

집중 하중을 받는 일방향 보강 섬유 금속 적층판의 손상 개시 모델링

남현욱* · 정성욱** · 한경섭***

Modeling of damage initiation in singly oriented ply Fiber Metal Laminate under concentrated loading conditions

HyunWook Nam, SungWook Jung and KyungSeop Han

KEY WORDS : 섬유 금속 적층판, 일차 전단 변형 이론, 파괴 지수, 압입 손상

ABSTRACT

In this research, damage initiation in singly oriented ply (SOP) FML under concentrated loading conditions was studied. The finite element method (FEM) base on the first order shear deformation theory is used for the analysis of fiber orientation effect on FML under concentrated loading conditions. The failure indices were calculated for the variation of fiber orientation and the results were compared with indentation experiments. The failure indices were well matched with damage initiation of SOP FML. Indentation results shows that the crack initiation of SOP FML is determined by stiffness induced by fiber orientation and the penetration load of SOP FML are influenced by the deformation tendency and boundary conditions.

1. 서론

1980년대 초반부터 연구가 시작된 FML은 다음 세기를 이끌어 갈 주력 재료로 주목을 받으며[1,2] 미국, 일본, 독일, 네덜란드 등 선진국을 중심으로 연구가 진행되고 있으나 적절한 설계 기준이 확립되어 있지 못하여 대부분 한 방향(Unidirectional)으로 섬유를 적층하여 사용하는 경우가 대부분이다. 그러나 섬유의 방향을 조절하여 재료의 물성을 설계할 수 있다는 것은 FML의 장점 중에 하나이기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. C.T. Sun 등은[3] 섬유 방향에 따른 FML의 물성을 탄소성 모델을 연구하였는데, 직교 이방성 소성 모델(Orthotropic Plasticity Model)과 적층판 모델(Laminate Plate Model)을 인장 실험값과 비교하

여 모델의 타당성을 보였다. 또한 Kawai 등도 섬유 방향에 따른 FML의 비탄성 거동을 고전 적층판 이론에 기초하여 연구하였다.[4] 이러한 연구들은 복합재료 적층판 이론이 in-plane 하중을 받는 경우에는 FML에도 적용될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나 현재까지의 연구는 단순 인장 하중 조건에서만 연구를 수행하여 압입이나 충격 등 out of plane 하중이 작용하는 경우는 고려하지는 못하였다.

본 연구에서는 집중하중을 받는 일방향 보강(SOP, Singly Oriented Ply) FML의 섬유 방향에 따른 손상 개시를 복합재료 적층판 이론 및 유한 요소 해석을 이용하여 모델링하고 이를 압입 시험을 통하여 검증하였다.

2. 고전 적층판 이론을 이용한 모델링

일차전단변형이론

본 연구에서는 복합재료 적층판에 사용하는 일

* 포항공과대학교 첨단공학연구소

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

*** 포항공과대학교 기계공학과

차 전단변형이론을 섬유 금속 적층판에 적용하였다. 변위-변형률 관계, 평형방정식, 구성방정식은 복합재료 적층판에 사용하는 이론과 같으며 강성 행렬을 계산할 때는 아래와 같이 prepreg 과 금속 판에 대하여 각각 계산한 다음 두께 방향으로 적분하여 합력과 합모멘트, 합전단력을 구하였다.

합력, 합모멘트, 합 전단력은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ \boldsymbol{\kappa} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} DS_{44} & DS_{45} \\ DS_{45} & DS_{55} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = [DS] \bar{\boldsymbol{\gamma}}$$

여기서 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$ 는 강성 행렬이며 다음과 같이 나타난다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n_i} (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) + \sum_{l=1}^{n_m} (\bar{Q}_{ij})_l (h_l - h_{l-1}), \quad i, j = 1, 2, 6$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^{n_i} (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) + \sum_{l=1}^{n_m} (\bar{Q}_{ij})_l (h_l^2 - h_{l-1}^2) \right], \quad i, j = 1, 2, 6$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \left[\sum_{k=1}^{n_i} (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) + \sum_{l=1}^{n_m} (\bar{Q}_{ij})_l (h_l^3 - h_{l-1}^3) \right], \quad i, j = 1, 2, 6$$

$$DS_{ij} = k \left[\sum_{k=1}^{n_i} (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) + \sum_{l=1}^{n_m} (\bar{Q}_{ij})_l (h_l - h_{l-1}) \right], \quad i, j = 4, 5$$

n_i 과 n_m 은 각각 섬유층과 금속판의 수이며, k 는 전단 보정 계수(Shear Correction Factor)이다.

유한요소해석

일차 전단 변형이론에 의해 얻어진 식은 변형을 에너지를 계산하는데 사용하였다. 변형률 에너지(u)는 다음과 같이 요소의 면적에 대하여 적분하여 구한다.

$$u = \frac{1}{2} \int_A [\mathbf{N}]^T \boldsymbol{\varepsilon}_0 dA + \frac{1}{2} \int_A [\mathbf{M}]^T \boldsymbol{\kappa} dA + \frac{1}{2} \int_A [\mathbf{Q}]^T \bar{\boldsymbol{\gamma}} dA$$

판의 총 위치 에너지(Total Potential Energy)를 표시하면 다음과 같다.

$$\pi = U + V$$

여기서 U 는 변형률 에너지, V 는 외력에 의한 위치 에너지이다. 변위에 대하여 π 를 최소화 시키면 다음의 최종적인 행렬식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{Kd} = \mathbf{f}$$

위 식을 계산하여 변위를 구하게 되며, 이 변위로부터 변형률을 계산하게 된다. 이 변형률을 각 층의 구성방정식을 이용하여 응력을 얻게 된다. 여기에서 얻어진 응력을 섬유 방향에 대하여 변환시키면 파괴 지수를 얻을 수 있다

본 연구에서는 섬유 층의 파괴 지수로 Tsai-Hill failure criterion 을 사용하였으며, 금속판의 적합도 함수로 Mises yield criterion 을 이용하였다.

$$\text{fiber prepreg: } f_{TH}(\theta) = \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2}$$

$$\text{metal laminate: } f_{MH}(\theta) = \frac{\sigma_x^2}{Y_t^2} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{Y_t^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y_t^2} + \frac{3\tau_{xy}^2}{Y_t^2}$$

3. 실험 방법

시편 제작

본 연구에서 FML 제작에 사용한 금속판은 알루미늄(Al1050)이며, 섬유층은 탄소섬유/에폭시 prepreg (주SK 케미칼, USN125 type A)를 이용하였다. FML 의 제작 과정은 FRP 의 경우와 유사하나, 금속판과 섬유층의 결합력을 높이기 위하여 금속판을 FPL 에칭하여 사용하였다.

시편은 $[M/\theta_1/\theta_2 / M/\theta_2/\theta_1/M]$ 으로 적층 구조를 가지며, 여기서 $[\theta_1/\theta_2]$ 는 $[0/0]$, $[5/5]$, $[10/10]$, $[15/15]$, $[30/30]$, $[45/45]$, $[60/60]$, $[75/75]$, $[80/80]$, $[85/85]$, $[90/90]$ 로 총 11 종류의 시편을 준비하였다.

압입 시험

압입 시험은 Shimadzu 사의 UTM(Ston)를 사용하였다. 압입자를 시편 상단 부분이 위치시키고 5mm/min 의 변위제어로 시험을 수행하였다. 압입 시험은 대부분의 경우 관통이 일어난 직후 시험을 정지 하였다. 이때 압입자의 끝은 반구형태이며, 지름은 12.7mm 이다. 압입 시험에서 나타나는 신호는 UTM 에서 기본 제공되는 X-Y 플로터를 이용해 얻었으며, 편의를 위해 PC 로 데이터를 얻을 수 있도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

유한요소해석검증

유한요소해석 방법의 검증을 위하여 단순 인장인 경우와 원통형 굽힘 하중을 받을 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 한쪽 끝 단이 고정되었으면서 단순 인장이 작용할 경우 최대의 강도를 얻을 수 있는 적층 방향은 고정단에 수직인 방향이며 양쪽 끝 단이 고정단이면서 굽힘 하중을 받을 경우

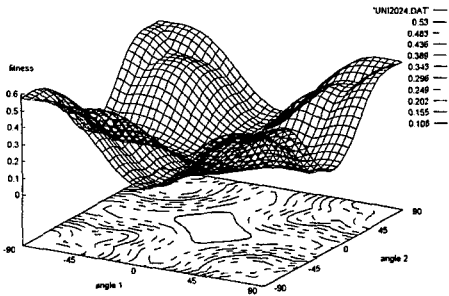


Fig. 1 Failure index of 3/4 FML for uniaxial loading

섬유 방향은 고정단을 수직으로 연결하는 방향임을 알 수 있다.

단순 인장 하중을 받을 경우 모든 적층각이 0°일 때 최소 파괴 지수를 가졌으며, 굽힘 하중의 경우 90°일 때 최소 파괴 지수를 가졌다. 이것은 앞에서 언급한 단순 인장 하중과 원통형 굽힘 하중 하에서의 참 값(exact solution)과 잘 일치하는 결과이며, 본 해석이 타당함을 보여주는 것이다. Fig.1 에 단순 인장을 받는 FML 의 적층 각도에 따른 파괴 지수를 나타내었다.

집중하중 하에서의 유한 요소 해석

앞 절에서 얻은 타당성을 바탕으로 집중하중 하에서의 FML 의 파괴지수를 유한 요소 해석을 통해 계산하였다. 해석에 사용한 금속판의 두께는 0.2mm 이며 섬유층의 두께는 0.125mm 이다.

Al1050 은 순수 알루미늄에 가까운 합금으로 항복강도는 160MPa 정도이며 탄성계수는 70GPa 이다. 섬유층은 (주)SK 케미칼의 탄소섬유/에폭시(USN125)를 이용하였으며 섬유방향의 강도와 탄성계수는 각각 2.2GPa, 140GPa 다. 해석한 FML 는 3 장의 금속판 4 장 섬유층으로 이루어졌으며 판의 두께는 1.1mm 이다.

경계조건은 양단 고정과 모든 면 고정의 두 조건에서 수행하였으며, 하중은 판의 중심에 200N 을 가하였다. Fig. 2 에 양쪽 끝단을 고정시키고 해석한 결과를 나타내었다.

파괴지수는 0°를 중심으로 대칭으로 완만하게 분포하고 있으며 0°부근에서 가장 높은 값을 가졌다가 90°로 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들은 양쪽 끝단이 고정된 경우의 해석임을 고려할 때 타당성 있는 결과들이라 할 수 있다.

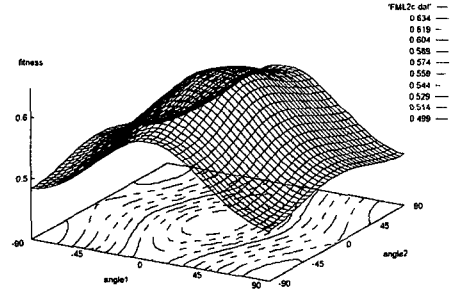


Fig. 2 Failure index of 3/4 FML for point loading

섬유 방향에 따른 섬유-금속 적층판의 압입 특성

Fig. 3 에 FML-A[0/0]의 압입 선도를 나타내었다. 변위의 증가에 따라 하중이 증가하다가 첫 번째 피크를 지나 감소하며, 다시 하중이 증가하여 두 번째 피크를 지나게 된다. 이러한 것은 동일한 방향으로 적층된 FML 의 공통된 특징이다. 일반적으로 압입 특성은 Hertz 식을 이용하여 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 0.2kN 에서부터 첫 번째 피크가 발생하기 어느 정도 전 구간까지의 데이터를 이용하여 회귀 분석하였다. 이것은 0.2kN 보다 낮은 응력 구간에서는 UTM 장비의 구조상 어느 정도 오차가 있을 수 있고, 첫 번째 피크 가까이는 이미 발생한 균열 때문에 하중의 증가율이 감소할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 Hertz 식을 이용하여 회귀 분석한 곡선이 실제 하중 곡선과 달라지는 점을 거시적 관점에서의 균열 발생 시작으로 보았다. 이는 균열의 발생으로 인해 하중의 증가율이 변화가 생길 수 있다는 점에서 타당하다. 초기 균열은 시편의 변형 형태로 볼 때 시편의 밑면에 있는 알루미늄 층과 섬유층 사이에 약간의

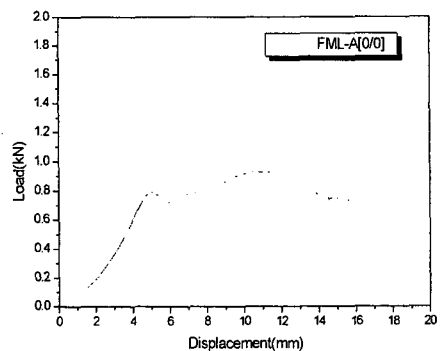


Fig. 3 Indentation curve of FML-A[0/0]

층간 분리(Delamination)가 발생하고 여기에서 발생한 균열이 섬유 분리를(Debonding)을 일으키면서 판의 두께 방향으로 전파되어 거시적 관점의 초기 균열을 발생시키고, 발생한 균열은 하중의 증가율을 감소시키면서 첫번째 피크에 도달한 다음 때까지 섬유를 따라 균열이 성장하게 되고, 이를 지나면 균열이 경계면에 도달하여 더 이상 전파할 수 없게 되면 시편의 폭 방향으로 변형을 일으키면서 다시 하중이 증가하게 된다. 이 때 하중은 진행된 균열사이를 비집고 들어 가려고 발생하는 힘이기 때문에 섬유의 파단(Breakage)은 없으며 압입자가 관통할 때 까지 하중이 증가하다가 관통 후 감소하게 된다.

섬유의 각도의 증가에 따라 초기 균열 발생 하중은 증가하는 경향을 나타내는데 이것은 앞 절의 유한요소해석에서의 결과와 같이 섬유의 각도가 커질수록 강성의 증가에 의한 파괴 지수가 감소하기 때문이다.

Fig. 4 에는 FML-A[90/90]의 압입 선도를 나타내었다. 섬유 각도의 증가에 따라 균열 개시 하중이 증가하여 첫 번째 피크와 두 번째 피크가 거의 동일함을 볼 수 있으며 첫 번째 피크와 두 번째 피크사이에서 하중이 떨어지는 구간이 명확하다. 이것은 섬유의 방향이 90°일 경우 굽힘 변형이 비교적 쉽게 발생하기 때문이다.

이상의 압입 실험에서 나타나는 손상 개시 하중을 유한요소법을 이용하여 계산한 파괴 지수와 비교 하였다. 유한요소법의 경우 균열을 고려하지 않으므로 손상 개시점을 파괴 지수와 비교하는 것이 타당하다. Fig. 5 에 실험에서 구한 균열 개시점과 유한 요소법을 이용하여 계산한 파괴 지수의 역수값을 나타내었다. 계산값과 실험값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 SOP FML 의 경우 인접한 섬유간의 간섭에 의한 강성 영향이

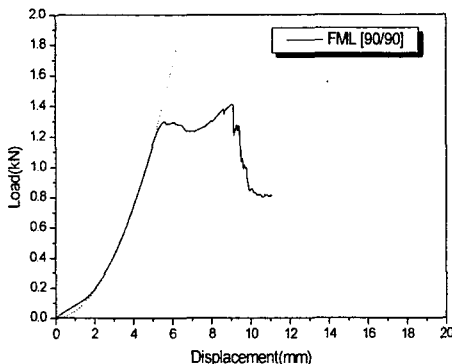


Fig. 4 Indentation curve of FML-A[90/90]

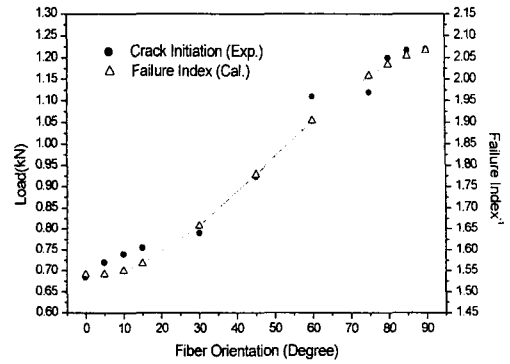


Fig. 5 Damage initiation and failure index for singly oriented ply FML-A

없기 때문에 섬유 방향에 따른 강성만을 고려한 복합재료 적층판 이론을 이용해도 분석이 가능하기 때문이다.

또한 이러한 결과는 강성에 의해 초기 균열 개시점이 결정되고 이 균열은 섬유 분리로 이어진다는 앞 장의 모델이 타당한 것을 나타낸다.

5. 결론

1. 일방향 보강 섬유 금속 적층판(SOP FML)은 양단이 고정된 경우 섬유 방향의 증가에 따라 손상 개시 하중이 증가하였으며, 이는 강성의 향상에 기인하는 것이다.

2. SOP FML 의 손상 개시를 복합재료 적층판 이론과 유한요소해석을 이용하여 모델링하였으며 실험 결과와 잘 일치하였다.

참고문헌

- (1) K. Kondo, *Advanced Composite Materials*, Vol. 4, No. 3, 1995, pp.197-298
- (2) A. Asundi and Alta Y.N. Choi, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.63, 1997, pp.384-394
- (3) J.L. Chen and C.T. Sun, *Composites Science and Technology* vol.36, 1989, pp.321-337
- (4) M. Kawai et al., *Int. J. Mech. Sci.* Vol.40, nos.2-3, pp.183-198, 1998