

주행 중 발생하는 고속전철 집전계 신호의 특성

Characteristics of Current Collection Signals during Test Run of High-speed Train

이시우¹ · 김정수² · 조용현³ · 최강윤³

Si-Woo Lee · Jung-Soo Kim · Yong-Hyeon Cho · Kang-Youn Choe

Abstract

The dynamic characteristics of the current collection process of the high-speed railway are investigated through signals acquired during a test run. The signals are obtained from accelerometers, load cells, and strain gauges attached to various positions of the pantograph, and they are processed in time-and frequency-domains to obtain the dynamic characteristics. The main natural frequency of the pantograph is found to be 8.5Hz. There also are components at low frequencies varying linearly with the train speed. The contact frequency components above 20Hz is attenuated as they pass through the secondary suspension. The main frequency component of the load cell signal is found to be related with the rolling motion of the panhead generated by the stagger in the catenary.

Keywords : 고속전철(High speed train), 집전시스템(Current collection system), 판토틀라프(Pantograph), 가선계(Catenary), 전차선(Contact wire), 팬헤드(Panhead)

1. 서론

고속철도는 그 빠른 속도, 안전성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있고, 개발선진국은 각국의 상황에 맞는 고유의 가선계를 개발하였고, 그 가선계에 적합한 판토틀라프를 최적화하여 왔다. 현재 고속철도 사업의 초기단계인 우리나라는 관련 기반기술 확보에 주력하고 있다. 판토틀라프는 가선계로부터 전력을 공급받는 장치이고, 열차주행시 가선계 및 판토틀라프로 이루어지는 집전시스템은 전력을 차량의 운행에 필요한 전력을 공급하는 기능을 수행하므로, 고속철도시스템과 차량의 안전성과 열차의 속도 향상 여부를 결정하는데 중요한 인자이다. 전차선과 판토틀라프는 접촉부에서 상호간에 기계적·전기적 작동이 끊임없이 수반되며 이러한 상호작용이 집전시스템의 성능을 결정하므로 집전시스템 성능 평가의 핵심은 접촉부에서 전차선과 판토틀라프의 사

이의 상호작용의 조화 특성 평가에 있다.

이전까지 실행되었던 연구를 예를 들면 전차선과 조가선은 현으로 모델링하고 판토틀라프는 질량과 강성, 감쇠를 갖는 3자유도 등가모델로 모델링하여 판토틀라프의 거동특성을 분석하거나[1,2] 접촉력을 계산하여 집전성능을 예측하였다[3]. 또한 전차선의 내부감쇠 등의 디자인 변수의 변화에 따른 집전성능을 살펴보고[4,5], 이러한 연구결과들은 고속전철용 판토틀라프의 설계에 반영하였다[6]. 그러나 시뮬레이션은 집전시스템을 단순화하여 모델링을 한 것이기 때문에 한계를 가지고 있다. 본 연구는 실제 주행시에 수집된 신호로 분석한 결과로서 시뮬레이션이 가지고 있던 한계를 보완할 수 있다는 면에서 의미가 있다. 한국형 고속전철의 최고 주행속도는 300km/hr 이상이다. 이 속도에서 취득한 신호가 의미가 있으나 본 연구에서는 일단 최고속도 199km/hr의 속도로 주행하는 고속전철의 신호를 사용하였다. 주행하는 고속전철의 판토틀라프에 부착된 센서로부터 신호를 얻기 위해 전용 계측장비를 사용하였고, 이 장비는 고속철도의 주행시 판토틀라프에 부착된 5개의 가속도계, 2개의 로드셀, 4개 스트레인 게이지에서 발생하는 신호

1 정회원, 홍익대학교 기계공학과 대학원, 석사과정

2 정회원, 홍익대학교 기계공학과, 부교수

3 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

를 동시에 수집, 처리할 수 있는 기능을 가지고 있다. 본 연구는 주행 시에 각 센서로부터 취득한 데이터를 분석하여 특성을 파악하였다.

2. 주행 신호 취득방법

집전시스템은 크게 가선계와 판토티그래프의 두 부분으로 나누어진다. Fig. 1은 가선계의 구조이다. 전차선은 열차 위에 설치된 판토티그래프와 직접적인 접촉을 이루어 전기를 공

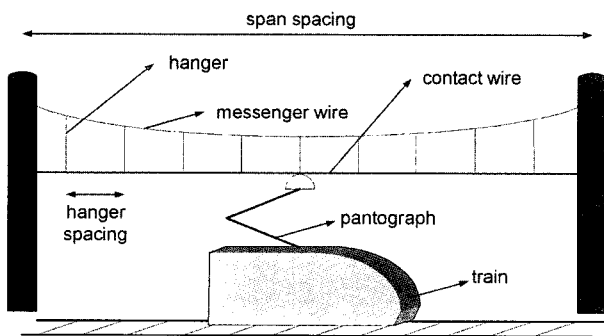


Fig. 1. The current collection system

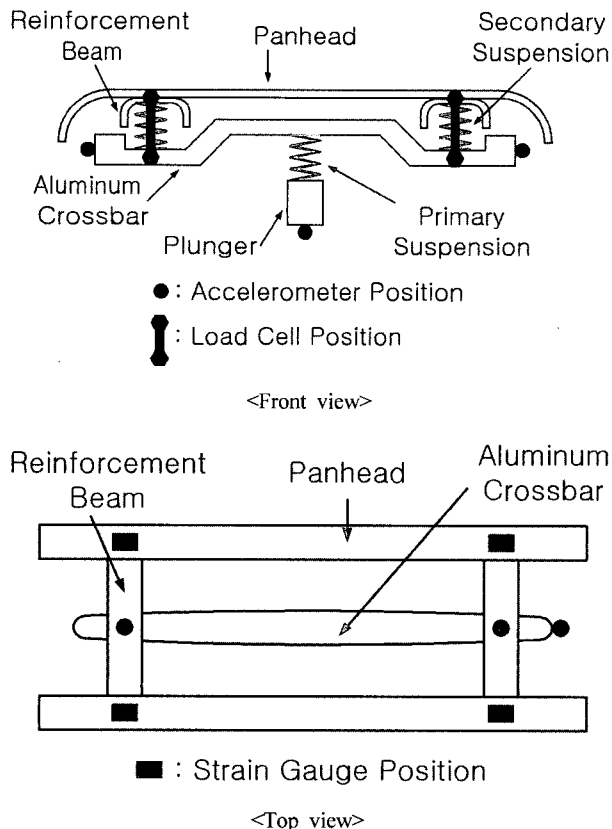


Fig. 2. Sensor locations

급하는 부분이고, 조가선은 전주에 현수되어 전차선을 지지하는 역할을 하며, 행거는 전차선과 조가선을 연결시켜 전차선의 동적 하중을 조가선에 확산시키는 역할을 수행한다. 고속철도의 이상적인 집전성능을 위해서는 열차 주행시 전차선과 판토티그래프가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력 공급이 유지되어야 한다.

Fig. 2는 판토티그래프의 구조와 센서의 위치이다. 판토티그래프의 구조는 맨 윗부분에 전차선과 접촉이 있는 펜헤드가 있고, 그 밑에는 펜헤드를 보강하기 위한 보강빔이 있다. 보강빔 아래에는 행거의 의해 발생하는 주파수에 대해 추종성을 좋게 하기 위한 2차 서스펜션이 좌·우측에 있고, 그 아래에는 알루미늄빔이 있다. 알루미늄빔 중간 하단에 1차 서스펜션(플런저)이 존재한다. 주행하는 열차의 펜헤드에 4개의 스트레인 게이지, 2개의 가속도계, 2차 서스펜션 아래에 위치한 알루미늄빔의 좌·우측에 각각 2개의 가속도계와 로드셀, 그리고 1차 서스펜션 플런저 하단에 1개의 가속도계를 설치하였다. 이와 같은 곳에 설치된 11개의 센서로부터 판토티그래프의 동적 거동에 관련된 신호를 동시에 취득하였다. 센서의 위치는 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2와 같이 설치된 센서로부터 발생하는 신호는 Fig. 3과 같이 텔레메트리 송신부에서 라디오전파를 통해 텔레메트리 수신부로 전달된다. 전차선의 고전압의 위협으로 인해 케이블 전송 방식을 피하였고, 수신부에서 취득된 신호는 VXI시스템으로 처리된다. Fig. 4는 텔레메트리 송신부이다.

Fig. 5는 텔레메트리 수신부와 VXI 시스템이다. VXI시스

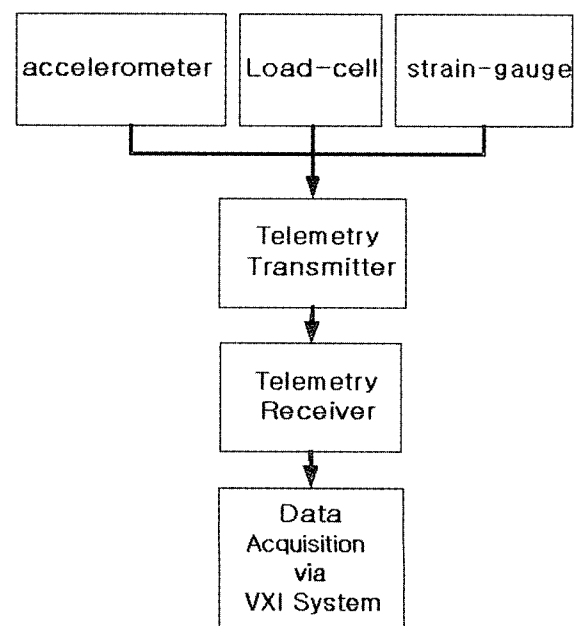


Fig. 3. Pantograph measurement system

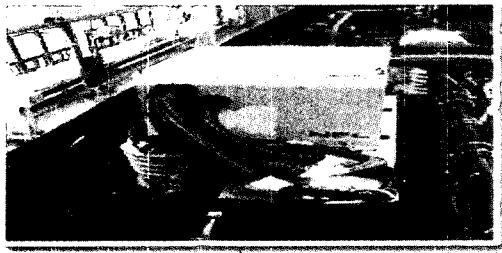


Fig. 4. Sending part of telemetry



Fig. 5. Receiving part of telemetry and VXI processing system

템은 실시간으로 데이터를 고속 및 저속으로 샘플링할 수 있는 계측시스템 하드웨어이다. 본 논문에서는 이와 같은 측정 시스템을 사용하여 얻은 가속도계, 로드셀에서 취득한 신호만을 시간 및 주파수영역에서 분석하여 제시하고자 한다.

3. 가속도계 신호 분석

열차가 주행할 때 판토품의 각 부위의 가속도계에서 취득한 신호를 시간 및 주파수 영역에서 분석하였다.

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 주행시험의 속도 선도이다. Fig. 7과 8은 팬헤드에 설치된 가속도계의 신호와 평균값

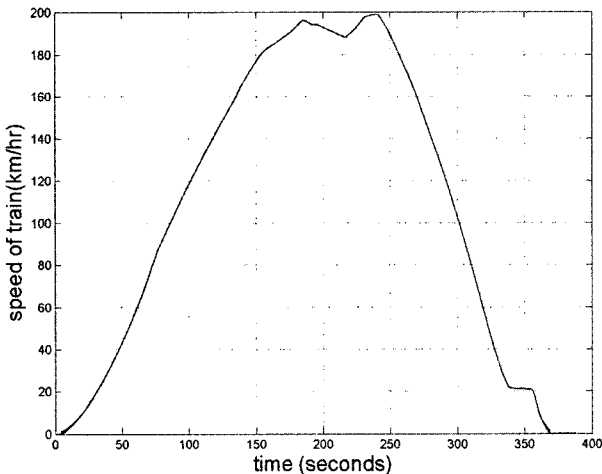


Fig. 6. Speed profile of test run

에 대한 진폭을 속도의 함수로서 나타낸 것이다. 속도가 증가할수록 가속도 신호도 비례하여 증가하고, 팬헤드의 거동도 커짐을 알 수가 있다.

Fig. 9는 고속전철의 속도변화에 따른 판토품의 응답의 특성을 보기 위해서 다른 주행속도에서 팬헤드에 설치된 가속도계의 신호를 분석하였다. Fig. 9의 (a)는 속도가 150km/hr, (b)는 속도가 190km/hr일 때 분석한 것이다. 이 주파수 선도를 보면 속도 변화에 비례하여 나타나는 주파수 성분이 존재하고, 속도에 변화에 관계없이 일정하게 나타나는 주파수 성분이 존재한다. 먼저 속도 변화에 비례하는 주파수 성분을 보면, 150km/hr의 주파수 선도에서 첫 번째 peak가 1.02Hz이고, 속도가 증가한 190km/hr의 주파수 선도에서는 첫 번째 peak가 1.31Hz로 이동한 것을 알 수가 있다. 주행속도, 경간 간격 및 주파수는 다음과 같은 관계를 갖는다[7].

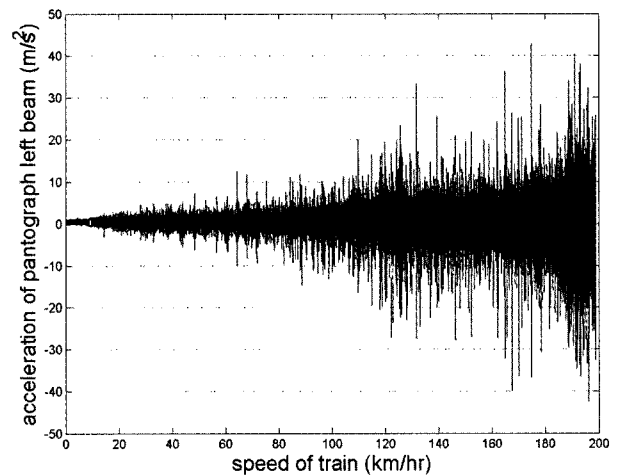


Fig. 7. Panhead acceleration vs. train speed

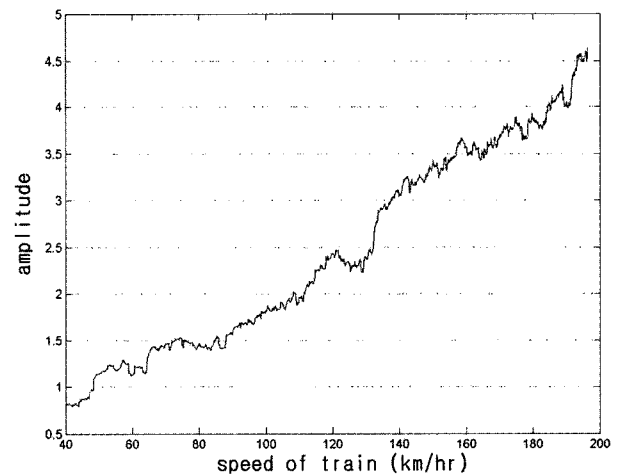
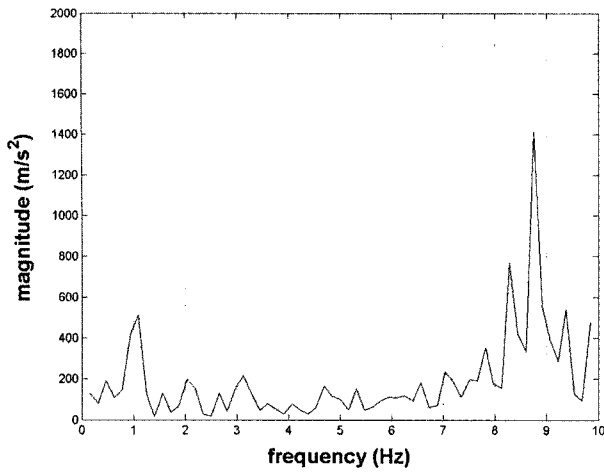
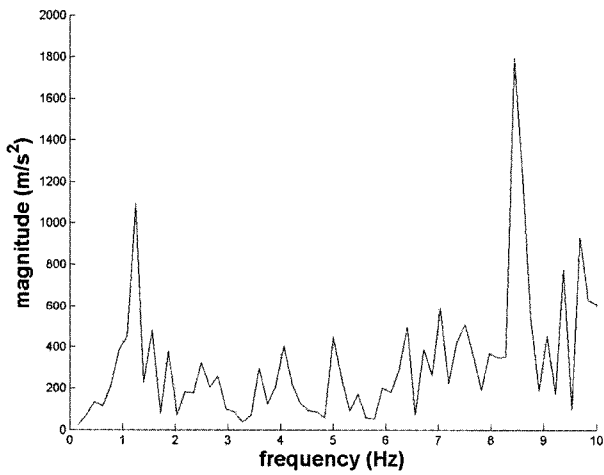


Fig. 8. Variation in panhead acceleration vs. train speed



(a) 150km/hr



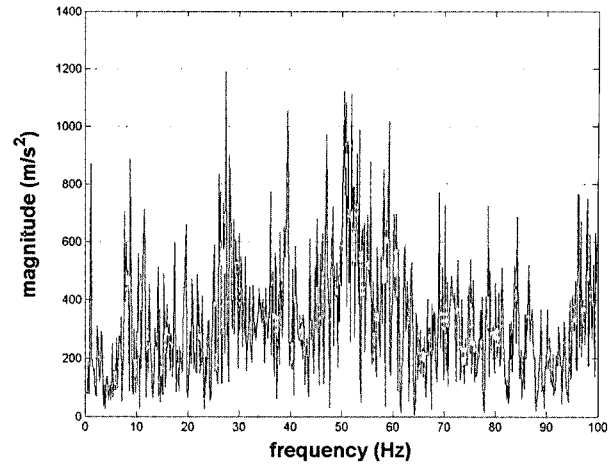
(b) 190km/hr

Fig. 9. Frequency characteristics of panhead acceleration at different train speeds

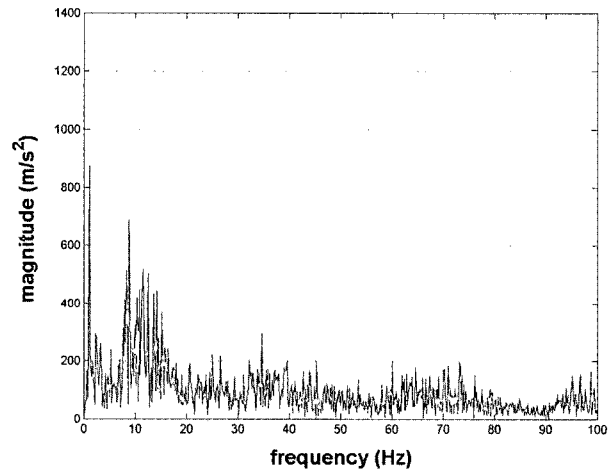
$$\left[\frac{\text{주행속도(km/hr)} \times 1,000}{3,600} \right] \times \left[\frac{1}{\text{경간간격(m)}} \right] = \text{주파수(frequency)} \quad (1)$$

속도에 변화에 관계없이 일정하게 나타나는 주파수 성분을 보면 8.5Hz 성분의 peak가 일정하게 나타난다. 이 주파수 성분이 판토품의 고유주파수이다.

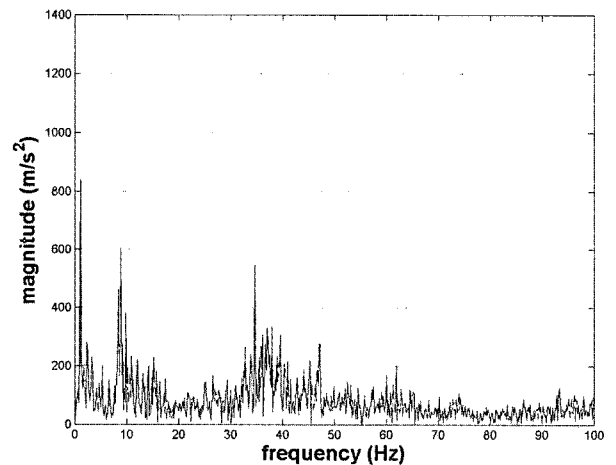
Fig. 10 (a)는 Fig. 2의 <front view>에서 팬헤드에 설치된 가속도계, (b)는 알루미늄바에 설치된 가속도계, (c)는 1차 서스펜션(플러저) 하단부에 설치된 가속도계에서 측정된 신호를 주파수 분석하여 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)와 (b)에 설치된 가속도계 사이에는 좌·우측에 2차 서스펜션이 설치되어있고, (b)와 (c)에 설치된 가속도계 사이에는 1차 서스펜션(플러저)이 있다. 1차, 2차 서스펜션은 경간·행거에 의해 발생하는 주파수에 대해 동적 추종성을 좋게 하기 위



(a) Panhead acceleration



(b) Al-crossbar acceleration



(c) Plunger acceleration

Fig. 10. Frequency characteristics of pantograph accelerometers

해 설치되었다. 특히, 2차 서스펜션은 행거에 의해 발생되는 고주파수 성분에 대해 추종성이 좋게 하기 위해 설치되었으

며, 고주파 성분을 감쇠시키는 역할을 한다. 1차 서스펜션은 저주파 성분을 감쇠시키는 역할을 한다[3,6]. Fig. 10처럼 실제 주행 시에 2차 서스펜션은 펜헤드에 작용하는 20Hz이상의 고주파 성분을 감쇠시키는 역할을 하였고, 1차 서스펜션의 역할인 저주파 성분의 감쇠는 2차 서스펜션과 비교하여 두드러지게 나타나지는 않았다. Fig. 10(c)의 플런저의 주파수 선도에서 보면 34Hz 성분의 peak가 존재하는데 이 성분은 판토품의 구조진동에 의해 생기는 성분이라 사료된다.

4. 로드셀 신호 분석

Fig. 11은 열차가 Fig. 12와 같이 4개의 구간을 지날 때 취득한 좌·우측 로드셀 신호이다. 이런 사인파의 형태로 나타나는 것은 판토품이 하나의 구간을 지날 때 펜헤드에 걸리는 하중이 접촉점을 따라서 좌측에서 우측으로 또는 우측에서 좌측으로 stagger하게 이동하기 때문이다[4]. Fig. 12는 구간 간격당 가선의 stagger한 형태를 나타낸 것이다.

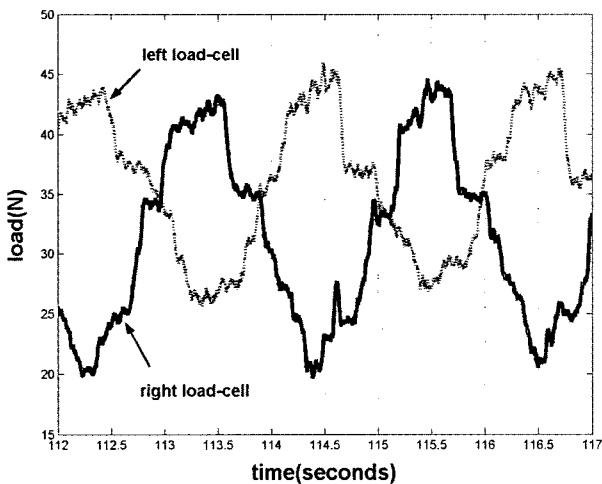


Fig. 11. Load-cell signals

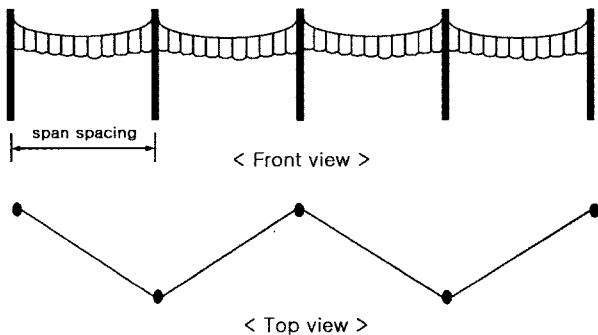


Fig. 12. Stagger in catenary

펜헤드가 전차선을 stagger하게 이동하는 이유는 펜헤드의 편중된 마모를 방지하기 위해서다.

Fig. 13은 가속도계 신호를 주파수 분석한 것(실선)과 로드셀 신호(점선)를 주파수 분석한 것을 함께 나타낸 것이다. 로드셀의 신호에서는 두 개의 peak가 존재하는데 첫 번째 peak는 두 구간을 지나쳤을 때의 신호이고, 두 번째 peak는 하나의 구간을 지나쳤을 때 나타난 신호이다. 두 번째 peak는 가속도계 신호의 peak와 일치하는데, 이는 위의 가속도계의 신호분석에서 말한 구간 간격에 의해 발생하는 주파수 성분이다. 로드셀 신호의 첫 번째의 peak는 두 번째의 peak의 절반에 해당하고, 가속도계의 신호에서는 나타나지 않는다.

Fig. 14는 속도의 증가에 따른 로드셀 신호의 주기의 변화를 나타낸 것이다. 속도가 증가함에 따라 주기가 감소하는

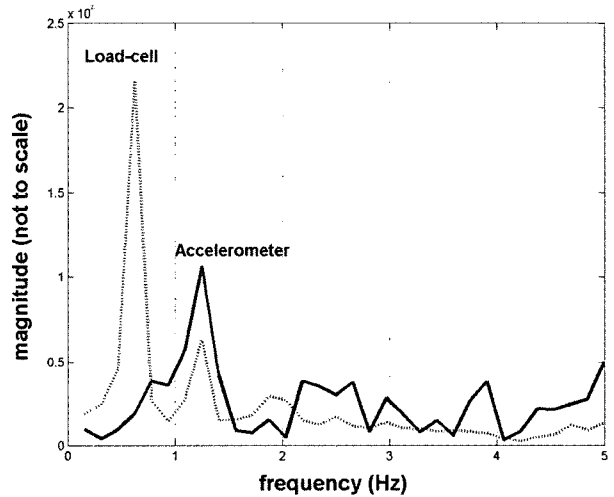


Fig. 13. Comparison of frequency characteristics of load-cell and accelerometer

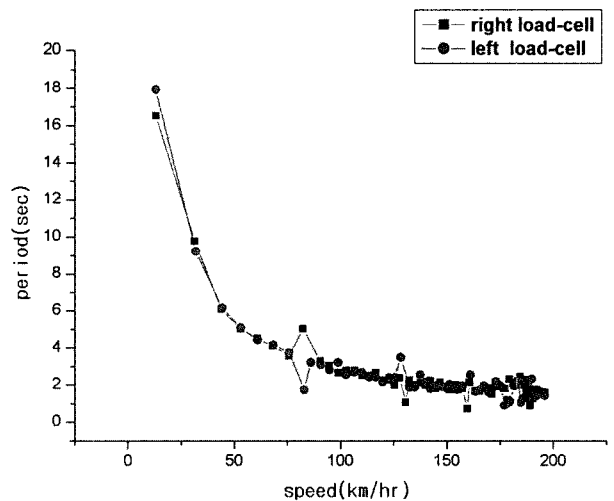


Fig. 14. Load-cell signal period vs. train speed

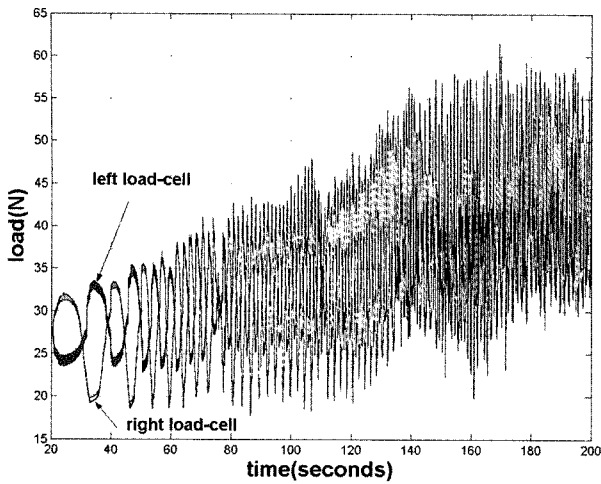


Fig. 15. Left and right load-cell signals

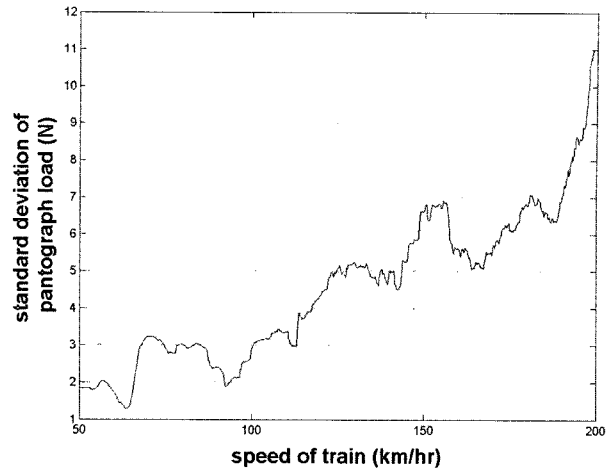


Fig. 17. Variation of load-cell signal vs. train speed

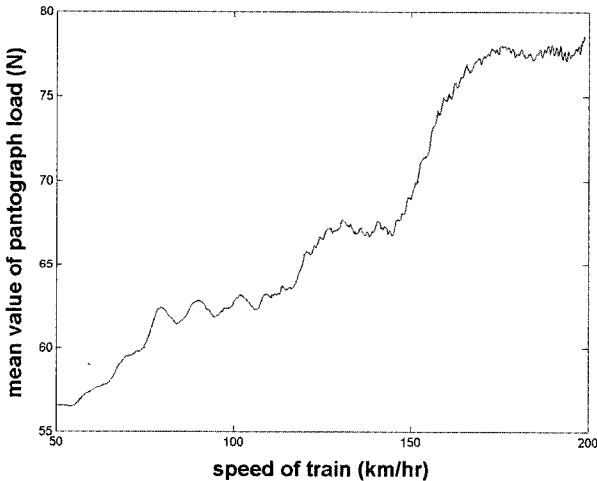


Fig. 16. Mean load-cell value vs. train speed and acceleration

4. 결론

주행하는 고속철도차량의 판토품라프에서 신호를 얻기 위하여 전용 계측장비를 사용하였다. 이 장비는 주행시 판토품라프에 부착된 5개의 가속도계, 2개의 로드셀, 4개 스트레인 게이지에서 발생하는 신호를 동시에 수집처리할 수 있다. 본 연구에서는 열차가 최고속도 199km/hr로 주행할 때 가속도계와 로드셀 신호를 취득, 분석하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

판토품라프의 가속도 신호를 분석한 결과를 보면 열차속도가 증가할수록 팬헤드의 가속도의 신호를 증가시키고, 팬헤드에 설치된 가속도계의 주파수 성분을 보면 속도에 비례하여 변하는 성분과 속도와 무관하게 변하지 않는 성분이 존재한다. 먼저 열차속도의 변화에 비례하여 존재하는 주요 주파수 성분은 경간 간격에 의해 발생되고, 열차속도의 변화에 비례하지 않는 성분인 8.5Hz성분이 일정하게 존재하는데, 이 성분은 판토품라프의 고유주파수이다. 접촉부에서 발생하는 20Hz이상의 고주파 성분은 2차 서스펜션을 통과하면서 진동의 크기가 감소하는 것을 알 수가 있다.

로드셀 신호를 분석한 결과를 보면 경간 간격에 의해 발생하는 주파수성분이 가속도계의 주파수 성분과는 다르게 나타나는데, 주요 성분은 가선계의 stagger에 기인한 팬헤드의 rolling motion과 관련이 있다. 또한 속도가 증가함에 따라 로드셀에 걸리는 힘의 평균값과 변동 폭이 함께 증가한다는 것을 알 수가 있다.

후 기

본 연구는 “고속전철 열차시험 및 성능평가기술개발”의 일환으로 수행된 연구이고, 이에 감사드립니다.

것을 알 수가 있다. 이는 속도의 증가하면서 경간을 지나치는 시간이 짧아지기 때문이다.

Fig. 15는 속도의 증가에 따른 좌·우측 로드셀 신호의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 16과 Fig. 17은 좌·우측 로드셀 신호의 합으로 나타낸 평균값과 표준편차이다. Fig. 16을 보면 속도가 증가함에 따라 로드셀에 걸리는 힘의 평균값이 증가한다는 것을 알 수가 있는데, 이는 속도가 증가함에 따라 팬헤드의 가속도와 로드셀에 걸리는 힘이 같이 증가한다는 것을 보여주고 있다. Fig. 17은 속도가 증가함에 따라서 평균값을 중심으로 한 로드셀의 변동값 또한 증가한다는 것을 보여주고 있다. 특히 150km/hr 이상에서 급격히 증가하는데 이는 열차 속도의 증가로 인하여 팬헤드 거동의 변화의 폭 또한 급격히 증가한다는 것을 의미한다.

참고문헌

1. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "TGV-K 집전 시스템의 동특성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.176-184.
2. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "한국형 고속전철 집전계의 동적거동", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.130-135.
3. 허신, 경진호, 송달호, 1998, "속도 향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전시스템의 성능에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.533-539.
4. 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, 1999, "집전시스템의 동적 수치모의 해석에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.151-158.
5. 조용현, 김영국, 현승호, 이기원, 김휘준, 2000, "G7 고속전철기술개발사업 집전시스템 사양의 최적화 연구", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.543-556.
6. 한형석, 경진호, 송달호, 배정찬, 1998, "고속용 판도그래프의 개념설계", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.337-344.
7. 김정수, 박성훈, 2001, "설계변수 변화에 따른 KTX 가선계의 동적응답 해석", 한국소음진동공학회 별책, 11권 제2호.