

소음 신호의 웨이블릿 변환 및 상호상관 함수를 이용한 고장 검출 및 위치 판별

Fault Detection and Localization using Wavelet Transform and Cross-correlation of Audio Signal

지효근¹, 김정현^{1,✉}
Hyo Geun Ji¹ and Jung Hyun Kim^{1,✉}

¹ 경성대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Kyung sung Univ.)
✉ Corresponding author: rungyi99@naver.com, Tel: +82-51-663-4694

Manuscript received: 2013.11.14 / Revised: 2014.3.19 / Accepted: 2014.3.20

This paper presents a method of fault detection and fault localization from acoustic noise measurements. In order to detect the presence of noise sources wavelet transform is applied to acoustic signal. In addition, a cross correlation based method is proposed to calculate the exact location of the noise allowing the user to quickly diagnose and resolve the source of the noise. The fault detection system is implemented using two microphones and a computer system. Experimental results show that the system can detect faults due to artifacts accidentally inserted during the manufacturing process and estimate the location of the fault with approximately 1 cm precision.

Key Words: Noise (소음), Cross-correlation (상호상관), Wavelet (웨이블릿), Hyperbola equation (쌍곡선방정식), Gaussian interpolation (가우스보간법)

1. 서론

최근 생활용품 중에서 에어컨은 가장 필요항목으로 자리 잡았다. 예전에는 에어컨의 냉방기술만 고려하여 상품을 선택하였지만, 현재는 평균화된 냉방기술 보다는 에어컨의 품질요소인 공기정화기능, 절전기능, 디자인, 그리고 진동 및 소음 문제에 대한 AS 서비스 요건들을 기준으로 에어컨을 선택을 한다. 특히 에어컨의 소음문제는 제품을 사용하는데 있어서 소비자들에게 불쾌감과 스트레스를 준다. 이러한 소음문제는 나아가 정신 건강에 미치는 영향도 무시 하지 못할 만큼 예민한 문제이다.¹

소음은 크게 구조를 통해 전해지는 소음(structure-borne noise)과 공기를 통해 전해지는 소

음 (air-borne noise) 으로 분류할 수 있다. 전자의 경우, 검출 가능한 부분에 설치된 진동센서를 통해서 측정 가능하지만, 후자의 경우 진동센서가 아닌 소음 센서를 통해서만 검출이 되는 경우가 많이 있다.

본 연구에서는 두 가지의 경우를 모두 포함하는 가전제품 중 에어컨 소음을 측정하기 위해 연구를 하였다. 에어컨 소음의 대표적 원인으로 생산 공정에서 조립공차에 의한 마찰음, 회전하는 팬에 이물질 끼임에 의한 소음, 모터 자기음 등이 있다. 특히 에어컨 팬은 차가운 바람이 나오는 부분으로써, 만약 이물질 끼이면 소음으로 바람과 함께 외부로 파생된다. 이러한 소음은 수 많은 기계들이 작동되는 생산 라인에서는 작업자가 테스트 할 때, 직접 검출이 어려우며, 만약 검출을 하

있더라도 소음의 정확한 위치를 판별하기 힘들기 때문에 어디 부분에서 잘못 되었는지 판단하기 어려운 문제점이 있다.

따라서 완성된 제품의 결함 유/무를 진단하는 방법이 필요하며, 그 위치를 파악하는 시스템을 자동화하고 계량화 할 필요가 있다. 먼저 진동센서는 접촉센서로써, 외부소음에 관계 없이 측정이 가능하지만 생산라인에서 잦은 탈 부착으로 인한 센서의 특성 변화를 가져오는 문제점과 센서 변질로 인한 센서의 소모품화를 초래한다. 그러므로 많은 양의 제품을 테스트하기 위한 비 접촉센서를 이용할 필요가 있다.

본 연구에서 사용되는 소음센서는 직접적으로 소음원을 측정하는 장점은 있지만, 생산라인과 같은 외부환경에서 발생하는 소음에 취약한 단점이 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 소음 차폐실을 적용했으며, 웨이블릿 변환을 통해 불량 신호를 필터링 함으로써 외부 소음에 대한 영향을 최소화 했다. 더군다나, 웨이블릿 방법은 극히 짧은 시간 동안 큰 진폭으로 나오는 충격신호인 임펄스 신호를 분석하는데 효과적이다. 즉, 에어컨의 팬 이물 소음은 임펄스 신호이며, 외부 잡음이 혼재된 신호로부터 고장 진단 정보를 추출하기 위해서는 웨이블릿 변환이 가장 적합한 방법이다. 현재 웨이블릿 을 이용한 많은 고장진단 연구가 이루어졌는데, 먼저 Morlet Wavelet 이론 및 고장진단 적용방법,² 펌프의 진동신호의 고장진단을 위한 Wavelet적용,³ 압축기의 AE신호를 Wavelet 을 이용하여 이상상태 진단 기법 제안,⁴ 공구의 파손을 진단하기 위한 Wavelet의 주파수 분석⁵⁻⁶ 등의 연구가 있었다.

그리고 결함소음의 위치를 판별하기 위하여 기존에 연구 된, 3개의 마이크 어레이를 통한 배전선로상에서 발생하는 고장신호의 거리 및 방향판단 알고리즘,⁷ 소음의 위치추적을 위한 빔 형성 기법,⁸ 다중 마이크 어레이를 통한 이동 소음의 위치 추적⁹ 등의 위치 추적 시스템이 연구되었지만, 본 연구는 고정된 구조물에서 2개의 마이크를 이용한 새로운 위치 추적 알고리즘을 제안한다.

이에 따라 본 논문에는 결함 진단을 위한 웨이블릿 변환과 결함 소음의 위치 결정에 쓰이는 상호상관함수 그리고 재구성된 쌍곡선 방정식 알고리즘에 대한 기술을 설명하고, 개발 된 소음 센서의 효과성을 입증하기 위한 다양한 실험 내용을 차례로 소개하고자 한다.

2. 불량 검출 및 위치진단 방법

2.1 Wavelet Transform based Fault detection

에어컨의 결함 신호는 일반적인 신호가 아닌 다양한 임펄스 신호원이다. 이러한 신호를 분석하는 방법 중에는 주파수 함수로 분석하는 FFT방법이 가장 흔한 분석 법이다. 이 분석 법은 제한된 범위에 대한 정보만을 제공하며, 빠른 과도현상이 일어나는 신호에 대해서는 정확한 분석이 어렵다는 문제점이 있다.

다양한 크기의 임펄스가 포함된 신호를 다중 해상도로 분석 가능한 웨이블릿 변환을 사용하면 임펄스 신호에 대한 분석이 가능하다. 웨이블릿 변환은 시간과 주파수 정보를 동시에 보여주는 시간-주파수 기법(time-frequency analysis)의 일종이다. 높은 주파수에서는 세밀한 시간 해상도를 가지며, 낮은 주파수에서는 좋은 주파수 해상도를 가지는 장점이 있으며, 다양한 형태의 신호 처리 기술과 결합하여 신호에 다각적인 분석이 가능하다.

다음으로 현재 사용된 웨이블릿은 Continuous Wavelet Transform (CWT)로써 다음 수식(1)에 의해 정의 된다.

$$CWT_s(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \varphi_0 \cdot \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

$s(t)$ 는 신호이고, a 와 τ 는 각각 스케일과 웨이블릿의 변화이다.

실제로 Fig. 1(a)는 빠르게 변화하는 에어컨 팬 결합소음을 1초동안의 변화된 신호를 측정한 그래프를 보여준다. 그리고 Fig. 1(b)는 이 신호를 웨이블릿 영역에서 재분석한 그래프의 모습을 나타낸다. 여기서 웨이블릿을 통해 에어컨 팬 소음만 검출하기 위해서는 외부소음을 차단해주는 차폐실이 중요하다. 그 이유는 Fig. 2(a)처럼 차폐실에서 결함소음을 웨이블릿 분석을 했을 시, 차폐실이 저주파 영역의 외부 소음만을 통과시켜, 외부 소음은 웨이블릿 평면의 저주파 영역에만 표현되고 차폐실 내부의 제품소음은 고주파 영역에 선명하게 나타나는 현상이 일어난다. Fig. 2(b)처럼 차폐실을 사용하지 않을 때는 외부소음이 웨이블릿 변환의 전 영역에 걸쳐 나타나기 때문에 제품소음과 구분하기 힘들게 된다. 반면 차폐실 이용 시 Fig. 2(a)와 같이 소음신호가 선명해진다. 본 연구는 위의 수식(1)을 토대로 Fig. 2(a)의 결과에 맞게 a 의 스케일 값을 5로 하여 연구를 진행하였다.

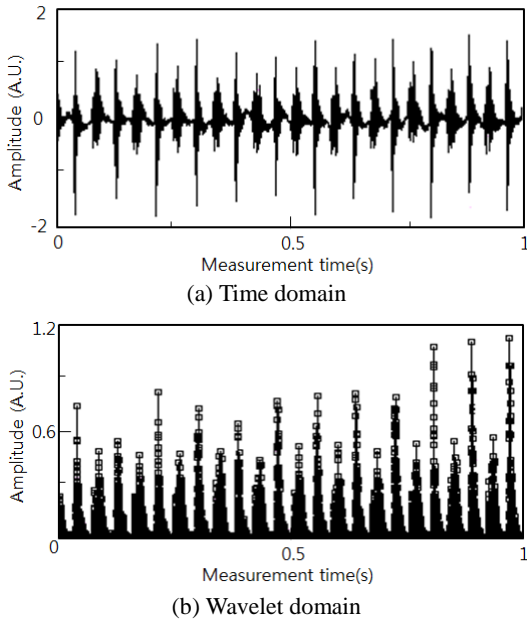


Fig. 1 Analysis for defect noise signal

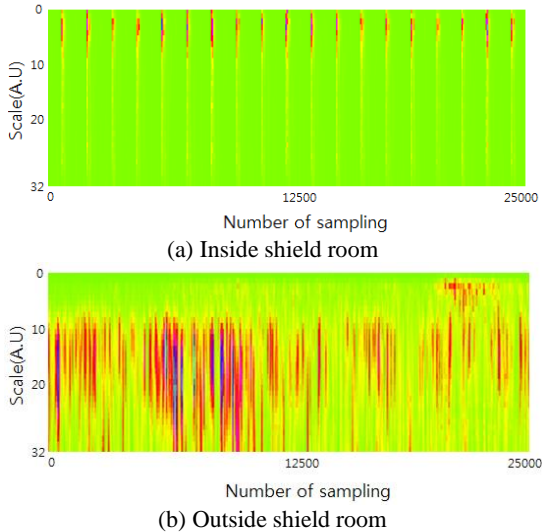


Fig. 2 Noise signal test result

이처럼 차폐실을 활용하면 시끄러운 생산라인에서도 소음원 자체 평가가 가능하므로, 차폐실 안에서 소음을 검출하는 것이 가장 효과적이다.

2.2 Correlation based fault localization

상호상관함수는 기본 신호를 시간 축과 함께 이동시키면서, 다른 신호와 곱셈을 통해서 최대값

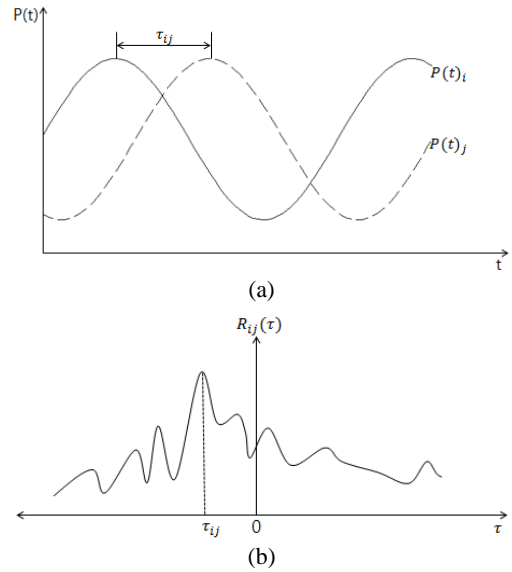


Fig. 3 (a) Time difference of arrival (b) Cross correlation result

이 나왔을 때 샘플링 값을 기준으로 얼마나 이동하였는지를 알아보는 방법이다. 즉 이 값이 Fig. 3에 명시된 τ_{ij} 값이다. 하지만 이 값은 샘플링 인덱스 값이기 때문에 정확한 지연시간 값인 Δt_{ij} 값을 알기 위해서는 수신되는 신호의 샘플링 주기인 Δt 을 곱하여 확인할 수 있다.

$$\Delta t_{ij} = \tau_{ij} \times \Delta t \tag{2}$$

두 마이크로폰으로 수신되는 신호는 에어컨 팬 결합 소음 발생의 위치에 따라 시간차를 가지고 입력된다. 위에서 말한 τ_{ij} 값을 알기 위해서는, 먼저 Wavelet을 통해 분석한 두 마이크로폰 신호를 가지고 상호상관함수를 통해 결과 값을 얻을 수 있다. 아래 식은 본 연구에 사용된 상호상관함의 기본 원리 식이다.

$$P_{ij}(\Delta n_{ij}) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n P_i(n) \cdot P_j(n + \Delta n_{ij}) \tag{3}$$

n 은 두 신호의 공통적인 샘플링 데이터 갯수이다. 여기서 구해지는 $\Delta n_{ij}(\tau_{ij})$ 값에 샘플링 주기를 곱하여 원하는 도달지연시간 결과 값을 얻을 수 있다.

2.3 Determining position using two microphones

쌍곡선이란 두 정점으로부터의 거리의 차이가 일정한 점들의 집합이다. 소음원으로부터 두 정점

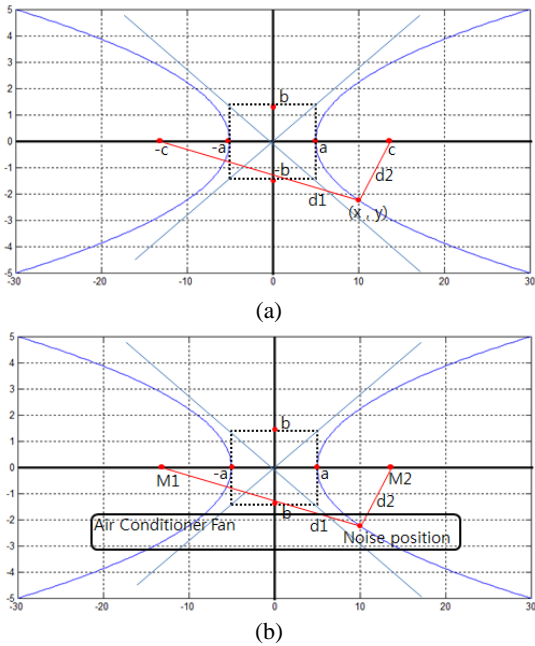


Fig. 4 (a) Hyperbola equation where c and -c are the foci, (b) Hyperbola equation imposed on schematic of air-conditioner and microphone position M1, M2

(마이크)에 도달하는 지연 시간을 얻게 되면, 두 마이크로부터의 거리 차이를 알게 되고, 소음원의 위치가 놓이게 되는 쌍곡선이 결정된다. 이러한 원리에 기반해 소음원의 위치를 계산할 수 있다. 쌍곡선-c 및 c 위치 기준으로, d1과 d2의 길이로 생성된 좌표는 어느 쌍곡선이나 2a로 동일한 값으로 정의된다는 원리를 기반으로 가지고 재구성된다. (d1 - d2 = 2a). 즉 두 마이크를 사용하여 소음의 위치를 결정하는 데 사용할 수 있다. 그리고 이 원칙을 이용하여, 에어컨 팬에서 발생하는 결합 소음의 위치를 찾을 수 있다.

Fig. 4(a)는 쌍곡선 방정식의 기본 그래프로써 그 원리를 얻을 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)의 쌍곡선 방정식의 원리를 이용하여 다시 재구성된 마이크와 에어컨 팬 관계에서 만든 그래프이다. 또한 그래프의 원점이 에어컨 팬의 중심이 되므로 변수 -x 와 x 축 값으로 측정된다. Fig. 4(a)에 따라 -c 및 c는 첫 번째 마이크와 두 번째 마이크의 위치이며 에어컨 팬 좌표의 소음의 위치는 d1과 d2에 의해 생성된다. 소음이 발생 좌표의 x 축으로만 이동하고, y 축 좌표 값은 마이크와 에어컨 팬 사이의 거리이다. 즉, 방음 상자 안에서

최적화 된 거리의 값은 아는 값으로 설정되어 있다. 또한 두 마이크를 사용하여 위의 이론 방정식에 따라 위치를 찾을 수 있다.

쌍곡선 방정식 특성상 아래의 기본 식이 유도된다.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{4}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 \tag{5}$$

y = 마이크와 에어컨 팬까지의 거리. 그리고 d1, d2의 관계에서 유도되는 식은,

$$d_1 - d_2 = 340\Delta t > 0 \tag{6}$$

음파의 속도(c)=340m/s, Δt = 도달지연 값. 위의 식을 풀면,

$$\begin{aligned} d_1 - d_2 &= c + a - (c - a) \\ a &= 170\Delta t \end{aligned} \tag{7}$$

또한 -c 에서 c까지의 거리를L 이라고 하면, (L: 두 개의 마이크 사이의 거리)

$$\begin{aligned} L &= 2 \times c = 2c \\ c &= \frac{L}{2} \end{aligned} \tag{8}$$

식(5), (7), (8)을 식(4)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{(170\Delta t)^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} &= 1 \\ \frac{x^2}{(170\Delta t)^2} - \frac{y^2}{\frac{L^2}{4} - (170\Delta t)^2} &= 1 \end{aligned} \tag{9}$$

식(9)의 소음위치 x 값으로 정리하면,

$$x = \sqrt{\frac{y^2}{\frac{L^2}{4} - (170\Delta t)^2} + 1} \times 170\Delta t \tag{10}$$

2.4 Gaussian Interpolation

Gaussian interpolation은 상호상관 함수의 결과를 더 정확하게 얻기 위해 본 연구에 사용된다. 즉, 상호상관함수 결과 신호에 봉투함수를 생성한 뒤 Gaussian interpolation 방법을 사용하여 샘플링 최대값 주위에 가우스 분포를 가정해서 정확한 최대값 피크를 결정하는 방법을 사용한다. 즉, 이 방법은 상호상관의 함수 결과에 해상도를 높여서 분석하

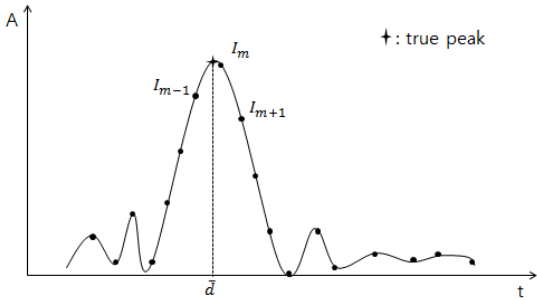


Fig. 5 Gaussian interpolation principle. Maxima occurs at \bar{d}

는 방법이다. 이 방법을 통해 정수로 된 결과 값이 아닌 소수점으로 된 정확한 상호상관함수의 결과 값을 얻을 수 있다.

그러므로 Gaussian interpolation 방법은 Fig. 5를 통해 설명한다. Gaussian interpolation 신호의 최대값 피크인 I_m 과 최대값 이전 피크인 I_{m-1} 그리고 최대값 다음 피크인 I_{m+1} 을 이용한다. 따라서 구하고자 하는 정수 값이 아닌 정확한 피크 값인 \bar{d} 값은 $(d_m, I_m), (d_{m-1}, I_{m-1}), (d_{m+1}, I_{m+1})$ 이 좌표 값을 이용하여 아래 식으로 정리 된다.

$$a = \frac{(\ln I_m - \ln I_{m+1})(d_m^2 - d_{m-1}^2)}{2\Delta d \{(\ln I_m - \ln I_{m-1}) + (\ln I_m - \ln I_{m+1})\}} \quad (11)$$

$$b = \frac{(\ln I_m - \ln I_{m-1})(d_m^2 - d_{m+1}^2)}{2\Delta d \{(\ln I_m - \ln I_{m-1}) + (\ln I_m - \ln I_{m+1})\}} \quad (12)$$

따라서 임의로 치환된 변수 a, b를 통해 정확한 최대값 피크인 \bar{d} 값을 구할 수 있다

$$\bar{d} = a - b \quad (13)$$

이 Gaussian interpolation 방법을 이용하여 얻은 결과 값인 \bar{d} 값을 사용하여 위치 판별에 중요한 변수 값을 얻을 수 있다.

3. 실험 결과

3.1 Experiment Setup

본 논문에 사용되는 에어컨의 모습은 Fig. 6에 있으며, 자체적으로 제작한 차폐실 안에서 실험을 진행하였다. 소음의 위치를 판별하기 위해서는 두 개의 마이크간의 거리 그리고 마이크와 에어컨 팬 사이의 거리가 중요하다. 따라서 본 논문에서는 여러 번의 반복 실험을 통해 최적화 된 위치를 선택

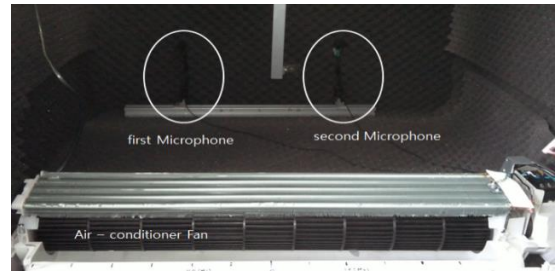


Fig. 6 Air conditioner placed inside shield room where position of two microphones is shown

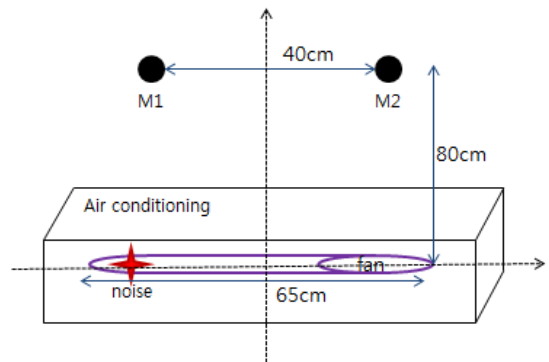


Fig. 7 Experiment schematic diagram. M1 and M2 respectively designate the position of two microphones

정하였다. 설정 값은 Fig. 7에 나타나 있다.

또한 자주 발생하는 에어컨 팬의 이물 소음을 재현하기 위하여 생산라인에서 직접 쓰는 테이프 조각을 이용하여 테이프가 에어컨 팬에 끼었을 때 발생하는 소음을 이용하여 실험을 하였다. 그리고 팬의 중심에서 테이프 조각을 -x, x축으로 이동 시키면서 소음이 발생하는 거리를 측정하였다.

마지막으로 실제 생산라인에서 발생하는 공장 소음을 녹음해서 스피커를 통해 재현했다. 공장 소음의 레벨은 평균 80dB 정도이다. 하지만 차폐실 안에서는 평균 50dB까지 내려가는 것을 실험을 통해 확인 하였다. 이렇듯 생산라인에서도 차폐실의 효과로 인해 에어컨 결합 소음을 검출 할 수 있는 것을 다음 실험을 통해 보여준다.

3.2 Experiment Results

Fig. 8은 에어컨 팬 전체길이 50cm 따라 소음원을 2.5cm 씩 옮기면서 소음의 위치를 측정할 그래프이다. Fig. 9는 -20cm에서 20cm까지 네 부분으

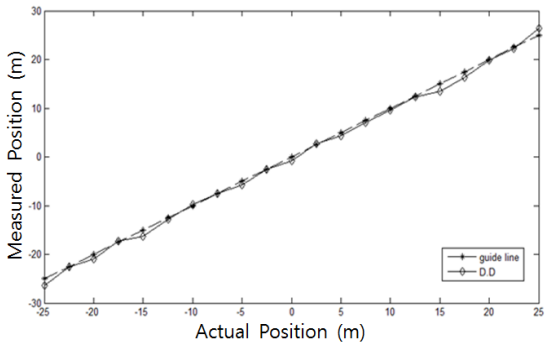
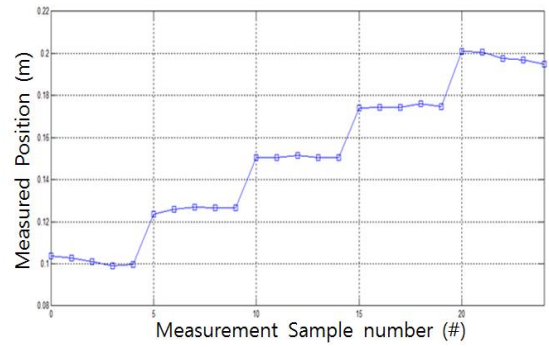
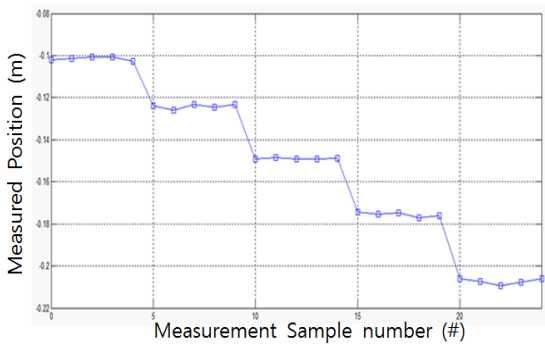


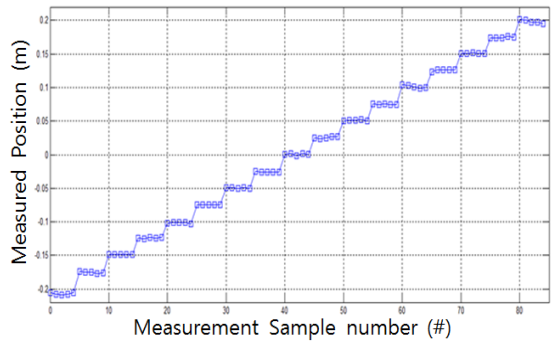
Fig. 8 Measurement of noise source position



(d) 10cm~20cm

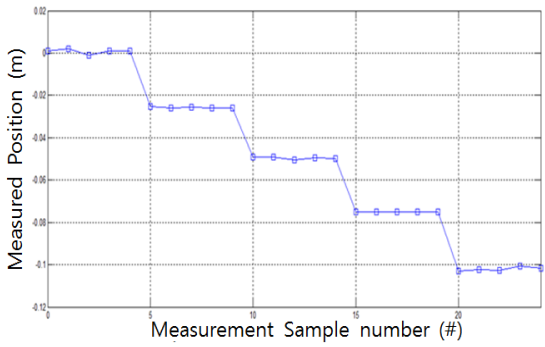


(a) -10cm~-20cm

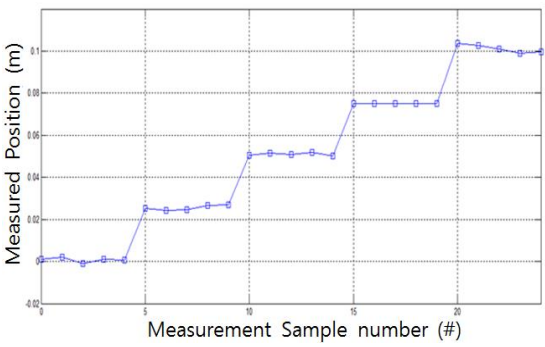


(e) All parts

Fig. 9 Repeat experiment



(b) 0~-10cm



(c) 0~10cm

Table 1 Each parts, average and standard deviation

Position	Average(m)	Standard deviation
20cm (0.2m)	0.200	0.00639
17.5cm(0.175m)	0.175	0.00123
15cm (0.15m)	0.150	0.00481
12.5cm (0.125m)	0.126	0.00191
10cm (0.1m)	0.101	0.00198
7.5cm (0.075m)	0.0750	0.0000526
5cm (0.05m)	0.0513	0.000605
2.5cm (0.025m)	0.0255	0.00122
0	0.000789	0.001142735
-2.5cm(-0.025m)	-0.0257	0.000321
-5cm (-0.05m)	-0.0497	0.000482
-7.5cm(-0.075m)	-0.0750	0.000748
-10cm (-0.1m)	-0.104	0.00228
-12.5cm(-0.125m)	-0.124	0.00104
-15cm (-0.15m)	-0.148	0.000331
-17.5cm(-0.175m)	-0.174	0.00111
-20cm (-0.2m)	-0.207	0.00133

로 나누어 반복적으로 실험한 결과 그래프이다. 각 위치에서 5번씩 실험했으며, Table 1은 반복 실험한 결과 데이터를 정리하여 보여준다. 각 위치 별 평균과 표준편차 값을 확인할 수 있다.

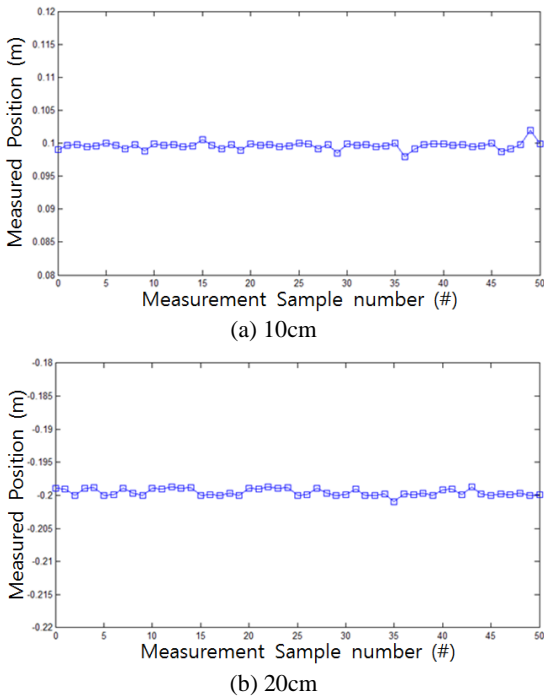


Fig. 10 Repeatability Experiments (50times)

Table 2 Repeat experiment data

	Time(s)	average(m)	Standard deviation
+10cm	50	0.0996	0.00101
-20cm	50	-0.199	0.000627

마지막으로 Fig. 10은 50번 반복 실험한 결과 그래프이며 측정의 반복성을 보여주기 위함이다. Table 2는 +10cm 및 -20cm의 실험 결과를 정리한 것이다. 각 위치의 평균 값과 표준편차 값을 확인할 수 있다. 반복성 실험을 통해 이 시스템의 소음위치 판별이 원활하게 이루어진다는 것을 실험을 통해 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는, 에어컨 팬 이물 결합소음이 발생하는 경우 감지 및 위치 추적을 위한 다양한 알고리즘에 대해 제안하였다. 결합 소음이 발생하였을 때 이를 검출하기 위한 웨이블릿 변환방법과 그 결합 소음의 위치를 찾기 위해서 상호상관함수 및 Gaussian interpolation과 그리고 재구성된 위치계산 알고리즘을 소개 하였다. 따라서 이 연구는 최소한의 마이크를 사용하여 소음 검출 및 위치 추

적 시스템을 제시하였고, 많은 반복성 실험을 통해, 에어컨 팬 결합 소음 및 진단에 있어서 매우 효과적인 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임(No. NRF-2011-0015118).

REFERENCES

- Kim, J. M., "The Health Effects of Industrial Noise," Journal of Korean society of Environmental Engineers, Vol. 29, No. 2, pp. 131-137, 2007.
- Lin, J. and Qu, L., "Feature Extraction Based on Morlet Wavelet and its Application for Mechanical Fault Diagnosis," Journal of Sound and Vibration, Vol. 234, No. 1, pp. 135-148, 2000.
- Park, S. J, Chung, W. S., Lee, S. Y., and Chung, T. J., "Fault Diagnosis of a Pump Using Acoustic and Vibration Signals," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 883-887, 2002.
- Jung, J. H, Lee, G. Y., Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, H. U., and et al., "Identification of Abnormal Compressor using Wavelet Transform," J. Korean Soc. Precis. Eng., No. 11, pp. 361-364, 1997.
- Yang, J. Y., Ha, M. K., Koo, Y., Yoon, M. C., Kwak, J. S., and Jung, J. S., "Detection of tool Failure by Wavelet Transform," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1063-1066, 2002.
- Ha, M. K., Kwak, J. S., Jin, I. T., Kim, B. T., and Yang, J. Y., "Analysis and Denoising of Cutting Force Using Wavelet Transform," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 19, No. 12, pp. 78-85, 2002.
- Seo, Y. S., Ha, H. U., and Lee, J. M., "The Recognition Algorithm of Bad-Insulator using Microphone Array," Proc. of KIIS Spring Conference, Vol. 20, No. 1, pp. 75-78, 2010.
- Kim, K. H. and Kim, Y. H., "Noise Source Localization using Comparison between Candidate Signal and Beam-Former Output in Time Domain," Proc. of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, No. 2, Paper No. 543, 2010.
- Seo, D. H., Jeon, J. H., Park, C. S., and Kim, Y. H.,

“Periodic Impulse Train Source Localization by using Beam-Forming Method in Time Domain,” Proc. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering conference, pp. 492-493, 2009.