

해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수 측정에 의한 구조적 특성 평가

Estimation of Structural Properties from the Measurements of Phase Velocity and Attenuation Coefficient in Trabecular Bone

이 강 일*
(Kang Il Lee*)

*강원대학교 물리학과

(접수일자: 2009년 8월 10일; 채택일자: 2009년 9월 18일)

해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수와 구조적 특성 사이의 상관관계를 고찰하기 위하여 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀이 이용되었다. 7개의 해면질골 팬텀의 골소주 간격 (trabecular separation; Tb,Sp)은 300 μm 부터 900 μm 까지 분포하였으며, 골용량 비율 (volume fraction; VF)은 1.6%부터 8.7%까지 분포하였다. 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수는 12.7 mm의 직경 및 1 MHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 광대역, 비집속형 초음파 변환기와 함께 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다. 1 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수는 Tb,Sp이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였으며, VF이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 위상속도 및 감쇠계수를 독립변수로 하고, Tb,Sp 및 VF을 종속변수로 하는 단순 및 다중선형회귀모델로부터 VF 예측을 위한 결정계수가 Tb,Sp 예측을 위한 결정계수에 비하여 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀에서 나타나는 결과는 사람의 해면질골에서 나타나는 결과와 잘 일치하였으며, 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수 측정으로부터 구조적 특성 평가가 가능하다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어: 골다공증, 해면질골, 골밀도, 골미세구조, 초음파, 위상속도, 감쇠계수

투고분야: 생체 및 의학 음향 분야 (15.4)

Trabecular-bone-mimicking phantoms consisting of parallel-nylon-wire arrays were used to investigate correlations of phase velocity and attenuation coefficient with structural properties in trabecular bone. Trabecular separation (Tb,Sp) of the 7 trabecular-bone-mimicking phantoms ranged from 300 to 900 μm and volume fraction (VF) from 1.6% to 8.7%. Phase velocity and attenuation coefficient of the phantoms were measured by using a through-transmission method in water, with a matched pair of broadband, unfocused transducers with a diameter of 12.7 mm and a center frequency of 1 MHz. Phase velocity and attenuation coefficient at 1 MHz decreased almost linearly with increasing Tb,Sp and increased almost linearly with increasing VF. The simple and multiple linear regression models with phase velocity and attenuation coefficient as independent variables and Tb,Sp and VF as dependent variables demonstrated that the coefficients of determination for the prediction of VF were higher than those for the prediction of Tb,Sp. The results obtained in the trabecular-bone-mimicking phantoms consisting of parallel-nylon-wire arrays were consistent with those in human trabecular bone, suggesting that the structural properties can be estimated from the measurements of phase velocity and attenuation coefficient in trabecular bone.

Keywords: Osteoporosis, Trabecular bone, Bone mineral density, Bone microarchitecture, Ultrasound, Phase velocity, Attenuation coefficient

ASK subject classification: Biological and Medical Acoustics (15.4)

I. 서론

골다공증은 골량의 감소 및 골 미세구조의 파괴로 인하여 작은 충격에도 골절이 쉽게 발생하는 전신적 골질환으로 정의된다. 현재 이중에너지 X-선 흡수계측법 (dual energy X-ray absorptiometry; DEXA)을 이용한 골밀도 측정이 가장 정확한 골다공증 진단방법으로 알려져 있다. 골밀도를 측정하는 이유는 골밀도가 골강도의 60%~80%를 대변할 뿐만 아니라 골생검 없이 비침습적으로 측정할 수 있는 지표이기 때문이다. 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 (quantitative ultrasound; QUS) 기술은 1984년 영국의 Langton 등에 의하여 최초로 제안된 이후에 그 동안 많은 발전을 거듭하였다 [1]. 현재 임상에서 이용되고 있는 초음파 골다공증 진단기기는 주로 해면질골로 이루어지고, 초음파가 투과하기에 용이한 해부학적 구조를 갖는 종골 (발뒤꿈치뼈)에서 투과법을 이용하여 음속 및 감쇠계수와 같은 음향특성을 측정한다 [2]. 이와 같이 종골에서 측정된 음속 및 감쇠계수는 각각 종골의 골밀도와 매우 높은 선형적인 상관관계를 가지므로 전신적 골질환인 골다공증의 진단 지표로 이용된다. 비록 QUS 기술은 DEXA에 비하여 골밀도 측정의 정확성이 떨어지지만, 방사선 노출의 위험성이 없고, 진단기기의 휴대가 용이하며, 진단기기의 가격 및 검진 비용이 저렴한 장점을 가지므로 골다공증 선별 검사에 널리 이용되고 있다.

최근에 골다공증의 의학적 정의는 골강도라는 개념이 추가되어 골강도의 감소로 인하여 작은 충격에도 골절이 쉽게 발생하는 전신적 골질환으로 변경되었다. 골강도란 골밀도 이외에 골미세구조 및 무기질화 등을 포함하는 개념으로서 골다공증으로 인한 골절률을 정확히 예측하기 위해서는 단지 골밀도의 변화보다 골강도의 변화가 더욱 중요하다는 것을 의미한다. 즉 뼈의 양적 변화뿐만 아니라 질적 변화도 중요하다고 할 수 있다. 이러한 측면



그림 1. μ CT를 이용하여 획득된 두 해면질골 샘플의 영상
Fig. 1. Images of two trabecular bone samples obtained by using μ CT.

에서 QUS 기술은 골밀도뿐만 아니라 골미세구조와 같은 골강도와 관련있는 부가적인 정보를 감지할 수 있는 장점을 가지므로 최근까지도 의학적 유용성이 꾸준히 제기되고 있다. 한편 골절률에 큰 영향을 미치는 골미세구조와 골밀도 또는 다공을 사이의 상관관계는 그다지 높지 않은 것으로 알려져 있다 [3]. 그림 1은 마이크로 컴퓨터 단층촬영법 (micro computed tomography; μ CT)을 이용하여 획득된 두 해면질골 샘플의 영상을 나타낸다 [4]. 그림 1의 두 해면질골 샘플은 매우 유사한 다공을 (A: 87.0%, B: 86.3%)을 갖지만 서로 다른 골미세구조를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 두 샘플의 위상속도 (A: 1518 m/s, B: 1551 m/s) 및 감쇠계수 (A: 6.5 dB/cm, B: 10.2 dB/cm)도 서로 다른 값을 갖는다.

본 연구에서는 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수와 구조적 특성 사이의 상관관계를 고찰하기 위하여 해면질골 팬텀이 이용되었다. 해면질골 팬텀은 구조적 특성을 용이하게 조절하기 위하여 해면질골과 유사한 음향특성을 갖는 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작되었다. 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수는 12.7 mm의 직경 및 1 MHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 팽대역, 비집속형 초음파 변환기와 함께 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다.

II. 대상 및 방법

본 연구에서 이용된 해면질골 팬텀은 구조적 특성을 용이하게 조절하기 위하여 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 의 단면적 및 20 mm의 두께를 갖는 직육면체 구조에 해면질골의 골소주를 모사하는 나일론 줄을 높이 방향으로 평행하게 배열하여 제작되었다. 나일론의 음속 (2600 m/s)은 무기질골의 음속 (2520~4290 m/s)과 비교적 유사한 값을 가지나, 나일론의 감쇠계수 (2.9 dB/cm @ 5 MHz)는 무기질골의 감쇠계수 (6~52 dB/cm)보다 다소 작은 값을 갖는 것으로 나타났다 [5]. 이와 같은 해면질골 팬텀은 해면질골의 산란특성을 연구하기 위하여 Wear에 의하여 최초로 이용되었다 [6]. 그림 2는 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀의 평면도를 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 나일론 줄의 직경은 해면질골의 구조적 특성 중의 하나인 골소주 두께 (trabecular thickness; Tb.Th)에 해당하며, 사람 종골에 대한 Tb.Th의 평균값 (127 μm) [4]과 유사한 150 μm 의 직경을 갖는 나일론 줄이 이용되었다. 높이 방향으로 평행하게 배열된 나일론 줄의 일정한

간격은 해면질골의 trabecular separation: Tb.Sp)에 해당하며, 나일론 줄의 직경과 마찬가지로 사람 종골에 대한 Tb.Sp의 평균값 (684 μm) [4]을 고려하여 300, 400, 500, 600, 700, 800, 및 900 μm의 서로 다른 Tb.Sp를 갖는 7개의 해면질골 팬텀이 제작되었다. 직육면체 구조를 갖는 해면질골 팬텀에서 원통형의 나일론 줄이 차지하는 골용량 비율 (volume fraction; VF)은 다음과 같이 주어진다.

$$VF = \frac{\pi(Tb.Th/2)^2}{(Tb.Th + Tb.Sp)^2} \quad (1)$$

표 1은 7개의 해면질골 팬텀에 대한 Tb.Th, Tb.Sp, 및 VF를 나타낸다. 표 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 이용된 7개의 해면질골 팬텀은 모두 150 μm의 동일한 Tb.Th를 갖는다. VF는 서로 다른 Tb.Sp으로 인하여 식 (1)로부터 각각 1.6%, 2.0%, 2.4%, 3.1%, 4.2%, 5.8%, 및 8.7%로 주어지며, 이는 사람 종골에 대한 VF의 범위 (2%~14%)에 포함된다. 또한 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된

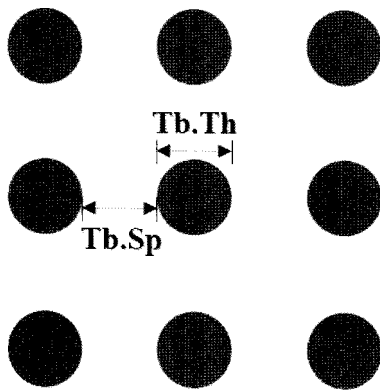


그림 2. 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀의 평면도

Fig. 2. Top view of trabecular-bone-mimicking phantoms consisting of parallel-nylon-wire arrays.

표 1. 7개의 해면질골 팬텀에 대한 Tb.Th, Tb.Sp, 및 VF
Table 1. Tb.Th, Tb.Sp, and VF for 7 trabecular-bone-mimicking phantoms.

Tb.Th [μm]	Tb.Sp [μm]	VF
150	300	0.087
150	400	0.058
150	500	0.042
150	600	0.031
150	700	0.024
150	800	0.020
150	900	0.016

해면질골 팬텀은 실제 해면질골에 비하여 매우 규칙적이고 단순한 구조를 갖지만 위상속도 및 감쇠계수의 주파수에 대한 의존성은 사람의 해면질골과 유사하게 나타나는 것으로 보고되었다 [7,8].

해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수는 그림 3과 같이 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다. 초음파 송·수신기는 12.7 mm의 직경 및 1 MHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 광대역, 비집속형 초음파 변환기 (Panametrics V303)가 이용되었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 서로 마주보는 초음파 송·수신기는 물 사이의 거리가 근거리 음장 길이 (26.5 mm)의 약 두 배 (50 mm)가 되는 지점에 설치되었다. 해면질골 팬텀은 초음파 송·수신기 사이의 중간 시점에 설치되었으며, 팬텀의 가장자리에서 발생할 수 있는 회전을 방지하기 위하여 초음파가 투과할 수 없는 두꺼운 스펀지가 설치되었다. 이외에 초음파 송·수신을 위하여 펄서/리시버 (Panametrics 5800PR) 및 자료 수집을 위하여 디지털 오실로스코프 (LeCroy WS44Xs)가 이용되었다.

해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수는 그림 3과 같이 수중에서 서로 마주보는 초음파 송·수신기 사이에 해면질골 팬텀이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호를 이용하여 결정되었다. 먼저 해면질골 팬텀의 위상속도 C_w [m/s]는 다음과 같은 식으로부터 계산되었다 [9].

$$c(\omega) = \frac{c_w}{1 - [c_w \Delta\phi(\omega) / \omega d]} \quad (2)$$

여기서 ω 는 각진동수, C_w 는 수중에서의 음속 (1476 m/s @ 18°C), d 는 해면질골 팬텀의 두께, 및 $\Delta\phi(\omega)$ 는

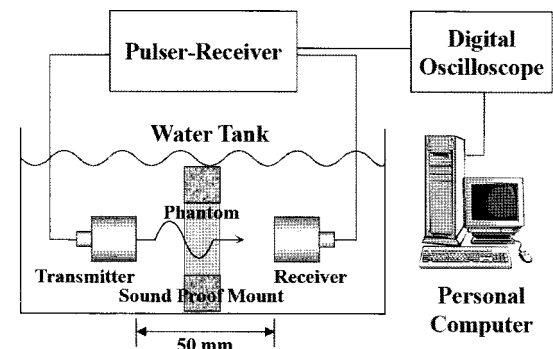


그림 3. 수중에서 투과법을 이용하여 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수를 측정하기 위한 실험 장치

Fig. 3. Experimental setup for the measurements of phase velocity and attenuation coefficient of trabecular-bone-mimicking phantoms by using a through-transmission method in water.

해면질골 팬텀이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호의 위상차를 나타낸다. 해면질골 팬텀의 감쇠계수 α (ω) [dB/cm]는 위상속도를 측정하기 위하여 수집된 수신 신호를 이용하여 다음과 같은 식으로부터 계산되었다 [9].

$$\alpha(\omega) = \frac{20 \log(e)}{d} \left[\ln \left| \frac{A_0(\omega)}{A_p(\omega)} \right| + \ln |\tau(\omega)| \right] \quad (3)$$

여기서 $A_0(\omega)$ 및 $A_p(\omega)$ 는 해면질골 팬텀이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호의 파워스펙트럼레벨, d 는 해면질골 팬텀의 두께, 및 $\tau(\omega)$ 는 물과 해면질골 팬텀 사이의 경계면에서의 파워투과계수를 나타낸다. 식 (3)의 우변에서 첫째 항은 해면질골 팬텀의 겉보기 감쇠계수를 나타내며, 둘째 항은 물과 해면질골 팬텀 사이의 경계면에서의 투과손실을 나타낸다. 일반적으로 수중에서 해면질골의 투과손실은 매우 작으므로 무시될 수 있다 [10].

III. 결과 및 고찰

그림 4 및 5는 각각 1 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수와 Tb.Sp 사이의 상관관계를 나타낸다. 그림 4 및 5의 ○ 기호는 7개의 해면질골 팬텀을 초음파 송·수신기 사이의 중간 지점에 재위치시키면서 10회 측정된 위상속도 및 감쇠계수의 평균값을 나타내며, 오차막대는 표준편차를 나타낸다. 실선은 측정자료에 대한 선형회귀를 나타낸다. 그림 4 및 5에서 볼 수 있듯이 해면질골 팬텀의 Tb.Sp이 증가함에 따라 위상속도 및 감쇠계수는 거의 선형적으로 감소하였다. 이는 사람 종골 및 대퇴골로부터

준비된 해면질골 샘플을 이용하여 보고된 결과와 잘 일치한다 [11,12]. 예를 들면, 사람 종골로부터 준비된 15개의 해면질골 샘플을 이용하여 0.5 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수는 Tb.Sp과 각각 $r=-0.77$ 및 $r=-0.74$ 의 음의 선형적인 상관관계 (r)를 갖는 것이 발표되었다 [11]. 최근에 Padilla 등 또한 사람 대퇴골로부터 준비된 37개의 해면질골 샘플을 이용하여 0.9 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수와 Tb.Sp 사이에서 각각 $r=-0.81$ 및 $r=-0.79$ 의 음의 선형적인 상관관계를 발견하였다 [12]. 그러므로 그림 4 및 5는 사람의 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수와 Tb.Sp 사이에 나타나는 높은 음의 상관관계를 설명하는데 도움이 된다. 한편 사람의 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수와 Tb.Th 사이에는 높은 양의 선형적인 상관관계가 나타나는 것으로 알려져 있다 ($r=0.87$ 및 $r=0.84$) [11]. 그러나 표 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 이용된 해면질골 팬텀은 모두 동일한 Tb.Th를 가지므로 위상속도 및 감쇠계수의 Tb.Th에 대한 의존성은 살펴볼 수 없었다.

그림 6 및 7은 각각 1 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수와 VF 사이의 상관관계를 나타낸다. 그림 6 및 7의 ○ 기호는 위상속도 및 감쇠계수의 평균값을 나타내며, 오차막대는 표준편차를 나타낸다. 실선은 측정자료에 대한 선형회귀를 나타낸다. 본 연구에서 이용된 해면질골 팬텀은 모두 동일한 Tb.Th를 가지므로 VF의 변화는 오로지 Tb.Sp의 변화에 기인한다. 그림 6 및 7에서 볼 수 있듯이 해면질골 팬텀의 VF이 증가함에 따라 위상속도 및 감쇠계수도 거의 선형적으로 증가하였다. 이는 그림 4 및 5와 마찬가지로 사람의 해면질골에서 나타나는 결과와 잘 일치한다 ($r=0.90$ 및 $r=0.88$) [11]. 한편 Lee 등은 2%~33%의 VF를 갖는 사람 및 소의 해면질골 샘플

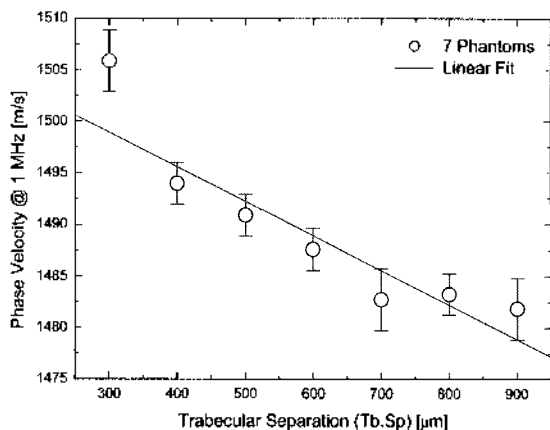


그림 4. 1 MHz에서 측정된 위상속도와 Tb.Sp 사이의 상관관계
Fig. 4. Correlation between phase velocity at 1 MHz and Tb.Sp.

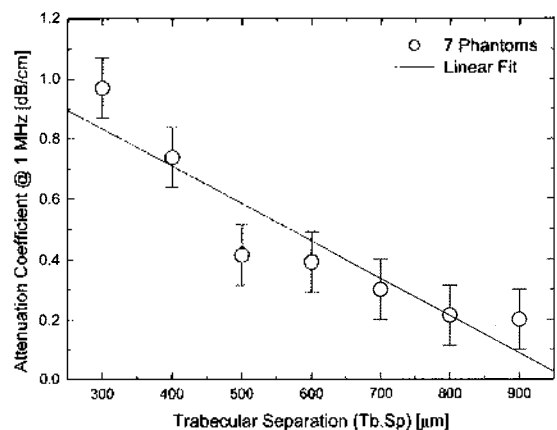


그림 5. 1 MHz에서 측정된 감쇠계수와 Tb.Sp 사이의 상관관계
Fig. 5. Correlation between attenuation coefficient at 1 MHz and Tb.Sp.

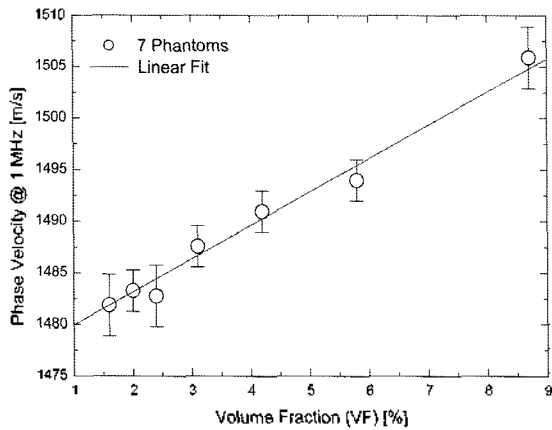


그림 6. 1 MHz에서 측정된 위상속도와 VF 사이의 상관관계
Fig. 6. Correlation between phase velocity at 1 MHz and VF.

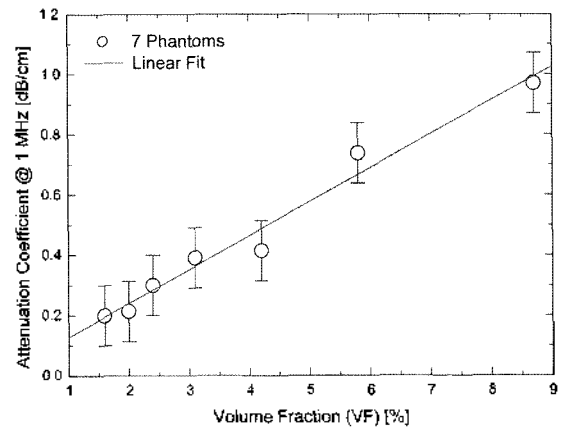


그림 7. 1 MHz에서 측정된 감쇠계수와 VF 사이의 상관관계
Fig. 7. Correlation between attenuation coefficient at 1 MHz and VF.

표 2. 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수로부터 Tb.Sp 및 VF를 예측하기 위한 단순 및 다중선형회귀모델

Table 2. Simple and multiple linear regression models for the predictions of Tb.Sp and VF from phase velocity and attenuation coefficient of trabecular-bone-mimicking phantoms.

Linear regression model	Prediction of Tb.Sp		Prediction of VF	
	R ²	RMSE (μm)	R ²	RMSE
Phase velocity	0.84	93	0.98	0.003
Attenuation coefficient	0.86	87	0.97	0.004
Phase velocity + Attenuation coefficient	0.87	95	0.99	0.001

을 이용하여 위상속도와 VF 사이에서 양의 비선형적인 상관관계를 발견하였다 [13]. Strelitzki 등 또한 젤라틴 입자로 제작된 해면질골 팬텀을 이용하여 0.6 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수가 17%~54%의 VF 범위에서 VF와 비선형적인 상관관계를 갖는 것을 발표하였다 [14]. 최근에 Lee 및 Choi는 폴리아세탈 (Polyacetal)로 제작된 해면질골 팬텀을 이용하여 34.1%~100%의 비교적 넓은 VF 범위에서 위상속도와 VF 사이에 양의 선형적인 상관관계가 나타나지만, 감쇠계수와 VF 사이에는 음의 상관관계가 나타나는 것을 보고하였다 [9]. 즉 위상속도 및 감쇠계수는 제한된 VF 범위 내에서 VF와 양의 선형적인 상관관계를 갖는다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 해면질골과 같은 다공성 매질에서 나타나는 위상속도 및 감쇠계수의 VF에 대한 의존성은 Biot 모델 등의 몇몇 이론적인 모델을 이용하여 설명될 수 있다 [15].

지금까지 살펴보았듯이 해면질골 및 해면질골 팬텀에서 위상속도 및 감쇠계수와 구조적 특성 사이에는 높은 양의 또는 음의 선형적인 상관관계가 존재한다. 이는 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수 측정으로부터 골밀도 뿐만 아니라 골미세구조도 평가가 가능하다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 그 유의성을 알아보기 위하여 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수를 독립변수로 하고,

Tb.Sp 및 VF를 종속변수로 하는 단순 및 다중선형회귀모델이 이용되었다. 표 2는 그 결과를 보여주며, 여기서 R² 및 RMSE는 각각 결정계수 (상관계수의 제곱) 및 평균제곱근오차를 나타낸다. 표 2에서 볼 수 있듯이 구조적 특성을 예측하기 위하여 위상속도 또는 감쇠계수 하나만을 독립변수로 하는 단순선형회귀모델의 결정계수는 서로 유사하게 나타났다 (Tb.Sp 예측: R²=0.84 및 R²=0.86, VF 예측: R²=0.98 및 R²=0.97). 또한 위상속도 및 감쇠계수 모두를 독립변수로 하는 다중선형회귀모델의 결정계수는 위상속도 또는 감쇠계수 하나만을 독립변수로 하는 단순선형회귀모델의 결정계수와 거의 동일하였다 (Tb.Sp 예측: R²=0.87, VF 예측: R²=0.99). 이는 사람 대퇴골의 해면질골 샘플에서 나타나는 선형회귀모델의 결과와 잘 일치한다 [12]. 마지막으로 VF 예측을 위한 선형회귀모델의 결정계수가 Tb.Sp 예측을 위한 선형회귀모델의 결정계수에 비하여 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 그림 4-7에서도 볼 수 있듯이 해면질골 팬텀의 위상속도 및 감쇠계수가 Tb.Sp에 비하여 VF에 보다 민감하게 의존한다는 것을 의미한다. 이와 마찬가지로 사람의 해면질골에서도 위상속도 및 감쇠계수는 Tb.Sp 및 Tb.Th에 비하여 VF과 다소 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있다 [11,12].

본 연구에서 나일론 줄을 이용하여 제작된 해면질골 팬텀에서 나타나는 위상속도 및 감쇠계수의 주파수에 대한 의존성은 Wear의 논문에서 잘 설명되어있다 [7,8]. Wear는 0.4-0.7 MHz의 주파수 범위에서 주파수가 증가함에 따라 해면질골 팬텀의 위상속도는 거의 선형적으로 감소하는 음의 분산을 나타내는 것을 보고하였다 [7]. 이와 마찬가지로 사람의 해면질골에서도 1 MHz 이하의 주파수 범위에서 음의 분산을 나타내는 것으로 알려져 있다 [16]. 특히 Wear는 사람의 해면질골 샘플에서 층형 (stratified) 모델을 이용하여 위상속도의 음의 분산을 최초로 예측하였으며 [17], Waters 및 Hoffmeister 또한 소의 해면질골 샘플에서 Kramers-Kronig 분산관계를 이용하여 이를 설명할 수 있었다 [18]. 최근에 Wear는 1.5-3.5 MHz의 넓은 주파수 범위에서 본 연구와 같이 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀의 감쇠계수를 측정하였으며, 1 MHz 이하의 주파수 범위에서 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수는 거의 선형적으로 증가하는 것을 발견하였다 [8]. 또한 Faran 이론을 이용하여 2 MHz 이상의 높은 주파수 범위에서 해면질골 팬텀의 감쇠계수는 나일론 줄로부터 발생한 산란에 기인한다는 것을 밝혔다. 한편 Wear에 의하여 1 MHz 이하의 주파수 범위에서 측정된 감쇠계수도 본 연구 (0.20-0.97 dB/cm @ 1 MHz) 와 같이 1 dB/cm 이하의 값을 갖는 것으로 나타났다 [8]. 이는 사람의 해면질골에서 측정되는 감쇠계수 (3.0-19.4 dB/cm @ 0.6 MHz) [4]에 비하여 작은 값으로서 나일론 줄을 이용하여 제작된 해면질골 팬텀이 갖는 단점이라고 할 수 있다. 그러므로 해면질골과 유사한 감쇠계수를 가지며, 아울러 Tb, Sp 및 VF뿐만 아니라 해면질골의 다양한 구조적 특성을 용이하게 조절할 수 있는 해면질골 팬텀을 개발할 필요가 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀을 이용하여 위상속도 및 감쇠계수와 같은 음향특성과 Tb, Sp 및 VF와 같은 구조적 특성 사이의 상관관계를 고찰하였다. 1 MHz에서 측정된 위상속도 및 감쇠계수는 Tb, Sp이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하였으며, VF이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 위상속도 및 감쇠계수를 독립변수로 하고, Tb, Sp 및 VF를 종속변수로 하는 단순 및 다중선형회귀모델로부터 VF 예측을 위한 결정계수가 Tb, Sp 예측을 위한 결정

계수에 비하여 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 나일론 줄을 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀에서 나타나는 결과는 사람의 해면질골에서 나타나는 결과와 잘 일치하였으며, 해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수 측정으로부터 구조적 특성 평가가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 향후에는 골질량을 보다 정확히 예측하기 위하여 골밀도뿐만 아니라 골미세구조도 함께 평가할 수 있는 QUS 기술을 개발하는 방향으로 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-C00124).

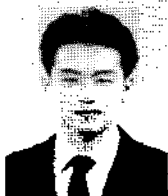
참고 문헌

1. C. F. Njeh, D. Hans, T. Fuerst, C. C. Gluer, and H. K. Genant, *Quantitative Ultrasound: Assessment of Osteoporosis and Bone Status*, Martin Dunitz, London, 1999.
2. P. Laugier, "An overview of bone sonometry," in *Proc. 7th Congress of the Asian Federation of Ultrasound in Medicine and Biology*, pp. 23-32, Oct. 2004.
3. P. Laugier, "Instrumentation for in vivo ultrasonic characterization of bone strength," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 6, pp. 1179-1196, 2008.
4. P. H. F. Nicholson, R. Muller, X. G. Cheng, P. Rueggsegger, G. Van Der Perre, J. Dequeker, and S. Boonen, "Quantitative ultrasound and trabecular architecture in the human calcaneus," *J. Bone Miner. Res.*, vol. 16, no. 10, pp. 1886-1892, 2001.
5. F. A. Duck, *Physical Properties of Tissue*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
6. K. A. Wear, "Measurement of dependence of backscatter coefficient from cylinders on frequency and diameter using focused transducers-with applications in trabecular bone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 1, pp. 66-72, 2004.
7. K. A. Wear, "The dependencies of phase velocity and dispersion on trabecular thickness and spacing in trabecular bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, no. 2, pp. 1186-1192, 2005.
8. K. A. Wear, "Ultrasonic attenuation in parallel-nylon-wire cancellous-bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, no. 6, pp. 4042-4046, 2008.
9. K. I. Lee and M. J. Choi, "Phase velocity and normalized broadband ultrasonic attenuation in Polyacetal cuboid bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 6, pp. EL263-EL269, 2007.
10. K. I. Lee and M. J. Choi, "Prediction of the dependence of phase velocity on porosity in cancellous bone," *J. Acoust. Soc. Kor.*, vol. 27, no. 2E, pp. 45-50, 2008.

11. S. Chaffai, F. Peyrin, S. Nuzzo, R. Porcher, G. Berger, and P. Laugier, "Ultrasonic characterization of human cancellous bone using transmission and backscatter measurements: Relationships to density and microstructure," *Bone*, vol. 30, no. 1, pp. 229–237, 2002.
12. F. Padilla, F. Jenson, V. Bousson, F. Peyrin, and P. Laugier, "Relationships of trabecular bone structure with quantitative ultrasound parameters: In vitro study on human proximal femur using transmission and backscatter measurements," *Bone*, vol. 42, no. 6, pp. 1193–1202, 2008.
13. K. I. Lee, V. F. Humphrey, T. G. Leighton, and S. W. Yoon, "Predictions of the modified Biot–Attenborough model for the dependence of phase velocity on porosity in cancellous bone," *Ultrasonics*, vol. 46, no. 4, pp. 323–330, 2007.
14. R. Strelitzki, J. A. Evans, and A. J. Clarke, "The influence of porosity and pore size on the ultrasonic properties of bone investigated using a phantom material," *Osteoporosis Int.*, vol. 7, no. 4, pp. 370–375, 1997.
15. K. I. Lee and S. W. Yoon, "Comparison of acoustic characteristics predicted by Biot's theory and the modified Biot–Attenborough model in cancellous bone," *J. Biomech.*, vol. 39, no. 2, pp. 364–368, 2006.
16. K. A. Wear, "The dependencies of phase velocity and dispersion on volume fraction in cancellous-bone-mimicking phantoms," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 2, pp. 1197–1201, 2009.
17. K. A. Wear, "A stratified model to predict dispersion in trabecular bone," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 48, no. 4, pp. 1079–1083, 2001.
18. K. R. Waters and B. K. Hoffmeister, "Kramers–Kronig analysis of attenuation and dispersion in trabecular bone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 118, no. 6, pp. 3912–3920, 2005.

저자 약력

•이 강 일 (Kang Il Lee)



1994년: 성균관대학교 물리학과, 이학사
 1997년: 성균관대학교 물리학과, 이학석사
 2004년: 성균관대학교 물리학과, 이학박사
 2005년~2006년: 영국 사우스햄튼대학교 Institute of Sound and Vibration Research, 박사후연구원
 2007년~현재: 강원대학교 물리학과, 조교수
 *관심분야: 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 기술, 암 치료를 위한 고강도 집중형 초음파 기술