

초음파 거리계의 성능 개선에 관한 연구

박종건, 임영천, 조경영, 박철수, 김영민  
 전남대학교

A Study on Performance Improvement of Ultrasonic Ranging System

Jong G. Park, Young C. Lim, Kyeung Y. Cho, Chul S. Park, Young M. Kim  
 Chonnam National Univ.

< Abstract >

This paper describes a new method for performance improvement ultrasonic ranging system using V40 controller. Detectable range of ultrasonic ranging system depends on transducer frequency and bandwidth of the receiver, and damping of the transducer, etc. Conventional ranging systems are somewhat inaccurate because they do not have capability of compensating changes in medium condition. The novel ranging system overcomes this disadvantage by placing in the same medium a dummy sensor functioning as a standard calibrating instrument and by providing data processing capability using V40 controller.

I. 서론

오늘날에는 시스템의 성능은 센서의 성능에 의해 좌우 된다고 해도 지나치지 않을 정도로 센서에 의존하고 있다. 산업계에서 사용되고 있는 많은 센서 중에서 초음파 센서는 소리라는 독특한 특성으로 인해 많은 분야에 이용이 되고 있는데, 군사용에서 산업용, 의료용에 이르기까지 널리 사용되고 있다.[1-4]

초음파 거리측정은 음파가 공기중을 주행하는 시간을 측정하므로 이루어진다. 그러데 음파 주행 시간은 음속에 의존하고, 음속은 대기환경에 크게 영향을 받기 때문에, 정확한 거리 측정을 위해서는 대기환경 요소인 온도, 압력, 습도, 점도 등에 대한 고려가 있어야 한다. 초음파센서를 거리 측정 및 근접센서로 사용하고자 1982년 이탈리아의 C. Canali 등에 의해 시도되었는데, 초음파 전파속도에 가장 많은 영향을 주는 온도에 의한 오차만을 보상하고 있다.[5] 하지만 보상회로 요소인 디미스터가 비선형 소자이므로 보상할 수 있는 온도범위가 한정되어지고, 회로부품 자체가 온도계수를 지니고 있기 때문에 온도에 대한 완전한 보상을 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 동일 조건의 매질중에 놓여진 디미 센서를 사용하여 이미 알고있는 표준 거리로부터 거리측정상수를 구하여, 대기중의 음속변화와 무관하게 미지의 거리를 정확히 측정할 수 있는 거리계를 구현 하였으며 V40 콘트롤러를 채용, 거리계를 제어하고 거리계로부터 얻어진 데이터를 실시간 처리하여 거리정보를 나타내게 하였다. 또한, 직렬로 IBM-PC와 데이터를 주고 받을 수 있게 하여 이를 재처리, 정적 시스템의 거리정보 뿐만 아니라 동적 시스템의 정보도 PC의 그래픽상에서 분석할 수 있도록 하였다.[6]

II. 초음파 거리계의 동작

1. 거리 측정 방법

초음파에 의한 거리측정의 원리는 펄스에코기술에 기본을 두고 있다. Fig. 8에서와 같이 펄스가 공기중으로 방사되는 순간( $t_0$ )부터 목표물에서 반사된 신호가 수신기에 감지되는 순간( $t_r$ )까지의 시간을 측정함으로써 식(1)에 의해 거리를 측정할 수 있다.

$$L = (t_r - t_0) C_0 / 2 \dots \dots \dots (1)$$

단) L:거리,  $t_r$ :반사신호 감지시간,  $t_0$ :송신시간,  $C_0$ :음속

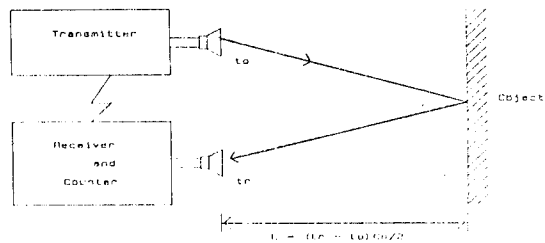


Fig. 1. Principle of measuring distance.

이와 같이 초음파의 거리측정은 초음파가 공기중을 주행하는 시간측정에 기본을 두고 있으므로, 정확한 주행시간 측정이 중요하다. 이 주행시간은 음속에 의존하고, 음속은 대기환경에 크게 영향을 받는다. 공기중(또는 기체)에서 음속은 다음과 같다.

$$C_0 = \sqrt{kp/\rho} [m/s] \dots \dots \dots (2)$$

단) k:비열비( $C_p/C_v \approx 1.402$ ), p:대기압[N/m<sup>2</sup>],  $\rho$ :공기밀도  
 대기압 p를 1기압, 0[°C] 일 때의 체적을  $V_0$ , t[°C]일 때의 체적을 V라 하면, (3)식과 같다.

$$V = V_0(1 + \sigma t) \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $\sigma$ 는 팽창계수(1/273)이다. (3)식을 밀도로 표시하면 (4), (5)식이 되고

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0}(1 + \sigma t) \dots \dots \dots (4)$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \sigma t} \dots \dots \dots (5)$$

(2)식을 (5)식에 대입하면,

$$C_0 = \sqrt{kp/\rho_0} \cdot \sqrt{1 + \sigma t} \approx C_1(1 + (1/2)\sigma t) \dots \dots (6)$$

단) C<sub>1</sub>: 온도 0°C일때의 음속, ρ<sub>0</sub>: 온도 0°C일때의 밀도.

ρ<sub>0</sub> ≃ 1.293[kg/m<sup>3</sup>], p = 1.013[mbar] = 1.013 × 10<sup>5</sup> [dyne/cm<sup>2</sup>] = 1.013 × 10<sup>5</sup> [N/m<sup>2</sup>] 이므로 t[°C]일때 음속은 (7)식과 같다.

$$C_0 \approx 331.42 + 0.6t \text{ [m/s]} \dots \dots \dots (7)$$

(2)식으로 부터 음속은 대기압 p의 영향을 받는다는 것을 알수 있으며, 대기압 p에 관련된 (8)식에서 상대습도의 영향을 고찰할 수 있다.

$$C_d = C_b \sqrt{1 - \frac{e}{p} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_a} - \frac{5}{8} \right)} \dots \dots (8)$$

단) C<sub>d</sub>: 건조공기에서의 음속, C<sub>b</sub>: 습공기에서의 음속, e: 수증기압, p: 대기압, γ<sub>w</sub>: 수증기에 대한 연용량, γ<sub>a</sub>: 공기에 대한 연용량.

위에서 고찰한바와 같이 대기압, 습도, 온도등이 변함에 따라 음속이 달라지므로 이에 대한 보상이 필요하다.

### 2. 제안된 측정 방법

거리측정은 음파의 주행시간을 측정하기 때문에 음파 속도에 따라 다르며, 음파는 공기를 매체로 전파되므로 공기의 상태에 영향을 받는다. 따라서 측정 거리값은 공기의 온도, 압력, 습도, 진도와 같은 요인에 따라 달라진다. 기존의 거리계에서는 이 온도에 대한 오차보상을 더미스터와 타이머 IC를 사용하여 해결하고자 하였지만, [5] 그 밖의 요인에 대한 보상은 이루지를 못하였고, 실제적으로 하드웨어적인 보상은 쉽지 않다. 그러나 본 시스템에서는 간단히 더미센서를 사용하여 완전한 보상을 실현하였다. 즉, Fig 2와 같이 측정센서와 동일한 더미센서를 시스템 후방에 설치함으로써 측정센서와 같은 대기환경에 놓이게 하였다.

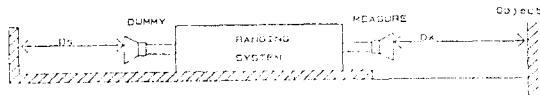


Fig. 2. The transducer arrangement.

거리(Dx)를 측정하기 전에, 먼저 더미센서를 구동한다. 더미센서와 표준거리(Ds)만큼 떨어져 있는 고정 목표물 사이를 왕복하는데 걸리는 시간에 비례하는 카운터 값으로부터 거리측정상수 K<sub>m</sub>(표준거리/카운터값)을 구한다. 그런후 측정센서로 전환하여 미지의 거리를 구한다.

$$K_m = D_s / N_s \dots \dots \dots (9)$$

단) K<sub>m</sub>: 거리상수, D<sub>s</sub>: 표준거리=500mm, N<sub>s</sub>: D<sub>s</sub>에 대한 카운터값

$$D_x = K_m * N_x \dots \dots \dots (10)$$

단) D<sub>x</sub>: 미지의 거리, N<sub>x</sub>: 미지의 거리에 대한 카운터값.

윗 식에서 알 수 있듯이 대기환경과는 무관하게 미지의 거리를 정확하게 측정할 수 있다.

### 3. V40 콘트롤러 채용

실제로 초음파가 공학이나 산업용 응용 시스템에 사용될때는 단순한 거리측정을 넘어서 복잡한 거리의 해석이 요구된다. 그러므로 본 시스템에서는 초음파 거리계에 V40 마이크로프로세서를 이용한 On-Board 콘트롤러를 내장하여 이와 같은 요구에 대응할 수

있도록 개발하였으며, 다른 시스템과 데이터 교환이 가능하도록 하였다. 또한 거리를 측정하는 과정에서 발생할 수 있는 카운터의 오버플로우를 감지하여 보상회로를 구동하고 기준거리에 대한 평균 오차나 실제거리를 계산하여 표시할 수 있도록 하였다. 그리고, 일정시간 측정한 거리에 대한 데이터를 메모리에 보관하여 피측정물의 움직임에 대한 속도나 가속도의 분석이 가능하도록 하였다.

속도와 가속도를 구하기 위해 먼저 피측정물이 초음파 센서로 측정할 수 있는 범위내에서 움직인다고 가정하고, 해석하기에 충분한 양의 카운터 값을 샘플링할 수 있도록 크기 n을 정하고 움직이는 피측정물의 동적인 카운터 값을 배열 Cnt[n]로 읽어 들인다. 그런 다음 시간 t에서의 거리의 변화율을 구해 속도로써 표시하면 다음 식과 같다.

$$\Delta t = t_c / n_c \dots \dots \dots (11)$$

$$v[t] = C \cdot (S[t-1] - S[t]) / [\Delta t \cdot C] \dots \dots (12)$$

단) t<sub>c</sub>: 카운터 값을 읽어들이는 총 시간, n<sub>c</sub>: 카운터의 총 갯수, Δt: 시간의 변화율, S[t]: 시간 t에서의 거리값, S[t-1]: 시간 t 바로 이전의 거리값, v[t]: 시간 t에서의 속도, C: 리운드 오프 오차를 보상하기 위한 상수.

(12)식에서 사용된 상수 C는 Δt 가 0에 가까워졌을 경우 생길 수 있는 리운드 오프 오차를 보상하기 위해서 양변에 곱해진다. 시간 t에서의 가속도 a[t]는 간단히 (13)식과 같이 시간 t와 t-1에서의 속도차로 구할 수 있다.

$$a[t] = (v[t-1] - v[t]) / \Delta t \dots \dots (13)$$

단) Δt: 시간의 변화.

### III. 하드웨어 구성

전체 하드웨어 구성은 Fig.3과 같다.

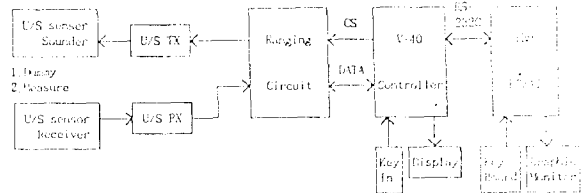


Fig. 3. Overall hardware structure.

실험에 사용한 초음파 센서는 MA40S2R/S로서, 이 센서의 공칭 주파수는 송신용과 수신용 모두 40KHz 이다.

이 거리계에 있어서 주파수 안정성이 문제가 되므로 1MHz의 표준 펄스 발생기는 수정편을 사용한 콜피츠 무조정회로의 부귀한 발진을 이용하였다. 1MHz의 표준 펄스는 25 분주회로를 거쳐 센서의 동작 주파수인 40KHz 펄스열(Pulse train)이 된다. 40KHz 펄스열은 주파수 20Hz, 펄스폭 0.4msec의 트리거 신호와 부 능리적이 되어 버스트파(Burst wave)가 되고 이 +5V/0V 비스트파는 4049 버퍼와 콘덴서 커플링에 의해 +5V/-5V로 센서를 구동하며, 20Hz 주기로 0.4msec(16개의 펄스)동안 초음파가 공기중으로 방사된다.

목적물에 반사된 신호를 수신기에서는 약 50dB의 이득으로 증폭하여 노이즈 필터를 걸쳐 다시 컴퓨터터로 정형한 다음 거리 측정 회로 RS플립플롭의 리셋 신호가 입력된다.

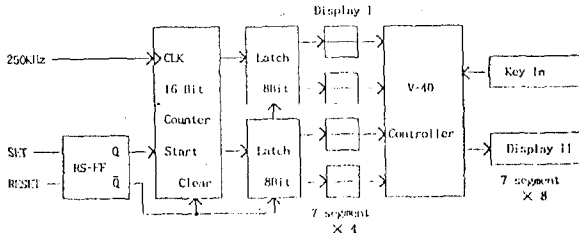


Fig. 4. Ranging circuit.

송신되는 순간 RS플립플롭이 셋트되고 동시에 표준 주파수 250KHz가 카운터의 클럭펄스로 입력되며, 반사 신호가 감지되는 순간 RS플립플롭은 리셋되는 동시에 카운터는 최종값을 유지한 채 정지한다. 그러면 V40콘트롤러는 래치(latch)된 카운터 값을 읽어들이어 거리값으로 환산하여 표시부에 나타내 준다.

#### IV. 소프트웨어 구성

본 시스템은 2가지의 프로그램으로 구성되어 있다. 하나는 V40 콘트롤러에서 운용되는 프로그램이고, 다른 하나는 IBM PC/AT에서 구동되는 프로그램이다. 각 프로그램의 기본 동작을 나타내는 흐름 선도는 Fig.5 과 Fig.6에 나타내었다.

측정시 카운터에 오버 플로우가 발생했을 경우 이를 보정하기 위해 보정신호를 출력하여 측정값이 항상 정확한 거리값을 유지할 수 있도록 하고 있다. 이 프로그램은 수동모드와 자동모드로 나뉘어 있으며, 수동모드를 선택하면 각각의 구분 동작을 실시할 수 있고, 자동모드를 선택하면 상수계산에서 오차보정까지 자동으로 해주게 된다. 또한 부수적으로 통신모드를 갖고 있어서 RS232C를 통해 데이터 송신요구가 들어오면 이에 응해서 원하는 만큼의 거리 데이터를 전송해주며 전송이 끝나면 다시 원상복구 하도록 되어있다.

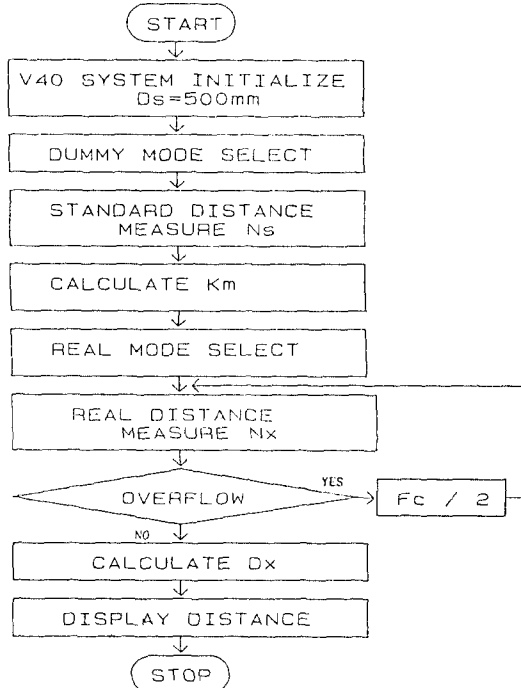


Fig.5. Flowchart of V40.

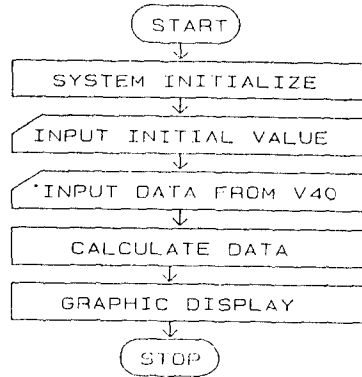


Fig.6. Flowchart of IBM PC/AT.

#### V. 실험결과 및 고찰

##### 1. 실험방법

###### 1-1. 대기 상태의 변화에 따른 오차값 측정

대기중의 온도와 습도에 따라 측정값이 어떻게 달라지며 얼마나 오차를 가지고 있는지를 측정한다.

###### 1-2. 2차원 동적 시스템의 해석

단진동 물체와 감쇠 진동 물체를 거리계 전면에 설치하여 물체의 2차원 운동을 거리계로 측정한다. 이때 얻어진 데이터를 PC로 받아들여 그래픽처리를 한후, 시간 대 거리의 그래프로 모니터 상에 나타내며 PC를 이용해 운동을 해석한다.

###### 1-3. 초음파의 반사파 산란각에 대한 실험

일정한 주파수를 가진 초음파가 직진하여 목표물에 부딪치면 일정한 산란각을 가지고 반사되며, 이때 산란각은 초음파의 주파수에 반비례하는 특성이 있다. 따라서 초음파의 송신축과 수신축이 이상적으로 동일한 위치에 있지않고 약간의 거리만큼 떨어져 있으면, 목표물이 송신축으로 기울어진 경우와 수신축으로 기울어진 경우의 최대 검출각은 각각 다르게 나타난다.

실험에 의하여 이 2가지 경우의 거리에 따른 검출각을 구하여 거리계로 측정할수 있는 목표물의 위치조건 즉 거리계와 목표물이 어떤 각도를 이루고 있을때 거리를 측정할 수 있는 허용각도를 알아낸다. 그리고 초음파 주행경로를 기하학적으로 단순화하여 초음파의 산란각을 구한다.

##### 2. 실험결과 및 고찰

###### 2-1. 대기상태의 변화에 따른 오차값 측정

초음파 거리계를 실험 탱크에 설치하고, 표준거리(500mm)에 설치된 반사판까지의 거리를 측정한다. 이때 반사판은 크기가 (1m X 1m)이며 면이 고른 판이다. 온도와 습도를 일정값 만큼 변화시켜 가면서 표준거리값을 측정한다. 이 표준거리의 값이 대기 상태의 변화에 따라 얼마나 변화하는가를 조사하였다. 5 [°C]에서 35 [°C]까지의 온도변화에 대해 +11.2 [mm]에서 -16.6 [mm]의 오차가 발생하였다. 최저 온도(5 [°C])와 최고 온도(35 [°C])에서 오차가 크며, 10 [°C]에서 16 [°C]까지는 거의 변하지 않았다. 온도가 상승할수록 음속이 빨라져, 같은 거리를 측정해도 높은 온도에서 측정된 거리가 더 짧게 측정되므로, 이에 대한 보상이 필요하다. 그러나 제한된 방법으로 측정할 경우 온도변화에

무관하게 항상 정확한 거리를 측정할 수 있음을 Fig. 8의 실험결과로 알 수 있다.

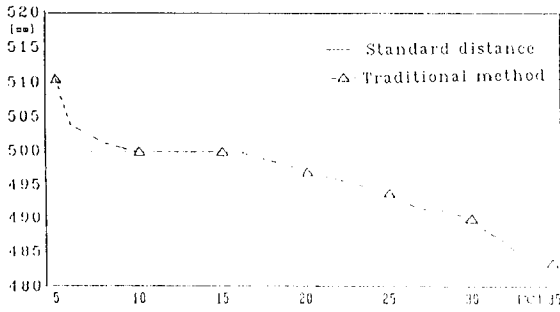


Fig.7. Graph of distance vs temperature(traditional method).

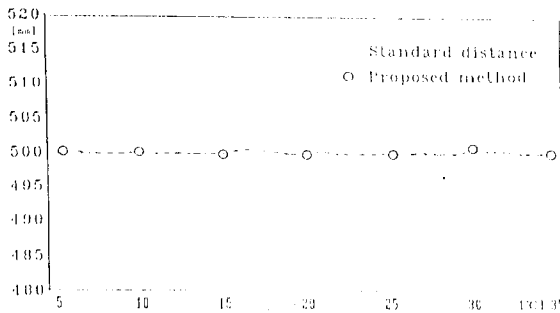


Fig.8. Graph of distance vs temperature(proposed method).

Fig. 9는 상대습도의 변화에 따른 측정 거리값을 보여 주고 있다.

그러나 제안된 방법으로 측정할 경우 상대습도 변화에 무관하게 항상 정확한 거리를 측정할 수 있음을 Fig.10의 실험결과로 알 수 있다.

이상에서 알수있는 바와 같이 기존방식의 거리계에 있어서는 대기상태(온도, 상대습도)의 변화에 따라 틀린 측정을 하게 되므로 이에 대한 보상이 이루어져야 한다. 그러나 제안된 측정 방법에 있어서는 대기상태의 변화와 무관하게 항상 정확한 거리를 측정할 수 있었다.

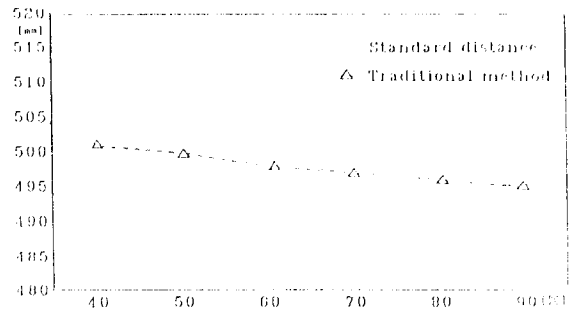


Fig.9. Graph of distance vs RH(traditional method).

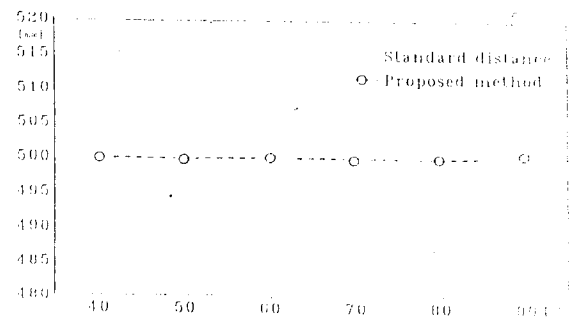


Fig.10. Graph of distance vs RH(proposed method).

2-2. 2차원 동적 시스템의 해석

단진동 물체와 감쇠 진동 물체를 거리계 전면에 설치하여 물체의 2차원 운동을 거리계로 측정하고 이때 얻어진 데이터를 PC로 받아들여 그래픽처리를 한후, 시간 대 거리의 좌표로 모니터상에 나타낸다. 다음 그림은 이 거리계가 PC를 이용하여 정적 시스템의 해석 뿐만 아니라 동적 시스템의 해석에도 사용될 수 있음을 보여준다. 대기압은 1[amt], 상대습도는 47[%], 온도는 23[°C]의 조건에서 측정한 것이다.

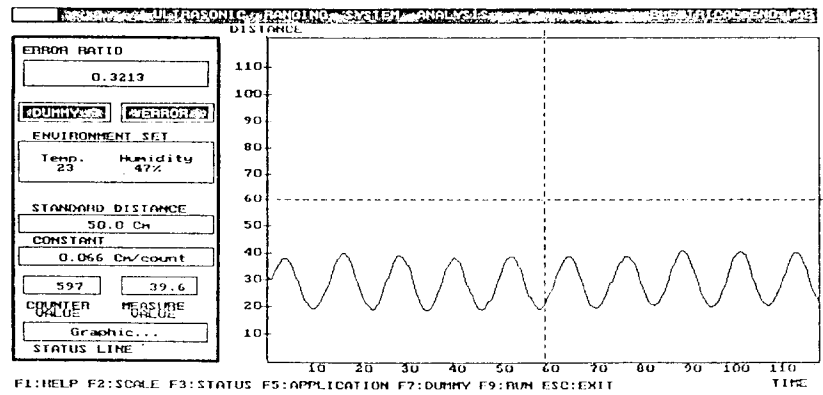


Fig.11. Simple oscillation.

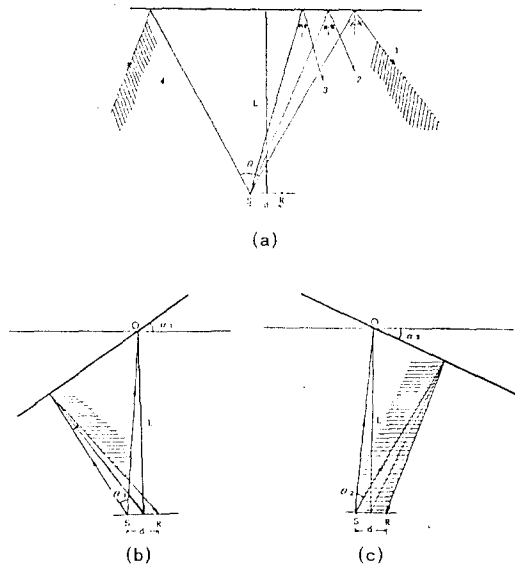


Fig.12. Measurement of directional angle.

### 2-3. 초음파의 반사파 산란각에 대한 실험

Fig. 12은 초음파의 반사파 산란각 측정에 대한 실험을 나타낸 것이다. Fig. 12.(a)에서는 입사파가 반사면에 직각으로 입사하므로 반사파도 직각으로 반사되고 산란각은 반사파와 대칭으로 산란된다. 수신측은 이 산란각 내에 있으므로 초음파를 검출한다. Fig. 12.(b)는 반사면이 송신측으로 기울어진 경우 초음파의 최대 검출각 측정을 나타내고 있다. Fig. 12.(c)는 수신측으로 반사면이 기울어진 경우 초음파의 최대 검출각 측정을 나타내고 있다. 여기서 산란각  $\theta$ 를 구할수가 있다. Fig. 12.(b)에서  $\theta$ 는 (14)식과 같다.

$$\theta \approx \alpha_1 - \tan^{-1}\{(d/2)/L\} \dots (14)$$

$\alpha_1$ 은 실험에 의하여 구해지고  $\tan^{-1}$ 는 송신측과 수신측의 간격  $d$ 와 송신측과 벽면과의 거리  $L$ 에 의해 구해진다.

## VI. 결 론

초음파거리계의 성능개선에 대해 연구한결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 더미 센서를 사용하여, 초음파 전파속도에 영향을 주는 대기 상태 변화에 무관하게 항상 정확하게 거리를 측정할 수 있었다.
2. V-40 콘트롤러를 채용하여, 정적인 거리에 대한 데이터뿐만 아니라 동적인 운동도 처리할 수 있는 거리계를 실현하였다.
3. 감지할 수 있는 거리가 0.2~4.5m였고, 공간 분해능은 약 1mm였다.
4. 거리계와 PC간의 통신이 가능하게 하여 데이터 보존기능을 부여하고, 얻어진 데이터는 C언어로 처리하여 PC의 발달된 그래픽 기능을 지원 받을 수 있게 하였다.

## 參 考 文 獻

- [1]. Stephen Wanuge, "Era of Sonics And Ultrasonics," IEEE Trans. So. Ultra., Vol. SU-23, July 1976, p.223.
- [2]. Warren P. Mason, "Sonics and Ultrasonics : Early History and Appl -ications," IEEE Trans. So. Ultra., Vol. SU-23, July 1976, pp. 224-232.
- [3]. Andrew Shoh, "Industrial Applications of Ultrasound - A Review: I, High - Power Ultrasound," IEEE Trans. So. Ultra., Vol. SU - 22, March 1975, pp.60-70.
- [4]. Lawrence C. Lynnworth, "Industrial Applications of Ultrasound - A Review:II, Measurements, Tests, and Process Control Using Low Inten -sity Ultrasound," IEEE Trans. So. Ultra., Vol. SU-22, March 1975, pp.71-101.
- [5]. C. Calani, Giorgy De Cicco, B. Morten, M. Prudenziati, and A. Ta -roni, "A Temperature Compensated Ultrasonic Sensor Operating in Air for Distance and Proximity Measurements," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. IE-29, Nov. 1982, pp.336-341.
- [6]. Willis J. Tompkins, John G. Webster, *Interfacing To the IBM-PC*, Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall Inc., 1988, pp.316-332.
- [7]. A. P. Cracknell, *Ultrasonics*, London : Wylceham Publication LTD., 1980, pp.2-10.