

횡파를 이용한 토모그래픽 영상 복원

황기환, 송대건, 전계석
경희대학교 전자공학과

The Reconstruction of Tomographic Images using Shear Wave

Kihwan Hwang, Deagun Song, Kyesuk Jun
Department of Electronic Engineering, Kyung Hee University

본 논문은 1996-1997년도 한국과학재단 핵심연구과제 연구비 지원에 의해 연구되었음

요 약

본 논문에서는 횡파를 이용한 STAM 시스템을 이용하여 다층구조물에 대한 토모그래픽 영상을 복원함으로써 토모그래픽 영상의 분해능을 개선시키는 방법에 관하여 연구하였다. 먼저, STAM 시스템의 구조에서 초음파가 시료로 입사될 때 입사각도에 따라 발생하는 종파와 횡파에 대한 모드변환에 관하여 고찰하였다. 실험을 위하여 시료로 각 층이 서로 다른 패턴을 갖는 2층의 알루미늄을 가공하여 다층구조물을 제작하였으며, 시료에 횡파를 여기시키기 위하여 초음파변환기의 입사각을 18°로 사각 입사시킬 수 있는 웨지를 가공하여 구조를 제작하였다. 본 실험에서는 동작주파수가 10MHz인 STAM 시스템을 이용하여 4중 프로젝션에 대한 토모그래픽 데이터를 영상처리하여 토모그래픽 영상을 복원하였으며 이를 기존의 종파를 이용한 토모그래픽 영상과 비교분석한 결과, 콘트라스트와 축방향 분해능이 향상되고 토모그래픽 영상을 복원할 수 있었다.

I. 서 론

SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscope) 시스템은 음향과 광학장치를 이용하여 실시간 영상처리할 수 있는 대표적인 비파괴 검사장비로 투과모드로 동작된다[1]. 이 시스템은 시료를 투과한 초음파의 세기에 대응하는 전기적인 신호의 진폭정보만을 영상처리하므로 초음파의 회절현상에 의한 분해능 저하와 다중 결함 및 구조물에 대한 탐상시 투과모드에 의한 중첩현상으로 층 및 결함 위치에 대한 깊이 정보인 축방향 분해능을 얻지 못하는 제한을 갖는다. STAM(Scanning Tomographic Acoustic Microscope)은 이러한 제한을 개선시키기 위하여 토모그래피 원리를 SLAM 시스템에 적용시킨 초음파를 이용한 토모그래픽 영상시스템으로 SLAM 시스템을 수정하여 각 프로젝션에 대한 진폭정보와 위상정보를

획득하고 초음파를 다중 프로젝션시켜 획득한 토모그래픽 데이터를 영상처리하여 축방향 분해능을 향상시킴으로써 다중 결함 및 구조물에 대하여 각 층마다 분리된 토모그래픽 영상을 복원할 수 있는 시스템이다[2,3].

본 연구에서는 STAM 시스템에 횡파를 이용하여 다층구조물에 대한 분해능이 향상된 토모그래픽 영상을 복원하고자 한다. 먼저, 횡파를 여기시킬 수 있는 적합한 입사각을 결정하기 위하여 초음파의 입사각도에 따른 투과계수와 반사계수를 분석하고, STAM 시스템의 구조에서 초음파가 고체인 시료로 입사될 때 입사각도에 따른 모드변환에 관하여 고찰한다. 실험을 위하여 시료로 알루미늄을 사용하여 각 층이 서로 다른 패턴을 갖는 2층개의 불균질 층을 가공하여 다층구조물을 제작하고, 시료에 횡파를 여기시키기 위하여 초음파변환기의 입사각을 18°로

시각 입사시킬 수 있도록 수조를 제작한다. 본 실험에서는 시료 회전장치로 구성된 동작주파수가 10MHz 인 STAM 시스템을 사용하여 4중 프로젝션시커 토모그래픽 데이터를 획득하고 이를 영상복원 프로그램을 이용한 영상처리를 통하여 횡파를 이용한 토모그래픽 영상을 복원하고 이를 기존의 종파를 이용한 토모그래픽 영상과 비교분석한다.

II. 횡파 여기

2-1. 입사파의 모드변환

시료에 초음파가 사각으로 입사될 때 매질이 다른 경계면에서 매질 전파속도 차에 의해 투과파의 굴절각이 다르므로 입사각도에 따른 종파, 횡파, 그리고 표면파가 여기되는 모드변환이 발생한다. 그림 1은 STAM 시스템에서 3차원 영상정보를 얻기 위하여 수조에서 시료로 초음파를 사각 입사시킬 때 경계면에서 발생하는 입사파에 대한 모드변환의 기하학적 구조를 나타낸다[4,5].

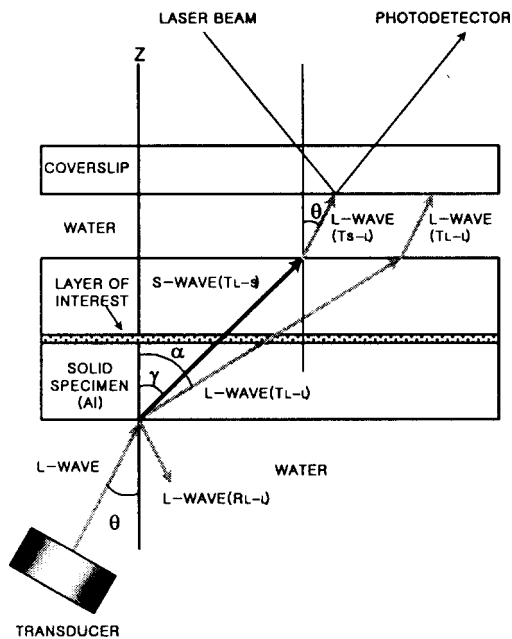


그림 1. 시각 입사파의 모드변환

그림에서 보는바와 같이 물에서 시료로 사각으로 입사된 초음파는 입사각도에 따라 시료내부에서 종파 굴절각(α)와 횡파 굴절각(γ)로 모드변환되어 종파 투과파(L-WAVE(T_{L-L}))와 횡파 투과파(S-WAVE(T_{L-S}))가 여기된다. 입사각에 따른 굴절각

의 모드변환 관계식은 Snell 법칙을 이용하여 다음 식(1)과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{C_L}{C_W} \sin \theta\right), \gamma = \sin^{-1}\left(\frac{C_S}{C_W} \sin \theta\right) \quad (1)$$

여기서 α 와 γ 는 각각 종파와 횡파에 대한 굴절각이다. C_W 는 물에서 초음파속도이고, C_L 과 C_S 는 각각 시료의 종파, 횡파속도이다.

표 1은 초음파를 물에서 고체시료로 사각 입사시킬 때 입사각도의 변화에 따른 시료를 투과하는 종파 및 횡파 굴절각이다.

표 1. 입사각도에 대한 매질의 굴절각

입사각	시료	횡파 굴절각	종파 굴절각
10°	Aluminum	20.61°	48.01°
	Brass	14.07°	32.96°
	Copper	15.24°	35.45°
	Steel	21.74°	43.08°
15°	Aluminum	31.64°	*
	Brass	21.24°	54.19°
	Copper	23.06°	59.82°
	Steel	33.51°	*
20°	Aluminum	43.88°	*
	Brass	28.61°	*
	Copper	31.17°	*
	Steel	46.86°	*
25°	Aluminum	58.93°	*
	Brass	36.28°	*
	Copper	39.76°	*
	Steel	64.37°	*

표에서 *는 전반사되어 투과되는 종파가 존재하지 않음을 나타낸다.

2-2. 반사 및 투과계수

초음파가 고체시료에 입사될 때 두 매질의 경계면에서 반사와 굴절에 의해 발생하는 반사파와 투과파의 반사 및 투과계수에 대한 관계식은 다음 식(2), 식(3) 그리고 식(4)와 같이 구할 수 있다[5].

$$R_{L-L} = \quad (2)$$

$$\frac{\cos \alpha - a \gamma \cos \theta [1 - 2 \sin \gamma \sin 2\gamma (\cos \gamma - (1/b) \cos \alpha)]}{\cos \alpha + a \gamma \cos \theta [1 - 2 \sin \gamma \sin 2\gamma (\cos \gamma - (1/b) \cos \alpha)]}$$

$$T_{L-L} = \quad (3)$$

$$\frac{2 \cos \theta \cos 2\gamma}{\cos \alpha + a \gamma \cos \theta [1 - 2 \sin \gamma \sin 2\gamma (\cos \gamma - (1/b) \cos \alpha)]}$$

$$T_{L-S} = \frac{(2af/b)\sin 2\theta \cos \alpha}{\cos \alpha + a\gamma \cos \theta [1 - 2 \sin \gamma \sin 2\gamma (\cos \gamma - (1/b) \cos \alpha)]} \quad (4)$$

여기서 R_{L-L} , T_{L-L} 그리고 T_{L-S} 는 각각 종파의 반사계수, 종파의 투과계수 그리고 횡파의 투과계수이며, $a = \frac{C_W}{C_L}$, $b = \frac{C_L}{C_S}$ 이고 C_L, C_S 는 각각 고체에서 종파와 횡파의 속도, C_W 는 물에서 파의 속도이다. ρ_1, ρ_2 는 각각 고체와 물의 밀도이고 α, γ 는 각각 투과된 종파와 횡파각 그리고 θ 는 입사각이다. 그림 2는 물과 알루미늄 경계면에서 발생하는 입사각도에 따른 종파와 횡파의 반사 및 투과계수를 시뮬레이션하여 얻은 플롯이다.

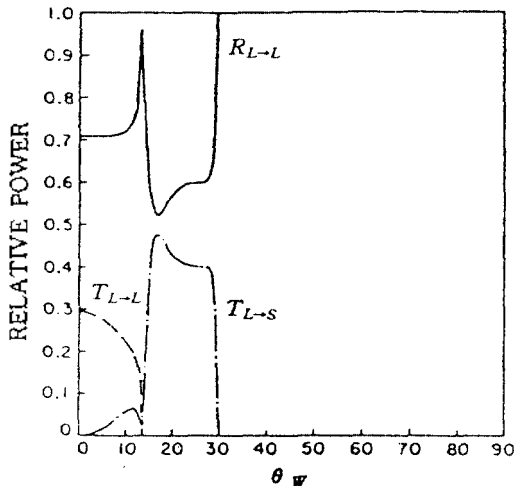


그림 2. 입사각도의 변화에 따른 종파와 횡파의 반사 및 투과계수

그림에서 나타난바와 같이 입사각이 증가함에 따라 횡파의 투과계수는 증가하는 반면 종파의 투과계수는 감소하며 종파 임계각보다 큰 입사각으로 초음파가 입사될 때 알루미늄 시료에서 굴절된 종파는 발생되지 않고 단지 횡파만 존재한다. 임계각을 결정하는 관계식은 다음과 같다.

$$\theta_{CL} = \sin^{-1}\left(\frac{C_W}{C_L}\right), \quad \theta_{CS} = \sin^{-1}\left(\frac{C_W}{C_S}\right) \quad (5)$$

여기서 θ_{CL} 와 θ_{CS} 는 각각 종파 및 횡파 임계각이다. 물과 알루미늄에 대한 종파 임계각은 약 13.5° 로 최대 투과율은 약 30% 정도이고, 횡파 임계각은 약 29.6° 로 투과율은 약 50%이다. 그러므로 횡파의

모드변환이 종파의 모드변환 보다 더욱 효과적이다. 표 2은 식(5)를 이용하여 구한 몇가지 고체에 대한 임계각이다.

표 1. 매질의 특성 및 임계각

매질	종파 속도	횡파 속도	종파 임계각	횡파 임계각
Aluminum	6420 m/s	3040 m/s	13.5°	29.5°
Brass	4700 m/s	2100 m/s	18.6°	45.5°
Copper	5010 m/s	2270 m/s	17.4°	41.3°
Steel	5900 m/s	3200 m/s	14.7°	27.9°
Vinyl	2230 m/s	*	42.2°	*

액체나 바닐과 같은 몇몇 고체에서는 횡파가 전파되지 않으므로 횡파를 이용하는 본 시스템은 제한적이나 대부분의 시료에서는 횡파를 여기시킬 수 있으므로 STAM 시스템에서 토모그래피 영상의 분해능을 향상시키는데 이용할 수 있다.

III. 실험 및 결과고찰

그림 3은 본 연구에서 제작한 STAM 시스템에 대한 블록선도이다. Sonoscan사의 Model 2140 SLAM 시스템에 제작한 쿼드러처 검출기와 시료 회전장치들

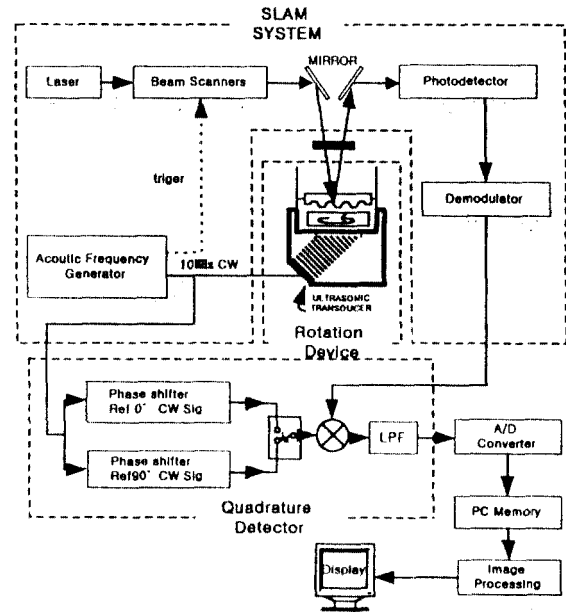
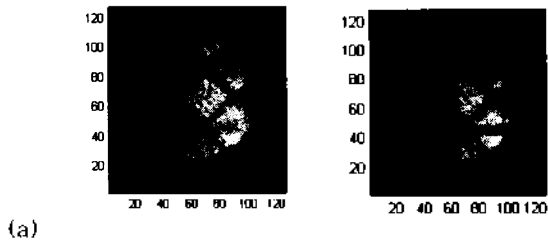


그림 3. STAM 시스템의 블록선도

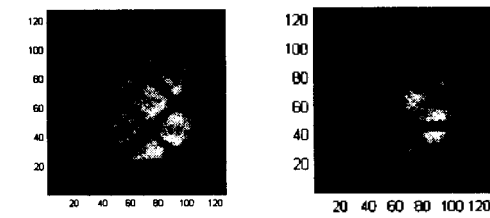
부착하고 토모그래피 영상복원 프로그램을 개발하여 STAM 시스템을 구성하였다. 각 프로섹션에 대한 실수부(동위상 성분)와 허수부(쿼드러처 성분)의 데이터는 A/D 변환기를 거쳐 PC 메모리에 저장되며,

이들 다중 프로젝션에 의해 획득한 토모그래픽 데이터는 영상복원 프로그램을 이용한 영상처리를 통하여 각 층에 대한 토모그래픽 영상을 복원한다.

실험을 위해 시료로 알루미늄을 사용하여 2개의 평면모양의 다른 패턴을 갖는 층 사이의 간격이 각각 1.2mm, 1.5mm 그리고 1.8mm인 다층구조물을 가공하였다. 실험조건에서는 횡파를 여기시키기 위하여 웨지들을 제작하여 초음파를 18°로 사각 입사시켰으며 동작주파수가 10MHz인 평면형 초음파변환기를 사용하였다. 커버슬립을 시료에서 0.6mm 위에 위치시켰다. 시료 회전장치를 이용하여 4개의 프로젝션(0°, 90°, 180°, 270°)에 대한 토모그래픽 데이터를 획득하였다. 그림 4는 횡파를 이용한 STAM 시스템을 사용하여 불균질 층 사이의 간격이 1.8mm(12 파장)인 다층구조의 시료에 대한 토모그래픽 영상이다. 그림 4(a)는 아래층에 대한 토모그래픽 영상이고 그림 4(b)은 위층에 대한 토모그래픽 영상이다. 아래층 영상은 그림 5(a)의 종파를 이용하여 복원한 아래층의 토모그래픽 영상보다 개선된 콘트라스트와 경계면에서 선명한 윤곽을 볼 수 있으며, 위층 영상은 투과파의 회절 및 산란에 의해 미세한 중첩현상이 여전히 나타남을 볼 수 있으나 그림 5(b)의 종파를 이용한 위층의 토모그래픽 영상보다 콘트라스트와 중첩이 향상된 토모그래픽 영상을 복원할 수 있었다.



(a) 아래층 영상 (b) 위층 영상
그림 4. 횡파를 이용한 토모그래픽 영상



(a) 아래층 영상 (b) 위층 영상
그림 5. 종파를 이용한 토모그래픽 영상

VI. 결론

본 논문에는 STAM 시스템의 분해능을 향상시키기 위하여 횡파를 이용한 STAM 시스템으로부터 토모그래픽 영상을 복원하였다. STAM 시스템의 구조에서 초음파를 시료로 사각 입사시킬 때 발생하는 모드변환을 고찰하고 모드변환에 의해 여기되는 종파와 횡파에 대한 반사 및 투과계수에 대하여 분석하였다. 실험을 위하여 먼저, 횡파를 여기시킬 수 있는 입사각으로 초음파변환기를 고정시키기 위하여 아크릴로 18° 기울기를 갖는 웨지들을 가공하여 STAM 시스템에 구성하였다. 본 연구에서 횡파를 이용한 STAM 시스템을 사용하여 2개의 알루미늄 층을 갖는 다층구조물의 시료에 대한 4중 프로젝션시켜 획득한 토모그래픽 데이터를 영상처리하여 토모그래픽 영상을 복원하였다. 이를 종파를 이용하여 복원한 토모그래픽 영상과 비교분석한 결과, 횡파를 이용함으로써 종파 파장보다 짧은 횡파 파장에 의해 다층구조물의 층 간격에 대한 축방향 분해능을 향상시킬 수 있으며, 또한 종파보다 높은 횡파의 투과율로 인해 콘트라스트가 개선된 토모그래픽 영상을 얻을 수 있음을 볼 수 있었다. 따라서 횡파를 이용한 STAM 시스템으로부터 콘트라스트와 축방향 분해능이 향상된 토모그래픽 영상을 복원할 수 있으므로 다층구조 및 결합을 갖는 시료에 대한 더욱 정확한 영상정보를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] L. W. Kesser, "Acoustic Microscopy-an Industrial View", IEEE Ultras. Symp. pp. 725-728, 1988.
- [2] Z. Lin, "A Planar Ultrasonic Tomographic Imaging System", Ph. D. Dissertation, UCSB., 1984.
- [3] R. Y. Chiao, H. Lee, "Multiple-Frequency and Multiple-Angle Tomography with the Scanning Tomographic Acoustic Microscope" IEEE. pp. 891-894, 1990.
- [4] Deasik Ko, "Resolution Enhancement of Scanning Tomographic Acoustic Microscope System", J. Acoust. Soc. Kor., Vol. 15(1E), pp. 70-76, 1996.
- [5] T. Pialucha and P. Cawley, "An Investigation of the Accuracy of Oblique Incidence Ultrasonic Refraction Coefficient Measurements," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96(3), PP. 1651-1660, 1994.