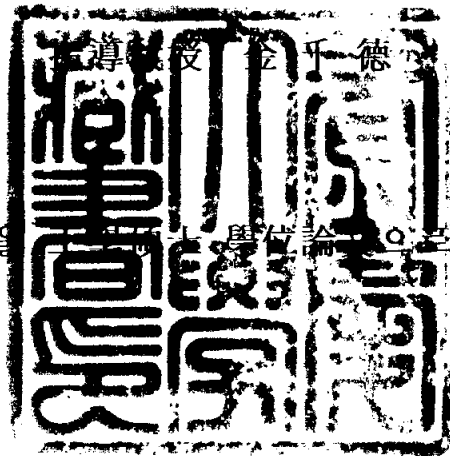


工学碩士 學位論文

센서의 평면 직교 배열에 의한
음원방향 추정에 관한 연구

이 論文을 工学碩士 學位論文으로 提出함



2003年 2月

釜慶大學校大學院

音響振動工學科(協同科程)

李 百 烈

李百烈의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002年 12月 日

主 審 工學博士 尹 鍾 樂



委 員 工學博士 河 康 烈



委 員 工學博士 金 千 德



목 차

Abstract	2
I. 서 론	4
II. 음향센서 배열에 의한 방위각 측정원리	6
II-1. 두 센서 배열에 의한 방위각 측정원리	6
II-1-1. 지연 시각 측정	7
II-2. 4개의 음향 센서 배열에 의한 방위각 측정	9
II-2-1. 음향 센서의 직교배열에 의한 음원방위각 측정	9
II-2-2. 두 센서 간 시간지연 측정을 위한 신호 분리 및 조합	12
II-2-3. delay-sum Beamforming에 의한 방위각 측정	15
III. 음원의 방위각 측정 실험 및 결과	16
III-1. 시뮬레이션	18
III-1-1. 5센서 3채널 출력 시스템	18
III-1-2. 4센서 4채널 출력 시스템	23
III-2. 무향실 실험	28
III-2-1. 5센서 3채널 출력 시스템	28
III-2-2. 4센서 4채널 출력 시스템	33
III-2-3. 4센서 3채널 출력 시스템	36
IV. 결 론	42
Reference	44

A Study on DOA Estimation of Source by Plane Crossing Array of Sensor

Baek-Lyeol Lee

*Department of Interdisciplinary Program
of Acoustics and Vibration Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

This paper describes an acoustical sensor in sound reception systems of ships which are acoustical electronic navigational aids to enable to measure azimuth angles of warning sound. According to the regulation SOLAS2000, all ships are required to install sound reception systems which can receive warning

sound generated from the other neighboring ships in a totally enclosed bridge. In order to measure azimuth angles of sound reception systems of ships, four omni-directional microphones are used for acoustical sensors. Two out of four omni-directional microphones are arrayed to be two sets of directional microphones, which are vertically arranged in a plane. The direction of output signals of the array which are obtained as signal differences in analogue circuit represents by consisting directional microphones of $\cos\theta$ and $\sin\theta$. When two sets of directional microphones are vertically arranged in a plane, the output signals at the center can be increased four times of the signals obtained from omni-directional microphones in the two directional arrays. Therefore, azimuth angles of sound reception systems of ships can be obtained from the delay-sum beam forming techniques which output signals of directional microphones, $\cos\theta$ and $\sin\theta$, and the analogue signals of three omni-directional microphones go simultaneously A/D converter.

In addition, the measurement system for sound source azimuth angles of incidence waves is designed by arranging four omni-directional microphones vertically in a plane. The results of experiments in anechoic room with noise level 35dB show that the error ranges are within $\pm 8^\circ$ error range, indicating its practicality.

I. 서 론

음을 발생하는 음원의 위치를 탐지하는 연구는 오래 전부터, 여러 가지 방법에 의해 수행되어 그 결과물은 군사적, 산업적으로 널리 사용되고 있다.

공기 중에 사용되는 음원의 위치측정시스템은 다수의 무지향성 마이크로폰을 직선 또는 원형배열하거나 4개의 무지향성 마이크로폰을 직교형태로 설치하여 도래각을 측정하고 있다.

최근 IMO 규정에 의해 해상에 운항중인 100톤 이상의 선박은 인근에 있는 선박이 발생하는 경고음을 수음하여 그 음의 도래각을 실시간에 측정하여 방향을 LED로 표시하고 그 경고음을 스피커로 재생할 수 있는 음향수신장치의 설치를 의무화하고 있다.

따라서 이 연구에서는 선박음향수신장치인 입사음의 도래각측정시스템을 제안하고 그 유효성을 실험에 의해 조사한다. 이 연구에서 제안한 입사음의 도래 측정시스템은 4개의 무지향성 마이크로폰을 사용하여, 무지향 마이크로폰을 2개씩 한 조로 어레이를 만들고, 두 조의 지향성 마이크로폰을 평면에 직교로 배열시킨다. 두 조의 지향성 마이크로폰은 각 어레이를 구성하는 두 개의 무지향성 마이크로폰의 출력신호의 차에 의해 구해지는 $\cos\theta$ 와 $\sin\theta$ 의 방위각을 구한다. 그리고 두 어레이 마이크로폰을 평면에 직교로 배치한 중심점의 출력신호는 두 어레이에 사용된 4개의 무지향성 마이크로폰의 출력신호를 전부 합한 값의 1/4이다. 그리고 입사된 음파의 방위각(DOA)은 두 조의 지향성 마이크로폰 출력신호 두 채널과 4개의 무지향성 출력신호를 합한 평면의 중심점 출력신호

1채널을 동시에 A/D변환하여 시간지연을 측정하고 그 정보로 방위각을 측정하는 상호상관법으로 계산하고, 또한 Delay-Sum Beamforming 기법에 의해 방위각을 측정하여 그 유효성을 확인한다.

II. 음향센서 배열에 의한 방위각 측정원리

II-1. 두 센서 배열에 의한 방위각 측정원리

음원에 대한 방위각 측정은 센서 어레이에서 법선을 기준으로 음원에 대한 각도이다. 방위각과 어레이를 구성하는 각 센서간의 상대적인 시간 지연 사이에는 센서간의 거리 $\frac{d}{2}$ 의 함수에 의해 관계식이 성립한다.

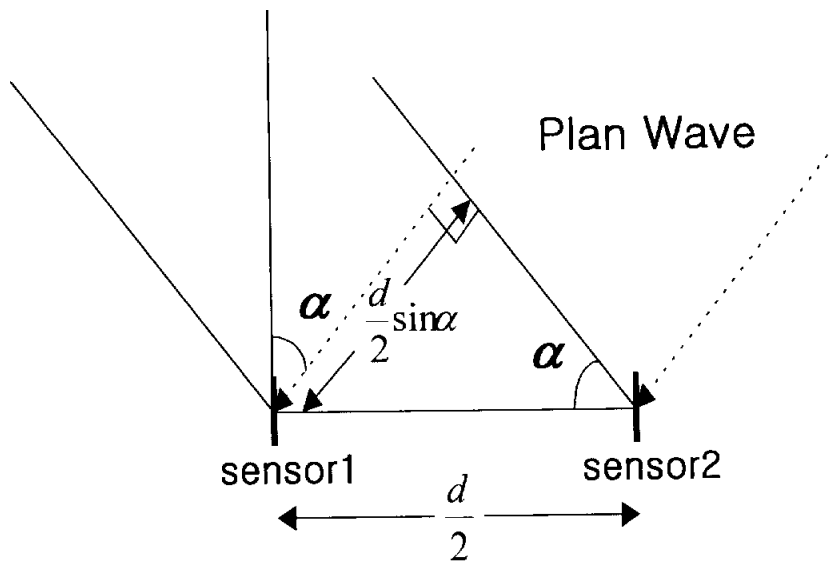


그림 1. 2센서 배열

Fig. 1 Two sensor array

그림 1과 같이 두 센서가 거리 $\frac{d}{2}$ 로 배열되었을 때 두 센서에 입력되는 신호의 지연시간과 방위각의 관계는 식(1)과 같이 나타난다. 두 센서사이의 시간지연 τ 를 알게 되면 방위각 α 를 구할 수 있다.

$$c*\tau = \frac{d}{2} * \sin \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ \frac{2*(c*\tau)}{d} \right\}$$

이 식에서 $\frac{d}{2}$:센서간의 거리

c :음속

τ :time delay

α :방위각

II-1-1. 지연 시간 측정

두 센서 어레이에 의한 임의의 각 α 로 입사하는 음파의 시간지연 측정에 이용되고 있는 알고리즘으로는 신호간의 상관성을 이용한 Cross-Correlation 알고리즘과 Generalized Cross-Correlation 알고리즘[3], 시간지연 측정 오차의 분산을 최소화하기 위해 제안

된 Maximum Likelihood Estimation[5], Roth Processor[6] 등 여러 알고리즘이 연구되고 있다.

이 연구에서는 센서 1과 센서 2에 입력되는 신호에 대해 먼저 Cross-Spectrum을 구하고 그 IDFT가 상호 상관 함수가 되는 윈너-힌치의 정리를 이용하여 시간지연을 측정한다.

$$\gamma_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^* y_{n+\tau} \quad (2)$$

식(2)는 상호 상관함수 이다. 여기서 τ 는 시간지연 lag이다. 여기서 각 신호에 대하여 식(3)과 같이 푸리에 변환하여 Cross-Spectrum을 구한다.

$$\begin{cases} X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j2\pi \frac{kn}{N}) \\ Y_k = \sum_{p=0}^{N-1} y_p \exp(-j2\pi \frac{kp}{N}) \end{cases} \quad (3)$$

Cross-Spectrum을 식(4)에서 역 푸리에 변환하면 식(2)의 상호 상관 함수가 된다.

$$\gamma_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \text{IDFT}[X_k^* Y_k] \quad (4)$$

시간지연 lag τ 는 식(4)의 최대 첨두치(max. peak)에 대응하는 시간이다.

II-2. 4개의 음향 센서 배열에 의한 방위각 측정

II-2-1. 음향 센서의 직교배열에 의한 음원방위각 측정

이 연구에 사용된 5센서 및 4센서 배열에 대한 구조를 그림 2에 그렸다. 그림 2의 (a)는 중심에 무지향성 음향센서(O) 1개를 설치하고, 이를 기준으로 4개의 센서를 $\frac{d}{2}$ 간격으로 직교배열시킨 2조의 직선어레이 시스템의 배치도이다. 그림 2의 (b)는 어레이 중심에 센서(O)없이 4개의 센서만을 간격 $\frac{d}{2}$ 로 직교 배열시킨 2조의 어레이 시스템이다.

그림 2의 (a)에서 Ch.A는 음향센서 A_1 과 A_2 에 수신된 신호 조합에 의한 출력이고, B_1, B_2 에 수신된 신호조합은 Ch.B로 출력된다. A_1 과 B_1 은 접지(Ground)시킨다.

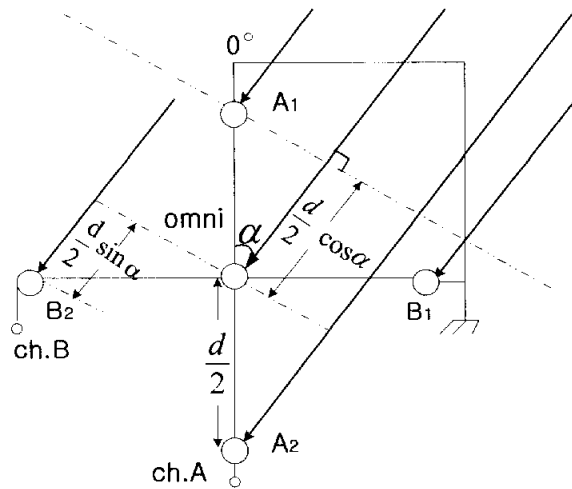
식 (5)는 그림 2에서 임의의 방위각 α 로 어레이 센서에 입력하는 음향신호의 각 센서 출력신호이다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jkr} & : O \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r - \frac{d}{2} \cos \alpha)} & : A_1 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r + \frac{d}{2} \cos \alpha)} & : A_2 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r - \frac{d}{2} \sin \alpha)} & : B_1 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r + \frac{d}{2} \sin \alpha)} & : B_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

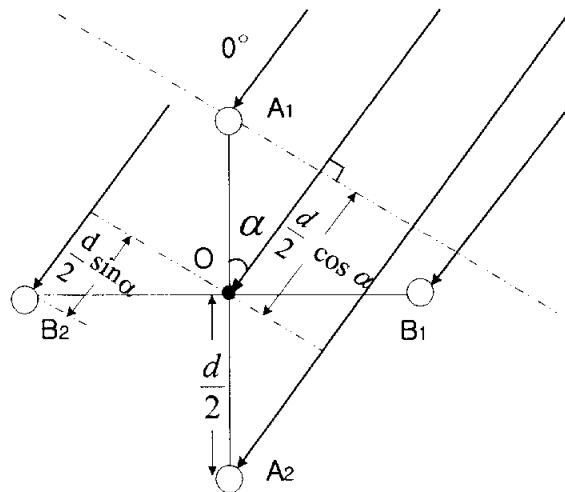
이 식에서 r 은 음원에서 어레이 중심점까지의 거리이다. 그리고 d 는 센서 A_1, A_2 와 B_1, B_2 사이의 거리, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 는 파수 (wavenumber)이다. 음원에서 입사되는 음향신호는 평면파로 간주한다.

그림 2의 (a)에서는 중심점에 설치한 무지향 센서 중심으로 했을 때 Ch.A의 A_1 신호는 $-\frac{d}{2} \cos \alpha$, A_2 신호는 $+\frac{d}{2} \cos \alpha$ 의 거리차가 생긴다. 그리고 Ch.B의 B_1 신호는 $-\frac{d}{2} \sin \alpha$, B_2 신호는 $+\frac{d}{2} \sin \alpha$ 의 거리차가 생긴다. A_1 과 A_2 그리고 B_1 과 B_2 에 의해 조합시킨 Ch.A, Ch.B의 출력신호는 식(6)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & A_1 - A_2 \\
 &= V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jkr} (e^{jk\frac{d}{2} \cos \alpha} - e^{-jk\frac{d}{2} \cos \alpha}) \\
 &= j2V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jkr} \sin(k\frac{d}{2} \cos \alpha) \quad : Ch. A \\
 & B_1 - B_2 \\
 &= V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jkr} (e^{jk\frac{d}{2} \sin \alpha} - e^{-jk\frac{d}{2} \sin \alpha}) \\
 &= j2V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jkr} \sin(k\frac{d}{2} \sin \alpha) \quad : Ch. B
 \end{aligned} \tag{6}$$



(a) 5센서 시스템



(b) 4센서 시스템

그림 2. 센서 어레이의 구조

Fig. 2 sensor array & Structure

II-2-2. 두 센서 간 시간지연 측정을 위한 신호 분리 및 조합

2조의 음향센서에서 두 센서 사이에 생기는 시간지연 측정은 각 센서의 출력 신호에 의해 구한다. 어레이를 구성하는 각 센서의 신호를 분리시키면 실제 수신되는 신호인 Ch.A, Ch.B, 중심 센서 신호(O)의 실수 성분은 정현파 신호를 나타내며 식 (7)과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} -2V_m \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) : Re[chA] \\ 2V_m \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) : Re[chB] \\ V_m \cos(\omega t - kr) : Re[O] \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_m \left\{ \cos(\omega t - kr) \cdot \cos\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) \right. \\ \quad \left. - \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) \right\} : Re[A_1] \\ V_m \left\{ \cos(\omega t - kr) \cdot \cos\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) \right. \\ \quad \left. + \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) \right\} : Re[A_2] \\ V_m \left\{ \cos(\omega t - kr) \cdot \cos\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) \right. \\ \quad \left. - \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) \right\} : Re[B_1] \\ V_m \left\{ \cos(\omega t - kr) \cdot \cos\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) \right. \\ \quad \left. + \sin(\omega t - kr) \cdot \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) \right\} : Re[B_2] \end{array} \right. \quad (8)$$

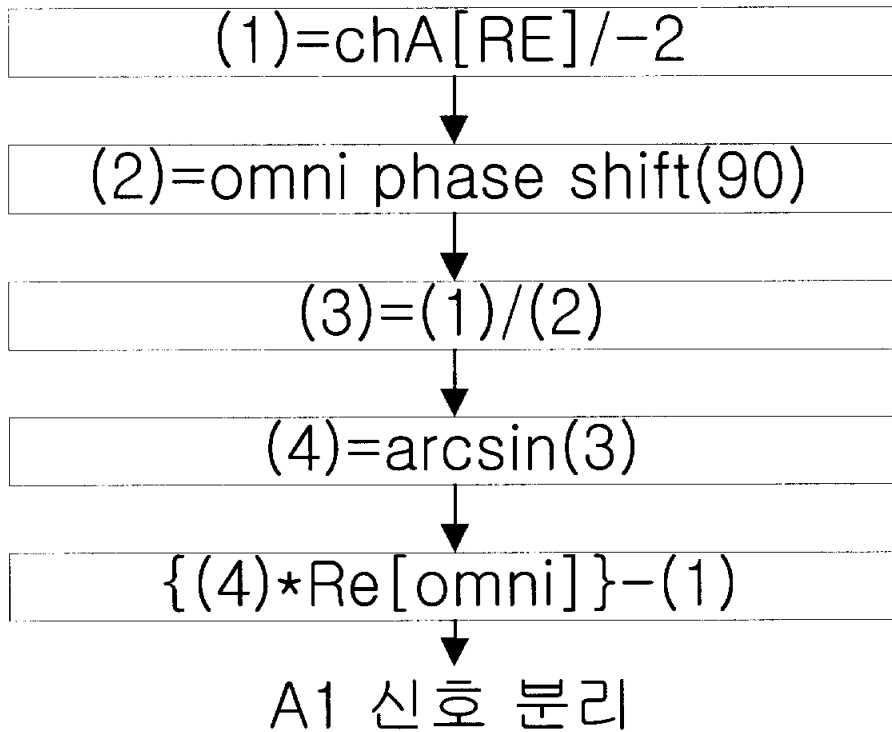


그림 3. 신호분리 순서

Fig. 3 signal separation Program

식 (7)에서 그림 3의 순서로 A_1 센서의 신호를 분리한다. 식 (8)은 그림 3과 같은 순서로 각각의 신호 A_1, A_2, B_1, B_2 를 분리한 결과이다. 식 (8)의 신호들은 식 (5)의 실수부와 같다.

4센서 시스템에서는 시간지연 측정을 위해 평면 배열 중심의 신호가 필요하다. 이 신호는 4센서의 신호로 조합이 가능하며 중심 센서신호를 이용 시간지연을 측정한다.

먼저 식 (8)과 같이 신호의 조합을 위해 각 센서 출력신호의 실

수부만을 취한다.

중심 센서신호는 식 (9)와 같이 조합된다. 구해진 중심 센서신호는 식 (7)의 중심 센서 신호와 같다.

$$\begin{aligned}
 & Re[A_1] + Re[A_2] + Re[B_1] + Re[B_2] \\
 &= 2 V_m \cos(\omega t - kr) \times \left\{ \cos\left(\frac{kd}{2} \cos \alpha\right) + \cos\left(\frac{kd}{2} \sin \alpha\right) \right\} \\
 &\doteq Re[4 * O]
 \end{aligned} \tag{9}$$

II-2-3. delay-sum Beamforming에 의한 방위각 측정

샘플링 주파수에 영향을 받지않는 delay-sum 빔포밍에 의해 방위각을 측정한다. 먼저 위상 성분 α 를 포함하는 식을 구하기 위하여 각 Ch.A, Ch.B의 출력에 중심센서의 출력으로 나누고, Ch.A의 $k\frac{d}{2}\cos\alpha$ 와 Ch.B의 $k\frac{d}{2}\sin\alpha$ 의 성분만을 추출하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{cases} k\frac{d}{2}\cos\alpha = \sin^{-1}\left\{\sin(k\frac{d}{2}\cos\alpha)\right\} \\ k\frac{d}{2}\sin\alpha = \sin^{-1}\left\{\sin(k\frac{d}{2}\sin\alpha)\right\} \end{cases} \quad (10)$$

최종적으로 평면 직교 배열 시스템에서 수신한 외부 음원의 방위각은 식 (11)과 같다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left\{\frac{k\frac{d}{2}\sin\alpha}{k\frac{d}{2}\cos\alpha}\right\} \quad (11)$$

따라서 임의의 각도로 입사해 들어오는 음원의 위치는 중심센서 신호와 Ch.A, Ch.B신호로 측정할 수 있다.

Ⅲ. 음원의 방위각 측정 실험 및 결과

이 연구에서 구현한 실험장치는 그림 4, 5 와 같다. 그림. 4는 5 센서 3채널 시스템에서의 실험장치이다. 음원과 센서간의 거리는 1m로 하였으며, 각 센서간의 간격은 0.07m로서 그 중심인 0.035m 거리에 무지향성 센서가 위치하여 신호를 수신한다. 방위각은 0°에서 360°까지 회전시키면서 수신하였으며, 실험은 암소음 레벨 20dB 이하인 부경대학교 음향 진동공학 연구소 무향실에서 실시하였다. 그림 5는 4센서 4채널 및 3채널 시스템을 직접 제작하여 실험 시 사용된 장치이다. 센서간의 간격은 5센서 시스템과 같으며 중심센서 없이 제작되었으며 음원과 센서간 거리는 2m이다. 실험은 부경대학교 용당캠퍼스 8공학관 무향실(3.5m×2.5m×2.5m)에서 실시하였다.

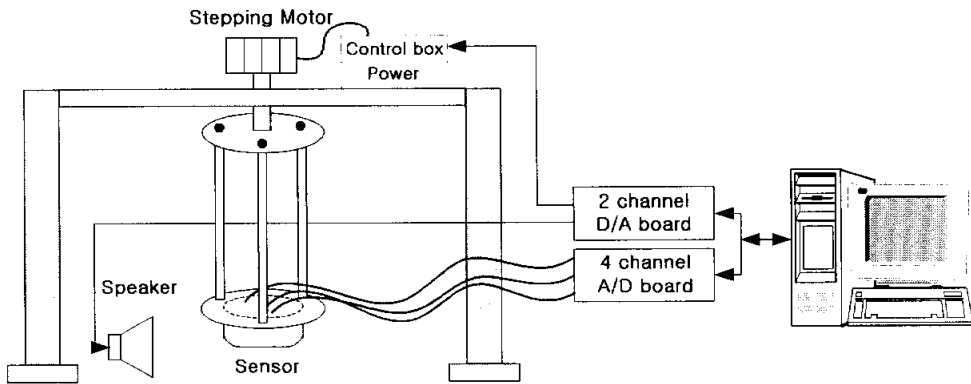


그림 4. 5센서 3채널 시스템의 실험장치

Fig. 4 Experiment construct of 3 channel system
by 5 sensor

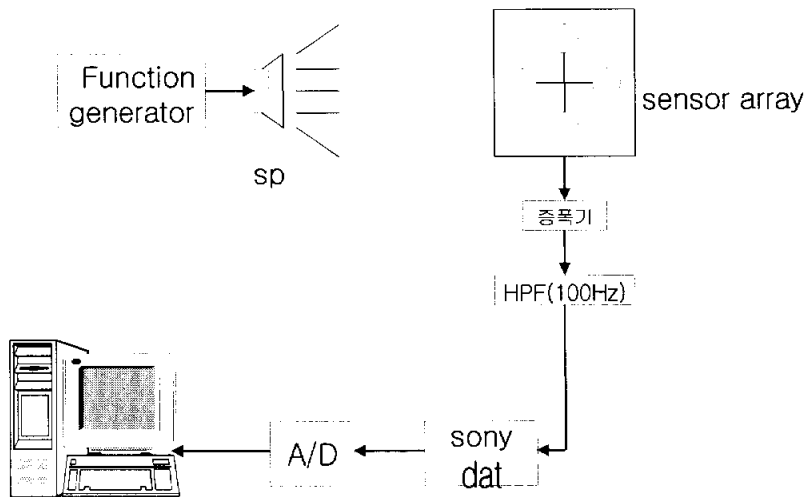


그림 5. 4센서 4채널 및 3채널 시스템의 실험장치

Fig. 5 Experiment construct of
4 channel & 3 channel system by 4 sensor

Ⅲ-1. 시뮬레이션 실험

Ⅲ-1-1. 5센서 3채널 출력시스템

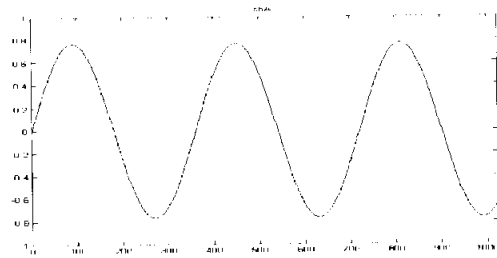
본 연구에서 제안한 알고리즘에 의한 신호의 분리와 음원 방향 측정에 관해 시뮬레이션 실험 하였다.

시뮬레이션 실험에서 음원은 주파수 700Hz 인 정현파, 데이터 수는 1024 포인트, 샘플링은 주파수의 360배인 252kHz, 거리 d 는 0.07m 이다. 먼저 각 센서의 신호를 만든후 조합하여 채널 A와 채널 B 신호를 만들고 다시 신호를 분리 방위각을 측정하였다.

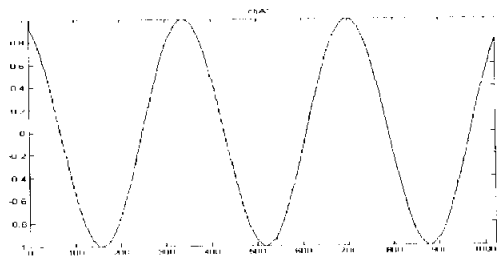
그림 6은 방위각 30°에서 Ch.A 신호를 분리한 결과이다. 그림 7은 잡음이 없는 경우에 있어서 0°에서 10°간격으로 360°까지 음원위치를 바꾸었을 경우 방위각 측정 결과이다.

잡음이 존재하는 환경을 고려 S/N비 3dB와 6dB, 10dB의 잡음을 각각 부가하고 시뮬레이션 하였다. 그림 8은 방위각 30°에서 3dB의 잡음을 부가한 경우 Ch.A 에서 A_1 과 A_2 신호로 분리된 결과이다. 그림 9는 잡음 환경하에서의 방위각 측정 결과이다.

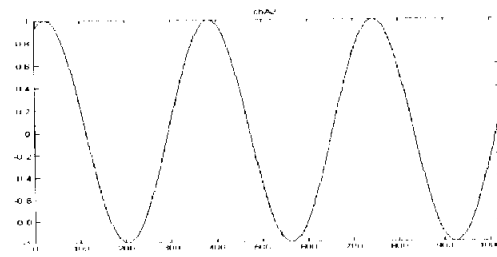
무잡음시의 방위각 측정 결과보다 측정 오차의 범위가 조금 커지지만 각각 $\pm 1.8^\circ$, $\pm 0.5^\circ$, $\pm 0.2^\circ$ 이내로 측정되었다.



(a) Ch. A



(b) A1



(c) A2

그림 6 Ch. A의 신호분리

Fig. 6 signal separation of Ch. A

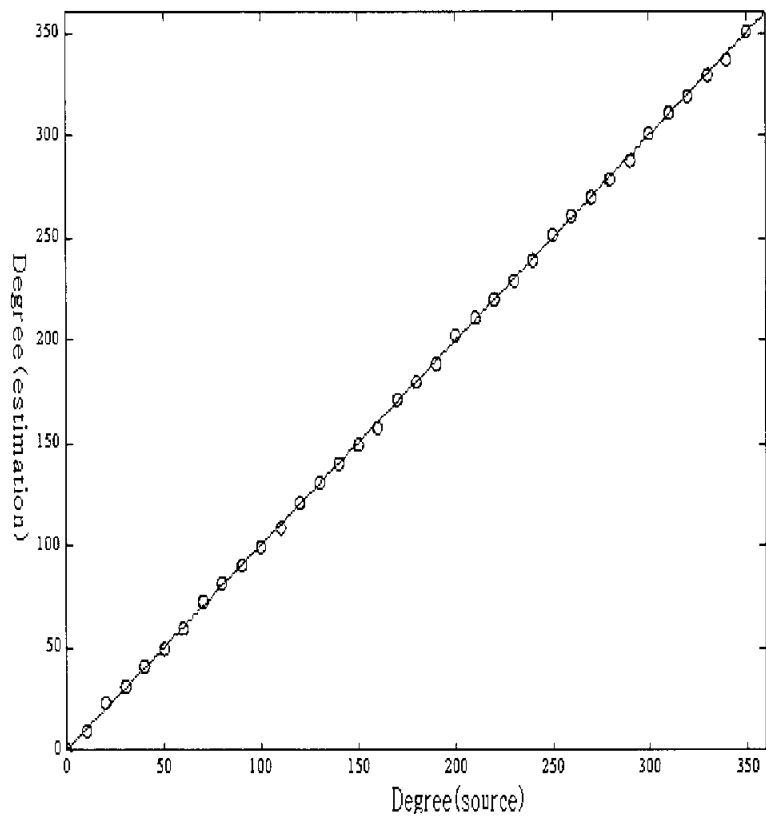
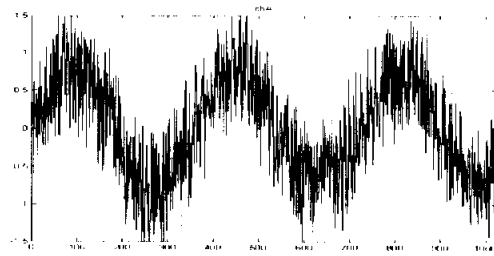
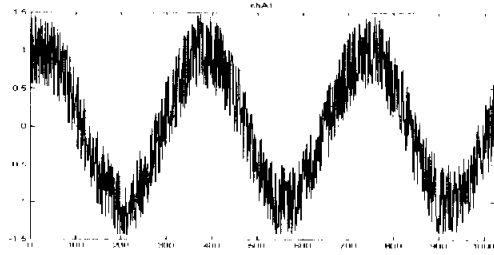


그림 7 방위각 측정결과

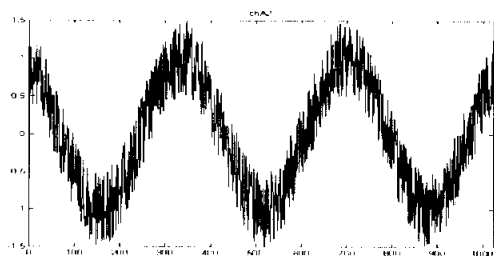
Fig. 7 DOA estimation result



(a) Ch. A



(b) A1



(c) A2

그림 8 Ch. A의 신호분리($S/N=3\text{dB}$)

Fig. 8 signal separation of Ch. A($S/N=3\text{dB}$)

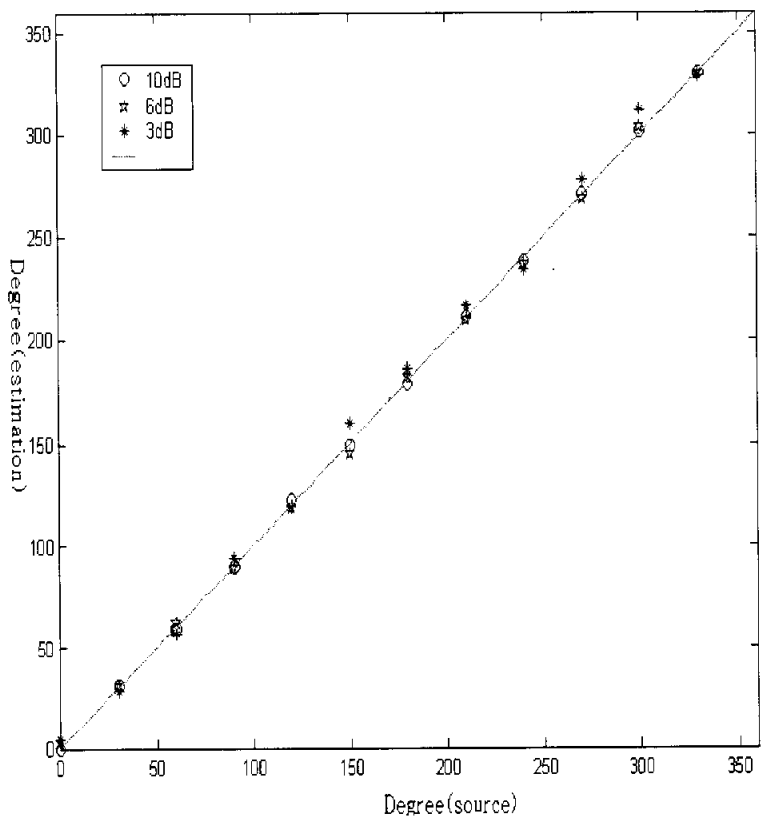


그림 9 방위각 측정결과

Fig. 9 DOA estimation result

III-1-2. 4센서 4채널 출력시스템

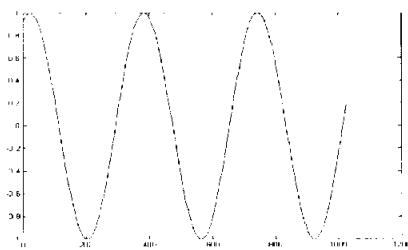
신호의 조합과 방위각 측정에 대해 시뮬레이션 하였다. 음향 신호는 주파수 700Hz의 정현파, 1024 포인트, 샘플링주파수는 252kHz, 센서간 거리 d 는 0.07m 이다. 4개의 센서 신호와 조합된 중심 센서 신호로 방위각을 측정하였다.

그림 10은 방위각 30°에서의 각 센서의 신호와 조합된 중심 센서 신호이다. 그림 11은 잡음이 없는 경우 0°에서 10°간격으로 360°까지 음원의 위치를 바꾸며 방위각을 측정한 결과이다.

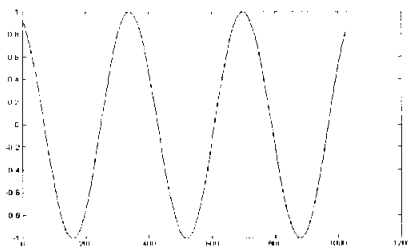
잡음 환경을 고려하여 센서의 입력 신호에 S/N비 3dB와 6dB, 10dB의 잡음을 각각 취하고, 잡음의 영향을 줄이기 위하여 센서의 출력에 1kHz의 로패스 필터를 거쳤다.

그림 12는 방위각 30°에서 3dB의 잡음에서 각 신호와 조합된 중심 센서 신호이다. 그림 13은 잡음 환경에서 로패스 필터를 통과한 신호로 방위각을 측정한 결과이다.

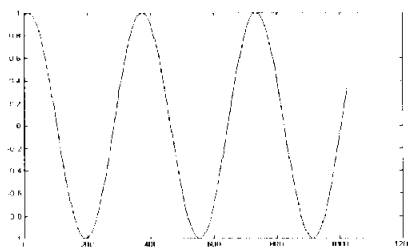
S/N비 10dB에서는 $\pm 4^\circ$ 의 측정 오차를 가지고, S/N비 6dB에서는 수직 및 수평 축 근처의 $\pm 10^\circ$ 에서는 방위각 측정이 어려웠고, 그 외의 방위각 측정에서는 $\pm 3.3^\circ$ 의 오차를 나타내었다. 또한, S/N비 3dB에서도 6dB에서의 결과처럼 센서의 배열 축 부근 $\pm 20^\circ$ 에서는 방위각 측정이 어렵고, 그외의 방위각 측정에서는 $\pm 4.9^\circ$ 의 오차를 나타내었다.



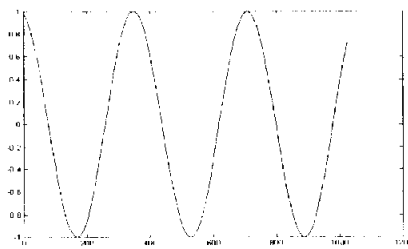
(a)A1



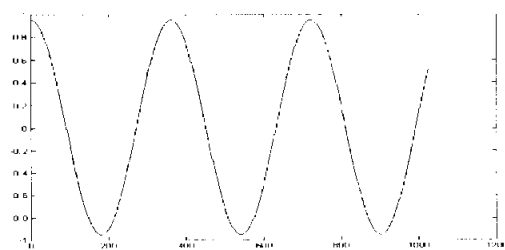
(b) A2



(c)B1



(d) B2



(e) O

그림 10. 수신신호 및 조합신호

Fig. 10 Received signal & Combination signal

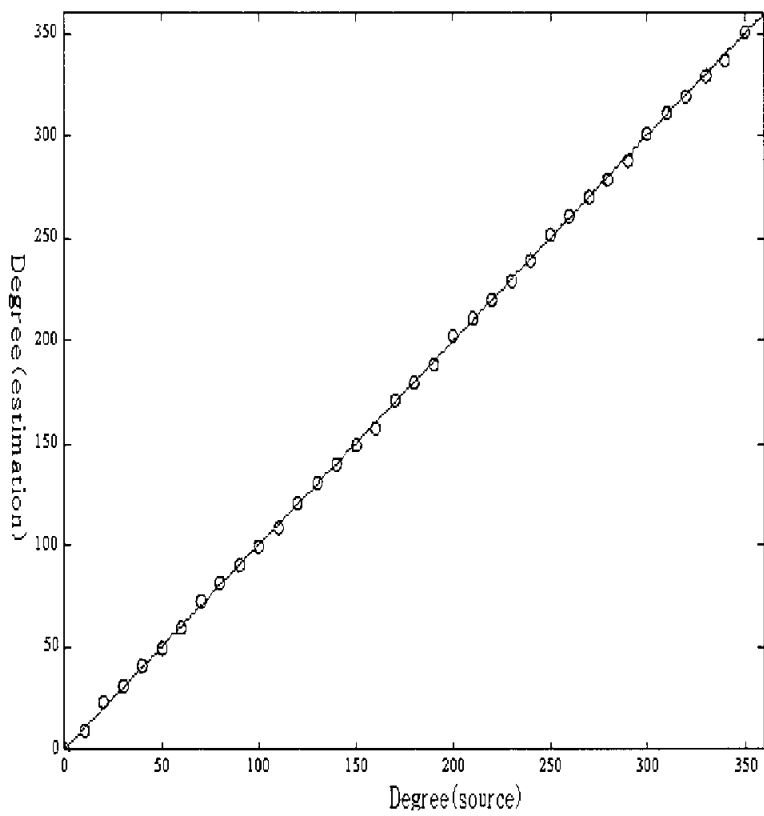
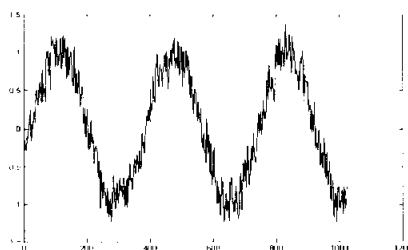
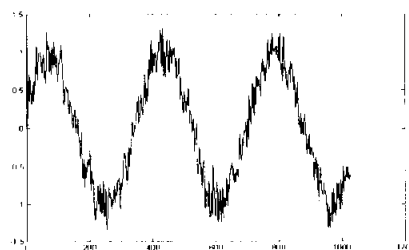


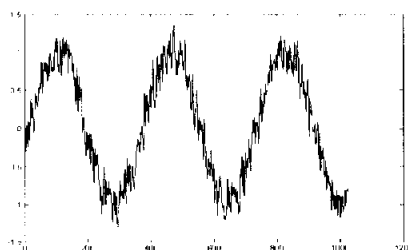
그림 11. 방위각 측정결과
Fig. 11 DOA estimation result



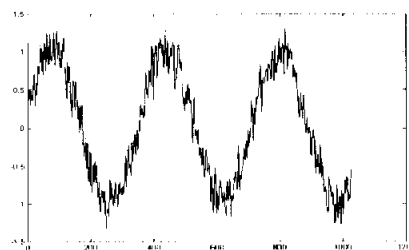
(a) A1



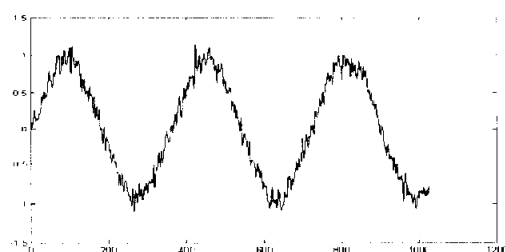
(b) A2



(c) B1



(d) B2



(e) O

그림 12. 수신신호 및 조합신호(S/N=3dB)

Fig. 12 Received signal & Combination signal(S/N=3dB)

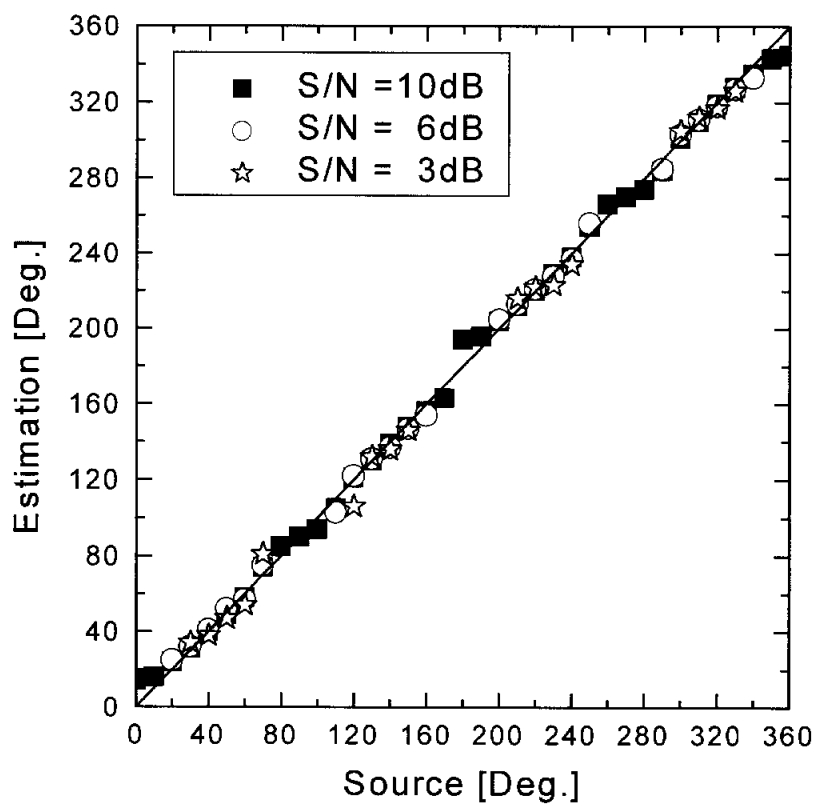


그림 13. 방위각 측정 결과

Fig. 13 DOA estimation result

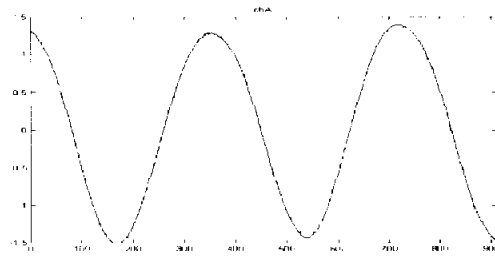
Ⅲ-2. 무향실 실험

Ⅲ-2-1. 5센서 3채널 출력시스템

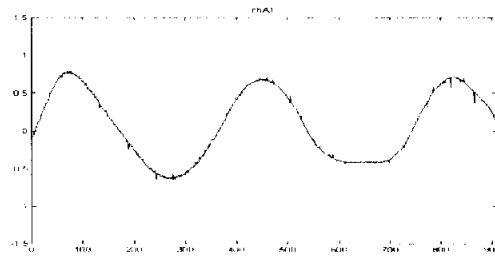
시뮬레이션과 같은 조건으로 데이터를 수신하고 샘플링 주파수는 각각 252kHz, 126kHz, 63kHz로 하여 실험하였다.

그림 14,15은 방위각 30°에서 수신된 신호의 분리와 각 샘플링에 따른 방위각 측정 결과이다. 분해능에 따른 추정 한계는 각각 $1^\circ:\pm 2.2^\circ$, $2^\circ:\pm 2.4^\circ$, $4^\circ:\pm 10^\circ$ 였다.

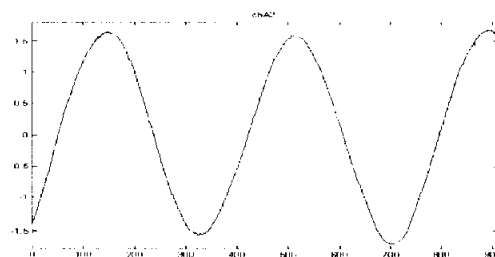
그림 16,17은 샘플링 주파수 변화와 무관한 delay-sum 빔포ald에 의한 방위각 측정 결과이다. 오차 범위는 $\pm 6^\circ$ 였다.



(a) Ch. A



(b) A1



(c) A2

그림 14. Ch.A의 신호 분리

Fig. 14 signal separation of Ch. A

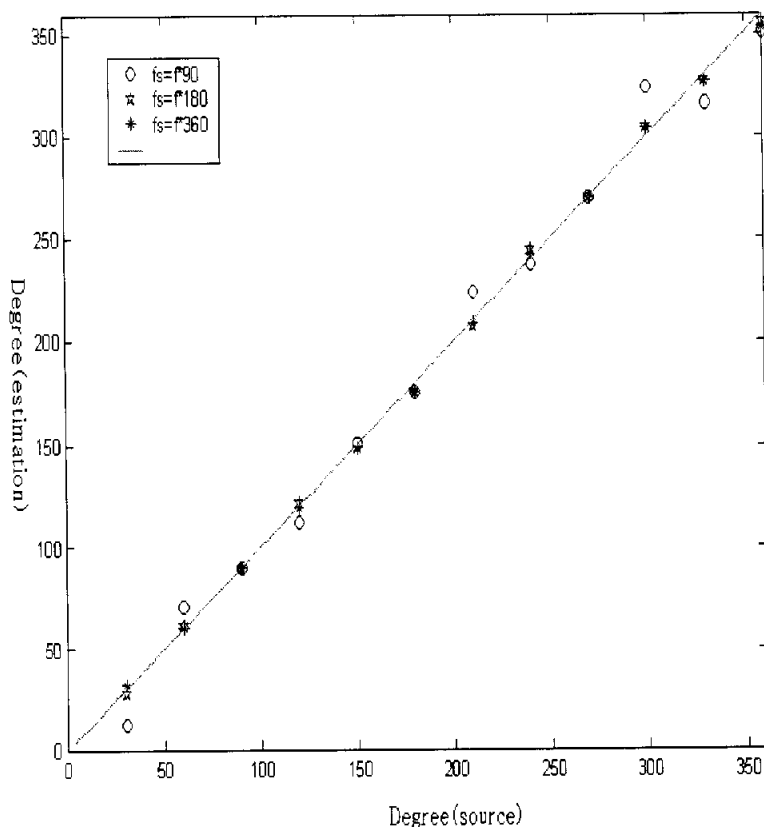
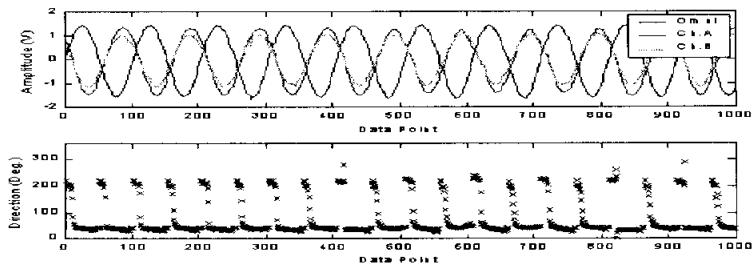
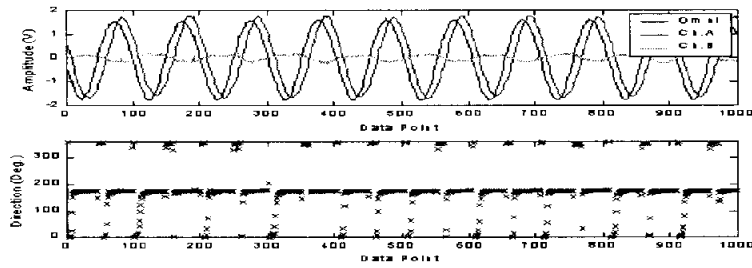


그림 15. 방위각 측정결과

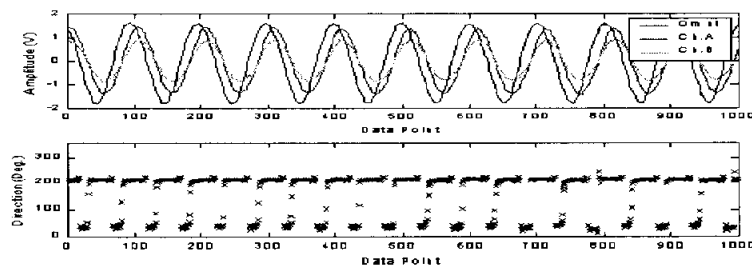
Fig. 15 DOA estimation result



(a) 45°



(b) 180°



(c) 225°

그림 16. delay-sum 빔포밍에 의한 방위각 측정

Fig. 16 DOA estimation by delay-sum beamforming

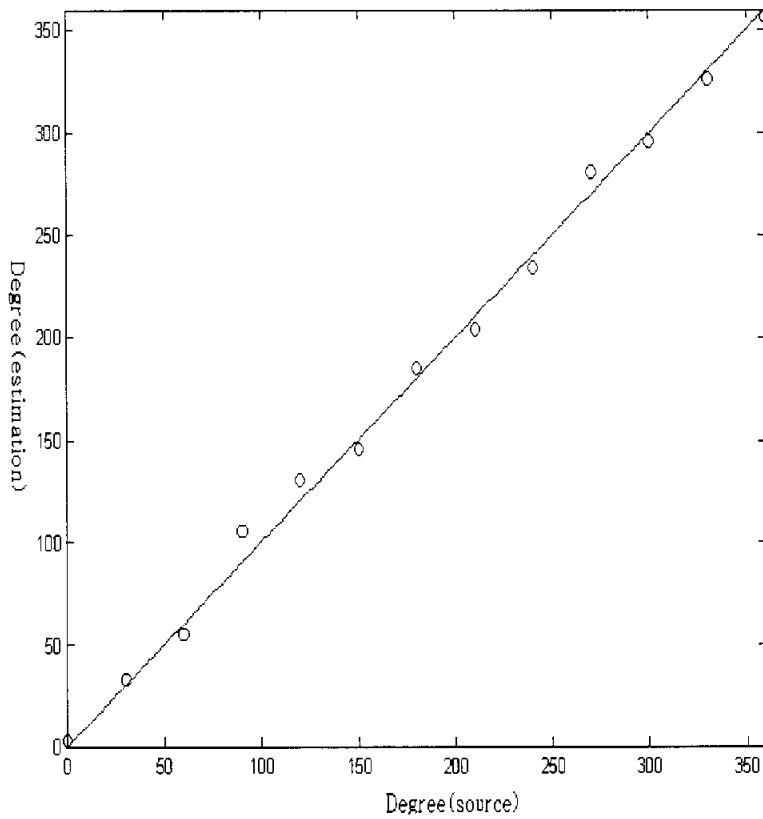


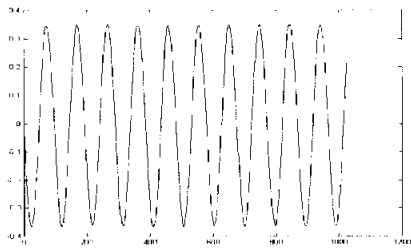
그림 17. delay-sum 빔포밍에 의한 방위각 측정결과

Fig. 17 DOA estimation result by delay-sum beamforming

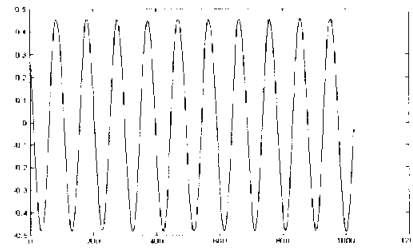
III-2-2. 4센서 4채널 출력시스템

시뮬레이션과 같은 조건으로 데이터를 수신하고 음향신호는 870Hz의 정현파, 샘플링 주파수는 82.5kHz로 하여 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 4개의 센서로 음향신호를 수신하고 OP앰프로 설계한 증폭기를 통해 증폭한 후 100Hz 하이패스 필터를 거친 신호를 DAT를 통해 저장한 뒤 A/D 변환하여 방위각 측정을 하였다.

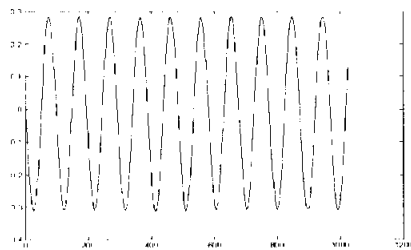
그림 18,19는 방위각 30°에서 수신된 신호의 조합과 각 방위각에 대한 측정 결과이다. 오차 범위는 $\pm 6.5^\circ$ 였다.



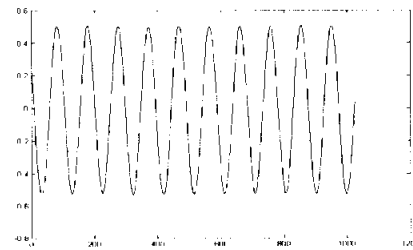
(a) A1



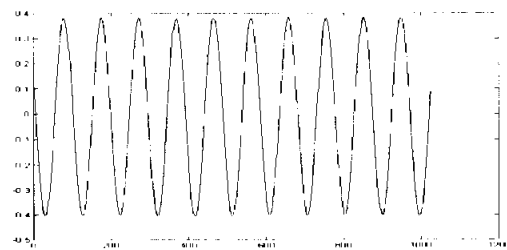
(b) A2



(c) B1



(d) B2



(e) O

그림 18. 수신신호 및 조합신호

Fig. 18 Received signal & Combination signal

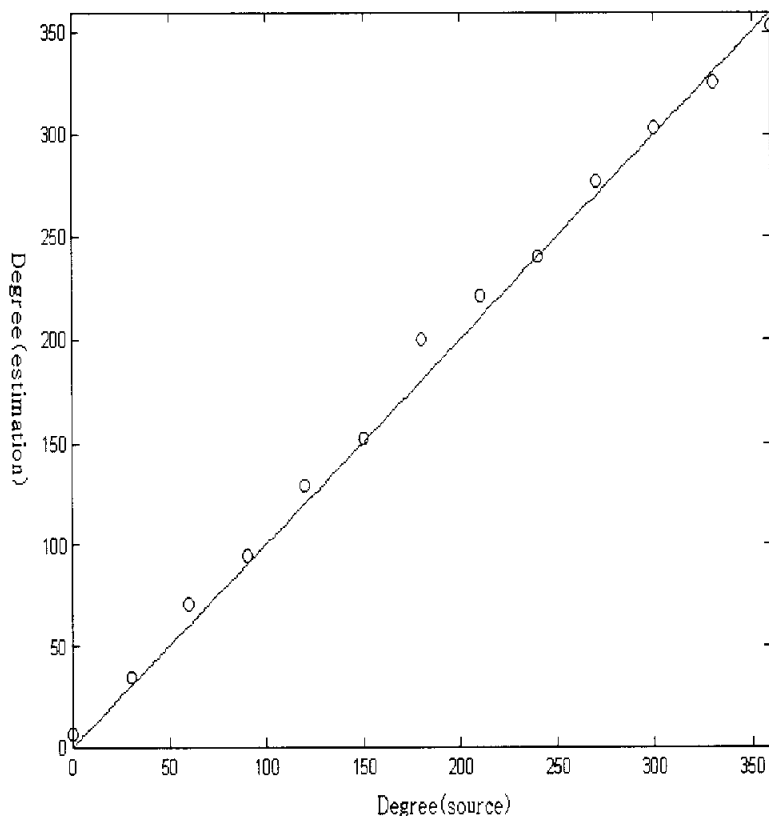


그림 19. 방위각 측정 결과

Fig. 19 DOA estimation result

III-2-3. 4센서 3채널 출력시스템

함수 발생기에서 870Hz의 정현파 신호를 스피커를 통해 각 방위에서 출력하고 평면 직교 배열된 4센서로 수신, 그림 20에서의 OP앰프로 설계된 증폭기로 증폭한다.

가산기와 감산기에 의해 각 채널의 신호와 중심 신호를 조합 3채널로 출력하고 100Hz 하이패스 필터를 통과해 DAT에 저장되어진 신호를 샘플링 주파수 82.5kHz로 A/D변환한다. 이렇게 변환된 신호로 방위각을 측정하였다.

그림 21은 설계된 하드웨어를 통해 출력된 각 채널 신호와 시간 지연 측정을 위해 필요한 각 센서의 신호이다. 그림 22는 시간 지연 측정을 통한 방위각 측정 결과로 오차 범위가 $\pm 10.05^\circ$ 였다.

그림 23은 샘플링 주파수에 영향을 받지 않는 delay-sum 빔포밍에 의한 방위각 측정 결과이다.

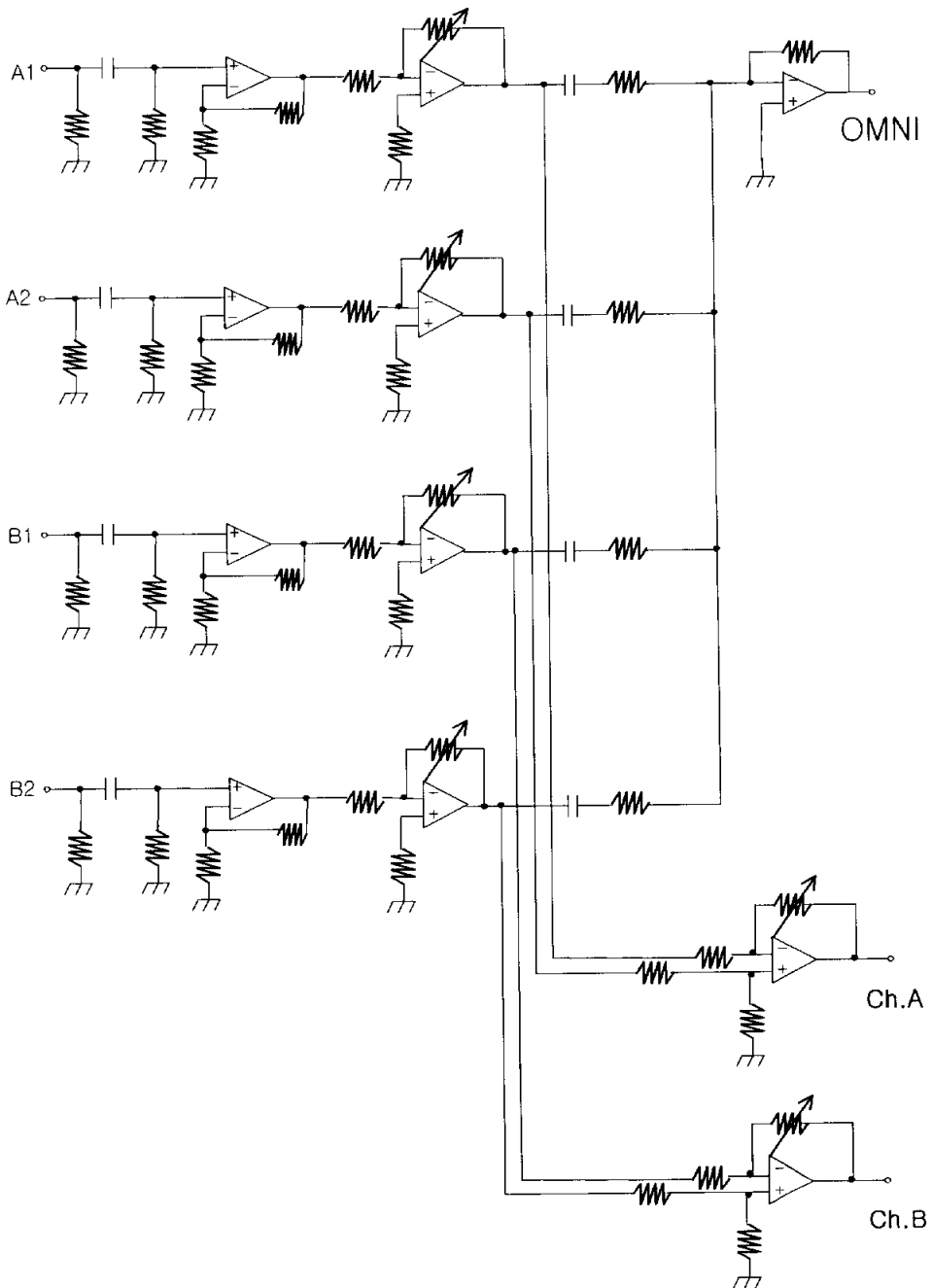
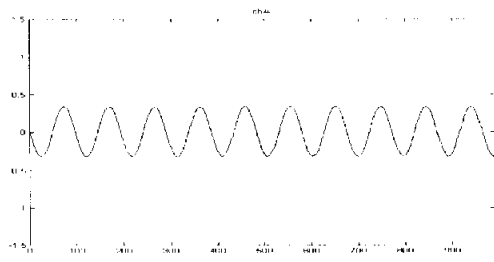
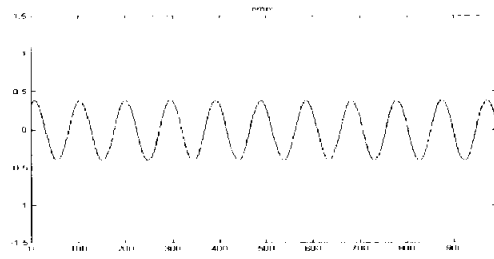


그림 20. OP앰프에 의한 증폭회로

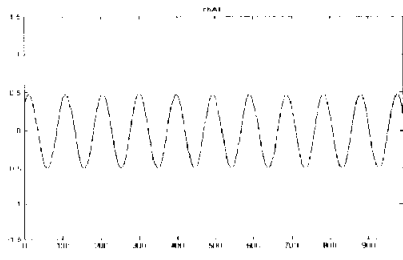
Fig. 20 A circuit of amplification by OP amp.



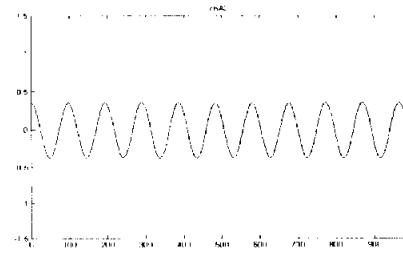
(a) Ch. A



(a) O



(a) A1



(a) A2

그림 21. 신호 분리 및 조합

Fig. 21 Signal separation & combination

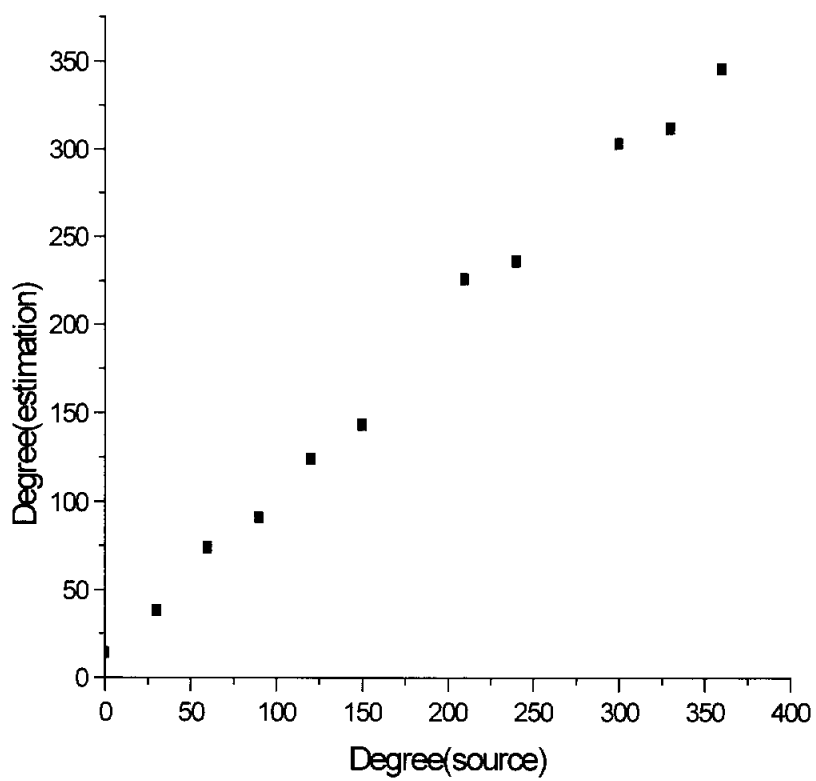
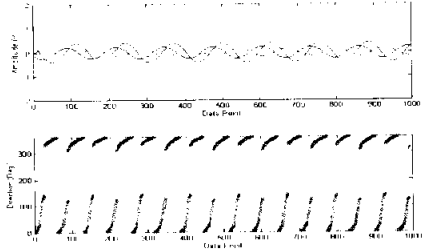
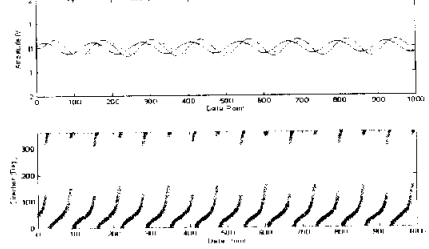


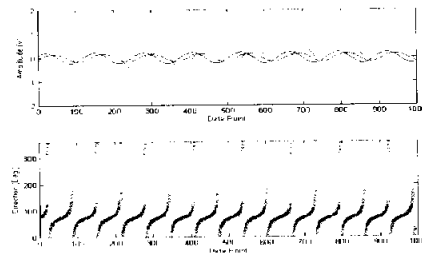
그림 22. 방위각 측정 결과
Fig. 22 DOA estimation result



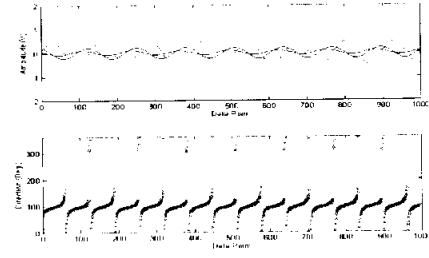
(a) 0°



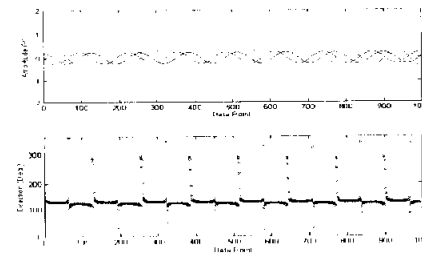
(b) 30°



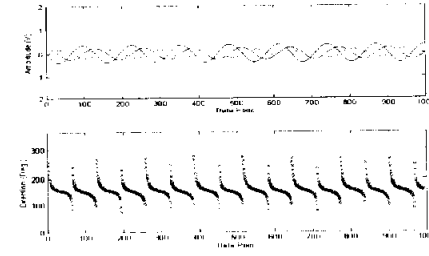
(c) 60°



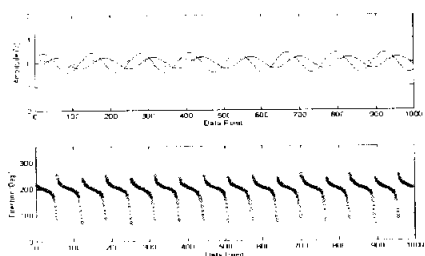
(d) 90°



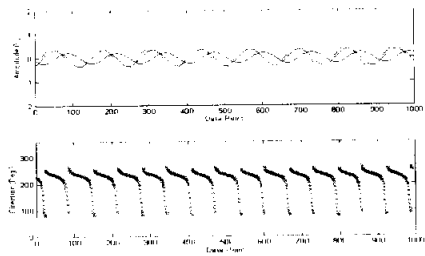
(e) 120°



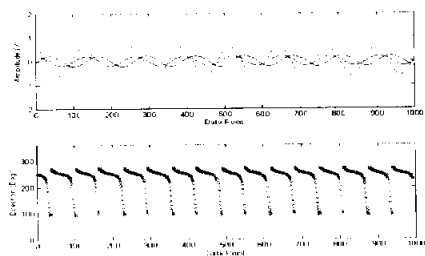
(f) 150°



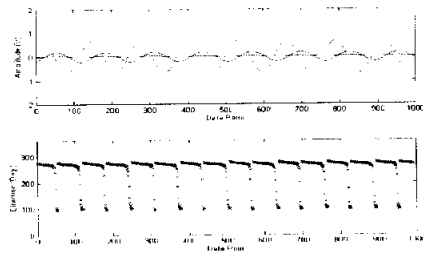
(g) 180°



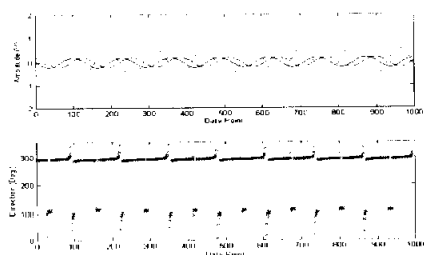
(h) 210°



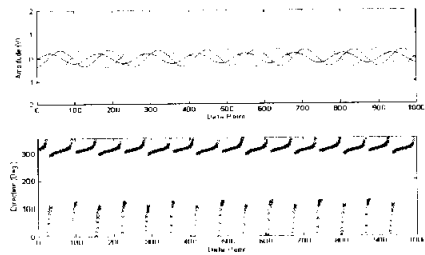
(i) 240°



(j) 270°



(k) 300°



(l) 330°

그림 23. delay-sum 빔포밍에 의한 방위각 측정

Fig. 23 DOA estimation by delay-sum beamforming

IV. 결 론

본 연구에서는 선박 음향 수신 장치에서 음원방향을 측정하기 위해서 4개의 무지향성 마이크로폰을 평면상에 직교로 배열하여 3채널의 출력신호를 가지는 시스템을 제작하였다.

본 연구에 앞서 예비적인 실험으로 5개의 음향센서를 가지고 신호가 3채널로 출력되는 소노부이를 사용하여 Ch.A와 Ch.B 신호를 각각의 센서 신호로 분리하고 방위각 측정에 대한 시뮬레이션과 실험 데이터로 확인한 결과 작성한 알고리즘에 의해 각 신호가 분리되었고 방위각 측정에 있어서도 샘플링 주파수에 따른 약간의 차이는 있으나 $\pm 2^\circ$ 정도의 오차로 측정 가능하였다. 중심에 위치하는 센서를 설치하지 않고 4개의 각 무지향성 센서로 수신되는 신호만을 조합하여 중심에 위치하는 센서의 신호를 만들어 방위각을 측정하는 4센서 배열에 의한 4채널 출력 시스템에서도 시뮬레이션과 실험 데이터로 확인한 결과 방위각 측정이 가능하였다.

이 실험 결과에서 4개의 무지향성 마이크로폰을 평면 직교 배열하고 마주하는 2개의 무지향성 마이크로폰에 수신되는 신호를 OP 앰프로 제작한 감산기를 통해 조합, 지향성인 2채널신호로 출력하고 중심의 무지향성 신호는 가산기를 통해 출력하여 4개의 무지향성 마이크로폰을 평면 직교 배열하여 신호를 3채널로 출력하는 시스템을 완성하였다. 이 시스템에서 상호상관법을 이용한 방위각 측정을 위해 3채널의 출력신호를 각 마이크로폰의 신호로 분리하여 시간지연을 측정하고 그 정보를 이용, 방위각을 측정하였다. 샘

플링 주파수의 영향으로 오차는 $\pm 10^\circ$ 정도였다. 또한 Delay-Sum Beamforming 법으로 방위각을 측정한 결과 $\pm 8^\circ$ 범위 내에서 입사되는 음파의 방향이 측정됨으로서 그 유효성이 확인되었다.

Reference

- [1] R.O.Nielsen, "*Sonar Signal Processing*", Artech House, 1991.
- [2] S.Haykin, "*Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*" Vol. 3, Prentice Hall, 1995.
- [3] 송도훈, 표적추적 시스템에서 시간지연 추정의 분해능 향상에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문, 2000.
- [4] 박진남, 실내 방사음의 음원 방향 추정법의 성능평가, 부경대학교 석사학위논문, 1996.
- [5] C.H.Knapp and G.C.Carter, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time delay", IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol 24. ASSP, Aug. 1976.
- [6] P.R.Roth, "Effective measurement using digital signal analysis", IEEE Spectrum, vol.8, Apr. 1971.
- [7] J.S.Bendat & A.G.Piersol, "Engineering application of correlation and Spectral analysis", John Wiley & Sons, 1980.
- [8] L.J.Ziomex, "Underwater Acoustics", Academic Press, 1985.

- [9] W.S.Burdic, "Underwater acoustic system analysis", Prentice-Hall, 1985.
- [10] C.W.Therrien, "Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing", Prentice-Hall, 1992.
- [11] S.Lawrence Marple Jr., "Digital Spectral Analysis with application", Prentice-Hall, 1987.

감사의 글

미흡하지만 이렇게 논문이 완성되기까지 저에게 많은 도움을 주신 여러분들께 이 자리를 빌어 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

먼저 대학원 생활 동안 여러 면에서 지도와 배려를 해주시고 부족하지만 이러한 학문적 성과를 얻게 해주신 김천덕 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 야깁없는 지도와 관심으로 학문의 길을 다져주신 윤종락 교수님, 하강열 교수님, 김무준 교수님을 비롯한 여러 음향진동공학과 교수님께 진심 어린 감사를 드립니다. 그리고 연구실 생활의 시작부터 끝까지 많은 관심과 조언으로 도움을 주셨던 김정호 선배님, 그리고 연구 과정에서 많은 지도와 가르침으로 이런 결과를 가지게 해주셨던 박순종 선배님께 감사를 드리고 싶습니다. 그리고 고등학교 은사님이시자 연구실 박사과정에 계신 배현기 선생님, 힘들때 많은 조언을 해주신 오경희 선생님, 끝까지 같이 하진 못했지만 동료로서 선배로서 많은 힘이 되어준 성호선배, 힘들 때 같이 했던 현승씨, 정화에게도 고마움을 전합니다. 그리고 많은 곳에서 지금도 열심히 자기할일을 잘하고 있는 전기공학과 94학번 동기들과 이 기쁨을 나누고 싶습니다. 10년이 넘게 술잔을 기울이며 인생을 얘기하며 고민했던 친구들 성호, 희식이, 문찬이, 학준이 그리고 후배이지만 친구처럼 힘들 때 같이 해준 창훈이, 경훈이, 경국이 에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 잘난 것 없는 형이지만 믿고 따라주고 자기가 있는 분야에서 너무나 열심히 하고 있는 우리 두 동생 수열이, 모열이 에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 이 어떤 감사함에 앞서 못난 아들을 둔 덕에 마음고생, 몸고생 너무나 많이 하신 우리 부모님께 그 어떤 말로 표현하더라도 부족하겠지만 감사함을 깊이 드리며 앞으로 더욱 더 열심히 살아서 부끄럽지 않은 아들이 되고 싶습니다.