

## 論文

## 광섬유센서를 이용한 복합적층판의 모재균열 검출

류치영\* · 박중완\*\* · 권일범\* · 홍창선\* · 김천곤\*

Detection of Matrix Cracking in Composite Laminates  
Using an Optical Fiber Sensor

C.Y. Ryu\*, J.W. Park\*\*, I.B. Kwon\*, C.S. Hong\* and C.G. Kim\*

## ABSTRACT

An optical fiber sensor based on the Michelson interferometer was constructed to detect AE(acoustic emission) signal occurred by matrix cracking in the laminated composites. To validate an optical fiber sensor as AE transducer, a forced vibration test for a composite beam was performed. In the experiment, the frequency of the detected signal was compared to the excitation frequencies with the frequency range of AE by matrix crack. The survivability of optical fiber sensor was tested experimentally. The experiment showed that it was advantageous to embed an optical fiber in the direction of the reinforced fiber of the composite laminates to protect the optical fiber from matrix cracks of various types. Also, the effect of the embedded direction of the optical fiber on the sensitivity of acquiring AE signal was examined. Under the tensile loading, the matrix cracking was detected by acquiring AE signal for cross-ply laminated composites, and it was confirmed by the replica method. As the density of matrix cracking was saturated, the detected signal waves showed relatively large energy release. In the frequency analysis of AE signal for matrix cracking, the characteristic frequency ranged approximately up to 120kHz.

## 초 록

모재균열에 의해 발생하는 AE 신호를 취득할 수 있도록 광섬유센서를 마이켈슨 간섭계를 이용해 구성하였다. 구성된 광섬유센서가 AE 트랜스듀서로 사용 되어질 수 있는지 확인하기 위하여 복합적층판의 강제진동 실험을 하였다. 이 실험에서 모재균열에 의한 AE 신호와 비슷한 대역의 가진 주파수와 광섬유센서로 취득한 주파수를 비교하였다. 또한 광섬유센서의 건전성을 평가하기 위한 실험을 하였고, 이 실험에서는 여러 형태의 모재균열로부터 보호될 수 있도록 광섬유를 복합적층판의 섬유방향으로 삽입하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 그리고 광섬유의 삽입방향에 따라 AE 신호 취득의 민감도에 미치는 영향을 조사하였다. 최종적으로 인장하중하에서 직교적층판에 대해서 AE 신호를 감지함으로써 모재균열 발생을 감지할 수 있었고 Replica 법으로 이를 확인하였다. 모재균열이 포화되어 감에 따라 상대적으로 더 큰 에너지 방출에 의해 발달된 형태의 파를 검출할 수 있었다. 모재균열에 따른 AE 신호의 주파수 해석 결과 특정 주파수 대역은 120 kHz까지 입을 알 수 있었다.

\* 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과

## 기 호 설 명

$\vec{E}_0$ : 전기장의 진폭	$P_{ij}$ : Strain-optic tensor(or Pockel's optic tensor)
$\vec{\lambda}$ : 빛의 파장	$L$ : Michelson 간섭계에서 시편에 삽입된 길이차(gauge length)
$\vec{k}$ : 전파상수 ( $\frac{2\pi}{\lambda}$ )	$\Delta L$ : 변형량이 $\lambda/4$ 보다 큰 변형에 의한 광로차
$k_0$ : 진공 중에서의 전파상수 ( $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ )	$\delta$ : 변형량이 $\lambda/4$ 보다 작은 미소변형에 의한 광로차
$I$ : 빛의 세기	
$\Delta\phi$ : 기준경로와 감지경로의 위상차	
$n$ : 매질 내에서의 굴절율	
$\Gamma$ : 빛이 매질내에서 실제 이동한 경로	

## 1. 서 론

복합재료는 하중을 지지하는 강화섬유(reinforced fiber)와 강화섬유들을 결합하고 강화섬유로 하중을 전달하는 모재(matrix)로 구성되어 있으며 일반 금속재료에 비해 비강성, 비강도가 매우 높고 피로특성 등이 우수할 뿐만 아니라 역학적 특성인 이방성을 이용하여 원하는 특성의 구조물을 제작할 수 있는 등 기존의 재료들과는 다른 여러가지 구조적 장점을 갖는다. 그런데 이러한 복합재료의 역학적 특성은 금속재료와는 매우 다르고 파괴양상 등 역학적 거동이 매우 복잡한 양상을 보인다. 복합재료 손상 진전 과정은 많은 부분이 모재균열과 층간분리의 형태로 나타나는데 특히 초기 손상형태인 모재균열은 적층구조에 의해서 최종 파단을 즉시 유발하지는 않으나, 적층구조물의 강성, 강도 및 피로수명 등의 역학적 기능저하 효과에 큰 영향을 끼친다. 그러므로 복합재료를 사용한 구조물을 설계, 운용하기 위해서는 하중이력(load history)에 따른 위와 같은 손상상태 및 손상진전과 손상상태에 따른 구조물의 설계변수 즉 강성, 강도 등의 변화를 적절히 평가할 수 있도록 파손 특성에 대한 연구와 실질적인 손상 검출 방법의 발전이 요구되고 있다.

지금까지 개발된 대표적인 손상 검출 방법에는 X-ray, 초음파를 이용한 C-Scan 등의 비파괴 검사가 있다. 이러한 비파괴 검사는 작업자의 기술과 경험에 따라 의존적이며, 작업자의 손이 미치지 않는 부분이나 구조물이 작동중이거나 구조물 전

체의 검사가 필요한 경우 검사가 용이하지 않은 단점이 있다. 그러므로 구조물의 변형상태 및 파손 여부를 기존의 검사 방법보다 더 효과적으로 감지하기 위한 기구의 필요성이 요구되어져 왔는데 이러한 요구에 맞는 감지기를 구성하는 매체로 광섬유가 있다.

광섬유는 기본물질이 유리로 구성되는데 이는 복합재료의 강화재에 사용되는 섬유와 물성치가 비슷하여 복합재 내부에 쉽게 삽입되며 작동 온도 범위가 매우 넓고, 광섬유의 직경이 작고 유연하여 설계자가 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있다. 또한 손상의 실시간 검출이 가능하며 빛을 이용하므로 감도가 매우 뛰어나고 전자기파의 영향을 받지 않는다. 빛의 간섭(interference)을 이용하는 방법으로 광섬유센서를 구성하면 빛의 파장 단위까지 감지가 가능한 매우 높은 민감도(sensitivity)를 가지는 광섬유센서를 얻을 수 있으므로 AE(acoustic emission) 트랜스듀서(transducer)로도 사용될 수 있다. AE 신호로 복합재 구조물에서 발생한 손상을 검출할 수 있는데 AE는 일반적으로 어떤 하중하에서 일시적 응력파(transient stress wave)로 나타나는 내부에너지(internally stored energy)의 방출로 정의된다[1]. 복합재 구조물에서 이러한 응력파는 모재균열, 섬유파단과 모재/섬유의 분리등과 같은 미시적 손상(micro failure)에 의해 발생한다.

광섬유로 구성된 센서로 AE 신호를 검출하여 손상을 조사하는 연구는 현재 활발히 진행되고 있는

데, graphite/epoxy에 대해 모재균열과 섬유파단시 발생하는 AE 신호를 검출하거나[2], 인장하중하에서 손상이 발생했을 때 나오는 AE 신호를 취득하는 연구[3] 등과, 복합적층판에 저속충격 등으로 발생하는 AE 신호를 검출하여 손상유무와 위치를 판별하는 연구[4~7] 등이 수행되고 있다. 일반적으로 사용되는 압전형 트랜스듀서를 사용한 AE 신호 취득 장비로 모재균열 손상으로 인한 AE 신호에 대해 그 주파수 영역을 조사한 연구 등에서 Lee [8]는 graphite/PEEK에 대해 45~100 kHz, Gardner와 Pearson등[9]은 graphite/epoxy에 대해 그 주파수 영역이 80 kHz 이내에 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 광섬유를 이용하여 센서로서 기본적인 요소인 변형률 측정장치를 마이켈슨 간섭 방법으로 구성하고 이러한 변형률 감지 시스템을 AE 트랜스듀서로 이용하였다. 구성된 변형률 감지 시스템을 AE 트랜스듀서로 이용 하는데 있어서 타당성을 확인하기 위한 실험으로 복합적층보를 강제 진동 시킨 후 광섬유센서로부터 감지된 신호를 조사하여 AE 신호 감지 가능성을 확인하였다. 그리고 복합 적층판의 모재균열 발생 검출을 위해 인장실험시 모재균열이 가장 먼저 발생하는 적층구조를 가진 직교적층판(cross-ply laminate)에 대해 인장 실험을 하여 이때 발생하는 모재균열에 의한 AE 신호를 구성된 광섬유센서로 취득하였다. 또한 광섬유센서로 취득한 AE 신호로부터 모재균열 발생에 의한 복합재 구조물의 파손과 AE 신호 특성을 연구하였다.

## 2. 간섭을 이용한 AE 신호 취득 원리

간섭을 이용하여 센서를 구성하는 방법은 동일한 광원으로부터 두 개의 다른 경로를 만들어 그 두 경로차 즉 위상차에 의해 간섭이 발생하는 원리를 이용한다. 간섭을 이용한 센서의 구성은 양방향 커플러를 이용하여 두 개의 경로를 발생시켜 하나는 기준선(reference line)으로 다른 하나는 감지선(sensing line)으로 사용하여 감지선에 물리적인 외란이나 변화가 발생하면 감지선을 통과하는 빛의 위상이 달라져 기준선을 통과하는 빛의 위상과 차

이가 발생하여 상쇄간섭이나 보강간섭을 일으켜 감지선의 변화를 감지할 수 있다.

광섬유 내부를 진행하는 빛의 전기장 방정식은 다음과 같다.

$$\vec{E}_j = \vec{E}_{0j} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x}_j - \omega t)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\vec{E}_0$ 는 빛이 분할되기 전 전기장의 진폭이며,  $\vec{k}$ 는 전파상수이고  $\frac{2\pi}{\lambda}$ 로 표시되며  $\lambda$ 는 매질내를 진행하는 빛의 파장이다.  $\vec{x}$ 는 빛이 진행하는 변위이며  $\omega$ 는 빛의 주파수를 가르킨다. 하첨자  $j$ 는 경로를 나타내는데, 1은 기준경로이며 2는 감지경로이다. 경로 1, 2의 전기장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{E}_{01} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 - \omega t)} \\ \vec{E}_2 &= \vec{E}_{02} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 - \omega t)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

빛은 광섬유 끝단면의 미러(mirror)에서 반사되므로 광섬유 내부에서 진행하는 빛의 실제 이동거리는 광섬유 실제 물리적 길이의 두배가 되어 식 (1)의  $\vec{x}$ 가 식 (2)에서는  $2\vec{x}$ 가 되었다. 편광을 고려하지 않고 빛이 50 : 50으로 분할되는 경우  $\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02} = \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{2}}$ 이므로, 식 (2)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{2}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_1 - \omega t)} \\ \vec{E}_2 &= \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{2}} e^{i(2\vec{k} \cdot \vec{x}_2 - \omega t)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

경로 1과 경로 2가 간섭을 일으킬 경우 빛의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$I \propto (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 \*는 복소수의 공액(conjugate)을 의미한다. 식 (3)을 식 (4)에 대입하여 정리하면

$$I = I_0 \{1 + \cos 2\vec{k} \cdot (\vec{x}_2 - \vec{x}_1)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $I_0$ 는  $I_0 = \vec{E}_0^2$ 로서 광섬유에 입사되어 양방향 커플러에서 분할되기 직전의 빛의 세기이다. 식 (5)에서 위상(phase)과 변위의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = 2k(x_2 - x_1) = \frac{4\pi}{\lambda} L$$

여기서  $L$ 은 두 아암(arm)의 차이이며, 센서의 경우

게이지 길이(gauge length)에 해당한다. 양 변에 증분을 취하면

$$\frac{\Delta\phi}{(\Delta L + \delta)} = \frac{4\pi}{\lambda} = \frac{4\pi m}{\lambda_0} \quad \dots\dots\dots (6)$$

가 되고  $n$ 은 매질의 굴절율,  $\lambda_0$ 는 진공속에서 파장을 가리킨다. 여기서  $\lambda$ 는 광섬유에 입사된 빛의 파장인데  $\Delta L$ 은  $L_1 - L_2$ 로서  $\lambda/4$  보다 큰 변형에 의한 광로차를 의미하고  $\delta$ 는 응력과 전달 등에 의해 발생한  $\lambda/4$  보다 작은 미소변형에 의한 광로차를 의미한다. 광섬유는 변형을 받게 되면 굴절율이 변화하는 스트레인-옵틱(strain-optic) 효과가 있다. 그러나, 식 (6)은 스트레인-옵틱 효과를 고려하지 못하므로, Sirkis와 Haslach[8]는 스트레인-옵틱 효과를 고려한 수정된 식을 제안하였다.

$$\Delta\phi = nk_0 \int_L \left\{ \varepsilon_1 - \frac{n^2}{4} [P_{2j} + P_{3j}] \varepsilon_j \right\} ds \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서  $P_{ij}$ 는 스트레인-옵틱 텐서이며, 매질의 재료가 등방성이고 균질인 경우  $P_{11}$ 과  $P_{12}$  성분만 존재한다. 식 (7)에서  $L$ 는 빛이 실제 이동한 경로를 나타내며, 광섬유에 축방향 하중(axial loading)만 작용하면 응력성분은 다음과 같다.

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$$

이므로,  $\sigma$ 와  $\varepsilon$ 의 관계식에서

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 &= -\frac{\nu}{E} \sigma_1 = -\varepsilon_1 \nu \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = 0$$

이 된다. 식 (7)을 전개하면

$$\Delta\phi = nk_0 \left\{ \int_L \varepsilon_1 ds - \frac{n^2}{4} \int_L [P_{2j} + P_{3j}] \varepsilon_j ds \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

가 된다. 마이켈슨 간섭계의 경우 빛이 실제 이동한 경로는 광섬유 끝단면 미러에서 반사하여 되돌아 오기 때문에 기하학적 경로의 두 배가 된다. 그러므로 식 (9)의 우변 첫 번째 적분항은

$$\int_L \varepsilon_1 ds = \varepsilon_1 \int_L ds = 2 \varepsilon_1 L \quad \dots\dots\dots (10)$$

이 되고, 두 번째 적분항은 스트레인-옵틱 효과를 나타내는 항으로서 식 (8)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & \int_L [P_{2j} + P_{3j}] \varepsilon_j ds \\ &= 2 \int_L \varepsilon_1 \{ P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12}) \} ds \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

이 된다. 식 (10)과 식 (11)을 식 (9)에 넣어 정리하면

$$\Delta\phi = 2nk_0(\Delta L + \delta) \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})] \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

가 얻어진다. 위상과 길이의 관계를 나타내는 최종적인 식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\phi}{(\Delta L + \delta)} = \frac{4\pi m}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})] \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Table 1에 있는  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ 와  $\nu$ ,  $n$ 를 식 (13)에 대입하면

$$\frac{\Delta\phi}{(\Delta L + \delta)} = 2.724 \times 10^7 \quad (rad/m) \quad \dots\dots\dots (14)$$

를 얻게 된다. 광로차 중  $\lambda/4$  보다 큰 변형량  $\Delta L$ 에 의해 발생하는 신호는  $\lambda/4$  보다 작은 AE에 의한 미소변형에 의해 발생하는 신호보다 상당히 낮은 주파수 영역대에 해당하므로 이러한 저주파의 신호를 하이패스 필터(high pass filter)를 사용하여 제거하면 광섬유센서로부터 취득되는 신호의 위상차와 AE에 의한 미소변형량과의 관계는 최종적으로 아래 식 (15)와 같다.

$$\Delta\phi = 2.724 \times 10^7 \delta \quad (rad) \quad \dots\dots\dots (15)$$

식 (15)에서 보면 매우 미소한 변형량  $\delta$ 에 대

Table 1. Specifications of optical fiber(F-SV of Newport Company)

outer diameter	250 $\mu$ m
cladding diameter	125 $\mu$ m
core diameter	4 $\mu$ m
NA	0.1
coating	acrylate
$P_{11}$	0.121
$P_{12}$	0.270
$\nu$	0.17
$n$	1.456

해서도 위상차  $\Delta\delta$ 가 발생하므로 간섭신호를 취득할 수 있게 되어 광섬유센서는 AE 트랜스듀서로 이용이 가능하다. 즉 복합재 구조물내에 모재균열 등에 의한 파손이 발생했을 때 나오는 AE 신호를 감지할 수 있게 되어 파손의 발생유무를 판별할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 시편제작

시편제작에 사용된 프리프레그(prepreg)는 (주)한국카이온 사의 CU 125 NS graphite/epoxy이며, 한 층의 두께는 0.125 mm이고, 재료상수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_1 &= 135.4 \text{ GPa} & E_2 = E_3 &= 9.6 \text{ GPa} \\ G_{12} = G_{13} &= 4.8 \text{ GPa} & G_{23} &= 3.2 \text{ GPa} \\ \nu_{12} = \nu_{13} &= 0.31 & \nu_{23} &= 0.52 \\ X_T &= 1933 \text{ MPa} & Y_T &= 51 \text{ MPa} \end{aligned}$$

복합재 구조물의 변형이나 파손을 감지하기 위해서는 광섬유를 복합재 구조물내에 삽입해야 하는데 마이켈슨 간섭계는 두가닥의 광섬유가 삽입되어야 한다. 이들 광섬유의 끝단면은 입사된 빛이 반사되어 돌아 나올 수 있도록 반사율이 높은 금을 사용하여 진공증착 방법에 의하여 미러 코팅(mirror coating)을 하였다. 광섬유 끝단면의 미러 코팅이 완전한지 광학 현미경을 사용하여 확인하였다. 또한 코팅된 광섬유를 독취 현미경을 사용하여 삽입 길이 차인 게이지 길이를 측정한 후 복합재 시편 내부에 삽입하고 적층하여 성형하였다.

복합적층보의 강제 진동 실험에 사용된 시편은 낮은 가진력에도 적절한 진동이 발생할 수 있도록 적층하였으며 보의 진동시 변형률이 가장 많이 발생하는 제1 바깥 층에 삽입하였다. 시편의 적층 각은  $[45/\{0\}/45/-45_2/90_2/-45_2/45_2]_T$  이고 광섬유의 게이지 길이는 약 10 mm로 제작하였다. 성형 후 시편의 표면에 가진력을 주기 위한 작동기인 압전 세라믹(peizoelectric-ceramic, PZT)을 에폭시로 부착하였다. 압전 세라믹이 부착된 후 시편을 다이

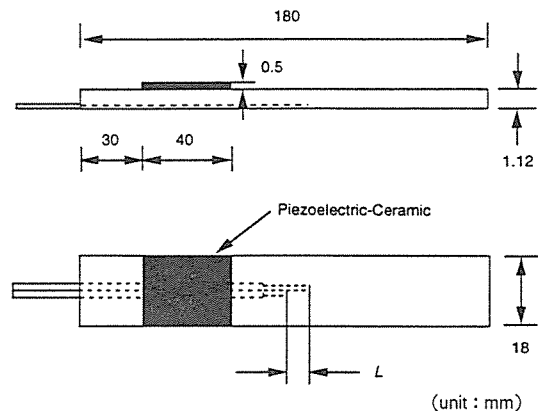


Fig. 1. Configuration of the beam test specimen.

아몬드 휠 커터(diamond wheel cutter)를 이용하여 절단하였으며 시편의 전체적인 형상은 Fig. 1과 같다.

인장실험에 사용된 시편은 여러 파손 모드 중 모재균열만을 취득할 수 있도록 초기 파손형태가 모재균열로 나타나는 직교 적층판으로  $[0_2/90_n]_S$ 의 적층 구조를 가지도록 하였다.  $n=4, 8$ 로 하여 광섬유의 삽입 방향이  $\{0\}$ 인  $[0/\{0\}/0/90_8/0_2]_T$ ,  $[0/\{0\}/0/90_{16}/0_2]_T$  시편과 삽입 방향이  $\{90\}$ 인  $[0_2/90_4/\{90\}/90_4/0_2]_T$ ,  $[0_2/90_8/\{90\}/90_8/0_2]_T$ 의 시편으로 광섬유의 삽입 방향이 두 종류인 시편을 제작하였다. 광섬유의 게이지 길이는 삽입방향이  $\{0\}$ 일 때는 10 mm이며, 삽입방향이  $\{90\}$ 일 때는 5 mm이다. 각각에 대한 시편의 형상은 Fig. 2와 같다. 접착 필름(FM-73)을 이용하여 두께 2 mm의 glass/epoxy 탭을 시편에 부착하였고 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 시편을 절단하였다. 절단시 발생한 자유 경계단의 손상 영역을 제거하기 위해 사포로 #1200까지 사용하여 시편 자유단을 연마하였다. 또한 측면 관찰을 위해 에지 레플리카(edge replica)의 선명도를 증가시키기 위하여 시편 측면을 1  $\mu\text{m}$ 의 알루미늄 분말을 사용하여 연마하였다. 인장실험시 모재균열의 발생을 감지하기 위해 게이지 길이가 30 mm로 비교적 긴 KYOWA 사의 스트레인 게이지(KFG-30-120-C1-11)를 시편의 시험부(test section)에 부착하였다.

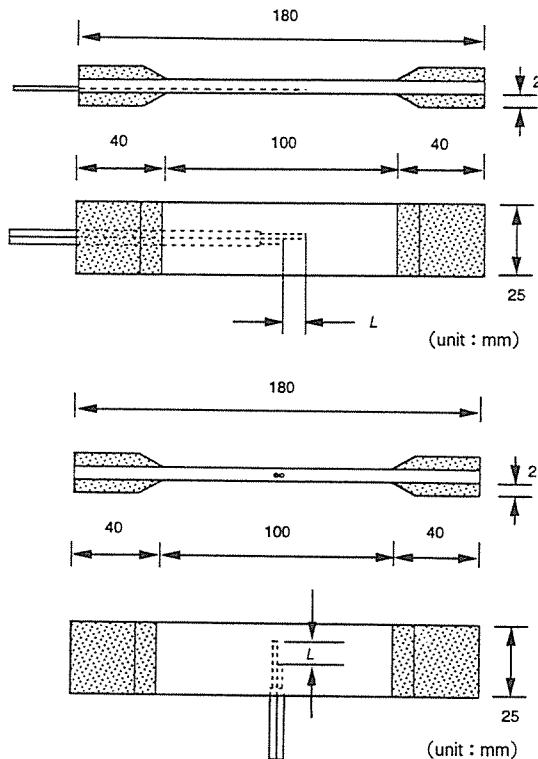


Fig. 2. Configuration of the tensile test specimen.

### 3-2. 실험장치

광섬유로 구성된 마이켈슨 간섭계의 실험장치는 대개 다음과 같은 다섯 부분으로 나눌 수 있다. 즉 광원으로 쓰이는 레이저, 광섬유에 빛을 입사시키는 부분, 간섭을 발생시키는데 필수적인 광분할 부분, 간섭 신호를 전기적 신호로 바꾸어 주는 부분 및 데이터 취득 부분으로 분류된다.

레이저는 편광비(polarization ratio)가 500 : 1, 최대출력 10 mW인 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)를 사용하였으며, 헬륨-네온 레이저의 파장은 632.8 nm이다. 실험에 사용된 광섬유는 Newport사의 싱글모드 광섬유(F-SV)이며, Table 1에 이 광섬유의 사양(specifications)을 표시하였다. 광섬유에서 빛을 분할하고 결합하는 장치를 양방향 커플러라고 하는데, Newport사의 F-506B를 사용하였다. 20배율의 현미경 렌즈와 미세 조절장치를

사용하여 광섬유에 빛을 입사시켰다. 간섭신호를 전기적 신호로 바꾸어 주는 장치로 Newport사의 포토디텍터(818-SL)를 사용하였다. 이 포토디텍터의 시간 응답성(time response)과 선형성(linearity)을 향상시키기 위해 역 바이어스 회로(reverse bias circuit)를 제작하여 포토디텍터에 연결하였다.

복합적층보의 강제 진동 실험에 대한 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 여기서 출력신호를 DANTEC사의 56N20 신호 조절기(signal conditioner)를 사용하여 필터링(filtering)과 증폭을 시킨 후 HP사의 54502A 디지털 스토리지 오실로스코프(digital storage oscilloscope)로 데이터를 취득하여 IEEE-488 인터페이스 보드(interface board)를 이용하여 PC로 전송해 데이터 처리를 하였다.

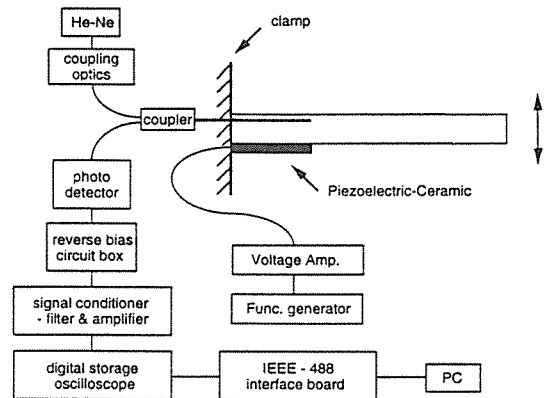


Fig. 3. Schematic diagram of the forced vibration test for composite beam.

인장실험에 대한 실험장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 본 실험에서는 유압식 재료 시험기인 10 ton 용량의 INSTRON사 (Model 1350)의 만능시험기를 사용하여 인장실험을 수행하였다. 모재균열에 의해 발생되는 신호는 복합적층보의 실험에서와 같은 신호 조절기와 디지털 스토리지 오실로스코프 등을 사용하여 IEEE-488 인터페이스 보드를 이용하여 PC로 데이터를 전송하였다.

### 3-3. 실험방법

시편에 삽입된 두 광섬유는 양방향 커플러의 두

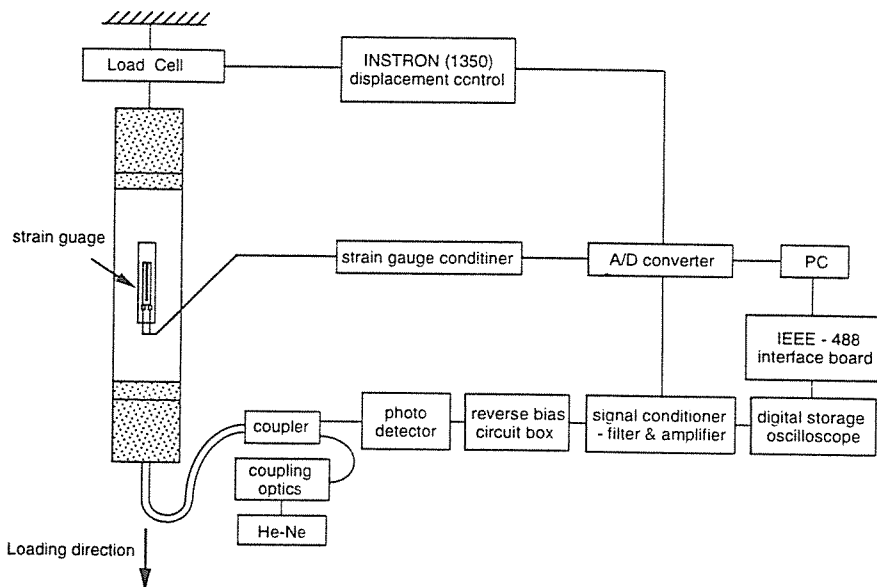


Fig.4. Schematic diagram of the tensile test for detection of matrix cracking in composite laminates.

선과 아아크 퓨전 스플라이서(arc fusion splicer)를 사용하여 연결한다. 복합적증보의 강제 진동 실험의 경우 커플러와 연결된 시편은 클램프(clamp)에 고정시키고 신호 발생기(function generator)로 일정 주파수의 정현파 신호를 발생시켜 이를 전압 증폭기(voltage amplifier)를 거쳐 증폭시킨 후 압전 세라믹에 연결하여 보를 가진시켰다. 보는 가진된 주파수에 따라 강제 진동하게 되는데 이 고주파의 진동수에 따라서 출력되는 간섭신호를 디지털 스토리지 오실로스코프로 취득하여 PC로 저장하였다. 저장된 신호는 FFT(fast Fourier transform)의 과정을 거쳐서 광섬유센서로 취득한 신호의 주파수 특성을 얻을 수 있게 되어 신호 발생기로 발생시킨 주파수와 비교할 수 있게 된다.

인장실험에서 커플러와 연결된 시편은 INSTRON사의 만능 시험기에 설치하고 1.5 mm/min의 변위제어(displacement control) 하에서 인장실험을 하였다. 직교적층 인장시편의 기지균열 발생하중을 측정하기 위하여 게이지 길이가 30 mm인 스트레인 게이지의 변형을 센서를 이용하였다. 스트레인 게이지의 신호는 Vishay사의 스트레인 게이지 컨디셔너(2100 system)를 사용하고 디지털 스토리지 오실로스코프와 A/D 변환기에 연결하여 데이터를

처리하였다. 초기에 발생하는 모재균열은 복합재료 자체의 불균질성으로 인하여 랜덤하게 발생하므로 게이지 길이가 작은 변형률 센서를 사용할 경우 초기 파손이 센서의 위치에서 벗어난 곳에서 발생하면 응력-변형률 곡선에서는 단순히 탄성역역에서의 응력제하 효과만 나타나게 되어 초기 파손하중 측정이 어렵게 된다. 이러한 실험상의 문제점을 해결하기 위해서 게이지 길이가 긴 변형률 센서를 이용하였다. 초기 모재균열 발생 하중은 적층구조의 응력-변형률 곡선에서 파손으로 인한 pop-in 현상 (혹은 knee-point) 발생점으로부터 측정이 가능하다[11].

본 연구에서는 레플리카법을 이용하여 여러 하중상태에 대해 삽입된 광섬유센서의 게이지 길이 부분에 해당하는 시편 측면의 균열상태를 관찰하였다. 레플리카법은 매우 얇은 아세틸 셀룰로오스 필름(acetyl cellulose film)의 표면을 메틸 아세테이트(methyl acetate)의 용제에 녹인후에 시편 측면에 부착시켜 균열 양상을 필름에 새기는 것이다. 어떠한 하중단계에 대해서도 측정이 가능하고 필름을 여러 번 채취할 수 있으므로 간단하면서도 정확한 방법이다.

변형을 발생으로 인한 광섬유에서 나오는 간섭

신호는 100 Hz의 절점 주파수(cut-off frequency)를 갖는 로우패스 필터(low pass filter)를 거쳐 20배 증폭된 후 디지털 스토리지 오실로스코프와 A/D 변환기를 통하여 PC에 저장하여 데이터의 후처리에 이용하였다.

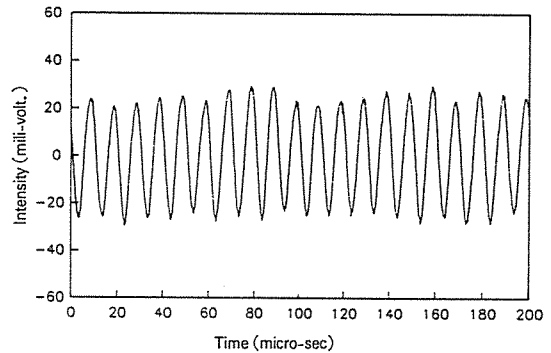
모재균열에 의해 발생한 AE 신호는 광섬유센서에 의해 감지되고 그로 인한 신호는 인장에 의한 변형률로부터 발생한 간섭신호와 주위의 온도변화나 공기의 흐름에 의한 간섭신호 등을 제거하기 위하여 신호 조절기를 사용하여 300Hz~200 kHz 주파수 대역을 갖는 밴드패스 필터(band pass filter)를 거쳐 200배 증폭된 후 디지털 스토리지 오실로스코프에 샘플링 시간(sampling time)을  $10^{-6}$  sec로 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터는 PC로 저장하였다. AE 신호의 주파수 분석시 사용된 신호의 데이터 갯수는 2048개로 하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

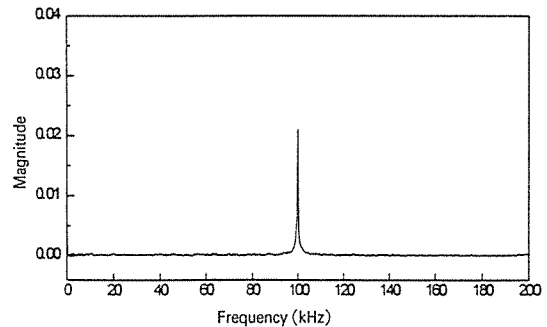
##### 4-1. 강제 진동 복합적층보의 신호 고찰

마이켈슨 간섭계로 구성된 광섬유센서가 모재균열 발생에 따른 고주파의 AE 신호를 취득할 수 있는지 가능성을 확인하기 위해 광섬유를 복합적층보에 삽입하고 이를 강제 진동시키면서 광섬유센서로부터 취득되는 신호 특성을 조사하였다.

복합적층보를 가진시키는 가진기로 압전세라믹이 부착되어 있고 기존의 연구된 모재균열에 의해 발생하는 AE 신호의 주파수 대역과 동일한 정도의 대역에서 일정 주파수를 신호 발생기로 발생시키고 전압증폭기로 증폭하여 압전세라믹을 통해 복합적층보를 가진시켰다. 각 보에 삽입된 두 광섬유는 가진 주파수에 따른 보의 진동으로 경로차가 발생하여 빛의 간섭이 일어난다. 신호 발생기로부터 정현파로 100 kHz의 주파수로 보를 가진시켰을 때 삽입된 광섬유에 의해 취득된 간섭신호와 이러한 간섭신호를 주파수 분석한 후의 결과가 Fig. 5에 나와 있다. 간섭신호는 정현파 형태로 나오며 주파수 분석 결과를 보면 광섬유센서의 신호 취득 정확도가 확연히 드러난다. 즉 가진 주파수와 이에



(a) Intensity vs. time curve.



(b) FFT results showing the power spectrum.

Fig. 5. Results for 100kHz-input frequency in the forced vibration test for composite beam.

의해 가진된 보에 삽입된 광섬유센서가 감지한 주파수는 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있고 100 kHz의 높은 주파수 신호 영역대까지 광섬유센서가 왜곡없이 신호를 취득함을 알 수 있었다.

이와 같은 실험결과로 모재균열 파손에 의해 발생하는 AE 신호를 취득하기 위한 AE 트랜스듀서로 광섬유센서를 사용할 수 있음을 확인하였다.

##### 4-2. 복합적층판내에 삽입된 광섬유센서의 건전성 고찰

인장실험하에서 복합적층판내에 삽입된 광섬유센서로 모재균열에 의한 손상을 검출하기 위해서는 하중이력에 따른 전 실험 과정동안 광섬유센서가 건전하여야 한다.

광섬유센서의 게이지 길이를 정확히 측정한 후 복합적층 인장시편내부에 하중 방향과 평행하게

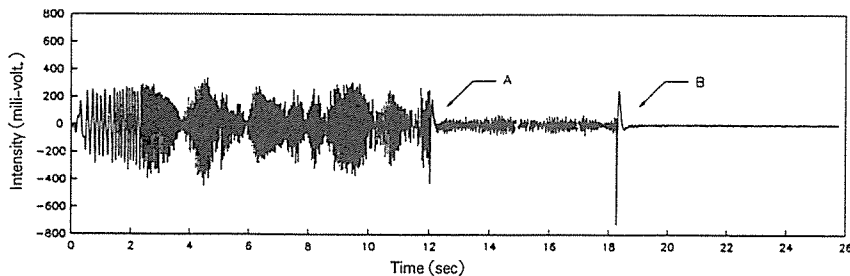


삽입하면 하중의 증가에 따른 시편의 변형에 따라 광섬유센서로부터 간섭신호를 취득할 수 있고 이로부터 정확한 변형률의 측정이 가능하다[12]. 또한 AE 신호에 의한 미소변형으로 일어나는 간섭신호를 취득함으로써 모재균열로 인한 손상의 검출이 가능한데, 본 연구에서는 광섬유센서의 건전성을 평가하기 위하여 이러한 간섭신호가 나오는 한계를 센서 기능을 할 수 있는 한계로 설정하였다. 실험에 사용된 시편은  $[O_2/90_5]_5$ 의 직교적층 구조로 광섬유를 중첩면  $90^\circ$ 층 사이에 삽입한 것과  $0^\circ$ 층 사이에 삽입한 것의 두 종류로 제작하였다. 두 종류 모두 시편의 게이지 길이는 1cm로 하였으며 광섬유의 삽입방향을 하중의 방향에 평행하게 하였다.

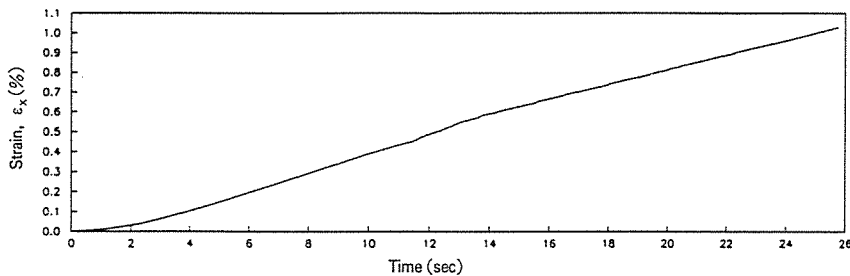
Fig. 6은  $90^\circ$ 층 사이에 광섬유를 삽입한 시편에 대해 인장실험을 하여 시간에 대한 빛의 세기와 변형률을 나타낸 선도이다. Fig. 6(a)를 보면 간섭신호의 진폭이 두 부분에 걸쳐 감소됨을 볼 수 있는데 이러한 진폭 감소는 복합적층판 내부에 삽입된 광섬유의 파단에 기인한다. 광섬유는 일반적으로 주성분이 유리로 구성된 코어(core), 클래딩(cladding) 부분과 이를 보호하는 피복(buffer coating) 부분으로 되어 있다. 광섬유센서 끝단면 미러코팅과 변형률이나 AE 등에 의한 응력과 전달 등을 감지하는데 있어서 민감도의 증대를 위해 광섬유의 피복

부분을 제거하여야 하는데 피복 제거 후 클래딩 부분은 인장 강도가 피복이 있을 때 비하여 현저히 떨어지므로[13] 피복이 제거된 부분에서 광섬유의 파단이 일어난다.

Fig. 6에서 A부분 이전의 간섭신호의 진폭이 일정한 폭안에 있지 않고 주기적으로 증대와 감소를 반복하는데 이는 적층시 광섬유가 얼라인먼트(alignment)가 맞지 않아 전단 변형을 받았거나 시편 밖으로 나온 선이 비틀림이나 굽힘을 받아 편광축의 변화가 발생한다에 기인한다. 시간대 변형률 선도를 보면 A부분은 모재균열이 다발적으로 발생하는(multiple matrix cracking) 영역임을 알 수 있고 이러한 모재균열 과정에서 모재에 완전 접촉되어 있는 광섬유가 파단되어 빛의 간섭신호 진폭이 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 이 시점의 변형률은 약 0.49%임을 알 수 있다. 모재균열이 다발적으로 발생하여 섬유의 파단이 일어나 빛의 진폭이 저하는 되었으나 미소하게 간섭신호는 나오는데 이는 광섬유가 한 두 곳에서 파단되었다고 파단 초기 단계에서는 파단된 광섬유 중심간의 얼라인먼트가 어느 정도 일치하여 빛이 전달되기 때문이다. B부분 즉 0.75% 변형률 정도에서 광섬유는 완전 파단되어 빛이 전달되지 않아 간섭이 일어나지 않고 신호가 소멸하는 것을 볼 수 있다.



(a) Intensity vs. time curve.



(b) Strain vs. time curve.

Fig. 6. Intensity and strain histories of  $[O_2/90_5/\{0\}/90_5/O_2]_T$  laminate.

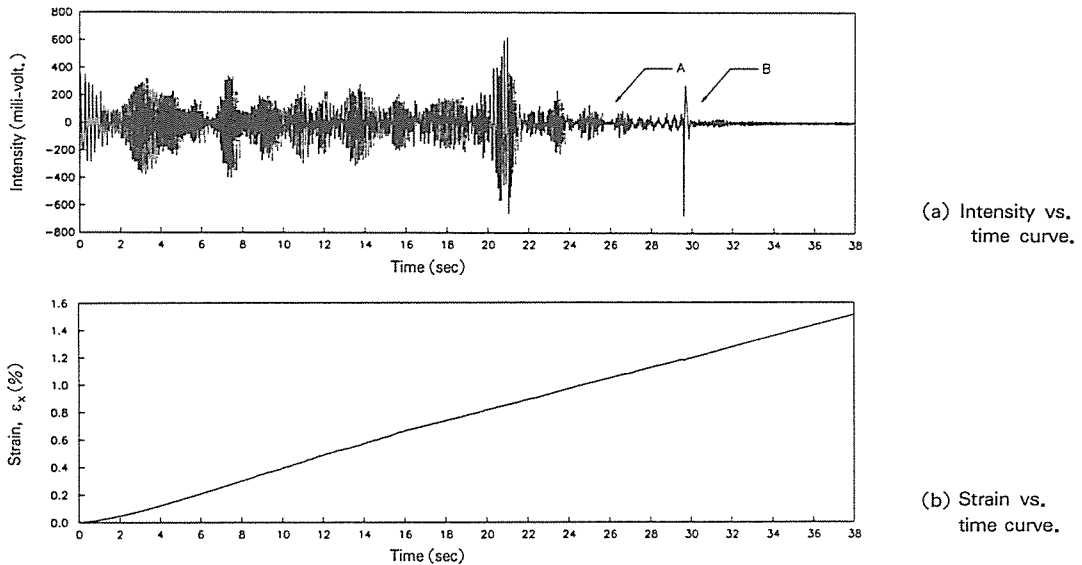


Fig. 7. Intensity and strain histories of  $[0/[0]/0/90_{10}/0_2]_T$  laminate.

변형률 약 0.49% 까지 나오는 빛의 간섭신호가 변형률이나 AE 신호 등을 감지할 수 있는 유효한 간섭신호이기 때문에 이 부분 이후에서는 광섬유 센서가 센서로서의 기능을 상실한다고 볼 수 있다.

Fig. 7은  $0^\circ$ 층 사이에 광섬유를 삽입한 시편에 대해 인장실험을 하여 시간에 대한 빛의 세기와 변형률을 나타낸 선도인데 경향은 앞의 경우와 비슷하나 광섬유의 파단이 더 늦게 발생함을 알 수 있다. 즉 센서로서 기능을 상실하는 시점의 변형률이  $90^\circ$ 층 사이에 삽입했을 때와는 달리 약 1.05%이고 광섬유의 완전파단 시점의 변형률은 약 1.18%이다. 광섬유를  $90^\circ$ 층 사이에 삽입했을 때와는 달리 센서로서의 기능 상실시점과 완전 파단 시점이 늦춰진 이유는 광섬유가  $0^\circ$ 층 사이에 삽입되어 있으므로  $90^\circ$ 층 사이에서 발생하는 다양한 형태의 모재균열로부터 영향을 받지 않기 때문이다.

모재균열에 의해 발생한 응력파는 직교적층 구조에서  $90^\circ$ 층과  $0^\circ$ 층으로 전파되어 광섬유의 삽입 위치에 큰 영향없이 AE 신호를 감지할 수 있다. 그러나 이상의 결과를 통하여 광섬유를 하중 방향과 평행하게 삽입하였을 때는 모재균열에 의한 AE 신호를 취득하는데 있어서 상당히 큰 변형률에 대해서도 센서로서의 기능이 건전할 수 있도록 광섬유를

$0^\circ$ 층에 삽입하는 것이  $90^\circ$ 층에 삽입하는 것보다 유리함을 알 수 있다.

#### 4-3. 복합적층판의 모재균열 검출

인장하중 하에서 발생하는 모재균열을 검출 하기 위해  $[0_2/90_4]_S$ ,  $[0_2/90_8]_S$ 의 직교적층구조에 각각 광섬유를 하중 방향에 평행하게 삽입한 것과 수직하게 삽입한 시편에 대하여 실험을 하였다. 각 적층각에 대해 응력-변형률 선도와 직선 모재균열

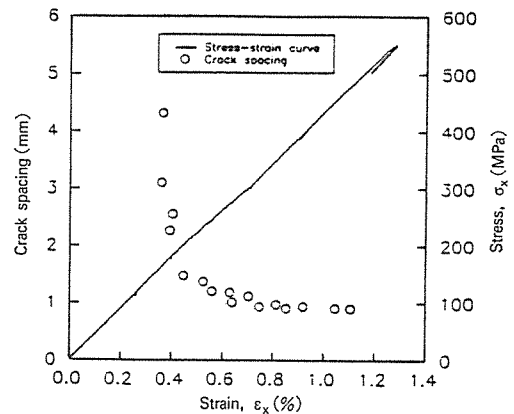


Fig. 8. Stress-strain curve and crack multiplication plot of  $[0_2/90_4]_S$  laminate.

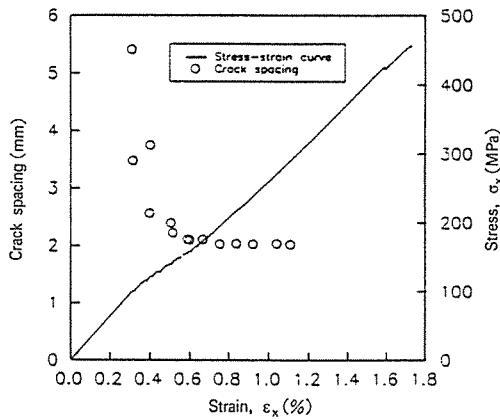
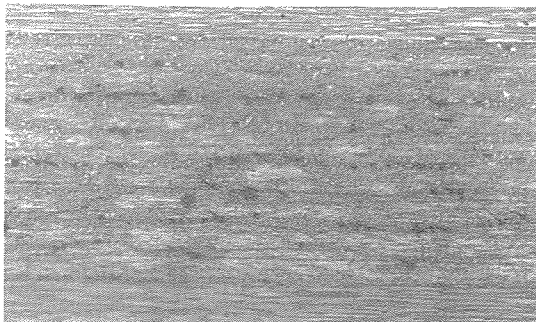


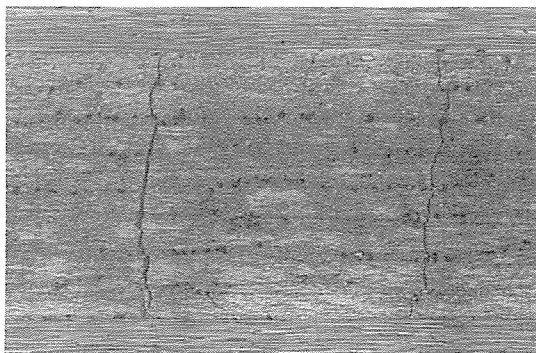
Fig. 9. Stress-strain curve and crack multiplication plot of  $[0_2/90_8]_s$  laminate.

간의 거리를 Fig. 8, 9에 나타내었다. 광섬유센서로부터 초기 모재균열에 의해 AE 신호가 취득되었을

edge replica×50

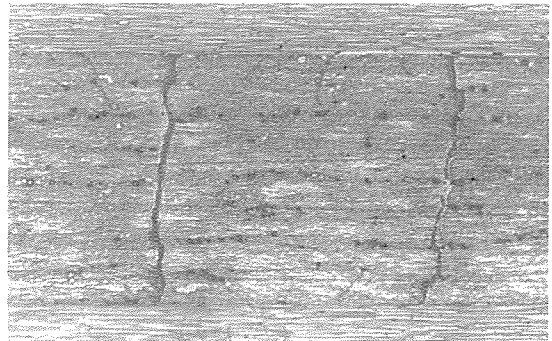


$\epsilon_x = 0.326\%$



$\epsilon_x = 0.402\%$

Fig. 10. Multiplication of matrix crack in  $[0_2/90_4]_s$  laminate.

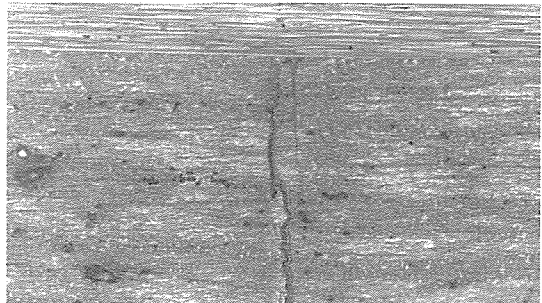


$\epsilon_x = 0.745\%$

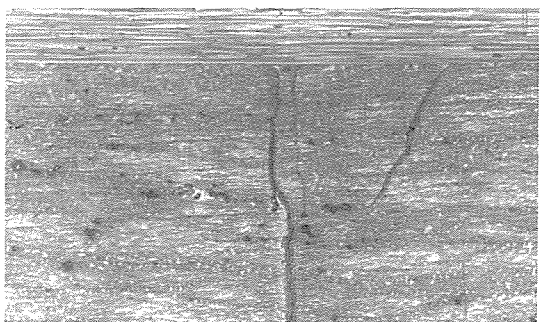
Fig. 10. Continued

때와 모재균열이 다발적으로 발생하여 AE 신호가 취득될 때 replica법으로 파손상태를 확인한 결과가 Fig. 10, 11에 나와 있다. 여기서 Fig. 11은  $[0_2/90_8]_s$ 의 층이 다른것에 비해 상대적으로 너무 두꺼워 층 두께의 반을 나타내었다. 모재균열이 포화되었을

edge replica×50



$\epsilon_x = 0.308\%$



$\epsilon_x = 0.505\%$

Fig. 11. Multiplication of matrix crack in  $[0_2/90_8]_s$  laminate.

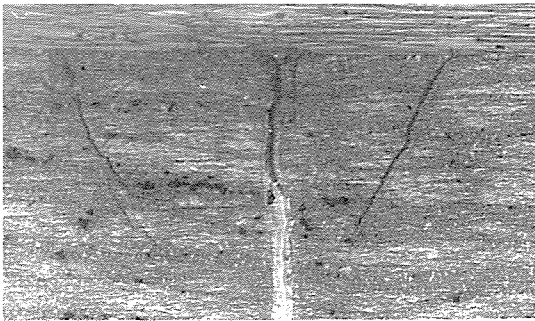

 $\epsilon_x = 0.754\%$ 

Fig. 11. Continued

때에 균열간의 거리는  $90^\circ$ 층이 많을수록 길어지는 것을 Fig. 8, 9에서 알 수 있으며 이는 파손밀도가 증가함에 따라 경사균열과 같은 다양한 작은 균열 등이 발생하기 때문이다. 이것은 Fig. 10, 11에서도 확인이 된다. 또한 Fig. 8, 9의 응력-변형률 선도에서 보듯이  $90^\circ$ 층이 많을수록 파손밀도 증가로 인한 적층구조의 강성저하가 큼을 알 수 있다. 이는 파손층 두께가 두꺼울수록 파손층이 지지하는 하

중이 클 뿐만 아니라 파손면의 큰 균열 열림변위에 기인한다[14].  $[0_2/90_4]_S$ ,  $[0_2/90_8]_S$ 의 적층구조에 대해서 광섬유를 하중 방향과 평행하게 {0}로 삽입한 것과 하중 방향에 수직하게 {90}로 삽입한 시편에 대해 광섬유센서로 취득한 AE 신호를 Fig. 12, 13, 14에 나타내었다. 광섬유센서 AE 신호를 처음 취득한 시점의 변형률은 모재균열이 발생하는 초기에 해당하고 이때의 신호형태는 Fig. 12에서 보듯이 DC 수준의 갑작스런 증가로 나타났다. 이는 모재균열 초기에는 균열간의 거리가 멀고 또한 이로 인해 취득되는 파손 에너지가 미약하여 완전한 파의 형태를 갖추지 못하는 것이다. 초기 직선 모재균열이 발생할 때 취득한 AE 신호와 비교하여 직선 모재균열이 생긴 후 완전히 발달해 나갈 때 잡은 신호 형태인 Fig. 13을 보면 균열간의 거리도 가까워지고 다수의 경사균열 등이 발생하여 상대적으로 큰 파손에너지에 의해 상당히 발달된 파형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 하중 방향에 수직하게 삽입된 광섬유센서로 모재균열에 의한 AE 신호를

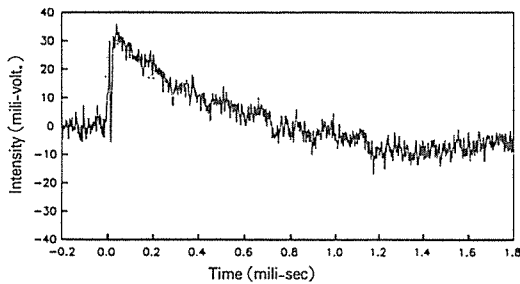
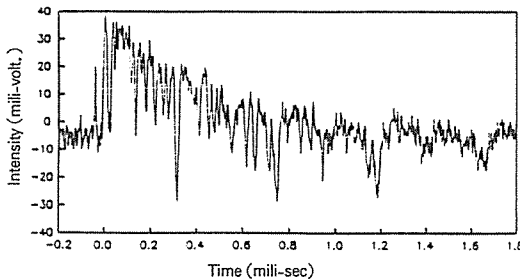
(a) For  $[0/0/0/90_8/0_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.361\%$ (b) For  $[0/0/0/90_{16}/0_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.314\%$ 

Fig. 12. AE signal at the initial matrix cracking strain detected from the optical fiber sensor embedded parallel to the load direction in cross-ply laminate.

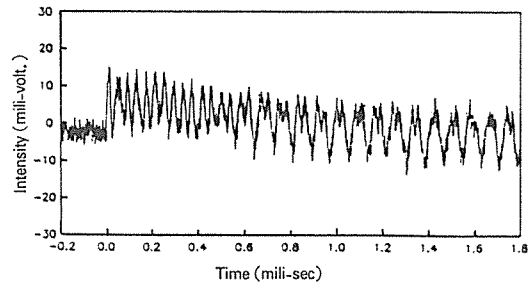
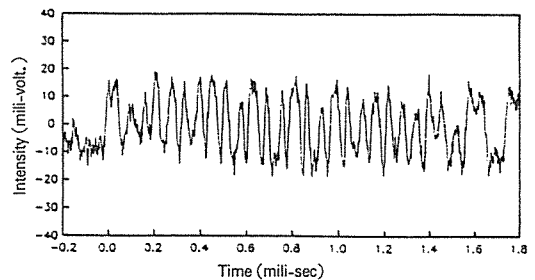
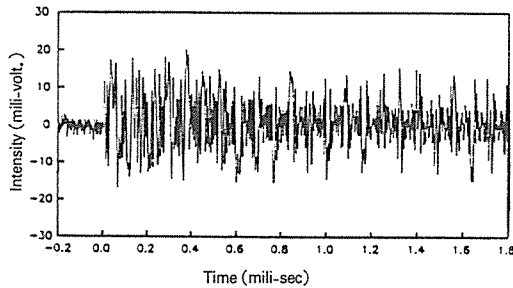
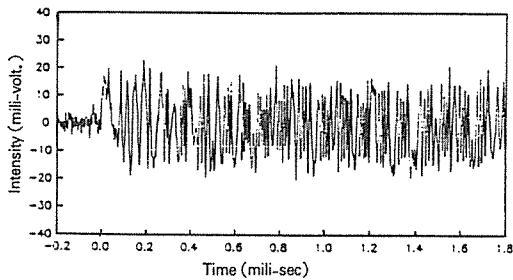
(a) For  $[0/0/0/90_8/0_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.444\%$ (b) For  $[0/0/0/90_{16}/0_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.515\%$ 

Fig. 13. AE signal at the multiple matrix cracking strain detected from the optical fiber sensor embedded parallel to the load direction in cross-ply laminate.

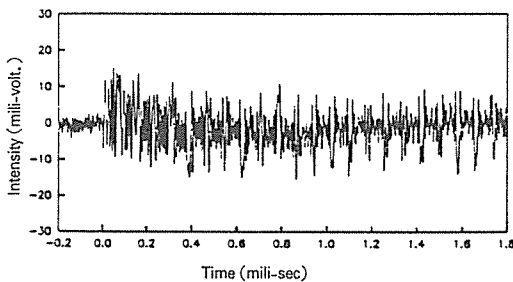


(a) For  $[0_2/90_4/[90]/90_4/O_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.402\%$

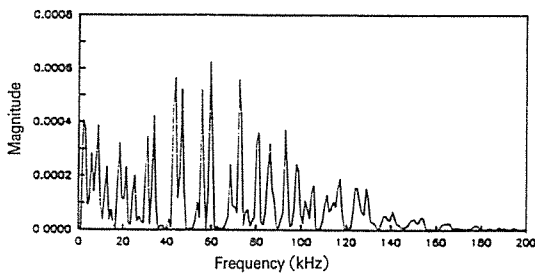


(b) For  $[0_2/90_8/[90]/90_8/O_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.505\%$

Fig. 14. AE signal at the multiple matrix cracking strain detected from the optical fiber sensor embedded perpendicularly to the load direction in cross-ply laminate.

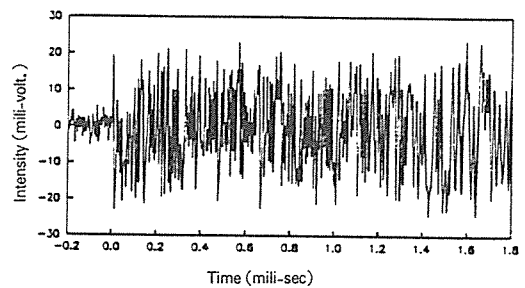


(a) Intensity vs. time curve.

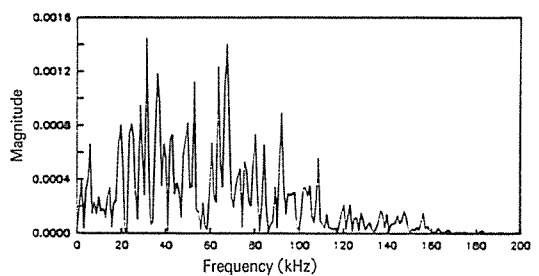


(b) Magnitude vs. frequency curve.

Fig. 15. AE signal and power spectrum from matrix cracking in  $[0_2/90_4/[90]/90_4/O_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.452\%$



(a) Intensity vs. time curve.



(b) Magnitude vs. frequency curve.

Fig. 16. AE signal and power spectrum from matrix cracking in  $[0_2/90_8/[90]/90_8/O_2]_T$  laminate at  $\epsilon_x = 0.521\%$

취득한 것이 하중 방향에 평행하게 삽입된 시편에 비해 더 발달된 파의 형태를 나타내는 것을 Fig. 14에서 볼 수 있는데 이것은 삽입된 광섬유가 변형을 받지 않고 있는 상태여서 파의 전달에 의한 신호를 더 민감하게 감지하는 것으로 생각된다. 이러한 발달된 파는 모재균열이 포화될 때까지 계속적으로 취득할 수 있었다. 하중방향에 수직하게 광섬유를 삽입한  $[0_2/90_4]_S$ ,  $[0_2/90_8]_S$  시편에 대해 직선 모재균열 발생시 취득한 AE 신호에 대해서 주파수 분석을 하였다. Fig. 15, 16을 보면 직선 모재균열에 의해 발생하는 AE 신호의 주파수 대역 특성은 가칭 주파수 대역인 20 kHz 이내를 포함해서 약 120 kHz까지 주파수 대역을 형성하고 있음을 알 수 있고 이는 기존 연구결과[8~9]에서 밝혀진 주파수 대역과 잘 일치한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 마이켈슨 간섭계를 이용하여 복합재 구조물에서 파손에 의해 발생하는 AE 신호를 취득할 수 있는 광섬유센서 시스템을 구성하였으며

구성 되어진 시스템을 복합적충보의 강제 진동 실험에 적용하여 AE 신호의 취득 가능성을 확인하였다. 확인된 광섬유센서 시스템을 인장실험하에서 적용조건을 밝히고 최종적으로 복합적충판내에 발생하는 모재균열로 인해 취득된 AE 신호를 조사하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- (1) 마이켈슨 간섭계로 구성된 광섬유센서는 복합재 구조물의 모재균열 발생에 따른 AE 신호를 감지함에 있어서 주파수의 왜곡없이 매우 정확하게 취득할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 인장하중에 의한 모재균열 검출을 위해 인장시편에 하중 방향과 평행하게 광섬유를 삽입하였을 때 90°층 사이에 삽입된 광섬유는 여러 형태의 모재 균열에 의해 낮은 변형률에서 파단이 일어나므로 모재균열로부터 광섬유가 보호될 수 있는 0°층 사이에 삽입하는 것이 유리함을 알 수 있었다.
- (3) 인장에 의한 외부하중을 받는 복합적충판에서 광섬유센서로 모재균열 발생을 감지할 수 있었고 레플리카법으로 이를 확인하였다.
- (4) 모재균열에 의해 발생하는 AE 신호는 하중 방향에 평행하게 삽입된 광섬유센서 보다 수직하게 삽입된 광섬유센서가 더 발달된 형태의 AE 파를 감지할 수 있었다.
- (5) 모재균열이 포화되기까지 계속적으로 AE 신호를 취득할 수 있었고 이때에 취득된 AE 신호를 주파수 분석한 결과 모재균열에 의해 발생하는 주파수는 약 120kHz까지 영역대를 형성하고 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Don E. Bray, Don McBride, Nondestructive testing techniques, Wiley-Interscience, 1992.
2. K. D. Bennett, R. O. Claus, "Internal monitoring of acoustic emission in graphite-epoxy composites using imbedded optical fiber sensors," Proc. Review of Progress in Quantitative NDE Conf., 1986, pp.331-335.
3. Kexing Liu, Suzanne M. Ferguson, and Keith McEwen, "Acoustic emission detection for composite damage assessment using embedded ordinary single-mode fiber-optic interferometric sensors," SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins II, Vol.1170, 1989, pp.205-210.
4. Andrew K. Tay, Dale A. Wilson, and A. Cancer Demirdogen, "Microdamage and optical signal analysis of impact induced fracture in smart structures," SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins III, Vol.1370, 1990, pp.328-343.
5. Z. J. Lu, F. A Blaha, "A fiber optic strain and impact sensor system for composite materials," SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins II, Vol.1170, 1989, pp.239-248.
6. 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.
7. P. Pojanasombon, S. E. Watkins, and K. Chandrashekhara, "Strain sensing of low-velocity impacts for smart composite plate," Proceedings of the ICIM 2nd conference, June 5-8, 1994, pp.985-993.
8. 이강용 외, "고인성 열가소성 복합재료의 적층제작 및 기계적 특성연구," 한국과학재단 특정연구과제 보고서, 1992, pp. IV 1-IV 100.
9. 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.
10. 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.
11. 임승규, "Cross-Ply 복합적충구조의 섬유방향 파손특성에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1988.
12. 박중완, "광섬유센서를 이용한 복합 적충판의 변형률 측정," 석사학위논문, 한국과학기술원, 1994.
13. T. Fukuda, K. Osaka, "Detection of crackings in polymer matrix composites with an embedded optical fiber," 第21回 FRP Symposium 講演論文集, 1991, pp.38-40.
14. S. G. Lim and C. S. Hong, "Prediction of Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Cross-Ply Laminated Composites," J. of Composite Materials, Vol.23, July, 1989, pp.695-713.