

## 공중 초음파 센서를 응용한 거리 형상인식에 관한 연구

한 응 교\* · 박 의 근\*\*

### A Study on the Distance and Object Recognition Applying the Airborne Ultrasonic Sensor

E. K. Han and I. G. Park

**Abstract** Recently, object recognition ultrasonic sensor is being used with automatization of industrial machine. Points which characterize the object can be detected by measuring the propagation time of ultrasonic impulse and azimuth which gives its maximum amplitude, and from these points shape, position and orientation of the object are deduced. A new measuring method is adopted, where the distance to the object is calculated by sound reflection time which is measured from O-cross point of sound wave, and azimuth is measured by angle indicating maximum amplitude. The measuring accuracy of 1.0mm for distance and 0.5-2° for azimuth have been accomplished. By rotational scanning of sensor the characteristic point of an object can be known and it gives the information of its shape, position and orientation. Experimental results showed that the object of some complicated shape can be recognized, which suggest its applicability to robot.

#### 1. 서 론

최근 산업용 기계의 자동화와 함께 로봇 등의 외계 인식 센서로 초음파가 이용되기 시작하였다.<sup>3-5</sup> 외계 인식 센서로는 광학적 화상을 이용한 연구가 주였으며, 현재에도 연구가 계속되고 있다. 그러나 일반적으로 화상은 처리해야 하는 정보량이 많기 때문에 요즘은 외계 인식 분야에 비교적 취급이 간편하고, 필요한

정보를 쉽게 얻을 수 있는 초음파에 관심을 가지게 되는 것이다.

초음파에 의한 거리, 형상 계측 기술은 액체나 고체중 내부 결함의 위치나 크기 등을 인식하는 초음파 탐상, 어군 탐지기, 인체의 진단 등에 널리 이용되고, 최근에는 CT나 초음파 현미경 등 고도의 초음파 영상 기술이 개발되고 있다. 이들 기존의 초음파 기술은 액체나 고체를 대상으로 한 것이 대부분이고 공기중에서의

\* 한양대학교 정밀기계공학과 교수

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

접수 : 1989년 12월 8일

적용에는 드물다. 그 이유로서는 공기중은 높은 주파수의 음파에 대해 감쇠율이 높고 분해능에 기준이 되는 주파수를 높일 수 없는점, 공기와 고체의 음향임피던스 차에 의한 보다 효율 좋은 Transducer를 얻지 못했기 때문이다. 또 화상 정보를 얻는다는 점에서 특수한 상황을 제외한 공기중은 광을 이용할 수 있기 때문에 공기중의 초음파 영상에 대한 연구가 지연되어 왔다.

본 연구에서는 초음파에 의한 공기중의 거리측정, 형상 인식 등에 대하여 계측 분해능을 높이고 간단한 2차원 물체의 형상, 위치 등을 인식하는 방법에 대하여 연구하였다.

欽島등은<sup>1)</sup> 이동 로봇에 장착한 초음파 센서에 의해 측벽까지 거리 또는 서 있는 원주의 위치를 인식하는 실험을 하였고, 수%의 오차로 위치를 결정하였다. 초음파 센서를 근접 센서로 사용하는 경우는 수%의 오차가 있어도 큰 문제가 되지 않으나 로봇이 물체를 잡는 등의 경우에는 1mm 이하의 오차로 물체의 위치, 자세를 인식할 필요가 있다.

형상인식의 방법으로는 공중초음파 센서로부터 형상물체까지 초음파 빔을 주사 했을 때 전파시간과 반사음압에 의한 형상인식과, 주파수 해석을 이용한 형상인식 방법으로 FFT Spectrum의 Algorithm에 의해 데이터를 해석하였다. 그 결과 형상물체까지의 전파시간과 반사파의 음압강도의 측정으로부터 형상인식이 가능함을 알수 있었고, 여러 물체의 반사에코패턴과 그 Spectrum 해석에 의해 특징점의 정보를 얻고 직육면체 또는 원주 등의 형상, 위치, 자세를 인식하는 것이 가능함을 알 수 있다. 이것을 시각인식과 비교해 볼때 위치정도가 매우 높고 장치가 간단하며 소형 경량인 점, 환경변동에 좌우되지 않는 점 등의 특징이 있고 산업용으로 간단한 물체인식 선별에 초음파 센서를 이용하는 것이 가능하다.

## 2. 이론적 고찰

### 2-1. 공중초음파의 기본적 성질

공기의 음파에 대한 특성은 액체나 고체의 경우와 많이 다르고, 음파를 계측수단으로 하는 경우 많은 제약이 되고 있다. 예를 들면 1MHz 초음파(공기중의 파장 0.34mm)의 감쇠율은 12dB/cm(수중은 0.002

dB/cm)이고, 로봇등의 작업공간을 생각해 볼 때 거의 사용할 수가 없다.

따라서 공중초음파는 통상 200KHz가 실제적 상한이 되고 있다. 또 음향 임피던스는 공기와 물의 경우를 비교해 볼때 물의 경우가 약 3,500배 정도로 크기 때문이다. 공중초음파 센서는 압전소자를 이용한 형이 대부분으로 공진주파수는 보통 10~40KHz인 것이 많다.

본 실험에 사용된 공중초음파 센서는 압전소자형식의 세라믹 마이크로폰으로 주파수 40KHz 6개, 1MHz 2개, 2MHz 4개를 사용했으며 그 사양은 표 1과 같다.

Table. 1 Specification of probes

SENSOR TYPE	FREQUENCY (KHz)
EFR-OUB 40 K 2	40
EFR-RUB 40 K 2	40
EFR-OWB 40 K 2	40
EFR-RWB 40 K 2	40
EFR-OUB 40 K 22	40
EFR-RUB 40 K 22	40
USP-A 400 T	1000
USP-A 400 R	1000
ULTRAN KG 100-1 91531	1000
ULTRAN KG 100-1 91532	1000
ULTRAN KG 100-1 91538	2000
ULTRAN KG 100-1 91539	2000

### 2-2. 초음파 펄스에 의한 반사파의 형성

반사파는 대상물에 도달한 음파가 대상물의 각 점에서 반사하고 그것들의 중합의 결과로 얻어진다고 생각될 수 있다. 음파에서 본 대상물의 투영면적을 거리 r의 함수 W(r)로 표시하면 음원에 되돌아 오는 반사파의 음압 P(t)는 식(1)로 표시될 수 있다.

$$P(t) \propto \int_0^{\infty} F(t, r) \frac{dW(r)}{dr} \omega dr \dots\dots\dots (1)$$

$$F(t, r) = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{u(\omega t - 2kr)}{(2\pi r)^2} \right] \right\}$$

u( ) : 음원의 체적진동속도    c : 음속  
 ω    : 각진동수                    ρ : 밀도  
 k    : w/c                            r : 거리

$$dW(r)/dr = \begin{cases} 0 & (r < r_0) \\ K = \text{정수} & (r_0 \leq r \leq r_1) \dots\dots\dots (3) \\ 0 & (r > r_1) \end{cases}$$

이와같은 해석은 Freedman이<sup>2)</sup> 행한 것으로 dW(r)/dr은 불연속의 크기에 비례하여 반사파가 형성된다는 것을 나타내고 있다. 여기서 간단한 대상 물체의 형상으로서 평면(벽)과 직육면체에 대해 생각해 보면 평면은 음원의 진행방향에 수직하게 위치하고, 직육면체는 저면의 변을 45° 경사진 방향으로 놓는다. 음원에서 본 투영면적 W(r)은 그림 1)에 나타낸 것과 같이 평면은 Step형이 되고 직육면체는 Ramp형으로 변화한다.

이 된다. 따라서 음압 P(t)는 평면의 경우

$$P(t) \propto \int_0^{\infty} F(t, r) \cdot s\delta(r_0)dr = S \cdot F(t, r_0) \dots (4)$$

직육면체의 경우

$$P(t) \propto \int_{r_0}^{r_1} F(t, r) \cdot K \cdot dr = K \int_{r_0}^{r_1} F(t, r) dr \dots\dots\dots (5)$$

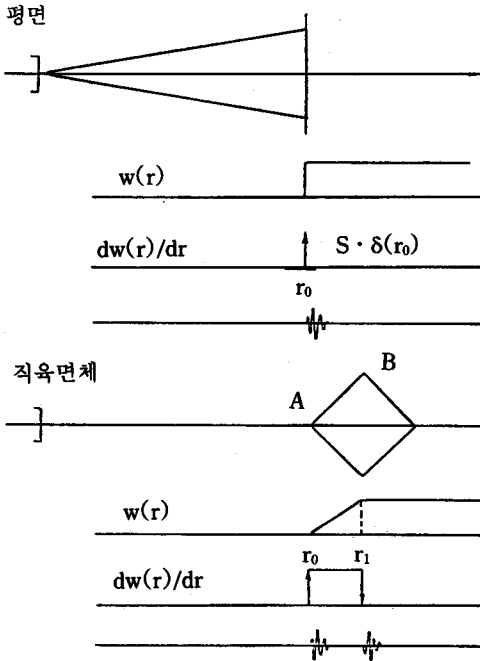


Fig. 1 Formation of reflection wave.

각각의 dW(r)/dr을 구해보면 평면의 경우

$$dW(r)/dr = s \cdot \delta(r_0) \dots\dots\dots (2)$$

s는 정수

직육면체의 경우

로 된다.

식(5)를 보면 직육면체로부터의 반사파는 평면반사파를 적분한 형이 되고 펄스파형이 그림 2)와 같으면, 이것을 적분을 하게 되면, 거리 r0와, r1에 상당하는 장소, 다시말해 변A와 변B로부터 반사파가 얻어진다.

또 변B)에서의 반사는 변A에서 반사가 반전된 것을 얻는다.

그림 3)은 실측파형이고 식 4), 5)의 내용과 잘 일치한다. 직방체 변에서의 반사파형은 서로 다르며 이것이 대상물형상의 판별에 이용 가능하다.

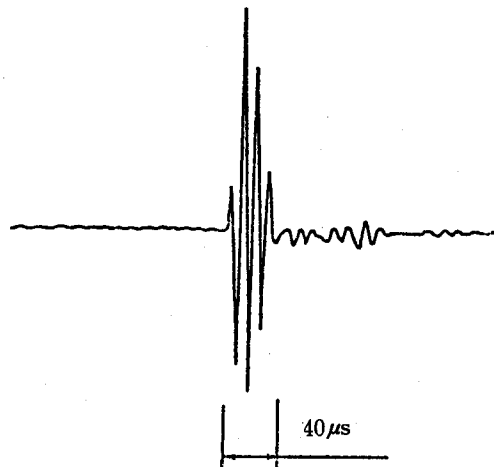


Fig. 2 Pulse wave form.

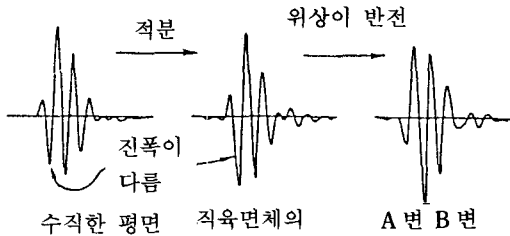


Fig. 3 Measured waveform of reflection wave.

2-3. 원주 및 구로부터의 변화

원주나 구로부터의 반사강도는 반경이나 거리와의 사이에 표 2와 같은 관계가 있다.<sup>10)</sup>

실제 센서로부터 100-400mm의 범위에서, 여러 직경의 원주나, 구에 대한 반사파의 강도를 측정한 결과 표 2의 관계식과 일치함을 확인하였다.

따라서 대상물이 이미 알고있는 원주나 구이면, 거리와 반사 강도로 부터 그 직경을 추정하는 것이 가능하다. 표 2의 관계로 부터 K1, K2를 정수라 하면 반경 a는

$$a = K1 \cdot P^2 \cdot X^3 \quad (\text{원주}) \dots\dots\dots (6)$$

$$a = K2 \cdot P \cdot X^2 \quad (\text{구}) \dots\dots\dots (7)$$

로부터 구해진다.

실험에 의하면 원주의 직경 추정오차는 약 10% 정도로 그다지 좋지 않다. 이것은 식(6)에서 같이 측정치의 2승 또는 3승의 항을 포함하기 때문이라 생각한다.

Table. 2 Relationship between object and echo amplitude.

형상	반사파의 강도	조건
평면	$P \propto \frac{1}{X}$	
원주	$P \propto \frac{\sqrt{a}}{X^{1.5}}$	$a \geq 0.1 \lambda$
구	$P \propto \frac{a}{X^2}$	$(2b/\sqrt{\lambda x}) > 4$ $(2\pi x/\lambda) > 1$

P : 반사강도 x : 물체까지의 거리 a : 반경  
b : 원주의 높이 λ : 파장

3. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 재원은 다음과 같다.

- 1) Ultrasonic Flaw Detector : UT 2000(HITACHI)
- 2) Digital Oscilloscope : TEKTRONIX-2430
- 3) Ultrasonic Pre-Amp : M 3010-2(HITACHI)
- 4) Function Generator : FG-141 (NF)
- 5) Computer : PC-9801 VM(NEC)
- 6) Printer : PC-PR 20KL(NEC)
- 7) Ultrasonic Sensor : Table 1
- 8) X Y X Table : Range 500mm

사진 1) 은 실험장치, 사진 2) 는 공중초음파 센서의 특성과 형상 인식시험에 사용된 초음파센서, XYZ Table, Block, Acryl plate, 회전주사장치등을 나타내며, 측정장치 Block Diagram은 그림 4) 와같이 구성하였다.

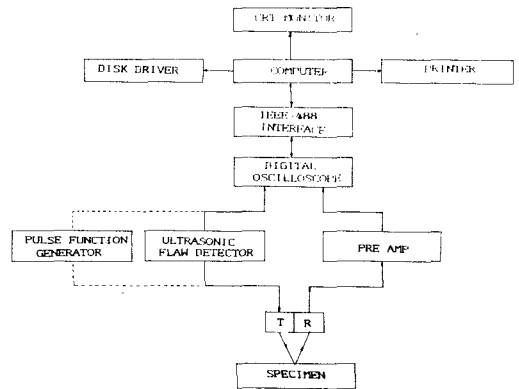


Fig. 4 Schematic diagram of measuring and analysis system.

4. 초음파 센서에 의한 거리 및 형상 인식 실험

4-1. 공중초음파 센서의 특성시험

사진 2)에서 Probe형식 (EFR-OUB 40K2, EFR-

RUB 40K2)의 초음파 센서를 XYZ Table에 송수신 센서를 장치하고 송신 Probe에 Probe 공진 주파수의 연속파를 인가시켜 음장특성과 거리진폭특성을 측정하였다. 인가된 주파수는 40KHz이다.

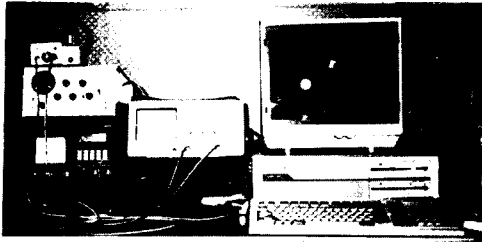


Photo. 1 Experimental apparatus

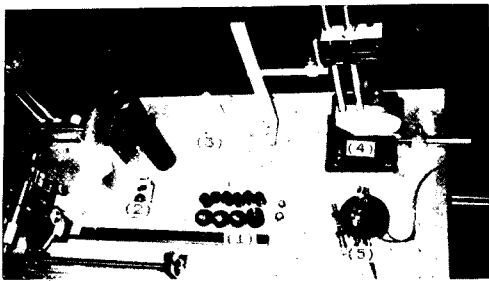


Photo. 2 : (1) Ultrasonic sensor  
(2) Acryl plate  
(3) Polystyrol block  
(4) X Y Z Table  
(5) Rotating scanning apparatus

4-2. 형상인식 시험

4-2-1. 거리 측정

초음파 센서에 의한 물체까지의 거리측정을 음의 전파시간  $Tr$ 로부터  $r=C.Tr/2$ 에 의해 구해진다.

$Tr$ : 왕복시간  $r$ : 거리  $c$ : 음속

전파시간의 측정은 종래에는 진폭이 적당한 문턱값(Threshold)을 넘는 순간까지의 시간에 의하지만 이 측정된 시간은 수신파의 진폭에 따라 변동하여 거리를 정확히 측정하는 것이 어려웠다.

여기서는 수신파의 진폭 특성은 대상물체의 형상에 관계없이 일정하다는 것을 이용하여 그림 5)와 같이

O-Cross인 점을 구하는 것으로부터 진폭의 영향을 최대한 적게 하고 있다.

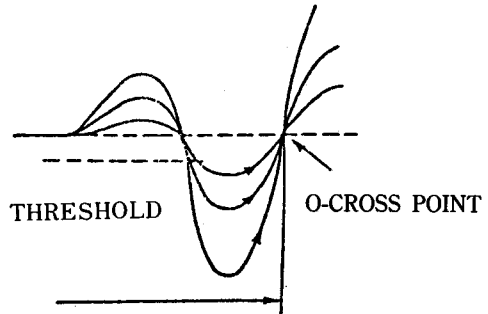


Fig. 5 Measurement of signal arrival time by O-cross point.

4-2-2. 주사에 의한 물체의 인식

주사에 의한 형상인식은 그림 6)과 같이 대상 물체를 배치하고 센서를 회전 주사하여 반사파의 강도, 파형 및 거리를 조사하는 것에 의한다.

4-2-3. 주파수 해석을 이용한 형상인식

그림 6)과 같이 초음파 빔을 회전 주사하였을 때 대상물체에서 반사된 반사파는 수신 Probe에 수신 되고 수신된 반사파는 Pre-Amp에서 증폭되어 Digital Oscilloscope에 입력되고 FFT-Spectrum의 Algorithm에 의해 데이터를 해석하였다.

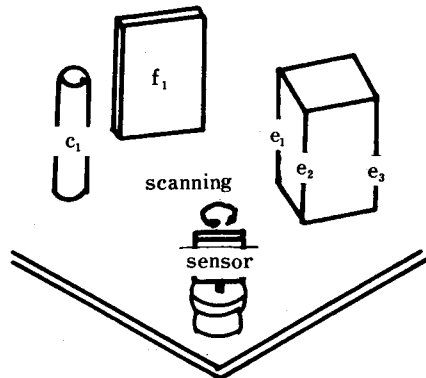


Fig. 6 Arrangement of sensor and objects.

5. 실험결과 및 고찰

그림 7) 은 초음파 센서 EFR-RUB 40K2, EFR-OUB 40K2를 사용하여 측정한 수신신호의 거리 진폭특성이다. 그림에서 횡축은 송수신 Probe의 거리, 종축은 수신신호의 진폭을 표시하며 거리가 증가함에 따라서 진폭은 진동하면서 감쇠 하는 것을 알 수 있다.

그 이유는 수신파의 간섭에 의한다고 생각한다. 그림 8), 9)는 그림 6)과 같이 대상물을 배치하고 센서를 회전 주사하였을 때 각 방향으로 부터의 반사파의 강도, 파형 및 거리에 의해 형상인식한 예이며 반사 강도의 분포를 그림 8)에 나타내고 있다.

그림에서 반사강도가 극대가 되는 방위는 극대값 부근의 점을 2차곡선으로 보간하는 것에 의해 추정하며, 추정정도는 반사강도에 따르는 것으로 0.5~2°였다. 방위각 0.1°의 오차는 거리 300mm에 약 0.5mm의 오차에 상당하고 거리방향정도 1mm보다 나쁘다.

그림 10)는 조금더 복잡한 형상을 인식한 예이다. 이와같이 Pulse-echo법과 회전주사의 조합 만으로 반사파의 진폭과 파형을 분석하는 것으로부터의 형상 인식이 가능함을 알 수 있다. 문제는 복잡한 형상 또는 여러개의 대상물이 존재하는 경우 간접적인 반사에 의해 "허상"이 검출되는 것과 센서와 대상물 사이에 2왕복 이상 반사하는 경우에 오인식의 요인이 되고 있다.

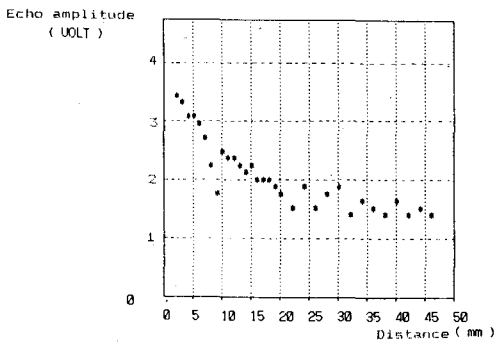


Fig. 7 Characteristics of distance and echo amplitude of ultrasonic sensor.

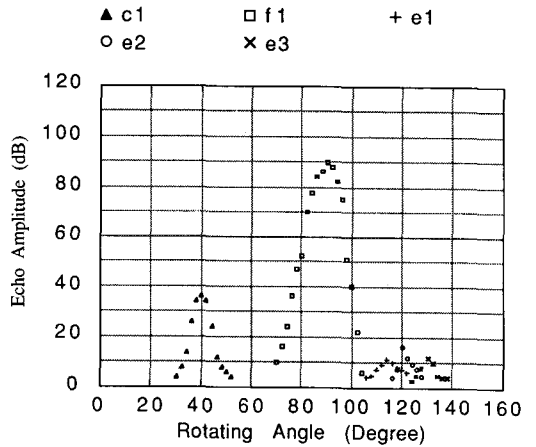


Fig. 8 Distribution of echo amplitude.

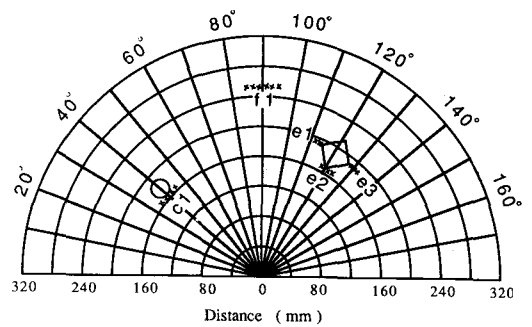


Fig. 9 Example of objects recognition.

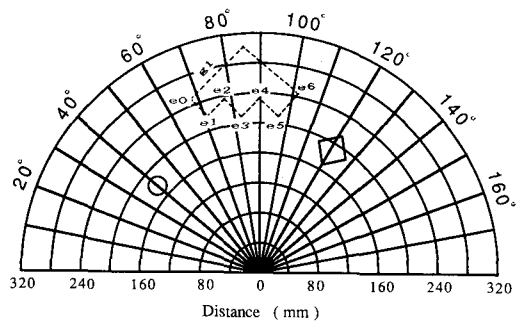


Fig. 10 Example of recognition of more complex objects.

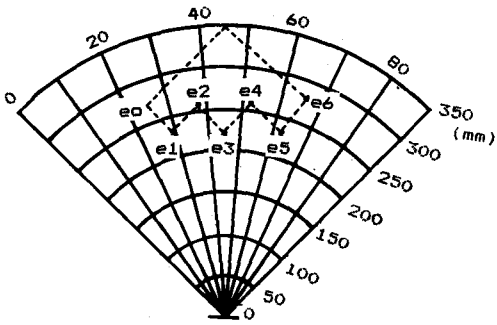


Fig. 10 Example of recognition of more complex objects.

그림 11)~13)는 FFT-Spectrum의 Algorithm에 의한 반사 에코 패턴과 Power Spectrum을 나타낸 것이며 그림 11과 13은 직육면체 모서리 부분의 반사 에코 패턴과 Power Spectrum을 나타낸 것으로 Power Spectrum이 두개의 선 Spectrum을 가지며, 그림 12)는 직육면체 평면부의 경우로서 한개의 선 Spectrum을 나타낼 수 있다.

이것으로부터 직육면체 모서리 부분과 평면부의 Power Spectrum으로도 형상 인식이 가능함을 알 수 있다.

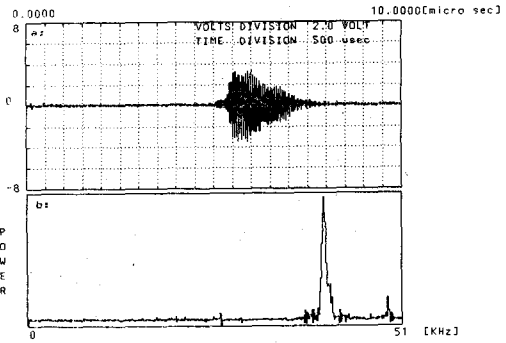


Fig. 12 Signal analysis of plane section (a : signal waveform b : FFT)

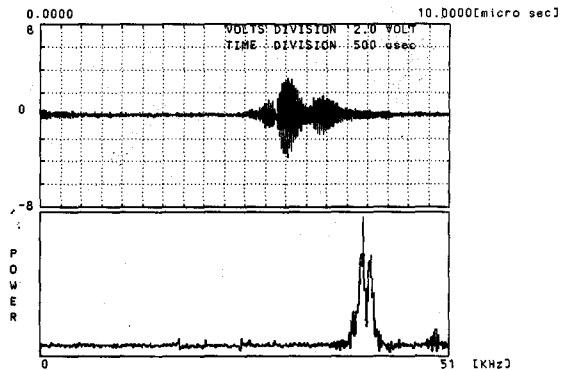


Fig. 13 Signal analysis of corner section (a : signal waveform b : FFT)

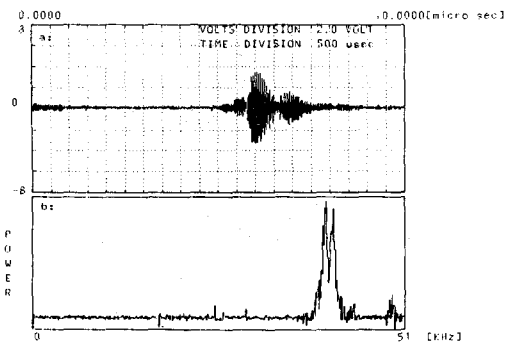


Fig. 11 Signal analysis of corner section (a : signal waveform b : FFT)

## 6. 결 론

공중초음파 센서를 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 센서에서 대상물체까지 전파 시간의 측정에 의해 대상물체의 특징점의 정보를 거리와 방위각의 측정으로부터 알고 간단한 형상물체의 형상, 위치, 자세 등을 인식하는 것이 가능함을 알 수 있었다.
2. 센서를 회전주사하고 진폭이 최대가 되는 각도로부터 물체의 방위각을 구하였으며, 그정도(精度)는 0.5-2° 였다.

3. 대상물체까지의 거리는 전파시간으로부터 측정하고 그 전파시간을 수신파의 O-cross점으로 산출하는 새로운 방법에 의해 거리정도(精度) 1mm을 얻는 것이 가능했다.
4. 직육면체의 경우 대상물체의 반사에코패턴과 그 주파수분포로도 형상인식이 가능함을 알 수 있다.

#### Reference

1. 油田信一, 金山 裕, 飯島純一, 1981 “移動ロボットのための超音波センサ”, 바이오메카니즘學會誌 5.3
2. A Freedman, 1962, “A Mechanism of Acoustic Echo Formation”, ACUSTICA VOL. 12
3. 村 他, “マニピュレタ用超音波センサを用いた3次元物體の形状認識システム”, 第2回 ロボット學術講演論文集 pp. 83~84.
4. 佐佐木 他, 1985, “ロボットのための高精度超音波センサの開発研究” 精密機械, 51卷 6號.
5. 佐佐木 他, 1986, “超音波センサを應用したロボットの物體認識と制御に関する研究”, 精密工學會誌, 52卷 3號.
6. J, J. G. McCue and A. Bertolini. 1964 “A portable Receiver for ultrasonic waves in Air” IEEE Frans. Sonic and Ultrasonics, 41.
7. L. Kay, 1985 “Airborne Ultrasonic Imaging of a Robot Workspace” Sensor Review. Jan. pp. 8~12.
8. 小森谷 他, “移動機械制御のための超音波による障害物の検出法” 第26回 學術講演論文集 pp. 187-188.
9. 片岡照榮 他, “センサハンドブック” pp. 106-113.
10. 超音波探傷法 丸善 1956.