

## 위상배열 EMAT의 제작 및 특성 평가

### Fabrication of Phased Array EMAT and Its Characteristics

안봉영\*<sup>†</sup>, 조승현\*, 김영주\*, 김기복\*

Bongyoung Ahn\*<sup>†</sup>, Seung Hyun Cho\*, Young Joo Kim\* and Ki-Bok Kim\*

초 록 EMAT는 비접촉식 탐촉자인 동시에 모드 선택성이 우수하여 다양한 분야에 적용되고 있으나 근본적으로 에너지 전환효율이 낮아 신호 대 잡음비의 증가에 한계를 보인다. EMAT에 위상배열 기술을 접목하면 초음파의 집속 효과를 얻을 수 있으므로 낮은 전환효율의 문제를 극복하기 위한 하나의 해결방안이 될 수 있을 것으로 판단한다. 본 연구에서는 위상배열 EMAT에 대한 기초연구로 3~4개의 코일로 구성되는 표면파 및 수직횡파 발생용 위상배열 EMAT를 제작하고 각 요소코일에 공급하는 펄스의 지연으로부터 위상배열의 효과를 확인하고 방향특성을 측정하였다. 또한 시험편의 표면에 0.5 mm 깊이의 표면결합과 시험편 내부에 직경 0.5 mm의 측면 드릴 홀을 가공하여 제작된 위상배열 EMAT로 결합 신호를 검출하였으며, 이로부터 제작된 EMAT의 성능을 평가하였다.

주요용어: EMAT, 위상배열, 시간 차이, 방향특성, 결합검출능

**Abstract** EMAT has been applied in various fields for flaw detection and material characterization because it has noncontact property in wave generation and a good mode selectivity. Unfortunately, however, EMAT shows low signal to noise ratio relative to commercial contact transducer because of low energy conversion efficiency. If the phase matching through the control of time delay between each coil consisting of the array EMAT is accomplished, it is expected that it will be a solution for the improvement of low signal to noise ratio. In this experiment, the phased array EMATs which consists of 3 or 4 meander coils and one big magnet were fabricated for surface and vertical shear wave generation. Effect of phased delay control on signal directivity and amplitude enhancement was verified. A slit with the depth of 0.5 mm and a side-drill hole of 0.5 mm diameter were clearly detected by fabricated phased array EMATs, respectively.

**Keywords:** EMAT, Phased Array, Time Delay, Beam Directivity, Flaw Detectability

#### 1. 서 론

초음파를 이용한 비파괴시험을 위해서는 시험 대상체의 형상에 따라 시험편의 수직인 방향으로 진행되는 수직 탐촉자, 표면에 대하여 경사진 방향으로 진행되는 경사각용 탐촉자, 또는 표면결합의 탐상을 위해서는 시험 대상체의 표면을 따라 진행하

는 표면 초음파용 탐촉자가 이용된다[1-2]. 압전소자를 이용하는 접촉식 초음파 탐촉자의 경우에는 이러한 시험 조건의 만족을 위하여 센서 앞에 적당한 굴절각을 갖는 썸을 부착하여 경사각 또는 표면을 따라 진행되는 초음파를 발생시킨다. 최근에는 압전소자를 일정한 간격으로 배열하고 각 소자에 시간 간격을 두고 펄스를 공급함으로써 초음파

빔의 방향을 전자적으로 조절하는 위상배열 탐촉자가 널리 이용되고 있다. 특히 의료영상진단 분야에서는 128개 혹은 256개의 소자를 배열한 탐촉자까지 사용하고 있으며, 빔의 방향뿐 아니라 빔을 집속하고 2차원의 영상을 획득하는 기술이 상용화되어 있다. EMAT는 탐촉자의 설계 과정에서 초음파 빔의 방향을 결정할 수 있다[3]. 즉, 일정한 주기를 갖는 meander 코일에 공급하는 펄스의 중심주파수를 적절하게 선택하면 원하는 방향으로 초음파 빔을 결정할 수 있다[4]. 또한 일반적인 위상배열 탐촉자와 유사하게 여러 개의 meander-line 코일을 배열하고 각 코일에 공급하는 펄스의 시간을 적절히 조절하면 초음파 진행방향을 더욱 적극적으로 조절할 수 있을 뿐 아니라 초음파 빔의 집속이 가능하여 더욱 작은 결함을 검출할 가능성을 갖는다[5-6]. EMAT는 비접촉으로 초음파를 송수신하기 때문에 위상배열 EMAT는 기존의 탐촉자에 비하여 활용분야가 더욱 넓을 것으로 기대한다.

본 연구는 위상배열 EMAT의 구현을 위한 기초 연구로 3개의 meander 코일과 하나의 영구자석으로 구성되는 EMAT를 제작하고 각 코일에 공급하는 펄스의 구동 시간을 적절히 조절하여 위상배열의 효과를 평가하고자 하였으며, 빔의 집속을 통하여 파장에 비하여 작은 결함의 탐상이 가능한지 실험적으로 검증하고자 하였다.

## 2. 위상배열 EMAT 제작

Fig. 1은 제작된 위상배열 EMAT의 외형이다. 그림에서 오른쪽은 송수신용 EMAT이고 왼쪽은 수신용 EMAT이다. EMAT의 제작에 사용된 송신용 코일은 Fig. 2의 구조를 갖는데, 그림에서  $\lambda_s$ 는

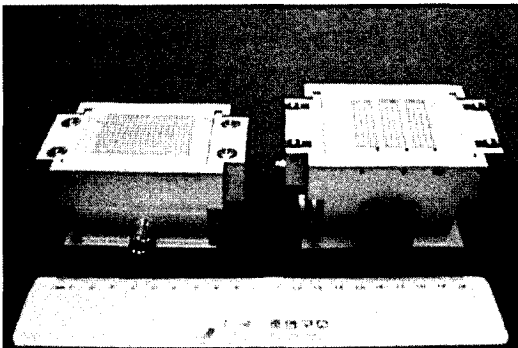


Fig. 1 Phased array EMAT consisting of 3 meander coils

각 요소의 주기이고,  $d$ 는 각 요소들 사이의 간격이다. 송신용 코일은 3개 또는 4개의 요소를 가지며, 각 요소들의 주기는 6 mm이다. 그리고 각 요소들 사이의 간격은 9/4 파장 떨어진 13.5 mm이다. 수신용 센서는 하나의 요소로 구성되며 주기는 6 mm이고, 총 길이는 48 mm이다. 한편 송신용 EMAT의 방향 특성 측정을 위한 수신용 EMAT는 측정의 공간 분해능 향상을 위해 주기 6 mm이며, 전체 길이가 12 mm인 하나의 요소를 코일로 사용하였다.

일정한 주기를 갖는 meander 코일로 발생하는 초음파 주빔의 방향,  $\alpha$ 는 식(1)로 결정된다.

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{\lambda_s} \quad (1)$$

식에서  $\lambda$ 는 초음파의 파장이며,  $\lambda_s$ 는 코일의 주기이다.

표면파 발생을 위해서는 입사각  $\alpha$ 가 90°이어야 함으로,  $\lambda$ 와  $\lambda_s$ 가 같아야 한다. 그러므로 표면파의 발생을 위해서는 표면파의 속도가 약 3000 m/s임을 가정하면 파장이 6 mm가 되는 초음파의 주파수 500 kHz이어야 한다.

반면에 입사각이 45°가 되기 위한 주파수  $f$ 는 식(2)를 이용하여 계산하면 약 830 kHz이다.

$$f = \frac{\sqrt{2}v}{\lambda_s} \quad (2)$$

즉, 500 kHz의 중심주파수를 갖는 펄스로는 표면 초음파를 발생시키고, 830 kHz의 펄스로는 45° 방향으로 진행하는 횡파를 발생시킨다. 결국 동일한 코일을 사용하여 제작된 EMAT의 구동 주파수만을 변화시키면 표면파 또는 원하는 방향으로 진행하는 초음파를 발생시킬 수 있다는 의미이다.

위에서 이미 설명한 바와 같이 코일의 사용주파수를 바꾸면 초음파 빔의 진행방향을 바꿀 수 있다. 또한 각 요소들에 공급하는 펄스의 위상을 변화시키면 역시 초음파 빔의 진행방향을 조절할 수 있다. Fig. 3은 이를 도식적으로 설명한 그림이다.

각 요소로부터 발생된 초음파는 각각의 방향특성 (beam directivity)를 갖는다. 그러므로 동일한 시간에 모든 요소에 같은 펄스를 공급하면 각각의 요소로부터 초음파가 발생하여 원래의 방향특성에 따라 진행하게 되므로 원하는 방향으로 초음파 빔을 조

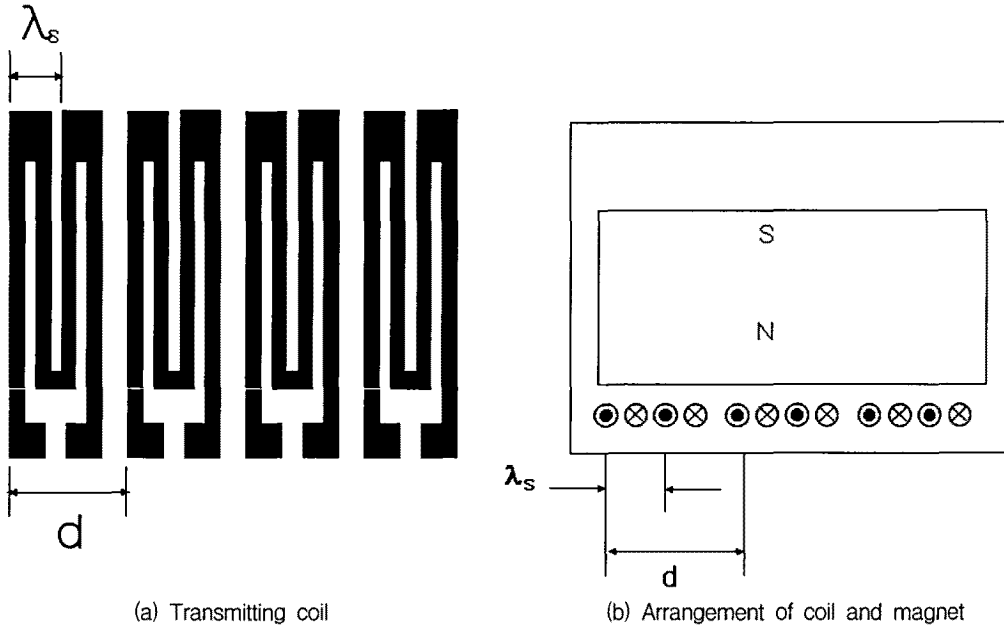


Fig. 2 Structure of phased array EMAT

절할 수는 없다. 그러나 그림에서와 같이 임의의 각  $\alpha$ 로 빔의 방향을 설정하고자 한다면, 첫 번째 요소로부터 발생된 초음파, 즉 그림의 A에서 출발한 초음파가 B에 도착한 순간에 C의 요소 2로부터 초음파를 발생시키고, 두 요소로부터 발생된 초음파가 함께 D에 도착한 순간 요소 3으로부터 초음파를 발생시키면 각각의 요소로부터 발생된 초음파 중에서 각도  $\alpha$ 의 방향으로 진행하는 초음파만 보강 간섭을 하게 되므로 발생된 초음파의 주빔의 방향이  $\alpha$ 로 고정된다. 그림에서 점 A와 B 사이의 거리는 각 요소 사이의 거리  $d$ 로부터 결정되며, 각 요소들 사이의 시간 지연은 A와 B 사이의 거리를 초음파 속도  $v$ 로 나누면 계산할 수 있다. 이를 수식화하면 식(3)과 같다.

$$\sin \alpha = v \frac{\Delta t}{d} \quad (3)$$

### 3. 위상배열 EMAT로 발생시킨 표면파의 특성

Fig. 4는 세 개의 요소들 중에서 각각 하나의 요소들에만 펄스를 가한 후 표면초음파 신호를 검출한 결과이다. 요소 3은 수신용 EMAT로부터 가장 가깝게 위치하고 있기 때문에 가장 먼저 도착하며,

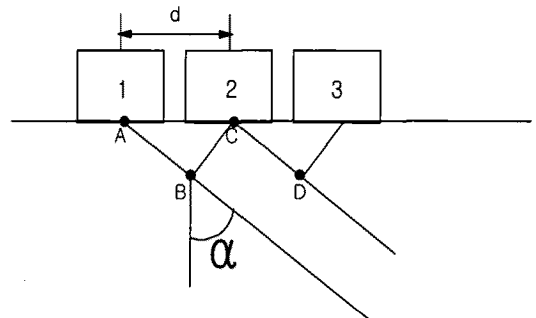


Fig. 3 Propagation direction of ultrasonic wave generated by a phased array EMAT

요소 1로부터의 신호는 가장 늦게 도착한다. 각 신호들 사이의 시간 지연은  $4.5 \mu\text{s}$ 이다. 그러므로 첫 번째 요소에서 초음파가 발생된 후  $4.5 \mu\text{s}$  후에 두 번째 요소에서 초음파를 발생시키고, 다시  $4.5 \mu\text{s}$  후에 세 번째 요소로부터 초음파를 발생시키면 세 요소로부터 발생된 표면 초음파가 모두 보강 간섭되어 신호 증가를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 각 요소들로부터 발생된 신호를 수신용 EMAT로 검출한 결과이다. 그림에서 (a)는 각 요소에 시간 지연을 고려하지 않고 모든 요소로부터 초음파를 발생 시켰을 경우에 측정된 신호이며, (b)는 각 요소에  $4.5 \mu\text{s}$ 의 시간 지연을 고려

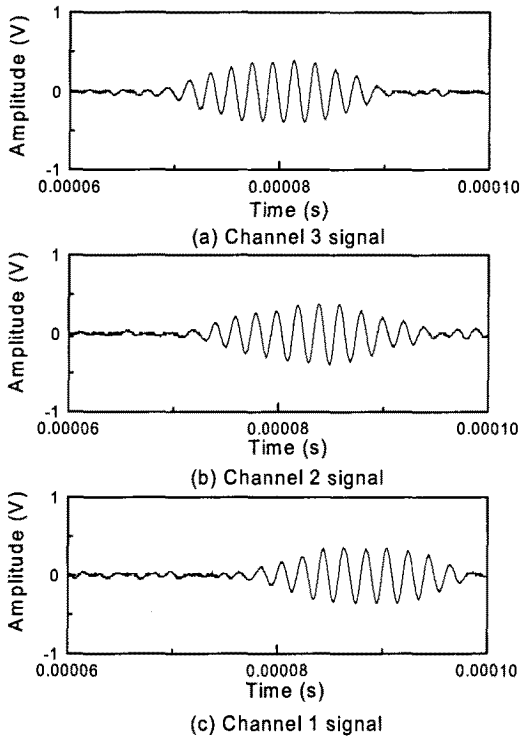


Fig. 4 Detection of surface wave excited by each element

한 경우의 신호 모양이다. (a)는 보강 간섭 없이 각 신호가 중첩되었기 때문에 신호 세기의 증가는 없이 시간 폭만 길게 늘어졌음을 볼 수 있으나, (b)는 각 요소들로부터의 신호가 정확하게 보강 간섭되어 시간 폭의 변화 없이 신호 크기가 크게 증가했음을 볼 수 있다. 일반적으로 EMAT로 초음파를 발생시키면 순방향뿐 아니라 역방향으로도 동일한 초음파가 발생되어 진행하게 된다. 위상배열 EMAT의 경우에는 각 요소들 사이의 시간 지연을 적절하게 조절하면 역방향으로 진행하는 초음파의 크기를 크게 줄일 수 있다. Fig. 6은 역방향으로 진행한 초음파의 검출 결과이다. (a)는 각 요소들 사이의 시간 차이를 고려하지 않은 경우인데, Fig. 5(a)와 유사하다. 반면에 Fig. 6(b)는 시간 차이를 고려하여 측정된 결과인데, 신호의 세기가 많이 감소했음을 볼 수 있다. 이는 각 신호들 사이에 소멸 간섭이 일어났기 때문인데, 각 요소들로부터의 신호가 겹치는 영역에서는 소멸 간섭이 일어나지만 각 신호가 겹치지 않는 영역에서는 간섭이 생기지 않기 때문에 완벽하게 역방향의 신호를 없앨 수는 없다. 결국 시간 차이를 고려하여 각 요소들로부터 초음파를 발생시키면 순방향으로 진행하는 초음파의 진폭은 크게 증

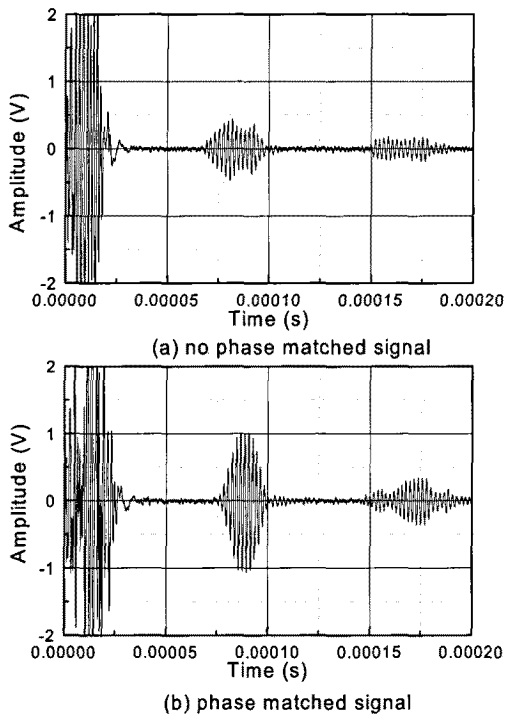


Fig. 5 Effect of phase delay on signal enhancement in forward direction

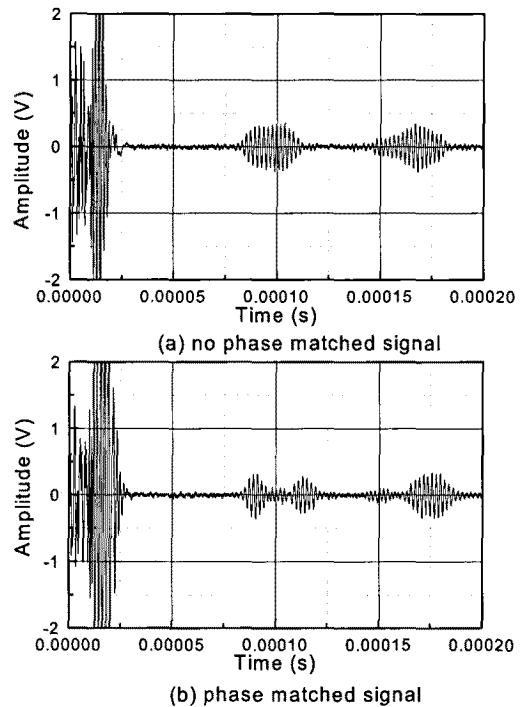


Fig. 6 Effect of phase delay on signal reduction in backward direction

가하는 반면 역방향으로 진행하는 초음파의 진폭은 상당부분 감소함을 알 수 있다.

Fig 7은 요소의 수가 신호 크기에 미치는 영향을 측정된 결과이다. 4 개의 요소를 갖는 EMAT를 이용하여 정확히 계산된 phase delay를 적용했을 경우 각 요소로부터의 신호들이 보강 간섭되어 신호가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 요소 수가 증가함에 따라 신호 증가는 거의 비례하여 증가한다.

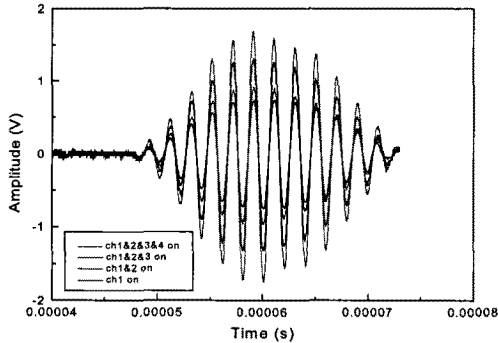


Fig. 7 Amplitude enhancement due to the superposition of waves excited by each element

#### 4. 위상배열 EMAT로 발생시킨 수직횡파의 특성

주기 6 mm인 meander 코일에 830 kHz의 펄스에 초음파를 발생시키면 주빔의 방향은 약 45°가 된다.

Fig. 8은 송신용 EMAT를 구성하는 여러 요소 중에서 하나의 요소만 구동한 경우의 방향특성 측정결과이다. 주 빔의 방향은 약 43°이고, -6 dB 폭은 약 13°임을 알 수 있다. 하나의 요소에 의한 정방향과 역방향의 특성은 동일하다.

3개의 요소에 식(3)으로 계산된 시간 지연을 적용하여 45°방향으로 진행한 신호를 검출한 결과는 Fig. 9와 같다. 그림에서 (a)는 순방향으로 진행한 신호이고, (b)는 역방향으로 진행한 신호이다. 순방향으로는 폭이 좁고 진폭이 큰 초음파가 발생되어 진행되는 반면 역방향으로는 폭이 넓어지고 진폭 또한 감소한 신호가 발생됨을 확인 할 수 있다. Fig. 10은 3개의 요소를 갖는 송신용 EMAT의 방향특성 측정결과이며, 정방향으로 진행한 주빔의 크기가 역방향으로 진행한 주빔 보다 훨씬 크다. 이는 표면파와 마찬가지로 역방향으로는 상쇄 간섭이 일어나기 때문이다.

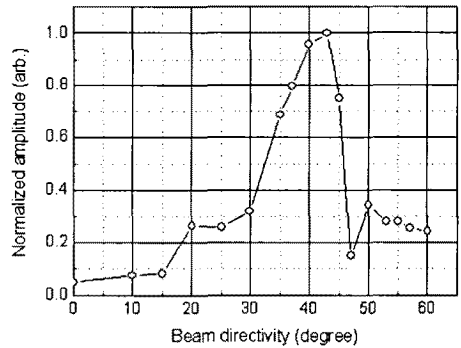
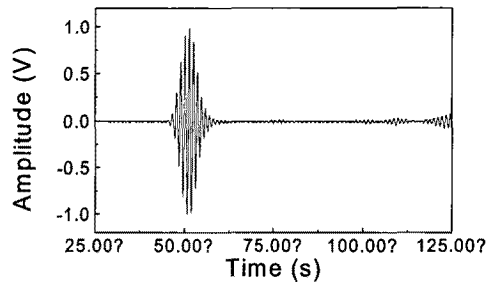
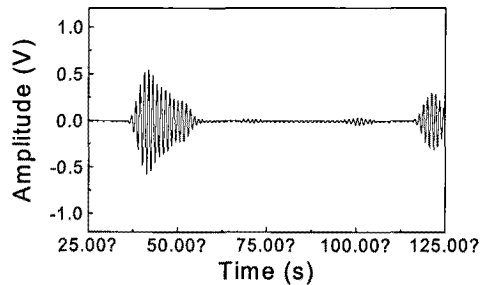


Fig. 8 Directivity pattern of one EMAT element



(a) Forward direction



(b) Backward direction

Fig. 9 SV wave excited by phase array EMAT. (Main beam direction : 45°)

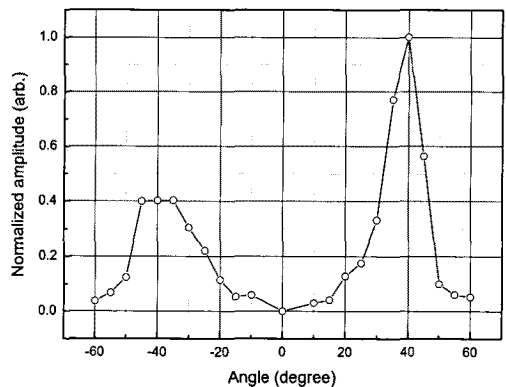


Fig. 10 Directivity pattern of phased array EMAT with 3 elements

Fig. 11은 식(3)에서 주 빔의 방향이 35°, 40°, 45°가 되도록 계산한 시간 지연을 적용하고 순방향에서 측정된 방향특성이다. 시간 지연에 따라 순방향의 경우 주 빔의 방향이 의도대로 조절됨을 볼 수 있다.

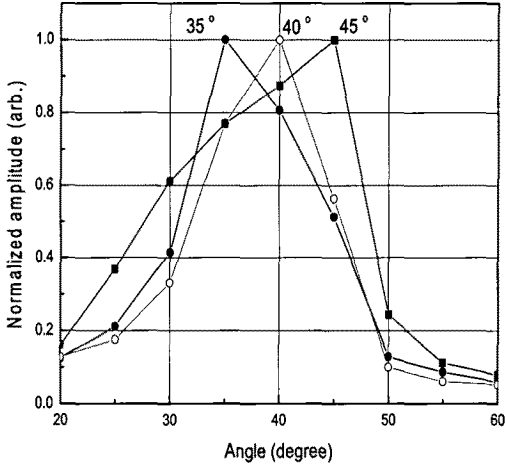


Fig. 11 Change of main beam direction by the change of exciting frequency

5. 위상배열 EMAT를 이용한 결함 검출

Fig. 12는 0.5 MHz의 중심주파수를 갖는 표면파 발생용 위상배열 EMAT를 이용하여 결함을 검출한 신호이다. 신호 'A'는 깊이 0.5 mm의 표면 결함으로부터 얻어진 신호이고, 'B'는 시험편 끝단으로부터의 신호이다. 실험에 이용된 EMAT는 주기 3 mm의 3-요소를 가지며 결함 신호는 위상 조절된 상태에서 얻어졌다.

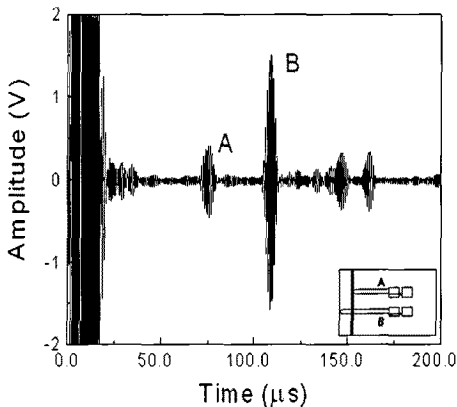
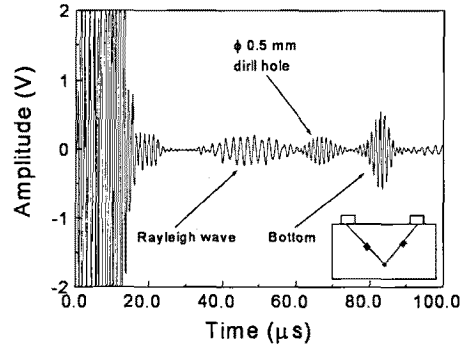
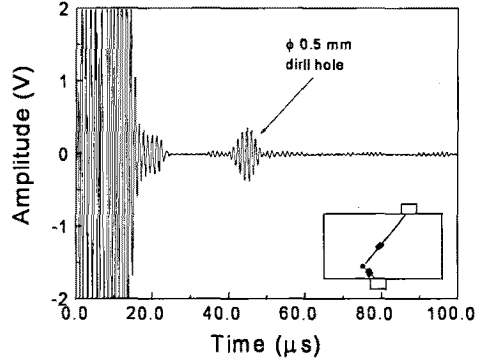


Fig. 12 Detection of surface flaw using a phased array EMAT



(a)



(b)

Fig. 13 Detection of side-drill hole of 0.5 mm diameter by using the phased array EMATs; (a) Flaw signal measured with two transducers in upper surface, (b) Flaw signal measured with two transducers in opposite surface

Fig. 13은 수직횡파 발생용 위상배열 EMAT의 각 요소로부터 발생하는 초음파가 직경 0.5 mm의 결함부위에 집중되도록 시간 지연을 계산하고 측정된 신호이다. 사용한 탐촉자의 중심주파수가 0.83 MHz, 시험편 내를 진행하는 초음파의 파장이 약 3.8 mm임을 고려하면 실험 결과에서와 같이 0.5 mm 직경의 결함을 비교적 높은 신호 대 잡음비로 검출할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 두 측정 결과를 비교하면 (a)와 같이 시험편의 한쪽 면에 송수신 탐촉자를 함께 위치시키고 측정된 결과에서는 결함 반사 신호와 함께 표면파가 발생됨을 볼 수 있다. 이는 (b)에서와 같이 송수신 탐촉자를 위아래로 분리하여 표면파를 수신할 수 없도록 배열한 결과에서 확인할 수 있다. 표면파 신호는 탐촉자 사이의 간격이 좁아지거나 시험편의 두께가 작아질 경우 결함 신호의 검출에 방해가 되므로 차후

송신용 펄스의 폭을 증가시켜 송신용 펄스의 주파수 폭을 좁히거나 아니면 설계 개선을 통하여 원천적으로 표면파가 발생되지 않도록 하는 등의 근본적인 대책이 필요할 듯하다.

## 6. 요약

EMAT를 이용한 표면 및 내부 결함 검출능 향상을 위하여 위상배열 EMAT를 설계 제작하고 그 특성을 평가하였다. 표면파 발생용 EMAT의 각 요소 코일에 위상차를 고려하여 펄스를 공급하면 순방향으로 진행되는 표면초음파는 보강 간섭의 영향으로 신호 증폭 효과가 발생되며, 역방향으로는 신호가 크게 감소됨을 확인하였다. 수직횡파 발생용 위상배열 EMAT의 경우, 계산된 시간 차이에 따라 주빔의 방향을 변화 시킬 수 있으며 역시 순방향 신호의 증폭 효과를 보인다. 중심주파수 0.5 MHz의 표면파 발생용 위상배열 EMAT와 중심주파수 0.83 MHz의 수직횡파 발생용 위상배열 EMAT로 각각 깊이 0.5 mm의 표면결합과 직경 0.5 mm의 측면 드릴 홀을 검출할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(소방방재청)의 재원으로 안전관리기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연

구임 (No. NEMA-09-MD-05).

## 참고문헌

- [1] Nondestructive Testing Handbook, Second Edition, Vol. 7, Sec. 10 : The American Society for Nondestructive Testing (1991)
- [2] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins, and S. B. Palmer, Research Techniques in Nondestructive Testing, Edited by R. S. Sharpe (Academic, London, 1981), Vol. 5, Chap. 8, 281 (1982)
- [3] R. B. Thompson, "Noncontact Transducer," Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 74-83 (1977)
- [4] 안봉영, 김영환, 김영주, "EMAT의 방향특성 측정", 응용물리학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 67-71 (1990)
- [5] G. Huebschen, "Generation of Horizontally Polarized Shear Waves with EMAT Transducers," The e-Journal of Nondestructive Testing, 3(3) (1998)
- [6] G. Selby, "Phased-Array UT Applications Development at EPRI NDE Center," The e-Journal of Nondestructive Testing 4(10) (1999)