

생체 내 경골의 피질골에서 시간역전 램파의 군속도와 피질골 특성 사이의 상관관계

Correlations between the group velocity of time-reversed Lamb waves and cortical bone properties in tibial cortical bone in vivo

이강일[†]

(Kang Il Lee^{1†})

¹강원대학교 물리학과

(Received August 3, 2023; revised September 22, 2023; accepted October 30, 2023)

초 록: 노화 및 골다공증으로 인한 경골 또는 요골과 같은 긴 뼈의 외부 껍질을 구성하는 피질골의 골강도 변화는 골절의 위험인자로 알려져 있다. 본 연구에서는 시간역전법을 이용하여 생체 내 경골의 피질골에서 발생된 시간역전 램파의 군속도를 측정하고, 군속도가 피질골의 골강도와 밀접한 관련이 있는 cortical bone thickness(cTh) 및 cortical bone mineral density(cBMD)와 갖는 상관관계를 조사하였다. 7명의 실험대상자의 우측 경골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r = 0.90$ ($p < 0.0001$)의 매우 높은 상관관계를 보이며, cBMD와는 $r = 0.69$ ($p < 0.0001$)의 상대적으로 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 본 생체 내 연구의 한계점은 단지 7명의 건강한 성인만으로 구성된 정상군에 대하여 시간역전 램파의 군속도가 측정되었다는 것이다. 향후 다수의 건강한 성인 및 골다공증 환자로 각각 구성된 정상군 및 골다공증군에 대한 후속연구를 통하여 시간역전 램파의 임상적 유용성이 입증된다면 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 기술의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시간역전 램파의 군속도를 측정하기 위한 골격 부위를 경골뿐만 아니라 대퇴골 또는 요골까지 확장시킬 필요가 있다.

핵심용어: 골다공증, 시간역전 램파, 피질골 두께, 피질골 골밀도

ABSTRACT: It is known that change in the bone strength of cortical bone constituting the outer shell of long bones such as the tibia or radius due to aging and osteoporosis is a risk factor for fracture. In this study, the group velocity of time-reversed Lamb waves generated in tibial cortical bone in vivo was measured using a time reversal method, and the correlations of the group velocity with the cortical bone thickness (cTh) and cortical bone mineral density (cBMD) closely related to the bone strength were investigated. It was found that the group velocity of time-reversed Lamb waves measured in the right tibia of 7 subjects showed a very high correlation, $r = 0.90$ ($p < 0.0001$), with the cTh and a relatively low correlation, $r = 0.69$ ($p < 0.0001$), with the cBMD. A limitation of this in vivo study is that the group velocity of time-reversed Lamb waves was measured for a normal group consisting of only 7 healthy adults. In the future, if the clinical usefulness of the time-reversed Lamb wave is demonstrated by follow-up studies on normal and osteoporotic groups consisting of a large number of healthy adults and osteoporotic patients, respectively, it is expected to improve the reliability of quantitative ultrasound technology for osteoporosis diagnosis. In addition, it is necessary to expand the skeletal site for measuring the group velocity of time-reversed Lamb waves not only to the tibia but also to the femur or radius.

Keywords: Osteoporosis, Time-reversed Lamb wave, Cortical bone thickness, Cortical bone mineral density

PACS numbers: 43.80.Cs, 43.80.Qf, 43.80.Vj

[†]Corresponding author: Kang Il Lee (acustica@kangwon.ac.kr)

Department of Physics, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, Republic of Korea
(Tel: 82-33-250-8475, Fax: 82-33-259-5666)



Copyright©2023 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 골다공증(osteoporosis)을 “골량(bone quantity)의 감소 및 골미세구조(bone microarchitecture)의 이상을 특징으로 하는 전신적인 골격계 질환으로, 결과적으로 뼈가 약해져 부러지기 쉬운 상태가 되는 질환”으로 정의하였으며, 최근 미국국립보건원(National Institutes of Health)은 이를 축약하여 “골강도(bone strength)의 약화로 인하여 골절 위험이 증가하게 되는 골격계 질환”으로 규정하였다.^[1] 여기서 골강도는 골밀도로 표현되는 골량 및 골미세구조 등으로 표현되는 골질(bone quality)에 의하여 결정된다. 일반적으로 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 기술은 해면질골(trabecular bone)의 골밀도를 평가하기 위하여 횡방향 전파법(transverse transmission method)을 이용하여 대부분 해면질골로 구성된 종골(calcaneus)과 같은 말초골격계의 음속 및 감쇠계수를 측정한다.^[2] 반면 노화 및 골다공증으로 인한 경골(tibia) 또는 요골(radius)과 같은 긴 뼈의 외부 껍질을 구성하는 피질골(cortical bone)의 골강도 변화도 골절의 위험인자로 알려져 있다.^[3] 따라서 피질골의 골강도와 밀접한 관련이 있는 피질골의 두께(cortical bone thickness, cTh) 및 골밀도(cortical bone mineral density, cBMD) 등을 평가하기 위하여 축방향 전파법(axial transmission method)을 이용하는 연구가 오래전부터 수행되어 왔다.^[4]

축방향 전파법을 이용하는 초음파 골다공증 진단 기기로서 두 종류의 대표적인 제품이 상용화되었다: Soundscan 2000/Compact(Myriad Ultrasound Systems Ltd., Rehovot, Israel) 및 Omnisense(Sunlight Medical Corp., Rehovot, Israel)는 각각 250 kHz 및 1.25 MHz의 주파수를 이용하여 경골 또는 요골의 피질골에서 발생된 유도초음파의 전파속도를 측정한다.^[5] 이때 경골 또는 요골의 축방향을 따라 수신된 유도초음파는 진폭은 매우 작지만 가장 먼저 도달되는 First Arriving Signal(FAS) 및 진폭은 매우 크지만 FAS 이후에 도달되는 Slow Guided Wave(SGW)로 구성된다.^[6] 예를 든 두 종류의 제품에서는 측정방법의 편이성 때문에 피질골의 골강도를 평가하기 위한 지표로서 FAS의 전파속도가 이용되고 있다. 그러나 최근에는 근본적으

로 A0 램파의 전파특성을 갖는 SGW의 이용가능성에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다. 그 이유는 SGW의 전파속도가 FAS에 비하여 cTh 등의 피질골 특성에 더 크게 의존하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 예를 들면, (1.25 MHz에서 작동되는) Omnisense를 이용하여 40개의 생체 외(in vitro) 사람 요골의 피질골에서 측정된 FAS의 전파속도와 cTh 사이의 상관관계는 $r = 0.19$ 로서 매우 낮게 나타났지만, 200 kHz의 주파수를 이용하여 측정된 SGW의 전파속도는 cTh와 $r = 0.72$ 의 높은 상관관계를 갖는 것으로 보고되었다.^[7] 그러나 생체 내(in vivo) 경골 또는 요골의 피질골에서는 피질골 껍질을 덮고 있는 연조직을 통하여 직접 수신되는 신호와 SGW의 간섭으로 인하여 SGW의 전파속도를 정확히 측정하는 것이 용이하지 않으므로 SGW를 이용하는 초음파 기기는 아직 상용화되지 않았다.

이와 같은 SGW의 한계점을 극복하기 위한 목적으로 수행된 본 저자의 선행연구에서는 시간역전법(time reversal method)을^[8,9] 이용하여 피질골 모사 팬텀(cortical-bone-mimicking phantom) 및 생체 외 동물 경골에서 발생된 시간역전 램파(time-reversed Lamb wave)의 군속도(group velocity)를 측정하고, 군속도가 피질골의 골강도와 밀접한 관련이 있는 cTh 및 cBMD와 높은 상관관계를 보이는 것을 발견하였다.^[10-12] 시간역전 램파는 시간역전 과정을 통하여 램파의 분산 특성을 자동으로 보상할 수 있으므로 시간역전 램파의 전파속도를 정확히 측정하는 것이 SGW에 비하여 상대적으로 더 용이하다.^[8] 본 연구에서는 생체 내 사람 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도가 cTh 및 cBMD와 갖는 상관관계를 조사하였다.

II. 대상 및 방법

본 연구는 실험대상자로서 총 7명의 건강한 성인으로 구성된 정상군(normal group)에 대하여 수행되었다(남성 6명, 여성 1명, 평균 연령 29.1 ± 10.2 세). 자발적으로 모집된 모든 실험대상자는 본 연구가 수행된 연구실에 소속된 연구원이었으며, 이들 중 방사선 치료 및 호르몬 관련 질환 등의 골밀도에 영향을

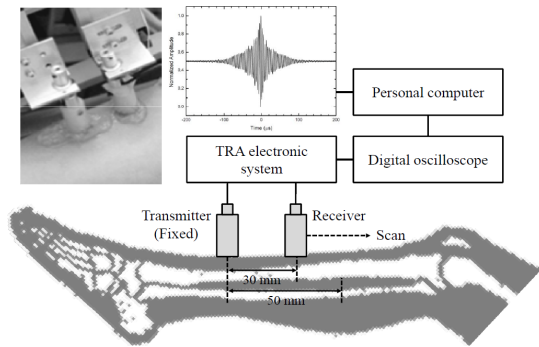


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for measuring the group velocity of time-reversed Lamb waves generated in tibial cortical bone in vivo using a time reversal method.

미치는 질병력이 있는 사람은 없었다.

Fig. 1은 시간역전법을 이용하여 생체 내 경골의 피질골에서 발생된 시간역전 램파의 군속도를 측정하기 위한 실험장치 개략도를 나타낸다. 시간역전 램파의 군속도는 각 실험대상자의 우측 경골에 대하여 피질골 껍질의 표면이 매끄러울 뿐만 아니라 피질골 껍질을 덮고 있는 연조직의 두께가 가장 얇은 중간 부위의 경골(tibial mid-shaft)에서 경골의 축방향을 따라 측정되었다. 200 kHz의 주파수는 일반적으로 1 mm~8 mm의 cTh를 갖는 사람 경골의 피질골에서 d램파가 가장 효율적으로 발생하는 최적 주파수로 알려져 있으며, 따라서 본 연구에서도 12.7 mm의 직경 및 200 kHz의 중심주파수를 갖도록 주문제작된 한 쌍의 비집속형 초음파 트랜스듀서가 이용되었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 2개의 원통형 초음파 트랜스듀서는 경골의 축방향을 따라 피질골 표면과 수직하게 설치되었으며, 트랜스듀서와 피질골 껍질을 덮고 있는 연조직 표면 사이에 젤 형태의 접촉매질이 도포되었다. 이때 송신용 트랜스듀서는 발목과 가까운 쪽에 고정되었으며, 수신용 트랜스듀서의 위치는 경골의 축방향을 따라 자동위치제어시스템을 이용하여 정밀하게 제어되었다. 시간역전 램파의 발생 및 신호처리를 위하여 미국의 Artann Laboratories에서 제작된 시간역전음향(Time Reversal Acoustics, TRA) 전자시스템이 이용되었다. 수신된 radio-frequency 신호는 디지털 오실로스코프(WS44Xs, LeCroy, Chestnut Ridge, NY, USA)를 이용하여 수집되었다.

생체 내 경골의 피질골에서 발생된 시간역전 램파

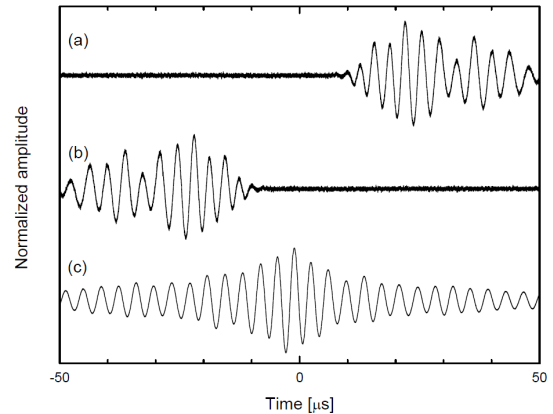


Fig. 2. (a) Initial Lamb wave recorded at the receiver, (b) time-reversed waveform of the initial Lamb wave, and (c) time-reversed Lamb wave recorded at the receiver.

의 군속도를 측정하기 위하여 다음과 같은 방법이 이용되었다: 첫째, 200 kHz의 중심주파수를 갖는 톤버스트 신호가 송신용 트랜스듀서를 통하여 경골의 축방향을 따라 전송되고, 수신용 트랜스듀서에 기록된다[Fig. 2(a)]. 둘째, 수신용 트랜스듀서에 기록된 신호의 시간이 역전된다[Fig. 2(b)]. 셋째, 시간역전된 신호가 송신용 트랜스듀서를 통하여 동일한 경로 및 방향을 따라 재전송되고, 수신용 트랜스듀서에 최종적으로 기록된다[Fig. 2(c)]. 이와 같은 방법을 이용하여 고정된 송신용 트랜스듀서로부터 수신용 트랜스듀서까지의 거리를 30 mm부터 50 mm까지 1 mm의 일정한 간격으로 증가시켜가며 총 21개의 지점에서 시간역전 램파의 파형이 수집되었다. 2개의 트랜스듀서 사이의 거리를 증가시켜가며 수집된 시간역전 램파의 군속도는 Hilbert transform을 이용하여 포락선(envelope)을 구한 후, 트랜스듀서 사이의 거리를 수직축으로, 포락선 피크의 도달시간을 수평축으로 하는 그래프의 기울기로부터 결정되었다. 각 실험대상자에 대한 군속도의 평균값을 구하기 위하여 동일한 측정방법을 이용하여 군속도 측정이 10회씩 반복되었다.

생체 내 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도가 피질골의 골강도와 밀접한 관련이 있는 cTh 및 cBMD와 갖는 상관관계를 조사하기 위하여 peripheral quantitative computed tomography(XCT 2000, Stratec Medizintechnik GmbH, Pforzheim, Germany)를

이용하여 군속도가 측정된 동일한 경골 부위의 cTh 및 cBMD를 측정하였다.^[7,13] 이때 slice thickness는 2 mm였으며, voxel size는 100 μm 였다. cTh 및 cBMD는 측정 부위에 따라 미세한 차이를 보이므로 군속도가 측정된 최대 경로(20 mm)의 중간 부위에서 획득된 경골의 단면 영상으로부터 결정되었다.

III. 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에 참여한 7명의 실험대상자에 대한 연령, 군속도, cTh, 및 cBMD의 평균값, 표준오차, 및 범위를 나타낸다. 본 연구에서 측정된 cTh(2.0 mm~4.2 mm)는 일반적으로 사람 경골이 갖는 cTh 범위(1 mm~8 mm)에 포함되는 것을 알 수 있다. 반면 본 연구에서 7명의 건강한 성인(평균 연령 29.1 ± 10.2 세)을 대상으로 측정된 평균 cBMD(976 mg/cm^3)는 26명의 폐경 후 골다공증 여성(평균 연령 57.0 ± 7.4 세)을 대상으로 측정된 평균 cBMD(427 mg/cm^3)에 비하여 상당히 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.^[13]

Figs. 3과 4는 각각 7명의 실험대상자의 우측 경골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도가 cTh 및 cBMD와 갖는 상관관계를 나타낸다. *는 동일한 측정방법을 이용하여 각 실험대상자에서 10회씩 측정된 군속도의 평균값이며, 실선은 측정값의 선형회귀(linear regression fit)이다. Figs. 3과 4에서 볼 수 있듯이, 생체 내 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r=0.90(p<0.0001)$ 의 매우 높은 상관관계를 보이며, cBMD와는 $r=0.69(p<0.0001)$ 의 상대적으로 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 여기서 r 및 p 는 각각 Pearson 상관계수 및 유의수준이다.

Figs. 3과 4에서 볼 수 있듯이, 생체 내 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 피질골의

Table 1. Descriptive statistics of the age, the group velocity, the cTh, and the cBMD in the 7 subjects.

Parameter	Mean \pm SD	Range
Age (years)	29.1 ± 10.2	22-51
Group velocity (m/s)	1797 ± 34	1750-1855
cTh (mm)	3.1 ± 0.8	2.0-4.2
cBMD (mg/cm^3)	976 ± 87	853-1088

골강도와 밀접한 관련이 있는 cTh 및 cBMD와 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 생체 내 사람 경골에서 새롭게 발견된 결과는 생체 외 동물 경골에서 획득된 선행연구 결과와 잘 일치한다. 예를 들면, 1.54 mm부터 4.26 mm까지의 cTh 범위를 갖는 18개의 소 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r=0.77$ 의 상관관계를 갖는 것으로 보고되었다.^[11] 또한 1.55 mm부터 3.53 mm까지의 cTh 범위 및 $1,219 \text{ mg/cm}^3$ 부터 $1,393 \text{ mg/cm}^3$ 까지의 cBMD 범위를 갖는 15개의 소 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r=0.81$ 의 상관관계를 가지며, cBMD와 $r=0.57$ 의 상관

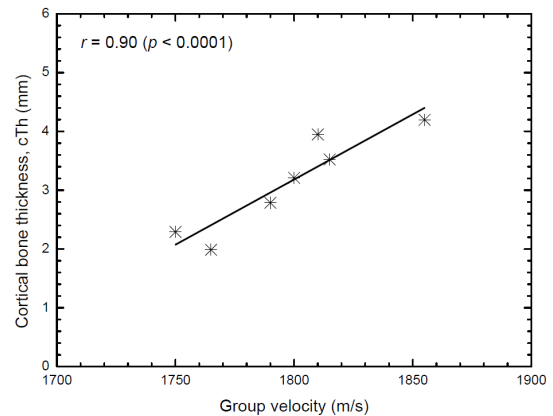


Fig. 3. Correlation between the group velocity of time-reversed Lamb waves and the cortical bone thickness (cTh). The solid line represents the linear regression fit.

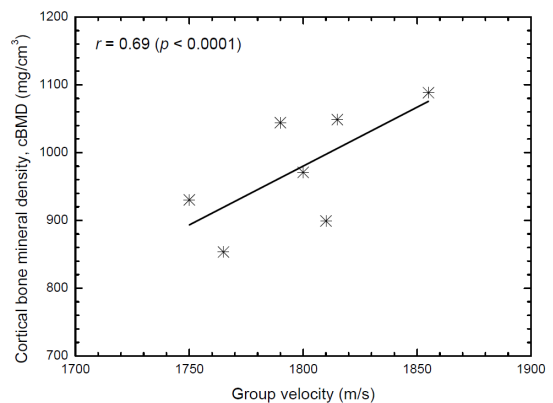


Fig. 4. Correlation between the group velocity of time-reversed Lamb waves and the cortical bone mineral density (cBMD). The solid line represents the linear regression fit.

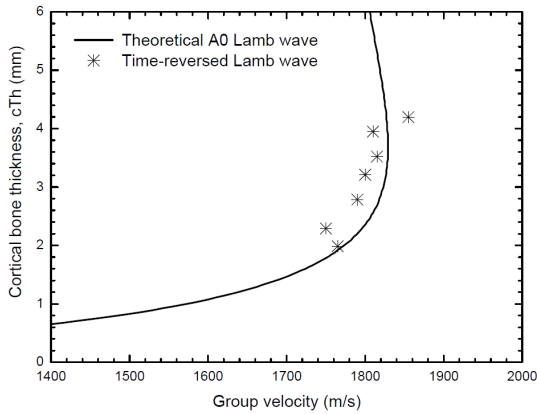


Fig. 5. Group velocity dispersion curve of the 200-kHz A0 Lamb wave calculated using the Lamb wave theory with the longitudinal and shear wave velocities of 4,000 m/s and 1,800 m/s in a cortical bone plate. The asterisks represent the group velocity of time-reversed Lamb waves measured in the 7 subjects.

관계를 갖는 것으로 보고되었다.^[12] 일반적으로 피질골 껍질을 덮고 있는 연조직이 존재하는 생체 내 경골의 피질골에서 측정된 유도초음파의 전파속도가 cTh 등의 피질골 특성과 갖는 상관관계는 골수 및 연조직이 완전히 제거된 생체 외 경골의 피질골에서 나타나는 상관관계에 비하여 상당히 낮은 것으로 알려져 있다. 그 이유는 연조직을 통하여 직접 수신되는 신호와 유도초음파의 간섭으로 인하여 유도초음파의 전파속도를 정확히 측정하는 것이 용이하지 않기 때문이다. 본 연구에서 시간역전 램파의 군속도가 생체 내 경골에서 측정되었음에도 불구하고 생체 외 경골에서 획득된 선행연구 결과에 비하여 더 높거나 유사한 상관관계를 보이는 것은 연조직 두께가 가장 얇은 중간 부위의 경골에서 군속도가 측정되는 경우 연조직의 존재가 군속도 측정에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 다만 본 연구는 단지 7명의 건강한 성인으로 구성된 정상군에 대하여 수행되었으므로 시간역전 램파의 임상적 유용성을 입증하기 위해서는 향후 다수의 건강한 성인 및 골다공증 환자로 각각 구성된 정상군 및 골다공증군에 대한 후속연구를 수행할 필요가 있다.

Fig. 5는 얇은 두께의 평판에서 전파하는 탄성파에 대한 램파 이론을 이용하여 판형 피질골에서 계산된 200-kHz A0 램파의 군속도 분산곡선을 나타낸다.^[14] 이때 피질골의 종파속도 및 횡파속도는 각각 4,000

m/s 및 1,800 m/s를 갖는 것으로 가정되었다.^[14] 곡선은 판형 피질골에서 계산된 200-kHz A0 램파의 군속도이며, * 는 동일한 측정방법을 이용하여 7명의 실험대상자에서 10회씩 측정된 시간역전 램파의 군속도의 평균값이다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 생체 내 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 램파 이론을 이용하여 판형 피질골에서 계산된 200-kHz A0 램파의 군속도와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이와 같이 생체 내 사람 경골에서 새롭게 발견된 결과는 피질골 모사 팬텀 및 생체 외 동물 경골에서 획득된 선행연구 결과와 일관된 경향을 보인다. 예를 들면, 2mm부터 12mm까지의 cTh 범위를 갖는 6개의 판형 아크릴로 구성된 피질골 모사 팬텀에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 판형 아크릴에서 계산된 200-kHz A0 램파의 군속도와 잘 일치하는 것으로 보고되었다.^[10] 그러나 본 연구와 다르게 2mm~12mm의 매우 넓은 cTh 범위를 갖는 6개의 판형 아크릴에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r=-0.03$ 의 매우 낮은 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 그 이유는 판형 아크릴에서 측정된 시간역전 램파의 군속도 및 판형 아크릴에서 계산된 A0 램파의 군속도 모두 약 2mm 이상의 cTh 범위에서 cTh가 증가함에 따라 매우 느리게 감소하기 때문이다. 반면 본 연구와 유사하게 1.55mm~3.53mm의 cTh 범위를 갖는 15개의 소 경골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh가 증가함에 따라 증가하면서, 즉 cTh와 양의 상관관계를 보이며 판형 피질골에서 계산된 200-kHz A0 램파의 군속도와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.^[12] 이와 같은 결과는 생체 내 또는 생체 외 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도가 cTh와 파장의 비에 상관없이 근본적으로 A0 램파의 전파특성을 가지며, 특히 시간역전 램파의 군속도와 cTh 사이의 상관관계는 cTh와 파장의 비가 작을수록 높게 나타난다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 생체 내 경골의 피질골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도가 피질골의 골강도와 밀접

한 관련이 있는 cTh 및 cBMD와 갖는 상관관계를 조사하였다. 7명의 실험대상자의 우측 경골에서 측정된 시간역전 램파의 군속도는 cTh와 $r=0.90$ 의 매우 높은 상관관계를 보이며, cBMD와는 $r=0.69$ 의 상대적으로 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 본 생체 내 연구의 한계점은 단지 7명의 건강한 성인으로 구성된 정상군에 대하여 시간역전 램파의 군속도가 측정되었다는 것이다. 향후 다수의 건강한 성인 및 골다공증 환자로 각각 구성된 정상군 및 골다공증군에 대한 후속연구를 통하여 시간역전 램파의 임상적 유용성이 입증된다면 골다공증 진단을 위한 정량적 초음파 기술의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 시간역전 램파의 군속도를 측정하기 위한 골격 부위를 경골뿐만 아니라 대퇴골 또는 요골까지 확장시킬 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1046161).

References

1. P. Laugier, "Instrumentation for in vivo ultrasonic characterization of bone strength," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **55**, 1179-1196 (2008).
2. K. A. Wear, "Mechanisms of interaction of ultrasound with cancellous bone: A review," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **67**, 454-482 (2020).
3. J. Karjalainen, O. Riekkinen, J. Toyras, H. Kroger, and J. Jurvelin, "Ultrasonic assessment of cortical bone thickness in vitro and in vivo," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **55**, 2191-2197 (2008).
4. P. Moilanen, "Ultrasonic guided waves in bone," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **55**, 1277-1286 (2008).
5. 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. **23**, 755-768 (2002).
6. 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. **56**, 2463-2470 (2009).

7. 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. **31**, 633-642 (2005).
8. R. K. Ing and M. Fink, "Time-reversed Lamb waves," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **45**, 1032-1043 (1998).
9. R. Watkins and R. Jha, "A modified time reversal method for Lamb wave based diagnostics of composite structures," Mech. Syst. Signal Process. **31**, 345-354 (2012).
10. K. I. Lee and S. W. Yoon, "Propagation of time-reversed Lamb waves in acrylic cylindrical tubes as cortical-bone-mimicking phantoms," Appl. Acoust. **112**, 10-13 (2016).
11. K. I. Lee and S. W. Yoon, "Propagation of time-reversed Lamb waves in bovine cortical bone in vitro," J. Acoust. Soc. Am. **137**, EL105-EL110 (2015).
12. K. I. Lee and S. W. Yoon, "Relationships of the group velocity of the time-reversed Lamb wave with bone properties in cortical bone in vitro," J. Biomech. **55**, 147-151 (2017).
13. D. J. Lee, N. H. Cho, and I. K. Han, "Assessment of bone density with pQCT: Short term precision and comparison with DXA," J. Bone Metab. **3**, 149-156 (1996).
14. H. Lamb, "On waves in an elastic plate," Proc. R. Soc. London A, **93**, 114-128 (1917).

저자 약력

▶ 이 강 일 (Kang Il Lee)



1994년 2월: 성균관대학교 물리학과 이학사
 1997년 2월: 성균관대학교 물리학과 이학 석사
 2004년 2월: 성균관대학교 물리학과 이학 박사
 2007년 3월 ~ 현재: 강원대학교 물리학과 교수
 <관심분야> 물리음향, 의학음향, 수중음향