

전기동차 구동부의 동특성

Dynamic Characteristics of Electric Train Driving System

이봉현* 최연선**
Lee, Bong-hyun Choi, Yeon-Sun

ABSTRACT

The characteristics of vibration and sound signals which occurs at the driving system of electric train are investigated in this study since the vibration of driving system is one of the main sources of vibration and sound in electric train. The vibration signals are changed its signal patterns during the transmission from the source to passengers due to noise or several unknown factors. To avoid the complexity of actual signals of electric train, signals from experimental apparatus of motor/gear driving system are analyzed to find the appropriate method of analysis and to characterize the signal patterns. The used methods are waterfall diagram, transfer function and modal analysis. The results shows that the vibration signals are usually originated from motor bearing and gear meshing and these signals are transmitted to bottom or bogie. Also, the sound signal is similar to the vibration of bottom or bogie, but it is not so clear to figure out the source of vibration.

1. 서론

전기동차의 경우 전동기와 감속기를 포함하는 구동장치의 진동은 레일과 바퀴에서 발생하는 진동과 더불어 전기동차에서 발생하는 진동과 소음의 1 차적인 원인이 된다.[1] 따라서 전기동차의 진동과 소음을 저감하기 위해서는 전기동차 구동부의 동특성에 대한 이해가 있어야 한다. 구동부에서 발생하는 진동과 소음 신호는 일정한 경로를 통해 대차 및 차실내로 전달되게 된다. 전달 도중 구동부에서 발생한 진동과 소음은 외부의 다른 잡음이 섞이고 또한 신호가 변조되어 순수한 구동부 신호의 특성을 밝히는 데는 많은 어려움이 있다.

실제 전기동차 구동계의 진동과 소음은 복잡하므로 먼저 본 연구에서는 실험실 규모로 제작한 전동기·기어 구동계 실험장치로부터 얻은 진동·소음 데이터를 이용하여 신호분석법의 타당성을 검증한 후 실차 주행 실험데이터에 검증된 분석법을 적용하여 전기동차 구동부의 동특성을 이해하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 구동부의 신호가 전파 도중 포함되는 잡음의 정도를 밝힘으로써 waterfall diagram, 코히어런스, 모드 해석 등을 통하여 구동부의 신호가 지지부에 전달되는 전파 경로를 밝히고 이를 근거로 구동부의 동적 모델을 만들었다.

신호분석은 전동기, 기어, 바닥면에서 운전 중 발생하는 진동신호와 소음신호의 waterfall diagram을 통해 고유진동수와 구동에 기인하는 회전 주파수성분을 찾아 그 전파경로를 추적하였다. 나아가 전달함수와 모드해석을 이용하여

* 성균관대학교 대학원
** 성균관대학교 교수, 정회원

출력신호로부터 입력신호를 추정하였다.[2-5]

2. 신호분석법

가진원으로부터 전달되는 신호에 대해 각각의 위치에서 센서를 이용, 신호를 측정하여 두 신호에 대해 식 (1)과 같이 코히어런스(coherence)를 구하면 두 신호의 상호연관성을 측정할 수 있다. 또한 두 측정 신호의 비로써 식 (2)와 같이 전달함수를 정의할 수 있다. 그러나 실제의 경우 두 신호는 외부 요인에 의한 잡음을 포함할 수 있으므로 잡음의 정도에 따라 응답 신호는 변조된다. 그러므로 측정된 위치에서의 두 신호에 대한 잡음의 정도를 식 (3)과 같이 주파수 영역에서 나타낼 수 있다. 또한 자기 자신의 신호와 잡음의 상관관계(Signal-to-Noise Ratio)를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 1 은 서로 다른 위치에서 두 개의 센서로 측정된 신호의 관계를 나타낸 그림이다.

$$\Gamma_{xy}^2(z) = \frac{|\Phi_{xy}(z)|^2}{\Phi_{xx}(z)\Phi_{yy}(z)} = \frac{1}{1 + 1/SNR(z)} \quad (1)$$

$$H(z) = \frac{\Phi_{xy}(z)}{\Phi_{xx}(z)} \quad (2)$$

$$\Phi_{nn}(z) = \Phi_{xx}(z)[\Gamma_{xy}^2(z) - 1] \quad (3)$$

$$SNR(z) = \frac{\Phi_{xx}(z)}{\Phi_{nn}(z)} = \frac{\Gamma_{xy}^2(z)}{1 - \Gamma_{xy}^2(z)} \quad (4)$$

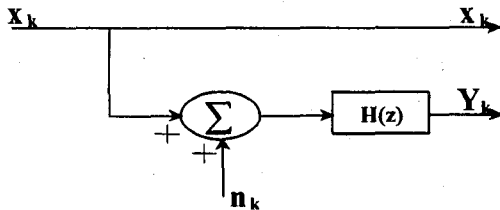


Fig. 1 Source signal passing through two sensors

3. 진동/소음 전파 경로 해석

3.1 전동기/기어 구동계 진동,소음 전파 경로

Fig. 2는 전동기·기어 구동계 실험장치의 개략도로서 전기동차의 구동계에 대한 연구를 수행하기에 앞서 구동계의 진동, 소음 신호에 대

한 신호분석방법의 타당성을 검증하고자 실험을 수행하였다.

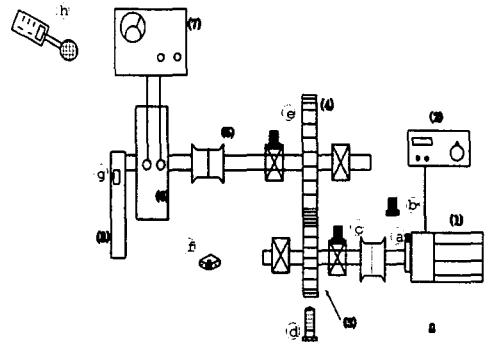


Fig. 2 Schematic diagram of motor/gear experimental apparatus

- Ⓐ : DC Motor Ⓑ : Accelerometer
- Ⓒ : Flexible Coupling Ⓓ : Magnetic Pick-up
- Ⓔ : Accelerometer Ⓕ : Accelerometer
- Ⓖ : Bearing Ⓗ : Microphone

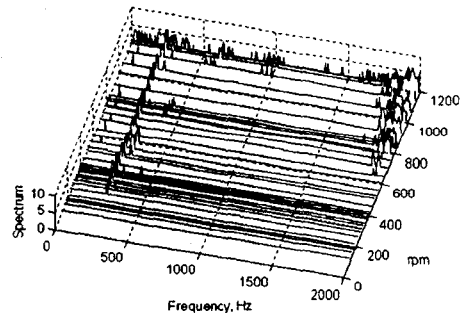


Fig. 3 Motor signals

진동신호의 전파과정을 밝히기 위하여 기어, 전동기, 바닥의 waterfall diagram을 Fig. 3~5에 나타내었고 소음의 waterfall diagram을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3은 전동기의 waterfall diagram으로 228 Hz에 고유진동수 성분과 베어링 회전주파수 성분이 나타남을 알 수 있으며 Fig. 4의 구동기기에 대한 waterfall diagram으로부터 191 Hz에서 고유진동수 성분과 기어물림 주파수 성분이 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 바닥면에서 측정된 신호의 waterfall diagram으로 191 Hz와 228 Hz에서 고유진동수 성분과 더불어 전동기와 기어의 회전수 변화에 의해 발생하는 가진주파수 성분이 발생함을 알 수 있다. 즉 기어와 전동기의 진동 성분이 바다

면에 그대로 전달된다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 소음신호의 waterfall diagram으로 228 Hz에서 고유진동수 성분이 발생하며 미약하게 191 Hz에서도 고유진동수 성분이 발생함을 알 수 있다. 즉 소음 신호는 기어와 전동기에서 발생한 진동이 소음 형태로 나타남을 알 수 있다.

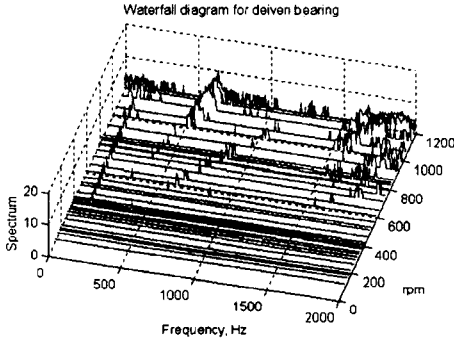


Fig. 4 Gear signals

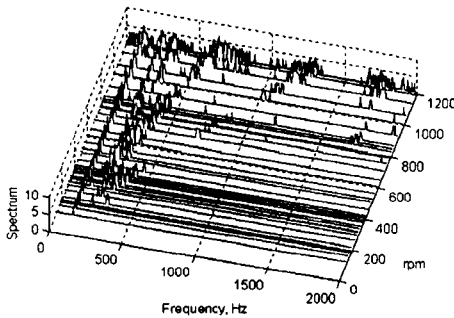


Fig. 5 Bottom signals

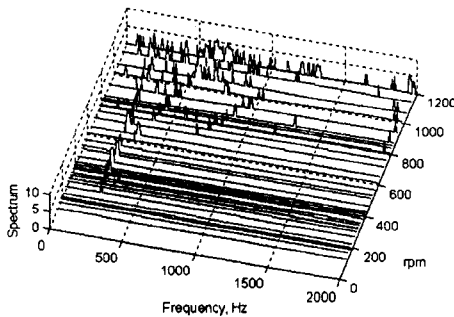


Fig. 6 Sound signals

Waterfall diagram으로부터 진동신호의 개략적인 경로를 알 수 있으나 실제로 가진원에서 발생한 진동신호는 전파과정에서 외부 요인에 의해 잡음이 섞이게 되므로 측정된 신호는 여

러 성분을 포함하게 된다. 그러므로 동적 해석을 수행하기에 앞서 잡음의 영향이 적은 구간을 알아보기 위하여 코히어런스를 계산하고 잡음 스펙트럼, SNR을 구하여 측정된 신호에 포함된 잡음의 정도를 알아보았다.

Fig. 7은 기어와 바닥신호 사이의 진동신호로써 기어의 고유진동수인 191 Hz 영역에서는 코히어런스가 다른 신호에 비해 높은 값을 아니지만 잡음의 영향이 거의 없음을 Fig. 7 (c)로부터 알 수 있다. 또한 전달함수의 결과에서도 191 Hz가 나타나므로 기어에서 발생하는 고유진동수 성분인 191 Hz 성분이 바닥에 전달됨을 알 수 있다.

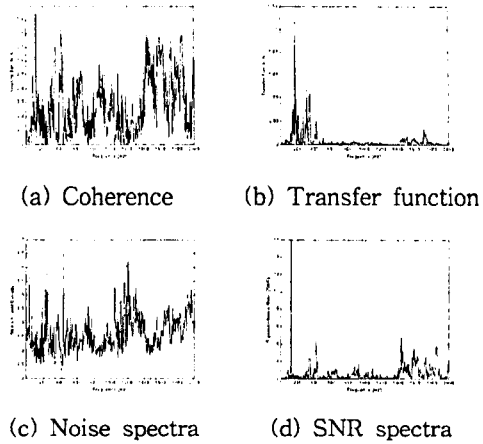


Fig. 7 Gear and bottom signals

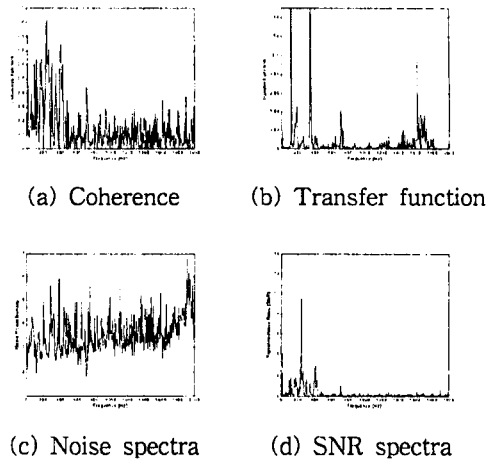


Fig. 8 Motor and bottom signals

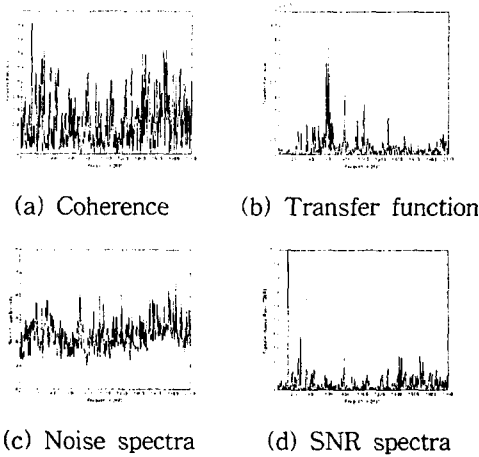


Fig. 9 Bottom and sound signals

Fig. 8은 전동기와 바닥신호의 결과로써 228 Hz의 고유진동수 영역에서의 코히어런스가 1에 가까운 값을 가지며 잡음은 반대로 낮은 값을 나타내므로 전동기에서 발생한 성분이 바닥에 전달됨을 알 수 있다. 특히 저주파 영역에서의 코히어런스가 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 전달함수로부터는 고유진동수 성분에 해당하는 성분이 미비하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9는 바닥과 소음신호 사이의 결과로써 코히어런스와 잡음 스펙트럼이 전 영역에 걸쳐서 일정한 형태를 나타내고 있지 않다.

Fig. 10~11은 식 (2)에 의해 계산된 전달함수를 이용하여 바닥의 진동 신호로부터 전동기와 기어의 진동 신호를 추정된 결과로써 측정된 신호와 유사함을 알 수 있다. 특히 추정된 기어의 진동 신호가 전동기의 진동 신호보다 실제와 잘 일치하는 것을 볼 수 있는 바, 바닥으로부터 얻어진 진동신호는 기어의 가진력에 의해 발생한 진동성분의 영향을 더 받는다는 것을 의미한다. 그러나 저주파 영역에서 고유진동수 부근을 제외한 영역의 주파수 성분이 일치하지 않는 것은 선형관계로 가정한 전달함수로는 정확한 추정이 불가능하기 때문이다. 또한 모터 신호의 경우 저주파 영역에 해당하는 신호의 주파수 성분이 거의 일치하게 나타나는 바, 이는 바닥과 전동기 신호의 코히어런스가 높게 나타난다는 결과와 일치함을 알 수 있다. Fig. 12는 소음 신호를 이용하여 바닥 신호를 추정된 결과로 소음과 진동 사이에는 상관관계가 적용되지 않음을 알 수 있다.

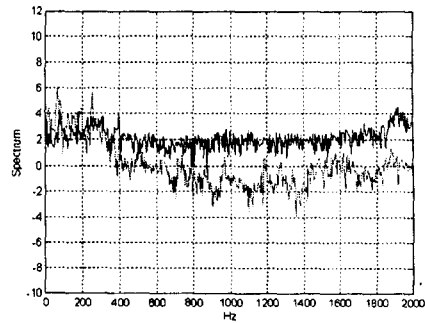


Fig. 10 Estimated motor signal

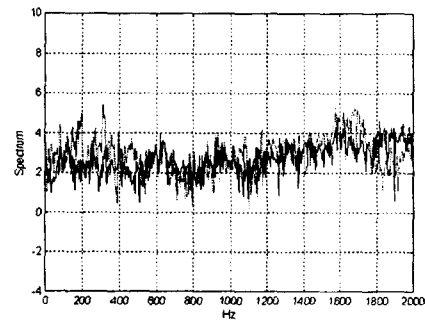


Fig. 11 Estimated gear signal

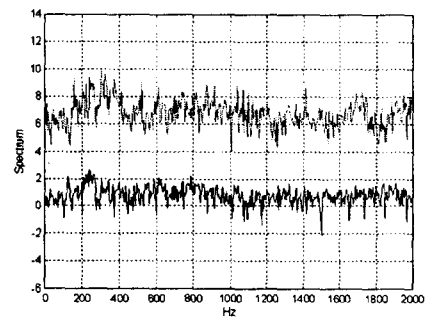


Fig. 12 Estimated sound signal from bottom signal

3.2 전기동차 구동계의 진동, 소음 전파 경로

전기동차의 진동과 소음은 승차감에 직접적인 영향을 미치므로 전기동차 설계시 이에 대한 충분한 고려가 있어야 한다. 특히 구동부의 진동과 소음은 차륜과 레일의 접촉과정에서 발생하는 진동, 소음과 더불어 전기동차 진동, 소음 원인의 1 차적인 원인을 제공하므로 이에 대한 연구가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 전동기·기어 구동계 실험장치에 대한 신호분

석법이 진동전과경로 해석 및 가진원 신호를 밝히는데 유용하였으므로 이를 이용하여 전기동차 구동계에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 특히 실차주행 실험시 감속기와 견인전동기와 같은 구동부에 센서를 부착하기 어려우므로 센서 부착이 용이한 대차에 가속도계를 부착시키고 여기서 얻어진 신호를 이용하여 견인전동기와 감속기의 신호를 추정할 수 있다면 고장진단에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

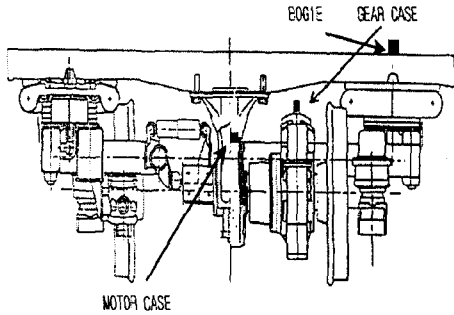


Fig. 13 Sensor location of electric train

본 연구를 위해 수도권 지하철 1호선의 금정~안산간을 주행하며 견인전동기, 감속기, 대차에 가속도계를 부착하여 진동신호를 측정하고 차실내에 마이크로폰을 설치하여 소음을 측정하는 바 있다. Fig. 13은 본 연구에서 사용된 센서의 위치를 나타낸다.

Fig. 14는 실차실험으로부터 얻은 대차 신호의 waterfall diagram으로서 기어물림주파수 성분에 해당하는 회전주파수성분과 248 Hz, 290 Hz, 800 Hz, 1150 Hz 그리고 100 Hz 미만의 저주파 영역에서 고유진동수 성분이 나타나고 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분인 광대역의 주파수 성분이 존재함을 알 수 있다. Fig. 15는 견인전동기 신호의 waterfall diagram으로서 290 Hz, 1150 Hz의 고유진동수 성분과 베어링 회전주파수 성분이 나타남을 알 수 있다. Fig. 16은 감속기 신호의 waterfall diagram으로서 기어물림 주파수 성분이 주된 성분임을 알 수 있으며 248 Hz에 고유진동수 성분이 존재함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 대차 진동의 주된 원인은 회전주파수 성분과 고유진동수 성분임을 알 수 있다. 또한 Fig. 17의 소음 신호는 진동 신호와 다른 주파수 성분을 나타내

는 바, 대차에 의한 진동이 실내 소음에 전달되기보다는 외부 요인에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있다.

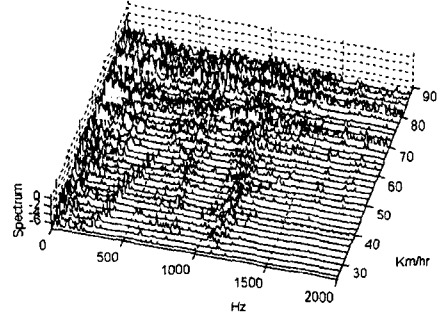


Fig. 14 Bogie signals

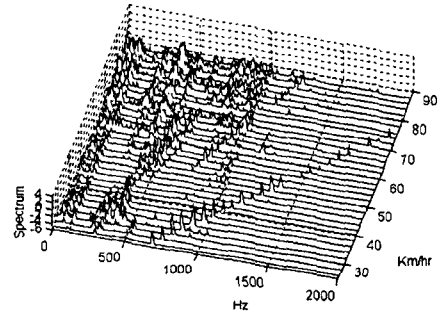


Fig. 15 Traction motor signals

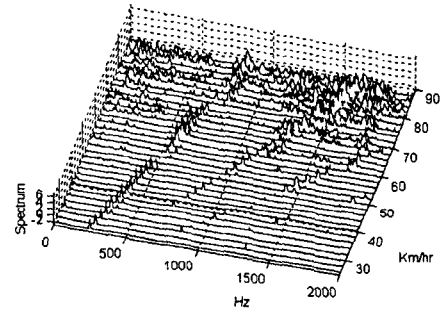


Fig. 16 Traction gear signals

Fig. 18~20는 입력신호로 구동부 신호인 감속기와 견인전동기 신호를 출력신호로는 대차 신호를 사용하고, 소음 신호에 대한 입력신호로는 대차 진동 신호를 사용하여 식 (1)~(4)를 이용하여 얻은 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기동차의 경우 전체적인 코히어런스가 전동기·기어 구동계의 경우보다 낮게 나타남

을 알 수 있으므로 진동전파 과정에서 외부요인에 의한 미지의 성분들이 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

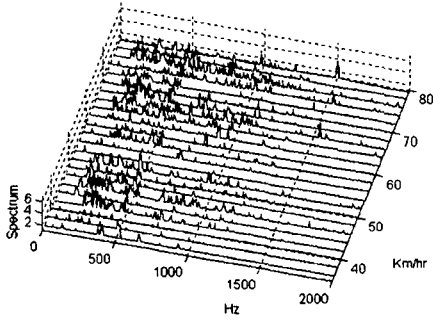


Fig. 17 Indoor sound signals

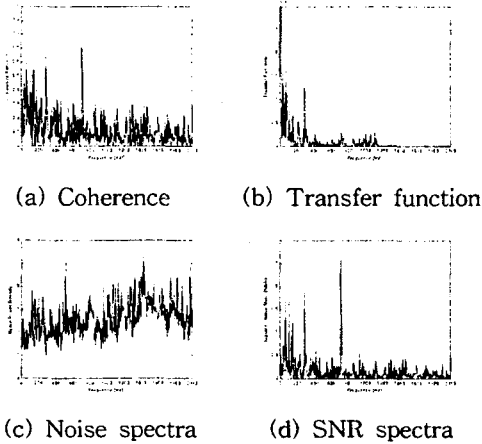


Fig. 18 Gear and bogie

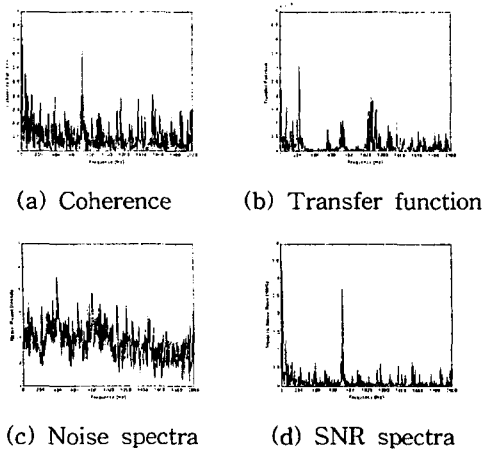


Fig. 19 Motor and bogie

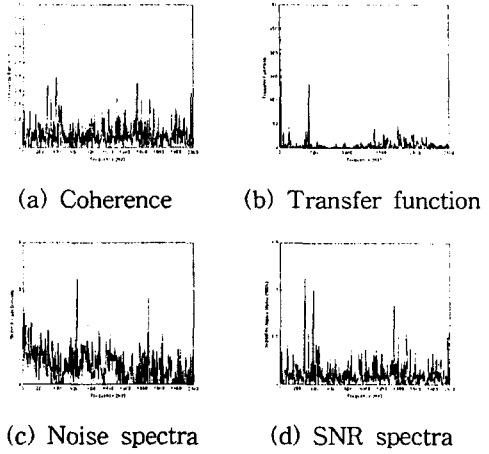


Fig. 20 Bogie and indoor sound

Fig. 21~22는 계산된 전달함수를 이용하여 대차 신호로부터 견인전동기와 감속기 신호를 추정된 그림이다. 그림으로부터 전달함수를 이용하여 추정된 구동부 신호가 측정된 신호와 좋은 상관관계를 보여 주고는 있으나 한계가 있음을 알 수 있다. 이는 대차 신호에 회전주파수 성분에 대한 정보가 포함되어 있기 때문에 비교적 정확하게 감속기와 견인전동기의 진동 신호를 추정할 수 있을 뿐 코히어런스 계산으로부터 알 수 있는 미지의 잡음 성분에 대한 충분한 고려가 불가능했기 때문이다. 또한 Fig. 23의 소음 신호에 의한 진동 신호의 추정엔 전동기·기어 구동계 실험과 마찬가지로 결과가 일치하지 않음을 알 수 있는 바 전달함수에 의한 소음신호의 원인 추적은 부적절함을 알 수 있다.

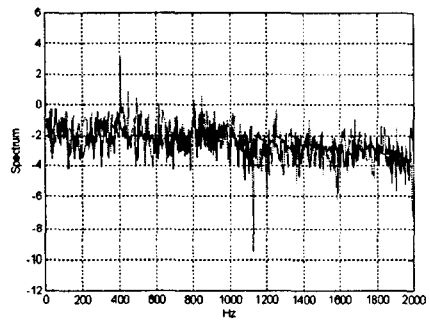


Fig. 21 Estimated traction motor signals

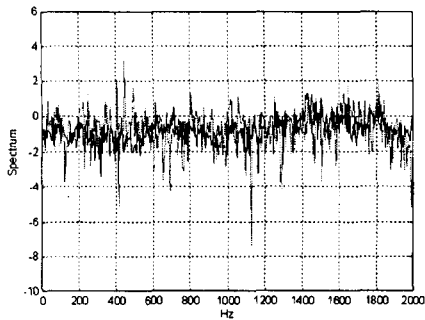


Fig. 22 Estimated traction gear signals

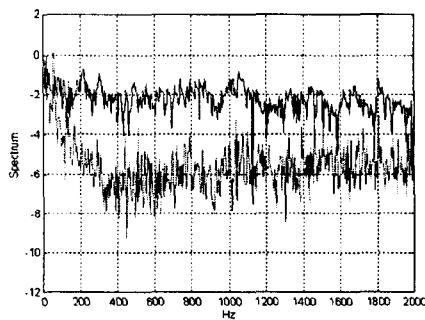


Fig. 23 Estimated bogie signals

4. 동적 해석 모델

전달함수를 이용한 전기동차 구동계의 동특성 해석은 waterfall diagram에서 나타난 전기동차 구동계의 동특성을 확실하게 설명할 수는 없었다. 이는 이미 언급한 바와 같이 실차주행 실험에서 얻은 데이터에 많은 잡음과 미지의 성분이 포함되어 있으나 이를 충분히 고려하기에는 한계가 있었기 때문이다. 그러나 waterfall diagram으로부터 구동계의 동특성은 고유진동수와 주요 회전주파수 성분이 지배하고 있음을 알 수 있었으므로 이를 이용하여 구동계에 대한 동적 해석 모델을 만들 수 있다. 즉 부품간의 주파수 응답함수를 이용하여 모드 해석을 함으로써 시스템의 모달 파라미터인 고유진동수와 감쇠비를 구하고 이러한 모달 파라미터를 이용하여 운동방정식을 유도함으로써 전동기·기어 구동계와 전기동차 구동계에 대한 동적 모델을 만들 수 있다. 이러한 전기동차 구동계의 동적 모델은 저소음 전기동차 개발 및 구동계의 고장진단에 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

4.1 기어/전동기 구동계의 동적 모델 해석

전동기·기어 구동계에 대한 전달함수로부터 기어의 고유진동수 성분인 228 Hz 성분과 전동기의 고유진동수 성분인 191 Hz 성분이 바닥에 전달되는 것을 알 수 있었다. 이는 기어와 전동기의 진동이 바닥에 전달되어 바닥 전체의 진동을 일으키는 것이므로 본 연구에서는 기어와 바닥의 주파수 응답함수와 전동기와 바닥의 주파수 응답함수를 사용하여 모드해석을 수행하였다.

Table 1 Modal parameter of Motor/gear driving system

감속기 - 바닥면	
Freq. (Hz)	Damp (%)
191	0.55
전동기 - 바닥면	
Freq. (Hz)	Damp (%)
228	0.958

고유진동수 성분을 기준으로 각각의 경우에 대해 주파수 응답함수를 구한 후 모드해석 프로그램인 SMS[6]를 이용하여 주파수 응답함수를 curve fitting 하면 기어와 바닥, 전동기와 바닥의 고유진동수와 감쇠비를 구할 수 있다. Table 1은 SMS 프로그램을 통해 얻은 모달 파라미터를 나타낸 표이다.

SMS를 이용하여 구한 모달 파라미터로부터 기어와 바닥, 전동기와 바닥 사이의 운동방정식을 유도할 수 있다. 기어의 진동은 191 Hz에 해당하는 고유진동수 성분을 포함하는 진동을 바닥에 전달하며 전동기는 228 Hz에 해당하는 고유진동수 성분을 바닥에 전달하고 있다. 따라서 바닥은 기어에서 전달되는 신호와 전동기에서 전달되는 신호의 합의 형태가 되게 된다.

4.2 전기동차 구동계의 동적 모델 해석

전동기·기어 구동계의 모드 해석과 같은 방법으로 전기동차 구동계의 모달 파라미터를 구하였다. 감속기와 대차, 견인전동기와 대차 사이의 주파수 응답함수를 구하고 주요 진동원인

이 고유진동수 성분과 회전주파수 성분임을 Fig. 16~18로부터 알 수 있다. 대차의 진동은 견인전동기의 290 Hz, 1150 Hz 영역에 해당하는 고유진동수 성분과 감속기 신호의 248 Hz에 해당하는 성분의 진동에 의해서 가진되며 자체 고유진동수 성분과 회전주파수 성분에 의해서 진동특성이 나타난다.

Table 2 Modal parameter of electric train driving system

감속기 - 대차	
Freq. (Hz)	Damp (%)
248	0.475
견인전동기 - 대차	
Freq. (Hz)	Damp (%)
290	0.002
1150	0.107

그러므로 감속기와 대차, 견인전동기와 대차의 시간영역 신호에 대한 주파수 응답함수를 구하고 모달 해석 프로그램인 SMS를 이용하여 curve fitting을 수행하면 Table 2와 같은 전기동차 구동계의 모달 파라미터를 얻을 수 있다.

전기동차의 경우 고유진동수 성분과 회전주파수 성분이 주요 원인이 되나 회전주파수 성분은 입력부의 신호에 포함되므로 본 연구에서는 고유진동수 성분만을 고려하여 감속기와 대차의 경우 1 자유도로, 견인전동기와 대차의 경우는 2 자유도계로 모델링하여 운동방정식을 구할 수 있으며 대차의 전체 진동은 견인전동기와 감속기에 의한 영향의 합으로 나타낼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전동기·기어 구동계 실험과 전기동차 실차주행 실험의 진동과 소음 신호를 이용하여 진동, 소음의 전파경로를 추적하고 전달함수를 이용하여 응답신호를 추정하였다. 이와 같은 결과를 이용하여 전기동차 구동계의 동적 모델을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전동기·기어 구동계의 경우 전동기와 기어의 진동성분이 바닥면으로 전달되며 전기동차 구동계의 견인전동기와 감속기의 진동이 대차에 전달되는 진동전파경로를 나타내는 것을 알 수 있었다.
2. 주요 전달 진동은 전동기와 기어의 고유주파수 성분이었으며, 전동기의 경우 구동에 기인한 베어링 성분이, 기어의 경우 물림 주파수 성분이 가진성분으로 전달되었다.
3. 소음신호를 이용한 진동신호의 추정은 적절치 못함을 알 수 있었다. 따라서 소음 신호에 의한 구동계의 고장진단은 어려울 것으로 판단되었다.
4. 전달함수를 이용하여 출력신호에 의한 입력신호의 추정은 전동기·기어 실험장치와 같이 단순한 시스템에서는 타당성이 있는 결론을 얻을 수 있었으나 전기동차와 같은 복잡한 시스템에서는 잡음, 또는 미지 성분으로 인하여 성공적인 추정은 불가능하였다.
6. 모달 해석 프로그램인 SMS를 이용하여 구동계의 주파수 응답함수로부터 모달 파라미터인 감쇠비, 고유진동수를 얻을 수 있었으며 이를 이용하여 구동부에 대한 운동방정식을 세울 수 있었다.

참고문헌

- [1] "Railway Noise", Railway Technical Research Pre-Report, No. B-86-5, The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, 1986.
- [2] J. S. Bendat and A. G. Piersol, "Random Data", 2nd-ed, John Wiley & Sons, Singapol, 1991.
- [3] Lyon, "Machine Noise Analysis", Butterworths, Boston, 1987.
- [4] Gordon R. Slemon, "Electric Machines and Drives", New-York Addison-Wesley Pub. 1992.
- [5] S. Y. Chen, M. S. Ju and Y. G. Tsuei, "Estimation of Mass, Stiffness and Damping Matrices from Frequency Response Functions", Journal of Vibration and Acoustics, 118, 78-82, 1996.
- [6] "STAR System - Users Guide"