

레이저를 이용한 탄소섬유강화 복합재료의 비파괴평가 기법에 관한 연구

A Study on Nondestructive Technique Using Laser Technique for Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Plastic

최상우*[†], 이준현**, 변준형***, 서경철****

Sang-Woo Choi*[†], Joon-Hyun Lee**, Joon-Hyung Byun*** and Kyeong-Cheol Seo****

초 록 섬유강화복합재료의 품질향상을 위하여 제조공정중에 발생하게 되는 층간 분리 및 기공 등의 결함이 온라인상에서 검출되어야 한다. 일반적으로 섬유강화복합재료의 비파괴 평가에 있어서 초음파 평가기법이 널리 이용되고 있으나 기존의 초음파 평가 기법은 초음파 전파를 위하여 접촉이 이루어져야 하는 단점이 있다. 따라서 기존의 초음파 평가기법은 비접촉의 기법이 아니므로 제조공정중에 적용할 수 없다. 비접촉식의 초음파 평가 기법을 구현하기 위하여 광학적 기법의 레이저 기법이 적용되었으며 본 연구에서는 레이저 유도 초음파 발생 기법과 레이저 간섭계를 이용한 수신기법이 섬유강화 복합재료 판재에서 적용되었다. 레이저 유도 초음파는 펄스레이저에 의한 복합재료 표면의 순간적인 가열과 이에 의한 열변형으로 발생되어 전파되며 본 연구에 가속도계, AE센서 등 주파수 범위가 다른 수신센서를 이용하여 전파방향 변화에 따른 유도 초음파를 수신하였으며 수신된 유도초음파의 전파방향에 따른 전파속도를 비교하였다. 또한 비접촉 수신기법으로 레이저 간섭계를 이용하여 탄소섬유강화 복합재료에서의 초음파를 수신하고 그 주파수 특성을 분석하였다.

주요용어: 섬유강화복합재료, 레이저 유도 초음파, 비파괴평가, 초음파전파속도, 레이저 간섭계

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 CFRP 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. In addition, laser interferometry was used to receive ultrasonic wave in CFRP and frequency was analysed.

Keywords: fiber reinforced plastic, laser-based ultrasound, nondestructive evaluation, ultrasonic wave velocity, laser interferometry

1. 서 론

항공우주산업, 토목건축산업, 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 재현성이 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 제조할 수 있는 장점이 있다. 특히 자동섬유배열기술은 다축제어기술에 의하여 섬유배열 각도 및 섬유 포함량 등의 정밀제어가 가능하며 3차원 형상의 비교적 복잡한 프리폼의 제조가 가능하다. 그러나 자동섬유배열기술은 고가의 생산시설을 요구하며 따라서 제조되는 복합재료는 고품질, 고성능이 요구된다. 이와 같은 첨단 기법에 의한 섬유강화복합재료의 품질 및 성능을 확보하기 위하여 제조과정중에 발생할 수 있는 층간분리 및 기공 등의 결함요인을 방지해야하며 이를 위하여 복합재료 제조공정과정에서의 실시간 비파괴평가가 필수적으로 적용되어야 한다.

복합재료의 비파괴평가 기법으로 초음파를 이용한 평가 기법이 층간분리 및 내부 기공 등을 검출하기 위하여 널리 적용되고 있다. 그러나 초음파를 이용한 복합재료 비파괴 평가기법은 완성된 구조물을 구조속에 수침시키는 C-scan 기법 또는 접촉매질을 도포하여 센서를 접촉시키는 기법 등을 적용하게 되므로 제조과정중에 적용할 수 없는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하는 새로운 초음파 기법으로 레이저 유도 초음파 기법이 활발히 연구되고 있다[1,2].

레이저를 이용한 초음파 발생의 경우는 1990년 Scruby[3]에 의하여 기본적 체계적 이론이 확립되었다. 비접촉식 비파괴 평가는 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로 비파괴 평가 분야에서 실제 현장 적용성이 대두되면서 급격히 발전하고 있지만, 구체적인 실용화가 부족한 실정이다.

해외 기술선진국의 경우 1993년 이미 Christine Corbel은 Q-switch Nd:YAG 레이저를 이용하여

Carbon과 Epoxy의 배향각도에 따라 초음파를 발생시키고 piezoelectric transducer와 optical-heterodyne interferometer를 이용하여 수신하는 연구를 수행하였다[4]. 1996년 Warwick 대학에서 W. M. D. Wright 팀은 레이저를 이용하여 Lamb파를 발생시키고 piezoelectric 효과를 이용한 air-coupled detection기법으로 CFRP에서의 초음파 측정에 관한 연구를 수행한바 있다[5]. 1998년 일본의 Shizuoka 대학의 Yasushisa Hayashi는 레이저 유도 Lamb파를 이용하여 금속박판 재료의 탄성물성치와 두께 등을 평가하였다[6]. 특히 복합재료의 on-line 평가를 위하여 Djordjevic 등은 레이저 유도 초음파 기법과 비접촉 수신기법을 적용하여 층간분리 결함에 대한 신호의 감쇠특성을 연구하였다[7].

본 논문은 자동섬유배열기법과 같은 연속되는 복합재료제조 공정 중에 발생하는 결함을 실시간으로 검출할 수 있는 온라인 비접촉식 초음파 평가기법을 개발하기위한 레이저 유도 초음파 기법의 섬유강화복합재료에서의 적용 기술을 연구하고자 주파수 특성이 다른 수신센서를 적용하여 강화재 배향 방향에 따른 레이저 유도 초음파 전파특성 및 광섬유(optical cable)를 이용하는 Michelson형 간섭계를 이용한 초음파의 수신 기법을 평가하였다. 레이저 유도 초음파의 수신을 위하여 저주파 대역의 수신센서를 사용하였으며, 가속도계를 이용하여 80 kHz 이하의 저주파수 성분의 레이저 유도 초음파를 수신하였고 AE센서를 이용하여 150 kHz 이상 대역 주파수 성분의 레이저 유도 초음파를 수신하였다. 본 연구에서는 주파수 대역이 다른 저주파수 대역의 센서에서 수신된 레이저 유도 초음파의 섬유강화재 배향 방향변화에 따른 전파 속도 등의 변화를 비교하였다.

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 할 수 없다. 표면 손상이 발생하지 않는 열탄성영역 내에서의 레이저 조사에 의하여 Fig. 1과 같이 열팽창/수축은 표면근방이내에서만 발생하고 두께방향의 변형량 보다는 표면과 평행된 면의 방향에서의 변형이 크게 발생한다. 이에 따라 표면근방에서의 탄성과 즉, 표면파가 발생하고 전파하게 된다.

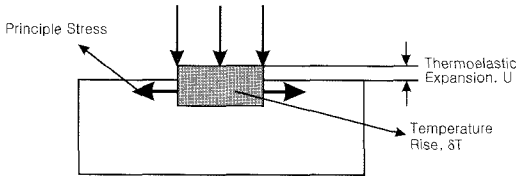


Fig. 1 Generation of laser-based ultrasonic wave by localized irradiation

Fig. 1과 같이 표면의 일부가 레이저 빔에 의하여 가열될 때, 표면의 일부가 온도증가에 의하여 팽창하게 되면, 압력이 표면 방향으로 작용하게 된다. 이러한 조건하에서 응력-변형률 관계식은 다음 식 (1)과 같이 된다.

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\epsilon_{zz} - 3Ba\delta T \quad (1)$$

여기서 λ 와 μ 는 재료의 탄성상수값이고, B 는 부피 탄성율(bulk modulus of elasticity)이고 $B = \lambda + 2/3\mu$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 a 는 열팽창계수이고, δT 는 레이저 조사에 의한 상승 온도이다. 이 경우 종파, 횡파, 표면파 등 모든 파가 생성될 수 있다[3].

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 결함 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 할 수 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 단일방향으로 배향시킨 두께 3 mm의 탄소섬유복합재료 판재에 532 nm의 파장을 가진 Nd:YAG 펄스 레이저를 조사시키고 조사된 지점에서의 열탄성변형에 의하여 발생한 초음파를 일정 거리 전파시킨 후 가속도계 및 AE센서 등을 통하여 수신하였다. AE센서는 150~300 kHz 범위에서 높은 수신 감도를 가지고 있으며 가속도계는 80 kHz에서 공진 주파수 특성을 가지고 있어 공진주파수와 공진주파수의 정수배에 해당하는 80 kHz와 160 kHz부근에서 높은 수신율을 나타낸다.

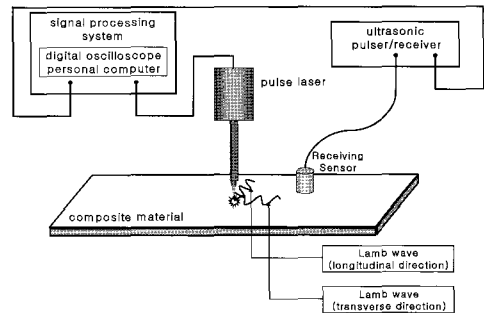


Fig. 2 Schematic experimental setup

수신 지점은 레이저 유도 초음파의 발생지점인 레이저 조사지점으로부터 40 mm와 70 mm만큼 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.

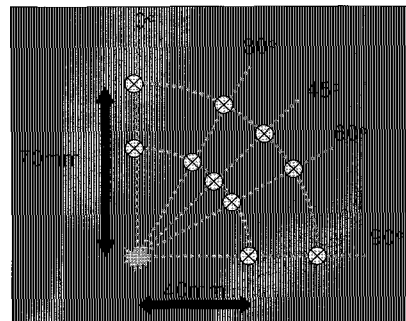


Fig. 3 Laser illumination and ultrasonic wave receiving spots on CFRP plate

2.3. 레이저 간섭계

비접촉식의 초음파 평가 기법의 또 다른 방법으로 Fig. 4와 같이 광섬유를 이용한 Michelson PM fiber interferometer를 이용하였다. 표면의 변위를 단색광인 레이저의 가간섭성(coherence)을 이용한 간섭계로 측정하여 초음파를 수신하였으며 적용된 레이저는 파장은 1,550 nm로 가시영역 밖의 적외선 영역이다. 간섭계의 레이저 빔 spot직경은 4.6 μ m 이고 초점거리 2.3 mm 최저 측정 분해능은 0.1 nm 미만이다. 본 연구에서는 복합재료의 뒷면에서 초음파 센서로 초음파를 송신시키고 투과된 초음파를 간섭계의 focuser를 접근시켜 표면 변위측정을 통하여 수신하였다.

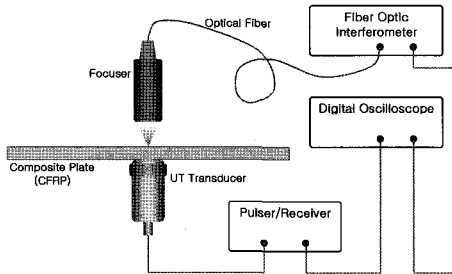


Fig. 4 Schematic experimental setup for reception of ultrasonic wave by using interferometer

3. 광학적 기법에 의한 초음파 송/수신

3.1. 수신센서 및 전파방향변화에 따른 레이저 유도 초음파 특성

다음 Fig. 5는 두 개의 가속도계를 이용하여 40 mm지점(Acc1)과 70 mm지점(Acc2)에서 섬유배향 방향에 대하여 다양한 전파 방향에 대한 수신 레이저 유도 초음파 파형이다. 탄소섬유강화재와 평행한 방향으로 전파된 레이저 유도 초음파를 수신한 파형인 Fig. 5 (a)에서 레이저 조사지점으로부터 40 mm 떨어진 지점에서 수신된 파형(Acc1)은 큰 진폭의 저주파 성분과 작은 진폭의 고주파수 성분이 포함되어 수신되었다. 레이저 조사지점으로부터 70 mm 떨어진 지점에서 수신된 파형(Acc2)는 30 mm 만큼의 전파동안 감쇠되어 진폭이 급감하였고, 고주파수 성분이 거의 수신되지 않았다. 탄소섬유강화재 배향 방향과 나란한 방향으로 전파되는 레이저 유도 초음파의 진폭이 가장 낮게 나타났고, Fig. 5 (b), (c), (d)와 같이 초음파의 전파방향이 탄소섬유강화재의 수직 방향으로 갈수록 그 진폭이 증가하였다. 그러나 0도 방향에서 수신되던 고주파수 성분은 다른 방향에서는 수신되지 않았으며 이는 섬유강화재를 가로질러 가는 방향에서의 섬유강화재에서의 산란으로 고주파 성분이 감쇠되고 저주파 성분만 전파되기 때문이다.

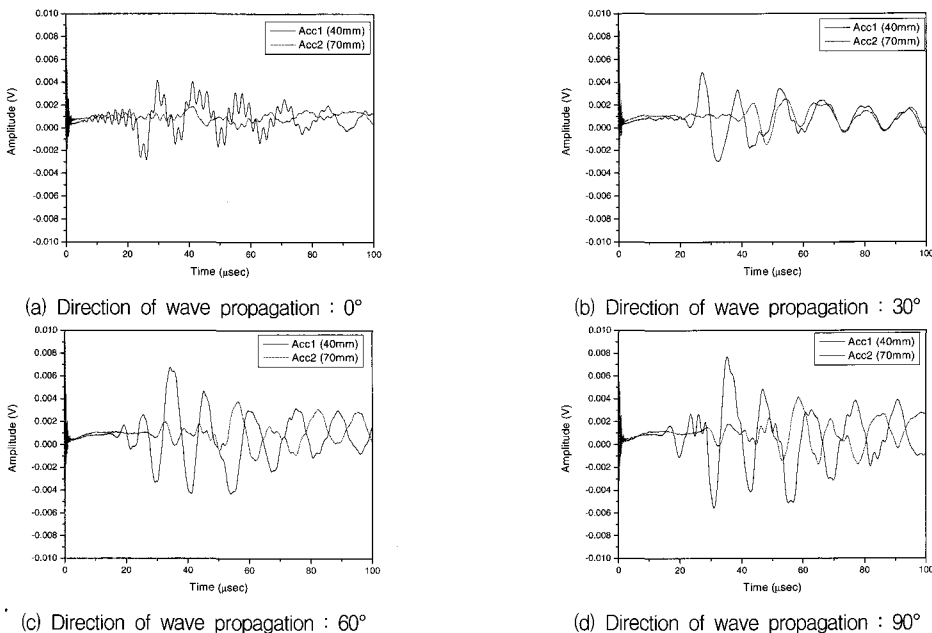


Fig. 5 Ultrasonic waveforms due to the variation of fiber orientation (Accelerometer, t : 3 mm)

가속도계를 이용하여 수신된 레이저 유도 초음파의 주파수영역의 신호 특성은 다음 Fig. 6과 같다. 가속도계가 80 kHz의 공진주파수 특성을 가지므로 80 kHz 및 160 kHz 부근에서 높은 수신율을 나타내었다. 특히 수신감도가 가장 높은 주파수 성분은 73 kHz로 비교적 낮은 주파수성분이 높은 강도를 나타내었고, 160 kHz 및 400 kHz부근의 고주파수로 갈수록 수신 진폭이 감소하는 일정한 경향을 나타내었다. 즉, 가속도계를 이용하여 레이저 유도 초음파를 수신하는 경우 80 kHz부근의 저주파성분에 대하여 민감하게 수신함을 보여주고 있다.

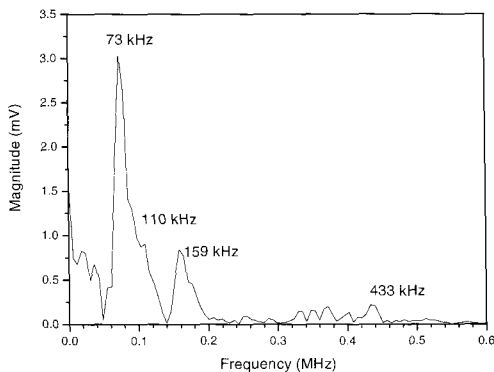
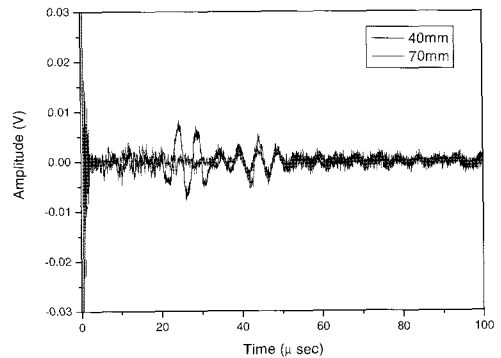


Fig. 6 FFT of ultrasonic wave received with accelerometer

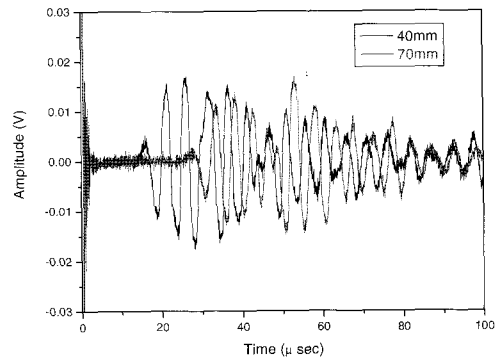
다음 Fig. 7은 AE센서를 이용하여 수신한 레이저 유도 초음파 파형이다. 섬유강화재 배향방향과 평행한 방향으로 전파되어 수신된 파형에서 가속도계와 같은 고주파성분이 혼합되는 특성은 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 7 (a)에서 5~20 μs 구간에서 훨씬 높은 고주파 성분 수신되었다. 이 성분은 강화재에 의한 산란으로 다른 전파 방향에서 감쇠되어 수신되지 않았다. 레이저 유도 초음파의 전파방향이 섬유강화재와 동일한 경우 보다 섬유강화재의 배향방향에 수직인 방향으로 갈수록 수신 신호의 진폭 높이가 증가하는 현상은 앞의 가속도계에서 수신된 신호와 동일한 특성이다.

AE센서에 의하여 수신된 레이저 유도 초음파의 주파수 영역 신호특성은 다음 Fig. 8과 같다. AE센서의 특성은 150 kHz부터 300 kHz사이의 범위에서 높은 수신감도를 가지므로 수신된 레이저 유도 초음파 역시 같은 범위에서 높은 수신율을 나타내었다. 한편, 이 범위 내에서도 177 kHz에서 가장 높은 수신감도를 나타내었으며 가속도계에 의하여 수신된 레이저 유도 초음파의 주파수 성분에 비하여

2배의 높은 주파수 특성을 나타내고 있다. 그러나 AE센서가 300 kHz범위까지의 수신감도를 고려하면 AE센서의 수신범위 이내에서도 낮은 주파수 성분이 수신되고 있음을 나타내고 있으며, 이는 섬유강화복합재료의 경우 구성 섬유강화재에서의 산란에 의한 높은 감쇠에 의하여 고주파성분은 감쇠되고 비교적 저주파성분의 레이저 유도 초음파가 전파되기 용이하기 때문으로 사료된다.



(a) Direction of wave propagating : 0°



(b) Direction of wave propagating : 90°

Fig. 7 Ultrasonic waveforms due to the variation of fiber orientation (AE sensor, t : 3 mm)

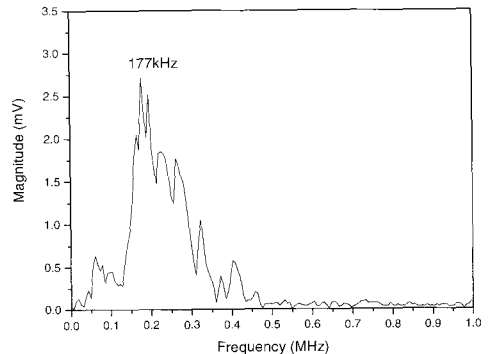


Fig. 8 FFT of ultrasonic wave received with AE sensor

3.2. 레이저 유도 초음파의 전파속도 특성

이들 각 수신 센서에 따른 레이저 유도 초음파의 전파속도를 전파방향에 따라 측정하면 다음 Fig. 9 와 같다. 가속도계로 수신된 80 kHz이하 저주파성분의 레이저 유도 초음파는 섬유강화재 배향방향으로 높은 속도로 전파되지만, 섬유강화재와 수직인 방향으로 갈수록 점차 그 전파속도가 감소하였다. 이는 섬유강화재의 배향방향으로의 탄성계수가 높은 섬유강화복합재료의 이방성 특성에 의하여 기인된 것이다. 그러나 AE센서로 수신하여 가속도계로 수신된 초음파 보다 상대적으로 높은 주파수인 180 kHz 부근의 주파수 대역 신호는 섬유강화재 방향변화에 따른 전파속도의 차이가 거의 없었다. 이는 전파되는 레이저 유도초음파 전파속도는 재료의 이방성 특성에 따른 탄성계수변화에 둔감하고 단지 기하학적 구조에 따라 그 전파속도가 결정된 것이다. 따라서, 섬유강화재 배향 방향을 평가하기 위하여 섬유강화재 배향방향에 따른 전파속도가 다른 가속도계로 수신되는 80 kHz미만의 저주파성분이 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

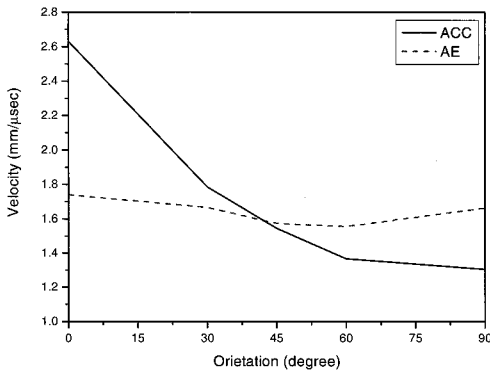
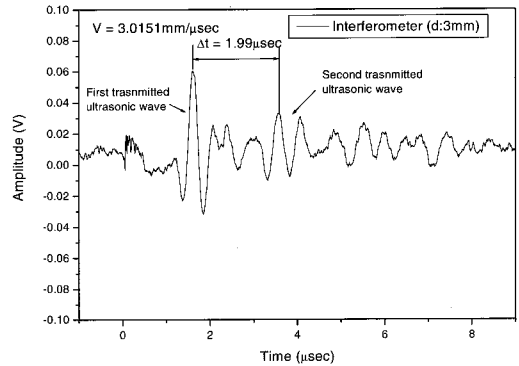


Fig. 9 Ultrasonic wave velocities due to the variation of fiber orientation

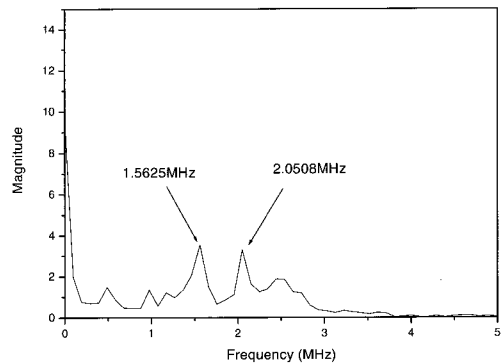
3.3. 간섭계의 수신 초음파 파형

Michelson간섭계를 이용한 경우 레이저 유도 초음파 및 일반적인 압전소자의 초음파 트랜스듀서를 이용하여 가진시킨 Lamb파를 수신할 수 없었으며, 수직 입사에 의한 투과파만을 수신할 수 있었다. 다음의 Fig. 10은 압전소자를 이용한 2 MHz의 종파용 트랜스듀서를 이용하여 수직 입사시킨 투과파 및 복합재료 두께를 1회 추가 왕복 후 수신된 파형을 나

타내며, 전파속도는 3.0 mm/μs로 측정되었다. 간섭계를 이용하여 수신된 Fig. 10 (a)의 파형에서는 두 개의 초음파 echo는 쉽게 구분이 되지만 전체적으로 잡음신호가 많이 포함되어 있었다. 이는 일반적인 PZT가 힘 즉 가속도를 측정하는 것과는 달리 Michelson간섭계는 변위를 측정하는 것으로 PZT가 수신하는 성분에 비하여 속도와 변위상의 잡음 신호가 추가되어 주위 잡음 신호로부터 민감한 영향을 받기 때문이다. 또한 Michelson 간섭계의 중요한 특성으로 수신민감도가 높은 변위는 간섭계의 레이저 빔이 전파하는 방향과 나란한 방향인 표면에 수직인 변위이므로 본 연구에서는 수직변위 뿐만 아니라 수평 방향의 변위를 동시에 발생시키는 Lamb파를 수신하지 못하고 표면에 대하여 수직변위 성분만 존재하는 수직종파를 수신할 수 있었다. Lamb파를 수신하기 위하여 레이저 간섭계를 적용하고자 하는 경우 변위보다는 속도나 가속도 성분에 민감하고 표면에 대하여 수직 변위 뿐 만 아니라 표면과 평행한 방향의 변위에 대하여 민감도가 높은 간섭계 기법을 적용해야 할 것으로 사료된다.



(a) Waveform in time domain



(b) FFT

Fig. 10 Ultrasonic wave received with interferometry

Fig. 10 (b)는 간섭계로 수신된 시간역의 초음파 파형을 주파수 대역으로 변환시킨 결과이다. 간섭계로 수신된 파형의 전체적인 수신감도는 낮았지만 1.5 MHz 및 2.0 MHz 신호가 비슷한 강도를 나타내어 넓은 주파수 대역에서 고른 분포를 나타내었다. 이는 앞의 가속도 센서와 AE 센서가 특정 주파수 대역에서 높은 수신율을 나타내고 이외의 영역에서는 낮은 수신 응답을 나타내는 것과 달리 간섭계는 주파수에 대한 민감도 낮고 넓은 주파수 영역에서 고른 수신율 특성이 있음을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 섬유강화복합재료의 광학적 비접촉 평가 기법을 개발하기 위하여 펄스레이저 및 레이저 간섭계를 각각 적용하는 레이저 초음파 기법을 연구하였으며 레이저 유도 초음파에 대한 주파수 대역을 구분하여 수신하고 그 특성을 비교하기 위하여 가속도계와 AE센서를 이용하였다.

복합재료의 섬유강화제에 방향에 따른 80 kHz 이하의 저주파성분의 가속도계로 수신된 레이저 유도 초음파의 전파속도는 레이저 유도 초음파의 전파방향에 섬유강화제와 수직인 방향으로 갈수록 그 전파속도가 감소하였다. 이는 판재형 복합재료에 전파되는 레이저 유도 초음파의 주파수 대역이 80 kHz 부근에서 섬유강화제 배향특성에 의한 복합재료의 이방성을 민감하게 나타냄을 보여준 것이다. 180 kHz 부근영역에서는 단방향 섬유강화 복합재료에서 강화제 방향에 따른 영향이 미소하여 배향특성에 따른 레이저 유도 초음파의 전파속도변화가 적었다. 즉 180 kHz 대역에서는 이방성에 대한 영향이 적은 모드의 Lamb파가 전파되었다. 한편 초음파의 전파방향에 섬유강화제와 수직인 방향으로 갈수록 초음파의 강도가 높아지는 경향을 나타내었다.

Michelson형의 레이저 간섭계를 적용하는 경우 외부의 진동 및 광학적 잡음 등에 의하여 초음파 파형의 S/N비가 낮게 수신되었다. 특히 Michelson 방식의 레이저 간섭계는 변위 방향이 표면에 수직인 성분에 대하여 측정 감도가 높으므로 수직종파는 수신할 수 있었으나 수직 및 수평 변위가 동시에 존재하는 Lamb는 수신하지 못하였다. 이는 향후 레이저 유도 초음파 수신 기법에서 간섭계의 설계시 고려해야할 부분이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] B. Audoin, "Non-destructive Evaluation of Composite Materials with Ultrasonic Waves Generated and Detected by Lasers," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 735-740, (2002)
- [2] Weimin Gao, Christ Glorieux and Jan Thoen, "Laser Ultrasonic Study of Lamb Waves: Determination of the Thickness and Velocities of a Thin Plate," *International J. of Engineering Science*, Vol. 41, pp. 219-228, (2003)
- [3] Scruby, C. B., Drain, L. E, "Laser Ultrasonic : Techniques and Applications," First edition, pp. 223-324, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, (1990)
- [4] Cristine Corbel, Frank Guillois, Daniel Royer, "Laser-Generated Elastic Waves in Carbon-Epoxy Composite," *IEEE Transactions on UFFC*, Vol. 40, No. 6, pp. 710-716, (1993)
- [5] W. M. D. Wright, D. A. Hutchins, G. Hayward, A. Gachagan, "Ultrasonic Imaging Using Laser Generation and Piezoelectric Air-coupled Detection," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 405-409, (1996)
- [6] Yasuhisa Hayashi, Shingo Ogawa, Hideo Cho, Mikio Takemoto, "Non-contact Estimation of Thickness and Elastic Properties of Metallic Foils by the Wavelet Transform of Laser-generated Lamb Waves," *NDT&E International* Vol. 32, pp. 21-27, (1999)
- [7] 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, pp. 2169-2177, (1998)