

적응신호처리에 의한 주행전기동차의 진동신호해석

Vibration Signal Analysis of Running Electric Train using Adaptive Signal Processing

최연선*

Choi, Yeon-Sun

ABSTRACT

The vibration signals of driving parts of electric train are distorted its signal patterns due to the impact components, which occurs when wheel passes rail joints. An elimination method of the impact components is investigated using adaptive signal processing technique in this study. The result shows that adaptive interference canceling method seems to be more effective than line enhancement technique. The application of adaptive interference canceling method to the signal measured at bogie shows that the extractions of the signals of driving parts of traction motor, reduction gear, and axle bearing are successful. Therefore, only the signals of bogie, which is the place to attach an accelerometer easily, is sufficient for the fault diagnosis and the safety evaluation of electric train. Also, adaptive interference canceling method can be applicable to evaluate the performance of vibration isolation between bogie and car body and to investigate the characteristics of indoor sound.

Key words : Electric Train (전기동차), Vibration Signal(진동신호), Adaptive Signal Processing(적응신호처리), Rail Joint(레일이음매), Fault Diagnosis(고장진단), Safety Evaluation(안전성평가)

1. 서론

전기동차의 경우 전동기와 감속기를 포함하는 구동장치의 진동은 레일과 차륜에서 발생하는 진동과 더불어 전기동차에서 발생하는 진동과 소음의 1차적인 원인이 된다.[1] 주행 중인 전기동차에서 구동부의 진동을 측정, 분석할 수 있다면 견인전동기, 감속기 등 구동부의 고장 여부와 더불어 전기동차의 안전운행을 보장할 수 있다.

특히 수도권 전철의 기계적 사고는 당해 노선의 운행정지를 초래할 수 있어 철저한 점검 및

보수가 요구된다. 그러나 기계적 고장부위의 판별은 전기적 고장에 비해 쉽지 않다. 이러한 입장에서 주행 중인 전기동차의 진동을 측정 분석하면 고장 부위를 쉽게 찾을 수 있다. 그러나 주행 중인 전기동차의 구동부에서 발생하는 진동은 전파 과정에서 다른 성분이 다수 포함될 뿐만 아니라, 진동을 전달하는 구조물의 동특성이 반영되므로 순수 구동원의 진동만을 알기는 쉽지 않다. 특히 전기동차가 레일이음매(rail joint)를 통과 시, 차륜에서 발생하는 충격적 진동성분은 구동부의 고장진단과는 관계없는 신호임에도 불구하고 구동부 신호에 비해 상대적으로 커서 구동부의 진동신호분석에 의한 전기동차의 주행안전성평가에 어려움이 따르게 된

*정회원, 성균관대학교, 기계공학부 교수

다.[2]

본 연구에서는 구동부에서 측정된 진동성분 중 차륜이 레일이음매를 통과할 때 발생하는 충격적 성분과 외부의 다른 잡음 성분을 제거하고 구동부만의 진동을 추출하기 위하여 적응신호처리법(adaptive signal processing)의 적용가능성을 검토하였다. 또한 적응신호처리법을 이용하여 대차의 진동 신호로부터 감속기와 견인전동기, 액슬베어링의 진동성분을 추출하여 대차신호만으로도 구동부의 고장진단이 가능한지를 밝히고자 했으며, 구동부의 신호에 의한 차실내의 진동과 소음에 미치는 영향을 알아보고자 했다.

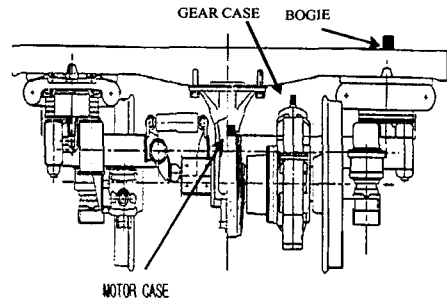
2. 차륜의 충격소음

주행하는 철도차량으로부터 발생하는 소음은 레일과 차륜의 상호관계로부터 발생하는 소음이 대부분이다. 대차와 차체에서 발생하는 소음은 오히려 2차적 요인에 불과하다. 여기서 레일과 차륜의 상호 관계란 레일과 차륜의 조도(roughness)와 레일이음매가 문제이다. 레일과 차륜의 조도가 문제시 될 경우, 진동과 소음은 전구간에 걸쳐 발생하게 된다. 그러나 주행중인 전기동차에서 측정된 철차의 진동과 소음은 바퀴가 레일의 이음매를 통과할 때, 진동과 소음 레벨이 갑자기 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 충격소음이 문제가 되고 있는 것이다. 철도차량에서의 충격음은 레일과 바퀴의 레일이음매 이외에도 바퀴의 평활도(wheel flats), 레일의 교차점(frogs), 신호연결기(signal junction) 등의 불규칙성에 기인한다. 이러한 철도차량에서의 충격음은 일반적으로 이음매 사이의 상호 분리된 간격의 크기, 상호 높이 차, 불규칙성에 따라 달라지나 step-up rail joint가 가장 큰 충격음을 낸다고 알려져 있다.[3]

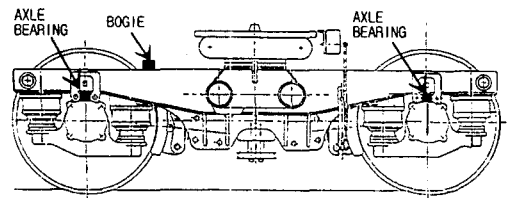
본 연구에서는 수도권 전기동차에 대해 실차 실험을 수행하여 얻은 주행 중의 전기동차 진동 신호에 대하여 분석하였다.[4] 실차 실험에서는 견인전동기, 감속기, 대차, 액슬베어링, 차실내 바닥 등 각각의 부위에 Fig. 1과 같이 가속도계를 부착하고 마이크로폰을 이용하여 실내 소음을 측정하였다. 전기동차의 속도를 측정하기 위하여는 광센서를 차륜 옆에 설치하여 1 회전 당

하나의 펄스(pulse)를 추출토록 하였다.

본 연구에 사용된 전기동차의 부위별 사양은 Table 1 에 나타내었다. 본 연구에서는 50 Km/hr의 주행 데이터에 대해 분석을 수행하였으며, Table 2는 50 Km/hr로 주행할 때 구동부에서 발생하는 주요 주파수 성분들을 나타낸 것이다.[4]



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 1 The location of sensors at electric train

Table 1. Specification of driving parts

Reduction gear	gear ratio	99 / 14
	weight (kg)	370
Axle bearing	17 ea (roller)	
Traction motor	8 ea (ball)	

Table 2. Frequencies during 50 km/hr running

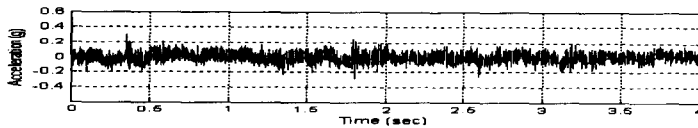
Axle bearing	88 Hz
Motor bearing	296 Hz
Gear meshing	517 Hz

실차 실험을 통하여 측정된 각 부위별 진동신호는 Fig. 2와 같이 동일 시각에 동일 주기로 각각의 부위에서 진동폭이 큰 충격신호가 보이고 있다. 이는 구동부의 신호가 레일이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분으로 인해 구동부 자체의 진동 신호에 심각한 오염이 있는 것으로 추정된다. 따라서 순수 구동부의 진동특성을 규

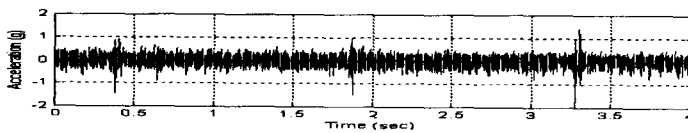
명하기에는 어려움이 따르게 된다. 이에 본 연구에서는 신호처리 기법의 하나인 적응신호분석법을 이용하여 충격적 성분을 제거하는 방법을 연구하였다.

3. 적응신호분석법

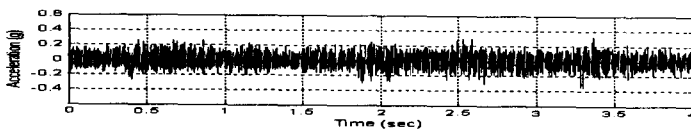
신호처리 과정에서 입력신호 성분을 모르는 경우 신호처리 시스템에서 요구되는 목적에 따라 신호처리 결과가 최적화 되도록 축차 수정해주는 기능을 적응필터(adaptive filter)라 하며, 이를 이용한 신호처리를 적응신호처리(adaptive signal processing)라 한다. 신호에 포함되어 있는 노이즈(noise) 성분을 제거하기 위해 사용되는 적응신호처리법으로는 적응간섭제거법(adaptive interference canceling)과 선향상기법(line



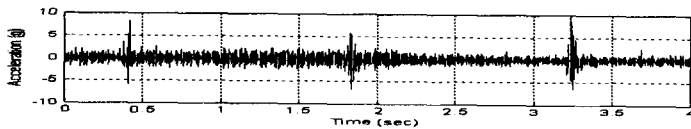
(a) Bogie signal



(b) Gear signal

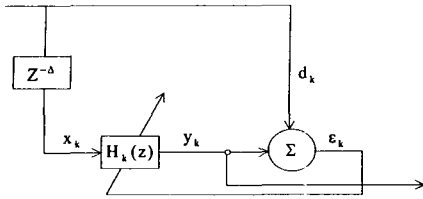


(c) Motor signal

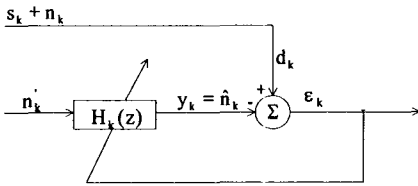


(d) Axle bearing signal

Fig. 2 Vibrations of running electric train



(a) Line enhancement



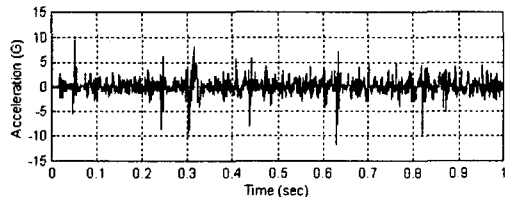
(b) Adaptive interference canceling

Fig. 3 Basic structures of adaptive signal processing

enhancement)이 있다.[5] 선향상기법은 원신호와 원신호에 시간지연(time delay)을 준 신호로부터 LMS 알고리즘(Least mean square algorithm)을 이용하여 노이즈를 제거하는 방법으로서 Fig. 3(a)에 블록선도를 나타내었다. 적응간섭제거법은 입력된 원신호로부터 해당성분만을 추출하기 위하여 해당신호와 같은 주파수 성분을 가진 신호를 생성시켜 LMS 알고리즘을 이용하여 계산하는 방법으로서 Fig. 3(b)에 블록선도를 나타내었다. 여기서 s_k 와 n_k 는 상관관계가 없는 신호와 노이즈를 의미하고, n_k 와 n_k 는 상관관계가 있는 신호이다. 위의 두가지 적응신호처리법의 최종출력신호는 ϵ_k 이다. 위의 두 방법 중 선향상기법은 노이즈의 영향이 적어 신호의 왜곡 정도가 비교적 적은 경우에 사용될 수 있는 기법이며, 적응간섭제거법은 원신호로부터 원하는 신호만을 추출하는 방법으로서 노이즈뿐만 아니라 기타 다른 신호가 포함되어 있어서 원신호를 판별할 수 없는 경우에도 쓰일 수 있는 방법이다. 일반적으로 적응간섭제거법은 선향상기법보다 복잡하므로 보다 많은 계산이 필요하게 된다.

차륜이 레일이음매를 통과할 때 발생하는 충격적 진동성분은 차륜과 가까이 위치한 액슬베

어링에 제일 먼저 전달되게 된다. 전달된 충격 성분은 원래의 액슬베어링 신호를 왜곡시키므로 측정된 액슬베어링의 진동신호로부터 액슬베어링의 고장유무를 판별하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 측정된 액슬베어링 신호에 대해 위의 두 기법 중 어느 방법이 보다 순수한 액슬베어링 진동성분을 찾을 수 있는지를 검토하였다. Fig. 4(a)는 액슬베어링신호에 대한 선향상기법을 적용한 결과로서 차륜이 레일이음매를 통과할 때 발생하는 충격성분이 남아 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4(b)에 보인 바와 같이 주파수 분석결과는 고주파 영역에 해당하는 노이즈 성분이 상당히 제거됨을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 노이즈가 포함되어 측정된 액슬베어링 신호, $s_k + n_k$ 에 대해 적응간섭제거법을 이용하여 액슬베어링의 회전주파수 성분인 88 Hz 를 n_k 로 하여 순수 액슬베어링 성분을 추출한 결과로서, 시간영역에서 레일이음매 통과 시 발생하는 충격성분이 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 4(d)에 보인 주파수 스펙트럼에서는 선향상기법보다 노이즈에 의한 고주파 성분이 크게 감소하고 있어 저주파 성분인 액슬베어링 회전주파수 성분이 보다 확실하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 실차 실험에서 얻어진 실험 데이터는 레일이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분으로 인해 원신호는 상당히 왜곡되어 있음을 알 수 있으며, 전파과정에서 노이즈가 크게 인입됨을 보여주고 있다. 따라서 선향상기법에 의한 단순 잡음제거만으로는 충격성분을 충분히 제거할 수 없으며, 적응간섭제거법을 사용하면 충격적 성분이 제거되면서도, 원 신호의 주파수 성분이 유용하게 추출될 수 있음을 알 수 있다.



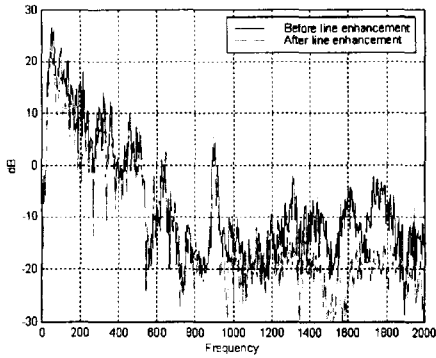
(a) Axle bearing signal after line enhancement

4. 대차신호분석

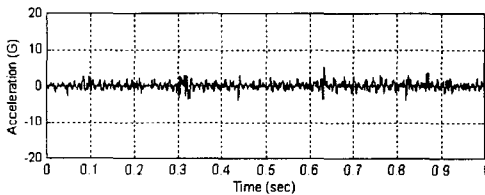
주행 중인 전기동차에 Fig. 1과 같이 각각의 구동부에 가속도계를 부착하면 보다 정확한 진동신호를 측정할 수는 있다. 그러나 해당 부위에 직접 가속도계를 부착하는 것은 쉽지 않을 뿐만 아니라 주행 중 가속도계가 떨어져 손상을 입을 수도 있다. 따라서 가속도계의 부착이 용이한 대차부위에서 측정된 신호로부터 각각의 구동부의 신호를 추출할 수 있다면 주행중인 전기동차의 안전성평가 및 고장진단이 보다 용이해 질 수 있다. 이에 본 연구에서는 대차 부위에서 측정한 진동신호로부터 적응간섭제거법을 이용하여 레일이음매 통과 시 발생하는 충격성분을 제거하고 감속기, 견인전동기, 액슬베어링의 신호만을 추출하여 각각의 진동 특성을 검토하였다.

Fig. 3(b)의 적응간섭제거법의 입력 신호 $s_k + n_k$ 로 대차에서 측정된 신호를 사용하였으며, 상판신호, n_k 로서 감속기 진동을 추출하기 위해서는 517 Hz의 기어물림주파수를, 액슬베어링 진동을 추출하기 위해서는 88 Hz의 액슬베어링 회전주파수 성분을 각각 사용하였다.

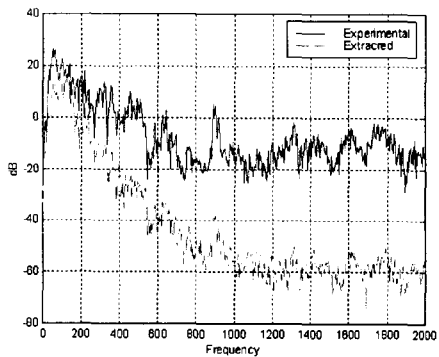
Fig. 5(a)는 액슬베어링 부위에서 측정된 원래 신호(axle bearing original), 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 이용하여 추출한 액슬베어링 신호(axle bearing in bogie)를 각각 도시한 그림이다. Fig. 5(b)는 감속기에서 측정된 원래 신호, 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 이용하여 추출한 감속기 신호(gear in bogie)와 감소기 부위에서 측정된 신호에 동일한 적응간섭 제거법을 이용하여 추출한 감속기 신호(gear in gear)를 각각 도시한 그림이다. 두 경우 모두 원래 신호는 레일이음매 통과에 따른 고주파 성분을 비롯 복잡한 주파수 특성을 보이고 있으나 적응간섭제거법을 적용하면 대차에서 측정된 신호나 감속기, 액슬베어링 각각에서 직접 측정된 신호가 거의 같아짐을 알 수 있다. 특히 예상 주파수 영역에서의 스펙트럼의 크기도 대차신호에 적응간섭제거법을 적용한 경우와 감속기, 액슬베어링에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용한 결과가 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 대차에서 측정된 신호만으로도 감속기 및 액슬베어링의 진동 성



(b) Spectrum after line enhancement



(c) Axle bearing signal after adaptive interference canceling



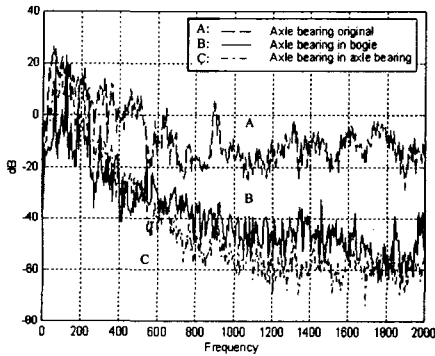
(d) Spectrum after adaptive interference canceling

Fig. 4 Comparison of two adaptive signal processing techniques

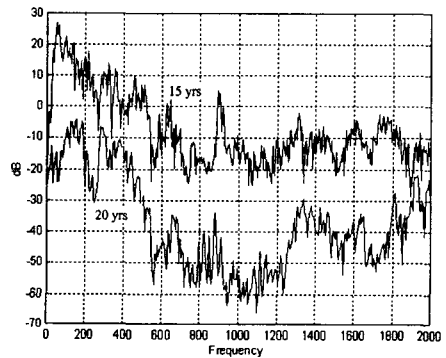
분을 추출할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 전기동차 구동부의 고장진단을 위해서는 각각의 부품에 가속도계를 부착할 필요없이 대차에서만 신호를 추출하고 이에 적응간섭제거법을 적용하면 각 구동부의 고장진단이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 차량사용연수가 15년, 20년된 전기동차의 액슬베어링 부위에서 측정된 신호의 주파수 분석 결과로서 15년 경과된 차량이 20년 경과된 차량보다 주파수 대역 별 진동이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

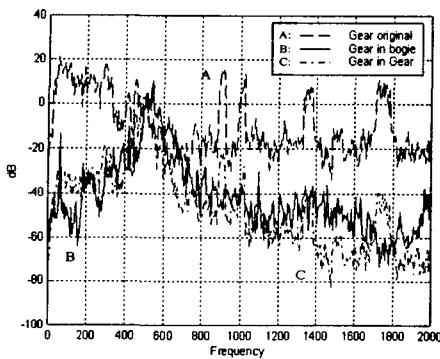
이는 20년 경과된 차량이 주행실험 실시 전에 정비가 이루어 졌기 때문이다. 그러나 대차에서 측정된 신호는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 20년 경과된 차량의 진동 레벨이 크다. 그럼에도 불구하고 Fig. 6(b)는 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용하여 액슬베어링 신호를 추출하여 주파수 분석한 결과로서 Fig. 6(a)와 같은 경향을 보여 주면서도 고주파 영역에서 잡음이 상당히 제거되었음을 볼 수 있다. 즉, 대차에서 측정된 신호로부터 액슬베어링 신호를 추출하면 액슬베어링의 노후정도를 판별 할 수 있다.



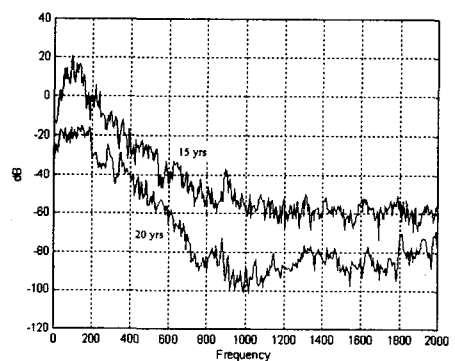
(a) Axle bearing



(a) Measured axle bearing signal



(b) Gear case



(b) Axle bearing signal from bogie signal

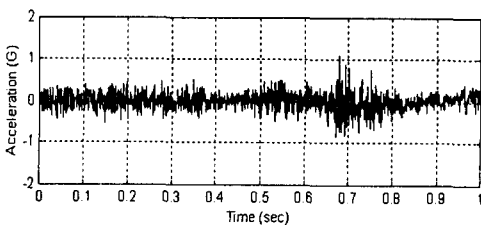
Fig. 5 Spectrums of driving parts after adaptive interference canceling

Fig. 6 Axle bearing signals depending on used years

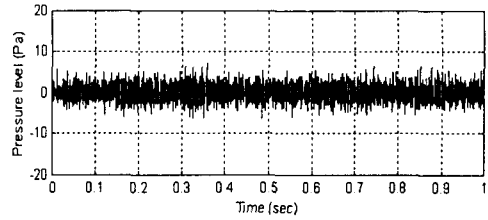
5. 실내소음과 진동레벨

전기동차가 주행 중 구동부 및 레일이음매에서 발생하는 진동과 소음은 대부분 차체와 연결된 대차를 거쳐 차실내로 전파되는 것으로 추정할 수 있다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 주행 중 차실내에서 측정된 진동과 소음신호이고 Fig. 7(c)와 (d)는 대차에서 측정된 신호를 상관신호, n_k 로 놓고 차실내 진동 및 소음신호를 입력신호, $s_k + n_k$ 로 하여 적응간섭제거법을 이용하여 분석한 결과이다. 진동 및 소음신호 모두 레일이음매에 의한 충격성분이 나타남을 알 수 있으나 그 크기는 상당히 저감된 것을 보여 주고 있다. 이로써 적응간섭제거법은 진동절연효과를 검증할 수 있는 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

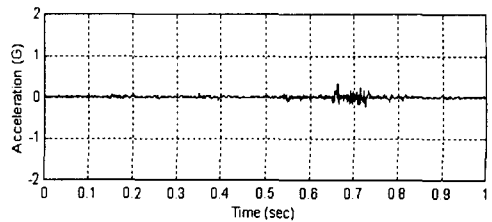
Fig. 8(a)는 5년차, 15년차, 20년차에 해당하는 전기동차의 대차에서 측정된 신호에 대한 주파수 분석결과로 Fig. 8(b)는 대차에서 측정된 신호로부터 적응간섭제거법을 이용하여 감속기 신호를 추출한 결과로 15년차, 20년차, 5년차 순으로 진동레벨이 나타남을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 전주파수 대역에서 대차의 진동레벨은 25년차, 15년차, 20년차 순으로 운행년도가 증가 될수록 진동레벨이 커지고 있는 것을 알 수 있으나, 대차신호에서 적응간섭제거법을 이용하여 추출된 감속기의 진동레벨은 5년차, 20년차, 15년차 순으로 바뀌는 것을 보여 주고 있다. 이와같이 된 것은 20년차 전기동차가 실차실험을 수행하기 직전에 정비를 받았기 때문이며, 이는 주행속도별 진동레벨 결과에서도 15년차가 20년차보다 진동레벨이 커짐을 확인하였다.[4] 따라서 대차에서 측정된 신호에 대해 적응간섭제거법을 적용하면 감속기 등 구동부의 노후도도 확인 가능함을 알 수 있었다.



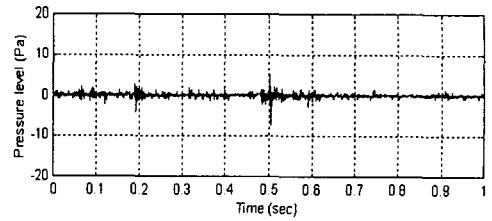
(a) Indoor vibration signal



(b) Indoor sound signal

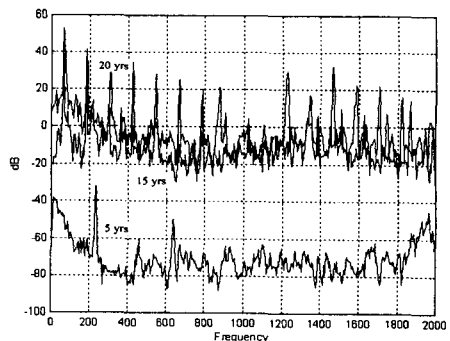


(c) Bogie signal from indoor vibration

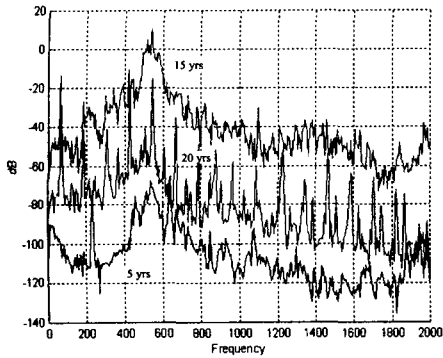


(d) Bogie signal from indoor sound

Fig. 7 Indoor vibration and sound signals .



(a) Bogie signal



(b) Gear bogie signal

Fig. 8 Spectrums of gear vibration depending on used years

6. 결론

주행 중인 전기동차의 구동부에서 측정된 진동신호는 차륜이 레일이음매를 통과 할 때 발생하는 충격성분을 비롯한 다수의 노이즈가 포함되어 있어 측정된 신호로부터 구동부의 진동특성을 규명하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 적응신호분석법을 이용하여 주행 중인 전기동차의 구동부에서 측정된 진동신호로부터 순수 구동부만의 신호를 추출하여 전기동차 구동부의 고장진단 및 안전성 평가 방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 전기동차의 구동부에서 측정된 진동신호로부터 레일이음매 통과 시 발생하는 충격성분을 제거하기 위해서는 적응간섭제거법이 선향상기법기법 보다 효율적이었다.
- (2) 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용하면 감속기와 액슬베어링 부위에서 직접 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용한 결과와 거의 같아지므로, 가속도계의 부착이 용이한 대차에서 측정된 신호만으로도 적응간섭제거법을 적용하면 구동부에 대한 노후도 평가 및 고장진단이 가능함을 알 수 있었다.
- (3) 대차신호와 차 실내 진동 및 소음신호에 적응간섭제거법을 적용하면 진동절연효과 및 진동과 소음과의 관계를 규명할 수 있었다.

이상의 결과로부터 전기동차 주행 중 차륜이 레일이음매를 통과 할 때 발생하는 충격성분은 전기동차 전체의 진동에 상당한 영향을 미치는 것이 확인되고 있어 장대레일 사용 등 보다 근본적인 해결책 강구되어야 할 것이다. 또한 주행 중 전기동차의 진동신호를 측정, 분석함으로써 전기동차의 상태감시와 더불어 레일의 상태를 파악하여 신속한 선로 보수 작업 및 노후 부품 교체를 통하여 철도의 안전, 쾌적 운영을 보장하여야 할 것이다.

후기: 본연구는 한국과학재단 (과제번호 : 95-0200-15-01-3)과 한국철도기술연구원의 협조로 이루어진 연구로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] "Railway Noise", Railway Technical Research Pre-Report, No. B-86-5, The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, 1986.
- [2] 임병덕, 최연선, "철로 이음매에 기인하는 전동차의 진동특성 분석," 한국철도학회, 1998년도 춘계학술대회논문집, pp. 287-290, 1998.
- [3] Remington, P. J., "Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What don't we know? where do we go from here?," Journal of Sound and Vibration, 116(2), pp. 339-353, 1985.
- [4] 최연선, "진동 및 소음 측정에 의한 전기동차 주행장치의 안전성 진단", 1997. 5, 연구보고서
- [5] Stearns S. D. and David R. A., "Signal Processing Algorithms in MATLAB", Prentice Hall, Inc., N. J., 1996.
- [6] Windrow B. and Stearns S. D., "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1985.