

위상 스펙트럴 차분법에 의한 초음파 감쇠 계수의 측정

○민 용기 최 중호 이 강호 최 중수  
 중앙 대학교 대학원 전자 공학과

Measurement Ultrasound Attenuation by Using  
 Phase Spectral Difference Method

MIN YONG KI, CHOI JONG HO, LEE KANG HO, CHOI JONG SOO  
 Dept. Electronic Eng., Chung-Ang University

(ABSTRACT)

To characterize the biological tissues, the new methods to measure the frequency dependent attenuation are presented in this paper. In general, ultrasonic phase information was assumed by linear function of the frequency. But, the minimum phase dispersion function which characterizes the frequency dispersion of tissue was derived in [1]. It is very significant to measure the attenuation by using the minimum phase function to characterize the frequency dispersion of tissue. Therefore, a more efficient method measuring the frequency dependent attenuation are proposed by using the estimated sound velocity and polarity of reflected signal. To verify the algorithms, pulse reflection experiments are performed.

1. 서론

1-1 본 연구의 배경

초음파 펄스에코법은 음향임피던스가 서로 다른 경계면의 존재유무를 영상화하는 것으로 어디까지나 형태 진단용으로 장기등의 형상을 영상화 하는데에는 적당하나, 조직의 기능이나 상태를 직접 표시해주는 것은 아니다. 따라서 조직의 병리학적 상태를 나타내 주기 위한 조직의 정량화에 관한 연구가 최근들어 활발히 연구되고 있다. 이를 위해 고려되는 대표적인 파라미터로는 음속과 주파수의존 감쇠를 들 수 있다. 본 논문에서는 수신용 진동자가 불필요하다는 측면에서, 펄스에코 신호를 이용하여 임상 응용에 더 적당하므로 스펙트럴 해석방법을 통하여, 음속과 주파수의존 감쇠의 측정법에 대해 집중적으로 연구하고자 한다.

1-2 본 논문의 목적 및 의의

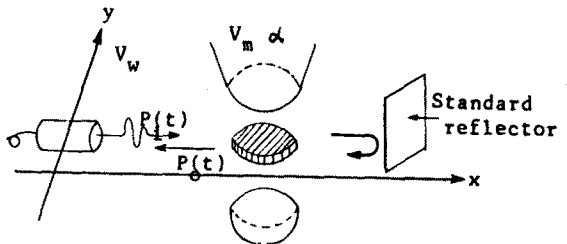
통상 감쇠매질의 진폭 특성은 많은 연구자들의 측정결과에 따르면 주파수의 선형함수가 된다. 이에 반해 위상 특성은 측정의 불가능하므로 인과성과 안정성의 측면에서 물리적으로 타당한 가정이 요구된다. Kak과 Diens[2]는 선형 위상 함수만을 가정하여 매질의 전달함수를 구하였으나, 이로 부터 얻은 임펄스응답은 비인과성을 갖는다. 이의 보완책으로 Hilbert 변환을 적용하여 얻은 최소 위상 함수를 이용하여 인과성을 가지는 임펄스응답을 얻고자하는 연구가 [1,3,4] 진행되어 왔다. 그 결과 생체조직을 전파한 초음파 위상정보는 선형 위상 함수와 최소 위상 함수로 표현 될 수 있다. 본 논문에서는 초음파 위상정보로부터 선형 위상 함수에 관계되는 반사파의 전파시간과 반사파의 극성을 추정하여 음속을

측정하였다. 그러나 음속의 변화는 생체조직 내에서 비교적 작으므로 생체조직의 정량화에 어려움이 있으므로, 상기의 결과들이 이용하여 주파수 영역에서의 감쇠계수 측정법에 대해 연구하였다. 즉 측정된 음속과 반사파의 극성을 이용하여 초음파 위상정보로부터 최소 위상정보만을 얻어, 이로부터 위상 스펙트럴 차분법에 의해 주파수분산을 고려한매질의 감쇠계수를 측정하였다.

2. 생체조직의 모델에 관한 기본이론

초음파 진료 시스템에서 사용되는 신호레벨은 비교적 작으며, 생체조직의 음속에 대해 생체의 운동기관은 운동속도는 비교적 작으므로 그림 2-1과 같은 선형 시불변 시스템으로 생각할 수 있다. 선형 시불변 시스템에서, 전달함수는 진폭과 위상성분으로 다음과 같이 나누어 쓸 수 있다.

$$H(w) = |H(w)| e^{j\phi(w)} \quad (2.1)$$



$$P_o(w)/P_i(w) = H(w) = |H(w)| e^{j\phi(w)}$$

그림 2-1 선형 시불변 시스템  
 fig 2.1 linear time invariant system

2-1 선형 위상 함수 모델

조직에서의 주파수의존 감쇠는 제한된 주파수 범위 안에서 주파수의 선형함수로서 쓸 수 있다.

$$\alpha(f) = \alpha \cdot |f| \quad \text{dB/cm} \quad (2.2)$$

두께가 d인 경우, 전파 거리에 따르는 감쇠를 고려하면 전달함수의 진폭은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H(f) = e^{-\alpha |f| d} \quad (2.3)$$

진료시스템에서 사용되는 주파수 범위 안에서 음속은 주파수 분산이 없다고 가정할 경우, 위상은 주파수의 선형함수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(f) = 2\pi \left( \frac{1}{v_w} - \frac{1}{v_m} \right) f \cdot d \quad (2.4)$$

그림 2-2에서는 샘플링 주기를 0.01MS로 하고, 감쇠계수는 간조직을 대상으로 0.94 dB/MHz 로 가정하여 진폭 H(f)에 자연대수를 취한값을 나타냈다. 또한 그림 2-3에서는 감쇠 계수를 0.94 dB/MHz/cm로 하고

음속을 1594m/sec로 했을 때의 위상특성과 임펄스 응답을 보인다.

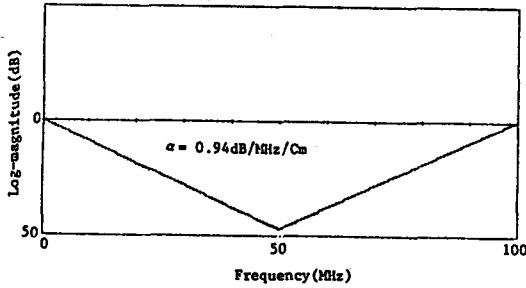
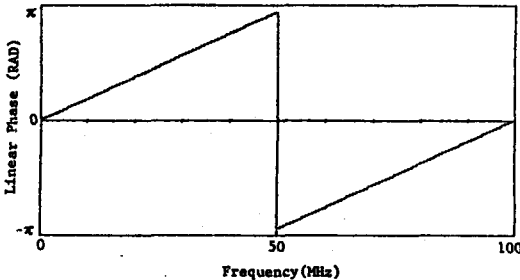
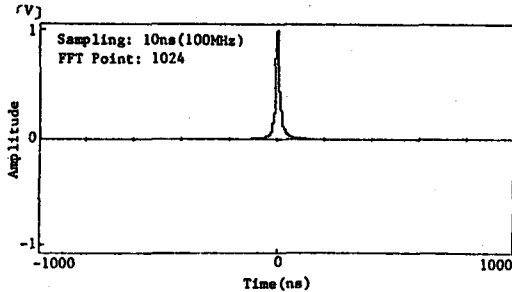


그림 2-2 대수 크기 특성  
fig 2.2 Log-magnitude characteristic



a) Linear phase



b) Impulse response

그림 2-3 선형 위상 모델  
fig 2.3 Linear phase model

2-2 최소위상 함수 모델

일반적으로 주파수 영역에서의 신호의 표현은 진폭과 위상을 사용하므로써 정의 될 수 있다. 그러나 진폭이나 혹은 위상만을 사용해서 신호보완 관계를 유지하려는 연구가 신호 처리 분야에서 연구되어 왔다. 인과성을 가지는 신호의 진폭과 위상과의 관계는 관심의 분야에 따라 명칭을 달리하고 있으나, Hilbert 변환의 관계로 알려져 있다. 이 관계는 최소 위상 조건으로 언급되기도 한다. 최소 위상 함수 모델에서의 진폭특성은 식(2.3)과 같게 되며 위상 특성은 많은 연구자들이 [1.3.4] 의해 연구 되었으나 본 논문의 특성상 [1]의 연구 결과를 이용하고자 한다. [1]의 결과에 따르면 최소 위상 함수는

$$\phi_{\min}(f) = \frac{2fd}{\pi} \ln(2\pi f) - \frac{2fd}{\pi} \tau_m \quad (2.5)$$

로 되고

생체조직을 전파한 초음파의 위상정보는 선형 위상 함수와 최소 위상 함수의 합으로 다 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(f) &= \phi(f) + \phi_{\min}(f) \\ &= -2\pi \left( \frac{1}{v_w} - \frac{1}{v_m} \right) fd + \frac{2fd}{\pi} \ln(2\pi f) \\ &\quad - \frac{2\alpha fd}{\pi} \tau_m \end{aligned} \quad (2.6)$$

3. 위상 스펙트럴 차분법

통상 제안되어 있는 기존의 감쇠계수 측정법에서는 스펙트럼에 절대치를 위한 값 즉 스펙트럼의 크기만을 이용 하고 있으므로 위상정보는 무시되고 있다. 그러나 주파수 분산을 고려해야 할 경우에는 위상정보와 매질에 의한 감쇠는 종속적인 관계에 있으므로 위상정보를 이용하여 종속성을 측정하는 일은 매우 바람직한 접근방향이 될 수 있다. 전절에서 논의된 선형 위상 함수와 최소 위상 함수를 이용하여, 전파한 초음파 위상정보를 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \phi(f) &= 2 \left( \frac{1}{v_w} - \frac{1}{v_m} \right) fd + f \left[ \frac{2d}{2} \ln(2\pi f) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2d}{\pi} \tau_m \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

로 되고

지연 요소만을 갖는 선형 위상 함수, 즉 식(2.7)의 1항으로부터 증폭에 위상을 나타내고 횡축을 주파수 축으로 잡으면 그 기울기는 다음으로 된다.

$$S_1 = 2\pi d \left( \frac{1}{v_w} - \frac{1}{v_m} \right) \quad (2.8)$$

기준이 되는 매질의 음속을 알고, 두께 d가 측정될 수 있다면 매질의 음속이 측정 될 수 있다. 상기의 방법으로 측정된 음속을 이용하여 선형 위상 함수에 대응되는 스펙트럼을 얻기 위하여 반사계수 r을 고려한다.

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

로 되고, 여기서 매질의 임피던스를 나타낸다.  $Z_1$  및  $Z_2$ 의 대소에 의해 반사되는 양음의 특성을 가지므로,

1. 전파로상의 매질의 음속은 주파수 분산이 없다.
  2. 생체의 음향 임피던스는 실수이다.
  3. 반사면의 초음파는 전파로 상에 수직이다.
- 라는 조건 하에서 선형 위상 함수는 (2.4)와 관계로 부터 다음과 같다.

$$\phi(f) = 2\pi \left( \frac{1}{v_w} - \frac{1}{v_m} \right) fd + m\pi \quad (2.9)$$

단, m은 정수이다. 선형 위상 함수의 특성은 주파수 f에 직선적으로 선형근사법을 적용하면 직선의 기울기로 부터 음속을 구 할 수 있으며, 주파수 대역밖의 부분을 얻고, 이로부터 m값을 얻어낸다. 그러나 진단에 사용되는 주파수 범위 안에서 음속의 변화는 비교적 적으므로 본절의 머릿말에서 밝힌 대로 주파수 분산을 고려한 감쇠계수 측정법을 제안한다. 반사파의 위상정보에서 추정된 선형 위상 함수를 곱하면 다음과 같은 최소 위상 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(f) - \phi(f) &= \phi_m(f) \\ &= \alpha \cdot f \left[ \frac{2d}{\pi} \ln(2\pi f) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2d}{\pi} \tau_m \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

식(2.10)으로부터 주파수의존 감쇠  $\alpha(f)$ 를 구하면

$$\alpha f = \frac{\phi(f) - \phi_0(f)}{\left[ \frac{2d}{\pi} k_n(2\pi f) - \frac{2d}{\pi} (\omega) \right]} \quad (2.11)$$

로 되고, 음속에서와 마찬가지로 횡축을 주파수 축으로  
 뒤하고 종축을 위상 스펙트럼 차분량을 나타내면, 그  
 기울기로 부터 주파수 분산을 고려한 매질의 음파 속도를  
 측정할 수 있다. 즉 트랜스듀서로부터의 반사파의  
 일점 쪽의 함으로서 길이의 방향에 따라 순차적으로  
 구간을 팔라서, 그 구간의 반사파를 스펙트럼 해석의  
 위해 주파수 분산을 행한 다음 길이에 대한 반사파의  
 스펙트럼인  $\phi_0(f)$ 와  $\phi(f)$ 의 차분을 구하면, 그  
 기에 의해 매질의 감쇠 계수가 산출 될 수 있다.

4. 실험

본 절에서는 최소 위상함수 모델의 타당성을  
 확인한 결과만을 실험장치, 실험방법 및 실험결과  
 의 순서로 서술한다.

4-1 실험장치

최소 위상함수 모델의 타당성 검증 및 감쇠 계수의  
 측정을 위해 사용된 장치의 블럭도를 그림 4-1에  
 나타냈다. 실험에 사용된 시험용 팬텀은 두께가 8mm  
 인 아크릴 판이며, 트랜스듀서는 중심주파수가 3MHz  
 이고 지름 D가 13mm인 평면 진동자이다. 반사되어  
 나오는 에코 신호 중에서 관심 부위의 신호를  
 위하여 근거리 경계면(Near Surface)과 원거리  
 경계면(Far Surface)에 해당하는 적당한 폭만을  
 선택하여 파형 기억장치에 기억시켰다. 파형  
 기억장치에서는 8bit의 A/D 변환기가 내장되어 있으며  
 A/D 변환된 에코신호는 퍼스널 컴퓨터의 보조  
 기억장치에 입력된다. 이 데이터는 off line  
 통하여 IBM-PC 컴퓨터에 전송되어 필요한 연산이  
 실시된다. 상기의 데이터 취득장치의 의해 얻은  
 신호들을 그림 4-2에 나타냈다.

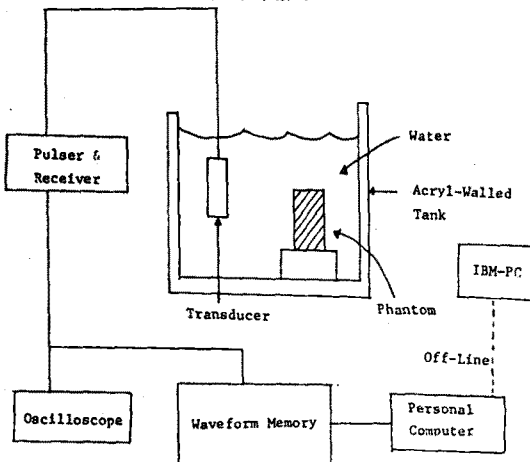
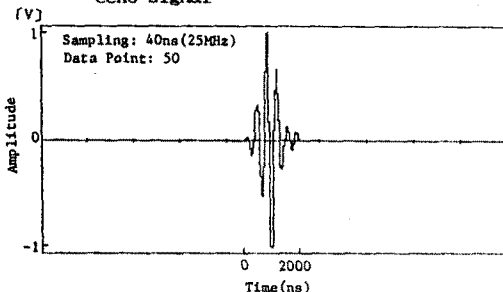
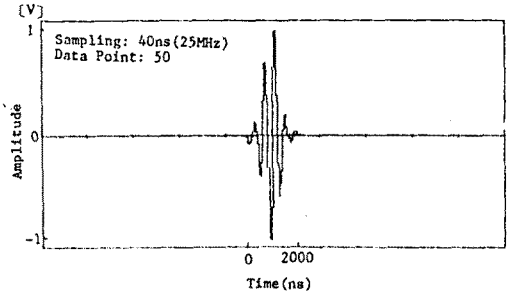


그림 4-1 데이터 취득 장치

fig 4.1 Data acquisition apparatus for ultrasonic echo signal



a) Near surface

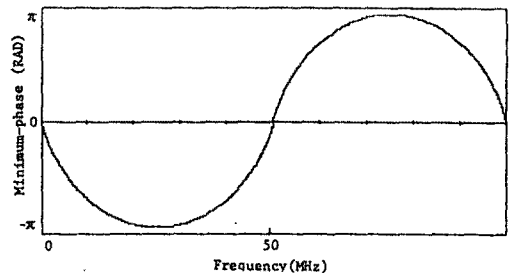


b) Far surface

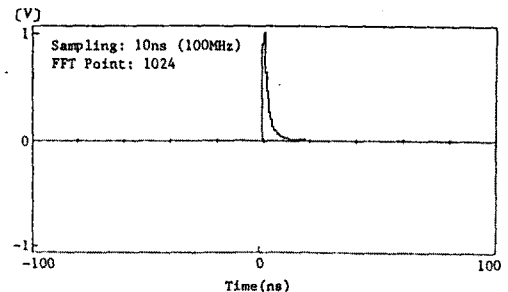
그림 4-2 아크릴판에서 얻은 에코신호(8mm)  
 fig 4.2 Echo signal obtained from acryl plate (8mm)

4-2 실험방법 및 결과

최소 위상함수 모델의  
 위상복수와 임펄스 응답을 그림 4-3에 나타냈다  
 감쇠 계수의 기울기를 0.94dB/MHz/cm로 하고 샘플링  
 시간과 FFT Point 수를 각각 0.04μs와 1024 Point로 한  
 경우이다. 상기의 복성을 갖은 최소 위상함수 모델의  
 정확도를 증명하기 위해 근거리 경계면에서의 신호  
 $\phi(t)$ 로부터 원거리 경계면에서의 신호를 예측하고,  
 이를 실험에서 측정된 결과와 비교해보았다. 원거리  
 경계면에서 반사되어 나오는 각 모델의 신호는 근거리  
 경계면에서의 신호를 부호 변환하여, 각각의 임펄스  
 응답과 컨볼루션을 위하여 예측하였다. 그  
 결과 그림 4-3에 나타냈다.



a) Minimum phase



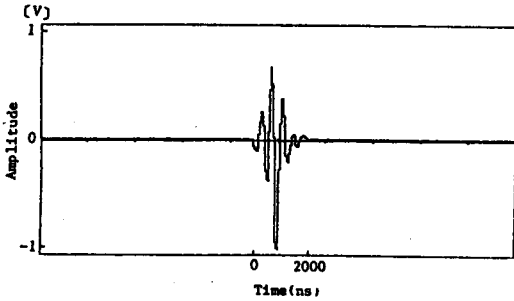
b) Impulse response

그림 4-3 최소 위상 모델  
 fig 4.3 Minimum phase model

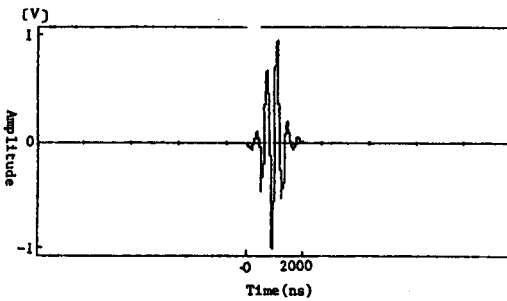
4-3 검토

본 절에서는 제안된 최소 위상함수 모델과  
 감쇠 계수 측정법의 유효성을 확인하기 위해 행한  
 실험결과를 검토하고 자 한다. 최소 위상함수 모델의  
 최대치(Peak Value)는 선형 위상함수 모델보다 약간  
 작게 되고, 구간(Duration)은 더 길 어지며, 인과성을  
 갖는다. 이러한 모양의 변화는 높은 주파수에서는  
 낮은 주파수에서 보다 위상속도가 약간 바르게 되기  
 때문이다. 원거리 경계면에서 반사되어 나오는

신호를 예측 하는 실험에서는 최소 위상함수 모델에 의해 예측된 파형이 실제로 얻은 파형에 훨씬 더 근접되었음을 알 수 있다. 상기의 결과에 따르면 제안된 최소 위상 모델은 선형 위상함수 모델 보다 감쇠 매질을 더 정확하게 표현한 모델이라 할 수 있다.



a) Predicted far surface reflection using linear phase model



b) Predicted far surface reflection using minimum phase model

그림 4-4 원거리 경계면에 대한 예측치 비교  
fig 4.4 Comparison of predicted and observed far surface reflection

### 5. 결 론

본 논문의 목적은 생체에 대해 무해, 무통한 초음파를 이용하여 조직을 정량화하는데 있다. 상기의 목적을 위해 2차원 에코 그래픽 영상에 생체의 병리학적 상태를 감쇠 계수로서 나타내주는 방법에 대해 연구하였다. 주파수 분산을 고려하기 위해 스펙트럴 크기 함수로부터 유도된 최소 위상 함수를 이용하여, 위상 스펙트럴 차분법에 의한 감쇠 계수 측정법을 제안하였다. 본 논문에 관한 연구가 충실히 수행된다면 초음파 의용 진단 기술이 진전되고 초음파에 관련된 연구의 향상에 기여하여, 생체계측 및 생체 모델 공학의 발전이 있을 것으로 기대된다.

### 6. 참고 문헌

- (1) K.V. Gurumurthy and R.M. Arthur, "A dispersive model for the propagation of ultrasound in soft tissue," *Ultrasound Imaging 4*, pp.355-377, 1982.
- (2) A.C. Kak and K.A. Diens, "Signal processing of broad band pulsed ultrasound: Measurement of soft biological tissue," *IEEE Trans. Biomedical Eng., Vol. BME-25*, pp.321-334, 1978.
- (3) Jong-Ho Choi, Jong soo Choi, "A measurement method of ultrasonic velocity in multilayered medium by dip points analysis from reflected echo spectrum," *IEEE international conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1977-1980, 1986
- (4) R. Kuc, "Modeling acoustic attenuation of soft tissue with a minimum-phase filter," *Ultrasound Imaging 6*, pp.24-36, 1984.