

광섬유 임베디드 센서 기반 분포 모니터링 기술

김영웅* · 김종열 · 류국빈 · 황영관 · 김현길

한국원자력연구원

Distributed Monitoring Technology using Fiber-Optic Embedded Sensor

Youngwoong Kim* · Jong-Yeol Kim · Gukbeen Ryu · Young-Gwan Hwang · Hyun-Gil Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

E-mail : kywave@kaeri.re.kr

요 약

3D 프린팅 기술을 이용하여 광섬유가 내장된 임베디드 센서 구조물을 제조하였으며, 광주파수 반사 산란광 측정법 기반의 분포 센서 기술을 이용하여 대상 구조물에 인가된 스트레인 분포를 측정하였다. 측정된 분포 데이터는 대상 구조물 형상에 실시간 대입하여 3차원 시각화 표현하였다.

ABSTRACT

An embedded fiber-optic sensor was manufactured using 3D printing technology for distributed structural monitoring. Strain distribution of the embedded sensor was measured by the optical frequency domain reflectometry, and real-time data visualization for the embedded sensor model was demonstrated.

키워드

Embedded sensor, 3D printing technology, Optical fiber, Distributed sensor

I. 서 론

임베디드 센서는 모니터링 구조물 내에 삽입되거나 혹은 일체화되어있는 형태의 센서로 외부 환경 변화(온도, 압력 등)나 외력에 의한 구조물의 상태변화를 내부에서 정밀하게 측정할 수 있는 기술이다. 임베디드 센서는 기존의 부착형 센서와 달리 외부의 신호 왜곡을 일으키는 각종 요인에 영향을 받지 않고, 센서 부착이나 설치를 위한 추가적인 공정이 필요 없는 장점이 있다. 따라서, 센서 적용에 따른 대상 구조물의 기능 저하나 안전성에 미치는 영향을 최소화할 수 있어 최근 항공이나 우주, 선박, 그리고 원전과 같은 특수환경 및 정밀 산업용 센서 기술로 주목받고 있다 [1]. 그중, 광섬유 기반의 임베디드 센서 기술은 광섬유 소재인 실리카 유리 특성상 내열성이 우수하여 고온의 임베딩 공정에도 내구성이 높고, 센서부에 전력 공급이 필요 없어 안전한 운용이 가능하다. 또한 소형/

경량 및 유연(flexibility)한 특성이 있어 소형/복합 구조물에 적용이 용이하고 분포(distributed) 센싱이 가능한 특징이 있다. 분포 센서란, 일반적인 점(point) 센서와 같이 특정 단일지점만을 측정하는 센서가 아닌, 광섬유 라인 전 범위에 대한 물리량 정보를 공간 연속적인 분포 형태로 측정할 수 있어 광역/광범위 상태감시에 적합한 기술이다 [2].

본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 이용하여 광섬유 기반 임베디드 센서를 제작하였으며, 하중 인가에 센서 구조물의 스트레인 분포 측정 결과를 분석하였다. 임베디드 센서 제작 공정에 사용한 3D 프린터의 모델은 F120TM, 소재는 ABS-M30이다.

II. 광섬유 임베디드 센서 구조물 제작

광섬유 임베디드 센서 구조물 제작에 사용된 3D 프린팅 FDM(fused deposition modeling) 기법은 열가소성 플라스틱 폴리머(ABS-M30)에 열을 가해 녹이면서 원하는 형태로 층을 쌓아 제작하는 방법이

* Corresponding author

다 [3]. 본 연구에서는 구조물 내 광섬유 센서를 삽입하기 위해 구조물 출력 중간에 광섬유 센서 케이블을 매설하여 제작하였다. 먼저 광섬유 매설 홈 공간이 설계된 임베디드 센서의 구조물 하부를 출력한 후, 광섬유 센서를 매설 홈에 고정하여 최종적으로 상부 프린팅 작업을 통해 임베디드 센서 구조물을 제작하였다. 구조물의 길이는 200 mm, 두께는 16 mm, 너비는 150 mm 이며, 중앙의 0.4 mm 직경의 2개의 홈에 광섬유 한가닥이 <그림 1> 과 같이 왕복 연결된 형태로 제작되었다. 광섬유는 acrylate polymer 코팅된 250 um 직경의 일반 상용 통신용 광섬유(SMF)를 이용하였다.

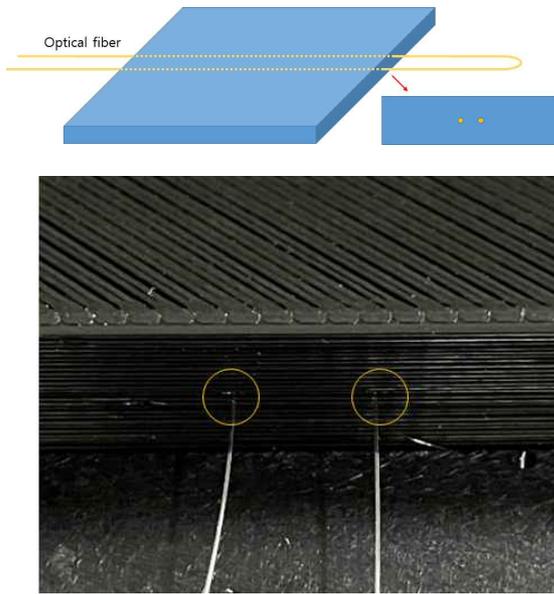


그림 1. 3D 프린팅 기반 광섬유 임베디드 센서 제작 구조도 및 사진

III. 임베디드 센서 분포 센싱 테스트

제작된 광섬유 임베디드 센서 구조물의 스트레인 분포 센싱 테스트를 수행하기 위해 <그림 2>와 같이 press bar와 분포 센서 인터로게이터(ODiSI 6104, Luna)를 이용하여 테스트베드를 구성하였다. 임베디드 센서 구조물 중앙부에 press bar를 통해 하중을 인가하였고, 하중에 의한 구조물의 스트레인 분포를 광주파수 반사 측정법(OFDR: Optical frequency domain reflectometry)을 이용하여 실시간 측정하였다.

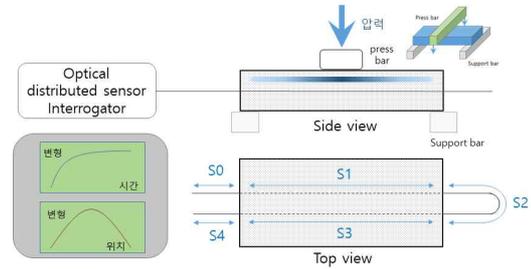


그림 2. 광섬유 임베디드 센서 구조물의 스트레인 분포 센서 테스트 구성도

점진적인 하중 증가에 따른 광섬유 임베디드 센서의 위치별 스트레인 분포 측정 결과를 <그림 3>에 나타내었다. 구조물 내부에 위치한 광섬유는 구경도 상에서 S1과 S3 구역이며, S0, S2, S4는 구조물 외부에 있으므로 하중에 영향을 받지 않는다. 측정 결과, press bar의 하중이 증가(#1->#9)함에 따라 임베디드 센서 내부인 S1과 S3 구역의 스트레인 변화가 증가하는 경향을 보였다. 이는 하중 증가에 의한 구조물 변형이 심해지면서 구조물 내부의 광섬유에 인가되는 장력이 증가하기 때문이다. 또한, 하중에 의한 변형이 가장 큰 구조물 중앙부에서 광섬유의 스트레인 변화가 가장 컸으며, 변형이 작은 구조물 가장자리로 갈수록 스트레인 변화가 작아지는 결과를 보였다.

분포 센서 기술은 측정된 물리량과 위치 정보를 함께 제공하기 때문에 대상 구조물 형상에 분포 데이터를 적용함으로써 상태 변화를 시각화 표현할 수 있다. 하중 인가 테스트를 통해 측정된 스트레인 분포 데이터를 대상 구조물 3차원 모델 형상에 반영하여 스트레인 세기에 따라 <그림 4>와 같이 색상으로 표현하였다. 이를 통해 임베디드 센서 구조물의 변형 정도를 대상 이미지상에서 실시간 시각화하여 현재 구조물 상태와 정확한 이상 발생 위치를 직관적으로 파악할 수 있다.

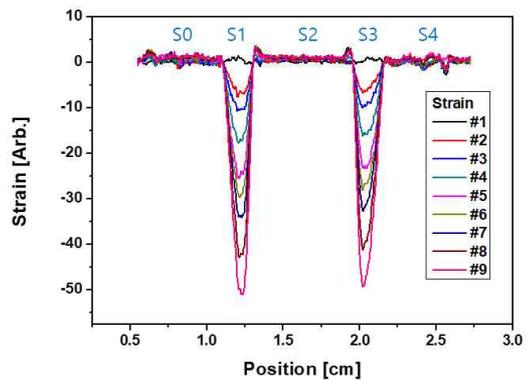


그림 3. 하중인가에 따른 광섬유 위치별 스트레인 분포 변화 (S1, S3: 구조물 내부)

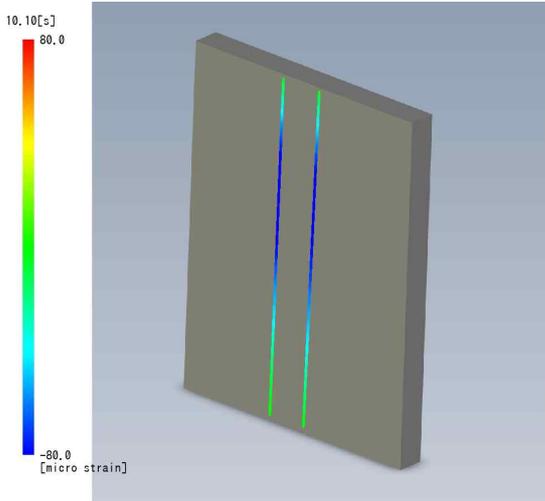


그림 4. 광섬유 임베디드 센서 구조물의 스트레인 분포 데이터 시각화 기술

IV. 결 론

FDM 방식의 3D 프린팅 기술을 통해 광섬유가 내장된 형태의 임베디드 센서 구조물을 제작하였다. 제작된 센서 구조물의 하중 인가에 따른 스트레인 분포를 광섬유 분포 센서 기술(OFDR)을 이용하여 측정하였다. 측정 결과, 하중이 인가된 구조물 중앙부의 광섬유 스트레인 변화가 가장 컸으며, 중앙부에서 멀어질수록 스트레인 변화가 점차 작아지는 분포 데이터를 얻을 수 있었다. 수집된 분포 데이터는 대상 구조물 3차원 형상에 맵핑하여 스트레인 변화량을 색상으로 시각화 표현하였다. 본 기술을 통해 대상 구조물의 상태 변화를 실시간 감시하면서 정밀한 이상 발생 위치 정보를 제공할 수 있음을 보였다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 524490-22 & No. RS-2022-00144110).

References

- [1] D. C. Sweeney, A. M. Schrell, Y. Liu, and C. M. Petrie, "Metal-embedded fiber optic sensor packaging and signal demodulation scheme towards high-frequency dynamic measurements in harsh environments," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 312, pp. 112075, Sep. 2020.
- [2] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed*

Optical Fibre Sensors, 1st ed. Boca Raton, CRC Press, 2017.

- [3] S. Wickramasinghe, T. Do, and P. Tran, "FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments," *Polymers*, Vol. 12, pp. 1529, Jul. 2020.