

# 섬유강화 복합재료의 비접촉식 초음파 평가 기법 연구

최상우\*·서경철\*\*·이준현\*\*\*·변준형\*\*\*\*

## A Study of Non-contacting Ultrasonic Technique for Evaluation of Fiber Reinforced Composite Materials

Sang-Woo Choi, Kyeong-Cheol Seo, Joon-Hyun Lee and Joon-Hyun Byun

### Abstract

Non-contact technique should be developed for receiving ultrasonic wave for on-line monitoring of processing defects of fiber reinforced composites, since couplant must be applied on composite materials when conventional ultrasonic testing technique was used. Restriction of conventional ultrasonic testing technique was proven by transmitting and receiving ultrasonic wave on CFRP in various direction of wave propagation with various incident angle of ultrasonic beam. Air-coupled transducer and laser interferometer were applied for non-contacting reception of ultrasonic wave in fiber reinforced composite materials. Air-coupled transducer has optimal sensitivity and frequency band of 300kHz has homogeneous characteristics on direction of wave propagation.

**Key Words:** Ultrasonic Testing(초음파평가), Laser-generated Ultrasonic Wave(레이저 유도 초음파), Air-coupled Transducer(공기결합트랜스듀서), Nondestructive Evaluation(비파괴 평가)

### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 고강도 경량화 재료로 최근 우주항공분야와 레저산업에서 급속히 그 적용이 증가하고 있는 구조재이다. 한편, 섬유강화 복합재료는 그 기지재로 적용되는 고분자 재료에 비하여 제조 공정의 제한성으로 다양한 형상의 구조물 제조에 많은 제약이 있었다. 그러나 최근의 섬유자동 배열 기술은 복잡한 복합재료 구조물을 제조할 수 있기 때문에 다양한 형상의 구조물 제조가 가능하게 되었다. 따라서 섬유자동 배열기술의 의하여 설계의 유연성, 정확한 섬유배열에 의한 제품의 정밀도, 자동 배열/적층에 의한 높은 생산성을 기대할 수 있게 되었다. 그러나 섬유강화 고분자 복합재료는 제조 공정중에서 기

공이 포함되거나 가압이 원활하지 못하는 경우 내부 결함이 생성되고 강화재의 배향특성에 따라 강도 특성에서 큰 차이를 유발하게 된다. 고품질의 고분자 복합재료를 제조하기 위하여 이와 같은 결함 및 강화재의 분포 특성을 비파괴적으로 평가할 필요가 있다. 특히, 섬유자동 배열 기술에 의한 복합재료에 대하여 기대되는 품질을 만족시키기 위하여 제조공정중의 on-line 평가 기술이 요구된다.[1]

기존의 비파괴 평가 기법중 섬유강화복합재료의 결함을 검출하는 기법으로는 초음파 C-scan에 의한 결함 영상화가 유용한 기법으로 적용되고 있다. 그러나 기존의 초음파 C-scan 기법은 수침식에 의한 방법이므로 검사대상체를 물과 같은 액체에 수침시켜야 하므로 제조공정중 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 수침법을 적용하지 않으면서 동시에 제조공정중 적용할수 있는 비접촉식의 초음파 평가 기법이 적용되어야 한다. 이를 위한 비접촉식 초음파 기법으로는 최근 레이저를 이용한 레이저 초음파 기법과 공기중에서의 초음파 송수신을 가능하게 하는 air-coupled transducer

\* 부산대학교 기계기술연구소  
\*\* 부산대학교 대학원  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 한국기계연구원

를 이용한 방법이 적용가능하다.[2] 따라서 본 연구에서는 제조공정중의 섬유강화 복합재료의 비파괴 평가를 위한 레이저 초음파 기법과 air-coupled transducer를 이용하는 비접촉식 초음파 기법에 대하여 연구하고자 하였다.

## 2. 비접촉 초음파 측정 기법

비접촉식 초음파 기법으로는 초음파 발생을 위한 레이저 유도 초음파 발생기법과 비접촉식 수신 기법이 있으며 선행된 연구에서는 섬유강화 복합재료에서의 레이저 유도 초음파 발생에 대하여 연구를 수행하였다.[3] 본 연구에서는 단일 방향으로 탄소섬유강화재가 배향된 CFRP판재에 대하여 초음파 센서로부터 발생되어 복합재료에서 전파된 초음파를 비접촉식 초음파 수신기법에 의하여 수신하였다. 비접촉식 초음파 수신기법으로는 air-coupled transducer를 이용하는 기법과 레이저 간섭계를 이용하는 기법 두가지를 적용하였다.

### 2.1 공기결합트랜스듀서(Air-coupled Transducer)

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 초음파 센서를 통하여 경사각 입사된 초음파로부터 Lamb wave를 발생시키고, 전파되는 Lamb파는 공기중으로 누설되는 성분으로 air-coupled transducer(공기결합트랜스듀서)를 통하여 수신하였다.

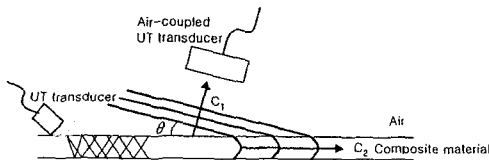


Fig. 1 Receiving angle of air-coupled transducer

Air-coupled transducer의 방향 즉, 수신각에 따라서 수신되는 초음파의 감도가 변화되며 이는 다음 식(1)과 같은 스넬의 법칙에 의하여 방향이 결정된다. 공기중의 음속( $C_1$ )은 340m/s이며 Lamb 파의 전파속도는  $C_2$ 이고 그 전파방향은 90도이다. 이때 공기 중으로 누설되는 초음파의 굴절각은 두 매질의 초음파 전파속도 비에 대한  $\sin$ 의 역함수 값으로 얻어진다.

$$\frac{C_1}{\sin \theta} = \frac{C_2}{\sin 90^\circ} = C_2 \quad (1)$$

### 2.2 레이저 간섭계

비접촉식의 초음파 수신기법의 또다른 방법으로 Fig. 2와 같이 광섬유를 이용한 Michelson PM fiber interferometer를 이용하였다. 표면의 변위를 레이저의 가간섭성을 이용한 간섭계로 측정하여 초음파를 수신하였으며 적용된 레이저는 파장은 1,550nm로 적외선 영역이다. 본 연구에서는 복합재료의 뒷면에서 초음파 센서로 초음파를 송신시키고 투과된 초음파를 간섭계의 focuser를 접근시켜 표면 변위측정을 통하여 수신하였다.

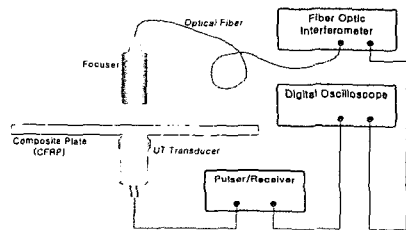


Fig. 2 Schematic experimental setup for reception of ultrasonic wave by using interferometer

## 3. 비접촉식 초음파 수신 파형

### 3.1 공기결합트랜스듀서의 수신 파형

#### 3.1.1 Direction of Lamb wave : 0°

Fig. 3은 Lamb파의 진행방향과 섬유강화재의 배향 방향이 일치하는 0도 방향으로의 전파에 대한 air-coupled transducer의 수신 파형이다. 초음파 센서로부터의 입사각이 10도 인경우이며 이때 높은 수신민감도를 가지는 air-coupled transducer의 수신각은 2도 이다. 수신된 Lamb파의 전파속도는 약 9.0mm/ $\mu$ s이었으며, 수신파형은 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 1.3MHz의 주파수 성분이 강하게 수신되었다. Air-coupled transducer의 수신 최대 주파수가 2MHz인 것을 고려하면 수신각 2도에서는 복합재료에서 전파되는 Lamb파중에서 고주파수 성분의 수신율이 높다는 것을 의미한다.

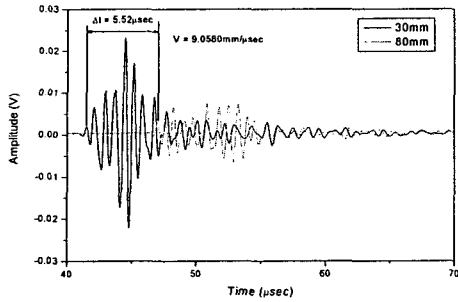


Fig. 3 Ultrasonic waveform received with air-coupled transducer (Incident angle:10°, receiving angle:2°)

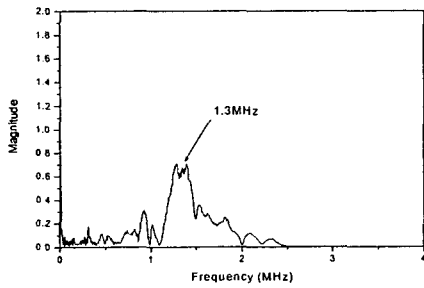


Fig. 4 FFT (Incident angle:10°, receiving angle:2°)

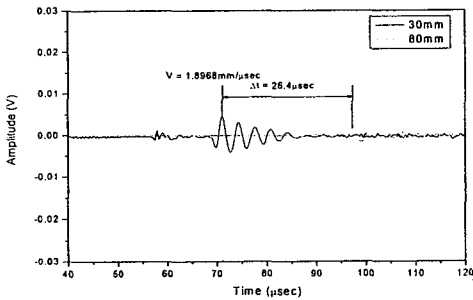


Fig. 5 Ultrasonic waveform received with air-coupled transducer (Incident angle:60°, receiving angle:10°)

Fig. 5는 초음파의 입사각이 60도 이고 air-coupled transducer의 수신각이 10도인 경우의 파형으로 전파속도는 약 1.9mm/μs으로 수신각 2도의 경우에 비하여 약 1/5배의 느린 성분이 수신되었다. 수신된 Lamb파는 Fig. 6과 같이

0.31MHz로 낮은 주파수 성분이 수신되었으며 앞의 수신각 2도의 경우와 비교해볼 때 수신각에 따라서 전파속도와 주파수가 다른 2가지 모드의 Lamb파가 전파되고 수신됨을 나타내고 있다.

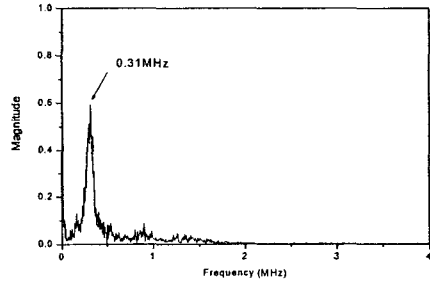


Fig. 6 FFT (Incident angle:60°, receiving angle:10°)

### 3.1.2 Direction of Lamb wave : 45°

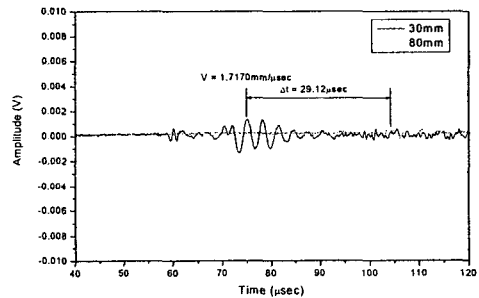


Fig. 7 Ultrasonic waveform received with air-coupled transducer (Incident angle:60°, receiving angle:10°)

Fig. 7은 Lamb파의 전파방향이 강화재 배향 방향과 45도의 각을 이루는 경우 air-coupled transducer로 수신된 파형으로 감도가 높은 수신각은 10도 였다. 전파속도는 약 1.7mm/μs이었으며, 강화재로부터의 산란으로 수신된 초음파의 진폭 크기가 낮게 나타났으며, 고주파성분은 감쇠되고 저주파성분이 수신되었다.

### 3.1.3 Direction of Lamb wave : 90°

초음파 Lamb파의 전파 방향이 강화재 배향방향과 직각인 경우 수신 파형은 Fig. 8과 같으며

수신가능한 air-coupled transducer의 수신각은 2도와 10도였다. 전파속도는 약.  $2\text{mm}/\mu\text{s}$ 였으며 수신 초음파의 주파수는 앞의 0도의 전파방향과 유사하게 수신각이 10도 인경우는 저주파수 성분이 수신되었고 수신각이 2도인 경우는 고주파수 성분이 수신되었다.

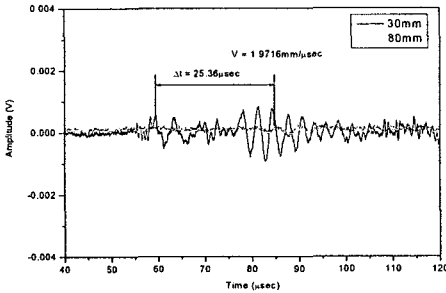


Fig. 8 Ultrasonic waveform received with air-coupled transducer (Incident angle:  $65^\circ$ , receiving angle:  $10^\circ$ )

### 3.2 간섭계의 수신 파형

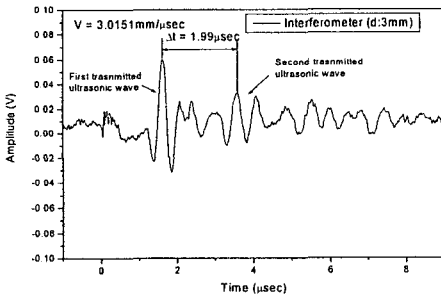


Fig. 9 Ultrasonic waveform received by interferometer

앞의 air-coupled transducer를 이용하여 수신한 경우와 달리 Michelson간섭계를 이용한 경우 Lamb파를 수신할 수 없었으며, 수직 입사에 의한 투과파를 수신할 수 있었다. 다음의 Fig. 9는 2MHz의 종파 트랜스듀서를 이용하여 수직 입사시킨 투과파 및 복합재료 두께를 1회 추가 왕복 후 수신된 파형을 나타내며 전파속도는  $3.0\text{mm}/\mu\text{s}$ 로 측정되었다. 두 개의 초음파 echo는 쉽게 구분이 되지만 전체적으로 잡음이 많이 포함되어 있

다. 이는 일반적인 PZT가 힘 측 가속도를 측정하는 것과는 달리 Michelson간섭계는 변위를 측정하는 것으로 주위의 진동으로부터 민감한 영향을 받기 때문이다.

## 4. 결 론

Air-coupled transducer를 이용하여 섬유강화복합 재료에 전파하는 초음파를 수신하는 경우 수신각에 따라서 초음파의 다양한 주파수 모드를 수신할 수 있었다. 특히 섬유강화재 배향방향에 대한 각 전파방향에서 균질한 전파특성을 보이고 수신 감도가 높은 저주파 성분은 약10도의 수신각으로 측정할 수 있었다.

Laser interferometer를 적용하는 경우 외부의 진동 및 광학적 잡음 등에 의하여 초음파 파형의 S/N비가 낮게 수신되었다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 "차세대 소재 성형 기술 개발"사업과 기본연구사업에서 수행된 연구 결과임.

## 참고문헌

- (1) B. Boro Djordjevic, T. Berndt, M. Ehrlich, K. Baldwin, D. Palmer, S. Holmes, "Advances in NDE for On-line Fiber Placement Process," 43rd International SAMPE Symposium, May 31-June 4, 1998. pp. 2169-2177.
- (2) 장경영, 김홍준, Donatella Ceringlia, Boro Djordjevic, "Non-Contact Ultrasonic Testing of Aircraft Joints Using Laser Generated Lamb Wave," 비파괴검사학회지 Vol. 21, No. 3, 2001, pp. 163-168.
- (3) 최상우, 이준현, 변준형, 서경철, "CFRP의 섬유강화재 배향성에 따른 레이저유도초음파 신호특성 평가," 복합재료학회 2004년도 춘계학술발표대회 논문집, 2004, pp. 143-146.