

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재료 구조물의 건전성 감시 기법 개발에 관한 연구

김원석*·이정주**

A study on structural health monitoring of composite structures by using embedded fiber Bragg grating sensors

Won-Seok Kim and Jung-Ju Lee

Key Words: 손상감지(damage detection), 구조물의 건전성 감시(structural health monitoring), 광섬유 브래그 격자 센서(fiber Bragg grating sensor), 복합 적층판(composite laminate).

Abstract

In this paper, a new structural health monitoring technique for composite laminates through the use of embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors is presented. The method traces the ply stress states of a laminate and compares them with failure criteria during the service time of structures. The ply stress state of every ply composing the composite laminate can be obtained using classical lamination theory by embedded FBG sensors in the laminate. Graphite/epoxy laminate specimens, embedded with three FBG sensors, were fabricated. Tension tests were performed to evaluate the ply stress states tracing technique. Experimental results show that laminates experience fracture when the ply stress states are over the boundaries of failure criteria. In this method, critical damage can be detected by the ply stress states which are close to the boundaries of the failure criteria.

1. 서론

최근 많은 연구가 이루어지고 있는 구조물의 건전성 감시(structural health monitoring) 개념은 구조물의 운행 중에 구조물의 변화를 감지해 내어 실시간으로 구조물 안전진단을 연속적으로 수행하겠다는 개념이다. 이는 기존의 비파괴 검사와 비교해 볼 때 손상 발생 즉시 이를 발견할 수 있고, 고가의 장비와 독립적인 검사 시간을 필요로 하지 않아 경제적이면서 효과적으로 손상 감지를 수행할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않으므로 크기가 작고 높은 분해능을 가지고 있기 때문에 구조물의 건전성 감시를 위한 감지계로서 많은 연구가 이루어져왔다. 특히 복합재료에는 재료의 물성 저하 없이 내부 삽입될 수 있어 지능 복합재료 구조물로 적용하기에 매우 매력적이다 [1]. 본 연구는 복합 적층판에 삽입된 광섬유 센서를 이용한 재료의 손상감지 기법에 관한 것으로, 구조물의 건전성 감시 개념이 적용 가능할 새로운 기법의 제시 및 평가를 목표로 하였다.

2. 손상감지 기법 소개

본 논문에서 제시하는 복합재료 구조물의 손상 감지 기법은 복합재료 내부에 삽입된 광섬유 브

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

래그 격자 센서를 이용, 구조물의 운행 중 실시간으로 변형률을 측정하여 재료가 건디는 응력상태를 손상영역 내에 도시하는 것이다. 그럼으로써 실제로 재료가 받는 응력 상태가 파손기준을 넘어서는지 또는 얼마나 가까이 접근하는지를 관찰하여 설계된 응력상태의 안전여부를 운행 중 감시하는 것이 가능해진다. 응력상태 감시에 사용한 복합재료 파손기준은 실제 설계에 많이 쓰이는 최대응력 기준, 최대변형률 기준, Tsai-Wu 파손이론이다.

복합 적층판 내부 삽입된 광섬유 센서로 측정하는 변형률을 이용하여 적층판을 구성하는 모든 플라이들의 응력상태를 계산하는 과정은 다음과 같다. 복합재료 적층판의 변형 상태를 기술하는데 필요한 일반적인 미지수는 $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, \kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ 6개로 고전 적층판 이론을 사용하면 3개의 적층판축 변형률 성분과 3개의 적층판축 곡률 성분을 사용하여 적층판을 구성하는 모든 플라이의 플라이축 변형률과 응력상태를 기술할 수 있다[2]. 만일 복합 적층판에 굽힘 하중이 작용하지 않거나 무시할 수 있을 정도로 작을 경우에는 곡률을 0으로, $\kappa=0$ 이라 가정할 수 있게 되고 적층판을 이루는 각 플라이의 변형률과 응력을 기술하는 데에는 3개의 적층판축 변형률 성분, $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ 만 알면 된다. 그런데 적층판축 변형률 성분과 플라이축 변형률 성분은 적층 각도만 알고 있으면 상호변환이 가능하므로 결국 적층판의 임의의 변형률 성분 3개만 측정할 수 있다면 모든 플라이의 변형률 및 응력 상태를 기술할 수 있게 된다. 광섬유 센서는 삽입한 복합 적층판의 물성저하 및 센서의 수명저하를 막기 위해 강화섬유와 같은 방향으로 삽입해야하기 때문에 Fig. 1과 같이 3개의 서로 다른 적층각을 갖는 적층판에 각각의 플라이의 강화섬유와 평행하게 광섬유를 삽입하였다 [1,3].

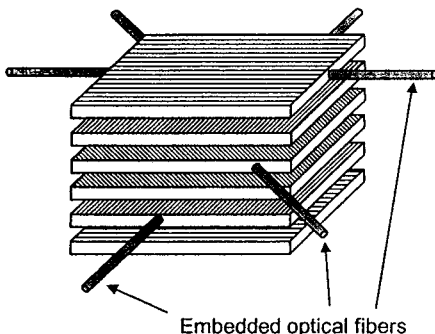


Fig. 1 복합재료 강화섬유와 평행하게 삽입된 3개의 광섬유 센서.

실험은 탄소섬유/에폭시 복합재료를 $[0/\pm 30]_s$ 적층 구성된 시편을 사용하였고 $0^\circ, 30^\circ, -30^\circ$ 층은 각각 0.13mm 정도 두께의 프리프레그(SK SkyFlex, USN150BX)를 4장씩 적층하여 총 24장 적층된 3mm 두께의 적층판을 사용하였다. 광섬유 센서는 각 $0^\circ, 30^\circ, -30^\circ$ 층을 이루는 4개의 프리프레그의 가운데, 즉 2장과 2장 사이에 삽입하여 지름 0.25mm 정도 되는 광섬유가 온전히 탄소 강화섬유에 둘러싸이도록 하였다.

복합 적층판에 삽입된 3개의 FBG 센서가 측정하는 변형률은 각 플라이의 탄소 강화섬유 방향 변형률 $\epsilon_1^0, \epsilon_1^{30}, \epsilon_1^{-30}$ 이다. 우선 측정된 플라이축 변형률을 적층판축 변형률로 변환해두면 사용한 복합재료의 물성과 적층 각도를 이용해 구한 축소강성(reduced stiffness)을 통해 적층판축 응력을 구할 수 있다. 적층판축 응력은 또 축변환 행렬 연산을 통해 모든 플라이의 플라이축 응력 상태로 계산된다. 복합 적층판 내부 삽입된 FBG 센서가 계속 변형률을 측정하면서 위의 연산을 반복적으로 수행하면 응력 상태감시가 가능해진다. 이때 가장 처음 측정되는 각 플라이의 강화섬유 방향 플라이축 변형률을 복합 적층판의 적층판축 변형률로 바꾸어주는 연산은 식 (1)과 같이 일반적인 변형률 축변환 연산에서 1행만 즉 강화섬유 방향 변형률만 나오도록 하여 3개의 각도에서 나오는 3개의 식으로 연립 방정식을 만들어주어야 한다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1^0 \\ \epsilon_1^{30} \\ \epsilon_1^{-30} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 0 & \sin^2 0 & \cos 0 \sin 0 \\ \cos^2 30 & \sin^2 30 & \cos 30 \sin 30 \\ \cos^2 -30 & \sin^2 -30 & \cos -30 \sin -30 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3. 광섬유 센서 시스템 및 센서 삽입시편

본 실험에서 사용한 센서 시스템은 Fig. 2와 같다. 광대역 파장의 광원, SLD(super-luminescent diode)에서 나온 빛이 광섬유를 통해 광분계기(coupler)에 도달하면 빛은 출력이 반으로 나뉘어지면서 시편 내부에 삽입된 광섬유 센서로까지 전달된다. 광섬유 브래그 격자 센서에서 빛은 특정 파장만 반사되고 나머지는 투과된다. 반사된 특정 파장의 빛은 다시 광분계기(coupler)로까지 전달되고 여기서 출력이 반으로 나뉘어 하나는 광원 쪽으로 다른 하나는 페브리-페롯(Fabry-Perot) 필터와 광감지기(photodetector)를 거쳐 컴퓨터로 저장된다. 광원 쪽으로 가는 빛은 한 방향으로만 빛을 투과시키는 고립장치(isolator)

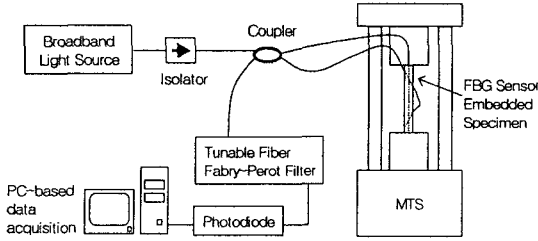


Fig. 2 광섬유 브래그 격자 센서 시스템.



Fig. 3 광섬유 센서가 삽입된 복합 적층판 시편.

로 인해 광원에 도달하지 못한다.

복합 적층판의 플라이 응력상태를 감시하면서 MTS를 이용하여 적층판 시편이 파손될 때까지 인장 실험을 수행하였다. 시편은 인장 및 피로 실험 규격에 맞게 ASTM-D3039를 따라서 만들었으며 $[0/\pm 30]_s$ 의 적층구조에 각 적층각도마다 탄소 강화섬유와 평행한 방향으로 광섬유 센서를 삽입하였다. 완성된 시편은 Fig. 3과 같다. 시편 표면에 항상 0° 적층판의 탄소 강화섬유 방향으로 스트레인 게이지를 부착하여 광섬유 센서 신호로부터 변환한 변형률 값을 검증하였다.

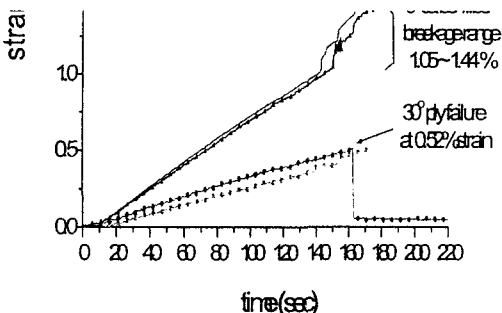


Fig. 4 3개의 광섬유 브래그 격자 센서로 측정된 인장 변형률 증가.

3. 인장실험 하에서 플라이 응력감시 수행 결과

탄소섬유/에폭시 복합재료 시편으로 인장 실험을 수행하여 시편이 파단 될 때까지 내부 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서가 보내주는 변형률 신호를 획득하며 제시한 기법을 평가하였다. Fig. 5는 시편이 파손될 때까지 삽입된 3개의 광섬유 브래그 격자 센서가 보내준 신호를 변형률로 변환하여 나타낸 그래프이다. 우선 0° 플라이에 삽입된 광섬유 센서 신호와 시편 표면 부착된 스트레인 게이지 신호가 일치함을 통하여 광섬유 센서 신호의 변형률 변환이 오차 없이 이루어졌음을 알 수 있다. 스트레인 게이지가 측정된 변형률의 경우 1.4%의 변형률 측정 후에 신호가 포화되어 그 이상의 변형률 측정을 못해주었고 0° 플라이에 삽입된 광섬유 센서는 1.44%의 변형률 측정 후에 광섬유의 파단으로 더 이상 신호를 보내주지 못하였다. 두 센서 모두 1%의 변형률을 넘어서면 변형률 증가가 선형적이지 못하고 불규칙하게 증가함을 보여주었는데 이는 이때부터 하중 방향인 0° 플라이의 탄소 섬유들이 대량으로 파단 되기 시작하기 때문이다. 일반적인 탄소섬유/에폭시 복합재료의 탄소 강화섬유 방향 파단 변형률이 1.2% 정도인 것을 고려할 때 0° 플라이의 탄소 강화섬유들이 파손되는 영역에서 우수하게 변형률을 측정하였다고 할 수 있다. 30° 플라이에 삽입된 센서는 0.52%까지 선형적인 변형률 증가를 측정하다가 갑자기 0%로 떨어졌는데, 이는 이 시점이 30° 플라이가 파손된 시점이기 때문이다. 앞의 0° 플라이에 삽입된 광섬유 센서와 달리 $\pm 30^\circ$ 플라이에 삽입된 광섬유 센서는 시편이 파손되어도 광섬유는 파손되지 않아 계속 신호를 보내줄 수 있다. 이론적인 $[0/\pm 30]_s$ 적층판의 파손 시 30° 플라이의 탄소 강화섬유 방향 변형률은 0.5%로서 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 이상의 인장실험을 통한 변형률 증가 관찰을 통해 탄소섬유/에폭시 복합재료 내부 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서는 적층판이 파손될 때까지 신호를 보내줄 수 있으며 정적 하중 하에서 발생하는 손상 영역의 큰 변형률을 측정할 수 있음이 확인되었다.

Fig. 6은 인장실험 동안 증가하는 변형률 신호를 제시한 기법을 사용하여 플라이 응력 상태로 변환하여 파손 기준과 함께 도시해준 프로그램의 실행 모습이다. 프로그램 실행결과 인장실험 하에서 시편이 받는 하중이 증가함에 따라 플라이 응력상태가 이론적인 $[0/\pm 30]_s$ 적층판의 응력 증

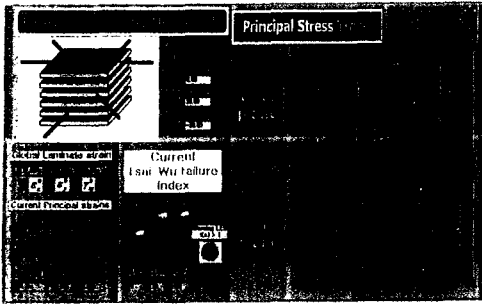


Fig. 5 인장실험에서 플라이 응력 감시 프로그램 실행 모습.

가 패적을 따라 증가함을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 복합 적층판의 파단 시에 광섬유 브래그 격자 센서로 측정된 변형률을 이용하여 계산한 플라이 응력상태이다. 인장 실험은 모두 3번 수행되었는데 이론적인 예상과 같이 30° 플라이의 전단응력이 가장 먼저 파손기준을 벗어남을 보여주었으며 그 후 0° 플라이의 탄소 강화섬유 방향 응력이 불규칙하게 떨리다가 파손기준 근처에서 재료의 파괴 후에 신호가 사라진다. 3번의 실험에서 모두 이론적인 파손 응력상태 지점을 넘어서서 파손 기준보다 멀리 떨어진 플라이 응력상태에서 재료가 파손된다.

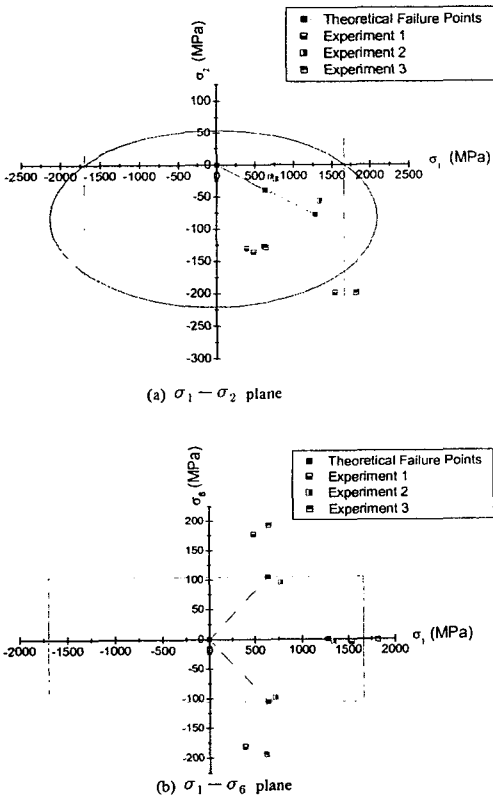


Fig. 6 탄소섬유/에폭시 복합재료 [0/±30]s 의 파손 응력상태.

4. 결론

본 연구는 복합재 구조물의 실시간 손상감지 기법개발에 관한 것으로 복합 적층판에 광섬유 브래그 격자 센서를 삽입하여 구조물의 운행 중 측정하는 변형률 신호를 플라이 응력상태로 변환, 복합재료 손상기준에 근거하여 손상 및 안전 여부를 판별하는 기법을 제시 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

정적하중 하에서 복합재료 내부 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서는 복합 적층판이 손상되고 파괴되는 영역까지 변형률을 측정할 수 있다. 0° 플라이 내부 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서는 1% 이상의 높은 변형률을 측정하며 탄소강화 섬유가 대량으로 파단되는 신호를 보내주었고 30° 플라이 내부 삽입된 광섬유 브래그 격자 센서는 전단 응력으로 플라이가 파손될 때까지 변형률을 측정하였고 플라이 파손이후에도 급격히 떨어지는 변형률 신호를 보내줌으로 플라이 파손도 감지할 수 있었다. 복합 적층판의 플라이 응력감시가 성공적으로 수행되었으며 복합 적층판은 플라이 응력상태가 손상기준을 벗어난 후에 파괴되었다. 따라서 플라이 응력 추적 기법을 이용하여 구조물의 운행 중 일어나는 설계된 응력상태 이상의 응력상태의 감지를 통해 구조물에 작용하는 과도한 하중이나 손상으로 인한 급작스런 파괴를 막을 수 있다.

참고문헌

- (1) 이동춘, 윤상재, 이정주, 홍창선 “광섬유센서를 삽입한 복합재료 적층판의 기계적 특성 및 손상 검출에 관한 연구,” 한국복합재료학회지, 제8권, 제2호, 1995, pp. 61-72.
- (2) D. G. Lee, and N. P. Suh, *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures*, Oxford Press
- (3) T. S. Jang, J. J. Lee and D. C. Lee, “The mechanical behavior of optical fiber sensor embedded within the composite laminate,” *Journal of Materials Science* Vol. 34, 1999, pp.5853-5860.