섬유-금속 적층판의 압입 하중에서의 손상 및 파손 검출

양유창* • 한경섭*

Damage and Failure Detection of Fiber-Metal Laminates Under Indentation Load

Y. C. Yang and K. S. Han

Key Words : Optical Fiber Sensor, Fiber-Metal Laminate, Damage Detection

ABSTRACT

Optical fiber vibrations sensors (OFVSs) and extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) were used in damage monitoring of fiber-metal laminates(FML). The optical fiber vibration sensor and EFPI were applied in order to detect and evaluate the strain, damage and failure of FML. Damages in composites, such as matrix cracks, delamination and fiber breakage may occur as a result of excessive load, fatigue and low-velocity impacts. Indentation test was performed with the measurement of optical signal and acoustic emission (AE). The signals of the optical fiber vibration sensor due to damages were quantitatively evaluated by wavelet transform. It was found that damage information of comparable in quality to acoustic emission data could be obtained from the optical fiber vibration sensor signals.

1. 서 론

기존의 비파괴 검사법은 작업자의 손이 미치지 않는 부분이나 구조물이 작동 중, 또는 구조물 전체의 검사가 필요한 경우 검사가 용이하지 않은 단점이 있다. 복합재 구조물에서의 손상에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔으나, 복합재 구조물의 파손은 거시적인 측면과 미시적인 측면이 혼합된 현태로 해석적 접근에는 많은 한계점이 나타나고 있다. 복합재 구조물의 적용과 신뢰성을 확보하기 위해 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 손상 및 파손 검출에 대한 연구는 매우 중요하다.

* 포항공과대학교 기계공학과

지능구조물의 센서로서 각광 받고 있는 광섬유 센서는 재료로 사용되는 광섬유가 가벼우며 직경이 매우 작고 유연하여 설계자가 원하는 모양과 크기로 센서를 쉽게 구성할 수 있다. 현재 광섬유 센서는 군수 산업과 일반 산업에 광범위하게 적용되고 있고 의료기기 및 환경분야의 센서로도 많은 적용이 이루어지고 있으며, 상당부분 산업계에 상용화된 제품으로 생산되고 있다. 또한 교량이나 터널, 그리고 댐 등의 사회 기본 시설(infrastructure)에의 응용 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 광섬유 지능 구조물에 대한 연구는 기존의 센서로서는 수행하기가 어려웠던 영역에 대한 광섬유 센서의 적용 가능성을 보여주고, 광섬유 센서가 차세대 구조물의 가장 유력한 센서로서 부각되고 있음을 보여주고 있다.

Kwon 등[1]은 마이켈슨 간섭계를 이용하여 복합재 직교적층판의 4 점 굽힘시험 중에 발생하는 손상을 검출하였다. Tsuda 등[2]은 같은 센서를 복

합재 표면에 부착하여 저속 충격 및 인장시험 중의 내부 손상을 감지하였다. Yang 과 Han[3]은 광섬유 진동센서를 사용하여 FRP 의 인장 및 압입 하중에서의 손상을 검출하였다. Park 등[4]은 층간 분리가 존재하는 복합적층 시편의 좌굴 실험을 통해 내부 균열 진전을 효과적으로 검출할 수 있음을 보였다. 최근 들어 가속도 센서나 압전 센서를 사용하여 측정하기에 적합하지 않은 구조물의 진동을 감지하기 위하여 광섬유 진동센서의 개발이 이루어지고 있다. Doyle 과 Fernando[5]는 광강도를 이용한 광섬유 진동센서를 제작하고 이를 이용하여 복합적층판에서의 충격 손상을 감지하는 연구를 수행하였다. 금속 적층판(FML)은 섬유와 금속을 차례로 적층한 다음 경화시켜 제작된 재료로서, 금속에 비하여 가볍고 높은 강도를 가지는 동시에 피로 균열 지연 특성이 우수하다. FML 에 대한 연구는 인장 특성 중심의 기계적 물성이나 피로 특성을 중심으로 연구되고 있고 압입 등 집중하중에 대한 연구결과가 단편적으로 보고되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 복합재 구조물의 손상 및 파손 감지를 위해 진동에 민감한 광섬유 진동센서를 제작하였다. 섬유-금속 적층판(fiber-metal laminate, FML)의 압입 하중 하에서의 변형, 손상 및 파괴를 광섬유 진동센서와 간섭형 광섬유 센서를 이용하여 감지하고 기존의 비파괴 검사법의 하나인 음향방출법(AE)의 결과와 비교하였다.

2. 광섬유 진동센서

광섬유 진동센서(OFVS)는 유리모세관 내부에 두 광섬유 단면이 마주보는 형태를 가지고 있다. 한 쪽의 광섬유 클래딩 부분을 외팔보 형태로 제작하여 진동이 가해졌을 때 광섬유 외팔보가 진동을 하게 되고 그에 따라 반대편으로 전해지는 빛의 세기가 변화하여 진동을 감지하는 원리이다. 광섬유의 두 단면은 정확히 수직을 유지해야 하며 이물질이 묻어있지 않아야 한다.

광섬유 진동센서의 신호는 두 개의 마주보는 광섬유간의 반지름 방향으로의 어긋남(radial offset), 축 방향으로 떨어진 거리(axial offset), 각도의 어긋남(angular offset) 등에 의해서 변화할 수 있다. 이 중에서 센서에 가해지는 진동에 의해 발생하는 반지름 방향으로의 어긋남이 센서 신호변화에 주요한 영향을 미치며, 축 방향으로 떨어진 거리는 센서를 제작할 때 정해지고 각도의 어긋난 정도는 무시할 만하다. 타 연구자들은 광섬유 클래딩에 사각형의 틀을 만들고 한 쪽 끝에 슬릿을 내거나, 지지 튜브를 따로 제작하여 클래딩이 삽입되도록 하였으나 본 연구에서는 광섬유의 자켓 부분을 그대로 모세관에 삽입하여 보다 간단한 형태의 광섬유 진동센서를 구현할 수 있다. 사용된 광섬유는 피복 지름 250μm, 클래딩 지름 125μm 의 삼성전자의 단일모드 광섬유를 사용하였다.

광섬유 진동센서의 자체 진동 특성은 광섬유 외팔보의 길이에 따라 좌우되며 외팔보의 길이가 길어질수록 센서 자체의 고유진동수는 낮아지고 민감도는 증가하며 길이가 짧아지면 반대의 효과가 일어나게 된다. 또한 광섬유를 통과한 빛은 공기 중에서 퍼져나가기 때문에 두 광섬유 단면의 간극이 작을수록 광섬유 진동센서의 민감도는 증가하게 된다. 광섬유 외팔보는 보통 수 mm 에서 약 20mm 내의 길이로 제작한다.

3. 재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 금속판은 알루미늄(Al1050)이며, 섬유층은 탄소섬유/에폭시 prepreg (㈜SK 케미칼, USN125A)를 이용하였다. FML 은 두께 0.2mm 의 Al1050 을 이용하여 제작하였다. FML 의 제작 과정 중 금속판과 섬유층의 결합력을 높이는 방법으로 일반적으로 사용되는 FPL(Forest Products Lab.) 에칭을 이용하여 금속판의 표면처리를 하였다. 이렇게 준비된 금속판을 prepreg 과 적층하여 Hot Press 를 이용하여 성형하였다. 시편은 [Al/θ/-θ/Al/-θ/θ/Al]의 적층 구조를 가진다. 편의를 위하여 시편의 명칭은 적층각이 θ일 경우 FML[θ/-θ]라 하였다.

압입 시편의 크기는 100x100mm^2 이며 ASTM 3763 을 참조하여 지름 76mm 의 원형으로 구속되게 하였다. 한 쪽 면으로부터 각각 30mm, 35mm 떨어진 곳에 광섬유 진동센서와 EFPI 를 부착하였다. 압입자의 형태는 일반적인 충격시험에서 사용하는 충격체와 동일한 형상을 가지도록 제작하였다. 압입자의 끝은 반구형태이며, 지름은 12.7mm 이다. 압입 시험은 5 톤 용량의 UTM(Shimadzu Co.)을 사용하여 5mm/min 의 변위제어로 수행하였다. AE 센서는 150kHz 공진주파수를 갖는 압전변환자이며 압입시험에서 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)은 45dB 로 하였다. 광검출기에 취득된

광섬유 센서의 신호는 PC-LabCard 를 통하여 각각 1000 samples/sec 의 비율로 PC에 저장되었다.

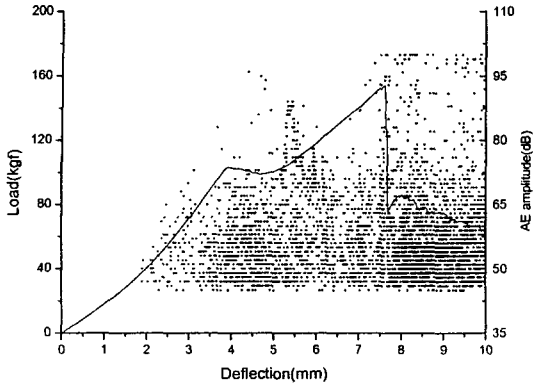

Fig. 1 Load-displacement curve and AE amplitude during indentation test

센서에 취득된 손상신호는 국부 해석(local analysis)이 가능한 웨이블릿 변환(wavelet transform, WT)을 사용하였다. 복합재 구조물의 파손과 손상이 발생할 때의 신호는 대부분 급격한 변형을 유발하고 이러한 신호의 특성은 과도기적 성향이 강한 신호이므로 이 분석방법은 매우 유용하다. 신호처리는 MATLAB toolbox 를 사용하였다. WT 에 사용된 기본함수는 다부치(Daubechy) 함수(db4)를 사용하였으며 decomposition 은 한 차례 수행하였고 WT 후에 노이즈 레벨의 신호를 제거하기 위해 de-noising 을 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 1 은 FML[0/0] 시편의 시간에 따른 하중의 변화와 AE 센서에 취득된 음향방출 신호의 진폭을 나타내고 있다. 하중선도는 변위의 증가에 따라 하중이 증가하다가 첫 번째 피크를 지나 감소하며 다시 하중이 증가하여 두 번째 피크를 지나게 된다. 이러한 것은 동일한 방향으로 적층된 FML 의 압입시험에서의 공통된 특징이다. 그래프에서 변위가 약 2㎜ 까지는 AE 신호가 거의 발생하지 않고 있으며 하중선도의 첫번째 피크점인 4㎜ 이하에서는 70dB 이하의 중저 진폭의 신호들이 나타나고 있다. 이러한 중저 진폭의 신호는 압입자가 시편에 압력을 가하면서 FML 에 알루미늄의 변형과 국부적인 모재균열 및 층간분리를 발생하게 함에 의한 약하고 스케일(scale)이 작은 손상 신호이다. 첫번째 피크를 지나면서 섬유를 따라 균열이 성장하게 되고 그에 따라 4㎜ 이상의 구간에서 80-90dB 의 중고 진폭의 신호가 나타나기 시작하고 있다. 6-7㎜ 부근의 구간에서는 진폭이 작아지고 낮은 count 가 주로 발생하고 했는데 이것으로 보아 시편의 구속조건에 의해 균열의 벌어짐이 어느 정도 억제되고 섬유가 하중을 지지하는 단계인 것으로 예상된다. 약 7㎜ 부근에서부터 90dB 이상, 높은 count 수의 신호가 발생하고 있다. 변위가 약 7.6㎜ 이상부터는 압입자가 닿는 부분의 섬유들이 거의 동시에 파괴되고 압입자가 시편을 관통하는 부분이다.

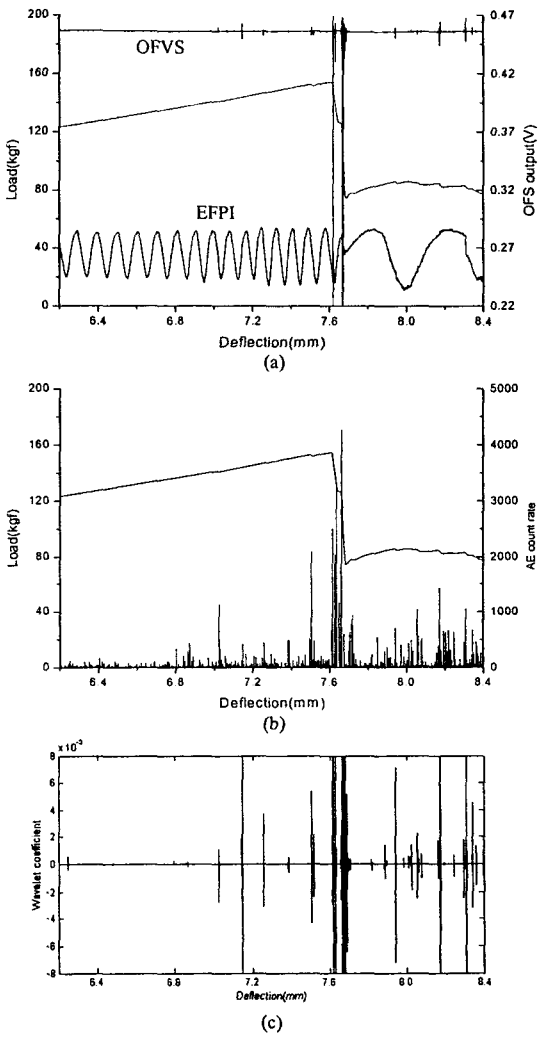

Fig. 2 Load-deflection curve and (a) OFS signal, (b) AE count, (c) WT of OFVS signal during indentation test(6.2-8.4mm).

압입자의 진행을 방해하는 섬유의 파손이 끝난 후 압입자는 균열 사이를 넓혀가며 전진하게 되고 이 때에 나타나는 AE 진폭 신호는 중고 진폭의 잔여 섬유의 파손신호와 저 진폭에서 나타나는 압입

자와 시편의 마찰에 의한 여러 가지 잡음이 뒤섞인 형태로 거의 모든 영역의 진폭에서 나타난다. OFVS 의 신호는 실험 초기에 거의 변화가 없다가 하중선도의 첫 번째 피크 점을 지나면서 약간의 변화를 보여주었고 본격적인 섬유 파손이 발생하는 7㎜ 부근에서부터 손상 신호가 많이 취득하였다.

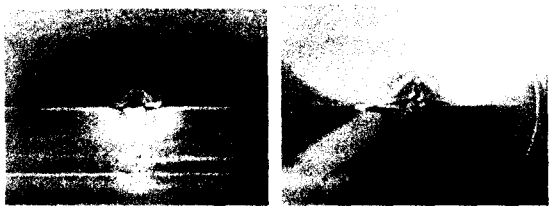

Fig. 3 (a)Front and (b)back face of FML[0/0] at final failure

Fig. 2 는 변위 6.2-8.4㎜ 구간에서의 하중선도와 광섬유 센서 신호, AE count 들을 보여주고 있다. 변위 6.2㎜ 이하의 구간에서는 섬유 방향으로 균열이 성장하다가 억제되고 섬유가 하중을 지지하는 단계이기 때문에 섬유의 파단은 거의 없으며 그에 따라 상대적으로 약한 손상 신호가 주로 검출되었다. 위 그래프는 하중선도의 두 번째 피크 점에 가까워옴에 따라 하중을 지지하는 일부 섬유들이 파손되기 시작하고 그에 따라 많은 손상 신호가 검출되기 시작하는 구간이다. Fig. 2(a)의 하중선도에서 알 수 있듯이 7.6㎜ 부근에서 순간적으로 두 번에 걸쳐 시편내부의 섬유중들이 파괴되었다. EFPI 신호는 7.6㎜ 이후부터 압입자가 시편을 관통하면서 EFPI 부착위치에서의 변형 발생이 거의 이루어지지 않아 간섭프린지의 간격이 현저하게 넓어졌다. Fig. 2(c)의 OFVS 신호를 WT 한 결과는 일부 약한 손상 신호를 제외하고 AE 의 결과와 비슷하게 손상발생 시점을 찾아내고 있다. AE 신호 데이터를 참조해 보면 OFVS 는 90dB 이상으로 나타나는 섬유 파손 신호는 거의 정확이 감지하고 있으며 그보다 작은 70, 80dB 정도의 손상 신호도 어느 정도 감지가 가능한 것을 알 수 있었다. 7.6㎜ 부근에서와 같이 많은 섬유들이 짧은 손간에 거의 동시에 파괴되는 대단히 강한 손상신호가 발생했을 때는 OFVS 내부의 광섬유 외팔보의 진동이 감쇠되기 전에 연이은 손상신호를 취득함에 따라 손상 신호간의 명확한 구분이 힘든 특성이 있다.

Fig. 3 은 FML[0/0] 시편의 압입시험 후의 시편의 형상을 보여주고 있다. 전면의 사진은 균열의 성장이 섬유 방향인 수평방향으로 이루어지고 있다는 것을 잘 보여주고 있다. 후면의 사진은 균열의 성장이 원형 구속 경계 부근까지 이루어졌으며 이러한 구속조건에 의해 균열이 계속 벌어지지 못하고 사진의 중간부분에 수직으로 나타난 것과 같이 섬유층의 파단으로 이어졌다는 것을 잘 보여주고 있다.

5. 결 론

FML 의 압입 시험에서 OFVS 의 신호를 시간 영역에서의 분석이 가능한 WT 를 사용하여 손상 및 파손을 검출하였다. 비교적 저렴한 비용으로 구성된 OFVS 센서 시스템은 넓은 대역의 주파수 특성을 갖는 AE 센서를 장착한 고가의 AE 장비와 거의 상응하는 손상 신호를 감지할 수 있었다. OFVS 는 섬유가 파손될 때 나타나는 90dB 이상의 높은 count 의 손상 신호는 거의 정확히 취득하였으며 상대적으로 작은 70-80dB 대의 손상 신호에 대해서도 어느 정도 신뢰성 있는 취득 결과를 보여주었다.

후 기

본 연구는 산업설비 안정성평가 연구센터 (SAFE) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Kwon, I. B., Kim, C. G., and Hong, C. S., 1997, "Simultaneous Sensing of the Strain and Points of Failure in Composite Beams with an Embedded Fiber Optic Michelson Sensor," *Composite Science and Technology*, Vol. 57, pp. 1639-1651.

(2) Tsuda, H., Takahashi, J., Urabe, K., and Ikeguchi, T., 1999, "Damage Monitoring of Carbon Fiber-Reinforced Plastics with Michelson Interferometric Fiber-Optic Sensors," *J. of Materials Science*, Vol. 34, pp. 4163-4172.

(3) Yang, Y. C. and Han, K. S., 2002, "Damage Monitoring and Impact Detection Using Optical Fiber Sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 11, No. 3, pp. 337-345.

(4) 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 Comp. Mat.*, Vol. 34, No. 19, pp. 1602-1623.

(5) 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.