

수중 거리 측정을 위한 초음파 센서의 개발

김치효* · 김태성* · 정준하** · 이진형** · † 이민기

*창원대학교 메카트로닉스연구원, **창원대학교 대학원, † 창원대학교 교수

장인성*** · 신창주***

***한국해양과학기술원

Development of Ultrasonic Sensor to Measure the Distance in Underwater

Chi-Hyo Kim · Tae-Sung Kim* · Jun-Ha Jung** · Jin-Hyung Lee** · † Min-Ki Lee*

**Research institutes of Mechatronics Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea*

***Graduate school of Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea*

† Department of Control and Instrumentation Eng., Changwon National University, Kyungnam 641-773, Korea

*In-Sung Jang*** · Chang-joo Shin****

****Korea Institute of Ocean Science & Technology*

요 약 : 본 연구는 수중 거리 측정을 위한 초음파 센서를 개발한다. 초음파 트랜스듀서는 음파를 발신하고 발신된 음파가 물체에 부딪혀 되돌아오는 반사파를 수신한다. 초음파 드라이버는 반사된 물체까지 거리 측정을 위해 음파의 비행시간을 검출해 음속을 곱한다. 본 연구에서는 비행시간을 검출하기 위해 임계값과 상호 상관 기법을 적용하고 그 결과를 보인다. 반사파가 노이즈에 감염되어 신호의 형태가 왜곡될 때 상호상관 기법은 기준 신호와 수신 신호의 유사성을 이용하여 비행시간을 검출한다. 기준 신호를 수중 환경에 따라 다르게 적용해 반사파와 유사성을 높여 센서의 성능을 향상시킨다. 논문에서는 초음파 센서 드라이버를 설명하고 실험환경에 따른 센서의 성능을 분석한다.

핵심용어 : 초음파 트랜스듀서, 반사파, 비행시간, 거리, 상호상관

ABSTRACT : *This research develops an ultrasonic sensor to measure the distance in underwater. The ultrasonic transducer transmits an acoustic signal to an object and receives the echo signal reflected from the object. The ultrasonic driver calculates a distance by multiplying the acoustic speed to the time of flight(TOF) which is the time necessary for the acoustic signal to travel from the transducer to the object. We apply a thresholding and a cross correlation methods to detect the TOF and show their results.*

When an echo pulse is corrupted with noise and its shape is distorted, the cross correlation method is used to find the TOF based on the maximum similarity between the reference and the delayed echo signals. The echoes used for the reference signal are achieved at the different environments, which improves the performance of the sensor. This paper describes the driver of the acoustic sensor and analyzes the performance of sensors in different measurement environments.

KEY WORDS : *ultrasonic transducer, echo signal, time of flight, distance, cross correlation*

1. 서 론

초음파 센서는 탁도가 높은 수중환경에서 거리를 측정하고

물체를 인식할 수 있어 ROV의 장애물 회피, 안내제어 등에 적용 된다(Sutton, 1979). 초음파 센서의 거리측정 원리는 음파가 발신기를 떠나 목표물에 반사되어 돌아오는 비행시간, Time of

† 교신저자, minkilee@changwon.ac.kr 055)213-3663

* 일반회원, chkim@changwon.ac.kr 010)6412-1390

** 일반회원, jung880716@naver.com 055)275-7553

*** 일반회원, isjang@kiost.ac 031)400-7810

Flight(TOF)에 기반을 두고 있다. 발신기로부터 목표물의 왕복 거리는 TOF에 음파속도를 곱한 것으로 음파속도가 거리측정에 주요한 요인이 된다(Krasilnikov, 1963).

에코신호는 간단한 임계 값 방법(Frederiksen. and Howard, 1974)으로 검출할 수 있는데 수신신호가 문턱 값을 넘으면 에코신호로 간주하고 발신과 수신사이의 시간지연을 찾아 TOF를 결정한다. 이 방법은 간단하지만 에코신호가 약하거나 노이즈로 오염되면 도달하는 시간을 찾기 어렵다(Sabatini, 2001). 또한, 밴드 폭이 낮을 경우 에코신호가 긴 상승 시간을 가져 오차가 발생하고, 실제로 에코는 지연시간을 지난 후 문턱 값을 넘어서게 된다.

위의 방법들은 에코신호가 도달한 시간을 찾는데 역점을 두고 있다. 따라서 신호를 샘플링하는 동안 도달한 첫 에코신호의 크기가 TOF를 결정하는 주요요인이 된다. Marioli et al.(1992)의 연구에 따르면 Cross Correlation(CC) 방법은 신호를 연속적으로 수집하고 발신신호와 에코신호를 CC해서 최대값을 가지는 시간을 찾는다. 최대값을 가지는 시간에서 두 신호가 가장 유사하다고 판단해 이를 에코신호가 지연한 시간으로 결정한다. 유사성을 찾는 방법으로 기준에코신호와 실제 반사된 에코신호를 CC하거나 각 Signal Envelope (SE)를 CC해 정밀도를 높인 경우도 있다(Ashraf. and Qayyum, 2011). 그러나 TOF가 샘플링 간격의 정수배로 나타나므로 샘플링 간격보다 높은 해상도를 가질 수 없다. 따라서 보간법을 이용해 더 정밀한 TOF를 구하거나 에코신호의 SE를 진폭, TOF, 트랜스듀서 변수가 포함된 비선형 함수로 가정하고 확장 칼만필터를 이용해 비선형 함수 속에 있는 TOF를 구하는 방법이 제시되었다(Angrisani et al., 2006).

본 연구는 초음파를 사석 고르기 장비의 레벨링 측정장치로 사용하고자 한다. 장비가 사석면을 평편하게 고를 때 장비 후미에 등 간격으로 초음파센서를 부착해 진행되는 레벨링 작업량과 작업품질 등을 분석하는데 사용하고자한다. 각 센서는 수직방향으로 초음파를 발사해 사석면에서 반사되는 에코파를 수신하여 TOF를 측정하고 높이를 계산한다.

본 논문은 개발된 초음파센서를 소개하고, Lock In Amplifier(LIA) 디지털 필터를 이용한 임계 값 방법을 기술한다. 또한, 환경에 따라 여러 기준신호를 취하고 에코신호와 CC하여 TOF를 정확히 찾는 방법을 제안한다.

2. 초음파 트랜스듀서 및 드라이버

초음파 센서는 Fig. 1과 같이 PZT(Piezoelectric), 매칭 레이어 및 백킹 레이어로 구성된다. PZT는 압전 세라믹으로 전기 에너지를 운동 에너지, 운동 에너지를 전기 에너지로 변환한다.

초음파가 목표물에 반사되어 트랜스듀서로 돌아오면 PZT가 진동하여 전기 에너지가 발생된다. 이 발생된 전기 에너지를 검출하면 초음파가 수중에서 비행한 시간, TOF를 알 수 있고 여기에 음파의 속도를 곱하면 트랜스듀서로부터 반사체까지의 왕복거리를 계산할 수 있다. 매칭 레이어는 초음파 센서와 매질과의 임피던스를 조절하여 초음파가 매질에 잘 전달 되도록 하고, 백킹 레이어는 PZT의 진동에 의해 큰 음압이 되도록 증폭하는 역할을 한다.

초음파 구동 드라이버는 Fig. 2와 같이 구성된다. 발신회로는 PZT를 진동시켜 초음파를 발신하도록 설계되어있다. 즉, CPU가 초음파 발신을 위한 Trigger Pulse를 생성하면 IFT(트랜스포머)가 PZT에 전압을 인가한다. PZT는 인가된 전압의 세기와 주파수로 진동하여 초음파를 발신한다.

수신회로는 에코 파에 의해 PZT가 진동할 때 이를 전기 에너지로 검출한다. 필터회로는 수중에서 발생하는 노이즈 신호를 차단하고, PZT의 공진주파수만 통과시킨다. 반사체의 재질에 따라 초음파가 약하게 반사될 경우 신호의 증폭이 필요하다. 신호증폭회로는 Op-Amp.를 이용하여 신호를 2단 증폭한다. 가변저항을 이용하여 신호의 증폭비를 가변적으로 변화할 수 있도록 하였다. 증폭된 에코신호는 ADC되어 CPU에 입력되고 CPU는 이를 이용하여 TOF계산을 위한 알고리즘을 수행한다.

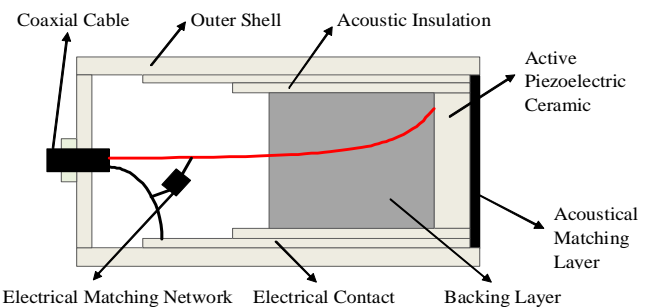


Fig. 1 Transducer of Ultrasonic sensor

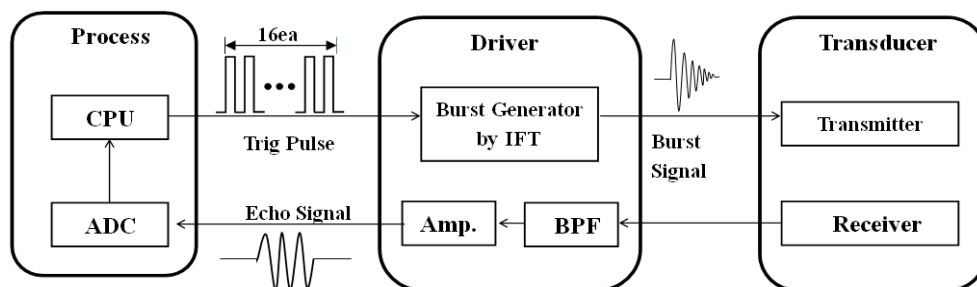


Fig. 2 Driver of Ultrasonic sensor

Table 1 Specification of Ultrasonic Driver

power	DC24V 15W
channel	16
process	TMS320F2812
transmitter freq.(max)	programable(400Khz)
filter center freq.(max)	adjustable by potentiometer(1Mhz)
amplifier	transistor & op-amp
amplifier ratio(max)	adjustable by potentiometer(50dB)

제작된 초음파 구동 드라이버의 사양은 Table 1과 같다. 송/수신 모듈이 앞면 6채널, 뒷면 10채널로 구성되어 총 16개의 초음파 센서를 구동할 수 있다. 드라이버는 각 초음파 센서의 수신 거리를 산출하여 RS232 통신으로 전송한다.

3. TOF 측정 기법

Marioli et al.(1992)의 연구에 따르면 펄스-에코 기술은 짧은 신호를 생성하고, 같은 트랜스듀서가 초음파를 발신 및 수신 하므로 간단히 적용해 볼 수 있는 방법이다. 초음파의 드라이버가 PZT를 진동해 발신신호

$$S(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

를 발생한다. 여기서, A 는 발신신호의 진폭이고, f 는 PZT의 공진 주파수이다. 발신신호는 수중 매체를 지나 목표물에 부딪혀 반사되어 트랜스듀서에 도착한다. 수중 매체는 신호를 감쇄시키고, 노이즈를 포함시켜 아래와 같은 에코신호를 얻게 된다.

$$Y(t) = \alpha(t) S(t-D) + n(t) \quad (2)$$

여기서, $\alpha(t)$ 는 SE로 반사파의 감쇄정도를 나타내며, $n(t)$ 는 에코신호에 포함된 노이즈, D 는 시간지연으로 TOF를 나타낸다.

에코신호는 가장 간단한 임계 값 방법으로 검출할 수 있다 (Frederiksen. and Howard, 1974). 즉, 수신신호가 설정한 문턱 값을 넘으면 에코신호로 간주하고 발신과 수신사이의 샘플링 수를 찾아 샘플링 간격을 곱하면 D 를 결정할 수 있다. 그러나 실험에서는 해저 면이 진흙 등으로 반사파 신호가 미약하고, 수중 부유물에 의해 신호가 크게 감쇄되어 에코신호를 원활히 검출 할 수 없다. 노이즈로 오염된 미약한 에코신호를 검출하기 위한 LIA 필터링 방법을 적용한다.

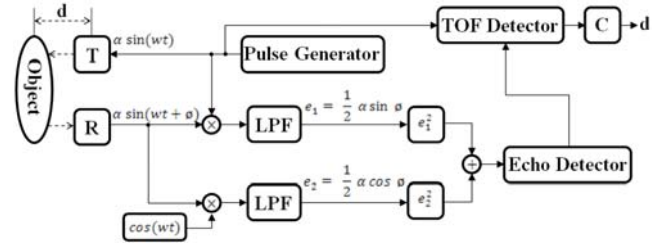


Fig. 3 Lock in amplifier to detect the echo signals

LIA는 특정 주파수만 통과시켜 노이즈에 묻힌 미소 신호를 검출하는 방법으로 Fig. 3과 같다. 에코신호는 발신신호와 주파수는 같고, 진폭은 α 로 줄어들고, 위상차가 ϕ 인 함수 $\alpha \sin(\omega t + \phi)$ 로 나타낸다. 공진주파수 이외의 신호를 제거하기 위해 발신신호와 위상차가 90° 인 $\cos(\omega t)$ 호를 각각 곱하고 아래와 같은 2차 디지털 Low Pass Filter(LPF)를 적용한다.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3)$$

필터를 거친 신호를 제공하여 더하면 주파수 성분이 없는 $a^2/4$ 를 얻게 된다. 이 신호를 Echo detector가 검출하여 TOF detector에 보내면 TOF detector는 발신신호와 에코신호 사이의 시간지연을 구해 TOF를 결정한다. 이 방법은 디지털 신호 처리로 발신주파수 이외의 신호를 제거하고 에코신호가 도달한 시간을 찾는 데 역점을 두고 있다. 따라서 신호를 샘플링하는 동안 도달한 첫 에코신호의 크기가 TOF를 결정하는데 주요요인이 된다. 반면, 신호의 크기에만 의존하지 않고 신호의 형태를 비교해 에코가 도달한 시간을 결정하는 CC 방법이 있다(Marioli et al., 1992; Ashraf. and Qayyum, 2011). 이 방법은 신호를 취득해 에코신호와 발신신호의 유사성을 비교해 TOF를 결정한다.

음파가 지나가는 수중매개체는 주파수가 증가할수록 신호를 감쇄시키며 반사파의 파장을 왜곡시킨다. 그러나 음파가 좁은 범위 내에서 일정한 값 α 로 감쇄되므로 디지털 측정시스템에서 발신신호 ($X(nT)$)와 수신신호 ($Y(nT)$)를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$X(nT) = S(nT) + v(nT) \quad (4a)$$

$$Y(nT) = \alpha S(nT) + n(nT) \quad (4b)$$

여기서, $v(nT)$ 는 이상적인 모델과 불일치한 것을 고려한 함수이고 $v(nT)$ 와 $n(nT)$ 의 평균값은 0이고, 서로 관계가 없는 랜덤 프로세스이다. 발신과 수신신호의 CC를 구하면

$$\gamma_{XY}(kT) = \frac{\sum_{i=1}^N [(X(iT) - \hat{X})^* (Y(iT+kT) - \hat{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(X(iT) - \hat{X})^2]} \sqrt{\sum_{i=1}^N [(Y(iT+kT) - \hat{Y})^2]}} \quad (5)$$

이고 통계적 기대치는

$$E[\gamma_{XY}(kT)] = \alpha \gamma_{XY}(\tau - D)|_{\tau=kT} \quad (6)$$

이다. 여기서, $\gamma_{XY}(\tau)$ 는 연속신호 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 CC으로 $\tau = D$ 일 때 가장 큰 값을 가진다. 즉, Y 가 D 만큼 지연되었을 때 X 와 유사성이 가장 높으므로 X 의 에코신호로 간주할 수 있다. 따라서 시간지연이 샘플링 간격의 정수배이고, k_D 가 $E = [\gamma_{TE}(kT)]$ 의 최대값을 가지는 인덱스라면 시간지연은 $D = k_D T$ 이다. 그러나 시간지연이 정수배가 아니면

$$D = (k_D + \epsilon) T, |\epsilon| \leq 0.5 \quad (7)$$

으로 샘플링 간격보다 더 높은 TOF를 구할 수 없다. 샘플링 간격보다 더 높은 해상도를 얻기 위해 보간법 또는 확장 칼만 필터 법등을 적용할 수 있다(Angrisani et al., 2006).

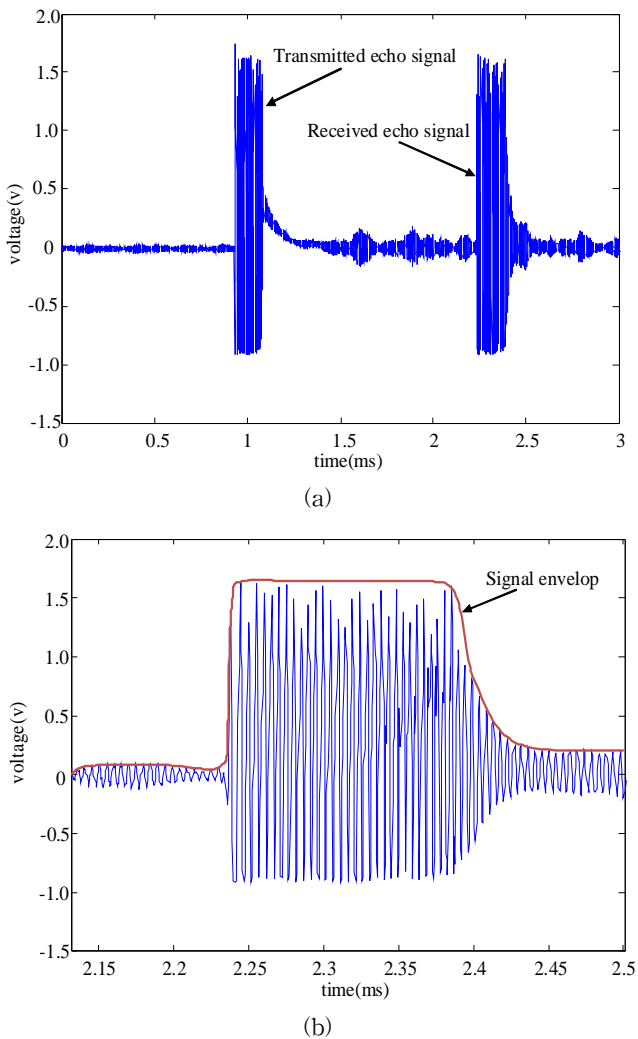


Fig. 4 Raw data of acoustic signal (a) profile (b) echo

본 연구는 초음파 센서를 해저 고르기 장비의 레벨링 측정 장치로 사용하고자 한다. 샘플링 시간은 $2\mu\text{s}$ 으로 음속이 1400m/sec 일 때 해상도는 1.4mm 이어서 항만공사 레벨링 측정 센서로는 충분한 해상도를 가지므로 TOF는 샘플링 간격의 정수배로 나타낸다.

4. TOF 측정 실험

초음파 센서의 성능을 실험하기 위해 실험수조의 바닥에 초음파를 발사해 Fig. 4(a)와 같이 신호를 받았다. 첫 번째 신호는 발신신호이고, 두 번째 신호는 수신된 에코신호이다. 에코 신호는 잡음이 거의 없는 강한 신호로 도착한 시점을 확대하면 Fig. 4(b)와 같다.

이 신호를 LIA와 CC으로 디지털 신호 처리를 하면 각각 Fig. 5(a), 5(b)와 같다. LIA는 노이즈를 제거하고 200kHz 의 주파수만 검출해 증폭한 결과로 2.24ms 에서 문턱 값을 넘는다. CC의 결과도 2.24ms 에서 최대값에 가지므로 에코신호가 2.24ms 에서 도착했음을 알 수 있다. 따라서 TOF는 도착시간에서 발신시간을 뺀 값이다.

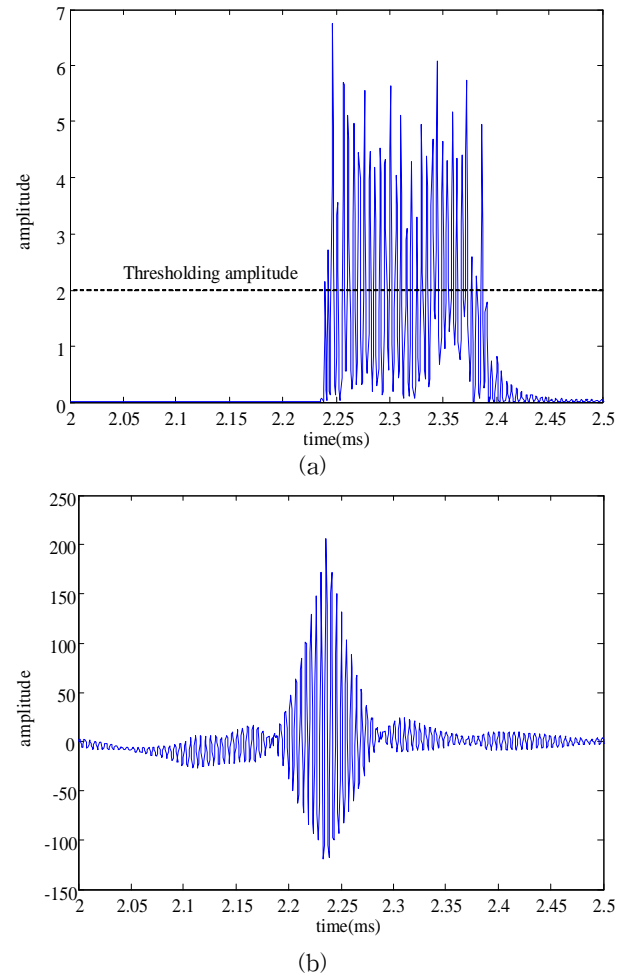


Fig. 5 Digital processing results of echo (a) by LIA (b) by cross correlation

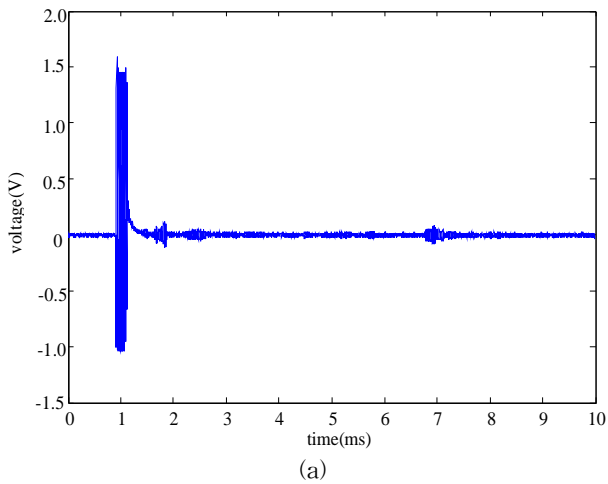
위와 같이 감도가 좋은 신호는 임계 값 방법으로도 에코를 검출할 수 있다. 그러나 실험에서는 에코신호가 약해 문턱 값을 넘지 못하는 경우가 많다. Fig. 6(a)는 탁도가 높은 진해항 인근에서 초음파를 해저 면에 발사해 수신한 결과이다. 초음파가 0.7ms 근방에서 발사되었으나 에코신호가 약해 노이즈와 비슷한 감도로 7ms 근방에서 수신되었다. LIA를 적용하면 Fig. 6(b)과 같이 에코신호가 나타나 6.77ms에서 도착했음을 알 수 있다. 그러나 설정한 문턱 값을 넘어서지 못해 임계 값 방법으로 TOF를 찾을 수 없다.

발신신호와 에코신호를 CC하면 Fig. 7(a)과 같이 최대값은 6.9ms 근방에서 나타나 에코신호가 도착한 시간이 LIA와 다르다. 이는 발신파와 에코파의 파형 차이에서 온 것으로 탁도가 높은 수중에서 음파의 파형이 왜곡되기 때문이다. 사실, 전기적 신호가 발신기에 적용되어 음파로 변환되고, 에코음파가 다시 전기적 신호로 돌아오는 과정에서 발신기와 수신기회로의 전기적 임피던스와 트랜스듀서의 밴드 폭에 의해 발신 파형과 에코 파형 사이에 차이가 있다. 이런 차이를 감안해 기준 신호를 현재 환경에 가장 유사한 신호를 택해야 한다. 실험역

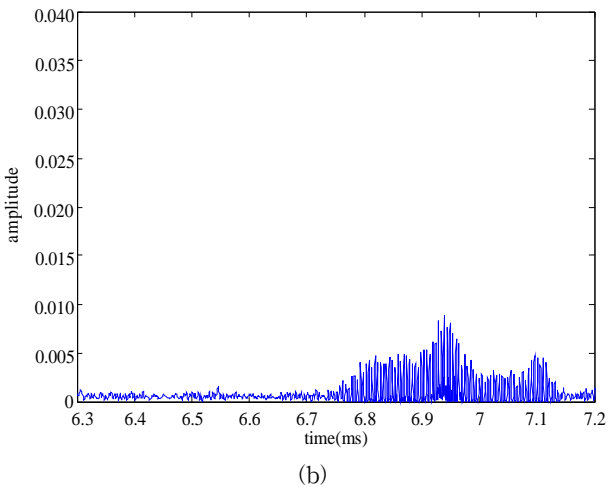
에서 반사된 에코파를 기준 신호로 택하고 지금의 에코신호와 CC하면 Fig. 7(b)과 같다. 두 신호의 유사성이 높아 피크 값은 6.77ms에서 나타나며 LIA에서 나타난 에코 도착시간과 일치한다. 따라서 실제 측정을 시작하기 전에 초기화 작업으로 트랜스듀서, 측정환경에 따라 에코신호를 받아 기준신호로 사용해야 한다.

수조에서 에코신호를 받아 기준신호로 사용하고, CC 방법을 적용해 수조바닥의 깊이를 측정했다. Fig. 8은 트랜스듀서 4개를 200mm 간격으로 설치하고 바닥에 10회 초음파를 발사해 거리를 측정결과이다. 트랜스듀서 T1는 수직으로 바닥에 음파를 발사해 수직으로 수신한 거리이고, T2-T4는 T1이 발사한 음파가 비스듬히 바닥에 부딪혀 반사된 최단거리이다. 수직으로 발수신하는 T1의 거리편차는 3mm 이내이며 경사각으로 수신하는 T2-T4의 편차도 10mm 이내이다.

이들 거리로 바닥면을 모델링하면 10mm 이내의 편차를 가져 고르기 장비의 사석 레벨링 센서로 충분한 정밀도를 가짐을 알 수 있다.

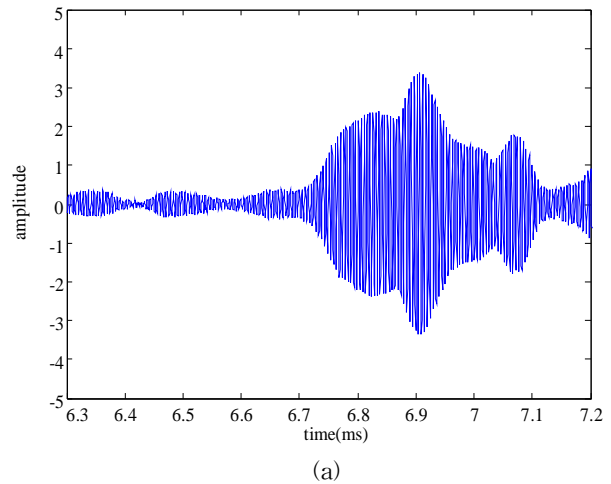


(a)

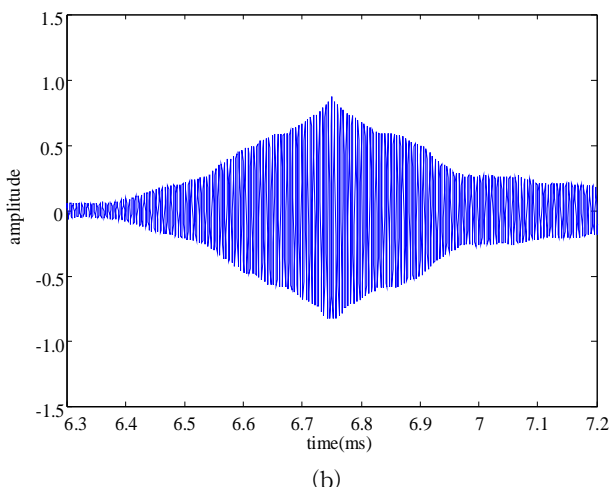


(b)

Fig. 6 Transmitted signal and echo reflected from gravel and sand in turbid water (a) raw data (b) signal filtered by LIA



(a)



(b)

Fig. 7 Result of cross correlation of (a) transmitted signal and echo (b) reference echo and current echo

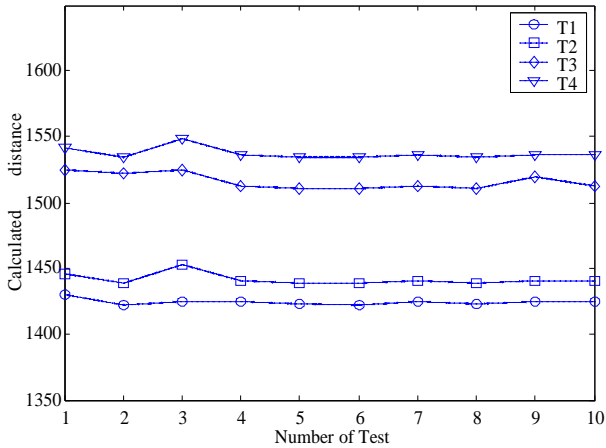


Fig. 8 Distance measured by transducers from T1 to T4 when T1 is transmitter/receiver and T2-T4 are receivers

5. 결론

사석 고르기 장비의 레벨링 측정센서로 초음파 센서를 개발했다. TOF를 검출하는 방법으로 LIA 필터를 이용한 임계값 방법과 CC방법을 적용했다. 공진주파수만 통과시켜 디지털 처리하는 LIA 방법은 노이즈에 묻힌 에코를 검출할 수 있으나 첫 에코신호의 강도가 TOF를 결정하는 주요요인이 되었다. 신호의 크기보다 신호의 형태를 비교해 에코신호가 도착한 시간을 찾는 CC방법은 비교 대상을 다양화함으로써 성능을 높일 수 있었다.

에코신호의 감도가 높은 경우 두 방법 모두 같은 TOF를 얻을 수 있으나 에코신호가 미약하고 파형이 왜곡된 경우 문턱 값을 넘지 못해 임계 값 방법으로는 TOF를 얻을 수 없었다. 신호의 유사성을 높이기 위해 같은 환경에서 수신한 에코파를 기준 신호로 사용해 에코파와 CC한 결과 정확한 TOF를 얻을 수 있었다.

사석 고르기 레벨링 센서로써 성능을 점검하기 위해 4개의 트랜스듀서를 등 간격으로 일직선으로 나열하고, 첫 번째 트랜스듀서는 발신 및 수신을 하고 나머지 트랜스듀서는 수신만 해 바닥에 비스듬히 반사되는 신호를 받게 했다. 각 트랜스듀서가 측정한 거리를 최단거리로 가정하고, 4개의 거리정보로부터 초음파가 반사된 바닥을 모델링한 결과 10mm의 오차를 가졌다. 이는 사석 고르기 작업으로써는 충분한 정밀도로 사석 레벨링 센서로 적용될 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단항만건설기술개발사업인 ‘항만수중공사용 무인다목적 기계화 시공 장비 개발’ 연구 과제로 수행된 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Sutton, J. L.(1979), “Under Water Acoustic Imaging”, Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 554-566.
- [2] Krasilnikov, V. A.(1963), “Sound and Ultrasound Waves”, 3rd Edition, Washington.
- [3] Frederiksen, T. M. and Howard, W. H.(1974), “A Single-chip Monolithic Sonar System”, IEEE J. Solid-state Circuits, Vol. SC-9, pp. 394-403.
- [4] Sabatini, A. M.(2001), “A Digital-signal-processing Technique for Ultrasonic Signal Modeling and Classification”, IEEE Trans Instrum Meas, Vol. 50, No. 1, pp. 15 - 21.
- [5] Marioli, D., Narduzzi, C., Offelli, C., Petri, D., Sardini, E. and Taroni, A.(1992), “Digital Time-of-flight Measurement for Ultrasonic Sensors”, IEEE Trans Instrument and Measurement, Vol. 41, No. 1, pp. 93-97.
- [6] Ashraf, M. and Qayyum, H.(2011), “High Accuracy Time of Flight Measurement Using Digital Signal Processing Techniques for Subsea Applications”, Journal of Signal and Information Processing, pp. 330-335.
- [7] Angrisani, L., Baccigalupi, A. and Moriello, R. S. L.(2006), “A Measurement Method Based on Kalman Filtering for Ultrasonic Time-of-flight Estimation”, IEEE Trans Instrument and Measurement, Vol. 55, No. 2, pp. 442-448.