

論文

삽입된 광섬유 마이켈슨 센서에 의한 복합재 보의 변형을 및 모재균열 파손의 동시 감지

권일범* · 김조권** · 김천곤* · 홍창선*

Simultaneous Sensing of the Strain and the Matrix Cracking Failure of a Composite Beam Using an Embedded Fiber Optic Michelson Sensor

I.B. Kwon*, Z.G. Kim**, C.G. Kim* and C.S. Hong*

ABSTRACT

The bending deformation and matrix cracking in smart composite structures were investigated by conducting four-point bending test of a cross-ply composite beam with embedded fiber optic Michelson sensor. The fiber optic Michelson interferometric sensor was constructed and embedded in the composite beam. The failure of composite beam, due to the cracking in matrix materials, were successfully detected by the fiber optic sensor. The matrix crack in composite beam was confirmed by an edge replica method. The triggered failure signals due to the matrix cracking failure of the composite beam were acquired and characterized. The digital processing method for simultaneous sensing was devised. After acquiring the fiber optic signal with 1 millisecond interval. The fiber optic sensor signal was used to calculate the strain of composite beam and was processed by digital filtering to know the failure instants. The failure instants were obviously noticeable from the filtered signal of the fiber optic sensor which is compared with PZT signal.

초 록

직교적층 복합재 보에 광섬유 마이켈슨 센서를 삽입하여 4점 굽힘 시험을 수행하면서 지능 복합재 구조물의 굽힘 변형과 모재균열 발생을 조사하였다. 광섬유 마이켈슨 간섭 센서를 구성하고 복합재 보에 삽입하여 성형 제작하였다. 모재균열 발생에 따른 복합재 보의 파손은 광섬유 센서에 의하여 성공적으로 검출되었다. 복합재 보의 모재균열은 에지 레플리카 방법에 의하여 확인되었다. 복합재 보의 모재균열 파손에 따른 광섬유 센서의 트리거된 파손 신호의 특성이 조사되었으며 동시 감지를 위한 디지털 신호 처리 방법이 고안되었다. 0.001초 간격으로 광섬유 센서 신호를 취득한 후 디지털 여파에 의하여 복합재 보의 변형을 결정하기 위한 신호와 파손 시점을 알 수 있는 신호로 분리할 수 있었다. 또한 광섬유 신호로부터 여파된 파손 신호는 PZT 센서 신호와 비교함에 의하여 파손 시점을 명확히 검출하고 있음을 확인하였다.

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

** 대구기능대학 산업설비학과

1. 서 론

항공우주구조물로 다양하게 사용되는 복합재 구조물은 제작과정 또는 사용중에 외부로부터 받는 하중이 극한을 초과하거나 또는 충격 등의 영향으로 구조물에 손상이 발생하게 된다. 이러한 손상은 복합재 구조물을 주구조물(primary structure)로 사용하는데 큰 어려움으로 작용하므로 이를 극복하기 위하여 구조물의 건전성(structural integrity)을 감지하고 적절하게 대처할 수 있는 기능을 구조물 자체에 부가하는 연구가 필요하게 되었다. 지능 복합재 구조물(smart composite structure)은 이러한 필요성을 만족할 수 있도록 기존의 복합재료에 센서(sensor)와 마이크로프로세서 및 작동기(actuator)를 적용하여 구조물에 작용하는 외부의 영향 및 구조물 내부의 특성 변화를 감지하고 평가하여 구조물 스스로 대처할 수 있도록 구성된다[1]. 광간섭 방식에 의한 광섬유 센서는 빛의 파장 단위까지 감지가 가능한 매우 높은 민감도를 가질뿐 아니라 광섬유를 복합재에 삽입하여 제작하기 쉽다. 또한 전자기파의 영향을 받지 않으며 센서 배열을 구성하여 구조물의 여러 장소에서 원하는 물리량을 동시에 감지할 수 있는 특성 등을 갖고 있기 때문에 구조물의 변형과 파손에 따른 신호를 취득하는 센서로 적합하다[2]. 또한 광섬유 센서 한 개로부터 여러 정보를 동시에 획득할 수 있다. 복합재 구조물의 파손은 많은 부분이 모재균열과 층간분리의 형태로 나타나는데 특히 초기 파손형태인 모재균열은 적층구조에 의해서 최종 파단을 즉시 유발하지는 않으나 적층구조물의 강성, 강도 및 피로수명 등의 역학적 기능저하 효과에 큰 영향을 끼친다[3]. 그러므로 복합재 구조물에 작용하는 하중 상태에 따라서 구조물의 변형률과 초기파손 형태인 모재균열 파손을 동시에 검출하는 것은 복합재 보의 파손 변형률을 미리 경고하거나 파손 발생정도를 실시간으로 평가할 수 있는 지능 복합재 구조물을 제작하기 위하여 매우 중요하다. 광섬유 센서를 사용한 지능 복합재 구조물의 연구로는 변형률을 검출하기 위한 연구[4~5]가 수행되었고 복합재 구조물의 파손에 의한 음향방출 신호를 검출하여

손상을 검출하는 연구[6~8]도 있었다. 특히 E. Tapanes는 광섬유 마이켈슨 간섭 센서(fiber optic Michelson interferometric sensor)에 의하여 변형률 및 파손에 따른 음향방출을 동시에 감지할 수 있음을 언급하였다[5]. 또한 A. K. Tay는 복합재 보에 광섬유를 삽입하고 5점 전단시험을 수행하면서 파손 발생에 따라 광섬유의 광강도저하를 확인하여 파손 발생 시점만을 검출하는 연구를 수행하였다[9]. 이러한 기존 연구는 주로 광섬유 센서의 변형률 감지도 또는 음향방출 신호에 대한 감지 가능성을 조사하는 연구였다. 광섬유 센서에 의하여 복합재 구조물의 변형률 및 파손에 따른 신호를 동시에 취득하면서 복합재 구조물의 변형 및 파손을 동시에 감지하는 것은 구조 안전성 평가를 위하여 매우 중요하다.

본 연구에서는 복합재 구조물의 구조 안전성 감지를 위하여 직교적층 복합재 보의 내부에 광섬유를 삽입하고 광섬유 마이켈슨 간섭계를 구성하여 보 시험편의 변형 및 파손 거동을 동시에 감지할 수 있도록 연구를 수행하였다. 4점 굽힘 시험에 의하여 복합재 보의 급격한 모재균열 파손에 따른 트리거된 신호(triggered signal)를 취득하고 신호 특성을 고찰하였다. 또한 0.001초 간격의 광섬유 신호를 취득한 후 디지털 여과함에 의하여 복합재 보의 변형률과 파손 시점을 알 수 있는 신호로 분리하고 파손시점을 파악하여 복합재 보의 초기 파손 변형률을 결정하였다.

2. 광섬유 마이켈슨 간섭 센서의 변형률 및 파손신호 감지원리

단일모드 광섬유(single mode optical fiber)는 변형을 받으면 변형률-광(strain-optic) 효과에 의하여 광섬유의 내부를 전파하는 빛의 위상차가 변화하게 된다. 3차원 변형률 장에 놓인 광섬유의 내부를 전파하는 빛의 위상차 변화량 $\Delta\phi$ 에 대하여 Sirkis와 Haslach[10]의 식에 의하면 광섬유에 축방향 하중(axial loading)만 작용하는 것으로 가정하고 식을 유도하였는데 다음의 식(1)과 같다.

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L + \delta} = \frac{4\pi n}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 n 은 광섬유 코어의 굴절률이고 λ_0 는 진공속에서 빛의 파장을 가리킨다. P_{ij} 는 변형률-광텐서(strain-optic tensor)이며 광섬유가 등방성이고 균질인 경우 P_{11} 과 P_{12} 성분만 존재한다. 본 연구에서 사용된 센서 시스템은 표 1과 같은데 광원은 헬륨-네온 레이저로 파장은 632.8nm이고 단일모드 광섬유의 굴절률은 1.456이고 ν 는 광섬유의 Poisson 비이며 보통 0.17의 값을 가지며 변형률-광텐서인 P_{11} 은 0.121, P_{12} 는 0.270의 값을 갖는다. 이 값들을 식(1)에 대입하면 2.309×10^7 이 되어 다음과 같은 식을 얻게 된다[11].

Table 1. Specification of fiber optic Michelson sensor system

Component	Specification	Manufacturer
Light source (He-Ne laser)	10mW Power 633nm Wavelength	Meles-Griot
Photo-detector	100mA/W Responsivity 400-1100nm Wavelength range	Newport model 818-SL
Fiber optic coupler	50 : 50 Dividing ratio 0.3dB Loss	Newport F-506B
Single mode optical fiber	125 μ m Cladding diameter 4 μ m Core diameter 1.456 Refractive index $P_{11}=0.121$ $P_{12}=0.270$ 0.17 Poisson's ratio	3M FS-SN-3224

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L + \delta} = 2.309 \times 10^7 \text{ (rad/m)} \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)에서 ΔL 은 광섬유가 천천히 변화하는 변형률에 의한 광섬유의 길이변화를 나타내며 δ 는 파손신호와 같은 고주파의 미소 변형률에 의한 광섬유의 길이 변화를 나타낸다. 실험에서 얻어지는 광출력 신호의 정현파 반주기의 갯수를 m 이라 하면 위상차 $\delta\phi$ 는 $\delta\phi = m\pi$ 라고 할 수 있으며 게이지 길이 L 에 대하여 변형률은 $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 이므로 식 (2)를 변형률로 나타내면 다음과 같은 식이 된다.

$$\varepsilon = \frac{m\pi}{2.309 \times 10^7 L} = 1.36 \times 10^{-7} \frac{m}{L} \dots\dots\dots (3)$$

윗 식에서 $L=1\text{cm}$ 일때 $m=1$ 로 하면 변형률 ε 은 13.6×10^{-6} 으로 광신호의 정현파 반주기를 계수할 때의 변형률 감지도가 매우 민감함을 알 수 있다. 식 (2)에서 고주파의 미소 변형률 변화에 의한 파손 신호 또는 파손 시점을 알 수 있게 해 주는 신호 δ 는 고주파 통과 필터(high pass filter)를 사용하여 ΔL 을 제거한 후 취득한다.

3. 실 험

3-1. 광섬유 마이켈슨 센서 탐촉자 (probe)의 제작

광섬유 마이켈슨 센서의 탐촉자는 광섬유의 끝 단면을 수직으로 자른후 입사된 빛이 반사되어 되돌아 나올 수 있도록 진공증착법에 의하여 반사율이 높은 금으로 거울 도금(mirror coating)한다. 이 거울 도금된 광섬유를 게이지 길이 만큼 길이차를 두면서 감지선과 기준선을 나란히 에폭시 순간 접착제로 접착한다. 광섬유 게이지 길이를 정확하게 측정하기 위하여 0.01mm의 정밀도를 갖는 PIKA 독취 현미경을 사용하여 게이지 길이를 측정하게 되면 마이켈슨 센서 탐촉자의 제작은 완료되게 된다.

3-2. 복합재 보 시험편의 제작

광섬유 센서를 제작한 후 복합재료 프리프레그의 층 사이에 삽입하고 적층하여 성형한 후 그림 1과 같이 광섬유가 삽입된 복합재 구조물의 외부로 나온 광섬유의 선을 각각 광섬유 양방향 연거기에 연결하여 빛을 입사시키고 반사되어 되돌아 나오는 빛을 간섭시켜 광검출기로 광강도를 검출할 수 있도록 광섬유 센서계를 구성한다. 본 연구에서는 표 2와 같이 광섬유 마이켈슨 센서를 삽입하고 게이지 길이를 약 6~18mm 로 하여 시험편을 제작하였다.

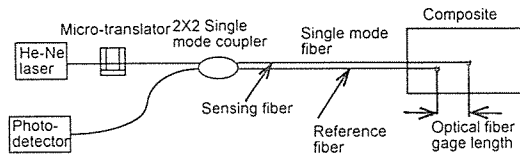


Fig. 1. Fiber Optic Michelson interferometric sensor.

Table 2. Specimens of composite beam with embedded fiber optic Michelson sensor

Specimen / Lay-up	Thickness / Width(mm)	Gage length length(mm)
T1* / $[90_4/0_2/\{0\}/0_6/90_4]_T$	1.71 / 24.21	12.49
T2** / $[90_4/0_2/\{0\}/0_6/90_4]_T$	1.73 / 23.19	5.87
M1*** / $[90_4/0_4/\{0\}/0_4/90_4]_T$	1.79 / 23.65	11.44
M2** / $[90_4/0_4/\{0\}/0_4/90_4]_T$	1.76 / 23.61	10.31
B1* / $[90_4/0_6/\{0\}/0_2/90_4]_T$	1.71 / 23.82	13.00
B2** / $[90_4/0_6/\{0\}/0_2/90_4]_T$	1.78 / 23.28	18.02

* For sensing the strain and failure instants simultaneously.

** For characterizing the triggered fiber optic failure signal.

*** For showing the mid-plane embedded fiber optic sensor signal.

복합재 프리프레그(prepreg)는 (주)한국카아본 사의 CU-125 NS 그라파이트/에폭시(graphite/epoxy)를 사용하였다. 굽힘 시험을 위한 복합재 보 시험편은 모재균열 파손이 지배적으로 발생하는 $[90_4/0_4]_S$ 적층을 사용하였으며 ASTM 시험법을 참고하여 스패 길이(span length)는 80mm로 하고 스패(load span)는 40mm로 하기 위하여 그림 2와 같이 시험편 길이를 100mm로 하였다. 또한 광섬유의 삽입 위치는 표 2와 같이 중립면(M1, M2) 또는 중립면보다 상층부(T1, T2) 및 중립면의 하층부(B1, B2)에 위치하도록 시험편을 제작하였다. 모든 시험편의 상부 표면 중앙에는 그림 2와 같이 게이지 길이 2mm의 전기 저항형 변형률 게이지를 부착하여 보 시험편의 상부 표면 변형률을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 압전 재료중 센서 용도로 개발되어 있는 PZT 센

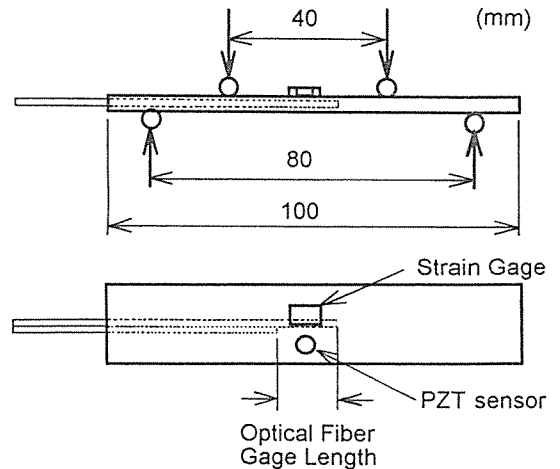
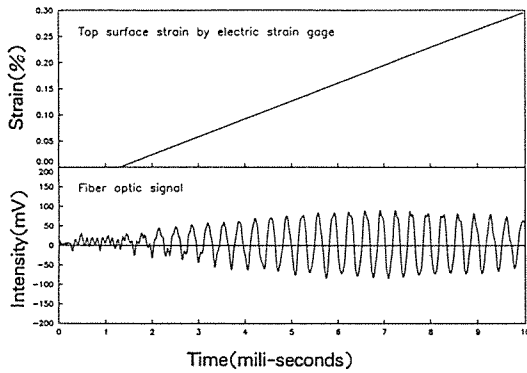


Fig. 2. Specimen configuration of Gr/Ep composite beam.

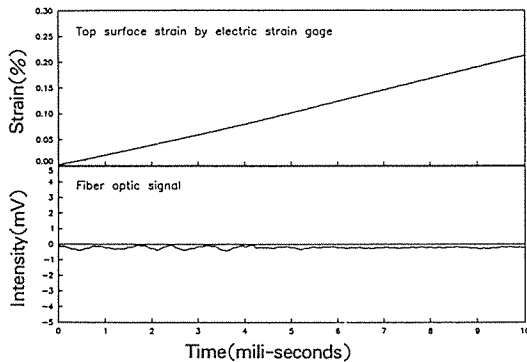
서(Fuji ceramics Co. C6-R0.36Z2T5D-L)를 T1, B1 시험편에 부착하여 파손 시점을 확인하였다. 모재균열 파손 발생을 확인하기 위하여 시험편의 측면을 산화알루미늄 연마제로 연마하여 에지레플리카를 사용하여 파손 형상을 채취할 수 있도록 하였다.

3-3. 실험 장치 및 방법

광섬유 센서는 일반적으로 다음과 같은 다섯 부분으로 이루어진다. 즉 광원으로 쓰이는 레이저, 광섬유에 빛을 입사시키는 부분, 간섭을 발생시키는 필수적인 광분할 및 결합 부분, 간섭 신호를 전기적 신호로 바꾸어 주는 부분 및 데이터 취득 부분으로 구성된다. 본 연구에서 광섬유 마이켈슨 센서의 구성 및 제원은 표 1과 같은데 간략하게 설명하면 다음과 같다. 광원은 632.8nm의 파장을 갖고 출력이 10mW인 Meles-Griot사의 단일 편광된 헬륨-네온 레이저를 사용하였다. 광섬유의 내부를 전파하는 빛을 분할하고 결합하는 장치인 광섬유 양방향 연계기(fiber optic bidirectional coupler)는 Newport사의 F-506B(광분할비 50 : 50)를 사용하였다. 광섬유에 빛을 입사시키기 위하여 20배율의 현미경 렌즈와 미세 이송장치(micro-translator)를 사용하였다. 단일모드 광섬유는 3M사의 FS-SN-



(a) $[90_4/O_2/[0]/O_6/90_4]_T$ laminate(T1)



(b) $[90_4/O_4/[0]/O_4/90_4]_T$ laminate(M1)

Fig. 4. Strain and fiber optic signal of $[90_4/O_4]_S$ specimen

상부에 삽입한 그림 4의 (a)의 경우에 변형률 변화에 따라 정현파 간섭 신호가 잘 생성되고 있음을 볼 수 있다. 그림 4의 (b)는 중립면에 광섬유를 삽입한 시험편의 표면변형률과 광섬유 신호를 보이고 있다. 여기서 중립면에서는 면내 변형이 거의 발생하지 않아서 광 간섭이 일어나지 않기 때문에 광 출력 신호의 진폭이 매우 작은 것을 볼 수 있다.

복합재 보 시험편의 파손은 에지레플리카 방법의 의하여 모재균열 밀도가 포화되었을 때 시험편의 측면을 채취하여 현미경으로 관찰하여 보면 그림 5와 같이 모재균열 파손만 존재함을 확인하였다. 복합재 보 시험편의 파손 발생에 의한 트리거된 신호는 대체적으로 그림 6과 같이 초기에 발생하는 파손신호는 큰 광섬유 출력을 보였으며 파손이 포화되어 감에 따라 신호의 진폭이 작아짐을 알 수 있다. 또한 광섬유 센서를 중립면 보다 상층부에

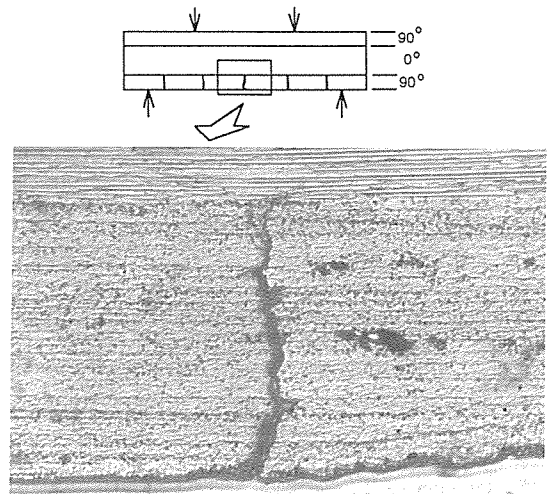


Fig. 5. Matrix cracking failure of $[90_4/O_4]_S$ specimen(T1).

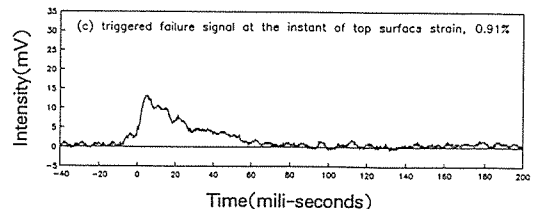
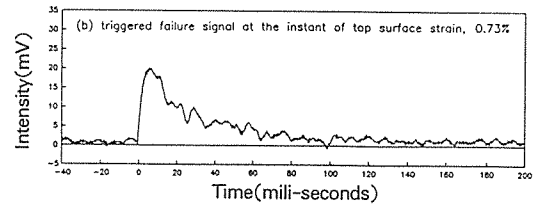
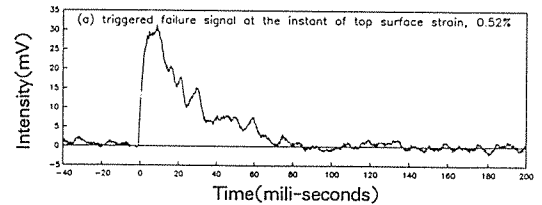


Fig. 6. Triggered fiber optic failure signals of $[90_4/O_6/[0]/O_2/90_4]_T$ specimen(B2).

삽입한 시험편에 대한 그림 7과 중립면에 광섬유를 삽입한 그림 8에서도 초기 파손신호는 진폭의 크기가 크고 파손정도가 증가함에 따라 신호의 진폭이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 트리거된 파손신호의

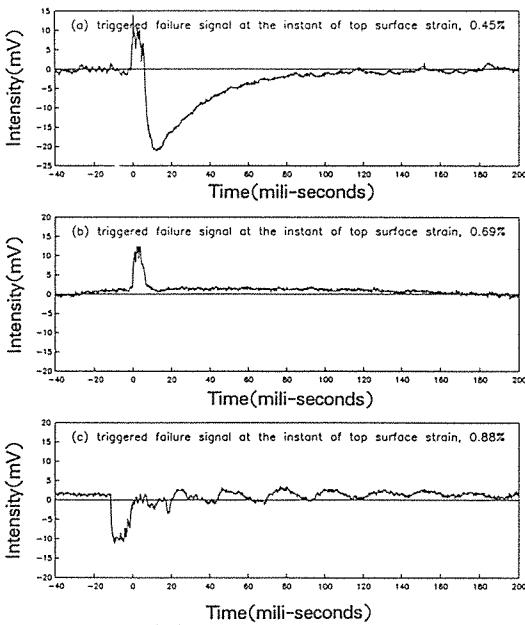


Fig. 7. Triggered fiber optic failure signals of $[90_4/O_2/\{0\}/0_6/90_4]_T$ specimen(T2).

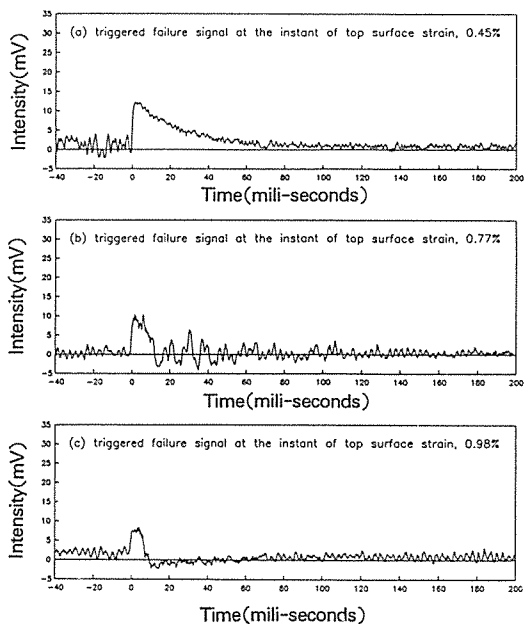
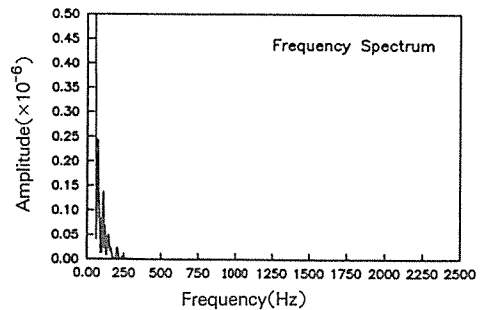
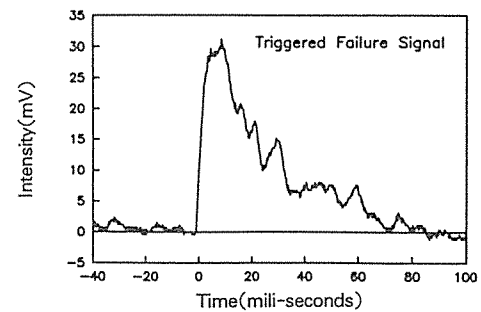


Fig. 8. Triggered fiber optic failure signals of $[90_4/O_4/\{0\}/0_4/90_4]_T$ specimen(M2).

경향은 각각의 시험편에서 나타나는 일반적인 경

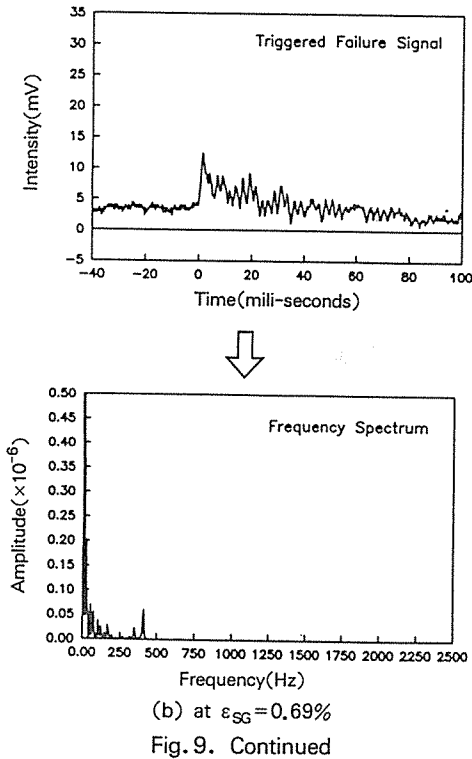
향으로 파손신호의 진폭이 엄격하게 모재균열 증가와 함께 항상 감소되는 것은 아니고 모재 균열 파손의 에너지 이완 정도에 따라 다소 증감이 있다. 그림 6, 7, 8로부터 복합재 보 시험편의 트리거된 파손신호는 대부분 0.1초까지의 시간대역을 형성하고 있음을 알 수 있으며 그림 9는 특징적인 파손신호를 주파수 분석한 결과로 파손신호의 주파수 대역이 0-450Hz임을 확인하였다.

복합재 보 시험편의 트리거된 파손 신호의 시간대역이 0.1초로 비교적 오랜 시간을 갖고 있으므로 0.001초 간격으로 광섬유 신호를 취득하게 되면 복합재 보의 정적 변형률과 파손 발생에 따른 신호를 모두 광섬유 신호에 담을 수 있게 된다. 그림 10은 광섬유 신호를 0.001초 간격으로 신호를 모두 취득하고 광섬유 센서에 의한 변형률을 구하기 위하여 저주파 통과 여과(low pass filtering)하고 파손 시점을 알아내기 위한 파손 신호를 얻기 위하여



(a) at $\epsilon_{SG}=0.52\%$

Fig.9. Frequency spectrum of matrix cracking failure signal of $[90_4/O_6/\{0\}/0_2/90_4]_T$ specimen(B2).



고주파 통과 여파(high pass filtering)하는 과정을 보이고 있다. 저주파 통과 여파된 신호는 광신호의 정상점(peak point)과 계곡점(valley point)를 결정하기 위하여 삼각파(triangular wave) 형태로 변환시켜 주고 정상점과 계곡점의 갯수를 계수하여 식 (3)의 광 위상차를 계산하게 되면 광섬유 센서에 의한 변형률 계산이 가능하게 된다. 또한 파손 시점을 알기 위한 파손 신호는 광섬유 신호를 간단하게 고주파 통과 여파하게 되면 파손 시점에서의 급격한 변형률 증가에 따른 신호가 그림 10에서 처럼 보이게 된다. 그림 10과 같은 신호처리는 MATLAB에 의하여 수행되어졌다.

그림 11과 그림 12는 광섬유 센서에 의하여 복합재 보의 내부 변형률과 파손 시점을 동시에 감지한 실험 결과로 광섬유 센서 신호 (b)를 취득하고 광섬유 변형률은 이 신호의 위상차 즉 정현파의 갯수를 계수하여 구하게 되며 신호 (b)를 차단 주파수 20Hz로 고주파 통과 디지털 여파하여 파손에 따른 신호 (c)를 구하였다. 또한 구해진 광섬유 파손

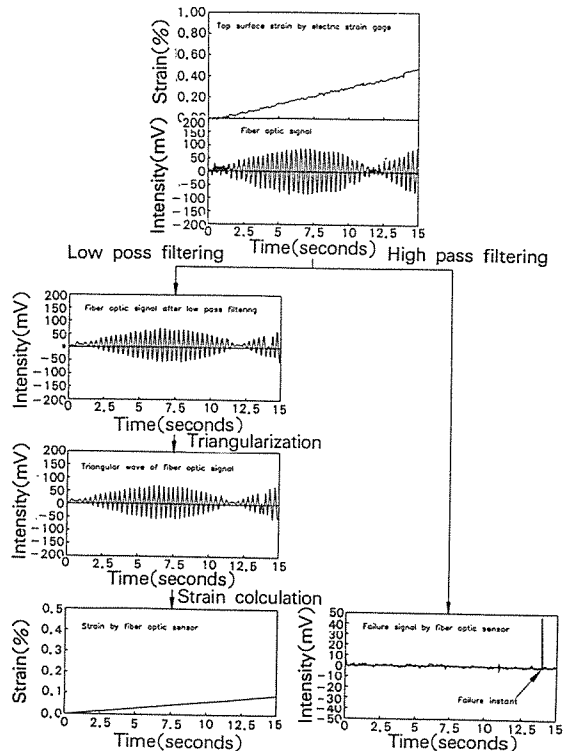


Fig. 10. Digital processing of fiber optic signal to sense the internal strain and failure instants of $[90_4/0_6/[0/0_2/90_4]_T$ composite beam(B1).

신호는 PZT 센서 신호와 비교하여 보면 파손 시점 검출이 명확하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 11에서 광섬유의 초기 파손 변형률을 계산하는 방법은 다음과 같다. 그림 11의 (c)에서 시간이 약 14초일 때 복합재 보 시험편은 초기 파손이 발생하여 광섬유 센서에 의한 파손신호가 검출되었는데 이 시점에서 (a)를 보면 시험편의 상부 표면 변형률은 0.41%였고 광섬유 센서의 신호는 그림 11의 (b)를 보면 초기파손이 발생한 14초까지의 광섬유 신호의 정현파 반주기 갯수는 61개였다. 따라서 광섬유 센서의 변형률은 위상차 $\Delta\phi = \pi m$ 으로 두고 정현파의 반주기 갯수를 $m = 61$ 로 하여 식 (3)에 의하여 계산해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{OF} &= \pi m / (12.49 \times 10^{-3} \times 2.309 \times 10^7) \\ &= \pi \times 61 / (12.49 \times 10^{-3} \times 2.309 \times 10^7) \\ &= 0.66 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

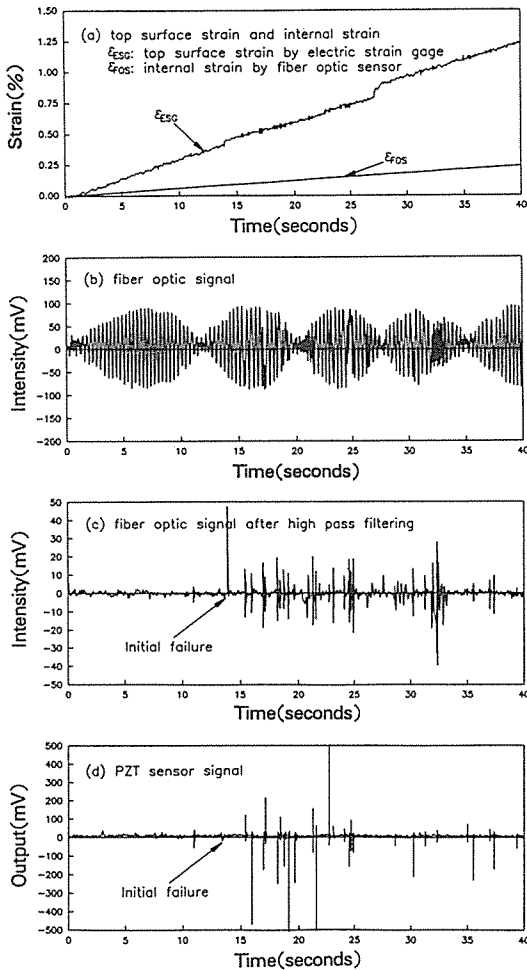


Fig. 11. Digital processing results of fiber optic sensor and PZT signal of $[90_4/0_2/\{0\}/0_6/90_4]_T$ specimen(B1).

위와 같은 광섬유 센서의 출력으로 부터 구한 광섬유 변형률과 변형률 게이지에 의한 복합재 보 시험편의 상부 표면 변형률 사이에 차이가 발생하는 원인은 광섬유는 보 시험편의 내부에 삽입되어 있기 때문에 중립면에 가까이 위치하여 굽힘변형 상태에서 상부 표면 변형률 보다 작은 변형률을 갖기 때문이다. 변형률 게이지에 의한 보 시험편의 표면 변형률에 의하여 보 시험편 내부의 광섬유 센서 위치에서 변형률을 1차전단 변형(first order shear deformation) 가정하에 계산해 보면 표면 변형률 0.41%의 1/4인 약 0.10%가 되어야 할 같으나 광

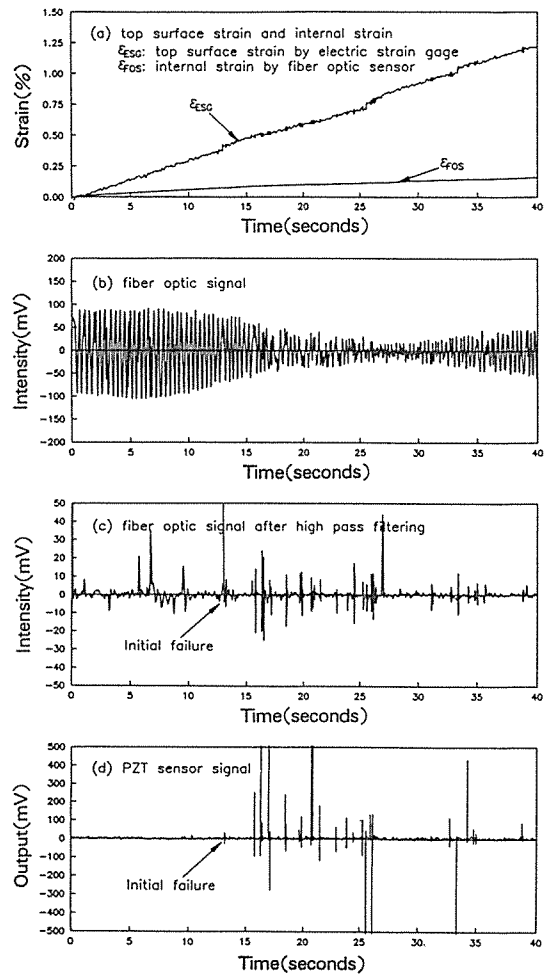


Fig. 12. Digital processing results of fiber optic sensor and PZT signal of $[90_4/0_6/\{0\}/0_2/90_4]_T$ specimen(T1).

섬유 센서에 의한 변형률은 0.06%로 표면 변형률로부터 계산된 값보다 작게 구해졌다. 그 원인으로 보 시험편이 초기파손될 때 급격한 상부 표면 변형률 증가가 발생하여 두께 방향으로 면내 변형이 선형적으로 변화한다고 하는 1차 전단변형 가정이 성립되지 않기 때문이다. 또한 다른 원인으로서는 변형률 측정량이 커서 변형 거동이 비선형 거동을 하는 점과 광섬유 센서의 삽입위치가 성형과정중 약간의 이동이 있을 수 있다는 점 등에 기인하는 것으로 사려된다. 이러한 파손에 따른 신호로부터 초기파손 발생 시점을 결정하고 그림 11의 (a)와

(b)로 부터 변형률 게이지와 광섬유 센서에 의한 초기 파손 변형률을 각각 결정하여 표 3에 정리하였다. 광섬유 센서에 의한 파손 신호와 PZT 센서 신호는 파손 시점을 명확히 검출하고 있음을 볼 수 있다.

그림 12는 광섬유 마이켈슨 센서를 시험편의 중립면 상부에 삽입한 시험편의 실험 결과로 광섬유 출력 신호 (b)를 보면 보 시험편의 굽힘변형에 따라서 정현파 간섭신호가 잘 발생하고 있음을 볼 수 있으며 파손에 따른 신호가 혼합되어 있음을 볼 수 있다. 그림 12의 (c)는 (b) 신호를 차단 주파수 20Hz로 고주파 통과 디지털 여과한 파손에 따른 신호로 파손 시점이 명확하게 확인되고 있으며 파손 정도도 신호진폭의 크기로 확인할 수 있다. 이와 같이 파손 시점을 검출하고 초기 파손 시점에서의 광섬유 및 변형률 게이지에 의한 변형률을 구하여 표 3에 정리하였다. 광섬유 센서에 의한 파손 신호 (c)와 PZT 센서 신호 (d)를 비교하여 보면 PZT 센서 신호의 초기 파손 이전에도 광섬유 센서의 파손 신호에 신호가 있음을 볼 수 있는데 이 신호는 광섬유 센서의 비틀림이나 그림 1에서 볼 수 있는 기준 광섬유와 감지 광섬유가 외부 영향을 받아서 나타나는 현상이다.

광섬유 마이켈슨 센서로부터 취득한 신호인 그림 11과 그림 12의 (b)는 자세히 관찰해 보면 복합재 보의 변형에 의한 신호와 파손에 따른 신호외에 신호 잡음이 존재함을 알 수 있다. 그림 12의 (c)에서 이러한 신호잡음이 파손 시점이외의 부분에 나타나 있다. 광섬유 마이켈슨 센서는 광섬유 감지선과 기준선이 분리되어 있어서 물리적으로 의미있는 신호 이외의 신호잡음이 발생하게 된다. 따라서 광섬유 마이켈슨 센서에 외란에 의한 신호잡음을 최소화하기 위하여 기준 광섬유와 감지 광섬유를 동일한 외부 환경에 있도록 두 광섬유를 한 개의 광섬유 케이블로 제작하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 실시간으로 복합재 구조물의 구조 안전성을 감지하기 위한 방법에 대한 연구로 복합재

구조물의 변형률 및 모재균열 발생에 따른 파손신호를 동시에 감지할 수 있도록 광섬유 마이켈슨 간섭 센서를 구성하고 직교적층 복합재 보에 삽입하여 4점 굽힘시험을 수행하였다.

(1) 광섬유 센서를 보 시험편의 중립면에 삽입하면 광섬유 신호는 제대로 출력되지 않음을 알 수 있었고 중립면 상층부 및 하층부에 삽입하면 광섬유 마이켈슨 신호는 양호하게 출력됨을 확인하였다.

(2) 복합재 보의 파손에 따른 트리거된 신호는 중립면과 중립면의 상층부 및 하층부에 삽입한 모든 시험편에서 검출되었으며 파손 신호는 0.1초까지의 시간대역을 가지고 주파수 대역은 0-450Hz였다.

(3) 광섬유 마이켈슨 센서 신호의 디지털 처리에 의하여 복합재 보의 변형률과 파손 시점을 동시에 감지할 수 있도록 신호 처리 기법을 구성하였다.

(4) 광섬유 마이켈슨 센서의 출력신호를 디지털 여과함에 의하여 변형률 신호와 파손시점을 알 수 있는 신호로 분리함에 의하여 복합재 보의 변형률과 모재균열 파손을 동시에 감지할 수 있었으며 초기 파손 변형률을 결정할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구비 지원에 의한 결과(과제번호 : 90-5-2)로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C.A. Rogers, D.K. Barker and C.A. Jager, "Introduction to Smart Materials and Structures," *Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop*, 1988, pp.17-28.
2. R.O. Claus, J.C. Mckeeman, R.G. May and K.D. Bennet, "Optical Fiber Sensors and Signal Processing for Smart Materials and Structures Applications," *Proc. of ARO Smart Materials, Structures and Mathematical Issues Workshop*, 1988, pp.29-38.
3. S.G. Lim and C.S. Hong, "Prediction of

Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Cross-ply Laminated Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol.23, July 1989, pp.695-713.

4. Y. Lo, J.S. Sirkis, "Passive demodulation techniques for optical fiber sensors," *Proceedings of the SEM 50th Conference*, Jun. 7-9, 1993, pp.576-586.

5. E. Tapanes, "Real-time structural integrity monitoring using a passive quadrature demodulated, localized Michelson optical fiber interferometer capable of simultaneous strain and acoustic emission sensing," *Fiber Optic Smart Structures and Skins IV*, SPIE, Vol.1588, 1991, pp.356-367.

6. D.S. Gardiner, L.H. Pearson, "Acoustic-emission monitoring of composite damage occurring under static and impact loading," *Experimental Technique*, November, 1985, pp.22-28.

7. A.K. Tay, D.A. Wilson, and A.C. Demidogen, "Microdamage and optical signal analysis of impact induced fracture in smart structures,"

Fiber Optic Smart Structures and Skins III, SPIE, Vol.1370, 1990, pp.328-343.

8. K. Murphy, M. Gunther, A. Wang and R.O. Claus, "Fiber optic impact detection and location system for metals and graphite composites," *Proceedings of the SEM 50th Conference*, Jun. 7-9, 1993, pp.587-596.

9. A.K. Tay, D.A. Wilson, J.R. Houghton and R.L. Wood, "Evaluation of an optical signal response and failure mechanisms induced by the transverse shear deformation in smart structures," *First European Conference on Smart Structures and Materials*, SPIE Vol.1777, May 12-14, 1992, pp.277-280.

10. J.S. Sirkis and H.W. Haslach, "Complete Phase-strain model for structurally embedded optical fiber sensors," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.2, Jan. 1991, pp.3-24.

11. 박중완, 김천곤, 홍창선, "광섬유 센서를 이용한 복합적층판의 변형률 측정," 한국복합재료 학회 춘계학술발표회 논문집, 1994, pp.105-108.