

論文

지능형 복합재 적층판 구조물에 삽입된 광섬유센서의 정적 인장강도에 관한 연구

장태성* · 이정주*

A Study on the Static Strength of Optical Fiber Sensor Embedded in Smart Composite Structures

Tae-Seong Jang* and Jung-Ju Lee*

ABSTRACT

Statistical analysis and experiment with test machine newly devised for the static strength of optical fiber embedded within composite laminates was performed. The static strength of optical fiber embedded within the composite laminate was measured by the use of intensity drop-off of laser signal transmitted through the optical fibers. The optical fiber embedded within composite laminate showed lower static strength compared to the strength of bare optical fiber due to the thermal degradation. However the strength of embedded optical fiber was higher than that of the bare optical fiber which was exposed to the same thermal cycle as that of curing of composite. The fracture of optical fiber embedded within the cross-ply laminate was caused by the transverse matrix crack, while the fracture of optical fiber within the unidirectional-ply laminate was caused by the internal defect of optical fiber itself.

초 록

정적 하중 하에서의 광섬유의 강도에 대한 통계적 방법을 이용한 이론적 해석을 수행하고, 정적 강도 측정을 위한 새로운 실험장치를 고안하여 실험을 수행하였다. 직교 적층판과 일방향 적층판의 인장시험에서 측정된 시편의 응력-변형률과 삽입된 광섬유센서를 통과한 레이저신호 세기와의 관계를 이용하여, 적층판에 삽입된 광섬유센서의 강도를 측정하였다. 복합재 적층판 내에 삽입된 광섬유의 인장강도는 삽입되지 않은 광섬유의 강도에 비하여 낮게 나타났으며 이는 경화과정에서 유발된 열영향으로 인한 강도의 저하로 사료된다. 그러나 적층판에 삽입된 광섬유의 강도는 적층판에 삽입되지는 않았지만 복합재 경화과정과 동일한 온도과정에서 노출되었던 광섬유에 비해서 더 높은 인장강도를 보였다. 직교적층판에 삽입된 광섬유는 횡방향 적층의 기지균열에 의해서 파단되며 반면에 일방향 적층에 삽입된 광섬유의 파손은 광섬유 내부에 존재하는 결함에 의해서 발생된다.

*한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

복합재 구조물 스스로가 건전성(health)을 감지하고, 효과적으로 손상을 검출하여 외부자극에 대해 일정한 반응동작을 하게 하는 지능형 복합재 구조물(Smart Composite Structures)에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[1]. 지능형 복합재는 항공 우주, 해양, 토목 구조물 등의 여러 분야에 다양하게 적용될 수 있다. 현재 광섬유센서는 다른 센서에 비해 여러 가지 장점을 지니고 있어서[2], 지능형 복합재 구조물의 감지 재료(sensing materials)로서 널리 이용되고 있다. 특히 건전성 감시(health monitoring)[3], 내부 변형 측정(internal deformation measurement)[4], 온도 측정(temperature measurement)[5], 음향 방출 탐지(acoustic emission detection)[6], 충격 탐지(impact detection) 및 진동 감지(vibration sensing)[7] 등의 기능을 수행할 수 있다.

복합재에 삽입된 광섬유가 복합재 주구조물(host structures)의 기계적 거동에 미치는 영향은, 광섬유의 센서로서의 적용을 위한 주요한 연구 대상이었다. 지금까지의 연구는 광섬유센서를 복합재에 삽입할 때, 광섬유센서가 주구조물의 건전성에 미치는 영향을 고려하는 것에 집중되었다. Jensen[8, 9] 등과 Measures[10] 등은 삽입된 광섬유가 복합재 적층판의 일방향 인장 및 압축 특성에 미치는 영향을 보고하였다. Singh 등은 직경과 피복상태가 서로 다르게 삽입된 광섬유 주위의 복합재료의 변형률을 측정하였다[11]. 서대철 등은 광섬유의 삽입으로 인해 야기된 손상을 직교 적층판의 횡방향 기지 균열밀도와와의 관계로 측정하였다[12].

이동춘 등은 광섬유를 삽입한 복합재의 피로거동에 관한 정량적인 조사를 수행하였다[13].

Games와 Menéndez 광섬유가 정적 인장하중 및 피로하중 상태에서 적층판에 부정적 영향을 미치지 않는다고 보고하였다[14].

그런데, 광섬유센서를 지능형 복합재 구조물에 효과적으로 적용하기 위해서는, 광섬유를 삽입한 복합재 적층판의 건전성뿐만 아니라, 복합재에 내에 삽입되어 감지기능을 수행하는 광섬유센서 자체의 건전성을 고려하는 것이 또한 필수적이다. 구조물은 사용기간 중에 원래 설계된 여러 가지 외부하중을 받게 된다. 따라서 복합재 내에 삽입된 광섬유센서가 지능형 복합재 구조물의 감지소재로서, 계획된 기간 동안 센서로서의 역할

을 충실히 수행하기 위해서는 필요한 강도와 내구성을 가져야 한다. 그리하여 삽입된 센서 자체가 그 구조물의 고유한 하중 조건 하에서 손상 및 파손없이 기계적으로 안전하게 보존됨으로써 센서로서의 고유한 감지 기능을 유지할 수 있다. 광섬유의 강도는 인장시험을 통하여 정해져야 하지만, 약 125~250 μ m의 직경을 갖는 광섬유와 같은 미세, 민감한 센서의 인장강도의 정확한 측정은 시편의 체결 등 여러 가지 문제를 수반한다. 따라서 본 연구에서는 자체 제작한 시험기를 이용하여 굽힘시험을 통하여 광섬유의 인장강도를 예측하기 위한 이론적 해석 및 실험방법에 대한 연구를 선행하였다. 최약체결과손이론(weakest link theory)에 근거한 광섬유센서의 누적파손분포를 비교하고, 수정계수를 도입함으로써, 굽힘시험이 인장시험을 대신할 수 있음을 보였다. 열처리한 광섬유센서와 열처리하지 않은 광섬유센서의 인장강도 평균값을 비교함으로써 복합 적층판의 경화 사이클 동안의 열처리가 광섬유센서의 건전성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 광섬유와 복합재 본체의 강화섬유와의 배치 각도를 0°, 90°로 조합하여 제작한 시편에 정적하중을 가함으로써 일방향 및 직교 적층판에 삽입된 광섬유센서의 정적 파괴양상을 정성적, 정량적으로 조사하였다. 하중방향과 나란하게 광섬유를 삽입한 유리섬유/에폭시 적층시편에 대한 인장 시험에서, 적층판 내에 삽입된 광섬유에 작용되는 하중만을 측정한다는 것은 어렵다. 하중계에서 얻어지는 하중값은 광섬유를 포함한 적층시편 전체에 작용되는 값이기 때문이다. 그러므로, 복합 적층판에 삽입된 광섬유는 그 주위의 적층판과 완전히 접착(perfect bonding)되어 있다고 가정하고, 적층판의 변형률을 정확히 측정함으로써, 이를 적층판에 삽입된 광섬유의 변형에 대한 정보로 사용할 것이다. 또한 적층판에 삽입된 광섬유와 적층판에 삽입되지 않은 광섬유의 인장강도에 대한 일관성 있는 비교를 위해, 취성재료인 광섬유의 파괴시 변형률 값을 광섬유의 인장강도로 대응할 것이다.

그리하여 본 연구에서는 광섬유 파괴시의 응력이 아닌 변형률을, 취성재료인 광섬유의 인장 특성을 기술하는데 일관되게 이용할 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 광섬유센서의 강도에 관한 이론적 고찰

광섬유와 같은 섬유상 재료의 강도는 내부에 함유된 결함의 불균일한 분포로 말미암아 어떤 하나의 값으로 정의되지 못하고 통계적인 방법으로 표현하는 것이 더욱 타당하다. 일반적으로 재료의 강도나 수명의 누적파손분포(cumulative failure distribution)는 최약체결 파손이론에 의해 다음과 같이 표현된다[15].

$$F(\epsilon) = 1 - \exp(-\int f(\epsilon)dV) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $f(\epsilon)$ 는 변형을 ϵ 에서 단위부피당 파괴가 발생할 확률이고, $F(\epsilon)$ 는 변형을 ϵ 까지의 누적파손분포이다. 식(1)은 $f(\epsilon)$ 가 매우 작고, V 가 크다고 가정하여 이항분포로부터 유도된 포아송분포로 기술된 것이다. $f(\epsilon)$ 의 함수로는 두 개의 파라미터를 갖는 다음과 같은 Weibull분포가 가장 널리 통용되고 있다[16].

$$f(\epsilon) = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \dots \dots \dots (2)$$

여기서, ϵ_0, m 등은 인장강도분포로부터 구해지는 Weibull분포계수이며, V_0 는 차원의 일치성을 위해 사용되었으며, 그 크기는 사용된 단위에 대해 1이다. 인장시험 상태에서 광섬유는 전 영역에 걸쳐 균일하중을 받게 되므로 다음을 얻을 수 있다.

$$F(\epsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^m\right) \dots \dots \dots (3)$$

단순 인장시험에서 얻어진 강도와 굽힘시험에서 얻어진 강도는 서로 다르다. 이는 하중을 받고 있는 시편 내부의 응력 및 변형 상태가 서로 다르기 때문이다. 굽힘을 받고 있는 광섬유의 변형상태는 굽힘상태의 빔이론을 적용하면 다음과 같은 비선형방정식으로 표시된다.

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} = \frac{F}{EI} \cos\theta \dots \dots \dots (4)$$

Fig. 1에 표시된 점 P에서의 경계조건($1/R = d\theta/ds = 0$ at $\theta = \pi$)을 식(4)에 적용하여 곡률 $d\theta/ds$ 에 대한 관계식을 얻는다.

$$\frac{d\theta}{ds} = \left(\frac{2F \sin\theta}{EI} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (5)$$

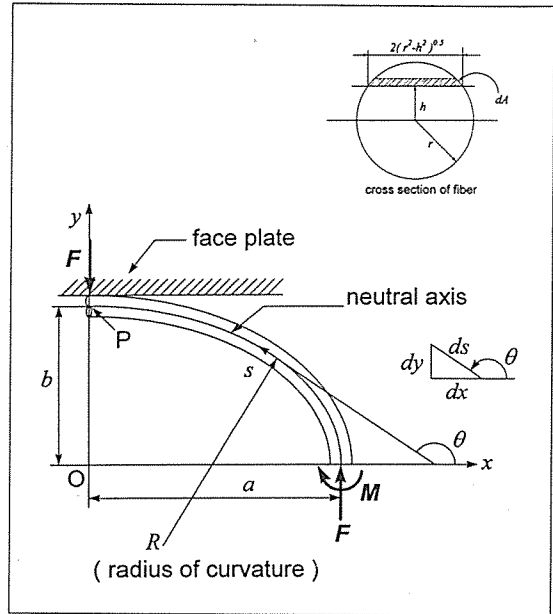


Fig. 1. Geometry of bent fiber

$$a = -\int_{\pi/2}^{\pi} ds \cos\theta = \sqrt{2} \left(\frac{EI}{F} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (6a)$$

$$b = \int_{\pi/2}^{\pi} ds \sin\theta = \frac{J(1/2)}{\sqrt{2}} \left(\frac{EI}{F} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (6b)$$

$$L = \int_{\pi/2}^{\pi} ds = \frac{J(-1/2)}{\sqrt{2}} \left(\frac{EI}{F} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (6c)$$

$$J(x) = \int_0^{\pi/2} \sin^x \psi d\psi = -\int_0^{\pi/2} \cos^x \psi d\psi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Gamma\left(\frac{x+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{x+2}{2}\right)} \dots (7)$$

형상 변수를 이용하여 변형률을 위치의 함수로 표현할 수 있다.

$$\epsilon(h, \theta) = h \frac{(2\sin\theta)^{0.5}}{b/0.847} \dots \dots \dots (8)$$

식(8)을 식(1)의 누적파손분포식에 대입하여, 정리하면 다음을 얻게된다.

$$F(\epsilon_{max}) = 1 - \exp\left(-\frac{c(m)}{V_0} \left(\frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_0}\right)^{m-1}\right) \dots\dots\dots (9)$$

$$c(m) = (1.754)^{1-m} (2)^{\frac{m+3}{2}} r^3 \frac{\pi}{4\epsilon_0} \times \frac{\Gamma\left(\frac{m+1}{4}\right) \left[\frac{\Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m+3}{4}\right)} \frac{\Gamma\left(\frac{m+3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m+4}{2}\right)} \right]}{\dots\dots\dots} \dots\dots\dots (10)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty \xi^{x-1} e^{-\xi} d\xi \dots\dots\dots (11)$$

식(9)는 광섬유의 인장강도분포가 식(2)를 따른다고 할 때, 변형률 ϵ_{max} 까지의 누적파손확률분포이며, m 과 ϵ_0 는 굽힘시험결과에서 얻어진 Weibull분포와 식(9)를 비교함으로써 얻을 수 있다. 얻어진 m 과 ϵ_0 를 식(3)에 대입하여 인장에서의 누적파손분포를 구하게 되는데, 이렇게 구한 평균강도 값은 실제와 다르게 된다. 이는 굽힘시험에서 얻어진 평균강도는 수 mm의 길이를 갖는 광섬유의 인장강도에 해당하기 때문이다. 본 시험에서 쓰이는 60mm 길이의 광섬유 인장강도를 예측하기 위해서 다음과 같은 수정식을 제안한다.

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\alpha \frac{V}{V_0} \left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_0}\right)^m\right) \dots\dots\dots (12)$$

α 는 보정계수로서 인장강도를 알고자 하는 광섬유의 인장시험을 통해 구하게 되며 일단 정해지면, 다른 조건하의 광섬유에도 굽힘시험을 통해 인장강도를 결정할 수 있게 된다. 본 시험에서는 열처리하지 않은 광섬유의 굽힘시험과 인장시험의 결과로부터 보정계수를 구함으로써 열처리한 광섬유의 파단변형률을 굽힘시험으로부터 구하는 방법을 제시하였다.

2.2 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도

일방향 복합적층판의 인장강도는 광섬유의 인장강도보다 2배이상 높다. 그러므로, 일방향 적층판의 강화섬유와 평행한 방향으로 삽입된 광섬유의 파단이 일어날 때까지도 일방향 적층판의 특징적인 파손 형태인 강화섬유의 파단이나 스플리팅 등이 나타나지 않으므로, 삽입된 광섬유에 가해지는 하중상태를 바꿀 수 있을 만한 어떠한 요인(즉 강화섬유의 파단 등과 같은 부분적

인 응력집중을 유발할 복합재 자체의 손상)도 존재하지 않는다고 생각할 수 있다.

그러므로 복합재 내에 삽입한 광섬유의 인장강도 분포는, 복합재 내에 삽입하지 않은 광섬유의 단순 인장하중하의 강도 분포와 거의 같을 것으로 판단된다. 하지만 복합적층판의 경화시 열에 의한 광섬유 강도 변화의 존재 가능성이 충분히 예상되어, 삽입되지 않은 광섬유를 적층판 경화 사이클과 같은 상태로 오토클레이브 안에서 경화하였다. 이렇게 경화한 광섬유를 굽힘시험을 통해 인장강도를 산출하고, 경화하지 않은 광섬유의 인장강도와 비교하여 열에 의한 광섬유 강도 변화를 실험에 의해서 측정하였다.

2.3 직교 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도

일방향 적층판과는 달리 직교 적층판은 광섬유의 인장 강도보다 낮은 하중 하에서도 기지균열과 같은 손상이 존재하게 된다. 직교 적층판에서의 기지 균열은 광섬유에 응력 및 변형을 집중을 일으켜 광섬유의 파단을 가속시킬 수 있다. 기지 균열이 광섬유에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전단-랙(shear-lag) 해석과 광섬유 인장강도의 Weibull 분포식을 함께 사용하여 광섬유 파단시 기지 균열의 개수에 따른 광섬유 인장강도의 변화를 예측해 보았다. 기지 균열 발생시 적층판의 외곽에 위치한 0° 층의 변형률과 광섬유의 변형률이 같다는 조건하에 서대철은 기지 균열 발생시 광섬유의 응력의 변화는 다음과 같음을 보였다[17].

$$\sigma_{of} = \sigma_{of_0} + \Delta\sigma_{of} \dots\dots\dots (13)$$

σ_{of_0} 은 기지 균열 발생이전 광섬유의 응력이며, $\Delta\sigma_{of}$ 는 기지 균열의 발생으로 인해 광섬유에 더해지는 응력의 양이다. 횡방향 적층에 균열이 발생했을 때, 균열에서 x 만큼 떨어진 곳에서 광섬유에 추가되는 응력은 전단-랙(shear-lag) 해석[18]에 의해 구해진다. 추가된 응력은 기지 균열이 발생한 $x=0$ 에서 최대이며, 이점에서 멀어짐에 따라 감소하는 함수형태로 주어지게 되는데 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{of} = \Delta\sigma_{of_0} \exp(-\sqrt{\phi}x) \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta\sigma_{of_0} = \frac{\sigma_a E_{of}}{E_c} \frac{E_f \nu_f}{E_f \nu_f + E_{of} \nu_{of}} \approx \frac{\sigma_a E_{of}}{E_c} \frac{E_f \nu_f}{E_f \nu_f} \dots\dots\dots (15)$$

여기서 v_i, u_i, v_{of} 는 각각 길이방향 적층과 횡방향 적층 및 광섬유의 체적함유율(volume fraction)을 나타낸다. 또한 σ_a 는 시편에 가해진 응력이고, E_c, E_l 및 E_{of} 는 각각 복합재, 길이방향 적층 및 광섬유의 탄성계수이다. ϕ 는 기지 균열에 의한 응력 집중의 영향을 받는 영역의 길이를 나타내는데 전단-랙(shear-lag) 해석에 의해 다음과 같이 주어진다. 여기서 R은 광섬유의 변형률과 적층판의 평균 변형률이 같아지는 광섬유 중심으로부터의 거리이다[17].

$$\phi = \frac{E_c G_l}{E_l v_i} \frac{2}{E_{of} r_{of}^2 \ln(R/r_{of})} \dots \dots \dots (16)$$

n개의 기지 균열이 발생하였을 때 광섬유가 파단될 확률은 다음과 같다.

$$F(n) = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{V_o} A \int_{-l}^l \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^m dx\right) \dots \dots \dots (17)$$

서로 인접하는 두 기지 균열이 서로 간섭하지 않는다고 하면 n개의 기지 균열에 대해 삽입된 광섬유의 파단 확률은 다음과 같다.

$$F(n) = 1 - \exp\left[\frac{-\alpha}{V_o} A \left\{ n \int_{-l}^l \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^m dx - (n-1) \int_{-l}^l \left(\frac{\epsilon_{ave}}{\epsilon_0}\right)^m dx \right\}\right] \dots \dots \dots (18)$$

ϵ 은 광섬유의 실제 변형률 상태를 나타내고 있고, ϵ_{ave} 는 광섬유의 평균 변형률로 기지 균열에 의한 변형률 집중이 일어나지 않았을 때 광섬유의 변형률과 같다. 위의 적분항 중 우측의 적분은 좌측의 적분에서 평균 변형률에 의한 n-1번의 불필요한 효과를 제거하기 위한 것이다. 위의 분포식으로부터 실제 사용된 두 가지 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도의 평균값은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}_{ave} = \frac{\Gamma(1.327)}{[13.05(8.763 \times 10^{-4} n + 6 \times 10^{-2})]^{1/3.06}} \dots \dots \dots (19)$$

$$\bar{\epsilon}_{ave} = \frac{\Gamma(1.327)}{[13.05(1.0188 \times 10^{-2} n + 6 \times 10^{-2})]^{1/3.06}} \dots \dots \dots (20)$$

식(19)는 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]$ 에 대한 식이며, 식(20)은 $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]$ 에 대한 식이다. 광섬유의 파단 변형률 평균값의 기지 균열의 개수에 따른 관계를 다음의 Fig. 2에 표시하였다.

$[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]$ 복합 적층판의 경우 기지 균열의 개수에 따른 파단 변형률의 감소는 그리 크지 않으나, $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]$ 복합 적층판의 경우에는 기지 균열의 개수에 따른 파단 변형률의 감소가 크다는 특징이 있음을 알 수 있다.

3. 실험방법

복합재에 삽입되지 않은 단일 광섬유의 인장강도를 시험하기 위하여 시험기를 자체 제작하였으며, 실험 장치의 구성은 Fig. 3과 같다. 본 실험에서 이용된 광섬유로는 삼성전자 단일모드 DSF(dispersion shifted fiber)를 사용하였다. 스텝모터와 하모닉 드라이브를 조합하여 펄스당 0.325 μ m의 변위를 제어할 수 있도록 구성하였다. 굽힘시험은 이송판과 고정판 면에 광섬유를 끼울 수 있도록 한 뒤 시험하였고, 인장시험은 두 판 위에 광섬유를 접착하여 시험하였다. 먼저 열처리한 광섬유와 열처리하지 않은 광섬유의 굽힘시험을 각각 30개씩 한 뒤 열처리하지 않은 60mm광섬유에 대한 인장시험을 10개의 시편에 대하여 행하여 수정계수를 구하여 이를 이용하여 열처리한 광섬유의 인장강도를 굽힘시험의 결과에서 구할 수 있도록 하였다.

인장시험에 사용된 복합재 적층시편은 세 종류로 구성되었다. 일방향 적층 $[0_6/OF/0_6]$ 및 직교적층

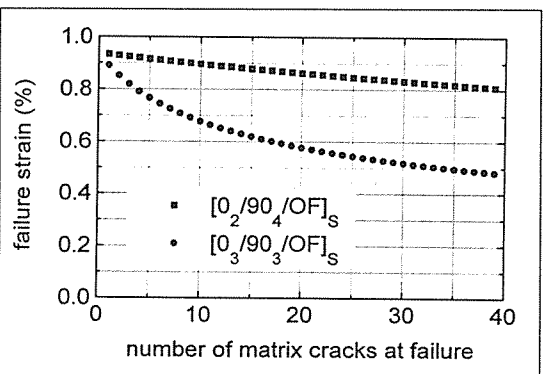


Fig. 2. Failure strain estimation of optical fiber embedded in $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]$ and $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]$ specimen by the number of transverse matrix cracks

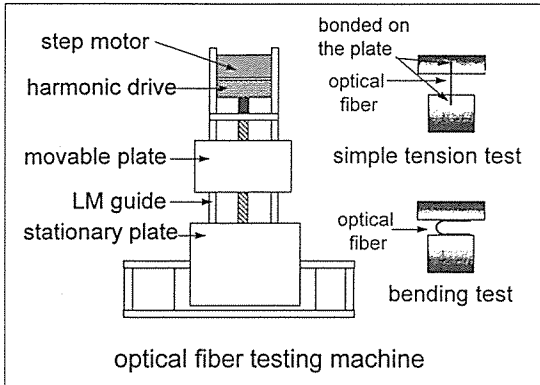


Fig. 3. Schematic diagram of optical fiber testing machine

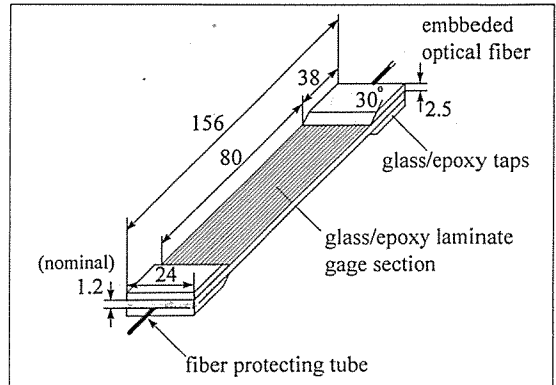


Fig. 4. Geometry and dimension of specimen (in mm)

[0₂/90₄/OF/90₄/0₂], [0₃/90₃/OF/90₃/0₃]으로 이루어졌다. 복합재 적층시편은 선경인더스트리(주)의 UGN-150 유리섬유/에폭시수지 프리프레그(prepreg)로 제조하였으며, UGN-150의 물성치는 Table 1에 제시하였다. 유리섬유/에폭시수지 적층판은 투명하므로, 적층분리(delamination), 스플리팅(splitting), 횡방향 기지 균열(transverse matrix crack)과 같은 손상의 개시(initiation)와 전진(growth) 그리고 레이저의 누출을 육안으로 용이하게 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 또한 한국화이바(주)의 HFG GU-300 E-glass를 이용하여 하중 탭을 만들었다.

시편의 양면에는 5mm 게이지 길이의 스트레인 게이지를 접착하여 변형률을 측정하고, 두 게이지에서 나온 신호의 평균값을 변형률로 사용함으로써, 시편의 초기 굽힘에 의한 영향을 제거하였다. 복합 적층판의 손상에 대한 광섬유센서의 민감도를 증가시키기 위해 광섬유 시험영역 60mm구간에서 광섬유의 피복(coating)을 아세톤(acetone)을 이용하여 화학적으로 제거하였다. 시편의 최종 형상은 Fig. 4와 같다.

복합 적층시편에 대한 정적 인장시험은 25톤 MTS-

810 서보 유압 시험기(servo-hydraulic test machine)를 사용하여 수행하였다. Fig. 5에 복합 적층시편에 대한 인장시험의 과정을 개략적으로 도시하였다. 시편의 정적 인장시험은 0.6mm/min의 일정 변위 조절 상태에서 행하였다.

파장 0.6328 μ m의 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)를 광섬유 위치 조절부와 렌즈로 구성된 커플러(coupler)를 사용하여 복합 적층시편에 삽입된 광섬유에 입사시켰다. 삽입된 광섬유를 통과한 레이저 신호의 강도(intensity)를 광다이오드(photo-diode)에 의해 측정하였다. 정적 인장하중 및 레이저 신호 강도는 PC를 이용한 데이터 수집 시스템에 의해 시험중 자동적으로 기록된다. 광섬유의 파괴는 광섬유를 통과한 레이저 신호 강도의 저하에 의해 감지되며, 또한 광섬유 파단 위치에서 레이저 누출에 의해 확인될 수 있다. 이러한 시험장치를 통해 정적 하중상태에서 광섬유의 파괴가 발생할 때까지 복합 적층시편에 작용된 평균 인장응력

Table 1. Material properties of SKI UGN-150 glass/epoxy laminate

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber direction	E_f	40.77 GPa
Elastic modulus in transverse direction	E_t	11.70 GPa
Shear modulus in 1-2 plane	G_t	4.86 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}	0.310
Tensile strength in fiber direction	S_f	1079.88 MPa
Tensile strength in transverse direction	S_t	57.86 MPa
Failure strain in transverse direction	ϵ_{tu}	0.537 %

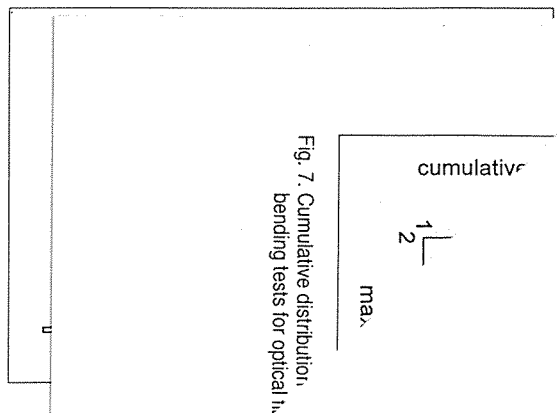


Fig. 7. Cumulative distribution bending tests for optical fiber

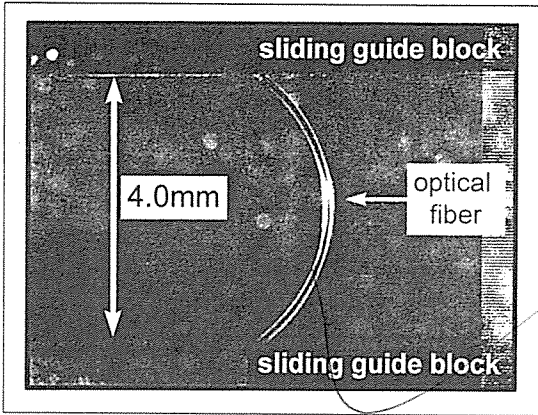


Fig. 6. Photographs of optical fiber under bending test

및 변형률을 얻었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열에 의한 광섬유센서의 강도 변화

굽힘시험 중의 광섬유 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 이는 피복을 제거한 광섬유를 굽힘시험하고 있는 확대 사진이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 열처리하지 않은 광섬유와 열처리한 광섬유의 굽힘시험에서 파괴가 발생할 때의 최대 변형률에 대한 누적파손확률을 보이고 있다. 또한, 이 결과를 2개의 파라미터를 갖는 Weibull분포에 따르는 누적파손분포곡선으로 적합화(curve fitting)하여 Fig. 7과 Fig. 8에 제시하였고, 이는 식(21), 식(22)과 같다.

$$F(\epsilon_{\max}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_{\max}}{8.192}\right)^{2.98}\right) \dots\dots\dots (21)$$

$$F(\epsilon_{\max}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_{\max}}{7.158}\right)^{2.06}\right) \dots\dots\dots (22)$$

식(21)과 식(22) 그리고 Fig. 7과 Fig. 8의 비교를 통해 열처리에 의해 강도저하가 상당히 발생함을 알 수 있다. 열처리하지 않은 광섬유의 굽힘시험에서 구한 누적파손분포를 식(9)와 비교함으로써 ϵ_0 , m 을 구하고, 이를 식(3)에 대입하여 광섬유의 인장일 때의 누적파손분포를 예측하면 다음과 같다.

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{0.4656}\right)^{3.98}\right) \dots\dots\dots (23)$$

그리고, 열처리하지 않은 광섬유의 실제 인장시험으로부터 구한 광섬유의 누적파손분포는 다음과 같다.

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{1.7636}\right)^{4.029}\right) \dots\dots\dots (24)$$

식 (23)과 식(24)를 비교해보면, Weibull지수는 굽힘에서 예측한 값이 3.98, 실제 인장시험에서 구한 값이 4.029로 잘 일치하는 것을 알 수 있지만, ϵ_0 는 각각 0.4656과 1.7636으로 서로 큰 차이를 보이고 있다. 이를 보정하기 위한 식(12)의 α 는 식(24)과 식(25)을 비교하여 다음과 같음을 알아내었다.

$$\alpha = 4.978 \times 10^{-3}/m$$

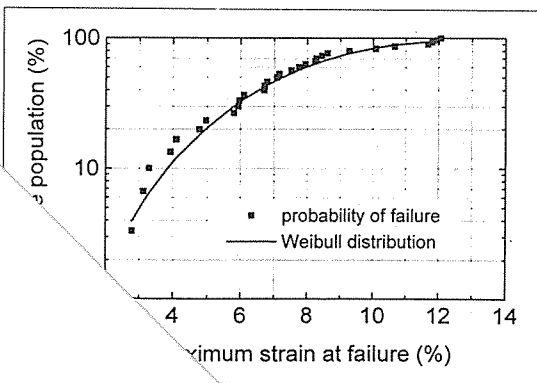


Fig. 7. Probability of failure probability obtained in bending tests for thermally treated optical fibers

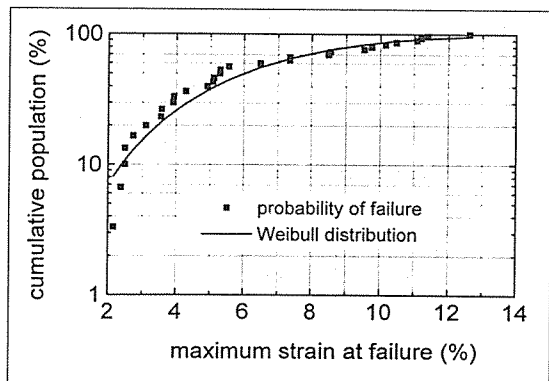


Fig. 8. Cumulative distribution of failure probability obtained in bending tests for thermally treated optical fibers

이 보정계수를 이용하여 열처리한 60mm 광섬유의 인장강도를 굽힘시험의 결과로부터 식(12)를 이용하여 구해보면 다음과 같다.

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{1.083}\right)^{3.06}\right) \dots\dots\dots (25)$$

이 분포에 해당하는 인장강도의 평균값은 0.968%의 변형률이다. 이는 열처리하지 않은 60mm 광섬유의 파단변형을 평균값인 1.445%의 약 70%에 해당하는 값으로 적층판의 경화 사이클 중 열에 의한 광섬유의 강도저하가 적지 않음을 보이고 있다.

4.2 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도

일방향 적층판에 삽입된 광섬유센서의 파단은 광섬유를 통과한 레이저 신호 강도의 급격한 저하(drop-off)에 의해 감지되는데, 레이저 강도 신호 저하의 특징을 Fig. 9에서 보여주고 있다.

일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도를 나타내는데 있어서, 적층판에 가해진 평균응력과 적층판의 양면에 부착된 스트레인 게이지에서 측정된 적층판의 변형률을 참조하였다.

이는 광섬유에 작용되는 하중상태를 직접 알 수는 없기 때문이며, 변형률의 경우 광섬유와 기지사이에 접착분리(debonding)가 발생하지 않는 한 광섬유와 적층판의 변형률이 같기 때문이다.

적층판의 인장강도는 약 900MPa이었으며, 광섬유 파단시 적층판에 작용되는 평균응력은 450MPa로서

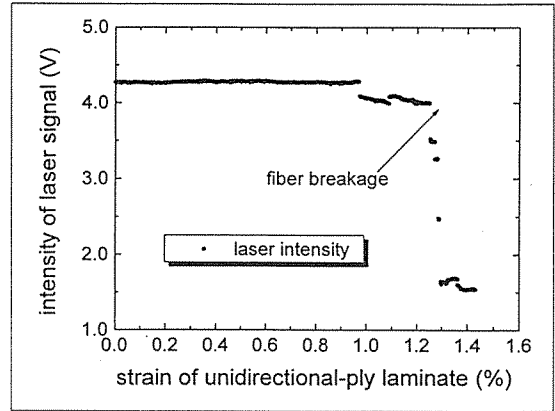


Fig. 9. The intensity change of laser signal transmitted through the optical fiber sensor embedded in unidirectional-ply laminate specimen under static loading

적층판 인장강도의 절반밖에 되지 않는데, 이 정도의 응력상태에서는 적층판 내의 강화섬유 파단이나 광섬유-기지간의 분리(debonding)는 발생하지 않았다. 따라서 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 파단은 열에 의해 손상을 입은 광섬유만의 파단양상을 따른다고 고려될 수 있다. Fig. 10의 광학현미경 사진에 의하면, 일방향 적층판에 삽입된 광섬유가 파괴될 때까지 광섬유 주위의 강화섬유나 기지에는 손상된 부분이 없음을 알 수 있다. 즉, 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 파손은 광섬유 내부에 존재하는 결함에 의해서 발생된다고 고려할 수 있다.

Fig. 11는 광섬유센서의 누적파손 분포로서, 열처리하지 않은 단일 광섬유의 인장시험 결과와 일방향 적

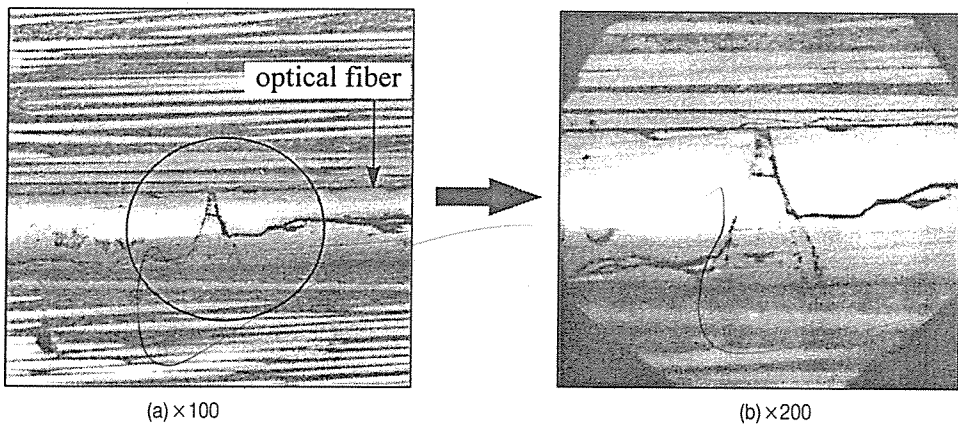


Fig. 10. Microscopic photographs of a failed optical fiber sensor embedded in unidirectional-ply laminate; where the diameter of uncoated optical fiber is 125 μ m

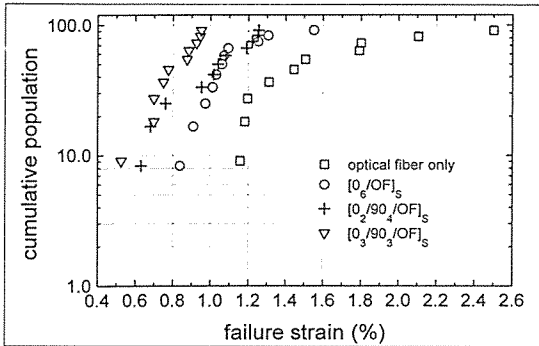


Fig. 11. Cumulative distribution of failure strain of optical fibers embedded within different specimens

층판에 삽입된 광섬유의 인장시험 결과 그리고 두 가지 직교 적층판에 삽입된 광섬유의 인장시험 결과를 함께 나타내어 비교하였다. Fig. 11에서 직교 적층판에 삽입된 광섬유의 파단 변형률 분포는 직선에 가깝게 표시되는 반면에 열처리하지 않은 단일 광섬유만의 파단 변형률이나 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 파단 변형률의 분포는 두 개의 직선 조합으로 특징지을 수 있으며, 이 두 직선이 만나는 곡점(knee point)이 발생하는 공통점을 지니고 있다. 즉, 일방향 적층판에 삽입된 광섬유는, 열처리하지 않은 단일 광섬유와 비슷한 양상으로 파단된다. 이러한 곡점은 사용된 광섬유 파단의 특성으로 고려된다. 또한 적층판의 경화사이클과 같은 과정으로 경화한 광섬유의 파단 변형률과 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 파단 변형률을 비교해 본 결과 각각 0.968% 와 1.1%로 큰 차이는 없지만 삽입된 광섬유의 파단 변형률이 약간 높게 나왔다. 이는 일방향 복합 적층판에 삽입된 광섬유를 둘러싼 고분자재료가 광섬유에 보강효과를 부여하는 것으로 고려해 볼 수 있다.

4.3 직교 적층판에 삽입된 광섬유의 인장강도

직교 적층판에 삽입된 광섬유센서의 파단 역시 적층판에 삽입된 광섬유를 통과한 레이저 신호 강도의 저하에 의해 판단되며, 그 전형적인 특징을 Fig. 12에서 보여주고 있다.

두 직교 적층판 [0₂/90₄/OF/90₄/0₂]와 [0₃/90₃/OF/90₃/0₃]에 삽입된 광섬유의 파단 변형률을 실험을 통해 측정하였다. 역시 적층판에 삽입된 광섬유를 통과한 레이저 강도 신호 저하점을 관측함으로써 광섬유의 파단 변형률을 측정하였다. 파단 변형률 측정 결과는

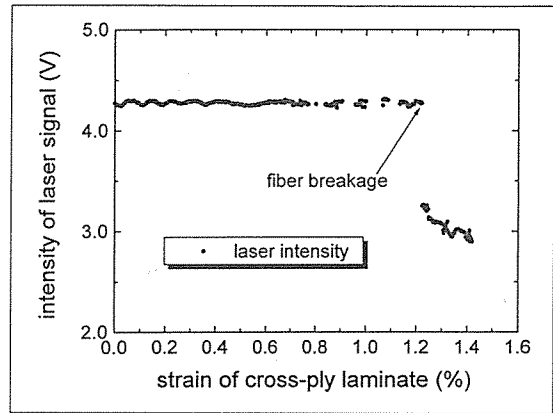


Fig. 12. The intensity change of laser signal transmitted through the optical fiber sensor embedded in cross-ply laminate specimen under static loading

Fig. 11에 나타내었다. 직교 적층판에서 나타나는 적층판의 파손형태는 기지 균열로서, 인장에 약한 90° 층에서 하중에 대해 직각방향으로 강화섬유의 방향을 따라서 진전하는 균열이다.

[0₂/90₄/OF/90₄/0₂]의 경우 기지 균열이 발생하는 변형률은 0.4731%, [0₃/90₃/OF/90₃/0₃]의 경우에는 0.393%이었다. 이와 같은 변형률은 각각 열처리한, 삽입되지 않은 광섬유의 파단 변형률의 반 정도에 해당하는 값이며, 광섬유의 파단이 일어나기까지 직교 적층시편에는 약 10~20개의 횡방향 기지 균열이 발생한다. 즉, 기지 균열이 광섬유의 파단에 큰 영향을 미치지만 광섬유의 파단시점과 기지 균열의 발생시점이 꼭 일치하는 것은 아니고, 적층판의 변형률이 충분히 높아야 하며, 기지 균열의 발생에 의한 응력집중이 광섬유의 충분히 약한 곳에 도달하여야 비로소 광섬유가 파단되는 것이다. Fig. 13의 현미경 관찰 사진에 의하면, 횡방향 기지 균열의 성장은 직교 적층판에 삽입된 광섬유 파괴의 직접적 원인이 됨을 알 수 있다.

광섬유의 평균 파단 시점은 적층판 [0₂/90₄/OF/90₄/0₂]의 평균 변형률이 1.0%일 때, 적층판 [0₃/90₃/OF/90₃/0₃]의 평균 변형률이 0.863%일 때로써, [0₃/90₃/OF/90₃/0₃] 적층판에 삽입된 광섬유의 파단 변형률이 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 앞서 이론에서 제시한 광섬유의 파단 변형률과 기지 균열 개수와 관계에서 보인 바와 같다. [0₂/90₄/OF/90₄/0₂]은 기지 균열의 수 증가에 따른 광섬유 파단 변형률의 변화가 적어 10개 이상의 기지 균열이 광섬유의 파단에 수

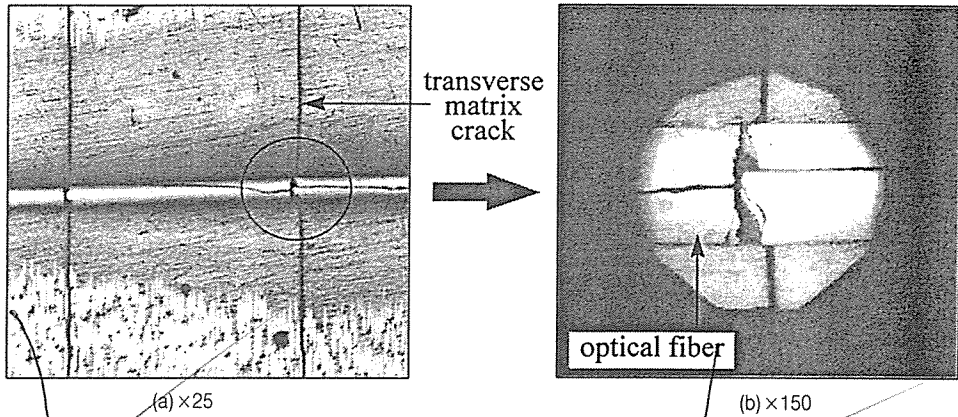


Fig. 13. Microscopic photographs of a failed optical fiber sensor embedded in cross-ply laminate; where the diameter of uncoated optical fiber is 125 μ m

반되었음에도 불구하고 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 파단 변형률과 큰 차이를 보이지 않았다.

5. 결 론

복합 적층판 경화 사이클 동안 열에 의한 광섬유센서의 인장강도 변화를 알아보기 위해 정적 하중 하에서의 광섬유센서의 강도에 대한 통계적 방법을 이용한 이론적 해석을 수행하고, 정적 강도 측정을 위한 적절한 실험방법을 고안하였다. 또한 일방향 적층판과 두가지 직교 적층판에 삽입된 광섬유센서의 인장강도를 비교하여 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

적층판 경화시의 열에 의한 광섬유센서의 강도 저하는 상당히 큰 것으로 나타났다. 일방향 적층판에 삽입된 광섬유센서는 적층판 내부 파손의 부재로 인해 광섬유만의 파단과 같은 양상으로 파단된다. 또한 광섬유센서를 일방향 적층판에 삽입할 때는 광섬유센서에 보강효과를 가져다 준다는 사실을 얻었다. 직교 적층판에 삽입된 광섬유센서는 기지 균열에 의해 파단에 이른다. 일방향 적층판에 광섬유센서를 삽입할 경우에는 광섬유만의 인장강도에 관한 정보만으로도, 광섬유센서를 복합재에 삽입한 후 광섬유센서의 건전성을 알아보는 데 큰 문제가 없지만, 직교 적층판에 광섬유센서를 삽입할 경우에는 기지 균열에 대한 충분한 검토가 따르 후, 행해져야 한다. 역으로 직교 적층판에 삽입된 광섬유센서는 기지 균열에 의한 적층판의 손상을 알아보는 좋은 센서로 쓰일 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구과제인 “압전재료 및 광섬유를 이용한 스마트 구조물의 동특성 및 감지/작동 특성 연구”(과제번호 : 96-0200-05-01-3)의 일환으로 수행되었으며, 이에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Visconti, I.C., Langella, A. and Cigliano, C., “Smart Composites: Technological Characterization of Optical Sensors”, Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials, Vol. 2, 1993, pp. 393-401.
2. Claus, R.O., “Overview of Fiber Optic Sensor-based Smart Materials and Structures”, Proceedings of the Conference on Optical Fiber Sensor-based Smart Materials and Structures, edited by Claus, R. O., held at Blacksburg, Virginia, 1991, p. 3.
3. Carman, G.P. and Mitrovic, M., “Health Monitoring Techniques for Composite Materials Employing Thermal Parameters and Fiber Optic Sensors”, Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Conference, Vol. 2191, 1994, pp. 244-256.
4. Valis, T., Tapanes, E.E., Liu, K. and Mea-

ures, R.M., "Passive Quadrature Demodulated Localized Michelson Fiber Optic Strain Sensor Embedded in Composite Material", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, 1991, pp. 535-544.

5. Baran, M., "Optical Fiber Sensor for Temperature Measuring", *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials*, SPIE Vol. 2779, 1996, pp. 198-202.

6. Murphy, K.A., Gunther, M.F., Wang, A. and Claus, R.O., "Detection of Acoustic Emission Location Using Optical Fiber Sensors", *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Conference*, Vol. 2191, 1994, pp. 282-290.

7. Crispin, D. and Gerard, F., "An Intensity-based Fibre-optic Vibration Sensor", *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 2718, 1996, pp. 94-102.

8. Jensen, D.W., Pascual, J. and August, J.A., "Performance of a Graphite/bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Tension", *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, 1992, pp. 24-30.

9. Jensen, D.W., Pascual, J. and August, J.A., "Performance of a Graphite/bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Compression", *Smart Materials Structures*, Vol. 1, 1992, pp. 31-35.

10. Measures, R.M., Glossop, N.D.W., Lymer, J., Leblanc, M., West, M., Dubois, S., Tsaw, W. and Tennyson, R.C., "Structurally Integrated Fiber Optic Damage Assessment System for Composite Materials", *Applied Optics*, Vol. 28, No. 13, 1989, pp. 2626-2633.

11. Singh, H., Sirkis, J.S. and Dasgupta, A., "Micro-interaction of Optical Fibers Embedded in Laminated Composites", *Proceedings of the SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins*, Vol. 1588, 1991, pp. 76.

12. Seo, D.C. and Lee, J.J., "Effect of Embedded Optical Fibers on Matrix Crack Spacing in Smart Structures", *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 51-58.

13. Lee, D.C., Lee, J.J. and Yun, S.J., "The Mechanical Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors", *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 39-50.

14. Güemes, A. and Menéndez, J.M., "Fatigue Strength of Glass Reinforced Polyester (GRP) Laminates with Embedded Optical Fibers", *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials*, SPIE Vol. 2779, 1996, pp. 217-221.

15. Matthewson, M.J. and Kurkjian, C.R., "Strength Measurement of Optical Fibers by Bending", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 69, 1986, pp. 815-821.

16. Weibull, W., "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *J. Appl. Mech.*, Vol. 18, 1951, pp. 293-296.

17. 서대철, 이정주, 홍창선, "삽입된 광섬유센서가 복합적층판의 횡방향 균열간격에 미치는 영향", *한국복합재료학회지*, 제9권 제2호, 1996, pp. 63-73.

18. Garrett, K.W., and Bailey, J.E., "Multiple Transverse Fracture in 90 Cross-Ply Laminates of a Glass Fibre-Reinforced Polyester", *Journal of Material Science*, Vol. 12, 1977, pp. 157-161.