

광섬유센서를 이용한 복합재 패치수리된 알루미늄판의 균열관찰

서대철*, 이정주*, 김상훈*

FATIGUE CRACK GROWTH MONITORING OF CRACKED ALUMINUM PLATE REPAIRED WITH COMPOSITE PATCH USING EMBEDDED OPTICAL FIBER SENSORS

Dae-Cheol Seo, Jung-Ju Lee and Sang-Hoon Kim

Key Words : Composite Patch Repair, Crack monitoring, Transmission-type extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensor (TEFPI)

ABSTRACT

Recently, based on the smart structure concept, optical fiber sensors have been increasingly applied to monitor the various engineering and civil structural components. Repairs based on adhesively bonded fiber reinforced composite patches are more structurally efficient and much less damaging to the parent structure than standard repairs based on mechanically fastened metallic patches. As a result of the high reinforcing efficiency of bonded patches fatigue cracks can be successfully repaired. However, when such repairs are applied to primary structures, it is needed to demonstrate that its loss can be immediately detected. This approach is based on the "smart patch" concept in which the patch system monitors its own health. The objective of this study is to evaluate the potentiality of application of transmission-type extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensor (TEFPI) to the monitoring of crack growth behavior of composite patch repaired structures. The sensing system of TEFPI and the data reduction principle for the detection of crack detection are presented. Finally, experimental results from the tests of center-cracked-tension aluminum specimens repaired with bonded composite patch is presented and discussed.

1. 서론

최근 지능형구조물 개념에 기초하여 광섬유센서는 많은 공학 및 토목 구조물에 더 많이 적용되고 있다. 이 광섬유센서 지능형 구조물은 공학자들로 하여금 구조물에 신경 시스템을 부여하게 하고 구조물에 다른 방법으로는 불가능한 연속적

인 손상감지능력을 부여한다. 광섬유센서를 사용하여 균열감지를 하는 많은 연구들이 보고되고 있다[1-4]. 광섬유센서는 온도, 진동, 음향파, 자기장에 매우 민감하다. 많은 연구자들에 의해 연구된 cavity-based 광섬유센서는 광강도와 위상의 측정을 이용하여 상용시스템에도 적용되고 있다. 기존의 대부분의 간섭식 광섬유센서들은 간섭무늬계수를 이용하여 좋은 민감도와 분해능을 가지고 있지만 인장과 압축과 같은 변형률의 방향을 쉽게 구별하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 기존의 반사형 EFPI(extrinsic Fabry-Perot Interferometer)

* 한국과학기술원 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

광섬유센서의 단점을 극복하기 위하여 quadrature phase-shifted EFPI system[5], 분광분석을 이용한 absolute EFPI system[6] 등이 보고되고 있다.

최근에 개발된 투과형 EFPI(TEFPI : transmission-type EFPI) 광섬유센서는 반사형 EFPI 광섬유센서의 장점을 가지면서도 쉽고 효과적으로 변형률의 방향을 구별할 수 있는 장점을 가지고 있다[7].

본 연구에서는 복합재 패치 수리된 구조물의 피로균열진전을 TEFPI 광섬유센서를 이용하여 측정할 수 있는 가능성을 보였다. TEFPI 광섬유센서의 측정시스템과 변형률의 변화로부터 균열을 감지하는 기법을 제시하였다. 그리고, 복합재 패치 수리된 중앙관통균열 시편의 실험적인 결과를 제시하였다.

2. 측정원리 및 센서제작

TEFPI 광섬유센서의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 기존의 반사형 EFPI 광섬유센서는 입사 및 반사용으로 하나의 단일모드 광섬유만을 가지고 있다. 반면에 TEFPI 광섬유센서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 유리 모세관사이에 삽입되어진 공기간극을 가지는 두개의 광섬유(광섬유 1 and 2)로 이루어져 있다. 광섬유 1은 광원으로부터 빛을 입사하여 공기간극을 통해 광섬유 2로 투과시켜 광수신부로 보내게 된다. 광섬유 1로부터 입사된 대부분의 빛은 광섬유 2로 투과되게 된다[경로 1]. 그러나 입사된 빛 중 3.5%는 광섬유 2의 끝단에서 반사되게 되고 다시 이 빛의 3.5%는 광섬유 1의 끝단에서 반사되어 광섬유 2로 투과되게 된다[경로 2]. 이 두 광경로의 위상차는 광수신부에서 간섭을 일으키게 된다. 따라서 유리 모세관의 길이방향으로 가해진 물리량에 의한 측정길이(gage length)의 변화는 측정신호에 간섭무늬를 형성하게 한다. TEFPI 광섬유센서는 기존의 반사형 EFPI 광섬유센서와는 다르게 공기간극에서 발생하는 빛의 퍼짐에 의한 광 손실이 두 경로에서 모두 나타나기 때문에 간극길이의 변화에 의한 광량의 변화가 크게 나타나게 된다. 따라서 TEFPI 광섬유센서에서는 간섭무늬계수를 통해 물리량을 측정하고 빛의 퍼짐에 의한 광량의 변화로부터 변형률의 방향 변화를 쉽게 구별할 수 있다.

TEFPI 광섬유센서의 두 광경로 1과 2에 대한 파동방정식에 프레넬 방정식(Fresnel's equations)의 광섬유/공기 반사계수 r , 광섬유/공기 투과계수 t_1 , 공기/광섬유 투과계수 t_2 를 도입하게 되면 다음과 같은 간섭식의 형태로 나타나게 된다. 광강도는 파동방정식의 전기장의 진폭 E 의 제곱에 비례하

므로 투과율 T 는 다음과 같이 나타나게 된다.

$$T(s) = \frac{E^2(s)}{E_0^2} = t_1^2 t_2^2 \left\{ L_1^2(s) + r^4 L_2^2(s) + 2r^2 L_1(s)L_2(s) \cos(2ks) \right\}$$

여기서 s 는 두 광섬유사이의 공기간극의 길이이고 $L_1(s)$ 과 $L_2(s)$ 은 각각 두 광경로에서의 빛의 퍼짐에 의한 광강도의 손실 비율을 나타낸다.

3. 시험편 및 시험방법

시험에 사용한 광섬유는 코어/클래딩 직경이 7.9/125 μm 인 단일모드 광섬유이다. 유리튜브의 내경과 외경은 각각 128, 280 μm 이다. TEFPI 광섬유센서는 3축 지그와 현미경을 사용하여 유리튜브안에 삽입한 다음 에폭시 접착제를 이용하여 양 끝단을 고정하였다. 접착된 양 끝단 사이의 길이는 Fig. 1에 보인 바와 같이 측정길이가 된다.

균열근처에 부착된 TEFPI 광섬유센서를 이용하여 피로균열진전을 감지하는 기법을 평가하기 위하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험에 사용한 중앙균열(CCT) 시편을 Fig. 2에 나타내었다. 시편의 치수는 190x70x10 mm이고 중앙에 6 mm 직경의 구멍을 내고 구멍양끝에 1 mm의 균열시작 노치를 가공하였다. 복합재 패치로 수리하기 전에 피로하중을 가하여 1 mm의 초기균열을 진전시켰다. 균열이 발생한 시편은 graphite/epoxy 복합재료를 이용하여 수리하였다. 복합재 패치의 치수는 70x70x1 mm이고 패치는 오토클레이브에서 경화한 다음 에폭시 접착필름을 이용하여 접착하였다. 한 개의 TEFPI 광섬유센서를 경화과정 중에 복합재 내에 삽입하였다. 다른 하나의 TEFPI 광섬유센서는 삽입된 센서와 같은 위치의 표면에 부착하였다. 삽입 및 표면부착 센서의 위치는 Fig. 2에 보인 바와 같이 시편의 중심과 균열 10mm 전방에 위치하였다. 피로시험은 서보 유압 시험기를 이용하여 최대하중 45 MPa, 응력비 0.1, 11 Hz의 사인파로 수행하였다. 하중, 길이, TEFPI 광섬유센서는 A/D 보드를 이용하여 1000 사이클마다 저장하였다.

4. 실험결과 및 토론

전형적인 1.5 사이클 동안의 TEFPI 광섬유센서의 신호를 Fig. 3에 나타내었다. TEFPI 광섬유센서

는 기존의 반사형 EFPI 센서와는 다르게 공기간극에서의 빛의 퍼짐에 의한 광 손실이 두 경로에서 모두 발생하기 때문에 투과된 빛의 광강도는 분명하게 변한다. 따라서 이 TEFPI 광섬유센서 시스템에서는 간섭무늬계수를 통하여 변형률을 측정하고 공기간극에서 발생하는 빛의 퍼짐에 의한 광 손실의 경향으로부터 변형률의 방향을 쉽게 구별할 수 있다. 측정신호는 인장과 압축하중에 따라 감소하거나 증가하게 된다. 변형률의 방향변화는 신호의 중간값의 변화로부터 간섭무늬의 한 주기 내에서도 구별할 수 있다. TEFPI 광섬유센서로부터 측정된 변형률과 하중과의 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. 이 변형률은 Fig. 3 에 보인 간섭무늬의 계수를 통해 계산되었다. 변형률과 하중 데이터는 잘 일치하였고 이것은 TEFPI 광섬유센서가 피로하중을 잘 측정할 수 있음을 보인다.

Fig. 5 에 시편의 중심에 삽입/표면부착한 TEFPI 광섬유센서의 변형률 변화를 균열길이에 대하여 나타내었다. 삽입된 TEFPI 광섬유센서는 표면부착된 TEFPI 광섬유센서와 매우 비슷한 경향을 보였으나, 변형률의 수준은 큰 차이를 보였다. 그러나 변형률의 수준이 다르다 하더라도 두 센서는 모두 피로균열 진전감시에 사용할 수 있다. 왜냐하면 피로균열 감시에서는 정확한 변형률의 양보다는 변화의 경향이 더 중요하기 때문이다. 두 센서는 모두 균열길이의 증가에 따라 균일하게 증가하였고 같은 기울기를 보였다. 따라서, 중심에서의 변형률과 균열길이의 교정데이터가 주어진다면 두 센서는 모두 피로균열 감시에 사용될 수 있다.

Fig. 6 에 초기균열의 10 mm 전방에 삽입/표면부착한 TEFPI 광섬유센서의 변형률의 변화를 균열길이에 대하여 나타내었다. 시편의 중심에 위치한 센서와는 다르게 변형률의 변화 기울기는 균열이 시편의 위치를 통과함에 따라 변화하였다. 균열이 센서의 위치를 통과하기 전에는 변형률의 변화는 아주 작았으나, 균열이 센서의 위치를 통과함에 따라 변형률의 변화는 급격히 증가하였다. 따라서 만약, TEFPI 광섬유센서가 균열이 발생 가능한 곳이나 존재하는 균열의 전방에 부착된다면 삽입/표면부착한 TEFPI 광섬유센서는 균열의 발생 혹은 진전을 알려줄 수 있다. 또한 그림에서 보인 바와 같이 삽입된 광섬유센서와 표면부착한 광섬유센서가 같은 변화경향을 나타내었기 때문에 실제 응용에 있어서는 필요에 따라 두 가지 경우 중 골라서 사용할 수 있다. 실제 항공기의 수리에 있어서는 삽입된 경우가 광섬유센서를 보호하고 매끈한 표면을 만들 수 있기 때문에 더 많이 이용될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 복합재 패치 수리된 알루미늄판의 피로균열 진전을 광섬유센서를 이용하여 감시하는 기법을 제시하였다. 최근 개발된 TEFPI 광섬유센서를 이용하여 피로균열 진전감시에 응용하였다. TEFPI 광섬유센서는 간섭무늬계수로부터 변형률을 측정하고 광강도의 변화로부터 변형률의 방향을 쉽게 결정할 수 있다. TEFPI 광섬유센서는 복합재 패치에 삽입하거나 표면에 부착하였고 두 경우 모두 같은 변화경향을 나타내었다. 시편의 중심에 위치한 TEFPI 광섬유센서는 균열의 증가에 따라 균일한 변형률의 증가를 보인 반면, 균열의 전방에 위치한 광섬유센서는 균열이 통과함에 따라 급격한 변형률의 변화를 보였다. 따라서 이 변형률의 변화로부터 피로균열의 진전감지가 가능하였다.

참고문헌

- (1) Wanser, K.H. and Voss K.F., "Crack Detection using Multimode Fiber Optical Time Domain Reflectometry," *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV*, Proc. SPIE, 1994, Vol. 2294, pp. 43-52.
- (2) Voss, K.F. and Wanser, K.H., "Fiber Sensors for Monitoring Structural Strain and Cracks," *Second European Conference on Smart Structures and Materials*, Proc. SPIE, Vol. 2361, 1994, pp. 144-147.
- (3) Hale, K.F., "An Optical-fiber Crack Detection and Monitoring System," *Proc. 1st European Conf. On Smart Structures and Materials*, Glasgow, UK, 1992, pp. 147-150.
- (4) Brönnimann, R., Farshad, M.P., Nollon, M., and Sennhauser, U., "Measurement of Crack Propagation in Polymer Pipes with Embedded Optical Fibers," *Smart Structures: Optical Instrumentation and Sensing Systems*, Proc. SPIE, Vol. 2509, 1995, pp. 12-19.
- (5) Murphy, K.A., Gunther, M.F., Vengsarkar, A.M. and Claus, R.O., "Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors," *Optics Letters*, vol. 16, no. 4, 1991, pp. 273-275
- (6) Bhatia, V., Murphy, K.A., Claus, R.O., Tran, T.A. and Greene, J.A., "Absolute strain and temperature measurements using high finesse EFPI cavities," *FEORC Fiber Optics Review Conference*, April, Blacksburg, VA, 1994.
- (7) Kim, S.H. Lee, J.J., Lee, D.C. and Kwon, I.B., "A study on the development of transmission-type extrinsic fabry-perot interferometric optical fiber sensor", *Journal of lightwave technology*, Vol. 17, No. 10, 1999, pp. 1869-1874.

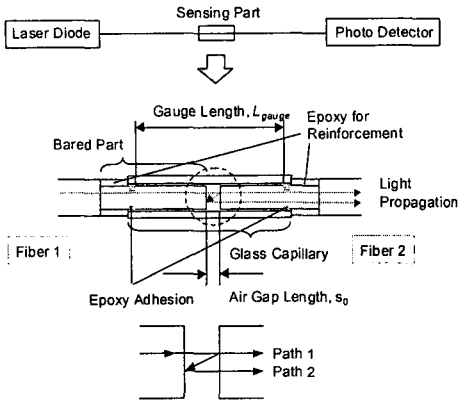


Fig. 1. Structure of the TEFPI optical fiber sensor

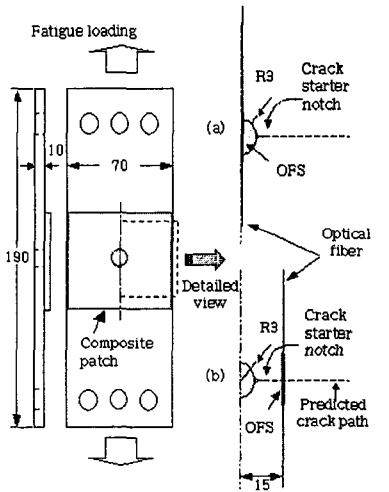


Fig. 2 Dimensions of a center cracked tension steel specimen for the fatigue tests and attached locations of the TEFPI sensor. (a) TEFPI sensor attached below and (b) in front of the crack path.

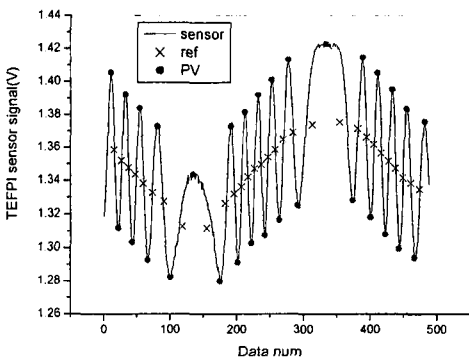


Fig. 3 A typical output signal of TEFPI optical fiber

sensor.

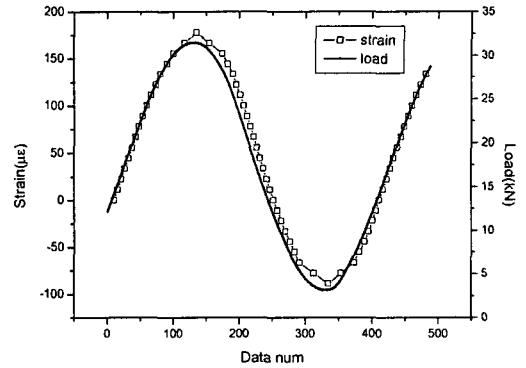


Fig. 4 Load and strain data from TEFPI optical fiber sensor

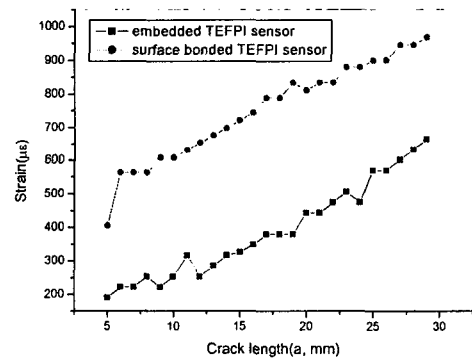


Fig. 5 Crack length vs. Strain data of TEFPI sensor located at the center point.

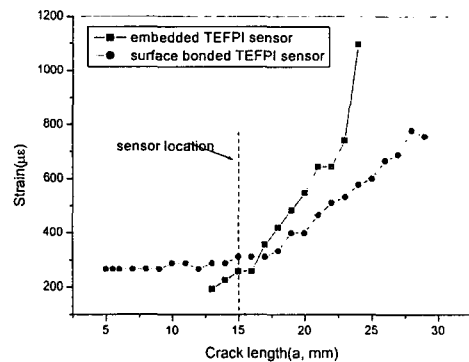


Fig. 6 Crack length vs. strain data of TEFPI sensor located at the 15 mm ahead of crack.