

터널 브래킷을 사용한 가선시스템의 최고속도 예측 및 검토

A prediction of maximum operation speed for the catenary using tunnel bracket

권삼영*
Kwon, Sam-Young

이기원**
Lee, Kiwon

창상훈***
Chang, Sang Hun

M'hamed Matri****

Abstract

The catenary system supported by the tunnel bracket which has been used uniquely in KNR was selected as the catenary inside narrow existing tunnel in the electrification of Kyeong-Bu Line for operation of Korea High Speed Train(KTX). It was demanded to judge the maximal operable speed of KTX in this catenary system to implement the planning.

To do this, the tunnel bracket was firstly tested to obtain the characteristic data. The stiffness of this bracket are computed depending on the location which catenary installed on. Moreover, the catenary using tunnel bracket is modelled numerically respecting the bracket stiffness. Based on these, the dynamics between this catenary and KTX pantograph are simulated with the program developed by ourselves independently.

The simulation result are evaluated according to the generally acceptable criteria. Consequently, the maximal operable speed of KTX in the catenary using KNR(Korean National Railroad) tunnel bracket is predicted and some items which are needed to be kept in the processing of implementation are drawn.

1. 서론

경부고속철도 운영을 위한 동대구-부산간 전철화에서 이 구간에 기존 터널이 다수 존재하며, 이 터널 구간은 공간이 협소한 관계로 터널 브래킷(tunnel bracket)을 사용하여 지지하는 가선방식(이를 "터널브래킷 방식 가선"이라 칭함)으로 설계되어있다.

그런데, 이 터널 브래킷을 사용한 가선시스템에서 경부고속차량(KTX)의 운행가능속도에 대하여 정립된 바가 없어 전차선로 시스템 건설 계획을 추진하는데 많은 어려움 겪고 있었다. 따라서, 이 방식의 KTX 최고 운행 가능한 속도를 평가할 필요가 절실하였으며, 이를 위하여 이 방식 가선에 대한 수학적 모뎀링을 통하여 전차선-팬터그래프 동력학 시뮬레이션을 실시하여 평가하기로 하였다.

터널 브래킷을 사용하는 가선시스템은 철도청(KNR)에서 고유하게 사용되고 있으며, 일반적인 전차선로-팬터그래프 동력학 시뮬레이션 프로그램으로는 그 특성을 정확히 반영하여 해석하기가 어렵다. 따라

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 주임연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** SNCF International 전차선 전문가(철도청 고속철도 기술지원단 소속)

서 본 가선을 위한 독자적인 동력학 시뮬레이션 프로그램을 개발하기로 하였다.

이를 위하여, 터널 브래킷의 기계적 특성변수가 아직 정립되어있지 않아, 브래킷을 직접 시험을 통하여 특성 데이터를 먼저 파악하였다. 다음으로, 터널 브래킷을 포함한 가선 시스템의 수학적 해석 모델을 실제 시스템의 거동 특성을 반영하여 수립하였다. 이를 바탕으로 경부고속철도차량(KTX) 팬터그래프와의 연계(coupling) 모델로서 시뮬레이션을 수행하였고, 자체적인 평가기준에 따라 최고운행속도를 예측하였다. 그러나, 여기서 예측된 속도는 KTX 팬터그래프에 한정된 것이었으며, 다른 차량에 대하여 적용되는 것은 아님을 밝혀둔다.

2. 터널 브래킷 가선 시스템

2.1 터널 브래킷을 사용한 가선 시스템

경부선에 설계된 터널 브래킷 방식 가선은 다음과 같은 구조와 파라미터를 갖는다(1)(2).

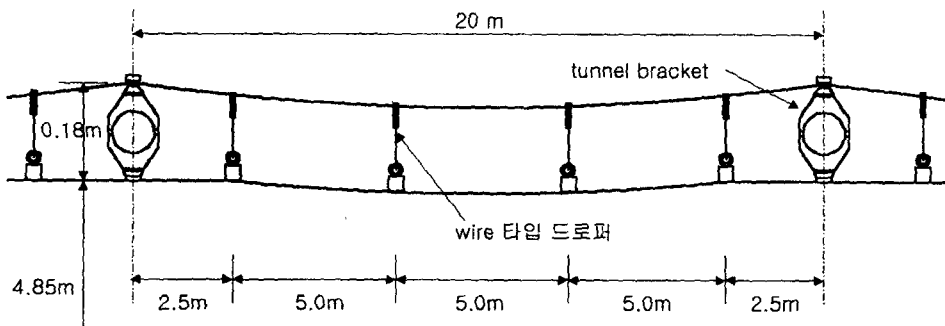


그림 1. 터널 브래킷 방식 가선

항목	데이터
표준 경간	20m
편위	±200mm, ±100mm 두가지 경우 가정
가고	0.18m
전차선 높이	4.85m
Pre-sag	경간길이/2000m
전차선	CdCu 150mm ² , 1.334 kg/m
조가선	Bz 65.49mm ² , 0.605 kg/m
드로퍼	Flexible) 와이어 Bz 12 mm ² , 0.290 kg/개
전선 장력	14000N(전차선, 조가선)

표 1. 커터너리 데이터

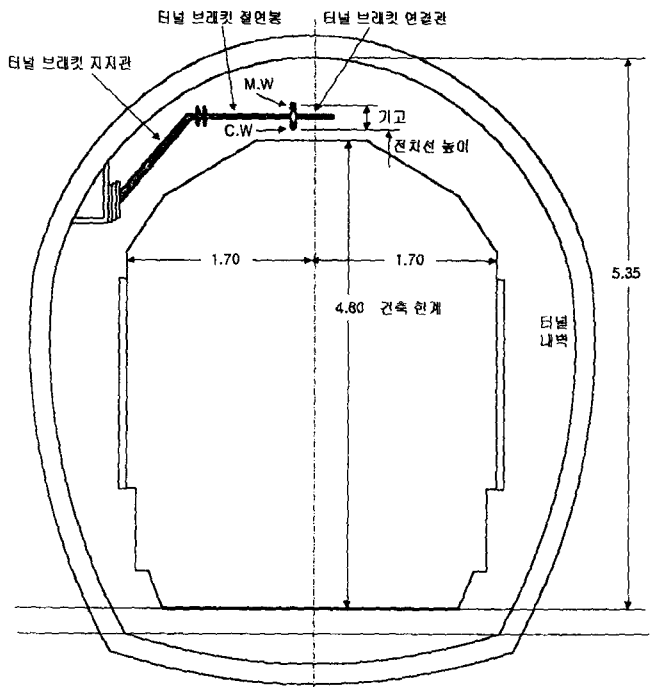


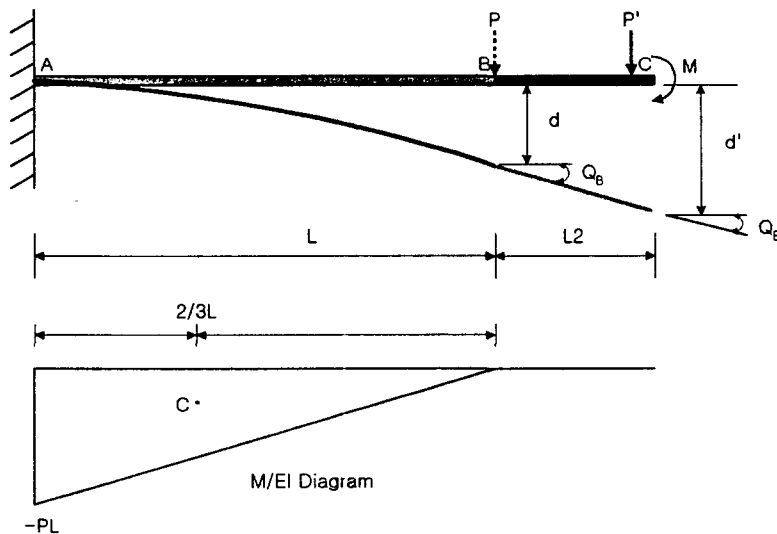
그림 2. 터널 내 설치도

터널 브래킷을 사용한 가선시스템은 터널과 같은 협소한 공간에 AC 25kV시스템을 설치하기 위하여 고안된 가선시스템으로서, 심플 커티너리(simple catenary)와 유사한 형태를 가진 가선시스템이다. 그러나 전차선과 조가선이 동일 터널 브래킷에 강제로 묶여지는 구조를 가짐으로서, 터널 브래킷이 전선의 자중과 수평하중을 감당하는 지지물 역할(높은 강성도)과 함께, 팬터그래프 통과에 따른 자유 운동을 허용하는 유연성(극히 낮은 강성도)을 가져야 하는, 서로 상반되는 역할을 동시에 만족시켜야 하는 어려움을 갖게 된다. 따라서, 터널 브래킷은 강성도를 적절히 결정하는 것이 핵심 기술이 되고 있으며, 이를 위하여 Fiber Glass 재질의 절연봉이 절연과 적절한 강성도를 위하여 사용되고 있다. 그러나, 브래킷에 설치되는 볼시벨을 포함한 금구의 질량이 너무 무거워 팬터그래프 통과에 따른 가선 진동시 관성력이 크게 작용하며, 절연봉의 감쇠가 매우 작아 진동을 흡수(댐핑)하는 기능을 거의 못하므로 동역학 특성에 나쁜 영향을 미치고 있다.

2.2 터널 브래킷 특성

2.2.1 강성도

앞에서 말한 바와 같이 터널브래킷 방식 가선시스템에서 브래킷의 강성도는 집전성능에 핵심적인 요소이다. 터널 브래킷의 강성도를 추정하는데 철도청의 철도용품 표준규격(3)에 명시된 처짐량 기준을 적용하여 계산에 의하여 산출하기로 한다. 브래킷의 수평 파이프는 재질과 Dimension이 다른 절연봉과 연결관이 연결된 복합(composite) 탄성 구조체로서, 표준규격 시험 기준에 명시된 하중을 가하는 지점과 처짐량을 측정하는 지점의 위치가 다르므로 다음과 같은 계산에 의해 산출한다(4). 절연봉의 Young's Modulus는 알지 못하며, 연결봉은 Steel의 Property 값을 사용한다.



적용식 :

$$\theta = \frac{ML}{EI}$$

$$d = \frac{ML^2}{2EI}$$

터널 브래킷의 강성도는 위치에 따라 차이가 크게 난다. 따라서 전차선이 설치되는 위치, 즉 편위에 따라 차이가 크므로, 편위가 0mm일 때는 연결관 끝에서 -100mm 지점, 편위가 ±100mm일 때는 연결관 끝에서 -200mm 지점, 편위가 ±200mm일 때는 연결관 끝에서 -300mm 지점으로 가정하였다. 계산 결과는 다음과

그림 3. 터널 브래킷 강성도 산정

같았으며, 이를 시뮬레이션의 입력 데이터로 사용한다.

표 2. 강성도 계산 결과

	편위 ±0mm일 때	편위 ±100mm일 때	편위 ±200mm일 때
강성도(N/m)	3400	5800	13500

2.2.2 질량

직접 측정을 통하여 얻은 질량은 정적 질량이며, 동적 질량 즉, 가선 진동에 따라 움직이는 부위의 질량은 정적 질량과는 다르다. 터널 브래킷의 자유 진동 시험에서 FRP 봉의 가운데 지점 이후 Compartment가 진동하는 것을 확인하였으므로 동적 질량은 다음과 같이 산정하였다.

동적 질량 = 절연봉(FRP) 질량*1/2+볼시벨 질량+전차선 이어+조가선 이어+연결관 질량 \approx 5 kg

2.2.3 감쇠

터널 브래킷의 감쇠는 터널 브래킷 자체에 대한 진동 시험을 실시한 결과 감쇠가 매우 미미하여 무시하기로 한다. 그러나 가선 전체의 감쇠 특성은 일반적인 가선의 감쇠상수를 적용하기로 한다.

3. 동역학 모델링

3.1 가선 모델링

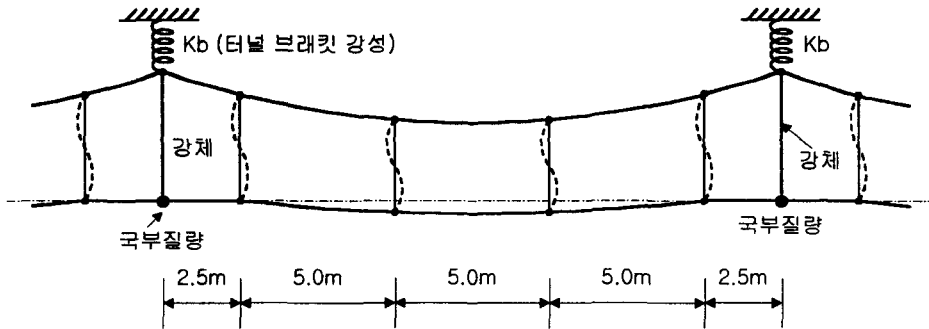


그림 4. 터널 커터너리 해석 모델(한 경간)

전차선과 조가선을 현(string) 요소로 모델링하고, 드로퍼는 인장/압축 시 비선형 특성이 반영되도록 하며, 가선 전체의 감쇠는 일반적인 Simple Catenary의 전형 값을 적용한다. 전체 가선은 위의 해석모델과 동일한 7 경간(span)이 연속되는 것으로 하며, 전체 가선의 고정점은 전차선 양 끝단, 조가선 양 끝단 및 터널브래킷 스프링 후단으로 하고, 시뮬레이션 결과 데이터 중 유효데이터는 고정단의 영향을 배제하기 위하여 가운데 3경간 데이터만으로 처리한다.

3.2 팬터그래프 모델링

경부고속철도에 운행될 KTX의 팬터그래프는 GPU 25kV Single Arm 타입으로서, SNCF의 TGV 북부선에서 운행되는 것과 동일한 것이다. 이 팬터그래프에 대한 동역학적 해석 모델은 ERRI 보고서에 나와 있어 이를 사용하기로 한다(5).

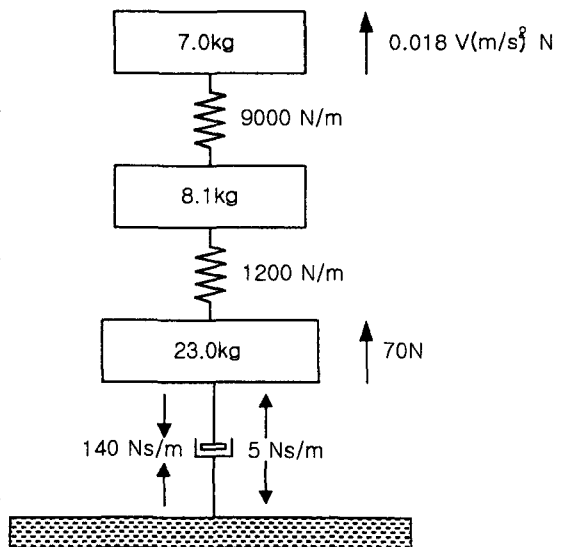


그림 5. 팬터그래프 해석 모델

4. 전차선로-팬터그래프간 동역학 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

앞에서도 말한 바와 같이 터널 브래킷은 전차선이 걸리는 위치에 따라 강성도가 달라진다. 따라서 시뮬레이션은 편위를 $\pm 200\text{mm}$ 를 주는 경우와(Case 1), $\pm 100\text{mm}$ 주는 경우(Case 2)로 나누어 실시하였다. 열

차속도는 각 Case에 대하여 130, 120, 115, 110 km/h로 시뮬레이션 하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 Case 1(편위를 $\pm 200\text{mm}$) 시뮬레이션

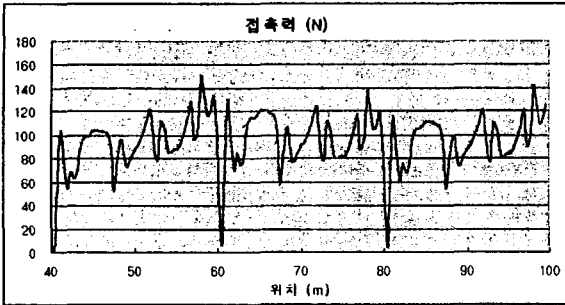


그림 6. V=130 km/h일 때 접촉력 그래프

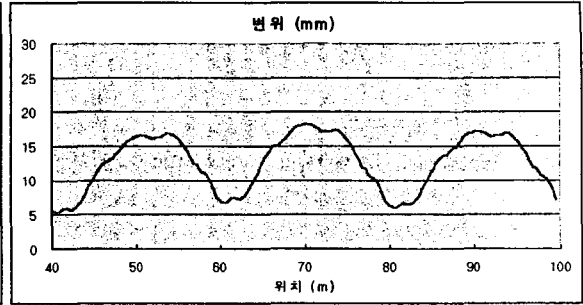


그림 7. V=130 km/h일 때 펜터그래프 접촉점 궤적

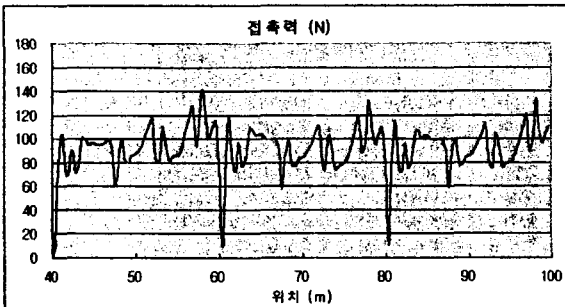


그림 8. V=120km/h일 때 접촉력 그래프

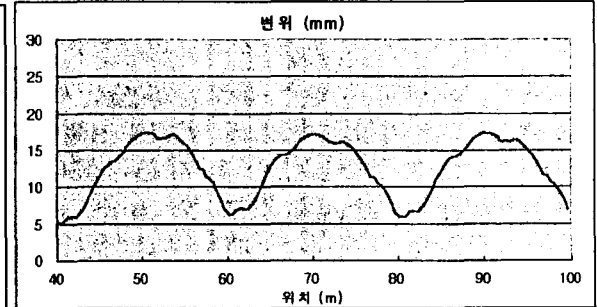


그림 9. V=120km/h일 때 펜터그래프 접촉점 궤적

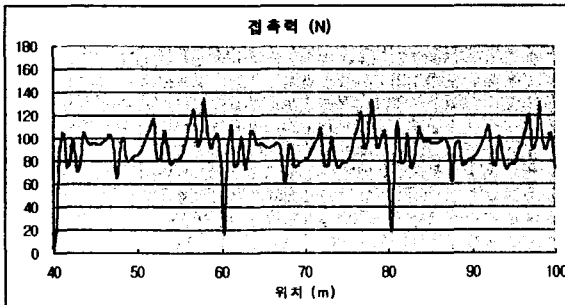


그림 10. V=115km/h일 때 접촉력 그래프

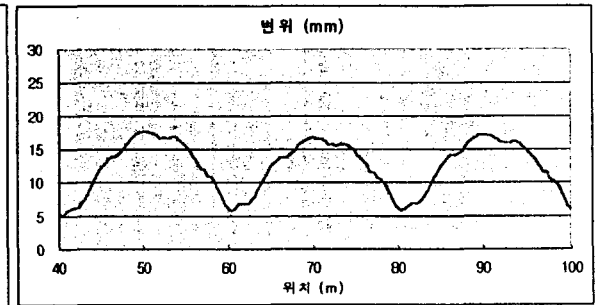


그림 11. V=115km/h일 때 펜터그래프 접촉점 궤적

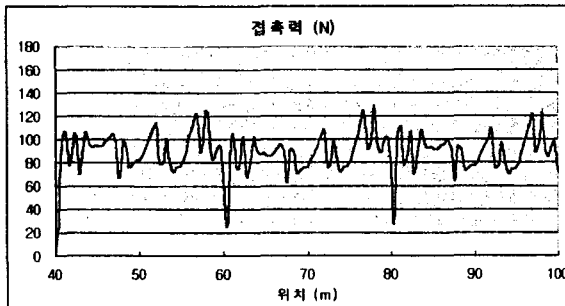


그림 12. V=110km/h일 때 접촉력 그래프

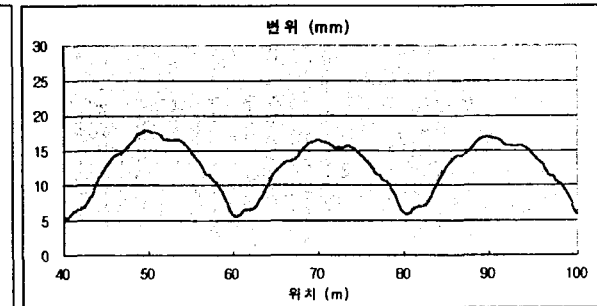


그림 13. V=110km/h일 때 펜터그래프 접촉점 궤적

4.2.2 Case 2(편위를 ±100mm) 시물레이션

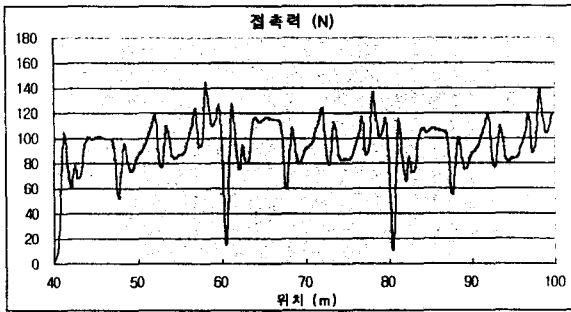


그림 14. V=130km/h일 때 접촉력 그래프

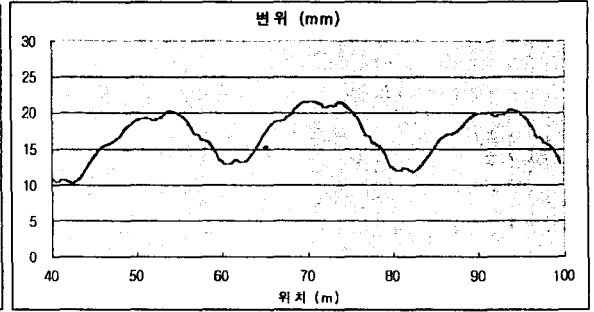


그림 15. V=130km/h일 때 팬터그래프 접촉점 궤적

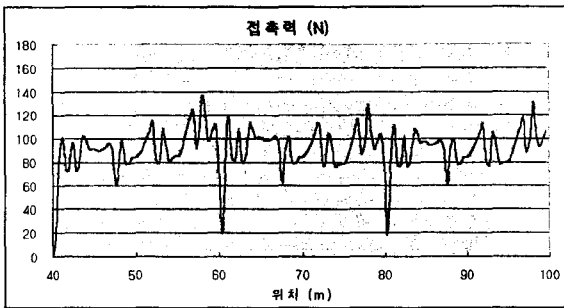


그림 16. V=120km/h일 때 접촉력 그래프

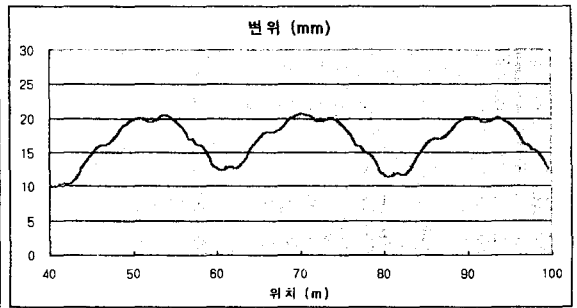


그림 17. V=120km/h일 때 팬터그래프 접촉점 궤적

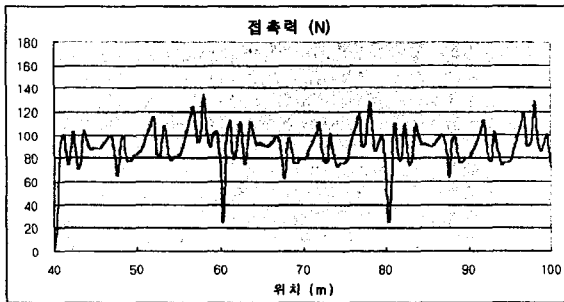


그림 18. V=115 km/h일 때 접촉력 그래프

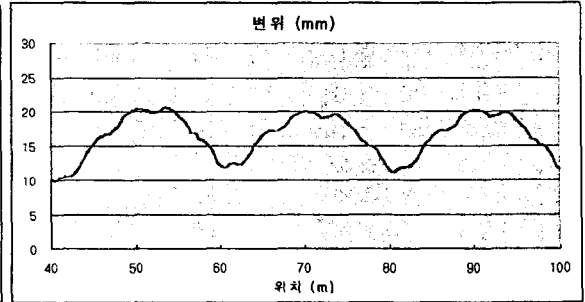


그림 19. V=115km/h일 때 팬터그래프 접촉점 궤적

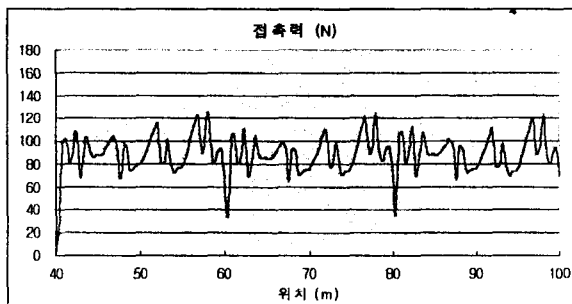


그림 20. V=110km/h일 때 접촉력 그래프

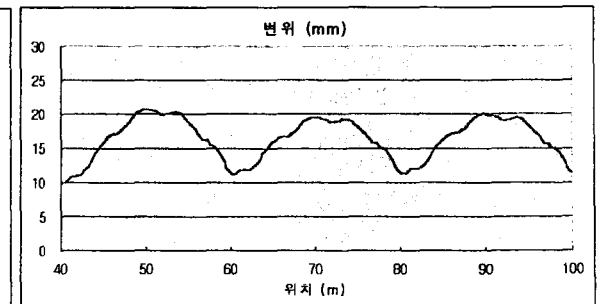


그림 21. V=110km/h일 때 팬터그래프 접촉점 궤적

4.2.3 통계 데이터

표 3. 시뮬레이션 결과에 대한 종합 통계데이터

시뮬레이션 조건		평균접촉력	최대접촉력	최소접촉력	접촉력의	표준편차/
Case	속도	(N)	(N)	(N)	표준편차(N)	평균접촉력(%)
1	130 km/h	98.5	149.2	4.1	26.3	26.7
	120 km/h	92.5	141.0	9.7	21.8	23.5
	115 km/h	90.1	134.8	15.6	19.8	22.0
	110 km/h	88.2	129.2	25.1	18.2	20.6
2	130 km/h	98.2	142.8	10.1	23.5	24.0
	120 km/h	92.9	137.8	18.2	19.8	21.3
	115 km/h	90.3	134.5	24.9	18.4	20.3
	110 km/h	88.0	125.3	33.7	17.1	19.4

5. 결과 검토 및 평가

5.1 전반적인 측면의 고찰

시뮬레이션 결과에 대하여 정성적으로 고찰해 보면, 터널 브래킷이 있는 곳에서 규칙적인 접촉력 하강 곡선이 나타남을 볼 수 있다. 이는 이선에게까지 이르지 않을 수도 있지만 이 지점이 경점(hard point)으로 작용되고 규칙적인 이선(아크)의 가능성이 매우 높음을 의미한다. 따라서 터널 브래킷 방식의 가선 시스템에서 브래킷의 강성도나 다른 보완적인 요소에 따라서 다소의 차이는 있겠지만 이러한 시스템의 최고속도는 일정한 범위에서 한계가 있음을 유추할 수 있다.

5.2 평가 기준

동력학 시뮬레이션에서 집전성능을 평가하는 기준으로 일반적으로 접촉력을 기준으로 삼는다. 접촉력의 크기는 이선들과 관련이 있고 또 전차선 및 집전판의 기계적 마모와 이선으로 인한 아크 마모와 직접적인 관련이 있기 때문이다. 시뮬레이션 또는 시험에 의해서 측정된 데이터도 접촉력을 정확하게 평가하기 위해서는 통계학적인 처리를 할 필요가 있다. 즉 접촉력의 시간 이력을 통계 처리하여 접촉력의 평균값(Fm)과 표준편차를 구하여 정규분포(Gauss 분포)에 포함되는 값만을 취하여 접촉력의 평가기준으로 삼는다.

집전성능에 대한 평가 기준은 철도 선진국에서도 각 나라마다 다르다. 그러나 독일, 프랑스 일본 등에서 거의 유사한 하나의 기준은 평균 접촉력에 대한 표준편차의 비가 대략 20% 정도 이내일 때를 양호한 집전 성능 범위로 평가한다. 프랑스 TGV의 경우 평균 접촉력에 대한 표준편차의 비가 22%미만일 때 1% 이선율을 만족하는 것으로 되어있다. 따라서 여기서도 이를 기준으로 삼기로 한다.

$$\text{양호한 집전 성능} \equiv \text{표준 편차} (\sigma) / \text{평균 접촉력}(F_m) < 22 \%$$

5.3 평가

표 3의 시뮬레이션 결과를 위의 기준에 따라 평가해 보면, 터널 브래킷을 사용하는 전차선로에서 KTX의 최고속도는 120 km/h 정도로 판단된다. 그러나 이 결과는 터널 브래킷에 ±100mm 편위를 줄 때에 대한 것이다. 따라서 편위를 주는 정도에 따라 최고속도가 달라짐을 염두에 두어야 하며, 터널 브래킷의 강성도와 처짐 관계, 어떻게 설치하느냐 하는 문제에 대하여 세심한 주의가 요망된다. 또한 여기서의 결과는 전차선로 및 궤도, 차량(펜터그래프)이 설계대로 설치되고, 유지된다는 정상적인 조건을 가

정한 예측이므로 시공 상태 및 유지보수 조건이 나빠지면 최고속도가 이보다 낮아질 수 있음을 염두에 두어야 한다.

6. 결론

이제까지, 경부선 동대구-부산간 기존 협소 터널에 KNR에서 고유하게 사용하고있는 터널 브래킷 (Tunnel Bracket)을 이용한 가선 시스템에 대하여, 경부선 전차선로 설계 데이터와 KTX 팬터그래프에 한하여, 최고 운행가능 속도를 예측하였다. 이를 위하여, 터널 브래킷의 강성도와 동적 질량, 감쇠 특성 데이터를 찾아내고, 터널 브래킷 방식 가선의 독특한 특성을 반영한 가선 모델링을 실시하고, 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 선정한 평가기준에 따라 평가한 결과, 가선이 적절히 설치된다면(편위 $\pm 100\text{mm}$ 등) 120km/h까지 운행 가능할 것으로 예측되었다. 아울러 설치 및 유지보수가 적절히 이루어져야 이 속도가 유지될 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. 경부선 동대구-부산, 대전, 대구, 부산지구 전차선로, 전력설비 기본 및 실시설계 설명보고서, 1999. 9, 철도청
2. 전차선로설계시공표준도, 1983. 4, 철도청
3. 철도용품 표준규격(철도 5975-3297, 1997.10.14 제정), 철도청
4. ERRI, "Pantograph/overhead line interaction", ERRI report A186/RP1, 1996. 4
5. 경부고속철도 TGV French Group 제의서 중 Technical Provisions Catenary Systems, Answer to Addendum 18 Appendix 2, 1993
6. Karl-Hans Bauer 등, "Effects of Design Parameters of Overhead Contact Lines on High-Speed Operation - a Comparison of Theory and Testing", Translation of an article from "Elektrische Bahnen", No. 10/1989, Page 269~279, SIEMENS,
7. 김길상, 권삼영, 유승위, "전차선과 팬터그래프 사이 동역학 시뮬레이션 프로그램 개발 연구", 고속철도 연구보고서(전기분야), 한국고속철도건설공단, 1996.2, P125-196
8. 권삼영 외 "전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구(II)" 연차보고서, 한국고속철도건설공단, 1998. 12