

# 압전고분자 센서를 이용한 복합재 구조의 실시간 손상탐지

권오양\*·Y.A. Dzenis\*\*

## Realtime Detection of Damage in Composite Structures by Using PVDF Sensor

Oh-Yang Kwon\* and Yuris A. Dzenis

**Keywords:** PVDF film sensor, Acoustic emission, Embedded sensor, Tensile failure, Fatigue damage

### Abstract

Polyvinylidene di-fluoride (PVDF) film sensor appeared to be practically useful for the structural health monitoring of composite materials and structures. PVDF film sensors were either attached to or embedded in the graphite/epoxy composite (CFRP) samples to detect the fatigue damage at the bondline of single-lap joints or the tensile failure of unidirectional laminates. PVDF sensors were sensitive enough to detect and determine the crack front in linear location since composites usually produce very energetic acoustic emission (AE). PVDF sensors are extremely cost-effective, as flexible as other plastic films, in low profile as thin as a few tens of microns, and have relatively wide-band response, all of which characteristics are readily utilized for the structural health monitoring of composite structures. Signals due to fatigue damage showed a characteristics of mode II (shear) type failure whereas those from fiber breakage at DEN notches showed that of mode I (tensile) type fracture.

## 1. 서론

AE는 고체 내부에 축적된 스트레인 에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로 그 파원이 균열의 발생/성장, 소성변형, 섬유파단, 기지균열, 층간분리 등에 해당하므로 이를 측정 분석함으로써 발생원의 정체를 밝히는데 널리 쓰이고 있다. 전통적인 AE 센서는 PZT-5A와 같은 압전세라믹을 바탕으로 구성되며, 일정한 점도를 가진 커플런트로 고체 표면에 부착되어 AE를 수신하고 이를 전기신호로 변환해주는 역할을 한다. PVDF는 고분자 중에서는 비교적 강한 압전효과를 보여주는 재료이지만 PZT와 비교하면 변환효율이 매우 낮다. 반면에 PVDF는 PZT와 비교할 때, 얇은 플라스틱 필름으로 유연성이 좋고 적층판에 쉽게

삽입할 수 있으며, 상대적으로 광대역 특성을 갖는 등의 이점이 있다. 특히, 저렴하게 만들 수 있어 대형 구조물에 다수의 센서를 영구적으로 부착해야 하는 경우 매우 경제적이다.

PVDF는 의료용 영상진단장치를 비롯한 초음파 센서에는 널리 응용되었으나[1-3], AE센서로 적용한 연구는 극히 제한적이다[4,5]. 복합재료는 내부적으로 손상이 발생할 때 비교적 강한 AE 신호를 발생하므로 PVDF의 측정민감도가 PZT에 비하여 다소 떨어진다고 하더라도 충분히 신호를 포착할 수 있는 점에 착안하여, 본 연구에서는 CFRP 복합재에 대하여 이를 활용한 실시간 손상탐지가 가능함을 입증하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 접착접합부의 피로손상

단일접치기 접합부를 갖는 CFRP 시편을 필름 접착제(Cytec FM300-2M)를 사용하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 2개의 PVDF 센서를 접합부를

\* 인하대학교 기계공학과

\*\* University of Nebraska - Lincoln

사이에 두고 120mm 떨어진 시편 표면에 그림과 같이 부착하였으며 필름센서의 크기는 12×12 mm이다. 처음부터 5mm의 층간분리를 가진 접합부를 피로하중을 가하기 약간 오픈하여 예비균열의 총 길이를 5~10mm로 하였다. 피로하중은  $5 \pm 2$  kN에 2Hz로 가하였으며 접합부의 단면에서 성장하는 피로균열의 길이를 이동식 광학현미경을 사용하여 AE 신호와 동시에 측정하고 균열성장의 전 과정을 녹화하였다.

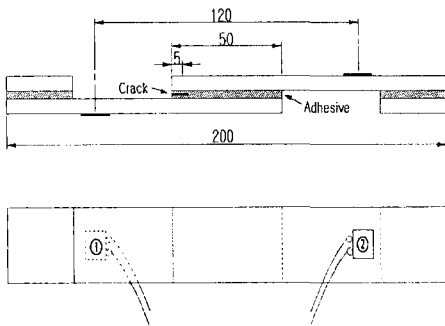


Fig. 1 An adhesively bonded single-lap joint specimen with a pre-crack and PVDF film sensors attached for the monitoring of fatigue crack growth at the joint.

PVDF 센서로 탐지된 신호의 처리에는 상용 AE 시험장비를 사용하였는데, 우선 100kHz - 1MHz의 대역통과필터가 내장된 프리앰프로 34dB 증폭한 다음 신호처리장치 본체에 저장하고 1차원 위치표정 등 필요한 신호처리를 수행하였다. 일반적으로 피로시험 환경은 다른 시험에 비하여 잡음이 심하기 때문에, AE 시험장비에서 가능한 기능으로 Delta-T 필터 등을 활용하여 외부적인 잡음을 제거하는데 유의하였다.

## 2.2. Embedded PVDF 센서와 인장 파괴

PVDF 센서의 장점을 최대한 활용하여 구조 건전성 진단에 활용할 수 있는 사례의 하나로 일방향 적층복합재 내부에 센서를 매몰하여 적층판의 파손 시 발생하는 섬유파단 및 섬유방향 분리(splitting)에 의한 AE 신호를 측정하고 1차원 위치표정을 통하여 이를 입증하였다. 이를 위하여 8-ply 및 16-ply 일방향 적층 CFRP 시편 길이의 중앙에 Fig. 2와 같이 양쪽으로 노치를 갖는 DEN 시편을 제작하고 노치를 중심으로 120mm

떨어지도록 2개의 센서를 중간면(mid-plane)에 삽입하였다. 센서와 노치의 상대적인 위치는  $L_1:L_2 = 1:1$  및  $1:2$  로 하였으며, 매몰된 센서에 의해 탐지된 신호의 처리에는 피로시험의 경우와 동일한 방법을 사용하였다.

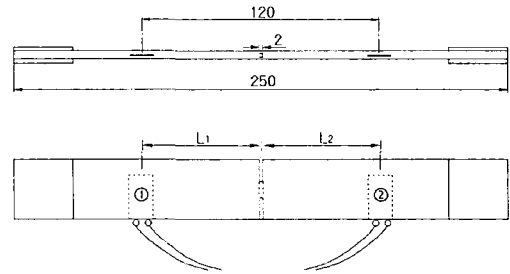


Fig. 2 A double-end notched (DEN) tensile specimen of CFRP/UD laminates with PVDF film sensors embedded at the mid-plane

PVDF 필름은 기본적으로 고분자이므로 사용 온도에 제한을 받는다. 실험에 사용한 센서의 경우 제조사가 추천하는 사용온도는  $\sim 80^\circ\text{C}$ 이지만, 본 연구에서 확인한 바에 의하면  $250^\circ\text{F}$ 용 프리프레그의 경화조건은 가까스로 견딜 수 있는 것으로 보인다. 즉, 사용한 프리프레그는 T700S/3501로서 경화사이클은 700kPa하에서 (30분/ $82^\circ\text{C}+90$ 분/ $121^\circ\text{C}$ )인데, 사용한 PVDF 필름은 이 조건에서 적층판에 매몰된 상태로 경화된 다음 센서로서 활용될 수 있었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 접착접합부의 피로손상

단일접합기 접합부는 8270 cycle에서 파단되었는데, 파괴는 접착층(adhesive layer)을 따라 전단파괴로 일어났음을 파면 관찰을 통해 확인할 수 있었다. 한편 전체적인 AE 발생 상황과 피로균열 성장과의 연관성은 Fig. 3에서 알아볼 수 있다. 이동식 광학현미경으로 측정된 피로균열의 길이는 7mm부터 30mm까지 측정치를 보여주는 데, 누적 AE 발생수 곡선과 함께 피로수명의 50%까지는 균열의 성장이 일어나지 않았음을 말해준다. 이후 균열은 5000~8000 cycle에서 매우 안정적인 성장을 보였으며 AE 발생수도 계단식 이기는 하나 완만한 증가를 보이고 있다. 그러나

최종단계에서는 약 300 cycle 동안에 매우 급격한 불안정성장에 이어 파단되었는데, 균열 길이에 AE 발생수도 매우 급격한 변화를 보였다.

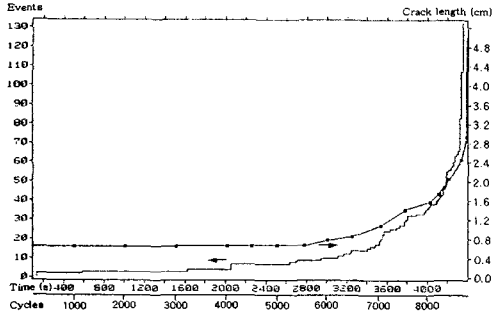


Fig. 3 Cumulative AE events monitored by the attached PVDF sensors and the crack length measured with fatigue cycles

2개의 PVDF 센서에 의해 탐지된 신호를 바탕으로 1차원 위치표정을 행하여 균열 선단의 위치를 추정해 본 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 점으로 나타난 데이터 포인트가 균열(혹은 광의 피로손상)이 발생한 지점이라 할 수 있는데 파단 직전의 불안정한 구간을 제외하면 시편 측면에서 광학적으로 측정된 균열길이에 비하여 한결같이 10~20mm 전방에 위치하고 있다. 이러한 불일치는 피로손상에 의한 AE 발생원은 실제로 관찰되는 균열의 선단보다 앞선 지점에서의 미소박리의 생성에 의한 것으로 추론할 수 있으므로 충분히 설명될 수 있다. 중요한 사실은 균열 길이 곡선과 AE 위치표정 결과가 일정한 간격을 유지하면서 균열전파 방향으로 나아가는 점이다.

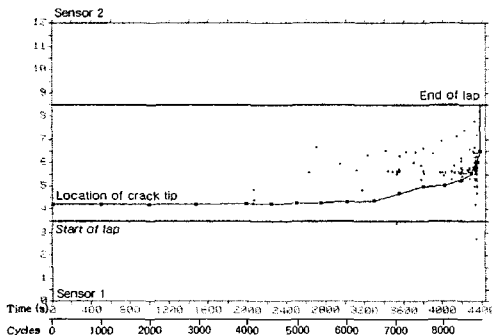
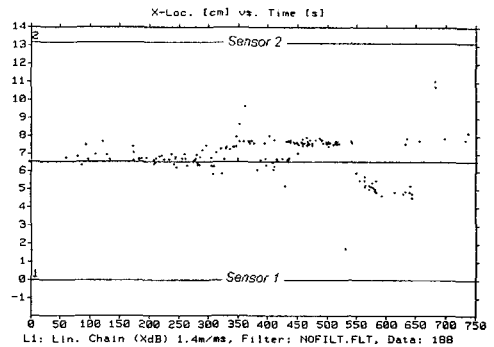


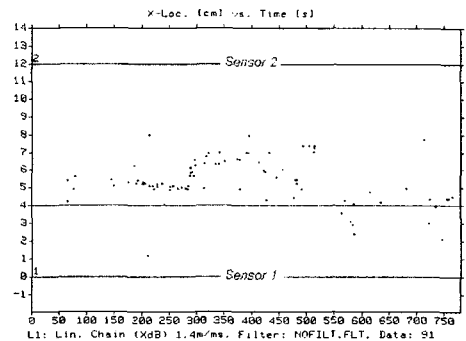
Fig. 4 Comparison of AE source locations by PVDF sensors with the location of crack tip measured by traveling microscope

### 3.2. Embedded PVDF 센서와 인장 파괴

Fig. 5는 DEN 시편에 인장 하중을 걸어 파단 시킨 경우에 발생한 AE를 탐지하여 1차원 위치표정에 의해 발생원의 위치를 추적한 결과이다. 세로축은 시편의 길이를 나타내므로 그로부터 2개의 센서와 DEN 노치의 위치를 나타내는 수평선을 그으면  $L_1:L_2 = 1:1$ 인 경우 Fig. 5(a)처럼,  $L_1:L_2 = 1:2$ 인 경우 Fig. 5(b)처럼 나타나며 여기에 AE 위치표정의 결과를 함께 표시하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Results of AE source location monitored by embedded PVDF film sensors for the tensile failure of DEN specimens of CFRP/UD laminates; (a)  $L_1:L_2=1:1$  and (b)  $L_1:L_2=1:2$

Fig. 5(a)에서 위치 표정은 350초까지는 노치의 위치를 나타내는 수평선을 중심으로 10mm 이내에 분포하며, 이후 550초까지는 센서2 쪽으로, 다시 이후 850초까지는 센서1 쪽으로 분산되는 경향을 나타낸다. 이것은 실제로 인장 하중에 의한 파괴가 처음에는 DEN 노치부에서의 섬유파단에 집중되었으나 중반 이후 시편의 길이 방향으로 splitting이 발생하였던 점과 일치한다. 유사한 결

과를 얻은 Fig. 5(b)는 DEN 노치를 중간이 아닌 위치에 두어 위치표정의 유효성을 확인하고자 하였는데, Fig. 5(a)에 비하여 다소 정확도가 떨어지지만 센서와 발생원의 거리에 대한 센서 자체의 크기를 감안할 때 실용적인 의미가 충분하다고 할 수 있다[6].

### 3.3. PVDF 센서로 탐지된 AE신호의 파형분석

접합부의 피로손상과 노치를 가진 적층판 시편의 인장파괴 과정에서 PVDF 센서로 탐지된 AE 신호의 파형과 주파수 스펙트럼은 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

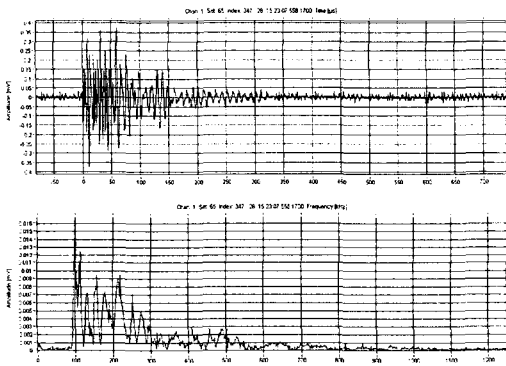


Fig. 6 Waveform and its power spectrum of the mode II signal from the fatigue damage

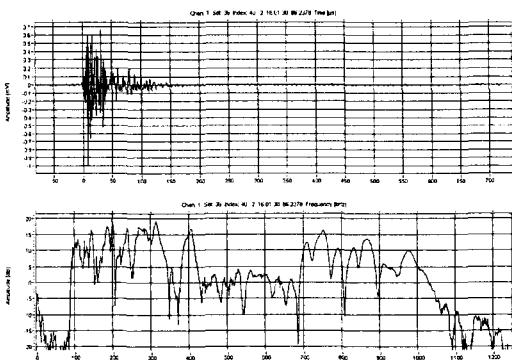


Fig. 7 Waveform and its power spectrum of the mode I signal from the tensile failure of DEN specimens of CFRP/UD laminates

매우 다른 파괴기구로부터 발생한 2가지 유형의 신호는 분명한 차이를 보이고 있다. 접착층의 피로손상은 전단파괴에 의한 mode II 신호를, 노

치부에서의 섬유파단은 인장파괴에 의한 mode I 신호를 보여준다[7]. 또한 Fig. 7에서처럼 섬유파단에 의한 신호가 100kHz-1MHz에 이르는 광대역 특성을 가졌음을 확인한 것은 특기할 만한 사실이며, 실제 대역폭은 사용된 장비에 의해 제한받지 않을 경우 이보다 훨씬 고주파수 성분을 보일 것으로 사료된다.

## 4. 결론

PVDF 센서는 복합재료 내부에 용이하게 매몰될 수 있으며, 영구적으로 부착하는 소모성 센서의 개념으로 대형 복합재료 구조의 실시간 건전성 진단에 기술적 및 경제적으로 충분히 활용될 수 있다.

## 후기

본 연구는 미국 Air Force Office of Scientific Research의 일부 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Brown, L. F., "Design Consideration of Piezoelectric Polymer Ultrasound Transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **47**, 2000, pp. 1377-1396.
- (2) Foster, F. S., Harasiewicz, K. A. and Sherar, M. D., "A History of Medical and Biological Imaging with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Transducers," *ibid*, **47**, 2000, pp. 1363-1371.
- (3) Brown, L. F., "Disposable PVDF Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing Applications," *ibid*, **43**, 1996, pp. 560-567.
- (4) Stiffler, R. and Henneke, E. G., "The Application of Polyvinylidene Fluoride as an Acoustic Emission Transducer for Fibrous Composite Materials," *Materials Evaluation*, **41**, 1983, pp. 956-960.
- (5) Brown, L. F., Sisson, W. M. and Guerin, C. P., "Custom PVDF Transducers for Pulse-Echo Testing of Solid Rocket Motors for Detection of Propellant-to-Boot-Liner Unbonds," *Rev. of Progress in Quantitative NDE*, R.B. Thompson and D.E. Chimenti, eds., Plenum Press, New York, NY, **12B**, 1993, pp. 1123-1128.
- (6) Chang, F.K., ed., *Structural Health Monitoring: The Demands and Challenges; Proc. of the 3rd International Workshop*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- (7) Qin, M. and Dzenis, Y.A., "Analysis of Single-Lap Adhesive Composite Joints with Delaminate Adherends," *Composite B: Engineering*, 2002 (in press)