

PVDF 압전박막을 이용한 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템의 개발

A Study on Ultrasonic Nonlinear Parameter B/A Measuring System Development Using PVDF Piezoelectric Film

김정구 · 배종립
(Kim Jeong-Koo · Bae Jong-Rim)
대구대학교 물리학과

요 약

PVDF 고분자 압전 초음파 변환기를 이용하여 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템을 제작하였다. 이 측정 시스템은 종래의 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템에 있어 문제점이었던 장치의 복잡성을 대폭 간략화할 수 있으며, 고차 고조파까지도 측정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장치를 이용하여 여러가지 물질에 대한 B/A를 측정한 결과 다른 문헌치와 잘 일치하였다.

I. 서 론

일반적으로 초음파 spectroscopy 시스템을 이용한 물성연구는 초음파의 전파과정의 진폭에 의존하지 않으므로 매질에 대한 특성을 조사하기 위해서는 초음파의 음속과 흡수가 구해져야 하며,^[1] 선형 초음파의 주파수 의존성 또는 온도 의존성으로 부터 물성연구가 되어지고 있다.^[2] 그러나 탄성파로서의 초음파는 변위가 커지면 비선형성을 무시할 수 없게된다. 따라서 진폭이 크면 비선형성의 요인이 고려 되어야한다.

초음파 비선형성을 이용한 물질의 물성연구는 물질 고유의 값인 초음파 비선형 파라메타 B/A의 측정에 의해 행하여진다.^[3,4,5] 이러한 비선형 파라메타 B/A는 초음파와 매질의 비선형 상호작용의 크기를 나타내는 값이며, 최근에는 의학적인 응용에서 주목을 받고 있다. 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정법으로는 초음파의 파형변화를 측정하는 유한진폭법이 있다. 일반적으로 유한진폭법은 압력변동량이 미소하기 때문에 매질이 자연에 근접한 상태에서 측정할 수 있다는점 등이 장점이다. 유한진폭법을 이용하여 비선형 파라메타 B/A

를 구하는 방법으로 회절된 광의 강도 분포로부터 임의의 고조파에 대해 구하는 방법과,^[6,7] 기본 주파수의 정수배의 공진주파수를 가진 초음파 변환기를 이용하는 방법등이 있었다.^[8] 그러나 이러한 방법들은 기본파용과 고조파용 등 복수의 초음파 변환기가 필요하며, 또한 고조파 성분이 나타나지 않으므로 오실로스코프를 이용한 전압파형왜곡을 관측하기에는 곤란한 점등이 결점으로 지적되고 있다. 그러므로 기존의 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템이 가지는 단점을 보완할 새로운 측정 시스템을 개발할 필요성이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 무기질계 세라믹이나, 수정등과 같은 기존의 압전소자를 이용한 초음파 변환기의 단점을 보완하고, 제작상의 어려움이 있는 PVDF 고분자 압전 박막을 사용하여 초음파 변환기를 제작하여, 이를 이용한 새로운 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템을 개발하였다.

II. 이론적 배경

초음파 비선형 파라메타 B/A를 측정하기 위한 유한진폭법은 전파하는 초음파 자신의 압력변화에

의해 발생하는 파형왜곡을 이용한다. 매질이 액체로서 단일상태인 경우 압력 P와 밀도 ρ 와의 비선형 관계를 테일러 전개를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_0 + A\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right) + \frac{B}{2!}\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)^2 + \dots \quad (1)$$

여기서 변수의 첨자 0는 정압시의 값을 나타내며, A, B는 액체 고유의 정수이다. 매질의 감쇠가 작은 경우 x축 방향으로 이동하는 평면초음파는 오일러형의 유체역학식에서 아래와 같이 기술된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

(2)식은 연속방정식, (3)식은 운동방정식이고 u, x, t는 각각 입자속도, 공간좌표, 시간이다. 이것에 (1)식의 상태방정식에 이차항까지를 더하고 적당한 근사에 의해 위의 세가지 식을 조합시키면 다음과 같은 변위 ξ 에 대한 파동방정식이 만들어진다.^[9]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{C_0^2 (B/A) + 2}{\left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right)} \quad (4)$$

음파의 위치(x=0)에서 정현파인 경우 식(4)의 해는

$$\xi = \xi_0 \cos \omega \left(\frac{x}{C_0 + \epsilon u} - t \right) \quad (5)$$

으로 되고 단 $\epsilon = 1 + (B/2A)$ 이다. 같은 형태로 입자속도를 표시하면

$$u = u_0 \sin \omega \left(\frac{x}{C_0 + \epsilon u} - t \right) \quad (6)$$

이며, 이것은 유한진폭파를 표현한다. (5), (6)식에 따른 정현파로부터 파형이 찌그러진 정도는 u로 이동하는 좌표계에서 그림 1에 나타낸 ξ 와 η 로 기술할 수 있다. 이때 ξ 와 η 는 다음과 같이

표현된다.

$$\xi = \theta + x\eta, \quad \eta = \sin \theta$$

여기서 θ 는 파라메타, x 는 마루가 정현파로부터 벗어난 정도를 나타낸다.

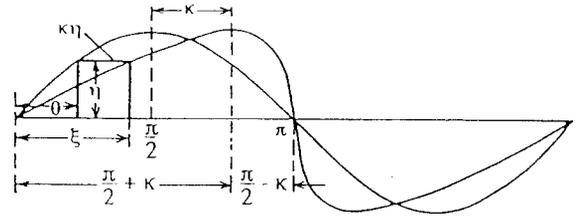


그림 1. Change in waveform of an initially sinusoidal plane acoustic wave of finite amplitude

Hargrove의 해석적 방법을 이용하여, 이 식에서 표시된 파의 푸리에 정현성분을 구하면 다음과 같다.^[10]

$$b_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\eta x} J_n(\eta x) \quad (7)$$

여기서 J_n 은 n차 Bessel 함수이며 κ 는

$$x = 2\pi \left(\frac{B}{2A} + 1 \right) P_0 \frac{f}{\rho_0 C_0^3} x \quad (8)$$

로 표시된다. 여기서 f 는 기본주파수, P_0 는 초기진폭이다. 음압진폭은

$$P = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \sin[2\pi n(f t - \frac{x}{\lambda})] \quad (9)$$

에 따르면 $J_n(\eta \kappa)$ 의 전개항의 제 1항만으로 근사하면 기본파의 음압진폭 P_1 과 2차 고조파의 음압진폭 P_2 에 의해 다음식으로 얻어진다.

$$P_2 = \frac{\pi f x}{2 \rho_0 C_0^3} \left(\frac{B}{A} + 2 \right) P_1^2 \quad (10)$$

그러므로, 초음파의 유효성에 의해 발생한 어차 고조파 성분을 측정하고 기본파 성분과의 비로부터 B/A가 구해진다.

III. 실험 방법

본 연구에서는 종래의 유한진폭법에 의한 비선형 파라메타 B/A를 구하는 방법이 장치가 복잡하

며, 고차 고조파를 직접 관측할 수 없다는 단점을 보완하여, 고분자 초음파 변환기의 중요한 성질중의 하나인 광대역 특성에 착안하여 기본파로부터 고차 고조파까지를 동시에 측정할 수 있으며, 장치가 간단한 새로운 측정 시스템을 구성 하였다.

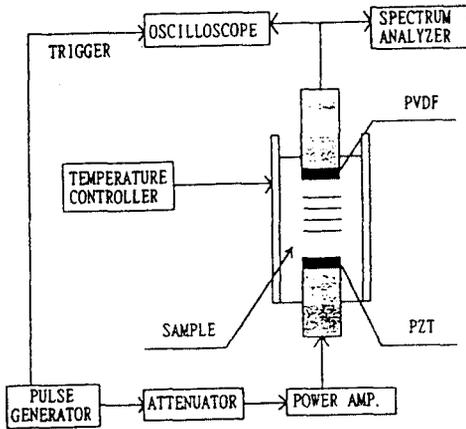


그림 2. Block diagram of experiment system.

그림 2는 비선형 파라메타 B/A를 측정하는 시스템의 개략도이다. 크게 나누면, 송신계로서 펄스 발생기(HP 8116A), 감쇄기(TRA-601D), 고주파용 파워앰프(ENI A150), PZT 변환기, 수신계로서 PVDF 변환기, 디지털 오실로스코프(TEXTRONIX 468), 스펙트럼 아날라이즈(ADVENTEST R4131C)로 구성된다. 수신용 초음파 변환기로 사용한 PVDF 고분자 압전 초음파 변환기는 DC 펄스 인가시 단 펄스가 발생되며, AC 펄스 인가시 광대역의 특징을 지니고 있어^[11] 본 연구의 시스템에 도입하였다. PVDF 초음파 변환기는 길이 150mm로 두께가 52 μ m인 PVDF 필름(공진주파수: 13MHz)을 접착시킨 후 backing 물질과 BNC connector를 리드선으로 연결하여 전기적 신호가 인가될 수 있도록 제작 하였다. 송신용 초음파 변환기는 전기기계 결합계수가 좋아 송신 효율이 좋은 PZT 변환기를 사용하였으며, 공진주파수는 3.2MHz 이다. 펄스발생기에서 나온 burst파는 감쇄기와 고주파용 파워앰

프를 거쳐 PZT 변환기에 인가되며, 매질을 투과한 파를 PVDF 변환기로 수신한 다음 오실로스코프를 이용하여 왜곡된 전압파형을 관측함과 동시에 그 파형왜곡을 스펙트럼 아날라이즈를 이용하여 주파수 축 상에서 기본파와 이차 고조파의 진폭해석을 통하여 비선형 파라메타 B/A를 측정한다. 이때 PZT 변환기에 입사하는 burst파에 고조파 성분이 포함되면 전파과정에서 발생하는 고조파와 중첩되므로 비선형 파라메타 B/A를 정확히 측정하기 위하여 매질에 입사하는 초음파는 고조파 성분이 포함되지 않은 정현파이어야 한다. 시료셀은 크기가 60 X 90 X 60mm인 스테인레스 재질이며 셀 내부의 온도를 조절하기 위하여 셀의 외부로 물이 순환하는 이중구조로 되어 있어 있으며, 외부의 온도조절기와 연결되어 시료셀의 온도를 0.1 $^{\circ}$ C까지 조절할 수 있도록 구성되어 있다. 셀에 부착되는 송신 변환기는 평행하여야 하므로 수신용 변환기가 부착되는 부분은 평행도를 조절할 수 있도록 제작 하였다.

IV. 결과 및 논의

그림 3은 송신용 PZT 초음파변환기에 인가한 전압을 45.52V로 일정하게 유지하고, 전송거리 d를 40mm와 80mm로 변화 시켰을 때 오실로스코프로 관측된 전압 파형과 스펙트럼 아날라이즈로 관측된 진폭해석 파형 스펙트럼의 사진이다. 전송거리가 짧으면 정현파에 가까운 전압 파형을 나타내며, 전송거리가 길면 왜곡된 전압 파형을 나타낸다. 또한 고조파 성분도 전송거리가 길면 많이 발생함을 알 수 있다. 이것은 종래의 유한진폭법의 하나인 기본 주파수에 대한 정수배의 공진주파수를 가진 초음파 변환기를 이용한 장치로서는 고차 고조파 성분을 동시에 관측할 수 없으며, 전압 파형 왜곡을 관측할 수 없다는 것에 비하여, 광대역 고

분자 초음파 변환기를 이용한 본 측정 시스템은 기본파 성분으로부터 고차고조파 성분까지를 동시에 관찰하면서, 비선형 파라미터 B/A를 측정할 수 있는 것이 장점이라 할 수 있다.

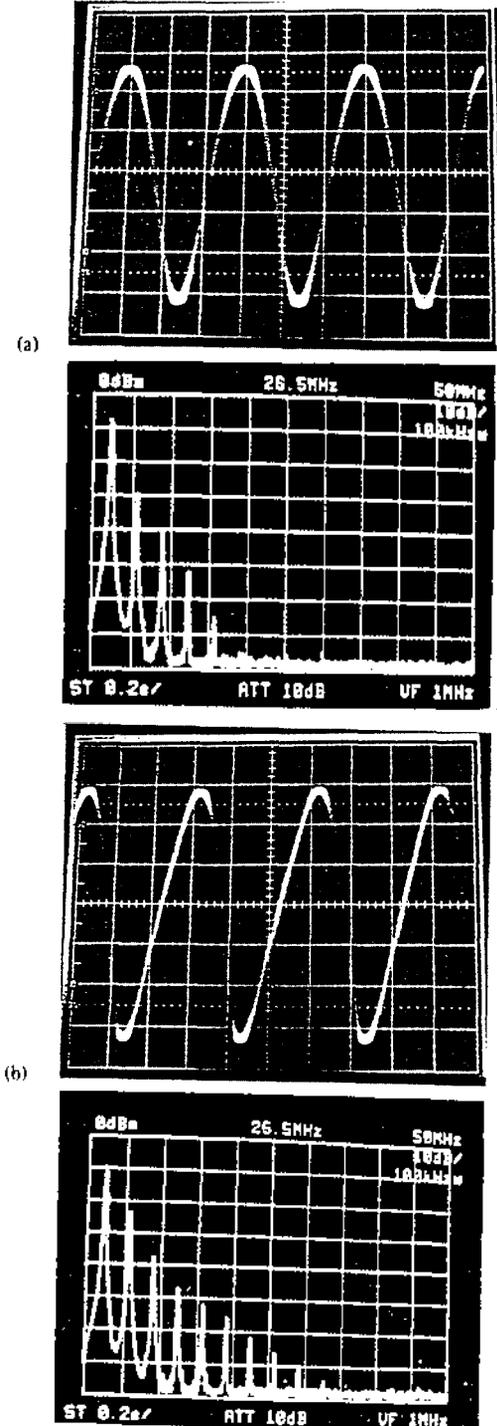


그림 3. Change of waveform distortion with distance for water. (a) $d=40$ mm, (b) $d=80$ mm

그림 4는 인가전압을 45.52V로 일정하게 유지한 다음 전송거리 d 에 대한 기본파성분 전압 V_1 과 이차 고조파성분 전압 V_2 , 4차, 6차, 8차 고조파성분 전압 V_4 , V_6 , V_8 의 관계를 나타내었다. 기본파 성분전압 V_1 은 전송에 동반하여 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 매질에 의한 감쇠와 기본파로부터 나온 에너지가 고조파성분의 에너지로 전환되어 전파되는 비선형 흡수에 의한 원인이다. 고조파성분은 전송거리가 증가함에 따라 고차항에서 큰 변화율로 증가 되었다. 이상과 같이 전송거리가 증가함에 따라 파형이 왜곡되며, 고차 고조파가 크게되는 것은 비선형 현상의 축적효과이기 때문이다.

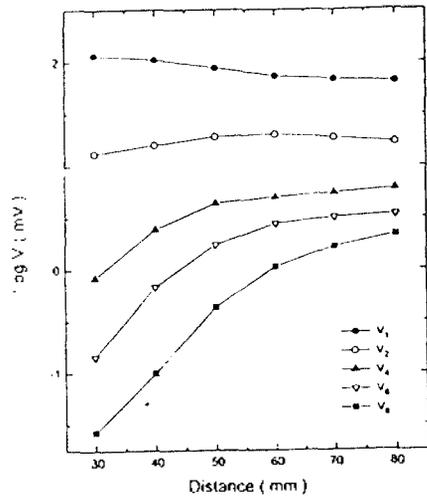


그림 4. Variation of higher-order harmonics with distance for water.

그림 5는 전송거리를 40mm로 일정하게 하여 PZT 초음파 변환기에 인가하는 전압을 변화시켰을 때 초음파 전송과정에 대한 진폭 의존성을 조사한 것이다. 기본파는 인가전압에 비례하여 커짐을 알 수 있으며, 인가 전압이 증가함에 따라 고차고조파 성분도 약 65%부근까지 고차 고조파가 크지는 포화상태가 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 인가 전압이 클수록 비선형성이 현저하게 되는 것을 나타내고 있다. 그림 6은 물 및 메탄올에 대한 이차

고조파 진폭 V_2 를 기본파 진폭의 v_{12} 에 대한 관계를 나타낸 것이다. 거리가 일정할 때 V_2 는 V_{12} 에 비례함을 알 수 있으며, 메탄올의 경우 물에 비하여 적은 인가전압에도 큰 파형왜곡을 나타내었다. 이러한 관계를 (10)식을 이용하여 비선형 파라메타 B/A를 계산하여 그 결과를 문헌치와 비교하여 표 1에 나타내었다. 메탄올과 에탄올의 증가치가 물에 비하여 크다는 것을 알 수 있으며 이것은 물에 비하여 비선형성이 크다는 것을 나타낸다.

Sample	B/A (Measured)	B/A [12] (Reference)
Water	5.00	5.02
Methanol	9.28	9.61
Ethanol	10.04	10.52

표 1. B/A values for water, Methanol and Ethanol

V. 결 론

비선형 초음파를 이용한 물질의 특성평가에서 물질의 고유한 특성을 지니는 초음파 비선형 파라메타 B/A를 PVDF 초음파 변환기를 이용하여 측정할 수 있는 새로운 측정 시스템을 제작하였다. 이러한 측정 시스템은 종래의 B/A 측정에 있어 문제점이었던 장치의 복잡성을 대폭 간략화 할 수 있으며, 파형왜곡 뿐만아니라 고차 고조파까지도 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장치를 이용하여 물 및 메탄올 에탄올에 대한 B/A를 측정된 결과 다른 문헌치와 잘 일치하였다.

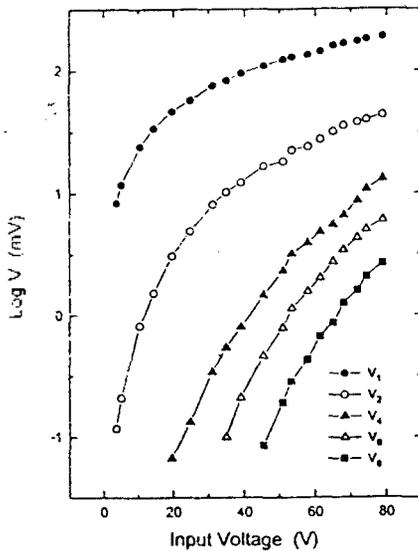


그림 5. Variation of higher-order harmonics with input voltage for water.

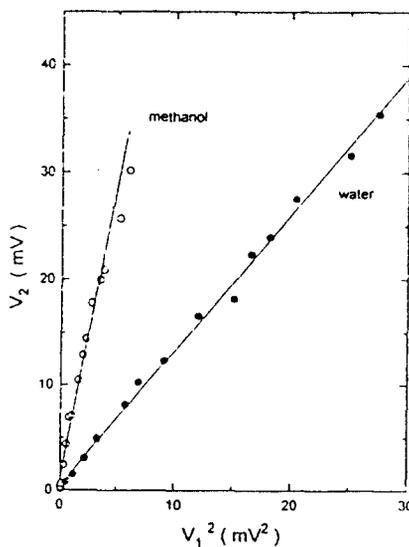


그림 6. Second harmonics as a function squared fundamental for water and methanol.

참 고 문 헌

1. 배종립, "초음파 Pulse의 다중반사에 의한 액체의 음파 속도 및 흡수 측정" 응용물리, 5, pp.136-141, 1992
2. A.P.Cracknell, "Ultrasonics", The Wykeham Science Series, 1980
3. R.T.Beyer, "Parameter of nonlinearity in fluids", J. Acoust. Soc. Am., 32, pp.719-726, 1960
4. 野村浩康, 馬場恒孝, 官原豊, "自由體積理論による液體の非線形性パラメ", 日本音響學會誌, 28, pp.565-568, 1972
5. C. M. Sehgal and J. F. Greenleaf, "Ultrasonic nonlinearity parameters and sound speed of alcohol-water mixture", J. Acoust. Soc. Am., 72, pp.566-570, 1986

6. D. A. Webster, and D. F. Blackstock, "finite-amplitude Saturation of plane sound waves in air", J. Acoust. Soc. Am, 62, pp.518-523, 1977
7. G. Xiu-fen, Z. Zhe ming, S. Tao, and H. Jian-hong, "Determination of the Acoustic Nonlinearity Parameter in Biological Media Using FAIS and ITD Method", J. Acoust. Soc. Am., 86, pp.1-5, 1989
8. E. L. Carstenson, W. K. Law, N. D McKay, and T.G. Muir, "emonstration of nonlinear acoustical effects at biomedical frequencies and intensities", Ultrasonic Med. Biol., 6, pp.359-368, 1980
9. H. Endo, "Determination of the nonlinearity parameters for liquids using thermodynamic constants" J. Acoust. Soc. Am. 71, pp 330-333, 1982
10. L.E.Hargrove, "Fourier series for the finite amplitude sound waveform in a dissipationless medium", J. Acoust.Soc. Am., 32, pp.511-512, 1960
11. 김정구, 배종립, "고분자 압전 Film을 이용한 초음파 변환기의 응답특성, 응용물리, 8, pp.398-402, 1995
12. A.B.Coppen, R.T.Beyer and J.Ballout, "Parameter of nonlinearity in fluids : Value of sound velocity in liquid metals", J. Acoust. Soc. Am., 41, pp 1443-1448, 1967