

유리섬유강화 복합재의 AE특성에 대한 섬유배향 효과

Fiber Orientation Effects on the Acoustic Emission Characteristics of Glass Fiber-Reinforced Composite Materials

김정현*, 우성충*, 최낙삼*[†]

Jung-Hyun Kim*, Sung-Choong Woo* and Nak-Sam Choi*[†]

초 록 본 연구에서는 연속형 일방향 및 주자직 유리섬유강화 복합재료로 인장 시험편을 만들어 AE 특성에 대한 섬유배향 효과를 살펴보았다. AE 신호들을 STFT 처리하여 특성별로 분류하였으며, 반사식 및 투과식 편광현미경을 이용하여 시험편의 손상영역을 관찰하였다. 저주파수 대역의 약한 AE 신호들은 모재 및 계면에서의 손상으로 나타났으며, 높은 진폭의 고주파수 대역 AE 신호들은 섬유 파단에 기인하였다. 섬유 파단 과정에서 발생하는 고진폭의 AE 사상률을 기본 특성 데이터로 하여 다른 섬유배향과 노치방향을 가진 복합재에서의 파괴과정을 특징지을 수 있었다. 결론적으로, AE법은 연속형 유리섬유 강화 복합재의 파괴거동을 탐지하는데 있어 유용함을 알 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 일방향 및 주자직 유리섬유강화 플라스틱, AE 사상률, AE 에너지, 단시간 푸리에 변환법, 현미경관찰법

Abstract The effects of fiber orientation on acoustic emission(AE) characteristics have been studied for the unidirectional and satin-weave, continuous glass-fiber reinforced plastic(UD-GFRP and SW-GFRP) tensile specimens. Reflection and transmission optical microscopy was used for investigation of the damage zone of specimens. AE signals were classified as different types by using short time Fourier transform(STFT) : AE signals with high intensity and high frequency band were due to fiber fracture, while weak AE signals with low frequency band were due to matrix and interfacial cracking. The feature in the rate of hit-events having high amplitudes showed a process of fiber breakages, which expressed the characteristic fracture processes of individual fiber-reinforced plastics with different fiber orientations and with different notching directions. As a consequence, the fracture behavior of the continuous GFRP could be monitored as nondestructive evaluation(NDE) through the AE technique.

Keywords: acoustis emission(AE), unidirectional, satin-weave, AE event-rate, AE energy, short time Fourier transform, microscopic examination

1. 서 론

복합소재(composite materials)는 항공우주선, 로켓, 고속선박, 스포츠용품, 군수용품, 기계구조물 등

의 경량화 설계를 위한 고급소재로서 적극 활용되고 있는 추세이며, 이는 보강재인 섬유의 배향각을 조정함으로써 재료의 이방성을 변화시킬 수 있고 기존의 금속재료나 알루미늄 합금에 비해 뛰어난

비강성(specific modulus)과 비강도(specific strength)를 가지는 여러 장점이 있기 때문이다. 그러나 복합소재는 내부의 구조와 형태가 다양하고 구성섬유와 모재의 특성이 재료마다 다를 뿐만 아니라 재료 내부에 결함이 발생하면 기계적 성질이 상당히 저하되어 구조물의 안전성, 신뢰성, 건전성에 영향을 줄 수 있으므로 결함을 검출하거나 파괴기구를 해석하는 것은 복합재료의 실용적 측면에서 중요한 문제가 된다.

음향방출(acoustic emission, AE)은 재료가 외적 하중을 받아서 재료 내부에서 미소한 손상과 균열, 소성변형이 발생할 때 방출되는 탄성파이며, 이러한 탄성파를 재료표면에 부착한 압전센서로 검출하여 그 특성을 분석 평가함으로써 재료 내부의 파손상황이나 변형상태를 연속적으로 온라인 모니터링하는 비파괴 탐상 기법을 음향방출법이라 한다. 종래의 여타 비파괴검사법이 금속재료 등의 균일 등방성체를 대상으로 발전되었기 때문에 섬유강화 복합재료와 같은 불균일 재료에 그대로 적용시키기에 많은 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라 실시간 평가법이 아니므로 모재균열(matrix cracking), 층간 분리(delamination), 섬유파단(fiber breakage) 등의 복잡한 형태의 파괴기구를 가지는 복합재료[1-3]의 평가범으로 부적당한 점이 많았다. 따라서 이러한 복합재료에서의 파괴특성을 파악하고 신뢰성을 확보하기 위하여 섬유강화 복합재료의 평가범으로 AE법을 이용한 AE 파라미터 해석에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다[4-6].

김 등은[7] AE 센서 이용한 AE 파라미터들의 해석을 통해 AE 검사법의 유효성과 평가기준을 설정하여 섬유강화 복합재료의 새로운 파괴특성 평가법을 개발하고자 하는 연구에서 AE 파라미터와 파괴 모드간의 관계를 찾아내기 위해 충격 에너지와 노치비의 함수로 AE 신호를 예측하였다. 모재의 미소 균열과 성장에 의해서는 저진폭 AE 신호가 나타나며 중진폭 신호는 섬유와 모재간의 층간분리와 계면분리에, 90dB의 고진폭 영역의 AE 신호는 유리 섬유의 파단에 각각 대응됨을 보여주었다[7,8].

또한, 적층판의 섬유배향각 변화에 따른 파괴인성과 파괴거동에 관한 연구[9]가 수행되었는데 탄소 섬유복합재료에서는 섬유배향각이 노치방향에 대하여 증가할수록 AE 신호는 낮은 하중에서 발생하기 시작하여 초기손상이 급진전되는 것으로 확인되었다. 섬유배향에 따른 파괴인성값과 AE 사상수

(event) 사이에는 거의 선형적으로 비례관계에 있으며, AE 진폭과 에너지는 섬유방향에 의존하지 않았음을 나타내었다.

파괴 메커니즘과 관련하여 짧고 무질서하게 배향되어 등방성을 보이는 단섬유 강화 복합재료(short fiber reinforced plastics, SFRP)의 AE 특성에 대한 연구에서는[10,11], 변위에 대한 AE 진폭 V_p 의 변화거동이 관찰된 파괴과정들과 일치하는 것을 보여주었다. 고진폭 대역의 V_p 는 거시적 균열(main crack)의 개시지점에서 최소가 됨을 보였고 거시적 균열 진전에 따른 추가적인 섬유파단으로 V_p 의 거동은 다시 빠른 속도로 증가하였다. 밴드패스 필터를 이용한 주파수 분석에서는 높은 진폭을 갖는 AE 사상수는 섬유 파단과 관련 있는 것으로 나타났다. 계면 파괴(interfacial failure)와 모재 파괴(matrix fracture)는 낮은 진폭의 AE 신호를 발생시켰다. 반사식 및 투과식 광학 현미경으로 살펴본 결과에서는 거시적 파괴에 있어서 노치선단부 앞에서의 섬유파단이 중요한 역할을 했던 것으로 나타났다. 또한 안정적 파괴과정에서 AE 발생의 특징적인 모델을 제시하였다. 그러나 단섬유강화 복합재료에 대한 이러한 연구결과가[10,11], 길게 연속적으로 배향되어 비등방성을 보이는 연속형 섬유강화 복합재료에 대해서 어떠한지에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 일방향 유리섬유강화 플라스틱 복합적층판(unidirectional glass fiber reinforced polymer-matrix laminates)과 수직적 유리섬유강화 플라스틱 복합적층판(satin weave glass fiber reinforced polymer-matrix laminates)의 두 종류 시험편에 관해서, 섬유배향의 변화에 따라 AE 신호 및 파괴거동이 어떤 특징을 갖는지를 파악하여, 다양한 섬유배향을 갖는 복합적층판의 파괴과정을 AE법으로 비파괴평가하기 위한 체계를 구하고자 한다.

2. 실험

2.1. 시험편 제작

본 연구에 사용된 복합적층판 시험편은 SK Chemical의 두께가 0.125 mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(UD-GFRP, UGN 150)와 수직적 유리섬유/에폭시(SW-GFRP)프리프레그의 두 가지를

이용하여 제작되었다. 복합적층판은 UD-GFRP 프리프레그(prepreg)를 각각 $[0_8]_s$, $[90_8]_s$, $[+45_4/-45_4]_s$ 및 $[0_4/90_4]_s$ 으로 적층하여 두께 2 mm로 하였고, SW-GFRP 프리프레그도 $[45_8]_s$ 및 $[90_8]_s$ 로 적층하여 두께 2.5 mm로 하였으며, 진공백(vacuum bag) 방식으로 오토클레이브(autoclave)에서 성형하였다. 이렇게 만들어진 복합적층판은 다이아몬드 휠커터를 이용하여 Fig. 1과 같은 시험편으로 절단하였다. 또한 초기 노치를 갖는 시험편을 만들기 위해 저속 다이아몬드 휠커터(ISOMET)를 이용하여 절단 시 손상발생을 최소화하면서 초기노치(길이 7.5 mm, 폭 0.4 mm)를 SEN(single edge notched)형으로 가공하였다. 이후, 자체 제작한 예비균열 도입장치로 노치선단부에 가는 면도날(thin sharp razor blade)을 정하중(300N)으로 부하함으로써 노치선단부를 예리하게 만들었다. 또한, 노치없는 평활시험편에 대해서는 인장시험 시 인장시험기의 그립(grip)부에 의한 집중응력발생이 노치시험편보다 두드러질 것

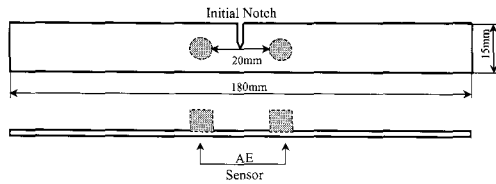


Fig. 1 Dimension of single-edge-notched specimen and AE sensor locations

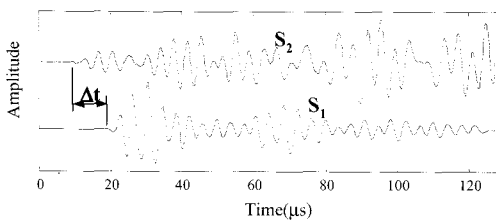


Fig. 2 Arrival time difference Dt between the two AE sensors

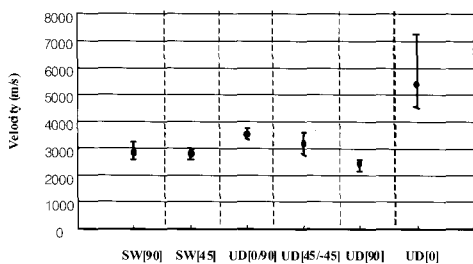


Fig. 3 Results of propagation velocity measurement

이 예상되므로 이를 최소화하기 위해 직물형 유리 섬유강화 플라스틱(woven fabric GFRP)으로 제작한 길이 50 mm, 폭 15 mm, 두께 2 mm의 텀을 24시간 경화제를 이용하여 시험편 양 끝단부에 부착하였다.

2.2. 탄성파의 전파속도 계측

탄성파의 시험편 종류별 전파속도값을 Mistras 2001(PAC사) 시스템에 입력함으로써, 인장시험시 시험편에서 발생하는 AE 발생원(AE source)의 위치를 구할 수 있게 되고 외부에서 들어오는 잡음을 걸러내어 두 센서 사이에서의 유효신호만을 골라내는 작업이 가능하다. 따라서, 시험편 종류별 탄성파의 전파속도를 계측할 필요가 있다. 이를 위해 서로 비슷한 특성을 갖는 2개의 AE 센서(Micro 30, Dunegan Co.) S1, S2를 시험편의 한쪽 표면에 일정 거리(200 mm)를 두어 센서간의 중앙으로부터 10 mm, 30 mm, 60 mm의 위치에서 연필심을 파단시켜 AE source를 발생시킨 후, 이 신호를 부착된 센서로 계측하였다. 이 신호를 증폭기(Gain: 40 dB)로 증폭시킨 후 Digital Oscilloscope (LeCroy)를 이용, 탄성파가 두 센서에 각각 도달하는데 걸리는 시간차 Dt(Fig. 2)를 구하고 연필심 파단 위치로부터 각 센서간의 거리 차(DL)를 계측하여 각 시험편 종류마다의 전파속도($v=DL/Dt$)를 계측하였다. Fig. 3에 시험편 별로 계측된 전파속도를 나타내었다. 탄성계수가 클수록 탄성파 전파속도가 커지는데, 시험편 종류별 탄성계수를 감안할 때 Fig. 3의 전파속도는 타당한 것으로 생각된다.

2.3. 실험 방법

앞에서 서술된 각각의 시험편에 대하여 하중증가에 따른 파괴거동 및 손상평가를 위한 음향방출기법의 적용성을 평가하기 위하여 AE센서(Micro 30, 주파수 검출대역: 100~600 kHz, 공진 주파수: 275 kHz)를 시험편에 부착하여 인장시험을 실시하였다. Fig. 4는 인장 하중 하에서 복합적층판의 손상을 음향방출법으로 평가하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 두 개의 AE 센서를 시험편의 한쪽 표면으로 시험편 중앙에서 각각 10 mm 떨어진 지점에 일정 압력을 줄 수 있는 고정구를 이용하여 부착하였으며 시험편과 센서 사이에는 커플런트(couplant)

로써 진공그리스(vacuum grease)를 사용하였다. 만능 인장 시험기(Zwick, 로드셀: 250kN)에 의해 인장하중 하에서의 하중-변위 곡선을 얻는 동시에 시험편의 파단과정에서 발생한 AE신호를 센서에 의해 감지하여 실시간 계측하였다. 이렇게 감지된 2-channel의 AE 신호는 증폭기(Pre-amp, Gain: 40dB, threshold level: 35 dB)에 의해 증폭된 후 AE본체(Mistras 2001, PAC)로 보내어져 AE 에너지(energy), AE 사상수(events), AE 진폭(amplitude) 분포, AE 위치표정(source location), AE 파형(waveform) 등의 여러 음향방출 파라미터로 분석된다. 이때 AE 신호 발생 예상영역(두 개 센서 사이의 영역) 이외 지역에서 탐지되는 신호는 모두 잡음(noise)처리 하였으며 시험편의 하중 속도는 노치가 존재하는 시험편의 경우 0.1 mm/min로, 평활 시험편의 경우에는 1 mm/min로 하였다.

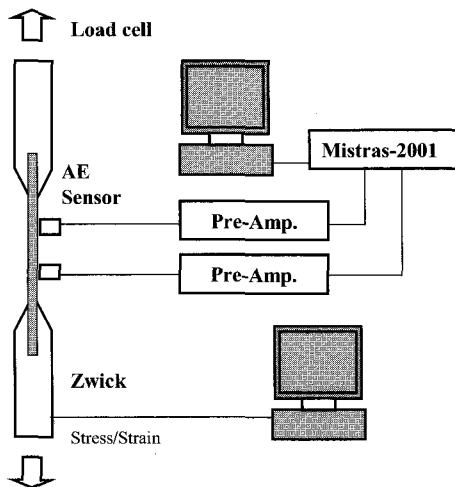


Fig. 4 Schematic of AE measurement system

3. 음향방출 신호처리 및 손상기구 추정

복합적층판에서 발생하는 손상의 종류는 모재균열, 층간분리, 섬유파단 등으로 나뉘어 진다. 이러한 손상 발생에 따라 탄성파인 음향방출파가 발생하며, 손상의 종류와 파손모드에 따라 다른 주파수 대역 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 시험편에서 감지되는 모든 AE 신호에 대해 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform, STFT)으로 처리하여 시간과 주파수 영역에서 해석함으로써 시험편 내부에서 발생하는 손상거동의 특성을 파악하고자 하였다.

3.1. AE 신호의 STFT 해석 결과

Fig. 5는 UD-GFRP [+45₄/-45₄]_s 시험편에서 문턱 전압값(threshold level) 70 dB로 계측한 AE 신호를 STFT로 처리한 예이다. A구간은 고주파수(270~480 kHz)가 중점적으로 발생하는 섬유파단에 따른 AE 신호에 의한 것이며 B구간은 저주파수(40~270 kHz)의 대역으로서 모재파괴에 따른 것이다. 본 연구에서 각 AE파들을 STFT로 처리한 결과 Fig. 6 (a) ~ (c)와 같이 크게 세가지 타입으로 분류되었다. Fig. 6a의 Type I 과 같은 저주파수 대역(40~270 kHz)의 AE 신호들은 모재파괴나 모재와 섬유간의 계면파괴(interfacial fracture)로부터 발생되며, Fig. 6b의 Type II와 같이 고주파수 대역(270~480 kHz)으로 분류되는 AE 신호들은 주로 섬유파단이 단독으로 일어날 때 나타난다[10,11].

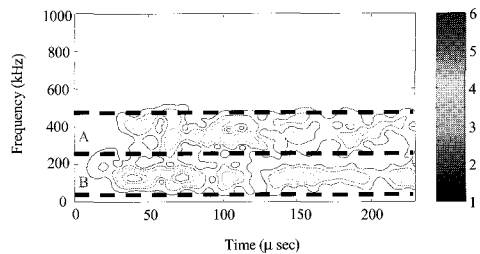


Fig. 5 STFT result of an AE signal from a UD-GFRP [+45₄/-45₄]_s specimen

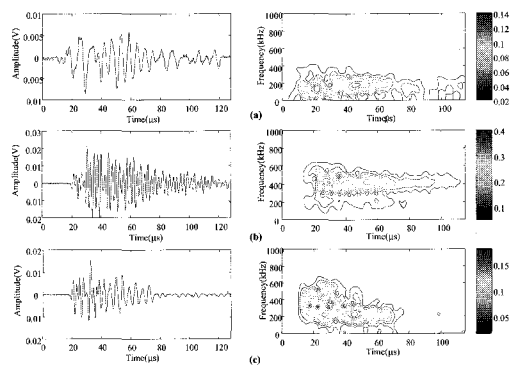


Fig. 6 Type I(a), Type II(b) and Type III(c) AE signals from a UD-GFRP [+45₄/-45₄]_s specimen

Type III(Fig. 5혹은 Fig. 6 (c))의 경우와 같이 저주파수와 고주파수가 동시에 나타나 (40~480 kHz) 광범위한 주파수대역을 보이는 AE 신호들은 모재파괴와 섬유파괴가 거의 동시에 복합적으로 일어난 것이다.

문턱전압값을 70dB로 하여 계측한 전체 AE 신호들 중에서 Fig. 6(a)에서와 같은 Type I의 AE 신호(전체 AE 사상수의 약 10%)나 Fig. 6(b)와 같은 Type II의 AE 신호(약 2%)는 적게 나타난 반면, Fig. 6(c)에서와 같이 40~480 kHz의 광대역으로 주파수가 분포하는 Type III의 AE 신호가 대부분(88%)을 차지하여, 문턱전압값 70dB이상의 고진폭 AE 신호들은 섬유와 모재의 거의 동시적인 파괴로 인한 고주파수와 저주파수 대역을 함께 갖는 AE 신호들임을 알 수 있었다. 따라서 연속형 유리섬유 강화 복합재(continuous glass fiber-reinforced plastics)에서의 섬유 파단에 따른 복합재 시험편의 파괴과정과 AE 특성을 주로 살펴보기 위해 AE 계측을 위한 문턱전압값을 70dB로 하였다.

4. 음향방출 거동의 해석

4.1. 노치 시험편의 음향방출 특성

Fig. 7은 노치가 있는 UD-GFRP 시험편과 SW-GFRP 시험편에 대한 인장하중하에서의 하중-변위 곡선 및 AE 사상률과 AE 에너지를 나타낸 그래프이다. 또한 Fig. 8에 위 시험편들의 파단후의 사진들을 제시한다. Fig. 7 (a)와 같이 UD-GFRP[0_s]s 시험편에서는 최대하중이 UD-GFRP[90_s]s 의 46배가 되어 매우 큰 강도를 나타내는데, 최대하중의 약 72%되는 시점(72% P_{max}, A시점)에서 event rate가 최소가 되는 부분이 나타났고 92% P_{max}(B지점) 이상으로 하중이 증가되면서 대부분의 AE파가 모재에서와 섬유-모재 계면간의 미세파손(micro-fracture)을 나타내며 낮은 진폭을 갖는, AE 발생의 초기단계에서와 유사한 매우 낮은 레벨로 급격히 감소하였다. Fig. 9는 UD-GFRP[0_s]s 시험편의 A 지점과 B지점 사이 II 구간에서의 시험편 손상부위를 박편화하여 반사형 편광현미경으로 촬영한 사진으로, 초기균열 앞부위에서 섬유파단이 다수 발생했으며 전단형 균열(shear crack)이 초기 노치방향에 수직하게 진전되고 있음을 알 수 있다. 이는 최소 사상률 시점(A시점)에서 노치 선단 부근의 개구형(mode I) 파괴를 야기하는 하중상태가 전단형(mode II) 하중으로 변화하는 파괴모드의 전환과정이 II 구간에서 일어나고 있음을 보여준다. 이러한 하중모드의 변화가 손상영역을 새롭게 전개하고 추가적인 섬유파단을 발생시키는데 영향을 주었을 것으로 보이며 두 번째 최소 사상률

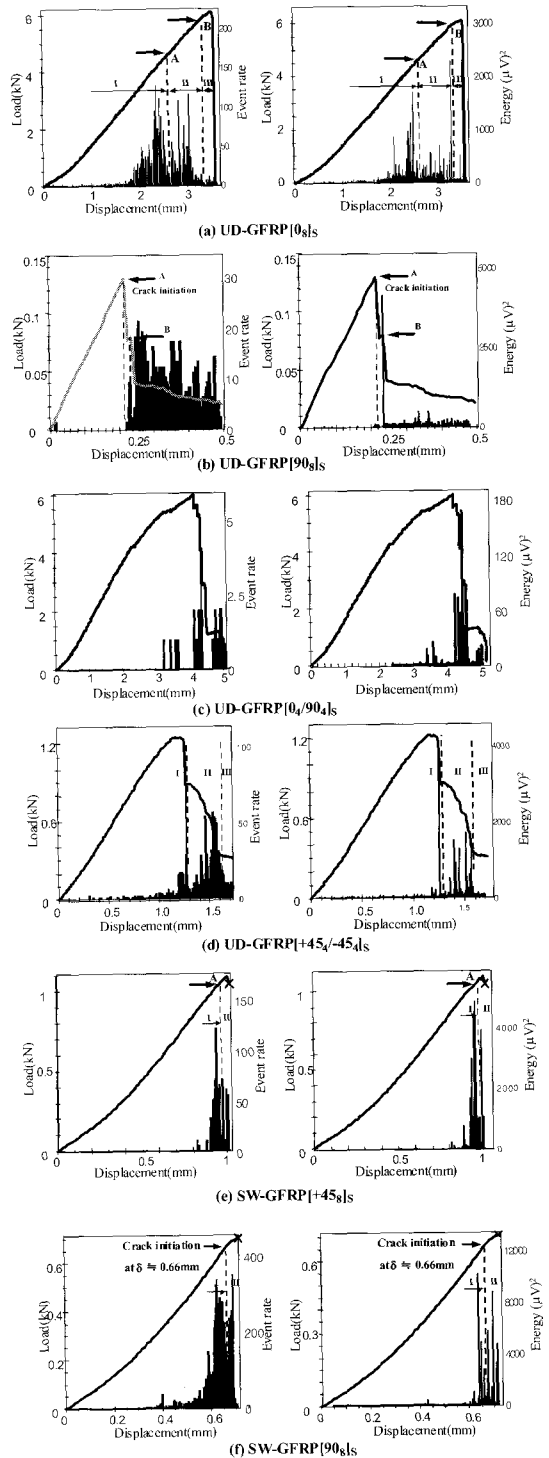


Fig. 7 AE energy and AE event rate for notched specimens of various UD-GFRP and SW-GFRP

지점(B지점)에서는, 거시적인 전단형 균열의 개시와 함께 하중은 인장형에서 전단형으로 완전히 모드 전환되었다고 여겨진다(Fig. 8 (a) 참조). B지점 이후에는 AE 사상률과 AE진폭의 발생수준이 UD-GFRP[90_s]_s의 경우(Fig. 7 (b))와 유사하게 됨에 따라, 이 거동은 섬유 길이 방향으로 전단형 균열이 진전하면서 발생하는 균열면간 가교섬유의 파괴현상에 대응하고 있다고 볼 수 있다.

섬유방향으로 초기 노치를 가하였던 UD-GFRP [90_s]_s 시험편의 경우, Fig. 7 (b)와 같이 최대 하중점(A 지점)에서 노치 방향을 따라 모재와 섬유사이에서 갑작스럽게 시작된 균열은 빠른 진전을 보였으며 B 지점에 이르러서 균열 성장에 따른 주목할 만한 AE 사상률 분포가 계속되었다. B 지점에서 발생한 AE 에너지는 상대적으로 매우 높은 값이었고 이는 균열의 성장을 가로막던 균열면의 위와 아래에 가교되어 있던 섬유 및 섬유다발이 하중의 집중에 못 이겨 파단된 것으로 여겨진다.

Fig. 10에는 본 시험편의 파단면(Fig. 8 (b)의 경우)을 주사형 전자현미경으로 관찰한 사진을 나타내는데, 가교섬유의 파단 흔적을 다수 볼 수 있었다.

UD-GFRP[0₄/90₄]_s 시험편의 경우, Fig. 7 (c)와 같이 노치 선단부로부터 내부 90° 층으로의 균열이 먼저 개시되었고, 최대하중에 이르러 외부층인 0° 층에서 고진폭의 높은 AE에너지를 발생하는 섬유 파단이 일어나고 또한 표면층과 심층사이의 층간분리가 일어나면서 파괴모드의 변화(fracture mode change)가 복잡하게 일어났다. 육안관찰 결과, 변위 4.5mm에 이르러서는 대부분의 하중을 지지하던 외부 0° 층에서 다수의 전단형 균열(shear crack)의 발생 및 진전과 함께 섬유다발들이 파단되면서 90° 층과의 층간분리 현상이 나타났으며 이후 외부층에서 일시 다발적으로 섬유파단이 일어나면서 외피가 일어나는 듯한 형상으로 파괴가 진행됨을 관찰할 수 있었다(Fig. 8 (c)).

노치 있는 UD-GFRP[+45₄/-45₄]_s 시험편에서는, Fig. 7 (d)와 같이 변위 0.3 mm로부터 AE사상률이 서서히 증가하다가 최대 하중 근처에 이르러서 급격히 증가하였다(I 구간). 이 시기에는 외부층에서 균열이 먼저 발생하여 진전한 것으로 여겨지며 구간이 끝나는 지점에서 큰 에너지의 AE 사상과 함께 하중이 감소한 것으로 보아 외부층의 균열이 크게 진전되었음을 알 수 있다. 그 후 AE 사상률은 최소화되었다가 내부층에서의 균열 진전 및 외부층

과 내부층의 층간분리로 안정적인 균열이 진전해 가며 AE사상률과 에너지가 다시 증가해 가는 II 구간을 거쳤다. III 구간에서는 낮은 에너지 수준의 AE 신호들이 나타났으며 균열 진전과 층간분리를 통해 최종 파단에 이르렀다(Fig. 8 (d)).

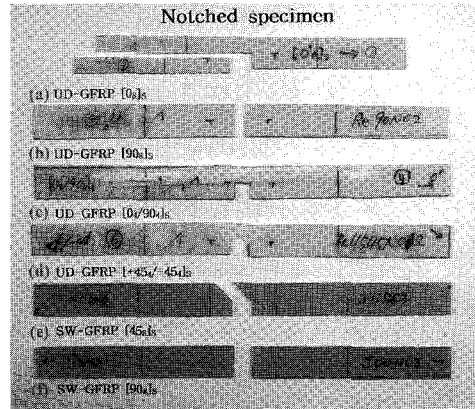


Fig. 8 Photographs of the final fracture of notched GFRP composites

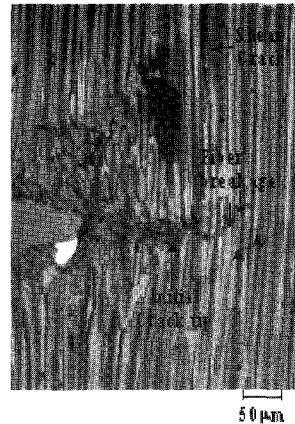


Fig. 9 Reflected optical micrograph of notched UD-GFRP[0_s]_s specimen in stage II

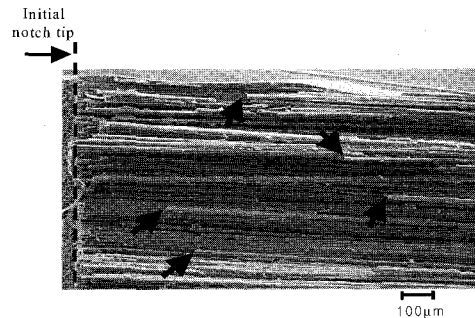


Fig. 10 SEM photograph from the fracture surface of notched UD-GFRP[90_s]_s specimen

SW-GFRP[+45_s]_s 시험편에서는, Fig. 7 (e)와 같이 변위 0.8 mm에서 AE 신호가 약간 나타났고 최대 하중의 92%지점(92% P_{max} , A지점)에 접근함에 따라 AE 사상률과 에너지가 급격히 증가하다가 다시 최소화(92% P_{max} , A지점)되었다(I 구간). 이어서 II 구간에서는 급격한 AE사상률의 증가와 함께 비교적 높은 에너지로 섬유파단의 파괴가 일어났다. 92% P_{max} 지점에서 손상부위의 박편화 관찰사진을 보면, 균열이 45° 방향으로 진전하여, 균열과 수직 관계에 있는 섬유들을 파단시키고, 내부 미세 균열이 진전되어가고 있었으나(Fig. 11 (b)), 아직 거시적 균열의 진전은 관찰되지 않고 있다(Fig. 11 (a)). 이는 노치 선단부에서 균열이 진전되기 직전 선단부의 섬유들이 파단되기까지 거시적 균열이 지체되었던 것을 보여주는 것이라 생각되며 이 후 급격한 AE 신호특성으로 볼 때 섬유파단과 함께 거시적 균열이 빠르게 진전되기 시작하였을 것으로 생각된다.

SW-GFRP[90_s]_s 시험편의 경우, Fig. 7 (f)에서 보는 것처럼 0.34 mm의 변위에서부터 탐지 가능한 AE사상률이 나타나기 시작하며 변위 δ 의 증가와 함께 섬유파손율이 급히 증가하다가 최소 에너지가 나타나는 변위 0.66 mm 부근에서 사상률 역시 최소로 나타났다. 변위 0.66 mm에서 시험편을 박편화하여 관찰한 결과, Fig. 11 (c)에서처럼 노치 선단부로부터 작은 균열이 초기 노치 방향으로 진전되기 시작하는 것을 알 수 있으며, 또한 이 구간에서 내부적으로 이미 많은 섬유 파단이 일어난 것을 투과식 관찰 사진(Fig. 11 (d))으로부터 알 수 있다.

따라서 노치 선단부 앞에서의 섬유파단은 거시적 균열의 발생에 앞서서 나타난다고 여겨지며, 균열 개시의 순간에는 AE사상률과 에너지가 최소화되는 것으로 생각된다. 그렇지만 균열의 진전이 진행되는 II 구간에서는 다시 AE사상률과 에너지가 크게 증가하는데, 이는 새롭게 형성된 균열 선단부의 앞에서 섬유파단이 발생하면서 균열이 진전되기 때문으로 생각된다.

Table 1에 노치 있는 연속 섬유강화 적층 시험편의 파괴과정과 AE특성에 관한 위의 실험결과를 정리하였다.

Table 1 Fracture process and AE characteristics for notched composites

	Fracture process	AE
UD-[0] _T	1. Main crack initiation	Minimized amplitude & event-rate
	2. Fracture mode change	Dual peak distribution, high event-rate
	3. Shear crack propagation	Low amplitude AE
UD-[90] _T	1. Until crack initiation	Few AE
	2. Crack propagation	Low amplitude AE
	3. Fractures of bridged fibers	High amplitude AE, low event-rate
UD-[+45/-45] _s	1. Until crack initiation	Low amplitude & low event-rate
	2. Crack propagation & delamination	Low & high amplitudes, high event-rate
UD-[0/90] _s	1. Until crack initiation	Low amplitude, low event-rate
	2. Fracture mode change	Dual peak distribution, low event rate
	3. Shear cracking & delamination	Low & high amplitudes, low event-rate
SW-[45] _T	1. Main crack initiation	Minimized amplitude & event-rate, dual peak distribution
	2. Crack propagation	Increased amplitude
SW-[90] _T	Same as above	Same as above

4.2. 노치 없는 평활시험편의 음향방출 특성

Fig. 12 (a)에서 보는 것처럼, 노치가 존재하지 않는 UD-GFRP[0_s]_s 시험편의 경우 인장강도가 가장 우수하게 나타났고 AE 에너지도 높은 수치를 보였다. 이 시험편의 최대하중의 75% 지점(A지점) 이후로 AE 사상률은 하중의 증가에 따라 급격한 증가를 나타냈다. 이 같은 양상은 약 97% P_{max} 지점(B지점)에 이르기까지 이어지고 있으며 이것은 A지점에서 내부에서의 섬유 파단이 개시되어 이후 B지점에 이르기까지 지속적인 다량의 섬유 파단과 섬유 인발(fiber pull-out)이 발생하였기 때문으로 사료된다. B지점에서 시험편 파단 직전까지 파단된 섬유의 인발과 모재균열이 진전하여 AE의 급격한 저하를 나타냈으며, 최종 파단 후의 육안 관찰결과(Fig. 13)

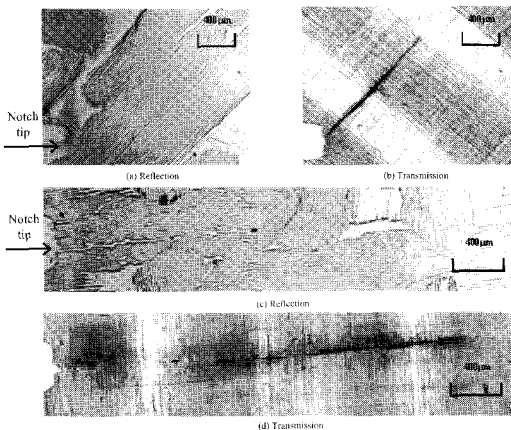


Fig. 11 Microscopic photographs of notched SW-GFRP[45_s]_s (a, b) and SW-GFRP[90_s]_s (c, d) specimen

많은 섬유유의 인발이 시험편 게이지부의 전체에 걸쳐 나타났음에 대응한다.

UD-GFRP[90₈]_s 시험편의 경우, Fig. 12 (b)와 같이 UD-GFRP[0₈]_s 시험편에 비하여 인장강도가 급격히 감소하였으며 AE 에너지와 사상률도 크게 감소한 형태를 보였다. 파단과정을 관찰한 결과 인장하중 방향에 수직방향으로 개구형 파괴가 일어났음을 알 수 있었고, 90% P_{max} 에서 98% P_{max} 까지의 구간에서는 파괴가 진행함에 따라 모재와 섬유사이의 계면 분리 및 모재 균열 발생으로 형성된 균열면 사이의 가교섬유들의 간헐적 파단이 주된 AE 발생원(AE source)이었다고 생각된다.

UD-GFRP[0₄/90₄]_s 시험편의 경우, Fig. 12 (c)와 같이 변위 1.5 mm에서 4 mm까지의 I 구간은 시험편 내부의 90° 층에서 균열이 발생 및 진전하여 먼저 파괴가 일어난 것으로 여겨지는 구간이다. 이 구간에서는 매우 낮은 수준의 AE 에너지가 나타났는데 육안관찰 결과에서 이러한 저진폭, 저에너지의 AE신호는 내부의 90° 층에서 우선적으로 발생한 균열의 진전 및 파단으로 인한 것임을 알 수 있었다. 변위 4 mm에서 5.8 mm 사이의 II 구간은 인장형인 개구형 하중으로부터 전단형 하중으로 외부 0° 층의 파괴모드가 전환되어가며 전단형의 파괴가 발생하는 구간으로, 이 구간에서는 이미 균열이 진전된 내부 90° 층을 둘러싸며 시험편의 하중을 지탱하던 외부 0° 층 사이에서의 층간분리(delamination)도 시작되었을 것으로 여겨진다. II 구간에서 AE사상률의 양상을 살펴보면 II 구간의 시작부에서 사상률이 급격히 증가하여 변위 5.2mm 근처에서 최대 분포가 나타남을 볼 수 있다. III 구간에서는 전단형 균열로 인해 모재 균열진전이 진행하면서 AE사상률이 급격히 저하되었으나, 가교섬유 파단에 의한 높은 에너지를 발생하는 섬유파단이 간헐적으로 일어남과 동시에 90° 층과 0° 층 사이에서의 층간분리(delamination)가 최종파괴 시까지 이어졌다(Fig. 13 (c)).

노치가 없는 UD-GFRP[+45₄/-45₄]_s 시험편에서는, Fig. 12(d)와 같이 최대하중까지의 구간인 I 구간에서 항복(yielding)이 일어나며 각층에서 섬유방향 균열이 발생하였다(Fig. 13 (d)). II 구간에서는 내부 층의 모재와 섬유간에서 섬유방향 균열이 발생하여 진전됨과 동시에 +45° 층과 -45° 층 사이의 층간분리도 발생되어 점차 큰 에너지의 AE사상이 계속되었다.

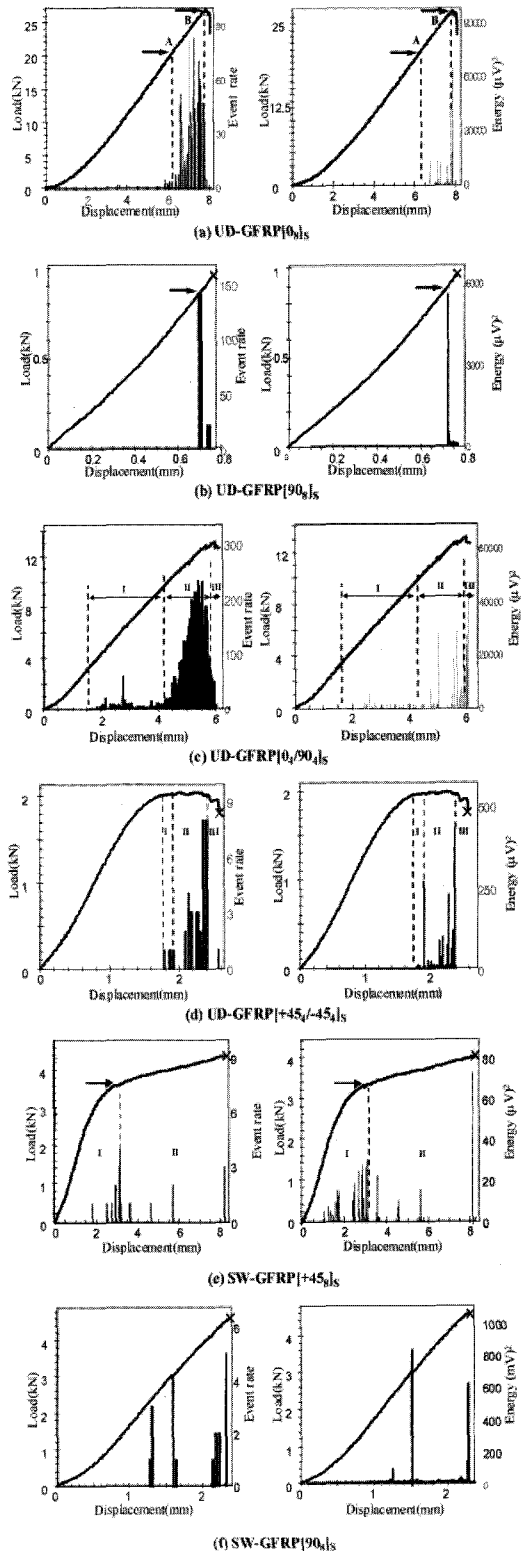


Fig. 12 AE energy and AE event rate for unnotched specimens of various UD-GFRP and SW-GFRP

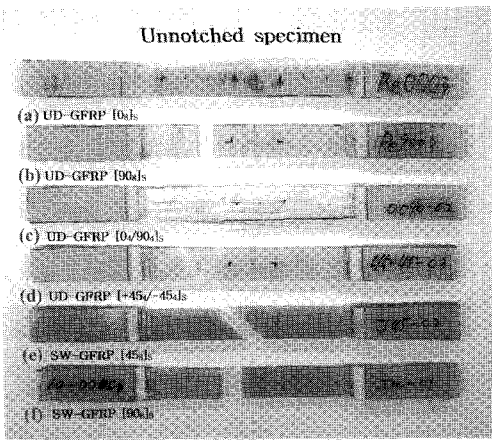


Fig. 13 Photographs of the final fractures of unnotched GFRP composites

SW-GFRP[+45]s 시험편의 경우, Fig. 12 (e)와 같이 하중증가와 함께 거의 비례적으로 증가해 가던 AE사상률은 3.2 mm 이후에는 감소했다. 변위 1 mm에서 3.2 mm까지의 구간에서는 다수의 섬유 파단 발생과 함께 섬유 인발 및 모재 파괴로 인한 45° 방향으로의 초기 손상이 발생한 것으로 추정된다. 그 이후 최종파단에 도달할 때까지의 구간에서는 상대적으로 낮은 에너지의 AE신호들이 나타나 손상이 45° 방향으로 진전되어 가는 동안 간헐적인 섬유 파괴가 발생하였던 것을 알 수 있었다(Fig. 13 (e)).

SW-GFRP[90]s 시험편에서는, Fig. 12 (f)처럼 하중이 증가함에 따라 드문드문 높은 에너지 발생이 나타나고 있다. 변위 1.6 mm에서 섬유들의 갑작스런 파손으로 고진폭의 AE신호가 나타났다. 이 지점

Table 2 Fracture process & AE characteristics for unnotched composites

	Fracture process	AE
UD-[0]T	A series of fiber breakages	Low and finally high amplitudes
UD-[90]T	Matrix fracture and then fiber breakages	Low & high amplitudes, low event-rate
UD-[+45/-45]S	Yielding & fiber breakages	• Few AE before yielding • Low event-rate • Low & high amplitudes
UD-[0/90]S	Crack occurrence in 90° layer and then delamination and then fiber breakages in 0° layer	• Dual peak distribution • Low and then high event-rate
SW-[45]T	• Yielding & fiber breakages • 45° crack propagation	• High event-rate & amplitude before yielding • Low event-rate & amplitude after yielding
SW-[90]T	• Matrix fracture & fiber breakage • 90° crack propagation	AE occurrence at large time intervals

이후에는 AE에너지와 사상률이 작아서 섬유 파손율의 완만한 진행을 보이다, 최대하중의 90% 근처부터 AE사상률이 크게 증가함으로써 섬유 파손율의 증가를 보이며 최종파괴에 도달하였다. (Fig. 13 (f)).

Table 2에 위에서 관찰한 노치 없는 시험편의 파괴과정과 AE 실험 결과를 정리하여 제시하였다.

5. 결 론

음향방출을 이용하여 일방향(unidirectional) 및 수직직(satin weave) 연속형 유리섬유강화 복합재료(continuous glass-fiber reinforced composite materials)의 AE 특성과 파괴과정에 대한 섬유배향 효과를 연구하였다.

- 1) 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform, STFT)에 의해서 음향방출 신호를 처리한 결과 3가지 타입으로 분류할 수 있었으며 섬유 파단(fiber breakage)에 의해서는 고진폭의 고주파수 대역으로, 모재 균열(matrix cracking)에 의해서는 저진폭의 저주파수 대역으로, 모재 파괴를 동반하는 섬유 파단의 경우에는 고주파수와 저주파수를 함께 갖는 대역으로 각각 나타났다.
- 2) 섬유파손형의 AE 사상을 AE 계측의 주된 대상으로 하기 위해 문턱 전압값을 70dB로 하였다. 그 결과, 연속형 유리섬유강화 복합재료의 파괴 거동에서의 음향방출 특성은 노치의 유무 및 섬유 배향에 따라 각각 다른 특징으로 나타났다. 노치가 있는 시험편의 경우, 섬유 배향된 방향으로의 균열 진전시에는 균열면 사이의 가교된 섬유들의 파단에 대응하는 AE 신호가 나타났고, 섬유배향과 수직한 초기노치의 경우 균열진전에 파괴 모드의 전환이 일어났으며 이 모드전환이 일어나는 시점을 전후로 쌍봉(dual peak)의 AE사상률 및 에너지 분포 특성이 관찰되었다.
- 3) 파손부위를 박편화하여 반사식/투과식 편광 현미경으로 관찰하고 이 결과들을 음향방출 특성과 관련시켜 본 결과, UD-GFRP[0]s, SW-GFRP[+45]s, SW-GFRP[90]s의 초기 노치 시험편의 경우 거시적 균열의 개시 직전에 AE 사상률과 AE 진폭이 최소화되는 것을 알 수 있었고 섬유 배향(fiber orientation)에 따라 균열 진전의 방향이 달라짐을 예측할 수 있었다.

4) 노치가 없는 시험편의 경우, 최종 파단에 이르기 까지 발생하는 내부 섬유들의 파손과정과 거시적 균열의 발생 및 진전의 단계가 섬유 배향 방식에 따라 확연히 다름을 AE계측을 통해 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제 번호: 2000-1-30400-004-3)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Bowling and G. W. Groves, "The debonding and pull-out of ductile wires from a brittle matrix", *Journal of Materials Science*, Vol. 14, pp. 431-442, (1979)
- [2] P. J. Hine, B. Brew, R. A. Duckett & I. M. Ward, "Failure Mechanisms in Continuous Carbon-Fiber Reinforced PEEK Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 35, pp. 31-51, (1989)
- [3] N. S. Choi, A. J. Kinloch and J. G. Williams, "Delamination Fracture of Multidirectional Carbon-Fiber/Epoxy Composites under Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Loading", *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 1, pp. 73-99, (1999)
- [4] 藤 直哉, 竹本 幹男, 鈴木 裕晶, 小野 桓司, "UD-GFRPとUD-C/CコンポジットのAE信號パターン認識解析による破壊タイプの分類", *日本複合材料學會誌*, 26, 6, pp. 227-235, (2000)
- [5] M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D'Amore & L. Nicolais, "An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials", *Composites Science and Technology*, 58, pp. 1923-1928, (1998)
- [6] T. Prasse, F. Michel, G. Mook, K. Schulte, and W. Bauhofer, "A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 831-835, (2001)
- [7] 김상태, 김덕윤, "음향방출법을 이용한 Glass Fiber/PET 복합재료의 손상평가", *한국복합재료학회지*, 제14권, 제1호, pp. 1-7, (2001. 2)
- [8] 이유태, 김상태, 권재도, 이택순, 岸 輝雄, 志波 光晴, "탄소섬유 강화 복합재료의 반복하중에 의한 손상과 파괴에서의 AE특성", *한국복합재료학회지*, 제8권 제2호, pp. 40-51, (1995)
- [9] 이상국, 김옥균, 남기우, 오세규, "탄소섬유 복합재료의 적층방법에 따른 파괴인성과 AE거동", *한국복합재료학회지*, 제8권, 제4호, pp. 83-91, (1995)
- [10] 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, Number 6, pp. 271-278, (1992)
- [11] N. S. Choi and 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)