

수압보증시험시의 음향방출에 의한 복합재 연소관의 파괴거동 예측

송성진*, 오치환**, 정현조***, 이상호****, 임수용****, 김호철*****

* 성균관대학교 기계공학부

** 조선대학교 기계공학부

*** 부산대학교 기계공학부

**** 국방과학연구소

***** 한국과학기술원 물리학과

요 약 섬유강화 복합재 연소관은 복합재료의 사용, 필라멘트 와인딩 및 경화공정 등으로 인하여 제작 중 다양한 결함이 발생할 수 있으며, 또한 사용 도중에도 예기치 않은 손상을 받아 기계적 성질이 저하될 수 있다. 따라서 제작 완료된 연소관의 품질 보증을 위해 수압보증시험이 사용되고 있으나 이를 위해 가한 수압이 오히려 연소관에 예기치 않은 손상을 가하여 실제 사용시 그 성능을 저하시키는 요인으로 작용하는 경우도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 수압보증시험시의 음향방출을 감지하여, 그 신호의 특성으로부터 복합재 연소관의 파손 거동을 예측하는 체계적인 기법의 개발을 시도하였다. 음향방출을 이용하여 연소관에 발생한 손상의 개략적 위치를 결정할 수 있었으며, 또한 파괴모드의 식별도 가능하였다. 다만, 시료의 부족으로 최종과열압력의 변화와 충격손상의 영향에 대한 신뢰성있는 분석은 불가능하였다.

1. 서 론

섬유강화 복합재료 제작된 고체 연료 로켓모타 케이스(이하 복합재 연소관)는 탄소 섬유를 필라멘트 와인딩으로 보강할 뿐아니라, 원통형의 실린더부, 곡률이 변하는 돔부 및 스키투부로 구성되어 기하학적 형상이 복잡하고, 또한 단면 구조도 절연고무층, 접합층, 복합재층 등 여러 계면으로 구성되어 있어 제작중 예기치 못한 결함이 발생하거나 사용 중에 손상이 진전될 가능성이 상존하고 있다. 따라서 제작 완료된 연소관이 사용압력 이상의 압력에서도 파열되지 않는다는 것을 사용전에 보증하기 위한 방법이 요구되고 있는데, 이러한 수단으로서 주로 사용

되고 있는 시험이 수압보증시험(hydroproof testing)이다. 복합재 연소관의 수압보증시험은 연소관의 최대 예상 사용압력(maximum expected operating pressure : MEOP)을 약간 상회하는 보증압력(proof pressure)을 수압 장치를 통해 가한 후 연소관의 구조적 건전성을 확인하는 방법이다. 이 시험은 금속재 압력 용기의 경우 매우 성공적으로 적용되고 있으나, 복합재 연소관의 경우는 보증 시험을 위해 가한 수압이 오히려 연소관에 손상을 가증시키는 효과를 가져오기도 하여, 수압보증시험에 합격한 제품이 그 다음 단계에서 예상 과열압력보다 훨씬 낮은 압력에서 파손이 발생하는 경우가 종종 발생하고 있다. 따라서 복합재 연소관의 보다 실제적인 품질 보증을 위해서

는 제조공정 뿐만 아니라 수압보증시험 과정에서 발생하는 결함과 손상을 함께 감지할 수 있는 기법의 확보가 바람직하다. 특히 수압보증시험시 생길 수 있는 불필요한 손상을 최소화하기 위해 낮은 압력으로 가압하였을 때 발생하는 초기의 경미한 손상의 특징으로부터 하중의 증가에 따른 파괴 거동의 변화와 나아가 파열 위치 및 압력을 정확히 예측할 수 있는 시험 기법의 개발이 필요하다.

음향방출시험(acoustic emission testing : 이하 AE 시험)은 결함의 진전시 수반되는 음향방출(acoustic emission : AE) 거동을 측정하기 때문에, AE 거동은 결함 성장 즉 손상 진전과 매우 밀접한 관계가 있다. 이러한 특성 때문에 지금까지 복합재 압력 용기의 품질을 평가하는 기법으로서 AE시험을 적용코자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 권오양 등¹⁾, Hill²⁾, Whittaker 등^{3,4)}, Hamstad 등⁵⁾, Gorman⁶⁾, Walker 등⁷⁾이 수행한 최근의 연구에서 수압시험중의 AE거동으로부터 파괴거동을 예측할 수 있는 기법의 개발을 위해 ① 손상에 대한 정보를 내포하고 있는 AE events를 효율적으로 발생시킬 수 있는 loading cycle의 선택, ② AE data 수집을 위한 AE센서의 수량 및 위치 결정, ③ AE parameter의 선정, ④ 수압시험 과정에서의 손상 위치 표정, ⑤ 파괴모드 식별, ⑥ 파열압력 예측 모형, 그리고 ⑦ 충격손상의 영향 평가 등에 대한 논의가 이루어진 바 있다.

이들 연구에서 수압시험 도중에 복합재 연소관에 진전되는 손상에 대한 정보를 내포하고 있는 AE data를 효율적으로 수집하기 위한 loading cycle로는 대체적으로 load - hold - unload를 반복하는 계단식 loading cycle이 채택되고 있으며, 또한 AE sensor의 위치와 수량은 수압시험중에 발생하는 손상의 진전을 가장 효율적으로 식별할 수 있도록 결정하고 있다^{1-4,6,7)}. 그리고 수압시험 도중에 수집한 AE data로부터 손상의 위치와 모드를 식별하고, 파열압력을 예측할 수 있는 가장 효율적인 AE parameter로는 AE rms¹⁾, AE high energy event와 percentage of high amplitude AE events²⁾, felicity ratio, normalized cumulative event rate moment, long duration events³⁻⁵⁾, event counts⁶⁾ 등이 사용된 바 있다.

AE에 의해 손상위치를 표정하는 방법으로는 zone location 기법과 도달시간차 위치표정(time - of - arrival difference location)기법이 있는데⁹⁾, 정확하

위치표정을 위해서는 도달시간차 위치표정기법을 활용하는 것이 바람직하다. 그러나 아직까지 이방성 재료에서 도달시간차 위치표정기법을 완벽하게 구현할 수 있는 상용 AE 신호처리 시스템이 개발되지 않았기 때문에, 기존의 연구에서는 zone location기법⁹⁾이나, 복합재의 음파의 진행방향에 따른 속도의 변화를 무시한 상태에서, 즉 복합재를 등방성 재료로 단순화하여 도달시간차 위치표정기법¹⁾을 적용하고 있다.

복합재의 손상(파괴)모드는 섬유파단, 층간분리, 그리고 기지균열 등이 있다. 기지균열은 수압시험 전과정을 통해 일어나며, 발생위치도 전체적으로 골고루 일어나고, 층간분리는 수압시험을 할 때 비교적 높은 압력에서 발생하며 층간 전단응력이 크게 작용하는 구역에서 발생할 확률이 높으며, 강화섬유의 파괴는 필라멘트 와인딩으로 제조된 압력용기의 성능을 좌우하는 가장 치명적인 손상 기구로서 높은 압력에서 주로 발생하는 것으로 보고되었다²⁾. 복합재 연소관의 파괴 모드를 식별하기 위해서는 위에서 언급한 3가지 파손 기구로부터 발생하는 AE의 특성을 파악해야 하는데, 지금까지의 연구에서는 amplitude, signal duration, energy 등이 주로 사용되었으며, AE amplitude distribution과 event energy spectra⁸⁾도 사용된 바 있다.

수압시험의 보증압력 혹은 그 이하의 압력(즉, 예상 파열 압력의 20~30% 정도의 압력)에서 수압시험을 할 때 수집한 AE data로부터 파열압력을 예측하는 것은 복합재 연소관의 품질보증을 위해 대단히 효율적인 방법의 하나이기 때문에 이에 대한 연구가 현재 활발히 진행중에 있다. 파열압력 예측을 위한 지금까지의 연구에는 loading cycle, 센서의 위치 및 배열, AE parameter들 중 하나를 독립변수로 하고 파열압력을 종속변수로 한 회귀분석법(regression analysis)²⁻⁶⁾과 AE parameter를 입력하여 파열압력을 출력하는 neural network approach⁷⁾가 사용되었다. 회귀분석법은 파열압력을 예측하는 회귀식과 함께 파열압력의 변화에 대한 각 AE parameter의 민감도를 분석할 수 있는 장점이 있으며, neural network approach는 AE parameter와 파열압력 사이에 존재할 수 있는 복잡한 비선형 관계를 학습 표본으로부터 추론할 수 있는 장점을 가지고 있다.

복합재 연소관에 있어서도 파열압력의 저하에 영향을 미칠 수 있는 여러가지 인자 중에서 충격손상

이 가장 중요한 요인중의 하나라는 점은 잘 알려진 사실이다. 따라서 이러한 관점에 대한 연구가 진행 된 바 있는데, 수압시험 전에 시험편(spherical shell)을 콘크리트 바닥에 낙하시킨 후에 수압시험을 하여 AE data를 수집하고 충격손상으로 인한 파열압력의 변화를 관찰하거나⁷⁾, 예측되는 파열압력의 80%의 압력에서 수압시험을 한 시험편에 끝이 뚫린 indenter를 알려진 높이에서 낙하시켜 충격을 가한 후, 다시 수압시험을 하여 AE data를 수집 분석하여 이와 같은 충격손상을 가한 복합재 시험편의 잔류강도를 예측하는 연구⁶⁾가 수행된 바 있다.

이상에서 살펴본 것처럼 외국의 경우 AE 거동으로부터 복합재의 파괴거동을 예측하는 연구에 대한 실험실적 결과들이 문헌에 다수 발표된 바 있으나, 국내에서는 아직 이에 관한 연구가 수행된 예가 매우 드물다. 따라서 본 연구에서는 가압압력을 연소관의 예상파열 압력보다 상당히 낮은 압력으로 설정한 수압보증시험시 발생하는 AE거동을 측정하여, 복합재 연소관의 결함 또는 손상 특성을 규명하고, 결함/손상이 연소관의 파괴거동에 미치는 영향을 평가할 수 있는 기법의 개발을 시도하였다.

2. 실험

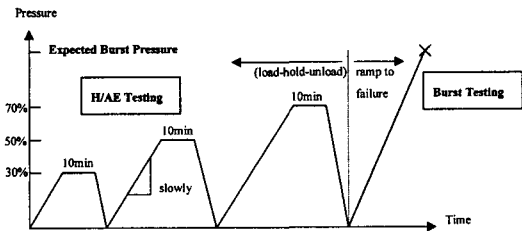
2.1. 복합재 연소관 시험편

본 연구에서는 실제로 사용되고 있는 고체연료 로켓모타케이스의 표준시험평가용 복합재 연소관과 동일한 조건으로 제작한 5개의 NSTEB 연소관("NSTEB"이란 표준시험평가용 연소관의 한 종류를 나타내는 약칭임)을 시험편(시험편 번호는 NSTEB 96-2부터 96-6)으로 제작 사용하였다^{10,11)}. 맨 안쪽의 고무 절연층 위에 강화섬유를 축방향에 대해 ±30° 방향으로 필라멘트 와인딩하여 1.3mm 두께의 헬리컬(hellical) 층을 만들고, 그 위에 다시 강화섬유를 축방향에 대해 90° 방향으로 필라멘트 와인딩하여 1.3mm 두께의 후프(hoop)층을 형성시켰다. 연소관의 실린더부 직경은 254mm(10inch)이고 전·후방 보스의 크기는 각각 45.7mm(1.8inch) 및 97.0mm(3.82inch)이며, 실린더부의 길이는 465mm(18.25inch)이다. 이 시험편은 제작 후 약 100 psi ~ 200 psi의 수압시험 중에서 누수가 없다는 것을 확인하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

수압보증시험시 방출되는 AE의 특성으로부터 연소관의 손상위치와 파열압력을 예측하는 기법의 개발을 위해 제 1차 수압보증시험 및 음향방출시험(이하 수압/AE시험), 충격시험, 제 2차 수압/AE시험, 그리고 파열시험순으로 이어지는 4종류의 실험을 실시하였다. 이러한 실험을 위해 수압시험장치와 AE 시험장치로 구성된 수압/AE시험장치, 낙하충격시험기와 X-ray 시험기로 구성된 충격시험장치 그리고 파열시험용 수압시험장치를 사용하였다^{10,11)}.

제 1차 수압/AE시험에서는 연소관 예상 파열압력의 약 30%, 50%, 70% 정도의 압력으로 가압한 수압시험을 실시하고 이때 방출되는 AE events를 AE시험 장치를 통해 수집하였다. 이때 연소관에 가한 loading cycle은 Fig. 1과 같다.



* H/AE : Hydroproof/Acoustic Emission

Fig. 1. Loading cycle applied to the motor cases

제 1차 수압/AE시험을 거친 연소관에 섬유파단과 함께 지지균열을 일으키기에 적당한 크기의 충격 에너지를 강구 낙하에 의하여 가한 후, 이로 인한 손상을 X-ray 시험을 통해 분석하였다. 충격손상을 가한 연소관에 대하여 제 1차 수압/AE시험시와 동일한 loading cycle로 제 2차 수압/AE시험을 실시하였다. 제 2차 수압/AE시험을 마친 연소관을 Fig. 1에 나타낸 ramp-to-failure loading 방식으로 가압한 수압시험을 통해 파열시키고 그 파열 압력을 측정하였다.

1) 수압/AE시험

Fig. 2에 본 연구에서 사용한 수압/AE시험 장치의 구성도를 나타내었다.

Fig. 2에 나타낸 장치중 수압시험장치는 복합재 연소관에 수압을 가하기 위한 수압펌프와 수압펌프의 가압속도를 조절하기 위한 공압펌프, 가해진 압

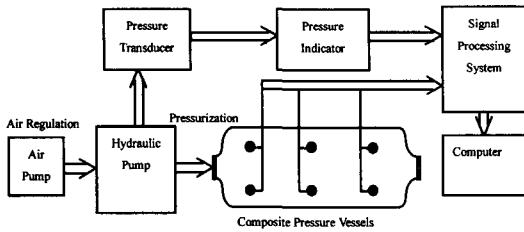


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set-up for acoustic emission during hydro-proof testing

력을 측정하는 압력센서, 측정된 압력을 디지털 값으로 표시하고 AE장치에 전달하는 디지털 압력지시계(digital pressure indicator: DPI) 그리고 압력을 받는 복합재 연소관을 넣을 수 있는 시험편 case로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 수압펌프는 본 연구를 위해 특별히 주문 제작하였으며 최대 가압 능력은 7000psi(500기압)이며, 수압/AE시험시 필요한 loading - holding - unloading의 가압 cycle을 구현할 수 있도록 가압속도 조절을 위한 조절기와 압력 유지를 위한 장치를 모두 갖추고 있다. 공압펌프(Harkel사의 모델 M - and MS)의 최대 가압 능력은 1.5HP인데, 본 연구에서는 수압펌프의 가압속도 조절을 위한 보조장치로 사용하였다. 압력센서는 Druck사의 PDCR911 모델이며, 압력의 측정범위는 최대 500기압(7000psi)이고, DPI는 Druck사의 DPI420 모델이다. 압력센서와 DPI의 압력지시치의 정확도 및 정밀도 확보를 위해 측정압력이 500기압일 때 500mV의 전압이 생성될 수 있도록 교정을 실시하였다. DPI에서 나오는 아날로그 전압 신호를 AE 신호의 처리와 분석을 위해 사용한 PAC(Physical Acoustic Corporation)사의 Spartan 2000 AE 신호 처리 장치에 입력시켜 향후 분석에 사용할 수 있도록 하였다.

AE 신호분석을 위해 Spartan 2000 신호처리 장치의 9개 channel을 사용하고, 각 channel에 공진형 AE 센서인 R15(공진 주파수 150kHz)의 출력을 전치증폭기 PAC사의 1220A(band pass filter 100~1200kHz)로 60dB로 증폭시킨 신호를 입력하였다. 입력된 신호는 주 처리 장치에서는 증폭시키지 않았다. AE 신호 획득을 위해 Fig. 3에 나타낸 것처럼

9개의 AE 센서를 복합재 연소관의 표면에 부착시켰다. 그림에 숫자로 표시된 부분이 AE 센서의 부착 위치를 나타내는데 복합재 연소관 실린더부 표면의 2/3를 4개의 사각형 array로 구성하였다. 본 연구에서는 물을 가득 채우고 수압을 가한 복합재 연소관을 바닥에 놓은 채로 실험을 실시하였기 때문에 바닥과의 접촉선을 포함하고 있는 부분(전체표면의 1/3)은 array 구성에서 제외하였다. AE 센서의 간격은 원주방향으로 265mm이며, 축방향으로는 230mm이다. 수압/AE시험시 발생하는 소음을 제거하기 위해 복합재 연소관에 센서를 부착하여 공압펌프와 수압펌프를 가동시킨 후 실제로 수압을 가하지 않은 상태에서 주위의 잡음이 입력되지 않도록 문턱값을 0.5mV(50dB)로 정하였다.

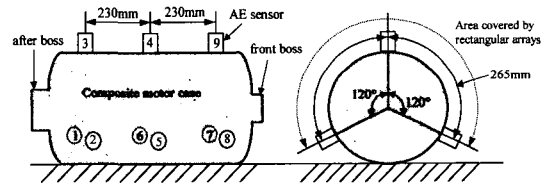


Fig. 3. Schematic diagram for location of AE sensors

수압 시험중 발생한 AE의 위치표정을 위해서는 복합재 연소관에서의 탄성과 진행속도를 알아야 한다. 이를 위해 복합재 연소관에서 초음파 신호를 발진시킨 후 pinducer로 이를 수신함으로써 탄성파의 속도측정을 시도하였다. 초음파 탐상기로는 Krautkrämmer사의 USD 15를 사용하였고, 초음파 센서로 1MHz 수직탐촉자를 이용하였으며, 접촉매질로는 Dow Corning의 고진공 그리스를 사용하였다. 연소관을 따라 진행되는 탄성파를 pinducer를 이용하여 검출하고 그 전파 속도를 연소관의 축 방향을 0°로 잡고 0°, 45°, 90° 방향에서 측정하였으나, 이 측정값이 의심스러워 권오양 등¹¹⁾이 별도의 실험을 통해 측정한 속도인 4,462m/s를 AE음원의 위치 표정을 위한 탄성파의 전파속도로 사용하였다. 그리고 연소관 표면에서 연필심 파괴 실험을 통해 AE음원 위치 표정의 정확도를 검증하는 실험을 실시한 결과, 이 속도값을 사용하여 음원(연필심 파괴)의 대략적 위치를 성공적으로 결정할 수 있음을 확인하였다.

복합재 연소관을 진행하는 탄성파의 속도는 AE

위치표정의 출발점이 되기 때문에, AE센서가 감지하는 특정주파수 성분을 갖는 탄성파의 진행방향별 전파속도를 정확히 측정하여야 하나, 본 연구에서는 시간과 장비의 제약으로 충분한 분석이 수행되지 못하였다. 이러한 문제점을 인지한 저자 등은 복합재 연소관에 광대역 초음파를 발진시키고 전파방향과 거리를 변화시킨 105지점에서 광대역 AE센서를 이용하여 복합재내를 전파되어온 탄성파를 수신하고, 그 특성(주파수, 전파속도)을 자세히 분석하는 연구¹²⁾를 본 연구에 이어 연속적으로 수행하였다. 그러나 애석하게도 그 연구에서 얻은 탄성파의 전파속도를 본 연구에는 활용하지 못하였다.

2) 충격시험

본 연구에서 충격 시험을 위해 사용한 장치는 복합재 연소관에 충격을 가하기 위한 낙하충격시험기와 충격 손상의 정도를 분석하는 X-ray 시험기로 구성된다. 낙하충격시험기는 정해진 위치에서 강구를 자유낙하시키는 저속 충격시험기로서 다양한 무게와 크기를 갖는 강구를 자유낙하시키는 높이를 자유롭게 설정할 수 있다. 충격이 가해진 복합재 연소관의 충격손상의 정도는 국방과학연구소가 보유하고 있는 X-ray 시험기를 이용하여 분석하였다.

3) 파열시험

수압/AE시험이 끝난 복합재 연소관에 대해서는 파열시험을 통해 최종 파열 위치와 압력을 측정하였다. 이때 파열시험 장치는 한국화이버주식회사가 보

유하고 있는 수압시험장치를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Table. 1에 본 연구에서 지금까지 수행한 실험과 그 결과의 개요를 요약하였다.

초기에 실험을 실시한 NSTEB 96-2와 96-4의 경우, 연소관의 예상파열압력을 3000~3500psi 정도로 추정하여 이 압력의 30% 수준인 1050psi(약 75kg/cm²), 50% 수준인 1750psi(약 125kg/cm²), 70% 수준인 2450psi(약 175kg/cm²) 등 3단계 압력을 순차적으로 가하는 수압/AE시험을 실시하려 했으나, NSTEB 96-2는 1050psi로 가압한 제1차 수압/AE시험의 제 1단계 가압시 hoop층 섬유파단이, NSTEB 96-4는 같은 가압조건에서 완전 파열(후방보스이탈)이 발생하였다. 이에 NSTEB 연소관의 예상파열압력을 1400psi (100kg/cm²)으로 낮추어 다시 설정하고, NSTEB 연소관의 96-3, 5, 6은 이 예상파열압력의 30% 수준인 420psi(약 30kg/cm²), 50% 수준인 700psi(약 50kg/cm²), 70% 수준인 980psi(약 70kg/cm²)의 3단계 압력을 순차적으로 가하도록 loading cycle를 수정하여, 제 1차 수압/AE시험을 실시하였다. 이 과정에서 NSTEB 96-6은 70kg/cm²의 압력으로 가한 제 1차 수압/AE시험의 제 3단계 가압에서 hoop층 파단이 발생하였기 때문에 X-ray 시험만 실시한 후 곧바로 파열시험을 실시하였다. NSTEB 96-3은 1차 수압시험후 13.2J의 충격손상을 가하고 제 2차 수압/AE시험을 거친 후 파열시험을 실시하였으며, NSTEB 96-5는 1차 수압 AE시험 후

Table 1. Summary of the experimental result

Specime	Expected Burst Pressure	1st H/AE test	Impact Test	2nd H/AE test	Burst test	Remarks
NSTEB 96-2	250kgf/cm ²	loading-holding up to 75kgf/cm ²	-	-	ABPO at 87kgf/cm ²	Fiber Breakage at 1st H/AE test
NSTEB 96-4	250kgf/cm ²	loading-holding up to 75kgf/cm ²	-	-	ABPO at 75kgf/cm ²	Fiber Breakage at 1st H/AE test
NSTEB 96-3	100kgf/cm ²	loading-holding-unloading up to 30,50,75kgf/cm ²	Impact Energy : 13J	same as in the 1st H/AE test	ABPO at 82kgf/cm ²	-
NSTEB 96-5	100kgf/cm ²	loading-holding-unloading up to 30,50,75kgf/cm ²	Impact Energy : 0J	same as in the 1st H/AE test	ABPO at 112 kgf/cm ²	-
NSTEB 96-6	100kgf/cm ²	loading-holding-unloading up to 30,50,75kgf/cm ²	-	-	ABPO at 93kgf/cm ²	Fiber Breakage at 1st H/AE test

충격손상을 가하지 않은 상태에서 2차 수압/AE시험을 거쳐 파열시험을 실시하였다.

제 1차와 제 2차 수압/AE시험을 통해 수집한 AE 신호를 분석하여 복합재 연소관내에 발생한 손상의 위치와 종류, 최종 파열 위치와 압력 등 복합재 연소관의 파괴거동을 예측할 수 있는 기법의 개발을 시도하였다.

1) AE신호 분석

본 연구에서는 5개의 복합재 연소관에 대해 실시한 제 1차와 제 2차 수압/AE시험시 연소관에 가한 압력과 이로 인해 방출된 AE 신호의 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 복합재 연소관의 수압 AE시험 중 방출된 탄성파는 주파수에 따라 진행속도가 다른 이른바 분산이 심한 Lamb파이므로¹²⁾, 이때 얻어지는 AE 신호는 매우 복잡한 형태를 가진다. 이 파는 주파수 성분과 전파 속도가 서로 다른 여러가지 파가 중첩되어 나타난 파인데, 이러한 파를 실험적으로 측정하기 위해서는 수신시 광대역형 AE 탐촉자를 사용해야 한다. 이렇게 광대역 탐촉자로 수신한 AE 신호는 복합재 연소관내에서 발생한 섬유파단, 층간분리, 기지균열 등의 다양한 파손현상이 방출시킨 AE의 특성을 잘 나타내기 때문에 파손거동해석 및 예측에 매우 유용할 것으로 판단된다.

그러나 불행히도 이러한 광대역 AE 신호를 수신받아 처리할 수 있는 AE 신호처리 장치가 아직까지 상용화되지 않은 상태이기 때문에, 본 실험에서는 협대역 공진형 AE 탐촉자를 사용하였다. 협대역 AE 탐촉자의 경우, 탐촉자에 수신된 외란의 종류에 상관없이 AE 탐촉자로부터 출력되는 파형은 탐촉자의 공진주파수를 중심 주파수로 갖는 협대역 신호가 된다. 따라서 이러한 신호에 대해서는 주파수 분석이 별다른 의미를 가지지 못하기 때문에, 본 연구에서는 신호의 시간영역에서 event, amplitude, energy, duration, rise time 등의 인자를 추출하고 이를 이용하여 복합재 연소관의 파손거동을 해석하였다.

본 실험의 경우 다양한 종류의 파손이 여러 곳에서 동시에 발생하기 때문에 개개의 파손을 모두 구분하여 개별적으로 해석한다는 것은 실제로 불가능하다. 이러한 어려움때문에 본 연구에서는 복합재 연소관의 수압/AE시험중에 얻은 AE 신호를 20초 간격으로 나누고, 이 20초 동안에 일어난 AE 신호를 대상으로 분석을 시도하였다.

Fig. 4에 AE data를 집중적으로 분석한 지점과 발생한 파손모드를 loading cycle 위에 시편별로 표시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이, 수압시험중 섬유파단(FB로 표시)은 NSTEB 96-2, NSTEB 96-4, NSTEB 96-6에서 발생하였으며, 후방보스이탈(ABPO로 표시)은 NSTEB 96-4, 그리고 기지균열(MC로 표시)은 모든 시험편에서 발생하였다. Fig. 4에 표시한 지점에서 20초 간격의 시간창(time window)를 설정하고 이 20초 사이에 방출된 AE에 대한 위치표정을 실시하였다. 아울러 amplitude distribution plot (hit vs. amplitude), energy distribution plot (hit vs. energy), duration distribution plot (hit vs. duration), 그리고 rise time distribution plot (hit vs. rise time) 등 4종류의 AE parameter distribution plot를 구하였다. 이 4가지 AE parameter distribution plot중 amplitude distribution plot이 분석에 가장 적합하다고 판단되어 본 연구에서는 AE source location결과와 amplitude distribution plot만을 이용하여 복합재 연소관의 파손거동을 분석하였다. 즉, AE source location으로부터 손상의 개략적 위치를 구하고, 그 위치에 발생한 손상의 내용을 육안으로 확인하고, 손상의 종류에 따라 AE amplitude distribution plot의 특성이 어떻게 변화하는가를 고찰하였다.

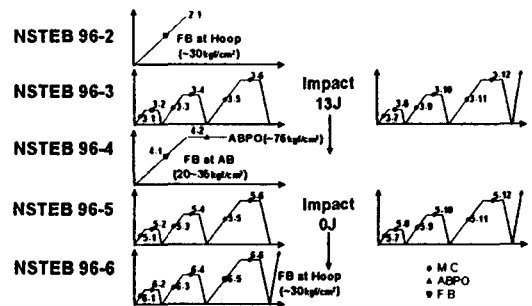
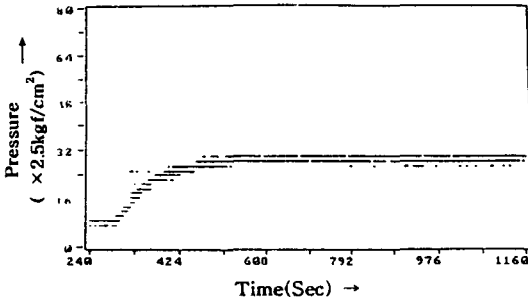


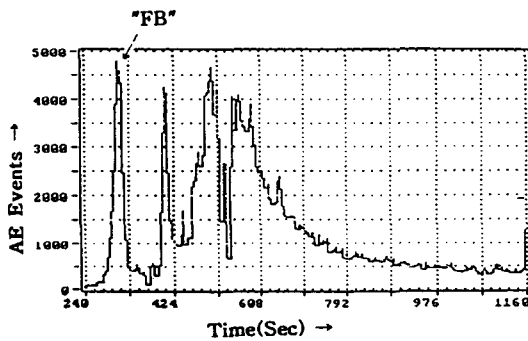
Fig. 4. Windows for analysis of AE behavior

2) 손상위치의 표정

수압시험시 연소관에 가해진 수압과 이로 인해 방출된 AE 신호의 시간에 따른 변화를 관찰하면서, 단순화된 도달시간차 위치표정기법을 적용하여 AE 음원의 위치를 결정하였다. Fig. 5는 NSTEB 96-2 시험편의 제 1차 수압AE시험의 제 1단계 가압시 관찰한 결과로서, a)는 시간에 따른 압력의 변화를, b)



a) Loading pressure vs. time



b) AE event count vs. time

Fig. 5. Loading pressure and AE events in the 1st level pressurization to the NSTEB 96-2 case during the 1st hydroproof & acoustic emission test

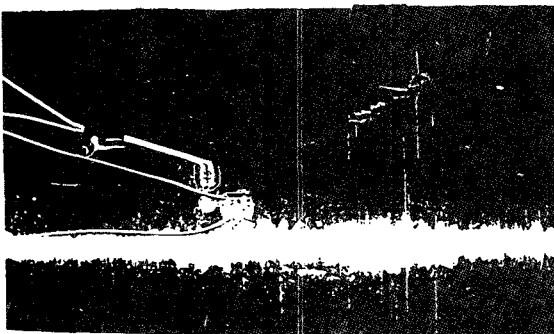


Photo. 1. Fiber breakage occurred in the hoop layer of the NSTEB 96-2 case

는 시간에 따른 AE event의 수의 변화를 보여주고 있다. Fig. 5를 보면, 가압시간이 330초 부근에 많은 양의 AE events가 방출되는 것을 볼 수 있는데, 이때 Photo. 1에 나타난 바와 같은 hoop층 섬유파단과 층간분리가 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있었

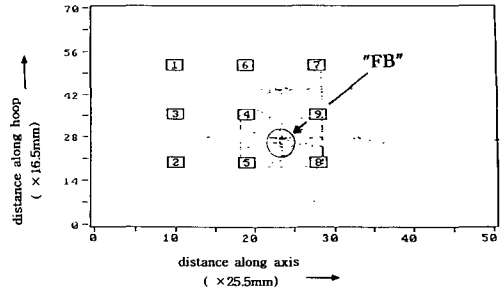


Fig. 6. AE source location at 330 second in the 1st level pressurization to the NSTEB 96-2 case during the 1st hydroproof & acoustic emission test

다. Fig. 6에 나타난 섬유파단이 일어난 시점에서 구한 AE음원 위치표정 결과를 보면 섬유파단이 일어난 지점에 AE음원이 집중되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4에 나타난 각 지점에서 얻은 AE 신호에 대해 이와같은 분석을 수행한 결과, 섬유파단(FB)과 후방보스이탈(ABPO)의 대략적 발생위치를 감지할 수 있었다. 그러나, 기지균열(MC)의 경우는 연소관의 표면에 걸쳐 광범위하게 발생하기 때문에 개별적인 기지균열의 위치를 정확히 표정할 수 없기 때문에 섬유파단과 후방보스이탈을 제외한 모든 손상을 기지균열로 간주하였다.

3) AE amplitude에 미치는 pressurization의 영향
본 연구의 주요 관점중의 하나는 섬유파단, 기지균열, 층간분리, 후방보스이탈 등의 파손모드의 변화에 따라 AE amplitude distribution이 어떻게 변화하는가를 분석하는 것이다. 그러나 실험을 통해 AE amplitude는 이러한 파손모드의 변화 뿐만 아니라 수압시험의 가압상태(pressurization)에 따라서도 달라짐을 발견하여, 먼저 가압 조건에 따른 AE amplitude의 변화를 고찰하였다.

Fig. 7은 NSTEB 96-3 시험편의 제 1차 수압시험의 제 1단계 가압과정에서 발생한 기지균열에 대한 AE amplitude distribution plot를 보여주고 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 가압시(loading)의 AE amplitude distribution은 50~80dB 사이인데 반해, 정압시(holding)의 AE amplitude distribution은 40~80dB로 나타났다. 이러한 AE amplitude의 분포 범위는 제 2단계와 제 3단계 가압과정에서도 가해준

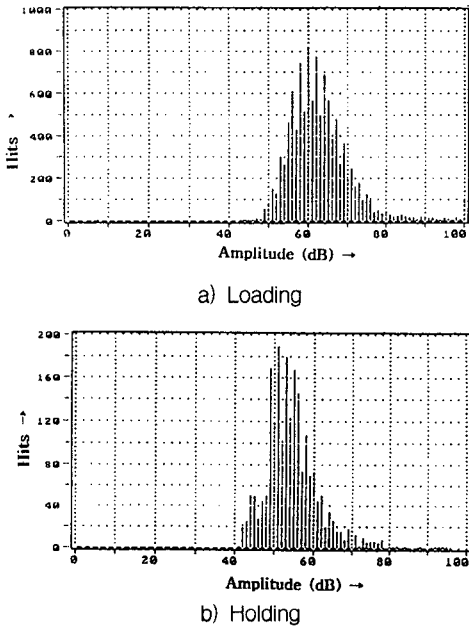


Fig. 7. Effect of load/hold on AE amplitude in the NSTEB 96-3 vessels

압력값에 상관없이 동일한 경향을 나타내었으며, NSTEB 96-5 시험편에서도 역시 같은 경향을 보여 주었다. 이러한 결과는 AE amplitude distribution이 가압상태의 영향을 받는데, 그 영향이란 정압보다 가압이 높은 amplitude를 갖는 AE events를 다량 발생시킨다는 것이다. 따라서, AE amplitude를 이용하여 파손현상을 분석코자 할 때 이러한 점을 충분히 고려해야만 한다.

4) 파괴모드의 식별

본 실험에서 사용한 시험편인 복합재 연소관의 파괴모드는 섬유파단, 층간분리, 지지균열의 3가지가 있을 수 있는데 본 실험에서는 이들의 구별을 위해 AE events의 amplitude distribution을 사용하였다. Fig. 8에 동일가압단계(제 1차 수압/AE시험의 제 1 단계 loading)내의 같은 크기의 가압력(~30kgf/cm²) 하에서 발생한 NSTEB 96-2의 섬유파단(Fig. 8. a))과 NSTEB 96-5의 지지균열(Fig. 8. b))을 비교하였다. 이 그림을 보면 섬유파단과 지지균열시 발생한 AE events의 범위는 50~80dB로 비슷하나, 섬유파단의 경우 약 65dB정도의 AE event가 가장 많이 발생한 반면, 지지균열의 경우는 약 58dB정도의 AE

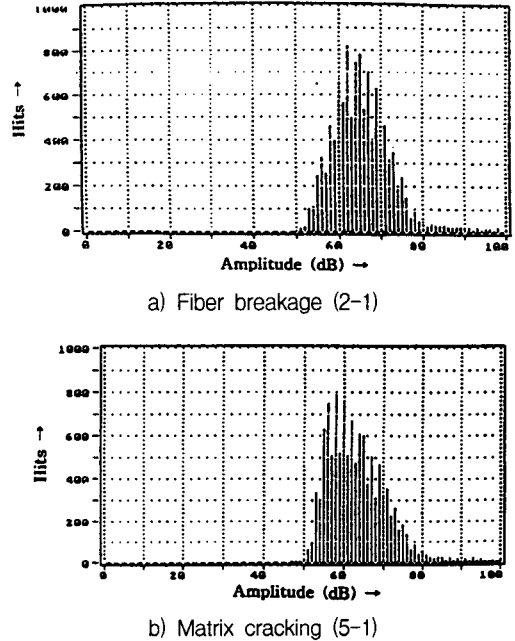


Fig. 8. Effect of failure mode on AE amplitude distribution

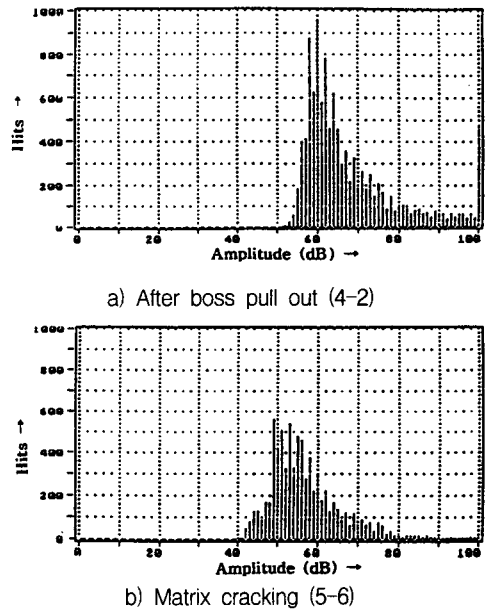


Fig. 9. Effect of failure mode on AE amplitude distribution

event가 가장 많이 발생하였다. 이를 보면 지지균열 보다는 섬유파단시 더 높은 amplitude를 갖는 AE

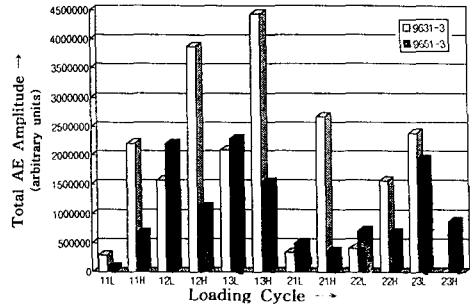
events가 더 많이 나오는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 NSTEB 96-4 시험편에 대한 제 1차 수압/AE시험의 제 3단계 holding(정압력~75kgf/cm²)시 발생한 후방보스이탈의 AE events와 NSTEB 96-5 시험편에 대한 제 1차 수압/AE시험의 제 3단계 holding(정압력~70kgf/cm²)시 발생한 기지균열의 AE events에 대한 amplitude distribution을 비교하였는데, 후방보스이탈(Fig. 9. a)시 매우 높은 amplitude를 갖는 AE events가 다량 방출됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들은 AE amplitude distribution plot를 이용하여 복합재 연소관내의 파손모드를 분간할 수 있음을 보여주고 있다.

5) 파열위치와 압력의 예측

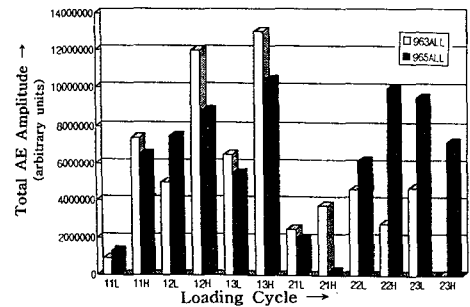
AE data로부터 파열위치를 예측하기 위해서는 AE parameter중 파열에 따른 매우 특징적인 parameter를 설정하여야 한다. 본 연구의 경우, 섬유파단이 발생한 시험편을 포함한 모든 시험편의 경우 최종파단은 후방보스이탈에 의해 발생하였다. 그러나, 동일조건하에서 파열위치와 압력을 비교할 수 있는 연소관은 오직 NSTEB 96-3과 NSTEB 96-5뿐이며, 다른 시험편들은 예기치 않은 파손이 발생하였기 때문에 이러한 분석의 목적에는 적합하지 않다.

NSTEB 96-3은 1차 수압 AE시험후 13.2J의 충격손상을 가한 시험편으로서 70kgf/cm²의 최종압력으로 가압한 2차 수압시험후 파열시험시 82kgf/cm²의 압력에서 후방보스 이탈이 일어났으며, NSTEB 96-5는 충격손상 없이 2차 수압시험을 행한 후 파열시험시 112 kgf/cm²의 압력에서 후방보스 이탈이 일어났다. 이 두 연소관의 파열위치와 파열압력을 비교하기 위해 Fig. 10에 두 연소관에 대한 수압 AE시험의 전과정에 걸쳐 방출된 AE 신호의 amplitude를 비교하였다.

Fig. 10에서 a) sensor: 1-3(at After Boss)은 후방보스 부위에 부착한 1~3까지의 3개의 AE sensor에 의해 검출된 AE 신호의 amplitude이며, b) sensor: 1-9(All)는 연소관에 부착한 9개의 AE sensor에 의해 검출된 AE 신호의 amplitude를 모두 합한 것이다. 이 두가지 data를 비교해 보면, 1차 수압시험에서는 NSTEB 96-3 시험편에서 더 많은 AE가 방출되었는데, 2차 수압시험에서는 NSTEB 96-5 시험편이 시험편 전체적으로 볼 때 더 많은 AE가 방출되었다. 그러나 후방보스에 부착된 AE



a) For 3 sensors(1-3) attached around the after boss



b) For all 9 sensors attached to the case

Fig. 10. Comparison of amplitude of AE signals in the NSTEB 96-3 case(white) and in the NSTEB 96-5 case(black)

sensor에 의해서는 NSTEB 96-3 시험편이 더 많은 AE 신호를 방출하고 있음을 알 수 있다. 그리고 NSTEB 96-3은 끝이온 파열시험에서 매우 낮은 파열압력을 보여주고 있는데, 이것은 곧 1차와 2차 수압시험을 통해 NSTEB 96-3 시험편의 후방보스 부위에 많은 미세 파손이 진행하였음을 알 수 있다. 활발한 AE 거동은 집중적인 미세 파손이 진행되고 있음을 의미하기 때문에, 곧 최종파단이 일어날 것을 예고한다고 생각할 수 있다. 이 사실은 AE시험을 통해 파열위치와 파열압력을 예측할 수 있는 가능성이 있다는 것을 말해준다.

6) 충격손상의 영향 평가

본 실험에서는 1차 수압/AE시험후 NSTEB 96-3 연소관에 13.2J의 충격손상을 가하였다. 충격손상이 파열위치나 압력에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 이 시험편의 파괴거동과 이와 동일한 조건하에서(충격손상만 제외하고) 시험을 실시한 NSTEB 96-5의 파손양상을 비교 분석해야 한다. X-ray 시험 결

과 NSTEB 96-3 연소관에 가해진 13.2J의 충격손상은 hoop층에 기지균열, 층간분리, 섬유파단의 손상을 입힌 것을 확인할 수 있었다. 그러나 충격손상을 입은 NSTEB 96-3 연소관 역시 최후파열이 후방보스이탈에 의해 이루어졌기 때문에, 13.2J의 충격손상이 연소관의 최종 파열위치를 변화시킬 만큼 큰 손상은 아닌 것으로 판단된다. 그렇지만 NSTEB 96-3 연소관의 파열압력은 충격손상을 받지 않은 연소관(NSTEB 96-5)의 파열압력 ($112\text{kg}/\text{cm}^2$)보다 약 27%가 낮은 $82\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났다. 이러한 결과로부터 복합재 연소관이 충격손상에 약하다는 것을 짐작할 수 있으나, 실험 데이터가 불충분하여 일반적인 결론을 내릴수는 없다.

4. 결론

수압/AE시험을 이용하여 복합재 연소관의 파손 거동 및 파열위치 그리고 파열 압력을 예측하는 기법에 대해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단순화된 도달시간차 기법을 이용한 AE음원 위치표정에 의해 복합재 연소관 내에 진행중인 손상의 대략적 위치를 결정할 수 있다.
- 2) AE amplitude distribution plot에 의해 복합재 연소관 내에 발생한 손상(기지균열, 섬유파단, 후방보스이탈)의 모드 식별이 어느정도 가능하다. 기지균열보다는 섬유파단과 후방 보스이탈 시 더 많은 양의 high amplitude AE 신호가 방출된다.
- 3) 후방보스부위에 부착된 AE 센서에 의해 감지된 활발한 AE 방출로부터 ABPO의 징후를 초기에 인지할 수 있다. 따라서 수압 AE시험중에 발생한 AE를 지속적으로 감지하면 파열 위치를 예측할 수 있다고 판단된다.
- 4) 파열압력이 낮은 연소관(NSTEB 96-3: $82\text{kgf}/\text{cm}^2$)이 파열압력이 높은 연소관(NSTEB 96-5: $112\text{kgf}/\text{cm}^2$)보다 후방보스부위에서 많은 양의 AE를 방출하였다. 따라서 AE 방출 거동으로부터 파열압력을 예측할 수 있다고 사료된다. 다만, 본 연구에서는 실험 데이터가 절대 부족하여 정량적인 결론을 도출할 수 없었다.
- 5) 충격손상을 받은 연소관이 충격손상을 받지 않은 연소관보다 낮은 파열 압력을 나타내고

있어, 충격손상이 연소관의 파열압력을 저하시키는 것으로 사료된다. 그러나 본 연구에서는 실험 데이터의 절대 부족으로 정량적인 결론을 내릴 수 없었다.

후기

이 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원과 함께 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계 부품공장 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- 1) 권오양, 윤동진, 정현조, 조원만, "복합재 연소관의 수압/AE시험 분석", 제 5차 유도무기 추진기관 학술대회 논문집, pp. 544-551, 국방과학연구소, (1995)
- 2) Eric v.K Hill, "Predicting Brst Pressures in Filament-Wound Composite Pressure Vessels by Using Acoustic Amission Data", Master. Eval. pp. 1439-1445, Dec. (1992)
- 3) J. W. Whittaker, W. D. Brosey and M. A. Hamstad, "Felicity Ratio Behavior of Pnue-matically and Hydraulically Loaded Spherical Composite Test Specimen", J. Acoustic Emission, Vol. 9, No. 2, pp. 75-83, (1990)
- 4) J. W. Whittaker, W. D. Brosey and M. A. Hamstad, "Correlation of Felicity Ratio and Strength Behavior of Impact Damaged Spherical Composite Test Specimen", J. Acoustic Emission, Vol. 9, No. 2, pp. 84-90, (1990)
- 5) M. A. Hamstad, J. W. Whittaker and W. D. Brosey, "Correlation of Residual Strength with Acoustic Emission from Impact - Damaged Composite Structures under Constant Biaxial Load", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 15, pp. 2307 - 2328, (1992)
- 6) M. R. Gorman, "Burst Prediction by Acoustic Emission in Filament Wound Pressure Vessels", Journal of Acoustic Emission, Vol.

- 9, No. 2, pp. 131-139, (1990)
- 7) J. Walker, M. Lansing, S. Russell, G. Walkman and A. Nettles, "Materials Characterization of Damage in Filament Wound Composite Pressure Vessels," 4th Annual Research Symposium, NDE of Composite and Composite Structures 1995 ASNT Spring Conference, Las Vegas, Nevada, March 20-24 (1995)
- 8) H. C. Kim, R. W. B. Stephens, P. Fortune and R. A. M. Scott, "Event Energy Distribution in Acoustic Emission - A New Approach", Proc. of the Institute of Acoustics, London, 4.21.1 (1977)
- 9) Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed, Vol. 5: Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, (1987)
- 10) 김호철, 남창희, 이정기, 송성진, 양인영, 오치환, "복합재 연소관 품질의 비파괴 평가기법 연구," 국방과학연구소 (1996)
- 11) 오치환, "수압음향방출에 의한 복합재 압력용기의 파괴거동 예측에 관한 연구," 조선대학교 대학원 석사학위 논문 (1997)
- 12) 송성진, 최지웅, 김학준, "복합재 구조물의 비파괴 평가를 위한 탄성과 전파특성 연구 - 실험적 접근," 대한기계학회 논문집 (제출중)

Prediction of Failure Behavior in Composite Motor Cases by Acoustic Emission during Hydroproof Testing

Sung-Jin Song*, Chi-Hwan Oh**, Hyunjo Jeong***, Sang-Ho Rhee****,
Soo-Yong Lim***** and Ho-Chul Kim*****

* School of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon 440-746

** School of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759

*** School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735

**** Agency for Defence Development, Taejon 305-600

***** Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Taejon 305-701

Abstract Prediction of failure behavior in filament-wound composite motor cases is one of the important issues for their reliable application. Acoustic emission during hydroproof testing of the cases is used to solve this problem. Based on the acoustic emission behavior, failure sites can be located successfully. The identification of failure modes is also possible using the distribution of acoustic emission amplitude. Due to the limitation in the number of samples, it is not possible to predict the final burst pressure of motor cases and the effect of impact damage on the final burst pressure.