

船舶汽笛音を 이용한 相對船舶 位置檢出에 관한 研究

문 성 배¹⁾, 전 승 환²⁾

A Study on Target Position Detecting System using Whistle-Blast

Serng-Bae Moon¹⁾, Seung-Hwan Jun²⁾

Abstract

The recent development of marine technology has resulted in the appearance of huge vessel causing marine casualties frequently. Marine casualties have born exorbitant economic loss and environment pollution at the sea. In particular, about 30% of the collision has happened under the foggy weather. In this foggy condition, navigator must heard the whistle, bell and/or the siren of lighthouses or ships. Specially, whistle blast is a very important information for safety sailing. In this study, it is designed to develop a sound source tracking system which is able to measure the range and relative bearing of sound source by utilizing the whistle blast.

Three microphone sensors receive the whistle sound. When one sensor is installed as a reference, the others have received the sound signal with the arriving time delay due to the distance difference between sensors. It is able to measure the relative position with range and bearing by considering these amount of time delays between sensors and the trigonometrical relation of sensors array and source.

Several experiments were carried out in the laboratory for developing the basic algorithm and signal processing system. Sound source was arranged within the 0°~180° circle and 330cm range randomly.

As a result, we have recognized that sound source tracking system is possible to

1) 한국해양대학교 해사수송학과라 전자과장 재직전임교원

2) 한국해양대학교 해사수송과장부 교수

the sea field with improvement of position error. This system shall be a very helpful to make a safety navigation and reduce the sea accident just like collision etc.

1. 서론

항해자가 농무증을 항해할 때, 접근하는 상대선박이 발신하는 기적음을 가청할 수 있어도 그 기적음 취명선박에 대한 정보의 애매모호성 때문에, 다른 수단을 통한 정보수집에만 의존하고 있는 실정이다. 결국, 선박에 첨단장비가 탑재됨에도 불구하고, 많은 선박 충돌사고가 발생하고 있으며, 이로 인해 막대한 경제적 손실과 심각한 환경오염을 초래하고 있다. 본 연구에서는 타선박이 발신하는 기적음을 Microphone sensor로 수신하고 일련의 신호처리를 하여, 기적음원의 상대위치를 자동적으로 검출할 수 있는 시스템을 개발하여, 선박 항해자에게 정확한 상대선박에 관한 정보를 제공하여 환경오염으로 이어지는 해난사고를 미연에 방지하고자 하는 것이다.

2. 상대선박 위치측정

2.1 방위 및 거리측정 개요

상대선박이 발신하는 기적음을 어떤 일정한 형태로 배치되어 있는 센서를 통하여 수신할 때, 각 센서의 위치, 배열, 간격 등의 제요소에 따라 수신음에 도달시간차(Time Delay)가 발생하게 된다. 이 도달시간차를 검출하여, 수신부에 대한 기적음원의 상대위치를 측정하는 것이 기본적인 알고리즘이다. 여기서, 기적음원과 수신부의 상대운동이 없다고 할 때, 기적음의 음파에너지가 복수개로 구성된 수신부에 수신된다고 하면, 어떤 시간 t 에 i 번째 센서에 수신되는 신호음은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$x_i(t) = s(t + \xi_i) + n_i(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

한편, 기적음원으로부터 i 번째 센서까지의 거리 R_i 와 각 센서사이의 기적음 도달시간차는 식(2.2)와 식(2.3)으로 나타낼 수 있다.

$$R_i = c \cdot \tau_i \text{ [m]} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

단, τ_i 는 음원으로부터 i 번째 센서까지 기적음의 전파시간 [sec]

$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j = -\tau_{ji} \text{ [sec]} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

마이크로폰 센서의 수가 많을수록 정확한 위치를 구할 수 있을 것으로 예측되어 지나, 반면 외부 잡음도 센서수에 비례하여 증가할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 센서의 개수를 3개로 하였고, 3 Sensor System이라 부르기로 하였다.

2.2 삼각함수 측정원리

삼각함수의 관계에 의한 기적음원의 위치측정 원리는, 하나의 기적음원과 3개의 마이크로폰 센서가 이루는 평면상의 기하학적인 배치관계^[1]를 이용하는 것으로, Fig.2.1은 이를 관계를 나타낸 것으로, M_1, M_2, M_3 은 수신센서로써 동일 직선상에 존재한다. 또한, L_1 과 L_2 는 센서간의 간격이고, R_1, R_2, R_3 은 음원으로부터 각 센서까지의 거리이며, B_1, B_2, B_3 은 각 센서에서 음원과 센서 배열선(Sensor Array)이 이루는 각이다. 여기서 M_2 센서를 기준으로 하여 음원까지의 거리 R_2 와 방위 B_2 를 검출하는 것으로 하였다. 센서 M_1 은 센서 M_2 에 비해 $\overline{M_1E_1}$ 거리만큼, 센서 M_3 은 센서 M_2 에 비해 $\overline{M_3E_2}$ 거리만큼 기적음의 도달시간차를 가지게 된다. 따라서, 음원으로부터 각 센서까지 거리의 관계는 식(2.4)과 같이 나타낼 수 있다.

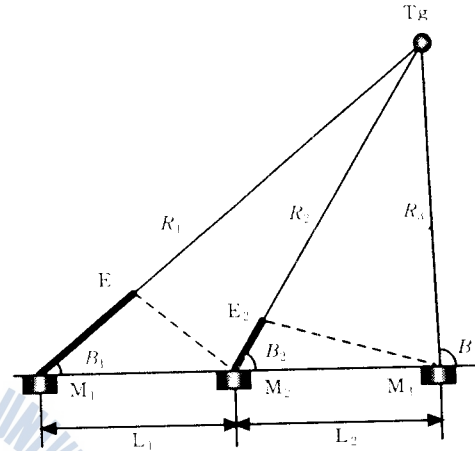


Fig.2.1 Trigonometrical Arrangement of Sensor and Target

$$R_1 = R_2 + c \cdot \tau_{12} \tag{2.4a}$$

$$R_3 = R_2 - c \cdot \tau_{23} \tag{2.4b}$$

단, c 는 음속 [m/s]

그리고, 음원과 3개의 센서가 이루는 삼각형 $\triangle Tg M_1 M_2$ 와 $\triangle Tg M_2 M_3$ 은 식(2.5)의 관계를 가지게 된다.

$$R_1^2 = R_2^2 + L_1^2 - 2 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot \cos(\pi - B_2) \tag{2.5a}$$

$$R_3^2 = R_2^2 + L_2^2 - 2 \cdot R_2 \cdot L_2 \cdot \cos(B_2) \tag{2.5b}$$

위의 식(2.4)를 식(2.5)에서 대입하고, 연산식을 간단히 하기 위해서 센서간의 간격을 $L_1 = L_2 = L$ 로 하여, R_1 과 R_3 을 소거하여 정리하면 음원까지의 거리와 상대방위를 식(2.6)과 식(2.7)로 나타낼 수 있다.

$$R_2 = \frac{2L^2 - (c \cdot \tau_{12})^2 - (c \cdot \tau_{23})^2}{2(c \cdot \tau_{12} - c \cdot \tau_{23})} \quad (2.6)$$

$$B_2 = \cos^{-1} \frac{L^2 + 2R_2 \cdot c \cdot \tau_{23} - (c \cdot \tau_{23})^2}{2R_2 \cdot L} \quad (2.7)$$

2.3 쌍곡선 측정원리

기적으로부터 발신된 기적음은 3개의 센서에 시간차를 가지고 도달할 때, 이 도달시간차를 거리차 Δl 로 환산하면 식(2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta l_{ij} = c \cdot \tau_{ij} \text{ [m]} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.8)$$

단, c 는 음속 [m/s], τ_{ij} 는 두 센서사이의 도달시간차 [sec]

따라서, 기적음원은 두 센서로부터 거리차가 일정한 궤적(軌跡)의 어느 한 점에 존재하고, 이 궤적은 두 센서를 초점으로하는 쌍곡선이 되고, 본 3-Sensor System이 가지는 3쌍의 궤적인 쌍곡선들의 교점을 기적음원의 위치로 간주하는 것이 쌍곡선 측정법의 기본원리이다. 이 측정법에서 기적음원의 위치측정은 쌍곡선의 방정식과 Cartesian좌표계를 이용한다. 여기서, 기준센서인 M_2 는 연산식을 간단히 하기 위해서 Cartesian좌표계의 원점으로 정했을 때, 3쌍의 쌍곡선은 식(2.9)와 같다.

$$\sqrt{(x_s - L_1)^2 + y_s^2} - \sqrt{x_s^2 + y_s^2} = \Delta l_{12} \quad (2.9a)$$

$$\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_s - L_2)^2 + y_s^2} = \Delta l_{23} \quad (2.9b)$$

$$\sqrt{(x_s - L_1)^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_s - L_2)^2 + y_s^2} = \Delta l_{13} \quad (2.9c)$$

그리고, 음원의 위치인 쌍곡선의 교점은 두 개의 방정식으로도 결정할 수 있기 때문에, 식(2.9a)와 식(2.9b)를 음원 위치검출의 기본식으로 하였다. 연산식을 간단히 하기 위하여 $L_1 = L_2 = L$ 로 두고, 두 식을 정리하면, 쌍곡선의 교점좌표를 식(2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

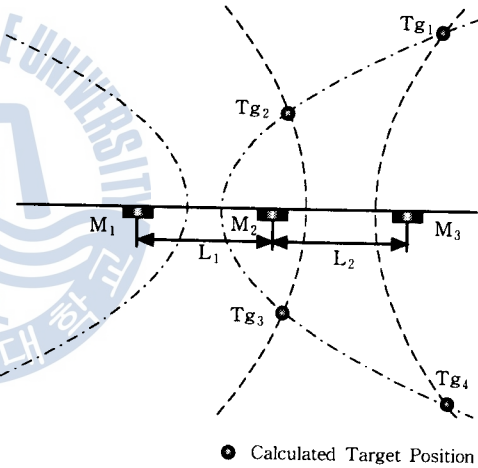


Fig.2.2 Estimation of Target Position using Hyperbola

$$x_s = \frac{2\Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2 - L^2 (\Delta l_{12}^2 + \Delta l_{23}^2)}{2L (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)} \tag{2.10a}$$

$$y_s = \frac{\sqrt{[L^2 (\Delta l_{12}^2 + \Delta l_{23}^2) - \Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2]^2 - (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)^2 (L^4 - \Delta l_{12}^2 \Delta l_{23}^2)}}{2L (\Delta l_{12}^2 - \Delta l_{23}^2)}$$

$$y_s = \frac{\sqrt{(L^2 - \Delta l_{12}^2) [4x_s^2 - 4Lx_s + (L^2 - \Delta l_{12}^2)]}}{2\Delta l_{12}^2} \tag{2.10b}$$

따라서, 식(2.11)과 식(2.12)를 이용하여 음원까지의 상대방위와 거리를 추정할 수 있다.

$$R_s = (x_s^2 + y_s^2)^{1/2} \tag{2.11}$$

$$B_s = \tan^{-1} \left(\frac{y_s}{x_s} \right) \tag{2.12}$$

Fig.2.2는 3개의 센서가 일직선상에 있고, 기적음원과 센서들이 평면상에 이루는 쌍곡선의 관계를 나타낸 것이다. M_1, M_2, M_3 은 센서로서 쌍곡선의 초점이고, L_1 과 L_2 는 센서간의 간격이다. 또한, Tg_1, Tg_2, Tg_3 및 Tg_4 는 식(2.10)의 연산을 통하여 구한 두 쌍곡선방정식의 교점이다. 여기서, Tg_3 과 Tg_4 는 센서배열선의 후방 교점들로서 관측대역에서 벗어나므로 음원의 위치가 아니고, Tg_1 과 Tg_2 중에서 음원의 위치는 각 센서에 수신되는 신호음의 도달순서에 따라서 결정된다.

삼각함수와 쌍곡선 추정원리는 음원의 위치추정을 위한 것이라는 점에서는 같다. 그러나, 도달시간차 추정에 오차가 내포된 경우, 쌍곡선 추정원리는 음원위치 추정의 정확도에 있어서 더 많은 영향을 받게 된다. 또한, 이 원리는 신호음 도달순서의 결정을 통하여 선위보정을 선결해야 한다는 등의 단점이 있다. 그러나, 센서의 배치구조가 일직선을 이루지 않고, 다른 형태의 구조를 가진다면 쌍곡선법이 보다 효과적이다. 본 계측시스템은 상선 또는 어선에서 활용될 경우, 센서배치시에 발생할 수 있는 센서의 공간위치 오차와 선배구조 등을 고려한다면 삼각함수법이 유용할 것으로 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 삼각함수 추정원리를 음원의 위치추정의 기본 원리로 하였다.

3. 음파의 도달시간차 계측원리

3.1 도달시간차 계측개요

앞장에서 살펴본 바와같이 기적음원의 위치를 결정하기 위해서는 도달시간차를 측정하는 것으로만 안된다. 본 장에서는 센서를 통하여 수신된 실제의 신호음 파형을 이용하여 도달시간차를 검출하는 방법에 관하여 논하기로 한다.

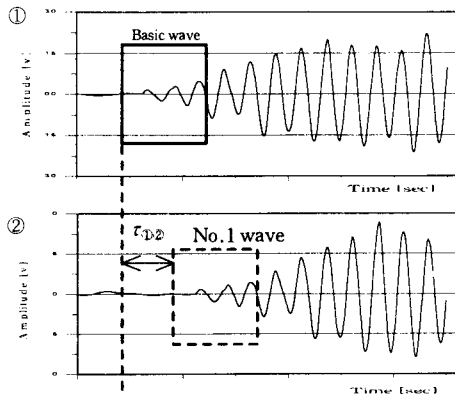


Fig.3.1 Detection of Time Delay

Fig.3.1에서 ①, ②파형은 각 센서를 통해 수신된 신호음의 파형을 나타낸 것으로, 가로축은 신호음이 수신되는 시간이고, 세로축은 신호의 진폭을 나타낸다. 먼저, 음파형 ①의 가운데로부터 기적음이 취명되기 시작하는 부분(굵은 윤곽선)을 기본파형(Basic wave)으로 하고, 이것을 음파형 ②의 파형위에 중첩시킨다. 이 때 기본파형을 조금씩 시간축상에서 이동(Shift)시켜서 가장 근사한 부분(No.1 wave)을 탐지하고, 기본파형이 본래의 위치로부터 어느 정도 이동하였는지를 측정하므로써, 음파형 ①과 음파형 ②의 도달시간차 $\tau_{D②}$ 를 측정할 수 있다.

3.2 도달시간차 계측법

Fig.3.3에서는 각 센서에 수신되는 신호의 도달시간차를 구하는 작업을 하였지만, 이것은 단순한 계측원리를 나타낸 것이다. 그러나, 도달시간차의 연산은 컴퓨터로 정확하게 측정하지 않으면 안된다. 이 연산법으로 본 논문에서는 상호상관분석법^[2]과 차분법^[3]에 관하여 논하기로 한다.

(1) 상호상관분석법(Cross-correlation analysis method)

기적음이 두 마이크로폰 센서 M_1 과 M_2 사이에 도달시간차 τ 를 가지고 수신된 두 신호가 N 개의 수치군일 때, 두 데이터 시퀀스 사이의 정규화된 상호상관계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$C_{x_1x_2}(j_{12}) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_1(n) x_2(n+j_{12})}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x_1(n))^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x_2(n))^2}} \quad \text{단, } j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3.1)$$

식(3.1)은 수치군 x_2 가 왼쪽으로 j 만큼 이동한 것을 나타낸다. 따라서, 두 신호의 상관도가 가장 높은 이동양인 j 를 구하고, 이것을 다음의 식(3.2)과 같이 시간으로 환산하므로써, 두 수신된 신호음의 도달시간차 τ_{12} 를 구할 수 있다.

$$\tau_{12} = j_{12}/f \text{ [sec]} \quad \text{단, } f \text{는 샘플링주파수 [Hz]} \quad (3.2)$$

(2) 차분법(Subtraction method)

두 개의 신호음이 N 개의 수치군인 $x_1(n)$, $x_2(n)$ 일 때, 어느 한 수치군을 왼쪽 또는 오

왼쪽으로 1 래그(Lag)씩 이동하면서, 두 수치군의 신호값의 차이를 구하고, 그 절대치를 모두 합하여 두 음파형의 상관정도를 수치로 표시하는 기법인 차분법은 식(3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{xx}(j_D) = \sum_n |x_1(n) - x_2(n+j_D)| \quad \text{단, } j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

식(3.3)에서 $x(n)$ 수치군을 1 래그씩 왼쪽으로 이동시키면 S_{xx} 의 값은 변하게 되고, 어느 이동한 래그수 j 에서 이 값은 최소가 된다. 따라서, 이 점에서 두 신호는 가장 유사하게 일치하게 되는 것이고, 이 이동된 래그수 j 를 식(3.2)에 의해서 시간으로 환산하면, 두 신호 사이의 도달시간차 τ_{D2} 를 얻을 수 있다.

차분법은 처리되는 신호음들의 파형이 거의 유사할 경우에는 효율적이지만, 파형의 형태가 다른 경우에는 기적음의 도달시간차를 정확히 측정하기에는 어려움이 따랐다. 한편, 상호상관분석법은 파형의 형태가 다소 다르더라도 정확한 도달시간차의 측정이 가능하므로, 본 논문에서는 상호상관분석법을 통하여 기적음의 도달시간차를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험개요

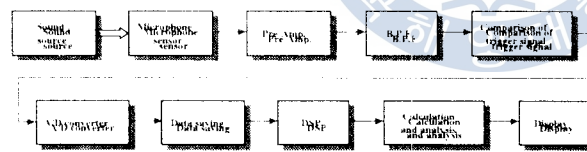


Fig.4.1 Diagram of Data Signal Processing

본 실험에서 구현한 실험장치는 크게 신호음 발생부, 수신부, H/W 신호처리부, S/W 신호처리부 및 연산표시부로 나뉘어 있고, 세부적인 실험체계 및 신호처리계는 Fig.4.1과 같다.

본 실험은 기적음원의 위치추정을 위한 실험체계 및 기본 알고리즘의 개발을 위하여, 실내에서 음원과 개추계의 상대운동이 없는 것을 기초로 하였다.

신호음의 발생부와 수신부는 지면으로부터 138cm의 높이를 유지하도록 하였다. 또한, 마이크로폰 센서들은 일직선상에 배치하였고, 센서간의 간격은 음원까지의 거리에 비해 지나치게 크지 않도록 50cm로 하였다. 또한, 신호음의 발생주파수는 200Hz로 설정하였다. 본 실험에서 중간센서로부터 음원까지의 거리와 방위는 규칙성을 배제하기 위해서 랜덤하게 설정하였다. 거리는 2.0m, 3.8m, 5.3m의 3단계로 확대하였고, 그 이상의 거리는 실험실의 공간적인 제약으로 생략하였다. 또한, 방위는 각 거리에서 $0^\circ \sim 180^\circ$ 의 범위에서 $5^\circ \sim 15^\circ$ 간격으로 설정하였는데, $180^\circ \sim 360^\circ$ 의 범위는 수신부의 후방에 있는 것이기 때문에 본 실험에서는 고려하여 않았다. 그리고, 실험은 같은 음원위치에서 12회 연속추

정하였다. 신호음의 정확한 도달시간차를 검출하기 위한 기본파형의 결정은 매우 중요한 문제로, Fig.3.1의 직사각형 부분을 기본파형으로 하여 도달시간차를 검출하는 것으로 하였다.

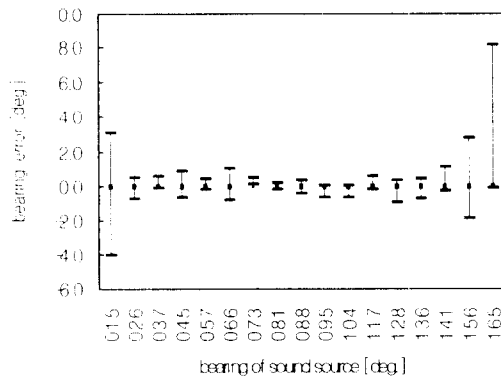
4.2 방위측정

Fig.4.2의 (1)은 음원까지의 거리가 2.0m인 경우의 방위검출 실험결과이다. 가로축은 측정시의 음원의 진방위를 나타내고, 세로축은 측정방위와 진방위의 오차량을 나타낸다. 여기서, 음원의 진방위가 015°, 156° 및 165°의 경우를 제외한 대부분의 경우는 측정된 음원의 방위가 $\pm 2.0^\circ$ 이내의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 음원의 방위가 045°, 066°, 128°, 136° 및 141° 일 때 방위오차의 분포가 다소 크지만, 이것은 12회중 2~3회만 약 $\pm 1.0^\circ$ 이내의 오차로 측정되었고, 나머지는 $\pm 0.5^\circ$ 이내의 오차내에서 측정된 것이다. (2)는 음원의 거리가 3.8m인 경우에 측정된 방위의 오차량 분포를 나타낸 것이다. 이 실험에서도 음원의 진방위가 015°의 경우를 제외한 대부분 측정방위 오차가 $\pm 2.0^\circ$ 이내에서 검출되었다. (3)은 음원의 거리가 5.3m인 경우로, 046°이하와 133°이상의 방위는 실험 여건상 생략하였다. 이 경우 대부분의 측정방위가 $\pm 1.0^\circ$ 이내의 오차를 가지고 검출되었다.

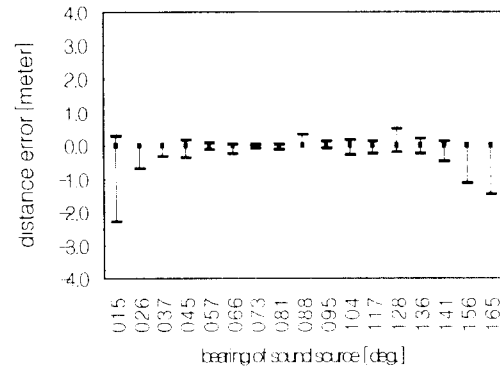
4.3 거리측정

도달시간차를 이용한 음원까지의 거리측정은 방위측정에 비하여 상당히 어렵다. Fig.4.3은 본 실험에서 얻은 거리검출 실험결과로 가로축은 측정시의 음원의 진방위이고, 세로축은 측정거리와 진거리와의 오차량을 나타낸 것이다. (1)은 음원까지의 거리가 2.0m인 경우로, 방위측정의 결과와 마찬가지로 음원의 방위가 015°, 156° 및 165°일 때 측정거리 오차량이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 057°, 073°, 081°의 경우는 대부분 오차량이 10cm이내 이었고, 045°~136°의 범위 내에서는 약 65%가 오차량 10cm이내로 측정되었다. (2)는 음원까지의 거리가 3.8m인 경우이다. 이 경우에 음원의 방위가 036°, 055°일 때 거리의 오차량이 상당히 크게 측정되었다. 이것은, Fig.4.10의 (2)에서 이들 방위에서 방위의 오차량이 크게 측정되는 것과 같은 양상을 보이고 있다. (3)은 음원까지의 거리가 5.3m인 경우로, 음원의 방위가 088°를 제외하고는 대부분 $\pm 2.0m$ 의 오차범위내에서 측정되었다. 거리측정의 실험에서도 음원의 방위가 센서배열선에 접근할수록 측정되는 거리의 오차량도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은, 방위측정의 경우와 같은 양상을 보이고 있지만, 방위보다는 거리에 미치는 영향이 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다.

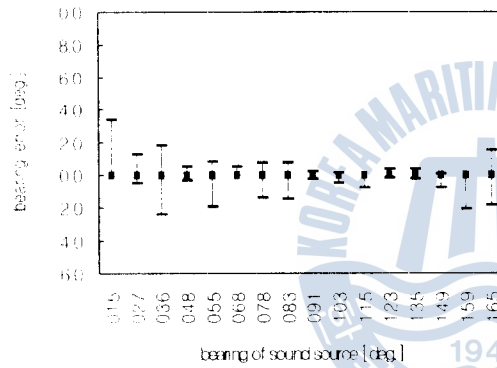
음원의 거리와 방위측정의 실험에서 발생하는 오차량은 음원의 진방위가 센서배열선에



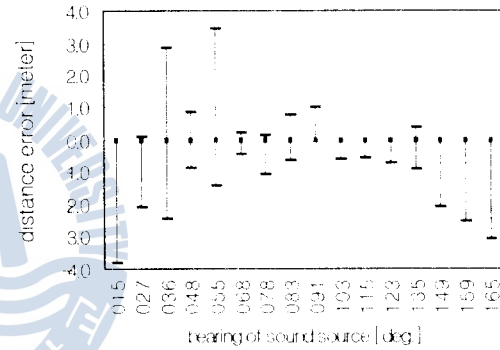
(1) In case of distance 2.0m



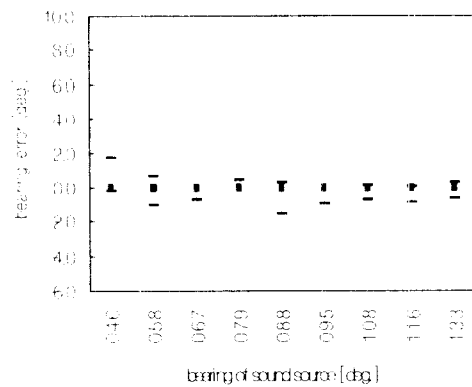
(1) In case of distance 2.0m



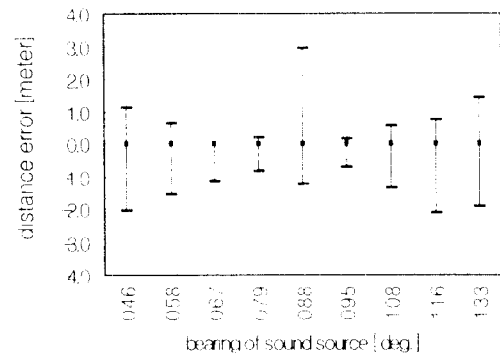
(2) In case of distance 3.8m



(2) In case of distance 3.8m



(3) In case of distance 5.3m



(3) In case of distance 5.3m

Fig.4.2 Distribution of bearing measurement

Fig.4.3 Distribution of distance measurement

접근할수록 커지는데, 도달시간차의 오차량이 같더라도 음원이 센서배열선에 가까울수록 방위와 거리측정에 미치는 영향이 커지기 때문이다. 이것은 선박에 탑재된 쌍곡선 항법 방식의 선위측정 장비인 LORAN, DECCA, OMEGA에서 주국과 종국이 이루는 기선의 연장선상에 선박이 근접할수록 선위측정에 많은 오차가 포함되는 것과 같은 원리이다.

특히, 음원방위의 센서배열선 접근에 따른 영향은 방위측정보다는 거리의 측정에 더 크게 작용하는 것으로 판명되었다. 따라서, 음원의 위치가 센서배열선에 접근함에 따라 미치는 오차의 요인을 제거할 수 있다면, 약 $040^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 의 측정범위의 분석에서와 같이 음원의 방위를 거의 정확하게 측정할 수 있고, 거리측정의 정확도도 향상될 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 상대선박에서 발신되는 기적음을 일직선상에 배치된 3개의 Microphone sensor를 통하여 수신하고, 노이즈를 제거하는 등의 일련의 신호처리를 하여 기적음 발신선박의 상대위치(방위와 거리)를 추적하는 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 실제측장치를 구성하여, 신호음원의 거리와 방위를 랜덤하게 설정 시키면서, 음원의 상대위치를 측정하는 기초실험을 하였다. 본 연구에서는 3-Sensor System으로 기적으로부터 발신된 신호음의 도달시간차를 검출하여, 발신음원인 상대선박의 위치를 측정(추적)할 수 있다는 가능성을 입증하였다. 본 시스템은 구조가 비교적 간단하고, 소형이면서 실시간 측정이 가능하므로 특히, 선박에 유용하게 적용될 것으로 기대된다. 또한, 무중항해시 상대선박에서 발신되는 기적음을 추적할 수 있어서, 선박충돌사고와 같은 해난사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

앞으로의 연구과제로서, 음원의 센서배열선 접근에 따른 오차발생 요인을 제거할 수 있는 센서배열법과 이에 따른 알고리즘의 개발, 정확한 도달시간차의 측정을 위한 H/W 및 S/W의 보완이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] G.Clifford Carter and Phillip B.Abraham, "Estimation of source motion from time delay and time compression measurements", J. Acoust. Soc. Am, 67(3), pp. 830-832, 1980
- [2] G.Clifford Carter and Charles H. Knapp, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time delay", J. Acoust. Soc. Am, 67(3), pp. 830-832, 1980
- [3] 木村降一, "汽笛音源の方向検出に關する基礎的研究", 日本航海學會誌, 第79号, pp. 83-90, 1988
- [4] 日野幹雄, "スペクトル解析", 朝倉書店, pp. 25-55, 1987