

고속전철의 주행조건이 집전계의 동특성에 미치는 영향

The Effect of Train Motion on Dynamic Characteristics of Current Collection System

김정수[†]

Jung-Soo Kim

Abstract

The dynamic characteristics of the current collection system are investigated by conducting a test run in which signals from accelerometers and load cells attached to the various parts of the pantograph are analyzed in both the time and frequency domains. The dynamic characteristics of the current collection system are found to be strongly influenced by the train speed; the fluctuation in the pantograph motion increases in direct proportion to the train speed. There exist two major frequency components in the pantograph motion related to the current collection, a speed-dependent component arising from the train traversing a span of the catenary, and a speed-independent component related to the pantograph resonant frequency. The train acceleration is also found to exert strong influence on the current collection system characteristics. The effect of the train motion is found to be stronger on the speed-dependent frequency component than on the speed-independent one.

Keywords : 고속전철(High speed train), 집전계(Current collection system), 판토히라프(Pantograph), 가선계(Catenary), 접촉특성(Contact characteristics), 주파수 성분(Frequency component)

1. 서론

고속철도는 빠른 속도, 안전성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있고 개발선진국은 각국의 상황에 맞는 고속철도 기술을 발전시키고 있다. 우리나라도 350km/hr급 한국형 고속철도 시제차량을 제작하여 시험운행중에 있으며 우리나라 가선계에 적합한 판토히라프를 개발하여 집전기술 확보에 주력하고 있다. 판토히라프는 가선계로부터 전력을 공급받는 장치이고, 열차 주행시 가선계 및 판토히라프로 이루어지는 집전시스템은 차량의 운행에 필요한 전력을 공급하는 기능을 수행하므로 고속철도시스템의 안전성과 열차의 속도 향상 여부를 결정하는데 중요한 요인으로 작용한다. 전차선과 판토히라프는 접촉부에서 기계적·전기적 상호작용이 끊임없이 수반되며 이러한 상호작용이 집전시스템의 성능을 결정하게 된다.

고속전철 집전계에 대한 연구에는 수치해석에 기반한 컴퓨터 시뮬레이션이 많이 활용되어 왔다. 예를 들면, 가선계를 인장보로 모델링하여 동적특성을 살펴보고[1,2], 가선계를 현으로, 판토히라프를 이산계로 모델링하여 집전특성을 분석하였으며[3,4], 디자인 변수에 따른 접촉력 변화를 계산하여 집전성능을 예측하였다[5,6,7]. 이러한 연구 결과들은 판토히라프의 초기 설계에 대단히 유용한 정보를 제공하였다[8]. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션은 집전계의 단순화를 수반하므로 개발된 판토히라프의 집전 성능을 검증하는 주행시험이 필수적이다. 본 저자는 한국형 고속철도 시제차량의 주행시험 시 취득한 신호를 분석하여 시뮬레이션이 예측한대로 집전특성과 열차 주행 속도 사이에 높은 상관관계가 있다는 사실을 확인한바 있다[9,10]. 그러나 고속철도의 운전조건은 견인, 타행, 제동이 반복되며 특히 우리나라 고속철도는 가감속 구간의 비중이 정속구간에 비하여 매우 높은 특징을 가지고 있다. 이에 비추어 볼 때 속도와 더불어 열차의 주행 가속도가 판토히라프 거동과 접촉력에 미치는 영향을 살펴보는 것도 의미 있는 일이라고 판단된다.

[†] 책임저자 : 정회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 부교수
E-mail : jungsoo@hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1471 FAX : (02)322-7003

본 논문에서는 먼저 열차의 주행 속도가 집전계의 동특성에 미치는 영향을 요약하여 기술하고 속도는 같으나 가속도가 다를 때 집전계의 동특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 실험 데이터는 주행하는 시제차량의 판토품라프에 부착된 5개의 가속도계, 2개의 로드셀, 4개 스트레인 게이지에서 발생하는 신호를 동시에 취득하여 확보하였고, 이 중 팬헤드에 부착된 가속도계와 로드셀 신호에 초점을 맞추어서 데이터 분석을 수행하였다.

2. 집전계 구조와 신호 취득

집전시스템은 크게 가선계(catenary)와 판토품라프(pantograph)의 두 부분으로 나누어진다. Fig. 1은 가선계의 구조이다. 전차선(contact wire)은 열차 위에 설치된 판토품라프와 직접적인 접촉을 이루어 전기를 공급하는 부분이고, 조가선(messenger wire)은 전주에 현수되어 전차선을 지지하는 역할을 하며, 행거(hanger)는 전차선과 조가선을 연결시켜 전차선의 동적 하중을 조가선에 확산시키는 역할을 한다. 고속철도의 이상적인 집전성능을 위해서는 열차 주행시 전차선과 판토품라프가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력공급이 유지되어야 한다.

Fig. 2는 한국형 고속열차 시제차량에 부착된 판토품라프의 구조와 센서의 위치이다. 판토품라프의 구조는 맨 윗부분에 전차선과 접촉이 있는 팬헤드(panhead)가 있고, 그 밑에는 팬헤드를 보강하기 위한 보강빔(reinforcement beam)이 있다. 보강빔 아래에는 행거에 의해 발생하는 주파수 성분에 대해 추종성을 좋게 하기 위한 2차 서스펜션(secondary suspension)이 좌·우측에 있고, 그 아래에는 알루미늄바(aluminum crossbar)가 있다. 알루미늄바 중간 하단에 1차 서스펜션(primary suspension or plunger)이 존재한다. 주행

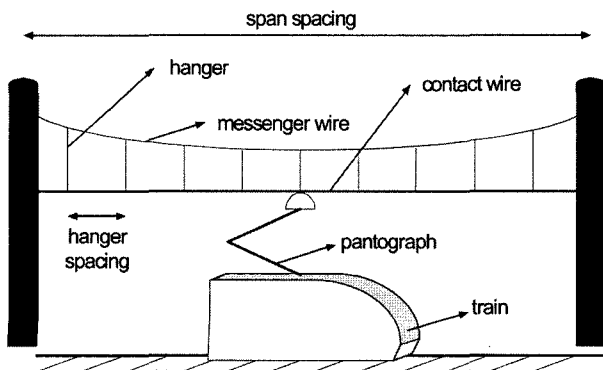


Fig. 1. The current collection system

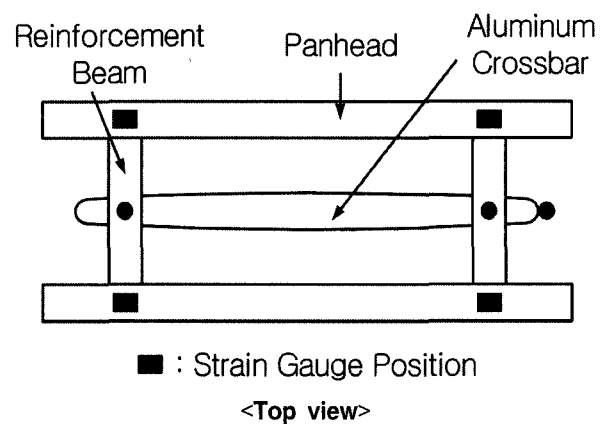
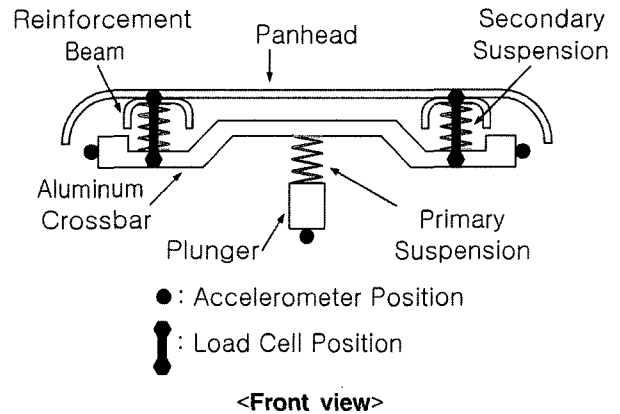


Fig. 2. Sensor locations

하는 열차의 팬헤드에 4개의 스트레인 게이지, 2개의 가속도계, 2차 서스펜션 아래에 위치한 알루미늄바의 좌·우측에 각각 2개의 가속도계와 로드셀, 그리고 1차 서스펜션 플런저 하단에 1개의 가속도계를 설치하였다. 이와 같이 설치된 11개의 센서로부터 시제차량이 시험구간을 운행하는 동안에 신호를 동시에 취득하였다. 센서의 위치는 Fig. 2에 나타나 있다.

3. 열차의 주행속도가 집전특성에 미치는 영향

열차가 주행할 때 판토품라프의 팬헤드에 부착된 가속도계에서 취득한 신호를 시간 및 주파수 영역에서 분석하였다.

Fig. 3은 가속도계 신호의 진폭을 속도의 함수로서 나타낸 것이다. 속도가 증가할수록 가속도 신호도 비례하여 증가하고, 판토품라프의 거동도 커짐을 알 수가 있다.

Fig. 4는 속도변화에 따른 판토품라프 응답의 특성 변화를 보기 위해서 서로 다른 주행속도에서 팬헤드에 설치된

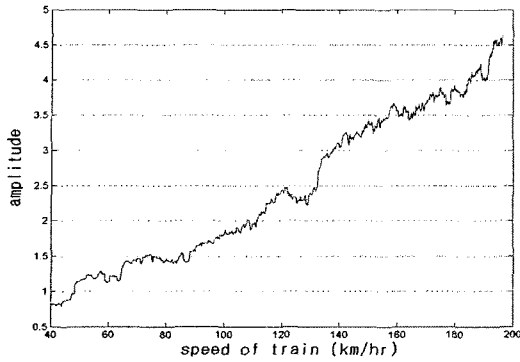


Fig. 3. Panhead acceleration vs. train speed

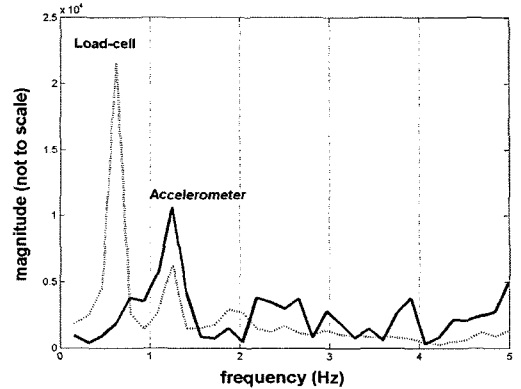
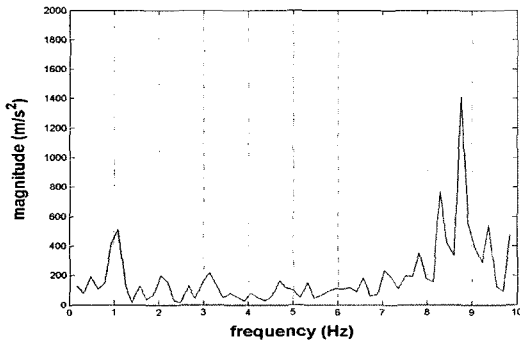
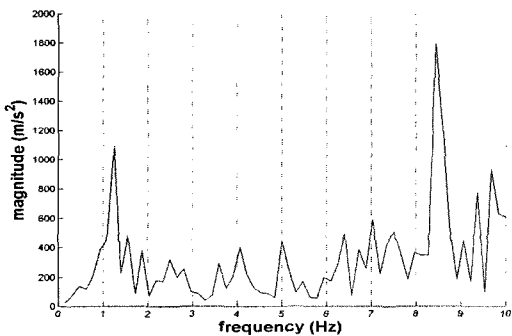


Fig. 5. Comparison of frequency characteristics of load cell and accelerometer signals



(a) 150 km/hr



(b) 190 km/hr

Fig. 4. Frequency characteristics of panhead acceleration at different train speeds

가속도계의 신호를 주파수 분석하였다. Fig. 4(a)는 속도가 150km/hr, 4(b)는 속도가 190km/hr일 때 분석한 것이다. 이 주파수 선도를 보면 열차 주행 속도 변화에 비례하여 변하는 주파수 성분과 함께 속도 변화에 관계없이 일정하게 나타나는 주파수 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. 먼저 속도

변화에 비례하는 주파수 성분을 보면, 150km/hr의 주파수 선도에서 첫 번째 피크가 1.02Hz이고, 속도가 증가한 190 km/hr의 주파수 선도에서는 첫 번째 피크가 1.31Hz로 이동한 것을 알 수가 있다. 주행속도, 경간간격과 이 피크 주파수는 다음과 같은 관계를 갖는다[9].

$$\left[\frac{\text{주행속도 (km/hr)} \times 1,000}{3,600} \right] \times \left(\frac{1}{\text{경간간격 (m)}} \right) = \text{주파수 (frequency)} \quad (1)$$

이 성분은 열차가 한 경간을 주파하는데 소요되는 시간의 역수이므로 경관통과주파수 성분(span-passing frequency)이라고 부른다. 두 번째 주요 성분인 속도에 관계없이 일정하게 나타나는 주파수 성분은 8.5Hz에 있다. 이 주파수 성분은 별도의 진동 실험을 통하여 판토품의 고유주파수로 판명되었으며 따라서 속도와 무관하다. 요약하면 판토품 집전부의 거동과 관련된 두 개의 주요 주파수 성분 중 하나는 열차 속도에 비례하고 하나는 속도와 무관하다. Fig. 4(a)와 (b)에 나타난 진폭을 보면 열차 주행 속도가 증가할 때 경관통과주파수 성분과 판토품 고유진동수 성분 모두 증가하나 경관통과주파수 성분이 속도 변화에 훨씬 민감함을 알 수 있다.

Fig. 5는 가속도계 신호를 주파수 분석한 것(굵은 실선)과 로드셀 신호(가는 점선)를 주파수 분석한 것을 함께 나타낸 것이다. 로드셀의 신호에서는 두 개의 피크가 존재하는데 첫 번째 피크는 열차가 두 경간을 통과하는 시간의 역수에 해당하는 주파수이고, 두 번째 피크는 가속도계 신호의 경간통과주파수 성분과 일치한다. 로드셀 신호의 첫 번째 피크는 두 번째의 피크의 절반에 해당하고, 가선계의 스테거(stagger)에 의한 판토품의 rolling motion에 기인한다.

따라서 로드셀의 주요 성분은 모두 속도에 비례함을 알 수 있다.

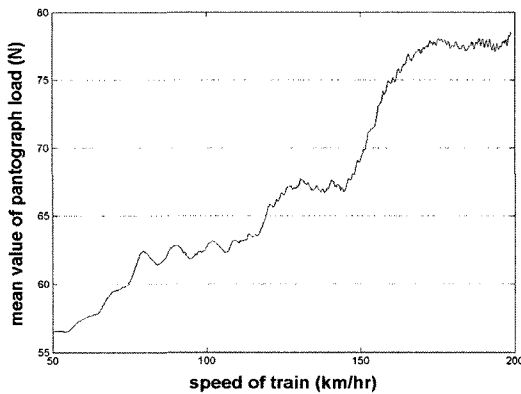


Fig. 6. Mean load cell value vs. train speed

Fig. 6은 좌우측 로드셀 신호의 평균값이다. Fig. 6을 보면 속도가 증가함에 따라 로드셀에 걸리는 힘의 평균값 또한 증가한다는 것을 알 수가 있는데, 이는 속도가 증가함에 따라 팬헤드의 가속도와 로드셀에 걸리는 힘이 함께 증가한다는 것을 보여주고 있다. 열차속도와 집전계 동특성 사이의 보다 상세한 분석결과는 다음을 참조하기 바란다[10].

4. 열차의 주행속도가 집전특성에 미치는 영향

이제까지 보고된 대다수 연구에서는 열차의 주행속도가 집전특성에 미치는 영향만을 고려하였으나 여기서는 열차의 주행속도가 미치는 영향을 살펴보기로 한다. Fig. 7의 첫 번째 그림은 열차가 189km/hr에서 196km/hr 사이의 같은 속도를 가지나 가속도는 서로 다른 주행 조건을 보여주고 있다. 여기서 x축은 속도를 y축은 가속도를 나타낸다. 같은 속도에서 굵은 실선으로 표시된 주행 구간은 가는 점선으로 나타난 구간보다 높은 가속도를 가지는 것을 알 수 있다. 바로 아래 세 개의 그림중 첫 번째 그림은 팬헤드 가속도 신호의 크기(RMS값), 두 번째 그림은 열차속도에 비례하는 경관통과주파수 성분의 크기, 마지막 그림은 열차속도와 무관한 8.5Hz 판토티그래프 고유진동수 성분의 크기를 비교한 것이다. 판토티그래프의 전체적인 거동의 폭은 크게 다르지 않으나 성분별로 차이를 보인다. 즉, 경관통과주파수 성분은 가속도에 민감하고 판토티그래프의 고유주파수 성분은 그리 민감하지 않은 것을 알 수 있다. 경관통과주파수 성분이 판토티그래프의 고유진동수 성분보다 속도변화에 민감하다는 결과를 상기하면 경관통과주파수 성분이 열차의 주행조건에 민감하다는 결론을 얻을 수 있다.

Fig. 8은 같은 주행 조건에서 로드셀 신호의 경관통과주

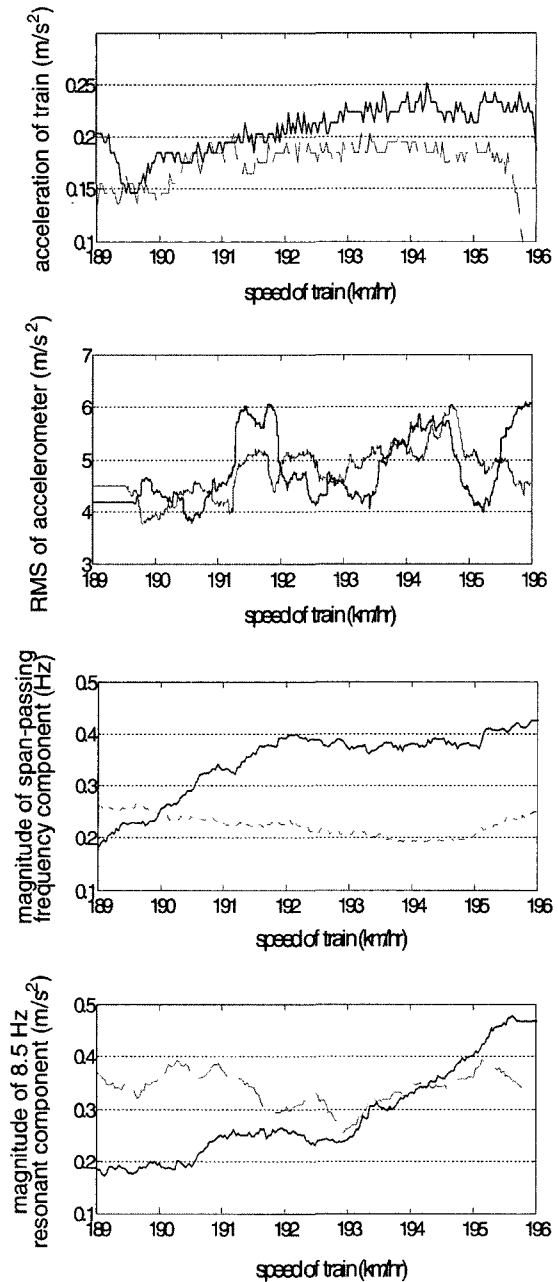


Fig. 7. Effect of train acceleration on panhead accelerometer signal

파수 성분을 비교한 것이다. 로드셀 신호 또한 열차 가속도에 매우 민감한 것을 알 수 있다.

5. 결론

주행하는 고속철도차량의 판토티그래프에 부착된 가속도계, 로드셀 신호를 동시에 취득하여 분석하였고 열차의 운행 속도 및 가속도가 집전계에 미치는 영향을 살펴보았다.

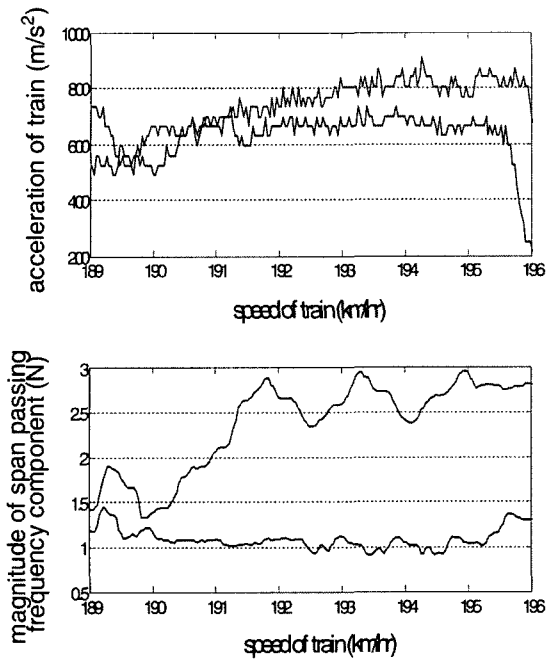


Fig. 8. Effect of train acceleration on load cell signal

먼저 열차의 주행속도가 집전특성에 미치는 영향을 살펴 보면 속도가 증가할수록 판토틀라프의 거동의 폭이 증가하는데 주요 주파수 성분을 보면 속도에 비례하여 변하는 성분과 속도와 무관하게 변하지 않는 성분이 존재한다. 열차 속도와 정비례하여 변하는 주요 주파수 성분은 경간 간격에 의해 발생되고, 열차속도에 비례하지 않고 일정한 8.5Hz 성분은 판토틀라프의 고유진동수에 해당된다. 이중 경관통과 주파수 성분이 고유진동수 성분보다 열차 주행 속도에 민감하다.

이전의 연구에서는 주어진 주행 속도만을 고려하여 집전 특성을 살펴 보았으나 이번 연구에서는 열차의 주행 가속도 또한 무시할 수 없는 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 경관통과주파수 성분이 판토틀라프 고유진동수 성분에 비하여 보다 민감하게 반응한다는 결론을 얻었으나 열차 주행

가속도와 집전특성 사이의 상관관계를 규명하기 위한 보다 상세한 연구가 필요하다. 특히 견인, 타행, 제동의 운전조건에 따른 집전성능을 살펴보는 향후 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었고, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김정수, 최병두 1999, "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 9권 제2호, pp.317-323.
2. W. M. Kim, J. T. Kim, J. S. Kim, J. W. Lee, 2003, "A Numerical Study on Dynamic Characteristics of a Catenary", KSME International Journal, Vol.17, No.6, pp.860-869.
3. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "TGV-K 집전 시스템의 동특성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.176-184.
4. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "한국형 고속전철 집전계의 동적거동", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.130-135.
5. 허신, 경진호, 송달호, 1998, "속도 향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전시스템의 성능에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.533-539.
6. 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, 1999, "집전시스템의 동적 수치모의 해석에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.151-158.
7. 조용현, 김영국, 현승호, 이기원, 김휘준, 2000, "G7 고속전철기술평가사업 집전시스템 사양의 최적화 연구", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.543-556.
8. 한형석, 경진호, 송달호, 배정찬, 1998, "고속용 판토틀라프의 개념설계", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.337-344.
9. 김정수, 박성훈 2001, "설계변수 변화에 따른 KTX 가선계의 동적응답 해석", 한국소음진동공학회지, 11권 제2호, pp.346-353.
10. 이시우, 김정수, 조용현, 최강윤 2004, "주행 중 발생하는 고속전철 집전계 신호의 특성", 한국철도학회논문집, 7권 3호, pp.232-238.