

자기변형 트랜스듀서의 위상차를 이용한 평판에서의 Lamb파 집속 기초 실험

Basic Experiment for Lamb Wave Focusing by Phased Magnetostrictive Transducers in a Plate

이 주 경*. 김 회 웅*. 이 호 철**. 김 윤 영†

Joo Kyung Lee, Hoe Woong Kim, Hocheol Lee and Yoon Young Kim

(2010년 11월 25일 접수 ; 2011년 2월 1일 심사완료)

Key Words : Magnetostrictive Transducer(자기변형 트랜스듀서), Ultrasonic Guided Wave(유도 초음파), Phased Array(위상배열), Lamb Wave(Lamb파)

ABSTRACT

The ultrasonic guided wave phased array using magnetostrictive patch transducers is proposed. The magnetostrictive transducer has received much attention because it is cost-effective and capable to generate ultrasonic waves with a simple configuration. However, it has not been used for ultrasonic guided wave phased array applications until now. In this paper, we propose a magnetostrictive transducer based phased array system consisting of a multi-channel function generator, power amplifiers and Lamb wave magnetostrictive transducers. To check the performance of the ultrasonic guided wave phased array, several Lamb wave focusing experiments were carried out in an aluminum plate. The results demonstrated the capability of the developed array to focus the Lamb waves at specific target points.

1. 서 론

산업 경제가 고도화되고, 사회 구성원들의 안전 욕구가 증대함에 따라, 공공의 안전성과 신뢰성 향상을 위한 기술적 요구가 증가하고 있다. 특히 원자력 발전소, 중화학 시설 및 사회 기반 시설에서 사용되는 배관, 압력 용기 등의 구조물은 작은 결함으

로도 대형 사고의 가능성이 있기 때문에, 이러한 구조물의 건전성 평가의 필요성이 급격히 증가하고 있다. 최근 유도 초음파(ultrasonic guided wave)를 이용한 비파괴 검사 기법이 건전성 평가의 방법으로 많은 관심을 받고 있다⁽¹⁻³⁾. 그 이유는 유도 초음파가 체적파(bulk wave)와는 달리 구조물의 경계에 의해 구속되어 전파하므로 넓은 영역을 효율적으로 검사할 수 있기 때문이다. 또한 피복 부위, 매설 부위와 같이 직접적인 접근이 어려운 부분의 검사에도 이 방법이 사용될 수 있다.

유도 초음파 탐상 기법에서는 압전 트랜스듀서, 자기변형 트랜스듀서, 전자기음향 트랜스듀서 등으로 대상 구조물에 탄성 초음파를 발생시킨 다음, 결함 등에 의해 반사되어 되돌아오는 초음파를 측정하여 결함의 유무 및 상태 등을 평가한다. 이 때 효

† 교신저자; 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 차세대 자동차 연구센터, 멀티스케일 설계연구단
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7154, Fax : (02)872-5431
* 서울대학교 기계항공공학부
** 정희원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

과적인 탐상을 위해서는 초음파의 강도를 증가시켜 신호 대 잡음 비(SNR)를 높여야 한다. 여러 개의 트랜스듀서를 사용하여 초음파를 집중시키는 위상 배열 기법은 신호 대 잡음 비를 높일 수 있을 뿐만 아니라, 결함의 위치에 관한 2차원 정보를 얻을 수 있음에 주목할 필요가 있다. 그런데 기존의 위상 배열에 관한 연구는 주로 체적파를 이용하여 왔으며, 최근에서야 얇은 판재에서 유도 초음파를 이용한 위상 배열 기법에 관한 연구들이 보고되고 있다⁽⁴⁻⁷⁾.

현재까지의 유도 초음파 위상 배열에 관한 연구에서는 주로 압전 트랜스듀서나 전자기음향 트랜스듀서를 이용하였고, 아직 자기변형 트랜스듀서를 이용한 연구는 보고된 적이 없다. 자기변형 트랜스듀서는 가격이 저렴하고, 간단한 구성으로 유도 초음파의 발생이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 지금까지는 단일 트랜스듀서 형태로 사용되어 왔다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 이 연구에서는 자기변형 트랜스듀서를 이용한 위상 배열 실험장치를 제안하고, 그것을 이용하여 평판에서의 Lamb파(Lamb wave) 집중 실험을 수행하여 제안된 실험장치의 타당성을 검증하였다. 기존의 자기변형 트랜스듀서에 기초한 위상 배열 기반 초음파 집중 실험이 전무하였다는 점에서, 그리고 향후 고도의 위상 배열 시스템 연구를 위한 기반 연구가 된다는 점에서 이 연구는 의미가 크다고 볼 수 있다.

2. Lamb파 집중 실험 장치 제안

이 연구에서는 Fig. 1과 같이 구성된 Lamb파 집중 실험 장치를 고안하였다. 4개의 트랜스듀서를 이용하여 Lamb파를 발생시키고, 각각의 트랜스듀서에서 다른 시간 지연(Δt)을 주어 원하는 지점에 Lamb파를 집중시키는 것이다.

다수의 트랜스듀서를 이용하여 Lamb파를 집중하기 위해서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 다채널 함수 발생기와 채널 수 만큼의 파워 앰프, 그리고 평판에서 전 방향에 대하여 균일한 크기의 Lamb파를 발생시킬 수 있는 트랜스듀서가 필요하다. 각 트랜스듀서와 집중 지점 사이의 거리가 모두 다르기 때문에, 다채널 함수 발생기는 트랜스듀서들과 집중 지점 사이의 거리를 보상할 수 있는 시간 지연이 가능하여야 한다. 또한 각 트랜스듀서에서 집중 지점까지의 거리는 집중 지점의 위치에 따라서 매우

작은 차이를 가질 수 있기 때문에, 수십 나노 초 단위의 시간 지연 제어가 가능한 FPGA(field programmable gate array) 모듈로 다채널 함수 발생기를 구현하였다.

FPGA란 다수의 입출력 포트에서 디지털 신호를 입력 받거나 출력할 수 있는 직접 회로로, 이 연구에서는 Altera사의 Cyclone™ 칩셋을 사용한 NewTC사의 FM-CY6S 개발모듈을 이용하였다. 이 모듈의 클럭은 50 MHz로, 최소 20 나노 초의 제어가 가능하다. FPGA에서는 디지털 출력을 이용한 사각파만을 발생시킬 수 있다. FPGA를 이용하여 350 kHz의 주파수를 갖는 3사이클의 사각파를 발생시켜, 실제 출력되는 신호를 Fig. 3에 그려보았다. 측정된 사각

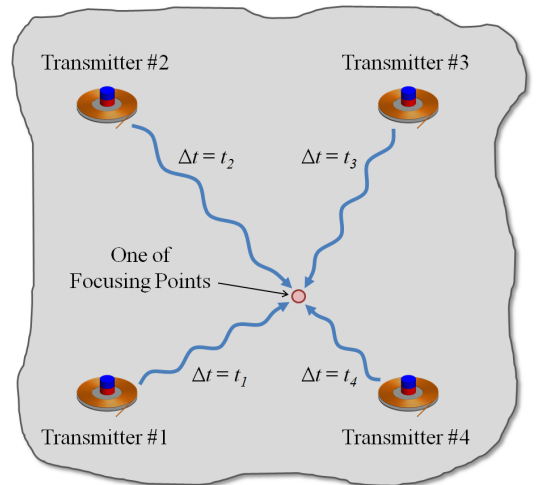


Fig. 1 Schematic diagram of the suggested Lamb wave focusing experiment

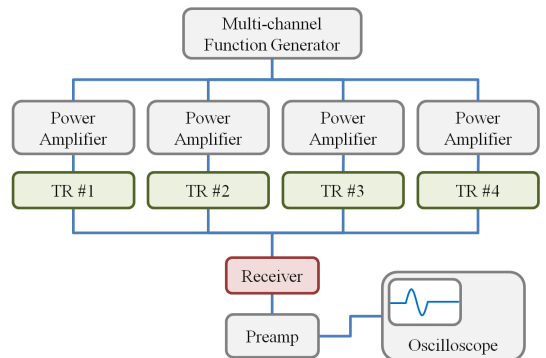


Fig. 2 Schematic diagram of suggested equipments for Lamb wave focusing

파의 상승, 하강 에지(edge) 부분에서 고주파 성분이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 급격한 전압 변화에 의해 나타나는 현상으로 간단한 RC 필터를 구성해 이를 보완하였다.

크기가 큰 탄성파를 발생시키기 위해서 다채널 함수 발생기로부터 발생된 신호는 트랜스듀서로 입력되기 전에 증폭 과정을 거쳐야 한다. 이를 위한 파워 앰프로 Cirrus Logic사의 MP111과 EK57 평가 키트를 사용하였다. MP111은 500 kHz의 대역폭을 가지며, 최대 100 V까지 출력이 가능하고, 버스트 방식(burst mode)에서 50 A의 전류를 공급할 수 있어 초음파 트랜스듀서 구동기로 사용하기에 적합한 특성을 가지고 있다. 다채널 함수 발생기에서 출력된 3사이클의 사각파를 MP111로 증폭하면 Fig. 4와 같은 신호가 출력된다. RC 필터를 적용하면 신호의 왜곡이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

파워 앰프에 의해 증폭된 신호는 각 트랜스듀서에 입력되어 구조물에 Lamb파를 발생시킨다. 이 때 효과적인 집속을 위해서는 평판에서 전 방향으로

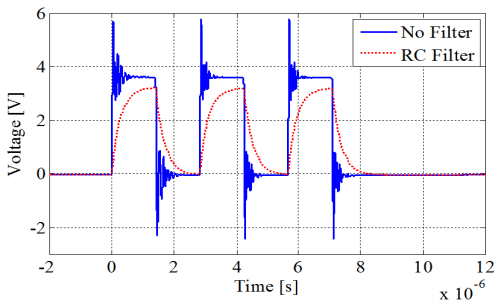


Fig. 3 Square wave(solid line) and filtered square wave(dotted line) generated from FPGA

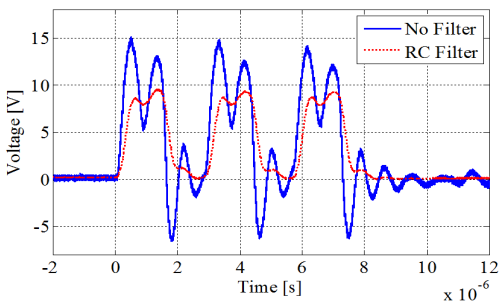


Fig. 4 Amplified square wave by MP111(solid line) and amplified filtered square wave by MP111 (dotted line)

균일한 Lamb파를 발생시키는 것이 중요하다. 이를 위해 Fig. 5(a)와 같이 구성된 새로운 형태의 자기변형 패치 트랜스듀서를 제안하였다. 제안된 트랜스듀서는 자기변형 물질인 니켈 패치와 전 방향으로 정자기장을 발생시키기 위한 영구 자석, 정자기장과 평행한 방향으로 동자기장을 발생시키기 위한 원형 코일로 이루어졌다. 니켈 패치의 직경은 24 mm이고, 코일의 직경은 0.2 mm이며 감은 수는 24회이다. 니켈 패치에 동자기장과 정자기장이 동일한 방향으로 형성되기 때문에 패치는 자기변형현상(magnetostriction)⁽¹¹⁾에 의해 코일에 흐르는 전류를 따라 수축과 인장을 반복하게 되고, 이로 인해 평판 도파체(waveguide)에 Lamb파가 발생된다. 이 때, 발생하는 Lamb파는 영구 자석을 중심으로 축대칭을 이루므로, 전 방향에 대하여 동일한 위상을 가지고 전파하게 된다.

제안된 트랜스듀서의 주파수 특성 및 발생된 Lamb파의 모드를 알아보기 위하여 가진 주파수를 변화시켜 가면서 신호를 측정하였다. 두께 2 mm인 알루미늄 평판에 가진 및 측정을 위하여 2개의 트랜스듀서를 200 mm 간격으로 설치하고, 가진 주파수를

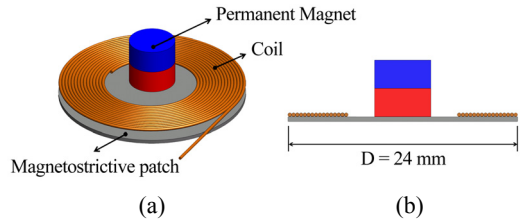


Fig. 5 (a) The configuration of the suggested magnetostrictive patch transducer and (b) the cross-sectional diagram of the transducer

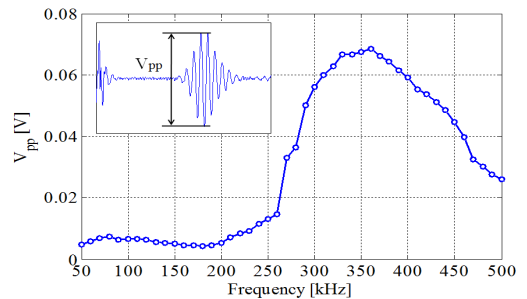


Fig. 6 Frequency and amplitude relation of the suggested transducer

50 kHz에서부터 500 kHz까지 10 kHz 단위로 변화시키면서 실험을 진행하였다. Fig. 6은 각 주파수에 따른 측정 신호에서 피크 값(V_{pp})을 추출하여 주파수에 대한 신호의 크기를 나타낸 결과이다. 이로부터 350 kHz 부근에서 가장 큰 신호가 측정되는 것을

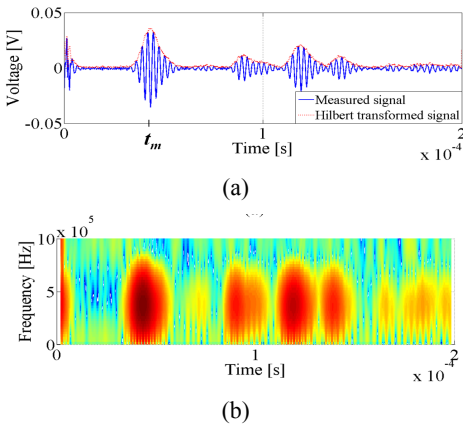


Fig. 7 (a) Measured signal and (b) spectrogram by using the suggested transducer at 350 kHz in a test aluminum plate

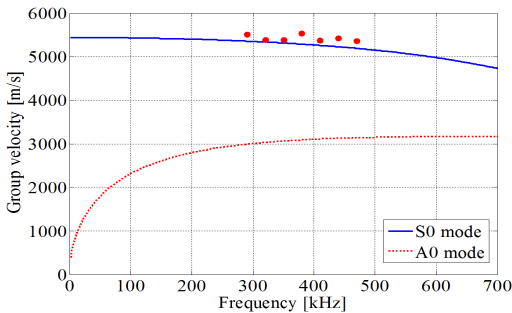


Fig. 8 The dispersion curve of the test aluminum plate(Dots : measured group velocity from the experiment)

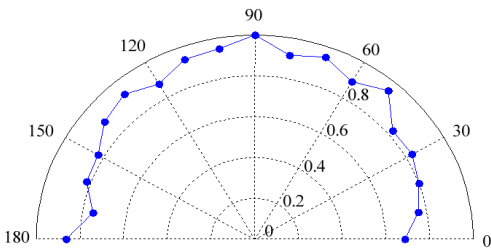


Fig. 9 Radiation pattern of the suggested transducer at 350 kHz

볼 수 있다. 350 kHz에서 측정된 신호와 그 신호의 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform)을 Fig. 7에 나타냈다. 단시간 푸리에 변환의 결과로부터 측정된 신호의 중심 주파수가 350 kHz 부근으로 가진 주파수와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 측정된 Lamb파의 군속도(group velocity)는 두 트랜스듀서 사이의 거리와 측정 신호의 힐버트 변환(Hilbert transform)의 피크(peak) 시간(t_m)으로부터 계산할 수 있다. 측정 신호의 크기가 충분히 크고, 그 파형이 잘 유지되는 290 kHz에서부터 470 kHz까지 30 kHz 간격으로 주파수에 따른 군속도를 계산하여 Fig. 8에 점으로 표시하였다. Fig. 8에서 실선과 점선은 각각 상용 프로그램(disperse)⁽¹²⁾을 이용하여 구한 두께 2 mm의 알루미늄 판 평판에서의 S0 모드와 A0 모드 Lamb파의 분산선도(dispersion curve)를 나타낸다. 측정된 군속도의 분포와 분산선도로부터, 발생된 신호는 S0 모드 Lamb파임을 확인할 수 있다. 결론적으로, 제안된 트랜스듀서는 350 kHz의 S0 모드 Lamb파를 가장 효율적으로 발생시키며, 이 주파수에서 이하의 실험들을 수행하였다.

Lamb파의 효과적인 집속을 위해서는 앞서 언급한 것과 같이 전 방향으로 균일한 크기의 방사패턴을 갖는 트랜스듀서가 필요하다. 제안된 트랜스듀서의 Lamb파 방사패턴을 알아보기 위하여 트랜스미터로부터 200 mm 떨어진 지점에서 트랜스미터를 중심으로 10도 간격으로 리시버를 이동하면서 신호를 측정하였다. 측정된 신호들의 피크 값을 이용하여 방사패턴을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 실었다. 측정 결과로부터 제안된 트랜스듀서는 전 방향으로 비교적 균일한 크기의 Lamb파를 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

3. Lamb파 집속 실험 및 결과

제안된 자기변형 트랜스듀서를 기반으로 한 위상 배열 실험 장치의 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같은 Lamb파 집속 실험을 수행하였다.

(1) 실험 구성

제안된 트랜스듀서를 이용한 S0 모드 Lamb파의 집속을 위한 실험 구성이 Fig. 10에 나타나있다. 두께 2 mm의 알루미늄 평판 위에 한 변이 400 mm 인

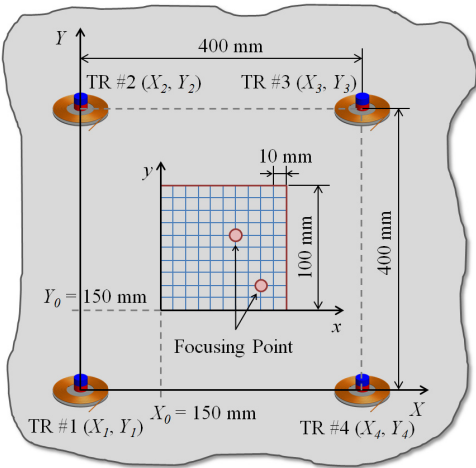


Fig. 10 Experimental setup for Lamb wave focusing. X and Y denote the global Cartesian coordinates and x and y denote the local Cartesian coordinates

정사각형의 영역을 설정하고, 네 꼭지점에 제안된 트랜스듀서를 설치하였다. 집속 영역은 정사각형 영역 내에 한 번의 길이가 100 mm인 작은 정사각형 영역으로 설정하였고, 가로와 세로 10 mm마다 격자를 나누어 총 121개의 지점으로 구분하였다. 각 트랜스듀서의 위치(X_i, Y_i)로부터 각 격자 점(x_j, y_j)까지의 거리(L_{ij})는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$L_{ij} = \sqrt{(x_j + X_0 - X_i)^2 + (y_j + Y_0 - Y_i)^2} \quad (1)$$

여기서 하첨자 i 는 각 트랜스듀서의 번호를 나타내고, 하첨자 j 는 각 집속 지점의 번호를 나타낸다.

Lamb파 집속을 위해 다채널 함수 발생기에 있는 4개의 채널을 이용하여 중심 주파수가 350 kHz인 사각파를 발생시켰다. 발생된 사각파의 사이클이 증가하면 주파수 특성이 향상되지만, 신호가 넓어져

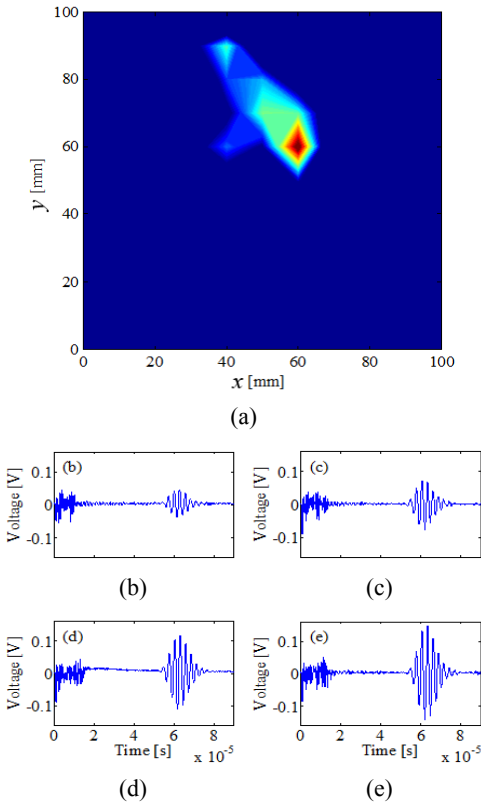


Fig. 11 Results for Lamb wave focusing at $(x_{73}, y_{73}) = (60 \text{ mm}, 60 \text{ mm})$. (a) Processed two-dimensional image. The numbers of the used transmitters are (b) 1, (c) 2, (d) 3 and (e) 4

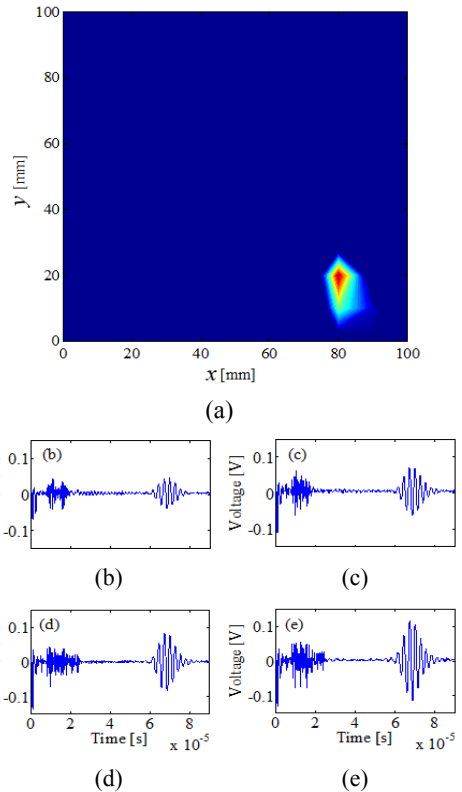


Fig. 12 Result for Lamb wave focusing at $(x_{31}, y_{31}) = (80 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$. (a) Processed two-dimensional image. The numbers of the used transmitters are (b) 1, (c) 2, (d) 3 and (e) 4

분해능이 저하되기 때문에 주파수 특성과 파동 다발(wave packet)의 크기를 고려하여 3사이클의 사각파를 사용하였다. 각 채널에서 발생된 신호들이 집중 영역 121개 지점 중 한 곳에 집중되도록 발생 시간 지연을 달리하였으며, 각 채널에 연결된 파워 앰프에 의해 증폭된 후 트랜스듀서로 전달되었다. 이 때 각 집중 지점에 따른 각 트랜스듀서의 발생 시간 지연(t_{ij})은 다음의 식으로 표현된다.

$$t_{ij} = \frac{(L_0 - L_{ij})}{c_g} \quad (2)$$

여기서 L_0 는 각 집중 지점에서 가장 멀리 떨어진 트랜스듀서까지의 거리를 의미하고, c_g 는 S0 모드 Lamb파의 350 kHz에서의 군속도($c_g = 5400$ m/s)를 의미한다. 가진용 트랜스듀서에서 발생된 Lamb파는 각 집중 실험에 대하여 121개의 모든 지점에서 가진용 트랜스듀서와 동일한 구성의 측정용 트랜스듀서를 이용하여 측정되었다.

(2) 실험 결과

Lamb파 집중 실험의 결과가 Fig. 11과 Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 11(a)는 집중 지점이 $(x_{73}, y_{73}) = (60 \text{ mm}, 60 \text{ mm})$ 인 경우로, 집중 영역의 각 지점에 대하여 측정된 121개의 데이터에서 피크 값을 추출하여 그 지점에서의 크기로 선정하였다. 집중 지점에 대한 각 트랜스듀서에서의 시간 지연은 식 (2)에 의해 예측할 수 있고, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 모든 방향에 대하여 350 kHz의 S0 모드 Lamb파의 군속도는 5440 m/s로 동일하므로, 각 트랜스듀서에서의 시간 지연은 집중 지점에 가까울수록 커진다. 이 지연 시간의 차이로 인해서 가진용 트랜스듀서에서 발생된 Lamb파는 집중 지점에 동시에 도달하고, 동일 위상이므로 보강 간섭이 발생하여, 집중 지점에서만 큰 신호가 측정된다. 그 외의 지점에서는 신호의 크기가 작다. Fig. 11(b)~(e)는

Table 1 Time delay for each transducer according to the focusing point

(x_j, y_j)	Transmitter No.			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
(x_{73}, y_{73})	0.00 μs	2.53 μs	5.20 μs	2.53 μs
(x_{31}, y_{31})	7.22 μs	0.00 μs	7.22 μs	15.60 μs

집중 실험에 사용되는 트랜스듀서의 개수를 변화시키면서 $(x_{73}, y_{73}) = (60 \text{ mm}, 60 \text{ mm})$ 지점에서 측정된 신호들이다. 측정 신호의 크기가 트랜스듀서의 수에 거의 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 $(x_{31}, y_{31}) = (80 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ 지점에 집중하였을 때의 결과로, 앞선 경우와 동일하게 집중 지점에서 가장 큰 크기의 Lamb파가 측정되고, 트랜스듀서의 개수에 비례하여 측정 신호의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과로부터, 제안된 자기변형 트랜스듀서의 위상차를 이용한 위상 배열 실험 장치에 의해 Lamb파가 성공적으로 집중된 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 자기변형 트랜스듀서를 이용하여 위상 배열 시스템을 처음으로 구성하였다. 이를 위해 다채널 함수 발생기, 파워 앰프, 자기변형 패치 트랜스듀서를 이용하였다. 제안된 트랜스듀서는 350 kHz의 S0 모드 Lamb파를 효과적으로 발생시켰으며, 전 방향에 대해 비교적 균일한 방사패턴을 가졌다. 빠른 속도의 FPGA 모듈을 이용하여 다채널 함수 발생기를 구현함으로써, 최소 20 나노 초 단위의 시간 지연 제어가 가능하였고, 제안된 장비를 이용한 평판에서의 Lamb파 집중 실험을 통해 원하는 지점에 Lamb파가 성공적으로 집중되는 것을 확인하였다. 이 연구를 통해 자기변형 트랜스듀서를 이용한 유도 초음파 위상 배열의 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 이를 바탕으로 트랜스듀서의 성능 향상, 결함 검출에의 직접적인 적용 등과 같은 후속 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부 창의적 연구 진흥 사업(과제번호: 2010-0019241)과 WCU(과제번호: R31-2010-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Ditri, J. J., 1994, Utilization of Guided Elastic

Waves for the Characterization of Circumferential Cracks in Hollow Cylinders, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 96, No. 6, pp. 3769~3775.

(2) Lowe, M. J. S., Alleyne, D. N. and Cawley, P., 1998, Defect Detection in Pipes Using Guided Waves, Ultrasonics, Vol. 36, No. 1-5, pp. 147~154.

(3) Hirao, M. and Ogi, H., 1999, An SH-wave EMAT Technique for Gas Pipeline Inspection, NDT&E International, Vol. 32, No. 3, pp. 127~132.

(4) Wilcox, P., Lowe, M. and Cawley, P., 2005, Omnidirectional Guided Wave Inspection of Large Metallic Plate Structures Using an EMAT Array, Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Vol. 52, No. 4, pp. 653~665.

(5) Fromme, P., Wilcox, P. D., Lowe, M. J. S. and Cawley, P., 2006, On the Development and Testing of a Guided Ultrasonic Wave Array for Structural Integrity Monitoring, Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, Vol. 53, No. 4, pp. 777~785.

(6) Velichko, A. and Wilcox, P. D., 2008, Guided Wave Arrays for High Resolution Inspection, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.

123, No. 1, pp. 186~196.

(7) Kwon, H. S., Park, S. C., Cho, S. H., Lee, S. S. and Kim, J. Y., 2009, Guided Wave Phased Array for Inspection of Plate Structures, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 56~63.

(8) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1998, Magnetostrictive Sensor Technology and its Applications, Ultrasonics, Vol. 36, No. 1-5, pp. 171~178.

(9) Lee, J. S., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2009, Radiation Pattern of Lamb Waves Generated by a Circular Magnetostrictive Patch Transducer, Applied Physics Letters, Vol. 90, No. 5, 054102.

(10) Lee, J. S., Kim, H. W., Jeon, B. C., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2010, Damage Detection in a Plate Using Beam-focused Shear-horizontal Wave Magnetostrictive Patch Transducers, AIAA Journal, Vol. 48, No. 3, pp. 654~663.

(11) Jiles, D. C., 1995, Theory of the Magnetomechanical Effect, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 28, No. 8, pp. 1537~1546.

(12) Pavlakovic, B. and Lowe, M., 2003, Disperse User Manual: a System for Generating Dispersion Curves, Imperial College, University of London.