

## 음향방출을 이용한 복합재 압력용기의 건전성 평가

이 상 호,\* 최 용 규\*

### The Structural Integrity Evaluation of Composite Pressure Vessel Using Acoustic Emission

Sang-Ho Rhee\* and Yong-Gyu Choi\*

#### ABSTRACT

During hydroproof test of composite pressure vessel, acoustic emission signal was measured and analyzed to evaluate structural integrity of composite motor case. When pressure was held for 1 min. at constant pressure from low pressure level to high pressure level, the pattern of hit rate of good composite pressure vessel is increased with higher value than that of bad composite pressure vessel.

This report also presents detection possibility of burst location approximately in the range of 25~36% of burst pressure using energy rate. In case that it is difficult to detect burst location of composite motor case, it is possible to detect burst location, i.e. structurally weak location of composite pressure vessel with applying same pressure lower than maximum expected operating pressure(MEOP) repeatedly.

#### 초 록

본 연구에서는 음향방출법을 활용한 복합재 연소관의 구조적 건전성 평가 방법을 개발하기 위하여 표준 평가용 시험 시편의 수압 시험 중, 압력용기로부터 방출되는 음향방출 신호를 측정함으로써 시편이 파괴되기 전, 대략적인 시편의 파열 위치 예측 및 일정 압력 유지 상태에서 hit rate(hit/sec) 양상에 의한 시편의 건전성 평가 방법을 제시하였다. 데이터 분석 기법의 향상을 위하여 음향방출 데이터를 시간 및 센서별로 분류하는 프로그램을 개발하였다. 수압 시험을 낮은 압력 단계부터 높은 압력 단계까지 일정 압력 유지 상태에서 발생한 hit 수와 1분간 유지한 후, 발생하는 hit rate의 값의 크고 작음이 복합재 압력 용기의 결합수의 증감으로 나타났으며, 이로부터 복합재 압력 용기의 파열 압력과의 상관 관계 및 건전성을 예측할 수 있었다. 복합재 압력 용기의 파열 위치는 energy rate(energy/sec) 측정값을 분석하여 예측하였으며, 시편 파열 압력의 25~36%에서 가능하였다.

\* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

## 1. 서 론

음향방출(acoustic emission; AE)은 1960년대 초기 로켓 모터 케이스용 복합재 연소관에 최초로 이용된 이후<sup>(1,2)</sup> 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.<sup>(3,4)</sup> 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.<sup>(5,6)</sup>

필라멘트 와인딩(filament winding)한 복합재 연소관은 재래식 금속재 연소관에 비해 무게가 40~60% 정도로 가볍고, 우수한 무게강도비를 갖는 장점으로 활용 범위가 급격히 증가되고 있으며 연구도 활발히 진행 중이다. 따라서 복합재 연소관의 사용은 향후 꾸준히 증가할 것으로 예상되며, 추진 기관 품질 보증 측면에서 비파괴 평가 방법의 정립이 절실한 실정이다. 복합재료 구조 요소의 기계적 특성은 이론적 예측이 매우 어렵고, 복합재료 고유의 불균질성 및 필라멘트 와인딩과 polymer curing으로부터 발생하는 공정등의 원인으로 인해 검사 결과의 편차도 상당히 크며, 표본 검사 적용의 신뢰도가 낮아 효과적인 비파괴 시험 기법의 개발이 요구되고 있다.<sup>(7)</sup>

금속재와 복합재 압력 용기의 품질 보증은 수압 보증 시험(hydroproof test)을 통하여 실시하고 있다. 수압 보증 시험은 압력 용기에 물을 채우고, 최대 예상 사용 압력(maximum expected operating pressure; MEOP)의 0.9~1.1배의 압력에 해당하는 보증 압력(proof pressure)까지 1회 가압하는 시험으로서, 금속재 연소관의 경우 추진체를 충전하기 전에 구조적 건전성(structural integrity)을 보증하는데 성공적이었으나, 복합재 연소관에 있어서는 수압 보증 시험을 통과한 연소관에 다시 한번 가압해 본 경우, 어떤 연소관은 보증 압력에 못 미치는 낮은 압력에서 파손되는 경우가 종종

발생하였다. 이는 수압 시험 자체가 복합재 연소관에 이미 치명적인 손상을 초래하는 것으로 규명되고 있으므로, 복합재 연소관인 경우 수압 시험을 통과한 연소관이라도 모두 구조적으로 건전하다고는 판단할 수 없다고 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

국내에서는 표준 시험용 평가 시편(standard test evaluation bottle; STEB)에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 복합재 연소관에 대한 비파괴 시험 및 평가에 관한 연구<sup>(9)</sup>와 수압 시험 중 손상 진전에 대한 대략적인 위치 표정 및 충격 손상에 대한 연구<sup>(10,11)</sup>가 있었으나, 시편의 부족으로 인하여 실제에 적용할 만한 신뢰성 있는 결과와 연소관의 구조적 건전성을 평가할 수 있는 파라미터(parameter)에 대한 연구 결과는 없었다.

본 연구에서는 복합재 연소관에 적용 가능한 비파괴 시험 기법 정립을 목표로, 음향방출법을 활용한 연소관의 구조적 건전성 평가 방법을 개발하기 위하여 STEB 시편의 수압 시험 중 측정된 음향방출 데이터를 분석함으로써 시편이 파괴되기 전, 대략적인 시편의 파열 위치 및 일정 압력 유지 상태에서 hit rate 양상에 의한 건전성 평가 방법을 제시하였으며, 이는 향후 복합재 연소관의 구조적 건전성을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술의 하나로 사용될 수 있다.

## 2. 이 론

음향방출은 고체 내부에 국부적으로 형성된 변형 에너지(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 일반적으로 Fig. 1과 같이 파의 형태로 방출되는데, 이러한 파를 검출함으로써 재료 내부에서의 변화를 감지하여 파괴를 예지하려는 기법이 음향방출이다. 음향방출의 발생 원인으로는 고체 내에서의 전위(dislocation)의 이동, 미소 균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 것으로 알려져 있는데, 섬유 강

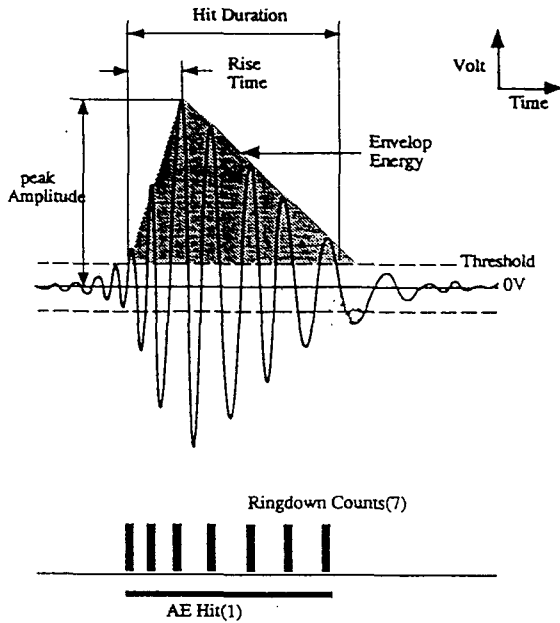


Fig. 1. Acoustic emission waveform parameter

화 복합재료의 경우에는 전위에 의한 발생은 배제되는 대신에 기지 균열(matrix cracking), 층간 분리(delamination) 및 강화 섬유 파단(fiber breakage) 등이 대표적인 발생 원인으로 알려져 있다.

복합재 연소관의 수압 시험 중에 발생하는 수많은 음향방출 사건수(hit)를 하나하나 분석하여

처리한다는 것은 많은 시간과 컴퓨터의 메모리를 소모하게 되므로, 파형의 특징을 나타내는 파라미터만을 추출하여 시험 분석 데이터로 이용하는 것이 일반적이다. 대표적인 음향방출 파라미터는 진폭(amplitude), 오름 시간(rise time), 감쇄 시간(decay time), 진동 횟수(ringdown count), 지속 시간(duration), 에너지(energy), 사건 발생수(hit), 임계 전압값(threshold)으로 이를 측정하여 데이터로서 기록한다. 측정된 이러한 음향방출 파라미터들은 측정 장비에 의해 신호 처리된 후, 컴퓨터 프로그램에 의해 자료 처리되어 하나의 데이터 파일(file)로서 저장된다. 저장된 파일은 필요에 따라 다양한 그래프로서 모니터 또는 프린터를 통해 출력 가능하며, 음향방출 신호의 분석은 이러한 그래프를 통하여 이루어지는 것이 일반적이다.

### 3. 시험 방법

#### 3.1 장비 구성

수압 보증 시험은 연소관을 실제 연소 중에 받는 압력을 모사하기 위해 물을 매체로 압력을 해당 사용 압력까지 가하는 방법이 주로 이용되는데, 본 시험에서는 복합재 시편에 수압을 가하기 위한 수압 펌프(hydraulic pump or pressurizer), 수압 펌프를 작동시키기 위해 공압을 공급하는 공기 압

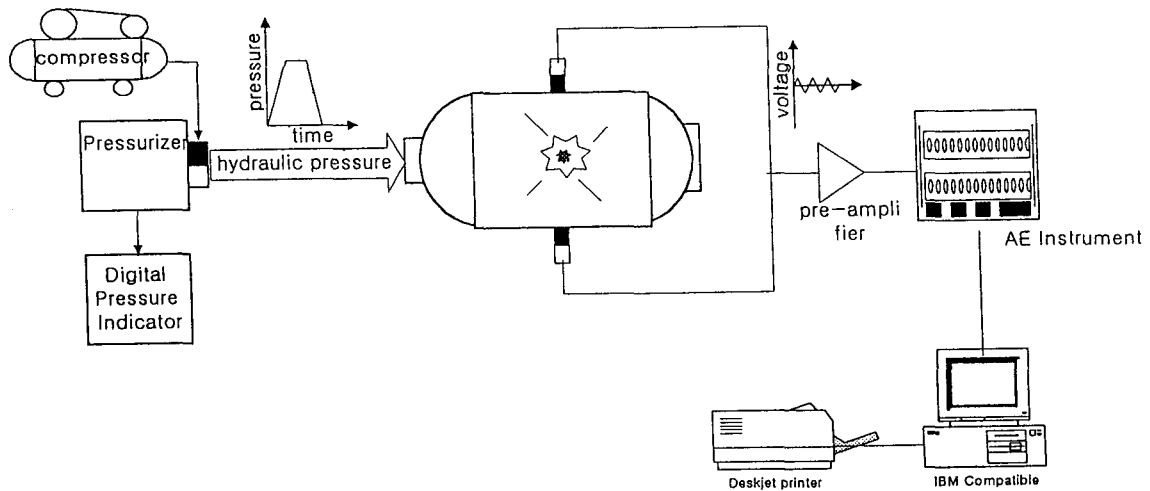


Fig. 2. Hydroproof test system configuration for STEB.

축기(air compressor), 시편에 가해진 압력을 표시하고, 음향방출 측정 장비에 외부 입력 파라미터로서 아날로그 전압(analog voltage)값을 전달하는 디지털 압력 지시계(digital pressure indicator) 및 음향방출 측정 장비로 구성되어 있으며, 수압 시험 중 음향방출 데이터를 측정하기 위한 시험 장치 구성도는 Fig. 2에서 나타내었다. 수압 펌프의 가압 속도 조절을 위해 보조 장치인 공압 조절기(air regulator)를 사용하였다. 시험시 필요한 load-hold-unload의 가압 사이클을 구현할 수 있도록 가압 속도 조절을 위한 수동식 공압 조절기와 일정한 압력에서 유지하기 위한 조절장치를 갖추고 있다. 압력지시계에서 출력되는 아날로그 전압 신호를 Physical Acoustics Corporation (PAC)사의 SPARTAN 2000 음향방출 측정 장비에 파라미터로 입력시켜 분석에 사용하였다. 사용한 음향방출 센서는 공진형 센서인 R15(공진 주파수 150kHz)를 사용하였고, 전치 증폭기(pre-

amplifier)는 PAC사의 1220A(band pass filter 100~300kHz)를 사용하였다.<sup>(12,13,14)</sup> 음향방출 센서에서 검출된 신호는 40dB로 증폭하였고, 주 처리 장치인 SPARTAN 2000에서는 20dB로 증폭하였으며, 임계전압값은 50dB로 설정하였다.

### 3.2 시편 제원

시험에 사용된 복합재 시편은 Table 1에서 보여 주는 바와 같이 모두 6조로서 예상 파열 압력이 1,400psi인 A-형 시편 3조와 예상 파열 압력이 2,800psi로 제작된 B-형 시편 3조에 대한 시험 데이터를 이용하였다.

수압 시험 중, 발생한 신호를 수집하기 위해서 A-형 시편에서는 9개의 공진형 음향방출 센서를 rectangular method로 설치하였고, B-형 시편에서는 6개를 Fig. 3와 같이 triangular method로 설치하였다. 복합재 시편과 음향방출 센서사이의 음향 정합(acoustic impedance)를 향상시키기 위

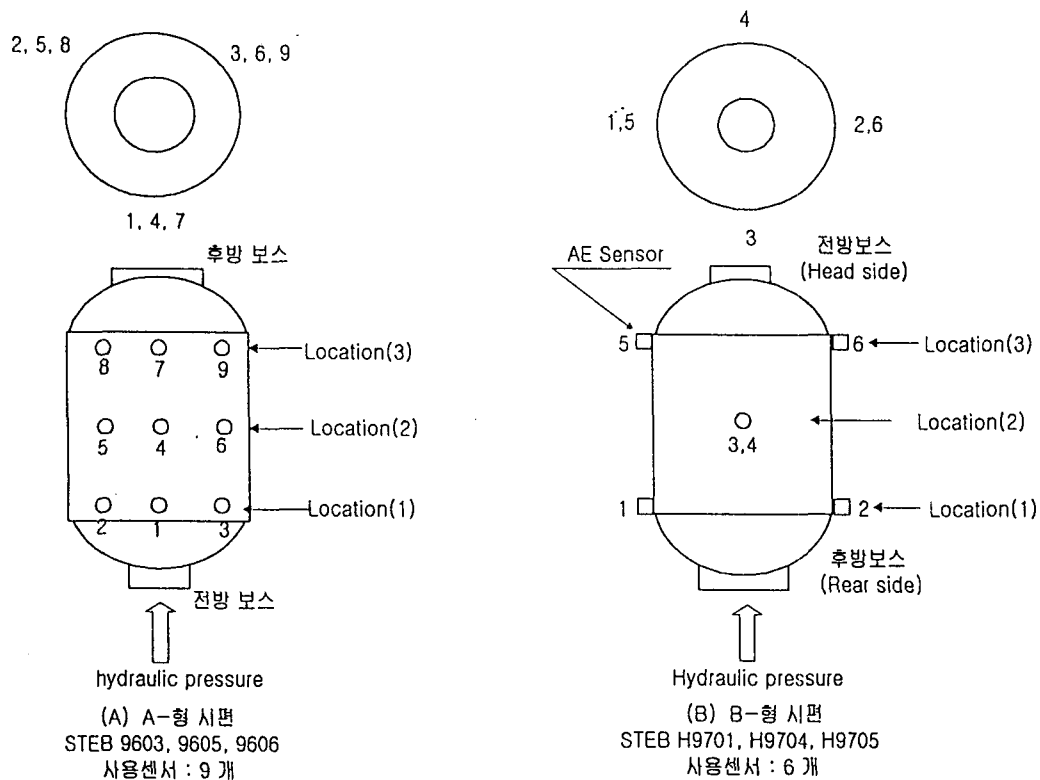


Fig. 3. Acoustic emission sensor configuration for hydroproof test.

Table 1. Test specimen

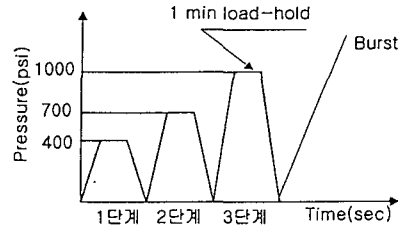
시편 구분	시편번호	재질	적층순서	예상파열력
A-형 시편	9603	T800/Epoxy	[[ $(\pm 30)_3 / (90)_6$ ]] <sub>T</sub>	1,400psi
	9605			
	9606			
B-형 시편	H9701	T800/Epoxy	[[ $(\pm 18)_2 / (90)_6$ ]] <sub>T</sub>	2,800psi
	H9704			
	H9705			

해서 진공 그리스(vacuum grease)를 사용하였으며, 시험 중 센서가 시편으로부터 떨어지지 않도록 테이프를 이용하여 부착시켰다.

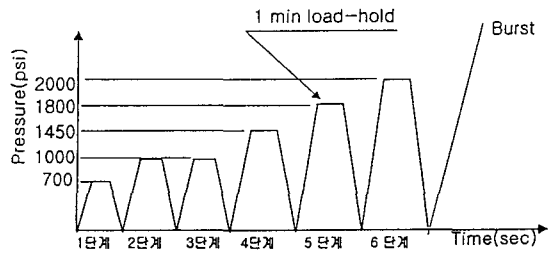
3.3 가압 선도

시편에 가한 압력은 Fig. 4에서 보여 주는 것과 같이 다단계로 압력을 높이면서 가압하였다. 세부적으로 각 압력단계를 살펴 보면, 가압 단계 (loading), 일정 압력 유지 단계(load-hold), 감압 단계(unloading) 3단계로 나눌 수 있다.

A-형 시편은 예상 파열 압력 1,400psi의 30, 50, 70%(400-700-1,000psi)인 3단계 압력을 순차적으로 가하도록 수압 시험을 실시하였고, B-형 시편은 A-형 시편과 달리 각 압력 단계별로 생되는 hit rate의 차이 및 파열 압력에 이르기까지의 징후를 알아보기 위해 700-1, 000-1, 000-1, 450-1, 800-2,000psi의 6단계로 나누어 가압하였다. A-형 시편은 1,000psi 수압 시험 후에, B-형 시편은 2,000psi 수압 시험 후에 센서를 제거하고, 파열 시험을 실시하였다.



A-형 시편(9603, 9605, 9606)



B-형 시편(H9701, H9704, H9705)

Fig. 4. Pressure loading cycle

4. 결과 및 고찰

4.1. 음향방출 파라미터 분류를 위한 프로그램 개발

방대한 양의 음향방출 데이터를 전용 프로그램에 의해 분석하는 것은 많은 시간을 소비하게 되므로 효율적인 데이터 분석을 위하여 binary file로 저장되어 있는 음향방출 데이터를 ASCII 전환 프로그램(asc.exe)에 의해 ASCII file로 전환하였고, FORTRAN 언어를 활용하여 음향방출 데이터를 초 단위로 시간에 따라 분류하도록 파라미터 분류 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 실행

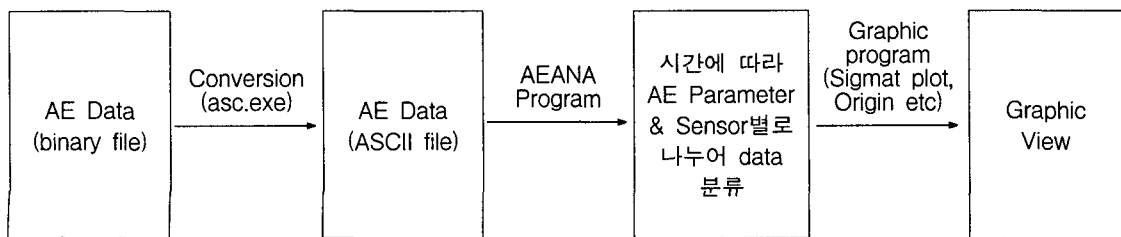


Fig. 5. Acoustic emission data analysis process.

하여 얻은 데이터는 그래프 전용 프로그램을 이용하여 시간에 따라 각 파라미터별, 각 센서별로 나누어 분석하였으며, Fig. 5에서는 효율적인 데이터 분석을 위하여 개발된 파라미터 분류 프로그램을 이용한 데이터 분석 과정을 나타내고 있다.

#### 4.2. 복합재 시편의 건전성 평가 모델

항공용으로 사용되는 복합재 연소관의 비파괴 검사 방법으로서 음향방출법을 이용하기 위하여는 시험 압력에 따라 파열 압력이 서로 다른 시편의 음향방출 신호 특성을 구분하여야 한다. 복합재 연소관의 수압시험 중, 획득한 데이터를 이용하여 파열압력이 정상적인 건전한 시편과 파열압력이 저하되는 불량한 시편과 구분하기 위하여 Fig. 6 과 같은 연소관의 건전성 평가 모델을 구상하였다. 시편의 압력을 일정하게 유지하는 동안 시간이 경과함에 따라 발생하는 hit 수가 건전한 시편

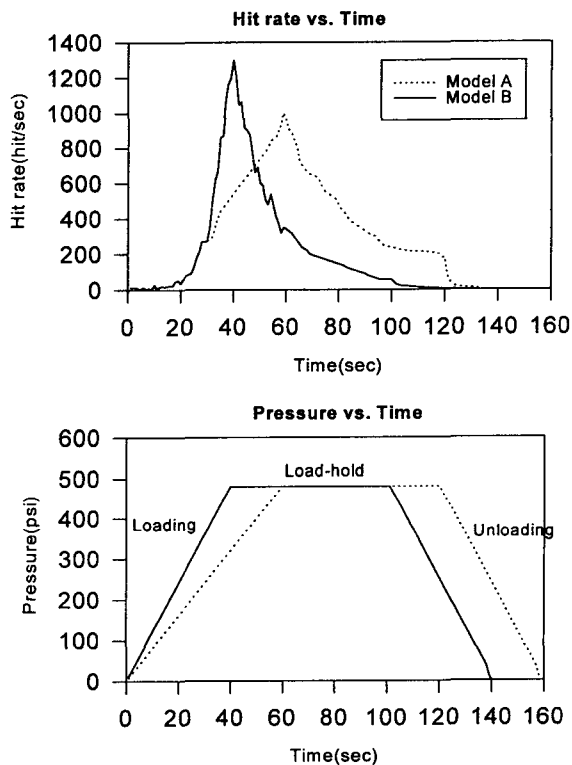


Fig. 6. The structural integrity evaluation model of composite motor case using acoustic emission.

은 건전하지 못한 시편에 비하여 발생하는 hit 수가 적을 것이며, hit rate의 양상도 크게 줄어들 것이다. 즉, 일정 압력 유지 상태 초기에 시편에 가해진 가압 속도가 Model A보다 빠른 Model B는 일정 압력 유지 상태 초기에 시편에서 발생하는 hit rate는 Model A보다 대부분 높을 것이다. 그러나, 1분 경과 후, 발생하는 hit rate는 가압 단계에서의 가압 속도에 영향을 받지 않고 시편의 건전성과 상관 관계가 있을 것이다.

이를 확인하기 위하여 Fig. 7에서는 가압 단계에서의 가압속도와 일정 압력 유지 단계에서 1분 경과 후, 발생하는 hit rate를 비교하였다. A-형 시편의 가압 속도 1.6~2.9psi/sec에서 hit rate는 308~510 사이의 값을 나타내고 있으며, B-형 시편의 가압 속도 4.1~15psi/sec에서 0~270 사이의 값을 나타내고 있다. 일정 압력 유지 단계에서 1분 경과 후에 발생하는 hit rate는 A-형 시편과 B-형 시편이 분리되는 현상을 나타내므로, 시편의 건전성과 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 가압 단계에서 가압속도와 1분 유지 후, 발생하는 hit rate와는 관계가 없으며 재료의 특성과 밀접한 관계가 있다고 판단된다. 본 연구에서의 데이터 분석은 각 압력 단계별로 일정 압력 유지 상태에서 발생한 데이터만을 이용하여 분석하였다.

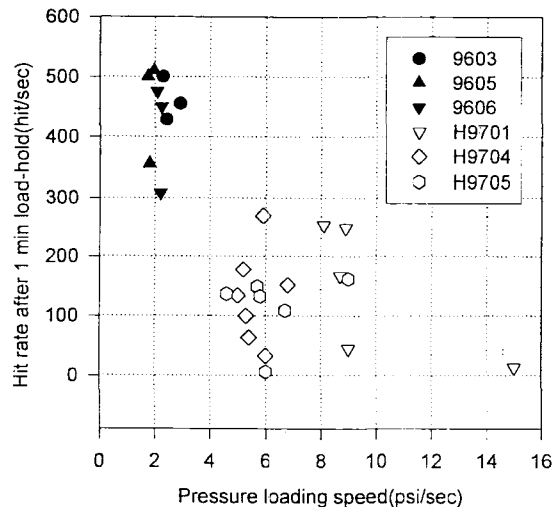


Fig. 7. Correlation of hit rate after 1 min load-hold with pressure loading speed.

4.3. 일정 압력 유지 단계에서 1분간 발생된 총 hit 수에 의한 분석

Fig. 8은 음향방출 센서 수에 관계 없이 시편에 가한 시험 압력과 해당 압력에서 1분간 일정하게 유지할 때 발생된 hit 수와 관계를 살펴보았다.

A-형 시편은 400, 700, 1,000psi에서 발생된 hit 수가 30,000개 이상이며, B-형 시편은 각 가압 단계별로 700psi 단계에서는 0~8,000개 사이에 있고, 1,000psi에서는 10,000~17,000개 사이에, MEOP 압력인 1,450psi에서는 13,000~20,000개 사이에 있다. 1,800~2,500psi에서는 주로 17,000~28,000개 사이에 있다. A-형과 B-형시편을 400~1,450psi범위에서 수압 시험으로 1분간 일정 압력 유지 중 발생한 최대 hit 수에 대해 그 건전성을 평가한 결과, 20,000개 이하이면 건전하였고, 그 이상이면 건전하지 못하였다.

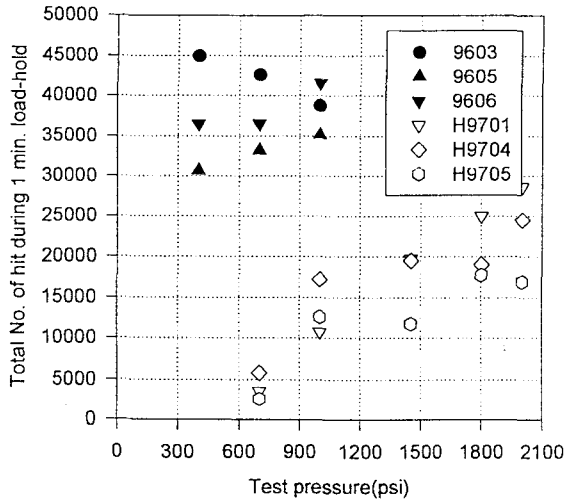


Fig. 8. Correlation of total No. of hit during 1 min load-hold with test pressure.

4.4. 일정 압력 유지 단계(700psi, 1,000psi)동안에 발생된 음향방출 센서당 hit수에 의한 분석

Fig. 9는 Fig. 3과 같이 센서가 부착된 시편을 700psi 시험 압력에서 1분간 일정하게 유지하는 동안 발생된 센서당 hit 수를 비교하였다. 가로축은 부착된 센서 번호를 나타내고, 세로축은 1분 동안에 발생된 hit 수를 나타냈다. 이 그래프에서

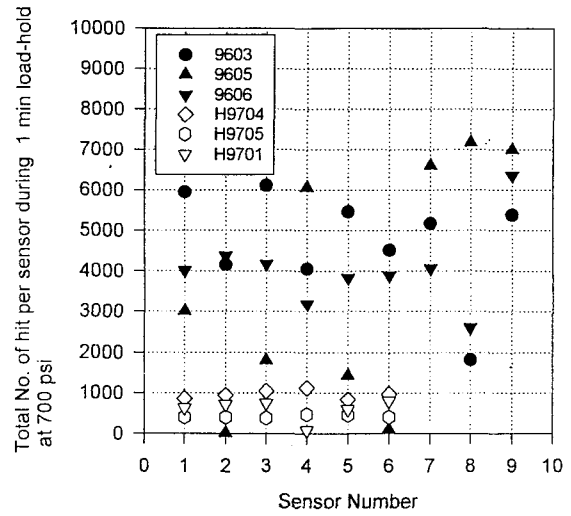


Fig. 9. Total No. of hit per sensor during 1 min load-hold at 700psi.

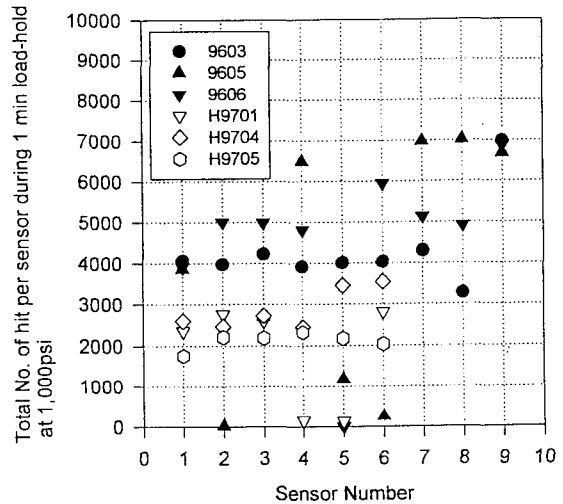


Fig. 10. Total No. of hit per sensor during 1 min load-hold at 1,000psi.

는 A-형 시편의 hit 수가 B-형 시편보다 대부분 높은 값으로 위치되어 있다. A-형 시편 9605시편의 경우 2, 6번의 센서의 값이 0으로, 3, 5번 센서의 값은 2,000개 이하로 위치해 있는데, 이는 시험 도중 센서가 시편으로부터 이탈된 것으로 보여진다. B-형 시편에서는 대부분 총 hit 수가 1,000이하에서 위치하고 있으며, 활성도(activity)가 높은

구역이 나타나지 않는다.

Fig. 10은 1,000psi 시험 압력에서 1분간 일정하게 유지하는 동안 발생된 센서당 hit 수를 비교하였다. 이 그래프에서도 A-형 시편의 hit 수가 B-형 시편보다 대부분 높은 값으로 나타났다. B-형 시편은 H9701만이 1, 2, 3번 센서의 활성도가 높았으며, 결국 이 부근이 파열되었다. 다른 시편에서는 활성도와 파열 위치와의 상관 관계를 알 수 없었다.

#### 4.5. 일정 압력 유지 단계에서 1분 경과 후 발생된 hit rate에 의한 분석

Fig. 11에서는 각 시편별로 수압 시험 중 1분간 압력을 일정한 상태로 유지한 후, 발생하는 hit rate를 이용하여 분석하였다. 시편의 압력이 일정 압력에서 유지되면 hit rate는 시간에 따라 감소하게 되는데, 건전한 시편은 큰 값으로 감소되며, 건전하지 못한 시편은 완만하게 감소된다. 수압 시험 중 일정 압력 유지 단계에서 1분간 유지한 후, 발생하는 hit rate를 비교하면, A-형 시편에서는 압력이 증가함에 따라 hit rate는 300~520사이에서 증가하고 있으며, B-형 시편은 가압함에 따라 hit rate가 0~300사이의 값에서 선형적인 관계로 증가함을 알 수 있다. 이 결과에 의해 수압 보증 압력에서 1분간 유지한 후에 발생하는 hit rate는

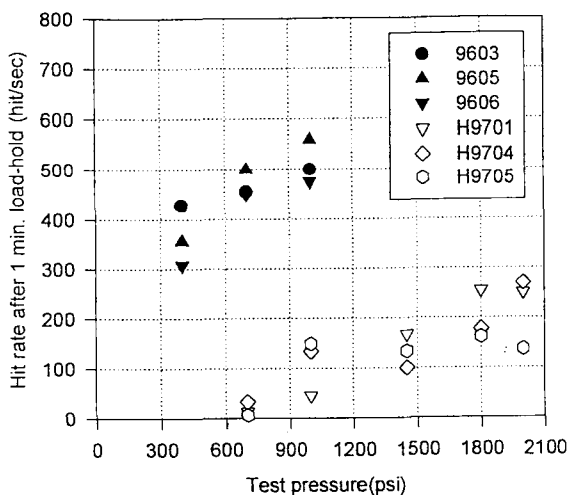


Fig. 11. Correlation of hit rate after 1 min load-hold with test pressure.

건전한 것과 불건전한 시편을 구분하는 기준이 될 수 있다고 판단된다.

#### 4.6. 일정 압력 유지 단계에서 1분 경과 후 센서당 발생된 평균 hit rate에 의한 분석

Fig. 12에서는 각 시편에 따라 수압 시험 압력 별로 나누어 1분간 압력을 일정한 상태로 유지한 후, 발생하는 센서당 평균 hit rate를 나타내었다. 전술한 바와 같이 수압 시험 중 1분간 일정한 압력에서 유지 후, 발생하는 센서당 평균 hit rate가 A-형 시편이 B-형 시편보다 낮은 압력에서 높은 압력까지 높은 값으로 유지하고 있다. A-형 시편의 센서당 평균 hit rate는 33~72hit/sec의 발생률을 나타내고 있으며, B-형 시편의 가압력 700~1,000psi에서는 0~28hit/sec 발생률을 나타내고 있다. B-형 시편의 가압력 1,450~2,000psi 사이에서는 12~45 hit/sec의 발생률을 나타내고 있다.

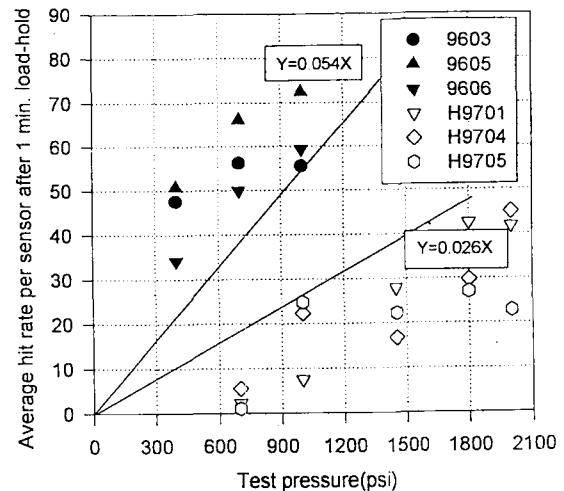


Fig. 12. Correlation of hit rate per sensor after 1 min load-hold with test pressure.

#### 4.7. 시편의 파열 위치 예측

시편의 파열 위치의 예측은 energy rate가 낮은 구역보다 상대적으로 높은 구역이 파열이 되었으므로 이를 이용하여 파열 위치를 예측하였다. 시편의 위치별로 energy rate 차이를 구분하기 어려울 때는 MEOP 이하의 압력인 1,000psi 압력에서 같은 압력을 2회 반복하여 가압함으로써 구조적으



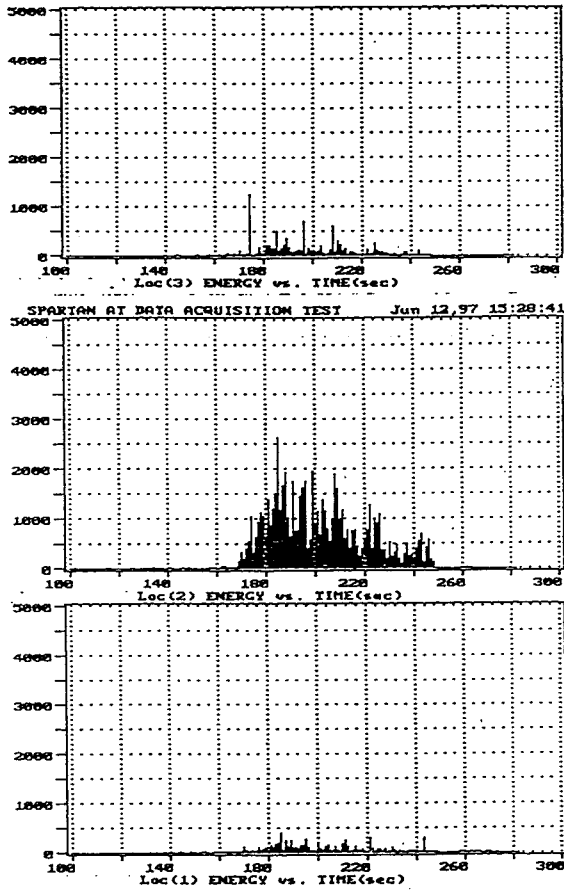


Fig. 13. STEB H9704 energy rate with respect to location at 1,000psi pressure level

로 취약한 부위, 즉 파열 위치를 예측할 수 있었다.

Fig. 13에서는 H9704 시편의 2차 1,000psi 가압 중 측정된 위치별 energy rate을 나타내고 있다. 시편의 전방 보스 부분(head side)이 Loc(3), 중

간 부분이 Loc(2), 후방 보스 부분(rear side)이 Loc(1)으로 나타난다. 파열위치인, 실린더 중간 부위인 Loc(2) 부분의 energy rate 값이 다른 위치보다 높음을 알 수 있다. 이 시편은 파열압력의 35%인 1,000psi에서 파열 위치가 대략 예측되었다. 파열 위치와 energy rate와 상관관계는 다른 A-형 시편 및 B-형 시편에서 동일한 현상으로 나타났다. 시편들의 파열 압력 및 파열 위치는 Table 2에 나타내고 있으며, Fig. 14에서는 대표적으로 H9705 시편의 파열 시험 후 사진을 보여주고 있다. 이 시편은 실린더 중간 부분이 파열되었으며, energy rate로 중간 부위의 파열을 예측할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 복합재 연소관의 음향방출 비파괴 시험에 의한 건전성 평가 기법을 연구하였으며, 복합재 압력 용기의 수압 보증 시험 중, 표면에 부착한 음향방출 센서로부터 발생된 음향방출 신호를 측정/분석함으로써 음향방출 파라미터와 파열 압력 및 파열 위치와의 상관 관계가 있음을 제시하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 음향방출 데이터의 분석에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 음향방출 측정 장비에서 측정된 binary file 데이터를 ASCII file로 전환한 후, 시간 및 센서별로 분류하는 프로그램을 개발하였다.
- 2) STEB 시편 6조의 시험 결과로부터 수압 시험을 낮은 압력 단계부터 높은 압력 단계까지 일정 압력 유지 상태(load-hold)에서 발생

Table 2. Burst location prediction

시편번호	파열압력(psi)	파열 위치 예측(파열압력비)	비 고
9603	1,164	약 34%에서 예측 가능	후방 보스 이탈
9605	1,590	약 25%에서 예측 가능	후방 보스 이탈
9606	1,320	약 30%에서 예측 가능	후방 보스 이탈
H9701	2,850	약 35%에서 예측 가능	후방 보스와 실린더 중간 부위 파열
H9704	2,850	약 35%에서 예측 가능	실린더 중간 부위 파열
H9705	2,780	약 36%에서 예측 가능	실린더 중간 부위 파열

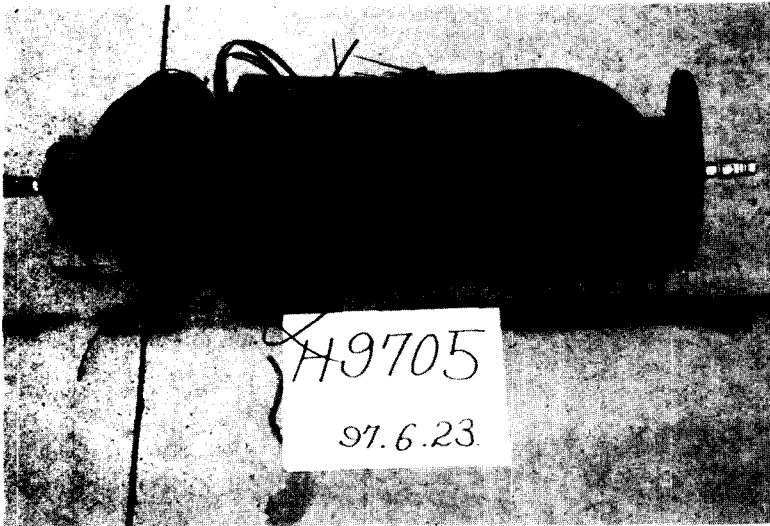


Fig. 14.  
Photograph of STEB H9705  
after burst test.

- 한 hit 수와 1분간 유지한 후 발생하는 hit rate의 값의 크고 작음이 복합재 압력 용기의 결함수의 증감으로 나타났으며, 이로부터 복합재 압력 용기의 파열 압력과 상관 관계 및 건전성을 예측할 수 있었다.
- 3) 일정 압력 유지 단계(700, 1,000psi)에서 측정된 센서당 hit 수로서 건전성의 구분이 가능하였다.
  - 4) 시편의 파열 위치를 energy rate(energy/sec) 측정값을 분석하여 예측하였으며, 파열 압력의 25~36% 압력에서 가능하였다.
  - 5) 위치에 따른 energy rate 차이의 구분이 어려울 경우, MEOP 이하의 압력에서 같은 압력을 2회 반복 가압 시험을 통해 구조적으로 취약한 부위, 즉 파열 위치의 발견 확률과 신뢰도를 높일 수 있었다.
  - 6) 향후 복합재 연소관의 품질 보증 시험에 시험 절차로서 적용하기 위해서는 본 연구에서 분석한 hit rate, energy rate 이외의 count 등, 다른 음향방출 파라미터의 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것이며, 가압과정 및 감압과정에서의 분석이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Ronnie K. Miller and Paul McIntire, "Nondestructive Testing Handbook : Acoustic Emission Testing," 2nd Ed., Vol. 5, 1987, American Society for Nondestructive Testing.
- [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, Jul. 1964, pp.137~139, 178, 180.
- [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, 1985, pp.859~863.
- [6] D. J. McNally, "Inspection of Composite

- Rocket Motor Case Using Acoustic Emission," *Materials Evaluation*, Vol.43, No.6, 1985, pp.728~732.
- [7] "섬유 강화 복합 재료의 비파괴 시험기법 개발 (III)," 한국기계연구원, 보고서 번호:UCN141-1163-C, 1988.
- [8] Eric v. K Hill, "Predicting Burst Pressures in Filament-Wound Composite Pressure Vessels by Using Acoustic Emission Data," *Materials Evaluation*, Dec. 1992, pp. 1439~1445.
- [9] 권오양, 윤동진, 이해룡, "복합재료 시편의 비파괴 시험/평가," 한국표준과학연구원, 1994.
- [10] 김호철, 송성진 "복합재 연소관 품질의 비파괴 평가 기법 연구," 한국과학기술원, 1996.
- [11] "F/W FRP 압력 용기의 시험 평가 기술 개발," 한국기계연구원, 보고서번호:UCN554-1998-C. 1994.
- [12] M. A. Hamstad and T. T. Chiao, "Structural Integrity of Fiber/Epoxy Vessels by Acoustic Emission," *SAMPE Quarterly*, Oct. 1976, pp.31~45.
- [13] M. R. Gorman, "Burst Prediction by Acoustic Emission in Filament Wound Pressure Vessels," *J. of Acoustic Emission*, Vol.9, No.2, 1990, pp.131-139.
- [14] 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, 1996, pp.744-754.