

## 2차 샘플링을 이용한 새로운 초음파 2차원 펄스 도플러 시스템에 관한 연구

박 세 현\* · 임 춘 성\* · 김 영 길\*

### A Study on A New Two-Dimensional Pulsed Doppler System Using Second-Order Sampling Method.

se-hyun Park\*, chun-sung Lim\*, young-kil Kim\*

#### - Abstract -

The doppler effect is used for measuring the velocity of the blood flow in artery. Because of the range information, the pulsed doppler system is most commonly used.

In this paper, we propose a new two-dimensional(2-D) pulsed Doppler system. Which uses second-order sampling method and serial processing.

The proposed system using second-order sampling method eliminates in-phase, quadrature-phase balancing problem at demodulator of quadrature detection method. In addition, the new pulsed 2-D doppler system eliminates balancing problem of channels of 2-D doppler system because of serial processing.

#### 요 약

도플러 효과는 혈관의 혈류속도를 측정하는데 이용된다. 대부분의 도플러 시스템은 측정위치에 대한 정보를 제공하는 펄스 도플러 시스템이다.

본 논문에서는 2차 샘플링 방식과 직렬 신호 처리를 이용한 새로운 2차원 펄스 도플러 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 직각 위상 검파 방식에서 동상과 90° 지연된 위상신호의 불평형을 해결하고, 또한 직렬 신호 처리를 사용하므로써 2차원 도플러 시스템에서의 채널 간의 평형성 문제를 해결했다.

#### 1. 서 론

초음파를 이용한 의료용 진단장치는 인체에 무해

<접수: 1989년 6월27일>

\*이주 대학교 전자공학과

\*Dept. of Electronic Eng., A-jou University

하며 실시간으로 관측할 수 있다는 장점으로 인해 새로운 초음파 진단장치가 계속 개발되고 있다. 초음파를 이용한 진단장치는 인체에 초음파를 방사하여 반사된 수신신호를 처리하는 방법에 따라 크게 스캐너 시스템과 도플러 시스템으로 나눌수 있다.<sup>1)</sup>

이 중 도플러시스템의 한 형태인 펄스 도플러 시스템은 인체에 초음파를 일정주기로 방사하여 혈액

내의 산란입자인 혈구에서 반사된 신호의 주파수 편이를 이용하여 혈류의 속도를 측정하는 대표적인 혈류계이다.<sup>2), 3)</sup> 1970년 Bark에 의해서 단일 채널 펄스 도플러 시스템이 제안된 이후 신호를 한개의 변환기(transducer)에서 받아 병렬 처리하는 다중 채널 펄스 도플러 시스템이 개발되었고, 최근에는 혈류의 속도를 B 스캐너(B-scanner)와 결합시켜서 2차원 영상으로 볼수 있는 2차원 펄스 도플러 시스템이 개발되었다.<sup>4~8)</sup>

기존의 도플러 시스템은 변환기를 사용하여 인체에 초음파를 발사하고 혈구에 반사되어 온 신호를 처리하는 방식은 직각 위상검파와 2차 샘플링 방식(second-order sampling)이 있고, 현재 사용중인 대부분 방식은 직각 위상검파 방식이다. 이 직각 위상 검파방식은 2개의 신호채널간의 이득과 위상평형문제가 Hardware 구현시 심각하게 나타난다.

2차 샘플링방식은 Halberg에 의해 소개가 되었고, 이 때의 방식은 단지 직각 위상검파기를 2차 샘플링하는 샘플 앤 홀드(S/H: sample and Hold)로 취환했기 때문에 두개의 위상 채널(phase channel) 간의 이득 및 위상의 평형문제는 남아있으며 다중 게이트 및 2차원 도플러 시스템으로서는 부적합하다.<sup>8)~9)</sup>

본 연구에서는 수신 신호를 직접 변환기 중심주파수 영역(RF영역)에서 ADC(Analog / Digital Convertor)로 신호를 2차 샘플링을 하고 DSP(digital signal processor)로 신호처리 하므로써 hardware의 간소화는 물론 동상과 직각위상의 2개의 위상 채널간 평형 문제를 해결하고, 직렬신호처리를 하므로써 기존의 2차원 도플러 시스템의 element 채널간의 평형 문제까지 해결하므로써 기본적으로 2차원도플러 시스템에 적합한 시스템을 제안하고자 한다.

## 2. 도플러 시스템의 기본 원리

### 2-1 도플러 시스템의 동작원리

인체에 초음파를 발사하여 혈액 속의 산란입자인 혈구에서 반사된 신호로부터 도플러 주파수편이를 측정하므로써 혈류 속의 속도를 알수 있다. 그림.1에

서와 같이 움직이는 물체와 측정한 도플러 주파수의 관계식은 다음과 같다.<sup>1)</sup>

$$F_d = \frac{2V \cos \theta}{C} \cdot F_0 \quad (1)$$

여기에서

$F_d$ : 측정한 도플러 주파수 편이.

$F_0$ : 송신초음파의 주파수.

$V$ : 이동 물체의 속도.

$C$ : 초음파 속도.

$\theta$ : 변환기와 혈류의 흐름이 이루는 각.

위와 같이 도플러 효과를 이용한 초기의 도플러 시스템은 연속적으로 초음파를 발사하는 연속파 도플러 시스템(Continuous Wave Doppler System)이었다. 연속파 도플러 시스템은 송신 초음파가 연속성을 가지므로 빔(beam)이 진행하는 모든점에서 속도가 검출되어서 특정 위치에서의 도플러 검출은 어렵다. 위치 정보에 대한 문제점은 연속파 대신에 초음파를 짧은 버스트(burst)로 송신하는 펄스도플러 시스템을 사용하면 해결 할수 있다. 펄스 도플러 시스템은 일정주기를 갖는 짧은 버스트로 초음파 송신신호를 발사하므로 한개의 변환기로 송수신을 결합할수 있다. 또한 송신 초음파 비임의 진행 방향에 놓인 전체 샘플 채적 중에서 측정하고자 하는 특정부위에 대한 정보만을 취함으로써 다른 샘플 채적으로부터 신호의 중첩을 막을 수 있다. 그러나 그림.1과 같은 원리를 갖는 단일 채널 펄스 도플러 시스템에서는 위치에 따라 치우친 정보를 얻을 수 있다.

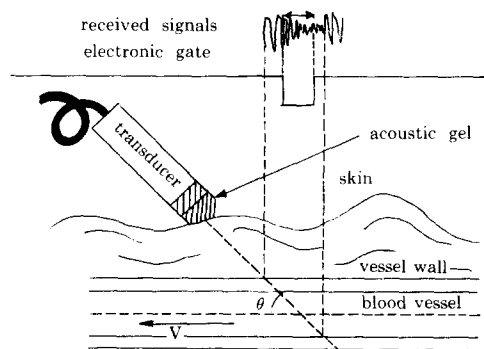


그림 1. 도플러 시스템의 동작원리.

즉 같은 혈관 내에서도 샘플 체적이 혈관 벽에 치우치면 혈구의 간섭이 심해 혈구의 흐름이 매우 불규칙 할것이며 혈관중심부에서는 매우 빠른 정보를 얻게 될것이다. 이렇게 혈류속도정보가 치우치는 것을 방지하기 위해서 여러개의 샘플체적을 취해 혈관 내 혈류속도 분포를 알수 있는 다중 채널 펄스 도플러 시스템이 개발되었다. 이러한 다중 채널 펄스 도플러 시스템에 초음파 영상장치를 결합하여 2차원적으로 혈류의 속도 정보를 알수 있게 한 것이 2차원 펄스 도플러 시스템이다.<sup>6)-7)</sup>

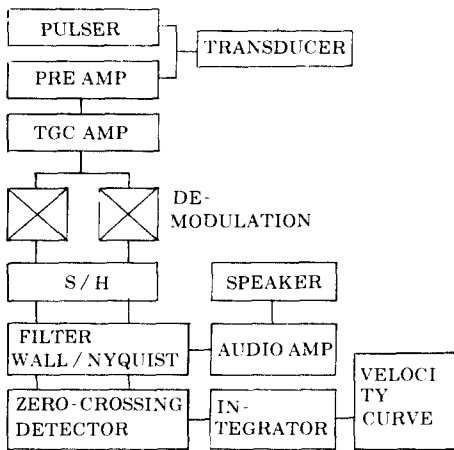


그림 2. 직각 위상 검파를 이용한 펄스 도플러 시스템.

### 2-2 직각 위상 검파 방식을 이용한 기존의 펄스도플러 시스템

기존의 직각 위상 검파 방식을 사용한 펄스 도플러 시스템의 전체적인 블럭 다이어그램을 그림[2]에 나타내었다.

이 시스템은 변환기를 통하여 수신된 신호를 TGC (Time Gain Control) 증폭기에서 깊이에 따른 감쇄를 보상하여 주기 위해서 대수함수적으로 이득을 주어서 증폭을 시킨다. 이 RF(Radio Frequency) 영역의 수신신호를 복조기에서 송신 초음파의 중심 주파수와 같은 주파수를 갖는 현형파를 곱해주어서 수신 신호의 주파수 대역을 기저대역으로 떨어뜨려서 신호를 처리한다.

이동 반사체로부터 반사된 수신신호는 주파수 및 위상 변조가 되어있다.

수신 신호의 일반적인 형태를 다음과 같이 정의하면

$$R(t) = A \cos \omega_0 t + U \cos(\omega_0 + \omega_u)t + L \cos(\omega_0 - \omega_1)t \quad (2)$$

가 되며 여기서

$R(t)$ : 송신 신호.

$\omega_0$ : 송신 초음파의 중심 주파수.

$A$ : 정지한 반사체에 의한 반사 신호 크기

$U$ : 정방향 이동체에 의한 신호의 크기

$\omega_u$ : 정방향 이동체에 의한 도플러 주파수

$L$ : 부방향 이동체에 의한 신호의 크기

$\omega_1$ : 부방향 이동체에 의한 도플러 주파수

직각 위상 검파를 하기 위해서 코사인을 곱한 동상 위상신호  $V_i(t)$ 와 사인을 곱한 직각위상신호  $V_q(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_i(t) &= R(t) \cos \omega_0 t \\ &= \frac{1}{2} [A + A \cos 2\omega_0 t + U \cos(2\omega_0 + \omega_u)t \\ &\quad + U \cos \omega_u t + L \cos(2\omega_0 - \omega_1)t + L \cos \omega_1 t] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_q(t) &= R(t) \sin \omega_0 t \\ &= \frac{1}{2} [A \sin 2\omega_0 t + U \cos(2\omega_0 + \omega_u)t \\ &\quad - U \sin \omega_u t + L \sin(2\omega_0 - \omega_1)t + L \sin \omega_1 t] \end{aligned}$$

대역제거 여파기로 직류 성분과 고조파 성분 그리고 클루티성분을 제거하면,

$$V'_i(t) = \frac{1}{2} [U \cos \omega_u t + L \cos \omega_1 t] \quad (3)$$

$$V'_q(t) = \frac{1}{2} [-U \sin \omega_u t + L \sin \omega_1 t] \quad (4)$$

이렇게 처리된 신호는 위상정보를 포함하고 있으므로 주파수대 전압변환 및 위상비교를 행하여 속도를 구할수 있다. 그림.2과 같은 직각 위상 검파에서

는 사인과 코사인을 곱하는 2개의 복조기를 사용한 다. 이 때 2개의 복조기를 통한 아날로그 위상 채널 에 있어서 소자간의 오차로 인한 평형성 문제가 있 으며, 이것을 사용한 기존의 2차원 도플러 시스템의 경우는 더욱 심각하다.

그림. 3은 기존의 2차원 도플러 시스템인 병렬 다 중 채널 2-D 도플러 시스템이다. 수십개의 채널을 가지고 있는 다중게이트 및 2차원 도플러 시스템에 서는 위상 및 이득의 평형성 문제가 심각한 영향을 주며 하드웨어 자체도 상당히 복잡해 진다.

### 2-3 2차 샘플링 방법(second-order sampling method)을 이용한 펄스 도플러 시스템

직각 위상 검파 방식의 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 수신신호를 TGC 증폭기를 거친후 RF 영역에서 직접 ADC로 2차 샘플링 방법을 사용 한다. 직각위상 검파 방식에서와 같은 동상위상과 직각위상신호를 얻기 위해서 동상위상 신호를 얻기 위한 샘플링 클럭보다 90도 위상차를 갖게 샘플링하 여 직각위상 신호를 얻는다.

이 샘플링 클럭을 시간축 상에서 보면

$$\frac{1}{(4 \cdot \text{초음파의 중심주파수})}$$

만큼 시간 지연을 가져야 하며, 고속의 S/H(Sample and Hold)를 구동 시켜야 하며 동작범위(Dynamic range)가 60dB 이상이 되어야 한다.<sup>17)</sup>

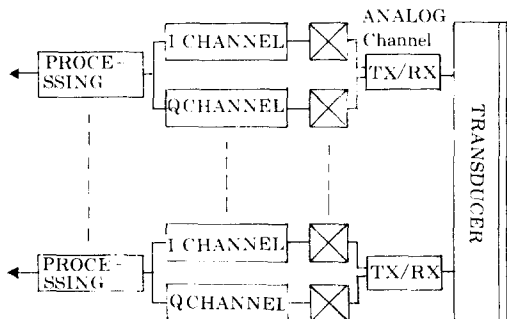


그림 3. 병렬 다중 채널 2-D 펄스 도플러 시스템.

그러나 초음파의 중심주파수가 올라 갈수록  $1/4f_0$  의 시간지연을 주어 연속적으로 샘플링할수 있는 A/D Converter의 구동은 현실적으로 무척 어렵다.(예를 들어 초음파의 중심주파수가 3.5MHz일때  $1/4f_0$ 는 71nsec이므로 conversion rate가 14MHz 12bit A/D Converter가 필요하게 된다) 이것을 직각 위상 신호를 얻기 위한 샘플링 클럭을 동상위 상 신호를 얻기 위한 샘플링 클럭보다  $3/4f_0, 5/4f_0$  만큼의 시간지연을 주어 샘플링하여 동상과 직각 위상 신호를 얻을 수 있으므로 ADC의 Conversion rate를 최소한 3배 이상 떨어 뜨릴수 있다. 이때 시 간지연을 다르게 주어 샘플링함에 따라 동상과 직각 위상 신호의 위상이 앞섬과 뒤짐을 다음식에서 볼수 있다. 즉, 송신 신호를

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a(t-mT)\cos[\omega_0(t-mT)] \text{ 라 할때}$$

여기서,  $a(t) = \exp(-t^2/\sigma^2)$

T는 펄스 반복주기

수신신호 R(t)는 송신신호가 지연된 형태로 나타난 다.

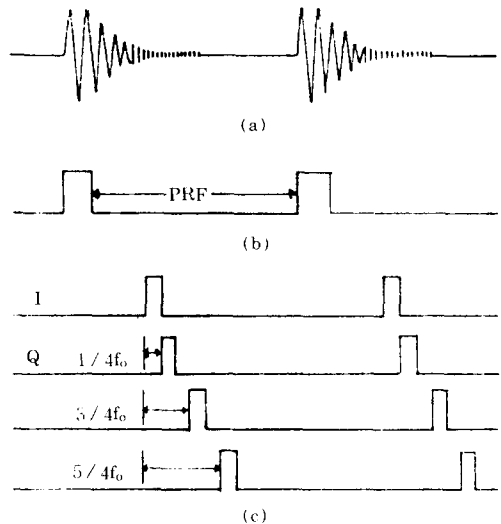


그림 4. 2차 샘플링방식  
(a) 수신신호  
(b) 펄스 반복 주기  
(c) 동상 위상 및 직각 신호 샘플링 출력

$$R(t) = \sum_{m=0}^{\infty} a(t-mT + 2V/CmT) \cos[\omega_0(t-mT + 2V/CmT)]$$

여기서, V: 산란 입자 속도

C: 초음파의 음속

k: = 2V / C

t = nT 일때 샘플링한 신호는

$$x(n) = R(t)|_{t=nT} = a(knT) \cos(\omega_0 knT) \text{ 이고}$$

t = nT + τ 일때 샘플링한 신호는

$$y(n) = R(t)|_{t=nT+\tau} = a(\tau + knT) \cos[\omega_0(\tau + knT)]$$

이다.

τ = 1 / 4f<sub>0</sub>, 3 / 4f<sub>0</sub>, 5 / 4f<sub>0</sub> 일때

$$y(n) = -a(\tau + knT) \sin \omega_0 knT$$

$$= a(\tau + knT) \sin \omega_0 knT$$

$$= -a(\tau + knT) \sin \omega_0 knT \text{ 이다.}$$

그러므로 샘플링한 신호의 위상이 앞서거나 뒤짐을 볼수 있다.

수신된 신호에서 동상과 직각위상 신호를 얻기 위한 샘플링 클럭과의 관계를 그림 [4]에 나타내었다.

그림의 (a)는 수신신호를 (b)는 송신 초음파의 펄스 반복 주기(pulse repetition frequency)를 (c)는 동상위상과 직각위상 신호를 얻기 위한 샘플링 출력을 나타낸다.

이와 같은 RF영역에서 2차 샘플링을 이용한 펄스도플러 시스템의 블록 다이어그램을 그림.5에 나타내었다. 그림.5에서 보는 바와 같이 TGC증폭기

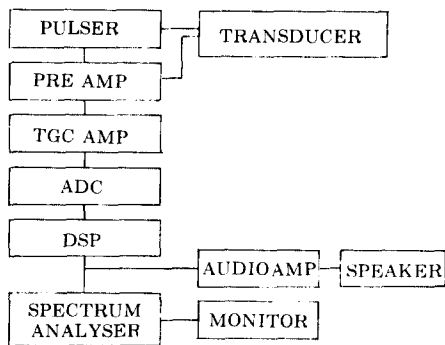


그림 5. 2차 샘플링을 이용한 펄스 도플러 시스템.

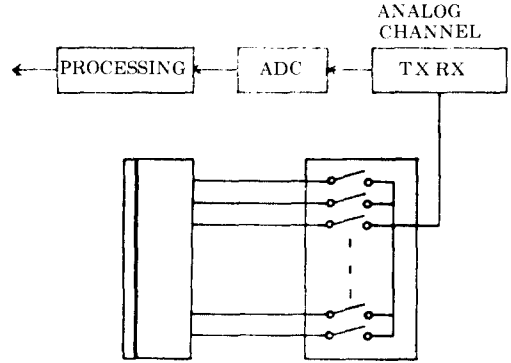


그림 6. 직렬 프로세싱을 이용한 2-D 펄스 도플러 시스템.

를 거친 뒤 바로 ADC로 2차 샘플링을 한 뒤 DSP (digital signal processor)로 신호처리를 하였다. 이러한 방식을 통해서 기존의 2개의 아날로그 위상 채널 간의 평형성을 해결하는 것은 물론 2차원 도플러 시스템에 적용하기 위하여 그림.6와 같이 직렬 프로세싱을 사용한다. 직렬 프로세싱을 하므로써 다중 채널 및 2차원 도플러 시스템에서 기존 방식인 동일 시스템을 병렬로 운용한다는 단점과 동일한 element 채널 간의 평형성 문제를 동시에 해결하였다.

### 3. 시스템 구성

본 논문에서 구현한 2-D 도플러 시스템은 중심 주파수가 3.5MHz인 송수신을 겸한 리니어 변환기를 사용하였으며 시스템의 규격은 8gate × 32 element 이다. 시스템의 출력은 stereo speaker로 들을수 있는 음성신호와 각 채널당 FFT 처리와 스펙트럼결과를 모니터에 표시한다. 제작된 시스템의 전체 구성도는 그림. 7와 같다.

먼저 송수신기 부분에서의 제어신호는 전력용 MOS FET를 사용하여 변환기를 여기시켜서 주파수 3.5MHz의 초음파 120μs(1 / PRF) 간격으로 버스트로 발사한다. 발사된 송신신호는 직렬 신호 처리부의 32 element 채널중 선택된 한 채널을 통하여 발사되고 혈액내의 혈구에서 반사된 도플러 신호는 같은 채널

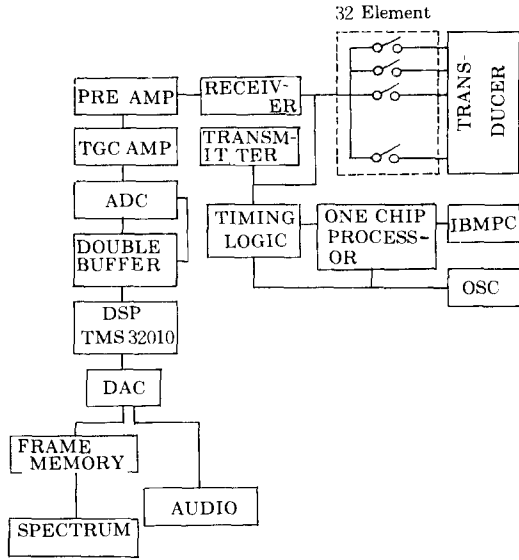


그림 7. 전체 시스템 구성도.

을 통하여 전치 증폭기(Pre amplifier) 및 TGC 증폭기로 보상한 후 ADC로 2차 샘플링한다.

직렬 신호 처리부에서는 기존의 동일 채널을 병렬로 운용하는 단점을 제거하는 동시에 high voltage switch HV1214를 사용해 각 채널 시스템간의 평형성 문제를 해결하였다.

HV1214의 timing을 제공하는 회로는 one-chip microprocessor 8751과 그 주변 logic이다. 여기서 2-D 도플러 시스템의 전 system timing을 제어하며 ADC의 I와 Q 샘플 펄스를 제공한다. 시스템 사양변경이 용이하게 IBM-PC로부터 8751로 Timing DATA의 Down-loading이 가능하게 설계하였다.

ADC에서 샘플된 신호는 도플러 스펙트럼 및 평균 주파수를 구하기 위하여 signal processor TM-S32010에 인가한다. 제작된 TMS32010 시스템은 간단한 Hardware로 구성되고 Software 변경만으로서 FFT나 autocorrelation이 가능하다.

여기서 사용된 프로그램은 2-D 시스템으로서의 타당성을 검증하기 위해서 각 채널당 FFT를 수행하였다. 수행된 DATA수는 128 point이며 DATA 검출에서 사용된 ADC는 CRYSTAL CSZ 5412이며 12bit, Dynamic range 72dB이다. TMS32010

에서 분석된 스펙트럼 결과를 모니터에 스크롤 모드로 표시하였다.

#### 4. 실험 결과 및 검토

제작된 시스템의 제어신호와 인체에 적용하여 얻은 결과를 그림. 8에서 그림. 14에 나타냈다.

그림. 8은 analog switch의 32 element 채널 중 CH1과 CH2의 Burst된 송신 신호이다.

각 채널이 선택된 뒤의 신호는 매우 안정된 것을 볼수 있다.

그림. 9은 전치 증폭기의 출력과 TGC 증폭기의 출력을 나타낸다.

일반적으로 도플러 시스템은 혈류에서 오는 수신 신호는 클루터에 비하여 40dB정도 적기 때문에 잡음 제거가 도플러 시스템 제작에 커다란 어려움을 준다. 제작된 시스템은 잡음의 크기가 30mV-50mV이며 기존의 특성 보다 잡음이 다소 증가되어 있지만 32 element의 모든 채널이 단일 채널 특성을 가지므로 채널간의 평형성 문제는 발생하지 않는다.

그림 .10은 수신된 신호와 8개의 샘플링 펄스를 나타낸다. 이 샘플링 펄스는 CSZ5412 ADC의 Hold 신호에 입력되고 실제 적용시 부논리로 되어 있다.

그림 .11은 I와 Q의 도플러 신호를 나타낸다.

그림 .12은 도플러 신호를 (a)1/4f<sub>0</sub>, (b)3/4f<sub>0</sub>, (c)5/4f<sub>0</sub>의 샘플링 클럭으로 S/H하여 FFT한 결과를 스크프에 표시했다. 실제적으로 목부위의 같은

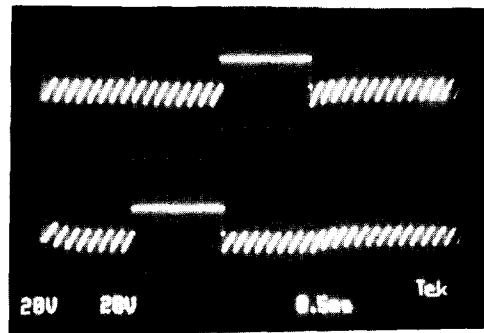


그림 8. Analog Switch의 CH1과 CH2.

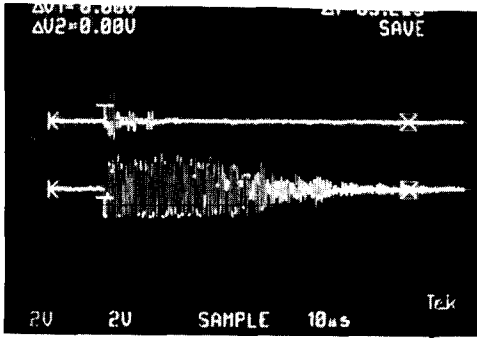
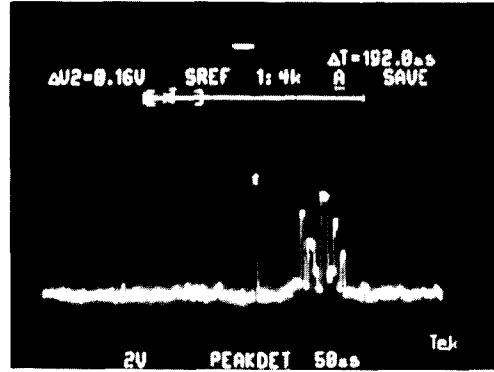


그림 9. 전치 증폭기 출력과 TGC 증폭기 출력



(a)

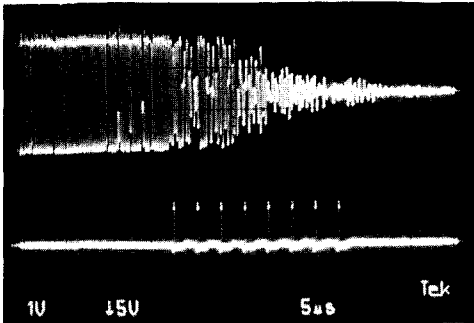
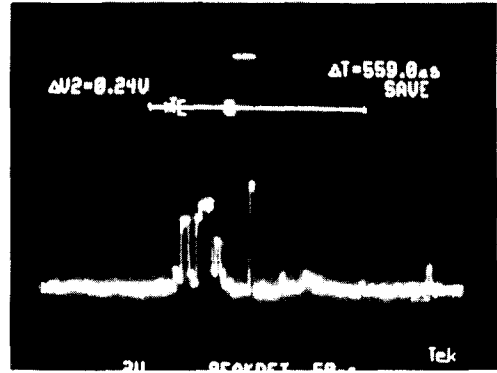


그림 10. 수신 신호와 gate pulse.



(b)

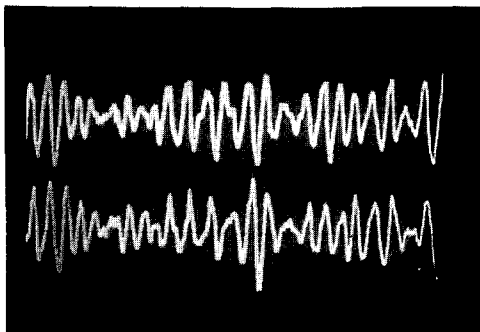
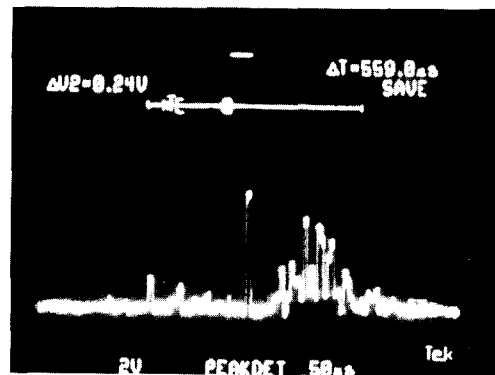


그림 11. In-phase 와 quadrature-phase Doppler signal.



(c)

그림 12. 샘플링 클럭에 따른 정방향 혈류신호의 스펙트럼.

(a)  $1/4f_0$  (b)  $3/4f_0$  (c)  $5/4f_0$

정방향 혈류의 흐름을 측정했는데 위상의 앞섬과 뒤짐을 볼 수 있다.

FFT한 결과를 모니터상에 표시해 그림. 13,14에 나타내었다.

출력 스펙트럼 형태는 각 주파수 성분의 크기를 알수 있도록 256 gray-level로 표시하거나 최고의 혈류속도를 알기쉽게 일정한 문턱값(threshold value)와 비교하여 최대 밝기로 모든 주파수 성분을 표시하는 2 gray-level로 나타낸다.

그림. 13 경우 목부위에서 측정한 정방향 혈류 신호인 동맥의 스펙트럼 변화이다.

그림. 14 경우 목부위에서 측정한 부방향 혈류 신호인 정맥의 스펙트럼 변화이다.

측정 결과에 의하여 정방향 혈류는 최고 2.5KHZ, 최저 210HZ, 부방향 동맥 혈류 주파수는 -1KHZ

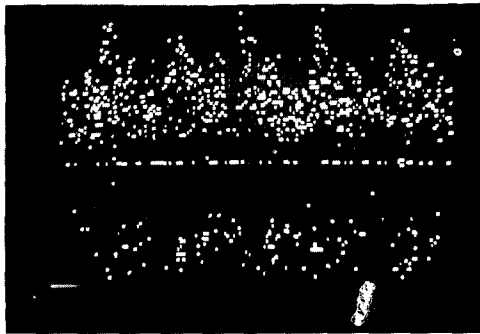


그림 13. 정방향 혈류신호의 스펙트럼 변화

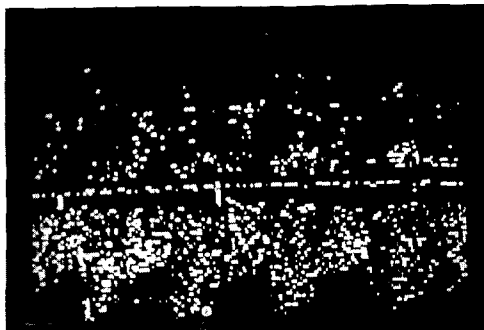


그림 14. 부방향 혈류신호의 스펙트럼 변화

에서 -200HZ이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 2차 샘플링을 이용한 새로운 2차원 도플러 시스템을 제작하였다. 제작된 시스템은 수신신호를 직접 RF단에서 ADC로 2차 샘플링하고 디지털 신호처리 하여 Hardware 복잡성과 채널간의 평형문제를 해결하였고 시리얼 프로세싱을 하여 2-D 시스템에서 평형성 문제도 해결하였다.

제작된 2-D 도플러 시스템의 동작여부를 알기 위하여 각 element별로 FFT를 한 결과 혈류 속도에 비례하는 정확한 주파수 측정과 정상적인 혈류 정보를 보여주었다.

사용한 DSP-Chip TMS32010 시스템은 간단한 software 변경만으로 Autocorrelation이나 Zero-Crossing 출력을 구할수 있다.

본 시스템을 스캐너와 함께 사용하여 체내의 2차원 영상정보와 2차원 혈류관계의 정보를 알수 있는 훌륭한 진단장치를 개발할 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학 재단 목적 기초연구비의 자원에 의하여 이루어진 바 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) James F.HAVLICE, John C. Taenzer, "Medical ultrasonic imaging: An overview of principles and instrumentation", Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No.4, April 1979, pp.620-641.
- 2) TOSHIBA, "Ultrasound Imaging", SSH-65 A / PSB-25R, PSB-37A, 1986.
- 3) D. L. Franklin, et al., "Blood flow measured by Doppler frequency shift of backscattered ultrasound", Science, Vol.134, 1961, pp. 564-568.
- 4) P. N. Twiss "Biomedical Ultrasonics" Academic Press, London, 1977.
- 5) D. W. Baker, "Pulsed ultrasonic Doppler



- blood-flow sensing," IEEE Trans. Sonic. Ultrason., SU-17, Jul. 1979, pp. 170-185.
- 6) K. Kristoffersen, B.A.J. Angelse, "A comparison between mean frequency estimators for multigated Doppler systems with serial signal processing", IEEE Trans. ON BME, vol. BME-32, No.9, september 1985, pp 645-657.
  - 7) 김 병철, 박 세현, 이 행세, 김 영길 "다중 채널 펄스 도플러 장치에 관한 연구"의공학회지, 제 7권, 제1호, pp. 75-79, 1986.
  - 8) chihiro kasai, koroku namekwa, "real time Two-dimensional Blood flow Imagining using an autocorrelation Technique", IEEE trans, on sonic and ultrasonic, Vol.su32, No.3, May 1985.
  - 9) L. I. Halberg and K. E. Thiele, "Extraction of blood flow information using Doppler-shift ultrasound," Hewlett-Packard journal, Jun 1986, pp. 35-44.
  - 10) G. H. Van Leewen, A. P. CT. Hocks, "Simulation of Read time frequency estimation for pulsed Doppler system", Ultrasonic Image 8, 1986, pp.252-271.
  - 11) Grandchamp, P.-A., A novel pulsed directional doppler velocimeter: the phase detection profilometer, in Ultrasonics in Medicine, E. Kazner, H. R. Muller and M.de Vlfeger cds., pp. 122-132 (Excerpta Medica, Amsterdam, 1975).
  - 12) McLeod Jr., F.D., A directional blowmeter, Digest 7th Int. conf. Med. & Biol. Eng., Stockholm, 3-4, p.213 (1967). Abstract only.
  - 13) Angelsen, B. A. J., Instantaneous Frequency, mean frequency, and variance of mean frequency estimators for ultrasonic blood velocity Doppler signals, IEEE Trans. Biomed. Engin. BME-28, 733-741 (1981).
  - 14) Namekawa, K., Kasai, C., Tsukamoto, M. and Koyano, a., Real time bloodflow imaging system utilizing autocorrelation techniques, in Ultrasound '82, R. A. Leraki and P. Morley and P. Morley eds., 203-208 (Pergamon press, Oxford, 1982).
  - 15) 백 광열 "FFT를 이용한 초음파 펄스 도플러 유속계의 구현에 관한 연구" KAIST석사학위 논문, 1986.
  - 16) Young-Kil Kim "Etude et realisation d'un systeme Doppler pulsee multiporte (128) directionnal A traitement de signal sequentiel" Ph. D thesis, JUNE, 1984.
  - 17) 김 영길 "초음파 펄스 도플러에서 2차 샘플링 및 프론트 앤드 스테어링 과 주사운동 보상에 관한 연구"KAIST박사 학위 논문, 1988.
  - 18) 김 재경, 박 세현, 김 영길, "2차 샘플링 방법을 이용한 단일채널 펄스 도플러 장치에 관한 연구", 아주 대학 논문집 제 12권, 1989. 2, pp.5-10.
  - 19) 강 충신, 박 세현, 김 영길, "스펙트럼 분석을 이용한 연속 초음파 도플러 장치에 관한 연구", 전자공학회 논문집 제25권 12호 1988년 12월