

論文

GFRP-알루미늄 하니컴 하이브리드 적층판의 압축 및 굽힘 파괴거동과 음향방출해석

이기호*, 구자욱*, 최낙삼**+

Acoustic Emission Characteristics and Fracture Behaviors of GFRP-Aluminum Honeycomb Hybrid Laminates under Compressive and Bending Loads

Ki-Ho Lee*, Ja-Uk Ju*, Nak-Sam Choi**+

ABSTRACT

This paper investigated acoustic emission (AE) characteristics in association with various fracture processes of glass fiber reinforced plastic skin/ aluminum honeycomb core (GF-AH) hybrid composites under compressive and bending loads. Various failure modes such as skin layer fracture, skin/core interfacial fracture, and local plastic yield buckling and cell wall adhesive fracture occurring in the honeycomb cell wall were classified through the fracture identification in association with the AE frequency and amplitude analysis. The distribution of the event-rate in which it has a high amplitude showed a procedure of cell wall adhesive fracture, skin/core interfacial debonding and fiber breakage, whereas distribution of different peak frequencies indicated the plastic deformation of aluminum cell wall and the friction between honeycomb walls. Consequently, the fracture behaviors of GF-AH hybrid composites could be characterized through a nondestructive evaluation employing the AE technique.

초 록

압축하중 및 굽힘하중을 받는 유리섬유플라스틱(GFRP) 표피/ 알루미늄 하니컴 코어(GF-AH) 하이브리드 복합재료의 음향방출(AE) 특성을 다양한 파괴과정과 연결시켜 연구하였다. 표피층 파괴, 표피/코어간의 계면박리, 하니컴 알루미늄 벽의 국부적인 소성 항복 좌굴 및 셀벽간의 접착수지 박리와 같은 다양한 파괴모드가 하니컴 코어/GFRP 표피 복합재를 이용한 AE 주파수 분포 해석과 진폭분포 해석결과를 통해 분류되었다. 높은 진폭을 가진 AE 사상율의 분포는 셀벽 접착수지의 파괴, 표피층과 심층 사이의 박리 및 미세파괴, 섬유파단에 대응하였으며 다른 피크 주파수의 분포는 알루미늄 셀벽의 소성변형, 셀벽간의 마찰로부터 발생한 것이다. 결론적으로 GF-AH 하이브리드 복합재료의 파괴거동 특성은 AE기법을 활용한 비파괴 평가를 통해 분석 가능하였다.

Key Words : 유리섬유플라스틱/알루미늄 하니컴 하이브리드 복합재료(GF/Al honeycomb hybrid composites), 음향방출 특성 (Acoustic emission characteristics), 비파괴 평가(Nondestructive evaluation), 파괴과정(Fracture process)

1. 서 론

기계구조물의 경량화 및 에너지 절약 추세에 따라 복합재료의 사용이 증가하고 있다. 복합재료 중에서 섬유 강화 복합재료

인 GFRP 혹은 CFRP를 외피층으로 하고 하니컴 코어를 심재로 하는 하니컴 샌드위치 복합재료(honeycomb sandwich composites, HSC) 적층판은 대표적인 경량화 재료 중의 하나로서 기존의 합금재료나 금속재료에 비해 뛰어난 비강성과 비강도를 가질 뿐

* 한양대학교 대학원 기계공학과

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

만 아니라 보강재인 섬유 배향각을 조절함으로써 재료의 이방성을 활용할 수 있어 사용분야가 점차 증대되고 있다. 또한 구조물에 요구되는 낮은 중량을 유지하면서도 높은 굽힘강성과 강도, 높은 충격 에너지 흡수 효과, 우수한 피로 저항 특성이 발휘되어 항공, 우주산업, 군수산업, 자동차, 철도차량, 건축 및 스포츠 용품에 적절한 소재로써 적극 적용되고 있다. 항공기 구조물로서의 HSC는 전투기 및 여객기에 응용되고 있으며 기존의 금속재료 사용과 비교하여 30% 이상의 무게 저감이 가능하고, 이에 따라 구조재 부품의 수도 상당히 감소시킬 수 있다[1].

Michelle[2]와 Swanson[3]은 굽힘하중이 가해졌을 때, 하니컴 샌드위치 복합재료 구조물에 국부적인 외피층의 파손과 하니컴 셀벽의 붕괴 및 손상기구를 실험적으로 연구하였다. Shuaib 등[4-9]은 하니컴 샌드위치 복합재에 압축하중이나 집중하중이 가해질 때 외피층 파손, 코어층의 붕괴 또는 국부적인 좌굴 변형 거동에 미치는 코어 타입의 효과를 연구하였다. 그런데, 이들 연구는 파손과 관련한 해당 HSC 자체의 내부구조 모델적인 파괴해석과 변형해석을 연구결과로 하고 있으며 HSC를 적용한 기계구조물의 신뢰성, 안전성, 건전성 확보를 위해서는 복합재 표피의 다양한 섬유구조, 하니컴 코어의 타입 및 이들 사이의 계면 접착부 상태를 고려한 파괴 및 변형기구의 심도 있는 해석이 필요할 것이다.

한편, 음향방출(Acoustic Emission, AE) 비파괴 검사법은 구조물 내부에서 미세손상과 균열, 소성변형이 발생할 때 방출하는 탄성파를 재료 표면에 부착한 센서로 검출하여 탄성파 신호의 특성을 분석함으로써 구조물 내부의 변형이나 파손상태를 실시간으로 감시하는 탐상 기법으로, 주로 사상수(hit counts)나 신호 진폭(amplitude), 신호 에너지(energy)를 시간의 함수로서 인자해석(parametric analysis)하여 복합재 구조물의 진단에 적용되고 있다[10-12]. 또한, 검출되는 각 신호에 대한 파형 해석[13,14], 주파수 분석[15-18]을 병행하여 음향방출기법의 신뢰성을 제고하고 있다. 저자는 이들 기법을 조합하여 적용함으로써 섬유강화플라스틱(FRP)의 AE 거동을 파피메커니즘과 관련시켜 해석하였고[19,20], 하이브리드 복합재료의 음향방출은 모재 균열, 섬유 파단, 층간 분리, 금속층의 소성변형과 파괴를 발생원으로 분류하여 분석한 바 있다[21,22]. HSC의 경우는 섬유 표피층과 하니컴 코어, 이들 사이의 계면 접착층으로 구성되기 때문에 이들 구성 재료의 소성변형과 파괴가 음향방출의 발생원으로 파악되어야 할 것이다. 즉, AE 발생원을 실시간으로 감시함으로써 HSC와 같은 복잡한 구조재료에 대한 파괴 및 변형기구를 해명할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은, 하이브리드 HSC가 기계 구조물로서 적용될 때 가장 흔히 받게 되는 하중인 압축하중과 굽힘하중을 가하여 AE인자 해석과 주파수 해석을 병행함으로써 HSC의 하중 단계별 변형 및 파괴 과정을 구하는 것이다. 이를 위해 HSC의 구성요소인 에폭시 수지 판상 시편, 하니컴 코어 시편, 유리섬유 복합재 판재를 각각 기계적으로 시험하여 AE거동을 조사하였다. 또한, 이동식 광학현미경으로 시편 표면 변형과 균열의 진전 상태를 관찰하여 AE거동의 타당성을 보완하였다.

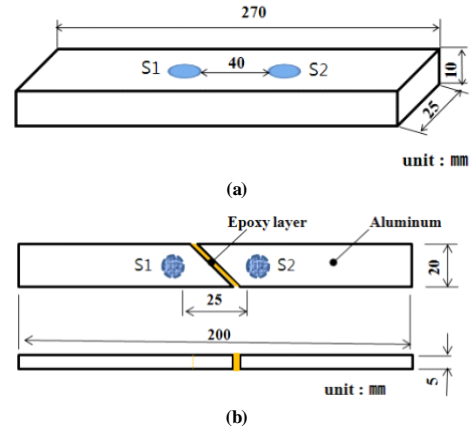


Fig. 1 (a) Epoxy resin specimen for vending test and (b) adhesively bonded specimen under tensile test.

2. 실험

2.1 시험편

유리섬유플라스틱(GFRP)표피/알루미늄 하니컴 코어복합재료(GF-AH) 하이브리드 적층판의 AE거동을 검토하기 위해 다음과 같이 5종류의 시험편을 제작하였다. 우선, 에폭시 단일체 굽힘시편을 제작하였다. Hühler사의 Epoxicure(Hardner)와 Epoxicure resin을 1:5의 비율로 혼합하고 미열을 가하여 혼합 액상의 기포를 제거한 후 12시간 상온 경화하여 주조방식으로 Fig. 1(a)와 같이 제작하였다. Buehler사의 Silicone Mold Release를 성형 전에 주조 틀 내벽에 칠하여 주조 틀로부터 시편의 탈착을 쉽게 하였다. 에폭시 단일체 굽힘시편의 표면은 800p 연마지를 부착한 Minipokisher로 연마 처리하였다. 또한, 알루미늄 맞대기 인장시편을 상기의 에폭시 수지 혼합용액으로 45° 맞대기 접착 후 상온 경화하여 Fig. 1(b)와 같이 제작하였다. 에폭시 수지와 알루미늄 사이의 박리(delamination)를 하중 초기에 유도하기 위해 1mm의 예비 크랙(pre-crack)을 성형 전에 테프론 필름으로 접착수지 단부와 알루미늄 사이의 계면부에 도입하였다. 이들 시편은 에폭시 자체나 계면부의 파괴에 따른 AE거동을 관찰하기 위해서 만들어졌다. 알루미늄 하니컴 단일체만의 압축좌굴 하중에 따른 음향방출 특성을 구하기 위하여, Showa Aircraft Industry Co.사에서 제작한 Al 5052 하니컴 (두께5mm, 셀벽 두께(t)0.038mm, 셀 크기 3.175mm) 소재를 면도칼형 절단기를 이용하여 Fig. 2와 같은 20×20mm의 시편으로 제작하였다. 유리섬유플라스틱(GFRP) 표피/알루미늄 하니컴 코어 복합재료(GF-AH) 하이브리드 적층판의 외피층(skin layer)은 두께가 0.125mm인 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(UD-GFRP, UGN 150, SK Chemicals)를 8장 적층 (두께1mm)하였고, 하니컴 코어 층의 재료는 상기한 알루미늄 하니컴을 사용하였다.

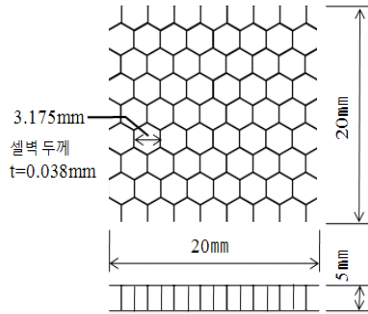


Fig. 2 Aluminum honeycomb core specimen for thickness-wise compressive test.

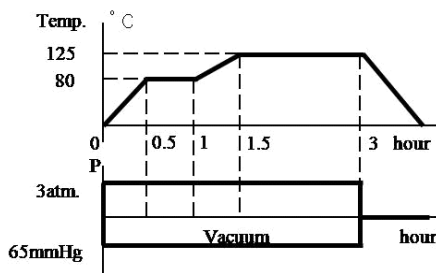


Fig. 3 Curing cycle of GF-AH composites.

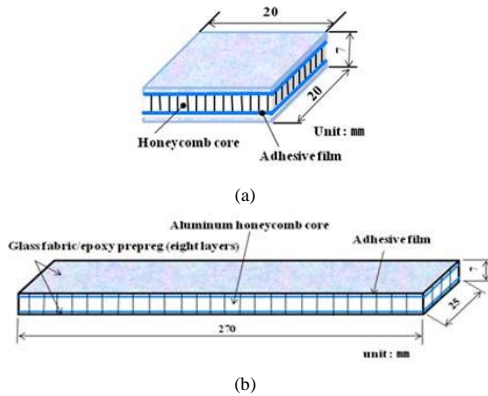


Fig. 4 (a) GF-AH hybrid composite square specimen for thickness-wise compression test, and (b) rectangular specimen for three point bending test.

Table 1 Mechanical properties of component materials in a GF-AH hybrid composite plate

Materials	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio(ν)	Yield Stress (MPa)
Composite skin layer	23.5	0.17	424±12.6
Core layer	1.69×10 ⁻³	0.99	0.7±0.3
Al material	70	0.33	190

외피층과 하니컴 코어의 물성치는 Table 1과 같다. 외피층과 하니컴 코어 사이에는 접착필름(Bondex 206 adhesive film, 한국 화이바)을 삽입하였다. 복합재료 외피층과 하니컴 코어층을 hand lay-up 방법으로 적층한 후 오토클레이브(auto-clave)를 사용하여 진공 백(vacuum bag) 성형하였다. Fig. 3과 같은 경화 사이클로 경화된 GF-AH 복합재 평판을 다이아몬드 휠 커터로 절단하여 Fig. 4(a)와 같이 길이 20mm, 폭 20mm, 두께 5mm의 압축시편을 제작하였다. 이 시편에는 순수 압축하중이 시편의 두께 방향으로 부하된다. 또한, 위와 동일한 성형방법으로 GF-AH 복합재 평판을 제작한 후 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 Fig. 4(b)와 같이 길이 270mm, 폭25mm, 두께 5mm의 3점 굽힘 시편을 제작하였다.

2.2 기계적 시험과 음향방출 실험

위의 5종류 시험편에 대하여 재료시험기(Zwic 250)를 이용한 기계적 시험을 음향방출 시험과 병행하여 실시하였다. 에폭시 단일체 굽힘 시편은 시편의 한쪽 표면 중앙에서 각각 20mm 떨어진 지점에 일정 압력을 줄 수 있는 고정구를 이용하여 2개의 AE센서(Micro 30, Dunegan사: 유효주파수 검출대역 100-600kHz, 공진주 파수 275kHz)를 부착하였다(Fig. 1(a)). 시편 표면과 센서 사이의 연결 매체로서 액상의 진공 그리스 커플런트 (vacuum grease couplant)를 사용하였다. 알루미늄 매트기 에폭시 접착 시편은 에폭시 접착부 중앙에서 각각 10mm 떨어진 지점에 2개의 AE 센서(Micro 30)를 부착하였다(Fig. 1(b)). 에폭시와 알루미늄 사이에 길이 1mm의 초기 크랙을 주어, 인장하중 하에서 에폭시층 내의 파괴나 계면부의 박리가 발생하도록 유도하였다. 알루미늄 하니컴 단일체의 셀형 시편에는 AE 센서를 시편 표면에 직접 부착하기 어려워 압축 부하를 주는 강판에 진공 그리스를 이용하여 부착하였다. 순수 압축하중만이 시편 두께 방향으로 부하될 수 있도록 시편보다 큰 직경 30mm의 평판형 압축강판 인덴터(indenter)를 시편의 상부와 하부에 배치했다.

GF-AH 하이브리드 적층판의 압축시편의 경우에도 하니컴 단일체 압축시편과 같이 압축 인덴터 강판에 AE센서를 부착하였다. GF-AH 하이브리드 적층판의 굽힘시편의 경우는 에폭시 단일체 굽힘시편(Fig. 1(a))과 같이 시편의 한쪽 표면 중앙에서 각각 20mm 떨어진 지점에 2개의 AE센서를 부착하였다. 이들 각 시편에 하중을 주어 시편의 하중-변위 곡선을 얻는 동시에 파괴 과정에서 발생한 AE신호를 센서에 의해 실시간 4MHz로 감지하여 획득하였다. 이렇게 감지된 AE신호는 예비 증폭기(40dB)에 의해 증폭된 후 2-channel의 AE본체(Mistras 2001, PAC사)로 보내어 획득 저장된 후에 사상수 (hit events), 진폭 (amplitudes), 에너지(energy)등의 AE 파라미터에 의해 시계열로 분석된다. 신호탐지를 위한 문턱전압값(threshold level)은 40dB로 하였다. 저장된 AE 데이터들을 임의의 문턱전압값 이상으로 추려낼 수 있으며, 일정시간 간격별 AE 사상률(AE rate)로 재계산 하였다. 또한, 신호가 센서에도착하는 시간차에 의해 AE 발생원의 위치를 계산하고, AE와 발생 예상 영역(2개 센서 사이)을 미리 설정하고 이와는 다른 영역에서 탐지되는 신호는 모

두 잡음(noise) 처리하였다. AE 발생원의 위치 계산을 위해서 시편 종류별 탄성파의 전파 속도를 본 실험 전에 측정했다. 서로 비슷한 특성을 갖는 2개의 AE센서(Micro 30: S1, S2)를 시편의 한쪽 표면에 부착한 상태에서 연필심을 센서 사이의 일정 위치에서 파단 시켜 탄성파가 두 센서에 도달하는데 걸리는 시간차를 구하고 이 값을 실제 파단 위치로부터 2개 센서까지의 거리에 맞도록 시편 종류별 평균 전파속도를 계산하였다[21]. 그 결과, 에폭시 평판의 전파속도는 약 930m/s, 알루미늄 평판은 약 3100m/s, GFRP는 약 2650m/s로 나타났다. 이들 속도 측정값은 각 시편의 비대칭 모드의 횡파 속도에 근접하는 것으로 타당하고 생각된다.

기계적 시험 시 시편에 대한 변위속도는 압축과 인장시험의 경우는 0.1mm/min, 굽힘 시험의 경우는 1mm/min 로서 일정하게 유지하였다. 시험 중에는 이동식 광학 현미경을 이용하여 시편의 외관적인 변형과 파괴 과정을 관찰하고 촬영하였다. 각 종류별로 3개 이상의 시편을 시험하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에폭시 단일체 굽힘 시편의 AE특성

굽힘하중을 받는 GF-AH 하이브리드 적층판의 굽힘 손상 진전에 따른 AE신호의 특성을 정확히 파악하기 위해서는, 먼저 GFRP 내의 수지 및 GFRP 표피층과 하니컴 코어층 사이의 접착층 수지의 파괴에 따른 AE거동을 파악할 필요가 있다. 따라서 에폭시수지 굽힘시편의 파괴시험을 통해 Fig. 5와 같은 하중-변위 곡선과 이에 병행하여 측정된 AE진폭 거동을 측정했다. 하중이 비선형 소성 변형영역에 진입하고 최대 하중을 지나도 유효한 AE 거동은 검출되지 않았으나, 변위 22.9mm 근처에서의 최종파단 직전에 5-10개 정도의 AE 사상이 검출되었다. 이들 AE사상은 최종파단의 일정변위 근처에서 좁은 시간대에 별개로 발생했던 것이다. 이들 사상에 대응하는 대표적인 AE진폭 분포를 Fig. 5에 기입했다. AE 진폭은 주로 50dB 이하에 분포했으며 최종적인 취성 파단 중에 61-70dB의 신호가 검출되기도 하였다. 이들 AE신호에 대한 푸리에 변환(FFT) 결과, 중심주파수가 180-246kHz 대역을 가지고 있었다.

3.2 에폭시 수지 접착 알루미늄 맞대기 시편의 AE 특성

Fig. 6은 에폭시 수지로 맞대기 접착한 알루미늄 시편에 대한 인장하중 하에서의 하중-변위 곡선 및 AE 진폭 분포이다. 하중-변위 곡선을 보면 변위 0.84mm에서 최대 인장하중 284N을 나타내며 최대 인장하중 직후 하중이 급격히 감소한다. 이후 변위의 증가에 따라 시편에 부하되는 인장하중이 지속적으로 증가하다가 변위 3.52mm에서 시편이 최종적으로 파단되었다. AE사상의 발생거동을 살펴보면 최대하중 직후에 초기균열이 진전하면서 급격한 하중저하가 일어나는 변위

0.85mm에서 첫 사상이 발생한 후, 약간의 사상들이 간헐적으로 발생하다가 최종적으로 파단되기 직전에 많은 사상들이 발생하고, 60dB 이하의 저진폭과 80dB이상의 고진폭의 AE 사상들이 혼재하는 거동을 보였다. 이는 균열의 초기진전 후에 접착 에폭시의 미세파괴나 계면부의 박리가 약간 발생하다가 최종 파단직전에 균열선단 주변부의 손상 영역이 일시적으로 확대되어 미시적인 수지파괴나 계면부 파괴가 많아지고 최종 파단에 급격한 균열진전이 이루어졌기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 Fig. 6의 모든 AE 사상에 대한 1차 중심주파수의 분포를 나타낸다. 저진폭의 AE 신호들은 1차 중심주파수가 110-200kHz 대역에 걸쳐 나타났다. 최종파단시에 나타나는 고진폭의 AE 신호들은 중심주파수가 240-280kHz 대역에 나타나서 저진폭 신호와는 다소 다른 주파수 특성을 보였다. 주파수가 높은 것은 파괴 매질의 탄성계수가 높거나 좀 더 취성적인 파괴거동에서 AE가 발생했음을 시사하는 것으로 고진폭 AE 사상은 최종파단이 고속으로 일어났음에 대응한다. 이러한 AE사상들의 진폭과 주파수 특성은 Fig. 5의 에폭시 단일체 굽힘 시편의 AE거동 결과와 비교될 수 있는데, 최종 파단시에 발생한 고진폭 사상들의 중심주파수가 높은 주파수 대역에 있었다는데 공통된 특성을 보였다. 에폭시 접착 알루미늄 맞대기 시편에서 좀 더 고진폭 고주파수 대역의 사상이 발생한 것은, 초기 균열 도입에 따른 응력 집중현상이 크게 일어나 에폭시 단일체 시편보다 미세 균열진전에 따른 순간적인 에너지 방출이 좀 더 컸기 때문으로 해석된다. 또한 예비균열이 계면부에 위치했으므로 최초의 AE사상(Fig. 6,7)은 계면부의 미세균열로부터 발생하였다고 볼 때, 이 사상의 진폭과 주파수는 Fig. 5의 에폭시 단일체로부터 나온 AE의 진폭과 주파수 대역에 있었다. 본 실험 결과의 전체 AE사상을 분석할 때에도 주파수와 진폭 특성만으로 계면박리와 에폭시 미세파괴를 구분하기는 어려웠으며 오히려 AE 주파수와 진폭 특성이 서로 유사한 것으로 나타났다. 한편 Fig. 6, 7의 파단시 AE사상의 개수가 서로 다르게 보이나 이는 동일 데이터점으로 중복된 사상이 발생했기 때문이다.

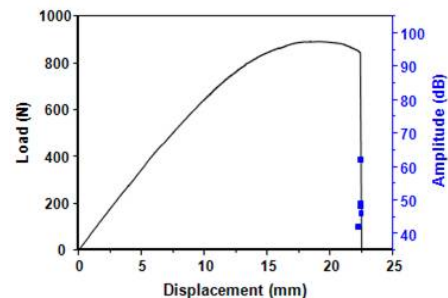


Fig. 5 Load and accompanying AE amplitudes versus displacement of an epoxy resin specimen under bending test.

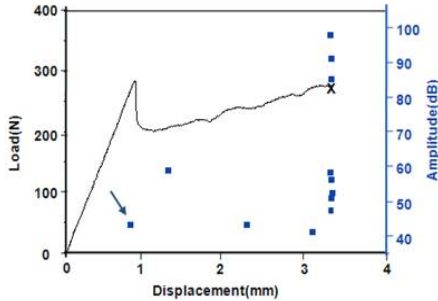


Fig. 6 Load and accompanying AE amplitudes versus displacement of an aluminum/epoxy/aluminum specimen under tensile test.

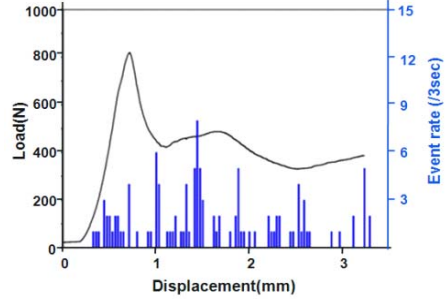


Fig. 8 Load and accompanying AE event rate versus displacement of an aluminum honeycomb core plate under the thickness-wise compressive load.

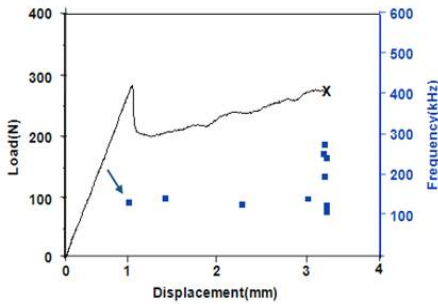


Fig. 7 Load and accompanying AE peak frequencies versus displacement in Fig. 6.

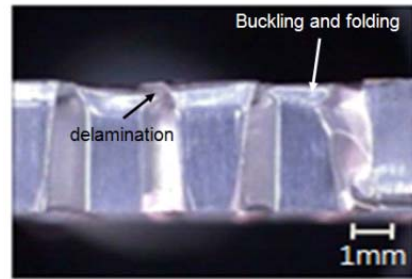


Fig. 9 Deformation and fracture of an aluminum honeycomb core plate at a displacement of 0.6mm in Fig. 8.

3.3 알루미늄 하이브리드 코어 단일체의 AE 특성

Fig. 8은 압축하중 하에서 알루미늄 하이브리드 코어 단일체 시편의 하중-변위 선도 및 이에 병행하여 측정된 AE 사상율(event rate)을 나타낸다. 하이브리드 코어의 압축거동은 하중이 변위 0.65mm 부근까지 급격히 증가하여 최대하중에 도달하였다가 하이브리드 셀벽의 1차 소성좌굴이 발생하여 하중이 급격히 저하되고, 다시 일시적인 하중 증가 후에 하이브리드 셀벽의 2차적인 좌굴 붕괴가 발생하였다. 하이브리드 코어는 1차 붕괴 후에 하중의 증감이 되풀이 되면서 셀벽의 좌굴 및 굽힘 변형이 반복적으로 일어나 전반적으로 일정한 압괴하중(crushing load)으로 지속되었다. AE 사상율은 변위 0.35mm부터 발생하였으며 변위 증가에 따른 셀벽의 좌굴변형 거동과 함께 간헐적으로 AE사상이 발생했다. Fig. 9는 알루미늄 하이브리드 코어의 압축하중에 따른 각 셀벽의 압괴변형 및 파괴거동에 대한 광학 사진이다. 사진은 동일 시편에 대해 일정 압축변위를 단계별로 부여한 뒤에 카메라로 촬영한 것이며, 셀벽의 접합형 굽힘 좌굴 변형거동(화살표)과 수직 접착제의 박리거동(화살표)이 나타나있다.

Fig. 10은 Fig. 8의 시편에서 발생한 AE사상들의 진폭분포를 나타낸다. 전체 사상수의 80% 정도가60dB이하의 저진폭 신호였으며, 1차 좌굴 변형이 완료되는 변위 0.8-1.3mm에서 80dB이상의 고진폭 신호가 계속되었다. 이들에 대한 1차 중심 주파수와 2차 중심 주파수의 분포는 Fig. 11에 나타냈는데, 90-130kHz의 저주파수 대역과 180-300kHz의 고주파수 대역에 분포했다.

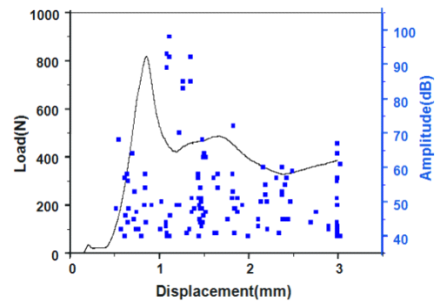


Fig. 10 Load and accompanying AE amplitudes versus displacement of an aluminum honeycomb core in Fig. 8.

특히 고진폭 신호들은 고주파수 대역의 신호에 해당했다. Fig. 5-Fig. 7에서 분석한 바와 같이 에폭시 단일체의 미세파괴를 발생원으로 하는 AE는 중심주파수 대역이180-280kHz였기 때문에, 90-130kHz의 저주파수 대역의AE 사상은 본 실험에서 알루미늄 하이브리드 셀벽이 접히면서 발생하는 소성 좌굴과 셀벽 상호간의 마찰에 의해 발생한 것으로 해석된다, 또한, 150-260kHz의 고주파수 대역의 사상수가 50-90개 정도로 소수인 것으로 보아 AE발생원의 대부분은, 상기한 Fig.5의 에폭시 단일체 및 Fig.7의 에폭시 접착제의 파손시에 발생하는 AE의 중심주파수 110~200kHz에 근사하여 셀벽 사이에서 접착수지가 불연속적으로 박리 및 파괴했음에 기인한 것으로 생각된다.

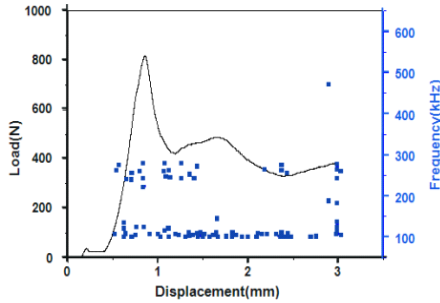


Fig. 11 Load and accompanying AE peak frequencies versus displacement of an aluminum honeycomb core in Fig. 8.

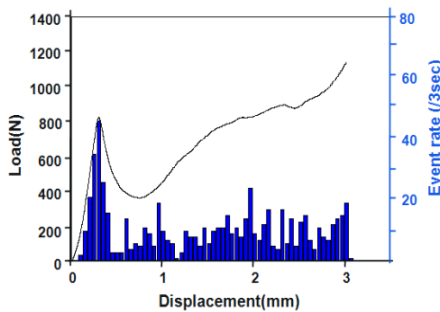
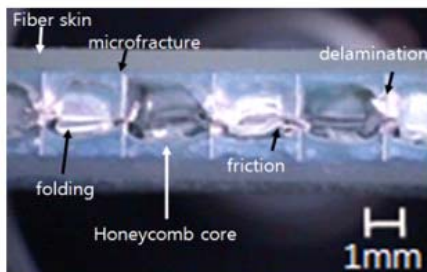
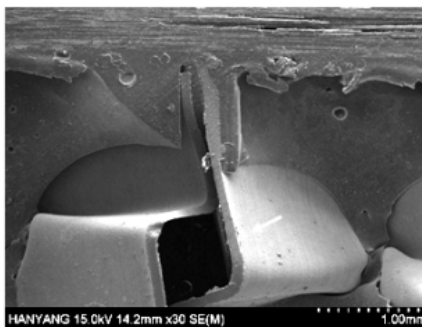


Fig. 12 Load and accompanying AE event rate versus displacement of a GF-AH hybrid composite plate under the thickness-wise compressive load.



(a)



(b)

Fig. 13 Deformation and fracture of a GF-AH hybrid composites plate at a displacement of 1.8mm in Fig.12. (a) overall view by photo, (b) enlarged view by FE-SEM.

3.4 GFRP표피-알루미늄 하니컴 코어 하이브리드 복합재의 압축하중에 따른 AE 특성

Fig. 12는 압축하중 하에서 GF-AH 하이브리드 적층판의 하중-변위 선도와 이에따른 AE사상율을 나타낸다. 본 적층판의 압축거동은 하중이 변위 약 0.4mm부근의 최대하중에 도달하였으나, 하니컴 셀벽의 좌굴 붕괴로 하중의 급격한 저하가 발생하였다. 이 때 셀벽의 중간 부위가 1차로 접힌 상태에서 더 이상의 2차적인 접힘은 일어나지 않고 하니컴벽의 중간부근에서 완전한 붕괴가 일어났으며, 이로 인해 Fig. 8의 1차 피크점의 변위보다 작은 변위에서 급격한 붕괴양상을 보인 것이다. 하지만, 이후 압축하중은 변위에 따라 점차 증가하는 거동을 보였다. 하니컴 셀의 좌굴접힘 변형이 한번만 일어난 이유는 앞서 실험한 알루미늄 하니컴 단일체와는 달리 GFRP표피가 하니컴 코어에 접착제(adhesive film)로 고정되어 2차, 3차적인 좌굴접힘 변형의 연속적 형성을 방해했기 때문이다.

Fig. 13(a)는 변위의 증가에 따른 GF-AH 시편의 변형 및 파괴거동의 광학사진을 나타내는데, 각 변위 단계별로 하니컴 셀벽의 좌굴붕괴와 1차적인 접힘 변형거동을 보였다. 셀벽의 좌굴붕괴는 셀벽 사이의 접착수지에서 박리파괴를 유발시켰지만 표피층과 하니컴 심재 사이의 접착부에서도 알루미늄 셀벽이 접착부로부터 박리되어 미세파괴를 유발시켰다 (Fig. 13(b)). AE사상율은 최대 하중점에 이르기까지 급격히 발생하였으며, 알루미늄 셀벽의 좌굴붕괴 후 압축변위 증가에 따라 사상율이 지속적으로 검출되었다. 하니컴 코어 시편의 경우(Fig. 8)와 비교하여 AE 사상율은 5배 이상 증가하였는데, 그만큼 셀벽 사이의 접착수지와 표피층/코어 사이의 접착부 박리 파괴가 많이 생성된 것으로 생각 된다. Fig. 14는 Fig. 12 시편의 AE사상들에 대한 진폭 분포를 나타낸다. 1차 최대하중 부근에서 70dB이상의 고진폭 사상을 포함한 다양한 진폭의 사상이 고밀도로 많이 발생하였다. 그 후 하중이 감소한 후 다시 증가하면서 다양한 진폭의 신호가 지속적으로 발생하였다. Fig. 15는 이들 AE사상에 대한 1차 중심주파수의 분포를 나타내는데, 200-280kHz대역에 분포하는 그룹과 90-140kHz대역에 분포하는 그룹으로 나뉘었다. 90-140kHz 대역에 분포하는 그룹은 70%이상이 50dB이하의 저진폭 신호에 해당했으며 이 사상들은 Fig. 11에서 살펴본 바와 같이 내부 알루미늄 셀벽이 접히면서 발생하는 소성좌굴과 셀벽 상호간의 마찰에 의해 발생한 것으로 판단되었다. 200-280kHz대역에 분포하는 그룹은 셀벽 사이에 있는 접착수지의 박리파괴와, 표피층과 심재 사이의 접착부 박리 및 미세 파괴에 해당할 것으로 생각된다. 이들은 기본적으로 수지의 파괴라는 점에서 3.1절의 에폭시 단일체, 3.2절의 에폭시 접착부와 유사하여 이중에서 200kHz 이상의 주파수 대역을 보이는 AE사상의 특성과 공통되었다.

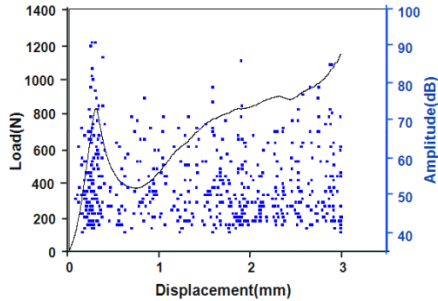


Fig. 14 Load and accompanying AE amplitudes versus displacement of a GF-AH hybrid composite plate in Fig. 12.

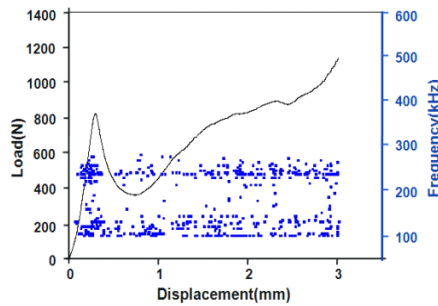


Fig. 15 Load and accompanying AE 1st peak frequencies versus displacement of a GF-AH hybrid composite plate in Fig. 12.

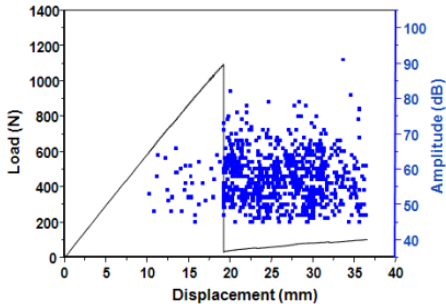


Fig. 16 Load and accompanying AE amplitudes versus displacement of a GF-AH hybrid composite plate under three point bending test.

3.5 GFRP표피-알루미늄 하니컴 코어 하이브리드 복합재의 굽힘하중에 따른 AE특성

Fig. 16은 GF-AH 하이브리드 보 시편에 대한 3점 굽힘 하중 하에서의 하중-변위 곡선 및 이에 따른 AE진폭 분포이다. 변위 초기에는 거의 선형적으로 하중이 증가하다가, Fig. 17에서 관찰되듯이 변위 4mm 이후로 하니컴 셀의 전단변형(shear deformation)과 좌굴 접힘변형(cell-buckling induced wrinkling)이 발생하였으며 변위 8mm 부근에서는 하니컴 셀간의 박리가 시작되었다. 변위 18mm에서는 보의 압축 부위인 GFRP 외피층에서 절단형 파단균열이 발생하면서 하중이 급격히 감소하는

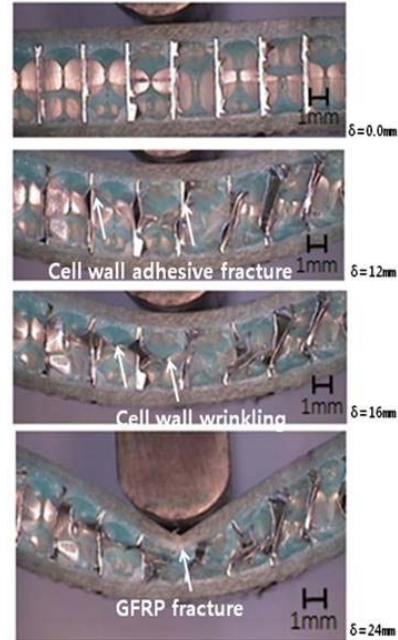


Fig. 17 Fracture processes of a GF-AH hybrid composites plate under three point bending test.

전행적인 취성파괴 거동을 보였다. AE사상은 외피층의 파단 전까지 총 40개 내외로 검출되었으며, Fig. 16에 그들 사상에 대한 진폭들을 병행하여 표시하였다. 이들 사상에 대한 진폭은 70dB이하로 분포하였고, 중심주파수는 주로 200-280kHz대역에 분포하였으므로 전 절에서 검토한 바와 같이 셀벽 사이에 있는 접착수지의 박리파괴(Fig. 17)에 해당할 것으로 생각된다. 또한 GFRP 외피층의 파단은 에폭시 수지의 파괴와 유리섬유의 파단을 유발하였는데, 이들 AE사상은 하중이 급감하였던 변위 18mm에서 급격히 많이 발생하였다. 파단 이후로도 지속적으로 많은 신호들이 발생되었는데 이는 GFRP층의 섬유 파단과 수지의 파괴가 지속되고 셀벽이 접히면서 추가적인 셀벽 간 접착수지의 박리와 마찰이 발생되기 때문이다. 섬유파단의 신호들은 주로 260-490kHz의 고주파수 대역과 60dB이상의 큰 진폭의 특성을 가지고 있으므로[19-22], 변위 18mm 이후의 AE 사상수에서 약 50%내외가 섬유파단에 따랐으며 기타 사상들은 셀벽 간 접착 수지의 박리와 마찰, 표피층과 코어 사이의 계면 파괴로부터 발생한 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 유리섬유 플라스틱(GFRP) 표피/ 알루미늄 하니컴 코어 하이브리드 적층 시편이 압축하중과 굽힘하중을 받을 때 일어나는 파괴 과정을 AE신호 특성과 관련하여 검

토했다. AE 해석방법으로는 사상수 분포, 진폭 분포 및 주파수 해석을 병행하였다.

- (1) 에폭시 접착 시편에서 검출된 AE는 그 진폭과 중심주파수가 에폭시 단일체 시편의 AE와 대체로 유사한 범위에 있었으나 최종 파단시에는 높은 진폭과 높은 중심주파수 대역에 위치했다.
- (2) 하니컴 코어 단일체의 두께방향 단순압축에 따른 AE 거동에 대해서는, 전체 사상수의 80%정도가 60dB 이하의 저진폭 신호였으며, 90-130kHz의 저주파수 대역에 분포하였다. 저주파수 대역의 AE사상은 알루미늄 셀벽이 접하면서 발생하는 소성좌굴과 셀벽 상호간의 마찰에 의해 발생한 것으로 해석된다. 또한 나머지 고주파수 대역의 사상에 대해, AE발생원의 대부분은 셀벽 사이에서 접착수지의 간헐적인 박리 및 파괴에 기인했다.
- (3) GFRP표피-알루미늄 하니컴 코어 하이브리드 복합재의 압축변형의 경우, 하니컴 셀벽의 좌굴 붕괴로 하중의 급격한 저하가 발생하였다. 이때 셀벽의 중간 부위가 1차로 접힌 상태에서 더 이상의 2차적인 연속 접힘은 일어나지 않았다. 하지만 AE사상은 하니컴 코어 단일체만의 검출 결과보다 대략 5배 정도 많았다. 압축 변형에서 200-280kHz 대역에 분포하는 사상들은 셀벽 사이에 있는 접착수지의 박리파괴와 표피층과 심재 사이의 접착부 박리 및 미세파괴에 해당하는 것으로 판단되었다.
- (4) GFRP표피-알루미늄 하니컴 코어 하이브리드 복합재의 굽힘 변형의 경우, 최대 하중까지 셀벽 사이에 있는 접착 수지의 박리 파괴로부터 AE사상이 발생하였다. 최대 하중 직후에는 GFRP 표피층의 파괴가 발생하여 하중의 급격한 저하가 일어났으며, 이때부터 섬유파괴가 AE사상의 주된 발생원이 되었다.

참고문헌

- 1) 권순철, 임철문, 최병근, 이세원, 한중원, 김윤해, “항공기용 복합재료 샌드위치 구조물의 오토 클레이브 성형 시 발생되는 결함 원인 분석과 그 최소화 방안, 한국복합재료학회지, 제14권 1호, 2001, pp. 22-29.
- 2) Turk, M.H., Michelle, S., Fatt, H., “The strength characteristics of aluminum honeycomb sand panels,” *Thin-walled Structures*, Vol. 35, 1999, pp. 205-231.
- 3) Kim, J.M., Swanson, S.R., “Design of sandwich structures for concentrated loading,” *Composite Structures*, Vol. 52, 2001, pp. 365-373.
- 4) Shuaib, F.M., Soden, P.D., “Indentation failure of composite sandwich beams,” *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 1249-1259.
- 5) Petras, A., Sutcliffe, M. P.F., “Indentation resistance of sandwich beams,” *Composites Structures*, Vol. 46, 1999, pp. 413-424.
- 6) Steeves, C.A., Fleck, N.A., “Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, 2004, pp. 561-583.
- 7) Lee, S.M., Tsotsis, T.K., “Indentation failure behavior of honeycomb sandwich panels,” *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1147-1159.
- 8) Turk, M. H., Michelle, S., Fatt, H., “Localized damage response of composite sandwich plates,” *Composites: part B*, Vol. 30, 1999, pp. 157-165.
- 9) 김형구, “하니컴 코어의 국부적 변형을 고려한 하니컴 샌드위치 복합재료의 강도 및 변형 해석,” 한양대학교, 박사학위논문집, 2005.
- 10) 박성완, 이장규, “AE법에 의한 유한 폭 CFRP 판재의 파괴특성,” 한국공작기계학회지, Vol. 16, No. 3, 2007, pp. 125-132.
- 11) 이종오, 이주석, 조경식, 이승희, 오세규, “CFRP 복합재료의 인장시험기 파괴기구의 해석,” 한국 복합재료학회지, Vol. 5, No. 2, 1992, pp. 11-23.
- 12) 김상태, 이유태, 김광수, “음향방출법을 이용한 탄소섬유 강화 복합재료(CFRP)의 파괴인성평가,” 한국복합재료학회지, Vol. 10, No. 1, 1997, pp. 23-33.
- 13) Johnson, M., Gudmundson, P., “Broad-band transient recordin and characterization of acoustic emission events in composites laminates,” *Composites Science and Technology*, vol. 60, 2000, pp. 2803-2818.
- 14) 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.
- 15) Qi, G., “Wavelet-based AE characterization of composite materials,” *NDT&E International*, vol. 33, 2000, pp. 133-144.
- 16) 이진경, 박영철, 이상필, 이준현, “탄성파를 이용한 스마트 복합재료의 손상거동 평가,” 대한기계 학회지, 춘계학술대회 논문집, 2006, pp. 1124-1129.
- 17) 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권, “시간-주파수 분석법에 의한 CFRP의 파괴거동,” 비파괴 검사학회지, Vol. 21, 2001, pp. 39-45.
- 18) 박재성, 김광수, 이호성, “복합재료 적층 구조물의 음향 방출 특성 연구,” 한국복합재료학회지, Vol. 16, No. 5, 2003, pp. 16-22.
- 19) Woo, S.C., Choi, N.S., “Analysis of fracture process in

- single-edge-notched laminated composites based on the high amplitude acoustic emission events,” *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 1499-1508.
- 20) Choi, N.S., Woo, S.C., “Effect of fiber orientation on the acoustic emission and fracture characteristics of composite laminates,” *Journal of Materials Science*, Vol. 42, 2007, pp. 1162-1168.
- 21) 우성충, 최낙삼, “음향방출법을 이용한 편축노치를 갖는 유리섬유/알루미늄 적층판의 파괴거동 해석”, *한국복합재료 학회지*, Vol. 18, No.2, 2005, pp.1-12.
- 22) Woo, S.C., Choi, N.S., Cho, N., “Characterization of the fracture process of notched glass fiber/aluminum hybrid laminates by acoustic emission,” *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 1521-1530.