콘크리트 구조물 진단/감시용 스마트센서 개발

Development of Smart Sensor for Diagnosis/ Monitoring of Concrete Structure

윤 동 진* · 이 영 섭** · 이 상 일*** · 권 재 화****

Yun, Dong-Jin · Lee, Young-Sup · Lee, Sang-Il · Kwon, Jae-Hwa

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) is a new technology that will be increasingly applied at the industrial field as a potential approach to improve cost and convenience of structural inspection. Recently, the development of smart sensor is very active for real application. This study has focused on preparation and application study of SAL sensor. In order to detect elastic wave, smart piezoelectric sensor, SAL, is fabricated by using a piezoelectric element, shielding layer and protection layer. This protection layer plays an important role in a patched network of distributed piezoelectric sensor and shielding treatment. Four types of SAL sensor are designed/prepared/tested, and these details will be discussed in the paper. In this study, SAL sensor can be feasibly applied to perform structural health monitoring and to detect damage sources which result in elastic waves.

Keywords: *smart sensor, elastic wave, structure health monitoring, acoustic emission*

1. 서 론

대부분의 구조물은 수명을 연장하고, 붕괴를 방지하기 위해서 구조물 안전 유지가 요구된다. 구조물안전감시는 비파괴평가 시스템이 구조물 내에 함침되거나 부착되어 손상과 파괴에 대한 연속적인 모니터링을 의미한다(Hall과 Conquest, 1999; Sun et al, 1995; Eatkins, 2003)

최근 이러한 기술들은 건축물, 교량, 항공기 그리고 기타 설비에 단독으로 또는 두 가지 이상의 센서를 조합하여 실제 응용하기 위해, 다양한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 최근 안전감시기술에 적용하기 위해 패치형 스마트 압전 센서가 연구되고 있다. 이 패치형 스마트 압전 센서는 본 연구에서 제작된 SAL과 유사한 형태로 실시간 구조물의 상황을 감시하기 위해, 액추에이터 또는 센서로 적용 가능한 몇 개의 압전 소자를 이용하여 일정한 간격으로 분포된 네트워크 구조를 이루고 있다. 이 센서는 구조물이 폐기될 때까지, 구조물의 파괴 및 손상 과정을 연속적으로

* 정회원 · 한국표준과학연구원 책임연구원 E-mail: djyoon@kriss.re.kr
** 전북대학교 기계공학부 교수 E-mail: highfield@naver.com
*** 한국표준과학연구원 박사후연수원 E-mail: esnag1@kriss.re.kr
**** 한국표준과학연구원 석사후연수원 E-mail: jhkwon@kriss.re.kr

모니터링 할 수 있고, 파괴에 대한 위치 표정을 할 수 있다는 장점이 있다(Sun et al, 2001; Osmont et al, 2002).

스마트능동레이어 (smart active layer, SAL) 센서라고 명명된 새로운 형태의 표면탄성파 검출용 압전 센서는 몇 개의 압전트랜스듀서를 하나의 strip 또는 sheet 상에 배열하여 부착함으로써, 센서의 부피를 획기적으로 줄임과 동시에 여러 지점에 대한 탄성파를 동시에 탐지할 수 있도록 설계되었고, 위에서 언급한 큰 장점을 함께 가지고 있는 센서이다.

본 연구에서 사용된 SAL 센서는 구조물 안전 감지기술에 응용하여, 내부 손상, 또는 파괴를 감지하기에 적합할 것으로 기대되며, 새로운 기술로서의 적용가능성을 확인하였다.

2. 스마트능동레이어 (SAL)의 제작

SAL 센서는 다양한 형상의 구조물에 부착 또는 함침이 가능한 것이므로, 이의 실증을 위해 SAL 센서에서는 2가지 형태가 구현되었다. 이들은 각각 긴 띠 모양의 strip type과 사각형 모양의 sheet type이다. SAL strip type 센서는 폭에 비해 길이가 긴 형상의 구조물, 예를 들어 교량 상판이나 항공기 날개에 적용 가능하며, SAL sheet type 센서는 압력용기 등과 같은 넓은 면적을 가지는 구조물에 적합하도록 고려되었다. SAL 센서의 제작에 사용된 압전 디스크는 Keramos의 K-182 (PZT 2 계열)로서, 다양한 PZT에 대한 평가 후에 결정되었다. Fig. 1은 SAL 센서의 제작에 사용된 wrap-around 방식의 압전 disc로서 직경은 6 mm, 두께는 0.25 mm이다.

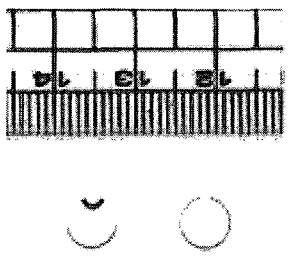


Fig. 1 PZT discs for SAL sensor

Fig. 2(a)는 SAL strip type 센서의 형상과 회로도를 보여주는 것으로 치수는 570.4 mm (길이) × 34 mm (폭)이며, 모두 5개의 압전 디스크를 부착 하였는데, 양끝 단에는 압전 디스크로부터 나오는 회로선을 연결시킨 커넥터의 설치가 가능토록 신호전극과 접지 전극이 교대로 배열된 10개의 전극 홀을 센서의 좌측 및 우측 끝에 각각 일직선으로 배치하였다. 이것은 SAL 센서가 커넥터를 통해 외부의 신호분석기와 연결을 용이하게 되도록 한다. 회로도에서, 센서의 전극과 커넥터 간의 전기적 연결을 보여주는데, 특히 신호전극과 접지 전극을 교대로 배치함으로써 신호 회로선 간의 EMI shielding 효과를 설계에 반영한 것이다. 이때 회로에 사용된 신호선의 선폭은 0.4 mm이고, 선간의 간격은 0.8 mm 이다. Fig. 2(b)는 SAL sheet type 센서의 형상과 회로도를 보여주는 것으로서 치수는 245.7 mm (길이) × 210 mm (폭) 이며, 외관을 제외한 나머지 부분은 SAL strip

type 센서와 동일하다.

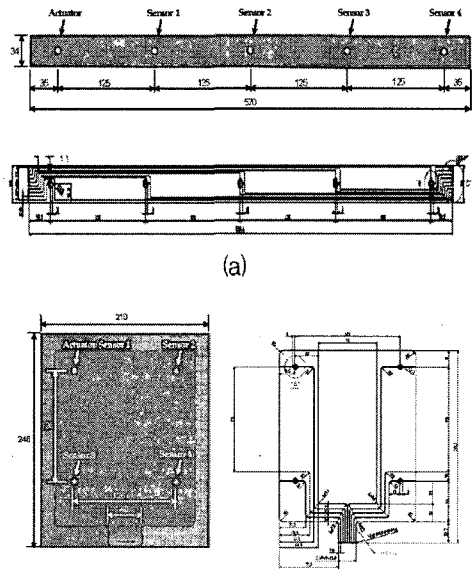


Fig. 2 Dimension and circuit design for SAL:

전체 SAL 센서를 지탱하는 역할을 하는 polyimide layer들은 매우 유연한 특성이 있기 때문에 평면뿐만 아니라 곡면 구조를 가지는 구조물에도 손쉽게 부착이 가능하다.

외면은 양쪽 모두 polyimide sheet로 덮이게 되는데, 이 polyimide 층은 SAL 센서 전체의 형상을 유지하고, 외부의 환경으로부터 압전 disc를 보호하는 역할을 한다. 또한 SAL 센서에서는 내외부의 전자기적 간섭 (EMI)으로부터 압전 disc의 signal electrode를 보호하기 위해 shielding 층을 도입하였다. 구리 박막 층으로 되어있는, 이 shielding 층은 두 개의 polyimide 층 사이에 존재하며, 압전 disc의 ground electrode와 연결된다. 따라서 SAL 센서에서는 총 4개의 polyimide층과 3개의 구리층으로 구성되어 있는데, 이 중 구리 박막 2개의 층은 EMI shielding layer이고, 1개는 circuit layer가 된다. 또한, circuit layer 아래쪽에 있는 3개의 layer에는 압전 disc가 들어 갈 수 있도록 압전 disc의 크기에 맞게 구멍을 낸다. 각 층 사이는 접착제를 이용하여 bonding을 하게 되는데, 접착층이 최대한 두께가 얇게 되도록 설계하였다.

이상과 같이 flexible PCB가 완성되면, 마지막으로 압전 disc를 circuit layer 부분에 부착한다. Fig. 1과 같이 설계된 압전 disc는 상부 전극과 하부 전극을 disc의 측면을 통해 연결시킨 형태에서 하부 전극의 한 부분을 반달모양으로 절연시킨 형태인데, 이 압전 disc를 circuit layer 부분에 접착시킴으로써SAL이 완성된다. SAL 센서는 실제 상용화가 가능하도록 설계 및 제작된 것으로, strip type과 sheet type의 두 가지 종류로 개발되었다.

SAL 센서는 flexible PCB 제작공정으로 제작되었으며 CAD도면이 완성된 후 gerber file을 작성하여 각 층 별로 필요한 etching 작업 후 레이어들을 접착하였다. 그 뒷면에 압전 디스크를 접착

하여 센서를 완성하였다. 압전 디스크와 SAL 센서의 회로와의 연결은 매우 얇은 bonding이 요구되므로 polyester 계열의 접착제를 사용하였다.

3. 실험

3.1. SAL 센서의 알루미늄판 실험

Fig. 3과 같이 두 종류의 SAL 센서에 대해 알루미늄판 (1000 mm × 1000 mm × 5 mm)에 각각 부착하여, 연필심 파괴 및 펄스 액추에이터 시험을 수행하였다. Fig. 3(a)는 SAL 센서 strip type에 대한 실험으로서 다음과 같은 3 종류의 실험이 수행되었다.

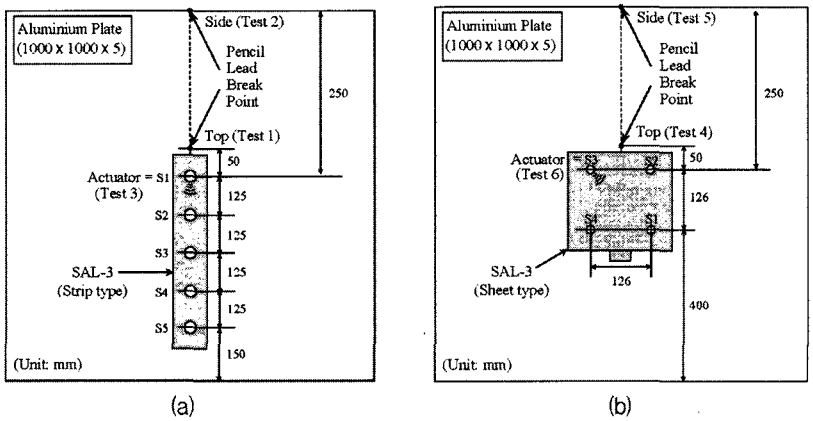


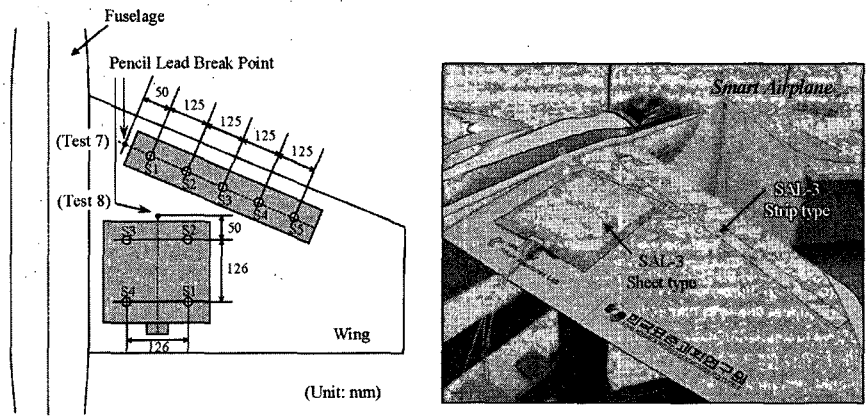
Fig. 3 SAL test on an aluminium plate: (a) strip type and (b) sheet type.

첫 번째로, sensor 1 (S1)으로부터 50 mm 떨어진 판의 상면 지점에 연필심 파괴 시험을 수행했고 (Test 1), 두 번째로, sensor 1 (S1)으로부터 250 mm 떨어진 판의 측면에 연필심 파괴 시험을 하였으며 (Test 2), 세 번째로, sensor 1 (S1)을 능동 펄스 액추에이터로 사용하여 펄스파를 발생시켜 그 신호를 감지하는 실험을 수행하였다 (Test 3).

마찬가지로 SAL 센서 sheet type에 대하여 동일한 알루미늄 판 위에서 Fig. 3(b)와 같은 세 가지의 실험을 수행하였다. 첫 번째로, sensor 2 (S2) 와 3 (S3)의 정 중앙에서 직선거리로 50 mm 떨어진 판의 상면에 연필심 파괴 시험을 수행하였고 (Test 4), 두 번째로, sensor 2 (S2) 와 3 (S3)의 정 중앙에서 직선거리로 250 mm 떨어진 곳의 판 측면에 연필심 파괴 시험을 수행하였으며 (Test 5), 세 번째로, sensor 3 (S3)을 능동 펄스 액추에이터로 사용하여 펄스파를 발생시켜 신호를 감지하는 실험을 수행하였다 (Test 6).

3.2. SAL의 복합재료 모형 항공기 실험

Fig. 4에 보는 것과 같이, 두 종류의 SAL 센서를 Smart Airplane의 우측 날개 상면에 각각 부착하여, 연필심 파괴 및 펄스 액추에이터 시험을 수행하였다. Smart Airplane은 SAL 센서를 시험하기 위해 주문 제작한 glass fiber/epoxy 복합재료의 모형항공기로서, 길이 2 m, 날개 전폭 2 m이다.



(a) (b)

Fig. 4 SAL sensors test on the wing of Smart Airplane: (a) experimental design and (b) a photograph

SAL-센서가 부착된 Smart Airplane의 날개 면의 복합재료 두께는 약 3 mm 정도로 제작하였다. SAL 센서에 대하여 다음과 같은 2 종류의 탄성파 검출 실험을 수행하였다. 첫 번째로, SAL 센서 strip type에 대해서, sensor 1 (S1) 으로부터 50 mm 떨어진 날개 상면에 연필심 파괴 시험을 하였고 (Test 7), 두 번째로, Smart Airplane에 부착된 SAL 센서 sheet type에 대하여, sensor 2 (S2)와 3 (S3)의 정 중앙에서 직선거리로 50 mm 떨어진 날개 상면에 연필심 파괴 시험을 하였다 (Test 8). 이때 Test 7 에서는 sensor 2, 3, 4, 5 (S2-S4)에서 계측되었고, Test 8에서는 sensor 1, 2, 3, 4 (S1-S4)에서 신호가 계측되었다.

4. 결과 및 분석

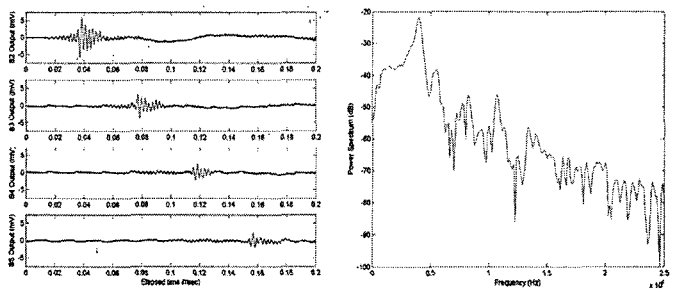
4.1. SAL 센서의 알루미늄판 실험

Fig. 5는 Fig. 3(a)에 도시된 SAL 센서 strip type에 대한 실험 Test 1, 2, 3에 대한 결과로서 시간 및 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. Fig. 5의 Test 1 결과 연필심 파괴 지점에서 멀어질수록 출력전압의 크기가 줄어들고, S1에서 S4까지 탄성파가 일정한 시간 간격 (약 0.04 msec)을 두고 검출됨을 알 수 있다. 이것은 압전 디스크가 일정한 125 mm의 간격으로 떨어져 있기 때문이다. 약 0.04 msec의 시간 간격은 표면 탄성파인 Rayleigh wave가 알루미늄 판을 타고 약 3125 m/sec의 위상속도를 가지고 전파됨을 보여준다. 그리고, 주파수영역에서는 약 413 kHz에서 공진모드가 나타나는데, 이것은 사용된 압전 디스크의 반경 방향 공진모드이다. 이 모드의 고유진동수(radial resonance mode)는 $f_r = N_p/D_o$로 계산되는데, 이때 외경 D_0 = 6 mm인 K182 압전 디스크의 N_p = 2490 (Hz/m) 이므로, 계산된 반경 방향 공진 주파수는 약 415 kHz가 되어 실제 측정결과와 정확히 일치한다. 즉, 시간영역에서 계측된 표면 탄성파는 주로 약 415 kHz 성분의 파동이다.

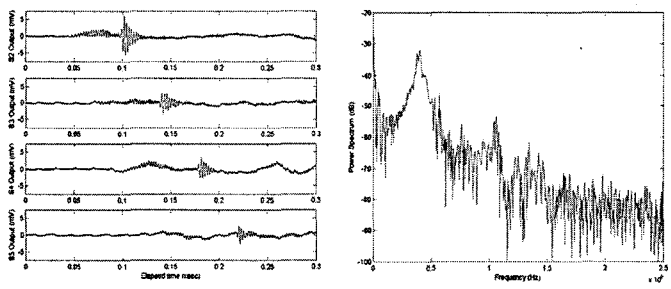
Fig. 5(b)의 Test 2에서는, 연필심 파괴를 판의 끝단 측면에서 실시하여 종파를 유발시켰다. 시간영역의 결과에서는 Test 1의 결과와는 상이한 결과를 나타내었다. 즉, Test 1의 탄성파 (Rayleigh wave)와는 달리 Test 2에서는 우선 진폭이 낮은 파가 지난 다음에 Rayleigh wave가 나타난다. 이

진폭이 낮은 파의 속도가 Rayleigh wave보다 더 빠른 종파인 것으로 추정된다. 이 종파 또한 각 센서 소자 (S1-S4) 간에 동일한 시간간격 (약 0.23 msec)을 보여주며, 위상속도는 약 5435 m/sec이다. Rayleigh wave는 Test 2에서도 약 3125 m/sec의 위상속도를 보인다. Test 2의 주파수 영역 결과도 Test 1의 그것과 거의 동일하다. 즉, 종파이든 Rayleigh wave이든 주로 약 415 kHz의 파동이 계측되었다.

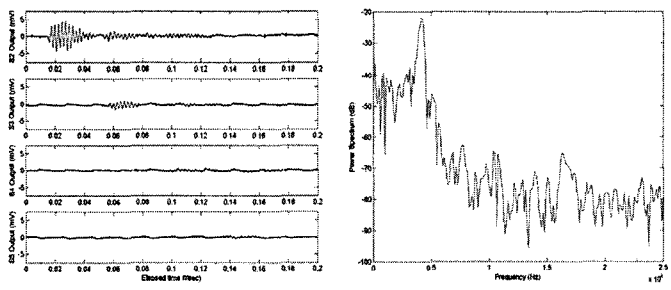
Fig. 5(c)의 Test 3에서는 sensor 1 (S1)을 펄스 액추에이터로 사용하였다. 펄스 신호 발생기는 Acoustic Emission Technology사의 Model-3001 type으로 5V의 전압을 압전 디스크 S1에 공급하였다. 따라서, S1이 액추에이터로 작용하여 알루미늄 판에 펄스파를 발생시킨다. 이 경우 센서들은



(a)



(b)

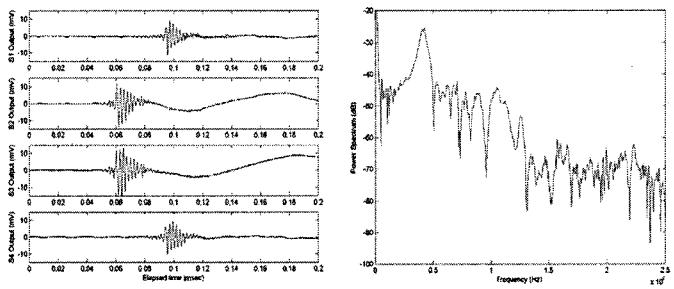


(c)

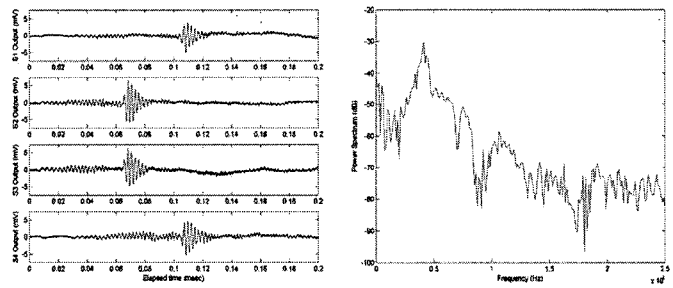
Fig. 5 Waveform and frequency responses of SAL strip type attached on an aluminium plate: (a) Test 1, (b) Test 2, and (c) Test 3

연필심 파괴 시험 때와는 다른 형태의 탄성파를 검출하였다. Test 1과 Test 2에 비해 Test 3에서 계측된 신호들은 상대적으로 작은 파형이 나타났다. 이 경우, 센서간 거리가 125 mm 이며, 탄성파의 도달 시간차는 약 0.04 msec으로서, 표면 탄성파의 위상 속도는 약 3125 m/sec로 추정된다.

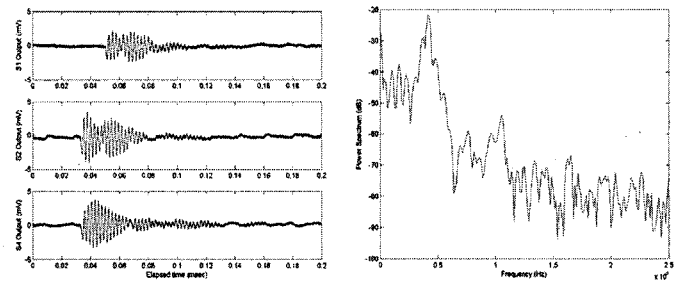
Fig. 6은 Fig. 3(b)에 도시된 SAL 센서 sheet type에 대한 실험 Test 4, 5, 6에 대한 결과로서, 시간 및 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. Fig. 6(a)의 Test 4의 경우, sensor 2 (S2)와 3 (S3)은 탄성파 발생 지점과 가깝고, sensor 1 (S1)과 4 (S4)는 멀다. 따라서 sensor 2, 3 (S2, S3)은 약 0.036 msec의 시간차로 sensor 1, 4 (S1, S4)보다 탄성파를 먼저 검출하였다. 탄성파 발생지점으로부터 S1, S4는 S2, S3 보다 약 106.5 mm 더 떨어져 있으므로, 이 때 탄성파 (Rayleigh wave)의 위상속도는



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Waveform and frequency responses of SAL sheet type attached on an aluminium plate: (a) Test 4, (b) Test 5, and (c) Test 6.

약 2960 m/sec가 된다. 주파수 영역에서는 여전히 압전 디스크의 반경모드 (415 kHz)가 지배적이다. Fig. 6(b)의 Test 5에서는 종파가 유발되도록 연필심 파괴 시험을 수행하였으므로, Rayleigh wave 보다 더 빨리 도착하는 종파가 검출됨을 확인할 수 있다.

Fig. 6(c)의 Test 6에서는 S3을 펄스 액추에이터로 이용하였으므로, S2와 S4는 같은 시간에 탄성파를 탐지하였고, 이들 보다 52.2 mm 더 떨어진 S1은 0.017 msec 뒤에 Rayleigh wave를 계측하였다. 이 경우에도 능동 압전 액추에이터는 탄성파의 전파에 유효함을 보여 주어, 스마트능동레이어 센서의 실제 적용성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

여러 개의 압전 소자를 하나의 strip 또는 sheet 상에 배열하여 부착함으로써, 전체 센서 부피를 크게 감소시키고, 다소 복잡한 형태의 구조물에도 적용가능하며, 그리고 여러 지점에서 하나의 탄성파 신호를 동시에 감지할 수 있는 SAL 센서를 개발하였다. 이 SAL 센서를 이용하여, 연필심 파괴 시험과 펄스 액추에이터 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 계측된 탄성파 신호는 신호 발생지점으로부터 거리가 가까울수록 크게 나타났으며, 거리가 먼 센서의 경우 실험대상체의 감쇠효과에 의해 신호가 작게 나타났고, 또한 신호 도달시간이 다소 지연되는 현상을 보였다. 둘째, 압전 소자 제조회사로부터 제공받은 센서의 공진 주파수와 실험을 통해 얻어진 센서의 공진 주파수가 거의 유사한 것으로 나타났다. 셋째, 알루미늄 판 실험에서 4개의 센서 모두에서 나타났던 연필심 파괴 신호가 복합재료실험 (smart plane실험)에서는 모든 센서에 나타나지 않았는데, 이것은 복합재료가 알루미늄에 비해 재료자체의 감쇠효과가 크기 때문인 것으로 생각된다. 넷째, 연필심 파괴 시험과 펄스 액추에이터 실험에서 계측된 두 위상속도가 거의 유사하게 나타났는데, 이를 통해 SAL을 이용한 펄스 액추에이터를 이용한 시험이 탄성파 검출을 위한 센서로서의 가능성을 확인하였다. 이상에서 살펴본 것과 같이, SAL의 특성 평가 결과, 여러 모드의 탄성파를 검출할 수 있는 것으로 나타났으며, 향후 각종 스마트 구조물에 적용되어 구조물의 이상이나 결함 검출 및 SHM에 활용될 수 있을 것으로 기대된다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 (NRL) 사업에 의한 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Hall, S. R. and Conquest, T. J. (1999) *Proc. of the USAF ASIP, 2nd ed.*

Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C. A. (1995). *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.*, 6(1), pp. 134-139,

Eatkins, S. E. (2003). *IEEE instrum & Meas. Magaz., Issue* June, pp. 25-30,

Sun, D., Tong, L. and Atluri, S. N. (2001). *Inter. J. of Sol. & Struc.* 38, pp. 9033-9051,

Osmont, D., Dupont, M., Gouyon, R., Lemistre, M. and Balageas, D. (2002) *Proc. of SPIE*, 3986, pp. 85-92,