

기적신호의 스펙트럼 분석을 통한 음향수신장치의 방향탐지 알고리즘 설계 및 분석

권혁진¹ · 김정창[†]

(Received August 19, 2016 ; Revised August 26, 2016 ; Accepted January 18, 2017)

Design and analysis of direction indicating algorithm for sound reception system based on spectral analysis of whistle signal

Hyuk-Jin Kwon¹ · Jeong-Chang Kim[†]

요약: 본 논문에서는 스펙트럼 분석을 통해 선박 기적신호의 위상 차이를 이용한 음향수신장치의 방향탐지 알고리즘을 설계하고 분석한다. 제안하는 시스템은 한 지점에서 90도 간격의 네 방향을 향하도록 설치된 마이크로폰으로부터 기적신호를 수신한다. 제안하는 알고리즘은 스펙트럼 분석을 통하여 각 수신 신호의 위상을 검출하고 인접한 2개의 마이크로폰으로부터 수신된 신호의 위상 차이를 얻음으로써 기적신호의 방향을 추정한다. 또한, 수신 신호의 도착 각도에 따라 인접한 두 수신 신호 사이의 위상 차이를 이론적으로 분석하고 DSP 칩을 이용하여 제안하는 시스템을 구현한다. 뿐만 아니라, 구현된 시스템을 이용하여 실험실 환경에서 제안하는 알고리즘의 동작을 검증한다. 실험 결과는 제안하는 방식이 기적신호의 방향을 잘 추정할 수 있음을 보여준다.

주제어: 위상차이, 수신 방향, 선박 기적소리, 음향수신장치, 스펙트럼 분석

Abstract: In this paper, a sound reception system using a phase difference of whistle signals is proposed and analyzed based on spectral analysis. The proposed system receives whistle signals from four microphones installed in four different directions with 90-degree intervals between them. The proposed algorithm detects the phase of each received signal based on spectral analysis and estimates the direction of the whistle signal by obtaining the phase difference between the received signals from two adjacent microphones. Furthermore, we theoretically analyze the phase difference between two adjacent received signals according to their arrival angles and implement the proposed system using a DSP chip. In addition, the operation of the proposed algorithm are verified using the implemented system in a laboratory environment. Experimental results show that the proposed scheme can well estimate the direction of the whistle signal.

Keywords: Phase difference, Received direction, Ship whistle, Sound reception system, Spectral analysis

1. 서론

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. 선박의 기적

소리를 사용할 경우 선교가 열려있는 상태에서는 그 소리를 파악하기 쉬우나 선교가 폐워진 상태에서는 당직항해사가 기적소리의 방향을 파악하기 힘든 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 음향수신장치(sound reception system: SRS)가 도입되었다. 음향수신장치란 가시거리가 확보되지 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 음향

[†] 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 49112, Korea, E-mail: jchkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4315

¹ Department of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: gurvls0813@gmail.com, Tel: 051-410-4909

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수신장치가 개발되었으나 바람소리, 파도소리, 해상 주변의 구조물에 의한 소리반사현상 등 잡음에 민감하고 탐지가능한 방향의 수가 제한적이라는 단점이 존재했다. 이에 디지털 기반의 선박용 음향수신장치가 개발되었다[4]-[8]. 먼저 [4]-[6]에서는 마이크로폰 수신 신호들간의 상호상관(cross-correlation)을 이용하여 기적음의 도달시간지연(time delay of arrival: TDOA)을 측정하는 방법이 제안되었다. 논문 [4]에서는 일자로 마이크로폰을 배열한 뒤 인접한 2개의 마이크로폰 사이의 TDOA를 측정한 뒤 그 결과를 거리로 환산하여 기적음과 마이크로폰들과의 평면 상의 함수관계로 기적음 발신지까지의 거리와 방향을 측정하였다[4].

논문 [5][6]에서는 선박 기적음의 도달시간차가 동일하게 되는 위치의 궤적을 쌍곡선으로 그린 후 쌍곡선의 교점을 기적음 발신지로 추정하는 방법이 제안되었다. 논문 [4][5]에서는 3개의 마이크로폰 배열을 이용해 방향탐지가 이루어지며 180° 범위 내에서만 방향 검출이 가능하다. 또한 [6]에서는 3개의 마이크로폰 배열과 반대로 향하는 1개의 마이크로폰을 추가로 설치하여 전방과 후방의 기적음에 대한 신호 크기 차이를 측정하여 360°의 영역에서 기적음의 방향을 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 향해 있는 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 수신 기적신호의 스펙트럼 분석을 통해 수신 신호의 위상 차이를 이용하는 방법을 제시하고 분석한다. 제안하는 알고리즘은 네 방향으로 설치된 마이크로폰을 통해 70 ~ 820Hz 사이의 주파수에 해당하는 기적음을 수신하여 스펙트럼 분석을 통해 각 마이크로폰 방향별로 수신 신호의 크기 응답(magnitude response) 및 위상 응답(phase response)을 구하여 해당하는 주파수와 위상을 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 스펙트럼 분석을 이용한 방향탐지 기법의 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 프로토타입 하드웨어를 구현한 결과에 대하여 서술하고 5장에서 실험을 통해 알고리즘의 성능을 확인한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 구성

Figure 1은 음향수신장치의 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 변환된 후 디지털 신호처리기(digital signal processor)로 입력되고 방향탐지 알고리즘을 통해 수신 음향신호의 방향을 탐지한다.

Figure 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. 따라서, ADC 출력은 FFT 크기 단위로 묶어서 신호처리된다. 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. 그러면, 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.

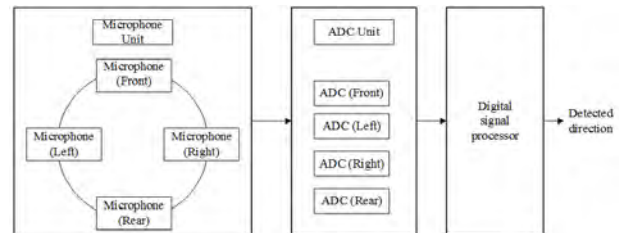


Figure 1: Block diagram of SRS

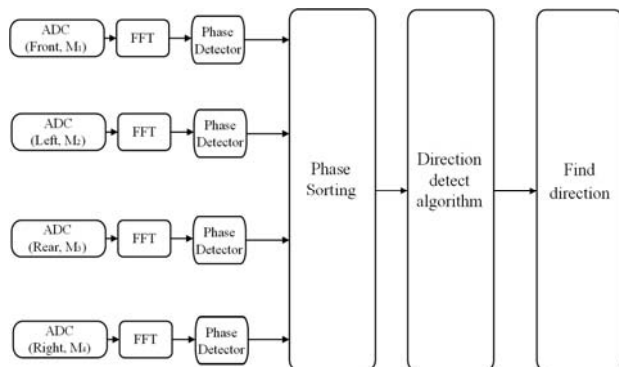


Figure 2: Block diagram of the proposed scheme

3. 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 기적신호의 수신 각도에 따른 위상 차이

먼저, Figure 3의 마이크로폰 배치와 같이 기적음이 마이크로폰 M₂의 정면 방향에서 수신되는 경우를 고려하자. Figure 3에서 D₁는 기적음의 발생지로부터 마이크로폰 M₁까지의 거리를 나타낸다. 본 논문에서 모든 마이크로폰은 동일 평면 상에 존재하고 마이크로폰 유닛의 중심으로부터 각 마이크로폰까지 거리가 d로서 모두 동일하게 배치한다. 선박에서 사용하는 기적음의 주파수(f)는 선박설비기준[9]에 정의되어 있으며 선박의 크기에 따라 Table 1과 같이 주어진다. 따라서 기적신호 x(t)는 x(t) = cos2πft와 같이 정현파 신호로 모델링될 수 있다. 마이크로폰 M₂에 수신된 신호를 r₂(t) = Acos2πft라고 하면 인접한 마이크로폰 M₁에 수신된 신호 r₁(t)는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

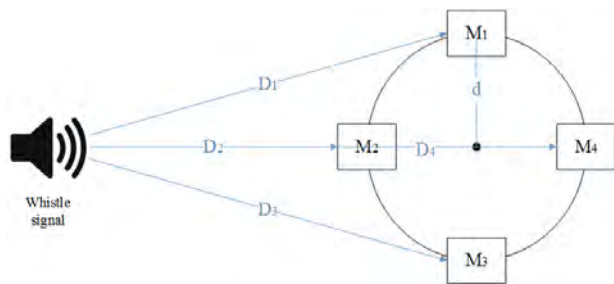


Figure 3: Deployment of four microphones

Table 1: Frequency range of the whistle according to the size of the ship

Classification	Frequency band [Hz]
Vessels of less than 20 m	250 ≤ f ≤ 700
Vessels of more than 20 m	250 ≤ f ≤ 700
Vessels of more than 75 m	130 ≤ f ≤ 350
Vessels of more than 200 m	70 ≤ f ≤ 200

$$\begin{aligned} r_1(t) &= A\cos\{2\pi f(t+\tau)\} \\ &= A\cos(2\pi ft + 2\pi f\tau) \\ &= A\cos(2\pi ft + \Delta\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, A는 마이크로폰에서 수신된 기적신호의 크기를 나타내며, τ는 M₂와 M₁에 수신되는 신호의 상대적인 수신 지연시간(delay time)을 나타낸다. 또한, Δθ는 지연시간 τ로 인해 발생하는 수신 신호의 위상 차이를 나타내며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, v는 소리의 속도를 나타내며 상온에서 344m/s이다.

Figure 3에 따르면 기적음 발생지에 가장 가까운 2개의 마이크로폰은 M₂와 M₁ 혹은 M₃이다. 기적음 발생지와 M₁ 및 M₃ 사이의 거리는 동일하므로 기적음 발생지에 두 번째로 가까운 마이크로폰은 편의상 M₁이라고 가정한다. 그러면, 기적음 발생 위치와 마이크로폰 M₂ 및 M₁이 동일한 평면 상에 있다고 가정하면 기적음의 발생지와 마이크로폰 M₂ 및 M₁의 위치를 Figure 4와 같이 다시 나타낼 수 있다.

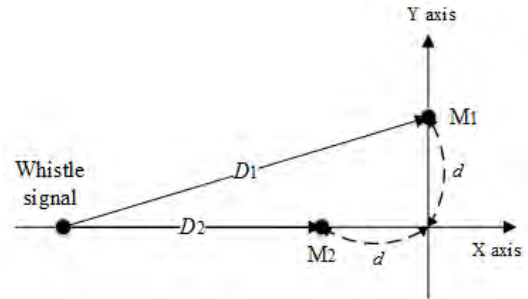


Figure 4: Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M₂ is 0

Figure 4로부터 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} D_1^2 &= d^2 + (D_2 + d)^2 \\ &= 2d^2 + 2dD_2 + D_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

그러면, 식 (3)은 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

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

또한, D₁ - D₂는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_1 - D_2 = \frac{2d^2}{D_1 + D_2} + \frac{2dD_2}{D_1 + D_2} \quad (5)$$

하나의 마이크로폰 유닛 내에 4개의 마이크로폰은 매우 가까이 위치하도록 구현되며 일반적으로 기적음을 발생하는 다른 선박은 마이크로폰 사이의 간격에 비해 상대적으로 멀리 위치해 있으므로 D₁, D₂ ≫ d이고, D₁ ≈ D₂로 가정할 수 있다. 그러면 D₁ - D₂는 식 (6)과 같이 근사화될 수 있다.

$$D_1 - D_2 \approx 0 + d = d \quad (6)$$

그러면, 식 (6)을 식 (2)에 대입하면 Δθ는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d}{v} f \quad (7)$$

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 Figure 4와 유사하게 Figure 5와 같이 나타낼 수 있다. X_2 와 Y_2 는 각각 수신 기적신호 발생지와 x축 및 y축을 잇는 직선이 만나는 점을 나타내고, X_1 과 Y_1 은 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, Figure 5로부터 식 (8)과 식 (9)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

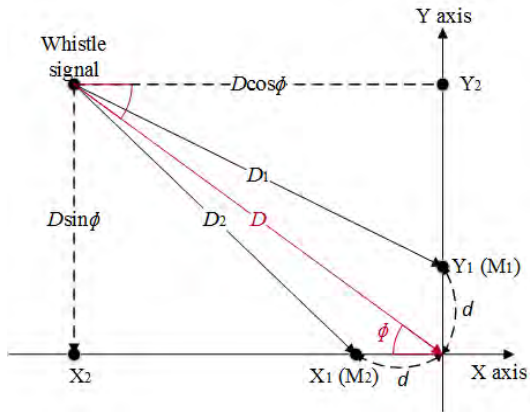


Figure 5: Locations of the whistle transmitter and microphones on a two-dimensional plane when the received angle for M_2 is not 0

$$D_1^2 - D^2 \cos^2 \phi = (D \sin \phi - d)^2 \quad (8)$$

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

식 (8)과 식 (9)는 다시 각각 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_1^2 - D^2 = d^2 - 2dD \sin \phi \quad (10)$$

$$D_2^2 - D^2 = d^2 - 2dD \cos \phi \quad (11)$$

식 (11)에서 식 (10)을 뺀 후 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$(D_1 - D_2) = \frac{2D}{D_1 + D_2} d (\cos \phi - \sin \phi) \quad (12)$$

여기서, 식 (6)에서 사용된 가정을 동일하게 적용하면 $2D/(D_1 + D_2)$ 는 1로 근사화될 수 있으므로 식 (12)는 식 (13)과 같이 근사화될 수 있다.

$$D_1 - D_2 \approx d (\cos \phi - \sin \phi) \quad (13)$$

따라서 식 (2)의 $\Delta\theta$ 는 식 (13)을 이용하여 식 (14)와 같이 근사화될 수 있다.

$$\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d(\cos \phi - \sin \phi)}{v} f \quad (14)$$

특히, M_2 정면으로 기적신호가 수신될 때 $\phi = 0^\circ$ 이므로 $\Delta\theta \approx 2\pi \frac{d}{v} f$ 와 같이 식 (7)과 동일한 결과를 얻을 수 있다.

Figure 6의 마이크로폰 배치에서 수신 기적소리의 위상이 가장 빠른 마이크로폰과 가장 느린 마이크로폰의 거리는 최대 $2d$ 이며, 이들 두 마이크로폰 사이의 위상 차이가 180° 를 넘어서면 ambiguity가 발생한다. 따라서, 마이크로폰 유닛 중심과 마이크로폰 사이의 간격 d 는 식 (14)로부터 다음과 같이 제한되어야 한다.

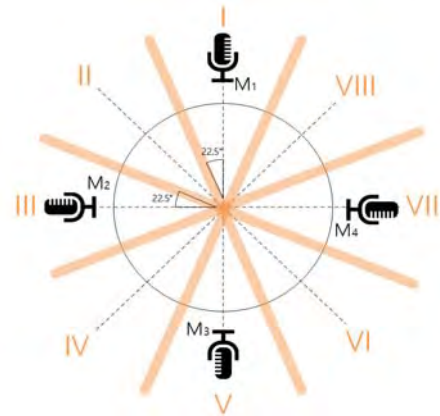


Figure 6: Deployment of microphones and the direction decision region

$$d < \frac{v}{4f} \quad (15)$$

따라서, 기적소리로 사용될 수 있는 최대 주파수에 대해 식 (15)를 만족할 수 있도록 간격 d 를 선택해야 한다. 예를 들어, 사용되는 주파수가 820Hz일 경우 $d < 10.4878\text{cm}$ 이다.

3.2 위상 차이를 이용한 방향탐지 알고리즘

Figure 6은 주어진 마이크로폰 배치에서 수신된 기적신호의 방향에 대한 결정 영역을 나타낸다. 본 논문에서는 ISO 14859 규정[10]의 Annex A를 참고하여 45° 간격으로 8방향의 기적신호 방향 영역을 결정할 수 있도록 한다. 예를 들어, 마이크로폰 M_1 과 마이크로폰 M_2 사이의 방향에서 기적신호가 수신된다면 2사분면 내의 I, II, III 영역 중 하나로 판단하게 된다. 이를 위하여 Figure 6에서처럼 2사분면에 2개의 경계를 정의하게 된다. 첫 번째는 M_1 으로 수신되는 신호의 위상이 M_2 보다 더 빠를 경우 M_1 을 기준으로 22.5° 를

경계로 하여 I 과 II의 영역을 구분한다. 그러면, 식 (14)로부터 $\phi = \pi/8$ 에 해당하는 $\Delta\theta$ 의 값을 문턱값으로 설정하여 $\Delta\theta$ 의 값이 문턱값보다 작으면 II의 영역으로 판단하고 크다면 I의 영역으로 판단할 수 있다. 두 번째는 M_2 로 수신되는 신호의 위상이 M_1 보다 더 빠를 경우 M_2 를 기준으로 22.5° 를 경계로 하여 II와 III의 영역을 구분한다. 그러면, $\phi = \pi/8$ 에 해당하는 $\Delta\theta$ 의 값을 문턱값으로 설정하여 $\Delta\theta$ 의 값이 문턱값보다 작으면 II의 영역으로 판단하고 크다면 III의 영역으로 판단할 수 있다. 여기서, 수신 각도 ϕ 는 위상이 가장 빠른 마이크로폰을 기준으로 정의된다. 나머지 1, 3, 4사분면에 대해서도 동일한 방법을 적용하면, 수신된 기적신호에 대해서 I ~ VIII의 수신 방향을 판단할 수 있다.

또한, 식 (14)에 따르면 주어진 수신 각도에 대한 위상 차이는 기적신호의 주파수에 따라 변하게 되므로 수신 기적소리의 주파수를 검출하여 주파수에 따라 적절한 문턱값을 설정하도록 한다. 4장에서 주파수 및 수신 각도에 따른 위상 차이를 전산 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

4. 시뮬레이션 결과

먼저, 기적신호의 수신각도 ϕ 와 D 에 따른 정확한 $D_1 - D_2$ 의 값과 식 (13)에 의한 근사값과의 차이를 비교해 보기 위해 $2D/(D_1 + D_2)$ 를 계산한다. 이 때, D_1 과 D_2 는 Figure 5로부터 임의의 D 에 대해 식 (15)와 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

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

$$D_2 = \sqrt{(D\cos\phi - d)^2 + (D\sin\phi)^2} \quad (17)$$

Figure 7은 주어진 기적신호의 수신각도 ϕ 에 대해 D 에 따른 $2D/(D_1 + D_2)$ 값을 그래프로 나타낸 것이다. 이 때 ϕ 는 위상이 가장 빠른 마이크로폰을 기준으로 정의되므로 $0^\circ \leq \phi \leq 45^\circ$ 만 고려한다. Figure 7에서 볼 수 있듯이 기적신호의 수신각도에 따라 차이는 있지만 D 가 커질수록 $2D/(D_1 + D_2)$ 의 값이 1에 수렴하는 것을 알 수 있다.

Figure 8은 주어진 D 에 대해 ϕ 에 따른 $2D/(D_1 + D_2)$ 값을 그래프로 나타낸 것이다. Figure 8에서 알 수 있듯이 D 가 커질수록 $2D/(D_1 + D_2)$ 는 ϕ 에 큰 영향을 받지 않으며 1로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Figure 7과 Figure 8로부터 ϕ 는 D 에 비해 의 값 변화에 영향을 적게 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 기적신호 발생지와 마이크로폰 유닛 사이의 거리가 충분히 멀다면 식 (13)의 근사화가 잘 들어맞음을 알 수 있다.

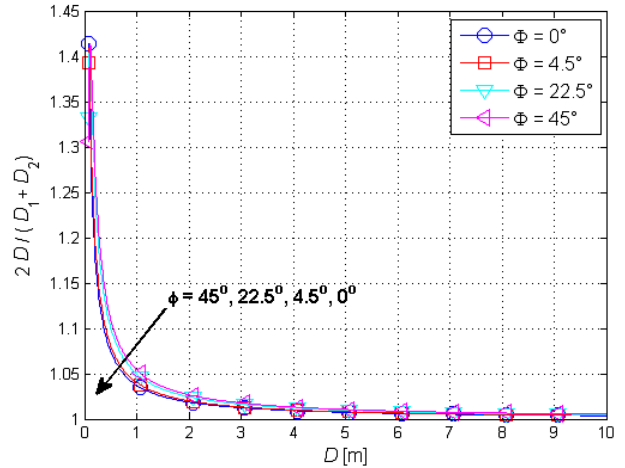


Figure 7: Curves of $2D/(D_1 + D_2)$ versus D for various values of ϕ

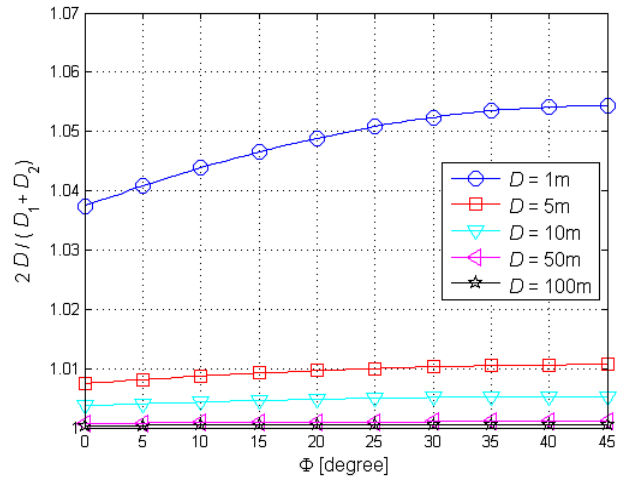


Figure 8: Curves of $2D/(D_1 + D_2)$ versus ϕ for various values of D

다음으로 식 (14)와 같이 근사화된 $\Delta\theta$ 와 식 (2)의 실제 $\Delta\theta$ 와의 차이는 어느 정도인지 알아보자. Figure 9는 $D = 2m$, $d = 7.5cm$ 로 정한 뒤 기적음의 주파수 f 에 따른 근사화된 $\Delta\theta$ 와 실제 $\Delta\theta$ 의 값을 그래프로 나타낸 것이다. Figure 9에서 볼 수 있듯이 이들의 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서, $D = 2m$ 는 실제 선박의 환경에 비하면 매우 가까운 거리이므로 Figure 7과 Figure 8에 따르면 그 이상의 거리에서는 근사화가 더욱 잘 들어맞음을 알 수 있다.

Figure 10은 $f = 350Hz$ 와 $d = 7.5cm$ 인 경우 D 에 따른 식 (14)의 근사화된 $\Delta\theta$ 의 값을 그래프로 나타낸 것이다. Figure 10에서 볼 수 있듯이 D 의 값이 일정 이상 확보될 경우에 D 는 $\Delta\theta$ 에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

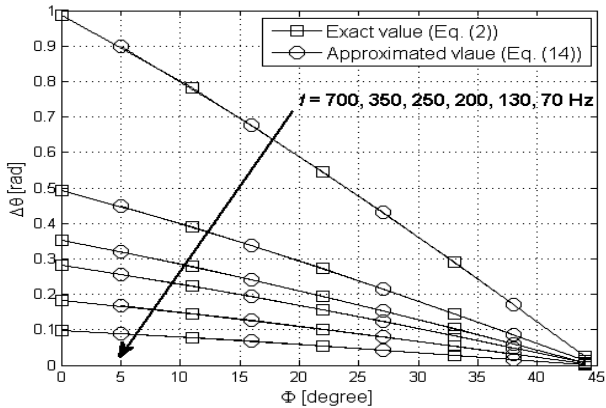


Figure 9: Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various f with $D = 2\text{m}$ and $d = 7.5\text{cm}$

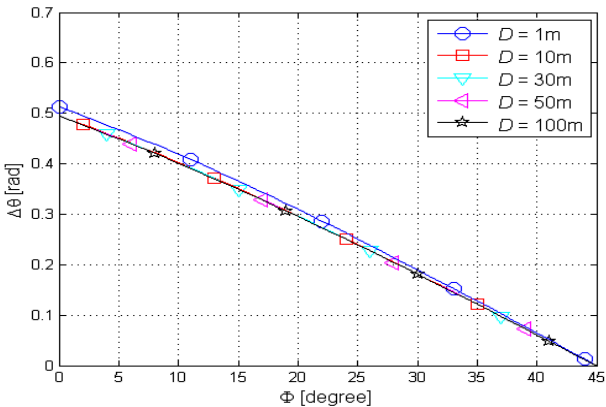


Figure 10: Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various D with $f = 350\text{Hz}$ and $d = 7.5\text{cm}$

4. 하드웨어 구현 결과

본 논문에서는 Analog Devices사의 DSP인 ADSP-BF538F를 이용하여 제안하는 방식을 하드웨어로 구현하였다. Figure 11은 구현된 하드웨어 보드의 모습이며 DSP 칩의 주요 사양은 Table 2와 같다. 구현된 하드웨어는 마이크로폰으로부터 입력 받은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC를 포함하는 오디오 코덱과 디지털 신호로 변환된 기적신호로부터 방향을 탐지하기 위한 디지털 신호처리부로 나뉜다. 이 때 사용된 ADC/DAC 코덱은 Analog Devices 사의 AD73322 칩을 사용했으며 구체적인 사양은 Table 3과 같다. 본 연구에서 구현한 SRS 시스템에서 사용한 ADC 샘플링율은 16kHz이다.



Figure 11: Implemented hardware

Table 2: Specification of the DSP chip

Item	Specification
Processing speed	Core performance up to 600 Mhz
Memory	SDRAM : 64MB x 2chips Flash memory : 4MB
Etc.	4 serial ports

Table 3: Specification of the ADC/DAC codec

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

5. 실험결과

본 논문에서 구현된 알고리즘 및 하드웨어를 통해 ISO 14859[10]에서 권장하는 실험 절차를 참고하여 동작 성능을 검증한다. 실험 절차에 따르면 SRS의 마이크로폰 유닛과 일정한 거리에서 스피커로 단일 주파수 음향 신호를 출력하고 SRS는 발생된 음향신호를 수신하여 방향을 제대로 탐지하는지 확인한다. 실험에서 사용된 마이크로폰은 무지향성이며 감도는 $-44 \pm 2\text{dB}$ 이다. 마이크로폰 유닛은 Figure 6과 같이 4개의 마이크로폰을 $d = 7.5\text{cm}$ 의 거리를 두고 90도 간격으로 서로 다른 방향을 향하도록 설치하였다.

실험 절차는 다음과 같다. 마이크로폰 유닛과 기적소리 신호를 발생시키는 스피커 사이에 일정한 거리 $D = 2\text{m}$ 를 유지하면서 15° 간격으로 방향을 바꾸어가며 기적신호를 발생시킨다. 마이크로폰 유닛에서 기적신호를 수신하면 ADC에서 디지털 신호로 변환된 후 DSP에서 각 마이크로폰으로 수신된 기적신호의 위상 $\Delta\theta$ 를 검출한다. 실험에서 사용한 기적소리의 주파수는 선박 크기에 따른 주파수 범위(Table 1)의 경계에 해당하는 주파수들을 사용하였다. 또한, 실험에서 설정한 기적소리의 수신신호 세기는 Table 4와 같다. 기적신호는 ISO 14859[10]를 기준으로 주파수 별로 서로 다른 세기를 가지며 본 논문에서는 $D = 2\text{m}$ 에서 마이크로폰에 도달하는 신호 세기가 Table 4와 같이 되도록 설정하였다.

Table 4: Signal levels of the received signal at the microphone for $D = 2\text{m}$

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

Figure 12는 마이크로폰 M_1 의 정면 방향($\phi=0$)에서 350Hz의 기적신호가 발생했을 때 마이크로폰 유닛으로 수신하여 DSP에서 관찰한 수신 신호의 파형이다. 기적소리의 발생지로부터 M_1 가 가장 가까이에 위치하므로 M_1 으로 수신된 신

호의 위상이 가장 빠르고 M_2 및 M_3 로 수신된 신호의 위상은 거의 동일하며 M_4 로 수신된 신호의 위상이 가장 느린 것을 관찰할 수 있다.

Figure 13은 M_1 과 M_2 의 가운데 방향($\phi=45^\circ$)에서 350Hz의 기적신호가 발생했을 때 마이크로폰 유닛으로 수신하여 DSP에서 관찰한 수신 신호의 파형이다. 기적소리의 발생지로부터 M_1 과 M_2 까지의 거리가 동일하므로 M_1 과 M_2 의 신호는 거의 동일한 위상을 나타내며 M_3 와 M_4 의 신호는 위상이 가장 느린 것을 관찰할 수 있다.

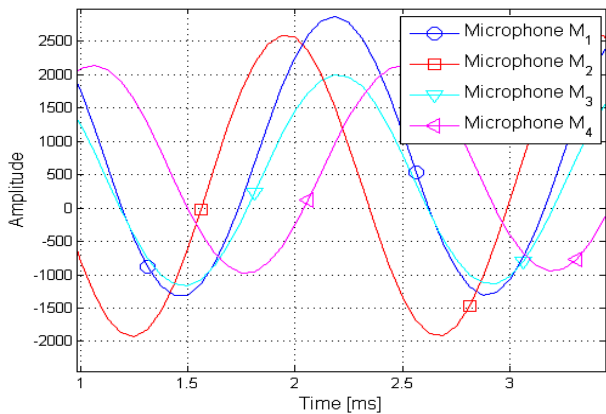


Figure 12: Snapshot of the received whistle signals when $\phi = 0^\circ$

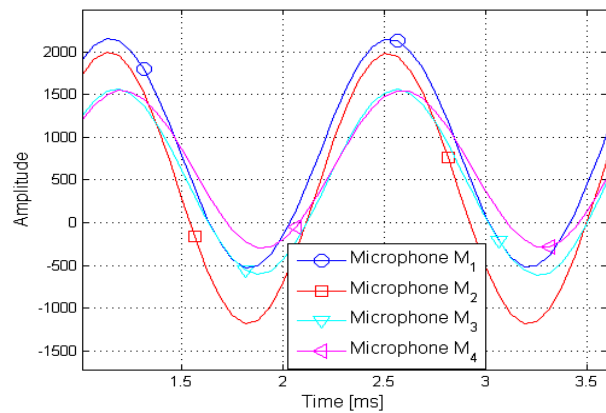


Figure 13: Wave of a received whistle signal at $\phi = 45^\circ$

Figure 14는 수신된 기적신호를 FFT한 후 크기 응답을 관찰한 결과를 나타낸다. 샘플링율은 16kHz이며 FFT의 크기는 512를 사용하였다. 따라서, 32Hz의 주파수 분해능(resolution)을 가지며 352Hz를 나타내는 11번째 주파수 빈(bin)에서 크기 응답이 가장 크게 나오는 것을 확인할 수 있다.

Figure 15는 구현된 하드웨어를 사용하여 다양한 기적소리 주파수에 대해서 수신 각도 ϕ 에 따른 위상 차이 $\Delta\theta$ 를 측정된 값과 식 (14)의 계산 값을 비교한 결과를 나타낸다. Figure 15에서 볼 수 있듯이 구현된 하드웨어를 이용한 기적신호 주파수 및 수신 각도에 따른 위상 차이의 측정 결과가 이론적인 계산 결과와 매우 유사하게 관찰됨을 알 수 있다.

Figure 16은 사용되는 기적소리의 주파수에 따라 수신 기

적신호의 방향을 결정하기 위한 결정 영역의 문턱값을 나타낸다. 수신 기적신호의 방향은 Figure 6에서와 같이 8방향 중 하나로 결정되므로 문턱값은 식 (14)로부터 $\phi = 22.5^\circ$ 일 때 위상 차이를 계산함으로써 얻을 수 있다. Figure 14와 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.

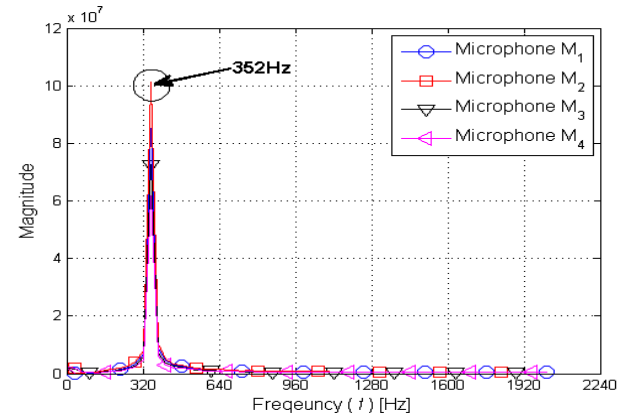


Figure 14: Snapshot of the magnitude response for the received whistle signals

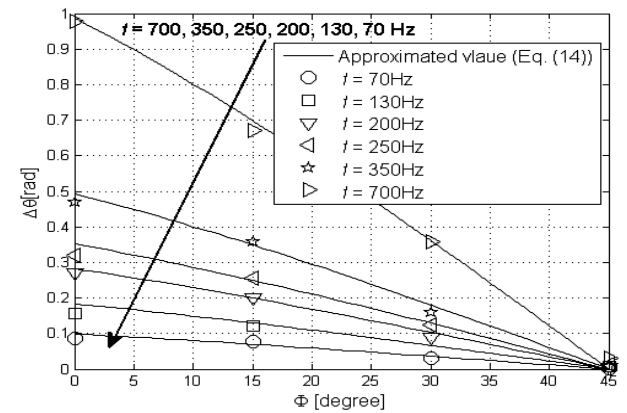


Figure 15: Curves of $\Delta\theta$ versus ϕ for various f

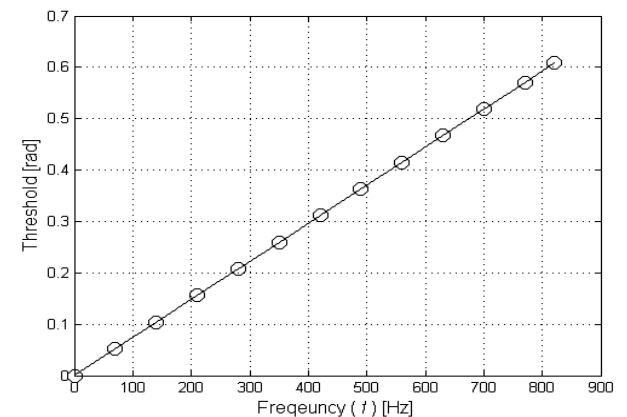


Figure 16: Curve of the required threshold versus f

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 테스트하였다. 사용한 주파수는 70, 130, 200, 250, 350, 700Hz이며 모든 주파수 대역에서 **Figure 6**의 8 방향을 성공적으로 검출함을 확인했다.

Table 5와 **Table 6**은 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 700Hz 주파수에서 1° 이내의 수신각도 오차를 나타낸다.

Table 5: 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 6: 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

6. 결 론

본 논문에서는 선박에서 수신 기적음의 스펙트럼 분석을 통해 수신 기적신호의 위상 차이를 이용하는 방법을 제시하고 분석하였다. 제안하는 알고리즘은 한 지점에서 90° 간격의 네 방향을 향하도록 설치된 마이크로폰을 통해 70 ~ 820Hz의 주파수에 해당하는 기적음을 수신하여 각 수신 신호의 위상을 검출하고 인접한 2개의 마이크로폰으로부터 수신된 신호의 위상 차이를 얻음으로써 기적신호의 방향을 추정한다. 또한 제안하는 알고리즘을 이론적으로 분석하고 구현된 시스템을 이용하여 실험실 환경에서 성능을 검증한 결과가 이론적 분석 결과를 잘 따르고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 이공계전문가 기술개발서포터즈 사업의 지원을 받아 수행되었음.[과제명: Brown noise 환경 하에서 ISO-14859 규정을 만족하는 선박용 sound reception system의 선급인증 및 양산화를 위한 성능개선 기술개발]

References

[1] Korea Maritime Safety Tribunal, Marine accident statistics 2015, <https://data.kmst.go.kr/kmst/statistics/preiodStat/selectPreiodStat.do>, Accessed November 7, 2015 (in Korean).
 [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, Accessed 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), Accessed December 8, 1998.
 [4] S. H. Jun and Y. B. Chae, "A basic study on position detecting system using vessel whistle blast," Journal of Korea Maritime University Research Institute of Maritime Industry, vol. 7, pp. 151-158, 1998 (in Korrean).
 [5] S. B. Moon and S. H. Jun, "A study on position detecting system using vessel whistle blast II," Journal of Advanced Research in Ocean Engineering (JAROE), vol. 1998, pp. 267-274, 1998 (in Korrean).
 [6] C. S. Roh, S. C. Do, and J. S. Lee, "Study on location estimation of nearby ships from whistle blast (1)," Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, vol. 4 no. 1, pp. 32-38, 2011 (in Korrean).
 [7] H. J. Kim and J. C. Kim, "A study on digital sound reception systems for ships," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 9, pp. 1125-1130, 2014 (in Korean).
 [8] H. J. Kwon and J. Kim, "Development of ship whistle direction indicating systems," Proceedings of 2015 The Korean Society of Broadcast Engineers Summer Conference (KOSBE), pp. 7-8, 2015 (in Korrean).
 [9] Korean Register, Ship facility standard, <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>, Accessed October 14, 2014 (in Korean).
 [10] ISO 14859:2012 - Ships and marine technology - Sound reception systems, http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=55195, Accessed April 1, 2012.