

차세대 고속철도 최고속도 시험에서 전차선 장력 증가 단계별 집전 성능 예측 시뮬레이션

A simulation study on predicting current collection performance with respect to the contact wire tension in 400km/h test run of the next high speed train HEMU-400X

권삼영† 박춘수* 안승화**
Kwon, Sam-Young Park, Chun-Soo An, Seung-Hwa

ABSTRACT

In the testing stage of HEMU-400X(next Korean high speed train) developing project, maximum speed(400 km/h) tests will be conducted. On present and near future conditions of the overhead contact lines, 400km/h is over the design speed criteria.

The predictions of current collection performance including the percentage loss of contact(arcs level) parameter through dynamic interaction simulation of HEMU-400X maximum speed test run are described in this paper. Various simulations are conducted at the condition of two different contact wire tensions to draw the proper contact wire increasing values in the 400km/h test line under the available contact wire tension supporting condition of that line.

1. 서론

차세대 고속철도 일명 HEMU-400X 차량 개발 사업이 본격적으로 추진되고 있다. 차세대 고속철도 사업에서는 HEMU-400X 개발 차량을 400km/h로 최고속도 주행 시험을 실시할 계획이다. 국내 고속철도 인프라의 현재 운영 중이거나 또는 구축 중인 노선의 설계 조건을 살펴볼 때, 이 최고 속도 시험은 정상적인 설계 속도나 또는 운영 속도 범위를 벗어나는 것이다. 따라서 특별한 대비나 허용 또는 변경을 행한 후 수행할 수밖에 없다. 특히 전차선로 측면에서는 이것 분명한 사실이다. 거의 확정적으로 굳어져가고 있는 시험선 노선으로는 경부 2단계 구간의 대구-경주 구간이다. 이 구간은 지금 건설 중이므로 HEMU-400X를 시험할 2012년쯤에는 개통 초기일 것이므로 전차선의 마모가 거의 없는 상태이므로 전차선의 장력을 높이는 것이 가능할 것이다. 또한 봄이나 가을과 같이 대풍과 같은 최악의 바람이 불지 않을 것이 확실한 조건이라면 전차선 장력을 조금 더 높이는 것이 가능할 것이다.

따라서 본 검토에서는 먼저 자체 개발한 전차선로-팬터그래프 동역학 시뮬레이션 프로그램의 정확성을 검증해 보고, 이 프로그램을 이용하여 경부 2단계 구간의 전차선로 조건에서 전차선 장력을 어느 정도 올리는 것이 HEMU-400X의 400km/h 시험 시에 보다 나은 조건인가를 집전 성능 예측을 통하여 검토해 보기로 한다.

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실

E-mail:sykwon@krri.re.kr, TEL:(031)460-5425 FAX:(031)460-5459

* 정희원, 한국철도기술연구원

** 비희원, 한국철도시설공단 KR연구원

2. 자체 개발한 동역학 시뮬레이션 프로그램의 검증

자체적으로 유한요소해석(FEM) 기법에 근거한 전차선로-팬티그래프 동특성 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 보유하고 있다. CaPoDyS 2.0이라 명명된 이 프로그램은 전차선로와 팬티그래프 사이의 기계적 상호 작용을 동역학적으로 구현한 것으로서, 접촉력과 압상량, 이동 궤적 및 이선을 등을 출력 데이터로 내어 집전 성능을 예측하는데 적합하도록 구성되어 있다.

이 프로그램을 이용하여 최고 속도 시험 시의 집전 성능 예측하기 전에 먼저 이 프로그램의 정확성을 검증하는 것이 필요할 것이다. EN50318에는 집전 성능 시뮬레이션 프로그램을 검증하는 절차 및 방법이 기술되어 있다. EN 50318은 “Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line”라는 제목으로 2002년 7월에 최초 발행된 것으로, 가공 전차선로와 팬티그래프 사이 동역학 시뮬레이션을 검증하는 방법에 대하여 기술하고 있는 규격서이다. 이 규격에는 검증용 예시 모델을 제시하고 있으며 그 결과가 가져야 할 범위에 대해서도 언급하고 있다. 따라서 EN50318에 제시된 절차와 예시 모델에 따라 본 검토에서 사용하고자 하는 프로그램인 CaPoDyS 2.0을 검증해 보기로 한다.

2.1 EN30518의 예시 모델링 데이터

EN50318에서 검증용으로 제시하는 예시 전차선로 모델은 다음과 같은 Simple Catenary 타입이다.

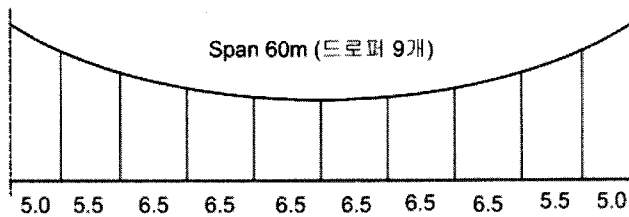


그림 1. Reference 커티너리 경간 및 드로퍼 configuration

표 1. Reference 커티너리 사양 데이터

항목	데이터
전차선 장력, 단위질량	20,000 N, 1.35 kg/m
조가선 장력, 단위질량	16,000 N, 1.07 kg/m
드로퍼 단위 질량, 드로퍼 클램프 질량	0.0 kg/m, 0 kg/개
곡선당김금구 길이, 단위질량	1.0 m, 1.0 kg/m
가고	1.2 m
편위	±0.2 m

전체 시뮬레이션 구간은 위의 60m 경간의 커티너리가 10경간 반복되는 구성으로 하고 양쪽 끝단의 전차선과 조가선은 고정점으로 처리하며 커티너리의 감쇠는 무시한다.

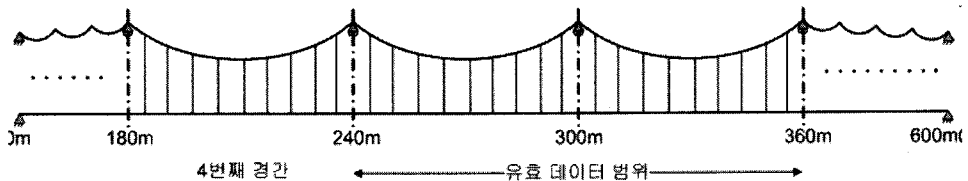


그림 2. 시뮬레이션 전체 구간 configuration

팬터그래프의 수학적 모델링은 그림 5.3의 모델과 같으며, 2단 질량 모델로서 각 단계에는 각각 스프링과 댐퍼가 있고, 팬터그래프에 작용하는 외부 힘은 두 번째 단계에 정적 압상력만 있고 공기역학적 양력은 없는 것으로 가정하고 있다.

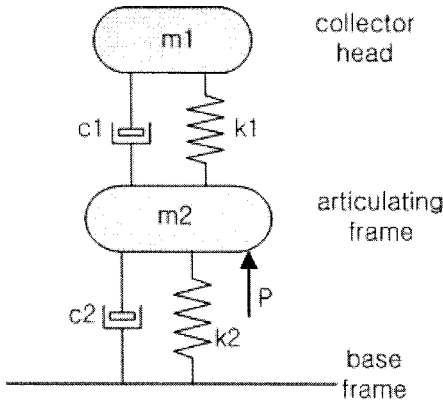


그림 3. 팬터그래프 수학적 모델

표 2. 수학적 모델링 데이터

변수	값	설명
m1	7.2 kg	집전판
m2	15.0 kg	관절 구조
kc	50000 N/m	접촉 가상 스프링
k1	4200 N/m	
k2	50 N/m	
c1	10	
c2	90	
P	120 N	정적압상력

속도는 250km/h와 300km/h 두 가지로 하고, 시뮬레이션 구간에서 양 끝단의 고정점의 영향을 배제하기 위하여 유효 데이터는 가운데 2경간(5~6번째)만으로 하고, 출력 데이터는 20Hz에서 필터링한다.

2.2 EN30518 절차에 따른 시뮬레이션 결과의 비교 및 검토

EN50318에는 시뮬레이션에서 추출해야 하는 결과 값의 종류와 결과 값이 가져야 할 범위를 명시해 놓고 있다. 이에 따라 개발 프로그램으로 시행한 시뮬레이션에서 얻은 데이터를 추출하여 비교하였다.

표 3. Reference 모델에 대한 EN50318 결과와 비교 (V=300km/h)

항목	EN50318에서 제시한 값	CaPoDyS 2.0으로 수행한 결과
평균 접촉력 F_m [N]	110 ~ 120	117.2
접촉력 표준편차 σ [N]	32 ~ 40	38.2
통계적 최대접촉력($F_m+3\sigma$) [N]	210 ~ 230	231.8
통계적 최소접촉력($F_m-3\sigma$) [N]	-5 ~ 20	2.6
실제 최대 접촉력 [N]	190 ~ 225	208.1
실제 최소 접촉력 [N]	30 ~ 55	62.1
전주에서 최대 압상량 [mm]	55 ~ 65	60
이선율 [%]	0	0.0

표 4. Reference 모델에 대한 EN50318 결과와 비교 (V=250km/h)

항목	EN50318에서 제시한 값	CaPoDyS 2.0으로 수행한 결과
평균 접촉력 F_m [N]	110 ~ 120	118.3
접촉력 표준편차 σ [N]	26 ~ 31	29.5
통계적 최대접촉력($F_m+3\sigma$) [N]	190 ~ 210	206.8
통계적 최소접촉력($F_m-3\sigma$) [N]	20 ~ 40	29.8
실제 최대 접촉력 [N]	175 ~ 210	172.2
실제 최소 접촉력 [N]	50 ~ 75	56.8
전주에서 최대 압상량 [mm]	48 ~ 55	49
이선율 [%]	0	0.0

위의 두 테이블에서 보는 바와 같이 개발 프로그램으로 시뮬레이션한 결과는 접촉력 부문과 통계치 부문, 압상량 부문에서 대부분 EN50318에서 제시하는 결과의 범위 이내에 들어감을 볼 수 있다. 다만, 통계적 최대 접촉력과 실제 최소 접촉력과 최대 접촉력 부문에서 미소하게 EN50318에서 제시하는 카테고리를 벗어나고 있으나 이것은 데이터 처리 과정에서 사소한 차이에 의하여 매우 민간하게 반응할 수 있는 데이터 들이라고 사료되고, 또는 그 정도의 사이는 이해할 수 있는 범위인 것으로 판단되어 그래도 수용하여도 무방하다고 사료된다. 따라서 이에 본 개발 프로그램의 신뢰성은 EN50318의 인정 절차에 따라 정확성이 검증된 것으로 판단된다.

3. 차세대 고속철도 HEMU-400X의 최고속도 시험

차세대 고속철도 사업에서는 개발하는 HEMU-400X 차량을 400km/h까지 시험하여야 한다. 이 속도에서의 시험을 위해서는 현재 거의 시험선구로 확정되어가고 경부 2단계 대구-경주 구간이 신선 건설 구간이라 하더라도 전차선로에 변경을 주어야 한다. 즉, 장력을 증가시키야만 가능할 것이다. 이것은 이미 참고문헌 1.에서 검토된 바가 있다. 참고문헌 1.에서는 전차선이 신선이므로 15% 마모 여유분 만큼인 3kN을 높여 23kN으로 장력 상승시키고 시험하는 것에 대하여 집전 성능을 검토한 바 있다.

그러나 여기서는 장력을 한 단계 더 상승시키는 방안에 대하여 검토하고자 한다. 참고문헌 1.에서 검토한 바로 400km/h에서는 이선율이 상당히 높아 아크로 인한 전차선 손상의 가능성이 전혀 없다고 보장할 수 있는 상황이 아니므로, 그렇다면 장력을 더 높여 안전하게 시험하는 방안이 좋지 않을까 하는 생각에서 이 방안의 모색이 시작되었다. 이것은 시험 시기를 봄이나 가을 계절에 실시함으로써 설계에서 최악 조건으로 상정하고 있는 태풍과 같은 최대 풍속이 불지 않을 것이 확실한 조건이라면, 전차선 장력을 조금 더 높이는 것이 가능할 것이라는 판단에서다. 이것(장력을 추가로 높이는 것)의 상세한 사항은 설계에서 상정하는 계산 조건을 다 따져보아야 할 일이지만 여기서는 그 가능한 조건을 따지는 것은 다른 검토에서 다루기로 하고 여기서는 장력을 23kN보다 더 높게 추가로 높이는 것이 가능하다는 전제에서 검토해보기로 한다.

4. 전차선 장력별 집전 성능 예측

따라서 여기서는 전차선로 경간 63m, 54m, 45m, 40.5m 네 가지 경우에 대하여, 전차선 장력을 23kN으로 했을 때와 25kN으로 더욱 올렸을 때 2가지 경우를 검토 대상으로 놓고, 앞에서 검증한 CaPoDyS 2.0 프로그램으로 집전 성능을 시뮬레이션해 보고자 한다.

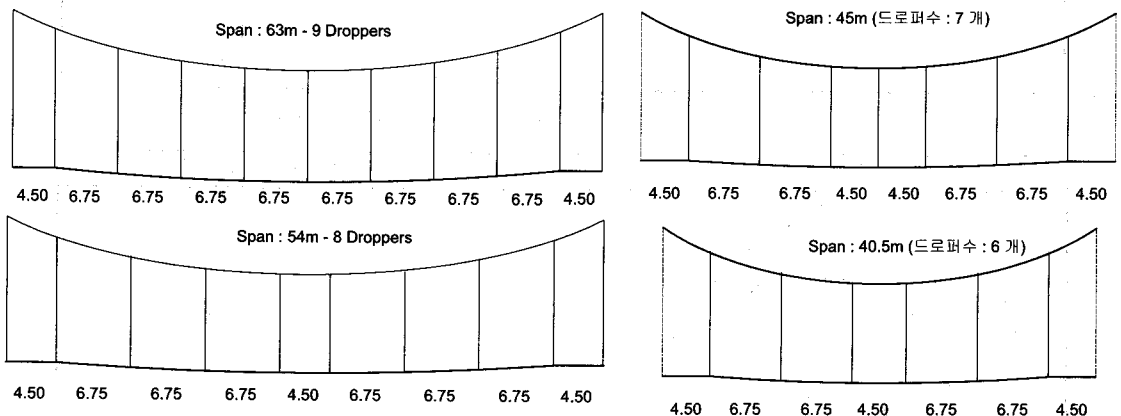


그림 4. 시뮬레이션 대상 경간 configuration

표 5. 커터너리 모델링 데이터

항목	데이터
전차선	23kN/25kN, 1.334kg/m
조가선	14kN, 0.605kg/m
드로피	0.108kg/m, 0.125kg/개
곡선당김금구	1.2 m, 1.6 kg/개
가고	1.4 m
Pre-sag	span/2000

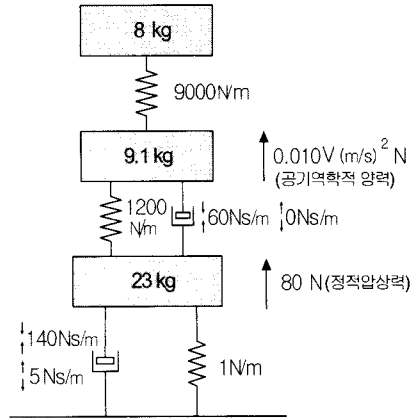


그림 5. 팬티그래프 모델링 데이터

시뮬레이션 결과는 다음 표와 같이 요약된다.

표 6. KHSL C.W.23kN, 400km/h

변수	단위	KHSL 63m	KHSL 54m	KHSL 45m	KHSL 40.5m
평균 접촉력 (Fm)	N	222.4	217.9	209.7	203.2
접촉력 표준편차 (σ)	N	79.3	74.1	77.3	68.5
통계적 최대접촉력 (Fm+3 σ)	N	460.3	440.2	441.6	408.7
통계적 최소접촉력 (Fm-3 σ)	N	-15.5	-4.4	-22.2	-2.3
전주에서 압상량(5/6/7th)	mm	11.8/14.0/12.8	99.6/12.5/12.8	87.3/98.3/12.1	87.3/84.8/10.6
이선율 1 (EN50318)	%	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)
이선율 2 (KTGV)	%	3.7 ($\geq 7.2_{ms}$)	2.9 ($\geq 7.2_{ms}$)	4.4 ($\geq 7.2_{ms}$)	4.9 ($\geq 7.2_{ms}$)
이선율 4 (Raw Data)	%	9.0 ($\geq 0.36_{ms}$)	8.5 ($\geq 0.36_{ms}$)	8.8 ($\geq 0.36_{ms}$)	9.1 ($\geq 0.36_{ms}$)

표 7. KHSL C.W.25kN, 400km/h

변수	단위	KHSL 63m	KHSL 54m	KHSL 45m	KHSL 40.5m
평균 접촉력 (Fm)	N	219.1	217.7	211.4	205.9
접촉력 표준편차 (σ)	N	63.0	67.5	71.8	65.1
통계적 최대접촉력 (Fm+3 σ)	N	408.1	420.2	426.8	401.2
통계적 최소접촉력 (Fm-3 σ)	N	30.1	15.2	-4	10.6
전주에서 압상량(5/6/7th)	mm	11.5/12.0/11.2	92.7/11.3/10.4	74.1/95.4/10.5	69.1/80.7/99.0
이선율 1 (EN50318)	%	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)	0.0 ($\geq 36_{ms}$)
이선율 2 (KTGV)	%	3.1 ($\geq 7.2_{ms}$)	2.2 ($\geq 7.2_{ms}$)	3.5 ($\geq 7.2_{ms}$)	2.9 ($\geq 7.2_{ms}$)
이선율 4 (Raw Data)	%	6.5 ($\geq 0.36_{ms}$)	5.7 ($\geq 0.36_{ms}$)	6.3 ($\geq 0.36_{ms}$)	7.0 ($\geq 0.36_{ms}$)

5. 결론

위의 시뮬레이션의 결과 데이터를 비교 검토하여 보면, 전차선의 장력을 23kN 보다 25kN으로 한 단계 더 올린다면 400km/h 주행 시의 접촉력 통계 데이터, 전차선 압상량 및 이선율이 좋아지는 것이 확연해 보인다. 따라서 경부고속철도 2단계 구간에서 HEMU-400X 개발 열차를 400km/h 속도 시험을 실시하고자 할 때, 전차선로는 어차피 장력을 높이는 변경 작업을 하여야 하므로, 그럴 경우 장력을 23kN으로 올리는 것 보다는 속도가 높은 구간에 대해서는 25kN으로 올리는 방안이 보다 적합해 보인다. 따

라서 장력을 25kN 또는 그 이상으로 올리는 방안에 대하여 보다 면밀하게 설계 기본 데이터 검토를 통한 가능성을 분석해 보고 타진해 보는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도 기술개발 사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권삼영, 박춘수, 조용현, 이기원, 박영, "차세대 고속철도의 최고속도 시험 계획 수립을 위한 집전 성능 예측 시뮬레이션", 한국철도학회 춘계학술대회, 2008. 6
2. ERRI, "EN 50318-Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", 2002.7
3. 한국건설교통기술평가원(한국철도기술연구원), "차세대 고속전철 기술개발사업 기획보고서" 2006.
4. SYSTRA, "Honam Line Electrification Catenary Dynamic Simulation Report" , 2001