

〈논 문〉

두 개의 정현 신호를 이용한 속도 측정용 고전력 쏘나 시스템 개발

Development of a High Power SONAR System Measuring Velocity by Using Two Gated Sinusoidal Signals

장 순 석* · 안 흥 구** · 이 제 형**

Soon Suck Jarng, Heung Gu Ahn and Je Hyeong Lee

(1999년 7월 12일 접수 ; 1999년 9월 13일 심사완료)

Key Words : Ultrasonic Device(초음파 기기), High Power Sonar System(고전력 쏘나 장치), Cross-Correlation(상호상관), Time Delay(지연 시간), Velocity Measurement(속도측정)

ABSTRACT

This paper aims for the development of the high power sonar system for measuring the velocity of a moving object. The high power sonar system transmits two gated 190 kHz sinusoidal signals with 1.6 [ms] time interval to the moving object. Then the sonar system detects and calculates the changed time delay of the reflected ultrasonic signals in order to derive the velocity of the moving object. The transmission part uses a high power amplifier so that 250 W gated sinusoidal signals can be transmitted to the transmitter. 1 M RAM is utilized for transmitting and storing of the ultrasonic signals. The time delay is calculated by the cross-correlation technique between the transmitted signals and the received signals. The measured value from the high power sonar system is compared with directly measured values by photo diodes. The result confirms the adjacency to 0.3% error.

1. 서 론

현대 산업사회에 있어서 초음파는 자동차의 후미 감지, SONAR(Sound Navigation and Ranging), 어군탐지, 건축물의 결함탐색, 초음파 모터, 의료 진단 등 다방면에 사용되어지고 있다. 그 중에서도 수중에서의 초음파의 활용은 초음파가 다른 파에 비해 감쇠가 적으므로 가장 많이 사용되고 있으며, 수중 음향 센서 활용을 위해서 장치개발이 절실히 요구되

고 있다. 본 논문에서는 속도 측정을 위해 주파수 영역의 도플러 방식을 사용⁽¹⁾하지 않고, 시간영역의 도플러 방식을 사용하였다. 주파수 영역의 도플러 방식을 사용하여 1 m/s미만의 속도를 측정할 경우, 공기중 음의 전파속도가 343 m/s이고, 움직이는 물체의 속도를 1 m/s, 전송되는 초음파의 주파수를 190 kHz라 할 때, 도플러 주파수는 약 1 kHz가 되어 초음파 주파수가 190 kHz인데 비해 너무 작으므로 속도 및 거리를 측정하는데 부적절하다. 본 논문을 통해서 개발된 고전력 쏘나 시스템은 중심주파수가 200 ± 10 kHz인 초음파 센서를 사용⁽²⁾하였고, 5 MHz의 샘플링을 행하여 공기 중에서 이동하는 물체의 속도를 측정하였다. 또한, 공기 중에서 사용하

* 정희원, 조선대학교 공과대학 전기제어계측공학부

** 조선대학교 대학원 제어계측공학과

는 초음파센서 대신 수중음향 센서를 사용하면 수중에서의 속도 및 거리 측정도 가능해진다. 공기 및 수중에서의 초음파가 전달되는 음압을 높이기 위해서 APEX사의 고 전력 앰프(PA85)를 사용⁽³⁾하였으며 PC와의 직접적인 인터페이스를 위해서 병렬포트를 사용⁽⁴⁾하였고, 초음파 센서를 통해 물체로부터 반사되어온 초음파 신호의 수집 및 분석이 가능하게 하였다. 이때, 반사되어온 초음파에는 잡음(noise)이 섞이는데 잡음제거를 위해서 전 처리로 150~250 kHz 대역의 아날로그 필터링을 하였다^(1,5). 두 개의 정현 신호는 초음파 센서를 구동하여 190 kHz의 초음파 신호를 전송하고 동시에 반사되어 되돌아오는 신호 사이의 시간차를 상호상관함수를 사용하여 구함으로써 초음파 센서부터 멀어지거나 가까워지는 물체의 속도를 측정했다.

2. 속도측정 원리

초음파를 음향 임피던스가 다른 물체에 송신하면 초음파는 약간의 흡수, 반사, 투과를 하게 된다. 이는 물체와 매질인 공기사이의 임피던스가 차이가 나 생기는 현상인데 임피던스 차가 클수록 반사되는 양이 커진다. 이렇게 반사되는 현상을 거울반사(specular

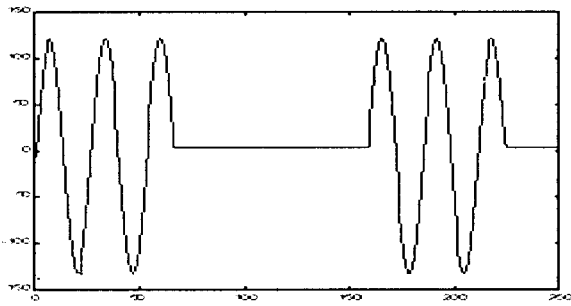


Fig. 1 Two gated sinusoidal signals

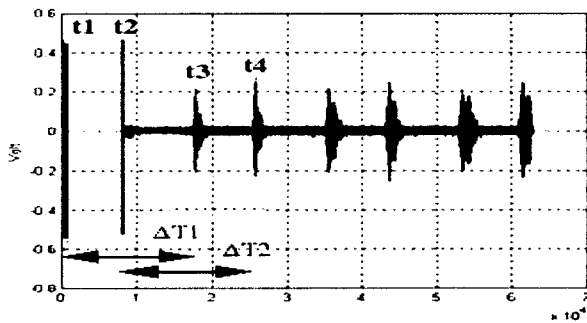


Fig. 2 The transmitting and receiving ultrasonic signals

reflection)⁽⁶⁾라 부른다. Fig. 1은 Fig. 2의 송신 신호를 확대한 것이다.

$$\Delta T_1 = t_3 - t_1 = t_3 - t_1 \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = t_4 - t_2 \quad (2)$$

t_1, t_2 : 송신신호의 첫 번째 시간지연,
두 번째 시간지연

t_3, t_4 : 수신신호의 첫 번째 시간지연,
두 번째 시간지연

D_1 : 시간 t_1 에서의 물체까지의 거리

D_2 : 시간 t_2 에서의 물체까지의 거리

A, A', B, B' : 초음파 센서로부터 일직선인 방향으로 이동하는 물체의 위치

이동 물체가 A지점에서 A' 지점으로 이동시, ΔT_1 동안의 이동 변위를 Δd_1 라 하면 다음과 같은 수식이 된다.

$$C \Delta T_1 = 2(D_1 + \Delta d_1), \quad \Delta d_1 = \frac{V \Delta T_1}{2} \quad (3)$$

이동 물체가 B지점에서 B' 지점으로 이동시, ΔT_2 동안의 이동 변위를 Δd_2 라 하면 다음과 같은 수식이 된다.

$$C \Delta T_2 = 2(D_2 + \Delta d_2), \quad \Delta d_2 = \frac{V \Delta T_2}{2} \quad (4)$$

여기서, $C = 331.5 + 0.607 t$ (m/s), t 는 온도이다.

$$D_2 = D_1 + V(t_2 - t_1) \quad (5)$$

V : 센서로부터 멀어지거나 가까워지는 이동 물체의 속도(단, 송수신 센서는 동일한 위치에 있고, 이동물체가 센서와 일직선상에 있다.)

이동하는 물체의 속도가 일정하다고 하면, 식

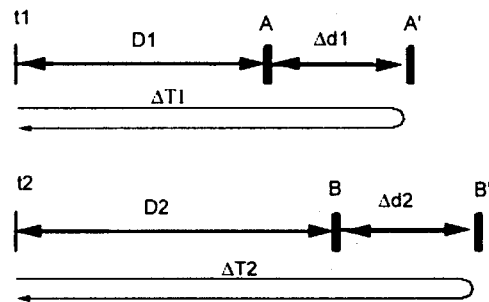


Fig. 3 Measuring the velocity of the moving object

(3)~(5)으로 부터 다음과 같은 수식이 된다.

$$\Delta T_1 - \Delta T_2 = \frac{2(\ell - \ell)}{1 - C/V} \quad (6)$$

식 (6)을 정리하면 이동물체의 속도는 다음과 같이 구해진다.

$$V = \frac{C(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\Delta T_2 - \Delta T_1 + 2(\ell - \ell)} \quad (7)$$

3. 쏘나 시스템

PC의 병렬 포트를 통해서 송신 센서를 구동하기 위한 데이터를 램에 저장한다. 저장된 데이터는 사용자의 명령에 따라 D/A 변환기를 통해 190 kHz의 ±5V 정현 신호로 변환되는데, DC-DC 변환기 (Power Plaza사 PS6-5-5)를 사용하여 음(-)전압을 D/A 변환기에 공급한다. 송신 센서로 보내지는 정현 신호는 외부 카운터를 사용하여 PC와 상관없이 5 MHz의 일정한 샘플링 주파수를 갖게 했다. 카운터에 의해 발생되어지는 구동신호는 1 Mbit 램중에 8192 bit를 차지하여 저장되는데, 덮 스위치를 사용하여 사용자에게 따라 저장구간을 바꿀 수 있게 했다. 램에 저장되는 데이터는 디지털 비교기를 사용하여 정현 구동신호가 보내짐과 동시에 자동으로 송신모드에서 수신모드로 바뀌어져 수신부로부터 수신된 신호를 저장하게 된다. 공기 중에서 이동하는 물체에 초음파를 발사하면 산란(scattering), 감쇠(attenuation), 분산(beam spread), 흡수(absorption)등에 의해 수신센서에 전달되는 초음파는 미약하게 된다. 그러므로, 송신센서에 보내어지는 정현 신호를 크게 하여 수신센서에 강한 음압이 전달되도록 할 필요가 있다. 본 쏘나 시스템에서는 고전력 앰프를 사용하여

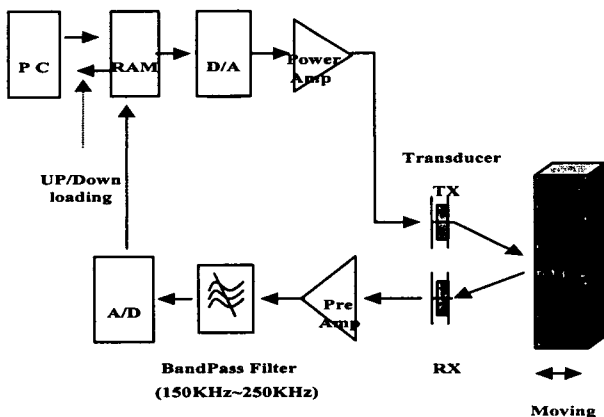


Fig. 4 High power sonar system

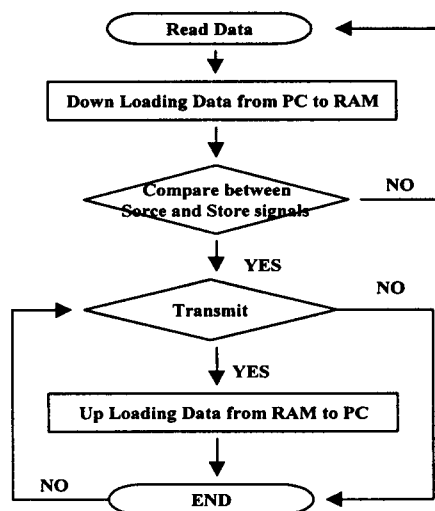


Fig. 5 Up/Down loading flow chart

송신센서의 정현 신호를 250 W가 되게 했다. 그러나, 수신센서에 전달되어지는 초음파 신호는 분석하는데 필요로 하는 전압보다 상당히 낮다. 따라서, 이 수신된 초음파 신호를 OP 앰프를 통해 약 30 dB 정도 증폭시켰다. 증폭된 신호는 150~250 kHz의 주파수 대역을 가지는 아날로그 BP 필터를 통과하고 다시 OP앰프를 통해 30 dB 정도 더 증폭된 후 A/D 변환기(AD1672, Analog Devices)에 보내진다.

이 시스템에서 사용되어진 A/D 변환기는 단일채널의 12 bit 3 Mbps를 사용했다. A/D 변환기를 거친 신호는 디지털 신호로 변하는데 외부 카운터에 의해 자동으로 램에 저장된다. 램 저장시, 데이터 버스는 8 bit이므로 A/D 변환기의 12 bit중 하위 4 bit는 사용하지 않고, 상위 8 bit만 사용하였다. 디지털 신호는 램 저장 시에 timer(NE555)에 의해서 수신모드 동안만 램에 수신신호가 저장되어지고, 램에 저장된 신호는 다시 PC의 병렬 포트를 사용하여 PC로 전송되게 된다. Fig. 5는 송/수신 초음파신호의 업/다운(up/down) 로딩(loading) 순서도이다.

4. 실험

본 실험은 Fig. 6과 같은 순서에 따라 시스템을 구성하였다.

4.1 송수신부

본 쏘나 시스템의 송/수신부는 Murata사(MA200A1)의 송/수신 초음파 센서를 Fig. 7과 같이 1.5 cm 간

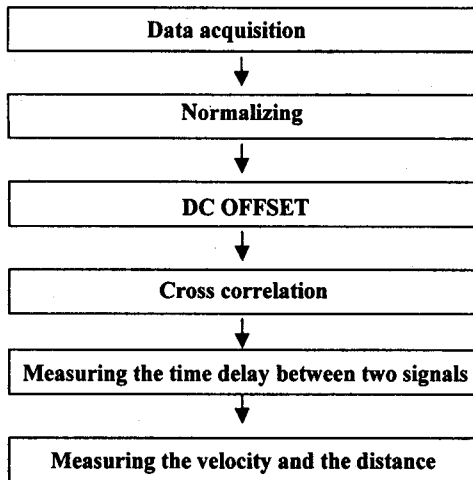


Fig. 6 The sequence of the experiment

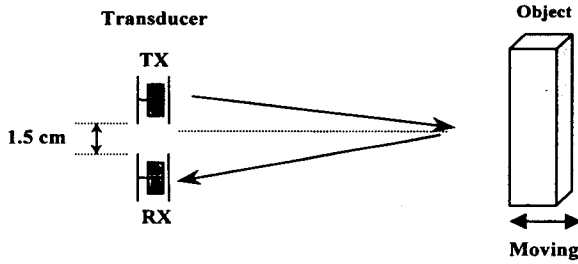


Fig. 7 The allocation of the ultrasonic sensor

격으로 배치하였는데 이 센서는 지향각이 7° 이고 최대 입력 전압은 120 V(Vp-p), 중심주파수 200 ± 10 kHz, 2 mm의 분해능을 갖는다. 초음파 센서를 구동하기 위해 정현 신호를 Fig. 1과 같이 구성한다. 첫 번째 보내지는 구동 신호와 두 번째 보내지는 구동 신호 사이는 약 16.384 ms의 시간차를 두었다.

4.2 필터링(Filtering)

물체에 반사되어 되돌아오는 신호는 상당한 잡음이 섞여있게 된다. 이 잡음을 제거하기 위해서 Fig. 8과 같이 아날로그 필터로 150~250 kHz 대역의 BP 필터를 설계 제작하였다. Fig. 8의 LP 필터의 폐회로 전압방정식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 R_1 I_1 + SL_1(I_1 - I_2) &= V_1 \\
 SL_1(I_2 - I_1) + \frac{1}{SC_1} I_2 + SL_2(I_2 - I_3) &= 0 \\
 SL_2(I_3 - I_2) + \frac{1}{SC_2} I_3 + SL_3(I_3 - I_4) &= 0 \\
 L_3(I_4 - I_3) + R_2 I_4 &= 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

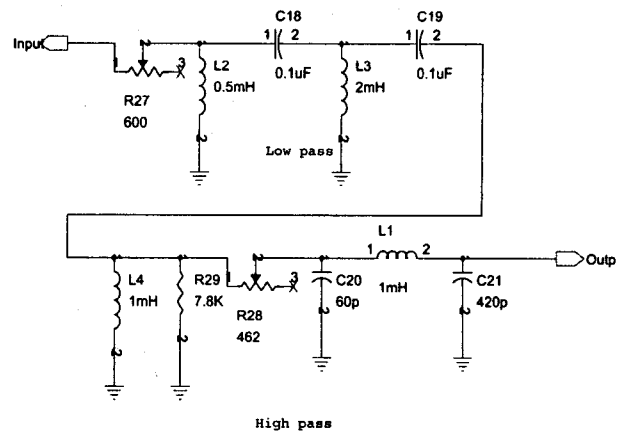


Fig. 8 BP filter (150~250 kHz)

$$\begin{bmatrix}
 SL_1 + R_1 & -SL_1 & 0 & 0 \\
 -SL_1 & (SL_1 + 1/SC_1 + SL_2) & -SL_2 & 0 \\
 0 & -SL_2 & (SL_2 + 1/SC_2 + SL_3) & -SL_3 \\
 0 & 0 & -SL_3 & R_2 + L_3
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_1 \\
 I_2 \\
 I_3 \\
 I_4
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix} \tag{9}$$

식 (8)에 임의 리액턴스와 캐패시턴스, 저항을 대입 하고, 주파수(150~250 kHz)에 따른 출력단의 전압을 구하여, 필터를 제작하였다.

4.3 상호상관함수 (Cross-correlation)

상관함수⁽⁸⁾에는 상호상관함수와 자기상관함수의 두 가지 형태가 있다. 상호상관함수는 두 신호의 유사성과 시간차를 나타내며 잡음이 포함되어 있는 신호의 검출 및 복원등에 사용되고, 자기상관함수는 주기검출에 사용되어진다. 상호상관함수는 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$r_{12} = \frac{1}{N-|k|} \sum_{n=0}^{N-|k|-1} x(n)y(n+k), \text{ unbiased} \tag{10}$$

Fig. 9는 속도가 0.609 m/s로 움직이는 물체에 초음파를 발사했을 때, 초음파 센서로부터 0.65204 m의 거리상에서 움직이는 물체에 반사된 초음파 신호들의 상호상관관계를 나타낸 것이다. 초음파 신호에 상호상관함수를 행하기 전에 Fig. 6과 같은 순서로 먼저 정규화를 하고 난 다음 DC 오프셋(offset)을 행하여 DC 성분을 제거한다. Fig. 9의 (a)는 송신 초음파 신호 사이의 상호 상관관계를 나타내며 이로부터 t1과 t2 사이의 시간간격을 계산한다. Fig. 9의 (b)는 수신 초음파 신호 사이의 상호 상관관계를 나타내며 이로부터 t3와 t4 사이의 시간 간격을 구한다.

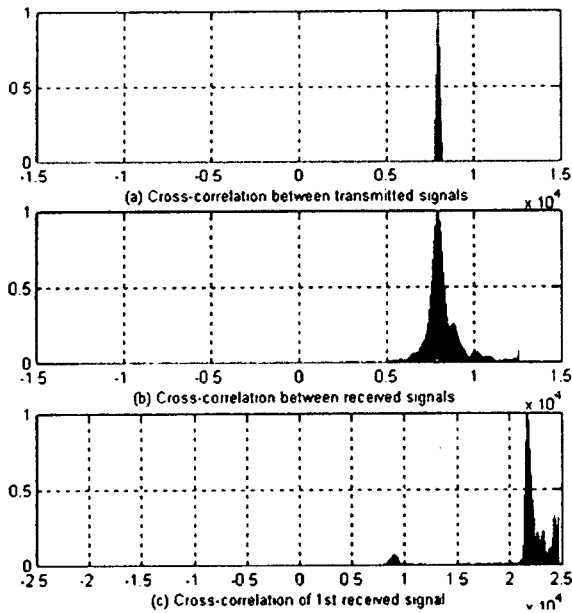


Fig. 9 The cross-correlation of transmitting and receiving ultrasonic sensor

Fig. 9의 (c)는 첫 번째 송신 초음파 신호와 첫 번째 수신 초음파 신호사이의 상호 상관 관계를 나타내며 이로부터 t_1 과 t_3 사이의 시간간격을 계산한다. 이때 t_1 은 상대적인 시간이므로 편이상 0으로 놓는다.

4.4 오실로스코프와 광 센서를 이용한 속도측정

초음파 센서로 측정된 값과 비교하기 위해서 오실로스코프(HP54520A)와 광 센서(EL-1L1,ST-1KLA)를 Fig. 10과 같이 구성하였다.

- EL-1L1 : 발광센서, 지향각: $\pm 20^\circ$
동작온도: $-30^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$
- ST-1KLA : 수광센서, 지향각: $\pm 30^\circ$
동작온도: $-30^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$

광 센서와 초음파 센서와의 거리는 60 cm, 광 센서와 광 센서 사이의 거리를 10 cm 떨어지게 설치하여 이동물체가 처음 광 센서를 지나고 다음 광 센서를 지날 때까지의 지연시간을 오실로스코프로 직접 측정하여 속도를 구했다. 광 센서를 이용하여 속도를 구할 경우, Fig. 10과 같이 오실로스코프의 두 채널을 사용하여 프로브를 수광 센서에 각각 연결한다. 프로브에 연결된 수광 센서는 연속해서 발광센서로부터 수신된 적외선에 의해 수광 센서에 전압이 생성 되는데, 이때 이동물체가 수광 센서와 발광 센서 사이에 놓이게 되면 적외선을 차단하기 때문에 전압은 나타나지 않고, 이동물체가 수/발광 센서 사이를 지나면 다시 수광 센

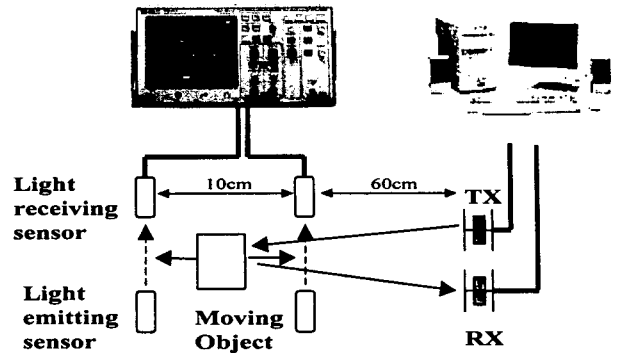


Fig. 10 The measuring of the velocity with photo sensor

서에는 전압이 나타나게 된다. 수광 센서에 나타나는 전압에 의해서 오실로스코프에 들어온 신호는 트리거(trigger)가 되는데 이를 이용하여 이동 물체가 광 센서와 광 센서 사이를 지나는 시간지연 값을 구했다.

5. 실험결과 및 고찰

Table 1은 제작된 이동 장치를 각기 다른 속도로 이동하게 한 다음 수/발광 센서를 사용하여 오실로스코프로 직접 측정된 것과 초음파 센서를 사용하여 각각의 속도로 10번 반복 측정된 것을 비교한 것이고, Table 2는 직접 잴 거리와 정지한 물체에 초음파를 전송하여 거리별로 10번씩 반복 측정된 것을 비교한 것이다. 초음파 센서에 의해서 측정된 값은 이동장치가 각 구간별로 약간의 속도 차이가 나는 점을 고려하여, Fig. 10처럼 광 센서가 설치된 지점(센서로부터 60 cm~70 cm)에서 초음파가 이동물체에 반사되게 하였다. 광 센서를 이용한 속도측정을 할 경우 물체가 수/발광 센서사이를 지나갈 때, 오실로스코프에 들어오는 신호가 트리거 됨으로써, 속도를 측정된 값이 비교적 정확함을 알 수 있다. 이 실험에서 이동하는 물체의 속도 측정은 상대오차가 최대 약 0.3%로 측정되었고, 정지한 물체의 거리 측정은 최대 약 0.3%로 측정되었다.

또나 시스템의 에러 보정을 위해서 정지한 물체에 초음파 신호를 여러 번 전송하여 평균속도를 구하고 감산함으로써 물체의 정지시 속도가 0에 가깝게 하였다. 또한, 초음파 신호가 물체로부터 반사되어 초음파 센서로부터 수신되는 신호는 미약한데 이로 인해 잡음이나 왜곡이 생기기 쉽다. 이를 줄이기 위해 송/수신 초음파 센서와 회로 사이의 연결에 동축 케이블을 사용하였다.

Table 1 Measuring the velocity of the moving object

Measuring the velocity (m/s) 26°C					
N	Photo sensor	Standard deviation	Ultrasonic sensor	Standard deviation	Relative error (%)
1	0.467	0.0034	0.466	0.0107	0.214
2	0.667	0.0031	0.665	0.0109	0.301
3	0.685	0.0061	0.687	0.0109	0.292
4	0.704	0.0095	0.706	0.0107	0.284
5	0.885	0.0102	0.887	0.0153	0.226

Table 2 Measuring the distance

Measuring the distance (m) 26°C				
N	Distance	Ultrasonic sensor	Standard deviation	Relative error (%)
1	0.450	0.451	0.0004	0.222
2	0.500	0.501	0.0006	0.200
3	0.600	0.599	0.0004	0.167
4	0.700	0.698	0.0037	0.286
5	0.800	0.801	0.0009	0.125
6	0.900	0.902	0.0007	0.222
7	1.000	1.003	0.0008	0.300

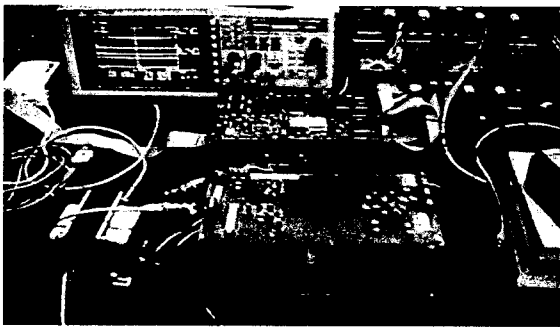


Fig. 7 Sonar system

6. 결 론

본 논문에서는 움직이는 물체의 속도 측정을 위한 고전력 소나 시스템 개발에 목적을 두었다. 송/수신 초음파 신호들 사이에 상호상관 함수를 행하여 시간 지연값을 구했고, 속도 측정을 위해 두 개의 정현 신호를 사용함으로써 간단한 수식에 의해 속도 및 거

리를 측정했다. 초음파 센서의 송신부에는 고전력 앰프를 사용하여 250 W의 정현 신호가 송신센서에 전달 되도록 하였다. 또한, 수신부에는 수신된 초음파 신호를 60 dB 증폭시키고, 150~250 kHz의 아날로그 BP 필터를 사용하여 잡음을 제거하였다. 본 논문에서는 속도 측정을 위해 센서로부터 멀어지거나 가까워지는 이동물체가 초음파 센서로부터 일직선상에 있을 때만 정확한 측정이 가능하였지만, 다채널을 이용하여 이동 물체와 센서가 일직선상에 있지 않고, 어느 위치에서도 속도 및 거리 측정이 가능한 시스템을 제작할 계획이다. 또한, 고전력 소나 시스템에서 사용한 초음파 센서 대신 수중 음향 센서를 사용하여 수중에서의 초음파 신호의 수집 및 분석을 통한 거리 및 속도 측정을 할 계획이다.

후 기

본 연구는 1998년 신기술보육(TBI)사업(과제명: 초음파 센서 응용 디바이스 설계/제조 및 원거리 속도 측정 시스템 개발)의 지원으로 연구가 수행되었음. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Eng, Tatt. and Ghiu., 1989~1990, "Frequency Modulated Continuous Wave Sonar," Birmingham Uni., U.K. Final Year Project.
- (2) 1998, Ultrasonic Sensor Application Manual, Murata Manufacturing Co., Ltd.
- (3) 1996, Apex Power Integrated Circuits, Apex Microtechnology Corporation, Vol. 7.
- (4) Peter H. Anderson., 1996, "Use of a PC Printer Port for Control and Data Acquisition," the Technology Interface, Vol. 1.
- (5) Harry Y-F. Lam., 1979, "Analog and Digital Filters Design and Realization," Prentice Hall, Inc.,
- (6) Rodney F. W. Coates., 1990, "Underwater Acoustics Systems," Macmillan Education Ltd., pp. 10~15.
- (7) Thomas L. Floyd., 1998, "Electronic Devices," Prentice Hall, Vol. 4, pp. 700~821.
- (8) Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jervis, 1996, "Digital Signal Processing, A Practical Approach," Addison-Wesley, pp. 183~213.