

소의 경골에서 유도초음파의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계

Correlations of Phase Velocities of Guided Ultrasonic Waves with Cortical Thickness in Bovine Tibia

이 강 일*
(Kang Il Lee*)

*강원대학교 물리학과

(접수일자: 2010년 10월 25일; 채택일자: 2010년 12월 26일)

본 연구에서는 생체 외 조건에서 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 피질골 샘플의 축방향을 따라 전파하는 first arriving signal (FAS) 및 slow guided wave (SGW)와 같은 유도초음파의 위상속도를 측정하고, 각각의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계를 고찰하였다. FAS 및 SGW의 위상속도는 12.7 mm의 직경 및 200 kHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 비집속형 초음파 변환기와 함께 공기중에서 축방향 전파법을 이용하여 측정되었다. 200 kHz에서 측정된 FAS의 위상속도는 피질골 두께와 매우 높은 음의 상관관계를 나타냈으며, FAS 이후에 수신되는 SGW의 위상속도는 피질골 두께와 높은 양의 상관관계를 나타냈다. FAS 및 SGW의 위상속도를 독립변수로 하고, 피질골 두께를 종속변수로 하는 단순 및 다중선형회귀모델의 결과로부터 다중선형회귀모델의 결정계수가 단순선형회귀모델의 결정계수보다 높게 나타났다. 또한 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도는 각각 관형 피질골에 대하여 200 kHz에서 계산된 S0 및 A0 램 모드의 위상속도와 잘 일치하였다.

핵심용어: 골다공증, 경골, 피질골, 피질골 두께, 유도초음파, 위상속도

투고분야: 생체 및 의학 음향 분야 (15.4)

In the present study, the phase velocities of guided ultrasonic waves such as the first arriving signal (FAS) and the slow guided wave (SGW) propagating along the long axis on the 12 tubular cortical bone samples *in vitro* were measured and their correlations with the cortical thickness were investigated. The phase velocities of the FAS and the SGW were measured by using the axial transmission method in air with a pair of unfocused ultrasonic transducers with a diameter of 12.7 mm and a center frequency of 200 kHz. The phase velocity of the FAS measured at 200 kHz exhibited a very high negative correlation with the cortical thickness and that of the SGW arriving after the FAS showed a high positive correlation with the cortical thickness. The simple and multiple linear regression models with the phase velocities of the FAS and the SGW as independent variables and the cortical thickness as a dependent variable revealed that the coefficient of determination of the multiple linear regression model was higher than those of the simple linear regression models. The phase velocities of the FAS and the SGW measured at 200 kHz on the 12 tubular cortical bone samples were, respectively, consistent with those of the S0 and the A0 Lamb modes calculated at 200 kHz on the cortical bone plate.

Keywords: Osteoporosis, Tibia, Cortical bone, Cortical thickness, Guided ultrasonic wave, Phase velocity

ASK subject classification: Biological and Medical Acoustics (15,4)

I. 서론

인체의 뼈는 피질골 (cortical bone) 및 해면질골 (cancellous bone)과 같은 두 종류의 골조직으로 분류된다 [1]. 그림 1에서 볼 수 있듯이 뼈의 외부 껍질은 매우 치밀한 구조를 갖는 (30 % 미만의 다공율을 갖는) 피질골로 구성되며, 뼈의 중심부 및 긴 뼈의 양쪽 말단은 해면소주가 3차원의 그물 구조를 갖는 (30 % 이상의 다공율을 갖는) 해면질골로 구성된다. 골량의 80 %는 피질골이 차지하지만, 피질골에 비하여 해면질골의 표면적이 매우 크므로 골조직의 물질대사는 대부분 해면질골에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 (quantitative ultrasound) 기술이란 해면질골의 골밀도 (bone mineral density)를 평가하기 위하여 해면질골로 구성된 종골 (calcaneus) 등의 말초 골격계에서 횡방향 전파법 (transverse transmission method)을 이용하여 음속 및 감쇠계수를 측정하는 기술을 의미한다 [2]. 최근에는 골절 위험률이 높은 대퇴골 근위부 (proximal femur)의 골밀도를 직접 평가하기 위하여 이 부위의 음속 및 감쇠계수를 측정할 수 있는 초음파 진단기기의 개발도 수행되고 있다 [3]. 반면에 골다공증 또는 노화로 인한 해면질골의 골밀도 감소 이외에 뼈의 외부 껍질을 구성하는 피질골의 골밀도 및 두께 감소도 골절 위험률에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [1]. 이에 따라 최근에는 피질골에 대한 정보를 얻기 위하여 축방향 전파법 (axial transmission method)을 이용하는 연구도 활발히 수행되고 있다 [4].

긴 뼈의 축방향을 따라 초음파를 전파시키는 축방향 전파법은 1950년대 뼈의 외부 껍질을 구성하는 피질골의 골절 회복 상태를 진단하기 위하여 최초로 제안되었으며 [5], 최근에는 피질골 두께 (cortical thickness)를 평가하기 위하여 많은 연구자들의 주목을 받고 있다 [6-8]. 현재까지 축방향 전파법을 이용하는 초음파 골다공증 진단기로서 두 종류의 제품이 상용화되었으며, 이들은 각각 0.25 MHz 또는 1.25 MHz의 주파수를 이용하여 피질골 껍질의 표면이 수평하고 매끄러울 뿐만 아니라 피질골 껍질 위를 덮고 있는 연부조직의 두께가 매우 얇은 경골 (tibia) 또는 요골 (radius)에서 축방향을 따라 가장 먼저 수신되는 일종의 유도초음파 (guided ultrasonic wave)인 first arriving signal (FAS)의 전파속도를 측정한다 [1,2,4]. 이와 같이 축방향 전파법을 이용하여 경골 등에서 측정된 FAS의 전파속도가 골다공증 진단을 위한 지표



그림 1. 경골과 같은 긴 뼈의 피질골 및 해면질골
Fig. 1. Cortical and cancellous bones of long bones such as the tibia.

로 이용되고 있으며, 일반적으로 3000-4000 m/s의 범위를 갖는다. 최근에는 피질골의 상태를 더욱 정확히 평가하기 위하여 경골과 같은 긴 뼈의 피질골 껍질에서 축방향을 따라 FAS 이후에 수신되는 slow guided wave (SGW)의 이용가능성에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다 [4]. 피질골 껍질에서 관찰되는 SGW는 두께가 얇은 판형 매질에서 전파하는 램파 (Lamb wave)의 특성을 가지며, 아직 기술적인 문제로 인하여 SGW를 측정하는 초음파 진단기기가 상용화되지는 않았지만 골다공증 진단을 위한 지표로서 SGW의 임상적 유용성에 대한 연구는 꾸준히 발표되고 있다 [9].

본 연구에서는 생체 외 (in vitro) 조건에서 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 피질골 샘플의 축방향을 따라 전파하는 FAS 및 SGW와 같은 유도초음파의 위상속도를 측정하고, 각각의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계를 고찰하였다. FAS 및 SGW의 위상속도는 12.7 mm의 직경 및 200 kHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 비집속형 초음파 변환기와 함께 공기중에서 축방향 전파법을 이용하여 측정되었다. 또한 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도를 램파 이론을 이용하여 관형 피질골에 대하여 200 kHz에서 계산된 기본 대칭 (S0) 및 비대칭 (A0) 램 모드들의 위상속도와 비교하였다 [10].

II. 대상 및 방법

본 연구에서 이용된 12개의 관형 피질골 샘플은 소의 경골로부터 준비되었다. 수중에서 2시간 동안 피질골 샘플을 끓이는 방법을 이용하여 피질골 샘플 내부의 골수를 완전히 제거하였다. 피질골 샘플은 실험 전에 약 4 °C의 냉장고에서 보관되었으며, 모든 실험은 실온의 공기중에서 수행되었다. 피질골 샘플의 피질골 두께는 디지털 캘

표 1. 12개의 관형 피질골 샘플에 대한 피질골 두께의 평균값, 표준오차, 및 범위

Table 1. Mean value, standard deviation, and range of the cortical thickness on the 12 tubular cortical bone samples.

피질골 샘플 #	평균값 [mm]	표준오차 [mm]	최소값 [mm]	최대값 [mm]
1	1.7	0.1	1.6	1.9
2	2.1	0.1	2.0	2.3
3	2.4	0.1	2.2	2.5
4	2.9	0.2	2.6	3.2
5	3.1	0.3	2.8	3.5
6	3.7	0.3	3.1	4.5
7	4.1	0.1	4.0	4.3
8	4.4	0.2	4.2	4.9
9	4.5	0.3	4.2	5.1
10	4.9	0.3	4.5	5.5
11	5.3	0.4	4.9	6.1
12	5.9	0.3	5.3	6.2

리퍼스를 이용하여 측정되었다. 표 1은 12개의 관형 피질골 샘플에 대한 피질골 두께의 평균값, 표준오차, 및 범위를 나타낸다. 피질골 두께는 측정위치에 따라 미세한 차이를 보이므로 피질골 두께의 평균값을 구하기 위하여 유도초음파가 전파하는 피질골 껍질의 축방향을 따라 10개의 서로 다른 위치에서 피질골 두께가 측정되었다. 표 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 소의 경골로부터 준비된 12개 피질골 샘플의 피질골 두께는 1.7 mm부터 5.9 mm까지의 범위를 가지며, 일반적으로 1-8 mm의 두께 범위를 갖는 사람 경골의 피질골과 유사한 것을 알 수 있다 [1]. 또한 12개의 관형 피질골 샘플은 피질골 두께에 비하여 충분히 큰 직경을 갖고 있었다.

생체 외 조건에서 관형 피질골 샘플의 축방향을 따라 전파하는 유도초음파의 위상속도는 그림 2와 같이 공기 중에서 축방향 전파법을 이용하여 측정되었다. 초음파 송-수신기로서 국내의 초음파 변환기 제조업체에 의뢰하여 주문제작된 12.7 mm의 직경 및 200 kHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 비집속형 초음파 변환기가 이용되었다. 본 연구에서 이용된 200 kHz의 주파수는 피질골에서 유도초음파가 가장 효율적으로 전파하는 최적 주파수로 알려져 있다 [7]. 그림 2에서 볼 수 있듯이 원통형 초음파 송-수신기는 그 축이 피질골 샘플의 표면에 수직이 되도록 설치되었으며, 송-수신기와 피질골 샘플 사이의 접촉면에 젤 형태의 접촉매질 (Sonotech Echogel)이 도포되었다. 송신기는 함수발생기 (Agilent 33250A) 및 전력증폭기 (AR 75A250A)를 이용하여 구동되었으며, 수신기에

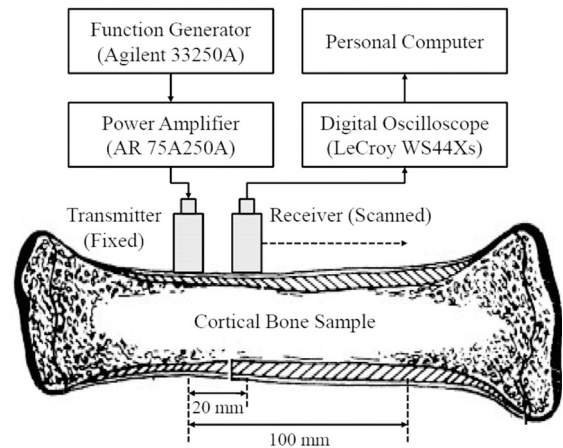


그림 2. 축방향 전파법을 이용하여 관형 피질골 샘플에서 유도초음파의 위상속도를 측정하기 위한 실험장치 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental arrangement for measuring the phase velocities of guided ultrasonic waves in the tubular cortical bone samples by using the axial transmission method.

수신된 신호는 디지털 오실로스코프 (LeCroy WS44Xs)를 이용하여 수집되었다. 피질골 샘플에 대한 유도초음파의 위상속도를 측정하기 위하여 피질골 샘플의 표면 위에 고정된 송신기로부터 피질골 샘플의 축방향을 따라 송-수신기 사이의 거리를 20 mm부터 100 mm까지 5 mm의 일정한 간격으로 증가시켜가며 총 16개의 송-수신기 간격에서 수집된 신호가 이용되었다. 이때 송신기에는 함수발생기로부터 1개의 사이클 및 200 kHz의 주파수를 갖는 펄스가 인가되었다. 또한 위상속도의 평균값을 구하기 위하여 각각의 피질골 샘플에 대하여 동일한 측정방법이 5회씩 반복되었다.

III. 결과 및 고찰

그림 3은 2.11 mm의 피질골 두께를 갖는 피질골 샘플에 대하여 100 mm의 송-수신기 간격에서 수신된 신호의 파형을 나타낸다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 도달시간 차이에 따라서 각각 FAS 및 SGW로 나타난 두 가지 종류의 유도초음파로 구별되며, FAS와 SGW 사이에 수신되는 신호는 관형 피질골 샘플의 축방향을 따라 가장 먼저 수신되는 FAS와 초음파가 전파하는 피질골 껍질의 아랫면으로부터 반사된 신호의 간섭으로 인하여 발생된다. 본 연구에서 이용된 서로 다른 피질골 두께를 갖는 12개의 피질골 샘플에 대하여 FAS 및 SGW의 위상속도는 송-수신기 사이의 거리를 x축으로 하고, FAS 및 SGW에 대한 첫째 피크의 수신시간을 y축으로 하는 그래프의 기울기

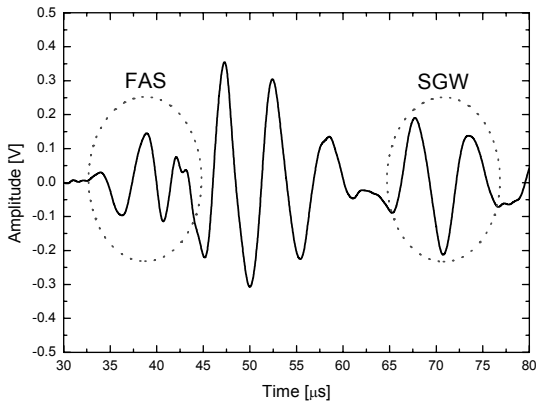


그림 3. 2.11 mm의 피질골 두께를 갖는 피질골 샘플에 대하여 100 mm의 송-수신기 간격에서 수신된 신호의 파형
 Fig. 3. Waveform of the received signal at the transmitter-receiver separation of 100 mm on the cortical bone sample with a cortical thickness of 2.11 mm.

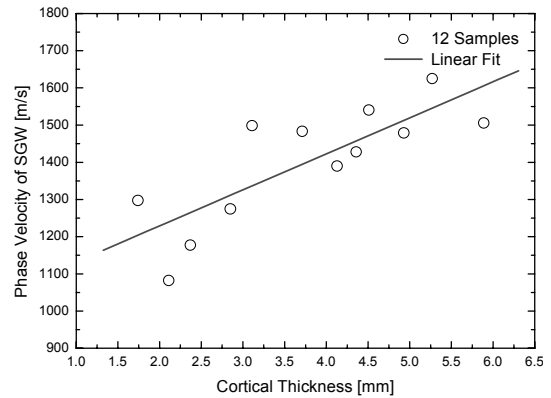


그림 5. 12개의 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 SGW의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계
 Fig. 5. Correlation between the phase velocity of the SGW measured at 200 kHz and the cortical thickness on the 12 cortical bone samples.

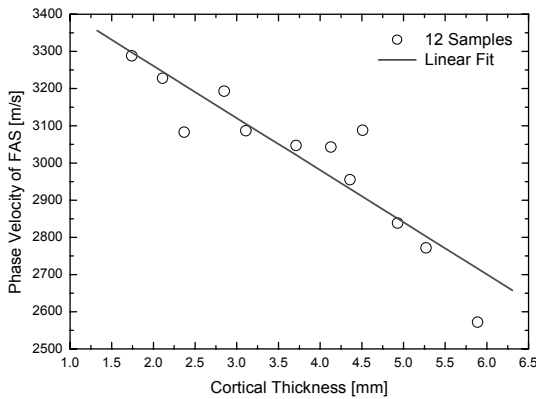


그림 4. 12개의 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계
 Fig. 4. Correlation between the phase velocity of the FAS measured at 200 kHz and the cortical thickness on the 12 cortical bone samples.

로부터 결정되었다.

그림 4 및 5는 각각 12개의 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계를 나타낸다. ○ 기호는 각각의 피질골 샘플에 대하여 5회씩 측정된 위상속도의 평균값을 나타내며, 실선은 측정값에 대한 선형회귀를 나타낸다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 관형 피질골 샘플의 축방향을 따라 가장 먼저 수신되는 FAS의 위상속도와 피질골 두께 사이에 매우 높은 음의 상관관계가 존재한다 ($R=-0.90$, $p<0.0001$). 여기서 R 및 p는 각각 Pearson 상관계수 및 유의수준을 나타낸다. 반면에 그림 5와 같이 FAS 이후에 수신되는 SGW의 위상속도는 피질골 두께와 높은 양의 상관관계를 나타낸다 ($R=0.79$, $p<0.001$). 즉 피질골 두께가 증가함에 따라 FAS의 위상속도는 감소하지만, SGW

표 2. 12개의 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도로부터 피질골 두께를 예측하기 위한 단순 및 다중선형회귀모델

Table 2. Simple and multiple linear regression models for predicting the cortical thickness from the phase velocities of the FAS and the SGW measured at 200 kHz on the 12 cortical bone samples.

선형회귀모델	피질골 두께 예측	
	R ²	RMSE [mm]
FAS	0.81	0.10
SGW	0.63	0.14
FAS + SGW	0.91	0.07

의 위상속도는 증가하는 것을 알 수 있다. 표 2는 12개의 피질골 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도로부터 피질골 두께를 예측하기 위하여 FAS 및 SGW의 위상속도를 독립변수로 하고, 피질골 두께를 종속변수로 하는 단순 및 다중선형회귀모델의 결과를 나타낸다. 여기서 R² 및 RMSE는 각각 결정계수 (즉 R의 제곱) 및 평균제곱근오차를 나타낸다. 표 2에서 볼 수 있듯이 FAS 또는 SGW의 위상속도 하나만을 독립변수로 하는 단순선형회귀모델의 결정계수는 각각 R²=0.81 및 R²=0.63으로 나타났다. FAS 및 SGW의 위상속도 모두를 독립변수를 하는 다중선형회귀모델의 결정계수는 R²=0.91로서 FAS 또는 SGW의 위상속도 하나만을 독립변수로 하는 단순선형회귀모델의 결정계수보다 높게 나타났다. 이와 같이 다중선형회귀모델이 단순선형회귀모델보다 높은 결정계수를 나타내는 이유는 다중선형회귀모델의 독립변수로 이용된 FAS 및 SGW의 위상속도 사이에 높은 상관관계가 존재하기 때문이며, 실제로 FAS의 위상속도는 SGW의 위상속도와 $R=-0.64$ ($p<0.02$)의 상관관

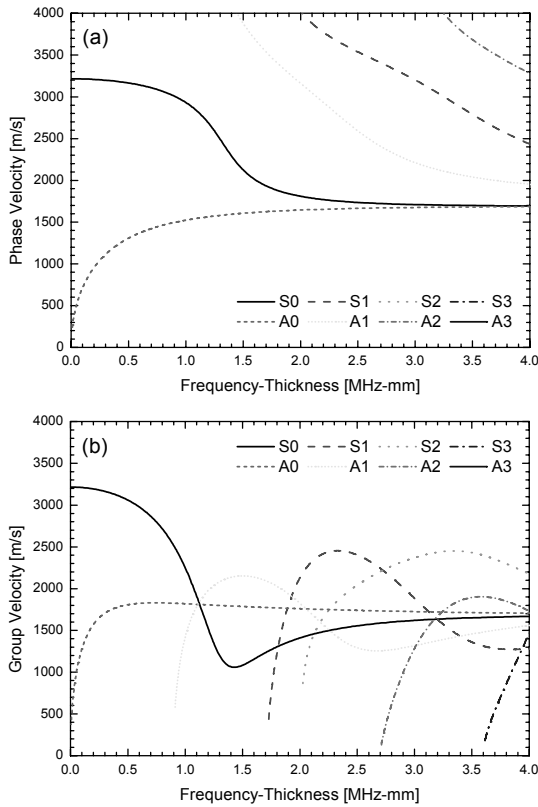


그림 6. 관형 피질골에 대하여 주파수-두께 곱의 함수로서 램파 분산곡선: (a) 위상속도 (b) 군속도

Fig. 6. Lamb wave dispersion curves as a function of the frequency-thickness product on the cortical bone plate: (a) phase velocity and (b) group velocity.

계를 나타냈다.

그림 6은 램파 이론을 이용하여 관형 피질골에 대하여 주파수-두께 곱의 함수로서 계산된 램파의 위상속도 및 군속도 분산곡선을 나타낸다 [10]. 그림 6의 관형 피질골에 대한 램파 분산곡선은 피질골의 종파속도 및 횡파속도를 각각 4000 m/s 및 1800 m/s로 가정하여 계산되었다 [8]. 그림 7은 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 피질골 두께의 함수로서 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도를 그림 6 (a)에도 나타내었듯이 관형 피질골에 대하여 판 두께의 함수로서 200 kHz에서 계산된 S0 및 A0 램 모드의 위상속도와 비교한 것이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 관형 피질골 샘플의 축방향을 따라 전파하는 FAS의 위상속도는 피질골 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 관형 피질골에서 전파하는 S0 램 모드의 위상속도와 잘 일치한다. 반면에 SGW의 위상속도는 피질골 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 관형 피질골에서 전파하는 A0 램 모드의 위상속도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 본 연구와 같이 두께에 비하여 충분히 큰 직경을 갖는 관형 매질에서 전

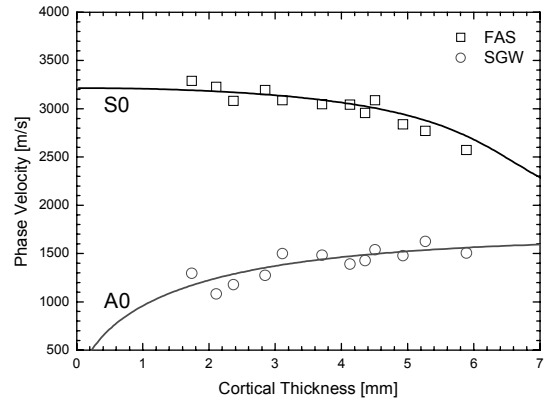


그림 7. 12개의 관형 피질골 샘플에 대하여 피질골 두께의 함수로서 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도 및 관형 피질골에 대하여 판 두께의 함수로서 200 kHz에서 계산된 S0 및 A0 램 모드의 위상속도

Fig. 7. Phase velocities of the FAS and the SGW measured at 200 kHz as a function of the cortical thickness on the 12 tubular cortical bone samples and phase velocities of the S0 and the A0 Lamb modes calculated at 200 kHz as a function of the plate thickness on the cortical bone plate.

파하는 유도초음파의 위상속도는 관형 매질에서 전파하는 유도초음파의 위상속도와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다 [4].

관형 피질골에서 축방향을 따라 가장 먼저 수신되는 FAS의 위상속도는 피질골 두께와 파장의 비 (피질골 두께 / 파장)에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다 [4]. Nicholson 등의 시뮬레이션 연구에 의하면 피질골 두께가 파장보다 큰 경우에 FAS는 lateral wave 또는 P-head wave로서 피질골 두께에 상관없이 피질골의 종파속도 (약 4000 m/s)를 갖는 것으로 예측되었다 [6]. 실제로 경골과 같은 긴 뼈의 관형 피질골을 모사하는 관형 polyvinyl chloride (PVC)로 제작된 피질골 팬텀에서도 동일한 경향이 관찰되었다 [11]. 그러나 피질골 두께가 파장보다 작은 경우에 피질골 두께가 감소함에 따라 lateral wave와 S0 램 모드의 간섭으로 인하여 FAS의 위상속도도 점차 감소하면서 관형 피질골에서 전파하는 S0 램 모드의 위상속도로 수렴하게 된다 [6]. 또한 피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우에는 그림 4 및 7에서 볼 수 있듯이 관형 피질골에서 전파하는 S0 램 모드의 특성을 가지며 피질골 두께가 증가함에 따라 FAS의 위상속도는 감소하는 경향을 나타낸다 [4]. 본 연구에서는 200 kHz의 주파수가 이용되었으므로 피질골의 종파속도를 4000 m/s라고 가정할 때 파장은 20 mm로서 12개의 피질골 샘플이 갖는 피질골 두께 (1.7-5.9 mm)보다 4배 이상 큰 경우이다. 그러므로 본 연구에서 이용된 12개의 피질골 샘플에

서 측정된 FAS의 위상속도는 그림 7과 같이 판형 피질골에서 전파하는 S0 램 모드의 위상속도와 잘 일치하며, 그림 4에서도 볼 수 있듯이 피질골 두께와 높은 음의 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다. Moilanen 등도 2.6 mm부터 10.2 mm까지의 두께 범위를 갖는 판형 PVC로 제작된 피질골 팬텀에 대하여 200 kHz에서 측정된 FAS의 위상속도는 (피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우에) 피질골 두께와 매우 높은 상관관계를 나타내는 것을 발견하였다 ($R^2=0.81$) [11]. 반면에 동일한 PVC 팬텀에 대하여 1.25 MHz에서 측정된 FAS의 위상속도와 (피질골 두께가 파장보다 큰 경우에) 피질골 두께 사이에는 상관관계가 전혀 존재하지 않는 것을 관찰하였다. 또한 Bossy 등은 생체 외 조건에서 1 mm부터 4 mm까지의 피질골 두께 범위를 갖는 피질골 샘플에 대하여 1 MHz에서 측정된 FAS의 위상속도는 (피질골 두께가 파장과 유사한 경우에) 피질골 두께와 낮은 상관관계를 나타내는 것을 보고하였다 ($R^2=0.20$) [12]. 생체 내 (in vivo) 조건의 연구에서도 이와 유사한 경향이 발견되었다 ($R^2=0.38$) [13]. 그러므로 판형 피질골에서 축방향을 따라 가장 먼저 수신되는 FAS의 위상속도는 본 연구와 같이 피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우에만 피질골 두께와 높은 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있다.

판형 피질골에서 축방향을 따라 FAS 이후에 수신되는 SGW의 위상속도는 피질골 두께와 파장의 비에 큰 상관 없이 판형 피질골에서 전파하는 A0 램 모드의 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다 [4]. 그러나 판형 피질골에서 유도초음파가 가장 효율적으로 전파하는 최적 주파수인 200 kHz를 이용하는 것이 일반적이다 [7]. Muller 등도 생체 외 조건에서 40개의 사람 요골 (radius) 샘플에 대하여 200 kHz에서 측정된 SGW의 위상속도와 (피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우에) 피질골 두께 사이에 높은 상관관계가 존재하는 것을 발표하였다 ($R^2=0.52$) [14]. 그러나 Moilanen 등은 생체 내 조건에서 106명의 12-14세 여성의 경골을 대상으로 200 kHz에서 측정된 SGW의 위상속도는 (피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우임에도 불구하고) 피질골 두께와 매우 낮은 상관관계를 나타내는 것을 관찰하였다 ($R^2=0.08$) [13]. 생체 외 조건에서 수행된 연구에 비하여 생체 내 조건에서 측정된 SGW의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계가 매우 낮게 나타나는 이유는 생체 내 조건에서 경골의 피질골 껍질을 덮고 있는 연부조직을 통하여 직접 수신되는 신호와 A0 램 모드의 간섭으로 인하여 SGW의 위상속도를 정확히 측정하는 것이 어렵기 때문이다 [4]. 그러므

로 최근에는 SGW의 위상속도를 보다 정확히 측정하기 위하여 2-D fast Fourier transform (2-DFFT)와 같은 신호처리방법을 이용하는 연구도 활발히 수행되고 있다 [9,15]. 생체 내 조건에서 위상속도 측정의 어려움에도 불구하고 FAS에 비하여 SGW가 갖는 장점은 다음과 같다. 먼저 그림 7에서 볼 수 있듯이 본 연구와 같이 피질골 두께가 파장보다 4배 이상 작은 경우에 FAS의 위상속도는 피질골 두께가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 5 mm 이상의 두께 영역에서 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에 SGW의 위상속도는 피질골 두께가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 2 mm 이상의 두께 영역에서 서서히 증가하는 경향을 나타낸다. 즉 2 mm 이하의 피질골 두께 영역에서는 FAS에 비하여 SGW의 위상속도가 피질골 두께에 더 민감하게 의존한다. 그러므로 골다공증 또는 노화로 인하여 피질골 두께가 크게 감소한 경우에는 SGW의 위상속도가 피질골의 두께 변화를 보다 정확히 평가할 수 있는 지표로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 연구에서는 생체 외 조건에서 12개의 판형 피질골 샘플에 대하여 피질골 샘플의 축방향을 따라 전파하는 FAS 및 SGW와 같은 유도초음파의 위상속도를 측정하고, 각각의 위상속도와 피질골 두께 사이의 상관관계를 고찰하였다. 200 kHz에서 측정된 FAS 및 SGW의 위상속도는 각각 피질골 두께와 매우 높은 상관관계를 나타냈으며, FAS 및 SGW의 위상속도 모두를 독립변수를 하는 다중선형회귀모델의 결정계수가 FAS 또는 SGW의 위상속도 하나만을 독립변수로 하는 단순선형회귀모델의 결정계수보다 높게 나타났다. 그러므로 경골 등의 피질골에서 FAS 및 SGW의 위상속도를 동시에 측정하여 피질골 두께를 보다 정확히 평가할 수 있는 초음파 진단기기를 개발한다면 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 기술의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 과제 (결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도사업인 재양성사업의 연구결과이며, 일부는 지식경제부의 지원을 받아 연구되었음.

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, "Instrumentation for in vivo ultrasonic characterization of bone strength," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 6, pp. 1179–1196, 2008.
3. R. Barkmann, P. Laugier, U. Moser, S. Dencks, M. Klausner, F. Padilla, G. Haiat, and C. C. Gluer, "A device for in vivo measurements of quantitative ultrasound variables at the human proximal femur," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 6, pp. 1197–1204, 2008.
4. P. Moilanen, "Ultrasonic guided waves in bone," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 6, pp. 1277–1286, 2008.
5. I. M. Siegel, G. T. Anast, and T. Fields, "The determination of fracture healing by measurement of sound velocity across the fracture site," *Surg. Gynecol. Obstet.*, vol. 107, no. 3, pp. 327–332, 1958.
6. P. H. F. Nicholson, P. Moilanen, T. Karkkainen, J. Timonen, and S. Cheng, "Guided ultrasonic waves in long bones: modelling, experiment and in vivo application," *Physiol. Meas.*, vol. 23, no. 4, pp. 755–768, 2002.
7. K. I. Lee and S. W. Yoon, "Feasibility of bone assessment with leaky Lamb waves in bone phantoms and a bovine tibia," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, no. 6, pp. 3210–3217, 2004.
8. S. P. Dodd, J. L. Cunningham, A. W. Miles, S. Gheduzzi, and V. F. Humphrey, "Ultrasonic propagation in cortical bone mimics," *Phys. Med. Biol.*, vol. 51, no. 18, pp. 4635–4647, 2006.
9. M. Sasso, M. Talmant, G. Haiat, S. Naili, and P. Laugier, "Analysis of the most energetic late arrival in axially transmitted signals in Cortical Bone," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 56, no. 11, pp. 2463–2470, 2009.
10. H. Lamb, "On waves in an elastic plate," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 93, no. 648, pp. 114–128, 1917.
11. P. Moilanen, V. Kilappa, P. H. F. Nicholson, J. Timonen, and S. Cheng, "Thickness sensitivity of ultrasound velocity in long bone phantoms," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 30, no. 11, pp. 1517–1521, 2004.
12. E. Bossy, M. Talmant, F. Peyrin, L. Akrou, P. Cloetens, and P. Laugier, "An in vitro study of the ultrasonic axial transmission technique at the radius: 1-MHz velocity measurements are sensitive to both mineralization and intracortical porosity," *J. Bone Miner. Res.*, vol. 19, no. 9, pp. 1548–1556, 2004.
13. P. Moilanen, P. H. F. Nicholson, T. Karkkainen, Q. Wang, J. Timonen, and S. Cheng, "Assessment of the tibia using ultrasonic guided waves in pubertal girls," *Osteoporosis Int.*, vol. 14, no. 12, pp. 1020–1027, 2003.
14. M. Muller, P. Moilanen, E. Bossy, P. Nicholson, V. Kilappa, J. Timonen, M. Talmant, S. Cheng, and P. Laugier, "Comparison of three ultrasonic axial transmission methods for bone assessment," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 31, no. 5, pp. 633–642, 2005.
15. D. Alleyne and P. Cawley, "A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, no. 3, pp. 1159–1168, 1991.

저자 약력

•이 강 일 (Kang Il Lee)

한국음향학회지 제28권 제7호 참조