

적용신호처리에 의한 주행전기동차의 진동신호해석

Vibration Signal Analysis of Running Electric Train using Adaptive Signal Processing

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

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.

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 고장여부와 더불어 전기동차의 안전운행을 보장할 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 레일 이음매(rail joint)를 통과 시, 차륜에서 발생하는 충격적 진동 성분은 구동부의 고장 진단과는 관계가 없는 신호임에도 불구하고 구동부 신호에 비해 상대적으로 커서, 구동부 진동 신호 분석에 의한 전기동차의 주행 안정성 평가에 어려움이 따르게 된다.[2]

본 연구에서는 구동부에서 측정된 진동 성분 중 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분과

* 성균관대학교 교수, 정회원

** 성균관대학교 대학원

외부의 다른 잡음 성분을 제거하고 구동부만의 진동을 추출하기 위하여 적응신호처리법(adaptive signal processing)의 적용 가능성을 검토하였다. 또한 적응신호처리법을 이용하여 대차의 진동 신호로부터 감속기와 견인전동기, 액슬베어링 성분만을 추출하여 대차 신호만으로도 구동부의 진동 신호 해석이 가능한지의 여부를 밝히고자 했으며, 구동부의 신호와 차실내 소음과의 관계를 밝혀 보고자 했다.

2. 차륜의 충격소음

주행하는 철도차량으로부터 발생하는 소음은 레일과 차륜의 상호 관계로부터 발생하는 소음이 대부분이다. 대차, 차체 등에서 발생하는 소음은 오히려 2차적 요인에 불과하다. 공력소음은 고속전철에서 240 km/hr 이상에서나 중요할 뿐 일반 전기동차에서는 별로 중요하지 않다. 여기서 레일과 차륜의 상호 관계란 레일과 차륜의 조도(roughness)가 문제가 될 수도 있다. 이 경우 진동과 소음은 전 구간에 걸쳐 조도에 따라 진동과 소음 레벨이 달라져야 한다. 그러나 실측된 철차의 진동과 소음은 바퀴가 레일을 통과할 때, 갑자기 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 충격소음이 a 문제가 되고 있는 것이다. 철도차량에서의 충격음은 레일과 바퀴의 레일 이음매 이외에도 바퀴의 평활도(wheel flats), 레일의 교차점(frogs), 신호연결기(signal junction) 등의 불규칙성에 기인한다. 이러한 철도차량에서의 충격음에 대한 연구는 아직 미미한 상태이나 smooth irregularity, level joint, step-up rail joint, step-down rail joint, wheel flat중 step-up rail joint 가 가장 큰 충격음을 낸다고 알려져 있다.[3]

본 연구에서는 수도권 전기동차에 대해 실차 실험을 수행하여 얻은 주행 중의 전기동차 진동신호에 대하여 분석하였다.[4] 실차 실험에서는 견인전동기, 감속기, 대차, 액슬베어링, 차 실내 바닥 등 각각의 부위에 Fig. 1과 같이 가속도계를 부착하고 마이크로폰을 이용하여 실내 소음을 측정하였다. 또한 전기동차의 속도를 측정하기 위하여 광센서를 차륜 옆에 설치하여 1 회전 당 하나의 펄스(pulse)를 추출토록 하였다. 본 연구에 사용된 전기동차의 부위별 사양은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 50 Km/hr의 주행 데이터에 대해 분석을 수행하였으며, Table 2는 주행 중 구동부에서 발생하는 주요 주파수 성분들을 나타낸 것이다.[4]

실차 실험을 통하여 측정된 각 부위별 진동신호는 Fig. 2와 같이 동일 시각에 동일 주기로 각각의 부위에서 진동폭이 큰 충격신호가 보이고 있다. 이는 구동부의 신호가 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분으로 인해 구동부 자체의 진동 신호에 심각한 오염이 있는 것으로 추정된다. 따라서 순수 구동부의 진동특성을 규명하기에는 어려움이 따르게 된다. 이에 본 연구에서는 신호처리 기법의 하나인 적응신호분석법을 이용하여 충격적 성분을 제거하는 방법을 연구하였다.

3. 적응신호분석법

LMS 알고리즘은 적응신호분석에서 많이 사용되는 방법으로서 시가변 FIR 필터(time varying FIR filter)를 이용하여 전달함수, $H_k(z)$ 를 구하는 방법이다. 신호속에 노이즈 성분을 제거하기 위해 사용되는 LMS 알고리즘으로는 적응간섭제거법(adaptive interference canceling)과 선향상기법(line enhancement)이 있다.[5] 선향상기법은 원신호와 원신호에 시간 지연을 준 신호로부터 LMS 알고리즘을 이용하여 노이즈를 제거하는 방법으로서 Fig. 3(a)에 블록선도를 나타내었다. 적응간섭제거법은 입력된 원신호로부터 해당성분만을 추출하기 위하여 해당신호와 같은 주파수성분을 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. 최종출력신호는 ε_k 에 해당된다. 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 경우에 쓰일 수 있는 방법이다. 일반적으로 적응간섭제거법은 선향상기법보다 많은 계산이 필요하고 순수 발생 신호를 알 수는 없다.

레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 진동 성분은 차륜과 가까이 위치한 액슬베어링에 제일 먼저 전달되게 된다. 따라서 주행 중 액슬베어링 관련 고장이 빈발하게 된다. 전달된 충격적 성분은 원래의 액슬베어링 신호를 왜곡시키므로 측정된 액슬베어링의 진동신호로부터 액슬베어링의 고장유무를 판별하기에는 어려움이 발생한다. 이에 본 연구에서는 측정된 액슬베어링 신호에 대해 위의 두 기법 중 어느 방법이 보다 순수한 액슬베어링 진동성분을 찾을 수 있는지를 검토하였다. 액슬베어링 신호에 대한 선향상기법을 적용한 결과, 주파수 분석에서는 고주파 영역에 해당하는 노이즈는 상당히 제거됨을 알 수 있으나, Fig. 4(c), 시간영역에서 본 신호, Fig. 4(a)는 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분이 그대로 존재함을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)는 노이즈가 포함되어 측정된 액슬베어링 신호, $s_k + n_k$ 에 대해 적응간섭제거법을 이용하여 액슬베어링 회전 주파수 성분의 88 Hz를 n_k 로 하여 순수 액슬베어링 성분을 추출한 결과로서, 시간영역, Fig. 4(b), 에서 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분이 나타나지 않음을 알 수 있으며, 주파수 영역, Fig. 4(d)에서 액슬베어링 회전 주파수 성분의 88 Hz의 1X 성분과 2X 성분이 나타남을 알 수 있다. 두 결과로부터 실차 실험에서 얻어진 실험 데이터는 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분으로 인해 원신호로부터 상당 부분 왜곡됨을 알 수 있으며, 전파 도중 여러 요인에 의해 진동성분의 변화가 심하게 일어남을 알 수 있다. 따라서 선향상기법에 의한 단순 잡음 제거만으로는 충격성분을 충분히 제거할 수 없으며, 적응간섭제거법을 사용하면 충격적 성분이 제거되면서도 해당 주파수 성분은 유용하게 추출할 수 있음을 알 수 있다.

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 탈착되어 손상을 입을 수도 있다. 따라서 가속도계의 부착이 용이한 대차 부위에서 측정된 신호로부터 각각의 구동부의 신호를 추출할 수 있다면 주행 중인 전기동차의 안전성평가 및 고장진단이 보다 용이해 질 수 있다. 이에 본 연구에서는 대차 부위에서 측정된 진동신호로부터 적응간섭제거법을 이용하여 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격적 성분을 제거하고 감속기, 견인전동기, 액슬베어링의 신호를 추출하여 각각의 진동 특성을 검토하였다.

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

Fig. 5(a)는 액슬베어링 부위에서 측정된 원래 신호, 대차에서 측정된 신호와 액슬베어링 부위에서 측정된 원래 신호에 적응간섭제거법을 이용하여 추출한 순수 액슬베어링 신호를 도시한 그림이다. Fig. 5(b)는 감속기에서 측정된 신호, 대차에서 측정된 신호와 감속기에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 이용하여 추출한 순수 감속기 신호를 도시한 그림이다. 두 경우 모두 원래 신호는 레일 이음매 통과에 따른 고주파 성분을 비롯 복잡한 주파수 특성을 보이고 있으나 적응간섭제거법을 적용하면 대차에서 측정된 신호나 감속기, 액슬베어링에서 직접 측정된 신호가 거의 같아짐을 알 수 있다. 특히 예상 주파수 영역에서는 스펙트럼의 크기도 잘 일치하고 있음을 보여

주고 있다.

Fig. 5(c)는 액슬베어링 부위에서 측정된 신호에 대한 주파수 분석 결과로서 15년 경과된 차량이 20년 경과된 차량보다 주파수 대역 별 진동이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용하여 분석된 결과로서 Fig. 5(c)와 같은 경향을 보여 주면서도 고주파 영역에서 잡음이 상당히 제거되어 순수 액슬베어링 관련 성분을 명확히 볼 수 있다. 따라서 위험도를 감수하고 액슬베어링 부위에서 신호를 얻기보다, 대차에서 측정된 신호에 적응간섭제거법을 적용하면 액슬베어링의 상태감시가 정확하면서도 용이해 짐을 알 수 있다. 결국 주행 중 가속도계의 부착이 용이한 대차에서만 진동신호를 측정하여도 적응간섭제거법을 적용하면 구동부 전체에 대한 고장진단이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

5. 실내소음과 진동레벨

전기동차가 주행 중 구동부 및 레일 이음매에서 발생하는 진동과 소음은 대부분 차체와 연결된 대차를 거쳐 차실내로 전파되는 것으로 추정할 수 있다. 이를 검증하기 위해서는 차실내의 진동과 소음에 대하여 대차에서 측정된 신호 성분과의 관계를 규명하여야 한다. Fig. 6(a)와 (c)는 각각 주행 중 차실내에서 측정된 진동과 소음 신호이고 Fig. 6(b)와 (d)는 대차에서 측정된 신호를 상관 신호, n_k 로 놓고 차실내 진동 및 소음 신호를 입력신호, $s_k + n_k$ 로 하여 적응간섭제거법을 이용하여 분석한 결과이다. 진동 및 소음 신호 모두 레일 이음매에 의한 충격 성분이 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. 6(e)와 (f)는 원래 신호와 적용신호처리된 신호의 주파수 분석 결과로 적용신호처리로 노이즈에 의한 고주파 성분이 상당히 저감되는 것을 알 수 있으며 대차에서의 저주파 성분은 차실내의 진동과 소음에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 5년차, 15년차, 20년차에 해당하는 전기동차의 대차에서 측정된 신호에 대한 주파수 분석결과로 Fig. 7(b)는 대차에서 측정된 신호로부터 적응간섭제거법을 이용하여 감속기 신호를 추출한 결과로 15년차, 20년차, 5년차 순으로 진동레벨이 나타남을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 전 주파수 대역에서 대차의 진동 레벨은 20년차, 15년차, 5년차 순으로 운행년도가 증가 될수록 진동레벨이 커지고 있는 것을 알 수 있으나, 대차신호에서 적응간섭제거법을 이용하여 추출된 감속기의 진동레벨은 15년차, 20년차, 5년차 순으로 바뀌는 것을 보여 주고 있다. 이와같이 된 것은 20년차 전기동차가 실차실험 당시 얼마 전에 정비를 받았기 때문이며, 이는 주행속도 별 진동레벨 결과에서도 15년차가 20년차보다 진동레벨이 커짐을 확인하였다.[4] 따라서 대차에서 측정된 신호에 대해 적응간섭제거법을 적용하면 감속기 등 구동부의 노후도도 확인 가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

주행 중인 전기동차의 구동부에서 측정된 진동신호는 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격 성분을 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 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격성분을 제

거하기 위해서는 적응간섭제거법의 적용이 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) 대차 신호와 차 실내 진동 및 소음 신호에 적응간섭제거법을 적용하면 진동절연효과 및 진동과 소음과의 관계를 규명할 수 있었다.

이상의 결과로부터 전기동차 주행 중 레일 이음매 통과 시 발생하는 충격성분은 전기동차 전체의 진동에 상당한 영향을 미치는 것이 확인되고 있어 장대레일 사용 등 보다 근본적인 해결책을 강구하여야 할 것이다. 또한 주행 중 전기동차의 진동신호를 측정, 분석함으로써 전기동차의 상태 감시와 더불어 레일의 상태를 파악하여 신속한 선로 보수 작업 및 노후 부품 교체를 통하여 철도의 안전, 쾌적 운영을 보장하여야 할 것이다.

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.

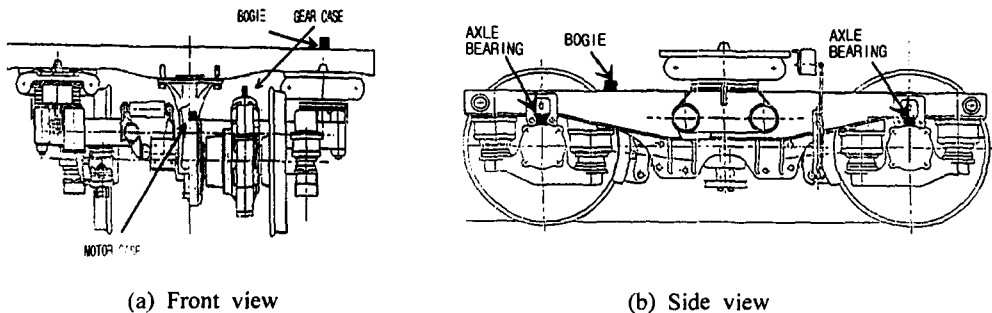


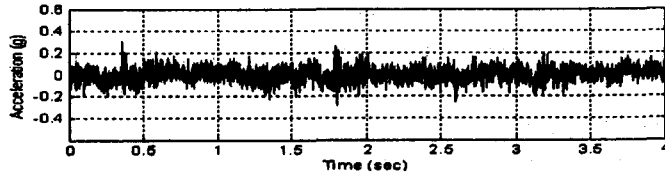
Fig. 1 The location of sensors at electric train

Table 1. Specification of driving parts

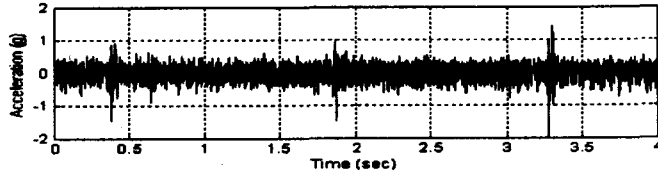
Reduction gear	gear ratio	99 / 14
	weight (kg)	370
Axle bearing	17 ea (roller)	
Traction motor	8 ea (ball)	

Table 2. Frequencies during 50 km/hr running

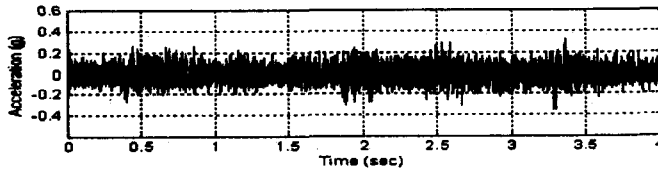
Axle bearing	88 Hz
Motor bearing	296 Hz
Gear meshing	517 Hz



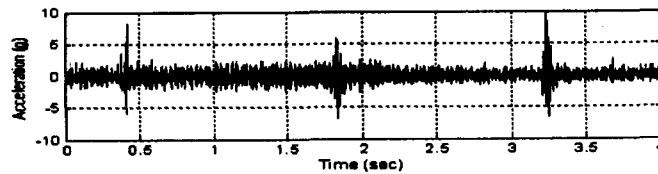
(a) Bogie signal



(b) Gear signal

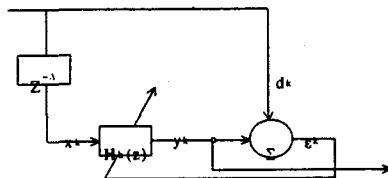


(c) Motor signal

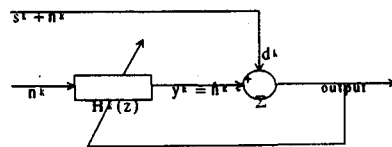


(d) Axle bearing signal

Fig. 2 Vibrations of running electric train

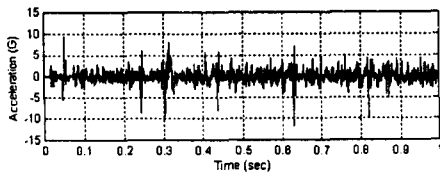


(a) Line enhancement

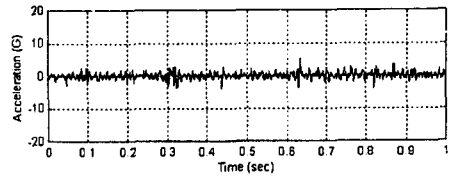


(b) Adaptive interference canceling

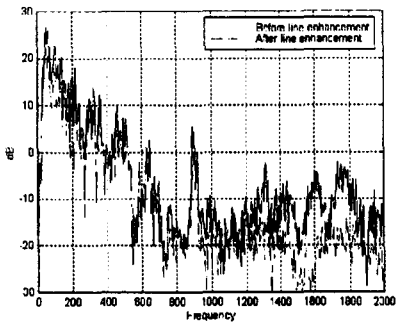
Fig. 3 Basic structures of adaptive signal processing



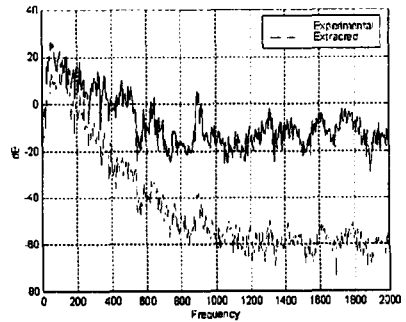
(a) After line enhancement



(b) After adaptive interference canceling

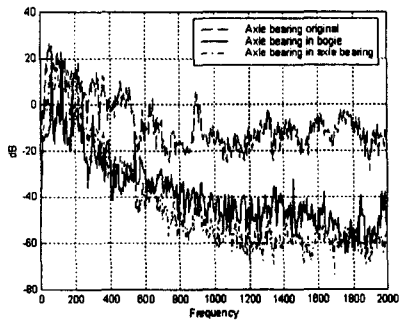


(c) Spectrum after line enhancement

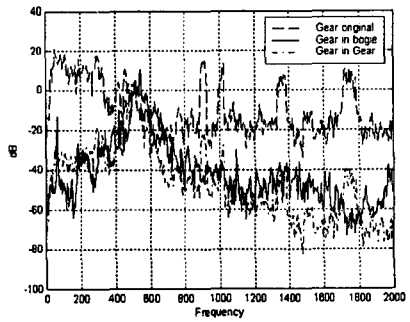


(d) Spectrum after adaptive interference canceling

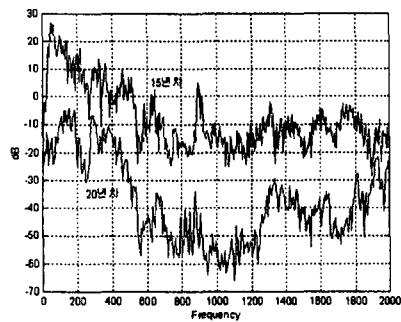
Fig. 4 Comparison of two adaptive signal processing techniques



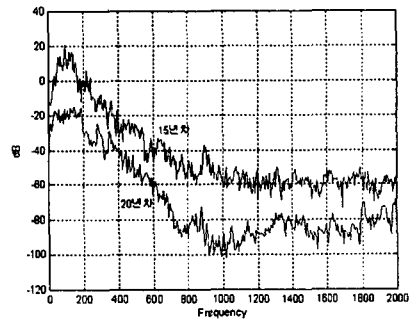
(a) Axle bearing



(b) Gear case

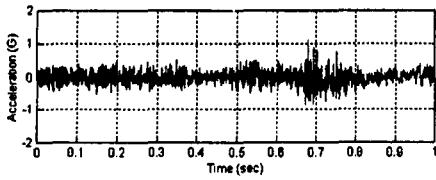


(c) Measured axle bearing signal

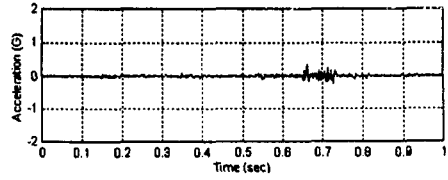


(d) Axle bearing signal from bogie signal

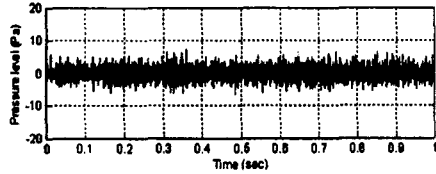
Fig. 5 Spectrums of driving parts after adaptive interference canceling



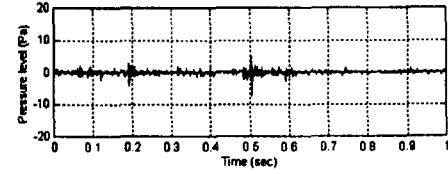
(a) Indoor vibration signal



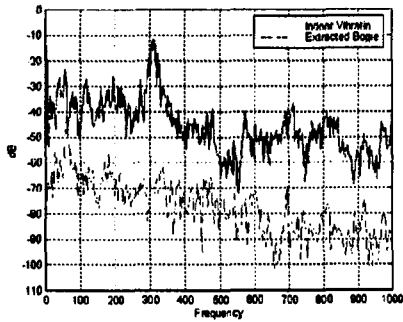
(b) Bogie signal from indoor vibration



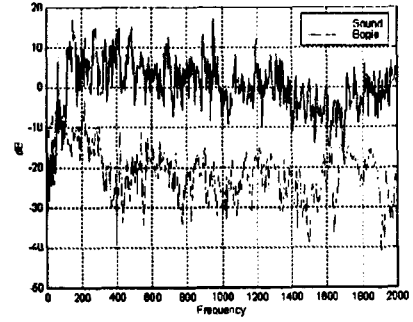
(c) Indoor sound signal



(d) Bogie signal from indoor sound

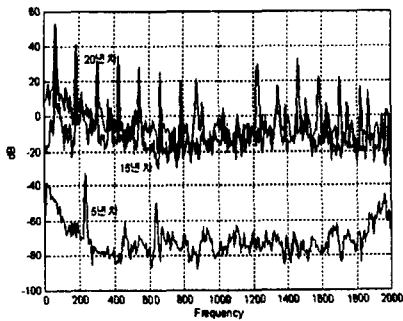


(e) Spectrums of indoor vibration and bogie signals after adaptive interference canceling

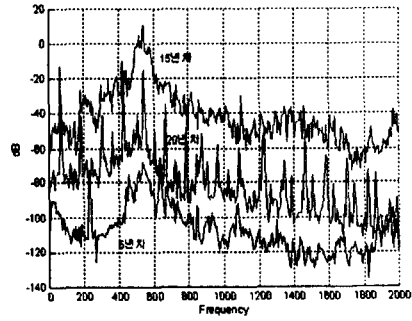


(f) Spectrums of indoor sound and bogie signals after adaptive interference canceling

Fig. 6 Indoor vibration and sound signals



(a) Bogie signal



(b) Gear signal from bogie signal

Fig. 7 Spectrums of gear vibration depending on used years