

유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 파괴과정과 음향방출 특성

Acoustic Emission Characteristics during Fracture Process of Glass Fiber/Aluminum Hybrid Laminates

우성충*, 최낙삼**†

Sung-Choong Woo* and Nak-Sam Choi**†

초 록 본 연구에서는 편측노치를 갖는 단일 Al판 및 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판에 대해 인장하중하의 파괴 거동에 따른 음향방출(AE) 특성을 살펴보았다. 단일 알루미늄의 파괴시에 발생하는 AE신호는 저주파수 대역을 갖는 신호와 고주파수 대역을 갖는 신호의 2가지 형태로 분류될 수 있었다. 고주파수 대역의 AE는 0.45mm 변위보다 큰 후반부 하중단계에서 주로 검출되었다. 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 경우에는, 고진폭의 긴 유지시간의 신호가 FFT 주파수 해석에 의거하여 거시적인 균열진전이나 Al층과 섬유층 사이의 층간분리에 해당하는 신호로 추정되었다. 위와 같은 AE신호의 해석결과와 광학현미경 및 초음파 스캔에 의한 파괴관찰에 의거하여 섬유층 배향에 따라 상이한 섬유/알루미늄 적층판의 파괴거동과 관련된 AE특성을 규명하였다.

주요용어: 음향방출, 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판, 층간분리, 파괴과정

Abstract Fracture behaviors and acoustic emission (AE) characteristics of single-edge-notched monolithic aluminum plates and glass fiber/aluminum hybrid laminate plates have been investigated under tensile loads. AE signals from monolithic aluminum could be classified into two different types: signals with low frequency band and high frequency band. High frequency signals were detected in the post stage of loading beyond displacement of 0.45 mm. For glass fiber/aluminum laminates, AE signals with high amplitude and long duration were additionally confirmed on FFT frequency analysis, which corresponded to macro-crack propagation and/or delamination between Al and fiber layers. On the basis of the above AE analysis and fracture observation with optical microscopy and ultrasonic T scan, characteristic features of AE associated with fracture processes of single-edge-notched glass fiber/aluminum laminates were elucidated according to different fiber ply orientations.

Keywords: acoustic emission, glass fiber/aluminum hybrid laminates, delamination, fracture process

1. 서론

최근 섬유강화 복합재료와 알루미늄의 단점을 최소화하고 이들의 장점을 극대화시킨 섬유 금속 적

층판 (Fiber Metal Laminates, 이하 FMLs)[1-4]이 유력한 공업재료로서 각광을 받고 있다. 일부 선진국에서는 1980년대 중반부터 상용화하여 반복하중 및 면외하중을 받는 항공기의 주익과 보조익에 부

분적으로 적용되고 있을 뿐만 아니라 현재에는 철도 차량에 그 적용성을 시도하고 있는 상황이다.

하지만 FMLs은 이종재료의 접합으로 발생하는 층간분리, 경화과정에서 기존의 복합재료의 성형시에 발생하지 않는 국부적인 공동현상, 경화과정 동안 금속층과 섬유층의 열적 수축 차이로 인한 잔류응력 등의 문제점을 안고 있어 현재에도 이러한 부분들에 대해서 정확한 해석 및 평가가 이루어지지 않고 있다. 또한, 이러한 문제점들은 혼합형(hybrid type) 복합재 구조물의 건전성, 안전성, 그리고 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 부하초기부터 최종 파단까지의 미시적·거시적 파괴과정을 감시하고 그 파괴발생원을 규명하는 것은 FMLs의 실용적 측면에서 중요하다.

한편, 음향방출(acoustic emission, AE)법은 구조물이 외부하중 하에 구조물 내의 미세손상과 균열, 소성변형이 발생할 때 방출되는 탄성파이며, 이러한 탄성파를 재료표면에 부착한 압전센서로 검출하여 그 특성을 분석 평가함으로써 재료 내부의 파손 상황이나 변형상태를 실시간으로 감시하는 비파괴평가 기법으로 복합재 구조물에서의 적용성을 많은 연구자들에 의해 인정받아왔다. AE법을 이용한 고분자복합재료 또는 금속복합재료의 AE특성에 관해서는 상당히 많은 연구[5-10]가 수행되어져 왔으나 FMLs에 이를 적용하여 모재균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파단(fiber breakage) 외에 알루미늄의 소성변형, 알루미늄층과 섬유층사이의 층간분리의 발생과 성장 등의 다양하고 복잡한 형태의 파괴기구를 규명한 연구는 아직 드문 실정이다. Yan[4] 등은 인장하중을 받는 아라미드 섬유금속적층판의 AE특성을 하중이력에 따른 진폭의 분포로 알루미늄의 그것과 단순 비교하였다. 그런데, AE법을 이용한 최근의 연구동향은 인자해석(parametric analysis)과 함께 각 신호의 파형해석[11,12]과 주파수 분석[13]을 병행하는 것이 더욱 설득력을 얻고 있다. 주파수 분석의 경우에도 특정 사상에 대한 1차 피크 주파수만으로 파괴기구를 평가하여 왔는데, 2, 3차 피크 주파수의 강도가 1차 피크 주파수와 비슷한 경우, 다양한 손상발생원이 구조물 내부에서 복합적으로 발생하는 것을 의미하기 때문에 결코 간과할 수 없다. 또한 전체적인 FMLs의 AE특성을 보다 정확히 평가하고 이해하기 위해서는 이를 구성하는 섬유층과 Al층 각각에 대한 AE거동의 연구가 진행되어야 하며 이를 바탕으

로 FMLs의 연구가 이루어져야 할 것이다. 저자들은 선행연구[14,15]에서 연속형 일방향 및 수직적 유리섬유강화 복합재료 시험편을 노치재와 평활재로 각각 제작하여 인장시험을 실시하고 인자해석과 파형 및 주파수해석을 통하여 AE특성과 파괴과정에 대한 노치의 유무와 섬유배향의 효과를 규명하고 투과식 및 반사식 광학현미경 관찰을 통하여 이들 효과에 대한 확인을 하였다. 또한 단일 Al(1050, 5052)판, GFRP, GFMLs 평활 시험편에 대해서는 인장특성을 평가하고 편축 노치를 갖는 시험편에 대해서는 응력확대계수와 에너지 해방률로서 파괴인성을 평가하였으며 균열선단 및 파단면을 투과식 및 반사식 광학현미경 관찰과 SEM을 이용하여 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 파괴 발생 메커니즘을 규명한 바가 있다[16].

본 연구에서는 편축 노치를 갖는 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판(glass fiber/aluminum hybrid laminates, 이하 GFMLs)의 파괴과정에 따른 음향방출 특성을 파악하기 위하여 단일 Al판의 AE특성을 먼저 파악하고 섬유층 배향에 따른 GFMLs의 AE특성을 인자해석법과 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform)에 의한 파형 및 주파수해석 통하여 신호를 분류·해석하고자 한다. 또한 균열 개시 및 성장에 대한 정확한 AE해석을 위해 인장시험을 하면서 동시에 이동식 광학현미경으로 균열의 진전상태를 관찰하고 시험이 끝난 시험편에 대해서는 광학현미경 관찰과 초음파 스캔을 통하여 GFMLs에의 AE적용성과 AE특성을 해명하고자 한다.

2. 실험

2.1. 시험편 제작

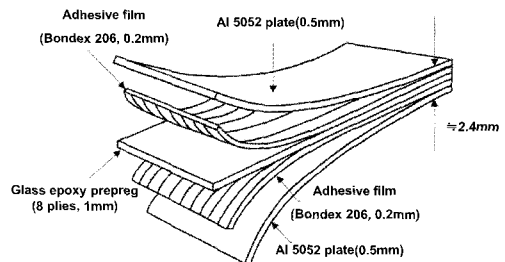


Fig. 1 Illustration of composition of a glass fiber/aluminum hybrid laminate

본 연구에 사용된 GFMLs은 두께가 0.5 mm인 단일 알루미늄 판재 (Al5052)와 두께가 0.125 mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그 (UGN 150, SK Chemical)를 Fig. 1과 같이 2:1의 구성비로 제작하였다. 섬유층의 적층배향에 따른 시험편의 이름, 적층구성 그리고 두께를 Table 1에 나타낸다. 여기서, 0° 방향은 섬유가 시험편 길이방향으로 배향되어 있음을 가리킨다. 섬유층과 Al층 사이에는 접합력을 높이기 위하여 Al표면을 인산처리 (phosphoric acid anodizing, 이하 PAA)하였고 적층시 섬유층과 Al층 사이에 접착필름 (Bondex 206 adhesive, 한국화이바)을 배치하였다. 이와 같이 유리섬유 prepreg와 Al을 hand lay-up 방법으로 적층하여 오토클레이브 내에서 제조사의 추천 경화사이클에 따라 진공백(vacuum bag)방식으로 성형하였다. 이들 시험편과의 AE특성 비교를 위해 단일 Al 판재로 폭 24 mm, 두께 0.5 mm, 게이지 길이 100 mm의 인장 시험편을 Fig. 2와 같은 형상으로 제작하였다. 또한 이들 시험편을 편측 노치(single-edge-notched)를 갖는 시험편으로 만들기 위해 저속 다이아몬드 휠 절단기를 이용하여 손상발생을 최소화하면서 초기노치(길이 12 mm, 폭 0.3 mm)를 편측 노치형으로 가공하였고 이후, 자체 제작한 예비균열 도입장치로 얇은 면도날(thin sharp razor blade)을 이용하여 노치 선단부를 예리하게 만들었다.

Table 1 Various GFMLs, their stacking sequences and thickness

Specimen Designation	Stacking sequence	Thickness (mm)
GFML-UD	[Al/0° ₂ /Al]	2.6
GFML-CP	[Al/0° ₂ /90° ₄ /0° ₂ /Al]	2.3
GFML-90	[Al/90° ₂ /Al]	2.6

2.2. 시험편별 전파속도 측정

Fig. 2의 센서1과 센서2 사이에서 발생하는 유효 신호만을 검출하고 이외의 영역에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 탄성파 측정시스템을 구형하여 Al 및 GFMLs의 시험편 종류별로 전파속도를 측정하였다. 주파수 특성이 비슷한 2개의 AE 센서 (Micro 30, Dunegan Co.) S1, S2를 시험편의 한쪽

표면에 일정거리(D=200mm)를 두어 S1으로부터 50 mm, S2로부터 150 mm만큼 떨어진 위치에서 연필심을 파단시켜 음원 (AE source)을 발생시킨 후, 이 신호를 부착된 센서로 측정하였다. 이 신호를 증폭기(Gain: 40 dB)로 증폭시킨 후 디지털 오실로스코프(LeCroy)를 이용하여 탄성파가 두 센서에 각각 도달하는데 걸리는 도달시간의 차를 구하고 연필심 파단 위치로부터 각 센서간의 거리차를 측정하여 각 시험편 종류마다 종파의 전파속도를 측정 (시험편당 20회 반복)하였다. 이 센서들은 단지 센서가 위치하는 표면의 변위 운동을 감지하게 되며 센서의 출력은 표면 변위를 야기하는 원파형의 형태나 전파경로에 대한 인식이 없으므로, 연필심 파단(pencil lead break)과 같은 알고 있는 음원을 사용하여 평균 전파속도로서 측정하였다. Fig. 3에서 시험편 별로 측정된 비대칭모드의 횡파형 판파의 속도와 인장시험을 하여 얻은 탄성계수값을 함께 나타낸다. 일반적으로 음파속도는 재료의 탄성계수가 클수록 커지게 되는데 시험편 종류별 탄성계수와 횡파의 전파속도를 고려할 때 Fig. 3의 전파속도는 비대칭모드의 횡파형 판파속도로서 타당한 것으로 판단된다.

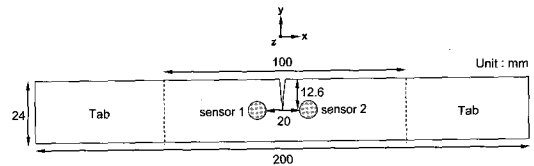


Fig. 2 Schematic of single-edge-notched specimen and AE sensor locations

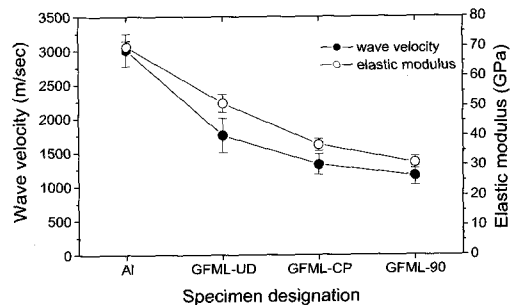


Fig. 3 Measured wave velocity and elastic modulus of Al and GFMLs specimens

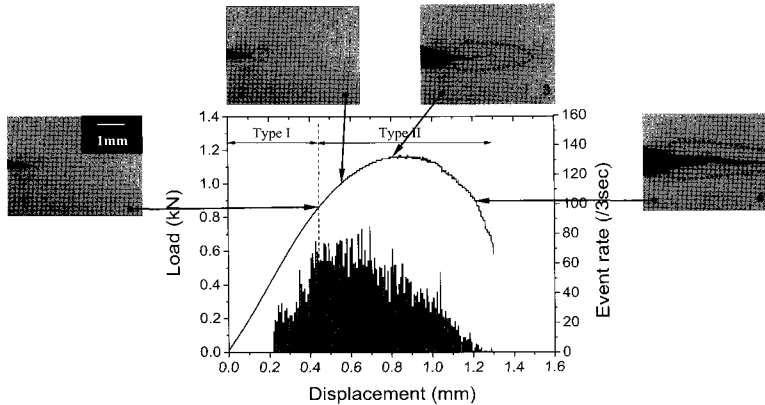


Fig. 4 Load-displacement, AE event-rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN monolithic aluminum specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation zone around the crack tip.

2.3. 인장시험 및 음향방출 측정

GFMLs시험편의 변위증가(0.5 mm/min)에 따른 균열진전 거동 및 손상평가를 위하여 유사한 검출특성을 가진 AE센서 (유효 주파수 검출대역: 100~600 kHz, 공진 주파수: 275 kHz) S1, S2를 시험편의 한쪽 면에 Fig. 2와 같이 부착하였다. 2개의 AE 센서 S1, S2를 시험편의 한쪽 표면에 예비균열과 각각 10 mm 떨어진 지점에 고정구를 이용하여 위치시켰으며 시험편과 센서 사이의 커플런트(couplant)로써 진공 그리스를 사용하였다. 만능 시험기(Zwick, 로드셀 최대용량: 250 kN)에 의해 인장하중 하에서의 하중-변위 곡선을 얻는 동시에, 이동식 광학현미경을 이용하여 시험편의 외관적인 균열진전 거동과 파단과정을 관찰하였다. 인장시험은 시험편의 최대하중을 지나 최대하중의 50%로 하중저하가 일어났을 때 자동 종료되도록 하였다. 감지된 AE 신호는 전치증폭기 (Pre-amp, Gain: 40 dB, threshold level: 40 dB)에 의해 증폭된 후 AE본체(Mistras 2001, PAC)로 보내어져 음향방출신호인자(진폭, 에너지, 유지시간, 사상수 등) 별로 시계열로 감시·분석된다. 음향방출 위치표정은 센서1과 센서2에 걸리는 도달시간차를 이용해 음향방출 측정시스템으로 수행되었고 도달시간차를 측정하기 위한 신호의 sampling rate는 4 MHz로 채택하였다. 음향방출 시험시의 노이즈를 제거하기 위해, 시험기의 그림부분에 시험편을 물린 상태에서 10여분 동안 그대로 두어 그림부분에서 발생하는 신호(20 μs 이하의 유지시간을 갖는 신호)가 비정상적으로 짧은 전기적 잡음신호임을 확인하고, 최종 실험획득된 신호들

을 인자해석할 때 20 μs이하의 유지시간을 가지는 신호들에 대해서는 시험후의 데이터 처리과정에서 모두 제거하였다. 이를 통해 실제의 AE데이터를 확보하여 분석하였다.

2.4. 파손관찰

각 시험편의 균열 선단 부근의 손상역을 관찰하기 위해 인장시험을 하면서 이동식 광학현미경으로 외관적인 균열의 발생 및 성장거동을 관찰하였고 최대하중점까지 하중을 가한 후 시험을 멈추고 하중을 제거한 다음, 시험편의 균열선단 주변 섬유층에서의 손상발생정도를 초음파 현미경(SONIX사의 HS-1000, 35 MHz, 집속형)을 이용한 T-scan (Ultrasonic through-scan)하여 섬유층에서의 손상 발생정도를 관찰하였다.

3. 음향방출거동의 해석

3.1. 단일 알루미늄 판재의 음향방출 특성

Fig. 4는 인장하중 하에서의 단일 AI 노치재의 변위-하중, AE 사상률 그리고 각 하중수준에 대응하는 균열의 성장사진을 함께 나타내며 사진내의 점선은 균열성장에 따른 균열선단 주변 AI표피층의 소성영역을 나타내고 있다. 단일 AI의 경우, 사상률의 분포는 변위 0.21 mm지점에서부터 발생하여 변위 0.45 mm까지 증가하다가 이후 최대하중점까지 완만히 증가하였다. 최대하중점 근처부터 균열이 개시

및 성장함에 따라 사상물은 평균적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 AE에너지 및 진폭의 분포에서도 나타났는데 이는 초기 노치선단에서 소성변형 영역(plastic deformation region)이 발생하여 성장함에 따라 균열선단부가 blunting될 때 나타나는 음향발생거동의 변화를 보여준다. AE에너지와 진폭은 변위 0.45 mm 근처에서 최대값을 나타냈는데, 균열선단의 내부 에너지가 최대로 축적되었다가 내부에서 발생한 전위(dislocation)가 급격하게 변동하면서 그 에너지의 일부가 탄성파로서 일시에 방출된 것을 의미한다. 음향방출 신호의 99%가 70 dB 이하의 저·중진폭 신호를 보였고 에너지 값도 GFMLs에 비해 상대적으로 낮은 수준이었다. 균열은 최대하중지점의 약 95% 수준에서 개시되기 시작하였으며 이후 변위증가에 따라 균열이 약 1.3 mm 정도 성장하여도 하중은 1.15 kN까지 증가하였는데 이는 균열개시 초기에 균열선단부의 소성거동에 어떤 형태의 강화효과가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 단일 AI의 모든 AE사상(event)에 대해서 FFT에 의한 결과를 나타낸다. AI에서 검출된 AE신호의 주파수 특성은 Fig. 5의 (a), (b)와 같이 크게 2가지 type으로 분류될 수 있었는데 최초 AE사상의 발생변위부터 변위 0.45 mm까지의 구간에서 AE신호는 120~260 kHz 대역의 비교적 저주파수 성분(type I)이 대부분이었고, 이 구간 이후에서 최종파단까지의 신호는 192~408 kHz 대역의 비교적 광대역 주파수 성분(type II)이 주로 나타났다. 따라서 변위 0.45 mm 전후에 내부의 소성변형 및 파괴과정에 큰 변화가 생겨 주된 파괴모드가 바뀌었음을 알 수 있다.

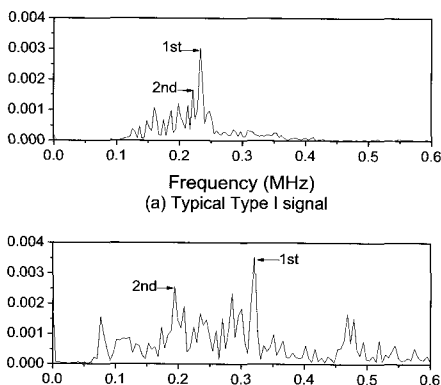


Fig. 5 Typical AE signals Type I and Type II processed by FFT from monolithic AI

Fig. 6 (a)와 (b)에는 각각 단일 AI에서 발생한 모든 AE사상에 대하여 변위증가에 따른 1차 중심주파수와 2차 중심주파수의 변화거동을 나타낸다. 여기서, 1차 중심주파수란 예를 들어, Fig. 5의 주파수 스펙트럼에서 에너지 강도(magnitude)가 가장 큰 피크를 갖는 주파수를 말한다. 2차 중심주파수를 선별하는 기준은 1차 중심주파수 전·후 10 kHz대역의 주파수 성분은 1차 중심주파수에 속하는 것으로 하고 그 대역 밖에서 1차 중심주파수의 에너지강도를 제외하여 가장 큰 피크를 갖는 주파수를 선택하였다. Fig. 4를 보면 변위 0.45 mm에서 사상물의 증가 기울기가 전환되어 높은 사상물이 일정하게 되었는데, 이때 Fig. 6(a)와 같이 410 kHz의 고주파수 신호(화살표 표시)가 1차 중심주파수로서 발생하였고 이 신호는 시험편에서 발생한 최대 에너지 및 최대 진폭값을 가지는 사상에 대응했다. 또한 1차 중심주파수만을 나타낸 그래프 Fig. 6(a)를 보면 190~260 kHz의 대역을 가지는 사상이 일정한 비율로 많이 검출된 것으로 보아, 미시적인 파괴모드에 따른 각 사상이 상당부분 공통된 특징을 내포하고 있다고 사료된다.

한편 2차 중심주파수만을 나타낸 Fig. 6(b)에서는 변위 0.45 mm 이후에 1차 중심주파수 대역에 추가적인 250~300 kHz의 주파수대역을 갖는 신호가 나타났다. 이 구간은 AI시험편의 균열선단에서 균열이 개시 및 성장하는 구간에 해당한다. 따라서 2차 중심주파수의 대역은 1차 중심주파수의 그것과는 확연히 달랐으므로 미시적인 파괴모드가 다르게 나타난 것을 알 수 있다.

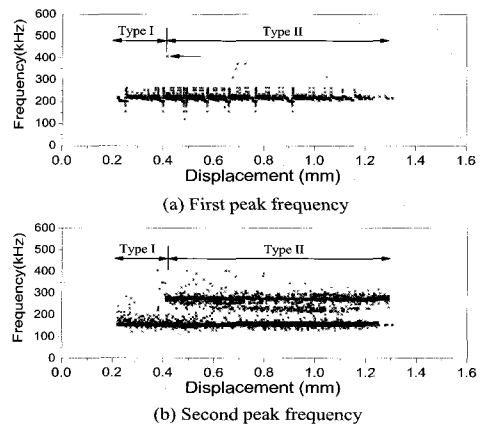


Fig. 6 Frequency analysis for monolithic AI specimen: (a) first peak (b) second peak frequency variation versus displacement

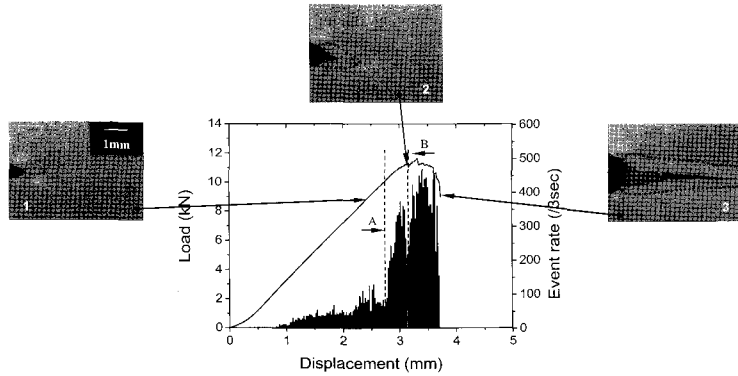


Fig. 7 Load-displacement, AE event rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN GFML-UD specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation

3.2. 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 음향방출특성

Fig. 7에는 인장하중 하에서의 GFML-UD 노치재의 변위-하중, AE 사상률 그리고 각 하중수준에 대응하는 균열의 성장사진을 함께 나타낸다. 변위 2.6 mm (Fig. 7의 사진1)인 시점에서 AI층의 균열이 초기 노치방향으로 조금 개시하였음을 알 수 있다. 섬유층 균열의 진행방향은 AI표피층 때문에 관찰할 수 없었다. AE사상률은 변위 2.75 mm (Fig. 7의 A지점)인 시점에서 최소화되었으며 이 시점에서의 에너지, 진폭값 또한 급락하였다. 이후, A-B구간에서 AE사상률의 급격한 증가가 일어났는데, 노치 선단 부근의 개구형(opening mode) 파괴를 야기하고자 하는 하중상태가 내부의 섬유층에서 전단형(shearing mode) 파괴로 전환되었다고 볼 수 있다. 이러한 하중모드의 변화는 선행연구[16,17]에서도 규명되었듯이 초기균열의 방향이 섬유층의 방향과 수직인 경우에 나타난다. 이후 변위가 증가하면서 80 dB이상의 고진폭 신호와 2 msec이상의 긴 유지시간을 갖는 신호들이 집중적으로 발생하였는데, 이 과정에서 AI층 자체의 균열 진전, 섬유층에서의 초기노치와 수직방향의 전단형 균열진전, 가교섬유의 파단, 그리고 AI층과 섬유층 사이에서는 층간분리가 복합적으로 발생하였을 것이다. 섬유층의 거시적인 전단형 균열의 성장과 함께 섬유층에서의 하중모드는 인장형에서 전단형으로 전환되었지만 AI층에서는 여전히 개구형 파괴가 진행하였으므로, 인장형 하중모드가 시험편에 작용하는 경우 섬유층과 AI층 사이에서는 층간분리가 발생하였을 것이다.

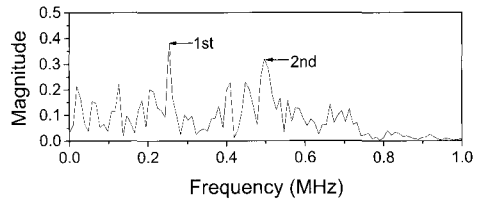


Fig. 8 FFT result for representative AE signals occurred after the stage A in Fig. 7

Fig. 7의 B시점은 AI층의 균열이 0.5 mm정도 급진전한 시점으로 약간의 하중 급저하와 함께 AE사상률도 급저하 했음을 알 수 있다. 즉, AI층의 AE사상률은 Fig. 4와 Fig. 7을 비교하여 알 수 있듯이 GFML-UD시험편의 약 1/5수준이므로, AI층의 균열 급진전에 따른 하중완화효과는 복합재료 내부층에 걸리는 응력을 일시적으로 완화시키고 복합재료층의 미세균열의 진전을 저하시켜 AE사상수의 급저하가 발생한 것이다. B시점 이후에 AE사상률과 AE진폭의 발생수준은 다시 급상승하였으며, 섬유의 길이방향으로 전단형 균열이 진전하면서 가교섬유의 파단이 일어나고 AI층과 섬유층의 층간분리가 활발히 발생했다고 볼 수 있다.

Fig. 8에는 Fig. 7의 A시점(변위 2.75 mm) 이후의 구간에서 발생한 신호들을 대상으로 FFT해석한 대표적인 예를 나타낸다. 1차 중심주파수는 250 kHz 근방에서, 2차 중심주파수는 490 kHz근방에서 나타났다. A-B구간에서 발생한 AE신호들의 공통점은 Fig. 8과 같이 150~500 kHz의 광범위한 주파수 대역의 신호들이 주류를 이루었고 이전에 발생한 신호

들에 비해 상대적으로 그 신호의 강도(magnitude)가 크고 2차 중심주파수 값이 400 kHz이상의 고주파수 대역에 집중했다. 이러한 신호특성을 사상을 변화거동과 하중-변위 선도에 결부시켜보면 AI층과 섬유층에서 균열이 성장하면서 발생하는 복잡한 모드의 파괴거동을 감시할 수 있을 것이다.

Fig. 9(a)와 (b)에는 각각 GFML-UD시험편에서 발생한 모든 AE사상에 대하여 변위증가에 따른 1차 중심주파수와 2차 중심주파수의 변화거동을 나타낸다. 1차 중심주파수만을 나타낸 Fig. 9(a)의 그

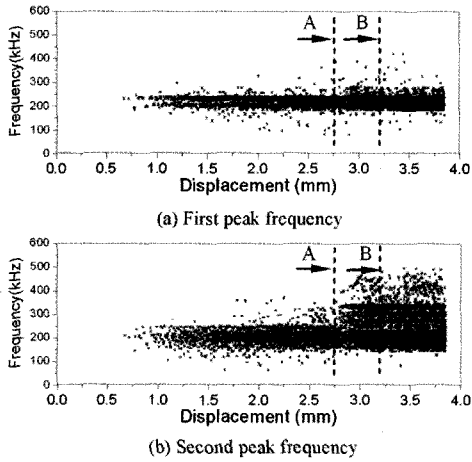


Fig. 9 Frequency analysis for GFML-UD specimen: (a) First peak (b) second peak frequency variation versus displacement.

래프를 보면 190~260 kHz의 저주파수 대역에서 주류를 이루었음을 알 수 있으며, 본 1차 중심주파수 대역은 Fig. 6(a)에 나타나는 신호의 1차 중심주파수 대역에 대응하므로 AI자체의 소성변형 및 파괴시에 발생하는 신호로 볼 수 있다. 하지만 2차 중심주파수만을 나타낸 그래프에서는 변위 2.75 mm를 기점으로 이전에는 저주파수 신호가 대부분이었으며 이후에는 저주파수 대역에 추가하여 260~490 kHz의 중·고주파수의 대역의 신호가 새롭게 발생하였다. 즉, Fig. 7의 A시점 이후의 구간에서 발생한 중·고주파수 대역의 신호는 섬유층의 전단형 균열진전으로 인한 가교섬유의 파단 및 AI층과 섬유층의 층간분리에 대응하는 AE신호라고 볼 수 있다. 따라서 1차 중심주파수와 2차 중심주파수를 함께 고려함으로써 주요 파괴 발생원을 감시할 수 있다고 생각된다.

GFML-CP시험편의 변위-하중, AE 사상률, 진폭 그리고 각 하중수준에 대응하는 균열의 성장사진을 Fig. 10에 나타낸다. 섬유층이 직교적층으로 구성되어 있는 GFML-CP시험편의 경우, 변위 0.47 mm 시점에서 최초 사상이 발생하여 서서히 증가하다가 C시점부터 급상승하면서 80 dB이상의 고진폭의 신호가 다량으로 발생하였다. C시점 이전에는 상대적으로 강도가 약한 내부 90°섬유층의 노치전단 근처에서 손상이 먼저 진행하여 약한 진폭의 AE가 저사상률로 나타난 것으로 생각되며, C시점 이후에는 90°섬유층에서의 균열개시와 함께 고진폭 신호를 발생하는 층간분리와 0°섬유층에서의 섬유파단이

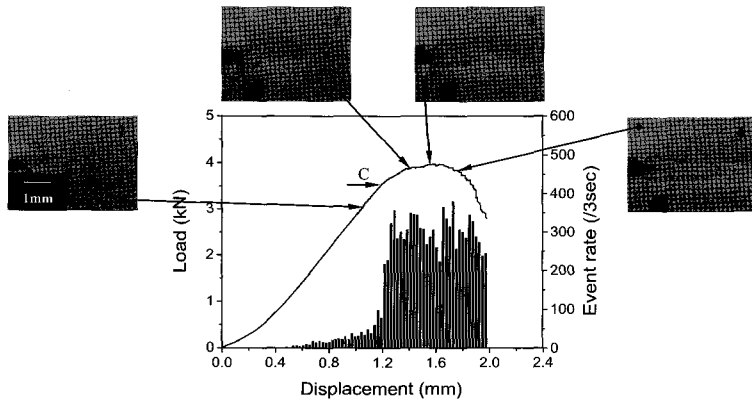


Fig. 10 Load-displacement, AE event rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN GFML-CP specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation zone around the crack tip

발생하였던 것으로 생각된다. 표피층인 AI층에서의 균열개시는 최대하중 직전인 변위 1.55 mm시점에 이르러 이동식 광학현미경을 통해 관찰되었다. 이때 사상률이 급저하 하였고 이후 다시 사상률의 증가가 발생하였는데 이는 Fig. 7의 A-B구간에서 발생하였던 사상률의 패턴과 비슷한 것으로 보아 0°섬유층에서 파괴모드의 전환이 일어나 전단형 균열이 일부 진행한 것으로 생각된다. 그렇지만 0°섬유층의 체적비(시험편 전체 체적의 25%)가 GFRP-UD에 비하여 상대적으로 적기 때문에 최대하중 이후에 0°섬유층에서 형성된 전단형 균열은 초기노치방향에 수직방향으로 길게 진전하지 못하고 섬유다발의 파단이 발생하면서 지그재그형태로 최종파단에 이른것으로 여겨진다.

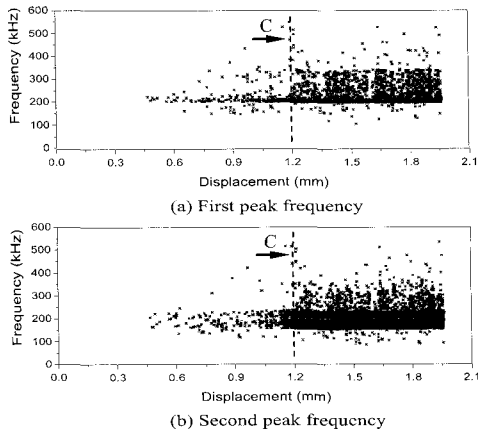


Fig. 11 Frequency analysis for GFML-CP specimen: (a) first peak (b) second peak frequency variation versus displacement

GFML-CP시험편에서 발생한 모든 AE사상에 대하여 변위증가에 따른 1차 중심주파수와 2차 중심주파수의 변화거동을 Fig. 11(a)와 (b)에 나타낸다. 1차 중심주파수만을 나타낸 그래프에서는 200~350 kHz의 중·고주파수 대역이 주류를 이루었고 변위 1.2 mm직후 350~550 kHz사이의 고주파수 신호의 분포가 나타나 있음에 주목할 필요가 있다. 이 구간은 Fig. 10의 C시점 직후의 구간에 해당하며 사상률의 분포가 급증하고 고진폭의 신호들이 주류를 이룬 구간에 해당하며 섬유파단이 주된 발생원인을 설명해 준다. 2차 중심주파수의 변화거동을 나타낸 그래프에서는 1차 중심주파수와 변화거동은 비슷하였고 1.2 mm를 기점으로 이전에는 저주파수 신호, 이후에는 저주파수 대역에 추가하여 중·고주파수 대역의 신호가 현저히 나타나는 것으로 보아 새로운 파괴모드 즉, 섬유파단과 층간분리가 추가로 일어난 것이다.

Fig. 12와 같이 섬유방향으로 초기 노치를 가하였던 GFML-90시험편의 경우, 사상률은 변위 0.4 mm 시점부터 발생하기 시작하여 D시점에서 갑자기 증가하다가 E시점에서 최소화되었고 최대하중점에서 피크를 보였다. 이러한 거동은 진폭 및 AE에너지 분포에서도 비슷한 경향으로 나타났다. 단일재 AI 표피층보다 강도가 약한 섬유층에서 노치 방향을 따라 먼저 내부균열이 개시되는 D시점부터 사상률이 증가하였지만, 이동식 광학현미경 관찰결과 E시점 근처에서 AI표피층의 균열이 진전하면서 오히려 사상률이 최소화되는 것으로 나타났다. 변위 0.92 mm지점에서 AI표피층에서의 균열이 개시했음에도 하중은 최대하중까지 약 0.3 kN 더 증가하였

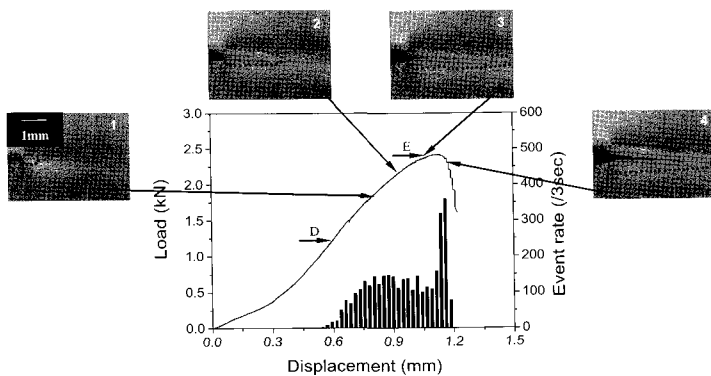


Fig. 12 Load-displacement, AE event rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN GFML-90 specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation zone around the crack tip

는데, 그 이유는 90°섬유층의 인성이 AI표피층보다 훨씬 낮아서 균열이 90°섬유층에서 더 빨리 성장함에 따라 90°섬유층과 AI층 사이에는 균열진전 길이의 차이가 생겨 층간 전단 응력의 발생에 따른 층간분리가 발생한 것에 기인된다. 즉, 균열선단부는 모드II파괴에 추가하여 모드II파괴거동이 조합되므로 하중의 추가적인 증가가 발생했던 것이다. E시점 이후부터 최대하중점 사이에서는 사상률의 급격한 증가가 보였으며 최대하중 이후에 하중이 급격히 저하함에 따라 80 dB이상의 고진폭 신호가 집중적으로 발생하였다. 90°섬유층의 코어층 내부가 완전히 분리되어 이 분리된 균열이 AI층의 두께방향으로는 진전하지 못하고 AI층과 섬유층의 층간분리가 급격히 진행하면서 고진폭의 AE사상이 활발히 발생하였던 것으로 여겨진다. 선행연구[14,15]에서 섬유방향으로 초기노치를 가하였던 GFRP-90시험편의 경우, 균열은 균열선단에서 갑작스럽게 시작되어 빠른 진전을 보인 반면, AI표피층을 가진 GFML-90시험편의 경우에는 노치방향으로의 급격한 균열진전 가능성을 인접한 AI층이 방해하여 최대하중이 동일 시험편 두께를 기준으로 약 17배 이상 증가하였으며 이는 AI층이 복합재의 파괴인성을 크게 증대시켰음을 의미한다.

GFML-90시험편에서 발생한 모든 AE사상에 대하여 변위증가에 따른 1차 중심주파수와 2차 중심주파수의 변화거동을 Fig. 13(a)와 (b)에 나타낸다. 1차 중심주파수만을 나타낸 그래프에서는 160~260 kHz

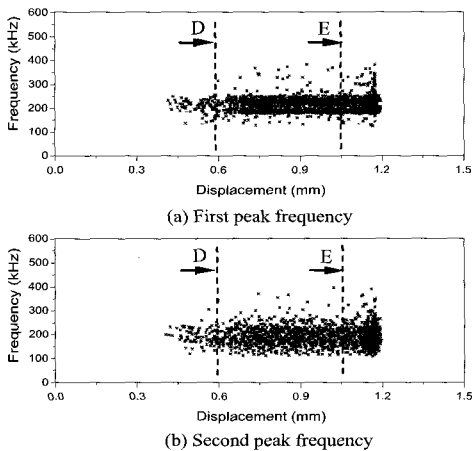


Fig. 13 Frequency analysis for GFML-90 specimen: (a) first peak (b) second peak frequency variation versus displacement

의 비교적 저주파수 대역에 집중하였고 2차 중심주파수는 1차 중심주파수 대역에 더하여 110~260 kHz의 범위에서 분포하였다. 이와 같은 경향은 단일 AI박판의 1차 중심주파수의 대역과 비슷한 것으로 보아 GFML-90시험편의 AE발생은 상당부분 AI에 의한 것이라 여겨진다.

AI과 GFMLs시험편에 대하여 시험시간에 따른 각 AE사상의 진폭 및 유지시간 데이터를 Fig. 14의 좌측에 나타내고, 80dB이상의 고진폭, 유지시간이 2msec이상인 신호들만을 따로 분류하여 우측에 나타낸다. 이러한 고진폭 및 긴 유지시간의 특성을 가지는 신호들은 하중-변위선도에서 거시적인 균열이 개시하여 최종파단까지의 구간에서 광대역주파수 성분을 포함하고 있는 신호들로서 각 시험편의 거시적 손상 및 층간분리에 의한 신호들이라 여겨진다.

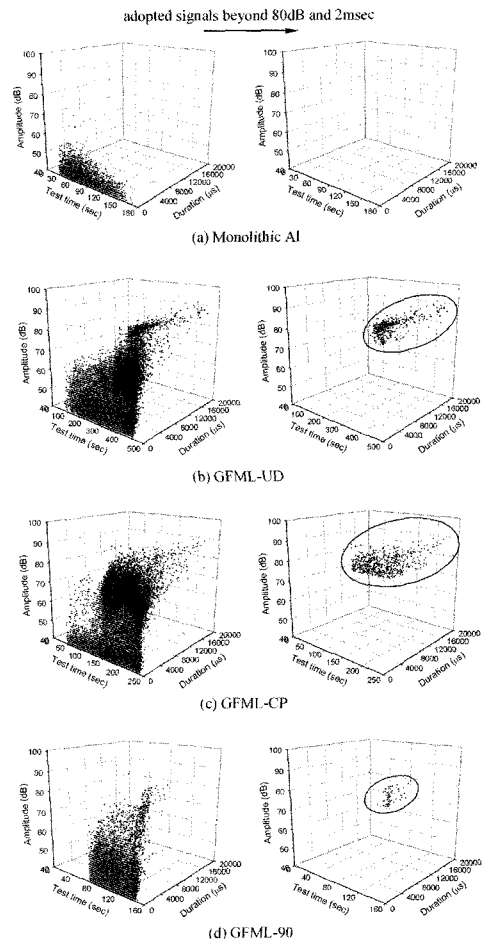


Fig. 14 Distribution of amplitudes and durations versus test time for AI and GFMLs specimen

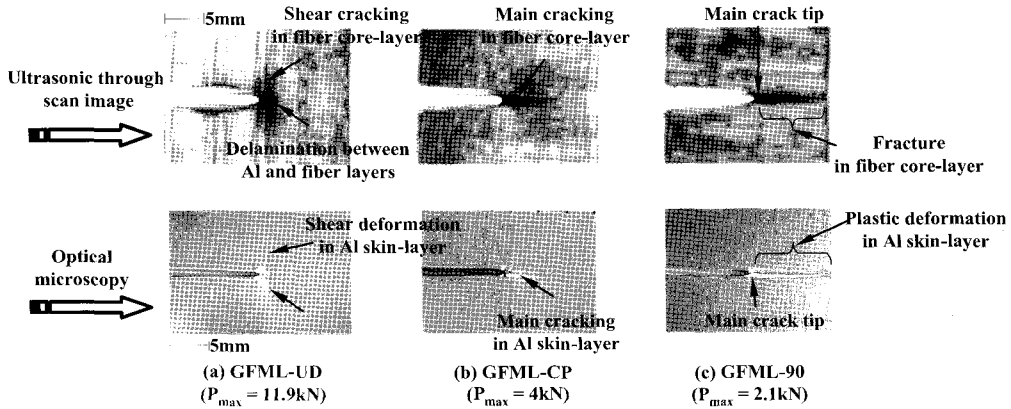


Fig. 15 x-y cross-sectional images observed by Ultrasonic T-scan (upper) and optical microscopy (lower) at P_{max} of GFMLs specimens

단일 Al Fig. 14(a)의 경우, 이러한 특성을 갖는 신호에 대응하는 사상이 존재하지 않았다. (b) GFML-UD의 경우에는 섬유층에서 전단형 균열이 성장하면서 발생하는 가교섬유의 파단 및 Al층과 섬유층사이의 층간분리에 의한 신호라 여겨진다. (c) GFML-CP의 경우에는 지그재그 형식으로 초기노치 방향으로 균열이 진전하면서 0° 섬유층에서는 섬유다발의 파손, 90° 섬유층에서는 가교섬유의 파손 그리고 Al층과 섬유층 사이의 층간분리에 해당하는 신호라 여겨진다. (d) GFRP-90의 경우에는 90° 층에서의 균열 상·하면 사이의 가교섬유의 파단이나 Al층과 섬유층 사이의 층간분리에 의한 신호라 추측된다. AE사상의 활성도 측면에서 볼 때, 이러한 고진폭 및 긴 유지시간을 가지는 신호들은 GFML-90 시험편 보다는 GFML-UD 시험편과 GFML-CP 시험편에서 훨씬 많은 사상수를 나타내었다. 이는 GFML-UD 시험편과 GFML-CP 시험편의 경우가 GFML-90 시험편보다 섬유파단과 층간분리를 훨씬 많이 발생시켰음을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 가지는 AE신호를 분류하여 해석하는 것은 복합재 구조물의 다양한 형태의 균열진전으로 인한 거시적인 파괴거동을 감지할 수 있으므로 유효하다고 생각된다.

Fig. 15는 각 시험편 종류별로 최대하중까지 하중을 가한 후 시험을 중단하고 하중을 제거하여 동일 균열 선단 부위를 초음파 T-scan(위 그림)과 광학현미경(아래 그림)으로 관찰한 사진이다. (a) GFML-UD의 광학현미경 사진에서는 균열선단에서 소성영과 함께 섬유배향으로 전단형 균열이 진전한 모습이 나

타났다. 초음파 T-scan 사진에서는 광학현미경으로 나타나지 않았던 균열선단 주변에서 섬유층과 Al층 사이의 층간분리 영역이 뚜렷하게 나타났고 또한 섬유층에서의 균열은 초기노치 방향으로 진전되지 않은 것을 관찰 할 수 있었다. 이 손상상태는 Fig. 7의 사진 2 바로 직후의 상태이며 이 시점에서는 사상률이 급격히 증가하고 Fig. 9 (a), (b)의 1, 2차 중심주파수 분포는 고주파수에 대응하는 시점에 해당한다.

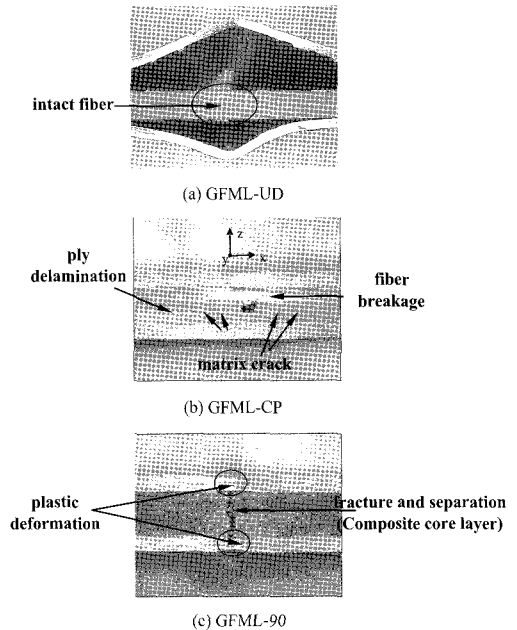


Fig.16 Microscopic thickness-wise views of GFMLs specimens after the tensile test

섬유층이 직교적층으로 구성되어 있는 (b) GFML-CP의 경우에는 균열선단에서 초기 노치방향으로 진행한 균열진전자국이 AI표피층에서 광학현미경 사진을 통해 관찰할 수 있었고 초음파 사진에서는 초기 노치방향으로 훨씬 더 진전한 흔적이 보였다. 이 시점에서의 사상을 분포(Fig. 10)와 1, 2차 중심주파수 분포를 보아 90°섬유층에서 먼저 개시된 균열과 AI층의 균열이 0°섬유층의 전단형 균열발생 가능성을 억제하여 0°섬유층에서는 섬유다발들이 파단되면서 초기 노치방향과 나란한 지그재그식의 주 균열(main crack)로서 성장한 것으로 보인다.

(c) GFML-90의 경우에는 AI층보다 강도가 약한 90°섬유층에서 먼저 개시된 횡단형 균열이 거의 직진형으로 관찰되었고 균열진전 정도는 시험편의 폭의 끝 부위까지 거의 진전되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 16은 인장시험이 끝난 각종 GFMLs 시험편에 대하여 노치와 반대편쪽의 시험편 모서리부에 대한 파손상태를 광학현미경으로 두께방향에서 관찰한 사진이다. (a) GFML-UD 시험편의 경우 0°섬유층에서의 균열은 초기노치 수직방향으로 전단형 균열로서 진전하고 AI층에서는 초기 노치 방향으로 진전하였기에 반대편쪽 시험편 모서리부의 섬유층에서는 손상이 아직 없는 상태로 AI층과 섬유층 사이에서 심한 층간분리가 발생하였음을 관찰할 수 있다. 섬유층이 직교적층으로 구성되어 있는 (b) GFML-CP 시험편의 경우, 0°섬유층에서는 섬유다발의 파단, 90°섬유층에서는 횡단형 모재균열, 0°섬유층과 90°섬유층의 경계에서는 플라이간의 층간분리, AI층과 섬유층사이의 층간분리가 관찰되었다. 섬유배향이 90°인 (c) GFML-90의 경우에는 횡단형 모재균열로 인한 90°섬유층의 분리, AI층과 섬유층사이의 층간분리 그리고 AI층에서는 노치방향으로 국부적인 줄목변형현상(necking)이 관찰되었다. GFMLs의 이러한 파괴기구는 FRP의 파괴기구 외에도 섬유층과 AI층 사이의 층간분리 및 AI층의 소성변형을 포함하고 있으며 앞서 기술된 AE특성과 밀접하게 관련되는 것이다.

3.3. 도달시간차를 이용한 AE원의 위치표정

도달 시간차를 이용한 AE원(source)의 위치표정법의 장점은 파손의 진행상태를 실시간으로 위치표정할 수 있어 금속 및 복합재료 용기의 안전성 검

사에 널리 사용되고 있다. Fig. 17에 단일 AI 판재와 GFMLs 시험편에 대하여 1차원 위치표정의 결과를 나타낸다. 그래프상에서 x축의 -10의 위치는 시험편에 부착된 센서1의 위치를 나타내고 +10은 센서2의 위치를 나타낸다. 각 시험편별로 측정된 탄성파의 전파속도 값 (Fig. 3참조)을 초기 입력값으로 주어 위치표정된 결과, 단일재 알루미늄의 경우(a), 거의 초기 노치방향으로 형성된 균열진전 경로에만 위치표정이 집중되었다. GFML-UD의 경우(b), 초기 노치방향 (X position = -1~+1 mm)의 영역뿐만 아니라 센서사이의 전 지역에서 많은 신호들이 위치표정 되었는데 이는 섬유층의 배향이 초기 노치방향과 수직방향으로 배열되어 파괴모드의 전환이 일어나면서 초기노치 수직방향으로 전단형 균열진전과 동시에 AI층에서는 균열이 초기노치방향으로 진전하면서 AI층과 섬유층 사이에 심한 층간분리가 일어나면서 폭넓은 영역에서의 다양한 손상발생으로 생긴 신호들인 것이다. 이러한 폭넓게 발생한 AE위치표정 데이터는 GFML-CP 시험편의 경우에도 어느 정도의 빈도로 나타났다. 초기 노치 방향 이외의 광범위한 지역에서 발생한 신호는 전체 시험시간의 후반부에 위치표정된 신호들인 것으로 보아 이는 0°섬유층과 AI층, 90°섬유층과 0°섬유층 사이의 층간분리에 의한 신호라 추정된다. GFML-90 시험편의 경우는 단일 AI 판재에서의 AE 위치표정 데이터보다 다소 분산되었는데, 초기 노치 방향 이외의 지역에서 위치표정된 신호는 섬유층과 AI층사이의 층간분리에 의한 신호라 여겨진다.

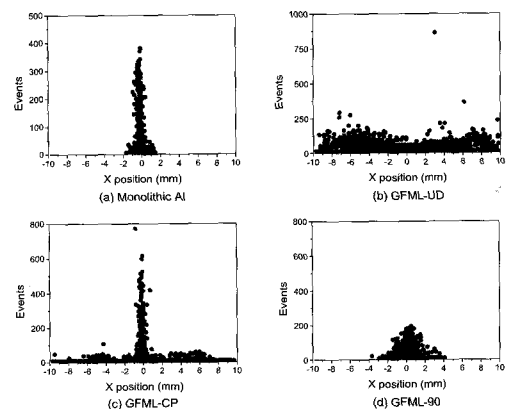


Fig. 17 Source location distribution of AE events accumulated until the final fracture for GFMLs specimens

3.4. GFMLs의 섬유배향에 따른 균열진전 및 층간분리 모델링

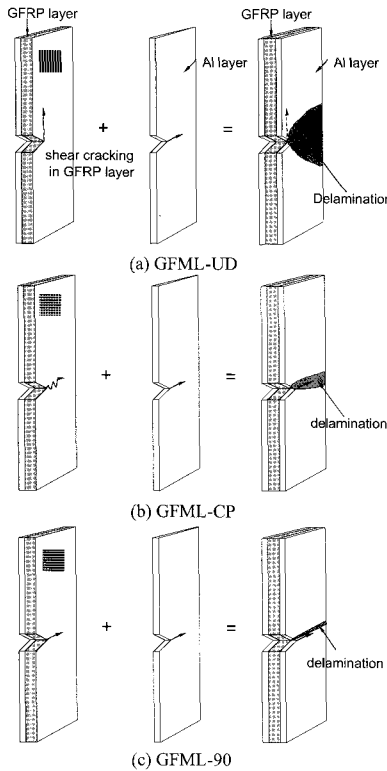


Fig. 18 Modeling of crack propagation of GFMLs

모든 시험편에 대하여 Al층을 저속 정밀절단기로 제거한 후 균열진전방향을 확인하고 초음파 T-scan 관찰과 1차원 위치표정 결과를 종합하여 Al표피층과 섬유층의 섬유배향에 따른 균열진전 양상을 Fig. 18에 모델링하여 나타낸다. GFML-UD 시험편의 경우(Fig. 18(a)) 거의 최대하중점에 이르러서는 섬유층에서 개시된 균열이 초기노치와 수직방향의 전단형 균열로서 진전하여, GFRP층의 균열이 개구형 모드에서 전단형 모드로 균열모드의 천이 (mode change)가 발생하였으며 Al층에서만 초기노치 방향으로 진전하였다. 또한 층별 균열모드가 달라짐에 따라 그들 층간에서는 심한 층간분리가 넓게 발생한 것이다. GFML-CP의 경우(Fig. 18(b)), 섬유층에서의 지그재그 식의 균열성장파 Al층에서의 노치방향으로의 균열진전으로 인해 적은 수준의 층간분리가 발생하였다. GFML-90(Fig. 18(c))은 Al층보다 강도가 약한 섬유층에서 먼저

개시된 횡단형 균열은 거의 직진형 진전형태로 나타났으며 섬유층의 균열이 Al층으로는 진전하지 못하고 Al층에 하중을 집중시켜 Al층의 해당부위에 줄목변형현상(necking)을 일으킴으로 인해 균열진전 경로 근처에만 층간분리가 약간 나타났다. 이런 결과로 미루어 볼 때, GFMLs의 균열진전방향은 섬유배향에 따라 층간분리의 정도가 크게 달라짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 편축 노치를 갖는 단일 Al재와 유리섬유/알루미늄 혼합 적층판의 파괴과정에 따른 음향방출특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 알루미늄의 AE신호는 저주파수 대역을 갖는 신호와 고주파수 대역을 갖는 신호의 2가지 형태로 분류될 수 있었고 고주파수 대역은 균열의 개시 및 성장하기 시작하는 후반부 하중 레벨에서 주로 검출되었다. 또한 평균적인 AE 사상률과 진폭의 수준은 GFML의 그것들에 비해 상당히 낮은 수준을 보였다.
- 2) GFML에서 나타나는 고진폭(>80 dB), 긴 유지시간(>2msec)을 동시에 갖는 신호들은 저주파수에서 고주파수 영역에 이르는 광대역주파수 특성을 나타내었다. 이러한 신호들은 하중-변위 선도에서 거시적 균열 및 Al과 섬유층 사이의 층간분리가 발생하는 구간과 일치하는 것으로 보아 이들 신호를 이용하여 FMLs 구조물의 내부에서 거시적인 주요 손상을 실시간으로 파악할 수 있을 것이다.
- 3) 하중이력에 따라 발생하는 모든 사상에 대해 주파수 영역에서 1, 2차 중심주파수를 검색하여 해석함으로써 거시적인 파괴거동 뿐만 아니라 미시적인 주요 파괴 발생원을 감시할 수 있었다.
- 4) 시험이 종료된 GFMLs의 Al층을 저속 정밀절단기로 제거한 후 균열진전방향을 확인하고 초음파 T-scan 관찰과 1차원 위치표정 결과를 종합한 결과, GFMLs의 균열진전은 섬유배향에 의존적이었으며 GFMLs의 음향발생원은 Al층의 소성변형과 모재의 파손, 섬유층 섬유의 파단, Al/섬유층 사이의 층간분리인 것으로 판명되었다. 또한, 이들 AE거동 특성은 GFMLs의 파괴거동과 미시적/거시적으로 밀접한 관련을 가졌다.

참고문헌

- [1] M. Kawai, M. Morishita, S. Tomura and K. Takumida, "Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE," *International Journal of Mechanical Sciences*, pp. 183-198, (1998)
- [2] Hai Yan, Rongzhen Ren, Chunhu Tao and Hongyun Li, "Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate GLARE 2," *Materials Science and Engineering A*, Volumes 234-236, pp. 621-624, (1997)
- [3] D. J. Shim, R. C. Alderliesten, S. M. Spearing and D. A. Burianek, "Fatigue crack growth prediction in GLARE hybrid laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1759-1767, (2003)
- [4] Yan Hai, Tao Chunhu and Li Hongyun, "Study on Arall failure behavior under tensile loading," *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 12, pp. 1379-1384, (1996)
- [5] S.T. Kim, Y.T. Lee, "Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method," *Materials Science & Engineering*, A234-236, pp. 322-326, (1997)
- [6] 이유태, 김상태, 권재도, 이택순, 岸 輝雄, 志波 光晴, "탄소 섬유 강화 복합재료의 반복하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성", *한국복합재료학회지*, 제8권 제2호, pp. 40-51, (1995)
- [7] 이상국, 김옥균, 남기우, 오세규, "탄소섬유 복합재료의 적층방법에 따른 파괴인성과 AE거동", *한국복합재료학회지*, 제8권, 제4호, pp. 83-91, (1995)
- [8] N. S. Choi, K. Takahashi and K. Hoshino, "Characteristics of acoustic emission during the damage process in notched short-fibre-reinforced thermoplastics," *NDT&E International*, Vol. 25, No. 6, pp. 271-278, (1992)
- [9] N. S. Choi, K. Takahashi, "Characterization of the damage process in short-fibre thermoplastic composites by acoustic emission," *Journal of Material Science*, Vol. 33, pp. 2357-2363, (1998)
- [10] Jin-Kyung Lee, "AE characteristic of the damage behavior of TiNi/Al6061 SMA composites," *Composite Structures*, 60, pp. 255-263, (2003)
- [11] Mikael Johnson and Peter Gudmundson, "Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composites laminates," *Composites Science and Technology*, Volume 60, pp. 2803-2818, (2000)
- [12] Ni QQ, Jinen E., "Fracture behavior and acoustic emission in bending test on single-fiber composites," *Eng Fracture Mech*, Vol. 56, pp. 779-796, (1997)
- [13] Gang, "Wavelet-based AE characterization of composite materials," *NDT&E International*, Volume 33, pp. 133-144, (2000)
- [14] 김정현, 우성충, 최낙삼, "유리섬유강화 복합재의 AE특성에 대한 섬유배향 효과", *비 파괴검사학회지*, Vol. 23, pp. 429-438, (2003)
- [15] Sung Choong Woo, Jung Hyun Kim, Nak Sam Choi, "Fracture Processes and Acoustic Emission in Continuous Fiber Reinforced Composite Laminates," *Key Engineering Materials*, Vols. 270-273, pp. 1827-1832, (2004)
- [16] 우성충, 최낙삼, "유리섬유/알루미늄 혼성 적층판의 인장특성과 파괴인성 평가", *대한기계학회논문집 A권*, 제29권 제6호, pp. 876-888, (2005)