

표면부착된 분포형 광섬유 센서의 유한요소해석

김상훈*, 이정주*, 권일범**, 허중수***

FEM Analysis of Distributed Optical Fiber Sensors
for the Strain Transfer

Sang-Hoon Kim*, Jung-Ju Lee*, Il-Bum Kwon**, and Jeung-Soo Huh***

요 약

국부적인 측정을 수행하는 일반적인 광섬유 센서에 비해 분포형 광섬유 센서는 광섬유의 길이방향을 따라 모든 위치에서 측정이 가능하며 보다 넓은 영역의 측정을 수행할 수 있다. 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서를 구조물의 건전성 감시에 이용할 때에는 광섬유 센서의 일반적인 부착 방법인 에폭시를 이용한 표면부착 방법을 사용하게 된다. 본 논문에서는 에폭시를 이용하여 브릴루인 분포형 광섬유 센서를 구조물의 표면에 부착하였을 때 구조물의 변형률 변화를 광섬유 센서가 정확히 측정해 낼 수 있는지에 대해 유한요소법을 통한 검증은 수행하였다. 구조물로부터 에폭시, 광섬유 코팅, 클래딩을 통해 코어로 전달되는 변형률의 전달률을 해석을 통해 확인하였으며 변형률 분포로부터 에폭시 끝 단의 자유 경계면이 미치는 영향을 살펴보았다.

Abstract

Comparing with general optical fiber sensors performing localized measurement, distributed optical fiber sensors can measure along an optical fiber, and they have large measuring range. The surface-mounting method with epoxy adhesive is general in attaching optical fiber sensors to structures, This is also applicable to the structural integrity monitoring with Brillouin-scattering distributed optical fiber sensors. In this paper, Brillouin-scattering distributed optical fiber sensors, which are attached to the surface of a structure with epoxy adhesive, was verified with the finite element method. From the analysis results of strain transfer through the structure, optical fiber coating, cladding and core, the strain transfer rates were calculated. And the influence of the epoxy free-end was also studied.

1. 서 론

-
- * 한국과학기술원 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)
 - ** 한국표준연구원 산업측정표준부 (Division of Industrial Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)
 - *** 경북대학교 공대 금속공학과 (Dept. of Metallurgical Engineering, Kyung-pook National University)

<접수일자 : 2000년 8월 31일>

일반적인 광섬유 센서는 각 센서마다 매우 작은 측정 길이를 형성하고 있기 때문에 국부적인 영역에 대한 측정을 수행한다. 이를 이용하여 규모가 큰 구조물의 안전을 감시할 때에는 여러 개의 광섬유 센서를 이용한 다중송신 기법의 적용이 불가피하게 되는데 다중송신을 적용할 수 있는 센서의 개수는 다중송신 기법의 특성에 의해 제한된다. 또한 센서 시스템의 구조상 불연속적인 지점에 대한 측정값만을 알 수 있게 된다.

반면 분포형 광섬유 센서는 광섬유의 길이 방향을 따라 모든 부분에서 측정을 수행하며, 하나의 센서 시스템을 이용하여 측정할 수 있는 영역이 수십 km에 이른다. 따라서 분포형 광섬유 센서는 교량이나 건축 구조물 등 규모가 큰 구조물의 안전을 감지하는데 매우 효과적이다.

레이리 산란은 광섬유에서 탄성 특성을 보이는 산란으로 산란광의 파장이 광원의 파장과 동일하게 나타난다. 일반적으로 레이리 산란은 OTDR(optical time domain reflectometry)의 방법을 이용하여 광섬유 센서 시스템으로 구성된다. 이러한 형태의 광섬유 센서 시스템은 구성이 간단하고 다 지점의 물리량을 동시에 측정하는데 효과적이다.

브릴루인 산란은 광섬유에서 발생하는 비탄성 산란 중 하나로써 빛의 진행 방향에 대한 후방 산란 광이 가장 강하며, 광섬유에 가해지는 변형률 및 온도 변화에 따라 브릴루인 주파수 이동량이 변하게 된다. 변형률의 변화에 따른 브릴루인 주파수의 이동량 변화는 식(1)과 같다. $\nu_B(\epsilon)$ 은 변형률 ϵ 에 대한 브릴루인 주파수 이동량을 의미한다.

$$\text{Strain Coefficient, } C \equiv \frac{1}{\nu_B(0)} \cdot \frac{\partial \nu_B(\epsilon)}{\partial \epsilon} \quad (1)$$

레이리 산란을 이용한 OTDR 광섬유 센서는 구조물의 변형을 측정하기 위해서 별도의 굽힘 손실형 장치가 고안되어야 하며 일반 광섬유 센서의 다중송신 기법과 마찬가지로 준분포형 측정을 수행한다. 하지만 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서는 식(1)과 같이 광섬유에 전달되는 변형률을 측정하는데 있어서 별도의 장치를 필요치 않는다.

최근에 들어서 Brillouin 산란 분포형 광섬유 센서를 구조물의 안전감시에 적용하기 위해 많은 연구가 많이 보고되고 있다. Horiguchi 등이 브릴루인 주파수 이동의 인장 변형률과 온도 변화에 대한 관계를 구체적으로 보고한 이후^[1,2], Smith 등은 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 적용 기법에 대한 연구를 수행하였다.^[3] DeMerchant와 Thevenaz는 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서를 이용하여 보 구조물의 변형률을 측정, 구조물 감시에 대한 적용이 가능함을 보였다.^[4,5] 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 실제 구조물에 대한 적용은 아직 구체적으로 구현된 예가 드물며, Thevenaz 등에 의해 스위스 Luzzone 댐에 이용된 연구가 보고된

바 있다.^[6]

광섬유 센서를 구조물에 적용하는 할 때에는 구조물의 내부에 삽입하거나 표면에 부착하는 방법을 이용한다. 광섬유를 삽입하는 방법은 복합재료나 콘크리트와 같은 구조물에 그 적용이 제한된다. 반면 표면 부착 방법은 다양한 측정대상에 보편적으로 사용될 수 있으며 주로 에폭시 접착제를 이용하여 광섬유 센서를 부착하게 된다.

브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서는 수 km에서 수십 km에 이르는 측정 길이에 대해서 에폭시를 이용하여 표면 부착된다. 본 연구에서는 강 구조물의 표면에 상대적으로 강성이 낮은 에폭시를 이용하여 광섬유 센서를 부착하였을 때의 변형률 측정에 대한 평가를 수행하였다.

II. 분포형 광섬유 센서 부착에 대한 유한요소 해석 모델링

광섬유 센서의 측정량을 나타내는 브릴루인 주파수 이동과 변형률과의 관계를 나타내는 식(1)의 변형률 계수는 Horiguchi^[1]의 연구결과에 의하면 대략 4.14의 값을 갖는다. 하지만 변형률 계수는 광섬유의 종류와 제조사에 따라 조금씩 다른 값을 갖기 때문에 측정을 수행하기에 앞서 사용하는 광섬유의 변형률 계수를 측정하여야 한다. 이렇게 측정된 변형률 계수는 광섬유 센서를 구조물의 표면에 에폭시를 이용하여 부착하였을 때에도 그대로 사용된다. 하지만 광섬유 센서에 전달되는 변형률이 측정하고자 하는 구조물의 변형률과 일치하지 않는다면 식(1)을 이용한 측정 방법을 신뢰하기 어렵게 된다.

브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서를 구조물에 부착시키는 에폭시 접착제의 형상은 그림 1과 같다. 구조물에 광섬유 길이 방향으로 인장 하중이 가해졌을 때 구조물의 변형률은 에폭시 접착제를 통해 광섬유 센서로 전달된 변형 형태로 전달된다. 또한 광섬유 센서는 코팅된 단일모드 광섬유로 구성되기 때문에 변형률이 코어부로 전달되기 전에 코팅, 클래딩을 거치게 된다. 에폭시 접착제 및 광섬유의 코팅은 다른 부분에 비해 강성이 낮으며 에폭시 접착제의 끝단에서는 광섬유 길이 방향으로의 구속이 없다. 따라서 광섬유 코어에 분포되는 변형률의 크기는 구조물과 같지 않을 수 있으며 이

를 유한요소법을 이용하여 확인하였다.

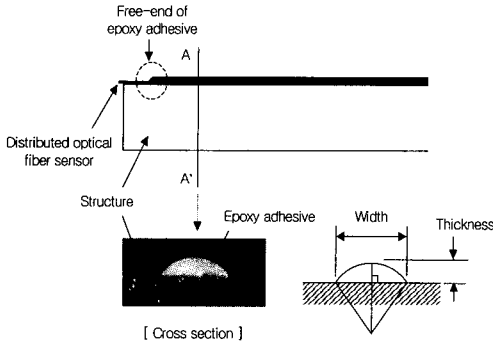


그림 1. 에폭시 접착제를 이용한 분포형 광섬유 센서의 표면 부착: 에폭시 접착제의 단면 형상
 Fig. 1. Surface-mounting of distributed optical fiber sensor with epoxy adhesive: cross section of epoxy adhesive

유한요소법을 이용한 광섬유 센서의 해석은 그 동안 복합재료 내에 삽입하였을 때의 광섬유 및 복합재료 변형을 분포에 집중되었으며 [7,8], 표면 부착에 대한 해석은 거의 보고된 바 없다. Sirkis는 표면에 부착된 광섬유의 전단 및 횡방향 수직 변형률에 대해 수식을 이용한 해석, 마크-젠더 광섬유 센서와 광탄성을 이용한 검증의 연구를 수행하였다.[9] 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 에폭시 표면부착과 같은 형태의 광섬유 센서는 마이켈슨 간섭계, 마크-젠더 간섭계 광섬유 센서나 내인식 패브리-페롯 간섭계 광섬유 센서 등 광섬유를 그대로 센서로 이용하는 종류로 한정되어 있다. 또한 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 설치 시 매우 긴 길이를 가지고 작업하기 때문에 광섬유의 코팅이 유지되어야 하는데, 이러한 광섬유 센서 부착 방법에 대한 검증은 아직까지 보고되지 않았다.

표 1. 유한요소해석에 사용된 재료의 물성치
 Table 1. Material properties used in the FEM analysis

Material	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio
Steel	200	0.3
Epoxy	2.5	0.35
Polyimide	4.5	0.35
Silica	68.9	0.19

본 연구에서는 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서로

써 사용되는 폴리이미드 코팅의 단일모드 광섬유를 인장 하중을 받고 있는 강구조물의 한쪽 표면에 에폭시 접착제를 이용하여 부착하는 적용 방법에 대해 유한요소 모델을 설계하였다. 해석에 이용된 각 재료의 물성은 표 1과 같다. 에폭시 접착제는 제작 과정에서 여러 가지 첨가제를 추가하게 되는데 이에 따라서 대략 0.5~4.5GPa의 탄성계수와 0.2~0.5의 포아송비를 갖는다. 해석에서는 에폭시 접착제의 탄성계수와 포아송비를 각각 2.5GPa, 0.35로 설정하였다. 광섬유의 코어와 클래딩은 실리카 유리의 물성으로 동일하다고 보며 클래딩 외부의 코팅은 폴리이미드로 구성되어 있다. 광섬유는 코어, 클래딩, 코팅의 직경이 각각 8 μ m, 125 μ m, 250 μ m인 단일모드 광섬유이다.

먼저 에폭시 접착제의 부착 형상을 확인하기 위해 광섬유 없이 에폭시 접착제를 강구조물인 인장 시편의 표면에 부착한 후 그 단면을 관찰하였다. 광섬유 센서를 구조물의 표면에 부착할 때 작업의 편의를 위해 광섬유의 크기에 비해 많은 양의 에폭시를 광섬유에 덮어 부착하게 된다. 에폭시 단면의 형상은 그림 1과 같으며, 폭과 두께의 비는 에폭시 접착제의 양에 따라 다소 차이가 있지만 오른쪽 그림과 같이 에폭시 접착제의 단면 형상을 원호의 일부로 가정할 수 있음을 알 수 있었다.

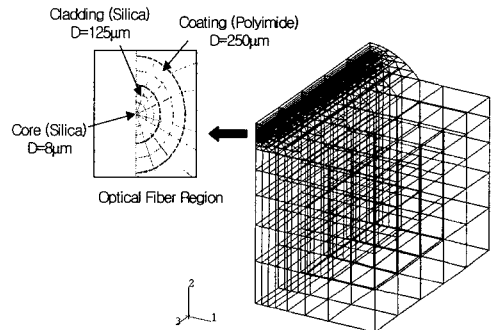


그림 2. 구조물의 표면에 부착된 분포형 광섬유 센서의 유한요소 모델
 Fig. 2. Finite element model of surface-mounted distributed optical fiber sensor

실제 관찰한 에폭시 부착 단면의 형상을 바탕으로 폭과 두께가 각각 5mm와 1mm인 원호 일부 형태로 유한요소 모델을 설계하였다. 광섬유 센서가 부착되는 강구조물은 폭 12mm, 두께 6mm의 직각 사각 단면을 갖는 길이 20mm의 인장시편으로 모델링하였다. 강구조 시편의

길이방향으로 에폭시를 이용, 광섬유를 표면 부착하였기 때문에 모델은 폭 방향에 대해 대칭이며, 자유단으로부터 일정 거리 이상에서는 강구조물과 에폭시, 광섬유 모두 길이 방향 변형률이 같다고 가정하여 그림 2과 같이 두 축에 대한 대칭 모델을 만들었다. 그림에서 모델의 1축의 왼쪽 면, 3축의 뒷면의 변위를 고정하였으며 3축의 앞쪽 면의 강구조물 부분에 일정한 인장하중을 가하였다. 그림의 왼쪽 확대영역은 광섬유 센서부를 나타낸 것으로 점선으로 구분된 바깥쪽이 광섬유의 피복이며 안쪽이 광섬유 클래딩 부분, 그 안쪽의 작은 영역이 광섬유 코어이다. 광섬유 코어 부분에는 6절점 쉐기형상 요소가, 나머지 부분에는 8절점 블록형상 요소가 사용되었다.

실제 에폭시의 자유 경계면 쪽의 길이방향 형상은 그림 1의 단면과 마찬가지로 원호의 일부 형태로 곡률을 갖게 나타나지만 본 유한 요소 해석에서는 3차원 모델링의 단순화를 위해서 끝 단의 자유 경계면 형상이 수직하게 나타나는 것으로 가정하였다.

광섬유 센서는 구조물에 부착 시 구조물 표면에 밀착되어야 한다. 하지만 에폭시 접착제를 사용하는 과정에서 광섬유와 구조물 사이에 발생하는 간격은 불가피하다. 따라서 광섬유는 강구조물의 표면으로부터 25 μ m 떨어진 것으로 모델링하였으며, 실제 광섬유 센서의 부착 작업 시의 허용 정도를 확인하기 위해서 광섬유를 강구조물의 표면으로부터 25 μ m를 포함, 200, 375, 500, 725 μ m 떨어지도록 모델링 하여 비교하였다. 이는 각각 광섬유의 중심 위치로 볼 때 두께 1mm 에폭시의 15, 32.5, 50, 67.5, 85%에 해당하는 위치이다.

분포형 광섬유 센서의 부착에 이용하는 에폭시 접착제 크기의 영향을 확인하기 위해서 앞의 해석 모델과 같은 형상이며 크기가 두 배인 두께 2mm, 폭 10mm인 에폭시 접착제에 대해 추가로 모델링하였다. 측정대상이 되는 강구조 시편은 두께는 그대로이며 폭과 길이는 두 배로 하였다. 이 경우에는 광섬유 센서의 중심 위치를 에폭시 두께의 85%인 1.7mm와 에폭시 두께 1mm 모델에서의 중간 위치였던 0.5mm로 설정하였다.

강구조물과 에폭시, 광섬유의 피복, 클래딩, 코어의 각 경계면은 완전결합되어 미끄러짐이 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 하중은 모든 재료가 탄성 거동을 보이도록 강구조물에 1MPa의 인장응력을 가하였다. 이는 강구조물에 길이방향으로 5×10^{-4} %의 수직 변형률을 유발한다.

III. 유한요소 해석결과

각 모델에 대해 ABAQUS를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 에폭시 접착제 두께 1mm인 모델에 대한 해석 결과 광섬유 코어의 길이방향 대칭면 쪽 요소의 길이 방향 수직 변형률 전달을 정리하면 표 2과 같다. 표 2의 결과는 유한요소해석의 오차 정도로써 모든 모델의 변형률 전달은 거의 100%에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 광섬유 센서가 구조물의 표면으로부터 어느 정도 떨어져 있어도 광섬유의 코어로 전달되는 길이방향 수직 변형률에는 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

표 2. 광섬유 코어에 대한 수직 변형률 전달의 해석 결과

Table 2. Analysis result of normal strain transferred to the optical fiber core

Position of Optical Fiber Axis (μ m)	Strain Transfer (%)
150	99.68
325	99.70
500	99.70
675	99.70
850	99.68

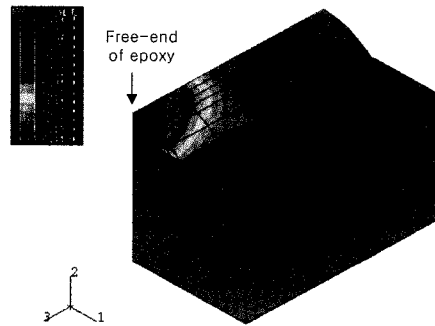


그림 3. 에폭시 접착제 두께 1mm 모델에 대한 변형률 분포

Fig. 3. Strain distribution of epoxy adhesive thickness 1mm model

그림 3은 에폭시 접착제 두께 1mm 모델에 분포된 길이 방향 수직 변형률을 나타낸 것이다. 그림 4는 에폭시의 자유 경계 면으로부터 길이 방향으로 광섬유 코어에 전달되는 변형률의 분포를 각 요소에 대해 계산한 결과이다.

변형률 분포의 결과로부터 광섬유 센서가 구조물의 표면에서 멀리 떨어질수록 자유 경계면 쪽 요소의 변형률 전달이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 광섬유 중심 위치가 $850\mu\text{m}$ 인 경우 자유 경계면 쪽 요소의 전달률은 42.6%이며 $150\mu\text{m}$ 인 경우는 77.2%이다. 자유 경계면으로부터 멀어질수록 변형률이 증가하게 되며 모든 경우 자유 경계면으로부터 5mm 위치에 이르러 100%에 접근하게 된다. 이렇게 100%에 도달하는 거리는 광섬유가 구조물 표면으로부터 떨어진 위치와 무관하며 에폭시 접착제의 두께와 관계가 있는 것으로 보인다.

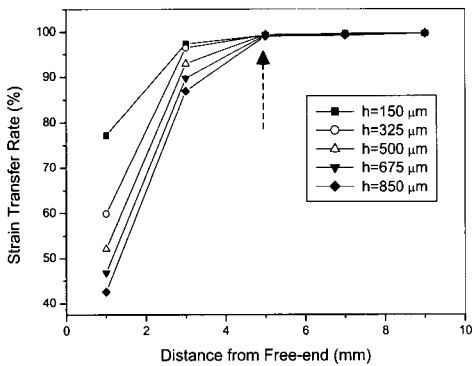


그림 4. 광섬유 센서 코어에 분포된 수직 변형률의 전달률:에폭시 접착제 두께 1mm 모델 (h:구조물 표면으로 부터의 광섬유 중심 위치)

Fig. 4 Strain transfer rate distributed along the optical fiber sensor core:epoxy adhesive thickness 1mm models (h:position of optical fiber axis from structure surface)

그림 5는 에폭시 접착제 두께 2mm인 해석 모델에 대한 해석결과로써 자유 경계면으로부터 길이 방향 위치에 대해 광섬유 코어에 전달되는 변형률의 계산결과를 보인 것이다.

해석 결과에서 광섬유 코어로 전달되는 변형률은 1.7mm의 광섬유 위치에서는 1mm 두께 에폭시 접착제 모델의 85% 광섬유 위치 경우에 비해 절반 정도 크기인 23.3%로 계산되었으며 0.5mm의 광섬유 위치에서는 1mm 두께에 비해 작은 값을 나타내었다. 2mm 두께 에폭시 접착제의 경우에서도 1.7mm, 0.5mm 광섬유 위치 모두 자유 경계면으로부터 10mm 위치에서 100%에 접근하는 변형률을 보이고 있다. 즉 자유 경계면으로부터 에폭시 접착제 두께의 5배 정도 떨어진 위치 이후로는 100%에 가까운 변형률이 전달되는 것을 알 수 있다.

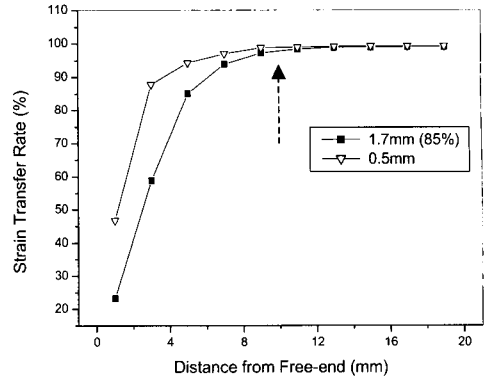


그림 5. 광섬유 센서 코어에 분포된 수직 변형률의 전달률:에폭시 접착제 두께 2mm 모델 (h:구조물 표면으로부터의 광섬유 중심 위치)

Fig. 5. Strain transfer rate distributed along the optical fiber sensor core:epoxy adhesive thickness 2mm models (h:position of optical fiber axis from structure surface)

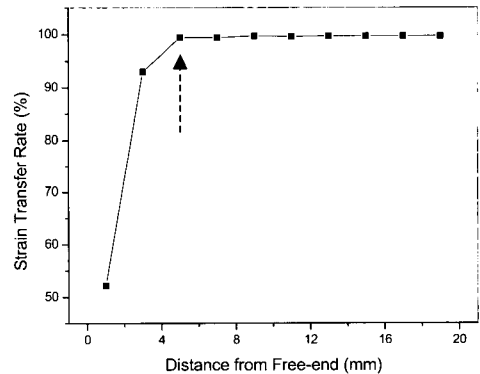


그림 6. 길이를 두 배로 확장시킨 모델에 대한 수직 변형률의 전달률 분포:에폭시 접착제 두께 1mm 모델 (에폭시 접착제 중간에서의 광섬유 위치)

Fig. 6 Distribution of strain transfer rate in the twice length model:epoxy adhesive thickness 1mm model (optical fiber at the middle position of the epoxy adhesive)

해석된 유한요소 모델의 길이에 대한 타당성을 확인하기 위하여 1mm 에폭시 접착제 두께의 0.5mm 광섬유 위치 모델의 길이를 두 배로 확장하여 해석을 수행하였다. 그림 6은 광섬유 코어로 전달된 변형률의 분포를 나타낸 것이다. 전달된 변형률은 그림 4의 결과에서와 마찬가지로 자유 경계면으로부터 에폭시 접착제 두께

의 5배에 해당하는 위치에서 100%에 접근하고 있다. 유한요소 모델에서 길이방향으로의 요소가 조밀해짐에 따라 광섬유 코어의 자유 경계면 쪽에서는 경계조건에 가까운 결과를 보인다. 하지만 2, 3, 4배 조밀한 길이방향 요소에 대한 모델을 비교해 본 결과 변형률 분포는 동일하게 나타났으며, 모델에서는 특별한 특이점이 존재하지 않으므로 요소 조밀도에는 큰 영향을 받지 않게 된다. 또한 구조물과 에폭시, 광섬유 클래딩과 피복 경계에서의 강성 차에 의한 응력 집중을 확인하기 위해 부분적으로 조밀한 요소로 모델을 구성해 보았으나 광섬유 코어로 전달되는 변형률에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

IV. 해석결과에 대한 고찰

본 유한요소해석의 결과로부터 구조물에서 에폭시 접착제로 부착된 광섬유 센서로 길이 방향 수직 변형률이 100%에 가깝게 전달되는 것을 확인하였다. 이는 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서를 구조물의 표면에 부착하여 변형률을 측정할 때 측정값을 신뢰할 수 있다는 것을 의미한다. 광섬유가 구조물의 표면으로부터 어느 정도 떨어져 있더라도 변형률 측정에는 지장이 없기 때문에 광섬유 센서의 실제 구조물 시공 시에 이를 허용할 수 있을 것으로 보인다.

에폭시의 자유 경계면 쪽으로 변형률 전달이 낮아지는 것은 해석 결과 에폭시 두께의 5배 정도 길이로 한정되는 것을 알 수 있었는데, 이것은 광섬유 센서가 구조물의 표면에 가까이 있을수록 그리고 에폭시의 두께가 작을수록 그 효과를 줄일 수 있음을 나타낸다. 하지만 에폭시의 두께를 지나치게 크게 하지 않는 이상 변형률 전달이 낮게 나타나는 길이는 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 수십 cm에서 수 m에 이르는 거리 분해능에 비하면 아주 짧기 때문에 무시할 수 있다. 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 거리분해능은 식(2)와 같다.

$$\text{Spatial Resolution} \equiv \frac{\Delta l}{2} = \frac{v_g \tau}{2} \quad (2)$$

위의 식에서 Δl 은 구동 펄스의 진행 길이이며 v_g 는 광섬유 내에서의 빛의 속도, τ 는 구동 펄스의 시간 폭을 의미한다. 만일 구동 펄스의 시간 폭을 줄여 광섬유

센서의 거리분해능을 향상시키게 되면 에폭시 자유단으로부터 전달 변형률이 낮게 나타나는 길이를 고려, 에폭시의 두께를 제한해야 할 것이다.

분포형 광섬유 센서는 피복을 포함한 직경이 250 μm 정도로 매우 작다. 이 정도의 크기는 수십 km에 이를 수 있는 측정 길이에 대해서 작업을 할 때 상당한 주의를 요구하게 된다. 만일 피복의 직경을 크게 한다면 분포형 광섬유 센서의 부착 작업이 보다 용이해질 것이다. 따라서 앞에서의 해석 모델과 같은 조건에 광섬유의 피복 직경이 600 μm , 1000 μm , 2000 μm 인 모델에 대한 추가적인 해석을 수행하였다. 에폭시 접착제의 두께와 폭은 광섬유 센서를 충분히 덮어 접착하기 위해서 600 μm 의 피복 직경의 경우는 각각 2mm, 10mm로, 1000 μm 와 2000 μm 의 피복 직경의 경우는 각각 4mm, 20mm로 설정하였다. 광섬유의 위치는 에폭시 접착제의 중심으로 하였으며, 강구조 시편의 폭은 에폭시 접착제의 크기를 고려하여 600 μm 의 피복 직경의 경우는 12mm, 1000 μm 와 2000 μm 의 피복 직경의 경우는 24mm로 정했다.

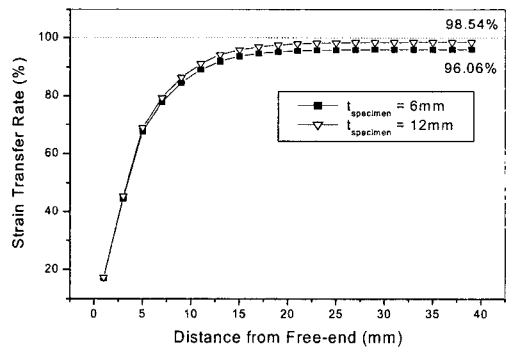


그림 7. 광섬유 코팅 직경이 1mm인 모델에 대한 수직 변형률의 전달률 분포

(강구조물 시편 두께: 6mm, 12mm)

Fig. 7. Distribution of strain transfer rate in 1mm optical fiber coating diameter models

(thickness of the steel specimen: 6mm and 12mm)

세 경우 모두 앞의 해석 결과와 마찬가지로 자유 경계면으로부터 길이 방향으로 에폭시 접착제 두께의 5배에 이르는 위치에서 수렴되는 변형률 전달을 보였다. 각 수렴 값은 600 μm 의 피복 직경에 대한 모델은 99.23%를 보였지만 1000 μm 와 2000 μm 의 피복 직경에 대한 모델은 각각 96.06%와 95.93%로 나타났다. 이러한 결과의 원인을 확인하기 위해서 1000 μm 와 2000 μm 의 피

복 직경에 대한 모델에서의 강구조 시편 두께를 두 배로 증가하여 해석을 수행하였다. 그림 7과 그림 8은 그 결과를 비교한 것으로 시편의 두께가 큰 경우 수렴되는 변형률 전달 값이 더 큰 것을 알 수 있었다. 이는 측정 대상의 두께와 에폭시 접착제의 두께의 비가 광섬유 센서로의 변형률 전달에 영향을 미치는 것을 의미하며, 에폭시 접착제의 두께를 상대적으로 작게 할수록 변형률 전달에 유리한 것을 확인할 수 있다. $600\mu\text{m}$ 의 피복 직경과 일반 피복 직경의 경우, $1000\mu\text{m}$ 의 피복 직경과 $2000\mu\text{m}$ 의 피복 직경의 경우를 각각 비교해 볼 때 광섬유 피복이 커질수록 변형률 전달률이 작아지는 하지만 그 영향은 그리 크지 않은 것을 알 수 있다.

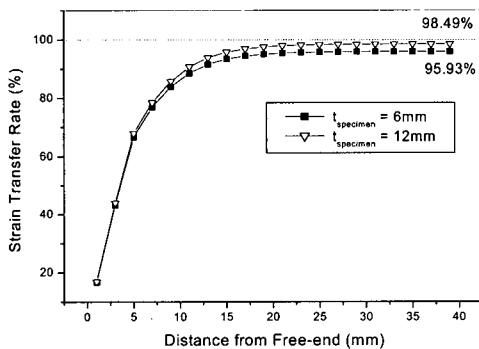


그림 8. 광섬유 코팅 직경이 2mm인 모델에 대한 수직 변형률의 전달률 분포

(강구조물 시편 두께: 6mm, 12mm)

Fig. 8. Distribution of strain transfer rate in 2mm optical fiber coating diameter models (thickness of the steel specimen: 6mm and 12mm)

V. 결론

본 연구에서는 구조물의 표면에 에폭시 접착제를 이용하여 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서를 부착할 때 센서가 구조물의 변형을 정확히 측정할 수 있는지를 유한요소법으로 확인하였다. 그 결과 구조물로부터 에폭시, 광섬유의 피복, 클래딩을 거쳐 광섬유 코어로 전달되는 변형률은 그 전달률이 100%에 근접함을 알 수 있었다. 또한 광섬유 센서가 어느 정도 구조물의 표면으로부터 떨어져 있더라도 변형률의 전달에는 그다지 영향을 주지 않았으며, 이러한 사실은 실제 구조물에 광섬유 센서를 설치할 때 어느 정도의 간격은 충분

히 허용할 수 있는 것을 의미한다. 에폭시 접착제의 끝 부분에서는 자유 경계면의 영향으로 변형률의 전달이 작게 나타나는 부분이 있었는데 이 길이는 대략 에폭시 두께의 5배 정도이기 때문에 에폭시의 두께를 작게 설치를 하면 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 거리 분해능 정도로 보아 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Horiguchi, T. Kurashima and M. Tateda, "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fiber," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 1, no. 5, pp. 107-108, 1989.
- [2] T. Kurashima, T. Horiguchi and M. Tateda, "Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers," Applied Optics, vol. 29, no. 5, pp. 2219-2222, 1990.
- [3] J. Smith, A. Brown, M. DeMechant and Xiaoyi Bao, "Simultaneous distributed strain and temperature measurement," Applied Optics, vol. 38, no. 25, pp. 5372-5377, 1999.
- [4] M. DeMechant, A. Brown, Xiaoyi Bao and T. Bremner, "Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor," Applied Optics, vol. 38, no. 13, pp. 2755-~2759, 1999.
- [5] L. Thevenaz, M. Facchini, A. Fellay and P. Robert, "Monitoring of large structure using distributed Brillouin fibre sensing," 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, Kyungju, Korea, pp. 345-347, April 12-16, 1999.
- [6] L. Thevenaz, M. Nikles, A. Fellay, M. Facchini and P. Robert, "Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers," Smart Structures and Materials 1998: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, SPIE Proc, v3330, pp 301-314, 1998.
- [7] A. Dasgupta and J.S. Sirkis, "Importance of

- coating to optical fiber sensors embedded in smart structures," AIAA Journal, vol. 30, no. 5, pp. 1337-1343, 1992.
- [8] J .S. Sirkis and I.O. Lu, "On interphase modeling for optical fiber sensors embedded in unidirectional composite systems," Journal of intelligent material systems and structures, vol. 6, pp. 199-209, 1995.
- [9] J .S. Sirkis and H.W. Haslach, Jr., "Interferometric strain measurement by arbitrarily configured, surface-mounted, optical fibers," Journal of lightwave technology, vol. 8, no. 10, pp. 1497-1503, 1990.

著 者 紹 介

김 상 훈

1974년생

1997년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(학사)

1999년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)

현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

주관심분야 : 광섬유 센서, 지능형 구조물

권 일 범

『센서학회지 제9권 2호』 논문 2000-9-2-02, p.16 참조

현재 한국표준과학연구원 산업측정표준부 시설안전계
측연구센터 선임연구원

이 정 주

『센서학회지 제7권 4호』 논문 98-7-4-08, p.285 참조

현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수

허 증 수

『센서학회지 제7권 4호』 논문 98-7-4-08, p.285 참조

현재 경북대학교 금속공학과 교수