

## 판형 구조물 유도초음파 검사를 위한 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈 개발

### Development of an SH Wave Magnetostrictive Transducer Module for Guided Wave Testing of Plate Structures

조승현\*<sup>†</sup>, 박재하\*, 권휴상\*\*, 안봉영\*, 이승석\*

Seung Hyun Cho\*<sup>†</sup>, Jae Ha Park\*, Hyu-Sang Kwon\*\*, Bongyoung Ahn\* and Seung Seok Lee\*

**초 록** 유도초음파 검사는 구조물의 장거리 탐상 적용 가능성으로 인해 최근 많은 주목을 받고 있다. 이러한 유도초음파를 이용한 비파괴검사에 있어서 탐상 성능은 검사시 이용하는 유도초음파 모드에 많은 영향을 받기 때문에 탐상 목적에 맞는 적절한 모드를 선택하는 것이 매우 중요하다. 판형 구조물 검사의 경우, 현재 까지 램파가 주로 이용되어 왔고 SH파의 응용은 상대적으로 적었다. SH파의 장점에도 불구하고 응용 빈도가 적은 것은 무엇보다도 성능이 검증되면서 사용이 용이한 트랜스듀서가 부족한 데 주 원인이 있다. 본 연구에서는 자기변형 현상을 이용한 새로운 소형 SH파 유도초음파 트랜스듀서 모듈을 제안하고자 한다. 기존의 SH파용 자기변형 트랜스듀서가 패치를 구조물에 접착제로 부착해서 사용해야하는 점으로 인해 많은 불편을 초래한 데 비해, 제안한 트랜스듀서는 모듈로 제작되어 전단커플러와 함께 이용할 수 있으므로 현장에서 신속하고 편리하게 적용이 가능하다. 개발된 트랜스듀서 모듈의 SH파 변환 기전과 구조를 설명하였으며, 이를 이용한 유도초음파 전파 시험을 통해 제안한 트랜스듀서 모듈의 성능 및 응용가능성을 확인하였다.

**주요용어:** SH파, 유도초음파 검사, 자기변형 트랜스듀서, 트랜스듀서 모듈, 평판

**Abstract** Recently much attention has been paid to a guided wave due to its effective applicability to long range and fast inspection of structures. In guided wave based NDE, the appropriate selection of wave modes is one of important factors since the test performance is highly dependent on which mode of guided waves is employed. As far as plate-like structures are concerned, so far, SH guided wave has not been frequently applied compared to Lamb waves, which is mostly caused by the lack of proper and convenient transducers to generate and measure the SH waves. In this investigation, a new small-sized SH guided wave transducer based on magnetostriction is proposed. The present transducer was designed to be modular and be used with shear couplant to avoid the inconvenience of the existing magnetostrictive patch transducers, which comprises the ferromagnetic patch tightly bonded to a structure. The wave transduction mechanism and the detailed configuration of the present transducer are presented. Experimental verification is also conducted on test specimens and the results confirm the good performance of the present transducer module.

**Keywords:** SH Wave, Guided Wave Testing, Magnetostrictive Transducer, Transducer Module, Plate

1. 서론

유도초음파(guided ultrasonic wave)는 구조물의 경계를 따라서 전파하는 탄성초음파로서 대개 먼 거리까지 전파가 가능하다. 이러한 원거리 전파특성으로 인해 유도초음파는 최근 다양한 대상의 비파괴평가를 위한 방법으로 많은 주목을 받고 있다 [1-5]. 초음파가 구조물 내에서 더 멀리까지 진행할 수 있으므로 넓은 영역을 고속으로 탐상할 수 있을 뿐만 아니라, 검사 부위에 직접 접근이 어려운 때도 원거리에서 탐상이 가능하다는 장점이 있다. 반면, 유도초음파는 구조물의 형상에 따라 그 종류와 모드가 다양하고 각 모드의 전파 양상이 복잡하므로 신호의 측정 및 해석이 어렵다. 특히, 사용하고 자 하는 유도초음파의 모드와 주파수 대역, 구조물의 형상 및 재질에 따라 파의 가진 및 측정을 위한 트랜스듀서, 측정 기기 및 신호 해석 방법이 차이가 날 뿐만 아니라, 진단 대상에 대한 민감도 역시 많은 영향을 받는다. 따라서, 유도초음파를 이용한 검사에서는 검사대상의 특성을 고려하여 이용하고자 하는 모드를 적절히 선택하고 이에 적합한 트랜스듀서를 선정하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)로 나뉘는 체적초음파(bulk ultrasonic wave)와는 달리 유도초음파는 도파구조물(waveguide structure)의 형상에 따라 다양한 종류와 모드가 존재한다. 판(plate) 구조물의 경우, 매질 변위의 방향에 따라 램파(Lamb wave)와 SH파(shear horizontal wave, 전단수평파) 두 종류의 유도초음

파가 있고, 각각 무한대의 모드가 존재한다. Fig. 1은 두께 1 mm인 알루미늄 판에서 각각 램파와 SH파의 주파수와 군속도(group velocity) 관계를 보여준다. 램파의 경우 A1 모드의 단절주파수(cutoff frequency) 이하의 주파수 대역에서 A0 모드와 S0 모드가 존재한다. 주파수가 증가하면서 점점 더 많은 모드가 나타나기 시작하는데 Fig. 1(a)에서 볼 수 있듯이 이들의 분산 곡선은 서로 복잡하게 교차하는 모습을 보인다. 따라서 주파수가 높은 대역에 램파를 이용하는 경우 다수의 모드들이 측정되었을 때 이를 분리해서 모드를 확인하는 것은 매우 까다로운 일이 될 수 있다. 이에 반해, SH파는 모드들의 분산 곡선이 서로 교차하지 않으므로 측정신호에서 모드의 분리가 비교적 쉽고 모드 속도가 순차적이므로 상대적으로 모드를 확인하는 작업이 용이하다고 할 수 있다. 또한, SH파의 경우에는 SH1 모드의 단절주파수 이하에서는 오직 SH0 한 모드만이 존재할 수 있으므로 다른 모드의 영향을 배제할 수 있다. 무엇보다도 SH0 모드는 주파수에 따라 속도가 변하지 않는 유일한 비분산파(nondispersive wave)이므로 파가 진행하더라도 파형이 변하지 않는다. 이와 같은 이유들로 인해, 유도초음파 기반 비파괴검사의 경우 SH파 특히 SH0 모드를 이용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

판에서 SH파를 가진 측정하기 위한 방법으로는 썰기(wedge)를 이용한 압전(piezoelectric) 트랜스듀서, EMAT(electromagnetic acoustic transducer, 전자기음향트랜스듀서)[6,7], 자기변형 트랜스듀서(magnetostrictive transducer)[8,9] 등을 들 수 있다.

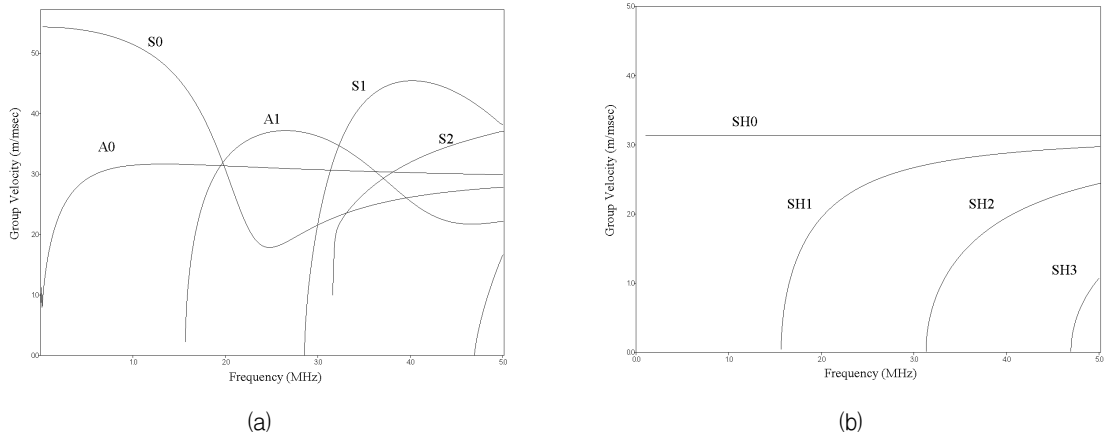


Fig. 1 Frequency - group velocity dispersion relation of a 1 mm thick aluminum plate; (a) Lamb waves, (b) SH waves

이 중 자기변형 트랜스듀서는 강자성(ferromagnetic) 물질이 자기장에 의해 변형하는 현상인 자기변형(magnetostriction) 원리를 이용한 것으로 판에서 SH파 및 배관이나 축에서 비틀림파를 가진 및 측정하는데 매우 효율적이다[10, 11]. 자기변형 트랜스듀서는 100 kHz 이하의 낮은 주파수 대역에서도 운용이 가능하고, 쿨리온도가 높은 강자성 물질을 이용한 경우 높은 온도에서도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 특히, 구조가 간단하고 내구성이 우수하다는 점과 저렴한 단가로 제작이 가능하다는 점은 실제 산업적 응용성을 고려할 때 매우 주목할 만하다.

일반적으로 자기변형 트랜스듀서는 주로 강한 자기변형성을 갖는 강자성 물질과 자기장을 인가하고 동시에 이를 측정하는 코일, 바이어스 자기장 및 이를 고정하는 보빈 등으로 구성된다. Fig. 2는 미앤더(meander) 코일과 얇은 강자성 패치를 이용한 SH파 자기변형 트랜스듀서의 한 예를 보여준다. 이 때, 효율적인 SH파 전달을 위해서 강자성 패치와 구조물 사이에서는 전단력이 전달되어야 하므로, 보통 강자성 패치는 에폭시 등의 접착제를 이용하여 구조물에 단단히 부착되어야 한다. 하지만, 이러한 점은 트랜스듀서를 사용하는데 많은 불편함을 야기한다. 먼저, 접착제를 이용하는 경우는 접착제가 경화되는데 수 분에서 수 시간 정도의 경화시간이 필요하다. 이와 같은 이유로 강자성 패치를 검사 지점에 부착시킨 후부터 파를 측정하기까지의 검사시간이 많이 소모된다. 또한 한 번 부착된 강자성 패치는 재활용이 어려우므로 재료의 소모가 많고, 측정 지점 마다 강자성 패치를 부착시켜야 하는 번거로움이 따른다. 이 밖에 강자성 패치와 코일 및 바이어스 자석 사이의 상대적인 위치가 일

정하지 않음으로 인해서 트랜스듀서의 민감도가 검사시 마다 변동이 크다는 것 또한 단점이다.

이러한 기존의 패치형 자기변형 트랜스듀서의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 모듈화된 소형 SH파 자기변형 트랜스듀서를 제안하고자 한다. 제안한 트랜스듀서는 강자성 물질 및 다른 요소를 포함하여 단일 모듈로 구성을 하였고, 강자성 패치를 구조물에 부착하는 대신 전단 커플러트(shear couplant)를 사용하도록 고안되었다. 이를 이용하면, 실제 구조물에서 유도초음파를 측정하는데 있어서 강자성 패치 부착 시간을 소모하지 않으므로 검사 시간을 현저히 줄일 수 있다. 또한, 다양한 지점을 측정하는데 있어, 별도의 강자성 물질을 소모하지 않을 뿐만 아니라, 측정 지점을 자유롭게 변경할 수 있으므로 검사자가 사용하는데 매우 편리하다.

본 연구에서는 제안한 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈의 구조 및 구성요소를 소개하고, 제작된 트랜스듀서의 성능을 평가하기 위해 실제 구조물에 적용한 결과를 보였다. 결과적으로, 제안한 트랜스듀서는 다양한 시편에서 SH파를 발생시키는데 효율적으로 적용 가능함을 보였다. 본 트랜스듀서의 개발로 인해 향후 유도초음파 검사에 있어 SH파가 비파괴검사 현장에서 좀 더 많이 적용될 것으로 생각된다.

## 2. SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈의 설계 및 제작

자기변형이란 자기장과 변형 사이의 연성관계를 뜻한다. 즉, 재질에 자기장이 가해졌을 때 변형이 발생하거나, 역으로 재질이 변형할 때 자기장이 유도되는 것을 자기변형 현상[12]이라고 한다. 자기변형 현상은 주로 철, 니켈, 코발트 등 강자성 물질 또는 이를 포함한 합금 등의 재질에서 주로 발생하며, 최근 Terfenol-D, Galfermol 등 거대자기변형(giant magnetostriction) 재질이 개발된 바 있다. 자기변형 현상은 모터나 변압기의 소음을 유발하는 등 강자성 물질로 이루어진 기구류의 손상 원인으로 지목되기도 하지만, 자기변형을 지능구조물의 일종으로 센서나 액추에이터에 능동적으로 이용하려고 하는 연구 또한 활발하다. 특히, 1970년대 후반부터는 자기변형을 탄성초음파의 발생 및 측정에 응용하는 연구가 시작되어 최근에는 유도초음파 변환에 다양하게 적용되고 있다[13,14].

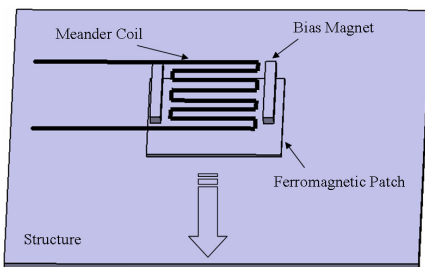


Fig. 2 The schematic diagram of the existing magnetostrictive transducer using a ferromagnetic patch bonded onto a structure

통상 자기변형 현상을 이용하여 구조물에 초음파를 발생시키려고 할 때, 강자성물질로 이루어진 구조물 자체의 자기변형성을 이용하는 방법과 구조물과 별도로 독립적인 자기변형 물질에서 발생한 초음파를 구조물로 전달시키는 방법이 있다. 후자의 경우 강한 자기변형성을 지닌 재질을 이용할 수 있고 구조물의 재질과 상관없이 적용이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 방법 중 하나가 강자성 패치를 구조물에 부착하여 초음파를 발생시키는 방법이다. 최근 자기변형성이 일반적인 강구조물에 비해 훨씬 강한 철-코발트 합금이 개발되어 이를 얇은 패치 형상으로 가공된 재질을 이용하면 판에서 램프, SH파, 봉 및 배관에서 비틀림과 등 다양한 모드의 유도초음파를 가진하거나 측정할 수 있고 [8-11,15], 특히 전단 유도초음파의 변환에 매우 효율적이라고 말할 수 있다. 하지만, 앞서 기술한 바와 같이 패치를 구조물에 부착을 시키는 방법은 접착제의 사용으로 인해 몇 가지 불편함이 필수적으로 따른다.

자기변형으로 구조물에 변형을 발생시킬 때, 바이어스 자기장이 매우 중요한 역할을 한다. 바이어스 자기장은 재질에 인가하는 정적 자기장을 뜻한다. 바이어스 자기장의 인가는 재질의 민감도를 증가시키고 선형성을 보장하는 역할을 한다. 무엇보다도 주목할 만한 것은 바이어스 자기장과 가진 신호를 입력하는 동적 자기장의 방향에 따라 변형 모드를 제어할 수 있다는 점이다. 즉, 바이어스 자기장과 가진 자기장의 방향이 일치할 때는 재질이 수직 변형(normal deformation)을, 두 방향이 서로 수직일 때는 재질이 전단 변형(shear deformation)을 겪는다[16]. 이는 바이어스 자기장이 마치 압전재질에서 분극(poling)과 같은 역할을 하는 것으로 이해할 수 있다. 바이어스 자기장의 방향만으로 편리하게 변형 모드를 선택할 수 있다는 것도 자기변형의 또 다른 장점중의 하나라고 할 수 있다. 바이어스 자기장은 정자기장이므로 영구자석 또는 직류전류가 흐르는 코일을 이용하여 구성한다. 본 연구에서는 SH파용 트랜스듀서를 개발하는 것이 목적이므로 바이어스 자기장의 방향은 가진 자기장의 방향과 서로 수직이 되게 구성한다.

본 연구에서 제안하는 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같다. 제안한 트랜스듀서 모듈은 강자성 소자, 코일, 영구자석으로 구성된다. 강자성 소자가 트랜스듀서 모듈의 밑

면을 구성하여 구조물에 직접 접촉하도록 하여 변형이 잘 전달되도록 하였으며, 코일과 영구자석은 강자성 소자에 적절한 자기장을 걸어줄 수 있도록 배치되었다. 이 때, 한 쌍의 영구자석은 바이어스 자기장이  $y$  방향으로 자기변형 재질을 잘 통과해서 인가되도록 배치되어야 한다. 이를 위해 제안한 트랜스듀서에서는 영구자석이 자석이 서로 반대의 극 방향을 가지도록 배열되었고 자기장의 손실을 줄이기 위해 요크를 두어 강자성 소자-영구자석-요크가 함께 폐자기회로(closed magnetic circuit)를 구성하도록 하였다.

강자성 소자에 가진 자기장을 공급하고 또 강자성 소자로부터 유도된 자기장을 측정하기 위한 코일로는 Fig. 2(b)와 같이 다수의 평면형 솔레노이드 코일(periodic planar solenoid)을 사용하였다. 코일에 의해 인가되는 자기장은  $x$  방향으로 바이어스 자기장과 수직 방향이다. 따라서, 앞서 언급한 바와 같이 가진 자기장과 바이어스 자기장이 서로 수직 방향이므로 강자성 소자는 전단 변형을 겪는다. 강자성 소자에 걸리는 가진 자기장은 코일의 형상에 따라 주기성을 지니므로 이로 인한 변형 또한 일정한 주기성을 갖는다. 코일의 이웃하는 선에 흐르는 전류의 방향은 서로 반대이므로 강자성 소자의 변형의 주기성은 선 간격의 두 배가 된다. 따라서, 트랜스듀서로 인해 발생한 파의 파장( $\lambda$ )과 코일 선간격( $d$ )는 다음과 같은 관계가 있다[9].

$$\lambda = 2d \quad (1)$$

그 밖에 코일보빈과 요크 사이의 공간은 메워서 지지해주는 내부 지지대(internal fixator), BNC 커넥터 및 케이스, 그리고 전기 임피던스(electric impedance) 매칭을 위해 수동 소자 회로가 포함된 임피던스 매칭 박스가 트랜스듀서 모듈을 구성하고 있다.

Fig. 3(c)는 제작된 트랜스듀서 모듈의 사진이다. 본 연구에서는 강자성 소자로 0.15 mm 두께의 철-코발트 합금 박판을 25 mm × 25 mm 크기로 잘라서 사용하였다. 바이어스 자석으로는 3 mm × 3 mm × 25 mm 크기의 네오디뮴자석 한 쌍을 이용하였다. 코일의 폭( $a$ )은 20 mm 선 간격( $d$ )은 5.5 mm이고, 감은 수(number of turns)는 5회이다.

전기 임피던스 매칭을 위해서는 모듈의 운용주파수( $f_{op}$ , operational frequency)가 우선 결정이 되어

야한다. 일반적으로 파장이 선택되어 있을 때, 운용 주파수의 선택에 따라서 가진 또는 측정하고자 하는 모드의 선택이 가능하다. 본 연구에서는 가장 응용가능성이 큰 SH0 모드에 대해서 민감한 트랜스듀서를 제작하여 성능을 시험하기로 하였다. 일반적으로 대부분의 구조용 금속 재질에서 전단파의 속도( $c_s$ )가 3000 m/s ~ 3200 m/s이므로, 그 중간값이 3100 m/s를 선택하여 운용주파수를 선택하였다.

운용주파수는 다음 식에 의해 계산된다.

$$f_{op} = \frac{c_s}{\lambda} = \frac{c_s}{2d} = \frac{3100 \text{ m/s}}{2 \times 5.5 \text{ mm}} = 281.8 \text{ kHz} \quad (2)$$

본 연구에서는 다루지 않지만 다른 운용주파수의 SH0 모드를 위해서는 선 간격이 다른 코일을 사용하면 된다. 이 때, 선 간격의 값은 식 (2)에 의해서 전단파의 속도( $c_s$ )와 운용주파수( $f_{op}$ )의 함수이다. 또한, 다른 고차 모드를 선택하여 측정하고 싶은 경우에는 분산선도에서 해당 모드의 운용주파수를 찾아서 이를 이용하면 된다.

### 3. 평판에서 SH파 전파 실험 및 결과

제작된 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈의 성능을 평가하기 위해 유도초음파 측정 실험을 수행하였다. 실험 셋업은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 시험 시편에 한 쌍의 트랜스듀서 모듈을 설치하여 각각 가진 및 수신 트랜스듀서로 이용하였으며, 전단커플러트(shear gel, Sonotech Inc.)를 사용하여 트랜스

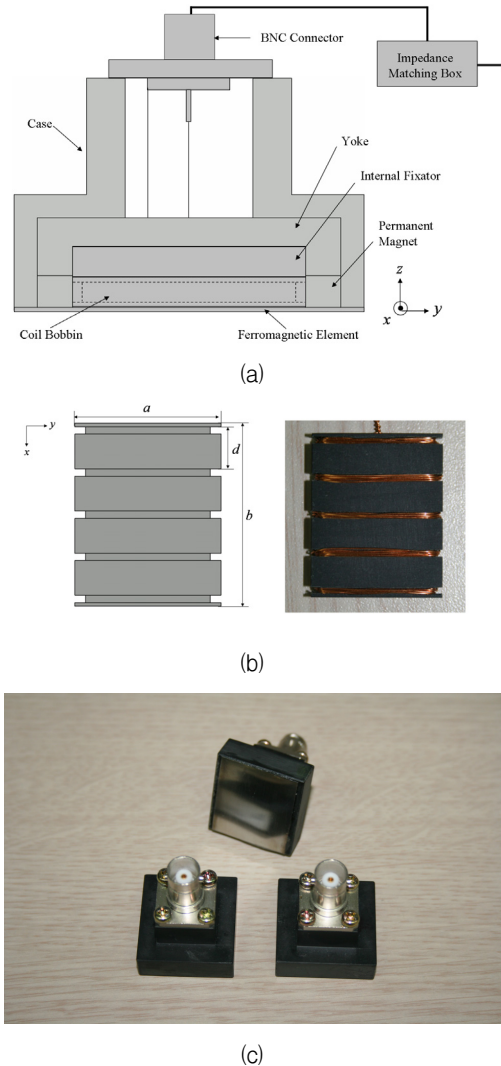


Fig. 3 (a) The cross-sectional schematic diagram of the proposed SH wave magnetostrictive transducer module, (b) the schematic diagram of the coil bobbin, and photograph of the coil and the coil bobbin, (c) the photograph of the manufactured transducer modules

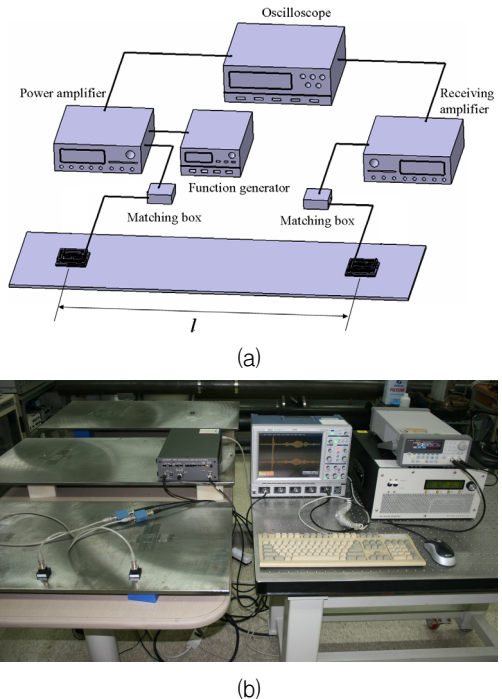


Fig. 4 (a) Experimental setup for pitch-catch wave transduction test with the proposed SH wave magnetostrictive transducer module, (b) the photograph of the installed transducer module on a test plate

듀서의 강자성 소자의 전단변형을 시편으로 전달시켰다. 파형발생기(33250A, Agilent Technologies)에서 주파수가 281.8 kHz인 1 사이클의 정현파 신호를 생성한 후 선형 파워앰프(AG1017L, T&C Power Conversion Inc.)를 증폭시켜 가진 신호를 발생하였다. 가진 트랜스듀서에서 발생한 SH파는 수신 트랜스듀서에서 측정되고 이 때 측정된 신호는 앰프(5307, NF Electronics Instruments)로 증폭시킨 다음 오실로스코프를 이용하여 관찰, 저장하였다. 실험에는 각각 두께 1.15 mm의 스테인레스 스틸 평판 및 각각 두께 1 mm, 11.75 mm의 탄소강판이 사용되었다.

Fig. 5의 그래프는 제안한 트랜스듀서를 이용하여 스테인레스 스틸 평판에서 측정된 신호를 보이고 있다. 측정신호에서 시간 0 sec에서 나타난 신호는 수신 트랜스듀서에서 측정된 가진 신호의 전기적인 유도신호이다. 약 90  $\mu$ sec이후에서 측정된 신호 처음 도달하는 신호이다. 신호 측정 시 가진 및 수신 트랜스듀서의 모듈 사이의 거리( $l$ )는 283 mm이므로 측정된 파의 속도를 계산하면 약 3150 m/sec (=283 mm/90/ $\mu$ sec)로서 이는 일반적인 SH0 파의 속도와 거의 같다. 따라서 측정된 신호는 SH0 파라고 확신할 수 있다. 측정된 신호에서 확인할 수 있듯이 S0 모드는 전혀 측정되지 않았는데, 이는 제안한 트랜스듀서가 오직 SH파에만 민감함을 보여준다.

Fig. 6의 그래프는 두께 1 mm의 탄소강 평판에서 측정된 신호이다. 앞선 결과와 마찬가지로 SH0 파가 매우 뚜렷하게 잘 측정됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 측정하고자 하는 구조물이 탄소강으로 이루어진 경우에는 자기변형 트랜스듀서의 바이어스 자기장 및 가진 자기장이 모듈내의 강자성 소자로 흐르는 것을 방해하는 경향이 있다. 대개 자기변형 트랜스듀서에서 사용하는 강자성 소자의 투자율(permeability)보다 탄소강의 투자율이 높기 때문에 정작 강자성 소자에 걸리는 자기장의 세기는 충분하지 못할 뿐만 아니라 불균일하기 마련이다. 이러한 이유로 강자성 소자의 변형이 효율적이지 못하게 되므로 탄소강 구조물에서는 영구자석을 이용하는 자기변형 트랜스듀서의 성능이 떨어졌다. 이를 보완하기 위해서, 영구자석 대신 잔류자화를 이용하는 방법이 제안된 바 있다. 그럼에도 불구하고, 제안한 트랜스듀서의 경우 별다른 변경없이 탄소강 구조물에서도 SH파가 잘 측정이 되는 결과를 얻을

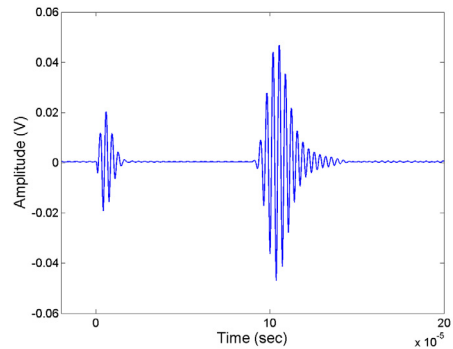


Fig. 5 The measured signal in a stainless steel test plate of 1.15 mm thickness with the proposed transducer module

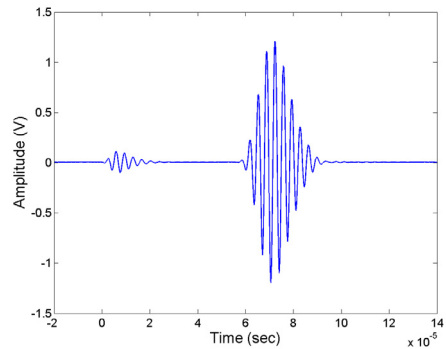


Fig. 6 The measured signal in a steel test plate of 1 mm thickness with the proposed transducer module

수 있었다. 이는 전단커플러트 사용이 트랜스듀서의 강자성 소자와 탄소강 구조물 사이의 직접적인 접촉을 차단하여 자기 갭(gap)을 형성하고 이로 인해 자기장이 탄소강 구조물의 영향을 덜 받는다고 유추해 볼 수 있다. 결과적으로, 제안한 트랜스듀서는 영구자석을 이용하지만 탄소강 구조물에서도 효율적으로 SH파를 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

마지막으로, Fig. 7은 두께 11.75 mm의 탄소강 평판에서 실험을 수행한 결과를 보여준다. 판의 두께가 두꺼워질수록 고차모드가 나타나기 시작하는 단절주파수가 점점 낮아지므로 정한 주파수 대역에서 고차모드들이 측정된다. Fig. 7(a)의 그래프에서 150  $\mu$ sec 이후에 측정된 신호는 처음 도달한 파이고, 300  $\mu$ sec 이후에 측정된 신호는 판의 끝단에서 반사되어 돌아온 파이다. 이 때 측정된 신호는 Fig. 5 또는 Fig. 6의 신호와는 달리 여러 펄스가 섞여



있는 듯한 파형을 지니고 있다. 파의 분석을 위해 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 이용한 시간-주파수 해석을 수행하였고, 계산된 스펙트로그램은 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같다. 이 경우 평판의 두께가 두꺼워 가진주파수 근처에서 여러 고차 모드까지 존재할 수 있으므로 기본 모드인 SH0 모드 뿐만 아니라 SH3 모드까지 측정됨을 알 수 있다. 처음 도달한 파는 단시간 푸리에 변환으로는 명확하게 모드가 구분되지는 않지만 끝단 반사파를 보면 SH0 모드와 SH1 모드가 측정됨을 알 수 있다. 비록 가진주파수가 281.8 kHz이지만 400 kHz나 500 kHz에서 나타나는 SH2 및 SH3 모드 또한 측정이 됨을 확인할 수 있었다. 이는 제안한 트랜스듀서가 SH파의 다양한 고차 모드들을 가진 및 측정할 수 있는 성능을 지니고 있음을 보여준다.

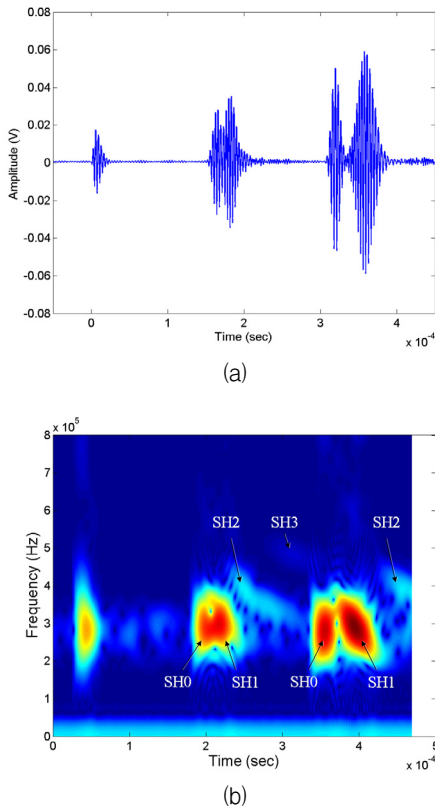


Fig. 7 (a) The measured signal in a steel test plate of 11.75 mm thickness with the proposed transducer module, (b) its spectrogram by the short-time Fourier transform

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 기존의 자기변형 트랜스듀서의 강자성 패치를 구조물에 접촉함으로써 발생하는 한계 및 이용자의 불편함을 극복하기 위해 새로운 소형 모듈형의 트랜스듀서를 제안하였다. 제안한 트랜스듀서는 평판형 구조물의 비파괴검사에 매우 유용한 모드인 SH파를 효율적으로 발생 및 측정할 수 있는 수단을 제공한다. 이 트랜스듀서는 강한 자기변형성을 지닌 강자성 소자, 평면형 솔레노이드 코일, 영구자석, 임피던스 매칭 회로 등으로 구성되고, 소형 모듈로 제작하였다. 제작된 모듈은 실제 구조물에서 전단커플러트와 함께 사용되어 접착제의 경화 시간에 따른 긴 검사시간 및 강자성 패치의 일회성 사용으로 인한 재질의 소모 등 기존의 방법의 한계를 극복할 수 있다. 몇몇 평판 시편에서 SH파 전파 시험을 통해 SH파가 매우 효율적으로 측정됨을 보였다. 특히, 비자성 구조물 시편뿐만 아니라 강자성 구조물 시편에서도 측정된 신호의 질이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 고차모드의 SH파 또한 효율적으로 측정될 수 있음을 보였다. 향후, 제안한 트랜스듀서 모듈이 SH파 가진 및 측정에 매우 편리한 수단을 제공함으로써, 비파괴검사 분야에서 SH파를 이용한 유도초음파 검사의 발전에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] P. Cawley and D. N. Alleyne, "The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 287-290, (1996)
- [2] J. L. Rose, "A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, No. 3, pp. 273-282, (2002)
- [3] P. Cawley, M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, B. Pavlakovic and P. Wilcox, "Practical long range guided wave testing: applications to pipes and rail," *Materials Evaluation*, Vol. 61, No. 1, pp. 66-74, (2003)
- [4] N. Ryden and M. J. S. Lowe, "Guided wave propagation in three-layer pavement

- structures," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116, No. 5, pp. 2902-2913, (2004)
- [5] H. Reis, B. L. Ervin, D. A. Kuchma and J. T. Bernhard, "Estimation of corrosion damage in steel reinforced mortar using guided waves," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, No. 3, pp. 255-261, (2005)
- [6] M. Hirao and H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection," *NDT & E international*, Vol. 32, No. 3, pp. 127-132, (1999)
- [7] J. Li and J. Rose, "Guided wave inspection of containment structures," *Materials Evaluation*, Vol. 59, pp. 783-787, (2001)
- [8] S. H. Cho, J. S. Lee and Y. Y. Kim, "Guided wave transduction experiment using a circular magnetostrictive patch and a figure-of-eight coil in nonferromagnetic plates," *Applied Physics Letters*, Vol. 88, 224101, (2006)
- [9] J. S. Lee, Y. Y. Kim and S. H. Cho, "Beam-focused shear horizontal wave generation in a plate by a circular magnetostrictive patch transducer employing a planar solenoid array," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, 015009, (2009)
- [10] C. I. Park, S. H. Cho and Y. Y. Kim, "Z-shaped magnetostrictive patch for efficient transduction of a torsional wave mode in a cylindrical waveguide," *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 174103, (2006)
- [11] S. H. Cho, S. W. Han, C. I. Park and Y. Y. Kim, "Noncontact torsional wave transduction in a rotating shaft using oblique magnetostrictive strips," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, 104903, (2006)
- [12] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, IEEE, New York, (1993)
- [13] H. Kwun and C. M. Teller, "Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a steel rod," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp. 1202-1204, (1994)
- [14] H. Kwun and K. A. Bartels, "Experimental observation of wave dispersion in cylindrical shells via time-frequency analysis," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 6, pp. 3905-3907, (1995)
- [15] H. Kwun, "Method and apparatus generating and detecting torsional wave inspection of pipes or tubes," U.S. Patent 6429650 B1, (2002)
- [16] R. B. Thompson, "Generation of horizontally polarized shear waves in ferromagnetic meander-coil electromagnetic transducers," *Applied Physics Letters*, Vol. 34, pp. 175-177, (1979)