

Analysis of Observer Agreement in Shear Wave Elastography using a Breast Phantom

Jin-Hee Kim, Jung-Hoon Kim, Sung-Hee Yang*

Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Received: July 17, 2024. Revised: August 14, 2024. Accepted: August 31, 2024.

ABSTRACT

This study evaluated the clinical utility of Shear Wave Elastography(SWE) by analyzing the differences in elastic modulus and shear wave speed across various types of breast tissue and assessing inter-observer agreement. A breast phantom that included normal breast tissue, benign tumors, and malignant tumors was utilized, and ten radiologists participated, measuring the minimum, average, and maximum elastic modulus and shear wave speed for each tissue type. Analysis of differences between tissues was conducted using one-way ANOVA, and intra- and inter-observer agreement was assessed using the Intraclass Correlation Coefficient(ICC). The results demonstrated significant differences in the average values of elastic modulus and shear wave speed among the tissue types($p<0.001$), with malignant tumor tissues showing the highest average values. Furthermore, the ICC analysis for elastic modulus ranged from 0.75 to 0.99 and for shear wave speed from 0.89 to 0.99, indicating high reproducibility and agreement. These findings suggest that SWE is a reliable tool with high reproducibility and specificity for the diagnosis of breast cancer.

Keywords: Breast phantom, Observer, Elastography, Elastic modulus, Agreement

I. INTRODUCTION

유방암은 전 세계적으로 여성에게 발생하는 가장 흔한 암 중 하나로, 한국에서도 높은 발생률을 보이고 있다. 국가암정보센터 보고에 따르면, 2021년 기준 전체 여성 암 환자 중 21.5%가 유방암 환자였으며, 이는 여성 암 발생의 상당 부분을 차지하고 있다^[1]. 유방암의 증가 원인은 서구화된 식생활, 비만, 늦은 결혼, 출산을 저하, 수유 감소, 이른 초경과 늦은 폐경, 환경 호르몬 등 여러 가지 요인으로 알려져 있으며, 에스트로겐(Estrogen) 노출 기간의 증가와 관련이 있는 것으로 보고되고 있다^[2].

유방암의 조기 발견은 치료 성공률을 높이고 사망률을 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 현재 유방암의 조기 발견을 위한 스크리닝 방법으로 유방촬영술(Mammography)과 유방초음파(Ultrasonography)

가 널리 사용되고 있으며, 국내에서는 2년마다 유방촬영 검사를 권장하고 있다^[3,4]. 유방촬영술은 폐경 전 여성이나 치밀유방을 가진 여성의 경우 민감도가 낮아 유방암의 10~30% 정도는 발견되지 않을 수 있다. 또한, 치밀유방이 많은 한국 여성에서는 위음성률(False negative rate)이 높고 방사선 노출 등의 단점이 있다. 반면, 유방초음파는 비침습적이며 실시간 진단이 가능하다는 장점이 있지만 낮은 특이도(Specificity)로 인해 많은 양성 병변이 악성으로 오인될 수 있는 단점이 있다^[5].

이러한 한계를 보완하기 위해 2000년대부터 탄성초음파(Ultrasound elastography)가 임상에서 널리 사용되고 있다^[6]. 이 기술은 악성 조직이 양성 조직보다 더 단단한 특성을 활용하여 유방암 진단에 도움을 주며, 유방 외에도 복부, 갑상선, 고환 등 다양한 인체 부위에서도 진단 목적으로 활용된다^[7].

* Corresponding Author: Sung-Hee Yang

E-mail: sonoyang@cup.ac.kr

Tel: +82-51-510-0582

탄성초음파 기법 중 하나인 전단파 탄성초음파(Shear wave elastography, SWE)는 체내에 전단파를 유발하는 과도 펄스를 보내 여러 횡 방향 위치에서 변위의 시간 정보를 수집하고, 이를 기반으로 속도를 측정해 조직의 탄성도를 평가하는 방법이다. 유방 조직 및 병변 특성에 대한 정량적 분석을 통해 탄성 차이에 따른 정보를 색상으로 구분한 Stiffness map으로 시각화하며, kPa 단위로 정량화하여 정확한 수치를 제공한다. 탄성 계수(Elastic Modulus)는 조직의 변형 저항 정도를 나타내며, 종양과 정상 조직을 구분하는 데 중요한 역할을 한다. 일반적으로 종양은 탄성 계수가 높아 더 단단하게 나타나며, 이는 SWE를 통해 정확하게 측정되고 시각화될 수 있다. 또한, 최근 연구에서는 전단파 탄성초음파를 병행함으로써 진단 특이도를 높이고, 불필요한 검사를 줄일 수 있다고 보고되고 있다^[8-11].

그러나 전단파 탄성초음파의 경우, 탐촉자를 피부에 단순히 접촉하는 것과 약간의 압력 또는 강한 압력을 가하는 것에 따라 탄성 계수 값이 각각 다르게 나타날 수 있다는 점이 관찰되었다. 이러한 압력 차이로 인해 측정된 탄성 계수 값에 변동이 발생할 수 있으며, 이는 실제 임상에서 반복 측정 시 결과의 일관성을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 이로 인해 초음파영상 진단에서 양성 종양과 악성 종양의 특성이 유사하게 나타나 검사자 간 판독 결과에 편차를 초래할 수 있다^[12,13].

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 전단파 탄성초음파 검사의 관측자 일치성을 체계적으로 평가하여, 다양한 관측자가 유방암 진단 시 일관된 결과를 도출할 수 있는지 분석하고자 하였다. 이를 통해 검사 방법의 신뢰성을 강화하고, 유방암 진단에 있어 효과적인 객관적 지표를 제시하여 기여하는 것을 목표로 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

유방 전단파 탄성초음파영상 획득에 사용된 BreastFAN(US-6, KYOTO KAGAKU, Kyoto, Japan)은 인체를 묘사한 팬텀으로 피하지방(Subcutaneous

adipose), 유선조직(Mammary gland), 유관(Mammary ducts), 쿠퍼인대(Cooper's ligament), 유방밑지방(Retromammary adipose), 큰가슴근(Pectoralis major), 폐(Lung), 림프결절(Lymph node), 갈비뼈(Rib), 빗장뼈(Clavicle) 등의 해부학적 구조를 갖추고 있으며, Fig. 1과 같이 양성 병변, 악성 병변을 포함한 초음파 영상을 시각화할 수 있다^[14]. 초음파 장비로는 V8(Samsung Medison Company, Korea) 고해상도 2~14 MHz 선형탐촉자(Linear probe)를 사용하였다.

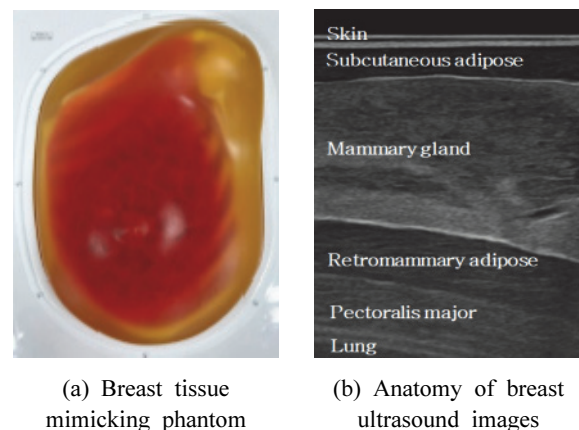


Fig. 1. Experimental materials for SWE image acquisition.

2. 실험방법

2.1. 전단파 탄성초음파영상 획득

실험에는 초음파 검사 경력 평균 5년인 방사선사 10명이 관측자로 참여하였다. 유방초음파 팬텀 모형을 사용하여, 내부에 포함된 각 유방 정상 실질(Normal parenchyma), 양성 종양(Benign lesion) 조직, 악성 종양(Malignant lesion) 조직을 기준으로 각 구역에서 10회의 전단파 탄성초음파 검사를 독립적으로 시행하였다. 탐촉자를 팬텀 피부 표면에 위치시킨 후 측정 부위가 모두 포함되도록 2.5 cm의 관심 영역(Region of interest, ROI)을 설정하였다. 젤을 충분히 도포한 후, 압력을 가하지 않은 상태에서 회색도 영상 위에 SWE 영상이 중첩되어 나타나면, 초음파 영상을 안정화하기 위해 몇 초간 정지한 후 영상을 획득하였다. SWE 영상은 경도(Stiffness)가 낮은 부분은 청색, 경도가 높은 부분은 적색으로 Fig. 2와 같이 표현된다.

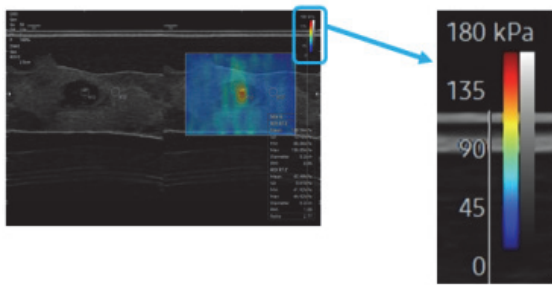


Fig. 2. Stiffness map & stiffness scale bar of SWE.

2.2. 진단과 탄성초음파와 탄성 계수

획득된 SWE 영상에서 가장 경도가 높게 나타난 범위에 0.2 cm의 위치 관심 영역(Site ROI)을 Fig. 3과 같이 설정한 후 최소(Minimum), 평균(Mean), 최대(Maximum) 탄성 계수 값을 kPa 단위로 나타냈다. 탄성 계수비(Elastic modulus ratio, EMR)는 측정하고자 하는 부위(Site ROI)의 평균 탄성 계수와 주변 조직 부위(Site ROI')의 탄성 계수의 비로 산출하였다^[14].

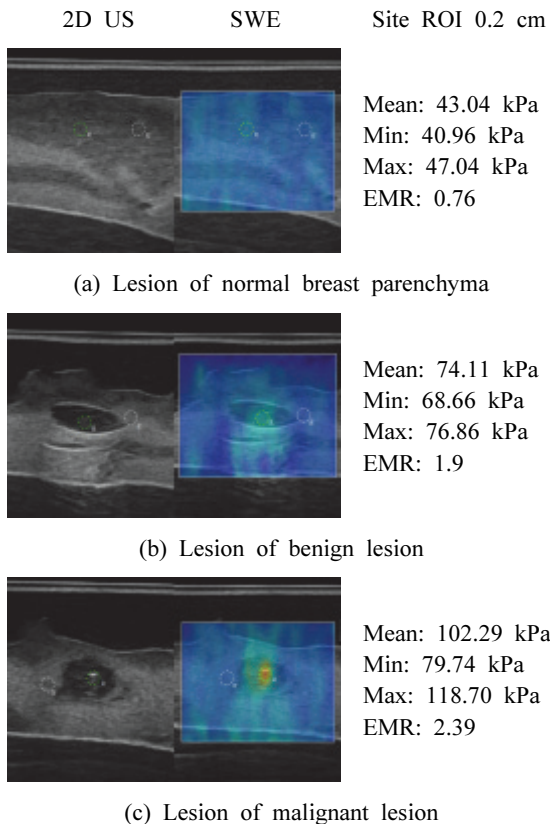


Fig. 3. Shear wave elasticity(SWE) imaging measurement by tissue morphology.

2.3. 진단과 탄성초음파와 횡파 속도

횡파 속도(Shear wave speed)는 Eq. (1)과 같이 m/s 단위로 계산되었으며^[15], Site ROI의 평균 횡파 속도와 Site ROI'의 횡파 속도의 비로 횡파 속도비(Shear wave speed ratio, SWSR)를 산출하였다.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

V_s (m/s) : Shear wave speed

G (Pa, Pascals) : Shear Modulus

ρ (kg/m^3) : Density

2.4. 통계 분석

자료 분석은 SPSS Window Version 29(SPSS INC, Chicago, IL, USA)를 사용하여 수행하였다. 10명의 관측자가 수집한 SWE 영상 데이터를 통해 정상 실질 조직, 양성과 악성 조직의 최소, 평균, 최대 탄성 계수 및 탄성 계수비, 횡파 속도 및 횡파 속도비를 산출하였으며 연속형 변수는 평균(Mean)과 표준편차(Standard deviation, SD)로 나타났다. 정상 실질 조직, 양성과 악성 조직 간의 평균 차이 분석은 일원 분산분석(One way ANOVA)을 시행하였으며 Tukey post-hoc test를 사용하여 사후 검정하였다. 관측자 내 및 관측자 간 일치도를 평가하기 위해 급내 상관계수(Intraclass correlation coefficients, ICC)를 분석하였다. 관측자 내 측정의 일치도는 이차원 혼합모형(Two way mixed effect model), 관측자 간 측정의 일치도는 이차원 변량 모형(Two way random model)을 적용하여 절대 합치도(Absolute agreement)를 기준으로 평가하였다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 미만으로 설정하였다.

III. RESULT

1. 유방 조직에 따른 탄성 계수 및 탄성 계수비

관측자 10명의 평균 측정 결과에서 정상 실질의 SWE 탄성 계수 값은 최소 47.39 ± 0.41 kPa, 평균 50.90 ± 0.42 kPa, 최대 53.01 ± 0.46 kPa로 나타났다. 양성 조직의 탄성 계수 값은 최소 64.79 ± 0.51 kPa, 평균 71.13 ± 0.56 kPa, 최대 75.04 ± 0.62 kPa이었으며,

악성 조직의 탄성 계수 값은 최소 83.52±0.74 kPa, 평균 100.27±0.66 kPa, 최대 109.94±0.88 kPa로 분석되었다. 탄성 계수비는 정상 실질은 1.20±0.01, 양성 조직은 1.88±0.02, 악성 조직은 2.32±0.03으로 분석되었다. 결과는 Table 1과 같다.

2. 유방 조직에 따른 횡파 속도 및 횡파 속도비

관측자 10명의 평균 측정 결과에서 정상 실질의 횡파 속도 값은 최소 3.97±0.02 m/s, 평균 4.11±0.02 m/s, 최대 4.20±0.02 m/s로 나타났다. 양성 조직의 횡파 속도 값은 최소 4.64±0.02 m/s, 평균 4.87±0.02 m/s, 최대 5.00±0.02 m/s이었으며, 악성 조직의 횡파 속도 값은 최소 5.27±0.02 m/s, 평균 5.77±0.02 m/s, 최대 6.05±0.03 m/s로 분석되었다. 횡파 속도비는

정상 실질은 1.10±0.00, 양성 조직은 1.37±0.01, 악성 조직은 1.52±0.01로 분석되었다. 결과는 Table 2와 같다.

3. 유방 조직에 따른 탄성 계수 및 횡파 속도의 차이 분석

유방의 정상 실질, 양성 조직, 악성 조직 간 탄성 계수 및 횡파 속도의 평균 차이 분석에서 각 그룹 간 유의한 차이를 보였다($p<0.001$). 평균 탄성 계수는 악성 조직에서 100.27±0.66 kPa로 가장 높았으며, 평균 횡파 속도에서도 악성 조직에서 5.77±0.02 m/s로 가장 높은 값을 나타냈다. 사후 분석 결과 세 군 모두 유의한 차이를 나타냈다($p<0.001$). 결과는 Table 3, Fig. 4와 같다.

Table 1. Elastic modulus and ratio according to the breast tissue of all observers [Mean±SD]

Variable	Elastic modulus (kPa)			Elastic modulus ratio (EMR)
	Min	Mean	Max	
Normal parenchyma	47.39±0.41	50.90±0.42	53.01±0.46	1.20±0.01
Benign lesion	64.79±0.51	71.13±0.56	75.04±0.62	1.88±0.02
Malignant lesion	83.52±0.74	100.27±0.66	109.94±0.88	2.32±0.03

SD: Standard Deviation

Table 2. Shear wave velocity and ratio according to the breast tissue of all observers [Mean±SD]

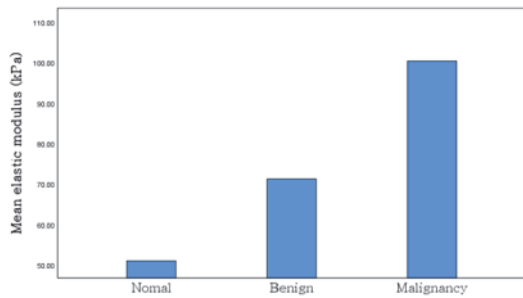
Variable	Shear wave speed (m/s)			Shear wave speed ratio (SWSR)
	Min	Mean	Max	
Normal parenchyma	3.97±0.02	4.11±0.02	4.20±0.02	1.10±0.00
Benign lesion	4.64±0.02	4.87±0.02	5.00±0.02	1.37±0.01
Malignant lesion	5.27±0.02	5.77±0.02	6.05±0.03	1.52±0.01

SD: Standard Deviation

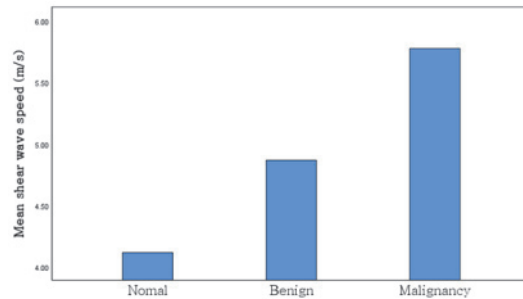
Table 3. Analysis of variations in elastic modulus and shear wave speed due to individual variables

Variable	N	Elastic modulus (kPa)				Shear wave speed (m/s)			
		Mean±SD	F	p	Tukey	Mean±SD	F	p	Tukey
Normal parenchyma ^a	100	50.90±0.42				4.11±0.02			
Benign lesion ^b	100	71.13±0.56	2001.39	<0.001	a<b<c	4.87±0.02	2030.70	<0.001	a<b<c
Malignant lesion ^c	100	100.27±0.66				5.77±0.02			

SD: Standard Deviation, Tukey: Tukey post-hoc test



(a) Average elastic modulus (kPa) by variable



(b) Average shear wave speed (m/s) by variable

Fig. 4. Graph of analysis of average differences by breast lesion.

4. 관측자 내 및 관측자 간 탄성 계수와 횡파 속도 일치도

관측자 10명의 SWE 탄성 계수 측정 결과에서 각 관측자 내 급내 상관계수는 최소값 0.75~0.98, 평균값 0.94~0.99, 최대값 0.91~0.98로 나타났으며, 탄성 계수비는 0.83~0.97로 분석되었다($p<0.001$).

관측자 간 급내 상관계수는 최소값 0.95, 평균값 0.97, 최대값 0.97, 탄성 계수비 0.94로 분석되었다 ($p<0.001$). 관측자 10명의 SWE 횡파 속도 측정 결과에서 각 관측자 내 급내 상관계수는 최소값 0.89~0.98, 평균값 0.94~0.99, 최대값 0.92~0.98로 나타났으며, 횡파 속도비는 0.84~0.97로 분석되었다 ($p<0.001$).

관측자 간 급내 상관계수는 최소값 0.95, 평균값 0.97, 최대값 0.97, 횡파 속도비 0.95로 분석되었다 ($p<0.001$). 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Intraclass and interclass correlation coefficients for agreement of elastic modulus and, shear wave speed and ratio among observers

Observer	Intraclass correlation coefficient (95% CI)										
	Elasticity				EMR	p value	Shear wave speed			SWSR	p value
	Min	Mean	Max				Min	Mean	Max		
1	0.93 (0.75-0.99)	0.96 (0.86-0.99)	0.96 (0.87-0.99)	0.84 (0.54-0.99)			0.93 (0.74-0.99)	0.96 (0.85-0.99)	0.96 (0.86-0.99)	0.92 (0.73-0.99)	
2	0.89 (0.66-0.99)	0.95 (0.83-0.99)	0.95 (0.82-0.99)	0.91 (0.70-0.99)			0.90 (0.67-0.99)	0.94 (0.81-0.99)	0.94 (0.80-0.99)	0.91 (0.71-0.99)	
3	0.75 (0.39-0.99)	0.95 (0.81-0.99)	0.91 (0.71-0.98)	0.89 (0.65-0.99)			0.89 (0.65-0.99)	0.94 (0.81-0.99)	0.92 (0.72-0.99)	0.90 (0.68-0.99)	
4	0.89 (0.65-0.99)	0.94 (0.80-0.99)	0.92 (0.74-0.99)	0.83 (0.52-0.99)			0.89 (0.66-0.99)	0.94 (0.80-0.99)	0.93 (0.75-0.99)	0.84 (0.55-0.99)	
5	0.92 (0.74-0.99)	0.98 (0.94-1.00)	0.98 (0.92-1.00)	0.85 (0.56-0.99)	<0.001		0.95 (0.82-0.99)	0.98 (0.94-1.00)	0.98 (0.92-1.00)	0.85 (0.55-0.99)	<0.001
6	0.96 (0.85-0.99)	0.98 (0.92-1.00)	0.96 (0.87-0.99)	0.89 (0.66-0.99)			0.97 (0.88-0.99)	0.98 (0.93-1.00)	0.97 (0.89-0.99)	0.91 (0.70-0.99)	
7	0.95 (0.83-0.99)	0.98 (0.94-1.00)	0.98 (0.92-1.00)	0.95 (0.83-0.99)			0.96 (0.86-0.99)	0.98 (0.95-1.00)	0.98 (0.93-1.00)	0.96 (0.85-0.99)	
8	0.98 (0.91-0.99)	0.99 (0.96-1.00)	0.98 (0.93-1.00)	0.97 (0.89-0.99)			0.98 (0.93-1.00)	0.99 (0.96-1.00)	0.98 (0.94-1.00)	0.97 (0.90-0.99)	
9	0.97 (0.87-0.99)	0.98 (0.92-1.00)	0.97 (0.91-0.99)	0.96 (0.86-0.99)			0.97 (0.90-0.99)	0.98 (0.94-1.00)	0.98 (0.93-1.00)	0.97 (0.89-0.99)	
10	0.96 (0.84-0.99)	0.98 (0.93-1.00)	0.98 (0.93-1.00)	0.95 (0.82-0.99)			0.96 (0.86-0.99)	0.98 (0.94-1.00)	0.98 (0.94-1.00)	0.96 (0.86-0.99)	
Total	0.95 (0.83-0.99)	0.97 (0.88-0.99)	0.97 (0.89-0.99)	0.94 (0.79-0.99)	<0.001		0.95 (0.84-0.99)	0.97 (0.89-0.99)	0.97 (0.90-0.99)	0.95 (0.81-0.99)	<0.001

CI: Confidence Interval

IV. DISCUSSION

유방암은 한국 여성에게서 발생하는 암 중 두 번째로 흔한 종류로, 발생률과 사망률이 매년 증가하고 있다^[16]. 이에 따라 정확한 유방암 검진은 매우 중요하다. 본 연구는 진단과 탄성초음파를 통해 유방 종양을 정확히 식별하고 특이도를 높이는 것을 목적으로 하며, 이를 위해 유방 병변의 정량적 탄성 계수와 횡파 속도를 측정하고 관측자 내 및 관측자 간 재현성을 분석하였다.

Cosgrove et. al^[17]의 보고에 따르면 SWE의 관찰자 내 및 관찰자 간 재현성을 평가하기 위해 총 758건의 데이터를 분석한 결과, 391건(51.6%)은 매우 일관된 탄성을 보였고, 212건(28.0%)은 어느 정도 일관된 탄성을 보였으며, 155건(20.4%)은 일관되지 않은 탄성을 보였다. 평균 탄성과 최대 탄성은 매우 높은 관찰자 간 일치도(ICC=0.87)를 나타냈다. 결론적으로 SWE는 유방 종괴의 탄성학적 특성을 평가할 때 내부 및 외부 간의 높은 재현성을 보여주며, BI-RADS 판독 기반 초음파 B-mode 특성과 유사한 일관성을 나타냈다는 것을 밝혀냈다.

Raza et. al^[18]은 RTE(Real-time tissue elastography)를 사용하여 유방 종괴를 평가하고 및 BI-RADS 병리학적 소견을 분석하였다. 186명의 여성과 200개의 병변을 대상으로 한 연구 결과, 188개의 병변 중 악성 61개, 양성 127개로 나타났다. 악성 병변의 84%는 ES(Elasticity score)가 5와 4로 분류되었으며, 양성 병변의 76%는 ES가 1과 2로 나타났다. 조직 검사 결과 양성으로 확인된 BI-RADS 4A 병변 중 82.9%가 ES 1과 2로 나타나 정상 조직과 일치하였다. 결론적으로 실시간 RTE는 유방 병변의 특성화를 개선하며, 특히 낮은 의심 병변에서 특이도를 향상시킬 수 있음을 규명하였다.

Hoyt et. al^[19]은 진단과 속도 추정 기법을 분석하기 위해 바이모프(Bimorph, Piezo Systems)라고 불리는 두 개의 굽힘 압전 요소를 진동원으로 사용하여 주어진 이미지 평면과 커널 크기에 대해 진단과 전파 축을 따라 위상 미분을 추정하였으며 진단 속도 분포를 정량화하였다. 이를 통해 실제 기저 조직의 탄성 정보를 반영할 수 있음을 밝혔다.

본 연구에서도 기존의 연구와 일치하게 10명의 관측자 평균 측정 결과에서 정상 실질, 양성 조직, 악성 조직의 SWE 탄성 계수와 탄성 계수비가 각각 증가함을 보였으며, 횡파 계수와 횡파 속도비도 동일한 패턴을 나타냈다. 또한, 관측자 10명의 관측자 간 및 관측자 내 일치도에서 SWE 탄성 계수 측정 결과, 최소, 평균, 최대값 및 탄성 계수비의 관측자 내 급내 상관계수는 0.75~0.98, 0.94~0.99, 0.91~0.98, 0.83~0.97로 나타났으며, 관측자 사이 급간 상관계수는 최소값 0.95, 평균값 0.97, 최대값 0.97, 탄성 계수비 0.94로 분석되었다($p < 0.001$). 또한, 횡파 속도 측정 결과, 최소, 평균, 최대값 및 횡파 속도비의 관측자 내 급내 상관계수는 0.89~0.98, 0.94~0.99, 0.92~0.98, 0.84~0.97로 나타났으며, 관측자 사이 급간 상관계수는 모두 0.95 이상으로 분석되었다($p < 0.001$). 이러한 결과는 진단과 탄성초음파가 정상 실질, 양성 종양 조직, 악성 종양 조직을 구분하는데 유용하며, SWE에서 높은 재현성과 특이도를 나타낸다는 것을 보여준다. 또한, 높은 상관계수는 연구의 재현성과 특이도가 뛰어남을 높이는 중요한 지표가 된다.

S. Mun^[6] 연구에서는 유방 영상 진단 전문가들로 구성된 영상 의학과 의사들의 검사 결과 높은 재현성을 확인하였으며, 연구 결과의 일반화를 위해서는 추가 연구 집단의 필요성을 제시하였다. 본 연구에 참여한 관찰자들은 모두 방사선사이자 초음파사들로 구성되었으며, 참여한 관찰자들 모두 높은 재현성을 나타냈다. 한편 탄성 초음파 영상법의 유방 종괴 감별 진단 성능 비교로 연구에서 N. Cho et. al^[20]은 비촉지성 유방 종괴의 감별 진단에서 탄성 영상법은 기존 초음파와 비슷한 진단 성능을 보인다고 했으나, 본 연구에서는 SWE가 높은 특이도와 재현성을 바탕으로 신뢰할 수 있는 진단 도구임을 알 수 있었다. 이를 통해 진단과 탄성 초음파가 유방 종괴의 감별 진단에 유용한 방법임을 입증하였다.

본 연구의 제한점 중 하나는 유방 팬텀을 대상으로 하였다는 점이다. 유방 팬텀 내부의 조직 및 종양을 평가하기 위해선 크기 외에도 음향적 및 물리적 특성을 정확히 이해해야 한다. 하지만, 유방 팬

팀의 제조사는 각 조직의 정확한 속성 값을 제공하지 않았기 때문에 연구 결과를 비교하는 데 제약이 있었다. 이러한 제한점을 고려했음에도 불구하고 관측자에 따른 재현성의 연구 목적은 유방 팬텀을 활용하여 충분히 달성할 수 있었다.

본 연구 결과를 임상에서 유방 조직 평가에 적용하려면 유방 팬텀 내 종양의 탄성 계수가 실제 인체 내 유방 종양 조직과 유사해야 한다. Evans et. al^[21], Youk et. al^[22]의 연구에 따르면 유방 조직의 탄성 계수 값은 정상 실질이 15~30 kPa, 양성 종양 조직에서 20~50 kPa, 악성 종양 조직은 50 kPa 이상이며 일부 연구는 80 kPa 이상을 기록하기도 하였다. 본 연구에서는 탄성 계수의 평균값이 정상 실질에서 50.90±0.42 kPa, 양성 종양 조직에서 71.13±0.56 kPa, 악성 종양 조직에서 100.27±0.66 kPa로 나타나 악성 종양 조직의 값에서 거의 일치함을 보였다. 따라서 본 연구 결과는 임상에서 유방 조직 평가에 유용하게 적용될 수 있음을 시사한다.

특히, 정상 실질, 양성 종양 조직, 악성 종양 조직의 탄성 계수와 횡파 속도를 정량적으로 측정하고 관측자 내 및 관측자 간의 높은 재현성을 입증함으로써, SWE가 유방 종괴 감별 진단에서 신뢰할 수 있는 도구임을 보여주었다. 이러한 결과는 임상에서 유방 조직 평가의 정확성을 향상시키고, 유방암 조기 진단과 치료계획 수립에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 연구에서 입증된 높은 재현성과 특이도는 SWE가 다양한 임상 환경에서 유방암 진단의 표준화와 효율성 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

V. CONCLUSION

본 연구는 진단과 탄성초음파를 활용하여 유방 조직의 특성을 분석하고 관찰자 간의 일치도를 평가하는 것을 목표로 하였다. 결과적으로 SWE가 정상 실질, 양성 종양 및 악성 종양 조직에서 탄성 계수와 횡파 속도의 차이를 명확하게 구별할 수 있음을 확인하였다. 높은 관찰자 일치도와 재현성을 바탕으로 SWE는 유방암 진단에 있어서 신뢰할 수 있는 도구임을 보여주었으며, 이러한 결과는 유방암의 조기 진단과 관리를 향상시킬 수 있는 중요한

기초 자료로 활용될 것이다.

Reference

- [1] Z. Zhang, S. He, Y. Zhong, H. Zou, L. Cai, Y. Zhang, H. Wang, "The effect of gel pads on the measurement of breast superficial lesion by shear wave elastography", *Annals of Medicine*, Vol. 55, No. 2, pp. 1-6, 2023.
<https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2269941>
- [2] H. Youn, S. Kang, S. Jung. "Clinical application of shear wave elastography in patients with breast cancer", *Journal of Surgical Ultrasound*, Vol. 5, No. 2, pp. 33-38, 2018.
<https://doi.org/10.46268/jsu.2018.5.2.33>
- [3] Y. Yeom, "Early detection health screening for breast cancer", *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 72, No. 9, pp 38-41, 2023.
<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11524253>
- [4] J. Jeong, "The Optimization of Design for Breast Ultrasound Diagnosis System Based on Usability Engineering", *Yonsei University, Master of Medicine*, 2023.
<https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/197075>
- [5] H. An, I. Im, "Comparison of Shear Wave Elastography and Pathologic Results Using BI - RADS Category for Breast Mass", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 2, pp. 217-223, 2018.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2018.12.2.217>
- [6] H. Mun, "Validation of intra-and interobserver reproducibility of shearwave elastography using phantom", *Hanyang University, Doctorate of Medicine, specializing in Radiology*, 2013.
<http://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.6.919>
- [7] E. Yang, "Conventional sonography and sonoelastographic diagnostic performances in the patients of breast biopsy", *Ajou University, Master of Public Health*, 2017.
<http://repository.ajou.ac.kr/handle/201003/16500>
- [8] Y. Im, "Assessment of Liver Stiffness using Color Histogram in Ultrasound Shear Wave Elastography", *Cheongju University, Master of Public Health*, 2020.
<http://www.riss.kr/link?id=T15488546>

- [9] J. Youk, E. Kim, "Current Trends in Breast Ultrasonography", *Journal of the Korean Society of Medical Ultrasound*, Vol. 31, No. 1, pp. 1-10, 2012. <https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/92370>
- [10] I. Woo, "Feasibility Study for the Breast Ultrasound Elastography in the Diagnosis of Breast Cancer and Assessment of the Influence of the Image Acquisition Direction", Korea University, Master of Medical Imaging Engineering, 2012. <https://doi.org/10.23186/korea.000000034468.11009.0000649>
- [11] J. Mo, "Shear wave elastography: a systematic review and meta-analysis", *Journal of the Korean Medical Association*, Vol. 59, No. 7, pp. 529-535, 2016. <http://doi.org/10.5124/jkma.2016.59.7.529>
- [12] W. Moon, J. Chang, N. Cho, "Elastography of the Breast: Imaging Techniques and Pitfalls in Interpretation", *Journal of Korean Society of Ultrasound in Medicine*, Vol. 30, No. 4, pp. 245-249, 2011. <https://www.e-ultrasonography.org/journal/view.php?number=339>
- [13] J. Kim, I. Kim, C. Jeon, J. Han, "Reproducibility Evaluation of Shear Wave Elastography According to the Depth of the Simulated Lesion in breast Ultrasonography", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 17, No. 6, pp. 919-927, 2023. <https://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.6.919>
- [14] A. Bulum, G. Ivanac, E. Divjak, I. Špoljar, M. Dominković, K. Bojanić, M. Lucijanić, B. Brkljačić, "Elastic Modulus and Elasticity Ratio of Malignant Breast Lesions with Shear Wave Ultrasound Elastography: Variations with Different Region of Interest and Lesion Size", *Diagnostics*, Vol. 11, No. 6, pp. 1-8, 2021. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11061015>
- [15] Speed of a transverse wave in a solid medium, From URL; <https://physics.stackexchange.com/questions/454089/speed-of-a-transverse-wave-in-a-solid-medium>
- [16] H. Shin, E. Ko, A. Yi, "Breast Cancer Screening in Korean Woman with Dense Breast Tissue", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 73, No. 5, pp. 279-286, 2015. <http://doi.org/10.3348/jksr.2015.73.5.279>
- [17] D. Cosgrove, W. Berg, C. Doré, D. Skyba, J. Henry, J. Gay, C. Cohen-Bacrie, BE1 Study Group, "Shear wave elastography for breast masses is highly reproducible", *European Radiology*, Vol. 22, pp. 1023-1032, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00330-011-2340-y>
- [18] S. Raza, A. Odulate, EM. Ong, S. Chikarmance, CW. Harston, "Using Real-time Tissue Elastography for Breast Lesion Evaluation Our Initial Experience", *Journal of Ultrasound in Medicine*, Vol. 29, No. 4, pp. 551-563, 2010. <https://doi.org/10.7863/jum.2010.29.4.551>
- [19] K. Hoyt, K. J. Parker, D. J. Rubens, "Real-Time Shear Velocity Imaging Using Sonoelastographic Techniques", In *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 33, No. 7, pp. 1086-1097, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2007.01.009>
- [20] N. Cho, W. Moon, J. Park, J. Cha, M. Jang, M. Seong, "Nonpalpable Breast Masses: Evaluation by US Elastography", *Korean Journal of Radiology*, Vol. 9, No. 2, pp. 111-118, 2008. <http://doi.org/10.3348/kjr.2008.9.2.111>
- [21] A. Evans, P. Whelehan, K. Thomson, D. McLean, K. Brauer, C. Purdie, L. Jordan, L. Baker, A. Thompson, "Quantitative shear wave ultrasound elastography: initial experience in solid breast masses", *Breast Cancer Research*, Vol. 12, No. 6, pp. 1-11, 2010. <https://doi.org/10.1186/bcr2787>
- [22] J. Youk, H. Gweon, E. Son, J. Chung, J. Kim, E. Kim, "Three-dimensional shear-wave elastography for differentiating benign and malignant breast lesions: comparison with two-dimensional shear-wave elastography", *European Radiology*, Vol. 23, No. 6, pp. 1519-1527, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00330-012-2736-3>

유방 팬텀을 활용한 진단과 탄성초음파 검사에서의 관측자 일치도 분석

김진희, 김정훈, 양성희*

부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요약

본 연구는 진단과 탄성초음파(SWE)의 임상적 유용성을 평가하기 위해 유방 조직의 탄성 계수와 횡파 속도의 차이를 분석하고 관찰자 간 일치도를 평가하였다. 정상 유방 조직, 양성 종양, 악성 종양을 포함하는 유방 팬텀을 사용하였으며 10명의 방사선사가 각 조직 유형별 최소, 평균, 최대 탄성 계수와 횡파 속도를 측정하였다. 조직 간의 차이 분석은 일원 분산분석을 시행하였으며 급내 상관계수(ICC)를 통해 관측자 내 및 관측자 간 일치도를 평가하였다. 그 결과 각 조직 간의 탄성 계수 및 횡파 속도의 평균에서 유의한 차이를 보였으며($p < 0.001$), 악성 종양 조직에서 가장 높은 평균 값을 나타냈다. 또한, 관측자 간 및 관측자 내 일치도 분석에서 ICC는 탄성 계수는 0.75-0.99, 횡파 속도는 0.89-0.99로 나타나 높은 재현성과 일치도를 보였다. 이러한 결과는 SWE가 유방암 진단에 있어 신뢰할 수 있는 도구이며 높은 재현성과 특이도를 갖춘 중요한 도구임을 시사한다.

중심단어: 유방 팬텀, 관측자, 탄성초음파, 탄성계수, 횡파 속도, 일치도

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김진희	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	대학원생
(공동저자)	김정훈	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	교수
(교신저자)	양성희	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수