

선박용 디지털 음향수신장치 연구

김형종¹ · 김정창[†]

(Received July 23, 2014 ; Revised October 14, 2014 ; Accepted October 31, 2014)

A study on digital sound reception systems for ships

Hyungjong Kim¹ · Jeongchang Kim[†]

요약: 본 논문에서는 디지털 신호처리 기술에 기반하여 주변잡음에 강건한 선박용 음향수신장치를 제안한다. 원하지 않는 주변 잡음을 억제하기 위하여 70Hz-820Hz의 통과대역을 갖는 디지털 대역통과 필터를 적용한다. 4개의 마이크로폰으로부터 입력된 음향 신호들이 디지털 대역통과 필터를 거친 후 8 방향의 방향 탐지가 가능한 방향 탐지 알고리즘을 제안한다. 또한, DSP 칩과 오디오 코덱을 이용한 프로토타입 시스템을 구현하여 본 알고리즘의 동작을 테스트한다.

주제어: 디지털 신호처리, 방향 탐지, 선박, 음향수신장치

Abstract: In this paper, we propose a sound reception system against surrounding noise for ships based on digital signal processing technologies. In order to suppress unwanted surrounding noises, a digital band-pass filter is designed, which the pass-band of the filter is between 70Hz to 820Hz. Also, we develop a sound direction indicating algorithm with 4 microphones. After filtering the audio signals from 4 microphones, the developed sound direction indicating algorithm can indicate 8 directions. In addition, we implement prototype board for the sound reception using a digital signal processor chip and audio codecs, and verify the proposed algorithm.

Keywords: Digital signal processing, direction indication, ship, sound reception system

1. 서 론

2000년 제73차 해사안전위원회에서 SOLAS 협약 제5장의 개정안이 채택되었고, 2002년 7월 1일 국제적으로 발효됨에 따라 음향수신장치(sound reception system: SRS)가 새로운 장비로 도입되었다[1]. 음향수신장치는 선교(ship's bridge)가 완전히 폐워된 선박의 경우 선교 내부에서 경적 등 타 선박의 기적신호(horn signal)를 청취하는 것이 어려우므로 항해 당직 중인 항해사가 기적신호를 듣고, 그 방향을 파악할 수 있도록 하는 장치를 말한다. 음향수신장치의 탑재대상 선박은 선박의 크기에 관계없이 선교가 완전히 폐워된 선박의 경우 주관청이 달리 결정하지 않는 한 음향수신장치를 설치해야 한다. 또한, 음향수신장치가 갖추어야 할 요건은 IMO resolution MSC.86(70) Annex 1 [2] 및 ISO 국제 표준[3]에 규정되어 있다.

기존 아날로그 방식의 음향수신장치는 선수(bow)와 선미(stern), 우현(starboard)과 좌현(port)에 설치된 마이크로폰(microphone) 입력 음향신호의 음압레벨(sound pressure lev-

el) 차이나 지연시간(time delay) 차이를 측정하여 방향을 탐지하고 있다[4]. 따라서, 기존 아날로그 방식의 경우 4개의 마이크로폰을 멀리 떨어뜨려 설치해야 하므로 간섭 및 잡음의 영향이 제각각이며, 4 방향의 방향 탐지만 가능하다는 단점이 있다. 또한, 대부분의 기존 음향수신장치는 아날로그 방식에 기반하고 있어서 설치 환경 등 외부 요인에 매우 민감하므로 설치 및 운용이 어려우며, 오작동하는 사례가 빈번하다는 문제점이 있다. 뿐만 아니라, 선박의 항해 시 바람소리, 팬 모터소리, 기관엔진소음, 레이더 전자파 등의 잡음이 유입되어 방향 탐지 오류를 발생시킬 수 있다. 이러한 오동작 시 실제 기적소리가 발생하지 않은 상황에서도 선교 내에 음향수신기가 작동되어 선박의 항해사들에게 당혹감을 불러일으킨다. 또한, 이러한 현상이 오랜 기간 반복되면 운항 중인 선박의 당직자들은 음향수신장치의 방향 탐지 결과 및 출력 기적신호를 불신하게 되어 선박의 사고 위험성이 증대된다.

따라서, 본 논문에서는 선박의 기적소리 수신 및 방향 탐

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8612-9360>): Department of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, South Korea, E-mail: jchkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4315

¹ ASRI, Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, South Korea, E-mail: hyungjong@gmail.com, Tel: 02-880-9053

지 시 기존 아날로그 방식의 주변 잡음에 의한 부정확한 방향 탐지 성능을 개선하기 위하여 디지털 신호처리 기술에 기반한 잡음에 매우 강건한 선박용 음향수신장치를 제안한다. 제안된 음향수신장치는 70Hz-820Hz의 오디오 주파수 영역에 대해서 대역통과 필터링 및 잡음의 영향을 줄이기 위한 이동 제곱 평균 필터링을 수행하여 8 방향의 기적소리 방향을 탐지한다. 2 장에서는 본 논문에서 제안한 디지털 음향수신장치의 시스템 모델에 대해서 설명하고, 3 장에서는 디지털 음향수신장치에 적용된 디지털 필터링 방식 및 방향탐지 알고리즘에 대해서 기술한다. 4 장에서 구현 및 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 5 장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서 제안한 선박용 음향수신장치는 디지털 신호처리 기술에 기반하고 있으며 Figure 1과 같은 구조를 갖는다. 본 논문에서 제안한 선박용 음향수신장치는 4개의 마이크로폰으로부터 음향신호를 수신한다. 선박에서 마이크로폰은 선수와 선미, 우현과 좌현을 향해서 설치된다. 각각의 마이크로폰으로 입력된 신호는 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter: ADC)를 거쳐서 디지털 신호처리부(digital signal processing unit)로 입력된다. 선박에서 사용하는 기적소리의 주파수는 70Hz-820Hz 범위의 값을 사용한다. 디지털 신호처리부에서는 각각의 마이크로폰으로 입력된 신호에 대해서 IMO resolution MSC.86(70) Annex 1에 규정된 70Hz-820Hz 범위의 신호만 필터링하기 위하여 대역통과(band-pass) 필터링을 수행한다. 대역통과 필터링을 수행함으로써 방향 탐지 시 70Hz 이하 및 820Hz 이상의 원하지 않는 신호로부터의 간섭을 줄일 수 있다.

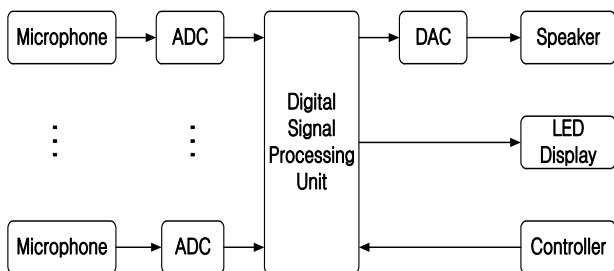


Figure 1: Block diagram of a sound reception system for ships.

각각의 대역통과 필터링된 신호에 대해서 대역 내의 잡음에 의한 영향을 줄이기 위하여 이동 제곱 평균 필터링을 수행한다. 또한, 4개의 대역통과 필터링된 신호에 대하여 이동 제곱 평균 값을 이용하여 8 방향을 구분하기 위한 방향 탐지를 수행한다. 인접한 두 개의 마이크로폰으로부터 입력된 신호에 대해서 각각의 마이크로폰이 향하는 방

향과 그 사이 방향 중 하나를 선택함으로써 방향을 탐지하게 되며 방향 탐지된 결과를 시각적, 청각적으로 전달하기 위하여 방향 지시등을 표시하고 수신된 기적소리를 스피커를 통하여 재생하게 된다.

본 논문에서는 탐지된 방향의 시각적 표시 기능은 구현하지 않았으며 디지털-아날로그 변환기(digital-to-analog converter: DAC)를 거쳐서 스피커로 출력함으로써 그 결과를 확인하였다.

3. 디지털 음향수신장치

선박에 설치되는 음향수신장치는 70Hz-820Hz 범위의 음향 신호를 수신하여 소리의 방향을 탐지해야 한다. 이는 선박에서 사용되는 기적소리가 대부분 70Hz-820Hz 범위의 주파수 영역에 존재하기 때문이다. 뿐만 아니라, 선박의 항해 시 바람소리, 팬 모터소리, 기관엔진소음, 레이더 전자파 등의 잡음이 유입되는데 이들 잡음은 모든 주파수 영역에 걸쳐서 나타난다. Figure 2는 실제 운항 중인 선박에서 마이크로폰을 통하여 기관엔진소음, 팬 모터소리, 바람소리와 같은 잡음을 녹음한 음향 신호의 스펙트럼의 예를 보여준다.

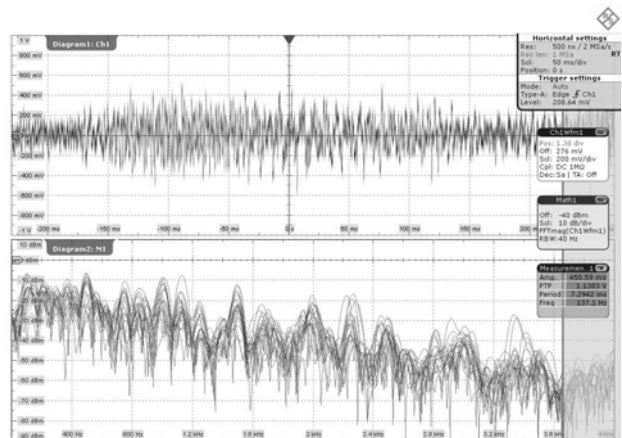


Figure 2: Snapshots of waveform and spectrum for the noise signal of ships (top: waveform, bottom: spectrum(0~4kHz)).

Figure 2에서 볼 수 있듯이 선박에서 다양한 잡음 신호는 비교적 넓은 주파수영역에 걸쳐서 나타남을 알 수 있다. 이러한 잡음 신호는 음향수신장치의 방향 탐지 성능을 열화시키는 요인으로 작용한다. 따라서, 본 논문에서는 [2]의 규정에서 요구하고 있는 주파수 영역인 70Hz-820Hz 범위를 통과대역(pass-band)으로 정하고 나머지 주파수 성분들을 억제함으로써 방향 탐지 성능을 향상시키고자 한다.

이를 위하여 본 논문에서 제안된 음향수신장치는 마이크로폰으로부터 입력된 음향 신호를 디지털 신호로 변환한 후 디지털 대역통과 필터를 이용하여 원하지 않는 주

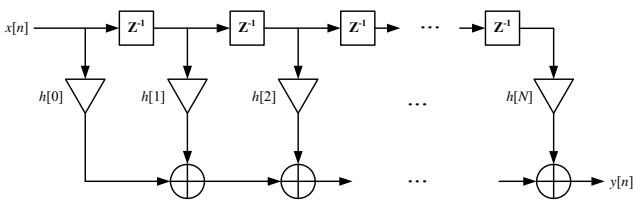


Figure 3: Structure of FIR filter for digital band-pass filter.

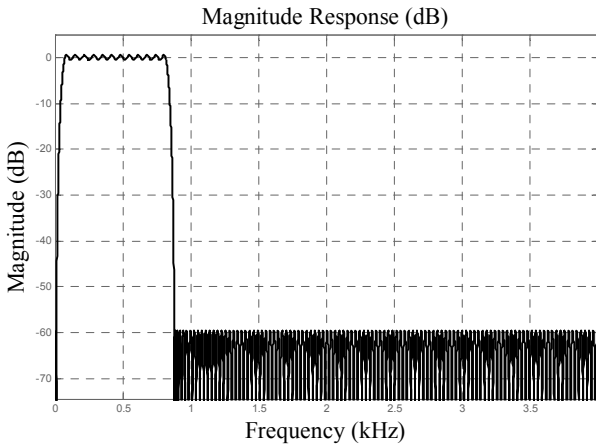


Figure 4: Magnitude responses of digital band-pass filter.

과수 대역의 신호를 억제한다. 이러한 디지털 대역통과 필터는 Figure 1의 디지털 신호처리부에서 구현된다.

본 논문에서 적용하고자 하는 디지털 대역통과 필터는 Figure 3과 같은 transposed form의 N 차(order) FIR (finite impulse response) 필터 구조를 가지며 필터 출력 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y[n] = \sum_{k=0}^N x[n-k]h[k] \quad (1)$$

여기서, $x[n]$ 은 디지털 신호처리부에 입력되는 아날로그-디지털 변환기의 n 번째 출력 값을 나타내고, $h[k]$ 는 입력 신호를 필터링하기 위한 디지털 필터의 k 번째 탭 계수(tap coefficient)를 나타낸다. 또한, N 은 디지털 필터의 차수이고 탭 계수는 모두 $(N+1)$ 개 이다.

Figure 4는 70Hz-820Hz 범위의 통과대역을 갖는 필터의 임펄스 응답 및 주파수 크기 응답의 예를 나타낸다. 아날로그-디지털 변환기의 sample rate은 8kHz이고 설계된 대역통과 필터의 차수는 264이다. Pass frequency는 70Hz-820Hz이며, stop frequency는 10Hz와 880Hz로 설정하였다. 저대역 및 고대역 억제 이득은 -60dB이다.

앞에서 설계한 디지털 필터의 주파수 응답은 필터의 차수 및 탭 계수를 적절히 설정함으로써 다양하게 설계될 수 있다. 그러나, 입력 신호의 전체 주파수 대역폭에 비해 통과대역의 폭이 상대적으로 좁으므로 원하는 대역을 가파르게 필터링하기 위해서는 FIR 필터의 차수가 매우 커지므로

계산량이 증가하게 되어 음향수신장치의 전력소모를 증가시키게 된다. 뿐만 아니라, 본 논문에서는 4개의 마이크로폰 입력에 대하여 각각 필터링을 수행해야 한다.

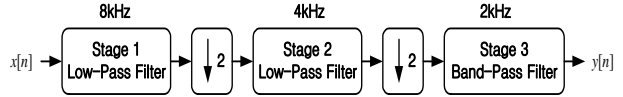


Figure 5: Multi-stage filter structure.

Table 1: Specification of filters in the multi-stage filter.

Stage	1	2	3
Type	Low-pass	Low-pass	Band-pass
Pass frequency [Hz]	820	820	70/820
Stop frequency [Hz]	2000	1000	10/880
Gain [dB]	-60	-60	-60/-60

따라서, 본 논문에서는 필터링 계산량을 줄임으로써 전력소모를 줄이기 위하여 Figure 5와 같은 다단계 (multi-stage) 구조의 필터를 음향수신장치에 적용한다.

먼저, stage 1에서는 pass frequency가 820Hz이고 stop frequency가 2kHz인 저역통과 (low-pass) 필터를 사용한다. 다음으로, stage 1 출력 신호를 2배 down-sampling 하여 sample rate을 4kHz로 줄인다. Sample rate이 감소하므로 뒷단에서 구현하는 필터의 계산량을 줄일 수 있다.

그러면, stage 2에서는 pass frequency가 820Hz이고 stop frequency가 1kHz인 저역통과 필터를 사용하여 1kHz 이상의 고대역에 해당하는 주파수 성분을 억제하게 된다. Stage 2 출력 신호를 다시 2배 down-sampling하여 sample rate을 2kHz로 줄일 수 있다.

마지막으로, stage 3에서는 2kHz의 sample rate을 가지는 신호에 대해서 70Hz-820Hz 범위의 통과대역을 갖는 band-pass filter를 사용함으로써 70Hz 이하 및 820Hz 이상의 주파수 성분을 억제한다. 본 논문에서 설계한 다단계 필터의 스펙은 Table 1과 같다.

각각의 대역통과 필터링된 신호에 대해서 대역 내의 잡음에 의한 영향을 줄이기 위하여 M 개의 샘플에 대한 이동 평균 필터링을 수행한다. M 샘플 이동 평균 필터링을 수행함으로써 M 개의 샘플에 대한 평균 전력 (average power)이 계산된다.

선박의 기적소리가 수신되는 방향은 어느 하나의 마이크로폰 방향이거나 기껏해야 인접한 두 개의 마이크로폰 사이의 방향이 될 것이다. 따라서, 본 논문에서는 선박 기적소리의 수신 방향 탐지를 위하여 수신 신호의 평균 전력이 가장 큰 마이크로폰과 두 번째로 큰 마이크로폰을 선택하여 평균 전력의 크기를 비교함으로써 방향 탐지를 수행한다. 여기서, 평균 전력이 두 번째로 큰 마이크로폰을 선택

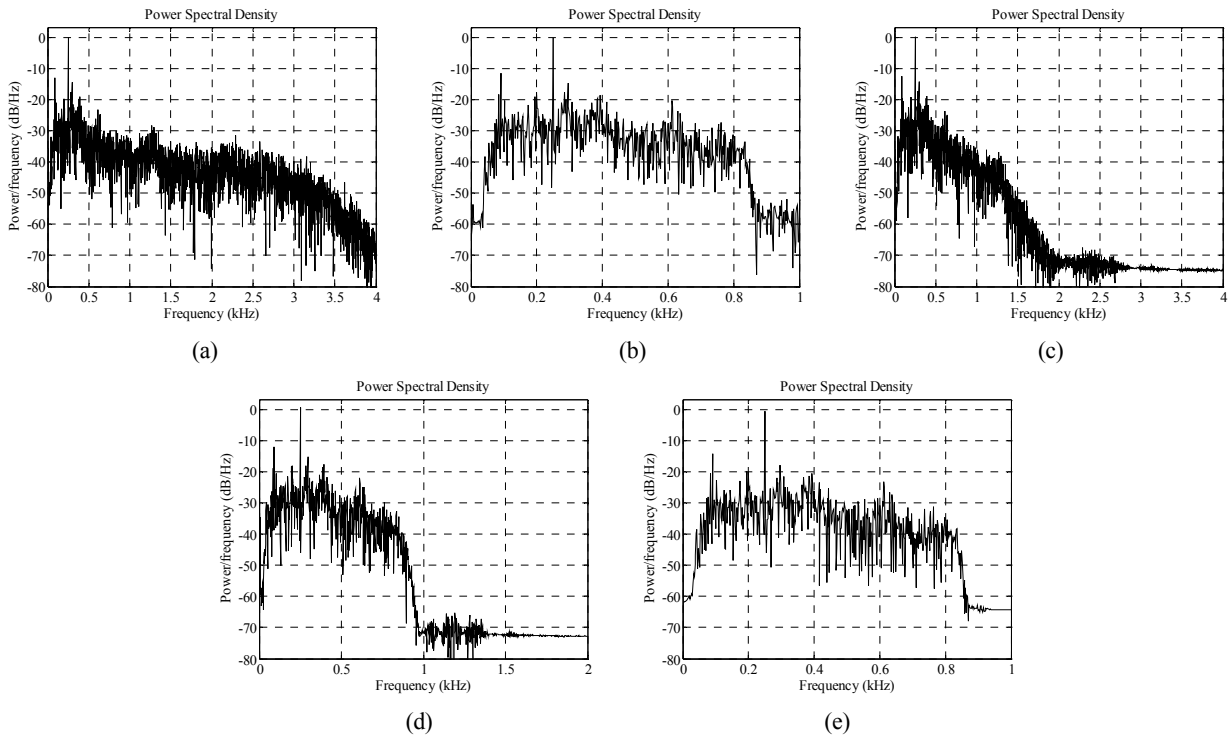


Figure 6: Spectrum of single band-pass filter and proposed multi-stage filter. (a) filter input (b) single bandpass filter output (c) 1st stage low-pass filter output (d) 2nd stage low-pass filter output (e) 3rd stage band-pass filter output.

하기 위하여 수신 신호의 평균 전력이 가장 큰 마이크로폰을 기준으로 인접한 두 개의 마이크로폰들 중에서 더 큰 평균 전력을 갖는 마이크로폰을 선택한다.

마이크로폰 입력에 대해서 디지털 필터링된 신호를 $y[n]$ 이라 할 때, 길이 M 샘플에 대한 평균 전력 $z[n]$ 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$z[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |y[n-k]|^2 \quad (2)$$

그러면, 4개의 마이크로폰 입력에 대해서 4개의 평균 전력 값이 계산되고, 이들의 크기를 비교함으로써 평균 전력의 크기가 가장 큰 마이크로폰과 이에 인접하는 두 개의 마이크로폰 중 그 다음으로 큰 평균 전력을 갖는 마이크로폰 입력을 선택한다.

이와 같은 방법으로 선택된 평균 전력이 가장 큰 두 개의 인접한 마이크로폰 입력에 대해서 디지털 필터링된 신호를 각각 $y_1[n]$, $y_2[n]$ 라고 할 때, 길이 M 샘플에 대한 평균 전력 $z_1[n]$, $z_2[n]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_1[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |y_1[n-k]|^2 \quad (3)$$

$$z_2[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |y_2[n-k]|^2 \quad (4)$$

위와 같이 계산된 평균 전력 값을 주어진 문턱값 (threshold) THR 과 비교하여 음향신호의 방향을 판단한다. 만약 $z_2 < THR < z_1$ 인 경우 1번 마이크로폰 방향에서 기적소리가 수신된 것으로 판단하고, $z_1 < THR < z_2$ 인 경우에는 2번 마이크로폰 방향에서 기적소리가 수신된 것으로 판단한다. 반면, 2 개의 전력 $z_1[n]$ 와 $z_2[n]$ 모두 문턱값보다 큰 경우에는 1번과 2번 마이크로폰의 사이 방향에서 기적소리가 수신된 것으로 판단한다.

Figure 6은 250Hz의 선박 기적소리와 **Figure 2**에서 보여진 주변 잡음이 섞여 있는 신호에 대해서 **Figure 4**의 265 탭 단일 대역통과 필터와 **Figure 5**의 다단계 구조의 필터 출력을 비교한 결과이다. **Figure 6**에서 볼 수 있듯이 다단계 구조의 필터와 대역통과 필터의 출력 스펙트럼은 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 또한, 디지털 필터를 사용함으로써 70Hz-820Hz 이외의 주파수 대역의 잡음 신호를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

뿐만 아니라, stage 1, 2, 3에 해당하는 필터의 탭 수는 각각 13, 45, 67이며 이들을 모두 합한 탭 수는 125이다. 따라서, **Figure 4**의 대역통과 필터의 탭 수가 265인 것에 비해 하드웨어 복잡도를 크게 줄일 수 있다. 또한, **Figure 4**의 단일 대역통과 필터의 입력 샘플 당 평균 곱셈 계산량은 265 회인 반면 제안하는 다단계 필터의 입력 샘플 당 평균 곱셈 계산량은 대략 53회이므로 계산 복잡도 및 전력 소모도 크게 줄일 수 있다.

4. 구현 및 실험결과

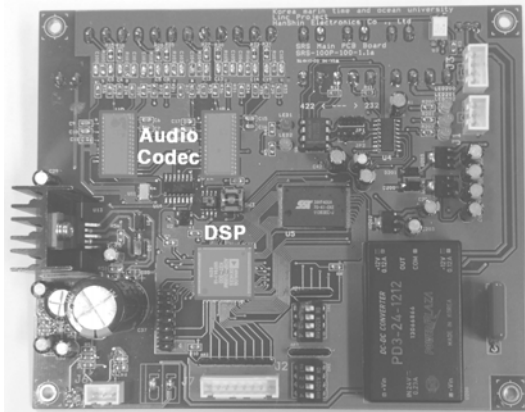


Figure 7: Implemented digital signal processing board.

Table 2: Specification of DSP chip.

Item	Specification
Processing speed	75 MIPS (mega instructions per second)
Memory	192K Bytes of On-Chip RAM - 32K words (24-bit) Program Memory RAM - 48K words (16-bit) Data Memory RAM
Etc.	Two serial ports (SPORTs)

Table 3: Specification of audio codec.

Item	Specification
ADC	Two 16-bit ADC
DAC	Two 16-bit DAC
Sampling rate	64kHz, 32kHz, 16kHz, 8kHz
Etc.	Transmission of digital data using a serial port

디지털 신호처리보드는 마이크로폰으로부터 입력받은 아날로그 신호를 디지털로 변환하는 아날로그-디지털 변환기 및 디지털화된 오디오 신호를 처리하기 위한 DSP (digital signal processor) 칩을 내장하고 있다. 또한, 디지털 오디오 신호를 아날로그 오디오 신호로 변환하기 위한 디지털-아날로그 변환기도 포함하고 있다.

Figure 7은 본 논문에서 제안한 디지털 음향수신장치의 디지털 신호처리보드 구현 결과를 나타낸다. 사용된 DSP 칩은 Analog Device 사의 ADSP 계열이고, ADC/DAC 칩은 Analog Device 사의 오디오 코덱이다. DSP 칩 및 오디오 코덱의 대략적인 사양은 Table 2 및 Table 3과 같다.

먼저, ADC에서 디지털로 변환된 오디오 신호는 DSP로

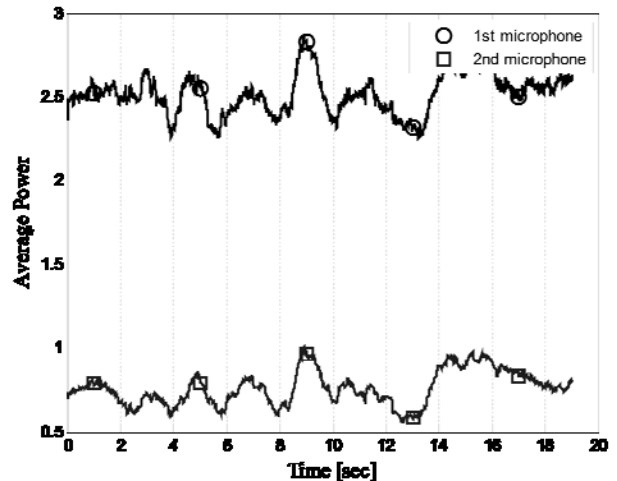


Figure 8: Comparison of average powers for two microphone inputs.

입력되어 디지털 필터를 통과하게 된다. 본 논문에서 설계한 다단계 필터의 스펙 및 스펙트럼은 각각 Table 1 및 Figure 6과 같다. 각 단계의 디지털 필터는 DSP에서 식 (1)을 C 언어로 프로그래밍함으로써 구현된다. 디지털 필터링된 신호를 이용하여 식 (3) 및 식(4)와 같이 평균 전력을 계산하고 기적소리 수신방향을 결정하게 된다. 이러한 연산은 모두 DSP에서 수행되며 C 언어로 프로그래밍함으로써 구현된다.

본 논문에서 개발한 음향수신장치의 동작을 검증하기 위하여 1번 마이크로폰으로 기적소리를 입력시킨 후 DSP에서 디지털 필터링된 신호의 평균전력을 계산하고 비교하였다.

Figure 8은 1번 마이크로폰 방향에서 선박의 기적소리가 존재하는 경우에 대해서 마이크로폰 입력 신호를 제안한 디지털 필터로 필터링한 후 계산된 평균 전력 값을 나타낸다. 여기서, 1번 및 2번 마이크로폰은 전체 4개의 마이크로폰들 중에서 필터링된 신호의 평균 전력 크기를 비교하여 선택되었다. 선박의 기적소리가 1번 마이크로폰 방향을 향하고 있으므로 2번 마이크로폰으로 수신되는 선박의 기적소리 성분은 매우 작으며 2번 마이크로폰으로 수신되는 음향신호의 대부분은 선박의 주변 잡음으로부터 기인한다.

Figure 9는 슬라이딩 윈도우의 길이를 변화시켜가며 관찰한 평균 전력의 평균 및 표준편차를 나타낸다. Figure 9 (a)에서 평균 전력의 평균값은 슬라이딩 윈도우의 길이와 상관없이 일정함을 알 수 있다. 1번 마이크로폰의 평균 전력의 평균값은 대략 2.51 정도이고, 2번 마이크로폰의 평균 전력의 평균값은 0.76 정도이다. 따라서, 이들 2개의 마이크로폰 평균 전력의 평균값들의 중간 값인 1.635를 문턱값으로 설정하였다. 즉, $THR=1.635$ 로 설정하였다. Figure 9 (b)에서 평균 전력의 표준편차는 슬라이딩 윈도우의 길이가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 슬라이딩

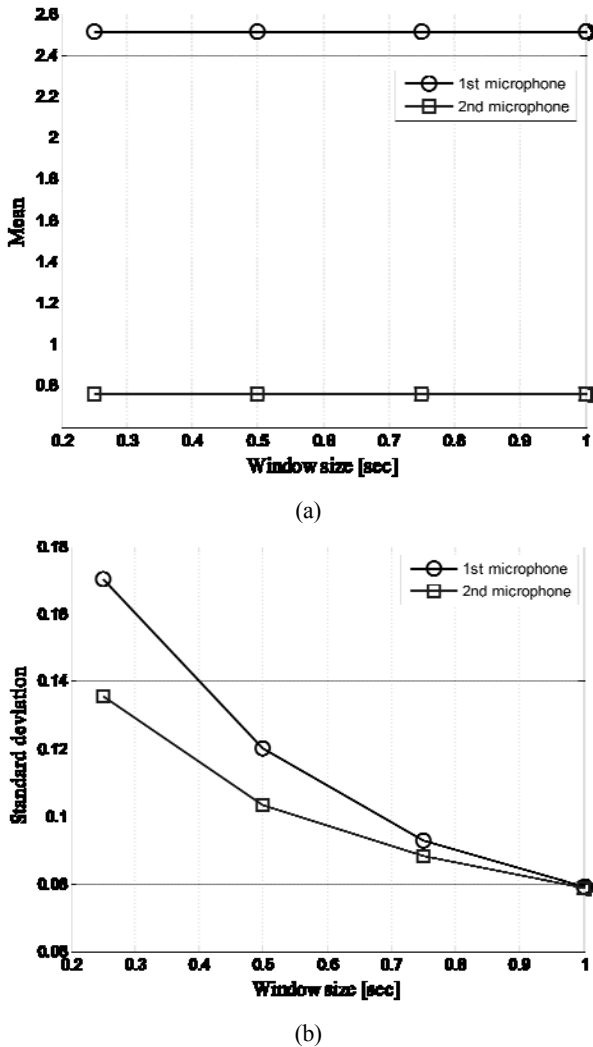


Figure 9: Mean and standard deviation of average powers versus windows size for two microphone inputs (a) Mean, (b) Standard deviation.

윈도우의 길이가 증가함에 따라 잡음이 평균되어 감소하기 때문이다. 따라서, 슬라이딩 윈도우의 길이가 증가할수록 방향 탐지 정확도가 증가할 것이다. 그러나, 선박의 기적소리가 유지되는 시간은 제한적이므로 슬라이딩 윈도우의 길이는 기적소리가 유지되는 시간을 고려하여 설정해야 한다. 여기서, 마이크로폰들 간의 표준편차에 차이가 있는 것은 각 마이크로폰의 위치에서 선박 주변 잡음 특성이 다르기 때문이다.

Figure 8의 실험에서는 선박의 기적소리가 비교적 짧게 유지되는 상황을 고려하여 $M=1000$ 으로 설정함으로써 0.5 초 길이의 슬라이딩 윈도우를 적용하여 지속적으로 평균 전력을 관찰하였다. Figure 8에서 볼 수 있듯이 1번 마이크로폰에 해당하는 평균 전력은 문턱값보다 높지만 2번 마이크로폰에 해당하는 평균 전력은 문턱값보다 작으므로 제안한 방향 탐지 알고리즘에 따르면 선박의 기적소리 방향은 1번 마이크로폰 방향으로 정확하게 탐지됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선박의 기적소리 수신 및 방향 탐지 시 기존 아날로그 방식의 주변 잡음에 의한 부정확한 방향 탐지 성능을 개선하기 위하여 디지털 신호처리 기술에 기반한 잡음에 매우 강건한 선박용 디지털 음향수신장치를 제안하였다. 통과대역 70Hz-820Hz인 디지털 필터를 설계하여 주변 잡음을 억제함으로써 방향 탐지 성능을 향상시킬 수 있으며, 8 방향을 탐지 할 수 있는 방향 탐지 알고리즘을 제안함으로써 디지털 음향수신장치의 핵심 기능들을 구현하였다.

후기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] SOLAS chapter V safety of navigation - Regulation 19 - Carriage requirements for shipborne navigational systems and equipment, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/343175/solas_v_on_safety_of_navigation.pdf, Accessed July 1, 2002.
- [2] IMO resolution MSC.86(70) - Adoption of new and amended performance standards for navigational equipment, [http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=15454&filename=86\(70\).pdf](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=15454&filename=86(70).pdf), Accessed Dec. 8, 1998.
- [3] ISO 14859 - Ships and marine technology - Sound reception systems, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14859:ed-1:v1:en>, Accessed April 1, 2012.
- [4] J. W. Choi and K. J. Kim, "A new sound reception system using a symmetrical microphone array and its numerical simulation," *Journal of Ship & Ocean Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 18-25, 2004.