논 문

비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 16, No. 4 (1996)

횡파를 이용한 SLAM의 분해능 개선

고대식*, 박준석*, 김영환**
* 목원대학교 전자공학과
** 대한검사기술(주) 부설연구소

요 약 기존의 Scanning Laser Acoustic Microscope (SLAM)에 횡파를 사용함으로써 분해능을 개선시키는 방법을 연구하였다. 액체-고체 경계에서는 모드 변환이 발생하여 액체에서 입사되는 종파 에너지의 일부분은 고체 시험편 내에서 횡파 에너지로 변환된다. SLAM의 분해능은 수신측의 레이저 빔 폭과 입사되는 초음파의 파장에 의하여 결정되고, 고체에서 횡파의 파장은 같은 주파수의 종파의 파장보다 짧기 때문에 횡파를 사용한다면 높은 분해능을 얻을 수 있다. 종파와 횡파를 사용하였을 때에 얻어지는 SLAM 영상을 시뮬레이션을 통하여 비교하여 횡파를 이용하면 분해능이 향상됨을 입증하였다. SLAM을 횡파 모드에서 동작시키기 위하여 입사각을 조절할 수 있는 웻지를 제작하였고, 알루미늄 시험편에 대하여 실험한 결과로부터 종파 모드 SLAM에 의한 영상보다는 횡파 모드 SLAM의 영상의 콘트라스트가 양호함을 확인하였다.

1. 서 론

초음파 현미경은 매우 짧은 파장의 초음파를 사용하여 높은 분해능의 초음파 영상을 얻으며, 그 얻어지는 영상은 탄성 특성의 국부적인 변화에 대한 직접적인 정보를 제공한다. 이는 생체, 광물, 반도체, 복합 재료, 세라믹과 같은 넓은 범위의 대상체에 적용되어 왔다. SLAM은 고체 내부에 존재하는 미소 결함을 실시간 영상 처리할 수 있는 비파괴 검사 장치 중의 하나로, 종파를 사용하여 시험체를 투과한 초음파를 광학적 검출기로 측정하는 투과 모드 초음파 시험 장치로 최근에 상용화되어 산업계에서 이용하고 있으며, 대표적인 동작 주파수는 10MHz, 30MHz 그리고 100MHz 이다.[1)]

초음파가 물에서 고체 시험편으로 진행할 경우에 액체-고체 경계면에서 종파가 횡파로 변환되는 모드 변환이 발생하며, 이때의 종파와 횡파의 굴절각과 세기는 초음파의 입사각에 영향을 받는다.[2,3)] 입사각이 종파 임계각보다 작을 경우에는 종파는 물론이고 횡파도 투과되며, 이들은 다른 각도로 진행한다. 이 경우에는 잔상이 겹쳐져 나타날 수 있다. 입사각이 종파 임계각과 횡파 임계각 사이이면 시험편 내부에는 횡파만 전파하게 된다. 현재 사용되고 있는 SLAM은 초음파의 입사각을 0° 와 10° 로 고정하여 사용하기 때문에 대부분의 시험체에서 종파 모드로 사용한다. 일반적으로 SLAM의 분해능은 수신측의 레이저 빔 폭과 입사되는 초음파의 파장에 의하여 결정되므로, 동일한 시험체 내에서 횡파의 파장은 같은 주파수의 종파의 파장보다 짧기 때문에 SLAM에서 횡파를 사용한다면 높은 분해능을 얻을 수 있을 것이다. 횡파를 사용할 경우에는 잔상이 나타나지 않는 장점도 기대된다. 시험체 내를 전

(접수 : 1996. 9. 5)

파한 횡파는 고체-액체 경계면에서 종파로 변환되어 투과하므로 횡파에 의한 변위를 검출할 수 있다. 즉, 횡파 모드 SLAM에서 탐촉자에서 발생된 초음파가 종파-횡파-종파의 모드 변환을 거침으로서 발생과 수신은 종파 모드 SLAM과 동일하고 시험체 내부에서만 횡파로 전파한다.

SLAM에서는 knife-edge와 포토 다이오드를 이용한 광 검출기(일명 knife-edge detector)가 널리 사용되고 있다.[4,5] Knife-edge 검출기는 시험체를 투과한 초음파가 수신단에 놓인 플라스틱 거울 면(일명 coverslip)의 표면에 발생시키는 리플을 효과적으로 검출할 수 있는 장치이다. 즉 최대 40mW 출력을 갖는 He-Ne 레이저 빔을 사각으로 플라스틱 거울 면에 입사시키고 리플이 없는 곳에서 반사된 빛이 knife-edge를 절반만 통과하도록 하였다면 리플이 있는 곳에서는 반사된 빛이 편향되어 knife-edge를 통과하는 빛의 세기가 절반보다 크거나 작게 된다. 이러한 빛의 변화는 포토 다이오드에 의하여 전류의 변화로 변환되어 모니터에서 실시간 영상 처리된다.

본 논문에서는, SLAM의 분해능을 개선시키기 위하여 종파 대신에 횡파를 사용하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 액체-고체의 경계에서 발생하는 초음파의 모드 변환 현상을 해석하였고, 종파와 횡파를 사용하였을 때에 얻어지는 SLAM 영상을 시뮬레이션을 통하여 비교하여 횡파를 이용하면 분해능이 향상됨을 입증하였다. 상용화되어 있는 시스템을 횡파 모드에서 동작하도록 입사각을 변화시키는 방법으로 웻지의 사용을 제안하였다. 실험을 위하여, 뒷면에 표면 결함이 있는 알루미늄 시험편을 제작하고 Sonoscan사의 모델 2140 SLAM 시스템을 이용하여 횡파 모드 동작의 유용성을 확인하였다.

2. 횡파를 이용한 SLAM 시스템

2.1. SLAM 시스템의 구조 및 데이터 획득

Fig. 1은 SLAM 시스템의 데이터 획득 장치 부분을 나타낸 구성도이다. 평면형 초음파 변환기에 의하여 발생된 초음파는 quartz나 물(모델 2140의 10MHz 동작 모드에서는 물임)을 통과한 후 시험편을 투과하여 수신단에 놓인 플라스틱 거울 면에 도달하여 리플을 발생시킨다. 사각으로 입사되는 레이저 빔은 리플이 갖고 있는 초음파 정보를 검출하기 위하여 플라스틱 거울 면 위를 2차원적으로 주사하면서 리플의 크기에 따라 서로 다른 각도로 반사하게 되며 리플이 없는 반사 빔을 기준으로 고정시켜 놓은 knife-edge를 통과한 후 포토 다이오드에서 전기적 신호로 변환된다. 이렇게 전기적으로 변환된 신호는 쿼드라춰 검출기(quadrature detector)나 포락선 검출기를 거쳐 직접 비디오 디스플레이 장치로 보내지거나 A/D변환되어 디지털 영상 처리된다.

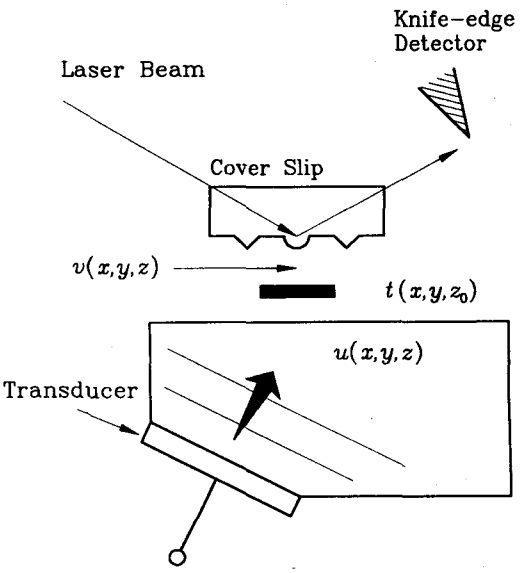


Fig. 1. Data acquisition of the SLAM.

Fig. 1에서 영상 처리하고자 하는 평면 즉 결함이 z_0에 있고, 입사파는 $u(x,y,z)$이며 투과파는 $v(x,y,z)$로 나타내었다. 위에서 언급된 SLAM 시스템의 수신파를 해석하기 위하여 입사파를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.[1~6]

$$u(x,y,z)=u_0\exp[j2\pi(f_{xi}x+f_{yi}y+f_{zi}z)] \cdots (1)$$

여기서, u_0는 초음파의 진폭, λ는 초음파의 파장, f_{xi}, f_{yi}는 $f_{zi}=\sqrt{1/\lambda^2-f_{xi}^2+f_{yi}^2}$ 관계를 갖는 초음파의 공간 주파수(spatial frequency)이다. 영상 처리하고자 하는 평면인 $z=z_0$의 초음파 투과

과 함수를 $t(x, y, z_0)$라고 하면 입사된 초음파는 이 투과 함수에 의하여 변조될 것이며 잡음 신호 성분을 $n(x, y, z_0)$이라면 결함층을 투과한 초음파는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v(x, y, z_0) = u(x, y, z_0)t(x, y, z_0) + n(x, y, z_0) \cdots (2)$$

2.2. 모드 변환 및 횡파의 검출

SLAM을 횡파 모드에서 동작시키기 위하여 초음파의 모드 변환 원리를 이용할 수 있다. 탐촉자에서 발생된 초음파(종파)가 Fig. 2와 같이 물에서 알루미늄과 같은 고체에 입사할 때에, 일부는 반사되고, 일부는 시험체 내부로 투과되며 모드 변환으로 횡파가 발생된다. 특히 입사각이 종파 임계각(12.9°)보다 크면 알루미늄 내부에는 횡파만이 투과 전파하게 되며, 이 경우에 투과된 횡파는 수신단인 알루미늄과 물 경계에서 모드 변환에 의해 종파로 변환되어 물로 투과한다.

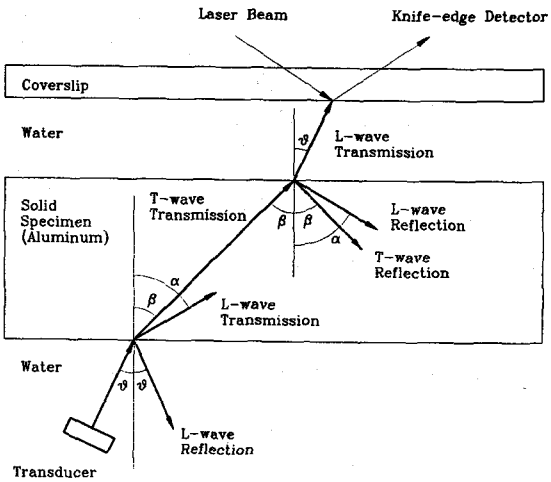


Fig. 2. Mode conversion of acoustic waves in SLAM. (L : Longitudinal wave, T : Transverse wave)

두 매질의 경계에서는 반사 및 굴절이 일어나고, 이때의 반사각이나 굴절각은 매질에서의 음파의 속도에 의해 결정된다(Snell의 법칙). 만약, 종파가 물에서 알루미늄으로 전파된다면, 종파 및 횡파의 투과 계수는 입사각의 함수로써 각각 식 (3)과 (4)로 구해진다[7].

$$T_{L\to L} = \frac{4}{N^2}\frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_L}\frac{\cos\alpha\ \sin 2\beta\ \sin 2\alpha}{\cos\theta} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$T_{L\to T} = \frac{4}{N^2}\left(\frac{V_T}{V_L^2}\right)^2\frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_L}\frac{\cos\alpha\ \sin 2\beta\ \sin 2\alpha}{\cos\theta} \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서, $T_{L\to L}$은 종파 입사에 대한 종파 투과 계수를, $T_{L\to T}$는 종파 입사에 대한 횡파 투과 계수를 나타내며 N은 다음과 같이 정의된다.

$$N = \left(\frac{V_T}{V_L}\right)\sin 2\alpha \sin 2\beta + \cos^2 2\beta + \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_L}\frac{\cos\alpha}{\cos\theta}$$

여기서 V_2는 물에서의 초음파의 속도이고, V_L과 V_T는 고체에서의 종파 및 횡파 속도이다. 그리고 ρ_1은 고체의 밀도, ρ_2는 물의 밀도이며 θ, α, β는 Fig. 2에 나타난 입사각, 종파 굴절각 및 횡파 굴절각이다. 여기서 투과 계수는 입사파와 투과파의 세기의 표면에 수직한 성분비로 정의하였고 따라서 시험체에서 물로 투과될 때의 투과 계수와 같다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 물로부터 알루미늄으로 종파가 입사되었을 때 입사각 변화에 따른 종파 및 횡파 투과 계수의 크기를 구해 보면 Fig. 3과 같다.[3~7] 이때 사용된 물에서의 초음파 속도, 알루미늄에서의 종파 속도 및 횡파 속도는 각각 1480m/s, 6420 m/s, 3040m/s이고 물과 알루미늄의 밀도는 각각 1.0g/cm^3, 2.7g/cm^{3}이다.

Fig. 3에서 입사각이 0°일 경우에는 종파만 투과하고, 입사각이 점차 증가하면 종파의 투과는 감소하고 모드 변환에 의하여 횡파도 투과하게 된다. 이 경우에 횡파의 굴절각은 종파의 굴절각과 다르므로 동일한 대상체에 대해서 다른 위치에 흐릿한 영상을 나타내는 원인이 될 수 있다. 입사각이 종파 임계각인 12.9°에 다다르면 종파의 투과는 더 이상 존재하지 않고 입사각이 더 커지면 횡파의 투과가 증가하며 이러한 횡파의 투과는 횡파 임계각도까지 계속된다. 입사각이 대략 17°가 되면 입사된 종파의 절반 정도가 횡파로 변환되는데 이는 종파가 투과될 경우보다 더 큼을 나타낸다. 물론 입사각이 횡파

의 임계각인 29°보다도 크다면 입사된 초음파는 투과하지 못한다.

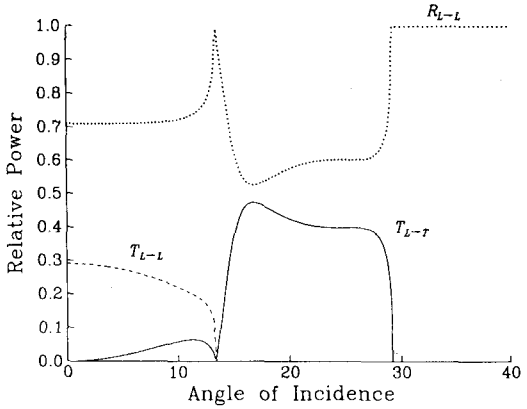


Fig. 3. Transmission coefficients as a function of incident angle at the interface of water and aluminum. The transmission and reflection coefficients are defined in terms of power density normal to interface between the media.
($R_{L\to L}$: power reflection coefficient, $T_{L\to L}$: transmission coefficient to a longitudinal wave, $T_{L\to T}$: transmission coefficient to a transverse wave)

한편 수신단에서의 횡파의 광학적 검출은 Fig. 2에서 알루미늄과 물의 경계에서 나타난 모드 변환을 이용하여 쉽게 구현될 수 있다. 즉 고체 내부를 투과한 횡파가 물과의 경계에 다다르면 고체와 물 경계에서는 다시 한번 모드 변환이 나타나기 때문에 횡파는 종파로 변환된다. 이때 알루미늄으로부터 물로 모드 변환되어 투과되는 초음파의 세기와 입사각의 관계는 식 (4)에 나타낸 물로부터 알루미늄으로 투과되는 횡파와 입사각과의 관계와 동일하다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

횡파를 이용한 SLAM의 성능을 알아보기 위하여 Fig. 4와 같은 인공 결함을 갖는 알루미늄 시료를 제작하였다. 먼저 시뮬레이션을 통한 성능 평가를 위해 설계된 시료를 프로그램을 이용하여 128×128 크기의 데이터 파일로 저장하였다. 즉 시료의 크기는 알루미늄의 횡파 파장의 64배 크기(약 2cm×2cm)로 가정하였으므로 한 라인의 데이터가 그리는 폭은 0.5 파장이 된다(0.5×0.3mm=0.15mm). 따라서 알루미늄에서의 횡파 파장인 0.3 mm의 폭을 갖는 결함 패턴은 두 라인의 데이터 값으로 만들 수 있다. 결함 패턴과 결함이 없는 부분의 차이는 결함이 있는 곳에 대한 데이터는 0.5로 하고 그 이외의 데이터는 모두 1로 하면 결함이 없는 부분에서는 감쇠없이 초음파가 투과되고 결함이 있는 부분에서는 입사된 초음파의 크기가 0.5씩 감쇠되어 투과하는 효과를 얻을

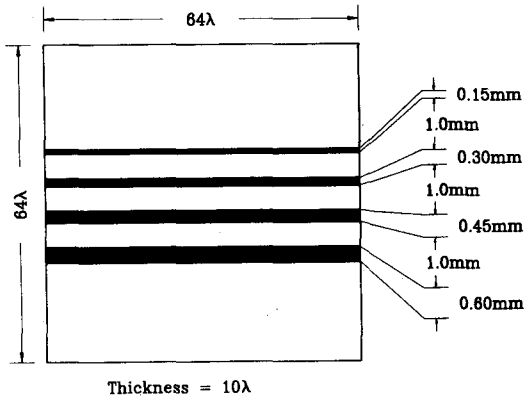
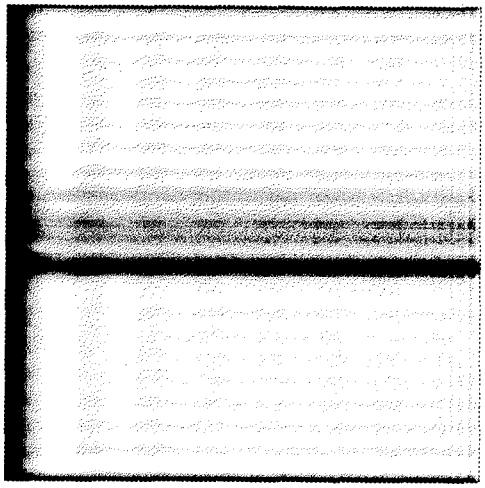


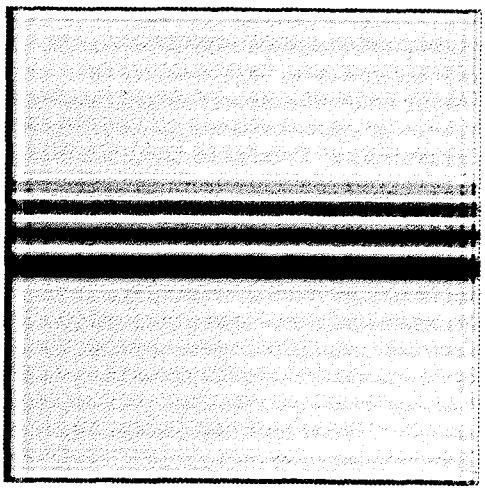
Fig. 4. Attenuation patterns of the specimen for simulation.

수 있다. Fig. 5-(a)와 (b)는 이와 같은 방법으로 얻어진 데이터를 가지고 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 종파와 횡파 모드에서 동작시킨 SLAM 시스템의 시뮬레이션 영상이다. 즉 종파 모드 동작을 위하여 입사각은 10°로 하고 파장은 종파 파장을 사용하였고 횡파 모드 동작을 위하여 입사각은 17°로 하고 파장은 횡파 파장을 사용하였으며 음향 감쇠나 각종 잡음은 무시하였다. 이 경우에 종파나 횡파 모드에 대하여 굴절각은 48° 정도로 동일하다. 시뮬레이션 결과, Fig. 5-(b)의 횡파 모드 컴퓨터 시뮬레이션 영상의 선명도가 종파 모드 영상보다 양호함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 모델 2140 SLAM을 이용하고 크기가 25 mm×90mm×10mm인 알루미늄에 폭이 0.1mm, 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm이고 결함의 깊이가 0.2mm인 결함을 갖는 알루미늄 시험체에 대하여 실험으로 얻어진 영상이다. 모델 2140 SLAM은 Sonoscan, Inc. 에서 제작한 시스템으로 초음파의 입사각은 0°와



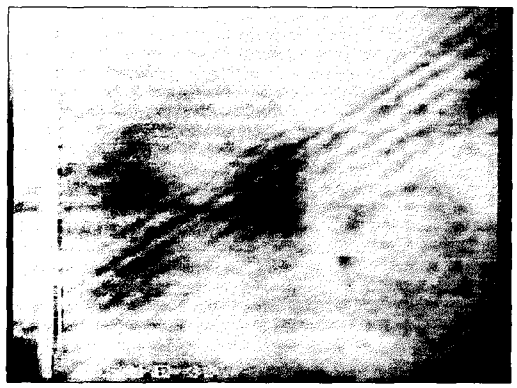
(a)



(b)

Fig. 5. Simulated images of the SLAM.
(a) Longitudinal wave image
(b) Transverse wave image

10° 동작 모드가 있고 동작 주파수 10MHz, 20-30 MHz, 100MHz가 별도의 물탱크와 레이저 스캔 장치를 갖도록 동작 스테이지가 분리되어 있으며 실시간으로 TV모니터를 이용하여 2차원 영상을 출력시킬 수 있다. 본 실험에서는 시료의 두께가 크므로 감쇠를 고려하여 동작 주파수로 10MHz를 사용하



(a)

(b)

Fig. 6. Experimental images of the SLAM.
(a) Longitudinal wave image
(b) Transverse wave image

였고 이때 레이저의 스캐닝 영역은 36 x 25mm 이었다.

Fig. 6-(a)는 기존 시스템의 입사각 중에서 10°를 이용하여 종파 영상을 얻은 것이고 Fig. 6-(b)는 기존의 입사각도 10°에 7°의 각도를 갖는 웻지를 이용하여 입사각을 17°로 변경시켜 횡파 모드에서 동작시킨 결과이다. Fig. 6에서 전체적으로 많은 잡음을 포함하고 있으며 라인이 비스듬하게 나타난 것은 보다 양호한 영상을 얻기 위하여 시료를 회전시켰기 때문이다. 알루미늄의 종파 파장은 0.64mm이고 횡파 파장은 0.30mm이므로 종파 영상에서는 0.6mm의 폭을 갖는 결함만 정확하게 검출할 것이고 나머지 작은 결함들은

흐릿한(blurring) 영상으로 나타난다. 반면에 횡파 영상에서는 0.3mm이상의 결함을 흐릿한 현상없이 검출할 수 있다. 하지만 Fig. 6의 실험 결과에서는 많은 잡음과 간섭의 영향으로 인하여 영상의 선명도 혹은 콘트라스트만을 비교 평가할 수 있었다. 실험으로 얻어진 영상에 나타난 여러 가지 간섭 현상의 원인을 살펴보면 우선, 결함의 제작시 시료의 두께를 10mm로 크게 하여 많은 음향 감쇠가 있었고 결함과 결함 사이의 간격을 1mm로 일정하게 설계하였기 때문에 실제의 결함 영상과 간섭에 의한 영상을 구별하기 어려웠고 더군다나 최소한의 깊이를 가질 수밖에 없는 결함의 깊이가 0.2mm인 관계로 초음파의 사각 입사에 따른 그림자 영상 또한 간섭으로 작용하였다. SLAM에서 나타나는 이와 같은 그림자 영상은 표면에 대하여 폭은 거의 없고 수직으로만 발생한 균열의 깊이를 측정하는 기술로 응용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는, SLAM의 분해능을 개선시키기 위하여 횡파를 이용하는 방법을 연구 분석하였다. 연구 결과, 초음파의 모드 변환을 통하여 시료 내부에 횡파를 발생시킬 수 있고 이를 위하여 상업화된 SLAM에서 초음파 입사각을 변경시키는 웻지를 이용할 수 있었다. 횡파의 광학적 검출은 고체 시료를 통과한 횡파의 모드 변환과 기존의 knife-edge 검출기를 이용하여 실현될 수 있다.

종파를 이용한 SLAM 영상과 횡파를 이용한 SLAM 영상을 비교하기 위해서, 인공 결함을 갖는 알루미늄 시료를 사용하여 시뮬레이션한 결과, 횡파 모드 SLAM의 분해능이 종파 모드 SLAM의 분해능보다 양호하였으며 모델 2140 SLAM을 횡파 모드에서 동작시키기 위한 웻지와 10MHz 초음파 변환기를 사용하여 얻어진 실험 결과 또한 이를 확인시켜 주었다. 횡파 모드 SLAM의 또 다른 장점으로는 종파 모드에서 생길 수 있는 이중상의 현상이 없다는 점이다. 만약 웻지 대신 종파 및 횡파를 발생시킬 수 있는 이중 구조의 초음파 변환기를 이용하고 추가적인 디지털 영상 처리 기술이 적용된다면 보다 양호한 실험 결과를 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

실험에 도움을 주신 삼성전자와 좋은 비평을 해주신 심사위원들에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. L. W. Kessler and D. E. Yuhas, "Acoustic Microscopy," Proc. IEEE, Vol. 67(1979), pp. 526-526.
2. D. S. Ko, A. Meyyappan and G. Wade, "A Planar Ultrasonic Tomography using Shear Waves," IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation(1996), pp. 85-88.
3. G. S. Kino, Acoustic Waves, Prentice-Hall, Chapter 2(1987).
4. R. K. Muller and R. L. Rylander, "New Demodulation Scheme for Laser Scanned-acoustic Imaging Systems," J. Opt. Soc. Amer., vol. 69 Mar.(1979), pp. 407-412.
5. R. L. Whitman and A. Korpel, "Probing of Acoustic Surface Purtubations by Coherent Light," Appl. Opt., Vol. 89(1969), pp. 1567-1576.
6. J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, Chapter 3(1968).
7. J. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, Appendix (1977).

Resolution Enhancement of Scanning Laser Acoustic Microscope Using Transverse Wave

D. S. Ko*, J. S. Park* and Y. H. Kim**
* Dept. of Electronic Engineering, Mokwon Univ., Taejon 301-729
** Korea Inspection & Engineering Co., R & D Center., Seoul 137-060

Abstract We studied the resolution enhancement of a novel scanning laser acoustic microscope (SLAM) using transverse waves. Mode conversion of the ultrasonic wave takes place at the liquid-solid interface and some energy of the insonifying longitudinal waves in the water will convert to transverse wave energy within the solid specimen. The resolution of SLAM depends on the size of detecting laser spot and the wavelength of the insonifying ultrasonic waves. Since the wavelength of the transverse wave is shorter than that of the longitudinal wave, we are able to achieve the high resolution by using transverse waves. In order to operate SLAM in the transverse wave mode, we made wedge for changing the incident angle. Our experimental results with model 2140 SLAM and an aluminum specimen showed higher contrast of the SLAM image in the transverse wave mode than that in the longitudinal wave mode.

(*Received : September* 5, 1996)