

STAM 시스템을 이용한 토모그래픽 영상 복원

The Reconstruction of Tomographic Images using STAM System

황기환*, 김현*, 김종찬**, 전계석*

(Ki Hwan Hwang*, Hyun Kim*, Jong Chan Kim**, Kye Suk Jun*)

* 이 논문은 1996-1997년도 한국과학재단 핵심연구과제(KOSEF 961-0922-123-2) 연구비 지원에 의해 연구되었음.

요약

본 논문에서는 다층구조물에 대한 토모그래픽 영상을 복원하기 위해 기존의 SLAM 시스템에 쿼드러처 검출기와 시료 회전장치를 추가하여 STAM 시스템을 구성하고 BFP 알고리즘을 이용하여 영상복원 프로그램을 개발하였다. 본 실험에서는 시료로서 알루미늄을 사용하여 2개 층이 서로 다른 패턴을 갖는 불균질 층을 만들고 그 사이를 물로써 채워진 다층구조물을 구성하였으며 또한 불균질 층 간격을 각각 8 λ , 10 λ 그리고 12 λ 가 되도록 제작하였다. 이들 시료는 STAM 시스템에서 4중 프로젝션(0°, 90°, 180°, 270°)시켜 토모그래픽 데이터를 획득하고 이를 영상처리하여 토모그래픽 영상을 복원하였다. 영상분석 결과, 본 STAM 시스템은 4중 프로젝션시 12 λ 의 불균질 층 간격에서 높은 분해능의 토모그래픽 영상을 얻을 수 있었고 각 층에 대한 위치를 결정할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, for the tomographic image reconstruction about the multilayered structure, we have constructed the STAM(scanning tomographic acoustic microscope) system by adding a quadrature signal detector and a specimen rotation device to conventional SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscope). we also developed a computer program for tomographic image processing using BFP algorithm. In this experiment, we made the Al specimens of 8 λ , 10 λ and 12 λ gap which consist of two-layers with different patterns respectively, this STAM system can give tomographic images through image processing by tomographic reconstruction program to the tomographic data which obtained at 4 projections to 0°, 90°, 180° and 270° positions. In the result of image analysis, we concluded that this STAM using 4 projections can be obtained high resolution tomographic images to the layer of 12 λ gap, and hence be determined position of layer.

I. 서론

SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscope) 시스템은 음향시스템과 병합된 광학장치를 이용하여 실시간에 영상처리할 수 있는 대표적인 비파괴 검사장비로 투과모드로 동작된다. 이 시스템은 시료내부를 투과한 초음파의 세기에 대응하는 전기적인 신호의 진폭변화를 영상처리하여 그림자 영상을 복원한다[1,2]. 그러나 SLAM 시스템은 진폭정보만을 영상처리하므로 초음파의 회절현상에 의한

분해능 저하와 특히 다층구조물이나 다층 결합을 갖는 시료에 대한 탐상시 투과모드에 의한 중첩현상으로 피사체를 정확하게 분석할 수 없는 단점을 갖는다. 이를 개선시키기 위하여 X-ray 단층영상 기술에 널리 응용된 토모그래피 원리를 SLAM 시스템에 적용시키기 위한 STAM 시스템에 관한 연구가 미국 산타바바라 대학의 Glen Wade 교수에 의하여 처음으로 제안되었다[3-5]. STAM(Scanning Tomographic Acoustic Microscope)은 초음파를 이용한 토모그래픽 영상시스템으로 기존의 SLAM 시스템을 수정하여 진폭정보와 위상정보를 획득하고 초음파를 다중 프로젝션시켜 토모그래픽 영상의 거리분해능을 향상시킴으로써 다층 결합 및 구조물에 대하여 각 층마다 분리된 토모그래픽 영상을 복원할 수 있는 시스템

*경희대학교 전자공학과
**한국생산기술연구원
접수일자 : 1998년 10월 7일

이다.

본 연구에서는 STAM 시스템을 구성하고 이를 이용하여 다층구조물에 대한 토모그래픽 영상을 복원하고자 한다. 동작주파수가 10MHz인 STAM 시스템은 진폭 및 위상신호를 동시에 검출하기 위한 쿼드러처 검출기와 3차원 영상정보를 얻기 위한 시료 회전장치를 제작하여 기존의 SLAM 시스템에 부가시켜 구성된다. 또한 STAM 시스템의 영상복원 프로그램은 BFP 알고리즘을 이용하여 구성된다. 본 실험에서는 다층 구조의 시료에 대한 토모그래픽 영상을 복원하기 위하여 알루미늄 재질을 사용하여 불균질 층 간격이 8λ, 10λ, 12λ이고 각 불균질 층이 서로 다른 패턴을 갖는 평면구조를 사용한다. 그리고 초음파 입사각을 10°로 하고 4층 프로젝션(0°, 90°, 180°, 270°)시켜 토모그래픽 데이터를 획득하여 토모그래픽 영상을 복원하고 불균질 층에 대한 위치를 결정한다.

II. 쿼드러처 신호검출 해석

그림 1은 SLAM 시스템으로부터 진폭과 위상정보를 얻기 위하여 본 연구에 이용된 쿼드러처 신호검출 방법에 대한 블록선도이다. 초음파변환기의 입력되는 기준신호에 대하여 90° 위상차를 갖는 두 기준신호를 사용하여 전자회로를 구성한다.

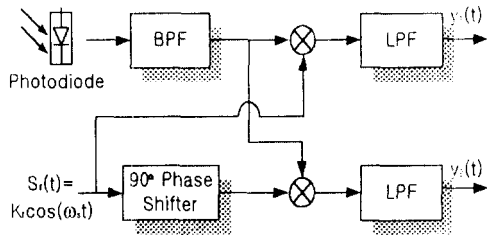


그림 1. 쿼드러처 검출기의 블록선도
Fig. 1. Block diagram of quadrature detector.

시료내부에 대한 원하는 초음파정보는 광-다이오드에 수신신호에서 도플러 천이된 주파수성분을 가져므로 대역통과 필터를 사용하며 쿼드러처 검출기의 입력신호는 다음식과 같다[3,6].

$$s(t) = K_s B(vt) \cos((\omega_s - \omega_d)t + \psi(vt)) \quad (1)$$

여기서 K_s 는 광-다이오드와 필터의 비례상수이고, ω_s 는 레이저빔의 스캔에 의한 도플러 천이된 주파수성분($2\pi f v$)이다. 광-다이오드에 수신된 입력신호 $s(t)$ 에 초음파변환기에 입력되는 기준신호 $s_r(t) = K_r \cos(\omega_d t)$ 와 90° 위상차를 갖는 기준신호를 각각 곱하여 광-다이오드에 수신되는 초음파신호의 복소수성분에 대한 동위상성분(실수부)과 쿼드러처성분(허수부)을 얻는다. 쿼드러처 검출기의 입력신호와 동위상 기준신호에 대한 믹서의 출력신호는 다음식과 같다.

$$s(t)s_r(t) = K_s K_r B(vt) \cos((\omega_s - \omega_d)t + \psi(vt)) K_r \cos(\omega_d t) \quad (2)$$

이를 저역통과필터에 통과시켜 얻은 실수부에 대한 출력신호는 다음식과 같다.

$$y_{1(t)} = \frac{K_s K_r B(vt)}{2} \cos(\omega_d t - \psi(vt)) \quad (3)$$

또한 쿼드러처 검출기의 입력신호와 90° 위상차를 갖는 기준신호 $s_r(t) = K_r \sin(\omega_d t)$ 를 믹서시키고 저역통과필터를 이용한 허수부의 출력신호는 다음식과 같다.

$$y_{2(t)} = \frac{K_s K_r B(vt)}{2} \sin(\omega_d t - \psi(vt)) \quad (4)$$

위 식에 대한 공간함수로부터 $B(x)$ 와 $\psi(x)$ 를 구할 수 있으며 광-다이오드의 전류변환식을 이용하여 진폭과 위상성분을 얻을 수 있다.

III. 다중 프로젝션을 위한 회전장치

STAM 시스템은 초음파 소스의 입사각을 변화시키기 위하여 초음파변환기를 회전시키거나 시료를 회전시키는 방법을 사용하여 다중 프로젝션시킴으로써 3차원 영상정보를 획득한다. 그림 2는 STAM 시스템의 다중 프로젝션을 위한 초음파변환기 및 시료 회전장치이다[3].

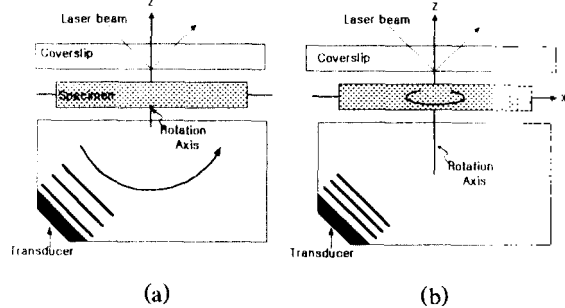


그림 2. STAM의 다중 프로젝션을 위한 회전장치.
(a) 초음파변환기 회전장치 (b) 시료 회전장치
Fig. 2. Rotating device for Multi-projection of STAM;
(a) Ultrasonic transducer rotating device,
(b) Specimen rotating device.

그림 2(a)의 초음파변환기 회전장치는 시료를 고정시키고 변환기를 시료 배면의 중심에서 지면으로 향하는 Y축을 중심으로 회전시켜 초음파를 시료에 프로젝션시킨다. 그림 2(b)의 시료 회전장치는 초음파변환기를 고정시키는 대신에 시료를 Z축을 중심으로 원형으로 회전시켜 초음파를 시료에 프로젝션시킨다. 본 회전장치는 초음파변환기를 Z축과 일정한 입사각도를 유지하면서 Z축을 중심으로 회전시키는 방법과 동일하므로 입사파 성분과 수신파 성분에 대한 좌표변환만 고려하면 초음파변환기를

원형으로 회전시키는 방법과 동일하다.

초음파변환기 회전장치는 초음파변환기의 스캔방향인 X축방향에 비해 스캔 수직방향인 Y축방향에서 분해능이 저하되는 X, Y축방향에 대하여 서로 다른 분해능을 나타내며, 시료 회전장치는 Z축을 중심으로 회전되므로 X, Y축방향에 대하여 동일한 분해능을 나타냄을 모의실험을 통하여 이미 분석하였다[7]. 또한 회전장치의 데이터를 획득하는 과정에서 발생하는 오차를 최소화시키기 위해서는 초음파변환기 회전장치는 정확한 입사각으로 초음파변환기를 회전시켜야 하며 특히, 회전축과 초음파변환기와의 거리를 일정하게 유지시켜야 정확한 영상정보를 얻을 수 있다. 시료 회전장치는 시료 회전시 시료에 대한 수평을 유지시켜야 한다. 초음파변환기 회전시 Knife-edge를 이용한 광검출장치에서 검출감도가 일정하지 못하는 단점을 갖는 반면에 시료 회전장치는 동일한 검출감도를 갖는다[8,9].

실제의 회전장치 설계 및 제작시 시료 회전구조는 초음파변환기 회전구조에 비해 물리적으로나 구조적으로 제작이 용이하므로 본 연구에서는 시료 회전장치를 제작하여 STAM 시스템을 구성하였다.

IV. BFP 토모그래픽 영상복원 알고리즘

토모그래픽 영상복원을 위한 BFP(Back-and-Forth Propagation) 알고리즘은 입사파의 성분과 투과파의 성분을 이용하여 원하는 층에 대한 투과계수를 결정하는 초음파 회절을 고려한 영상복원 알고리즘으로 특히 평면구조를 갖는 구조물에 대하여 유용하다[9,10].



그림 3. 평면물체에 초음파 입사
Fig. 3. Ultrasound insonification on the plane structure.

그림 3과 같은 평면구조의 시료 배면에 평면파가 입사되고 평면 z=0과 z=z0 사이에 전달함수 $t(x, y; z)$ 를 갖는 평면 z=z0을 제외하고는 모두 균질한 탄성물질 영역으로 투과율이 동일하다고 가정한다. 평면 z=0에 입사파성분은 $v(x, y; 0)$ 이고 z=z0면의 바로 아래까지 전방향-전파성분을 $v(x, y; z)$ 로 놓으면 z=z0면을 투과한 투과파성분 $v_t(x, y; z)$ 은 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$v_t(x, y; z_0) = v(x, y; z_0) t(x, y; z_0) \tag{5}$$

전달함수 $t(x, y; z)$ 에 대하여 입사파성분의 전방향-전파성분과 z=z0평면까지 투과한 수신파성분 $v(x, y; z)$ 의 후방향-전파성분 $u(x, y; z)$ 을 이용하여 다음 관계식을 나타낼 수 있다.

$$u(x, y; z_0) = v_t(x, y; z_0) + n(x, y; z_0) \tag{6}$$

$$= v(x, y; z_0) t(x, y; z_0) + n(x, y; z_0)$$

여기서 $n(x, y; z)$ 는 물체내의 산란에 의해 발생한 잡음성분이다. LSE(Least-Squares Estimate)를 사용하여 얻은 z=z0면의 전달함수 분포 $t(x, y; z)$ 는 다음식과 같다[10].

$$\hat{t}(x, y; z_0) = \frac{\int_a^b u_{\phi}^*(x, y; z_0) v_{\phi}^*(x, y; z_0) d_{\phi}}{\int_a^b v_{\phi}^*(x, y; z_0) v_{\phi}^*(x, y; z_0) d_{\phi}} \tag{7}$$

실제의 데이터 획득과정에서는 유효각에서 입사되는 유효한개의 프로젝션만 이용되므로 다음식과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\hat{t}(x, y; z_0) = \frac{\sum_j u_{\phi_j}^*(x, y; z_0) v_{\phi_j}^*(x, y; z_0)}{\sum_j v_{\phi_j}^*(x, y; z_0) v_{\phi_j}^*(x, y; z_0)} \tag{8}$$

V. 실험 및 결과 고찰

그림 4는 본 연구에서 제작한 STAM 시스템에 대한 블록선도이다. Sonoscan사의 Model 2140 SLAM 시스템에 제작한 쿼드러처 검출기와 시료 회전장치를 부착하여 STAM 시스템을 구성하였다.

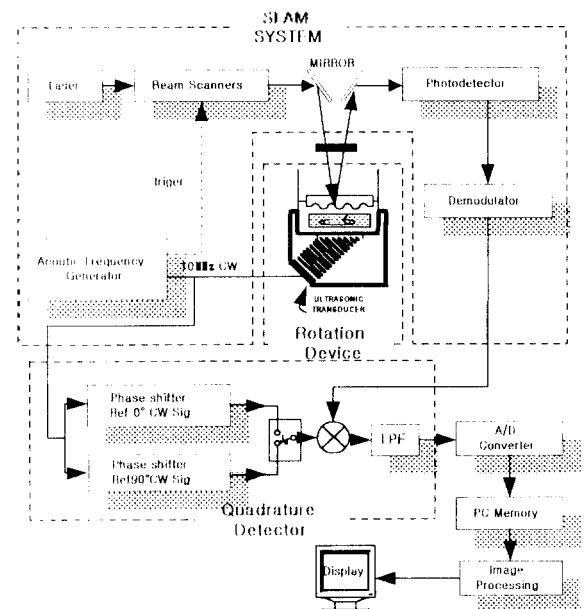


그림 4. STAM 시스템의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of STAM System.

각 프로젝션에 대한 실수부(동위상 성분)와 허수부(쿼드러쳐 성분)의 데이터는 A/D 변환기를 거쳐 PC 메모리에 저장되며, 이들 다중 프로젝션에 의해 획득한 토모그래피 데이터는 영상복원 프로그램을 이용한 영상처리를 통하여 각 층에 대한 토모그래피 영상을 복원한다. 실험을 위하여 시료로 평면모양의 다른 패턴을 갖는 아래층과 위층 사이의 간격이 1.2mm, 1.5mm 그리고 1.8mm인 2층 구조물을 알루미늄 재질로 가공하였다. 그림 5는 알루미늄 층을 갖는 시료 구조도이다.

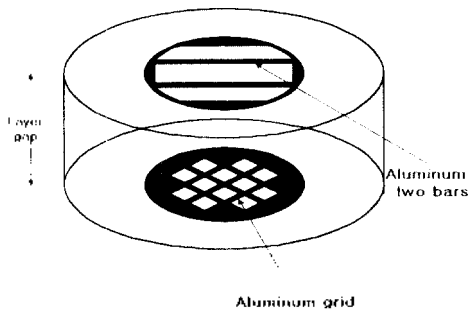


그림 5. 시료 구조도
Fig. 5. Scheme of specimen.

먼저 동작주파수가 10MHz인 평면형 초음파변환기를 사용한 기존의 SLAM 시스템으로부터 SLAM 영상을 획득하였다.

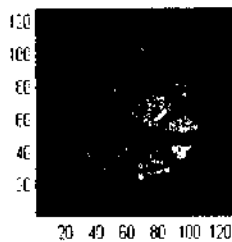
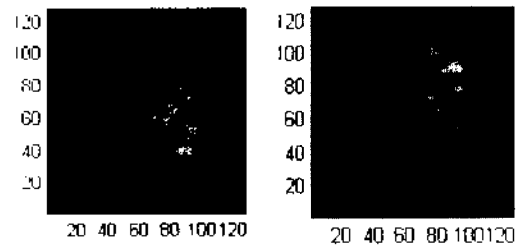


그림 6. 불균질 층의 시료에 대한 SLAM 영상
Fig. 6. SLAM image to the specimen with multilayered Structure.

그림 6은 이미지 필드가 128×128 pts인 SLAM 영상으로 저하된 콘트라스트와 불균질 층에 대한 중첩 현상을 나타낸다. SLAM 영상은 다층구조물에 대한 시료를 분석하는데 있어 제한적임을 알 수 있으며 불균질 층의 위치를 결정할 수 없는 단점을 보여준다.

본 STAM 시스템을 이용하여 토모그래피 영상을 복원하기 위한 실험조건으로 동작주파수가 10MHz인 평면형 초음파변환기를 사용하였고 초음파를 10°로 입사시켰으며 커버슬립을 시료에서 0.6mm 위에 위치시켰다. 시료 회전장치를 이용하여 4개의 프로젝션(0°, 90°, 180°, 270°)에 대한 토모그래피 데이터를 획득하였으며 쿼드러쳐 검출기로부터 각 프로젝션에 대한 진폭과 위상정보를 획득하였다.



(a) 아래층 영상 (b) 위층 영상

그림 7. 불균질 다층 구조물의 토모그래피 영상

Fig. 7. Tomographic image to the inhomogeneous multilayered structure.

그림 7은 본 STAM 시스템을 사용하여 획득한 토모그래피 데이터를 영상복원 프로그램을 이용하여 복원시킨 층 간격이 12λ인 시료에 대한 토모그래피 영상이다. 그림 7(a)는 아래층에 대한 토모그래피 영상이고 그림 7(b)는 위층에 대한 토모그래피 영상이다. 두 영상을 비교해 보면 아래층 영상은 좋은 분해능의 영상을 보였으며, 위층 영상은 투과파의 회절 및 산란에 의해 미세하게 중첩됨을 볼 수 있으나 그림 6의 중첩된 SLAM 영상과는 달리 각 층이 분리된 높은 분해능의 토모그래피 영상을 얻을 수 있었다. 또한 층 간격이 12λ인 시료에 대하여 영상복원 프로그램의 층 간격과 커버슬립과의 간격 조건을 변화시켜 복원한 토모그래피 영상을 비교분석한 결과, 시료 조건인 층 간격 12λ와 커버슬립과 시료 위층 간격 4λ에서 가장 좋은 콘트라스트를 갖는 토모그래피 영상을 복원하므로써 불균질 다층구조물에 대한 층의 위치를 결정할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 STAM 시스템을 구성하고 다층구조물에 대한 토모그래피 영상 복원과 축방향의 분해능에 관하여 연구하였다. 이를 위하여 쿼드러쳐 검출기와 시료 회전장치를 제작하여 기존의 SLAM 시스템에 부가하므로써 동작주파수가 10MHz인 STAM 시스템을 구성하였으며 BFP 알고리즘을 이용하여 시료 회전장치에 대한 영상복원 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서 구성한 STAM 시스템을 사용하여 알루미늄 재질로써 불균질 층 간격이 8λ, 10λ, 12λ이고 각 불균질 층이 서로 다른 패턴을 갖는 다층구조물의 시료에 대한 4중 프로젝션시켜 획득한 토모그래피 데이터를 영상처리한 결과, 본 STAM 시스템은 층 간격이 12λ인 시료에 대하여 각 층이 분리된 토모그래피 영상을 복원할 수 있었다. 또한 층 간격이 12λ인 시료에 대하여 영상복원 프로그램의 층 간격과 커버슬립과의 간격 조건을 변화시켜 복원한 토모그래피 영상을 비교분석한 결과, 실제 시료의 층 간

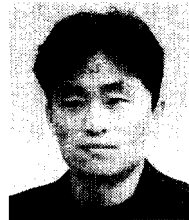
격인 12λ 조건에서 분해능이 가장 좋은 토모그래픽 영상을 복원함으로써 각 층에 대한 위치를 결정할 수 있었다.

앞으로 영상복원 알고리즘과 시료 회전장치의 얼라이먼트를 더욱 개선시킨다면 보다 높은 분해능을 갖는 토모그래픽 영상복원은 물론 다층 구조 및 결함에 대한 위치를 분석하는데 유용하게 이용되리라 기대된다.

참 고 문 헌

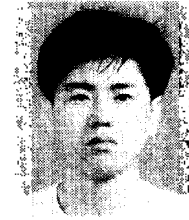
1. L. W. Kesser, "Acoustic Microscopy-an Industrial View", IEEE Ultras. Symp. pp. 725-728, 1988.
2. L. W. Kessler and D. E. Yuhas, "Acoustic Microscopy-1979", Proc. IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 526-536, April 1979.
3. Z. Lin, H. Lee, and G. Wade, "Data Acquisition in Tomographic Acoustic Microscopy", IEEE Ultrason. Symp., PP. 627-631, 1983.
4. R. Y. Chiao, H. Lee, "Multiple-Frequency and Multiple-Angle Tomography with the Scanning Tomographic Acoustic Microscope" IEEE. PP. 891-894, 1990.
5. B. L. Douglas, S. D. Kent, H. Lee, "Parameter Estimation and the Importance of Phase in Acoustic Microscopy", Ultrasonic Symposium. PP. 715-718, 1992.
6. 황기환, 전계석, "SLAM 영상을 이용한 크랙 깊이 측정", 한국음향학회지, Vol. 16, No. 3. pp. 51-56, 1997.
7. 황기환, 고대식, 전계석, "STAM 토모그래픽 영상의 분해능 해석", 한국음향학회지, Vol. 16, No. 1, PP. 33-38, 1997.
8. R. L. Whitman and A. Korpel, "Probing of Acoustic Surface Perturbations by Coherent Light," Applied Optics, Vol. 8, No. 8, PP. 1567-1576, Aug. 1969.
9. Z. Lin, "A Planar Ultrasonic Tomographic Imaging System", Ph. D. Dissertation, UCSB. 1984.
10. Z. Lin, H. Lee, and G. Wade, "Back-and-Forth Propagation for Diffraction Tomography", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol. SU-31, No. 6, Nov. 1984.

▲황 기 환(Ki Hwan Hwang)



1991년 2월: 경희대학교 물리학과(이학사)
 1993년 2월: 경희대학교 전자공학과(공학석사)
 1994년 3월 현재: 경희대학교 전자공학과 박사과정
 * 주관심분야: 토모그래픽 영상시스템, 음향-광 신호처리 및 영상처리, 비파괴 검사 등

▲김 현(Hyun Kim)



1990년 2월: 경희대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월: 경희대학교 전자공학과(공학석사)
 1992년 3월 현재: 경희대학교 전자공학과 박사과정
 * 주관심분야: 비파괴 검사, 초음파 신호처리 및 영상처리, 광-음향현미경, 안테나 등임

▲김 중 찬(Jong Chan Kim)

1988년~현재: 한국생산기술연구원 선임연구원

▲전 계 석(Kye Suk Jun)

한국음향학회지 14권 6호 참조