

## 다중접착구조물의 초음파 공진 신호 분석

### Analysis of Ultrasonic Resonance Signal in Multi-Layered Structure

김동륜\*, 김재훈\*\*†

Dong-Ryun Kim\* and Jae-Hoon Kim\*\*†

**초 록** 초음파 시험은 접착계면에서 발생하는 미접착 결함을 검출할 수 있는 다른 비파괴 시험보다 미접착 검출 능력이 월등히 뛰어나다. 하지만, 스틸 연소관, 내열 고무, 라이너 및 추진제로 구성된 고체 추진기관은 각 재료의 음향 임피던스의 큰 차이와 반사파의 중첩 때문에 초음파 신호를 분석하기에는 많은 어려움이 있다. 그러므로 고체 추진기관의 미접착 결함을 검출하기 위한 초음파 시험은 자동화된 C-Scan 시스템을 이용하여 스틸 연소관과 내열 고무 계면의 극히 제한된 영역에서 적용되어 왔다. 기존의 초음파 시험은 대부분의 초음파가 음향 임피던스가 낮은 고무 재료에서 흡수되므로 고체 추진기관의 라이너와 추진제 사이의 미접착 결함을 검출할 수 없었고, 이런 문제점을 해결하기 위하여 초음파 공진법을 사용하여 주파수 스펙트럼으로부터 공진 주파수를 분석하였다. 본 논문은 초음파 공진 특성을 이용하여 라이너와 추진제 사이의 미접착 결함을 검출할 수 있는 기법에 대해 자세히 기술하였다.

**주요용어:** 다중접착구조물, 고체 추진기관, 초음파 시험, 초음파 공진, 미접착

**Abstract** Ultrasonic testing are far superior to other nondestructive tests for detecting the disbond interface which occurred in adhesive interface. However, a solid rocket motor consisting of a steel case, rubber insulation, liner, and propellant poses many difficulties for analyzing ultrasonic waves because of the superposition of reflected waves and large differences in acoustic impedance of various materials. Therefore, ultrasonic tests for detecting the disbond interface in solid rocket motor have been applied in very limited areas between the steel case and rubber insulation using an automatic C-scan system. The existing ultrasonic test cannot detect the disbond interface between the liner and propellant of a solid rocket motor because most of the ultrasonic waves are absorbed in the rubber material which has low acoustic impedance. This problem could be overcome by analyzing the resonance frequency from the frequency spectrum using the ultrasonic resonance method. In this paper, a new technique to detect the disbond interface between the liner and propellant using ultrasonic resonance characteristics is discussed in detail.

**Keywords:** Multi-Layered Structure, Solid Rocket Motor, Ultrasonic Testing, Ultrasonic Resonance, Disbond

#### 1. 서 론

추진기관은 스틸 연소관, 내열 고무, 라이너 및 추진제와 같은 물질이 접착되어 있는 다중접착구조물이며, 접착부의 품질은 추진기관의 성능을 좌우하므로 접착계면의 품질을 평가하고 보

증할 수 있는 비파괴시험 방법이 절실히 요구되고 있다. 추진기관은 연소시 고온, 고압의 환경에서 라이너/추진제 접착계면에 미접착 결함이 존재하면 미접착 결함 내부로 화염이 침투하여 연소면적을 증가시킴으로 추진기관의 내부 압력이 상승하여 추진기관의 구조적 파괴를 일으킬

수 있다[1].

추진기관은 장기 저장 중 노화 때문에 라이너와 추진체의 화학적 결합력이 약해져서 라이너와 추진체 접촉계면에서 미접착 결함이 발생할 수 있다. 라이너/추진체 접촉계면의 미접착 결함은 판독이 상대적으로 용이하고 결함을 형상화하기 쉬운 방사선투과시험을 적용하여 검출하고 있으나, 방사선투과시험은 검사 비용 및 시간에 대한 현실적 제약이 수반되고, 미접착 결함의 폭이 방사선투과시험의 해상력 이하인 경우에는 미접착 결함을 검출할 수 없다.

비파괴시험 기법 중에서 초음파시험은 미접착 결함을 검출하기 위해 가장 많이 사용되고 있는데, 다른 비파괴시험 기법과 비교하여 미접착 검출 효율이 높기 때문이다. 하지만, 추진기관과 같은 다중접착구조물의 경우에는 초음파의 반사와 투과가 복잡하고, 초음파가 스틸을 왕복하는데 소요되는 시간이 고무를 왕복하는데 소요되는 시간보다 짧기 때문에 다중 반사파로부터 미접착 결함을 구분하기 어렵다. 또한, 고무 재질의 낮은 음향 임피던스는 초음파의 대부분이 고무에서 감쇠됨으로 초음파 펄스에코법은 적용하기 곤란한 실정이었다[2,3].

본 논문에서는 초음파가 접촉계면에서 반사되는 에너지의 차이로 라이너/추진체 미접착을 검출하는 펄스 에코법 대신 주파수 스펙트럼으로부터 공진 주파수를 분석함으로 라이너/추진체 미접착 결함을 검출하는 초음파 공진 시험법에 대하여 기술하였다.

## 2. 공진 주파수 예측

제 1 매질과 제 3 매질 사이에 일정한 두께  $L$  인 제 2 매질이 존재하고, 초음파가 제 1 매질에 수직으로 입사하면, 제 1 매질에 입사한 초음파  $P_i$ 는 제 1 매질과 제 2 매질의 경계면에서 반사파  $P_r$ 과 투과파  $P_a$ 로 나누어진다. 제 2 매질로 투과한 초음파는 제 2 매질과 제 3 매질의 경계면에서 반사파  $P_b$ 와 투과파  $P_t$ 로 나누어지며, 반사파와 투과파는 각 재질의 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해진다. 경계 조건을 적용하면 3중 매질에 대한 음압 반사 계수는 식(1)과 같이 유도될 수 있다[4].

$$R = \frac{\left(1 - \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos k_2 L + j \left(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2}\right) \sin k_2 L}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos k_2 L + j \left(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \sin k_2 L} \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 3중 매질에 대한 음압 반사 계수이고,  $Z_i$ 는  $i$ 번째 매질의 음향 임피던스이며,  $k_2$ 와  $L$ 은 제 2 매질의 파수 및 두께이다.

식(1)에서 제 1 매질은 접촉매질, 제 2 매질은 스틸, 제 3 매질은 공기라고 가정하면 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $k_2 L = n\pi$ 의 조건이 성립되며, 스틸의 공진 주파수는 식(2)과 같이 유도될 수 있다.

$$f_s = n \frac{c_2}{2L} \quad (2)$$

여기서,  $f_s$ 는 제 2 매질인 스틸의 공진 주파수이며,  $c_2$ 는 스틸의 음속이다. 식(2)를 이용하여 스틸의 공진 주파수를 구할 수 있고, 스틸 두께  $L$ 에 대한 파장  $\lambda$ 의 관계는  $L = n\lambda/2$ 로 나타낼 수 있다.

식(1)에서 제 1 매질은 스틸, 제 2 매질은 고무, 제 3 매질은 공기라고 가정하면 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $k_2 L = (2n-1)(\pi/2)$ 의 조건이 성립되며 고무의 공진 주파수는 식(3)과 같이 유도될 수 있다.

$$f_r = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{c_2}{2L} \quad (3)$$

여기서,  $f_r$ 는 제 2 매질인 고무의 공진 주파수이며,  $c_2$ 는 고무의 음속이다. 추진기관에 고무/추진체 미접착이 발생하면 식(3)을 이용하여 고무의 공진 주파수를 구할 수 있고, 고무 두께  $L$ 에 대한 파장  $\lambda$ 의 관계는  $L = (n-1/2)\lambda/2$ 로 나타낼 수 있다[5,6].

Fig. 1(a)는 3중 매질에 대한 초음파의 반사와 투과를 나타내었고, 식(1)을 이용하여  $k_2 L$ 과 음압 반사 계수의 상관관계를 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)와 같이 도시하였다. Fig. 1(b)에서 접촉매질/스틸/공기 계면과 접촉매질/스틸/고무 계면에 대해 각 매질의 음향 임피던스를 대입하여 음압 반사 계수를 도시하였으며, Fig. 1(c)에서 스틸/고무/공기 계면과 스틸/고무/추진체 계면에 대해 각 매질의 음향 임피던스를 대입하여 음압 반사 계수를 도시하였다.

Fig. 1(b)에서 접촉매질/스틸/공기 계면은 스틸/고무 미접착 계면을 모사할 수 있으며, 접촉매질/스틸/고무 계면은 스틸/고무 접착 계면을 모사할

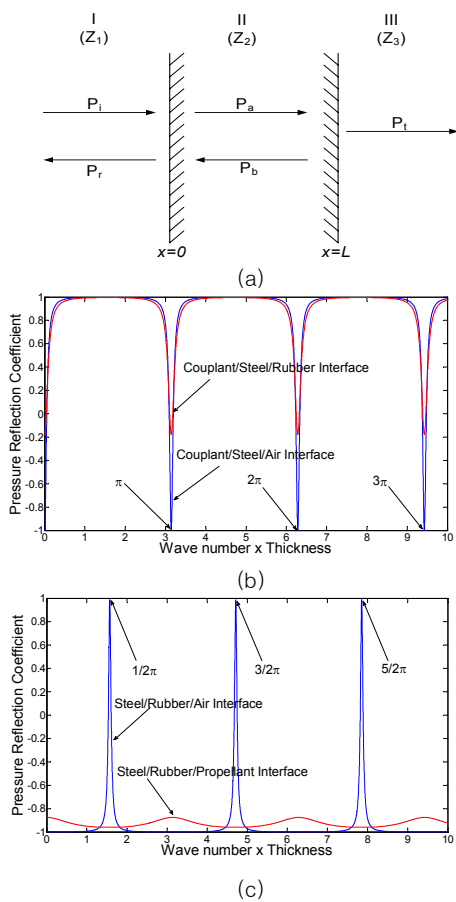


Fig. 1 Prediction of resonance frequency using the pressure reflection coefficient spectrum (a) reflection and transmission of plane wave normally incident on 3-layered medium (b) pressure reflection coefficient of couplant/steel/air interface and couplant/steel/rubber interface (c) pressure reflection coefficient of steel/rubber/air interface and steel/rubber/propellant interface

수 있다. 스틸/고무 미접착 계면과 스틸/고무 접착 계면의 음압 반사 계수는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $n\pi$ 의 조건에서 식(2)와 같은 스틸 공진 주파수를 예측할 수 있다. 스틸/고무 미접착 계면과 스틸/고무 접착 계면의 스틸 공진 주파수는 같으므로 스틸/고무 미접착 계면과 스틸/고무 접착 계면은 스틸 공진 주파수를 이용하여 구별할 수 없다.

Fig. 1(c)에서 스틸/고무/공기 계면은 고무/추진제 미접착 계면을 모사할 수 있으며, 스틸/고무/추진제 계면은 고무/추진제 접착 계면을 모사할 수 있다. 고무/추진제 미접착 계면의 음압 반사 계수

는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $(2n-1)\pi/2$ 의 조건에서 식(3)과 같은 고무 공진 주파수를 예측할 수 있지만, 고무/추진제 접착 계면은 공진 특성이 다르므로 고무/추진제 미접착 계면에서 예측한 고무 공진 주파수를 적용할 수 없다.

고무/추진제 미접착 계면과 고무/추진제 접착 계면은 공진 특성이 다르므로 고무 공진 주파수를 분석하면 고무/추진제 미접착 계면과 고무/추진제 접착 계면을 쉽게 구별할 수 있다. 일반적으로 추진기관에는 고무와 추진제 사이에 추진제의 접착력을 증진시키기 위해 라이너를 설치한다. 라이너는 고무와 동일한 재질이므로 고무/추진제 미접착 계면은 라이너/추진제 미접착 계면과 같은 고무 공진 패턴을 갖게 된다.

Fig. 1(b)의 스틸/고무 미접착 계면은 음압 반사 계수의 최소값에서 공진을 하며, Fig. 1(c)의 고무/추진제 미접착 계면은 음압 반사 계수의 최대값에서 공진을 한다. 스틸/고무 미접착 결합과 고무/추진제 미접착 결합이 서로 다른 공진 특성을 갖는 이유는 매질 경계면에서 초음파가 반사될 때 경계 조건에 의해 초음파 위상이 반전되기 때문이다.

### 3. 실험 장비 및 시험편

#### 3.1. 실험 장비

Fig. 2는 초음파 공진 신호를 분석하기 위한 실험 장치 구성도이다. 실험은 고풍력 비선형 초음파 분석 장비(RAM-5000 SNAP)를 사용하였고, 초음파 탐촉자는 Krautkramer사에서 제작한 공칭 주파수 100 kHz인 접촉식 단일 진동자 탐촉자(K0,1G)와 공칭 주파수가 250 kHz인 접촉식 단일 진동자 탐촉자(K0,25G)와 공칭 주파수가 450 kHz인 접촉식 단일 진동자 탐촉자(045ZIP)를 사용하였다.

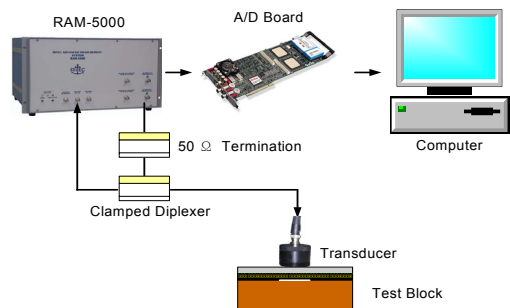


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

고출력 비선형 초음파 분석 장비에서 입사파의 가진 주파수는 탐촉자의 공칭 주파수와 일치시켰고, 온도에 따른 음속의 변화를 고려하여 실험은 20°C 환경에서 동일한 일자에 수행하였다. 100 kHz 탐촉자는 펄스 반복 주파수를 50 Hz로 설정하였고, 톤버스트의 펄스 폭을 30  $\mu$ s로 가진하여 제 1 공진 주파수를 분석하였다. 250 kHz 탐촉자는 펄스 반복 주파수를 100 Hz로 설정하였고, 톤버스트의 펄스 폭을 12  $\mu$ s로 가진하여 제 2 공진 주파수를 분석하였다. 450 kHz 탐촉자는 펄스 반복 주파수를 100 Hz로 설정하였고, 톤버스트의 펄스 폭을 6.6625  $\mu$ s로 가진하여 제 3 공진 주파수를 분석하였다. 탐촉자로부터 수신된 초음파 신호는 GaGe사의 AD보드(CS 82G-2M)를 통해 디지털 신호로 전환하여 분석하였고, 샘플링 주파수는 10 MS/s 였다.

### 3.2. 시험편

#### 3.2.1. 스틸/고무 접착 시험편

스틸/고무 접착 시험편을 제작하기 위해 스틸 두께가 1.86 mm, 2.82 mm, 5.68 mm 및 7.00 mm 이고, 길이와 폭이 150 mm인 스틸 평판을 스틸 두께별로 3개씩 12개를 준비하였다. 모든 스틸 평판은 고무를 잘 접착하기 위해 샌딩(sanding) 작업을 한 후에 챔록(chemlok)을 도포하였다. 고체 상태의 EPDM 고무판을 챔록이 도포된 스틸 면에 적층한 후 오토클레이브(autoclave)에서 가압 성형하여 스틸과 고무를 접착시켰다.

고무 두께는 각 스틸의 두께에 따라 2.95 mm, 4.06 mm, 5.01 mm였으며, 고무의 두께는 오토클레이브에서 고무를 녹여 성형하였기 때문에  $\pm 0.15$  mm의 두께 편차가 발생하였다. 라이너로 인한 초음파 공진의 영향을 알기 위하여 성형된 고무 절반 면적에 라이너를 0.97 mm 두께로 도포하였으며, 고무와 마찬가지로  $\pm 0.10$  mm의 두께 편차가 발생하였다. Fig. 3(a)은 스틸/고무 접착 시험편의 단면도이다.

#### 3.2.2. 라이너/추진제 미접착 시험편

라이너/추진제 미접착 시험편을 제작하기 위해 스틸 두께가 1.86 mm, 2.82 mm, 5.68 mm 및 7.00 mm

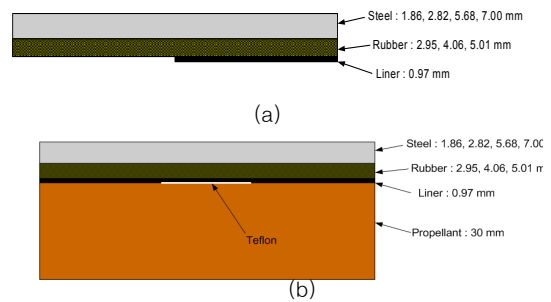


Fig. 3 Sectional view of test block (a) steel/rubber adhesive test block (b) liner/propellant disbond test block

이고 길이와 폭이 150 mm인 스틸 평판을 스틸 두께별로 3개씩 12개를 준비하였다. 스틸/고무 접착 시험편 제작 공정과 동일한 공정으로 스틸 면에 고무를 접착시켰고, 고무 두께는 각 스틸의 두께에 따라 2.95 mm, 4.06 mm, 5.01 mm였다. 고무 면 위에 라이너를 0.97 mm 두께로 도포한 후에 추진제를 30 mm 충전하였다. 충전 공정에서 라이너/추진제 미접착 결함을 모사하기 위해 시험편 중앙의 라이너 면에 길이와 폭이 40 mm이고 두께가 0.1 mm인 얇은 테프론 시트(teflon sheet)를 삽입하였다. Fig. 3(b)는 라이너/추진제 미접착 시험편의 단면도이다.

## 4. 실험 및 결과 고찰

### 4.1. 스틸/고무 접착 시험편의 공진 주파수 분석

스틸/고무 접착 시험편은 추진기관의 스틸 연소관에 추진제가 충전되지 않고 내열 고무만 접착되었을 때의 초음파 신호를 분석하기 위해 제작하였고, 라이너로 인한 고무 공진의 영향을 분석하기 위해 내열 고무 절반 면적에 라이너를 도포하였다. 라이너는 내열 고무와 추진제의 접착력을 증진시키기 위해 설치되는 고무상의 얇은 층이다. 고무와 라이너는 음향 임피던스가 유사하여 동일한 재료로 가정하였고, 본 실험에서는 라이너 두께를 고무 두께에 산술적으로 합산하였다. 실험은 스틸/고무 접착 시험편에서 스틸 두께 1.86 mm, 고무 두께 4.06 mm 및 라이너 두께 0.97 mm인 시험편을 선정하여 실시하였고, 고무 두께는 라이너 두께와 합산하여 5.03 mm로 가정하였다.

상기 시편에 대해 스틸 공진 주파수는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $1,591.39(n)$  kHz로 측정될 것이며, 고무 공진 주파수는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $152.39(n-1/2)$  kHz로 측정될 것이다. 스틸 제 1 공진 주파수는 1591.39 kHz이고, 고무 제 1 공진 주파수는 76.19 kHz이므로 적절한 저주파수 탐촉자를 이용하면 스틸의 공진 주파수를 배제하고 고무의 공진만을 측정할 수 있다.

100 kHz 탐촉자(K0,1G)를 이용하여 상기 시편에 대한 초음파 신호를 측정하였고, 고속푸리에변환을 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. 실험에서 측정된 고무 공진 주파수는  $164.6(n-1/2)$  kHz로써 고무 제 1 공진 주파수는 82.30 kHz로 측정되었고, 고무 제 2 공진 주파수와 고무 제 3 공진 주파수도 측정되었다.

실험에서 측정된 고무 제 1 공진 주파수는 82.30 kHz이고, 예측한 고무 제 1 공진 주파수는 76.19 kHz이므로 약간의 차이가 발생하였다. 예측한 고무 제 1 공진 주파수와 측정된 고무 제 1 공진 주파수의 차이는 6.11 kHz였고, 고무 두께로 환

산하면 0.37 mm 차이를 보였다. 예측한 공진 주파수와 측정된 공진 주파수에서 미소한 차이가 발생한 이유는 시험편 제작시 고무 및 라이너 두께 편차에 기인하였다고 판단하였다.

Fig. 4는 스틸 두께 1.86 mm, 고무 두께 4.06 mm 및 라이너 두께 0.97 mm인 스틸/고무 접착 시험편에 대해 100 kHz 탐촉자로 측정한 초음파 신호로서 초음파 공진이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 100 kHz 탐촉자로 측정된 초음파 공진 신호에 대해 고속푸리에변환을 실시하여 주파수 분석을 수행한 결과이다. 고무 제 1 공진 주파수는 82.30 kHz, 고무 제 2 공진 주파수는 245.67 kHz, 고무 제 3 공진 주파수는 412.73 kHz로 측정되었다.

상기 시험편에 대해 250 kHz 탐촉자(K0,25G)를 이용하여 고무 제 2 공진 주파수를 측정하였다. 250 kHz 탐촉자의 주파수 대역 폭에 고무 제 2 공진 주파수가 위치함으로 250 kHz 탐촉자는 고무 제 2 공진 주파수를 측정하기에 유리하다고 판단하였다.

실험에서 측정된 고무 공진 주파수는  $149.26(n-1/2)$  kHz로써 고무 제 2 공진 주파수인 223.89 kHz만 측정되었다. 예측한 고무의 공진 주파수는  $152.39(n-1/2)$  kHz로써 예측한 고무 제 2 공진 주파수는 228.56 kHz였다. 측정된 고무 제 2 공진 주파수와 예측한 고무 제 2 공진 주파수의 차이는 4.67 kHz 였으며, 고무 두께로 환산하면 0.11 mm 차이를 보여주었다. Fig. 6은 250 kHz 탐촉자로 측정된 초음파 공진 신호에 대해 고속푸리에변환을 실시하여 주파수 분석을 수행한 결과이다.

상기 시험편에 대해 450 kHz 탐촉자(O45ZIP)를 이용하여 고무 제 3 공진 주파수를 측정하였다. 450 kHz 탐촉자의 주파수 대역 폭에 고무 제 3 공진 주파수가 위치함으로 450 kHz 탐촉자는 고무의 제 3 공진 주파수를 측정하기에 유리하다고 판단하였다.

실험에서 측정된 고무 공진 주파수는  $150.26(n-1/2)$  kHz로써 고무 제 3 공진 주파수인 375.66 kHz가 측정되었다. 예측한 고무의 공진 주파수는  $152.39(n-1/2)$  kHz로써 예측한 고무 제 3 공진 주파수는 380.98 kHz였다. 측정된 고무 제 3 공진 주파수와 예측한 고무 제 3 공진 주파수의 차이는 4.67 kHz 였으며, 고무 두께로 환산하

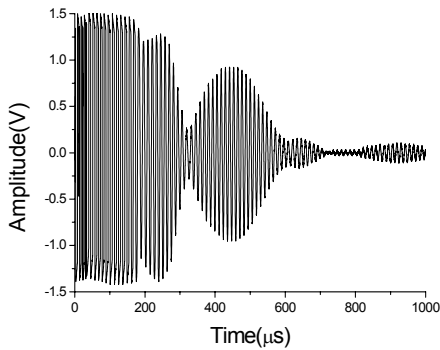


Fig. 4 Ultrasonic resonance signal of steel/rubber adhesive test block with 100 kHz ultrasonic transducer

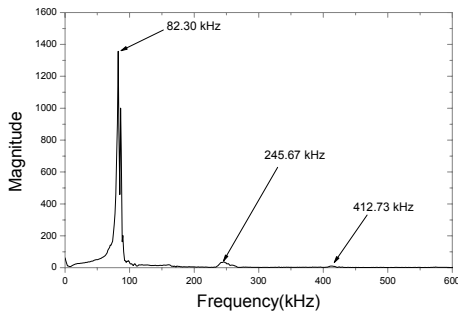


Fig. 5 Analysis of the ultrasonic resonance frequency with 100 kHz ultrasonic transducer

면 0.07 mm 차이를 보여주었다. Fig. 7은 450 kHz 탐촉자로 계측된 초음파 공진 신호에 대해 고속푸리에변환을 실시하여 주파수 분석을 수행한 결과이다. 공칭 주파수가 다른 세 탐촉자를 이용하여 고무 제 1 공진 주파수와 고무 제 2 공진 주파수 및 고무 제 3 공진 주파수를 측정하였다. 이론으로 예측한 공진 주파수와 실험으로 측정된 공진 주파수에서 미소한 차이가 발생하였지만 대체로 일치한 결과를 얻었다.

스틸/고무 접착 시험편 12개에 대해 고무 두께 변화에 따른 고무 공진 주파수 변화를 측정하여 Fig. 8에 도시하였다. 100 kHz 탐촉자는 고무 제 1 공진 주파수를 측정하였고, 250 kHz 탐촉자는 고무 제 2 공진 주파수를 측정하였으며, 450 kHz 탐촉자는 고무 제 3 공진 주파수를 측정하였다. 실선은 고무 두께에 대해 예측한 고무 공진 주파수이다.

100 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 1 공진 주파수와 예측한 고무 제 1 공진 주파수의 차이는 대체로 일치하고 있으나, 고무 두께가 6.0 mm인 곳에서는 고무 제 1 공진 주파수가 계속되지 않았다. 고무 두께가 6.0 mm인 곳에서 고무 제 1 공진 주파수는 63.88 kHz가 측정될 것으로 예측하였으나, 고무 제 1 공진 주파수가 100 kHz 탐촉자의 주파수 대역폭보다 낮게 벗어났으므로 고무 공진 신호를 측정할 수 없었다. 고무 두께가 6.0 mm인 곳에서 고무 제 1 공진 주파수를 계속하기 위해 펄스 폭을 30  $\mu$ s에서 1  $\mu$ s로 변경하고 가진 주파수를 고무 제 1 공진 주파수와 일치시켜 고출력 펄스를 가진하였지만 고무 제 1 공진 주파수는 측정되지 않았다.

250 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 2 공진 주파수와 예측한 고무 제 2 공진 주파수는 약간 낮게 측정되었으며, 고무 두께가 3.0 mm 지점에서 250 kHz 탐촉자의 주파수 대역폭을 높게 벗어났으므로 고무 제 2 공진 주파수가 계속되지 않았다. 고무 두께가 3.0 mm인 곳에서 고무 제 2 공진 주파수를 계속하기 위해 펄스 폭을 30  $\mu$ s에서 1  $\mu$ s로 변경하고 고출력 펄스를 가진하였을 때 고무 제 2 공진 주파수가 측정되었다. 고무 두께가 3.0 mm인 지점에서 고무 제 2 공진 주파수는 383.25 kHz가 측정될 것으로 예측하였고, 스틸 1.86 mm에 접착된 고무에서는 377.35 kHz의 고무 제 2 공진 주파수를 측정하였고, 스틸 2.82 mm에 접착된 고무에서는 372.64 kHz의 고무 제 2 공진 주파수를 측정

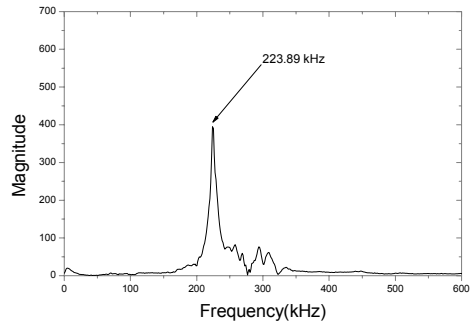


Fig. 6 Analysis of the ultrasonic resonance frequency with 250 kHz ultrasonic transducer

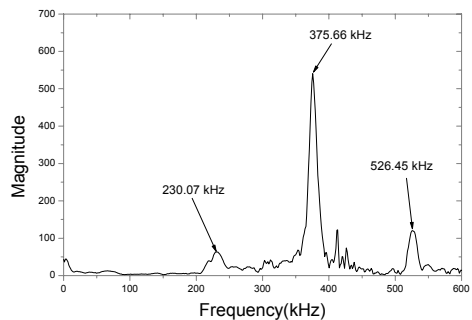


Fig. 7 Analysis of the ultrasonic resonance frequency with 450 kHz ultrasonic Transducer

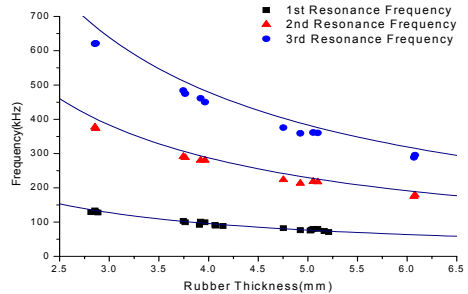


Fig. 8 Analysis of the ultrasonic resonance frequency about the steel/rubber adhesive test block

하였다.

450 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 3 공진 주파수와 예측한 고무 제 3 공진 주파수는 조금 낮게 측정되고 있으며, 고무 두께가 3.0 mm 지점에서 450 kHz 탐촉자의 주파수 대역폭을 높게 벗어났으므로 고무 제 3 공진 주파수가 계속되지 않았다. 고무 두께가 3.0 mm인 곳에서 고무 제 3 공진 주파수를 계속하기 위해 펄스 폭을 30  $\mu$ s에서 1  $\mu$ s로

변경하고 고출력 펄스를 가진하였을 때 고무 제 3 공진 주파수가 측정되었다. 고무 두께가 3.0 mm인 지점에서 고무 제 3 공진 주파수는 638.75 kHz가 측정될 것으로 예측하였고, 스틸 1.86 mm에 접촉된 고무에서는 620.39 kHz의 고무 제 3 공진 주파수를 측정되었고, 스틸 2.82 mm에 접촉된 고무에서는 621.36 kHz의 고무 제 3 공진 주파수를 측정되었다.

100 kHz 탐촉자는 스틸 5.68 mm 및 스틸 7.00 mm에 접촉된 고무에 대해서도 고무 공진 주파수를 측정하였으나, 250 kHz 탐촉자 및 450 kHz 탐촉자는 스틸 5.68 mm 및 스틸 7.00 mm에 접촉된 고무에 대해 튜버스트의 펄스 폭을 조정하고 입사파의 가진 주파수를 고무 두께에 따라 조정하여도 고무 공진 신호를 측정할 수 없었다.

고무 제 1 공진 주파수는 실험 값과 예측 값이 대체로 일치하고 있으나, 고무 제 2 공진 주파수와 고무 제 3 공진 주파수는 실험 값이 예측 값보다 조금 낮았다. 고감쇠 재질인 고무는 제 1 공진 주파수 보다 주파수가 높은 제 2 공진 주파수 및 제 3 공진 주파수에서 주파수 감쇠가 크기 때문에 나타난 현상이라 판단하였다.

#### 4.2. 라이너/추진제 미접착 시험편의 공진 주파수 분석

라이너/추진제 미접착 시험편은 40×40 mm의 테프론을 라이너/추진제 계면에 삽입하여 추진기관에 발생할 수 있는 라이너/추진제 미접착 결함을 모사하고 있는 시험편이다. Fig. 9는 100 kHz 탐촉자를 이용하여 스틸 두께 1.86 mm, 고무 두께 4.06 mm, 라이너 두께 0.97 mm에 추진제가 30 mm 충전된 시험편에 대한 라이너/추진제 미접착 계면의 초음파 신호로서 초음파 공진이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 상기 시험편의 초음파 공진 신호에 대한 주파수 분석 결과이며, 스틸/고무 접촉 시험편에서 측정된 고무 공진 주파수와 유사한 결과를 얻었다. 주파수 분석 결과 고무 제 1 공진 주파수는 87.195 kHz에서 측정되었고, 고무 제 2 공진 주파수 264.81 kHz에서 측정되었고, 고무 제 3 공진 주파수는 434.36 kHz에서 측정되었다. Fig. 1(c)와 같이 라이너/추진제 미접착 계면에서는 고무 공진 주파수를 계측할 수 있으므로 라이너/추진제 계면

에서 미접착 결함이 발생하면 고무 공진 주파수를 분석하여 라이너/추진제 미접착 결함을 검출할 수 있다.

라이너/추진제 미접착 시험편 12개 대하여 고무 두께 변화에 따른 고무 공진 주파수를 측정하여 Fig. 11에 도시하였다. 100 kHz 탐촉자는 고무 제 1 공진 주파수를 나타내었고, 250 kHz 탐촉자는 고무 제 2 공진 주파수를 나타내었으며, 450 kHz

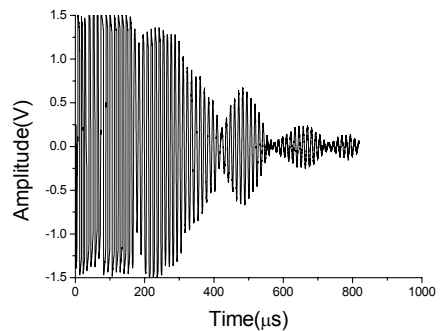


Fig. 9 Ultrasonic resonance signal of liner/propellant disbond interface

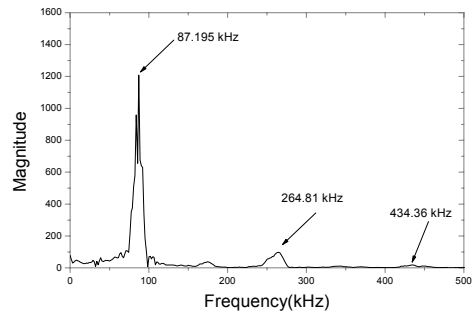


Fig. 10 Analysis of the ultrasonic resonance frequency about liner/propellant disbond interface using 100 kHz ultrasonic transducer

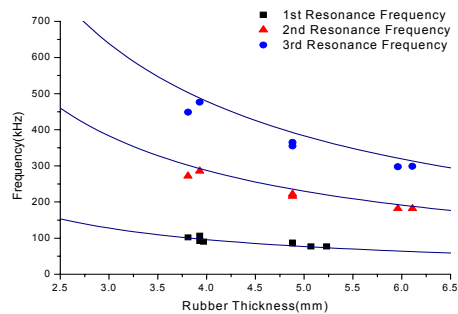


Fig. 11 Analysis of the ultrasonic resonance frequency about the liner/propellant disbond interface

탐촉자는 고무 제 3 공진 주파수를 나타내었다. 실선은 예측한 고무 공진 주파수이다.

100 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 1 공진 주파수와 예측한 고무 제 1 공진 주파수는 대체로 일치하고 있으며, 고무 두께가 6.0 mm인 곳에서는 스틸/고무 접착 시험편의 실험 결과와 마찬가지로 고무 공진 주파수가 계측되지 않았다.

250 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 2 공진 주파수와 예측한 고무 제 2 공진 주파수는 약간 낮게 측정되었으며, 스틸 5.68 mm 및 스틸 7.00 mm에 접착된 고무에 대해 마찬가지로 고무 공진 주파수가 측정되지 않았다. 450 kHz 탐촉자로 측정된 고무 제 3 공진 주파수와 예측한 고무 제 3 공진 주파수는 조금 낮게 측정되었으며, 스틸 5.68 mm 및 스틸 7.00 mm에 접착된 고무에 대해 마찬가지로 고무 공진 주파수가 측정되지 않았다.

라이너/추진제 미접착 시험편은 테프론 시트를 삽입하여 강제적으로 라이너/추진제 미접착결함을 발생시켰으나, 테프론 시트 이외의 영역은 추진제

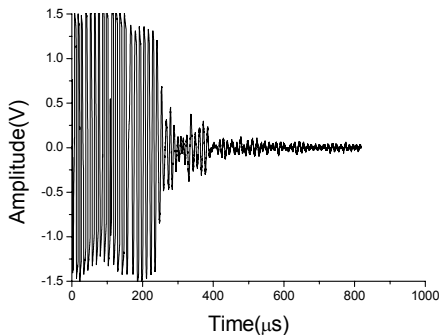


Fig. 12 Ultrasonic signal of liner/propellant adhesive interface

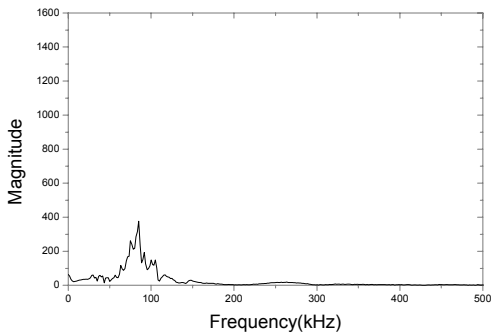


Fig. 13 Analysis of the ultrasonic frequency about liner/propellant adhesive interface using 100 kHz ultrasonic transducer

와 라이너가 접착되어 있다. 라이너/추진제가 미접착 결함이 발생한 경우와 접착된 경우를 상호 비교하기 위하여 동일한 실험 조건으로 라이너/추진제 접착 계면에 대해 초음파시험을 실시하였다.

Fig. 12는 100 kHz 탐촉자를 이용하여 라이너/추진제 접착 계면에 대해 계측한 초음파 신호이다. 라이너/추진제 미접착 결함이 존재할 때 측정되었던 고무 공진 신호가 라이너/추진제 접착 계면에서는 측정되지 않았다. Fig. 13의 주파수 분석 결과에서도 고무 공진으로 판단할 수 있는 고무 공진 주파수가 측정되지 않았다. 라이너/추진제 미접착 결함은 Fig. 1(c)에서와 같이 주파수 분석에 의해 고무 공진 주파수를 예측하고 Fig. 10과 같이 실험으로 고무 공진 주파수를 측정할 수 있는 반면, 라이너/추진제 접착 계면에서는 고무 공진 주파수를 얻지 못하였다.

라이너/추진제 미접착 계면과 라이너/추진제 접착 계면은 공진 특성이 다르므로 고무 공진 주파수를 분석하면 고무/추진제 미접착 계면과 고무/추진제 접착 계면을 쉽게 구별할 수 없으므로 두 신호를 비교하면 쉽게 라이너/추진제 미접착 결함을 검출할 수 있다.

## 5. 결론

추진기관의 라이너/추진제 미접착 결함을 검출하기 위해 고무 공진 신호를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스틸/고무 접착 시험편을 이용하여 고무 공진 주파수를 측정하였고, 3중 매질의 음압 반사 계수를 이용하여 예측한 고무 공진 주파수와 비교하였으며, 측정된 고무 공진 주파수와 예측한 고무 공진 주파수는 대체로 일치하였다.
- 2) 라이너/추진제 미접착 시험편에서도 스틸/고무 접착 시험편과 동일한 고무 공진 신호를 계측하였다.
- 3) 라이너/추진제 접착 계면에서는 고무 공진 신호가 계측되지 않았고, 주파수 분석으로도 고무 공진으로 판단할 수 있는 주파수가 측정되지 않았다.
- 4) 초음파 공진법을 이용하면 추진기관과 같은 다중접착구조물의 라이너/추진제 미접착 결함을 기존의 펄스 에코법보다 쉽게 검출할 수 있다.



## 참고문헌

- [1] F. Chu, H. Ouyang, V. Silberschmidt, L. Garibaldi, C. Surace, W. M. Ostachowicz and D. Jiang, "Influence of disbond defects on the dispersion properties of adhesive bonding structures," *Key Engineering Materials*, Vol. 413, pp. 767-774 (2009)
- [2] M. Hajian and H. Farhang, "Reflectivity estimation using an expectation maximization algorithm for ultrasonic testing of adhesive bonds," *Materials Evaluation*, Vol. 69, No. 2, pp. 208-219 (2011)
- [3] J. M. Allin, P. Cawley and M. J. S. Lowe, "Adhesive disbond detection of automotive components using first mode ultrasonic resonance," *NDT & E International*, Vol. 36, No. 7, pp. 503-514 (2003)
- [4] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, "Fundamental of acoustics," *John Wiley & Sons*, 3rd Edition, pp. 127-131 (1982)
- [5] L. J. Busse, H. D. Collins and J. D. Erick, "An acoustical imaging system for the inspection of solid rocket motor," *AFROL TR-84-002*, Air Force Rocket Propulsion Laboratory (1984)
- [6] M. Shimizu, K. Itoh and T. Fujiwara, "Swept frequency type of ultrasonic inspection method for liner-propellant separations of the H-I upper stage motors," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 26, pp. 379-384 (1989)