

◆특집◆ 레이저 계측

레이저 초음파를 이용한 복합재료 층간 결함의 정량적 평가

이준현*, 이승준*, 최상우**, 변준형***

Quantitative Evaluation of Delamination in CFRP Using Laser-Based Ultrasound

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

Key Words : Composite (복합재료), Nondestructive evaluation (비파괴 평가), Delamination (층간결함), Laser based Ultrasound (레이저 초음파)

1. 서론

섬유 강화 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)는 기존의 금속재료에 비해 강도, 강성, 밀도, 적합성 등의 면에서 많은 장점을 가지고 있고 따라서 항공 우주 및 레저, 군사 분야 등의 고부가 가치 산업 분야에서 사용 빈도가 높아지고 있다. 그러나 기존의 복합재료 제조 방법은 디자인과 적층 형태에서 한계점을 가지고 있기 때문에, 대량 생산과 대형화, 제품의 정밀도에 대한 요구를 충족시킬 자동화 기법으로서의 대체 공정이 필요하게 되었다. 최근 개발된 자동 적층 방식(Fiber Placement System: FPS)은 몰드 위에 테이프(tape) 형태의 프리프레그(prepreg)를 설계된 순서와 두께로 적층시키는 성형 공정으로서, 노동력과 재료의 손실을 줄일 수 있고, 디자인과 적층 형태에서 유연하게 대처할 수 있으며, 재현성이 우수한 대체

공정으로 주목받고 있다.¹ 그런데 이와 같은 적층 기법의 경우, 가공 중에 층간결함과 같은 내부 결함을 발생시킬 우려가 있다. 이런 내부 결함은 고가인 재료의 손실을 불러일으킬 뿐만 아니라, 근본적으로 제품의 강도를 떨어뜨리므로 제품의 안전성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 육안 검사를 할 수 없는 이와 같은 내부 결함에 대한 공정 중 탐지가 가능한 비파괴 평가 기법의 개발이 요구되고 있다.

기존의 비파괴 평가 기법 중에서 섬유 강화 복

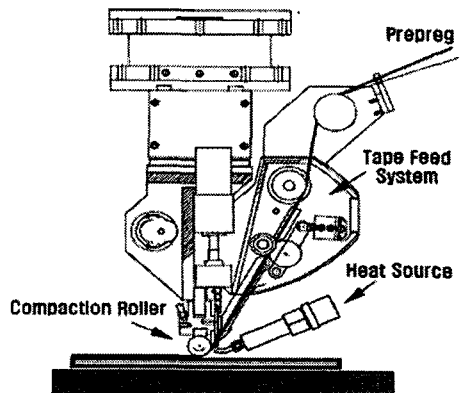


Fig. 1 Schematic diagram of fiber placement system

* 부산대학교 기계공학부 대학원

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

Email johlee@pusan.ac.kr

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

** POSCO

*** 한국기계연구원

합재료의 결함을 검출하는 대표적인 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 중에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 수침법을 적용하지 않으면서 동시에 제조 공정 과정에서 적용할 수 있는 비접촉식의 초음파 평가 기법이 필요하다. 이에 최근 레이저를 이용한 레이저 초음파 기법과 공기 중에서 초음파의 송수신을 가능하게 하는 공기 접촉식 트랜스듀서(air-coupled transducer)를 이용한 방법이 그 대안으로 제시되고 있다.^{2,3}

공정 중 발생하는 내부 결함이 복합재료의 최상층에서 발생하므로 투과파에 의한 신호 변화와 표면파의 상호작용에 의한 모드 변화에 관심을 가지고 있다. 섬유 적층 기법에 의한 층간 결함을 제조 공정 중 진단하기 위한 방법은 Fig. 2 와 같이 크게 두 가지가 있으며⁴, 본 연구에서는 초음파 투과파와 표면파를 이용하여 표면 직하의 층간 결함을 실시간으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다.

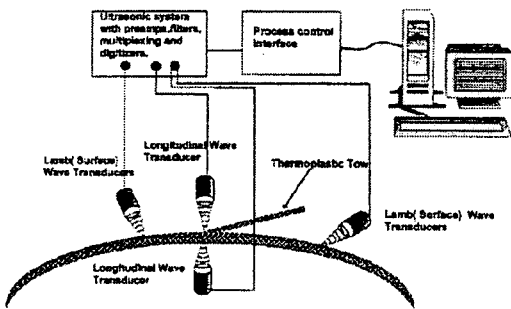


Fig. 2 Possible ultrasonic test configurations for non-contact, on-line monitoring of fiber placement process

2. 실험장치 및 구성

본 연구에서 사용된 시험편은 Fig. 3 에서 보는 것과 같다. 인위적으로 층간 분리 결함을 만들기 위해 가로와 세로의 길이가 각각 20 mm 인 정사각형의 테프론 필름을 첫 번째와 두 번째 층 사이에 삽입하였다. 일축방향의 탄소/에폭시(carbon/epoxy)

열경화성 복합재료 시험편의 두께는 3 mm 이며, 총 24 층(ply)으로 구성되어 있다. Fig. 4 는 기존의 수침식의 초음파 C-scan 방법을 통하여 내부 결함 영상을 얻은 것이다.

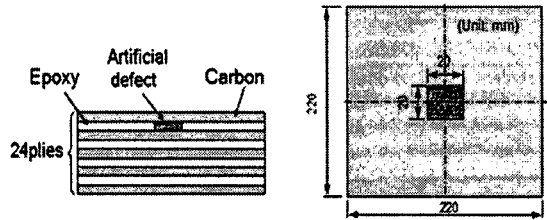


Fig. 3 Dimension and location of artificial delamination in CFRP specimen

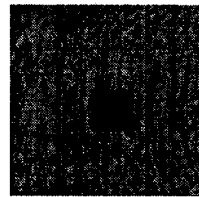


Fig. 4 Ultrasonic C-scan image of CFRP specimen($f = 5\text{MHz}$)

Fig. 5 는 본 연구에서 적용한 레이저 초음파의 송수신 방법을 나타낸 것으로 레이저 조사 지점 뒷면에서 투과파를 수신하는 방법과 레이저 조사 지점과 동일한 평면에서 유도 초음파를 수신하는 방법을 적용하였다. 투과파를 수신하는 경우 단순히 원형의 레이저 초음파 발생원을 이용하여 유도 초음파를 발생시키고 레이저 조사 지점과 동일한 평면에서 일정 거리의 간격을 두고 접촉식 압전형 트랜스듀서(PZT transducer) 또는 air-coupled transducer 로 수신하는 방법을 사용한다. 이와 달리 레이저 조사 지점과 동일한 평면에서 유도 초음파를 송수신하는 기법에서는 선형 다중 슬릿(line array slit)을 사용하는데 이는 유도 초음파의 방향성을 증가시켜 에너지 효율을 높이고 협대역의 신호 특성을 얻기 위해서이다. 본 연구에서는 이와 같이 두 가지 방법에 의하여 수신한 신호가 결함 유무에 따라 변화하는 신호 특성을 연구하고 이 결과를 바탕으로 결함의 이미지를 얻고자 하였다.

본 연구에서 적용된 Nd:YAG 펄스 레이저 시스템은 532 nm 의 파장과 32 mJ 의 에너지를 가지며,

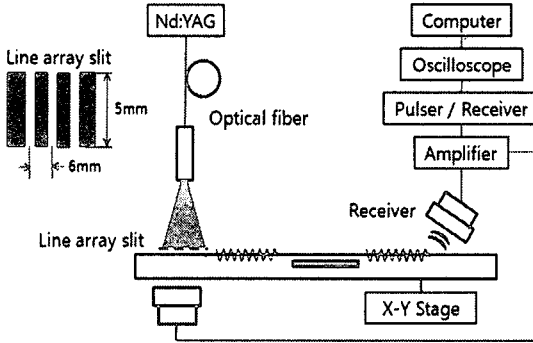


Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up

펄스 레이저는 화이버 커플링에 의하여 멀티 모드 광섬유를 통과하여 임의의 위치와 방향으로 전달된다. 펄스레이저의 광섬유 말단부에서 주사되는 레이저 빔은 약 30 도의 퍼짐각을 가지므로 광섬유의 말단부와 다중 슬릿 사이의 거리를 일정하게 유지하여 추가적인 렌즈를 적용하지 않고 다중 슬릿 전체를 조사할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 투과파를 이용한 결함 특성평가

복합재료의 층간 분리 결함을 검출하기 위해 레이저 초음파의 투과파의 특성을 평가하였다. Fig. 6 은 원형의 레이저 빔을 복합재료 표면에 조사하여 초음파를 발생시키고 전파된 초음파를 레이저 조사 지점의 뒷면에서 접촉식 PZT 센서로 수신한 다음 이 신호를 FFT 기법을 이용하여 변환시킨 주파수 분석 결과이다. 층간 분리 결함이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 차이는 224 kHz 성분과 488 kHz 성분의 크기 차이이다. Fig. 6(a)는 층간 분리 결함이 존재하지 않는 경우의 결과이며 244 kHz 의 저주파 성분이 높게 나타났다. 한편 Fig. 6(b)는 층간 분리 결함이 존재하여 투과파가 층간 분리 영역을 투과하여 수신된 것으로 244 kHz 의 성분이 감소하고 488 kHz 의 성분이 증가되는 특성을 나타내고 있다. Fig. 7 은 앞서 언급한 주파수 특성을 통해 얻은 결함 이미지이다. 원형의 레이저 빔과 air-coupled transducer 를 결함 영역 위로 스캔하였다. 스캔 영역은 가로, 세로 각각 60 mm 이다. 수신된 신호를 주파수 분석하여 최대 크기를 나타내는 주파수 값에 색 차를 부여하였다. 결함이 없는 주변에 비하여 결함을 나타내는 영역

은 검게 나타나고 있다.^{5,6}

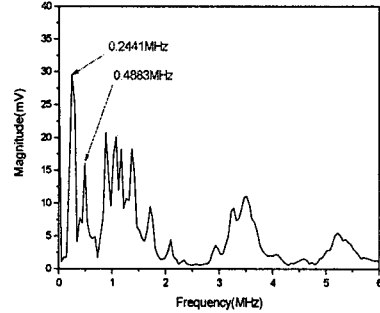


Fig. 6(a) Frequency spectrum of transmitted wave received with 1 MHz PZT sensor in defect-free region

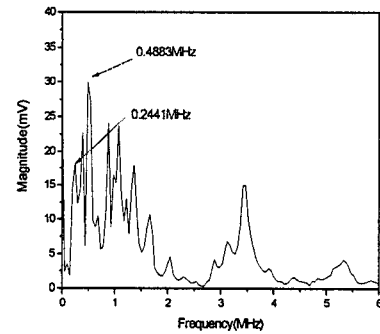


Fig. 6(b) Frequency spectrum of transmitted wave received with 1 MHz PZT sensor in defect region

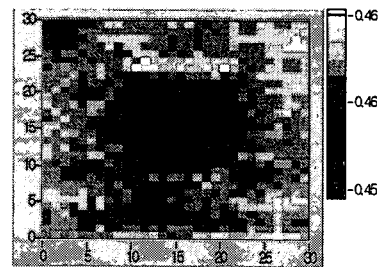


Fig. 7 Laser ultrasonic scan image using fully non-contacted transmission method

3.2 유도초음파를 이용한 결함 특성평가

레이저 유도초음파를 이용한 탄소 섬유 강화 복합재료의 내부 결함 평가에 있어서 유도 초음파의 전파 방향성을 높이기 위하여 앞의 Fig. 5 에서

언급한 선형다중 슬릿을 이용한 초음파 발생 및 air-coupled transducer 를 이용한 비접촉 초음파 수신에 의한 조합으로 구성된다. 특히 복합재료 내의 결함에 의한 유도초음파 신호의 수신 방법은 Fig. 8 과 같이 결함을 통과한 유도초음파 신호를 수신하는 방법과 결함을 통과하기 직전 결함에 의해 반사되는 유도초음파 신호를 수신하는 방법이 있다.⁷

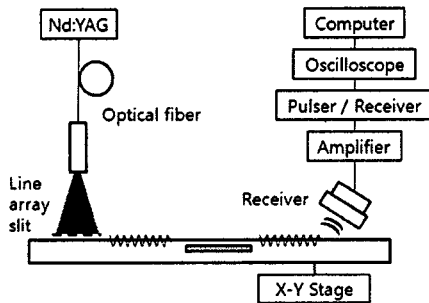


Fig. 8(a) Schematic diagram of reception method of transmitted wave through defect

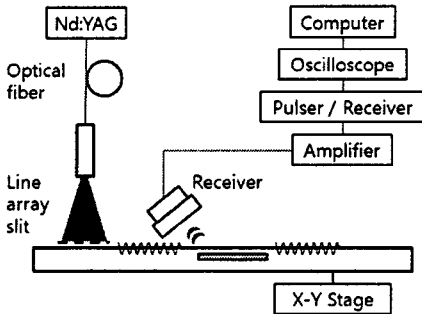


Fig. 8(b) Schematic diagram of reception method of reflected wave from defect

3.2.1 수신 방법에 따른 신호 특성

Fig. 9 는 결함을 지나 누출되는 신호를 6.6 도의 수신각도로 결함 영역과 결함이 없는 영역에서 수신한 신호의 분석 결과로서 복합재료의 강화재의 배향방향을 따라 전파된 신호 파형과 주파수 특성을 분석하였다. Fig. 9(a), (b)는 각각 결함이 없는 영역과 결함이 존재하는 영역에서 수신된 신호의 특성을 보여주고 있다. 파형 그래프를 비교해보면 결함을 지나면서 누출되어 오는 신호는 결함이 없을 때에 비해 0.05~0.3 msec(A 시간 대역)에

서 진폭이 크게 증가하며, 1~1.2 msec(B 시간 대역)에서는 진폭이 감소함을 확인할 수 있다. 이와 같은 특성을 morlet wavelet 을 활용한 wavelet 변환에 의한 시간-주파수 역으로 분석하여 보면 더욱 정확히 확인할 수 있다. 이 기법을 이용하면 같은 시간 위치에서 다양한 주파수의 성분을 분해하여 나타낼 수 있어 동일 시간영역에서 주파수 성분의 변화를 분해해 낼 수 있다. Fig. 9 에서 결함을 지나면서 40 kHz 의 주파수 대역의 신호가 0.05~0.3 msec(A 시간 대역)에서는 커지고 1~1.2 msec(B 시간 대역)에서는 작아지고 있다. 이와 같이 각 시간 대역에서의 피크값의 변화를 통해 결함 구분이 가능하다.

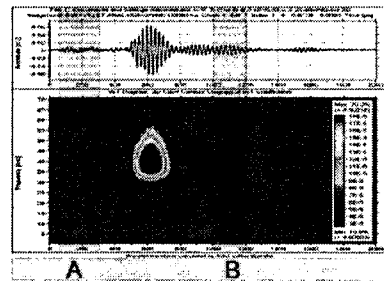


Fig. 9(a) waveform and time-frequency domain data decomposed by wavelet transform of laser-generated guided wave at defect-free region (received angle: 6.6°)

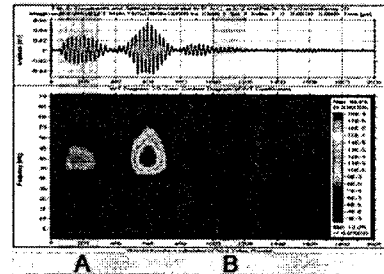


Fig. 9(b) waveform and time-frequency domain data decomposed by wavelet transform of laser-generated guided wave at defect region (received angle: 6.6°)

한편 Fig. 10 은 결함영역을 지나도록 라인 스캔하여 수신한 신호 중 A, B 시간 대역의 피크값을 도시한 그래프이다. 진폭의 크기가 급변하는

특성을 통해 결함 영역을 예측할 수 있다. Fig. 10(a)의 경우 결함영역을 지나면서 최대 3 배 이상의 신호 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 라인 스캔을 한 포인트 간의 간격은 5 mm 이고, 그림에서 결함을 나타내는 구간은 대략 20 mm 이므로 실제 인공결함의 크기와 근사한 결과를 보여 주고 있다.

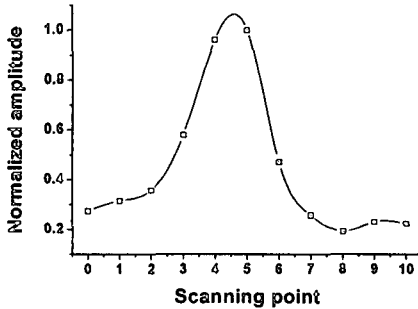


Fig. 10(a) Normalized amplitude depending on the scanning step at A time domain

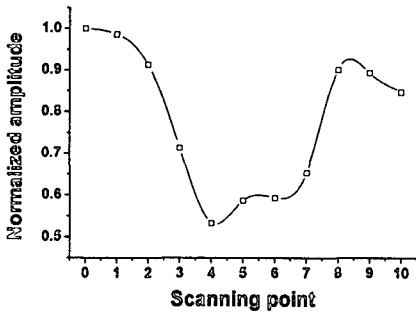


Fig. 10(b) Normalized amplitude depending on the scanning step at B time domain

Fig. 11 은 결함으로부터 반사되어 되돌아 나오면서 누출되는 신호를 -6.6 도에서 배양방향을 따라 수신한 파형과 시간-주파수 특성을 분석한 그래프이다. 결함 영역에서 파형과 주파수 특성의 확인한 증가를 확인할 수 있다. 이는 결함 영역에서 반사되어 누설된 신호를 수신한 것이므로 결함이 없을 때는 신호 특성이 없다가 결함이 존재할 때만 이와 같은 신호 특성이 나타나기 때문이다. 결함을 지나면서 0.1~0.4 sec(C 시간 영역)에서 진폭이 커지고 있으며, 35~40 kHz 대역의 주파수 크기도 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 결함과 비결함 영역에서의 주파수 특성을 비교한 Fig. 12

의 그래프를 통해서도 확인해 볼 수 있다.

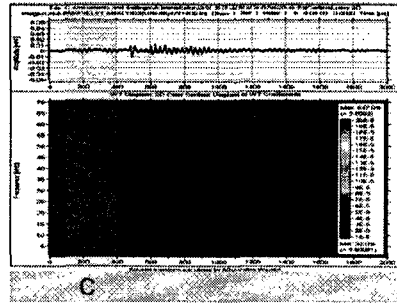


Fig. 11(a) waveform and time-frequency domain data decomposed by wavelet transform of laser-generated guided wave at defect-free region (received angle: -6.6°)

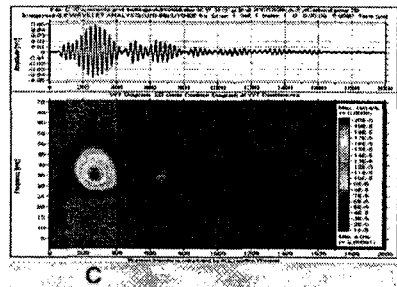


Fig. 11(b) waveform and time-frequency domain data decomposed by wavelet transform of laser-generated guided wave at defect region (received angle: -6.6°)

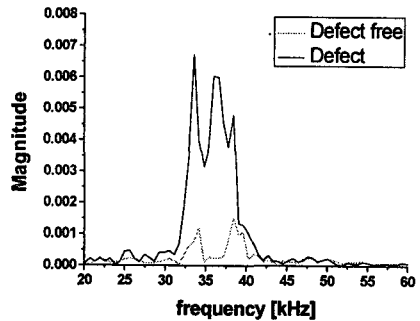


Fig. 12 Signal characteristics of frequency spectrum at defect/defect free region (received angle: -6.6°)

결함을 지나면서 나타나는 이와 같은 신호의

특성을 이용하여 결함 영역을 지나도록 라인 스캔 한 결과는 Fig. 13 과 같다. Fig. 13(a)는 수신된 신호 중 0.1~0.4 msec(C 시간 영역)에서 진폭의 변화를 도시한 것으로 결함을 지나면서 최대 5 배 이상의 진폭 증가 특성을 보이고 있다. 또한 수신된 신호를 푸리에 변환을 이용하여 얻은 주파수 특성 중 35~40 kHz 대역의 최대 진폭을 도시한 Fig. 13(b)에서도 결함 영역에서 최대 3 배 이상의 신호 크기 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 라인 스캔을 한 포인트간의 간격은 5 mm 로서, 20 mm 의 결함 크기에 근접한 뚜렷한 결과를 보여주고 있다. 신속한 결함 탐지를 가능하게 하는 이 방법을 이용하여 결함의 위치와 개략적 크기 측정이 가능함을 확인하였다.

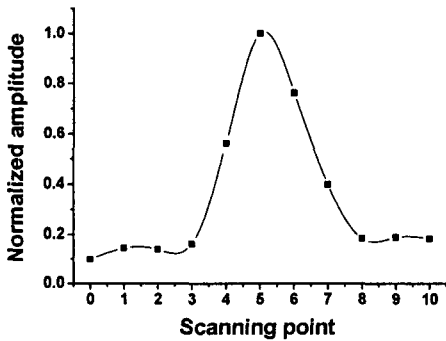


Fig. 13(a) Normalized amplitude depending on the scanning step at C time domain

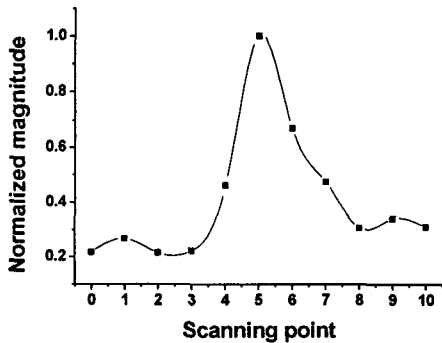


Fig. 13(b) Normalized magnitude depending on the scanning step at 35~40kHz frequency domain

동일 결함에 대해서 결함을 통과하여 누출되는 신호와 결함에 반사되어 누출되는 신호를 수신하였을 경우 모두 결함의 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 앞서 분석된 +6.6 도와 -6.6 도로 수신한 신호의 특성을 바탕으로 결함 영역을 레이저 초음파 C-scan 하면 Fig. 14(a), (b)와 같은 이미지를 얻을 수 있다. 5 mm 간격으로 수신하였으므로 사각형 한 개의 크기는 가로, 세로 각각 5 mm 이다. Fig. 14(a)를 보면 인공 결함으로 넣은 테프론 필름과 수신 센서 사이의 모서리로 추측되는 부분에서 영상 신호가 뚜렷하게 나타난다. 이는 결함을 지나면서 모드 변환된 신호 특성과 표면의 미세한 굴곡에 의한 신호 특성에 기인한 결과이다. 비슷한 결과가 Fig. 14(b)에서도 나타나 있다. 이는 내부에서 반사되는 신호의 크기가 가장 큰 지점임과 동시에 누출되는 신호의 감쇠가 가장 적게 발생하는 지점이기 때문이다. 한편 각각의 신호는 수신지점의 높이(standoff)와 수신각에 의해 만들어지는 간격으로 인해 누출 지점과 수신 지점 사이에 차이가 발생하게 되므로 수신 센서의 위치보다 뒤 혹은 앞에서 영상이 나타나는 것처럼 보인다.

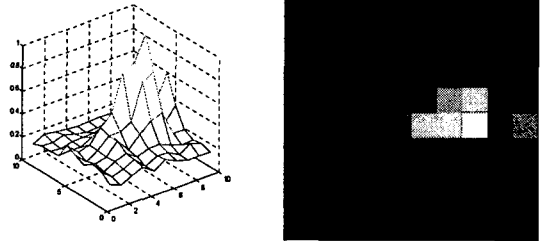


Fig. 14(a) Laser ultrasonic C-scan image using transmitted wave through defect

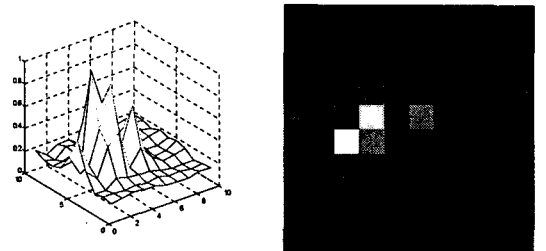


Fig. 14(b) Laser ultrasonic C-scan image using reflected wave from defect

3.2.2 유도 초음파를 이용한 결함의 영상화

앞선 두 영상은 결함을 지난 이후에도 결함 신호의 영향을 받거나 혹은 결함보다 앞서 결함으로부터 반사되어 누출되는 신호로 인해 실제 결함의 크기보다 더 크게 나타났다. 이와 같은 오차는 레이저 초음파의 송신부와 수신부 사이의 거리가 길어질수록 더 크게 나타난다. 이와 같은 오차를 보완하기 위해 다소의 신호 처리 과정이 필요하다. 동일 결함으로부터 얻은 다른 두 영상 신호를 결함 포인트로부터 수신 포인트 사이의 거리 혹은 시간 차이를 보간하여 두 데이터를 합성하면 Fig. 15(a), (b)와 같은 결함 영상을 얻을 수 있다. Fig. 15(a)는 중첩되는 결함 특성을 얻기 위해 각각의 방향에서 수신한 표준 신호 값들을 평균한 결과이며, Fig. 15(b)는 모서리의 신호 특성을 강화하기 위해 각각의 방향에서 수신한 표준 신호 값들을 곱하여 얻은 결과이다. 수침식 초음파 C-scan의 결과인 Fig. 15(c)와 비교하여 볼 때, 레이저 초음파 C-scan 기법을 이용하는 경우에도 접촉식 기법인 수침식 초음파 C-scan의 결과에 근접한 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

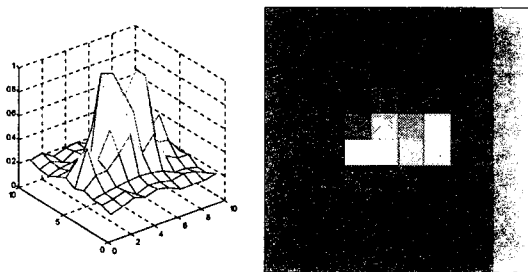


Fig. 15(a) Defect image constructed from non-contacted laser ultrasound using mean value process

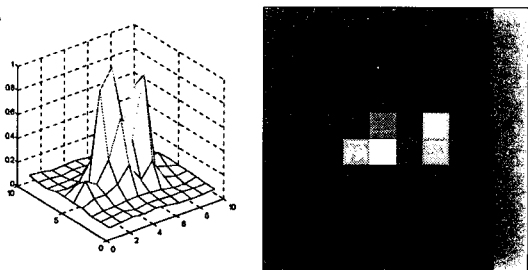


Fig. 15(b) Defect image constructed from non-contacted laser ultrasound using multiply process

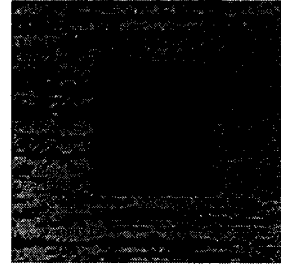


Fig. 15(c) Defect image obtained from conventional ultrasonic C-scan image(immersion method)

4. 결론

본 연구에서는 레이저 발생원/air-coupled transducer 수신원의 하이브리드 타입 초음파 검사 시스템을 이용하여 복합재료의 표면 직하의 결함을 검출하고자 하였다. 내부 결함이 존재하는 영역을 지나서 수신되거나 반사되어 수신된 신호의 특성을 분석하면 결함에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 이 같은 특성을 적용하여 재료를 라인 스캔할 경우 신속히 내부 결함 영역을 판별할 수 있었고, 레이저 초음파 C-scan 기법을 적용할 경우 결함 영상을 얻을 수도 있었다. 비접촉 방식으로 투과파와 표면파의 송수신이 가능하다는 점을 고려할 때 실제 온라인 공정 중에도 본 실험 방법론의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

1. Shuart, M. J., Johnston, N. J., Dexter, H. B., Marchello, J. M. and Grenoble, R. W., “Automated Fabrication Technologies for High Performance Polymer Composites,” NASA Langley Technical Report Server, Technical Report: NASA-98-AGARD-mjs, 1998.
2. Lanza di Scalea, F. and Green, R. E. Jr., “A Hybrid Non-Contact Ultrasonic System for Sensing Bond

- Quality in Tow-Placed Thermoplastic Composites,”
Journal of Composite Materials, Vol. 34, No. 21, pp.
1860-1880, 2000.
3. 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, Issue 5, pp. 329-
334, 1999.
 4. 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.
 5. Fomitchov, P. A., Kromine, A. K., Sohn, Y.,
Krishnaswamy, S. and Achenbach, J. D., “Ultrasonic
Imaging of Small Surface-breaking Defects Using
Scanning Laser Source Technique,” Review of
Quantitative Evaluation, Vol. 21A , pp. 356-362,
2000.
 6. Lee, J. H., Choi, S. W. and Byun, J. H., “A Study on
Non-contacting Ultrasonic Testing for Inspecting
Delamination in CFRP,” J. KSPE, Vol. 24, No. 3, pp.
23-30, 2007.
 7. Kažys, R., Demčenko, A., Žukauskas, E. and
Mažeika, L., “Air-coupled ultrasonic investigation of
multi-layered composite materials,” Ultrasonics, Vol.
44, Issue 1, pp. e819-e822, 2006.