

## 로켓 연소관 조립체의 음향방출 신호해석

### Interpretation of AE Signals from Rocket Motor Case Assembly

이상호\*<sup>†</sup>, 황태경\*, 문순일\*

Sang-Ho Rhee\*<sup>†</sup>, Tae-Kyong Hwang\* and Sun-Il Mun\*

초 록 본 연구에서는 금속재 연소관내부에 단열고무/내열복합재로 구성된 연소관 조립체의 품질평가에 적용 가능한 음향방출 비파괴 시험 평가 기법을 정립하기 위하여 그간 수행되었던 시험결과를 종합하여 실제 생산에 적용가능한 평가 기법을 정립하였다. 유한요소 code를 사용하여 연소관 조립체 구조 해석한 결과를 바탕으로 내열 복합재에 절개선이 있는 연소관 표면의 스트레인값과 절개선이 없는 연소관 표면의 스트레인값을 비교하였다. 해석 결과는 공압시험 중 연소관 표면에 부착된 스트레인값과 음향방출센서로부터 측정된 신호와 비교함으로써 연소관과 단열고무 접착성이 확인되었다. 음향방출법을 이용하여 금속재 연소관과 단열고무와의 접착성을 평가하는 방법으로서 실제 생산과정에 적용 가능함을 확인하였다.

**주요용어** : 음향방출, 연소관, 미접착, 복합재료

**Abstract** To establish nondestructive test method for rocket motor assembly with rubber and aerospace composite materials, practicable quality control acoustic emission test method is presented. Structural analysis for motor assembly is performed by ABAQUS code and analysis output result is confirmed by strain gage and AE data. Various specimens were tested and analyzed using strain gage and acoustic emission data. The hit rate of acoustic emission was closely related with case/rubber debonding. This report also describes practicable acoustic emission nondestructive method for evaluating motor case assembly quality assurance in the industrial field.

**Keywords:** acoustic emission, rocket motor case, debonding, composite material

#### 1. 서 론

음향방출(acoustic emission; AE)은 1960년대 초기 로켓 모터 케이스용 복합재 연소관에 최초로 이용된 이후[1] 발전을 거듭하여 1980년대 초기에는 산업용 복합재 압력 용기의 음향방출법이 Society of Plastic Industry(SPI)의 음향방출 분과 위원회에 의해 추천되었고, 이 방법이 American Society of Testing Materials(ASM), American Society of Mechanical Engineers(ASME)에 의해

받아들여져 규격화되었다[2,3]. 1985년에는 선진국의 일부 항공 관련 회사에 의해 복합재 연소관에 적용 가능한 음향방출 시험 절차가 제시된 바 있으나, 공인기관에 의해 표준화 되거나 규격서로 제정된 것은 아직 없다.

국내에서는 복합재료 등에서 발생하는 음향방출 신호를 측정하여 건전성 평가에 관한 연구 등 많은 연구가 있었으나, 시편의 부족 등으로 인하여 시험 기법의 정립은 아직 만족할 만한 수준에 미치지 않는 상태에 있다

국내에서는 섬유강화복합재료 인장시험과 STEB (standard test evaluation bottle; 표준시험용 시편) 시편의 손상평가 및 위치표정 등의 연구가 있었으나, 시편의 부족으로 인하여 만족스런 결과는 없는 실정이다. 실험실 수준의 기초연구에 머무르고 있으며, 음향방출법을 실제 구조물에 적용함으로써 품질보증 분야, 및 구조시험 등의 활용은 거의 없는 실정이다[4-8].

본 연구에서 사용한 연소관은 실제 연소시험중에 사용하는 연소관으로서 금속재 연소관과 단열고무/내열복합재로 구성된 연소관 조립체의 품질평가에 적용할 수 있는 비파괴 시험 기법 정립을 목표로 시험개발중에 수행되었던 시험결과를 바탕으로 평가기법을 기술하였다. 연소관은 실제 연소시험중에 추진제에서 발생하는 고온의 연소 가스가 분출되는데, 이때 연소관과 단열고무와의 접착이 완전해야만 정상적으로 작동된다. 만일, 단열고무와의 미접착(debonding)이 발생한 경우, 고온의 연소 가스는 연소관과 단열고무와의 사이로 침투하면서 연소관의 강도를 저하시켜 종국에는 연소관의 파괴로 이어지게 된다. 따라서, 단열고무와의 접착성은 연소관의 품질 평가시 매우 중요한 관건이 된다. 본고에서는 연소관과 단열고무와의 접착성을 판단하는 비파괴 평가기법에 관하여 기술하였다.

본 보고에서는 금속재 연소관과 단열고무/내열복합재로 구성된 연소관 조립체의 공압시험중 연소관 표면에 설치된 음향방출 신호를 측정/분석하여 연소관과 고무/내열재의 이상유무를 판단하기 위한 비파괴 시험법으로서 음향방출법을 활용하였으며, 분석방법 및 평가방법을 제시하였다. 이를 바탕으로 실제 양산되는 추진기관에 적용가능한 품질 평가방법으로서 제시하고자 한다.

2. 이론

음향방출은 고체 내부에 급부적으로 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 Fig. 1과 같은 형태로 방출되는데, 섬유 강화 복합재료의 경우, 음향방출의 발생 원인은 기지 균열(matrix cracking),

층간분리(delamination) 및 강화 섬유의 파단(fiber breakage) 등으로 알려져 있다.

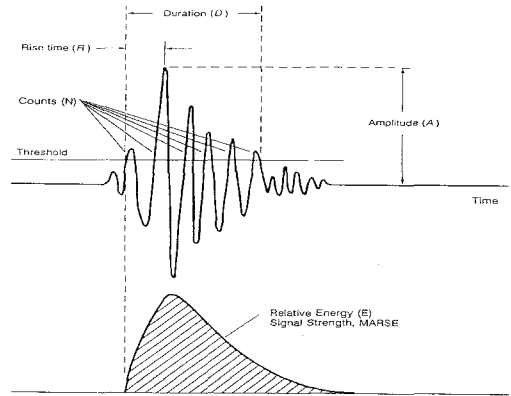


Fig. 1 Acoustic emission waveform parameter

3. 유한요소 구조해석

3.1. 연소관 조립체 구조해석

연소관 조립체는 금속재 연소관과 내부에 단열고무 및 내열 복합재로 구성되어 있다. 유한 요소 구조해석을 위해 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 이때 내열 복합재는 연소관과의 조립의 용이성을 위해 그림과 같이 축 방향으로 절개되어 삽입된다. 내압 변형 거동 해석을 위해 ABAQUS STANDARD를 이용하여 단열 고무와 연소관과의 접착 유무를 해석 변수로 한 구조 응력 해석을 수행하였다. 조립체의 원통부를 Plan strain요소로 모델링하였고, 각 소재의 재료 물성은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Material Property

재 료	물성값	비 고
연소관(Steel)	$E_{steel}=18631.0, \nu=0.3$	
단열 고무	$\alpha_1=4.282, \alpha_2=-2.583, \alpha_3=0.5918, \mu_1=1.999, \mu_2=4.001, \mu_3=-1.999$	(3차 Ogden)
FRP 1 (1K C/P)	$E_x=990, E_y=7646, E_z=6625, \nu_{xy}=0.09, \nu_{yz}=0.18, \nu_{xz}=0.09, G_{xy}=400, G_{yz}=400, G_{xz}=800, \epsilon_{fail}=0.66\%$	Unit: kg/mm <sup>2</sup>

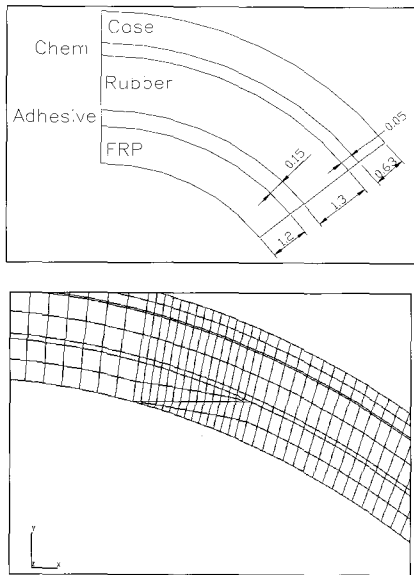


Fig. 2 Cross section of rocket motor assembly and structural analysis modelling

3.2. 완전 접착 (Perfect Bonding)

가장 이상적인 상태로서, 연소관/단열고무/내열 복합재 사이의 접착이 완벽한 경우에 대해 Fig. 3과 같이 내압 거동해석을 수행하였다. Fig. 4에서 보듯

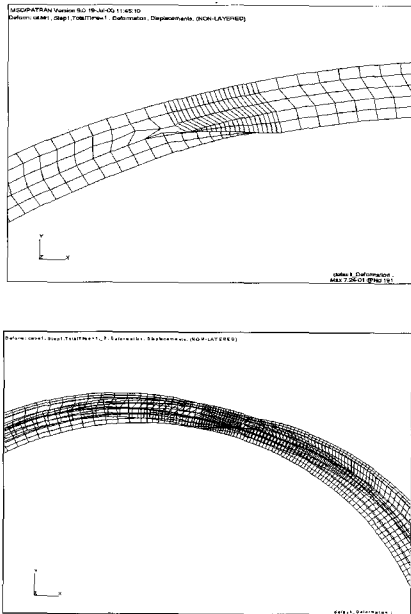


Fig. 3 Deformed behavior in case of perfect bonding (X50)

이 완전 접착일 경우 내압에 의한 변형시 연소관과 내열재가 동시에 내압 하중을 지지하고, 단지 절개부 지점에서만 변형값이 커지게 된다. 이때 절개부 지점의 내열재 변형은 상호 상대변형으로 인해 균열 단립 현상이 발생하여 그림과 같이 미끄럼 변형 형태가 나타난다. Fig. 5, 6는 고무/연소관, 고무/내열재 층의 층간 전단 응력 분포를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 절개부 존재로 인한 내압 변형의 불 균일성으로 인해 이들 각 계면에 층간 전단 응력이 발생한다. 이러한 이유로 비록 각 계면의 접착이 완벽하더라도 내열재의 절개면 존재로 인해, 내압 원주 방향 변형의 불 균일 현상이 발생하여 각 계면에 미 접착을 유도하는 층간 전단 변형 현상이 나타나게 된다.

이러한 이유로 각 계면의 접착이 완벽한 경우, 내압 증가에 따라 내열 복합재의 변형도 증가하여 수직 균열 및 섬유 파괴 현상이 발생된다.

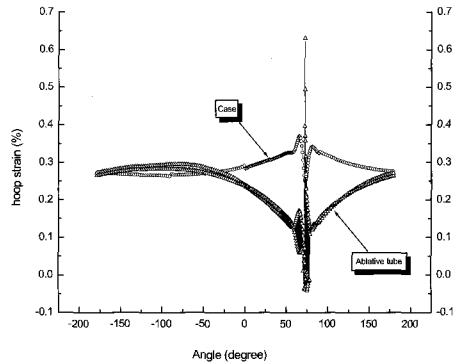


Fig. 4 Hoop strain distribution for steel case and ablative tube in case of perfect bonding

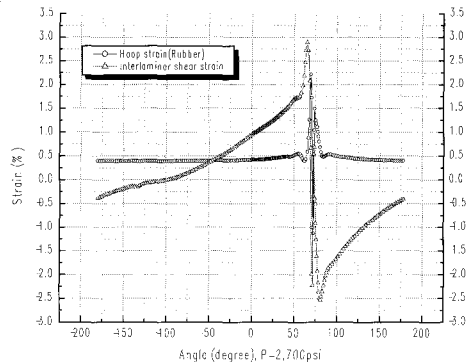


Fig. 5 Distribution of inter-laminar shear strain between steel case and rubber in case of perfect bonding

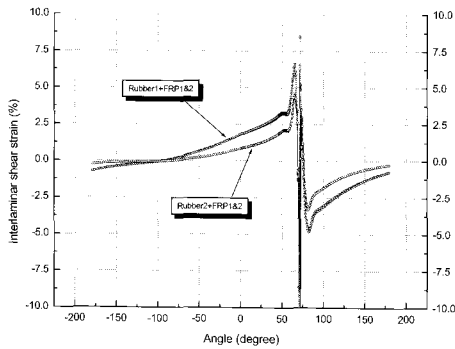


Fig. 6 Distribution of inter-laminar shear strain between ablative tube and rubber in case of perfect bonding

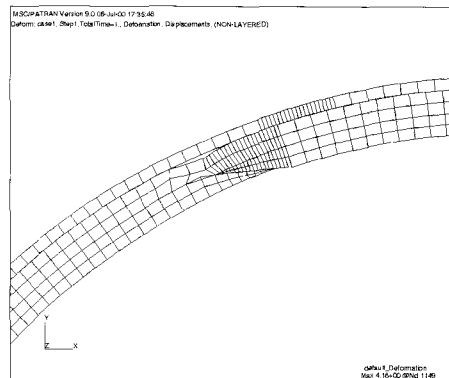


Fig. 7 Deformed behavior in case of contact condition

### 3.3. 완전 미접착(Perfect Debonding)

Fig. 7은 연소관이 완전 미접착인 경우 내압에 의한 변형 양상을 나타내고 있다. Fig. 8에서 보듯이 연소관과 내열재간의 완전 미 접착 현상이 발생하면, 내압 하중에 의해 내열재와 연소관 변형이 상대적으로 발생하여 결국엔 모든 내압 변형이 절개부의 단열 고무에 집중된다. 이러한 이유로 내열재는 구조적으로 보강 효과를 전혀 못함으로서, 연소관의 내압 변형은 내열재가 없는 경우와 동일하게 나타나고 내열재는 절개부 지점 이외에서는 구조적 변형이 발생되지 않는다. 이러한 해석 결과를 근거로 Table 2와 같이 접착 유무에 따른 연소관 조립체의 연소관 외면 변형을 값을 정리하였다. 즉 만약 단열 고무와 연소관간의 접착이 완벽하면 내부 내열재가 내압 변형을 연소관과 분배함으로서 연소관 외면의 원주 방향 변형을 값이 0.27%로 작은 결과를 보이고, 반대로 단열고무와 연소관간의 미 접착이 발생되면 0.43%의 큰 원주 방향 변형을 값을 나타낸다. 절개부 지점은 내열재가 길이 방향으로 절개됨으로 인해 단열 고무와 연소관간의 접착 유무에 상관없이 동일하게 0.43%의 원주 방향 변형 값을 나타낸다. 이러한 이유로 각 계면이 접촉인 경우, 내압 증가에 따라 내열 복합재의 변형 현상이 없게되어 어떠한 구조 파괴 현상도 발생하지 않게된다.

### 4. 음향방출 측정장비구성

연소관 조립체에 가해진 공압력에 의해 발생한 음향방출 신호를 측정하기 위한 장비의 제원은 Table 3

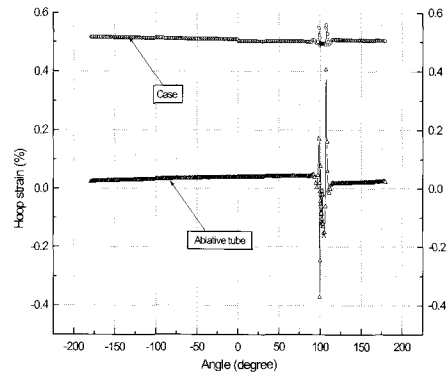


Fig. 8 Hoop strain distribution for steel case and ablative tube in case of contact condition

Table 2 Hoop strain distribution of steel case and ablative tube for the bonding and contact condition

		절개부	미절개부	비고
완전접착	연소관	0.45%	0.27%	- 연소관만의 변형:0.45% - 내열재 S/F=2.5
	내열재	-	0.32%	
미접착	연소관	0.43%	0.43%	- P:2,400 psi
	내열재	-	-	

에 나타냈다. 음향방출신호의 측정과 분석을 위해 사용한 측정 장비는 미국 Physical Acoustics Corporation (PAC)사의 AE-DISP board와 전용 program을 사용하였다. 시편에는 모두 4개의 공진형 음향방출 센서를 Fig. 9와 같이 설치하였다. 연소관 표면과 센서사이의 신호전달을 좋게 하기 위하

여 그리스(grease)를 도포하여 공기층을 제거하였고, 시험 도중 센서가 연소관으로부터 떨어지지 않도록 전열테이프를 이용하여 부착시켰다. 편의상, 이 시험에서 센서번호는 S1, S2, S3, S4로 나타냈다. 연소관의 공압시험을 수행하기 위한 시험장치구성은 Fig. 10와 같이 설치하였다. 공기압축기에 의해 작동되는 pressurizer는 질소가스를 이용하여 연소관에 가압되며, 압력은 디지털 압력지시기에 표시되도록 구성되었다. 연소관에 적용된 압력 profile은 Fig. 11와 같이 load-load hold-reload-load hold 방식을 적용하였다. 압력 profile에 따라 Pressurizer에 의해 가해진 연소관의 압력은 점점 높아지면서, 내부의 내열재는 팽창하고, 연소관과 단열고무와의 접착면에 전단력이 발생한다. 이때 발생된 음향방출 신호는 연소관 표면에 설치된 4개의 센서에 의해 탐지되어 장비에서 측정된다. 시험에서 사용한 음향방출 센서는 공진형 센서로 R15(공진 주파수 150kHz)를 사용하였고, Preampifier는 1220A(band pass filter 100~300kHz)를 사용하였다. 음향방출 센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB로 증폭하였고, 주 처리 장치인 AE-DISP에서는 20dB로 증폭하였으며, Threshold는 40dB(float)로 설정하였다

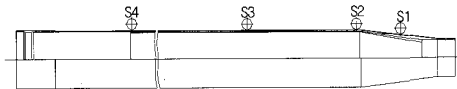


Fig. 9 AE sensor location

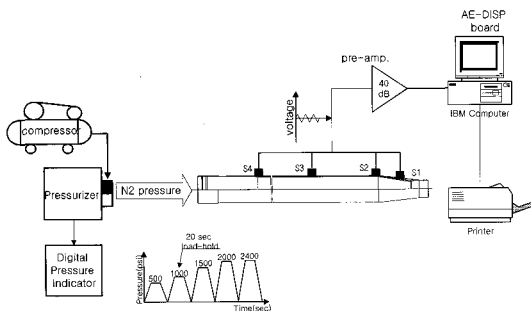


Fig. 10 Acoustic emission test configuration.

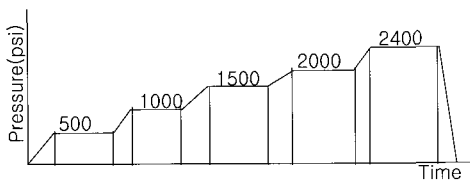


Fig. 11 Pressure diagram

Table 3 Configuration of acoustic emission measurement system

품목	모델번호	제작	비고
음향방출 데이터 획득 장비	AE-DISP	PAC	Acoustic emission data acquisition system
음향방출 센서	R15	PAC	150 kHz resonance type
전치증폭기 (Preamplifier)	1220A	PAC	100~300kHz bandpass filter
Computer	-	국산	Pentium III

### 5. 고 찰

#### 5.1. 연소관 조립체의 음향방출법의 적용

연소관 내열재의 공압시험 중 내열재에서 발생되는 이상현상을 발견하기 위해 연소관 표면에 음향방출 센서를 부착하여 발생하는 신호를 탐지/분석하였다. 음향방출 측정에 사용되는 여러 parameter를 분석한 결과, hit rate(hit/sec)가 공압시험 중에 연소관 조립체의 상태를 가장 잘 나타내 주는 것으로 판단되었다. 실제 공압시험에 발생하는 신호를 측정/분석한 결과 연소관 조립체에서 발생하는 신호를 정상적인 AE신호와 비정상적인 AE신호로 분석할 수 있었으며, 비정상적인 신호에는 I)AE 신호가 전혀 없는 경우와 II)시험 중 case/고무의 분리되는 경우로 나눌 수 있었다. 분석은 hit rate와 연소관 표면에 부착된 스트레인지지. data와 비교/분석하였다.

#### 5.2. 정상적인 조립체의 음향방출 신호(양호한 경우)

Fig. 12, 14, 16에서는 정상적인 연소관 조립체에서 발생하는 음향방출 신호에 대한 것으로 500 psi 압력에서 2400 psi 압력까지 가압중 1000psi 압력 이하에서는 절개선이 분리되는 신호로 판단되며, 이후 압력에서는 특별히 높은 신호가 관찰되지 않는다. Fig. 13, 15, 17에서는 해당하는 연소관 조립체의 변형률 그래프를 표시하였다. 변형률 그래프에서도 초기 압력부터 2400psi 압력까지 절개선에서의 변형률과 절개선 반대편에서의 값에 분명한 차이를 볼 수 있다.

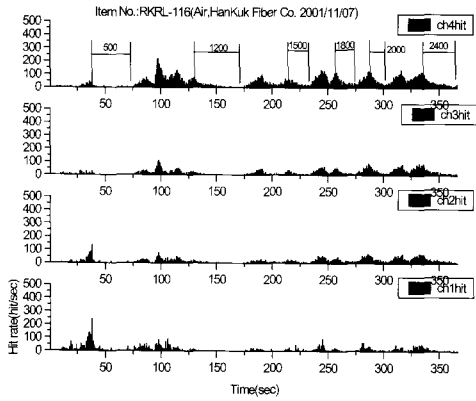


Fig. 12 #116 AE output data

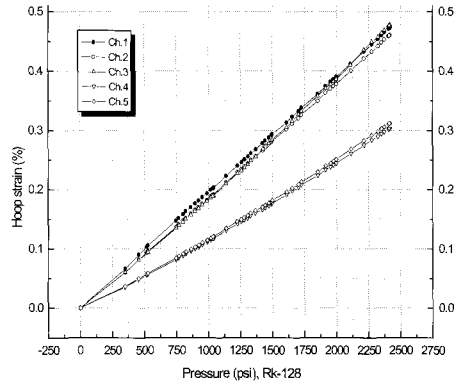


Fig. 15 #128 Strain gage output data

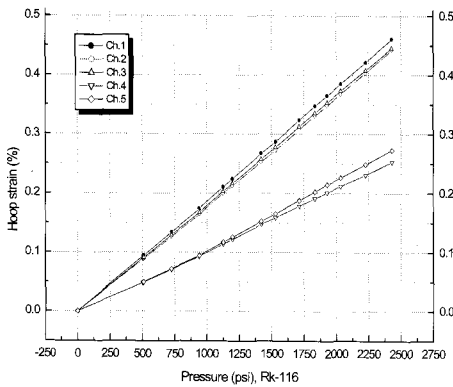


Fig. 13 #116 Strain gage output data

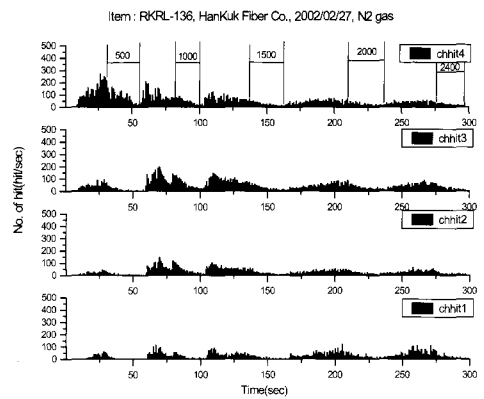


Fig. 16 #136 AE output data

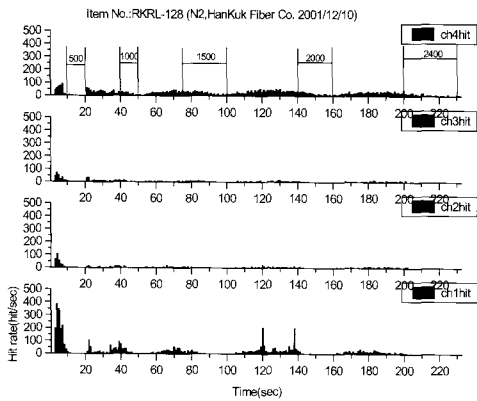


Fig. 14 #128 AE output data

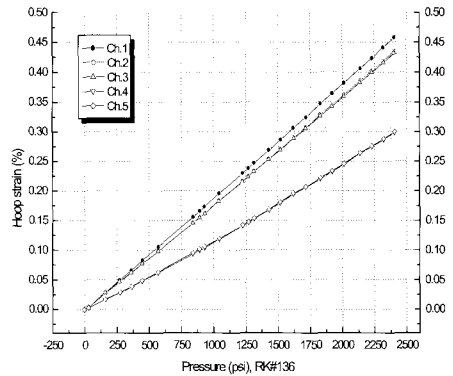


Fig. 17 #136 Strain gage output data

5.3. 비정상적인 조립체의 음향방출 신호(불량한 경우)

비정상적인 음향방출 신호는 다음의 2가지 나누어 분석하였다.

I) AE 신호가 전혀 없는 경우(No AE type):

Fig. 18에서는 500psi 압력 이전에서 절개선이 분리되는 것으로 판단되는 초당 200 hit/sec 이상의 신호가 몇 초간 발생된 후, 더 이상의 신호가 측정되지 않는다. Fig. 19에서 스트레인게이지 데이터를 살펴보면, 초기부터 연소관/고무와의 완전 미접착이었음을 알 수 있다. 즉, 임의의 압력에서 순간 신호가 발생하고, 이후 신호가 전혀 없거나 미약한 신호만 나타나면 각 계면 간의 미 접착이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 20에서는 축소부인 1번센서 신호만 발생되고, 2, 3, 4번의 신호는 나타나지 않는다. Fig. 21의 스트레인게이지 data도 초기부터 연소관과 완전 미접착이었음을 알 수 있다. 즉, 신호가 전혀 없는 경우는 연소관과 단열고무가 완전 미접착이라 판단할 수 있다.

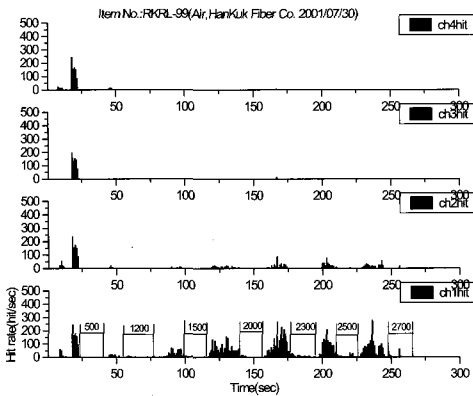


Fig. 18 #99 AE output data

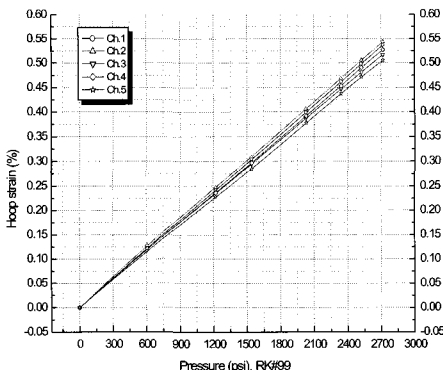


Fig. 19 #99 Strain gage output data

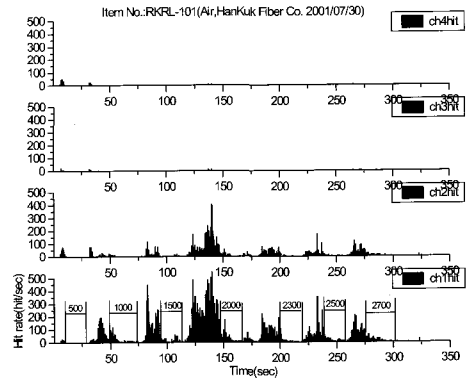


Fig. 20 #101 AE output data

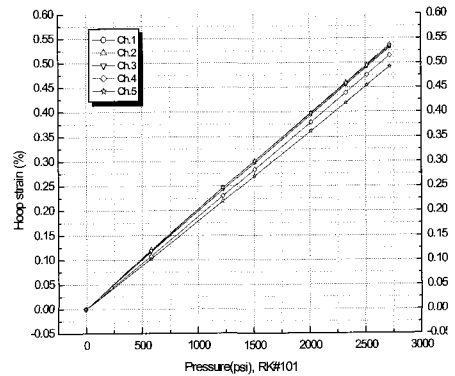


Fig. 21 #101 Strain gage output data

II) 시험 중 case/고무의 분리(Debonding during Test)되는 경우:

Fig. 22에서 보여주는 연소관 조립체는 내열재와 단열고무와 접착성을 파악하기위해 구조시험용으로 제작된 것으로 4000psi 압력까지 실시되었다. 센서 2, 3번에서는 1500psi 압력까지만 신호가 탐지되었고, 센서 4번에서는 2000psi 압력이상에서는 추가적인 신호는 탐지되지 않는다. Fig. 23의 변형률 선도에서도 이미 1000~1500psi 압력사이에서는 연소관/고무와 미접착에 의해 스트레인 값의 기울기가 변화되었음을 알 수 있다. 즉, 연소관에 가압 중 신호가 발생되면서, 진행하다가 갑자기 없는 경우에는 연소관과 단열고무의 미접착이 발생되었다고, 판단할 수 있다.

Fig. 24에서는 2000psi이전 압력까지 비교적 양호한 음향방출신호로 진행하다가, 이후 압력에서는 신호가 전혀 나타나지 않는다. Fig. 25의 변형률은 1750psi 압력을 경계로 기울기가 변하면서, 미절개부의 변형률이 연소관의 변형률과 같아짐을 알 수 있다. 즉, 접착이 양호한 상태로 진행해오다가 1750psi

압력에서 연소관과 단열고무의 전단력으로 인해 미접착이 되었다고 판단할 수 있다.

Fig. 26에서는 1500psi 압력까지 음향방출신호 없이 진행하다가, 압력이 2000psi로 상승되면서, 갑자기 신호가 탐지되었다. Fig. 27의 변형률은 1750psi 압력을 경계로 기울기가 변하면서, 미절개부의 변형

률이 연소관의 변형률과 같아짐을 알 수 있다. 즉, 초기 압력에서는 양호한 접착상태로 진행해오다가 1750psi 압력에서 연소관과 단열고무사이가 미접착이 되었다고 판단할 수 있다

Fig. 28에서는 2000psi 압력까지 음향방출신호 없이 진행하다가, 압력이 2400psi로 상승되면서, 갑자기

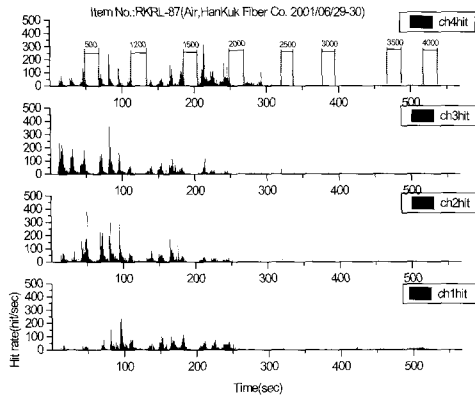


Fig. 22 #87 AE output data

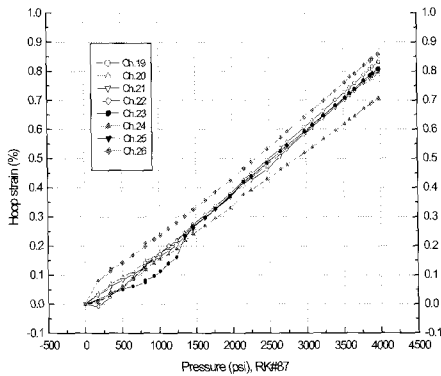


Fig. 23 #87 Strain gage output data

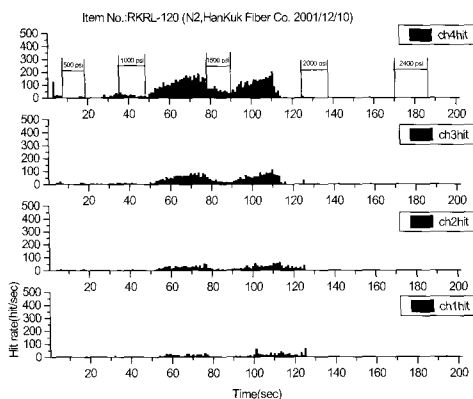


Fig. 24 #120 AE output data

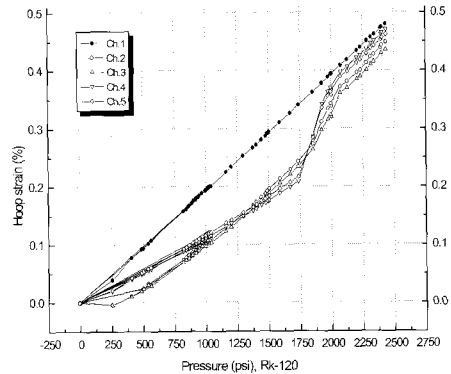


Fig. 25 #120 Strain gage output data

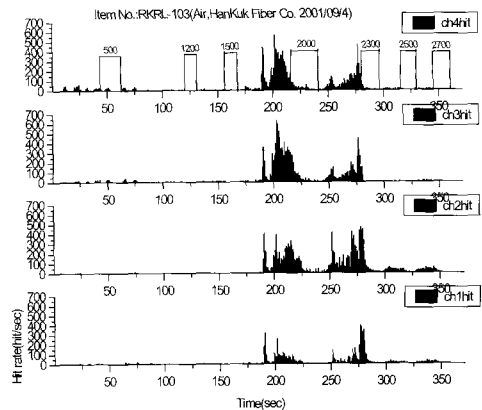


Fig. 26 #103 AE output data

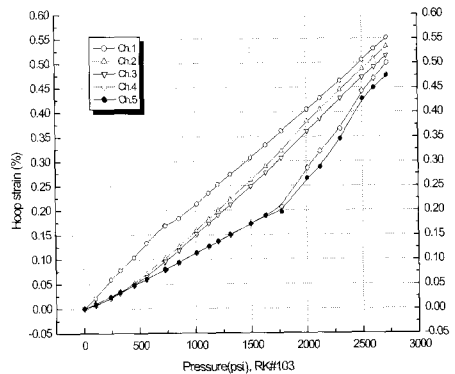


Fig. 27 #103 Strain gage output data



신호가 탐지되었다. Fig. 29의 변형률은 2400psi 압력에서 절개선의 스트레인이 0.27에서 0.32부근을 커짐을 보여준다. 이는 접착이 양호한 상태로 진행해오다가 2400psi 압력에서 연소관과 단열고무 사이에 전단력으로 인해 미접착이 되었다고 판단할 수 있다.

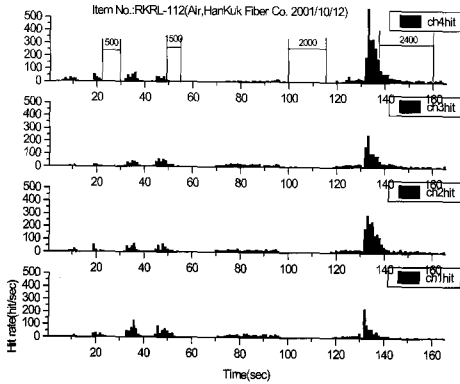


Fig. 28 #112 AE output data

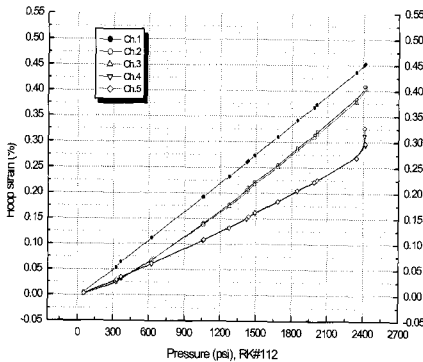


Fig. 29 #112 Strain gage output data

결론적으로, 압력이 진행됨에 따라 음향신호 없이 진행 중, 갑자기 초당 300 hit 수 이상의 음향신호가 발생되거나, 음향신호가 발생되다가, 갑자기 없는 경우에는 미접착 또는 부분미접착이라고 판단되지만, 음향방출 신호를 통하여 연소관/고무와의 미접착을 정량적으로 알 수는 없었다.

6. 결론

본 논문에서는 연소관 조립체의 건전성을 판단하기 위한 비파괴 평가기법의 정립을 위해 로켓 모터의 개발 중에 사용해 왔던 결과들을 종합하여 연소관 조립체의 품질 평가방법을 종합/분석하였다. ABAQUS 유한요소 code를 활용하여 조립체의 구조

해석을 수행하였고, 내열복합재의 절개선이 있는 부분과 없는 부위와의 변형률을 계산하였다. 이를 실제 조립체 공압시험 중 연소관 표면에서 측정된 스트레인값과 음향방출 hit rate를 비교/평가하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 연소관 조립체의 건전성은 정상적인 신호와 비정상적인 신호로 나누어 판단이 가능하였다. 정상적인 신호는 공압 시험 초기부터 작은 신호가 지속적으로 발생하는 경우이며, 비정상적인 신호는 I)AE 신호가 전혀 없는 경우(No AE type)와 II)시험 중 case/고무 또는 고무/내열재의 분리(debonding during test)로 인해 순간적으로 신호가 발생하는 경우로 나눌 수 있다.
- 2) 음향방출법을 통하여 공압 시험 중의 신공 연소관/고무/내열재와의 접착상태를 정성적으로 판단할 수 있었으며, 음향방출법과 초음파(UT), X-ray 비파괴 검사 및 육안검사를 병행하면, 더욱 효과적인 연소관의 품질 판단이 가능한 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] American Society for Nondestructive Testing, "Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing", 2nd Ed, Vol. 5, (1987)
- [2] ASME Code Sec. V Article 11, "Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels"
- [3] ASTM E1067-89(Reapproved 89), "Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin(FRP) Tanks/Vessels"
- [4] 한국기계연구원, "섬유강화 복합재료의 비파괴 시험기법 개발 (III)", 번호 : UCN141-1163-C, (1988)
- [5] 한국기계연구원, "F/W FRP 압력용기의 시험평가 기술 개발", 번호 : UCN554-1998-C, (1994)
- [6] 권오양, 윤동진, 이해룡, "복합재료 시험편의 비파괴 시험/평가", 국방과학연구소(한국표준과학연구원에서 수행), (1994)
- [7] 김호철, 송성진 "복합재 연소관 품질의 비파괴 평가기법 연구", 국방과학연구소(한국과학기술원에서 수행), (1996)
- [8] 이상호, "항공용 복합재료에 대한 음향방출의 활용", 비파괴검사학회지 21권, 3호, pp. 313-318 (2001)