

불균일 물질에 대한 비선형음향계수(B/A) 측정에 관한 연구

이 은 방*

A Study on the Measurement of the Acoustic Nonlinearity Parameter(B/A) for Inhomogeneous Materials

Eun-Bang Lee

Abstract

A new method for measurement of the acoustic nonlinearity parameter (B/A) in inhomogeneous materials in which the sound waves propagate through multi-paths is presented. The B/A is determined by measuring the changes of sound velocity in the ambient pressure. The change of sound velocity in inhomogeneous sample is calculated on the phase curves of transmitting and receiving pulses, when the hydrostatic pressure is quickly reduced from a known value.

In the proposed method, the B/A values are determined by using a plenty of wave information to which the characteristics of media respond. So measured values included the effect of multi propagation in inhomogeneous media. The experimental system is arranged for measuring B/A values and distribution of homogeneous sample such as distilled water and other liquids, and inhomogeneous sample such as living tissue. The B/A values for inhomogeneous samples measured by proposed method are found to be different from these by the conventional method, but the values of homogeneous sampled by two measurement method is nearly equal.

* 해양경찰학과 조교수

I. 서 론

탄성과인 음파는 매질을 전파함에 있어서 매질의 탄성적 특성, 즉 압력과 변위의 비례 관계가 무너짐에 따라 파형이 일그러지는 비선형 현상이 발생한다. 이러한 현상은 음파라고 하는 외력에 대한 매질의 동적 응답의 하나로 음속, 산란, 감쇄 등과 같은 음향계수들과는 다른 매질의 내부 정보를 제공해줄 것으로 기대되고 있어 물질구조 분석분야는 물론, 의용 진단분야, 해양탐사 등에 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 매질의 비선형음향 특성을 비선형음향계수(B/A)로 정량화 하여 물질의 내부구조나 정량적인 진단정보를 얻으려는 tissue characterization 분야도 상당한 연구 결과가 발표되고 있다^[1].

이와 같은 응용분야에 B/A가 활용되기 위해서는 정확한 B/A측정시스템의 개발과 많은 조직에 대한 데이터의 축적이 필요하다. B/A 계수를 측정하는 방식으로 크게 열역학적법, 유한 진폭법, 2차 고조파법 등이 보고되어 있고 이들을 응용한 여러 측정방법들이 발표된바 있다. 그러나 이러한 기존 측정방법들은 매질들의 B/A 값이 5~10정도로 그 차이가 미소함에 비하여 측정 오차가 크고 매질 내부에서의 음파의 전파특성이 고려되지 않아 물질내부 성질의 파악이나 진단정보로의 활용에는 한계가 있는 실정이다^[2].

본 연구에서는 생체조직과 같은 미소시료의 측정에 적합한 열역학적 방식을 사용하여 음속의 음압 의존성을 정확하게 측정하여 B/A 값을 결정하는 새로운 알고리즘을 제시하고자 한다. 제안된 측정법에서는 초음파 영역의 송수신 펄스 파형을 시간영역에서 정의된 위상으로 분석하여 얻은 송수신 파형의 위상곡선 전체 영역에서 동일 위상간의 시간차를 평균하여 압력변화에 의한 전파 시간차를 측정함으로써 비선형 음향계수를 결정하게 된다. 본 논문에서는 새로운 측정 알고리즘의 원리와 측정시스템을 소개하고 불균일 매질과 균일 매질의 시료의 측정 결과를 종래의 방법에 의한 측정 결과와 비교검토 함으로써 음파의 다경로 전파에 의한 영향을 검토하고자 한다.

II. 음파의 비선형 현상

2.1 비선형 특성

매질 중을 음파가 전파하면 음파의 순시 압력이나 입자 속도에 의존하여 음속변화가 발생하여 파형의 일그러짐이 발생하는 것을 음파의 비선형 현상으로 알려져 있다. 매질의 음파에 대하여 비선형 성질은 Fig. 1에서와 같이 액체 매질의 압력과 밀도의 관계가 비례하지 않는 것이 원인이고 그 정도는 매질에 따라 다르다. 일반적으로 파동방정식에서는 음파의 강도를 무한 소진폭으로 가정하여 음압과 전파매질의 밀도와와의 관계가 선형관계로 가정하고 있지만 실제로는 양자의 관계가 비선형이다.

따라서 공중이나 수중에 음압이 큰 음파를 방사하면 전파 매질의 비선형의 영향이 나타나 전

파하는 음파에 파형의 일그러짐이 관측 될 뿐만 아니라 음파를 이용한 여러 화상표시 장치에도 화면의 선명도와 분해능을 저해하는 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 현상의 발생은 음원으로부터 방사된 본래의 주파수 성분외에 다른 주파수 성분이 발생한 것을 의미하며 음파의 진폭, 주파수, 전파거리 뿐만 아니라 매질 그 자체의 탄성적 성질에 크게 의존한다. 음파의 비선형 현상은 음파의 존재에 의한 매질의 압축 정도의 차이, 즉 음속이 압력에 의존하기 때문에 나타나는 탄성매질의 본질적 성질로 분자 레벨에서는 분자간의 분자 potential energy의 비대칭성이 원인으로 생각되고 있다.

음파의 비선형 효과를 오차로 취급하여 그 효과를 최소로 하려는 움직임이 있는 반면, 한편으로는 매질의 동적 특성을 비파괴적으로 연구 할 수 있는 정보로 적극적으로 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 후자의 경우 음파의 비선형 효과를 종래의 초음파 영상법에서 얻을 수 없었던 매질의 내부 구조의 정보와 생체 조직의 새로운 진단 정보를 얻기 위한 노력으로 음파의 비선형 특성을 정량화한 비선형 계수에 관한 연구가 진행되어 실용화 단계에 접어들고 있다.

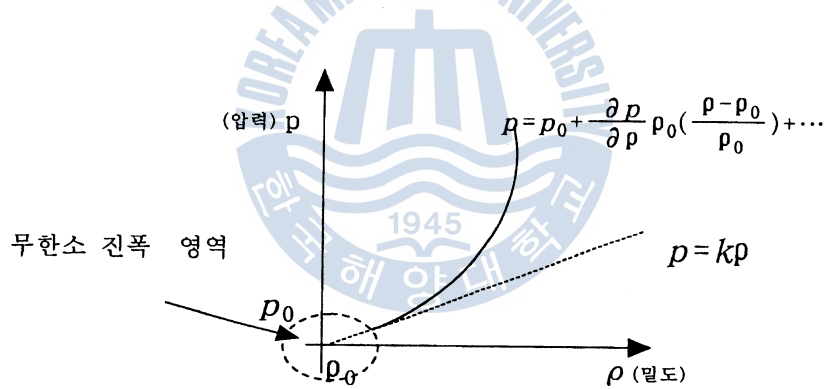


Fig. 1. 압력(음압)과 밀도의 비선형 관계.

2.2 비선형 계수(B/A)

음파의 비선형 현상을 정량적으로 계측하기 위해서 비선형 음향계수(acoustic nonlinearity parameter)가 사용되고 있다. 이 계수는 압력과 밀도의 변화가 동일한 entropy내에서 고속으로 이루어진다고 가정 하에 압력과 밀도의 관계를 나타내는 상태방정식을 테일러 급수 전개 공식을 이용하여 2차의 미소량 항까지 이용함으로써, 다음과 같이 정의된다^[3,4].

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 + \frac{\partial p}{\partial \rho} \rho_0 \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} + \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \frac{(\rho - \rho_0)^2}{2\rho_0^2} + \dots \\
 &= p_0 + A \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} + B \frac{(\rho - \rho_0)^2}{2\rho_0^2} + \dots
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 p_0, ρ_0 는 각각 정압 시의 압력과 밀도이다.

(1)식의 1, 2차 항의 계수를 A, B로 하였을 때 B와 A의 비를 비선형음향계수(B/A)라 한다. 즉, c_0 와 S 가 각각 무한 소진폭의 음속과 등엔트로피를 표시하면 A, B는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} A &= \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \\ &= \rho_0 c_0^2 \\ B &= \rho_0^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right)_s \\ &= 2\rho_0^2 c_0^3 \left(\frac{\partial c}{\partial p} \right)_s \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 비선형음향계수(B/A)는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$B/A = 2\rho_0 c_0 \left(\partial c / \partial p \right)_s \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있듯이 B/A는 탄성적 계수로 음파를 이용하여 계측하려면 밀도와 음속(ρ_0, c_0)과 음속의 압력의존성을 계측하면 B/A값이 결정될 수 있다.

III. B/A의 측정원리

3.1 전파 시간 측정

식(3)에서 알 수 있듯이 시료의 비선형 음향계수의 결정을 위하여서는 시료 내에서의 정압 시의 음속과 압력의 변화에 따른 음속의 변화를 측정하여야 한다. 정압 시의 음속(c_0)은 송수신 진동자를 일정한 거리(d)에 설치하고 그 사이에 시료를 채워 넣으면 초음파 펄스의 전파 시간(T_t)을 측정함으로써 결정될 수 있다.

$$c_0 = \frac{d}{T_t} \quad (4)$$

여기서, 시료의 내부에서 음파의 다경로 전파 등의 전파 특성을 고려하기 위해서 시료의 내부 정보를 내포하고 있는 수신 파형의 정보를 전부 활용하여 전파 시간(T_t)을 결정하는 방법을 제안한다. 먼저 음파의 전파 시간을 결정하기 위해서는 파형이 다른 두 송수신 파형간의 전구간에서 시간차를 구하기 위해 진폭과는 달리 주기성과 일정한 값을 가지고 미소한 시간을 나타내는 위상의 개념을 도입한다. 본래 위상은 특정 주파수에 대한 시간을 표시하는 변수이나 여기서는 시간 영역에서 식(5)와 같이 펄스 신호의 위상을 시간 함수로 정의한다^[5].

$$\theta(t) = \arg \left(\int_{-T/2}^{T/2} f(t+\tau) \sin \omega \tau d\tau + j \int_{-T/2}^{T/2} f(t+\tau) \cos \omega \tau d\tau \right) \quad (5)$$

여기서, T는 송신 펄스의 주기이다.

송수신 펄스 신호를 정의된 식(5)로 변환하면 송수신 신호의 위상곡선을 얻을 수 있다.

송수신 위상 곡선은 본래의 송수신 신호와는 달리 동일한 모양을 가진 시간 함수로 표시되므로 두 신호간의 시간차를 식(6)으로 구할 수 있다.

$$\tau_d = \frac{1}{2(n+1)\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (T_{ri}(\phi) - T_{ti}(\phi)) d\phi \quad (6)$$

Fig. 2는 위상곡선 상에서 전파시간의 결정 방법을 나타낸다. 즉 다른 모양의 송수신 신호간의 시간차를 구함에 있어서 시간 영역에서 정의된 위상곡선 상에서 같은 위상에 해당하는 신호간의 시간차의 전체 평균을 전파 시간차로 결정한다. 본 방법은 종래의 zero-crossing 법과는 달리 다수의 비교 점에서 전파시간을 결정하기 때문에 확장 zero-crossing 법이라고도 할 수 있다.

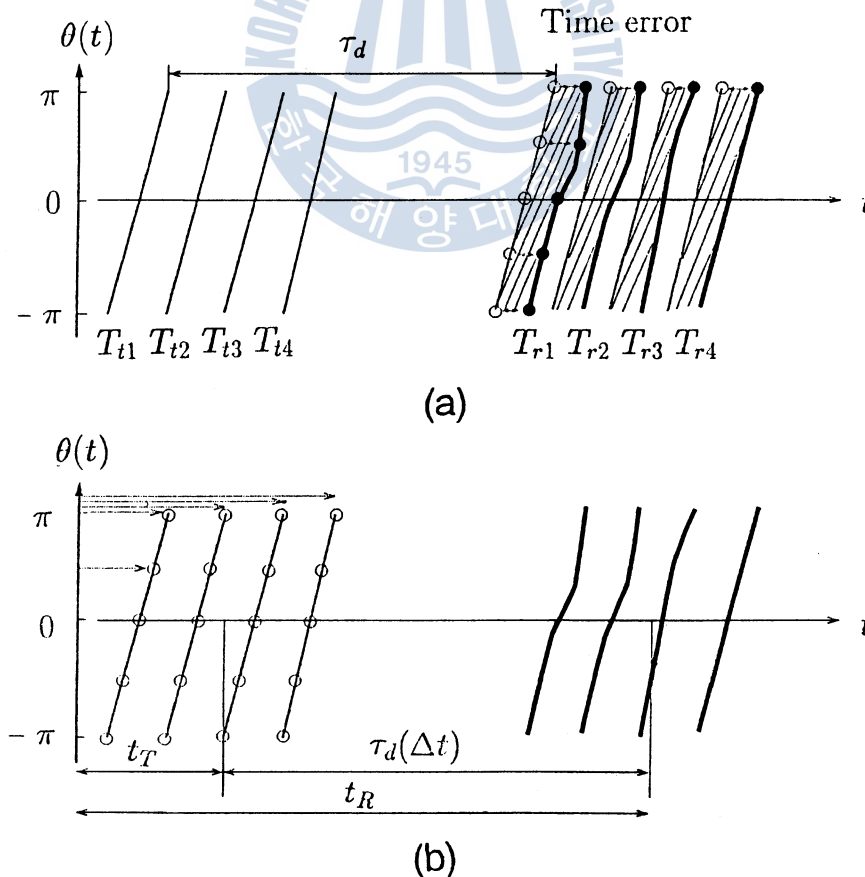


Fig. 2. Extended Zero-Cross 측정법의 원리

3.2 비선형 음향 계수 측정

정압에서 밀도(ρ_0)가 측정된 시료를 밀폐된 용기에 넣고 압력을 부가하였을 때 시료의 전파 시간을 T_{tp} 라하고 압력을 빠른 시간에 감압하여 정압일 때 시료내의 전파 시간을 T_0 라 하면 앞에서 제안한 방법을 도입하여 비선형 음향계수(B/A)는 다음 식과 같이 결정된다.

$$B/A = 2\rho_0 \frac{d^2}{\Delta p} \frac{T_0 - T_{tp}}{T_0^2 T_{tp}} \quad (7)$$

여기서, d , Δp 는 각각 시료의 길이와 압력의 변화치를 표시한다.

제안된 B/A 측정법은 전파 시간만의 측정으로 B/A가 간단히 결정될 뿐만 아니라, 송수신 파형의 정보를 전부 사용함으로써 시료의 내부 정보를 보다 충실히 반영되는 B/A값을 얻을 수 있다. 또한 고압력을 가하면 시료의 물리적 변화가 예상되나 미소한 압력변화에 대하여도 고감도로 비선형 음향계수의 측정이 용이함으로 압력에 약한 시료의 B/A의 계측 등에 활용이 기대된다.

IV. 측정 시스템과 측정결과

4.1 측정시스템

Fig. 3은 B/A의 측정시스템의 블록다이어그램을 나타낸다. 오목 진동자를 2cm 간격에 설치하여 음파의 송수신 장치로 이용하고 그 사이에 측정하고자 하는 시료를 두었다. 1MHz의 펄스(5주기)를 송신하고 수신 파형을 Waverecorder에 기록하여 20MHz로 샘플링하고 데이터를 컴퓨터에 저장할 수 있도록 하였다. 비선형 음향계수의 측정을 위하여 밀폐된 용기에 송수신기와 측정시료를 설치하고 50기압을 핸드 펌프로 가압 하였을 때 시료 내부의 초음파의 전파 시간과 단 시간에(등엔트로피) 정압으로 감압한 후에 시료내의 초음파 전파시간을 제안된 방법으로 결정하여 음파의 압력 특성인 B/A를 계측하였다.

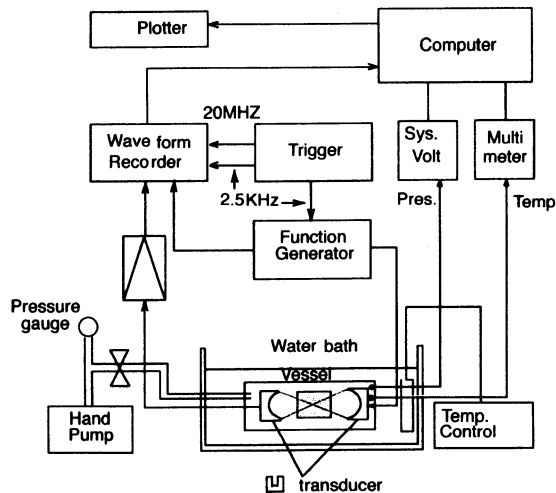


Fig. 3. B/A 측정 시스템

컴퓨터에 저장할 수 있도록 하였다. 비선형 음향계수의 측정을 위하여 밀폐된 용기에 송수신기와 측정시료를 설치하고 50기압을 핸드 펌프로 가압 하였을 때 시료 내부의 초음파의 전파 시간과 단 시간에(등엔트로피) 정압으로 감압한 후에 시료내의 초음파 전파시간을 제안된 방법으로 결정하여 음파의 압력 특성인 B/A를 계측하였다.

또한 음압이 높은 곳에서 비선형 현상이 현저함으로 오목 진동자를 사용함으로써 음압이 가장 높은 곳을 대표 값으로 하여 시료의 2차원 B/A 값을 표시하였

다. Fig. 4는 초점 거리가 1cm인 오목 진동자로 음파를 방사하였을 때의 음압 분포를 나타낸다. 측정 시료는 증류수, methanol, saline, formalin, living tissue(쥐의 간조직)에 대하여 측정하여 보았다.

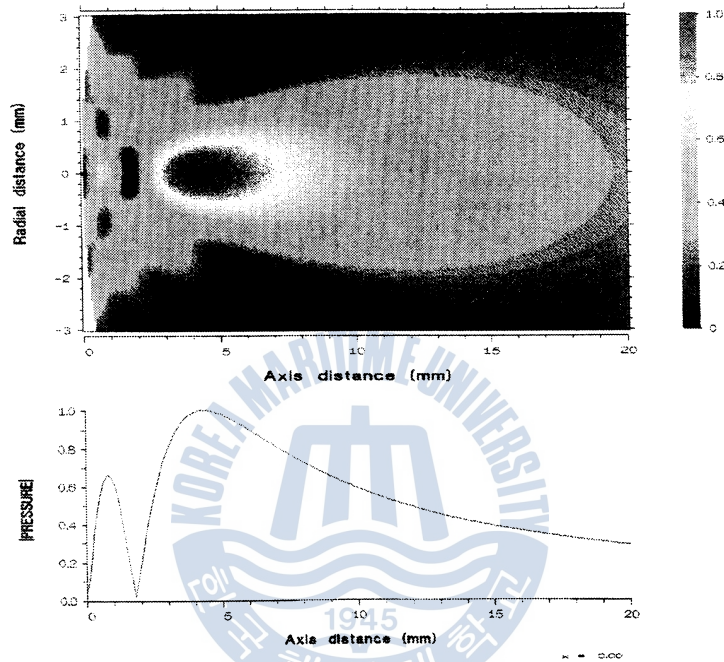


Fig. 4. 오목 진동자(초점 거리 1cm)의 음압 분포

4.2 측정 결과

Fig. 5는 송수신기 사이에 시료가 들어 있는 밀폐된 용기를 항온조에 넣고 온도를 5도 간격으로 시료들의 B/A 값을 측정된 결과와 문헌 값을 표시하였다. 측정값은 같은 온도에서 10번 측정하여 평균치와 편차를 기록하였다.

증류수의 B/A는 5.1~5.4로 문헌 값과 온도의 특성이 일치하고 전반적으로 0.1정도 작으나 표준 편차가 적어 안정된 값이 측정되었다¹⁶⁾. methanol의 B/A 값은 9.4~9.5로 문헌 값과 거의 일치하였다. Saline과 formalin 값은 5.4~5.7이나 formalin은 온도에 따른 차이가 거의 없고 측정값의 편차가 크다. 쥐의 간 조직의 B/A 값은 5.7~6.1 사이로 측정 편차가 큰 편이다.

Fig. 6은 증류수와 간 조직에 대하여 B/A 값을 분포로 측정된 결과이다. 방사 음압 분포가 가장 높은 곳을 대표 값으로 하여 5mm 간격으로 측정하였다. 균일 물질인 증류수는 거의 일정하나 간 조직은 위치에 따라 다른 B/A 값으로 측정되었다. 종래 측정 방법과는 달리 조직내의 전파 특성이 고려된 측정법으로 물질 내부의 탄성적 성질을 음파를 이용한 비파괴적 조사에 있어서 새로운 계수로 활용이 기대된다.

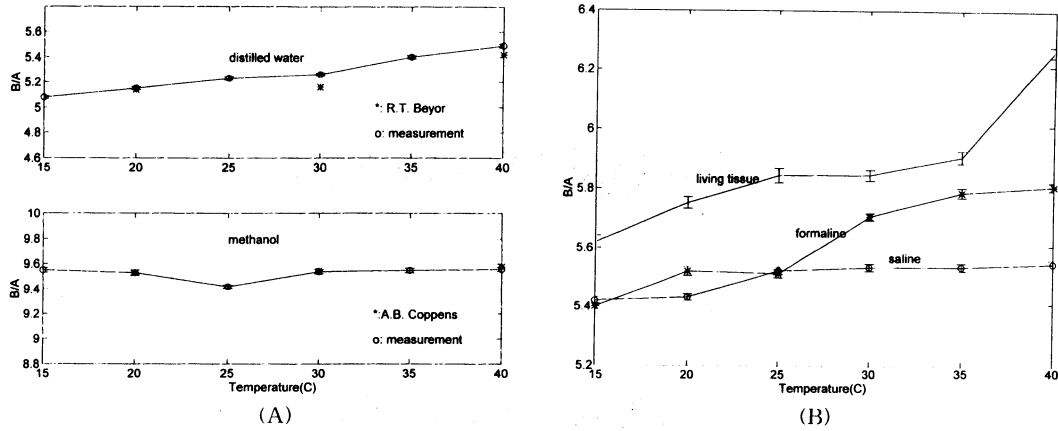


Fig. 5. 액체와 생체 조직의 B/A 측정 결과

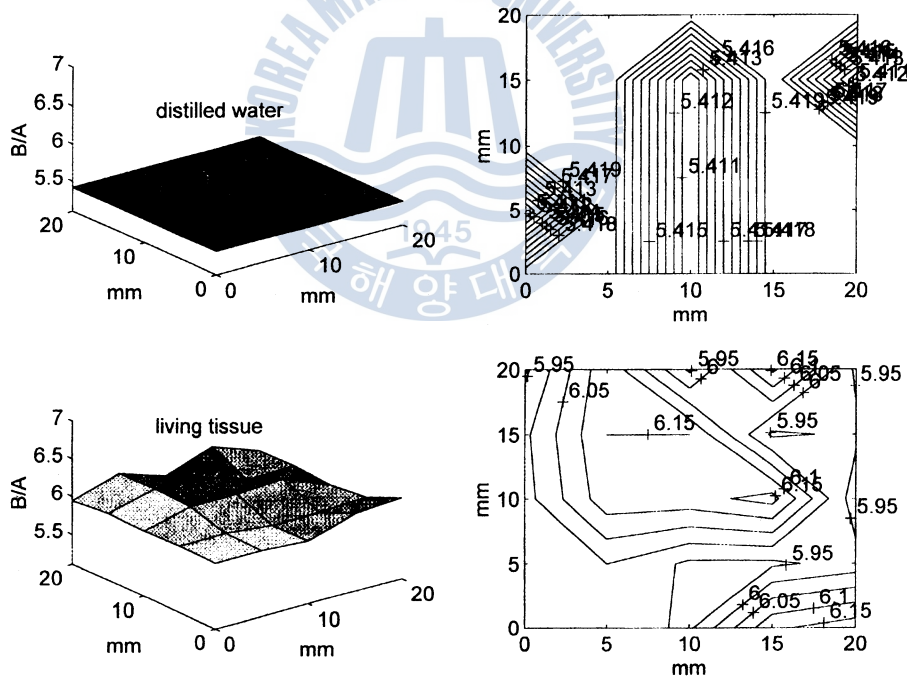


Fig. 6. 증류수와 생체조직의 B/A 분포

V. 결 론

음파를 이용하여 비파괴적 방법으로 매질의 탄성적 특성의 하나인 비선형 음향계수를 측정하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하고 측정 시스템을 구성하여 다양한 샘플 시료의 B/A 값을 측정하였다. 제안된 측정법에서는 송수신 펄스 파형의 전체의 데이터를 활용한 전파 시간

을 가지고 비선형 음향계수를 결정함으로써 종래의 일부분의 데이터로 음속의 압력 변화 값을 측정하여 결정하는 방법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 불 균일 매질에서의 다경로 전파 등과 같은 매질의 특성이 충실히 반영된다.
- (2) 작은 압력으로도 안정된 측정 값이 결정된다.
- (3) 평균 전파 시간의 측정으로 B/A가 간단히 결정된다.

또한, 측정 시스템을 구성하여 실측한 결과도 종래의 측정 결과에 비하여 측정 표준 편차가 적고 안정된 값이 측정되었고 B/A의 분포 측정의 가능성을 보여 불 균일 물질에서 새로운 탄성적 특성을 관찰하는 정보로의 활용이 기대된다. 다양한 분야에 B/A의 활용을 위해서는 분포 측정의 이론적 보완과 정확한 측정기법의 지속적인 개발이 필요하고 많은 시료에 대한 측정 데이터의 축적이 요구된다.

참고 문헌

1. T. Asahina, Measurement of B/A of animal tissue by the thermodynamic method in vitro. J.Med Ultrasonic Vol. 17. No. 4 pp. 358-363.
2. S. Saito, Measurement of the acoustic nonlinearity parameter in liquid media using focused ultrasound, J. Acoustic. Soc. Am. 93(1), pp. 162-172.
3. Y.K. Periklis, Instantaneous envelope and phase extraction from real signal: theory, implementation, and an application to EEG analysis, Signal Process. 2, pp. 373-385.
4. W.K. Law and F. Dunn, Comparison of thermodynamic and finite amplitude method of B/A measurement in biological materials, J. Acoustic. Soc. Am. 74(4), pp. 1295-1297.
5. Eun-bang Lee and S. Ohtsuki, An extended zero-crossing method for ultrasonic velocity measurements, J. Acoustic. Soc. Jpn(E), pp. 341-344.
6. L.Bjorno, Characterization of biological media by means of their non-linearity, Ultrasonic, Vol. 24, 1986. pp. 373-385.

