

전기동차 구동장치의 안전진단을 위한

진동 · 소음 측정

최연선*, 이봉현**, 최경진***, 유원희***

(Vibration and Noise Measurement on the Driving System of Electric Train for Safety Diagnosis)

(Y. S. Choi, B. H. Lee, K. J. Choi, and W. H. You)

ABSTRACT

Safety diagnosis on the driving system of electric train is performed using the vibration and noise signals of running railway train. Safety diagnosis is tried on the viewpoints of the appreciation of superannuation and the fault diagnosis of motor, reduction gear and boggie. The appreciation of superannuation is checked by the rms vibration levels of driving parts and the fault diagnosis is done by analyzing the frequencies of the vibration signals. The methods of measuring and analyzing the signals are decided on the basis of field measured signals. The results shows that the vibration levels of each parts increase as the train goes older and each parts have their own frequency patterns of the vibration. As the results, the vibration and noise can be utilized successfully for the safety diagnosis of the driving part of electric train.

1. 서론

대량 수송체계로서 많은 승객을 이동시키는 전기동차에서 안전 운행은 무엇보다도 중요한 과제이다. 진철의 안전운행은 각 부품의 노후도나 고장 결함 등 차량의 상태를 정확히 진단하고 이를 바탕으로 보수점검과 부품교체가 적기에 이루어 질 때 가능한 것이다. 진동과 소음을 이용한 철도 차량의 안전진단은 이미 해외에서 많이 시행되고 있다.[1,2] 진동과 소음 신호로 철도차량의 상태를 진단하기 위해서는 진동과 소음의 측정방법, 측정된 신호의 분석방법과 더불어 안전성 판별기준이 마

련되어야 한다. 이를 위해서는 반복적인 실측과 분석을 통하여 해당 부품에서 발생하는 신호의 특성을 이해하고 이에 적합한 분석기술이 개발되어야 한다.[3,4]

본 연구에서는 전기동차의 구동장치에 대한 진동과 소음을 측정·분석하여 철도차량의 안전성을 평가하였다. 안전성 평가는 노후도 평가와 고장진단 측면에서 시도하였으며, 노후도 평가는 진동레벨로, 고장진단은 주파수분석을 통하여 수행되었다. 이를 위하여 본 연구에서는 sensor의 위치 등 신호측정방법과 진동레벨, 대역주파수영역 등 신호 분석방법을 개발하였다. 이와 같이 개발된 분석방법에 의해 사용년도별로 측정된 모터, 감속기, 대차의 진동신호를 이용하여 각각의 진동 특성과 안전성을 평가하였다.

* 성균관대학교 기계공학부, 교수

** 성균관대학교 대학원

*** 한국철도기술연구원, 책임연구원

2. 실차주행실험

본 연구에서는 전기동차의 안전진단을 위해 구동장치인 모터 및 감속기의 진동신호와, 승차감 평가를 위해 대차 진동과 실내소음을 사용년수별로 측정하였다. 주행 중인 전기동차의 차륜과 레일에서 발생하는 진동은 모터와 감속기의 진동에 많은 영향을 미치므로 차륜과 직결된 대차의 진동도 측정하였다. 또한 주행 중 microphone을 차량 실내에 설치하여 실내소음을 측정하였다.

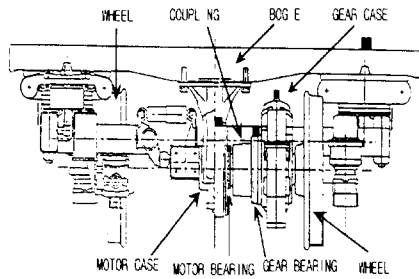


Fig. 1 Sensor locations of electric train

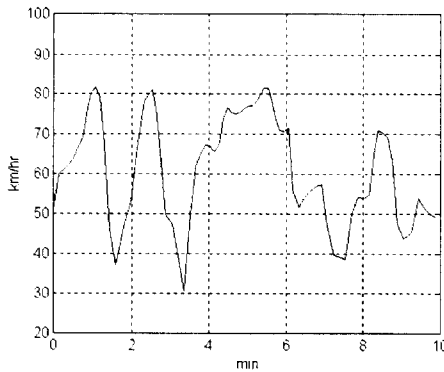


Fig. 2 Velocity of a running electric train

Fig. 1은 본 연구에 사용된 전기동차 구동장치에 설치된 가속도계(accelerometer)의 위치를 나타낸 것으로 감속기와 모터의 케이스, 대차에 가속도계를 설치하였다. 회전속도의 변화를 알기 위해서는 광센서(photo-sensor)를 차륜에 부착시켜 1회전당 1 pulse를 얻을 수 있도록 하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 광센서에 의해서 얻어진 전기동차의

주행 속도 변화를 나타낸 것이다.

3. 신호분석방법

전기동차의 진동·소음 측정에 의한 구동장치의 노후도 평가와 고장진단을 위해서는 일반적인 기계 요소의 진동평가 기준을 적용할 수 없으므로 새로운 분석방법 및 평가기준이 마련되어야 한다. 본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 전기동차의 안전성 평가를 위한 타당한 분석방법을 얻고자 하였다.

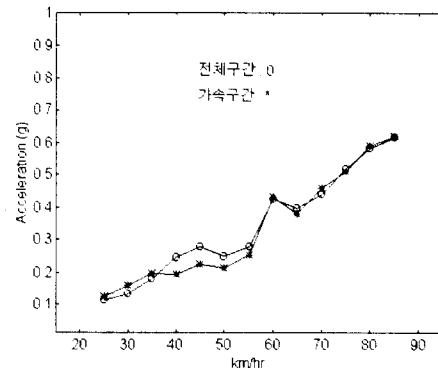


Fig. 3 Acceleration rms vs. speed region

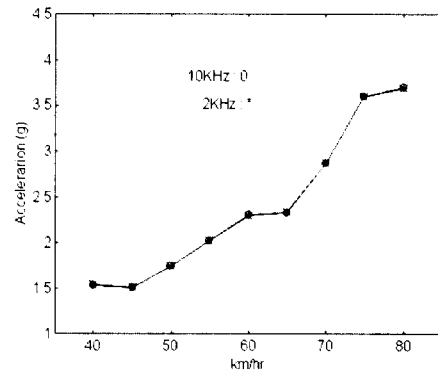


Fig. 4 Vibration level changes due to sampling frequencies

Fig. 3은 광센서에서 발생하는 매 pulse 구간의 가속도신호에 대해 rms를 취하고, 동시에 그 구간의 속도를 계산하여 속도 구간별로 가속도신호에

대한 rms값을 평균한 것으로 전체구간과 하나의 가속구간에 대해서 계산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체구간과 하나의 가속 구간에 대한 가속도 rms 값은 약간의 차이는 있으나 전체적으로 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 rms에 의한 진동레벨 평가는 전체구간을 택하는 것이 정확하나, 하나의 가속도 구간만을 취해도 충분히 의미가 있음을 알 수 있다.

철도차량의 승차감을 평가하기 위해서는 인체에 진동 민감도가 높은 저주파 영역의 진동만을 고려해도 충분하다. 그러나 고장진단 및 안전성 평가를 위해서는 기계 작동에 따른 진동 신호를 보아야 하므로 해당 기계에 따라 달라질 수밖에 없다. Fig. 4는 10 KHz로 sampling한 신호에 대하여 rms를 취한 결과와 2 KHz로 sampling한 신호에 대하여 rms를 취한 결과를 나타낸 것으로서 rms 값 비교에는 전혀 차이가 없었다.

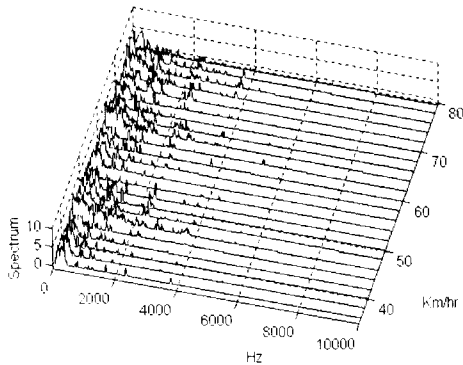


Fig. 5 Waterfall diagram of gear case (10 KHz)

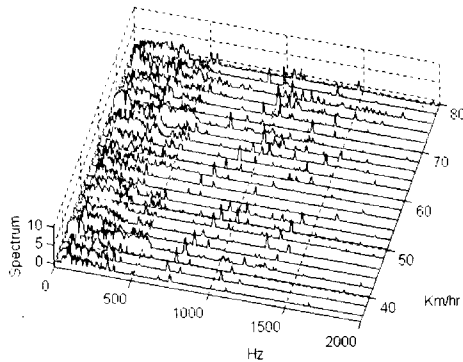


Fig. 6 Waterfall diagram of gear case (2 KHz)

Fig. 5와 6은 10 KHz와 2 KHz로 각각 sampling한 신호에 대하여 주파수 분석한 결과로서 2 KHz 이하가 주요 회전주파수 성분임을 알 수 있어 고장진단을 위한 진동신호의 대역주파수로서 2 KHz가 적절함을 알 수 있다.

4. 측정결과 및 평가

앞에서 결정한 분석방법을 이용하여 모터, 감속기, 대차의 진동과 실내소음을 사용년도별로 전기동차에 대하여 적용하여 각각의 진동 특성과 안전성을 평가하였다. Fig. 7과 8은 5년과 15년이 경과한 전기동차의 모터에서 측정된 진동 신호의 water-fall diagram으로서 5년차의 경우 회전주파수 성분이 명확하게 보이나 15년차의 경우는 저주파 성분이 크게 나타나고 있다. 회전주파수 성분은 베어링에서 발생한 주파수로서 1, 2, 3차 성분에 해당되며[5,6] 5년차의 경우에는 확실히 보이나 15년차의 경우는 저주파 영역에서 진동레벨이 커져 회전주파수 성분이 거의 보이고 있지 않다.

Fig. 9는 모터케이스의 진동레벨을 사용 년도별로 표시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 진동레벨은 연도가 증가함에 따라 커지고 있음을 알 수 있다. 다만 15년차가 20년차 보다 더 커지고 있어 20년차의 구동장치에 대한 보수가 최근에 이루어졌음을 알 수 있다.

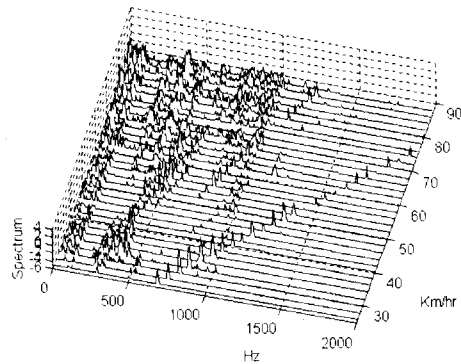


Fig. 7 Waterfall diagram of motor case (5 years passed)

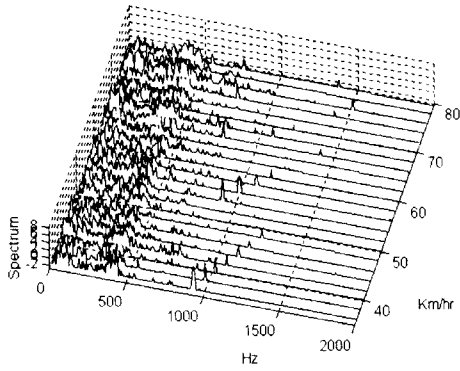


Fig. 8 Waterfall diagram of motor case (15 years passed)

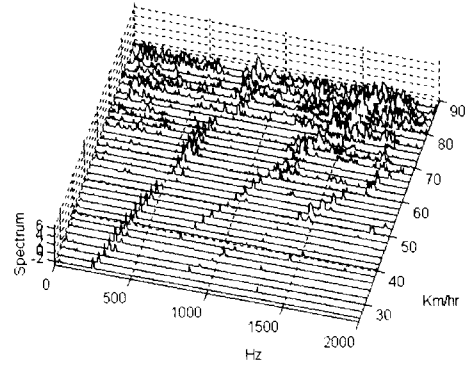


Fig. 10 Waterfall diagram of gear case (5 years passed)

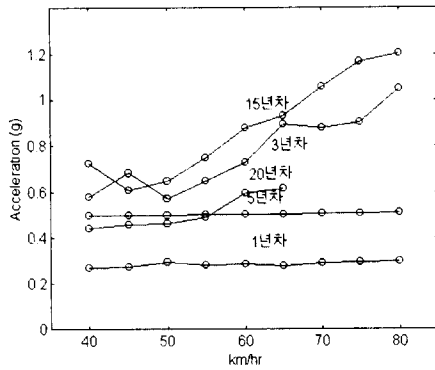


Fig. 9 Vibration levels of motor case

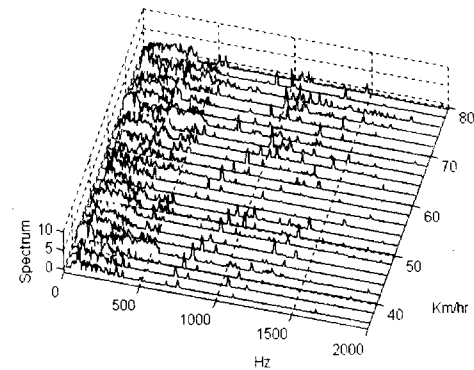


Fig. 11 Waterfall diagram of gear case (15 years passed)

전기동차에서 감속기는 모터의 구동력을 차륜에 전달하는 장치로서 1차 기어는 커플링에 의해 모터에 연결되어 있고, 2차 기어는 차축에 직결되어 있다. 감속기는 차륜과 모터로부터 진동의 영향을 받게 되어 감속기만의 진동특성을 파악하기는 쉽지 않다. 일반적으로 감속기는 기어구동에 따른 다양한 진동이 발생할 수 있으며, 이러한 진동은 기어의 운전상태 및 고장여부를 판별하는 데 쓰일 수 있는 좋은 자료가 된다.

Fig. 10과 11은 5년과 15년이 경과한 전기동차의 기어케이스에서 측정된 가속도 신호의 waterfall diagram으로서 기어의 물림주파수 성분의 1, 2, 3 차 배수 성분이 각각 뚜렷하게 보이고 있다.[7] 15년차의 경우 저주파 성분이 크게 보이고 있는 바, 이는 레일과 차륜에서 발생한 진동의 영

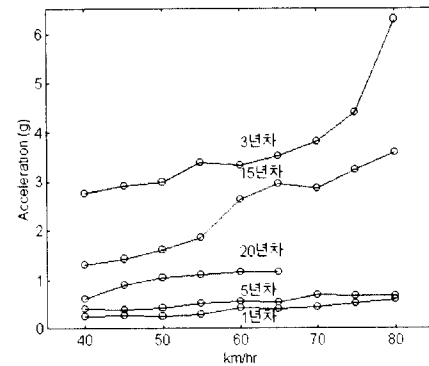


Fig. 12 Vibration levels of gear case

향으로 보인다. Fig. 12는 년도별 차량의 경우 감속기의 진동레벨을 도시한 결과로서 모터의 경우와 같이 15년차와 3년차가 진동레벨이 가장 컸다. 3년차의 진동레벨이 큰 것은 3년차 차량은 일반 저항제어차가 아닌 인버터제어방식으로서 제어방식에 따른 진동특성으로 판단된다.

전기동차의 승차감 해석을 위해서는 대차 진동의 저주파 영역에 대한 검토만으로도 충분하나, 안전주행을 위한 고장진단 해석을 위해서는 고주파 영역에 대한 검토도 필요하다. 본 연구에서는 대차의 진동과 모터, 감속기 등 구동장치에서 발생하는 진동과의 관계를 살펴보기 위해 대차에 가속도계를 부착하여 진동을 측정하였다.

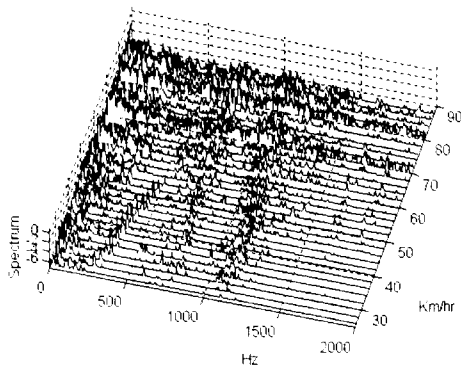


Fig. 13 Waterfall diagram of boggie (5 years passed)

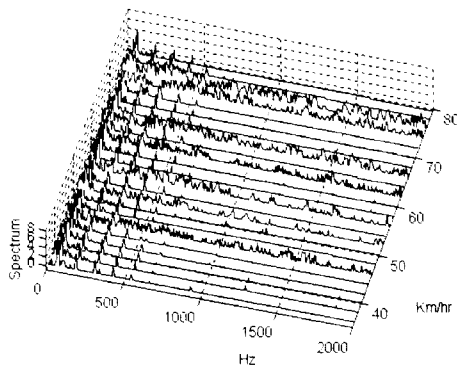


Fig. 14 Waterfall diagram of boggie (15 years passed)

Fig. 13과 14는 5년과 15년 경과한 전기동차의 대차에서 측정된 가속도 신호의 waterfall diagram으로서 회전수 성분은 보이지 않고, 고유진동수 성분만 보이는 바, 대차 진동은 레일과 차륜의 충격적 접촉에 의해 현가장치를 비롯한 전기동차 구조물의 고유진동수에 따라 결정되기 때문으로 추정된다. Fig. 14의 waterfall diagram 중 특정 속도 구간에서 전체 주파수성분이 나타나는 것은 차륜이 레일의 이음매를 통과하면서 발생한 충격성분에 기인한 때문이다. Fig. 13에서 100 Hz 미만의 저주파 영역과 700 Hz, 1100 Hz 부근에도 고유진동수가 있는 것을 보여주고 있다. 이러한 주파수는 소음에 영향을 주는 주파수 대역으로서 대차의 진동과 실내 소음과는 상호 관련이 있게 된다. Fig. 15는 년차별 대차 진동레벨을 보여주고 있는 그림으로서 사용년도가 많아질수록 진동레벨이 커지고 있는 것을 알 수 있다. 모터와 감속기에서는 15년차가 20년차 보다 크게 나타났던 것은 20년차가 최근에 정비가 이루어졌기 때문이다. 그러나 보수 점검이 불가능한 대차의 경우 사용년도에 비례하여 진동레벨이 나빠지는 것이 당연하며 실험적으로도 입증되는 바, 진동 측정에 의한 대차의 노후도 평가가 가능함을 알 수 있다.

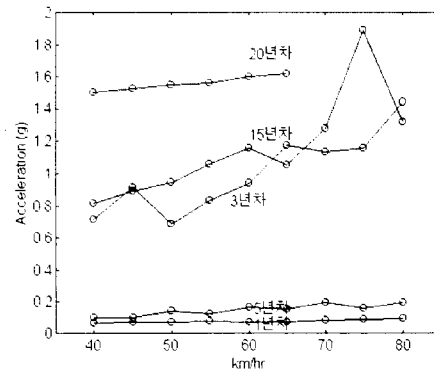


Fig. 15 Vibration levels of boggie

본 연구에서는 실차 주행 실험시 전기동차 내부에 소음계를 설치하여 차량 내부의 소음을 측정, 기록하였다. 실내 소음은 차량의 속도, 레일 상태 등, 주행조건과 차량 내부의 방음구조에 따라 크게 달라지므로 보다 정확한 측정이 요구되나 본 연구에서는 구동장치에서 발생하는 진동과의 관련성만

을 보고자 했다. Fig. 16는 실내 소음에 대한 waterfall diagram 으로서 속도증가 성분은 보이지 않고, 레일의 이음매 통과 여부에 따라 소음 주파수가 달라짐을 보여주고 있으며, 대개 100~1200 Hz 부근의 소음이 철차 실내 소음의 주요 주파수 영역임을 보여 주고 있다. 이는 대차의 진동 주파수 대역과 일치하는 것으로서 실내소음 레벨을 감소시키기 위해서는 대차의 진동을 줄여야 하며 이를 위해서는 현가장치의 보수와 함께 레일의 진동 특성을 개선하여야 함을 알 수 있다. Fig. 17은 년차별 실내소음 레벨로서 76~80 dBA의 수준을 보이고 있으며 속도 증가에 크게 민감하지 않음을 알 수 있다. 또한 사용년도와 무관하게 진동레벨이 달라지고 있음을 알 수 있다.

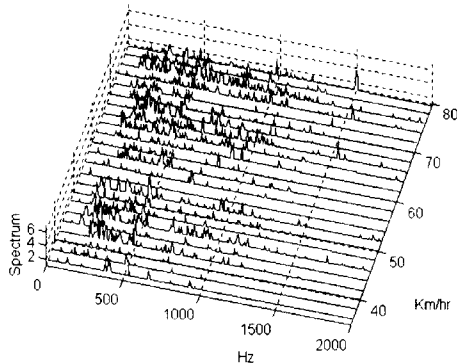


Fig. 16 Waterfall diagram of indoor noise

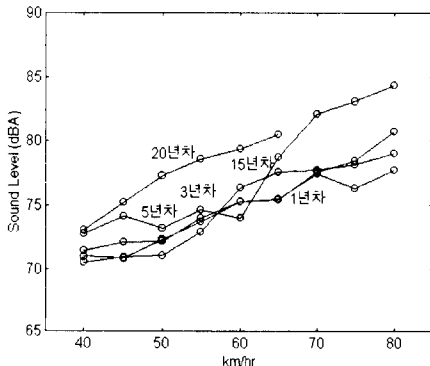


Fig. 17 Indoor sound level

5. 결론

본 연구에서는 주행 중인 전기동차의 진동과 소음 신호를 측정하여 전기동차 구동부의 안전성을 평가하였다. 안정성 평가는 고장진단과 노후도평가 측면에서 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모터의 주요 진동수는 베어링 회전성분으로 보수점검이 오래될수록 진동 레벨이 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 감속기의 주요 진동수는 1, 2, 3차 기어 물림주파수 성분이며 사용년수가 커지면 대차에 의한 저주파 성분이 크게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 대차는 연도수가 증가할수록 진동레벨이 커짐으로서 진동에 의한 대차의 노후도 평가가 가능함을 알 수 있었다.
- 4) 소음레벨은 사용년도에 무관하고 차량과 레일상태에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 石黒義則, “振動解釋 による 回轉機 の 非解體 についての 研究”, 電氣車 の 科學 Vol. 43, No. 1, 1990.
- [2] Abdul Ghaffar, Abdul Rahman, “Condition monitoring of locomotive traction motors on the Malayan Railway based on vibration measurement”, Proceedings of COMADEM 91, July 1991, pp. 228-232.
- [3] K. G. McConnel, “Vibration Testing—Theory and Practice”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [4] Victor Wowk, “Machinery Vibration—Measurement and analysis”, McGraw-Hill, 1991.
- [5] Glenn H. Bate, “Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives”, B. Sc., M. Sc., Dip. UCL. Bruel & Kjaer, pp. 148-157.
- [6] Tedric A. Harris, “Rolling Bearing Analysis”, A Wiley-Interscience Pub., 1991.
- [7] R.A. Collacott, Mechanical fault Diagnosis, Chapman and Hall, London, 1977