

집중하중을 받는 일방향 섬유 금속 적층판의 손상 거동

남현욱* · 김용환** · 정성욱** · 정창규** · 한경섭*

Damage Behavior of Singly Oriented Ply Fiber Metal Laminate under Concentrated Loading Conditions

H.W. Nam, Y.H. Kim, S.W. Jung, C.K. Jung, S.W. Jung and K.S. Han

Key Words : Fiber Metal Laminate(섬유금속적층판), Indentation(압입), Damage(손상)

Abstract

In this research, damage behavior of singly oriented ply (SOP) fiber metal laminate (FML) subject to concentrated load was studied. The static indentation tests were conducted to study fiber orientation effect on damage behavior of FML. During the static indentation tests, Acoustic Emission technique (AE) was adopted to study damage characteristics of FML. AE signals were obtained by using AE sensor with 150kHz resonance frequency and the signals were compared with indentation curves of FML.

As fiber orientation angle increases, the crack initiation load of SOP FML increases because the stiffness induced by fiber orientation is increased. The penetration load of SOP FML is influenced by the deformation tendency and boundary conditions.

Cumulative AE counts were well predicted crack initiation and crack propagation and AE amplitude were useful for prediction of damage failure mode. During the matrix cracking, fiber debonding and fiber breakage, AE amplitude has 45~60dB, 60~80dB and 90~100dB, respectively.

1. 서론

현재 대부분의 FML 은 동일한 방향으로 섬유를 적층하여 기준 축에 평행하게(Align) 사용하는 것이 대부분이며, 기준 축에 평행하지 않은(off axis) FML 에 대한 연구는 부족한 편이다. 인장 하중 같은 in-plain 하중에 대하여는 이러한 것에 대한 몇몇 연구들이 보고 되고 있으나[1,2,3] 압입이나 충격 하중 같은 out of plain 하중에서는 이러한 연구들이 전무하다. 그러나, FML 이 실제 구조물에 적용되었을 경우 기울어진 각도로 사용될 가능성이 높고 기울어진 각도에 따라 그 특성이 달라짐으로 이에 대한 연구는 중요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 교차하지는 않고 동일한 방향으로 적층된 (Singly Oriented Ply, SOP) FML 의 압입 특성을 섬유의 방향에 따라 연구하였다.

2. 이론

2.1 정적 압입

일반적으로 압입에서 발생하는 접촉력은 Hertz 의 접촉 법칙으로부터 구해진다. Willis[4] 는 등방성(Isotropic) 재료에 적용되는 Hertz 접촉 법칙을 비등방성 (Anisotropic)재료에 맞게 수정하여 다음과 같은 식을 구했다.

$$F = k\alpha^n$$

여기서 F 는 접촉력, α 는 변위, k 는 물질에 따른 접촉 상수이다. 이 식은 압입 시험시 각 재료의 강성을 나타내 주는 것이 가능하다. 즉, n 이 높을수록 강성이 큰 재료이며, 낮을수록 작은 재료이다. 각각의 상수는 압입 시험에서 얻어진 자료를 바탕으로 회귀 분석하여 구하게 된다. 본 연구에서는 이 식을 이용하여 균열 개시전의 압입 선도를 회귀 분석하여 이 식과 실제 곡선이 벗어

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

나는 점을 거시적 균열의 개시로 정하였다. 이것은 균열의 발생이 강성의 저하를 가져온다는 점에서 타당하다.

2.2 음향방출법(Acoustic Emission, AE)

2.2.1 AE의 원리

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료내부에 축적되어 있던 변형에너지(strain energy)는 파면 형성에너지, 열에너지, 격자 변형 에너지, 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이때 외부에서의 계측 장치의 힘에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파를 AE 신호라 한다. 탄성파는 본질적으로는 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 압전센서에 의해서 전기적 신호로 변환될 때 비로소 AE 신호로 검출되게 된다

2.2.2 발생기구(AE Source Mechanisms)

고체 내에서의 전위(dislocation)의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있는데, 전자의 경우는 연속형 신호를, 후자의 경우는 돌발형 신호를 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제로는 음향방출의 발생원은 대상재료의 특성에 의해 좌우된다. 예를 들면 복합재료 중에서도 금속기지 복합재료(MMC)에서는 상기의 두 가지 발생원이 모두 고려될 수 있으나, 고분자기지 복합재료(FRP)의 경우에는 전위에 의한 음향방출의 발생은 배제된다. 대신에 고분자기지의 균열 발생, 강화섬유와 모재 계면의 분리 및 마찰, 강화섬유의 절단 등이 일반적으로 제시되고 있다. 금속 재료에서의 발생원으로는 전위의 두 가지 외에도 쌍정이나 결정 입계 이동, 그리고 비금속재물과 모재의 분리, 고상변태, 용융 및 응고, 자구(magnetic domain)의 이동, 성장 및 소멸 등이 알려져 있다.

3. 실험

3.1 시편 제작

본 연구에서 사용한 금속판은 알루미늄(Al1050)이며, 섬유층은 탄소섬유/에폭시 prepreg (주)SK 케미칼, USN125 type A)를 이용하였다. 이 prepreg의 두께는 0.125mm이며 섬유방향 인장강도와 탄성계수는 각각 2.2GPa, 140GPa이다.

금속판의 두께는 FML 중 섬유의 파괴비를 결정하게 됨으로 이를 적절히 조절하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 FML의 금속판으로 사용되

는 재료는 0.2-0.5mm 정도의 2024 나 7075 알루미늄이 사용된다. 그러나 이들 재료는 높은 가격 때문에 경제성이 떨어지는 면이 있다. 본 연구에서는 0.2mm의 Al1050을 이용하여 FML을 제작하였다. 이것은 경제성 측면이 외에도 본 연구에서 수행하고자 하는 적층 순서에 따른 압입 거동의 변화를 비교적 쉽게 연구할 수 있기 때문이다.

FML의 제작 과정은 FRP의 경우와 유사하나, 금속판과 섬유층이 적층되기 때문에 층간 분리(Delamination)가 발생할 가능성이 높으며, 이를 방지하기 위하여 이들 사이의 결합력을 높이는 것이 중요하다. 금속판과 섬유층의 결합력을 높이는 방법으로 금속판을 표면 처리하는 방법이 있으며, 금속의 종류에 따라 달라진다. 본 연구에서는 FPL(Forest Products Lab.)을 이용하여 알루미늄을 표면 처리하였다. [5]

표면 처리된 금속판은 prepreg와 적층하여 Hot Press를 이용하여 성형하였다. 시편은 $[M/\theta_1/\theta_2/M/\theta_2/\theta_1/M]$ 으로 적층 구조를 가진다. 편의를 위해 시편의 명칭은 사용된 금속과 각도에 따라 FML-A $[\theta_1/\theta_2]$ 라 하였다.

섬유의 방향성(Fiber orientation)에 따른 압입 거동을 연구하기 위하여 $[\theta_1/\theta_2]$ 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.

Fig. 1에 제조된 FML 압입 시편과 성형 후 임의의 형상을 변형시킨 FML을 나타내었다. 이것은 FML의 가공성이 우수한 것을 보여주고 있다.

3.2 압입 시험

일반적인 압입이나 충격시험에 사용되는 규격은 BSS7260, ASTM3763, NASA-ST1의 규격으로 나눌 수 있다. BSS7260은 시편의 노출 형태가 직사각형

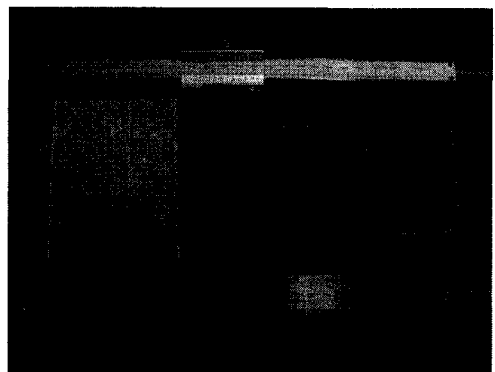


Fig. 1 Fabricated Fiber Metal Laminate

이며, ASTM3763은 원형, NASA-ST1의 경우 정사각형이다. 본 연구의 시편형태는 NASA-ST1이 가장 유사하지만, 이 경우 경계조건을 조절할 수 없기 때문에 시편의 노출 형태가 정사각형이면서 경계조건을 조절할 수 있도록 고정 장치를 제작하였다. 압입 시험은 모든 조건에서 시편의 양 끝단만 고정시켰다. 시편의 크기는 80 × 100 (mm)이며 고정시켰을 경우 노출 되는 부분의 크기는 70 × 70 (mm)이다. 각 조건 별로 시편 3 개를 실험하였다.

압입 시험은 Shimadzu 사의 UTM(5ton)를 사용하였다. 압입자를 시편 상단 부분이 위치시키고 5mm/min의 변위계로 시험을 수행하였다. 압입 시험은 대부분의 경우 관통이 일어난 직후 시험을 정지 하였다. 이때 압입자의 형태는 일반적인 충격시험에서 사용하는 충격체와 동일한 형상을 가지도록 제작하였다. 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. 로드셀(Load Cell)에서 측정되는 전압(Voltage)신호를 PCL 818 Lab Card(Advantech)을 이용하여 받았으며, 실제 하중과의 보정을 위해 X-Y 플로터에서 기록되는 신호와 비교하여 보정 계수를 구하였다. 또한 데이터의 노이즈를 제거하기 위하여 5Hz 저주파 여파기(Low pass filter)를 제작하여 로드셀에서 나오는 신호가 저주파 여파기를 거친 다음 Lab Card 에 전달되도록 하였다.

3.3 음향 방출법 시험

AE 시험은 압입 시험과 병행하여 수행하였으며, 사용한 시편은 압입 시험에서와 동일하다. AE 시험은 SOP FML-A 중 손상 특성이 달라지는 대표적인 적층 각도에서 수행하였다. SOP FML-A의 경우 FML-A[0/0], [45/45], [90/90]에 대하여 시험하였다.

AE 시험에 사용한 압전변환자는 150kHz의 공진 주파수를 갖는다. 압전변환자의 고정을 위하여 판에 진공그리스를 바르고 그 위에 변환자를 올려 압착시켰다. 이 때 압전변환자의 위치는 항상 동일하도록 하였으며 압입 시험시 압입자와 접촉하지 않도록 하였다.

5mm/min의 속도로 하중을 가하여 압입 시험을 행하면서 검출되어진 AE 신호는 이득(gain)이 40dB인 예비 증폭기를 통하여 이득이 20dB인 추가 증폭기의 지원을 받는 PAC사의 SPATRAN-AT를 사용하여 수록, 해석하였다. 여기서 threshold 값은 45dB로 하였다.

4. 결과

Fig. 2에 FML-A[0/0]의 압입 선도를 AE 신호와 함께 나타내었다. 변위의 증가에 따라 하중이 증가하다가 첫번째 피크를 지나 감소하며, 다시 하중이 증가하여 두 번째 피크를 지나게 된다. 이러한 것은 동일한 방향으로 적층된 FML의 공통된 특징이다. 일반적으로 압입 특성은 Hertz 식을 이용하여 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 0.2kN에서부터 첫번째 피크가 발생하기 어느 정도 전 구간까지의 데이터를 이용하여 회귀 분석하였다. 이것은 0.2kN보다 낮은 응력 구간에서는 UTM 장비의 구조상 어느 정도 오차가 있을 수 있고, 첫번째 피크 가까이에는 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 증가율에 변화가 생길 수 있다는 점에서 타당하다.

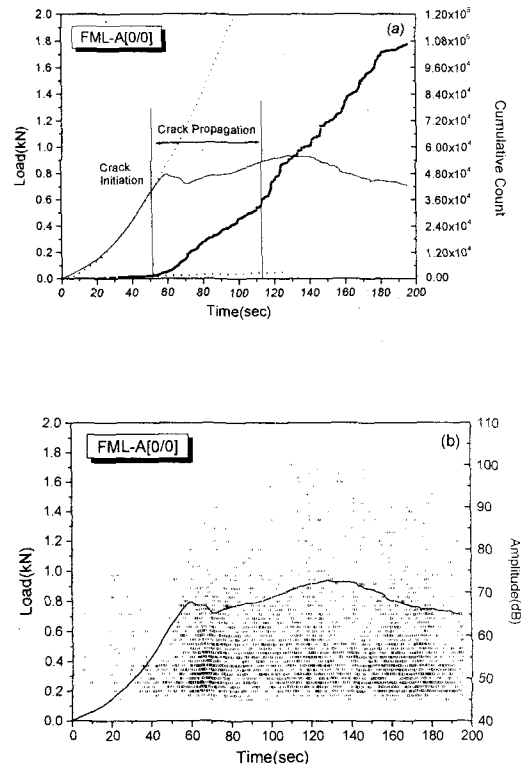


Fig. 2 Test data of FML-A[0/0] showing the load-time curve and AE response (a) cumulative count (b) amplitude

초기 균열은 시편의 변형 형태로 볼 때 시편의 밑면에 있는 알루미늄층과 섬유층 사이에 약간의 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 힘이기에 때문에 섬유의 파단(Breakage)은 없으며 압입자가 관통할 때 까지 하중이 증가하다가 관통 후 감소하게 된다. 따라서 FML-A[0/0]의 경우 첫번째 피크를 지나면서 시편 자체의 하중 지지 능력은 상실했다 할 수 있다.

Fig. 2 (a)에 나타나듯이 누적 AE count는 초기에 선형적으로 증가하는 구간을 보인 다음 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 선형적인 구간을 벗어나는 점에서의 하중을 균열 개시 하중과 비교하면 상당히 유사한 것을 볼 수 있다. 이것은 앞에서 Hertz 식을 이용하여 구한 균열 개시 하중이 타당한 것을 보여 준다. 또한 두 번째 변곡점은 균열 진전이 끝나는 지점을 나타내 주는 것으로 FML-A [0/0]의 손상 거동과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

압입 초기에 나타나는 신호는 60~70dB 의 비교적 높은 신호로 미루어(Fig 2 (b) 참조) 알루미늄과 섬유층 사이의 층간 분리에서 나타나는 신호로 생각되며 이 후 층간 분리 후의 균열이 모재 사이로 전파되어 나타나는 신호로 생각되는 50dB 의 낮은 신호를 거친 다음 거시적 균열의 시작점으로부터 60~80dB 의 증진폭을 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 구간은 균열의 시작점으로부터 균열 진전이 끝나는 약 120 초 이전 까지 계속되는데 이것은 실제 균열 진전 거동과 잘 일치한다. 120 초 이후의 90~100dB 의 높은 진폭영역은 압입자가 균열 사이를 넓히고 지나가기 위해 X 방향의 변형을 동반하면서 약간의 섬유 파괴와 층간 분리를 동반하면서 나타나는 신호로 생각된다. FML-A[5/5], FML-A[10/10]은 균열 개시 하중, 첫번째 피크, 두 번째 피크의 값이 FML-A[0/0] 보다 높다는 점이 외에는 FML-A[0/0] 거의 유사한 압입 거동을 보인다. 초기 균열 발생 하중의 증가는 섬유의 각도가 커질수록 강성의 증가에 의한 파괴 지수가 감소하기 때문이다. 하중이 첫번째 피크를 지나면서 시편은

섬유방향을 따라 변형하려는 경향을 가지는데, 실제로 시편은 X 방향으로만 변형이 가능하다. 이러한 조건은 시편의 변형을 방해함으로써 두 번째 피크를 상승시킨다.

이러한 경향은 섬유의 방향 각도의 증가에 따라 더욱 커져, FML-A[45/45]에서는 X 방향으로 변형이 발생하지 않게 된다. 따라서 압입자는 시편을 관통할 때 균열 틈을 비집고 들어가지 못하고 섬유를 파괴하면서 지나가면서 관통 하중을 상승시킨다. 이것은 Fig. 3 의 FML-A[45/45]의 압입 선도에서 확인 할 수 있다. 압입 선도의 두 번째 피크에서의 급격한 하중 감소가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3 (a)의 누적 AE count 선도는 FML-A [0/0]에서와 마찬가지로 거시적 균열의 예상점에서 누적 AE count 의 일차 변곡점이 발생하는 것을 볼 수 있으며 균열의 진전이 끝나는 지점에서 2 차 변곡점을 가져 FML-A 의 손상 거동을 잘 나타내 주고 있다.

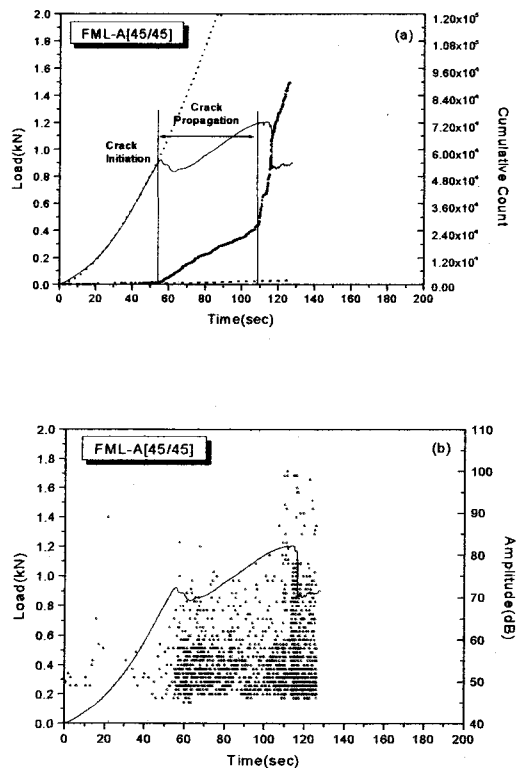


Fig. 3 Test data of FML-A[45/45] showing the load-time curve and AE response (a) cumulative count (b) amplitude

Fig. 3.(b)에 하중 선도와 AE 진폭을 나타내었다. 압입 초기에 50~60dB의 낮은 신호들은 모재 균열로 생각되며 거시적 균열의 시작점에서 60~80dB의 중진폭 신호들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 신호는 섬유에 파괴가 발생하기 직전인 110 초까지 발생하는데, 이 구간에서 균열이 섬유의 방향을 따라 진전하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 FRP의 AE 신호 중 계면 분리에 해당하는 신호가 중진폭이라는[6] 것에도 잘 일치하고 있다. 균열 진전이 끝나는 지점으로부터 80~100dB의 고진폭 신호가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 여기서 섬유의 파단이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 섬유의 파단시 높은 진폭이 발생하는 것은 섬유의 강도와 탄성율이 모재에 비하여 매우 높기 때문에 파단시 방출되는 에너지는 모재에 비하여 훨씬 높을 것이며 이에 따라 AE 진폭도 높게 나타나기 때문이다. FML-A[0/0]의 경우 압입자의 관통에 따라 고진폭의 신호들이 간헐적으로 나타나는데 비하여 FML-A [45/45]의 경우 섬유의 파단에 따라 고진폭의 신호들이 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

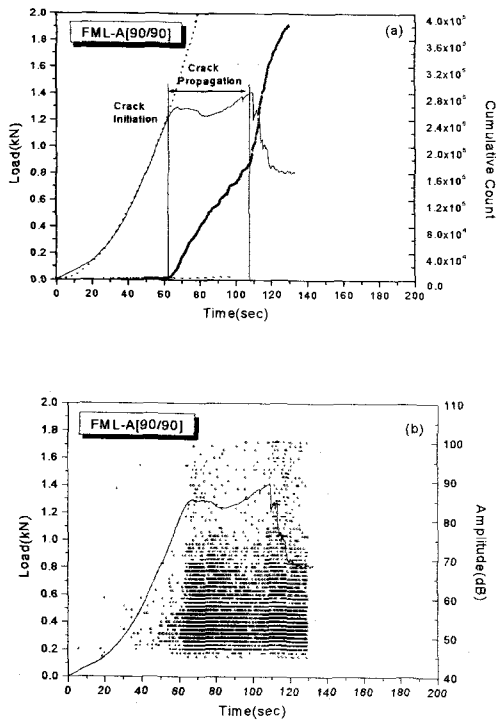


Fig. 4 Fig. 3.5-23 Test data of FML-A[90/90] showing the load-time curve and AE response(a) cumulative count (b) amplitude

Fig. 4에 FML-A[90/90]의 압입 선도를 AE 신호와 함께 나타내었다. 두 경우 모두 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. Fig. 4의 (a) 누적 AE count 역시 앞에서와 같이 균열의 시작점과 누적 AE count의 변곡점이 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. FML-A [90/90]에서는 균열 개시 직후부터 80~100dB의 고진폭의 신호들이 검출되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 균열의 진전과 함께 섬유의 파괴가 일어났다는 것을 의미한다. 이러한 신호는 균열이 진전됨에 따라 60~80dB의 중진폭 신호들을 주로 발생되며 관통 직전에 다시 고진폭의 신호들이 발생되고 있다. 따라서 FML-A [90/90]에서는 균열 진전 과정에서 섬유의 파괴를 동반한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 FML-A[0/0], FML-A[45/45], FML-A[90/90]의 각 시편들의 누적 AE count 선도를 나타내었다. FML-A [90/90]은 많은 수의 섬유 파단으로 인해 누적 Count는 40 만개 정도를 나타내었으며, FML-A [45/45]와 FML-A [0/0]의 경우 각각 10 만개 정도의 누적 Count를 나타내었다. FML-A[90/90]과 FML-A[45/45]의 경우 균열개시와 섬유의 파단 발생점에서 두개의 변곡점을 명확히 가졌으나 FML-A[0/0]는 섬유의 파단이 발생하지 않아 상대적으로 변곡점이 명확히 나타나지 않았다. 이러한 누적 Count 선도는 FML-A의 압입 특성을 잘 나타내어 FML-A의 특성 변화 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

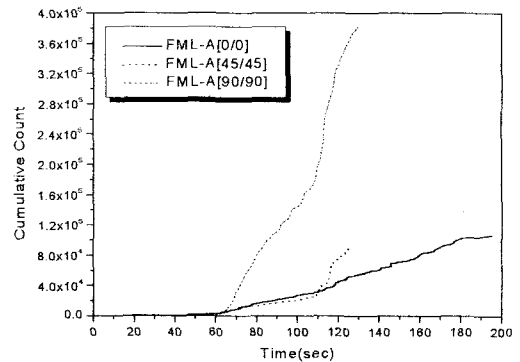


Fig. 5 Cumulative AE count of singly oriented ply FML

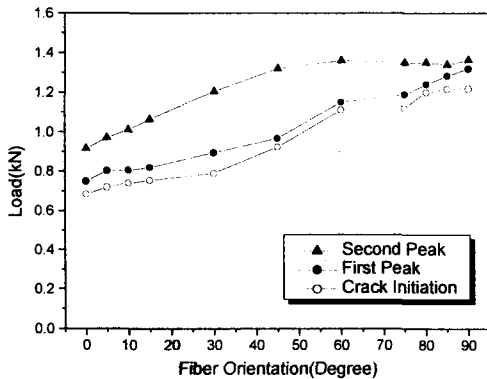


Fig. 6 Behavior of crack initiation point, first and second peak varied with fiber orientation

압입 시험한 모든 시편의 각도에 대한 균열 개시 하중, 첫 번째 피크, 두 번째 피크를 나타내면 Fig. 6 과 같다. 각도가 증가 함에 따라 균열 개시 점 및 첫 번째 피크는 계속 증가하였으며, 두 번째 피크는 45° 이 후에서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이것은 섬유 각도가 45° 보다 클 경우 시편이 X 방향으로 변형을 할 수 없기 때문에 섬유 파단에 의해 관통이 발생하기 때문이다.

5. 결론

본 연구는 집중하중 하에 있는 일방향 섬유 금속 적층판의 손상 거동에 관한 연구로 섬유 방향에 따른 손상 특성을 압입 시험과 음향 방출법을 이용하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SOP FML 의 균열 개시 하중은 적층 각도의 증가에 따라 증가하였으며, 이는 섬유 방향성에 따른 강성의 향상에 기인하는 것이다.

2. SOP FML 의 거시적 균열은 섬유 분리의 형태로 나타나 섬유의 방향을 따라 성장하였으며, 관통 하중은 경계조건에 영향을 받아 45 까지 증가하다 이후 일정한 값을 나타내었다.

3. SOP FML 의 누적 AE 선도의 변곡점은 균열 개시점과 비교적 잘 일치하였으며, 이 때 AE 진폭은 60~80dB 의 신호를 나타내어 거시적 균열이 섬유 분리 형태임을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) J.L. Chen and C.T. Sun, 1989, "Modeling of Orthotropic Elastic-Plastic Properties of ARALL Laminate," Composites Science and Technology vol.36, pp.321-337
- (2) M. Kawai et al., 1998, "Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE," Int. J. Mech. Sci. Vol.40, nos.2-3, pp.183-198
- (3) G.X. Sui and G.H. He, 1995, "Effects of fiber orientation on the vibration damping characteristics of virall laminates," J. of materials science letters, vol. 14, pp.1218-1219
- (4) J.R., Willis, 1966, "Hertzian Contact of Anisotropic Bodies," Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 14, pp.163-176
- (5) Raymond F. Wegman, 1989, Surface preparation techniques for adhesive bonding, Noyes Publications
- (6) Q.Q. Ni and E. Jinen, 1997, "Fracture Behavior and acoustic emission in bending test on single fiber composites," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, No.6, pp.779~796