

웨이브렛 변환을 이용한 초음파의 조직 특성화 연구

최민주* · 홍경진** · 박재우*** · 이헌주***

A Study of Ultrasonic Tissue Characterization Using a Wavelet Transformation

Min-Joo Choi*, Kyoung-Jin Hong**, Jae-Woo Park*** and Heon-Ju Lee***

요약

본 논문에서는 조직의 특성화 변수로 산란체의 간격에 대해 고려하였다. 조직 내에서 산란된 초음파 신호를 분석하여 특정 위치에서의 산란체의 간격을 추정하였다. Born approximation 이용하여 얻어진 초음파 반사 신호를 이용하여 모의 실험을 하였다. 산란체의 위치는 초음파 신호를 웨이브렛 변환 후 여러 단계에서 반복적으로 출현하는 높은 계수 값의 위치로부터 예측하였다. 시뮬레이션 결과 본 연구에서 개발된 알고리즘은 산란체의 간격이 초음파의 파장보다 큰 경우 정확하게 산란체의 간격을 추정하고 있음을 확인하였다. 산란체 간격 추정 알고리즘을 이용하여 조직내 산란 간격을 영상 변수로 한 초음파 영상을 구성하고 임상적 유용성을 고찰하였다.

Key Words : 초음파, 산란, 웨이브렛 변환

1. 서론

간 또는 신장과 같은 연 조직의 음향학적인 특성은 병리적인 상태에 따라 달라진다. 간은 격자 조직으로 간주할 수 있는데 격자간의 간격은 정상 상태인 경우와 강건변(cirrhosis)이 진행된 경우 달라진다. 본 논문에서는 조직내의 초음파 산란 특성을 이용하여 조직내의 격자간의 간격(inter scatterer spacing)을 추

정하여 조직 특성화에 이용할 수 있는 기법을 연구하였다.

본 논문에서는 간단한 1차원 격자 조직 모델을 만들어 조직내에서 후방으로 반사된 초음파 신호를 얻었다. 특정 위치에서의 산란체의 간격은 조직에서 반사된 초음파 신호를 wavelet transform을 한 후, 여러 단계에서 반복적으로 출현하는 높은 계수 값의 위치 정보로부터 예측하였다.

II. 방법

2.1 Ultrasonic Echo Signal Model

그림 1은 본 연구에서 사용한 간단한 1차원 음향 조직 모델을 보여준다. 입사 초음파는 조직내에서 각

* 제주대학교 의과대학 의학과/ 인공심장연구소
Department of Medicine/ Institute of Artificial Heart, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 의공학협동과정
Interdisciplinary Postgraduate Program in Biomedical Engineering, Cheju Nat'l Univ.

*** 제주대학교 에너지공학과, 첨단기술연구소
Department of Nuclear and Energy Engineering, Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

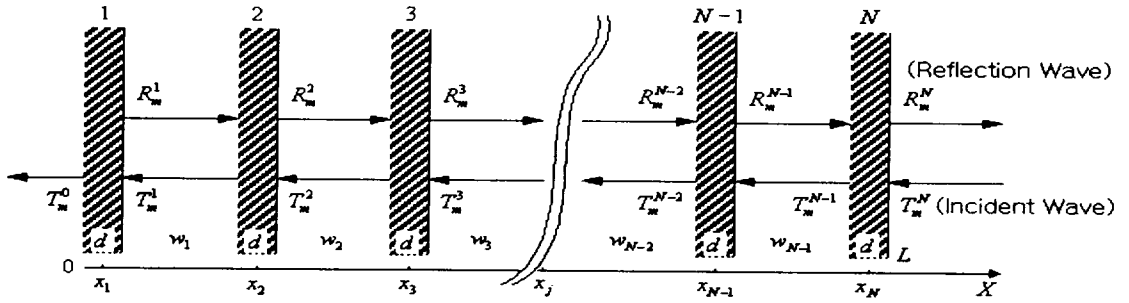


그림 1. 1차원 조직모델.

격자조직 (slab)을 만날 때 반사한다. 각 격자에서 후방으로 반사된 초음파의 주파수 특성 $S(d, \omega)$ 은 식 (1)로 부터 계산된다¹⁾.

$$S(d, \omega) = \frac{j(\eta^2 - 1) \sin(k_1 \times d)}{2\eta \cos(k_1 \times d) + j(1 + \eta^2) \sin(k_1 \times d)} \quad (1)$$

여기서 k_1 은 wave number of the slab. k_2 는 wave number of the host medium. Z_1 은 acoustical impedance of the slab. Z_2 는 acoustical impedance of the host medium. η 는 Z_1/Z_2 . d 는 slab thickness를 의미한다.

만일 입사 초음파의 주파수 특성 $P(\omega)$ 가 식 (2)와 같이 주어진다면

$$P(\omega) = r\sqrt{\pi} \exp[-(\omega - \omega_0)^2 \tau^2 / 4] \quad (2)$$

여기서 τ 는 pulse shape factor. $\omega_0 = 2\pi f_0$. f_0 는 입사파의 center frequency를 의미한다.

후방으로 반사된 초음파 신호 $y(t)$ 는 born approximation을 이용하면 식(3)에 의해 계산할 수 있다.

$$y(t) = \text{ifft}(Y(\omega)) \quad (3)$$

$Y(\omega)$ 는 조직에서 반사된 초음파 신호의 주파수 특성이며 식 (4)와 (5)로부터 계산한다.

$$Y(\omega) = P(\omega) S(\omega) \quad (4)$$

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^N S_j(a_j, \omega) \cdot \exp(-i 2 k_m \Delta x_j) \quad (5)$$

여기서 $S(\omega)$ 는 Born approximation을 이용하여 모든

격자에서 반사된 초음파를 합성한 신호의 주파수 특성을 계산한 것이며. $k_m = 2\pi / \lambda_m$. λ_m 는 wavelength in the host medium. Δx_j 는 distance between the center of the j th slab to the right-most interface of the system를 의미한다.

본 연구에서는 초음파 반사 신호에 white 노이즈 성분을 포함하였으며, 조직을 통과하면서 발생하는 초음파 감쇠(attenuation) 효과를 반영하였다.

2.2 격자 간격 (ISS) 추정 알고리즘

식 (3)으로부터 얻은 초음파 신호 $y(t)$ 로부터 아래의 순서에 따라 격자간의 간격을 추정하였다.

1. $y(t)$ 대해 웨이브렛 변환을 한다. 웨이브렛 변환의 최종 level은 식 (6)을 사용하여 계산하였다²⁾.

$$\log_2\left(\frac{f_s}{f_1}\right) - 1 < J \leq \log_2\left(\frac{f_s}{f_1}\right) \quad (6)$$

여기서 f_s 는 sampling frequency. f_1 는 inter scatterer spacing (ISS)에 대응하는 기본 주파수로, 만일 ISS의 기대치를 μ' 라 하면 $f_1 = c/(2\mu')$ 로 계산할 수 있다 (c 는 조직에서 초음파의 전파 속도).

2. Hilbert Transformation³⁾을 이용하여 각 단계의 details의 계수값 신호에 대해 envelop 신호를 구한다.

3. envelop 신호에 대해 local maxima의 위치와 높이를 표기하는 수선을 그린다.

4. J-2, J-1, J 수준의 local maxima 그래프를 합성한

다. 합성 순서는 J-2와 J-1을 먼저 합성하고 합성된 것과 J를 다시 합성한다. J-2와 J-1의 합성은 J-2의 각 local maximum의 위치에서 일정한 대역폭 (wn) 내에 있는 J-1의 local maximum을 합성한다. 합성 후 local maximum의 크기로 합성할 두 local maxima 크기의 평균값을 취하고, 위치는 두 위치간의 중간값을 택한다. 합성된 새로운 local maximum은 다시 J와 합성하여 ISS 추정을 위한 최종 local maxima를 얻는다.

5. 합성된 local maxima의 특정한 높이 (threshold: THR)를 가지는 수평선과의 교점을 구한다. 조직의 특정 위치에서 ISS 추정값은 그 위치 양쪽에 위치한 교점간의 거리로 한다.

2.3 영상화

조직 모델을 양분하여 각각 슬랩 간격의 평균이 0.5 mm이고 표준 편차가 0.1 mm인 정규 분포를 가지는 영역과 격자간의 평균이 1 mm이고 표준 편차가 0.1 mm인 정규 분포를 영역을 가지는 조직을 modeling하였다. 수십 차례의 초음파 반사파를 시뮬레이션 하여 격자간의 간격을 추정하고 영상화하였다.

III. 결과

그림 2는 격자 (슬랩) 사이의 간격이 1 mm, 샘플 주파수가 100 MHz, center frequency가 5 MHz, 샘플 수 2048, 조직의 감쇠 계수 10 Npm-1에 대해 계산된 초음파 반사 신호를 보여준다. 그림 2는 식 (3)에서 계산된 $y(t)$ 에 white noise를 혼합한 경우이다. white noise를 합성하기 위해 Matlab (ver 5.3) m-file awgn.m (signal to noise ratio=70dB)를 사용하였다.

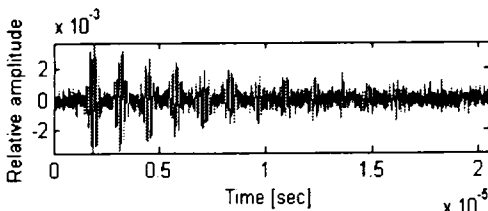


그림 2 1차원 격자 조직으로부터 반사된 초음파 신호

그림 3은 조직으로부터 반사된 초음파 신호의 노이즈 성분을 제거하고 감쇠 계수를 보정한 후 웨이브렛 변환을 하고 (J=6, Biorthogonal wavelet order 2.6), 각 level의 detail coefficients에 대해 local maxima의 크기와 위치를 보여 주고 있는 그림이다.

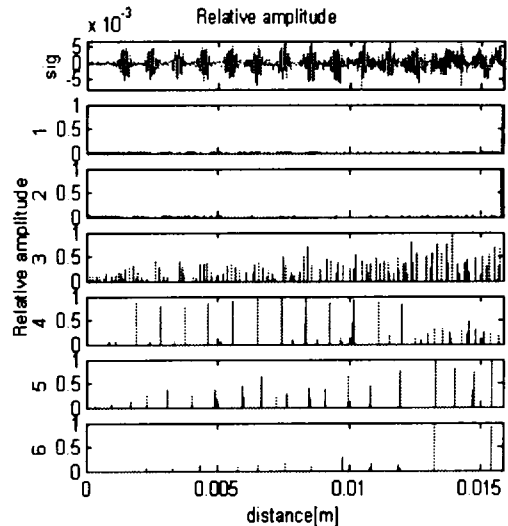


그림 3. 초음파 신호를 웨이브렛 변환 후 각 수준의 detail coefficient들의 envelop에 대한 local maxima (J=6)

그림 4는 detail coefficients의 J-2, J-1, J level의 local maxima를 결합하여 거리에 따른 추정된 ISS 값의 변화를 보여 주고 있다. local maxima의 합성은 J-2의 local maxima를 기준으로 ISS의 기대치 ($\mu' = 1\text{mm}$)의 $\pm 3.87\%$ 의 사이에 있는 J-1의 local maxima를 합성하고 다시 같은 방법으로 J의 local maxima를 합성하였다.

그림 5에서는 ISS를 추정하기 위해 local maxima 최대치의 40%를 threshold로 설정한 경우이다. 격자간의 간격이 5% 정도 작은 값을 추정하고 있다.

그림 6은 웨이브렛 변환 후 J-2, J-1, J level의 detail coefficients들의 local maxima를 결합하는 과정에서 설정하는 대역폭 (wn)의 변화에 따른 ISS 추정값의 평균값의 변화를 보여 주고 있다. 그림 6에서 수평축은 대역폭을 ISS와의 상대적인 크기를 백분율로 사용하였다. (대역폭 [%]) = $(c \times wn / fs) / \mu' \times 100$

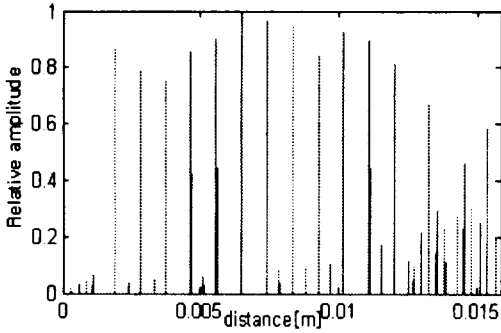


그림 4. 그림 3의 J-2, J-1, J 수준의 local maxima를 합성한 그래프. 그림 3의 J-2의 local maxima를 기준으로 ISS의 기대치($\mu' = 1\text{mm}$)의 $\pm 3.87\%$ 의 사이에 있는 J-1의 local maxima를 합성하고 다시 같은 방법으로 J의 local maxima를 합성하였음.

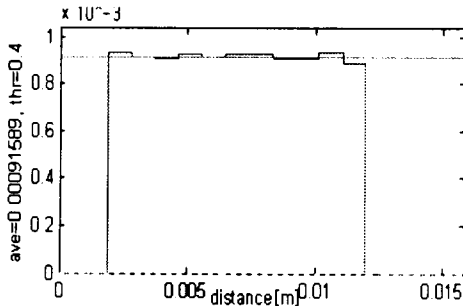


그림 5. 조직의 깊이에 따른 추정된 ISS 값.

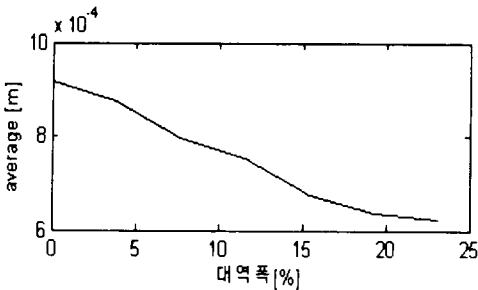


그림 6. 대역폭에 따른 추정된 ISS 평균값의 변화. 대역폭: ISS 기대치와의 상대적인 크기를 백분율 표기하였음.

그림 7은 THR값의 변화에 따른 ISS 추정 정밀도를 격자 간격이 1 mm, 0.5 mm, 1.5 mm 경우에 대하

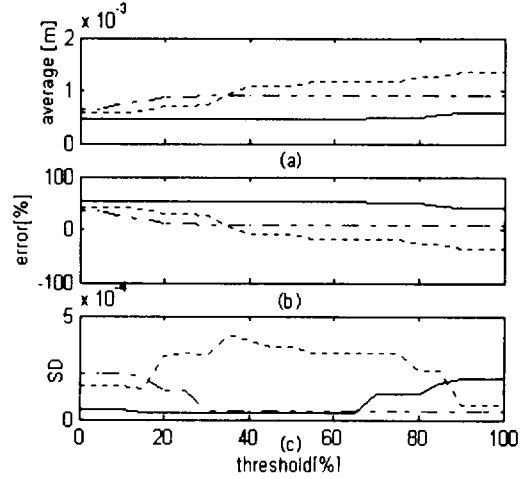


그림 7. THR값에 따른 ISS 추정 정밀도: 일점 채선: 1 mm, 실선: 0.5 mm, 점선: 1.5 mm. (a) 추정된 ISS 평균값, (b) 오차, (c) 표준 편차.

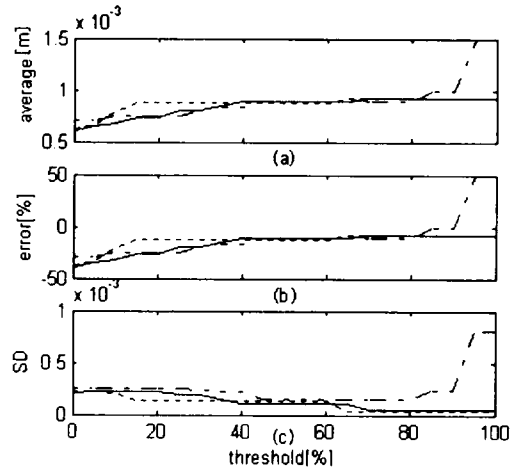


그림 8. 초음파 신호에 포함된 노이즈 크기에 따른 ISS 추정 정밀도. NSR(noise to signal ratio): -5dB (일점채선), -10dB (실선), -20dB (점선). (a) 추정된 ISS 평균값, (b) 오차, (c) 표준 편차.

여 보여 주고 있다. 추정 정밀도는 추정된 ISS 평균값(그림 7a), 오차(그림 7b), 표준 편차(그림 7c) 관점으로 표기하였다. 오차는 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

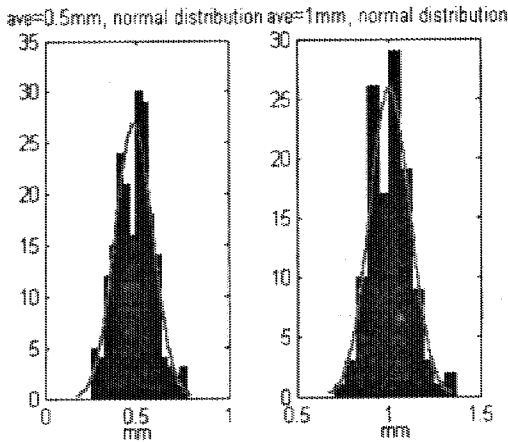


그림 9-(a)

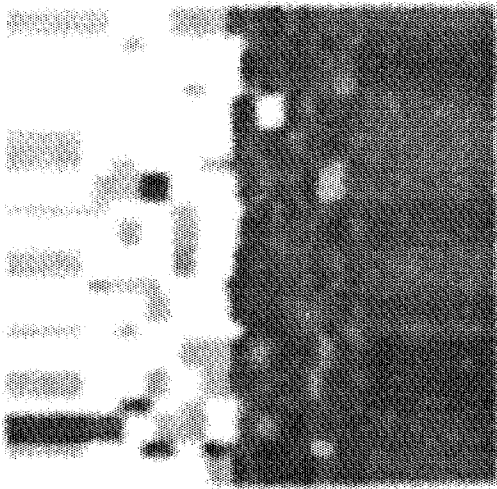


그림 9-(b)

그림 9. ISS가 정규 분포를 하는 조직내에서 ISS 값의 추정. 조직은 가운데 경계선을 중심으로 ISS의 평균값이 왼쪽은 0.5 mm, 오른쪽은 1 mm로 설정되어 있음.(SD = 평균값의 10%). (a) ISS 추정 결과의 히스토그램, (b) ISS 초음파 영상.

$$error(\%) = \frac{ISS_{참값} - ISS_{추정값}}{ISS_{참값}} \times 100 \quad (7)$$

그림 8은 초음파 신호에 포함된 noise의 정도에 따른 ISS 추정 정밀도를 보여 주고 있다. 그림 8에서는 white noise의 크기는 reflected wave의 power의 최대값에 대한 각각 -5dB, -10dB, -20dB에 대해 고려하였다.

그림 9는 조직의 중앙을 경계로 0.5 mm, 1 mm의 normal distribution (SD: 평균값의 10%)을 이루는 슬랩 간격을 가지는 조직 모델에 대해 초음파 스캐닝을 하여 ISS 값을 추정하고 이 값을 이용하여 초음파 2차원 영상을 구현한 것이다. 초음파 영상으로부터 슬랩 간격이 0.5 mm와 1 mm인 조직의 영역과 경계가 확실하게 분별이 가능함을 볼 수 있다.

IV. 토의 및 결론

본 논문에서는 격자 조직으로부터 후방 반사되어 나오는 초음파 신호로부터 조직의 산란체 간격을 추정했다. 초음파 신호 처리를 위해 wavelet transform을 이용한 방법을 개발하였다. 산란 간격 추정시 사용된 대역폭(wn)과 THR 값과 오차와의 상관성을 살펴보았다. 또한 이 방법을 이용하여 건강한 조직과 병이 걸린 조직의 식별이 가능한 초음파 영상을 얻을 수 있음을 보였다. 향후 실제 생체 조직을 이용한 실험과 생체내 실험을 통하여 본 연구 결과의 임상적 활용 가능성을 평가할 계획이다.

감사의 글

본 연구의 일부 내용은 원자력기초 연구 사업비 지원 연구비로 수행된 결과이다.

참고 문헌

- 1) J. Zhang et al. 1994. A computer model for simulating ultrasonic scattering in biological tissues with high scatterer concentration.. *Ultrasound in Med & Biol.* 20, No.9. 903-913.
- 2) X. Tang et al. 2000. Wavelet transforms in estimating scatterer spacing from ultrasound echoes. *Ultrasonics*, 38, 688-692.
- 3) R. N. Bracewell. 1986. *The fourier transformation and its applications*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.