

스마트 능동 레이어 센서 개발 (I) : 이론 및 개념 연구

Development of Smart Active Layer Sensor (I) : Theory and Concept Study

윤동진*[†], 이영섭*, 권재화*, 이상일*

Dong-Jin Yoon*[†], Young-Sup Lee*, Jae-Hwa Kwon* and Sang-Il Lee*

초 록 본 논문은 두 편으로 구성된 스마트 능동 레이어(smart active layer, SAL) 센서 개발에 관한 첫 번째 논문으로, 구조 내에 발생하는 균열 및 손상에 의한 탄성과 검출을 위한 SAL 센서의 이론 및 개념을 연구하였다. 본 SAL 센서의 개발을 위해, 첫째, 탄성과의 기본 이론을 고찰하였고, 둘째, 이론적 토대 위에 단일 압전 disc의 유한요소해석법(finite element analysis, FEA)을 이용하여 탄성과 검출 센서로서의 가능성을 검증하였고, 셋째, 몇 종류의 압전 disc 센서와 상용 음향방출(acoustic emission, AE) 센서를 연필심 파괴시험을 통해 상호 성능을 비교하여 실험적으로 그 가능성을 확인하였다. 또한 수 개의 센서를 일정한 거리로 분포시켜서 구조물 결함의 효과적인 검출 및 위치 표정이 가능한 스마트능동레이어 센서의 개념연구를 수행하였다.

주요용어: 스마트 능동레이어, 탄성과, 유한요소해석법, 음향방출 센서, 위치 표정

Abstract This paper is the first part of the study on the development of a smart active layer (SAL) sensor, which consists of two parts. In this first part, the theory and concept of the SAL sensor is investigated, which is designed for the detection of elastic waves caused by internal cracks and damages in structures. For the development SAL sensor, (i) the basic theory of elastic waves was studied, (ii) the feasible study of the SAL as an elastic waves detection sensor using the finite element analysis (FEA) with respect to a piezoceramic disc was performed. (iii) the comparison of performances between some piezoceramic sensors and a commercial acoustic emission (AE) sensor was accomplished to ensure the applicability by the experimental means, such as a pencil lead break test. Also, the conceptional study for the SAL sensor, which can be utilized for the effective detection and locating of defects by the arrangement of regularly distributed sensors, was discussed.

Keywords: smart active layer (SAL), elastic wave, finite element analysis (FEA), acoustic emission (AE) sensor, source location

1. 서 론

지금까지 일반적인 구조물의 개념은 수동적이며, 고정적인 하중 담당 기능이 대부분이었다. 그러나, 향후의 구조물은 급격한 기술의 발달로 그 개념이

많이 달라져 하중담당 기능 이외에도 감지(sensing), 작동(actuation), 판단(judgment) 등의 부가적인 기능도 담당하리라 예상된다. 특히 교량이나 항공기와 같은 구조물에서는 실제 사용 중에 피로하중, 충격하중 등과 같은 다양한 크기의 반복하중을 받고 있기 때

문에 이에 따른 균열의 발생 및 진전을 조기에 검출하여 경고함으로써 구조물의 안전성과 신뢰성을 유지하는 것은 매우 중요한 과제로 대두되고 있다[1-5].

스마트 구조물(smart structures)이라 함은 이와 같은 감지나 작동능력을 가진 지능형 재료(smart materials)를 이용하여 외부의 자극에 대한 변형 및 손상을 스스로 감지할 수 있고 이에 대한 적응능력을 가진 구조물을 이른다[6]. 고도의 기능을 갖춘 스마트 구조물은 다양한 종류의 센서와 액추에이터가 그 구조물 내부에 삽입되거나 부착되도록 제작된 구조물로서 통상 판단을 위한 마이크로 프로세서를 갖추고 있다. 이와 같은 스마트 구조와 재료에 관련된 기술에서 소형화, 경량화, 지능화된 스마트 센서기술은 중요한 핵심기반 기술이다[7].

지능형 재료에는 광섬유(optical fiber)[8], 압전재료(piezoelectric material)[9], 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)[10,11] 등이 많이 사용되고 있다.

이 중에서도 압전재료는 구조물의 균열이나 변형 등에 의해서 발생하는 음향방출(acoustic emission, AE) 신호의 검출에 이용되는 대표적인 재료이다. 기존의 AE 센서는 구조물을 상시 모니터링 하기 위하여 매립하거나 부착하기에는 현실적으로 부피나 부착방법에서 다소 힘든 면이 있다. 이에 따라 Lin et al[12]과 Lin과 Chang[13] 등은 복수의 압전소자를 하나의 sheet 상에 배열한 것을 구조물 내에 삽입 또는 부착함으로써 센서의 부피를 획기적으로 줄이는 동시에 복수의 지점에 대한 탄성파를 동시에 탐지할 수 있는 스마트 레이어(smart layer)를 개발하였다.

본 논문은 이러한 개념을 가진 스마트 압전 센서의 개발에 관한 것으로 2부분으로 구성이 되었는데, 그 첫 부분은 본 논문이다.

본 연구의 2장에서는 스마트 능동레이어(smart active layer, SAL) 센서의 기본적 개념 및 설계철학 등에 관해 기술하며, 3장에서는 SAL센서에 대한 이론적 해석 및 유한요소법을 이용한 탄성파 검출 성능에 대해 수치적 결과를 바탕으로 논의한다.

4장에서는 3장에서 이론적, 수치적 해석 결과와 더불어 실험적 결과를 비교, 분석하는데, 여기에서는 압전소자와 상용 음향방출센서 성능평가를 포함한다.

이상으로써 스마트능동레이어 센서의 기본적 해석 및 개념을 논의하게 되며, 두 번째 논문인 "스마트능동레이어 센서의 개발(II): 제작 및 적용 연구"[14]에서 실제의 제작 및 실험결과 분석을 통해 본 연구의 타당성에 대해 기술한다.

2. SAL 센서의 개념

본 스마트 능동레이어 센서의 개념은 이미 Lin and Chang 등에 의해 이미 정립되었다[12,13]. 여기에서는 이러한 개념의 센서에 대해 기술적으로 요약 서술하고, 이에 대한 비파괴적 측면에서의 구조물 감시(monitoring)에 관해 논한다.

본 SAL 센서는 인체와 유사한 개념으로 설명할 수 있다. 인체의 센서시스템은 감각기관의 분포와 함께 신경으로서 전신에 걸쳐 구석구석까지 뻗어져 있으며 이것이 중추신경을 따라 뇌에 연결되어 있다. 이로 인해 인체의 어느 부위에 자극이 가해지면 감각기관이 이를 즉각적으로 신경을 따라 뇌에 전달하며, 뇌는 그 부위가 어디인지 인식하고 인체로 하여금 그 자극에 대한 반응을 보이도록 만든다. 이러한 감각기관, 신경 그리고 뇌로 구성된 인체의 센서시스템은 본 센서의 개념과 정확히 일치한다. 그러므로 감각기관은 PZT 압전트랜스듀서, 신경은 신호전달 회로선, 그리고 두뇌는 이를 판단하는 정보처리장치에 대응되는 것이다. Fig. 1[15]은 이러한 개념을 항공기의 결함 검출 및 모니터링을 위해 적용한 것으로 미래의 항공기는 이러한 센서시스템을 갖출 것으로 예견된다[16]. 본 SAL 센서시스템은 이러한 스마트 구조물에 적용 가능한 기본적 형태가 될 수 있다.

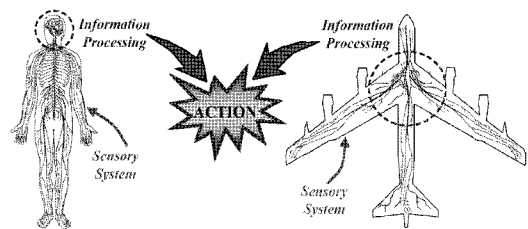


Fig. 1 Human sensory system vs. future airplane sensor system[15]

또한, 기존센서는 수동적 개념의 센서 (passive sensors)로서 균열 등의 결함이 구조물에 발생할 때 생기는 탄성파를 탐지하는 것이다. 이 경우 탄성파가 문턱값(threshold level)을 넘지 못하거나 주변 노이즈로 인해 탐지를 못할 경우 균열 등의 결함이 진행되어도 손상을 검출하지 못할 수도 있다. 이와는 달리 능동적 개념의 센서, 즉 능동적 센서(active sensors)인 SAL은 복수 개로 부착되는 압전 소자의

배열에서 하나의 압전 소자를 펄스 액추에이터(actuator)로 제작하여 필요시 탄성파 펄스를 발생시켜 나머지 압전 소자들이 탄성파의 전파/거동을 실시간으로 모니터링 하여 결함의 위치표정을 할 수 있을 것이다. 아울러 신호분석 시스템을 도입하면 능동적 펄스 액추에이터를 활용하여 손쉽게 문턱값의 조정이 가능하므로 스마트구조에 적합하게 된다.

또한 SAL은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 과거의 한 특정 지점에 대한 점 센서(point sensor)의 개념에서 박막화, 소형화 및 스마트화된 분포 센서(distributed sensor)의 개념으로 발전시킨 것으로, 넓은 면적을 한꺼번에 감지 가능한 분포 배열 센서(distributed array sensor)라는 획기적인 장점을 가지고 있다[17]. 이들 압전소자의 배열은 고분자 필름 위에 회로를 설치한 뒤 압전 소자를 부착시킨 것으로 기존의 음향방출[18,19] 센서에 비해 매우 단순한 구조를 가진다. 이러한 압전 소자의 배열은 소자 간의 상대적인 거리를 알 수 있으므로 결함에 의한 탄성파의 발생 시 결함위치 표정을 가능하게 할 수 있다[18-20].

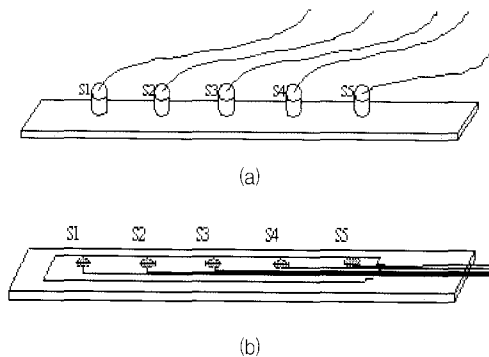


Fig. 2 Comparison of point sensors and distributed sensors at (a) commercial acoustic emission sensor array and (b) state of the art smart piezo sensor array

기존의 음향방출 센서는 압전소자 이외에도 wear plate(matching layer), backing material, electrical shielding 등으로 이루어져 있는 반면에 최소의 부피를 갖도록 설계되는 이 압전센서의 배열은 압전 소자가 직접 구조물에 접하게 되므로 electrical noise에 노출이 되고, matching layer와 backing 재료가 없기 때문에 수신 감도나 주파수 특성이 저하될 수도 있음을 고려해야 한다.

Fig. 3[15]은 압력용기의 외면에 스마트 레이어 센서를 부착하였을 경우로서, 압전 액추에이터가 펄스를 발생시켜 압력용기에 존재하는 결함의 위치를 능동적으로 탐지하는 것을 개념적으로 보여주고 있다. 이와 같은 능동적인 센서 개념은 정기적인 센서 시스템의 점검으로부터 획기적으로 비용절감 및 시간단축이 가능하다[13].

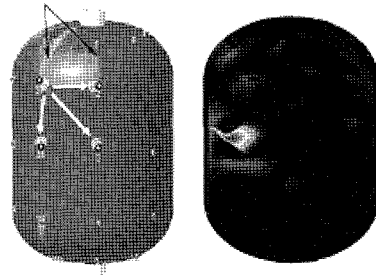


Fig. 3 Concept of active sensors for damage detection of a pressure vessel[15]

이와 같이 SAL 센서는 구조물 안전 감시기술에 적용하여, 내부 손상, 또는 파괴를 감지하기에 적합할 것으로 기대된다.

3. 스마트 능동레이어 센서의 이론

3.1. 이론적 해석

탄성파(elastic waves)는 일반적으로 초음파 영역에서 고체에서 전파되는 파동으로 고체의 탄성에 의해 입자의 진동으로 전달되어진다. 고체에서 전파되는 탄성파는 전파매질에 따라 크게 3가지로 분류 가능하다[21,22].

고체를 전파하는 탄성파는 매질의 형태에 의해서 무한한 공간을 갖는 매질에서 전파하는 체적파(bulk waves)와 하나의 표면을 갖는 무한 반공간의 표면을 따라 전파하는 표면파(surface waves), 그리고 판이나 봉과 같이 제한된 공간에 탄성파의 에너지를 구속시키는 파유도체(wave guide)를 따라 전파하는 유도파(guided wave)로 구분한다. 특히 bulk waves와 surface waves는 매질의 특성에 따라 더 세분하게 나눌 수 있는데, bulk wave는 longitudinal wave와 transverse wave로 나눌 수 있고 surface wave에는 Rayleigh wave, leaky Rayleigh wave, Stoneley wave, longitudinal creeping wave, wave 등이 있다.

무한 공간에서 전파하는 bulk waves는 매질의 입자가 전파 방향과 같은 방향으로 진동하는 종파(longitudinal wave)와 전파 방향에 수직인 방향으로 진동하는 횡파(transverse wave)로 구분하며, 이러한 waves가 고체에서 전파하는 탄성파의 기본 모드로, 고체에서의 종파의 속도 c_l 는 횡파의 속도 c_t 보다 약 2배 가량 빠른 특징을 가지며 고체의 탄성계수와 다음과 같은 관계를 갖는다[23,24].

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$c_R = n_R \cdot c_t, \quad n_R = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} \quad (1)$$

여기서 c_R 은 Rayleigh Wave의 속도 속도이고, ρ 는 고체의 밀도, E와 G는 각각 고체의 영률(Young's modulus)과 전단탄성률(shear modulus)이며, ν 는 Poisson의 비이다.

평면의 고체 표면이 진공과 접해 있을 때 고체표면을 따라 전파하는 파는 Lord Rayleigh [12]에 의해 최초로 논의된 surface wave로 Rayleigh wave라고 하며, 표면이 유체와 접해 있을 때 고체 쪽에 에너지가 집중되어 유체 쪽으로 에너지를 방출하면서 표면을 따라 전파하는 leaky Rayleigh wave는 Rayleigh creeping wave라고 부르기도 하며 Rayleigh wave보다는 매우 조금 빠르게 전파하나, 유사한 특성을 지니므로 Rayleigh wave의 일종으로 구분한다[22].

Fig. 4와 같이 전파되는 Rayleigh wave에서 고체 입자의 x와 z 방향에 대한 변의 실수부, U_R , W_R 은 다음과 같이 주어진다.[23]

$$U_R = Ak_R(e^{-q_R z} - \frac{2q_R s_R}{k_R^2 - s_R^2} e^{-s_R z}) \sin(k_R x - \omega t)$$

$$W_R = Aq_R(e^{-q_R z} - \frac{2k_R s_R}{k_R^2 + s_R^2} e^{-s_R z}) \sin(k_R x - \omega t) \quad (2)$$

여기서, A는 임의의 상수, t는 시간, ω 는 주파수, x와 z는 각각 매질의 길이 방향 위치와 높이 방향 위치이고, k_R 을 Rayleigh wave 파수, k_l 은 종파의 파수, k_t 는 횡파의 파수라고 하면, q_R 과 s_R 은 각각 $q_R = \sqrt{k_R^2 - k_l^2}$ 과 $s_R = \sqrt{k_R^2 - k_t^2}$ 로 정의된다.

또한, Rayleigh wave는 전파되면서 산란(scattering)과 흡수(absorption)에 의해 감쇠를 일으

키게 되며, 또한 무한 반공간의 표면에서 전파되면서 발생원에서 구면파 형태로 퍼져가므로 거리 R이 증가할수록 Rayleigh wave의 진폭은 $\frac{1}{\sqrt{k_R R}}$ 에 비례하게 되어[23], Fig. 5와 같이 거리의 증가에 따른 진폭의 변화를 보이게 된다[25].

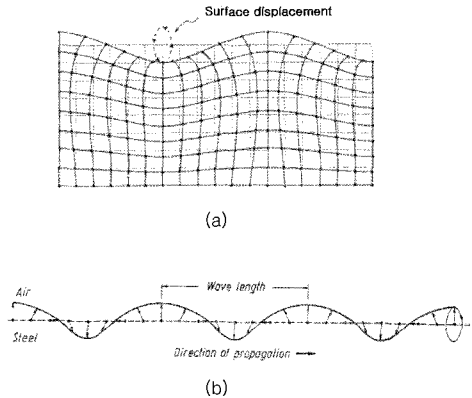


Fig. 4 (a) Rayleigh wave motion and (b) the details at the surface[24]

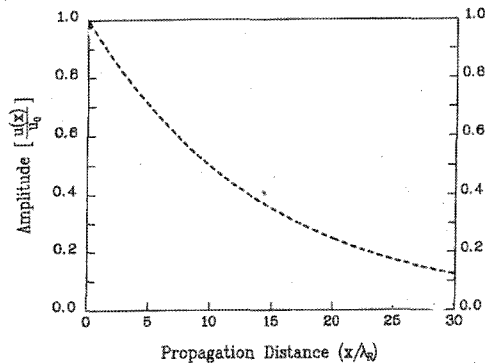


Fig. 5 Attenuation of Rayleigh wave amplitude against propagation distance[25]

3.2. 유한요소법에 의한 해석

구조물 표면에 부착된 PZT(lead zirconate titanate)등과 같은 단일 압전 소자가 구조물 내에서 발생되어 전파되는 표면탄성파를 검출할 수 있는지 여부를 확인하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 이로부터 PZT 압전 소자가 AE 센서로서의 기능을 할 수 있는지 그 특성을 해석하였다.

해석 방법은 벌크 형태의 스테인레스 강 매질 상에 PZT 소자를 부착하고, 일정한 거리가 떨어진 곳에서 탄성파가 발생하였을 때, 센서에서 발생하는 전압 신호를 검출하여 비교하는 것으로 Fig. 6 과 같이 2차원 모델을 이용하여 해석을 하였다. 매질은 y축 1/2 대칭을 이루는 길이 × 높이 = 80 mm × 100 mm의 스테인레스 강이고, 그 위에 점 A에서 -y 방향으로 1 N의 힘을 아주 짧은 순간 동안 인가한 후, A점에서 x방향으로 20 mm 떨어진 B 지점에 중심을 둔 PZT 소자의 양 전극 면에서 발생하는 전압을 transient해석을 통하여 구하였다. 이 때 점 A에 인가하는 impulse force는 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 각각 0.5 μsec 및 0.25 μsec의 duration time을 가지는 삼각 펄스이며, 해당 주파수는 각각 1 MHz와 2.5 MHz인 두 가지 경우에 대해서 해석하였다. 센서의 경우도 PZT의 직경은 10 mm로 고정된 상태에서 두께가 100 μm와 500 μm인 경우에 대해서 해석을 수행하였다. Fig. 6는 이와 같은 방법으로 ANSYS를 이용하여 모델링한 그림인데, 약 22,000개의 요소와 약 23,000개의 절점으로 구성되었다. 또한, 본 유한요소해석에 이용된 스테인레스 강과 PZT 소자의 물성은 Table 1에 나타내었다.

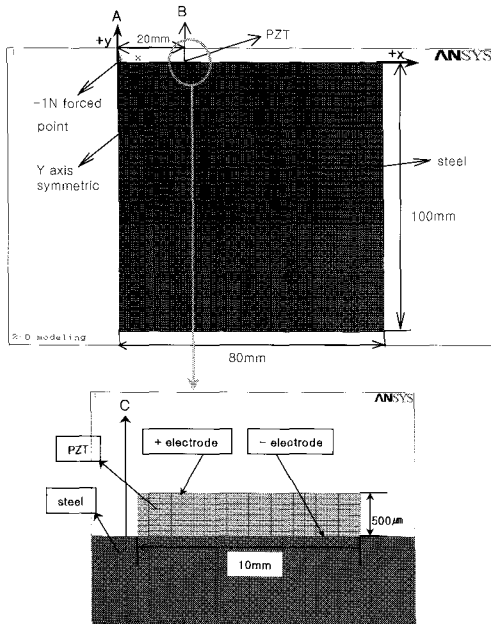


Fig. 6 The modelling for analysis of PZT sensor

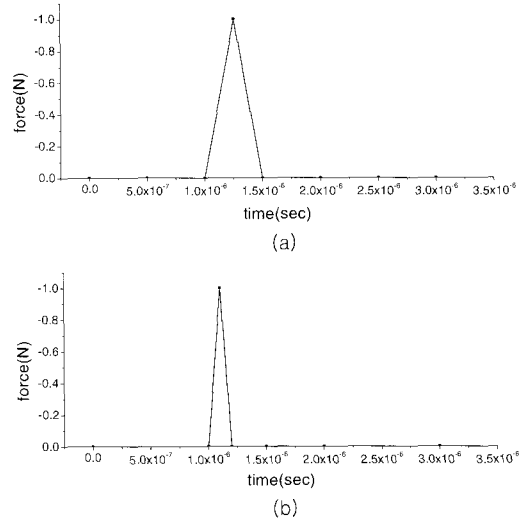


Fig. 7 (a) 1 MHz impulse and (b) 2.5 MHz impulse

Table 1 Physical properties of stainless steel and PZT used in FEA

Material	Property	Value
Stainless steel	Density(kg/m ³)	8800
	Young's modulus (10 ¹⁰ N/m ²)	21
	Poisson's ratio	0.28
PZT-4	Density(kg/m ³)	7500
	Dielectric matrix [ε] (10 ⁻⁹ F/m ³)	$\begin{bmatrix} 7.124 & 0 & 0 \\ 0 & 7.124 & 0 \\ 0 & 0 & 5.841 \end{bmatrix}$
	Piezoelectric matrix [e] (C/m ²)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 & 0 \\ -5.2 & -5.2 & 15.1 & 0 & 12.7 & 0 \end{bmatrix}$
	Stiffness matrix [c] (10 ¹⁰ N/m ²)	$\begin{bmatrix} 13.9 & 7.78 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ & 13.2 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2.56 & 0 & 0 \\ & & & & 3.06 & 0 \\ & & & & & 3.06 \end{bmatrix}$

앞의 모델링을 기준으로 PZT 요소(두께: 100 μm, 500 μm)에 대한 시간 및 주파수 영역에서의 유한 요소 해석결과는 Fig. 8 - Fig. 9(100 μm) 및 Fig. 10 - Fig. 11(500 μm)에 나타내었다. Fig. 8 - Fig. 11의 (a), (b), (c)는 각각 압전센서 출력(mV), 파워 스펙트럼 크기(dB), 압전센서의 전단면위치인 점 C에서의 매질의 변위(종방향: ux, 횡방향: uy)를 나타내고 있다.

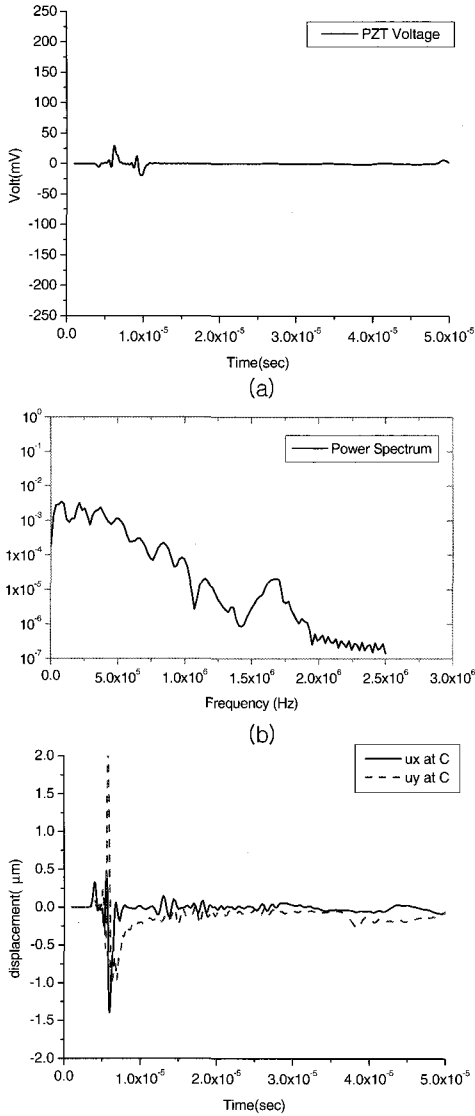


Fig. 8 Responses of a 100 μm thick PZT for 1 MHz impulse : (a) voltage output, (b) power spectrum and (c) displacement at point C

Fig. 8은 Fig. 7(a)의 1 MHz impulse force에 대하여 PZT 센서(직경 \times 두께=10 \times 0.1 mm)의 응답을 나타낸 것으로, 점 C에서의 횡방향 변위(uy)가 종방향 변위(ux) 보다 일반적으로 더 크게 나타남을 확인하였다. 이것은 가해진 impulse force가 횡방향으로 작용했기 때문이다. 그리고, 2.5 MHz impulse force에 대한 동일한 치수의 PZT 센서 응답은 Fig. 9에 나타내었다. 가해진 force의 절대적 에너지가

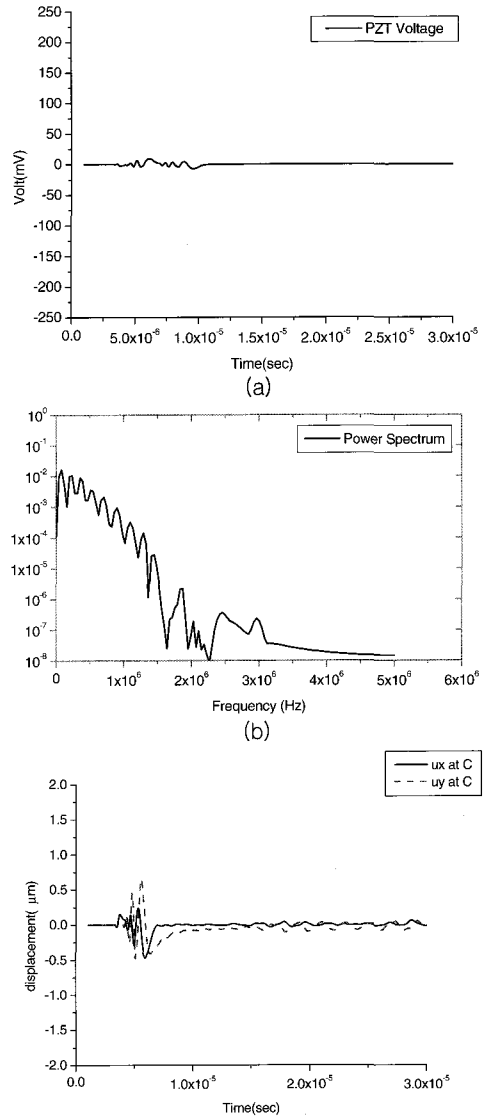


Fig. 9 Responses of a 100 μm thick PZT for 2.5 MHz impulse: (a) voltage output, (b) power spectrum and (c) displacement at point C

적은 관계로 변위 ux, uy는 Fig. 8에 비해 적게 나왔다. 여전히 이 경우에도 횡방향 변위가 종방향 변위 보다 크게 나오는 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 11은 Fig. 8과 9의 경우와 각각 동일한 조건이나 압전의 두께가 500 μm 로 다를 뿐이다. 이 센서의 출력은 100 μm 센서보다 크게 나왔는데, 이것은 출력이 일정한 범위 이내에서는 압전의 두께에 비례하기 때문이다.

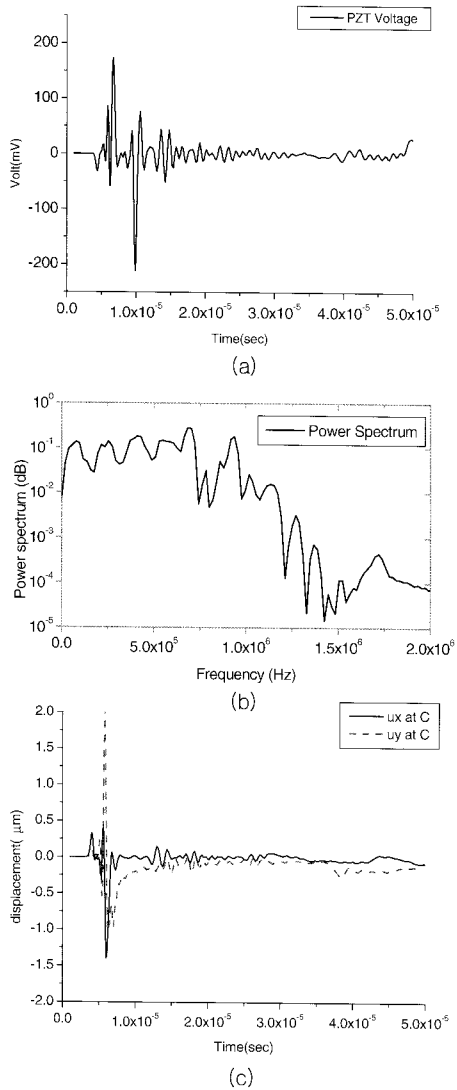


Fig. 10 Responses of a 500 μm thick PZT for 1 MHz impulse : (a) voltage output, (b) power spectrum and (c) displacement at point C

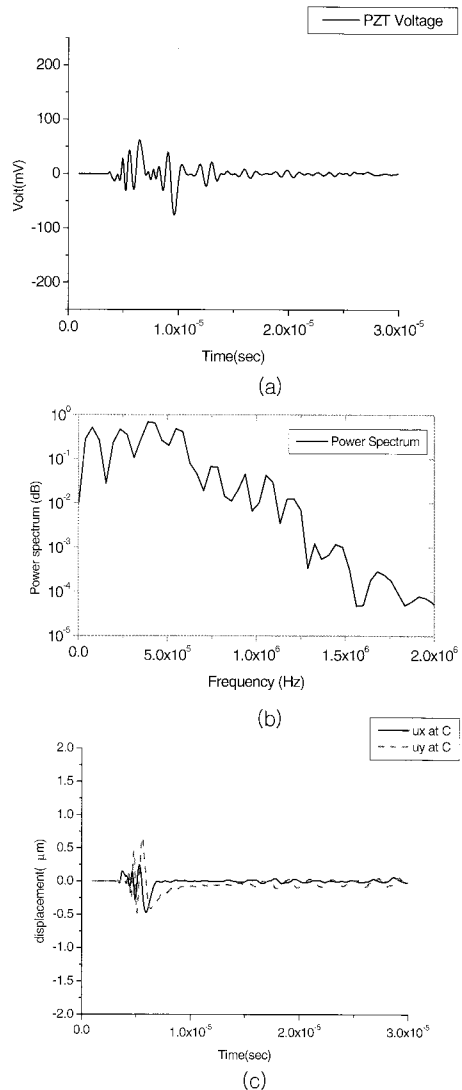


Fig. 11 Responses of a 500 μm thick PZT for 2.5 MHz impulse : (a) voltage output, (b) power spectrum and (c) displacement at point C

이 유한요소 해석은 비록 2차원에서 수행이 되었지만, 임의의 탄성과 계측을 위한 압전 센서의 설계 시 의미있는 파라미터들의 변경을 통해 사전에 충분히 정밀한 정보를 획득 가능하게 되었다. 이러한 유한요소해석법은 구조물의 균열탐지를 위한 스마트 능동레이어 센서의 개발에 가장 기본적인 설계인자를 제공할 수 있다. 따라서 개발하고자하는 센서의 특정 파라미터와 구조물의 구조와 재료 물성 등으로 센서의 출력 및 성능을 설계 단계에서 확인할 수 있는 도구를 확립하였다.

4. 특성 평가 및 비교

기존의 음향방출 센서는 압전소자 이외에도 wear plate(matching), backing material, electrical shielding 등으로 이루어져 있는 반면에 스마트 능동레이어 센서의 경우는 최소한의 두께를 가지도록 고분자 필름 위에 전기적 연결선과 shielding layer 를 가지도록 설계된다.

즉, matching layer 및 backing plate가 존재하지 않으므로 충분한 AE 센서로 사용 가능한지에 대해

이미 유한요소법으로 압전소자의 시편에 대한 직접적 적용에 관해 검토를 하였지만, 아울러 실험적 검증 또한 필수적으로 요구된다. 이것은 곧 PZT 압전소자를 스마트 AE 센서로 사용하기 위해서는 압전소자가 AE 발생에 의한 탄성파를 검출할 수 있어야 한다는 것이다. 따라서 PZT 소자가 매질에 부착되었을 때, AE 신호를 검출할 수 있는지를 확인하기 위하여 PZT 소자에 대해서 탄성과 검출 실험을 하였다. Table 2와 Fig. 12에서 보이는 것과 같이 두께가 0.2 mm이고 직경이 각각 10 mm와 5 mm인 disc 형태의 PZT와 두께가 0.44 mm인 직사각형 형태의 PZT 등 3종류의 PZT 소자와 비교를 위하여 상용 AE 센서에 대해 실험을 하였다. 실험에 사용된 상용 AE 센서는 주파수 범위가 100 kHz에서 1 MHz인 광대역 센서로 중심주파수는 125 kHz이다.

실험 방법은 Fig. 13에 보인 것과 같이 stainless steel 시편 위에 각각의 PZT 소자와 상용 AE 센서를 vacuum grease로 부착하고, 20 mm 떨어진 곳에서 연필심 파단(pencil lead break) 시험을 하였을 때 센서의 전극면에 발생하는 전압을 오실로스코프로 측정하였다. Fig. 14-17은 각각의 센서에 대한 실험결과를 나타내었다. 먼저 시간 영역에서 보면, 두께가 0.2 mm인 disc type의 PZT에서는 직경이 10 mm인 No. 1이 직경이 5 mm인 No. 2의 경우보다 조금 더 큰 출력이 나왔다. 두께가 0.44 mm인 No. 3의 경우에는 상용 센서 보다 훨씬 더 큰 출력을 보였는데, 이는 압전 센서의 출력이 압전소자의 두께에 비례한다는 사실을 나타내며 유한요소 해석의 결과와 일치한다.

주파수 특성은 상용 AE 센서가 가장 광대역인 반면에 PZT 소자들은 대체로 협대역의 몇 가지 모드가 섞여 있다. 직경이 10 mm인 No. 1은 약 250 kHz

이하의 저주파 쪽에서 가장 좋은 감도를 보였으나, No. 2와 No. 3 소자는 저주파에서 감도가 조금 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나, 약 500 kHz 부근에 중심을 두고 대체적으로 AE 신호를 수신하기에 충분한 주파수 대역을 가진다고 볼 수 있다. 따라서 SAL에 PZT 소자만을 부착한 단순한 구조로도 AE에 의한 탄성파를 충분히 검출할 수 있다는 것을 확인하였다.

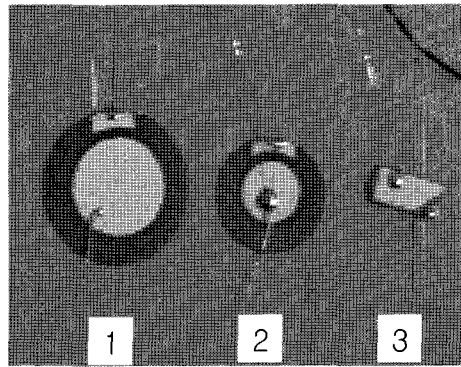


Fig. 12 PZT elements for experiments



Fig. 13 Experimental set-up for pencil lead break test

Table 2 Shape and dimension of each sensor

Index	material	shape	dimension	sensor volume
No. 1	PZT	disc	diameter : 10 mm thickness : 0.2 mm	15.7 mm ³
No. 2	PZT	disc	diameter : 5 mm thickness : 0.2 mm	3.9 mm ³
No. 3	PZT	rectangle	side : 8.0 mm × 4.0 mm thickness : 0.44 mm	14.1 mm ³
No. 4	PZT (commercial AE sensor)	disc	case diameter: 10 mm case thickness : 4 mm	314 mm ³

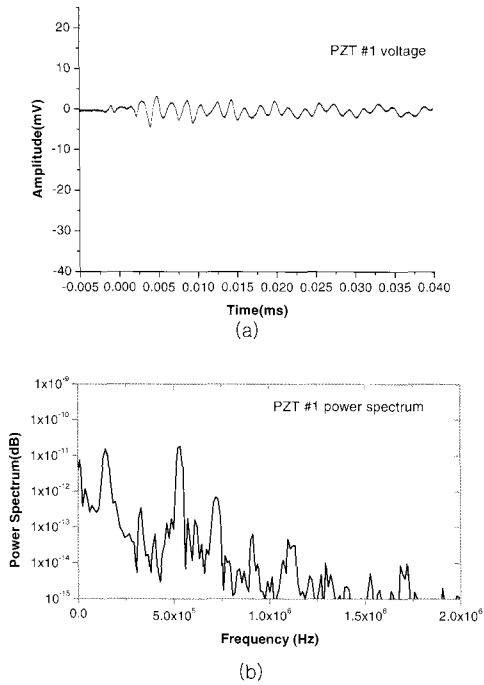


Fig. 14 Measured responses of PZT No. 1 with a pencil lead break test : (a) waveform and (b) frequency spectrum

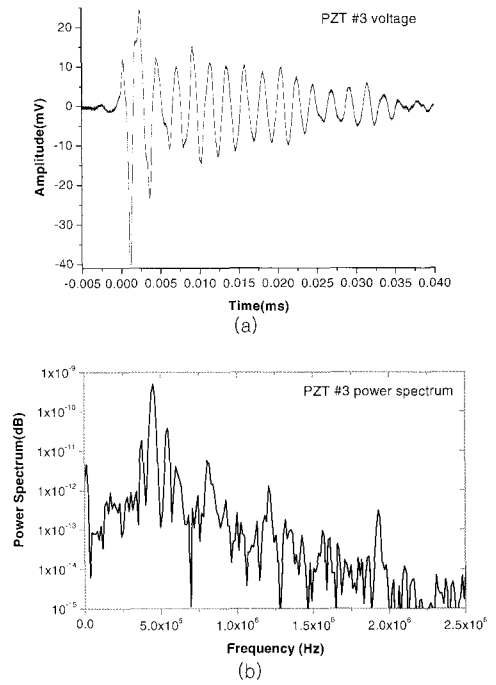


Fig. 16 Measured responses of PZT No. 3 with a pencil lead break test : (a) waveform and (b) frequency spectrum

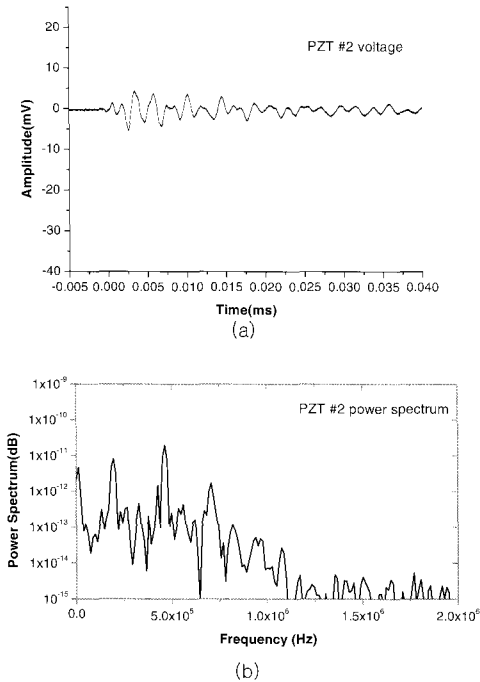


Fig. 15 Measured responses of PZT No. 2 with a pencil lead break test : (a) waveform and (b) frequency spectrum

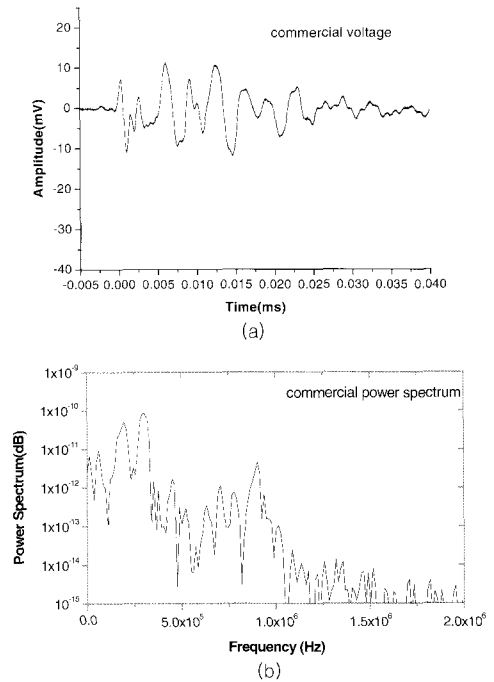


Fig. 17 Measured responses of commercial AE sensor with a pencil lead break test. (a) waveform and (b) frequency spectrum

5. 결 론

본 논문에서는 스마트능동레이어 센서 개발의 이론 및 개념연구에 관해 기술하였다. 이론 연구를 통해 구조물 내에서 발생한 균열이나 결함 등에 의한 탄성파의 검출과 관련한 탄성파 전파 및 탐지에 관해 체계적 연구를 수행하였다. 그리고, 유한요소 해석법을 이용하여 압전소자가 금속 표면에 부착될 때의 탄성파 검출에 관해 시간 및 주파수 영역에서 해석을 시도하여 스마트능동레이어 센서의 주요 파라미터를 설계 이전 단계에서 도출 가능한 도구를 확보하였다. 또한, 기존의 상용 AE 센서와 압전소자를 동시에 동일한 시편에 부착하여 연필심 파괴 시험을 통해 그 출력을 상호 비교해 상대적으로 매우 단순한 구조를 갖게 되는 스마트능동레이어의 실제적 적용 가능성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, Y. S. Zheng, Z. Zhu, and Z. G. Wang, "Acoustic emission monitoring of fatigue crack closure," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, No. 12, pp. 1691-1694, (1992)
- [2] I. M. Daniel, J. J. Luo, C. G. Sifniotopoulos, and H. J. Chun, "Acoustic emission monitoring of fatigue damage in metals," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 14, pp. 71-87, (1998)
- [3] S. R. Hall and T. J. Conquest, "The total data integrity initiative-structural health monitoring, the next generation," *Proceedings of the USAF ASIP*, 2nd edition (1999)
- [4] F. P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang and C. A. Rogers, "Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, No. 1, pp. 134-139, (1995)
- [5] D. Sun, L. Tong and S. N. Atluri, "Effect of piezosensor/actuator debonding on vibration control of smart beam," *International Journal of Solids & Structures*, Vol. 38, pp. 9033-9051, (2001)
- [6] P. Ball, *Made to Measure: New Materials for the 21st Century*, Princeton University Press, New Jersey, USA, (1997)
- [7] Y.-S. Lee, *Active Control of Smart Structures using Distributed Piezoelectric Transducers*, Ph.D. Thesis, University of Southampton, (2000)
- [8] V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong and L. K. Seah, "Cure monitoring of smart composites using Fiber Bragg Grating based embedded sensors," *Sensor and Actuators*, Vol. 79, pp. 153-161, (2000)
- [9] Z. Jiang, "Structure health monitoring with piezoelectric sensor and actuators," *Journal of the Japanese Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp.18-28, (1997)
- [10] T. Takagi, "The concept and the recent research on intelligent materials," *ICIM/ECSSM 96*, Lyon 96, (1996)
- [11] M. V. Gandhi and B. S. Thompson, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, (1992)
- [12] M. Lin, X. Qing, A. Kumar and S. J. Beard, "Smart layer and smart suitcase for structural health monitoring applications," *Smart Materials and Structures*, Vol. 4332, pp. 98-106, (2001)
- [13] M. Lin and F. K. Chang, "The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics," *Composites Science & Technology*, Vol. 62, pp. 919-939, (2002)
- [14] 이영섭, 이상일, 권재화, 윤동진, "스마트 능동레이어 센서의 개발 (II) : 제작 및 특성평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 24, No. 5, pp. 476-486, (2004)
- [15] www.acellent.com
- [16] M. Schwartz, *Encyclopedia of Smart Materials*, John Wiley & Sons, New York, USA, (2003)
- [17] V. Giurgiutiu, A. Zagrai and J. J. Bao, "Embedded active sensors for in-situ structural health monitoring of thin-wall structures," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, pp. 293-302, (2002)

- [18] 정중채, 윤동진, 박휘립, 김기복, 이승석, "구조용 알루미늄 합금의 피로균열 열림 및 닫힘 시 AE 발생특성 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 155-169, (2002)
- [19] 이영섭, 윤동진, 정중채, "음향방출 및 가속도 신호를 이용한 지하매설 상수도 배관의 누수지점 탐지 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 227-236, (2003)
- [20] M. J. Shulz, P. F. Pai and D. J. Inman, "Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches," Composites: Part B, Vol. 30, pp. 713-725, (1999)
- [21] K. F. Graff, Wave Motion in Elastic Solids, Dover Publications, (1975)
- [22] H. Überall, Surface Waves in Acoustics in Physical Acoustics, Vol. 10, ed. W. P. Mason and R. N. Thurston, Academic Press, (1973)
- [23] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, New York, (1967)
- [24] J. D. N. Cheeke, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, CRC Press (2002)
- [25] 이정기, 초음파 후방산란에 미치는 표면 밀 구조의 영향 및 이방성 재료에서 램파의 전파 특성, 박사학위논문, 한국과학기술원 (1999)