

論文

음향방출법을 이용한 편측노치를 갖는
유리섬유/알루미늄 적층판의 파괴거동 해석

우성충*, 최낙삼*+

A Study on Fracture Behaviors of Single-Edge-Notched
Glass Fiber/Aluminum Laminates Using Acoustic Emission

Sung-Choong Woo*, Nak-Sam Choi*+

ABSTRACT

Fracture behaviors of single-edge-notched monolithic aluminum plates and glass fiber/aluminum laminates under tensile loadings have been studied using acoustic emission(AE) monitoring. AE signals from monolithic aluminum could be classified into two different types. For glass fiber/aluminum laminates, AE signals with high amplitude and long duration were additionally confirmed on FFT frequency analysis, which corresponded to macrocrack propagation and/or delamination. AE source location determined by signal arrival time showed the zone of fracture. On the basis of the above AE analysis and fracture observation, characteristic features of fracture processes of single-edge-notched glass fiber/aluminum laminates were elucidated according to different fiber ply orientations and fiber/aluminum lay-up ratios.

초 록

본 연구에서는 음향방출법을 이용하여 편측노치를 갖는 단일 Al판재 및 유리섬유/알루미늄 적층판에 대해 인장하중하의 파괴거동을 살펴보았다. 단일 알루미늄의 AE신호는 2가지 형태로 분류될 수 있었다. 유리섬유/알루미늄 적층판의 경우에는, 고진폭의 긴 유지시간의 신호를 대상으로 한 FFT 주파수 해석 결과 이러한 신호들은 거시적인 균열진전 및 층간분리에 해당하는 신호임을 알았다. 또한 도달시간차를 이용한 위치표정은 균열의 개시 및 진전과정의 특징을 보여주었다. 위와 같은 AE해석과 파괴관찰을 토대로, 편측노치를 갖는 섬유/알루미늄 적층판의 파괴특성을 해명하였으며 이는 섬유층 배향 및 섬유/알루미늄층 구성비에 의존하여 변화하였다.

Key Words: 음향방출(acoustic emission), 유리섬유/알루미늄 적층판(glass fiber/aluminum laminates), 층간분리(delamination), 파괴거동(fracture behavior), 위치표정(source location)

1. 서 론

알루미늄합금은 경량성, 신뢰성 및 경제성 등으로 항공기 기체 재료로 많이 사용되어 왔으나 비강도 및 내피로 특성 향상에 한계가 있어 이를 보완하기 위하여 유리 섬유/에폭시, 아

라미드 섬유/에폭시, 탄소 섬유/에폭시와 같은 고분자 기지의 섬유강화 복합재료의 사용량이 증가하고 있다. 고분자 기지 섬유강화 복합소재는 섬유상의 강화재와 수지상의 기지재로 구분되며 기지재는 에폭시계 수지가 일반적으로 널리 사용된다. 그러나 에폭시계 수지는 강화재인 섬유에 비해 상대적으로 열

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

*+ 한양대학교 기계정보경영공학부, 교신저자(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

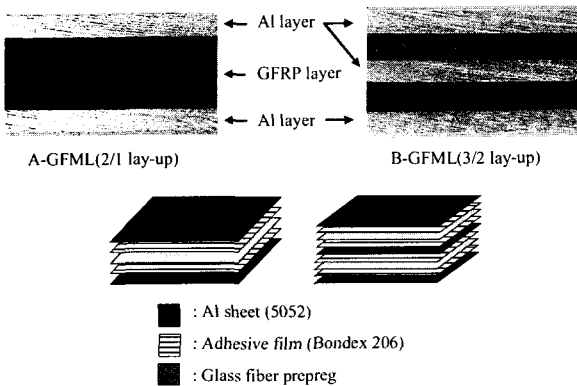


Fig. 1 Fabricated GFMLs and schematic of lay-up composition ratio.

에 취약하고 화학적으로 불안정하며 취성을 가지고 있다. 이러한 결점은 복합재를 이용한 구조물의 파괴인성이나 손상 허용성을 감소시킨다. 이와 같이 수지를 기지재로 사용한 복합재료의 문제점을 해결하고 섬유강화 복합재료의 장점을 유지하기 위해 기존의 금속재료의 장점과 결합한 섬유 금속 적층판(Fiber Metal Laminates, 이하 FMLs)이 유력한 공업재료로서 각광을 받고 있다. 이에 선진국에서는 1980년대 중반부터 GLARE (GLASS fiber REinforced metal lamiantes)[1-3], ARALL (ARamid reinforced AL Laminates)[4]라는 이름으로 상용화하였고 반복하중 및 면외하중을 받는 항공기 구조물 뿐만 아니라 최근에는 철도 차량에 적용성을 시도하고 있는 상황이다.

하지만 FMLs는 섬유층과 금속층의 접합으로 인해 발생하는 층간분리현상, 경화과정에서 기존의 복합재료의 성형 시에는 발생하지 않는 국부적인 공동현상이 생기는 점, 경화후의 금속층과 섬유층의 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력의 존재 등의 문제점을 안고 있고 현재에도 여전히 정확한 해석 및 평가가 필요하다고 할 수 있다. 또한, 이러한 문제점들은 구조물의 안전성, 신뢰성 그리고 건전성에 영향을 줄수 있으므로 결함을 검출하거나 파괴기구를 해석하는 것은 FMLs의 실용적 측면에서 중요한 문제가 된다.

한편, 음향방출(acoustic emission, AE)법은 구조물이 외부 하중 하에 구조물 내의 미세손상과 균열, 소성변형이 발생할 때에 방출되는 탄성파이며, 이러한 탄성파를 재료표면에 부착한 압전센서로 검출하여 그 특성을 분석 평가함으로써 재료 내부의 파손상황이나 변형상태를 실시간으로 감시하는 비파괴 탐상 기법으로 복합재 구조물예의 적용성을 많은 연구자들에 의해 인정받아왔다. 등방성 재료의 경우, 외력을 받으면 일반적으로 하중이 임계하중에 도달했을 때 파괴되거나 이와는 대조적으로 이방성인 복합재료는 재료 내부에 미세손상이 점진적으로 누적되었다가 누적된 손상들이 성장 및 합체하여 최종적인 파괴에 이르게 된다. 음향방출법을

이용한 고분자복합재료 또는 금속복합재료의 음향방출특성에 관해서는 상당히 많은 연구[5-10]가 수행되어져 왔으나 FMLs에 음향방출법을 적용하여 모재균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파단(fiber breakage)등의 복잡한 형태의 파괴기구를 규명한 연구는 아직 드물다. 예를들어, FMLs는 FRP(fiber reinforced plastics)의 음향발생원 외에도 알루미늄의 소성변형, 알루미늄층과 섬유층사이의 층간분리의 발생과 성장 등 다양한 음향발생원을 포함하고 있다. 남현욱 등[11]은 음향방출법의 인자해석(parametric analysis)을 바탕으로 집중하중을 받는 일방향 보강 섬유 금속 적층판의 손상거동을 연구하였는데, 알루미늄층과 섬유층 사이에 층간분리가 발생하고, 발생한 균열이 섬유파괴를 일으키면서 판의 두께 방향으로 전파되어 거시적인 초기 균열을 일으킨다고 보고하였다. 그런데 음향방출법을 이용한 최근의 연구동향은 인자해석만으로는 정확한 파손기구를 예측할 수 없으며 각 신호의 파형해석[12-13]과 주파수 분석[14]을 병행하는 것이 더욱 설득력을 얻고 있다. 또한 전체적인 FMLs에 대한 연구에 앞서 이를 구성하고 있는 섬유층과 알루미늄층 각각에 대한 음향방출 거동의 연구가 선행되어야 하며 이를 바탕으로 FMLs의 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 연구자 등은 선행연구[15-16]에서 연속형 일방향 및 수직유리섬유강화 복합재료 시험편을 노치제와 평향재로 각각 제작하여 인장시험을 실시하고 인자해석과 파형 및 주파수 해석을 통하여 AE특성과 파괴과정에 대한 노치의 유무와 섬유배향의 효과를 규명하고 투과식 및 반사식 광학현미경 관찰을 통하여 이들 효과에 대한 확인을 하였다.

따라서, 본 연구에서는 인장하중 하에 편축 노치를 갖는 유리섬유 금속 적층판(glass fiber/aluminum laminates, 이하 GFMLs)의 파괴특성을 파악하기 위하여 단일 Al판재의 AE특성을 먼저 파악하고 섬유/알루미늄 적층구성비와 섬유층 배향에 따른 유리섬유 금속 적층판의 파괴거동을 인자해석법과 파형 및 주파수해석을 이용하여 신호를 분류하고 해석함으로써 GFMLs의 하중단계별 파괴거동을 파악하고자 한다. 또한 균열 개시 및 성장에 대한 정확한 AE해석을 위해 인장시험을 하면서 동시에 이동식 광학현미경으로 균열의 진전상태를 관찰하였다. 시험이 끝난 시험편에 대해서는 다이아몬드 저속경밀절단과 박편화기법을 통해 광학관찰용 시험편을 제작하고 투과식 및 반사식 광학현미경 관찰을 통하여 AE평가법의 타당성과 GFMLs의 AE발생원을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편 제작

본 연구에 사용된 GFMLs는 두께가 0.5mm인 단일 알루미늄 판재(Al5052)와 두께가 0.125mm인 일방향 유리섬유/에폭시

Table 1 Various GFMLs, their stacking sequences and 0° fiber volume fraction

Specimen Designation	Stacking sequence	0° fiber volume fraction (%)
A-GFML-UD	[A/0° _s /A]	50
A-GFML-CP	[A/0° ₂ /90° ₄ /0° ₂ /A]	25
A-GFML-90	[A/90° _s /A]	0
B-GFML-UD	[A/0° ₂ /A/0° ₂ /A]	25
B-GFML-CP	[A/0° ₂ /90° ₄ /A/90° ₄ /0° ₂ /A]	12.5
B-GFML-90	[A/90° ₂ /A/90° ₂ /A]	0

프리프레그(UGN 150, SK Chemical)를 Fig. 1과 같이 2/1과 3/2의 구성비로 제작하였다. 편이상 2/1로 구성된 것을 A-GFML, 3/2의 구성비를 가지는 것을 B-GFML이라 명명하였다. 섬유층의 적층배향과 AI의 구성비에 따른 시험편의 이름, 적층구성 그리고 0°섬유층의 체적비를 Table 1에 나타낸다. 섬유층과 알루미늄층 사이에는 접합력을 높이기 위하여 1차적으로 알루미늄 표면을 인산처리(phosphoric acid anodizing, PAA)하였고 2차적으로는 적층시 섬유층과 알루미늄층 사이에 접착필름(Bondex 206 adhesive, 한국화이바)을 배치하였다. 이와같이 유리섬유 프리프레그와 알루미늄을 hand lay-up 방법으로 적층하여 오토클레이브 내에서 제조회사의 추천 경화사이클에 따라 진공백(vacuum bag)방식으로 성형하였다. 이들 시험편과의 AE특성 비교를 위해 AI 단일판재로 폭 24mm, 두께 0.5mm, 게이지 길이 100mm의 인장시험편을 Fig. 4와 같은 형상으로 제작하였다. 또한 이들 시험편을 편측 노치(single-edge-notched, SEN)를 갖는 시험편으로 만들기 위해 저속 다이아몬드 휠 절단기를 이용하여 손상발생을 최소화하면서 초기노치(길이 12mm, 폭 0.3mm)를 편측 노치형으로 절단·가공하였고 이후, 자체 제작한 예비균열 도입장치로 얇은 면도날(thin sharp razorblade)을 이용하여 노치 선단부를 예리하게 만들었다.

2.2 시험편별 전파속도 측정

음향방출 발생원의 정확한 위치표정과 센서1과 센서2 사이에서 발생하는 유효신호만을 검출하고 이외의 영역에서 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 Fig. 2(a)와 같은 탄성파 측정시스템을 구현하여 AI 및 GFMLs 시험편 종류별로 전파속도값을 계속하였다. 서로 비슷한 특성을 갖는 2개의 AE 센서(Micro 30, Dunegan Co.) S1, S2를 시험편의 한쪽 표면에 일정거리(D=200mm)를 두어 S1으로부터 d만큼 떨어진 위치에서 연필심을 파단시켜 음원(AE source)을 발생시킨 후, 이 신호를 부착된 센서로 계속하였다. 이 신호를 증폭기(Gain: 40dB)로 증폭시킨 후 디지털 오실로스코프를 이용하여 탄성파가 두 센서에 각각 도달하는데 걸리는 도달시간의 차를 구하고 연필심 파단 위치로부터 각 센서간의 거리차를

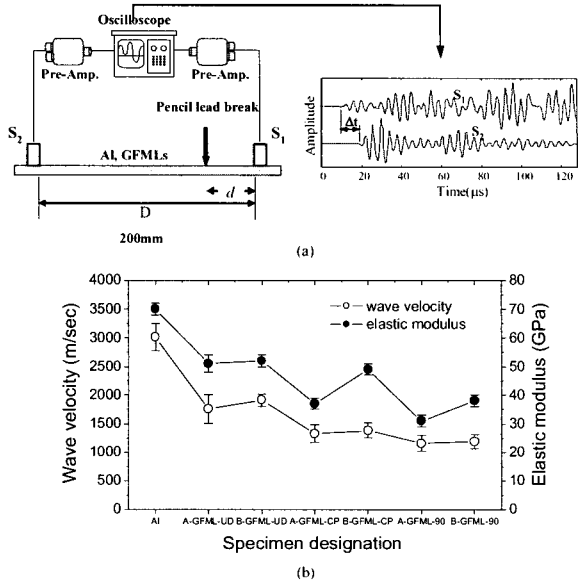


Fig. 2 Wave velocity measurement system (a) and results of measured wave velocity and elastic modulus of AI and GFMLs (b).

계측하여 각 시험편 종류마다의 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(직경:0.5mm, 길이:5mm, HB) 파단(pencil lead break)과 같은 알고 있는 음원을 사용하여 평균 전파속도로써 측정하였다. Fig. 2(b)에 시험편 별로 계속된 전파속도와 탄성계수를 함께 나타낸다. 전파속도는 재료의 탄성계수가 클수록 커지게 되는데 시험편 종류별 탄성계수를 고려할 때 Fig. 2(b)의 전파속도는 타당한 것으로 생각된다.

2.3 실험방법

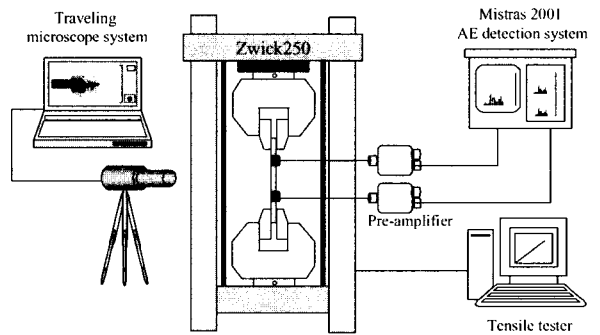


Fig. 3 Schematic diagram of tensile test and AE measurement system.

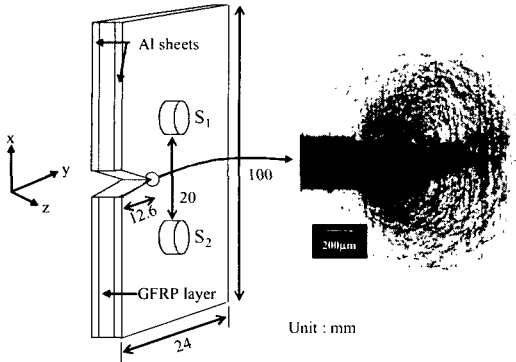


Fig. 4 Schematic of single-edge-notched specimen and AE sensors location. Right photo shows a magnified view of an initial crack tip introduced by sharp razor blade.

Fig. 3은 인장 하중 하에서 GFMLs의 균열진전 거동을 이동식 광학 현미경으로 관찰하기 위한 실험과 음향방출 신호를 감지하기 위한 장치의 개략도이다. GFMLs 시험편의 변위증가(0.5mm/min)에 따른 균열진전 거동 및 손상평가를 위하여 유사한 검출특성을 가진 AE센서(유효 주파수 검출 대역: 100~600kHz, 공진 주파수: 275kHz) S1, S2를 시험편의 한쪽면에 Fig. 4와 같이 부착하였다. 두 개의 AE 센서 S1, S2를 시험편의 한쪽 표면에 예비균열과 각각 10mm 떨어진 지점에 고정구를 이용하여 위치시켰으며 시험편과 센서 사이의 커플런트(couplant)로써 진공 그리스를 사용하였다. 만능 인장 시험기(Zwick, 로드셀 최대용량: 250kN)에 의해 인장하중 하에서의 하중-변위 곡선을 얻는 동시에, 이동식 광학현미경을 이용하여 시험편의 외관적인 균열진전 거동과 파단과정을 관찰하였다. 시험은 시험편의 최대하중을 지나 최대하중의 50%로 하중저하가 일어났을 때 자동

종료되도록 하였다. 감지된 AE 신호는 예비증폭기(Pre-amp, Gain: 40dB, threshold level: 40dB)에 의해 증폭된 후 AE본체(Mistras 2001, PAC)로 보내어져 시간에 따른 음향방출 신호인자(진폭, 에너지, 유지시간, 사상수 등)별로 분석된다. 음향방출 시험시의 노이즈를 제거하기 위해, 시험기의 그립부분에 시험편을 물린 상태에서 10여분 동안 그대로 두어 그립부분에서 발생하는 유지시간이 10µsec이하의 잡음 신호를 확인하고, 최종 실험 획득된 신호들을 인자해석할 때 10µsec이하의 유지시간을 가지는 신호들에 대해서는 모두 필터링하였다.

3. 음향방출 거동의 해석

복합재료의 대표적인 손상기구는 모재균열, 층간분리, 섬유파단 등으로 나뉘어 진다. FMLs의 경우에는 알루미늄의 소성변형, 섬유층과 AI층 사이의 층간분리가 추가적으로 발생한다. 음향방출 신호는 손상기구와 파손모드에 따라 특정 주파수 대역을 보이는 것으로 알려져 있다[12-16]. 본 연구에서는 시험편의 변위에 따라 감지되는 모든 음향방출 신호에 대해 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT)의 과정을 거쳐 주파수 분석함으로써 FMLs에서 발생하는 파괴거동의 특성을 파악하고자 하였다.

3.1 단일 알루미늄 판재의 음향방출 특성

Fig. 5는 인장하중 하에서의 단일 알루미늄(Al 5052) 노치재의 변위-하중, AE 사상률 그리고 각 하중수준에 대응하는 균열의 성장사진을 함께 나타내며 사진내의 점선은 균열성장률에 따른 균열선단 주변의 소성영역을 나타내고 있

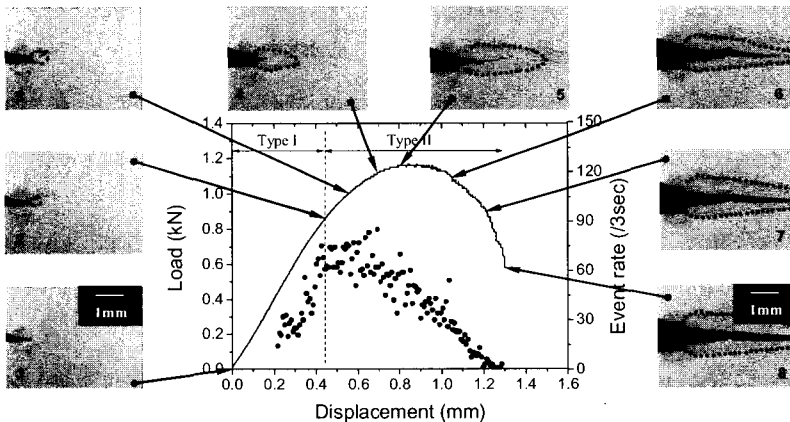


Fig. 5 Load-displacement, AE event-rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN monolithic aluminum specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation zone around the crack tip.

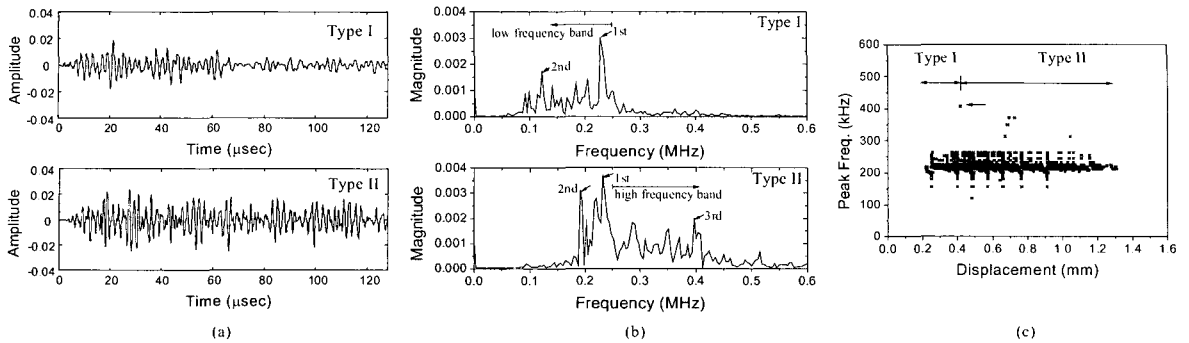


Fig. 6 AE signals from monolithic Al : (a) typical waveforms of type I and type II signals, (b) their corresponding FFT results, and (c) first peak frequency variation with displacement.

다. 단일 Al 판재의 경우, 사상률(event rate)의 분포는 변위 0.21mm 지점에서부터 발생하여 변위 0.45mm까지 증가하다가 이후 최대하중점까지 완만히 증가하였다. 최대하중점 근처부터 균열이 개시 및 성장함에 따라 사상률은 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 음향방출거동의 변화를 보여준다. AE에너지와 진폭은 변위 0.45mm 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 70dB이하의 저·중진폭 신호를 보였고 에너지 값도 GFMLs에 비해 상대적으로 낮은 수준이었다. 균열은 최대하중점의 약 95% 수준에서 개시되기 시작하였으며(Fig. 5의 사진4) 이후 변위증가에 따라 하중은 균열이 약 1.3mm정도 성장하여도 1.15kN까지 증가하였는데 이는 균열개시 초기에 균열선단부의 소성거동에 어떤 형태의 강화효과가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 단일재 알루미늄의 모든 AE사상(event)에 대해서 주파수 분석 및 파형해석을 한 결과이며, Fig. 6(a)에 전형적인 파형 Type I과 Type II를, Fig. 6(b)에 이들에 대한 FFT 결과를 나타낸다. 알루미늄의 주파수 특성은 크게 2가지 type으로 분류될 수 있었는데 최초 AE사상의 발생변위부터 변위 0.45mm까지의 구간에서는 120~260kHz 대역의 비교적 저주파수 성분(type I)이 대부분이었고, 이 구간 이후에서 최종파단까지의 신호는 192~408kHz 대역의 비교적 광대역 주파수 성분(type II)이 주로 나타났다. 따라서 변위 0.45mm 전후에 내부의 소성변형 및 파괴과정에 큰 변화가 생겨 주된 파괴모드가 바뀌었음을 나타낸다.

Fig. 6(c)는 변위증가에 따라 발생한 각 사상에 대해 1차

중심주파수의 변동을 나타낸다. 여기서, 1차 중심주파수란 예를 들어, Fig. 6(b)의 주파수 스펙트럼에서 에너지 강도(magnitude)가 가장 큰 피크를 갖는 주파수를 말한다. Fig. 5를 보면 변위 0.45mm에서 사상률의 증가기울기가 전환되어 높은 사상률이 일정하게 되었는데, 이때 Fig. 6(c)와 같이 410kHz의 고주파수 신호(화살표 표시)가 발생하였고 이 신호는 시험편에서 발생한 최대 에너지 및 최대 진폭값을 가지는 사상에 대응했다. 또한 1차 중심주파수(first peak frequency)만을 나타낸 그래프 Fig. 6(c)를 보면 190~260kHz의 대역을 가지는 사상이 일정한 비율로 많이 검출된 것으로 보아, 미시적인 파괴모드가 달라도 각 사상은 상당부분 공통된 특징을 내포하고 있다고 사료된다.

3.2 유리섬유/알루미늄 적층판의 음향방출 특성

Fig. 7에는 인장하중 하에서의 A-GFML-UD 노치재의 변위-하중, AE 사상률 그리고 각 하중수준에 대응하는 균열의 성장사진을 함께 나타낸다. 그리고 사진내의 점선은 Al 표피층에서의 균열선단 주변의 소성영역을 표시한다. 변위 2.6mm(Fig. 7의 사진3)인 시점에서 Al층의 균열이 초기 노치방향으로 개시하였음을 알 수 있다. 섬유층 균열의 진행 방향은 Al표피층 때문에 관찰 할 수 없었지만, 시험이 끝난 시험편의 Al표피층을 정밀 절단기로 제거한 후에 광학현미경 관찰을 하였다. Fig. 8(a)와 (b)는 Fig. 7의 A시점과 B시점 사이의 구간까지 인장하중을 가한 후 시험편의 섬유층을 두께 약 200μm로 박편화[17]하고 투과식 및 반사식 편광현미경으로 관찰한 사진을 나타낸다. 섬유층이 일방향 적층판이므로 Fig. 8(a)처럼 초기 균열선단에서 초기노치와 수직방향으로 전단형 균열이 섬유방향으로 진전되었다.

AE사상률은 변위 2.75mm(Fig. 7의 A지점)인 시점에서 최소화되었으며 이 시점에서의 에너지, 진폭값 또한 급락하였다. 이후, 노치 선단 부근의 개구형(opening mode) 파괴를

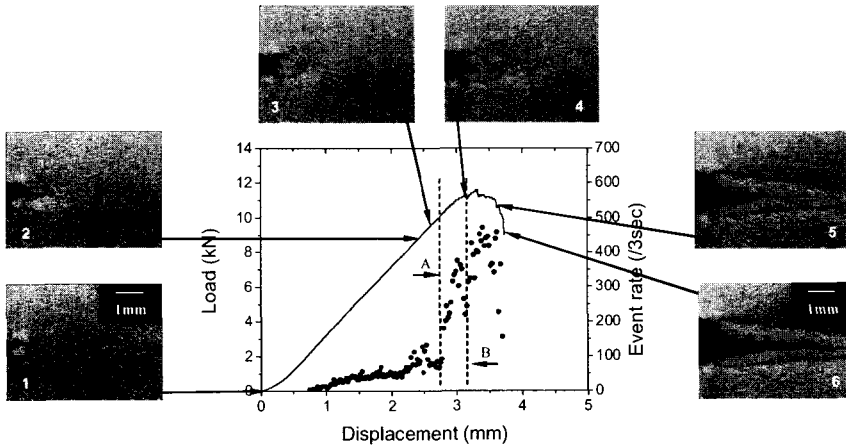


Fig. 7 Load-displacement, AE event rate and crack growth photographs corresponding to each load level for a SEN A GFML-UD specimen. Dotted lines indicate boundaries of plastic deformation zone around the crack tip.

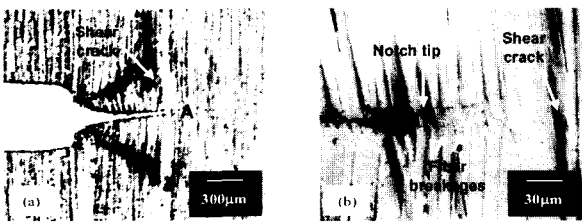


Fig. 8 Optical microscopy observation of damages around the crack tip of A-GFML-UD: (a) shear crack initiated to propagate perpendicular to the initial notch tip, (b) magnified view of area A in (a).

야기하고자 하는 하중상태가 전단형(shearing mode) 파괴로 전환되어 A-B구간에서 AE사상률의 급격한 증가가 일어났다고 볼 수 있다. 이러한 하중모드의 변화는 선행연구 [15-16]에서도 규명되었듯이 초기균열의 방향이 일방향 유리섬유 적층판과 수직인 경우에 나타난다. 이후 변위가 증가하면서 80dB이상의 고진폭 신호와 2msec이상의 긴 유지시간을 갖는 신호들이 집중적으로 발생하면서 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. 7의 B시점은 AI층의 균열이 0.5mm정도 급진전한 시점으로 약간의 하중 급저하와 함께 AE사상률도 급저하

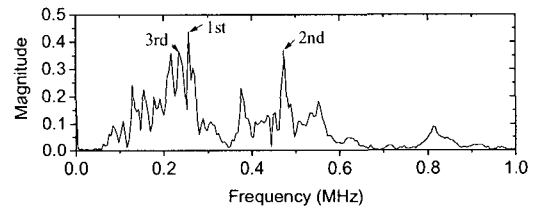


Fig. 9 FFT result for representative AE signals occurred after Point A.

했음을 알 수 있다. 즉, AI층의 AE사상률은 Fig. 5와 Fig. 7을 비교하여 알 수 있듯이 A-GFML-UD시험편의 약 1/5수준이므로, AI층의 균열 급진전에 따른 하중완화효과는 복합재료 내부층에 걸리는 응력을 일시적으로 완화시키고 복합재료층의 미세균열의 진전을 저하시켜 AE사상률의 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. 9에는 Fig. 7의 A시점(변위 2.75mm) 이후의 구간에서 발생한 신호들을 대상으로 FFT해석한 대표적인 예를 나타낸다. 1차 중심주파수는 260kHz근방에서 나타나며 2차 중심주파수는 470kHz근방에서 나타났다. A-B구간에서 발생하는 AE신호들의 공통점은 Fig. 9와 같은 130~460kHz의 광범위한 주파수 대역의 신호들이 주류를 이루었다. 또한 신호들이 이전에 발생한 신호들에 비해 상대적으로 그 신호의 강도가 크고 2차 중심주파수 값이 400kHz이상의 고주파수 대역에 집중했다. 이러한 신호특성을 사상을 변화거동과 하중-변위 선도에

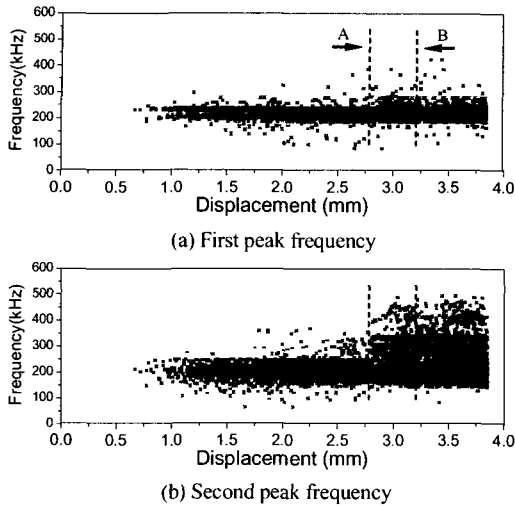


Fig. 10 Frequency analysis for A-GFML-UD specimen: (a) First peak (b) second peak frequency variation versus displacement.

결부시켜보면 AI층과 섬유층에서 균열이 성장하면서 발생하는 복잡한 파괴거동을 감시할 수 있다.

Fig. 10(a)와 (b)에는 각각 A-GFML-UD 시험편에서 발생한 모든 AE사상에 대하여 변위증가에 따른 1차 중심주파수와 2차 중심주파수의 변화거동을 나타낸다. 여기서 2차 중심주파수를 선별하는 기준은 1차 중심주파수 전·후 10kHz대역내의 중심주파수는 2차 중심주파수로 간주하지 않았다.

다시 말해서 1차 중심주파수 전·후 10kHz대역의 주파수 성분은 1차 중심주파수에 속하는 것으로 가정한 것이다. 1차 중심주파수만을 나타낸 Fig. 10(a)의 그래프를 보면 190~260kHz의 저주파수 대역에서 주류를 이루었음을 알 수 있으며, 본 1차 중심주파수 대역은 Fig. 6(c)에 나타나는 신호의 1차 중심주파수 대역에 대응하므로 AI자체의 소성변형 및 파괴시에 발생하는 신호로 볼 수 있다.

하지만 2차 중심주파수만을 나타낸 그래프에서는 변위 2.75mm를 기점으로 이전에는 저주파수 신호가 대부분이었으며 이후에는 저주파수 대역에 추가하여 260~490kHz의 중·고주파수의 대역의 신호가 새롭게 발생하였다. 즉, Fig. 7의 A시점 이후의 구간에서 발생한 중·고주파수의 대역의 신호는 Fig. 7과 Fig. 8의 파괴관찰 결과로서 유추할 수 있듯이 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.

Fig. 11에는 A-GFML-90 시험편과 A-GFML-CP 시험편의 변위증가에 따른 사상률 분포, 진폭 분포 그리고 최종파단된 시험편의 파괴모양을 두께방향에서 관찰한 사진을 함께 나타낸다. 섬유방향으로 초기 노치를 가하였던 A-GFML-90 시험편의 경우, 사상은 변위 0.4mm시점부터 발생하기 시작하여 A시점에서 갑자기 증가하다가 B시점에서 최소화되었고 최대하중점에서 피크를 보였다. 이러한 거동은 진폭 및 AE에너지 분포에서도 비슷한 경향으로 나타났다. 단일재

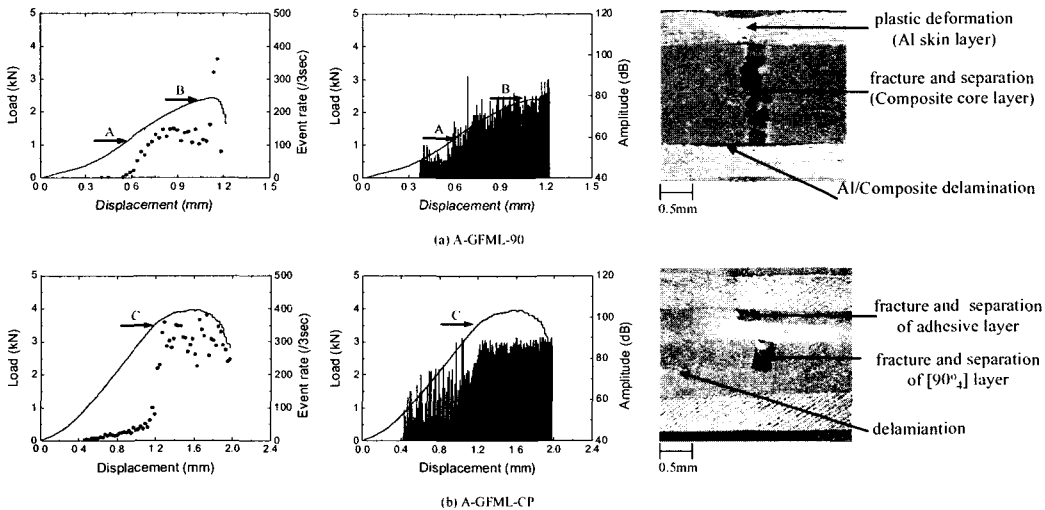


Fig. 11 Typical diagrams of load-displacement, AE event rate, AE amplitude distribution and fracture behaviors for A-GFML-CP and A-GFML-90 specimens.

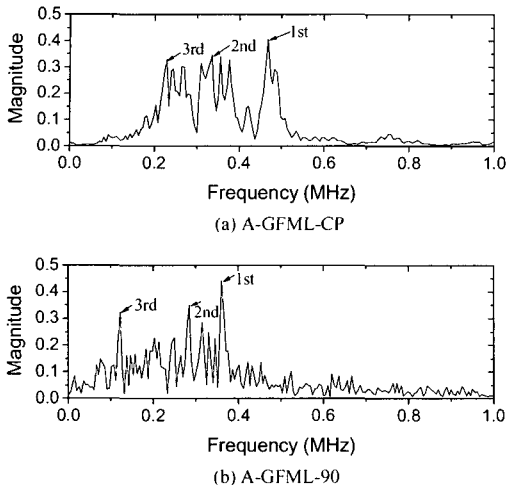


Fig. 12 FFT results of AE signals with high amplitude (>80dB) and long duration (2>msec) for A-GFML-CP and A-GFML-90 specimen.

AI 표피층보다 강도가 약한 섬유층에서 노치 방향을 따라 먼저 내부균열이 개시되는 A시점부터 사상률이 증가하였지만, 이동식 광학현미경 관찰결과 B시점 근처에서 AI표피층의 균열이 개시될 때는 오히려 사상률이 최소화되는 것으로 나타났다. B시점 이후부터 최대하중점 사이에서는 사상률의 급격한 증가가 보였으며 최대하중 이후에 하중이 급격히 저하함에 따라 80dB 이상의 신호가 집중적으로 발생하였다. 시험종료후의 시험편의 두께방향에서 관찰한 사진에서 알 수 있는바와 같이(Fig. 11(a) 참조) 90 섬유의 코어층 내부가 완전히 분리되어 이 분리된 균열이 AI층의 두께 방향으로서는 진전하지 못하고 AI층과 섬유층의 층간분리가 급격히 진행하면서 고진폭의 AE사상이 활발히 발생하였던 것으로 여겨진다.

선행연구[15-16]에서 섬유방향으로 초기노치를 가하였던 일방향 유리섬유 적층판의 경우 균열은 균열선단에서 갑작스럽게 시작되어 빠른 진전을 보인 반면, 표피층이 AI층인 A-GFML-90시험편의 경우에는 노치방향으로의 급격한 균열진전 가능성을 인접한 AI층이 방해하여 최대하중이 동일 시험편 두께를 기준으로 약 17배 이상 증가하였으며 이는 AI층이 복합재의 파괴인성을 크게 증대시키고 있음을 의미한다.

섬유층이 적교적층으로 구성되어 있는 A-GFML-CP시험편의 경우, 변위 0.47mm시점에서 최초 사상이 발생하여 서서히 증가하다가 C시점부터 급상승하면서 80dB 이상의 고진폭의 신호가 고밀도로 빈번히 나타났다. C시점 이전에는 상대적으로 강도가 약한 내부 90 섬유층의 노치선단 근처에서 손상이 먼저 진행하여 약한 진폭의 AE가 저사상률로 나타난 것으로 생각되며, C시점 이후에는 90 섬유층에

서의 균열개시와 함께 고진폭 신호를 발생하는 층간분리와 0°섬유층에서의 섬유파단이 발생하였던 것으로 생각된다. 표피층인 AI층에서의 균열개시는 최대하중 직전인 변위 1.6mm시점에 이르러 이동식 광학현미경을 통해 관찰되었다. 이 때 사상이 최소화되었고 이후 다시 사상의 증가가 발생하였는데 이는 Fig. 7의 A-B구간에서 발생하였던 사상의 패턴과 비슷한 것으로 보아 0° 섬유층에서 파괴모드의 전환이 일어나 전단형 균열이 일부 진행된 것으로 생각되었다. 그렇지만 0° 섬유층의 체적비(전체 체적의 25%)가 상대적으로적기 때문에 최대하중 이후에 0° 섬유층에서 형성된 전단형 균열은 초기노치방향에 수직방향으로 길게 진전하지 못하고 섬유다발의 파단이 발생하면서 지그재그 형태로 최종파단에 이르게 된다.

Fig. 12(a)와 (b)에는 각각 A-GFML-CP와 A-GFML-90시험편에 대하여 80dB 이상의 고진폭, 2msec 이상의 긴 유지시간을 동시에 가지는 신호들을 대상으로 FFT 해석한 대표적인 결과를 나타낸다. 저주파수, 저진폭의 AE발생원은 주로 모재균열이나 모재/섬유 계면분리에 해당하고 고주파수, 고진폭의 AE발생원은 섬유파단으로 알려져 있다[8-10]. 보고된 결과들에 비추어볼 때, A-GFML-CP의 경우(Fig. 12(a)) 450kHz 근방의 1차 중심주파수와 330kHz의 2차 중심주파수는 섬유파단이나 층간분리에 해당하고 230kHz 근처의 3차 중심주파수 성분은 모재(수지)균열 및 모재/섬유 계면파괴에 대응하는 주파수 성분이라 생각된다. 또한 고진폭, 긴 유지시간을 동시에 갖는 신호들의 공통점은 하나의 사상(event)에 대하여 특정주파수 성분이 함께 포함되어 있고 각각의 주파수 성분에 대한 에너지의 강도가 크게 차이가 없는 것으로서 각기 다른 음향발생원이 거의 동시에 발생하여 형성된 신호라 여겨진다. 또한 A-GFML-90의 경우(Fig. 12(b)) 360kHz와 290kHz 근방의 1차 및 2차 중심주파수는 가교섬유의 파단이나 AI과 섬유층의 층간분리에 해당하며 120kHz 근방의 3차 중심주파수 성분은 횡단형 모재균열에 의한 것으로 생각되며 각각의 주파수 성분에 대한 강도가 비슷하였다.

A-GFMLs 시험편에 대하여 시험시간에 따른 각 AE사상의 AE진폭 및 AE유지시간 데이터를 Fig. 13의 좌측에 나타내고, 80dB 이상의 고진폭, 유지시간이 2msec 이상인 신호들만을 따로 분류하여 Fig. 13의 우측에 나타낸다. 이러한 고진폭 및 긴 유지시간의 특성을 가지는 신호들은 하중-변위선도에서 거시적인 균열이 개시하여 최종파단까지의 구간에서 고밀도로 발생하는 신호들이며 Fig. 9 및 Fig. 12와 같은 광대역주파수 성분을 포함하고 있는 신호들로서 각 시험편의 거시적 손상 및 층간분리에 의한 신호들이라 여겨진다. 예컨대, Fig. 13(a)의 경우에는 섬유층에서 전단형 균열이 성장하면서 발생하는 가교섬유의 파단 및 AI층과 섬유층사이의 층간분리에 의한 신호라 여겨진다. Fig. 13(b)의 경우에는 초기노치방향으로 균열이 진전하면서 0° 섬유층에서는 섬유다발의 파손,

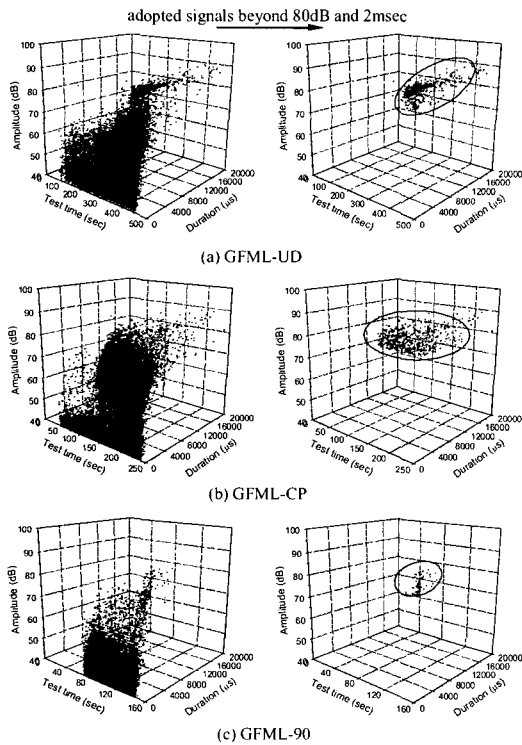


Fig. 13 Distribution of amplitudes and durations versus test time for A-GFMLs specimen.

90°섬유층에서는 가교섬유의 파손 그리고 AI층과 섬유층 사이의 층간분리에 해당하는 신호라 여겨진다.

Fig. 13(c)의 경우에는 90°층에서의 균열 상·하면 사이의 가교섬유의 파단이나 AI층과 섬유층 사이의 층간분리에 의한 신호라 추측된다. AE사상의 활성도 측면에서 볼 때, 이러한 고진폭 및 긴 유지시간을 가지는 신호들은 A-GFML-90시험편 보다는 A-GFML-UD시험편과 A-GFML-CP시험편에서 훨씬 많은 사상수를 나타내었다. 이는 A-GFML-UD시험편과

A-GFML-CP시험편의 경우가 A-GFML-90시험편보다 섬유파단과 층간분리를 훨씬 많이 발생시켰음을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 가지는 AE신호를 분류하여 해석하는 것은 복합재 구조물의 다양한 형태의 균열진전으로 인한 거시적인 파괴거동을 감시할 수 있으므로 유효하다고 생각된다.

Fig. 14는 여러 가지 GFMLs시험편의 파면을 주사형 전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. Fig. 14(a)와 같은 파면은 B-GFML-UD시험편의 초기노치방향으로 균열이 0°섬유층에 진전하면서 생긴 섬유다발의 파손과 모재/섬유 계면의 파손상태를 나타내며, 이 경우에는 고주파수와 저주파수의 AE가 혼합된 형태로서 높은 AE에너지가 방출되었을 것으로 추정된다. Fig. 14(b)의 경우에는 직교적층판에서 나타나는 전형적인 파괴 메커니즘으로서 0°섬유층과 90°섬유층의 경계근처에서 층간분리가 관찰되었으며 상대적으로 강도가 약한 90°섬유층에서 모재균열이 먼저 진전하였을 것이며 Fig. 12(b)와 같은 저·중·고주파수의 AE가 발생하였을 것이다. Fig. 14(c)와 같은 A-GFML-90시험편의 파면의 경우 가교된 섬유의 파단과 섬유들 사이로 모재균열이 발생하였다.

Fig. 15는 인장시험이 끝난 각종 GFMLs시험편에 대하여 노치와 반대편쪽의 시험편 모서리부에 대한 파손상태를 광학현미경으로 두께방향에서 관찰한 사진이다. (a) A-GFML-UD시험편의 경우 0°섬유층에서의 균열은 초기노치 수직방향으로 전단형 균열로서 진전하고 AI층에서는 초기 노치 방향으로 진전하였기에 AI층과 섬유층 사이에서 심한 층간분리가 발생하였지만 반대편쪽 시험편 모서리부의 섬유층에서는 손상이 아직 없음을 관찰할 수 있다. 이와는 대조적으로 (d) B-GFML-UD의 경우에는 섬유층의 체적구성비가 상대적으로 적어 초기노치와 수직방향으로 균열이 길게 진전하지 못하고 지그재그형태를 반복하면서 초기노치방향으로 완전히 분리되었음을 확인할 수 있었다. 섬유층이 직교적층으로 구성되어 있는 GFML-CP시험편의 경우(Fig. 16(b)와 (c))에는 0°섬유층에서는 섬유다발의 파단, 90°섬유층에서는 횡단형 모재균열, 0°섬유층과 90°섬유층의 경계에서는

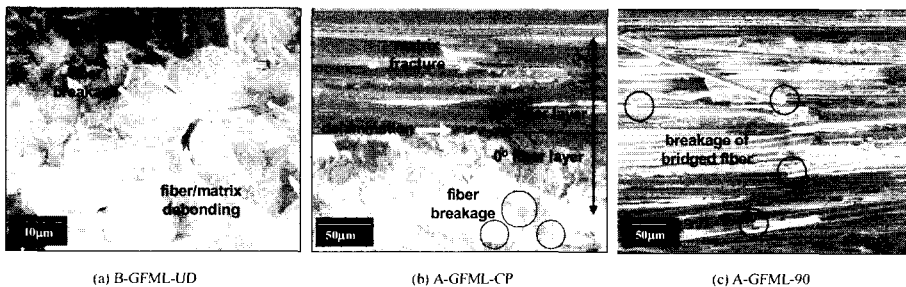


Fig. 14 SEM photographs taken from fracture surface of GFMLs specimen.

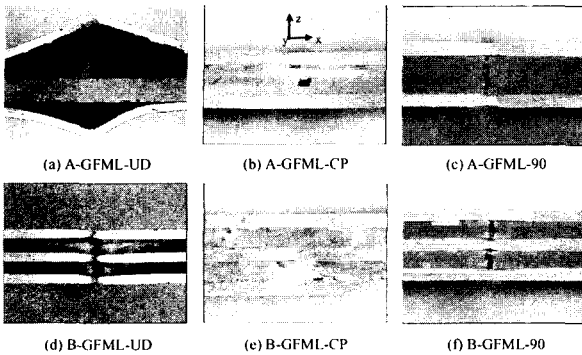


Fig. 15 Microscopic thickness-wise views of GFMLs specimens after the tensile test.

플라이간의 층간분리, AI층과 섬유층사이의 층간분리가 관찰되었다. 섬유배향이 90°인 GFML-90(Fig. 16(c)와 (f))의 경우에는 횡단형 모재균열로 인한 90°섬유층의 분리, AI층과 섬유층 사이의 층간분리 그리고 AI층에서는 노치방향으로 국부적인 소성변형(necking)이 관찰되었다. GFMLs의 이러한 파괴기구는 FRP의 파괴기구 외에도 섬유층과 AI층 사이의 층간분리 및 AI층의 소성변형을 포함하고 있으며 위의 AE거동과 밀접하게 관련되는 것이다.

3.3 도달시간차를 이용한 위치표정

도달 시간차를 이용한 AE신호의 위치표정방법의 장점은 파손의 진행상태를 실시간으로 매우 정밀하게 위치표정할 수 있어 금속 및 복합재료 용기의 안전성 검사에 널리 사용되고 있다. Fig. 16에 단일 AI 판재와 A-GFMLs 시험편에 대하여 1차원 위치표정의 결과를 나타낸다. 그래프상에서 x축의 -10의 위치는 시험편에 부착된 센서1의 위치를 나타내고 +10은 센서2의 위치를 나타낸다. 각 시험편별로 측정된 탄성파의 전파 속도값(Fig. 2(b)참조)을 초기 입력값으로 주어 위치표정된 결과, 단일재 알루미늄의 경우(a), 거의 초기 노치방향으로 형성된 균열진전경로에만 위치표정이 집중되었다. A-GFML-UD의 경우(b), 초기 노치방향 (X position = -1 ~ +1mm)의 영역뿐만 아니라 센서사이의 전 지역에서 많은 신호들이 위치표정되었는데 이는 섬유층의 배향이 초기 노치방향과 수직방향으로 배열되어 파괴모드의 전환이 일어나면서 초기노치 수직방향으로 전단형 균열진전이 일어나고 동시에 AI층에서는 균열이 초기노치방향으로 진전하면서 알루미늄층과 섬유층 사이에 심한 층간분리가 일어나면서 폭넓은 영역에서의 다양한 손상 발생으로 생긴 신호들인 것이다. 이러한 폭넓게 발생한 AE위치표정 데이터는 A-GFML-CP시험편의 경우에도 어느 정도의 빈도로 나타났다. 초기 노치방향 이외의 광범위한 지역에서 발생한 신호는 전체 시험시간의 후반부에 위치표정된 신호들인 것으로 보아 이는 0°섬유층과 AI층, 90°섬유층과 0°섬유층

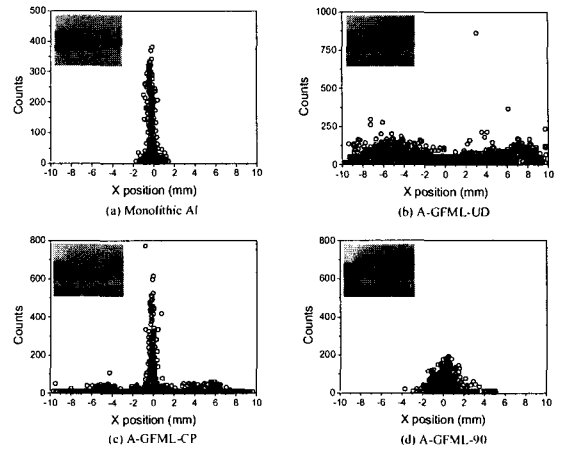


Fig. 16 Linear source location and crack propagation at final fracture for A-GFMLs specimen.

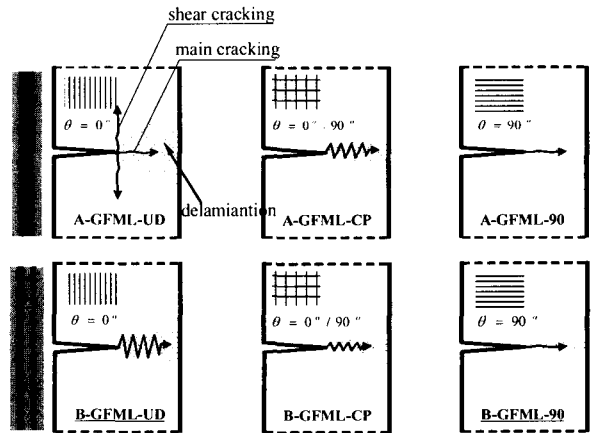


Fig. 17 Schematics of various crack propagation behaviors depending on fiber orientation and lay-up composition ratio.

사이의 층간분리에 의한 신호라 추측된다. A-GFML-90시험편의 경우는 단일 AI판재에서의 AE위치표정 데이터보다 다소 분산되었는데, 초기 노치방향 이외의 지역에서 위치표정된 신호는 섬유층과 AI층사이의 층간분리에 의한 신호라 여겨진다.

3.4 균열진전의 도식화

모든 시험편에 대하여 AI층을 저속 정밀절단기로 제거한 후 균열진전방향을 확인하고 1차원 위치표정 결과를 종합하여 AI과 섬유층의 적층구성과 구성비에 따른 균열진전 양상을 Fig. 17에 도식적으로 나타낸다. A-GFML-UD시험편을 제외한 모든 시험편에 대하여 균열은 초기 노치방향으로 진전

하였지만 A-GFML-UD시험편의 경우 섬유층에서는 초기노치 수직방향으로 전단형 균열로서 진전하였으며 AI층에서는 초기노치 방향으로 진전하였다. 이런 결과로 미루어 볼 때, GFMLs의 균열진전방향은섬유배향에 의존적이며 섬유의 구성 체적비가 적은 경우에는 인접한 AI층이 섬유방향으로의 전단형 균열진전을 방해하기 때문에 섬유다발의 파손을 일으키며 균열이 진행함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 편축 노치를 갖는 단일재 알루미늄 판재 및 다양한 적층각을 가지는 유리섬유/알루미늄 적층판의 파괴거동을 음향방출법을 이용하여 연구하였다.

- 1) 사상물, 진폭, 유지시간 등의 음향방출인자를 이용한 해석은 구조물의 전체적인 파괴거동(global fracture behaviors)을 평가하는데 유용하였고 주파수 분석 및 파형해석을 통하여 유리섬유/알루미늄 적층판의 국부적인 파괴거동(local fracture behaviors)을 예측 및 판단할 수 있었다. 특히 고진폭(80dB 이상), 긴 유지시간(2msec 이상)을 동시에 갖는 신호들만을 대상으로 주파수 분석 및 파형해석 결과를 보면, 저주파수 영역에서 고주파수 영역에 이르는 광범위한 주파수 특성을 나타내었으며 특정 주파수영역에서 피크값을 나타내었다. 이러한 신호들은 하중-변위 선도에서 거시적 균열 및 SI과 섬유층 사이의 층간분리가 발생하는 구간과 일치하는 것으로 보아 이들 신호를 이용하여 섬유급속적층판 구조물의 내부에서 거시적인 주요 손상을 실시간으로 파악할 수 있을 것이다.
- 2) 음향방출 발생원을 추정하기 위해서는 1차 중심주파수와 2차 중심주파수, 나아가서는 3차 중심주파수까지 고려를 해야하며 시간에 따른 모든 사상수들을 2차 중심주파수까지 분석한 결과 피크값을 가지는 특정 주파수성분으로 시험편 내부의 전체적인 파괴거동 뿐만 아니라 미시적인 파손거동까지도 추정할 수 있었다.
- 3) 사전에 측정된 탄성파의 전파 속도값과 도달시간차를 이용한 1차원 위치표정은 손상의 발생 및 균열진전위치를 실시간으로 잘 감지하였다. 다양한 파괴발생원의 위치를 비파괴적으로 측정할 수 있고 유용한 방법임을 확인하였다.

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*, 1998, pp 183-198.

2) Hai Yan, Rongzhen Ren, Chunhu Tao and Hongyun Li, "Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate GLARE 2," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 234-236, 1997, pp 621-624.

3) D. J. Shim, R. C. Alderliesten, S. M. Spearing and D. A. Buriának, "Fatigue crack growth prediction in GLARE hybrid laminates," *Composites Science and Technology*, Volume 63, 2003, pp 1759-1767.

4) Yan Hai, Tao Chunhu and Li Hongyun, "Study on Arall failure behavior under tensile loading," *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 12, 1996, pp. 1379-1384.

5) Sang-Tea Kim, You-Tae 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, 1997, pp 322-326.

6) 이유태, 김상태, 권재도, 이택순, 岸 輝雄, 志波 光晴, "탄소 섬유 강화 복합재료의 반복하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성," 한국복합재료학회지, 제8권, 제2호, 1995, pp. 40-51.

7) 이상국, 김옥균, 남기우, 오세규, "탄소섬유 복합재료의 적 층방법에 따른 파괴인성과 AE거동," 한국복합재료학회지, 제8권, 제4호, 1995, pp. 83-91.

8) N. S. Choi, K. Takahashi, K. Hoshino, "Characteristics of acoustic emission during the damage process in notched short-fibre-reinforced thermoplastics," *NDT&E International*, Vol. 25, Number 6, 1992, pp. 271-278.

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, 1998, pp. 2357-2363.

10) Jin-Kyung Lee, "AE characteristic of the damage behavior of TiNi/Al6061 SMA composites," *Composite Structures*, 60, 2003, 255-263.

11) 남현욱, 김용환, 한경섭, "음향방출법을 이용한 집중하중을 받는 일방향 섬유 금속 적층판의 손상 해석," 복합재료학회지, 제14권, 제5호, 2001, pp. 46-53.

12) Mikael Johnson and Peter Gudmundson, "Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composites laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2803-2818.

13) Ni QQ, Jinen E., "Fracture behavior and acoustic emission in bending test on single-fiber composites," *Eng Fracture Mech*, Vol. 56, 1997, pp. 779-796.

14) Gang Qi, "Wavelet-based AE characterization of composite

- materials," *NDT&E International*. Vol. 33, 2000, pp. 133-144.
- 15) 김정현, 우성충, 최낙삼, "유리섬유강화 복합재의 AE특성에 대한 섬유배향 효과," *비파괴검사학회지*, Vol. 23, 2003, pp. 429-438.
- 16) 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, 2004, pp. 1827-1832.
- 17) N.S. Choi, K. Takahashi, "Microscopic observation of failure in polymer-matrix composites under reflected and transmitted light," *Journal of Material Science Letters*, Vol. 12, 1993, pp. 1718-1721.