

초음파 섹터 B-스캐너의 개발 (Ⅲ)

—초음파 펄스 도플러 장치—

백광렬 · 안영복 · 이범석 · 장흥순
김영모 · 김주한 · 박송배

==Abstract==

Development of Ultrasound Sector B-Scanner(Ⅲ)

—Pulsed Ultrasonic Doppler System—

Kwang-Ryul Baek, Young-Bok An, Bum-Seok Lee, Heung-Soon Jang
Yeong-Mo Kim, Joo-Han Kim, Song-Bai Park

Pulsed ultrasonic Doppler system is a useful diagnostic instrument to measure blood-flow-velocity, velocity profile, and volume-blood-flow. This system is more powerful compare with 2-dimensional B-scan tissue image. A system has been developed and is being evaluated using TMS 32010 DSP. We use this DSP for the purpose of real-time spectrum analyzer to obtain spectrogram in singlegate pulsed Doppler system and for the serial comb filter to cancel clutter and zero crossing counter to estimate Doppler mean frequency in multigate pulsed Doppler system. The Doppler shift of the backscattered signals is sensed in a phase detector. This Doppler signal corresponds to the mean velocity over a some region in space defined by the ultrasonic beam dimensions, transmitted pulse duration, and transducer bandwidth. Multigate pulsed Doppler system enable the transcutaneous and simultaneous assessment of the velocities in a number of adjacent sample volumes as a continuous function of time. A multigate pulsed Doppler system processing the information originating from 8 sample volumes in a sequential way is presented.

요 약

본 논문은 TMS 32010이라는 디지털 신호 처리용소자를 사용하여 초음파 펄스 도플러 장치를 구현한 것이다.

도플러 장치란 초음파 신호의 송수신 과정에서 발생

<접수 : 1986년 12월 11일>

*한국과학기술원 전기전자공학과

**Dept. of Electrical Eng. and Electronic Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

하는 도플러 효과를 이용하여 혈류의 속도를 측정하는 장치이다.

한 점에서의 속도를 측정하는 단일채널 도플러 장치에서는 실시간 고속 푸리에 변환기를 구현하여 도플러 주파수의 스펙트럼을 측정함으로써 혈류속도를 측정하며 초음파 빔의 일직선상에서의 여러점을 동시에 측정하는 다중채널 도플러 장치에서는 영점교차검출기를 구현하여 평균주파수를 측정하였다. 다중채널 장치는 직렬처리법을 사용하여 하드웨어를 간단히 하였으며 8 점에서의 속도를 측정할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

초음파 도플러 장치란 인체에 무해한 초음파 진단장치의 일부로서 도플러 효과를 이용하여 체내에 흐르는 혈류의 속도, 유량 및 혈류가 흐르는 방향등을 측정하는데 사용된다. 특히 본 논문에서 사용되고 있는 펄스 도플러 시스템은 초음파 영상장치와 병행하여 사용함으로써 측정하고자 하는 위치를 정확하게 알 수 있는 장점이 있다.

초음파 도플러 장치도 다른 초음파 진단장치처럼 초음파를 방사하여 인체 내부에서 반사되어 되돌아오는 신호로부터 필요한 정보를 획득한다. 이때 혈액내의 적혈구는 초음파의 산란 입자로 작용하여 초음파가 입사할 때의 주파수와 반사될 때의 주파수가 적혈구의 움직임에 따라 달라지게 되며 두 주파수의 차가 도플러 주파수가 되며 적혈구의 속도에 비례하게 된다.

초기의 도플러 장치는 연속파(continuous-wave)를 사용하여 속도를 측정하였으며 속도의 방향 및 측정하는 곳의 위치등을 알지 못하였다. 속도의 방향에 대한 문제는 1966년 McCleod가 제안한 직각위상검파(quadrature detection)에 의한 단일 측파대만을 선택하는 방법으로 해결되었으며 1970년에 Baker에 의해 펄스 도플러 장치가 개발되어 측정하는 위치에 대한 정보도 알 수 있게 되었다¹⁾.

그러나 펄스 도플러 장치는 많은 장점을 가지고 있으나 최대 측정 속도와 최대 측정 깊이의 곱이 일정하다는 단점을 가지고 있어 이에 대한 해결책도 계속 연구되고 있다^{2,3)}. 그외에도 도플러 진단장치의 문제점은 초음파 신호가 적혈구에 산란되어 되돌아 올 때 혈관벽이나 초음파 변환소자(transducer) 자체의 움직임 등에 의한 클러터(clutter)성분의 제거에 있다. 이 클러터 신호성분은 주파수가 50~200 HZ 정도로 도플러 주파수에 비해 낮으나 크기는 도플러 신호에 비해 40~60 dB 정도가 된다.

펄스 도플러 장치는 측정하는 위치의 수에 따라 단일채널(single channel)과 다중채널(mutli channel) 펄스 도플러 장치가 있으며 본 논문에서는 TMS 32010이라는 디지털 신호처리기(Digital signal processor)를 사용하여 도플러 주파수를 계산하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 실시간 스펙트럼 분석기와 평균 주파수 편이를 구하기 위해 영점교차 검출기(zero-crossing detector) 및 불필요한 신호를 제거하기 위한 디지털 필터(digital comb filter)등을 구현하였다.

2. 도플러 장치의 원리

(1) 연속파 도플러 장치의 원리

그림 1에서처럼 직경 D 인 관에 초음파 산란입자를 포함한 유체가 흐른다고 생각할 때 수신된 신호로부터 구한 도플러 주파수는

$$f_d = \frac{2 f_0 V}{c} (\cos\theta_{In} + \cos\theta_{Rn}) \quad (1)$$

여기서

f_d : 도플러 주파수

f_0 : 입사된 주파수

V : 산란입자의 속도, 즉 유체의 속도

c : 매질내에서의 초음파의 속도 (인체내에서 약 1,540 m/sec)

θ_{In}, θ_{Rn} : 입사 및 반사시의 교차각으로 주어진다.

(2) 방향 검출 원리

직각위상변조 방법에 의한 방향 검출원리는 그림 2로서 설명할 수 있다. 송신 신호를 $V_i(t)$, 수신된 신호를 $V_r(t)$ 라고 하면

$$V_i = A \cos \omega_0 t \quad (2)$$

$$V_r = B \cos(\omega_0 t + \phi) + U \cos(\omega_0 + \omega_u) t + L \cos(\omega_0 - \omega_L) t \quad (3)$$

이때 ω_u 와 ω_L 은 산란입자들의 움직임에 의해 일어난 도플러 주파수 편이로 산란입자가 초음파 변환소자와 가까워지는 방향으로 움직일때 +, 멀어질 때는 -로

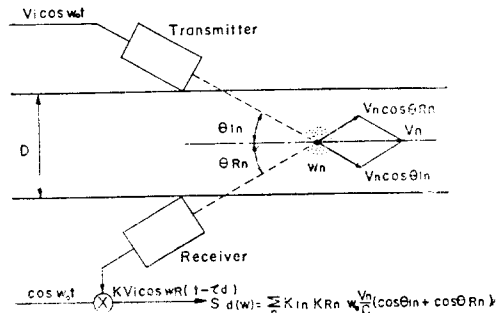


그림 1. 연속파 도플러의 원리
Fig. 1. Principle of CW Doppler system.

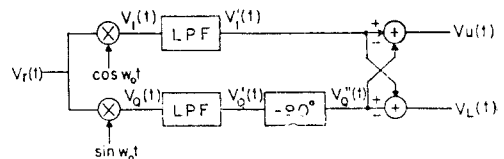


그림 2. 시간축에서의 방향 검출
Fig. 2. Direction sensing in time domain.

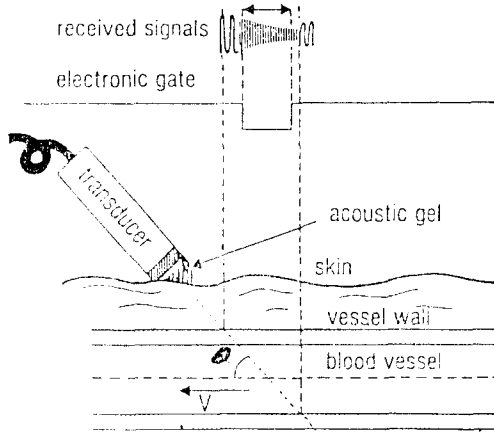


그림 3. 펄스 도플러 장치의 원리.
Fig. 3. Principle of pulsed ultrasonic Doppler system.

주파수 편이가 발생한다.

직각복조(quadrature demodulation)를 위해 90° 위상차가 있는 $\cos\omega_0 t$ 와 $\sin\omega_0 t$ 를 곱하고 클러터 성분 및 고조파 성분을 제거하기 위해 대역 통과필터(BPF)를 통과시킨다.

$$V_I'(t) = \frac{U}{2} \cos\omega_u t + \frac{L}{2} \cos\omega_l t \quad (4)$$

$$V_Q'(t) = -\frac{U}{2} \sin\omega_u t + \frac{L}{2} \sin\omega_l t \quad (5)$$

여기서 상측파대 신호인 ω_u 와 하측파대 신호인 ω_l 를 분리하기 위해 $V_Q'(t)$ 를 90° 위상 지연 시킨 뒤 $V_I'(t)$ 와 가감하면 각 측파대를 분리할 수 있다.

$$V_Q''(t) = \frac{U}{2} \cos\omega_u t - \frac{L}{2} \cos\omega_l t \quad (6)$$

$$V_U(t) = V_I'(t) + V_Q''(t) = U \cos\omega_u t \quad (7)$$

$$V_L(t) = V_I'(t) - V_Q''(t) = L \cos\omega_l t \quad (8)$$

일반적으로 한 순간에서는 유체가 한 방향으로만 흐른다고 가정하면 $V_U(t)$ 와 $V_L(t)$ 중 한 신호만이 존재하므로 방향을 알 수 있다.

(3) 펄스 도플러 장치의 원리

펄스 도플러 장치란 초음파 송신 소자에서 주기적 (PRF: pulse repetition frequency)으로 초음파를 발생시켜 되돌아 오는 신호로부터 도플러 신호를 검출하는 방법이다.

그림 3에서 처럼 측정하고자 하는 부분에서의 신호만을 샘플링함으로써 도플러 신호를 획득하며 샘플링 펄스의 시간 지연을 조정하여 측정 깊이를 조정하고 샘플링 펄스의 폭을 조정하여 신호의 에너지를 증감할 수 있으나 샘플링 펄스의 폭이 너무 넓으면 샘플링 체적(sampling volume)이 넓어져 분해능(resolution)이 떨어지게 된다.

속도는 다음 식처럼 주어진다.

$$V = \frac{\Delta f \cdot c}{2 \cdot f_0 \cdot \cos\theta} \quad (9)$$

여기서

V : 유체의 속도

Δf : 도플러 주파수 편이

c : 매질내에서의 초음파의 속도

f_0 : 초음파 변환 소자의 중심 주파수

θ : 유체의 속도와 초음파 빔의 교차각.

3. 초음파 펄스 도플러 장치의 구현

(1) 단일 채널 펄스 도플러 장치

단일 채널이란 측정하는 샘플링 체적이 하나인 경우로 유체의 속도 정보를 자세히 알고자 할 때 사용되며 주로 도플러 주파수의 스펙트럼을 분석하게 되므로 실시간 스펙트럼 분석기가 필요하다.

그림 4는 본 논문에서 구현한 초음파 펄스 도플러 장치의 구성도이다. 방향탐지를 위한 직각복조를 하기 위해 두 채널로 구성되어 있다.

송신기에서 초음파 소자에 일정한 간격으로 펄스를

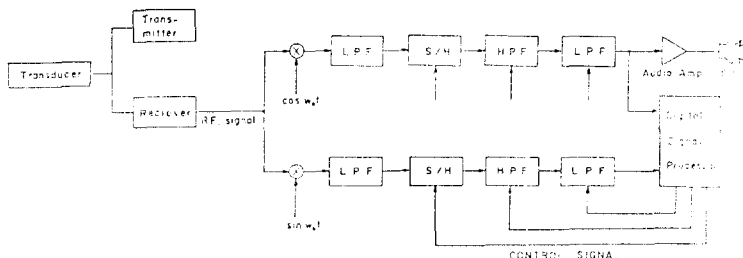


그림 4. 단일 채널 펄스 도플러 장치의 구성도.
Fig. 4. Block diagram of single-channel pulsed Doppler system.

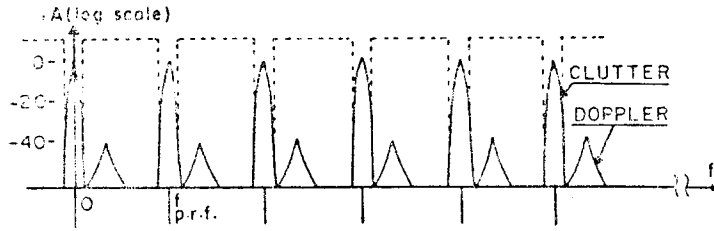


그림 5. 샘플링된 신호의 스펙트럼.
Fig. 5. Sampled signal spectrum.

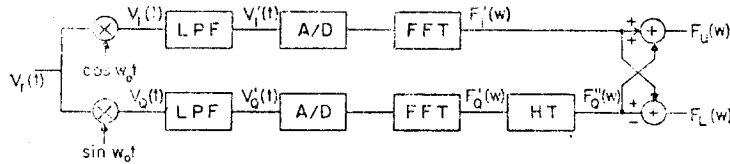


그림 6. 주파수축에서의 방향 검출.
Fig. 6. Direction sensing in frequency domain.

인가하면 초음파 소자는 전기적 펄스를 초음파로 변환시켜 인체에 초음파를 발사시킨다. 매질을 통과하면서 반사되어 되돌아 온 초음파 신호가 수신기로 인가되어 증폭 및 거리에 대한 신호의 감쇄를 보상하는등 적절한 신호처리를 한다. 이 신호가 적각 복조기를 지나 샘플링되면 그림 5와 같은 스펙트럼을 가지며 클러티 신호를 제거하기 위해 고역통과 필터(HPF)를 샘플링에 의한 고조파를 제거하기 위해 PRF/2의 차단 주파수를 가지는 저역통과 필터를 통과시켜 디지털 신호 처리기로 들어간다. 이때의 신호는 도플러 주파수로서 보통 가칭 주파수내에 존재하므로 음성 증폭기로 증폭시키면 소리로써도 유체의 빠르기를 판별할 수 있다.

디지털 신호 처리기는 TMS 32010이라는 디지털 신호 처리소자와 A-D, D-A 변환기 및 기억소자등으로 구성되어 있다.

단일 채널 도플러 장치로서의 디지털 신호 처리는 FFT 및 Hilbert 변환을 하여 방향검출 및 속도의 크기를 측정한다. 본 논문에서 사용한 TMS 32010은 고속 신호처리용 소자로서 128 point의 실시간 FFT를 12 ms 내에 수행할 수 있다⁴⁾. 그림 2에서 설명한 방향 검출법에서는 넓은 범위에 걸쳐 정확하게 90°를 지연시키기 어려우나 주파수축 상에서는 90°지연이 Hilbert 변환으로 쉽게 수행된다. 주파수축상에서의 방향 검출의 방법은 그림 6으로 설명된다.

$V_I'(t)$ 와 $V_Q'(t)$, 즉 식 4)와 5)를 Fourier 변환하여 각각 $F_I'(\omega)$, $F_Q'(\omega)$ 라고 하면

$$F_I'(\omega) = \frac{U}{2} [\delta(\omega_u) + \delta(-\omega_u)]$$

$$+ \frac{L}{2} [\delta(\omega_l) + \delta(-\omega_l)] \quad (10)$$

$$F_Q'(\omega) = \frac{U}{2} [j\delta(\omega_u) - j\delta(-\omega_u)] + \frac{L}{2} [-j\delta(\omega_l) + \delta(-\omega_l)] \quad (11)$$

으로 표시되고 $F_Q'(\omega)$ 를 Hilbert 변환하여 $F_Q''(\omega)$ 라고 한다.

$$F_Q''(\omega) = -j\text{sgn}(\omega) \cdot F_Q'(\omega) = \frac{U}{2} [\delta(\omega_u) + \delta(-\omega_u)] - \frac{L}{2} [\delta(\omega_l) + \delta(-\omega_l)] \quad (12)$$

여기서

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega > 0 \\ -1 & \omega < 0 \end{cases}$$

$F_I'(\omega)$ 와 $F_Q''(\omega)$ 를 서로 가감하여 방향을 탐지한다.

$$F_U(\omega) = F_I'(\omega) + F_Q''(\omega) = U[\delta(\omega_u) + \delta(-\omega_u)] \quad (13)$$

$$F_L(\omega) = F_I'(\omega) - F_Q''(\omega) = L[\delta(\omega_l) + \delta(-\omega_l)] \quad (14)$$

그러나 실제로 구현할 때는 직접 Hilbert 변환을 수행하지 않고 FFT를 하여 스펙트럼의 실수부와 허수부를 적당히 가감함으로써 수행한다. 여기서는 $\omega > 0$ 인 경우만을 예를 들어 설명한다.

$$F_I'(\omega) = I_{re}(\omega) + jI_{im}(\omega) \quad (15)$$

$$F_Q'(\omega) = Q_{re}(\omega) + jQ_{im}(\omega) \quad (16)$$

$$F_Q''(\omega) = -j\text{sgn}(\omega)F_Q'(\omega) = Q_{im}(\omega) - jQ_{re}(\omega) \quad (17)$$

$$F_U(\omega) = F_I'(\omega) + F_Q''(\omega)$$

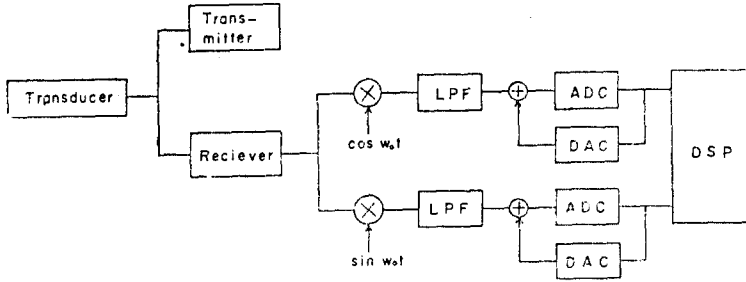


그림 7. 다중 채널 펄스 도플러 장치의 구성도.
Fig. 7. Block diagram of multi-channel pulsed Doppler system.

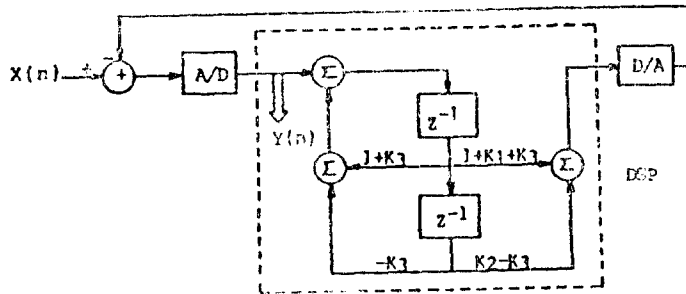


그림 8. 디지털 콤 필터의 구성도.
Fig. 8. Block diagram of digital comb filter.

$$= I_{re}(\omega) + jI_{im}(\omega) + Q_{im}(\omega) - jQ_{re}(\omega)$$

$$= [I_{re}(\omega) + Q_{im}(\omega)] + j[I_{im}(\omega) - Q_{re}(\omega)] \quad (18)$$

$$F_L(\omega) = F_I'(\omega) - F_Q''(\omega)$$

$$= [I_{re}(\omega) + Q_{im}(\omega)] + j[I_{im}(\omega) + Q_{re}(\omega)] \quad (19)$$

즉, 가감을 복소 스펙트럼에서 행하여 Hilbert 변환을 동시에 수행하여 신호 처리 시간을 절약하였다. 전체적인 디지털 신호 처리시간은 약 27 ms 정도 소요되었다.

(2) 다중 채널 도플러 장치의 구현

다중 채널 도플러 장치란 단일 채널과는 달리 샘플링하는 위치를 초음파 빔이 진행해 나가는 일직선상의 여러점에서 결정하여 혈류가 흐르는 전체적인 속도 분포등을 측정한다. 단일 채널과는 달리 다중 채널에서는 처리할 신호가 여러개가 있으므로 병렬처리(parallel processing)법과¹⁾ 직렬처리(serial processing)법²⁾이 있으며 병렬처리방법은 채널의 수만큼 회로가 커지게 된다. 반면 직렬처리방법은 신호를 순차적으로 받아 처리하므로 시스템이 간단해진다.

그림 7은 본 논문에서 구현한 장치의 구성도로 직각 복조까지는 단일 채널 도플러 장치와 같으며 그후에 직접 디지털 신호 처리기로 들어가 A-D 변환기와 D-A 변환기로 구성된 디지털 콤 필터(digital comb filter)

로 클러터를 제거한 후 도플러 주파수를 측정한다. 이때 도플러 주파수는 영점교차 검출기를 이용하여 평균 주파수를 측정한다. 이때 방향검출은 영점교차시 직각 신호(quadrature signal)의 위상을 조사함으로써 결정된다²⁾.

(3) Stationary Canceller

다중 채널 도플러 장치에서 클러터를 제거하기 위해 디지털 필터를 구현한다. 클러터를 포함한 도플러 신호의 동적범위(dynamic range)는 70 dB 정도로 12 bit 이상의 분해능을 가지는 A-D 변환기를 필요로 한다. 그러나, 변환 속도가 빠르고 12 bit의 A-D 변환기는 매우 고가이므로 A-D 변환시 신호의 동적범위를 가능한 감소시켜 40 dB 이하로 줄이면 8 bit A-D 변환기로도 가능하게 된다.

그러므로 그림 8과 같이 시스템을 구성하여 클러터 성분을 미리 제거시키면 동적범위가 감소되어 8 bit A-D 변환기는 사용할 수 있게 된다. 본 논문에서 실험한 A-D 및 D-A 변환기는 8 bit A-D 변환기와 10 bit D-A 변환기가 같이 들어있는 KSV 3100으로 변환시간이 26 ns 정도까지 가능하다.

본 논문에서 사용한 필터의 주파수 특성은 그림 9와 같으며 전달함수는 최적화 프로그램(optimization pr-

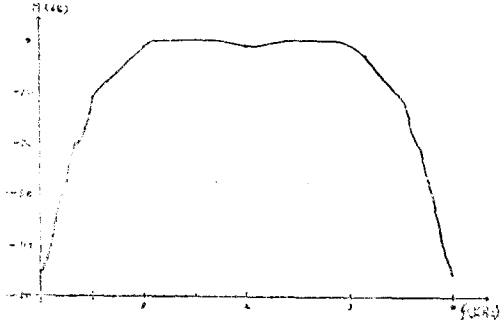


그림 9. 디지털 필터의 주파수 특성.
Fig. 9. Frequency response of stationary canceler.

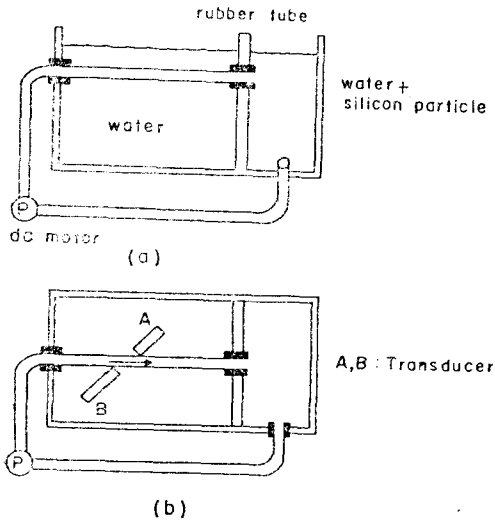


그림 10. 실험장치.
Fig. 10. experimental set.

ogram)을 이용하여 구하였으며 전달함수는 다음과 같다.

$$H(Z) = \frac{(Z-1)(Z-K_3)}{Z^2 + K_1Z + K_2Z} \quad (20)$$

여기서

$$K_1 = 0.2094$$

$$K_2 = 0.5756$$

$$K_3 = 0.9788$$

위 전달함수의 주파수 응답은 그림 9와 같다. 그림 9에서 알 수 있듯이 클러터 성분이 40 dB 이상 제거됨을 보여준다.

실험 결과

실험은 그림 10과 같은 실험장치를 만들어 유체속도

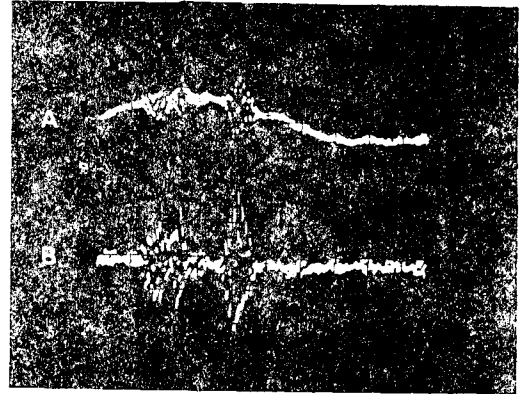


그림 11. A) 샘플링된 신호
B) 클러터가 제거된 신호.
Fig. 11. A) sampled signal.
B) clutter eliminated signal

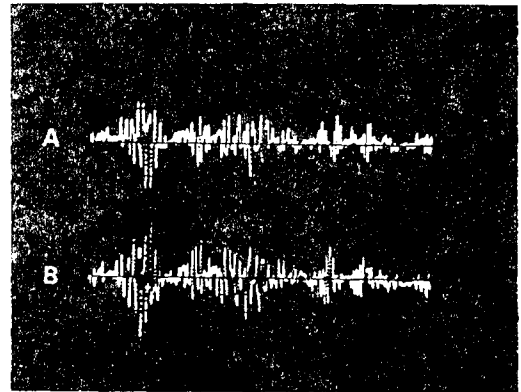


그림 12. 디지털 신호 처리기에 인가되는 신호.
Fig. 12. Input signal of digital signal processor.

를 조절 가능하게 하며 실리콘 입자를 산란 입자로 사용하여 적혈구를 대처하였다.

초음파 변환소자의 중심 주파수는 2.25 MHz 이며 펄스 반복 주파수(PRF)는 4 KHz 로 실험하였다.

그림 11의 A)는 샘플링된 신호이며 B)는 고역통과 필터를 지나 클러터 신호가 제거되었음을 보여 준다. 그림 12는 디지털 신호 처리기로 들어가는 신호로서 이중 하나의 신호를 음성 증폭기로 증폭시키면 소리로서 신호를 판별하게 된다.

그림 13은 유체와 초음파 소자의 교차각을 45°로 펄스 반복 주파수는 4 KHz 로 하여 얻은 스펙트럼의 한 예로 forward 로 표시된 스펙트럼은 식 18에 해당되며 reverse 로 표시된 스펙트럼은 식 19에 해당된다. 그림에서 알 수 있듯이 유체가 초음파 소자에 가까이 다가 오고 있음을 판별할 수 있고 도플러 주파수 편이가 약

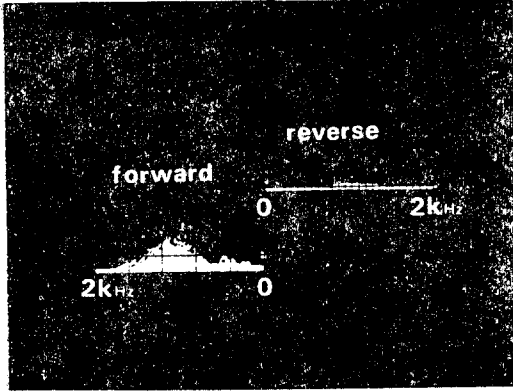


그림 13. 실험 예.
Fig. 13. experimental example.

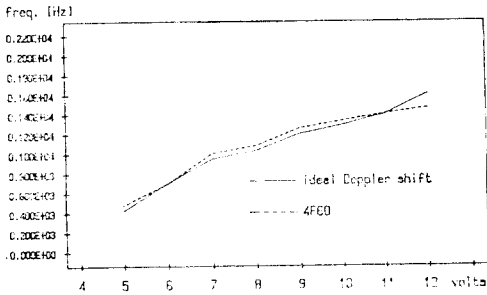


그림 14. 이론치와 측정치의 비교.
Fig. 14. Doppler shift comparison.

1 KHZ 정도임을 보여주고 있다.

그림 14는 교차각을 60°로 하고 유체의 속도를 조절하는 직류 전동기에 인가하는 전압을 변화시키며 도플러 주파수 편이를 이론치와 비교한 것이다.

결 론

TMS 32010을 사용한 실시간 스펙트럼 분석기를 구현하여 단일 채널 도플러 장치에 도입하여 실시간으로 유체 속도를 측정하였으며 다중 채널 도플러 장치에서는 최적화 프로그램을 이용하여 가장 적절한 필터 제거용 필터를 구성하여 A·D 변환기의 변환 분해능을 감소시켰다.

참 고 문 헌

- 1) Baker D.W., "Pulsed ultrasonic Doppler blood-flow sensing," *IEEE Trans. Sonics and Ultrason*, Vol SU-17, July 1970, pp170-185
- 2) Hartley C.J., "Resolution of frequency aliases in ultrasonic pulsed Doppler velocimeter," *IE-EE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol. SU-28, March 1981, pp69-75
- 3) 이상호 : "초음파 펄스 도플러 시스템의 애매함수 및 다중채널 실현에 관한 연구" KAIST 석사학위논문, 1985
- 4) 백광렬 : "FFT를 이용한 초음파 펄스 도플러 유속계의 구현에 관한 연구" KAIST 석사학위논문 1985
- 5) Arnold P.G. Hoeks, Reneman R.S., Personneau P.A., "A multigate Pulsed Doppler system with serial data processing," *IEEE Trans. on Sonics and Ultrason.*, Vol. SU-28, No. 4, July 1981, pp242-247