

## 원통형 구조물에서 비틀림 유도초음파 변환을 위한 모듈형 자기변형 트랜스듀서 개발

### Development of a Modular Magnetostrictive Transducer for Torsional Guided Wave Transduction in a Cylindrical Structure

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

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

**초 록** 배관, 축 등과 같은 원통형 구조물은 산업설비에 널리 이용되고 그 중요성으로 인해 지속적인 건전성 평가를 요구하는 대상이 되는 경우가 많다. 최근, 이러한 원통형 구조물의 비파괴평가를 위해 자기변형 패치 트랜스듀서를 이용한 비틀림 유도초음파 검사가 활발히 연구되고 있다. 하지만, 기존의 자기변형 패치 트랜스듀서가 민감도 증가를 위해 자기변형 성능이 큰 강자성 패치를 구조물에 부착하여 사용하기 때문에, 시간과 비용의 소모를 비롯한, 많은 불편함을 초래한다는 한계를 지니고 있다. 이러한 기존 트랜스듀서의 단점을 극복하기 위해서 원통형 구조물에 적용이 가능한 비틀림과 변환용 모듈형 자기변형 트랜스듀서를 개발하였다. 제안한 트랜스듀서는 모든 구성요소가 모듈 내부에 집적되어 강자성 패치를 구조물에 따로 부착하는 대신, 전단 커플러를 이용한 액상접촉이나 매개물을 사용하지 않는 건식접촉 방법으로 사용이 가능하므로, 비틀림 유도초음파 시험을 용이하고 효율적으로 수행할 수 있는 수단을 제공한다. 본 연구에서는, 상세한 구조와 구동원리를 기술하고 탄소강 시편을 대상으로 실험적 검증을 수행함으로써, 제안한 트랜스듀서의 성능 및 응용가능성을 확인하였다.

**주요용어:** 원통구조물, 비틀림과, 모듈형 자기변형 트랜스듀서, 건식접촉

**Abstract** Cylindrical structures such as pipes and shafts are widely used in various industrial facilities. Recently, researches on magnetostrictive transduction of torsional waves have been actively reported for the nondestructive evaluation of those cylindrical structures. However, the existing magnetostrictive patch transducer has somewhat inconvenient and time consuming process like patch bonding to a structure since it should employ a magnetostrictive patch having strong magnetostriction. To overcome these limitations of the existing transducer, in this work, we develop a novel modular magnetostrictive transducer to generate and measure torsional waves to inspect a cylindrical structure. The proposed transducer can be applied as viscous liquid coupling with shear couplant or dry coupling without coupling media instead of patch bonding to a structure. We describe a detailed structure of the modular transducer and conduct some experiments to verify its performance.

**Keywords:** Cylindrical Structure, Torsional Wave, Modular Magnetostrictive Transducer, Dry Coupling

## 1. 서론

원형 단면을 가진 원통형 구조물은 배관, 튜브, 보 및 축 등 다양한 형태로 산업설비에 널리 적용되고 있다. 국가 중요 산업시설에서도 역시 다양한 원통형 구조물을 흔히 볼 수 있는데, 예를 들어, 원자력발전소 내부만 살펴보더라도 수많은 배관과 튜브로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 원전이나 석유화학설비의 배관이나 튜브 등과 제조업 생산 설비에 널리 적용되는 동력 구동축 등의 원통형 구조물은 그 중요성으로 인해 안전성 및 건전성의 지속적인 평가를 요구하는 경우가 많으므로, 많은 원통형 구조물이 정기적인 비파괴검사나 상시 감시(online monitoring)의 대상이 된다.

이러한 원통형 구조물의 비파괴검사 방법으로 많은 주목을 받고 있는 방법중의 하나가 바로 유도초음파검사(guided wave testing)이다[1-5]. 유도초음파는 역학적 파동 에너지가 도파구조물(waveguide structure)의 기하학적 경계조건의 영향을 받으면서 전파하는 것을 일컫는데, 대부분의 에너지가 구조물을 따라서 진행하므로 원거리 전파가 가능하다. 대개 체적초음파(bulk wave)를 이용하는 일반 초음파검사(ultrasonic testing, UT)가 국부적인 결함 또는 손상의 탐상을 목적으로 하는데 반해, 유도초음파는 넓은 영역의 검사가 가능하므로 신속탐상(fast inspection) 또는 선별검사(screening test)에 적합하다는 장점이 있다. 하지만, 유도초음파는 도파구조물의 재질 및 기하학적 형상에 따라 다양한 종류의 파가 존재하고, 주파수 성분에 따라서 속도가 다른 파의 분산(dispersion) 특성으로 인해 전파양상이 매우 복잡하다. 따라서, 성공적인 유도초음파 검사의 수행을 위해서는 대상 구조물에서 발생하는 유

도초음파 전파 현상에 대한 이해, 모드 선택 및 검사 위치 선정, 측정신호 후처리 및 분석 등이 함께 수행되어야 한다.

원통형 구조물의 경우 매질 변위의 방향에 따라 종파(longitudinal wave), 굽힘파(flexural or bending wave), 비틀림파(torsional wave), 세 종류의 유도초음파가 존재한다[6,7]. 이 중 비틀림파는 모드들이 여타 다른 파에 비해 상대적으로 전파양상이 덜 복잡하므로 모드 분석과 같은 신호처리에 많은 장점이 있다. Fig. 1은 탄소강 배관의 비틀림파 분산곡선(dispersion curve)을 보여주고 있다. 분산곡선에 확인할 수 있듯이 비틀림파의 모드들이 서로 교차하지 않음을 알 수 있고, 이러한 점으로 인해 비틀림파의 모드 분석이 좀 더 용이하다. 무엇보다도, 비틀림파의 기본 모드(fundamental mode)인  $T(0,1)$  모드는 원통형 구조물에서 존재하는 유일한 비분산파(nondispersive wave)로써, 주파수와 무관하게 항상 속도가 일정하므로 신호처리 측면에서 매우 유리하다. 또한,  $T(0,2)$  모드가 나타나기 시작하는  $T(0,2)$ 의 단절주파수(cutoff frequency) 이하의 주파수 영역에서는 오직  $T(0,1)$  모드만이 존재하므로, 대부분의 유도초음파 검사 시에는  $T(0,1)$  모드를 이용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

원통형 구조물에서 비틀림파 변환을 위해서 몇 가지 방법이 적용 가능하다. 먼저, 가장 일반적으로 적용이 가능한 전단파용 압전 트랜스듀서와 췌기(wedge)를 조합하여 비틀림파를 발생시키는 방법을 생각해 볼 수 있다. 다음으로, 로렌츠 힘(Lorentz force) 원리를 이용한 EMAT (electromagnetic acoustic transducer, 전자기 음향 트랜스듀서)[8] 및 자기변형(magnetostriction)을 이용한 자기변형

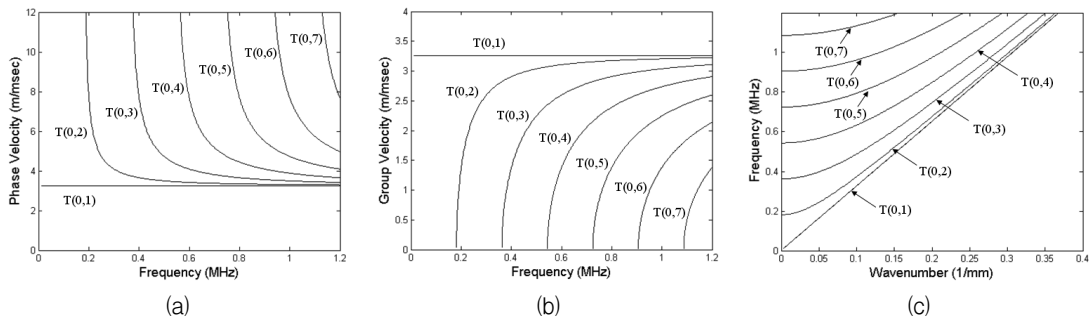


Fig. 1 The dispersion relation of torsional guided waves in a pipe; (a) phase velocity - frequency, (b) group velocity - frequency, and (c) frequency - wavenumber. (Carbon steel pipe, thickness: 9 mm, outer diameter: 165 mm)

트랜스듀서를 등을 들 수 있다. 특히, 강한 자기변형성을 지닌 자기변형 패치를 구조물에 부착하여 비틀림파를 변환하는 자기변형 패치 트랜스듀서(magnetostrictive patch transducer)[9-13]는 매우 우수한 비틀림파 변환 성능을 발휘하므로 최근 많은 연구가 수행되어 왔다. 하지만, 검사를 수행할 때마다 패치를 구조물에 부착해야 하는 작업의 번거로움이 따르고, 접착제의 경화시간으로 인한 시간 소모도 심하다. 비교적 고가인 패치의 재활용이 어려운 점을 포함한 이와 같은 현실적인 문제점들이 장애물이 되어 현장 적용 가능성을 저하하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 기존의 자기변형 패치 트랜스듀서가 지닌 번거로움을 극복하고 적용의 편리성을 극대화시킨 원통형 구조물에서 비틀림파 변환을 위한 모듈형 자기변형 트랜스듀서를 개발하였다. 본 연구에 앞서 수행한 평판 구조물에서 SH파용 트랜스듀서 개발 연구[14]와는 달리 곡률이 있는 검사체를 고려하여 트랜스듀서를 설계 및 제작하였다. 제한한 트랜스듀서는 접착제를 이용해 패치를 구조물에 부착하는 대신, 젤(gel)상의 전단 커플러트(shear couplant)와 함께 적용할 수 있도록 고안되었기 때문에, 대부분의 초음파검사에 주로 쓰이는 일반 압전 트랜스듀서처럼 간편하게 이용할 수 있다.

제한한 비틀림파 변환용 모듈형 자기변형 트랜스듀서의 타당성을 검증하기 위해 작동 원리 및 세부 구성을 기술하고, 성능의 검증을 위해 배판 시편에서 실험을 수행하였다. 패치가 아닌 강자성 구조물 자체의 자기변형성을 이용한 경우와 측정 신호를 비교하여 강자성 패치 사용의 근거를 확보하였고, 건식접촉법(dry coupling method)의 가능성을 실험적으로 확인하였다.

## 2. 비틀림파 변환용 모듈형 자기변형 트랜스듀서 설계 및 제작

자기변형이란 자기장과 변형 사이의 연성관계를 의미한다. 즉, 재질에 자기장이 가해졌을 때 변형이 발생하거나, 역으로 재질이 변형할 때 자기장이 유도되는 것을 자기변형 현상[15]이라고 한다. 자기변형 현상은 주로 철, 니켈, 코발트 등 강자성 물질(ferromagnetic material)에서 발생한다. 최근, 자기변형성이 매우 큰 Terfenol-D, Galfenol 등 자기변

형성이 일반 재질과 비교하게 현저하게 큰 거대자기변형(giant magnetostriction) 재질이 개발되면서 센서나 액추에이터 쪽에서 자기변형의 응용 분야가 점점 더 확대되고 있다. 1970년대 후반부터는 자기변형을 탄성초음파의 발생 및 측정에 응용하는 연구가 시작되어[16] 최근에는 유도초음파 분야에서 연구가 활발하다.

대상이 강자성 물질로 이루어진 구조물인 경우 자기변형을 이용하여 유도초음파를 발생시키고자 할 때 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 즉, 구조물 자체의 자기변형성을 이용하는 방법과 구조물과는 별도로 독립적인 자기변형 물질에서 발생된 초음파를 구조물로 전달시키는 방법이 있다. 후자의 경우 자기변형성이 훨씬 강한 재질을 이용하므로 민감도의 증가 등 성능을 증대시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 강자성 재질이 아닌 금속, 비금속, 및 복합재 등으로 이루어진 비자성 재질(nonferromagnetic material) 구조물에도 동일하게 적용할 수 있으므로 응용대상이 훨씬 확대될 수 있다는 장점이 있다.

이러한 방법중 하나가 얇은 박판형태의 강자성 패치를 구조물에 부착하여 유도초음파를 발생시키는 방법이다. 최근, 자기변형성이 강구조물에 통상 쓰이는 탄소강에 비해 월등히 강하면서도 얇은 박판형태로 제작이 가능한 철-코발트 합금이 소개되어, 이를 구조물에 부착하여 다양한 모드의 유도초음파를 변환하는 방법이 보고되고 있다[11,14]. 무엇보다도, 강자성 패치를 이용한 방법은 전단 변형에 민감하다는 점으로 인해, 평판에서 SH파나 원통에서 비틀림파 등 전단 유도초음파의 변환에 효율적이다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이, 강자성 패치를 이용한 자기변형 패치 트랜스듀서는 강자성 패치, 바이

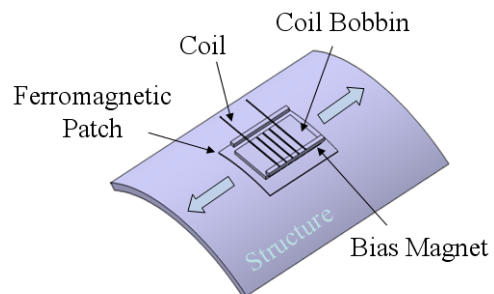


Fig. 2 The schematic diagram of the existing magnetostrictive transducer using a ferromagnetic patch bonded onto a structure

어스 자석, 가진 및 수신 코일로 구성된다. 이 때 바이어스 자석은 트랜스듀서의 민감도를 증가시키고 선형성을 보장하는 역할을 하며, 무엇보다도, 코일의 자기장 방향과의 상대적인 배열에 따라서 재료의 변형 모드를 제어할 수 있다. 즉, 바이어스 자기장과 가진 자기장의 방향이 일치할 때는 재질이 수직변형(normal deformation)을, 두 방향이 서로 수직일 때는 재질이 전단변형(shear deformation)을 겪는다[17].

강자성 패치를 구조물에 부착할 때는 주로 에폭시 등의 접착제를 이용한다. 패치의 부착이 끝나면 패치 위에 코일과 자석, 요크 등 트랜스듀서의 나머지 구성요소를 설치한 후 유도초음파를 가진 측정할 수 있다. 하지만, 이렇게 강자성 패치를 직접 구조물에 부착하는 방식은 앞서 언급한 바와 같이 여러 가지 불편함을 피할 수 없다. 먼저, 패치의 부착에 따르는 번거로움이다. 검사 위치가 정해질 때마다 패치를 부착하고 접착제가 경화되기를 기다려야 한다. 접착제 경화시간은 접착제의 종류마다 다르지만, 대개 수 시간 이상이 소모된다. 또한, 패치와 코일, 자석 등 다른 구성요소 간의 상대적인 위치가 고정되어 있지 않고 코일이 노출되어 있으므로, 신호의 반복성이 보장되지 않을뿐더러 많은 잡음성분이 함께 측정되어 신호의 질이 좋지 못하다. 마지막으로, 접착제로 붙인 패치는 제거할 때 패치의 손상을 피하기 어렵기 때문에 재활용이 어려운데, 철-코발트 합금은 비교적 고가이므로 검사 횟수가 많아질수록 재료의 소모로 인한 비용도 함께 증가하게 된다.

이러한 기존 트랜스듀서의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 모듈형 자기변형 트랜스듀서를 제안하였다. 제안한 트랜스듀서는 모듈 내에 강자성 패치, 코일, 영구자석 등의 트랜스듀서의 구성요소를 집적하여 구현되었다. 강자성 패치가 트랜스듀서 모듈의 밑면을 구성하여, 구조물에 직접 접촉하도록 고안되었고, 원통형 구조물에 적용을 위하여 강자성 소자와 코일 보빈(Fig. 3(b))의 한 면이 검사 대상 원통 구조물과 동일 곡률을 가지도록 설계되었다. 영구자석은 바이어스 자기장이  $y$ 방향(Fig. 3(a))으로 강자성 패치를 잘 통과해서 인가되도록 배치되었다.

제작 트랜스듀서 모듈은 외경 165 mm의 배관에 적용할 수 있도록 가공하였다. 강자성 재료로 두께 0.15 mm의 철-코발트 합금을 25 mm × 25 mm의

크기로 잘라서 사용하였다. 강자성 패치는 에폭시를 이용하여 코일 보빈과 케이스에 부착된다. 코일의 선 간격은 3.1 mm 이고, 각 3회 권선하였다. 바이어스 자석으로 3 mm × 3 mm × 25 mm 크기의 네오디뮴 자석 한 쌍을 이용하였고, 내부에 요크를 두어 강자성 패치에 자기장이 잘 인가될 수 있도록 했다. Fig. 3(c)는 제작된 모듈형 트랜스듀서의 사진이다.

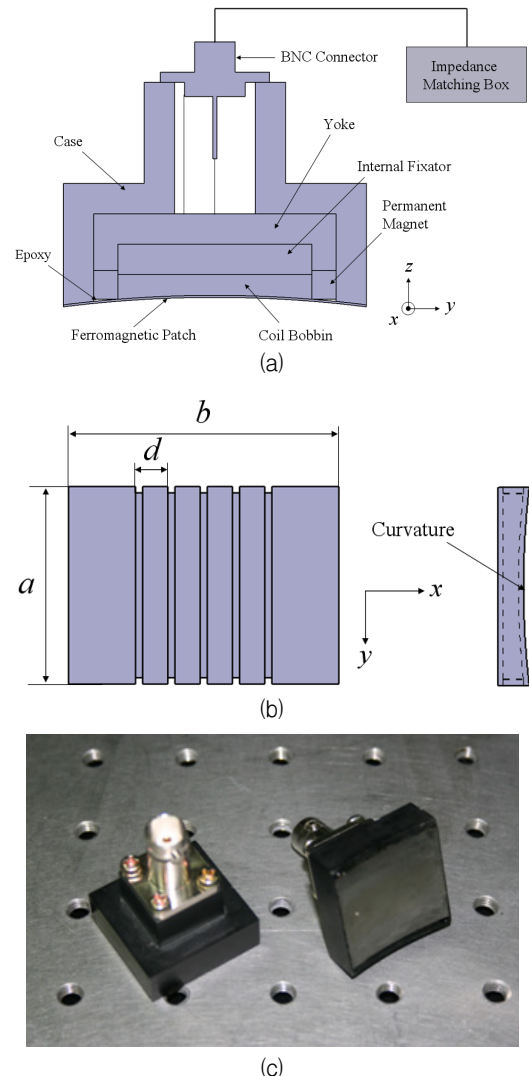


Fig. 3 (a) The cross-sectional schematic diagram of the proposed modular magnetostrictive transducer for torsional waves, (b) the schematic diagram of the coil bobbin, and (c) the photograph of the manufactured transducers

### 3. 배관에서 비틀림파 전파 실험

제안한 트랜스듀서의 검증을 위해서 Fig. 4와 같이 배관 시편에 각각 가진 및 수신 용도로 한 쌍의 트랜스듀서를 설치하고 비틀림파 전파시험을 수행하였다. 시험시편으로 외경 165 mm, 두께 9 mm의 탄소강 배관을 제작하여 사용하였다. RITEC 사의 RAM-10000 시스템을 이용하여 가진 신호를 가진 트랜스듀서에 공급하고 측정신호를 증폭하였다. 가진 신호는 2 사이클의 500 kHz 정현파 신호를 생성하여 가진 트랜스듀서로 공급하였다.

트랜스듀서와 검사 대상 구조물 사이의 접촉을 위해서, 커플런트 유무에 따라 액상접촉(liquid coupling) 및 건식접촉(dry coupling) 두 가지 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 5(a),(b)는 각각 액상접촉 방식과 건식접촉 방식의 실험 모습을 보여준다. 액상접촉시에는 Sonotech 사의 전단 커플런트를 사용하였고, 건식접촉시에는 별도의 매개물 없이 시험자가 트랜스듀서를 구조물 쪽으로 밀착시킨 후 약간의 힘을 가하여 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 제작된 모듈형 트랜스듀서를 이용하여 액상접촉법으로 측정된 신호를 보여주고 있다. 가진 트랜스듀서와 수신 트랜스듀서의 거리를 각각 100 mm, 150 mm, 200 mm로 하여 비틀림파를 측정된 결과이다. 시간 0  $\mu$ s에서 처음 측정되는 신호는 가진 신호의 전기적 유도신호가 측정된 것으로서 일반적으로 코일형의 전자기형 트랜스듀서에는 피할 수 없는 신호이다. Fig. 1(b)의 검사 시편의 비틀림파 균속도 분산곡선을 참고하면, T(0,4) 모드의 단절주파수는 500 kHz보다 크므로 500 kHz 대역에서는 T(0,1), T(0,2), T(0,3) 세 모드가 측정된다. 일반적인 탄소강의 물성에 기초해 500 kHz에서 세 모드의 이론적인 속도를 구하면 각각 3260 m/s, 3036 m/s, 2242 m/s 이므로, 각각의 모드가 100 mm 전파후 도달하는 시간은 30.68  $\mu$ s, 32.94  $\mu$ s, 44.60  $\mu$ s 이다. 100 mm 전파후 측정된 Fig. 6(a)의 신호를 보면 약 30  $\mu$ s 이후에 처음 도달하는 신호가 측정되므로, 이 신호는 T(0,1) 모드임을 알 수 있다. 하지만, T(0,1), T(0,2), T(0,3) 모드는 균속도 차이가 있음에도 불구하고, 수신 트랜스듀서로 도달 시간이 거의 비슷하므로 시간영역에서의 신호 파형이 서로 중첩되어 구분하기 쉽지 않다. 90  $\mu$ s 이후에 도달하는 신호는 가진 트랜스듀서에서 반대편으로 전파 후 시편의 끝단을 맞고 반사된 신호가

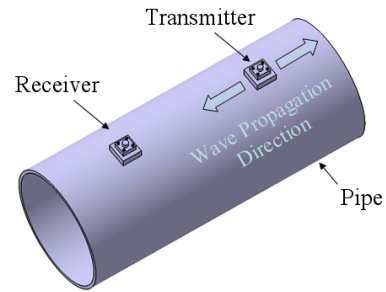


Fig. 4 The arrangement of the transducers for the pitch-catch wave transduction test with the proposed modular magnetostrictive transducer

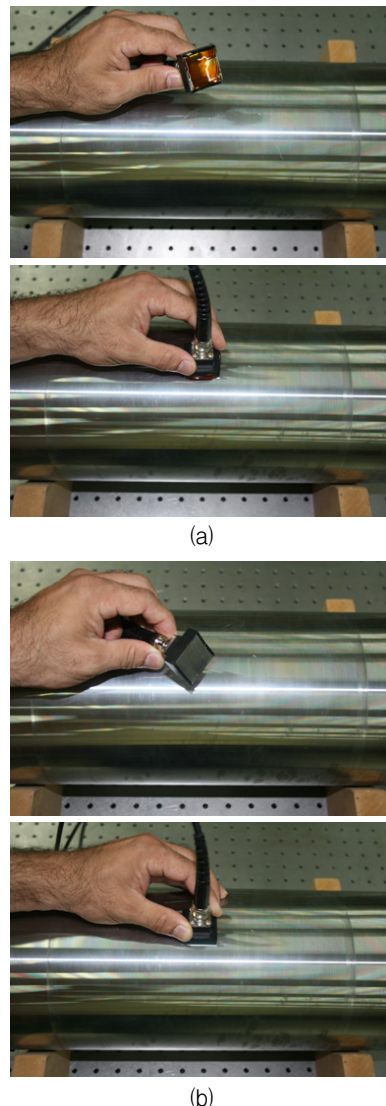


Fig. 5 (a) Liquid coupling method using shear gel couplant, (b) dry coupling method without coupling media

측정된 것이다. 측정 신호를 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 수행한 후 시간-주파수 영역에서 관찰하면, 측정된 파의 양상을 좀더 명확하게 파악할 수 있다. 이 경우에도 역시 T(0,1)과 T(0,2)는 잘 구별이 되질 않지만, T(0,3) 모드는 쉽게 확인이 가능하다. 또한, 희미하지만 주파수 800 kHz, 시간 50  $\mu$ s에서 T(0,4) 모드 또한 관찰할 수 있다. Fig. 6(b,c)의 거리 150 mm, 200 mm에서 측정된 신호에서 볼 수 있듯이, 비틀림파의 전파거리가 멀어질수록 모드간의 도달 시간의 차이도

점점 커지므로, 측정거리가 멀어짐에 따라 시간-주파수 영역에서 모드들의 구분이 더 용이해진다. Fig. 6의 각 신호는 모두 시간영역에서 100번 평균화(averaging)한 신호이다. 비록 평균화를 수행하는 했지만, 신호 대 잡음비(S/N ratio)가 매우 우수한 신호를 획득할 수 있었다. 무엇보다도 비틀림파 이외의 종파, 굽힘파 등 다른 종류의 파들은 전혀 측정이 되지 않는다는 점은 주목할 만하다. 따라서, 진단 커플러트를 이용한 액상접촉 방식을 이용할 때, 제안한 모듈형 트랜스듀서는 상당히 우수한 비

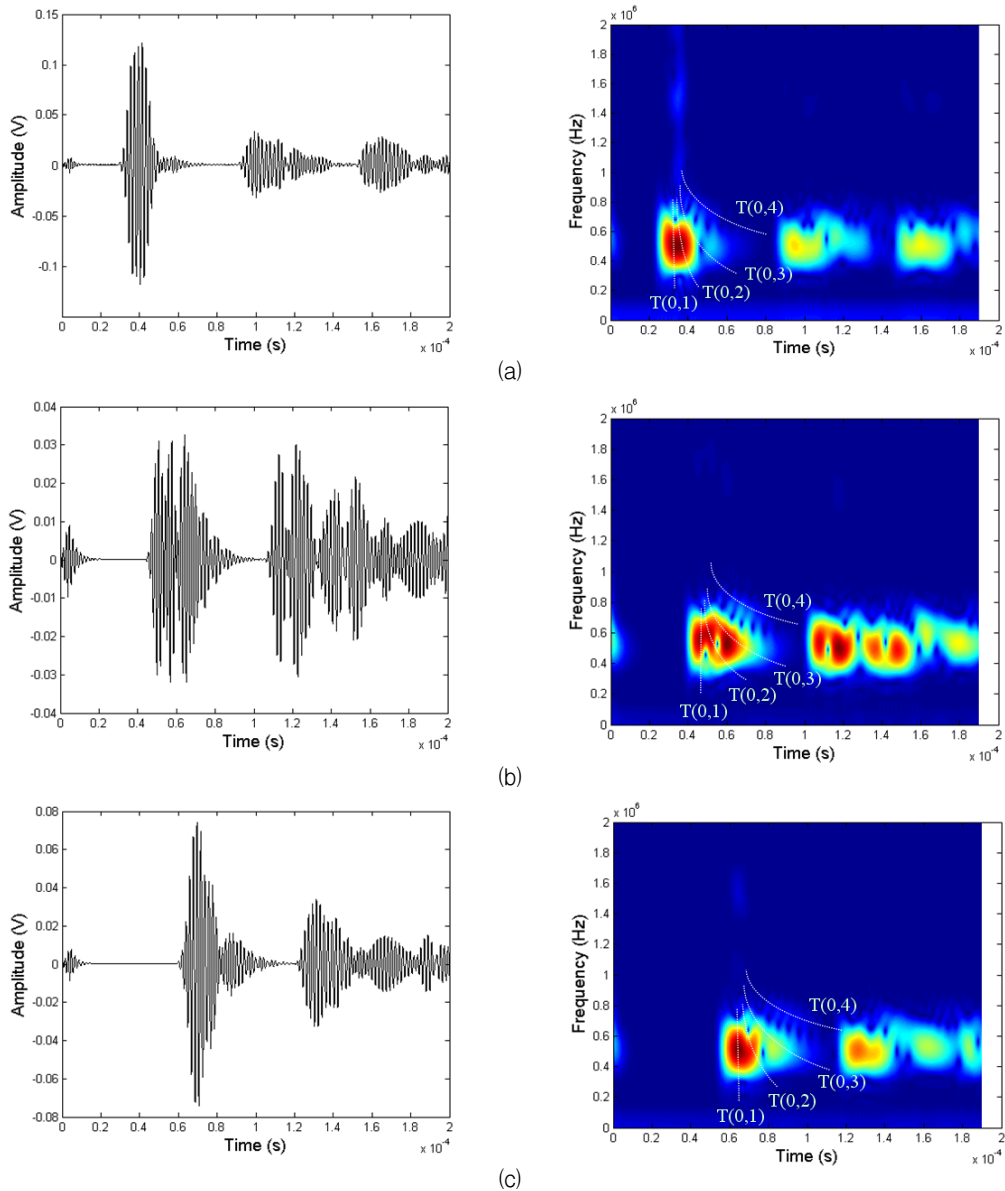


Fig. 6 The measured signal by the liquid coupling method and its spectrogram by the short-time Fourier transform; the distance between two transducers is (a) 100 mm, (b) 150 mm, and (c) 200 mm



틀림과 변환 성능을 보였다.

다음은 각각 강자성 패치를 포함하여 제작된 모듈형 트랜스듀서를 이용할 때(Fig. 7(a))와 강자성 패치 없이 탄소강 배관의 자기변형성을 이용하여 비틀림파를 측정 한 신호(Fig. 7(b))를 비교해 보았다. 시험체가 강자성 물질로 이루어져 있으므로, 자기변형성을 갖기 때문에 강자성 패치가 없어도 원칙적으로 파의 측정이 가능하므로, 본 실험을 통해 강자성 패치 사용시 효율성을 확인하고자 하였다. 측정 신호를 보면, Fig. 7(b)의 경우 Fig. 7(a)의 경우보다 가진신호의 출력을 1.5배, 수신 앰프의 이득(gain)을 30 dB 증폭하였음에도 불구하고, 그 효과는 매우 큰 차이를 보인다. 구조물의 자기변형성보다는 강자성 패치를 이용한 경우에 트랜스듀서의 민감도가 훨씬 예민할 뿐만 아니라, 신호 대 잡음비 또한 월등히 크다. 이는 비록 검사대상이 자기변형성을 지닌 탄소강 등으로 이루어진 구조물이라고 해도, 강자성 패치를 사용하는 것이 유도초음파 신호를 획득하는데 유리하다는 사실을 말해준다.

마지막으로 Fig. 8은 건식 접촉 방식을 이용하여 시험을 했을 경우 측정된 신호이다. 이 신호를 Fig. 6(c)의 액상 접촉 방식으로 측정된 신호와 비교하면, 측정 신호의 신호 대 잡음비가 다소 나빠졌음을 알 수 있다. 단, 시간-주파수 영역에서 측정된 비틀림파 모드를 비교하면, 측정 성능이 별 차이가 없었다. 건식 접촉으로 신호를 측정할 경우 대상과 트랜스듀서의 패치 사이의 접촉면이 고르게 분포해야 하기 때문에 트랜스듀서의 표면의 곡률이 더욱 정밀하게 가공되어야 하고, 측정대상의 표면 또한 매끄럽게 처리가 될 필요가 있다. 또한, 탄소강의 투자율(permeability)이 철-코발트 합금의 투자율보다 더 높기 때문에, 측정 대상의 영향을 받아 바이어스 자기장이나 가진 자기장이 패치에 걸리는 효율이 떨어질 가능성이 있다. 이러한 이유로 액상 접촉시보다는 측정 신호의 크기나 질이 저하되는 사실을 충분히 예상할 수 있다. 하지만, 커플런트 없이 유도초음파의 시험을 하는 것은 이러한 단점을 보상할 만큼 많은 장점을 가지므로 신호의 질이 어느 정도 저하되는 것을 참작하더라도 실제 현장 적용에 있어서 유리한 점이 많다. 실험 결과에 따르면, 본 연구에서 개발한 모듈형 트랜스듀서의 경우도 건식접촉으로 비틀림파를 변환하는데 충분히 적용 가능하다고 판단된다.

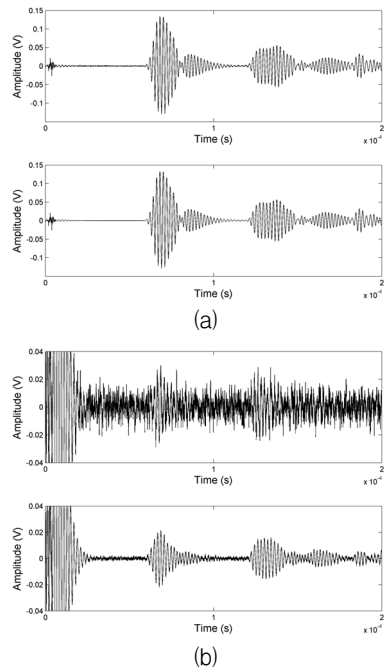


Fig. 7 The measured signals (a) by using modular magnetostrictive transducer and (b) by using the magnetostrictive effect of carbon steel pipe without iron cobalt patch. (upper: raw signal, lower: 100 time averaged signal)

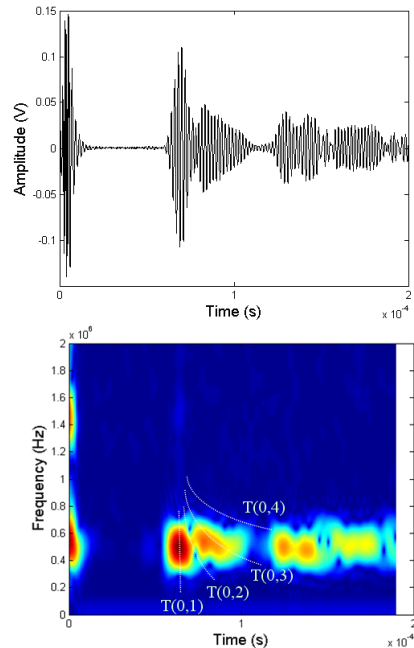


Fig. 8 The measured signal by the dry coupling method and its spectrogram by the short-time Fourier transform; the distance between two transducers is 200 mm

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 원통형 구조물에서 비틀림파를 발생시키는데 있어 기존의 자기변형 패치 트랜스듀서가 지니는 한계 및 불편함을 개선할 수 있는 모듈형 트랜스듀서를 개발하였다. 제안한 트랜스듀서는 배관, 튜브 및 축 등에 간편히 설치하여 비틀림파 변환을 효율적으로 수행할 수 있는 수단을 제공함으로써, 결과적으로 비틀림 유도초음파 검사의 적용 가능성을 향상시켰다. 원통형 구조물의 곡률을 고려하여 설계되었고, 모듈 내부는 강자성 패치, 가진 및 수신 코일, 영구자석 등으로 구성되어 있다. 실제 배관 시편에 적용하여 비틀림파 변환 시험을 수행하였으며, 실험을 통해 비틀림파 변환 성능이 우수함을 확인하였다. 특히, 전단 커플러트를 사용하는 액상접촉 방식뿐만 아니라 트랜스듀서와 검사체 사이에 매개물이 없는 건식접촉 방식을 적용할 때도 비틀림파의 변환 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 마지막으로, 강자성 패치의 사용 없이 구조물 자체의 자기변형성을 이용하여 측정된 경우와 비교함으로써 강자성 패치 사용의 타당성에 대한 근거를 제시하였다. 제안한 모듈형 트랜스듀서는 실제 비틀림파 변환의 편의성 및 효율성을 현저히 개선하면서도, 우수한 성능을 지니고 있다고 말할 수 있다. 향후, 본 연구에서 개발한 트랜스듀서가 유도초음파 검사의 질적 수준 향상 및 적용 대상 확대에 많은 기여를 할 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] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press (1999)
- [7] J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*, Elsevier Science Publishers (1993)
- [8] 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)
- [9] 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, pp. 224101 (2006)
- [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, pp. 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, pp. 104903 (2006)
- [12] J. S. Lee, Y. Y. Kim and S. H. Cho, "Bean-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, pp. 015009 (2009)
- [13] 정용무, "자기변형 스트립 탐촉자에 의한 유



- 도초음파 모드변환에 대한 실험적 검증 및 해석", 비파괴검사학회지, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97 (2009)
- [14] 조승현, 박재하, 권휴상, 안봉영, 이승석, "관형 구조물 유도초음파 검사를 위한 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈 개발," 비파괴검사학회지, Vol. 29, No. 2, pp. 122-129 (2009)
- [15] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE, New York, (1993)
- [16] 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)
- [17] R. B. Thompson, "Generation of horizontally polarized shear waves in ferromagnetic meander-coil electromagnetic transducers," Applied Physics Letters, Vol. 34, pp. 175-177 (1979)