

초음파 위상 반전에 의한 FRP/고무 접착계면의 미접착 결함 검출 연구

김동륜* · 정상기* · 이상우**

Debonding Detection Techniques of FRP/Rubber Interface by the Ultrasonic Phase Reversal

Dongryun Kim* · Sangki Chung* · Sangwoo Lee**

ABSTRACT

The object of this study is to develop new examination techniques for detecting the debonds in adhesive interface of different kinds of the material. 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 quantitatively evaluate the minimum detection ability of the 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 debonds on the basis of the theoretically predicted ultrasonic signal and ultrasonic test data.

초 록

본 연구는 이종 접착 재료의 접착계면에서 미접착 결함을 검출하기 위한 새로운 시험 기법을 개발하기 위함이다. 접착계면과 미접착계면에서의 초음파 전달 현상을 이론적으로 해석하여 초음파 신호를 모델링하였고, 이론적 분석에 기초하여 미접착계면에서의 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(위상반전), Adhesive Interface(접착계면), Debonds(미접착)

* 국방과학연구소 기술연구본부 4부

** 한국화이바 특수사업본부

연락처, E-mail: ndtpro@hanmail.net

이중 접착 재료는 현대 산업의 고도 성장에 따라 추진기관, 항공기, 자동차 등의 소재로 많이 사용되고 있다. 접착부의 품질은 구조물의 성능을 좌우하므로 접착계면의 품질을 평가하고 보증할 수 있는 비파괴시험 방법이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 제품의 품질 보증을 위해 비파괴시험 방법을 적용할 때에는 제품 내에 존재하는 결함의 형상, 특성, 발생 위치, 물리적 성질 등을 고려하여 결함을 검출할 수 있는 신뢰성 높은 시험 방법을 선정하여야 한다.

현재 초음파 시험이 미접착 결함을 검출하기 위해 가장 많이 사용되고 있다[1]. 초음파 시험은 미접착 결함의 검출 능력이 탁월하며 다른 시험법과 비교하여 미접착을 검출하는 효율이 높다. 하지만 초음파의 진행 방향과 미접착 결함이 수직을 이루어야 미접착 결함이 검출되는 기하학적 한계를 가지고 있으며 탐촉자의 주파수, 접촉 매질 및 접촉 압력 등과 같은 실험 변수에 영향을 많이 받는다. 또한, 초음파가 진행할 때 매질의 진행 거리에 의해 초음파의 감쇠 정도가 달라지므로 접착계면에서 반사되는 초음파의 에너지를 매질의 두께로 보정을 해야 한다.

초음파 시험은 접착부에 대해 미접착 결함 검출 능력이 뛰어나지만 기하학적 형상 및 실험 변수가 실험 결과에 영향을 주어 실험 결과를 분석할 수 없는 경우가 종종 발생하게 되어 기존에 사용했던 펄스-에코반사법 대신 새로운 시험법을 개발할 필요가 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서 초음파가 접착계면에서 반사되는 에너지의 차이로 미접착을 검출하는 시험법 대신 초음파의 위상이 반전되는 현상을 이용하여 미접착을 검출하는 시험법을 연구하였다.

2. 초음파 신호의 모델링

2.1 이론적 배경

매질 내로 입사된 초음파는 매질의 경계 면에서 두 매질의 음향 임피던스의 차이 및 파의 종류별 특성에 의하여 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.

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

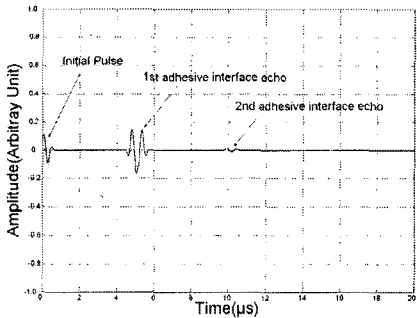
여기서, R_{12} 는 매질 1과 매질 2의 경계 면에 매질 1에서 초음파가 입사되었을 때 입사파의 음압에 대한 반사파의 음압 반사 계수이고 Z 는 음향 임피던스이다.

매질 2의 음향 임피던스가 높은 경우는 음압 반사 계수는 양의 값을 갖게 되고, 초음파가 매질 2로 수월하게 진행되며 반사파의 위상이 변하지 않아 자유단의 파동의 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 파동의 반사와 같이 위상이 반전된다[2].

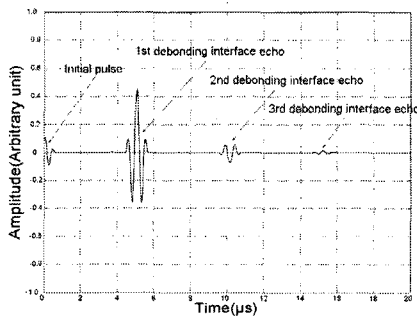
2.2 초음파 신호의 모델링

초음파의 모델링은 고무와 FRP의 접착계면에서 미접착이 발생한 경우와 완전 접착된 경우로 구분하였다. 고무와 FRP가 접착되지 않았을 때 매질 1은 글리세린이고, 매질 2는 고무이며, 매질 3은 FRP가 아닌 공기로 구성된 구조로 가정하였고, 고무와 FRP가 접착되었을 때 매질 1은 글리세린이고, 매질 2는 고무이며, 매질 3은 FRP로 구성된 구조라 가정하였다[3, 4].

Figure 1의 (a)는 고무와 FRP에 미접착 결함이 있는 경우를 모델링하여 이론적으로 계산한 초음파 신호이고, Figure 1의 (b)는 고무와 FRP가 접착된 경우를 모델링하여 이론적으로 계산한 초음파 신호이다. 미접착 결함과 완전 접착의 초음파 모델링 신호에서 보듯이 초음파 반사신호의 위상이 반전됨을 알 수 있다.



(a) Debonding Signal of Rubber and FRP



(b) Adhesive Signal of Rubber and FRP

Fig. 1 Modeling of Ultrasonic Signal

3. 실험장치 및 시험편

Figure 2는 실험 장비의 개략도이다. 본 연구의 실험을 위하여 초음파의 송, 수신을 위한 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고 초음파 탐촉자는 진동자의 크기가 12.5 mm이고 초음파의 공칭 주파수가 2.25 MHz인 접촉식 일진동자 수직 탐촉자를 사용하였다. 탐촉자에서 수신된 초음파 신호는 A/D Board에서 초음파 전달 시간에 따른 초음파 음압을 RF-Signal로 표시하여 스펙트럼 해석, 음파의 감쇠 및 속도를 측정하였다. 탐촉자와 피검체의 신호 전달을 용이하게 하기 위하여 접촉 매질은 글리세린을 사용하였다.

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 시편의 크기는 290×75 mm이고, FRP에 접착된 고무의 두께는 2.5 mm에서 6.0 mm로 고무가 점차적으로 두꺼워지는 구조로서 미접착이 없는 무결함 시편과 세 개의 미접착이 존재하는 결함 시편을 제작하였다. 결함시편의 미접착 크기는 고무 두께 2.92mm에서 6×12 mm, 고무 두께 3.53mm에서 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 4mm의 고무가 용착된 형상이다. 미접착 결함을 모사하기 위하여 지름이 2 mm에서 10 mm 까지 1 mm 간격으로 치수가 다른 엔드 밀을 사용하여 알루미늄과 고무가 접착된 면까지 수직으로 평저공(Flat Bottom Hole)을 가공하였다.

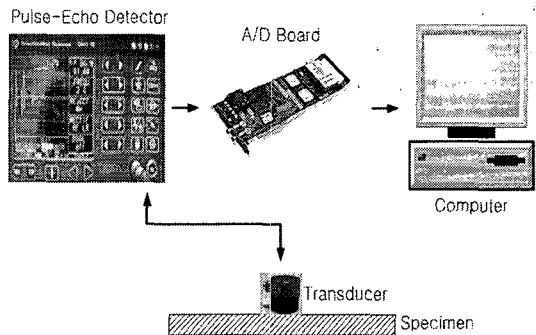


Fig. 2 Schematic Drawing of Experimental Apparatus

4. 실험 및 실험결과

4.1 펄스에코반사법

펄스에코반사법은 반사신호의 크기 및 위치를 측정하여 결함을 판정하는 일반적인 초음파시험 기법이다. Figure 3은 거리에 따른 고무 시편 저면에서 반사신호의 크기, FRP와 고무가 완전하게 접착되었을 때 이론적으로 예측한 반사신호의 크기, FRP/고무 무결함 시편에서 고무 두께가 2.7 mm에서 6.0 mm까지 0.1 mm 간격으로

측정한 FRP/고무 계면의 반사신호의 크기 및 FRP/고무 결합 시편에서의 미접착에 대한 반사신호의 크기를 보여준다.

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

FRP/고무 무결합 시편을 이용하여 고무 두께 변화에 따른 반사신호의 크기를 측정하였다. 반사신호의 크기는 고무 시편에 FRP가 접착될 경우 예측한 값과 유사하였으나 일부에서는 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 반사신호 크기는 FRP/고무가 정상적으로 접착되었을 때보다는 컸지만 미접착이라 가정된 고무 시편의 반사신호와 비교하면 신호의 크기가 많이 차이가 났으므로 반사신호의 크기만으로는 미접착 결함을 검출하기가 곤란할 수 있다.

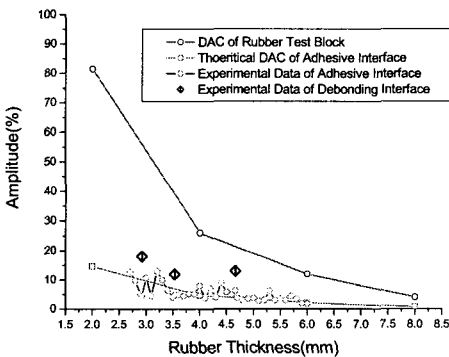


Fig. 3 Height of Reflection Echo by Rubber Thickness

4.2 위상반전법

펄스에코반사법에서 사용한 FRP/고무 시편을 이용하여 미접착의 초음파 위상과 정상접착의 초음파 위상을 상호 비교하였다. FRP/고무 미접

착 시편은 고무 두께가 2.92 mm, 3.53 mm, 4.66 mm일 때 미접착이 존재하므로 FRP/고무 무결합 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 반대였다. Figure 4는 고무두께가 2.92mm인 미접착계면의 초음파 신호와 접착계면의 초음파 신호로서 초음파의 위상이 반전됨을 알 수 있다. 펄스에코반사법으로 반사신호의 크기를 이용하여 미접착을 검출하려면 탐촉자의 접촉 상태, 소재의 두께 및 기하학적 형상 등을 고려해야 하지만 위상반전법은 초음파 위상의 반전여부만을 이용하여 미접착을 검출할 수 있다.

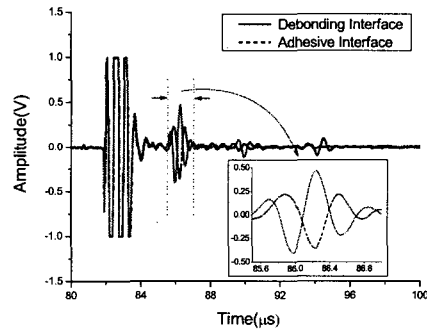


Fig. 4 Ultrasonic Signal of the Debonding and Adhesive Interface in the FRP/Rubber Test Block with 2.92 mm Rubber Thickness

4.3 결합의 정량적 평가

펄스에코반사법과 위상반전법으로 구별할 수 있는 결합은 탐촉자의 면적과 결합의 면적에 상호 연관되어 있다. 결합의 크기가 탐촉자의 면적보다 작게 발생하였을 때는 정량화된 시편으로 최소 결합 검출 능력을 판단해야 하기 때문에 이를 위해 알루미늄에 고무를 융착시켜 시편을 제작하고 평저공을 가공하였다[5].

알루미늄/고무 시편은 탐촉자를 고무 면에 놓

고 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 정상접착에서 초음파 신호의 크기가 같아진다면 반사신호의 크기는 영이 될 것이며 위상 반전이 발생할 수 있는 미접착의 최소 크기가 된다.

Figure 5에서 탐촉자의 진동자 크기가 12.5mm일 때 평저공의 크기에 따른 반사신호 크기의 예측값과 실험값을 도시하였다. 본 실험에서 평저공의 크기가 7.939 mm일 때 초음파 신호가 최소가 될 것으로 예측하였고 알루미늄/고무 시편에서는 평저공이 8mm와 등가로 간주하였다.

실험은 평저공 2 mm에서 10 mm의 알루미늄/고무 시편의 평저공에서 반사신호의 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 고무면의 손상에 의해 초음파의 반사신호의 일부가 산란되어 발생한 현상이다. Figure 6에서 알루미늄/고무 시편의 평저공 4 mm, 8 mm, 9 mm 및 10 mm에 대한 초음파 위상을 나타내었다.

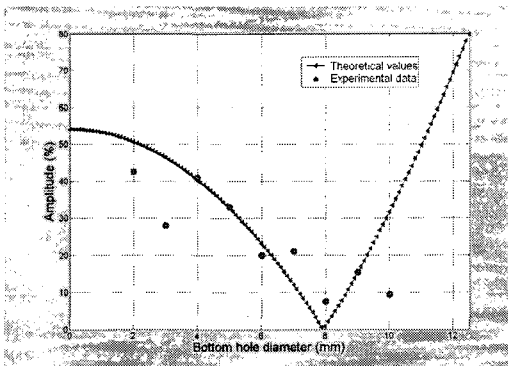


Fig. 5 Amplitude about Flat Bottom Hole Diameter in Aluminum/Rubber Test Block

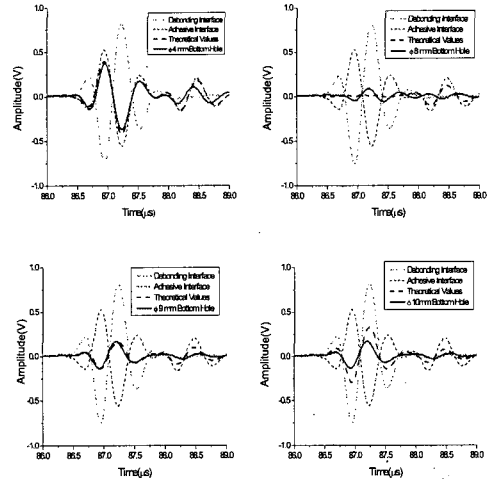


Fig. 6 Configuration of Phase about Flat Bottom Hole in Aluminum/Rubber Test Block

탐촉자의 진동자 크기가 12.5mm이고 미접착의 지름이 7.939 mm일 때 미접착 초음파 신호와 정상 접착 신호의 크기가 같아진다. 탐촉자의 진동자 크기가 12.5 mm이므로 탐촉자와 미접착 결합의 면적 비율은 40.34%로 미접착의 면적이 탐촉자 면적의 약 40.34% 이상이 되면 초음파의 위상이 반전될 것이다.

위상반전이 시작되는 미접착의 크기를 알기 위하여 알루미늄/고무 시편을 제작하는 공정에서 미접착이 발생한 결합 시편을 이용하였다. 알루미늄/고무의 결합 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. Figure 7은 알루미늄/고무 시편을 절단한 모습으로 미접착과 정상 접착의 경계를 확인하기 위하여 핀셋으로 고무를 벌려 확인하였다.

Figure 8은 탐촉자의 면적과 미접착 결합의 면적 비율을 알기 위하여 영상 현미경으로 절단면을 100 배 확대한 사진이다. Figure 8에서 미접착은 접착계면보다 진한 검은색을 보여주고 있으며 미접착과 접착계면의 경계에서 미접착의

폭이 급격히 좁아지는 것을 볼 수 있었다. 미접착 결합은 탐촉자의 중심점 궤적보다 약 800 μ m 정도 미접착 결합 쪽으로 위치하였다. 이를 탐촉자의 면적과 미접착 결합의 면적 비율로 나타내면 45.76%이었고 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.

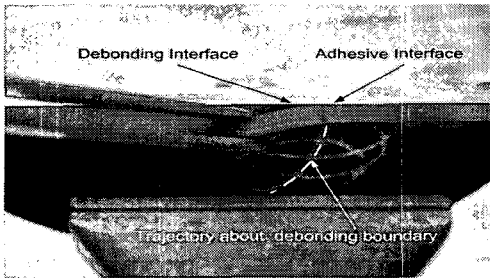


Fig. 7 Cutting Side of Aluminum/Rubber Test Block

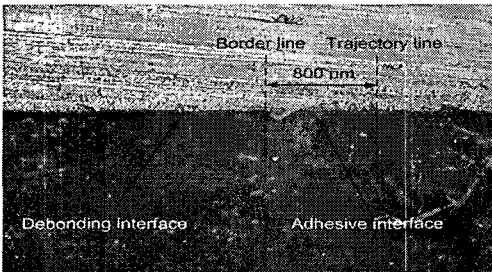


Fig. 8 Video Microscope Image of Aluminum /Rubber Test Block at the Border Line of Debonding Interface($\times 100$)

5. 결 론

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

1) 미접착의 반사신호 크기는 FRP/고무가 완전

하게 접착되었을 때보다는 컸지만 미접착이라 가정된 고무 시편의 반사신호와 비교하면 신호의 크기가 일치하지 않음으로 펄스에코반사법만으로는 미접착 결합을 검출하기가 곤란할 수 있다.

- 2) 초음파 위상은 FRP/고무 시편의 미접착 부위와 접착 부위에서 신호를 비교하였을 때 시간축을 기준으로 서로 반전된 것을 알 수 있다.
- 3) 알루미늄/고무 시편을 이용하여 검출 능력을 측정한 결과 탐촉자의 진동자 크기가 12.5 mm일 때 탐촉자 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. S. Hirsekorn, 2001, "Nonlinear Transfer of Ultrasound by Adhesive Joints - A Theoretical Description", *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 57-68
2. L. W. Schmerr, "Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation", Plenum Press, 1998
3. E. C. Johnson, J. N. Schurr and G. F. Hawking, 1991, "Ultrasonic Evaluation of SMRU Bondlines", Aerospace Corporation, pp. 1-25
4. 은 길수, 김 노유, 나 환선, 송 영철, 2000, "원자로 격납 건물 내부 에폭시 도장재의 초음파 열화 평가", 한국비파괴검사학회 추계 학술대회 논문집, pp. 190-198
5. L. Reinhold, S. John, "Ultrasound NDE of Adhesive Bond Integrity: A Quantitative Measure", U.S Army Materials Technology Laboratory, 1992