

2차원적 음원추적에 관한 연구Ⅲ - 디지털 신호처리를 중심으로 -

문성배*, 전승환**

A Study on 2-Dimensional Sound Source Tracking System Ⅲ
- mainly on digital signal processing -

*Serng-Bae Moon**, *Seung-Hwan Jun***

〈목 차〉	
Abstract	3. 실험방법 및 결과
1. 서론	4. 결론
2. 실험계의 구성	참고문헌

Abstract

Before some experiments were carried out with analog bandpass filter which used for filtering the noise included in sound source signal. And this filter was constituted by condenser, register and operational amplifier. But these elements made the phase characteristics to differentiate in each sensing channel and cause a little of measurement error.

We made new measurement system that was substituted digital filter for the analog filter in order to develop the optimal system which could find the time delay between each sensors with high accuracy.

This paper describes the new system's constitution and the function of each parts. Specially three digital filters were designed and applied to the digital signal processing part. And a series of experiments were carried out with the source's distance 9.53meters and the random bearing interval within the limits of $0^\circ \sim 180^\circ$. As a result, we have recognized that the accuracy of measurements were differentiated by the methods what kind of digital filter were adopted. And we have confirmed the facts that IIR LPF was suitable for sound source's bearing measurement and FIR LPF reduced the range measurement error.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원
** 정회원, 한국해양대학교 운항시스템공학부 교수

1. 서론

선박에는 해무(海霧) 등으로 인해 시정이 제한된 상황에서 자선 및 타선의 존재와 의사를 서로 주고 받을 수 있는 법정 항해장비로 기적(Whistle)이 있다. 그러나, 선박간의 거리, 선교주변의 잡음 또는 항해자의 신체적 차이 등 여러 가지 원인으로 항해자가 상대선박이 발신하는 기적음을 청취하여 안전항해를 위한 일련의 의사결정을 하기에는 어려움이 있다. 이것은 기적음 청취를 오로지 인간의 감각기관에만 의존하고 있기 때문이다.

전 논문^{1),2)}에서는 3개의 Microphone을 이용하여 기적음을 수신 및 신호처리 함으로써, 기적음원의 2차원적 상대위치를 측정하는 알고리즘을 제안하였고, 기적음원의 위치측정 원리와 측정오차의 종류 및 그에 대한 시뮬레이션의 결과를 보고하였다. 또한, 기적음의 도달시간차 측정의 기본적인 원리와 상호상관분석법 및 차분법으로 도달시간차를 연산하는 기법과 신호음원의 상대위치 측정에 관한 기초실험 결과를 보고하였다. 이 기초실험에서는 수신된 신호음에 포함된 잡음(noise)를 제거하는 신호처리로 아날로그 대역통과필터를 이용하였는데, 회로 구성에 있어서 기본적으로 사용되는 콘덴서, 저항 및 OP앰프와 같은 부품의 용량차(容量差)로 인하여 각 신호음 수신 채널의 위상특성이 달라지는 현상이 발생하였다.

본 연구는 위와 같은 아날로그 신호처리에서 발생하는 위상특성과 같은 문제점을 보완함으로써 신호음의 도달시간차를 정확하게 측정할 수 있는 최적의 계측계를 개발하고, 기적음을 발신한 상대선박의 상대적 위치를 자동적으로 측정하는 시스템을 개발하고자 한다.

본 논문에서는 아날로그 필터를 디지털필터로 대체하여 새로이 제작한 시스템의 전체적인 구성 및 시스템 각 부분의 기능과 역할에 대하여 기술하였다. 그리고, 최적의 계측계를 개발하기 위하여 신호음원의 위치를 다양하게 바꾸면서 신호음을 수신하도록 하였고, 여러 가지 FIR(Finite Impulse Response)필터와 IIR(Infinite Impulse Response)

필터로 신호처리 후 신호음원의 상대적 위치를 연산하여 그 정도(精度)를 비교 분석하였다.

2. 실험계의 구성

본 실험에서 구현한 실험계는 크게 신호음 발신부, 수신부, H/W 신호처리부, S/W 신호처리부 및 연산표시부로 나뉘어져 있고, 세부적인 실제측계 및 신호처리계는 Fig.1과 같다.

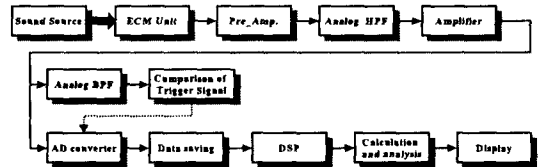


Fig. 1 Diagram of signal processing

2.1 신호음 발신부

실험 여건상 실제 기적음을 이용할 수 없기 때문에, 선박에서 발신되는 기적음과 유사한 형태의 파형이 발진되는 Audio Generator의 신호를 일반적인 개인용 컴퓨터용 스피커에 연결시켜 신호음을 발생시켰다. 그리고, 지면으로부터의 높이는 신호음 수신부인 마이크로폰 센서열의 높이와 거의 같도록 하였다. Fig.2는 설치된 신호음 발신부의 전체적인 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 2 Sound transmitting part

Table 1 Specification of microphone sensor

Directivity	Omnidirectional	Impedence	1.0k Ω
Sensitivity	-44 \pm 6dB/Pa	Max Operation Voltage	10V, DC
Standard Operation Voltage	4.5V, DC	Sensitivity Reduction	Within -3dB at 1.5V
Current Consumption	300 μ A. Max	*Built in Nickel coated POLAR PLATE	
S/N ratio	More than 60dB/Pa		

2.2 신호음 수신부

본 실험에서 사용한 마이크로폰 센서는 Table 1과 같은 특성을 가지는 SKT-440H의 모델을 채택하였다.

이 센서는 ECM(electric condensing mike) Unit 외에 Pre-Amp.로써 전계효과트랜지스터(FET)가 내장되어 있다. 센서에 따라 출력전압이 달라지는 것은 이 FET의 증폭률이 다르게 제작되어 있기 때문이다. 센서의 진폭특성을 파악하기 위하여 3개의 센서를 같은 위치에 배치하고, 신호음은 센서로부터 100cm 전방에 설치하였다. 신호음의 주파수는 100Hz로 하였으며, 동일한 조건에서 10회 연속 측정하여 비교 분석하였다. 그 결과 1번 센서를 기준으로 할 때, 2번 센서는 1번 센서에 비해 약 1.58[dB] 작았고, 3번 센서는 1번 센서에 비해 약 0.83[dB] 작았다. 이것에 대한 보정은 디지털 신호처리 부분에서 하도록 하였다. 3개의 센서는 신호음 발신장치까지의 거리에 비해 크지 않도록 50cm의 간격으로 일직선상에 배열하였고, 이들 센서의 높이는 신호음 발신장치인 스피커의 높이와 같도록 하였다. 센서들은 목재에 고정되도록 하였고,

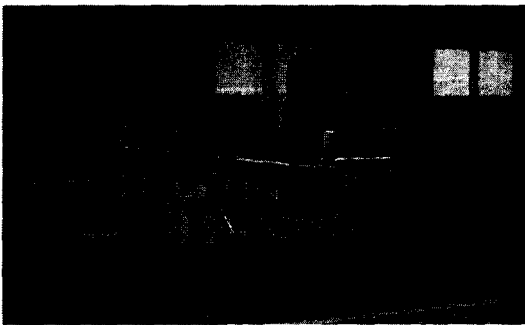


Fig. 3 Sound signal receiving part

이 고정부는 길이가 100cm인 알루미늄 재질의 바(bar)위에 설치하였다. Fig.3은 실제로 제작된 신호음 수신부의 전체적인 모습을 나타낸 것이다.

2.3 하드웨어 신호처리부

본 시스템에서 하드웨어 신호처리부는 아날로그 고역통과필터(HPF), 증폭기, 아날로그 대역통과필터(BPF) 및 ADC(analog-digital converter)로 구성되어 있다. Fig.4는 ADC를 제외한 나머지 하드웨어 신호처리부 회로를 나타낸 것이다. 고역통과필터는 RC형으로 수신부로부터 출력되는 약 1.0[V]의 구동전압 성분을 0[V]에 가깝도록 낮추기 위한 것이다. 그리고, 증폭기는 고역통과필터를 통과한 미세신호를 신호처리에 적당하게 증폭한다. 한편, 아날로그 대역통과필터는 신호음의 유무를 판단함과 동시에 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 동작이 이루어지도록 하는 트리거신호를 위한 것으로써, 증폭기를 통과한 3채널의 신호 중에서 하나를 선택하였다.



Fig. 4 Signal processing circuit

ADC는 컴퓨터를 통한 소프트웨어적인 신호처리를 위해서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 것이다. 본 실험에서는 'NuDaq PCI-9812'를 채택하였고, 변환기의 샘플링 주파수는 1MHz로 설정하였다. 그리고, 3채널 동시 샘플링이 이루어지도록 하였고, 데이터는 신호음이 시작되기 이전부터 획득하여 컴퓨터 임시기억장치에 저장되도록 하였다.

2.4 소프트웨어 신호처리 및 연산표시부

본 시스템에서 소프트웨어적 신호처리부는 데이터의 저장, DSP 및 연산으로 구성하였다. 그리고, 본 실험에서 ADC의 제어, 소프트웨어 신호처리 및 연산표시의 모든 과정을 윈도우용 '비주얼 C++ 6.0'을 이용하여 프로그래밍하였다. 파일로 저장되는 데이터의 각 채널 샘플 수는 32,768개로 약 32.8ms 분량이고, 신호음이 없는 부분의 데이터는 약 10,000개로 약 10ms 정도가 되도록 하였다. 여기서, 신호음이 시작되는 부분의 데이터는 마이크로폰 센서간의 도달시간차를 측정하기 위하여 사용하고, 파형이 안정된 뒷부분의 데이터는 신호의 주기, 신호간의 위상비교 및 신호의 진폭 등과 같은 정보를 파악하기 위해서 이용하였다.

전 논문²⁾의 실험에서는 신호음에 포함된 잡음을 제거하기 위하여 아날로그 필터회로를 이용하였지만, 본 실험에서는 디지털필터를 이용하였다. 그리

고, 연산처리과정에서는 도달시간차의 연산을 위한 신호음의 상호상관분석³⁾ 및 거리와 방위의 연산이 이루어지도록 하였다. 연산된 신호음원의 거리와 상대방위는 여러 가지 형태로 표시될 수 있지만, 본 실험에서는 Fig.5와 같이 컴퓨터의 모니터에 표시되도록 하였고, 이러한 형태는 차후 제작될 하드웨어적인 디스플레이 장치의 기본 모델이라 할 수 있다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 실험방법

본 연구에서 실험은 중간센서로부터 신호 음원까지의 거리를 충분히 크게 하기 위하여 길이가 약 30m, 폭이 약 15m, 높이가 약 5m인 건물의 실내에서 이루어졌다. 거리는 9m 53cm로, 방위는 $10^\circ \pm 5^\circ$ 간격으로 $0^\circ \sim 180^\circ$ 의 범위에서 랜덤하게 설정하였다. 그리고, $180^\circ \sim 360^\circ$ 의 범위는 신호음 수신부의 후면에 있기 때문에 본 실험에서는 고려하지 않았다. 실험은 같은 음원위치에서 15회 측정하여, 음원의 방위 및 거리를 검출하도록 하였다.

한편, 디지털 신호처리부분에서는 다양한 디지털 필터^{4) 5)}를 이용하여 디지털 신호를 필터링하였고, 신호음원의 방위 및 거리를 검출하여 그 정도(程度)를 비교하였다. 첫 번째는 Fig.6과 같이 아날로그 고역통과필터로만 필터링된 신호를 이용하여 위치검출 연산을 하는 경우이고, 두 번째는 Fig.6의 신호를 비재귀형 저역통과필터로 필터링한 후 위치검출 연산을 하는 경우로서, Fig.7은 그 필터

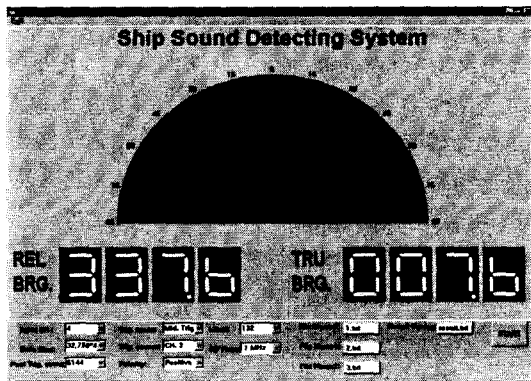


Fig. 5 Display of measurement result

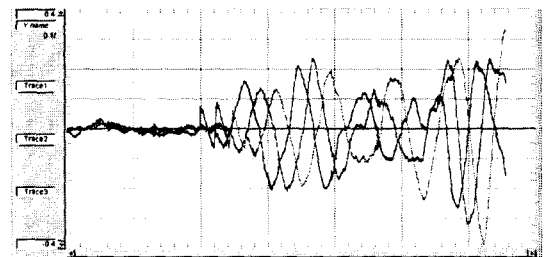


Fig. 6 Filtered signal by analog HPF

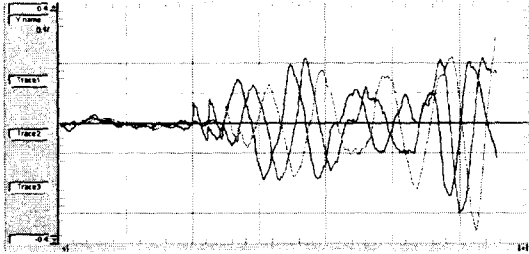


Fig. 7 Filtered signal by FIR LPF

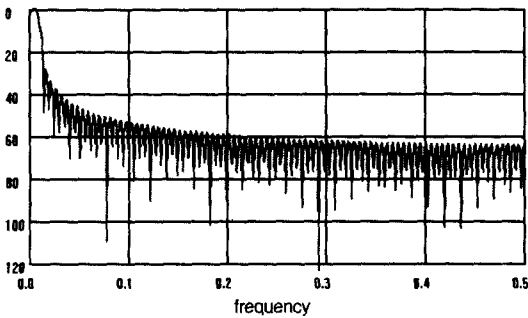


Fig. 8 FIR LPF frequency response

링된 신호의 파형을 나타낸 것이다. 이 비재귀형 저역통과필터는 카이저창(Kaiser window) 함수법을 이용하여 설계되었고, 필터의 차수는 181차이였으며 Fig.8은 이 필터의 주파수응답을 나타낸 것이다. 가로축은 정규화된 주파수를, 세로축은 감쇠율을 나타낸 것이다. 세 번째는 Fig.6의 신호를 재귀형 역체브체프(Inverse-chebyshev) 저역통과필터로 필터링한 경우로, Fig.9는 이 디지털필터로 필터링된 신호를 나타낸 것이다. 또한, Fig.10은 6차 역체브체프 저역통과필터의 주파수응답을 나타낸 것으로서, 가로축은 주파수를 세로축은 감쇠율을 나타낸 것이다. 네 번째는 재귀형 역체브체프 고역통과필터와 비재귀형 저역통과필터로 필터링한 후 위치검출 연산을 하는 경우로서, Fig.11은 이 혼합형 필터로 필터링된 신호를 나타낸 것이다. 그리고, Fig.12는 4차 역체브체프 HPF의 주파수응답을 나타낸 것이다. 여기서, 네 번째의 경우는 Fig.6에서 굵은 박스로 표시한 부분의 파형 즉, 신호음이 시작되기 시작하는 부분의 파형을 그 후에 이어지

는 파형이 안정된 신호보다 상대적으로 증폭하여 위치검출 연산을 하기 위한 것이다. 이 부분은 실제로 신호음이 각 센서에 제일 먼저 수신되는 음파에 해당하는 것으로, 다른 부분에 비해 멀티패스(Multipath)와 같은 영향으로 인한 파형의 왜곡 및 위상변화 등이 가장 적게 발생하는 부분이라 할 수 있다.

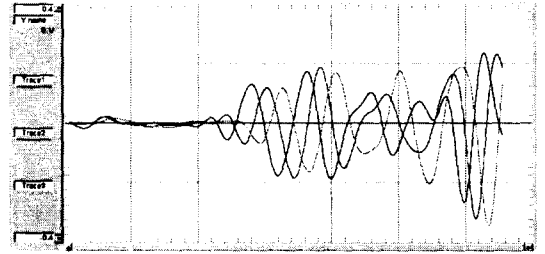


Fig. 9 Filtered signal by IIR LPF

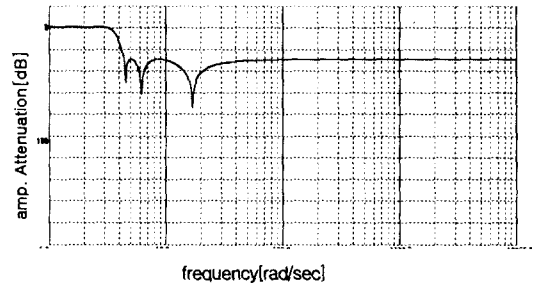


Fig. 10 IIR LPF frequency response

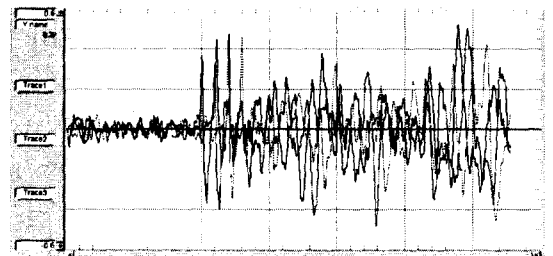


Fig. 11 Filtered signal by IIR HPF and FIR LPF

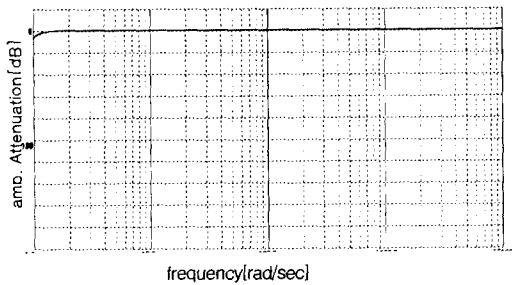
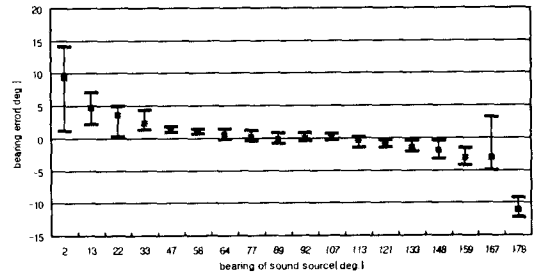


Fig. 12 IIR HPF frequency response

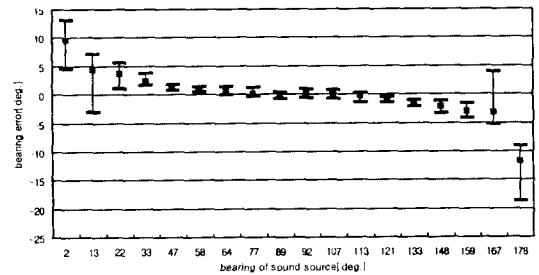
3.2 실험결과

3.2.1 방위계측

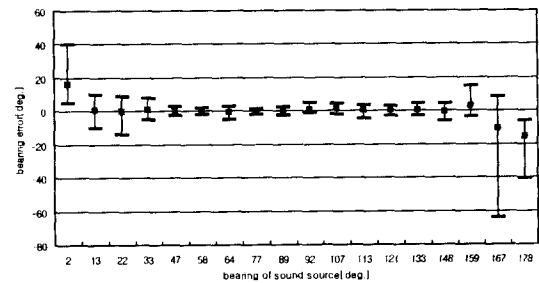
Fig.13은 각각의 필터링 방법에 따라 측정된 방위결과를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 음원의 진방위를 세로축은 방위오차량을 나타낸 것이고, 측정결과로서 측정된 방위의 오차범위 및 그 평균값을 나타내고 있다. 실험결과 방위측정은 앞서 제안한 논문1)-2)에서와 마찬가지로 신호음원이 센서배열선에 접근할 수록 신호처리방법에 상관없이 오차가 증가하는 것을 알 수 있었다. 한편, Fig.13에서 (2)의 경우는 디지털필터링을 하지 않은 (1)의 경우와 유사한 양상을 나타냈고, (3)의 경우는 FIR LPF로 필터링한 (2)의 경우보다 각 측정 방위에서 최대 및 최소오차가 다소 증가하지만, 그 평균오차량은 약간 감소하였다. 그리고, Fig.13에서 (4)의 경우는 IIR HPF와 FIR LPF로 동시에 필터링하여 측정된 결과를 나타낸 것으로 다른 어떠한 경우보다도 측정 정도가 높은 것을 알 수 있었다. Fig.14는 각 필터링 방법으로 측정된 방위의 오차량 범위내에서 측정된 회수를 전체 측정회수에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 가로축은 방위오차량이고, 세로축은 측정된 회수의 비율이다. 신호음원의 방위측정에서는 IIR HPF와 FIR LPF로 필터링하는 방법이 방위오차를 가장 적게하고, 그 다음으로는 IIR LPF로 필터링하는 방법이 측정오차가 작게 검출되었다. 그러나, Fig.6에서 굵은 박스로 표시된 부분과 같은 파형은 신호음압이 작거나 음원까지의 거리가 멀게되면 나타나지 않을 수 있기 때문에 그 사용에는 제약이있을 것으로 생각된다. 따라서, 방위측정에서 신호음의 신호처리 방법으로는



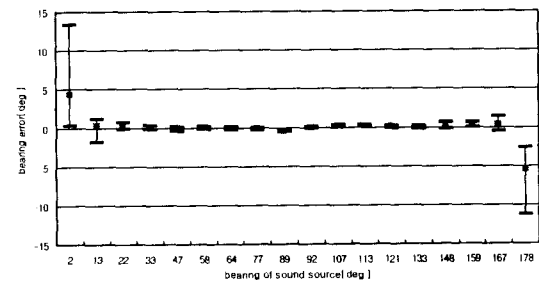
(1) In case of analog HPF



(2) In case of FIR LPF



(3) In case of IIR LPF



(4) In case of IIR HPF and FIR LPF

Fig. 13 Measured bearing error

IIR LPF가 작은 차수의 필터계수로 설계가 가능하고, 연산량을 줄일 수 있다는 장점이 있기 때문에 가장 적합한 방법임을 알 수 있었다.

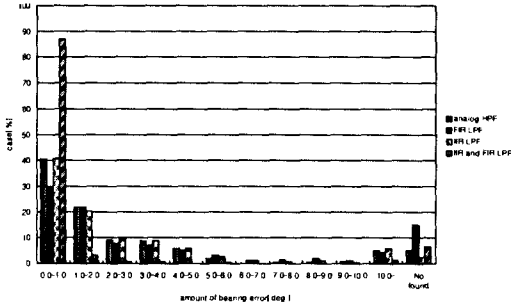
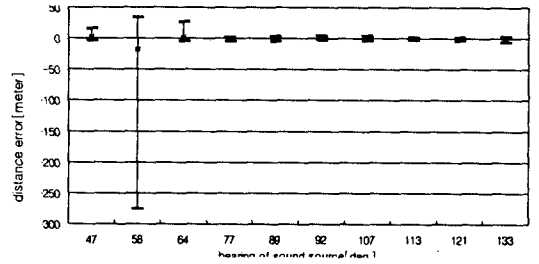


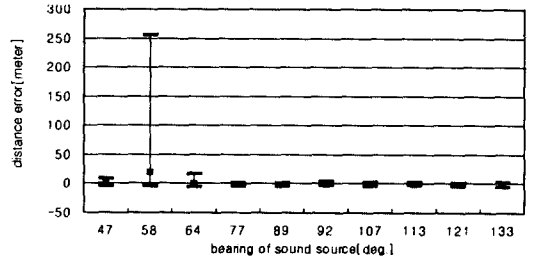
Fig. 14 Measuring rate in each bearing error

3.2.2 거리계측

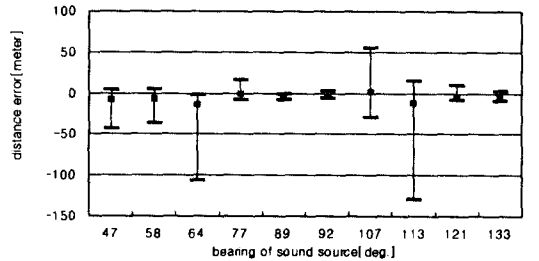
Fig.15는 각각의 필터로 신호처리하였을 경우의 거리측정 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 음원의 진방위를 세로축은 거리오차량을 나타낸 것이고, 측정결과로서 측정된 거리의 오차범위 및 그 평균 값을 나타내고 있다. 본 실험에서는 40° ~140°의 범위내에서 측정한 데이터만을 이용하기로 한다. 이 범위 이외의 구역에서는 거리 오차가 상당히 큰 경우도 있고, 거리계산이 되지 않는 경우도 있는데, 이것은 두 시간지연의 차이가 거의 없거나 매우 작기 때문에 적은 오차의 발생이 있으면 거리측정에는 상당히 많은 영향을 주기 때문이다. 이러한 양상은 앞서 제안한 논문(1)의 시뮬레이션과 일치하고 있는 것이다. Fig.15의 (2)는 FIR LPF로 필터링한 경우의 결과로 (1)의 경우와 비슷한 양상을 나타내고 있고, (3)의 경우는 측정된 거리오차가 크게되는 경우가 다른 경우에 비해 많음을 알 수 있었다. 그리고, Fig.15에서 (4)의 경우는 다른 경우보다 오차의 범위도 작을 뿐만 아니라 측정 정도도 가장 높았다. Fig.16은 각 필터링 방법으로 측정된 거리의 오차율에서 측정된 회수를 전체 측정 회수에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 가로축은 거리 오차율이고, 세로축은 측정된 회수의 비율이다. 신호음원의 거리측정에서는 IIR HPF와 FIR LPF로 필터링하는 기법이 방위측정의 경우와 마찬가지로 정도가 가장 좋았으며, 그 다음으로는 FIR LPF로 필터링하는 기법이 측정 성능이 우수함을 알 수 있었다. 여기서, IIR LPF로 필터링하는 기법은 방위측정의 정도는 좋게 하지만, 오히려 거리측정에서는 정도가 가장 낮을 뿐만 아니라 연산이 되



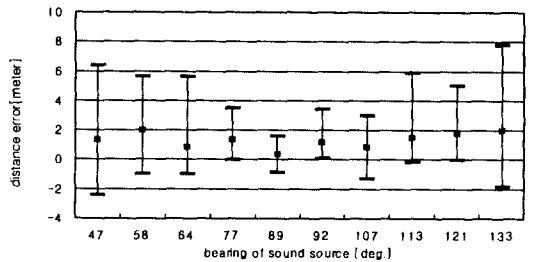
(1) In case of analog HPF



(2) In case of analog FIR LPF



(3) In case of IIR LPF



(4) In case of IIR HPF and FIR LPF

Fig. 15 Measured distance error

지 않거나 과도한 오차를 가지는 경우가 전체의 약 66%를 차지하고 있기 때문에 거리측정의 연산에는 적합하지 않은 것을 알 수 있었다. 따라서, Fig.6의 굵은 박스로 표시된 파형의 획득이 가능하

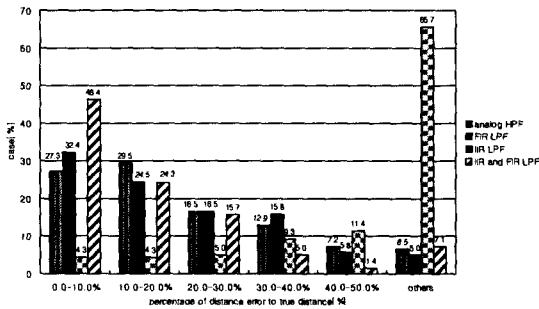


Fig. 16 Measuring rate in each distance error

다면 IIR HPF와 FIR LPF로 필터링하는 기법이 적합하고, 그렇지 않다면 FIR LPF로 필터링하는 기법이 신호음원의 거리측정에 적합하였다.

4. 결론

본 논문에서는 각 센서로부터 수신된 신호음에서 잡음을 제거하기 위한 방법으로 아날로그 필터를 이용하지 않고 디지털 필터로 필터링하는 새로운 실계측계 및 신호처리계의 구성과 그 특성에 대하여 기술하였다. 그리고, 신호음원의 위치를 랜덤하게 변화시키면서 신호를 획득 한 후, 이 신호를 재귀형 디지털 필터와 비재귀형 디지털 필터로 신호처리하여 신호음원의 방위와 거리를 연산하여 그 정도를 비교 분석하였다.

실험결과 방위측정에서는 역체브체프형 저역통과필터로 필터링하는 기법이 다른 기법에 비해 정도가 우수하였고, 거리측정의 경우에는 카이저 창

합수법을 이용한 비재귀형 저역통과필터가 적합함을 입증하였다. 그리고, 수신된 신호음에 Fig.6의 굵은 박스로 표시된 부분과 같은 파형이 존재하면, 역체브체프 고역통과필터와 카이저 창합수법을 이용한 저역통과필터의 혼합형이 검출성능이 우수함을 확인하였다.

앞으로의 연구과제로써, 센서배열선에 가까운 음원의 위치를 정확하게 측정할 수 있는 센서의 공간배치법에 관한 검토, 신호음이 안정된 부분에서 정확한 도달시간차를 측정할 수 있는 신호처리 기법의 개발 및 이를 근거로 한 계측장치의 보완과 현장실험을 통한 본 시스템의 정량적 평가 등의 문제가 남아 있다.

참고문헌

1. 문성배,전승환, "2차원적 음원추적에 관한 연구", 한국향해학회, 제20권 제4호, 1996
2. 문성배,전승환, "2차원적 음원추적에 관한 연구 II", 한국향해학회, 제22권 제4호, 1998
3. C.Koppermann, "A signal model for cross-correlation flowmeters to analyse systematic measurement errors", Measurement, vol2 No.3, p129-133, 1984
4. Emmanuel C.Ifeachor, "Digital signal processing", Addison-Wesley, 1993
5. 石田義久,鎌田強之, "デジタル信號處理のポイント", 産業圖書, 1989