

# 잡음환경에서 구름 볼 베어링의 결함검출을 위한 ALE의 적용

김영태\*, 최만용<sup>+</sup>, 김기복<sup>+</sup>, 박해원<sup>+</sup>, 박정학<sup>+</sup>, 김종억<sup>++</sup>, 류준<sup>+++</sup>

## Application of ALE for detection of rolling ball bearing defects in noisy environment

Young-Tae Kim\*, Man-Yong Choi<sup>+</sup>, Ki-Bok Kim<sup>+</sup>, Hae-Won Park<sup>+</sup>, Jeong-Hak Park<sup>+</sup>, Jong-Ock Kim<sup>++</sup>, Jun Lyou<sup>+++</sup>

### Abstract

It is very important to detect the bearing defects in rotating machinery since the critical failure of bearing cause a machinery shutdown. However it is difficult to detect the vibration signal resulting from the initial defects of bearing because of the high level of broadband noise. A signal processing technique, called the adaptive line enhancer(ALE) as one of adaptive filter, is studied in this work. This technique is to eliminate broadband noise without a prior knowledge of the noise and signal characteristics. Also we propose the optimal methods for selecting the three main ALE parameters such as correlation length, filter order and adaptation constant used in the adaptative process. Vibration signals for three abnormal bearings, including inner and outer raceways and ball defects, were acquired from Anderson(angular derivative of radius on)meter. The experimental results showed that the proposed technique can reliably detect the bearing defective signals masked by broadband noise.

**Key Words :** Bearing defect(베어링 결함), Broadband noise(광대역 잡음), ALE(Adaptive line enhancer), Adaptive filter(적응필터), Correlation length(상관길이), Filter order(필터차수), Adaptation constant(적응상수)

## 1. 서론

최근 산업이 발전함에 따라 회전기계는 수요증가와 더불어 대형화, 고속화, 경량화, 정밀화 등이 되어 가고 있으며

이에 따라 회전기계의 고장 및 파손의 가능성이 더욱 증대되고 있다. 베어링은 회전기계의 성능과 품질에 결정적인 영향을 미치는 구성요소이다. 베어링의 초기결함 및 퇴화현상이 사전에 발견되지 않으면 회전기계의 돌발적인

\* 주저자, 한국표준과학연구원 환경안전제측센터 (rckyt1@kriss.re.kr)

주소: 305-340 대전시 유성구 도룡동 1

+ 한국표준과학연구원 환경안전제측센터

++ FAG Bearing Korea(주) 연구소

+++ 충남대학교 전자공학과

고장 또는 파손으로 이어질 수가 있다. 이러한 베어링의 초기결함을 검출하기 위한 가장 보편적인 방법으로 많이 사용되는 방법은 회전기계 운전 시 나타나는 베어링 진동신호의 특징적인 패턴을 검출하는 것이다. 진동신호의 특징적인 패턴을 진단하기 위한 방법으로 시간영역, 주파수영역, 시간-주파수영역, 캡스트럼(Cepstrum)영역에서 분석하는 방법 등이 이용되고 있다. 그러나 이러한 진단기술들은 S/N 비가 비교적 높을 때만 분석이 가능하다. 특히 베어링의 초기결함과 같이 결함이 작은 경우에는 결함으로 발생하는 진동 에너지가 다른 부위의 진동 에너지에 비해 미소하기 때문에 결함으로 발생하는 특징적인 패턴을 심한 잡음환경에서 추출해 내는 신호처리 과정이 결함검출하기 이전에 선행되어야 한다.

베어링 결함검출 이전의 동기신호평균(synchronous signal averaging)법<sup>(1)</sup>, 무빙 윈도우(moving window)<sup>(2)</sup>, 고주파 공진(high-frequency resonance)법<sup>(3)</sup>, 웨이블릿 변환(wavelet transform)<sup>(4)</sup> 등을 이용한 기존의 신호처리 기술은 잡음성분과 신호성분의 사전지식을 알아야 하는 제약이 따르고 특히 신호성분과 잡음성분의 특성이 시간에 따라 변하는 경우 효율적이지 못하다. 그 반면 적응 필터링 기술은 필터가 자동적으로 필터계수를 조절하기 때문에 필터 설계 시 잡음성분과 신호성분의 사전지식을 거의 필요로 하지 않는 장점이 있다. 적응 필터링 기술은 음성과 통신 신호처리 등 다양한 응용분야에서 잡음을 제거하기 위해 많이 이용되고 있다<sup>(5,6)</sup>. Chaturvedi<sup>(7)</sup>는 적응 잡음 제거기(adaptive noise canceller: ANC)를 회전기계의 베어링 결함검출을 하는데 이용하였다. 일반적으로 ANC는 신호성분과 잡음성분의 합으로 이루어진 주 입력(primary input)과 또 하나의 잡음으로 이루어진 기준입력(reference input)을 필요로 한다. 여기서 주 입력의 잡음성분으로부터 신호성분을 분리하기 위해선 기준입력은 주 입력의 신호성분과 상관을 갖지 않고(uncorrelated) 주 입력의 잡음성분과는 상관(correlated)을 갖아야 하며 통계적으로 독립(statistically independent)인 잡음의 측정을 필요로 한다. 그러나 광대역 랜덤잡음은 매 측정 때마다 특성이 상이하게 변하기 때문에 기준입력의 잡음을 완전하게 위 특성들을 갖도록 주 입력과 기준입력 측정을 위한 두 개의 센서 위치를 선정하는데 많은 어려움이 있다. ALE는 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로 단지 한 개의 센서로 측정된 입력신호를 주 입력으로 하고 기준입력은 주 입력신호를 고정된 샘플로 지연시켜 얻을 수가 있다. Kim 등<sup>(8)</sup>은 회전과 왕복기계의 고장에서 발생하는 임펄스 신호를 음색잡음(tonal noise)과 광대역 잡음(broadband noise)환경에서 검출하기 위해 두 개의 ALE를 직렬로 연결

한 2단(two-stage) ALE를 제안하였다.

본 연구에서는 베어링 생산 공정의 양산단계에 있어서 결함검출 이전의 신호처리 과정으로 베어링 진동신호의 측정 과정에서 생기는 광대역 랜덤잡음 제거하기 위해서 ALE를 이용하여 그 유용성을 검토하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 베어링 특성주파수

일반적으로 구름 볼 베어링은 내륜과 외륜이라 부르는 두 개의 링과 전동체인 볼과 케이지로 구성되어 있다. 베어링의 볼은 내·외륜과 접촉각을 갖고 서로 접촉되어 있으며 베어링의 회전 시 볼 서로 간의 접촉으로부터 보호하기 위해 볼은 케이지 속에 있게 된다. Fig. 1은 구름 볼 베어링의 기하학적인 구조를 나타낸다. 베어링의 내·외륜 또는 볼에 결함이 존재할 때 축의 회전속도로 베어링의 내륜이 회전운동함에 따라 내·외륜 또는 볼이 결함부와 접촉하게 되어 주기적인 충격으로 정지되어 있는 외륜을 가진시킨다. 결함에 의한 이러한 충격신호의 기본 주파수는 베어링의 회전속도( $F_S$ )와 기하학적인 치수로부터 식 (1) ~ (4)와 같이 유도된다<sup>(9)</sup>.

기본 케이지 주파수(Fundamental cage frequency) :

$$F_C = \frac{1}{2} F_S \left( 1 - \frac{D_b \cos \alpha}{D_p} \right) \quad (1)$$

볼 통과 내륜 주파수(Ball pass inner raceway frequency) :

$$F_{BFI} = \frac{N_B}{2} F_S \left( 1 + \frac{D_b \cos \alpha}{D_p} \right) \quad (2)$$

볼 통과 외륜 주파수(Ball pass outer raceway frequency) :

$$F_{BFO} = \frac{N_B}{2} F_S \left( 1 - \frac{D_b \cos \alpha}{D_p} \right) \quad (3)$$

볼 회전 주파수(Ball rotational frequency) :

$$F_B = \frac{D_p}{2D_b} F_S \left( 1 - \frac{D_b^2 \cos^2 \alpha}{D_p^2} \right) \quad (4)$$

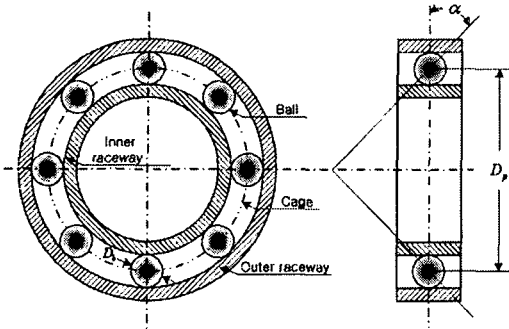


Fig. 1 Structure of rolling ball bearing

Table 1 Specification of test rolling ball bearing

Specification	Size
Number of balls(e.a): $N_B$	8
Pitch diameter(mm): $D_p$	25.5
Ball diameter(mm): $D_b$	5.95
Contact angle(degree): $\alpha$	0

## 2.2 ALE의 원리와 파라미터 설정

Fig. 2는 ALE의 구조를 나타내고 있다. 이 적응필터는 계산 구조가 간단하고 수렴특성이 좋은 최대 경사(steepest descent)법을 기반으로 한 Widrow-Hoff의 LMS(least mean square) 알고리즘의 적응상수를 입력신호의 전력으로 정규화한 NLMS(normalized least mean square) 알고리즘을 이용한다. 이 필터는 베어링의 결합신호  $s(k)$ , 랜덤잡음  $n(k)$ 로 구성되어 있는 주 입력신호  $x(k)$ 와 주 입력신호를 고정된 샘플수  $m$ 으로 지연시켜 얻은 기준 입력신호  $x(k-m)$ 의 차인 오차  $e(k)$ 의 평균자승오차(mean square error)  $E[e^2(k)]$ 가 최소가 되도록 필터계수  $u(k)$ 를 식 (6) ~ (8)의 알고리즘에 의해 자동으로 갱신한다<sup>(10)</sup>.

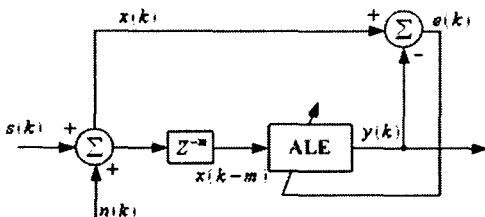


Fig. 2 Structure of ALE

$$x(k) = s(k) + n(k) \quad (5)$$

$$y(k) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(k-m-i) \quad (6)$$

$$e(k) = x(k) - y(k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u(k+1) &= w_i(k) + 2\mu_n e(k)x(k-m-i) \\ &= w_i(k) + \frac{2\mu e(k)x(k-m-i)}{L\sigma_x^2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $L$ 은 필터의 길이,  $\mu_n$ 는 적응상수(adaptation constant),  $\mu_n$ 은 정규화 적응상수이고  $\sigma_x^2$ 은 입력신호의 전력이다.

### 2.2.1 적응상수 설정

$\mu_n$ 는 필터의 수렴속도와 안정성을 조절하는 필터 설계자가 지정할 수 있는 상수로서 이 값을 크게 설정하면 필터는 최소 평균오차에 빨리 수렴하게 되지만 발산할 위험이 있고 이 값을 너무 작게 설정하면 안정하게 수렴하지만 수렴속도가 느려지게 되는 상반관계(trade-off)가 있다. 적응필터의 안정된 수렴에 대한 적응상수의 범위는 다음과 같다<sup>(10)</sup>.

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}} \quad (9)$$

여기서  $\lambda_{\max}$ 는 입력신호에 대한 자기상관행렬(auto-correlation)의 가장 큰 고유치(eigenvalue)이다.

### 2.2.2 상관길이 설정

이론적으로 주기신호의 상관길이(correlation length)는 무한대이며 랜덤성분의 상관길이는 아주 짧다. 따라서 ALE의 기준입력에 지연된 입력신호를 제공함으로써 상관길이의 차에 의해 기준입력과 주 입력의 주기적인 결합신호는 상관(correlated)시키고 랜덤잡음은  $E[n(k)n(k-m)] = 0$ 으로 비상관(de-correlated)시킬 수가 있다. 그러나 베어링 결합이 작은 경우에는 결합부분이 충돌해서 나타나는 결합신호가 측정시간 동안 연속적 주기를 갖지 않고 국부적인 주기(local period)를 갖는다. 또한 축의 흔들림(shaft fluctuation) 등으로 인해 결합신호는 준 주기(quasi-period) 신호에 가깝다. 그러므로 사용되는 상관길이 즉, 지연을 너무 길게 설정하면 자기상관은 최후에는 0으로 수렴하게 된다. Fig. 3은 결합신호를 시간영역에서 나타내고 있다. 주 입력의 주기 또는 준

주기를 갖는 결합신호는 상관시키고 주기를 갖지 않는 랜덤 잡음은 비 상관시키기 위해선 상관길이  $m$ 을 최소 상관길이  $(1/\Delta B_m)$ 와 샘플링 주파수 비의 차수로 설정하면 된다<sup>(11)</sup>.

$$m = K_1 \frac{F_{sample}}{\Delta B_m}, \quad K_1 = 1, 2, \dots \quad (10)$$

여기서  $F_{sample}$ 은 샘플링 주파수이다.

### 2.2.3 필터차수 설정

주파수 영역에서 베어링의 결합신호는 베어링의 공진주파수 주위에 각 결합위치에 해당하는 결합 주파수(식 (1) ~ (4)) 간격으로 측파대를 형성한다. 따라서 상관길이를 식 (8)에 따라 설정하면 ALE는 주기적인 결합신호를 추정하게 되어 결국에는 결합 주파수의 고조파를 중심으로 한 comb 필터와 유사한 응답을 하게 된다. 그렇지만 결합신호를 주파수 전 대역에 퍼져 있는 광대역 랜덤잡음으로부터 완전히 분리하기 위해선 결합 주파수를 중심으로 한 ALE의 각 대역통과 폭은 충분히 좁아야 한다. Zeidler 등<sup>(11,12,13)</sup>은 결합 주파수를 중심으로 한 각 대역통과 필터의 주엽 폭(main lobe width)과 필터의 차수에 관계를 식 (6) ~ (8)에 의해 자동으로 갱신하는 필터계수의 정상상태 주파수 응답크기 함수로 다음과 같이 보여주었다.

$$\begin{aligned} |W(f)| &= \left| \frac{SNR}{1+LSNR} \cdot e^{-2\pi(f-f_s)mT} \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{1-e^{-2\pi(f-f_s)LT}}{1-e^{-2\pi(f-f_s)T}} \right| \quad (11) \\ &= \frac{SNR}{1+LSNR} \left| \frac{\sin[\pi(f-f_s)LT]}{\sin[\pi(f-f_s)T]} \right| \end{aligned}$$

여기서  $SNR$ 은 기준입력신호의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio),  $L$ 은 ALE의 필터차수,  $f_s$ 는 베어링의 결합 주파수이고  $T$ 는 샘플링 주기이다. 식 (11)에 0을 대입하여 해를 구하면 Fig. 4와 같이 결합 주파수 중심으로 한 각 통과 주엽 폭  $\Delta B_m$ 을 구할 수가 있다.

$$\Delta B_m = \frac{1}{LT} = \frac{F_{sample}}{L} \quad (12)$$

식 (12)에서 나타나 있는 것처럼 필터차수  $L$ 을 조절함으로써 ALE의 각 통과 주엽 폭  $\Delta B_m$ 을 조절할 수가 있다.

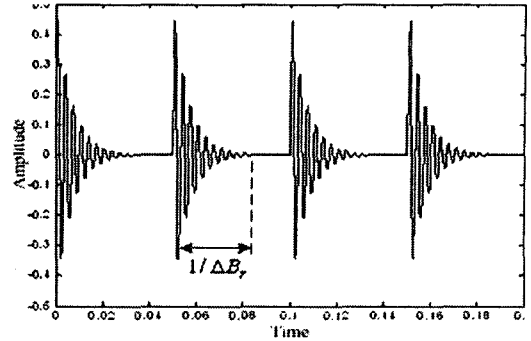


Fig. 3 Bearing defective signal in time domain

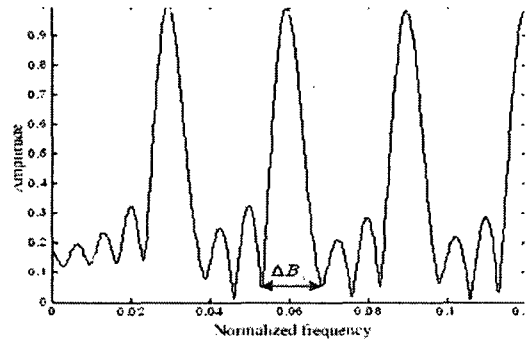


Fig. 4 Frequency response of ALE

## 3. 실험장치 및 방법

본 연구를 수행하기 위한 실험장치가 Fig.5에 나타나 있다. 본 연구에서의 시험 베어링은 깊은 홈 볼 베어링(KBC 6202Z, FAG B.K. Co., Korea)으로서 볼에 점 결합(지름: 100 $\mu$ m, 길이: 60 $\mu$ m)과 내·외륧에 각각 긁힘결합(길이: 5 mm, 길이: 60 $\mu$ m)이 있는 베어링을 대상으로 연구를 수행하였다. 시험에 사용된 구름 볼 베어링의 사양은 Table. 1에 자세히 나타나 있다. 안테나미터의 스피들 축에 베어링의 내륧이 끼워져 1800rpm으로 회전하며 이때 외륧은 고정되어 있다. 압전형 가속도 센서(AP57, AP Tech. Co., U.S.)가 45° 방향으로 외륧과 접촉해 있으며 직접 설계·제작한 10 Hz~10kHz의 버터워스(Butterworth) 4차 대역통과 필터를 내장한 전치 증폭기를 사용하여 가속도 센서로부터의 신호를 전처리했다. 전치 증폭기로부터의 데이터 획득은 고성능 A/D 변환기가 내장되어 있는 데이터 수집 장비인 메모리 하이코디(HIOKI 8855, HIOKI E.E. Co., Japan)를 사용하여 20kHz의 속도로 샘플링 되었고 데이터 획득시간은

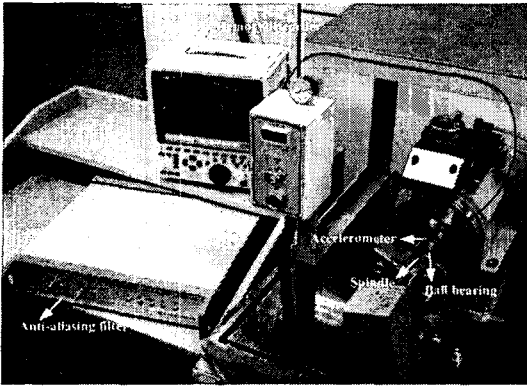


Fig. 5 Experimental set-up

Table 2 Parameters used for ALE

Defect Parameter	Inner raceway	Outer raceway	Ball
Adaptation constant: $\mu$	$0.7/\lambda_{max}$	$0.7/\lambda_{max}$	$0.7/\lambda_{max}$
correlation length: $m$	400 (20msec)	200 (10msec)	200 (10msec)
Filter order: $L$	2000	2000	2000

총 1sec로 하였다. 획득된 데이터는 Matlab(Ver. 6.5, Mathworks Co., U.S.) 프로그램을 이용하여 설계된 디지털 ALE로 베어링 진동신호의 측정과정에서 생기는 광대역 랜덤잡음을 제거하였다. Table 2는 앞의 이론 식 (8), 식 (10) 과 식 (12)를 근거로 베어링의 각 결함위치 별로 설정된 ALE의 파라미터들이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

안테로미터의 스피들 속도를 1800mp으로 고정된 상태에서 볼에 점결함이 있는 베어링과 내·외륜에 각각 흠집결함이 있는 베어링으로부터 얻은 ALE 적용 이전의 진동신호와 이 진동신호로부터 잡음을 제거하기 위한 ALE 적용 후의 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 8에서 보는 바와 같다.

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 외륜에 흠집결함을 갖는 베어링의 경우에 대한 ALE 적용 이전과 이후의 결과로 ALE 적용 이전의 Fig. 6(a)에서는 잡음에 가려 베어링 결함의 주기뿐만 아니라 존재유무조차도 확인하는 것이 가능하지가 않았다.

반면에 ALE 적용 후의 Fig. 6(b)에서는 결함신호의 존재유무와 결함주기 10msec( $1/F_{BFO}$ )의 확인이 가능하였다.

또한 Fig. 7(a)와 (b)는 각각 내륜에 흠집결함을 갖는 베어링의 경우에 대한 ALE의 적용 이전과 적용 후의 결과이고 Fig. 8(a)와 (b)는 각각 볼에 점 결함을 갖는 베어링 경우에 대한 ALE의 적용 이전과 적용 후의 결과이다. ALE의 적용 이전의 Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)에서 검출하지 못했던 결함주기를 ALE의 적용 이후의 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)에서는 각 결함주기에 해당하는  $6.5\text{msec}(1/F_{BFT})$ 와  $7.5\text{msec}(1/F_B)$ 를 검출하는 것이 가능했다.

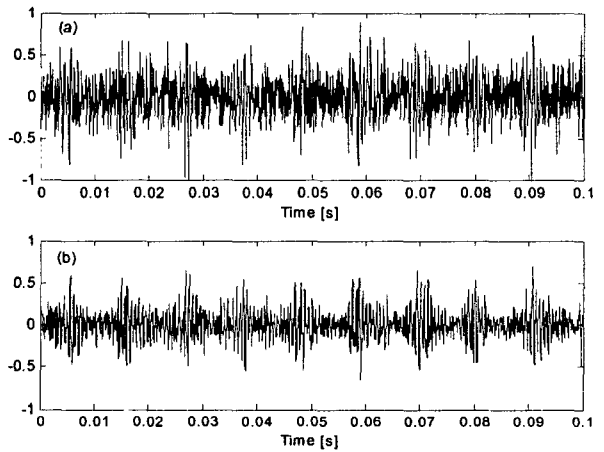


Fig. 6 Outer raceway defect

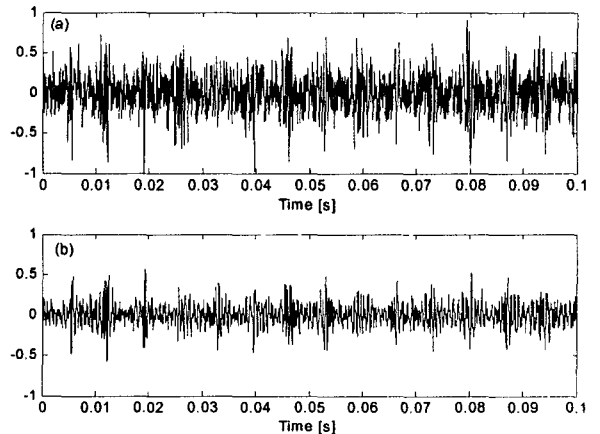


Fig. 7 Inner raceway defect

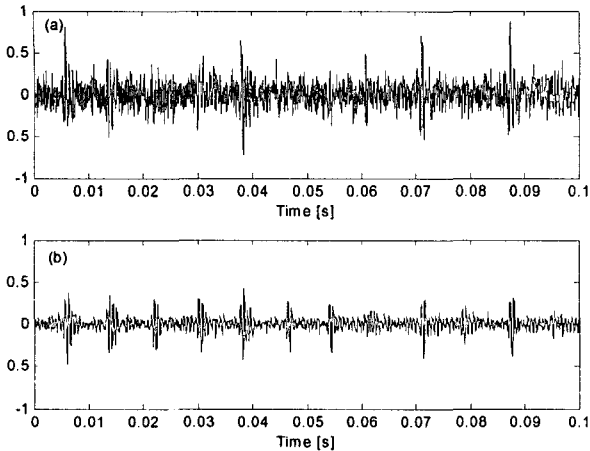


Fig. 8 Ball defect

## 5. 결 론

- (1) 잡음이 심한 환경에서 회전기계의 베어링 결함검출을 하기 위한 종래의 신호처리 기술은 신호처리 이전에 신호와 잡음의 충분한 사전지식을 필요로 하는 제약이 있었다. 특히 신호와 잡음이 시간에 따라 변하는 경우 필터계수가 고정된 종래의 기술은 잡음을 제거하는데 효율적이지 못했다.
- (2) 본 연구에서 제안된 ALE는 단지 한 개의 센서로 측정된 입력신호만을 필요로 하고 필터계수를 자동적으로 조절하기 때문에 신호와 잡음이 시간에 따라 상이하게 변하는 환경에서도 베어링의 작은 결함신호를 검출하는데 매우 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다.
- (3) 실험결과, ALE의 파라미터 설정에 있어서 본 연구에서 제안된 방법과 ALE의 랜덤잡음 제거 성능은 잘 일치함을 확인할 수가 있었다.
- (4) 따라서 ALE를 회전기계의 베어링 이상 진단 및 베어링 생산라인의 자동 진단 시스템에 신호처리 기술로서 실시간으로 적용할 경우 구현이 용이하고 잡음이 심한 환경에서도 작은 결함의 양부판정 및 위치판정까지도 가능하리라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) S. G. Braun and B. B. Steth, 1977, "On the Extraction and Filtering of Signal Acquired from Rotating Machines", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 65, pp.

3750.

- (2) Y. H. Kim, B. D. Lim and W. S. Cheoung, 1991, "Fault Detection in a Ball Bearing System using a Moving Window", *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 5, pp. 461473.
- (3) P. D. McFadden and J. D. Smith, 1984, "Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 96, No.1, pp 6982.
- (4) W. J. Wang and P. D. McFadden, 1996, "Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 192, 927939.
- (5) Treichler, J., 1979, "Transient and Convergent Behavior of the Adaptive Line Enhancer", *IEEE trans on ASSP*, Vol. 27, pp. 5362.
- (6) Treichler, J. and Larimore, M., 1985, "The Tone Capture Properties of CMA-based Interference Suppressors", *IEEE trans on ASSP*, Vol. 33, pp. 946958.
- (7) G. Chaturvedi, 1981, "Adaptive Noise Cancelling and Condition Monitoring", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 76, No. 3, pp. 391405.
- (8) S. K. Lee and P. R. White, 1998, "The Enhancement of Impulsive Noise and Signals for Fault Detection in Rotating and Reciprocating Machinery", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 217, No. 3, pp. 485505.
- (9) T. A. Harris, 1991, *Rolling Bearing Analysis*, Wiley, New York, pp. 950951.
- (10) B. Widrow and S. D. Stearns, 1985, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 102~103.
- (11) J. Antoni and R.B. Randall, 2004, "Unsupervise Noise Cancellation for Vibration Signals: part I - Evaluation of Adaptive Algorithms", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, pp. 89~101.
- (12) F. Wang, Chris K. and Mechefske, 2004, "Frequency properties of an adaptive line enhancer", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, No. 4, pp. 797~812.
- (13) J. R. Zeidler, et al., 1978, "Adaptive Enhancement of Multiple Sinusoids in Uncorrelated Noise", *IEEE trans on ASSP*, Vol. 26, No. 3, pp. 240~254.