한국소음진동공학회논문집 제 15 권 제 1 호, pp. 81~86, 2005.

조향 자기변형 트랜스듀서를 이용한 평판 결함진단

Damage Detection in a Plate Using an Orientation-adjustable Magnetostrictive Transducer

조승현* · 이주승* · 선경호* · 김윤영†

Seung Hyun Cho, Ju Seung Lee, Kyung Ho Sun and Yoon Young Kim

(2004년 10월 22일 접수 : 2004년 12월 29일 심사완료)

Key Words : Damage Detection(결함진단), Magnetostrictive Transducer(자기변형 트랜스듀서), Plate(판재), Guided Wave(유도초음파), Orientation-adjustable(조향 가능)

ABSTRACT

In this work, we propose a new ultrasonic damage inspection method in plate structures. The proposed method employs an OPMT(orientation-adjustable patch-type magnetostrictive transducer) in order to make the ultrasonic waves directed to a specific target point. For experiments, virtual grid points were set up at every 50 mm in an aluminum plate and two OPMTs were used for inspection. If there exists a crack in a plate, the reflected Lamb wave from the crack is measured in addition to the direct waves from the transmitting transducer to the receiving transducer.

1. 서 론

평판이나 셸(shell) 구조물의 건전성 평가나 상태 감시를 위해 제안된 많은 방식 중에, 유도초음파(guided wave)를 이용한 탐상법은 넓은 영역을 손쉽게 탐상할 수 있기 때문에 거대 구조물의 이상진단에 매우 효율적이다. 유도초음파를 기반으로 하는 전통적인 탐상법은 주로 1차원 방향으로의 탐상에 적용되어왔으나,[1,2] 이차원 구조에 대한 유도 초음파 탐상 기법에 대한 연구는 그리 많지 않다.

트랜스듀서를 이동시키지 않고 2차원 탐상을 효율적으로 할 수 있는 2차원 유도초음파 탐상 기법으로 위상 배열 트랜스듀서 기법(phased array transducer method)[3,4]이 있다. 이 방법은 다수의 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)를 배열한 후, 각 트랜스듀서의 가진 신호의 위상을 제어하여 특정 위치에 초음파 에너지가 집중시켜 2차원 탐상을 수행하는 방법이다. 하지만, 이 방식은 다수의 압전 트랜스듀서를 사용하여야 하고 또 각각의 신호를 정확하게 제어하여야 한다는 단점을 지니고 있다.

이 연구에서는 이에 대한 대안으로 최근에 제안된 OPMT(orientation-adjustable patch-type magnetostrictive transducer)[5,6]를 이용한 이차원 탐상법을 제시하고자 한다. OPMT는 자기변형 현상(magnetostrictive effect)을 이용한 트랜스듀서로 영구 자석, 코일 및 니켈 패치 등과 같은 간단한 요소로 이루어져 있다. 이 트랜스듀서는 이동하지 않고도, 원하는 방향으로 초음파을 보낼 수 있도록 고안되었기 때문에, 극히 소수의 트랜스듀서를 사용하여도 비교적 넓은 2차원 영역을 탐상할 수 있다. 이 트랜스듀서의 작동 원리는 다음 절에서 소개할 것이다.

이 연구의 목적은 두 개의 OPMT를 이용하여 평판 구조물에 존재하는 결함을 탐상하는 방법을 제시하고 이를 인공적인 원형 결함이 있는 평판에서 실험적으로 검증하는 것이다. OPMT는 한 개로 가진과

† 책임저자, 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7154, Fax : (02) 872-5431
* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

수신이 가능하나, 이 연구에서는 한 개의 OPMT는 가진용으로만, 그리고 다른 한 개의 OPMT는 수신용으로만 사용하고자 한다.

결함 탐상 실험을 위해 알루미늄 평판의 영역을 50 mm 간격을 갖는 가상 격자점(grid points)으로 나누었다. 2차원 탐상을 위해 두개의 트랜스듀서에서 각각 발생되고 수신되는 초음파 방향이 탐상하고자 하는 격자점을 향하도록 하는 것이 본 연구의 핵심 아이디어이다. 결함 주위의 여러 격자점을 목표로 탐상을 하여 과연 결함의 정보를 효과적으로 유추해낼 수 있는지 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

램(Lamb)파와 SH(shear horizontal)파를 동시에 발생시키는 OPMT의 특성으로 인해, 측정 신호에는 두 유도초음파가 모두 측정이 된다. 두 트랜스듀서의 위치와 파의 속도는 미리 알고 있으므로 램파와 SH파가 측정되는 시간을 예측할 수 있다. 이 때, 두 트랜스듀서가 향하는 격자점의 위치에 결함이 존재할 경우에는 직접 전파되어오는 램파와 SH파 외에도 결함에서 반사되어오는 파가 수신용 트랜스듀서에 의해 측정이 되므로 그 신호로부터 결함의 유무를 판별할 수 있다.

2. OPMT의 원리

이 연구팀에 의해 제작된 OPMT의 모습은 Fig. 1 (a)에, 그 구조는 Fig. 1(b)에 제시하였다.[5,6] OPMT는 두 개의 바이어스 영구 자석, 8자형 코일, 비자성체 하우징으로 구성되며, 비자성 구조물를 탐상하는 경우 그림에서와 같이 원형 니켈 패치를 탐상대상에 에폭시로 부착한다. 여기서, 니켈 패치를 제외한, 영구 자석, 8자형 코일을 포함하는 하우징 부분은 니켈 패치 위에 단순히 올려놓기만 하면 되기 때문에, 자유롭게 회전이 가능하다.

OPMT는 니켈의 자기변형 현상을 이용하는 것인데, 이것은 니켈과 같은 자성체에 자기장이 인가되면 기계적인 변형이 발생하고, 자성체에 발생한 기계적인 변형은 역으로 자기장의 변화를 일으키는 현상을 지칭한다.[7,8] 그런데 주요 기계적 변형은 자기장 벡터의 방향으로 발생하기 때문에, Fig. 1(b)에 큰 화살표로 표시한 자기장의 방향을 주요 기계적 변형을 일으키고자 하는 방향으로 조정하면, 그 방향으로 램(Lamb)파[9~11]형태의 초음파가 발생된다.(Fig. 2(a) 참조) 그런데 교류 자기장을 가하는 순간 그 방향으로 인장 변형이 발생하게 되면, 푸아송

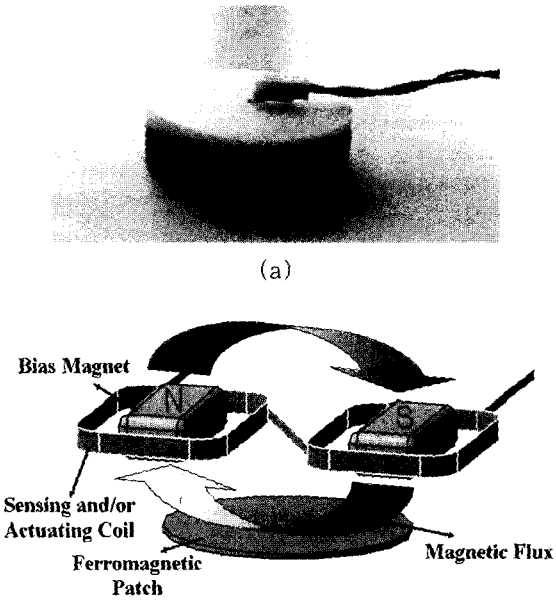


Fig. 1 (a) Manufactured OPMT (b) Schematic diagram of an OPMT

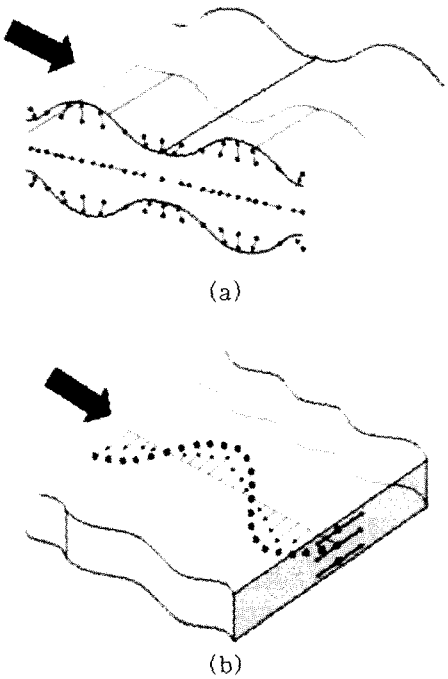


Fig. 2 Guided waves in a plate (a) Lamb wave (b) SH wave

효과에 의해 그 방향과 90도 되는 방향으로 압축 변형이 발생하게 된다. 따라서 어떤 방향에는 램파 뿐만 아니라 SH(shear horizontal)파라고(Fig. 2(b) 참조) 하는 전단파도 전달된다. OPMT의 각 방향에서 측정한 신호에 따르면,[6] 자기장 방향과 거기에 수직한 방향으로는 램파만이 전달되고, 자기장 방향으로부터 약 60도 되는 방향으로는 SH파만이 전달된다. 측정하는 트랜스듀서의 경우에는 상반정리(reciprocal theorem)에 의해 초음파가 발생하는 경우와 상반되는(reciprocal) 현상이 측정용 트랜스듀서에 적용된다.

3. OPMT를 이용한 평판 탐상

먼저 OPMT를 초음파를 이용한 결함 탐상에 적용하기 위해서는 램파와 SH파의 전파속도를 실험적으로 구해야 한다. 원하는 주파수가 선정되면 두 개의 OPMT로 램파와 SH파의 속도를 측정하게 된다. Cho 등[6]의 연구 결과에 따르면, 가진용 트랜스듀서와 수신용 트랜스듀서를 이어주는 방향으로 자기장을 인가해주면, 램파만을 측정할 수 있고, 그 방향에서 각각 60도 되는 방향으로 자기장을 인가해주면 SH파만을 측정할 수 있다. 따라서, 간단한 예비 실험을 통해서 원하는 주파수의 전파속도를 구할 수 있다.

이 연구에서는 OPMT를 이용하여 평판의 결함 탐상을 하기 위해 다음과 같은 탐상 전략 제안한다.

(1) 탐상 대상 판 구조에 적당한 간격을 갖는 가상의 격자를 구성한다.(일반적으로 격자의 크기를 줄이면 탐상의 정밀도를 높일 수 있다.)

(2) 가진용 OPMT와 수신용 OPMT의 자기장방향이 가상의 격자점을 향하도록 조절한다.

(3) 가진용 OPMT에 신호처리가 용이한 특정 형상의 신호를 발생시킨다.(사용된 가진신호의 형태는 아래의 식 (1)로 주어짐)

(4) 가상의 모든 격자점을 목표로 하여 신호를 측정한 후, 결함으로부터 반사되는 신호의 크기가 가장 크게 나타나는 격자점의 위치를 결함의 위치로 판정한다.

이 실험에서는 가진용 트랜스듀서에 입사되는 가진신호로서 다음과 같은 가보 펄스[12]를 사용하였다.

$$f_{Gp}(t)=\frac{1}{(\pi\hat{\sigma})^{\frac{1}{4}}}e^{-\frac{t^2}{2\hat{\sigma}^2}}\cos\eta t \tag{1}$$

식 (1)의 가보 펄스는 시간-주파수 영역에서 에너지를 가장 집중시킬 수 있는 함수로서, 램파와 같이 분산 현상이 일어나는 경우 특히 유용하게 사용될 수 있고, 식 (1)의 펄스를 이용한 신호처리 기법은 참고문헌 (12)에서 제시된 바 있다. 식 (1)에서 η는 가보 펄스의 중심주파수, $\hat{\sigma}$는 시간 영역에서 펄스의 폭을 나타내는데, 이 연구에서는 $\eta=200$ kHz, $\hat{\sigma}=8\times10^{-6}$ sec를 사용하였다.(물론 주파수가 높을수록 작은 결함을 탐상할 수 있으나, 이 연구에서는 OPMT의 유용성을 보여주는 것을 주 목적으로 하였기 때문에 200 kHz의 한 주파수만을 사용하였다.)

위에서 제안한 탐상 기법의 유용성을 검증하기 위해서 Fig. 3과 같은 실험 장치를 구성하였다. 지름이 8 mm인 원형 구멍 결함을 갖는 두께 3 mm의 알루미늄 판을 측정 대상으로 하였으며 두 개의 OPMT를 각각 가진 및 측정용 트랜스듀서로 사용하였다. 그리고 실제 결함 탐상에 사용된 두 개의 트랜스듀서의 위치, 그리고 결함의 위치는 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 이 실험에서 결함은 지름이 8 mm인 인공적인 원형 구멍으로 선택하였다.

위에서 제시한 탐상 전략 1의 구현을 위해 가상 격자점을 50 mm 등간격으로 나누었다. 그 후 탐상 전략 2, 3, 4를 이용하여 결함 탐상을 수행하고 측정된 신호를 분석하였다.

Fig. 5는 결함이 없는 평판에서 트랜스듀서의 위치

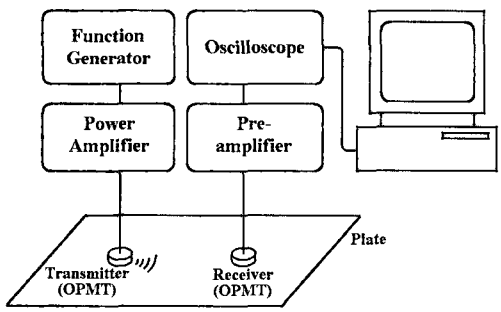
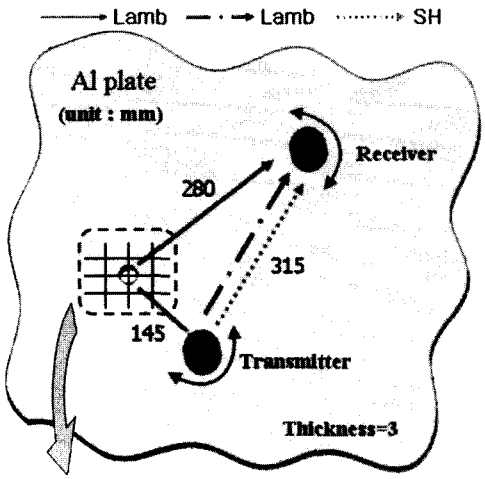
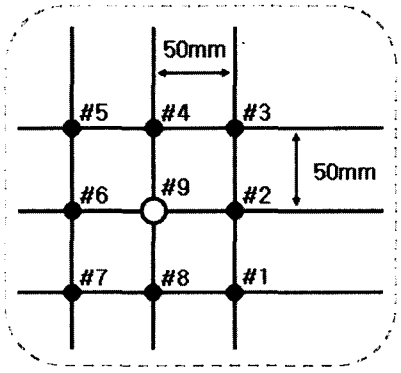


Fig. 3 The experimental arrangement (function generator: agilent 33120A, power amplifier: RAM5000, pre-amplifier: SR560, oscilloscope: Lecroy LT354)



(a)



(b)

Fig. 4 (a) The location of OPMT's(a transmitter and a receiver) in a 3-mm thick plate with a hole (hole diameter = 8 mm) The arrows on OPMT in the figure denote the directions of the applied bias magnetic flux. (b) Grid points on a plate. Point #9 corresponds to the damage location

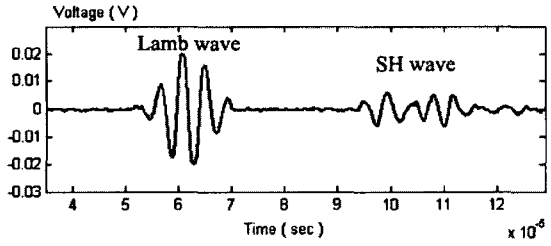


Fig. 5 The measured signal in a plate without any crack. The locations of the transducers are the same as those illustrated in Fig. 4

를 Fig. 4와 같이 두고, 또 각 트랜스듀서에 인가되는 자기장의 방향을 결함이 있는 곳을 향하도록 하여 측정한 신호이다. 측정된 신호에서 알 수 있듯이, 탐상에 참가하는 두개의 트랜스듀서에 가해지는 자기장의 방향이 두 트랜스듀서를 연결하는 방향과 일치하지 않기 때문에, 램파와 SH파가 모두 측정되었다. 여기서 램파의 전파속도(5222 m/sec)가 SH파의 전파속도(3080 m/sec)보다 빠르기 때문에 Fig. 5에서처럼, 램파가 먼저 측정된 다음 SH 파가 측정된다.

실제 제안된 탐상 기법을 이용하여 측정된 신호를 알기 쉽게 보여주기 위해, 편의상 결함주위의 가상 격

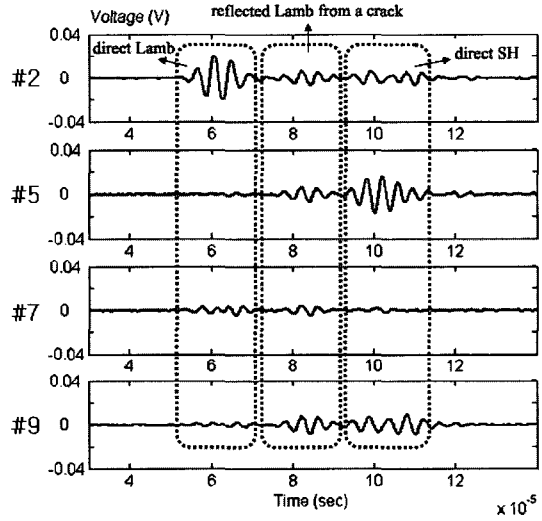


Fig. 6 The measured signals when the magnetic fluxes of the transmitting and the receiving transducers point in the direction of the crack. The transmitter and the receiver orient grid point #2, #5, #7, and #9, respectively

Table 1 Signal magnitude (mV) of the reflected signals from a crack

Node number	Signal magnitude (mV)
#1	14.0
#2	12.7
#3	10.9
#4	14.2
#5	14.0
#6	13.1
#7	9.20
#8	10.9
#9	15.9

자점을 Fig. 4(b)와 같이 지정하였다. 이 그림에서 결함은 9번 격자점의 위치에 놓이기 때문에, 9번 격자점을 향하도록 두 개의 트랜스듀서의 방향을 맞추어 신호를 측정하면, 다른 격자점을 향해 측정한 신호의 경우보다, 큰 결함 신호가 얻어져야만 할 것이다.

Fig. 6은 결함 위치 및 결함 주변의 격자점을 향해 두 개의 OPMT의 자기장 방향을 맞추어 얻은 신호이다. Fig. 6에서 얻어진 신호와, 결함이 없는 신호, 즉 Fig. 5의 신호와 비교하면, 가진용 트랜스듀서에서 수신용 트랜스듀서로 직접 전파되는 램파와 SH파 사이에, 결함으로부터 반사되어 오는 신호가(이 경우 램파로 확인됨) 측정됨을 알 수 있다.

Table 1은 신호의 크기, 즉 결함으로부터 반사된 신호의 피크치(peak-to-peak value)의 크기를 Fig. 6의 각 격자점에 대하여 구하였다. 결함신호의 정확한 크기를 구하기 위한 신호처리 기법으로 Hong 등[12]이 제안한 정합추적(matching pursuit)기법을 사용하였다. 정합추적기법은 해석하고자 하는 신호를 적합한 함수로 근사화 시키는 기법으로서, 이 실험에서는 결함에 의해 반사된 펄스를 특정한 형태의 가보함수로 근사화시켰다. 그 과정에서 추출된 결함신호의 크기는 Table 1에 도시하였다. Table 1의 결과에서 알 수 있듯이 결함이 위치한 9번 격자점의 위치를 목표로 하여 초음파를 발생시켜 계측을 했을 시에 가장 큰 신호가 되돌아옴을 알 수 있다. 즉 이 결과로부터 격자 9의 위치에서 결함이 있다는 사실을 예측할 수 있다. 만약 목표 격자점과 두 개의 트랜스듀서의 간격에 따라 신호의 감쇠(attenuation) 현상까지 고려하게 되면, 위 실험 결과를 확장하여 평판에 대한 2차원 영상을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 연구에서는 특정 방향으로 초음파 전파 방향 조절이 가능한 자기변형 트랜스듀서인 OPMT를 이용하여 2차원 평판구조물의 결함을 탐상할 수 있는 기법을 제시하였다. 알루미늄 판재에 설치된 가진 및 측정용 OPMT는 일정한 간격을 이루는 가상의 격자점을 향하여 유도초음파를 보낼 수 있었고, 결함이 있는 경우 그 결함에서 반사된 램파를 측정용 OPMT로 효과적으로 측정할 수 있었다. 이 연구에서는 결함주위의 여러 격자점을 목표로 초음파 신호를 보내고 받는 실험을 수행하였다. 이를 통해, 두 개의 OPMT의 자기장 방향이 결함을 향하게 되면 큰 결함 반사신호를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Kwun, H., Light, G. M., Kim, S.-Y., Spinks, R. L., 2002, "Magnetostrictive Sensor for Active Health Monitoring in Structures," Proceedings of SPIE, Vol. 4702, pp. 282~288.

(2) Light, G. M., Kwun, H., Kim, S.-Y., Spinks, R. L., Jr., 2002, "Method and Apparatus for Short Term Inspection or Long Term Structural Health Monitoring," U. S. Patent 6396262 B2.

(3) Purekar, A. S., Pines, D. J., Sundararaman, S. and Adams, D. E., 2004, "Directional Piezoelectric Phased Array Filters for Detecting Damage in Isotropic Plates", Smart Mater. Struct., Vol. 13, pp. 838~850.

(4) Wilcox, P. D., Lowe, M. J. S., Cawley, P., 2000, "Lamb and SH Wave Transducer Arrays for the Inspection of Large Areas of Thick Plates," Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 19, American Institute of Physics, pp. 1049~1056.

(5) 이주승, 조승현, 선경호, 김윤영, 2004, "자기변형 트랜스듀서를 이용한 평판구조물의 특정방향 가진 및 측정," 한국소음진동공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 153~158.

(6) Cho, S. H., Sun, K. H., Lee, J. S., and Kim, Y. Y. 2004 "Orientation-adjustable Patch-type Magnetostrictive Ultrasonic Transducer for Non-ferromagnetic Plates," Proceedings of EMSA 2004, pp. T-O 6.

(7) Joule, J. P., 1847, "On the Effect of Magnetism upon the Dimensions of Iron and Steel Bars," Phi. Mag. III, 30, pp.76.

(8) Villari, E., 1865, "Change of Magnetization by Tension and by Electric Current," Ann. Phy. Chem., 126, pp. 87~122.

(9) Thompson, R. B., 1977, "Mechanisms of Electro-magnetic Generation and Detection of Ultrasonic Lamb Waves in Iron-nickel Alloy Polycrystals," J. Appl. Phys., Vol. 48, pp. 4942~4950

(10) Thompson, R. B., 1979, "Generation of Horizontally Polarized Shear Waves in Ferromagnetic Materials Using Magnetostrictively Coupled Meandering-coil Electromagnetic Transducers," Appl. Phy. Lett., Vol. 34, No. 2, pp. 175

(11) Murayama, R. 1996, "Driving Mechanism on Magnetostrictive Type Electromagnetic Acoustic Transducer for Symmetrical Vertical-mode Lamb Wave and for Shear Horizontal-Mode Plate Wave," Ultrasonics., Vol. 34, pp. 729~736

(12) Hong, J-. C., Sun, K. H. and Kim, Y. Y., 2004 "The Matching Pursuit Approach Based on the Modulated-Gaussian Pulse for Efficient Guide-wave Damage Inspection," Smart Mater. Struct., Accepted.