

바이스펙트럼 해석을 이용한 생체조직내에서의 진동의 비선형 전파특성 계측

장경영* · Igor Yu. Demin** · 佐藤拓末**

= Abstract =

Measurement of Nonlinear Propagation Characteristics of Vibration in the Tissue Using Bispectral Analysis

Kyung-Young Jhang*, Igor Yu. Demin**, and Takuso Sato**

It is well known that nonlinear propagation characteristics of the wave in the tissue may give very useful information for the medical diagnosis. In this paper, a new method to detect nonlinear propagation characteristics of the internal vibration in the tissue for the low frequency mechanical vibration by using bispectral analysis is proposed. In the method, low frequency vibration of f_0 ($=100\text{Hz}$) is applied on the surface of the object, and the waveform of the internal vibration $x(t)$ is measured from Doppler frequency modulation of simultaneously transmitted probing ultrasonic waves. Then, the bispectra of the signal $x(t)$ at the frequencies (f_0, f_0) and $(f_0, 2f_0)$ are calculated to estimate the nonlinear propagation characteristics as their magnitude ratio, where since bispectrum is free from the gaussian additive noise we can get the value with high S/N. Basic experimental system is constructed by using 3.0 MHz probing ultrasonic waves and the several experiments are carried out for some phantoms. Results show the superiority of the proposed method to the conventional method using power spectrum and also its usefulness for the tissue characterization.

1. 서 론

생체조직등에 저주파 진동을 가하여 그것이 조직 내부를 전파할 때의 파형을 초음파 프로우브를 이용하여 검출함으로써 진동의 전파특성을 알고, 이로 부터 조직을 특성화 하는 방법이 의용진단이나 비파괴검사에 있어서 유망시 되고 있다.[1]

특히 정현적인 진동을 가했을 때의 파형이 매질

내부를 전파해 감에 따라 변화하는 정도를 알 수 있다면, 이것은 기본적으로는 진동의 진폭에 의존하여 특성이 변화하는 비율, 즉 비선형 특성을 추정할 수 있음을 뜻하게 되고, 이를 이용하면 매질의 미묘한 변화도 검출해 낼 수 있게 된다.[2]

본 논문에서는 이와 같은 파형의 변화로 부터 매질의 비선형특성을 고정도(高精度) 및 고감도(高感度)로 검출하기 위하여, 바이스펙트럼 해석을 적용하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 먼저 비선형 파동 전파의 대표적인 모델인 Burgers 방정식[3]으로 부터 출발하여 파동의 전파거리가 특성거리(characteristic distance) 보다 매우 작아서 전파에 따른 감쇠는 매우 작다고 하는 가정과 경계조건을 이용하여 얻어지는 해로부터 매질의 비선형 특성을 정량화 하였다.

(접수 : 1993년 1월 8일)

* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 동경공업대학 총합이공학연구과

* Hangyang Univ., Dept. of Precision Mechanical Eng.

** Tokyo Institute of Technology

그러나 본 논문에서의 주 관심사인 파형의 변화는 그 파형에 대한 파워스펙트럼의 변화로부터도 손쉽게 추정될 수 있을 것이다.

그러나 대부분의 계측계에서 검출되는 조직내부 진동의 파형에는 계측계의 잡음을 포함하여 다중 반사에 의한 다른 여러 방향으로 부터 유입되는 진동의 영향등 가법성 잡음성분이 많이 존재하게 되며, 파워스펙트럼 상에는 이들 잡음성분의 파워 또한 그대로 남아있게 된다. 따라서 파워스펙트럼의 변화로부터 매질의 비선형특성에 따른 파형의 미소변화량을 정확히 추출하기는 기대하기 어렵다.

한편 바이스펙트럼이란, 파워스펙트럼이 각 주파수 성분의 파워분포를 나타내는 데 대하여 주파수 성분 사이의 관계를 나타내는 3차의 동계량으로서, 이것은 정규성의 가법성 잡음의 영향을 받지 않는다는 특징을 갖고 있다.[4,5]

본 논문에서는 이와 같은 비이스펙트럼의 특징에 착안해서 파형신호를 일단 바이스펙트럼 영역으로 변환한 뒤 이로부터 비선형특성값을 추정함으로써 비교적 정확히 비선형 전파특성을 구할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이 방법의 유효성을 이론적인 고찰을 바탕으로 한 계산기 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 실험에서는 3MHz의 초음파를 사용한 조직내부진동의 파형기록계 및 신호처리계로 이루어지는 실제의 계측계를 구성하여 이용하였다. 이를 이용한 모의 생체조직에 대한 기초실험 결과, 이론적인 정량화로부터 구한 비선형 특성값과 실제파형의 바이스펙트럼 해석에 의하여

구한값이 좋은 일치율을 보였으며, 이로 부터 제안된 비선형특성의 정량화가 정당함을 실증할 수 있었고, 바이스펙트럼 해석을 이용한 비선형특성 계측이 생체에 대한 특성화에 충분히 응용가능함을 확인할 수 있었다.

2. 초음파를 이용한 진동파형의 검출

생체조직 내부의 진동파형은 초음파 펄스도플러법에 의하여 검출할 수 있는데, 그원리를 간단히 설명하면 다음과 같다.

관측점의 입자가 속도 $v(t)$ 로 움직이는 물체에 초음파를 송신하여 그것이 입자에 반사되어 되돌아오는 반사파에는 도플러 효과에 의한 위상변화가 존재하게 되는데, 이 위상변화량을 $p(t)$ 라 할 때 $p(t)$ 는 입자속도 $v(t)$, 입자변위 $\xi(t)$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$p(t) = \frac{4\pi f_c}{c} v(t) dt = \frac{4\pi f_c}{c} \xi(t) \cdot K \quad (1)$$

여기서 c 는 음속, f_c 는 초음파의 중심주파수이고, K 는 상수이다.

한편, 수신된 반사파를 초음파의 중심주파수 f_c 의 정현파인 $\sin(2\pi f_c t)$ 와 $\cos(2\pi f_c t)$ 와로 직교점파한 도플러 신호 $d_1(t), d_2(t)$ 는 각각 다음과 같이 표현된다.[1]

$$d_1(t) = K' \cos\{p(t) + \phi\} \quad (2)$$

$$d_2(t) = K' \sin\{p(t) + \phi\} \quad (3)$$

단, K' 는 상수이며, ϕ 는 진동의 전파거리에 상응하는 위상변화량이다.

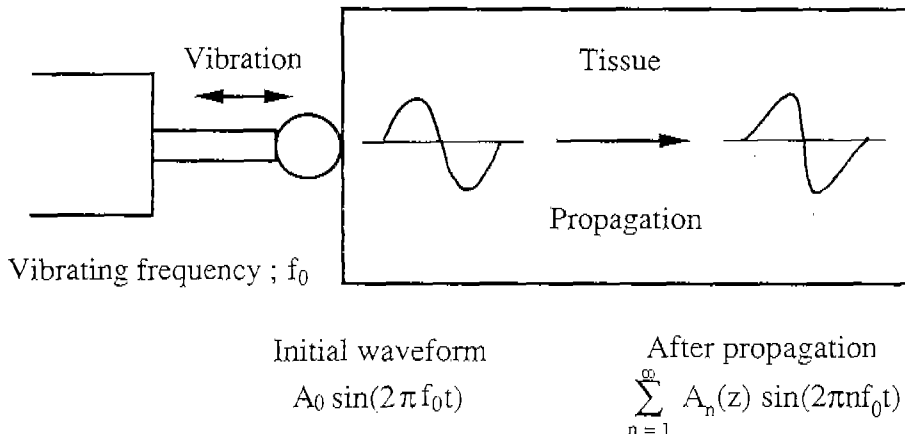


Fig. 1 Distortion of the waveform due to the propagation of vibration in the tissue

따라서, 이들 관계로 부터 진동파형을 나타내는 입자변위 $\xi(t)$ 는 다음식으로 구할수 있다.

$$\xi(t) = \frac{c}{4\pi f_c} \left\{ \tan^{-1} \frac{d_z(t)}{d_l(t)} \pm n\pi \right\} \quad (4)$$

여기서 n 은 변위에 따라서 축차적으로 증감되는 정수이다.

3. 비선형 전파특성의 정량화

3.1 진동의 전파에 따른 파형변화와 비선형 전파특성

Fig.1에서 보이는 바와 같이 물체의 표면을 정현적으로 가진했을 경우, 그 진동파는 일반적으로 물체내부를 전파함에 따라서 파형이 변화하여 간다. 즉 물체내부에서는 전파파형은 비정현적으로 된다.

예를 들어, 초기가진파형이

$$\xi(t, l=0) = A \sin(2\pi f_0 t) \quad (5)$$

인 경우, 이 파형은 물체내부를 전파하는 과정에서, 비선형특성에 의한 고조파 성분의 발생, 검출계를 포함하는 가법성의 잡음혼재, 다른 방향으로 부터 유입되는 불규칙진동 등의 영향을 받아서 일반적으로 $l=li$ 의 전파거리에 있어서는

$$\xi(t, l=li) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(2\pi k f_0 t + q_k) + n_1(t, l=li) + n_2(t, l=li) \quad (6)$$

A_k : k 차 고주파 성분의 진폭.

q_k : k 차 고주파 성분의 위상.

$n_1(t, l=li)$: 검출계를 포함한 가법성 잡음.

$n_2(t, l=li)$: 다른 방향으로 부터의 불규칙진동과 같이 표현될 수 있다.

그런데, 여기에서 진동전파의 비선형특성은 가진 주파수 f_0 의 고조파성분의 발생크기로서 표현될 수 있으므로, (6)식의 제1항으로 나타난 신호성분의 기본주파수와 3차 고조파성분에 착안하여 비선형 전파특성 파라미터 N 을 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$N = \frac{|A_3|}{|A_1|} \quad (7)$$

즉, 파형이 전파해 감에 따라 어느정도 정현파로부터 벗어났는지를 여기에서는 기본 진동진폭과 3차 고조파의 진동진폭의 절대값비로서 평가하려고

하는 것이며, 본 논문에서는, 이 파라미터 N 을 잡음 성분 n_1, n_2 등에 영향을 받지 않고 정확히 추정하기 위하여 바이스펙트럼 해석을 이용하고자 하는 것이다.

3.2 파형변화의 정식화에 의한 비선형 전파특성의 정량화

진동의 전파에 따른 파형변화를 정식화하기 위하여, 생체조직내부를 전파하는 진동은 횡파이고, 매질은 탄성, 점성과 비선형성을 갖는 것으로 고려한 다음과 같은 무차원 변수로 표현되는 비선형 파동방정식인 Burgers 방정식을 생각한다.

$$\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = \delta \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} \quad (8)$$

$V = u/u_0$, u : 입자속도 ($u = \partial \xi / \partial t$, $\xi(x, \tau)$: 입자변위)

u_0 : 초기입자속도

$\theta = \omega_0 \tau = \omega_0(t - x/c_0)$

x, t : 공간, 시간변수

c_0 : 횡파의 전파속도

$\omega_0 = 2\pi f_0$, (f_0 : 가진주파수)

$z = x/x_c$, x_c : 특성거리 (characteristic distance)

$\delta = \frac{1}{2 \Gamma R_e}$: 감쇠계수

Γ : 매질의 비선형 파라미터

R_e : 음향 레이놀즈 수

그런데, 여기서 가진주파수는 100Hz 정도로 비교적 낮은 주파수이며 비선형 전파특성을 측정하고자 하는 지점까지의 진동의 전파거리는 특성거리에 비하여 매우 짧아서 감쇠는 무시할 수 있다고 가정하고, 경계조건

$$\xi(x=0, \tau) = A_0 \sin(\omega_0 \tau) \quad (9)$$

을 생각하면, (8)식의 해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(z) = \sin(n\omega_0 \tau) \quad (10)$$

이것은 (6)식의 제1항의 이론적인 근거가 되며, 파동이 전파해 갈 때 비선형성에 의하여 고조파성분이 발생함을 의미한다. 여기에서 고조파성분의 크기를 나타내는 진폭 $A_n(z)$ 는 Bessel 함수와 그 근사식을 이용하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_n(z) = \frac{2J_n(nz)}{nz} \approx \frac{(nz/2)^{n-1}}{n!} \quad (11)$$

따라서, 앞서서 정의한 바 있는 비선형 전파특성 파라미터 N 은 기본진동진폭과 3차 고조파의 진동

진폭의 절대비이므로

$$N = \frac{|A_3(z)|}{|A_1(z)|} \approx 0.375 z^2 \quad (12)$$

로 근사될 수 있고, 여기서 다시 특성거리 x_c 가

$$x_c = \frac{c_0^2}{\Gamma \omega_0^2 A_0} \quad (13)$$

과 같이 주어지는 것을 이용하면, 최종적으로 N 은

$$N \approx 0.375 \left(\frac{\Gamma \omega_0^2 A_0}{c_0^2} \right)^2 x^2 = \alpha x^2, \quad (14)$$

으로 정량화 할 수 있다.

이것은 N 의 값이 전파거리 x 의 제곱에 비례하여 증가함을 의미하고, 계수항을 α 로 두었다.

4. 바이스펙트럼 해석에 의한 비선형 전파 특성의 추정

비선형 전파특성 파라미터 N 은 그 정의로부터 파형의 기본주파수성분과 3차 고조파성분의 크기를 알아냄으로써 구할 수 있다. 이와 같은 경우 파형에 대한 주파수 분석이 유효하리라는 것은 쉽게 추측할 수 있다.

여기에서는 일반적으로 주파수 분석에 많이 이용되어지는 파워스펙트럼을 이용하는 경우와 파워스펙트럼보다 1차원 높은 바이스펙트럼을 이용하는 경우에 있어서의 N 의 추정법에 대하여 논하고, 후자(後者)가 전자(前者)에 비하여 추정정도(精度) 면에서 우월함을 보이고자 한다.

4.1 파워스펙트럼 해석에 의한 방법

일반적으로 불규칙신호 $\xi(t)$ 에 대한 파워스펙트럼은 복소 Fourier 성분과 그 공액항을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(f) = A(f) \cdot A^*(f) = |A(f)|^2 \quad (15)$$

여기서 $A(f)$ 는 $\xi(t)$ 의 복소 Fourier 성분이며, f 는 주파수이다.

이와 같이 파워스펙트럼을 이용하여 파라미터 N 을 추정하기 위하여 다음과 같이 정의되는 파라미터 N_p 를 생각한다.

$$N_p = \frac{|P(3f_0)|}{|P(f_0)|} = \frac{|A_3 A_3^*|}{|A_1 A_1^*|} \sim \frac{|A_3|}{|A_1|} = N \quad (16)$$

이것은 기본진동성분의 절대진폭에 대한 3차 고조파성분의 파워비의 제곱근으로서 신호에 잡음성분이 없는 경우에는 앞서 정의된 파라미터 N 과 일치한다.

그러나 검출신호 $\xi(t)$ 가(6)식에서 표현된 바와 같이 가법성의 잡음을 포함할 경우, 즉 $\xi(t) = s(t) + n(t)$ 로 생각할 수 있는 경우(여기서 $s(t)$ 는(6)식의 제1항, $n(t) = n_1(t) + n_2(t)$ 에는 잡음의 파워성분이 그대로 파워스펙트럼에 잔류하기 때문에(16)식에서 정의된 파라미터 N_p 는 N 과 일치하지 않는다. 즉

$$N_p = \frac{|P(3f_0)|}{|P(f_0)|} = \frac{|P_s(3f_0) + P_n(3f_0)|}{|P_s(f_0) + P_n(f_0)|} \neq N \quad (17)$$

여기에서 $P_s(f)$ 와 $P_n(f)$ 는 각각 순수한 파형신호와 가법성잡음의 파워스펙트럼이다.

따라서 파워스펙트럼 해석에 의한 비선형 전파 특성 파라미터 N 의 정확한 추정은 기대하기 어렵다.

4.2 바이스펙트럼 해석에 의한 방법

바이스펙트럼은 일반적으로 다음과 같이 3차 상관함수의 2차원 Fourier 변환으로 정의된다.

$$B(f_1, f_2) = R(\tau_1, \tau_2) e^{-j2\pi(f_1 \tau_1 + f_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (18)$$

여기에서 $R(\tau_1, \tau_2)$ 는 신호 $\xi(t)$ 의 3차 상관함수이며, τ_1, τ_2 는 지연시간이다.

이것은 파워스펙트럼이 주파수영역에 있어서의 주파수성분의 파워분포를 나타내는 2차의 특성량인데 대하여, 신호중의 f_1, f_2, f_1+f_2 라고 하는 3가지 주파수성분 사이의 관련성을 나타내는 3차의 특성량이다.

한편, 타이스펙트럼은 복소 Fourier 성분과 공액항을 이용하면 다음과 같이 구할 수도 있다.

$$B(f_1, f_2) = A(f_1) \cdot A(f_2) \cdot A^*(f_1 + f_2) \quad (19)$$

이와 같은 바이스펙트럼을 이용하여 파라미터 N 을 추정하기 위하여 다음과 같은 바이스펙트럼의 크기의 비로서 정의되는 파라미터 N_B 를 생각한다.

$$N_B = \frac{|B(f_0, 2f_0)|}{|B(f_0, f_0)|} = \frac{|A_1 A_2 A_3^*|}{|A_1 A_1 A_2^*|} \approx \frac{|A_3|}{|A_1|} = N \quad (20)$$

이것은 검출하고자 하는 파형의 기본진동성분과 고조파성분의 위상이 일정한 관계를 갖게 되는 것을 고려하면, 파라미터 N_B 는 신호에 잡음이 내재하지 않는 경우, N_p 와 마찬가지로 N 과 일치함을 알 수 있다.

그러나, N_p 의 경우와는 달리 N_B 의 경우, 신호에 잡음이 내재하는 경우일지라도, 그잡음이 정규성

(Gaussian)의 가법성잡음인 경우 그것의 3차 상관 함수가 zero이므로(18)의 관계로 부터 바이스펙트럼의 크기는 'zero'이며, 따라서 파라미터 N과의 일치성이 유지된다. 즉,

$$N_B = \frac{|B_S(2f_0, f_0) + B_N(2f_0, f_0)|}{|B_S(f_0, f_0) + B_N(f_0, f_0)|} = \frac{|B_S(2f_0, f_0)|}{|B_S(f_0, f_0)|} = N \quad (21)$$

여기에서 $B_S(f_1, f_2)$ 는 순수한 가진파형성분의 바이스펙트럼이며, $B_N(f_1, f_2)$ 는 잡음의 바이스펙트럼으로 위의 경우 zero이다.

이상으로 부터 파워스펙트럼에 의한 추정 N_b 는 정규성의 가법성잡음의 영향을 받지만, 바이스펙트럼에 의한 추정 N_B 는 그 영향을 받지 않는다고 하는 매우 유용한 특징이 있음을 분명히 알 수 있다.

특히 실제로 초음파에 의하여 검출되는 생체조직 내부진동의 파형은 전파거리가 멀어짐에 따라 다중경로를 거친 반사파의 유입등으로 인하여 많은 잡음을 갖게 되므로, 비선형 파라미터 N을 정확히 검출하기 위하여 바이스펙트럼 해석을 이용하는 것은 매우 유효할 것으로 사료된다.

5. 계산기 시뮬레이션

파라미터 N을 추정하는데 있어서 파워스펙트럼 해석에 의한 방법보다 바이스펙트럼 해석에 의한 방법이 추정정도에 있어서 우월함을 검증하기 위하여 다음과 같은 계산기 시뮬레이션을 수행하였다.

5.1 신호의 발생

먼저 검출파형으로서 (6)식을 바탕으로 다음의 (22)식으로 주어지는 임의의 파형을 발생시켰다. 단, 여기서는 파라미터 N을 추정하기에 충분한 3차 고조파성분까지만을 고려하였다.

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^3 A_n(Z) \sin(2\pi n f_0 t) + \eta_n(t) \quad (22)$$

여기에서 $A_n(z)$ 는 (11)식으로 부터 각각 $A_1(z) = 1.0$, $A_2(z) = 0.5z$, $A_3(z) = 0.375z^2$ 로 주어지며, $n(t)$ 는 -1.0과 1.0사이의 정규성잡음이고 η 의 값에 따라 여러가지 형태로 발생시킬 수 있다.

z 는 전파거리의 특성거리에 대한 비율로서 비선형성의 척도를 나타내며 z 의 값이 클수록 파형의 변형이 크게 되는데 $z=1.0$ 이면 완전한 톱니형(또는 N형)의 파형으로 변하게 된다. 그러나 여기에

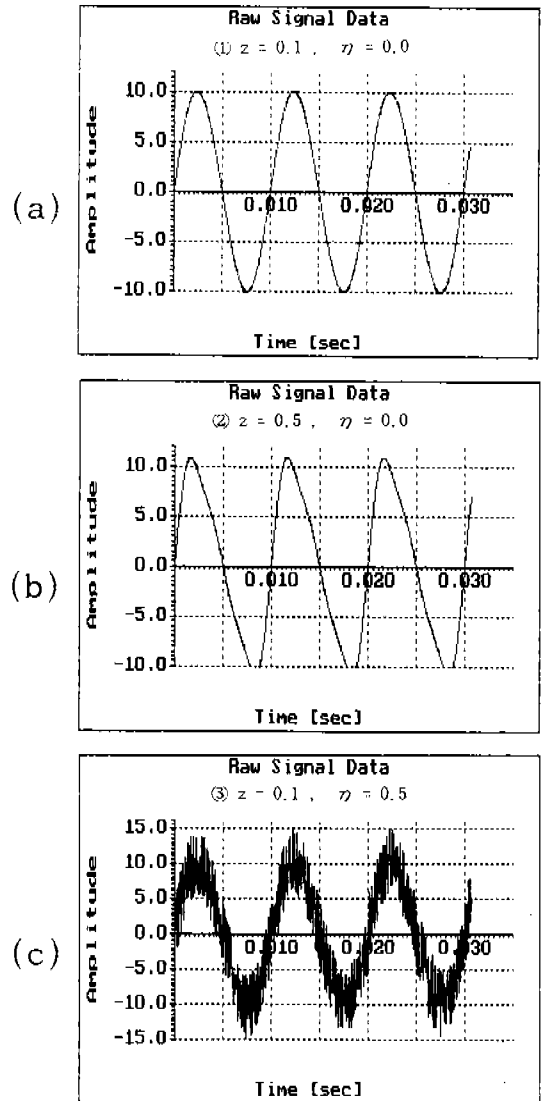


Fig. 2 Example of generated signals when (a) $z = 0.1, \eta = 0.0$, (b) $z = 0.5, \eta = 0.0$ and (c) $z = 0.1, \eta = 0.5$

서는 점탄성 매질을 고려하여, $0.0 \leq z \leq 0.5$ 의 범위에서 생각하였으며, Fig.2는 $z = 0.1$ 과 0.5 의 경우에 대하여 잡음이 혼재된 경우를 포함하여 계산기에서 발생시킨 파형의 예를 보여주고 있다.

이상과 같이 하여 생성된 파형의 경우 비선형 파라미터 N은 $|A_3| / |A_1| = 0.375z^2$ 로 주어지

게 된다.

5.2 시뮬레이션 결과

여기서는 (22)식의 z 와 η 의 값을 바꾸어 가며 발생시킨 파형에 대하여 파워스펙트럼 해석과 바이스펙트럼 해석을 실행하여 N_p, N_B 를 구한 뒤 실제의 N 의 값과 비교하였다.

Table.1은 잡음이 없는 경우로서 $z = 0.1, z = 0.3, z = 0.5$ 의 세가지 경우에 대한 결과이다.

Table 1 Simulation result for signals without noise : comparison between the given value of N and the estimated ones N_p and N_B , at several values of z

z	N	N_p	N_B
0.1	0.0037	0.0037	0.0039
0.3	0.0337	0.0330	0.0327
0.5	0.0937	0.0918	0.0901

이 경우는 잡음이 없으므로 N_p, N_B 양자 모두 실제의 N 의 값에 잘 일치하고 있다. 약간의 차이를 보이는 것은 이산신호처리에 있어서의 오차, 즉 Sampling rate, 데이터의 길이 등에 기인한 것으로 사료된다.

다음은 고의로 잡음을 추가했을 경우에 대하여

살펴보았다.

Fig.3은 $z = 0.1$ 일때 η 가 0.1, 0.2, 0.5의 세가지 경우에 대한 N_p 와 N_B 의 추정결과이다. 이 경우 이론적인 N 의 값은 0.0037이며 η 가 클수록 잡음이 강하게 된다. 여기에서 N_p 와 N_B 를 비교해 보면, N_p 는 잡음이 커짐에 따라 추정오차가 크게 발생하고 있으나 N_B 의 경우 매우 안정된 추정결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터 N 을 추정하는데 있어서 그 정도면에서 N_p 보다는 N_B 가 더욱 효과적임을 검

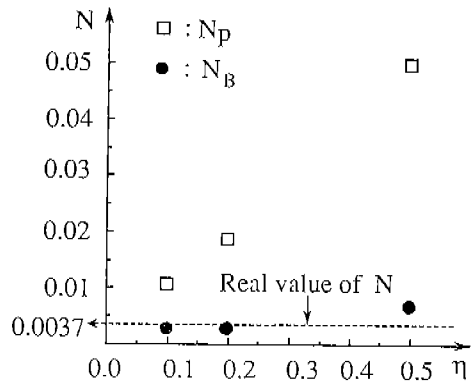


Fig. 3 Simulation result for signals with noise when $z = 0.1$: the change of estimated value of N_p and N_B as increasing of noise level

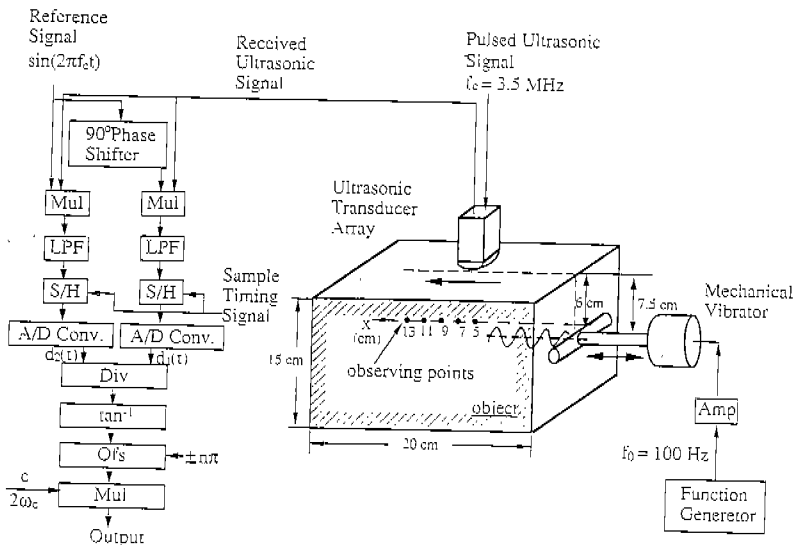


Fig. 4 Schematic diagram of constructed system for measurement of vibration in the tissue by using ultrasonic waves

증할 수 있다.

6. 계측계의 구성

6.1 초음파를 이용한 진동파형의 검출

진동파형을 검출하기 위한 계측계는 Fig.4에 보이는 바와 같이, 크게 나누어 계측대상물체에 저주파의 진동을 주기 위한 가진계, 대상물체의 내부 움직임을 초음파 펄스도플러 신호로써 검출하는 초음파 송수신장치, 그리고 도플러 신호로부터 파형을 추출하고 파라미터 N을 추정하기 위한 신호처리계로 구성된다.

6.1.1 가진계

먼저 가진계에서는 관측물체에 주기 위한 진동파형의 주파수와 진폭을 신호발생기에서 설정하고, 그 출력을 파워앰프를 통하여 가진기에 입력한다. 이 가진기에는 1차원적으로 균일한 진도진폭이 물체에 가해질 수 있도록 끝 부분에 직경 10mm, 길이 30mm의 아크릴 봉으로 만들어진 가진헤드를 부착시키고 있다.

가진기의 진폭변위는 최대 6mm, 주파수는 10Hz ~ 18kHz 범위에서 가능하나, 이후의 실험에서는, 진폭은 75 μ m ~ 185 μ m, 주파수는 100Hz의 진동을 이용하였다.

6.1.2 초음파 송수신장치

이것은 초음파를 이용하여 물체의 움직임을 도플러 신호로서 검출하기 위한 장치로서 구체적으로는 초음파 영상장치 RT-3600(YMS社)를 사용하였다.

이 장치는 의용진단용의 일반적인 초음파 영상장치이며, 여기서는 기본주파수 3.0MHz 초음파 펄스의 송신과 그 반사파의 수신에 이용된다. 이때 반사파에는 물체의 움직임에 의한 도플러 효과를 받게 되는데 다음에 설명하는 신호처리계에서 도플러 효과에 의한 변조신호만을 추출하여 파형을 얻게 된다.

6.1.3 신호처리계

신호처리계는 다시 아날로그 신호처리장치, A/D 변환기, 계산기로 구성된다.

먼저 아날로그 신호처리장치는 앞서 보인 초음파 송수신장치로부터 얻어지는 초음파 펄스반사파로부터 도플러 위상변환신호를 얻기 위한 장치로서 90° 위상 shifter, Multiplier, LPF로 구성되며, 수신 펄스는 우선 송신펄스와 동기하여 주파수 3.0MHz의 연속파와 승산(乘算)처리된 뒤, LPF를 거참으로써 (2), (3)식에서 보여진 도플러 신호 $d_1(t)$, $d_2(t)$ 가 얻어진다. 이 도플러 신호는 A/D 변화되어 계산기

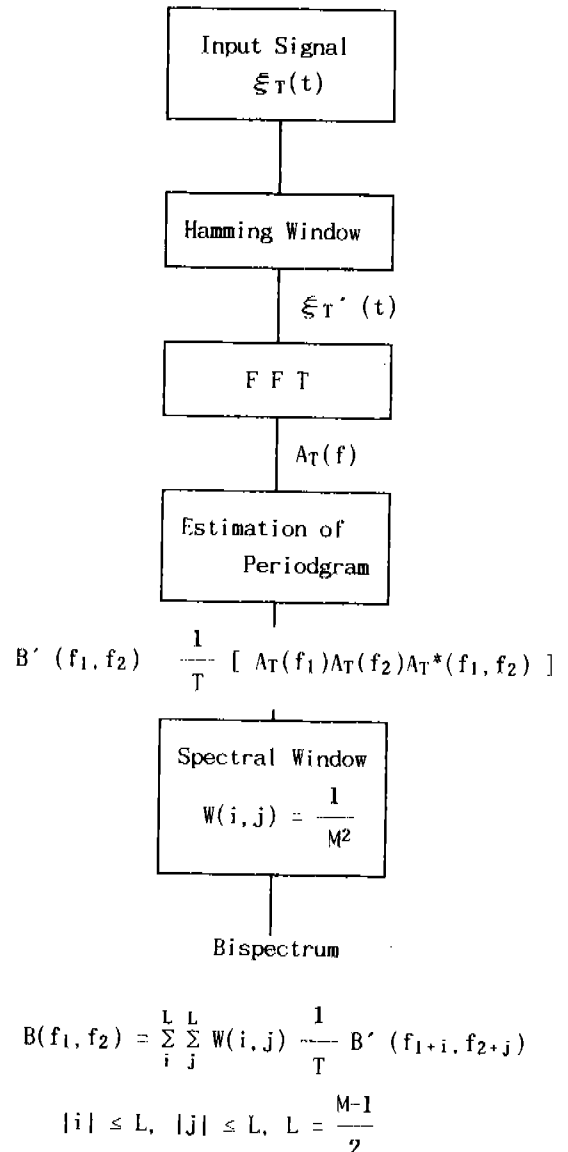


Fig. 5 Signal processing flow for calculation of bispectrum

로 보내어지는데, 이때 샘플링 주파수는 2kHz로 하였다. 계산기로서는 DSP를 장착한 PC-9801 (NEC社)를 이용하였으며, 여기에서 도플러 신호로부터 (4)식의 관계에 따라 변위 $\xi(t)$ 를 계산하고, 바이스펙트럼 해석 등의 주파수 분석을 실행하도록 되어 있다.

6.2 계산기에서의 바이스펙트럼의 추정

바이스펙트럼은 3차 상관함수의 2차원 Fourier 변환으로 부터 구할 수 있지만, 계산량 등을 생각할 때 이 방법은 좋은 방법이라 할 수 없다.

여기에서는 보다 유효한 방법으로서, 유한한 길이의 시계열 Fourier변환으로 부터(19)식에서 보인 바와 같은 3차의 피리오그램(periodgram)을 구하여 스펙트럼 윈도우를 거쳐서 평활화하는 방법을

채택하였다.

Fig.5는 유한한 시간폭[O,T]로 잘린 신호를 $\xi_T(t)$, 그것의 Fourier변환을 $A_T(f)$ 라 할 때의 바이스펙트럼을 구하기 위한 신호처리의 흐름도를 보여 주고 있다.

7. 실험결과

실험에서는 탄성특성과 초음파에 대한 산란특성이 생체에 가깝고 제작이 용이한 한천을 이용하여 모의 생체조직을 만들어 관측대상으로 이용하였으며, 5종류의 전과거리 즉, $x = 5, 7, 9, 11, 13\text{cm}$ 에 있어서의 파형을 검출하여 각각의 위치에 있어서의 비선형 파라미터 N_0 를 추정하였다. 실제로 검출된 파형의 예를 Fig.6에 나타내었다. (a)는 $x = 5\text{cm}$,

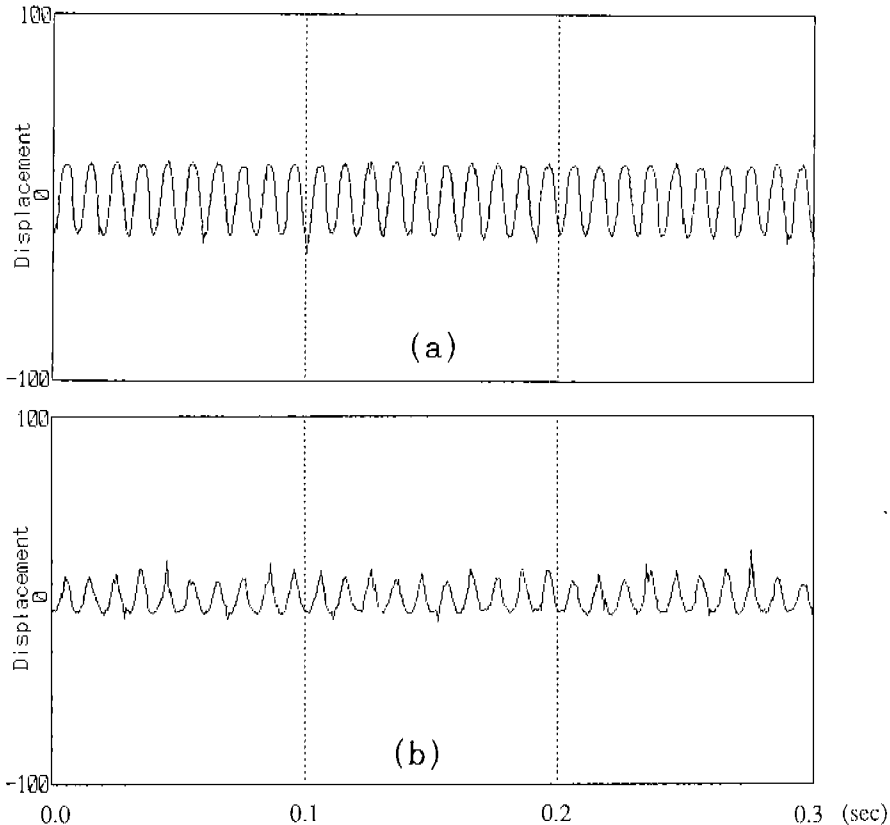


Fig. 6 Examples of waveform detected (a) at $x = 5\text{cm}$ and (b) at $x = 13\text{cm}$

즉 가진기로 부터 가까운 위치에서 검출된 파형으로서 비교적 정현적인 가진파형을 유지하고 있는데 반하여, (b)는 $X=13\text{cm}$, 즉 가진기로 부터 먼 위치에서 검출된 파형으로서 상대적으로 파형의 변화가 많이 일어났음을 알 수 있다.

이때, 모의 생체조직 내의 산란체 분포의 비균질성의 영향을 줄이기 위하여 하나의 관측점에 대하여 그 주위의 반경 2mm 이내의 10점에서의 파형을 검출하였는데, 각각에 대하여 계산된 바이스펙트럼을 복소평면상에서 가산 평균한 값을 하나의 측정점에서의 최종적인 바이스펙트럼으로서 구하였다. 이렇게 하여 각 측정위치에서 추정된 비선형 파라미터의 값을 Fig.7에 나타내었다. 여기서 굵은 점은 측정결과이며 실선은 측정점에 대하여 최소자승법을 이용(14)식의 관계 $N = \alpha x^2$ 에 Fitting시킨 결과이다. 그 결과, 계수 α 는 $0.488/\text{m}^2$ 로 나타났다. 이것은 한천을 이용한 모의 생체조직에 대하여 잘 알려져 있는 비선형 파라미터 $\Gamma=0.11$ 과 펄스투과법에 의하여 실제로 계측된 전파속도 $c_0=219\text{cm/sec}$, 그리고 실험조건인 $f_0=100\text{Hz}$, $A_0=130\mu\text{m}$ 를 이용하여(14)식의 관계로 부터 이론적으로 계산된 값 $0.518/\text{m}^2$ 에 매우 근사하는 값이다.

이 실험결과로 부터 비선형 파라미터 N 을 추정하는 데 있어서 N_B 가 유용함을 실증할수 있고, 동시에 바이스펙트럼 해석이 효과적임을 확인할 수 있다.

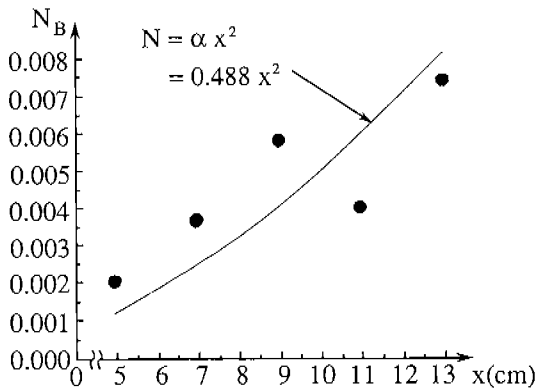


Fig. 7 Experimental results : variation of parameter N_B due to the increasement of propagating distance.

8. 결 과

본 연구에서는 물체의 표면에 정현적인 진동을 가하여 이것이 물체내부를 전파해 갈때의 파형을 초음파를 이용하여 검출하고, 전파거리에 따른 파형의 변화, 즉 비선형 전파특성을 바이스펙트럼 해석을 이용하여 고정도·고감도로 추정하고자 하였다.

이를 위하여 먼저 탄성, 점성 및 비선형성을 갖는 매질을 전파하는 횡파에 대한 비선형 파동방정식인 Burgers방정식으로 부터 비압축성, 비감쇠 모델의 해를 구하여 비선형 전파 특성을 정량화 하였으며, 이를 바탕으로 한 계산기 시뮬레이션을 통하여 바이스펙트럼 해석을 이용하는 것이 종래의 파워스펙트럼 해석을 이용하는 방법에 비하여 비선형 전파특성의 추정정도에 있어서 매우 뛰어난 것을 검증하였다.

또한 초음파를 이용하여 비선형 전파특성을 추정하기 위한 실제 계측계를 구성하고 모의 생체조직에 대하여 실시간 기초실험결과 이론적으로 계산된 비선형 전파특성과 바이스펙트럼 해석을 이용하여 실측된 특성이 서로 잘 일치하였으며, 이로부터 비선형 전파특성의 추정에 바이스펙트럼 해석의 이용이 유용함을 실증하였다.

한편 본 논문에서는 N 의 값을 정확하게 추정하는 방법을 제안함과 동시에 전파거리 x 에 대한 N 의 값의 변화가 (14)식의 관계를 잘 나타내 주고 있음도 검증하고 있다. 따라서 이것을 이용하면 계수 α 를 구함으로써 매질의 비선형성 Γ 를 계측할 수 있고, 이로부터 매질재료의 특성화도 가능하게 될 것으로 확신한다.

앞으로도 계속하여 모의 생체조직 뿐만 아니라 in Vitro, in Vivo조직에 대한 비선형 전파특성의 계측을 진행하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1) 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
- 2) 佐藤拓宋, "波動を利用した計測係における非線形校果の最近の2,3の應用",精密機械, Vol.49, No.9,

pp 1155~1161, 1983

- 3) O.U. Rudenko and S. L. Soluyan, "Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics, Consultants Bureau, New York, N.Y., 1977.
- 4) 佐藤拓宋, 佐佐木公男, "バースペクトル解析とその応用(1),(2)"機械の研究, Vol.31 (1979), pp

721.

- 5) Gopal Sundaramoorthy, M. R. Raghuveer 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.