

## 초음파 위상 반전에 의한 FRP/고무 접착 계면의 미접착 결함 검출 연구

김동륜\* · 임수용\* · 정상기\*

### A Debonding Detection Technique for FRP/Rubber Interface by Ultrasonic Phase Reversal

Dongryun Kim\* · Sooyong Lim\* · Sangki Chung\*

#### ABSTRACT

The object of this study is to develop new examination technique for detecting debond in adhesive interface of different kinds of materials. Ultrasonic signal was modeled by theoretically analyzing ultrasonic propagation phenomenon of the adhesive interface and debonding interface. The test method using the phase reversal of the debonding interface applied to the FRP/Rubber test block. Aluminum/Rubber test block with the flat bottom hole was manufactured to evaluate quantitatively the minimum detection ability of defects. The pulse echo reflection method and the phase reversal method were mutually compared and it was estimated that the phase reversal method could detect the debond on the basis of the theoretically predicted ultrasonic signal and ultrasonic test data.

#### 초 록

본 연구는 이종 접착 재료의 접착 계면에서 미접착 결함을 검출하기 위한 새로운 시험 기법을 개발하기 위함이다. 접착 계면과 미접착 계면에서의 초음파 전달 현상을 이론적으로 해석하여 초음파 신호를 모델링하였고, 이론적 분석에 기초하여 미접착 계면에서의 위상 반전 현상을 이용한 검사 방법을 FRP/고무 시편에 적용하였다. 정량적으로 결함의 최소 검출 능력을 평가하기 위하여 알루미늄/고무 시편에 평저공을 가공하여 제작하였고 일반적으로 사용하고 있는 펄스에코반사법과 새로운 시험 기법인 위상반전법을 상호 비교하였으며 이론적으로 예측한 초음파 신호와 실험에서 얻은 초음파 신호를 근거로 위상반전법으로 미접착 결함을 검출할 수 있다고 판단하였다.

Key Words: Non-destructive Testing(비파괴시험), Ultrasonic Test(초음파시험), Phase Reversal(위상 반전), Adhesive Interface(접착 계면), Debonds(미접착)

† 2008년 11월 9일 접수 ~ 2009년 2월 10일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 제1기술연구본부 6부  
연락저자, E-mail: ndtpro@hanmail.net

## 1. 서 론

복합재 연소관은 추진기관의 성능을 결정하는 중요한 구성품으로서 섬유강화 복합재료(FRP)와 고무, 금속 부품 등으로 구성되어 있다. 이 때 FRP는 우수한 비강도 특성으로 인해 국내외 신진 추진기관 시스템에 채택·적용되어 왔으며, 또한 고무는 운용 환경 조건에서 내열 성능 및 기밀 성능을 갖는 재료가 사용된다. 복합재 연소관 내부에 추진체를 충전하고, 점화 장치와 노즐 내열재 등을 조립하면 복합재 연소관 추진기관이 완성된다.

복합재 연소관 추진기관에 있어서 복합재 연소관의 안정성은 전체 시스템의 성공 여부와 직결된다고 볼 수 있으며, 복합재 연소관의 FRP/고무 계면에 일정 크기 이상의 미접착이 존재하면 추진체 연소시 고온·고압의 연소 환경에서 치명적인 결함으로 나타나 추진기관의 내열 파괴에 의한 구조 파괴까지 야기시킬 수 있다. 따라서 내부 응력 해석이나 시험 데이터 베이스 등을 통하여 계면 미접착의 영향치가 높은 구역은 위험 구역으로 지정하여 비파괴시험 및 육안·촉감 검사 또는 연소관 내부 진공압 검사 등을 통해 엄격히 품질 관리를 하는 경우가 많다. 연소관 내 미접착 존재로 인한 추진기관의 실패 사례는 우주 왕복선 관련 사항을 비롯한 여러 문헌을 통해 보고되어 있다[1, 2].

따라서, FRP/고무 접착부의 품질은 복합재 연소관의 성능을 좌우하므로 접착 계면의 품질을 평가하고 보증할 수 있는 비파괴시험 방법이 절실히 요구되고 있는 실정이다. FRP/고무의 접착 상태를 검증하기 위한 비파괴시험 방법은 방사선투과시험, 전산화 단층촬영, 열영상법 및 초음파시험 등이 있으며, 이들 시험을 선정할 때에는 제품 내에 존재하는 결함의 형상, 특성, 발생 위치, 물리적 성질 등을 고려해야 한다.

방사선투과시험은 FRP/고무 미접착 결함과 방사선의 진행 경로가 평행이어야 하므로 복합재 연소관의 직경이 커질수록 미접착 결함을 검출하는 능력이 현저히 낮아진다. 전산화 단층 활

영은 영상을 재구성하는 과정에서 발생하는 블러링효과(Blurring effect)때문에 단층촬영 영상만으로는 FRP/고무의 미접착 판독이 불가능하므로 미접착을 검출하고 평가할 수 있는 전용 프로그램을 개발해야 하는 단점이 있다. 열영상법은 FRP에서 복잡한 온도 분포를 가지므로 온도 분포를 해석하기 어려우므로 FRP/고무의 미접착 결함을 분석하는데 상당한 노력이 필요하다.

초음파시험은 FRP/고무의 미접착에 초음파가 수직으로 입사하므로 다른 시험법과 비교하여 미접착을 검출하는 능력이 탁월하지만, 탐촉자의 주파수, 접촉 매질 및 접촉 압력 등과 같은 실험 변수에 영향을 많이 받는다[3, 4]. 또한, 초음파가 진행할 때 매질의 진행 거리에 의해 초음파의 감쇠 정도가 달라지므로 접착 계면에서 반사되는 초음파 에너지를 매질 두께로 보정을 해야 한다.

초음파시험을 위해 주로 적용하고 있는 펄스 에코반사법은 초음파가 접착 계면에서 반사되는 에너지 차이로 미접착을 검출하는 방법으로써, 복합재 연소관의 기하학적 형상 및 실험 변수 등에 의해 실험 결과를 분석할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 이런 이유로 펄스에코반사법을 대체할 수 있는 새로운 초음파시험 기법이 절실히 요구되었으며, 초음파가 고무에서 FRP로 입사할 때 미접착 계면에서 위상이 다른 현상을 이용하여 실험 변수 및 매질의 두께를 보정하지 않고 실시간으로 미접착을 검출할 수 있는 위상반전법을 개발하게 되었다.

본 연구에서 초음파 신호를 모델링하여 접착 계면에서 초음파 신호가 반전되는 현상을 규명하였고, 기존의 펄스에코반사법과 위상반전법의 미접착 검출 능력을 실험으로 상호 비교하였으며, 위상반전법으로 검출 가능한 최소 미접착 크기를 평가하였다.

## 2. 초음파 신호의 모델링

### 2.1 이론적 배경

매질 내로 입사된 초음파는 매질의 경계 면에서 두 매질의 음향 임피던스의 차이 및 파의 종류에 따라 다양한 진행 특성을 나타내게 된다. 일반적인 경우로서 초음파가 경계 면에 수직으로 입사할 때 초음파는 경계 면에서 반사하는 성분과 투과하는 성분으로 나누어지고, 반사와 투과는 식 (1)과 같이 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해진다.

$$R_{12} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

여기서,  $R_{12}$ 는 매질 1과 매질 2의 경계 면으로 매질 1에서 초음파가 수직으로 입사하였을 때 입사파의 음압에 대한 반사파의 음압 반사 계수이고,  $P_i$ 는 매질 1에서 매질 2의 경계 면으로 음파가 수직으로 진행할 때 입사되는 음압의 크기이며  $P_r$ 은 경계 면에서 반사되는 음압이고,  $Z_1$  및  $Z_2$ 는 매질 1 및 매질 2의 음향 임피던스이다.

매질 2의 음향 임피던스가 높은 경우는 음압 반사 계수는 양의 값을 갖게 되고, 초음파가 매질 2로 수월하게 진행되며 반사파의 위상이 변하지 않아 자유단의 파동 반사와 같게 된다. 매질 2의 음향 임피던스가 낮은 경우는 음압 반사 계수는 음의 값을 갖게 되며, 초음파의 진행이 어려워 경계 면에서 초음파의 대부분이 반사를 하며 고정단에서의 파동 반사와 같이 위상이 반전된다[5].

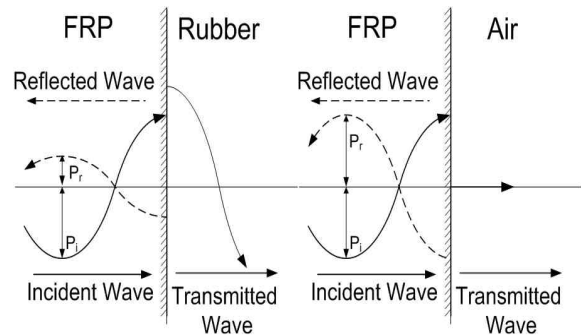
2.2 위상반전법 적용 조건

Figure 1(a)에서와 같이 초음파가 FRP에서 고무로 입사하였을 때 접착 계면의 음압 반사 계수는 음의 부호이고, 초음파가 FRP에서 공기로 입사하였을 때 미접착 계면의 음압 반사 계수는 음의 부호이다. 공기의 초음파 특성과 미접착의 초음파 특성은 같으므로 FRP/공기 계면을 FRP/고무 미접착 계면과 같다고 가정하였다. FRP/고무 접착 계면과 FRP/고무 미접착 계면의 음압 반사 계수가 모두 음의 부호를 가지므로 위상반

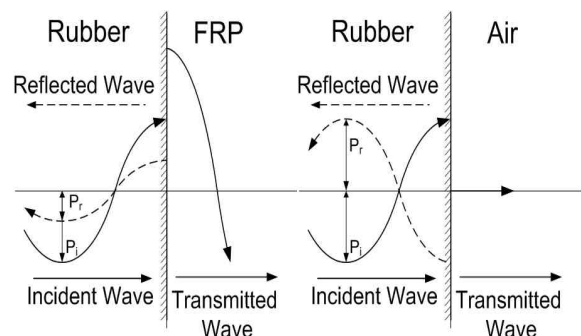
전법을 적용할 수 없다.

Figure 1(b)에서와 같이 초음파가 고무에서 FRP로 입사하였을 때 접착 계면의 음압 반사 계수는 양의 부호이고, 초음파가 고무에서 공기로 입사하였을 때 미접착 계면의 음압 반사 계수는 음의 부호이다. 고무/FRP 접착 계면과 고무/FRP 미접착 계면의 음압반사계수의 부호가 서로 다르므로 위상반전법을 적용할 수 있다.

위상반전법은 동일한 소재의 접착 계면에서도 초음파의 입사 면에 따라 적용 여부를 판단해야 하며, 위상반전법을 적용하기 위해서는 반드시 음압 반사 계수가 정상 접착 계면에서 양의 부호를 가져야 하고, 미접착 계면에서 음의 부호를 가져야 한다. 복합재 연소관에서는 초음파를 고무 면에서 입사시켜야 위상반전법을 적용할 수 있다. Table 1에서 초음파의 진행 경로에 대한 음압 반사 계수를 나타내었다.



(a) Ultrasonic Propagation from FRP to Rubber and Air



(b) Ultrasonic Propagation from Rubber to FRP and Air

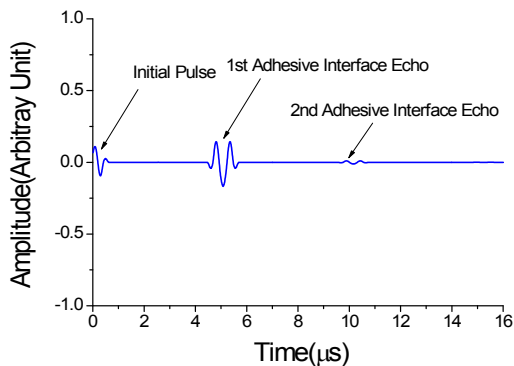
Fig. 1 Reflection and Transmission of Ultrasonic waves normally incident on the Interface

Table 1. Reflection Coefficient of FRP/Rubber Specimen

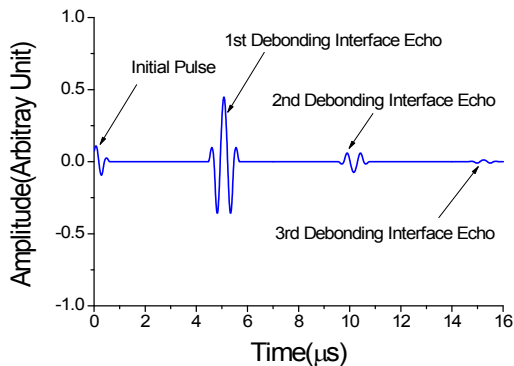
Ultrasonic Incident Path	Reflection Coefficient
FRP to Rubber	-0.4245
FRP to Air	-0.9998
Rubber to FRP	0.4245
Rubber to Air	-0.9995

2.3 초음파 신호의 모델링

초음파 신호의 모델링은 고무와 FRP의 접착 계면에서 완전 접착된 경우와 미접착 결합이 발생한 경우로 구분하였다. 고무와 FRP가 접착되었을 때 매질 1은 글리세린, 매질 2는 고무, 매질 3은 FRP라 가정하였고, 고무와 FRP가 접착되지 않았을 때는 매질 1은 글리세린, 매질 2는 고무, 매질 3은 FRP가 아닌 미접착과 초음파 특성이 같은 공기로 가정하였다[6].



(a) Adhesive Signal of Rubber and FRP



(b) Debonding Signal of Rubber and FRP

Fig. 2 Modeling of Ultrasonic Signal

초음파 신호를 모델링하기 위하여 삼중 매질의 음압 반사 계수와 음압 투과 계수를 시간에 따라 나타내는 시스템 응답 함수와 탐촉자의 중심 주파수가 2.25 MHz, 펄스 폭은 1.3 μs인 입력 함수를 시간 영역에서 컨볼루션 적분을 하여 초음파 신호를 예측하였다.

Figure 2(a)는 고무와 FRP가 완전 접착된 경우를 모델링한 초음파 신호이고, Fig. 2(b)는 고무와 FRP가 미접착된 경우를 모델링한 초음파 신호이다. 초음파 모델링 신호에서 보듯이 Fig. 2(a)의 첫 번째 고무/FRP 접착 신호와 Fig. 2(b)의 첫 번째 고무/ FRP 미접착 신호는 위상이 반전된 것을 알 수 있다.

3. 실험 장치 및 시편

3.1 실험 장치

Figure 3은 초음파 신호를 얻기 위한 실험의 구성도를 나타내었다. 본 연구의 실험을 위하여 초음파의 송·수신을 위한 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고, 초음파 탐촉자는 진동자의 직경이 12.5 mm이고, 초음파의 공칭 주파수가 2.25 MHz인 접촉식 일진동자 수직 탐촉자를 사용하였다. 탐촉자와 피검체의 신호 전달을 용이하게 하기 위하여 접촉 매질은 글리세린을 사용하였다. 탐촉자에서 수신된 초음파 신호는 A/D Board에서 초음파 전달 시간에 따른 초음파 음압을 RF-Signal로 표시하여 스펙트럼 해석, 음파의 감쇠 및 속도를 측정하였다.

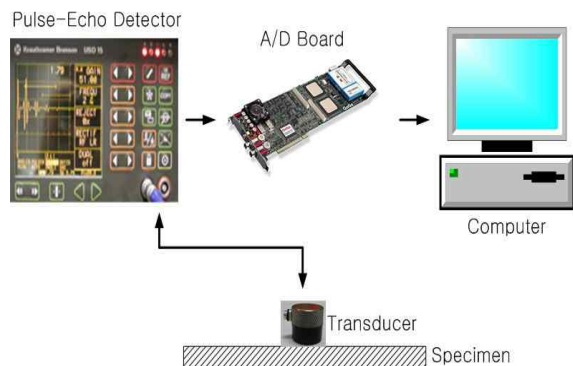


Fig. 3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

### 3.2 시편

실험은 고무의 초음파 속도 측정 및 미접착을 모사하기 위한 고무 시편, 펄스에코반사법과 위상반전법을 비교 분석하기 위한 FRP/고무 시편 및 미접착 면적을 정량적으로 측정하기 위한 알루미늄/고무 시편을 이용하였다.

고무 시편은 크기는 100×50 mm이고, 각각의 두께가 1.94 mm, 4.07 mm 및 5.33 mm인 세 개의 시편을 제작하였다.

FRP/고무 시편은 복합재 연소관의 FRP/고무가 완전 접착된 부위에서 무결함 시편을 채취하였고, 제작 공정 불량으로 복합재 연소관의 FRP/고무가 미접착된 부위에서 미접착 시편을 채취하여 제작하였다. FRP/고무 시편의 크기는 290×75 mm이고, FRP에 접착된 고무의 두께는 2.5 mm에서 6.0 mm로 고무가 점차적으로 두꺼워지는 형상이다. 미접착 시편에서는 세 개의 미접착 결함이 존재하였으며, 결함 크기는 고무 두께 2.92 mm에서 6×12 mm, 고무 두께 3.53 mm에서 15×8 mm, 고무 두께 4.66 mm에서 17×11 mm이다.

알루미늄/고무 시편은 지름 80 mm, 두께 4 mm인 알루미늄에 지름 80 mm, 두께 4 mm의 고무가 용착된 형상이다. 미접착 결함을 모사하기 위하여 지름이 2 mm에서 10 mm까지 1 mm 간격으로 치수가 다른 엔드밀을 사용하여 알루미늄과 고무가 접착된 면까지 수직으로 평저공(Flat Bottom Hole)을 가공하였다.

## 4. 실험 결과 분석

### 4.1 펄스에코반사법

펄스에코반사법은 반사 신호의 크기 및 위치를 측정하여 결함을 판정하는 일반적인 초음파 시험 기법이며, 초음파 진행에 따른 감쇠 정도를 나타낸 거리진폭특성곡선(Distance Amplitude Curve, DAC)을 도시해야 한다. Fig. 4는 고무 시편 저면의 반사 신호에 대한 거리진폭특성곡선, FRP와 고무가 완전하게 접착되었을 때 이론적으로 예측한 거리진폭특성곡선, FRP/고무 무

결함 시편에서 고무 두께가 2.7 mm에서 6.0 mm까지 0.1 mm 간격으로 측정된 FRP/고무 계면의 반사 신호의 크기 및 FRP/고무 결함 시편의 고무 두께가 2.92 mm, 3.53 mm, 4.66 mm에서 미접착 결함에 대한 반사 신호의 크기를 보여준다.

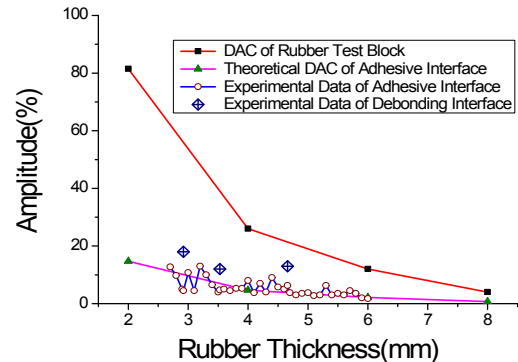


Fig. 4 Height of Reflection Echo by Rubber Thickness

고무 시편 저면에서 반사 신호의 크기는 고무 시편 저면이 공기층이므로 미접착과 크기가 같은 반사 신호를 보여준다. 고무 시편 저면에 FRP가 접착되어 있다면 반사 신호의 크기는 고무 시편 저면과 비교하여 14.88 dB 낮아질 것이다.

FRP/고무 무결함 시편을 이용하여 고무 두께 변화에 따른 반사 신호의 크기를 측정하였다. 반사 신호의 크기는 고무 시편에 FRP가 접착될 경우 예측한 값과 유사하였으나 일부분에서는 반사 에코의 크기가 불규칙하게 변하였다. 이러한 원인은 탐촉자와 탐상 면의 불완전 접촉, FRP의 화학 성분과 적층 방향의 복잡성 및 고무가 점점 두꺼워지는 기하학적 형상 때문에 발생한 문제이다.

FRP/고무 미접착 시편에서 미접착의 반사 신호 크기는 FRP/고무가 정상적으로 접착되었을 때보다는 컸지만 미접착을 모사한 고무 시편의 반사 신호와 비교하면 신호의 크기가 많이 차이가 났으므로 반사 신호의 크기만으로는 미접착 결함을 검출하기가 곤란할 수 있다.

4.2 위상반전법

펄스에코반사법에서 사용한 FRP/고무 시편을 이용하여 초음파를 고무에서 FRP로 입사시킨 후, 정상 접착의 초음파 위상과 미접착의 초음파 위상을 상호 비교하였다. FRP/고무 미접착 시편은 고무 두께가 2.92 mm, 3.53 mm, 4.66 mm일 때 미접착이 존재하므로 FRP/고무 무결함 시편에서 동일한 두께의 위치를 찾아 초음파 신호를 측정하였다.

FRP와 고무가 정상적으로 접착된 계면에서 얻은 초음파 신호와 FRP와 고무가 접착되지 않은 계면에서 얻은 초음파 신호는 고무의 두께와 무관하게 위상이 반전되었다. Fig. 5는 고무 두께가 2.92 mm인 미접착 계면의 초음파 신호와 접착 계면의 초음파 신호로서 초음파의 위상이 반전됨을 알 수 있다. 펄스에코반사법으로 반사 신호의 크기를 이용하여 미접착을 검출하려면 탐촉자의 접촉 상태, 소재의 두께 및 기하학적 형상 등을 고려해야 하지만 위상반전법은 초음파 위상의 반전 여부만을 이용하여 미접착을 검출할 수 있다.

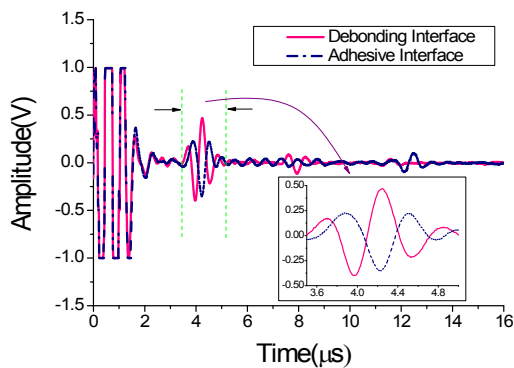


Fig. 5 Ultrasonic Signal of the Debonding and Adhesive Interface in the FRP/Rubber Test Block with 2.92 mm Rubber Thickness

4.3 결함의 정량적 평가

위상반전법으로 검출할 수 있는 미접착은 탐촉자의 진동자 및 미접착의 면적과 상호 연관되어 있다. 만약, 미접착의 면적이 진동자의 면적보다 작은 경우에는 정량화된 시편으로 최소 결

함 검출 능력을 판단해야 하기 때문에 이를 위해 알루미늄에 고무를 용착시켜 시편을 제작하고 평저공을 가공하였다[7].

알루미늄/고무 시편은 탐촉자를 고무 면에 놓고 탐촉자에서 초음파를 발생시키면 고무와 알루미늄 계면의 평저공에서는 미접착의 초음파 신호가 반사될 것이며 평저공 바깥으로는 알루미늄과 고무가 접착되었으므로 접착 신호의 초음파가 반사될 것이다. 미접착에서 초음파 신호의 크기와 정상 접착에서 초음파 신호의 크기가 같아진다면 반사 신호의 크기는 영이 될 것이며 위상 반전이 발생할 수 있는 미접착의 최소 크기가 된다.

Figure 6에서 탐촉자의 진동자 직경이 12.5 mm일 때 평저공의 지름에 따른 반사 신호 크기의 예측 값과 실험 결과를 도시하였다. 본 실험에서 평저공의 지름이 7.94 mm일 때 초음파 신호가 최소가 될 것으로 예측하였고 알루미늄/고무 시편에서는 평저공이 8 mm와 같을 것으로 간주하였다.

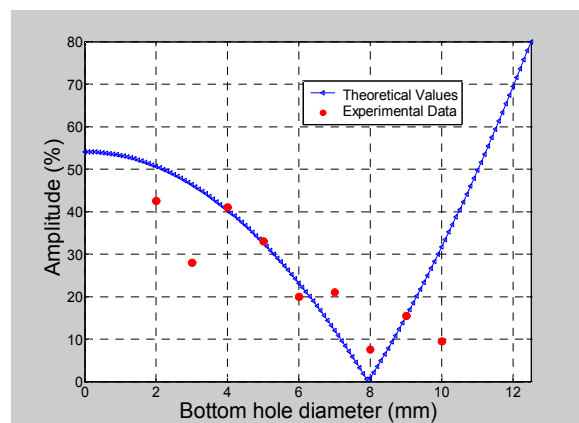


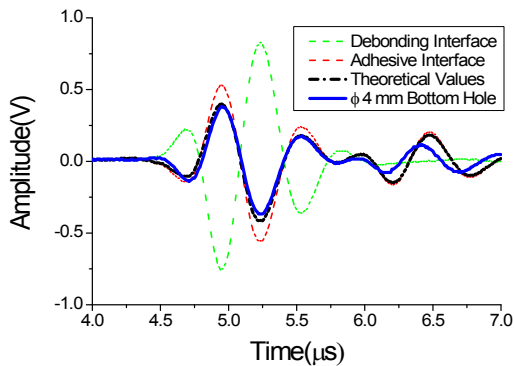
Fig. 6 Amplitude about Flat Bottom Hole Diameter in Aluminum/Rubber Test Block

실험은 평저공 2 mm에서 10 mm의 알루미늄/고무 시편에서 반사 신호의 크기를 측정하였다. 이론 값과 실험 결과가 평저공 4 mm, 5 mm, 6 mm 및 9 mm는 일치하였으나 나머지 실험 결과는 약간의 차이가 있었는데 시편을 확인한 결과 시편 가공 미숙으로 고무 면의 손상에 의해

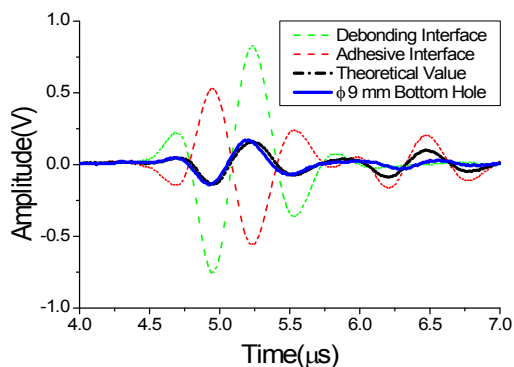
초음파의 반사 신호 일부가 산란되어 발생한 현상이다.

Figure 7에서 알루미늄/고무 시편의 평저공 4 mm 및 9 mm에 대한 초음파 위상을 나타내었다. 탐촉자의 진동자 직경이 12.5 mm일 때 위상 반전법으로 검출할 수 있는 미접착의 최소 지름은 7.939 mm이므로 Fig. 7(a)과 같이 평저공 4 mm에서는 검출 가능한 미접착의 최소 지름보다 작으므로 위상이 반전되지 않았으나, Fig. 7(b)와 같이 평저공 9 mm에서는 검출 가능한 미접착의 최소 지름보다 크므로 위상이 반전되었다.

탐촉자의 진동자 직경이 12.5 mm이므로 진동자와 미접착 결함의 면적 비율이 40.34% 이상이면 초음파의 위상이 반전될 것이다.



(a) Diameter 4 mm Bottom Hole



(a) Diameter 9 mm Bottom Hole

Fig. 7 Configuration of Phase about Flat Bottom Hole in Aluminum/Rubber Test Block

위상반전이 시작되는 미접착 면적을 검증하기 위하여 알루미늄/고무 시편을 제작하는 공정에

서 미접착이 발생한 결함 시편을 이용하였다. 알루미늄/고무의 결함 시편에서 반사 에코가 최소가 되는 지점을 추적하여 탐촉자 외경을 고무면에 그려 넣었고 탐촉자의 중심점의 궤적을 고무 시편에 표시하였다. 탐촉자의 중심점의 궤적과 직교하는 방향으로 알루미늄/고무 시편을 절단하였다. Fig. 8은 알루미늄/고무 시편을 절단한 사진이며, 미접착과 정상 접착의 경계를 확인하기 위하여 핀셋으로 고무를 벌려 측정하였다.

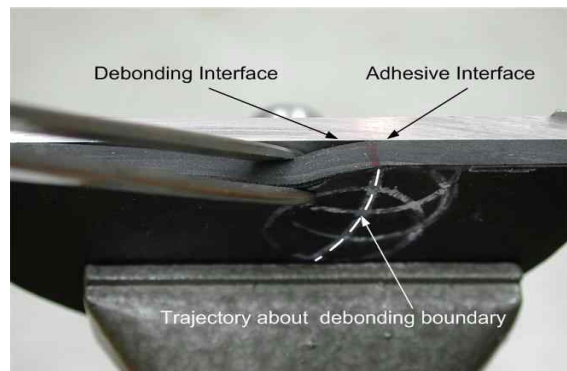


Fig. 8 Cutting Side of Aluminum/Rubber Test Block

Figure 9는 진동자의 면적과 미접착 결함의 면적 비율을 알기 위하여 영상 현미경으로 절단면을 100배 확대한 사진이다. Fig. 9에서 미접착은 접착 계면보다 진한 검은색을 보여주고 있으며 미접착과 접착 계면의 경계에서 미접착의 폭이 급격히 좁아지는 것을 볼 수 있었다.

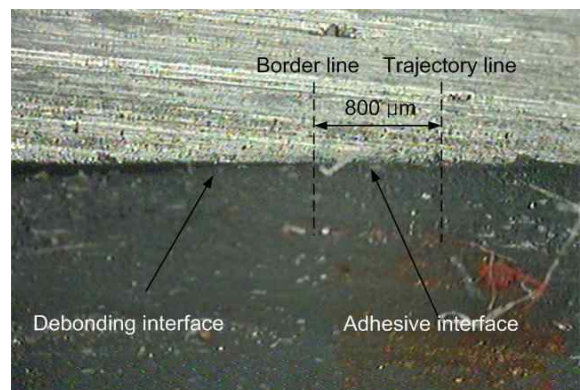


Fig. 9 Video Microscope Image of Aluminum/Rubber Test Block at the Border Line of Debonding Interface(x100)

미접착 결합은 탐촉자의 중심점 궤적보다 약 800  $\mu\text{m}$  정도 미접착 결합 쪽으로 위치하였다. 이를 탐촉자의 진동자와 미접착 결합의 면적 비율로 나타내면 45.76%이었으며 측정 오차를 고려하면 이론에서 구한 40.34%와 유사한 결과를 얻었고, 결론적으로 미접착의 면적이 탐촉자 면적의 약 40% 이상일 경우 위상 반전이 시작됨을 알 수 있다. 또한, 영상 현미경으로 미접착의 폭을 측정하였을 때 미접착의 폭은 약 20  $\mu\text{m}$ 이었으므로 위상반전법으로 20  $\mu\text{m}$  이상의 미접착을 검출할 수 있다고 판단하였다

위상반전법은 동일한 소재의 접착 계면일지라도 초음파의 입사 면에 따라 적용 여부가 달라지므로 반드시 음압 반사 계수를 이용하여 적용 가능성을 고려해야 한다. 하지만 위상반전법을 적용할 수 있는 소재는 기존의 펄스에코반사법보다 미접착을 쉽게 검출할 수 있으며, 미접착의 면적도 정량적으로 평가할 수 있다.

## 5. 결 론

미접착 검출을 위한 기존의 시험 기법인 펄스에코반사법과 새로운 시험 기법인 위상반전법의 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 펄스에코반사법에서 미접착의 반사 신호 크기는 정상 접착의 반사 신호보다 컸지만 미접착 결합을 모사한 고무 시편의 반사 신호와 비교하면 신호의 크기가 상대적으로 작기 때문에 반사 신호의 크기만으로는 미접착 결합을 검출하기가 곤란할 수 있다.
- 2) 초음파 위상은 FRP/고무 시편의 미접착 계면과 접착 계면에서 신호를 비교하였을 때 시간 축을 기준으로 서로 반전된 것을 알 수 있다.
- 3) 알루미늄/고무 시편을 이용하여 미접착 검출

능력을 측정된 결과, 탐촉자의 진동자 직경이 12.5 mm이고 진동자 면적이 미접착 면적의 40% 이상이면 위상이 반전하기 시작한다.

- 4) 위상반전법이 적용될 수 있는 조건은 초음파가 매질 1에서 매질 2로 진행할 때 매질 1의 음향 임피던스가 매질 2의 음향임피던스보다 작을 경우에만 성립한다.

## 참 고 문 헌

1. J. R. Biagioni, "Application of Taguchi Methods to Composite Case Problems", AIAA-90-1969, 1990
2. E. Pierre-Louis, S. R. Lin, and N. R. Patel, "Motor Case-To-Insulation Unbond Repair Accept/Reject Criterion", AIAA-90-2208, 1990
3. S. Hirsekorn, "Nonlinear Transfer of Ultrasound by Adhesive Joints - A Theoretical Description", Ultrasonics, Vol. 39, 2001, pp.57-68
4. 김동륜, 류백능, "추진기관의 라이너/추진제 미접착 검출 기법 연구", 한국추진공학회지, 제12권, 제2호, 2008, pp.40-47
5. L. W. Schmerr, "Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation", Plenum Press, 1998
6. E. C. Johnson, J. N. Schurr and G. F. Hawking, "Ultrasonic Evaluation of SMRU Bondlines", Aerospace Corporation, 1991, pp.1-25
7. L. Reinhold and S. John, "Ultrasound NDE of Adhesive Bond Integrity: A Quantitative Measure", U.S Army Materials Technology Laboratory, 1992