

〈논 문〉

진동신호를 이용한 전기동차 구동장치의 안전성 평가

Safety Diagnosis of Electric Train Driving System Using Vibration Signal

이 봉 현* · 최 연 선**

B. H. Lee and Y. S. Choi

(1998년 6월 29일 접수 : 1998년 8월 4일 심사완료)

Key Words : Electric Train(전기동차), Safety Diagnosis(안전성 평가), Fault Diagnosis(고장진단), Vibration Signal(진동신호)

ABSTRACT

Safety diagnosis of electric train driving system is performed using vibration signals of running electric train. Safety diagnosis is tried on the viewpoints of the appreciation of superannuation and the fault diagnosis of motor, reduction gear and bogie. The appreciation of superannuation is checked by the vibration levels of driving parts and the fault diagnosis is done by analyzing the frequencies of the vibration signals which are measured directly from a running electric train. The results shows that the vibration levels of each parts increase as the train gets older and each parts have their own frequency patterns of the vibration. Vibration propagation path is also investigated using calculated the coherence value between bogie and driving system. As the results, it is known that vibration signal can be utilized successfully for the safety diagnosis of the driving part of electric train.

1. 서 론

지하철과 같은 대형, 대중 운송 수단에서 안전 운행은 무엇보다 중요한 과제이다. 지하철용 전기동차의 안전운행은 각 부품의 노후도나 고장결함 등 차량의 상태를 정확히 진단하고 이를 바탕으로 보수점검과 부품교체가 적기에 이루어 질 때 가능한 것이다. 현재 시행되고 있는 지하철용 전기동차를 비롯한 일반 철도차량의 해체검사 방법은 노력과 시간이 많이 들고 육안검사와 같은 주관적 검사가 많아 경험에 의존하는 검사자를 필요로 하며 검사 자체도 기계

의 운전 상태가 아닌 정지 상태에서 행하여지므로 완벽한 상태진단을 하기에는 한계점이 있다. 이미 해외에서는 진동신호를 이용한 비해체 검사방법을 이용함으로써 철도차량 검사에 필요한 시간과 비용을 절감하고 있다.^(1,2) 진동신호로 철도차량의 상태를 진단하기 위해서는 진동신호의 측정방법, 측정된 신호의 분석방법이 확립되어야 한다. 이를 위해서는 반복적인 실측과 분석을 통해 해당 부품에서 발생하는 신호의 특성을 이해하고 이에 따른 적절한 분석 기술이 개발되어야 한다.^(3,4)

본 연구에서는 주행중인 전기동차의 구동장치에 대한 진동신호를 측정·분석함으로써 지하철용 전기동차의 고장진단과 노후도 평가를 실시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 센서의 위치 등 신호측정방법과 진동레벨, 대역주파수영역 등 신호분석방법을 개발

* 성균관대학교 대학원

** 정희원, 성균관대학교 공과대학 기계공학부

하였고 개발된 분석방법에 의해 사용년도 별로 모터, 감속기, 대차의 진동신호 각각에 대한 주파수 특성과 진동레벨을 계산하였고 대차의 진동과 감속기와 모터의 진동에 대한 상관관계를 알아보았다.

2. 실차 주행 실험

본 연구에서는 전기동차 구동부의 모터와 감속기에 가속도계를 부착하여 실제 주행하면서 전기동차의 진동신호를 측정하였다. 주행 중인 전기동차의 차륜과 레일에서 발생하는 진동은 모터와 감속기의 진동에 많은 영향을 미치므로 차륜과 직결된 대차의 진동을 측정하여 대차진동이 모터와 감속기의 진동에 어떠한 영향을 미치는지 평가하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 전기동차 구동장치에 설치된 가속도계의 위치를 나타낸 것으로 감속기와 모터의 케이스, 대차에 가속도계를 설치하였다. 또한 전기동차의 주행속도를 측정하기 위하여 광센서(photo-sensor)를 차륜에 부착하여 1회전 당 하나의

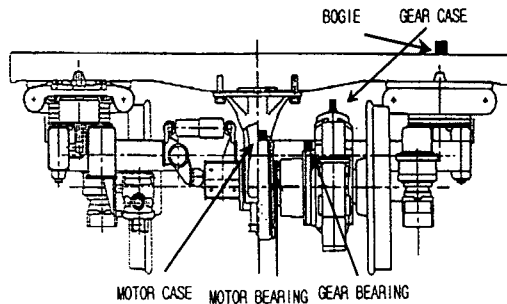


Fig. 1 Sensor locations

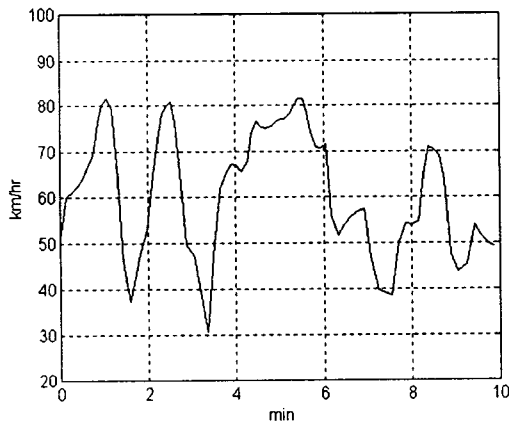


Fig. 2 Velocity variation of running electric train

펄스를 얻도록 하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 광센서에 의해서 얻어진 전기동차의 주행 속도 변화를 나타낸 것으로서 가속과 감속이 반복됨을 알 수 있다.

3. 신호분석방법

주행 중 측정된 전기동차의 진동신호는 레일의 이음매를 통과할 때 Fig. 3과 같이 충격적인 진동을 발생시키므로 일반 회전기계의 진동평가 기준을 적용하여 전기동차의 진동을 평가할 수는 없다. 전기동차 고유의 진동신호 분석방법 및 평가기준이 마련되어야 하는 것이다. 본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 사용년도에 따른 전기동차의 안전성 평가를 위한 타당한 분석방법을 제시하고자 하였다. 먼저 전기동차의 안전성 평가는 구동장치의 노후도 평가와 고장진단 측면에서 수행하고자 하므로 진동레벨의 표시 방법과 주파수 분석 시 요구되는 데이터 획득방법에 대해 알아보았다. 가속도계로부터 측정된 신호는 전하증폭기(charge amplifier)를 거쳐 tape recorder에 저장되고 실험실에서 A/D 변환 후 PC를 이용하여 신호분석을 수행하였다.

진동레벨 표기 방법으로 광센서에서 발생하는 매 펄스 구간의 가속도 신호에 대해 RMS(root mean square)를 취하고, 동시에 그 구간에서 철차의 속도를 계산하여 속도 구간별로 가속도 신호에 대한 RMS값의 평균을 취하였다. 가속도의 평균값은 속도 구간에 따라 약간의 편차는 존재하나 전체적인 진동레벨을 표기하는 방법으로 적절함을 알았다. Fig. 4는 위와 같은 방법으로 얻어진 전체구간과 하

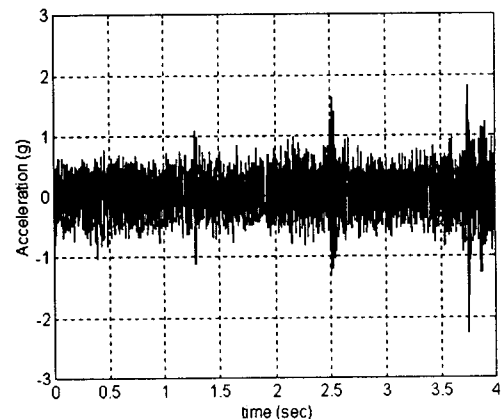


Fig. 3 Vibration signal of driving condition

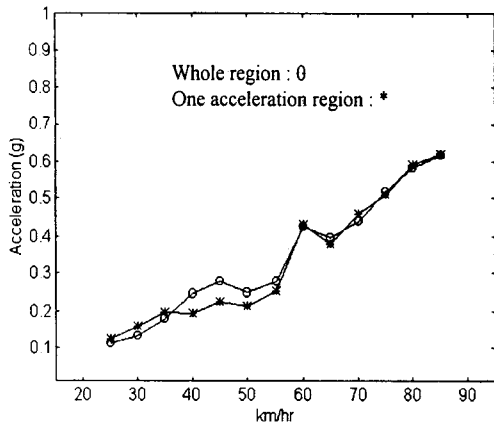


Fig. 4 Acceleration vs. speed

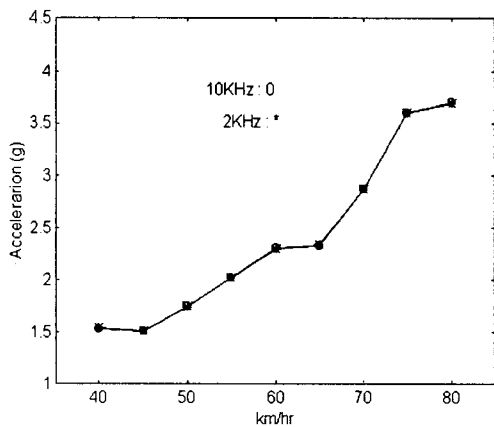


Fig. 5 Vibration level variation due to sampling frequencies

나의 가속구간에 대한 진동 레벨이다. 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 하나의 가속도 구간만을 취해서 분석해도 충분히 의미가 있음을 알 수 있었다.

주파수 분석시 전기동차의 승차감을 평가하기 위해서는 인체에 진동 민감도가 높은 저주파 영역 진동만을 고려해도 충분하다. 그러나 고장진단 및 안전성 평가를 위해서는 기계 구동에 따라 발생하는 측정 진동 신호를 검토하여야 하므로 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 최대 주파수 범위를 선정하였다.

Fig. 5는 10 kHz로 샘플링한 가속도신호에 대하여 RMS를 취한 결과와 2 kHz로 샘플링한 진동신

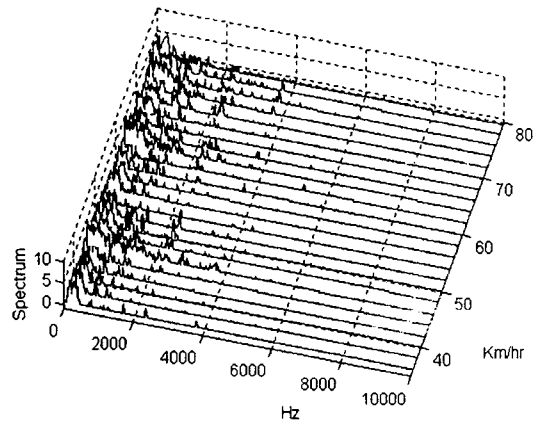


Fig. 6 Vibration signal at gear case (10 kHz)

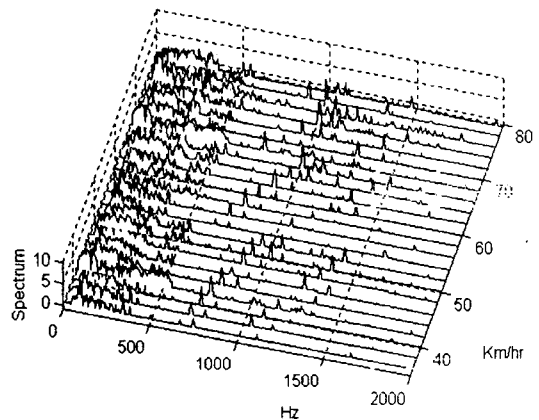


Fig. 7 Vibration signal at gear case (2 kHz)

호에 대하여 RMS를 취한 결과를 나타낸 것으로서 RMS 값 비교에는 전혀 차이가 없었다.

Fig. 6과 7은 10 kHz와 2 kHz로 획득한 신호에 대하여 주파수 분석한 결과로서 기어 물림 주파수와 베어링 성분 등을 나타내는 2 kHz 이하가 주요 진동주파수 성분임을 알 수 있었다. 따라서 고장진단을 위해서는 진동신호의 대역주파수로서 2 kHz가 적절함을 알 수 있었다.^(4~7)

4. 측정 결과 및 평가

본 연구에서는 앞에서 결정한 분석방법을 이용하여 사용년도 별로 전기동차의 진동신호를 측정하였다. 지하철용 전기동차는 저항제어차와 인버터제어차의 두 종류가 있으며 본 실험에서는 3년 사용한

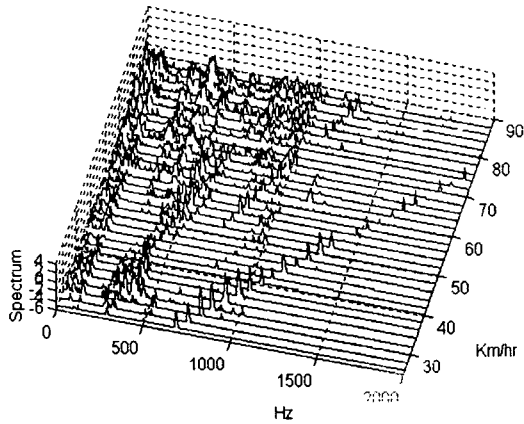


Fig. 8 Vibration signal at motor case (5 years used train)

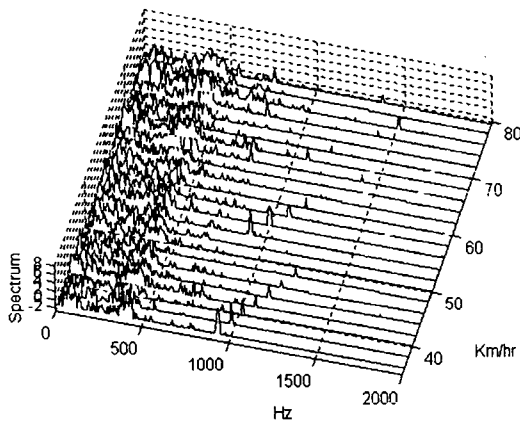


Fig. 9 Vibration signal at motor case (15 years used train)

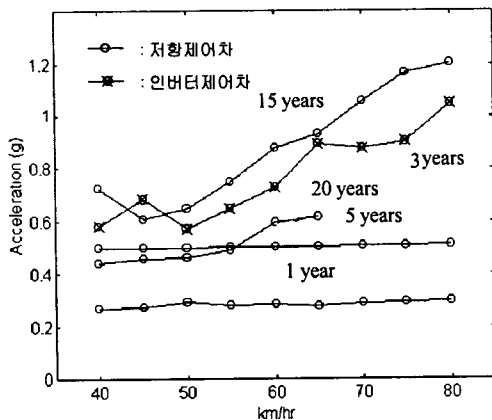


Fig. 10 Vibration levels of motor case

인버터제어차 한 대와 1, 5, 15, 20년 사용한 저항제어차 4대에 대한 모터, 감속기, 대차의 진동을 측정, 분석하여 각각의 진동 특성과 안전성을 평가하였다.

4.1 모터

모터는 구동력을 발생시키는 장치로써 주행 중 전기적 요인에 의한 진동과 기계적 요인에 의한 진동이 모두 발생하므로 모터 고유의 진동 특성을 파악하기는 쉽지 않다. Fig. 8과 9는 5년과 15년 사용한 전기동차의 모터케이스에서 측정된 진동 신호의 waterfall diagram으로서 5년차의 경우 회전주파수 성분이 명확하게 보이나 15년차의 경우는 저주파 성분이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 회전주파수 성분은 모터와 감속기를 연결하는 축을 지지하는 베어링에서 발생한 주파수로서 1, 2, 3차 성분에 해당된다.^(5,6) 5년차의 경우에는 회전 주파수 성분이 명확히 보이나 15년차의 경우는 저주파 영역의 진동레벨이 회전 주파수 성분에 비해 커서 회전 주파수 성분이 거의 보이지 않고 있다.

Fig. 10은 모터케이스의 진동레벨을 사용년도 별로 표시한 그림으로 진동레벨은 년도가 증가함에 따라 커지고 있음을 알 수 있다. 다만 15년차가 20년차 보다 더 커지고 있는 바, 이는 20년차의 구동장치에 대한 보수가 최근에 이루어졌기 때문이다. 3년차는 인버터제어방식을 사용한 전기동차로써 저항제어차보다 진동레벨이 큼을 알 수 있었다.

4.2 감속기

전기동차에서 감속기는 모터의 구동력을 차륜에 전달하는 장치로서 1차 기어는 커플링에 의해 모터에 연결되어 있고, 2차 기어는 차축에 연결되어 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 판별하는데 쓰일 수 있다.

Fig. 11과 12는 5년과 15년 사용한 전기동차의 감속기케이스에서 측정된 가속도 신호의 waterfall diagram으로서 기어 물림주파수 성분의 1, 2, 3차 배수 성분이 뚜렷하게 보이고 있다. 15년차의 경우 저주파 성분이 크게 보이고 있는 바, 이는 주행 중 레일의 이음매를 통과할 때 차륜에서 발생한 진동의 영향으로 보인다.

Fig. 13은 감속기의 년도별 진동레벨을 도시한 결과로서 모터의 경우와 같이 15년차와 3년차의 진동

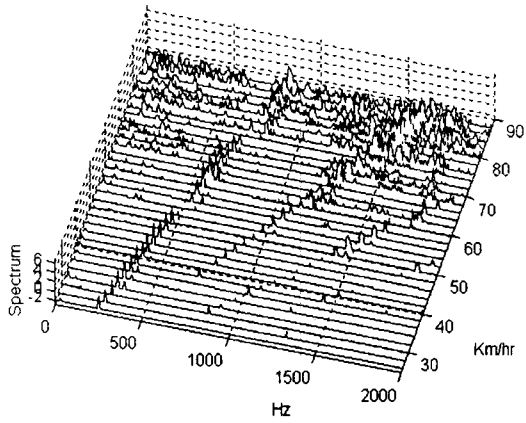


Fig. 11 Vibration signal at gear case (5 years used train)

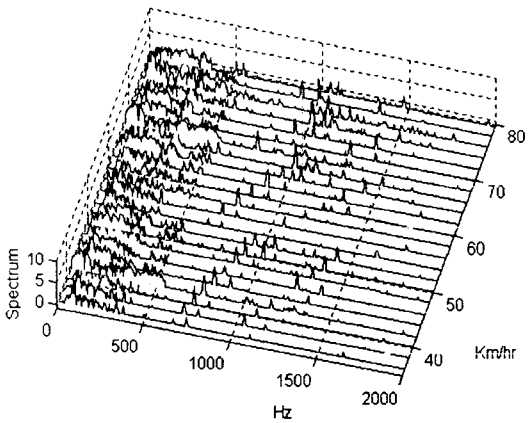


Fig. 12 Vibration signal at gear case (15 years used train)

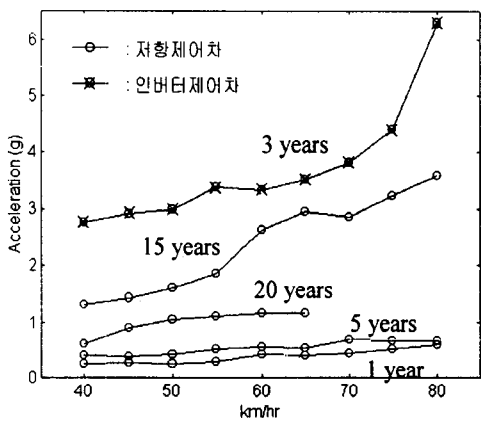


Fig. 13 Vibration levels of gear case

레벨이 가장 크게 나타났다. 특히 감속기의 경우 일반 저항제어차보다 인버터 제어방식에 의한 진동레벨이 모터의 경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

4.3 대 차

전기동차의 승차감 해석을 위해서는 대차 진동의 저주파 영역에 대한 검토만으로도 충분하나, 안전주행을 위한 고장진단 해석을 위해서 고주파 영역까지 검토하였다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 대차에 가속도계를 부착하여 상하방향의 진동을 측정하였다.

Fig. 14와 15는 5년과 15년 사용한 전기동차의 대차에서 측정된 가속도 신호의 waterfall diagram으로서 회전수 성분은 거의 보이지 않고 고유진동수

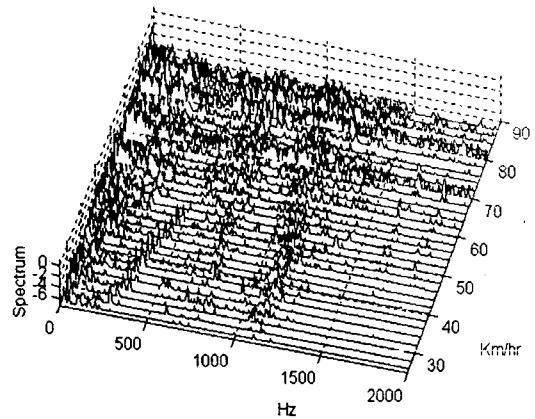


Fig. 14 Vibration signal at bogie (5 years used train)

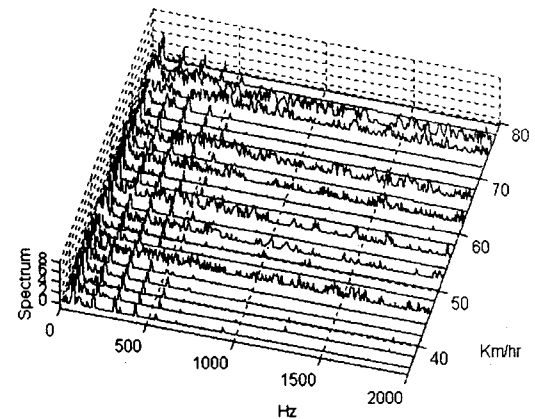


Fig. 15 Vibration signal at bogie (15 years used train)

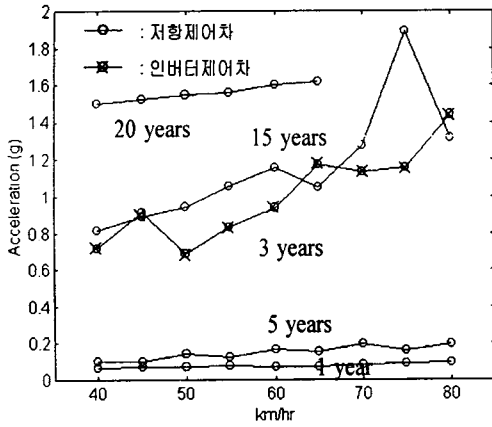


Fig. 16 Vibration levels of bogie

성분만 보이고 있다. 이는 대차 진동이 레일과 차륜의 충격적 접촉에 의해서 현가장치를 비롯한 대차를 구성하는 전기동차 구조물 각각의 고유진동수가 대차의 진동 특성을 결정하는 것으로 추정된다. Fig. 15의 waterfall diagram 중 특정 속도 구간에서 전체 주파수 스펙트럼이 나타나는 것은 차륜이 레일의 이음매를 통과하면서 발생한 충격성분이 백색잡음을 일으키기 때문이다. Fig. 14에서 100 Hz 미만의 저주파 영역과 700 Hz, 1100 Hz 부근에서 고유진동수가 있는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 16은 년차별 대차 진동레벨을 보여 주고 있는 그림으로서 사용연도가 증가할수록 진동레벨이 커지고 있는 것을 알 수 있다. 모터와 감속기에서는 20년차가 15년차 보다 진동레벨이 작게 나타난 것은 20년차가 최근에 정비가 이루어진 것임이 확인되었다. 그러나 보수점검이 불가능한 대차의 경우 사용연도에 비례하여 진동레벨이 나빠지는 것을 실험적으로 확인할 수 있는 바, 진동 측정에 의한 대차의 노후도 평가가 가능함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 실차 주행 실험시 전기동차에서 발생하는 진동의 전파과정을 알아보기 위하여 모터, 기어 등 구동부 진동과 대차진동의 상관관계를 알아보았다. 대차에 전달되는 진동신호를 알아보기 위해 모터케이스와 대차, 감속기케이스와 대차 진동신호에 대한 코히어런스(coherence)를 구하였다.

Fig. 17은 대차와 감속기케이스의 코히어런스로써 0~120 Hz 사이의 저주파 영역에서 두 신호의 상관관계가 크나 고주파 영역에서는 거의 상관관계가 없음을 알 수 있었다.

Fig. 18은 대차와 모터케이스 사이의 코히어런스로써 감속기케이스의 경우와 마찬가지로 저주파 영

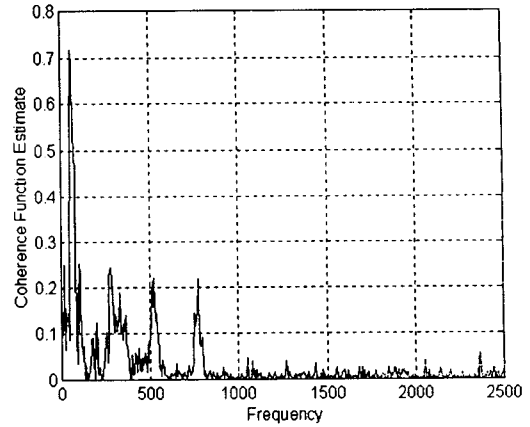


Fig. 17 Coherence between bogie and gear case

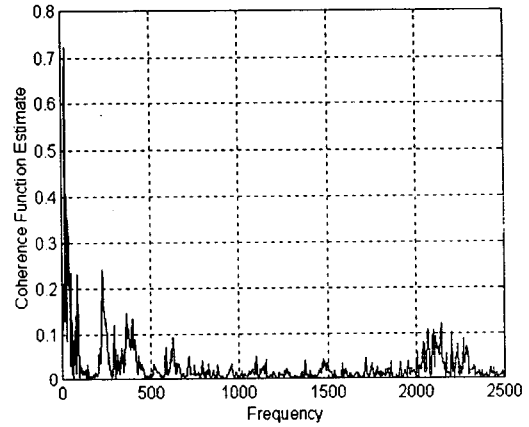


Fig. 18 Coherence between bogie and motor case

역인 0~120 Hz 사이에서 코히어런스값이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 전기동차 구동부에서 발생한 저주파 영역의 진동 신호만이 대차에 전달됨을 알 수 있었고, 고주파 성분은 모터, 기어 등 구동부의 진동에 기인하기 보다는 다른 요인에 의해서 진동이 발생함을 알 수 있었다. 저주파 영역에 해당하는 진동신호는 승차감에 영향을 미치므로 전기동차의 승차감을 높이기 위해서는 저주파 진동을 저감하여야 한다. 저주파 성분은 차륜이나 레일 이음매 통과시 발생된 충격적 진동이 구조물의 저주파 영역 고유진동수를 야기하는 것으로 추정되므로 레일 이음매 통과시 발생하는 저주파 성분을 저감하여야 함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 주행 중인 전기동차의 진동 신호를

측정하여 전기동차 구동부의 안전성을 평가하였다. 안전성 평가는 고장진단과 노후도 평가 측면에서 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 사용년도수가 오래 사용될수록 주행 중 각 부위의 진동레벨이 크게 나타나고 대상 부품별 특징적인 진동주파수 성분을 보임으로써 진동에 의한 전동차의 안전성 평가가 가능함을 밝혔다.

(2) 전동차의 진동평가는 최대 2 kHz 주파수 범위의 가속도 신호로 하나의 가속 구간에서 차륜 일회전당 RMS 값을 계산함으로써 가능함을 알았다.

(3) 모터 및 감속기의 주요 진동수는 베어링 회전성분과 기어물림주파수 성분이며 보수점검이 오래 될수록 진동 레벨이 증가함을 알 수 있었다.

(4) 대차는 년도수가 증가할수록 진동레벨이 커짐으로서 진동에 의한 대차의 노후도 평가가 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(95-0200-15-01-3)와 한국철도기술연구원의 협조로 이루어진 연구로써 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 石黒義則, 1990, "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.
- (2) Ghaffar A., Rahman A., 1991, "Condition Monitoring of Locomotive Traction Motors on the Malayan Railway Based on Vibration Measurement", Proceedings of COMADEM 91, pp. 228~232.
- (3) McConnel K. G., 1995, "Vibration Testing-Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) Wowk V., 1991, "Machinery Vibration-Measurement and Analysis", McGraw-Hill.
- (5) Bate G. H., "Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives", B. Sc., M. Sc., Dip. UCL. Bruel & Kjaer, pp. 148~157.
- (6) Harris T. A., 1991, "Rolling Bearing Analysis", A Wiley-Interscience Pub.
- (7) Collacott R. A., 1997, Mechanical fault Diagnosis, Chapman and Hall, London.