

섬유-금속 적층판의 인장 및 압입 하중에서의 손상감지

양유창[†] · 한경섭^{*}

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

Yoo Chang Yang and Kyung Seop Han

Key Words : Optical Fiber Sensor(광섬유센서), Fiber-Metal Laminate(섬유-금속 적층판), Damage Detection(손상감지)

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. Tensile and 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 형태로 해석적 접근에는 많은 한계점이 나타나고 있다. 복합재 구조물의 적용과 신뢰성을 확보하기 위해 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 손상 및 파손 검출에 대한 연구는 매우 중요하다.

지능구조물의 센서로서 각광 받고 있는 광섬유 센서는 재료로 사용되는 광섬유가 가벼우며 직경이 매우 작고 유연하여 설계자가 원하는 모양과 크기로 센서를 쉽게 구성할 수 있다. 또한 광섬유

가 유리의 주성분인 실리카(silica)로 구성되어 있어서 복합재료의 강화섬유(reinforcement fiber)와 재료특성이 비슷하여 복합재 구조물의 물성저하를 일으키지 않으면서 쉽게 삽입할 수 있으며, 작동 온도의 범위가 매우 넓고, 또한 빛을 이용하므로 감도가 매우 뛰어나고 전자기파의 영향을 받지 않으며 센서망(sensor array)을 구성하기에 적합한 장점을 가지고 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

[†] 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : ycyang@postech.ac.kr
TEL : (054)279-5893 FAX : (054)279-5899

^{*} 포항공과대학교 기계공학과

합재 표면에 부착하여 저속 충격 및 인장시험 중의 내부 손상을 감지하였다. Yang 과 Han[3]은 광섬유 진동센서를 사용하여 FRP의 인장 및 압입 하중에서의 손상을 검출하였다. Park 등[4]은 층간분리가 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. FML에 대한 연구는 인장 특성 중심의 기계적 물성이나 피로 특성을 중심으로 연구되고 있고 압입 등 집중 하중에 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 인장 및 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 Fig. 1과 같이 유리 모세관 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

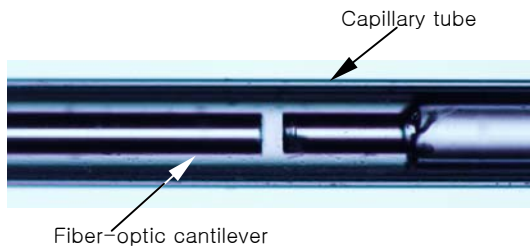


Fig. 1 Photograph of fiber-optic cantilever and gap separation in OFVS.

감지하는 원리이다. 광섬유의 두 단면은 정확히 수직을 유지해야 하며 이물질이 묻어있지 않아야 한다. 왼쪽으로 보이는 클래딩 부분이 외부로부터 진동이 가해졌을 때 진동하여 센서의 신호변화를 일으키는 광섬유 외팔보이다.

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 어긋남 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 250 μ m, 클래딩 지름 125 μ m의 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 mm에서 약 20mm 내의 길이로 제작한다.

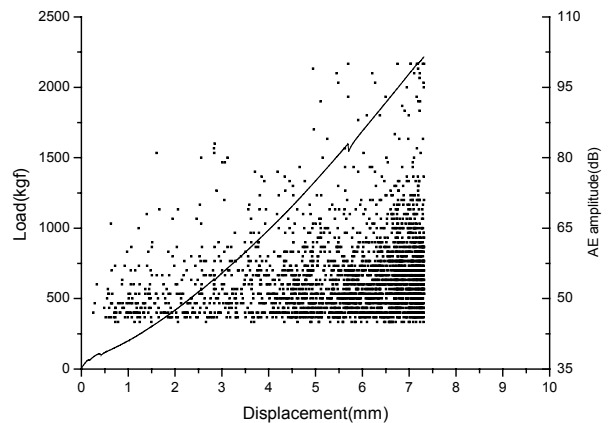


Fig. 2 Load-displacement curve and (a)AE amplitude, (b)AE count rate during tensile test.

3. 재료 및 실험방법

본 연구에서 사용한 금속판은 알루미늄(A11050)이며, 섬유층은 탄소섬유/에폭시 prepreg (주SK 케미칼, USN125A)를 이용하였다. FML 은 두께 0.2mm 의 A11050 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 [A1/θ/-θ/A1/-θ/θ/A1]의 적층 구조를 가진다. 편의를 위하여 시편의 명칭은 적층각이 일 경우 FML[θ/-θ]라 하였다. 인장시편의 경우 FML[0/0], 압입시편의 경우 FML[15/-15]의 적층각을 가진다.

인장실험을 위한 시편은 전체 크기가 250x25mm²이며 게이지길이는 150mm 로 제작하였다. 시편의 과단이 중앙에서 일어나도록 중간부분에 2mm 지름의 원형 노치(notch)를 내었다. EFPI 를 노치에서 20mm 떨어진 표면에 부착하였으며 광섬유 진동센서는 그 반대편 면에 부착하였다. 광섬유 진동센서에 인장하중이 가해지지 않도록 하중방향에 수직으로 부착되었다. 압입 시편의 크기는 100x100mm²이며 ASTM3763 을 참조하여 지름 76mm 의 원형으로 구속되게 하였다. 한 쪽 면으로부터 각각 30mm, 35mm 떨어진 곳에 광섬유 진동센서와 EFPI 를 부착하였다. 광섬유 진동센서는 굽힘변형을 받을 경우 신호가 제대로 전달되지 않는 특성이 있기 때문에 굽힘을 받지 않도록 고려하여 부착하였다. 압입자의 형태는

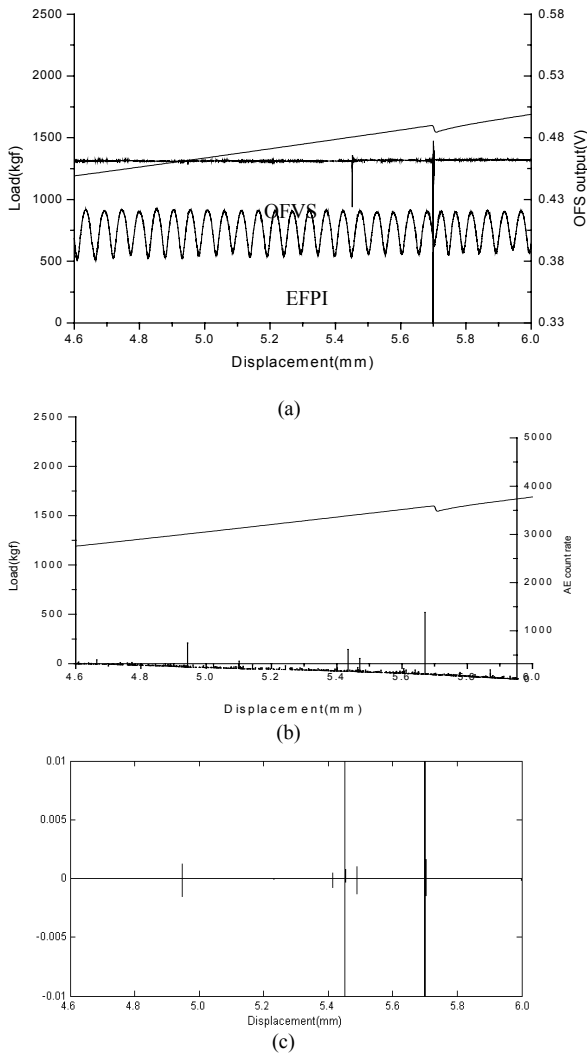


Fig. 3 Load-displacement curve and (a) OFS signal, (b) AE count, (c) WT of OFVS signal during tensile test(4.6-6.0mm).

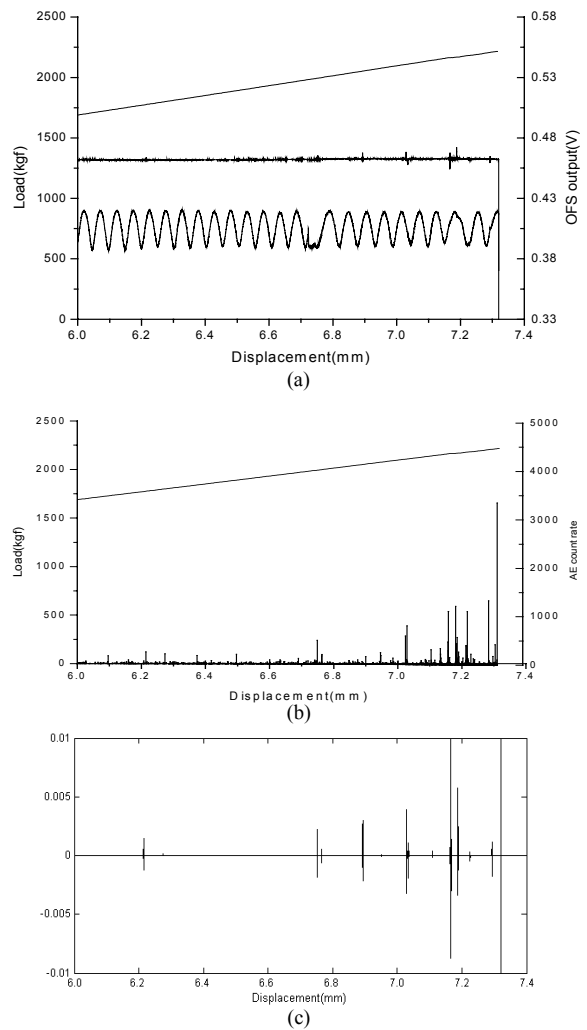


Fig. 4 Load-displacement curve and (a) OFS signal, (b) AE count, (c) WT of OFVS signal during tensile test(6.0mm-end of test).

일반적인 충격시험에서 사용하는 충격체와 동일한 형상을 가지도록 제작하였다. 압입자의 끝은 반구형태이며, 지름은 12.7mm 이다. 인장 및 압입 시험은 5 톤 용량의 UTM(Shimadzu Co.)을 사용하여 5mm/min 의 변위제어로 수행하였다. AE 센서는 150kHz 공진주파수를 갖는 압전변환자이며 압입 및 인장시험에서 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 45dB 로 하였다. 광검출기에 취득된 광섬유 센서의 신호는 PC-LabCard 를 통하여 각각 1000 samples/sec 의 비율로 PC 에 저장되었다.

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

4.1 인장시험 결과

Fig. 2 는 FML[0/0] 시편의 인장시험 중 변위에 따른 하중의 변화와 AE 센서에 취득된 음향방출 신호의 진폭(amplitude)을 나타내고 있다. AE 신호의 진폭과 count 수는 정확히 비례한다고 하기는 어렵지만 대략적으로 비례관계에 있다. 즉, 높은 진폭의 AE 신호는 높은 count 수를 나타내고 그 반대의 경우도 마찬가지이다. Fig. 2 에서 시험 초기 약 0.5mm 변위까지를 제외하고는 하중선도는 시간에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있다. 위의 그래프는 하중이 증가함에 따라 AE 진폭도 점차적으로 증가하는 전형적인 인장시험 중의 AE 진폭 분포를 보여주고 있다. 변위가 약 5mm 이전까지는 재료 내부의 모재 균열에 의해 대부분 80dB 이하의 진폭의 AE 신호가 나타나고 그 이후에 본격적인 섬유 파단이 시작되며 90dB 이상의 신호들이

나타나고 있다.

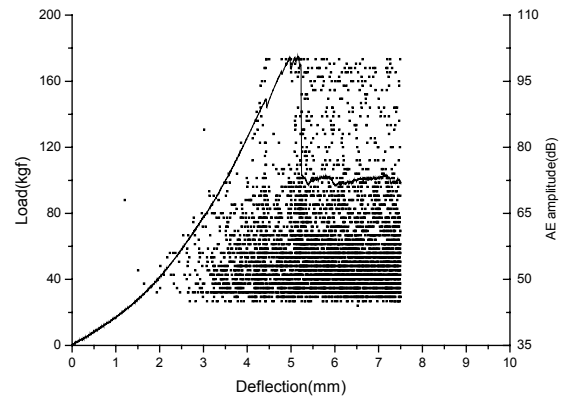


Fig. 5 Load-displacement curve and (a)AE amplitude, (b)AE count rate during indentation test

인장시험 중 취득된 EFPI 간섭프린트를 이용해서 구한 변형률은 EFPI 가 부착된 위치에서 시편이 파단될 때에 약 1.1%로 측정되었다. 이는 변형률 게이지를 같은 위치에 부착하고 수행한 예비 실험 결과와 거의 비슷한 수준이다.

Fig. 3 은 변위 4.6-6.0mm 구간에서의 하중선도와 광섬유 센서, AE count, 그리고 OFVS 의 WT 결과를 함께 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 5.7mm 변위일 때 시편 내부에 다량의 섬유들이 파단되며 하중선도에서도 불연속 부분으로 나타날 만한 큰 손상이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 그 순간 OFVS 와 EFPI 도 손상 신호를 취득하였다. OFVS 의 내부 광섬유 외팔보는 확실한 방향이 있는 진동의 경우에는 단순한 ‘위-아래’나 ‘좌-우’로의 변위를 가지며 진동하여 센서의 신호 크기가 진동의 크기를 가늠할 수 있는 척도가 되지만 임의의 충격이 가해졌을 경우 내부 외팔보는 원형 또는 타원형으로 진동할 가능성도 있다. 따라서 임의의 손상신호를 취득할 때 OFVS 신호의 변화량은 어느 정도 손상의 크기를 반영하고 있지만 반드시 센서에 가해지는 손상의 크기에 비례한다고 하기는 어렵다.

Fig. 3(c)에 OFVS 의 신호를 WT 한 후 de-noising 한 결과를 나타내었다. Fig. 3(b)의 AE 신호에서 4.95, 5.45, 5.49, 5.7mm 변위일 때의 손상 발생 순간을 OFVS 도 역시 감지하였음을 보여준다. 위와 같은 변위에서 발생한 손상은 그 진폭이 90dB 이상의 섬유 파손에 의한 것이다. OFVS 신호를 WT 한 후 de-noising 한 결과는 OFVS 의 경우 손상신호의 취득이 msec. 단위의 짧은 진동으로 나타나므로 WT 로써 일반신호와 손상신호를 분리한 후, 노이즈 레벨의 신호를 제거함으로써 눈으로 확인하기 어려운 신호를 볼 수 있도록 해준

다는데 주요한 의미가 있다. EFPI 의 경우 5.7mm 순간에서와 같이 하중선도의 불연속 점으로 나타날 만큼 큰 손상이 발생했을 때 간섭프린지에서 급격한 천이점이 발생하여 WT 로써 그 손상을 취득할 수 있으나, 작은 손상이 발생했을 때는 EFPI 신호의 변화량이 노이즈 수준으로 미미하여 정확한 손상발생 시점을 찾기가 힘들다.

Fig. 4 는 변위 6.0mm 에서 시편이 과단될 때까지의 하중선도와 광섬유 센서, AE count, 그리고 OFVS 의 WT 결과를 함께 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서 하중선도는 거의 선형으로 증가하고 있으며 6.72mm 부근의 EFPI 신호의 불연속 거동은 그 순간에 OFVS, AE 센서에 큰 손상 신호가 없는 것으로 미루어 보아 섬유파괴는 상관없는, 하중선도에 나타나지 않을 정도의 미세한 순간 변형이 일어난 것으로 판단된다.

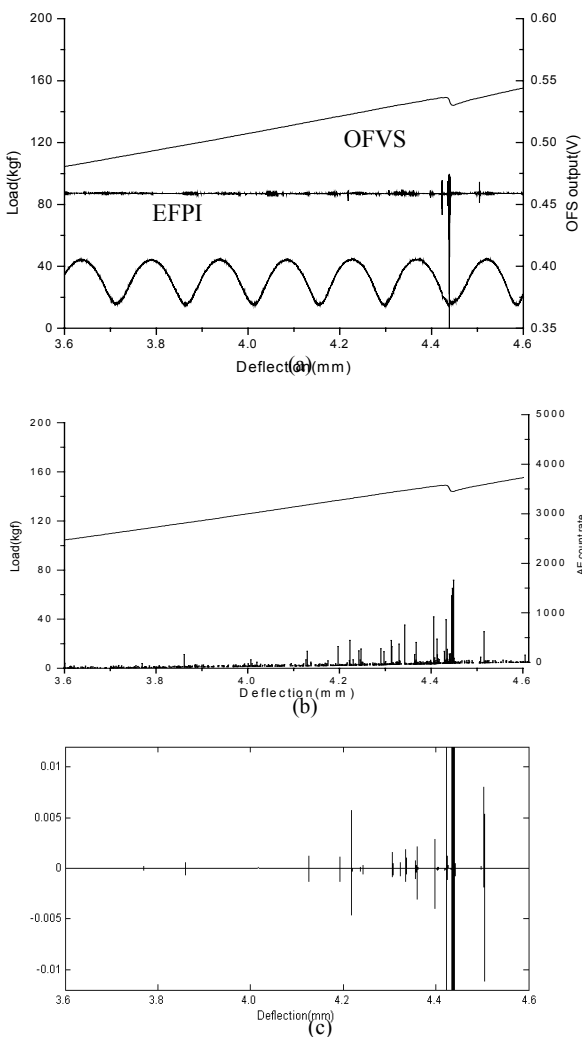


Fig. 6 Load-displacement curve and (a) OFS signal, (b) AE count, (c) WT of OFVS signal during indentation test(3.6-4.6mm).

OFVS 는 Fig. 4(b), (c)에 나타난 것과 같이 6.1-6.5mm 구간의 몇몇 낮은 count 신호를 제외하고 인장시험에서 발생하는 주요한 손상 발생 시점을 정확히 취득하였다.

4.2 압입시험 결과

Fig. 5 는 FML[15/-15] 시편의 시간에 따른 하중의 변화와 AE 센서에 취득된 음향방출 신호의 진폭, 그리고 AE count 수를 나타내고 있다. 균열의 전파에 의한 하중 상승곡선의 기울기가 거의 바뀌지 않고 섬유의 파단이 발생할 때 까지 하중이 여러 개의 첨단을 형성하며 계속 증가하는 것을 볼 수 있다.

이것은 [15/-15]이상의 교차각을 가지는 경우 큰 교차각 때문에 균

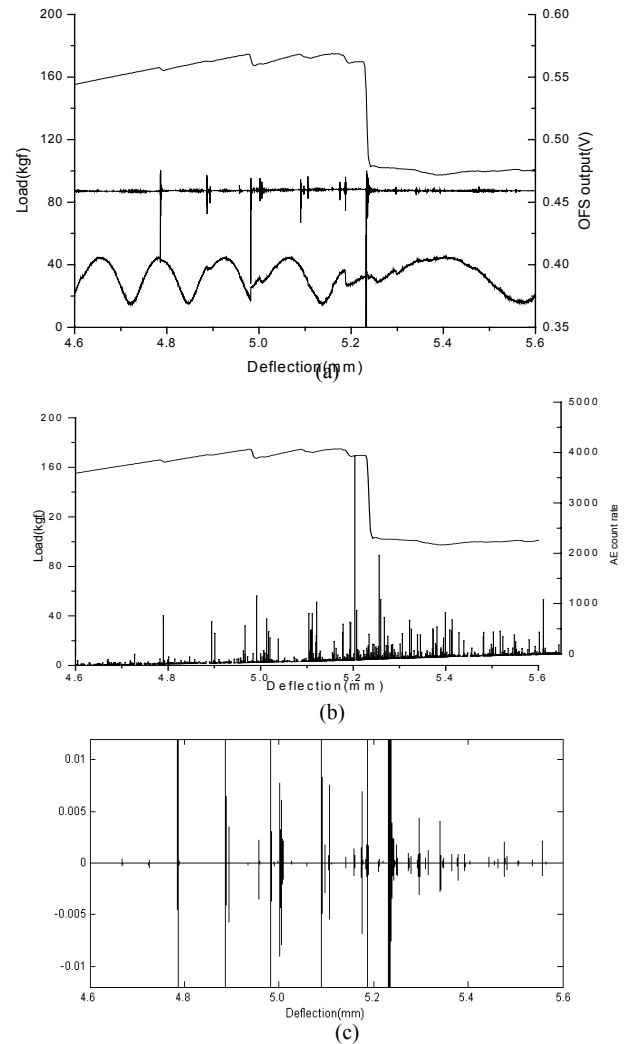


Fig. 7 Load-displacement curve and (a) OFS signal, (b) AE count, (c) WT of OFVS signal during indentation test(4.6-5.6mm).

열의 결합 및 성장이 어렵기 때문이다. 실제로 섬유방향으로의 균열 전파는 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 4mm 이전까지는 주로 80dB 이하의 신호가 검출되어 국부적인 모재손상만 발생함을 알 수 있고 그 이후로 90dB 이상의 고진폭, 큰 count 의 신호가 발생하여 섬유의 파단이 시작되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 변위 3.6-4.6mm 구간에서의 하중선도와 광섬유 센서 신호, AE count, 그리고 OFVS의 WT 결과를 보여주고 있다. 일부 섬유의 파손으로 인해 4.44mm 에서 하중선도의 불연속점이 나타나고 있으며 그 순간의 AE count 와 OFVS 신호도 크게 변화하고 있다. EFPI 의 신호는 하중의 불연속 지점에서 약간 튀는 모습을 보여주고 있는데 그 이외는 손상신호가 거의 관찰되지 못하였다. Fig. 6(c)의 OFVS 를 WT 한 결과는 AE count 신호와 정확히 일치하고 있다. WT 결과 4.2mm 이하에서 취득된 손상신호는 그 진폭이 74-86dB 범위 안에 들어있는 것들로서 OFVS 가 이정도 범위의 손상신호에도 신뢰성 있는 결과를 보여줌을 알 수 있다.

Fig. 7 은 변위 4.6-5.6mm 구간에서의 신호들을 보여주고 있다. 하중선도는 섬유의 파단이 이어지면서 여러 개의 첨단을 보이고 있으며 그에 따라 광섬유 센서의 신호들도 변화를 보이고 있다. EFPI 의 신호는 4.79, 4.89, 4.98, 5, 5.2mm 부분에서 간섭 프린지의 불연속 점들이 나타나고 있다. EFPI 는 하중선도에 불연속 점들로 나타날 만큼의 큰 손상 신호는 취득할 수 있으나 하중선도에 나타나지 않을 만큼의 작은 손상에 대해서는 EFPI 자체 노이즈 레벨의 신호로 밖에 관찰되지 않아 특별한 신호처리를 하지 않는 이상 손상 감지에 어려움이 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 결과는 OFVS 가 손상신호에 민감하고 AE 결과와 거의 일치함을 보여주고 있다.

Fig. 8 은 FML[15/-15] 시편의 압입시험 후의 모습을 보여주고 있다. 전면에서는 원형 모양의



Fig. 8 (a)Front and (b)back face of FML[15/-15] at final failure

파손 형상만 나타나고 후면에서도 균열의 전파는 나타나지 않았다. 이것은 어느 정도 이상의 교차각을 가지는 경우 교차각 때문에 균열의 결합 및 성장이 어렵기 때문이다. 후면사진에서 15° 방향으로 짧게 발생한 균열과 섬유층이 파괴되면서 적층각에 수직으로 발생한 균열 모습이 함께 나타나 있다.

5. 결론

FML 의 인장 및 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.