

항공용 복합재료에 대한 음향방출의 활용

Acoustic Emission Application for Aerospace Composite Materials

이 상 호*
 Sang-Ho Lee*

초 록 본 연구에서는 복합재료에 적용 가능한 음향방출 비파괴 시험 평가 기법의 정립을 목표로, 복합재 표준 시험용 평가 시편(STEB), 금속재 압력용기 내부의 복합재 내열튜브, 추진기관 토출관 등의 수압 보충 시험에서 음향방출 시험법을 적용하였다. 복합재 표준 시험용 평가 시편의 경우 음향방출 hit rate parameter를 이용하여 파열압력이 낮은 시편(2100psi이하)과, 파열압력이 높은 시편(2100psi이상)과의 구분이 가능하였으며, 파열압력이 낮은 시편은 파열압력의 50%범위내에서 파열위치의 탐지가 가능하였다. 금속재 압력용기 내부의 복합재료 내열튜브 및 추진기관 토출관의 시험 결과, 수압시험 중 크랙의 발생 압력, 초기 발생 위치, 및 진전과정의 탐지가 가능하였다.

주요용어: 음향방출, 항공용 복합재료, 내열재료, 파열 압력, 크랙 진전

Abstract To establish nondestructive test method for aerospace composite materials, various composite specimens were tested and analyzed using acoustic emission. The hit rate of acoustic emission closely was related with crack initiation and propagation. This report also presents detection capability of crack initiation pressure, initial crack active location, and crack propagation using acoustic emission.

Keywords: acoustic emission, aerospace composite materials, ablative materials, burst pressure, crack growth

1. 서 론

음향방출(acoustic emission: AE)은 1960년대 초기 로켓 모터 케이스용 복합재 연소관에 최초로 이용된 이후[1,2] 발전을 거듭하여 1980년대 초기에는 산업용 복합재 압력 용기의 음향방출 시험법이 Society of Plastic Industry(SPI)의 음향방출 분과 위원회에 의해 추천되었고, 이 방법이 American Society of Testing Materials(ASTM), American Society of Mechanical Engineers (ASME)에 의해 받아들여져 규격화되었다[3,4]. 1985년에는 선진국의 일부 항공 관련 회사에 의해 복합재 연소관에 적용 가능한 음향방출 시험 절차가 제시된 바 있으나, 공인기관에 의해 표준화되거나 규격서로 제정된 것은 아직 없다[5-10].

국내에서는 복합재료 등에서 발생하는 음향방출 신호를

측정하여 건전성 평가에 관한 연구 등 많은 연구가 있었으나, 시편의 부족 등으로 인하여 시험기법의 정립은 아직 만족할 만한 수준에 미치지 않는 상태에 있다[11-14].

본 보고에서는 복합재료에 적용 가능한 비파괴 시험 기법 정립을 목표로, 그 동안 진행되어 왔던 여러 시험들을 종합하여 적용분야와 분석방법 및 성과 등에 대해 기술하였으며, 향후 복합재료의 구조 건전성을 음향방출 비파괴방법으로 측정/평가할 수 있는 기술의 하나로써 가능성을 제시하고자 한다.

2. 이 론

음향방출은 고체 내부에 국부적으로 형성된 변형 에너

Table 1 Test specimen

시험편	제작방법 및 재질	시험조건	예상파열압력	파열압력
A9704	[(±27.5)3/(90)7]T T800/Epoxy	Pre-amp: 40dB Main gain: 20dB T/H: 40dB(Float)	2,300psi	2,527psi(전방 hoop충파괴)
A9706	[(±27.5)3/(90)7]T T800/Epoxy		2,300psi	2,044psi(전방 hoop충파괴)
A9707	Wafer 보강 T800/Epoxy		3,000psi	2,900psi(후방 hoop충파괴)

지(strain energy)가 급격히 해소되면서 발생하는 탄성파(elastic wave)로 정의된다. 일반적으로 재료에 외력이 가해지면 초기에 탄성 변형이 일어나고, 점차 외력이 증가함에 따라 소성 변형이 일어나며, 더욱 큰 힘을 받으면 균열이 발생하면서 큰 에너지가 방출된다. 이 에너지는 Fig. 1과 같은 형태로 방출되는데, 섬유 강화 복합재료의 경우, 음향방출의 발생 원인은 기지 균열(matrix cracking), 층간 분리(delamination) 및 강화 섬유의 파단(fiber breakage) 등으로 알려져 있다.

본 시험에서 사용한 음향방출 센서는 공진형 센서로 R15(공진 주파수 150kHz)를 사용하였고, Preamplifier는 1220A(band pass filter 100~300kHz)를 사용하였다[12-14]. 음향방출 센서에서 검출된 신호는 전자증폭기에서 40dB로 증폭하였고 주 처리 장치인 SPARTAN 2000에서는 20dB로 증폭하였으며, Threshold는 40-42dB로 설정하였다.

3. 적용 분야

3.1 복합재 표준 시험용 평가 시편에 대한 적용

표준 시험용 평가 시편(Standard Test Evaluation Bottle; STEB)이란 설계변수를 확인하기 위하여 압력용기의 실제

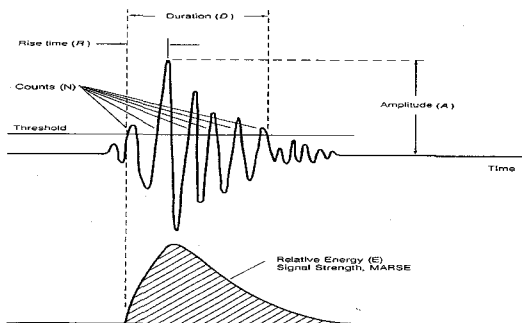


Fig. 1 Acoustic emission waveform parameter

크기를 축소시켜 제작된 시편으로 품질보증은 수압보증시험(hydrostatic test)으로 실시하고 있다. 사용 중에 받는 압력을 모사하기 위해 물을 이용하여 해당 사용 압력까지 가하는 방법으로, 수압 펌프, 공기압축기, 압력지시계 및 음향방출 측정 장비로 구성되어 있으며, 시험 장치 구성도는 Fig. 2에서 나타냈다.

Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 발생한 신호를 수집하기 위해서 6개의 센서를 180도 간격으로 설치하였다. 가한 압력은 가압 단계(loading), 일정 압력 유지단계(load-hold), 감압 단계(unloading) 3단계로 나누어 가하였다. Table 1에서는 제작방법, 시험 조건, 예상파열압력 및 파열압력 결과 등을 나타냈다.

시편의 건전성 평가는 hit rate 선도를 이용하여 정성

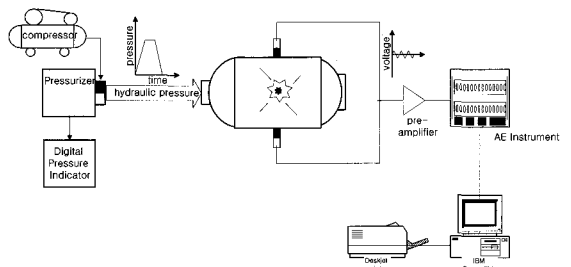


Fig. 2 Hydroproof test system configuration for STEB

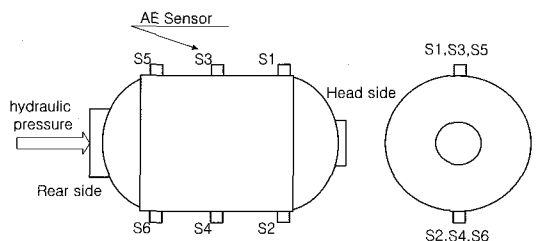


Fig. 3 Acoustic emission sensor configuration for hydroproof test

적 측면에서 분석을 수행하였다. 가압 과정에서는 hit rate가 시간에 따라 증가하다가, 일정 압력 유지 구간에서 구조적으로 건전하다고 판단되는 시편은 hit rate가 크게 감소되는데 비하여, 건전하지 못한 시편은 hit rate가 완만하게 줄어드는 경향이 나타난다.

Fig. 4(a), (b), (c)에서는 각 압력 단계별로 측정된 hit rate 선도를 나타낸 것이다. A9704 시편의 파열압력은 2,527psi, A9706시편은 2,044psi, A9707시편은 2,900psi 로 가장 높았는데, 이는 boss 경계부와 접선부 hoop층을 보강하였기 때문이다. Fig. 4(b)에서 파열압력이 가장 낮은 A9706 시편을 살펴보면, 다른 시편과 달리 1000(2nd step)psi 압력에서 hit rate가 매우 높게 나타났다. 이 시편은 700psi 압력단계에서도 다른 시편에 비해 hit 발생율이 다른 시편에 비해 높게 나타남을 알수 있으며, 1450, 1700psi 압력에서의 hit 발생수도 매우 높은 경향을 보였다. 그러나, A9704와 A9707은 파열압력이 500~900psi 정도 차이가 있지만, 두 시편이 확연히 구분되지 않는 경향을 보여, 음향방출법으로는 STEB 시편의 건전성 평가 적용이 어렵다는 것을 알 수 있었다. 또한, AE 장비 성능의 한계로 Lost AE(측정시험중 측정장비의 탐지능력을 초과하는 탐지하지 못한 신호)가 발생되었다.

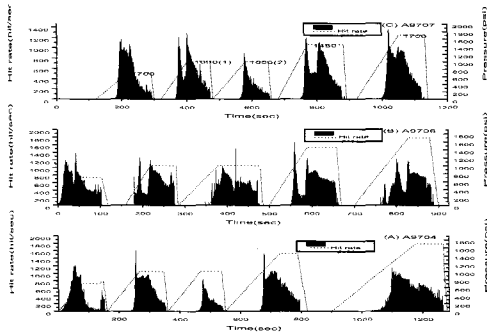


Fig. 4 Hit rate diagrams for test specimen: (a) A9704, (b) A9706, (c) A9707

Fig. 5에서는 A9706 시편의 각 센서별로 측정된 hit rate 선도를 보였다. 파열위치인 1, 2번 센서의 hit 수가 다른 시편에 비해 매우 높았으며, 결국 이 부근에서 파괴되었다. 1번 센서의 700psi 압력에서 살펴보면, 다른 부분과는 달리 시간에 따라 증가하는 경향을 보였다. 일정 압력하에서 hit 수가 시간에 따라 증가한다는 것은 종국에 가서 파괴로 진전될 수 있다는 매우 위험한 징후로 보인다. 1,000(2nd step)psi 압력에서도 다른 센서에 비해 1, 2번 센서의 hit 발생율이 매우 높았다. 따라서, 복합재 시편에서 발생하는 음향방출 신호를 측정/분석함으로써 파열압력과 상관관계 및 구조적으로 파열 위치의 탐지가 가능하였다.

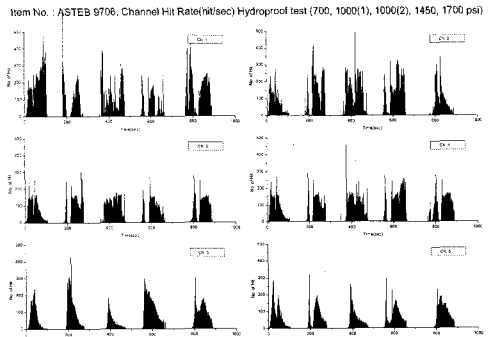


Fig. 5 Channel hit rates for A9706 specimen.

3.2. 금속재 압력용기 내부의 복합재로 내열튜브에 대한 적용

금속재 압력용기 내부의 복합재 내열튜브에 대한 품질 보증시험도 음향방출 신호를 측정/분석함으로써 활용되고 있다. 시편에는 모두 3개의 음향방출 센서를 Fig. 6과 같이 설치하였다. 이 시험에서 센서번호는 S1, S2, S3로 나타났다. 제작방법, 내열재 재질, 시험 조건 및 시험 결과

Table 2 Test condition for insulation tubes

번호	내열재 재질	시험조건	보증압력	파열압력	시험결과 요약
9726	Rolling Carbon-Phenol Pre-preg type	Pre-amp: 40dB Main gain: 20dB T/H: 42dB (Float)	3800psi	4500psi	- 육안상으로 결함 없음.
9760			3800psi	4500psi	- 3000psi에서 AE 이상신호 발견으로 수압시험 중지후, 육안검사로 크랙 발생 확인

등은 Table 2에 나타냈다. CTPB(Carboxyl - Terminated Polybutadiene) 시편에 대해서는 1차 및 2차로 2140-2360psi 까지 가압하는 방법의 시험이 적용되었다.

Fig. 7은 1차 시험의 hit rate 거동을 나타내 주고 있다. 1360psi 압력부터 갑자기 급격한 AE 신호 발생을 보여 1360psi 압력에서 초기 crack의 발생이 진진한다고 볼 수 있다. 2030psi 압력 유지 구간 중에 2번 센서(화살표 2번)에서 불안정한 AE 신호를 나타내 시험을 중지하고, 내열재의 상태를 확인한 결과, 내열재의 접합부가 시험전 보다 더 벌어진 것을 확인하였다.

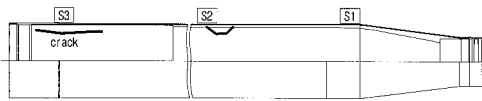


Fig. 6 Location of acoustic sensors

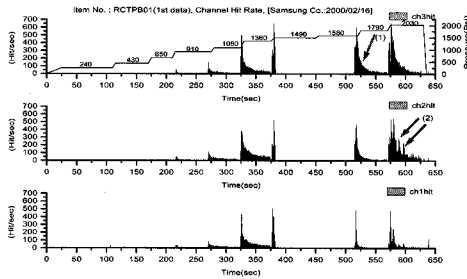


Fig. 7 Channel hit rates for CTPB specimen during hydroproof test(1st test)

Fig. 8은 2차 시험의 거동을 나타내고 있다. 2140-2360psi 압력에서의 일정 압력 유지 구간에서 불안정한 AE 신호거동(화살표 부분)을 나타내고 있다. 1, 2번 센서(촉소부 및 중간부위)에서는 신호가 나타나지 않는데 비하여 3번 센서 부분에서 150 hit/sec 비율로 연속적인 신호로 불안정하게 나타나고 있다. 3번 head 부위의 크랙진 전임을 확인하고 시험을 중단하고, 연소관의 내부를 확인

한 결과 실린더 중간부위에서 “혹” 처럼 불룩한 부분과, 3번 head 부위에 새롭게 생성되어 진행된 크랙을 확인하였다.

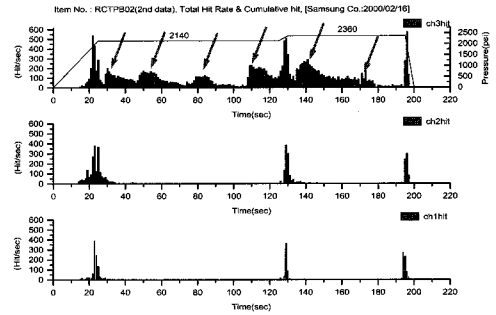


Fig. 8 Channel hit rates for CTPB specimen during hydroproof test(2nd test)

3.3. 추진기관 토출관에 적용

토출관은 추진기관의 노즐목이 설치되어 있는 부품으로 추진제 연소시 매우 높은 압력과 고열이 직접 접촉되는 곳으로 내부는 복합재료, 외부는 금속재로 이루어져 있다. 연소중에 내부의 복합재에 크랙이 발생될 경우 고열이 직접 내열재를 덮고 있는 금속재에 가해짐으로써 강도를 저하시켜 종국에는 노즐의 파괴를 초래할 수 있다. 적용된 시험 조건은 Table 3과 같으며, 설치된 센서는 Fig. 9와 같다.

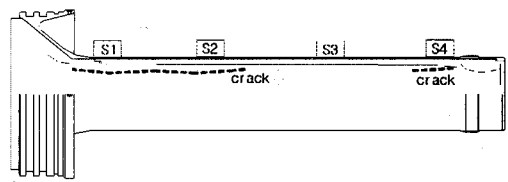


Fig. 9 Location of acoustic sensors

Table 3 Test condition for composite insulation tubes

번호	제작방법 및 내열재 재질	시험조건	보증압력	파열압력	시험결과 요약
CTPB	무가공 0 deg. Rolling Carbon-Phenol Pre-preg type	Pre-amp: 40dB Main gain: 20dB T/H: 40dB Float type	2700psi	3500psi	- 튜브 중간부위 : 불룩하게 “혹” 발생 - 튜브 head 부위 : 크랙 발생

수압보증압력은 3800psi(1분 유지)로 초기 200psi~3800psi 압력까지 200psi 압력별로 30초씩 일정압력에서 유지하는 방법으로 실시되었다. Fig. 10에서는 9726시편의 1차 수압보증시험중 발생한 hit rate를 각 압력에 따라 보여주고 있다. 이 시편은 1400psi 일정압력에서 3번센서 부근에서 이상신호(화살표)가 발생하여 시험을 중단한 후, 내부의 압력을 내린 후, 내부를 확인한 결과 육안상 결함을 발견할 수 없었다. 다시 수압을 한번에 1,400psi 압력까지 가한 후, 다시 200psi 압력별로 가하여 3800psi까지 수압을 가한 hit rate 선도를 나타내고 있다. 2차로 가압한 초기에 AE 신호가 발생한 것외에는 이상신호라 할 만한 것이 없으며, 3800psi 압력까지 발생한 hit rate 거동이 대체로 낮음을 알 수 있다. 압력을 내린 후, 확인한 결과, 육안상 결함은 없었다.

Fig. 11에서는 9760시편의 수압보증시험중 발생한 hit rate를 각 압력에 따라 보여주고 있다. 이 시편은 3000psi

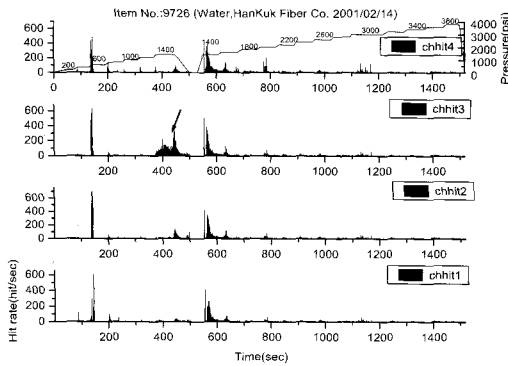


Fig. 10 Channel hit rates of A9726 specimen

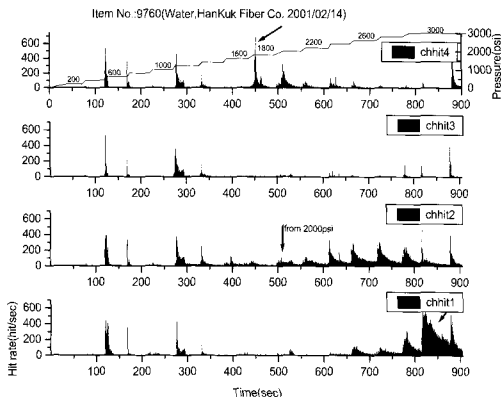


Fig. 11 Channel hit rates of A9760 specimen

압력에서 센서 1번에서 높은 AE 이상신호가 발생하여 시험을 중지하고, 내부를 육안으로 관찰한 결과, 크랙이 Fig. 9와 같이 존재함을 확인하였다. 크랙은 축소부와 확대부 2곳에서 발생되었는데, 축소부의 크랙은 1600~1800psi압력으로 가압하는 중에 4번 센서로부터 발생한 것으로 추정되며, 확대부쪽의 크랙은 이미 1800psi부터 2번 센서로부터 서서히 진행하여 1번 센서방향(확대부)으로 진행한 것으로 보여진다.

4. 결 론

본 연구에서는 복합재료에 적용 가능한 음향방출 비파괴 시험 평가 기법의 정립을 목표로, 복합재 표준 시험용 평가 시편(STEB), 금속재 압력용기 내부의 복합재 내열튜브, 추진기관 토출관 등의 수압 보증 시험에서 발생된 신호를 측정/분석함으로써 음향방출 hit rate와 파열 압력 및 파열 위치와의 관계, 크랙의 발생 및 진전과의 관계가 있음을 제시하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 복합재 표준시험용 평가 시편(STEB)의 경우 음향방출 hit rate parameter를 이용하여 파열압력이 낮은 시편(2,100psi 이하)에 대해서는 크랙의 발생 및 진전 과정의 탐지가 가능하였으나, 파열압력이 높은 시편(2,500psi 이상)에 대해서는 알 수 없었다. 파열압력이 낮은 시편은 파열압력의 50%범위내에서 파열위치의 탐지가 가능하였다.
- 2) STEB 시편의 경우 수압시험 중 음향방출 신호 탐지 능력이상(700 hit/sec)의 다량의 AE 신호가 발생하여 장비 성능의 한계로 탐지하지 못한 신호(Lost AE)가 발생되었다. 따라서, 향후 시험에서는 Threshold를 높여 시험하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 3) 금속재 압력용기 내부의 복합재료 내열튜브 및 추진기관 토출관의 시험 결과, 수압시험 중 크랙의 발생 압력 및 초기 발생 위치, 진전과정의 탐지가 가능하였다.

참고문헌

[1] Ronnie K. Miller and Paul McIntire, "Nondes- tructive Testing Handbook:Acoustic Emission Testing," 2nd Ed., Vol. 5, American Society for

- Nondestructive Testing, (1987)
- [2] A. T. Green, C. S. Lockman, and R. K. Steele, "Acoustic Verification of Structural Integrity Polaris Chambers," *Modern Plastics, MOPLAY*, Vol. 41, No. 11, pp. 137~139, 178, 180, (1964)
- [3] ASME Code Sec. V Article 11, "Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels"
- [4] ASTM E1067-89(Reapproved 89), "Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels"
- [5] Eric v. k. Hill and T. J. Lewis, "Acoustic Emission Monitoring of a Filament-Wound Composite Rocket Motor Case during Hydroproof," *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 7, pp. 859~863, (1985)
- [6] D. J. McNally, "Inspection of Composite Rocket Motor Case Using Acoustic Emission," *Materials Evaluation*, Vol. 43, No. 6, pp. 728~732, (1985)
- [7] Eric V. K Hill, "Predicting Burst Pressures in Filament-Wound Composite Pressure Vessels by Using Acoustic Emission Data," *Materials Evaluation*, pp. 1439~1445, (1992)
- [8] M. A. Hamstad and T. T. Chiao, "Structural Integrity of Fiber/Epoxy Vessels by Acoustic Emission," *SAMPE Quarterly*, pp. 31~45, (1976)
- [9] M. R. Gorman, "Burst Prediction by Acoustic Emission in Filament Wound Pressure Vessels," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 9, No. 2, pp. 131~139, (1990)
- [10] Eric v. k. Hill, James L. Waker II, and Ginger H. Rowell "Burst Pressure Prediction in Graphite/Epoxy Pressure Vessels Using Neural Networks and Acoustic Emission Amplitude Data," *Materials Evaluation*, Vol. 54, No. 6, pp. 744~754, (1996)
- [11] "섬유 강화 복합 재료의 비파괴 시험기법 개발 (III)," 한국기계연구원, 보고서 번호 : UCN141-1163-C, (1988)
- [12] 권오양, 윤동진, 이해룡 "복합재료 시편의 비파괴 시험/평가," 한국표준과학연구원, (1994)
- [13] 송성진, 김호철 "복합재 연소관 품질의 비파괴 평가 기법 연구," 한국과학기술원, (1996)
- [14] "F/W FRP 압력 용기의 시험 평가 기술 개발," 한국기계연구원, 보고서번호 : UCN554-1998-C, (1994)