performance requirements are satisfied from proposed input data. The new model was developed by proposed data base on the simulation result. A new developed model data used in following characteristics meet to be sure about what the test was done to count the equivalence of mass. Depending on the results of test to performance prediction, and propose research directions.

## 1. 서론

차세대고속전철에 적용되는 판토틀라프에 대한 주행 성능 예측을 위하여 EN 50119 에서 요구하는 성능을 만족하는지를 확인하기 위하여 추종 특성 분석을 수행하였다. 추종특성 분석 결과에 따라 판토틀라프의 설계변수( $m, c, k$ )에 대한 설계변경이 발생하였다. 추종특성 분석 결과를 통하여 현재 모델에 대한 성능 검토 및 차세대고속전철에서 요구하는 성능을 만족하기 위한 설계변경 방안을 제시하였으며, 제시된 입력 변수를 만족하기 위하여 판토틀라프 모델에 대한 설계변경이 진행되었다. 본 논문에서는 새롭게 개발된 모델이 추종특성 분석에 사용된 입력 변수를 만족하는지에 대한 확인을 위하여 등가 질량에 대한 확인 시험을 수행하였으며, 시험결과에 따라 확인된 차세대고속전철용 판토틀라프에 대한 성능을 예측해 보고 향후 연구방향에 대한 제시를 한다.

## 2. 본론

### 2.1 차세대고속전철용 판토틀라프의 주행 조건

차세대고속전철이 시속 400 km/h 로 주행하기 위해서 가장 중요한 것이 지상설비와의 인터페이스 문제를 해결하는 것이다. 그중에서 판토틀라프는 가선과 접촉을 해야 하므로 가선과의 인터페이스 문제는 세계 어디에서나 항상 중요한 문제가 되고 있다. 그 만큼, 판토틀라프와 가선과의 상호작용(Interaction)에 대한 문제는 고속전철의 속도향상을 위한 화두가 되고 있다.

판토틀라프와 가선과의 상호작용에 대한 문제는 파동전파속도(Wave motion spread speed)를 규정하여 관리하고 있으며, 파동전파속도는 전차선 장력을 전차선의 단위 질량으로 나눈 값의 제곱근으로 표현한다. 따라서, 전차선의 장력이 클수록, 전차선의 단위 질량이 작을수록 파동전파속도는 커지게 되며, 그에 따라 차량의 주행 가능한 허용속도가 증가하게 된다. 일반적으로 적용되는 파동전파속도에 대한 규정은 도표 1과 같다.

† 교신저자, 유진기공산업(주) 철도차량기술연구소  
E-mail : knkim@yujinltd.co.kr

\* 한국철도기술연구원, 집전전력연구실

\*\* 한국철도기술연구원, 신소재 탈빙열차 시스템 연구단

\*\*\* 서울시 도시기반시설본부

도표 1. 파동전파속도에 대한 규정

구분	파동전파 속도(C)	비고
EN50119	70% 미만(무차원비 0.7 이하) 추천	2002년 3월 제정
UIC 799-OR	$V_{max} + 40\text{m/s}(144\text{km/h})$	2001년 9월 제정

차세대고속전철이 시속 400 km/h 로 주행하기 위해서는 최소한 파동전파속도가 572.0 km/h 이어야 하며, 파동전파 속도를 만족하기 위해서는 전차선의 장력이 33.7 kN 을 만족할 수 있어야 한다. 그러나, 차세대고속전철이 대구 - 경주구간의 2단계 경부고속선에서 시험운행을 할 경우 해당 노선에서는 가선의 장력은 안전을 고려하여 25 kN 이상으로 조정하기에는 무리가 있으므로 가선 장력 33.7 kN 을 확보할 수 없는 상황이며, 따라서 차세대고속전철은 25 kN 의 가선장력을 가지고 400 km/h 로 주행해야 하는 상황이다.

### 2.2 Proto 모델에 대한 추종특성 분석

가선장력 25 kN에서 차세대고속전철이 시속 400 km/h로 주행할 수 있는지에 대한 검토를 위하여 판토틀과 가선의 상호작용에 대한 추종특성 분석을 수행하였다. 추종특성 분석에 사용된 판토틀 모델의 입력 변수는 그림 1과 같으며 추종특성 분석에 대한 결과는 도표 2, 도표 3과 같다.

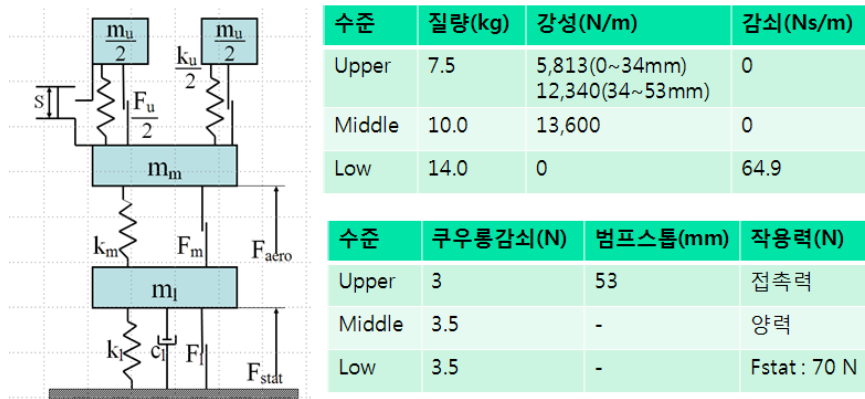


그림 1. Proto 모델에 대한 추종특성 분석을 위한 입력 변수

도표 2. Proto 모델에 대한 추종특성 분석 결과

구분	평균접촉력 (N, $F_m$ )	표준편차 (N, $\sigma$ )	최소접촉력 (N, $F_m - \sigma$ )	압상량 (mm)	최대접촉력 (N, $F_{max}$ )	장력 (kN)
350 km/h	180.9	50.0	77.1	80	293.6	26
400 km/h	138.0	66.4	-61.2	68.7	337.2	23
400 km/h	138.4	55.6	-28.4	58.2	305.2	26
기준	< 200	-	> Positive	< 200 (EN 50119)	< 350 (EN 50119)	-

성능 평가의 항목은 예측되는 평균 접촉력이 200 N 이하이어야 하며, 통계적 최대 접촉력( $F_m + 3\sigma$ )이 350 N 이하, 통계적 최소 접촉력( $F_m - 3\sigma$ )이 0 이상을 만족하여야 한다.

도표 3. Proto 모델에 대한 추종특성 분석 결과(속도 400 km/h, 장력 25 kN)

경간(m)	평균접촉력 F <sub>m</sub> , [N]	표준편차 σ, [N]	통계적 최대접촉력 F <sub>m</sub> +3σ[N]	통계적 최소접촉력 F <sub>m</sub> -3σ[N]
40.5	200.1	59.6	<b>379.0</b>	21.3
45.0	198.1	79.8	<b>437.5</b>	<b>-41.2</b>
49.5	198.7	81.9	<b>444.2</b>	<b>-46.9</b>
54.0	199.1	75.0	<b>423.9</b>	<b>-25.8</b>
63.0	198.9	80.5	<b>440.4</b>	<b>-42.5</b>

### 2.3 모델 설계 변경

2.2항의 추종특성 분석 결과에 따라 판토품에 대한 설계변경을 진행하였다. 설계변경은 그림 2의 추종특성 분석 입력 변수에서 등가질량을 줄이고 댐퍼의 성능을 증가시키는 방향으로 설계변경을 진행하였다. 설계변경 전후에 대한 비교는 그림 2와 같다.

구분	변경 내역		비고
	Ver.1	Ver.2	
모델			
상부 암			Cross pipe & Upper frame pipe 설계변경.
하부 암			U-자형 Tube 축소.
댐퍼	64.9 Ns/m <sup>2</sup>	200 Ns/m <sup>2</sup>	Damper 모델 변경

그림 2. Proto 모델에 대한 설계변경 내용 비교

변경된 모델에 대한 설계 입력변수는 그림 3과 같다. 변경된 모델에서는 판토품 상부 암을 2 pole 구조에서 1 pole 구조로 변경하였으며, 판토품 프레임 구조를 2수준 중량-스프링-댐퍼 모델로 모델링하였다.

또한, 변경된 모델은 차량의 속도에 따라 70 N 으로 설정된 정적 압상력을 가변적으로 제어하는 Semi-active control 방식을 적용하여 300 km/h 이상에서는 그림 4에서와 같이 압상력을 제어할 수 있도록 하였다.

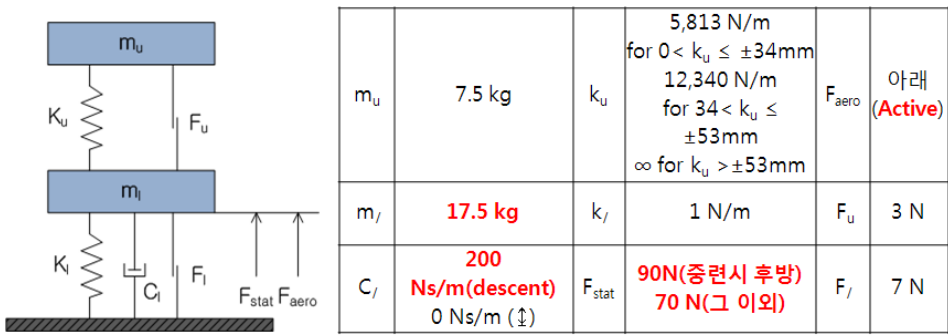


그림 3. 차세대고속전철용 변경 모델에 대한 추종특성 분석을 위한 입력 변수

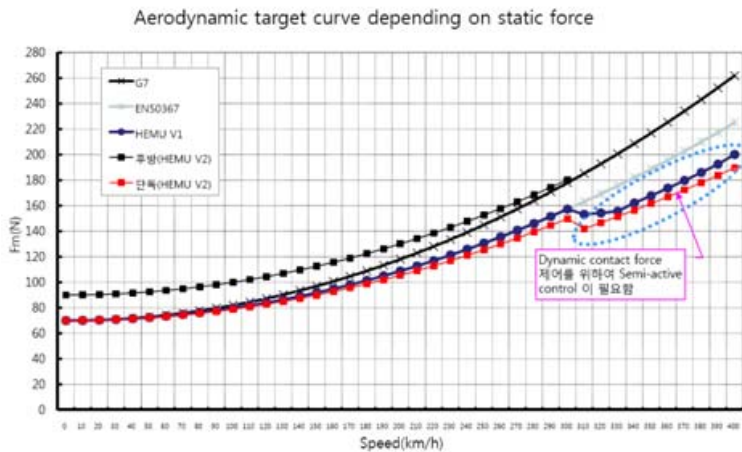


그림 4. 차세대고속전철용 판토틀라프의 압상력 제어 곡선

### 2.3 설계 변경된 모델의 추종특성 분석

그림 3 및 그림 4의 조건을 고려한 판토틀라프에 대한 추종특성 분석 결과는 도표 4 ~ 도표 6과 같다. 도표 4는 주행속도 370 km/h, 가선장력 23 kN 에서의 분석결과를 나타내고 있다. 분석결과에 의하며, 경간 49.5 m 에서 통계적 최소 접촉력이 요구조건을 만족하지 못하는 것을 알 수 있으며, 가선 장력이 25 kN 일 경우에는 도표 5 에서와 같이 통계적 최대 접촉력과 통계적 최소 접촉력이 EN50119의 요구조건을 만족하는 것을 알 수 있다.

도표 4. 수정 모델에 대한 추종특성분석 결과(속도 370 km/h, 장력 23 kN)

경간(m)	평균접촉력 $F_m$ , [N]	표준편차 $\sigma$ , [N]	통계적 최대접촉력 $F_m + 3\sigma$ [N]	통계적 최소접촉력 $F_m - 3\sigma$ [N]
40.5	170.8	56.4	340.0	1.5
45.0	170.7	42.4	298.0	43.5
49.5	170.2	57.7	343.3	-3.0
54.0	170.3	42.2	296.8	43.8
63.0	170.1	53.2	329.8	10.5

도표 5. 수정 모델에 대한 추종특성분석 결과(속도 370 km/h, 장력 25 kN)

경간(m)	평균접촉력 $F_m$ , [N]	표준편차 $\sigma$ , [N]	통계적 최대접촉력 $F_m + 3\sigma$ [N]	통계적 최소접촉력 $F_m - 3\sigma$ [N]
49.5	170.7	41.5	295.5	46.0

주행속도 400 km/h 에서는 도표 6 에서와 같이 경간 45 m 와 49.5 m에서 최소 접촉력이 요구조건을 만족하지 못하고 있으며, 최대 접촉력도 전체적으로 요구조건을 만족하지 못하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

도표 6. 수정 모델에 대한 추중특성분석 결과(속도 400 km/h, 장력 25 kN)

경간(m)	평균접촉력 Fm, [N]	표준편차 σ,[N]	통계적 최대접촉력 Fm+3σ[N]	통계적 최소접촉력 Fm-3σ[N]
40.5	187.8	52.3	344.7	30.8
45.0	187.5	63.8	<b>378.8</b>	<b>-3.8</b>
49.5	187.2	63.4	<b>377.4</b>	<b>-3.0</b>
54.0	187.2	60.0	<b>366.9</b>	7.5
63.0	187.2	60.1	<b>367.6</b>	6.8

## 2.4 판토품프레임 등가 질량 확인 시험

제작된 시작품에 대한 등가질량 확인을 통하여 실제 추중특성 분석에 사용된 입력 변수에 대한 검증이 필요하며, 제작된 시작품을 이용하여 등가 질량 확인 시험을 수행하였다.

시험은 고속선에서 판토품프레임의 작용 높이를 고려하여 진행하였으며, 애자를 제외하고 판토품프레임 설치 높이에서 450 mm, 600 mm, 800 mm 기준으로 시험을 진행하였으며, 실제 집전헤드의 높이를 고려하면, 고속선 가선높이 전체를 포함하게 된다. 시험 결과는 DAQ(NEC Omnicore II RA1300) 를 이용하여 기록하였으며, 데이터는 5ms 단위로 취득하였다.

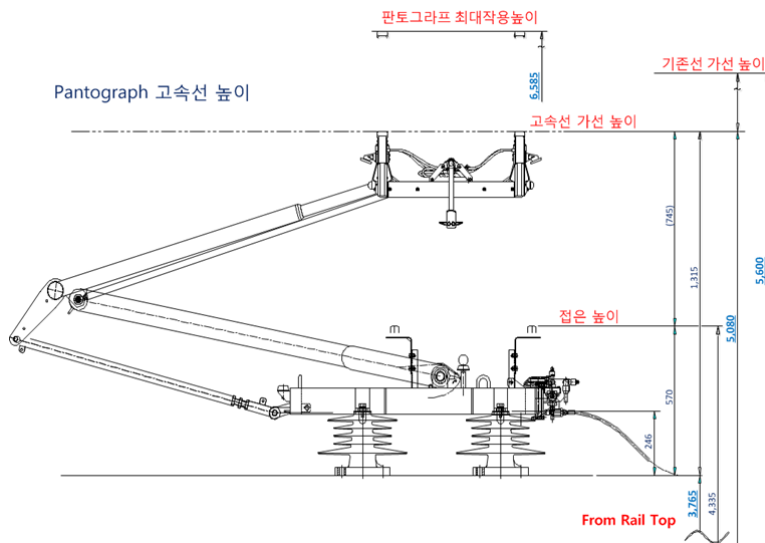


그림 5. 차세대고속전철용 판토품프레임 설치 및 작용 높이

등가 질량( $m_{eq}$ ) 측정을 위한 시험 장치는 그림 6 과 같으며, 등가 질량은 고유 진동수( $f_n$ ) 측정을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_{eq} = \frac{k}{(2\pi f_n)^2} - m_{ad} \quad (\text{식 1})$$

시험에 사용된 스프링 상수( $k$ )는 530 N/m 로 확인 되었으며 프레임의 자유 진동에 의한 고유진동수는 판토품프레임 높이가 800 mm 일 경우 그림 8에서 보여 주듯이 1.172 Hz가 되므로 프레임에 대한 등가 질량은 9.77 kg 을 얻게 된다. 추가질량( $m_{ad}$ ) 은 스프링이 프레임 자중에 의하여 충분한 변위를 가지므로 추가로 부여하지는 않았다. 다만, 그림 6의 우측 그림에서와 같이 추가 질량을 부여한 것은 별도의 비교

시험을 목적으로 수행 하였다.

$$m_{eq} = \frac{k}{(2\pi f_n)^2} - m_{ad} = \frac{530}{(2 * \pi * 1.172)^2} - 0 = 9.77 \text{ kg}$$

그림 3에서와 같이 추종특성 분석에 사용된 입력변수 17.5 kg 은 프레임의 등가 질량에 스프링 케이스, 취부 브라켓, 스프링등의 질량을 추가하면 17.96 kg으로 계산된다. 판토폴라프 높이에 따른 등가 질량의 변화는 도표 7과 같다.

도표 7. 판토폴라프 높이에 따른 등가 질량

시험 높이 (mm)	고유진동수 (Hz)	프레임 등가 질량 (kg)	m <sub>f</sub> (kg)	비고
450	1.221	9.005	17.19	
600	1.196	9.385	17.57	
800	1.172	9.773	17.96	

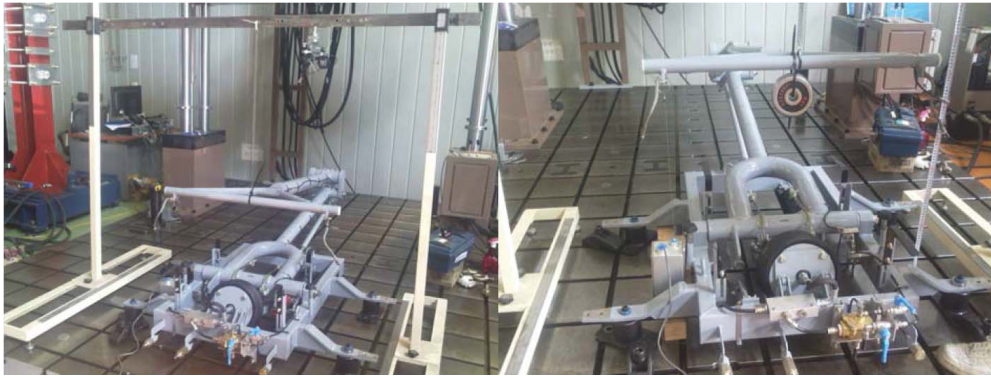


그림 6. 차세대고속전철용 판토폴라프 프레임에 대한 등가 질량 확인 시험



그림 7. 시험에 사용된 스프링 및 변위계

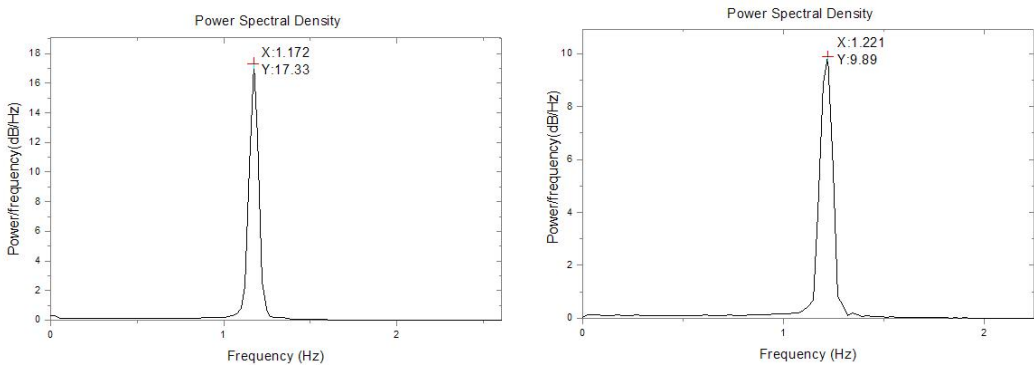


그림 8. 프레임 등가 질량 측정시 자유 진동 변위에 대한 주파수 분석 결과



추중특성 분석 결과에 영향을 주는 인자중에서 집전헤드의 무게, Suspension 구조에 따른 스프링 특성, 프레임 등가 질량 등이 큰 영향을 미치게 되며, 실제로 그림 9 ~ 그림 10 및 도표 8에서와 같이 프레임에 인위적으로 추가 질량을 부여한 시험결과와 비교하면 상당한 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 판토품 프레임의 등가 질량을 줄이는 것은 판토품의 성능 향상에 중요한 역할을 한다.

도표 8. 무게추 추가에 따른 등가 질량의 비교

시험 높이 (mm)	추가 중량 (kg)	고유진동수 (Hz)	프레임 등가 질량 (kg)	비교
450	0	1.221	9.005	
	1	1.172	9.773	△0.768
600	0	1.196	9.385	
	1	1.147	10.204	△0.819

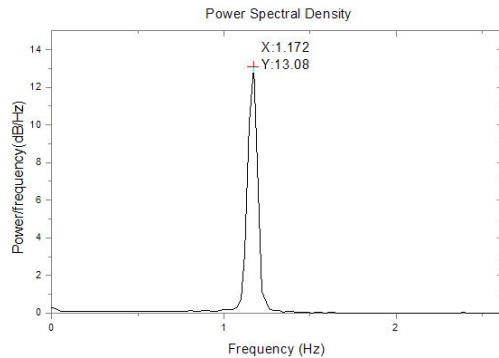
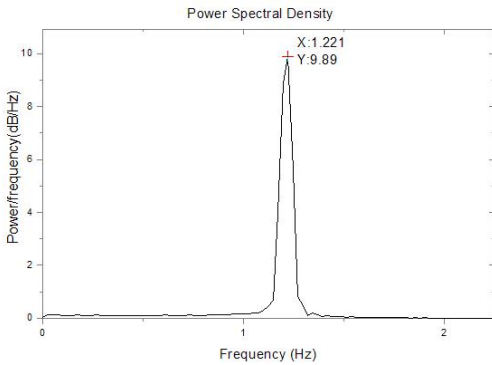


그림 9. 프레임에 1 kg의 무게추를 추가한 시험결과(우측) 비교(시험높이 450 mm)

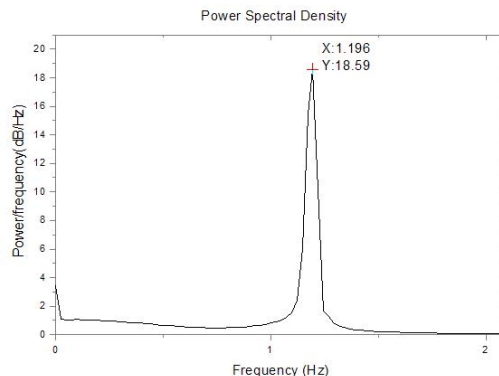
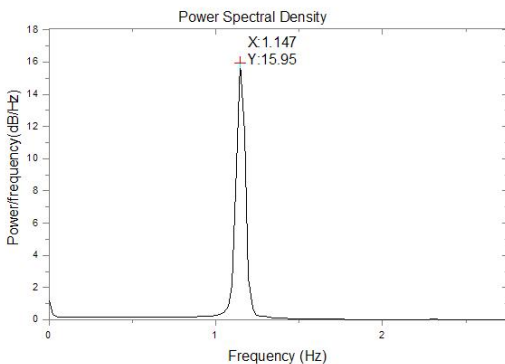


그림 10. 프레임에 1 kg의 무게추를 추가한 시험결과(우측) 비교(시험높이 600 mm)

### 2.4 등가 질량 확인 시험 결과에 따른 설계 보완

2.3의 결과에 따라 판토품 프레임의 등가 질량을 추가(약 0.7 kg)로 줄여야 하는 문제가 발생하였다. 또한, 도표 6에 따르면 전체적인 해석결과에서 판토품의 성능을 개선할 필요가 있으므로 최종 모델은 추가로 일부 설계변경등을 진행될 예정이다.

### 3. 결론

차세대전동차는 400 km/h 뿐만 아니라 430 km/h 주행을 위한 추가 성능 검토가 필요하다. 따라서, 판토품 측면에서도 추가로 설계변경을 통하여 지속적으로 성능을 향상시킬 필요가 있다. 향후 판토품

라프의 성능 향상을 위하여 검토되어야 할 부분을 도표 9에 정리하였으며, 430 km/h 주행시에는 그림 11에서와 같이 압상력 제어 곡선을 조정하여야 한다.

도표 9. 성능향상을 위한 추가 검토 사항

구분	추가 검토 사항	비고
집전헤드 중량	430 km/h 주행을 위한 m1 중량에 대한 절감 방안 검토.	
Carrier	Steel carrier 대신에 Al carrier 적용 검토.	
집전용량	700A 의 적절성 검토.	
주습판 소재	메탈라이즈 카본에서 순수 카본 적용 검토.	

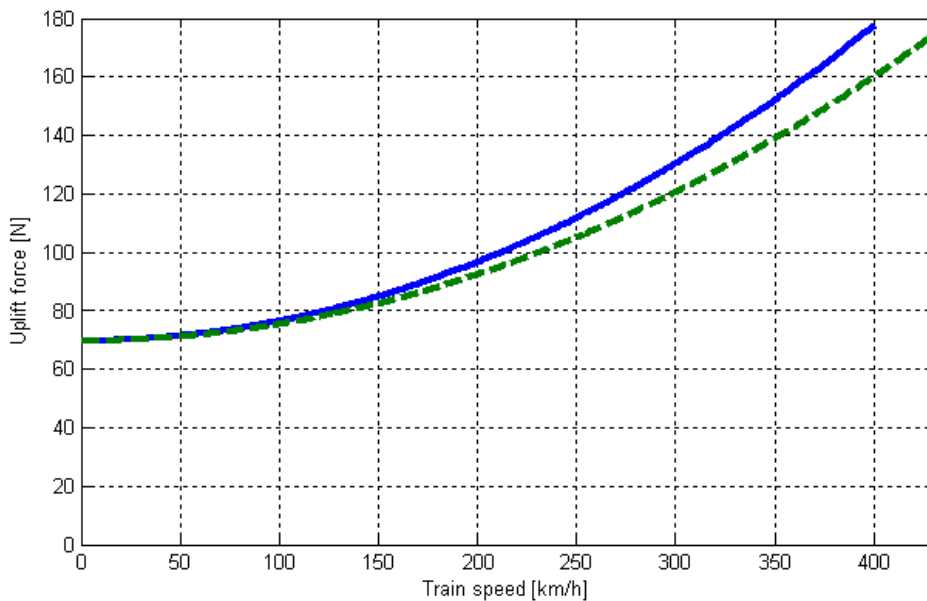


그림 11. 430 km/n 주행시 차세대고속전철용 판토틀라프의 압상력 제어 곡선

### 참고문헌

1. 김기남, 조용현, 고태환, “HEMU용 판토틀라프 시작품에 대한 양력 측정 결과”, 한국철도학회, 2010년 추계철도학회, 2010. 10, pp. 1036~1043 (8pages).
2. 권혁빈, 조용현, 이기원, 김기남, “고속철도차량용 팬티그래프의 공력특성 평가를 위한 실모형 풍동시험”, 한국철도학회 논문집, 제12권 제5호(통권54호), 2009. 10, pp. 732 ~ 737 (6pages).
3. 김기남, 조용현, 고태환, 권혁빈, “구배조건부 판토틀라프 모델에 대한 공력특성 평가”, 한국철도학회, 2009년 춘계학술대회, 2009. 5, pp. 152 ~ 161 (10pages).
4. 고태환, 김기남, 한성호, 최영민, “한국형 틸팅열차 판토틀라프의 추종성능 특성 시험”, 한국철도학회, 2006년 춘계학술대회, 2006. 5, pp. 15 ~ 20 (6pages).
5. EN50367:2006, Railway applications - Current collection system - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line.
6. EN50119:2001, Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines.