

< 기술논문 >

초음파 골밀도 측정에서 재현성 향상 방법에 관한 연구

신정식* · 안중환** · 김화영** · 김형준*** · 한승무†
(2004년 12월 2일 접수, 2005년 8월 3일 심사완료)

A Study on Method for Improving Reproducibility in the Ultrasonic Measurement of Bone Mineral Density

Jeong Sik Shin, Jung Hwan Ahn, Hwa Young Kim, Hyung Jun Kim and Seung Moo Han

Key Words : Ultrasound(초음파), Reproducibility(재현성), Bone Mineral Density(골밀도), Broadband Ultrasound Attenuation(광역초음파감쇠)

Abstract

It is very important to achieve a high reproducibility in the ultrasonic measurement of bone mineral density. In this study, we examined number of sampling waveform, control of temperature, diameter of region of interest as factors to improve reproducibility. We decided the optimal number of waveforms to be converted to frequency domain as period of 1. We have minimized the effects of variable temperature and constrained generation of micro bubble by keeping temperature within a range of $32 \pm 0.5^\circ\text{C}$ with a precise temperature controlling algorithm. We also found the optimal diameter of region of interest to be 13mm. In this paper, we demonstrated the improved reproducibility by controlling various factors affecting the ultrasonic measurement of bone mineral density.

1. 서론

초음파는 투과 매질의 밀도, 음향 임피던스, 탄성 계수에 따라 전파 거동의 변화가 발생하는 특성 때문에 비파괴 검사 및 의료 분야에 폭넓게 이용되고 있다. 일반적인 산업 현장의 비파괴 검사에 있어서는 재료 내부 결함의 유무 확인을 위해 주로 초음파의 전파 시간만을 측정하고 있으나 의료 분야에서는 초음파 전파 속도 및 초음파 광역 감쇠의 정량적인 분석이 필요한 경우가 많다.⁽¹⁻⁵⁾

초음파 측정 신호를 이용한 골밀도의 정량적인 분석은 인체 뼈를 통과한 초음파 신호의 전달 시간을 측정하는 방법과 주파수 영역에서 감쇠의 변

화를 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이는 초음파 신호의 주파수 영역에서의 감쇠가 골밀도 뿐만 아니라 뼈 미세구조의 상태도 잘 반영하기 때문이다.

골밀도 측정에 있어서 가장 중요한 요소는 정확성(Accuracy)과 재현성(Reproducibility)이다. 특히 높은 재현성을 구현하는 것은 측정 결과의 신뢰성을 확보하는데 있어 필수적이다.

초음파 골밀도 진단에서는 주파수 500kHz의 초음파 펄스를 사용하며 전파 매질로는 주로 물을 사용하고 있다. 음향 임피던스는 전파 매질의 종류와 온도에 영향을 받는데 특히 물의 경우는 Fig. 1에서처럼 온도 변화에 따라 큰 폭의 임피던스 변화를 나타내고 있다. 따라서 온도 변화로 인하여 초음파 신호의 변화가 크게 발생하게 되어 재현성을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.⁽⁷⁻⁹⁾ 즉, 기존의 측정 장비들이 계절에 따라 측정 값에서 오차를 갖는 것은 이러한 이유 때문이다. 이처럼 초음파 골밀도 측정에 있어서 재현성에 영향을 미치는 인자로는 초음파 신호 처리 방법, 전파 매

† 책임저자, 회원, 경희대학교 동서의료공학과
E-mail : smhan@khu.ac.kr

TEL : (031)201-2171 FAX : (031)204-6117

* 부산대학교 지능기계공학과 대학원

** 부산대학교 지능기계공학과

*** 경희대학교 동서의학대학원

질의 온도 및 온도 상승 시간에 따른 전파 매질 내부의 마이크로버블의 발생에 따른 영향, 관심영역(Region of Interest : ROI)의 위치 및 크기, 탐촉자의 성능, 피측정자의 자세 그리고 측정 장비의 안정성 등 여러 가지가 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 재현성에 영향을 미치는 요인들 중 측정 방식에 있어서 제어가 가능한 인자들을 최적화하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 파형의 주기수에 따른 재현성의 영향과 전파 매질의 온도 변화에 따른 초음파 신호의 변화, 온도 상승 변화율에 따른 마이크로버블의 발생을 억제하기 위한 온도제어 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 초음파 파라미터

정량적 초음파의 적용에 있어서 주로 이용되는 시간 영역의 초음파 파라미터는 Fig. 2 에 나타난 신호의 도달 시간(Time of Flight : TOF)의 측정으로 산출된 음속(SOS : Speed of Sound)을 이용한 방법을 많이 사용하고 있다. 이는 온도의 함수로 주어지며 식 (1)과 같이 실험식으로 나타낼 수 있다.^(11,12)

$$SOS = 1402.74 + 5.033T - 0.058T^2 + (3.316 \times 10^{-4})T^3 - (1.453 \times 10^{-6})T^4 + (3.045 \times 10^{-9})T^5 \quad (1)$$

(m/s)

이때 물의 온도 T(°C)는 경계면에서의 산란을 최대한 억제하기 위해 발의 표면온도에 가까운 32°C로 한다. 온도가 31, 32 그리고 33°C일 때의 음속값은 각각 1509.4, 1511.6 그리고 1513.8m/s 로 1°C당 약 2.2m/s 의 편차를 보이므로 온도에 따른 영향은 그렇게 크지 않다. 그런데, 골밀도 진단의 경우에는 주파수영역에서 초음파 감쇠도 함께 계산해야 하므로 주파수 영역으로 변환하였을 때 재현성을 높일 수 있는 방법이 고려되어야 한다.

재현성에 영향을 미치는 인자는 우선 전파 매질의 온도 변화와 같이 초음파의 주파수 특성에 영향을 미치는 외부 환경 요인과 시간 영역의 신호처리 방법에서 측정된 신호 전체에서 신호를 분리하는 내부 처리 문제가 있다. 정량적 분석을 통한 재현성 향상을 위해서 골밀도 진단에서는 측정된 데이터 전체를 모두 사용하지 않고 일부분만 분리해서 사용한다. 분리한 데이터는 고속 푸리에 변환을 통해서 주파수 영역으로 변환한다. Fig. 3 에 보인 바와 같이 정해진 주파수 대역에서 물과 뼈의 스펙트럼 차이를 선형 보간하여 기울기를 구하는데 이것을 광역 초음파 감쇠(BUA, Broadband Ultrasound Attenuation)라 하며 초음파 골밀도 진단

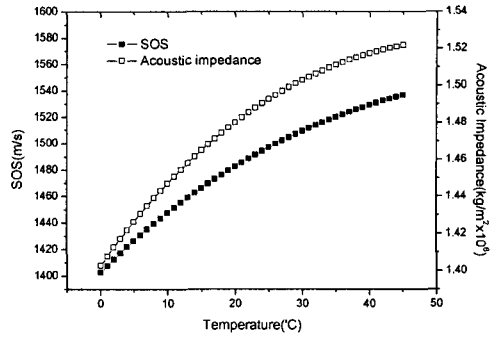


Fig. 1 Relationship between acoustic impedance and temperature in water

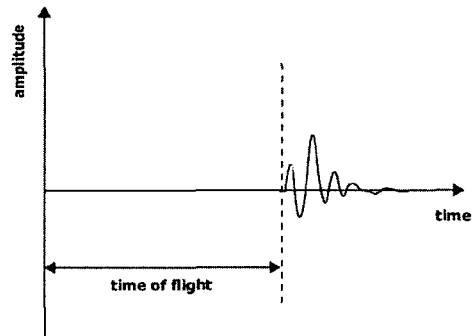


Fig. 2 Concept of SOS measurement

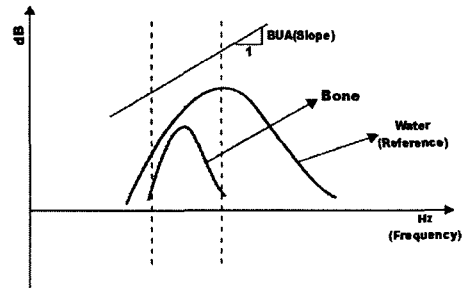


Fig. 3 Principle of broadband ultrasound attenuation

$$CV(\%) = \frac{SD}{Average\ BUA} \times 100 \quad (2)$$

SD : Standard Deviation

기의 파라미터로 가장 많이 사용되고 있다. BUA 의 단위는 dB/MHz 이다.⁽¹³⁾

일반적으로 재현성은 CV(Coefficient Variable)값으로 평가하며 이는 식 (2)로 정의된다.

2.2 초음파 신호 파형 추출

Fig. 4 는 초음파 측정 장치에서 물을 매질로 하여 측정된 초음파 신호의 시간 영역 파형을 나

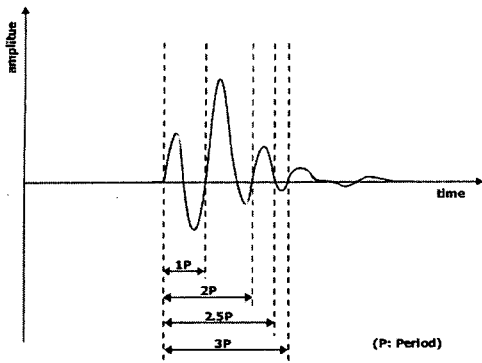


Fig. 4 Ultrasound signal extraction

타내고 있다. 초음파 신호는 원신호에 이동평균법에 의한 저역통과 필터, 오프셋조정, 글리치(glitch)제거 등의 전처리 과정을 거친 것이다.

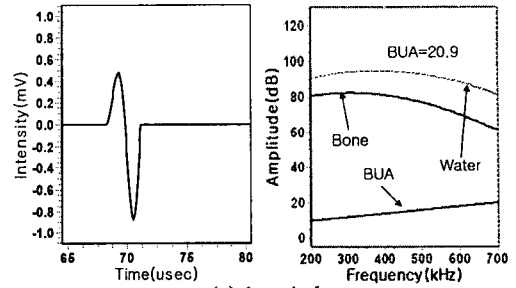
파형 분리는 시간 축 상에서 이루어지며 1 주기 분리는 첫번째 꼭지점 앞쪽의 영점 교차점(zero crossing point)을 분리 시작점으로 하여 뒤쪽으로 진행하면서 다음번 영점 교차점을 분리 종료점으로 한다. 1.5 주기, 2 주기 그리고 2.5 주기에서는 기준점 앞쪽은 1 주기와 동일하게 하고 뒤쪽으로는 1 회 영점 교차할 때마다 0.5 주기가 증가하는 것으로 해서 신호를 분리한다. Fig. 5 는 동일한 초음파 신호를 1 주기, 1.5 주기, 2 주기 그리고 2.5 주기로 각각 분리해서 고속 푸리에 변환을 실시한 결과이다. 여기서 초음파 광역감쇠값은 분리해내는 파형의 주기수에 영향을 받으며 주기수가 늘어날수록 광역감쇠값은 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 주기수가 늘어날수록 각 주기의 꼭지점을 잇는 윤곽선의 시간축상에서 폭이 늘어나게 되어 주파수영역에서 보면 저주파 성분이 증가한 것으로 나타나기 때문이다.

Fig. 5 에서는 중심 주파수가 500kHz 에서 약간 벗어나 450kHz 정도에 위치하는 것을 볼 수 있는데 이것은 탐촉자 자체의 오차가 약 5%정도 있으며 전처리 과정에서 저역통과 필터를 거치기 때문이다

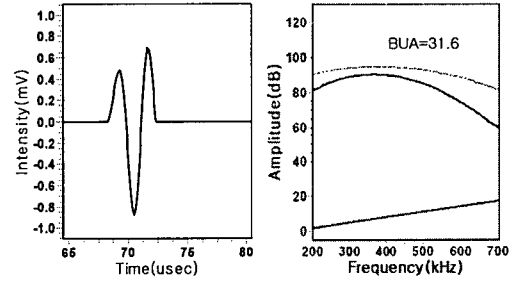
2.3 초음파 파라미터의 온도특성 분석

Fig. 6 은 27℃, 29℃ 그리고 32℃ 온도에서 물에서의 초음파 신호와 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 전파 매질인 물의 온도가 27℃에서 32℃로 상승함에 따라 전달시간은 작아지며 진폭은 커지게 된다. 이때 시간영역에서 29℃의 최대 진폭이 32℃보다 다소 큰 것처럼 보이나 이는 A/D 변환기의 양자화 오차로 및 전기적인 오차에 의한 것으로 생각되며 파형전체를 보면 32℃쪽이 대체로 진폭이 큰 것을 알 수 있다.

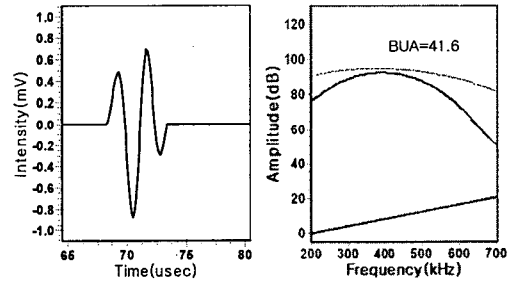
주파수 스펙트럼의 진폭은 상승하며 대역폭은 좁아짐을 알 수 있는데 이것은 온도 상승에 따라 음향 임피던스가 감소하기 때문이다. Fig. 7 은 폴



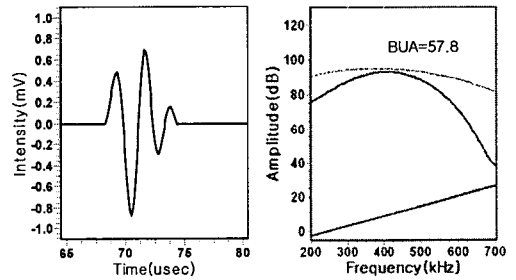
(a) 1 period



(b) 1.5 period



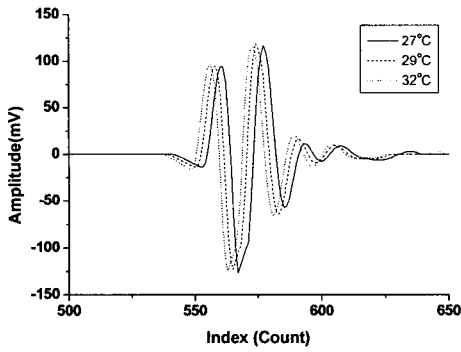
(c) 2 period



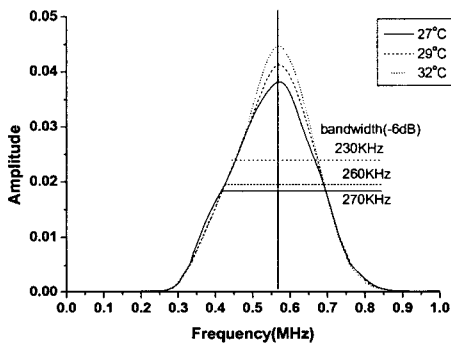
(d) 2.5 period

Fig. 5 Description of four different signal extraction methods

리에틸렌(PE) 시편에 대해서 27℃와 32℃에서 측정된 초음파 신호와 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 물을 통과하여 얻어진 결과와 같이 온도 상승에 따라 전달시간은 감소하고, 주파수 스펙트럼의 진폭은 상승하며, 대역폭은 좁아짐을 알 수 있다.



(a) Time domain



(b) Frequency domain

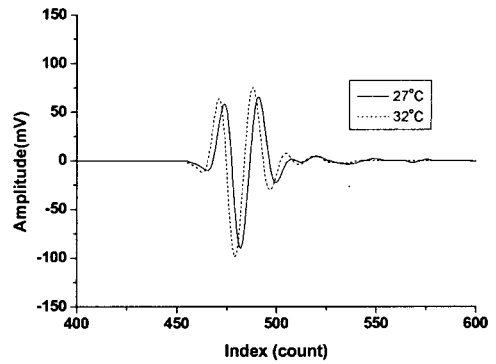
Fig. 6 Signal variation at different water temperatures

2.4 온도제어 알고리즘

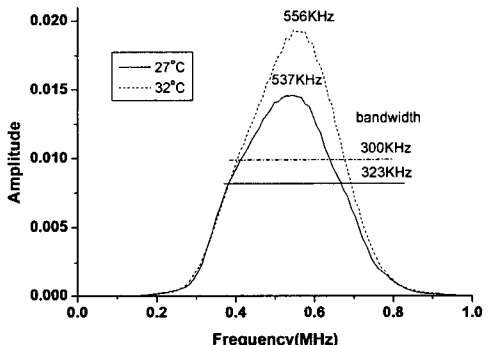
마이크로 버블은 물속의 용존 성분이 수온의 상승에 따라 기화할 때 나타나며 이때 수온 상승 속도가 지나치게 빠르면 마이크로 버블이 탐촉자의 표면이나 측정부의 내벽에 부착되어 초음파 신호의 진행을 방해한다. 따라서 측정을 정상적으로 수행하여 재현성을 향상시키기 위해서는 적절한 속도로 온도를 제어하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 초음파 전파 매질인 물이 담기는 수조의 온도제어는 수조 하단에 장착된 평판형 실리콘 히터에 220V 교류를 0.1sec의 고정된 시간만큼 도통시킴으로써 가열하며 그 주기를 바꿈으로써 온도를 제어하는 방식을 채택하고 있다.

10°C 내외의 차가운 물을 급속히 가열하면 마이크로 버블이 발생하기 쉬운 조건이 된다. 본 논문에서는 마이크로 버블의 발생을 억제하면서도 가열시간을 단축하고 정밀한 온도제어를 위한 온도 제어 알고리즘을 Fig. 8에 제시하고 있다. 여기서 T_{target} 과 T_{range} 는 목표온도와 오차범위이다. 급수 직후에는 물의 상태가 불안정하므로 시간지연을 주고 있으며 측정 온도와 목표 온도의 차이에 따라 펄스 인가시간의 주기를 4 종류로 가져가도록 하여 마이크로 버블의 발생을 억제하고 있다. 또한 최근 50초간의 온도변화 추이가 0.5°C 이하이며



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 7 Signal variation at different PE specimen temperatures

현재의 온도가 목표 온도보다 낮을 때는 1분간 펄스를 추가로 인가하여 가열 시간을 단축하도록 하고 있다.

2.5 관심영역의 위치 및 크기

골밀도 진단값은 관심영역에서 구한 측정값의 평균값으로 구한다. 종골에서 관심영역은 초음파 입사면의 표면이 비교적 요철이 심하지 않은 평평한 영역이다. 관심영역 주변은 보통 굴곡이 심하고 입사면도 경사져있는 경우가 많다. 따라서 관심영역의 직경이 지나치게 크면 요철 부위가 골밀도 계산에 포함되어 정확한 결과를 기대할 수 없으며 재현성도 나빠질 수 있다. 반대로 지나치게 작은 경우는 관심영역의 위치에 미세한 오차가 발생했을 때 골밀도의 진단값이 영향을 받기 쉬워 재현성을 악화시킬 수 있다. 따라서 정확성과 재현성을 확보할 수 있는 관심영역의 적절한 직경을 결정하는 것이 필요하다.

3. 실험

본 연구에서 사용한 초음파 골밀도 측정 시스템(OsteoImagerPLUS, BMTech21, Korea)의 도식도가

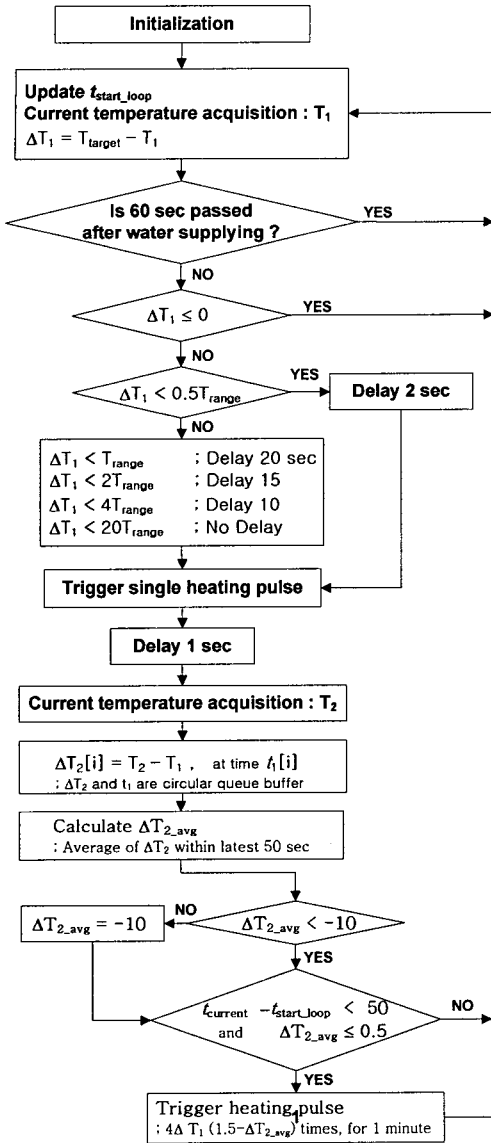


Fig.8 Flowchart of temperature control algorithm

Fig. 9 에 나타나 있다. 초음파 시스템은 크게 스캐너와 컴퓨터 시스템으로 구성되어 있다. 스캐너는 1 쌍의 수침식 초음파 탐촉자가 중심축이 일치된 채 110mm 의 거리를 두고 서로 마주보고 있으며, 그 사이에 발뿌꿈치를 일정한 자세로 놓을 수 있도록 설계된 발판이 있다. 발판은 얇은 플라스틱 판으로 수조와 분리되어 있으며 밸브와 펌프를 통해 발판 내부로 물을 공급하고 배수할 수 있도록 되어 있다.

사용된 초음파 탐촉자는 수침식의 유초점형으로 중심 주파수가 0.5MHz, 초점거리는 31.75mm 이며 진동소자의 직경은 25.4mm 이다.

Fig. 10 은 실험에 사용한 초음파 펄서/리시버

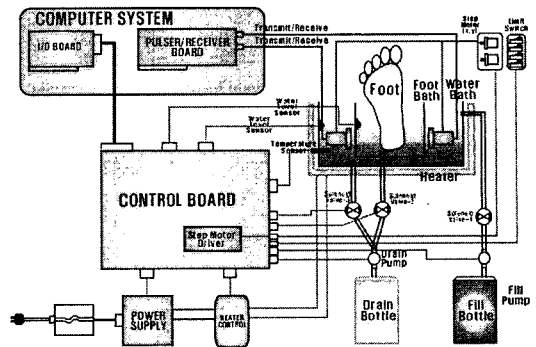


Fig. 9 Schematic diagram of ultrasonic measurement

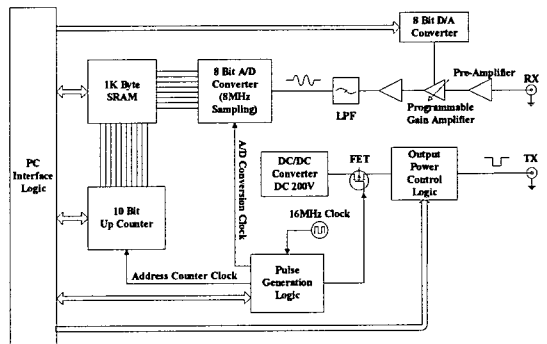


Fig. 10 Block diagram of ultrasonic pulser/receiver board

보드로서 초음파 펄스 발생부, 초음파 수신부, 고속 A/D 변환기, 메모리, PC 인터페이스 로직회로 등이 탑재되어 있다. A/D 변환은 8 비트 분해능으로 샘플링 주파수는 8MHz 이며 한번에 1024 바이트의 데이터를 샘플링하여 메모리에 저장하고 PC 로 전송하는 구조로 되어 있다.

초음파의 전파 매질로는 증류수가 사용되었으며, 물의 공급 및 배수를 위하여 2 개의 기어펌프, 2 개의 솔레노이드 밸브, 광학식 수위 센서, 물의 가열을 위한 실리콘 평판 히터, 반도체 온도 감지 센서를 사용하였다.

물의 온도는 경계면에서의 산란을 최대한 억제하기 위해 발의 표면온도에 가까운 32±0.5℃의 범위로 제어하여 온도에 의한 영향은 최대한 배제하였다. 실험은 성인 남녀 7 명(남자 3 명, 여자 4 명)에 대해 각각 10 회씩 실시하였으며 측정신호를 파일로 저장하여 주기를 1 주기, 1.5 주기, 2 주기, 2.5 주기 그리고 3 주기로 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 수행하였다.

온도 변화에 따른 초음파 파라미터의 특성을 분석하기 위해 균일한 재질의 폴리에틸렌(음향 임피던스: 1.7), MC-Nylon(음향 임피던스: 2.9), 테플론(음향 임피던스: 3.0) 그리고 우레탄(음향 임피던스: 1.9) 재질의 시편과 골밀도가 정상인 사람과 골다공증 환자를 측정하였다. 그 결과를 Table 1 에

Table 1 Ultrasonic Spectral features of each specimen at different temperatures.

C.F.: Center Frequency(kHz)
 B.W.: Bandwidth -6dB(kHz)
 P.A.: Peak Amplitude
 Person 1: Normal
 Person 2: Osteopenia

27℃	C.F.	B.W.	P.A.
PE	537	323	0.0146
MC-Nylon	566	275	0.0094
Teflon	596	256	0.000217
Urethane 12t	527	313	0.0106
Urethane 46t	400	250	0.00135
Person 1	234.5	342	0.00017
Person 2	267.4	364	0.00065

(a) At 27℃

32℃	C.F.	B.W.	P.A.
PE	556	300	0.0192
MC-Nylon	566	236	0.0173
Teflon	605	215	0.000117
Urethane 12t	547	291	0.0138
Urethane 46t	400	260	0.0007
Person 1	245.2	331	0.00026
Person 2	279.5	350	0.00089

(b) At 32℃

나타내고 있다. 특히 사람을 측정할 때는 초음파의 입사에 대해 전반적으로 평평한 종골 용기 부위를 측정함으로써 종골 형상에 따른 영향을 최대한 억제한 상태에서 측정을 실시하였다.

종골의 골질 분포 영상으로부터 ROI의 직경 변화에 따른 광역감쇠값의 재현성에 대한 평가를 실시하였다. 동일한 측정데이터에 대해 관심영역의 직경에 따른 재현성을 평가하기 위해 우선 10회 반복 측정된 초음파 데이터를 매번 파일로 저장하였으며 관심영역의 직경을 5, 9, 13 그리고 17mm로 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

구해진 관심영역의 각 직경별 광역감쇠값은 연령과 비교하여 상관 관계를 분석하였다. 이를 위하여 모두 171명(20~88세)의 여성 피측정자에 대한 각각의 관심영역 직경에서 광역감쇠의 평균값과 연령과의 선형관계를 구하였다.

진폭이 감소하여 초음파 광역 감쇠가 증가하였다. 최대 주파수 스펙트럼 진폭은 온도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하였으나, 테프론 시편과 우레탄 46t 두께 시편의 경우에는 감소함을 나타내었다. 이는 테프론 시편의 경우에는 재료 내부의 구조에 의해 초음파 주파수의 변화가 일어난 결과이고, 우레탄 46t 시편의 경우에는 12t 시편에 비해 초음파가 전파하는 물의 거리가 상대적으로 줄어든 것과 재료 내부의 구조가 복합적으로 작용

Table 2 Coefficients of variation(CV) in the measurement of BUA with different periods

person s	periods				
	1	1.5	2	2.5	3
A	0.96	4.47	4.88	4.88	4.40
B	0.83	3.22	1.72	2.78	3.46
C	0.43	5.02	5.62	5.17	6.47
D	0.87	0.75	0.95	2.37	2.91
E	0.72	4.00	4.22	2.20	2.55
F	0.69	1.10	1.38	2.14	2.51
G	0.96	1.38	1.72	1.74	1.46
H	0.88	3.28	3.63	3.81	4.03
I	0.74	1.79	2.45	2.90	3.22
J	0.81	2.16	3.03	2.94	3.46
K	0.93	4.35	4.69	5.12	5.75
L	0.83	3.16	3.36	3.78	3.98
M	0.73	1.63	2.79	2.85	4.04
N	0.91	4.52	4.81	5.07	5.03
O	0.84	3.05	3.24	3.33	3.86
P	0.62	1.47	2.16	2.59	3.09
Q	0.73	2.83	2.96	3.08	3.65
R	0.75	2.23	2.81	3.96	4.14
S	0.83	3.24	3.52	3.81	4.06
T	0.93	4.20	4.79	5.15	5.47
Average	0.80	2.89	3.24	3.48	3.88
SD	0.13	1.28	1.30	1.11	1.18

한 결과이다.

4. 결과 및 고찰

Table.2에 20명에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. CV 값이 작게 나타날수록 재현성이 우수한 것으로 1주기일 때가 재현성이 가장 우수하며 개인간 재현성의 편차도 가장 작게 나타났다. 주기수가 늘어날수록 대체로 재현성이 떨어지며 개인간 편차도 커지는 것을 알 수 있었다. 분리 주기를 달리 했을 때 재현성의 변동폭이 개인차를 보이는 것을 알 수 있었다. 이때 피측정자 C의 경우 1주기 때와 1.5주기에서 재현성이 역전되었으며 C, J는 1.5주기와 2주기 사이에서 재현성이 역전되는 것을 볼 수 있다. 또한 G, M은 2주기와 2.5주기에서 역전됨을 알 수 있다.

이상을 종합하여 보면 BUA의 변화에 따른 재현성은 분리되는 초음파 신호 파형의 주기수에 따라 영향을 받게 된다. 주기수가 늘어날수록 대체로 재현성이 떨어지며 재현성의 역전 빈도가 자주 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 주기수가 바뀌면 주파수 성분이 달라지고 특히, 2차 및 3차 주기의 파형이 포함되면 그 영향이 더욱 커지게 됨을 알 수 있다.

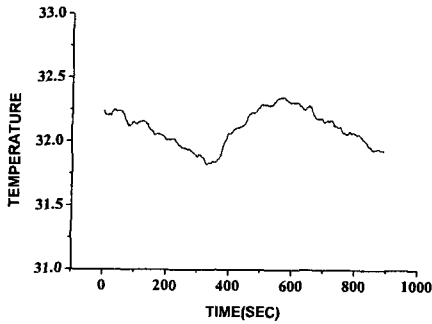


Fig.11 Temperature change when algorithm applied

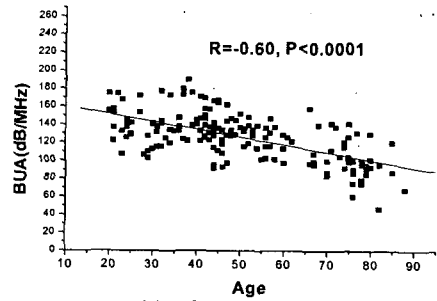


(a)Algorithm not applied (b) Algorithm applied

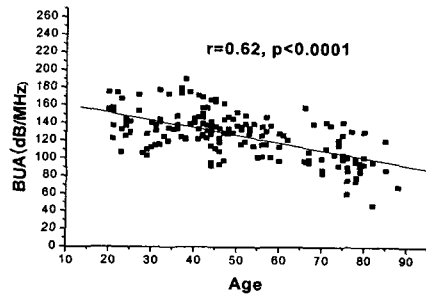
Fig. 12 Elimination of microbubble using temperature control algorithm

Fig. 11 은 2.3 절에서 제시한 온도제어 알고리즘의 수행 결과를 나타내고, 온도가 $32 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 제어되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 12 는 온도제어 알고리즘의 마이크로 버블의 발생 억제를 나타내고 있다. Fig. 12(a)는 온도제어 알고리즘을 사용하지 않았을 경우 초음파 탐촉자의 표면과 그 주위에 많은 마이크로 버블이 부착되어 있는 상태를 보여주고 있다. 그러나 온도제어 알고리즘을 사용한 Fig. 12(b)의 경우는 탐촉자의 표면이 깨끗하게 나타나 알고리즘이 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

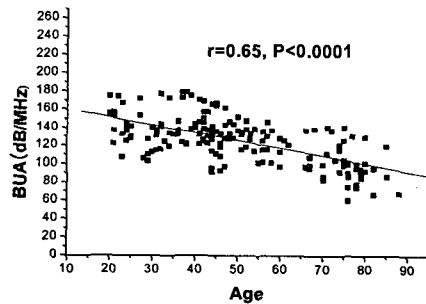
시편의 재질에 따른 측정 결과를 보면 동일 온도에서 중심 주파수는 비중이 가장 큰 테프론 시편에서 음향 임피던스가 가장 크게 나왔으며, 대역폭 및 최대 주파수 스펙트럼 진폭은 비중과 음향 임피던스가 가장 작은 폴리에틸렌 시편에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 비중 및 음향 임피던스가 작은 재질의 물질이 중심주파수의 저주파수 대역으로의 천이 및 최대 주파수 스펙트럼 진폭의 감소로 인해 초음파 광역 감쇠값이 증가함을 나타내는 결과이다. 동일한 재질의 두께가 다른 우레탄 시편에 대한 결과에서는 두께가 증가할수록, 중심 주파수가 저주파수 대역으로 천이되고, 주파수 대역폭이 감소하며, 최대 주파수 스펙트럼 진폭이 감소하여 초음파 광역 감쇠가 증가하였다. 최대 주파수 스펙트럼 진폭은 온도가



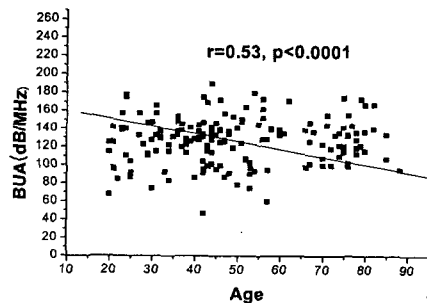
(a) ROI diameter = 5mm



(b) ROI diameter = 9mm



(c) ROI diameter = 13mm



(d) ROI diameter = 17mm

Fig.13 Relationship between BUA and age using different ROI diameters

증가함에 따라 전반적으로 증가하였으나, 테프론 시편과 우레탄 46t 두께 시편의 경우에는 감소함을 나타내었다. 이는 테프론 시편의 경우에는 재료 내부의 구조에 의해 초음파 주파수의 변화가 일어난 결과이고, 우레탄 46t 시편의 경우에는 12t

Table 3 Coefficient of variation with different ROI diameters

Diameter	Person (10 times)				
	P1	P2	P3	P4	P5
5mm	2.18	1.72	1.63	2.07	0.93
9mm	1.37	1.51	1.86	1.23	0.49
13mm	1.42	1.36	1.57	2.18	1.52
17mm	1.55	1.88	1.73	2.37	1.57

시편에 비해 초음파가 전파하는 물의 거리가 상대적으로 줄어든 것과 재료 내부의 구조가 복합적으로 작용한 결과이다.

모든 시편 및 사람에 대해 온도의 증가에 따라 중심 주파수는 증가하고, 대역폭은 좁아지며 주파수 스펙트럼의 최대 진폭은 증가하게 되어 초음파 광역 감쇠의 값이 감소하게 됨을 확인 할 수 있었다.

Table 3 은 5 명의 피측정자(평균나이±SD : 28.3±4.6 세)의 종골 영상에서 관심영역의 직경에 따른 재현성을 나타내고 있다. 9mm 일 때가 재현성이 가장 좋은 것으로 나타났으며 13mm 일 때도 비교적 양호한 재현성을 보여주었다.

171 명의 (20~88 세)의 여성 피측정자에 대한 각각의 관심영역 직경에서 광역감쇠의 평균값과 연령과의 상관 관계를 Fig. 13 에 나타내었다. 관심영역의 직경이 13mm 일 때가 연령에 대한 선형성이 가장 높게 나타났다.

이와 같이 본 연구를 통하여 높은 재현성을 얻기 위한 방법으로는 파형의 주기수 선택, 온도 제어를 통한 마이크로 버블의 발생 억제와 일정 온도 유지, 최적의 관심영역 직경 선정 등이 중요함을 알 수 있었다. 실험 및 시뮬레이션 결과 파형의 주기수는 1 주기 때가 가장 좋았으며, 온도를 32±0.5°C 이내로 제어할 때 마이크로 버블의 발생이 현저하게 감소하였다. 또한 관심영역의 직경은 13mm 일 때가 재현성이 가장 좋았으며 연령과의 상관관계도 높게 나타났다.

초음파 골밀도 측정시 본 연구에서 제시한 방법들을 적용함으로써 재현성을 크게 향상시켜 정확한 골다공증의 진단이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

초음파 골밀도 측정의 재현성을 향상시키기 위한 초음파 신호 분리, 온도 제어, 최적의 관심영역 선택 등 다양한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 파형을 1 주기로 분리하는 것이 재현성에 가장 적합한 것으로 나타났다.
- (2) 온도 제어 알고리즘으로 마이크로 버블의 발생을 크게 감소 시켰다.

(3) 관심 영역의 직경이 13mm 일 때가 재현성이 좋았으며 골밀도와 연령과의 상관관계도 높게 나타났다.

(4) 최적의 측정 조건들을 구비하여 보다 향상된 재현성을 얻고, 이를 통하여 보다 정확한 골다공증의 진단이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Josef Krautkramer, Herbert Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials," 4th Fully Revised Edition.
- (2) Langton, Palmer, Porter, 1984, "The Measurement of Broadband Ultrasonic Attenuation in Cancellous Bone," *Eng in Med*, Vol. 13, No. 2, 89-91.
- (3) Han, 1997, "Ultrasound and Quantitative Computed Tomography in Assessing Trabecular Bone Strength," *Ultrasound International* 3:188-194.
- (4) Kitamura, Nishikouri, Ueha, Kimura and Ohtomo, 1998, "Estimation of Trabecular Bone Axis for Characterization of Cancellous Bone Using Scattered Ultrasonic Wave," *Jpn J Appl Phys* 37:3082-3087.
- (5) Kumer, 1996, "A New Approach of Ultrasonic Attenuation Measurement for NDE and Material Characterization," *Proceedings of the 14th World Conference on NDT.*, Vol. 4, 2263-2266.
- (6) Iki, Kajita, Mitamura, Nishino, Yamagami, Nagahama, 1999, "Precision of Quantitative Ultrasound Measurement of the Heel Bone and Effects of Ambient Temperature on the Parameters," *Osteoporosis International*, Vol. 10, 462-467.
- (7) Laugier, Fournier, Berger, 1996, "Ultrasound Parametric Imaging of the Calcaneus: In Vivo Results with a New Device," *Calcif Tissue Int* 58:326-331.
- (8) Chopard, Berger, Roux, Laugier, 1999, "Ultrasound Measurement on the Calcaneus: Influence of Immersion Time and Rotation of Foot," *Osteoporosis Int*. 9:318-326.
- (9) Cheng, Suominen, et. al., 1999, "Comparison of Ultrasound and Bone Mineral Density Assessment of the Calcaneus with Different Regions of Interest in Healthy Early Menopausal Women," *J Clin Densitom*, Vol. 2(2), pp.117-126.
- (10) Brooke, Wavell, Jones, Pye, 1995, "Ultrasound and Dual X-Ray Absorptiometry Measurement of the Calcaneus: Influence of Region of Interest Location," *Calcif Tissue Int*, Vol. 57(1), pp. 20-24.
- (11) Lowet and Van der Perre, 1996, "Ultrasound Velocity Measurement in Long Bones: Measurement Method and Simulation of Ultrasound Wave Propagation," *J. Biomechanics*, Vol. 29(10), pp. 1255-1262.
- (12) Han, Medige, Faran, Feng, and Ziv, 1997, "Prediction of Mechanical Properties of Trabecular Bone by Ultrasound Velocity and Attenuation: Effect of Strain Rate," *Orthopaedic Transactions, Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 20(3).
- (13) Serpe and Rho, 1996, "The Nonlinear Transition Period of Broadband Ultrasonic Attenuation as Bone Density Varies," *J. Biomechanics*, Vol. 29(7), pp. 963-966.