

광강도형 광섬유 센서를 이용한 복합재 적층판의 피로손상 감시

이동춘, 이정주, 서대철

Monitoring of Fatigue Damage of Composite Laminates Using Embedded Intensity-Based Optical Fiber Sensors

Dong Chun Lee, Jung Ju Lee and Dae Cheol Seo

KEY WORDS : Smart Structure(지능형 구조물), Optical Fiber Sensors(광섬유 센서), Intensity-based Optical Fiber Sensors(광강도형 광섬유 센서), Fatigue Damage Monitoring(피로손상 감시)

ABSTRACT

In this study, a technique for monitoring of fatigue damage of composite laminates by measuring the stiffness change using embedded intensity-based optical fiber sensors was investigated. Firstly, the underlying measurement principle and structure of intensity-based sensors and then a simple stiffness conversion process was explained. The monitoring technique was evaluated by fatigue tests of composite laminates with an embedded intensity-based sensor. From the test results, the response of the intensity-based sensor showed good correlation with that of surface mounted extensometer. Therefore, it can be concluded that the intensity-based sensors have good potential for the monitoring of fatigue damage of composite structures under fatigue loading. In addition, it could be confirmed that the intensity-based sensors have higher resistance to fatigue than the commercial electrical strain gauge.

1. 서론

복합재 구조물의 피로손상은 기지균열의 진전, 강화섬유의 파단, 층간분리 및 섬유방향 균열(longitudinal splitting) 등과 같이 다양한 형태로 나타나게 되며, 복합재 구조물이 피로손상을 입으면, 복합재 구조물의 전반적인 강성(overall stiffness)이 저하하게 된다. 1980년대 이후 많은 연구자^[1-4]들이 피로손상과 복합적층판의 강성변화 사이의 관계에 관한 연구를 수행하여 복합재 구조물의 강성을 측정함으로써 피로손상에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

강성측정을 위한 광섬유센서로는 페브리-페로

센서(Fabry-Perot sensor)^[5-6], 브레그 그레이팅 센서(Bragg grating sensor)^[7], OFTD 센서(optical fiber time domain sensor)^[8] 등이 사용되어 왔다. 페브리-페로 센서는 간섭을 이용한 센서로 매우 높은 분해능을 갖고 있어 매우 정밀한 측정이 가능하지만, 비교적 고가의 장비와 복잡한 구조를 가지고 있으며, 무늬 계수(fringe counting)와 같은 복잡한 신호처리 과정을 필요로 한다. 브레그 그레이팅 센서는 기계적인 접합이 없어 복합재 내에 삽입할 때 가장 유리하고, 단순한 구조와 다중측정(multiplexing)이 쉬운 점 등 많은 장점이 있지만, 광 파장변화 측정을 위한 신호처리과정과 고가의 장비가 필요하다. OFTD 센서는 신호처리과정과 고가의 장비와 고속의 데이터 획득시스템을 요구한다. 위의 연구들^[5-8]에서는 복잡한 신호처리과정이나 데이터 획득

* 한국과학기술원 기계공학과

득속도의 한계 등으로 인한 신호처리속도의 한계로 인하여 피로시험을 하는 도중 데이터를 획득할 동안에는 시험기의 하중 반복속도를 매우 낮게 하여야만 하였다. 이들 센서들에 비해 본 연구에서 사용된 광강도형 센서^[9]는 비록 분해능은 다소 낮지만, 저가의 장비와 단순한 장치구성, 쉬운 신호처리과정 등의 장점으로 인해 실제 현장에서 중요한 경제성과 유지 및 보수의 용이성의 측면에서 볼 때 매우 매력적인 센서이다. 또한, 고속의 데이터 획득이 필요하지 않아 빠른 하중속도에서도 실시간 측정이 가능하다. 또한 강성측정은 매우 정밀한 변형률의 측정보다는, 하중의 변화에 대한 변형률의 변화의 기울기를 측정하는 것이 중요하므로, 매우 높은 수준의 분해능은 필요로 하지 않는다.

본 연구에서는 1995년 Badcock 등^[9]에 의해 원리가 제안되고 기본 특성이 평가된 광강도형 광섬유 센서를 복합재 구조물에 삽입하여 내부 강성을 측정함으로써 구조물의 피로손상을 감시하는 기법에 관해 고찰하였다. 이를 위해 우선 광강도형 광섬유 센서의 원리 및 구조에 대해 간단히 살펴본 후, 간단한 강성환산과정을 제안하고 설명하였다. 그리고 광강도형 센서를 삽입한 복합적층판의 피로실험을 통하여 이를 평가해 보았다.

2. 광강도형 광섬유 센서의 이론

본 연구에서 사용된 광강도형 광섬유 센서는 두 광섬유의 간격 사이에서 발생하는 광손실(optical loss)을 이용하여 변형률을 측정한다. 광섬유의 한 단면에서 빛이 방출될 때는 광섬유의 입계각, θ_c 의 범위에서 방사되므로 두 번째 광섬유에는 그 빛의 일부만이 입사하게 된다. 따라서, 한 광섬유에서 다른 광섬유로 빛이 전달될 때 발생하는 그 빛의 전달비율 또는 전달손실은 두 광섬유 사이의 간격에 따라 달라진다. 따라서, 두 광섬유 사이의 간격변화는 통과한 빛의 광손실을 측정함으로써 알 수 있다.

광강도형 광섬유 센서의 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 사용된 광섬유는 그레이디드 인덱스형(graded-index) 다중모드 광섬유(multi-mode optical fiber)로서 외경이 $125 \mu\text{m}$ 이다. 사용된 모세관(capillary tube)은 석영유리로 제작하여 사용하였으며, 대체적인 크기는 외경이 $280 \mu\text{m}$, 내경이 $128 \mu\text{m}$ 정도이다. 센서의 제작은 현미경으로 관찰하면서 지그를 이용하여 광섬유를 모세관에 조심스럽게 삽입한 다음, 두 광섬유가 적당한 초기 간격(initial gap distance)이 되도록 광섬유와 모세관을

에폭시 접착제(epoxy adhesive)로 접합하여 센서를 완성하였다. 이 때 센서의 게이지 길이는 두 접합점 사이의 거리가 된다.

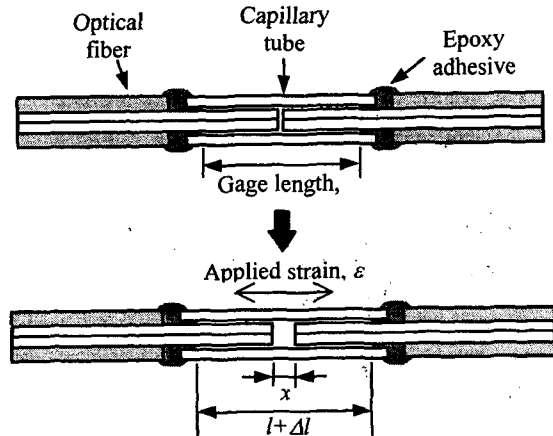


Fig. 1 The structure of the IOFS.

본 연구에서는 센서 시스템을 구성할 때 가능한 한 저렴하고 단순한 재료를 이용하여 구성하는데 중점을 두었다. 광원으로는 조명용으로 널리 사용되는 할로겐 램프(halogen lamp)를 사용하였고, 렌즈와 이송장치로 이루어진 커플러를 이용하여 광섬유에 빛을 입사시켰다. 광다이오드(photodiode)와 오프앰프(OP-amp) 소자를 이용하여 직접 제작한 증폭기로 구성된 수광부로 광강도를 측정하였다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 본 센서는 상대적으로 매우 쉬운 측정원리를 갖고 있으며 매우 저렴한 재료들로 구성할 수 있다. 또한, 기존의 간섭형 센서들과는 달리 절대적인 변위를 측정하므로 간섭무늬 계수(fringe counting)의 과정이 없어 고속의 데이터 획득이 필요 없다. 이는 데이터 획득 시스템의 비용을 매우 낮추어 줄 뿐만 아니라 고속의 변형률 측정을 용이하게 한다.

3. 시편제작 및 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 모두 유리섬유에폭시 프리프레그로 제작되었고, 표준 경화과정에 따라 오토클레이브를 이용하여 제작하였다. 시편의 형상 및 크기와 광섬유의 삽입위치를 Fig. 2에 나타내었다. 시편의 적층구조는 $[0_2/90_2/0_2]$ 로 하고, 광섬유는 중립면에 길이방향으로 삽입하였다. 광섬유센서를 삽입할 때는 강화섬유와 나란한 방향으로 삽입하여야 센서 및 복합적층판의 기계적 특성

의 저하를 최소화할 수 있기 때문에, 광섬유센서가 0°층에 삽입되도록 적층구성을 선택하였다. 시편의 성형 및 제작과정에서 광섬유의 리드부(lead)는 파손되기 쉬운데, Fig. 2에서 보는 바와 같이 내경 1mm의 강철 튜브를 이용하여 보호함으로써 이 문제를 해결하였다.

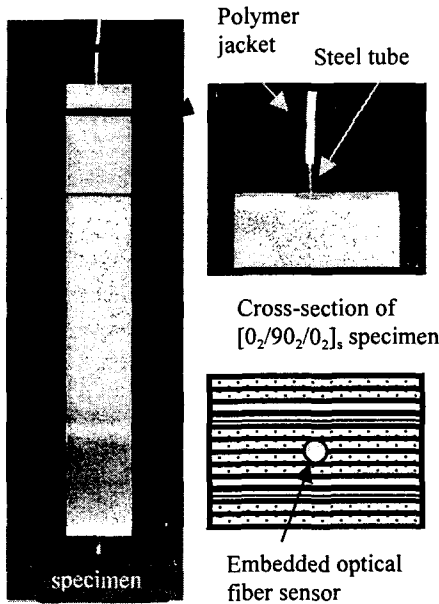


Fig. 2 Specimen configuration and embedded location of the IBOF sensor.

피로실험은 MTS 유압시험기를 이용하여 5Hz의 정현파형의 반복하중을 가하였으며 하중비는 0.1로 하였다. 시편 표면에 부착된 익스텐소미터로부터 변형률을 측정하여 삽입된 광강도형 센서로 측정된 결과와 서로 비교하였다. 하중, 스트레인 및 광강도 신호는 매 2000사이클마다 측정하여 A/D 변환보드를 이용하여 컴퓨터에 저장한 후, 강성으로 환산하여 실시간으로 모니터에 표시하였다. 다른 종류의 광섬유 센서들^[5-8]은 데이터 획득을 위해 피로시험을 중단하고 하중속도를 저하시켜야 했지만, 광강도형 센서는 매우 단순한 신호처리과정으로 인해 데이터를 획득하는 도중에도 하중반복속도의 저하 없이 측정이 가능하였다.

4. 결과 및 검토

피로실험에 앞서 안정된 광원의 출력을 얻기 위하여 적어도 3시간 이상의 할로젠 램프를 예열(warming-up)시켰다. 그 후 입력 광강도를 얻기 위

해 광원에서 나온 빛의 강도를 측정 후 광섬유센서에 입사시켰다. 하중이 정상상태에 이르렀을 때 데이터를 얻기 위해 최초 50사이클에서 처음으로 데이터를 획득하고 그 후 매 2000사이클마다 측정하여 저장하였다. Fig. 3은 임의의 한 사이클에서 얻어진 광강도형 센서와 익스텐소미터의 신호를 각각 하중과 시간에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 두 센서의 거동은 상관도(correlation)가 매우 높음을 알 수 있으며, 하중과 광강도형 센서의 신호는 앞서 말한 바와 같이 선형적인 거동을 보임을 알 수 있다.

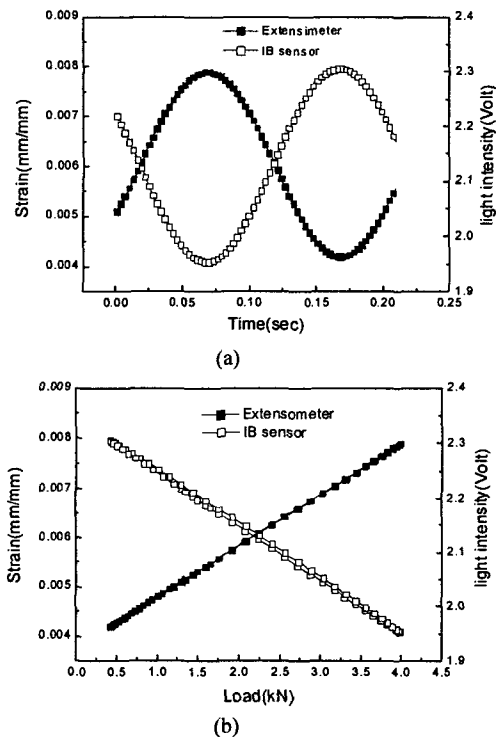


Fig. 3 Typical signal behaviors of the embedded IBOF sensor and the surface-mounted extensometer with respect to (a) time and (b) load.

[0₂/90₂/0₂]₃ 시편에 대해 두 가지의 서로 다른 최대하중을 가하고 이에 대한 센서의 거동을 살펴 보았다. 우선, 75Mpa (0.23%의 변형률)의 낮은 최대하중에 대한 강성측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 피로하중이 낮아서 복합재의 강성변화는 거의 나타나지 않았지만, 두 센서의 거동은 거의 일치하였다. 또한 광강도형 광섬유센서는 약 335만 사이클에서 시험을 중지할 때까지 파손되지 않고 정확한 신호를 내보냈다.

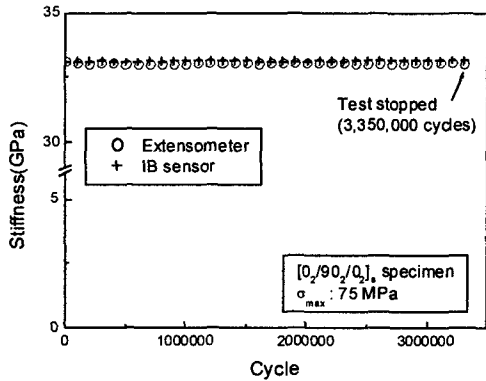


Fig. 4 Results of measurements of stiffness change for $[0_2/90_2/0_2]$, specimen under fatigue load with a maximum stress of 75MPa (0.23% strain)

다음엔 복합재가 어느 정도 강성변화가 생기도록 좀 더 높은 최대하중을 가한 후, 센서의 거동을 살펴 보았다. Fig. 5는 130MPa(0.4%의 변형률)의 최대하중에 대한 강성측정의 결과를 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 광강도형 센서는 익스텐소미터 신호와 매우 가까운 거동을 보였으며, 시험초기에 기지균열의 진전으로 인해 강성이 급격히 감소하다가 점차 강성저하 속도가 줄어드는 직교적층 복합재의 피로하중 하에서의 전형적인 강성변화 패턴을 보였다. 광섬유센서가 파단될 때까지 약 10% 전체 강성저하를 보였다.

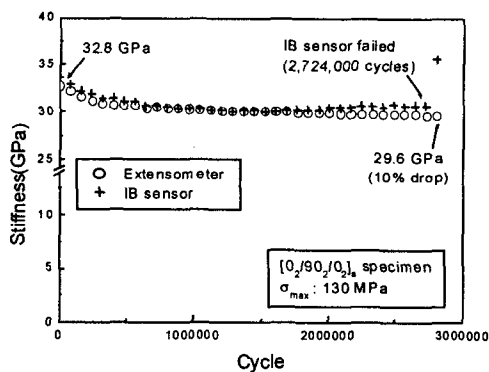


Fig. 5 Results of measurements of stiffness change for $[0_2/90_2/0_2]$, specimen under fatigue load with a maximum stress of 130MPa (0.4% strain)

5. 결론

본 연구에서는 광강도형 센서를 삽입하여 복합재 적층판의 피로하중 하에서의 강성변화를 실

시간으로 측정하여 피로손상을 감시하는 기법에 관하여 고찰하였다. 광강도형 센서는 비록 분해능은 다른 광섬유 센서들에 비해 다소 떨어지지만, 간단하고 저렴한 장치들로 구성할 수 있고, 쉬운 신호처리과정으로 인해 실시간으로 측정이 가능한 점 등 산업현장에서 요구되는 경제성과 설치 및 유지의 단순성의 측면에서 매우 유용한 센서이다. 아직까지 다른 종류의 광섬유 센서들은 여러 가지 제한으로 인해 피로하중과 같은 고속의 측정은 쉽지 않은 상황이다. 그러나, 광강도형 센서는 쉬운 데이터처리과정으로 인해 피로실험을 중단하지 않고도 데이터의 획득이 가능하였다.

실험결과 광강도형 센서는 시편 표면에 부착된 익스텐소미터와 매우 일치하는 거동을 보였다. 다양한 하중 레벨에서 제 기능을 발휘함을 보였고, 하중이 바뀌는 경우에도 강성변화를 잘 측정함을 볼 수 있었다. 따라서, 피로하중을 받고 있는 복합재 구조물의 강성변화의 측정센서로 이용할 수 있으며, 이를 통하여 피로손상을 감시할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) T. K. O'Brien and K. L. Reifsnider, *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, 1981, pp. 55-70.
- (2) A. L. Highsmith and K. L. Reifsnider, *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775, 1982, pp. 103-117.
- (3) R. Talreja, *Journal of Composite Materials*, Vol. 19, 1985, pp. 335-375.
- (4) J. N. Yang, L. J. Lee and D. Y. Sheu, *Composite Structures*, Vol. 21, 1992, pp. 91-100.
- (5) J. J. Lesco, S. W. Case, K. L. Reifsnider, R. May, B. Fogg, R. O. Claus, C. V. O'Keefe, B. N. Ranganathan and W. Couch, *Fiber Optic Sensor-based Smart Materials and Structures Workshop*, 1992, pp. 125-130.
- (6) P. Shyprykevich, B. R. Fogg, K. A. Murphy and R. O. Claus, *SPIE Smart Structures and Materials 1993 Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 1918, 1993, pp. 388-399.
- (7) C. Doyle, A. Martin, T. Liu, M. Wu, S. Hayes, P. A. Crosby, G. R. Powell, D. Brooks, and G. F. Fernando, *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, 1998, pp. 145-158.
- (8) G. Yaniv, B. Zimmermann and K. Lou, *SPIE Smart Structures and Materials 1993 Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, Vol. 1918, 1993, pp. 377-387.
- (9) R. A. Badcock and G. F. Fernando, *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, 1995, pp. 223-230.