

속도 축척 모형 실험 방법을 통한 집전계 성능 분석 연구의 실험 방법 및 효율성에 대한 연구

A study on experiment methods and effectiveness of the current collection study using the speed scale-downed catenary-pantograph model

박사훈*
Park, Sa-Hoon

권삼영**
Kwon, Sam-Young

ABSTRACT

To test the current collection characteristics between overhead contact lines and pantograph in a real speed scale costs too much, therefore, it is very difficult to be realized especially in a high speed region. As a alternative, the speed scale-downed tests is proposed. In this paper, the experimental methodology and effectiveness of the speed scale-downed tests are discussed through the dynamic simulation evaluations. To get a more precise test results to the real speed scale test in the 1/2 and 1/4 speed scale-downed tests, various experimental conditions are discussed. Throughout the simulation in a various conditions the effectiveness are evaluated.

1. 서론

전차선로와 팬티그래프로 이루어진 집전계에서 두 계(system) 사이의 동역학적 상호 작용이나 이선과 같은 집전 특성은 직접 현장 시험을 통하여 확인하는 것이 가장 정확하고 확실한 방법이며, 꼭 필요한 것으로 여겨지고 있다. 그러나 고속이 될수록 집전 성능을 직접 현장에서 시험을 통하여 실시하는 것은 매우 어려운 일이다. 우선 긴 시험선로가 있어야 한다. 예를 들어 속도 300km/h 정도로 실제 열차를 가지고 시험하려면 최소한 20 내지 30km 길이의 시험 선로가 있어야 한다. 400km/h를 시험하려면 30 내지 40km 이상의 시험 선로가 필요하다. 프랑스에서 2007년에 575km/h 최고속도 시험하는데 60km 이상의 시험선로를 사용했다. 다음으로 비용이 많이 필요하다. 또한 많은 인원이 동원되어야 한다. 이러한 경제적 및 현실적인 문제로 실제 선로에서 직접 시험하는 것은 불가능한 경우가 대부분이다. 그래서 대안으로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 방법이 이용되고 있다. 그러나 이것은 유용한 방법이지만 하나 현장 시험을 대체하는 방법이 아닌 하나의 보조적인 방법으로 간주되고 있는 것이 일반적인 관점이다.

2. 집전계 주행 시험기

실제 속도 스케일의 현장 시험에 대한 하나의 대안으로 속도 축척 모형의 집전계 주행시험기를 이용하는 방법이 있다. 집전계 주행시험기란 길이 500m 내지 1000m, 폭 3~4m 정도의 짧은 주행로를 갖는 전차선로 시험선로로서, 선로에 실제 전차선로를 가선하고 실제 스케일 크기의 팬티그래프를 탑재한

* 한국철도시설공단, 강원지역본부, 정희원

E-mail : psh429@hanmail.net

TEL : (033)749-7911 FAX : (033)749-7820 HP : 011-9714-4630

** 한국철도기술연구원

축소형 대차를 약 120~200km/h까지 급가감속으로 주행시켜 집전 성능 및 전차선로 설비의 신뢰성을 시험하는 설비이다. 그림 1에 개념도를 나타내었다. 유사한 설비의 예는 일본 철도종합연구소(RTRI)에서 찾아볼 수 있다. 그림 2~4에서 RTRI의 집전 시험기를 소개한다.

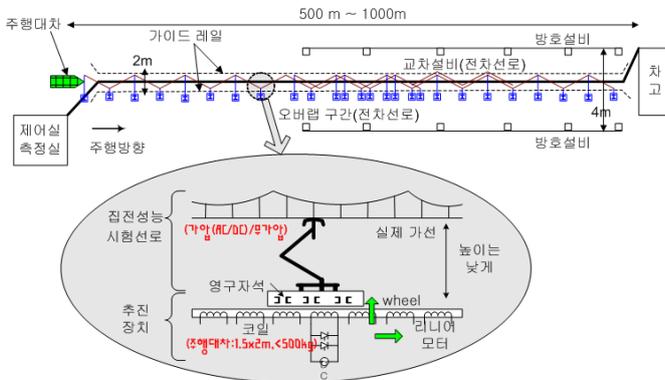


그림 1. 전차선로-집전계 주행시험기 개념도

일본 철도종합연구소(RTRI)의 집전 시험기 (1)

최초 구축

- ✓ 1990년대 초 완공
- ✓ 건설비 : 약 50억원 (당시 가격)
- ✓ 최고속도 : 150km/h
- ✓ 주행로 길이 : 500m

리모델링

- ✓ 2002년 초 완료
- ✓ 최고속도 : 200km/h
- ✓ 주행로는 그대로 두고, 경량화, 영구자석 교체, 전원설비 보강 등으로 고속화

그림 2. 일본 RTRI의 집전 시험기 소개(1)

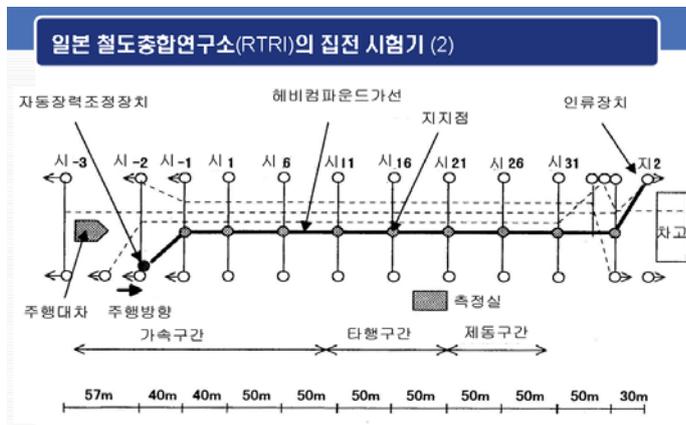


그림 3. 일본 RTRI의 집전 시험기 소개(2)

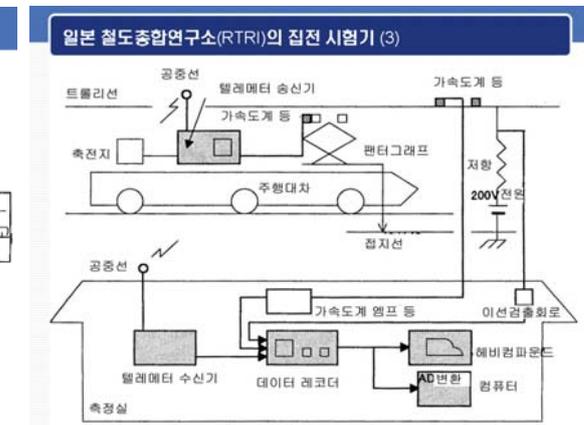


그림 4. 일본 RTRI의 집전 시험기 소개(3)

집전계 주행 시험기에서는 실제 가선과 실제 팬터그래프를 이용한다. 다만 속도를 실제 속도의 1/2이나 1/1.5 정도의 속도에서 시험을 행하지만 실제 속도에서의 특성을 우회적으로 확인하는 방법을 택하고자 한다. 이것의 실현 가능성을 여기서 검토해 보고자 한다.

3. 동역학 시뮬레이션 프로그램

집전 주행 시험기를 통한 전차선로-집전계의 속도 축척 모형 실험 방법의 타당성과 효율성을 검토해 보기 위하여 전차선과 팬터그래프 사이의 동역학 시뮬레이션 프로그램을 사용하기로 한다. 사용할 프로그램은 FEM 기법에 근거하여 전차선과 조가선을 현(string) 요소로 모델링하여 독자적으로 개발한 프로그램이다. 유럽 규격인 EN50318에 동역학 시뮬레이션 프로그램의 정확성을 검증(validation)하는 방법으로 예제(reference model) 시뮬레이션을 통한 검증(validation) 방법이 소개되어 있으므로 이를 따르기로 한다. EN 50318은 "Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line"라는 제목으로 2002년 7월에 최초 발행된 것으로, 가공 전차선로와 팬터그래프 사이 동역학 시뮬레이션을 검증하는 방법에 대하여 기술하고 있는 규격서이다.

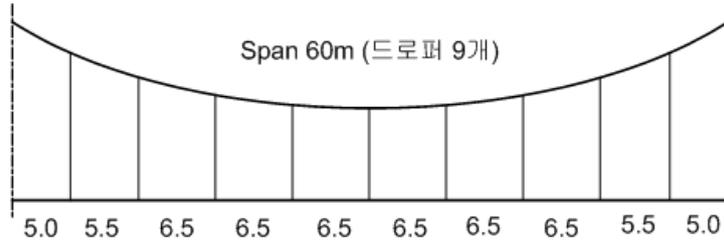


그림 5. EN50318 예제(reference) 커티너리 configuration

표 1. EN50318의 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 단위질량, 드로퍼 클램프 질량	0.0 kg/m, 0 kg/개
곡선당김금구 길이, 단위질량	1.0 m, 1.0 kg/m
가고 및 편위	1.2 m, ± 0.2 m

표 2. 수학적 모델링 데이터

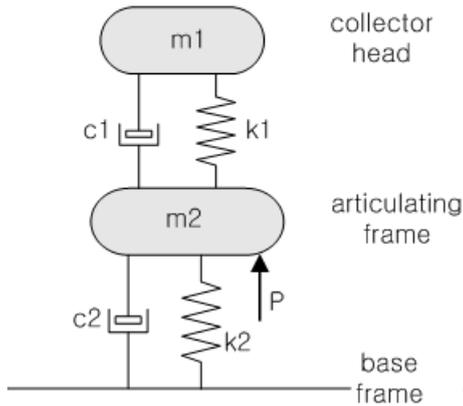


그림 6. 팬터그래프 수학적 모델

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

그림 5와 6 및 표 1과 2은 EN50318에서 제시하고 있는 입력 데이터로서, 이와 동일하게 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. EN50318에는 300km/h와 250km/h 두 가지 속도에 대하여 시뮬레이션하도록 요구하고 있으며, 이에 따라 실시하고 그 결과는 표 3과 4에 나타내었다.

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

항목	EN50318에서 제시한 값	본 프로그램으로 수행한 결과
평균 접촉력 F_m [N]	110 ~ 120	115.3
접촉력 표준편차 σ [N]	32 ~ 40	36.0
통계적 최대접촉력 ($F_m + 3\sigma$) [N]	210 ~ 230	223.3
통계적 최소접촉력 ($F_m - 3\sigma$) [N]	-5 ~ 20	7.3
실제 최대 접촉력 [N]	190 ~ 225	195.8
실제 최소 접촉력 [N]	30 ~ 55	2.1
전주에서 최대 압상량 [mm]	55 ~ 65	60.0
이선율 [%]	0	0.0

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

항목	EN50318에서 제시한 값	본 프로그램으로 수행한 결과
평균 접촉력 F_m [N]	110 ~ 120	115.8
접촉력 표준편차 σ [N]	26 ~ 31	30.9
통계적 최대접촉력 ($F_m+3\sigma$) [N]	190 ~ 210	208.4
통계적 최소접촉력 ($F_m-3\sigma$) [N]	20 ~ 40	23.2
실제 최대 접촉력 [N]	175 ~ 210	179.3
실제 최소 접촉력 [N]	50 ~ 75	26.4
전주에서 최대 압상량 [mm]	48 ~ 55	49.5
이선율 [%]	0	0.0

위 표 3과 4에서 보는 바와 같이, 독자 개발 프로그램으로 시뮬레이션한 결과는 평균 접촉력, 접촉력 표준편차 및 통계적 최소, 최대 접촉력 부분 및 압상량, 이선율 부분에 모두 EN50318에서 제시하는 결과의 범위 이내에 들어감을 볼 수 있다. 다만 일부 데이터에서 EN50318과 조금 다른 결과가 나왔으나, 이는 본 프로그램이 독자적인 데이터 필터링 알고리즘을 사용하고 있고, 또 접촉력 부분이 여러가지 조건과 실제계와 상관없는 미소한 변수의 변화에도 민감하게 반응하는 데이터이고, 필터에도 영향을 많이 받으며, 커티너리 감쇠가 없는 상황에서 프로그램 상의 내부적인 사소한 조건이 조금만 달라져도 민감하게 반응하고 크게 흔들리거나 일관성이 결여되는 측면도 있는 등 다년간 시뮬레이션을 해본 경험적으로 보았을 때 이정도의 차이는 이해 또는 허용될 수 있는 범위이므로 프로그램의 신뢰성은 검증된 것으로 보아도 무방하다고 판단하고 있다.

4. 속도 축척 모형 실험 방법에 대한 타당성 검토

앞에서 언급한 바와 같이 집전계 주행 시험기와 같은 짧은 시험선로를 활용하여 실제계보다 1/2정도 낮은 속도에서 시험이 실제계의 집전 성능을 판단하는데 유용하게 활용될 수 있을 지를 시뮬레이션으로 파악해 보기 위하여 검토 대상 전차선로를 다음 그림 7 및 표 5와 같이 선정하기로 한다.

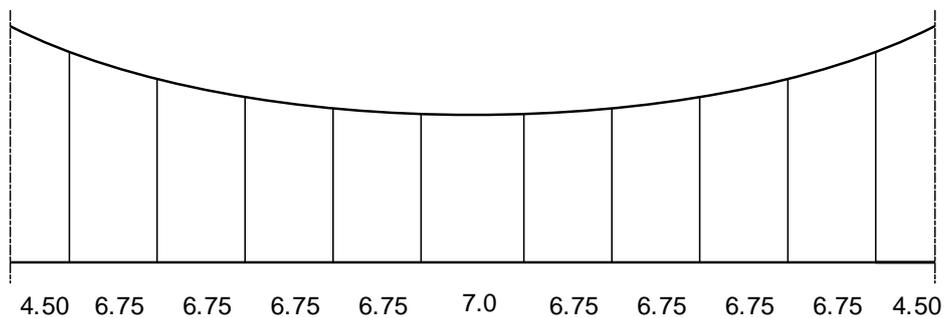


그림 7. 검토 대상 경간 선정(경간 길이 70m, 드로퍼 수 10개)

표 5. 검토 대상 경간(70m, 드로퍼 10개)의 제원

항목	데이터	비고
전차선 장력 및 선밀도	20000N, 1.334 kg/m	과동전과속도 : 440km/h (360km/h와의 비율 82%)
조가선 장력 및 선밀도	14000N, 0.605 kg/m	
드로퍼 및 드로퍼 클램프 단위질량	0.12 kg/m, 0.125 kg/개	
곡선당김금구 길이, 단위질량	1.2 m, 1.6 kg/m	
가고	1.4 m	
Pre-Sag	경간/2000	
편위	±0.2 m	

팬터그래프는 KTX 팬터그래프를 모델로 선정하며 수학적 모델링 데이터는 그림 8 및 표 6와 같다. 다만 속도를 360km/h 정도로 할 예정이므로 공기역학적 양력 계수를 이에 맞게 조정하였다.

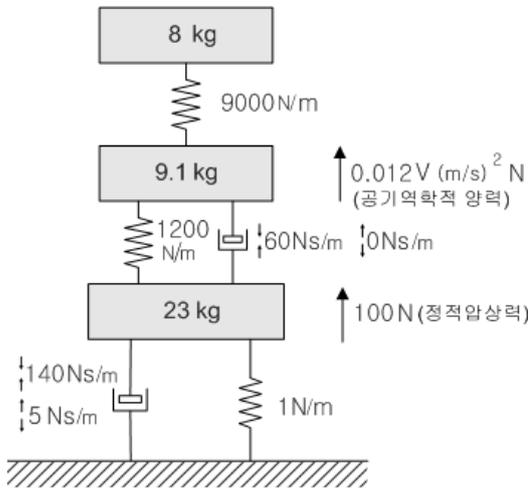


그림 8. 팬터그래프 모델링 데이터

표 6. 시뮬레이션 커터너리 데이터

항목	데이터
전차선	40,000N, 1.334kg/m
조가선	20,000N, 1.07kg/m
드로퍼	0.12kg/m, 0.13kg/개
곡선당김금구	1.2 m, 1.6 kg/개
가고	1.4 m
편위	±0.2 m
Pre-sag	span/2000

이제 위와 같은 전차선로-팬터그래프 조합으로 360km/h로 주행하는 것을 모의해 보기로 한다. 이 속도는 중국적으로 검증하고자하는 실제계의 속도가 되는 것이다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

표 7. 70m 경간에서 360km/h 주행 시뮬레이션 결과 데이터

변수	기호	단위	결과 값	설명
평균 접촉력	Fm	N	203.7	10ms 간격으로 Evaluation
최대 접촉력	Fmax	N	557.8	"
최소 접촉력	Fmin	N	0.0	"
접촉력 표준편차	σ	N	126.9	$\sigma/Fm = 55.9\%$
통계적 최대 접촉력	Fmx	N	584.4	$Fm + 3*\sigma$
통계적 최소 접촉력	Fmn	N	-177.0	$Fm - 3*\sigma$
전주에서 압상량	Uplift	mm	128	최대값
전주 중앙에서 압상량		mm	166	최대값
이선율	NQ	%	2.85	$\geq 10ms$

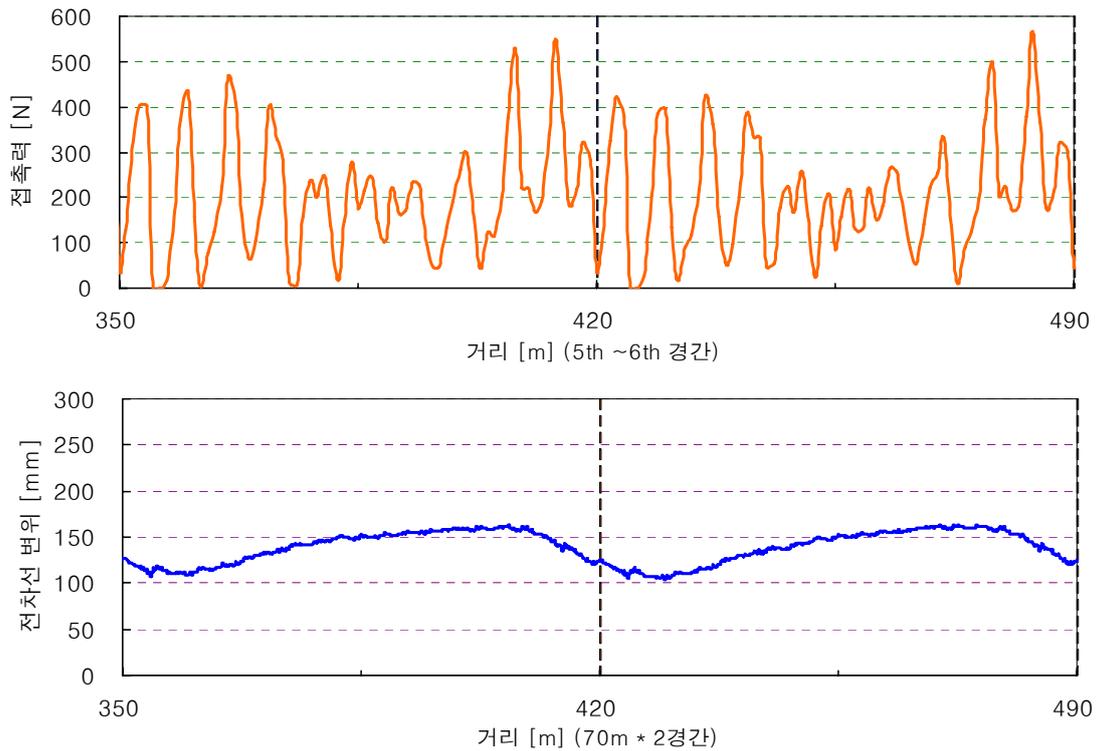


그림 9. 70m 경간에서 360km/h 주행의 접촉력(100Hz) 및 변위 궤적(1000Hz) 그래프

다음으로 속도 180km/h에서 시뮬레이션해 보기로 한다. 이 속도는 집전 주행 시험기로 구현하는 속도이다. 그러나 이 속도에서의 집전 특성은 360km/h 실제계에서와 같거나 근접하도록 하고자 하는 것이다. 따라서 전차선로와 팬터그래프를 변형하기로 한다. 전차선로는 1/2 축척으로 변형한 모델인 그림 10 및 표 8과 같이 변경한다. 전차선 장력을 5000N으로 정한 이유는 360km/h 시뮬레이션 조건일 때의 과도전과 속도 대 실제 주행속도의 비율인 무차원비(β)를 동일하게 하는 차원에서이다. 팬터그래프도 속도를 1/2 스케일로 줄이기 때문에 전차선에 가하는 힘은 360km/h와 동일하게 되도록 하기 위하여 공기역학적 양력 계수를 0.048로 올리기로 한다. 나머지는 그림 8과 동일하게 한다.

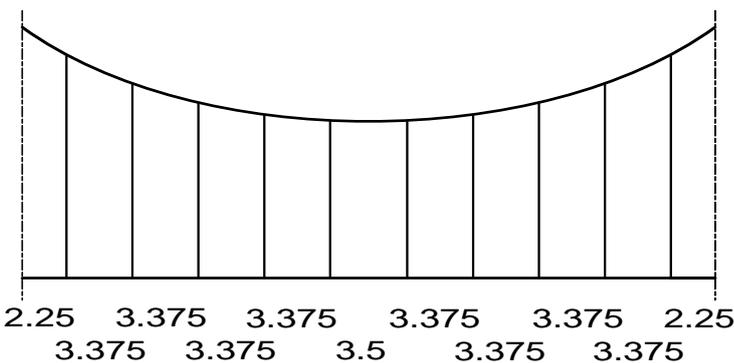


그림 10. 1/2 속도 축척용 경간(35m, 10개 드로퍼)

표 8. 표 5에 비해 변경되는 제원

항목	데이터	비고
전차선 장력	5000N	과도전과 속도 : 220km/h (180km/h와의 비율 82% (무차원비 0.82))
편위	±0.1 m	

이 조건에서 시뮬레이션해 보니 비정상적인 운행 조건이라는 결과가 나타났다. 이선율이 67%를 넘고 접촉력이 무한대로 치솟는 등 집전이 불가능한 상태라고 해석할 수밖에 없는 데이터로서, 70m 경간에서 360km/h 주행 시와 전혀 다른 결과가 나타났다. 따라서 전차선로의 조건을 바꾸어 다시 시뮬레이션 해 보기로 한다. 이번에는 전차선의 장력을 12600N으로 선정하고 시뮬레이션해보기로 한다. 12600N으로 선정한 근거는 임의적이지만 과도전과 속도 350km/h를 염두에 둔 것으로 운행 속도 감소분의 1/2 만큼을 440km/h에서 빼 본 것이다.

표 9. 35m 경간, 전차선 12600N에서 180km/h 주행 시뮬레이션 결과 데이터

변수	기호	단위	결과 값	설명
평균 접촉력	Fm	N	199.0	10ms 간격으로 Evaluation
최대 접촉력	Fmax	N	455.3	"
최소 접촉력	Fmin	N	43.7	"
접촉력 표준편차	σ	N	81.8	$\sigma/Fm = 41.1\%$
통계적 최대 접촉력	Fmx	N	444.4	$Fm+3*\sigma$
통계적 최소 접촉력	Fmn	N	-46.4	$Fm-3*\sigma$
전주에서 압상량	Uplift	mm	46.4	최대값
전주 중앙에서 압상량		mm	96.2	최대값
이선율	NQ	%	0.0	$\geq 10ms$

시뮬레이션 결과가 70m 경간 360km/h에서와 유사하지만 조금 다르게 나타났다. 그래서 이번에는 전차선로의 장력을 11000N으로 낮추기로 한다. 이럴 경우 파동전파속도는 327km/h가 되고 180km/h의 55%에 해당한다.

표 10. 35m 경간, 전차선 11000N에서 180km/h 주행 시뮬레이션 결과 데이터

변수	기호	단위	결과 값	설명
평균 접촉력	Fm	N	202.4	10ms 간격으로 Evaluation
최대 접촉력	Fmax	N	477.9	"
최소 접촉력	Fmin	N	12.3	"
접촉력 표준편차	σ	N	118.3	$\sigma/Fm = 19.9\%$
통계적 최대 접촉력	Fmx	N	557.3	$Fm+3*\sigma$
통계적 최소 접촉력	Fmn	N	-152.5	$Fm-3*\sigma$
전주에서 압상량	Uplift	mm	49.0	최대값
전주 중앙에서 압상량		mm	102.1	최대값
이선율	NQ	%	0.0	$\geq 10ms$

시뮬레이션 결과를 분석해 보면 압상량은 약 1/2 정도 작게 나온다는 점을 시전에 미리 인지하고 파악하면 되고, 접촉력의 분포 측면이나 이선 측면 등에서 실제 속도 스케일에서의 계와 어느 정도 근접한 데이터가 나오기를 알 수 있다.

5. 결론

이제까지 고속의 실제계에서 전차선로 및 팬터그래프의 집전계를 직접 현장 시험하는 것이 어려운 경우에는, 짧은 주행 시험선로에서 축소된 모형 선로를 시설하고 1/2 정도의 축소된 속도로 시험하여 실제계의 집전 성능을 파악하는 것이 유용하게 적용될 수 있는지를 검토해 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 속도 축소 모형 실험은 실제 속도계에 대한 유용한 정보를 줌을 확인할 수 있었으며, 동역학 시뮬레이션을 통한 비교 및 가이드 수단으로 활용하면 보다 더 유용하게 활용될 수 있다.

(2) 스케일 차이 상 근본적으로 차이가 날 수 밖에 없는 이미 알려진 계수에 대한 보정과 추가적인 보정 계수의 도입 등을 통하여 추가 보완적인 변환 보정 해석 기법을 도입하면 유사한 집전 성능 특성과 결과 값이 나타나게 할 수 있을 것이다.

그러나 보다 정확한 대체 시험 수단이 되기 위해서는, 다양한 팬터그래프 모델과 보다 더 많은 전차 선로 케이스에 대한 분석 및 팬터그래프 공기역학적 압상량 계수와 같은 속도에 영향을 갖는 변수의 적절한 치환 기법 등에 대하여 앞으로 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. ERRI, "EN 50318-Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", 2002.7
2. SYSTRA, "Honam Line Electrification Catenary Dynamic Simulation Report", 2001
3. 眞鍋克士, 架線□パンタグラフ系の高速性能(第1報)Ⅲ, 速度縮尺模型實驗による標準系の特性", 日本機械學會論文集 (C編速) 54卷504号, 1988.
4. Takefumi SHIMADA, "Improvement of Current Test Equipment", QR of RTRI, Vol. 43, No. 2, Jul. 2002

속도 축척 모형 실험 방법을 통한 집전계 성능 분석 연구의 실험 방법 및 효용성에 대한 연구

A study on experiment methods and effectiveness of the current collection study using the speed scale-downed catenary-pantograph model

박사훈*
Park, Sa-Hoon

권삼영**
Kwon, Sam-Young

ABSTRACT

To test the current collection characteristics between overhead contact lines and pantograph in a real speed scale costs too much, therefore, it is very difficult to be realized especially in a high speed region. As a alternative, the speed scale-downed tests is proposed. In this paper, the experimental methodology and effectiveness of the speed scale-downed tests are discussed through the dynamic simulation evaluations. To get a more precise test results to the real speed scale test in the 1/2 and 1/4 speed scale-downed tests, various experimental conditions are discussed. Throughout the simulation in a various conditions the effectiveness are evaluated.

국문 요약

전차선로와 팬터그래프로 이루어진 집전계에서 두 계 사이의 기계적 상호 작용이나 이선과 같은 집 전 특성은 직접 현장 시험을 통하여 확인하는 것이 가장 정확하고 확실한 방법이며, 꼭 필요한 것으로 여겨지고 있다. 그러나 고속이 될수록 집전 성능을 직접 현장에서 시험을 통하여 실시하는 것은 경제 적으로나 현실적으로 불가능한 경우가 대부분이다. 그래서 대안으로 시뮬레이션 방법이 이용되기는 하나 이것은 현장 시험을 대체하는 방법이 아닌 하나의 보조적인 방법에 불과하다. 그래서 대안으로 컴 퓨터를 이용한 시뮬레이션 방법이 이용되고 있다. 그러나 이것은 유용한 방법이긴 하나 현장 시험을 대체하는 방법이 아닌 하나의 보조적인 방법으로 간주되고 있는 것이 일반적인 관점이다.

그래서 실제 속도의 현장 시험에 대한 하나의 대안으로 속도 축척 모형의 집전계 주행시험기를 이용 하는 방법이 있다. 이것은 실제 속도의 1/2이나 1/4 정도의 속도에서 시험을 하면서 실제 속도에서의 특성을 확인하는 시험 방법이다.

본 논문에서는 이 속도 축척 모형 시험의 세부적인 시험 방법과 시험 설비에 대하여 알아본다. 그리고 이 방법으로 시험하였을 때 나타나는 성능이 실제 속도에서의 성능을 어느 정도 가깝게 나타내는지를 파악해 보고자 특정 속도와 조건을 선정하여 전차선로-집전계 사이의 동역학 시뮬레이션을 실시하여 보았다. 시뮬레이션 결과 특정 조건이 갖추어진다면 이 속도 축척 모형 시험 방법이 효용성이 있음을 확인할 수 있었다.

* 한국철도시설공단, 강원지역본부, 정희원

E-mail : psh429@hanmail.net

TEL : (033)749-7911 FAX : (033)749-7820 HP : 011-9714-4630

** 한국철도기술연구원