

# 해면질골 팬텀으로서 개포된 구조를 갖는 구리폼 및 니켈폼에서 구조적 특성에 대한 군속도 및 감쇠계수의 의존성

## Dependencies of Group Velocity and Attenuation Coefficient on Structural Properties in Copper and Nickel Foams with an Open-Celled Structure as Trabecular-Bone-Mimicking Phantoms

김 성 일\*, 이 강 일\*  
(Seong Il Kim\*, Kang Il Lee\*)

\*강원대학교 물리학과

(접수일자: 2011년 1월 14일; 수정일자: 2011년 3월 3일; 채택일자: 2011년 3월 9일)

본 연구에서는 해면질골에서 해면소주 두께 (Tb,Th) 및 해면소주 간격 (Tb,Sp)과 같은 구조적 특성에 대한 군속도 및 감쇠계수의 의존성을 살펴보기 위하여 해면질골 팬텀으로서 개포된 구조를 갖는 8개의 구리폼 및 니켈폼이 이용되었다. 구리폼 및 니켈폼의 군속도 및 감쇠계수는 12.7 mm의 직경 및 1.0 MHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 광대역, 비집속형 초음파 변환기와 함께 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다. 구리폼 및 니켈폼을 투과한 초음파 신호에서 Biot의 fast wave 및 slow wave가 분리되어 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 구리폼 및 니켈폼의 군속도는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 모두 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 구리폼의 감쇠계수는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 높은 음의 상관관계를 나타내는 반면에 니켈폼의 감쇠계수는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 이와 같은 결과는 해면질골 샘플 또는 팬텀을 이용한 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과를 이해하는데 도움이 된다.

**핵심용어:** 골다공증, 해면질골 팬텀, 골미세구조, 정량적 초음파, 군속도, 감쇠계수

**투고분야:** 생체 및 의학 음향 분야 (15.4)

In the present study, copper and nickel foams with an open-celled structure as trabecular-bone-mimicking phantoms were used to investigate the dependencies of group velocity and attenuation coefficient on structural properties such as trabecular thickness (Tb,Th) and trabecular separation (Tb,Sp) in trabecular bone. The group velocity and attenuation coefficient of the copper and nickel foams were measured by a through-transmission method in water, using a pair of broadband, unfocused transducers with a diameter of 12.7 mm and a center frequency of 1.0 MHz. The separation of the Biot's fast and slow waves was consistently observed in the ultrasonic signals transmitted through the copper and nickel foams. The group velocities of the copper and nickel foams showed highly positive correlations with Tb,Th and Tb,Sp. The attenuation coefficient of the copper foam showed a highly negative correlation with Tb,Th and Tb,Sp, whereas that of the nickel foam showed a highly positive correlation with Tb,Th and Tb,Sp. These results advance our understanding of those previously reported by other researchers using trabecular bone samples or phantoms.

**Keywords:** Osteoporosis, Trabecular-Bone-Mimicking Phantom, Bone Microarchitecture, Quantitative Ultrasound, Group Velocity, Attenuation Coefficient

**ASK subject classification:** Biological and Medical Acoustics (15.4)

## I. 서론

골다공증은 골밀도 (bone mineral density)의 감소로 인하여 작은 충격에도 골절이 쉽게 발생하는 전신적 골질환으로 인식되어 왔으나, 최근에는 골강도 (bone strength)의 감소로 인하여 골절률이 증가하는 질환으로 새롭게 정의되었다 [1]. 골강도는 골밀도뿐만 아니라 골미세구조 (bone microarchitecture) 등의 골질 (bone quality)을 포함하는 개념이며, 골강도를 결정짓는 요소 중에서 골밀도보다도 골질이 강조되는 추세이다. 그 이유는 동일한 골밀도라 하더라도 연령이 높은 경우나 골절상의 병력 및 스테로이드류의 약물 치료를 받은 경우에 골절률이 더 높으며, 골다공증 약제의 골절률 감소 효과를 골밀도 변화만으로는 설명할 수 없기 때문이다. 그러므로 골밀도 및 골질을 함께 고려하여 종합적으로 골강도를 예측해야만 골다공증의 원인을 규명하고, 보다 정확하게 골다공증을 진단할 수 있다. 이와 같은 이유로 최근에는 골밀도 외에 해면소주 두께, 해면소주 간격, 및 해면소주 이방성 등의 골미세구조와 같은 정보를 획득할 수 있는 진단기술에 대한 관심이 점차 증가하고 있다 [2-3].

인체의 뼈는 피질골 (cortical bone) 및 해면질골 (trabecular bone)과 같은 두 종류의 골조직으로 구분된다. 뼈의 외부 껍질은 매우 치밀한 구조를 갖는 피질골로 구성되며, 뼈의 중심부 및 긴 뼈의 양쪽 말단은 해면소주가 3차원의 그물 구조를 갖는 해면질골로 구성된다. 골량의 80%는 피질골이 차지하지만, 피질골에 비하여 해면질골의 표면적이 매우 크므로 골조직의 물질대사는 대부분 해면질골에서 발생한다 [4]. 현재 임상에서는 골다공증을 진단하기 위한 지표로서 해면질골의 골밀도를 측정하고 있으며, 그 이유는 골밀도가 골강도의 60-80%를 반영할 뿐만 아니라 골생검 없이 비침습적으로 측정할 수 있는 지표이기 때문이다. 말초 골격계의 골밀도를 측정하는 정량적 초음파 (quantitative ultrasound; QUS) 기술은 초음파가 투과하기에 가장 용이한 해부학적 구조를 갖는 종골 (발뒤꿈치뼈) 또는 지골 (손가락뼈)에서 음속 (speed of sound; SOS) 및 광대역 감쇠계수 (broadband ultrasound attenuation; BUA)와 같은 초음파 변수를 측정하고, 이들과 골밀도 사이의 상관관계로부터 골밀도를 예측한다 [4]. 비록 초음파 골밀도 측정기는 X-선 촬영법에 비하여 골밀도 측정의 정확성이 떨어지지만, 방사선 노출에 대한 위험성이 없고, 진단기기의 휴대가 용이하

며, 진단기기의 가격 및 검진 비용이 상대적으로 저렴한 장점을 가지므로 골다공증 선별 검사에 널리 이용되고 있다.

최근에는 QUS 기술을 이용하여 해면질골에서 해면소주 두께 (trabecular thickness; Tb.Th) 및 해면소주 간격 (trabecular separation; Tb.Sp) 등의 골미세구조에 대한 초음파 변수의 의존성으로부터 골미세구조를 예측하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [5-6]. 본 연구에서는 해면질골에서 Tb.Th 및 Tb.Sp와 같은 대표적인 구조적 특성에 대하여 골다공증 진단을 위한 초음파 변수로서 이용되는 균속도 및 감쇠계수의 의존성을 살펴보기 위하여 해면질골 팬텀으로서 개포된 구조를 갖는 발포금속인 구리폼 (copper foam) 및 니켈폼 (nickel foam)이 이용되었다. 구리폼 및 니켈폼의 균속도 및 감쇠계수는 12.7 mm의 직경 및 1.0 MHz의 중심 주파수를 갖는 한쌍의 광대역, 비집속형 초음파 변환기와 함께 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다.

## II. 대상 및 방법

본 연구에서는 해면질골 팬텀으로서 구리 및 니켈과 같은 금속 재질을 이용하여 개포된 구조를 갖도록 제작된 총 8개의 구리폼 (4개) 및 니켈폼 (4개)이 이용되었다 (메탈폼 코리아(주), 대한민국). 내부에 수많은 다공을 갖는 발포금속은 크게 폐포형 및 개포형으로 구분된다. 폐포형 발포금속은 내부의 다공들이 연결되지 않고 독립적으로 존재하며, 개포형 발포금속은 내부의 다공들이 서로 연결된 형태로서 유체의 통과가 용이하므로 폐포형 발포금속에 비하여 고온용 필터, 소음기, 및 열 교환기 등의 다양한 산업분야에 이용되고 있다. 상용화된 개포형 발포금속 중에서 구리폼 및 니켈폼은 인체의 해면질골과 유사하게 단위체적당 표면적이 매우 크고, 90% 이상의 높은 다공율을 가질 뿐만 아니라 재질의 특성상 가공이 용이하고, 음속 (구리: 4759 m/s, 니켈: 5814 m/s)이 무기질골의 음속 (약 4000 m/s)과 비교적 큰 차이를 나타내지 않으므로 본 연구에서 해면질골 팬텀으로 이용되었다 [2]. 그림 1은 인체의 해면질골뿐만 아니라 본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼의 구조를 나타내며, 그림 2는 주사전자현미경을 이용하여 획득된 니켈폼의 영상을 나타낸다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 구리폼 및 니켈폼은 내부의 다공들이 서로 연결된 형태로 개포된 구조를 가지며, 해면질골과 매우 유사한 구조를 갖는 것을 알 수 있

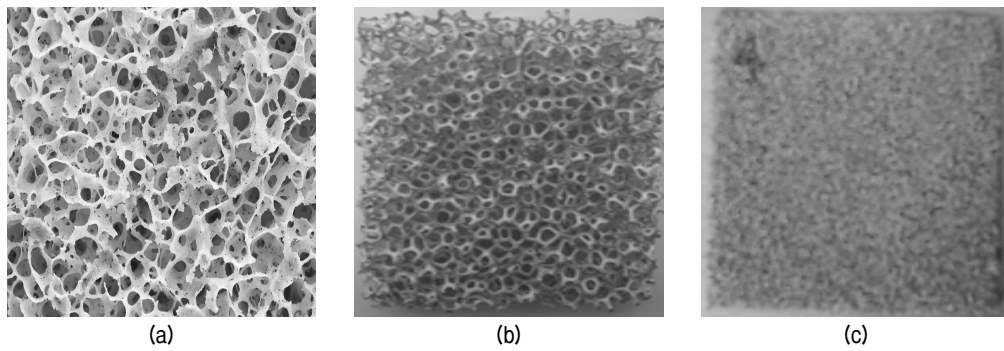


그림 1. (a) 인체의 해면질골, (b) 구리폼, 및 (c) 니켈폼의 구조  
 Fig. 1. Structures of (a) a human trabecular bone, (b) a copper foam, and (c) a nickel foam.

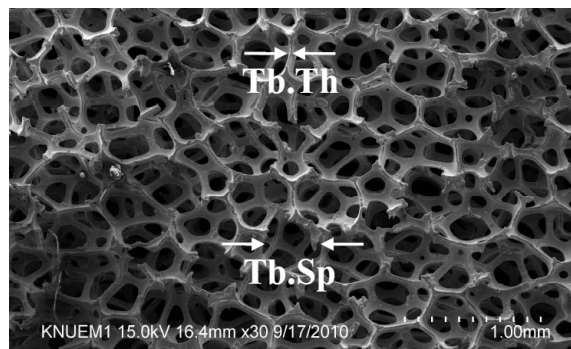


그림 2. 주사전자현미경을 이용하여 획득된 니켈폼의 영상  
 Fig. 2. Micrograph of a nickel foam obtained using a scanning electron microscope.

표 1. 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대한 구조적 특성 (Tb.Th 및 Tb.Sp) 및 다공율  
 Table 1. Structural properties (Tb.Th and Tb.Sp) and porosity for the 8 copper and nickel foams used in the present study.

Metal	Phantom #	Tb.Th	Tb.Sp	Tb.Th : Tb.Sp	Porosity
Copper	1	0.33 mm	1.14 mm	1 : 3.5	92.8%
	2	0.44 mm	1.44 mm	1 : 3.3	93.9%
	3	0.50 mm	1.86 mm	1 : 3.7	93.7%
	4	0.61 mm	2.38 mm	1 : 3.9	94.8%
Nickel	1	0.05 mm	0.16 mm	1 : 3.2	97.4%
	2	0.07 mm	0.23 mm	1 : 3.3	97.7%
	3	0.10 mm	0.33 mm	1 : 3.3	97.7%
	4	0.13 mm	0.46 mm	1 : 3.5	98.2%

다. 또한 그림 2에 나타내었듯이 해면질골 팬텀을 구성하는 금속 뼈대의 두께 및 간격은 각각 해면질골의 Tb.Th 및 Tb.Sp에 해당된다. 구리폼 및 니켈폼은 모두 50×50 mm<sup>2</sup>의 동일한 단면적을 가지며, 5.5 mm부터 12 mm까지 서로 다른 두께를 갖는 직육면체 형태로 가공되었다. 표 1은 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대한 구조적 특성 (Tb.Th 및 Tb.Sp) 및 다공율을 나타낸다. 각각의 구리폼 및 니켈폼에서 Tb.Th 및 Tb.Sp는 측정 위치에 따라 미세한 차이를 보이므로 Tb.Th 및 Tb.Sp의 평균값을 구하기 위하여 그림 2와 같이 주사전자현미경으로부터 획득된 영상을 이용하여 40개의 서로 다른 위치

에서 디지털 캘리퍼스를 이용하여 측정되었다. 표 1에 나타난 구리폼 및 니켈폼에 대한 Tb.Th 및 Tb.Sp의 평균값은 인체 종골의 해면질골과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다 [7]. 다공율은 다공을 포함하는 겉보기 체적에 대한 다공 체적의 비로부터 결정되었으며 [8], 구리폼 및 니켈폼이 갖는 다공율 범위는 각각 92.8–94.8 % 및 97.4–98.2 %로서 모두 인체 종골이 갖는 다공율 범위 (86–98 %)에 포함되는 것으로 나타났다 [9]. 또한 구리폼 및 니켈폼에서 Tb.Th에 대한 Tb.Sp의 비 (구리폼: 1:3.6 ± 0.3, 니켈폼: 1:3.3 ± 0.1)는 거의 일정하므로 구조적 특성이 서로 다르더라도 유사한 다공율을 가지며, 구리

폼에 비하여 니켈폼의 다공율이 다소 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

구리폼 및 니켈폼의 군속도 및 감쇠계수는 그림 3과 같은 실험 장치와 함께 수중에서 투과법을 이용하여 측정되었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 12.7 mm의 직경 및 1.0 MHz의 중심 주파수를 갖는 한 쌍의 광대역, 비집속형 초음파 변환기 (Panametrics V303)는 변환기의 발산각 (약 10°) 및 팬텀의 크기를 고려하여 두 변환기 표면 사이의 거리가 제조자에 의하여 명시된 근거리 음장 길이 (27.6 mm)의 약 두 배 (50 mm)가 되는 지점에 설치되었다 [3]. 초음파 신호를 발생 및 수신하기 위하여 펄서/리시버 (Panametrics 5800PR)가 이용되었으며, 수신된 초음파 신호를 관찰 및 수집하기 위하여 디지털 오실로스코프 (LeCroy WS44Xs)가 이용되었다. 구리폼 및 니켈폼의 군속도 및 감쇠계수는 그림 3과 같이 수직방향으로 서주마주 보는 초음파 변환기 사이에 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 초음파 신호를 이용하여 결정되었다. 구리폼 및 니켈폼의 군속도  $c_g$  [m/s]는 다음과 같은 식에 의하여 계산되었다 [10].

$$c_g = \frac{c_w}{1 - \frac{c_w \Delta t}{d}} \quad (1)$$

여기서  $c_w$ 는 수중에서의 음속 (1486 m/s @ 21.5 °C),  $d$ 는 구리폼 및 니켈폼의 두께, 및  $\Delta t$ 는 초음파 변환기 사이에 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 초음파 신호의 수신 시간 차이를 나타낸다. 주파수에 의존하는 구리폼 및 니켈폼의 감쇠계수  $\alpha(\omega)$  [dB/cm]는 군속도를 측정하기 위하여 수집된 동일한 수신 신호를 이용하여 다음과 같은 식에 의하여 계산되었다 [11].

$$\alpha(\omega) = \frac{20 \log(e)}{d} \left[ \ln \frac{|A_0(\omega)|}{|A_p(\omega)|} + \ln |\tau(\omega)| \right] \quad (2)$$

여기서  $A_0(\omega)$  및  $A_p(\omega)$ 는 초음파 변환기 사이에 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 초음파 신호의 파워스펙트럼레벨,  $d$ 는 구리폼 및 니켈폼의 두께, 및  $\tau(\omega)$ 는 물과 구리폼 및 니켈폼 사이의 경계면에서의 파워투과계수를 나타낸다. 식 (2)의 우변에서 첫째 항은 구리폼 및 니켈폼의 겉보기 감쇠계수를 나타내며, 둘째 항은 물과 구리폼 및 니켈폼 사이의 경계면에서 발생하는 투과손실을 나타낸다. 일반적으로 수중에서

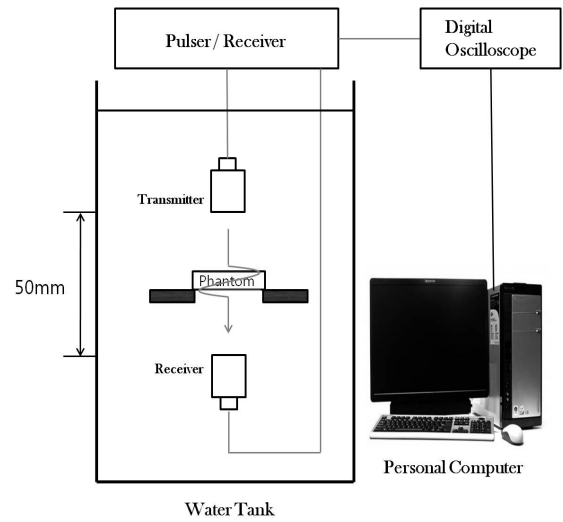


그림 3. 수중에서 투과법을 이용하여 구리폼 및 니켈폼의 군속도 및 감쇠계수를 측정하기 위한 실험 장치

Fig. 3. Experimental setup for the measurements of group velocity and attenuation coefficient of the copper and nickel foams using a through-transmission method in water.

90 % 이상의 높은 다공율을 갖는 다공성 매질의 투과손실은 매우 작으므로 무시될 수 있으나, 본 연구에서는 다음의 식 (3)을 이용하여 파워투과계수  $\tau(\omega)$ 를 구하여 감쇠계수를 보정하였다.

$$\tau(\omega) = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3)$$

여기서  $Z_1$  (물: 1.49 Mrayl) 및  $Z_2$  (구리폼: 0.52–0.67 Mrayl, 니켈폼: 0.26–0.40 Mrayl)는 각 매질의 음속과 밀도의 곱으로 주어지는 음향임피던스를 나타낸다.

### III. 결과 및 고찰

그림 4는 수중에서 초음파 변환기 사이에 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 초음파 신호를 나타낸다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 구리폼 및 니켈폼을 투과한 신호들은 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우에 수신된 신호 (기준 신호)보다 더 느린 수신 시간을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 5는 그림 4에 나타난 수신 신호에 푸리에 변환 (fast Fourier transform)을 취하여 획득된 주파수 함수에 대한 파워스펙트럼레벨을 나타낸다. 구리폼을 투과한 수신 신호의 파워스펙트럼은 초음파 변환기 사이에 구리폼이 없는 경우에 수신된 신호 (기준 신호)의 파워스펙트럼과 같이 약 1 MHz의 중심 주파수를 갖지만,

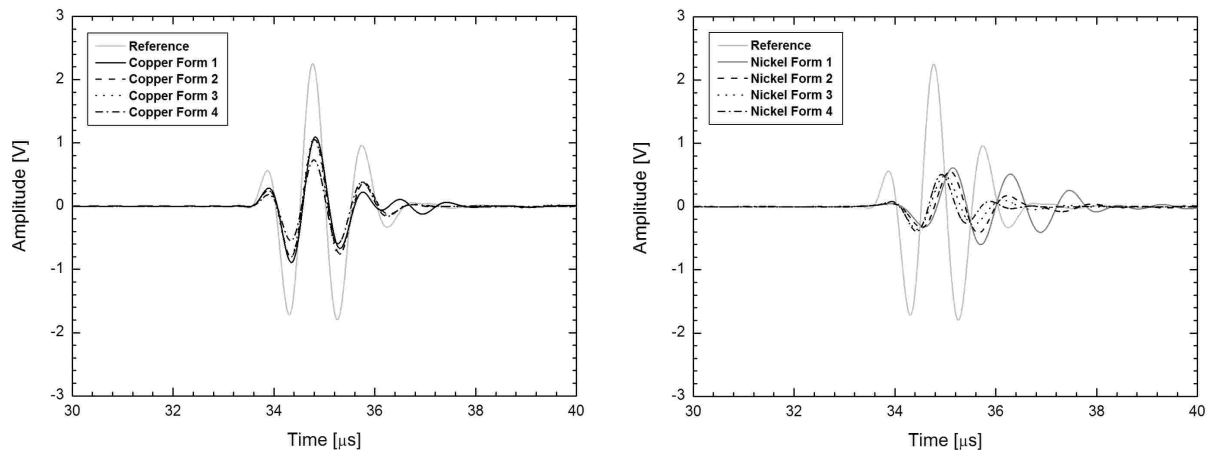


그림 4. 수중에서 초음파 변환기 사이에 구리폼 및 니켈폼이 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 초음파 신호  
 Fig. 4. Ultrasonic signals received with and without the copper and nickel foams between the ultrasonic transducers in water.

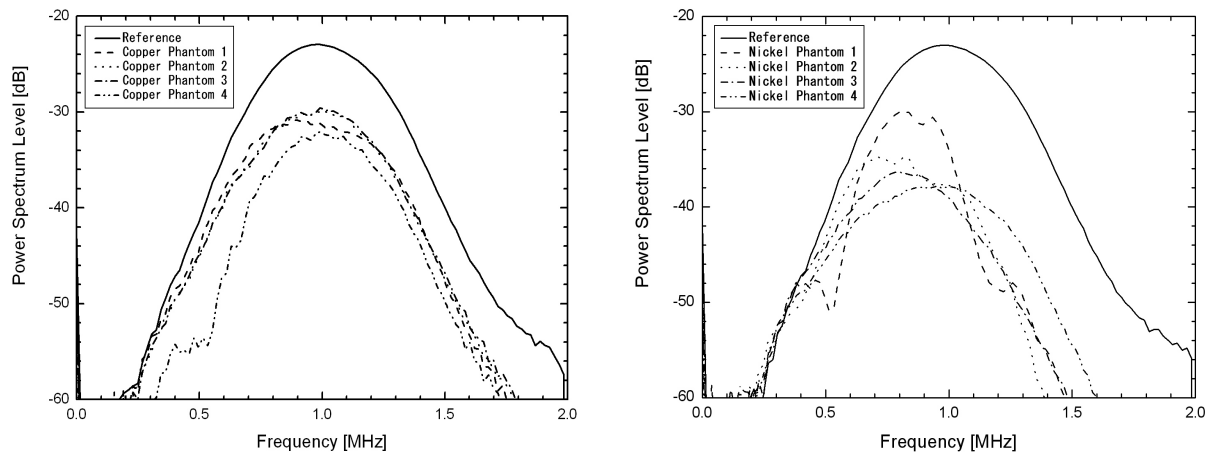


그림 5. 그림 4에 나타난 수신 신호의 주파수 함수에 대한 파워스펙트럼레벨  
 Fig. 5. Power spectrum levels as a function of frequency of the received signals presented in Fig. 4.

니켈폼을 투과한 수신 신호의 파워스펙트럼은 약 0.8 MHz의 중심 주파수를 갖는 것을 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 서로 다른 금속 재질을 이용하여 제작된 각 팬텀의 감쇠특성을 고려하여 구리폼의 경우에 1 MHz에서, 니켈폼의 경우에 0.8 MHz에서 측정된 감쇠계수를 이용하였다.

그림 6은 수중에서 초음파 변환기 사이에 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼 중에서 대표적으로 구리폼 4가 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호의 앞부분을 동일한 비율로 확대하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 초음파 변환기 사이에 구리폼 4가 없는 경우에 수신된 신호에 비하여 구리폼 4가 있는 경우에는 수신된 신호의 앞부분에서 매우 작은 진폭을 갖는 신호가 발견되었으며, 구리폼 4 이외의 나머지 모든 팬텀에서도 동일한 현상이 관찰되었다. 이는 1950년대 Biot가 이론적으로 제안하였듯이 점성이 있는 유체로 포화된 다공성 매질

을 투과한 초음파 신호가 fast wave 및 slow wave와 같이 서로 다른 음속을 갖는 두 종류의 종파로 분리되는 현상이라고 할 수 있다 [12]. 본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼을 투과한 초음파 신호에서도 (수신 시간이 빠른) 매우 작은 진폭을 갖는 fast wave 및 (수신 시간이 느린) 큰 진폭을 갖는 slow wave가 분리되어 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. fast wave의 경우에는 진폭이 매우 작으므로 군속도 및 감쇠계수를 결정하기 위하여 큰 진폭을 갖는 slow wave가 이용되었다.

위에서 언급하였듯이 8개의 구리폼 및 니켈폼을 투과한 초음파 신호에서 Biot가 제안한 서로 다른 음속을 갖는 두 종류의 종파, 즉 fast wave 및 slow wave가 관찰되었다 [12]. 이와 같은 현상은 Biot 이론을 이용하여 다공성 매질에서의 포아즈이유 흐름 (Poiseuille's flow) 및 점성 침투깊이 (viscous skin depth)로부터 설명될 수 있다 [13]. 포아즈이유 흐름이란 점성이 있는 유체로 포화된

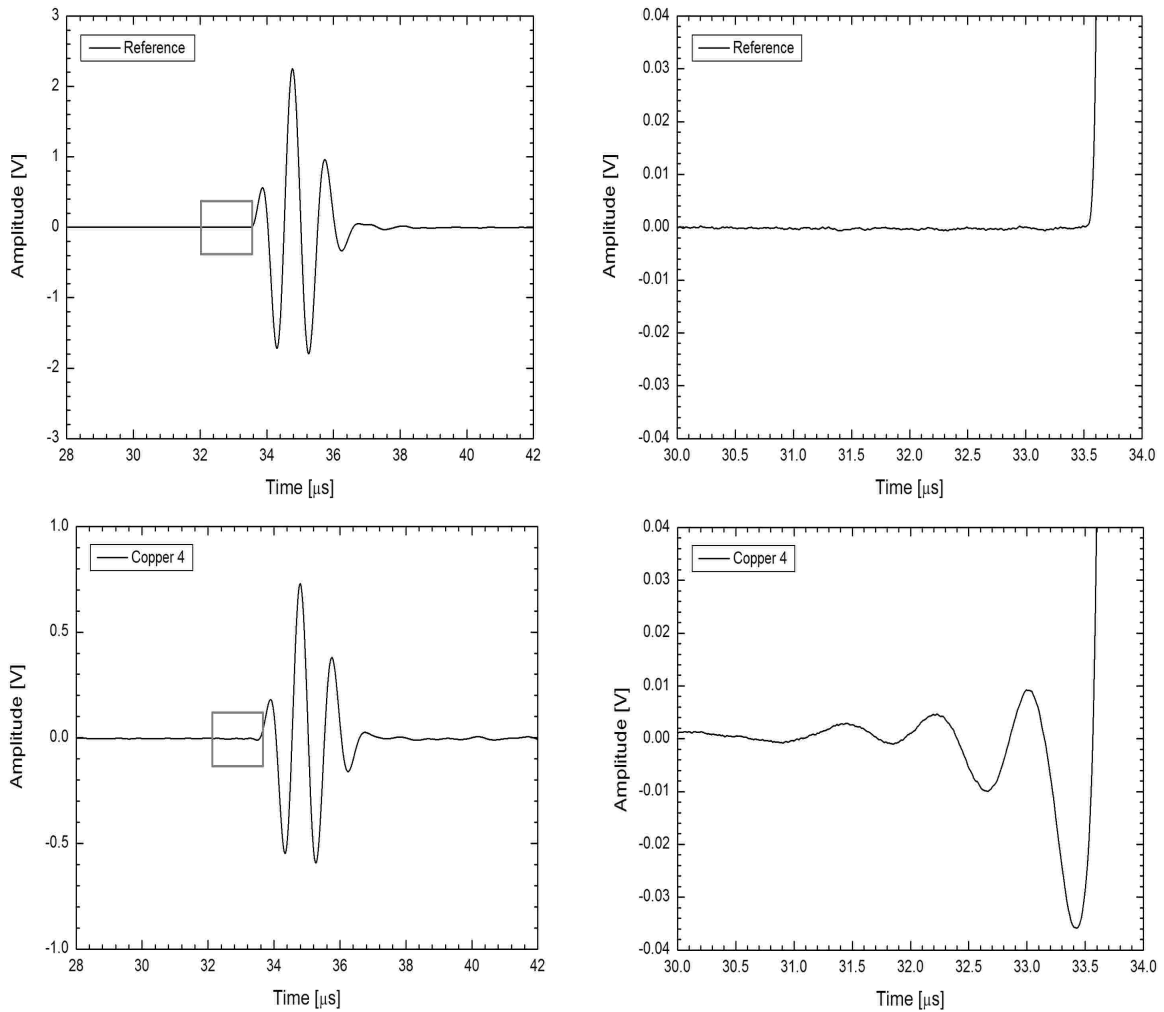


그림 6. 수중에서 초음파 변환기 사이에 구리폼 4가 없는 경우와 있는 경우에 각각 수신된 신호  
 Fig. 6. Ultrasonic signals received with and without copper foam 4 between the ultrasonic transducers in water.

원통형 다공에서 유체의 점성에 의하여 발생하는 마찰력으로 인하여 다공의 중심으로부터 벽에 가까울수록 유속이 느려지는 유체의 흐름을 의미한다. 이 때 원통형 다공에서 유속이 가장 빠른 지점과 유속이 가장 느린 지점 사이의 거리를 점성침투깊이라고 하며, 점성침투깊이  $\delta$ 는 다음과 같은 식에 의하여 주어진다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta_f}{\rho_f \omega}} \quad (4)$$

여기서  $\eta_f$ 는 유체의 점성도,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도, 및  $\omega$ 는 각주파수를 나타낸다. 다공성 매질의 점성침투깊이가 다공 크기보다 큰 경우에는 다공성 매질을 구성하는 고체성분과 유체성분 사이에 동위상 (in phase)의 입자 운동으로 의하여 fast wave가 지배적으로 발생된다. 반면 다공성 매질의 점성침투깊이가 다공 크기보다 작은 경우에는

고체성분과 유체성분 사이에 역위상 (out of phase)의 입자 운동으로 인하여 slow wave가 지배적으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 물의 점성도 ( $\eta_f = 0.0001 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ), 밀도 ( $\rho_f = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), 및 주파수 ( $f = 1 \text{ MHz}$ )를 고려할 때 점성침투깊이는 약  $0.18 \mu\text{m}$ 로서 표 1과 같이 본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼의 최소 다공 크기인  $160 \mu\text{m}$ 보다 매우 작은 값을 갖는 경우이다. 그러므로 그림 6에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼에서는 fast wave에 비하여 매우 큰 진폭을 갖는 slow wave가 현저하게 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 구리폼 ( $1466\text{--}1484 \text{ m}/\text{s}$ ) 및 니켈폼 ( $1426\text{--}1467 \text{ m}/\text{s}$ )의 군속도는 Biot 이론과 일치하게 물의 음속 ( $1486 \text{ m}/\text{s} @ 21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )보다 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 실제로 fast wave 및 slow wave는 생체 외 (in vitro) 조건에서 물로 포화된 해면질골 샘플에서도 쉽게 관찰되는 것으로 알려져 있다 [14–16].

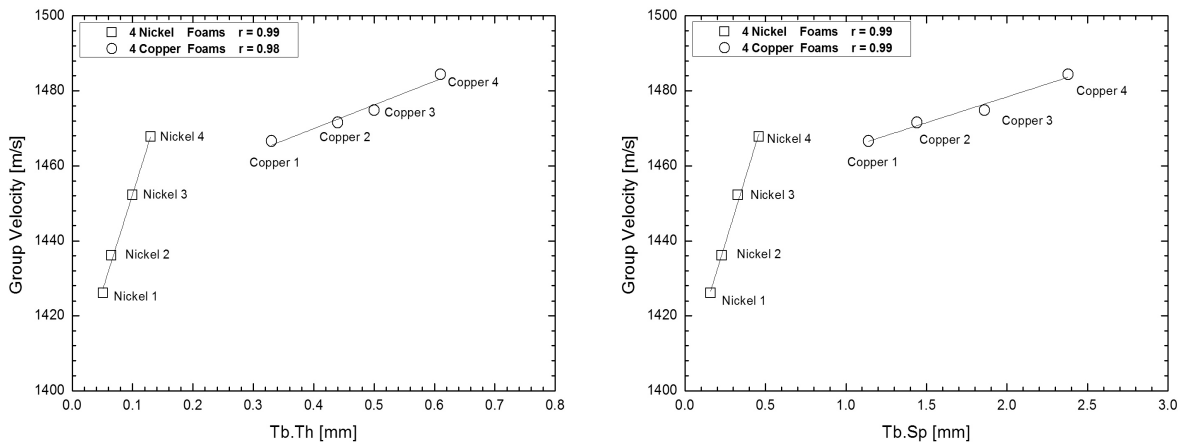


그림 7. 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대하여 군속도와 Tb.Th 및 Tb.Sp 사이의 상관관계  
 Fig. 7. Correlations of group velocity with Tb.Th and Tb.Sp for the 8 copper and nickel foams used in the present study.

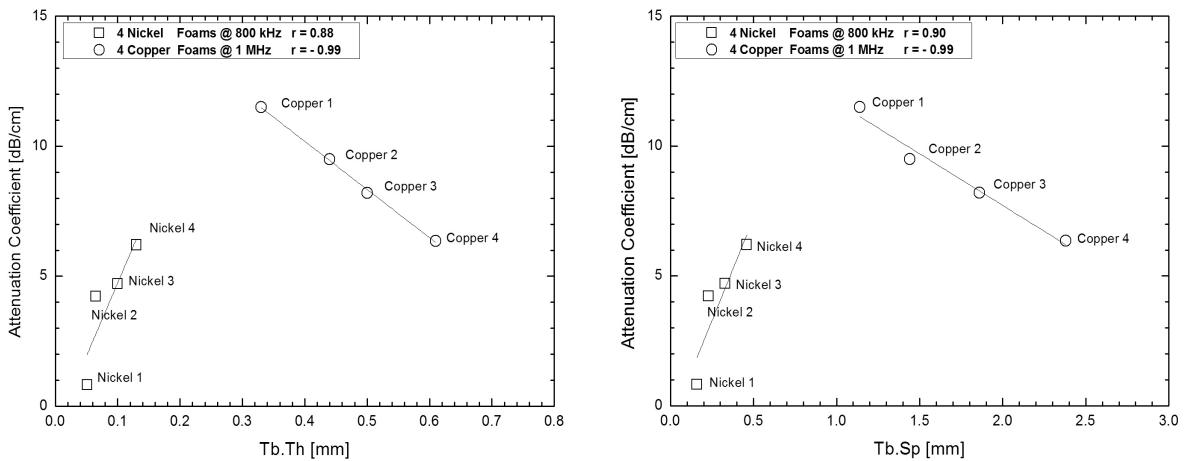


그림 8. 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대하여 감쇠계수와 Tb.Th 및 Tb.Sp 사이의 상관관계  
 Fig. 8. Correlations of attenuation coefficient with Tb.Th and Tb.Sp for the 8 copper and nickel foams used in the present study.

그림 7은 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대하여 군속도와 Tb.Th 및 Tb.Sp 사이의 상관관계를 나타낸다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 구리폼 및 니켈폼의 군속도와 Tb.Th 및 Tb.Sp와 사이에 모두 높은 양의 상관관계 ( $R=0.98$  및  $R=0.99$ )가 나타났다. 여기서  $R$ 은 Pearson 상관계수를 나타낸다. 이와 같은 결과는 해면질골 샘플 또는 팬텀을 이용한 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과를 이해하는데 도움이 된다 [17-18]. 예를 들면 Chaffai 등은 사람의 종골에서 채취한 해면질골 샘플을 이용하여 0.5 MHz에서 측정된 위상속도가 Tb.Th와  $R=0.87$ 의 높은 양의 상관관계를 나타내는 것을 발견하였다 [17]. 또한 Wear는 나일론 줄을 높이 방향으로 평행하게 배열하여 제작된 89-97%의 다공율 범위를 갖는 해면질골 팬텀을 이용하여 152  $\mu\text{m}$ 부터 305  $\mu\text{m}$ 까지 Tb.Th가 증가함에 따라 0.5 MHz에서 측정된 위상속도도 증가하는 것을 관찰하였다 [18]. 그림 7에서 주목해야 할 점은

본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼의 경우에 군속도와 Tb.Sp 사이에 양의 상관관계가 나타난다는 것이다. 반면 사람의 종골에서 채취한 해면질골 샘플에서는 위상속도와 Tb.Sp 사이에  $R=-0.77$ 의 음의 상관관계가 나타나는 것으로 보고되었으며 [17], 나일론 줄로 제작된 해면질골 팬텀에서도 Tb.Th (150  $\mu\text{m}$ )가 일정할 때 300  $\mu\text{m}$ 부터 900  $\mu\text{m}$ 까지 Tb.Sp가 증가함에 따라 1 MHz에서 측정된 위상속도가 감소하는 것으로 나타났다 [2]. 이와 같이 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과와 상반되게 구리폼 및 니켈폼의 군속도가 Tb.Sp와 양의 상관관계를 나타내는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 이용된 구리폼 및 니켈폼에서 Tb.Sp의 변화 범위 (구리폼: 1.14-2.38 mm, 니켈폼: 0.16-0.46 mm)에 비하여 Tb.Th의 변화 범위 (구리폼: 0.33-0.61 mm, 니켈폼: 0.05-0.13 mm)가 훨씬 더 작은 것을 알 수 있다. 그러므로 구리폼 및 니켈폼의 군속도는 Tb.Sp에 비하여

Tb,Th에 더 큰 의존성을 갖는다고 할 수 있으며, 결과적으로 Tb,Th에 대한 의존성을 따라서 Tb,Sp와도 양의 상관관계를 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 실제로 Wear에 의하여 나일론 줄로 제작된 해면질골 팬텀에서도 이와 유사한 경향이 관찰되는 것으로 보고되었다 [18].

그림 8은 본 연구에서 이용된 8개의 구리폼 및 니켈폼에 대하여 감쇠계수와 Tb,Th 및 Tb,Sp 사이의 상관관계를 나타낸다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 니켈폼의 감쇠계수와 Tb,Th 및 Tb,Sp 사이에 높은 양의 상관관계 ( $R=0.88$  및  $R=0.90$ )가 나타났다. 니켈폼의 감쇠계수와 Tb,Th 사이에 양의 상관관계가 나타나는 것은 해면질골 샘플 또는 팬텀을 이용한 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과와 잘 일치한다 [17-20]. 예를 들면 사람의 종골에서 채취한 해면질골 샘플에서 0.5 MHz에서 측정된 감쇠계수와 Tb,Th 사이에  $R=0.84$ 의 양의 상관관계가 나타나는 것으로 보고되었다 [17]. 최근에 Wear는 연부조직과 유사한 매질에 나일론 필라멘트를 무작위로 삽입하여 제작된 해면질골 팬텀을 이용하여 152  $\mu\text{m}$ 부터 356  $\mu\text{m}$ 까지 Tb,Th가 증가함에 따라 감쇠계수가 증가하는 것을 관찰하였다 [19]. 또한 나일론 줄로 제작된 해면질골 팬텀에서의 감쇠는 해면질골의 해면소주를 모사하는 나일론 줄로부터 발생하는 산란에 기인한다는 것이 보고되었으며 [20], 본 연구에서 이용된 니켈폼의 경우에도 해면소주에 해당되는 금속 뼈대로부터 발생하는 산란이 감쇠의 가장 큰 원인이라고 할 수 있다. 군속도와 마찬가지로 니켈폼의 감쇠계수가 Tb,Th 및 Tb,Sp와 양의 상관관계를 나타내는 이유는 Tb,Sp에 비하여 Tb,Th에 대한 감쇠계수의 의존성이 더 크기 때문이다. 반면 니켈폼과는 상반되게 구리폼의 감쇠계수와 Tb,Th 및 Tb,Sp 사이에 높은 음의 상관관계 ( $R=-0.99$ )가 나타났다. 구리폼의 감쇠계수가 Tb,Sp와 음의 상관관계를 나타내는 것은 해면질골 샘플 또는 팬텀을 이용한 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과와 잘 일치한다 [2,17]. 예를 들면 사람의 종골에서 채취한 해면질골 샘플에서 0.5 MHz에서 측정된 감쇠계수와 Tb,Sp 사이에  $R=-0.74$ 의 음의 상관관계가 나타나는 것으로 보고되었다 [17]. 나일론 줄을 높이 방향으로 평행하게 배열하여 제작된 해면질골 팬텀에서도 Tb,Th (150  $\mu\text{m}$ )가 일정할 때 300  $\mu\text{m}$ 부터 900  $\mu\text{m}$ 까지 Tb,Sp가 증가함에 따라 1 MHz에서 측정된 감쇠계수가 감소하는 것으로 나타났다 [2]. 니켈폼 (Tb,Sp: 0.16-0.46 mm)에 비하여 더 큰 Tb,Sp를 갖는 구리폼 (Tb,Sp: 1.14-2.38 mm)의 감쇠계수가 Tb,Th와 음의 상관관계를 나타내는 이유는 Tb,Sp의 증가에 따른 산란의 감소가 감쇠에 가장 큰 영향

을 미치기 때문이다. 즉 그림 8에서 종합적으로 볼 수 있듯이 감쇠계수는 Tb,Th 및 Tb,Sp의 값에 따라서 (Tb,Th 및 Tb,Sp가 작은 영역에서는) Tb,Th 및 Tb,Sp와 양의 상관관계를 그리고 (Tb,Th 및 Tb,Sp가 큰 영역에서는) 음의 상관관계를 갖는 비선형적인 의존성을 가지며, 이와 같은 감쇠계수의 의존성은 구리폼 및 니켈폼에서 감쇠의 주요한 메커니즘이 산란에 기인하기 때문이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 해면질골에서 Tb,Th 및 Tb,Sp과 같은 대표적인 구조적 특성에 대하여 골다공증 진단을 위한 초음파 변수로서 이용되는 군속도 및 감쇠계수의 의존성을 살펴보기 위하여 해면질골 팬텀으로서 개포된 구조를 갖는 발포금속인 구리폼 및 니켈폼이 이용되었다. 수중에서 12.7 mm의 직경 및 1.0 MHz의 중심 주파수를 갖는 초음파 변환기를 이용하여 측정된 구리폼 및 니켈폼의 군속도는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 모두 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 구리폼의 감쇠계수는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 높은 음의 상관관계를 나타내는 반면에 니켈폼의 감쇠계수는 Tb,Th 및 Tb,Sp와 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 이와 같은 결과는 해면질골 샘플 또는 팬텀을 이용한 다른 연구자들에 의하여 보고된 결과를 이해하는데 도움이 된다. 향후 골다공증 환자에 대한 추가적인 임상연구를 통하여 해면질골에서 측정된 군속도 및 감쇠계수가 골밀도 뿐만 아니라 골미세구조도 예측하기에 충분한 지표라는 것이 증명된다면 골다공증 진단을 위한 QUS 기술의 신뢰도를 배가할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

1. 김덕윤, "골밀도 측정의 올바른 임상적용," *대한골다공증학회지*, 38권, 4호, 275-281쪽, 2004.
2. 이강일, "해면질골에서 위상속도 및 감쇠계수 측정에 의한 구조적 특성 평가," *한국음향학회지*, 28권, 7호, 661-667쪽, 2009.
3. 김성일, 최민주, 이강일, "뼈 모사체에서 다공률 및 구조에 대한 음속 및 감쇠계수의 변화," *한국음향학회지*, 29권, 6호, 388-394쪽, 2010.



4. 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.
5. K. Mizuno, H. Somiya, T. Kubo, M. Matsukawa, and T. Otani, "Influence of cancellous bone microstructure on two ultrasonic wave propagation in bovine femur: An in vitro study," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 5, pp. 3181–3189, 2010.
6. Wei Lin, Yi Xia, and Yi-Xian Qin, "Characterization of the trabecular bone structure using frequency modulated ultrasound pulse," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 6, pp. 4071–4077, 2009.
7. P. H. F. Nicholson, R. Muller, X. G. Cheng, P. Ruegsegger, 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.
8. 한국산업부 기술표준원, "파인세라믹스-파인세라믹스 소결체의 밀도 및 결보기 기공을 시험방법," KS L ISO 18754, pp. 1–11, 2007.
9. K. A. Wear, "Comparison of measurements of phase velocity in human calcaneus to Biot theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 5, pp. 3319–3324, 2005.
10. K. A. Wear, "Measurement of phase velocity and group velocity in human calcaneus," *Ultrasound Med Biol.*, vol. 26, no. 4, pp. 641–646, 2000.
11. 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.
12. M. A. Biot, "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, no. 2, pp. 168–178, 1956.
13. E. R. Hughes, T. G. Leighton, G. W. Petley, P. R. White, R. C. Chivers, "Estimation of critical and viscous frequencies for Biot theory in cancellous bone," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 5, pp. 365–368, 2003.
14. A. Hosokawa and T. Otani, "Ultrasonic wave propagation in bovine cancellous bone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, no. 1, pp. 558–562, 1997.
15. A. Hosokawa, "Effect of porosity distribution in the propagation direction on ultrasound wave through cancellous bone," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 57, no. 6, pp. 1320–1328, 2010.
16. K. Mizuno, M. Matukawa, T. Otani, M. Takada, I. Mano, and T. Tsujimoto, "Effects of structural anisotropy of cancellous bone on speed of ultrasonic fast waves in the bovine femur," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 7, pp. 1480–1487, 2008.
17. 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.
18. 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.
19. K. A. Wear, "Mechanisms for attenuation in cancellous bone-mimicking phantoms," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 11, pp. 2418–2424, 2008.
20. 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.

---

## 저자 약력

---

• **김 성 일 (Seong Il Kim)**

한국음향학회지 제29권 제6호 참조

• **이 강 일 (Kang Il Lee)**

한국음향학회지 제29권 제6호 참조