철도차량 하부결함검지장치 성능시험에 관한 연구

Performance Test of Condtion Monitoring Equipment Using Emitted Noise Signal under Train

*유원희[1], #고효인[1], 김양한[2], 전종훈[2], 박인태[3], 정인수[3]
*W. H. You(whyou@krri.re.kr)[1]. #H. I. Koh(hikoh@krri.re.kr)[1], Y. H. Kim[2], J. H. Jeon[2], I. T. Park[3], I. S. Jung[3]
[1] 한국철도기술연구원, [2]한국과학기술원, [3]코레일

Key words : Microphone Array, Condition Monitoring, Performance Test

1. 서론

철도차량 하부에 있는 주행 및 추진에 관여하는 장치들은 지면에 개방되어 있기 때문에 외부로부터의 충격 또는 장치 자체의 문제로 인하여 결함이 발생하는 경우가 많이 있다. 결함은 발생 초기에는 잘 발견되지 않지만, 지속적으로 운전을 하게 되면 균열의 진전 혹은 심한 마모 등으로 인하여 파손으로 이어질 수 있다. 이러한 부품의 파손은 철도차량의 탈선과 같은 사고로 이어질 수 있으므로, 발생 초기에 결함을 검지함으로써 그에 상응하는 조치를 취할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서는 결함의 유무 파악은 물론 결함의 발생 위치가 조기에 검지되어야 한다.

일반적으로 결함의 유무 및 위치를 찾아내기 위해서는 결함이 발생했을 때 나타나는 제반 증상을 정확히 파악하고, 이를 이용하여 결함의 위치를 발견해야 한다. 그러나 차량이 정지해 있는 상태에서는 결함의 유무 및 그 증상을 파악하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 주행 중인 차량에서 발생하는 특징적인 증상을 이용하여 결함의 유무와 그 위치를 찾아낼 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 관점에서 사용될 수 있는 방법이 몇 가지가 있다. 우선, 베어링과 같이 결함을 파악하고자 하는 대상의 위치가 명확한 경우 대차에 장착된 차축베어링에 가속도계나 열감지센서를 부착하여 베어링의 결함을 검지하는 방법이 있다. 그러나 이 방법들은 장점도 있지만 각자 큰 단점을 가지고 있다. 가속도계를 이용한 경우에는 차축의 양옆 베어링에 하나씩 부착해야 하므로 엄청난 기속도계가 필요로 하며 그에 따라 비용이 많이 들어가게 된다. 열감지센서를 이용한 경우에는 가속도계보다는 비용 측면에서 저렴하다 할지라도 가속도계와 마찬가지로 베어링 하나에 센서 하나씩 부착해야 하므로 비용이 많이 들며 가속도계에 비해 조기 검지성능이 매우 부족하다는 단점이 있다. 베어링에 결함이 생기면 그 증상은 진동과 소음으로 우선 나타나며 서서히 결함이 커짐에 따라 증상은 열의 발산으로 나타나기 때문에 조기에 베어링의 결함을 검지하기 위해서는 가속도계나 마이크로폰을 이용하는 것이 보다 바람직하다. 가속도계와 마이크로폰은 비교하면 TTCI에서 개발한 방법과 같이 마이크로폰을 어레이 형태로 배열하여 윤축 베어링 위치와 동일한 높이로 철도 연변에 설치하여 열차 전체를 검지할 수 있는 방법을 사용하는 방안이 비용과 효율 측면에서 훨씬 유리하다.

결함의 위치가 명확하지 않을 경우에도 역시 마이크로폰 어레이를 이용한 방법이 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 즉, 차량 하부 궤도의 양측 레일 사이에 마이크로폰 어레이를 수직으로 배열하여 열차가 지나갈 때 열차의 하부에서 발생하는 소음신호를 적절한 신호처리기법을 이용하여 분석함으로서 결함의 유무 및 위치를 찾아내는 방법이 그것이다. 소리가 갖는 공간정보를 이용하여 소음원을 찾는 방법으로 많이 쓰이는 방법이 음향홀로그래피이다. 이 방법은 측정면의 음압분포를 이용하여 측정면 이외의 면에서의 음압분포, 입자속도, 인텐시티 등을 예측하는 방법이다. 과거에는 정지해 있는 소음원에 대해서만 적용이 가능했으나, 최근 이동프레임 홀로그래피 방법이 개발되어 이동하는 주기적인 충격소음을 가시화하는 방법까지 개발되었다. 그러나 철도차량 하부의 경우 결함 이외의 잡음이 매우 많이 존재하는데 이로 인하여 차량하부결함에 의한 소음원의 위치를 찾기 어렵게 된다.

본 연구에서는 차량하부와 같이 많은 잡음이 있는 상태에서 결함에 의한 소음을 찾아내는 방법에 대해 연구하고, 이를 실제 철도차량 하부에 인위적으로 부착한 스피커에 대해 적용하여 결함 검지성능에 대해 실험을 실시하였다.

2. 결함신호 검지방법

일반적으로 철도차량 하부의 결함신호는 주기성을 가지며, 때로는 일부 충격성의 신호가 될 수도 있다. 다음 Fig. 1(a)는 주행하는 열차의 하부에서 측정한 소음신호의 예를 보이고 있으며, Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)와 같은 구간에서 다른 열차의 하부에서 얻은 신호이지만 대차의 특성이 다름으로 인하여 소음신호의 특성이 현저히 다름을 보여준다.

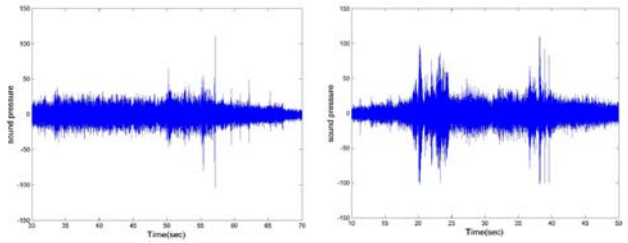

Fig. 1 Example of noise signal
(a) normal bogie vibration (b) anomalous bogie vibation

여러 가지 잡음 중에서 결함신호를 구별해내기 위한 신호처리 방법이 필요하다. Fig. 3과 같이 충격량 F_0인 주기적인 충격신호가 $t=t_1$인 시간에 처음 발생되어 마이크로폰 어레이를 일정속도로 지나간다고 가정한다. 이때 시간 t에서 거리 r인 지점에서 마이크로폰에서 측정한 음압은 다음과 같이 표현된다.

$$p(r,t)=F_0 h(t)\sum_{t=-\infty}^{\infty}\frac{1}{r_d}\delta(t-(t_i+i\,T+\frac{1}{c}r_d)) \qquad (1)$$

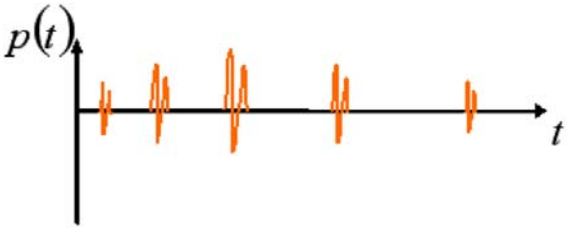

Fig. 2 Emitted impulse signal

T는 충격신호의 주기이며, c는 음속, $h(t)$는 충격응답함수를 나타낸다. 소음이 시간에 따라 변하는 소음원위치에서 발생하여 측정위치까지 움직이므로 측정된 충격신호는 Fig. 3과 같이 변한다.

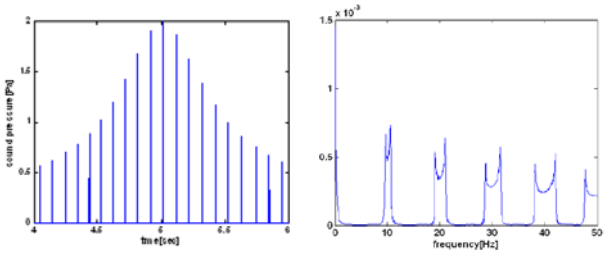

Fig. 3 Measured impulse signal of moving sound source

이때 이 신호의 주파수 스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$P(r,f) = F_0 H_0 \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_d} e^{j2\pi f(t_i + iT + \frac{r_d}{c})} \quad (2)$$

여기서 H_0는 충격에 의해 발생되는 소음원을 단음원(Monopole)으로 표현한 것이다. 따라서 주기적으로 이동하는 신호는 이동하는 순음(Pure Tone)들의 합으로 표현할 수 있으며, 이를 통해 소음원의 위치를 가시화할 수 있다. 이동 음향홀로그래피 방법에서는 이동하는 순음이 고정된 마이크로폰 어레이에 의해 협대역 주파수범위로 측정되며, 여기에 도플러효과를 제거하는 과정이 추가된다. Fig. 4는 이동 음향홀로그래피를 보여주고 있다.

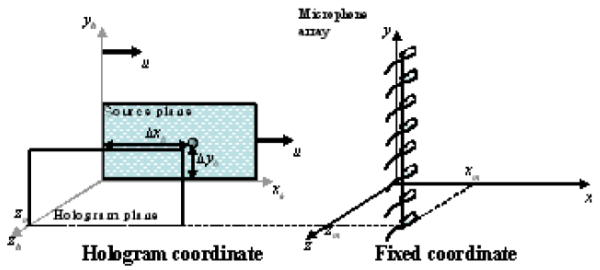

Fig. 4 Coordinate systems for a moving holography method

앞에서 언급한 바와 같이 이동 음향홀로그래피에서는 밴드통과필터를 이용하여 중심주파수 $f_c = i/T$의 밴드대역에 대한 음장을 가시화 할 수 있다. M을 마하수라고 할 때, 협대역 신호는 주파수 $(1-2M)f_c$와 $(1+2M)f_c$ 사이의 스펙트럼을 갖는다. 충격결함신호의 음장은 다음과 같은 주파수범위 내에서 오차없이 가시화 할 수 있다.

$$f_i < \frac{1-2M}{4M}\frac{1}{T} \quad (3)$$

Fig. 5는 이동 음향홀로그래피로부터 얻은 결과를 보여준다. 왼쪽은 식 (3)에 표현된 주파수범위 내에서 소음원의 위치를 찾은 것이며, 오른쪽은 식 (3)의 한계를 초과하는 주파수범위에서 소음원의 위치를 찾은 결과이다.

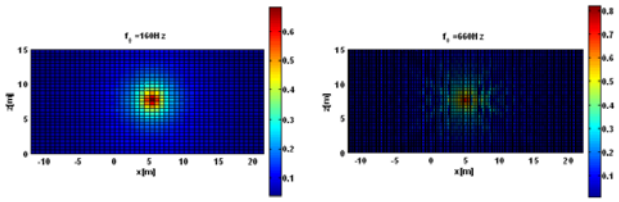

Fig. 5 Sound Source Localization
(Left : within error limit, Right : above error limit)

이를 토대로 실험실 실험을 통해 주기적인 결함신호의 위치를 찾아내는 방법을 확립하였으며, 실제 차량에 적용하여 결함에 의한 소음원의 위치를 추적해 보았다.

3. 실차시험

본 연구에서 제안된 이동 음향홀로그래피 방법을 이용하여 결함에 의한 소음원의 위치를 찾는 실험을 위해 대전철도차량관리단에 설치된 주행시험대를 이용하였다. Fig. 6의 왼쪽은 주행시험대를 보여주고 있으며 오른쪽은 2열의 어레이마이크로폰을 보여주고 있다. Fig. 7은 이 시험을 통해 음향지도를 얻는 프로세스를 보여주고 있다. 차량 하부에 스피커를 설치하고 주기 0.1초의 결함신호를 발생시켰다. 차량이 주행시험대를 통과할 때 발생되는 모든 잡음에 대해 2 마이크로폰을 이용한 3차원 반사파 분리방법을 통해 반사파를 제거하고 난 후 음향홀로그래피 방법을 이용하여 음향지도를 얻어내었다.

Fig. 6 Vehicle Running Tester and 2 microphone arrays

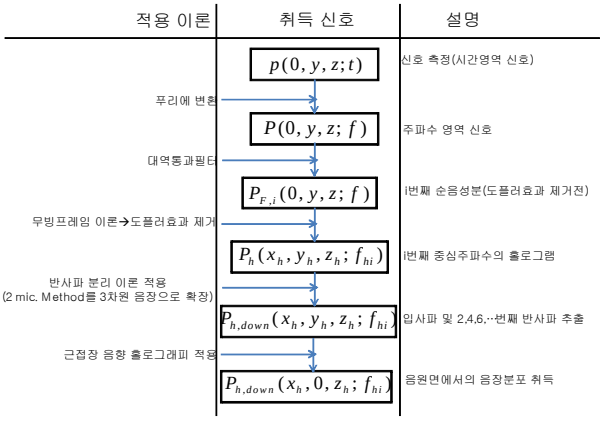

Fig. 7 Process for obtaining acoustic map

Fig. 8은 이러한 프로세스에 따라 소음지도를 구한 결과이다. 결론적으로 아주 우수한 음향지도를 얻어 내었다. 그러나 이 방법은 선로에서부터 들어오는 충격신호를 미리 알 수 있기 때문에 쉽게 적용할 수 있었다.

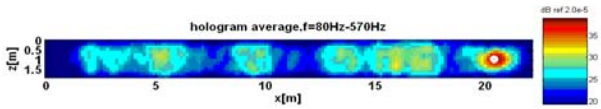

Fig. 8 Acoustic map(white circle : speaker location)

4. 결론

본 연구에 의해 개발된 차량하부결함 검지장치는 가능한 선로의 충격음이 없는 곳에 설치하여 사용하는 것이 바람직하다. 향후 철도차량이 정비를 위해 검수고에 입고하기 전 검수고 앞 선로에 본 장비를 설치하여 실제 결함의 검지성능을 확보할 예정이다.

후기

본 실험을 위해 주행시험대의 사용을 협조해 주신 코레일 연구원과 대전철도차량관리단 관계자분들게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. H.I.Koh, W.H.You, J.H.Jeon, Y.H.Kim,“Rolling stock condition monitoring using emitted noise signal under car body”, WCRR 08.
2. 전종훈, 김양한,“주행 중 철도차량의 결함 위치 추정방법”, 철도학회 추계학술대회, 2007
3. Michael Brandstein and Darren Ward, Microphone array - Signal Processing Techniques and Applications, Springer Verlag.