

論文

삽입된 광섬유센서가 복합적층판의 횡방향 균열간격에 미치는 영향

서대철* · 이정주* · 홍창선**

Effect of Embedded Optical Fiber Sensors on Transverse Crack Spacing of Composite Laminates

D.C. Seo*, J.J. Lee* and C.S. Hong**

ABSTRACT

In this study the effect of the presence of embedded optical fiber sensors on the transverse cracking of cross-ply laminates was investigated. The transverse crack spacing of cross-ply laminates with embedded optical fiber sensors was predicted using modified shearlag analysis considering the presence of optical fibers and compared with experimental results. The effect of the orientation and quantity of optical fibers was evaluated and the effect of coating of optical fiber was also investigated. Specimens were made with transparent Glass/Epoxy prepreg because the transverse crack and other damages such as delamination, splitting and bleeding of laser can be examined directly and visually. It has been found that the transverse crack spacing was not affected significantly by the embedding of optical fibers at low volume fraction of optical fibers. However, the following trend was found that specimens with embedded optical fibers showed earlier crack initiation and smaller crack spacing than specimens without embedded optical fibers. The theoretical crack spacing evaluated from the shear lag analysis showed good agreements with experimental results.

초 록

광섬유 복합재료내에 직접적으로 삽입되어서 손상검출 혹은 진정성감시를 할 수 있는 지능형 구조물을 제작하는데 유용한 센서로서 사용되고 있다. 그러나 광섬유의 직경은 복합재료 강화섬유의 직경보다 훨씬 크기 때문에 삽입된 광섬유가 주재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 종합적인 연구가 요구된다. 본 연구에서는 삽입된 광섬유센서가 직교적층판의 대표적인 파괴양상인 횡방향 균열에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 삽입된 광섬유를 가지는 직교적층판의 균열간격은 삽입된 광섬유의 존재를 고려한 수정된 shear-lag 해석을 통해 예측되었고 인장실험을 통한 실험값과 비교되었다. 삽입된 광섬유의 방향과 수량에 따른 영향도 평가 되었고 광섬유 코팅의 유무에 따른 영향도 고찰되었다. 시편은 횡방향 균열(transverse crack), 층간분리(delamination), 분할

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 항공우주공학과

(splitting), 레이저 신호의 누출(bleeding of laser signal) 등의 손상의 발생여부와 진전상황등을 직접적으로 관찰할 수 있는 투명한 유리섬유에폭시 프리프레그로 제작되었다. 삽입된 광섬유의 체적함유율이 작을 때는 광섬유가 횡방향 균열간격에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다. 그러나, 광섬유가 삽입된 시편은 광섬유를 삽입하지 않은 시편보다 약간 낮은 응력레벨에서 균열이 발생하였고 같은 응력레벨에서는 더 작은 균열간격을 보였다. shear-lag 해석을 통해 예측한 이론적인 균열간격은 실험값과 잘 일치 하였다. 광섬유의 방향과 코팅의 유무도 균열 간격에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다.

1. 서 론

광섬유센서는 구조물 스스로가 내부변형상태 및 손상 등을 감지, 진단하여 능동적으로 대처할 수 있는 지능형구조물(smart structure)의 응용에 있어서 다른 형태의 센서에 비해 많은 장점들을 가지고 있다. 광섬유센서는 복합재의 강화섬유와 물성치가 비슷하고, 광섬유의 직경이 작고 유연하여 복합재료 내에 쉽게 삽입될 수 있으며, 다양한 범위의 환경 조건에서 사용가능하며, 유전재료(dielectric material)인 석영유리로 만들어지므로 전자기파의 영향을 받지 않으며, 감도가 뛰어나고, 여러 위치에서 동시에 많은 물리량들을 종합적으로 측정할 수 있는 점등의 장점을 갖고 있다. 광섬유센서는 손상검출(damage detection) 혹은 건강성감시(health monitoring)를 할 수 있는 센서 네트워크(network)를 구성하기 위해 복합재료내에 직접적으로 삽입될 수 있다. 그러나, 광섬유의 직경은 약 125~250 μm 정도로 매우 작지만 복합 적층판의 강화 섬유 직경(예를 들어 탄소섬유 5~10 μm 유리섬유 17 μm) 또는 한 적층의 두께(약 120~300 μm)에 비하면 상대적으로 크다고 할 수 있다. 따라서, 광섬유센서가 구조물의 진전성과 손상 등을 검출하기 위해 복합재료 내에 쉽게 삽입될 수 있다고는 하나, 이러한 광섬유센서의 삽입은 복합재료의 기계적 특성을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있으므로, 복합재료내에 삽입된 광섬유가 주재료(host material)의 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 종합적인 연구 및 해석이 요구된다.

광섬유를 삽입한 복합재료의 인장과 압축 하중 하에서의 거동에 대한 여러 연구가 Jensen *et al.* [1~3]과 Measures *et al.* [4]에 의해 수행되었다.

그들의 연구에 의하면 광섬유는 인장거동에 약간에 영향을 미치고 압축거동에는 상당한 영향을 미친다. 그러나 그들의 연구는 제한된 기계적 성질과 시험 환경만을 다루고 있다.

횡방향균열(transverse crack)은 복합재료의 여러 파괴양상(failure mode) 즉, 강화섬유파단(matrix crack), 기지균열(delamination) 층간분리(low-strain damage) 중에서 직교적층판에서 가장 먼저 일어나는 저 변형률 손상(low-strain damage)이다. 직교적층판에 대한 shear-lag 모델의 공식화(formulation)는 Bailey등[5~7]에 의해 제기 되었다. 이들의 연구는 일방향적층판에 대한 Aveston and Kelly[8]의 연구에 의존하고 있다. shear-lag 모델에 대한 연구는 Wang[9], Highsmith and Reifsnider[10], Flaggs and Kural[11]등에 의해 이어졌다.

본 연구에서는 광섬유를 삽입한 지능형 복합재 구조물에 있어서 삽입된 광섬유가 직교적층판의 대표적인 파괴양상인 횡방향균열에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 유리섬유에폭시 복합재료를 이용하여 적층구성과 삽입된 광섬유의 갯수, 방향, 코팅유무를 달리해 가면서 삽입된 광섬유가 횡방향균열에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 삽입된 광섬유의 존재를 고려한 shear-lag 해석을 통해 횡방향균열 간격을 예측하고 실험치와 비교하였다.

2. 광섬유가 삽입된 직교적층판의 shear-lag 해석

일방향적층판(unidirectional laminate)에서 기지재료의 파괴변형률 ϵ_{mu} 가 강화섬유의 파괴변형률 ϵ_{fu} 보다 작다면 다수의 기지균열이 발생하게 된다.

그러나, 직교적층판에서는 ϵ_{mu} 가 ϵ_{fu} 보다 크지만 횡방향적층(transverse ply)에서 다수의 횡방향균열(transverse crack)이 발생하게 된다. 이것은 횡방향적층이 높은 파괴변형률의 재료 사이에 끼어 있는 낮은 파괴변형률의 재료와 같이 행동하기 때문이다.

광섬유의 파괴변형률은 약 1.4~1.5%로 횡방향적층의 파괴변형률 0.4~0.5% 보다 크기 때문에 삽입된 광섬유도 길이방향적층(longitudinal ply)과 마찬가지로 높은 파괴변형률을 가진 재료로 행동하게 된다. 따라서 횡방향적층내에 광섬유를 삽입하게 되면 횡방향적층은 길이방향적층과 광섬유 사이에 끼어 있는 낮은 파괴변형률을 가진 재료로 행동하게 된다.

Fig. 1에 이하의 이론적인 해석에 사용된 모델을 나타내었다. 횡방향적층은 취성(brittle) 재료이기 때문에 일정한 파괴변형률 ϵ_{tu} 와 인장강도(tensile strength) σ_{tu} 를 가진다고 가정할 수 있다. 만약 하중이 길이방향적층과 같은 방향으로 가해진다면

횡방향적층은 σ_{tu} 에서 파괴되게 된다. 이 때 횡방향적층이 지탱했던 하중은 길이방향적층과 광섬유에 전가되게 된다. 만약 다음의 부등식이 만족된다면 다수의 균열이 횡방향적층에서 발생하게 된다.

$$\sigma_{lu} v_l + \sigma_{ofu} v_{of} \geq \sigma_{tu} v_t + \sigma'_t v_l + \sigma'_{of} v_{of} \quad \cdots (1)$$

여기서 σ'_t 와 σ'_{of} 는 각각 횡방향적층이 파괴되었을 때의 길이방향적층과 광섬유의 응력이다. σ_{lu} 와 σ_{ofu} 는 각각 길이방향적층과 광섬유의 인장강도이며, v_l 과 v_t 와 v_{of} 는 각각의 체적분율(volume fraction)을 나타낸다. 만약, 위의 부등식이 만족되지 않는다면 길이방향적층이 횡방향적층의 파괴로 인해 부가되는 하중을 지탱하지 못하므로 복합적층판 전체가 최종적으로 파괴되게 된다.

횡방향균열이 발생할 때 길이방향적층과 횡방향적층 사이의 하중전달 지배방정식(governing equation)은 다음과 같다.

$$\frac{dF_l}{dx} = 2c\tau_l \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

여기서 dF_l 은 전단응력 τ_l 상태에서 길이방향적층과 횡방향적층의 계면에서 길이 dx 에서 전달된 하중을 나타낸다. 한편 광섬유와 횡방향적층 사이의 하중전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dF_{of}}{dx} = \frac{2v_{of}A}{r_{of}} \tau_{of} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

여기서 dF_{of} 는 길이 dx 에서 광섬유의 횡방향적층 사이에 전달된 힘이고 τ_{of} 은 둘 사이의 계면에서의 전단응력이고 r_{of} 는 광섬유 반경이며 A 는 시편의 단면적이다.

적층사이의 계면과 광섬유와 횡방향적층 사이의 계면 모두가 탄성적으로 접촉되어 있다고 가정한다면 τ_l 과 τ_{of} 모두 길이 x 의 함수가 된다. 첫번째의 균열이 ϵ_{tu} 에서 횡방향적층에 발생하게 되면 $\Delta\sigma_l$ 과 $\Delta\sigma_{of}$ 가 각각 길이방향적층과 광섬유에 부가되게 된다. 이 부가적인 응력들은 각각 균열면에서 최고값 $\Delta\sigma_{lo}$ 와 $\Delta\sigma_{of_o}$ 를 갖고 균열면에서 멀어질수록 하중이 전단응력에 의해 다시 횡방향적층으로 전달되므로 길이 x 를 따라서 줄어들게 된다.

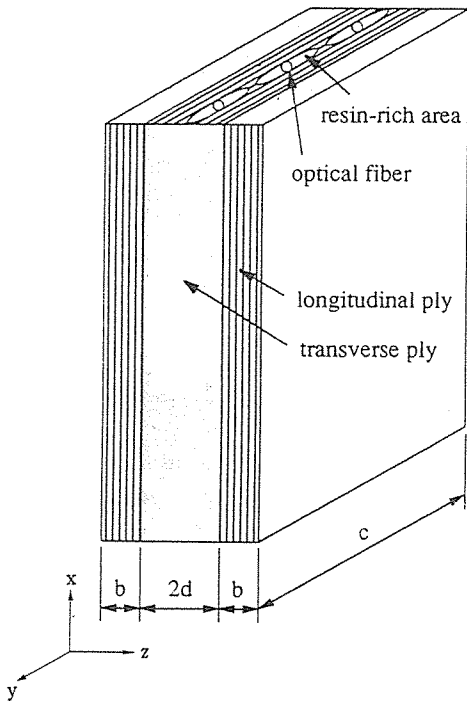


Fig. 1. Specimen model

길이 방향적응과 광섬유 내의 하중분포가 균일하다고 가정하면 $\Delta\sigma_{l_o}$ 와 $\Delta\sigma_{of_o}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{l_o} = \frac{\sigma_a}{v_l} \alpha - E_l \frac{\sigma_o}{E_c} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta\sigma_{of_o} = \frac{\sigma_a}{v_{of}} \beta - E_{of} \frac{\sigma_o}{E_c} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 σ_a 은 시편에 가해진 응력이고 α 와 β 는 각각 길이방향적응과 광섬유에 전가되는 하중분율(load fraction)이다. E_c 와 E_l 와 E_{of} 는 각각 복합재, 길이방향적응, 광섬유의 탄성계수이다. 그리고 σ_a/E_c 는 균열이 없을 때의 복합재의 변형률을 나타낸다. 길이방향적응과 광섬유내에는 균열이 없으므로 균열면에서 길이방향적응과 광섬유의 변형률이 같다고 가정할 수 있다. 따라서

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{of} = \frac{1}{E_l} \left(\frac{\sigma_a \alpha}{v_l} \right) = \frac{1}{E_{of}} \left(\frac{\sigma_a \beta}{v_{of}} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

이고, 이때 $\alpha + \beta = 1$ 이므로 식(6)으로부터 $\Delta\sigma_{l_o}$ 와 $\Delta\sigma_{of_o}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{l_o} = \frac{\sigma_a E_l}{E_c} \frac{E_l v_l}{E_l v_l + E_{of} v_{of}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta\sigma_{of_o} = \frac{\sigma_a E_{of}}{E_c} \frac{E_l v_l}{E_l v_l + E_{of} v_{of}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

기존의 shear-lag해석[5]에 삽입된 광섬유의 존재를 고려한 항을 첨가하여 근사적인 탄성해(approximate elastic solution)을 다음과 같이 구할 수 있다. 횡방향 적층의 첫번째 균열은 $\varepsilon_{tu} = \sigma_a/E_c$ 일때 발생한다. 균열면에서 먼 곳의 길이방향 적층과 횡방향 적층의 변형률은 같으므로 길이방향 적층의 응력은 $E_l \sigma_a/E_c$ 이 된다. 따라서 균열면에서 길이 x 만큼 떨어진 곳에서 길이방향 적층에 부가되는 응력 $\Delta\sigma_l$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_l = \sigma_l - E_l \frac{\sigma_a}{E_c} \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 σ_l 는 균열에서 길이 x 만큼 떨어진 곳에서의 길이방향 적층의 응력이다. shear-lag 해석의 가정에서

$$\frac{d\Delta\sigma_l}{dx} = H_l(u-v) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{d\bar{v}}{dx} = \bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{E_l v_l} (\sigma_a - \sigma_l v_l - \sigma_{of} v_{of}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

여기서 H_l 는 상수이고 u 와 v 는 각각 길이방향 적층과 횡방향 적층의 x 방향 변위이고, $\bar{\varepsilon}_t$ 는 횡방향 적층의 평균 변형률이다. 위 식(10)을 미분하여 식(9)와 식(11)을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2\Delta\sigma_l}{dx^2} = \phi_l \Delta\sigma_l \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서

$$\phi_l = \frac{H_l E_c}{E_l E_l v_l} \quad \dots\dots\dots (13)$$

균열면에서 $\Delta\sigma_l = \Delta\sigma_{l_o}$ 이고 균열면에서 먼곳에서 $\Delta\sigma_l = 0$ 을 만족시키는 식(12)의 일반해는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_l = \Delta\sigma_{l_o} \exp(-\sqrt{\phi_l} x) \quad \dots\dots\dots (14)$$

여기서 ϕ_l 은 단면에서의 응력 평형으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_l = \frac{E_c G_l}{E_l v_l} \frac{1}{E_l b d} \quad \dots\dots\dots (15)$$

한편 횡방향 적층에 균열이 발생했을 때 균열에서 x 만큼 떨어진 곳에서 광섬유에 부가되는 응력도 위와 비슷한 과정에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\sigma_{of} = \Delta\sigma_{of_o} \exp(-\sqrt{\phi_{of}} x) \quad \dots\dots\dots (16)$$

여기서

$$\phi_{of} = \frac{E_c G_t}{E_l v_t} \frac{2}{E_{of} r_{of}^2 \ln(R/r_{of})} \quad \dots\dots\dots (17)$$

이다. 여기서 G_t 는 횡방향적층의 x 방향 전단계수(shear modulus)이고 R 은 광섬유의 중심에서 기지재료의 변위가 기지재료의 평균 변위와 같아지는 점까지의 거리이다.

식(14)와 식(16)과 힘평형 방정식으로부터 계면에서의 전단응력을 구하여 식(2)와 식(3)에 대입하면 균열면으로부터 길이 l 만큼 떨어진 곳에서 횡방향적층으로 전달된 하중은 다음과 같다.

$$F_l = v_l A \Delta \sigma_{l_o} (1 - \exp(-\sqrt{\phi_l} l)) \quad \dots\dots (18)$$

$$F_{of} = v_{of} A \Delta \sigma_{of_o} (1 - \exp(-\sqrt{\phi_{of}} l)) \quad \dots\dots (19)$$

횡방향적층에서의 첫번째 균열은 횡방향적층이 담당하는 하중이 $\sigma_{lu} v_l A$ 일때 발생하게 된다. 균열발생 후 이 하중은 길이방향적층과 광섬유에 전가된다. 다음번 균열은 전단력에 의한 힘전달에 의해 횡방향적층이 담당하는 하중이 다시 $\sigma_{lu} v_l A$ 가 되면 발생하게 된다.

만약 현재 균열간격이 $2h$ 라면 전단응력은 양쪽의 균열로부터 같은 크기에 다른 부호로 생기게 되므로 다음 균열은 현재 균열의 중간에 생기게 된다. 전단력에 의해 횡방향적층으로 전달된 하중은 다음과 같다.

$$F_l = v_l A \Delta \sigma_{l_o} [1 + \exp(-\sqrt{\phi_l} 2h) - 2\exp(-\sqrt{\phi_l} h)] \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$F_{of} = v_{of} A \Delta \sigma_{of_o} [1 + \exp(-\sqrt{\phi_{of}} 2h) - 2\exp(-\sqrt{\phi_{of}} h)] \quad \dots\dots\dots (21)$$

$F = F_l + F_{of} = \sigma_{lu} v_l A$ 를 이용하면 가해진 응력 σ_a 은 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_a = \sigma_{lu} \frac{E_c}{E_t} (E_l v_l + E_{of} v_{of}) [E_l v_l \{1 + \exp(-\sqrt{\phi_l} 2h) - 2\exp(-\sqrt{\phi_l} h)\} + E_{of} v_{of} \{1 + \exp(-\sqrt{\phi_{of}} 2h) - 2\exp(-\sqrt{\phi_{of}} h)\}]^{-1} \quad \dots\dots\dots (22)$$

한편 광섬유를 첨가하지 않은 직교적층판의 이론적인 균열간격은 Parvizi and Bailey[6]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_a = \sigma_{lu} \frac{E_c}{E_t} [1 + \exp(-\sqrt{\phi} 2h) - 2\exp(-\sqrt{\phi} h)]^{-1} \quad \dots\dots\dots (23)$$

여기서

$$\phi = \frac{E_c G_l}{E_t E_l} \frac{(b+d)}{bd^2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

3. 실험

3-1. 시편제작

광섬유센서가 삽입된 복합재 적층판의 층간분리, 분할, 횡방향균열 등과 같은 손상의 발생여부 및 진전상황, 광섬유를 통과하는 레이저신호, 광섬유의 파단으로 인한 레이저 빛의 누출등을 육안으로 관찰하기 위하여 본 연구에서 사용한 모든 시편은 유리섬유에폭시 프리프레그(glass/epoxy prepreg)로 제작하였다.

횡방향적층의 두께의 영향을 관찰하기 위해 $[0/90_2]_S$ 와 $[0_2/90_3]_S$ 의 두가지 종류의 적층은 선택되었다. $[0/90_2]_S$ 시편에는 한국화이바(주)의 HFG GU300 프리프레그가 사용되었고, $[0_2/90_3]_S$ 시편에는 선경인더스트리(주)의 UGN-150 프리프레그가 사용되었다. 시편은 길이 200 mm, 폭 24 mm, 두께는 $[0/90_2]_S$ 시편은 1.8 mm $[0_2/90_3]_S$ 시편은 1 mm로 제작되었다. 각 시편의 양단에는 길이 38 mm의 유리섬유복합재료(E-glass)로 된 탭(tab)을 붙여서, 124 mm의 측정구간(test section)이 남도록 하였다. 광섬유는 Fig.2에 보는 바와 같이 하중방향과 평행 또는 수직하게 하여 여러 위치에 삽입하였다.

적층판은 200×180 mm의 프리프레그를 정해진 적층순서로 쌓아서 제작하였다. 광섬유는 코어직경 6.3 μm , 클래딩직경 124.6 μm , 코딩직경 250 μm 인 (주)삼성전자의 싱글모드 DSF(dispersion shifted fiber)로 광섬유 고정용 지그(fiber positioning jig)를 사용하여 삽입하였다. 일반적으로 아크릴 코팅은 손상에 대한 민감도를 높이기 위해 아세톤을 이용하여 제거하였는데, 어떤 시편은 코팅의 영향을 평가하기 위해 제거하지 않았다. 광섬유 사이의 간격은 한 적층판에 여섯개의 시편이 나오도록 정하였다.

적층판은 경화용재료(cure material)들을 정해진 순서로 덮고 다음과 같은 경화사이클(cure cycle)로 오토클레이브(sutoclave)에서 경화하였다. 먼저 온도를 80℃로 올려서 30분간 유지한 다음 130℃로 다시 올려서 6기압하에서 2시간동안 유지하였다.

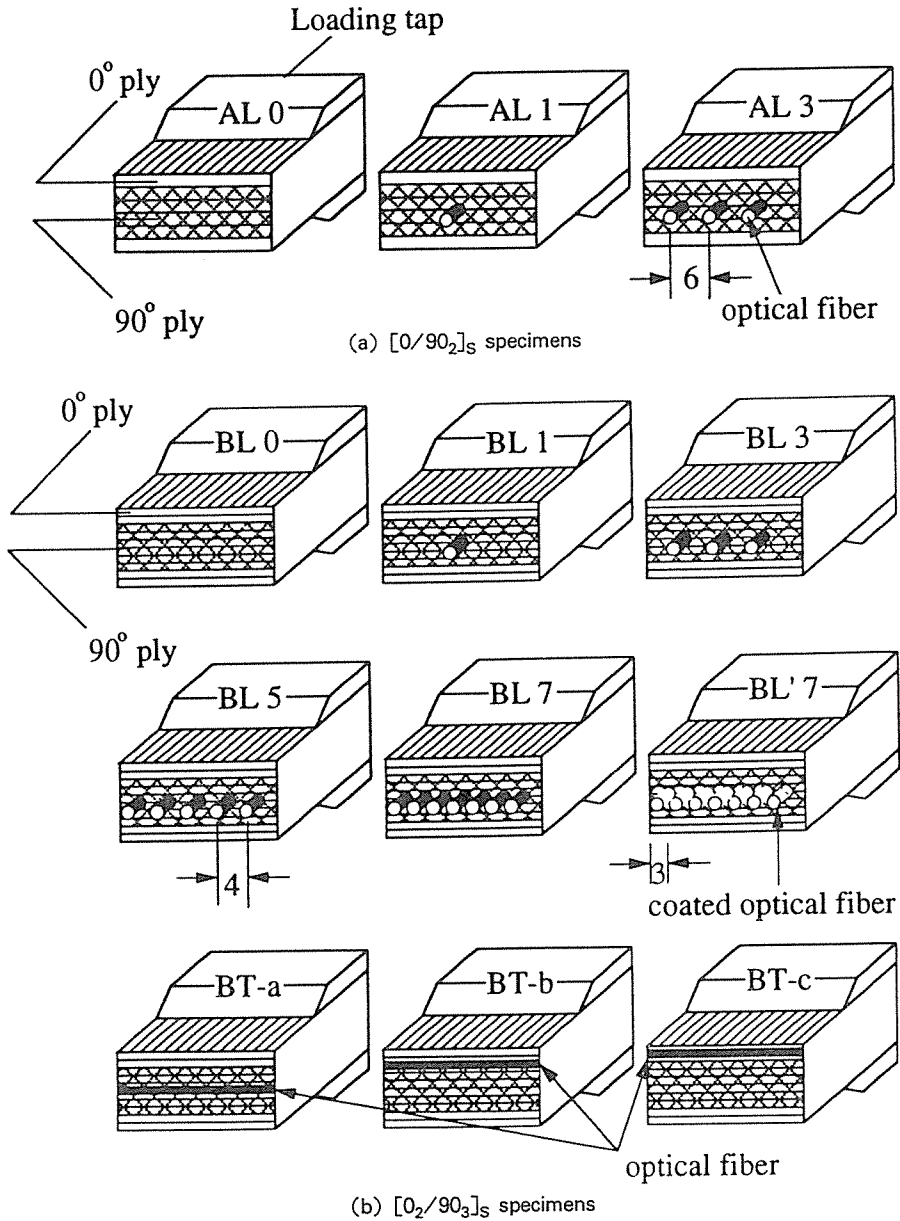


Fig.2. Schematic diagram showing specimen configurations with embedded optical fibers

경화된 적층판을 오토클레이브에서 꺼낸 다음 양단에 두께 2.5 mm 의 탭을 붙였다. 탭은 유리섬유 복합재료를 $38 \times 180\text{ mm}$ 로 자른 후 한쪽에 30° 각도의 경사면을 만들고, 접착강도를 높이기 위해 접착면을 사포로 처리한 다음 CYANAMID FM 73 접착필름(film adhesive)를 이용하여 적층판에 붙

이고 탭지그로 고정된 다음 전기오븐에 넣어 온도 120°C 에서 1시간 동안 경화하여 접착하였다. 이 적층판을 다이아몬드 휠 커터(water-cooled diamond wheel cutter)를 이용하여 폭 24 mm 가 되도록 잘라서 시편을 완성하였다.

3-2. 실험방법

모든 시편은 0.6 mm/min 의 일정변위속도로 MTS 10톤 유압시험기를 이용하여 최종파단이 될때 까지 하중을 가하였다. 레이저는 렌즈와 광섬유 고정장치로 되어 있는 커플러를 이용하여 광섬유에 입사시켰다. 광섬유를 통과한 레이저 신호의 강도(intensity)는 광다이오드를 이용하여 측정하였으며 하중, 변형률, 레이저신호의 강도 등의 데이터는 MTS 제어장치에 내장된 A/D 변환기를 이용하여 0.5초 마다 저장하여 처리하였다. 직교적층시편은 Fig.3에 보인것처럼 40 mm 의 측정구간을 시편에 표시하여 실험도중 여러 순간에 카메라를 이용하여 시편사진을 촬영하였다. 그 후, 측정구간내의 횡방향균열의 수를 세어 균열간격을 계산하고 각 시편마다 평균을 취하였다. 또한, 사진촬영시 매순간 기록한 서터신호를 이용하여 하중과 변형률 데이터를 얻었다.

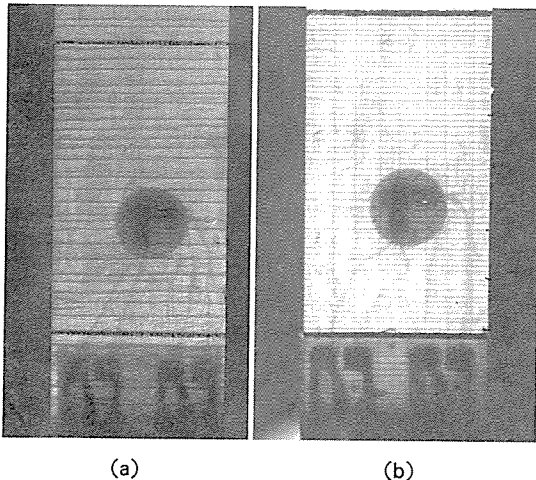


Fig.3. photographs showing the transverse cracking of (a) $[0/90_2]_S$ specimen (b) $[0_2/90_3]_S$ specimen.

4. 결과 및 검토

4-1. 광섬유가 삽입된 직교적층판의 Shear lag 해석 결과

광섬유 삽입의 영향을 보기 위해 Fig.4에 $[0/90_2]_S$ 시편에 광섬유가 50개 삽입되었을 때와 삽입되지 않았을 때의 이론적인 균열간격을 나타내었다. 이 때의 광섬유의 체적분율은 1.4%이고 해석에 사용된 재료의 물성치는 $[0]_T$, $[90]_T$, $[\pm 45]_T$ 시편의 시험을 통해 구해서 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 광섬유를 삽입하였을 때는 Fig.4에서 보는 바와 같이 광섬유를 삽입한 시편은 같은 응력레벨에서 광섬유를 삽입하지 않은 시편보다 작은 균열간격을 가졌다. 이것은 광섬유가 많이 삽입될 수록 하중을 담당하는 횡방향 적층의 체적분율이 작아지므로 같은 크기의 균열간격이 되기 위해 필요한 응력의 크기가 작기 때문이다.

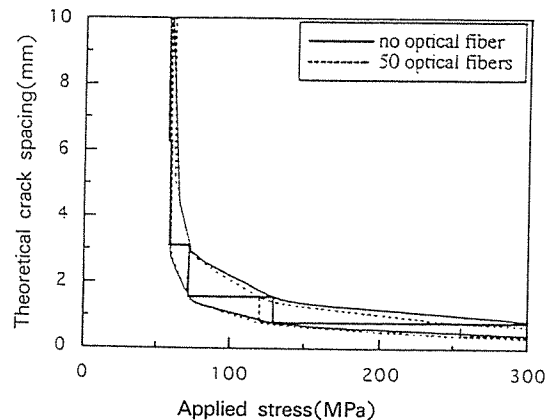


Fig.4. Applied stress vs. theoretical crack spacing of $[0/90_2]_S$ specimens with 0 and 50 optical fibers embedded parallel to the loading direction.

Table 1. The material properties of HFG GU-300.

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_l	45.77 GPa
Elastic modulus in transverse direction	E_t	19.90 GPa
Shear modulus in 1-2 plane	G_t	7.38 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}	0.270
Tensile strength in fiber-direction	S_l	1017.09 MPa
Tensile strength in transverse direction	S_t	38.87 MPa
Failure strain in transverse direction	ϵ_{tu}	0.199%

Table 2. The material properties of SKI UGN-150.

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_l	40.77 GPa
Elastic modulus in transverse direction	E_t	11.70 GPa
Shear modulus in 1-2 plane	G_t	4.86 GPa
Poisson's ratios	ν_{12}	0.310
Tensile strength in fiber-direction	S_l	1079.88 MPa
Tensile strength in transverse direction	S_t	57.86 MPa
Failure strain in transverse direction	ε_{tu}	0.537%

$[O_2/90_3]_S$ 시편에 광섬유를 7개 삽입했을 때와 삽입하지 않았을 때의 이론적인 균열간격을 Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 계단모양곡선(steped curve)은 길이 124 mm, 횡방향적층 두께 0.6 mm 시편의 중앙에 첫번째 균열이 발생했을 때의 이론적인 균열간격이다. 계단모양곡선 위, 아래의 곡선은 Garrett and Bailey[5]에서 밝힌 바와 같이 임의의 길이 시편에서 임의의 위치에 첫번째 균열이 발생했을 때의 균열간격의 범위를 나타낸다. Fig. 5에서는 광섬유의 삽입으로 인한 차이는 거의 없는 것으로 보인다. 따라서 삽입된 광섬유의 체적분율이 작을 때에는 광섬유의 삽입으로 인한 횡방향균열간격의 영향은 매우 작을 것으로 생각되어진다.

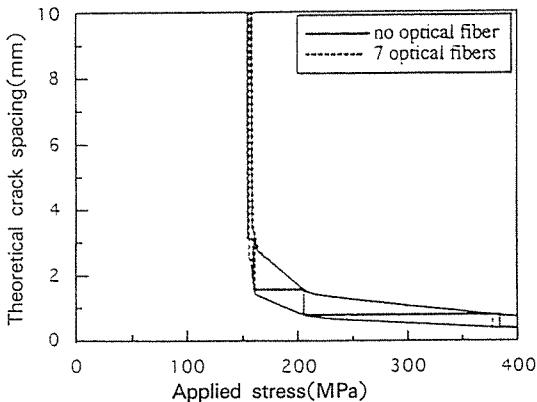


Fig. 5. Applied stress vs. theoretical crack spacing of $[O_2/90_3]_S$ specimens with 0 and 7 optical fibers embedded parallel to the loading direction.

4-2. 광섬유 수량의 영향

광섬유를 삽입하지 않은 $[O/90_2]_S$ 시편과 광섬유를 1, 3개 삽입한 $[O/90_2]_S$ 시편의 인장실험을 통해 구한 균열간격을 응력에 대한 그래프로 Fig. 6에 나타내었다. 균열간격은 시험중에 촬영한 사진으로부터 구하여 각 시편마다 평균을 취하였다. 이 때 광섬유의 체적분율은 광섬유가 3개 일때 0.085%이다. 광섬유를 삽입한 시편의 균열간격은 광섬유를 삽입하지 않은 시편의 균열간격과 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 삽입된 광섬유의 체적분율이 작을 때의 shear-lag 해석의 결과와도 일치한다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 실험값은 shear-lag 해석을 통해 예측한 이론값들과 잘 일치하였다.

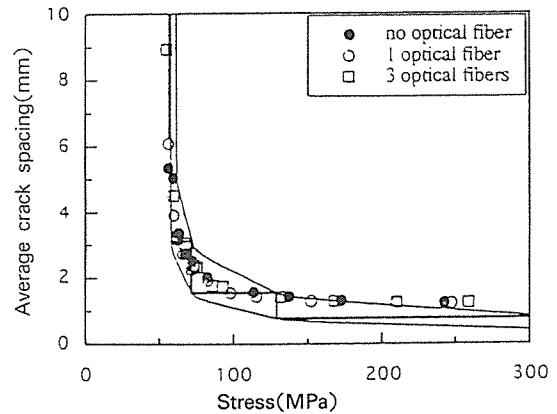


Fig. 6. Stress vs. theoretical and experimental crack spacing of $[O/90_2]_S$ specimens with 0 and 1, 3 optical fibers embedded parallel to the loading direction.

횡방향균열은 횡방향적층이 담당하는 하중이 횡방향 인장강도(transverse strength)와 같아질때 발생하기 때문에 횡방향적층의 인장강도 σ_{tu} 는 shear-lag 해석에서 매우 중요한 값이다. 그러나 Flagg and Kural[11]에 의하면 횡방향 인장강도는 원위치 횡방향 인장강도(in situ transverse strength)가 횡방향적층의 두께와 이웃한 적층의 방향에 의존하기 때문에 적층의 고유한 성질(intrinsic lamina property)로 취급할 수 없다. 또한 Parvizi et al.[7]에 의하면 유리섬유복합재료 직교적층시편

에서 횡방향적층의 두께가 매우 작다면 횡방향균열 구속(cracking constraint)이 발생하게 된다.

$[0_2/90_3]_S$ 시편의 경우 횡방향적층의 두께는 0.6mm 로 매우 작다. $[90]_T$ 시편의 시험으로부터 얻은 Table 2의 횡방향 인장강도 $\sigma_{tu} = 57.86\text{MPa}$ 를 사용하여 shear-lag 해석을 통해 구한 이론적인 균열간격은 실험치와 차이를 보였다. 따라서 $[0_2/90_3]_S$ 시편의 경우에는 shear-lag 해석에 시편의 시험도중 얻은 원위치 횡방향 인장강도 $\sigma'_{tu} = 75.47\text{MPa}$ 를 사용하였다.

광섬유를 삽입하지 않은 $[0_2/90_3]_S$ 시편과 하중 방향에 평행하게 1, 3, 5, 7개의 광섬유를 삽입한 $[0_2/90_3]_S$ 시편의 균열간격을 Fig. 7에 나타내었다. 광섬유를 7개 넣었을때의 광섬유의 체적분율은 0.36%이다. 광섬유를 삽입하지 않은 시편과 삽입한 시편의 균열간격사이에는 약간의 차이가 있었다. 광섬유를 삽입한 시편은 광섬유를 삽입하지 않은 시편보다 더 낮은 응력레벨에서 균열이 발생하였고, 같은 응력레벨에서는 더 작은 균열간격을 보였다. 이러한 차이는 Fig. 4에서와 같이 shear-lag 해석에 의해 예측되었다. 그러나 실험에서 구한 균열간격은 이론값의 범위내에 들었다.

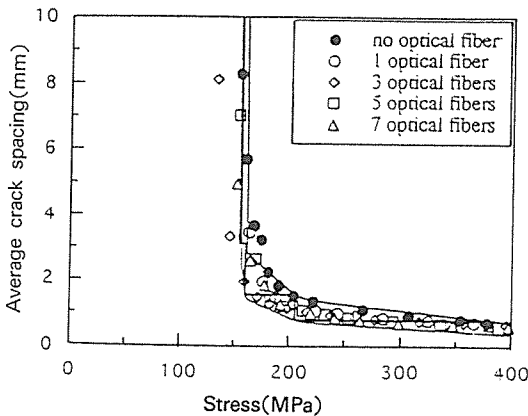


Fig. 7. Stress vs. theoretical and experimental crack spacing of $[0_2/90_3]_S$ specimens with 0 and 1, 3, 5, 7 optical fibers embedded parallel to the loading direction.

4-3. 광섬유 방향의 영향

광섬유의 방향과 위치에 따른 영향을 평가하기

위해 광섬유가 하중방향과 수직하게 삽입된 세가지 종류의 시편을 시험하였다. 광섬유는 중립면, $0^\circ/90^\circ$ 경계면, $0^\circ/0^\circ$ 경계면에 삽입되었다.

실험에서 구한 균열간격을 응력에 대한 그래프로 Fig. 8에 나타내었다. 광섬유가 하중방향과 평행하게 삽입된 시편과 마찬가지로 광섬유가 하중방향에 수직하게 삽입된 시편의 균열간격은 광섬유가 삽입되지 않은 시편의 균열간격과 약간의 차이를 보였다. 광섬유가 $0^\circ/0^\circ$ 경계면에 삽입된 시편이 가장 큰 차이를 보였다. 이것은 광섬유가 이웃한 적층에 수직하게 삽입되므로 발생한 모재모임영역(resin-rich area) 때문으로 생각되어진다. 그러나 모든 실험값들은 이론값의 범위내에 들었다.

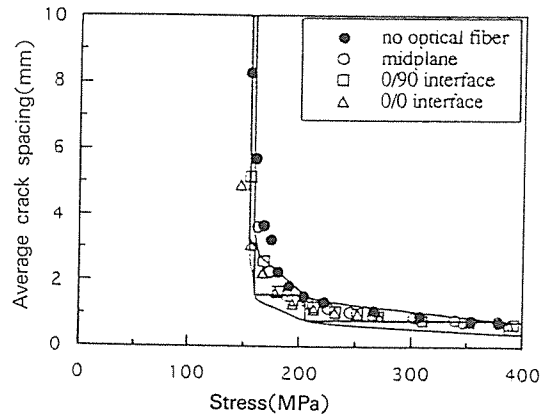


Fig. 8. Stress vs. theoretical and experimental crack spacing of $[0_2/90_3]_S$ specimens with 1 optical fibers embedded perpendicular to the loading direction.

4-4. 광섬유 코팅의 영향

일반적으로 광섬유는 클래딩 바깥에 고분자재료로 된 코팅을 갖는다. 만약 광섬유가 센서로서 사용된다면 코팅은 민감도를 높이기 위해 제거된다. 광섬유 코팅의 영향을 고찰하기 위해 코팅을 제거한 광섬유를 7개 삽입한 $[0_2/90_3]_S$ 시편의 균열간격을 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 코팅을 제거한 광섬유를 삽입한 시편과 코팅을 제거하지 않은 광섬유를 삽입한 시편의 균열간격사이에는 약간의 차이가 있었다. 이것은 광섬유 코팅으로 인해 모재

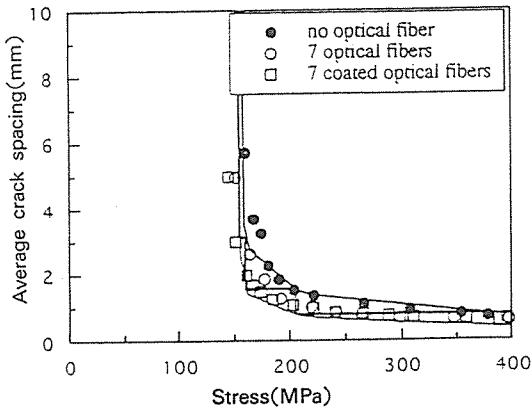


Fig. 9. Stress vs. theoretical and experimental crack spacing of $[O_2/90_3]_S$ specimens with 7 uncoated and 7 coated optical fibers embedded parallel to the loading direction.

모임영역의 크기가 더 커지기 때문으로 생각되어진다.

한편 광섬유센서를 삽입한 지능형 복합재구조물에서 중요한 광섬유센서의 수명은 광섬유 코팅의 유무에 따라 큰 차이를 보였다. Fig. 10에 코팅을 제거한 광섬유와 제거하지 않은 광섬유를 통과한 레이저 신호의 세기를 응력에 대하여 나타내었는데, 그림에서 볼 수 있듯이 코팅을 제거한 광섬유는 약 250~350 MPa 사이의 응력레벨에서 모두 파손되지만 코팅을 제거하지 않은 광섬유는 시편이 최종 파단될때 까지 파손되지 않았다. 이것은 코팅과

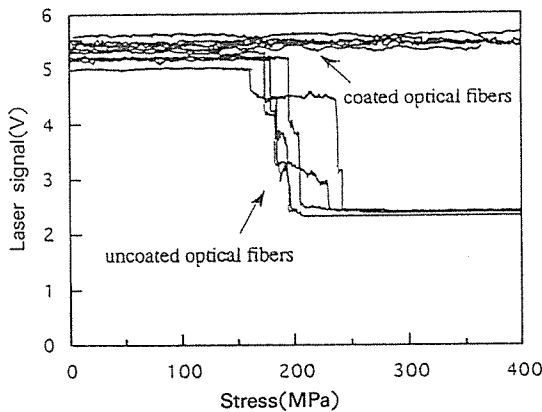


Fig. 10. Stress vs. laser signal of $[O_2/90_3]_S$ specimens with coated and uncoated optical fibers.

광섬유사이에서 미끄러짐(sliding)이 생겨서 시편에 가해주는 하중이 광섬유에 전가되지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서 실제 구조물에 광섬유센서를 삽입할 때 센서부를 제외한 곳은 모두 코팅을 입혀 광섬유센서를 보호해야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 지능형 구조물에 삽입되는 광섬유센서가 직교적층판의 대표적인 파괴모드인 횡방향 균열에 미치는 영향을 알아보기 위해 정적 인장 시험과 수정된 shear-lag 해석을 삽입된 광섬유센서가 횡방향 균열간격에 미치는 영향을 고찰하였다. 광섬유센서가 적은 체적분율로 하중방향과 평행하게 삽입되었을때 횡방향 균열간격은 광섬유센서의 수량에 크게 영향을 받지 않았다. 삽입된 광섬유센서를 고려하는 shear-lag 해석을 통해 예측한 이론적인 균열간격의 범위내에 실험에서 구한 균열간격의 값이 위치하여 실험값과 이론값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 광섬유센서를 삽입한 시편은 비록 이론적인 균열간격의 범위내에 있다 하더라도 다소 낮은 응력레벨에서 초기 균열이 발생하였고 같은 응력레벨에서는 좀더 작은 균열간격을 보였다. 광섬유센서가 하중방향과 수직하게 삽입된 시편도 하중방향과 평행하게 삽입된 시편과 비슷한 결과를 보여 광섬유센서의 방향과 위치가 균열간격에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 광섬유센서를 보호하는 코팅의 유무도 균열간격에 큰 영향을 미치지 않았다. 결론적으로 직교적층판에 삽입된 광섬유센서는 정적 인장하중하에서 횡방향 균열간격에 큰 영향을 미치지 않았다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구비 지원으로 진행중인 과제의 일부분이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Jensen, D.W. and J. Pscual, 1990, "De-

gradation of graphite/bismaleimide laminates," Proc. SPIE Fiber Optic Smart Structures and SkinsIII, Vol.1370, pp.228-237.

2. Jensen, D.W., J. Pascual and J.A., August, 1992, "Performance of graphite/bismaleimide laminates with embedded optical fibers. Part I : uniaxial tension," Smart Mater. Struct., Vol.1, pp.24-30.

3. Jensen, D.W., J. Pascual and J.A. August, 1992, "Performance of graphite/bismaleimide laminates with embedded optical fibers," Part II : uniaxial compression. Smart Mater. Struct, Vol. 1, pp.31-35.

4. Measures, R.M., N.D.. Glossop, J. Lymer, M. Leblanc, M. West, S. Dubois, W. Tsaw and R.C. Tennyson, 1989, "Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials," Applied Optics, Vol.28, No.13, pp.2626-2633.

5. Garrett, K.W. and J.E. Bailey, 1977, "Multiple Transverse Fracture in 90° Cross-Ply Laminates of a Glass Fibre-Reinforced Polyester," J. Mater. Sci., Vol.12, pp.157-168.

6. Parvizi, A. and J.E. Bailey, 1978, "On Multiple Transverse Cracking in Glass Fibre Epoxy Cross-Ply Laminates," J. Mater. Sci., Vol.13, pp.2131-2136.

7. Parvizi, A., K.W. Garrett and J.E. Bailey, 1978, "Constrained Cracking in Glass Fibre-Reinforced Epoxy Cross-Ply Laminates," J. Mater. Sci., Vol.13, pp.195-201.

8. Aveston, J. and A. Kelly, 1973, "Theory of Multiple Fracture of Fibrous Composites," J. Mater. Sci., Vol.8, pp.352-362.

9. Wang, A.S.D., 1980, "Growth mechanisms of transverse cracks and ply delamination in composite laminates," Proc. ICCM-3, Paris, pp. 170-185.

10. Highsmith, A.L. and K.L. Reifsnider, 1982, "Stiffness reduction mechanisms in composite laminates," ASTM STP775, pp.103-117.

11. Flagg, D.L. and M.H. Kural, 1982, "Experimental determination of the in situ transverse lamina strength in graphite-epoxy laminates," J. Comp. Mat., Vol.16, pp.103-116.