

# 초음파 공진을 이용한 스틸 연소관의 내열 고무 두께 측정 기법 연구

김동륜\* · 김재훈\*\*†

## Study on Thickness Measurement about Insulation Rubber of Steel Motor Case Using Ultrasonic Resonance

Dongryun Kim\* · Jaehoon Kim\*\*†

### ABSTRACT

The rubber side could be contaminated using the existing pulse echo method because the ultrasonic wave was incident on the rubber side from the interior of the steel motor case, which could lead to the critical disbond defect. To develop the test method which can be replaced the existing method, the ultrasonic wave was incident on steel face of the steel/rubber adhesive test block. Rubber resonance frequencies measured from the steel/rubber adhesive test block were in good agreement with theoretically predicted rubber resonance frequencies. This paper was described about the ultrasonic resonance method to convert the rubber resonance frequency into the rubber thickness.

### 초 록

기존의 펄스에코법은 스틸 연소관 내부에서 고무면으로 초음파를 입사시키므로 검사 도중에 고무면이 오염될 수 있으며, 이로 인해 치명적인 미접착 결함을 유발시킬 수 있다. 상기 방법을 보완할 수 있는 시험기법을 개발하기 위해 스틸/고무 접착 시험편을 제작하여 스틸면으로 초음파를 입사시켰다. 스틸/고무 접착 시험편으로부터 측정한 고무 공진 주파수는 이론적으로 예측한 공진 주파수와 일치하였다. 본 논문은 고무 공진 주파수를 이용하여 고무 두께를 측정할 수 있는 초음파 공진법에 대해 기술하였다.

Key Words: Nondestructive Test(비파괴시험), Ultrasonic Wave(초음파), Ultrasonic Resonance(초음파 공진), Steel Motor Case(스틸 연소관), Rubber Thickness(고무 두께)

### 1. 서 론

추진기관은 스틸 연소관, 내열 고무, 라이너 및 추진제와 같은 물질이 접착되어 있는 다중접착구조물이고, 내열 고무는 스틸 연소관과 추진제 사이에 존재하여 추진제 연소시 고온 고압의 연소가스로부터 스틸 연소관을 보호하는 역할과

\* 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

\*\* 충남대학교 기계설계공학과

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

동시에 이동 및 보관 시 열적 혹은 기계적 응력을 견딜 수 있는 역할을 하기 때문에 재질은 라이너와 유사한 고무상 재질이 사용된다.

스틸 연소관의 내열 고무는 설계 치수보다 얇게 성형되었을 경우에는 연소시 내열 성능이 저하되어 내열 파괴를 초래할 수 있으며, 설계 치수보다 두껍게 성형되었을 경우에는 추진제가 기준보다 적게 충전되어 추력이 저하될 수 있다.

스틸 연소관의 내열 고무 두께를 측정하는 비파괴시험은 판독이 상대적으로 용이하고 스틸 연소관을 형상화하기 쉬운 방사선투과시험을 적용하였으나, 방사선투과시험은 스틸 연소관과 내열 고무 접촉계면에서 발생하는 흐릿한 영상(Blurring)과 산란선의 영향으로 측정 오차가 크고, 측정부와 X-ray 진행 방향이 접선방향으로 일치되어야 하기 때문에 많은 검사 비용과 시간이 소요된다[1].

방사선투과시험의 대안으로써 초음파시험이 대표적인데, 초음파시험은 방사선투과시험보다 신속하고 정확하게 스틸 연소관의 내열 고무 두께를 측정할 수 있다. 현재 내열 고무 두께는 스틸 연소관 내부에서 고무면으로 초음파를 입사시키는 펄스에코법을 이용하여 측정하고 있다. 상기 방법은 탐촉자를 내열 고무에 접촉해야 하고 초음파를 원활하게 입사시키기 위해 접촉매질을 도포해야 한다. 도포된 접촉매질은 추진제를 충전하기 위하여 제거해야 하는 공정 및 비용이 소요되며, 불완전 제거시 오염으로 인하여 추진제/라이너 미접착 결함과 같은 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다. 직경이 작고 길이가 긴 스틸 연소관은 고무면과 탐촉자의 접촉이 용이하지 않기 때문에 두께 측정에 제한이 따른다.

펄스에코법은 매질을 왕복하는데 소요되는 시간과 초음파 속도를 이용하여 매질의 두께를 측정할 수 있는 초음파시험 방법으로 의료 및 산업계에서 두께 측정을 위해 많이 활용하고 있다. Huysmans et al.은 고주파수 초음파를 이용하여 펄스에코법으로 치아의 에나멜 두께를 측정하였고, Zhao et al.은 중파 속도를 이용하여 펄스에코법으로 에폭시 코팅 두께를 측정하였다[2, 3]. 상기 방법은 탐촉자를 검사물에 직접 접촉시키

거나 탐촉자와 검사물에 일정한 물거리를 두고 검사물의 두께를 측정한다.

본 논문은 탐촉자를 고무면에 접촉하였을 때 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위해 스틸면에서 초음파를 입사시켜 내열 고무 두께를 측정하는 기법에 대해 기술하였다. 이를 위해 삼중 매질의 음압반사계수를 이용하여 고무 공진 주파수를 예측하였고, 고무 공진 주파수를 이용하여 고무 두께를 측정하였다[4]. 초음파가 스틸면으로 입사하였을 때 펄스에코법의 적용 한계를 초음파 모델링으로 분석하였고, 실험으로 고무 공진 주파수를 이용하여 고무 두께를 측정할 수 있음을 입증하였다.

## 2. 이론적 배경

제 1 매질과 제 3 매질 사이에 일정한 두께의 제 2 매질이 존재하고, 초음파가 제 1 매질에 수직으로 입사하면, 제 1 매질에 입사한 초음파는 제 1 매질과 제 2 매질의 경계면에서 반사파와 투과파로 나누어진다. 제 2 매질로 투과한 초음파는 제 2 매질과 제 3 매질의 경계면에서 반사파와 투과파로 나누어지며, 반사파와 투과파는 각 매질의 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해진다. 경계 조건을 적용하면 삼중 매질의 음압 반사계수는 Eq. 1과 같이 유도될 수 있다[5, 6].

$$R = \frac{\left(1 - \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos k_3 L + j \left(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2}\right) \sin k_2 L}{\left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \cos k_3 L + j \left(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2}\right) \sin k_2 L} \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 삼중 매질의 음압반사계수이고,  $Z_i$ 는  $i$ 번째 매질의 음향 임피던스이며,  $k_2$ 와  $L$ 은 제 2 매질의 파수 및 두께이다.

Equation 1에서 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 성립되고 스틸은 공진하게 되며, 스틸 두께는 Eq. 2와

같이 유도될 수 있다.

$$L_s = n \frac{c_s}{2f_s} \quad (2)$$

여기서,  $f_s$ 는 제 2 매질인 스틸 공진 주파수이며,  $c_s$ 는 스틸의 음속이고,  $L_s$ 는 스틸의 두께이다. 스틸 공진 주파수와 음속을 이용하면 스틸의 두께를 구할 수 있다.

Equation 1에서 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 성립되고, 고무는 공진하게 되며, 고무 두께는 Eq. 3과 같이 유도될 수 있다.

$$L_r = (n - \frac{1}{2}) \frac{c_r}{2f_r} \quad (3)$$

여기서,  $f_r$ 는 제 2 매질인 고무 공진 주파수이며,  $c_r$ 는 고무를 음속이고,  $L_r$ 은 고무를 두께이다. 고무 공진 주파수와 음속을 이용하면 고무를 두께를 구할 수 있다.

Equation 1을 이용하여  $k_2 L$ 과 음압반사계수  $R$ 의 상관관계를 Fig. 1과 같이 극좌표계로 표시하였다. Fig. 1(a)에서 제 1 매질은 접촉매질, 제 2 매질은 스틸, 제 3 매질은 공기로 설정하였고, 각 매질의 음향 임피던스를 대입하였다. Fig. 1(b)에서 제 1 매질은 스틸, 제 2 매질은 고무, 제 3 매질은 공기로 설정하였고, 각 매질의 음향 임피던스를 대입하였다. Fig. 1(a)에서 음압반사계수는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $n\pi$ 의 조건에서 낮아지며, Fig. 1(b)에서 음압반사계수는 임의의 정수  $n$ 에 대하여  $(2n-1)\pi/2$ 의 조건에서 낮아지고 있고, 음압반사계수가 최소가 될 때 초음파는 공진하게 된다.

스틸 공진 주파수는 Fig. 1(a)를 이용하여 예측할 수 있으며, 고무 공진 주파수는 Fig. 1(b)를 이용하여 예측할 수 있다. 스틸과 고무가 서로 다른 공진 조건을 갖는 이유는 매질 경계면에서 초음파가 반사될 때 경계 조건에 의해 초음파 위상이 반전하기 때문이다.

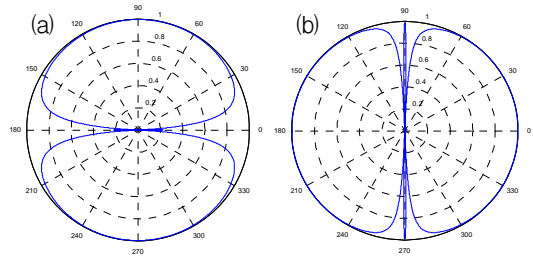


Fig. 1 Prediction of Ultrasonic Resonance Frequency Using the Pressure Reflection Coefficient (a) Resonance Condition of Steel (b) Resonance Condition of Rubber

### 3. 실험 장비 및 시험편

#### 3.1 실험 장비

Figure 2는 초음파 공진 신호를 분석하기 위한 실험 장치 구성도이다. 본 연구에서는 초음파의 송·수신을 위하여 Ritec사의 고출력 비선형 초음파 분석 장비(RAM-5000 SNAP)를 사용하였고, 고무 공진 신호를 계측하기 위해 Krautkramer사의 공칭 주파수 100 kHz인 접촉식 일진동자 초음파 탐촉자(K0,1G)를 사용하였으며, 탐촉자로부터 수신된 초음파 신호는 Gage사의 A/D 보드(CS82G)를 이용하여 분석하였다.

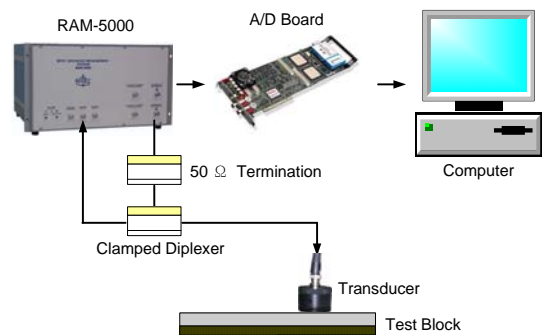


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

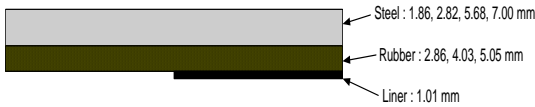


Fig. 3 Sectional View of Steel/Rubber Adhesive Test Block

### 3.2 스틸/고무 접착 시험편

스틸/고무 접착 시험편을 제작하기 위해 스틸 두께가 1.86 mm, 2.82 mm, 5.68 mm 및 7.00 mm이고 길이와 폭이 150 mm인 스틸 평판을 스틸 두께별로 3개씩 12개를 준비하였다. 모든 스틸 평판은 고무를 잘 접착하기 위해 샌딩 작업을 한 후에 캄록을 도포하였다. 고체 상태의 EPDM 고무판을 캄록이 도포된 스틸 면에 적층한 후 오토클레이브에서 가압 성형하여 스틸과 고무를 접착시켰다.

고무 두께는 각 스틸의 두께에 따라 2.86 mm, 4.03 mm, 5.05 mm였으며, 고무 두께는 오토클레이브에서 고무를 녹여 성형하였기 때문에 같은 시험편 내에서도 굴곡이 있어 두께가 일정하지 않았고  $\pm 0.20$  mm의 편차가 발생하였다. 고무면에 라이너가 접착되었을 때 초음파 공진의 영향을 알기 위하여 성형된 고무 절반 면적에 라이너를 1.01 mm 두께로 도포하였으며, 고무면보다는 굴곡이 적었지만 두께가 일정하지 않았고  $\pm 0.10$  mm의 편차가 발생하였다. Fig. 3은 스틸/고무 접착 시험편의 단면도이다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 펄스에코법

초음파가 스틸 연소관에 입사하게 되면 초음파는 스틸 내부를 압력과 형태로 진행하게 되는데 스틸과 고무를 접착계면에서 스틸과 고무를 음향 임피던스 차이에 의해 초음파는 반사와 투과를 반복적으로 수행한다. 스틸 내부에서 반사된 초음파 신호는 반복적으로 반사와 투과를 수행하며, 고무 내부로 투과된 초음파도 반복적으로

로 반사와 투과를 수행한다. 펄스에코법은 초음파가 매질을 왕복하는데 소요되는 시간을 이용하여 결합 위치 및 두께를 평가할 수 있으며, 초음파의 진폭을 이용하여 결합 크기 및 접착계면 상태를 평가할 수 있는 통상적인 초음파 시험법이다[7].

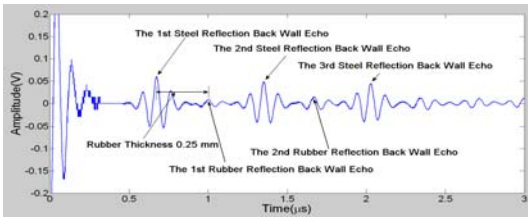
매질을 왕복하는데 소요되는 시간을 일반적으로 음향 두께라고 정의한다. 스틸의 음향 두께는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 스틸 제 2 저면 반사 신호의 시간 차이를 측정하여 구할 수 있고, 고무를 음향 두께는 고무 제 1 저면 반사 신호와 고무 제 2 반사 신호의 시간 차이를 측정하여 구할 수 있다. 스틸과 고무를 음향 두께는 초음파 위상 반전 현상을 고려하여 측정하였다.

스틸의 음향 두께가 고무를 음향 두께보다 크면 고무 제 1 저면 반사 신호는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 스틸 제 2 저면 반사 신호 사이에 위치하게 된다. 스틸에 접착된 고무를 음향 두께는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 고무 제 1 저면 반사 신호의 시간 차이를 측정하고 고무를 초음파 음속을 이용하여 고무 두께를 계산할 수 있다.

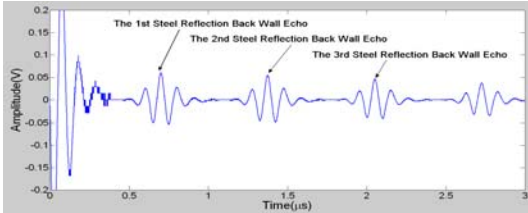
Fig. 4(a)는 스틸 두께 2 mm에 고무 두께 0.25 mm가 접착되었을 때의 초음파 모델링 신호이다 [8]. 스틸의 음향 두께는  $0.68 \mu\text{s}$ 이고, 고무를 음향 두께는  $0.33 \mu\text{s}$ 이므로 스틸의 음향 두께가 고무를 음향 두께보다 크기 때문에 스틸 제 1 저면 반사 신호와 고무 제 1 저면 반사 신호의 시간 차이를 이용하여 고무 두께를 계산할 수 있다.

스틸의 음향 두께와 고무를 음향 두께가 같으면 고무 제 1 저면 반사 신호는 스틸 제 1 저면 반사 신호에 중첩되므로 스틸에 접착된 고무를 음향 두께는 고무 제 1 저면 반사 신호를 측정할 수 없으므로 고무를 음향 두께를 측정할 수 없다.

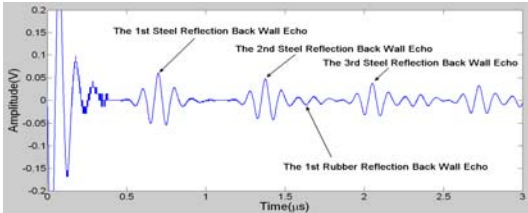
Fig. 4(b)는 스틸 두께 2 mm에 고무 두께 0.52 mm가 접착되었을 때의 초음파 모델링 신호이다. 스틸의 음향 두께는  $0.68 \mu\text{s}$ 이고, 고무를 음향 두께는  $0.68 \mu\text{s}$ 이므로 스틸의 음향 두께와 고무를 음향 두께가 같기 때문에 스틸 제 1 저면 반사 신호에 고무 제 1 저면 반사 신호가 중첩되어 고무 두께를 측정할 수 없다.



(a) Rubber Thickness 0.25 mm



(b) Rubber Thickness 0.52 mm



(c) Rubber Thickness 0.75 mm

Fig. 4 Ultrasonic Modelling Signal at Steel/Rubber Adhesive interface in case of Steel Thickness 2 mm

스틸의 음향 두께가 고무의 음향 두께보다 작으면 고무 제 1 저면 반사 신호는 스틸의 제 2 저면 반사 신호 뒤에 위치하게 된다. 스틸에 접착된 고무의 두께는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 고무 제 1 저면 반사 신호의 시간 차이를 이용하여 측정할 수 있지만, 고무 제 1 저면 반사 신호의 진폭이 작고 고무의 초음파 파형이 감쇠 계수로 인해 왜곡되므로 고무의 두께를 측정하기에는 어려움이 많다.

Fig. 4(c)는 스틸 두께 2 mm에 고무 두께 0.75 mm가 접착되었을 때의 초음파 모델링 신호이다. 스틸의 음향 두께는 0.68  $\mu\text{s}$ 이고, 고무의 음향 두께는 0.98  $\mu\text{s}$ 이므로 스틸의 음향 두께가 고무의 음향 두께보다 작기 때문에 스틸 제 2 저면 반사 신호 뒤에 고무 제 1 저면 반사 신호가

위치하며 고무 두께를 측정하기에는 한계가 있다.

초음파를 스틸면에서 고무로 입사시킬 때 펄스에코법은 스틸의 음향 두께가 고무의 음향 두께보다 큰 경우에만 적용할 수 있다. 펄스에코법으로 고무 두께를 측정하기 위해서는 매질의 음향 두께를 반드시 고려해야 한다. 일반적으로 스틸 연소관은 스틸의 음향 두께가 고무의 음향 두께보다 작기 때문에 스틸면에서 고무로 초음파를 입사시키는 펄스에코법을 적용할 수 없다.

이런 이유로 현재까지 스틸 연소관의 고무 두께를 측정하기 위해서 고무면에 탐촉자를 접촉시켜 초음파를 고무면으로 입사시키는 펄스에코법을 적용하고 있지만, 현재의 방법은 고무면의 오염으로 추진제/라이너 미접착 결함과 같은 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다.

기존의 펄스에코법을 개선하기 위해 고무 공진 주파수를 이용하여 고무 두께를 측정하는 초음파 공진법을 개발하였다. 초음파 공진법은 스틸의 음향 두께가 고무의 음향 두께보다 작은 경우에도 적용할 수 있으므로 초음파를 스틸면에서 고무로 입사시켰다.

#### 4.2 초음파 공진법

초음파 공진법은 스틸/고무 접착 시험편과 공진 주파수가 100 kHz인 수직 탐촉자를 이용하였고, 초음파는 스틸면에서 고무 내부로 입사시켰다. 실험에 사용한 스틸/고무 접착 시험편의 스틸 음속은 5,920 m/s이므로 스틸 두께가 1.86 mm에서는 1,591.40 kHz, 2.82 mm에서 1,049.65 kHz, 5.68 mm에서는 521.13 kHz 및 7.00 mm에서 422.86 kHz의 스틸 제 1 공진 주파수를 갖게 된다. 스틸 제 1 공진 주파수는 실험에 사용한 탐촉자의 밴드폭을 벗어나기 때문에 계측되지 않을 것이다.

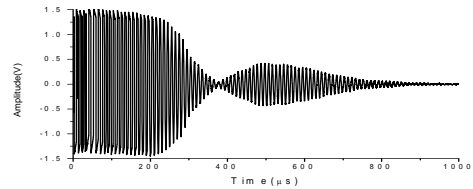
고무는 스틸에 2.86 mm, 4.03 mm, 5.05 mm의 두께로 접착되었으며, 고무 절반 면적에 라이너를 1.01 mm 두께로 도포하였다. 고무 음속은 1,532 m/s이므로 고무 두께에 따라 고무 제 1 공진 주파수는 75.84 kHz와 133.91 kHz 사이에

서 측정될 것이며, 고무에 라이너가 접착된 경우는 고무 두께에 라이너 두께를 합산한 두께에 따라 고무 제 1 공진 주파수는 63.20 kHz와 98.97 kHz 사이에서 측정될 것이다. 라이너는 내열 고무와 추진제의 접착력을 증진시키기 위해 설치되는 고무상의 얇은 층이므로, 고무와 라이너는 음향 임피던스가 유사하여 동일한 재질로 가정하였고, 본 실험에서는 라이너 두께를 고무 두께에 산술적으로 합산하였다.

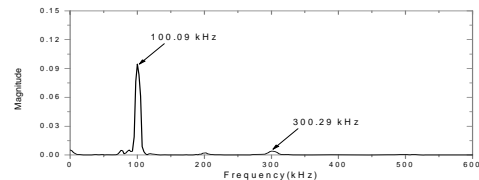
Figure 5(a)는 스틸 두께 1.86 mm에 고무가 3.97 mm 두께로 접착된 스틸/고무 접착 시험편의 초음파 공진 신호이고, Fig. 5(b)는 초음파 공진 신호를 고속푸리에변환을 실시하여 얻은 주파수 스펙트럼이다. 스틸 두께 1.86 mm에서는 스틸 제 1 공진 주파수가 1,591.40 kHz에서 측정될 것으로 예측하였고, 고무 3.97 mm에서는 고무 제 1 공진 주파수가 96.47 kHz에서 측정될 것으로 예측하였다. 주파수 분석 결과 스틸 제 1 공진 주파수는 탐촉자의 밴드폭을 벗어나므로 측정되지 않았고, 고무 제 1 공진 주파수는 100.09 kHz에서 측정되었고, 고무 제 2 공진 주파수는 300.29 kHz에서 약하게 측정되었다. 고무 제 1 공진 주파수인 100.09 kHz는 Eq. 3을 이용하여 고무 두께로 계산하면 3.83 mm이며 실제 고무 두께보다 0.14 mm 적게 측정되었다.

Figure 6(a)는 스틸 두께 1.86 mm에 고무 두께 2.86 mm가 접착되고, 라이너 두께 0.89 mm가 도포된 스틸/고무 접착 시험편의 초음파 공진 신호이고, Fig. 6(b)는 초음파 공진 신호를 고속푸리에변환을 실시하여 얻은 주파수 스펙트럼이다. 라이너는 고무와 동일한 고무상의 얇은 층이므로 라이너 두께는 고무 두께에 산술적으로 합산하여 고무 두께는 3.75mm로 계산하였다. 스틸 두께 1.86 mm에서는 스틸 제 1 공진 주파수가 1,591.40 kHz에서 측정될 것으로 예측하였고, 고무 두께 3.75 mm에서는 고무 제 1 공진 주파수가 102.13 kHz에서 측정될 것으로 예측하였다. 주파수 분석 결과 스틸 제 1 공진 주파수는 탐촉자의 밴드폭을 벗어나므로 측정되지 않았고, 고무 제 1 공진 주파수는 103.75 kHz에서 측정되었고, 고무 제 2 공진 주파수는 307.62 kHz에

서 약하게 측정되었다. 고무 제 1 공진 주파수인 103.75 kHz는 Eq. 3을 이용하여 고무 두께로 계산하면 3.69 mm이며 실제 고무 두께보다 0.06 mm 적게 측정되었다.

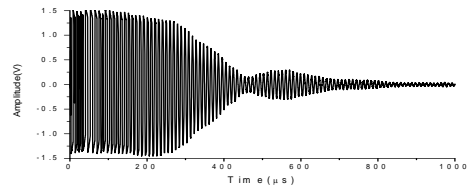


(a) Ultrasonic Resonance Signal

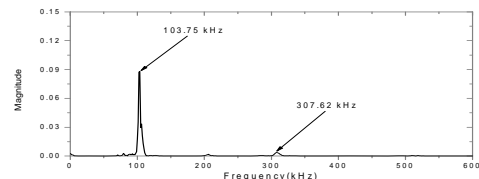


(b) Ultrasonic Frequency Spectrum

Fig. 5 Analysis of Ultrasonic Signal from Steel/Rubber Adhesive Test Block with Steel 2 mm and Rubber 3.97 mm in Thickness



(a) Ultrasonic Resonance Signal



(b) Ultrasonic Frequency Spectrum

Fig. 6 Analysis of Ultrasonic Signal from Steel/Rubber Adhesive Test Block with Steel 2 mm, Rubber 2.86 mm and Liner 0.89 mm in Thickness

Figure 5는 스틸에 고무만 접착되었을 때의 초음파 신호 분석 결과이며, Fig. 6은 스틸에 고무가 접착되고 라이너가 도포되었을 때의 초음파 신호 분석 결과이다. 두 실험에서 스틸의 두께는 1.86 mm로 동일했고, 고무 두께는 각각 3.97 mm와 3.75 mm로 유사하였다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교하면 초음파 공진 신호와 주파수 스펙트럼이 유사하였으므로 라이너를 고무와 산술적으로 합산하여도 무방하다고 판단하였다.

스틸/고무 접착 시험편 12개에 대해 고무 두께 변화에 따른 고무 제 1 공진 주파수를 측정하였다. 스틸/고무 접착 시험편 절반은 고무면에 라이너가 1.01 mm 도포되었으며, 라이너 두께는 고무 두께와 합산하였다. 초음파 시험은 스틸/고무 접착 시험편에 대해 라이너가 도포되지 않은 경우와 라이너가 도포된 경우를 분류하여 초음파 신호를 측정하였다. Fig. 7에서 스틸/고무 접착 시험편 12개의 고무 두께에 대한 고무 제 1 공진 주파수를 도시하였고, 실선은 이론으로 예측한 고무 제 1 공진 주파수에 대한 고무 두께 선도이다. 스틸에 접착된 고무 두께 5.05 mm에 라이너 1.01 mm가 도포된 시험편은 고무 두께에 라이너를 합산하여 고무 두께는 6.06 mm로 산술하였으나, 고무 제 1 공진 주파수는 측정되지 않았다. 고무 두께 6.06 mm에서는 고무 제 1 공진 주파수가 63.2 kHz에서 측정되어야 하지만 100 kHz 탐촉자의 밴드폭을 벗어나므로 고무 제 1 공진 주파수는 측정되지 않았다.

스틸/고무 접착 시험편으로 측정한 고무 제 1 공진 주파수는 이론으로 예측한 고무 제 1 공진 주파수와 비교하여 약간의 오차를 보이고 있다. 스틸/고무 접착 시험편에서 스틸에 고무만 접착되어 있는 경우는 실제 고무 두께와 예측한 고무 두께 차이는 대부분 0.2 mm 내에서 발생하였고, 최대 두께 차이는 0.35 mm였다. 스틸에 고무가 접착되고 라이너가 도포된 경우는 실제 고무 두께와 예측한 고무 두께 차이는 대부분 0.1 mm 내에서 발생하였고, 최대 두께 차이는 0.25 mm 였다.

스틸/고무 접착 시험편에서 고무는 오토클레이브에서 고무를 녹여 성형하였기 때문에 고무

두께는 일정하지 않았으며  $\pm 0.20$  mm의 두께 편차가 발생하였다. 라이너는 고무 면 위에 라이너를 도포하였으므로 고무면과 비교하면 굴곡이 적었지만  $\pm 0.10$  mm의 두께 편차가 발생하였다.

Fig. 8에서 스틸/고무 접착 시험편의 고무면과 라이너면을 도시하였다. 스틸/고무 접착 시험편의 고무면은 고무 성형 과정에서 고무 유동에 의해 형성된 굴곡이 있었고, 심지어 고무면이 주름진 곳도 보이고 있지만, 라이너 면은 고무면과 비교하여 매끈하였다. 실험은 고무가 주름진 곳을 피하여 두께가 비교적 일정한 영역의 초음파 신호를 취득했지만 스틸/고무 접착 시험편이 가지고 있는 두께 편차로 인하여 두께 측정에 약간의 오차가 발생한 것으로 판단하였다.

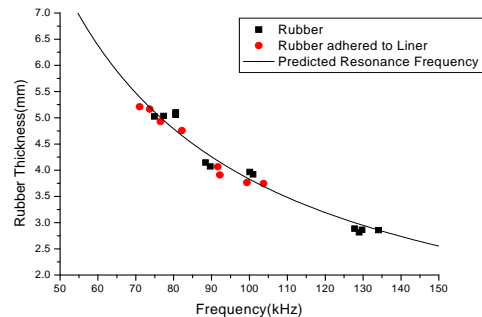


Fig. 7 Rubber Thickness Measurement of Steel/Rubber Adhesive Test Block Using the Ultrasonic Resonance Frequency

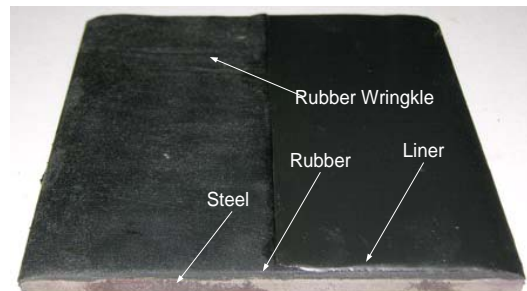


Fig. 8 Rubber and Liner Side of Steel/Rubber Adhesive Test Block

## 5. 결 론

스틸 연소관의 내열 고무 두께를 측정하기 위해 고무 공진 주파수를 측정하여 고무 두께로 계산하는 기법을 개발하였고, 기존의 고무 두께 측정을 위해 사용하였던 펄스에코법과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 펄스에코법은 스틸 연소관 내부에서 고무면에 탐촉자를 접촉시키기 때문에 고무면을 오염시킬 수 있으므로 추진제/라이너 미접촉과 같은 결함을 유발시킬 수 있다.
- 2) 스틸에서 고무로 초음파를 입사시키는 방식의 펄스에코법을 적용하려면 스틸의 음향 두께가 반드시 고무의 음향 두께보다 커야 한다.
- 3) 초음파 공진법을 적용하면 스틸의 음향 두께가 고무의 음향두께보다 작은 경우에도 고무 공진 주파수를 분석하여 고무 두께를 측정할 수 있다.
- 4) 초음파 공진법을 적용하려면 탐촉자의 밴드 폭 내에 고무 공진 주파수에 있어야 한다.
- 5) 실제 고무 두께는 예측한 고무 두께와 약간의 차이가 있었지만, 고무 및 라이너의 두께 편차를 고려하면 실제 고무 두께는 예측한 고무 두께와 일치한다고 판단하였다.

## 참 고 문 헌

1. 이성식, 장병규, 김영환, "방사선투과필름에서 Density Profile을 이용한 배관의 두께 평가," 비파괴검사학회지, 제22권, 제5호, 2002, pp.483-489
2. M. Huysmans, and J. M. Thijssen, "Ultrasonic Measurement of Enamel Thickness: A Tool for Monitoring Dental Erosion," Journal of Dentistry, Vol. 28, No. 3, 2000, pp.187-191
3. Y. Zhao, L. Lin, X. M. Li and M. K. Lei, "Simultaneous Determination of the Coating Thickness and Its Longitudinal Velocity by Ultrasonic Nondestructive Method," NDT & E International, Vol. 43, No. 7, 2010, pp.579-585
4. 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, 2003, pp.503-514
5. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, "Fundamental of Acoustics," 3rd ed., John Wiley & Sons Inc, 1982
6. Y. Zhao, X. M. Li, and M. K. Lei, "Measurements of Coating Density Using Ultrasonic Reflection Coefficient Phase Spectrum," Ultrasonics, Vol. 51, No. 5, 2011, pp.596-601
7. 김동륜, 임수용, 정상기, 이경훈, "복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램 개발," 한국추진공학회지, 제16권, 제2호, 2012, pp.65-72
8. M. Hajian and F. Honarvar, "Reflectivity Estimation Using an Expectation Maximization Algorithm for Ultrasonic Testing of Adhesive Bonds," Materials Evaluation, Vol. 69, No. 2, 2011, pp.208-219