

배열 탐촉자를 사용한 유도초음파의 모드선정 기법

Dynamic Mode Tuning of Ultrasonic Guided Wave Using an Array Transducer

김영환*[†], 송성진*, 박준수*, 김재희**, 엄홍섭**

Young H. Kim*[†], Sung-Jin Song*, Joon-Soo Park*, Jae-Hee Kim** and Heung-Sup Eom**

초 록 유도초음파는 판, 봉 또는 관과 같은 구조물의 장거리 탐상에 사용되고 있다. 그러나, 유도초음파에는 그 모드가 많고 전파속도가 달라서, 원하는 모드를 선택적으로 발생시키고 수신하는 기법이 유도초음파를 응용하는데 핵심적인 기술 중 하나이다. 본 연구에서는 배열형 탐촉자의 위상을 조절하여 유도초음파를 발생시키는 방법에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 8채널 초음파 펄서/리시버, 그리고 각각의 채널을 일정한 시간간격으로 구동할 수 있는 회로를 개발하였다. 8개의 탐촉자를 만들어서 배열형으로 사용하여 유도 초음파를 발생시켰다. 이웃한 요소 탐촉자 사이의 구동시간 간격을 제어하여 이에 맞는 위상속도를 지닌 유도초음파를 선택적으로 발생시켰고, 발생된 유도초음파의 군속도를 측정하였으며, 배열탐촉자에서 수신된 신호를 시간지연을 가지고 합성하여 유도초음파의 모드를 선택적으로 수신하였다. 그 결과, 이웃한 요소 탐촉자 사이의 구동시간 간격을 바꿈으로써 원하는 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 수 있었다.

주요용어: 유도초음파, 배열형 탐촉자, 위상제어, 모드선택

Abstract Ultrasonic guided waves have been widely employed for long range inspection of structures such as plates, rods and pipes. There are numerous modes with different wave velocities, and the appropriate mode selection is one of key techniques in the application of guided waves. In the present work, phase tuning by an array transducer was applied to generate ultrasonic guided waves. For this purpose, 8-channel ultrasonic pulser/receiver and their controller which enables sequential activation of each channels with given time delay were developed. Eight transducers were fabricated in order to generate guided waves by using an array transducer. The selective tuning of wave mode can be achieved by changing the interval between elements of an array transducer.

Keywords: ultrasonic guided wave, array transducer, phase tuning, mode selection

1. 서 론

유도초음파는 광범위하게 두께가 얇은 판, 파이프, 봉 등과 같은 구조물을 검사하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 유도초음파는 수많은 모드가 존

재하며, 전파속도는 매질의 탄성계수, 밀도, 주파수, 두께에 따라 달라지는데, 이를 분산이라고 일컫는다. 초음파 에너지의 전파속도인 군속도는 위상속도와는 다르다. 유도초음파는 모드에 따라 전파속도와 감쇠가 다르고[1], 결함에서의 산란 특성이 다

르다. 따라서 유도초음파를 이용한 장거리 비파괴 평가에 있어서 선택적으로 유도초음파 모드를 발생시키고 수신하는 것은 매우 중요하다[2].

유도초음파를 발생시키고 수신하는 방법에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이들 중에서 가장 간단한 방법은 연필심 파괴[3]나 레이저 빔[4]을 사용하여 시험체의 국부적인 부분을 가진시키는 것이다. 이 방법은 쉽게 유도 초음파를 발생시킬 수 있지만, 다중모드의 유도초음파가 동시에 발생하기 때문에 수신신호의 해석이 어려운 단점이 있다. 사각탐상 기법을 이용한 방식은 유도초음파의 모드를 발생시키고 수신하는 방법이 널리 사용되고 있다. 두께가 얇은 시험체에 경사지게 입사되는 파는 Snell의 법칙에 의해 시험체 내에서 유도초음파로 전환된다[5,6]. 이 기법은 입사각을 정확하게 조절하기는 어렵고 웨지 배열에서의 파속보다 느린 위상속도를 지닌 유도초음파 모드를 발생시키는 것은 어렵다.

따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위해서 빗살형 탐촉자나 IDT (Inter-Digit Transducer)와 같은 배열 탐촉자를 이용하여 유도초음파를 발생시키는 연구가 진행되고 있다[7]. 비록, 이 방식이 유도 초음파 시험 절차를 향상시키고, 사각탐상 방식의 한계를 극복하고 있지만, 아직 탐촉자의 간격을 조절해야 하는 기술적 문제점이 남겨 있고, 가장 큰 단점은 파가 탐촉자의 두 방향 모두에 전파된다는 점이라 할 것이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 이론적인 모델링을 통하여 선형 위상 배열 탐촉자가 탐촉자의 간격을 바꾸지 않고 원하는 모드를 선택적으로 발생시키는 가능성에 대하여 연구되었고[8,9], 실험적으로는 거대한 다채널 초음파 발생장치를 사용하지 않기 위해서 개개의 채널에 대한 송수신 신호를 수집한 후에 소프트웨어에 의한 모사를 통해서 모드 선택을 구현하였다[10]. 이러한 방법은 S/N비를 높이는 데에 제한이 있다. 그러나, 현재의 의료용 초음파 영상을 얻기 위해서 196채널까지 사용하고 있는 현실을 감안할 때에 다채널 초음파 발생장치를 사용하는 것은 그리 큰 문제가 아니다.

본 연구에서는 다채널 초음파 발생장치와 배열 탐촉자를 사용한 유도초음파 발생 장치를 개발하였다. 배열 탐촉자를 제작하고, 다채널의 초음파 펄서와 이들 펄서를 순차적으로 구동할 수 있는 회로를 개발하여 유도 초음파의 모드를 선택적으로 발생시켰다. 개발된 기법을 검증하기 위하여 심리스 스테인리스강 배관에서 유도초음파의 모드를 선택적으

로 발생시키고, 수신된 모드의 판독하는 실험을 수행하였다.

2. 장치 개발

유도초음파의 특정한 모드를 선택적으로 발생시키기 위해서 배열 탐촉자의 각각의 요소를 독립적으로 시간지연을 가지고 구동시켜야 한다. 단일 요소를 구동시키면 다중 모드의 분산성 파가 양쪽 방향으로 전파한다. 이웃한 요소를 원하는 모드의 파가 도착하는 순간에 가진하면 원하는 모드는 보강간섭을 일으켜 그 신호가 커지는 반면에, 원하지 않는 모드는 서로 소멸되어 그 신호가 작아진다. 이때의 시간지연은 다음과 같은 식으로 결정할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{d}{c_p} \quad (1)$$

여기서, d 는 배열 탐촉자의 인접한 두 요소 사이의 중심과 중심 사이의 거리이고, c_p 는 원하는 모드의 유도초음파의 위상속도이다. 순차적으로 각각의 요소를 일정한 시간지연을 가지고 가진시키면, 특정한 모드, 즉 원하는 모드의 진폭이 점차 커지고 원하지 않는 모드의 진폭은 줄어들어 원하는 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있다. 배열 탐촉자의 요소 수를 늘리면 모드선택 효율이 높아진다. 배열 탐촉자로 수신한 초음파 신호는 가진할 때에 주어진 시간간격만큼 지연시켜서 합성을 한다면 원하는 모드를 선택적으로 수신할 수 있다. 또한, 시간지연을 바꾸게 되면 식 (1)에서 해당되는 위상속도가 달라지고 따라서 다른 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 수 있다. 이 방법은 초음파 입사각을 바꾸거나 탐촉자 요소 사이의 거리를 바꾸지 않고도 유도초음파의 모드를 선택할 수 있으며 가진 또는 합성하는 순서에 따라서 유도초음파의 진행방향을 결정할 수 있다.

Fig. 1은 유도초음파의 모드 선택을 할 수 있는 장비의 개요를 나타내고 있다. 9개의 탐촉자는 압전복합재를 사용하여 제작되었다. 각 요소 탐촉자의 진동자 크기는 $6 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 이고 중심 주파수는 250 kHz 이다. 파이프의 곡면에 탐촉자의 잘 부착하기 위해서 아크릴로 제작된 웨지를 부착하였다. 본 연구는 8개의 탐촉자를 이용하여 송신하였고, 1개의 탐촉자로 수신하였다. 배열 탐촉자 각각의 요소 사이의 거리 d 는 10 mm 이다.

각각의 배열 탐촉자를 구동하기 위해서 8채널의 초음파 펄서가 제작되었다. 이들 각각의 펄서는 일정한 시간간격을 가지고 각각의 요소 탐촉자를 구동해야 한다. 이를 위해서 Fig. 2와 같은 순차적 트리거 회로 (Sequential Trigger Circuit; STC)를 개발하였다. 이 회로는 function generator에서 발생되는 규칙적인 펄스를 ring counter를 사용하여 각 채널에 순차적으로 트리거 신호로 공급한다. 따라서, 요소 탐촉자 간의 시간간격은 function generator의 주파수를 바꾸어 정밀하게 제어할 수 있다. 배열 탐촉자에 의해 발생된 유도초음파 신호를 수신 탐촉자로 수신하여 증폭하고 PC로 전송하였다.

3. 실험

본 실험에 쓰인 배관은 외경 60.3 mm, 두께 5.54 mm의 스테인리스강 파이프이다. 개발된 장비와 기법의 유효성을 검증하기 위한 일련의 실험을

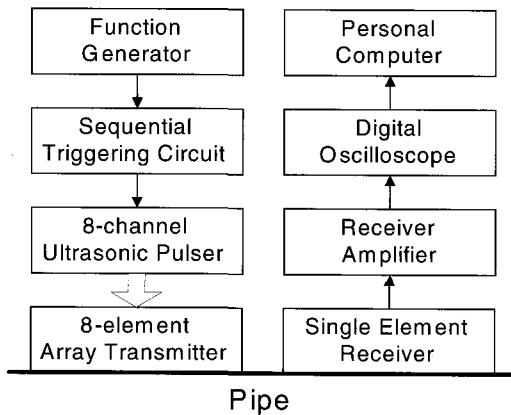


Fig. 1 Schematic diagram of phase tuning system using an array transducer.

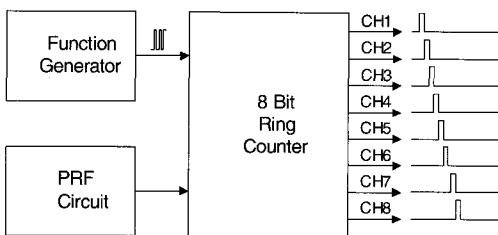


Fig. 2 Schematic diagram of sequential triggering circuit

수행하였다. 본 연구에서 사용된 탐촉자의 배치를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시키기 위한 실험이다. 8개로 구성된 배열 탐촉자와 한개의 수신 탐촉자를 배관에 고정한다. 수신탐촉자와 배열탐촉자 거리를 L 로 고정하고, 배관에 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시키기 위해 시간간격을 변화시켰다. Fig. 3(b)는 선택된 모드의 군속도를 측정하기 위한 실험이다. 여기서 수신 탐촉자의 위치를 100 mm씩 증가하면서 비행시간을 측정하였다. Fig. 3(c)는 수신된 유도초음파 신호에 대한 모드 선택을 위한 실험이다. 본 연구에서, 배열 탐촉자를 이용한 수신을 모사하기 위해 송신 배열 탐촉자의 각 요소 사이의 거리와 같은 10 mm씩 수신 탐촉자를 이동시키면서 신호를 수신하였다.

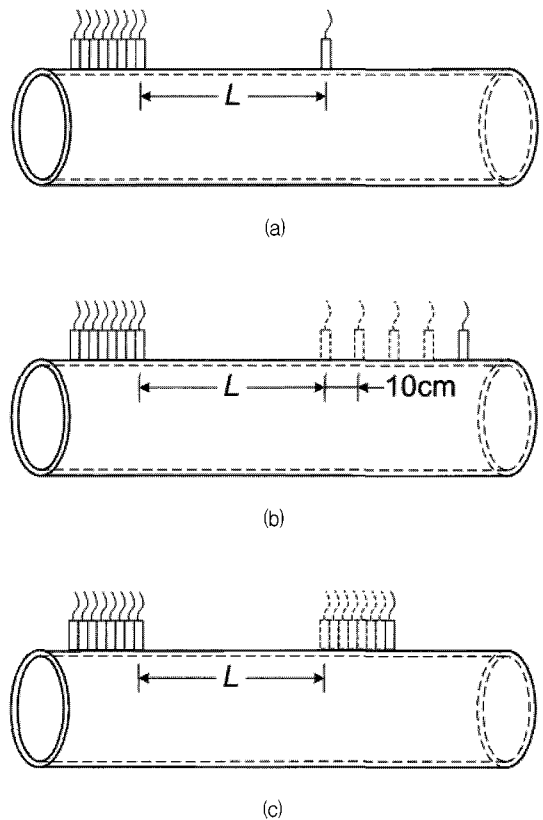


Fig. 3 Experimental setup for (a) tuning the mode of a generated wave, (b) group velocity measurement and (c) tuning the mode of a received wave

4. 결과 및 토의

4.1. 유도초음파 모드의 선택적 발생

배열 탐촉자를 사용하여 유도초음파를 선택적으로 발생할 수 있는지 알아보기 위해서 배열 탐촉자의 구동요소를 증가시키면서 신호를 수신하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이때 시간지연은 $2 \mu\text{s}$ 이고 배열탐촉자와 수신탐촉자 사이의 거리, L 은 500 mm이다. 한개의 요소 탐촉자만 가진할 경우에는 발생하는 초음파 신호가 매우 작아서 Fig. 4(a)와 같이 수신신호가 거의 나타나지 않지만, 구동되는 요소 탐촉자의 수가 늘어날수록 수신되는 신호가 점차 커진다. 특히 $150 \mu\text{s}$ 근처에서 수신된 신호의 진폭은 2개의 요소 탐촉자에 의해 구동된

신호에 비해 8개의 요소 탐촉자로 구동되었을 경우 다른 부분의 신호에 비해 상대적으로 더 커짐을 알 수 있다. 이는 구동하는 요소의 개수를 증가시키면 발생하는 초음파의 신호가 커짐은 물론이고, 특정한 모드의 유도초음파가 선택적으로 커져서 모드 선택이 가능함을 의미한다.

시간지연을 바꾸면 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 서로 다른 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 수 있었으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이 경우에 송신용 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리, L 은 1,000 mm이다. Fig. 5(a)는 시간지연이 $2.08 \mu\text{s}$ 일 때에 수신된 신호이며 이 때의 위상속도는 $4.8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 이다. Fig. 5(b)는 시간지연이 $4.17 \mu\text{s}$ 일 때에 수신된 신호이며 이 때의 위상속도는 $2.4 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 이다. 각각의 경우에 대해서 수신된 파형에

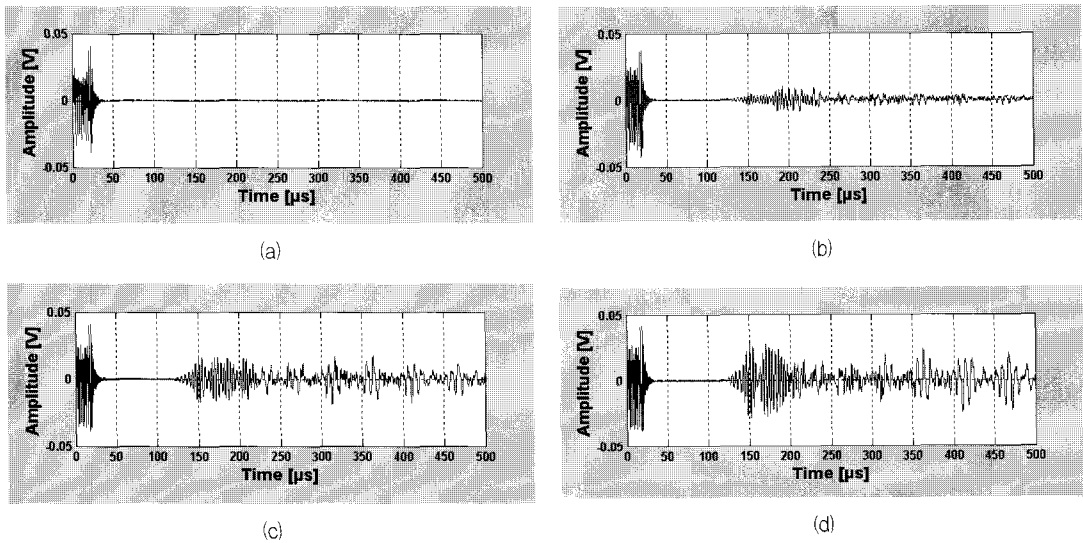


Fig. 4 Demonstration of mode tuned generation. Detected rf waveform generated by using (a) single element (b) two elements, (c) four elements and (d) eight elements. $\Delta t = 2 \mu\text{s}$ and $L = 50 \text{ cm}$.

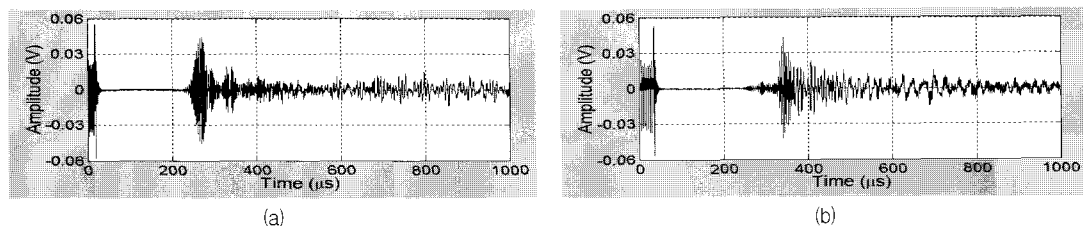


Fig. 5 Mode tuning of generated guided waves by change the time interval. (a) $\Delta t = 2.08 \mu\text{s}$ and (b) $\Delta t = 4.17 \mu\text{s}$. The distance between transmitter and receiver was 100 cm.

서 피크가 나타는 위치는 다른데, Fig. 5(a)에서는 $270 \mu s$, Fig. 5(b)에서는 $330 \mu s$ 이다. 이는 발생된 모드의 군속도가 다름을 의미한다. 또한, Fig. 5(b)의 경우에는 $270 \mu s$ 근처의 신호가 Fig. 5(a)에 비하여 상당히 많이 억제되어 있음을 알 수 있다. 따라서 시간지연을 조절함으로써 발생하는 유도초음파의 모드를 효과적으로 선택할 수 있음을 알 수 있다.

4.2. 군속도 측정

유도초음파의 모드를 판별하는 방법 중의 하나는 군속도이다. 군속도는 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리와 비행시간으로 쉽게 구할 수 있지만, 측정되는 비행시간은 탐촉자와 전기회로에서의 시간지연뿐 아니라 모드 선택을 위한 시간지연을 포함하고 있다. 이런 시간지연을 상쇄하기 위해서 Fig. 3(b)에 보여준 것과 같이 수신탐촉자를 이동시키면서 비행시간을 측정한다. 비행시간과 송수신 탐촉자 사이의 거리 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 군속도는 Fig. 6의 선분의 기울기 값의 역수로 반비례로 결정되는데, $\Delta t = 2.1 \mu s$, $\Delta t = 4.2 \mu s$ 인 경우에 발생된 유도초음파 모드의 군속도는 각각 $4.32 \text{ mm}/\mu s$, $3.31 \text{ mm}/\mu s$ 이다.

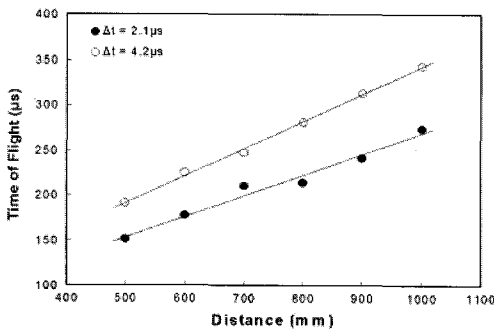
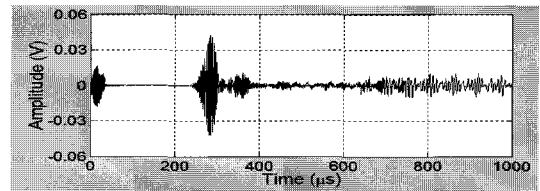


Fig. 6 Measured time of flight for different receiver positions

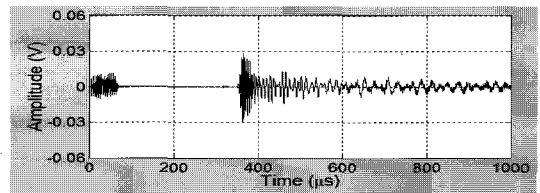
4.3. 수신신호의 모드 선택

배열 탐촉자를 사용하여 수신된 유도 초음파 신호의 모드를 선택할 수 있다. 각각의 요소 탐촉자의 수신신호를 시간지연을 두고 중첩하면 원하는 모드에 대해서만 선택적으로 신호를 수신할 수 있다. 본 연구에서는 하나의 수신 탐촉자를 사용하여 Fig. 3(c)와 같이 탐촉자의 위치를 이용시키면서 수

신하여 배열형 탐촉자를 모사하였다. 유도초음파 발생시 사용한 시간지연과 동일한 시간지연을 두고 수신신호를 중첩한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 수신신호에 대한 모드선택을 수행하면 Fig. 5의 결과와 비교하여 원하지 않는 모드를 훨씬 더 줄일 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Tuning the mode of received wave. (a) $\Delta t = 2.08 \mu s$ and (b) $= 4.17 \mu s$

4.4. 모드 분석

유도초음파 신호의 RF 파형, 주파수 스펙트럼, STFT, 위상속도와 군속도의 분산선도는 초음파 모드를 평가하기 위한 요소 들이다. Fig. 8은 유도초음파의 모드를 분석하기 위해서 이들 요소를 유기적으로 결합한 그림이다 [11]. 이 그림에서 수직선은 위상속도이고 수평선은 수신된 RF 신호의 주파수 스펙트럼에서의 피크 값을 나타낸다. 따라서, 위상속도 분산곡선에서의 수직과 수평선의 교점은 수신된 유도초음파의 모드를 나타낸다. Fig. 8에서 지연시간이 $2.08 \mu s$ 이고, 이에 해당하는 위상속도는 $4.8 \text{ mm}/\mu s$ 이며, 이 경우에 수신된 모드는 Fig. 8 Δt 의 위상속도 분산곡선에서 하나로 구별하기는 어렵지만 $L(0,2) \sim F(m,3)$ 의 모드가 됨을 알 수 있다. 이 모드들의 군속도는 군속도 분산 곡선에서 해당하는 모드와 수평선이 만나는 값에 의해 결정되는데, 이는 4.2 절에서 측정된 군속도, $4.32 \text{ mm}/\mu s$ 와 잘 일치한다. 또한, STFT의 모양이 해당하는 모드의 군속도 분산곡선과 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서,

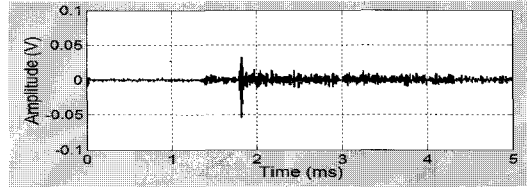
지연시간이 2.08 μs 인 경우에 수신된 유도초음파의 모드는 L(0,2)나 F(m,3)으로 확인할 수 있다.

Fig. 9는 시간지연 4.17 μs , 위상속도 2.40 mm/ μs 일 때 수신된 유도초음파의 모드 해석 결과이다. Fig. 8과 마찬가지로 분석하면, 수신된 유도초음파의 모드는 L(0,1)~F(m,1)임을 확인할 수 있으며, 군속도는 측정값 3.31 mm/ μs 와 잘 일치함을 알 수 있었다.

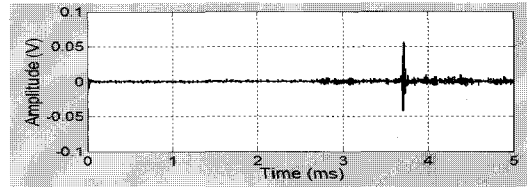
4.5. 장거리 전파특성

유도초음파의 중요한 장점 중 하나인 장거리 탐상의 가능성을 확인하기 위해서 길이가 24 m인 스테인리스 배관에 대한 유도 초음파 시험을 수행하였다. 송신 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리를 16 m까지 늘려가면서 발생된 유도 초음파를 수신하였으며, 그 중에서 거리가 6 m 및 12 m 인 경우에 수신된 신호를 Fig. 10에 나타내었다. 각각

의 경우에 대하여 용접부가 1개 및 2개가 존재하였으나, 수신된 신호의 진폭에는 큰 변화가 없어서 장거리 탐상의 가능성을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 Long-range transmission results. Receiver

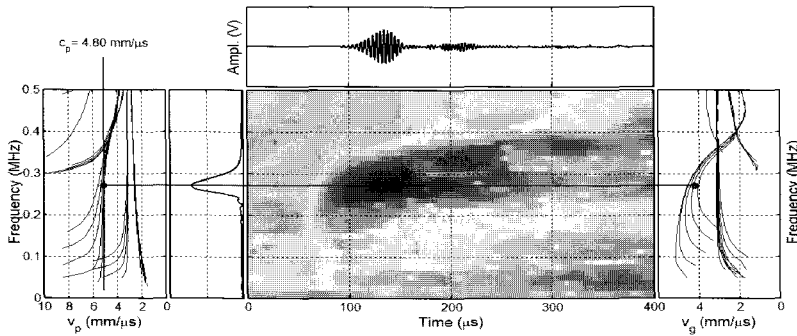


Fig. 8 Diagram for mode identification for time delay of 2.08 μs . Top: Rf waveform. Bottom: phase velocity dispersion curves, frequency spectrum, STFT result and group velocity dispersion curves (from left to right)

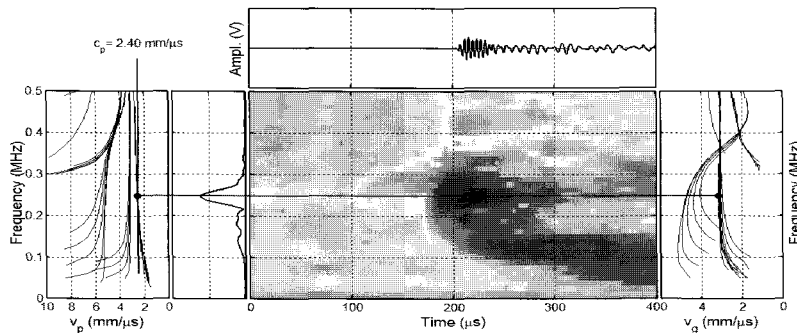


Fig. 9 Diagram for mode identification for the time delay of 4.17 μs .

transducer was placed at (a) 6 m and (b) 12 m far from transmitter.

5. 결 론

배열 탐촉자를 사용하여 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있는 시스템을 제작하였다. 초음파 탐촉자, 초음파 펄서, 순차적 트리거 회로를 제작하였으며, 인접한 요소 탐촉자를 구동하는 시간지연을 function generator를 사용하여 정확히 제어하였다. 개발된 기법을 심리스 스테인리스 스틸 배관에 적용하였다. 지연시간을 $2.08 \mu\text{s}$ 인 경우에는 L(0,2)~F(m,3) 모드와 지연시간이 $4.17 \mu\text{s}$ 인 경우에는 L(0,1)~F(m,1) 모드가 발생됨을 알수 있었다. 또한 본 기법의 장거리 배관에 대한 적용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] T. R. Hay and J. L. Rose, "Flexible PVDF comb transducers for excitation of axisymmetric guided waves in pipe," *Sensor Actuat. A-Phys.*, Vol. 100, pp. 18-23, (2002)
- [2] J. L. Rose, *J. Press. Vess. - T ASME*, "A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential," Vol. 124, pp. 273-282, (2002)
- [3] 이정기, 김호철, 최명선, 김영환, "유리판과 단일방향 탄소섬유강화 플라스틱판에서 점원에 의해 발생된 과도적 탄성파의 주파수 해석," *한국음향학회지*, 제13권 제6호, pp. 50-59, (1994)
- [4] D. A. Hutchins, K. Lundgren and S. B. Palmer, "A laser study of transient Lamb waves in thin materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 1441-1448, (1989)
- [5] J. J. Ditre and J. L. Rose, "Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions," *J. Appl. Phys.*, Vol. 72, pp. 2589-2597, (1992)
- [6] 엄홍섭, 김재희, 송성진, 김영환, "원전 기기 건전성의 온라인 검사를 위한 유도 초음파의 실험적 연구," *비파괴검사학회지*, 제24권 제4호, pp. 331-340, (2004)
- [7] J. L. Rose, S. P. Pelts and M. J. Quarry, "A comb transducer model for guided wave NDE," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 163-169, (1998)
- [8] J. L. Rose, S. P. Pelts and Y. Cho, "A comb transducer model for guided wave mode control," *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, Vol. 18, pp. 1029-11036 (Kluwer Academic/Plenum, New York, 1999)
- [9] 조윤희, J. L. Rose and S. P. Pelts, "원전설비 건전성평가를 위한 지식기반형 유도초음파 변환기 설계" 제7회 원전 기기 건전성 workshop, pp. 383-395, (2000년)
- [10] S. -C. Woo and Y. Shi, "Synthetic phase tuning of guided waves," *IEEE T UFFC*, Vol. 48, pp. 209-223, (2001)
- [11] Y. H. Kim, S. -J. Song and S. -D, Kwon, "Determination of dispersion curves of phase and group velocities using backward radiated leaky Lamb waves," *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, Vol. 23, pp. 150-157 (AIP, New York, 2004)