

확대부 내열재의 접착계면 결함 검출을 위한 초음파 공진 신호 분석

김동륜* · 김재훈**† · 임수용* · 박성한* · 예병한*

Analysis of Ultrasonic Resonance Signal for Detecting the Defect of Adhesive Interface in Exit Cone

Dongryun Kim* · Jaehoon Kim**† · Sooyong Lim* · Sunghan Park* · Byunghahn Yeh*

ABSTRACT

The ultrasonic resonance method was applied to detect the disbond interface and empty layer between steel and FRP of the exit cone. The ultrasonic resonance method can easily detect the disbond interface and empty layer by amplifying the ultrasonic signal, but pulse echo method is difficult to distinguish adhesive interface from disbond interface or empty layer. The resonance frequency was predicted using the pressure reflection coefficient of 3-layered medium, and measured from ultrasonic signal of the test block using Fast Fourier Transform. The ultrasonic resonance proved that the predicted resonance frequency was in good agreement with the measured resonance frequency.

초 록

확대부 내열재의 스틸과 FRP 사이에 존재하는 미접착 결함과 미충전 결함을 검출하기 위해 초음파 공진법을 적용하였다. 초음파 공진법은 초음파 신호가 증폭되기 때문에 펄스에코법으로 검출하기 어려운 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함을 쉽게 검출할 수 있다. 공진 주파수는 삼중 매질의 음압 반사계수를 이용하여 예측하였고, 시험편의 초음파 신호에 대해 고속푸리에변환을 실시하여 측정하였다. 예측한 공진 주파수는 측정된 공진 주파수와 일치하므로 초음파 공진을 입증하였다.

Key Words: Nondestructive Test(비파괴시험), Ultrasonic Wave(초음파), Ultrasonic Resonance(초음파 공진), Exit Cone(확대부 내열재), Disbond(미접착)

1. 서 론

확대부 내열재는 스틸, 에폭시 및 FRP의 삼중 접착 구조물이고, 스틸과 FRP는 에폭시에 의해 접착되어 있다. 접착부의 품질은 확대부 내열재의 성능에 악영향을 미칠 수 있으므로 에폭시의 접착 상태를 평가하고 보증할 수 있는 비파괴 시험 방법이 절실히 요구되고 있다. 확대부 내열

* 국방과학연구소 1기술연구본부 6부
** 충남대학교 기계설계공학과
† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

재의 스틸과 FRP에 에폭시가 접착되지 않으면 추진기관 연소시 스틸과 FRP의 빈 공간으로 고온 고압의 화염이 침투하여 FRP가 스틸에서 이탈되는 사고를 초래할 수 있다.

기존의 비파괴시험은 스틸과 FRP에 존재하는 미접착 결함을 검출하기 위해 판독이 상대적으로 용이하고 결함을 형상화하기 쉬운 방사선투과시험을 적용하여 결함을 검출하였다. 하지만 방사선투과시험은 작은 크기의 미접착 결함이나 균열 등과 같은 면적형 결함을 검출하기 위해서는 많은 검사 비용과 시간이 소요되고, 미접착 결함 폭이 방사선투과시험의 해상력 이하인 경우에는 미접착 결함을 검출할 수 없다. 방사선투과시험법의 대안으로써 초음파 시험법이 대표적인데, 초음파 시험은 방사선투과시험에서 검출하기 어려운 면적형 결함들을 쉽게 검출할 수 있기 때문이다[1].

확대부 내열재는 접착 상태에 따라 정상접착, 스틸/에폭시 미접착 결함, 에폭시/FRP 미접착 결함 및 에폭시 미충전으로 구분할 수 있다. 정상접착은 스틸과 FRP에 에폭시가 완전하게 접착된 경우이고, 스틸/에폭시 미접착 결함은 스틸에 에폭시가 접착되지 않은 경우이고, 에폭시/FRP 미접착 결함은 FRP에 에폭시가 접착되지 않은 경우이며, 에폭시 미충전은 스틸과 FRP에 에폭시가 접착되지 않은 경우이다.

확대부 내열재와 같이 에폭시가 접착된 구조물은 항공 및 자동차 산업에서도 많이 사용되고 있으며, 에폭시 접착 상태를 평가하기 위해 초음파 시험이 적용되고 있다. Goglio et al.은 0.8 mm의 얇은 금속판 내 접착제를 검사하기 위해 펄스에코법을 적용하여 미접착 결함을 검출하였고[2], Titov et al.과 Hajian et al.은 자동차 부품의 접착 상태를 평가하기 위해 다중접착계면의 초음파 전달 현상을 모델링하여 초음파 신호를 예측하였고 펄스에코법으로 에폭시의 접착 상태를 평가하였다[3, 4].

펄스에코법은 초음파 진폭을 비교하여 결함을 검출하는 통상적인 초음파 시험 기법이지만, 에폭시 접착 구조물과 같은 다중접착구조물은 초음파의 반사와 투과가 복잡하여 초음파 신호 해

석이 어렵다. 펄스에코법을 적용하기 위해서는 초음파가 스틸을 왕복하는데 소요되는 시간보다 에폭시를 왕복하는데 소요되는 시간보다 반드시 길어야 하며, 에폭시의 낮은 음향 임피던스로 인하여 초음파 대부분이 에폭시에서 감쇠되기 때문에 에폭시의 감쇠 특성을 반드시 고려해야 한다.

초음파 공진법은 초음파 신호를 증폭시켜 미접착 결함을 검출하기 때문에 기존의 펄스에코법보다 결함 검출 효율이 높다[5]. 본 연구에서는 삼중 매질의 음압 반사계수로부터 스틸 공진 주파수를 예측하였고, 확대부 내열재의 결함을 모사한 시험편을 제작하여 기존의 펄스에코법과 초음파 공진법의 결함 검출 능력을 상호 비교하였고, 예측한 공진 주파수와 실험으로 측정된 공진 주파수를 비교하였으며, 초음파 시험으로 검출 가능한 미접착 폭을 예측하였다.

2. 공진 주파수 예측

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[6, 7].

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

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

Equation 1에서 스틸/에폭시 미접착 결함을 모사하기 위해 제 1 매질은 접촉매질, 제 2 매질은 스틸, 제 3 매질은 공기라고 가정하면 임의의 정수 n 에 대하여 $k_2L = n\pi$ 의 조건이 성립되며, 스틸 공진 주파수는 Eq. 2와 같이 유도될 수 있다.

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

여기서, f_s 는 제 2 매질인 스틸 공진 주파수이며, c_2 는 스틸의 음속이다. 확대부 내열재에 스틸/에폭시 미접착 결함이 발생하였거나 에폭시 미충전 결함이 발생한 경우에는 Eq. 2를 이용하여 스틸 공진 주파수를 구할 수 있다. 스틸 두께 L 에 대한 파장 λ 의 관계는 $L = n\lambda/2$ 로 나타낼 수 있다.

스틸에 에폭시가 얇은 층으로 접착되었고 에폭시와 FRP에 미접착 결함이 발생한 경우에도 Eq. 2를 적용하여 스틸 공진 주파수를 예측할 수 있다. 이는 에폭시의 음향 임피던스가 스틸의 음향 임피던스보다 낮기 때문이다.

Equation 1에서 스틸/에폭시/FRP 정상접착을 모사하기 위해 제 1 매질은 스틸, 제 2 매질은 에폭시, 제 3 매질은 FRP라고 가정하면 임의의 정수 n 에 대하여 $k_2L = (2n-1)(\pi/2)$ 의 조건이 성립되지만 특정 성분의 공진 주파수를 예측할 수 없다.

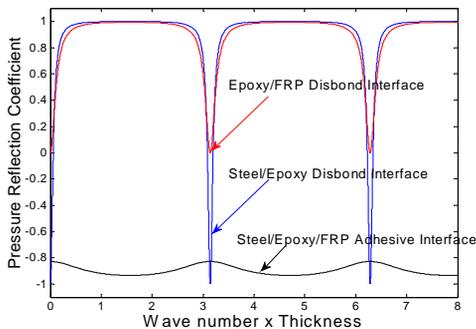


Fig. 1 Prediction of Ultrasonic Resonance Frequency Using the Pressure Reflection Coefficient

Equation 1을 이용하여 k_2L 과 음압 반사계수 R 의 상관관계를 Fig. 1과 같이 도시하였다. 스틸/에폭시 미접착 결함과 에폭시/스틸 미접착 결함은 음압 반사계수가 임의의 정수 n 에 대하여 $n\pi$ 일 때 낮아지고 있으며, 음압 반사계수가 최소가 될 때 초음파는 공진하게 된다. 스틸/에폭시/FRP가 완전하게 접착된 정상접착은 초음파 공진 주파수를 예측할 수 없으므로 초음파 공진이 발생하지 않을 것이다.

3. 실험 장비 및 시험편

3.1 실험 장비

Figure 2는 실험 장비의 개략도이다. 본 연구에서는 초음파의 송·수신을 위한 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고, 초음파 탐촉자는 진동자의 크기가 6.35 mm이고 초음파 공칭 주파수가 15 MHz인 수직 탐촉자를 사용하여 펄스에코법을 실시하였고, 진동자의 크기가 12.7 mm이고 초음파 공칭 주파수가 2.25 MHz, 3.5 MHz 및 5 MHz인 수직 탐촉자를 사용하여 초음파 공진법을 실시하였다. 탐촉자에서 수신된 신호는 A/D Board에서 초음파 전달 시간에 따른 초음파 음압을 RF 신호로 표시하여 스펙트럼 해석, 음파 감쇠 및 속도를 측정하였다. 탐촉자와 피검체의 신호 전달을 용이하게 하기 위하여 접촉 매질은 글리세린을 사용하였다.

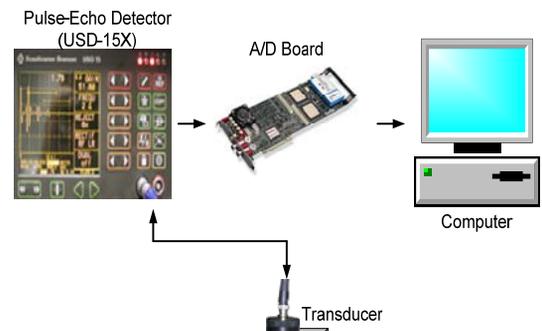


Fig. 2 Schematic Drawing of Experimental Apparatus

3.2 시험편

초음파 시험을 위해 시험편 4조를 제작하였다. 시험편을 제작하기 위해 두께 2 mm의 스틸 평판과 두께 10.06 mm의 FRP 평판을 각각 4조 준비하였고, 스틸과 FRP를 일정한 간격으로 유지하기 위해 FRP 모서리 부분에 330 μm 의 스페이서를 설치하였다. 스틸과 에폭시의 접착력을 향상시키기 위해 에폭시 접착부는 샌딩 작업을 실시하였다.

시험편 1은 스틸/에폭시/FRP가 완전하게 접착된 무결함 시험편이고, 시험편 2는 스틸/에폭시 미접착 결함 시험편으로 FRP에 80 μm 의 에폭시가 접착되었으며, 시험편 3은 에폭시/FRP 미접착 결함 시험편으로 스틸에 85 μm 의 에폭시가 접착되었다. 시험편 4는 절반 면적에는 에폭시/FRP 미접착 결함을 포함하고 있으며 스틸에 253 μm 의 에폭시가 접착되어 있는 영역을 시험편 4-1로 명명하였다. 나머지 절반 면적에는 스틸/FRP 내 에폭시 미충전 결함을 포함하고 있으며 스틸 및 FRP에 에폭시가 접착되지 않은 영역을 시험편 4-2로 명명하였다. Fig. 3에서 시험편의 형상과 크기를 나타내었다.

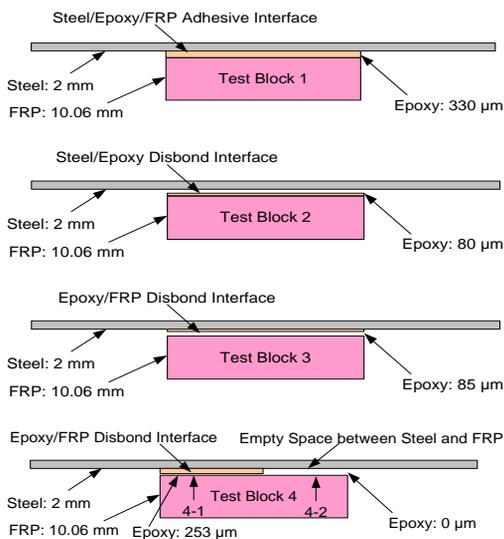


Fig. 2 Configuration and Dimension of Test Block

4. 실험 결과 및 분석

4.1 펄스에코법

펄스에코법은 진동자 직경이 6.35 mm이고 공칭 주파수가 15 MHz인 수직 탐촉자를 사용하여 실시하였다. 펄스에코법을 적용하기 전 스틸, 에폭시, FRP의 초음파 물성을 측정하였다. 각 재료의 초음파 속도는 음향 임피던스에 의한 초음파 위상 반전 현상을 고려하여 측정하였고, 감쇠계수는 제 1 저면 반사 신호 및 제 2 저면 반사 신호의 진폭 크기와 시험편의 두께를 이용하여 측정하였다. FRP는 다공성 고감쇠재질이므로 15 MHz 수직 탐촉자를 이용하여 감쇠계수를 측정할 수 없었다. Table 1은 확대부 내열재에 적용되는 스틸, 에폭시, FRP의 초음파 물성 값이다.

실험 방법은 스틸 제 1 저면 반사 신호를 이용하여 정상접착의 진폭과 스틸/에폭시 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함의 진폭을 비교하였고, 에폭시 제 1 저면 반사 신호를 이용하여 정상접착의 파형과 에폭시/FRP 미접착 결함의 파형을 비교하였다.

스틸 제 1 저면 반사 신호를 측정하는 실험은 시험편 1인 무결함 시험편, 시험편 2인 스틸/에폭시 미접착 결함 시험편 및 시험편 4-2인 에폭시 미충전 시험편을 이용하였다. 정상접착인 경우에는 초음파 음압의 일부가 에폭시에 전달되지만, 미접착 결함이나 미충전 결함인 경우에는 초음파 음압의 대부분이 반사하게 된다.

시험편 1인 무결함 시험편의 초음파 진폭은 시험편 2 및 시험편 4-2의 초음파 진폭보다 7.3% 낮게 측정되었다. 초음파 진폭의 차이는 있지만 초음파 진폭의 차이가 크지 않아 펄스에코법으로는 정상접착과 스틸/에폭시 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함을 구별하기가 어려웠다. Fig. 4에서 시험편 1, 시험편 2 및 시험편 4-2에 대한 스틸 제 1 저면 반사 신호를 나타내었다.

Table 1. Ultrasonic Mechanical Properties of Materials in the Exit Cone

Material	Density (g/cm ³)	UV* (m/s)	AI** (10 ⁶ kg/m ³ s)	AC*** (dB/mm)
Steel	7.8	5,920	46.176	1.381
Epoxy	1.08	2,441	2.636	8.126
FRP	1.55	2,820	4.371	-

*Ultrasonic Velocity, **Acoustic Impedance, **Attenuation Coefficient

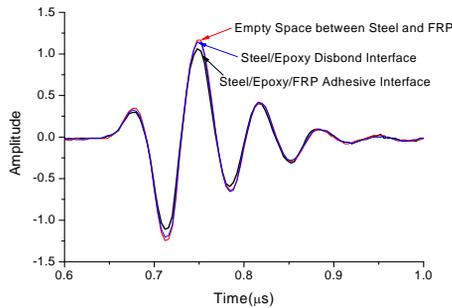


Fig. 4 The 1st Reflection Back Wall Echo of Steel layer about Test Block

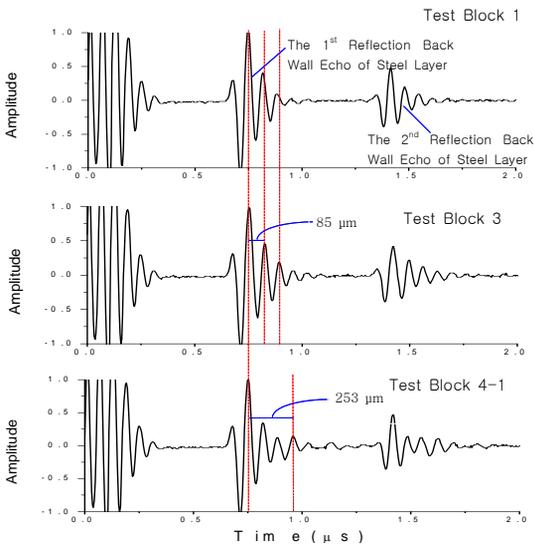


Fig. 5 The Ultrasonic Waveform of the 1st Reflection Back Wall Echo

에폭시 제 1 저면 반사 신호를 측정하는 실험은 시험편 1인 무결합 시험편, 시험편 3과 시험편 4-1인 에폭시/FRP 미접착 결합 시험편을 이용하였다. 초음파가 스틸을 왕복하는데 소요되는 시간이 에폭시를 왕복하는데 소요되는 시간보다 길기 때문에 에폭시 제 1 저면 반사 신호는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 스틸 제 2 저면 반사 신호 사이에 위치하게 된다.

시험편 1에서 스틸 제 1 저면 반사 신호와 스틸 제 2 저면 반사 신호가 계측되고 있으나, 에폭시/FRP 접착계면에서 반사되는 초음파 신호는 측정되지 않았다. 이는 에폭시와 FRP가 접착되었을 때 초음파 음압의 대부분이 FRP로 전달되기 때문이다. 시험편 3은 스틸에 85 μm의 에폭시가 접착되어 있으며, 에폭시/FRP 미접착 결합을 포함하고 있다. 에폭시 제 1 저면 반사 신호를 측정할 수 있지만, 스틸 제 1 저면 반사 신호와 중첩되어 시험편 1인 무결합 시험편의 초음파 신호와 시험편 3인 에폭시/FRP 미접착 결합의 초음파 신호를 구별하기가 어려웠다.

시험편 4-1은 스틸에 253 μm의 에폭시가 접착되어 있으며, 에폭시/FRP 미접착 결합을 포함하고 있다. 에폭시 제 1 저면 반사 신호와 스틸 제 1 저면 반사 신호가 분리되기 때문에 에폭시 제 1 저면 반사 신호는 측정이 가능하였으며, 에폭시 제 1 저면 반사 신호를 이용하여 에폭시/FRP 미접착 결합을 쉽게 검출할 수 있었다.

Figure 5에서 시험편 1, 시험편 3 및 시험편 4-1에 대한 스틸 제 1 저면 반사 신호와 에폭시 제 1 저면 반사 신호의 파형을 나타내었다. 정상 접착인 경우에는 스틸 제 1 저면 반사 신호만 측정되었으며, 에폭시의 두께가 점점 두꺼워질수록 스틸 제 1 저면 반사 신호와 에폭시 제 1 저면 반사 신호가 분리되는 것을 알 수 있었다.

펄스에코법에서 사용한 15 MHz 탐촉자는 스틸에 에폭시가 41 μm 이하로 접착되었을 경우 에폭시/FRP 미접착 결합이 존재하더라도 스틸 제 1 저면 반사 신호와 에폭시 제 1 저면 반사 신호가 중첩되어 에폭시/FRP 미접착 결합을 검출할 수 없다.

4.2 초음파 공진법

초음파 공진법은 진동자 직경이 12.7 mm이고 공칭 주파수가 2.25 MHz, 3.5 MHz 및 5 MHz 인 수직 탐촉자를 이용하여 실시하였다. 초음파는 스틸/에폭시 미접착 결합, 에폭시 미충전 결합 및 에폭시/FRP 미접착 결합이 있는 경우 스틸에서 공진이 발생할 것이며, 삼중 매질의 음압 반사계수를 이용하여 스틸 공진 주파수를 예측할 수 있다.

스틸 공진 주파수는 스틸의 두께와 음속에 의해 결정된다. 스틸 공진 주파수는 시험편의 스틸 두께 2 mm와 스틸 종파 음속 5,920 m/s 및 횡파 속도 3,240 m/s를 Eq. 2에 대입하여 예측하였다. 매질에 입사된 초음파는 종파였지만 횡파를 고려한 이유는 초음파가 매질에서 다중 반사를 반복하면서 일부 초음파가 종파에서 횡파로 모드가 변하였기 때문이다. Table 2에서 예측한 스틸 공진 주파수를 나타내었다.

초음파 공진법은 시험편 1인 무결합 시험편, 시험편 2인 스틸/에폭시 미접착 결합 시험편, 시험편 3과 시험편 4-1인 에폭시/FRP 미접착 결합 시험편 및 시험편 4-2인 에폭시 미충전 시험편을 이용하여 실시하였다. 스틸/에폭시/FRP가 완전하게 접착된 경우에는 초음파 공진이 발생하지 않을 것으로 예측하였고, 스틸과 FRP 내에 미접착 결합이나 미충전 결합이 있으면 초음파 공진이 발생할 것으로 예측하였다.

Figure 6은 2.25 MHz 탐촉자를 이용하여 각 시험편에서 측정된 초음파 공진 신호이다. 시험편 1은 무결합 시험편으로 초음파 공진 신호가 측정되지 않았고, 그 외의 시험편에서는 초음파 공진 신호가 측정되었다.

Table 2. Prediction of Resonance Frequency about Steel Layer of 2 mm Thickness(Unit: MHz)

PM*	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
LW**	1.48	2.96	4.44	5.92	7.40	8.88	10.36
TW***	0.81	1.62	2.42	3.23	4.04	4.85	5.65

*Propagation Mode, **Longitudinal Wave, ***Transverse Wave

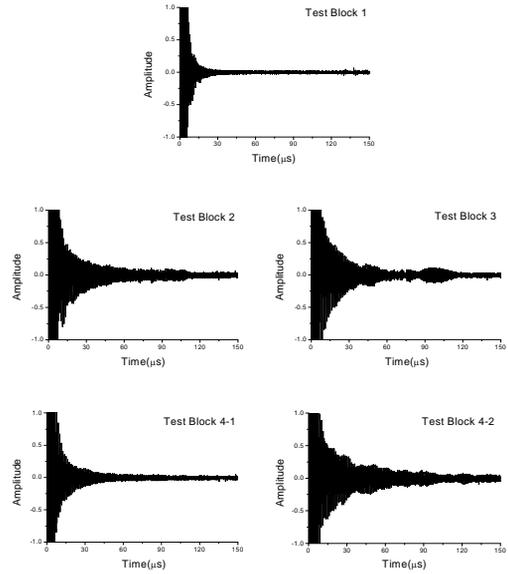


Fig. 6 Ultrasonic Resonance Signal of Test Block by 2.25 MHz Transducer

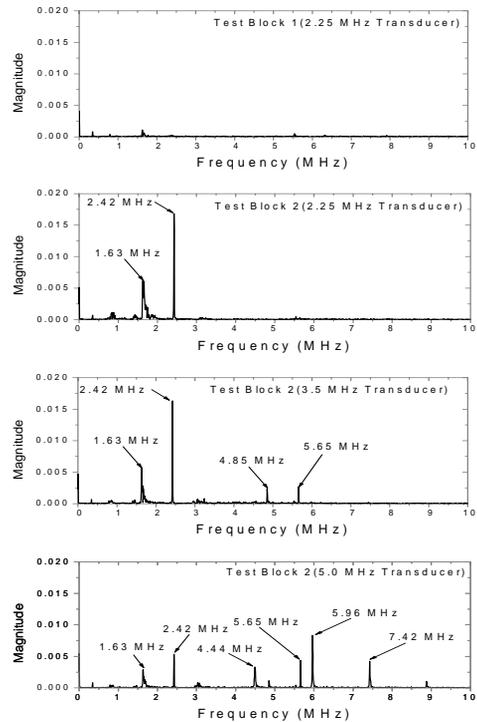


Fig. 7 Analysis of Ultrasonic Resonance Frequency

스틸/에폭시 미접착 결함과 에폭시 미충전 결함에 대한 펄스에코법의 실험 결과는 정상접착의 초음파 진폭과 스틸/에폭시 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함의 초음파 진폭의 차이가 크지 않아 결함을 구별하기가 어려웠다. 에폭시/FRP 미접착 결함에 대한 펄스에코법의 실험 결과는 스틸에 접촉된 에폭시의 두께가 얇은 경우에는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 에폭시 제 1 저면 반사 신호가 중첩되기 때문에 에폭시/FRP 미접착 결함을 검출할 수 없었다. 하지만 초음파 공진법은 초음파 신호가 증폭되기 때문에 펄스에코법으로 검출하기 어려운 스틸/에폭시 미접착 결함, 에폭시/FRP 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함을 쉽게 검출할 수 있었다.

3.5 MHz 탐촉자 및 5.0 MHz 탐촉자를 사용한 초음파 공진 실험에서도 시험편 1인 무결함 시험편에서는 초음파 공진 신호를 얻지 못했지만, 시험편 2인 스틸/에폭시 미접착 시험편, 시험편 3와 시험편 4-1인 에폭시/FRP 미접착 시험편 및 시험편 4-2인 에폭시 미충전 시험편에서는 초음파 신호가 증폭하는 공진 신호를 얻을 수 있었다.

Figure 7은 시험편 1인 무결함 시험편의 초음파 신호에 대한 2.25 MHz 탐촉자의 주파수 분석 결과와 시험편 2인 스틸/에폭시 미접착 결함 시험편에 대해 2.25 MHz, 3.5 MHz 및 5.0 MHz 탐촉자로 취득한 초음파 신호의 주파수 분석 결과이다. 시험편 1에서는 초음파 공진 주파수가 측정되지 않았으나, 시험편 2에서는 초음파 공진 주파수가 측정되었다. 2.25 MHz 탐촉자를 이용하여 시험편 2에 대한 초음파 주파수 분석 결과는 1.63 MHz와 2.42 MHz의 주파수가 측정되었으며, Table 2의 예측한 공진 주파수인 1.62 MHz와 2.42 MHz와 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.5 MHz 탐촉자를 이용하여 시험편 2에 대한 초음파 주파수 분석 결과는 1.63 MHz, 2.42 MHz, 4.85 MHz 및 5.65 MHz에서 초음파 공진 주파수가 측정되었고, Table 2의 예측 공진 주파수인 1.62 MHz, 2.42 MHz, 4.85 MHz 및 5.65 MHz와 일치하고 있다. 5.0 MHz 탐촉자를 이용

하여 시험편 2에 대한 초음파 분석 결과는 1.63 MHz, 2.42 MHz, 4.44 MHz, 5.65 MHz, 5.96 MHz 및 7.42 MHz에서 초음파 공진 주파수가 측정되었고, Table 2의 예측 공진 주파수인 1.62 MHz, 2.42 MHz, 4.44 MHz, 5.65 MHz, 5.92 MHz 및 7.40 MHz로 측정되어 일치하고 있음을 알 수 있다.

초음파 시험으로 검출 가능한 최소 미접착 폭은 모의결함시험편을 제작하여 측정하기가 곤란하기 때문에 스틸 및 에폭시 미접착 결함에 대해 삼중 매질의 모델링을 실시하여 이론적으로 계산하고 예측하였다.

Fig. 8은 에너지 보존의 법칙을 이용하여 5 MHz 탐촉자에 대해 삼중 매질의 초음파 반사율과 투과율을 나타낸 그래프이며, 공기층의 초음파 파장은 $1/2 \lambda$ 일 때 $34 \mu\text{m}$ 이다. 일반적으로 공기층의 파장이 $1/10 \lambda$ 이상이면 미접착 결함을 검출할 수 있는 것으로 알려져 있으므로 5MHz 탐촉자는 스틸/에폭시 미접착 결함의 폭이 $6.8 \mu\text{m}$ 이상이면 미접착 결함 검출이 가능할 것으로 판단하였다[8].

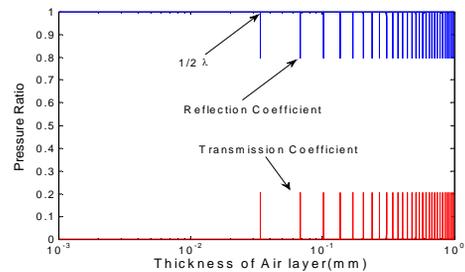


Fig. 8 Expectation of Detectable Disbond Width between Steel and Epoxy Interface

5. 결론

확대부 내열재의 스틸과 FRP 사이에 발생할 수 있는 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함에 대해 초음파 공진 신호를 분석하였으며 기존의 펄스에코법과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스틸/에폭시 정상접착의 초음파 진폭은 스틸/에폭시 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함의 초음파 진폭과 비교하여 차이가 크지 않았기 때문에 펄스에코법으로는 정상접착과 스틸/에폭시 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함을 구별하기가 어려웠다.
- 2) 에폭시/FRP 미접착 결함은 스틸에 접촉된 에폭시의 두께가 얇은 경우에는 스틸 제 1 저면 반사 신호와 에폭시 제 1 저면 반사 신호가 중첩되기 때문에 펄스에코법으로는 에폭시/FRP 미접착 결함을 검출할 수 없다.
- 3) 초음파 공진법은 정상접착에서 초음파 신호가 증폭되지 않았으나, 미접착 결함 및 에폭시 미충전 결함에서는 초음파 신호가 증폭되어 쉽게 결함을 검출할 수 있었다.
- 4) 예측한 공진 주파수와 측정된 공진 주파수는 일치하므로 초음파 공진 현상을 입증하였다.
- 5) 5MHz 탐촉자는 스틸/에폭시 미접착 결함의 폭이 6.8 μm 이상이면 미접착 결함 검출이 가능하다.

참 고 문 헌

1. 김동륜, 임수용, 정상기, 이경훈, "복합재 연소관의 초음파 결함 분석 프로그램 개발," 한국추진공학회지, 제16권, 제2호, 2012, pp.65-72
2. L. Goglio and M. Rossetto, "Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheet," NDT & E International, Vol. 32,

- 1999, pp.323-331
3. S. A. Titov, R. G. Maev and A. N. Bogachenkov, "Pulse-echo NDT of Adhesively Bonded Joints in Automotive Assemblies," Ultrasonics, Vol. 48, 2008, pp.537-546
4. 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
5. 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
6. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, "Fundamental of Acoustics," 3rd ed., John Wiley & Sons Inc, 1982
7. 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
8. N. Y. Kim and S. S. Lee, "Ultrasonic Measurement of Interfacial Layer Thickness of Sub-Quarter-Wavelength," Journal of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 23, No. 6, 2003, pp.577-582