

711
0214
2
12

공학석사 학위논문

음향부이 음향특성 성능평가
시스템 개발에 관한 연구



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2003년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전기공학과

김 정 화

김정화의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월

주 심 공학박사 노 의 철



위 원 공학박사 김 영 학



위 원 공학박사 김 천 덕



목 차

Abstract	2
I. 서 론	4
II. DIFAR Sonobuoy 의 도래각 측정 원리	6
II-1. 크로스 스펙트럼(Cross-spectrum)법	8
II-2. Delay and Sum Beamforming법	14
III. DIFAR Sonobuoy 성능 측정 시스템의 구현	17
III-1. 소노부이 센서의 음향 방위각 측정 원리	20
III-2. 모터 구동 장치	23
III-3. 음향 센서부의 작동 원리	25
IV. 성능 평가 시스템의 프로그램 구성	31
V. 성능 평가 결과	33
VI. 결 론	39

A Study on Development of Acoustical Characteristics Evaluation System of Sonobuoy

Jung-Hwa Kim

*Department of Electrical Engineering, Graduate School
Pukyong National University
Busan Korea*

Abstract

This study designed a new evaluation system for the efficiency of DOA(Direction of Arriving) estimation of passive type sonobuoy. The efficiency test for the DOA estimation can be evaluated as follows: The sound source which is to be estimated as target can be generated as sinusoidal signal with frequency of 700Hz which is from the speaker. The results of the DOA estimation of passive type sonobuoy indicate that the DOA are within the error range of $\pm 10^\circ$ and $\pm 5^\circ$ in anechoic room with noise level 24dB and in water tank respectively.

Evaluation system of DIFAR sonobuoy is used A/D board and D/A board for system control and software that is used in algorithm composition for DOA estimation is utilized LabVIEW. The average error is $\pm 6.33^\circ$ in the anechoic room, $\pm 3.65^\circ$ in the water tank.

It is suggested that the efficiency of the DOA estimation and acoustical characteristics of the passive type sonobuoy that is developed as trial products in Korea showed the similar results as those from the foreign products.

I. 서 론

최근 수중에서 목표물의 음향 정보의 탐지는 군사적 목적 뿐 아니라 지질탐사나 어업 등에서 널리 이용되고 있다.

수중에서 목표물이 발생하는 음향 신호의 도래각을 탐지할 목적으로 개발된 DIFAR 소노부이(Sonobuoy)에 의한 목표물의 방위각 측정은 항공기에 의해 소노부이를 해상에 투하시켜 음원이 발생하는 신호를 수음하여 그 신호를 무선으로 송신하여 기지국에서 음원의 위치 정보를 획득하고 있다. 소노부이는 종래부터 외국산에 의존하여 수입하여 사용하였으나 최근 우리나라에서도 소노부이 완제품을 생산할 단계에 이르렀다. 그리고 공장에서 생산된 소노부이 완제품에 대한 음향 성능 평가는 지금까지는 시험대상 소노부이들을 항공기로 직접 해상에 투하하여 탐지하려는 목표물의 음원 신호를 수음하여 항공기상에 탑재된 장비로 그 성능을 평가하고 있어 성능 평가 시험의 복잡성과 경비적 측면이 문제가 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 소노부이를 제품 생산단계에서 실험실내에서 소노부이의 외곽에 음원을 설치하여 소노부이내 장치한 음향 센서가 수음하여 소노부이에 입사하는 음향 신호의 도래각을 정확하게 측정하는지 여부를 검사할 수 있는 성능 평가 시스템을 구현하고자 한다. 이를 위한 평가 알고리즘으로는 시간영역(TDOA)에서 실시간으로 측정할 수 있는 Delay-and-Sum Beamforming 기법을 적용하고자 한다.

본 연구에서 제안하여 구현한 성능 평가 시스템은 소노부이에 장착한 자북을 지시하는 플럭스 게이트(flux gate)의 2채널의 출력 신

호와 5개의 음향 센서에 수음된 신호를 조합한 마이크로폰(무지향 마이크로폰 1개, 지향성 마이크로폰 2쌍-4개)의 3채널 출력신호를 PC에 입력시켜 먼저 플럭스 게이트(Flux Gate)로부터 진북(True North)에 대한 목표물의 방향을 측정하고, 다음 음향 센서로부터 임의의 각에서 입사한 신호를 소노부이 센서에서 측정한 도래각을 측정하여 진북에 대한 도래하는 음원의 방향 절대각을 측정한다. 그리고 실험은 소노부이 외부에 설치한 음원의 위치각은 알고 있으므로 실제 플럭스 게이트와 음향 센서로부터 구한 음원 도래각을 비교하여 제안한 측정 시스템의 유효성을 검토하였다.

임의의 각도에서 입사되어 소노부이의 음향 센서에 수음되는 음원 신호에 대해 무지향성 신호와 지향성 채널인 두 조의 어레이 채널 신호는 $\cos \theta$, $\sin \theta$ 방향으로 그 크기와 위상에 의해 측정 목표물의 음원의 위치를 동정할 수 있다.

본 시스템은 소노부이내 장착된 하이드로폰으로 실시간으로 획득한 신호를 모니터상에 나타내고, 입사한 파형의 진폭, 위상과 함께 알고리즘에 의해 측정한 입사 음원의 도래각을 구하여 그래픽으로 나타내고 그 도래각을 표시하도록 하였다. 공기 중과 수중의 두 실험 환경에서 구동 신호 주파수 700Hz 에 의해 방위각을 측정했을 때 각각 $\pm 6.33^\circ$, $\pm 3.65^\circ$ 오차범위내에서 측정되었다.

II. DIFAR Sonobuoy 의 도래각 측정 원리

그림 1은 DIFAR 소노부이(Sonobuoy) 내 장착한 하이드로폰(hydrophone)의 배치도를 도시화한 것이다. 중심점(원점)에 무지향성 하이드로폰(Omni-directional hydrophone)을 설치하고, 이를 기준으로 상하 좌우 $d/2$ 의 간격으로 배치한 하이드로폰 2개씩을 직선 배열시켜 지향성 하이드로폰이 2쌍이 직교로 배치하였다. Ch.A(cos)는 하이드로폰 A_1 과 A_2 로 수신된 신호의 조합되면 각 축 방향에서 음원에 대해 -180° 위상차를 갖으며 나타나는 신호이고, 하이드로폰 B_1 과 B_2 의 조합 신호는 Ch.B(sin)로 출력되며 각 축 방향에서 음원이 입사시 정(+)과 부(-) 음으로 -180° 위상차를 갖도록 구성되

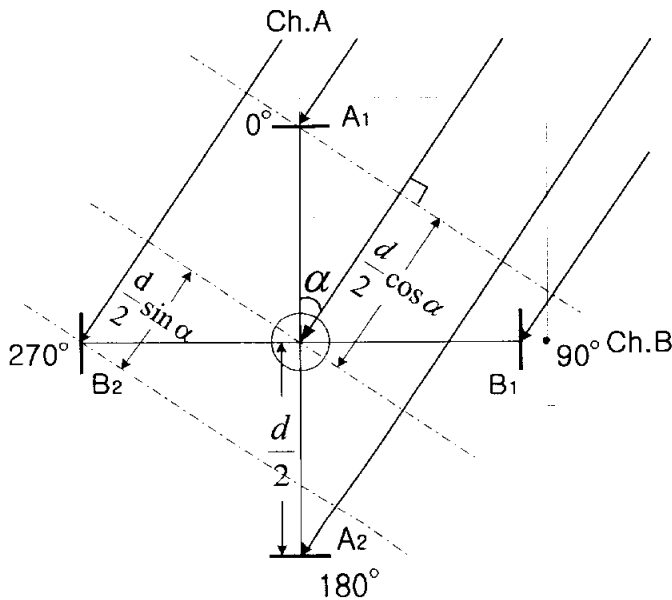


그림 1. 하이드로폰 배치도

Fig. 1. Arrangement plan of hydrophone

고 무지향 신호와 총 3채널의 신호가 출력된다. A_1 과 B_1 에 접지가 연결되어 있다.

시험 대상으로 소노부이 외곽에 설치한 음원이 임의의 도래각 α 로 소노부이에 입사할 때 음향 신호에 대한 각 하이드로폰의 출력은 다음의 식(1) 과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk r} & : Omni \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r-d/2 \cos \alpha)} & : A_1 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r+d/2 \cos \alpha)} & : A_2 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r-d/2 \sin \alpha)} & : B_1 \\ V_{\max} e^{j\omega t} e^{-jk(r+d/2 \sin \alpha)} & : B_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

여기에서 r 은 음원으로부터 무지향성 하이드로폰 까지의 거리를 나타내며, d 는 하이드로폰 사이의 간격, $k=2\pi/\lambda$ 는 파수(wavenumber)이고, 음원은 소노부이로부터 긴 거리 r 떨어져 평면파로 입사된다고 가정한다.

소노부이 중앙에 설치한 무지향성 하이드로폰 신호를 기준으로 지향성 하이드로폰 A_1 의 신호는 그림 1에서 $-d/2 \cos \alpha$ 만큼, A_2 의 신호는 $+d/2 \cos \alpha$ 의 거리 차가 생기고, B_1 과 B_2 의 신호는 $\pm d/2 \sin \alpha$ 의 거리 차가 발생하게 된다.

한편 A_1 의 하이드로폰과 A_2 의 하이드로폰 신호의 조합에 의해 출력되는 Ch.A 와 Ch.B 의 신호는 식(2) 와 같다.

Ch.A 와 Ch.B 는 식(1) 의 지향성 하이드로폰 신호 A_1 과 A_2 의 차와 B_1 과 B_2 의 차로써 구해진다.

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

II-1. 크로스 스펙트럼(Cross-Spectrum)법

시간 영역에서의 음원 방향 측정에 있어서 가장 일반화된 방법은 각 신호 상호간의 상관 관계를 이용하여 시간 지연을 구하는 상호상관함수(cross-correlation)법이다. 이를 적용하기 위해서는 총 3채널의 출력신호 중 Ch.A 를 A_1, A_2 로 Ch.B 의 신호를 B_1, B_2 로 각각 분리하여 신호를 검출하여 각 센서간의 시간 지연을 구해야 한다. 먼저, 센서의 신호를 분리하기 위해서 실제 수신되는 신호인 무지향, Ch.A, Ch.B 신호의 실수 성분만을 취하면 다음 식(3) 과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_m \cos(\omega t - kr) & : Re[O] \\ -2V_m \sin(\omega t - kr) \cdot \sin(\frac{kd}{2}\cos\alpha) & : Re[Ch.A] \\ 2V_m \sin(\omega t - kr) \cdot \sin(\frac{kd}{2}\sin\alpha) & : Re[Ch.B] \end{array} \right. \tag{3}$$

Ch.A 로부터 A_1 센서의 신호를 검출하기 위해서는 식(3) 의 $Re[Ch.A]$ 를 -2로 나누고, 90° 시프트 시킨 무지향 신호를 다시 나누

여 역사인을 취하면 Ch.A 신호의 도래각 성분만을 추출할 수 있다. 그리고 마지막으로 A_1 의 신호를 만들기 위해 추출된 각도 값과 무지향의 신호의 곱의 결과와 Ch.A 신호의 차에 의해 결정된다.

채널을 나누어 분리하여 각각의 신호를 표현하면 신호 A_1, A_2, B_1, B_2 는 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_m \{ \cos(wt - kr) \cdot \cos(kd/2 \cos \alpha) \\ \quad - \sin(wt - kr) \cdot \sin(kd/2 \cos \alpha) \} : Re[A_1] \\ V_m \{ \cos(wt - kr) \cdot \cos(kd/2 \cos \alpha) \\ \quad + \sin(wt - kr) \cdot \sin(kd/2 \cos \alpha) \} : Re[A_2] \\ V_m \{ \cos(wt - kr) \cdot \cos(kd/2 \sin \alpha) \\ \quad + \sin(wt - kr) \cdot \sin(kd/2 \sin \alpha) \} : Re[B_1] \\ V_m \{ \cos(wt - kr) \cdot \cos(kd/2 \sin \alpha) \\ \quad - \sin(wt - kr) \cdot \sin(kd/2 \sin \alpha) \} : Re[B_2] \end{array} \right. \quad (4)$$

식(4)의 분리된 신호들은 식(1)의 각 방위각 센서 출력의 실수부와 같음을 확인할 수 있다.

상호 상관 함수는 다음 식(5)와 같다.

$$\gamma_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot y_{n+\tau} \quad (5)$$

식(5)에 나타내는 바와 같이 상호 상관함수는 x_n, y_n 의 두 신호의 상관관계를 구하여 그 시간지연 τ 를 구하는 것이 가능하다. 하지만 본 시스템의 적용시 신호의 길이가 길어짐에 따라 많은 계산시

간이 요구되고, 각 채널에 입력신호와 상관이 적은 외부 잡음 신호가 혼입하였을 경우 오차에 영향을 크게 미칠 수 있다. 이런 점을 감안하여 각 신호에 대하여 주파수 성분을 구할 필요성이 있다.

각 신호의 푸리에 변환한 주파수 성분은 다음 식(6) 과 같다.

$$\begin{cases} X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j2\pi \frac{kn}{N}) \\ Y_k = \sum_{p=0}^{N-1} y_p \exp(-j2\pi \frac{kp}{N}) \end{cases} \quad (6)$$

먼저, 중앙의 무지향 신호와 각 센서 신호들의 각각의 크로스 스펙트럼(Cross-spectrum) 을 구하고 이를 역 푸리에 변환하여 상호상관 함수를 구한다.

다음 식(7) 은 크로스 스펙트럼과 상호상관 함수의 관계를 나타낸 것이다.

$$\gamma_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} IDFT[X_k^* \cdot Y_k] \quad (7)$$

식(5) 와 식(7) 에 나타낸 상호 상관함수로부터 시간지연을 구하여 음원의 도래 방향을 측정하는 과정은 그림 1에서 나타낸 바와 같이 센서 A₁ 출력과 무지향 센서 출력과 지연 시간은 $\frac{d}{2} \cos \alpha / c$ 이며, 여기에 식(7) 의 상호상관으로부터 구해진 시간지연을 적용하면 음원의 도래 방위각은 최종적으로 식(8) 과 같이 구해지게 된다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ (c \cdot \tau) / \frac{d}{2} \right\} \quad (8)$$

여기서 τ 는 시간 지연(sec), c 는 매질 음속을 나타내며 공기중에서의 음속은 340m/s 이다. 이와 같은 방법으로 A_2 및 B_1 , B_2 와의 관계를 구할 수 있다.

그림 2는 공기중에서 주파수 700Hz의 정현파를 입력으로 하여 도래각 30° 일 때의 소노부이 Ch.A 신호와 식(4)에 의해서 각각 분리된 A_1 , A_2 의 신호를 나타낸 것이다. 그리고 각각의 A_1 , A_2 와 무지향 신호와의 상호상관함수를 취했을 때의 결과는 그림 3과 같고 두 신호간의 시간 지연이 나타남을 확인할 수 있다. 0° 에서 360° 까지 30° 의 간격으로 신호를 입력받아 그 도래각을 측정하였을 때의 결과는 그림 4와 같다. 그 결과 크로스 스펙트럼 법에 의한 도래각 측정은 동일한 데이터에서 입력 주파수에 대해 샘플링 주파수를 변화시켰을 때 도래각 측정 오차 정도는 그 샘플링 주파수에 따라 달라짐을 확인하였다. 입력 주파수 700Hz의 신호에서 샘플링 주파수를 각각 360배(252kHz-*) , 180배(126kHz-★) 로 하였을 경우 도래각 측정 오차는 평균 $\pm 4^\circ$ 를 보였으나 샘플링 주파수를 90배(63kHz-○) 로 하였을 때의 측정 오차는 평균 10° 이상을 나타냈다. 따라서 크로스 스펙트럼에 의한 도래각 측정 방법은 잡음 환경에 강한 장점을 가지고 있지만 샘플링 주파수를 따라 오차의 정도의 변화가 크게 나타나며 오차를 줄이고자 샘플링 주파수의 값을 크게 하였을 경우 많은 데이터를 획득하여야 하므로 그에 따라 시간도 길어지게 된다. 그리고 크로스 스펙트럼법은 실제 소노부이가 출력하는 3채널의 신호에서 각각의 센서의 신호로 분리해야하는 번거로운 과

정을 거쳐야하는 단점을 가지고 있다.

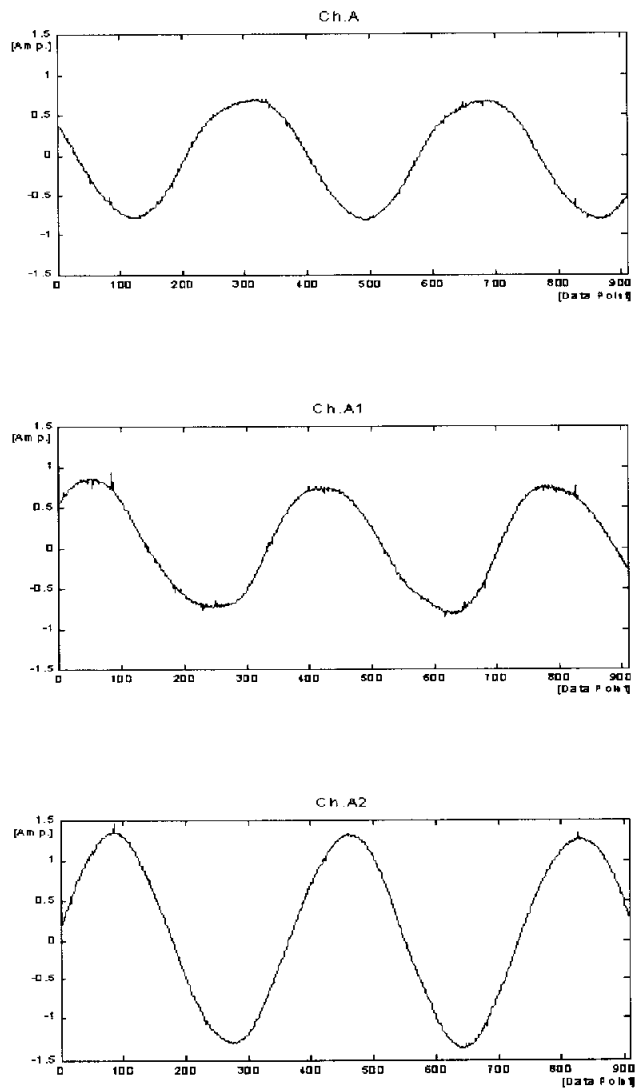


그림 2. Ch.A 신호와 분리된 각 하이드로폰의 A_1 , A_2 신호

Fig. 2. Ch.A signal and separated A_1 , A_2 signal of hydrophone

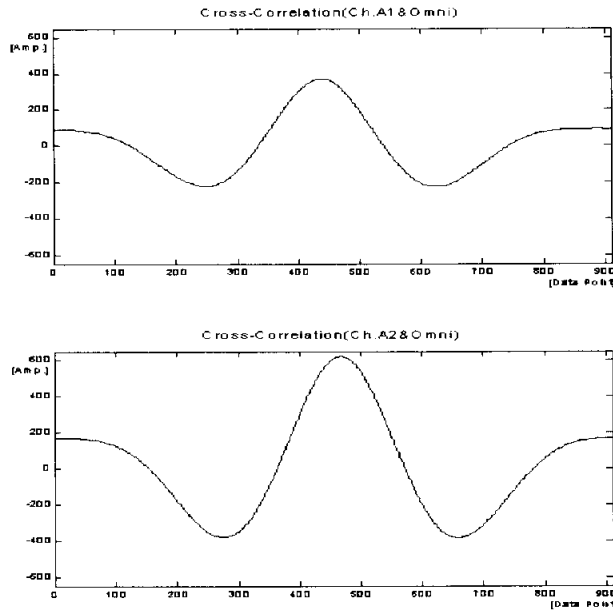


그림 3. 무지향 신호와 A_1 , A_2 신호와의 상호상관 결과

Fig. 3. The result of omni and A_1 A_2 signal cross-correlation

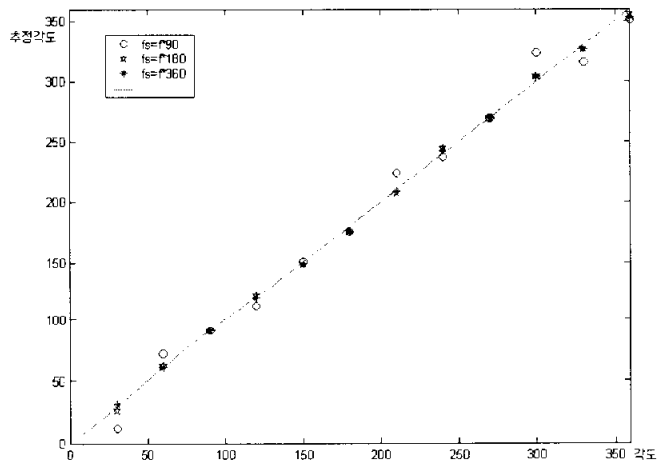


그림 4. 샘플링에 따른 도래각 측정

Fig. 4. The DOA estimation with sampling

II-2. Delay and Sum Beamforming법

소노부이의 도래각 측정의 한 방법으로 지향 센서의 방위각도에 따른 출력의 크기와 무지향 센서 신호와 지향 센서 신호간의 위상을 이용한 Delay and Sum Beamforming 방법이 있다.

지향성 하이드로폰 두 채널의 출력 신호인 식(2) 에서 도래각 α 를 포함하는 식을 구하기 위하여 각 Ch.A, Ch.B 의 신호를 무지향성 하이드로폰 의 출력으로 각 각 나누고, Ch.A 의 $k\frac{d}{2}\cos\alpha$ 와 Ch.B 의 $k\frac{d}{2}\sin\alpha$ 의 성분만을 추출하면, 다음의 식(9) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} k\frac{d}{2}\cos\alpha = \sin^{-1}\left\{\sin(k\frac{d}{2}\cos\alpha)\right\} \\ k\frac{d}{2}\sin\alpha = \sin^{-1}\left\{\sin(k\frac{d}{2}\sin\alpha)\right\} \end{cases} \quad (9)$$

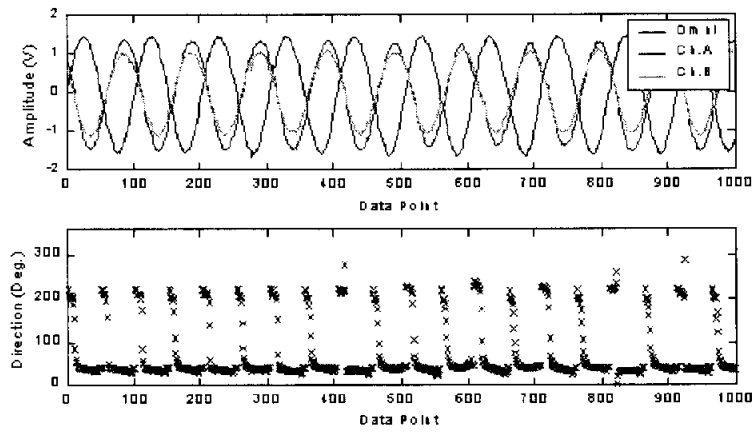
식(9) 로부터 소노부이에 입사한 음원의 도래각 α 는 다음 식(10) 와 같이 구할 수 있다.

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

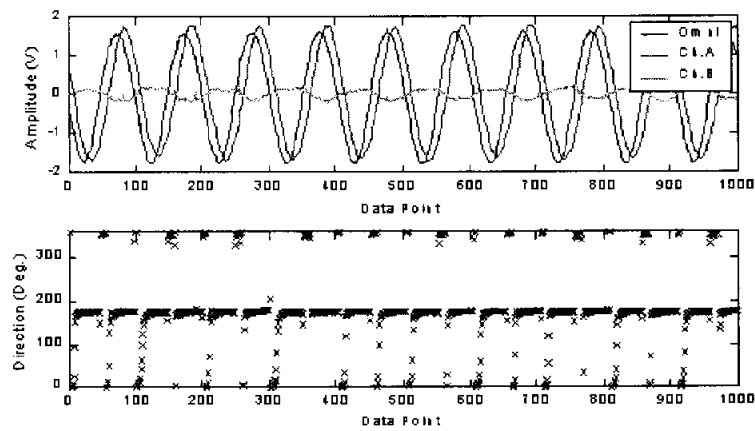
따라서 소노부이에 입사하는 대상 목표물인 음원의 각도 측정은 소

노부이 중앙에 장치한 무지향 하이드로폰 신호와 두 조로 구성된 지향성 하이드로폰 신호 2채널에 의해 간단하게 소노부이에 입사한 음향 신호의 도래각을 구할 수가 있다.

그림 5는 Delay and Sum법에 의한 도래각 측정 결과로써 입력 주파수 700Hz로 하였을 때 소노부이 3채널의 출력 그래프와 함께 나타내었다. 도래각을 각 각 45° , 180° 로 하였을 때 측정 결과는 데이터의 80%이상이 실제 각도를 나타냈음을 확인할 수 있다. 도래각의 측정 오차는 세 출력 신호의 위상 편이에 의한 것으로 이는 공기중에서의 실험환경에서 임피던스 매칭에 따른 결과이다. 따라서 위상 편이에 의한 실험환경적인 오차를 제외하고 도래각을 측정할 필요성이 있다.



(a) 45°



(b) 180°

그림 5. 도래각 측정 결과

Fig. 5. The result of DOA estimation

Ⅲ. DIFAR Sonobuoy 성능 측정 시스템의 구현

그림 6은 소노부이 외곽에 설치한 음원으로부터 입사한 음향 신호의 도래각 측정하기 위하여 플렉스 게이트와 음향 센서로써 음원 방위각을 측정할 수 있는 실험 장치도이다.

이 장치는 검사하려는 소노부이를 무향실이나 수조내 중앙에 설치하여 음향 신호를 발생시키는 음원을 소노부이 외곽의 임의각 만큼 음원을 변화시켜 시험하여야 하지만 편의상 음원을 소노부이 외곽의 일정 위치에 설치하고 소노부이 자체를 시험하고자 하는 각도별로 회전시켜 입사 음원의 방위를 측정한다. 먼저 음원에 발생하는 음향 신호의 도래각을 일정하게 변화시키기 위해 DC 스텝핑 모터를 사용하였고, 이를 제어하기 위해 D/A 보드의 디지털 출력포트(DO)에 의해 시험하고자 하는 각도만큼 스텝핑 모터를 회전시킨다. 다음으로 음원에서 방사되는 시험 대상의 주파수를 갖는 정현파 신호를 외곽에 설치한 음원 스피커를 구동시켜 발생시킨다.

음향 부이 성능 평가 시스템 실험 순서는 다음과 같다.

1. 모터 제어 : 일정 각도로 신호를 받을 센서를 위치시킨다.
2. 스피커 음원 방사 : 일정 주파수의 정현파 신호 발생시킨다.
3. 하이드로폰 신호 수음하여 PC 에 신호 입력 : 플렉스 게이트 방위각 1 채널, 무지향 신호 1 채널, 지향 신호 3 채널, 총 4채널의 신호를 A/D 변환한 후 PC 모니터상에 실시간으로 출력한다.
4. 입사 음원의 도래각 측정 : 소노부이에 도래하는 음향 신호의

음원 위치를 측정하기 하여 제어용 컴퓨터상에서 도래각 측정 알고리즘을 사용하고, 실제 설치한 위치 각도와 비교하여 그 오차를 구한다.

5. 플렉스 게이트 방위각 측정 : 자북의 위치 정보를 입력시켜 진북과 비교한다.
6. 1항으로 돌아가 일정 각도로 센서의 위치를 변화시킨 후 5항까지 다시 반복 실험한다.

위와 같은 음향 특성 성능 평가 시스템의 작동과 도래각 측정 알고리즘을 실행하는 원도상의 소프트웨어는 LabVIEW 5.1 를 사용하여 시스템의 총괄적인 제어 및 모니터상에 디스플레이가 가능하도록 구성하였다.

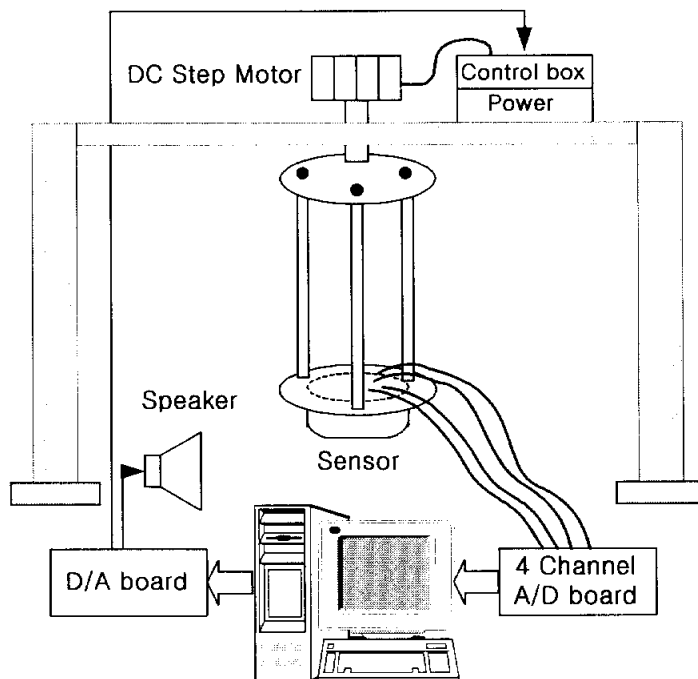


그림 6. 전체 시스템의 블록도

Fig. 6. Block diagram of entitle system

Ⅲ-1. 소노부이 센서의 음향 방위각 측정원리

소노부이내에 설치한 센서는 음향 센서 5개와 플럭스 게이트가 설치되어 있다.

플럭스 게이트(Flux Gate)는 소노부이의 자북(Magnetic North)의 방위를 측정한다. 플럭스 게이트에서 측정된 자북의 방향에 음향센서로부터 구한 목표물로부터 입사한 방위각을 구하여 가감한다.

그림 7은 지향성 하이드로폰의 빔 패턴과 자북과의 관계를 나타낸 것이다. ϕ 는 센서의 y 축과 자북 사이의 각도이고, θ 는 센서의 y 축과 임의의 음원 신호와의 각도이다. 플럭스 게이트에서 검출된 정보는 바로 ϕ 값이다. 따라서 실제 음원의 위치는 자침의 방향과 음원 신호의 방향을 합한 $\phi + \theta$ 이 된다.

플럭스 게이트의 각도 측정 방법은 그림 8에 나타내었다. 플럭스 게이트 신호는 자기회로를 구동시키는 주파수 7.5kHz 의 기준 신호(Reference) 와 링형을 90° 간격으로 감은 코일에 의해 생성된 위상차 신호(Signal) 로 구성되어 있다.

기준 신호와 위상차 신호는 모두 7.5kHz 주파수의 펄스 신호로써 일정 각도에 따라 위상차 신호가 일정 변화한다. 따라서 기준 신호에 비해 일정 각도만큼 변화하였을 경우 그 위상차 신호의 움직임에 따라 변화된 각도를 측정하게 된다.

그림 8에 나타난 바와 같이 0° 의 경우 기준 신호와 위상차 신호가 일치하여 나타나지만 각도의 변화에 따라 90° 일 때는 위상차 신호가 반주기(15kHz)의 1/4만큼 이동하여 나타난다. 마찬가지로 180° 일 때는 1/2만큼, 360° 가 되면 완전히 반주기를 이동하게 된다.

이와 같은 원리로 두 신호를 AND 하여 나타난 펄스(빛금 부분의 크기)를 이용하여 소노부이의 방위 각도를 측정하게 된다.

반주기 15kHz 에서 360° 의 분해능을 가지기 위해서 샘플링 주파수는 최소 5MHz 이상이 요구된다.

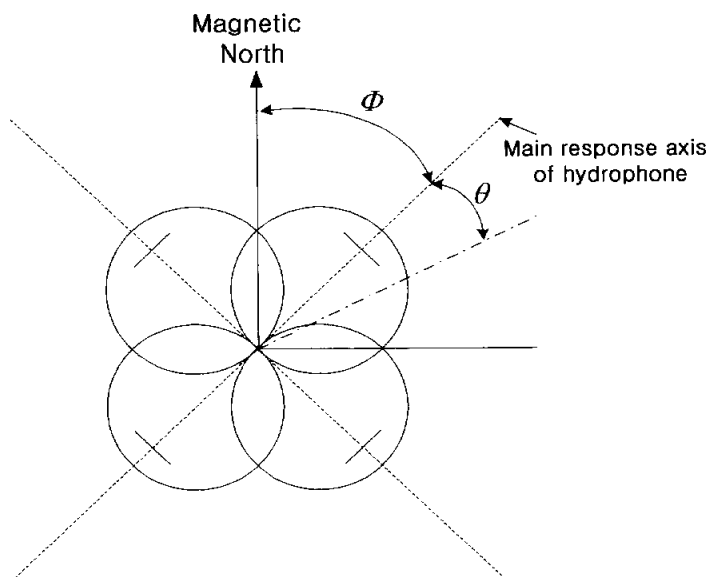


그림 7. 하이드로폰의 빔 패턴과 자북과의 관계

Fig. 7. Hydrophone beam patterns and their relationship to buoy orientation relative to magnetic north

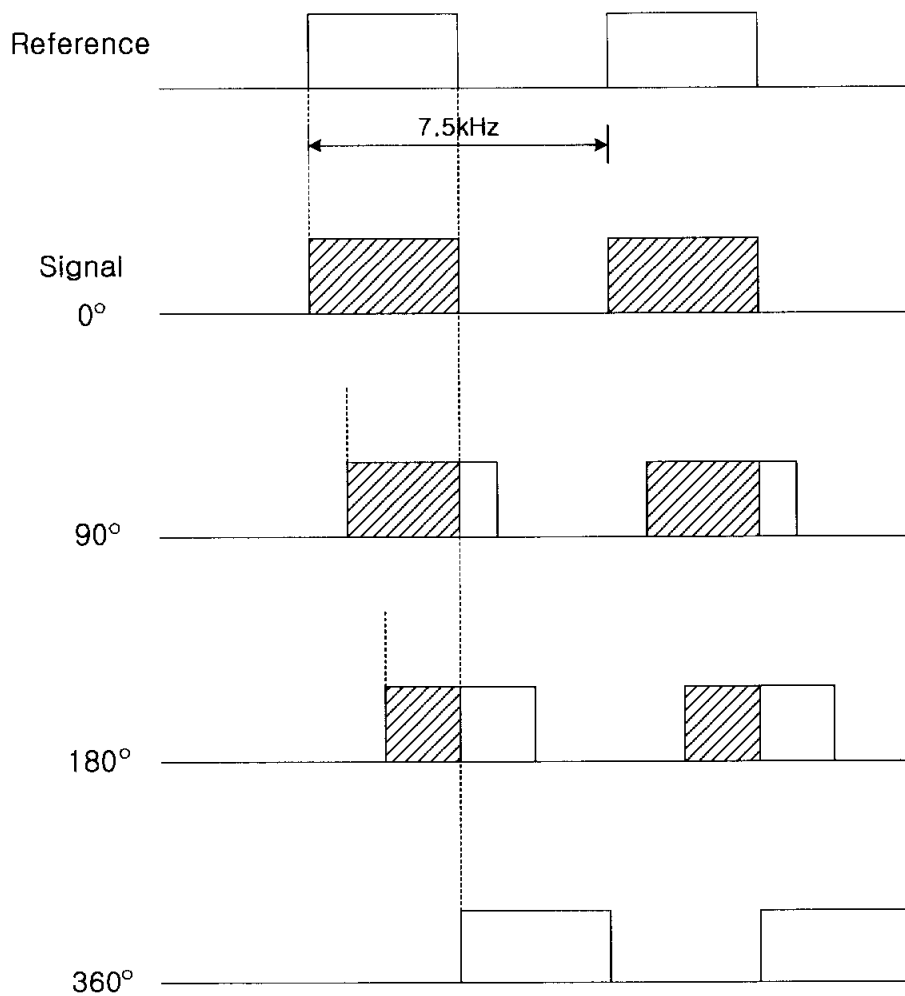


그림 8. 플럭스 게이트 각도 측정
Fig. 8. Degree estimation of flux gate

III-2. 모터 구동 장치

모터 드라이버((주)삼정 6410)는 모터 구동 전원 연결부 -파워 접속 컨넥터, 모터의 상(A , $\overline{A}$, B , $\overline{B}$) 연결부 -모터 접속 컨넥터, 모터의 펄스를 제어하는 부분 -신호 접속 컨넥터 총 3개의 입력/출력 컨넥터로 나눌 수 있다.

모터 구동 전원의 경우 DC 24[V] ~ 75[V], 5[A] 가 필요하며 시스템의 경우 50[V], 5[A] 의 스위칭 모드 파워를 사용하였다.

모터 컨넥터부는 모터와 직접 연결되는데 모터에서는 총 8개의 선이 출력되어 이 8개의 권선 연결 방법에 따라 직/병렬 운전으로 나눌 수 있다. 도래각 측정 시스템의 경우 파워를 크게 하기 위해 직렬 권선 방법을 사용하여 구성하였고, 모터의 접지는 케이스에 연결시켜준다.

펄스 제어를 위한 신호 컨넥트부는 그림 9에 자세히 나타내었다. 총 9핀으로 5[V] 크기의 펄스로써 구동된다. 핀 1번(STEP) 은 펄스 입력 단자로써 실제 모터의 속도나 위치를 제어한다. 핀 2번(DIR) 은 모터의 회전 방향을 결정하는 것으로써 (-)일 경우 모터와 연결된 센서는 시계 반대 방향으로 회전하게 된다. 사용자는 STEP 과 DIR을 제어함으로써 원하는 속도로 일정 각도만큼 센서를 배치시키게 된다.

모터는 1 STEP 의 입력에 1.8° 의 크기를 가지지만 도래각 측정 시스템의 경우 속도 제어가 아닌 위치 제어를 목적으로 하기 때문에 1/10의 감속기어를 달아 정밀한 위치 제어를 할 수 있게 하였다. Step Size 는 사용자의 프로그램상에서 펄스 폭과 간격으로 제어하

는 방법과 모터 구동 드라이버의 펄스 스위치를 변화시킴으로써 제어하는 방법이 있다.

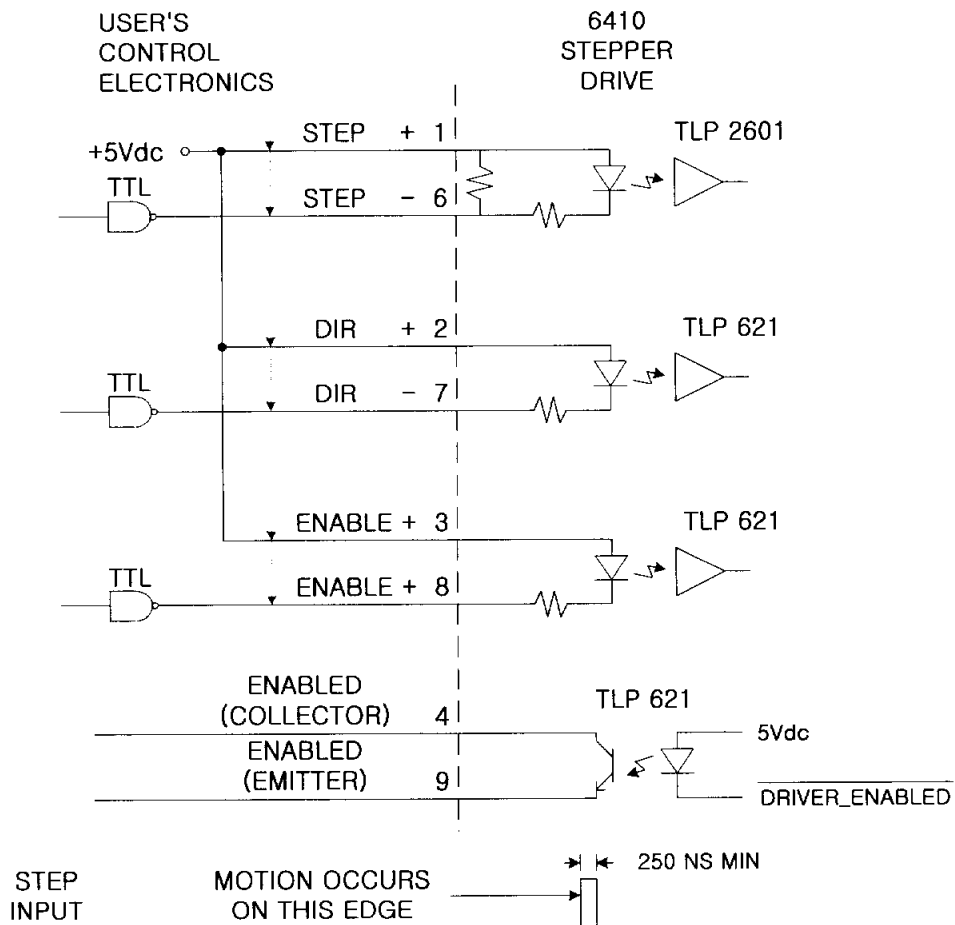


그림 9. 펄스 제어를 위한 신호 컨넥트

Fig. 9. Signal connector about pulse control

Ⅲ-3. 음향 센서부의 작동 원리

그림 10은 소노부이 외부로부터 입사한 신호를 소노부이에 장착한 각 음향 센서가 수음하여 도래각을 측정하는 블록도이다. 그림 (a)는 소노부이의 방위각을 변화시키기 위한 모터 제어와 정현파 신호의 음원 방사를 위한 스피커 제어의 처리 블록선도이고, 그림 (b)는 플럭스 게이트와 음향 신호의 입력 도래각 측정을 위한 블록선도이다.

먼저, 소노부이 센서를 임의각 만큼 변화시키기 위해 컴퓨터상에서 임의 각도만큼 입력시킨다. 이는 D/A 보드의 DO 신호로써 펄스 신호가 출력되고, 모터의 드라이버로 스텝핑 모터에 입력시켜 모터의 위치를 제어한다. 그리고 임의의 음향 신호를 스피커를 통해 방사시킨다. 음향 신호를 입력받은 센서의 출력은 고역통과 필터와 저역통과 필터를 거쳐 A/D 보드로 입력되어 도래각 측정 알고리즘을 통해 그 도래각을 측정하게 된다.

그림 11은 전체 시스템의 신호 흐름도를 블록도로 나타낸 것이다. 성능 평가 장치대의 전원 공급 장치(Power Supply Box)에는 스텝핑 모터 구동을 위한 DC 50[V] 전원과 모터 드라이버 신호 제어를 위한 DC 5[V] 전원, 그리고 소노부이의 DC 15[V] 전원이 내장되어 있다.

소노부이내에 장착된 각 센서에서 출력되는 신호는 총 7개로 플럭스 게이트 신호선 2 (Reference, signal), 하이드로폰 신호선 4 (Omni signal, direction signal 2, GND) 이다. 이들 출력 신호는 컴퓨터 전단의 Signal Box 에서 플럭스 게이트는 신호검출 보드를 거치고, 하이드로폰 출력 신호는 직류 신호 제거를 위한 고역통과 필터

터(High pass Filter)와 잡음과 모터의 소음을 제거하기 위한 저역통과 필터(Low pass Filter)를 거치게 된다. 그리고 컴퓨터에 내장되어 있는 4채널 A/D 보드를 통과하여 플럭스 게이트 채널1, Omni 신호 채널2, cos 신호 채널3, sin 신호 채널4 로 실시간으로 데이터를 획득하여 모니터 상에 출력하고, 도레각 측정 알고리즘을 통해 측정 각도를 나타내게 된다.

컴퓨터에서 출력되는 제어신호는 D/A 보드를 통해서 스피커 단으로 가는 정현파 신호와 스텝핑 모터 드라이버로 가는 펄스 신호 2가지로 나뉜다.

스피커 단의 정현파 신호의 경우 프로그램상에서 일정 크기의 일정 주파수 정현파 신호를 발생시켜 D/A 의 아날로그 한 채널을 통해서 출력되어 2kHz 저역통과 필터와 앰프를 통과하여 스피커를 구동시켜 음을 방사되게 된다.

스텝핑 모터 드라이버의 제어 신호는 D/A 의 I/O 신호인 디지털 출력 한 채널을 할당하여 시험하고자하는 각도만큼 출력되도록 프로그램상에서 제어된다.

그림 12는 시스템에서 사용한 2차 버터워스 고역통과 필터(Butterworth Highpass Filter)와 2차 버터워스 저역통과 필터(Butterworth Lowpass Filter)회로도를 나타낸 것이다.

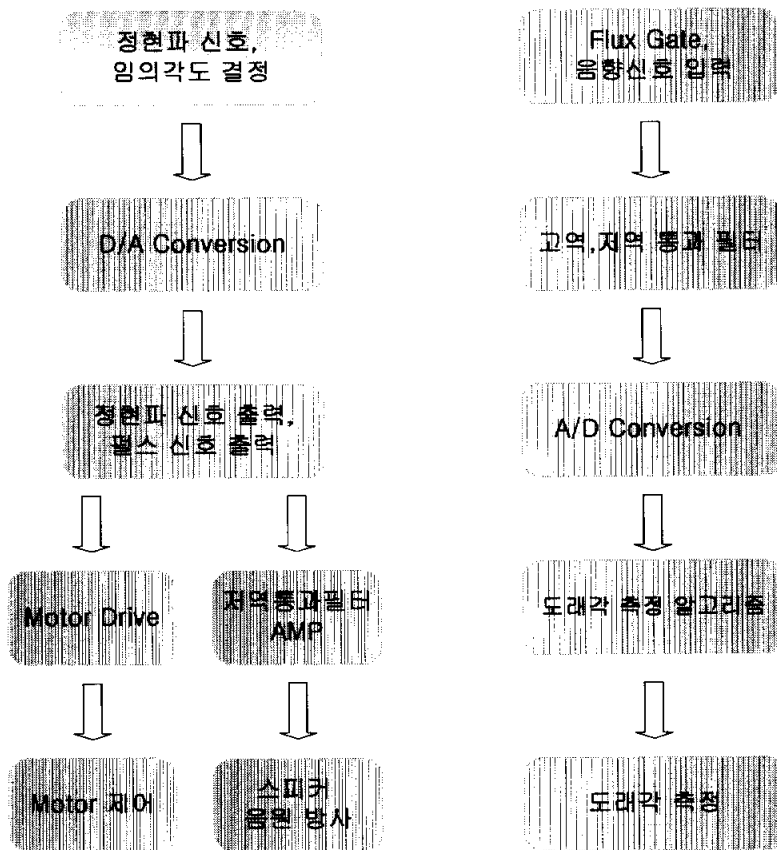
고역통과 필터의 경우 소노부이의 5[V] 직류 신호와 그 고조파 성분을 제거하기 위한 목적으로 Cut off 주파수는 180Hz 이며 가변 저항의 사용으로 차단 주파수를 가변하도록 하였다.

2차 저역통과 필터는 주변의 잡음과 모터의 소음을 제거하기 위한 목적으로 Cut off 주파수는 3kHz 이며 역시 가변 저항과 OP-Amp

LF 356 을 사용하였다.

그림 13은 플럭스 게이트 신호 검출을 위한 회로도이다.

소노부이의 플럭스 게이트 기준 신호와 위상차 신호를 추출하여 LF 356 Op-Amp 와 버퍼 74LS14 를 거친 후 74LS08 를 통해 AND 된다. AND Gate 를 통과한 펄스 신호의 주기를 A/D 하여 각도를 측정하게 된다.



(a) 모터, 스피커 신호 발생부의 제어 블록도

(b) 음원 신호의 도래각 측정 블록도

그림 10. 데이터 처리 블록도

Fig. 10. Block diagram of data processing

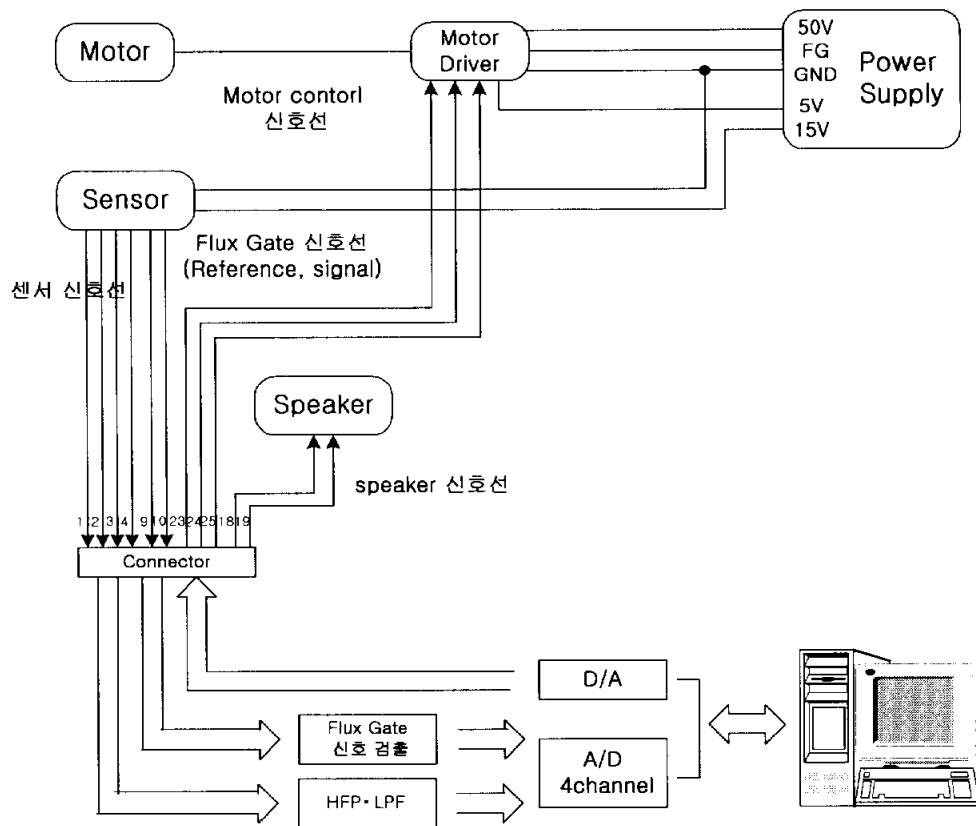


그림 11. 시스템 신호 흐름도

Fig. 11. Block diagram of system signal

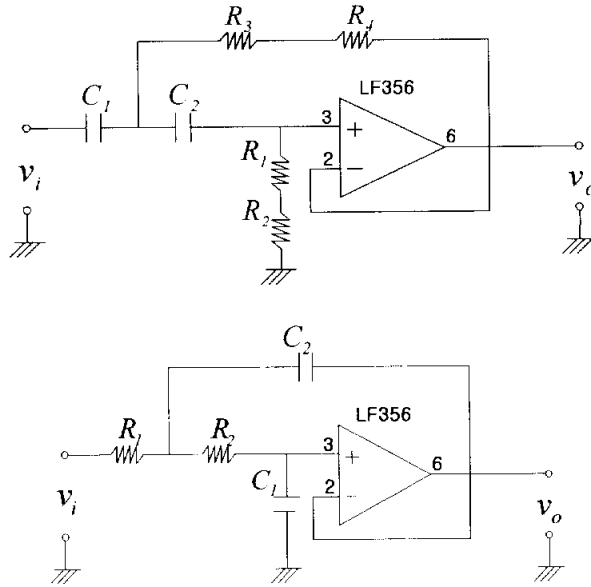


그림 12. 고역통과 필터와 저역통과 필터 회로도

Fig. 12. High pass filter and low pass filter schematic

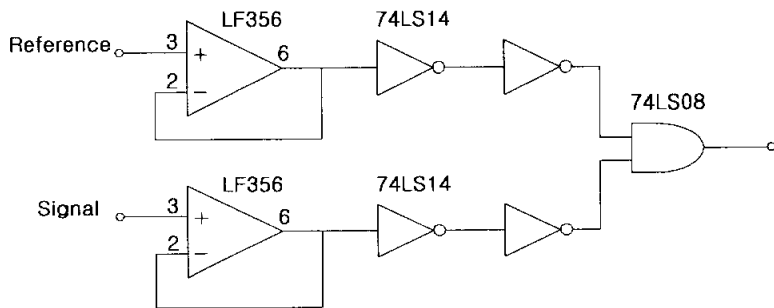


그림 13. 플럭스 게이트 신호 검출 회로도

Fig. 13. Flux gate signal detection schematic

IV. 성능 평가 시스템의 프로그램 구성

소노부이의 성능 평가 시스템 작동은 A/D, D/A 보드의 실시간 제어와 그래픽적인 화면처리를 위해 LabVIEW 5.1 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 을 사용하였다. 소프트웨어는 크게 나누면 스텝핑 모터 제어를 위한 프로그램과 플렉스 게이트와 음향 신호의 각도 측정의 메인 프로그램 두 가지로 나눌 수 있다.

스텝핑 모터의 각도 제어에서의 정밀도는 최소 1° 에서 제어 가능하다.

그림 14는 전체 시스템의 메인 화면을 나타낸 것이다.

메인 프로그램은 샘플링 주파수를 결정하는 “Scan fred.” 부분과 A/D 보드의 버퍼의 용량으로 실제 받고자하는 데이터의 수를 결정하는 “Num Data to View” 의 파라메타 입력 부분과 4채널 입력 신호를 실시간으로 그래프로 보여주는 부분, 도레각 측정 알고리즘에 따른 측정 각도를 보여주는 그래프와 결과 값을 나타내 주는 부분이 있다. 그리고 각 신호의 평균 피크 값과 각 채널간(omni-cos, omni-sin, cos-sin)의 피크 값의 차이를 dB 값으로 나타내어 각 센서간의 감도를 비교할 수 있도록 하였으며 각 채널간의 위상 차이도 나타내었다.

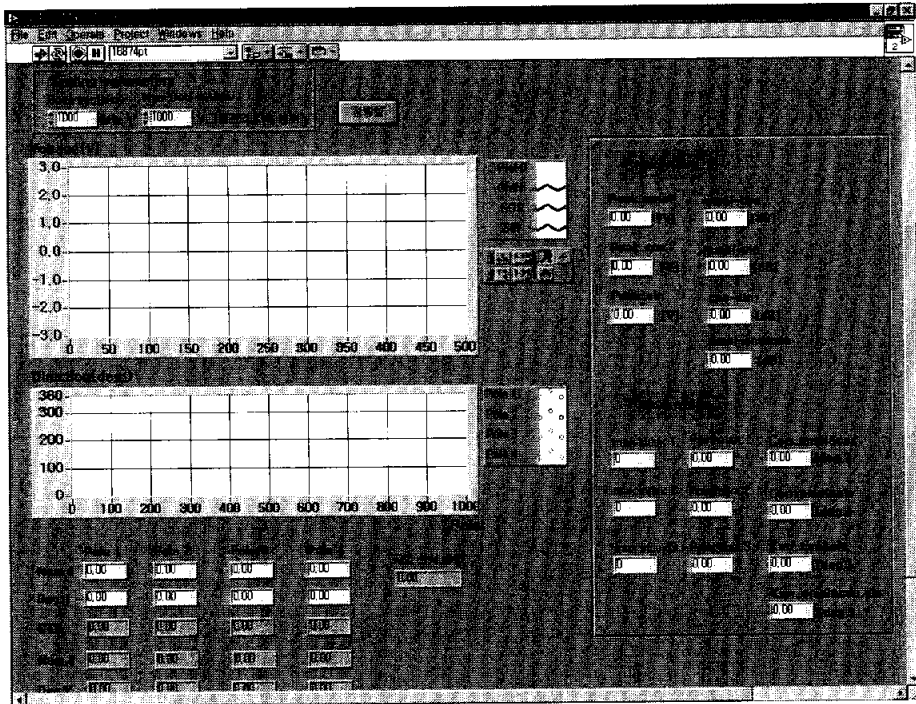


그림 14. 시스템의 메인 화면

Fig. 14. Main screen of system

V. 성능 평가 결과

그림 15는 앞 절에서 설명한 도래각 측정 평가 시스템을 이용하여 일반 실내에서 음향 신호 3채널에 대한 입력 신호와 음원 도래각을 측정한 결과 값 중에서 몇 개의 데이터를 나타낸 것이다. x축은 입력 신호의 데이터수(point)이고, y축은 신호의 크기(voltage)를 나타낸다.

도래각 측정은 음원의 방향에 따라 지향 2채널의 입력 신호의 크기가 각각 변화되므로 이를 이용하여 입사해 들어오는 음원의 위치를 측정한다.

그림 15와 그림 16은 무향실과 수조에서 각각 음원 도래각을 측정한 결과로써 대표적인 각도에 대해 나타내었다. 음향 신호는 동일한 조건의 주파수 700Hz 에서 실시하였다.

수조와 무향실에 대해 각각 실험 결과를 볼 때 소노부이의 지향 채널의 빔 패턴은 같은 모양을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 15-(a)는 공기중에서 도래각이 0° 인 경우를 나타낸 것이다. 음원 방향이 Ch.A 에 정방향으로 입사되기 때문에 Ch.A 의 센서는 가장 크게 신호를 입력받게 되고, 반면 Ch.B 에서는 거의 신호를 받을 수 없어 0에 가깝게 나타난다. 또한 무지향 신호와는 180° 의 위상차를 보이고 있다. 그 결과 측정된 각도는 0° 와 360° 부근에서 나타나고 있다.

그림 15-(b)에 나타낸 도래각 120° 일 때는 제 4사분면의 하이드로폰 B₁과 A₂ 사이에서 입사해 들어오는 신호로써 정확한 대각선 135° 의 신호보다 Ch.B 에 치우쳐 있어 Ch.A 에 비해 큰 값을 가진

다.

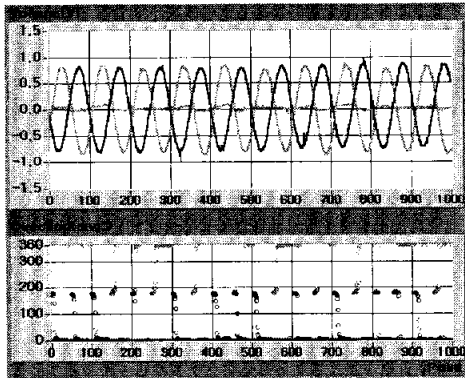
그림 15-(c)의 결과는 음원이 180° 에서 입사해 들어올 경우이다. 지향 2채널은 0° 와 같은 모양으로 Ch.A 의 신호가 크게 나타나고, Ch.B 의 신호는 거의 0의 값을 보이고 있다. 그러나 무지향 신호와는 반대로 동위상을 나타내게 되어 180° 를 찾게 된다.

그림 15-(d) 300° 의 경우는 그림 15-(b)의 조건과는 반대방향의 제 2사분면에서 입사해 들어오는 신호이기 때문에 무지향의 신호의 위상차만 다르게 나타나게 된다.

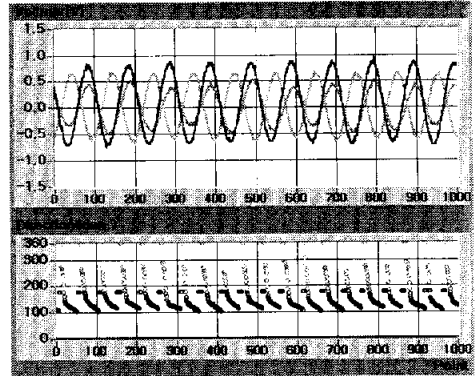
그림 16은 수중에서 음향 신호 주파수를 700Hz 로 했을 때의 결과이다. 수중에서의 실험은 수조에서 하이드로폰이 물에 잠길 수 있게 설치하고 음원을 방사하기 위한 스피커는 수중 스피커를 사용하여 수조에 완전히 잠기도록 하였다. 공기중에서의 음속(340m/s)에 비해 약 5배(1500m/s) 크기 때문에 스피커와의 간격은 공기중에서의 700Hz 의 실험과 비교해 5배 정도의 5m 거리를 유지하였다. 그 결과 무지향 신호와 지향 신호의 패턴은 공기중에서의 실험과 같음을 알 수 있다. 수조에서의 실험의 경우 센서를 둘러싸고 있는 폴리우레탄과의 임피던스 매칭 때문에 세 출력 신호의 위상 편이가 거의 없어 각도 측정 오차를 줄이고 있다. 뿐만 아니라 주위의 소음이나 진동에 대해 공기중에 비해 더 안정된 신호를 나타내었다. 단지 신호의 크기 차이는 수중과 공기 중의 파장의 차이에 따른 스피커와의 거리차이로 입사된 음향 신호의 크기 값이 다르기 때문이다.

표 1은 두 실험 환경에서 음원 도래각 측정시 입사해 들어오는 각도를 30° 간격으로 했을 때 그 측정각도와 오차를 나타낸 것으로 전체의 데이터 중에서 실제 각도에 영향을 미치는 값들만을 평균하여

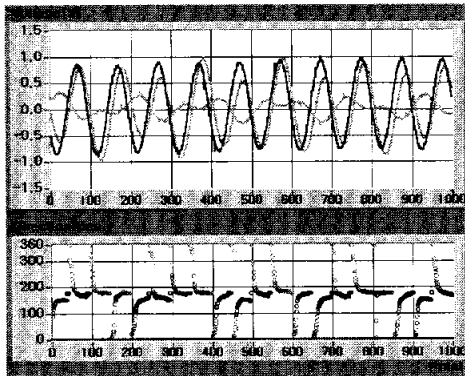
나타내었다. 수조에서의 도래각 측정 결과 값은 최대 $+8.52(180^\circ)$ 에서 $-0.47(240^\circ)$ 로 평균 $\pm 3.65^\circ$ 의 오차를 보이고 있으며, 실내의 경우는 최대 $+14.81(90^\circ)$ 에서 $+2.90(30^\circ)$ 로 평균 $\pm 6.33^\circ$ 의 오차를 보였다.



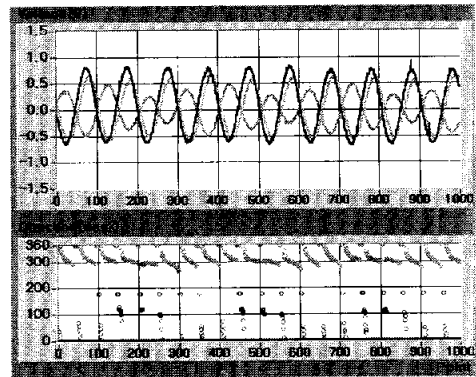
(a) 0°



(b) 120°



(c) 180°

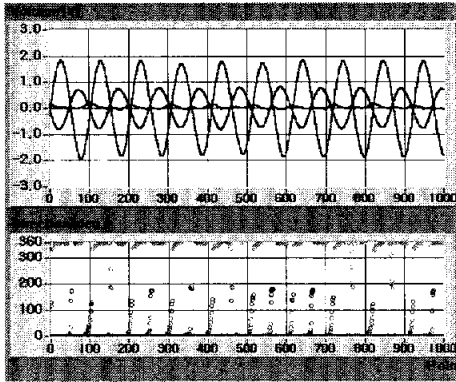


(d) 300°

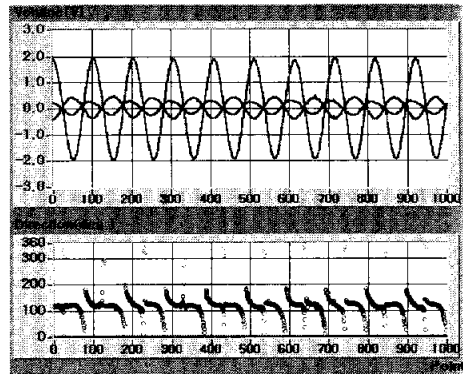
그림 15. 음원 방향 추정 (무향실, $f_o = 700\text{Hz}$)

Fig. 15. The estimation of sound source direction

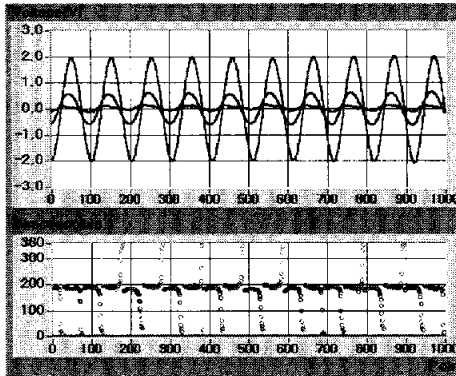
(anechoic, $f_o = 700\text{Hz}$)



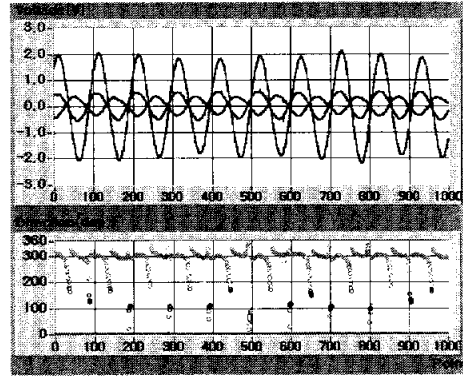
(a) 0°



(b) 120°



(c) 180°



(d) 300°

그림 16. 음원 방향 측정 (수조, $f_o = 700\text{Hz}$)

Fig. 16. The estimation of sound source direction

(water tank, $f_o = 700\text{Hz}$)

표 1. 도래각 측정 및 오차 (단위:도)

Table 1. The estimation and error of DOA

음원 방향		0°	30°	60°	90°	120°	150°
700Hz (무향실)	측정각도	3.24	32.90	55.19	104.81	130.53	144.95
	오 차	+3.24	+2.90	-4.81	+14.81	+10.53	-5.05
700Hz (수조)	측정각도	1.18	30.74	55.07	83.61	123.25	156.89
	오 차	+1.18	+0.74	-4.93	-6.39	+3.25	+6.89
음원 방향		180°	210°	240°	270°	300°	330°
700Hz (무향실)	측정각도	184.95	204.25	234.49	280.93	295.98	326.60
	오 차	+4.95	-5.75	-5.51	+10.93	-4.02	-3.4
700Hz (수조)	측정각도	189.52	214.31	239.53	268.84	304.32	333.28
	오 차	+9.52	+4.31	-0.47	-1.16	+4.32	+3.28

VI. 결 론

수동형 DIFAR 소노부이에 대해 실제 음원의 방향 측정과 그 오차에 대한 평가 시스템을 구현하기 위해 크로스 스펙트럼법과 Delay and Sum Beamforming 알고리즘을 적용하여 그 도래각을 측정하였다. 그 결과 각각의 하이드로폰 신호간의 시간지연을 이용한 크로스 스펙트럼법의 경우 샘플링에 따른 오차 발생과 신호를 각각 분리해야하는 단점을 보였다. 하지만 지향 센서 두 채널 신호간의 크기와 무지향 센서와 지향 센서 신호간의 위상을 이용한 Delay and Sum 법은 시간영역에서 간단하게 음향 신호에 대한 도래각 측정이 가능하였다.

따라서 본 연구에서는 수동형 DIFAR 소노부이의 평가 시스템을 실시간으로 구현하고 공기중과 수중에서 측정 알고리즘을 사용하여 일정 각도로 입사해 들어오는 음향 신호에 대해 그 도래각을 측정하였다. 그 결과 한 주기의 약 80% 이상의 데이터가 실제 각도를 나타냈으며 그 오차 정도는 10° 이내로 보이고 있다. 일정한 음향 신호 ($f_0 = 700Hz$)를 방사했을 때 공기중에서는 $\pm 6.33^{\circ}$, 수중에서는 $\pm 3.65^{\circ}$ 의 각도 오차를 나타냈다. 따라서 실제 생산라인에서 소노부이의 도래각 측정 평가 시스템이 적용 가능한 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Richard O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Boston, Artech House, 1991.
- [2] Simon Haykin, *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing Vol. 3*, (New Jersey 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.
- [4] 이호철, 시간지연추정을 이용한 음원위치추적에 관한 연구, 국민대학교 석사학위논문, 2000.
- [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] Lawrence J. Ziomex, *Underwater Acoustics*, Academic Press, 1985.
- [7] William S. Burdic, *Underwater acoustic system analysis*, Prentice-Hall, 1985.

[8] Charles W. Therrien, *Discrete Random signals and Statistical Signal Processing*, Prentice-Hall, 1992.

[9] 곽두영, *LabVIEW*, Ohm사, 2002.

감사의 글

대학원을 입학하면서 학부 과정에서의 부족함을 느끼고 나름대로 많은 계획과 의지를 가지고 시작하였지만 2년의 석사 과정을 마치고 되돌아보니 처음의 마음가짐과 달리 많은 아쉬움을 느낍니다. 하지만 많은 분의 도움이 있었기에 부족하나마 마지막 결실을 맺을 수 있었던 것 같습니다. 이 자리를 빌어서 작게나마 감사의 뜻을 전하고 싶습니다.

먼저 끊임없는 지도와 격려로 이끌어주신 김천덕 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 바쁘신 와중에도 부족한 논문에 많은 조언을 주신 노의철 교수님과 김영학 교수님께도 감사 드립니다. 또한 충고와 관심을 아끼지 않으신 김인동 교수님, 장윤석 교수님을 비롯하여 여러 전기과 교수님과 음향진동 교수님들께 감사의 마음을 전합니다.

여름내 같이 고생해주신 박순중 선배, 처음 연구실 생활을 시작하며 많은 도움이 되었던 김정호 선배, 배현기 선생님, 오경희 선생님, 이백열 선배, 윤현승씨 이제 대학원 생활을 시작하는 미현이 모두에게 감사 드립니다.

마지막으로 대학원 동기들, 선후배들께 고마움을 전하며 이 자리까지 뒤에서 지켜봐 주신 부모님께 감사 드립니다.