

선박의 음향수신장치를 위한 주파수 검출 및 위상 차이를 이용한 방향 탐지 알고리즘

염 명 길*, 김 정 창^o

Frequency Detection and Phase Difference Based Direction Detection Algorithms for Sound Reception System of Ships

Myeonggil Yeom*, Jeongchang Kim^o

요 약

본 논문은 백색 가우시안 잡음 환경에서 인접한 두 마이크로폰의 수신 신호 사이의 상관 (correlation)을 이용하여 주파수 검출 및 위상 차이 추정에 기반한 선박의 디지털 음향수신장치 (sound reception system)를 위한 선박 기적소리 (whistle signal)의 새로운 방향 검출 알고리즘을 제안한다. 제안된 상관 기반 주파수 검출기 및 위상 차이 추정기는 단일 주파수 정현파 기적소리에 대하여 잡음의 영향을 줄이기 위하여 인접한 두 마이크로폰의 모든 가능한 조합에 대한 상관 값들을 누적한다. 제안된 방향 검출 알고리즘은 두 개의 인접한 마이크로폰의 모든 조합에 대해 추정된 위상 차이 값들을 이용하여 수신 방향에 해당하는 섹터를 구분하고 수신 각을 추정한다. 또한, 실제 구현된 음향수신장치 하드웨어 및 소프트웨어를 이용하여 제안된 방법들에 대한 실험실 테스트를 수행하고 결과를 제시한다.

Key Words : Digital Signal Processor, Direction Detection, Frequency Detection, Phase Difference, Sound Reception System, Ship Whistle

ABSTRACT

In the paper, we propose a new direction detection scheme of the ship whistle for the digital sound reception system (SRS) of ships based on the frequency detection and the phase difference estimation using correlation values between the received signals for two neighboring microphones under a white Gaussian noise environment. In order to suppress the noise, the proposed correlation-based frequency detector and phase difference estimator accumulate the correlation values for all possible combinations of two neighboring microphones. By utilizing the estimates of the phase differences for all combinations of two neighboring microphones, the proposed direction detection algorithm distinguishes the sector for the direction of the whistle signal and estimates the arrival angle. In addition, using the practically implemented SRS hardware and software, the laboratory test for the proposed schemes is performed and test results are presented.

* 본 연구는 연구개발특구진흥재단의 2017년 기술이전사업으로 지원을 받아 수행되었음. [과제명: DNV TAP 845.50 규정에 만족하는 선박용 디지털 음향 수신장치]

※ 본 논문은 2018년도 한국통신학회 동계종합학술발표회에서 부분적으로 발표되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0003-0538-5344)Division of Electronics and Electrical Information Engineering, Korea Maritime and Ocean University, csspyeom@kmou.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-8612-9360)Division of Electronics and Electrical Information Engineering, Korea Maritime and Ocean University, jchkim@kmou.ac.kr, 중진회원

논문번호 : 201806-D-006-RN, Received May 7, 2018; Revised June 12, 2018; Accepted June 12, 2018

I. 서 론

2000년 제73차 해사안전위원회 (maritime safety committee: MSC)에서 SOLAS (safety-of-life-at-sea) 협약 제 5장^[1]의 개정안이 채택되고, 2002년 7월 1일 국제적으로 발효되면서 선박에 음향수신장치 (sound reception system: SRS)가 필수로 도입되었다. 음향수신장치는 완전히 밀폐된 선교 (bridge) 내부의 항해사가 타 선박의 기적소리 (ship whistle)를 듣기 어려우므로 항해사가 타 선박의 존재 유무 및 그 방향을 파악할 수 있도록 선박의 방향을 탐지하여 표시하고 선교 내부에서 기적소리를 들을 수 있도록 해주는 장비이다.

탐재 대상 선박은 선박의 크기에 관계없이 선교가 완전히 밀폐된 선박의 경우 주관청이 달리 결정하지 않는 한 음향수신장치를 설치해야 한다^[1]. 음향수신장치가 갖추어야 할 기본적인 요건들은 IMO (International Maritime Organization) resolution MSC.86(70) Annex1^[2]에 명시되어 있으며 2012년 ISO (International Organization for Standardization) 국제 표준으로 제정되었다^[3]. 또한, 기적소리로는 70Hz ~ 820Hz 범위의 주파수가 사용되며 선박의 크기에 따라 사용되는 주파수가 다를 수 있다^[3]. 이에, 선박용 음향수신장치는 2015년 8월부터 MED (Marine Equipment Directive) 규정 사항으로 정해져 MED 인증이 있어야만 선박 설치가 가능하다^[4]. 뿐만 아니라 국제적으로 인정받고 있는 DNV GL 선급에서는 음향수신장치의 국제 규격을 만족하는 성능 실험 방법에 대한 기준을 개별적으로 마련하고 있다^[5].

초기의 음향수신장치는 선박의 선수 (bow)와 선미 (stern), 좌현 (port), 우현 (starport)에 각각 마이크로폰 (microphone)을 설치하고 마이크로폰으로 수신된 신호를 아날로그 신호처리를 통하여 수신 음향신호의 음압레벨 (sound pressure level) 차이와 지연시간 (delay time) 차이를 측정하여 방향을 판단하였다^[6]. 하지만 아날로그 방식은 잡음환경에서 방향 탐지 성능 열화가 심해 최근에는 디지털 신호처리를 이용한 음향수신장치의 연구 및 개발이 진행되고 있다^[7-11].

디지털 방식의 음향수신장치에서는 마이크로폰을 선수, 선미, 좌현, 우현에 따로 설치하지 않고 하나의 마이크로폰 유닛 (microphone unit)에 여러 방향을 향하고 있는 다수의 마이크로폰을 내장하여 사용한다. 논문 [7]에서는 디지털 신호처리에 기반한 음향수신장치 개발을 위하여 원하지 않는 주파수 대역의 신호를 제거하는 디지털 필터를 설계하고 수신 신호 전력에

기반한 방향 탐지 방법을 사용하였다. 그러나, 수신 신호 전력에 기반한 방식은 선박에서 겪을 수 있는 다양한 간섭으로 인하여 방향 탐지에 큰 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다. 논문 [8]에서는 이러한 단점을 극복하고자 신호의 크기가 아니라 인접 마이크로폰 간 수신된 기적소리의 위상 차이 (phase difference)를 이용한 방향 탐지 방법이 고려되었다. 더욱이 [9]에서는 수신 신호의 스펙트럼 분석을 통하여 기적소리로 사용된 주파수를 검출하고 위상 차이와 기적소리 방향의 관계를 이론적으로 분석하였다. 각 마이크로폰의 수신 신호에 대한 개별 FFT 결과의 크기 응답으로부터 기적소리의 주파수를 검출한 후, 위상 응답으로부터 해당 주파수의 위상 값을 추출하여 가장 앞서는 2개의 위상 값의 차이를 계산하였다. 그러나, 논문 [9]에서는 잡음이 없는 환경에서 실험한 결과만 제시하고 있으며, 주파수 검출 성능도 제시되지 않았다. 잡음이 심한 환경에서는 FFT 결과의 위상 응답으로부터 얻은 위상 값에 대한 신뢰도가 매우 낮다는 단점이 있다. 기적소리로 사용된 주파수를 추정하기 위하여 상태공간 (state space) 표현을 이용한 방법도 제안되었으나^[10] 잡음이 심하지 않은 환경에서의 동작 결과만 제시되었으며 잡음이 심한 환경에서는 제대로 동작하지 않는다는 단점이 있다. 이처럼 여러 연구가 진행되었으나 여전히 주파수 검출 및 위상 차이 추정 값의 정확도 향상을 통하여 방향 탐지 성능 개선의 여지가 많이 남아 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 백색 가우시안 잡음 (white Gaussian noise) 환경에서 인접한 두 마이크로폰의 수신 신호 사이의 상관 (correlation)을 이용하여 주파수 검출 및 위상 차이 추정에 기반한 선박의 디지털 음향수신장치를 위한 선박 기적소리의 새로운 방향 검출 (direction detection) 알고리즘을 제안한다. 제안된 상관 기반 주파수 검출기 (frequency detector) 및 위상 차이 추정기 (phase difference estimator)는 70Hz ~ 820Hz 사이의 단일 주파수 정현파 기적소리에 대하여 잡음의 영향을 줄이기 위하여 인접한 두 마이크로폰의 모든 가능한 조합에 대한 상관 값들을 누적한다. 또한, 모든 가능한 조합에 대해 추정된 위상 차이 값들을 이용하여 수신 방향에 해당하는 섹터 (sector)를 구분하고 수신 각 (arrival angle)을 추정하는 방향 검출 알고리즘을 제안한다. 뿐만 아니라, 실제 구현된 음향수신장치 하드웨어 및 소프트웨어를 이용하여 제안된 방법들에 대한 실험실 테스트를 수행하고 결과를 제시한다. 기적소리 주파수의 검출 확률 (detection probability), 미 검출 확률 (miss probability), 오 검출

확률 (false alarm probability)을 관찰함으로써 주파수 검출기의 성능을 분석하고, 수신 각 추정을 위한 위상 차이 값의 평균 제곱 오차 (mean square error: MSE)를 관찰함으로써 위상 차이 추정기의 성능을 분석한다. 실험 결과는 제안하는 주파수 검출기가 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) SNR=-21dB 이상에서 기적소리의 주파수가 성공적으로 검출됨을 보여주며 상관 값의 누적을 통하여 방향 탐지에 사용되는 위상 차이 값의 평균 제곱 오차가 낮아짐을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 음향수신장치의 시스템 구성을 살펴보고 3장에서 마이크로폰으로 수신되는 신호를 수학적 모델링하고 제안하는 주파수 검출 및 위상 차이 추정 방법을 제시하고, 4장에서는 제안하는 주파수 검출 및 위상 차이 기반 방향 검출 알고리즘을 설명한다. 5장에서는 실제 구현된 SRS 하드웨어 실험을 통해 동작 검증 및 성능에 대해 논의하며, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 음향수신장치의 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 고려하는 음향수신장치의 마이크로폰 유닛에 내장한 4개의 마이크로폰의 배치도를 나타낸다. 4개의 마이크로폰은 동일 평면상에서 반경 r 인 원 위에 $\pi/2$ rad 각도의 균등한 간격을 갖도록 Mic_1 을 기준으로 반시계 방향으로 Mic_2 , Mic_3 , Mic_4 와 같은 순서로 배치된다. 본 논문에서는

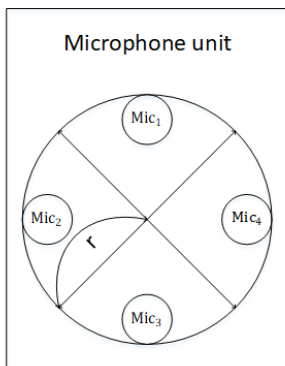


그림 1. 음향수신장치의 마이크로폰 유닛에 내장된 마이크로폰의 배치도
Fig. 1. Deployment of microphones in the microphone unit of the SRS

각 마이크로폰까지 도달하는 기적소리의 지연시간에 따른 마이크로폰 간의 위상 차이를 이용하여 기적소리의 방향을 추정하는 음향수신장치를 대상 시스템으로 가정한다. 이러한 위상 차이 값은 배치된 마이크로폰 사이의 간격에 영향을 받으며 최대 π rad 이내의 위상 차이가 발생하도록 마이크로폰 사이의 간격이 결정되어야 한다. 동일한 마이크로폰 간격에 대해서 사용되는 주파수가 높을수록 위상 차이가 증가하므로 사용 가능한 기적소리 주파수 중에서 최대 주파수인 820Hz를 기준으로 마이크로폰 사이의 간격을 결정할 수 있다. 공기 중에서 음파의 속도는 344m/s이므로 820Hz 주파수의 기적신호에 대한 정현파 신호의 파장 길이는 41.95cm이다. 그림 1의 마이크로폰 배치에 따르면 서로 다른 두 마이크로폰 사이의 최대 거리는 $2r$ 이 되므로 $r < 10.4875cm$ 를 만족해야 하며 본 논문에서 사용한 음향수신장치 하드웨어는 $r = 6.5cm$ 로서 이를 만족한다.

그림 2는 본 논문에서 고려하는 음향수신장치의 기능 블록 다이어그램을 나타낸다. 4개의 마이크로폰으로 입력된 신호는 아날로그-디지털 변환기 (analog-to-digital converter: ADC)를 거쳐 디지털 신호처리부 (digital signal processor: DSP)로 입력된다. DSP로 입력된 샘플들은 고속 푸리에 변환 (fast Fourier transform: FFT)을 위하여 버퍼 (buffer)에 저장되고 FFT 길이인 N_{FFT} 샘플이 모여 FFT 연산이 수행된다. 본 논문에서는 FFT 연산된 결과를 이용하여 인접 마이크로폰 사이의 상관 계산과 상관 값의 누적을 통한 성능 향상 방법을 제안한다. 또한, 상관 값으로부터 위상 차이 값을 추정하고 이를 이용하여 수신 방향에 해당하는 섹터의 구분 및 수신 각을 추정하는 방향 검출 알고리즘을 제안한다. 이러한 알고리즘은 DSP에서 소프트웨어적으로 처리되며 그림 2에서

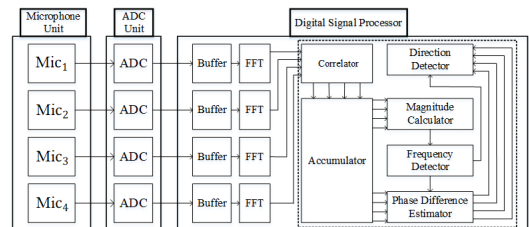


그림 2. 음향수신장치의 기능 블록 다이어그램
Fig. 2. Functional block diagram of the SRS

1) 본 논문에서 사용된 마이크로폰 유닛은 기존 하드웨어를 이용하였다[9].

2) 본 논문에서 사용된 음향수신장치 하드웨어는 기존 시스템을 사용하였으며[9], FFT 연산까지는 기존 시스템과 동일하게 동작한다.

FFT 이후의 점선 네모 상자의 블록 다이어그램에 해당한다. FFT 연산된 결과는 상관기 (correlator)로 입력되어 인접한 마이크로폰에 대한 FFT 결과들 사이의 상관 계산이 수행된다. 계산된 상관 값 결과는 누적기 (accumulator)로 입력되어 미리 설정된 횟수만큼 누적된다. 인접한 마이크로폰의 누적된 상관 값은 주파수 검출을 위하여 크기 계산기 (magnitude calculator)로 입력되고, 방향 탐지를 위하여 위상 차이 추정기로 입력된다. 여기서, 주파수 검출기에서 검출된 주파수에 대해서만 위상 차이를 얻으면 된다. 주파수 검출기에서는 상관 값의 크기를 미리 설정된 임계값 (threshold)과 비교하여 기적소리로 사용된 주파수를 검출한다. 위상 차이 추정기는 주파수 검출이 완료된 후 인접한 마이크로폰에 대한 FFT 결과들 사이의 누적된 상관 값 중 해당 주파수에 대한 위상을 추정하여 방향 검출기 (direction detector)로 출력한다. 여기서, 위상 차이 추정기로 입력된 인접한 마이크로폰에 대한 FFT 결과들 사이의 누적된 상관 값의 위상은 인접한 마이크로폰 사이의 위상 차이를 나타내게 된다. 마지막으로, 방향 검출기는 입력된 다양한 위상 차이 값들을 이용하여 기적소리 신호의 방향을 검출하게 된다.

III. 상관 기반 주파수 검출 및 위상 차이 추정 방법

본 장에서는 인접한 마이크로폰의 상관 연산 및 누적을 이용한 기적소리의 주파수 검출 및 위상 차이의 추정 방법을 제안한다. 그림 3은 제안하는 주파수 검출 방법 및 위상 차이 추정 방법의 순서도를 나타낸다. 음향수신장치의 수신 신호를 수학적으로 모델링하고 그림 3의 순서에 따른 주파수 검출 및 위상 차이 추정 방법을 설명한다. 본 논문에서는 모델링의 단순화를 위하여 선박의 이동에 따른 도플러 천이 (Doppler shift)와 선박의 움직임은 고려하지 않는다³⁾. 기적소리로는 단일 주파수가 사용되므로 기적소리 신호 $x(t)$ 를 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = P \cos(2\pi ft + \alpha) \quad (1)$$

여기서, P 는 기적소리의 신호 크기, f 는 기적소리 신호의 주파수, α 는 기적소리 신호의 위상을 나타낸다.

3) ISO-14859 규정에 따르면 음향수신장치의 성능 실험 환경은 선박의 이동을 가정하지 않고 있으며 본 논문에서도 ISO-14859 규정에 따라 선박의 이동은 고려하지 않는다.

음향수신장치의 m 번째 마이크로폰으로 수신된 신호 $r_m(t)$ 는 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $m = 1, 2, 3, 4$ 이다.

$$\begin{aligned} r_m(t) &= \beta_m x(t - \tau_m) + w_m(t) \\ &= \beta_m P \cos(2\pi f(t - \tau_m) + \alpha) + w_m(t) \\ &= \beta_m P \cos(2\pi ft - 2\pi f\tau_m + \alpha) + w_m(t) \\ &= \beta_m P \cos(2\pi ft + \alpha_m) + w_m(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, β_m 과 τ_m 은 각각 m 번째 마이크로폰에 도달하기까지 겪는 신호의 감쇠 (attenuation)와 지연시간을 나타내고, $w_m(t)$ 는 m 번째 마이크로폰에 수신되는 잡음 신호를 나타낸다. 또한, α_m 은 m 번째 마이크로폰의 수신 신호의 위상을 나타내며 $\alpha_m = \alpha - 2\pi f\tau_m$ 이다.

각 마이크로폰으로 수신된 신호는 ADC를 거친 후 수식 (3)과 같이 이산시간 (discrete-time) 신호 $r_m[n]$ 으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} r_m[n] &= r_m(nT_s) \\ &= \beta_m P \cos(2\pi fnT_s + \alpha_m) + w_m(nT_s) \\ &= \beta_m P \cos(\omega_s n + \alpha_m) + w_m[n] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, T_s 는 ADC의 샘플링 간격을 나타내고, $\omega_s = 2\pi fT_s$ 이다. 또한, $w_m[n]$ 은 m 번째 마이크로폰에 수신되는 잡음 성분의 샘플링된 값을 나타낸다.

수신 샘플은 그림 2의 버퍼에 저장되고 N_{FFT} 길이 만큼 모여 FFT 연산이 수행된다. 그러면, FFT 출력 $R_m(e^{j\Omega})$ 는 수식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_m(e^{j\Omega}) &= \text{FFT}\{r_m[n]\} \\ &= \beta_m A(e^{j\Omega})e^{j\alpha_m} + W_m(e^{j\Omega}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $A(e^{j\Omega})$ 는 기적소리 성분 $x[n] = x(nT_s)$ 에 대한 FFT 결과를 나타내며, $W_m(e^{j\Omega})$ 는 잡음 성분에 대한 FFT 결과를 나타낸다.

인접한 두 마이크로폰에 대한 FFT 결과들 사이의 상관 값 $C_l(e^{j\Omega})$ 을 수식 (5)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} C_l(e^{j\Omega}) &= R_m(e^{j\Omega})R_k^*(e^{j\Omega}), \\ \{l, m, k\} &= \{(1,1,2), (2,2,3), (3,3,4), (4,4,1)\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 인접한 서로 다른 두 마이크로폰의 조합은

모두 4가지가 존재하며, (l, m, k) 는 가능한 조합의 마이크로폰 및 상관 결과에 대한 인덱스를 나타낸다. 그러면, 수식 (5)는 다음과 같이 전개하여 다시 쓸 수 있다.

$$C_l(e^{j\Omega}) = \beta_m \beta_k |A(e^{j\Omega})|^2 e^{j(\alpha_m - \alpha_k)} + \beta_m A(e^{j\Omega}) e^{j\alpha_m} W_k^*(e^{j\Omega}) + \beta_k A^*(e^{j\Omega}) e^{-j\alpha_k} W_m(e^{j\Omega}) + W_m(e^{j\Omega}) W_k^*(e^{j\Omega}) \quad (6)$$

여기서, 수식 (6)의 첫 번째 항은 기적소리 성분에 의한 상관 값을 나타내고 $\alpha_m - \alpha_k$ 는 두 마이크로폰 사이의 위상 차이를 의미한다. 또한, 나머지 항들은 잡음 성분에 의한 영향을 나타낸다.

두 마이크로폰 사이의 위상 차이는 기적소리가 마이크로폰에 도달하는 지연시간의 차이에 의해서 발생하며, 선박의 이동과 움직임을 고려하지 않는다면 FFT 윈도우 (window) 마다 이러한 위상 차이는 고정된 값을 가진다. 따라서, 인접한 두 마이크로폰 사이의 상관 값 $C_l(e^{j\Omega})$ 를 누적함으로써 잡음의 영향을 줄일 수 있다. 여기서 누적 횟수는 N_{acc} 로 정의된다. 누적된 상관 값은 모두 4 가지의 마이크로폰 조합에

대해 얻어지며 각 마이크로폰 조합에 대한 위상 차이는 기적소리의 방향에 따라 다를 수 있으므로 크기 계산기에서는 누적된 상관 값의 크기를 계산한 후 4 가지의 마이크로폰 조합에 대한 누적된 상관 값의 크기를 모두 더함으로써 다이버시티 이득 (diversity gain)을 얻을 수 있다. 이와 같이 모두 더한 후 임계값 시험을 통하여 주파수가 검출된다. 주파수가 검출되지 않을 경우 누적기를 초기화하고 상관 값의 누적 및 주파수 검출 과정을 다시 시작한다.

기적소리 주파수가 검출되면 위상 차이 추정기가 동작한다. 위상 차이 추정기는 누적기에서 누적된 각 상관 값의 위상을 계산함으로써 인접한 두 마이크로폰 조합 (l, m, k) 에 대한 위상 차이 $\alpha_m - \alpha_k$ 를 추정할 수 있다. 위상 차이 추정 과정은 누적기까지는 주파수 검출 과정과 동일하며 주파수가 검출된 후 누적기 출력의 위상 값을 추출함으로써 위상 차이 추정 값이 얻어진다.

IV. 제안하는 방향 탐지 알고리즘

그림 4와 같이 기적소리의 방향이 인접한 두 마이크로폰 Mic_m 과 Mic_k ($m - k = -1, 3$) 사이 영역이 될 경우 l 번째 마이크로폰 조합에 대해 기적소리가 두 마이크로폰에 도달하기까지의 지연시간에 의한 위상 차이 θ_l 는 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\theta_l = 2\pi f \frac{D_m - D_k}{v} \quad (7)$$

여기서, D_m 과 D_k 는 각각 기적소리가 발생한 다른 선박으로부터 두 마이크로폰 Mic_m 과 Mic_k 까지의 거리를 나타내고, v 는 공기 중에서 음파의 속도를 나타낸다.

또한, 기적소리가 발생한 다른 선박으로부터 마이크로폰 유닛의 중심까지의 거리를 D 라고 하면 위상 차이 θ_l 과 기적소리의 수신 각도 ϕ 사이의 관계는 수식 (8)과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\theta_l \approx \frac{2\pi fr}{v} (\cos \phi - \sin \phi), \quad \phi = \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \quad (8)$$

인접한 두 마이크로폰 Mic_m 과 Mic_k 사이의 위상 차이를 얻을 수 있으면 수식 (8)의 관계로부터 수신 각도를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 여기서, 수식

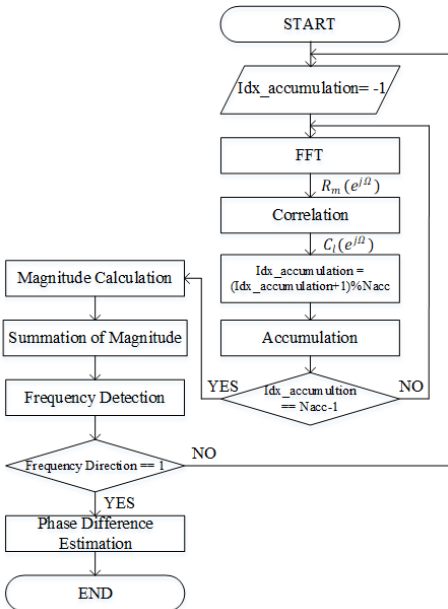


그림 3. 제안하는 주파수 검출과 위상 차이 추정 방법의 순서도
Fig. 3. Flow chart of the proposed frequency detection and phase difference estimation schemes

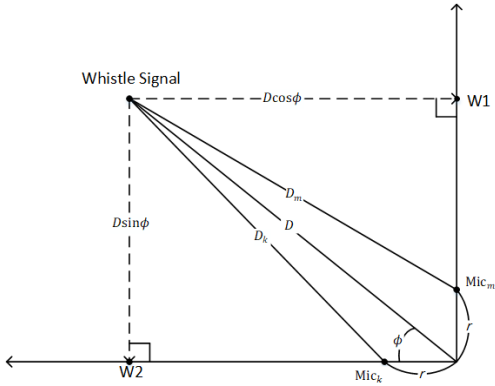


그림 4. 마이크론 m 과 마이크론 k 사이에 기적신호가 있는 배치도
Fig. 4. Layout in whistle signal between Mic_m and Mic_k

(8)은 인접한 두 마이크론 Mic_m 과 Mic_k 사이의 영역에서 기적소리가 수신되는 경우에 대한 위상 차이를 나타내므로 위상 차이로부터 기적소리의 방향을 탐지하기 위해서는 기적소리가 모든 가능한 두 마이크론 조합 중 어느 영역에서 수신되는지를 알아야 한다. 따라서, 본 논문에서는 4가지 마이크론 조합에 대한 위상 차이 정보를 이용하여 기적소리가 수신되는 영역을 판별하는 방법을 추가로 제안한다.

그림 5는 기적소리가 수신되는 영역을 판별하기 위한 섹터 판별기 (sector discriminator)를 포함한 기적소리 방향 검출기의 기능 블록 다이어그램을 나타낸다. 먼저, 위상 차이 추정기에서 추정된 4개의 위상 값들이 섹터 판별기로 입력되고 이를 이용하여 기적소리가 수신되는 섹터를 검출한다. 여기서, 기적소리의 수신 섹터는 45도 간격으로 모두 8개로 나누어 판별된다. 섹터가 판별되면 해당 섹터의 마이크론 조합

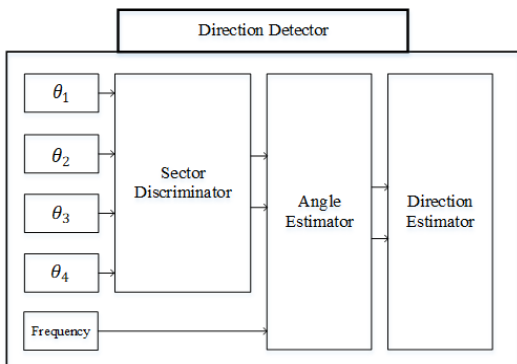


그림 5. 제안하는 방향 검출기의 기능 블록 다이어그램
Fig. 5. Block diagram of the proposed direction detector

을 알 수 있으므로 판별된 섹터와 해당 마이크론 조합에 대한 위상 차이 값이 수신 각 추정기로 (angle estimator)로 입력된다. 수신 각 추정기에서는 검출된 주파수 값과 위상 차이 값을 이용해 수신 각 ϕ 를 추정하고 섹터 정보를 추가로 이용하여 기적소리의 방향을 탐지한다.

4.1 제안하는 섹터 판별 방법

본 논문에서 제안하는 섹터 판별기는 인접한 마이크론의 위상 차이 값의 부호 및 위상 차이 값들의 차이를 이용하여 그림 6과 같이 45도 간격의 8개 섹터를 구분한다. 각 위상 차이 값의 부호 및 이들의 조합에 따른 섹터는 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 위상 차이 θ_1 의 부호로부터 섹터 그룹 (H, A, B, C)와 (D, E, F, G)를 서로 구분할 수 있으며, 위상 차이 θ_2 의 부호로부터 섹터 그룹 (F, G, H, A)와 (B, C, D, E)를 서로 구분할 수 있다. 이와 유사하게, 위상 차이 θ_3 와 θ_4 로부터도 서로 다른 2개의 섹터 그룹을 구분할 수 있다. 따라서, 이러한 4개의 위상 차이 값의 부호를 모두 조합하면 4개의 섹터 그룹 (B, C), (D, E), (F, G), (H, A)을 구분할 수 있다. 뿐만 아니라, 위상 차이 값들의 차이 $\theta_1 - \theta_2$ 로부터는 섹터 그룹 (A, B, C, D)와 (E, F, G, H)를 서로 구분할 수 있고 $\theta_2 - \theta_3$ 로부터는 섹터 그룹 (G, H, A, B)와 (C, D, E, F)를 서로 구분할 수 있으므로 이들까지 모두 이용하면 표 1과 같이 전체 8개의 섹터를 모두 구분할 수 있다.

위상 차이 값의 부호들의 조합으로부터 기적소리가 수신되는 섹터를 판별한 후 해당 섹터에 대한 위상 차이 값 θ_i 을 이용해 수신 각 ϕ 를 추정한다.

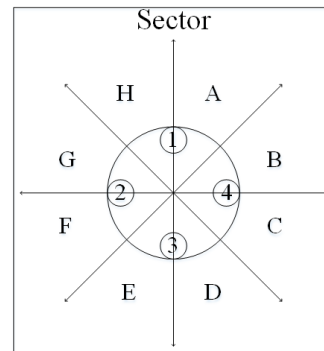


그림 6. 섹터 판별기를 위한 8개의 섹터
Fig. 6. Eight sectors for the sector discriminator

표 1. 위상 차이 값의 부호에 따른 섹터 판별표
Table 1. Combination of signs of phase difference values according to the sector.

Phase Sector	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	$\theta_1 - \theta_2$	$\theta_2 - \theta_3$
A	+	+	-	-	+	+
B	+	-	-	+	+	+
C	+	-	-	+	+	-
D	-	-	+	+	+	-
E	-	-	+	+	-	-
F	-	+	+	-	-	-
G	-	+	+	-	-	+
H	+	+	-	-	-	+

4.2 제안하는 수신 각 추정 및 방향 탐지 알고리즘

섹터 판별기에서 기적소리의 수신 영역을 8개로 구분하여 판별하므로 섹터 판별기에서 해당 섹터가 결정된 이후에 수신 각 추정기 (angle estimator)는 위상 차이 값 θ_i 에 대해서 수신 각 ϕ 를 $[0, \pi/4]$ 범위에서 추정하면 된다. 먼저, 수식 (8)에서 $\cos\phi - \sin\phi$ 를 테일러 급수 (Taylor series)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\theta_i| \approx \frac{2\pi fr}{v} T_2(\phi), \quad \phi = \left[0 \sim \frac{\pi}{4} \right] \quad (9)$$

여기서, $T_2(\phi)$ 는 실수 a 에서 2차 테일러 급수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_2(\phi) &= \sum_{k=0}^2 \frac{f^k(a)}{k!} (\phi - a)^k \\ &= f(a) + f^{(1)}(a)(\phi - a) + \frac{1}{2} f^{(2)}(a)(\phi - a)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $f(\phi) = \cos\phi - \sin\phi$ 이다. 본 논문에서는 $a = \pi/8$ 와 $a = 0$ 인 두 경우를 고려한다. 수식 (11)과 (12)는 각각 $a = \pi/8$ 과 $a = 0$ 일 때 2차 테일러 급수를 이용한 수신 각 계산 근사식을 나타낸다.

$$\phi \approx -2.0215 + \frac{\sqrt{2.2929 - 1.0824Q}}{0.5412} \quad (11)$$

$$\phi \approx -1 + \sqrt{3 - 2Q} \quad (12)$$

여기서, $Q = v|\theta_i|/2\pi fr$ 이다.

그림 7은 수신 각 추정을 위하여 사용된 근사화된

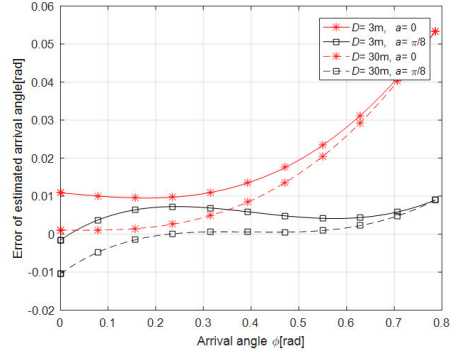


그림 7. 각 추정기에서 근사화된 수신 각의 오차 곡선
Fig. 7. Error curves of the approximated arrival angle in the angle estimator

수식 (11) 및 (12)의 결과와 주어진 정확한 수신 각의 오차 값을 나타낸다. 여기서, 기적소리와 마이크로폰 유닛 사이의 거리 및 마이크로폰 유닛의 반경은 각각 $D = 3m, 30m$ 과 $r = 6.5cm$ 로 설정하였으며, 기적소리로 사용된 주파수는 $f = 560Hz$ 로 설정하였다.

수식 (8)은 기적소리와 마이크로폰 사이의 거리가 충분히 멀다는 가정을 사용하여 수식 (7)로부터 근사화되었으므로 수식 (8)의 근사화는 $D = 30m$ 인 경우가 $D = 3m$ 인 경우에 비해 보다 정확할 것이다. 그림 7에서 보여지듯이 제안된 근사화 방법에 의한 수신 각 추정 오차의 최대값이 D 의 값에 따라 큰 차이를 나타내지는 않으므로 수식 (8)에서 사용된 근사화에 따른 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 수식 (8)의 근사화에 대한 가정과 상관없이 위상 차이가 0이 되는 수신 각은 수식 (7)과 수식 (8)로부터 $\pi/4$ 임을 알 수 있다. 그러나, 2차 테일러 급수를 사용한 수식 (11)과 수식 (12)의 근사식에서는 오차가 발생함을 알 수 있다. 먼저, 수식 (12)와 같이 $a = 0$ 에 대한 2차 테일러 급수를 사용할 경우 기적소리의 방향이 섹터의 한 쪽 경계인 $\phi = \pi/4$ rad에 해당하는 한 쪽 마이크로폰의 정면을 향할 때 수신 각의 최대 오차가 약 0.054 rad 정도 발생하게 된다. 반면, 수식 (11)과 같이 $a = \pi/8$ 에 대한 2차 테일러 급수를 사용할 경우 기적소리의 방향이 섹터의 한 쪽 경계인 $\phi = \pi/4$ rad에 해당하는 한 쪽 마이크로폰의 정면을 향할 때 최대 수신 각의 오차가 약 0.01 rad 정도 발생하게 된다. 따라서, 수식 (11)과 같이 $a = \pi/8$ 에 대한 2차 테일러 급수를 이용함으로써 섹터 경계에서 오차를 최소화할 수 있다.

수신 각 ϕ 는 검출된 주파수 값과 두 마이크로폰 사이의 위상 차이 값에 의해 결정된다. 그러면 수식 (11)

표 2. 판별된 섹터와 추정된 ϕ 를 이용한 기적소리 방향 탐지
Table 2. Direction detection of the ship whistle using the detected sector and estimated ϕ .

Sector	Final angle
A	ϕ
B	$\pi/2 - \phi$
C	$\pi/2 + \phi$
D	$\pi - \phi$
E	$\pi + \phi$
F	$3\pi/2 - \phi$
G	$3\pi/2 + \phi$
H	$2\pi - \phi$

혹은 (12)를 이용하여 얻은 수신 각 과 판별된 섹터를 이용하여 표 2와 같이 기적소리가 수신되는 수신 각을 최종적으로 추정함으로써 기적소리의 방향을 탐지한다.

V. 실험 결과

그림 8은 ISO-14859 규정에 따른 하드웨어 실험을 위한 마이크로폰 유닛과 기적소리 및 잡음의 배치를 나타낸다^[3]. 그림 8에서 ‘S’와 ‘N’은 각각 기적소리 신호 음원과 잡음 신호 음원의 위치를 나타낸다. 잡음 신호의 음원은 모두 3군데 위치하며 기적소리 신호 음원의 방향에서 반시계 방향으로 각각 22° , 135° , 225° 만큼 회전시킨 위치에 배치된다^[3]. 또한, 마이크로폰 유닛의 지름을 $R_{max} = 2r$ 로 정의하면 마이크로폰 유닛의 중심에서 기적소리 신호 음원과 22° 에 위치한 잡음 신호 음원까지의 거리는 $6R_{max}$ 이고 나

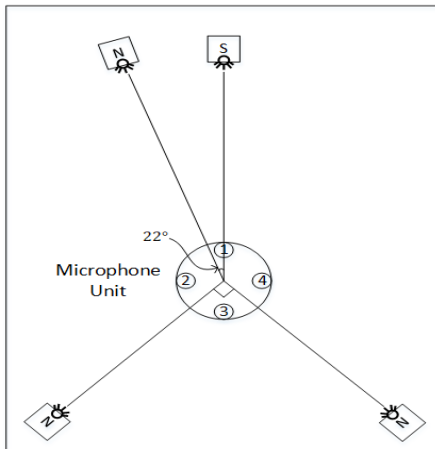


그림 8. 하드웨어 실험 환경 설정
Fig. 8. Setup of the test environment for hardware experiments

머지 2개의 잡음 신호 음원까지의 거리는 $3.7R_{max}$ 로 설정된다^[3].

본 논문에서 구현한 음향수신장치에서 DSP의 동작 클럭 속도는 300MHz이고, ADC의 샘플링율 (sampling rate)은 16ksps (sample per second)이다. 또한, FFT 크기는 $N_{FFT} = 512$ 로 설정하였다. 이에 따라, 주파수 분해능 (resolution)은 31.25Hz가 된다. 또한, 3개의 잡음은 서로 독립적으로 발생시킨 백색 가우시안 잡음을 가정한다. 그림 9는 기적소리 주파수를 검출하기 위한 주파수 검출기에서 계산된 누적된 상관 값의 히스토그램 (histogram)을 나타낸다. 실험에서 누적 횟수 $N_{acc} = 2, 4, 8, 16$ 을 사용하였고 SNR=-22dB에서 관찰하였다. 그림 9에서 누적 횟수가 증가함에 따라 주파수 검출기에서 계산된 누적된 상관 값의 분산이 줄어드는 것을 알 수 있다.

주파수 검출기는 누적된 상관 값에 대하여 임계값 시험을 통하여 해당 주파수의 존재를 검출한다. 그림 10은 각각 임계값에 따른 주파수 검출기의 검출 확률, 미 검출 확률, 오 검출 확률을 나타낸다. 여기서, 검출은 기적 소리를 수신 했을 때 주파수 분해능 내에서 해당하는 주파수로 판단하는 경우, 미 검출은 임계값을 넘지 못하여 기적 소리가 존재하지 않는다고 판단하는 경우, 오 검출은 실험에 사용한 주파수가 아닌 다른 주파수로 판단하는 경우를 의미한다. 주파수 검출 실험을 위하여 4000번의 검출 결과를 관찰하였다. 누적 회수는 4회로 설정하고 Threshold = 65, 95, 122의 3가지 임계값에 대해서 주파수 검출 실험을 진행하였다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 임계값이 높을수록 주파수 검출 확률과 오 검출 확률은 낮아지고 미 검출

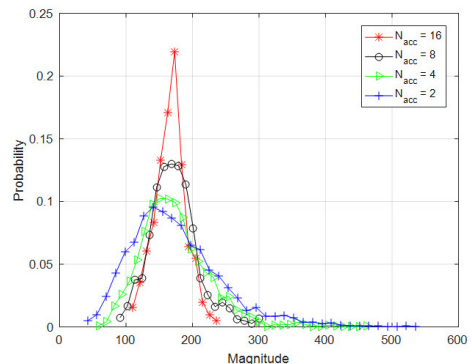


그림 9. 누적 횟수에 따른 주파수 검출기의 누적된 상관 값의 히스토그램, SNR = -22dB
Fig. 9. Histogram of the accumulated correlation for the frequency detector according to the number of accumulations, SNR=-22dB

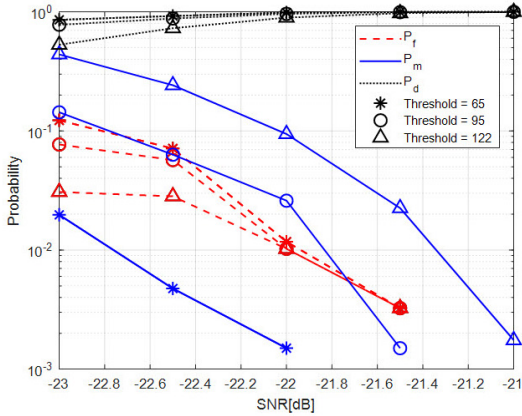


그림 10. WGN 환경에서 주파수 검출기의 검출, 미 검출 및 오 검출 확률
Fig. 10. Detection, miss, false alarm probabilities of the frequency detector under WGN environment

확률은 높아진다. 이는, 임계값이 높을수록 누적된 상관 값이 임계값을 초과하지 못하는 경우가 더 많이 발생하여 기적소리로 인식하는 경우가 줄어들고 기적소리가 존재하더라도 검출하지 못하는 경우는 더 많이 발생하기 때문이다. 세 가지 임계값 모두 SNR=-21dB에서 기적소리 주파수가 성공적으로 검출됨을 알 수 있다.

그림 10의 결과를 통하여 주파수 검출이 성공적으로 이루어지는 SNR=-21dB에서 누적 횟수에 따른 위상 차이 값의 분포를 관찰하였다. 그림 11은 그림 8의 실험 환경에서 마이크로폰 유닛을 시계방향으로 $\pi/4$ 만큼 회전시켜 기적 소리가 Mic₁과 Mic₂ 사이에 위치하여 $\phi = \pi/4$ 일 때 누적된 상관 값을 이용한 인접한 마이크로폰 사이의 위상 차이 값의 히스토그램을

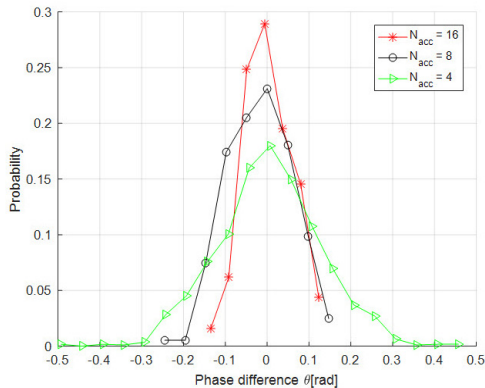


그림 11. 관찰된 위상 차이의 히스토그램, SNR=-21dB
Fig. 11. Histogram of the observed phase difference value, SNR=-21dB

나타낸다. 상관 값 관찰을 위한 누적 횟수는 4, 8, 16 회로 설정하였으며 모두 4000개의 위상 차이 값을 관찰하였다. 누적 횟수에 따른 위상 차이의 평균 제곱 오차를 나타내면 그림 12와 같다.

그림 11과 그림 12에서 볼 수 있듯이 누적 횟수가 증가할수록 추정된 위상 차이의 평균 제곱 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 13은 인접한 마이크로폰 사이의 위상 차이가 최대가 되도록 기적소리가 Mic₁의 정면에 위치하여 $\phi = 0$ 이 되는 경우 관찰된 위상 차이 값의 평균 제곱 오차를 나타낸다. 여기서, 누적 횟수는 4회로 설정하였다. 신호 대 잡음비가 높아질수록 관찰된 위상 차이 값의 평균 제곱 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

제안하는 주파수 검출 방법은 SNR=-21dB 이상에서 주파수 검출이 잘 이루어지며 상관 값의 누적을 통

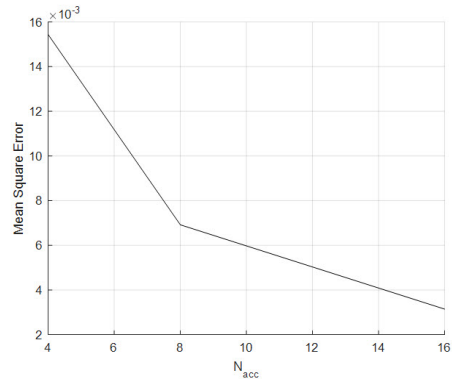


그림 12. 누적 횟수에 따른 관찰된 위상 차이의 평균 제곱 오차, SNR=-21dB
Fig. 12. Mean square error of the observed phase difference value according to the number of accumulations, SNR=-21dB

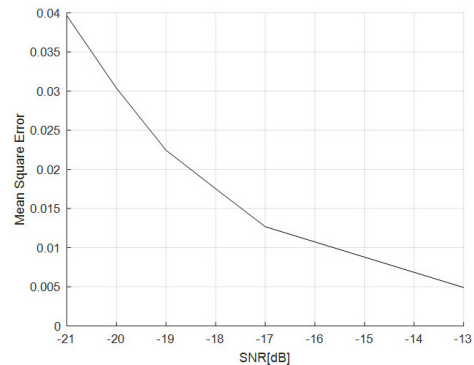


그림 13. SNR에 따른 관찰된 위상 차이의 평균 제곱 오차
Fig. 13. Mean square error of the observed phase difference value according to SNR

하여 위상 차이 추정 값의 오차가 감소함으로써 SNR 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, 실험에서 고려된 SNR에 대해서 섹터 판별기는 섹터를 성공적으로 판별함을 확인하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 타 선박에서 발생한 기적소리의 방향을 탐지하는 선박의 음향수신장치를 위한 상관 기반 주파수 검출 및 위상 차이 추정 값의 정확도 향상 방법을 제안하고 실제 하드웨어 실험을 통하여 성능을 분석하였다. 제안된 방식은 단일 주파수 정현파 기적소리에 대하여 음향수신장치에서 주파수 검출 및 위상 차이 추정 시 잡음의 영향을 줄이기 위하여 다양한 마이크로폰 조합에 대한 상관 값들을 누적하였다. 또한, 제안하는 방식에서 위상 차이 추정은 $\pi/4$ 의 수신 각 범위에서 이루어지므로 전체 영역을 8개의 섹터로 나누어 기적소리가 수신되는 섹터를 먼저 판단하는 방법도 제안하였다. 뿐만 아니라, 2차 테일러 급수를 이용하여 위상 차이와 수신 각 사이의 관계식을 유도하고 근사화에 따른 오차를 분석하였으며 제안된 알고리즘의 성능을 실제 구현된 음향수신장치 하드웨어에서 분석하였다. 주파수 검출 성능 분석을 위하여 검출 확률, 미 검출 확률, 오 검출 확률을 관찰하고, 수신 각 추정을 위한 위상 차이 값의 평균 제곱 오차를 관찰하였다. 실험 결과는 제안하는 주파수 검출기가 SNR=-21dB 이상에서 주파수 검출이 성공적으로 이루어짐을 보여주며 상관 값의 누적을 통하여 방향 탐지에 사용되는 위상 차이 값의 평균 제곱 오차가 감소함을 보여준다.

References

[1] SOLAS Chapter V Safety of Navigation, Regulation 19 - Carriage requirements for shipborne navigational systems and equipment - 2.1.8, Retrieved Apr. 21, 2018, <http://solasv.mca.gov.uk/>

[2] Resolution MSC.86(70) ANNEX1, Recommendation on performance standards for sound reception systems, Retrieved Apr. 21, 2018, [http://www.imo.org/en/Knowledge Centre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MS.86\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/Knowledge Centre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MS.86(70).pdf)

[3] ISO 14859:2012(en), Retrieved Apr. 21, 2018,

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14859:ed-1:v1:en>

[4] Commission Implementing Regulation (EU) 2017-306, Retrieved Apr. 21, 2018, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/ec/a1_1.pdf

[5] DNV GL Standard for certification No. 2.9 type approval programmer 845. 50 <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/tap/2009-04/TAP845-50.pdf>

[6] J. W. Choi and K. J. Kim, "A new sound reception system using a symmetrical microphone array and its numerical simulation," *J. Ship & Ocean Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 18-25, Sept. 2004.

[7] H. Kim and J. Kim, "A study on digital sound reception systems for ships," *J. Korea Soc. Marine Eng.*, vol. 38, no. 9, pp. 1125-1130, Nov. 2014.

[8] H. Kwon and J. Kim, "Study on detection scheme of direction of ship whistle in the frequency domain," *Int. Technical Conf. Circuits/System, Comput. and Commun. 2016*, pp. 1061-1063, Okinawa, Japan, Jul. 2016.

[9] H. J. Kwon and J. Kim, "Design and analysis of direction indicating algorithm for sound reception system based on spectral analysis of whistle signal," *J. Korean Soc. Marine Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 83-90, Jan. 2017.

[10] H. Kim and J. Kim, "Frequency estimation scheme for sound reception systems of ships," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 711-712, Jeongseon, Korea, Jan. 2017.

염 명 길 (Myeonggil Yeom)



2018년 2월 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 졸업
2018년 3월~현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
<관심분야> 디지털신호처리, MIMO, 딥러닝

김 정 창 (Jeongchang Kim)



2000년 2월 : 한양대학교 전자·전자통신·전파공학과군 (공학사)
2002년 2월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 (공학석사)
2006년 8월 : 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 (공학박사)
2006년 9월~2008년 5월 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원
2008년 5월~2009년 8월 : 포항공과대학교 미래정보기술사업단 연구조교수
2009년 8월~2010년 8월 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구부 선임연구원
2010년 9월~현재 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수
2017년 1월~현재 : 방송공학회논문지 편집위원
2017년 7월~현재 : ETRI Journal 편집위원
2018년 6월~현재 : IEEE Transactions on Broadcasting, Associate Editor
<관심분야> 디지털통신시스템, 디지털방송 전송시스템, 디지털신호처리, MIMO