

## 연소관 조립체의 접착 체결부에 대한 비파괴 시험 방법 연구

### A Study on the Nondestructive Test Method for Adhesively Bonded Joint in Motor Case Assembly

황태경\*<sup>†</sup>, 이상호\*, 김동륜\*, 문순일\*

Tae-Kyung Hwang\*<sup>†</sup>, Sang-Ho Rhee\*, Dong-Ryun Kim\* and Soon-Il Moon\*

초 록 본 논문에서는 금속 연소관, 단일 고무 그리고 내열 복합재로 구성된 연소관 조립체의 접착 체결 상태를 확인하기 위해 변형률, 음향방출 신호 그리고 초음파 시험자료를 이용한 비파괴 시험 방법이 제시되었다. 또한 내압 상태에서 연소관 조립체의 각 계면 접착 상태를 정량적으로 평가하기 위해 유한요소 해석이 수행되었다. 공압 시험 중 계속한 변형률 값과 음향방출 신호 상관관계 연구를 통해 연소관 조립체의 접착 건전성 평가가 가능했다. 그리고 연소관 조립체의 여러 접착 계면 중 첫 번째 계면인 연소관과 고무간의 접착은 초음파 방법으로 분류하였다. 이러한 연구를 통해 연소관 조립체의 모든 접착 계면은 1) 초기 완전 미접착, 2) 공압 시험 중 완전 접착 분리, 3) 공압 시험 중 부분 접착 분리, 4) 완전 접착 등 4가지 형태로 분류 및 검출되었다.

**주요어:** 연소관 조립체, 접착 체결부, 유한요소해석, 음향방출, 초음파 시험

**Abstract** In the present paper, the nondestructive test method was suggest to establish the bonding status of a motor case assembly composed of a steel motor case, adiabatic rubber layer and an ablative composite tube with strain data, AE(acoustic emission) signals and UT(ultrasonic test) data. And, finite element analysis was conducted to verify quantitatively the bonding status of motor case assembly under inner pressure loading. The bonding status could be judged whether the bonding status is perfect or contact condition by the data correlation study with AE signals and strain data measured from air pressure test. And, to classify the bonding status of motor case and rubber layer among bonding layers, UT method was also applied. From this study, the bonding status could be classified and detected into fourth types for all bonding layers as follows: (1) initial un-bonding, (2) perfect de-bonding during an air pressure test, (3) partially de-bonding during an air pressure test, and (4) perfect bonding.

**Keywords:** Motor Case Assembly, Adhesive Joint, Finite Element Analysis, Acoustic Emission, Ultrasonic Test

#### 1. 서 론

로켓 추진기관 중 연소관 조립체(motor case assembly)는 추진제(propellant)가 연소되는 공간으로서 연소 중 고온, 고압 유동 가스를 생성시켜 추력(thrust)을 발생시키는 역할을 한다. 그러므로 연소관 조립체의 고온 구조 안전성 평가가 매우 중요

하며, 이를 위해 정밀한 연소관 품질 보증(quality assurance)안이 요구된다. 특히 본 연소관 조립체는 형상의 복잡성과 부품의 다양성으로 결함 발생 확률이 매우 높은 구조를 갖고 있다. Fig. 1에서 보듯이 연소관 조립체는 고강도 금속 연소관(motor case)과 단일 고무(adiabatic rubber) 그리고 내열 복합재(ablative composite)로 구성된다. 이들 각 부품

의 명칭 간략화를 위해 이후에는 연소관, 고무 그리고 복합재로 통일하였다. 이들의 역할은 연소관인 경우 고압 하중을 지지하고, 고무는 내부로부터 발생하는 고열 에너지로 인한 고온으로부터 연소관을 보호해주고, 복합재는 연소 시 발생하는 고온 고속 유동에 대한 내 삭마(ablation) 역할을 한다. 이들 중 일부라도 구조적 파괴나 기능을 상실하면 추진제 연소 중 추진기관의 파괴가 발생한다. 특히 연소관 조립체 제작 공정 특성상 복합재는 두께 방향으로 45도 각도를 갖는 절개 라인(split line)이 길이 방향으로 존재한다. 이러한 절개 라인은 복합재와 연소관간의 조립문제로 적용되며, 내압 하중 시 이 지점을 기점으로 층간전단 응력이 발생하여 복합재 층간, 복합재/고무 그리고 고무/연소관간의 계면 접착 분리 현상이 나타난다. 이러한 각 계면의 미접착(un-bonding) 또는 계면 분리(de-bonding)는 연소 시험 중 고온의 화염이 절개 면을 타고 이동할 수 있는 공간을 허용하게 되어 연소 시험 중 구조물 파괴의 원인이 된다. 이러한 이유로 공압 시험 전, 후에 각 접착 계면의 발생 유무를 비파괴 기법으로 분리해낼 수 있는 품질 보증 기법이 요구되었다. 여러 가지 품질 보증 시험법 중, 음향방출 (acoustic emission) 시험법이 계면 접착 건전성 평가에 효과적이고 [1,2], 또한 복합재 압력 용기의 손상 예측에도 유용함이 제시되고 있다[3-7]. 특히 항공기 구조재로서 사용되는 복합재/금속의 접착 품질 보증을 위해 acousto-ultrasonic 방법이 사용되었다[8]. 그러나 본 연소관 조립체와 같이 여러 재료의 접착 계면을 갖으면서, 많은 수량이 제작/생산되는 실 구조물에 대한 적용 사례가 거의 없는 관계로 자체 연구를 통해 계면 접착 품질 보증 안을 마련하였다[9]. 그러나 이러한 방법은 전체 계면의 접착 이상 유무는 확인 할 수 있으나, 접착 분리가 발생한 계면을 분리해 낼 수 없는 문제가 존재하여 Fig. 2와 같이 현재 가용한 비파괴 방법들을 이용한 연구가 수행되었다. 즉 초음파 방법(C-Scan)을 이용한 연소관/고무계면의 결함 검출 기술, 변형률(strain) 계측 및 분석을 통한 각 계면 분리 현상의 정량적 판정법, 그리고 계면 접착 관련 음향방출 신호 분석 및 변형률과 연계한 음향방출 신호의 정량화 기법이 이에 해당된다. Fig. 2에서 보듯이 음향방출 신호는 공압 시험 중 발생하는 연소관 조립체의 모든 계면과 복합재 파손으로부터 발생하는 이상 신호를 나타내지만 이들 각 파손위치 및 종류를 분류할 수 없고, 변형률 값은

각 계면의 정량적인 이상 유무 판정이 가능하지만 이상 발생 계면의 구분이 불가능하다. 반면에 초음파 방법은 연소관과 고무 계면의 이상 유무 판정이 가능하다. 이와 같이 각기 다른 결함 검출 특성을 갖는 3가지 비파괴적 검사법을 적용, 분석하여 연소관 조립체의 각 계면에 발생하는 결함을 위치 별 종류 별 정량적 분류하는 것이 본 논문의 목적이다.

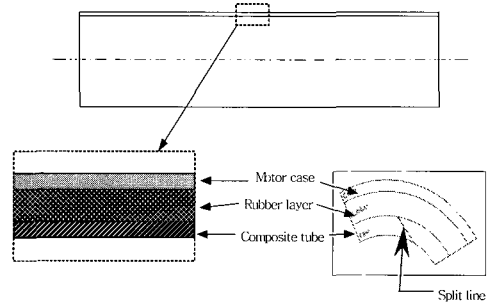


Fig. 1 Cross section of motor case assembly

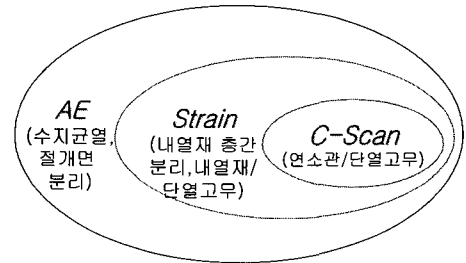


Fig. 2 Nondestructive test method to detect the defects of motor case assembly

## 2. 연소관 조립체의 비파괴검사 방법

음향방출 신호를 이용한 접착 계면의 정량적 분석을 위해, 공압 시험 중 연소관 표면에 AE 센서와 스트레인 게이지(strain gage)를 Fig. 3과 같이 부착하여 압력 별 음향방출 신호와 변형률을 동시에 계측하였다. 이때 연소관 조립체의 내압 거동은 복합재의 보강 효과에 따라 다르게 나타나서, 스트레인 게이지는 복합재의 절개선 지점과 반대편 지점으로 나누어 부착하였다. 즉 연소관 표면 변형률 값은 연소관/고무/복합재간의 접착 상태에 따라 변하게 되는데, 정량적인 변형률 크기 변화는 응력 해석 결과로부터 결정된다. 또한 연소관과 고무간의 접착 상태를 검사하기 위해 공압(空壓) 시험 전, 후 초음파 탐상법이 적용되었다.

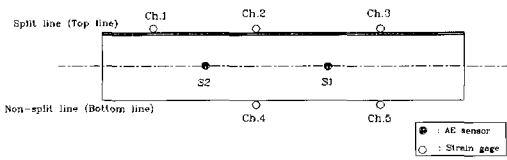


Fig. 3 Strain gage and AE sensor location

2.1. 변형을 계측 및 응력 해석 방법

공압 시험 중 계측되는 변형을 측정 방법은 공압에 의해 발생하는 연소관 조립체의 모든 계면(연소관/고무/복합재)의 접착 분리와 복합재의 구조 파괴 등 연소관 조립체의 내압 강성(stiffness)에 영향을 미치는 현상을 동시에 계측 할 수 있다. 이러한 모든 현상의 계측이 가능한 반면, 발생 결함의 분류는 불가능하다는 단점이 존재한다. 즉 이상 신호가 계측되더라도 어떠한 결함이 원인인지에 대해서는 정보를 알 수 없다. 이러한 계측 변형률 값을 이용하여 연소관 조립체 내부에 발생한 현상을 설명하기 위하여 Fig. 4와 같이 상용 유한 요소 해석(finite element analysis) 코드인 ABAQUS를 이용한 응력 해석이 수행되었다. 전체 단면 해석은 2차원 축 대칭 요소(axi-symmetric solid element)로 수행되었고, 복합재 절개부 지점의 상세 변형 해석을 위해서는 3차원 솔리드 요소(three dimensional solid element)를 이용한 해석이 수행되었다. 해석의 편의성을 위해 각 계면 전체가 완전 접착(perfect bonding)인 경우와 완전 미접착(prefect un-bonding)인 경우로 나누어 해석을 수행하여 정량적으로 분류 할 수 있는 변형률 값을 구하였다. 해석을 위해 각 부품의 재료 물성을 시편 시험을 통해 구하여 Table 1에 정리하였다. 여기서 복합재는 1 K T300 탄소섬유 (Toray)로 직조된 직물로 롤링(rolling) 공업으로 제작되며, 각 부품의 두께는 복합재가 약 1.2 mm, 고무는 약 1.3 mm 그리고 연소관은 약 0.65 mm의 박판으로 구성된다.

2.1.1. 완전접착계면

Fig. 5에서 보듯이 연소관/고무/복합재의 모든 계면이 완전 접착인 경우, 복합재가 연소관과 함께 내압을 담당함으로써 복합재 절개 지점을 제외한 나머지 지점에서의 연소관 외면 변형률이 비교적 균일 값을 나타내게 된다. 반면에 복합재 절개 지점은

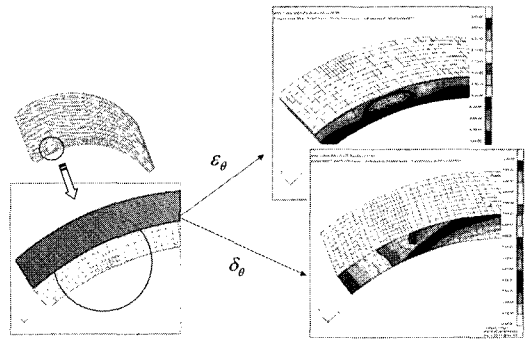


Fig. 4 Three dimensional FEA modeling

Table 1 Material properties for each components in motor case assembly (unit: kg/mm<sup>2</sup>)

	재료물성
복합재 (1K C/P)	$E_r=990, E_{\theta}=7646, E_z=6625, \nu_{r\theta}=0.09, \nu_{rz}=0.09, \nu_{\theta z}=0.18, G_{r\theta}=400, G_{rz}=400, G_{\theta z}=800, \epsilon_{fail}=0.66\%$
고무 (3차 ogden)	$\alpha_1=4.282, \alpha_2=-2.583, \alpha_3=0.591, \mu_1=1.999, \mu_2=4.00, \mu_3=-1.999$
연소관	$E_{steel}=18631.0, \nu=0.3$

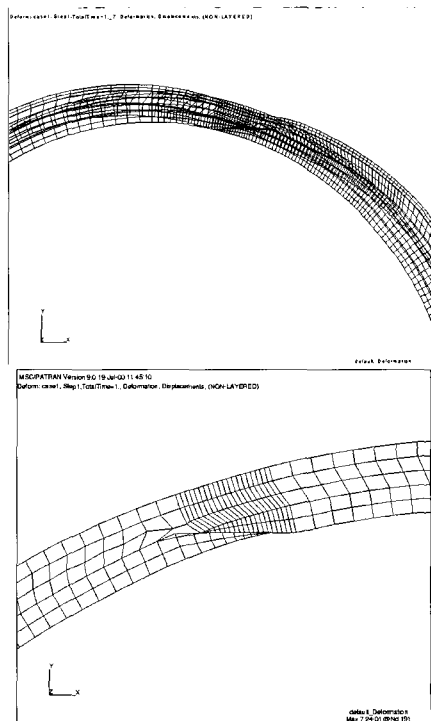


Fig. 5 Deformed shape for the perfect bonding condition (x50)

복합재가 내압 보강 효과를 할 수 없으므로, 이 지점의 연소관 외면 변형을 값이 커지게 된다. 즉 Fig. 6에서 보듯이 내압에 의한 변형이 원통부 원주 방향으로 비교적 균일하게 발생하는 반면, 절개부 지점은 복합재가 원주 방향으로 강성이 존재하지 않음으로서 연소관 외면의 원주 방향 변형을 값이 약 35% 커지게 된다. 이때의 변형을 값은 내부에 복합재가 없는 순수 연소관만의 변형을 크기를 나타낸다. 이러한 해석 모델링은 Fig. 7에서 보듯이 공압 시험 결과와의 비교를 통해 타당성이 입증되었다.

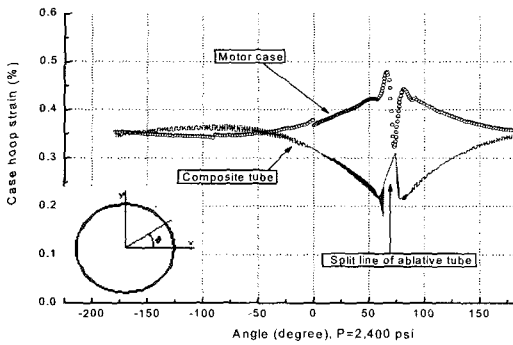


Fig. 6 Hoop strain distribution of motor case and ablative tube for the perfect bonding condition

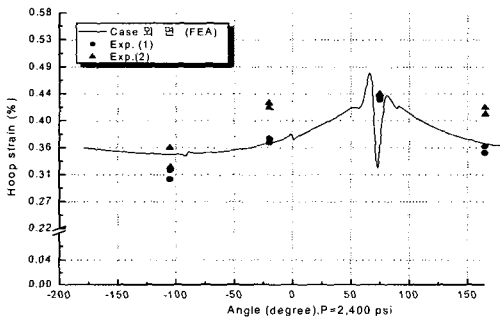


Fig. 7 Comparison of surface hoop strain for FEA results and experimental test data

2.1.2. 완전 미접착 계면

Fig. 8에서 보듯이 각 계면이 전체 미접착인 경우, 내압 하중에 의한 복합재 변형이 절개부를 기준으로 순수하게 고무층에서만 발생함으로써 내압 하중을 연소관만 담당하게 된다. 그러므로 연소관 외면 원주 방향 변형을 값이 Fig. 9와 같이 전체 구간에서 동일하게 나타난다. 즉 고무와 연소관 또

는 고무와 복합재간의 미접착인 경우 내압에 의한 모든 변형을 강성이 가장 작은 복합재 절개부의 고무층에서만 발생하고 복합재는 단지 미끄러짐 현상만 보인다. 이러한 이유로 Fig. 9와 같이 모든 영역에서 연소관 원주 방향 변형을 값이 동일하게 분포하고, 내부 복합재는 변형을 값이 존재하지 않는다.

이상의 해석 결과를 종합/분석하면 Fig. 10과 같다. 즉 연소관 조립체가 완전 접촉 상태이면 공압 2,400psi일때 복합재 절개부 지점을 제외한 지점에서는 약 0.35%이고, 절개부 지점은 약 0.5%의 원주 방향 변형을 나타내는 반면, 미 접착인 경우 연소관 표면 변형을 값은 모든 영역에서 약 0.5%를 나타낸다. 이러한 변형을 분포는 내압에 의해 복합재가 구조적으로 파괴된 경우에도 나타난다. 이러한 값을 기준으로 공압 시험 시 측정된 연소관 표면 변형률로부터 연소관/고무/복합재 층간 미접착 현상의 판정이 가능해졌다. 이상의 정량적 변형률 결과는 음향방출 신호 분석 및 정량화 자료로 이용하였다.

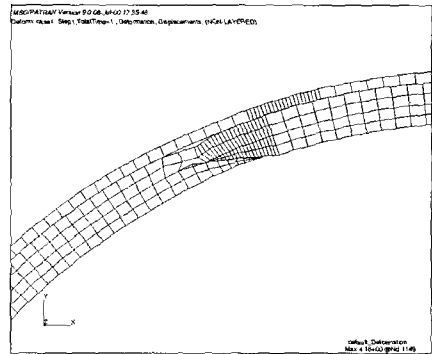


Fig. 8 Deformed shape and contour for perfect un-bonding condition

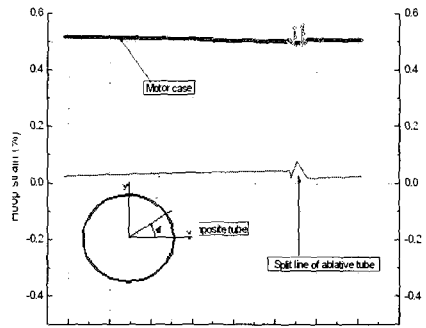


Fig. 9 Hoop strain distribution of motor case and ablative tube for the perfect contact condition

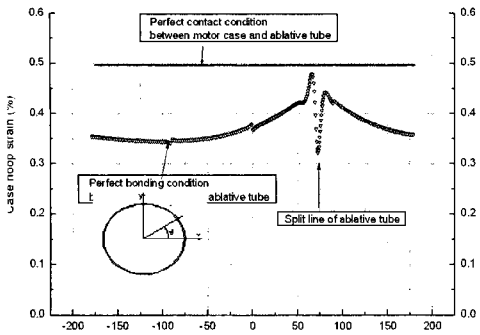


Fig. 10 Comparison of hoop strain distribution for the bonding status between motor case and ablative tube

2.2. 음향방출 신호 분류법

음향방출 시험법은 외력에 의한 구조물 변형에너지에서 발생하는 탄성과 (elastic wave)를 Fig. 11과 같이 여러 형태의 음향방출 신호로 감지하여 제품의 결함 발생 여부를 판단한다. 공압에 의한 연소관 조립체의 음향방출 신호를 측정하기 위한 장비의 제원과 시험 구성도는 Fig. 12와 같다. 음향방출신호의 측정과 분석을 위해 사용한 측정 장비는 미국 Physical Acoustics Corporation(PAC)사의 AE-DiSP board와 전용 program을 사용하였다. 시편에는 모두 2개의 음향방출 센서를 Fig. 3과 같이 설치하였다. 공기압축기에 의해 작동되는 pressurizer는 N<sub>2</sub> gas를 이용하여 연소관에 가압되며, 압력은 디지털 압력지시기에 표시되도록 구성되었다. 연소관에 적용된 압력 profile은 Fig. 12와 같이 load-load hold-reload-load hold 방식을 적용하였다. 시험중 발생한 음향방출 신호는 연소관 표면에 설치된 2개의 센서에 의해 탐지되어 장비에서 측정된다. 시험에서 사용한 음향방출 센서는 공진형 센서로 R15(공진 주파수 150 kHz)를 사용하였고, Pre-amplifier는 1220A (band pass filter 100~300 kHz)를 사용하였다. 음향방출 센서에서 검출된 신호는 진치증폭기에서 40 dB로 증폭하였고, 주 처리 장치인 AE-DiSP에서는 20 dB로 증폭하였으며, Threshold는 40 dB(float)로 설정하였다. 이때 발생하는 음향은 복합제에서는 수치균열/층간 분리와 각 층간 접착 분리로 기인된다. 이러한 음향방출 시험은 시험중 모든 이상(異常) 현상을 음향으로 계측한다는 장점이 있는 반면 결함 종류별 구분이 불가능하고, 정량적 분석이 어렵다는 단점이 존재한다. 이를 위하여 많은 연소관 조립체

공압 시험을 통하여 음향방출 신호의 중요 parameter와 발생 결함 종류별 정량화 작업을 수행하여 문제점을 해결하였다. 특히 공압 시험중 계속된 연소관 표면 변형을 결과와의 비교/분석을 통해 결함 분류 및 정량화 작업을 수행하여 여러 신호중 (threshold voltage, event count, ring down count, peak amplitude, event energy, rise time, duration time) 시간 당 hit rate(hit/sec)가 연소관 조립체의 구조 건전성 평가의 중요한 parameter임을 확인하였다. 이러한 음향방출 시험의 정량화 연구를 통해 음향방출 신호중 hit rate를기준으로 연소관 조립체의 결함 발생 유무 판정 기준을 결정하였다[9].

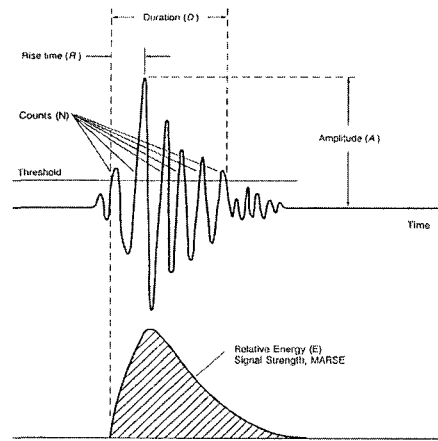
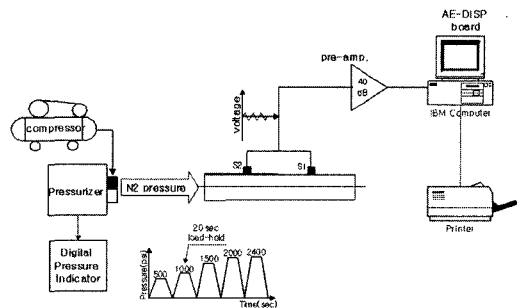


Fig. 11 Acoustic emission waveform parameter



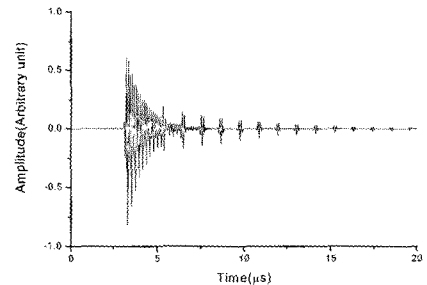
품목	모델번호	제작	비고
음향방출 데이터 획득 장비	AE-DiSP	PAC	Acoustic emission data acquisition system
음향방출 센서	R15	PAC	150 kHz resonance type
진치증폭기 (Pre-amplifier)	1220A	PAC	100~300kHz bandpass filter
Computer	-	국산	Pentium III

Fig. 12 Schematic diagrams and equipments for acoustic emission test

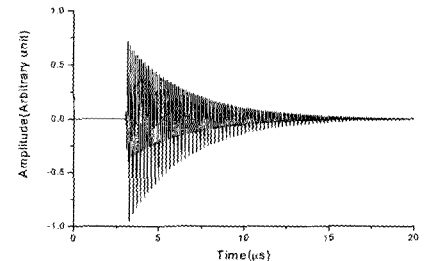
### 2.3. 초음파 탐상 방법

변형을 계측과 음향방출법으로 연소관 조립체의 모든 계면에서의 이상 현상을 판정한 후, 각 계면의 이상 상태 분류를 위해 초음파 탐상법이 적용되었다. 연소관 조립체의 초음파시험에 사용한 장비는 Portascan 007 (NDT System Co., U.S.A)이며, 2축 (X: 주행, Y: 회전)을 제어할 수 있는 기계구동부와 초음파 신호 처리 및 데이터 처리를 수행하는 펄서/리시버 (pulser/receiver)부로 구성되어 있다. 펄서/리시버부에서 생성된 전기적인 초음파 신호는 7.5 MHz의 송, 수신 분할형 탐촉자를 통하여 연소관과 고무의 접착계면에서 반사되어오는 초음파 음압을 검출한다. 초음파 신호는 기계구동부의 2축 엔코더에서 읽은 위치 데이터와 대응하여 2차원적인 C-Scan 영상(C-Scan image)을 형성하게 되고 C-Scan 영상의 각 지점에서 초음파 음압은 미리 설정해 놓은 색상 표에 따라 변환되어 펄서/리시버부의 모니터에 상대적인 색깔로 표시된다. 일진동자 접촉식 탐촉자를 이용한 A-Scan은 제품의 건전성을 평가를 위해 일반적으로 사용되고 있으나 연소관 조립체 처럼 연소관 두께가 0.65 mm로 얇고 곡률이 있는 박판은 초기 펄스와 연소관의 전면 반사 신호 및 연소관/고무의 계면 반사 신호가 중첩되므로 연소관/고무의 미 접착 결함을 검출할 수 없다[10-11]. 이러한 문제점은 송신과 수신이 분리된 7.5 MHz 분할형 탐촉자 적용하여 pitch-catch 기법으로 초기 펄스 및 연소관 전면 반사 신호의 영향을 감소시켰고 동시에 water membrane(수막접촉)을 접촉매질로 사용하는 국부 수침법을 이용하여 연소관/고무의 계면 반사 신호를 지연시켜 초기펄스와 분리시킬 수 있었다. 연소관 조립체에 대한 초음파 시험을 적용하기 전에 초음파 신호에 대한 정확한 해석 및 적절한 검사 조건을 설정하기 위하여 초음파 신호를 예측하였다. 연소관 조립체는 금속 연소관/고무/복합재로 구성되었고 연소관 전면에는 접촉매질로 물을 사용하고 복합재 후면에는 공기와 접해있으므로, 5중 매질에서의 초음파 반사와 투과 현상을 이용하였다[12]. Fig. 13은 연소관 조립체의 연소관/고무의 접착 및 미 접착인 경우에 대하여 초음파 신호를 모델링하여 예측한 결과이다. 본 모델링은 분할형 탐촉자를 사용한다고 가정하여 스틸 전면 반사 신호를 배제하고 연소관/고무 계면 및 고무/복합재 계면에 대한 반사 신호만 고려하였다. 본 모델

링에서는 분할형 탐촉자의 입사각 및 고무와 복합재의 음압감쇠계수를 고려하지 않았지만 초음파의 음압은 연소관/고무 계면의 첫 번째 미 접착 반사 신호가 금속/고무 계면의 첫 번째 접착 반사 신호보다 1.27 dB 높으므로 미 접착 및 접착 상태를 구별할 수 있다고 판단하였다. 초음파가 스틸 내부를 왕복하는 시간은 0.22  $\mu$ s로서 초음파의 펄스 폭인 0.5  $\mu$ s 보다 작으므로 스틸 전면 반사 신호와 연소관/고무 계면의 반사 신호를 분리할 수 없으므로 gate 값은 시간 축에 대하여 초기 펄스를 제외한 전 영역에서 모든 반사 신호를 측정하여 반사 신호의 최대 값을 C-Scan 영상으로 나타내었다[13]. 초음파시험의 최적화를 위해 분할형 탐촉자의 성능을 평가할 수 있는 대비 시험편 I을 제작하였고 초음파 감도 및 gate 위치를 검증할 수 있는 대비 시험편 II를 제작하였으며 C-Scan의 검사 속도 및 최소 결함 검출 능력을 판단할 수 있는 대비 시험편 III를 제작하였다. 최적화된 실험 조건으로 미 접착 결함의 최소 검출 능력은 2.0 mm까지 가능하였다. 이러한 초음파 탐상법을 이용하여 연소관 첫 번째 접착 영역인 연소관과 고무 경계의 접착 유무를 확인할 수 있었다.



(a) Adhesive interface of motor case and rubber



(b) De-bonding interface of motor case and rubber

Fig. 13 Modeling of ultrasonic signal

### 3. 비파괴 시험

이상의 3가지 비파괴 방법을 이용하여 신공 연소관 조립체의 구조 건전성 평가를 Fig. 14와 같은 순서로 진행하였다. 즉 연소관 조립체의 기본 성능 검사를 수행 후 초기에 초음파 시험을 통해 연소관과 고무간의 공정 접착 검사를 하고, 공압 시험동안 음향방출 신호와 변형을 계측을 통해 모든 계면의 이상 유무를 확인한다. 그리고 공압 시험 후 연소관/고무 계면의 접착 분리 검사를 초음파로 재확인 한다. 최종적으로 이들 3가지 검사 결과로부터 연소관 조립체의 각 계면 접착성과 복합재의 구조 건전성을 평가한다. 이때 연소관 조립체에서 발생할 수 있는 모든 결함 중 복합재의 구조 파괴는 육안 검사로 가능함으로서 비파괴 이상 신호 분석에서 배제하였고, 연소관/고무 계면은 초음파로 나머지 계면은 음향방출법과 변형을 값으로 판단하였다.

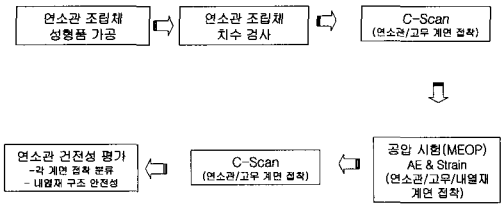


Fig. 14 Nondestructive test procedure for motor case assembly

### 4. 고찰

이상의 3가지 비파괴 시험 기법을 연소관 조립체 적용하여 다음과 같이 4가지 경우의 계면 접착 상태로 구분하였으며, 이들 계면 상태는 다시 연소관과 고무 또는 고무와 복합재 계면 접착 유무로 분리한다. 즉 모두 8가지 경우의 접착 계면 판정이 가능하였다.

#### 4.1. 초기 완전 미접착 경우 (Perfect Un-Bonding)

공정 초기부터 완전 미접착인 경우는 공압 중 스트레인 게이지로부터의 변형률결과가 Fig. 15의 (a)와 같이 절개부와 미절개부 구분 없이 약 0.5% 이상으로 수렴하고 음향방출 신호는 (b)와 같이 각 계면의 접착이 존재하지 않은 관계로 복합재에 어떠한 구조 변형이 없는 관계로 가압 초기부터 끝날 때까지 어떠한 음향 신호가 잡히지 않는다. 간혹

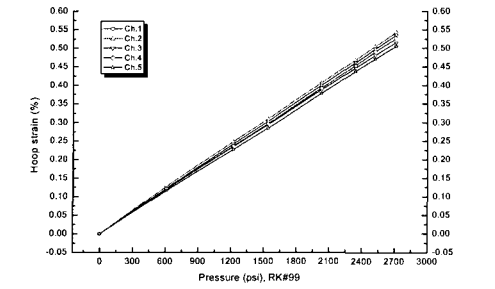
발생하더라도 200hit rate이하의 미소 신호만이 잡힌다. 만약 육안검사로 복합재의 구조 파괴가 없는 경우, 미 접착 계면 분리는 초음파 결과가 침부됨으로서 가능하다. 즉 Fig. 15의 (c)와 같이 초음파 결과가 나온 경우 연소관과 고무간의 접착이 공정 초기에 발생하는 것으로 판정되고, (d)와 같은 경우 복합재 층간이나 복합재 및 고무간의 미접착이 공정초기에 발생된 것으로 분류되었다.

#### 4.2. 시험중 접착이 전부 분리된 경우 (Perfect De-Bonding)

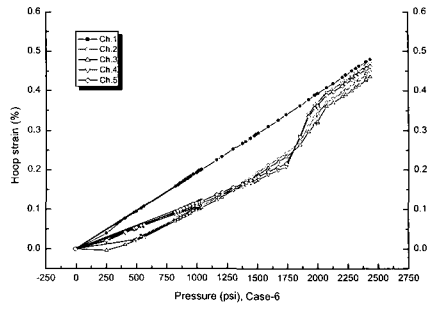
공압 시험중 연소관 조립체 계면이 완전 분리된 경우는 Fig. 16의 (a)와 같이 공압중 변형을 값이 임의 압력까지는 절개부와 미절개부로 구분되어 나타나다가, 그 이상의 압력에서 미절개부의 변형률 값이 순간적으로 증가하여 절개부와 같은 변형률 값이 되어, 최종적으로 압력 2,400psi에서 약 0.5% 이상으로 수렴하였다. 또한 음향방출신호도 (b)와 같이 임의 압력까지는 지속적으로 작은 신호를 방출하다가 갑자기 200 hit rate이상의 신호를 방출한 후 그 이후에 신호가 없어졌다. 이런 경우를 공압 시험 중 계면의 완전 접착 분리로 구분하는데, 분리된 계면의 분류는 초음파 결과가 Fig. 16의 (c)와 같은 경우 연소관과 고무간의 접착이 공압 시험 중 완전 접착 분리된 것으로 판정하고, (d)와 같은 경우 복합재 층간이나 복합재와 고무간의 접착이 분리된 것으로 분류하였다.

#### 4.3. 시험중 접착이 부분 분리된 경우 (Partially Bonding)

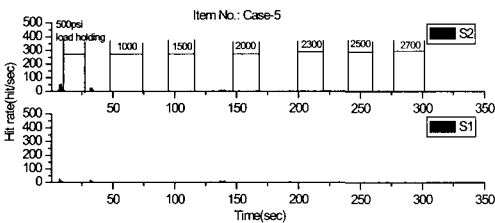
공압 시험중 연소관 조립체 계면이 부분 분리된 경우는 Fig. 17의 (a)와 같이 공압 시험중 변형률 값이 임의 압력까지는 절개부와 미 절개부로 구분되어 나타나다가, 그 이상의 압력에서 미절개부의 변형률 값이 순간적으로 증가하여 절개부보다는 작고 미절개부 보다는 큰 변형률 값이 되는데 그 크기가 압력 2,400psi에서 약 0.45%로 수렴하였다. 또한 음향방출 시험결과도 Fig. 18의 (b)와 같이 임의 압력까지는 지속적으로 작은 신호를 방출하다가 그 이후에 지속적으로 200 hit rate이상의 신호가 발생되었다. 이러한 경우를 공압 시험중 계면의 부분 접착 분리로 구분하는데, 분리된 계면의 분류는



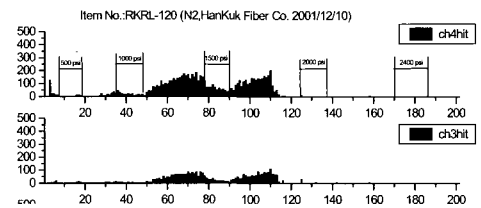
(a)



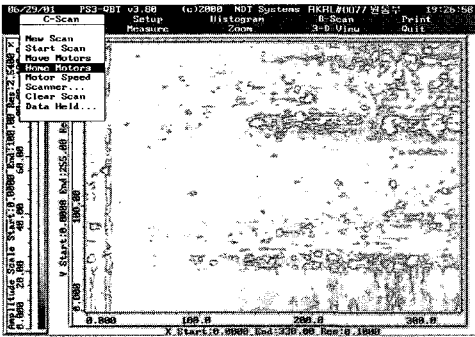
(a)



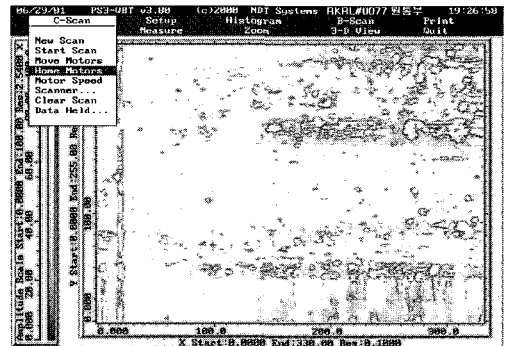
(b)



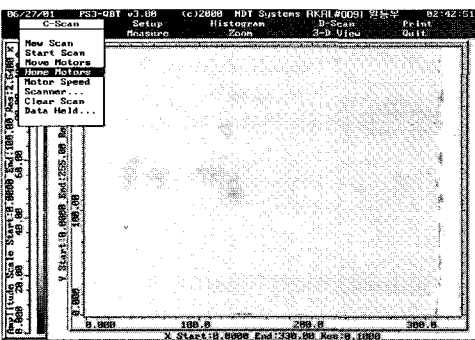
(b)



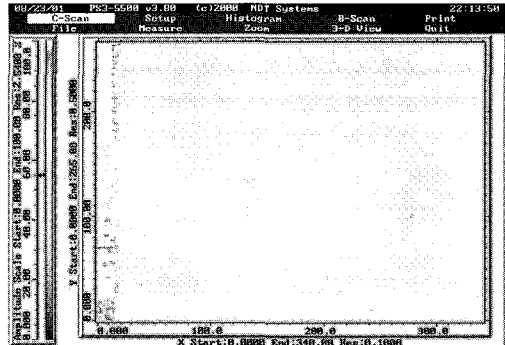
(c)



(c)



(d)



(d)

Fig. 15 NDT results for the perfect un-bonding condition of motor case assembly

Fig. 16 NDT results for the perfect de-bonding condition of motor case assembly



Fig. 17(c)와 같이 초음파 결과가 나온 경우 연소관과 고무간의 접착이 공압 시험 중 부분 분리된 것으로 판정하고, (d)와 같은 경우, 복합재 층간이나 복합재 및 고무간의 공압 시험 중 부분 분리된 것으로 판정하였다.

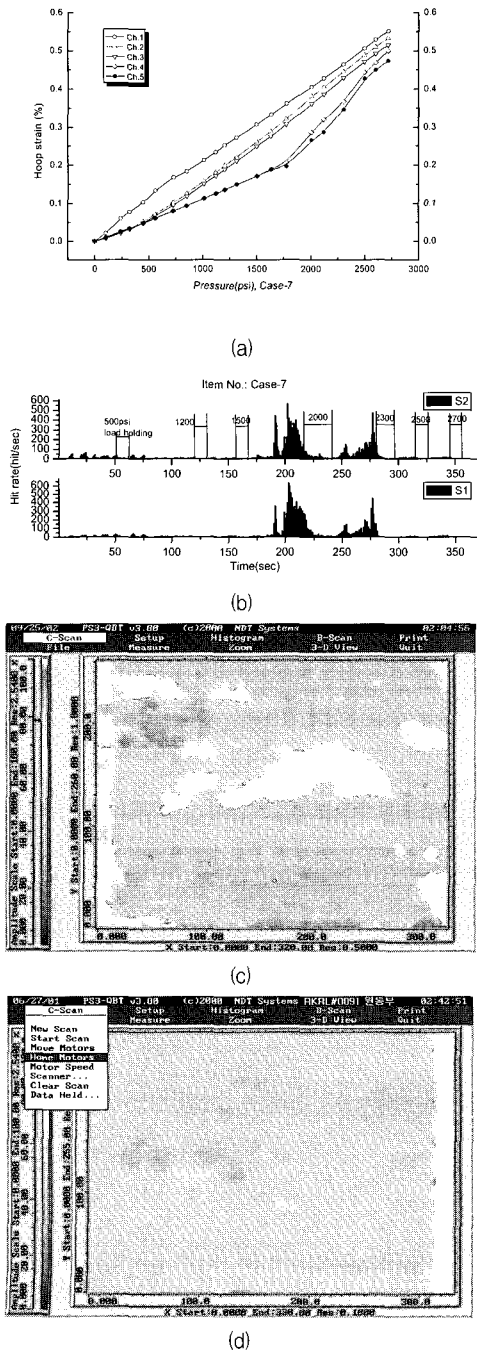


Fig. 17 NDT results for the partially bonding condition of motor case assembly

4.4. 모든 계면의 접착이 완전한 경우 (Perfect Bonding)

공압 시험 전/후 모든 계면의 접착이 완전한 경우는 Fig. 18의 (a), (b)와 같이 공압 시험중 변형률 값이 최종 압력(2400psi)까지 절개부와 미절개부로 확실히 구분되어 각각 0.3%, 0.5%이내로 나타나고, 음향방출 신호도 최종 압력까지 지속적으로 200 hit rate 이하의 신호를 방출하게 된다. 또한 그림 (c)와 같이 초음파 결과도 연소관과 고무간의 접착이 건전한 것으로 나타날 경우에, 연소관 조립체의 모든 계면이 완전 접착인 것으로 분류하였다.

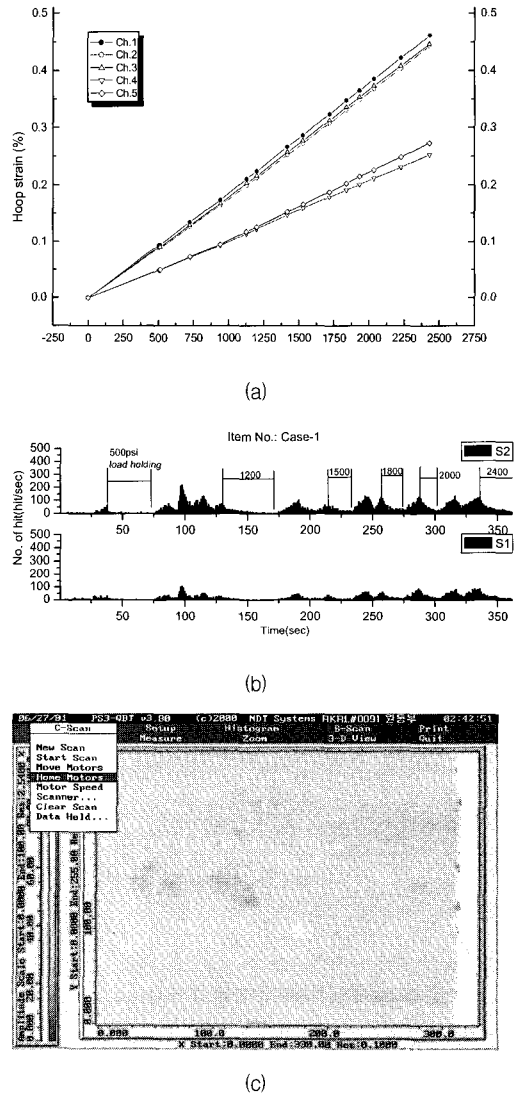


Fig. 18 NDT results for the perfect bonding condition of motor case assembly

## 5. 결 론

3종 재질(금속/고무/복합재) 연소관 조립체에 존재하는 각 계면 미접착 및 공압 시험중 발생하는 계면 분리현상을 비 파괴적 시험 기법으로 검출 및 분류할 수 있는 방법이 제시되었다. 각각 적용의 특성과 제한점이 있지만 상호 보완할 수 있는 3가지 시험(스트레인게이지/AE/UT)결과의 상호 연관성 연구를 수행되었다. 각 계면의 접착 여부에 따른 구조 응력 해석 결과를 기준으로 공압 시험중 계측한 변형률과 음향방출 신호 분석을 통해 음향방출 hit rate를 이용한 정량적 계면 접착 건전성 평가가 가능하였다. 또한 접착 계면 분류 목적으로 초음파 탐상법이 적용되어 적용의 난점으로 알려진 초 박판 원통 구조물의 결합 분류 작업을 7.5 MHz 분할형 탐촉자와 국부 수침법을 이용하여 해결함으로써 첫 번째 계면인 금속 연소관과 고무 계면의 결합 발생 유무판정이 가능하였다. 최종적으로 연소관 조립체의 모든 접착 계면을 1) 초기 완전 미접착, 2) 공압 시험중 완전 접착 분리, 3) 공압 시험중 부분 접착 분리, 4) 완전 접착 등 4가지 형태로 분류하여 검출할 수 있었다.

이상의 연구를 통해 각 계면의 접착 유무에 따른 모두 8가지 경우의 결합 발생을 비파괴적으로 검출 및 분류가 가능하였고 이러한 방법의 타당성 입증 을 위해 연소관 조립체의 공압 시험후 X-Ray 검사를 동시 수행하여 상호 비교/분석한 결과 약 86%의 일치성을 나타내었다.

## 참고문헌

- [1] H. Zhang and Li D. Y., "Determination of interfacial bonding strength using a cantilever bending method with in situ monitoring acoustic emission," *Surface and Coating Technology*, Vol. 155, pp. 190-194, (2002)
- [2] D. Crocicolo and R. Cuppini, "A methodology to estimate the adhesive bonding defects and the final releasing moments in conical joints based on the acoustic emissions technique," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 26, No. 7, pp. 490-497, (2006)
- [3] Lee Ho-Sung, Yoon Jong-Hoon, Park Jae-Sung and Yi Yeong-Moo, "A study on failure characteristic of spherical pressure vessel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, No. 15, pp. 882-888, (2005)
- [4] C. Kaya, F. Kaya and H. Mori, "Damage assessment of Alumina fibre-reinforced mullite matrix composites subjected to cyclic fatigue at ambient and elevated temperatures," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 4, pp. 447-452, (2002)
- [5] Lee Jin-Kyung, "AE characteristic of the damage behavior of TiNi/Al6061 SMA Composite, *Composite Structures*," Vol. 60, No. 3, pp. 255-263, (2003)
- [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] Kwon Oh-Yang and Lee Seung-Hwan, "Acousto-ultrasonic evaluation of adhesively bonded CFRP-Aluminum joints," *NDT&E International*, Vol. 32, No. 3, pp. 153-160, (1999)
- [9] 이상호, 황태경, 문순일 "로켓 연소관 조립체의 음향방출 신호 해석", *한국비파괴검사학회지* 23권, 5호, p. 488, (2003)
- [10] R. D. Adams and B. W. Drinkwater, "Nondestructive testing of adhesively-bonded joints," *NDT&E International*, Vol. 30, No. 2, pp. 93-98, (1997)
- [11] K. Kawashima, et al., "Nonlinear ultrasonic imaging of imperfectly bonded interfaces," *Ultrasonics*, (2006)
- [12] 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, "시간 및 주파수 영역에서의 신호 처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정", *비파괴검사학회지*, Vol. 19, No. 2, pp. 118-128, (1999)
- [13] T. Kundu, et al., "C-Scan and L-Scan generated images of the concrete/GFRP composite interface," *NDT&E International*, Vol. 32, pp. 61-69, (1999)