

## 어린이 성장판 영상화를 위한 초음파와 X-선 방식의 비교 평가

김상후, 김형준, 한은옥<sup>1</sup>, 한승무

경희대학교 동서의학대학원 의료공학 전공  
<sup>1</sup>이화여자대학교 보건교육학과  
(2004년 11월 8일 접수, 2004년 12월 10일 채택)

## Comparison Between Ultrasonic and X-ray Methods for Imaging the Children's Growth Plate

Sang Hoo Kim, Hyung Jun Kim, Eun Ok Han<sup>1</sup>, Seung Moo Han

Department of Medical Engineering, Graduate School of East-West  
Medical Science, Kyung Hee University  
Department of Health Education,

<sup>1</sup>The Graduate School of Ewha Womans University  
(Received November 8, 2004. Accepted December 10, 2004)

**요약** : 본 연구에서는 진단 방법의 정확성이 아직까지 구체적으로 규명되지 않고 있는 어린이의 성장 발육을 체계적이고 과학적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 시도하였다. 현재 많이 이용되고 있는 성장 진단 방법은 X-ray 영상을 이용한 각 관절 부위의 성장판의 개폐 분석이다. 그러나 X-ray 방식은 성장 진단에서 요구되는 주기적이고 반복적인 측정을 하지 못함과 동시에 방사선 노출이라는 단점을 가지고 있다. 따라서 인체에 무해한 초음파 영상을 이용한 성장판 개폐 분석 대체 가능성을 평가하기 위해 종골의 초음파 광역 감쇄 영상을 이용한 프로파일 분석 및 성장판 영상 분석 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서는 7세 ~ 16세의 어린이 269명에 대해서 X-ray를 이용하여 무릎, 손가락, 종골에서의 성장판 영상을 얻었다. 또한 초음파 방식을 이용하여 종골의 성장판 영상을 얻었다. 각 관절에서의 성장판 개폐 유무 시기는 각 개인별로 측정 방법에 따라 조금의 차이는 있으나 전반적으로 일치하였다. 또한, X-ray방식과 초음파 방식에 의한 성장판 영상을 비교한 결과 상호 높은 연관성을 나타내었다. 이와 같이 성장판을 정확하게 측정하기 위해 도입된 초음파 프로파일 분석 알고리즘은 기존의 X-ray 영상 방식에 의한 성장판의 측정을 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** : The purpose of this study was to suggest a systematic and scientific method for measurement of children's growth development, in which the accuracy of existing diagnosis method has not been concretely examined yet. The most popular method for diagnosis of children's growth is to analyze the opening degree of growth plate in each joint by X-ray image. However, X-ray method has some disadvantages; it is impossible to measure the diagnosis of growth periodically and repeatedly due to the radiation problem. Hence, this study introduced a profile analysis and the algorithm of analyzing the image of growth plate with the BUA(Broadband Ultrasound Attenuation) of calcaneus, to verify the possibility of alternative ultrasonic method harmless to human body. We obtained the images of growth plate in proximal tibiae, phalanges, and calcanei of 269 children (7 ~ 16 years old) with X-ray. And the image of growth plate in calcanei was also obtained from those children with ultrasound. The results showed that the time of the opening degree of growth plate in each joint was almost consistent between X-ray and ultrasonic images. Also, the images of growth plate measured by X-ray and ultrasound showed the high correlation. Therefore, it is expected that the algorithm of ultrasonic profile analysis introduced in this study can replace the existing X-ray method to measure the growth plate correctly.

**Key words** : Ultrasound, Growth plate, X-ray, Calcaneus, Imaging method

### INTRODUCTION

청소년기의 성장에 영향을 미치는 인자는 주로 유전적인 요인과 환경적인 요인으로 나누어진다. 유전적인 요인

은 성장에 있어 약 30% 정도의 영향을 미치며, 나머지는 대부분 환경적인 요인들이다<sup>[1]</sup>. 환경적인 요인 중에서 성장에 가장 직접적인 영향을 미치는 것으로는 성장호르몬의 분비와 이에 따른 뼈의 길이 방향으로의 신장이 있다. 성장의 멈춘 뼈의 길이 방향으로의 신장에 반드시 필요한 성장판의 존재가 없어짐(성장판의 닫힘)을 의미한다. 이러한 성장 정지가 이루어지는 시기는 사춘기의 제2차 성장이 시작되는 때로서, 성장호르몬이 성장호르몬의 분비를 감소시켜 각 관절의 연골부위에 있는 성장판의 융합을 일으켜 결

통신저자 : 한승무, (449-701) 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1  
경희대학교 동서의학대학원 의료공학 전공  
Tel. 031-201-2171, Fax. 031-204-6117  
E-mail. smhan@khu.ac.kr

과적으로 성장판이 닫히게 된다. 성장 정지에 중요한 영향을 미치는 성호르몬은 성장호르몬과의 길항 작용을 통해 성호르몬의 증가가 성장호르몬의 감소를 가져와 결국 성장이 정지되는 것이다.

성장의 정지를 판단하기 위해서 성장판의 개폐, 즉 뼈의 길이 방향 신장을 예측하기 위한 여러 가지 방법들이 제시되어져 왔다<sup>[2]</sup>. 대표적인 방법이 X-ray 영상에 의한 골단부 성장판의 개폐 분석이다. 그러나 X-ray의 경우 인체에 유해한 방사선의 노출로 인해 성장 진단에 요구되는 주기적이고 반복적인 측정이 어렵다<sup>[3][4]</sup>. 다른 방법은 골연령의 평가를 통한 성장 진단이 있다. 이는 각 장골의 닫히는 시기에 따른 평가 방법, 손목의 화골핵수의 변화에 따른 평가 방법, 골밀도의 측정에 의한 평가 방법 등으로 나뉘어진다<sup>[5-7]</sup>. 최근에는 X-ray 영상에 의한 성장판의 개폐 유무 분석과 골밀도 측정에 의한 골연령의 평가를 조합하여 진단하는 경우도 제시되고 있다<sup>[8][9]</sup>. 주기적이고 반복적인 측정을 필요로 하는 성장 진단의 특성상 가장 최근에는 인체에 무해한 초음파 방식에 의한 골밀도 측정을 통하여 골연령을 평가하는 방법이 제시되고 있다<sup>[10-12]</sup>.

본 연구에서는 새로운 성장 진단 방법의 일환으로 골질 영상을 제공할 수 있는 초음파를 이용하여 종골에서의 성장판 영상화 방법을 제시하고 이를 검증하였다.

METHODS

성장판 개폐 유무의 분석을 위해 7세 ~ 16세 어린이 269명에 대한 종골의 초음파 골질 파라미터 및 초음파 영상을 얻었다. 종골은 대부분 연골(Cancellous Bone)로 구성되어 있으며 초음파 측정이 용이하다. 기존의 초음파 골밀도 진단 방식은 특정 한 점에서만 측정을 하기 때문에 측정 위치에 따른 오차가 발생하며, 각 개인별 종골의 해부학적 형상을 반영하여 일관성 있게 측정하기 어렵다. 본 연구에서는 종골의 골질 분포를 초음파로 영상화하였다. 초음파 골질 분포는 그림 1에서와 같이 종골의 일정 영역에 대해 계단식의 스캐닝에 의해 얻어졌다. 스캐닝 영역은 60×60 mm 이고, 구해진 각축으로의 분해능은 1 mm 이며, 측정 데이터 수는 3600개이다. 측정된 초음파 광역 감쇠(Broadband Ultrasound Attenuation : BUA) 값은 Pixel 값이 정해진 흑백의 칼라 바(8비트 양자화)에 의해 색상으로 변환되며(영역: BUA = 30dB/MHz ~ 150dB/MHz), 이를 이용하여 영상을 재구성하였다.

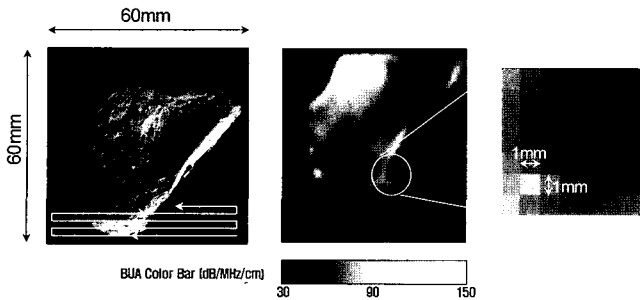


그림 1. BUA 영상의 재구성 원리  
Fig. 1. Principle of BUA image reconstruction

초음파 영상에서 성장판 크기를 자동으로 검출하기 위하여 새로운 영상 분석 알고리즘을 도입하였다. 이 방식은 BUA값이 성장판 근처에서 급격한 변화가 발생하는 것을 이용한 것이다. 우선 골질 영상에서 이진화 및 침식을 반복 적용하여 종골의 외곽 형상을 추출하였다. 그리고 최소 자승법을 적용하여 종골을 정의하는 3개의 외곽 직선을 얻고 종골의 중심 축을 정의하였다. 그림 2는 초음파 영상을 분석하기 위하여 형태가 다른 임의의 초음파 종골 영상들에 대한 외곽 형상의 추출 및 종골의 중심축을 정의하는 과정을 나타내고 있다.

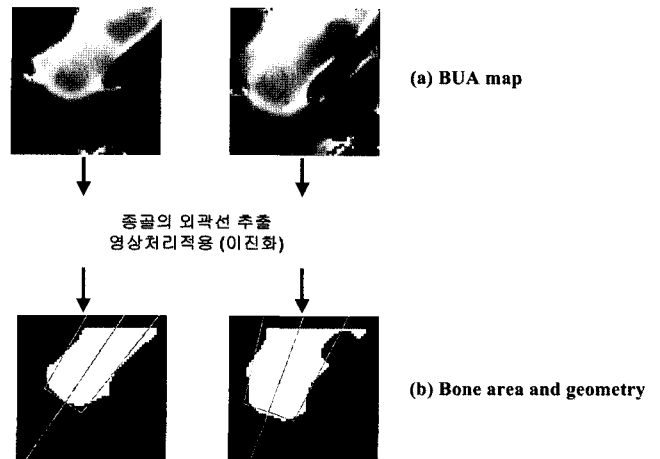


그림 2. 초음파 영상 분석 (종골의 외곽 추출 및 중심축 정의)  
Fig. 2. Ultrasonic image analysis (detection of the outer shape and definition of a central axis of calcaneus)

이와 같이 정의된 종골의 외곽과 중심 축과의 관계를 이용하여 중심 축에 수직인 방향으로 측정 관심 영역 (Region Of Interest : ROI)의 직경만큼의 선분을 그었다. ROI의 선택은 종골 용기 근처에서 BUA의 극부적 최소점을 선정하였으며, 종골 용기를 선택한 이유는 초음파 입사면에 대해 전반적으로 편평한(Flat)한 면이 감쇠가 작게 일어나고, 이 부위에서 골밀도를 계산할 때 정확한 값을 얻을 수 있기 때문이다.

각 선분에서 얻어진 초음파 광역 감쇠 값의 평균을 중심 축 거리에 대해 나타낸 프로파일을 작성하여 성장판과의 관계에 대해 분석하였다. 초음파 파라미터의 분석에 의한 성장판 검출 알고리즘은 발뒤꿈치 일정영역에 대한 스캐닝을 통해 얻어진 초음파 파라미터로부터 ROI 정보, 윤곽선 정보, 발 기울기 정보가 추출된다. 그 다음 뼈 기울기에 수직 방향으로 ROI 중심점에서부터 영상의 바닥까지 1 mm 간격으로 BUA의 평균값의 프로파일을 구한다. 패턴 검색으로 성장판 근처 영역의 프로파일을 추출하고 추출된 프로파일에서 2개의 극대값을 구한다. 여기서 두 개의 극대값을 연결한 직선과 그 사이의 프로파일 간의 면적을 구한다. 이러한 성장판의 검출 원리를 토대로 그림 3은 종골 영상에서 성장판 분석을 위하여 구성된 프로파일 분석 소프트웨어 화면이다. 소프트웨어 화면 아래에 도시된 초음파 파라미터의 프로파일에서 나타낸 것과 같이 성장판 부근에서 나타나는 1개의 극소점과 2개의 극대점을 이용하여 성장판의 위치 검출과 크기를 분석하였다. 그리고 그림 3

은 각각의 측정된 초음파 영상과 이런 측정 영상을 재구성하기 위하여 초음파 파라미터의 변화를 동시에 나타내고 있다. 이렇게 해서 구성되어진 프로파일 분석 소프트웨어는 측정을 통해 구해진 BMP Format의 각 개인 측정 영상파일을 열고 초음파 광역 감쇠 영상과 프로파일 그래프를 동시에 도시한다. 프로파일 값은 성장판 근처에서 2개의 극대값을 갖게 되는데 이를 이용하여 성장판 사이의 거리를 정의하였다. 성장판의 측정 거리의 단위는 mm 이다. 이렇게 해서 구해진 성장판 영상은 열린 경우, 닫혀 가는 경우, 닫힌 경우로 분류하였다.

본 연구에서는 또한 새로운 초음파 성장판 영상 분석 방식을 검증하기 위하여 동일 어린이에 대한 경골, 지골, 종골의 X-ray 영상을 얻어서 초음파 영상과 비교하였다. 이는 각 관절간의 성장판 개폐의 상관성을 분석하고 종골에 대한 X-ray 영상과 초음파 영상의 비교 분석을 위한 것이다. 또한 어린이 성장 진단에 가장 일반적인 무릎의 X-ray를 이용한 성장판 진단과 종골의 초음파 진단의 상관성을 검증하기 위함이다. X-ray 시스템은 FCF5000(Fuji, Japan)과 KXO-30R(Toshiba, Japan)을 사용하였다.

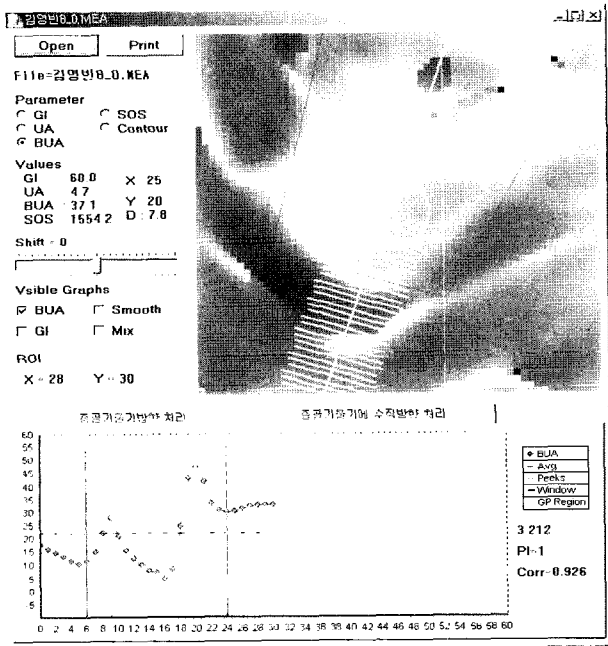


그림 3. 초음파 영상에서 성장판 검출 알고리즘(Profile)  
Fig. 3. Algorithm for detecting the growth plate with ultrasonic images (Profile)

### RESULTS AND DISCUSSION

그림 4는 스캐닝을 통해 얻어진 골질 분포 영상을 나타내고 있다. 종골의 골질 분포 영상에서 성장판의 개폐, 닫혀 가는 정도를 확인할 수 있었다. 또한, 성장판이 열린 경우에는 그 열린 정도가 각 개인의 성장 정도에 따라 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4에서 7세와 9세의 경우 모두 성장판이 열려 있지만 성장판의 개폐 정도에는 차이가 있음을 알 수 있다. 나

이가 증가함에 따라 성장판은 닫혀가는 중 영상에서 닫힌 영상으로 바뀌어 가는데 이는 성장에는 특정 시기가 있음을 의미한다. 또한, 성장의 정지는 성장판의 존재가 없어짐을 의미하는데 이는 성장판의 닫힌 영상으로 확인할 수 있고 더 이상 성장하기가 어렵다는 것을 나타낸다.

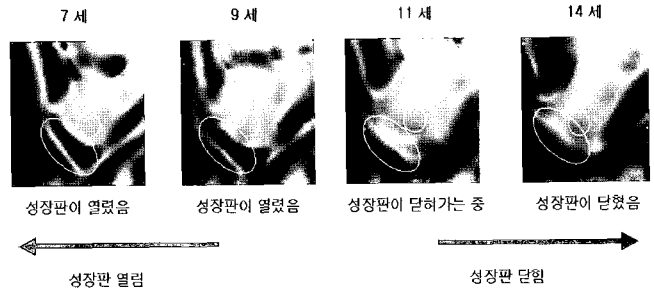


그림 4. 종골의 초음파 성장판 영상  
Fig. 4. Ultrasonic images of growth plate in calcaneus

그림 5는 각 관절에 있는 성장판의 개폐 시기의 상관성을 비교 평가하였다. 그림 5에서와 같이 경골 상단부, 지골 사이의 관절부 그리고 종골 말단부 각각에서 성장판이 열려 있는 경우, 닫혀 가는 중인 경우 그리고 닫힌 경우 모두에서 성장판 개폐 유무가 확연히 구분되었다. 이와 같이 X-ray 영상을 이용하여 각 관절마다 성장판 개폐 유무의 상관성이 높음을 확인할 수 있었다. 또한 종골의 X-ray 영상과 초음파 영상의 성장판 개폐를 비교한 결과 상호 높은 연관성이 있음을 알 수 있었다.

Method	X-ray	
	경골 (Proximal Tibia)	지골 (Phalanges)
열림		
닫혀가는 중		
닫힘		

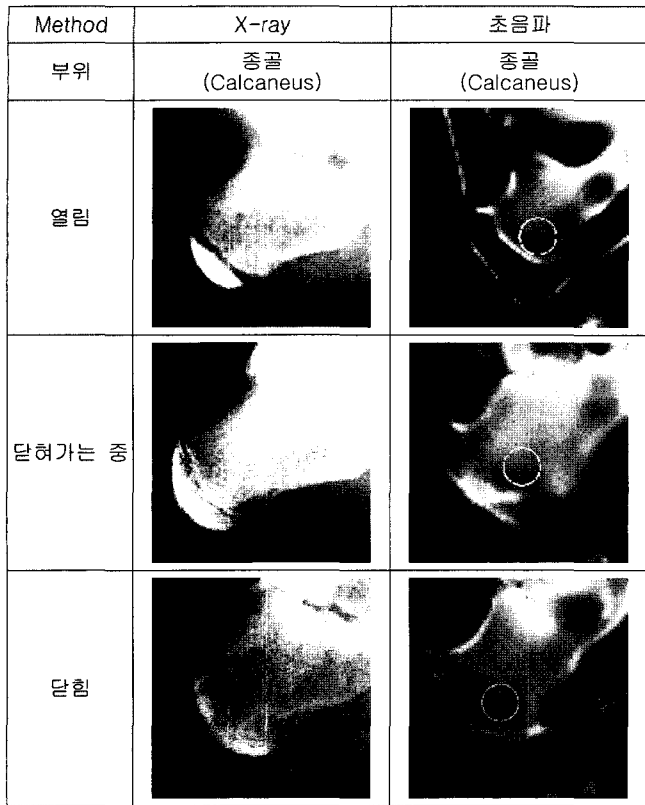


그림 5. 각 부위별 X-ray 영상과 종골 초음파 영상의 상관성 비교

Fig. 5. The comparison of correlation between X-ray image at each site and ultrasonic image in calcaneus

표 1에서는 X-ray 영상에 의한 무릎, 손가락, 종골에서 성장판이 열린 경우, 닫혀 가는 경우, 닫힌 경우 각각에 대해 초음파 영상과 비교한 수치적 결과를 나타내고 있다. 각각 영상에 대한 성장판 개폐 유무의 정의는 성장판의 크기를 통하여 기존의 X-ray 방식에서 사용되고 있는 육안 판별에 의한 정의 방식을 적용하였다. X-ray 영상에서 각 관절 부위에서의 성장판의 개폐 유무를 비교한 결과 높은 상관관계가 있었다. 또한 X-ray 영상과 초음파 영상에 의한 종골의 성장판 개폐 유무를 비교한 결과 상호 높은 연관성이 있음을 확인할 수 있었다.

표 1. X-ray와 초음파 영상에서 얻어진 성장판의 개폐 유무 비교  
Table 1. Comparison of the opening degree of growth plate between X-ray and ultrasonic images.

방법	X-ray 영상			초음파 영상
	부위	경골 (Proximal Tibia)	지골 (Phalanges)	종골 (Calcaneus)
성장판 개폐 유무				종골 (Calcaneus)
열림		128 명	123 명	124 명
닫혀가는 중		103 명	112 명	110 명
닫힘		38 명	34 명	35 명
				36 명

그림 6은 종골 부위에서 초음파 및 X-ray 방식으로 얻어진 성장판의 크기에 관한 영상을 나타내고 있다. 그림 6의 (a)와 (b)는 초음파 성장판 검출 알고리즘을 이용하여 얻은 영상이고, (c)와 (d)는 X-ray를 이용하여 촬영한 영상이다. X-ray 영상의 실측 분석을 위해서 X-ray 영상의 측정 배율을 계산하여 팬텀을 설정하고 동일한 조건 (Collimator 높이 1m로 고정)으로 성장판의 크기를 측정하였다. 초음파 영상에서 성장판의 크기를 측정하는 것과 동일한 방식으로 종골의 중심축을 정하고 성장판의 거리를 측정하였다.

그림 6의 (a)에서 나타난 것과 같이 성장판이 열려있는 8세 여아의 경우 초음파 영상 분석을 통해 검출된 프로파일에서 종골 중심축 위에서 두 개의 극대값을 가진다. 그래서 그 두 개의 극대값 사이의 거리가 5 mm 였으므로 성장판의 크기는 5 mm 가 된다. 그리고 그림 6의 (c)에서 X-ray 영상의 실측을 분석을 통해 측정된 성장판의 크기는 5.5 mm 였다.

그림 6의 (b)와 (d)는 성장판이 닫혀가고 있는 중인 14세 남아의 초음파 영상과 X-ray 영상을 나타낸다. 그림 6의 (b)는 그림 (a)와 같은 방법으로 종골 중심축 위에 두 개의 극대값을 가져 그 극대값 사이의 거리는 2 mm 였다. 이와 같이 성장판의 크기는 2 mm 이다. 그림 6의 (d)는 동일한 방법으로 구한 성장판의 크기가 1.6 mm 였다. 이와 같이 동일인에 대한 X-ray 영상과 초음파 영상에 의한 성장판의 크기가 다소 차이가 났지만 거의 비슷한 크기임을 확인할 수 있었다. 그림 7은 X-ray 및 초음파 방식에 의해 측정된 성장판의 크기가 상호 밀접한 관련( $r=0.95$ ,  $p<0.0001$ )이 있음을 나타내고 있다.

일반적으로 X-ray 영상에 의해 측정된 성장판의 영상은 각 측정자에 따른 오차가 존재하였다. 초음파 방식은 초음파 영상의 분석에 의해 각 개인별로 동일한 알고리즘을 적용하여 자동으로 측정이 가능하다. 따라서 측정자의 주관 이 반영되지 않아서 좀 더 정확한 분석이 가능하였다.

본 연구에서 구해진 전체 측정 연령에 대한 X-ray 영상에서의 성장판의 평균 크기(mean±SD)는 경골에서  $1.47\pm 1.12$  mm, 종골에서는  $3.39\pm 1.43$  mm 였다. 또한 종골에서 초음파, 성장판 영상으로 구해진 성장판의 크기는  $4.18\pm 1.46$  mm 였다. 각 측정 대상자별로 종골에서의 초음파 영상과 X-ray 영상을 비교해 본 결과 초음파 영상에 의한 어린이 성장판은 X-ray 영상에 비해서 평균 1.2배 크게 나타났다. 본 결과를 통해 역으로 산출된 초음파 종골 영상에서 성장판 개폐 유무의 경계가 되는 프로파일 값은 각각 1.4 mm 와 3.4 mm 로 나타났다. 1.4 mm 이하의 값에서는 성장판이 열림으로, 1.4 mm 에서 3.4 mm 사이의 값에서는 성장판이 닫혀가는 중으로, 3.4 mm 이상의 값에서는 성장판이 닫힘으로 정의될 수 있음을 알 수 있었다.

초음파 영상이 X-ray 영상에 비해 크게 나타나는 것은 성장판과 뼈의 경계면에서 초음파 신호의 산란에 기인한 것으로 생각한다. 초음파 신호 처리에 있어서 Time Domain의 경우에는 성장판과 뼈, 뼈 외부와 뼈 사이에서의 진폭의 급격한 변화가 발생하고, Frequency Domain에서는 주파수 대역폭이 매우 좁아지는 특성을 나타낸다. 그리고 종골 부위에서는 초음파 전파 방향에 대해 뼈의 중첩에 의한 초음파의 산란 감쇠의 영향을 받기 때문에 어린이 성장판의 크기가 다소 크게 나타날 수 있을 것이다. 그림

에도 불구하고 인체에 무해한 초음파를 사용하여 성장판의 영상을 얻을 수 있음은 참으로 중요한 발견이다. 향후 초음파 영상의 quality를 더욱 개선하는 연구가 계속 된다면 어린이의 성장진단에 X-ray 대신 초음파를 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

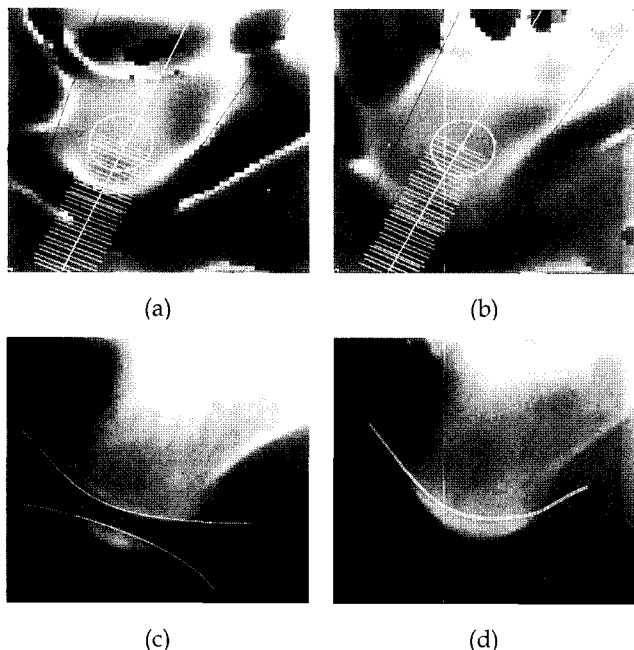


그림 6. 초음파와 X-ray 방식에 의해 얻어진 종골의 이미지, (a), (c) 는 성장판이 열린 8살 여아의 경우, (b), (d) 는 성장판이 닫혀 가는 중인 14살 남아의 경우

Fig. 6. Calcaneal images obtained by ultrasound (up) and X-ray (down) methods, showing growth plate open in the case of 8 years old female (a) and (c), and growth plate being closed in the case of 14 years old male (b) and (d).

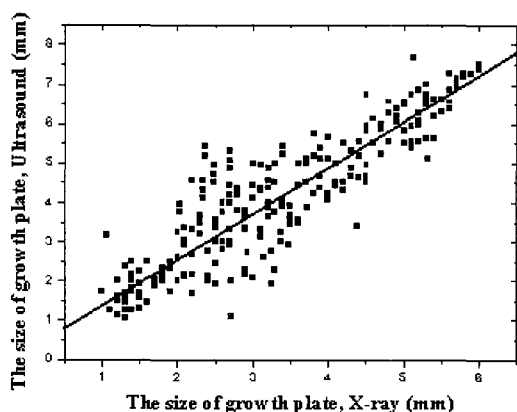


그림 7. X-ray와 초음파 영상에서 분석된 성장판 크기의 선형관계.  $r=0.95(p<0.0001)$

Fig. 7. The linear correlation of growth plate sizes between X-ray and ultrasonic methods.  $r=0.95(p<0.0001)$

## REFERENCES

1. S. Fischer, A. Milinarsky, V. Giadrosich, G. Dib, M. Arriagada and R. Arinoviche, "X-ray Absorptiometry of Bone in Obese and Eutrophic Children from Valparaiso", Chile, The Journal of Rheumatology, Vol. 27(3), No. 5, pp. 1294-1296, 2000
2. F. Rauch and E. Schoenau, "Changes in Bone Density During Childhood and Adolescence: An Approach Based on Bone's Biological Organization", Journal of Bone and Mineral research, Vol. 16(8), No. 4, pp. 597-604, 2001
3. M. H. Leguin, R. R. van Rijn, S. G. F. Robbon, W. C. J. Hop and C. van Kuijk, "Normal Values for Tibial Quantitative ultrasonometry in Caucasian Children and Adolescents (Aged 6 to 19 Years)", Calcified Tissue International, Vol. 67(5), pp. 101-105, 2000
4. D. R. Raaffe, C. Duret, C. S. cooper and R. Marcus, "Comparison of calcaneal ultrasound and DXA in young women", Medicine & Science in Sprts & Exercise, pp. 1484-1489, 1998
5. Tamura K, Akiyama T, Taguchi A, Fujikawa H, Saitoh H and Yanaihara T, "Measurement of bone density by ultrasound bone densitometer in normal pregnant women", Nippon Sanka Fujinka Gakkai Zasshi Nov, 48(11), pp. 1079-1084, 1996
6. Strelitzki R, Clarke AJ and Evans JA, "The measurement of the velocity of ultrasound in fixed trabecular bone using broadband pulses and single-frequency tone bursts", Physics in Medicine and Biology Apr, 41(4): pp. 743-753, 1996
7. S.M. Han, J. Rho, J. Medige and I. Ziv, "Ultrasound velocity and broadband attenuation over a wide range of bone mineral density", Osteoporosis International, 6(6), pp. 291-296, 1996
8. Bayer M and Kutilek S, "Ultrasound transmission through the Os calcis in children: which side should we measure?", Calcified Tissue International Des, 61(6), pp. 441-442, 1997
9. Jaworski M, Lebedowski M and Lorenc RS, "Measurements of calcaneus bone density by ultrasonography in children and adolescents", Polski Tygodnik Lekarski Nov, 50(44-47), pp. 20-23, 1995
10. Han SM and Davis J, "A comparison between the patella and the calcaneus using ultrasound velocity and attenuation as predictors of bone mineral density", Physics in Medicine and Biology Oct, 42(10), pp. 1947-1955, 1997
11. Wendt B, Cornelius A and Otto R, "Diagnosis of osteoporosis with ultrasound densitometry of the calcaneus", Radiologe Jan, 36(1), pp. 58-63, 1996
12. Hans D, Arlot ME, Schott AM, Roux JP, Kotzki PO and Meunier PJ, "Do ultrasound measurements on the os calcis reflect more the bone microarchitecture than the bone

- mass?: a two-dimensional histomorphometric study*", Bone Mar, 16(3), pp. 295-300, 1995
13. S.M. Han, J. Medige, J. Davis, K. Fishkin, W. Mihalko and I. Ziv, "Ultrasound velocity and broadband attenuation as predictors of load-bearing capacities of human calcanei", Calcified Tissue International, 60(5), 1, pp. 21-25, 1997
  14. Laugier P, Giat P and Berger G, "Broadband ultrasonic attenuation imaging: a new imaging technique of the os calcis", Calcified Tissue International Feb, 54(2), pp. 83-6, 1994
  15. Françoise Lefebvre, Genevieve Berger and Pascal Laugier, "Automatic Detection of the Boundary of the Calcaneus from Ultrasound Parametric Images Using an Active Contour Model; Clinical Assessment", IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, VOL. 17, NO. 1, 1998
  16. K. Brooke-Wavell, P.R.M. Jones and D.W.Pye, "Ultrasound and Dual X-ray Absorptiometry Measurement of the Calcaneus: Influence of Region of Interest Location", Calcified Tissue International, 57, pp. 20-24, 1995
  17. Damilakis J, Perisinakis K, Vagios E, Tsirikas D and Gourtsoyiannis N, "Effect of region of interest location on ultrasound measurements of the calcaneus", Calcified Tissue International Oct, 63(4), pp. 300-305, 1998
  18. S.M. Han and J. Rho, "Dependence of broadband ultrasound attenuation on the anisotropy of elastic moduli in cancellous bone", IMechE, Journal of Engineering in Medicine, 212(5), pp. 1-5, 1998