

논문 2010-47SP-5-27

# 주파수 해상도 증가를 위해 Zoom FFT 기법을 사용한 ADCP 음향신호처리

(Acoustic Signal Processing for ADCP using Zoom FFT Method to  
increase Frequency Resolution)

한 진 현\*, 심 태 보\*\*

(JinHyun Han and Taebo Shim)

## 요 약

본 논문에서는 수심이 낮은 곳에서도 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 사용할 수 있도록 주파수 해상도를 높이는 음향신호처리 기법을 제안하였다. ADCP는 유속을 측정하는 장치이다. 일반적으로 바다에서 사용하는 ADCP는 수심의 제약이 없어서 300K Hz 이하의 중심주파수를 사용할 수 있으나 하천의 경우는 가뭄이 길어지면 수심이 30cm 이하도 나타나기 때문에 사용하기 힘들다. 따라서 기존의 신호처리 방법으로는 수심이 낮은 하천에서 유속을 측정하기 매우 어렵다. 본 연구에서는 낮은 하천의 수심을 고려하여 Zoom FFT 방법을 이용하여 유속을 추정하는 연구를 시뮬레이션해본 결과 이론적으로는 약  $\pm 62$  cm/s 정도의 오차를 줄일 수 있었고, 실험적으로는 약  $\pm 93$  cm/s 정도의 오차가 줄어들었다. 실험에서도 기존의 알고리즘으로 추정이 안 되었던 것이, 유속 20 cm/s 이상에서는 유속 추정이 가능하였다.

## Abstract

This paper proposed the acoustic signal processing techniques, which are applicable even in the shallow river, and will enhance the frequency resolution of the ADCP (Acoustic Doppler Current profiler). ADCP is a device that measures the velocity of a moving fluid. ADCP, in general, can be operated at  $\sim 300$  KHz of center frequency due to no depth limit in the sea. However, it can hardly be used due to water depth of 30cm or shallower during the dry season in the river. Therefore, existing signal processing methods are not suitable to use in the shallow river. We are proposing an alternative acoustic signal processing method using Zoom FFT. Simulation results show that errors are reduced  $\pm 62$  cm/s in theory, and  $\pm 93$  cm/s in the experiment. The existing algorithm could not estimate the current speed at the shallow river below 30 cm, but proposed algorithm estimated the current speed that was faster than 20 cm/s at the shallow river below 30 cm.

**Keywords :** ADCP, Zoom FFT, 신호처리, 음향, 주파수 해상도

## I. 서 론

현재 초음파를 이용한 유속측정기술은 실생활에서 널리 적용될 정도로 기술이 발달하였다. 초음파 유속측정기술이 많이 쓰이는 이유는 유체의 흐름을 방해하지 않고, 선형응답성을 가지며 거의 모든 유체에 적용이

가능하기 때문이다. 현재 가장 많이 사용되는 유속측정 방식에는 초음파 신호를 송신할 때 유체 내의 기포나 입자에 의해 발생한 신호를 해석하는 도플러 방식이다. 도플러 방식 중에서도 CW(Continuous Wave)를 이용한 연속파 도플러(CW Doppler)보다는 짧은 펄스파를 주기적으로 발생하는 펄스 도플러(Pulse Doppler)방식이 점차 주목받고 있다.

일반적으로 수중에서의 음파전달 속도는 1500m/s이기 때문에 유속의 해상도를 적정수준으로 유지하려면

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부  
(Soongsil University Electronic Engineering)  
접수일자: 2009년11월12일, 수정완료일: 2010년8월4일

어느 정도의 수심이 보장되어야 한다. 실제로 널리 사용되는 RDI사의 중심주파수 1200 KHz ADCP에서는 정확한 유속 해상도에 필요한 최소공간을 0.5m 정도로 설정하였다. 우리나라의 갈수기 기간에는 하천의 수심이 30 cm 이하로 되기 때문에 일반적인 ADCP의 신호처리 방법은 하천에서 사용하기 힘들다. 따라서 하천에서 초음파 유속계를 사용하려면 극히 낮은 수심으로 인하여 발생하는 유속 해상도의 저하 문제를 해결하는 알고리즘 개발이 요구된다.

현재 도플러 초음파 유속계의 신호해석에 사용되는 방법들은 FFT 방법, 교차상관관계 방법, 자기상관관계 방법, 파워 스펙트럼 분석방법 등이 있다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 제안한 알고리즘을 FFT방법과 결합하여 적용시키고, 개수로에서 사용할 수 있으며 펄스 도플러를 사용하는 도플러 초음파 유속측정기의 신호처리를 제안한다. 그리고 유속추정결과를 시뮬레이션한 후, 실제 초음파 센서로 수신한 데이터를 알고리즘에 적용시켜서 분석할 것이다. II장은 본 논문에 제안한 알고리즘과 수식을, III장에서는 제안한 알고리즘을 적용시킨 신호처리의 성능 시뮬레이션 및 실험, 그리고 마지막 IV장은 본 논문의 결론을 서술하였다.

## II. 본 론

ADCP는 초음파신호를 송신한 뒤 수중의 산란체에서 반사되는 신호를 수신하게 된다. 반사되어 들어오는 신호에는 산란체의 움직임으로 발생하는 도플러 주파수가 포함되어져있기 때문에 도플러주파수를 추정할 수 있다면 유속계산이 가능하다.

일반적으로 가까운 거리의 유속을 측정하기 위해서 사용되는 주파수는 1000K Hz 이상의 초음파를 사용한다. 수심이 30cm 이하라면 수중에서 음파의 전달속도가 약 1500 m/s 이므로

$$\frac{\text{음파전달속도}}{\text{샘플링 주파수}} \times \text{샘플수} < \text{센서와 수면사이 거리}$$

임을 감안하여 10000K Hz의 샘플링 주파수를 사용하면 FFT의 포인트 수를 약 4096개 정도밖에 사용할 수 없다.[표2 참조] 이러한 경우 주파수 분해능이 현저하게 떨어지므로 유속의 오차가 매우 증가하게 된다. 유속의 정확도 향상을 위해 주파수 분해능을 높이려면 샘플링 주파수를 낮추거나 샘플의 개수를 늘려야한다. 본 논문에서

서는 Decimation, LPF, Zero Padding 등의 Zoom FFT 신호처리를 수행하여서 주파수 분해능을 향상시켰고, 파워스펙트럼 분석방법을 이용하여 유속을 계산하였다.

### 1. Zoom FFT 방법

Zoom FFT란 decimation을 통하여 현재의 주파수 해상도를 높일 수 있는 방법으로서 레이더 신호 등 디지털신호처리를 하는데 사용된다. Zoom FFT를 하는 순서는 첫 째로 A/D된 신호를 I, Q신호로 분리한 뒤 윈도우를 거치는 것으로 시작한다. 수신신호가 non-stationary 하기 때문에 추출한 신호에 불연속점이 발생할 가능성이 있으므로 윈도우 사용이 필요하다. 그리고 FFT의 특성상 고주파수 제거고 대역제한을 하기 위하여 LPF(Low Pass Filter)를 통과시킨다. 고주파수가 제거된 신호는 원하는 만큼 Decimation 시킨다. Decimation 된 신호를 원하는 주파수 분해능으로 조정하기 위해서 신호의 뒷 부분에 '0'을 채워 넣는 Zero Padding 기법을 사용한 후 FFT를 하면 Zoom FFT가 된다.<sup>[2]</sup> 이렇게 계산된 도플러 주파수를 이용하여 유속을 계산하였다. 마지막으로 Compensation 부분은 수신신호에 제안한 알고리즘을 통하여 얻은 유속값에서 알고리즘을 이용하여 얻은 송신신호의 유속을 빼주는 것으로 하였다. Function generator로 신호를 발생시키더라도 항상 똑같은 주파수가 발생하는 것이 아니라 1~30 Hz 정도의 오차가 발생하기 때문에 이를 보상해주는 의미에서 Compensation 블록을 사용하였다.

기존의 데이터 개수를 N이라고 하고, 샘플링 주파수를 Fs라고 하면 주파수 분해능  $\Delta f$ 는 아래의 식 (1)과 같이 된다.

$$\Delta f = \frac{Fs}{N} \tag{1}$$

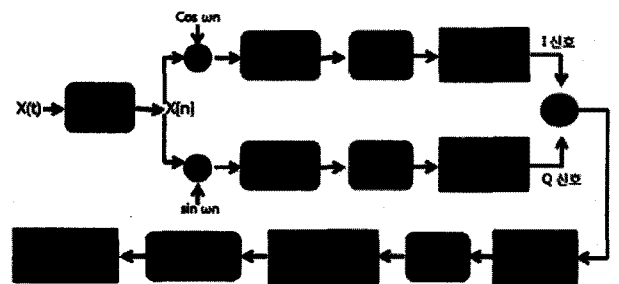


그림 1. 제안하는 알고리즘의 신호처리 처리과정  
Fig. 1. A signal processing of proposed algorithm.

주파수 분해능  $\Delta f$ 을 향상시키기 위해서는  $F_s$ 를 낮추거나 데이터의 수  $N$ 을 늘려야하는데, 본 논문에서는 decimation을 이용하여  $F_s$ 를 낮추고, 줄어든 데이터의 개수를 zero-padding 기법을 이용하여 원래의 데이터 개수인  $N$ 으로 유지하여 주파수 분해능을 향상시켰다.

2. 도플러 주파수 추정 방법

ADCP의 초음파 센서로 유속을 측정할 때는 시간영역에서 데이터를 측정하고, 이 데이터들의 subsample을 취해서 Fourier 변환을 시키면 주파수영역에서 신호의 특성들을 볼 수 있다. 수신신호는 송신주파수와 함께 유속으로 인해 발생한 도플러주파수가 포함되어서 나타나기 때문에 수신신호의 파워스펙트럼을 분석하면 도플러 주파수를 추정할 수 있다. 수신신호의 평균주파수를 구하기 위하여 식(1)을 사용하였다.<sup>[3]</sup>

$$\bar{\omega} = \frac{\int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \omega P_X(\omega) d\omega}{\int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} P_X(\omega) d\omega} \quad (2)$$

3. 도플러 주파수를 유속으로 환산

그림 2에서 유속을 계산하기 위하여 아래 식 (3)로 나타내었다.

$$f_d(C - v \cos \theta) = f(C + v \cos \theta) \quad (3)$$

여기서  $v$  는 유속,  $c$ 는 수중에서의 음속,  $\theta$ 는 송신각도,  $f_d$ 는 도플러 주파수,  $f$ 는 송신 주파수이다.

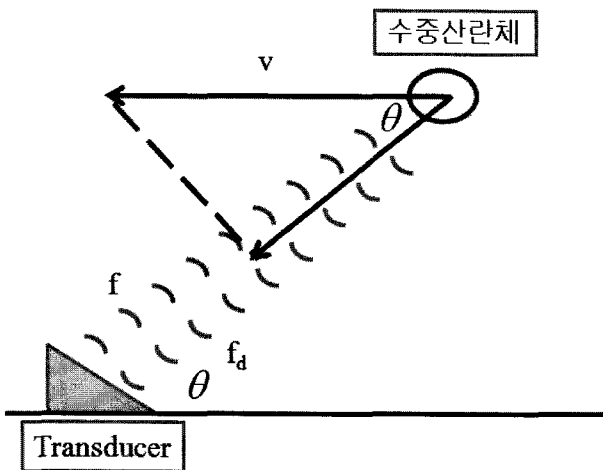


그림 2. 유속 계산의 원리  
Fig. 2. A conception of velocity calculation.

식 (3)을 도플러주파수에 관하여 정리하면

$$f_d = f \frac{C + v \cos \theta}{C - v \cos \theta} = f \frac{C^2 + 2Cv \cos \theta + v^2 \cos^2 \theta}{C^2 - v^2 \cos^2 \theta} \quad (4)$$

이다. 그런데  $C=1500$ 이고, 하천에서는  $v < 5$  이기 때문에  $C^2 \gg v^2 \cos^2 \theta$  이므로,  $v^2 \cos^2 \theta$ 를 0으로 가정하면

$$f_d = f \frac{2v \cos \theta}{C} \quad (5)$$

를 얻을 수 있다. 위의 식 (5) 을 유속에 관한 식으로 정리하면

$$v = \frac{c \times f_d}{2 \times \cos \theta \times f} \quad (6)$$

위의 식 (6)로 표현할 수 있다.<sup>[3]</sup>

III. 실험

제안한 알고리즘의 유속추정 정확도를 알아보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경에서 사용된 주요 파라미터를 아래의 표 1.로 나타내었다.

신호는 CW가 아닌 Tone burst 타입으로 하였다. 보통은 10~30 cycle의 정현파를 사용하지만 초음파센서가 진동하고 멈추는데 약 2배 정도의 시간이 걸리므로 50 cycle의 정현파가 발생한다고 가정하였다. 데이터 획득

표 1. 시뮬레이션 환경의 주요 파라미터  
Table 1. Important parameters of the simulation.

주요 파라미터	값
샘플링 주파수 [Fs]	10000K Hz
Decimation [F_ds]	20K Hz
Zero Padding Factor[K]	2^12=4096개
샘플링 주기 [Ts]	1 × 10 <sup>-7</sup> 초
센서 발신 주파수 [Fc]	1000K Hz
신호 타입	Burst (50 cycles)
신호 모양	Sine wave
데이터 갯 수 [N]	4096개
수온 [T]	15°C
측정각도 [θ]	30도
수심	20cm
입력전압	1V
SNR	15 dB

표 2. bin의 계산을 위한 파라미터  
Table 2. Parameters for calculation of bin.

파라미터	획득 방법	값
음파전달속도 [c]	식(4)에 T를 적용시킴	약 1465.8 m/s
센서에서 수면 까지 거리[d]	c와 N, 그리고 Ts를 사용	약 60 cm
bin	d와 측정각도 $\theta$ 를 사용	약 15 cm

득 시간이 매우 짧은 30cm 이하의 수심에서 적당한 데이터의 수를 계산하기 위하여 bin의 간격을 정하는 것이 중요하다. 여기서 bin이란 데이터를 수집하여 유속을 계산할 공간을 의미한다. bin을 구하기 위해서 필요한 수중 음파전달속도 및 수면에서 센서까지 왕복거리는 아래 표 2.로 나타내었다.<sup>[4]</sup>

$$c = 1404.3 + 4.7T - 0.04T^2 \quad (4)$$

위의 15cm로 데이터를 얻을 수 있는 최대 2<sup>n</sup>개는 4096개이다. 만약 8192개의 데이터를 사용하려고 하면 30cm 이하의 수심에서는 사용 할 수 없게 되기 때문에 본 논문에서는 4096개의 데이터를 획득하는 것으로 하였다.

시뮬레이션 환경에서는 그림 1의 과정에서 A/D 바로 뒤에 BPF(Band Pass Filter)를 사용하였다. BPF는 Equiripple 방식을 사용하였고, 스톱밴드 700 KHz, 1300 KHz로 설정하고, 패스밴드를 990 KHz, 1010 KHz로 설정한 62차 FIR필터로 설계한 뒤 hamming 윈도우를 사용하여 신호의 시작과 끝을 감쇄시켰다. 그리고 주파수분해능을 향상시키기 위하여 원신호의 5배 길이를 zero-padding 하여 데이터를 20480개로 만든 뒤 decimation을 위하여 Fs를 1/100로 조정하고, resample 후 생긴 205개의 데이터를 생성한다. 그리고 다시 zero-padding을 이용하여 데이터 개수 N=4096로 맞추면 (1)로부터 주파수분해능  $\Delta f=4.88$  Hz를 계산하였다. 결국 decimation을 1/500 한 것으로, 실제 실험데이터를 여러 가지 decimation 상황으로 분석한 결과 원신호를 5배 zero-padding한 뒤 decimation을 1/100으로 하는 것이 결과가 가장 좋았기 때문에 이러한 방식을 사용하였다.

1. 알고리즘의 시뮬레이션 결과 분석  
초음파 센서를 이용한 유속추정 시 SNR이 10 dB 이

상으로 나와야 유속측정이 가능하다. 보다 정확한 유속 측정을 위해 시뮬레이션 환경에서는 그보다 조금 향상된 SNR이 15dB인 AWGN 정현파를 적용하면 아래 그림 3와 같은 신호가 형성된다<sup>[5]</sup>.

위의 정현파 50 cycle을 포함한 4096개의 데이터를 한 샘플로 하고 신호를 생성하였다. 생성된 신호에 도플러주파수를 첨가시킨 후 Zoom FFT 알고리즘의 신호처리를 한 결과 그림 4와 같은 그래프를 얻었다.

1 MHz의 중심주파수에 도플러주파수를 그림 4의 x축과 같이 100 Hz 간격으로 생성하여 적용한 결과 알고리즘을 통한 추정 도플러 주파수가 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

그림 5는 위의 그림 3의 입력신호에 AWGN을 적용하여 계산한 유속값을 나타낸 그래프이다.

그림 6의 결과를 살펴본 결과 기존의 알고리즘과 이론유속의 오차는 최대  $\pm 71$  cm/s 정도 나오는 것을 확인하였다. 성능개선 알고리즘을 적용한 유속과 이론적인 유속의 오차는 최대  $\pm 9$  cm/s 정도 나옴을 확인함으로써, 수심이 낮아 유속 해상도가 떨어지는 곳에서는

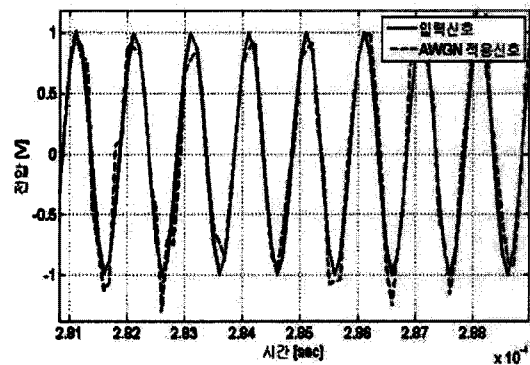


그림 3. 입력신호와 AWGN 신호  
Fig. 3. input and AWGN signal.

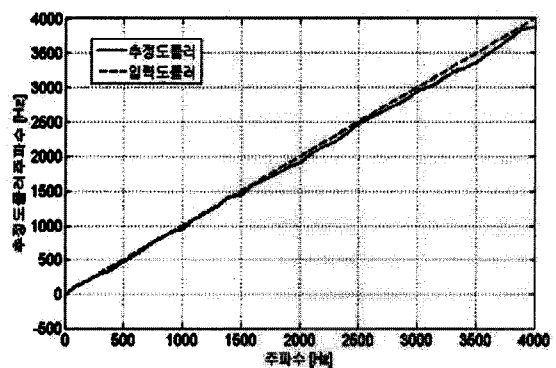


그림 4. 추정도플러신호와 입력신호의 비교 그래프  
Fig. 4. Comparison of input signal with estimated doppler signal.

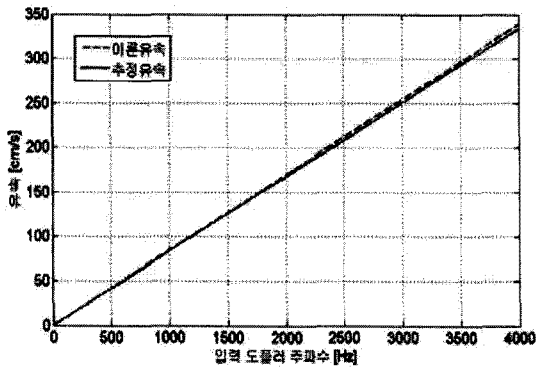


그림 5. 추정유속과 이론유속의 비교 그래프  
 Fig. 5. Comparison of theoretical velocity with estimated velocity.

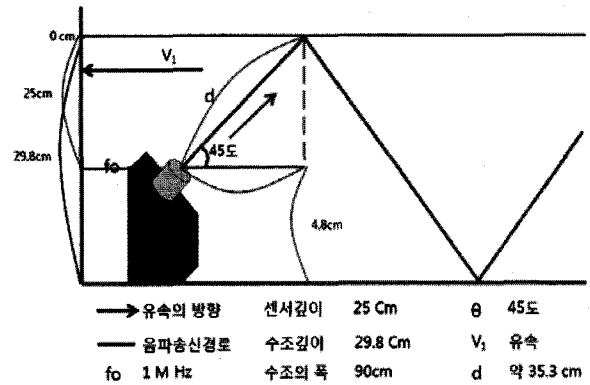


그림 7. 실험 환경  
 Fig. 7. Experimental environment.

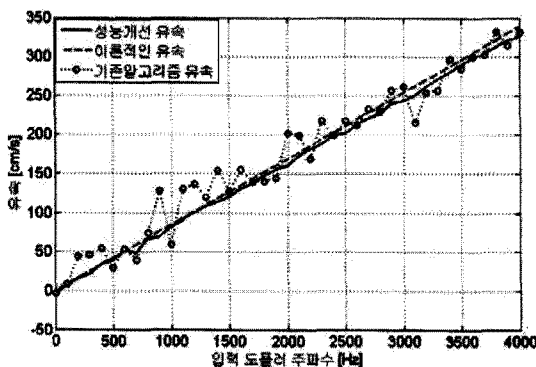


그림 6 AWGN을 적용한 추정유속과 이론유속의 비교 그래프  
 Fig. 6. Comparison of theoretical velocity with estimated velocity with AWGN.

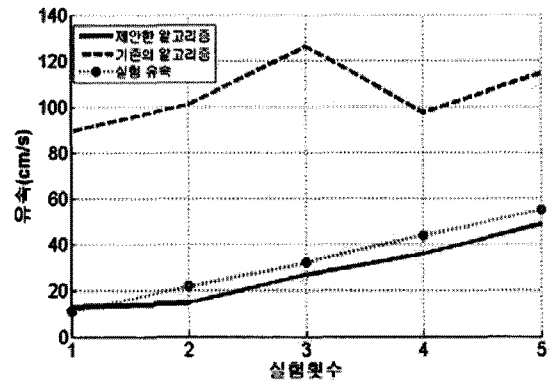


그림 8. 실험 데이터를 이용한 유속 비교 그래프  
 Fig. 8. Comparison velocity values among existing algorithm, proposed algorithm, and ultrasonic current meter using the experiment data.

제안한 알고리즘의 유속추정이 기존의 알고리즘보다 더 정확한 유속 추정이 가능하다 것을 확인하였다.

### 2. 실측데이터를 이용한 결과 분석

제안한 알고리즘의 성능을 알아보기 위해서 한국건설연구기술원에 설치되어있는 실험용 하수로에서 실험을 해보았다. 실험환경의 주요 파라미터는 그림 7에 표시하였다.

그림 8에서의 실측유속은 한국건설기술연구원의 보정완료된 ADCP Flow Tracker를 사용하여 측정한 유속이다. Flow Tracker의 상세 제원은 표 2에 적어 놓았다. 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘에 사용된 데이터는 현재 국내에서 개발된 초음파센서를 이용하여 실험한 데이터를 이용하였다. 기존의 알고리즘은 실험 데이터를 FFT 한 것이고, 제안한 알고리즘은 window, decimation, zero padding, FFT, compensation 등을 모두 적용시킨 것이다.

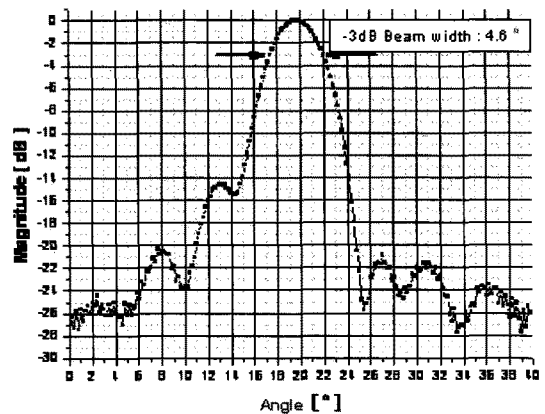


그림 9. 실험에 사용한 센서의 빔 패턴  
 Fig. 9. Beam pattern of the sensor which is used the experiment.

실험에 사용한 센서의 빔 패턴은 위의 그림 9와 같으며 빔 폭은 약 4.6도 정도이다. 실험데이터는 0.1초 마다 데이터 샘플을 4096 포인트씩 측정하였고, 실험 데이터의 개수는 200개를 사용하여 제안한 알고리즘을 이

용하여 결과를 얻고, 그 결과를 평균을 내었다. 그리고 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘에 13cm/s를 더하였다. 이유는 제안한 알고리즘과 실험유속의 값을 쉽게 비교하기 위해서이다. 그림 7을 보면 기존의 알고리즘은 유속 해상도 문제로 인하여 실험 유속과 전혀 다른 값 들을 보여주고 있다. 반면 제안한 알고리즘은 처음 약 11 cm/s와 22 cm/s의 유속이 비슷하게 나오고 33 cm/s 이후의 유속은 선형적으로 나타났다. 10 cm/s 이하의 유속에서는 반사신호강도가 매우 낮기 때문에 오차가 크게 나타나는 것으로 보인다.

#### IV. 결 론

본 논문은 수중에서 초음파센서를 이용하는 ADCP의 신호처리 방식에서 Zoom FFT 방식을 적용하고, 주파수 분해능을 향상시키기 위한 Zero Padding 기법을 적용한 후 보상을 통하여 신호를 처리하였다. 실제로 하천에서 갈수기 때는 수심이 30cm 이하로 줄어드는 것을 감안한다면, 기존의 ADCP 신호처리 방법보다 제안한 알고리즘의 신호처리방법이 이론적으로는 추정오차가 약  $\pm 62$  cm/s 정도 개선되었고, 실험적으로는 약  $\pm 93$  cm/s 정도의 성능 개선이 이루어졌음을 결과분석을 통하여 확인하였다. 기존의 알고리즘은 수심이 30cm 이하에서 사용하려면 유속 분해능이 210cm/s 였기 때문에 유속 추정이 거의 불가능하였고, 비록 정보의 양은 늘어나지 않았지만 주파수 분해능을 향상시킨 제안한 알고리즘을 이용하여 실제로 유속을 추정하는 것이 기존의 것보다 더 나은 것으로 나타났다. 다만 유속이 느릴수록 수중 반사체를 맞고 돌아오는 신호들의 세기가 약해지기 때문에 유속의 정확도가 떨어진 모습을 보였다. 이를 해결하기 위해서 반사되어 들어오는 신호의 SNR을 높일 수 있는 신호처리방법이 연구되어야 할 것이다.

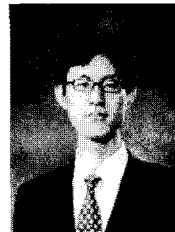
#### 참 고 문 헌

- [1] (주)킵솔, “한수관거용 초음파 도플러 유량계”, www.keepsol.com.
- [2] 김민준, 천이환, 김주현, “Real FFT를 이용한 FMCW 레이더 신호처리”, 한국해양정보통신학회 논문지, 제11권, 제 12호, pp. 2227~2232
- [3] Kumari L. Fernando, V. John Mathews, Edward B. Clark, “Mean Frequency Estimation of

Narrowband Signals”, IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS, VOL. 11, NO. 2, FEBRUARY 2004.

- [4] NPL “Underwater Acoustics Technical Guides - Speed of Sound in Pure Water”, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK, TW11 0LW
- [5] Setephen F. Blanchard, “Policy on the use of the FlowTracker for discharge measurements”, Office of Surface Water Technical Memorandum 2004.04, June 2, 2004.
- [6] 정진우, 김락훈, 심태보, 김성일, “수중통신채널에서 적응변조기법을 적용한 STBC(Space-Time Block Code) 시스템의 성능 분석”, 한국음향학회 학술발표회 논문집, 22회, 2007.
- [7] 김창호, 이덕기, 백종승, 조문재, “초음파 상호상관 기법을 이용한 유체의 평균유속 측정 연구”, 한국음향학회지 제 14권 2호, 1995.

#### 저 자 소 개



한 진 현(학생회원)

2008년 숭실대학교 정보통신전자공학 학사 졸업.

2008년~현재 숭실대학교 정보통신공학 석사 과정.

<주관심분야 : 수중음향, 통신, 신호처리>



심 태 보(정회원)

1974년 서울대학교 문리대 학사 졸업.

1980년 서울대학교 물리해양학 석사 졸업.

1986년 루이지애나 주립대학교 물리해양학 박사 졸업.

<주관심분야 : 수중음향, 통신, 신호처리, 수중음향 영상처리>