

## 초음파를 이용한 조직구조 특성변수의 측정

곽철은 · 김종원 · 이상훈 · 민병구 · 이충웅\*

= Abstract =

### Parameter Estimation of Tissue Structure Characteristics in Ultrasound Measurement

Cheol Eun Kwark, Jong Won Kim, Sang Hoon Lee, Byoung Goo Min,  
Choong Woong Lee\*

The objective of tissue characterization is to provide quantitative information about the physical state of tissue interrogated by an ultrasound beam. In the computer simulation, it was found that the echoes were composed of the interferences of the ultrasonic waves reflected from both sides of the thin object, and could be separated by the spectral correlation method.

Also, the phantom study demonstrates that thickness of the thin acryl layer beyond the resolution of common ultrasonic imaging systems can be measured using this method.

#### 1. 서 론

비 관혈적(non-invasive)인 진단장치로 이용되어 온 초음파 영상 시스템은 진단목적에 따라 여러가지 형태의 초음파 신호변환기(ultrasonic transducer)와 신호처리 방식을 사용하여 필요한 영상을 구성한다. 그 구성된 영상은, 초음파 신호변환기의 빔 형태와 신호처리 방식이 영상의 화질, 즉 해상도(resolution)에 제한요인이 되고 있어, 이를 보완할 수 있는 방법이 요구된다.

조직특성연구(tissue characterization)는, 초음파 영상과는 다른 연구 방법으로, 생체로부터 반사 또는 투과된 초음파 신호를 분석하여 조직의 특성을 관찰하

고 병변을 검출하려는 생체 연구 방법이다.

그 한 유형으로 조직에 관한 특성 변수(characteristic parameter)를 설정하고 초음파 신호를 가지고 적당한 알고리즘을 통하여 계산된 결과와 조직의 병리학적 상태와의 관계를 비교, 분석하는 감쇠계수(attenuation coefficient), 반사계수(backscattering coefficient), 임피던스(impedance)등을 추정하는 변수추정(parameter estimation)방식이 있다.

다른 유형으로 반사된 초음파 신호를 신호처리 방식을 통하여 상관함수, 전력 스펙트럼(power spectrum) 등을 정량적으로 계산하여, 이로 부터 직접 조직의 구조적 상태를 관찰하는 구조특성화(structure characterization) 방식이 있다.

본 연구는 조직의 구조적 관찰을 위한 기초 연구이다.

음파 파동 방정식의 해석을 통하여 얇은 막에 의한 음파 간섭 현상을 보이고, 컴퓨터 모의 실험 결과로부터 스펙트럼 상관 함수(spectral correlation function)를 후리에 변환(Fourier transform)하면 해상도 아래의 막 두께를 추정할 수 있음을 보였다. 또한, 수조내의 얇은 아크릴(acryl) 판(1mm)에서 반사된 초음파

<1986. 6. 12 접수>

서울대학교 의과대학 의공학교실

\* 서울대학교 공과대학 전자공학과

Department of Biomedical Engineering,

\* Department of Electronics Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

<본 연구는 서울대학교 병원의 '86 특진 연구비에 의하여 이루어진 것임.>

펄스를 분석하여 아크릴 판의 두께를 측정하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 1) 음파 방정식의 해석

비 균질 물질 내에서의 음파 파동 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\nabla^2 P - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \gamma(\vec{r}) + \nabla \cdot (\mu(\vec{r}) \nabla P) \quad \dots\dots(1)$$

$$\gamma(\vec{r}) = \frac{K-K_0}{K_0}, \quad \mu(\vec{r}) = \frac{\rho-\rho_0}{\rho}, \quad C_0^2 = \frac{1}{K_0 \rho_0}$$

$P$ : 압력함수 (pressure function)

$K$ : 비 균질 물질의 압축률 (compressibility)

$\rho$ : 비 균질 물질의 밀도 (density)

$K_0$ : 균질 물질의 압축률

$\rho_0$ : 균질 물질의 밀도

음파 파동 방정식의 해를 구하기 위하여 그린 정리 (Green's theorem)를 적용하고 본의 1차 근사 (Born approximation)를 사용하면, 산란된 음파의 압력 함수  $P_{sc}(\vec{r}, t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_{sc}(\vec{r}, t) = - \int d^3 \vec{r}' \int dt' \left[ \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P_i(\vec{r}', t')}{\partial t'^2} \gamma(\vec{r}') + \nabla \cdot (\mu(\vec{r}') \nabla P_i(\vec{r}', t')) \right] \frac{\delta(t' - t + \frac{|\vec{r} - \vec{r}'|}{C_0})}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|} \quad \dots\dots(2)$$

윗 식에서  $P_i(\vec{r}, t)$ 는 비 균질 물질에 인가되는 음파의 압력 함수로, 진행방향의 진폭 특성을  $a(\cdot)$ , 이에 수직인 방향의 진폭 특성을  $b(\cdot)$ 로 나타내면 아래 식과 같이 표현된다.

$$P_i(\vec{r}, t) = a(z - C_0 t) b(h) e^{iK_0(z - C_0 t)} \quad \dots\dots(3)$$

한편, 식 (2)의 우변에서  $\mu(\vec{r})$ 은 매질의 밀도 변화에 따른 압력 함수의 변화율로 생체내에서  $r \gg \mu$ 이므로 이 항을 무시하고, 결과 식의 후리에 변환 (Fourier transform)을 통하여 산란된 압력 함수의 스펙트럼 표현을 구하면 아래와 같다.

$$P_{sc}(R, K) = \frac{K_0^2}{2RC_0} A(K - K_0) \Gamma(2K) e^{i2KR} \quad \dots\dots(4)$$

$$A(K) = \int_{-\infty}^{\infty} a(z) e^{-iKz} dz \quad \dots\dots(4a)$$

$$\Gamma(2K) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} b(h) \gamma(h, \theta, z) e^{i2Kz} \times h dh \cdot d\theta \cdot dz \quad \dots\dots(4b)$$

식 (4)로부터 얇은 막에 의하여 산란된 음파의 압력

함수에 대한 스펙트럼 표현은 아래와 같다.

$$|P_{sc}(R, K)| = \frac{a_0 \alpha}{1 + \alpha^2 (K - K_0)^2} \frac{\gamma_0 K_0}{2RC_0} \frac{1}{2\beta^2} |1 - e^{-i2Kd}| = \frac{a_0 \gamma_0 K_0^2 \alpha}{1 + \alpha^2 (K - K_0)^2} \frac{1}{RC_0 \beta^2} |\sin Kd| \quad \dots\dots(5)$$

$$a(z) = \begin{cases} a_0 \frac{z}{a} & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases} \quad \dots\dots(5a)$$

$$b(h) = e^{-\beta^2 h^2} \quad \dots\dots(5b)$$

$$\gamma(h, \theta, z) = \gamma_0 (\delta(z) - \delta(z + d)) \quad \dots\dots(5c)$$

따라서 얇은 막에 의하여 산란, 반사된 음파는 막의 두께  $d$ 를 주기로 하는 주기함수형의 스펙트럼 표현을 갖게됨을 알 수 있다.

### 2) 스펙트럼 상관함수

얇은 막에 입사되는 음파의 압력함수는 식 (3)과 같이 주어지므로 이의 스펙트럼 표현을  $P_i(R, K)$ 로 표시하고, 막으로부터 산란, 반사되는 음파의 압력 함수에 대한 스펙트럼 표현을  $P_{sc}(R, K)$ 로 나타내면, 입사 및 반사되는 음파의 스펙트럼 상관함수  $Cd(R, K)$ 는 아래와 같이 정의될 수 있으며,

$$Cd(R, K) = \frac{P_i(R, K) - P_{sc}(R, K)}{P_i(R, K)} \quad \dots\dots(6)$$

이때 상관함수  $Cd(R, K)$ 는 막의 두께  $d$ 에 의한 주파수 성분을 갖게되므로 역후리에 변환 (inverse Fourier transform)을 통하여  $d$ 를 추정할 수 있다. 한편 식 (6)을 사용하는 경우에는 얇은 막의 전, 후면에서 일어나는 반사파를 분리하여 입사되는 음파에 의한 스펙트럼 표현  $P_i(R, K)$ 가 요구되는데 실험적 방법에 의한 분리는 불가능하며, 결과적으로  $P_i(R, K)$ 를 얻기 위하여 완전반사체를 이용한 실험이 선행되어야 한다. 이러한 일련의 실험방법에 의하여 얻어진 입사파의 스펙트럼  $P'_i(R, K)$ 는 독립실험에 의한 위상차 (phase difference)로 인하여 식 (6)의  $P_i(R, K)$ 와는 일치하지 않으며, 따라서 아래와 같이 전력 스펙트럼 (power spectrum)을 이용한 상관함수를 사용하여야 한다.

$$|Cd(R, K)| = 1 - \frac{|P_{sc}(R, K)|}{|P'_i(R, K)|} \quad \dots\dots(7)$$

위의 식에서  $P'_i(R, K)$ 는 독립 실험에 의하여 얻어진 입사파의 전력 스펙트럼이다.

## 3. 컴퓨터 모의실험 및 팬텀 실험

### 1) 컴퓨터 모의실험

반사된 음파의 압력함수에 대한 스펙트럼 표현  $P_{sc}$

( $R$ ,  $K$ )가 주기함수이고 이 주기로 부터 얇은 막의 두께  $d$ 를 구할 수 있음을 전절에서 보였다.

컴퓨터 모의실험을 위하여 아래와 같이 입사파 및 반사파를 모델화하였다.

$$P_i(t) = a_i t e^{-\frac{t}{\tau}} \cos 2\pi f_0 t \quad \dots(8)$$

$$P_{sc}(t) = P_i(t) - a_i^2 a_R b_i(t + \Delta t) \quad \dots(9)$$

$$\Delta t = \frac{2d}{C}, \quad a_R + a_i = 1$$

- $C$ : 막에서의 음파 전달 속도
- $a_i$ : 입사파의 진폭계수
- $a_R$ : 경계면에서의 반사계수
- $b_i$ : 경계면에서의 투과계수
- $\tau$ : 신호변환기의 진동특성계수

또한, 신호 변환기(transducer)의 아나로그 신호를 디지털화하는데 있어서의 양자화 효과(quantization effect) 및 투과계수, 신호 변환기의 진동 특성 계수등

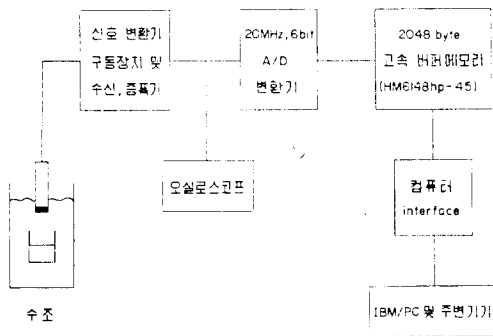


그림 1. 실험 장치 구성도  
Fig. 1. System block diagram.

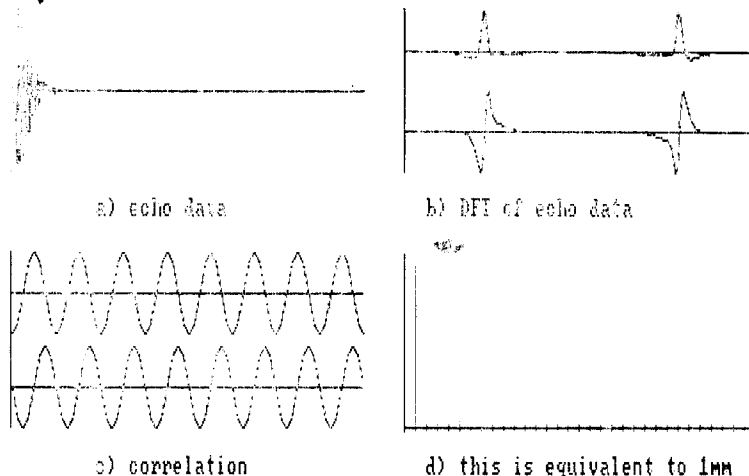


그림 2. 컴퓨터 모의실험에 의한 두께 측정 결과  
Fig. 2. Thickness estimate by computer simulation.

이 막의 두께  $d$ 를 계산하는데 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

## 2) 팬텀 실험

본 실험을 위하여 중심 주파수가 2.25 MHz 인 신호 변환기와 구동장치, 20 MHz A/D 변환기, 메모리 및 IBM-PC 컴퓨터를 연결하여 데이터 수집 장치를 구성하고, 팬텀으로는 수조내의 두께가 1 mm 인 아크릴판을 사용하였다(그림 1).

입사파  $P_i(t)$ 를 얻기 위하여 같은 재질의 두께가 15 mm 인 아크릴판을 사용하였으며, 그 스펙트럼을 정규화하였다.

## 4. 결과 및 고찰

전술한 바와같이 범용의 초음파 영상장치는 그 해상도에 제한이 있어 미세조직 구조의 관찰 및 검진에는 난점이 있으며, 따라서 미세조직 특성화를 위한 연구가 필요하다.

미세조직 구조에 의한 음파의 산란, 반사 과정을 얇은 막 간섭 현상으로 해석하고 이를 위하여 초음파 영상장치의 해상도 보다 얇은 두께를 갖는 막의 전·후면에서 일어나는 반사파를 분석하였다. 컴퓨터 모의실험에서는 범용의 초음파 영상 장치에 사용되는 초음파 신호 변환기(ultrasonic transducer)의 음파 발생 형태를 모델화하여 사용하였는 바, 스펙트럼 상관관수에 의하여 얇은 막 전·후면에서 일어나는 반사파를 분리, 그 두께의 측정이 가능하였다. 또한, 반사신호의 디지털

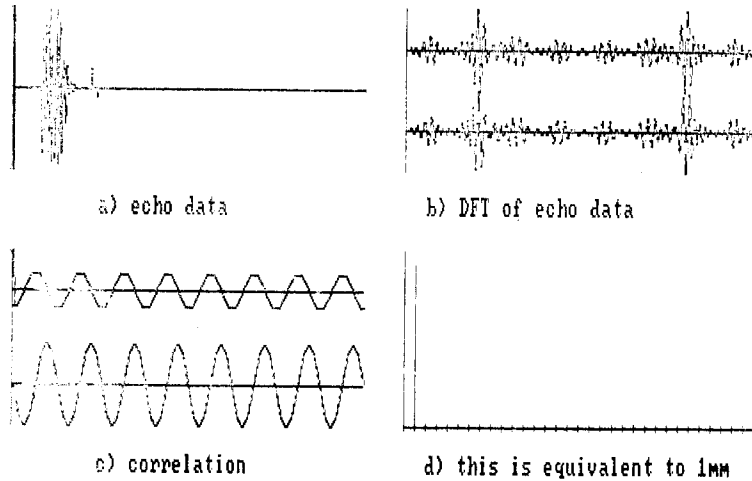


그림 3. 팬텀 실험에 의한 두께 측정 결과  
Fig. 3. Thickness estimate by phantom experiment.

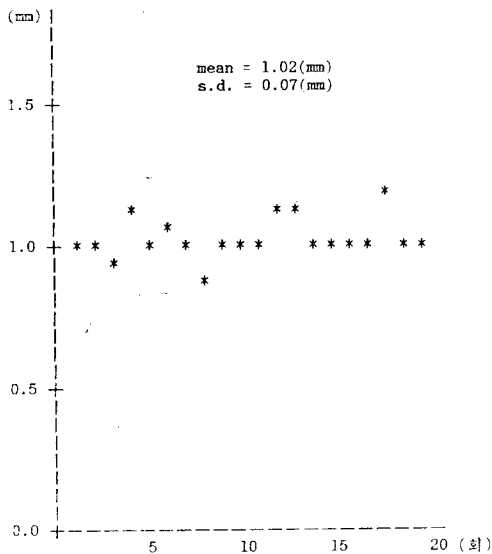


그림 4. 측정된 막 두께의 분포  
Fig. 4. Distribution of estimated thickness.

탈화에 필요로 되는 표본화 주파수(sampling frequency)나 bit 수는 두께측정에 제한요인이 되는데, 특히 bit 수는 dynamic range가 큰 초음파 반사신호의 경우 매우 중요한 의미를 갖는다.

컴퓨터 모의실험에서는 1 mm의 두께를 갖는 막의 경우 최소 6 bit의 양자화가 필요시되며 표본화 주파수는 2.25 MHz 신호 변환기를 사용할 때 20 MHz 이상

이 필요한 결과를 보였다.

본 실험을 실제로 생체에 응용할 경우 산란 물질(scatterer)이 조직내에서 불규칙한 분포를 이루므로 반사신호는 훨씬 복잡한 형태를 띠게 되며 또한 부가적인 잡음요인이 두께 측정의 제한요인이 된다. 이러한 일련의 난점을 배제하기 위하여는 적절한 디지털 신호 처리방식이 요구되며, 앞으로의 과제이기도 하다.

### 참 고 문 헌

- 1) Lizzi, F.L., et al, "Use of Spectrum System for Characterization of Malignant Melanoma", *Ultrasound in Medicine, Vol. 4, Plenum Press, New York, 1978.*
- 2) Fellingham, L.L., Sommer, F.G., "Ultrasonic Characterization of Tissue Structure in the IN VIVO Human Liver and Spleen", *IEEE Trans. on SU, Vol. SU-31, No. 4, July, 1984.*
- 3) Wells, P.N.T., "Biomedical Ultrasonics", *Academic Press, London, 1977.*
- 4) Hiroaki Ohkawai, et al, "IN VIVO Measurement of Thickness or of Speed of Sound in Biological Tissue Structure.", *IEEE Trans. on SU, Vol. SU-30, No.4, July, 1983.*
- 5) Lizzi, F.L., et al, "Theoretical Framework for Spectrum Analysis in Ultrasonic Tissue Characterization", *JASA, 73(4), April, 1983.*