

◆특집◆ 비접촉 측정

탄소 섬유 강화 복합재료(CFRP)의 층간 분리 결함 평가를 위한 비접촉식 초음파 평가 기법 연구

이준현*, 최상우**, 변준형***

A Study on Non-contacting Ultrasonic Testing for Inspecting Delamination in CFRP

Joon-Hyun Lee*, Sang-Woo Choi** and Joon-Hyung Byun***

Key Words : Non-contacting Ultrasonic Testing(비접촉 초음파 탐상), Delamination(층간 결함), CFRP(탄소 섬유 복합 재료), SLS(주사형 레이저 유도 초음파), PZT(압전형 트랜스듀서), Air-coupled transducer(공기 접촉식 트랜스듀서)

1. 서론

고강도 경량화 구조용 재료인 섬유강화 고분자 복합재료(fiber reinforced plastic materials)는 내식성, 고강도, 고탄성 등이 매우 우수하여 우주항공 및 레저 등의 고부가가치 산업 분야에서 적용되고 있다. 최근 3 차원 섬유 자동 배열(fiber placement system)기법의 개발로 인해 기존의 제조 공정에 의한 형상의 한계를 극복하였으며, 보다 복잡하고 다양한 형상의 구조물 제조가 가능하게 되었다. 섬유 자동 배열 기법에 의한 제조 공정은 몰드 위에 테이프(tape) 형태의 프리프레그(prepreg)를 설계된 순서와 두께로 적층시키는 성형 공정이다. 이들 복합재료는 섬유 강화재의 배향 방향과 층간 분리 및 기공 등과 같은 결함에 의하여 강도의 변화가

크게 나타나게 되므로 비파괴 평가의 필요성이 높은 소재이다. 한편 섬유 자동 배열 기법과 같은 고가의 제조 공정을 적용하는 경우 제조 비용에 따른 기대 품질을 만족시킬 필요가 있으며 이에 따라 복합재료 구조물의 제조완료 후 비파괴 평가를 실시하게 되면 많은 제조 비용이 요구되므로 제조 공정 과정에서 온라인으로 비파괴 평가를 수행하고 결함 발생시 실시간으로 보완할 필요가 있다.¹

기존의 비파괴 평가 기법 중에서 섬유 강화 복합재료의 결함을 검출하는 기법으로는 초음파 C-scan 에 의한 결함 영상화가 유용한 기법으로 적용되고 있다. 그러나 기존의 초음파 C-scan 기법은 수침식에 의한 방법이므로 검사 대상체를 물과 같은 액체에 수침시켜야 하므로 제조 공정 중 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 수침법을 적용하지 않으면서 동시에 제조 공정 중 적용할 수 있는 비접촉식의 초음파 평가 기법이 적용되어야 한다. 이를 위한 비접촉식 초음파 기법으로는 최근 레이저를 이용한 레이저 초음파 기법과 공기 중에서 초음파의 송수신을 가능하게 하는 air-coupled transducer 를 이용한 방법이 적용 가능하다.²⁻⁵ 따라서 본 연구에서는 섬유 강화 복합재료의 비접촉

* 부산대학교 기계공학부

** ㈜ POSCO

*** 한국기계연구원

Tel. 051-510-2430, Fax. 051-512-9835

Email jholee@pusan.ac.kr

발전 설비, 구조물, 각종 부품 등의 파손 방지 및 신뢰성 확보를 위한 비파괴 평가 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

초음파 기법에 의한 비파괴 평가를 위하여 복합재료 내부 결함에 대한 레이저 초음파의 송수신기법 및 그 수신 신호 특성에 대하여 연구하였으며 또한 주사형 레이저 유도 초음파(Scanning Laser Source)기법을 적용하여 결함의 영상을 얻고자 하였다.

2. 비접촉 초음파 측정기법

본 연구에서는 에폭시 수지를 기지재로 하는 탄소 섬유 강화 복합재료에 대하여 레이저 초음파를 발생시키고 이를 수신감도가 높은 PZT 센서로 수신하고 결함 유무에 따른 그 신호 특성을 분석하여 결함 검출 인자로 추출하고자 하였다. 그리고 수신감도가 높은 기존의 PZT 센서는 접촉식 센서이므로 비접촉식의 air-coupled transducer를 적용하여 앞에서 도출된 결함 신호 인자를 적용하고자 하였으며, 결함 신호 인자를 SLS 기법에 적용하여 비접촉식 초음파 영상을 얻고자 하였다. 본 연구에서는 섬유강화재가 단일방향으로 배향된 탄소 섬유 강화 고분자 복합재료 내부에 Fig. 1의 (a)와 같이 가로와 세로의 길이가 각각 20 mm 인 정사각형의 테프론 필름(teflon film)으로 인위적으로 가공된 인공 층간 분리 결함을 내재한 시험편을 이용하였다. 시험편의 두께는 3 mm이며 적층된 ply 수는 총 24 층이다. 이를 기존의 수침식의 초음파 C-scan을 통하여 결함 영상을 얻게 되면 Fig. 1 (b)와 같이 정사각형의 결함을 확인할 수 있다.

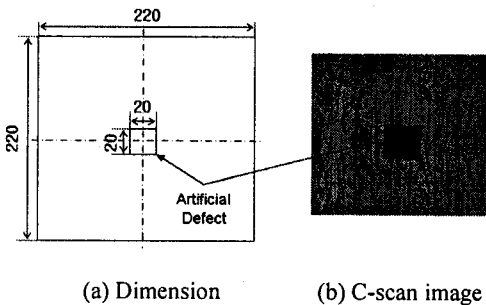


Fig. 1 Size and location of artificial delamination in CFRP plate

본 연구에서는 일차적으로 레이저를 이용하여 초음파를 발생시키고 섬유 강화 복합재료 내부에

전파되는 초음파를 수신 감도가 높은 접촉식의 PZT 센서로 수신하여 수신된 신호로부터 결함 특성을 나타내는 인자를 추출하였다. 이 추출된 인자 특성을 비접촉식의 초음파 수신 센서의 한 종류인 air-coupled transducer를 이용하여 적용하고자 하였다. 한편, 비접촉식 초음파의 발생에 있어서 본 연구에서는 두 가지 방법의 레이저 초음파 발생 기법을 적용하였다. 특정한 파장을 가지는 유도 초음파 발생을 위하여 다중 슬릿을 이용하여 다수의 선형의 발생원을 가지는 파장 제어에 의한 레이저 유도 초음파 발생 방법과 하나의 원형의 발생원을 적용하여 전방향으로 불특정 모드의 초음파를 전파시키게 되는 방법 등을 적용하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 적용한 레이저 초음파의 송수신 방법을 나타낸 것으로 레이저 조사지점과 동일한 평면에서 유도 초음파를 수신하는 방법과 레이저 조사 지점 뒷면에서 투과파를 수신하는 방법을 적용하였다. 다중 슬릿을 이용하여 파장을 제어하는 방법으로 특정 모드의 레이저 유도 초음파를 발생시키거나 또는 단순히 원형의 레이저 초음파 발생원을 이용하여 유도 초음파를 발생시키고 레이저 조사 지점과 동일한 평면에서 일정거리의 간격을 두고 PZT 센서 또는 air-coupled transducer로 수신 받았다. 또 다른 방법은 다중 슬릿없이 원형의 레이저 빔 조사에 의하여 얇은 박판재에 대한 투과파를 발생시켜 복합재료의 뒷면에서 PZT 센서 또는 air-coupled transducer로 투과된 초음파를 수신하였다. 본 연구에서는 이와 같이 각각 두 가지의 수신 방법에 의하여 수신 받은 신호의 결함 유무에 따른 신호 특성의 변화 및 이에 따른 SLS 기법의 결함 이미지를 얻고자 하였다.

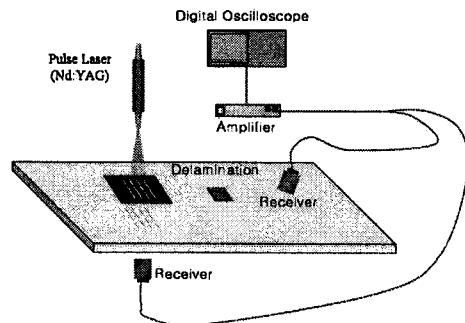


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

본 연구에서 적용된 펄스레이저 시스템은 32 mJ의 에너지를 가지며 fiber coupling에 의하여 멀티모드 광섬유를 통과하여 임의의 위치와 방향으로 전달된다. 펄스레이저의 광섬유 말단부에서 주사되는 레이저 빔은 약 30°의 퍼짐각을 가지므로, 광섬유의 말단부와 다중 슬릿 사이의 거리를 일정하게 유지하여 추가적인 렌즈를 적용하지 않고 다중 슬릿 전체를 조사할 수 있는 장점이 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Lamb 파에 의한 결함 신호 특성

3.1.1 PZT 수신 센서의 결함신호 특성

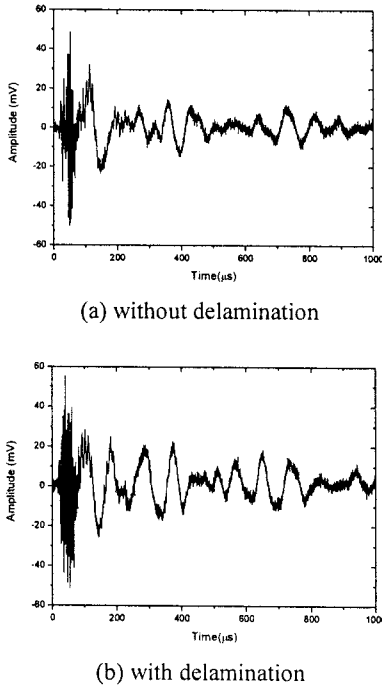


Fig. 3 Ultrasonic waveform of laser-generated guided wave (90°)

Fig. 3은 다중 슬릿을 적용하지 않고 원형의 레이저 빔을 탄소 섬유 강화 복합재료 표면에 조사하여 레이저 초음파를 발생시키고, 유도 초음파 형태로 섬유 강화재의 배향 방향과 수직 방향으로 전파하여 동일 표면에 부착된 초음파 센서로 수신 받은 파형이다. 수신용 PZT 초음파 센서는 1MHz의 중심주파수를 가지며, 본 실험에서는 레

이저 조사 지점과 수신 센서 사이에 층간 분리의 결함이 없는 Fig. 3 (a)와 테프론 필름에 의하여 인위적인 층간 분리 결함이 있는 경우인 Fig. 3 (b)의 파형을 수신하였다. 본 결과에서 수신 파형 앞쪽에 고주파 성분이 수신되었고 그 이후에 저주파 성분이 수신되었다. 본 시간 영역(time-domain)의 초음파 파형으로부터 층간 분리 결함의 유무에 따른 신호 특성 차이를 구별할 수 없었다.

PZT 센서로 수신된 레이저 유도 초음파의 결합 신호 특성을 구분하기 위하여 시간 영역의 파형 데이터를 FFT를 통하여 주파수 영역으로 변환시켜 Fig. 4와 같은 결과를 얻게 되었다. 시간영역의 파형에서는 층간 분리 결함 존재 유무에 따른 신호 특성의 차이가 발견되지 못하였으나 FFT 결과에서는 인공 결함이 존재하는 않는 경우의 결과인 Fig. 4 (a)에서 나타났던 1.12 MHz의 고주파 성분은 결함이 존재하는 Fig. 4 (b)에서는 급격히 감소한 것으로 나타났다. 한편 561 kHz의 성분은 층간 분리의 결함 존재 여부에 따라 감소되지 않는 특성을 나타내고 있다.

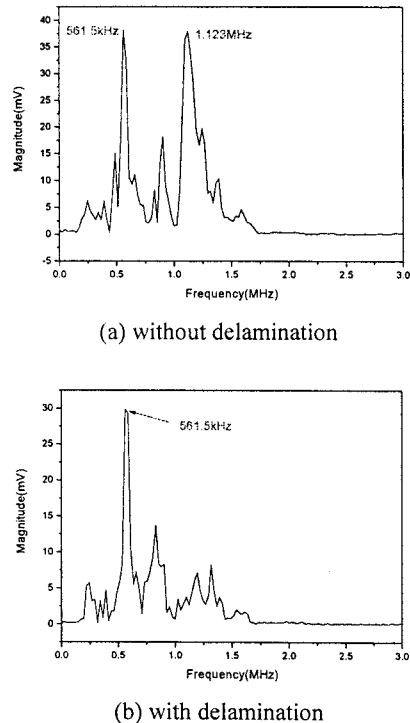
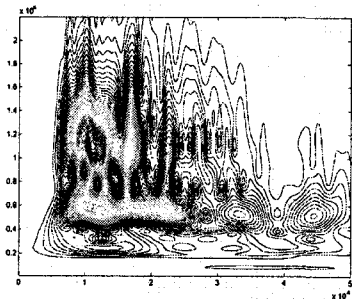
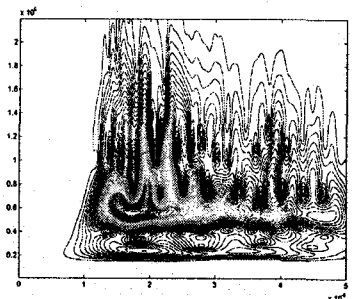


Fig. 4 Frequency spectrums of laser-generated guided wave (90°)

앞의 Fig. 3 과 4 의 결과를 보다 세밀하게 분석하기 위하여 시간영역의 파형 데이터를 Morlet wavelet 을 활용한 wavelet 변환에 의한 시간-주파수역으로 분해하여 Fig. 5 와 같은 결과를 얻게 되었다. Fig. 5 는 시간-주파수영역의 데이터로 가로축이 시간이고 세로축이 주파수로 같은 시간 위치에서 다양한 주파수의 성분을 분해하여 나타낼 수 있어 동일 시간영역에서 고주파 성분과 저주파 성분의 변화를 분해해 낼 수 있게 되었다. Fig. 5 (a)는 결합이 없는 경우의 레이저 유도 초음파를 시간-주파수역으로 분해한 결과로 시간축의 1 부근의 위치에서 1 MHz 와 1.2 MHz 사이에 위치하는 고주파 성분과 400 kHz 와 500 kHz 사이의 저주파 성분이 같은 시간대에 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5 (b)는 레이저 유도 초음파 발생 위치와 PZT 수신 센서 사이에 복합재료 내부의 층간 분리 결함이 존재하는 경우의 시간-주파수영역으로 분해된 결과이며 앞의 Fig. 5 (a)와 다르게 1 MHz 와 1.2 MHz 사이의 고주파 성분이 감쇠된 특성을 나타내었다.



(a) without delamination



(b) with delamination

Fig. 5 Time-frequency domain data decomposed by wavelet transform of laser-generated guided wave (90°)

앞의 Fig. 3~5 의 결과로부터 레이저 유도 초음파의 발생 위치와 수신 위치 사이에 복합재료 내부의 층간 분리 결함이 존재하는 경우 시간 영역의 파형으로부터 그 특성을 추출할 수는 없지만, 주파수 성분을 분석한 결과 1.1 MHz 대역의 성분의 레이저 유도 초음파가 층간 분리 결함을 통과하면서 급격히 감쇠하는 특성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 1.1 MHz 대역의 레이저 유도 초음파를 송수신 하는 경우 복합재료 내부의 층간 분리 결함을 민감하게 평가할 수 있을 것으로 기대되었다.

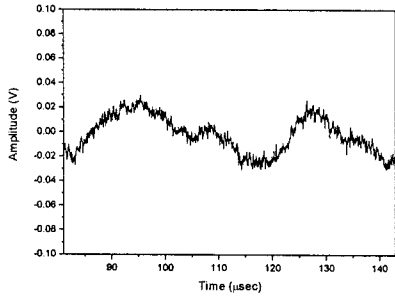
3.1.2 Air-coupled transducer 를 이용한 레이저 유도 초음파 수신

앞의 원형 레이저 빔의 조사에 의한 레이저 유도 초음파 발생과 PZT 센서에 의한 수신 결과에서 1.1 MHz 의 고주파 성분이 복합재료 내부 층간 분리 결함에 민감한 특성 변화를 나타내는 특성으로 나타났다. 본 결과에서는 이를 비접촉식 초음파 송수신 기법으로 적용하기 위하여 접촉식의 PZT 센서가 아닌 비접촉 수신센서인 air-coupled transducer 를 적용하였고, 1.1 MHz 의 특정 주파수 성분의 레이저 유도 초음파 발생 효율을 향상시키기 위하여 좁은 폭을 가지는 다중 슬릿을 적용하여 파장 조절 기법에 의한 레이저 유도 초음파를 발생하고 수신하고자 하였다. 즉, 식(1)과 같이 파장, λ 를 결정하여 주파수, f 성분을 가지는 위상 속도 C_p 의 유도 초음파 모드를 가진 시킬 수 있다.

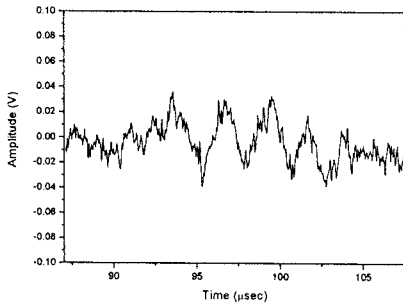
$$C_p = f \times \lambda \tag{1}$$

Fig. 6 은 다중 슬릿을 이용하여 특정 파장 간격으로 발생시킨 레이저 유도 초음파를 air-coupled transducer 로 수신한 시간 영역의 파형을 나타낸 결과이다. 본 결과에서 적용된 다중 슬릿은 Fig. 6 (a)은 선형의 슬릿이 1 mm 간격으로 배열되어 있으며 슬릿의 폭은 0.5 mm 이고 슬릿 사이의 간격이 0.5 mm 인 경우의 결과이다. Fig. 6 (b)는 선형 슬릿이 3 mm 간격으로 배열되어 있으며 슬릿의 폭은 1 mm 이고 슬릿 간의 간격이 2 mm 일 때 수신된 파형 결과이다. Fig. 6 (c)는 폭 1 mm 의 선형 슬릿이 5 mm 간격으로 배열되어 있으며 슬릿간의 간격이 4 mm 인 경우의 수신 파형 결과이다. 슬릿의 간격이 좁을수록 짧은 파장으로 고주파 성분이 발생되

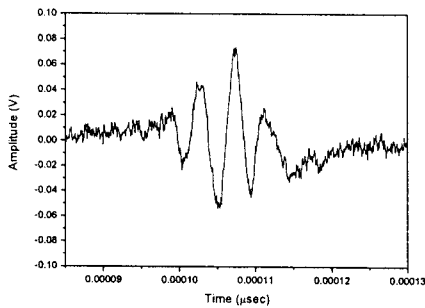
고 수신되어야 한다. 그러나 Fig. 6 (a) 결과는 오히려 파장이 긴 형태의 파형이 수신되었다. Fig. 6 (b)의 결과는 Fig. 6 (a)보다 오히려 파장이 더 짧은 고주파 성분이 수신되었다. 한편 Fig. 6 (c)는 세 가지 조건 중에서 가장 파장이 긴 저주파 성분의 레이저 유도 초음파가 송수신 되어야 하는 조건이며 수신 진폭이 가장 높으며 파형의 명확하게 수신되어 가장 양호한 송수신 결과를 나타내었다.



(a) Slit interval : 1mm

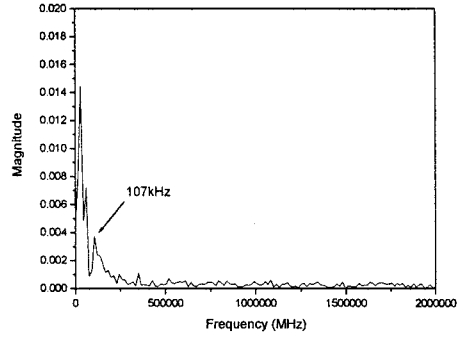


(b) Slit interval : 3mm

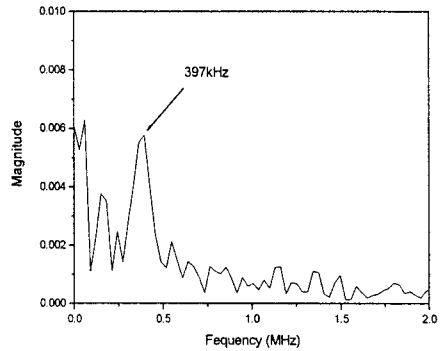


(c) Slit interval : 5mm

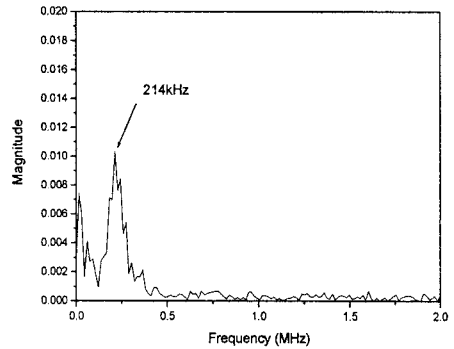
Fig. 6 Ultrasonic guided wave generated by pulse laser and slit array



(a) Slit interval : 1mm



(b) Slit interval : 3mm



(c) Slit interval : 5mm

Fig. 7 Frequency spectrums of laser-generated guided wave received with air-coupled transducer (90°)

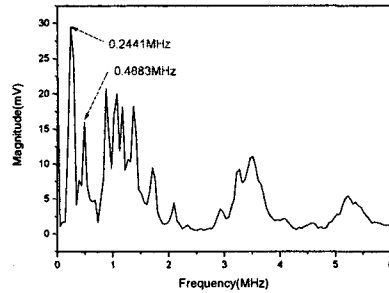
앞의 Fig. 6의 결과를 FFT를 통하여 주파수역으로 변환시킨 결과는 Fig. 7과 같다. 주파수가 가장 높은 성분의 레이저 유도 초음파가 송수신되어야 하는 조건인 Fig. 6 (a)의 결과 파형의 주파수 성분은 107 kHz의 성분으로 오히려 가장 낮은 주

파수 특성을 나타내었다. Fig. 7 (b)는 슬릿 간격 3 mm 인 경우의 파형에 대한 주파수 특성으로 세 가지 경우 중에서 가장 높은 주파수인 397 kHz의 성분을 나타내었다. Fig. 7 (c)는 Fig. 7 (b)에 비하여 낮은 주파수인 214 kHz의 성분을 나타내었다. Fig. 7 (b)와 (c)결과의 경향은 슬릿 간격이 넓어질수록 주파수가 감소하게 되는 원리와 일치하는 결과이다. 그러나 본 실험의 취지였던 1.1 MHz의 레이저 유도 초음파의 송수신되지 않았다. 그 이유는 복합재료의 구조 특성에 따라 고주파의 성분이 섬유 강화재와 기지재가 이루는 다수의 경계면에 의하여 산란되어 감쇠되기 때문이며 공기 중에서의 고주파 성분의 감쇠가 발생하여 400 kHz 이상의 성분을 수신할 수 없었기 때문으로 평가된다. 한편 섬유 강화재와 평행한 방향으로 전파되는 레이저 유도 초음파는 1.3 MHz 등의 고주파 성분이 전파 가능하였으며, 섬유 강화재와 수직한 방향으로 전파되는 레이저 유도 초음파는 0.31 MHz 등의 저주파 성분이 전파 가능하다는 연구 결과가 있다.² 이와 비교했을 때 본 연구 결과는 섬유 강화재와 수직한 방향으로 전파하는 레이저 유도 초음파임에도 불구하고 약 0.4 MHz의 성분이 높은 진폭으로 가진되어 다중 슬릿에 의한 특정 파장의 레이저 유도 초음파가 효과적으로 발생됨을 제시하게 되었다.

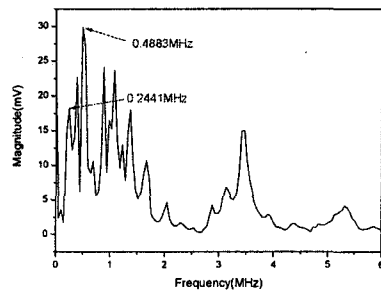
3.2 투과파에 의한 결함 신호 특성

3.2.1 PZT 수신 센서를 이용한 수신

복합재료의 층간 분리 결함을 검출하기 위하여 레이저 초음파의 투과파의 특성을 평가하였다. Fig. 8의 결과는 원형의 레이저 빔을 복합재료 표면에 조사하여 초음파를 발생시키고 전파된 초음파를 레이저 조사지점의 뒷면에서 접촉식 PZT 센서로 수신한 초음파 파형의 FFT에 의하여 변환된 주파수 대역 신호이다. 층간 분리 결함이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 차이는 244 kHz 성분과 488 kHz 성분의 비율 차이이다. Fig. 8 (a)는 층간 분리 결함이 존재하지 않는 경우의 결과이며 244 kHz의 저주파 성분이 높게 나타났으나 Fig. 8 (b)는 층간 분리 결함이 존재하여 투과파가 층간 분리 영역을 투과하여 수신된 파형 특성으로 244 kHz의 성분이 감소하고 488 kHz의 성분이 증가되는 특성을 나타내고 있다.



(a) Without delamination



(b) With delamination

Fig. 8 Frequency spectrums of laser-generated wave received with 1MHz PZT transducer in trough-transmission method (90°)

3.2.2 Air-coupled transducer 를 이용한 SLS

복합재료 내부 층간 분리결함의 크기와 형상을 평가하기 위하여 비접촉 측정 기술에 의한 초음파 영상화 기법인 SLS 기법을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 SLS 기법은 기존의 초음파 C-scan 기법에 비하여 레이저 초음파를 이용하게 되므로 비접촉 기법의 적용이 가능하고, 레이저 초음파의 표면파 성분이 강하게 송수신되는 특성에 의하여 표면 균열 및 표면 직하 결함에 대한 검출 능력이 높은 초음파 영상기법이다.^{6,7} 본 연구에서는 레이저 초음파를 이용하여 초음파를 발생시키고 투과된 초음파를 air-coupled transducer 를 이용하여 수신하는 비접촉 초음파 송수신 기법을 활용하여 SLS에 의한 결함 영상을 얻었다. SLS 기법에서는 Fig. 9 (a)와 같이 수신된 레이저 초음파의 최고 진폭 높이를 이용하여 영상화시키는 진폭 이미지가 있으며, Fig. 9 (b)와 같이 수신된 초음파의 FFT 변화 결과에서 최대 크기를 나타내는 주파수 값으로 영상화시키는 주파수 이미지가 있다. 또한 중심

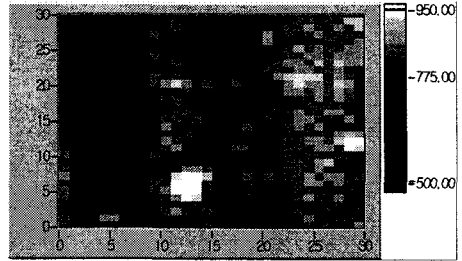
주파수에 대한 저주파수 및 고주파수의 비율을 이용하여 영상화시키는 harmonic 이미지가 있으며 Fig. 9 (c)는 식(2)와 같이 저주파수 비율에 대한 주파수 감소 비율(down shift ratio, r_{down}) 이미지이며 Fig. 9 (d)는 식(3)과 같이 고주파수 비율에 대한 주파수 증가 비율(up shift ratio, r_{up}) 이미지이다. 여기서 $A_{f,center}$ 는 중심 주파수의 진폭 크기를 뜻하며, $A_{f,low}$ 와 $A_{f,high}$ 는 저주파 성분과 고주파 성분의 진폭 크기를 나타낸다.

$$r_{down} = \frac{A_{f,low}}{A_{f,center}} \quad (2)$$

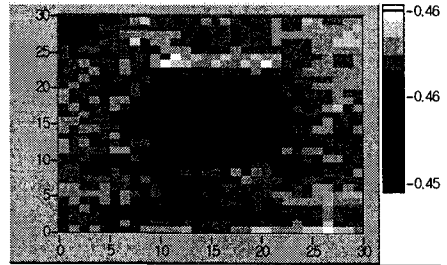
$$r_{up} = \frac{A_{f,high}}{A_{f,center}} \quad (3)$$

본 연구에서는 Fig. 9 (b)와 (c)와 같이 복합재료 내부에 존재하는 층간 분리 결함을 영상화시켜 그 결과를 검출할 수 있었다. 특히 Fig. 9 (b)의 주파수 이미지 영상은 층간 분리 결함의 형상을 비교적 정확하게 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 층간 분리 결함이 존재하는 영역에서 투과되는 레이저 유도 초음파는 최대 진폭을 가지는 중심주파수가 약 0.46 MHz에서 내부결함의 투과에 의하여 감쇠 현상이 발생하여 약 0.45 MHz 대역으로 이동하게 되는 특성으로 결함의 정확한 영상을 얻을 수 있었다. Fig. 9 (c)는 앞의 Fig. 8의 결과의 특성인 244 kHz 영역의 저주파 성분이 층간 분리 결함 영역에서 그 강도가 감소한다는 특성을 이용하여 영상화시킨 결과이다. 중심주파수에 대한 저주파 성분의 비율이 층간 분리 영역에서 감소하는 특성이 결함 형상으로 나타났으나 그 경계가 Fig. 9 (b)의 결과만큼 선명하지 않다. 일반적으로 결함이 존재하는 영역에서 투과되는 초음파는 많은 감쇠가 유발될 것으로 예측된다. 그러나 수신 초음파의 최대 진폭으로 영상화시킨 Fig. 9 (a)결과에서는 결함 형상에 따른 진폭 변화는 거의 검출되지 않고, 오히려 섬유강화복합재료의 제조상의 불균질한 특성에서 기인된 것으로 사료되는 불규칙적인 진폭 상승분포 특성이 나타났다. 이는 Fig. 9 (d)에서도 유사한 특성으로 Fig. 9 (a)와 동일 지점에서 고주파수 비율에 대한 주파수 증가 비율이 증가하는 특성이 나타났다. Fig. 9 (a)와 (b)에서 높은 진폭 및 고주파 성분의 증가된 영역의 공통된 지점을 제외

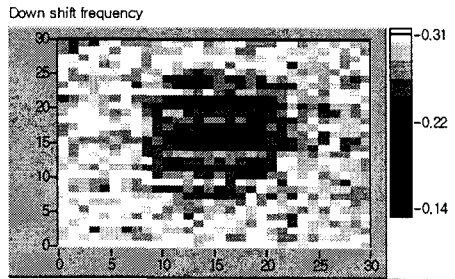
시키고 남은 영역 중에서 Fig. 9 (d)의 고주파수 비율의 주파수 증가 영역은 결함의 영역과 일치하는 경향을 나타내고 있다.



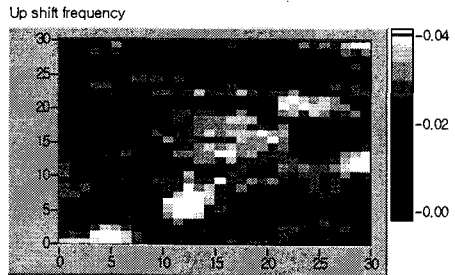
(a) Amplitude image



(b) Frequency image



(c) Harmonic ratio image of down shift frequency



(d) Harmonic ratio image of up shift frequency

Fig. 9 SLS images

4. 결론

본 연구에서는 fiber optic 펄스 레이저를 이용하여 비접촉 기법에 의한 레이저 초음파를 발생시키고 이를 PZT 수신 센서를 수신하여 복합재료 내부의 층간 분리 결함에 대한 신호 특성변화를 검출하여 결함 평가 기준으로 추출하고자 하였다. 또한 레이저 초음파와 air-coupled transducer 를 이용한 완벽한 비접촉식 초음파 송수신 기법에서 선행단계의 층간 분리 결함에 대한 초음파 신호 특성을 적용하여 비접촉식 초음파 기법에 의한 복합재료의 결함 평가기법으로 적용하고자 하였다.

레이저 유도 초음파를 이용한 실험결과에서 1.1 MHz 대역의 레이저 유도 초음파의 신호가 층간 분리 결함 검출에 유용한 신호 특성으로 나타났으나 레이저 유도 초음파의 송신과 air-coupled transducer 의 수신기법에서는 1 MHz 대역의 높은 주파수성분에 대한 수신효율이 낮으므로 적용성이 없는 기법으로 평가 되었다. 그러나 다중 슬릿을 활용하는 경우 단순히 원형의 레이저 빔을 이용하는 경우에 비하여 air-coupled transducer 에서 수신하는 주파수를 상향시킬 수 있는 기법으로 확인되었다.

박판구조의 복합재료에서는 레이저 초음파의 투과파 성분이 수신 가능하였고, 수신된 레이저 초음파의 성분 중 0.488 MHz 의 기준 주파수 성분에 비하여 0.244 MHz 의 저주파 성분이 층간 분리 결함 유무에 따라서 그 진폭 비율이 변하는 특성이 확인되어 이를 층간 분리 결함 검출 기법으로 적용할 수 있었다. 이와 같은 특성을 활용하여 복합재료 내부의 결함을 SLS 기법으로 영상화 시킬 수 있었으며 진폭크기 변화보다는 중심주파수의 주파수 변화와 주파수감소비율의 변화가 효과적인 결함영상화 인자로 평가되었다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 “차세대 소재 성형 기술 개발” 사업과 기본연구 사업에서 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Djordjevic, B. B., Berndt, T., Ehrlich, M., Baldwin,

K., Palmer, D. and Holmes, S., “Advances in NDE for On-line Fiber Placement Process,” 43rd International SAMPE Symposium, pp.2169-2177, 1998.

2. Choi, S. W., Lee, J. H., Byun, J. H. and Seo, K. C., “A Study on Nondestructive Technique Using Laser Technique for Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Plastic,” Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 25, No. 2, pp. 103-109, 2005.

3. Choi, S. W., Seo, K. C., Lee, J. H., Cho, Y. H. and Byun, J. H., “A Study of Non-contacting Ultrasonic Technique for Non-destructive Evaluation of Fiber Reinforced Composite Materials,” Proceeding of 2004 Annual Autumn Conference of The Korea Society for Nondestructive Testing, pp. 38-43, 2004.

4. Wright, W. M. D., Hutchins, D. A., Hayward, G. and Gachagan, A., “Ultrasonic Imaging Using Laser Generation and Piezoelectric Air-coupled Detection,” Ultrasonics, Vol. 34, No. 2-5, pp. 405-409, 1996.

5. Baldwin, K. C., Berndt, T. P. and Ehrlich, M. J., “Narrowband Laser Generation / Air-coupled Detection : Ultrasonic System for On-line Process Control of Composites,” Ultrasonics, Vol. 37, No. 5, pp. 329-334, 1999.

6. Fomitchov, P. A., Kromine, A. K., Sohn, Y. H., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J. D., “Ultrasonic Imaging of Small Surface-breaking Defects Using Scanning Laser Source Technique,” Review of Quantitative Evaluation, Vol. 21, pp. 356-362, 2002.

7. Kromine, A. K., Fomitchov, P. A., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J. D., “Laser Ultrasonic Detection of Surface Breaking Discontinuities : Scanning Laser Source Technique,” Materials Evaluation, Vol. 58, No.2, pp.173-177, 2000.