

외란이 포함된 찰상차륜의 진동신호 분석에 대한 연구

A Study on Analysis of Vibration Signals in Flat Wheel Including a Disturbance.

조병진*, 김거영*, 이정준*, 구정서*†

Byungjin Cho*, Geoyoung Kim*, Jeongjun Lee*, Jeongseo Koo**†

Abstract Defects of railway wheel have been checked by the unaided eye with a periodic preventive maintenance because they occur from frictions of rail and wheel-contact. These days, it is required to develop monitoring systems by using CBM which can reduce maintenance expenses. We detected flat wheels by using a Cepstrum which is one of vibration signal analysis methods for checking defects of a body of a revolution like a wheel. We analyzed vibration signals of normal and flat wheels considering a wheel/rail contact by using a simulation program. We could find defect signals in wheel effectively with a result of the Cepstrum analysis in the flat wheel including a disturbance.

Keywords : Condition based maintenance, Wheel flat, Cepstrum, Disturbance, Vibration signal

초 록 철도차량의 차륜결함은 레일과의 접촉부에서 마찰로 인하여 발생하므로 주기적인 예방정비를 통하여 육안으로 확인하고 있다. 최근에는 유지보수비용을 크게 절감 할 수 있는 상태기반유지보수(CBM)를 이용한 이상진단 모니터링 시스템 개발이 요구되고 있다. 차륜과 같은 회전체의 이상진단을 위한 진동신호 분석법으로 켈스트럼(cepstrum)을 적용하여 찰상상태를 검출하였다. 분석을 위한 정상 및 찰상차륜의 진동신호는 차륜/레일 접촉 조건을 고려한 동역학 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 외란이 포함된 찰상차륜의 cepstrum 분석결과 차륜회전주기의 찰상신호를 효과적으로 검지할 수 있었다.

주요어 : 상태기반유지보수, 차륜 찰상, 켈스트럼, 외란, 진동신호

1. 서 론

철도차량의 차륜에 결함이 발생하는 원인으로는 레일과의 접촉부에서 발생하는 구름접촉 피로(rolling contact fatigue)와 제동 시 발생하는 마찰력에 의한 열 응력(thermal stress)으로 인하여 찰상, 그루빙, 마모, 박리, 수직마모 등의 손상이 발생한다.[1]

이러한 차륜결함은 정기적인 예방정비를 통해 손상 정도를 육안으로 확인하고, 차륜의 마모량을 측정하여 일정기준 이상이 되면 삭정을 통하여 유지보수를 하고 있다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 필요한 시점에 정비를 하여 고장을 최소화 하며, 유지비용을 크게 절감할 수 있는 상태기반유지보수(Condition based maintenance)기술을 이용한 이상진단 모니터링 시스템이 연구되고 있다.[1-5]

본 논문에서는 차륜의 찰상 신호를 얻고자 다물체 동역학 소프트웨어 Recurdyn을 이용하여

† 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과(koojs@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과

차륜/레일 접촉 시뮬레이션을 수행하였으며, 외란 조건으로는 베어링을 적용하여 외란이 포함된 차륜의 진동신호를 비교 분석하였다.

신호처리 방법으로는 회전기계 진단에 많이 사용되고 있는 켈스트럼(cepstrum) 분석법을 적용하여 외란이 적용된 차량에서의 차륜찰상진단 가능성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 진동신호 분석방법

철도차량은 주행 시 기어, 베어링 등의 회전기기에서 진동이 많이 발생한다. 이처럼 다양한 진동신호는 전달경로, 운전조건, 환경 등의 다양한 정보를 포함하고 있다. 따라서 적절한 신호처리 기법으로 선택하여 분석을 해야 한다.

Bogert 등 [6]은 스펙트럼 신호의 로그값에 역 푸리에 변환하여 시간 단위와 동일한 쿼프렌시(quefreny) 도메인에서 신호를 표현할 수 있는 켈스트럼 신호처리 방법을 제안하였다. Randall 등 [7,8]은 회전기계 결함 검출의 신호처리 방법으로 켈스트럼을 사용하여 왔다. 켈스트럼 분석법은 신호의 주기성에 관한 정보를 표현하는데 효과적인 것으로 알려져 있다.

본 논문에서 분석하고자 하는 찰상신호는 크기, 개수, 위치 등에 따라 불균일하게 발생하고, 주행속도에 따라 주기적으로 발생한다. 이처럼 차륜 회전에 의한 주기적인 신호를 분석하는 방법으로 켈스트럼 분석법이 사용되고 있으며, 운행시 발생하는 다양한 외란 조건의 찰상신호 분석에도 효과적일 것으로 판단된다.

켈스트럼은 대표적으로 complex cepstrum(C_c)과 power cepstrum(C_p)이 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$C_c(\tau) = \mathcal{F}^{-1}[\ln(X(f))] = \mathcal{F}^{-1}[\ln(A(f)) + j\phi(f)] \quad (1)$$

$$C_p(\tau) = \mathcal{F}^{-1}[\ln(|X(f)|^2)] = \mathcal{F}^{-1}[\ln(A^2(f))] = \mathcal{F}^{-1}[2\ln(A(f))] \quad (2)$$

$$x(f) = \mathcal{F}x(t) = A(f)\exp(j\phi(f)) \quad (3)$$

여기서 \mathcal{F} 는 푸리에 변환, $x(t)$ 는 가속도 신호, $x(f)$ 는 가속도 신호를 푸리에 변환한 결과이다.

2.2 동역학 모델링 및 해석방법

차륜결함의 신호전달 특성을 분석하기 위하여 다물체 동역학 시뮬레이션 프로그램 Recurdyn을 이용하여 찰상에 의한 신호특성을 확인하였다. 철도차량 특성은 운용사에서 제공받은 정보와 도면을 바탕으로 차량을 모델링 하였다. 차륜레일 접촉은 surface to surface 조건을 사용하였고, 접촉강성은 식(4)의 궤도강성 값을 참고하여 적용하였다

$$k = \frac{Q}{y} = 4\sqrt{\frac{64EI}{d^3}k_{eq}^3}$$

EI : 레일의 휨강성

d : 침목간격

k_{eq} : 등가궤도지지강성

Q : 윤중

y : 궤도의 최대침하량

(4)

시뮬레이션 모델은 Fig. 1과 같이 모델링 하였으며, 하중값은 현가장치에 예하중(preload)을 적용하여 해석 초기에 자중에 의한 수직 진동이 발생하지 않는 안정된 상태에서 해석하였다. 차륜의 삭정 기준인 75mm 1개소의 찰상이 왼쪽 앞부분(FL)에 위치하며, 외란성분을 모사하기 위하여 베어링 툴킷(bearing toolkit)을 함께 적용하여 모델링 하였다.

차축과 베어링으로 연결된 저널박스의 중심에 신호분석에 필요한 가속도계 총 4개를 모델링하여 대차의 각 위치에서 가속도 신호를 추출하였다.

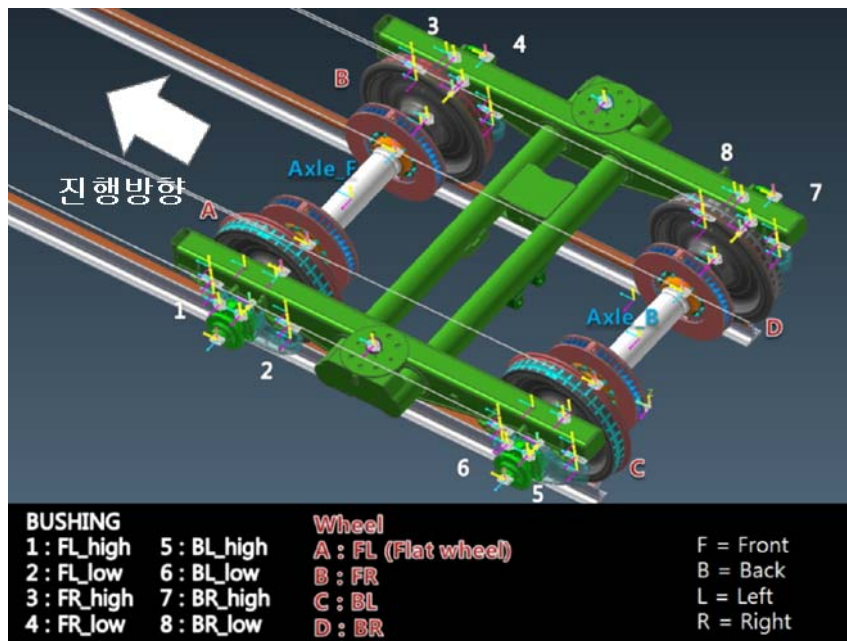


Fig. 1 Bogie modeling

도시철도차량의 평균운행속도 40km/h 기준으로 차륜 직경이 0.43m일때 각속도는 25.84rad/s가 된다. 앞서 모델링 된 75mm의 찰상에 해당하는 크기는 $10^\circ = 0.174\text{rad}$ 이며, Sampling rate가 1485Hz일 때 0.0174rad/s 이다. 따라서 한 바퀴 회전 시 찰상부위에서 얻을 수 있는 샘플링의 수는 10개로 하였다

2.3 Cepstrum 분석결과

Fig. 2는 시뮬레이션 해석에 의한 차륜 회전 각도에 대한 가속도 신호값을 나타낸 것으로 정상 차륜과 찰상차륜의 신호파형을 비교한 것이다. 찰상만 있는 경우의 신호파형은 명확하게 구분되나 베어링 모델을 추가한 해석결과는 찰상 외의 노이즈 성분이 증가함을 확인할 수 있다.

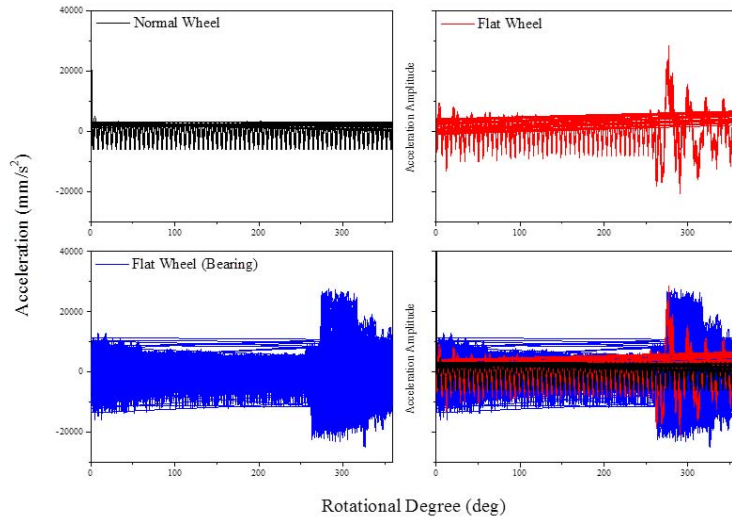


Fig. 2 Comparison of wheel flat signal vs. rotational degree

Fig. 3은 찰상차륜의 가속도 신호를 FFT 한 결과이다. 찰상차륜이 정상차륜보다 모든 대역에서 큰 값을 보이고 있으며 특히 차륜회전주파수 4.1Hz의 2x, 3x, 4x 등 배수의 조화성분의 주파수에서 주기적으로 피크가 발생하고 있다.

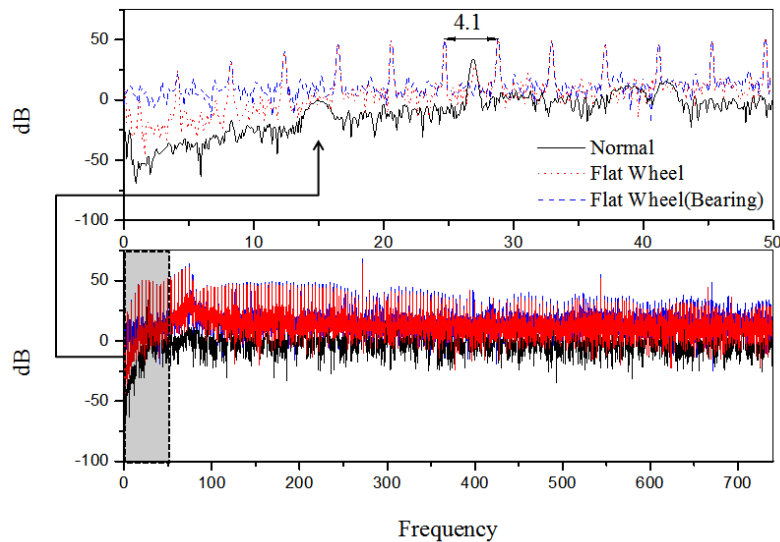


Fig. 3 FFT of wheel axle acceleration

Fig. 4는 정상차륜과 찰상차륜의 10초의 입력 데이터(Sampling rate:1458*10)에 대한 켈스트럼 결과를 비교한 것이다. 회전주파수에서의 정상차륜의 값은 거의 0에 가깝고 찰상차륜에서는 찰상의 신호주기인 0.243s에서 피크값이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

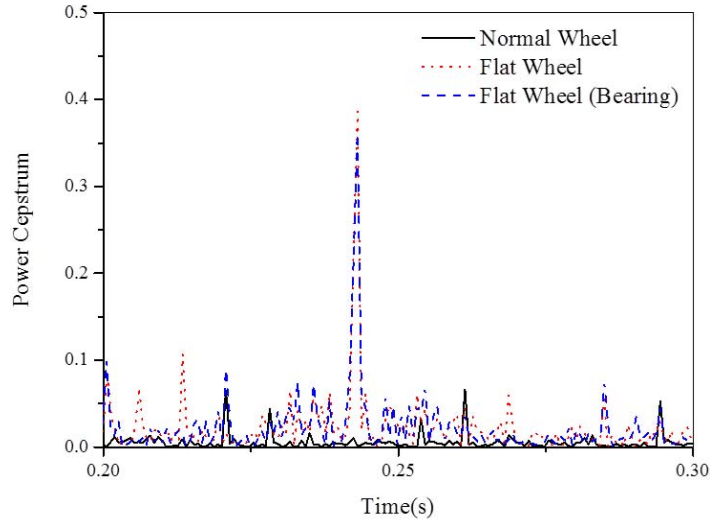


Fig. 4 Cepstrum of wheel axle acceleration(10s)

3. 결론

차륜의 찰상 진단 알고리즘 개발을 위한 선행연구로 동역학 시뮬레이션을 수행하여 축상 가속도 신호를 추출하였고, 회전체 결함진단에 유용한 켈스트럼 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

정상차륜과 찰상차륜의 켈스트럼 분석결과 찰상신호의 주기(0.243s)에서 확인한 차이를 보였고, 차축베어링을 외란 성분으로 고려한 켈스트럼 결과 또한 동일한 차륜회전주기에서 피크값이 발생하였다.

외란 성분이 찰상신호에 추가되어도 차륜회전주기 신호를 분류하여 보여주는 켈스트럼의 특성으로 다른 주기성분이 추가되더라도 찰상신호에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

진동신호 분석기법인 켈스트럼 분석법을 이용하여 찰상주기신호를 효과적으로 분리해 낼 수 있다는 점을 확인하였으나 차량 속도, 찰상 크기, 실제 외란 등의 다양한 조건에 대해서 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] R.W. Ngigi, C. Pislaru, et al. (2012) Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics, *Journal of Physics: Conference Series*, 364.
- [2] B. Liang, S. Iwnicki, et al.(2013) Railway wheel flat and rail surface defect detection by time-frequency analysis, *Chemical Engineering Transactions*, vol.33, pp.745-750
- [3] H.Y. Ji, K.H. Lee, et al.(2013) Fault Dignosis of a High-speed Railway Reduction Unit Using Analysis of Vibration Characteristics, *Journal of the Korean society for railway*, vol.16, NO.1, pp.26-31
- [4] Y.C. Choi, Y.H. Kim (2007) Fault detection in a ball bearing system using minimum variance cepstrum, *Measurement Science and Technology*, 18(5), pp. 1433-1440
- [5] J. Antoni, R.B. Randall (2002) Differential diagnosis of gear and bearing faults, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 124 (2), pp. 165–171
- [6] B. P. Bogert(1963) The Quefreny Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking, *Proc. of the Symposium on Time Series Analysis*, pp. 209-243
- [7] R. B. Randall, J. Antoni (2011) Rolling element bearing diagnostics—A tutorial, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25 (2), pp. 485-520
- [8] R. B. Randall(2011) *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, 1st Edition, Wiley,pp.103-110