

스마트 능동 레이어 센서 개발 (II): 제작 및 적용 연구

Development of Smart Active Layer Sensor (II): Manufacturing and Application

이영섭*[†], 이상일*, 권재화*, 윤동진*

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

초 록 본 논문은 두 편으로 구성된 스마트능동레이어 (smart active layer, SAL) 센서 개발에 관한 두 번째 것이다. 이미 첫번째 논문에서 언급되었지만, 구조물 건전성 감시 (structural health monitoring, SHM)는 구조물 안전 감시의 비용과 편리성을 개선하기 위한 방법으로서, 산업현장에서 그 응용이 점차 증가하는 새로운 기술이며, 최근 실제 응용을 하기 위한 스마트 센서의 개발 및 연구가 매우 활발하다. 본 논문에서는 첫 번째 논문에 기술된 SAL 센서의 이론 및 개념 연구에 이어서 실제 제작 및 적용연구에 관해 기술한다. 본 연구에서는 탄성과 감지를 위한 스마트 압전 센서 SAL을 개발하였는데, 압전 소자, 전자기파 차폐층 (EMI shielding layer) 및 보호 층 (protection layer)으로 구성되었다. 보호층에 일정 간격으로 분포된 압전 센서가 부착되고, 이들을 전기적으로 연결하는 회로층이 위치하고 있다. 모두 4종류의 SAL 센서가 설계, 제작 및 시험되었으며 이에 대해 상세히 기술하고 있다. 본 연구를 통해 SAL 센서는 SHM의 수행과 탄성파에 의한 손상 위치를 표정하는데 적용 가능할 것으로 예상된다.

주요용어: 스마트 능동 레이어, 구조물 건전성 감시, 압전 센서, 음향방출, 탄성파

Abstract This paper is the second part of the study on the development of a smart active layer (SAL) sensor, which consists of two parts. As mentioned in the first paper, structural health monitoring (SHM) is a new technology that is being 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 which is described with regard to the theory and concept of the SAL sensor in the first paper. 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 active layer (SAL), structure health monitoring, piezoelectric sensor, acoustic emission (AE), elastic wave

1. 서 론

이미 첫 번째 논문에서 본 연구의 필요성 및 배경에 대해 충분히 언급되었다[1]. 구조물의 파괴 및 손상은 보이지 않는 미세한 micro-cracks, debonding, delamination, 그리고 다른 노화 문제에 기인한 성장 메커니즘에 의해 발생한다. 대부분의 구조물은 수명을 연장하고, 붕괴를 방지하기 위해서 구조물 안전 유지가 요구된다. 구조물 건전성 감시 (structural health monitoring, SHM)는 콘크리트 교량, 각종 건축물, 항공기 등과 그 외 다른 형태의 구조물의 경우, 그 안정성과 신뢰성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 구조물 안전감시는 비파괴평가 (non-destructive evaluation, NDE) 시스템이 구조물 내에 함침되거나 부착되어 손상과 파괴에 대한 연속적인 모니터링을 의미한다[2-5].

구조물 건전성 감시에 비파괴적인 평가법이 많이 적용되는데, 일반적으로 초음파 기술[6]과 광섬유 센서 기술[7,8] 그리고, 압전 센서 및 액츄에이터 [9,10]들이 널리 적용되고 있다. 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 안전 감시기술에 적용하기 위해 패치형 스마트 압전 센서가 연구되고 있다. 이 패치형 스마트 압전 센서는 본 연구에서 제작된 SAL과 유사한 형태로 실시간 구조물의 상황을 감시하기 위해, 액츄에이터 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 모니터링할 수 있고, 임의의 파괴에 대한 위치 표정을 할 수 있다는 장점이 있다[6-10].

이미 첫 번째 논문[1]에서 스마트능동레이어 (smart active layer, SAL) 센서라고 명명된 새로운 형태의 표면탄성과 검출용 압전 센서에 대해 기술하였다. 이것은 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 감시기술에 응용하여, 내부 손상, 또는 파괴를 감지하기에 적합할 것으로 기대되며, 새로운 기술로서의 적용가능성을 확인하였다.

2. 스마트능동레이어 (SAL)의 제작

2.1. SAL 제작

본 연구에서는 스마트능동레이어 센서 개념 [1]을 바탕으로 SAL-1, SAL-2, SAL-3 strip type 및 sheet type 이라는 4 종류의 SAL 센서를 설계 및 제작하였다. 이 SAL 센서들은 모두 결합의 존재 유무 확인 및 결합 위치표정에 이용 가능하도록 설계되었다.

2.1.1. SAL-1

SAL-1은 스마트능동레이어 센서의 기본적인 성능 확인을 위한 원형 (prototype) 으로 설계 및 제작한 것으로, Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 polyimide layer 위에 thin silver strip으로 제작된 회로선 [0.025 mm (폭) × 0.001 mm (두께)]을 부착한 뒤, 직경 12.5 mm, 두께 1 mm의 PZT 압전디스크 5개를 35 mm의 균등간격으로 배치 및 부착하였다. 그리고 압전 디스크 위치를 제외한 부분에 또 다른 polyimide layer를 부착하여, 압전 디스크 및 회로선을 보호하도록 하였다. SAL-1의 전체크기는 210 mm (길이) × 40 mm (폭)로 제작되었다.

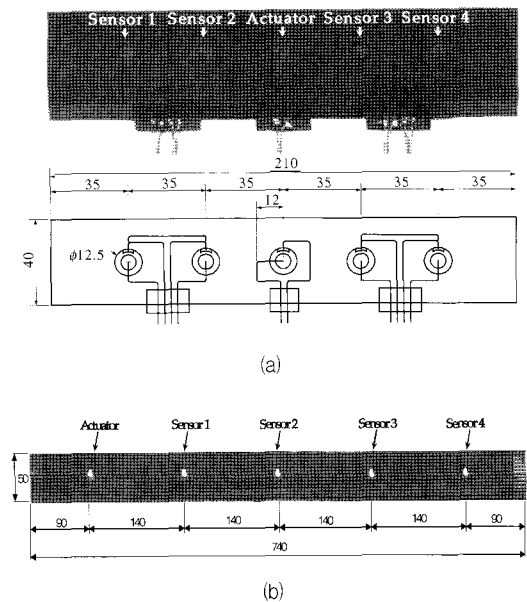


Fig. 1 Configurations of smart active layer: (a) SAL-1 and (b) SAL-2

5개의 압전 디스크 중에서 가운데 소자는 능동적인 압전 소자로서 펄스 액츄에이터로 사용할 수 있도록 커넥터를 별도로 제작하였으며, 이것을 중심으로 좌우에 각 2개씩의 압전 디스크를 배치하여 커넥터를 부착하였다. 이때, 사용된 압전 PZT disc는 Fig. 2(a)에 나타내었으며, 사용된 접착제는 epoxy였는데, epoxy 층은 매우 얇게 형성되도록 제작하여 압전 소자의 전극과 회로선이 epoxy층을 지나 통전되도록 하였다.

2.1.2. SAL-2

SAL-2는 SAL-1의 설계 개념 하에 flexible 인쇄회로기판 (printed circuit board, PCB) 공정을 적용하여 제작하였다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 구리로 제작된 회로선 [1 mm (폭) × 0.033 mm (두께)]을 채택하였으며, 외면층은 양쪽 모두 polyimide sheet를 사용하였다. 이 polyimide 층은 전체 센서레이어의 형상을 유지하고 외부의 환경으로부터 압전 디스크를 보호하는 역할을 한다. 또한 SAL-2에서는 내외부의 전자기적 간섭(electro-magnetic interference, EMI)으로부터 압전 디스크의 신호전극을 보호하기 위해 전기적 shielding 층을 추가하였다. 박막의 구리층으로 제작된 이 shielding 층은 압전 disc의 ground electrode와 연결시켰다. 모두 5개의 압전 disc가 부착된 SAL-2에서는, Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이, 가장 좌측의 압전 디스크를 능동적 펄스 액츄에이터로 사용하도록 하였으며, 나머지 4개는 센서로 설계하였다. 사용된 압전 디스크는 SAL-1과 동일한 직경 12.5 mm, 두께 1 mm의 PZT이었으며 140 mm의 균등간격으로 배치, 부착하였는데 SAL-1과 같이 epoxy 접착제가 사용되었다. SAL-2의 전체크기는 740 mm (길이) × 50 mm (폭)로 제작되었다.

2.1.3. SAL-3

SAL-3센서는 이미 제작된 SAL-1과 SAL-2에서의 경험을 바탕으로 실제 상용화가 가능한 수준의 설계 및 제작 기법이 적용되었다. SAL 센서는 이론적으로 다양한 형상의 구조물에 부착 또는 합침이 가능한 것이므로, 이의 실증을 위해 SAL-3 센서에서는 2가지 형태가 구현되었다. 이들은 각각 긴 띠

모양의 strip type과 사각형 모양의 sheet type이다. SAL-3 strip type 센서는 폭에 비해 길이가 긴 형상의 구조물, 예를 들어 교량 상판이나 항공기 날개에 적용 가능하며, SAL-3 sheet type 센서는 압력용기 등과 같은 넓은 면적을 가지는 구조물에 적합하도록 고려되어 졌다. SAL-3의 제작에 사용된 압전 디스크는 Keramos의 K-182 (PZT 2 계열)로서, 다양한 PZT에 대한 평가 후에 결정되었다. Fig. 2(b)는 SAL-3의 제작에 사용된 wrap-around 방식의 압전 디스크로서 직경은 6 mm, 두께는 0.25 mm이다.

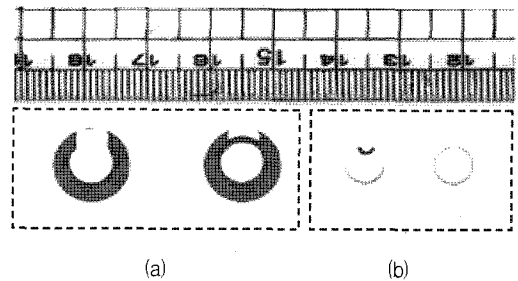


Fig. 2 PZT discs for (a) SAL-1, SAL-2, and (b) For SAL-3

Fig. 3(a)는 SAL-3 strip type으로 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-3 센서가 커넥터를 통해 외부의 신호분석기와 연결을 용이하게 되도록 한다. Fig. 3(b)에 나타난 SAL-3 센서 strip type의 회로도로서 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. 3(c)는 SAL-3 sheet type으로서 245.7 mm (길이) × 210 mm (폭)이며, 외관을 제외한 나머지 부분은 SAL-3 strip type과 동일하다. Fig. 3(d)는 SAL-3 sheet type의 회로도이다.

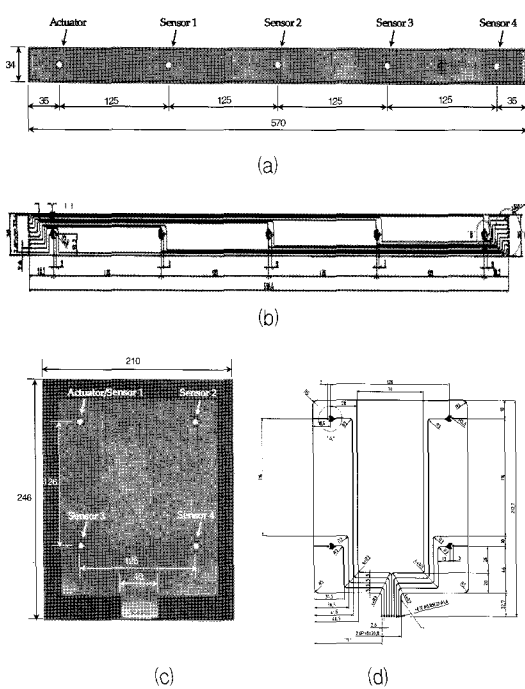


Fig. 3 SAL-3: (a) dimension and (b) circuit design for strip type; (c) dimension and (d) circuit design for sheet type

Fig. 4는 완성된 SAL-3의 상세 단면배치도로서 압전 disc 접착 후의 단면을 묘사한 그림인데, 모두 7개의 레이어의 구성을 보여준다. 압전 디스크를 접합하기 전의 설계두께는 약 244 μm , 접합 후 두께는 250 μm 로서 압전 디스크가 외부로 약 137 μm 정도 돌출하게 된다. 이러한 외부돌출은 구조물에 압전 디스크들이 쉽고 견고하게 부착되도록 할 수 있게 한다. 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-3 전체의 형상을 유지하고 외부의 환경으로부터 압전 disc를 보호하는 역할을 한다. 또한 SAL-3에서는 내외부의 전자기적 간섭 (EMI)에서 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-3에서는 총 4개의 polyimide 층과 3개의 구리층으로 되어있

는데, 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. 2(b)와 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 접촉시킴으로써 SAL이 완성된다. SAL-3는 실제 상용화가 가능하도록 설계 및 제작된 것으로, strip type과 sheet type의 두 가지 종류로 개발되었다.

SAL-3는 flexible PCB 제작공정으로 제작되었으며 CAD도면이 완성된 후 gerber file을 작성하여 각 층 별로 필요한 etching 작업 후 레이어들을 접착하였다. 그 뒷면에 압전 디스크를 접착하여 센서를 완성하였다. 압전 디스크와 SAL-3의 회로와의 연결은 매우 얇은 bonding이 요구되므로 polyester 계열의 접착제를 사용하였다.

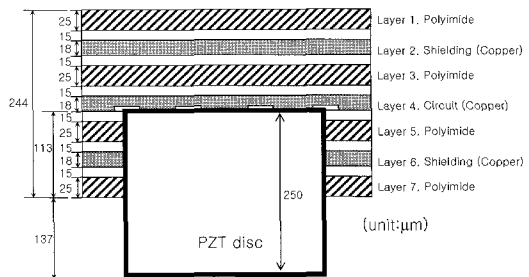


Fig. 4 Layer arrangement of SAL-3

3. 실험

3.1. SAL-1 실험

Fig. 5에 보는 바와 같이, 1000 mm \times 1000 mm \times 5 mm의 정사각형 알루미늄 판 위에 SAL-1센서를 부착한 후, S1 압전 디스크로부터 각각 100 mm, 300 mm 및 500 mm 떨어진 지점에 연필심 파괴를 통해 표면탄성파를 유발시켰다. 모두 4개의 압전 소자 (S1-S4)를 부착한 SAL-1센서로부터 감지

되는 각각의 탄성과 신호는 LeCroy 9354A 500 MHz oscilloscope를 이용하여 저장, 분석되었다.

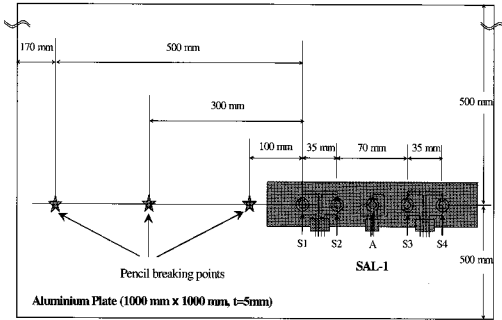
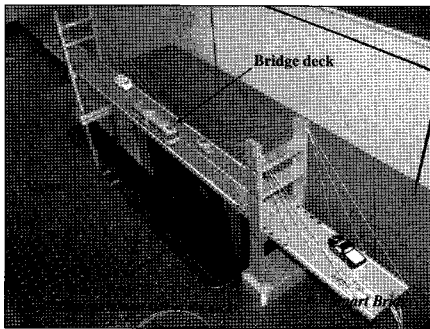
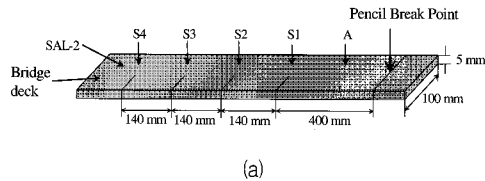


Fig. 5 SAL-1 test on an aluminium plate



(a)

(b)

Fig. 6 SAL-2 test on the deck of Smart Bridge: (a) arrangement of SAL-2 on the deck and (b) Smart Bridge

3.2. SAL-2 실험

Fig. 6(a)와 같이 길이 1500 mm × 100 mm × 5 mm의 긴 띠 형태의 알루미늄 판위에 SAL-2 센서를 부착하였다. 이 알루미늄 판은 Smart Bridge 라는 모형 교량의 상판으로서 SAL-2는 이 상판의 하부에 부착되어 실험이 수행되었다. (이것은 Fig. 6(b)의 사진에서 거울을 통해 SAL-2가 상판의 하면에 부착되어 있음을 확인할 수 있다.) SAL-2에서는 모두 5개의 압전 디스크가 있는데, 하나는 펄스 액추에이터 (A)이고, 나머지 4개 (S1-S4)는 센서이다.

Sensor 1 (S1)로부터 400 mm 떨어진 상판의 한 지점에서 연필심 파괴 시험을 수행하였다.

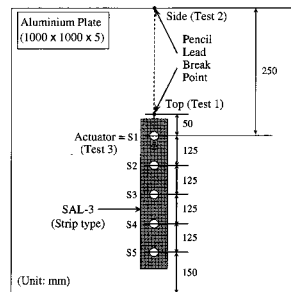
3.3. SAL-3의 실험

두 종류의 SAL-3 센서는 알루미늄 판과 FRP로 제작된 축소 모형 항공기 Smart Airplane에 각각 부착되어 표면탄성과 검출성능 평가시험을 수행하였다.

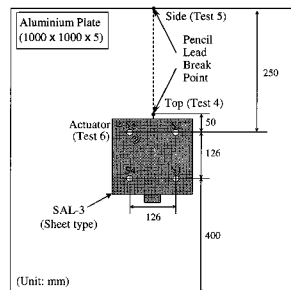
3.3.1. SAL-3의 aluminium 판 실험

Fig. 7과 같이 두 종류의 SAL-3 센서에 대해 알루미늄 판 (1000 mm × 1000 mm × 5 mm)에 각각 부착하여 연필심 파괴 및 펄스 액추에이터 시험을 수행하였다. Fig. 7(a)는 SAL-3 센서 strip type에 대한 실험으로서 다음과 같은 3 종류의 실험이 수행되었다.

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).



(a)



(b)

Fig. 7 SAL-3 test on an aluminium plate: (a) strip type and (b) sheet type

마찬가지로 SAL-3센서 sheet type에 대하여 동일한 알루미늄 판 위에서 Fig. 7(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).

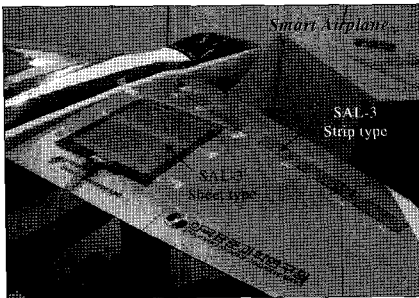
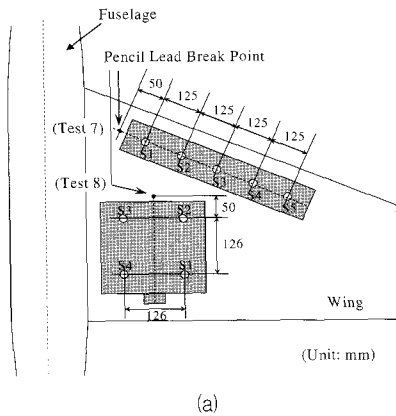


Fig. 8 SAL-3 test on the wing of Smart Airplane: (a) arrangement of SAL-3 on the wing and (b) Smart Airplane

3.3.2. SAL-3의 복합재료 구조물 실험

Fig. 8에 보는 것과 같이, 두 종류의 SAL-3 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 모

형항공기로서 길이 2 m, 날개전폭 2 m이다. SAL-3 센서가 부착된 Smart Airplane의 날개 면의 복합재료 두께는 약 3 mm로 제작하였다.

SAL-3 센서에 대하여 다음과 같은 2 종류의 탄성과 검출 실험을 수행하였다. 첫 번째로, strip type에 대하여, sensor 1 (S1)으로부터 50 mm 떨어진 날개 상면에 연필심 파괴 시험을 하였고 (Test 7), 두 번째로, Smart Airplane에 부착된 SAL-3 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 7에서는 sensor 2, 3, 4, 5 (S2-S4)에서 계속되었고, Test 8에서는 sensor 1, 2, 3, 4 (S1-S4)에서 신호가 계속되었다.

4. 결과 및 분석

4.1. SAL-1 실험 결과 분석

Fig. 9는 Fig. 5에 도시된 SAL-1 센서에 대한 실험 결과로서, 각 센서 (S1-S4)에서 계속된 시간 영역 탄성과 신호를 보여준다. 탄성과 발생지점으로부터 거리가 먼 센서일수록 신호의 크기는 거리 감소로 인해 줄어들었으며, 재료의 탄성과 속도를 알면 비록 탄성과 발생위치에 대한 정보가 없어도 서로 위치가 다른 복수개의 센서를 사용하므로 탄성과 발생원을 쉽게 찾아낼 수 있다. 이러한 위치 표정 기술은 복수개의 센서에서 감지된 탄성과의 도달 시간차 (arrival time difference)를 이용한다[11].

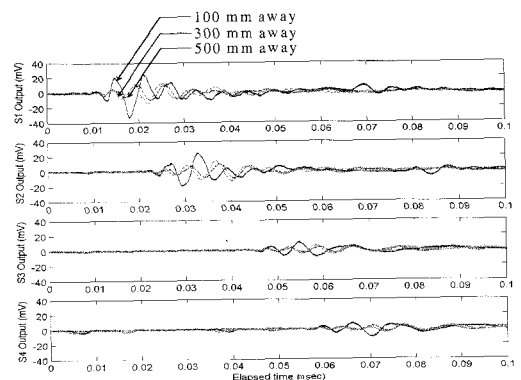


Fig. 9 Time responses of SAL-1 sensor on an aluminium plate

참고로, SAL-1 실험의 경우, Fig. 9에서 보는 바와 같이 S1과 S2간의 거리는 35 mm이며, 탄성파의 도달 시간차는 약 0.011 msec로서, 표면 탄성파의 위상속도는 약 3180 m/sec이다.

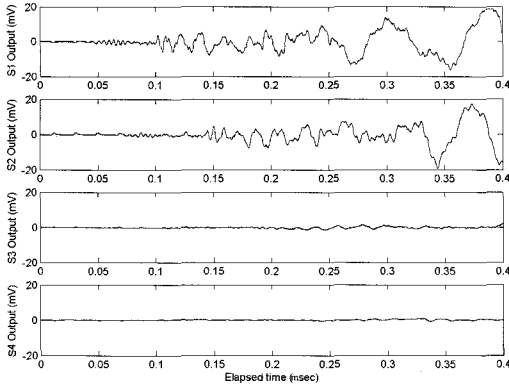


Fig. 10 Time responses of SAL-2 sensor on the deck of Smart Bridge

4.2. SAL-2 실험 결과 분석

Fig. 10은 Fig. 6(a)에 도시된 SAL-2 센서에 대한 실험 결과로서, 시간영역에서의 연필심 파괴로 인한 표면탄성파의 거동을 계측한 것이다. 위에서 밑으로 sensor 1-sensor 4 (S1-S4)의 출력전압을 보여주고 있다. Sensor 1(S1)의 경우 직접적인 탄성파는 0.1 msec 이내에서 계측되었고, 그 이후로는 모형교량 상판의 폭이 100 mm로 길이에 비해 상대적으로 짧기 때문에 폭 양단에서의 반사파가 중첩되어 나타나면서 출력전압이 크게 나타났다.

Sensor 2 (S2)의 경우는 직접적인 탄성파는 0.1 msec 근처에서 계측되었으며, 상대적으로 거리가 먼 sensor 3 (S3)과 4(S4)는 각각 0.2 msec와 0.25 msec에서 직접적인 탄성파가 미약하게 검출되었다. 이 경우, S1 및 S2간의 거리는 140 mm이며, 탄성파의 도달 시간차는 약 0.045 msec로서, 표면 탄성파의 위상 속도는 약 3110 m/sec로 추정된다.

4.3. SAL-3 실험 결과 분석

4.3.1. 알루미늄 판 실험

Fig. 11은 Fig. 7(a)에 도시된 SAL-3 센서 strip type에 대한 실험 Test 1, 2, 3에 대한 결과로서 시

간 및 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. Fig. 11의 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, 주파수 영역에서는 약 413 kHz에서 공진모드가 나타나는데, 이것은 사용된 압전 디스크의 반경 방향 공진 모드이다. 이 모드의 고유진동수(radial resonance mode)는 $f_r = N_p/D_0$ 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. 11(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. 11(c)의 Test 3에서는 sensor 1 (S1)을 펄스 액추에이터로 사용하였다. 펄스 신호 발생기는 Acoustic Emission Technology사의 Model-3001 type으로 5V를 압전 디스크 S1에 공급하였다. S1 액추에이터는 이에 따라 알루미늄 판에 펄스파를 발생시킨다. 이 경우 센서들은 연필심 파괴 시험 때와는 다른 형태의 탄성파를 검출하였다. Test 1 및 Test 2에 비해 Test 3에서 계측된 신호들은 상대적으로 작은 파형이 나타났다. 이 경우, 센서간 거리가 125 mm이며, 탄성파의 도달 시간차는 약 0.04 msec로서, 표면 탄성파의 위상 속도는 약 3125 m/sec로 추정된다.

Fig. 12는 Fig. 7(b)에 도시된 SAL-3 센서 sheet type에 대한 실험 Test 4, 5, 6에 대한 결과로서 시간 및 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. Fig. 12(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 약 2960 m/sec가 된다. 주파수 영역에서는 여전히 압전 디스크의 반경모드 (415 kHz)가 지배적이다. Fig. 12(b)의 Test 5에서는 종파가 유발되도록 연필심 파괴 시험을 수행하였으므로, Rayleigh wave 보다 더 빨리 도착하는 종파가 검출됨을 확인할 수 있다.

Fig. 12(c)의 Test 6에서는 S3을 펄스 액추에이터로 이용하였으므로, S2와 S4는 같은 시간에 탄성파를 탐지하였고, 이들 보다 52.2 mm 더 떨어진 S1

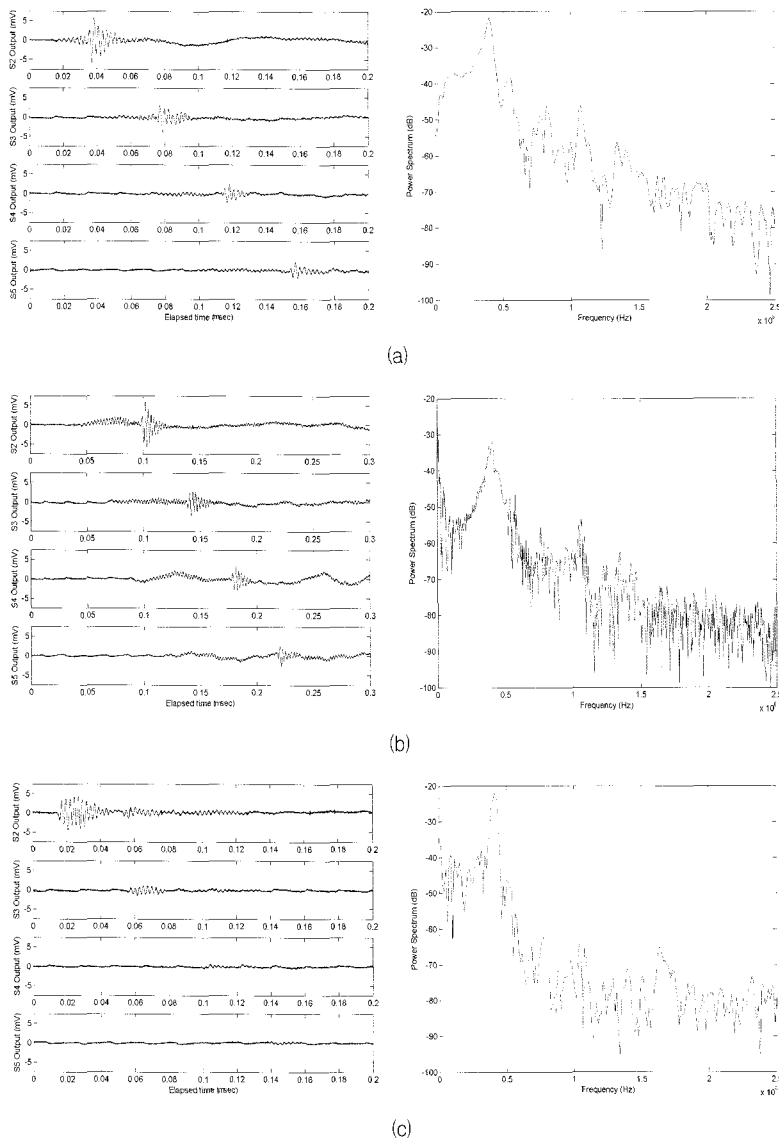


Fig. 11 Waveform and frequency responses of SAL-3 strip type attached on an aluminium plate: (a) Test 1 (pencil lead break test), (b) Test 2 (pencil lead break test), and (c) Test 3 (piezo disc pulse actuation test)

은 0.017 msec 뒤에 Rayleigh wave를 계측하였다. 이 경우에도 능동 압전 액추에이터는 탄성파의 전파에 유효함을 보여 주어, 스마트능동레이어 센서의 실제 적용성을 확인할 수 있었다.

4.3.2. 복합재료 실험

Fig. 13은 Fig. 8(a)에 도시된 SAL-3 센서 strip type에 대한 실험 Test 7, 8에 대한 결과로서 시간

및 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. Fig. 13(a)의 Test 7 결과에서는 알루미늄 판에 대한 실험과는 달리 4개의 센서 모두에서 상대적으로 덜 선명한 표면탄성파가 나타났다. 검출된 탄성파는 상대적으로 저주파인 음파영역에 가까운 것이었으며, 주파수 분석에서도 압전 디스크의 반경모드(415 kHz)는 미약한 크기로 나타났다. 이 경우, 센서간 거리는 균등하게 125 mm 이며, 탄성파의 도달 시간차 (S2와 S3)는 약 0.038 msec이므로, 복합재료로 만들어진

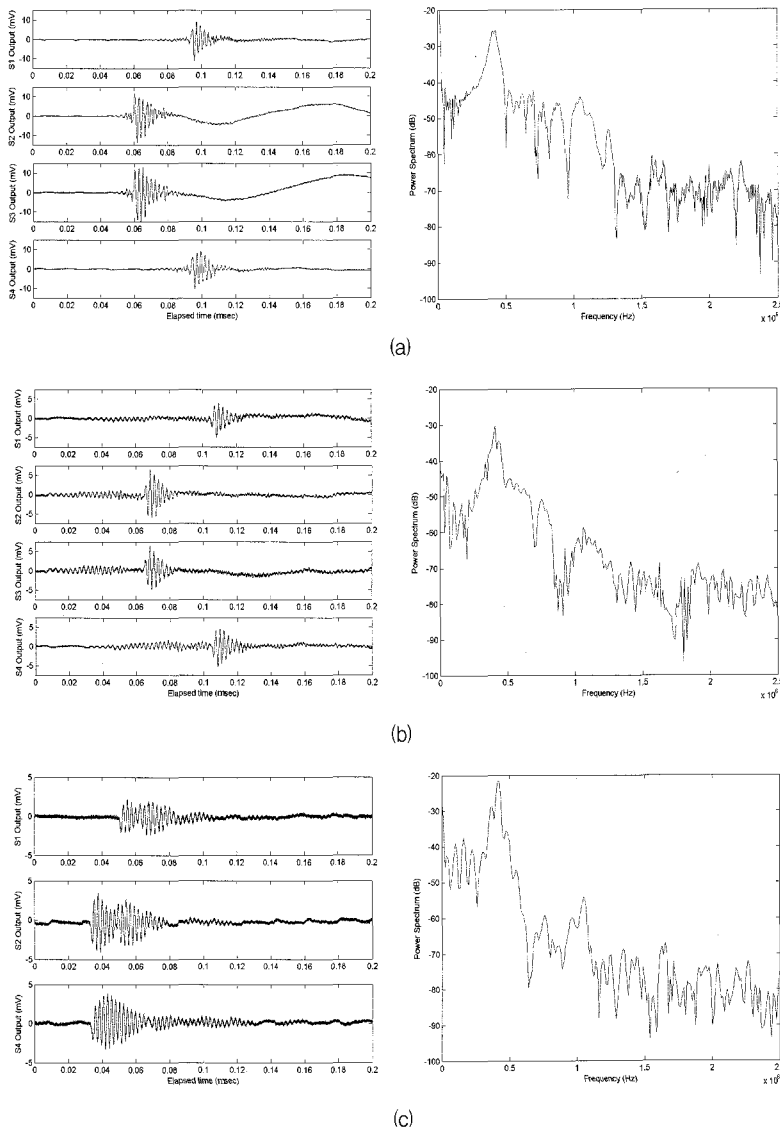


Fig. 12 Waveform and frequency responses of SAL-3 sheet type attached on an aluminium plate: (a) Test 4 (pencil lead break test), (b) Test 5 (pencil lead break test), and (c) Test 6 (piezo disc pulse actuation test)

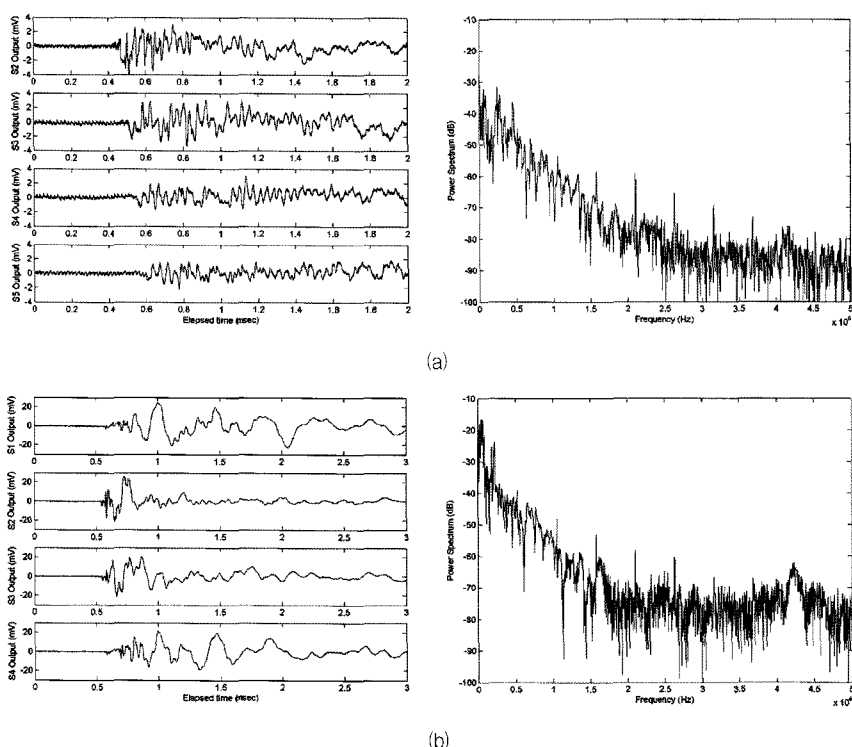


Fig. 13 Waveform and frequency responses in SAL-3 sensors attached on the wing of Smart Airplane: (a) Test 7 (pencil lead break test) and (b) Test 8 (pencil lead break test)

Smart Airplane 날개에서 표면탄성파의 위상속도는 약 3290 m/sec로 추정된다.

Fig. 13(b)는 Fig. 8(a)에 도시된 SAL-3 센서 sheet type에 대한 연필심 파괴 시험인 Test 8의 결과로서, 시간과 주파수 영역에서의 응답을 보여준다. 이 실험의 경우, S2와 S1의 연필심 파괴 지점에서의 상대적인 거리차이는 106.5 mm이며, 탄성파의 도달 시간차는 약 0.032 msec였으므로, 이때 표면 탄성파는 약 3280 m/sec의 위상속도로 전파됨을 알 수 있다. 이것은 glass fiber/epoxy로 제작된 Smart Airplane의 날개 재료의 특성이 연필심 파괴 시험을 해서는 표면 탄성파의 전파를 원활히 하지 못함을 알 수 있다. 이것은 복합재료의 경우 알루미늄 등의 금속재료에 비해 표면 탄성파의 전파에 불리한 큰 감쇠 계수를 갖는 것으로 추정된다.

5. 결 론

여러 개의 압전 소자를 하나의 strip 또는 sheet 상에 배열하여 부착함으로써, 전체 센서 부피를 크

게 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 제공 받은 센서의 공진주파수와 실험을 통해 얻어진 센서의 공진주파수가 거의 유사한 것으로 나타났다. 셋째, 알루미늄 판 실험에서 4개의 센서 모두에서 나타났던 연필심 파괴 신호가 복합재료실험 (smart plane 실험)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 액추에

이터를 이용한 시험이 탄성과 검출을 위한 센서로서의 가능성을 확인하였다. 이상에서 살펴본 것과 같이, SAL의 특성 평가 결과, 여러 모드의 탄성과를 검출할 수 있는 것으로 나타났으며, 향후 각종 스마트 구조물에 적용되어 구조물의 이상이나 결함 검출 및 SHM에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 윤동진, 이영섭, 이상일, 권재화, "스마트 능동 레이어 센서 개발 (I): 이론 및 개념 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 5, pp. 465-475, (2004)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] D. Osmont, M Dupont, R. Gouyon, M. Lemistre and D. Balageas, "Damage and damaging impact monitoring by PZT sensors-based HUMS," Proceedings of SPIE, Vol. 3986, pp. 85-92, (2002)
- [6] H. W. Reinhardt and C. U. Grosse, "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete," Construction and Building Materials, Vol. 18, pp. 145-154, (2004)
- [7] S. E. Eatkins, "Smart bridge with fiber-optic sensors," IEEE instrumentation & Measurement Magazine, Issue June, pp. 25-30, (2003)
- [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," Sensors and Actuators, Vol. 79, pp. 153-161, (2000)
- [9] Z. Jiang, "Structure health monitoring with piezoelectric sensor and actuators," Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 5, No. 4, pp.18-28, (1997)
- [10] J. M. Park, S. I. Lee, O. Y. Kwon, H. S. Choi and J. H. Lee, "Comparison of nondestructive microfailure evaluation of fiber-optic Bragg grating and acoustic emission piezoelectric sensors using fragmentation test," Composites: Part A, Vol. 34, pp. 203-216, (2003)
- [11] I. Garbec and T. Kosel, "Location of continuous AE sources by sensory neural network," Journal of Ultrasonics, Vol. 36, pp. 525-530, (1998)