

論文

복합재료 적층 구조물의 음향방출 특성 연구

박재성*, 김광수*, 이호성*

A study on the acoustic emission characteristics of laminated composite structures

Jaesung Park*, Kwang-Su Kim*, Ho-Sung Lee*

ABSTRACT

This paper studied the AE(acoustic emission) characteristics of the laminated composite structures. The composite stiffened panels under the compressive loading emitted various AE signals when they buckled or changed the buckling modes. In addition, the failure initiation and propagation generated a lot of complex signals. From the continuous signal generation, we identified when the failures initiated and whether they propagated or not. The single lap joint of laminated plates under tensional load also generated AE signals when bonding region failed. The first failure occurrence and its propagation are monitored by generated AE signals. The characteristics of AE signals used in this analysis are cumulative hits, hit distribution, peak frequency of generated AE waveform and amplitude of signals. The analysis of AE signals shows that continuous increment of cumulative hits can be regarded as damage propagation and three dominant peak frequencies can correspond to typical failure modes in the laminated composites.

초 록

음향방출 신호를 측정하면 운용 중에 구조물 내부의 파손 발생이나 진전 시점을 측정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 보강된 복합적층 패널의 압축시험에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 누적 신호분포와 주파수 특성을 분석하였다. 보강 패널의 좌굴 발생과 좌굴 모드의 변환시 음향방출 신호가 발생하였으며, 파손 발생 후 진전시 연속적인 신호가 나타났다. 복합재료 본딩 체결부의 강도시험에서는 발생하는 음향방출 신호와 파손 형태와의 관계를 분석하였다. 본 연구의 음향방출 신호 분석에 사용된 특성은 시간에 따른 누적 히트(hit) 분포, 주파수 특성과 신호의 크기이다. 본 연구를 통하여 음향방출 신호의 연속적인 발생은 파손의 진전에 따라 나타나는 특성이며, 측정된 음향방출 신호의 주파수 특성을 분석함으로써 적층 복합재료에서 나타나는 파손 모드와의 관계를 유추할 수 있다. 내부 응력크기에 따라 모재균열, 층간분리 또는 디본딩, 섬유파손을 각각 100 kHz 근방, 220 kHz 근방, 500 kHz 이상으로 분류할 수 있다.

Key Words : 음향방출(acoustic emission), 건전성감시 (health monitoring), 복합재 보강패널(composite stiffened panel), 접착체결(single lap joint)

1. 서 론

음향방출은 재료 내부의 결함 발생과 진전 등의 구조적

변화에 의하여 스트레인 에너지가 급격히 방출되어 나타나는 현상이다. 금속재료의 경우 크랙의 진전, 상변화 및 dislocation의 이동시 음향방출이 발생하고, 복합재료 적층

*+ 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 구조그룹, 교신저자(E-mail:cronus@kari.re.kr)

* 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 구조그룹

구조물의 경우 모재파손, 섬유파단 및 층간 분리시에 음향방출이 일어난다. 이러한 음향방출을 측정하여 구조물의 건전성을 판단하는 것은 실제 하중이 가해지는 동안 구조물의 상태를 모니터링할 수 있으며, 한 개의 센서가 특정 지점이 아닌 특정 범위에서 발생하는 파손을 검출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 AE 신호의 검출은 비교적 용이하지만 그 신호들로부터 재료 내부에서 발생한 현상을 예측하는 것은 많은 경험이 필요하고, 재료와 구조물의 형태 등에 따라서 AE 신호의 특성이 다르다는 단점을 가지고 있다.

파손 거동이 복잡한 복합재료에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 파손의 종류와 특성을 분석하는 많은 연구가 수행되어 왔다[1-5]. Okoroafor는 4종류의 섬유에 대해서 섬유 파단시 발생하는 신호와 섬유강도의 관계를 연구하였다. 음향방출 신호의 특성 중에 이벤트당 ringdown count를 사용하였는데 섬유의 강도보다는 섬유 파단시 발생시키는 변형을 에너지에 관련이 있다고 보고하였다. 또한 다른 논문을 통해 같은 신호 특성으로 섬유와 수지 사이의 접착강도 평가방법을 제시하였다. Wevers[3]는 다양한 복합재료에 대하여 인장 및 피로 시험을 수행하여 파손 신호특성을 파악하였다. peak amplitude, duration time, ringdown count를 이용하여 파손의 발생뿐만 아니라 파손 모드를 판정하는 기준을 정립하였다. 또한 파손 모드 판정을 위해서는 불필요한 주변 노이즈를 제거해야하며 다른 기법(edge replica, light microscopy, deply technique 등)을 병행해야 하고, 신호 특성을 이용한 기준이 모든 복합재료에 동일하게 적용될 수는 없다고 지적하였다. Dong[4]은 압전 필름을 이용하여 음향방출 센서를 구성하고, PLF(pencil lead fracture) 방법으로 음향방출 신호의 거리에 따른 감쇄효과를 측정하였다. 특히 압력용기에 유체가 있는 경우 음향방출 신호의 크기(amplitude) 감쇄효과가 15~29% 정도 발생하며 센서와 신호발생 지점이 가까운 경우에 감쇄 영향이 크다고 보고하였다. Ravishankar[5]는 두께가 다른 복합재료 패널의 홀작업시 발생하는 음향방출 신호를 thrust force에 대하여 측정하였다. 음향방출 신호 중에 AE-RMS voltage를 이용하여 홀작업의 각 단계별 신호 특성과 thrust force에 대한 파형 변화를 연구하였다. 홀작업에서 발생하는 복잡한 파손을 AE-RMS로 평가하는 것은 어렵고 wavelet transform과 같은 방법을 적용하여 음향방출 파형을 시간, 주파수 영역에서 분석해야만 한다고 지적하였다.

Mashino[6]는 티타늄 재료의 크랙 진전에 따라 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 재료의 파괴인성(fracture toughness)을 계산하였다. 또한 음향방출 신호의 발생 시점 및 크기에 따라 재료간 파괴 과정의 차이점을 연구하였다. Adrian[7]은 음향방출에 대한 전반적인 내용을 정리하였다. 특히 압력용기에 대하여 Felicity effect를 이용하여 수락시험(acceptance test)을 수행할 수 있으며, FRP 탱크의 경우

FR(Felicity ratio)값이 0.95 미만인 경우 불량으로 처리하는 ASME 규정을 소개하였다. 또한 다양한 적용사례를 소개하여 금속재료 및 복합재료 구조물의 건전성 실시간 모니터링에 음향방출 측정이 매우 효과적이라고 소개하였다.

대형발사체의 개발과정에서 수행될 각종 시험을 살펴보면 반복적으로 하중이 가해지며, 시험의 안전성 확보를 위하여 운용 중에 구조물들에 대한 건전성 실시간 모니터링이 필수적이다. 취약하다고 판단되는 부분에 각종 변형을 측정 센서들을 부착하여 건전성에 대한 판단을 하는데, 발사체의 크기가 비약적으로 증가하고 특정 부분에 대한 모니터링이 전체 구조물의 안전성을 충분히 보증하지 못할 것으로 예측하고 있다. 따라서 개발 시험을 위해 운용 중에 보다 넓은 범위를 감시할 수 있으며 실제 파손의 발생이나 진전에 따라 방출되는 AE 신호의 측정 및 활용이 요구된다.

향후 국산 위성발사체의 개발에는 구조물 경량화를 위하여 고압탱크, 탱크 연결 외피부, 탑재부와 페어링 등에 복합재료 구조물이 적용될 예정이다. 특히 고압탱크는 금속재료 라이너위에 복합재료를 와인딩하는 방법으로 제작될 예정으로 작동 압력이 높아서 운용 중에 파손의 발생이나 진전 여부를 실시간으로 모니터링 해야 한다. 또한 경량화를 위하여 주구조물인 외피 및 페어링에 복합재료가 적용되므로 시제품 개발 과정에서 파손에 의한 음향방출 신호 특성을 연구하여 향후 발사 모델에 대한 비파괴 검사 방법으로써 음향방출 신호 측정을 사용할 예정이다.

2. 음향방출(AE)의 정의

Fig. 1은 전형적인 AE 신호를 나타낸 것으로 x축은 시간을 나타내고, y축은 측정된 신호의 세기를 데시벨로 표시한 것이다. 실제 재료에서 발생하는 AE 신호는 센서에 의해서 측정되는 신호와 차이가 난다. Fig. 1의 파형은 실제로 AE 발생지점의 파형이 아니며 매질을 따라서 감쇄되고 구조물 경계로부터 반사된 파형이 복잡하게 중첩된 형태이다. 따라서 파형에 따라 파손의 형태나 발생한 결함의 종류를 판단하는 것은 어렵고, 전파되면서 변하지 않는 파의 성질을 추출하여 분류한다. AE 신호에서 주로 사용되는 인자들은 hit, count, frequency, energy, RMS 값, duration, rising time 등이 있다. AE 신호처리의 추세를 살펴보면 초기에는 합산된 hit이나 count 수를 힘이나 압력 등의 하중과 비교하여 결함 발생 시점을 판단하였다. 최근에는 측정된 AE 신호의 파형을 주파수 대역에서 분석하는 연구로 진전되었고, 측정된 파형으로부터 AE 발생 신호를 역으로 유추하는 연구를 통해 파손 형태까지 예측하는 연구가 수행되고 있다.

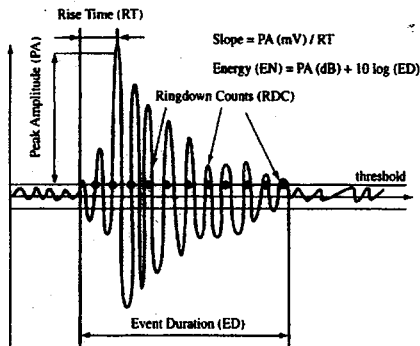


Fig. 1 The typical shape of an AE signal.

그러나 구조물에 대한 건전성을 실시간으로 모니터링할 경우에는 파형의 분석을 거치는 과정을 병행하기 힘들고, 시편 단위의 시험 결과를 실제 구조물에서 나타나는 특성에 적용하는 것이 어렵다. 따라서 2차적인 파형분석은 실시간 건전성 모니터링에는 적합하지 않은 점이 있다. 최근에는 파형의 특성을 신경망에 교육시키거나 유전자 알고리즘을 통해 실시간으로 분석할 수 있는 지능형 소프트웨어를 지원하는 AE 측정 시스템이 등장하고 있다.

본 연구에서 사용된 AE 신호는 hit, count, amplitude, peak frequency 등으로 측정 시스템으로부터 실시간으로 판단이 가능하다.

3. 복합재료 보강패널의 좌굴 시험

복합재료 보강패널의 좌굴 시험에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하였다. 센서는 2종류의 8개 센서를 적용하였다. 2개의 광대역 파장에 대하여 고른 증폭비를 갖는 broadband type 센서와 저주파(150 kHz)에 공진주파수를 갖는 resonant type 센서 6개를 사용하였다. 광대역 센서는 주로 신호의 주파수 특성과 파형을 판별하는데 사용하고, 저주파 센서는 AE 신호의 발생량과 그 크기를 판별하는데 사용하였다. Fig. 2는 보강패널 뒤쪽에 부착된 스트레인 게이지 센서와 음향방출 센서가 부착된 모습이다. 좌굴 모드에 영향을 미치지 않도록 보강재의 뒤쪽, 좌굴 형상의 node 부근에 AE 센서를 부착하였다. 시편의 세로방향으로 2개의 보강재가 있기 때문에 보강재의 양쪽에서 중간분리나 접착제 파손을 검출하기 위하여 추가적으로 센서를 부착하였고, 스트레인 게이지 때문에 오른쪽 중심에는 AE 센서를 부착하지 못 했다. 사용된 음향방출 신호 측정 시스템은 PAC(Physical Acoustics Corporation)의 DISP24 시스템이고, 신호측정을 위해 사용된 세팅은 다음과 같다.

HDT(hit definition time) : 100 μ sec

PDT(peak definition time) : 30 μ sec

Preamp gain : 40 dB

Threshold : 32 dB

Sampling rate : 10 MHz

문턱값은 주변의 잡음이 관찰되지 않는 범위에서 가장 작은 값으로 셋팅하여 발생하는 작은 파손에 의한 신호도 측정할 수 있도록 하였다. 측정된 신호로부터 시험 후에 필터를 도입하여 결과를 후처리할 수 있기 때문에 측정 가능 범위의 신호를 모두 취득하였다.

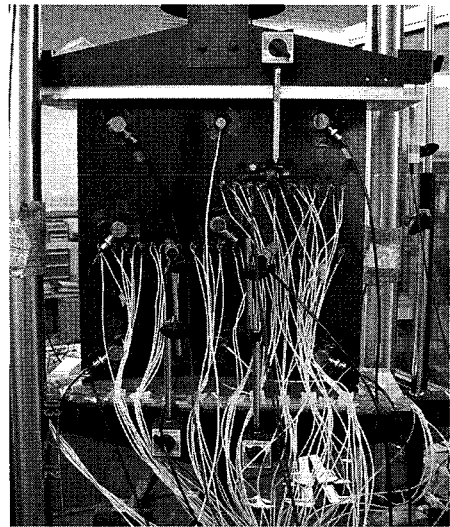


Fig. 2 The experimental setup of composite stiffened panel.

Fig. 3은 복합재료 보강패널의 좌굴시험에서 측정된 음향방출 신호이다. 시간에 따른 하중의 증가와 음향방출 hit의 누적분포를 나타내었다. 하중의 증가에 따라 좌굴 모드가 순간적으로 나타나면서 음향방출량이 계단식으로 증가하는 모습을 보이다가 내부 파손이 발생하는 하중에 이르면 음향방출량이 연속적으로 증가하게 된다. 이 때의 하중을 파손이 진전하는 시점으로 판단할 수 있다. AE 신호로부터 판정한 최초 파손 시점은 78 kN이다. 이는 최초 좌굴 발생 시점과 일치한다. 좌굴 이후에는 파손의 정도가 미미하여 진전이 급격하게 이루어지지 않거나 다른 위치에서 독립적으로 소형 파손이 발생하므로 신호량의 증가가 관찰되지 않는다. 하중이 155 kN이 되면 파손이 진전하면서 AE 신호 발생량이 급격히 늘어나는 것을 알 수 있다. 파손 직전에서 시험을 중단하였고, 육안으로 관찰되는 디본딩이나 층간분리 파손은 없었다.

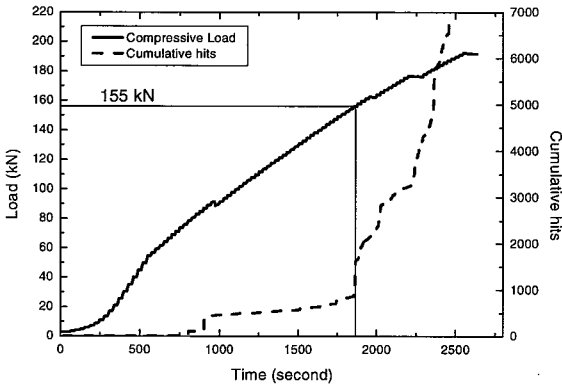


Fig. 3 The cumulative hit distribution(unloading before final failure, specimen 1).

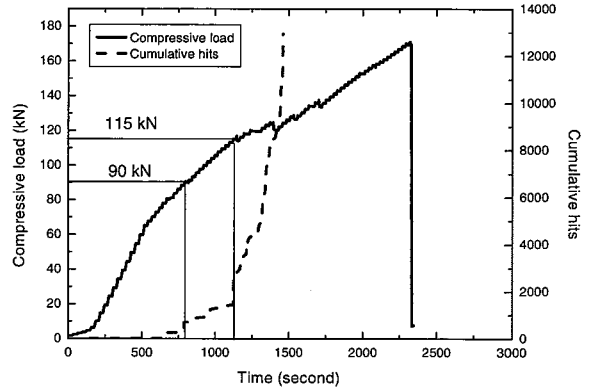


Fig. 5 The cumulative hit distribution(final failure, secondary bonding specimen).

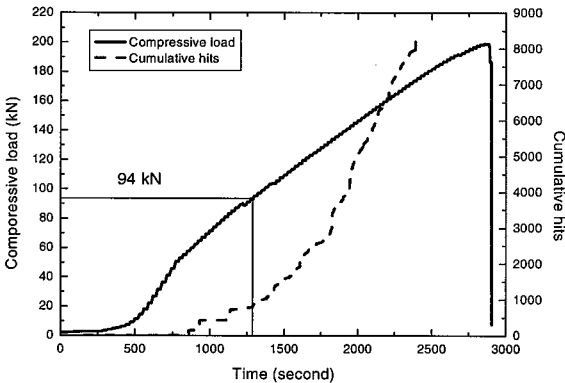


Fig. 4 The cumulative hit distribution(final failure, specimen 1).

Fig. 4는 같은 시편에 대하여 내부 파손의 발생 후 최종 파손 시점까지 하중을 증가시키면서 얻은 그래프이다. Fig. 3과 비교해보면 낮은 하중에서부터 파손이 진전하면서 음향방출이 발생하는 것을 알 수 있다. 연속적인 신호발생으로부터 판정할 수 있는 급격한 파손 진전시점은 94 kN 근방이다. Fig. 3의 155 kN 근방인 것과 비교하면 파손의 진전 시점이 낮아진 것을 알 수 있다. 복합재료의 경우 특정 하중 이상에서 파손이 발생하면 이후 그보다 작은 하중에서도 파손이 진전하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 구조물의 운용시 파손의 발생이나 진전여부를 음향방출 신호를 측정함으로써 확인할 수 있다.

Fig. 5는 보강재를 일체성형하지 않고, 이차 본딩으로 접합한 보강 패널의 압축시험시 발생하는 음향방출 신호를 나타낸 그림이다. 앞의 Fig. 3, 4와는 다르게 초기부터 파손이 진전하는 모습을 보이는데 이것은 시험과정에서 보강재와 스킨사이에 접착분리가 발생하여 많은 양의 음향방출

신호가 발생하였다. 너무 많은 양이 발생하여 시험이 끝날 때까지 신호를 측정할 수 없었다. 사용된 AE 센서는 증폭 회로가 내장된 타입으로 시험을 중지하지 않고 문턱값을 조절할 수 없었다. 이러한 문제는 문턱값을 높게 설정하여 작은 파손신호는 배제하고, 센서의 위치와 숫자를 조절하여 같은 파손신호를 여러 센서가 측정하는 것을 막음으로써 해결할 수 있다. 최초의 파손 발생은 78 kN으로 최초 좌굴 발생시점으로 판단할 수 있으며 급격한 파손의 진전은 나타나지 않는다. 이 결과는 일체성형된 시편 1의 좌굴 시점과 일치하는 결과이다. 진전되는 파손은 90 kN에서 발생하여 연속적인 음향방출 신호를 나타낸다. 115 kN에서부터 급격한 파손의 진전이 발생하며 이는 일체형으로 제작된 시편의 155 kN보다 낮은 하중 레벨이다. 이차 본딩 시편의 경우 낮은 하중에서 예측하지 못한 접착분리가 발생하여 1차 시편에 비하여 낮은 압축강도를 갖는 것으로 나타났다며 급격한 신호방출 시점에서는 육안으로 보강재-스킨간의 디본딩을 확인할 수 있었다.

각 시편에 대하여 음향방출 신호의 주파수 특성을 살펴보면 Fig. 6-8과 같다.

Fig. 6, 7로부터 파손에 따라 발생하는 음향방출 신호의 peak 주파수는 90, 220, 540 kHz 근방의 세 가지로 구분할 수 있다. 특히 Fig. 6에서 파손이 진전하는 구간인 155 kN 이상에서는 90 kHz 부근의 신호가 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 이 신호는 복합재료의 초기 파손형태인 모재 균열로 분류할 수 있는데 이는 육안으로 확인할 수 있는 보강재와 스킨간의 디본딩이나 층간분리가 없었고 복합재료의 초기 파손 모드가 모재 균열로 볼 수 있기 때문이다. 또한 하중이 커짐에 따라서 220 kHz 부근의 신호가 발생하며 이는 모재균열의 증가에 따른 층간분리 발생으로 판단할 수 있다. Fig. 7에서는 220 kHz 부근 신호가 뚜렷하게 나타나고 540 kHz 부근의 신호가 나타난다. 초기

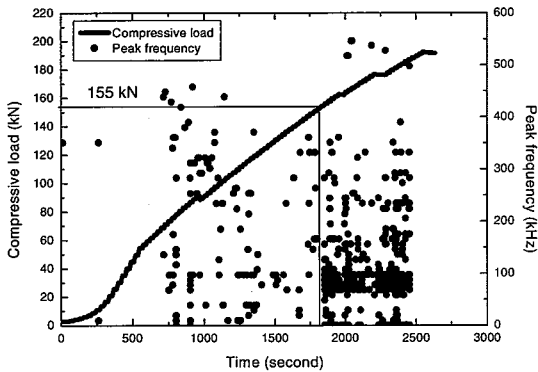


Fig. 6 The peak frequency distribution(unloading before final failure, specimen 1).

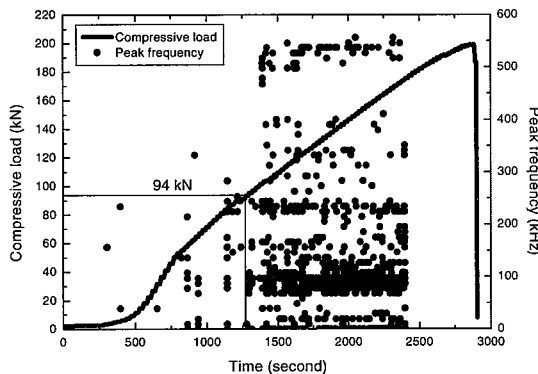


Fig. 7 The peak frequency distribution(final failure, specimen 1).

모재균열이 다른 파손모드를 유발하면서 발생하는 현상으로 220 kHz 부근 신호는 층간분리, 540 kHz 부근의 신호는 섬유파손에 의한 신호로 유추할 수 있다. 분류의 기준은 신호발생 시점의 하중크기 순서이며 복합재료 파손의 일반적인 진전 형태이다. 또한 시편 1의 두 번째 시험에서는 낮은 하중에서 보강재-스킨간의 디분딩과 그에 따른 스킨, 보강재의 층간분리를 육안으로 확인할 수 있었기 때문이다. 복합재료 보강 패널의 주요한 파손 형태는 보강재-스킨간의 디분딩 또는 보강재 주변 스킨의 층간분리이지만 이러한 파손으로부터 일부 섬유파손이 유발되므로 500 kHz 이상의 신호를 섬유파손에 따른 신호로 볼 수 있다.

Fig. 8의 2차 본딩시편에서는 낮은 하중 레벨에서 접착 분리가 발생하였는데 이러한 접착분리가 층간분리의 형태로 주변으로 진전하였다. 이때 주로 발생한 신호의 특성은 220 kHz 주변의 신호인 것을 확인할 수 있었는데 이를 통하여 층간분리 또는 접착제-복합재료간의 분리에서 발생하는 신호의 주파수 특성을 유추할 수 있다.

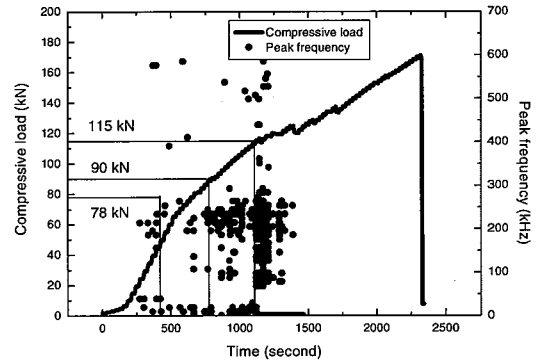


Fig. 8 The peak frequency distribution(final failure, secondary bonding specimen).

4. Single lap 체결부 강도 시험

Single lap 접착 체결부에 대한 강도시험시 발생하는 음향방출 신호를 측정하였다. 총 4개의 시편에 대하여 강도시험을 수행하였으며, 2개의 AE 센서를 적용하였다. 적용된 센서는 고주파(500 kHz) resonant type 센서와 저주파(150 kHz) resonant type 센서이다. Fig. 9는 센서가 부착된 시편의 시험 모습이다. 시편의 위·아래에 부착된 AE 센서를 확인할 수 있다.

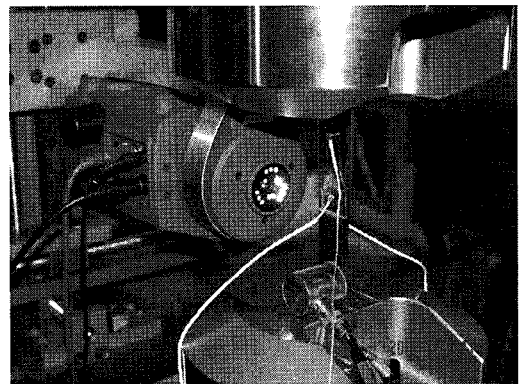


Fig. 9 Tensile test setup of single-lap joint specimen.

인장하중을 가하면서 발생하는 파손의 형태, 하중과 신호의 발생량을 측정하였다. 본 시험에 사용된 센서는 광대역 센서가 아니라 특정 주파수대역에 대해 증폭비가 크므로 파형 및 주파수 특성에 대한 분석은 크게 의미가 없다.

Fig. 10~13은 각 시편에 대하여 인장하중에 따른 음향방출 신호의 크기를 나타낸 것으로 점의 숫자는 발생량을 나타낸다.

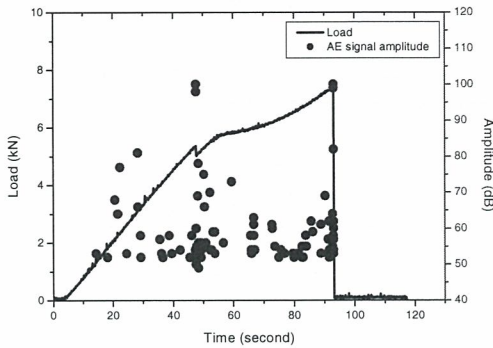


Fig. 10 Amplitude distribution of specimen 1.

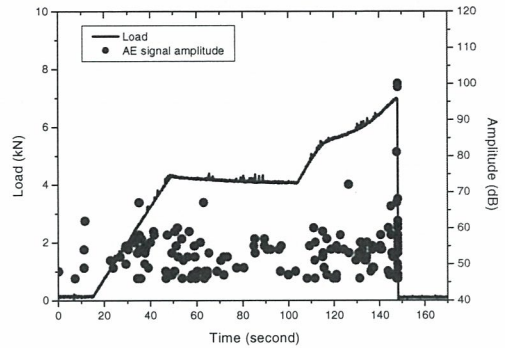


Fig. 13 Amplitude distribution of specimen 4.

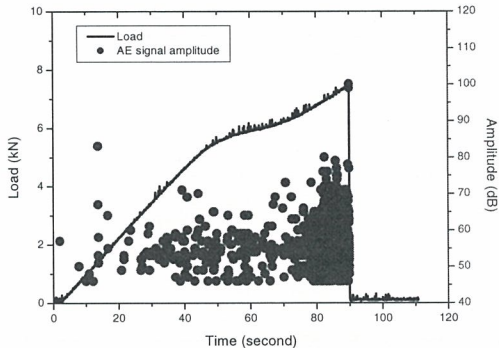


Fig. 11 Amplitude distribution of specimen 2.

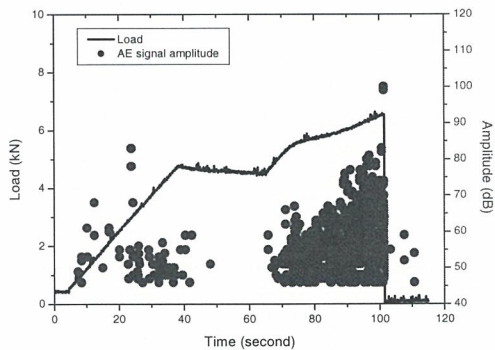


Fig. 12 Amplitude distribution of specimen 3.

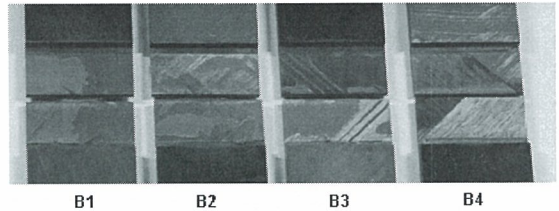


Fig. 14 Failure surface of the specimens.

Fig. 10과의 비교를 통해 파손 범위가 넓고, 복합적인 경우가 신호량이 많은 것을 알 수 있다. 시험도중에 층간분리나 접착제층 파손을 검출하기 위하여 잠시 변위를 유지하여 Fig. 12~13의 경우에는 하중이 일정한 부분이 나타났다.

Fig. 14의 파손면과 AE 발생 특성을 비교해 보면 AE신호가 많이 발생한 2, 3번째 시편의 경우 파손 형태가 복합적이며 파손된 면이 불규칙적임을 알 수 있다. 또한 접착제 층의 분리와 층간분리가 복합적으로 발생하면서 파손이 여러 곳에서 발생하고 독립적으로 진전하게 되어 음향방출 신호가 많이 발생함을 알 수 있다. 주된 파손 모드를 살펴보면 1번 시편의 경우 접착제-복합재 사이가 분리되었으며, 4번 시편의 경우는 45°층의 복합재에 층간분리가 발생하였다. 1, 4번 시편은 파손의 발생과 진전이 주로 한 가지 형태를 보이며 최종 파손도 초기 파손의 진전에 의해 발생하였다. 특히 1번 시편의 경우에는 다른 시편과는 달리 초기 파손 시점에서 하중의 감소가 관찰되었으며 이때 상당히 큰 크기를 갖는 음향 방출 신호가 검출되었다. 이 신호는 모든 시편에 대해 최종 파손에서 나타나는 크기를 갖고 있으며 초기에 상당한 범위의 접착제층 분리가 발생했음을 알 수 있다.

주파수 특성에 대한 분석을 수행한 결과 센서의 증폭비가 가장 큰 150 kHz(저주파 센서)와 500 kHz(고주파 센서)에서 peak 주파수가 관찰되었다. 그러나 본 실험에 적용된 AE 센서는 150 kHz와 500 kHz의 공진주파수를 갖는 resonant 타입의 센서로, 이는 음향 방출 신호의 특성보다는 센서의 응답특성에 의하여 나타나는 결과로 판단된다.

Fig. 10의 경우 최종 파손에서 나타나는 100 dB의 신호가 낮은 하중에서 발생하고, 이 때 하중이 일시적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 11~13의 시편의 경우에는 최종 파손에서 100 dB 근처의 신호가 발생하며, 파손면을 관찰해 보면 여러 지점에서 접착제-복합재간, 복합재-복합재간의 파손이 발생했음을 알 수 있다. (Fig. 14)

본당시편에 대한 음향방출 특성을 측정한 결과 음향방출 신호의 양은 파손 강도보다는 초기 파손의 발생 범위와 진전 모습에 관계되고, 최종 파손 강도와는 크게 관련이 없는 것으로 판단된다. 누적 hit 분포는 하중에 대하여 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 2, 3번 시편의 경우 파손 전에 신호량이 증가하였지만 1, 4번 시편의 경우에는 특별한 증가없이 최종 파손에 이르렀다.

5. 결 론

복합적층 구조물의 좌굴 및 체결 강도 시험에서 발생하는 음향방출 신호의 특성을 살펴보았다. 음향방출의 측정을 통하여 복합재 구조물의 파손의 발생과 진전 여부를 관찰할 수 있으며, 파손 모드 및 형태에 따른 신호 특성을 알 수 있다.

• 복합재료 보강 패널의 좌굴 시험

- 좌굴 및 파손의 발생 · 진전에 따라 음향방출이 나타난다. 연속적인 음향방출 신호는 파손의 진전으로 볼 수 있다. 따라서 내재된 결함의 존재를 파악할 수 있다.
- 파손이 발생한 시편의 경우에는 초기 파손 강도보다 낮은 하중에서 기존의 파손이 진전한다. 파손이 있는 구조물에 대한 반복사용은 파손진전 및 예상하지 못한 하중에서의 파괴를 가져올 수 있다.
- 하중에 따른 파손의 발생 순서로부터 파손 모드에 따라서 모재 균열은 100 kHz 미만의 저주파 대역의 신호를 방출하고, 층간분리나 접착제층 분리는 220 kHz 부근의 신호를 방출함을 유추할 수 있다. 높은 하중에서 발생하는 550 kHz 근방의 신호는 섬유파손으로 판단된다.
- 음향방출 신호에 대한 모니터링을 통해 내재 결함의 존재 여부와 파손 진전을 확인할 수 있으므로 향후 구조물의 운용 중 건전성 확인에 적용할 수 있다.

• Single lap 체결부의 강도시험

- 음향방출 신호는 작은 하중에서부터 연속적으로 발생한다. 접착면 또는 그 주변의 복합재 적층에서 결함이 낮은 하중에서부터 발생, 진전함을 알 수 있다. 향후 반복 시험을 통해 접착 체결부의 결함발생 후 진전 여부를 확인 할 예정이다.
- 접착제-복합재 또는 복합재-복합재간의 파손 형태가 복합적으로 진전하는 경우에는 신호량이 많고, 한가지 주된 초기 파손 형태로 최종 파손에 이르는 경우 신호량이 작게 나타난다. 따라서 음향방출 신호의 양은 접착 강도보다는 체결부의 파손 형태에 영향을 받음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) E. U. Okoroafor and R. Hill, "Relating acoustic emission signal parameter to the strength of fibres used in the manufacturing of polymeric composites," *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 2, 1995, pp. 123-131.
- 2) E. U. Okoroafor, A-M. Priston and R. Hill, "Adhesion in fibre reinforced plastics investigated by means of acoustic emission," *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, 1996, pp. 141-146
- 3) M. Wevers, "Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behaviour," *NDT&E International*, Vol. 30, No. 2, 1997, pp. 99-106.
- 4) L. Dong & J. Mistry, "Acoustic emission monitoring of composite cylinders," *Composite Structures*, Vol. 40, No. 1, 1998, pp. 43-53.
- 5) S. R. Ravishankar & C. R. L. Murthy, "Application of acoustic emission in drilling of composite laminates," *NDT&E International*, Vol. 33, 2000, pp. 429-435.
- 6) S. Mashino, Y. Mashimo, T. Horiya, M. Shiwa, T. Kishi, "Analysis of microfracture mechanism of titanium alloy by acoustic emission technique," *Material Science & Engineering A*, 213, 1996, pp. 66-70.
- 7) Adrian A. Pollck, "Acoustic emission inspection," *Metals Handbook*, 9th edition, Vol. 17, ASM International, 1989, pp. 278-294.