

복합재료의 변형 및 파손탐지를 위한 광섬유 TR-EFPI 센서의 적용

박래영* · 권일범** · 최낙삼***

Application of a fiber optic TR-EFPI sensor to detect deformation and failure in composite materials

Lai-Young Park* · Il-Bum Kwon** · Nak-Sam Choi***

Key Words : Intelligent structure(지능형 구조물), Fiber optic TR-EFPI sensor(전반사형 광섬유 외부 패브리-페로 센서), Composite specimen(복합재료 시편), Internal strain(내부 변형률)

ABSTRACT

A study on the method that can measure the internal strain of composite materials is performed to monitor the health status of composite structures. A fiber optic sensor was constructed using the total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometer(TR-EFPI) probe with a broadband light source. Result obtained from electrical strain gage adhered on the aluminum beam specimen was compared with that from the fiber optic TR-EFPI sensor and showed a good agreement. It was found that fiber optic TR-EFPI sensor system was adequate for monitoring the strain and thus failure processes in the interior of composite materials.

1. 서론

구조물의 파손 상태 및 파손 진전에 따른 구조물의 강성, 강도 등의 변화를 적절히 평가할 수 있도록 파손 특성에 대한 연구와 실질적인 손상 검출 방법에는 X-Ray 와 초음파를 이용한 C-Scan 등이 있다. 그러나 이러한 비파괴 검사는 작업자의 기술과 경험에 의존적이어서 작업자의 손이 미치지 않는 부분이나 구조물이 작동중일 때 또는 구조물 전체의 검사가 필요한 경우 검사가 용이하지 않는 단점이 있다. 그러므로 기존의 검사방법보다 효율적인 검사방법이 요구되어져 왔으며, 이를 위해 구조물의 변형상태 및 파손여부를 감지하고 능동적으로 대처할 수 있는 기능을 구조물 자체에 부여하는 연구의 필요성이 대두되었다. 이런 구조물을 지능 구조물(intelligent structure)이라고 하는데 이를 구성하기 위한 매체로는 압전 현상을 이용하는 압전 재료나 ER 유체 및 빛의 간섭(interferometer)이나 편광(polarization)을 이용하는 광섬유(optical fiber)가 있다⁽¹⁾.

광섬유 TR-EFPI 센서는 기존의 EFPI 센서의 한쪽 단면에 금 코팅을 한 것으로써 광대역 광원을

사용하게 되면 광섬유 센서의 신호를 시간에 따라 연속적으로 취득할 필요 없이 필요한 시점에서 센서의 반사 파형을 취득하여 파장 영역에서 반사 신호의 최고점(peak)들 사이의 파장 간격의 변화만을 측정하면 된다. 따라서 센서나 구조물에 가해지는 외란의 영향을 거의 받지 않으며 오차가 누적되는 효과도 없고 간단한 계산을 통해 변형률을 구할 수 있으므로 신호처리가 용이한 장점이 있다^(2,3).

본 연구에서는 구조물의 내부 변형률을 측정하기 위하여 광대역 광원을 이용한 광섬유 TR-EFPI 센서 시스템을 구성하였다. 또한 센서 내부의 한쪽 반사면을 금으로 진공 증착하여 센서의 성능을 향상시켰으며 시스템의 최적 작동조건을 구현하였다. 제작된 센서를 알루미늄 시편에 적용하여 변형률 측정을 위한 교정 실험을 하였고, 이러한 조건하에서 복합재료 시편의 파손에 따른 변형률 변화를 측정하였다.

2. 광섬유 TR-EFPI 센서의 작동 원리

광섬유 TR-EFPI 센서는 광섬유의 2 차 단면에 코팅을 하여 외부로 빠져나가는 광 손실량을 없앴

으로써 광 강도를 증가시키고 노이즈를 감소시키는 등 센서의 성능을 향상시킨 것으로서 Fig. 1 과 같이 구성되는데 센서 탐촉자의 외부에서 변형이 가해져 광섬유 사이의 공기 간극 d 의 길이가 변화하면 광 검출기(PD)에서 측정되는 광 출력 신호는 입력광이 공기 간극에서 겪게 되는 광 손실 및 간섭에 따른 효과를 갖게 된다.

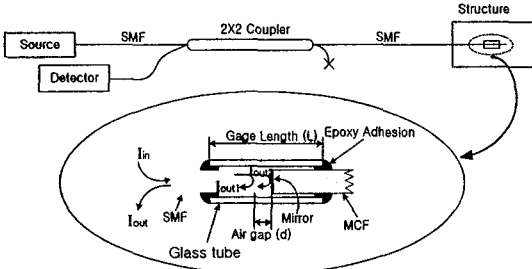


Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic TR-EFPI(total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric) sensor 간섭 신호의 출력 강도는 식 (1)과 같이 나타나어 지고, 간섭 신호는 정현파 형태로 나타나며 간섭 신호의 위상(ϕ)은 식 (2)와 같이 공기간극 길이의 함수가 된다⁽⁴⁾.

$$I = I_0(1 + \cos \phi) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2)$$

여기서 간섭 무늬의 위상은 EFPI 센서의 공기 간극 길이에 의해 결정되므로 식 (3)과 같이 간섭 무늬의 최고점 파장들의 간격으로부터 공기 간극 길이를 구할 수 있다⁽⁵⁾.

$$d = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (3)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 는 $2m\pi$ 만큼의 위상 차이를 가지는 두 최고점의 파장이며 m 은 λ_1 과 λ_2 사이에 있는 간섭 무늬 개수에서 1을 뺀 정수이다.

광섬유 TR-EFPI 센서에 변형이 가해졌을 때, 센서의 게이지 길이를 L , 변형을 가하기 전 초기의 공기 간극 길이를 d_0 , 변형이 가해진 후의 공기 간극 길이를 d_n , 변형 전후의 공기 간극 길이의 변화량을 Δd 라고 하면 광섬유 TR-EFPI 센서에 의해서 측정되는 변형률은 식 (4)로 구해진다.

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{L} = \frac{\Delta d}{L} \quad (4)$$

3. 광섬유 TR-EFPI 센서의 특성 평가

본 연구에서 사용한 LED 는 출력이 150mA 에서 10 μ W 이고, 1200~1350nm 파장 영역에서 사용 가

능한 Lasertron 사의 QLD3S502 모델이다.

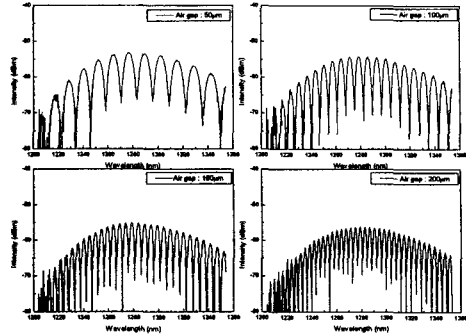


Fig. 2 Variation of reflected spectrum of LED

Fig. 2 는 마이크로미터(micrometer)를 사용하여 공기 간극을 50 μ m 씩 증가시켰을 때 길이의 변화에 따른 LED 의 반사 파형의 변화이다. 공기 간극이 넓어짐에 따라 피크 수가 많아지면서 피크 간 간격이 좁아졌으며 이를 통해 LED 는 변형률을 측정하기 위한 광대역 광원으로 사용 가능성이 확인되었다. Labview 를 이용한 실시간 신호 처리 프로그램에 의해 피크를 검출하고 입력된 이론식으로 구한 공기간극길이와 현미경을 통해 마이크로미터로 측정된 값은 Fig. 3 과 같이 평균 11.75 μ m 의 오차를 보였다. 또한 공기 간극이 700 μ m 이후부터는 이론값과 측정값의 선형관계가 깨지고 있음을 볼 수 있고, 이 값에서의 반사 파형은 피크를 전혀 구별할 수 없는 상황이었다.

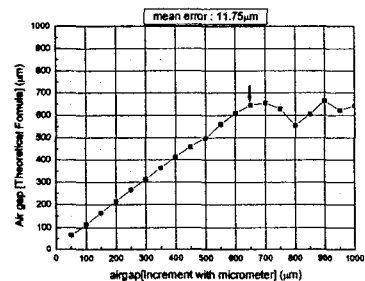


Fig. 3 Comparison between theoretical and experimental values of air gap

4. 광섬유 TR-EFPI 센서 신호의 최적화

4.1 분해능, 파장 폭에 따른 최적 조건

광대역 광원을 이용한 광섬유 TR-EFPI 센서 시스템은 피크를 정확하게 검출해 내는 것이 가장 큰 관건이다. 그러나 정밀도만 높이면 오히려 피크 주변의 노이즈를 피크로 검출하게 되어 정확한 변형률을 측정하는데 치명적인 방해가 된다. 따라서 구성한 신호 처리 프로그램을 이용하

여 적절한 분해능과 파장 폭의 값을 찾아야 한다.

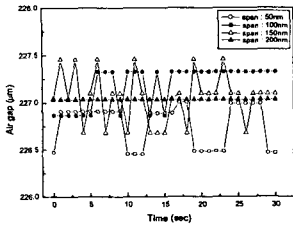


Fig. 4 Variation of air gap at Resolution 1.0nm

반사 파형에서 0.1nm의 인접 피크간 간격 오차는 약 1 μ m의 공기 간극 길이 오차와 100 μ s 정도의 변형률 오차를 가져오게 된다. 이 정도의 값은 변형률 측정에 큰 오차를 수반하지 않으므로 본 연구에서는 위의 값들을 허용 오차로 정하였다.

분해능과 파장 폭에 대한 여러 입력 값 중 Fig. 4와 같이 분해능을 1.0nm로 했을 때 네 가지 파장 폭의 값에 대한 공기 간극 길이의 오차는 모두 1 μ m 이내였으며 특히 200nm의 파장 폭에서는 매우 안정된 경향을 보였다.

4.2 피크 수에 따른 최적 조건

Fig. 5는 m 값에 따른 공기 간극 길이의 오차를 보이고 있다. m 값이 7이 될 때 공기 간극 길이의 오차는 처음으로 1 μ m 이하(점선 이하)인 898nm가 되었고, m 값을 크게 할수록 공기 간극 길이의 오차가 감소하고 있음을 확인하였다.

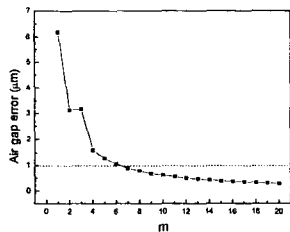


Fig. 5 Air gap error as a function of m values

4.3 정확한 피크 검출을 위한 최적 조건

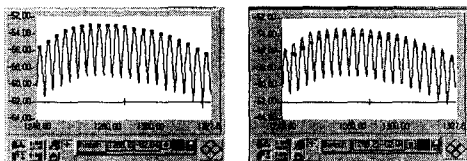


Fig. 6 Variation of Width value for precise peak detection

Width 값은 하나의 간섭무늬에서 몇 개의 점을 가지고 피크를 찾아낼 것인지를 의미하는 수이다. 다시 말해 width 값은 피크를 찾기 위한 점의 수

이고, 여러 값을 대입해 본 결과 Fig. 6과 같이 width를 10으로 했을 때 가장 정확한 피크 검출이 이루어짐을 확인하였다.

5. 변형률 측정 실험

5.1 알루미늄 시편의 변형률 측정

구조물의 변형률 측정을 위한 교정 실험으로서 일반 판재용으로 많이 사용되는 길이 310 mm, 폭 25 mm, 두께 5 mm인 알루미늄 60 시험편을 준비하였고, 시편 중앙에 TR-EFPI 센서와 변형률 게이지를 부착하였다. 광섬유센서구성을 위해 광대역 광원으로는 LED를 사용하였고, 광 파형 분석기의 스캐닝(scanning) 도중에 발생하는 외란의 영향을 배제시키기 위하여 1mm/min의 속도로 0.175mm (0.07425% 변형)씩 지그(jig)의 변위를 증가시키고 그때마다 약 15 초 정도 상태를 유지하면서 변형률 변화를 관찰하였다. 실험을 통하여 Fig.7과 같이 광섬유 센서와 변형률 게이지에 의해 측정된 변형률이 허용 오차내에서 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

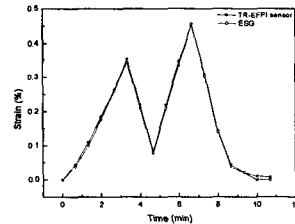


Fig. 7 Comparison of strains measured by modified conditions

5.2 복합재료 시편의 변형률 측정

5.2.1 시편 제작 및 실험 방법

광섬유센서를 삽입한 복합재료 시험편을 $[0, 90/0_2/(0/0_2)_r]$, $[0, 90/0_2/(0/0_2)_r]$, $[0, 90/0_2/(0/0_2)_r]$ 와 같이 세 가지 형태로 적층하여 Fig.8과 같은 크기로 제작하였다.

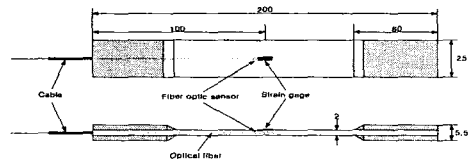
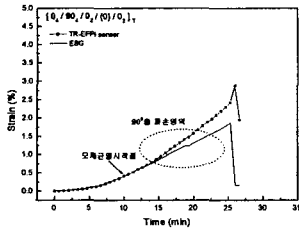


Fig.8 Laminated composite specimen containing embedded fiber optic TR-EFPI sensor and electrical strain gage adhered to the surface

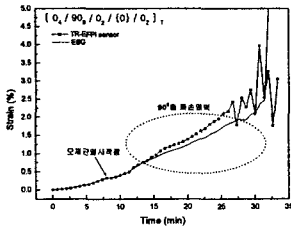
광섬유 TR-EFPI 센서를 삽입한 복합재료의 인장 시험을 위하여 앞서 수행했던 변형률 측정을 위한 교정 실험과 같은 시스템 구성을 따라 유사한 인장 시험을 하였다.

5.2.2 실험 결과 및 분석

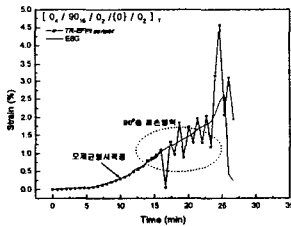
인장 시험에 의한 복합재료 시편의 파손 감시 결과를 광섬유 TR-EFPI 센서와 변형률 게이지의 변형률 값 비교에 의해 나타내었다.



(a) $[0_4/90_4/0_2/\{0\}/0_2]_R$ specimen



(b) $[0_4/90_8/0_2/\{0\}/0_2]_R$ specimen



(c) $[0_4/90_{16}/0_2/\{0\}/0_2]_R$ specimen

Fig. 9 Comparison between strains measured by ESG and TR-EFPI sensors at 0.07mm displacement interval

Fig. 9 (a)의 경우 시편 내부에 삽입한 광섬유 TR-EFPI 센서와 시편 표면에 부착한 변형률 게이지는 같은 시점에서 파손되었으나 (b), (c)와 같이 90° 층의 층두께가 크고 적층개수가 많은 시편의 경우는 90° 층의 파손에 의한 영향이 커서 이 층에 삽입된 광섬유 센서가 보다 일찍 파손되었다. 또한, 90° 층이 파손되는 영역에서는 광섬유 TR-EFPI 센서에 의해 측정된 변형률의 기울기가 갑자기 커지고 있음을 확인할 수 있고, 광섬유센서 파손 시에는 변형률게이지로 측정한 변형률보다 5-7.5 $\mu\epsilon$ 정도 큰 값을 보였다. 이것은 복합 재료 시편에 삽입된 광섬유 센서가 시편표면에 위치한 변형률 게이지에 비하여 시편 내부의 파손 상태를 잘 감지하고 있는 것이라고 보여지는 결과이다.

Fig. 9 (c)의 경우 90° 층의 파손 초기에 광섬유 TR-EFPI 센서가 파손되었다. 따라서 이러한 파손된 신호를 가지고도 급격히 변형이 증가한 시편 내부의 상황을 알 수 있으므로 비파괴 검사적으로 유용할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 광섬유 센서를 이용하여 기존의 방법보다 효과적인 변형률 측정을 위해 광대역 광원을 사용한 광섬유 TR-EFPI 센서 시스템을 구성하고 이를 복합재료의 변형 및 파손감지에 적용하였다. 즉, 구성한 실시간 신호처리 프로그램으로 분해능, 파장 폭, 간섭무늬 개수, 피크검출 기준 등의 입력값에 대한 최적 작동 조건을 결정하였으며, 복합재료 시편 내부에 삽입한 광섬유 TR-EFPI 센서와 시편 표면에 부착한 변형률 게이지의 변형률을 비교분석함에 의하여 복합재료 내부의 파손 여부를 최종 파단 이전에 감시할 수 있었다. 신호처리 프로그램에 위험 수준에 대한 경보 기능을 추가함으로써 각종 대형 구조물의 건전성 감시에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2-00294)지원 및 한국표준과학연구원 기관고유사업(과제번호:KRIS/IR-2002-011)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) 박중완, "광섬유 센서를 이용한 복합적층판의 변형률 측정," 석사학위논문, 한국과학기술원, 1994, pp. 1-4.
- (2) V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus, T. A. Tran and J. A. Greene, "Absolute strain and temperature measurements using high finesse EFPI cavities," *FEORC Fiber Optics Review Conference*, Blacksburg, VA, April, 1994.
- (3) 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천곤, 전승문, "광섬유 AEFPI 센서를 이용한 구조물의 동적 변형률 측정," *한국항공우주학회지*, 제 29권, 제 1호, 2000, pp. 39-41.
- (4) D. A. Jackson, and J. D. C. Jones, *Interferometers Optical Fiber Sensors* (Optical Fiber Sensors : Systems and Applications), Vol. 2, Ed. B. Culshaw and J. Dakin, London, Artech House, 1988.
- (5) V. Bhatia, M. B. Sen, K. A. Murphy, and R. O. Claus, "Wavelength-tracked White Light Interferometry for Highly Sensitive Strain and Temperature Measurements," *Electronics Letters*, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 247-249.