

논문 96-5-6-03

지능형 복합재 구조물에 대한 광섬유센서의 적용에 관한 연구

장 태성*, 김 호**, 이 정주*

A study on the application of optical fiber sensors
to smart composite structures

Tae-Seong Jang*, Ho Kim**, Jung-Ju Lee*

요 약

본 연구에서는 광섬유센서를 지능형 복합재 구조물에 적용하기 위한 기초적 연구의 일부로서, 구조물내에서의 광섬유센서의 건전성 평가와 주구조물에 유발된 변형 및 손상에 대한 광섬유센서의 신호검출 거동을 연구 검토하였다. 첫째로, 최악제결파손이론에 근거한 광섬유센서의 누적파손분포를 비교하고 수정계수를 도입함으로써, 굽힘시험이 인장시험을 대신할 수 있음을 보였다. 실험에 의해 Weibull 파라미터를 얻고, 굽힘시험에서 유도된 누적파손분포에 적용된 수정계수를 구했다. 열처리한 광섬유센서와 열처리하지 않은 광섬유센서의 인장강도 평균값을 비교함으로써 복합재료 적층판의 경화 사이클 동안 열처리에 의해 야기되는 광섬유센서의 건전성을 평가하였다. 둘째로, 직교적층판과 일방향적층판의 인장시험에서 측정된 시편의 응력-변형률과 삽입된 광섬유센서를 통과한 레이저신호 세기와의 관계를 검토하고, 광섬유센서를 이용한 효과적 손상검출 가능성을 연구 검토하였다.

Abstract

In this study, as a part of the basic study for the application of optical fiber sensors to smart composite structures, the integrity of optical fiber sensors embedded within the composite structures was examined and then the laser signal transmitted through optical fiber sensors during the deformation of host structures was investigated. Firstly, it was found that bending test could be substituted for tensile test by comparing cumulative failure distribution based on weakest link theory and introducing the correction factor. Weibull parameters were obtained through the experiments and the correction factor was found to be applied to cumulative failure distribution derived from bending test. The integrity of embedded optical fiber sensors due to the thermal effect was evaluated by the comparison of the mean tensile strengths of cured and uncured optical fibers. Secondly, relationships between stress-strain curve obtained in tensile test of composite laminate and the intensity of laser signal transmitted through embedded optical fibers were examined and the possibility of the effective damage detection using optical fiber sensors was studied.

1. 서 론

지능형 복합재 구조물(smart composite structures)에 적용되는 복합재료는 금속재료에 비해 비강성, 비강도가 매우 높아 항공기, 우주공간의 구조물, 레이저용품, 자동차 부품 등 경량화가 요구되는 구조물에 널리 사용되고 있다. 하지만, 항공기, 우주공간의 구조물은 파손

* 한국과학기술원 기계공학과
(KAIST, Dept. of Mechanical Eng.)

** 기아자동차 중앙기술연구소
(KIA Motors Corp., R&D Center)
<접수일자 : 1996년 6월 3일>

이 곧 커다란 인명 손실과 경제적 손실로 연결되므로 높은 신뢰성 확보는 반드시 이루어져야 한다. 최근 구조물 자체가 내부변형상태 및 손상 등을 감지, 진단하여 스스로 능동적으로 적응제어(adaptive control)할 수 있는 지능형 구조물(smart structures)^[1]에 대한 연구의 필요성이 새롭게 대두되었다. 지능형 구조물은 외부자극으로 인한 구조물의 변형 및 손상을 검출하는 감지소재(sensing material)와 구조물이 외부자극에 대해 일정한 반응동작을 하게 하는 작동소재(actuating material), 그리고 감지소재로부터 검출된 변형과 손상 등의 양을 계산하고 작동소재가 그에 대응하는 동작을 수행하도록 제어하는 지능소재(intelligence material) 등이 내재된 구조물이다.

이러한 지능형 복합재 구조물의 감지소재로 사용되는 광섬유센서는 온도나 습도 등의 환경적 영향에 민감하지 않으며, 부피가 작아 복합재 내에 삽입이 용이할 뿐만 아니라, 전자기파의 영향을 받지 않아 우주공간의 구조물에도 쓰일 수 있다. 광섬유센서를 이용한 지능형 구조물의 연구가 다른 센서를 이용한 연구에 비해 훨씬 활발하다는 사실 또한 광섬유의 센서로서의 우수성을 말해주고 있다.

광섬유센서를 삽입한 복합재 구조물의 기계적 안정성을 확보하기 위해서는 광섬유 삽입으로 인해 복합재에 치명적 영향을 주지 말아야 한다. 게다가 복합재 내에 삽입된 광섬유센서도 건전성을 유지하여야만 한다. 지금까지는 주로 광섬유 삽입으로 인해 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구^[2-4]가 이루어졌다. 그들의 연구결과로부터 삽입된 광섬유는 복합재의 정적인 기계적 특성에 큰 영향을 주지 않는다는 것이 알려졌다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 지능형 복합재 구조물에 삽입된 광섬유센서의 거동을 평가하기 위한 방법의 일부로서 인장시험의 대응으로서 굽힘시험 방법을 제시하고 이들 사이의 관계를 최약체결파손이론^[5](weakest link theory)에 근거한 누적파손분포(cumulative failure distribution)를 통해 이론적으로 살펴보았다. 특히 광섬유를 삽입한 복합재를 열처리할 때 열에 의한 광섬유의 강도변화 특성을 파악함으로써 센서의 건전성에 대해 살펴보았다. 한편 직교적층시편과 인장적층시편의 인장시험을 수행하는 동안 삽입된 광섬유에 레이저를 통과시켜 나온 빛의 세기의 변화와 시편의 응력-변형률 및 광섬유의 파단과 재료의 손상과의 관계에 대해서도 고찰하였다.

II. 광섬유센서의 적용에 관한 기본 고찰

2. 1 지능형 복합재 구조물에 삽입된 광섬유센서의 강도에 관한 이론적 고찰

구조물은 항상 사용기간 중에 원래 설계된 여러가지 외부하중을 받게 된다. 따라서 지능형 복합재 구조물이 이러한 외부하중의 지배를 받을 때, 복합재 내에 삽입된 광섬유가 계획된 기간 내에 이러한 외부하중 하에서 센서로서의 역할을 충실히 수행하기 위해서는 필요한 강도를 가져야 하고, 이에 따른 건전성이 확보되어야 한다. 그런데, 광섬유와 같은 섬유상의 재료의 강도는 내부에 함유된 결함의 불균일한 분포로 말미암아 어떤 하나의 값으로 정의되지 못하고 통계적인 값으로 나타나게 된다. 즉, 충분한 개수의 시편에 대한 실험을 통해 인장강도를 얻어야 하며 얻어진 인장강도의 전체 분포를 알아야 한다. 일반적으로 재료의 강도나 수명의 누적확률분포는 최약체결파손이론에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$F(\epsilon) = 1 - \exp\left(-\int f(\epsilon)dV\right) \quad (1)$$

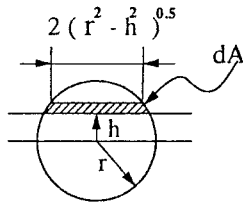
여기서 $f(\epsilon)$ 는 변형률 ϵ 에서 단위부피당 파괴가 발생할 확률이고, F 는 변형률 ϵ 까지의 누적파손분포이다. 식(1)은 $f(\epsilon)$ 가 매우 작고, V 가 크다고 가정하여 이항분포로부터 유도된 포아송분포로 기술된 것이다. $f(\epsilon)$ 의 함수로는 두 개의 파라미터를 갖는 다음과 같은 Weibull분포^[6]가 가장 널리 통용되고 있다.

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

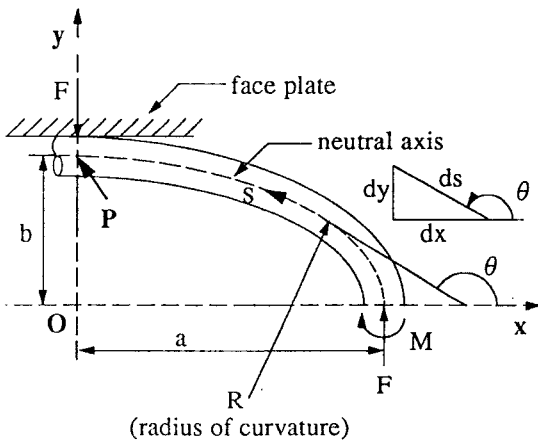
여기서, ϵ_0 , m 등은 인장강도분포로부터 구해지는 Weibull분포계수이며, V_0 는 차원의 일치성을 위해 사용되었으며, 그 크기는 사용된 단위에 대해 1이다. 인장시험 상태에서 광섬유는 전 영역에 걸쳐 균일하중을 받게 되므로 (2)를 (1)에 대입한 후 적분을 하면 다음을 얻을 수 있다.

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

광섬유의 강도는 인장시험을 통하여 정해져야 하지만, 인장시험시 시편의 체결에 따르는 여러 가지 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 굽힘시험을 통하여 광섬유의 인장강도를 간접적으로 얻어내는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 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. 여기서 각 변수는 그림 1에 정의된 바와 같다.



cross section of fiber



(radius of curvature)

그림 1. 굽은 섬유의 형상

Fig. 1. Geometry of the bent fiber

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

이때, E는 광섬유의 Young's modulus이고, I는 단면의 2차 모멘트이다. 그림 1에 표시된 점 P에서의 경계조건(1/R=dθ/ds=0 at θ=π)을 식(4)에 적용하여 곡률 dθ/ds에 대한 관계식을 얻는다.

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

굽은 광섬유의 형상 변수를 적용시키기 위해 다음과 같은 적분을 한다.

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

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

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

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(x) &= \int_0^{\pi/2} \sin^x \psi \, d\psi \\ &= \int_0^{\pi/2} \cos^x \psi \, d\psi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Gamma\left(\frac{x+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{x+2}{2}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

a와 b는 그림 1에 제시된 바와 같고, L은 광섬유의 굽은 부분 전체길이의 절반이다. 식(7)은 초월함수의 적분을 위해 도입되었다. 이렇게 구한 형상 변수를 이용하여 변형률을 위치의 함수로 표현할 수 있다.

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

식(8)을 식(1)의 누적파손분포식에 대입하여, 체적에 대해 적분을 한 후 정리하면 다음을 얻게된다.

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

$$c(m) = (1.754)^{1-m} (2)^{\frac{m+3}{2}} r^3 \frac{\pi}{4\epsilon_0} \times$$

$$\left[\frac{\Gamma\left(\frac{m+1}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{m+3}{4}\right)} \left[\frac{\Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)} - \frac{\Gamma\left(\frac{m+3}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{m+4}{2}\right)} \right] \right]$$

(10)

여기서 Γ(x)는 감마함수(Gamma function)로서 다음과 같이 정의된다.

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

식(9)은 광섬유의 인장강도분포가 식(2)을 따른다고 할 때, 변형률 ϵ_{max} 까지의 누적파손확률분포이며, m 과 ϵ_0 는 굽힘시험결과에서 얻어진 Weibull분포와 식(9)을 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 위해서는 이러한 결함을 보완해야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 수정식을 제안한다.

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

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 광섬유의 파단과 재료의 손상검출

광섬유는 그림 2에서와 같이 코어(core), 클래딩(cladding), 피복(coating)으로 구성되어 있다. 코어와 클래딩의 성분은 석영유리인데, 코어의 굴절률이 클래딩 보다 1~2% 정도 크게 되어 있어 코어를 통과하는 빛이 코어와 클래딩의 경계에서 전반사되어 손실이 거의 없이 전파된다.

복합재 내에 광섬유를 삽입시키고 인장시험을 수행하게 되면, 복합재시편의 변형에 따라 광섬유가 변형하게 되고, 임계 변형값에서 파단이 일어나게 된다. 이때 광섬유는 레이저 신호를 제대로 전달할 수 없게 되고, 이를 관찰 및 분석함으로써 복합재의 건전성을 진단할 수 있다. 광섬유의 광전과 특성을 이용하여, 삽입된 광섬유를 통과하는 레이저 신호세기와 복합재의 변형정도를 비교하는 실험을 통해 시편 내부 손상감지를 수행한다.

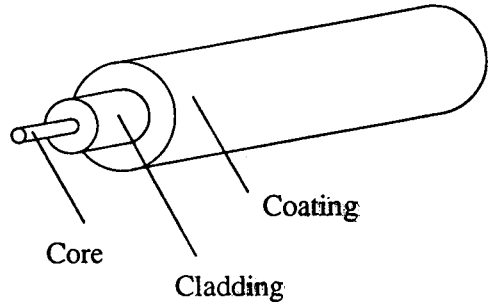


그림 2. 광섬유의 구조
Fig. 2. Structure of an optical fiber

III. 광섬유센서의 인장강도 측정 및 손상검출에 관한 고찰

3. 1 광섬유센서의 인장강도 측정

광섬유의 인장강도를 시험하기 위한 실험장치의 구성은 그림 3과 같다. 스텝모터와 하모닉 드라이브를 조합하여 펄스당 0.325mm의 변위를 제어할 수 있도록 하였다. 굽힘시험은 이송판과 고정판 면에 구리판을 한 면에 두장씩 붙여 광섬유를 끼울 수 있도록 한 뒤 시험하였고, 인장시험은 두 판 위에 광섬유를 접촉하여 시험하였다.

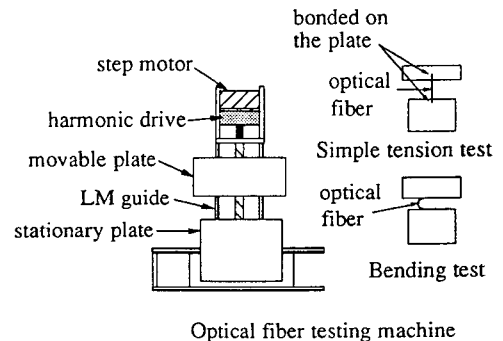


그림 3. 광섬유 강도 측정장치 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the strength measurement system for optical fibers

먼저 열처리한 광섬유와 열처리하지 않은 광섬유의 굽힘시험을 각각 30개씩 한 뒤 열처리하지 않은 40mm광섬유에 대한 인장시험을 10개의 시편에 대해

여 행하여 수정계수를 구하여 이를 이용하여 열처리한 광섬유의 인장강도를 굽힘시험의 결과에서 구할 수 있도록 하였다. 인장시험은 MTS만능시험기를 이용하여 0.6mm/min로 변위제어를 하여 행하였으며, 광섬유를 통해 레이저를 통과시켜 광섬유의 파단여부를 알아보았다.

3. 2 손상검출을 위한 시편제작 및 실험장치 구성

모든 적층판은 유리섬유/에폭시 프리프레그를 이용하여 제작하였다. 유리섬유/에폭시 복합재료는 투명하여 층간분리, 스플리팅, 모재균열 등의 적층판에 존재하는 손상이나, 광섬유 파단시 레이저의 누출(bleeding)현상을 직접 육안으로 관측할 수 있다는 특징이 있다. 시험에 이용된 광섬유는 삼선전자의 DSF(dispersion shifted fiber)로 손상에 대한 감도를 높이기 위해 합성수지로 이루어진 코팅부를 제거하였다. 인접한 강화섬유의 방향에 따른 광섬유의 인장특성 변화를 살피기 위해 일방향적층시편 $[0_6]_T$ 과 직교적층시편 $[0/90_2]_S$ 의 두 종류를 제작하였다. 각 시편의 중립면에 하중방향과 평행하게 광섬유를 3개씩 삽입하였고, 이들 각 시편군에 대해 10개의 시편을 제작하여 실험을 수행하

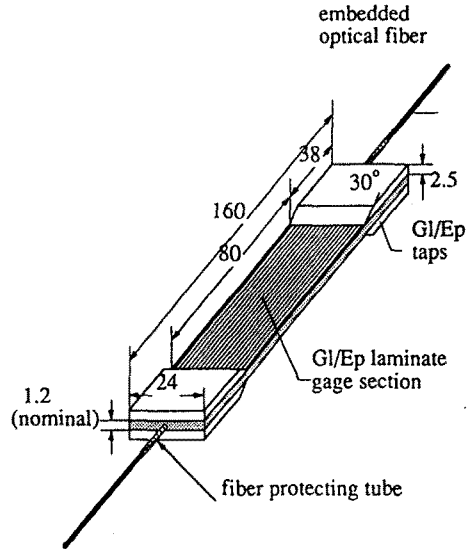
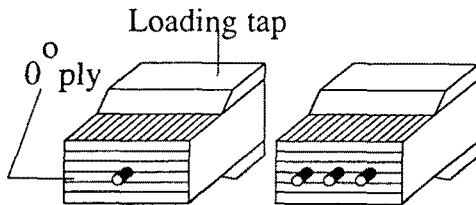
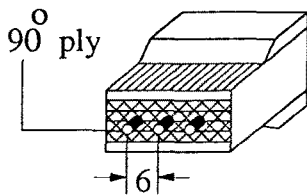


그림 5. 시편의 형상 (단위 mm)

Fig. 5. Geometry of a specimen (dimension in millimeters)



(a) Unidirectional specimen



(b) Crossply specimen

그림 4. 광섬유를 삽입한 시편의 단면

Fig. 4. Cross section of the specimen with optical fibers

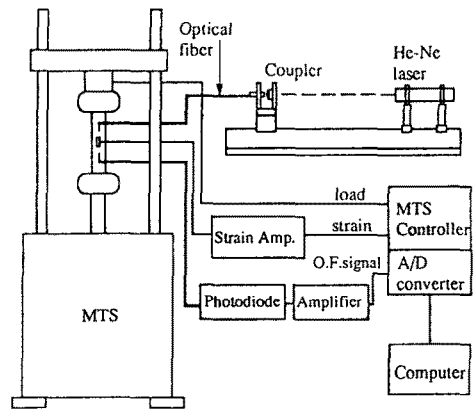


그림 6. 실험장치의 개략도

Fig. 6. Schematic diagram of experimental setup

였다. 그리고 광섬유를 1개 삽입한 일방향적층시편을 따로 제작하여 인장시험시 광섬유 파단으로 인한 레이저 누출현상이 명확히 관찰될 수 있도록 하고, 그 결과를 제시하였다. 각 시편군의 형상과 광섬유의 개수 및 위치를 그림 4에 나타내었다. 그리고 적층판을 일반적인 열처리과정에 따라 경화용 재료(curing material)를 덮고 패널형 오토클레이브(panel autoclave)에 넣

어 열처리하였다.

시편의 크기는 ASTM standard D3039-76을 참고하여 그림 5에서 보는 바와 같이 길이 200mm, 폭 24mm로 제작하였다. 각 시편의 양단에는 길이 38mm의 유리섬유 복합재료로 된 탭(tab)을 붙여서 124mm의 측정구간(test section)이 남도록 하였다.

실험장치는 MTS 10톤 유압실험기, 빛을 발생시키는 레이저(laser)와 광섬유로 빛을 입사시키는 커플러(coupler), 시편을 통과한 레이저 빛의 강도를 전기적 신호로 변환하는 장치인 광다이오드(photodiode)와 케이스로 구성된 수광부, 스트레인게이지로부터 나온 변형률 신호를 증폭시키는 스트레인앰프(strain amplifier), 데이터를 저장하기 위한 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다. 그림 6은 실험장치의 개략도이다.

레이저는 Melles Griot사의 10mW He-Ne laser를 사용하였고, 파장은 $0.6238\mu\text{m}$ 이다. 광다이오드는 SHARP BS142를 이용하였다. 정적 인장시험에서 최종파단이 일어날 때까지 변위를 증가시키는 동안 레이저를 입사시켜 통과한 레이저 빛의 강도를 측정하였다. 데이터는 MTS의 로드셀(load cell)로부터 하중, 변위계(LVDT)로부터 그립(grip)간 변위, 스트레인게이지로부터 변형률, 광다이오드로부터 광섬유를 통과한 빛의 세기를 MTS제어기에 내장된 A/D변환기를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 특히 직교적층시편의 경우에는 실험도중 여러 순간에 걸쳐 카메라를 이용하여 시편 사진을 찍어 기지균열밀도(matrix-crack density)를 측정하고, 그 순간의 변형률, 하중 등을 기록하였다.

IV. 결과 및 고찰

4. 1 열에 의한 광섬유센서의 강도 변화

일방향적층판의 인장강도는 광섬유의 인장강도보다 2배 이상 높다. 그러므로, 광섬유의 파단이 일어날 때까지 일방향적층판의 특징적인 파손형태인 보강섬유의 파단, 스플리팅 등이 나타나지 않으므로 삽입된 광섬유의 하중상태를 바꿀 수 있을 만한 어떠한 요인도 있지 않게 된다. 따라서, 삽입 후의 광섬유의 인장강도분포는 단순 인장하중하의 광섬유의 인장강도분포와 같을 것으로 생각된다. 하지만, 적층판의 경화시 열에 의한 광섬유 강도의 저하가 클 것으로 예상되어 삽입되지 않은 광섬유를 적층판 경화 사이클과 같은 상태로 오토클레이브 안에서 열처리시켰다. 이렇게 열처리한 광

섬유를 굽힘시험을 통해 인장강도를 구하고 열처리하지 않은 광섬유의 인장강도와 비교하여 열에 의한 광섬유 강도의 변화를 알아보았다.

광섬유의 굽힘시험 또는 인장시험을 n 회 수행하였을 때, 파손이 발생할 때의 최대변형률 값을 작은 값부터 순서대로 나열하여 ε_i ($i=1, \dots, n$)로 나타낼 수 있고, 이때 누적파손확률은 일반적으로 다음에 의해 구해진다.

$$F_i = \frac{i}{n+1} \quad (i=1, \dots, n) \quad (13)$$

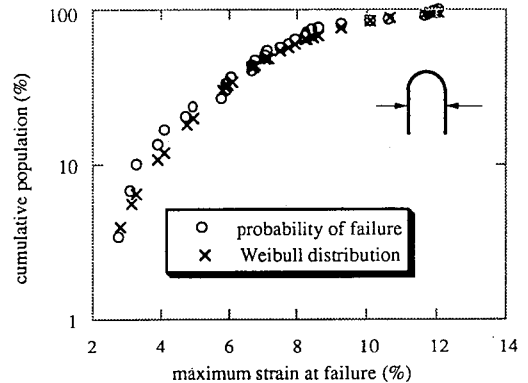


그림 7. 열처리하지 않은 광섬유의 굽힘시험에서 얻은 누적파손분포

Fig. 7. Cumulative failure distribution obtained in bending of uncured optical fiber

그림 7과 그림 8은 열처리하지 않은 광섬유와 열처리한 광섬유의 굽힘시험에서 파괴가 발생할 때의 최대 변형률에 대한 누적파손확률을 보이고 있다. 또한, 이 결과를 최소자승법(least square method)을 이용하여 2개의 파라미터를 갖는 Weibull분포에 따르는 누적파손분포곡선으로 적합화(curve fitting)하여 그림 7과 8에 제시하였고, 이는 식(14), 식(15)와 같다.

식(14)과 식(15) 그리고 그림 7과 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 40mm 광섬유의 인장일때의 누적파손분포를 예측하면 식(16)과 같다

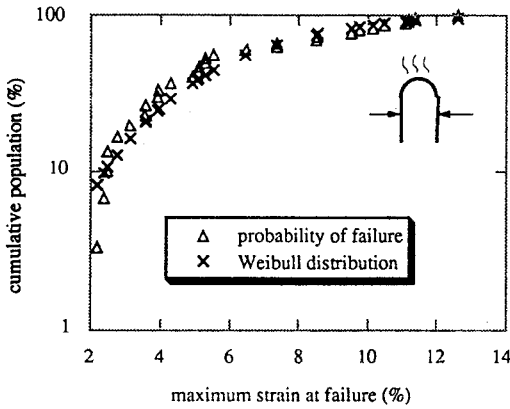


그림 8. 열처리한 광섬유의 굽힘시험에서 얻은 누적 파손분포

Fig. 8. Cumulative failure distribution obtained in bending of cured optical fiber

$$F(\epsilon_{max}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_{max}}{8.192}\right)^{2.98}\right) \quad (14)$$

$$F(\epsilon_{max}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_{max}}{7.158}\right)^{2.06}\right) \quad (15)$$

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{0.4656}\right)^{3.98}\right) \quad (16)$$

그리고, 열처리하지 않은 40mm 광섬유의 실제 인장시험으로부터 구한 광섬유의 누적파손분포는 다음과 같다.

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{1.7636}\right)^{4.029}\right) \quad (17)$$

식 (16)과 식(17)을 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(16)과 식(17)을 비교하여 다음과 같음을 알아내었다.

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

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

$$F(\epsilon_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\epsilon_f}{1.083}\right)^{3.06}\right) \quad (18)$$

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

4. 2 레이저신호의 세기와 손상과의 관계

그림 9에서는 1개의 광섬유를 삽입한 일방향적층시편에 레이저를 입사시키고 인장시험을 수행할 때 시편의 변형에 따른 광섬유센서의 파손 및 파단과 그에 따른 광신호의 누출과정을 보이고 있다. 시편이 파괴되기 이전에 광섬유의 파단으로 인한 빛의 누출현상이 수차례 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

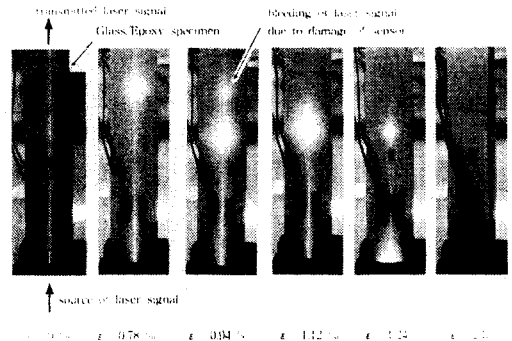


그림 9. 광섬유센서의 손상에 따른 레이저신호 누출 과정

Fig. 9. The process of laser signal bleeding according to the damage of an optical fiber sensor

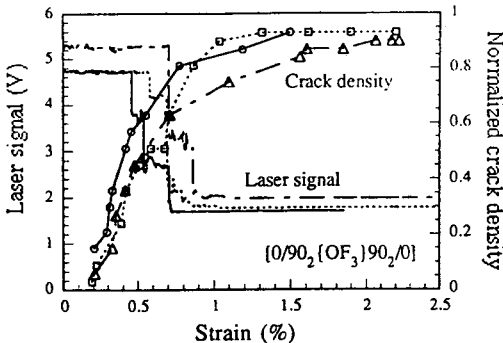
그림 10과 11에서는 변형률에 따른 레이저신호 세기곡선을 제시하였다. 시편에 가하는 하중 증가로 인해 첫 번째 빛의 누출현상이 발생하면 레이저신호의 세기를 나타내는 광다이오드의 출력전압이 현저히 저하된다. 한 두 군데서 광섬유의 파단이 발생하더라도 초기단계에서는 파단된 광섬유간의 중심이 아직 일치되기 때문에 레이저 신호의 전달이 지속된다. 빛의 누출로 인한 전압강하를 수 차례 보인 후 암전류레벨로 떨어짐을 관찰할 수 있다.

그림 10은 3개의 광섬유를 삽입한 직교적층시편의

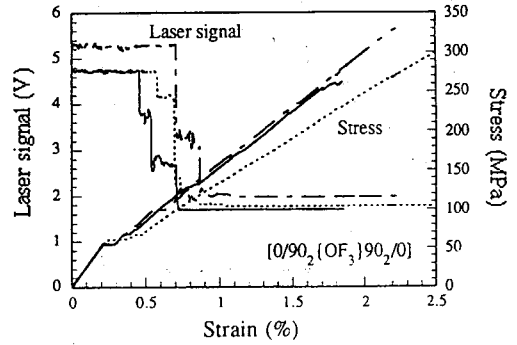
변형에 따른 레이저신호 세기, 기지균열밀도, 응력의 변화를 나타내고 있다. 여기서는 직교적층시편 세 개의 결과를 동시에 제시하였다. 그림 10(a)에서 보듯이 기지균열이 생긴다고 해서 곧바로 레이저신호의 세기가 저하되지는 않으며, 이는 기지균열이 생겨도 그 속의 광섬유가 즉시 파단되지는 않는다는 것을 의미한다. 그림 10(b)에서는 광섬유가 처음 파단되는 시점과, 응력-변형률 곡선에서 몇 번의 기울기 감소 후에 최종적인 기울기를 갖게 되는 시점이 거의 일치함을 관찰할 수 있다. 응력-변형률 곡선에서 최종적인 기울기를 갖게 되는 시점은 하중의 대부분을 0° 적층판이 지탱하게 되는 시점임을 의미한다. 따라서 이 시점부터 횡방향적층판은 증가되는 변형률에 대하여 주로 기지균열이 벌어지는 형태로 변형을 하게되고, 그 속을 관통하고 있는 광섬유는 기지균열이 벌어짐에 따라 그 부분에서 국부적인 과대변형이 가해져서 파단되는 것으로 여겨진다. 이러한 광섬유의 파단메카니즘(fracture mechanism)을 보다 명확히 규명하기 위해서는 미시적인 파괴양상의 고찰, 파괴역학의 개념이나 유한요소법을 이용한 해석적인 방법 등을 이용한 연구가 필요하다.

한편, 변형률을 증가시키에 따라 기지균열 사이의 간격은 무한히 감소하는 것이 아니라 횡방향적층의 두께정도에서 포화된다. 따라서, 기지균열밀도에 횡방향적층의 두께를 곱하여 식(19)와 같은 정규기지균열밀도(normalized matrix crack density)라는 양을 정의할 수 있다.

$$\overline{D}_{mc} = \frac{N_{mc}}{L} \times t_T \quad (19)$$



(a)



(b)

그림 10. 횡방향적층판 시편의 변형률에 따른 레이저신호 세기, 정규기지균열밀도 및 응력 변화

Fig. 10. Changes of laser signal intensity, normalized crack density and stress according to the strain of crossply laminate specimen

이때, \overline{D}_{mc} 는 정규기지균열밀도, N_{mc} 는 측정구간내의 기지균열의 수, L 은 측정구간의 길이(40mm), t_T 는 횡방향적층판의 두께(mm)이다. 정규기지균열밀도는 횡방향 적층두께 만큼의 길이내의 균열갯수를 의미하며 균열밀도의 포화상태에서 그 값이 1로 수렴하게 된다. 광섬유가 처음 파단되는 시점, 즉 최초로 레이저신호의 세기가 저하되는 시점은 시편 모두 정규기지밀도는 0.65정도이고 변형률은 0.65% 정도이며, 레이저신호가 완전히 암전류레벨로 떨어지는 시점은 정규기지균열밀도가 0.8 정도로서 기지균열이 포화되기 시작하는 부분이며, 변형률로는 약 1%에 해당한다. 따라서, 레이저신호의 세기의 변화를 관찰하여 시편의 손상정도를 검출할 수 있다.

그림 11은 3개의 광섬유를 삽입한 일방향적층시편들의 변형에 따른 레이저신호의 세기와 응력 변화를 나타낸 것이다. 일방향적층시편의 경우에는 광섬유가 파단되는 시점에서 거시적인 시편의 손상이 관찰되지 않았으며, 광섬유가 파단될 때의 시편의 변형률도 일정하지 않았다. 그러므로, 일방향적층시편 내의 손상과 레이저신호와의 관계를 규정하기는 어렵다. 그러나, 광섬유가 파단될 때의 시편의 변형률이 1~1.7%의 범위 내에 있어 광섬유의 파단이 관찰되면 재료에 이미 상당한 변형 및 미시적 손상이 유발되었다는 것을 의미하므로 구조물의 설계시 적용되는 안전계수 등을 고려

한다면 광섬유센서의 파단 그 자체가 하나의 구조물의 안전도 진단에 유용한 자료로서 이용될 수 있을 것으로 고려된다.

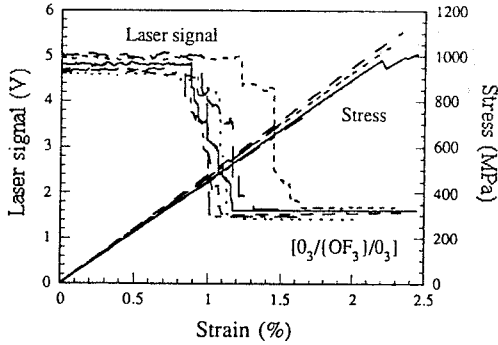


그림 11. 일방향적층판 시편의 변형률에 따른 레이저 신호 세기와 응력변화

Fig. 11. Changes of laser signal intensity and stress according to the strain of unidirectional laminate specimen

V. 결 론

기능형 복합재 구조물에 광섬유 적용에 관한 실험을 수행하여 광섬유의 기능형 복합재 구조물 내에서의 건전성 평가와, 또한 인장하중하에서 복합재료 시편에 삽입된 광섬유를 통과한 레이저 신호와 구조물의 변형 및 손상과의 관계를 연구 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

굽힘상태의 광섬유에 빔이론을 적용하고, 최약체결 파손이론에 근거한 누적파손분포에 수정계수를 도입함으로써 굽힘시험을 통해 광섬유와 같은 섬유상 센서 재료의 강도 측정이 가능함을 밝혔다. 그리고 굽힘시험과 인장시험에서의 누적파손분포를 비교하여 수정계수를 얻을 수 있었다. 또한 복합재료 적층판의 경화 사이클과 같은 과정으로 열처리한 광섬유센서와 열처리하지 않은 광섬유센서의 인장강도를 비교함으로써 적층판 경화시 열처리로 인한 광섬유의 강도저하가 적지 않다는 사실을 관찰하였다. 이에 따라 복합재료 적층판 경화시 광섬유의 강도저하로 인한 센서로서의 기능저하를 해결할 방법에 대한 연구가 필요하다. 직교적층시편의 경우 인장하중 상태에서 횡방향적층에 기지균열이 발생하여도 곧바로 광섬유의 파단을 유발하

지는 않으며, 기지균열이 상당히 많이 발생하여 포화되기 직전에 광섬유의 파단이 관찰되었다. 또한 광섬유를 통과한 레이저신호의 분석 결과, 직교적층시편의 경우 광섬유의 파단은 횡방향적층판이 하중을 더 이상 지탱하지 못할 정도로 손상이 상당히 진행되었음을 의미하는 것이므로 이를 응용하여 손상진단 신호로 사용될 수 있다. 일방향적층시편의 경우는 재료 내에 육안으로 확인될 만한 거시적인 손상이 발생하기 전에 광섬유가 먼저 파단된다. 이를 이용하면 안전계수를 고려하여 설정한 일정범위 이상의 변형에 대한 경고신호 등으로서 이용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제 연구지원비로 수행된 결과로서 이에 대해 감사를 드립니다.

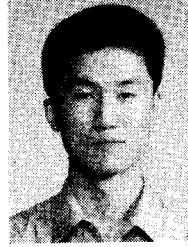
참고문헌

- [1] B. S. Thompson, and M. V. Gandhi, "Smart Materials and Structures Technologies", Technomic Publication, Pennsylvania, pp. 1~19, 1990.
- [2] H. Singh, J. S. Sirkis, and A. Dasgupta, "Micro-interaction of Optical Fibers Embedded in Laminated Composites", Proc. of SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins, Vol. 1588, pp. 76, 1991.
- [3] Dae-Cheol Seo, "Effect of Embedded Optical Fibers on Matrix Crack Spacing in Smart Structures", M. S. thesis, KAIST, 1995.
- [4] Sang-Jae Yoon, "Fatigue Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors", M. S. thesis, KAIST, 1995.
- [5] M. J. Matthewson and C. R. Kurkjian, "Strength Measurement of Optical Fibers by Bending", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 69, pp. 815~821, 1986.
- [6] Weibull, W., "A statistical Distribution Function of Wide Applicability", J. Appl. Mech., Vol. 18, pp. 293~296, 1951.

 著 者 紹 介

**장 태 성**

1971년 4월 17일생. 1993년 고려대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1996년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1996~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정. 주관심분야 : smart materials & structures.

**김 호**

1971년 6월 25일생. 1994년 한양대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1996년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 기아자동차 중앙기술연구소 연구부 구조해석팀 근무. 주관심분야 : 차량구조해석

**이 정 주**

1951년 12월 3일생. 1974년 경북대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1978년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1992년 University of Surrey 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수. 주관심 분야 : smart materials & structures.