

論文

광섬유센서를 삽입한 지능형 복합재 구조물의 피로특성

이동춘*, 이정주*

Fatigue Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors

D.C.Lee* and J.J.Lee*

ABSTRACT

To evaluate the effect of embedded optical fibers within the unidirectional and crossply specimens on the fatigue behavior of the laminates, fatigue tests were performed. The optical fibers embedded within the composite layer of the same direction have little influence on the fatigue life reduction, while the optical fibers embedded in the 90° direction to the adjacent ply cause the fatigue life reduction. For the unidirectional specimens, the splitting of laminates was initiated from the interfacial cracking due to the weak interfacial bonding strength between the optical fiber and matrix resin, and these effect on the fatigue life was not so significant. For the crossply specimens, the splitting of laminates was initiated from the stress concentration caused by embedded optical fibers and these effect of splitting in the crossply laminates on the fatigue life was relatively high compared to the unidirectional ply case.

초 록

광섬유를 삽입한 지능형 복합재 구조물의 피로특성에 대한 삽입된 광섬유의 영향을 고찰하기 위해, 일방향적층과 직교적층의 중립면에 각각 서로 다른 수의 광섬유를 삽입한 시편의 피로시험을 수행하였다. 그 결과, 삽입된 광섬유는 0° 층에 삽입되었을 경우(일방향적층)에는 복합적층판의 피로수명에 그다지 큰 영향을 미치지 않지만 90° 층에 삽입되었을 경우(직교적층)에는 복합적층판의 피로수명에 저하를 유발하는 것으로 나타났다. 일방향적층시편의 경우에는 광섬유와 레진 사이의 낮은 계면접착력으로 인해 계면균열이 발생되지만, 이러한 계면균열은 피로수명의 최종단계에서 발생하며, 피로수명에는 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 직교적층시편의 경우에는 삽입된 광섬유는 0° 층의 광섬유가 삽입된 위치에서 발생하는 응력집중이 스플리팅의 발생과 진전을 촉진시킴으로써 피로수명의 저하를 유발하게 된다.

1. 서 론

최근 구조물 내에 감지기능, 동작기능, 판단기능을 부여하여 구조물 자신이 사용하중 하에서 변형 및 손

상 등을 검출하고, 그에 대응하여 일정한 동작을 수행하도록 한 지능형구조물(smart structure)[1]에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 구조물에 감지기능을 부여하기 위해 삽입되거나 부착되는 형태로

*한국과학기술원 기계공학과

이용되고 있는 광섬유센서(optical fiber sensor)는 크기가 작고 유연하여 임의의 모양으로 삽입할 수 있고, 유전재료(dielectric materials)로 만들어져 전자기파(electromagnetic wave)의 영향을 받지 않으며, 다양한 환경조건에서 동시에 많은 물리량들을 정밀하게 측정할 수 있는 등의 장점이 있어 유망한 감지소재(sensing material)로서 주목받고 있다[1~3].

광섬유센서를 이용한 지능형 복합재 구조물은 항공기의 경량화와 안전성의 개선 및 더욱 편리하고 저렴한 유지, 보수를 가능하게 하고[4], 빌딩이나 교량과 같은 대형구조물의 적극적이고 효율적인 구조안전진단기법[5~7]으로 사용할 수 있는 등 그 응용분야가 매우 넓어, 현재 본격적인 적용을 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

광섬유센서를 이용한 지능형 구조물은 항공기를 비롯한 기타 경량화 및 고강도 특성을 요구하는 구조물에 널리 사용되고 있는 복합재료 내에 삽입된, 즉 지능형 복합재 구조물의 형태로 주로 연구가 진행되고 있다. 그런데, 광섬유의 직경(일반적으로 코팅(coating)을 제거하였을 때 $125\mu\text{m}$)이 복합재료 내에 쉽게 삽입될 수 있을 만큼 작다고는 하나, 강화섬유의 직경(탄소섬유는 약 $5\sim 10\mu\text{mm}$, 유리섬유는 약 $9\sim 13\mu\text{mm}$)이나 한 적층(ply)의 두께(일반적으로 약 $100\sim 300\mu\text{mm}$)에 비하면 상대적으로 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 이러한 광섬유의 삽입은 재료 내에 기하학적 불연속성(geometric discontinuity)을 유발하여 국부적인 변형률집중(local strain concentration) 현상을 유발할 수 있으며[8], 나아가 모재(host material)의 기계적 특성을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 따라서, 광섬유센서를 삽입한 지능형 구조물의 실제적인 응용을 위해서는 광섬유의 삽입이 모재(host material)인 복합재료의 기계적 특성(mechanical characteristics)에 미치는 영향에 대한 종합적인 검토가 요구되고 있다.

광섬유가 삽입된 복합적층판의 기계적 특성에 관한 연구는 1980년대 후반 이후 발표되기 시작하였다. 많은 연구들[9~15]이 정적하중(static load) 하의 기계적 특성에 관한 실험적 평가를 수행하였는데, 이들의 결과에 의하면 지능형 복합재 구조물에 삽입된 광섬유는 다양한 광섬유의 부피비(volume fraction), 직경, 삽입방향(orientation)에 대해서 압축강도를 제외하고는 구조물의 정적하중 하의 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 압축강도의 경우는 광섬유가 하중방향과 인접적층의 강화섬유에 모두 평행하게 삽

입되었을 경우에는 그다지 저하되지 않지만, 광섬유가 하중방향에 수직으로 삽입되거나 인접적층의 강화섬유와 수직으로 삽입되었을 경우에는 상당히 큰 저하를 보였다[10, 12].

삽입된 광섬유센서가 지능형 복합재 구조물의 충격 거동에 미치는 영향은 Sirkis 등[16]의 연구에서 보고된 바 있다. 그들은 서로 다른 코팅을 갖고 있는 $100\sim 600\mu\text{m}$ 의 다양한 직경의 광섬유가 삽입된 세 종류의 적층구성의 탄소섬유에폭시 복합적층판의 충격손상의 진전거동에 대해 고찰하였다. 그들의 연구결과를 보면 $600\mu\text{m}$ 정도의 큰 직경을 갖는 광섬유를 제외하면 광섬유의 삽입이 충격손상의 진전거동에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

광섬유가 삽입된 복합재 구조물의 피로하중 하에서의 기계적 특성에 관한 연구는 매우 제한된 범위에서 진행되어 왔다. Leka 등[17]은 광섬유가 삽입된 복합적층판에 십회의 피로 사이클(ten fatigue cycles)을 가한 후, 광섬유와 복합재 사이의 계면에서 σ (a) 큰 변화가 없음을 보고하였다. ... [18, 19]은 서로 다른 삽입방향의 광섬유가 삽입된 복합적층판에 대해 최대하중을 인장강도의 50%로 하여 인장-인장 피로시험(tension-tension fatigue test)을 수행하고, 모든 시편이 백만 사이클까지 파괴가 일어나지 않음을 보였다. 그 후 이 시편들의 잔류인장강도(residual tensile strength)를 측정하고 비교하였는데, 광섬유가 하중방향과 인접적층의 강화섬유에 모두 수직으로 삽입된 경우는 약 25% 정도의 잔류강도의 저하를 보였고 나머지는 모두 저하가 크지 않은 것으로 보고하였다. Roberts 등[20]은 삽입된 광섬유가 복합재 구조물의 저사이클 피로수명(low cycle fatigue life)에 미치는 영향에 대해 고찰하여 광섬유의 삽입이 직교적층판의 초기 피로거동에는 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다. 그러나, Roberts 등의 결과는 시험편의 수가 제한적이고 피로사이클이 모두 이만사이클(20,000 cycles) 이하에 국한되어 있다. Guemes 등[21]은 유리섬유폴리에스터(glass/polyester) 적층판의 정적 및 피로 층간전단강도(static and fatigue interlaminar shear strength)에는 광섬유의 삽입이 그다지 큰 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. 그런데, 이들의 시편은 단 하나의 광섬유만을 삽입하였으며 게다가 하중점에서 떨어진 곳에 광섬유를 삽입하였기 때문에 광섬유의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

그런데, 본 저자[22]는 광섬유가 삽입된 복합적층판

의 축방향 반복하중 하에서의 피로수명(fatigue life)에 미치는 영향에 관한 기초연구에서 광섬유로 인한 피로수명의 저하를 보고한 바 있다. 이 연구에서는 일방향적층(unidirection)과 직교적층(crossply)에 각각 서로 다른 수의 광섬유를 중립면(neutral plane)에 하중방향으로 삽입하고 피로수명을 측정하여, 삽입된 광섬유는 적층판의 피로수명에 상당히 큰 영향이 있음을 보였다. 그런데, 이 기초연구에서는 일방향적층의 경우에는 제한된 수의 시편만을 시험하여 광섬유의 영향에 대한 좀더 일반적인 결론은 내리기가 어려웠다.

그래서, 본 연구에서는 축방향 반복하중 하에서의 피로특성에 관한 좀더 폭넓은 고찰을 통해 광섬유의 삽입이 복합적층판의 피로수명에 미치는 영향을 알아보고, 파단메카니즘(fracture mechanism)과 피로수명과 의 관계에 대해 고찰해 보았다. 우선 일방향적층과 직교적층의 두 적층구성의 시편에 대해 각각 서로 다른 수의 광섬유를 삽입한 시편의 피로수명을 측정하고 서로 비교하여 삽입된 광섬유의 수와 방향에 따른 영향을 살펴 보았다. 그리고, 일방향적층시편의 파단면과 직교적층시편의 피로손상의 관찰, 직교적층시편의 하중반복수에 대한 기지균열간격(matrix crack spacing)의 변화와 강성(stiffness)변화의 측정, 그리고 유한요소해석을 통한 직교적층시편의 광섬유가 삽입된 위치에서의 응력집중현상에 대한 해석 등을 통하여 피로하중 하에서의 파단메카니즘과 피로수명과의 관계에 대해 고찰해 보았다.

2. 실험

2.1 시편의 제작 및 준비

본 연구에서 사용된 시편은 유리섬유에폭시 프리프 레그((주)선경인더스트리의 UGN-150)로 제작하였다. 유리섬유에폭시는 반투명한 성질을 갖고 있어 경화 후에 삽입된 광섬유의 위치를 확인할 수 있고, 기지균열(matrix crack), 스플릿팅(splitting) 등과 같은 재료 내의 손상의 발생이나 진전상황 등을 육안으로 쉽게 관찰할 수 있다. 시편의 적층구성(stacking sequence)은 일방향적층 $[0]_{12}_T$ 와 직교적층 $[0/90_4]_S$, $[0_2/90_4]_S$ 의 세 종류이고, 시편의 형상(Fig. 1)은 $[0]_{12}_T$, $[0_2/90_4]_S$ 시편의 경우에는 길이 $L=160\text{mm}$, 폭 $W=24\text{mm}$, 두께 $t=1.2\text{mm}$ 이고, $[0/90_4]_S$ 시편의 경우에는 길이 $L=200\text{mm}$, 폭 $W=24\text{mm}$, 두께 $t=1\text{mm}$ 인

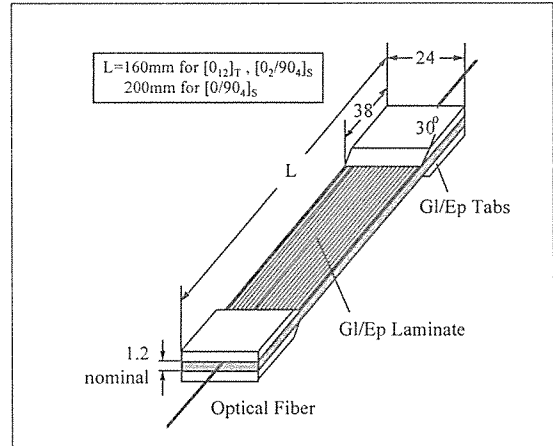


Fig. 1. Shape and dimension of a specimen

쿠펀(coupon)형태이다. 각 시편의 양단에는 길이 38mm의 유리섬유에폭시 하중탭(load tab)을 붙였다. 시편의 제작은 표준적인 경화과정을 따랐고, 적층판 간의 경화싸이클을 일정하게 하기 위해 프로그램이 가능한 오토클레이브를 이용하여 Fig. 2와 같은 경화싸이클에 따라 경화하였다.

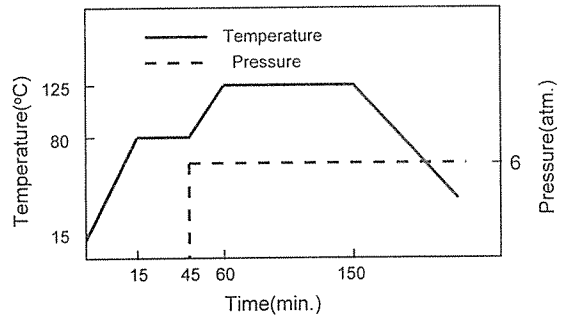


Fig. 2. Cure cycle of composite fatigue specimens with embedded optical fiber

사용된 광섬유는 싱글모드 DSF(single mode dispersion shifted fiber : (주)삼성전자의 DS-2 YAYH)로 코어직경은 $6.3\mu\text{m}$, 클래딩직경은 $124.6\mu\text{m}$, 피복직경은 $250\mu\text{m}$ 이며, 각 시편의 중립면에 하중방향으로 삽입하였다. 광섬유를 삽입할 때는 측정구간에 해당하는 부분의 피복을 아세톤을 이용하여 제거한 후 삽입하였다. 삽입된 광섬유의 개수는 $[0/90_4]_S$ 시편의 경우에는 다섯 종류(0, 1, 3, 5, 7개), $[0]_{12}_T$, $[0_2/90_4]_S$ 시편의 경우에는 네 종류(0, 1, 3, 5개)로 하고, 각 시편

Table 1. Configurations of the specimens and the embedded optical fibers for the fatigue test

Stacking sequence	No. of embedded optical fibers	Spacing between optical fibers	No. of tested specimens
Unidirectional specimens, $[0_{12}]_T$	0	—	12
	1	—	10
	3	6	11
	5	4	11
Crossply specimens, $[0_2/90_4]_S$	0	—	5
	1	—	6
	3	6	6
	5	4	6
Crossply specimens, $[0/90_4]_S$	0	—	5
	1	—	5
	3	6	5
	5	4	5
	7	3	5

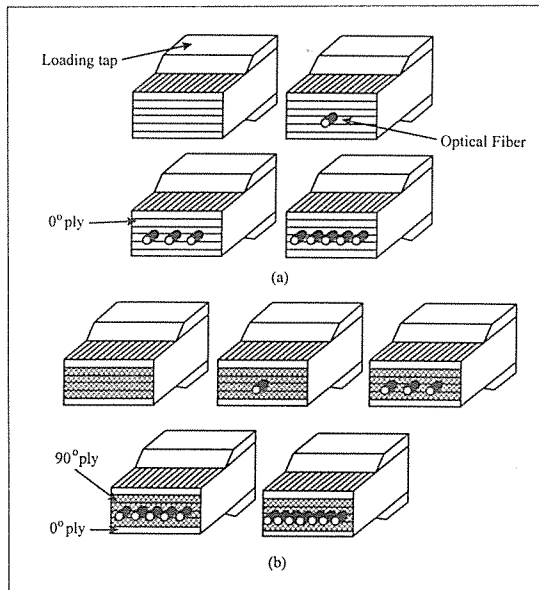


Fig. 3. Schematic diagram showing the location of embedded optical fibers: (a) unidirectional specimens, (b) crossply specimens

형상에 대해 6개 또는 12개씩의 시편을 제작하고 피로 시험을 수행하였다. 이 때, 광섬유는 시편 내에서 일정한 간격을 가지도록 배치하였다. Table 1에 적층구성과 삽입된 광섬유의 갯수와 광섬유의 삽입간격, 그리고

각 시편구성에 대한 시편갯수를 나타내었고, Fig. 3에 그림으로 표시하였다.

2.2 실험장치 및 방법

피로시험은 MTS 유압시험기를 이용하여 각 시편에 4Hz의 정현파형(sinusoidal waveform)의 인장반복 하중을 가하여 수행하였다. 피로시험은 우선 $[0/90_4]_S$ 시편으로 먼저 수행하였는데, 이 때 최대응력은 정적 인장시험에서 구한 기지균열 발생 임계응력인 87.5MPa보다 약 30% 정도 높은 114MPa로 하고 응력비는 0으로 하였다. 여기서 최대응력은 $[0/90_4]_S$ 시편의 정적인장강도의 약 50%에 해당한다. 그런데, 이 최대응력은 시편의 수명이 최대 십만사이클 정도로 너무 짧은 수명들을 보였다. 그래서, 광섬유를 넣지 않은 시편이 오십만~백만 사이클 정도의 수명을 갖도록 하기 위해 $[0_2/90_4]_S$ 시편은 최대응력을 160MPa, $[0_{12}]_T$ 시편은 최대응력을 600MPa로 정하였으며, 응력비는 시편에 압축응력이 걸리는 것을 방지하기 위해 0.1로 정하여 피로시험을 수행하였다. 이 때, 최대응력은 $[0_2/90_4]_S$ 시편의 경우에는 정적인장강도의 약 50%, $[0_{12}]_T$ 시편의 경우에는 약 60%에 해당되는 값이다.

피로하중 하에서의 파단 메카니즘과 피로수명과의 관계를 조사하기 위해 $[0_2/90_4]_S$ 시편의 시험 도중에 0° 층에 발생하는 스플릿팅의 사진을 찍어 해석하였으며, $[0_{12}]_T$ 시편의 경우에는 파단 후에 파단면의 사진을 찍어 해석하였다. $[0/90_4]_S$ 시편은 시험전에 표면에 40mm의 측정구간을 표시하고 시험을 수행하는 동안 미리 계획한 사이클마다 시편사진을 찍어 하중 반복사이클에 대한 기지균열간격을 측정하였다. $[0_2/90_4]_S$ 시편은 피로시험을 수행하는 동안 강성의 변화를 측정하였는데, 시험의 편의상 하중 대 변위 선도의 기울기를 강성으로 하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로수명

광섬유를 삽입한 지능형 복합재 구조의 축방향 반복 하중(axial fatigue loading) 하에서의 피로특성의 고찰을 위해 광섬유가 삽입된 여러 시편을 제작하고 피로수명을 비교하였다. Fig. 4~6에 각 시편의 피로수명(fatigue life)과 각 시편구성에 대한 피로수명의 평균값(average)과 표준편차(standard deviation)를 나타

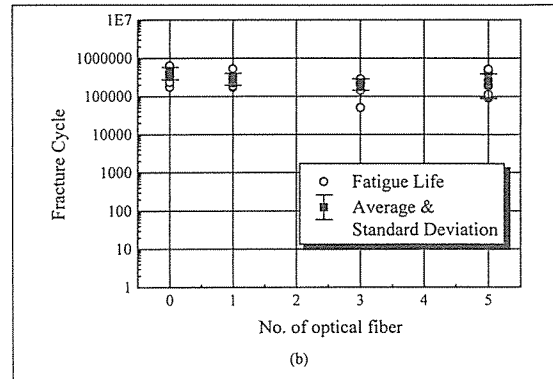
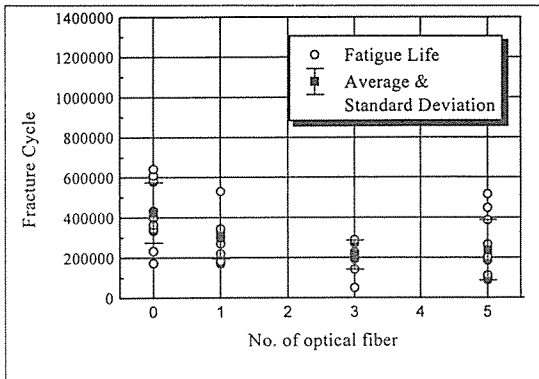


Fig. 4. Plots of fatigue life cycles versus the number of embedded optical fibers for the unidirectional specimens, $[0_{12}]_T$: (a) linear scale, (b) logarithmic scale

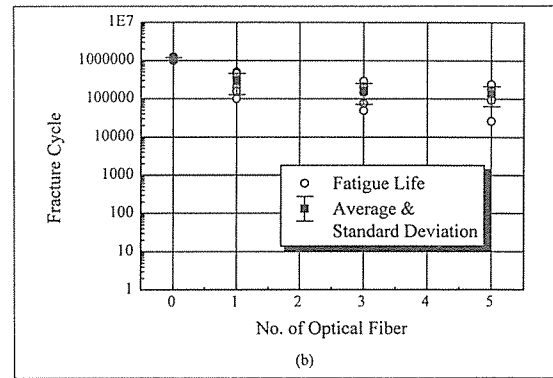
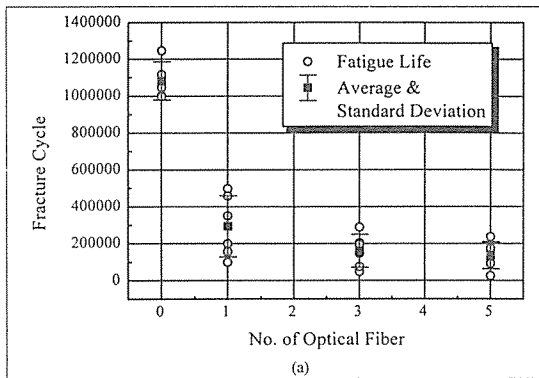


Fig. 5. Plots of fatigue life cycles versus the number of embedded optical fibers for the crossply specimens, $[0_2/90_4]_S$: (a) linear scale, (b) logarithmic scale

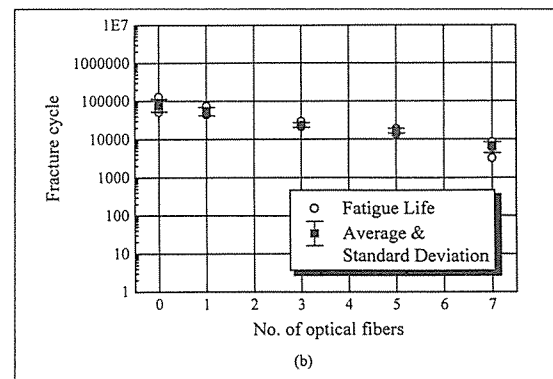
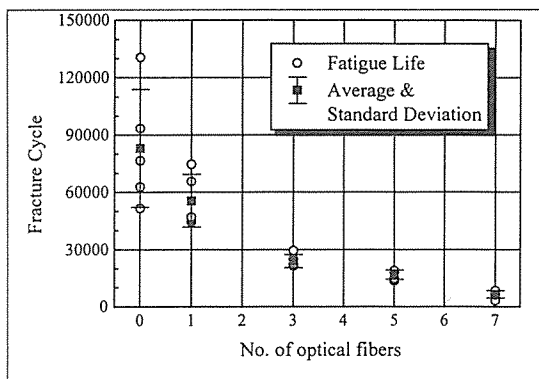


Fig. 6. Plots of fatigue life cycles versus the number of embedded optical fibers for the crossply specimens, $[0_2/90_4]_S$: (a) linear scale, (b) logarithmic scale

Table 2. Average values and standard deviation of the fatigue life data and life reduction ratio with respect to specimens without optical fiber for the unidirectional specimens, $[0]_T$

No. of embedded optical fibers	Average (cycle)	Standard deviation (cycle)	Life reduction ratio(%)
0	424,468	150681	—
1	298,090	102489	29.8%
3	214,500	72057	49.4%
5	237,690	149970	44.0%

Table 3. Average values and standard deviation of the fatigue life data and life reduction ratio with respect to specimens without optical fiber for the crossply specimens, $[0_2/90_2]_S$

No. of embedded optical fibers	Average (cycle)	Standard deviation (cycle)	Life reduction ratio(%)
0	1,081,767	103925	—
1	293,508	165934	72.9%
3	160,373	89226	85.2%
5	1368.44	73432	87.4%

Table 4. Average values and standard deviation of the fatigue life data and life reduction ratio with respect to specimens without optical fiber for the crossply specimens, $[0/90]_S$

No. of embedded optical fibers	Average (cycle)	Standard deviation (cycle)	Life reduction ratio(%)
0	83054	30864	—
1	55524	13744	33.1
3	23906	3466	71.2
5	16820	2405	79.8
7	6444	1981	92.2

내었고, Table 2~4는 각 시편구성에 대한 피로수명의 평균값과 표준편차 및 평균 피로수명의 저하율(reduction ratio)을 정리한 것이다. 각 시편구성의 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 피로수명이 더 저하되는 경향을 보이고 있다.

적층구성에 따른 차이를 비교해 보면, 일방향적층보다는 직교적층에 광섬유가 삽입되었을 때 더 큰 피로수명의 저하를 보인다. 이는 광섬유의 삽입으로 인한

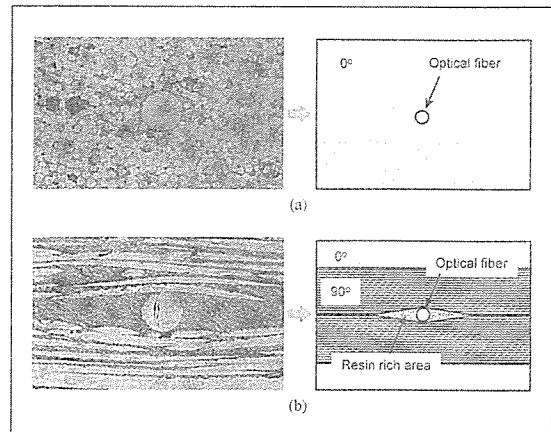


Fig. 7. Schematic diagrams of cross-section showing the geometric discontinuity around the embedded optical fiber, (a) a unidirectional specimen, (b) a crossply specimen

두 적층구성간의 기하학적 불연속성의 차이와 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, Fig. 7에서 보는 바와 같이 일방향적층에 광섬유가 삽입되었을 경우에는 인접적층의 강화섬유와 평행하므로 강화후 광섬유가 인접적층속으로 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. 이러한 현상은 이전의 다른 기계적 특성에 관한 많은 연구들에서도 나타나고 있다.

Table 2~4에서 평균 피로수명의 저하율을 살펴 보면, 일방향적층시편은 삽입된 광섬유의 수에 따라 약 30~50%의 수명저하를 보이고 있고, 직교적층시편은 약 30~90%까지의 저하를 보이고 있어 매우 큰 저하를 보이고 있다고 말할 수 있다. 그런데, 여기서 유의할 점은 일방향적층시편의 피로수명의 데이터의 흩어짐(scatter)의 정도이다. 일방향적층시편의 경우에는 데이터의 표준편차가 피로수명의 저하량과 비슷한 값을 보이는데, 이러한 큰 데이터의 흩어짐은 일방향적층시편의 피로수명 데이터의 전형적인 특징이다. 따라서, 일방향적층시편의 경우에는 큰 데이터의 흩어짐으로 인해 광섬유로 인한 피로수명의 저하가 크다고 쉽게 결론을 내리기는 어렵다. 일반적으로 피로수명의 비교에 흔히 쓰이는 피로수명의 축을 로그값으로 취한 그래프(Fig.

4~6)들을 살펴보면, 직교적층시편들과는 달리 일방향적층시편의 피로수명의 저하는 그다지 크지 않음을 볼 수 있다.

따라서, 이전의 여러 연구들과 마찬가지로 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 수직인 방향으로 삽입되는 경우는 피하여야 피로수명의 저하를 최소화할 수 있다.

3.2 파단메카니즘

앞에서 삽입된 광섬유는 삽입방향에 따라 복합적층판의 축방향 반복하중 하의 피로수명을 저하시킬 수 있음을 보았다. 이러한 피로수명의 저하의 원인과 파단 메카니즘을 살펴보기 위해 피로손상과 파단면을 조사해보았다.

Fig. 8은 일방향적층시편의 피로파단 후의 한 파단면을 보이고 있는데, 중앙에 삽입된 광섬유를 볼 수 있다. 광섬유는 파단 후에도 그 표면이 깨끗하게 보이는데, 이는 광섬유와 레진 사이의 접착력이 강하지 않음을 의미한다. 또한 파단면은 시편의 폭방향과 수직인 면을 이루고 있음을 볼 수 있었다. 따라서, Fig. 9에서 보는 바와 같이, 피로하중이 가해짐에 따라 접착력이 약한 광섬유와 레진 사이의 계면에서 균열이 발생하고 이 균열이 진전하여 복합재의 강도저하 및 파단이 시작되어 최종파단에 이르게 된다고 생각할 수 있다. 따라서, 광섬유를 삽입하지 않은 시편보다 광섬유를 삽입

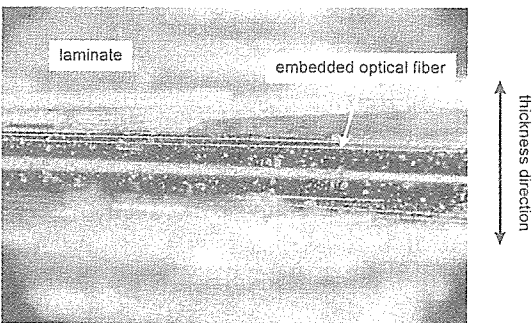


Fig. 8. Photograph of the fractured surface of a unidirectional specimen

한 시편이 피로손상의 발생 및 진전이 촉진될 것이며, 광섬유의 수가 많을수록 더 촉진될 것이다. 그러나, 광섬유와 레진 사이에서 발생한 균열은 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 두께 방향으로 진전하므로 광섬유의 갯수가 많은 경우에도 각각의 광섬유에서 발생한 균열의 상호작용, 즉 균열의 합체가 발생하지 않으므로 삽입된 광섬유의 수에 의한 피로손상의 정도의 차이는 적은 것으로 생각된다. 또한, 일방향적층시편의 경우 이러한

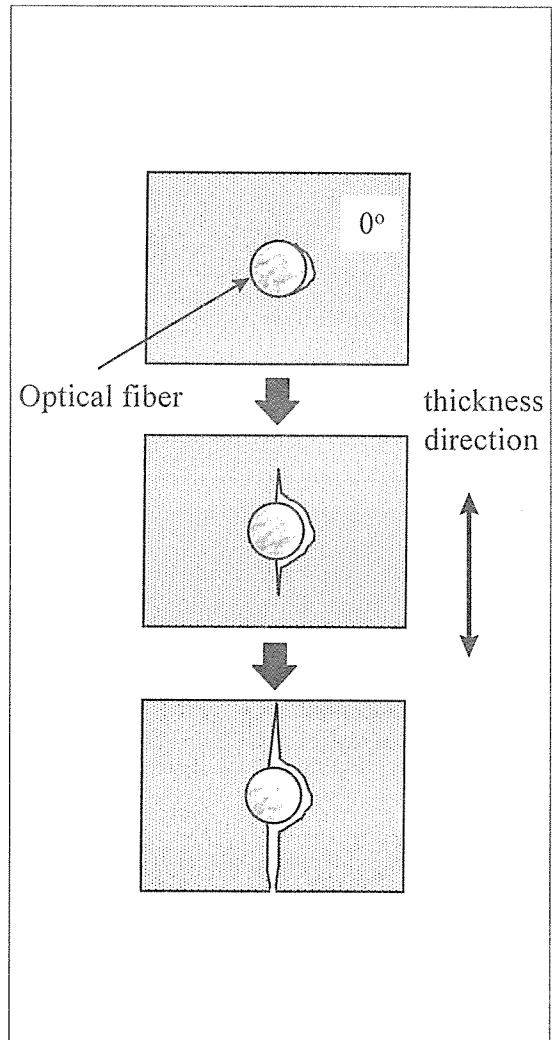


Fig. 9. Schematic diagrams showing the process of initiation and growth of the interfacial crack between the embedded optical fiber and resin in the unidirectional specimen

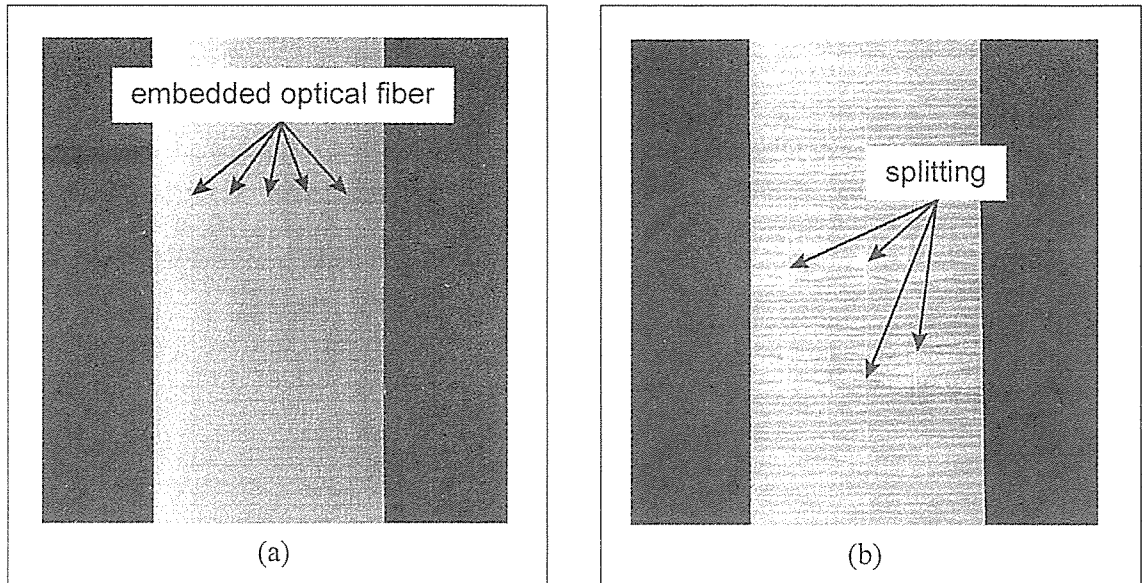


Fig. 10. Photographs of a crossply specimen with 5 embedded optical fibers showing the splitting growth at the location of the embedded optical fibers : (a) before the splittings are formed, (b) after the splittings are formed

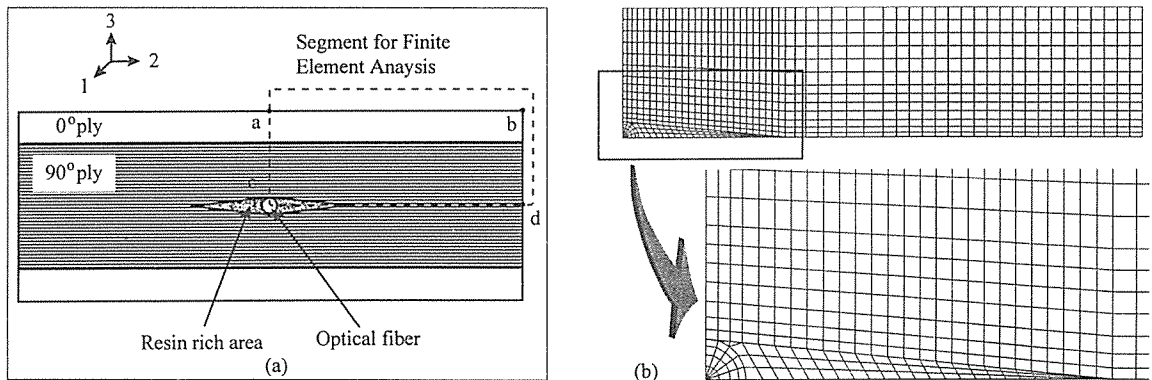


Fig. 11. Modelling used in the finite element analysis. (a) schematic diagram for cross-section of a crossply specimen with an embedded optical fiber, (b) model for finite element analysis

손상은 피로수명의 최종단계에서 발생하며, 앞의 피로 수명에 관한 결과와 함께 고려해 볼 때 이러한 현상이 피로수명에는 그다지 큰 영향을 미치는 것 같지는 않다. 하지만, 광섬유가 구조물의 변형이나 온도 등을 측정하는 센서로서 사용될 때에는 광섬유와 레진 사이에 계면균열이 발생하면 실제값과 광섬유센서의 측정값 사이에 오차가 발생할 수 있으므로, 광섬유와 레진 사이의 접착력을 높일 수 있는 코팅기술이나 표면처리기술에 대한 연구와 각각의 피로특성에 미치는 영향에

대한 연구가 요구된다.

직교적층시편의 피로수명의 저하의 원인은 피로손상의 관찰로부터 찾을 수 있다. Fig. 10는 직교적층시편의 0°층에 스플리팅(splitting)이 발생하는 초기단계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 스플리팅의 발생위치가 광섬유의 삽입위치와 일치함을 볼 수 있는데, 이는 스플리팅이 광섬유가 삽입된 위치에서 가장 먼저 발생함을 의미한다. 즉, 광섬유의 삽입으로 인하여 스플리팅이 더 빨리 발생하고, 이로 인해 광섬유를 삽

입한 시편의 피로수명이 저하된다고 할 수 있다.

삽입된 광섬유의 수에 따른 영향은 삽입된 광섬유의 수가 증가할수록 피로수명이 더 저하되는 경향을 보이지만 그 차이는 그다지 크지 않은데, 이는 스플릿팅이 두께방향으로 발생하는 손상이므로 광섬유의 갯수가 많은 경우에도 각각의 광섬유에서 발생한 균열의 상호작용, 즉 균열의 합체가 발생하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

광섬유를 삽입한 위치에서 스플릿팅이 가장 먼저 발생하는 이유를 알아 보기 위해 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 0° 층의 응력분포를 구해 보았다. Fig. 11에서 나타낸 바와 같이, 해석에 사용된 모델은 중앙에 광섬유가 삽입된 시편의 단면을 일반화된 평면변형을 요소(generalized plane strain element)로 모델링한 것이다. 이 때, 사용된 요소의 수는 785개이고, 절점의 수는 2484개였다. 유리섬유복합재료는 직교이방성재료라고 가정하였으며, 모재모임영역과 광섬유는 등방성재료로 가정하여 해석하였으며, 광섬유 주위의 모재모임영역을 제외한 복합재료의 영역에서는 섬유체적비가 일정하다고 가정하였다. 해석에 사용된 각 재료의 물성치는 다음과 같다.

GFRP	$E_1=40.0\text{GPa}$	$\nu_{12}=0.25$	$G_{12}=4.0\text{GPa}$
	$E_2=8.0\text{GPa}$	$\nu_{13}=0.25$	$G_{13}=4.0\text{GPa}$
	$E_3=8.0\text{GPa}$	$\nu_{23}=0.5$	$G_{23}=4.0\text{GPa}$

Optical fiber $E=71.0\text{GPa}$ $\nu=0.14$

Resin $E=3.4\text{GPa}$ $\nu=0.34$

이 모델에 대해 면에 수직한 방향 즉 축방향으로 1%의 변형률에 해당하는 일장변위를 가하였을 때의 응력분포를 구하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 (a)는 광섬유를 지나는 두 축과 시편표면에서의 응력의 분포를 비교해 보았다. 우선 c-d경로의 σ_{33} 는 모재모임 영역에서만 약간의 인장응력이 발생하나 이외의 영역에서는 거의 응력이 발생하지 않으며, 0° 층에서의 σ_{22} 와 비교해 볼 때 낮은 응력상태를 보이고 있다. 그러므로 90° 층에서 발생하는 층간분리보다 0° 층에서 스플릿팅이 먼저 발생하게 될 것이다. 스플릿팅의 발생에 가장 큰 영향을 미치는 σ_{22} 의 분포를 보면 0° 층에서 인장응력이 발생함을 볼 수 있으며, a-b경로에서의 분포를 보면 광섬유의 위치에서 다른 곳보다 조금 높은 응력이 발생함을 알 수 있다. 광섬유의 위치에서 발생하는 응력의 집중의 정도를 알아보기 위해 Fig. 12 (b)와 같이 a-b경로에서의 σ_{22} 의 분포를 정규화(normalization)하여 표시해 보았다. 그래프에서 X축은 시편폭에 대한 광섬유로부터 떨어진 거리의 비율로 표시하였고, Y축은 광섬유의 영향과 가장자리의 영향이 없는 위치($d/w=0.4$ 부근)에서의 응력에 대한 비율로 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 광섬유로부터 떨어진 부근의 응력보다 광섬유의 위치인 a점에서 약 15% 정도의 인장응력의 집중이 있음을 알 수 있다. 따라서, 광섬유가 삽입된 위치에서 스플릿팅의 발생 및 진전이 촉진되어, 시편의 피로수명저하를 유발하게 된다고 할 수 있다. 그림에서 광섬유에서 먼 곳에서의 응력의 저하는 가장자리의 영향(edge effect)에 기인한다.

3.3 기지균열간격과 강성저하

기지균열간격(matrix crack spacing)은 직교적층시

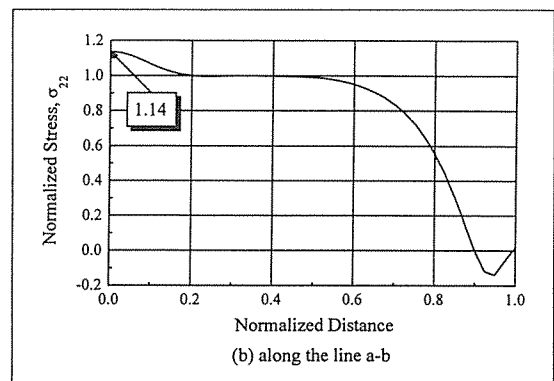
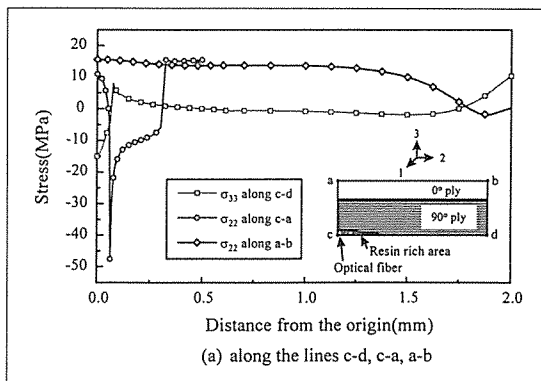


Fig. 12. FEM results showing the stress concentration in 0° ply at the location of the embedded optical fiber

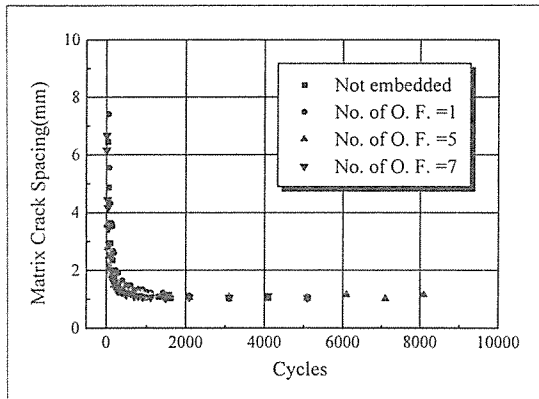


Fig. 13. Changes of the matrix crack spacings versus the fatigue cycles for crossply specimens, $[0/90_4]_s$, with different number of embedded optical fibers

편, $[0/90_4]_s$ 의 피로시험을 수행하는 동안 미리 계획된 싸이클에서 찍은 시편사진을 이용하여 구하였다. 서로 다른 수의 광섬유를 가진 시편형상들의 기지균열간격을 비교하기 위해 Fig. 13에 동시에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 피로수명과는 달리 기지균열간격은 삽입된 광섬유에 큰 영향을 받지 않았다. 그러므로, 광섬유의 삽입은 피로하중 하에서 기지균열의 발생 및 진전에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그리고, 직교적층시편, $[0_2/90_4]_s$ 의 경우에는 시험을 수행하는 동안 강성변화를 측정하여 보았는데, 시험의 편의를 위해 하중 대 변위의 기울기를 강성으로 하여 측정하였다. Fig. 14에서 보는 바와 같이, 기지균열의 발생으로 인한 급격한 강성저하(단계 I), 층간분리 및 미소균열의 발생으로 인한 완만한 강성변화(단계 II) 그리고 스프릿팅의 발생 및 성장으로 인한 빠른 강성저하 및 최종파단(단계 III)으로 이어지는 전형적인 직교적층의 피로하중 하의 강성변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 단계 III에 이르기 전에는 강성변화에 광섬유의 삽입으로 인한 영향은 거의 없었다. 그러므로, 앞서 살펴 본 바와 마찬가지로 단계 I의 주된 강성저하의 원인인 기지균열의 발생 및 진전 그리고 단계 II의 주된 강성저하의 원인인 층간분리의 발생 및 진전에도 광섬유가 그다지 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 그러나, 단계 III은 광섬유가 삽입되었을 경우 그리고 광섬유의 수가 많을수록 빨리 일어나는데, 이는 광섬유의 삽입으로 인한 응력집중으로 인해 스프릿팅의 발생과 진전이 촉진되기 때문인 것으로 생각되며 이로 인해 복합적층판의 피로수명의 저하가 발생한다

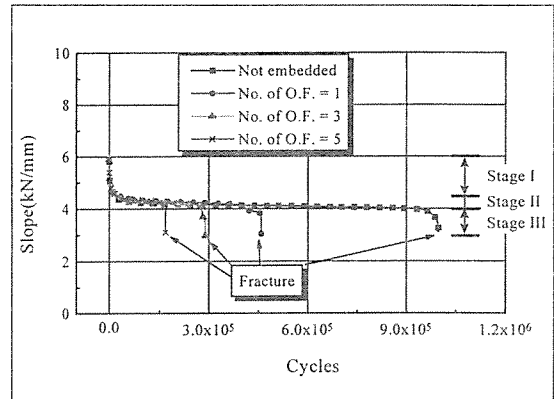


Fig. 14. Stiffness changes versus the fatigue cycles for the crossply specimens, $[0_2/90_4]_s$, with different number of embedded optical fibers

고 말할 수 있다.

여기서, Jensen 등[18, 19]의 연구결과에 주목해 볼 필요가 있다. 그들은 광섬유를 하중방향과 평행 또는 수직방향으로, 그리고 각각의 경우에 대해 인접적층의 강화섬유와 평행 또는 수직방향으로 삽입한 복합적층판에 정적인장강도의 50%에 해당하는 인장-인장 피로하중을 가한 실험을 수행하였는데, 모든 시편이 백만 싸이클에서도 파괴가 일어나지 않았다. 피로시험 이후, 시편들의 잔류인장강도를 측정하였는데, 광섬유가 하중방향과 그리고 인접적층의 강화섬유에 모두 수직인 경우만 약 25% 정도의 저하를 보였으며, 본 연구에서 사용된 직교적층시편과 같은 경우인 하중방향과는 평행하게 그리고 인접적층의 강화섬유와 수직으로 삽입된 경우는 그다지 저하가 크지 않았다. 이러한 결과들은 본 연구결과와 비교하여 고려해 볼 때 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. 즉, 모든 시편은 백만 싸이클에서도 파괴가 일어나지 않았으므로 광섬유의 삽입으로 인한 영향이 나타나는 영역인 단계 III에 이르지 못하였다. 그러므로, 피로하중을 받은 모든 시편은 피로손상의 정도가 비슷하였을 것이며, 따라서 잔류인장강도에도 그다지 큰 영향이 없었을 것이다. 또한 광섬유가 하중방향과 그리고 인접적층의 강화섬유에 모두 수직인 시편의 잔류인장강도의 저하는 삽입된 광섬유로 인한 피로손상의 증가에 의한 원인도 있을 수 있으나 그것보다는 기하학적인 불연속성이나 응력집중에 의한 원인에 더 큰 영향을 받은 것이라고 생각된다.

이상에서 살펴 본 바와 같이, 삽입된 광섬유는 피로하중 하에서 기지균열의 발생과 진전에는 그다지 큰

영향을 미치지 않으며, 주로 스프링의 발생과 진전을 촉진시킴으로써 피로수명의 저하를 유발하게 된다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유의 삽입이 복합적층판의 축방향 반복하중 하에서의 피로특성에 미치는 영향에 대해 고찰해 보기 위해 광섬유를 삽입한 시편을 제작하고 피로시험을 수행하였다. 그리고, 삽입된 광섬유가 파단 메카니즘에 어떤 영향을 미치는지 고찰해보고 피로수명저하의 원인에 대해 살펴보았다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 삽입된 광섬유는 0° 층에 삽입되었을 경우(일방향 적층)에는 복합적층판의 피로수명에 그다지 큰 영향을 미치지 않지만 90° 층에 삽입되었을 경우(직교적층)에는 복합적층판의 피로수명에 저하를 유발할 수 있다. 이는 0° 층에 삽입되었을 경우보다 90° 층에 삽입되었을 때 모재모입영역과 같은 더 큰 기하학적 불연속성을 갖기 때문이다.

2. 일방향적층시편의 경우에는 평균 피로수명의 저하율이 크다 하더라도 데이터의 표준편차가 매우 커서 삽입된 광섬유로 인한 피로수명의 저하가 크다고 쉽게 결론을 내리기는 어렵다. 따라서, 광섬유센서를 복합적층판에 삽입할 때에는 광섬유센서의 삽입방향과 평행한 방향의 적층에 삽입하여야 피로수명의 저하를 최소화할 수 있다고 할 수 있다.

3. 일방향적층시편의 경우에는 광섬유와 레진 사이의 낮은 계면접착력으로 인해 계면균열이 발생되지만, 이러한 계면균열은 피로수명의 최종단계에서 발생하며 피로수명에 관한 결과와 비교하여 고려해 볼 때 피로수명에는 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 직교적층시편의 경우에는 삽입된 광섬유는 기지균열의 발생과 진전에는 그다지 큰 영향을 미치지 않으며, 0° 층의 광섬유가 삽입된 위치에서 발생하는 약 15% 정도의 응력집중이 스프링의 발생과 진전을 촉진시킴으로써 피로수명의 저하를 유발하게 된다.

참 고 문 헌

1. Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., "Smart

Materials and Structures Technologies," Technomic Publication, Pennsylvania, 1990, pp. 1-19.

2. Claus, R. O., "Overview of Fiber Optic Sensor-Based Smart Materials and Structures," Proc. of the Conference on Optical Fiber Sensor-Based Smart Materials and Structures, edited by Claus, R. O., held at Blacksburg, Virginia, 1991, p. 3.

3. Fukuda, T., Osaka, K. and Kitade, S., "Measurement of Strain and Detection of Cracking in Graphite Epoxy Composite with Embedded Optical Fibers," J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol. 42, No. 474, 1993, p. 269.

4. Sendeckyj, G. P. And Paul, C. A., "Some Smart Structures Concepts," Proceedings of SPIE Fiber Optic Smart Structures and Skins II, Vol. 1170, 1989, pp. 2-10.

5. Lou, K., Yaniv, G., and Hardtmann, D., "Fiber Optic Strain Monitoring of Bridge Column Retrofitted with Composite Jacket under Flexural Loads," Proceedings of Smart Structures and Materials 1995 : Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, SPIE Vol. 2446, pp. 16-24, 1995.

6. Habel, W. R. and Hillemeier, B., "Results in Monitoring and Assessment of Damages in Large Steel and Concrete Structures by means of Fiber Optic Sensors," Proceedings of Smart Structures and Materials 1995 : Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, SPIE Vol. 2446, pp. 25-36, 1995.

7. Griffiths, R. W., "Structural Integrity Monitoring of Bridges Using Fiber Optics," Proceedings of Smart Structures and Materials 1995 : Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, SPIE Vol. 2446, pp. 127-138, 1995.

8. Singh, H., Sirkis, J. S., and Dasgupta, A., "Micro-Interaction of Optical Fibers Embedded in Laminated Composites," Fiber Optic Smart Structures and Skins IV, SPIE, Vol. 1588, 1991, pp. 76-85.

9. Measures, R. M., Glossop, N. D. W., Lymer, J., Leblanc, M., West, M., Dubois, S., Tsaw, W. and Tennyson, R. C., "Structurally Integrated

Fiber Optic Damage Assessment System for Composite Materials," *Applied Optics*, Vol. 28, No. 13, 1989, pp. 2626-2633.

10. Jensen, D. W. and Pascual, J., "Degradation of Graphite/Bismaleimide Laminate with Multiple Embedded Fiber Optic Sensors," *Fiber Optic Smart Structures and Skins III*, SPIE, Vol. 1370, 1990, pp. 228-237.

11. Jensen, D. W., Pascual, J. and August, J. A., "Performance of Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Tension," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 1, 1992, pp. 24-30.

12. Jensen, D. W., Pascual, J. and August, J. A., "Performance of Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers. Part I: Uniaxial Compression," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 1, 1992, pp. 31-35.

13. Holl, M and Boyd, S., "The Effect of Embedded Fiber Optics on the Mechanical Properties of a Composite Host Material," *Smart Materials*, SPIE, Vol. 1916, 1993, pp. 109-117.

14. Roberts, S. S. and Davidson, R., "Mechanical Properties Composite Materials Containing Embedded Fiber Optic Sensors," *Fiber Optic Smart Structures and Skins IV*, SPIE, Vol. 1588, 1991, pp. 326-341.

15. Lee, D. C., Lee, J. J., and Yun, S. J., "The Mechanical Characteristics of Smart Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 39-50.

16. Sirkis, J. S., Chang, C. C., and Smith, B. T., "Low Velocity Impact of Optical Fiber Embedded

Laminates Graphite/Epoxy Panels. Part I: Macro-Scale," *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 14, 1994, pp. 1347-1370.

17. Leka, L. G. And Bayo, E., "A Close Look at the Embedment of Optical Fibers into Composite Structures," *Journal of Composites Technology and Research*, JCTRE, Vol. 11, No. 3, 1989, pp. 106-112.

18. Jensen, D. W. and Brzenchek, D. J., "Fatigue of a Composite Laminate with Embedded Optical Fibers," *Proceedings of the 7th international conference on Experimental Mechanics*, Las Vegas, 8-11 June 1992, pp. 1319-1325.

19. Udd, E., Eds., *Fiber Optic Smart Structures*, New York, Wiley, 1995, p. 116.

20. Roberts, S. S. J. and Davidson, R., "Short Term Fatigue Behavior of Composite Materials Containing Embedded Fiber Optic Sensors and Actuators," *First European Conference on Smart Structures and Materials*, B. Culshaw, P. T. Gardiner, and A. McDonach, Eds., Institute of Physics Publishing, Bristol, 1992, pp. 255-262.

21. Guemes, A. and Menendez, J. M., "Fatigue Strength of Glass Reinforced Polyester (GRP) Laminates with Embedded Optical Fibers," *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Materials*, Lyon, 1996, pp. 217-221.

22. Lee, D. C. And Lee, J. J., "Fatigue Behavior of Composite Structures with Embedded Optical Fiber Sensors," *10th International Conference on Composite Material*, Vol. 5, Vancouver, 1995, pp. 307-314.