

지능형 복합재 구조물에 삽입된 광섬유센서의 피로거동에 관한 연구

장태성* · 김 호* · 이정주*

(1997년 6월 9일 접수)

A Study on the Fatigue Behavior of Optical Fiber Sensors Embedded in Smart Composite Structures

Tae Seong Jang, Ho Kim and Jung Ju Lee

Key Words : Fatigue(피로), Optical Fiber Sensor(광섬유센서), Smart Composite Structures (지능형 복합재 구조물), Transverse Matrix Crack(횡방향 기지균열), Cumulative Failure Distribution(누적 파손 분포)

Abstract

In this study, fatigue behavior of the optical fiber sensor embedded in composite laminate was investigated. Static tensile and fatigue tests were performed for three types of laminated composite specimens with embedded optical fiber sensor in the neutral plane ; $[0_6/OF/0_6]_T$, $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ and $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$. The fracture of the embedded optical fiber sensor was detected by the intensity drop off of laser signal transmitted through the optical fiber sensors embedded within laminated composite specimen. The maximum fatigue stress applied to laminated specimen was compared with the average tensile stress at which the fracture of the embedded optical fiber within the laminate occurred under static tensile loading. From the experiments, firstly it is observed that the decrease in the life of optical fiber sensors embedded within unidirectional-ply laminate by the fatigue loading is relatively small compared to that of cross-ply laminate. Secondly, the optical fiber embedded in unidirectional-ply laminate is fractured by the fatigue damage due to the growth of internal defects of optical fiber, however the optical fiber embedded in cross-ply laminate is fractured by the growth of transverse matrix crack.

1. 서 론

복합재료는 비강성, 비강도가 높아 경량화가 요구되는 다양한 구조물에 널리 적용되고 있으나, 손상허용치(damage tolerance)가 낮다는 것이 문제점으로 지적된다. 그러므로 복합재 구조물 스스로가 건전성(health)을 감지하고, 효과적으로 손상을

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

검출하여 외부자극에 대해 일정한 반응동작을 하게 하는 지능형 복합재 구조물에 대한 연구가 최근에 부각되고 있다. 지능형 복합재는 항공우주, 해양, 토목 구조물 등의 여러 분야에 다양하게 적용될 수 있다.⁽¹⁾ 현재 광섬유센서는 다른 센서에 비해 여러 가지 장점을 지니고 있어서 지능형 복합재 구조물 내의 감지재료로서 널리 이용되고 있다. 광섬유센서는 전자기적 간섭의 영향을 받지 않고, 화학적 부식 환경에 대한 저항성이 강하며, 매우 감도가

우수하고, 가볍고, 직경이 작고, 유연하며, 취급이 편리하여 지능형 복합재 구조물 내에 적용 및 삽입이 용이하다.^(2, 3) 광섬유센서는 또한 건전성 감지(health monitoring),⁽⁴⁾ 내부 변형측정(internal deformation measurement),⁽⁵⁾ 온도측정(temperature measurement),⁽⁶⁾ 음향방출검출(acoustic emission detection),⁽⁷⁾ 충격검출(impact detection) 및 진동감지(vibration sensing)^(8, 9) 등의 기능을 수행할 수 있다.

광섬유센서를 복합재에 삽입할 때, 광섬유센서가 주구조물(host structures)의 건전성에 미치는 영향을 고려하는 것은 중요하다. 복합재에 삽입된 광섬유가 복합재 주구조물의 기계적 거동에 미치는 영향에 대한 연구로서 다음과 같은 결과들이 발표되었다. Jensen^(10, 11) 등과 Measures⁽¹²⁾ 등은 삽입된 광섬유가 복합재 적층판의 일방향 인장 및 압축 특성에 미치는 영향을 보고하였다. Singh 등⁽¹³⁾은 직경과 피복상태가 서로 다르게 삽입된 광섬유 주위의 복합재료의 변형률을 측정하였다. 서대철 등⁽¹⁴⁾은 광섬유의 삽입으로 인해 야기된 손상을 직교 적층판의 횡방향 기지균열밀도와의 관계로 측정하였다. 이동춘 등⁽¹⁵⁾은 광섬유를 삽입한 복합재의 피로거동에 관한 정량적인 조사를 수행하였다. Güemes와 Menéndez⁽¹⁶⁾는 광섬유가 정적 인장하중 및 피로하중 상태에서 적층판에 부정적 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. 그러나, 광섬유센서를 지능형 구조물에 성공적으로 적용하기 위해서는, 광섬유를 삽입한 복합재 적층판의 건전성뿐만 아니라, 복합재에 삽입되어 감지기능을 수행하는 광섬유센서 자체의 수명을 또한 고려하는 것이 필수적이다. 사용중인 구조물은 보통 일정치 않은 하중을 받게 되며, 피로하중상태의 재료는 일반적으로 정적 인장하중에서보다 낮은 응력수준에서 파괴된다. 그러므로 삽입된 광섬유가 피로하중에서 요구되는 수명을 유지하여, 설계된 기능을 제대로 수행하는지를 조사해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 광섬유센서가 삽입된 복합적층 시편에 대해 피로시험을 수행하였다. 피로하중하에서 복합적층판에 삽입된 광섬유의 피로수명을 측정하여 S-N곡선의 작성 및 분석을 수행하였다. 또한 실험적 결과를 통해서 서로 다른 적층판에 삽입된 광섬유의 피로파괴 거동에 대하여 연구, 조사하였다.

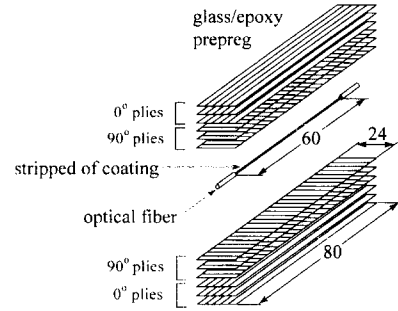


Fig. 1 The position and the orientation of the embedded optical fiber, for $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ specimen.

2. 시편제조 및 실험장치

2.1 시편 제조

시험에 사용된 시편은 세 종류의 적층으로 구성되었다. 일방향 적층 $[0_6/OF/0_6]_T$ 및 직교적층 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$, $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 로 이루어졌다. Fig. 1은 세 가지 종류의 시편 중 직교적층 시편 $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 에서의 광섬유 삽입위치 및 방향을 예로써 나타내고 있다.

모든 시편은 (주)선경의 UGN-150 유리섬유/에폭시수지 프리프레그(prepreg)로 제조하였고, 복합적층 시편에 삽입되는 광섬유로는 삼성전자(주) 단일모드 DSF(dispersion shifted fiber)를 사용하였다. 유리섬유/에폭시수지 적층판은 투명하므로, 적층분리(delamination), 스플리팅(splitting), 횡방향 기지균열(transverse matrix crack)과 같은 손상의 개시(initiation)와 진전(growth) 그리고 광섬유센서의 파손에 의한 레이저의 누출을 육안으로 용이하게 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 광섬유를 하중방향으로 쉽게 정렬할 수 있도록 고안된 섬유 위치조절 지그(jig)를 사용하여 시편의 중립면에 하나의 광섬유를 삽입하였다. 복합적층판의 손상에 대한 광섬유센서의 민감도를 증가시키기 위해 광섬유 시험영역 60 mm 구간에서 광섬유의 피복(coating)을 아세톤(acetone)을 이용하여 화학적으로 제거하였다. 적층판을 경화 사이클에 따라 오토클레이브(autoclave)에서 경화한 후, 한국화이버(주)의 HFG GU-300 E-glass로 제조된 하중 탭(load tabs)을 CYANAMID FM 73 필름 접착제를 이용하여 적층판의 양끝에 접착시켰다. 접착된 탭을 경화한 후, 완성된 적층판을 수냉식 다이아몬드 회전

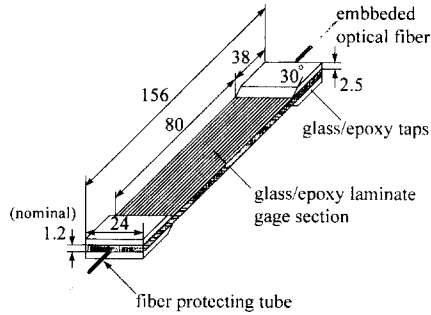


Fig. 2 Geometry of specimen (unit in mm).

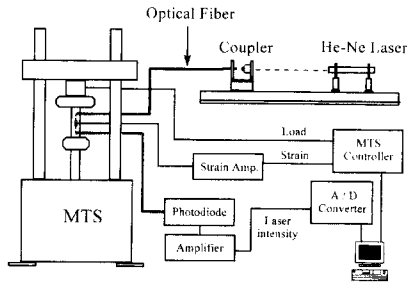


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup.

절단기에 의해 일정 크기로 절단함으로써 시편을 완성하였다. 시편의 최종 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 실험장치

25톤 MTS 810 보유압 시험기 (servo-hydraulic test machine) 를 사용하여 복합적층 시편에 대한 정적 인장시험과 피로시험을 각각 수행하였다. 시편의 정적 인장시험은 0.6 mm/min의 일정 변위 조절 상태에서 이루어졌다. 시편의 피로시험은 진동수 5 Hz의 정현파 (sinusoidal waveform)로 하중을 제어하여 이루어졌으며, 이때 시편에 압축응력이 가해지는 것을 피하기 위해 응력비 (stress ratio) R 을 0.1로 조절하였다. 전체적인 실험장치는 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다.

파장 0.6328 μm의 헬륨-네온 레이저 (He-Ne laser) 를 광섬유 위치 조절부와 렌즈로 구성된 커플러 (coupler)를 사용하여 복합적층 시편에 삽입된 광섬유에 입사시켰다. 삽입된 광섬유를 통과한 레이저 신호의 강도 (intensity)를 광다이오드 (photo-diode)에 의해 측정하였다. 광섬유의 파괴는 광섬유를 통과한 레이저신호 강도의 저하에 의해 감지되며, 또한 광섬유 파단위치에서 레이저 누출에 의해 확인될 수 있다. 정적 인장시험에서의 인장하중

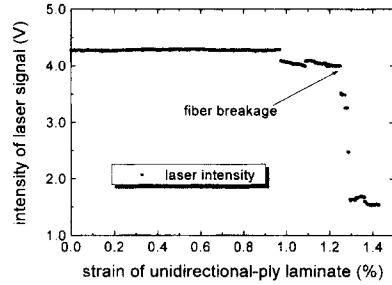


Fig. 4 The intensity change of laser signal transmitted through the optical fiber sensor embedded in unidirectional-ply laminate under static loading.

과 피로시험에서의 피로하중 이력 (history) 및 레이저신호 강도는 PC를 이용한 데이터 수집 시스템에 의해 시험중 자동적으로 기록된다.

이러한 시험장치를 통해 정적 하중상태에서 광섬유의 파괴가 발생할 때까지 복합적층 시편에 작용된 평균 인장응력을 얻었다. 또한 피로하중하에서 광섬유가 파단될 때까지 적층판에 작용된 최대 인장응력과 하중 사이클수를 얻었다. 복합적층판에 삽입된 광섬유센서의 S-N곡선을 얻고, 적층순서에 따른 광섬유센서의 피로수명을 비교하였다.

3. 광섬유를 삽입한 적층 시편의 인장시험

3.1 광섬유를 삽입한 일방향 적층 시편에 대한 인장시험

광섬유의 피로거동을 알아보기 위한 피로시험을 수행하기 전에, 정적 인장시험을 통해, 시편에 삽입된 광섬유의 파괴가 발생할 때까지 일방향 적층판 [0₆/OF/0₆]_T에 작용된 평균 인장응력을 측정하였다. 정적 인장시험 결과는 피로시험 결과와의 비교를 위해 수행되며, 광섬유의 파손양상 및 피로거동을 파악하는데 이용될 것이다.

일방향 적층시편의 인장시험에서, 복합재에 삽입된 광섬유가 손상되지 않는 한, 광섬유를 통과한 레이저신호 강도의 급격한 저하는 관찰되지 않았다. 복합적층판에 삽입된 광섬유의 파손시점을 결정하기 위해 레이저신호 강도와 시편에 작용된 인장응력 및 시편의 변형률을 함께 기록하였다. Fig. 4는 정적 인장하중상태에서 시편의 변형률이 증가함에 따라 적층판 [0₆/OF/0₆]_T에 삽입된 광섬유를 통과한 레이저신호의 강도 특징을 나타내고 있다.

이때, 변형률 1.3% 근방에서 레이저신호 강도의

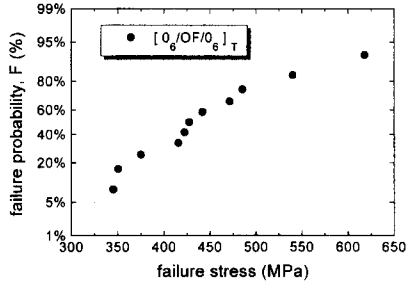


Fig. 5 Cumulative failure distribution of the embedded optical fiber sensor for the tensile stress applied to $[0_6/OF/0_6]_T$ specimen.

급격한 저하는 광섬유의 손상 및 파단을 의미한다. 정적 인장하중하에서 일방향 적층시편에 작용된 인장응력에 대한 시편에 삽입된 광섬유의 누적파손분포(cumulative failure distribution)를 Fig. 5에 나타내었다.

일반적으로 강화섬유나 광섬유와 같은 섬유상 재료의 인장응력에 대한 파손확률(probability of failure)은 내부 결함의 불균일한 분포로 인해 편차가 큰 것이 특징이다. 이와 같은 재료에 대한 강도데이터의 확률분포에 관한 연구에는 2-parameter Weibull 분포를 많이 사용하고 있다.^(17, 18) 일방향 적층 시편에 작용된 인장응력에서 광섬유의 파괴가 발생할 확률의 누적분포를 식 (1)에 기술한 바와 같이 두개의 매개변수를 갖는 Weibull 분포로 나타내었다.

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{480}\right)^{5.47}\right) \quad (1)$$

여기서, $F(\sigma)$ 는 시편에 가해진 응력(σ)까지의 광섬유의 누적파손확률이며, 응력(σ)의 단위는 MPa이다. 정적 인장하중하에서 복합적층 시편에 삽입된 광섬유가 파괴될 때 일방향 적층 시편에 작용된 평균 인장응력은 Weibull 분포식으로부터 구해질 수 있으며, 그 값으로 443 MPa을 얻었다. 그러나, 인장시험을 통해 일방향 적층시편 $[0_6/OF/0_6]_T$ 의 평균 파손응력으로 900 MPa을 얻었다. 거시적으로 관찰할 때, 삽입된 광섬유가 파괴될 때까지 $[0_6/OF/0_6]_T$ 시편에 작용된 평균 인장응력 443 MPa 근방에서는 강화섬유 파단이나 기지균열 혹은 적층분리와 같은 적층판 내의 어떤 종류의 손상도 발견되지 않았다.

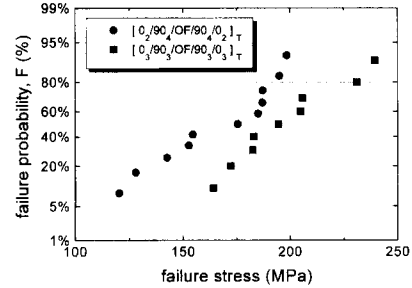


Fig. 6 Cumulative failure distribution of the embedded optical fiber sensor for the tensile stress applied to $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$, $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ specimen.

3.2 광섬유를 삽입한 직교적층 시편에 대한 인장시험

일방향 적층판에서와 동일한 방법으로 직교적층 시편에 대한 정적 인장시험을 수행하였다. Fig. 6은 삽입된 광섬유가 정적 인장하중하에서 파괴될 때, 광섬유를 삽입한 직교적층 시편 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$, $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 에 작용된 인장응력에 대한 광섬유의 누적 파손분포를 나타내고 있다.

이 두 가지 직교적층 시편에 삽입된 광섬유의 파손과 관련된 Weibull 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{179}\right)^{5.68}\right) \quad (2)$$

$[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ 시편의 경우

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{209}\right)^{7.49}\right) \quad (3)$$

$[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 시편의 경우

여기서, 응력(σ)의 단위는 MPa이다. 위 두 식과 Fig. 6으로부터 직교적층판에 삽입된 광섬유의 파손은 0° 플라이(ply) 수에 의존함을 알 수 있다. 광섬유가 $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 시편에 삽입되었을 때보다 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ 시편에 삽입되었을 때, 더 낮은 인장응력에서 광섬유가 파손될 확률이 높다는 것을 알 수 있다. Weibull 분포로부터, 광섬유가 파괴되는 순간 직교적층 시편에 작용된 평균 인장응력을 얻었다. $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ 시편의 경우에는 165 MPa을, $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 시편의 경우에는 197 MPa을 얻었다. 정적 인장하중하에서 적층판에 삽입된 광섬유가 파괴될 때까지 두 종류의 직교적층 시편 모두에 대해, 시편 중앙

의 길이방향 40 mm 구간 내에서 약 10~20개의 횡방향 기지균열을 관찰할 수 있었다.

4. 적층판에 삽입된 광섬유의 피로거동

4.1 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 피로거동

피로하중상태에서 광섬유의 파괴도 레이저신호 강도의 저하를 관찰함으로써 감지된다. Fig. 7은 피로하중 사이클이 증가함에 따른 일방향 적층시편 [0₆/OF/0₆]_T에 삽입된 광섬유를 통과한 레이저신호 강도의 전형적인 변화를 나타내고 있다. Fig. 7에서 관찰할 수 있는 바와 같이 광섬유의 파괴가 발생할 때까지는 레이저신호 강도는 거의 일정하다. Fig. 4와는 달리 Fig. 7의 데이터가 가로축에 따라 조밀해지는 것은 가로축에 로그척도(log-scale)를 적용하였기 때문이다. 또한 Fig. 4의 초기 전압 수준과 Fig. 7의 초기 전압 수준이 다른 것은 광섬유에 입사되는 레이저 빔의 양의 변화와 관계한다. 즉, 헬륨-네온 레이저를 커플러를 사용하여 광섬유에 입사시킬 때, 어느 정도로 축을 잘 일치시키느냐에 따라 입사되는 레이저의 양이 달라질 수 있다. 광섬유의 코아(core)의 직경은 16 μm로서 매우 작고, 매번 실험마다 광섬유 축과 레이저 빔을 정확히 일치시키기는 어렵기 때문에 광다이오드에서 받은 신호를 증폭한 레이저신호 강도전압은 약간 다르게 된다. 그러나, 이는 광섬유의 파단 시점을 결정하는데는 영향을 미치지 못한다. 광섬유의 파단 전과 파단 후의 상대적인 급격한 전압강하에 의해서만 광섬유의 파단 시점을 결정짓기 때문이다.

Fig. 8에 제시된 것처럼 파손된 광섬유의 미시적

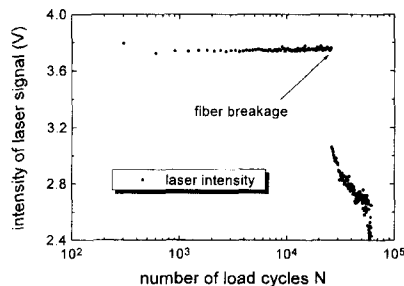


Fig. 7 The intensity change of laser signal transmitted through the optical fiber sensor embedded in unidirectional-ply laminate under fatigue loading.

인 관찰을 위해 광섬유를 덮고 있는 시편의 바깥쪽 플라이를 광섬유가 나타날 때까지 연마재를 이용하여 제거하였다.

Fig. 9에 보인 바와 같이 광학현미경 사진에 의하면, 일방향 적층판에 삽입된 광섬유가 피로하중에 의해 파괴될 때까지 광섬유 주위의 강화섬유나 기지에는 손상된 부분이 없음을 알 수 있다. 또한 광섬유에 불균일한 진단응력을 전달시킴으로써 취성의 광섬유 파괴를 촉진시킬 수 있는 광섬유와 기지 사이의 분리(debonding)도 발견되지 않았다. 강화섬유나 기지에는 손상된 부분이 없고, 단지 광섬유 자체에만 손상이 발생했다는 사실로부터, 일방향 적층판에 삽입된 광섬유는 피로하중하에서 광섬유 내부결함의 성장에 의한 피로손상에 의해 파괴되는 것으로 판단된다.

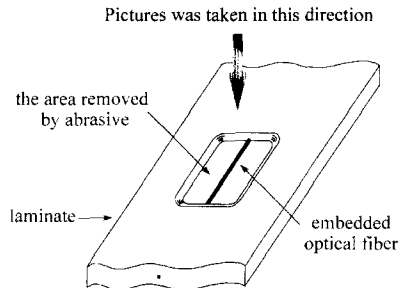


Fig. 8 Schematic diagram of the specimen prepared for microscopic observation

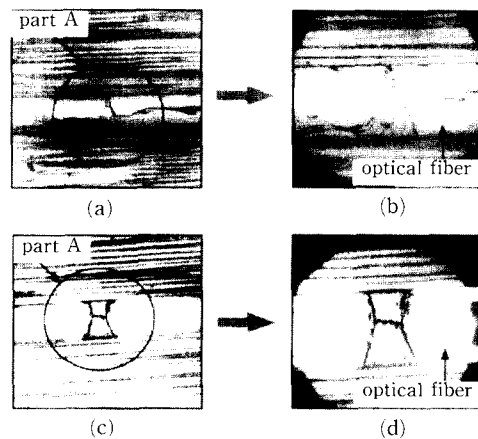


Fig. 9 Microscopic photographs of a failed optical fiber sensor embedded in unidirectional-ply laminate; (a) and (c) ×100, (b) and (d) ×200, where the diameter of uncoated optical fiber is 125 μm.

정적 인장하중상태에서 광섬유가 파괴될 때까지 일방향 적층 시편에 가해진 평균 인장응력과, 피로 하중상태에서 일방향 적층 시편에 가해진 최대응력을 비교하였다. 레이저신호 강도의 급격한 저하는 광섬유의 손상 및 파괴를 의미하므로, 그 순간의 하중 사이클수로부터 Fig. 10과 같은 S-N곡선을 작성하였다.

이 곡선에서 세로축은 정적 인장하중상태에서 광섬유의 파괴가 발생할 때까지 적층판에 가해진 평균 인장응력에 대한 적층판에 가해진 최대피로응력의 비를 나타낸다. 데이터의 산포(scatter)가 커서 일방향 적층판에 삽입된 광섬유의 피로거동을 특징 짓는 것은 쉽지 않다. 이러한 산포는 광섬유 내부 결함의 불균일한 분포로 인해 야기된 것으로 여겨진다. 산포가 크다는 것은 광섬유의 내부 결함의 크기 및 위치의 다양성을 대변한다. 실험을 통해 일방향 적층판에 삽입된 광섬유는 적층판이 정적 인장하중을 받을 때보다 피로하중을 받을 때, 더 낮은 응력수준에서 파괴가 된다는 사실을 알 수 있다. 그러므로, 피로하중상태에서 광섬유센서를 지능형 복합재 구조물에 성공적으로 적용하기 위해서는 광섬유센서의 피로하중에 대한 건전성을 충분히 고려하여 설계되어야 한다.

4.2 직교적층판에 삽입된 광섬유의 피로거동

피로시험에서도 적층판에 삽입된 광섬유가 파괴되기 전에, 횡방향 플라이에서 기지균열의 성장이 관찰되었다. 이 사실은 일방향 적층판의 경우와는 상당히 다르다. 일방향 적층 시편에 대해서는 광섬유가 파괴되기까지 적층판 내의 어떠한 손상을 관찰할 수 없었다. 직교적층 시편에 대해서는 적층판에 피로하중이 반복됨에 따라, 특히 횡방향 플라이에서 강화섬유의 방향으로 기지 균열이 성장한다. 이때 다른 균열보다 더 빠르게 성장하는 하나의 균열이 광섬유에 최초로 도달하면, 균열은 변형률 집중을 야기하므로, 이 횡방향 기지균열이 광섬유에 도달한 후, 단지 몇 하중 사이클 내에 광섬유가 파괴됨을 관찰할 수 있었다. 그러므로, 직교적층판에 삽입된 광섬유의 피로수명은 첫번째 기지균열이 광섬유에 도달하는데 걸리는 하중 사이클수와 거의 일치하게 된다. 직교적층판에 삽입된 광섬유가 파단되는 위치에서의 현미경 관찰 사진을 Fig. 11에 제시하였다.

이 사진을 관찰하면, 횡방향 기지균열의 성장은

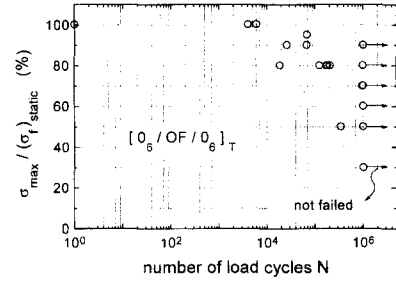


Fig. 10 S-N curve of the optical fiber sensor embedded in $[0_6/OF/0_6]_T$

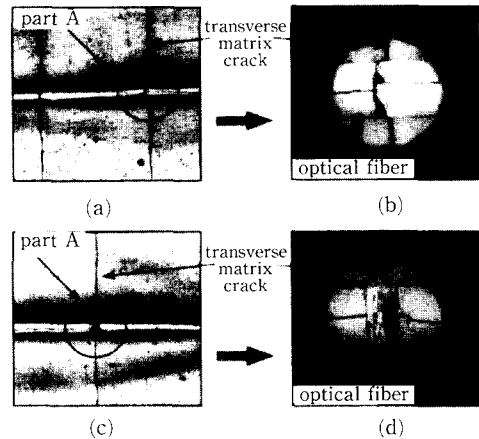


Fig. 11 Microscopic photographs of a failed optical fiber sensor embedded in cross-ply laminate; (a) and (c) $\times 25$, (b) and (d) $\times 150$, where the diameter of uncoated optical fiber is $125 \mu\text{m}$.

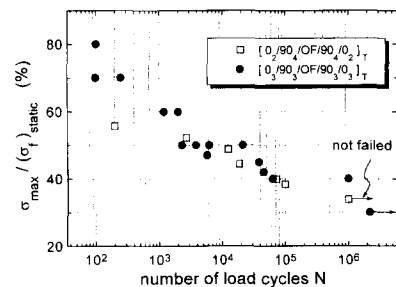


Fig. 12 S-N curves of the optical fiber sensor embedded in cross ply laminate.

광섬유 파괴의 직접적 원인이 됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 9에서 일방향 적층판에서의 강화섬유나 기지에는 손상된 부분이 전혀 없었다는 사실과는 크게 다르다. 피로하중하에서 광섬유는 단지 첫 번째 기지균열에 의해서 파괴된다는 사실에 주목해야 한다. 정적 인장하중하에서는 시편 중앙의 40 mm 길

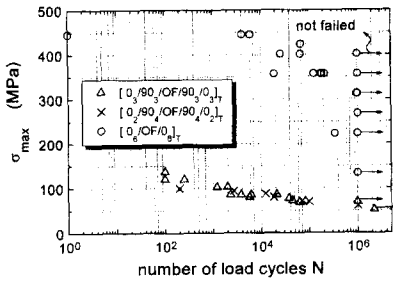


Fig. 13 S-N curves of the optical fiber sensor embedded in different laminates, R=0.1.

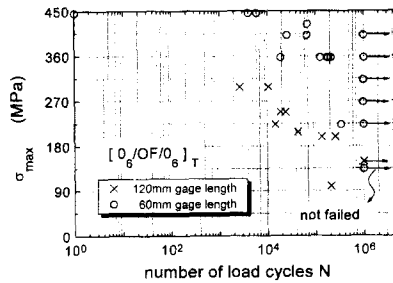


Fig. 14 S-N curves of the optical fiber sensor embedded in $[0_6/OF/0_6]_T$ with different gage length.

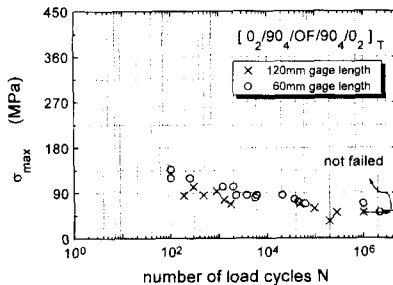


Fig. 15 S-N curves of the optical fiber sensor embedded in $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ with different gage length.

이방향 측정구간에서 충분한 양(10~20개)의 지지균열이 형성될 때까지 광섬유 파손은 발생하지 않았다는 사실과 비교할 때, 주목할 만하다. 이 횡방향 지지균열은 피로하중하에서 변형률 집중에 의해 광섬유 파손에 더 지배적 영향을 미치는 것으로 판단된다. 두 종류의 직교적층 시편 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ 와 $[0_3/90_3/OF/90_3/0_3]_T$ 에 대한 S-N곡선을 Fig. 12에 나타내었다.

이 두 종류의 적층판에 삽입된 광섬유의 피로한도는 대략 정적 인장하중하에서 광섬유 파손이 발생할 때까지 적층판에 작용된 평균 인장응력의

30% 수준이다. 일방향 적층판의 경우보다 산포정도가 훨씬 작다는 사실을 알 수 있다. 이는 피로하중하에서 직교적층판에 삽입된 광섬유 파손의 주원인이 광섬유 내부 결함에 의한 피로손상이 아님을 뒷받침한다. 피로하중하에서 직교적층판에 삽입된 광섬유의 파손 시점은 횡방향 지지균열이 광섬유에 도달하게 되는 시점에 근접하기 때문이다. Fig. 13은 서로 다른 종류의 적층판에 삽입된 광섬유의 피로수명을 나타내고 있다.

여기서 세로축은 피로하중하에서 적층 시편에 작용된 최대응력을 나타낸다. 광섬유는 일방향 적층판보다는 직교적층판에 삽입되었을 때 더 낮은 피로저항성을 갖는다고 말할 수 있다. 이러한 결과로부터 직교적층판에서의 피로에 의한 지지균열의 성장은 적층판에 삽입된 광섬유센서에 의해 감지될 수 있음을 알 수 있다.

4.3 서로 다른 길이로 적층판에 삽입된 광섬유의 피로거동

앞서 행한 실험에서는 모든 시편의 게이지(gage) 길이를 60 mm로 하였다. 일반적으로 섬유상 재료의 인장강도는 게이지길이에 따라 다른 값을 갖는다. 복합적층판에 삽입된 광섬유센서의 피로수명과 광섬유 게이지길이와의 관계를 조사하기 위해 120 mm 게이지길이를 갖는 일방향 적층 시편 $[0_6/OF/0_6]_T$ 와 직교적층 시편 $[0_2/90_4/OF/90_4/0_2]_T$ 에 대한 피로시험을 수행하였다. 그리고 이 결과를 60mm 게이지길이를 갖는 시편에 대한 피로시험 결과와 비교하였다. Fig. 14는 일방향 적층 시편 $[0_6/OF/0_6]_T$ 에 대해 게이지길이에 따른 광섬유의 피로수명 변화를 나타내고 있다.

Fig. 14에서는 게이지길이 120 mm를 갖는 일방향 적층 시편 $[0_6/OF/0_6]_T$ 에 삽입된 광섬유의 피로수명 감소를 확인할 수 있다. 또한 두 경우의 게이지 길이에 대한 피로수명 데이터는 모두 산포정도가 크게 나타난다. 이것은 광섬유 내부 결함의 불균일한 분포에 기인한다고 여겨진다. 또한 광섬유의 체적이 증가할수록, 광섬유 내에 더 많은 결함을 포함할 수 있다는 사실로부터 게이지길이 증가에 따라 적층판에 삽입된 광섬유는 더 낮은 응력 수준에서 파손될 확률이 높다고 설명될 수 있다. 일방향 적층 시편에서 게이지 길이는 적층판에 삽입된 광섬유의 피로수명에 영향을 주는 매우 중요한 인자임을 발견할 수 있다. 그러나, 직교적층 시

편에서는 Fig. 15에서와 같이 두 곡선이 거의 근접한다.

이것은 파괴기구(failure mechanism)의 차이 때문이다. 일방향 적층판에서는 삽입된 광섬유의 파괴는 피로하중에 의한 내부결합의 성장으로 인해 발생한다. 그러나, 직교적층판에서는 피로하중에 따라 횡방향 기지균열이 성장하면서, 이 균열이 적층판에 삽입된 광섬유에 도달할 때, 기지균열 선단에서의 변형률 집중에 의해 삽입된 광섬유의 파괴가 발생한다. 그러므로 직교적층 시편에 삽입된 광섬유의 피로수명은 시편의 게이지길이에 덜 민감하다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재 적층판에 삽입된 광섬유센서의 피로거동을 조사하였다. 복합재 적층판에 삽입된 광섬유의 S-N곡선을 구하고, 광섬유 파손 형태를 관찰함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

피로하중하에서 적층판에 삽입된 광섬유는, 정적 인장하중하에서 광섬유가 파괴될 때까지 적층판에 가해진 평균 인장응력보다 더 낮은 응력 수준에서 파괴된다. 특히 광섬유가 직교 적층판에 삽입된 경우, 일방향 적층판에 삽입된 경우에 비해 광섬유의 피로하중에 의한 수명의 저하가 크다. 그러므로, 지능형 복합재 구조물에 성공적으로 광섬유센서를 적용하기 위해서는 설계단계에서 이 점이 고려되어야 한다. 일방향 적층판에 삽입된 광섬유는 피로하중하에서 광섬유 내부 결합의 성장으로 인한 피로 손상에 의해 파괴된다. 그러나 직교적층판에 삽입된 광섬유는 피로하중하에서 횡방향 기지균열의 선단에서 발생된 변형률 집중에 의해 파괴된다. 광섬유가 직교적층판에 삽입되었을 때, 광섬유의 피로 수명은 게이지길이에 크게 의존하지 않는다. 횡방향 기지균열은 직교적층판에 삽입된 광섬유의 피로 수명에 영향을 주는 중요한 인자이다. 직교적층판에 삽입된 광섬유의 피로파괴 특성을 고려함으로써, 직교적층판에서의 횡방향 플라이 내의 기지 균열의 성장은 적층판에 삽입된 광섬유센서의 피로수명 측정에 의해 감지될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Visconti, I. C., Langella, A. and Cigliano, C., 1993, “Smart Composites: Technological Characterization of Optical Sensors,” *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials*, Vol. 2, pp. 393~401.
- (2) Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., 1990, *Smart Materials and Structures Technologies*, Technomic publication, Pennsylvania, pp. 56~64.
- (3) Claus, R. O., 1991, “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, p. 3.
- (4) Greg P. Carman and Milan Mitrovic, 1994, “Health Monitoring Techniques for Composite Materials Employing Thermal Parameters and Fiber Optic Sensors,” *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Conference*, Vol. 2191, pp. 244~256.
- (5) Valis, T., Tapanes, E. E., Liu, K. and Measures, R. M., 1991, “Passive Quadrature Demodulated Localized Michelson Fiber Optic Strain Sensor Embedded in Composite Material,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, pp. 535~544.
- (6) Markijan Baran, 1996, “Optical Fiber Sensor for Temperature Measuring,” *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials, SPIE*, Vol. 2779, pp. 198~202.
- (7) Kent A. Murphy, Michael F. Gunther, Anbo Wang and Richard O. Claus, 1994, “Detection of

- Acoustic Emission Location Using Optical Fiber Sensors," *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Conference*, Vol. 2191, pp. 282~290.
- (8) Malki Abdelrafik, Gafsi Rachid, Michel Laurent, Labarrère Michel and Lecoy Pierre, 1996, "Impact and Vibration Detection in Composite Materials by Using Intermodal Interference in Multimode Optical Fibers," *Applied Optics*, Vol. 35, pp. 5198~5201.
- (9) Doyle Crispin and Fernando Gerard, 1996, "An Intensity-based Fibre-optic Vibration Sensor," *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 2718, pp. 94~102.
- (10) Jensen, D. W., Pascual, J. and August, J. A., 1992, "Performance of a Graphite/bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Tension," *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, pp. 24~30.
- (11) Jensen, D. W., Pascual, J. and August, J. A., 1992, "Performance of a Graphite/bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I : Uniaxial Compression," *Smart Materials Structures*, Vol. 1, pp. 31~35.
- (12) Measures, R. M., Glossop, N. D. W., Lymer, J., Leblanc, M., West, M., Dubois, S., Tsaw, W. and Tennyson, R. C., 1989, "Structurally Integrated Fiber Optic Damage Assessment System for Composite Materials," *Applied Optics*, Vol. 28, No. 13, pp. 2626~2633.
- (13) Singh, H., Sirkis, J. S. and Dasgupta, A., 1991, "Micro-interaction of Optical Fibers Embedded in Laminated Composites," *Proceedings of the SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins*, Vol. 1588, pp. 76.
- (14) Seo, D. C. and Lee, J. J., 1995, "Effect of Embedded Optical Fibers on Matrix Crack Spacing in Smart Structures," *Composite Structures*, Vol. 32, pp. 51~58.
- (15) Lee, D. C., Lee, J. J. and Yun, S. J., 1995, "The Mechanical Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors," *Composite Structures*, Vol. 32, pp. 39~50.
- (16) Alfredo Güemes and JoséM. Menéndez, 1996, "Fatigue Strength of Glass Reinforced Polyester (GRP) Laminates with Embedded Optical Fibers," *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials, SPIE*, Vol. 2779, pp. 217~221.
- (17) 김선진, 이상국, 남기우, 오세규, 1996, "탄소섬유강화 복합재료 강도데이터의 통계적 특성에 관한 연구," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제2호, pp. 511~519.
- (18) 김정규, 심동석, 1996, "랜덤하중하에서의 GFRP의 피로누적손상거동과 피로수명예측," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제12호, pp. 3892~3898.