

광섬유 진동센서를 이용한 복합재료의 손상 및 파손검출

양유창* · 한경섭**

Damage and Failure Detection of Composites Using Optical Fiber Vibration Sensor

Y. C. Yang* and K. S. Han**

Key Words : Optical fiber sensor(광섬유센서), Smart structures(지능구조), Acoustic emission(음향방출)

Abstract

An intensity-based optical fiber vibration sensor is applied to detect and evaluate damages and fiber failure of composites. The optical fiber vibration sensor is constructed by placing two cleaved fiber end, one of which is cantilevered in a hollow glass tube. The movement of the cantilevered section lags behind the rest of the sensor in response to an applied vibration and the amount of light coupled between the two fibers is thereby modulated. Vibration characteristics of the optical fiber vibration sensor are investigated. Surface mounted optical fiber vibration sensor is used in tensile and indentation test. Experimental results show that the optical fiber sensor can detect damages and fiber failure of composites correctly.

1. 서론

지능형 구조물(smart structure)의 센서로서 광섬유센서는 기존의 센서에 비하여 가볍고 센서의 크기를 매우 작게 구성할 수 있으며, 감도가 뛰어나고 내장(embedding)이 용이하며, 작동온도 범위가 넓고, 전자기장의 영향을 받지 않으며 센서망(sensor array)을 구성하기 적합하다는 등의 많은 장점과 잠재적 가능성을 가지고 있어서 센서의 제작 및 적용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

복합재료 구조물의 파손은 모재균열(matrix cracking), 층과 층 사이가 분리되는 층간분리(delamination), 섬유파손(fiber breakage), 섬유와 모재의 계면분리(fiber-matrix debonding) 등으로 구분되며 이와 같은 파손모드는 복합재료 구조물 내부에 혼합된 다차원적인 파손형태로 나타난다. 따라서 복합재료 구조물을 실제 구조물에 적용하기 위

해서는 높은 신뢰성과 안전성을 확보해야 하며, 이를 위해서는 복합재료 구조물의 파손 특성의 이해와 실질적인 손상검출 방법의 발전이 요구되고 있다.

복합재료 구조물의 손상 검출방법으로는 초음파를 이용한 C-scan, X ray 검사법, 구조물의 손상이 발생하였을 때 나타나는 음향방출을 감지하는 AE(acoustic emission) 법 등의 비파괴검사가 이용된다. 이러한 비파괴검사는 작업자의 숙련된 기술과 많은 경험이 요구되며, 작업자의 손이 미치지 않는 부분이나 구조물이 작동중일 경우 검사 방법이 용이하지 않은 단점이 있다. 복합재료 구조물의 파손은 거시적인 측면과 미시적인 측면이 혼합된 형태로 나타나 해석하기에 많은 한계점을 드러내고 있다. 복합재료를 실제 구조물에 적용하고 구조물의 신뢰성을 확보하기 위해 광섬유 센서를 이용한 파손 검출 연구는 매우 중요하다.

광섬유센서를 이용한 복합재료 구조물의 진동 및 파손감지에 관한 연구는 1980년대 후반 이후에 본격적으로 이루어지기 시작하였다. Doyle 등[1]은 광강도형 광섬유 진동 센서(intensity-based optical fiber vibration sensor)를 이용하여 충격시험을 통해 복합재료의 충격손상 감지에 관한

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

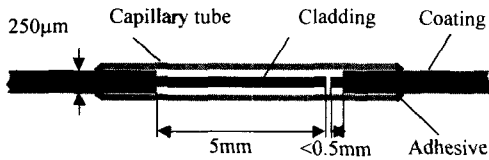


Fig. 1 Schematic illustration of optical fiber vibration sensor

연구를 수행하였다. Akhavan 등[2]은 복합재료의 표면에 EFPI 를 부착시키고 저속 충격실험을 수행하였다. EFPI 신호는 변형률 게이지(strain gage)와 PVDF film 센서와 비교하여 비슷한 경향을 보였으나 EFPI 의 게이지 길이 및 방향성에 다소 영향을 받는 결과를 보였다. 또한, 광강도형 광섬유 진동센서의 원리가 기본적으로 외팔보 형태의 광섬유의 진동을 이용하는 사실로부터 저주파 가속도 센서로의 응용에 관한 연구[3,4]도 이루어졌다. 층간분리에 관한 연구로는 Bhatia[5] 등이 복합재료 평판 앞뒤 면에 EFPI 를 부착하고 압전가진기로 초음파 펄스를 가진시켜 EFPI 신호의 응답특성 감쇠정도로 층간분리를 검출하는 방법을 제시하였다. Park 과 Hong[6] 등은 EFPI 를 이용하여 좌굴시점의 검출과 층간분리 성장을 검출하였다. Tsuda[7] 등은 광섬유 Michelson 센서를 이용하여 복합재료의 충격 및 인장 시험에서의 손상신호를 취득하였다.

본 연구에서는 보다 간단한 형태의 광섬유 진동센서를 제작하고 진동 신호특성을 알아보았다. 제작된 광섬유 센서를 복합재료 시편의 표면에 부착하여 압입시험 및 인장시험을 통하여 복합재료의 손상 및 파괴정도를 감지하였다. 또한 상용으로 사용되는 AE 센서 신호와의 비교를 통하여 광섬유 진동센서의 성능을 검증하였다.

2. 광섬유 진동센서의 측정원리 및 제작

일반적으로 광섬유는 주 구조인 코어(core)와 클래딩(cladding), 그리고 코어와 클래딩을 보호하기 위한 코팅(coating)의 세 부분으로 구성되어 있다. 광섬유에 입사된 빛은 주성분이 유리인 코어와 클래딩의 경계면에서의 굴절률 차이에 의해 반사가 이루어지며 전파되고, 특히 경계면에서 전 반사가 이루어질 때 빛의 손실이 가장 적어진다.

광섬유센서의 종류는 앞에서 서술한 것과 같이 다양한 종류가 있으며 그 중에서 광강도형 광섬유 센서와 EFPI 등은 기본적으로 절단된 양쪽의 광섬유 사이에 공기층을 가진 구조이다. 광섬유와 공기의 굴절률의 차이로 광섬유에서 공기층으로 입사된 빛은 광섬유의 경계면에서 연속적으로 반사와 투과를 하게 된다. 이러한 형태의 광섬유 센서는 단면에서 반사되어서 나오는 신호들의 간섭현상을 이용하는 방법과 투과된 빛의 강도를 이용하는 방법 등의 두 가지로 구분된다. 간섭현상을 이용하는 광섬유센서는 분해능이 사용되는 광원의 파장 단위 정도로 매우 높은 정밀도를 가지고 있으나 측정신호의 처리과정이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 그에 비하여 광강도형 광섬유센서는 민감도는 다소 떨어지지만 구조가 매우 간단하고 신호처리 방법이 간편하고 고가의 장비를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다. 광섬유 진동센서는 일반적인 광섬유 센서의 특성과 마찬가지로 빛의 투과정도나 반사정도를 이용할 수 있는데 본 연구에서는 투과량의 변화로 진동을 감지하는 광강도형 광섬유 진동센서를 사용하였다. 그리고 그 구조는 유리 모세관 내부에 수직으로 절단된 두 광섬유 단면이 동일선상에 위치시키는 면에서 일반적인 EFPI 나 광강도형 광섬유 변형센서의 구조와 유사하다.

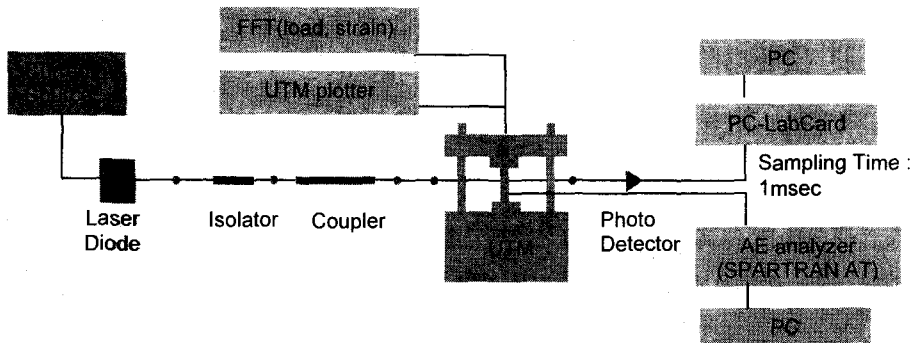
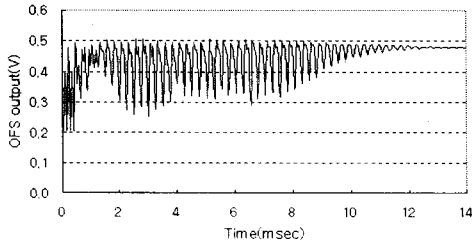
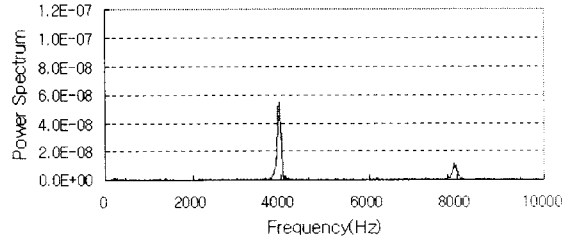


Fig. 2 Schematic illustration of experimental set up



(a)



(b)

Fig. 3 Time trace and power spectrum of optical fiber vibration sensor signal

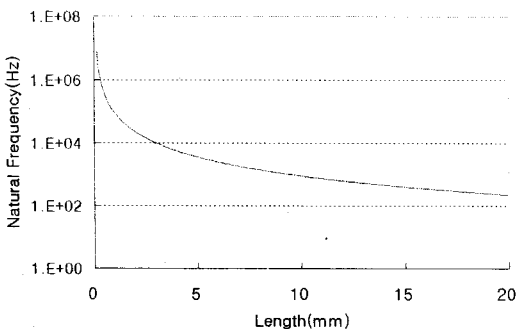
Fig. 1 은 광섬유 진동센서의 모습을 보여주고 있다. 광섬유 진동센서의 제작과정은 다음과 같다. 적당한 굵기의 모세관을 13mm-15mm 정도의 길이로 수직으로 절단한 후 아세톤 등을 이용하여 모세관에 묻어있는 이물질을 깨끗이 제거한다. 실험에서 사용된 광섬유는 3M사에서 제작된 FS-SN-3224 단일모드 광섬유이다. 두 광섬유를 충분한 길이로 자른 후 각각의 코팅부분을 피복 제거기(jacket stripper)를 사용하여 제거하고 이물질이 남아있지 않도록 아세톤을 이용하여 깨끗이 닦아낸다. 광섬유 끝의 단면의 상태는 빛의 전송에 매우 중요하므로 광섬유 절단기(cleaver)를 사용하여 절단하고 현미경을 이용하여 단면이 수직으로 절단되었는지의 여부와 이물질이 묻었는지의 여부를 확인한다. Fig. 1(b)에서와 같이 남아있는 클래딩 부분이 각각 약 5mm, 0.5mm 가 되도록 절단한다. 준비된 모세관을 미세조정장치에 고정시키고 현미경과 3 축-이동기(xyz-translator)를 사용하여 광섬유를 모세관에 삽입한 후 예폭시로 모세관과 광섬유를 접촉 시킨다. 완전히 경화가 끝난 후 위와 같은 과정을 모세관의 반대쪽 부분에 대해서 실시한다. 오실로스코프를 통하여 센서의 신호특성을 확인하며 현미경과 미세조정장치를 이용하여 광섬유의 간극은 40-50 μm 를 유지하도록

한다.

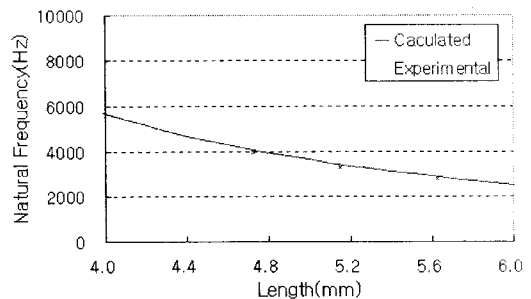
제작된 광섬유 진동센서는 진동이 발생했을 때 외팔보 형태의 광섬유(cantilevered optical fiber)가 진동을 하게 되고, 그에 따라 맞은 편 광섬유로 전해지는 빛의 양이 변화하여 진동을 감지하게 된다. 센서의 공진 주파수는 광섬유 외팔보의 길이를 변화시킴으로써 수천 Hz 정도의 범위에서 조절할 수 있다. 광섬유 외팔보의 길이가 짧아질수록 공진주파수는 높아지고 센서의 민감도는 떨어지며 길이가 길어지면 그 반대의 현상이 나타나게 된다. 타 연구[1]에서는 모세관에서의 광섬유 클래딩이 fiber support tube 를 통하여 삽입되도록 제작하였으나 본 연구에서는 코팅부분을 그대로 삽입하여 보다 간단한 형태의 광섬유 진동센서의 제작이 가능하였다.

3. 실험 및 결과

본 연구에서는 광섬유 센서에 입사하는 빛으로 파장이 1310nm 인 레이저 다이오드를 사용하였으며, 입사된 빛은 다시 양방향 연계기(bidirectional coupler)를 사용하여 두 개로 분할되었다. 여기에 사용된 양방향 연계기는 Newport 에서 제작된 F-SLP-S2263S 를 사용하였고, 이것은 입사된 빛을 50:50 으로 분할하며 약 3dB



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of natural frequency of optical fiber vibration sensor

의 연결 손실을 갖는다. 이러한 방법으로 분할된 빛은 Newport 사의 FS-SK-SA 광섬유 접속기(fiber splicer)를 사용하여 각각 시편의 광섬유 센서로 연결되어 입사 된다. 광섬유 센서를 통과한 빛은 센서의 감지 정도에 따라 신호의 세기가 변화하며 광검출기(photo detector)에서 전압으로 인식된다.

제작된 광섬유 진동 센서는 시험편의 표면에 에폭시를 이용하여 부착하였으며 광검출기에 취득된 신호는 PC-LabCard 를 통하여 PC 에 저장되었다. AE 센서는 150kHz 공진주파수를 갖는 압전 변환자이며 AE 센서에 검출되어진 신호는 이득(gain)이 40dB 인 예비 증폭기를 통하여 이득이 20dB 인 추가 증폭기의 지원을 받는 PAC 사의 SPATRAN-AT 를 사용하여 저장, 해석하였다. 여기서 문턱값(threshold value)는 45dB로 하였다. Fig. 2 는 전체적인 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

3.1 광섬유 진동 센서의 진동 특성

Fig. 3 은 제작된 광섬유 진동 센서 자체의 진동 특성을 나타내는 그래프이다. 임의의 충격이 센서에 가해졌을 때 광섬유 진동 센서는 내부의 광섬유 외팔보의 진동에 의해 Fig. 3(a)와 같은 형태로 진동 신호를 나타내게 되며 광섬유 외팔보의 길이에 따라 다소의 차이는 있지만 대부분 15msec 이내에 진동이 대부분 감쇠되는 경향을 보인다. Fig. 3(b)는 (a)의 진동 신호를 주파수 분석한 그림으로 제작된 광섬유 진동 센서가 약 4000Hz의 고유진동수를 가짐을 나타내고 있다. 또한 마주보는 광섬

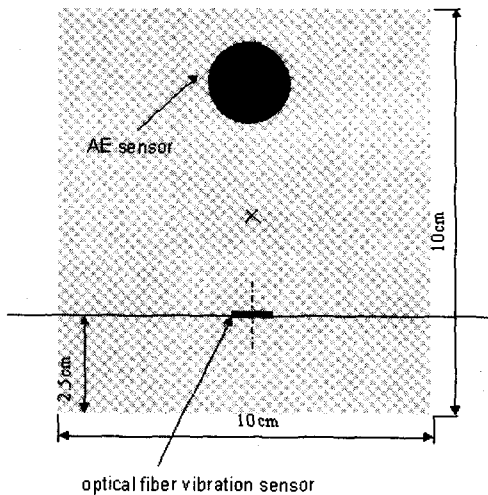


Fig. 5 Schematic of specimen for indentation test

유 끝면이 정확한 일직선상에 놓이지 않은 이유로 8000Hz 근방에서 두 배 진동모드가 나타나고 있다. 이러한 광섬유 진동 센서의 공진주파수는 광섬유 외팔보의 길이와 광섬유의 물리적 성질로 결정되며 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi} (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

여기서 l 은 광섬유 외팔보의 길이, A 는 광섬유 단면적, ρ 는 광섬유의 밀도, E 는 광섬유의 탄성계수, I 는 광섬유 단면의 관성 모멘트 등이다. 광섬유 외팔보의 길이를 20mm 이내에서 변화시키며 식 (1)에 대입하면 광섬유 진동 센서는 수백 Hz 에서 수십 kHz 사이의 고유진동수를 가지게 되며 위에서 설명한 바와 같이 광섬유 외팔보의 길이와 센서의 민감도 사이는 서로 반비례하는 경향을 보이게 된다. Fig. 4는 계산된 광섬유 진동 센서의 고유진동수와 측정된 센서의 고유진동수를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 광섬유 외팔보의 길이가 20mm 이내에서 변화할 때 광섬유 센서의 고유진동수는 수백 Hz 에서 수십 kHz 사이에서 변화함을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 제작된 세 개의 센서에 대하여 고유진동수의 계산값과 측정값을 비교하고 있으며 두 결과는 잘 일치하고 있다.

3.2 압입 시험

시편의 노출 상태가 정사각형이면서 압입 시험(indentation test)을 위한 고정장치를 제작하였다. 시편의 4 면은 모두 고정시켰으며 Fig. 5에서와 같이 시편의 크기는 100x100mm², 고정시켰을 경우 노출되는 부분의 크기는 70x70mm²이다. 압입 시험은 Shimadzu 사의 UTM(5 ton)을 사용하였다. 압

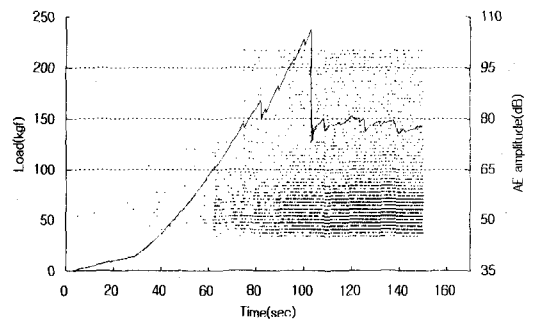


Fig. 6 Load-time curve and AE amplitude during indentation test

입자를 시편 표면 바로 위에 위치시키고 3mm/min의 변위제어로 시험을 수행하였다. 이때 압입자의 형태는 반구형태이며 지름은 12.7mm이다. 시편의 적층각은 $[(\pm 45)_2/0_2]_s$ 이다. 광섬유 진동센서는 굽힘변형에 취약하기 때문에 압입시험 시 굽힘변형의 영향을 받지 않도록 조심하여 시편 중앙에서 2.5cm 되는 부분에 부착하였다.

Fig. 6은 시간에 따른 하중의 변화와 AE 센서에 취득된 음향방출 신호의 진폭(amplitude)을 나타내고 있다. 80 초 이전의 하중선도에서는 변위가 증가함에 따라 하중이 증가하고 복합재료의 모재균열 및 층간분리에 의한 손상신호가 AE 센서에 의해 45-65dB의 크기로 감지됨이 관찰되었다. 약 80 초 이후부터 약 105 초까지는 모재균열 및 층간분리의 양이 많아지며 65dB 이하의 중저 진폭의 신호가 점점 증가함과 동시에 섬유가 파괴될 때 발생하는 90-100dB의 높은 진폭의 신호가 관찰된다. 섬유파괴 신호는 하중선도에서의 불연속성으로부터 어느 정도 관찰할 수 있다. 약 105 초 이후에서는 압입자가 균열 사이를 넓히며 관통하는 상태로 AE 센서신호는 거의 모든 영역의 진폭에서 검출되고 있다.

Fig. 7은 손상 및 균열이 본격적으로 발생하는 시간대인 70 초 이후에서의 AE 센서신호와 광섬유 센서신호를 비교하고 있다. 두 센서의 부착 위치가 다르고 손상 발생에 의한 탄성파의 전파 모드의 불일치성 때문에 두 센서의 신호 크기는 정확히 비례하지 않고 있다. 두 센서의 신호를 비교하였을 때 광섬유 진동센서는 복합재료 내부의 모재 균열 등에 의한 미약한 손상 신호 일부분을 제외하고는 상용 센서인 AE 센서와 거의 동일하게 복합재료 손상 및 파괴 신호를 감지할 수 있었다.

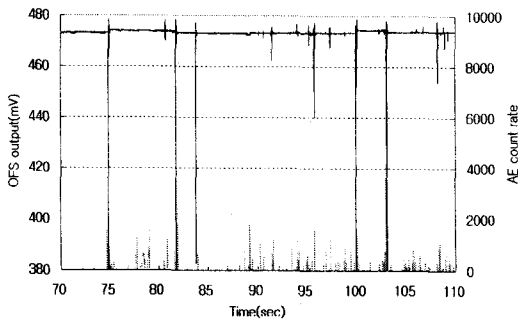


Fig. 7 AE count rate and OFS signal during indentation test(70-110sec.)

3.3 인장시험

Fig. 8에서와 같이 인장시험은 일방향 $[0_6]$ 의 적층각을 갖고 15cm의 게이지 길이를 갖는 시편에 AE 센서, 변형률 게이지, 광섬유 진동센서를 각각 표면에 부착시켜 수행되었다. 축방향의 변형의 영향을 없애도록 광섬유 진동센서는 시편의 길이 방향에 수직하게 부착되었다. 인장시험은 압입시험과 마찬가지로 UTM을 이용하여 3mm/min의 변위제어로 수행되었다.

Fig. 9는 인장시험 시 시간에 따른 하중의 변화와 AE 센서에 취득된 음향방출 신호의 진폭을 나타내고 있다. 인장시험에 사용된 시편은 압입시험에 사용된 12층의 시편에 비하여 6층으로 상대적으로 얇으며 일방향으로 적층되어 축방향 하중에 의한 섬유 파손이 주된 파손 기구이기 때문에 AE 센서에 취득된 신호의 총량은 압입시험 시에 비교하여 상대적으로 작은 경향을 보이고 있다. 시편에 부착된 변형률 게이지는 약 1%의 변형에서 떨어져나가 시편파손까지의 변형률은 측정하지 못했다. 시편의 손상 정도에 따른 AE 신호 특성은 압입시험에서와 유사하였다. 45 초 및 105 초 이전에 AE 센서에 취득된 신호의 크기는 65dB 이하의 중저 레벨의 신호가 누적되다가 약 45 초, 105 초 근방에서 45-100dB의 모든 영역의 강한 신호가 나타나 인장시험에서 시편 파괴 이전의 주요한 내부 손상은 약 45 초, 105 초 근방에서 일어났음을 보이고 있다.

Fig. 10은 인장시험 중에 취득된 AE 센서 신호와 광섬유 진동센서 신호를 비교하고 있다. 일방향으

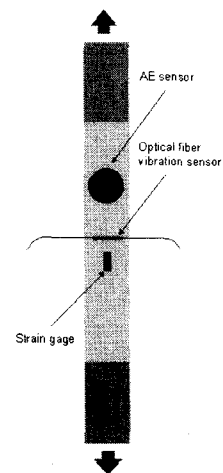


Fig. 8 Schematic of specimen for tensile test

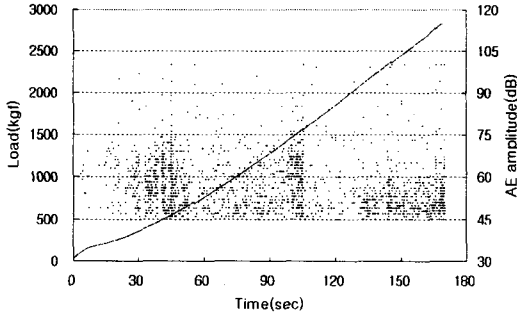


Fig. 9 Load-time curve and AE amplitude during tensile test

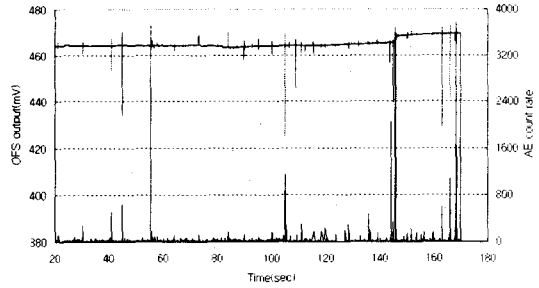


Fig. 10 AE count rate and OFS signal during tensile test

로 적층되어 섬유파손이 주요한 손상원인이 된 인장 시험에서는 광섬유 진동센서의 신호가 AE 센서의 신호와 거의 정확히 일치함을 보이고 있다. 약 145 초 근방에서 광섬유센서 신호가 튀는 현상은 내부 섬유 파괴가 강하게 발생하여 부착된 광섬유 진동센서의 형태가 미세하게 변형된 것에 기인한 것으로 사료된다.

4. 결론

광섬유 외팔보를 이용한 보다 간단한 형태의 광섬유 진동센서를 제작하였다. 광섬유 진동센서 내부의 광섬유 외팔보의 길이를 20mm 이내에서 변화시킬 때 센서 자체의 고유진동 주파수는 $10^2 - 10^5$ Hz 사이에서 변화하며 제작된 센서의 진동특성은 계산값과 잘 부합하였다. 또한 복합재료 표면에 광섬유 진동센서를 부착하고 압입 및 인장 시험을 수행한 결과 복합재료의 손상 및 파손 신호를 비교적 정확히 취득할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Doyle, C. and Fernando, G., 1998, "Detecting impact damage in a composite material with an optical fibre vibration sensor system," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 543-549.
- (2) Akhavan, F., Watkins, S. E. and Chandrashekhara, K., 1998, "Measurement and analysis of impact - induced strain using extrinsic Fabry - Perot fiber optic sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 745-751.
- (3) Lopez-Higuera, J. M., Morante, M. A. and Cobo, A., 1997, "Simple low-frequency optical fiber accelerometer with large rotating machine monitoring applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 7, pp. 1120-1130.
- (4) Morante, M., Cobo, A., Lopez-Higuera, J. M. and Lopez-Amo, M., 1996, "New approach using a bare

fiber optic cantilever beam as a low-frequency acceleration measuring element," *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 6, pp. 1700-1706.

- (5) Bhatia, V., Schmid, C. A., Murphy, K. A., Claus, R. O., Tran, T. A., Greene, J. A. and Miller, M. S., 1995 "Optical fiber sensing technique for edge-induced and internal delamination detection in composites," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, pp. 164-169.
- (6) Park, J. W., Ryu, C. Y., Kang, H. K. and Hong, C. S., 2000, "Detection of buckling and crack growth in the delaminated composites using fiber optic sensor," *J. of Composite Materials*, Vol. 34, No. 19, pp. 1602-1623.
- (7) Tsuda, H., Takahashi, J. and Urabe, K., 1999, "Damage monitoring of carbon fiber-reinforced plastics with Michelson interferometric fiber-optic sensors," *J. of Material Science*, Vol. 34, pp. 4163-4172.