

論文

음향 방출법을 이용한 집중하중을 받는 일방향 섬유 금속 적층판의 손상 해석

남현욱*, 김용환**, 한정섭***

Damage Analysis of Singly Oriented Ply Fiber Metal Laminate under Concentrated Loading Conditions by Using Acoustic Emission

H.W. Nam*, Y.H. Kim** and K.S. Han***

ABSTRACT

In this research, damage behavior of singly oriented ply (SOP) fiber metal laminate (FML) subjected 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.

The damage process of SOP FML was divided by three parts, i.e., crack initiation, crack propagation, and penetration. The AE characteristics during crack initiation show that the micro crack is initiated at lower ply of the plate, then propagate along the thickness of the plate with creating fiber debonding. The crack grow along the fiber direction with occurring 60~80dB AE signal. During the penetration, the fiber breakage was observed. As fiber orientation increases, the fiber breakage occurs more frequently. The AE signal behaviors support these results. Cumulative AE counts could well predict crack initiation and crack propagation and AE amplitude were useful for the prediction of damage failure mode.

초 록

집중하중을 받는 일방향 보강(singly oriented ply, SOP) 섬유 금속 적층판(fiber metal laminate, FML)의 손상 거동을 음향 방출법(acoustic emission, AE)을 이용하여 연구하였다. 섬유 방향의 영향을 연구하기 위하여 다양한 섬유 방향을 가지는 SOP FML을 제작하였으며, UTM을 이용하여 압입 하중을 가하였다. 압입 시험 시 발생하는 AE신호는 150kHz의 공진 주파수를 가지는 AE센서를 이용하여 측정하였으며, 여기에서 발생된 신호를 하중-변위 선도와 비교하였다.

SOP FML의 손상 과정은 균열 개시, 균열 전파, 관통에 따라 3구간으로 나누어 졌다. 균열 개시전까지의 AE 신호의 특성으로 보아 미소 균열이 시편의 하부에서 발생하고 이 균열이 시편의 두께 방향으로 전파되어 섬유 분리를 발생시키는 것으로 생각된다. 발생된 균열은 섬유 방향을 따라 성장하였으며, 이 때 60~80dB의 AE신호들이 발생되었다. 관통이 발생할 때는 80~100dB의 고진폭의 AE신호가 나타나 섬유의 파괴가 발생함을 보였으며, 섬유의 방향이 증가할수록 섬유의 파괴가 많이 발생되었다. 누적 AE count선도는 FML의 압입 특성을 잘 나타내어 FML의 특성 변호 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

* 포항공과대학교 기계공학과 연구원, 교신저자 (E-mail:redhair@postech.ac.kr)

** 포항공과대학교 기계공학과 대학원

*** 포항공과대학교 기계공학과 교수

1. 서 론

섬유 금속 적층판(fiber metal laminate, FML)은 Fig. 1과 같이 섬유와 금속을 차례로 적층한 다음 경화(curing)시켜 제작된 재료로서, 가볍고 높은 강도를 가지는 동시에 피로 균열 지연 특성이 우수하기 때문에 차세대 항공기 재료로 주목을 받고 있다. FML은 FRP에서 문제가 되는 횡방향 하중이나 충격 하중에 대해서도 우수한 특성을 보이며, 성형성이 좋아 목적 형상에 따라 plate, hollow shaft 등의 임의 형상으로 제작이 가능하며, milling, sawing, drilling, rivetting 등 금속에서 사용하는 가공 및 결합 기술을 사용할 수 있다. 또한 사용 목적에 따라 프리프레그 (prepreg : glass, graphite, aramid 등)와 금속(metal : Al, Fe, Cu 등)을 적절히 선택하여 사용하거나 FRP에서와 같이 프리프레그의 적층 각도나 수를 조절함으로써 설계자의 의도에 맞게 설계하는 것이 가능하다. 그러나 현재 대부분의 FML은 동일한 방향으로 섬유를 적층하여 기준 축에 평행하게 사용하는 것이 대부분이며, 기준 축에 평행하지 않은(off axis) FML에 대한 연구는 부족한 편이다. 인장 하중 같은 in-plain 하중에 대하여는 섬유 방향의 영향 대한 몇몇 연구들이 보고 되고 있으나[1-3] 압입이나 충격 하중 같은 out of plain 하중에서는 이러한 연구들이 전무하다. 그러나, FML이 실제 구조물에 적용되었을 경우 다양한 각도로 사용될 가능성이 높고 주어진 각도에 따라 그 특성이 달라짐으로 이에 대한 연구는 중요하다 할 수 있다.

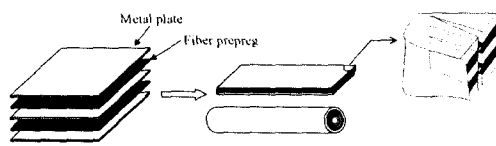


Fig. 1 Fiber Metal Laminates.

한편 음향 방출법 (acoustic emission, AE)에 의한 비파괴 검사법은 대상물에 붙인 AE센서에서 미세적인 파괴에 따른 탄성과 방출을 수신하여 광범위하게 손상의 위치, 크기, 종류를 추정할 수 있는 검사법으로써 금속 뿐만 아니라 복합재료, 세라믹 등에 적용하기 위한 노력이 진행되고 있다.

금속에서는 소성변형이나 균열의 발생 및 전파 등이 AE 발생의 주요 원인이 되며 FRP의 경우에는 기지 균열, 섬유/기지 계면 분리, 층간 분리, 섬유의 뽑힘(Pullout), 섬유 파단 등이 주요한 AE 발생원으로 알려져 있다[4].

FML은 기존의 FRP에서 보이는 이러한 발생원 외에도 금속판에서 발생할 수 있는 소성 변형이나 균열의 발생과

성장, Prepreg와의 분리 등 더욱 다양한 발생원이 존재한다. 금속복합재료나 고분자 복합재료의 AE특성에 관해서는 많은 연구가 수행되고 있으나[5-8], FML의 AE특성과 관련된 연구는 매우 드물다. Yan 등이 인장 시험 시 발생하는 FML의 AE특성을 원재료인 알루미늄 및 케블라 섬유의 AE특성과 비교한 것[9] 외에는 이러한 연구가 보고되고 있지 않고 있다.

본 연구에서는 집중 하중을 받는 일방향 보강(singly oriented ply, SOP) 섬유 금속 적층판의 손상 특성을 연구하기 위하여 다양한 적층각을 가진 SOP FML을 제작하였으며, 각각의 하중 선도와 적층 각도에 따른 AE신호를 비교하여 손상 특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1 시편 제작

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

Table 1 Material Properties

Fiber	USN 125	Metal	Al1050
$E_{1,1}$ (GPa)	140	E_m (GPa)	70
$E_{2,1}$ (GPa)	8		
$G_{12,1}=G_{13,1}$ (GPa)	3.2	G_m	26.3
$G_{23,1}$ (GPa)	3.2		
$\nu_{12,1}$	0.31	$\nu_{12,m}$	0.33
X(MPa)	2200		
Y(MPa)	21	Y _t (MPa)	160
S(MPa)	226		100

각 재료의 물성은 Table 1에 나타내었다. 금속판의 두께는 FML 중 섬유의 부피비를 결정하게 됨으로 이를 적절히 조절하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 FML의 금속판으로 사용 되는 재료는 0.2-0.5mm 정도의 알루미늄이 사용된다. 본 연구에서는 0.2mm의 Al1050을 이용하여 FML을 제작하였다.

FML의 제작 과정은 FRP의 경우와 유사하나, 금속판과 섬유층이 적층되기 때문에 층간 분리가 발생할 가능성이 높으며, 이를 방지하기 위하여 이들 사이의 결합력을 높이

는 것이 중요하다. 금속판과 섬유층의 결합력을 높이는 방법으로 금속판을 표면 처리하는 방법이 있으며, 금속의 종류에 따라 달라진다. 본 연구에서는 FPL(forest products lab.)방법을 이용하여 알루미늄을 표면 처리하였다[10].

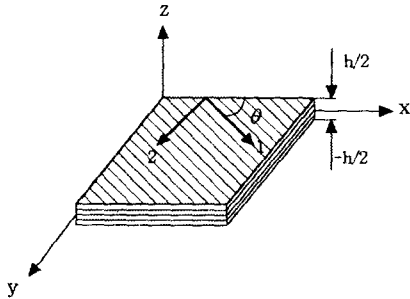


Fig. 2 fiber orientation and coordinate.

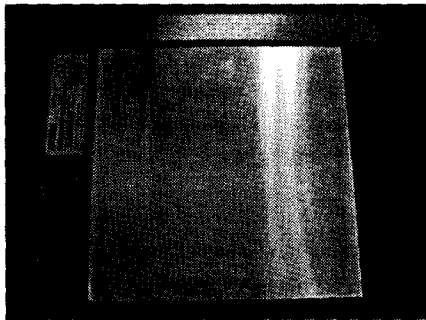


Fig. 3 Fabricated Fiber Metal Laminate.

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. Fig. 2에 섬유의 방향과 좌표를 나타내었다. 편의를 위해 시편의 명칭은 사용된 금속과 각도에 따라 FML-A $[\theta_1/\theta_2]$ 라 하였으며, $[\theta_1/\theta_2]$ 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 11종류의 시편을 준비하였다.

Fig. 3에 제조된 FML을 나타내었다. 제조된 시편은 전단기(shearing machine)를 이용하여 가공하였으며, 섬유와 금속간의 층간 분리는 발생하지 않았다.

2.2 압입 시험

일반적인 압입이나 충격시험에 사용되는 규격은 BSS7260, ASTM3763, NASA-ST1의 규격으로 나눌 수 있다.

BSS7260은 시편의 노출 형태가 직사각형이며, ASTM3763은 원형, NASA-ST1의 경우 정사각형이다. 본 연구의 시편 형태는 NASA-ST1이 가장 유사하지만, 이 경우 4면이 고정 단이기 때문에 섬유 방향의 영향을 연구하기에는 적절하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 시편을 양단 고정할 수 있도록 고정 장치를 제작하였다. 압입 시험은 모든 조건에서 시편의 양 끝단을 고정시켰다. 시편의 크기는 80×100 (mm)이며 고정시켰을 경우 노출 되는 부분의 크기는 70 × 70 (mm)이다. 각 조건 별로 시편3개를 실험하였다.

압입 시험은 Shimadzu사의 UTM(5ton)를 사용하였다.

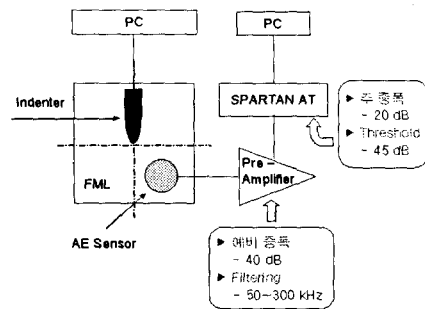


Fig. 4 Test sample and the AE monitoring system.

압입자를 시편 상단 부분이 위치시키고 5mm/min의 변위 제어로 시험을 수행하였다. 압입 시험은 관통이 일어난 직후 시험을 정지 하였다. 이때 압입자의 형태는 일반적인 충격시험에서 사용하는 충격체와 동일한 형상을 가지도록 제작하였다. 압입자의 끝은 반구형태이며, 지름은 12.7mm이다. 압입 시험에서 나타나는 신호는 UTM에서 기본 제공되는 X-Y 플로터를 이용해 얻었으며, 편의를 위해 PC로 데이터를 얻을 수 있도록 하였다. 로드셀에서 측정되는 전압 신호를 PCL 818 Lab Card(advantech)을 이용하여 받았으며, 실제 하중과의 보정을 위해 X-Y플로터에서 기록되는 신호와 비교하여 보정 계수를 구하였다. 또한 데이터의 노이즈를 제거하기 위하여 5Hz저주파 여과기(low pass filter)를 제작하여 로드셀에서 나오는 신호가 저주파 여과기를 거친 다음 Lab Card에 전달되도록 하였다.

2.3 음향 방출 시험

AE 시험은 압입 시험과 병행하여 수행하였다. AE센서의 위치는 Fig. 4 와 같이 시편의 우측하단에 설치하였다. 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 AE신호는 이득(gain)이 40dB인 예비 증폭기를 통하여 이득이 20dB인 추가 증폭기의 지원을 받는 PAC사의 SPATRAN-AT를 사용하여 수록, 해석하였다. 여기서 threshold값은 45dB로 하였다.

3. 결과

일반적으로 압입에서 발생하는 접촉력은 Hertz의 접촉 법칙으로부터 구해진다. Willis[11] 는 등방성 재료에 적용되는 Hertz 접촉 법칙을 비등방성 재료에 맞게 수정하여 다음과 같은 식을 구했다.

$$F = k\alpha^n \tag{1}$$

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

Fig. 5 에 FML-A[0/0]의 압입 선도를 AE 신호와 함께 나타내었다. SOP의 압입 선도는 변위의 증가에 따라 하중이 증가하는 I구간, 균열의 전파에 의해 하중이 떨어지는 II구간, 관통(penetration)이 발생하는 III구간으로 나누어 지는 특성을 나타내었다. I구간은 앞에서 언급한 Hertz식을 이용해서 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 0.2kN에서부터 첫 번째 피크가 발생하기 어느 정도 전 구간까지의 데이터를 이용하여 회귀 분석하였다.

I구간의 초기에는 AE 신호가 매우 적게 나타나다 20sec 되는 구간에서 60~70dB의 신호가 나타나며, 다시 낮은 진폭을 가지는 신호들이 발생하였다. 60~70dB의 신호는 복합 재료에서 층간 분리가 발생할 때 발생하는 신호로[8]. 압입자가 하중을 가하는 시편 중앙부의 알루미늄층과 섬유층 사이의 층간 분리가 미소하게 발생된 것으로 생각된다. 이 이후에 낮은 진폭의 신호들이 발생하는데, 45~60dB의 진

폭으로 미루어 층간 분리가 발생된 지점에서 미소 균열이 성장하는 것을 생각된다. Fig. 6 (a)는 균열개시 직전의 시편을 촬영한 것으로 시편 상부의 알루미늄 층에 균열 전파가 시작되려는 것을 볼 수 있다. 거시적 균열이 시작되는 II구간에서는 60~80dB의 신호들이 나타나기 시작하는 것을 볼 수 있는데 이러한 신호들은 발생된 균열이 섬유 방향을 따라 성장하면서 섬유 분리를 발생시킴에 따라 나타나는 신호이다. Fig. 6의 (b), (c)는 균열이 전파되고 있는 II구간에서의 시편을 촬영한 사진이다. 0도 방향의 섬유를 따라 균열이 섬유 분리를 일으키며 성장하는 것을 볼 수 있다.

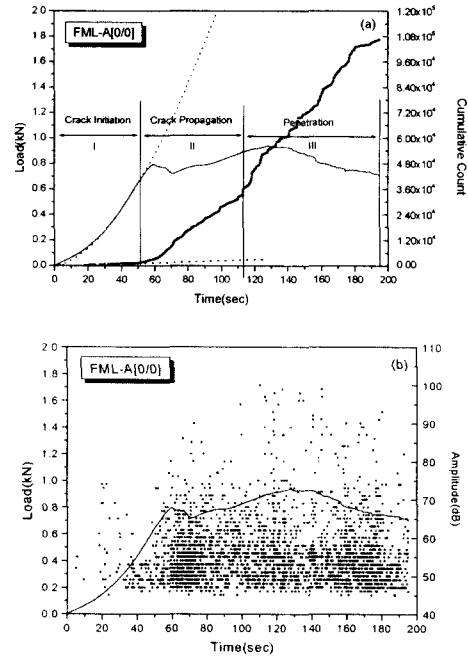


Fig. 5 Test data of FML-A[0/0] showing the load-time curve and AE response (a) cumulative count (b) amplitude.

관통이 발생하려는 III구간에서는 80~100dB의 고진폭의 신호들이 나타나고 있다. 일반적으로 80~100dB 고진폭의 신호들은 섬유 파괴될 때 발생하는 신호인데, FML-A[0/0]에서는 압입자가 섬유 파괴를 일으키면서 관통되는 것이 아니라 섬유 분리에 의해 발생된 틈을 비집고 들어가기 때문에 매우 적은 수의 신호만 발생된다. Fig. 5 (a)의 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 Hertz식을 이용하여

구한 균열 개시 하중이 타당한 것을 보여 준다. 또한 두 번째 변곡점은 실제 균열 진전이 끝나는 점과 잘 일치하여 FML의 손상 거동을 잘 나타내었다.

이상의 AE 신호의 특성과 Fig. 6에서 FML-A[0/0]의 손상 진행과정은 다음과 같다. 시편 밑 부분의 알루미늄 층과 섬유층 사이에 층간 분리가 발생하고 여기에서 발생한 균열이 섬유 분리를 일으키면서 판의 두께 방향으로 전파되어 거시적 관점의 초기 균열을 일으킨다. 발생한 균열은 하중의 증가율을 감소시키면서 섬유를 따라 균열이 성장하게 되며, 섬유의 파단은 거의 발생하지 않는다.

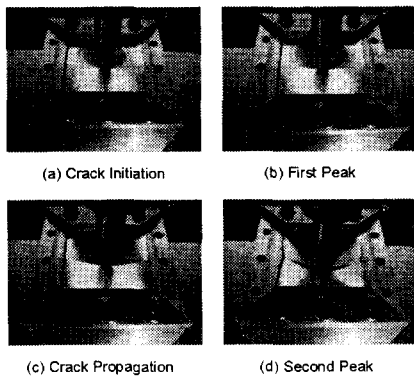


Fig. 6 Damage Process for FML-A[0/0].

Fig. 7 에 FML-A[5/5], [10/10], [30/30]의 압입 선도를 나타내었다. FML-A[5/5], [10/10]의 경우 균열 개시 하중과 관통 하중이 FML-A[0/0] 보다 높다는 점이 외에는 FML-A[0/0] 거의 유사한 압입 거동을 보인다. 그러나 FML-A[30/30]의 압입 거동은 0~10의 낮은 섬유 방향의 FML과 약간 달라지는 것을 볼 수 있다.

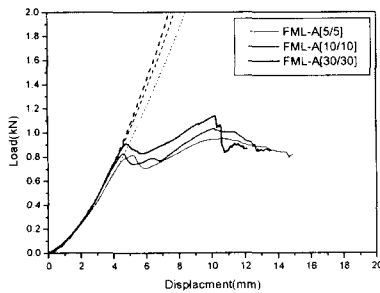


Fig. 7 Indentation curve of FML-A[5/5], [10/10] and [30/30].

즉, 두 번째 피크에서 갑자기 하중이 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 섬유의 파단이 발생한다는 증거이다. 이러한 경향을 보이는 것은 섬유 방향 각도가 증가함에 따라 시편의 변형이 힘들어 지기 때문이다. 이러한 경향은 섬유의 방향 각도의 증가에 따라 더욱 커져, FML-A[45/45]에서는 X방향으로 변형이 발생하지 않게 된다. 따라서 압입자는 시편을 관통할 때 균열 틈을 비집고 들어가지 못하고 섬유를 파괴하면서 지나가면서 관통 하중을 상승시킨다. 따라서 FML-A[45/45]의 손상 기구는 낮은 각도의 SOP FML과는 다른 손상 기구를 가진다.

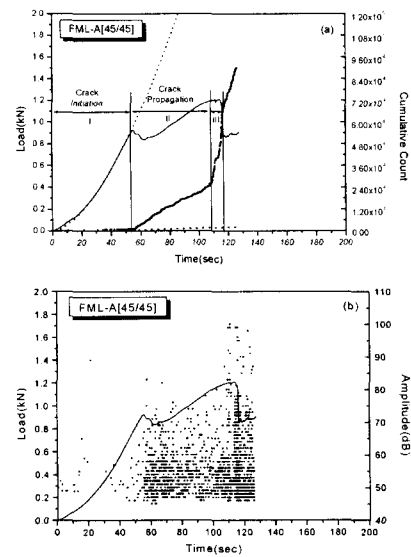


Fig. 8 Test data of FML-A[45/45] showing the load-time curve and AE response (a) cumulative count (b) amplitude.

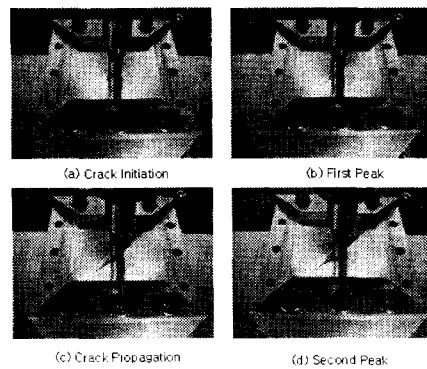


Fig. 9 Damage Process for FML-A[45/45].

Fig. 8의 FML-A[45/45]의 압입 선도와 AE 신호를 나타내었다. FML-A[45/45]의 압입 선도 역시 균열 개시, 균열 전파, 관통이 발생하는 구간으로 나누어지며 FML-A[0/0]과 마찬가지로 누적 AE count의 변곡점들은 거시적 균열의 시작과 끝을 잘 나타내 주었다. FML-A[45/45]의 I구간의 AE신호는 FML-A[0/0]에서와 같이 초기에 50dB이하의 낮은 신호를 나타내다 20sec 부근에서 비교적 높은 진폭을 가진 AE 신호가 발생이 되었다가 다시 45-60dB의 신호들이 나타났다. 이것은 초기 미소 균열의 발생이 FML-A[0/0]과 유사하다는 것을 나타낸다.

II구간에서도 FML-A[0/0]에서와 같이 60-80dB의 중진폭 신호들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 신호는 섬유의 파괴가 발생하기 직전인 110초까지 발생하는데, 이 구간에서 균열이 섬유의 방향을 따라 진전하고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 균열 진전이 끝나는 III에서는 FML-A[0/0]에 비하여 80-100dB의 높은 진폭을 가지는 AE신호가 상당히 많이 발생하고 있는데, 이것은 섬유의 파괴가 많이 발생하고 있다는 것을 나타낸다. 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.

이렇게 FML-A[45/45]의 III구간에서 많은 섬유의 파괴가 발생하는 것은 FML-A[45/45]가 FML-A[0/0]에 비하여 X방향으로의 변형이 어렵기 때문이다. Fig. 9에 FML-A[45/45]의 손상 과정을 나타내었다. 초기 균열 발생이나 전파 거동은 FML-A[0/0]과 비슷하지만 관통 할 때 X방향으로 거의 변형하지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에 FML-A[60/60], [75/75], [80/80] 압입 선도를 나타내었다. FML-A[60/60] 압입 선도는 FML-A[45/45]와 비슷한 경향을 나타내면서도 두 번째 피크가 가장 높게 나타났다. 이것은 이 각도에서 굽힘 변형을 하기도 어렵기 때문인데, 각도가 증가 할수록 첫 번째 피크에서 두 번째 피크까지의 변형량이 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 변형 경향은 섬유의 방향이 Y축과 동일할 경우(90°) 굽힘 변형이 쉽게 일어날 수 있다는 것을 의미하는데, FML-A[75/75]의 압입 선도에서 균열발생 이후 두 번째 피크까지의 기울기가 완만해지면서 섬유의 파단이 일어남을 볼 수 있다. FML-A[80/80]에서는 굽힘 변형이 더욱 쉬워져 첫번째 피크 이후 하중이 감소한 후 다시 증가하여 섬유 파단으로 이어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11에 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. Fig. 11의 (a) 누적 AE count 역시 앞에서와 같이 균열의 시작점과 누적 AE count의 변곡점이 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

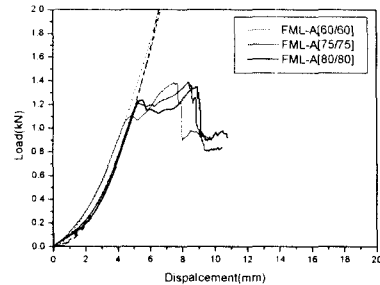


Fig. 10 Indentation curve of FML-A[60/60], [75/75] and [80/80].

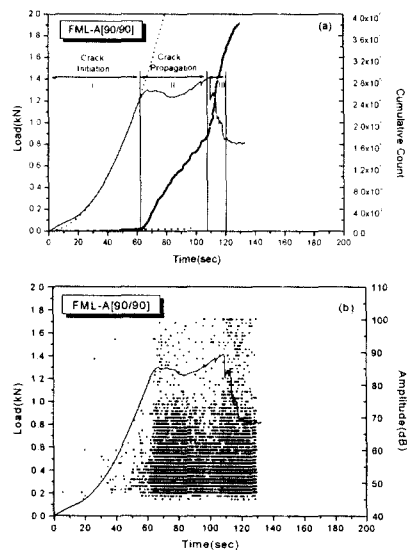


Fig. 11 Test data of FML-A[90/90] showing the load-time curve and AE response(a) cumulative count (b) amplitude

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 고진폭의 신호는 균열이 진전됨에 따라 줄어들었다가 관통 직전에 다시 다수의 고진폭의 신호들이 발생되었다.

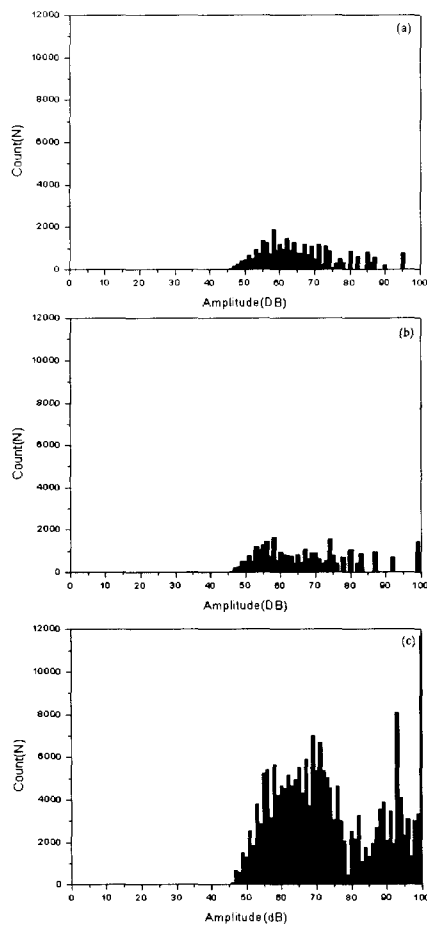


Fig. 12 Amplitude distribution histogram of AE counts for (a)FML-A[0/0] (b) FML-A[45/45] (c) FML-A[90/90] during crack propagation.

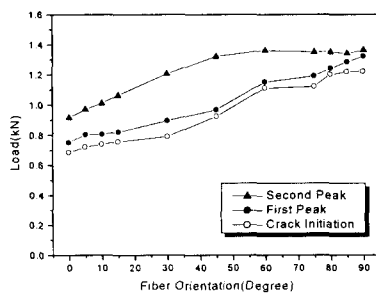


Fig. 13 Behavior of crack initiation point, first and second peak varied with fiber orientation.

Fig. 12에 II구간에서의 FML-A[0/0], [45/45], [90/90]의 진폭에 따른 AE count를 나타내었다. FML-A[0/0], [45/45]은 이 구간에서 50~80dB의 AE 신호들이 대부분을 차지하고 있으나 FML-A[90/90]의 경우 80~100dB이상의 신호들이 많이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 FML-A [90/90]는 거시적 균열은 섬유 분리와 섬유 파괴가 동반되어 발생하는 것을 나타낸다. 압입 시험한 모든 시편의 각도에 대한 균열 개시 하중, 첫 번째 피크, 두 번째 피크를 나타내면 Fig. 13과 같다. 각도가 증가 함에 따라 균열 개시점 및 첫 번째 피크는 계속 증가하였으며, 두 번째 피크는 45° 이후에서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이것은 섬유의 각도가 45° 보다 클 경우 시편이 X방향으로 변형을 할 수 없기 때문에 섬유 파단에 의해 관통이 발생하기 때문이다.

4. 결 론

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. 알루미늄 층과 섬유층 사이에 층간 분리가 발생하고 여기에서 발생한 균열이 섬유 분리를 일으키면서 판의 두께 방향으로 전파되어 거시적 관점의 초기 균열을 일으킨다.
2. 거시적 균열은 섬유 분리의 형태로 나타나 섬유의 방향을 따라 성장하였으며, 섬유의 각도가 증가할수록 균열이 전파할 때 80~100dB의 고 진폭의 AE신호가 발생되어 섬유 파괴를 동반하였다.
3. 누적 AE 선도의 변곡점은 하중 선도에서 정의한 균열 개시점과 잘 일치하였으며, 이 때 AE 진폭은 60~80dB의 신호를 나타내어 거시적 균열이 섬유 분리 형태임을 보였다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Chen, J.L. and Sun, C.T., "Modeling of Orthotropic Elastic-Plastic Properties of ARALL Laminate," Composites

- Science and Technology vol. 36, pp. 321-337, 1989.
- 2) Kawai, M. et al., "Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE," *Int. J. Mech. Sci.* Vol.40, No. 2-3, pp. 183-198, 1998.
 - 3) Sui, G.X. and He, G.H., "Effects of fiber orientation on the vibration damping characteristics of virall laminates," *J. of materials science letters*, vol. 14, pp.1218-1219, 1995.
 - 4) Hamstad, M.A., "A Review : Acoustic Emission, a Tool for Composite Material Studies," *Experimental Mechanics*, pp. 7-13, 1986.
 - 5) 윤동진 외, "음향방출을 이용한 Loading-Unloading 인장 시험시 CFRP의 파괴거동해석," *한국복합재료학회지*, Vol. 3, No. 2, pp. 22~30, 1990.
 - 6) 최용만, "복합재료 시험편에서의 AE 발생 특성에 관한 연구," *한국산업안전학회지*, Vol. 6, No. 4, pp. 21~27, 1991.
 - 7) From, P.S. et al, "Indentation and acoustic emission in filtration processed platelet reinforced ceramics," *Mat. Sci. and Eng. A*197, pp. 231~236, 1995.
 - 8) 이유태 외, "탄소섬유 강화 복합재료의 반복하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성," *한국복합재료학회지*, Vol.8, No. 2 pp. 40~51, 1995.
 - 9) Hai, Yand et al, "Study on ARALL failure behavior under tensile loading," *Scripta Materialia*, vol. 35, No. 12, pp. 1379-1384, 1996.
 - 10) Raymond F. Wegman, *Surface preparation techniques for adhesive bonding*, Noyes Publications, 1989.
 - 11) J.R., Willis, "Hertzian Contact of Anisotropic Bodies," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 14, pp. 163-176, 1966.
 - 12) Q.Q. Ni and E. Jinen, "Fracture Behavior and acoustic emission in bending test on single fiber composites," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 6, pp. 779~796, 1997.