

삽입된 광강도형 광섬유센서가 지능형 복합재 구조물의 건전성에 미치는 영향 및 피로손상 감시

이동춘*, 이정주*, 서대철*, 허증수**

Effect on the structural integrity and fatigue damage monitoring of smart composite structures with embedded intensity based optical fiber sensors

Dong Chun Lee*, Jung Ju Lee*, Dae Cheol Seo* and Jeung Soo Huh**

요 약

본 연구에서는 복합재료에 삽입된 광섬유센서의 인장하중하에서의 정적 물성치와 피로하중하에서의 동적 물성치를 실험적인 방법과 유한요소해석을 통하여 고찰하였다. 결과에 의하면 삽입된 광섬유센서는 인접한 강화섬유에 수직인 방향으로 삽입된 피로하중의 경우를 제외하고 복합재료의 기계적인 물성치에 큰 영향을 끼치지 않는다고 결론지을 수 있다. 광강도형 광섬유센서를 복합재료 적층판에 삽입하여 복합재 적층판의 강성저하를 측정함으로써 적교적층판 피로손상을 검출하였다. 이 실험의 결과에 의하면 광강도형 광섬유센서는 간단하고 저렴한 장치와 측정된 신호의 복잡한 후처리 과정이 필요 없다는 장점으로 인하여 구조물의 강성저하를 측정하여 피로손상을 감시하는데 있어서 큰 잠재력을 가진다고 할 수 있다. 또한 삽입된 광강도형 광섬유센서는 우수한 내 피로성과 넓은 강성측정 범위를 보였다.

Abstract

In this study, the effects of embedded optical fibers on the static properties under tensile load and dynamic properties under fatigue load of composite laminates were investigated by experimental tests and finite element analysis. Based on the results, it can be concluded that the embedded optical fiber sensors do not have significant effects on the structural integrity of the smart composite structures except when the sensors are embedded perpendicular to the adjacent reinforcing fibers under fatigue loading. An intensity-based optical fiber sensor was embedded in the crossply composite laminates to monitor the fatigue damage by detecting the stiffness changes of the laminates. The result of this experiment has shown that the intensity-based optical fiber sensor has large potential to monitor the fatigue damage of composite structures by detecting the stiffness changes of the structures with simple and inexpensive instruments and without complex post-processing of measured signals. In addition, the optical fiber sensor showed good resistance to fatigue loading and wide sensing ranges of stiffness.

1. 서 론

* 한국과학기술원 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, KAIST)

** 경북대학교 공대 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Kyung-pook National University)
<접수일자 : 2000년 10월 23일>

복합재료는 기존의 금속재료에 비해 높은 비강성과 비강도를 갖고 있어 경량화와 안정성이 요구되는 항공기나 자동차의 구조용 재료로서 사용되어 큰 실효를

거두고 있다. 하지만, 복합재 구조물은 비등방성 및 비균질성으로 인해 복잡한 기계적 거동을 보이며, 파괴거동도 다양한 파괴 기구들에 의한 매우 복잡한 양상을 보이므로, 이에 적절한 구조물의 안전성 진단기술의 확충이 요구되어 왔다. 현재까지는 복합재 구조물의 손상검출을 위해 비파괴 검사법이 사용되어 왔으나, 검사 과정이 매우 복잡하고, 전체 구조물에 대한 광범위한 검사의 어려움, 작동 중인 구조물의 실시간 검사가 어려운 점 등의 단점들이 지적되어 왔다.

이러한 단점을 개선하고 보다 효율적인 구조물의 건전성 향상 및 진단기술을 개발하기 위하여 영, 미, 일 등의 선진국을 중심으로 구조물 스스로 외부 환경변화에 적절히 대응할 수 있도록 하는 연구를 진행하고 있다. 이러한 구조물은 지능형 구조물이라 불리며, 최근의 급속한 컴퓨터 및 센서기술의 발달을 이용하여 구조물에 감지기능, 동작기능 및 지능을 부여하여, 구조물 스스로 내, 외부 환경조건, 즉 하중 및 손상 등을 실시간으로 감지하고, 능동적으로 그에 적절한 대응동작을 하도록 한 구조물을 말한다.^[1] 감지기능은 광섬유 센서, 압전센서 등의 여러 가지 센서를 이용하며, 동작기능은 압전세라믹, 전장변형유체(electro-rheological fluids), 형상기억합금 등을 이용하며, 지능은 마이크로프로세서로 부여하게 된다.

지능형 복합재 구조물의 감지기로는 현재 광섬유 센서가 가장 유용한 것으로 주목을 받고 있다. 광섬유 센서는 강화섬유와 물성치가 비슷하고, 직경이 작고 유연하여 복합재 내에 삽입이 용이하고, 환경적인 요인에 강하며, 전자기적 간섭에 영향을 받지 않으며, 감도가 우수하고, 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 구성하여 다점측정이 가능하여 전체 구조물 검사에 용이한 점 등 기존 센서에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 하지만 광섬유 센서를 복합재 내에 삽입하여 지능형 복합재 구조물로 사용하기에 앞서 삽입된 광섬유 센서가 복합재 구조물의 기계적 특성에 미치는 영향에 관한 고려가 우선되어야 한다. 본 연구는 광섬유를 삽입한 복합적층판의 인장 및 피로특성의 실험적 고찰과 유한요소해석을 통한 수치적 해석 등 다양한 고찰을 통해 광섬유 센서를 복합재 내에 삽입할 때 발생할 수 있는 기계적인 문제점을 파악하고, 이를 바탕으로 광섬유 센서를 삽입한 지능형 복합재 구조물의 설계, 제작 시 고려할 사항에 대해 조사하였다.

한편, 피로하중을 받고 있는 복합재 구조물의 피로

손상 감시는 기존의 금속 구조물에 적용되었던 방법으로는 한계가 있다. 그래서 복합재료가 피로하중을 받을 때 발생하는 손상의 거동측정 및 예측,^[2,3] 강도 또는 강성변화와 손상과의 관계,^[4-6] 피로수명예측 모델의 수립^[7-9] 등에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 이 연구들은 피로하중을 받는 복합적층판의 강성변화를 측정함으로써 손상의 검출, 안전성 평가 및 잔존수명 예측 등이 가능함을 보고하였다. 그러나, 실제 복합재 구조물의 강성을 감시하는 방법으로는 스트레인 게이지를 이용하는 방법 외엔 적당한 방법이 없다. 그런데, 실제 구조물의 측정환경은 전자기적 간섭이 심하고 부식 등이 발생하기 쉬운 매우 열악한 조건이므로 이 방법도 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 광섬유 센서를 이용한 복합재 구조물의 피로손상 검출기법은 이러한 문제점을 해결하면서 구조물에 감지기능을 부여하며 또한 실시간 검출이 가능한 방법으로써 연구의 필요성이 매우 높다.

따라서, 본 연구에서는 광섬유 센서를 삽입한 지능형 복합적층판을 제작하고, 피로하중을 받는 복합재 구조물의 강성변화를 광강도형 광섬유 센서를 이용하여 측정함으로써 피로손상을 감시하는 기법에 관해 고찰해보았다.

II. 광섬유를 삽입한 복합적층판의 기계적 특성

2.1 시편 및 시험장치

각 실험에 사용된 시편은 유리섬유 에폭시 프리프레그로 제작되었고, Fig. 1과 같은 쿠편 형태로 제작되었다. 인장시편의 크기는 ASTM standard D3039-76^[10]에 기초하여 길이 L=200mm, 폭 W=24mm, 두께 t=1.8mm로 하였고, 피로시편의 크기는 길이 L=160mm, 폭 W=24mm 두께 t=1.2mm로 하였다. 인장시편과 피로시편 모두 양단에 길이 38mm의 유리섬유 에폭시 하중탭(load tab)을 붙였다.

적층구조는 인장과 피로시편 모두 일방향적층(unidirectional laminate)과 직교적층(crossply laminate)의 두 가지로 하여 삽입된 광섬유와 인접적층의 강화섬유 사이의 각도가 0° 및 90°의 두 종류가 되게 하였다. 사용된 광섬유는 모두 (주)삼성전자의 싱글모드 DSF(dispersion shifted fiber)로 코어직경은 6.3μm, 클레딩직경은 125μm, 피복직경은 250μm이다. 모든 광섬

유는 삽입하기 전 코팅을 벗기고 각 시편의 중립면에 하중방향과 평행하도록 삽입하였다. 이 때, 광섬유는 시편 내에서 일정한 간격을 가지도록 배치하였다. Table 1과 Table 2는 각각 인장시편과 피로시편의 적층순서, 삽입한 광섬유의 개수 및 시험한 시편개수를 나타낸 것이다.

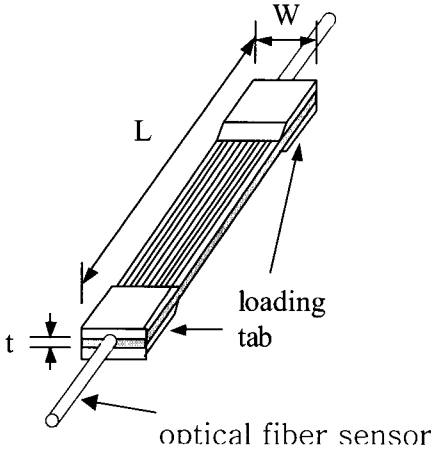


그림 1. 인장 시험 및 피로시험편의 치수
Fig. 1 Geometry of the tension and fatigue test specimen

표 1. 인장시험편의 구성
Table 1. Details of configurations of the tension test specimens

Specimen mark	Stacking sequence	No. of embedded optical fibers	No. of tested specimens
TU0	Uni	0	9
TU1	Uni	1	10
TU3	Uni	3	10
TC0	Crossply	0	9
TC1	Crossply	1	10
TC3	Crossply	3	10

* T : tension, U : unidirectional, C : crossply
* Numbers in the specimen mark means the number of embedded optical fibers.

시험은 모두 MTS 10톤 유압시험기를 이용하였으며, 인장시험은 0.6mm/min 의 일정변위속도제어로 최

종파단이 일어날 때까지 변위를 증가시켰다. 피로시험은 4Hz의 정현파형(sinusoidal waveform)의 인장반복하중을 가하였는데, 최대응력은 직교적층시편은 최대응력을 160MPa, 일방향적층시편은 최대응력을 600MPa로 정하였으며, 응력비는 시편에 압축응력이 걸리는 것을 방지하기 위해 0.1로 하였다. 이 때, 최대응력은 직교적층시편의 경우에는 정적인장강도의 약 50%, 일방향적층시편의 경우에는 약 60%에 해당되는 값이다.

표 2. 피로시험편의 구성
Table 2. Details of configurations of the fatigue test specimens

Stacking sequence	No. of embedded optical fibers	Spacing between optical fibers(mm)	No. of tested specimens
Uni-directional specimens, [0] ₁₂ r	0	-	12
	1	-	10
	3	6	10
	5	4	11
Crossply specimens, [0 ₂ /90 ₄] _s	0	-	5
	1	-	6
	3	6	6
	5	4	6

2.2 복합적층관의 인장특성

인장시험으로 얻은 데이터로부터 6종류의 각 시편에 대한 강성(stiffness), 강도(strength) 및 포와송비(Poisson's ratio)의 평균값과 표준편차를 계산하고, Table 3, 4, 5에 각각 나타내어 비교하였다. 또한, 광섬유를 넣지 않은 시편과의 편차의 백분율도 같이 나타내었다. 이 Table들에서 보는 바와 같이, 삽입된 광섬유의 수에 관계없이 강성, 강도는 최대 4% 정도의 편차를 보였고, 포와송비는 최대 10% 정도의 편차를 보였다. 그리고, 일방향적층시편과 직교적층시편의 결과를 비교해볼 때 광섬유와 인접적층의 강화섬유 사이의 각도도 인장특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

따라서, 이 결과로부터 삽입된 광섬유의 부피비가 낮은 경우에는 광섬유센서의 삽입이 복합재 구조물의 인장특성에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 3. 인장시험 결과 - 강성

Table 3. Results of the tension tests - stiffness

Specimen	Stiffness (GPa)		
	Average	Standard deviation	Difference(%)
TU0	45.97	0.65	-
TU1	46.61	0.54	1.39
TU3	46.64	1.53	1.46
TC0	24.84	0.58	-
TC1	25.40	0.88	2.25
TC3	25.76	1.03	3.70

* T : tension, U : unidirectional, C : crossply
 * Numbers in the specimen mark means the number of embedded optical fibers.

표 4. 인장시험 결과 - 강도

Table 4. Results of the tension tests - strength

Specimen	Strength (MPa)		
	Average	Standard deviation	Difference(%)
TU0	1028.48	47.93	-
TU1	1054.14	35.69	2.50
TU3	1034.21	48.39	0.56
TC0	318.75	14.12	-
TC1	319.72	23.99	0.30
TC3	319.19	21.85	0.14

* T : tension, U : unidirectional, C : crossply
 * Numbers in the specimen mark means the number of embedded optical fibers.

2.3 복합적층판의 피로특성

축방향 반복하중 하에서 광섬유의 삽입이 복합적층판의 피로수명에 미치는 영향을 알아보기 위해, 우선 일방향적층과 직교적층의 시편에 대해 각각 서로 다른 수의 광섬유를 삽입한 시편의 피로수명을 측정하고, Fig. 2, 3에 각 시편의 피로수명(fatigue life)과 피로수명의 평균값(average), 표준편차(standard deviation)를 나타내었다. 피로수명의 평균값을 비교해 보면 광섬유가 삽입된 시편은 광섬유가 삽입되지 않은 시편에 비해 피로수명이 저하됨을 알 수 있다. 그리고, 삽입된 광섬유의 수에 따른 피로수명 저하율의 차이는 그다지 크지 않지만, 삽입된 광섬유의 수가 증가할수록 피로수

명이 더 저하되는 경향을 보이고 있다.

표 5. 인장시험 결과 - 포와송비

Table 5. Results of the tension tests - Poisson's ratio

Specimen	Poisson's ratio		
	Average	Standard deviation	Difference(%)
TU0	0.268	0.009	-
TU1	0.273	0.016	1.87
TU3	0.279	0.013	4.10
TC0	0.118	0.006	-
TC1	0.122	0.005	3.39
TC3	0.129	0.013	9.32

* T : tension, U : unidirectional, C : crossply
 * Numbers in the specimen mark means the number of embedded optical fibers.

적층구성에 따른 차이를 비교해 보면, 일방향적층보다는 직교적층에 광섬유가 삽입되었을 때 더 큰 피로수명의 저하를 보인다. 이는 광섬유의 삽입으로 인한 두 적층구성간의 기하학적 불연속성의 차이와 관련이 있는 것으로 판단된다.

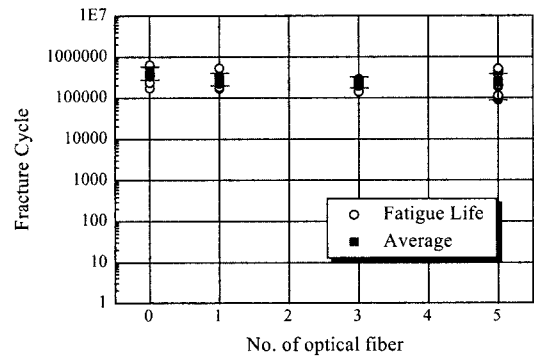


그림 2. 일방향적층시편의 피로시험 결과

Fig. 2 Results of the fatigue tests for the unidirectional specimens.

즉, 일방향적층에 광섬유가 삽입되었을 경우에는 인접적층의 강화섬유와 평행하므로 경화 후 광섬유가 인접적층 속으로 함침되는 반면, 직교적층에 광섬유가 삽입되었을 경우에는 인접적층의 강화섬유와 수직으로 만나게 되어 눈 모양의 모재모임영역(eye-shaped resin rich area)을 형성하게 된다. 따라서, 일방향적층보다는

직교적층에 광섬유가 삽입되었을 때 더 큰 기하학적 불연속성을 형성하게 되고 피로수명의 저하도 더 크게 된다. 따라서, 광섬유가 인접적층의 강화섬유와 평행하게 삽입될 경우에는 복합적층판의 피로수명에 그다지 큰 영향을 미치지 않지만, 인접적층의 강화섬유와 수직으로 삽입하였을 경우에는 복합적층판의 피로수명에 영향을 미친다고 말할 수 있다. 그러므로, 광섬유센서를 삽입한 지능형 복합재 구조물을 설계할 때에는 광섬유센서와 강화섬유가 수직한 방향으로 삽입되는 경우는 피하여야 피로수명의 저하를 최소화할 수 있다.

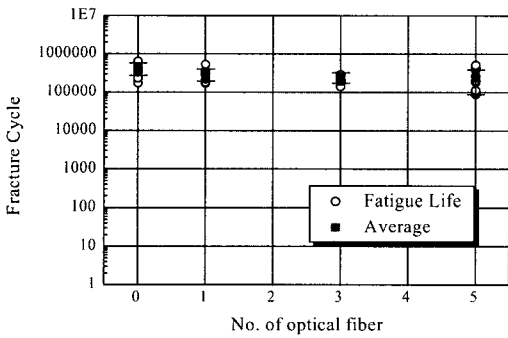


그림 3. 직교적층 시편의 피로시험 결과
 Fig. 3 Results of the fatigue tests for the crossply specimens

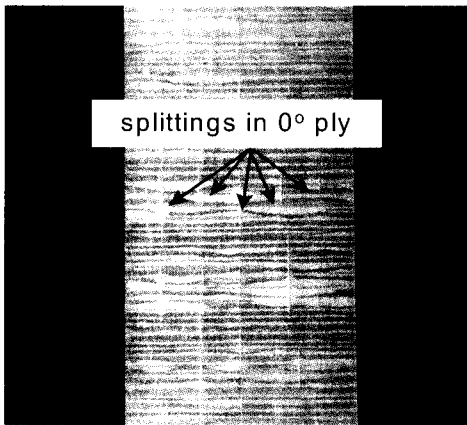


그림 4. 광섬유가 삽입된 위치에서 스플릿팅의 시작을 보여주는 5개의 광섬유가 삽입된 직교적층시편의 사진
 Fig. 4 Photographs of a crossply specimen with 5 embedded optical fibers showing the splitting growth at the location of the embedded optical fibers.

2.4 유한요소해석

피로하중 하에서 직교적층시편의 수명저하의 원인을 찾기 위해, 직교적층시편의 피로손상의 관찰 및 유한요소해석을 통하여 피로하중 하에서의 파단메카니즘과 피로수명과의 관계에 대해 고찰해 보았다.

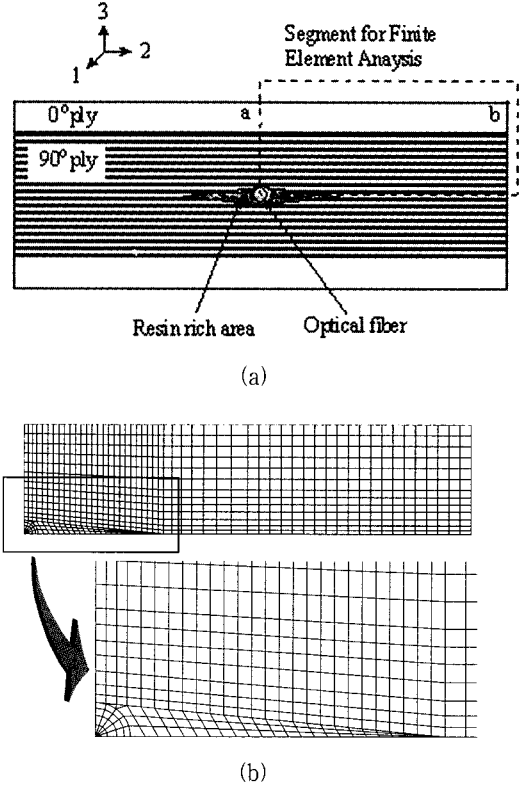


그림 5. 유한요소해석에 사용된 모델 (a) 광섬유가 삽입된 직교적층시편의 단면 개략도 (b) 유한요소해석에 사용된 메쉬

Fig. 5 Modeling used in the finite element analysis. (a) schematic diagram of cross-section of a crossply specimen with an embedded optical fiber, (b) the mesh used in finite element analysis.

Fig. 4는 5개의 광섬유가 삽입된 직교적층시편에서 스플릿팅이 생기기 시작한 모습을 보여주는 사진이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 광섬유를 삽입한 위치에서 0°층에 스플릿팅이 가장 먼저 발생함을 관찰할 수 있었다. 광섬유를 삽입한 위치에서 스플릿팅이 가장 먼저 발생하는 원인을 알아보기 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 0°층의 응력분포를 구

해 보았다. Fig. 5에서 나타낸 바와 같이, 해석에 사용된 모델은 중앙에 광섬유가 삽입된 시편의 단면을 3차원 요소로 모델링한 것이다. 이 모델에 대해 면에 수직인 방향의 일정변위 즉 축방향 일정변위를 가하였을 때의 응력을 해석하여 0°층에서 스프릿팅을 발생시키는 응력 성분인 σ_{22} 의 분포를 구해 보았다.

Fig. 6은 Fig. 5에 표시된 a점과 b점 사이의 σ_{22} 의 분포를 나타낸 것이다. 그래프에서 X축은 시편 폭에 대한 광섬유로부터 떨어진 거리의 비율로 표시하였고, Y축은 광섬유의 영향과 가장자리의 영향이 없는 위치 ($d/w=0.4$ 부근)에서의 응력에 대한 비율로 표시하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 광섬유로부터 떨어진 부근의 응력보다 광섬유가 삽입된 위치인 a점에서 약 14% 정도의 인장응력의 집중이 있음을 알 수 있다. 따라서, 광섬유가 삽입된 위치에서 스프릿팅이 제일 먼저 발생하게 되고, 시편의 피로수명저하를 유발하게 된다. 광섬유에서 먼 곳에서의 응력의 저하는 가장자리 효과(edge effect)에 기인한다.

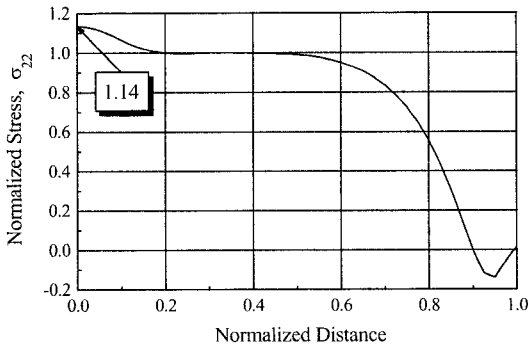


그림 6. 삽입된 광섬유의 위치에서 응력집중을 보여주는 그림 5의 a-b선상에서의 응력 분포

Fig. 6 Stress distribution along the line a-b in Fig. 5 showing the stress concentration at the location of the embedded optical fiber

III. 광섬유센서를 이용한 복합적층판의 피로손상 감시

광섬유센서를 이용하여 피로하중을 받고 있는 복합적층판의 강성변화를 측정함으로써 피로손상을 감시하는 기법에 관해 고찰하기 위해 광섬유센서를 삽입한 복합적층판을 제작하고 피로시험을 수행하였다.

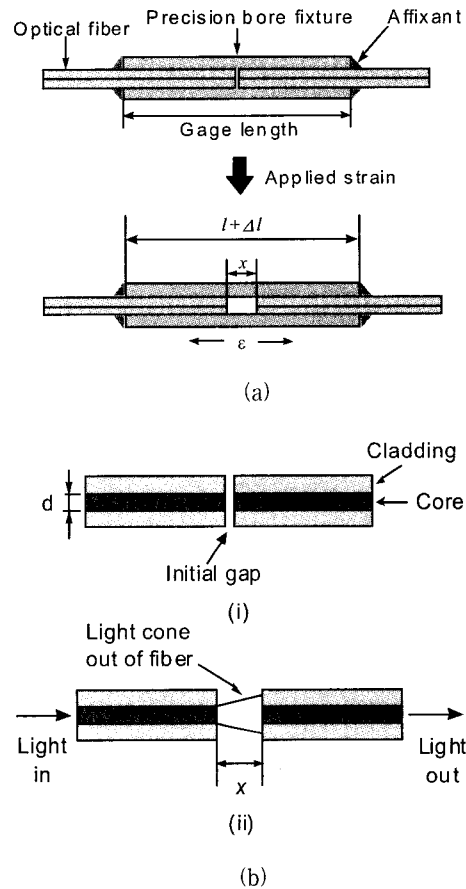


그림 7. (a) 광강도형 센서의 개략도 (b) 광강도형 센서의 측정원리 - (i) 변형률이 없을 때 (ii) 변형률이 가해졌을 때

Fig. 7 Schematic diagrams showing (a) the shape of the intensity-based optical fiber sensor and (b) the principle of measurement (i) No applied strain, (ii) Applied strain

본 연구에서 사용된 광강도형 광섬유 센서는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 두 광섬유의 간격 사이에서 발생하는 광손실(optical loss)을 이용하여 변형률을 측정한다. Fig. 7(b)는 센서의 측정원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 광섬유의 한 단면에서 빛이 방출될 때는 광섬유의 임계각, 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 광섬유센서의 기본 원리는 Badcock 등^[11]에 의해 1995년도에 제안되었으며 또한 복합적층판의 피로손상의 검출 가능성이 보고된바 있다. 광강도형 광섬유 센서는 스트레인 게이지 정도의 분해능을 가지며, 다른 광섬유센서들에 비해 간단하고 저렴한 장치들로 구성할 수 있고, 데이터의 후처리 과정이 간단한 점등의 장점을 갖고 있다. 강성의 변화의 측정은 변형의 정밀한 측정보다는 변형의 변화량을 측정하면 되므로 복잡한 장치구성과 데이터의 후처리 과정이 필요한 간섭형 센서보다는 비록 간섭형 센서에 비해 분해능은 다소 떨어지지만 저렴하고 쉬운 장치구성으로도 측정이 가능한 광강도형 광섬유센서를 이용하였다.

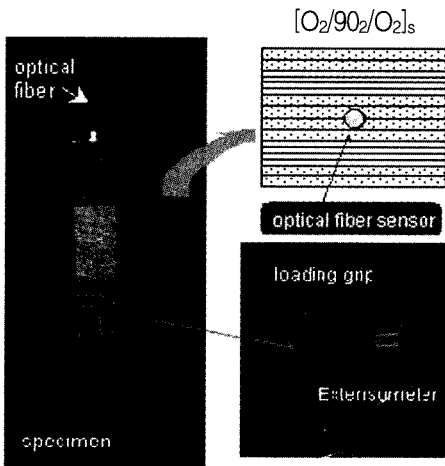


그림 8. 시편구성, 광섬유센서 삽입위치, 시험장치 구성의 개략도

Fig. 8 Diagrams showing configuration of the specimen, embedding location of the optical fiber sensor, and the test setup

시편은 유리섬유 에폭시 프리프레그를 이용하여 제작하였고, 적층구조는 $[O_2/90z/O_2]_s$ 이며 광섬유센서는 중립면에 하중방향과 평행하게 삽입하였다. 앞서 살펴 본 바와 같이 복합적층판 및 광섬유 센서의 기계적 특성의 영향을 최소화하기 위해 광섬유센서는 0° 적층에 삽입되도록 적층구조를 정하였다. Fig. 8은 시험에 사용된 시편의 형상과 광섬유센서의 삽입위치를 표시하고 있다. 광강도형 광섬유센서는 코어직경이 $50\mu\text{m}$ 이고 클래딩직경이 $125\mu\text{m}$ 인 다중모드 광섬유를 현미경으로

관찰하면서 정밀3축지그를 이용하여 내경 $128\mu\text{m}$, 외경 $280\mu\text{m}$ 인 유리관에 삽입한 후 양끝단을 에폭시로 고정하여 제작하였다. 센서시험에 사용한 광원은 할로젠 램프이고, 광다이오드를 이용하여 센서를 통과한 빛의 강도를 측정하였다.

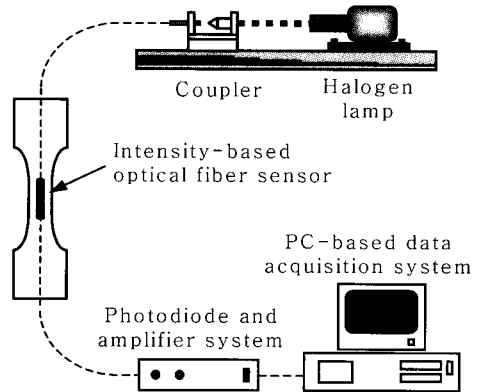


그림 9. 광강도형 광섬유 센서시스템의 구성도
Fig. 9 Experimental set-up of the IOFS system

광강도형 광섬유센서는 두 광섬유의 단면 사이에서 빛이 전달될 때 발생하는 광손실을 이용하여 두 광섬유 사이의 간극의 변화를 측정하므로 코어직경이 커서 광전달량이 크고 광섬유의 어긋남(misalignment)에 대해 덜 민감한 다중모드 광섬유를 사용하였다. 이 다중모드 광섬유는 기계적 특성시험에 사용한 단일모드 광섬유와는 상이하나 두 광섬유 모두 실리카 유리(silica glass)로 제작된 광섬유이고 외경은 $125\mu\text{m}$ 로 일치하므로 광섬유의 기계적 물성치(mechanical property)는 거의 동일하고 복합적층판의 기계적특성에 미치는 영향은 같다고 할 수 있다.

하중은 MTS 10톤 유압시험기를 이용하여 5Hz의 정현파형의 일정진폭의 반복하중을 가하였으며, 하중비는 0.1로 하였다. 광섬유센서의 신호와 함께 시편에 부착한 익스텐소미터(extensometer)의 신호도 같이 주기적으로 측정하였다. Fig. 9에 시험장치의 개략도를 나타내었다.

주기적으로 측정된 하중 대 익스텐소미터 신호의 기울기를 구하여 강성을 계산하고, 하중 대 광섬유 센서의 신호의 기울기로부터 또한 강성을 환산하여 비교하였다. $[O_2/90z/O_2]_s$ 시편에 대해 세 가지의 서로 다른 최대하중을 가하고 이에 대한 센서의 거동을 살펴보았다. 우선, 75Mpa (0.23%의 변형률)의 낮은 최대하중에 대

한 강성측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 피로하중이 낮아서 복합재의 강성변화는 거의 나타나지 않았지만, 익스텐소미터와 광강도형 광섬유센서(IB sensor)의 측정값은 거의 일치하였다.

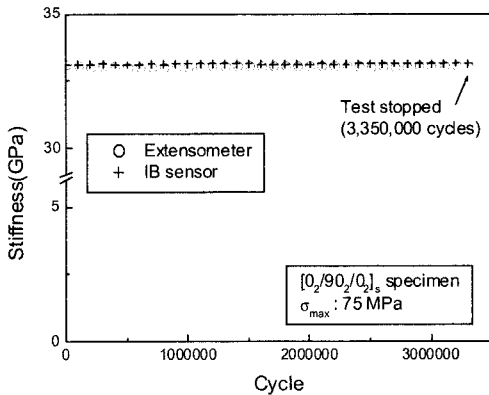


그림 10. 최대하중 75MPa(0.23%변형률)의 피로하중 하에서의 $[0_2/90_2/0_2]_s$ 시편의 강성 변화 측정 결과

Fig. 10 Results of measurements of stiffness change for $[0_2/90_2/0_2]_s$ 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 살펴보았다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 130MPa(0.4%의 변형률)과 150MPa(0.46%의 변형률)의 최대하중에 대한 강성 측정의 결과를 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 광강도형 센서는 익스텐소미터 신호와 매우 잘 일치하는 측정값을 보였으며, 시험초기에 기지 균열의 진전으로 인해 강성이 급격히 감소하다가 점차 강성저하 속도가 줄어드는 직교적층 복합재의 피로하중 하에서의 전형적인 강성변화 패턴을 잘 측정하였다. 광섬유센서가 파단될 때까지 전체 강성저하는 각각 약 10%와 14%를 보였다.

따라서, 광강도형 광섬유센서는 지능형 복합재 구조물의 강성의 변화를 실시간으로 검출할 수 있으며, 이를 이용하여 구조물의 피로손상을 감지할 수 있음을 알 수 있다. 또한 복합재 구조물의 설계시 임계변형률에 해당하는 0.4%정도의 비교적 큰 변형률 하에서도 250만 사이클 이상의 피로수명을 보임으로써 광섬유센

서의 내구성도 매우 우수함을 알 수 있었으며, 14% 정도의 강성변화에도 잘 동작하였으므로 센서의 동작범위도 넓다는 것을 알 수 있었다.

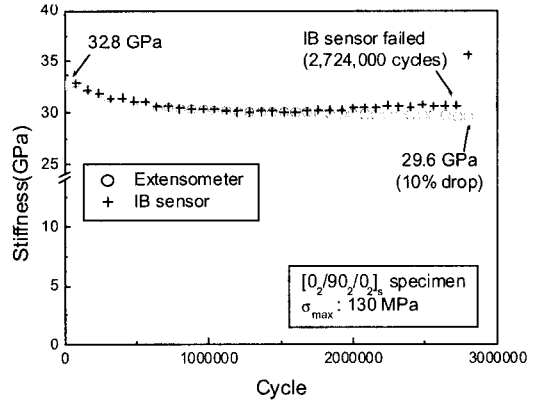


그림 11. 최대하중 130 MPa (0.4 % 변형률)의 피로하중 하에서의 $[0_2/90_2/0_2]_s$ 시편의 강성변화 측정 결과

Fig. 11 Results of measurements of stiffness change for $[0_2/90_2/0_2]_s$ specimen under fatigue load with a maximum stress of 130 MPa (0.4 % strain)

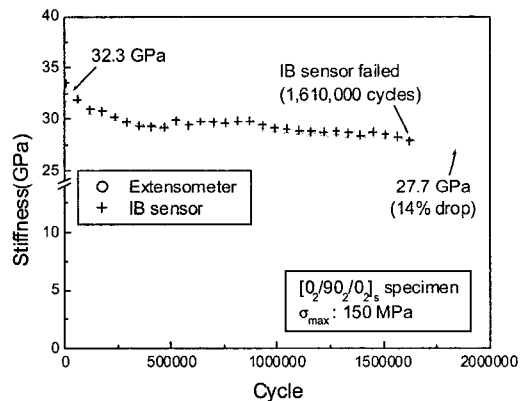


그림 12. 최대하중 150 MPa (0.46 % 변형률)의 피로하중 하에서의 $[0_2/90_2/0_2]_s$ 시편의 강성변화 측정 결과

Fig. 12 Results of measurements of stiffness change for $[0_2/90_2/0_2]_s$ specimen under fatigue load with a maximum stress of 150 MPa (0.46 % strain)

IV. 결 론

본 연구에서는 광섬유 센서를 삽입한 지능형 복합재 구조물을 응용하기에 앞서 광섬유 센서가 복합재 구조물의 정적 및 동적하중 하에서의 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 그리고, 직접 광섬유센서를 제작하고 복합적층판에 삽입한 후 피로하중 하에서의 강성변화를 측정하여 보았다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 작은 부피비를 갖는 광섬유 센서를 지능 복합재 구조물에 삽입한 경우에는 광섬유와 인접적층의 강화섬유와의 각도에 관계없이 광섬유의 삽입이 복합재 구조물의 정적인장하중 하의 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않는다.

(2) 동적 피로하중 하에서는 광섬유센서의 삽입으로 인해 일방향적층의 경우에는 피로수명의 저하가 그다지 크지 않으나 직교적층의 경우에는 피로수명이 현저히 저하된다. 또한, 삽입한 광섬유의 개수가 증가할수록 더 큰 영향을 미친다.

(3) 광강도형 광섬유센서는 비교적 단순하고 저렴한 장치구성과 쉬운 후처리 과정 등의 장점을 갖고 있으며, 지능형 복합적층판의 강성변화를 측정하여 피로손상을 감시할 수 있다. 또한 비교적 큰 피로하중 하에서도 내구성이 매우 우수하며 비교적 넓은 범위의 강성변화도 측정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. S. Thompson and M. V. Gandhi, Smart materials and structures technologies, Technomic Publication, Pennsylvania, 1990.
- [2] M. J. Salkind, Composite materials: Testing and design (second conference), ASTM STP 497, American society for testing and materials, p. 143, 1972.
- [3] A. Rotem, "Stiffness Change of a Graphite Epoxy Laminates under Reverse Fatigue Loading," Journal of composites technology and research, Vol. 11, No. 2, p. 59., 1989.
- [4] H. T. Hahn and R. Y. Kim, "Proof testing of composite materials," J. Comp. Mater., Vol. 9, p. 297, 1975.
- [5] A. L. Highsmith and K. L. Reifsnider, Damage in composite materials, ASTM STP 775, K. L. Reifsnider, Ed., American society for testing and materials, p. 103, 1982.
- [6] R. Talreja, "Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Composite Laminates," J. Comp. Mater, Vol. 19, 1985, p. 355, 1985.
- [7] H. T. Hahn, Composite materials: Testing and design (fifth conference), ASTM STP 674, S. W. Tsai, Ed., American society for testing and materials, p. 383, 1979.
- [8] J. N. Yang, S. H. Yang and D. L. Jones, "A stiffness-based statistical model for predicting the fatigue life of graphite/epoxy laminates," J. Comp. Tech. Res, Vol. 11, No. 4, p. 129, 1989.
- [9] J. N. Yang, L. J. Lee and D. Y. Sheu, "Prediction of fatigue life for matrix dominated composite laminates," Comp. Sci. Tech., Vol. 46, p. 21, 1993.
- [10] Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites, ASTM D3039-76, ASTM standards, ASTM international, vol. 15.03, pp. 117-120, 1998.
- [11] R. A. Badcock and G. F. Fernando, Proceedings of Smart Structures and Materials 1995: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation, SPIE Vol. 2444, pp. 422-431, 1995.

著 者 紹 介

이 동 춘(李東春)

1968년 10월 6일생.

1991년 한양대학교 공과대학 기계공학과 졸업(학사).

1993년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사).

2000년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사).

2000년 - 현재 (주) 삼성전자 근무.

주관심분야: 복합재 구조물, 광섬유센서

이 정 주

센서학회지 제 7권 4호 논문 98-7-4-08, p285참조 현

재 한국과학기술원 기계공학과 부교수

서 대 철(徐大喆)

1971년 5월 9일생.

1993년 한국과학기술원 과학기술대학 기계공학과 졸업
(학사).

1995년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1995 -

현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정.

주관심분야: 복합재 패치 수리, 광섬유센서

허 중 수

센서학회지 제 7권 4호 논문 98-7-4-08, p285참조 현

재 경북대학교 금속공학과 교수