

SH-EMAT의 신호 수신을 위한 광섬유 패브리-페롯 간섭계 센서의 적용

Application of a Fiber Fabry-Pérot Interferometer Sensor for Receiving SH-EMAT Signals

이진혁*, 김대현**[†], 박익근**

Jin-Hyuk Lee*, Dae-Hyun Kim**[†] and Ik-Keun Park**

초 록 수평횡파(SH-wave)는 배관과 같은 박판 구조물에서 판파 모드로 전파하고 분산성이 단순하여 구조물의 건전성 평가에 유용하다. 전자기초음파탐촉자(EMAT)는 비접촉식으로 자석과 코일 배열을 조절하여 수평횡파를 발생하기 용이하다. 따라서 수평횡파 전자기초음파탐촉자(SH-EMAT)를 이용한 자동화 검사 시스템은 박판 구조물 건전성 감시에 매우 유용하다. 하지만 발전설비 또는 자동화 장비 등에서는 전자기노이즈가 상당히 많이 발생하고 EMAT 수신 센서는 전자기노이즈에 취약한 면이 있다. 광섬유 센서는 빛을 이용하여 전자기노이즈 환경에서 매우 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 환경적 제약을 고려하여 광섬유 패브리-페롯 간섭계(FFPI)를 SH-EMAT으로 발생하는 초음파의 수신용 센서로 제안하였다. 평판시험편에서 SH-EMAT의 신호를 FFPI 센서를 이용하여 수신하고 이 신호에 대한 분석을 하였다. 제안된 FFPI 센서가 EMAT으로 가진된 SH wave의 신호를 명료하게 수신할 수 있음을 확인하였다.

주요용어: 광섬유 패브리-페롯 간섭계, 전자기초음파탐촉자, 수평횡파, 구조물 건전성 감시

Abstract Shear horizontal (SH) waves propagate as a type of plate wave in a thin sheet. The dispersion characteristics of SH waves can be used for signal analysis. Therefore, SH-waves are useful for monitoring the structural health of a thin-sheet-structure. An electromagnetic acoustic transducer (EMAT), which is a non-contact ultrasonic transducer, can generate SH-waves easily by varying the shape and array of magnets and coils. Therefore, an EMAT can be applied to an automated ultrasonic testing system for structural health monitoring. When used as a sensor, however, the EMAT has a weakness in that electromagnetic interference (EMI) noise can occur easily in the automated system because of motors and electric devices. Alternatively, a fiber optic sensor works well in the same environment with EMI noise because it uses a light signal instead of an electric signal. In this paper, a fiber Fabry-Pérot interferometer (FFPI) was proposed as a sensor to receive the SH-waves generated by an EMAT. A simple test was performed to verify the performance of the FFPI sensor. It is thus shown that the FFPI can receive SH-wave signals clearly.

Keywords: Fiber Fabry-Pérot Interferometer (FFPI), Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), Shear Horizontal Wave (SH-Wave), Structural Health Monitoring (SHM)

1. 서 론

사회 기반 시설이나 발전설비 또는 대형 플랜트는 그 규모나 역할로 인해 안전성에 대한 고

신뢰도가 요구된다. 최근 수많은 구조물로 구성되는 이러한 시설의 안전성을 확보하고 유지하기 위한 다양한 안전검사가 수행되고 있으며, 비파괴검사 기반의 구조물 건전성 감시시스템에 대한

[접수일: 2014. 3. 28, 수정일: 2014. 4. 24, 게재확정일: 2014. 4. 24] *서울과학기술대학교 에너지환경대학원, **서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, [†]Corresponding Author: Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea (E-mail: dkim@seoultech.ac.kr)

연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 초음파 비파괴검사 기법은 적용 가능한 검사 대상물이 다양하고 결과의 신뢰성이 높아 구조물 건전성 평가에 적용과 새로운 검사 방법 및 시스템의 개발, 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 초음파검사 기반의 구조물 감시 시스템은 최근 로봇 등을 이용한 자동화 무인검사에 대한 요구와 연구가 많이 진행되고 있다[1,2].

전자기초음파탐촉자(electromagnetic acoustic transducer; EMAT)는 비접촉식 방법으로 검사체 내에 초음파를 발생시키고 수신이 가능하여 자동화검사 시스템에 매우 유리하다. 또한 탐촉자의 구성 요소인 자석과 코일의 배열 및 형상에 따라서 다양한 초음파 모드의 발생이 가능하고 특히 검사 대상의 두께 범위 전체의 감시가 가능한 판과 모드의 발생이 용이하다[3,4]. 수평횡파(shear horizontal wave; SH wave)는 일정 두께 이하의 판재에서 판과 모드로 전파되고, 다른 모드에 비해 분산 특성이 단순하여 신호의 분석이 용이하여 적용성이 높다[4,5]. 또한 EMAT는 수평횡파를 시험체 내에서 직접 발생시켜 다른 방식의 탐촉자에 비해 SH-wave 가진에 매우 유리한 탐촉자이다. 이러한 장점으로 SH-EMAT을 이용하여 검사체의 두께에 따른 분산성을 활용한 두께 감속 평가 연구[6,7] 또 자동화 장비에 탑재하여 접근이 어려운 지역의 결함 검사 등의 연구[1]가 수행되고 있다. 그러나 EMAT 수신 센서의 경우 비접촉 환경에 따라 감도가 떨어질 수 있어 신호의 취득 및 해석에 어려움이 있을 수 있다. 또한 센서의 형상 및 크기에 제한이 있어 반사법을 이용한 검사의 경우 미소한 결함 검출에 한계가 있을 수 있다[4]. 게다가 EMAT는 전기장과 자기장을 기반으로 초음파 송수신이 이루어지는 원리로 발전설비와 같이 전자기노이즈가 심한 검사 환경이나 자동화 시스템의 각종 모터 및 제어시스템에서 발생하는 전자기노이즈는 수신 센서에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

이에 반해, 광섬유 기반 센서는 빛을 이용하기 때문에 전자기노이즈 환경에 최적의 해결 방안이 될 수 있고, 또한 초음파로 발생하는 미세변형을 높은 민감도로 측정할 수 있다. 또한 광섬유는 장거리 신호 수신에 용이하고 형태나 무게가 구조물에 거의 영향을 미치지 않아 다수의 센서 적용 및 원거리 감시 시스템 구축에 유리하다[8-10].

이와 같은 특성으로 구조물에 광섬유 센서 네트워크를 구성하고, 로봇과 같은 자동화 시스템에 EMAT를 적용하여 비접촉식 판과 모드 초음파 가진 시스템을 구축한다면 무인, 원격 상시검사가 필요한 구조물의 건전성 감시 시스템 개발이 가능해진다.

본 연구에서는 시스템 개발을 위해, 우선 광섬유 패브리-페롯 간섭계(fiber Fabry-Pérot interferometer; FFPI) 센서를 적용하였다. 패브리-페롯 간섭계는 빛의 간섭현상을 이용하여 미소 변위의 측정이 가능하고, 초음파와 같은 고주파수 진동 측정에 유용하다. 또한 센서의 구성과 제작이 다른 광섬유 센서에 비해 단순하여 다양한 분야에 적용성이 높다. 이 센서의 적용성을 확인하기 위하여 EMAT으로 가진된 수평횡파의 수신 실험을 수행하였다. SH-EMAT의 신호를 FFPI 센서가 낮은 노이즈 레벨로 가진된 초음파 모드의 신호 취득이 가능함을 확인하였다.

2. 섬유 패브리-페롯 간섭계 센서

광섬유 패브리-페롯 간섭계 센서의 헤드는 Fig. 1에서와 같이 두 광섬유 가닥을 유리판에 서로 마주보도록 장착하여 구성한다[8-10]. 그림에서와 같이 입사광의 세기 I_0 가 첫 번째 광섬유의 단면에서 4%의 반사를 일으켜 I_1 를 발생하고, 96%는 매질이 공기인 간극 s 만큼의 거리를 통과하여 두 번째 광섬유의 단면에서 다시 반사를 일으켜 I_2 를 발생시켜 최종적으로 I_1 과 I_2 가 서로 간섭을 일으킨다. 여기서 두 번 이상 반사한 빛들은 돌아오는 양이 매우 적으므로 그 빛들을 무시하면 I_1 과 I_2 의 간섭된 빛의 세기는 식(1)과 같이 근사적으로 I 가 된다.

센서 외부에 하중, 압력, 온도변화, 변형 등의 환경의 변화가 발생하면 센서에 변형이 가해져

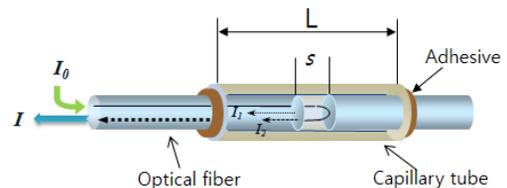


Fig. 1 Schematic diagram of fiber Fabry-Pérot interferometer

간극 길이 s 가 변화한다. 이러한 간극의 변화에 따라 I 는 보강간섭과 상쇄간섭이 교대로 나타나는 정현파의 형태를 보인다. FFPI 센서에서 변형에 따른 빛의 세기는 식(1)로 표현된다.

$$I = I_0 \{1 - \cos 2k(x_2 - x_1)\} \quad (1)$$

여기서, k 는 $k = 2\pi/\lambda$ 로 빛의 파장(λ)과 관계되는 전파상수이며, x_1, x_2 는 간섭을 일으키는 빛의 경로이다. 간섭경로 ($x_2 - x_1$)를 간극 길이 s 라 하면 식(1)은 다음과 같은 식(2)가 된다.

$$I = I_0 \{1 - \cos 2ks\} \quad (2)$$

간극 길이 s 가 증가 혹은 감소함에 따라 간섭계에서 발생하는 빛의 세기 I 는 코사인 함수로 나타나며 식(2)에서 위상과 간극(s)의 관계는 식(3)과 같이 정의 된다.

$$\phi = 2ks \quad (3)$$

빛의 세기 I 의 변화를 측정하면 위상(ϕ) 변화를 측정할 수 있고 간극(s)의 변화량을 측정할 수 있게 된다. 최종적으로는 센서에 작용하는 변위 ($\Delta L/L = \Delta s/L$)를 측정할 수 있다. Fig. 2는 FFPI의 이러한 신호특성을 보여준다. 초음파는 구조물 내부에 미소진동의 변위를 발생시킨다. 이러한 미소변위에 의해 발생하는 미소위상변화는 식(4)와 같이 표현된다[10].

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta s - \frac{4\pi}{\lambda^2} s \Delta\lambda \quad (4)$$

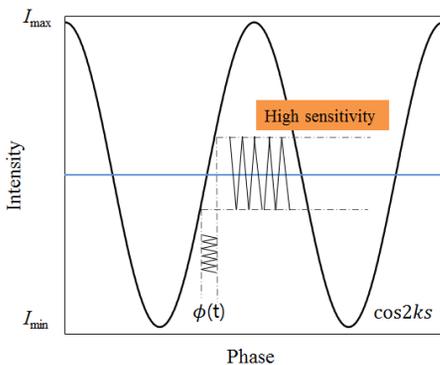


Fig. 2 Characteristic of FFPI signals

이와 같은 원리로 FFPI는 초음파로 인해 발생하는 미소변위를 측정할 수 있다. 또한 Fig. 2의 FFPI 신호 특성에서 볼 수 있듯이 미소변위로 발생하는 미소한 위상(ϕ) 변화를 $\cos 2ks$ 가 0이 되는 지점을 기준으로 I 를 측정함으로써 실제 변위에 의한 위상 변화보다 높은 민감도를 가지고 측정할 수 있다.

3. FFPI 기반 SH-EMAT 신호 수신 실험

FFPI 센서를 이용하여 EMAT로 가진된 SH-wave 신호 수신 및 분석을 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

3.1. 실험 구성 및 방법

본 실험에서는 EMAT을 이용하여 초음파를 발생시켜야 하고 이에 따른 전자기 신호를 발생시키는 펄서시스템이 필요하다. 그리고 초음파 수신을 위한 FFPI 센서는 빛을 이용하므로 이를 위한 광학시스템이 구성되어야 한다. Fig. 3은 FFPI 센서를 이용하여 SH-EMAT 신호 수신 실험을 위한 시스템 구성의 개략도이다. SH-wave 수신 실험을 위해 두께 2 mm의 알루미늄 평판시험편을 사용하였다. EMAT를 이용하여 시험편에 SH-wave를 전파시키기 위해서 초음파 펄서(RITEC,

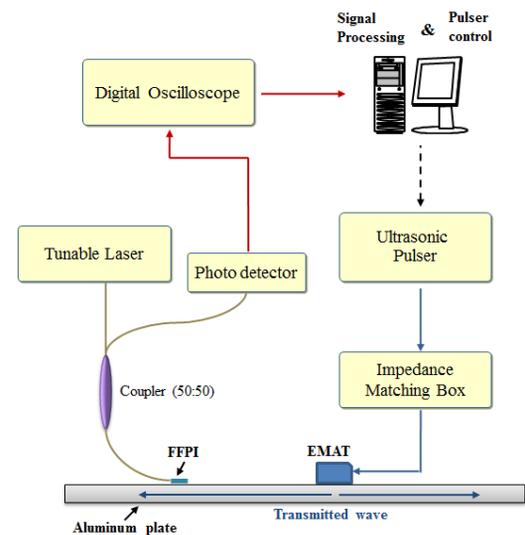


Fig. 3 Schematic diagram of SH-wave measurement system using FFPI

RAM-10000)가 사용되었다. 또한 초음파를 효과적으로 발생시키기 위하여 임피던스 매칭 시스템(WIS, EMAT matching network)이 적용되었다. 이때 초음파 발생을 위한 EMAT는 로렌츠힘을 이용하는 타입으로 제작하였으며, SH-wave 중심파장이 5.2 mm가 되도록 자석 간격 2.6 mm와 스파이럴 코일을 제작 및 배열하였다.

FFPI를 이용하여 초음파 신호를 수신하기 위해서는 FFPI에 협대역 파장의 빛을 송신하고 이 파장의 광강도가 초음파의 미소변위에 의해 변경되는 강도 정보를 취득하여야 한다. 이를 위해 협대역 파장의 빛을 발생할 수 있는 tunable laser 광원(Agilent, 81941A), 빛의 신호를 전기신호로 변경하는 photo-detector 광 검출기(New Focus, 2117) 그리고 광 분기기(coupler)로 시스템이 구성되었다.

구성된 시스템을 기반으로 실험은 다음의 방법으로 진행되었다. 컴퓨터를 이용하여 펄서를 제어해서 특정 주파수의 신호를 EMAT에 전달하여 EMAT에서 SH-wave를 가진하였다. 신호 수신을 위한 FFPI에는 광학 특성을 확인 후 tunable laser를 이용하여 최대 민감도가 발생하는 파장대역(1570 nm)의 빛을 전파하였다. 발생된 SH-wave는 시험편에서 전파되고 FFPI에서 미소진동을 수신한 후 광 검출기에서 빛의 강도를 전압의 신호로 변경하여 오실로스코프(Lecroy, Wavesurfer 434)에 최종적으로 수집되었다. 이때, 신호의 안정화와 저주파노이즈를 감소시키기 위해 averaging(300회)를 거쳐 신호를 수집하였다. 그리고 신호의 모드 분석을 위해 EMAT과 FFPI의 간격은 100 mm로 고정하였다. Fig. 4는 실험의 실제 구성과 진행을 보여준다.

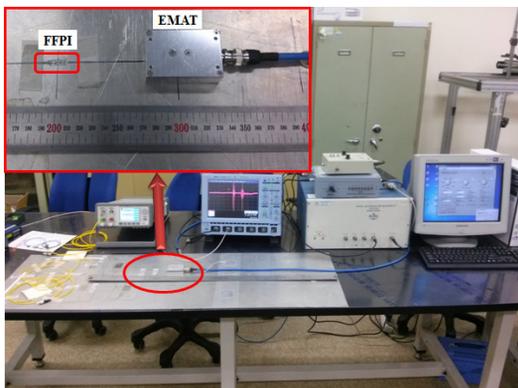


Fig. 4 SH-wave generation and measurement system using EMAT and FFPI

3.2. 실험 결과

SH-wave의 특정 모드를 가진하기 위해서는 파장 분산선도를 이용하여 펄서의 주파수 설정을 통해 해당 모드를 발생시킬 수 있다. 실험에 사용된 EMAT의 중심 파장은 5.2 mm로 펄서에서 실험 모드의 주파수를 튜닝하여 EMAT로 초음파를 발생시키고 전파된 초음파가 FFPI 센서에 수신되는 것을 확인하였다. Fig. 5는 SH₀ 모드를 발생시키기 위해 600 kHz의 주파수로 튜닝된 펄서의 신호와 수신된 FFPI 신호를 보여준다. 펄서의 신호와 FFPI 신호를 오실로스코프에서 시간을 동기화하여 측정된 결과 신호의 수신시간 영역이 SH₀모드의 속도로 전파하는 시간대임을 것을 확인할 수 있다. 또한 FFPI 수신 신호는 노이즈가 일부 있으나 크지 않아 정확한 신호의 취득 및 분석이 가능하다. 즉 FFPI 센서가 EMAT으로 발생된 SH-wave를 명료하게 수신함을 알 수 있다.

SH-wave는 파의 진행 방향과 시험편 입자의 진동 방향이 수직인 특성을 가진다. FFPI는 광섬유의 길이 방향의 변위에 의해 간섭이 지배적으로 일어나게 되어 초음파의 전파 방향 또는 입자의 진동 방향에 따라 센서의 적용 방향을 확인할 필요가 있다. 이에 따라 FFPI의 길이 방향과 EMAT을 0°와 90°의 방향에 적용하여 각각 SH-wave를 가진하였다. Fig. 6은 EMAT의 위치에 따라 FFPI에서 수집된 신호이다. 신호의 진폭을 보면 FFPI의 길이 방향이 SH-wave의 전파 방향과 일직선인 0°의 신호가 약간 더 높은 전압을 발생하는 것을 보인다. 이러한 결과는 파의 전파에너지가 입자의 진동 변위보다 센서의 길이 변화를 조금 더 크게 발생시키는 것으로 사료된다. 즉, 센서가 파의 전파방향과 일직선일 때 조금 더 높은 민감도를 가지는 신호의 취득이 가능한 것을 확인할 수 있다.

SH-wave는 다양한 모드 특성이 있으며, 특히 SH₁ 이상의 고차 모드에서는 시험체의 두께와 주파수에 따라 음속이 변화하는 분산 특성을 보인다. 이러한 분산 특성을 이용한 결함의 평가 연구도 다양하고, 이에 따라 고차 모드의 명확한 수신도 요구된다. Fig. 7은 FFPI 센서로 이용하여 SH₀와 SH₁ 모드를 수신한 신호를 보여준다. SH₀모드의 가진을 위해 앞서와 마찬가지로 600 kHz로 EMAT를 가진하였고, SH₁모드의 가진을 위해 1 MHz의 신호로 EMAT를 가진하였다.

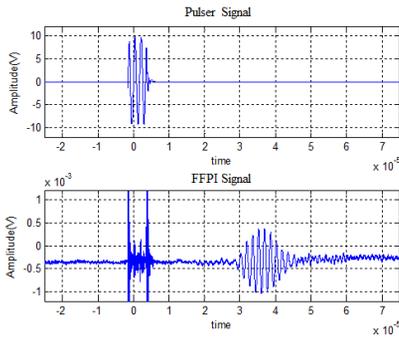


Fig. 5 Generated signal from pulser and received signal with FFPI sensor

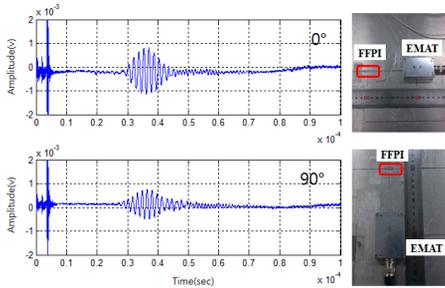


Fig. 6 FFPI sensor signals according to the propagating direction of SH-wave

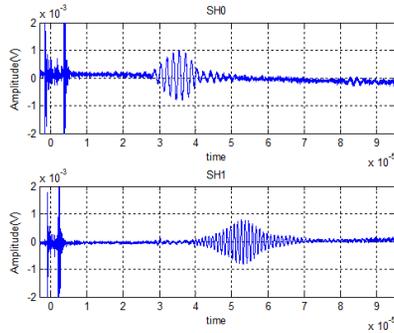


Fig. 7 SH₀ and SH₁ mode signals received with FFPI sensor

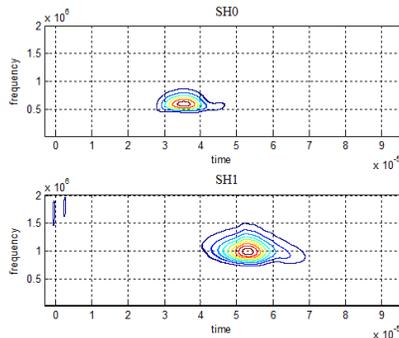


Fig. 8 Wavelet transformed signals of SH₀ and SH₁ mode signals

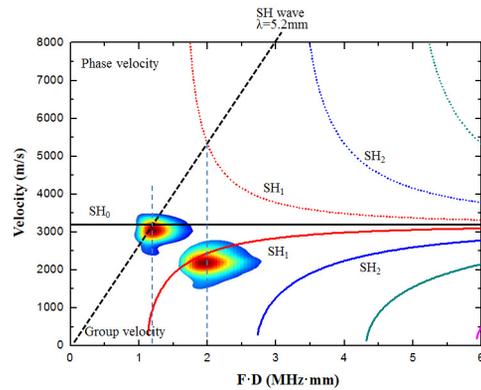


Fig. 9 Analyzed SH-wave signals on the SH-wave dispersion curve

측정된 신호를 확인하면 각각 모드의 군속도에 해당하는 시간영역에서 신호가 수신된다. 신호의 보다 명확한 모드 확인을 위해서 연속 웨이브렛 변환(continuous wavelet)을 통해 신호의 주파수 분석을 수행하였다. 이때, 모 웨이브렛(mother wavelet)으로는 Morlet 웨이브렛을 적용하였다. Fig. 8은 웨이브렛 변환을 수행한 결과를 보여주며, 이 신호에는 SH₀와 SH₁모드의 발생을 위해 가진된 주파수 영역의 신호가 지배적임을 확인할 수 있다. Fig. 9는 SH-wave의 분산선도와 수신된 신호의 속도와 주파수를 분석한 결과를 보여준다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 수신된 신호가 해당 모드의 주파수 영역과 속도 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 제안된 FFPI센서가 EMAT으로 발생하는 SH-wave를 낮은 노이즈 레벨과 모드를 구분하여 측정할 수 있어 신호 수신 센서로 활용 가능성을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 EMAT으로 가진되는 SH-wave의 신호를 수신하는 센서로 FFPI 센서를 제안하였다. FFPI는 빛의 간섭을 기반으로 외부 환경 변화를 측정하여 미소변위를 발생하는 초음파를 낮은 노이즈 레벨로 측정할 수 있었다. 또한 SH-wave의 다양한 모드의 신호를 명료하게 측정할 수 있었다. 즉, 제안된 FFPI 센서는 주파수와 음속의 특성이 중요한 신호를 명확하게 측정할 수 있고 이 결과를 바탕으로 모드의 중첩이 쉬운 SH-wave의 신호의 분석에 큰 강점을 보일 수 있

다. 더 나아가 Lamb wave 등의 분산성과 모드 중첩 특성이 강한 초음파 수신에도 유용하게 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 연구 지원한 (NRF-2013M2A2A9043274)의 결과물입니다.

참고문헌

- [1] R. Murayama, S. Makiyama, M. Kodama and Y. Taniguchi, "Development of an ultrasonic inspection robot using an electromagnetic acoustic transducer for a Lamb wave and an SH-plate wave," *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 825-829 (2004)
- [2] J.-H. Lee, S.-J. Lim, I.-K. Park and D.-H. Kim, "Development of automated ultrasonic testing system for partial joint-weld of heat exchanger's header to tube in power plant," *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, Vol. 30, No. 4, pp. 367-372 (2010)
- [3] M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements," Kluwer Academic Publisher (2003)
- [4] J.-H. Lee and D.-H. Kim, "Flaw-detection of pipes-welded zone by using wavelet transform and SH-EMAT," *Transactions of the KSME A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1511-1519 (2012)
- [5] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press (1999)
- [6] J. H. Lee, I. K. Park, Y. K. Kim and D. H. Kim, "Evaluation of thickness reduction in steel plate by using SH-EMATs," *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, Vol. 31, No. 1, pp. 38-43 (2011)
- [7] I. K. Park and Y. K. Kim, "Mode characteristics analysis of the SH-EMAT waves for evaluating the thickness reduction," *Journal of the KSME*, Vol. 19, No. 2, pp. 198-203 (2010)
- [8] E. Udd, "An overview of fiber-optic sensor," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66 pp. 4015-4030 (1995)
- [9] D.-H. Kim, J.-W. Park, H.-K. Kang, C.-S. Hong and C.-G. Kim, "Measuring dynamic strain of structures using a gold-deposited EFPI," *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-5 (2003)
- [10] D.-H. Kim, B.-Y. Koo, C.-G. Kim and C.-S. Hong, "Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 593-598 (2004)