

적응예측기-이진트리구조 필터뱅크 시스템을 이용한 잡음이 부가된 시변 진동신호 분석

배현덕*

Noisy Time Varying Vibration Signal Analysis using Adaptive Predictor-Binary Tree Structured Filter Bank System

Hyeon-Deok Bae*

요약 회전하는 기계시스템에서는 일반적으로 시변 진동신호가 발생되며, 회전에 고장이 있는 경우 이 신호에 잡음이 포함된다. 본 논문에서는 잡음이 포함된 시변 진동신호를 분해하기 위한 적응예측기와 이진트리구조 필터뱅크로 구성되는 시스템을 제안한다. 그리고 이 시스템에서 분석된 진동신호 결과를 회전기 고장진단에 활용할 수 있음을 보인다. 제안 시스템 적응 예측기는 주기신호성분을 예측하며, 필터뱅크 시스템에서는 입력신호와 예측된 주기신호와의 차 신호를 부밴드 대역으로 분해한다. 각 부밴드 신호에는 고장에 따른 잡음 신호성분이 포함되므로, 이를 이용 회전기의 고장진단이 가능하다. 제안한 진동신호분석 방법의 타당성을 시뮬레이션에서 보이며, 시뮬레이션에서는 주기신호 성분이 제거된 진동신호를 32 부밴드로 분해하여 고장관련 신호 특성을 분석한다.

Abstract Generally, a time-varying vibration signal is generated in a rotating machine system, and when there is a failure in the rotating machine, the signal contains noise. In this paper, we propose a system consisting of an adaptive predictor and a binary tree filter bank for analyzing time - varying vibration signals with noise. And the vibration signal analyzed results in this system is used for fault diagnosis of the rotating machine. The adaptive predictor of the proposed system predicts the periodic signal components, and the filter bank system decomposes the difference signal between the input signal and the predicted periodic signal into subband. Since each subband signal includes a noise signal component due to a failure, it is possible to diagnose the failure of the using rotary machine. The validity of the proposed vibration signal analysis method is shown in the simulations, where the periodic components cancelled vibrating signals are decomposed to 32 subband, and the signal characteristics related faults are analyzed.

Key Words : Noisy time varying periodic signal, rotating machine, adaptive predictor, filter bank, fault diagnosis

1. 서론

전기-기계적 시스템에 회전기가 포함되면, 발생하는 진동음향신호에는 시간에 따라 주파수와 크기가 변하는 주기적성분과 고장으로 발생하는 신호가 포함된다. 이러한 진동신호를 처리 분석함으로써 시스템의 동작 상태를 예측하여 사고를 미연

에 방지할 수 있으며, 또한 신호의 정밀분석을 통해 고장원인의 정확한 진단도 가능하게 된다. 회전기에서 발생하는 진동신호는 기계적 회전기기의 동작모드 변화로 인해 비정상적(non-stationary) 성질을 가지므로 이를 분석하여 기계설비 상태를 감시하고 기계적 결함(fault)을 분석하는 데 많은 어려움이 있다[1][2][5]. 그리고 시변 특성의 신호이

*Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Chungbuk National University (hdbae@cbnu.ac.kr)
 Received January 27, 2017 Revised February 02, 2017 Accepted February 04, 2017

므로 신호처리에서 신호의 시간-주파수 특성을 동시에 볼 수 있는 방법이 요구된다. 이러한 신호 특성의 처리 및 분석에는 웨이브릿변환(wavelet transform)과 특성이 유사한 필터뱅크를 이용하는 방법이 유용하며, 이 방법은 다해상도 분석이 가능하므로 비정제적인 신호 뿐만 아니라 정제적인 신호에 대해서도 효과적이다[2][6][7]. 기계설비의 초기 결함에 의해 발생하는 진동신호는 크기가 작기 때문에 정상동작 시 고유하게 발생하는 주기적인 신호성분에 의해 그 특성을 찾는 데 어려움이 있다. 그러므로 주기적인 신호성분을 사전에 제거시켜서 결합신호성분만을 추출해 낼 수 있는 방법이 필요하다. 주기적인 신호성분 제거에 있어서 주기성이 시간에 따라 변화하는 경우 적응신호처리 알고리즘이 유용하게 이용될 수 있다[4][8][9][10]. 본 논문에서는 회전기 등에서 발생하는 시변 특성의 진동신호의 분석을 위해 적응예측기(adaptive predictor)와 2진 트리 구조 필터뱅크를 중속 접속하는 시스템을 제안 이용한다. 적응 예측기에서는 시간에 따라 변하는 주기적 신호성분을 예측하며, 예측된 신호와 원 입력신호와의 오차를 이용 기계적 결합신호가 포함된 비정상적 특성의 잡음신호를 추출한다. 회전기의 결합으로 인하여 발생하는 신호의 분석을 위해 2진 트리구조(binary tree structure)의 필터뱅크(filter bank)를 이용 신호를 부밴드(sub-band)분해한다[8][9][10].

결합이 있는 회전기에서 발생하는 신호는 결합에 따라 발생 신호의 주파수 대역이 다를 수 있으므로, 필터뱅크로 분해된 각 부밴드 신호로부터 결합의 추정이 가능해진다. 제안하는 시스템의 성능 평가를 위해, 입력으로 공업용 팬에서 발생하는 음향신호, 볼 베어링에 발생하는 진동신호를 이용하여 시뮬레이션을 통하여 타당성을 평가한다.

2. 잡음 포함된 진동신호 분석 시스템

회전기에서 발생하는 진동신호에는 시변 주기적 성분에 기계적 결합으로 발생하는 신호성분이 포함된다. 진동신호로부터 결합신호 성분을 추출, 분

석하기 위해서는 주기신호성분 제거와, 제거된 신호의 분석 과정이 요구된다. 이를 위해 그림1과 같이 시변 주기신호성분 제거를 위한 적응예측기와 주기성분이 제거된 신호의 다 해상도 분석을 위한 필터뱅크시스템을 중속 접속하여 전체 진동신호 분석시스템을 구성한다.

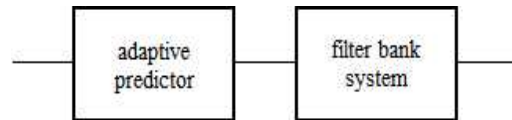


그림 1. 진동신호 분석시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of vibrating analysis system

2.1. 적응 예측기

회전기에서 결합신호와 주기적 정상동작 신호의 주파수 대역이 중첩되어 있는 경우 그림 2와 같은 적응 예측기를 이용 분리할 수 있으며, 두 신호대역이 분리되어 있을 때도 진폭이 큰 주기신호성분을 제거함으로써 결합신호 검출이 용이하게 된다.

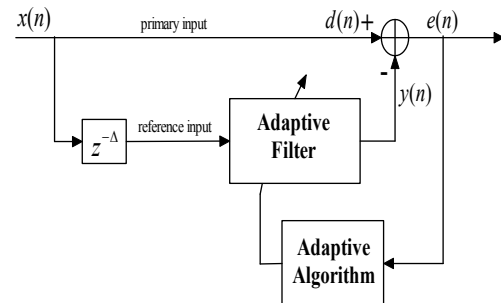


그림 2. 적응 예측기
Fig. 2. Adaptive predictor

그림 2 적응 예측기에서는 주 입력(primary input)과 기준입력(reference input) 사이에 적절한 지연을 주어 신호 간의 상호 상관성을 작게 함으로서 적응필터를 이용 주 입력 신호에서 크기가 큰 주기신호 성분 예측이 가능하다. 주 입력신호 $x(n)$ 과 예측된 주기신호성분($y(n)$)과의 오차 $e(n)$ 으로부터 결합성분 신호의 추출이 가능하다.

적응 예측기에는 여러 적응알고리즘을 적용할 수 있지만, 여기에서는 입력신호 변화의 영향을 덜

받고 비교적 수렴속도가 빠른 NLMS(Normalized Least Mean Square)를 사용한다. NLMS 알고리즘에서 계수벡터 $\mathbf{w}(n)$ 의 갱신 식은 다음과 같다 [3][4].

$$= \mathbf{w}(n) + \frac{\beta}{\varepsilon + \|\mathbf{x}(n)\|^2} \mathbf{x}(n - \Delta) e(n) \quad (1)$$

여기서, $x(n)$, $e(n)$ 은 각각 그림 2의 주 입력과 오차이다. 그리고 β 는 $0 < \beta < 2$ 의 범위를 만족하는 적응이득이며 ε 은 매우 작은 양수이다.

2.2. 2진 트리 구조 필터뱅크 시스템

진동신호에 포함된 결합신호는 임펄스성의 비정제적 성질을 가지므로 웨이브릿 패킷 변환(wavelet packet transform)과 유사하며 고주파대역과 저주파대역에서 동일한 주파수 해상도를 가지는[1][2][6] 2진 트리구조 필터뱅크를 이용 신호를 분해할 경우 신호를 여러 대역으로 동시에 분해가 가능하나, 이 경우 각 대역신호의 상관성을 없애는 직교필터(orthogonal filter)의 설계에 많은 어려움이 따른다. 그러므로 일반적으로 2-채널 QMF(Quadrature Mirror Filter)뱅크를 설계하여 이를 다단으로 종속 접속하는 2진 트리구조 필터뱅크가 많이 이용된다. 2-채널 QMF뱅크 구조는 그림 3과 같다.

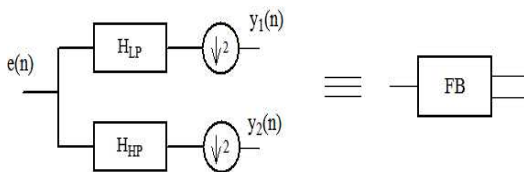


그림 3. QMF 뱅크
Fig. 3. QMF bank

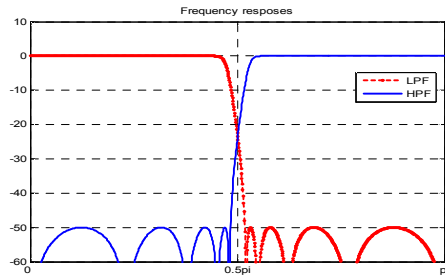
그림 3의 QMF뱅크는 저역통과필터 H_{LP} , 고역통과필터 H_{HP} , 데시메이터(decimator) $\downarrow 2$ 로 구성된다.

QMF뱅크 입력 $e(n)$ 과 출력 $y_1(n)$, $y_2(n)$ 과의 z -변환 관계는 다음과 같다[1].

$$Y_1(z) = \frac{1}{2}[E(z^{1/2})H_{LP}(z^{1/2}) + [E(-z^{1/2})H_{LP}(-z^{1/2})]]$$

$$Y_2(z) = \frac{1}{2}[E(z^{1/2})H_{HP}(z^{1/2}) + [E(-z^{1/2})H_{HP}(-z^{1/2})]] \quad (2)$$

그리고 일반적으로 $H_{HP}(z) = H_{LP}(-z)$ 의 관계를 가진다. QMF뱅크는 저주파대역과 고주파대역간의 스펙트럼 누설이 작아야 하므로 저지대역 감쇄가 커야하고, 다단으로 연결하여 필터뱅크 시스템을 구성할 경우 지연이 작게 설계하여야한다. 이러한 조건을 만족하는 13차의 타원형(elliptic) IIR(Infinite Impulse Response) 필터로 설계한 H_{LP} , H_{HP} 의 주파수 특성은 그림 4와 같다.



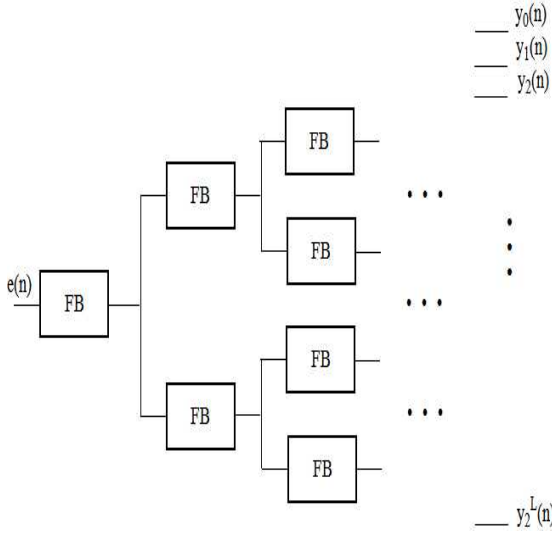


그림 5. 2진 트리구조 필터뱅크 시스템
Fig. 5. Binary tree-structured filter bank system

그림 5의 필터뱅크 시스템에서 입력 $e(n)$ 과 출력 $y_i(n)$ ($i = 1, 2, \dots, 2^L$)과의 z -변환 일부는 $L=3$ 일 경우 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_0(z) &= H_{LP}(z)H_{LP}(z^2)H_{LP}(z^4)E(z) \\ Y_1(z) &= H_{LP}(z)H_{LP}(z^2)H_{HP}(z^4)E(z) \end{aligned} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션

진동신호 분석기는 그림 2와 그림 5를 중속 접속하여 실현하며, 그림 2의 적응 예측기는 79차의 FIR(Finite Impulse Response)필터를 사용하며 적응알고리즘으로 NLMS를 이용한다. 그리고 그림 5의 FB는 특성이 그림 4와 같은 QMF뱅크이다. 진동신호분석시스템의 성능 검증은 공업용 팬에서 발생하는 음향신호와 그림6과 같은 볼베어링의 내륜(inner raceway), 외륜(outer raceway), 볼(ball)에 결함이 있는 진동신호에 대해 수행하였다. 베어링에서 발생하는 진동신호는 KAIST 소음제어 연구실에서 제공받아 사용하였다.

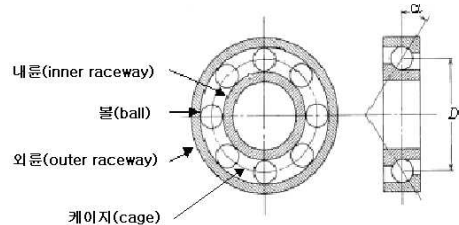


그림 6. 볼 베어링 구조
Fig. 6. The structure of a ball bearing.

3.1. 팬에서 발생하는 음향 신호 분석

회전기의 축소 모델을 팬으로 하여, 발생하는 음향신호를 8kHz로 샘플링한 정상신호와 결함신호는 그림 7과 같다.

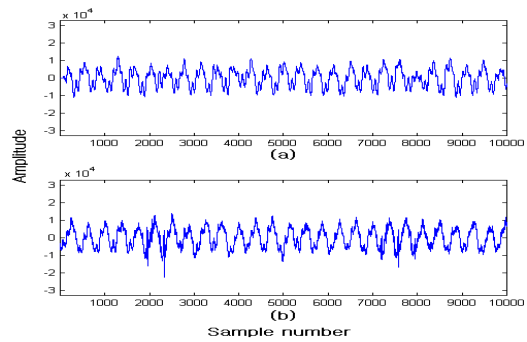


그림 7. 팬에서 발생하는 음향신호
(a)정상신호, (b)결함신호
Fig. 7. Acoustic signals generated from fan
(a)normal signal (b)fault signal

팬에서 발생하는 정상신호와 결함신호를 4단 필터뱅크 시스템에서 32 부대역으로 분해한 결과가 그림 8과 같다.

그림 8의 결과로부터 팬에서 발생하는 신호에는 회전으로 인해 발생하는 주기신호 성분이 저주파 대역에 존재함을 알 수 있다. 그리고 결함으로 인해 발생하는 신호는 주기신호 성분 보다 높은 주파수 대역에 위치함을 알 수 있다.

만약 결함신호가 주기신호성분과 주파수 대역이 겹칠 경우에는 주기신호 성분을 제거하면 음향진동 신호로부터 결함과 연관된 보다 정확한 정보를

얻을 수 있다.

적응예측기와 필터뱅크 시스템을 이용하는 진동 분석시스템에서 팬에서 발생하는 정상신호와 결합신호를 32 부대역으로 분해한 결과는 그림 9와 같다.

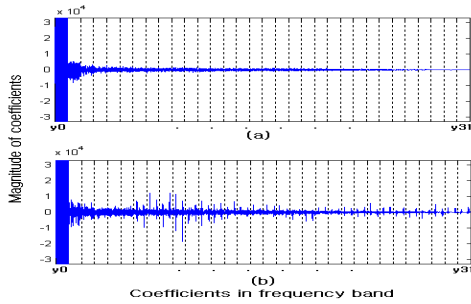


그림 8. 팬에서 발생하는 음향신호를 필터뱅크 시스템에서 분해결과 (a)정상신호, (b)결합신호
Fig. 8. Decomposed results of acoustic signals generated from fan by filter bank system (a) normal signal (b) fault signal

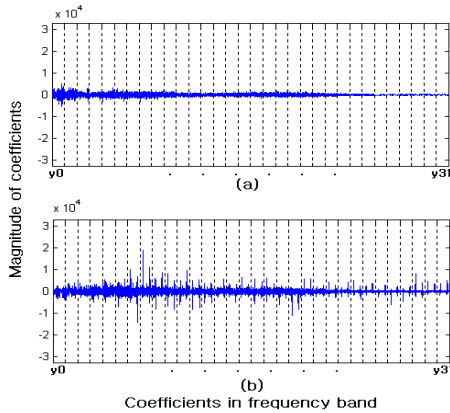


그림 9. 팬에서 발생하는 음향신호를 진동분석시스템에서 분해한 결과 (a)정상신호 (b)결합신호
Fig. 9. Decomposed results of acoustic signals generated from fan by vibration analysis system (a)normal signal (b)fault signal

저주파 대역(y_0, y_1)의 주기신호 성분이 제거된 분해결과인 그림 9로부터 진동신호에 주기적인 신호성분이 포함되면 적응예측기로 전 처리한 후 필터뱅크 시스템으로 신호를 분해하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 그리고 32부밴드로 분해한 결과

로부터 결합신호가 y_6, y_7, y_8 (750Hz - 1kHz)대역에 주로 위치함을 알 수 있다.

3.2. 베어링 발생 진동신호 분석

기계장치 회전에 대부분에서 사용되는 그림 6과 같은볼 베어링에서 발생하는 결합에는 내륜 결합, 외륜 결합, 볼 결합 등이 있다. 따라서 베어링에서 발생하는 진동신호에는 결합신호성분이 포함된다. 한국과학기술원 소음 제어 연구실로부터 제공된 베어링에서 발생하는 정상진동신호와 결합신호성분이 존재하는 3종류의 진동신호는 그림 10과 같다.

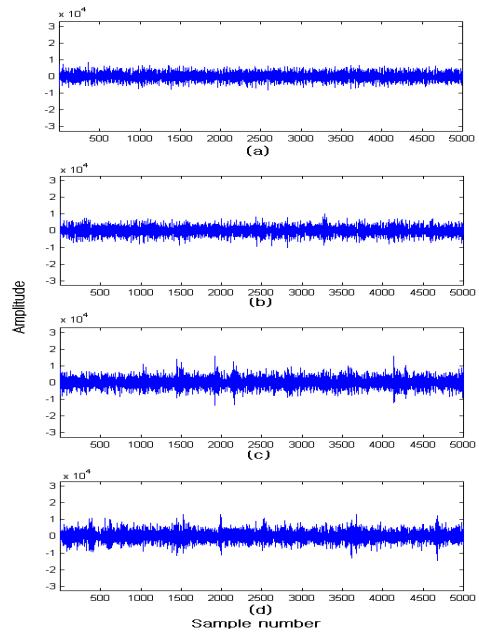


그림 10. 베어링 진동신호 (a)정상신호 (b)내륜 결합신호 (c)외륜 결합신호 (d) 볼 결합신호
Fig.10 Vibration signals in bearing (a) normal signal (b) fault signal of inner raceway (c) fault signal of outer raceway (d) fault signal of ball.

베어링에서 발생하는 정상진동신호와 결합신호성분을 포함하는 3종류의 진동신호에 대하여 필터뱅크 시스템만으로 분해한 결과는 그림 11과 같다.

그리고 적응예측기로 전 처리하여 주기신호성분을 제거한 후 32부대역으로 분해한 결과는 그림 12와 같다. 그림 12의 결과로부터 $y_{10} - y_{18}$ 대역에 분포된 주기신호성분이 제거되었음을 알 수 있다. 그리고 3종류 결함 관련 신호성분은 $y_7 - y_{10}$, $y_{14} - y_{18}$,

$y_{23} - y_{27}$ 대역에 주로 위치함을 알 수 있으며 결함 신호가 위치한 대역의 에너지는 내륜 결함, 외륜 결함, 볼 결함 순으로 커짐을 알 수 있다.

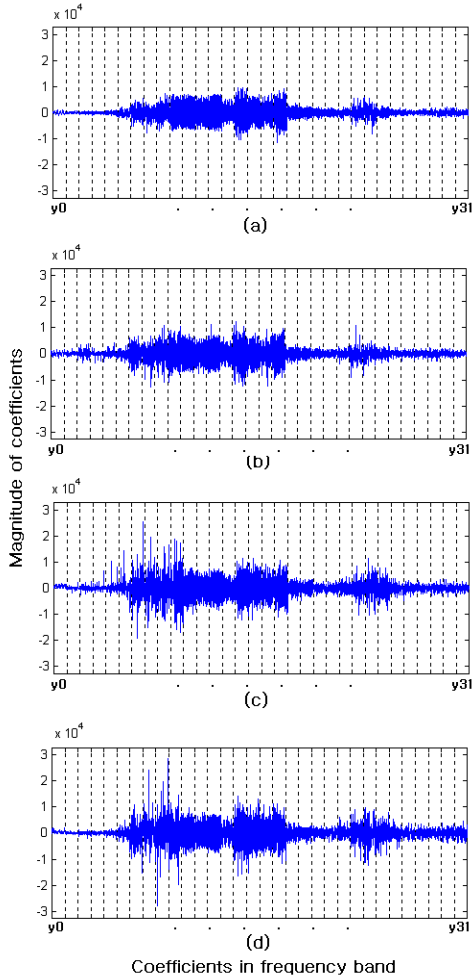


그림 11 볼베어링 진동신호의 필터뱅크 시스템 분해 결과
 (a)정상신호 (b)내륜 결함신호
 (c)외륜 결함신호 (d)볼 결함신호
 Fig.11 The decomposed results of vibration signal in bearing using filter bank system
 (a) normal signal
 (b) fault signal of inner raceway
 (c) fault signal of outer raceway
 (d) fault signal of ball.

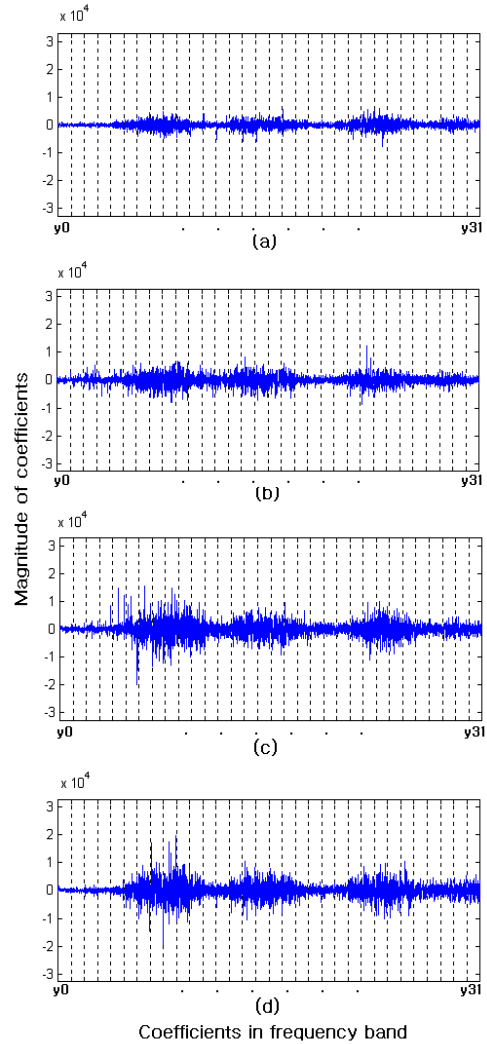


그림 12 볼베어링 진동신호의 필터뱅크 시스템 분해 결과
 (a)정상신호 (b)내륜 결함신호
 (c)외륜 결함신호 (d)볼 결함신호
 Fig.11 The decomposed results of vibration signal in bearing using filter bank system
 (a) normal signal
 (b) fault signal of inner raceway
 (c) fault signal of outer raceway
 (d) fault signal of ball.

그림 11, 그림 12의 처리된 결과로부터 진동신호에 주기적인 성분이 포함되면 적응예측기로 전처리한 후 필터뱅크 시스템을 이용 분해하는 것이 진동신호 분석에 효과적임을 알 수 있다.

4. 결론

회전기에서 발생하는 진동신호에는 시변 주기신호성분과 결합신호 성분이 포함되므로 회전기의 결합관련 정보를 얻기 위해서는 신호처리를 통한 각 신호의 분리 및 분해가 필요하다. 본 논문에서는 적응예측기와 필터뱅크 시스템을 종속접속하여 신호를 분해하는 진동신호 분석 시스템을 제안하였다. 적응예측기를 이용 진동신호를 전처리하여 시변 주기성분을 제거한 후 결합신호성분만을 필터뱅크 시스템을 이용 32부밴드로 분해하여 해석하였다. 팬에서 발생신호와 베어링 진동신호에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 결합에 따라 진동신호가 부밴드 대역에서 다른 특성을 보임을 확인하였다. 이 결과로부터 제안 방법이 회전기 진동신호로부터 결합신호 성분을 추출하는데 더욱 효과적임을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] P.P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Prentice-Hall, 1993.
- [2] He Zhengjia, Zhao Jiyuan, He Yibin and Meng Qingfeng, "Wavelet Transform and Multiresolution Signal Decomposition for Machinery Monitoring and Diagnosis," Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology, vol.1, pp. 724-727, 1996.
- [3] Simon Kaykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, 1996.
- [4] Jeronimo Arenas-Garcia, Anibal R. Figueiras-Vidal, and Ali H. Sayed, "Mean-square performance of a convex combination two adaptive filters," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 54, no. 3, pp. 1078-1090, Mar. 2006.
- [5] S.K. Lee and P.R. White, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery using Two-stage Adaptive Line Enhancer," IEE Colloquium on Modeling and Signal Processing for Fault Diagnosis, vol.1, pp. 6/1 -6/6, 1996.
- [6] Y.H.Gu and M.H.J.Bollen, "Time-Frequency and Time-Scale Domain analysis of Voltage Disturbances," IEEE Trans. Power Del., vol.15, no.4, pp.1279-1284, Oct. 2000.
- [7] H.H.Chang, K-L Lian, Y-C Su, and Wei-Jen Lee, "Power-Spectrum-Based Wavelet Transform for Nonintrusive Demand Monitoring and Load Identification," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol.50, no.3, pp.2081-2089, Mar. 2014.
- [8] Sangwook Shon, A.J.Allen, H.H.Bae, and Surya Santoso, "Singular Point Detection of Time-Varying Power Event using Filter Banks and Adaptive Filter," Proc. of 2012 IEEE PES General Meeting, vol.1, pp.1-7, July 2012.
- [9] Kiseob Hong, Daesung Kim, Geuntaek Ryu, H.D. Bae, "Implementation of Vibrating Signal Analyzer with ALE-Tree Structured Filter Bank," J. of Ind. and Tech. Institute, Chungbuk National Univ., vol.15, no.1, pp.97-106, June 2001.
- [10] Jaejun Yun, Jeongkyu Lee, Sangwook Sohn, H.D.Bae, "Power Quality Disturbances Detection Technique using Filter Bank and Adaptive Filters," The Trans. of The Korean Institute of Electrical Eng., vol.61, no.1, pp.162-167, Jan. 2012.

저자약력

배 현 덕(Hyeon-Deok Bae)

[중심회원]



- 1977년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1980년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전기공학부 교수

<관심분야>

적응신호처리, 멀티레이트
신호처리, 전력품질 신호처리