한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 153~158.

자기변형 트랜스듀서를 이용한 평판구조물의 특정방향 가진 및 측정

The Actuation and Measurement of Plate Structures at a Specific Direction by a Magnetostrictive Transducer

이주승* · 조승현* · 선경호* · 김윤영**

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

Key Words : Magnetostrictive transducer(자기변형 트랜스듀서), Magnetostrictive patch(자기변형 패치), Plate(판재), guided wave(유도초음파)

ABSTRACT

The coupling phenomenon between stress and magnetic induction, known as magnetostriction, has been successfully applied to generate and measure elastic waves. Most applications of this phenomenon thus far, however, are rather limited to cylindrical ferromagnetic waveguides. The main objective of this work is to develop a new patch-type, orientation-adjustable magnetostrictive transducer that is applicable for non-cylindrical, non-ferromagnetic waveguides. The existing patch-type transducer consisting of a ferromagnetic patch and a racetrack coil is useful to generate elastic waves only in one specific direction once the patch is bonded to a test specimen. However, the proposed transducer can transmit and receive elastic waves in any direction only with one patch at a given location. The proposed magnetostrictive transducer consists of a circular nickel patch, a figure-of-eight coil, and a couple of bias permanent magnets. Because of the unique configuration of the transducer, the propagating direction of the generated waves can be freely controlled since the set of bias magnets and the coil is not bonded to the magnetostrictive patch. In this work, the characteristics of the proposed transducer were investigated experimentally.

1. 서 론

최근 구조물의 비파괴평가시 유도초음파(guided wave)를 이용한 탐상기법이 널리 사용되고 있다. 일반적으로 유도초음파 기반 기법은 넓은 탐상범위를 가지므로 길이가 매우 긴 구조물을 효율적으로 검사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 유도초음파의 발생 및 측정을 위한 트랜스듀서로는 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)가 널리 사용되나, 최근들어 자기변형 트랜스듀서(magnetostrictive transducer)를 이용한 사례들이 자주 보고되고 있다. 자기변형 트랜스듀서는 측정대상과의 물리적인 접촉 없이 구조물에 진행하고 있는 탄성파를 측정할 수 있고, 상대적으로 큰 출력을 낼 수 있어 원거리 탐상에 유리하다. 또한, 구조가 간단하기 때문에 비용이 저렴하여 경제적인 면에서도 장점을 지니고 있다.[1]-[8]

자기변형 트랜스듀서는 자기변형효과(magnetostriction)에 의해 구동되는데, 자기변형효과란 자기장과 응력장 사이의 연성 효과를 가리킨다. 즉, 자기변형 트랜스듀서는 구조물의 국부에 자기장을 가하여 변형시킴으로써 탄성파를 발생시키고, 역으로 구조물에 유도되는 자기장을 코일을 이용함으로써 진행하는 탄성파를 측정한다. 하지만 자기변형효과는 철, 니켈, 코발트 등과 같은 강자성체에만 발생하기 때문에 비자성체로 이루어진 구조물에는 적용하기 힘들었다.

이런 자기변형 트랜스듀서의 단점을 극복하기 위해 Kwun[7]은 강자성 패치(ferromagnetic patch)를 이용하여 비자성체 구조물에 적용할 수 있는 패치형(patch-type) 자기변형 트랜스듀서를 고안하였고, Light et. al.[9]은 이를 비자성체 판재에 적용가능한 트랜스듀서를 제안하였다. Fig. 1 은 Light et. al. 이 제안한 트랜스듀서로서 판재의 상부에 강자성패치가 부착되어 있으며, 그 위의 트랙형 코일(racetrack coil)로 구성되어있다. 코일에 전류를 흘려주면 패치에 자기장이 걸리고, 자기변형현상에

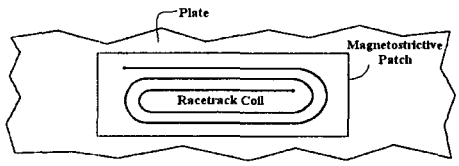


Fig.1 Light et. al.'s patch-type magnetostrictive transducer[9]

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7130, Fax : (02)872-5431

의해 패치가 변형을 하게되어 비자성체 판재에 탄성파가 발생한다. 그러나, 이러한 방식의 트랜스듀서는 탄성파의 진행방향이 패치의 형상 및 부착방식에 의해 고정되기 때문에 탄성파의 진행방향을 바꾸고자 할 때는 패치를 떼내어 다시 부착시켜야 하는 번거로움이 따른다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 패치형 자기변형 트랜스듀서의 단점을 보완하기 위해 임의의 방향으로 탄성파를 발생시킬수 있는 새로운 패치형 자기변형 트랜스듀서를 제안하였다. 제안한 트랜스듀서는 패치를 구조물에 부착시킨 후 다시 탈착시키지 않고도 임의의 방향으로 탄성파를 전달시킬 수 있으므로, 검사 시간을 단축시켜 효율적인 탐상이 가능하다. 뿐만 아니라, 접근이 힘든 판 구조물의 장시간 감시(long-term monitoring) 등에도 응용이 가능하다.

본 연구에서 제안하는 패치형 자기변형 트랜스듀서는 두 개의 영구 자석과 팔자 형상 코일(figure-of-eight type coil) 및 원형의 강자성체 패치로 구성된다. 두 개의 영구자석은 특정방향으로 바이어스 자기장을 집중시켜주는 역할을 하며, 팔자 형상의 코일은 바이어스 자기장과 동일한 방향으로 가진 자기장을 걸어주는 역할과 패치에 의해 유도되는 자기장을 측정하는 역할을 동시에 수행한다. 또한, 기존의 사각형 형태의 패치와 달리 본 연구에서는 원형 패치를 이용함으로써, 모든 방향에 대해서 동일한 크기를 지닌 탄성파를 발생시키고 측정할 수 있도록 하였다. Fig.2 는 본 연구에서 제안한 트랜스듀서의 구성을 보여주고있다. 원형 패치가 비자성체 판재의 상부에 부착되어 있고 그 위에 일체 제작된 트랜스듀서가 원하는 방향으로 회전하며 탐상을 수행하게 된다.

이후로 제안한 트랜스듀서를 OPMT(Orientation-adjustable Patch-type Magnetostrictive Transducer)라 명명하도록 한다. 본 연구에서는, 제안한 OPMT 의 성능을 검증하기 위해 비자성체 판재에서 램파(Lamb wave)를 다양한 주파수 대역에서 발생시키고 측정하였으며, 또한 실험을 통하여 OPMT 의 방향성(directivity characteristic)을 확인함으로써 탄성파가 자기장 방향으로 집중됨을 보였다.

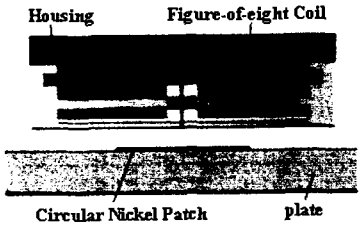


Fig. 2 Configuration of OPMT

2. 이론적 배경

2.1 자기변형효과

자성을 가진 물체가 자기장 아래 놓일 때 자기장의 방향으로 기계적인 변형이 발생하는 것을 주울 효과(Joule effect)[10] 라 하며 역 현상을 빌라리 효과(Villari effect)[11]라고 한다. 이 두 가지 현상을 를 통틀어 자기변형 효과라 한다. 주울 효과와 빌라리 효과는 다음과 같은 식들로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^H} + q^* H \tag{1}$$

$$B = \mu^\sigma H + q\sigma \tag{2}$$

여기서 ε는 변형률, σ는 재료에 가해지는 응력, E^H는 일정한 자기장이 걸려있을 때의 탄성계수, H는 자기장강도, B는 자속밀도, μ^σ는 일정한 응력이 작용할 때의 투자율이며 q^*와 q는 각각의 주울 효과와 빌라리 효과를 나타내는 계수이다.

OPMT 가 액츄에이터로 사용될 때, 코일에 교류전류가 가해지면 앙페르 법칙(Ampere's law)[12] 에 의해 코일 주변에 자기장이 형성되며, 주울 효과에 의해 강자성체에 기계적 응력이 발생하여 탄성파가 발생하게 된다. 반대로 OPMT 가 센서로 사용될 때에는, 빌라리 효과에 의해 강자성 패치의 변형으로부터 자속이 유도되며, 페러데이-렌츠 법칙(Faraday-Lenz law)[12]에 의해 기전력이 발생하여 탄성파를 측정할 수 있다.

2.2 판재에서의 유도초음파

일반적으로 얇은 판재에서 발생할 수 있는 유도초음파로는 램파(Lamb wave)와 SH 파(shear-horizontal wave)가 있다. 2 차원의 평면 변형률(plane strain) 조건을 갖는 등방성(isotropic) 판재에서 단면을 파동전파방향에 평행하게 정의하였을 때, 램파는 입자의 변위가 단면 내에서만 정의되는 유도초음파를, 반면에 SH 파는 입자의 변위가 평판의 수평면 내에서 파동전파의 방향에는 수직한 방향으로 정의되는 유도초음파를 각각 일컫는다. 보통 SH 파의 첫번째 모드가 비분산(non-dispersion) 특성을 갖기 때문에 탐상에 가장 적합하지만, 파를 발생시키기가 까다롭기 때문에 주로 램파가 이용된다.

얇은 평판에 발생하는 램파에 대해서, 각 주파

수 (angular frequency) ω 와 파수(wave number) k 의 관계는 다음과 같다[15].

$$\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 = \alpha^2 \tag{3}$$

$$\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 = \beta^2 \tag{4}$$

여기서 c_1 과 c_2 는 종파와 횡파의 속도를 나타내며 다음과 같이 표현된다:

$$c_1 = \sqrt{E/\rho} \tag{5}$$

$$c_2 = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)} \tag{6}$$

식 (5,6)에서 E, ρ, ν 는 각각 탄성계수, 밀도, 포아송비를 나타내며, 식 (3,4)에서의 α, β 는 다음과 같은 식들로 결정된다.

$$\frac{\tan\beta b}{\tan\alpha b} = -\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2-\beta^2)^2} \quad \text{for symmetric modes} \tag{7}$$

$$\frac{\tan\beta b}{\tan\alpha b} = -\frac{(k^2-\beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \quad \text{for antisymmetric modes} \tag{8}$$

여기서 $2b$ 는 판재의 두께를 나타낸다.

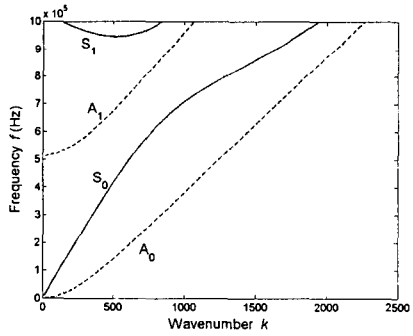


Fig. 3 The frequency spectrum of the guided Lamb waves in a 3-mm thick aluminum plate. (Solid lines: symmetric modes, dashed lines: antisymmetric modes)

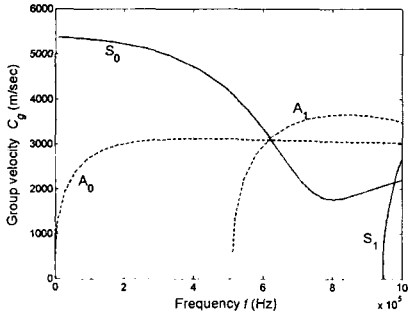


Fig. 4 The group velocity dispersion curve of the guided Lamb waves in a 3-mm thick aluminum plate. (Solid lines: symmetric modes, dashed lines: antisymmetric modes)

Fig. 3,4 는 실험에 사용된 알루미늄 판재에서 전파될 수 있는 램파에 대한 주파수 스펙트럼과 군속도 곡선(group velocity curve)을 나타낸다. Fig. 4 에서 첫 번째 대칭 모드인 S_0 모드는 낮은 주파수 영역에서는 비교적 비분산(non-dispersion) 특성을 지닌다. 따라서, 램파를 이용한 판재의 탐상에는 주로 S_0 모드가 널리 사용된다[16].

3. OPMT

본 연구에서 제안하는 자기변형 트랜스듀서는 원형의 강자성체 패치, 바이어스 자기장 발생을 위한 두 개의 영구자석 및 팔자 형상의 코일로 구성되며, Fig. 5 는 제안한 OPMT 의 개념도를 보여주고 있다. 패치의 형상이 원형이기 때문에 각 방향에 동일한 크기의 탄성파를 발생시킬 수 있으며, 패치와 트랜스듀서 사이의 직접 접촉을 필요로 하지 않기 때문에 트랜스듀서를 자유롭게 회전시킬 수 있다.

두 개의 영구 자석은 특정 방향으로 바이어스 자기장이 걸리도록 배열되었으며, 이는 탄성파의 발생을 한 방향으로 집중시켜주는 역할을 한다. 또한 바이어스 자기장과 가진 자기장을 일치시키기 위해 팔자 형상의 코일을 적용하였다. 바이어스 자기장과 가진 자기장이 강자성체 패치를 따라 걸리면서 자기변형 현상에 의해 패치에 변형이 발생하고, 판재에 램파가 전파하게 된다. 제안한 OPMT 는 패치의 재질로 니켈을 사용한다. 니켈은 연질자성재료(soft magnetic material)로 자화곡선의 상승이 빠르고 히스테리시스가 적어 자기장이 제거된 후 원래의 상태로 비교적 빨리 돌아오는 성질을 가지고 있다[17].

Fig. 6 은 제작된 OPMT 를 실험을 위해 판재에 적용한 모습이다. 니켈 패치와 판의 결합을 위해 에폭시(Model:3M DP420)를 사용했고, 패치의 두께, 직경은 각각 0.1mm, 24mm 이다. 바이어스 자석으로는 Nd 자석을 사용했다.

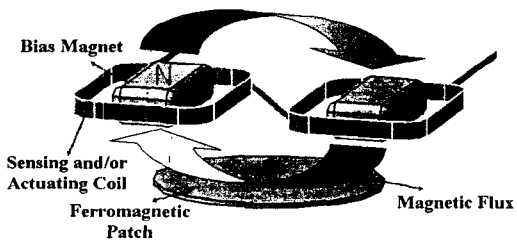


Fig. 5 Schematic diagram of an OPMT

Fig. 6 Experimental setup used to be test the performance of OPMT

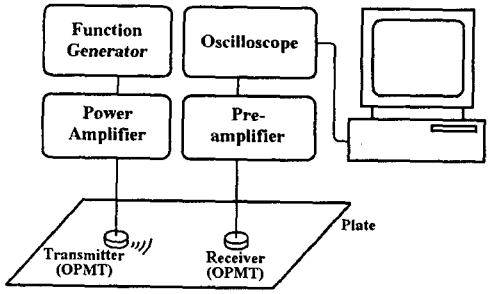


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental arrangement. (Function generator: Agilent 33120A, Power Amplifier: RAM5000, Pre-amplifier: SR560, Oscilloscope: Lecroy LT354)

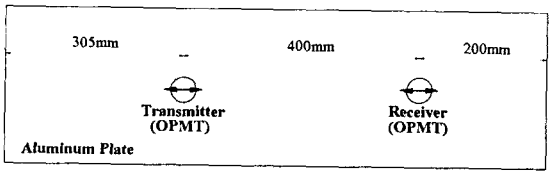


Fig. 8 The transducer location in a 3-mm thick aluminum plate. The arrows in the figure denote the direction of the applied bias magnetic flux.

4. 판재에서 유도초음파의 발생 및 측정

본 절에서는 실험을 통해 OPMT 의 효율성을 확인하였다. 모든 실험은 두 개의 OPMT 를 이용한 피치-캐치 방식(pitch-catch method)으로 진행되었다. 실험 장치의 구성은 Fig. 7 과 같다.

4.1 램파의 발생 및 측정

본 연구에서는 가진신호로서 시간, 주파수 영역에서 에너지 집중도가 우수한 가보 펄스(Gabor pulse)를 이용하였다[18]. 가보 펄스는 펄스의 중심에 에너지가 집중되어 있기 때문에 시간영역의 해상도가 우수하고, 주파수 영역에서도 에너지가 중심주파수에 집중되어 있기 때문에 분산의 영향을 최소할 할 수 있는 장점을 지닌다. 가보 펄스 $f_{Gp}(t)$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{Gp}(t) = \frac{1}{(\pi\hat{\sigma})^{\frac{1}{4}}} e^{\frac{t^2}{2\hat{\sigma}^2}} \cos \eta t \qquad (9)$$

여기서 η 는 가보 펄스의 중심주파수이며, $\hat{\sigma}$ 로 시간 영역에서 펄스의 구간을 조절한다.

램파의 측정을 위해 Fig. 8 과 같이 3mm 두께의 알루미늄 판재에 두 개의 OPMT 를 설치하였다. Fig. 9 는 측정된 신호와 단시간푸리에변환(short time Fourier transform)한 결과들이다. 이때 가진 되는 주파수는 각각 50 kHz, 200 kHz, 500 kHz 이며, 각 주파수 대역에서 램파의 몇몇 모드가 선명하게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 4 에 도시한 분산 곡선(Dispersion curve)를 이용하여 측정된 파의 모드를 확인할 수 있다. 또한 입사파와 판의 모서리에서 반사되어 돌아오는 파 간의 시간차이와 진행거리로부터 탄성파의 속도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c_{A_0}|_{EXP} = \frac{400\ \text{mm}}{3.685\times10^{-4}\text{-}1.984\times10^{-4}\text{sec}} = 2351\ \text{m/sec at 50 kHz}$$

$$c_{S_0}|_{EXP} = \frac{400\ \text{mm}}{1.541\times10^{-4}\text{-}0.780\times10^{-4}\text{sec}} = 5259\ \text{m/sec at 200 kHz}$$

이 결과를 Fig. 4 에 도시한 분산곡선을 이용하여 추정한 아래의 이론값과 비교하면 측정한 파의 모드를 확인할 수 있다.

$$c_{A_0}|_{THEORY} = 2264\ \text{m/sec at 50 kHz}$$

$$c_{S_0}|_{THEORY} = 5222\ \text{m/sec at 200 kHz}$$

이와 같은 결과를 통해 제안하는 OPMT 가 판재에서 램파를 발생 및 측정에 효율적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4.2 OPMT 의 방향 특성

OPMT 의 방향 특성을 조사하기 위해 8 개의 OPMT 를 Fig. 10 과 같이 배치하였다. 그림에서 화살표는 자기장 방향을 나타낸다. 가진 특성의 확인을 위해서, A 를 액츄에이터로 B1~B7 을 센서로 두고 신호를 측정하였다. 이때 가진 신호는 100 kHz 의 중심주파수를 사인 펄스(single-sine pulse)를 사용하였으며 측정된 신호는 Fig. 11-(a)에 도시하였다. Fig. 11-(b)는 액추에이터 A 의 자기장 방향으

로부터의 각도에 따른 측정신호들의 크기를 보여 준다. 가진부의 자속 방향과 수신부의 자속 방향이 일치할 때 발생된 탄성파의 크기비가 가장 큰 것을 Fig. 11 을 통해 알 수 있으며 두 개의 자속 각이 커질수록 크기비가 감소 함을 알 수 있다. Fig. 10 에서 각 α 가 거의 60°가 될 때 크기비가 거의 0 이 됨을 볼 수 있다. 결과적으로 본 실험을 통해서 제안한 OPMT 가 특정방향으로 탄성파를 집중시켜 전달한다는 것을 확인하였다.

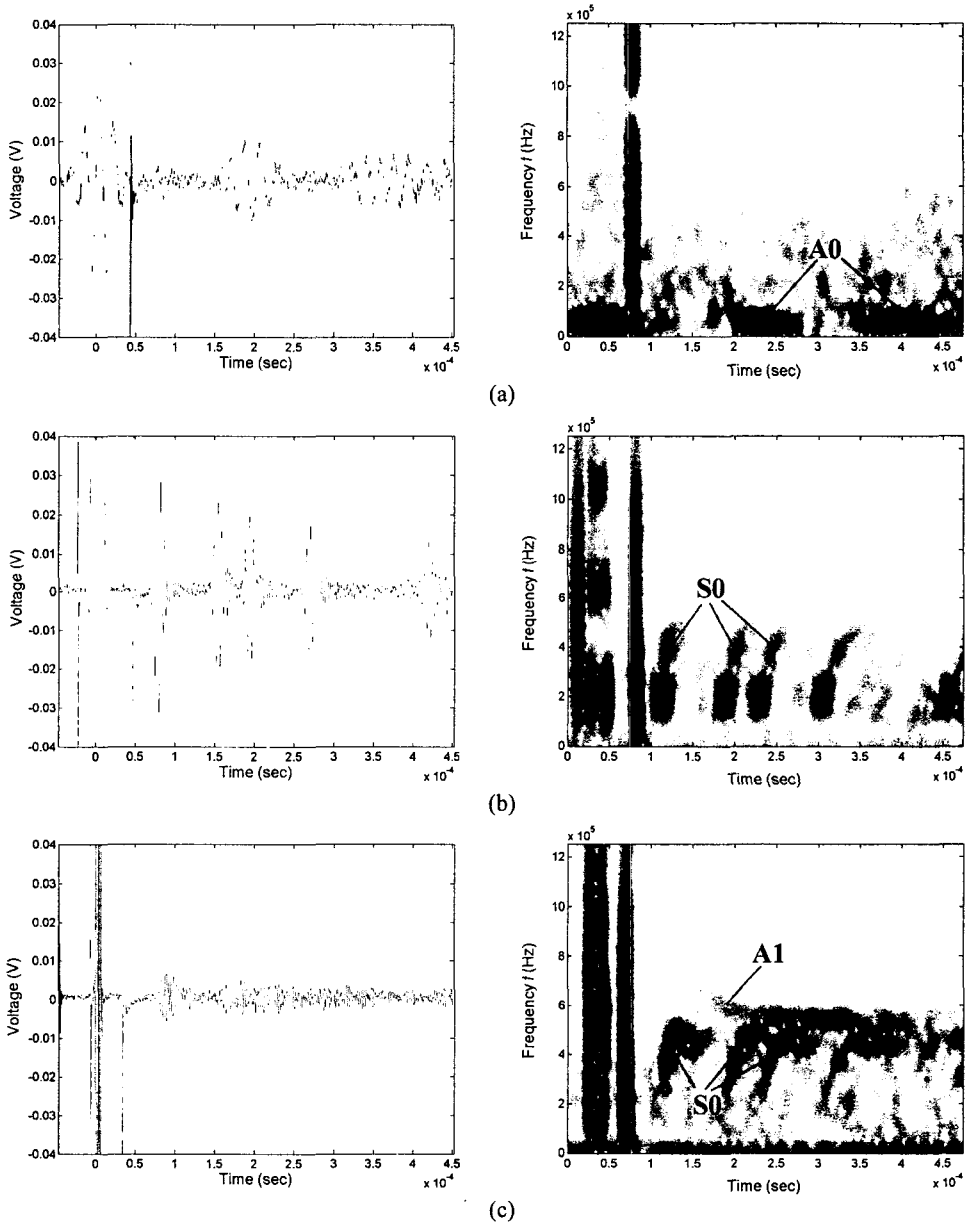


Fig. 9 The measured signal in time domain and its spectrogram with the excitation frequency at (a) 50 kHz, (b) 200 kHz, and (c) 500 kHz

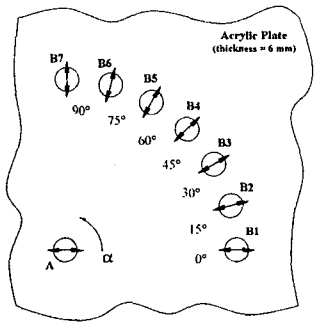
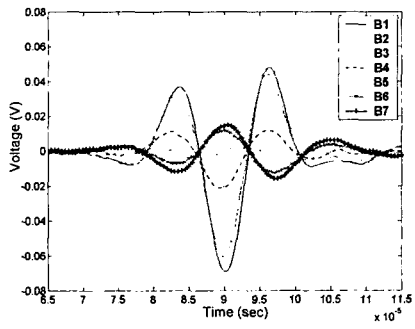
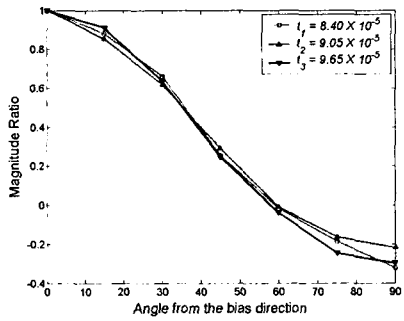


Fig. 10 The experimental configuration setup to investigate the directivity characteristics of OPMT. The arrows indicate the direction of applied magnetic flux. (The distance from **A** to **B**'s is 200 mm.)



(a)



(b)

Fig. 11 The measured signals at the receiver **B1~B7** from the transmitter **A** in Fig. 11. (a) Time signal and (b) ratio of the magnitude of the peak vs. angle from the magnetic flux direction at t_1=84.0, t_2=90.5 and t_3=96.5 μsec.

5. 결 론

본 연구에서 비자성체 판재에 탄성파를 임의의 방향으로 보낼 수 있는 자기변형 트랜스듀서를 개발하였다. 즉 원형의 강자성체 패치를 판재에 부착한 후, 그 곳에서 원하는 방향으로 정,동적 자기장을 인가하는 방식의 방향 조절 자기기계 트랜스듀서(OPMT)를 개발하였다. 제안된 OPMT 로 램파라는 탄성파를 효과적으로 발생하고, 또 측정할 수 있었다. 실제 측정된 탄성파의 실험결과는 이론적인 탄성파와 동일한 특성을 보임을 확인하였다. 또한 가진 OPMT 의 바이어스 자속 각도에 따른 방향성을 파악할 수 있었다.

참고문헌

(1) Kwun, H. and Teller, C. M., 1994, "Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a rod," J. Acoust. Soc. Am., 96, pp.1202-1204,

(2) Kwun, H. and Bartels, K. A. 1995, "Experimental observation of wave dispersion in cylindrical shells via time-frequency analysis," J. Acoust. Soc. Am., 97(6), pp.3905-3907.

(3) Kwun, H. and Bartels, K. A. 1998, "Magnetostrictive sensor technology and its application," Ultrasonics, 36, pp. 171-178.

(4) Ohzeki, H., Mashine, A., Aoyama, H. and Inasaki, I., 1999, "Development of a magnetostrictive torque sensor for milling process monitoring," Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121, pp.615-622.

(5) Lee, H. C. and Kim, Y. Y., 2002, "Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder," J. Acoust. Soc. Am., 112(3), pp.953-960.

(6) Kim, Y. Y., Cho, S. H. and Lee, H. C., 2003, "Application of magnetomechanical sensors for modal testing," Journal of Sound and Vibration, 268(4), 799-808.

(7) Kwun, H., 2001, "Method and apparatus for nondestructive inspection of plate type ferromagnetic structures using magnetostrictive techniques," U.S. Patent 6294912 B1.

(8) Kwun, H. 2002, "Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes," U.S. Patent 6429650 B1.

(9) Light, G. M., Kwun, H., Kim, S.-Y. and Spinks, R. L., Jr., 2002, "Method and apparatus for short term inspection or long term structural health monitoring," U.S. Patent 6396262 B2.

(10) Joule, J. P., 1847, "On the effect of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars," Phi. Mag. III, 30, pp.76.

(11) Villari, E., 1865, "Change of magnetization by tension and by electric current," Ann. Phy. Chem., 126, pp.87-122.

(12) Griffiths, D. J., 1999 Introduction to Electrodynamics, 3rd edn, Prentice Hall International, Inc.,Upper Saddle River, New Jersey

(13) Rose, J. I.,1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge.

(14) Achenbach, J. D., 1984, "Wave Propagation in Elastic Solid", North-Holland.

(15) Graff, K. F., 1975, Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State Univ. Press, Columbus

(16) Diligent, O., Grahn, T., Boström, A., Cawley, P., and Lowe, M. J. S.,2002, "The low-frequency reflection and scattering of the S_0 Lamb mode from a circular through-thickness hole in a plate: Finite Element, analytical and experimental studies," J. Acoust. Soc. Am., 112(6), pp.2589-2601.

(17) Borzorth, R. M., 1993, Ferromagnetism, Piscataway, N. J.: IEEE Press.

(18) Hong, J-. C., Sun, K. H. and Kim, Y. Y., 2004 "The matching pursuit approach based on the Gabor pulse in waveguide damage detection," to be submitted.