

CFRP의 섬유강화재 배향성에 따른 레이저유도초음파 신호특성 평가

최상우* · 이준현* · 변준형** · 서경철*

Evaluation of Laser-based Ultrasonic Signals due to Fiber Orientation of CFRP

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

Abstract

Fiber reinforced plastic material should be inspected in fabrication process in order to enhance quality by prevent defects such as delamination and void. Generally, ultrasonic technique is widely used to evaluate FRP. In conventional ultrasonic techniques, transducer should be contacted on FRP. However, conventional contacting method could not be applied in fabrication process and novel non-contact evaluating technique was required. Laser-based ultrasonic technique was tried to evaluate FRP plate. Laser-based ultrasonic waves propagated on CFRP were received with various transducers such as accelerometer and AE sensor in order to evaluate the properties of waves due to the variation of frequency. Velocities of laser-based ultrasonic waves were evaluated for various fiber orientation.

Key Words: 섬유강화복합재료(FRP), 레이저 유도 초음파(Laser-based Ultrasound), 비파괴평가(Nondestructive Evaluation), 초음파전파속도(Ultrasonic wave velocity).

1. 서 론

항공우주산업, 토목건축 산업, 선박해양산업에 적용되는 복합재료 성형기술은 비교적 규모가 크고 형상이 복잡한 구조물이므로 수작업에 의한 적층공정이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 수적층법(hand lay-up)은 복합재의 크기나 형상에 제약이 적고, 저렴한 생산시설비용의 장점이 있으나, 적층에 많은 시간이 소요되고 작업자의 숙련도에 의하여 품질의 재연성이 떨어지는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 프리프레임을 자동으로 배열시키는 자동섬유배열기술을 적용한 기법이 개발되고 있으며, 기존의 고생산성의 섬유강화복합재료 제조 공법인 filament winding,

pultrusion, RTM 등의 기법에 비하여 복잡한 구조물을 제조할수 있는 장점이 있다. 특히 자동섬유배열기술은 다축제어기술에 의하여 섬유배열 각도 및 섬유 포함량등을 정밀제어 가능하며 3차원형상의 비교적 복잡한 프리프레임의 제조가 가능하다. 그러나 이와 같은 자동섬유배열기술은 고가의 생산시설을 요구하며 따라서 제조되는 복합재료는 고품질, 고성능이 요구된다. 이와 같은 첨단기법에 의한 섬유강화복합재료의 품질 및 성능을 확보하기 위하여 제조공정중에 발생할 수 있는 층간분리 및 기공 등의 결함요인을 방지해야하며 이를 위하여 복합재료 제조공정과정에서의 실시간 비파괴 평가가 필수적으로 적용되어야 한다.

복합재료의 비파괴 평가 기법으로 초음파를 이용한 평가 기법이 층간분리 및 내부 기공등을 검출하기 위하여 널리 적용되고 있다. 그러나 초음파를 이용한 복합재료 비파괴 평가기법은 완성된 구조물을 수조속에 수침시키는 C-scan 기법 또는 접촉매질을 도포하여 센서를 접촉시키는 기법등

* 부산대학교

** 한국기계연구원(KIMM)

을 적용하게 되므로 제조공정중에 적용할 수 없는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하는 새로운 초음파 기법으로 레이저 유도 초음파 기법이 활발히 연구되고 있다.[1-2]

본 논문은 자동섬유배열기법과 같은 연속되는 복합재료제조 공정중 발생하는 결함을 실시간으로 검출할 수 있는 온라인 비접촉식 초음파 평가 기법을 개발하기위한 레이저 유도 초음파 기법의 섬유강화복합재료에서의 적용 기술을 연구하고자 주파수 특성이 다른 수신센서를 적용하여 강화재 배향방향에 따른 레이저 유도 초음파 전파특성을 평가하였다.

2. 복합재료의 레이저 유도 초음파 적용

2.1 레이저 유도 초음파 발생

레이저 유도 초음파는 nsec 단위의 아주 짧은 시간동안의 펄스 레이저 빔 조사에 의한 국부적인 조사지점에서의 열팽창 수축에 의하여 발생하는 탄성파이다. 레이저의 강도(intensity)가 과다하게 되면 표면에서의 재료의 증발 현상이 일어나며 이것을 ablation이라고 한다. 이 경우 증발되는 성분의 반발력에 의하여 깊이방향으로 체적파가 전파되지만 이는 표면상의 손상을 유발하므로 엄밀한 의미의 비파괴평가기법이라 할수 없다. 표면 손상이 발생하지 않는 열탄성영역내에서의 레이저 조사에 의하여 Fig. 1과 같이 열팽창/수축은 표면근방이내에서만 발생하고 이에 따라 표면근방에서의 탄성파 즉, 표면파가 발생하고 전파하게 된다.

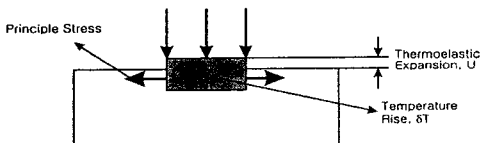


Fig. 1 Generation of laser-based ultrasonic wave by localized irradiation

2.2 복합재료에서의 레이저 유도 초음파

열탄성영역에서의 레이저 유도 초음파는 깊이 방향으로 전파되는 체적파가 아니고 표면파가 주성분이 된다. 따라서 레이저 유도 초음파 기법의 적용은 두꺼운 재료의 내부결함 보다는 표면 결

함 또는 박판재료의 결함 검출에 적합하다. 섬유강화 복합재료의 경우 일반적으로 두께가 얇은 판재의 구조가 널리 적용된다. 따라서 일반적인 체적파 보다는 판재의 형상에 적합한 판파(Lamb wave)의 적용이 적절한 초음파 비파괴 평가 기법이라 할수 있으며 레이저에 의하여 발생하는 표면파는 얇은 판재의 경우 판파모드로 변환되므로 레이저 유도 초음파 기법은 복합재료의 비파괴 평가에 적합한 비접촉식 평가 기법의 조건을 가지고 있다.

섬유강화복합재료에서의 레이저 유도 초음파 적용은 다음 Fig. 2와 같이 수행되었다. 섬유강화재를 단방향으로 배향시킨 두께 3mm의 탄소섬유 복합재료 판재에 532nm의 파장을 가진 Nd:YAG 펄스 레이저를 조사시키고 조사된 지점에서의 열탄성에 의하여 발생된 초음파를 일정 거리 전파시킨후 가속도계 및 AE센서등을 통하여 수신하였다. AE센서는 150~300kHz 범위에서 높은 수신 감도를 가지고 있으며 가속도계는 80kHz에서 공진 주파수 특성을 가지고 있어 80kHz와 160kHz 부근에서 높은 수신율을 나타낸다. 수신 지점은 레이저 유도 초음파의 발생지점인 레이저 조사지점으로부터 40mm와 70mm만큼 떨어진 점이며, 레이저 조사지점으로부터의 방향은 섬유배향방향에 나란한 0° 그리고 30°, 45°, 60° 및 섬유배향방향에 수직인 90° 이다. 두 측정 지점 사이에서의 레이저 유도 초음파의 도달 시간 차이로 전파속도를 구하고, 섬유강화재의 배향방향에 따른 속도 및 수신 주파수에 따른 속도 변화특성을 분석하였다.

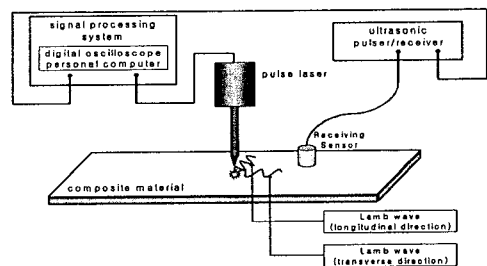


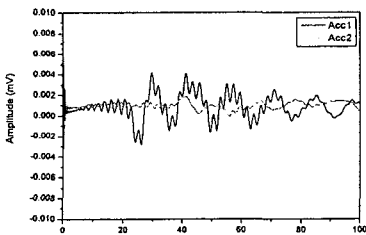
Fig. 2 Schematic experimental setup

3. 초음파 송/수신 및 속도 측정

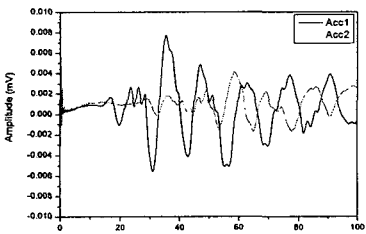
3.1 레이저 유도 초음파 송수신

다음 Fig. 3는 두 개의 가속도계를 이용하여 40mm지점(Acc1)과 70mm지점(Acc2)에서 섬유배향 방향에 대하여 여러 각도에서 수신한 레이저 유도 초음파 파형이다. 탄소섬유강화재와 평행한 방향으로 전파된 레이저 유도 초음파를 수신한 파형인 Fig. 3 (a)에서 레이저 조사지점으로부터 40mm 떨어진 지점에서 수신된 파형(Acc1)은 큰 진폭의 저주파 성분과 작은 진폭의 고주파수 성분이 포함되어 수신되었다. 레이저 조사지점으로부터 70mm 떨어진 지점에서 수신된 파형(Acc2)는 30mm만큼의 전파동안 감쇠되어 진폭이 급감하였고, 고주파수 성분이 거의 수신되지 않았다.

탄소섬유강화재 배향방향과 나란한 방향으로 전파되는 레이저 유도 초음파의 진폭이 가장 낮게 나타났고, Fig. 3 (b)와 같은 탄소섬유강화재의 수직 방향으로 갈수록 그 진폭이 증가하였다. 그러나 0도 방향에서 수신되던 고주파수 성분은 다른 방향에서는 수신되지 않았으며 이는 섬유강화재를 가로질러가는 방향에서의 섬유강화재에서의 산란으로 고주파수 성분이 감쇠되고 저주파 성분만 전파되기 때문이다.



(a) 0 degree (Parallel)



(b) 90 degree

Fig. 3 Ultrasonic waveforms due to the variation of fiber orientation (Accelerometer, t:3mm)

가속도계를 이용하여 수신된 레이저 유도 초음파의 주파수영역의 신호 특성은 다음 Fig. 4와 같다. 가속도계가 80kHz의 공진주파수 특성을 가지므로 80kHz 및 160kHz 부근에서 높은 수신율을 나타내었다. 특히 가장 높은 주파수 성분은 73kHz로 비교적 낮은 주파수 성분이 높은 강도를 나타내었다.

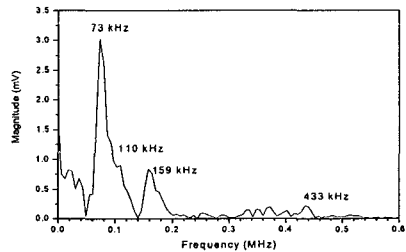
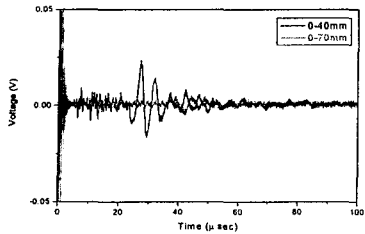


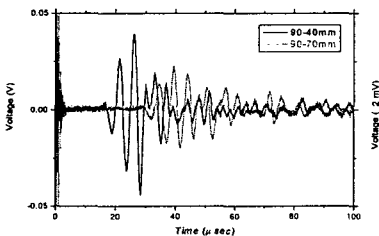
Fig. 4 FFT of ultrasonic wave received with accelerometer

다음 Fig. 5는 AE센서를 이용하여 수신한 레이저 유도 초음파 파형이다. 섬유강화재 배향방향과 평행한 방향으로 전파되어 수신된 파형에서 가속계와 같은 고주파수 성분의 혼합되는 특성은 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 5 (a)에서 5~20μs 구간에서 훨씬 높은 고주파 성분 수신되었다. 이 성분은 강화재에 의한 산란으로 다른 전파 방향에서 감쇠되어 수신되지 않았다. 레이저 유도 초음파의 전파방향이 섬유강화재와 동일한 경우 보다 섬유강화재의 배향방향에 수직인 방향으로 갈수록 수신 신호의 진폭 높이가 증가하는 현상은 앞의 가속도계에서 수신된 신호와 동일한 특성이었다.

AE센서에 의하여 수신된 레이저 유도 초음파의 주파수 영역 신호특성은 다음 Fig. 6과 같다. AE센서의 특성은 150kHz부터 300kHz사이의 범위에서 높은 수신감도를 가지므로 수신된 레이저 유도 초음파 역시 같은 범위에서 높은 수신율을 나타내었다. 그러나 이 범위내에서도 177kHz에서 가장 높은 감도를 나타내었다. 이는 섬유강화복합재료의 경우 구성 섬유강화재에서의 산란에 의한 높은 감쇠에 의하여 고주파수 성분은 감쇠되고 비교적 저주파수 성분이 전파되기 용이하기 때문이다.



(a) 0 Degree (Parallel)



(b) 90 Degree

Fig. 5 Ultrasonic waveforms due to the variation of fiber orientation (AE sensor, t:3mm)

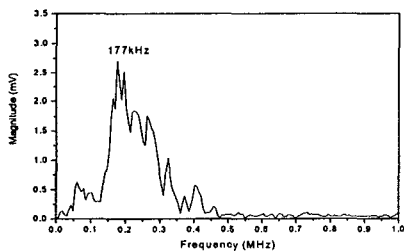


Fig. 6 FFT of ultrasonic wave received with AE sensor

3.2 레이저 유도 초음파의 전파속도 특성

이들 각 수신 센서에 따른 레이저 유도 초음파의 전파속도를 전파방향에 따라 측정하면 다음 Fig. 7과 같다. 저주파성분의 가속도계로 수신된 레이저 유도 초음파는 섬유강화재 배향방향으로는 높은 속도로 전파되지만 섬유강화재와 수직 방향으로 갈수록 점차 그 전파속도가 감소하였다. 그러나 AE센서로 수신하여 그보다 높은 주파수 대역의 신호는 전파속도의 차이가 거의 없었다. 따라서 복합재료 내부에 존재하는 결함을 검

출하기 위하여 레이저 유도 초음파의 속도 변화 등을 이용하는 경우 각 방향에 속도의 변화가 미소한 177kHz영역의 신호를 수신하는 것이 용이할 것으로 판단된다.

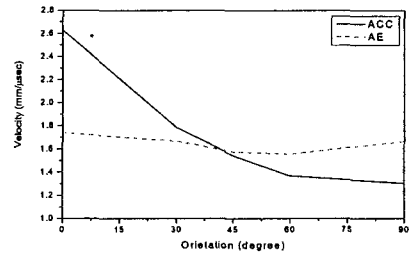


Fig. 7 Ultrasonic wave velocities due to the variation of fiber orientation

4. 결론

복합재료의 섬유강화재에 방향에 따른 레이저 유도 초음파의 전파속도는 수직방향으로 갈수록 그 전파속도가 감소하였으나 177kHz영역에서는 강화재 방향에 따른 영향이 미소하여 전파속도변화를 이용한 결함 평가시에 유용하게 적용될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) B. Audoin, "Non-destructive Evaluation of Composite Materials with Ultrasonic Waves Generated and Detected by Lasers," *Ultrasonics*, Vol. 40 (2002), pp. 735-740.
- (2) Weimin Gao, Christ Glorieux, Jan Thoen, "Laser Ultrasonic Study of Lamb Waves: Determination of the Thickness and Velocities of a Thin Plate," *Internation J. of Engineering Science*, Vol. 41(2003), pp. 219-228.