



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박 기적음의 위상차를 이용한 방향탐지 시스템
Sound Reception System using Phase Difference of
Ship Whistle



지도교수 김정창

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

전자통신공학과

권혁진

본 논문을 권혁진의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 박 동 국 (인)

위 원 김 정 창 (인)

위 원 손 경 락 (인)



2016년 12월 22일

1945

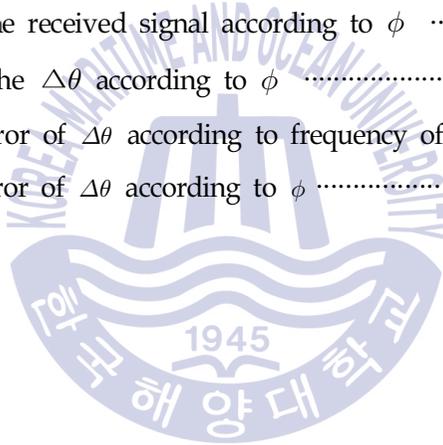
한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 음향 수신 장치	
2.1 음향 수신 장치의 개요	4
2.2 음향 수신 장치의 구성	4
3. 방향탐지 알고리즘	
3.1 수신각도에 따른 기적소리신호의 위상차이	8
3.2 위상 차이를 이용한 방향탐지 알고리즘	14
4. 시뮬레이션	16
5. 방향탐지 시스템 하드웨어 구현	21
6. 실험	
6.1 실험 과정	25
6.2 실험 결과	27
7. 결론	47

List of Tables

Table 1 Specification of the DSP Chip	22
Table 2 Specification of the ADC/DAC codec	23
Table 3 Frequency range of the whistle according to the size of the ship	27
Table 4 Signal levels of the received signal at the microphone for D=2m	27
Table 5 Phase of the received signal according to ϕ	43
Table 6 Values of the $\Delta\theta$ according to ϕ	43
Table 7 Average error of $\Delta\theta$ according to frequency of the whistle signal	46
Table 8 Average error of $\Delta\theta$ according to ϕ	46



List of Figures

Fig. 1 Block diagram of SRS	5
Fig. 2 Block diagram of the proposed scheme	6
Fig. 3 Data flow diagram of the fast Fourier transform for $N = 8$	7
Fig. 4 Deployment of four microphones	8
Fig. 5 Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M_2 is 0	10
Fig. 6 Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M_2 is not 0	12
Fig. 7 Deployment of microphones and the direction decision region	14
Fig. 8 Flow chart of algorithm finding direction	15
Fig. 9 Curves of $2D/(D_1 + D_2)$ versus D for various values of ϕ	17
Fig. 10 Curves of $2D/(D_1 + D_2)$ versus ϕ for various values of D	18
Fig. 11 Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various f with $D=2m$ and $d=7.5cm$	19
Fig. 12 Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various D with $f=350Hz$ and $d=7.5cm$	20
Fig. 13 Block diagram of SRS hardware	21
Fig. 14 Implemented SRS hardware	22
Fig. 15 Master station	23
Fig. 16 Microphone unit	25
Fig. 17 Experimental environment	26
Fig. 18 Snapshot of the magnitude response for the received whistle signals	28
Fig. 19 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 0^\circ$	31
Fig. 20 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 15^\circ$	35
Fig. 21 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 30^\circ$	38
Fig. 22 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$	42
Fig. 23 Comparison of the experimental result and simulation result	43

Fig. 24 Curve of the required threshold versus f 45



Direction detection system using phase difference of ship whistle

Kwon, Hyuk Jin

Department of Electronics & Communications Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

In this paper, a sound reception system using a phase difference of whistle signals is proposed and analyzed through a spectral analysis. The proposed system receives whistle signals from four microphones which are installed toward four directions with 90 degree interval at the position. The proposed algorithm detects the phase of each received signal through the spectral analysis and estimates the direction of the whistle signal by obtaining the phase differences of the received signals from two adjacent microphones. Also, we theoretically analyze the phase difference between two adjacent received signals according to the arrival angle of the received signal and implement the proposed system using DSP chip. In addition, we verify the operation of the proposed algorithm using the implemented system in a laboratory environment. Experimental results show that the proposed scheme can well estimate the direction of the whistle signal.

KEY WORDS: phase difference, received direction, ship whistle, sound reception system, spectral analysis

제 1 장 서 론

해양사고란 해양 및 내수면에서 발생하는 사고를 말한다. 2015년도 해양사고통계에 따르면 해양사고의 유형들 중에 기관손상(33.4%), 안전운항 저해(15.7%) 다음으로 높은 것이 바로 타 선박간의 충돌 및 접촉사고(12.5%) 이다. 선종별 해양사고로는 어선(68.6%)으로 가장 높으며 선박톤수별 해양사고에서는 20톤미만(62.8%)의 선박이 가장 많은 사고빈도를 보인다[1].

무중(under dense fog)향해 중에는 시야가 확보되지 않아 눈으로 타 선박의 유무를 파악하기 힘들다. 이럴 경우에는 선박의 레이더 장비 및 기적음(ship whistle)이 타 선박의 위치를 파악하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 하지만 레이더 장비는 고가의 장비이기 때문에 소형선박 및 어선은 현실적으로 사용하기 어려우며 선박의 기적음은 가격이 저렴하고 선교가 열려있는 상태에서는 그 소리를 파악하기 쉬우나 선교가 폐워된 상태에서는 당직항해사가 파악하기 힘든 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 음향수신장치(sound reception system: SRS)가 도입되었다. 음향수신장치란 가시거리가 유지되지 않을 시 타 선박의 기적음을 통해 선박의 방향을 파악하고 충돌을 방지하는 목적을 가진 장비이다. 음향수신장치는 2000년 SOLAS 협약 제 5장의 개정안이 채택됨에 따라 도입되었다[2]. 이렇게 도입된 음향수신장치가 갖추어야 할 요건은 IMO resolution MSC.86(70)에 명시되어 있다[3].

음향수신장치가 도입된 초기에는 아날로그 방식의 음향수신장치가 개발되었으나 바람소리, 파도소리, 해상 주변의 구조물에 의한 소리반사현상 등 잡음에 민감하고 탐지가능한 방향의 수가 제한적이라는 단점이 존재했다. 이에 디지털 기반의 선박용 음향 수신 장치가 개발되었다[4]-[8].

먼저 [4]-[6]에서는 마이크로폰 수신 신호들간의 상호상관(cross-correlation)을 이용하여 기적음원의 도달시간지연(time delay of arrival: TDOA)을 측정하는 방법이 제안되었다. 논문 [4]에서는 일자로 마이크로폰을 배열한 뒤 인접한 2개의

마이크로폰 사이의 TDOA를 측정된 뒤 그 결과를 거리로 환산하여 기적음원과 마이크로폰들과의 평면상의 함수관계로 기적음원의 거리와 방위를 측정하였다[4]. 논문[5]-[6]에서는 선박 기적음원의 도달시간차가 같은 위치의 자취를 쌍곡선으로 그린 후 쌍곡선의 교점을 음원의 발신지로 추정하는 방법이 제안되었다. 논문 [4]-[5]에서는 3개의 마이크로폰 배열을 이용해 방위탐지가 이루어지며 180° 범위 내에서만 방위 검출이 가능하다. 또한 [6]에서는 3개의 마이크로폰 배열과 반대로 향하는 1개의 마이크로폰을 추가로 설치하여 전방과 후방의 기적음 음압차이를 측정하여 360°의 영역에서 기적음의 방위를 검출한다.

일렬로 설치된 마이크로폰 배열을 이용하여 TDOA를 측정하여 기적음의 방향을 탐지한 것과는 달리 [7]-[8]에서는 오직 한 지점에 서로 다른 방향을 향하고 있는 마이크로폰들을 이용하여 기적음의 방향을 추정하는 방법이 제안되었다. 논문 [7]에서는 한 지점에 서로 다른 네 방향으로 향해있는 마이크로폰 별로 수신 기적음의 평균 전력을 계산하고 문턱값(threshold) 비교를 통하여 기적음의 방향을 탐지한다. 반면, 논문 [8]에서는 마이크로폰별로 수신 신호에 대한 평균 전력의 크기 비를 이용하여 방향을 탐지한다. 그러나, 이 방법은 일정한 크기의 기적음이 발생하더라도 기적음이 다중경로채널을 겪음으로 인해 발생하는 간섭 때문에 방향 탐지에 큰 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고자 수신 기적음의 주파수영역 분석을 통해 음향신호의 위상차이를 이용하는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 네 방향으로 설치된 마이크로폰을 통해 유의미한 주파수에 해당하는 기적음을 수신하여 주파수 영역 분석을 통해 각 마이크로폰 방향별로 수신신호의 크기 응답(magnitude response) 및 위상 응답을 구하여 해당하는 주파수와 위상(phase)을 얻는다. 그리고 4개의 마이크로폰 입력으로부터 얻어진 위상값의 차이를 계산하여 수신 기적음의 방향을 찾는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 알고리즘을 구현할 시스템 구성에 대해 설명하고 3장에서 주파수 분석을 이용한 방향탐지기법의 알고리즘을

설명한다. 4장에서는 프로토타입의 하드웨어를 구현한 결과에 대하여 서술하고 5장에서 실험을 통해 알고리즘의 성능을 확인한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.



제 2 장 음향 수신 장치

2.1 음향 수신 장치의 개요

음향 수신 장치는 서론에서 밝힌 바와 같이 선박의 외부와 완전히 격리된 선박의 선교 내부에서 타 선박의 기적 또는 호종 등의 음향신호를 파악하기 힘들기 때문에 외부의 작은 음향신호를 증폭해서 들을 수 있고, 소리의 방향을 파악할 수 있도록 하는 장치이다. 이러한 음향 수신 장치는 70Hz ~ 820Hz에서 모든 방향으로부터 음향신호를 수신하여 선교 내에서 청취 가능해야 하며 외부에서 발생한 소리신호 및 소리의 개략적인 발생 방향을 최소한 3초 이상 눈으로 확인할 수 있도록 화면상에 표시할 수 있어야 한다. 이러한 음향 수신 장치는 네 방향으로 설치된 마이크로폰과 볼륨조절 및 소리의 방향을 눈으로 확인할 수 있는 마스터 스테이션으로 구성된다.

2.2 음향 수신 장치의 구성

Fig. 1은 제안하는 음향 수신장치의 구성을 나타낸다. M_i 는 네 방향으로 향해있는 i 번째 마이크로폰을 나타내며 선박의 한 지점에서 90도 간격으로 앞, 뒤, 좌, 우 네 방향을 향해 4개의 마이크로폰을 설치하여 각각의 방향에서 들어오는 음향신호를 수신한다. 수신된 음향신호는 ADC(analog-to-digital converter)를 거쳐 디지털 신호로 변환되어 디지털 신호처리기(digital signal processor)로 입력되어 방향탐지 알고리즘을 통해 수신된 음향신호의 방향을 탐지한다. 탐지된 음향신호의 방향은 LED를 이용해 사용자가 방향을 인지할 수 있도록 한다.

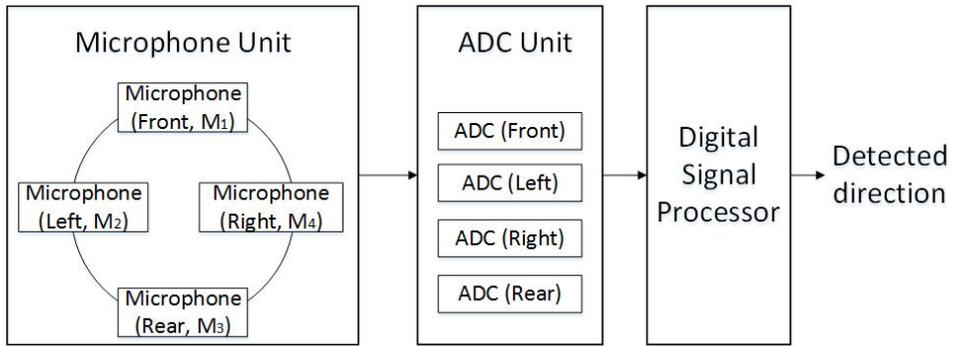


Fig. 1 Block diagram of SRS

Fig. 2는 제안하는 방향탐지 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸다. 2차원 평면 상에서 서로 수직인 네 방향을 향해있는 마이크로폰으로 수신된 음향신호에 대하여 각각 고속 푸리에 변환 (fast Fourier transform: FFT)을 수행하여 주파수 영역 신호로 변환한다. 변환된 결과로부터 70 ~ 820Hz를 제외한 주파수 성분을 제거하는 필터링을 수행한다. 필터링된 각각의 결과에 대하여 크기 응답의 피크(peak)를 추출하여 기적소리의 주파수 및 이에 해당하는 위상 값을 추정한다. 4개의 마이크로폰에 대해 추정된 4개의 위상 값을 크기 순으로 정렬하고 정렬된 위상 값들의 차이를 계산하여 기적신호의 수신 방향을 검출한다. 본 논문에서 제안하는 방향탐지 알고리즘은 3장에서 자세히 기술한다.

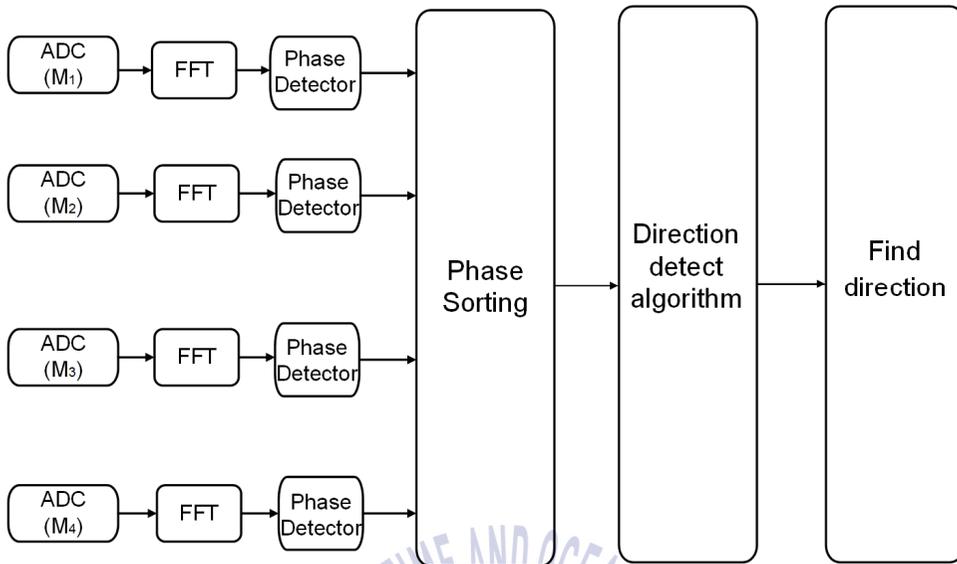


Fig. 2 Block diagram of the proposed scheme

시간 축으로 표현된 모든 데이터는 주파수가 다른 수많은 Sin파와 Cos파의 합으로 표현할 수 있다. 해상에서 수신되는 기적소리 신호는 단일 주파수로 발생되는데, 이러한 기적소리 신호를 푸리에변환 과정을 통해 어떤 주파수의 Sin파와 Cos파가 어떤 크기로 응답하는 지를 볼 수 있다. 고속 푸리에 변환은 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)과 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘이다. FFT는 디지털 신호 처리에서 편미분 방정식의 근을 구하는 알고리즘에 이르기까지 많은 분야에서 사용하고 있는데 x_0, \dots, x_{n-1} 이 복소수라고 가정하면 DFT는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad j = 0, \dots, n-1 \quad (1)$$

이 식을 정의에 따라 계산하면 n^2 번의 계산이 필요하지만 FFT를 이용하면

$n \log n$ 번의 연산으로 가능하다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 FFT 알고리즘은 콜리-튜키 알고리즘(Colley-Tukey algorithm)이다. 이 알고리즘은 분할 정복 알고리즘을 사용하며 재귀적으로 n 크기의 DFT를 같은 크기의 두 DFT로 나눈 뒤 그 결과를 n 시간에 합치는 것이다. 예를 들어 $N = 8$ 일 때 $W = e^{-2\pi i/n}$ 라고 정의하면 FFT의 과정을 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

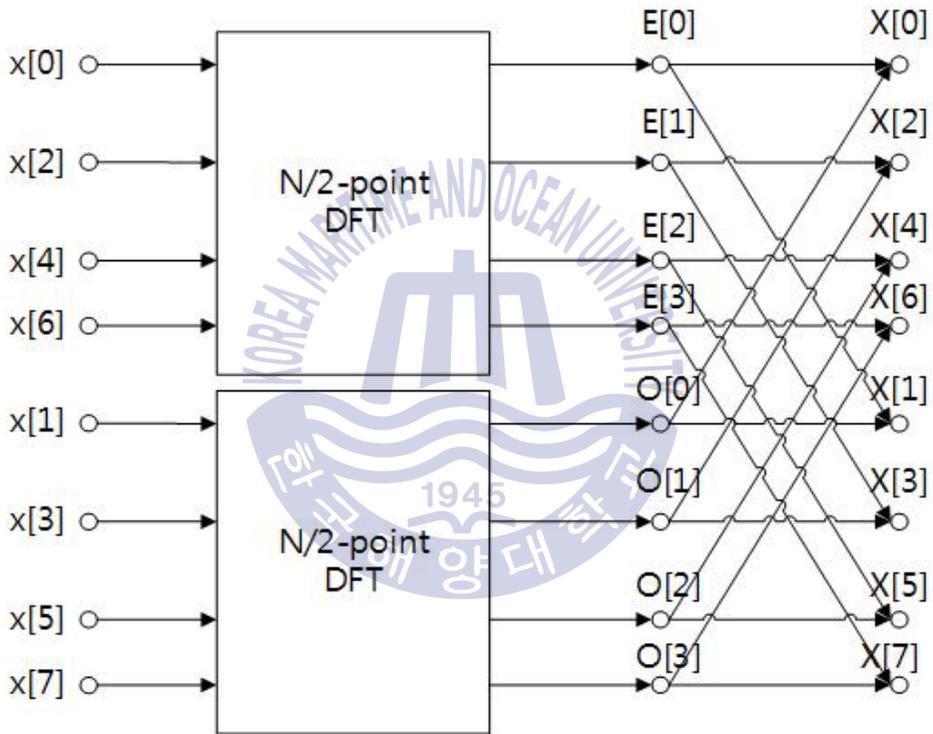


Fig. 3 Data flow diagram of the fast Fourier transform for $N = 8$

이 과정을 재귀적으로 적용하면 $N = 2^k$ 인 DFT를 $n \log n$ 안에 할 수 있다. 이러한 연산과정은 나비 연산(Butterfly operation)이라고도 불린다. 제안하는 알고리즘에서는 FFT 과정을 통해 효율적으로 푸리에 변환을 수행하여 수신되는 기적소리 신호의 주파수와 그 크기 응답을 구한다.

제 3 장 방향탐지 알고리즘

서로 인접한 2개의 마이크로폰에서 추출된 위상 값의 차이는 기적음이 해당 마이크로폰에 도달하는 시간 차이에 비례하므로 본 논문에서는 4개의 마이크로폰 중 가장 앞서는 2개의 위상 값의 차이로부터 기적음의 방향을 탐지하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 먼저, 기적신호의 수신 각도에 따른 위상 차이를 수학적으로 계산하고 전산실험을 통하여 확인한다.

3.1 수신각도에 따른 기적소리신호의 위상차이

먼저, 기적소리신호의 수신각도에 따른 음원과 마이크로폰 유닛간의 수직관계를 알아본다. Fig. 4은 마이크로폰 유닛이 기적소리신호를 M_2 의 정면방향에서 수신한 경우를 나타낸다.

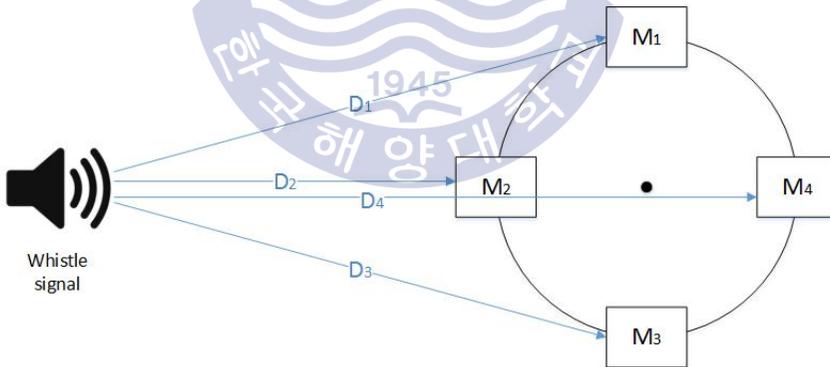


Fig. 4 Deployment of four microphones

D_i 는 기적소리신호 발생지로부터 M_i 까지의 거리를 나타낸다. 따라서 기적소리신호를 $x(t) = \cos 2\pi ft$ 라고 모델링한다면 마이크로폰 M_1 과 M_2 의 거리차이에 따른 시간지연 τ 가 발생한다. 이 때 M_1 또는 M_2 에서 수신되는

신호는 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_1(t) = \cos\left\{2\pi f\left(t - \frac{D_1}{v}\right)\right\} \quad (2)$$

$$r_2(t) = \cos\left\{2\pi f\left(t - \frac{D_2}{v}\right)\right\}$$

이 때 시간지연 τ 로 인해 위상차이가 발생하며 마이크로폰 M_1 과 M_2 로 수신되는 기적소리 신호의 위상차이를 $\Delta\theta$ 라고 나타낼 수 있으며 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\theta = 2\pi\tau f = 2\pi\frac{D_1 - D_2}{v}f \quad (3)$$

여기서, $v = 344m/s$ 는 상온에서 소리의 속도를 나타내며 f 는 기적소리신호의 주파수를 의미한다.

본 논문에서 모든 마이크로폰은 동일 평면 상에 존재하고 마이크로폰 유닛의 중심으로부터 각 마이크로폰까지 거리가 d 로서 모두 동일하게 배치한다. Fig. 4에 따르면 기적음 발생지에 가장 가까운 2개의 마이크로폰은 M_2 와 M_1 혹은 M_3 이다. 기적음 발생지와 M_1 및 M_3 사이의 거리는 동일하므로 기적음 발생지에 두 번째로 가까운 마이크로폰은 편의상 M_1 이라고 가정한다. 그러면, 기적음 발생 위치와 마이크로폰 M_2 및 M_1 이 동일한 평면 상에 있다고 가정하면 기적음의 발생지와 마이크로폰 M_2 및 M_1 의 위치를 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

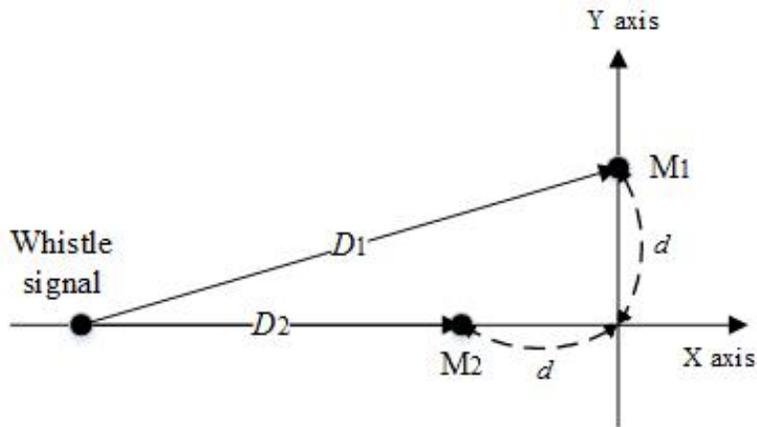


Fig. 5 Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M_2 is 0

Figure 5로부터 식 (4)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_1^2 &= d^2 + (D_2 + d)^2 \\
 &= d^2 + D_2^2 + 2dD_2 + d^2 \\
 &= 2d^2 + 2dD_2 + D_2^2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그러면, 식 (4)는 다음 식 (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_1^2 - D_2^2 &= (D_1 - D_2)(D_1 + D_2) \\
 &= 2d^2 + 2dD_2
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

그러면 $D_1 - D_2$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_1 - D_2 &= \frac{2d^2 + 2dD_2}{D_1 + D_2} \\
 &= \frac{2d^2}{D_1 + D_2} + \frac{2dD_2}{D_1 + D_2}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

하나의 마이크로폰 유닛 내에 4개의 마이크로폰은 매우 가까이 위치하도록 구현되며 일반적으로 기적음을 발생하는 다른 선박은 마이크로폰 사이의 간격에 비해 상대적으로 멀리 위치해 있으므로 $D_1, D_2 \gg d$ 이고, $D_1 \approx D_2$ 로 가정할 수 있다. 그러면 $D_1 - D_2$ 는 식 (7)과 같이 근사화될 수 있다.

$$D_1 - D_2 \approx 0 + d = d \tag{7}$$

따라서, 식 (7)을 식 (3)에 대입하면 $\Delta\theta$ 는 식 (8)과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d}{v} f \tag{8}$$

다음으로 임의의 방향으로부터 기적신호가 수신되는 경우를 고려하자. 기적음 발생지에 가장 가까운 2개의 마이크로폰이 M_2 및 M_1 이고 기적음 발생 위치와 마이크로폰 M_2 및 M_1 이 동일한 평면 상에 있다고 가정하면 기적음의 발생지와 마이크로폰 M_2 및 M_1 의 위치를 Fig. 5와 유사하게 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. X_2 와 Y_2 는 각각 수신 기적신호 발생지와 x축과 y축을 잇는 직선이 만나는 점을 나타내고, X_1 과 X_2 는 각각 M_1 과 M_2 의 위치를 나타낸다. 또한, ϕ 는 x축에 대한 기적음의 수신 각도를 의미한다. 여기서, 선분 $\overline{X_1X_2}$ 와 $\overline{Y_1Y_2}$ 의 길이는 각각 $D\cos\phi - d$ 와 $D\sin\phi - d$ 와 같이 계산할 수 있다. 그러면, Fig. 6로부터 식 (9)와 식 (10)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

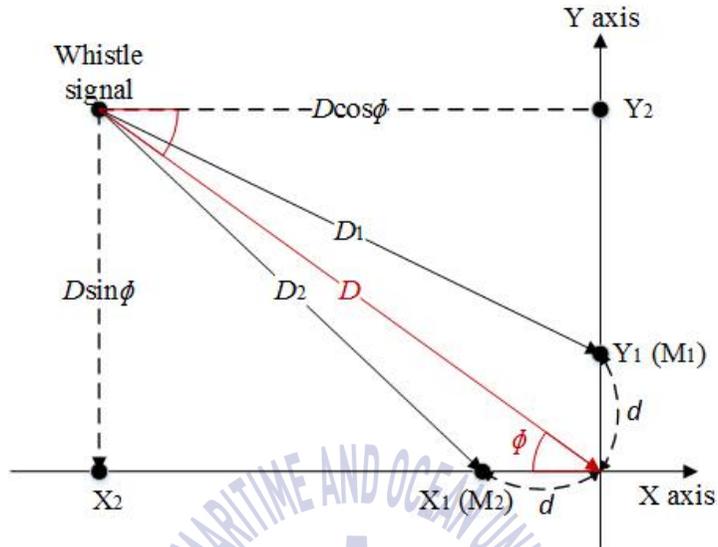


Fig. 6 Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M_2 is not 0

$$\sqrt{D_2^2 - D^2 \sin^2 \phi} + d = D \cos \phi \quad (9)$$

$$\sqrt{D_1^2 - D^2 \cos^2 \phi} + d = D \sin \phi \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)를 제곱하며 정리하면 각각 식 (11)과 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_2^2 - D^2 \sin^2 \phi &= (D \cos \phi - d)^2 \\ &= D^2 \cos^2 \phi - 2dD \cos \phi + d^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 D_1^2 - D^2 \cos^2 \phi &= (D \sin \phi - d)^2 \\
 &= D^2 \sin^2 \phi - 2dD \sin \phi + d^2
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

식 (12)에서 식 (11)을 빼면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_1^2 - D_2^2 &= (D_1 - D_2)(D_1 + D_2) \\
 &= 2dD(\cos \phi - \sin \phi)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

여기서, 식 (7)에서 사용된 가정을 적용하면 $\frac{2D}{D_1 + D_2}$ 는 1로 근사되기 때문에 식 (13)은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_1 - D_2 &= \frac{2D}{D_1 + D_2} d(\cos \phi - \sin \phi) \\
 &\approx d(\cos \phi - \sin \phi)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

따라서 식 (3)의 $\Delta\theta$ 는 식 (14)을 이용하여 식 (15)와 같이 근사화될 수 있다.

$$\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d(\cos \phi - \sin \phi)}{v} f
 \tag{15}$$

예를 들어, M_2 정면으로 기적소리신호가 수신될 때 $\phi = 0^\circ$ 이므로 $\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d}{v} f$ 와 같이 식 (8)과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

3.2 위상 차이를 이용한 방향탐지 알고리즘

식 (15)에 따르면 주파수에 따라 $\Delta\theta$ 의 값이 변화하기 때문에 주파수별로 기적소리신호의 영역을 결정하는 문턱값을 결정한다. Fig. 7은 마이크론의 구성과 방향결정 영역을 나타낸 것이다. ISO 14859.Annex1[9]의 규정을 근거로 45°간격으로 8방향의 기적소리신호 방위 영역을 결정할 수 있다.

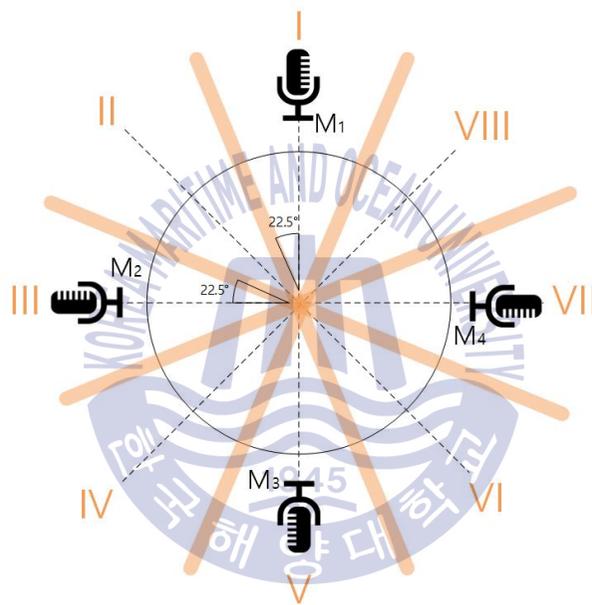


Fig. 7 Deployment of microphones and the direction decision region

예를 들어, 마이크론 M_1 과 마이크론 M_2 사이의 방향에서 기적소리신호가 수신된다면 $0^\circ \sim 90^\circ$ 안에서 I, II, III의 영역 중 하나로 판단해야 하므로 2개의 경계를 가진다. 첫 번째는 M_1 으로 수신되는 신호의 위상이 더 빠를 경우 M_1 을 기준으로 22.5° 를 경계로 하여 I과 II의 영역을 구분한다. 이 때, 22.5° 에 해당하는 $\Delta\theta$ 의 값을 문턱값으로 설정하여 $\Delta\theta$ 의 값이 작으면 II의 영역으로 판단하고 크다면 I의 영역으로 판단한다. 두 번째는 M_2 로 수신되는 신호의

위상이 더 빠를 경우 M_2 를 기준으로 22.5° 를 경계로 하여 I 과 II의 영역을 구분한다. 이 때, 22.5° 에 해당하는 $\Delta\theta$ 의 값을 문턱값으로 설정하여 $\Delta\theta$ 의 값이 작으면 II의 영역으로 판단하고 크다면 III의 영역으로 판단한다. Fig. 8은 이 과정을 플로우차트로 나타낸 것이다. 이러한 알고리즘을 $90^\circ \sim 180^\circ$, $180^\circ \sim 270^\circ$, $270^\circ \sim 360^\circ$ 에서도 적용한다면 기적소리가 $0^\circ \sim 360^\circ$ 에서 수신될 때, I ~ VIII을 나타내는 8개의 영역을 모두 판단할 수 있다.

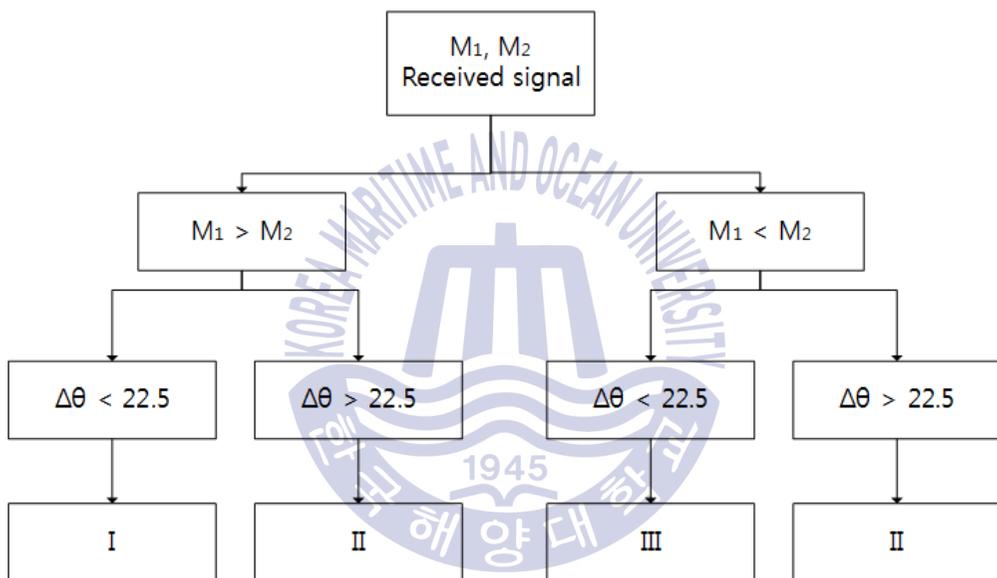


Fig. 8 Flow chart of algorithm finding direction

제 4 장 시물레이션

기적소리신호의 수신각도 ϕ 와 D 에 따른 정확한 $D_1 - D_2$ 와 근사화한 식 (14)의 $D_1 - D_2$ 사이의 차이를 알아보기 위해 $\frac{2D}{D_1 + D_2}$ 를 계산한다. 이 때 $\frac{2D}{D_1 + D_2}$ 에서 사용된 D_1 과 D_2 는 식 (9)와 (10)에서의 관계에 따라 식 (16)과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{(D\cos\phi)^2 + (D\sin\phi - d)^2} \\ D_2 &= \sqrt{(D\cos\phi - d)^2 + (D\sin\phi)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

Fig. 9는 주어진 기적소리신호의 수신각도 ϕ 에 대해 D 에 따른 거리별 $\frac{2D}{D_1 + D_2}$ 값을 그래프로 나타낸 것이다. 이 때 ϕ 가 45° 를 넘어가면 $\cos\phi - \sin\phi$ 의 값이 음수가 되고 Fig. 5에서의 D_1 과 D_2 의 거리 관계가 서로 바뀌면서 x 축과 y 축이 변하므로 $0^\circ \leq \phi \leq 45^\circ$ 만 고려한다. 그래프를 살펴보면 기적소리신호의 수신각도에 따라 차이는 있지만 D 가 커질수록 $\frac{2D}{D_1 + D_2}$ 의 값이 1에 수렴하는 것을 볼 수 있다.

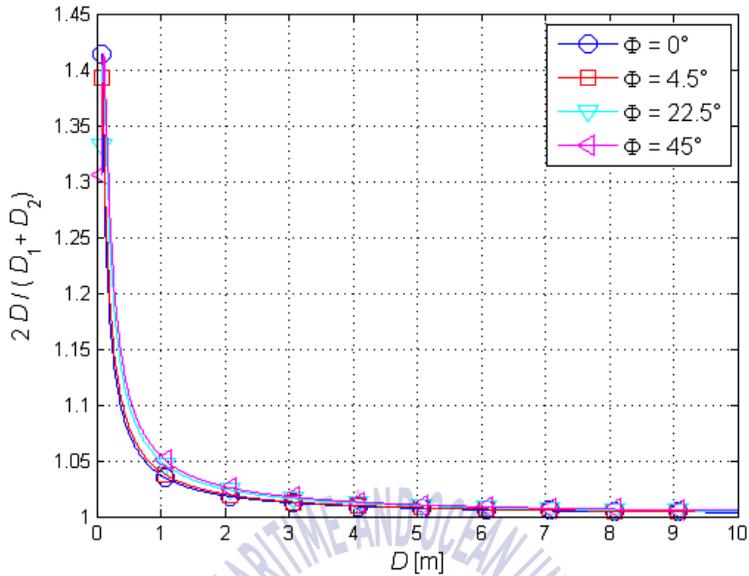


Fig. 9 Curves of $2D/(D_1+D_2)$ versus D for various values of ϕ

Fig. 10은 주어진 D 에 대해 ϕ 에 따른 거리별 $\frac{2D}{D_1+D_2}$ 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 살펴보면 ϕ 에 따라 차이는 있지만 D 가 커질수록 $\frac{2D}{D_1+D_2}$ 의 값이 1로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 하지만 ϕ 는 D 에 비해 $\frac{2D}{D_1+D_2}$ 의 값 변화에 영향이 적다. 따라서 기적소리신호 발생지와 마이크로폰 유닛 사이의 거리가 충분히 멀다면 식 (14)의 가정이 성립함을 알 수 있다.

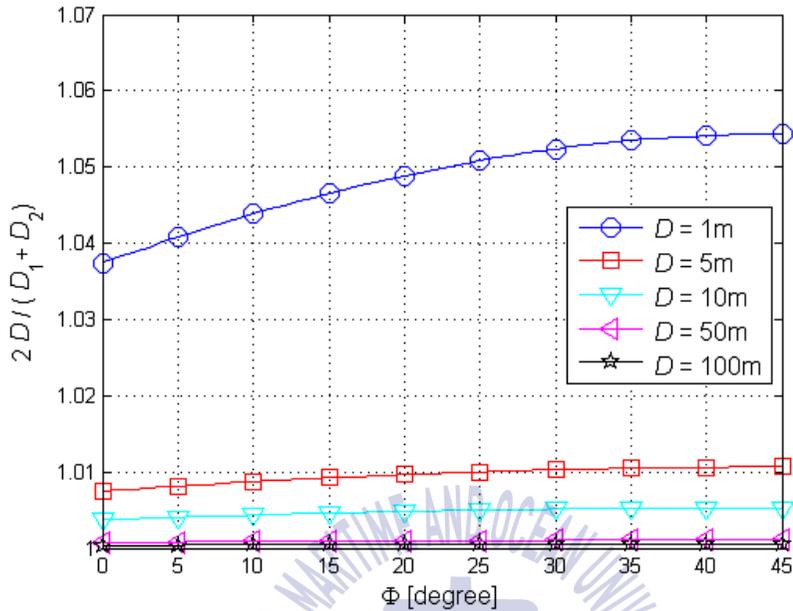


Fig. 10 Curves of $2D/(D_1+D_2)$ versus ϕ for various values of D

그렇다면 식 (15)와 같이 근사화한 $\Delta\theta$ 와 식 (3)에서 정의한 정확한 $\Delta\theta$ 의 차이는 어느 정도인지 조사하였다. Fig. 11은 기적음원의 발생지와 마이크로폰 유닛과의 거리 D 와 마이크로폰 유닛의 중심과 각 마이크로폰들 사이의 거리 d 를 7.5cm로 정한 뒤 주파수 f 에 따른 근사화한 $\Delta\theta$ 와 정확한 $\Delta\theta$ 의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 이 때 D 는 실험환경에 맞추어 2m의 값을 주었으며 주파수는 70Hz ~ 700Hz까지 변화시키면서 관찰하였다. 결과를 관찰해보면 근사화한 $\Delta\theta$ 와 정확한 $\Delta\theta$ 의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한 모든 주파수대역에서 수신각도가 45°일 때 $\Delta\theta$ 는 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 낮은 주파수대역에선 $\Delta\theta$ 가 작았으며 주파수가 높아질수록 $\Delta\theta$ 가 커지는 것을 확인하였다.

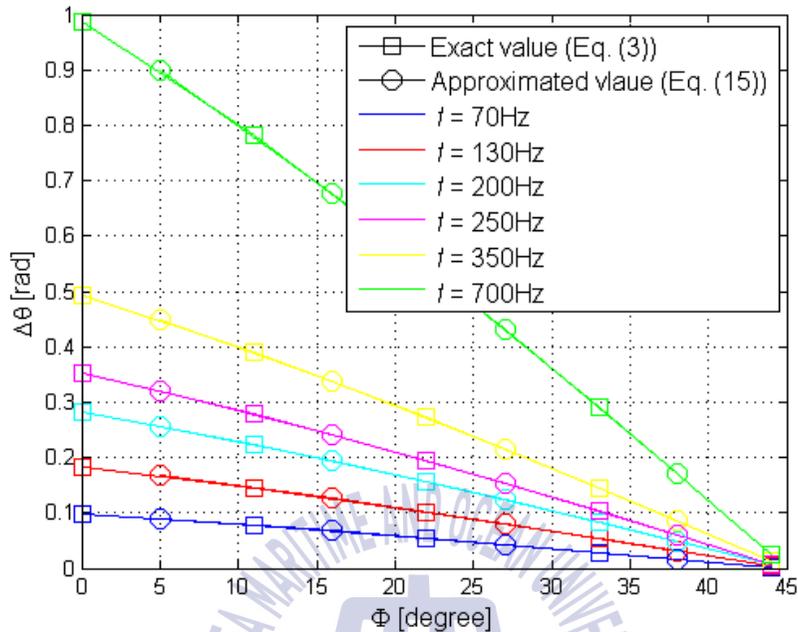


Fig. 11 Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various f with $D=2\text{m}$ and $d=7.5\text{cm}$

Fig. 12는 기적음원의 주파수 f 와 마이크론 유닛의 중심과 각 마이크론들 사이의 거리 d 를 7.5cm , f 를 350Hz 로 두고 D 에 따른 근사화한 $\Delta\theta$ 와 정확한 $\Delta\theta$ 의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 사용된 주파수는 350Hz 이며, 크기에 따른 선박의 기적소리 주파수대역 중에 가장 많은 범주를 차지하기 때문에 350Hz 를 사용하였다. 그래프를 확인해보면 D 가 1m 이상 확보된다면 $\Delta\theta$ 의 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 D 가 충분히 확보된다면 제 3 장에서 제안한 알고리즘이 제대로 동작할 것을 기대할 수 있다.

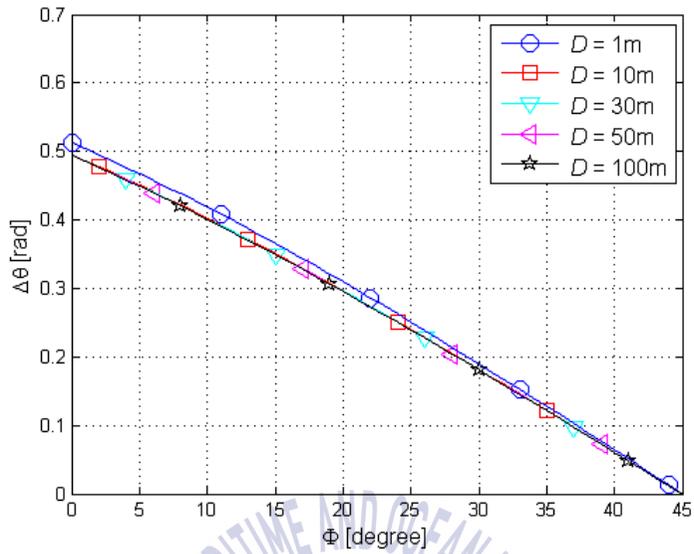
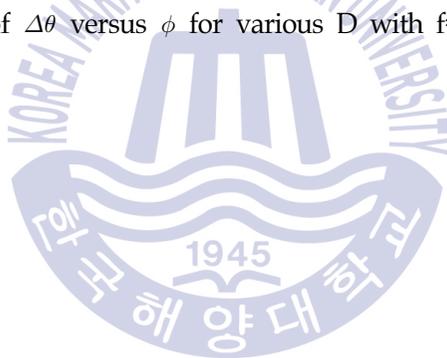


Fig. 12 Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various D with $f=350\text{Hz}$ and $d=7.5\text{cm}$



제 5 장 방향탐지 시스템 하드웨어 구현

Fig 13은 구현된 방향탐지 시스템 하드웨어의 블록다이어그램이다. 구현된 SRS는 마이크론 유닛으로부터 기적소리 신호를 수신하여 ADC를 통해 디지털신호로 변환되어 DSP로 입력된다. DSP에서 입력된 신호를 방향탐지 알고리즘을 거쳐 기적소리신호의 방향을 찾으면 마스터 스테이션에서 기적소리신호의 방향을 LED로 나타낸다. 또한 수신된 기적소리신호를 재생할 수 있으며 그 소리의 크기를 조절할 수 있다.

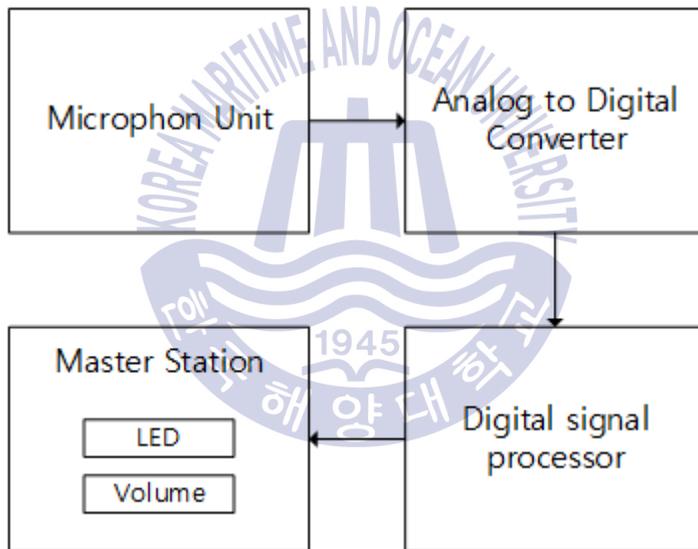


Fig. 13 Block diagram of SRS hardware

제안하는 알고리즘의 구현에 사용된 DSP는 Analog Devices사의 ADSP-BF538F이다. Fig. 14는 구현된 하드웨어의 모습이며 DSP Chip의 주요 스펙은 Table 1과 같다.



Fig. 14 Implemented SRS hardware

Table 1 Specification of the DSP Chip

Item	Specification
Processing speed	Core performance up to 600 Mhz
Memory	SDRAM : 64MB x 2chips Flash memory : 4MB
SPORTs	4
UARTs	3
SPI	3
TWI	2
PPI	1

또한 마이크로폰으로부터 입력받은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC/DAC 코텍은 Analog Devices 사의 AD73322 칩을 사용했으며 구체적인

사양은 Table 2와 같다. 본 연구에서 구현한 SRS 시스템에서 사용한 ADC 샘플링율은 16kHz이다.

Table 2 Specification of the ADC/DAC codec

Item	Specification
ADC	Two 16-bit ADC
DAC	Two 16-bit DAC
Sampling rate	64kHz, 32kHz, 16kHz, 8kHz

그리고 Fig. 15는 마스터 스테이션을 나타낸다. 제안하는 알고리즘에 따라 DSP에서 추정된 기적소리신호의 방향을 45°단위로 시각적으로 나타내며 증폭된 신호의 볼륨을 조절한다.



Fig. 15 Master station

이와 같이 구현된 하드웨어를 통해 IMO resolution MSC.86(70)에서 권장하는 실험 절차를 참고하여 만족해야하는 성능 부분을 검증한다. 실험은 각 방향으로 향해있는 마이크로폰 사이의 거리가 7.5cm인 마이크로폰 유닛과 기적소리신호를 발생시키는 스피커와 2m의 거리를 둔 뒤 0° ~ 45°의 영역에서 15°간격으로 기적소리신호를 발생시켜서 그 때의 $\Delta\theta$ 의 값을 확인하는 것으로 실험을 진행했다.



제 6 장 실험

6.1 실험 과정

구현한 하드웨어의 성능을 검증하기 위해 실험을 진행하였다. 실험은 일정한 거리에서 스피커로 단일 주파수 소리신호를 출력하여 구현한 SRS의 마이크론 유닛에 입력되도록 하여 방향탐지 알고리즘이 잘 동작하는지를 검증하는 것으로 진행하였다. 실험에서 사용된 마이크론 유닛은 Fig. 16과 같고 특성은 무지향성이며 감도는 $-44 \pm 2dB$ 이다.



Fig. 16 Microphone unit

Fig. 17과 같이 각 방향으로 향해있는 마이크론 사이의 거리가 7.5cm인 마이크론 유닛과 기적소리신호를 발생시키는 스피커와 2m의 거리를 둔 뒤 $0^\circ \sim 45^\circ$ 의 영역에서 15° 간격으로 기적소리신호를 발생시켜서 그 때의 $\Delta\theta$ 의 값을 확인하는 것으로 실험을 진행하였다.

그 전에 먼저 기적소리신호가 정상적으로 수신된 것을 확인하기 위해 입력파형을 관찰하고, FFT 결과를 확인하기 위해 크기 응답을 확인해보았다. 실제 환경에서는 사방이 트인 해상이므로 기적소리신호가 반사에 의해 더해지는 경우가 드물기 때문에 실험환경은 기적소리신호가 사방의 벽에 반사되어 각 마이크로폰으로 수신되는 신호에 간섭이 발생하는 것을 방지하기 위해 Fig. 17과 같이 흡음제를 사방으로 설치한 상태에서 실험을 진행하였다.



Fig. 17 Experimental environment

또한 선박에서 사용되는 기적은 선박설비기준[10]에 의한 요건을 갖추어야 하는데, 그 요건은 다음의 Table 3과 같다. 그리고 실험에 사용된 기적소리신호는 ISO 14859를 기준으로 주파수 별로 서로 다른 세기를 가지며 실험환경인 $D=2m$ 에서 마이크로폰에 도달하는 신호의 세기가 Table 4와 같도록 설정하였다.

Table 3 Frequency range of the whistle according to the size of the ship

Classification	Frequency band [Hz]	Sound pressure level(SPL) [dB]
Vessels of less than 20m	$250 \leq f \leq 700$	$111 \leq \text{SPL} \leq 120$
Vessels of more than 20m	$250 \leq f \leq 700$	$130 \leq \text{SPL}$
Vessels of more than 75m	$130 \leq f \leq 350$	$138 \leq \text{SPL}$
Vessels of more than 200m	$70 \leq f \leq 200$	$143 \leq \text{SPL}$

Table 4 Signal levels of the received signal at the microphone for D=2m

Frequency [Hz]	70	130	200	250	350	700
Signal level [dB]	54	59	62	48	50	46

6.2 실험 결과

Fig. 18은 수신된 기적소리신호의 크기 응답을 나타낸다. 이 때 사용된 기적소리신호의 주파수는 350Hz이며 샘플링 비율은 16kHz이다. 또한 FFT의 크기는 512이므로 31.25Hz의 분해능을 가지는 데, 343.75Hz를 나타내는 위치에서 크기 응답이 가장 크게 나오는 것을 확인가능하며 이 값은 350Hz와 오차가 있지만 이는 분해능에 의한 것이므로 FFT가 잘 이루어졌음을 알 수 있다. FFT결과에서 주파수를 올바르게 추출하였으므로 해당하는 주파수 영역에서의 마이크론과의 위상차이를 구한다면 제 3장에서 제안한 방향탐지 알고리즘을 적용할 수 있다.

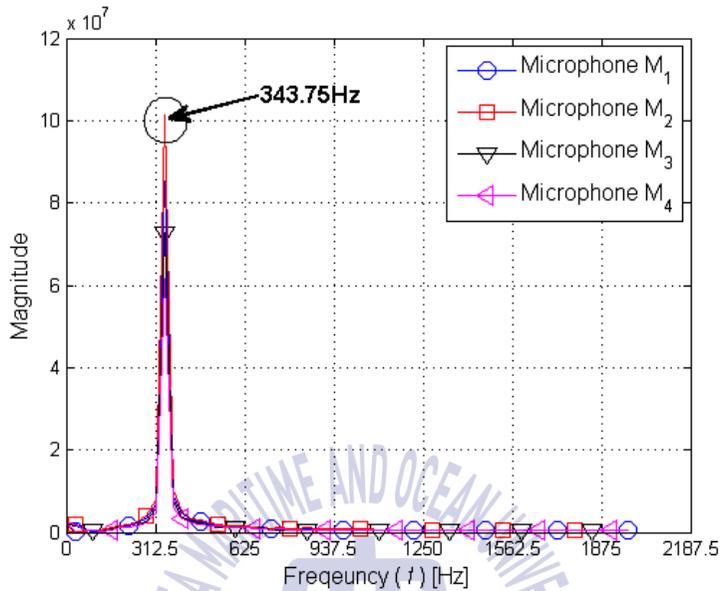
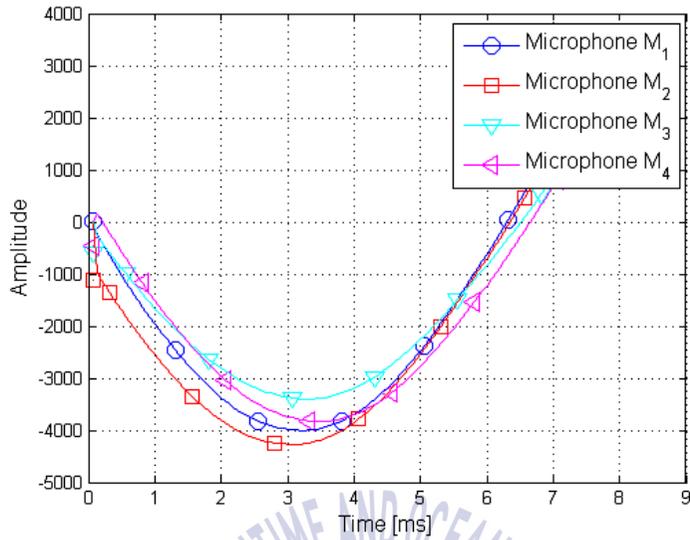
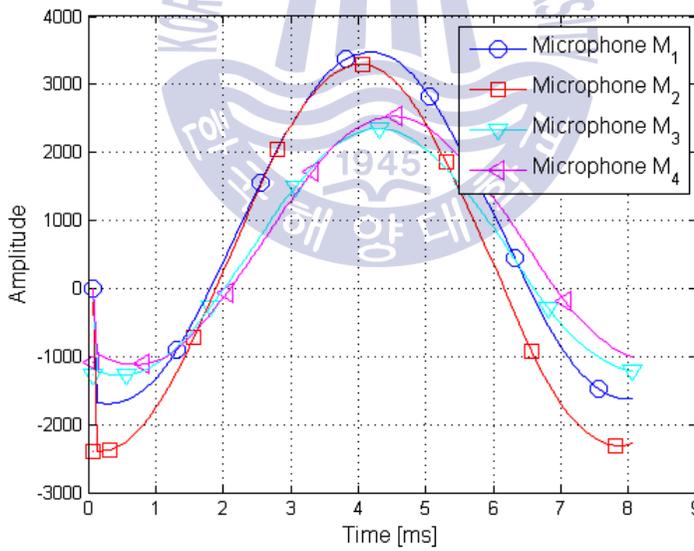


Fig. 18 Snapshot of the magnitude response for the received whistle signals

Fig. 19는 3.1절에서 정의한 정면(M₂) 방향($\phi = 0^\circ$)에서 각 주파수별로 기적소리신호가 발생했을 때 마이크론 유닛으로 수신한 신호의 파형을 DSP에서 관찰한 그래프이다. 모든 주파수 대역에서 M₂에서의 신호가 가장 빠르고 M₁와 M₃의 신호가 거의 같으며 M₄에서 가장 느린 것을 관찰할 수 있다. 앞부분에서 그래프가 불연속적인 현상은 DSP상에서 하나의 윈도우 크기만큼을 저장하고 다시 앞부분부터 덮어쓰게 되는데 이 때문에 발생하는 현상이다.

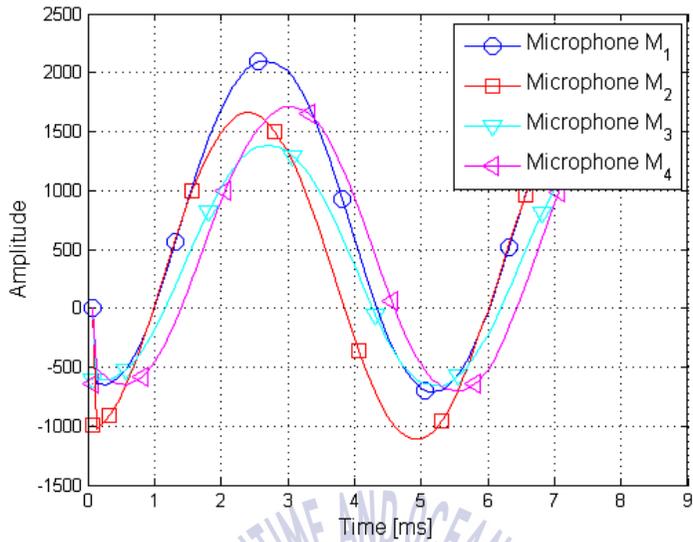


(a) $f = 70$ Hz

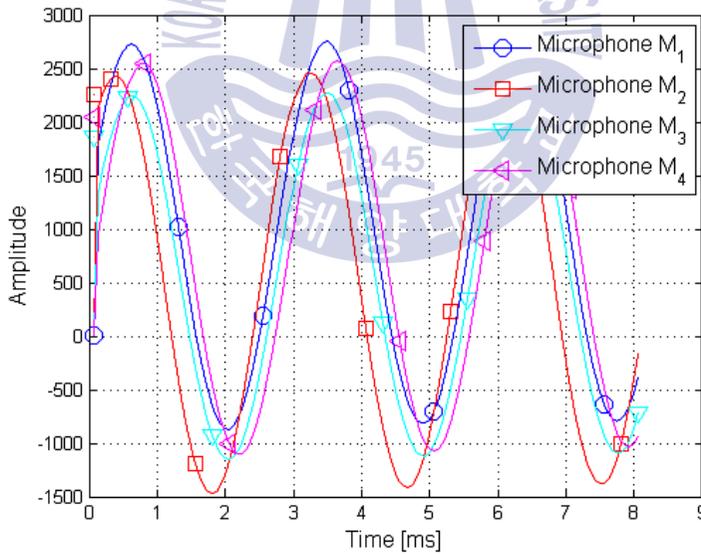


(b) $f = 130$ Hz

Fig. 19 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 0^\circ$,
 (a) $f = 70$ Hz (b) $f = 130$ Hz

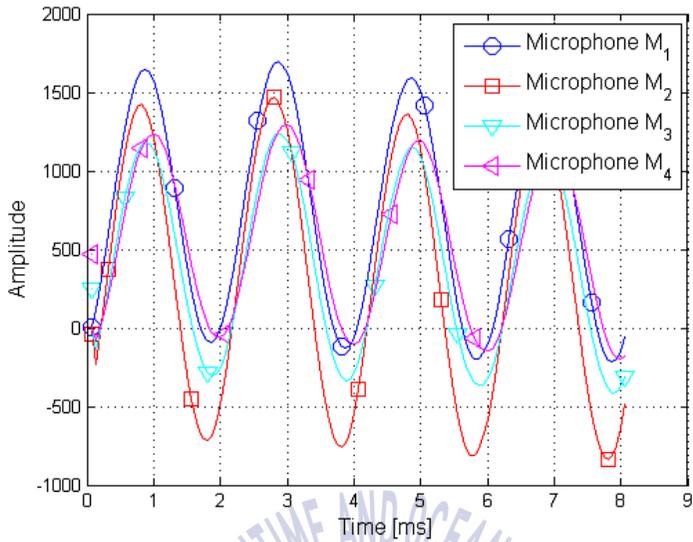


(c) $f = 200$ Hz

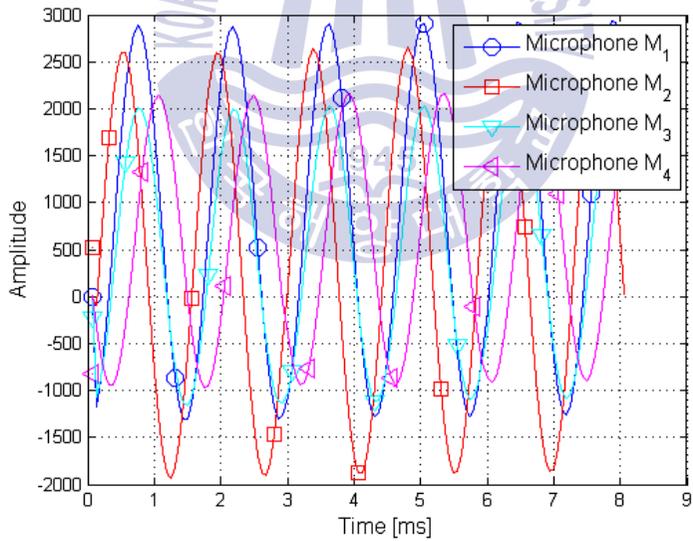


(d) $f = 250$ Hz

Fig. 19 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 0^\circ$ (continued),
(c) $f = 200$ Hz (d) $f = 250$ Hz



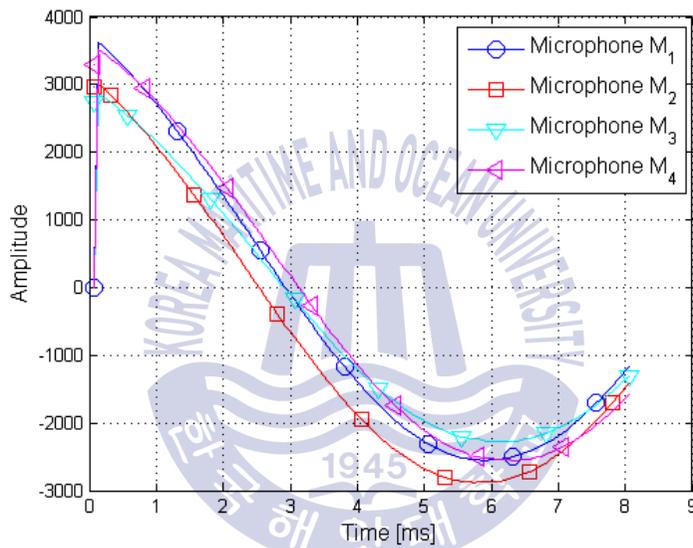
(e) $f = 350$ Hz



(f) $f = 700$ Hz

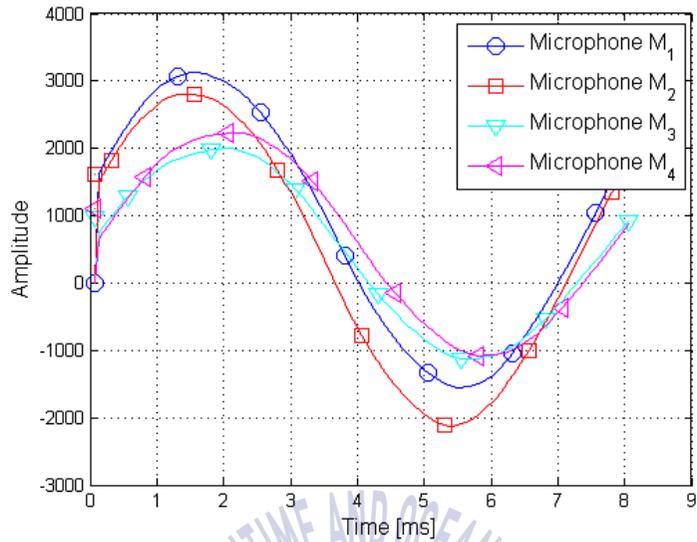
Fig. 19 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 0^\circ$ (continued),
 (e) $f = 350$ Hz (f) $f = 700$ Hz

Fig. 20은 수신각도 $\phi = 15^\circ$ 방향에서 각 주파수별로 기적소리신호가 발생했을 때 마이크로폰 유닛으로 수신한 신호의 파형을 DSP에서 관찰한 그래프이다. M_2 의 신호가 먼저 수신되고 M_1, M_3, M_4 의 순서로 신호가 수신됨을 관찰할 수 있다.

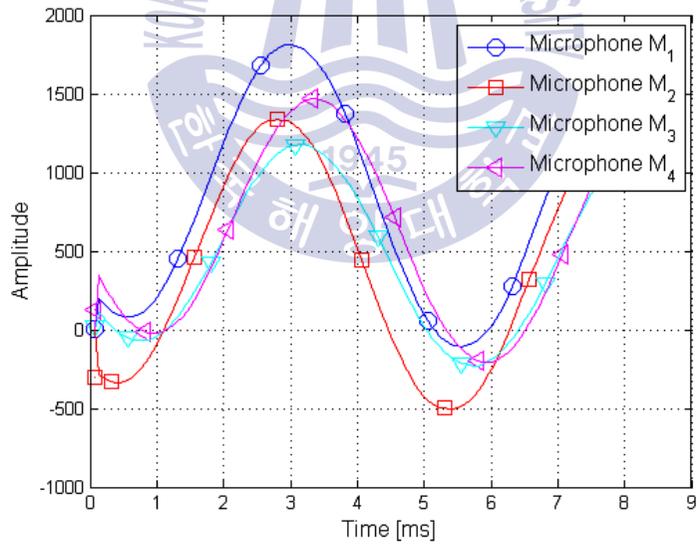


(a) $f = 70$ Hz

Fig. 20 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 15^\circ$

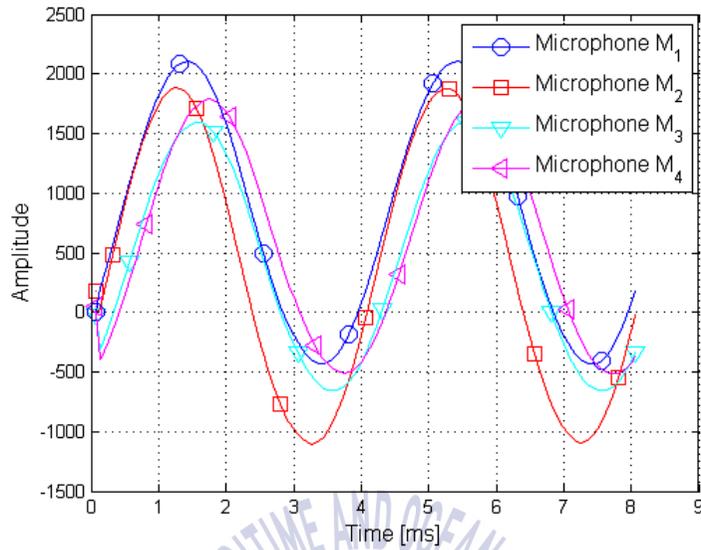


(b) $f = 130$ Hz

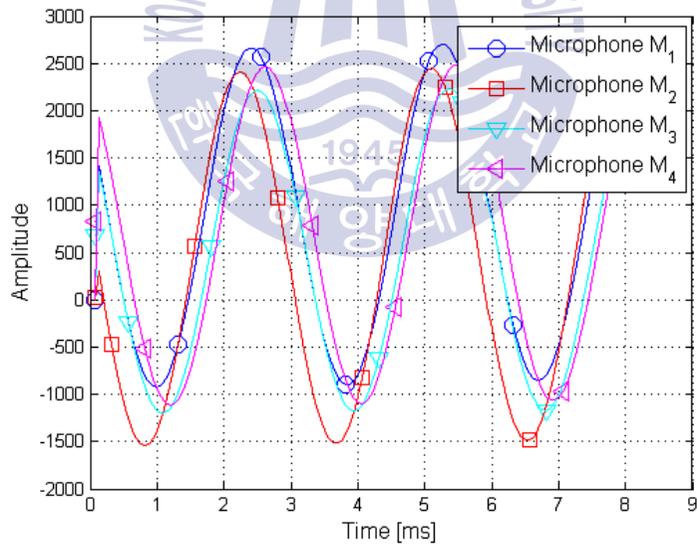


(c) $f = 200$ Hz

Fig. 20 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 15^\circ$ (continued),
 (b) $f = 130$ Hz (c) $f = 200$ Hz



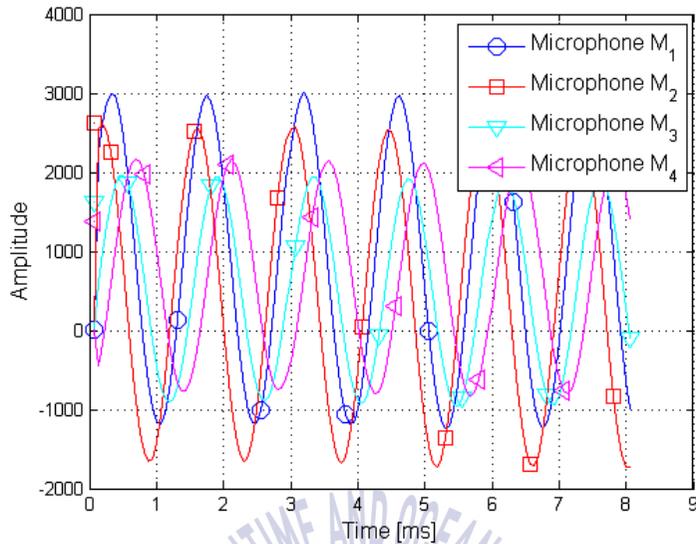
(d) $f = 250$ Hz



(e) $f = 350$ Hz

Fig. 20 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 15^\circ$ (continued),

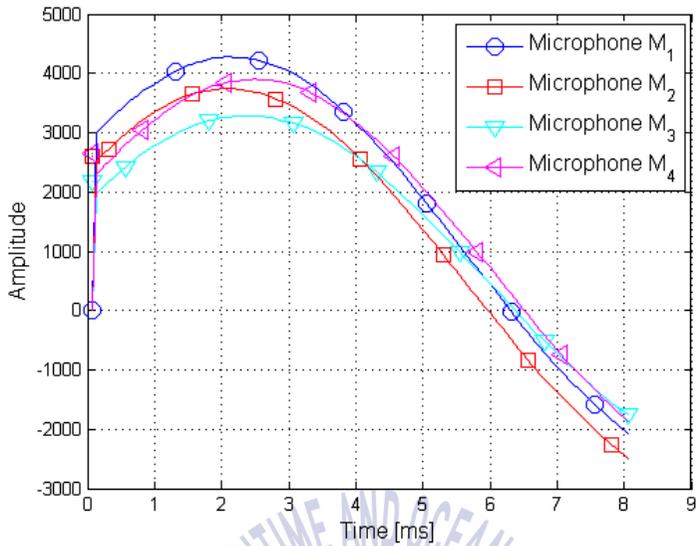
(d) $f = 250$ Hz (e) $f = 350$ Hz



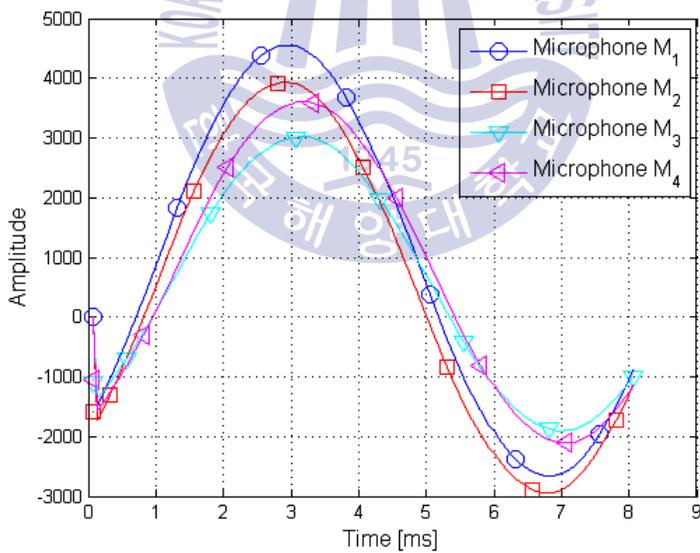
(f) $f = 700 \text{ Hz}$

Fig. 20 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 15^\circ$ (continued)

Fig. 21은 수신각도 $\phi = 30^\circ$ 방향에서 각 주파수별로 기적소리신호가 발생했을 때 마이크로폰 유닛으로 수신한 신호의 파형을 DSP에서 관찰한 그래프이다. M_2 의 신호가 먼저 수신되고 M_1 , M_3 , M_4 의 순서로 신호가 수신되지만, M_2 와 M_1 의 차이가 매우 작음을 관찰할 수 있다.



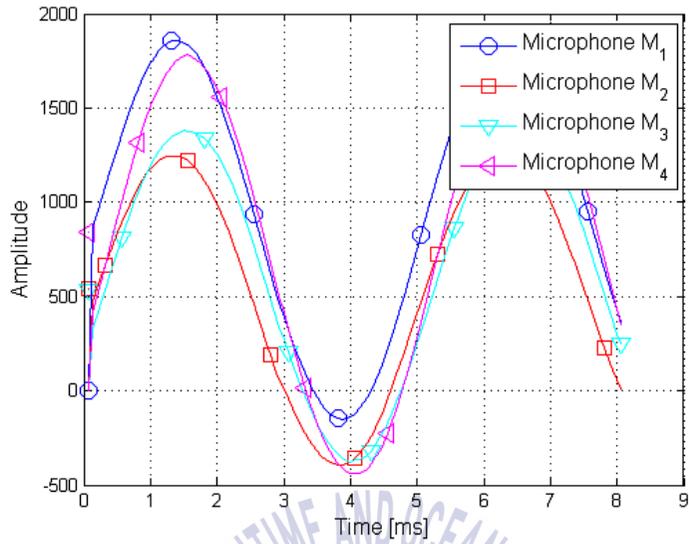
(a) $f = 70$ Hz



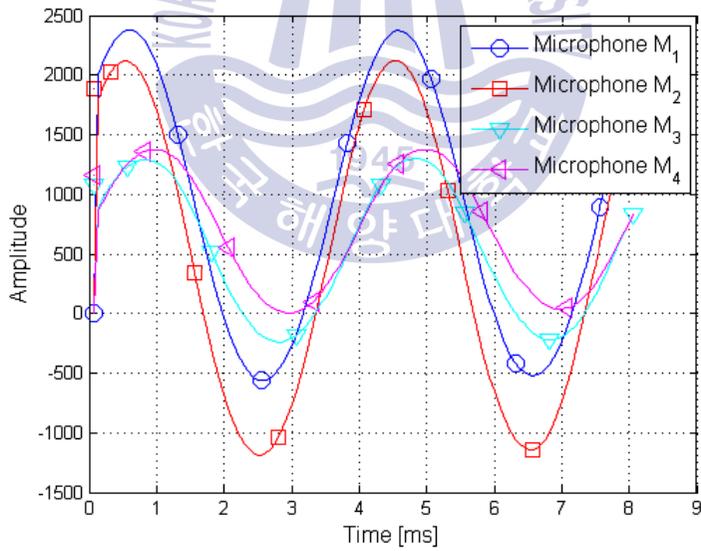
(b) $f = 130$ Hz

Fig. 21 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 30^\circ$,

(a) $f = 70$ Hz (b) $f = 130$ Hz

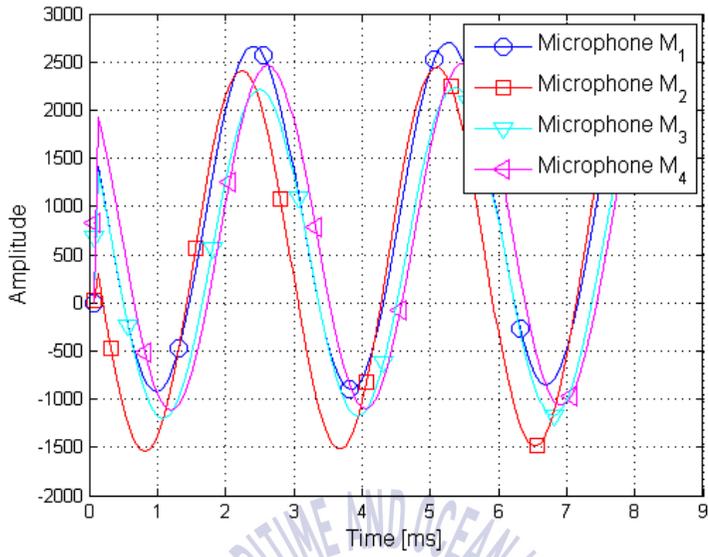


(c) $f = 200$ Hz

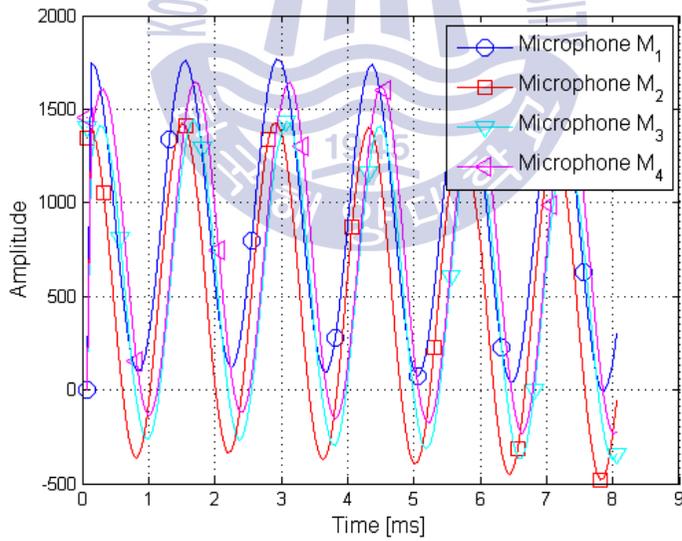


(d) $f = 250$ Hz

Fig. 21 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 30^\circ$ (continued),
(c) $f = 200$ Hz (d) $f = 250$ Hz



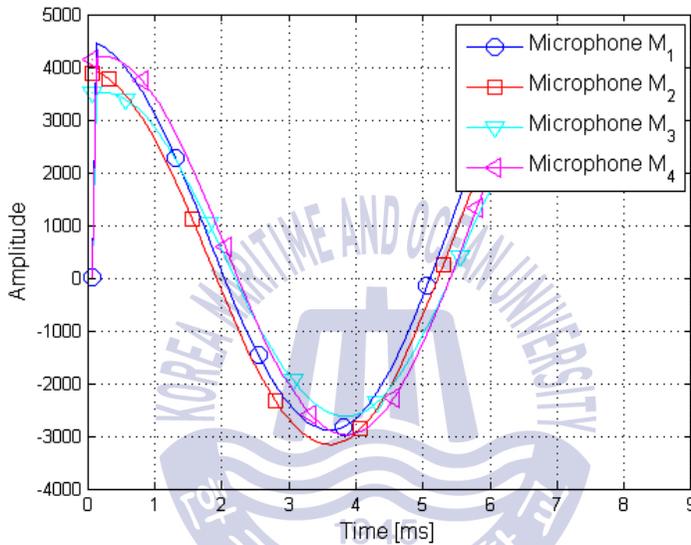
(e) $f = 350 \text{ Hz}$



(f) $f = 700 \text{ Hz}$

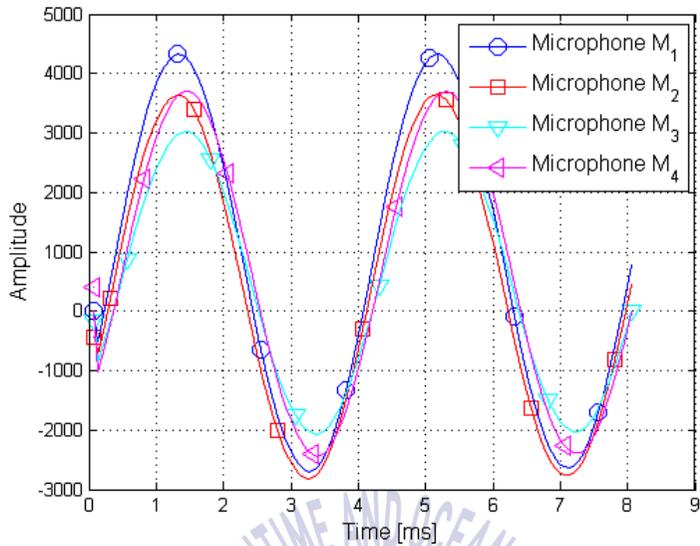
Fig. 21 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 30^\circ$ (continued),
 (e) $f = 350 \text{ Hz}$ (f) $f = 700 \text{ Hz}$

Fig. 22는 수신각도 $\phi = 45^\circ$ 방향에서 각 주파수별로 기적소리신호가 발생했을 때 마이크로폰 유닛으로 수신한 신호의 파형을 DSP에서 관찰한 그래프이다. M_1 과 M_2 의 신호가 동일한 수준의 순서로 먼저 수신되고 그 뒤로 M_3 와 M_4 의 신호가 동일한 수준의 순서로 신호가 수신됨을 관찰할 수 있다.

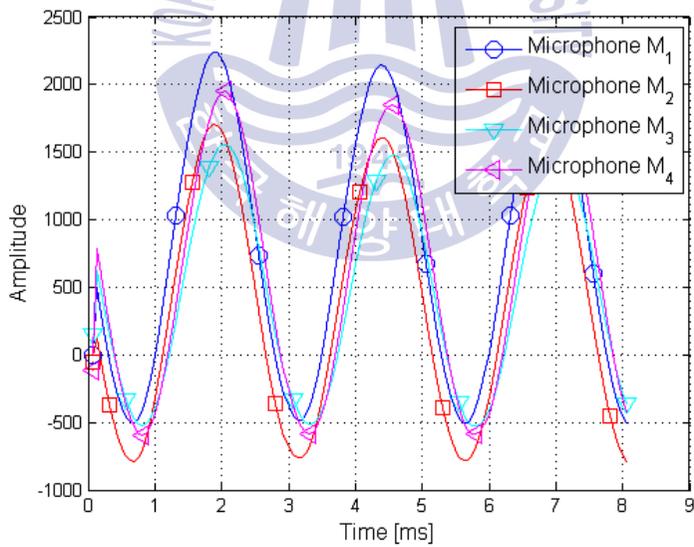


(a) $f = 70$ Hz

Fig. 22 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$

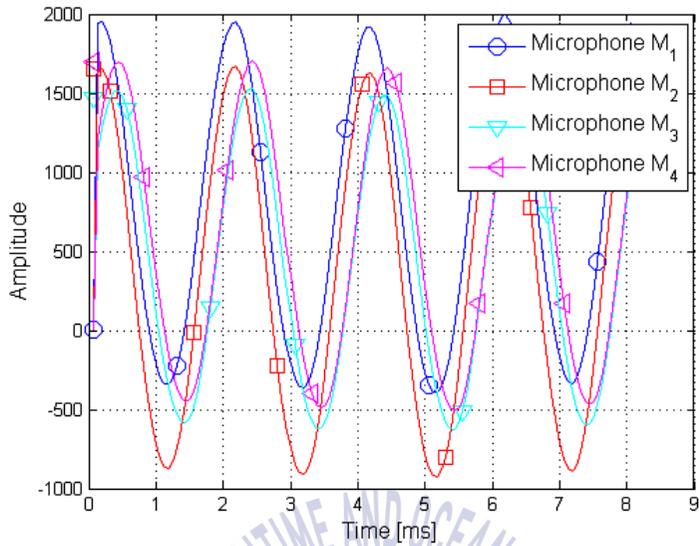


(b) $f = 130$ Hz

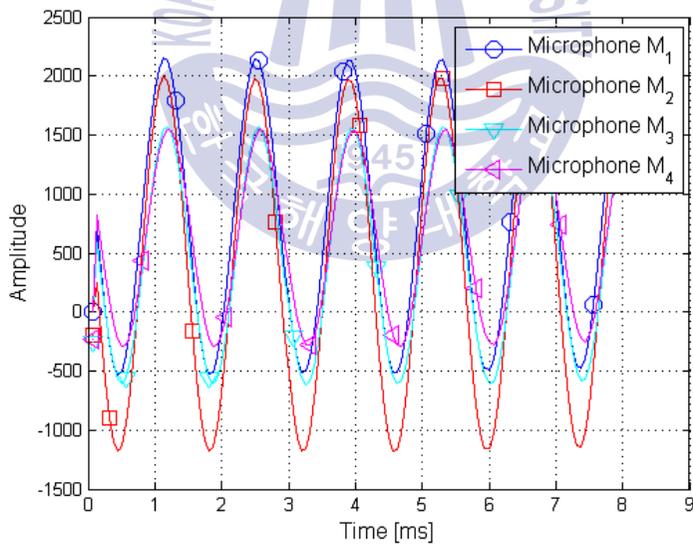


(c) $f = 200$ Hz

Fig. 22 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$ (continued),
 (b) $f = 130$ Hz (c) $f = 200$ Hz

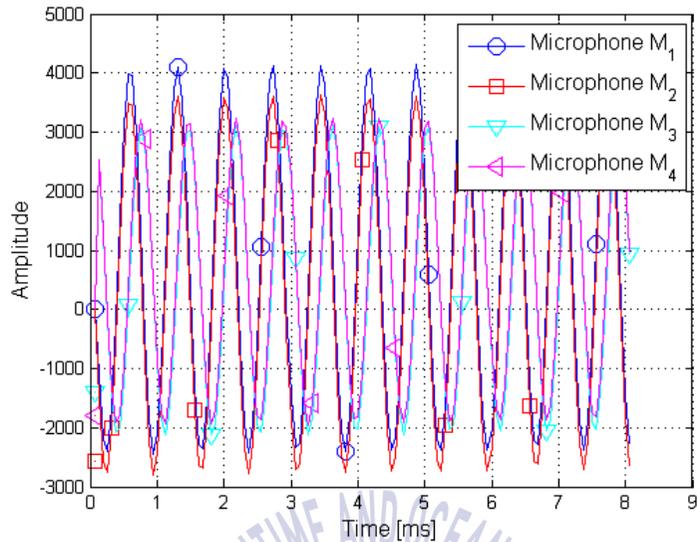


(d) $f = 250$ Hz



(e) $f = 350$ Hz

Fig. 22 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$ (continued),
 (d) $f = 250$ Hz (e) $f = 350$ Hz



(f) $f = 700 \text{ Hz}$

Fig. 22 Snapshot of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$ (continued)

위의 실험과정에서 각 방향의 마이크로폰으로 수신된 기적소리신호의 위상값과 4개의 마이크로폰 중 가장 앞서서 2개의 위상 값을 구하여 그 값의 차이를 계산한다. 기적소리신호의 위상값과 가장 위상이 앞서서 마이크로폰과 인접한 마이크로폰과의 위상 값의 차이를 계산한 값은 Table 5와 Table 6에서 확인할 수 있다. Table 5는 컴파일러상에서 각각의 마이크로폰으로 수신되는 기적소리신호의 $\Delta\theta$ 를 계산한 값을 관찰한 것이다. 이 값들에서 가장 큰 위상값과 두 번째로 큰 위상값의 차이를 계산한 것이 Table 6이다. 그리고 Table 6의 결과로부터 주파수별로 수신각도에 따른 위상값의 차이가 다르다는 것을 알 수 있다.

Table 5 Phase of the received signal according to ϕ

	$\phi = 0^\circ$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 45^\circ$	
70 Hz	①	4.85773	①	0.450223	①	5.39923	①	3.48751
	②	4.94345	②	0.527306	②	5.42914	②	3.48587
	③	4.85639	③	0.385029	③	5.30029	③	3.29499
	④	4.77567	④	0.298359	④	5.27459	④	3.3134
130 Hz	①	2.05896	①	5.08016	①	3.00986	①	2.07663
	②	2.22657	②	5.16261	②	3.06757	②	2.06831
	③	2.06909	③	4.93213	③	2.80067	③	1.78421
	④	4.91449	④	4.84182	④	2.78878	④	1.85267
200 Hz	①	5.31854	①	3.8079	①	2.32897	①	3.16585
	②	5.59347	②	4.00906	②	2.15778	②	3.10018
	③	5.32245	③	3.54532	③	2.06742	③	2.67795
	④	3.42308	④	3.39202	④	1.93723	④	2.69559
250 Hz	①	5.64914	①	0.722059	①	4.59677	①	4.83664
	②	5.97236	②	0.977529	②	4.72215	②	4.83247
	③	5.65136	③	0.397301	③	4.13695	③	4.19716
	④	5.02302	④	0.055606	④	3.93926	④	4.14175
350 Hz	①	1.69059	①	5.18433	①	1.45441	①	2.58783
	②	2.161	②	5.54112	②	1.61298	②	2.58073
	③	1.69285	③	4.63059	③	1.21108	③	2.16521
	④	0.817995	④	2.84661	④	0.980214	④	2.07202
700 Hz	①	2.024	①	4.12104	①	3.14159	①	3.2484
	②	3.002	②	4.79139	②	3.4997	②	3.21848
	③	2.02466	③	3.46066	③	1.3522	③	2.30366
	④	0.927291	④	2.52685	④	0.661146	④	2.45571

Table 6 Values of the $\Delta\theta$ according to ϕ

	$\phi = 0^\circ$		$\phi = 15^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 45^\circ$	
70 Hz	$\Delta\theta$	0.08572	$\Delta\theta$	0.077083	$\Delta\theta$	0.02991	$\Delta\theta$	0.00164
130 Hz	$\Delta\theta$	0.15748	$\Delta\theta$	0.12248	$\Delta\theta$	0.05771	$\Delta\theta$	0.00832
200 Hz	$\Delta\theta$	0.27102	$\Delta\theta$	0.20116	$\Delta\theta$	0.09036	$\Delta\theta$	0.00417
250 Hz	$\Delta\theta$	0.321	$\Delta\theta$	0.25547	$\Delta\theta$	0.12538	$\Delta\theta$	0.01419
350 Hz	$\Delta\theta$	0.47041	$\Delta\theta$	0.35679	$\Delta\theta$	0.15857	$\Delta\theta$	0.0071
700 Hz	$\Delta\theta$	0.978	$\Delta\theta$	0.67035	$\Delta\theta$	0.35811	$\Delta\theta$	0.02992

Fig. 23은 Fig. 11에서 실행한 시뮬레이션 값과 Table 6에서 구한 실제 측정값을 비교한 그래프이다. 그래프를 확인하면 시뮬레이션에서 추론한 결과와 실제 측정결과에서 주파수 f 에 따른 $\Delta\theta$ 의 변화 추이가 같음을 볼 수 있다. 따라서 이론상으로 설계한 알고리즘이 실제 실험에서 잘 동작한 것을 확인할 수 있다.

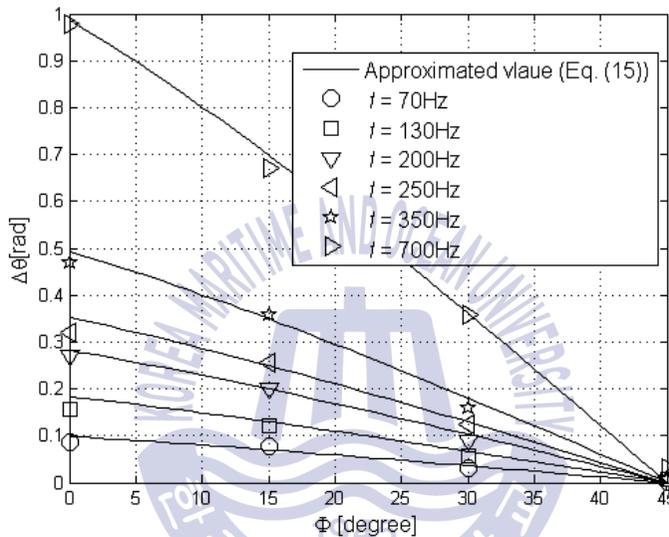


Fig. 23 Comparison of the experimental result and simulation result

Fig. 24는 사용되는 기적소리의 주파수에 따라 수신 기적신호의 방향을 결정하기 위한 결정 영역의 문턱값을 나타낸다. 수신 기적신호의 방향은 Fig. 7에서와 같이 8 방향 중 하나로 결정되므로 문턱값은 $\phi = 22.5^\circ$ 일 때의 위상 차이를 계산함으로써 얻을 수 있다. Fig. 18와 같이 FFT 크기 응답으로부터 수신 기적소리에서 사용된 주파수를 검출한 후 이에 해당하는 문턱값을 적용한다. 그러면, 각 마이크로폰으로부터 수신된 기적소리의 위상 차이를 계산하고 이를 문턱값과 비교하여 수신된 기적신호의 방향을 결정한다.

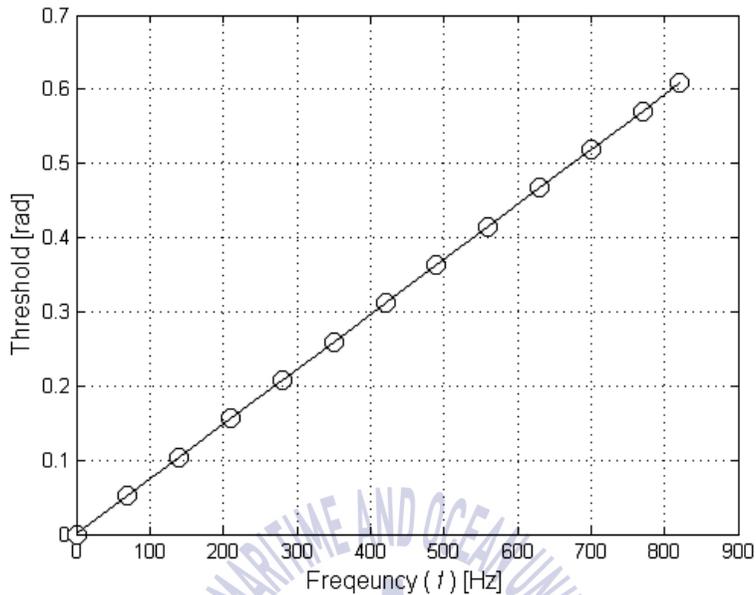


Fig. 24 Curve of the required threshold versus f

앞서 설명한대로 실험은 마이크로폰 유닛과 기적소리 신호를 발생시키는 스피커 사이에 일정한 거리 $D=2m$ 를 유지하면서 15° 간격으로 방향을 바꾸는 동시에 기적신호의 주파수도 변경하면서 방향 검출 성능을 테스트하였으며 사용한 주파수는 70, 130, 200, 250, 350, 700Hz이다. 또한 Fig. 24에서 구한 문턱값을 적용하여 진행하여 모든 주파수 대역에서 Fig. 7의 8 방향을 성공적으로 검출하는 것을 확인하였다.

Table 7와 Table 8은 기적소리의 주파수 및 방향에 따른 추정된 위상 차이 $\Delta\theta$ 의 평균 오차를 나타낸다. 모든 경우에 있어서 $\Delta\theta$ 는 0.02 rad 이내의 평균 오차를 나타내며, 이는 1° 이내의 수신각도 오차를 의미한다. 따라서 제안하는 방향탐지 알고리즘의 정확도가 높다고 판단할 수 있다.

Table 7 Average error of $\Delta\theta$ according to frequency of the whistle signal

Frequency [Hz]	70	130	200	250	350	700
Average error of $\Delta\theta$ [rad]	0.0070	0.0127	0.0075	0.0139	0.0151	0.0177

Table 8 Average error of $\Delta\theta$ according to ϕ

ϕ [degree]	0	15	30	45
Average error of $\Delta\theta$ [rad]	0.0191	0.0096	0.0096	0.0109



제 7 장 결론

본 논문에서는 선박에서 수신 기적음의 주파수 분석을 통해 수신 기적신호의 위상 차이를 이용하여 수신 기적소리의 방향을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 한 지점에서 네 방향으로 설치된 마이크로폰을 통해 70 ~ 820Hz 사이의 주파수에 해당하는 기적소리신호를 수신하여 주파수 분석을 통해 각 마이크로폰 방향별로 수신 신호의 크기 응답 및 위상 응답을 구하여 해당하는 주파수와 위상을 얻는다. 그리고 서로 인접한 2개의 마이크로폰에서 추출된 위상 값의 차이는 기적음이 해당 마이크로폰에 도달하는 시간 차이에 비례하므로 본 논문에서는 4개의 마이크로폰 중 가장 앞서는 2개의 위상 값의 차이로부터 기적음의 방향을 탐지하는 방법을 제안하였다.

또한 제안하는 알고리즘을 이론적으로 분석하고 DSP로 구현된 시스템을 이용하여 기적소리신호 발생장치와 이를 수신하는 마이크로폰 사이의 거리가 2m인 실험실 안에 흡음제를 설치한 환경에서 성능을 검증한 결과가 이론적 분석 결과와 비교하였을 때 수신각도 1°이내의 매우 작은 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 해양수산부 중앙해양안전심판원, 해양사고통계 15년, <https://data.kmst.go.kr/kmst/statistics/preiodStat/selectPreiodStat.do>, 2015.
- [2] 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, July 1, 2002.
- [3] 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), Dec 8, 1998.
- [4] 전승환, 채양범, “선박기적음의 위치검출에 관한 기초연구”, 海事産業研究所論文集, vol.7, 1998.
- [5] 문성배, 전승환, “기적음원의 위치검출에 관한 연구Ⅱ”, 한국해양환경공학회 학술대회논문집, vol.1998, p.267-274, 1998.
- [6] 노창수, 도성찬, 이종수, “선박 기적음을 활용한 위치추정 시스템개발”, 한국정보전자통신기술학회논문지, vol.4 no.1, 2011.
- [7] 김형중, 김정창, “선박용 디지털 음향수신장치 연구”, 한국마린엔지니어링학회지 (KOSME), vol. 38, no. 9, pp.1125-1130, 2014.
- [8] 권혁진, 김정창 “선박의 기적소리방향 검출장치 개발”, 2015년도 한국방송공학회 하계 학술대회, pp.7-8, 2015.
- [9] ISO 14859:2012 - Ships and marine technology - Sound reception systems, http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=55195, Apr 1, 2012
- [10] 한국선급, 선박설비기준, <http://www.krs.co.kr:8080/kor/dn/rul/%EC%84%A0%EB%B0%95%EC%84%A4%EB%B9%84%EA%B8%B0%EC%A4%80.pdf>, 2014.