

## 바이스펙트럼해석을 이용한 혈관의 비선형 전파특성의 계측

○  
장 경영, 김 경조  
한양대학교 정밀기계공학과

### Measurement of Nonlinear Propagation Characteristics of Blood Vessel Using Bispectral Analysis

Kyung-Young Jhang, Kyung-cho Kim  
Hanyang University, Department of Precision Mechanical Engineering

#### 1. 서론

최근 성인병 중에 동맥경화등의 혈관질환이 급증하고 있으며, 이의 조기발견이 요구되고 있다. 혈관의 움직임상태는 모든 질병을 대변하여 줄 만큼 신체 각부의 상태와 밀접한 관계를 갖고있기 때문이다. 따라서, 종래로 부터 한방에서는 맥을 짚어 병상을 진단하는 것이 가장 확실한 진단법으로 인식되어서 왔다. 그러나, 이 방법은 의사의 경험에 크게 의존하여 오진의 여지가 크므로, 이를 과학적으로 판별하는 방법의 개발에 대한 요구가 크게 대두되고 있다.

본 연구는, 혈관거동은 초음파를 이용하여 검출하고, 여기에 바이스펙트럼해석을 적용함으로써 혈관상태의 이상유무를 비선형성까지를 고려한 고감도, 고정밀도로 평가 할 수 있는 진단시스템을 개발하기 위한 기초적 연구에 그 목적이 있다.

이를 위하여 먼저, 초음파 도플러 신호를 이용하여 혈관변위를 구할 수 있는 계측계를 구성하며, 모의 생체조직에 대하여 혈관변위파형과 각각의 바이스펙트럼과 각점사이의 비선형 전달함수를 구하여, 계측원리및 계측계의 정당성을 검증한다. 다음으로, 신체의 4개부위(간장, 복부동맥, 대퇴부의 2점)에 대하여 같은데이터를 구한 후 바이스펙트럼 해석을 이용한 혈관 비선형 전달특성 평가가능성에 대해 검토한다.

#### 2. 초음파 도플러신호를 이용한 혈관거동 계측 원리

##### 2.1 초음파도플러효과

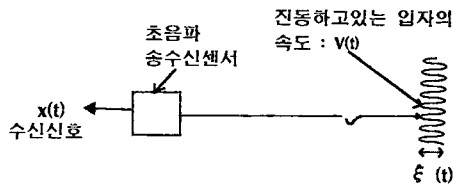


Fig 1 Doppler effect

Fig.1에서와 같이 관측점인 혈관의 관벽 또는 생체조직이 속도  $v(t)$ 로 움직인다면, 그곳에서 반사초음파는 도플러효과에 의해, 다음처럼 그 위상이 변화한다.

$$\theta(t) = \int \omega dt = \omega_0 t + s(t) + \varphi \quad (1)$$

여기서,  $\omega_0$  : 초음파의 중심각 주파수(=  $2\pi f_0$ )

$c$  : 음속  
 $\varphi$  : 진동부에서 관측점까지의 전파에 따르는 위상변화

$$s(t) = \frac{4\pi f_0}{c} \int v(t) dt = \frac{4\pi f_0}{c} \xi(t) + K'$$

$\xi(t)$  : 변위

본 연구에서는 직교검파법을 이용하여, 수신초음파의 위상을 검출하고, 이 위상정보로부터 변위정보  $\xi(t)$ 를 얻고자 한다

##### 2.2 직교검파법에 의한 변위계측원리<sup>[1],[2]</sup>

수신신호  $x(t) = A \cos(2\pi f_0 t + s(t) + \varphi)$ 에  $\cos(2\pi f_0 t)$ 를 곱하고, 차단주파수  $f_0$ 의 Low Pass Filter를 거치면,  $f_0$ 이하의 주파수 성분만 남게 되는데 이들을  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$ 라 하면,

$$d_1(t) = K \cos[s(t) + \varphi] \quad (2)$$

$$d_2(t) = K \sin[s(t) + \varphi] \quad (3)$$

그러면 도플러효과에 의한 위상변동량  $s(t)$ 는  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$s(t) = \tan^{-1} \frac{d_2(t)}{d_1(t)} - \varphi \quad (4)$$

이와 같은 위상변동성분을 구해내기 위한 일련의 과정을 직교검파라 하며, 변위는 도플러위상변화와의 관계로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$\xi(t) = \frac{c}{2\omega} \left[ \tan^{-1} \frac{d_2(t)}{d_1(t)} - n\pi \right] \quad (5)$$

#### 3 바이스펙트럼해석을 이용한 비선형 전달특성규명

##### 3.1 바이스펙트럼<sup>[5],[6]</sup>

파워스펙트럼은 2차 상관함수의 1차원 푸리에 변환으로 정의될 수 있으며, 주파수성분의 파워의 분포를 나타낸다. 이에 대해 바이스펙트럼은 다음과 같이 3차 상관함수의 2차원 푸리에 변환으로 정의되며,

$$\begin{aligned} \phi_{xxx}(f_1, f_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) \\ &\times e^{-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (6) \end{aligned}$$

$f_1, f_2$ 와  $f_1 + f_2$ 의 3개 주파수 성분 사이의 관련을 나타내게 된다. 여기서,  $R_{xxx}$ 는 신호  $x(t)$ 의 3차 상관함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau_1) \times x(t+\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (7)$$

### 3.2 바이스펙트럼의 추정법

3.1에서 설명한 것처럼 바이스펙트럼의 추정에는 3차 상관함수의 2차원 푸리에 변환에 의한 방법이 생각될 수 있으나, 실제 계산에 있어서는 많은 시간이 걸린다. 이를 극복하기 위해 유한한 길이의 시계열신호에 대한 푸리에 변환을 기초로 3차의 피리어드그램 윈도우에서 평활화하는 방법을 취했다.

유한한 시간폭  $[0, T]$ 로 잘라서 나온 신호를  $x(t)$ 라 하고,  $x(t)$ 의 푸리에 변환을  $X_T(f)$ 라 할 때 3차의 피리어드그램을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{xxx}(f_1, f_2) = \frac{1}{T} X_T(f_1)X_T(f_2)X_T^*(f_1 + f_2) \quad (8)$$

### 3.3 바이스펙트럼을 이용한 비선형 전달 특성 규명법

혈관을 맥동의 전달계로 생각 할 때, 혈관의 특성규명은 곧 이 전달계의 전달 특성 규명 문제로 귀착된다. 이를 위하여 다음과 같은 볼테라 전개를 이용한다.

$$y(t) = \int h_1(\tau)x(t-\tau) d\tau + \int \int h_2(\tau_1, \tau_2) \times x(t-\tau_1)x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (9)$$

여기서  $x(t)$ 는 입력,  $y(t)$ 는 출력이며,  $h_1$ 은 1차 선형 전달 함수,  $h_2$ 는 2차의 비선형 전달 함수이다. 또한, 3차 이상의 고차 비선형 항은 무시되었다.

이 때 선형 전달 함수  $h_1$ 은 입출력 신호의 파워스펙트럼으로부터 간단히 구해질 수 있다. 즉,

$$P_{yy}(f) = H_1(f)P_{xx}(f) \quad (10)$$

여기서  $P_{yy}(f)$ 는 입력과 출력의 크로스 파워 스펙트럼이고,  $P_{xx}(f)$ 는 입력의 파워스펙트럼이다. 또,  $H_1(f)$ 는  $h_1(\tau)$ 의 푸리에 변환이다.

그러나, 비선형 전달 함수  $h_2(\tau)$ 의 규명을 위하여는 입출력 신호 사이의 바이스펙트럼이 필요하며, 최종적으로는 다음 관계식으로 부터 얻어진다.

$$B_{xy}(f_1, f_2) = 2H_2(-f_1, -f_2)P_{xx}(f_1)P_{xx}(f_2) \quad (11)$$

여기서,  $B_{xy}$ 는 크로스 바이스펙트럼이며,  $H_2$ 는  $h_2(\tau)$ 의 2차원 푸리에 변환이다. 따라서, 바이스펙트럼 해석을 이용함으로써 전달계의 2차 비선형 특성을 규명할 수 있는 것이다.

## 4. 생체 내부의 변위계측

### 4.1 계측계의 구성

Fig.2는 혈관의 변위파형을 측정하기 위한 계측계의 구성을 나타낸다. 초음파 측정장치로서 MEDISON사의 SONOACE4800을 이용하여 도플러 신호를 얻었으며, 이를 다시, 10Hz Low Pass Filter를 통과시킴으로서  $d_1(t), d_2(t)$  신호를 얻는다. 초음파의 중심주파수는 3.5MHz이다. 데이터는 A/D 변환 후 컴퓨터에서 처리된다. 변위 변동 신호  $\xi(t)$ 는  $d_1(t), d_2(t)$ 를 이용하여 식(5)에 따라 컴퓨터에서 계산된다. 이 때 잡음 제거를 위하여 이동평균, Low Pass Filtering 등이 행하여 진다.

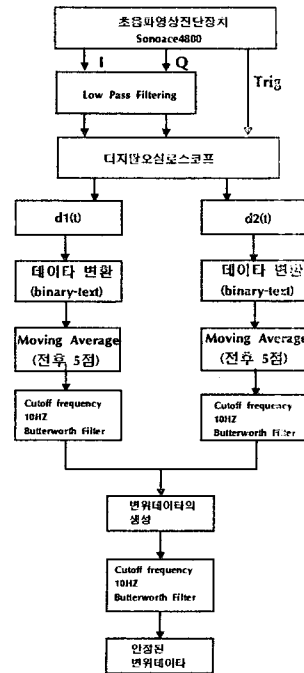


Fig 2 Composure of measurement system

### 4.2 모의 생체조직을 이용한 실험

측정계의 동작을 검증하기 위하여 모의생체조직을 이용한 실험을 선행하였다. Fig.3은 측정점을 나타내며, 모의 생체조직으로는 한천을 이용하였다.

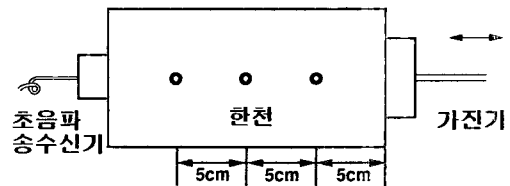


Fig.3 Measured Point of Phantom

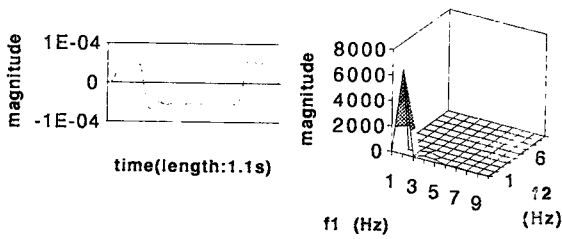
## 5. 모의 생체조직에 대한 실험결과

Fig.3과 같이 함수발생기로 한천을 가진 경우의 변위, 바이스펙트럼을 Fig.4~6에 나타내었다.

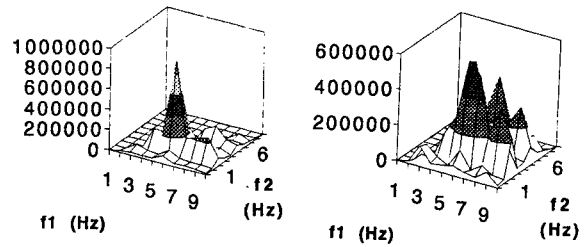
먼저, 변위파형에 대해서 살펴보면 가진점에서 가까운 point1에서의 변위파형은 가진파형을 잘 반영하고 있어 구성된 변위계측계의 성능을 검증할 수 있다. 또한, 가진점에서 멀어질수록 파형의 혼어짐이 증대함을 알 수 있다.

바이스펙트럼에서는 가진점에서 가까운 point1의 경우 가진 주파수 1Hz에서 높은값을 가지나 가진점에서 멀어질수록 고주파 성분이 커지고 있다. 이러한 경향을 정량적으로 확인하기 위하여 바이스펙트럼분포의 중심을 구하여 비교하여 보았다. Fig.7은 그 결과를 나타내며, 이렇게 고주파 성분이 나타나는 것은 비선형 효과에 의한 것이며, 비선형 전달 함수에서도 동일한 경향을 볼 수 있었다.

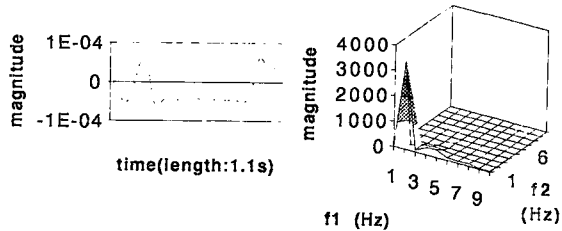
바이스펙트럼해석을 이용한 혈관의 비선형 전파특성의 계측



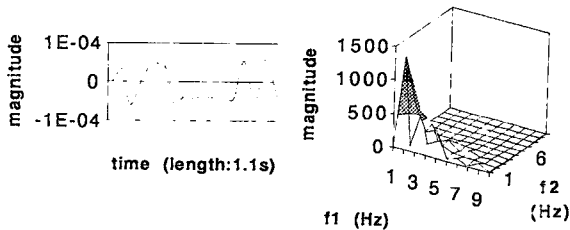
(a) Displacement wave of point1 (b) Bispectrum of Displacement wave  
Fig.4 Displacement wave and it's bispectrum of point1



(a) Nonlinear transfer function between point1 and point2 (b) Nonlinear transfer function between point1 and point3  
Fig.8 Nonlinear transfer function between point1 and 2, 1 and 3



(a) Displacement wave of point2 (b) Bispectrum of Displacement wave  
Fig.5 Displacement wave and it's bispectrum of point2



(a) Displacement wave of point3 (b) Bispectrum of Displacement wave  
Fig.6 Displacement wave and it's bispectrum of point3

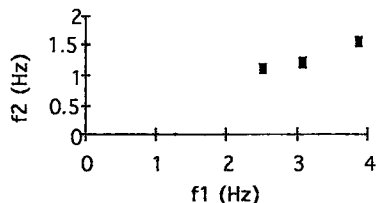


Fig.7 Movement of center of bispectrum distribution with ultrasonic propagation distance

Fig.8에는 Point1과 Point2, Point1과 Point3 사이의 비선형 전달함수를 각각 나타내었다.

Point1과 2사이의 비선형 전달함수에서는  $f_1$ 은 5Hz,  $f_2$  는 2Hz인 지점에서 큰 값을 가지는 볼 수 있고, Point2와 3사이의 비선형 전달함수에서는  $f_1$ 은 5Hz,  $f_2$  는 2Hz인 지점에서 큰 값을 가지기는 하나 흠여짐이 커지는 것을 볼 수 있다. 이것으로 비선형 전달함수에서는 전달에 따라 파형이 흠여진다는 것을 알 수 있다. 이상의 일련의 경향은 일반적인 음향비선형성과 상통하는 것이다.<sup>[3][4]</sup>

6. 혈관에 대한 실험결과

Fig.9는 측정점의 위치를 나타낸다.

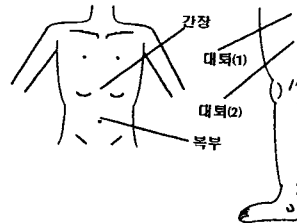


Fig.9 Names of parts in human body

Fig.9에서의 측정점의 바이스펙트럼을 구하여 그 중심을 구해보니 Fig.10과 같이 간장에서 대퇴(2)로 감에 따라 비선형성이 나타나는 것을 볼 수 있었다.

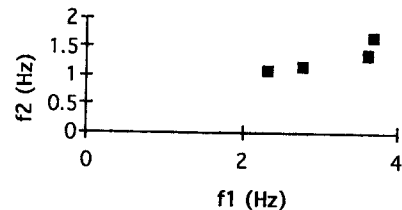
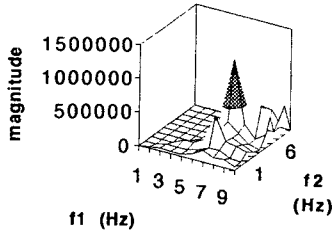


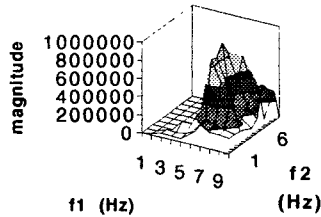
Fig.10 Movement of center of bispectrum distribution

7. 혈관에 대한 비선형 전달함수 추정결과

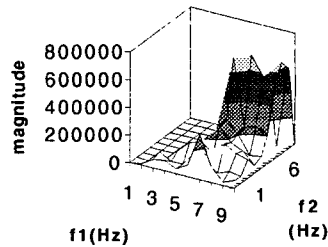
Fig.11 은 간장과 복부, 대퇴(1), 대퇴(2)사이의 비선형 전달함수를 나타냈다. 간장에서 대퇴부로 진행해 감에 따라 높은 주파수의 한 값에서 점점 흠여지고, 전체적인 값은 감쇄에 의해 작아지는 것을 볼 수 있다. 간장과 복부사이의 비선형 전달함수에서는  $f_1$ 은 6Hz,  $f_2$  는 5Hz인 지점에서 큰 값을 가지는 볼 수 있고, 간장과 대퇴(1)사이의 비선형 전달함수에서는  $f_1$ 은 6Hz,  $f_2$  는 5Hz인 지점을 중심으로 약간 흠여지는 것을 볼 수 있고, 간장과 대퇴(2)사이에서는 흠여짐이 커지는 것을 볼 수 있다. 이것으로 비선형 전달함수에서는 전달에 따라 파형이 흠여진다는 것을 확인 할 수 있었다.



(a) Nonlinear transfer function between the liver and the belly



(b) Nonlinear transfer function between the liver and the thigh(1)



(c) Nonlinear transfer function between the liver and the thigh(2)

Fig.11 Nonlinear transfer function between the liver and the belly, the thigh(1), thigh(2)

## 8 결론

생체내의 미소한 움직임을 검출하기 위하여 초음파 도플러 효과를 이용한 검출계를 구성하였으며, 실험을 통하여 그 성능을 실증적으로 확인하였다.

모의생체조직을 이용한 실험결과, 가진점에서 멀어질수록 바이스펙트럼의 분포가 고주파쪽으로 진행하는 것을 볼 수 있었고, 비선형 전달함수도 멀수록 높은 주파수의 한 값의 흠어짐이 큰 것을 볼 수 있었다.

실제생체에 적용했을때, 심장에서 가까운 곳에서는 기본심장 박동에 가까운 주파수에서 큰 값을 얻을 수 있었고, 멀수록 점점 고주파쪽으로 진행하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 구성한 시스템에서 데이터를 얻어서 해석할 수 있었으므로 급후 병상에 의한 변화, 특히 동맥경화등 많은 샘플에 대해서 계측을 행하여 통계적으로 판정함에 의해서 의용 진단에 도움이 되는 방향으로 연구를 계속 할 수 있다고 생각된다.

## 9 참고문헌

- (1) 장 경 영, "생체조직 내에서의 진동의 비선형 전파특성의 계측에 관한 조직의 특성화", J of the Research Institute of Industrial Science, Vol.37, pp. 143~152, 1993.
- (2) Y. Yamakoshi, J. Sato and T. Sato, "Ultrasonic Imaging of Internal Vibration of Soft Tissue Under Forced Vibration", IEEE, T-UFFC, Vol.37, No.2, pp. 45~53, 1990.
- (3) 佐藤拓末, "波動の利用した計測係における非線形効果の最近の2, 3の適用", 精密機械, Vol.49, No.9, pp.1155~1161, 1983.
- (4) O.U. Rundenko and S.L.Soluyan, "Theoretical foundations of Nonlinear acoustics", consultants Bureau, New York, N.Y., 1977.
- (5) 佐藤拓末, 佐佐木公男, "バイスペクトル解析とその応用(1), (2)", 機械の研究, Vol.31(1979), pp. 721.
- (6) Gopal Soundaramoorthy, M.R. Raghuvver and S.A Dianat, " Bispectral Reconstruction of Signals in Noise : Amplitude Reconstruction Issues", IEEE Trans. ASSP, Vol. 38, No.7, pp.1297~1306, July 1990.