한국철도학회논문집
제10권 제4호 2007년 ▌ pp. 414-419

실차실험에 의한 집전계의 접촉 동특성 규명

A Verification of the Contact Dynamics of the Current Collection System on a Test Run

김정수†
Jung-Soo Kim

Abstract

The contact characteristics of the current collection system are investigated by analyzing data collected during a test run of the Korean high speed rail vehicle. For the analysis, the signals from accelerometers and load cells attached to the various parts of the pantograph are analyzed in both the time and frequency domains. In the frequency domain, the pantograph response consists of low frequency components related to the rigid-body motion of the panhead assembly and high frequency components due to the structural vibration modes of the pantograph. The analysis shows that the inclusion of the high frequency structural vibration modes of the pantograph in the contact force calculation has a negligible effect on the predicted mean value of the contact force but significantly affects the magnitude of its fluctuations. This finding implies that numerical simulations using lumped element models of the pantograph may accurately predict the mean contact force but is limited in its capacity for predicting the fluctuation about the mean. Since the ratio of the fluctuation to the mean in the contact force increases with increased train speed, the limitation of the predictions based on numerical simulation results becomes more pronounced at higher train speed.

Keywords : High speed train, Current collection system, Catenary, Pantograph, Contact force
고속전철, 집전계, 가선계, 판토그라프, 접촉력

1. 서 론

고속철도는 빠른 속력, 안전성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있고 개발선진국은 각 국의 상황에 맞는 고속철도 기술을 발전시키고 있다. 우리나라도 350 km/hr급 한국형 고속철도 차량과 함께 우리나라 가선계에 적합한 판토그라프를 개발하여 집전기술 확보에 주력하고 있다. 판토그라프는 가선계로부터 전력을 공급받는 장치이고, 열차주행시 가선계 및 판토그라프로 이루어지는 집전시스템은 차량의 운행에 필요한 전력을 공급하는 기능을 수행하므로 고속철도시스템의 안전성을 결정하는데 중요한 요인으로 작용한다.

고속전철 집전계는 그 특성상 실험에 의한 평가가 쉽지 않다. 따라서 집전계에 대한 연구에는 수치해석에 기반한 컴퓨터 시뮬레이션이 많이 활용되어 왔다. 집전성능을 결정하는 접촉력 및 판토그라프의 거동을 예측하기 위하여 가선계를 현에 기반한 유한차분법을 사용하여 모델링하고 판토그라프는 3자유도를 갖는 이산계로 모델링하여 특성을 분석하였고[1,2], 판토그라프와 가선계 접촉부의 수치해석 시 수학적 특성에 관한 분석이 제시되었으며[3], 디자인 변수에 따른 접촉력의 변화를 계산하여 집전성능을 예측하는 연구가 수행되었다[4,5,6,7]. 가선계만을 대상으로 한 연구에서는 가선계를 인장보로 간주하고 유한요소 모델링을 수행하여 동적 특성을 살펴보았다[8,9]. 또한 판토그라프를 이산계로 모델링하여 해석이 수행되었고[10,11] 판토그라트의 개념 설계가 제안되었이다[12]. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션은 집전계의 단순화를 수반하므로 개발된 판토그라프의 집전성능을 검증하는 시험이 필수적인데 시험은 상사모델을 이용한 시험과 실제 대상을 가지고 수행하는 주행시험으로 구분된다. 축소모델을 사용한 고속전철 집전성능시험이 해외에서 보고된바 있다[13]. 본 저자는 한국형 고속철도 시제차량의 주행시험시 취득한 신호를 분석하여 집전계의 운동특성과 열차 주행조건사이의 상관관계를 살펴보았다[14,15]. 본 논문에서는

† 책임저자 : 정회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail : apollo11@hanmail.net
TEL : (02)320-1471 FAX : (02)320-1113

집전계 접촉력의 동적 특성 규명에 초점을 맞추어서 데이터 분석을 수행하였다.

2. 집전계의 신호 취득

집전시스템은 크게 가선계(catenary)와 판토그라프(pantograph)의 두 부분으로 나누어진다. Fig. 1은 가선계의 구조와 집전과정을 나타낸다. 전차선(contact wire)은 열차 위에 설치된 판토그라프와 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. 또한 곡선당김금구(steady arm)가 가선계에 스태거(stagger)를 주어서 판토그라프에 마모가 편중되는 것을 방지한다. 고속철도의 이상적인 집전성능이란 열차 주행시 전차선과 판토그라프가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력공급이 이루어지는 것을 말한다.

Fig. 2는 한국형 고속열차 시제차량에 부착된 판토그라프의 구조와 센서의 위치이다. 판토그라프의 구조를 살펴보면 맨 윗부분에 전차선과 접촉이 있는 팬헤드(panhead)가 있고, 그 밑에는 팬헤드를 보강하기 위한 보강빔(reinforcement beam)이 있다. 보강빔 아래에는 행거에 의해 발생되는 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. 주행하는 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.

Fig. 2와 같이 설치된 센서로부터 발생되는 신호는 Fig. 3과 같이 텔리메트리 송신부에서 라디오전파를 통해 텔리메트리 수신부로 전달된다. 전차선의 고전압의 위험으로 인해 케이블 전송 방식을 회피하였다.

3. 집전계의 거동 특성

열차가 주행할 때 판토그라프의 팬헤드에 부착된(실제로는 팬헤드 하부의 보강빔에 부착됨) 가속도계에서 취득한 신호를 시간 및 주파수 영역에서 분석하였다.

Fig. 4는 가속도계 신호의 root mean square(RMS)값을 속

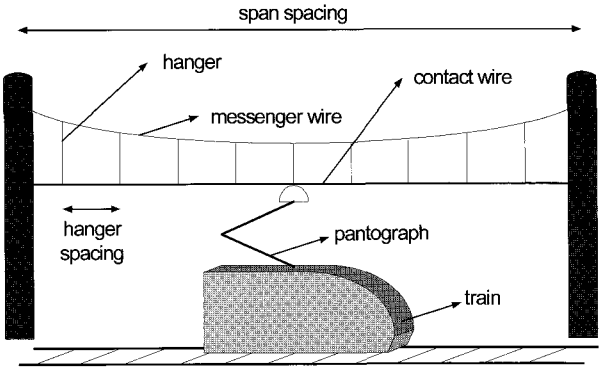


Fig. 1. The current collection system

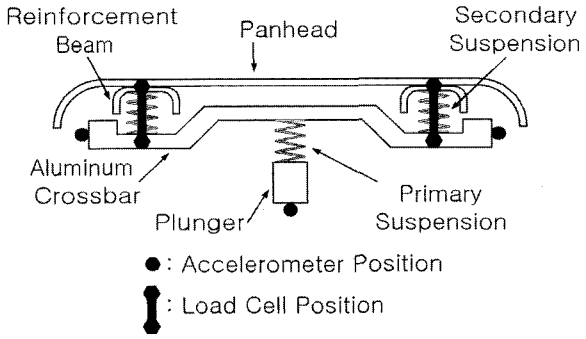


Fig. 2. Sensor placement

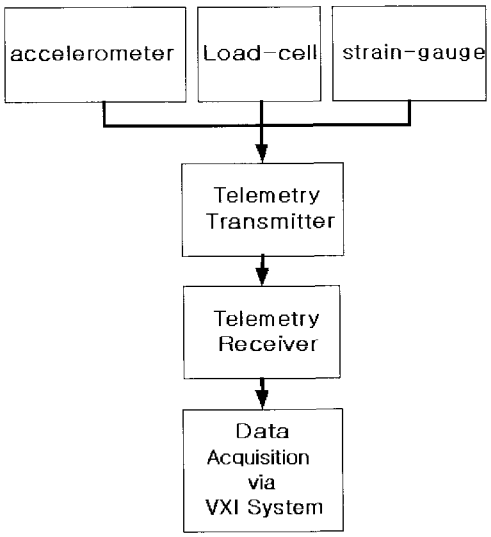


Fig. 3. Data collection apparatus

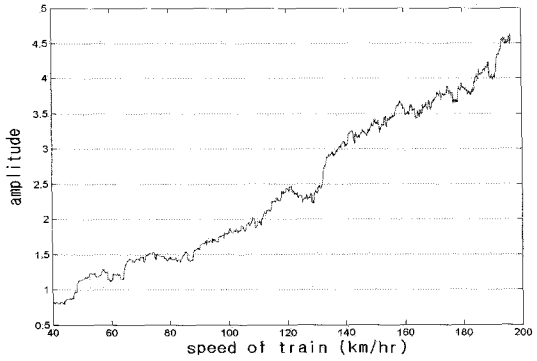
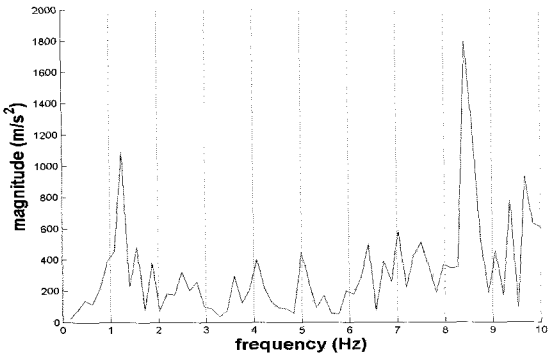
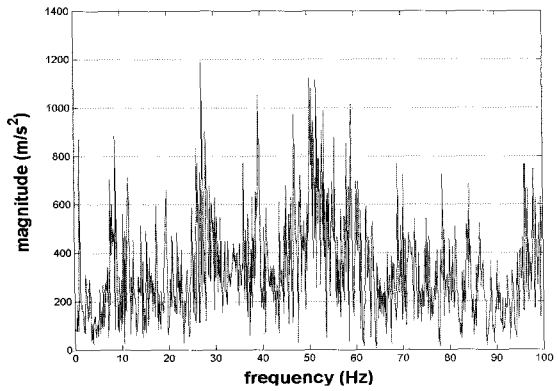


Fig. 4. Panhead acceleration vs. train speed



(a) 10 Hz frequency range



(b) 100 Hz frequency range

Fig. 5. Frequency characteristics of panhead acceleration

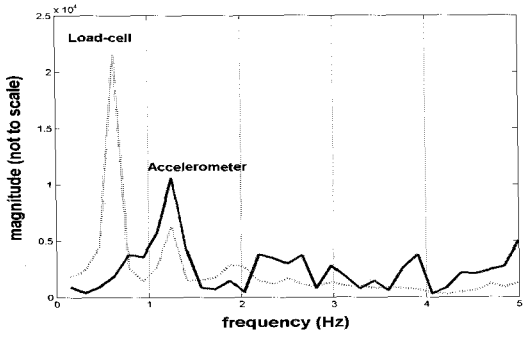


Fig. 6. Comparison of load cell and accelerometer signals

도의 함수로서 나타낸 것이다. 속도가 증가할수록 가속도 신호도 비례하여 증가하고, 팬토그라프의 거동도 커짐을 알 수가 있다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 주행 속도가 190 km/hr일 때 가속도 신호의 주파수 분석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 10 Hz 이내의 저주파 성분을, Fig. 5(b)는 주파수 범위 100 Hz 까지 확대하여 살펴본 것이다. Fig. 5(a)는 1.3 Hz 에서 경관통과주파수 성분(span-passing frequency)을, 8.5Hz에서 판토그라프의 고유주파수 성분을 보여주고 있는데 모두 팬헤드가 서스펜션 위에서 강체로서 거동하는, 즉 팬헤드의 강체운동 부분에 해당된다. Fig. 5(b)에서 20 Hz 이상 되는 주요 성분들은 팬헤드 및 판토그라프 각 부위의 구조진동에 기인됨을 별도의 진동 실험을 통하여 확인하였다. 보다 상세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다[14].

Fig. 6은 저주파 영역에서 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 첫 번째 피

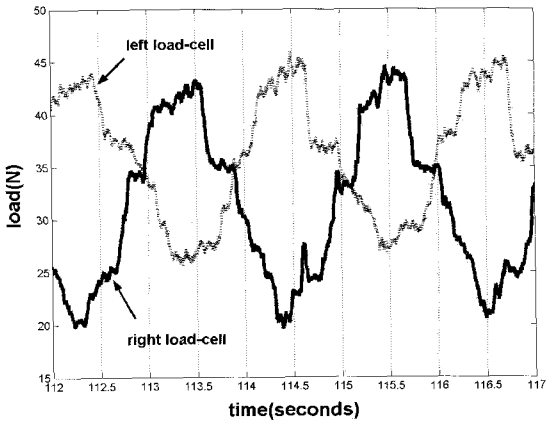


Fig. 7. Rolling motion of panhead

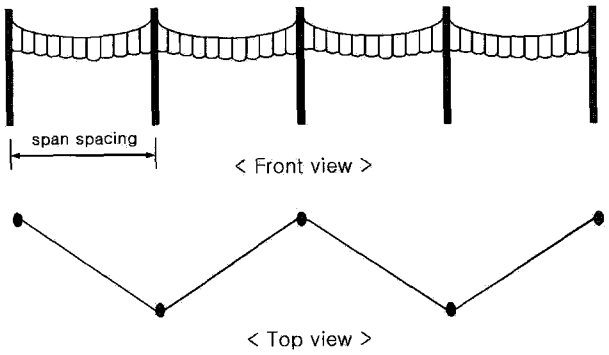


Fig. 8. Stagger in catenary

크의 두 배수로서 가속도계 신호의 경간통과주파수 성분과 일치한다. 로드셀 신호의 첫 번째 피크는 가선계의 스태거(stagger)에 의한 판토그라프의 rolling motion에 기인한다.

Fig. 7은 열차가 Fig. 8에 나타난 대로 4개의 경간을 통과할 때 취득한 좌·우측 로드셀 신호이다. 신호가 각각 사인파의 형태로 나타나는 것은 판토그라프가 하나의 경간을 지날 때 팬헤드에 걸리는 하중이 접촉점을 따라서 좌측에서 우측으로 또는 우측에서 좌측으로 스태거(stagger)를 가지고 이동하기 때문이며 이에 의하여 판토그라프는 rolling motion을 보이게 된다[5]. Fig. 8의 아래그림에는 곡선당김금구(steady arm)를 통하여 구현되는 가선계의 스태거가 나타나 있다. 가선계에 스태거를 주는 이유는 팬헤드 집전판에 마모가 편중되지 않고 골고루 일어나게 하기 위해서다.

4. 집전계의 접촉력 특성

접촉력은 집전여부를 평가하는 중요한 지표로서 사용될 수 있다. 접촉력이 충분하지 못하면 가선계와 판토그라프 사이의 이선 발생율이 높아지고 접촉력이 너무 높으면 이선율은 줄어드나 팬헤드 및 전차선의 마모가 증가한다. 따라서 접촉력을 설계된 범위 내에서 유지하는 것이 집전계의 성능 및 신뢰도를 결정하는 매우 중요한 요인이 된다. 접촉력을 정확히 측정하려면 전차선과 팬헤드 사이의 접촉부에 센서를 직접 부착하여야 하나 전차선과 팬헤드 사이의 상대운동 및 고전압 전류를 감안하면 팬헤드의 하부에 로드셀을 부착하여 측정하는 것이 보다 타당한 방법일 것이다. 본 시험을 위해서도 이 방법이 채택되었다. 다만 이 경우에는 팬헤드의 거동에 의한 관성력을 감안하여야만 한다. 즉 로드셀은 접촉력에서 팬헤드의 가속도에 의한 관성력을 뺀 부분만을 측정하게 된다. 따라서 접촉력은 로드셀에 계측된 힘과 팬헤드의 관성력을 합한 값이 된다.

먼저 로드셀 신호를 살펴보기로 한다. Fig. 9는 좌·우측 로드셀 신호의 평균값을 열차 주행속도의 함수로서 나타낸 것이다. 주행속도가 증가함에 따라 로드셀에 걸리는 힘의 평균값 또한 증가하는데 이는 속도가 증가함에 따라 팬헤드의 가속도와 로드셀에 걸리는 힘이 함께 증가한다는 것을 보여주고 있다. 열차속도와 집전계 동특성 사이의 보다 상세한 분석결과는 참고문헌에 나타나있다[14].

관성력 계산에 필요한 팬헤드의 가속도는 주파수대역에서 볼 때 팬헤드의 강체운동 부분에 해당하는 10 Hz 미만의 저주파 성분과 판토그라프의 구조진동에 주로 기인하는 고주파 성분으로 나눌 수 있다. 일단 팬헤드의 강체운동만을 고려하여 관성력을 구하려면 가속도 신호에서 구조진동 부분에 해당하는 주파수 성분을 제거하면 된다. 팬헤드의 강체운동에서 가장 큰 성분은 8.5 Hz 고유진동 모드 성분이므로 12 Hz 필터링을 하면 8.5 Hz 성분까지를 확실히 포함하게 된다. 이때 접촉력은 다음의 간단한 식을 사용하여 구할 수 있다.

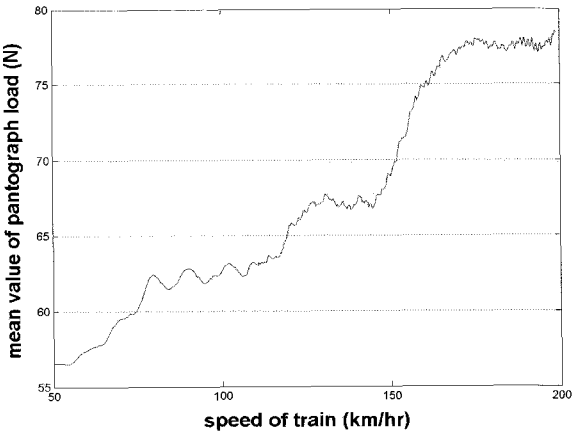
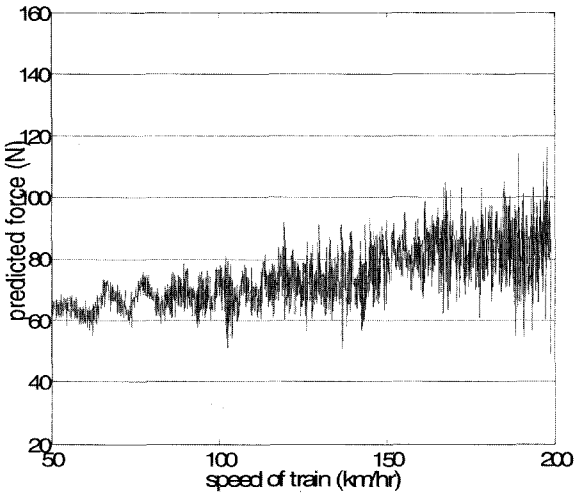


Fig. 9. Mean load cell value vs. train speed

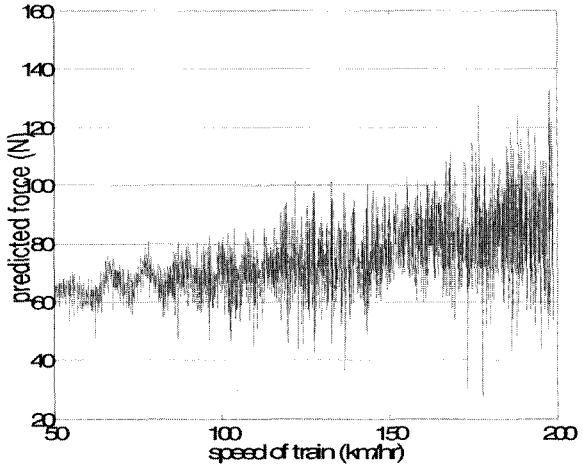
$$F_{contact} = F_{load\ cell} + m_{panhead} \cdot a_{accelerometer} \quad (1)$$

여기서 첫 번째 항은 로드셀에 걸리는 힘이고, 두 번째 항은 팬헤드의 강체운동만을 고려한 관성력으로서 팬헤드의 질량과 12 Hz 필터링이 사용된 팬헤드의 가속도를 곱한 값이다. 계산된 접촉력은 Fig. 10(a)에 나타나 있다. 이와 같은 계산방법은 판토그라프를 이산계로 모델링한 시뮬레이션을 통하여 접촉력을 계산하는 대다수의 수치해석 연구에서 채택하는 방법과 유사하다[4,5,6].

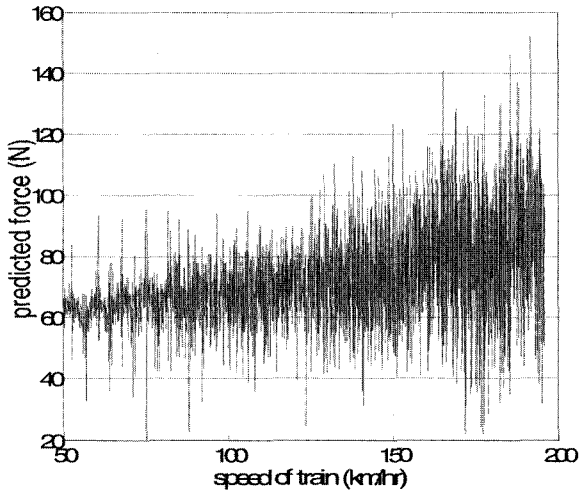
보다 정확한 관성력을 구하려면 팬헤드의 구조진동에 기인한 가속도 성분이 포함되어야만 한다. 이때 다음의 두 가지 사항에 대하여 유의하여야만 한다. 첫 번째는 Fig. 5(b)에서 팬헤드의 구조진동(주로 굽힘진동)에 해당하는 성분만을 구분하기가 쉽지 않다는 것이고 두 번째는 구조진동을 포함하는 팬헤드의 관성력을 충분한 정확도를 가지고 계산하려면 여러개의 가속도계를 팬헤드 곳곳에 부착하여 가속도를 측정하여야만 하고 이때 각 측정점 사이에는 상대운동이 존재하므로 적합한 계산 알고리즘을 개발하여야 한다는 것이다. 현실적인 관성력 측정방법은 각 측정점에 적절한 가중치를 주어 부분 관성력을 구하고 팬헤드의 관성력은 이런 부분관성력의 합으로서 구하는 방법일 것이다. 본 연구에서는 일단 팬헤드 하부에서 측정한 2개의 가속도계에 1/2의 동일한 가중치를 부여하고 20 Hz, 30 Hz 필터링을 적용하여 가속도 신호 각각의 부분관성력을 구한 후 이를 합하여 팬헤드의 전체 관



(a) with 12 Hz filtering



(b) with 20 Hz filtering



(c) with 30 Hz filtering

Fig. 10. Predicted Contact Force vs. Train Speed

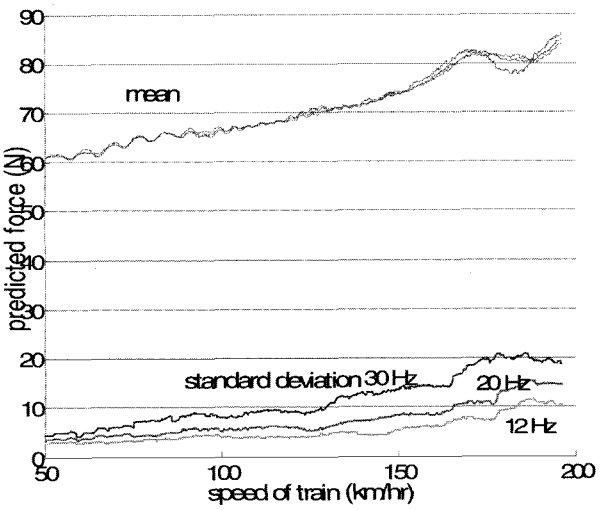


Fig. 11. Mean and Standard Deviation of Contact Force

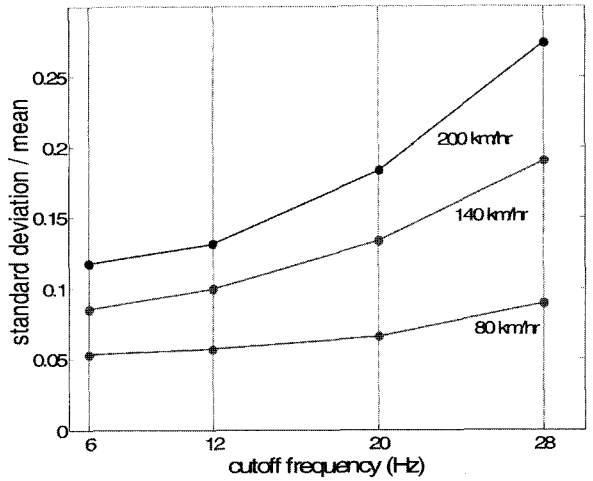


Fig. 12. Standard Deviation / Mean

성력을 구하는 방법을 사용하였다. Fig. 10(b)와 Fig. 10(c)는 이 경우에 식(1)을 적용하여 계산된 접촉력을 시제차 주행속도의 함수로서 나타낸 것이다. 제시된 계산 방법은 정확도는 높지 않을 것으로 예상되나 제반조건의 변화에 따른 접촉력 변화의 추세를 살펴보기에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 Fig. 10의 각각의 필터링의 경우에 해당되는 접촉력의 평균값과 변동폭을 나타낸 것이다. 변동폭의 척도로는 표준편차를 사용하였다. 평균값은 필터링과 거의 무관하나 표준편차는 큰 차이를 보이고 있다. 예를 들어 200 km/hr 주행속도에서 표준편차는 12 Hz 필터링 적용시 11 N에서 30 Hz의 20 N으로 두 배에 가까운 차이를 보이고 있다. 참고로 20 Hz 필터링 적용 시 수치해석에 기반한 시뮬레이션은 같은 주행속도에서 121.5 N의 평균접촉력과 14.7 N의 표준편차를 보여주고 있다[5]. Fig. 12는 필터링 주파수에 따른 접촉력의

표준편차(변동폭)와 평균값 사이의 비율을 주행속도가 80 km/hr, 140 km/hr, 200 km/hr 인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 열차의 주행속도가 증가할수록 이 비율이 커지고 필터링에 의한 차이 또한 증폭되는 것을 알 수 있다. 해외에서 보고된 연구 결과에 따르면 이 비율을 1/3 이내에 유지하는 것이 집전계 신뢰도에 중요하다고 한다[16].

위의 분석결과는 시뮬레이션에 기반하여 접촉력을 예측할 때 참고할만한 중요한 단서를 제공한다. 이산계 판토그라프 모델을 사용하는 대다수의 수치해석 결과는 접촉력의 평균값은 정확하게 계산할지 모르나 패헤드의 구조진동 성분과 연관성이 높은 변동폭에 대해서는 정확도에 한계를 가질 것이라는 점이다. Fig. 12에 의하면 주행속도와 비례하여 평균값 대비 변동폭이 증가하고 필터링의 영향 또한 증가하므로 시뮬레이션 결과의 신뢰도는 높은 열차 주행속도일수록 감소할 것으로 예상된다.

4. 결 론

주행하는 고속철도차량의 판토그라프에 부착된 가속도계, 로드셀 신호를 동시에 취득하여 분석하였고 열차의 운행 속도와 패헤드 관성력 계산에 따른 접촉력의 변화에 초점을 맞추어서 연구를 진행하였다.

먼저 열차의 주행속도가 집전계의 거동에 미치는 영향을 살펴보면 속도가 증가할수록 거동 폭 또한 증가하며 이때의 주요 주파수 성분을 팬헤드의 운동특성 관점에서 분류하면 강체운동 성분은 경관통과주파수 성분과 판토그라프의 1차 고유진동수 등을 포함하여 10 Hz 미만이고 구조진동 성분은 20 Hz 이상임을 확인하였다.

접촉력의 평균값은 팬헤드의 관성력 계산 시 팬헤드의 구조진동 성분이 포함되는지 여부와 거의 무관하나 변동폭은 구조진동 성분의 포함 여부에 매우 민감하게 영향을 받는다. 열차의 주행속도가 증가할수록 접촉력의 표준편차(변동폭)와 평균값의 비율이 커지게 되며 필터링의 효과 또한 증가하므로 집전성능을 유지하는 것이 중요한 관건이 된다.

본 연구의 분석결과는 시뮬레이션에 기반하여 접촉력을 예측할 때 참고가 되는 중요한 단서를 제공한다. 이산계 판토그라프 모델을 사용하는 대다수의 수치해석 결과는 접촉력의 평균값은 정확하게 계산할지 모르나 패헤드의 구조진동 성분과 연관성이 높은 접촉력의 변동폭에 대한 기술은 한계를 가질 것이라는 점이다. 주행속도가 높을수록접촉력의 평균값 대비 변동폭이 증가하고 필터링에 의한 오차 또한 증가하므로 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 고속 주행에서 유지하려면 많은 노력이 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2007년도 서울시 신기술 연구개발 사업 연구비에 의하여 지원되었고 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "TGV-K 집전시스템의 동특성 해석", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.176~184.
2. 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "한국형 고속전철 집전계의 동적거동", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 130~135.
3. Arnold, M., Simeon, B., 2000, "Pantograph and Catenary Dynamics: A Benchmark Problem and its Numerical Solutions," Applied Numerical Mathematics, Vol. 34, ppl 345~352.
4. 허신, 경진호, 송달호, 1998, "속도 향상을 위한 고속전철 TGV-K 집전시스템의 성능에 관한 연구 ", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.533~539.
5. 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, 1999, "집전시스템의 동적 수치모의 해석에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.151~158.
6. 조용현, 김영국, 현승호, 이기원, 김휘준, 2000, "G7 고속전철기술개발사업 집전시스템 사양의 최적화 연구", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.543~556.
7. 김정수, 박성훈 2001, "설계변수 변화에 따른 KTX 가선계의 동적 응답 해석", 한국소음진동공학회지, 11권 제2호, pp.346~353.
8. 김정수, 최병두 1999, "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 9권 제2호, pp.317~323.
9. 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.
10. Seering, W., Armbruster, K., Vesely, C. and Wormley, D., 1991, "Experimental and Analytical Study of Pantograph Dynamics," J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 242~247.
11. Park, T. J., Han, C. S., Jang, J. H., 2003, "Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle," J. Sound and Vibration, Vol. 266, pp.235~260.
12. 한형석, 경진호, 송달호, 배정찬, 1998, "고속용 판토그래프의 개념설계", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.337~344.
13. Manabe, K., 1989, "High Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System," JSME Int. J., Vol. 32, No. 2, pp.200~205.
14. 이시우, 김정수, 조용현, 최강윤 2004, "주행 중 발생하는 고속전철 집전계 신호의 특성", 한국철도학회논문집, 7권 3호, pp.232~238.
15. 김정수 2006, "고속전철의 주행조건이 집전계의 동특성에 미치는 영향", 한국철도학회논문집, 9권 1호, pp.18~22.
16. Betts, A. I., Holmes, R., Hall, J. H., 1986 "Defining and Measuring the Quality of Current Collection on Overhead Electrified Railways," British Railways Board, pp.214~217.

(2007년 6월 7일 논문접수, 2007년 7월 4일 심사완료)