

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.5.089>

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 시험 기법을 개발하기 위해 스틸/고무 접착 시험편을 제작하여 스틸면으로 초음파를 입사시켰다. 스틸/고무 접착 시험편으로부터 측정된 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)

접수일 2012. 5. 23, 수정완료일 2012. 9. 13, 게재확정일 2012. 9. 19

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

** 종신회원, 충남대학교 기계설계공학과

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 춘계학술대회(2012. 5. 17-18, 금오공과대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

스틸 연소관의 내열 고무는 스틸 연소관과 추진제 사이에 존재하여 추진제 연소시 고온 고압

의 연소 가스로부터 스틸 연소관을 보호하는 역할과 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.

현재 내열 고무 두께는 고무면에서 스틸로 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 종파 속도를 이용하여 펄스에코법으로 에폭시 코팅 두께를 측정하였다[1, 2]. 상기 방법은 탐촉자를 검사물에 직접 접촉시키거나 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. 초음파 공진법을 이용하여 매질의 두께를 측정하기 위해서 Allin et al.은 Hook's 법칙을 이용하여 제 1 공진 주파수를 예측하였고, 금속 접착 구조물의 접착제로 사용한 에폭시 두께를 제 1 공진 주파수를 이용하여 측정하였다[3]. 본 논문에서는 삼중 매질의

음압반사계수를 이용하여 고무 공진 주파수를 예측하였고, 고무 공진 주파수를 고무 두께로 환산하였다. 초음파가 스틸면으로 입사하였을 때 펄스에코법의 적용 한계를 초음파 모델링으로 분석하였고, 실험으로 고무 공진 주파수를 이용하여 고무 두께를 측정할 수 있음을 입증하였다.

2. 이론적 배경

일정한 길이와 단면적을 가진 물질에 하중이 작용하면 물질은 수직 변형이 발생하게 된다. 고체 바에서 수직 응력과 Newton의 역학 법칙의 상관관계를 이용하면 Eq. 1과 같은 일차원 종파 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, ξ 는 수직 변형을 나타내고 c 는 파동의 위상 속도이며 x 는 축방향 거리이며 t 는 시간이다. 일차원 종파 방정식에 변수분리법을 이용하면 Eq. 2와 같은 해를 구할 수 있다.

$$\xi(x, t) = A \exp[j(\omega t - kx)] + B \exp[j(\omega t + kx)] \quad (2)$$

여기서, $A \exp[j(\omega t - kx)]$ 는 $+x$ 방향으로 이동하는 파동으로 투과파를 나타내고, $B \exp[j(\omega t + kx)]$ 는 $-x$ 방향으로 이동하는 파동으로 반사파를 나타낸다.

$x=0$ 에서 경계 조건을 고정단으로 가정하면 Eq. 2는 투과파와 반사파의 합은 0이 된다. 고정단에서 반사파는 위상이 반전되어 $-x$ 방향으로 진행한다. $x=0$ 에서 경계 조건을 자유단으로 가정하면 전단력이 존재하지 않으므로 $(\frac{\partial \xi}{\partial x})_{x=0} = 0$ 이 되고, 자유단에서 반사파는 투과파와 같은 위상을 가지고 $-x$ 방향으로 진행한다. 경계 조건에 의해 고정단과 자유단에서 초음파 위상이 반전되기 때문에 공진 조건도 달라진다.

스틸 연소관은 스틸에 내열 고무가 접착된 구조물이며 제 1 매질은 접촉매질, 제 2 매질은 스

틸, 제 3 매질은 내열 고무 및 제 4 매질은 공기 층으로 설정할 수 있다. 초음파가 스틸 연소관에 입사되어 스틸 연소관 내부로 진행하면 모든 접착 계면들에서 반사와 투과 현상이 반복되며 복잡한 초음파 신호를 형성하게 된다. 각 매질의 접착계면에서 투과파와 반사파의 음압과 입사 속도가 같아지게 되며, 이 경계 조건을 적용하면 삼중 매질의 음압반사계수는 Eq. 3과 같이 유도될 수 있다[4, 5].

$$R = \frac{(1 - \frac{Z_1}{Z_3})Re[\exp j(-k_2x_2)] + j(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2})Im[\exp j(-k_2x_2)]}{(1 + \frac{Z_1}{Z_3})Re[\exp j(-k_2x_2)] + j(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2})Im[\exp j(-k_2x_2)]} \quad (3)$$

여기서, R 은 삼중 매질의 음압반사계수이고, Z_i 는 i 번째 매질의 음향 임피던스이며, k_2 와 x_2 은 제 2 매질의 파수 및 두께이다.

Equation 3에서 제 1 매질은 접촉매질, 제 2 매질은 스틸, 제 3 매질은 공기라고 가정하면 임의의 정수 n 에 대하여 스틸은 초음파 파장이 $n\lambda/2$ 의 조건에서 공진이 발생하며, 제 1 매질은 스틸, 제 2 매질은 고무, 제 3 매질은 공기라고 가정하면 임의의 정수 n 에 대하여 고무는 초음파 파장이 $(2n-1)\lambda/4$ 의 조건에서 공진이 발생한다. Eq. 4에서 스틸과 고무가 공진할 때 음압반사계수를 나타내었다.

$$R_s = \frac{(Z_3 - Z_1)}{(Z_3 + Z_1)}, R_r = \frac{(Z_2^2 - Z_1Z_3)}{(Z_2^2 + Z_1Z_3)} \quad (4)$$

여기서, R_s 는 스틸이 공진할 때 음압반사계수이고, R_r 은 고무가 공진할 때 음압반사계수이며, Z_i 는 i 번째 매질의 음향 임피던스이다. 각 매질의 음향 임피던스를 대입하면 R_s 는 음의 부호를 갖고, R_r 는 양의 부호를 갖게 되므로 초음파 위상은 반전된다.

Equation 3을 이용하여 k_2L 과 음압반사계수 R 의 상관관계를 Fig. 1과 같이 극좌표계로 표시하였다. 스틸 공진 주파수는 Fig. 1(a)를 이용하여 예측할 수 있으며, 고무 공진 주파수는 Fig. 1(b)를 이용하여 예측할 수 있다. 스틸과 고무가

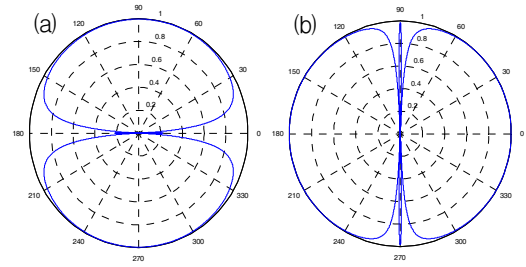


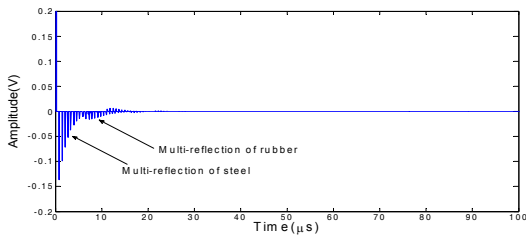
Fig. 1 Prediction of Ultrasonic Resonance Frequency Using the Pressure Reflection Coefficient (a) Resonance Condition of Steel (b) Resonance Condition of Rubber

서 다른 공진 조건을 갖는 이유는 매질 경계면에서 초음파가 반사될 때 경계 조건에 의해 초음파 위상이 반전하기 때문이다.

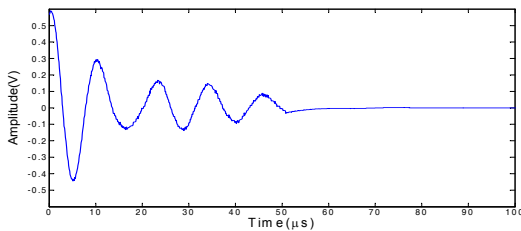
3. 초음파 전달 모델링

초음파가 스틸 연소관에 입사하게 되면 초음파는 스틸 내부를 압력과 형태로 진행하게 되는데 스틸 연소관과 같이 이종 재료가 접착된 경우에는 경계면에서 두 재료의 음향 임피던스 및 진행파의 종류에 의하여 다양한 형태의 전파 특성을 나타내게 된다. 스틸 연소관에서 초음파는 각각의 경계면에서 반사파와 투과파로 나누어지며 각각의 반사파는 진행방향에서 만나는 모든 경계면에서 연속적으로 반사파와 투과파로 분리되어 매우 복잡한 초음파 신호를 형성하게 된다.

스틸 연소관은 스틸에 내열 고무가 접착된 구조물이며, 초음파 전달 현상을 모델링하기 위해 스틸의 두께는 1.86 mm, 내열 고무의 두께는 3.97 mm로 설정하였고, 펄스에코법에서의 반사 신호에 대한 시간 지연과 초음파 진폭에 대한 시스템 응답 함수를 구하였다. 초음파 출력 신호를 모사하기 위하여 초기입력함수는 100 kHz 탐촉자에서 발생하는 실제 파형을 측정하여 사용하였다. 시스템 응답 함수와 초기 입력 함수에 대하여 콘볼루션 적분을 수행하였으며 Fig. 2와 같은 펄스에코법의 초음파 신호를 예측하였다[6, 7].



(a) System Response Function



(b) Ultrasonic Modelling Signal

Fig. 2 Simulation Result at Steel 1.86 mm and Rubber 3.97 mm

매질을 왕복하는데 소요되는 시간을 일반적으로 음향 두께라고 정의한다. 스틸 1.86 mm의 음향 두께는 $0.67 \mu\text{s}$ 이고 고무 3.97 mm의 음향 두께는 $5.18 \mu\text{s}$ 이다. Fig. 2(a)는 시스템 응답 함수이며 초기펄스에서 $0.67 \mu\text{s}$ 의 시간이 지연된 스틸의 반사 신호가 측정되고 있으며 음파의 감쇠로 인하여 스틸 신호의 크기가 점점 작아지고 있다. 초기펄스에서 $5.85 \mu\text{s}$ 의 시간이 지연된 고무의 반사 신호도 측정되고 있었다. 고무의 반사 신호는 스틸 층과 고무 층 사이를 연속적으로 반복하여 반사와 투과를 하기 때문에 같은 시간 지연 현상을 가지는 초음파 신호가 동시에 도착되어 초음파 진폭의 세기가 일시적으로 증가하였다가 초음파 감쇠로 인하여 신호들이 작아지고 있다.

Figure 2(b)는 초기 입력 함수가 100 kHz인 탐촉자의 파형과 시스템 응답 함수에 대해 콘볼루션 적분을 수행하여 예측한 초음파 출력 신호이다. 시스템 응답 함수에서는 제 1 스틸 반사 신호가 $0.67 \mu\text{s}$ 에서 측정되었고 제 2 고무 반사 신호가 $5.85 \mu\text{s}$ 에서 측정되었으나, 초음파 출력 신호는 스틸 반사 신호와 고무 반사 신호를 구

분할 수 없었다. 100 kHz 탐촉자의 파형 지속 시간(waveform duration)이 $64.10 \mu\text{s}$ 이므로 스틸의 음향 두께인 $0.67 \mu\text{s}$ 와 고무의 음향 두께인 $5.18 \mu\text{s}$ 보다 월등히 크므로 나타난 현상이다. 파형 지속 시간을 줄이기 위하여 고주파수 탐촉자를 사용할 수 있지만, 고주파수에서는 초음파 감쇠 계수가 커지므로 초음파가 고무 매질을 투과할 수 없기 때문에 고무의 두께를 측정할 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 펄스 지속 시간이 매질의 음향 두께보다 길어서 송신 펄스와 반사파를 분리하기 곤란한 경우에 사용할 수 있다. 초음파의 대역폭(bandwidth)은 고무 공진 주파수 범위로 제한하여 스틸 공진 주파수가 측정되지 않도록 하였으며 초음파를 스틸면에서 고무로 입사시켜 고무 공진 주파수를 측정하였다.

4. 실험 장비 및 시험편

4.1 실험 장비

Figure 3은 초음파 공진 신호를 분석하기 위한 실험 장치 구성도이다. 본 연구에서는 초음파의 송·수신을 위하여 Ritec사의 고풍력 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 사용하였다.

고출력 비선형 초음파 분석 장비에서 입사파의 가진 주파수는 탐촉자의 공칭 주파수와 일치시켰고, 온도에 따른 음속의 변화를 고려하여 실험은 20°C 환경에서 동일한 일자에 수행하였다.

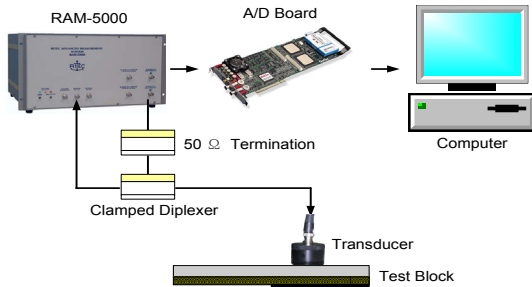


Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

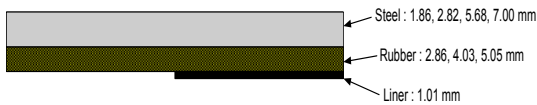


Fig. 4 Sectional View of Steel/Rubber Adhesive Test Block

100 kHz 탐촉자는 펄스 반복 주파수를 50 Hz로 설정하였고, 튜버스트의 펄스 폭을 30 μ s로 가진하여 제 1 공진 주파수를 분석하였다. 탐촉자로부터 수신된 초음파 신호는 Gage사의 A/D 보드(CS82G)를 통해 디지털 신호로 전환하여 분석하였고, 샘플링 주파수는 10 MS/s 였다.

4.2 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 접착시키기 위해 샌딩 작업을 한 후에 챔록을 도포하였다. 고체 상태의 EPDM 고무판을 챔록이 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 mm였지만, 오토클레이브에서 고무를 녹여 성형하였기 때문에 같은 시험편 내에서도 굴곡이 있어 두께가 일정하지 않았고 마이크로미터를 이용하여 두께를 측정하였을 때 ± 0.20 mm의 두께 편차가 발생함을 확인하였다. 고무면에 라이너가 접착되었을 때 초음파 공진의 영향을 알기 위하여 성형된 고무 절반 면적

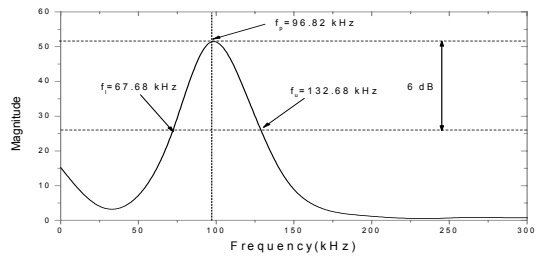


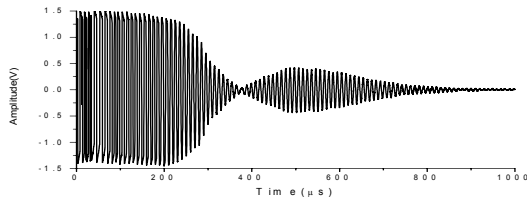
Fig. 5 Frequency Response Curve of 100 kHz Ultrasonic Transducer

에 라이너를 1.01 mm 두께로 도포하였으며, 고무면보다는 굴곡이 적었지만 두께가 일정하지 않았고 마이크로미터를 이용하여 두께를 측정하였을 때 ± 0.10 mm의 두께 편차가 발생함을 확인하였다. Fig. 4는 스틸/고무 접착 시험편의 단면도이다.

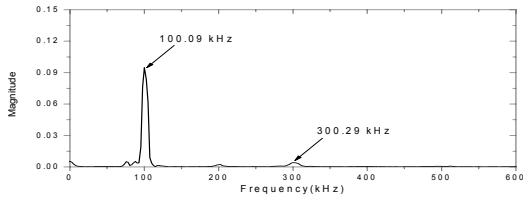
5. 실험 결과 및 분석

실험에 사용한 탐촉자는 공칭 주파수가 100 kHz인 접촉식 일진동자 탐촉자이다. 탐촉자의 특성을 평가하기 위해 고무로부터 반사되는 신호를 취득하였고, 취득된 신호를 고속푸리에변환(FFT)하여 주파수를 분석하였다. Fig. 5는 100 kHz 탐촉자의 주파수 응답 선도로써 중심 주파수(central frequency)가 100.18 kHz이고, 피크주파수(peak frequency)는 96.82 kHz인 비대칭 주파수 응답을 보여주고 있으며, 대역폭의 하한 주파수(lower frequency)는 67.68 kHz이고, 상한 주파수(upper frequency)는 132.68 kHz였다.

실험은 스틸/고무 접착 시험편과 100 kHz 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. 하지만, 스틸 제 1 공진 주파수는 100 kHz 탐촉자의 대역폭을 벗어나기 때문에 계측되지 않을 것으로 예측하였다.



(a) Ultrasonic Resonance Signal

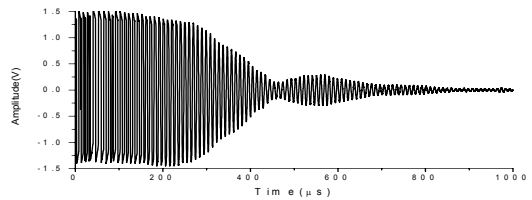


(b) Ultrasonic Frequency Spectrum

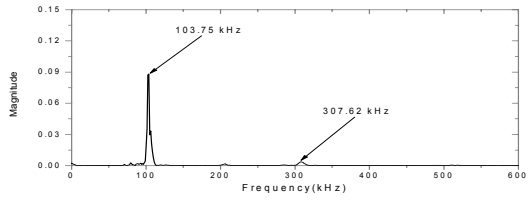
Fig. 6 Analysis of Ultrasonic Signal from Steel/Rubber Adhesive Test Block with Steel 1.86 mm and Rubber 3.97 mm in Thickness

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 kHz~133.91 kHz 범위 내에서 측정될 것으로 예측하였고, 고무에 라이너가 접착된 경우는 고무 두께에 라이너 두께를 합산하여 고무 제 1 공진 주파수는 63.20 kHz~98.97 kHz 범위 내에서 측정될 것으로 예측하였다. 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 6(a)는 스틸 두께 1.86 mm에 고무가 3.97 mm 두께로 접착된 스틸/고무 접착 시험편의 초음파 공진 신호이고, Fig. 6(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



(a) Ultrasonic Resonance Signal



(b) Ultrasonic Frequency Spectrum

Fig. 7 Analysis of Ultrasonic Signal from Steel/Rubber Adhesive Test Block with Steel 1.86 mm, Rubber 2.86 mm and Liner 0.89 mm in Thickness

공진 주파수는 탐촉자의 대역폭을 벗어나므로 측정되지 않았으나, 고무 제 1 공진 주파수는 100.09 kHz에서 측정되었고, 고무 제 2 공진 주파수는 300.29 kHz에서 약하게 측정되었다. 고무는 초음파 파장이 $(2n-1)\lambda/4$ 의 조건에서 공진하게 되며 고무 제 1 공진 주파수인 100.09 kHz를 고무 두께로 환산하면 3.83 mm가 된다. 주파수 분석한 실제 고무 두께가 3.97 mm였으므로 실제보다 0.14 mm 적게 측정되었다.

Figure 7(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. 7(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. 주파수 분석 결과 스틸 제 1 공진 주파수는 탐촉자의 대역폭을 벗어나므로 측정되지 않았고, 고무 제 1 공진 주파수는 103.75 kHz에서 측정되었다. 고무 제 1 공진 주파수인 103.75 kHz는 고무 두께로 환산하면 3.69 mm이며 실제 고무 두

께보다 0.06 mm 적게 측정되었다.

Figure 6은 스틸에 고무만 접착되었을 때의 초음파 신호 분석 결과이며, Fig. 7은 스틸에 고무가 접착되고 라이너가 도포되었을 때의 초음파 신호 분석 결과이다. 두 실험에서 스틸의 두께는 1.86 mm로 동일했지만, 고무 두께는 각각 3.97 mm와 3.75 mm였다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)를 비교하면 초음파가 공진하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)같이 주파수 스펙트럼에서도 고무 제 1 공진 주파수가 계속됨으로 고무에 라이너가 도포되었을 때 라이너 두께를 고무 두께에 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. 8에서 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 mm였지만, 고

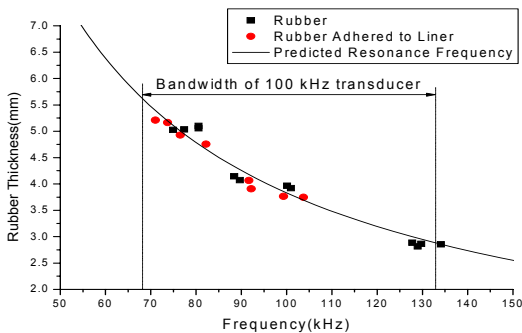


Fig. 8 Rubber Thickness Measurement of Steel/Rubber Adhesive Test Block Using the Ultrasonic Resonance Frequency

무 제 1 공진 주파수는 측정되지 않았다. 고무 두께 6.06 mm에서는 고무 제 1 공진 주파수가 63.2 kHz에서 측정될 것으로 예측하였지만 100 kHz 탐촉자의 하한 주파수가 67.68 kHz이어서 탐촉자의 대역폭을 벗어났으므로 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 접착된 경우에는 실제 고무 두께와 실험으로 측정된 고무 두께 차이가 대부분 0.2 mm 내에서 발생하였고, 최대 두께 차이는 0.35 mm였다. 스틸에 고무가 접착되고 라이너가 도포된 경우에는 실제 고무 두께와 실험으로 측정한 고무 두께 차이는 대부분 0.1 mm 내에서 발생하였고, 최대 두께 차이는 0.25 mm였다.

Figure 9에서 스틸/고무 접착 시험편의 고무면과 라이너면을 도시하였다. 스틸/고무 접착 시험편은 오토클레이브에서 고무를 녹여 성형하였기 때문에 고무 두께는 일정하지 않았으며 같은 시험편 내에서도 ± 0.20 mm의 두께 편차가 발생하였다. 라이너는 고무 면 위에 라이너를 도포하였으므로 고무면과 비교하면 굴곡이 적었지만 ± 0.10 mm의 두께 편차가 발생하였다. 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 고무를 주름진 곳을 피하여 두께가 비교적 일정한 영역의 초음파 신호를 취득했지만 스틸/고무 접

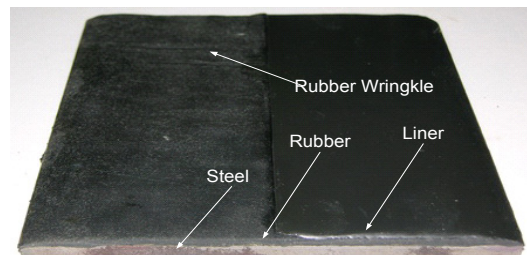


Fig. 9 Rubber and Liner Side of Steel/Rubber Adhesive Test Block

착 시험편이 가지고 있는 두께 편차로 인하여 두께 측정에 약간의 오차가 발생하였다.

6. 결 론

스틸 연소관의 내열 고무 두께를 측정하기 위해 스틸에서 고무로 초음파를 입사시켜 고무 공진 주파수를 측정하였고, 측정된 고무 공진 주파수를 고무 두께로 환산하는 기법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 펄스에코법은 스틸 연소관 내부에서 고무면에 탐촉자를 접촉시키기 때문에 고무면을 오염시킬 수 있으므로 추진제/라이너 미접착과 같은 결함을 유발시킬 수 있다.
- 2) 스틸 및 고무의 음향 두께보다 탐촉자의 파형 지속시간이 긴 경우에는 펄스에코법을 이용하여 각 매질에서의 반사 신호를 구분할 수 없다.
- 3) 초음파의 대역폭은 고무 공진 주파수 범위로 제한하였기 때문에 스틸 공진 주파수는 측정되지 않았다.
- 4) 스틸에 고무만 접착된 경우에는 실제 고무 두께와 실험으로 측정한 고무 두께 차이가 대부분 0.2 mm 내에서 발생하였고, 스틸에 고무가 접착되고 라이너가 도포된 경우에는 실제 고무 두께와 실험으로 측정한 고무 두께 차이는 대부분 0.1 mm 내에서 발생하였다.
- 5) 실제 고무 두께는 실험으로 측정한 고무 두께와 약간의 차이가 있었지만, 고무 및 라이너의 두께 편차를 고려하면 실제 고무 두께는 실험으로 측정한 고무 두께와 일치한다고 판단하였다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 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
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, 2003, pp.503-514
4. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamental of Acoustics*, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc, 1982
5. 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
6. 임수용, 김동륜, "다중 접착계면의 초음파 전달 모델 연구," *한국추진공학회지*, 제16권, 제3호, 2012, pp.9-15
7. 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