

Auto-Correlation을 이용한 펄스 도플러 시스템에 관한 연구

* 임춘성, 강승신, 이행세, 김영길
* 아주대학교 전자공학과

A study on the development of Pulsed Doppler System using Auto-Correlation

Chun Sung Lim, Chung Shin Kang, Hang Sei Lee, Young Kil Kim
*Dept. of Electronic Eng. A-Jou University

<Abstract>

Ultrasound Doppler Diagnostic System utilizes the Doppler effect for measurement of blood velocity.

The sign of the Doppler frequency shift represents blood flow direction.

Pulsed Doppler System uses Phase detector and zerocrossing method to produce simultaneous independent audio and velocity signals for forward and reverse blood flow direction in the time domain, had been fabricated.

But time-domain analyzing such as audio evaluation and zerocrossing detection for instantaneous and mean frequency measurement doesn't provide both an accurate and quantitative result.

Therefore, it is necessary to adopt frequency domain technique to improve system performance.

In this paper, we describe a unit which is composed of Pulsed Doppler System and real-time spectrum analyzer (installed TMS 32010 DSP Chip).

This unit shows time-dependent spectrum variation and mean velocity of blood signal.

I. 서론

최근의 전자공학 기술의 발달에 따라 의용 초음파 진단기의 성능이 획기적으로 개선되어 이제는 제2의 청진기로서 역할을 담당하게 되었으며, 초음파를 사용하는 의료 진단장치는 인체를 이온화시키지 않으므로 정시간 사용하더라도 환자나 진단자에게 해가 없고 또한 실시간처리처리가 가능하므로 동적영상이나 이동물체에 대한 정보를 제공하며 경제성이 뛰어나 우수한 의료장비로 평가되고 있다[1][2].

인체에 초음파를 발사하고 생체부들에서 반사된 신호를 이용하는 방법에 따라 생체저항이 다른 경계면 부분에서 초음파가 반사되는 신호를 측정하는 A-Scan B-Scan C-Scan과 발사된 초음파의 주파수와 이동하는 물체에서 반사된 초음파의 주파수를 비교하는 Doppler system으로 분류된다.

이러한 도플러 장치들은 진단서 주로 혈류의 속도나 심장등의 움직임을 관측하는데 사용되며 때로는 B-Scanner의 영상장치와 결합되어 사용되기도 한다.

본 논문에서는 TI사의 DSP Chip인 TMS32010 을 이용하여 펄스도플러 시스템의 혈류 신호를

실시간으로 주파수 영역에서 혈류 방향을 분리하고 방향분리된 혈류신호의 시간에 따른 스펙트럼 변화를 모니터에 나타내고 이로 부터 평균속도를 구하는 시스템의 구성과 그 인체실험(IN VIVO)결과에 대해 기술한다.

II. 펄스 도플러 시스템

펄스 도플러 시스템에서는 초음파 소자에서 발생하는 신호를 $a(t)\cos\omega_0 t$ 라고 표시하면 이 신호는 주기적(PRF : pulse repetition frequency)으로 반복되어 나타나며 그림1과 같다.

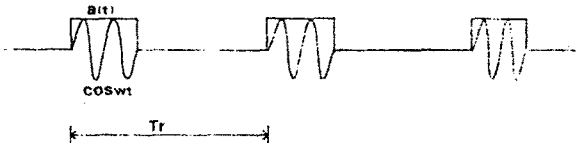


그림1. 송신 신호

이 송신신호를 움직이는 목표물에 송신하여 반사되어 돌아오는 신호로부터 도플러 신호를 얻을 수 있다. 혈류 속도를 측정하기 위해 초음파 발생소자는 고정되어 있고 목표물이 Transducer방향으로 다가올 때 일어나는 도플러 현상을 알아본다[그림2].

초음파 송신 신호를

$$e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a(t-nTr)\cos\omega_0(t-nTr) \text{라 하면}$$

$n, n+1$ 번째 송신신호로부터 반사되어 돌아오는 신호를 r_n, r_{n+1} 로 나타내면 아래식과 같이 표시될 수 있다.

$$r_n = a\left(t - \frac{2Rn}{C}\right)\cos\omega_0\left(t - \frac{2Rn}{C}\right)$$

$$r_{n+1} = a\left(t - \frac{2R(n+1)}{C}\right)\cos\omega_0\left(t - \frac{2R(n+1)}{C}\right)$$

$$= a\left(t - \frac{2(Rn-VTr)}{C}\right)\cos\omega_0\left(t - \frac{2(Rn-VTr)}{C}\right)$$

여기서,

- $Rn, Rn+1$: 목표물까지의 거리
- Tr : 펄스 반복주기 (=1/PRF)
- f_0 : 송신신호의 중심주파수
- C : 매질내에서의 초음파속도

위의 수식으로 부터 위상편이 및 주파수 편이를 구하면

$$\Delta \phi_n = \phi_{n+1} - \phi_n = \omega_0 \frac{2VTr}{C}$$

$$\Delta \omega_0 = \frac{\phi_{n+1} - \phi_n}{Tr} = \frac{2V\omega_0}{C}$$

$$\Delta f_0 = \frac{2Vf_0}{C}$$

윗 식에서 알수 있듯이 주파수 편이는 목표물의 속도에 비례하게 되며 목표물의 속도가 일정하면 주파수 편이도 일정하게 된다. 일반적인 경우 Transducer와 혈류가 θ 의 각도를 가지고 있으므로 이때 발생하는 도플러 주파수는 다음과 같다 [그림 2].

$$\Delta f = \frac{2Vf_0 \cos \theta}{C} \quad V = \frac{\Delta f C}{2f_0 \cos \theta}$$

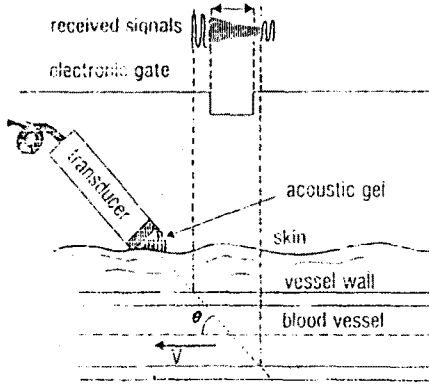


그림 2. 펄스 도플러 시스템의 혈류신호 검출

혈관내에서 반사된 수신신호로부터 혈류 속도 및 방향에 대한 성분을 검출하는 방법으로는 coherent 도플러 방식과 noncoherent 도플러 방식이 있다.

Noncoherent 도플러 방식은 coherent 도플러 방식보다 간단하나 속도 성분인 도플러 신호와 혈관벽이 움직이는 현상에 의해 발생된 clutter 신호가 혼합된 비율에 따라 도플러 신호가 불규칙적으로 변화되는 큰 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하는 방식으로 coherent 펄스 도플러 방식을 사용하여 발사된 신호와 반사신호의 위상차이로부터 도플러 신호를 검출할 수 있다. 이동 반사체에 의해 반사된 수신신호는 주파수 및 위상변조가 되어 있으며 위상의 전후는 혈류 흐름방향에 대한 정보만을 포함하고 있다. 수신신호의 주파수 스펙트럼은 중심주파수에 편이되어 있으며 직각 위상검파 (Quadrature detection)를 하여 주파수 편이를 검출할 수 있다 [그림 3].

수신신호의 일반적인 형태는 $R(t) = S \cos \omega_0 t + F \cos(\omega_0 + \omega_{wd})t + R \cos(\omega_0 - \omega_{reu})t$ 이며 여기서,

- R(t) : 수신신호
- ω_0 : 송신 초음파의 중심주파수
- S : 정지한 반사체에 의한 반사신호의 크기
- F : 정방향 (Transducer로 다가오는 방향) 이동 반사체에 의한 반사신호의 크기
- ω_{wd} : 정방향 이동 반사체에 의한 도플러 주파수
- R : 부방향 (Transducer에서 멀어지는 방향) 이동 반사체에 의한 반사신호의 크기
- ω_{reu} : 부방향 이동 반사체에 의한 도플러 주파수

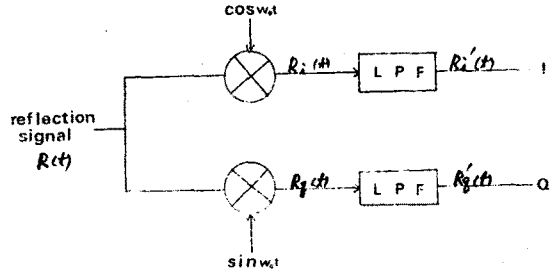


그림 3. 반사 신호로부터 도플러 신호 검출

직각 위상 검파를 통하여 $\cos \omega_0 t$ 로 곱한 in-phase 항 $R_i(t)$ 와 $\sin \omega_0 t$ 를 곱한 quadrature-phase 항 $R_q(t)$ 는 다음과 같다.

$$R_i(t) = R(t) * \cos \omega_0 t = \frac{1}{2} [S + S \cos 2\omega_0 t + F \cos(2\omega_0 + \omega_{wd})t + F \cos \omega_{wd} t + R \cos(2\omega_0 - \omega_{reu})t + R \cos \omega_{reu} t]$$

$$R_q(t) = R(t) * \sin \omega_0 t = \frac{1}{2} [S \sin 2\omega_0 t + F \sin(2\omega_0 - \omega_{reu})t - F \sin \omega_{reu} t + R \sin(2\omega_0 + \omega_{wd})t + R \sin \omega_{wd} t]$$

필터를 사용해서 고주파와 stationary에 의한 직류성분을 제거하면 다음과 같다.

$$R_i'(t) = \frac{1}{2} [F \cos \omega_{wd} t + R \cos \omega_{reu} t]$$

$$R_q'(t) = \frac{1}{2} [-F \sin \omega_{reu} t + R \sin \omega_{reu} t]$$

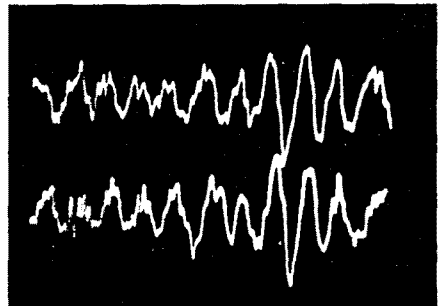
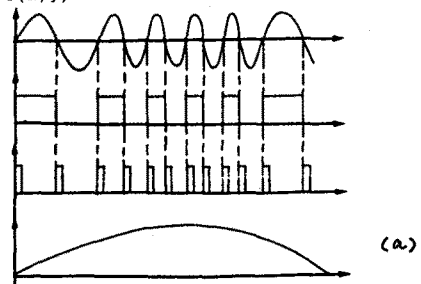


그림 4. In-phase와 Quadrature-phase의 도플러 신호

이렇게 처리된 신호는 위상정보를 포함하고 있으므로 phase detector나 zero-crossing, Auto-Correlation 방법등을 이용해서 혈류의 속도와 흐름의 방향등을 구할 수 있다. 도플러 신호는 일반적으로 가청 주파수 범위내에 있기 때문에 검출된 신호를 음성 증폭기를 통해 소리를 들어 도플러 신호를 판별할 수 있는 가장 간단한 방법이 있으나, 실제적인 혈류의 속도와 방향을 구하기 위해서는 두 신호의 상대적인 위상차를 비교해서 혈류의 방향을 검출하는 phase detector 방법과 도플러 영점(zero)을 지날 때마다 입력에서 발생하는 도플러 신호의 정교차수에 비례하는 출력값을 구하고, 이때 구한 출력전압의 크기를 주파수의 평균값을 나타내는 zero-crossing 방법이 있으나 [그림 5(a)],



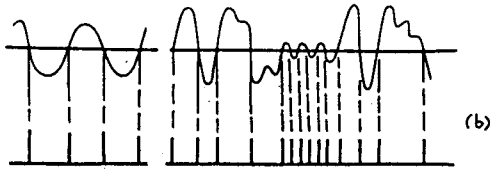


그림 5. zerocrossing원리 및 문제점

그림 5(b)에서 보듯이 영점을 교차하지 않고 Doppler 신호가 변할때는 이들 출력전압의 크기로 나타내지 못한다는 단점이 있으므로, DSP chip인 TMS32010을 사용하여 손쉽게 디지털처리로 Auto-Correlation을 하여 손쉽게 정확한 혈류 방향과 속도를 검출했다 [그림 6].

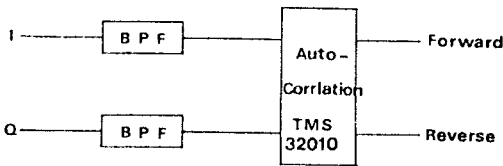


그림 6. 도플러 신호의 Auto-Correlation

Correlator의 입력 신호가 다음과 같다 정의하면 [3][4],

$$x'(t) = Ri(t) + jRq(t) = A(t) \exp[j\phi(t)]$$

여기서, $Ri(t)$: in-phase signal

$Rq(t)$: quadrature-phase signal

디지털 시스템의 주파수 측정 알고리즘에 의해 평균 주파수 [5,6]은 다음과 같다.

$$f'(t) = 1/2\pi \{ \phi(t) - \phi(t-1) \}$$

$$= 1/2\pi \{ \tan^{-1}(Rq(t)/Ri(t)) - \tan^{-1}(Rq(t-1)/Ri(t-1)) \}$$

그러므로, 주파수 편이가 $\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t-1)$ 이면,

$$\tan[\Delta\phi(t)] = \frac{Rq(t)/Ri(t) - Rq(t-1)/Ri(t-1)}{1 + Rq(t)Rq(t-1)/[Ri(t)Ri(t-1)]}$$

$$\tan^{-1}(\tan[\Delta\phi(t)]) = \Delta\phi(t)$$

평균 주파수를 다시 적으면,

$$f'(k) = 1/2\pi \tan^{-1} \frac{Ri(t-1)Rq(t) - Ri(t)Rq(t-1)}{Ri(t)Ri(t-1) + Rq(t)Rq(t-1)}$$

신호 $x'(t)$ 의 Auto-Correlation 함수 $R(m)$ 의 계산치를 $R'(m)$ 라 하면,

$$R'(m) = 1/N \sum_{i=1}^N x'(t)x'(t-m) \text{ 이다.}$$

위의 평균 주파수는 $N=1$, $m=1$ 이라 하면 실수부와 허수부로 나눌 수 있으며,

$$f'(k) = 1/2\pi \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im } R'(1)}{\text{Re } R'(1)} \right\} \text{ 이다.}$$

Auto-Correlation $R(m)$ 과 스펙트럼 밀도 $S(w)$ 간의 상관관계는

$$R(m) = 1/2\pi \int_{-\pi}^{\pi} S(w) \exp[jwm] dw$$

위의 식에서 보듯이 도플러 신호의 중심 주파수에 대한 확실한 측정치를 구할 수 있으며, S/N 비가 평균 주파수 측정 결과에 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

III. Auto-Correlation을 이용한 펄스 도플러 시스템의 구현

제작된 시스템의 구성도를 그림 7에 나타내었다. 본 시스템은 그림 4의 In-phase와 Quadrature-phase의 신호를 입력으로 받아 Band Pass Filter를 통과 시켜 clutter성분을 제거하고 8-비트 A/D 변환기를 거쳐 TMS32010으로 Auto-Correlation을 위해 혈류의 평균속도를 구하였다.

이때 Auto-Correlation은 그림 8에서 보는바와 같이 좌로 한 point shift되면서 8-point를 취하여 Correlation을 계산하였다.

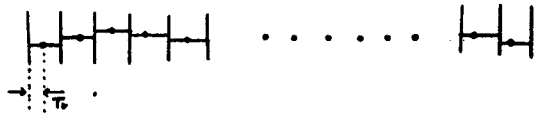


그림 8. 8-point Auto-Correlation

그림 9는 기존의 아날로그 처리방법인 zerocrossing방법으로 혈류 속도곡선을 구한 것이고, 그림 10은 Auto-Correlation을 디지털 처리를 하여 혈류 속도곡선을 구한 결과이다.

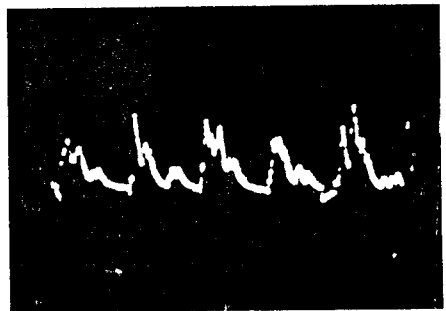


그림 9. zerocrossing을 이용한 속도곡선

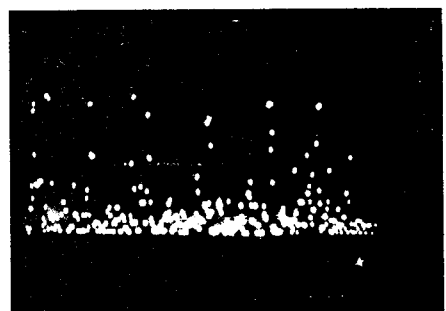


그림 10. Auto-Correlation을 이용한 속도곡선

IV. 결 론

기존의 펄스 도플러 시스템에서는 도플러 신호의 스펙트럼 및 다중 게이트 평균 주파수를 정확히 알 수 없었으나, 본 시스템에서 스펙트럼을 구할 수 없었으나, 본 시스템에서 스펙트럼으로 속도를 구하는 것을 디지털 처리를 함으로써 정확히 혈류속도를 구할 수 있고, 프로세서를 사용함으로써 PRF를 조절함으로써 다른 시스템의 입력 신호 역치 처리를 할 수 있으며 또한 간단하게 소프트웨어만의 변경으로 FFT나 zero-crossing출력을 얻을 수 있다[그림 11].

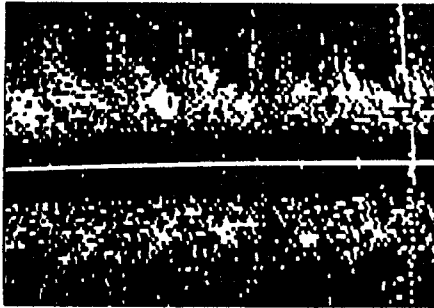


그림 11. FFT처리를 한 도플러 신호

V. 참고 문헌

- [1] Kenneth R.Erikson, Francis J, Fry, Joie P. Jones "Ultrasound in Medicine A review" IEEE, Su 21, No.3, JUL,1974
- [2] Raymond G.O'Connell, Jr "The role of Doppler Ultrasound in Cardiac Diagnosis" HEWLETT PACKARD Journal, JUN, 1986
- [3] Angelsen, B.A.J., "Spectral estimation of a narrow-band Gaussian process from the distribution of the distance between adjacent zeroes", IEEE Trans. Biomed. Engin. BME-27, pp.108-110, 1980
- [4] Kasai, C., Namekawa, K., Koyane, A. and Omoto, R., "Real-time two-dimensional blood flow imaging using an autocorrelation technique", IEEE Trans. Sonics Ultrasonic, SU-32, pp.458-463, 1985
- [5] Angelsen, B.A.J. and Kristoffersen, K., "On ultrasonic MFI measurement of velocity profiles in blood flow", IEEE Trans. Biomed. Engin. BME-26, pp.665-671, 1979
- [6] Hokes, A.P.G., "On the development of a multigate pulsed Doppler system with serial data processing", Thesis, Univ. of Limburg, The Netherlands, 1982
- [6] 김영길 "혈류 진단을 위하여 직렬데이터 처리를 하는 다중 채널 초음파 펄스 도플러 시스템에 관한 연구", 대한전자공학회지, 제7권, 제1호, 1986
- [7] 김병철, 박세현, 이형재, 김영길 "다중채널 펄스 도플러장치에 관한 연구", 의공학회지, 제7권, 제1호, 1986

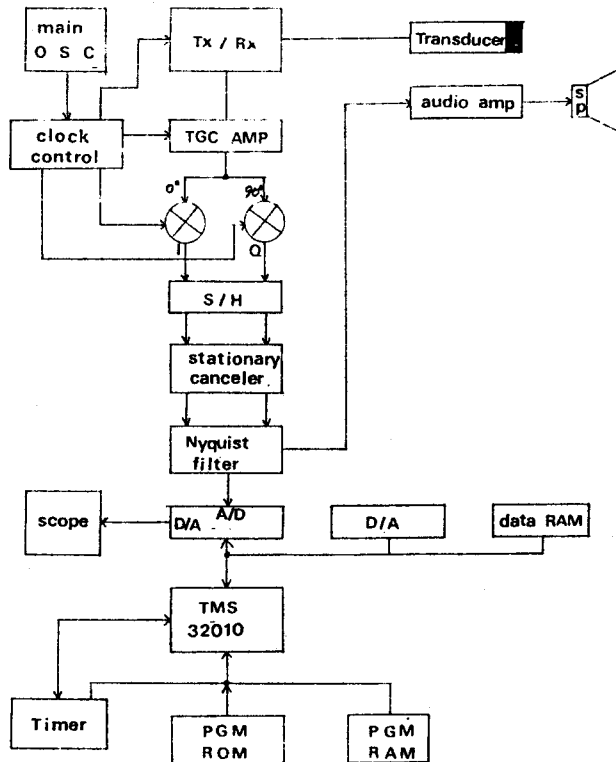


그림 7. Auto-Correlation을 이용한 펄스 도플러 시스템