

복합재 격자 구조 비파괴평가를 위한 초음파전파 영상화 시스템 활용 연구

박재윤* · 신혜진** · 이정률*[†]

Study on Application of Ultrasonic Propagation Imager for Non-destructive Evaluation of Composite Lattice Structure

Jae-Yoon Park*, Hye-Jin Shin**, Jung-Ryul Lee*[†]

ABSTRACT: Composite lattice structures are tried to be used in various fields because of its benefit in physical properties. With increase of demand of the composite lattice structure, nondestructive testing technology is also required to certificate the quality of the manufactured structures. Recently, research on the development of the composite lattice structure in Republic of Korea was started and accordingly, fast and accurate non-destructive evaluation technology was needed to finalize the manufacturing process. This paper studied non-destructive testing methods for composite lattice structure using laser ultrasonic propagation imaging systems. Pulse-echo ultrasonic propagation imaging system was able to inspect a rib structure wrapped with a skin structure. To reduce the time of inspection, a band divider, which can get signal in different frequency bands at once, was developed. Its performance was proved in an aluminum sandwich panel. In addition, to increase a quality of results, curvature compensating algorithm was developed. On the other hand, guided wave ultrasonic propagation imaging system was applied to inspect delamination in a rib structure. To increase an area of inspection, multi-source ultrasonic wave propagation image was applied, and defects were successfully highlighted with variable time window amplitude mapping algorithm. These imply that ultrasonic propagation imaging systems provides fast and accurate non-destructive testing results for composite lattice structure in a stage of the manufacturing process.

초 록: 복합재 격자 구조는 동일한 무게를 갖는 다른 구조에 비해 더 큰 하중을 견딜 수 있다는 장점으로 인해 다양한 분야에 적용이 시도되고 있다. 최근, 국내에서도 복합재 격자 구조 제작을 위한 기술 개발이 이루어지고 있으며 이에 복합재 격자 구조를 빠르고 정밀하게 검사할 수 있는 비파괴검사 기술의 개발 역시 필요하게 되었다. 본 논문에서는 초음파전파 영상화 시스템들을 활용하여 복합재 격자 구조에 빠르고 정밀한 비파괴검사를 하기 위한 연구를 수행하였다. 레이저 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템을 통해 스킨에 쌓여 있는 복합재 격자 구조의 내부 리브 구조를 관찰할 수 있었고 접착분리를 검출할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 검사시간을 줄이기 위해 주파수 영역을 최적화 하기 위한 밴드 디바이더를 개발 적용하였으며, 검사 결과의 질을 향상시키기 위해 곡률 보상 알고리즘을 개발하였다. 유도파 초음파전파 영상화 시스템으로는 리브 구조에 있는 층간분리 결함을 확인할 수 있었으며, 다중 소스 초음파전파영상을 통해 검사 영역을 확대시켰고 가변시간창 진폭 이미지 알고리즘을 통해 결함을 강조시킬 수 있도록 했다. 이와 같은 결과들을 통해 격자구조에 최적화 된 초음파전파 영상화 시스템의 지속적인 개발이 이뤄지면 복합재 격자 구조의 대량생산에 이은 고속 정밀 비파괴검사가 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.

Received 29 August 2017, received in revised form 26 December 2017, accepted 27 December 2017

*Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Korea

*[†]Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Korea,
Corresponding author (E-mail: leejrr@kaist.ac.kr)

**Mechanical Technology Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

Key Words: 복합재 격자 구조(Composite lattice structure), 비파괴평가(Non-destructive evaluation), 펄스-에코 초음파 전파 영상화 시스템(Pulse-echo ultrasonic propagation imaging system), 유도파 초음파전파 영상화 시스템(Guided wave ultrasonic propagation imaging system)

1. 서 론

복합재 격자 구조는 격자 구조라는 구조적 특징으로 인해 같은 무게로도 더 큰 하중을 견딜 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 다양한 구조에 적용되고 있다. 그 예로 Petrokovskiy[1]에 의하면, 러시아에서 개발한 Proton-M 발사체는 기존 Proton-K 발사체의 일부를 복합재 격자 구조로 대체하면서 페이로드를 약 1500 kg이나 증가시킬 수 있었다. 하지만 구조적으로 필요한 부분만을 사용하는 복합재 격자 구조의 특성상 작은 결함에도 구조 전체가 큰 영향을 받을 수 있다. 실제로 1997년 1월, Delta II의 로켓 부스터 CFRP 복합재 구조에서 제조 시에 발생한 5 mm 크기의 균열로 인해 발사 13초 만에 폭발하는 사고가 발생하였다. 이처럼 현재 복합재 격자 구조의 국내 개발이 이루어짐에 따라 구조체에 대한 빠르고 정밀한 비파괴검사 기술의 개발 역시 매우 중요하다.

복합재 격자 구조는 복합재라는 재료의 특성으로 인해 결함의 육안 검사가 어려우며 빈 공간이 많아 비파괴검사의 적용이 쉽지 않다. Amano 등[2]은 복합재 격자 구조의 리브 구조에 압전소자와 광섬유 센서를 설치하여 리브 구조의 균열 존재 여부와 리브 구조와 스킨 구조 사이의 접착 분리 결함 혹은 손상의 유무를 확인하였다. Higgins 등[3]에 의하면, 2000년부터 19차례 발사된 미국 Orbital Science Cooperation 사의 Minotaur의 경우, 자동 초음파 펄스-에코 시험을 통해 복합재 페이로드 페어링의 리브 구조와 스킨 구조 사이의 접착분리를 검사하는 비파괴검사를 시행하고 있다. 하지만 광섬유 센서를 활용할 경우, 결함 및 손상의 대략적인 위치만 알 수 있으며 구조 전체에 센서를 설치해야만 한다. 자동 초음파 펄스-에코 시험의 경우, 정밀하지만 검사 속도가 느리며 매번 검사 시에 물을 필요로 한다.

본 논문에서는 앞서 나열한 비파괴검사 방법보다 빠르고 정밀하게 비파괴검사를 하기 위한 대안으로 초음파전파 영상화 시스템을 적용하기 위한 연구를 시행하였다. 초음파전파 영상화 시스템은 레이저를 통해 열탄성 효과로 발생한 초음파를 센서를 통해 측정하여 검사 영역 안에서 초음파가 전파되는 과정을 영상으로 보여줄 수 있는 시스템으로 다양한 구조에 대해서 그 성능을 입증하였다. 복합재 격자 구조를 Hong 등[4]에 의해 개발된 펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템과 Chong와 Lee[5]에 의해 개발된 유도파 초음파전파 영상화 시스템을 통해 비파괴검사를 한 결과, 각각 스킨 구조에 쌓인 리브 구조와 리브 구조 내부

에 존재하는 접착분리 결함을 확인할 수 있었다.

초음파전파 영상화 시스템으로 구조를 검사할 때, 필터링할 주파수 영역을 구조에서 퍼지는 초음파의 주파수에 맞게 설정하면 검사의 질을 높일 수 있는데, 이를 위해 밴드 디바이더가 적용되었다. 이 밴드 디바이더의 성능을 확인하기 위해 알루미늄 샌드위치 패널 시편을 사용하여 상용 필터와 비교하였다. 또한, 펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템으로 곡률이 있는 시편을 검사할 때 결함이 곡률에 의해 그 모양과 크기가 불분명해지는 것을 해결하기 위해 곡률 보상 알고리즘을 개발하였고, 복합재 격자 구조처럼 곡률을 가지고 있는 여러 복합재 시편들 중 하나인 CFRP 날개 패널 시편을 사용하여 그 성능을 확인하였다.

유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템으로 리브 구조를 검사할 때, 초음파가 전파됨에 따라 감쇄되는 문제를 해결하기 위해 다중 소스 초음파전파영상을 만들었으며, 결과에서 결함을 강조하기 위해 가변시간창 진폭 이미지를 만들어 그 결과를 확인하였다.

2. 펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템 적용

2.1 펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템

펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템은 Fig. 1과 같이 가진 레이저와 센싱 레이저가 같은 위치를 향해 조사되어, 가진 레이저에 의해 발생한 초음파가 깊이 방향으로 전파되었다가 되돌아오는 것을 센싱 레이저를 통해 측정하며, 이와 같은 과정을 검사영역에 대해서 실행하고 그 결과를 영상화하여 시간에 따라 깊이 방향으로 퍼지는 초음파를 실시간으로 확인할 수 있다. 이 시스템은 완전 비접촉의 방식으로 시편을 검사할 수 있으며 최대 초당 1000점까지 고속 검사가 가능하며 Hong 등[6]에 의해 펄스-에코 초음파전파 영상화 시스템으로 페인트 칠이 된 CN-235의 표면을 검사하여 시스템의 성능이 확인된 바 있다.

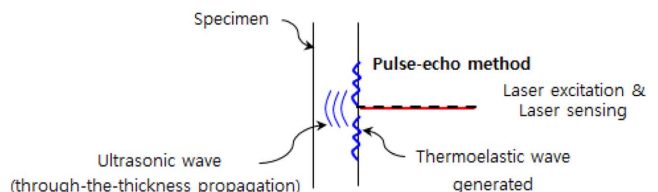


Fig. 1. Principle of pulse-echo ultrasonic propagation imaging system

2.2 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템의 복합재 격자 구조 검사 결과

펄스에코 초음파전파 영상화 시스템으로 시편을 검사하기 위해서는 검사 주파수 영역을 적절하게 설정해 주어야 한다. 아래의 식 (1)은 시편에서 퍼지는 초음파의 주파수를 대략적으로 계산하기 위한 식이다.

$$f = \frac{v}{2t} \quad (v = 2972 \text{ m/s for composite laminate}) \quad (1)$$

여기서 f 는 신호의 크기가 가장 클 것으로 예상되는 중심 주파수(MHz)이고, v 는 초음파의 깊이 방향으로의 전파속도(km/s)로 매질에 따라 달라지며, t 는 시편의 두께(mm)를 나타낸다. 검사에 사용된 복합재 격자 구조의 두께가 약 12 mm 이므로 식 (1)에 의해 중심 주파수는 약 0.124 MHz가 된다. 해당 시편은 필라멘트 와인딩 기법으로 제작되었기에 실제로는 중심주파수가 더 낮을 것이라 예상되며, 이 중심 주파수를 포함하는 주파수 영역인 0.01 MHz부터 0.25 MHz의 범위로 시편을 검사하였다. Fig. 2는 검사한 시편의 검사영역(점선구역)을 나타냈으며, Fig. 3은 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템이 시편을 검사하는 모습을 나타내었다.



Fig. 2. Composite lattice structure (rib structure with skin)



Fig. 3. Inspection of composite lattice structure using pulse echo ultrasonic propagation imaging system

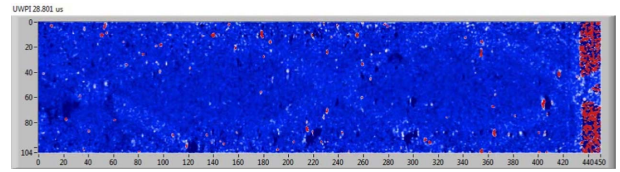


Fig. 4. Ultrasonic wave propagation image result of composite lattice structure using pulse echo ultrasonic propagation imaging system (frequency range: 0.01-0.250 MHz)

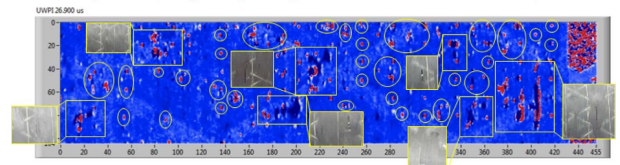


Fig. 5. Ultrasonic wave propagation image result of composite lattice structure using pulse echo ultrasonic propagation imaging system (frequency range: 0.01-0.090 MHz)

검사에는 1064 nm Q 스위치 레이저를 사용했으며 Laser Doppler Vibrometer 센서를 통해 초음파를 측정하였다. 검사 영역에서의 검사 간격은 0.26 mm, 시스템과 시편 사이의 거리는 약 69.4 cm이다.

Fig. 4는 검사 결과로 나타난 영상의 스냅샷을 나타내었다. 스킨 구조의 외부에 존재하는 결함과 스킨 구조에 둘러싸인 내부의 리브 구조가 관찰되나 명확하지 않아 주파수 영역의 조정이 필요했다. 검사 주파수 영역을 0.01 MHz에서 0.09 MHz로 조정해 검사한 결과, 내부의 리브 구조가 더 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

2.3 밴드 디바이더를 통한 검사 주파수 영역의 최적화

앞서 복합재 격자 구조의 적절한 검사 주파수를 찾기 위해서는 여러 번의 반복 실험이 필요하다. 이는 구조에 대한 초기 검사 조건을 찾는 데 소요되는 시간을 결정하게 된다. 한번 찾아진 최적조건은 계속 적용될 수 있으나 임의의 구조로 변경될 때는 유사한 최적화 과정이 필요하기 때문

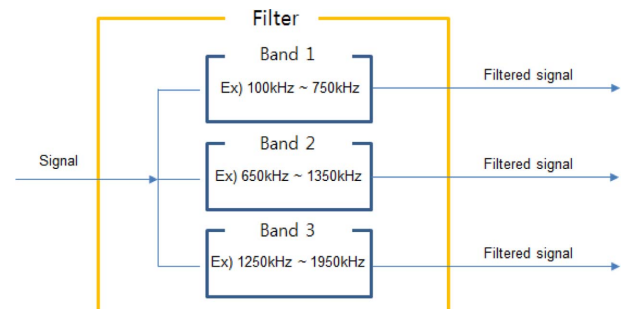


Fig. 6. Concept of band divider

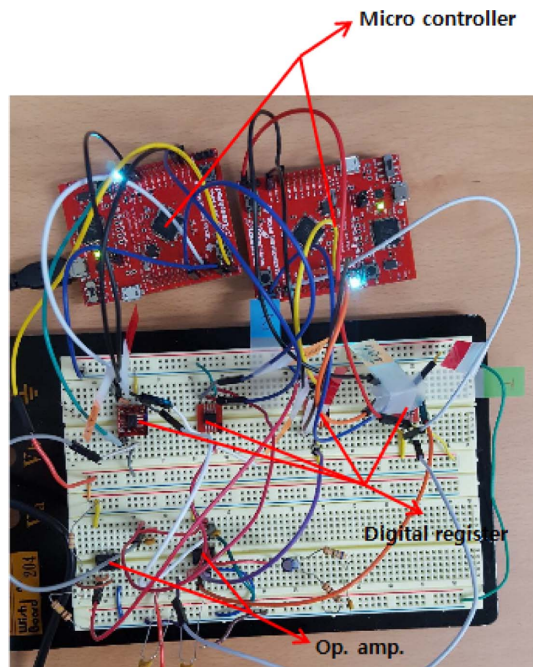


Fig. 7. Band divider on a breadboard

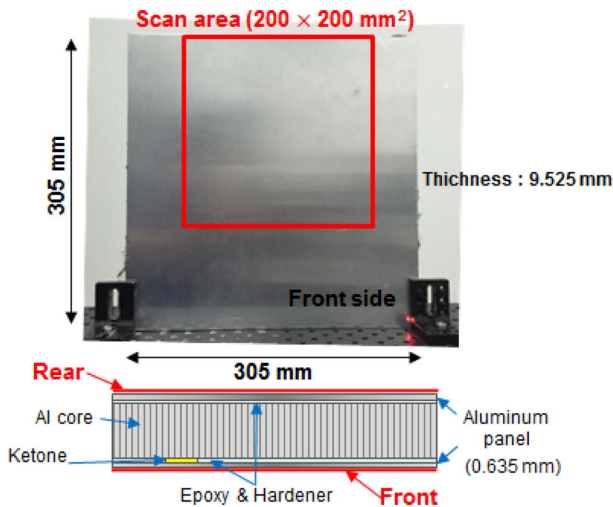


Fig. 8. Aluminum sandwich h panel specimen

에 이러한 문제를 해결하고자 받은 초음파 신호를 동시에 여러 주파수 영역으로 필터링할 수 있는 밴드 디바이더를 개발하였다. Fig. 6에 밴드 디바이더에 대한 개념도를 나타내었다. Fig. 7에 밴드 디바이더 회로의 모습을 나타내었다. 밴드 디바이더는 마이크로 컨트롤러(Micro controller)로부터 명령을 받아 Digital register의 값을 조정하며 이를 통해 정해진 전압 값으로 연산 증폭기(Op. amp., Operation amplifier)를 통해 필터링 하게 될 주파수 구간을 설정할 수 있다.

개발된 밴드 디바이더의 성능을 확인하기 위해 Fig. 8에 나타난 알루미늄 샌드위치 패널 시편을 가지고 펄스에코

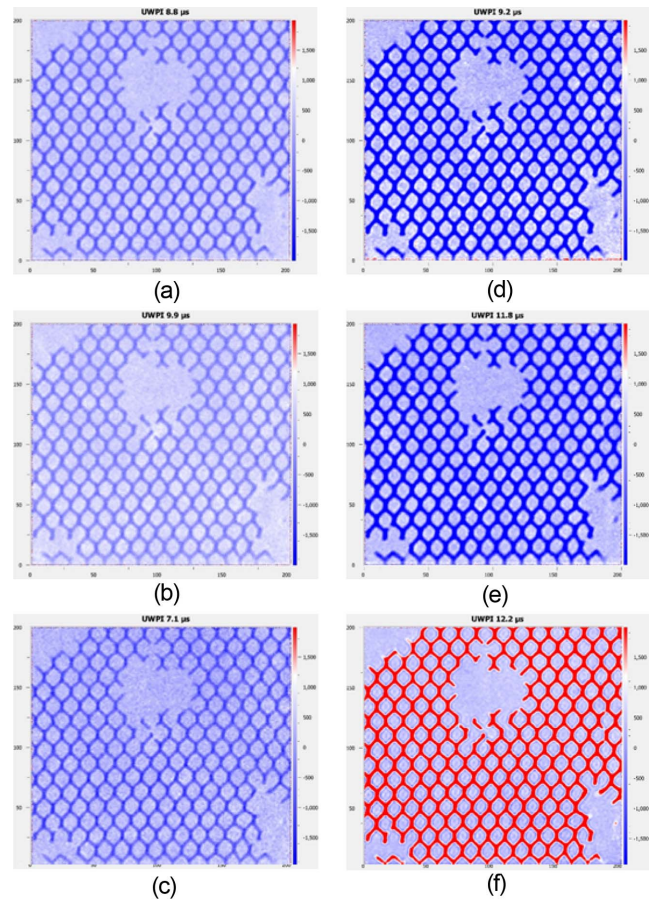


Fig. 9. Ultrasonic wave propagation imaging of aluminum honeycomb sandwich panel using pulse echo ultrasonic propagation imaging system with band divider filtered in (a) 10 kHz to 200 kHz, (b) 10 kHz to 100 kHz, (c) 50 kHz to 200 kHz, and with decade filter filtered in (d) 10 kHz to 200 kHz, (e) 10 kHz to 100 kHz, (f) 50 kHz to 200 kHz

초음파전파 영상화 시스템으로 검사하여 밴드 디바이더에서의 결과와 상용필터에서의 결과를 비교하였다. 개발된 밴드 디바이더는 받은 초음파를 동시에 3개의 서로 다른 주파수 영역으로 필터링하여 처리가 가능하다. 따라서, 알루미늄 샌드위치 패널 시편을 0.010 MHz에서 0.200 MHz, 0.010 MHz에서 0.100 MHz, 0.050 MHz에서 0.050 MHz에서 0.200 MHz의 3개의 주파수 범위에 대해서 밴드 디바이더에서의 필터링 결과와 상용 필터에서의 결과를 비교하였다. 검사 영역의 크기는 200 mm × 200 mm이며 1064 nm QL 레이저와 Laser Doppler Vibrometer 센서를 통해 검사하였다.

알루미늄 샌드위치 패널 시편의 검사 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 상용 필터에서의 결과를 보면 0.050 MHz에서의 0.200 MHz의 주파수 범위일 때 가장 허니콤 구조가 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 이와 마찬가지로 밴드 디바이더에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 상용 필터

를 사용하면 3회 검사를 통해 최적화된 주파수 영역을 확인할 수 있는 것에 비해 밴드 디바이더는 이를 한번에 확인할 수 있으며, 초기 검사 조건을 임의의 구조에 대해서도 신속하게 찾을 수 있다.

2.4 곡률 보상 알고리즘을 통한 신호대 잡음비 향상

Abetew 등[7]에 의하면 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템에서 평면의 시편을 검사하여 초음파 신호를 관찰하면 신호의 앞부분은 비슷한 모양과 크기를 갖는다. 이와 같은 특징을 갖는 이유는 시편의 표면에서 반사된 신호가 측정되었기 때문에 시편의 표면에만 영향을 받는 신호 구간이 존재하는 것이다. 이와 같은 특징을 이용하면 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템이 곡률을 갖는 구조를 검사할 때 결함의 크기가 명확하게 나타나지 않는 현상을 해결할 수 있다. 곡률을 갖는 CFRP wing 패널 시편에 대해 곡률에 의해 결함이 가려지는 문제를 해결하기 위한 곡률 보상 알고리즘을 적용하여 그 성능을 확인하였다. 이 알고리즘은 앞서 Shin 등[8]에 의해 UHF 안테나 시편에 적용되어 그 효과를 보였다. 알고리즘을 적용하기 위해 사용된 시편은 Fig. 10에 나타내었다. 이 시편을 단순히 검사할 경우, Fig. 11(b)에 나타난 것처럼 두 개의 BVID(Barely visible

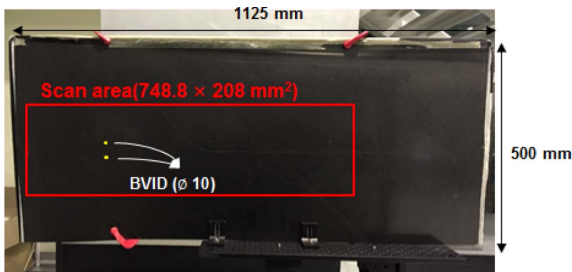


Fig. 10. CFRP wing panel

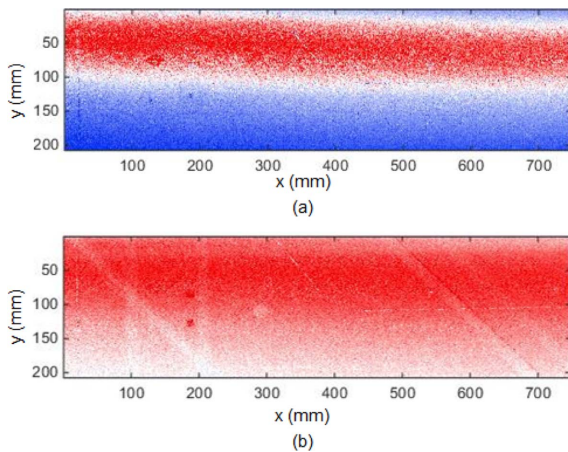


Fig. 11. (a) Reference freeze frame at 19.10 ms and (b) target freeze frame at 33.05 ms in ultrasonic wave propagation image results of CFRP wing panel

impact damage) 중 하나가 명확히 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 곡률 보상 알고리즘을 적용시켜 이와 같이 가려진 손상 영역을 강조시키기 위해 표면에서 반사되어 나온 신호가 나타난 시간 프레임을 Fig. 11(a)와 같이 설정하였다.

위에서 Fig. 11(a)는 기준 프레임, Fig. 11(b)는 목표 프레임이라 할 때, $A(x, y, t_{ref})$ 을 기준 프레임의 시간 t_{ref} 일 때 손상이 없는 (x, y) 지점에서의 신호 크기라 하고, $A(x, y, t_{tar})$ 을 목표 프레임의 시간 t_{tar} 일 때 (x, y) 지점에서의 신호 크기라 하

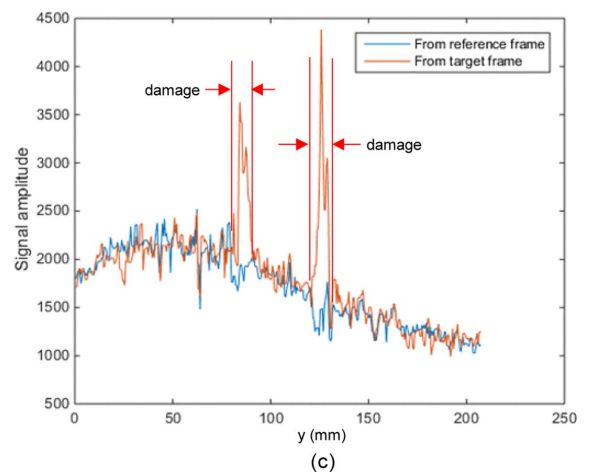
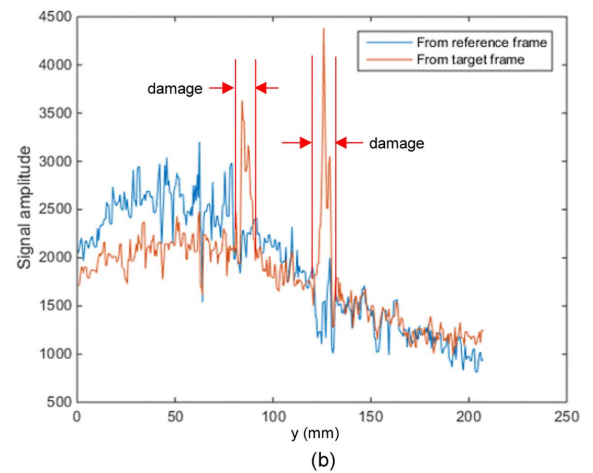
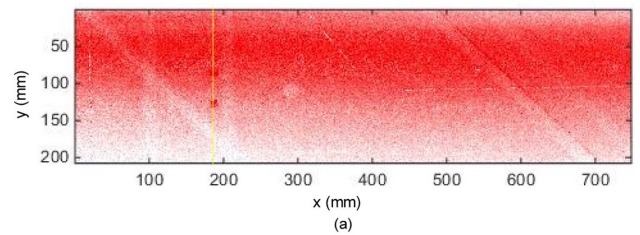


Fig. 12. (a) Target freeze frame at 33.05 ms of ultrasonic wave propagation image results of CFRP wing panel, ultrasonic amplitude distributions along $x = 188.76$ mm (b) before algorithm applied, (c) after algorithm applied

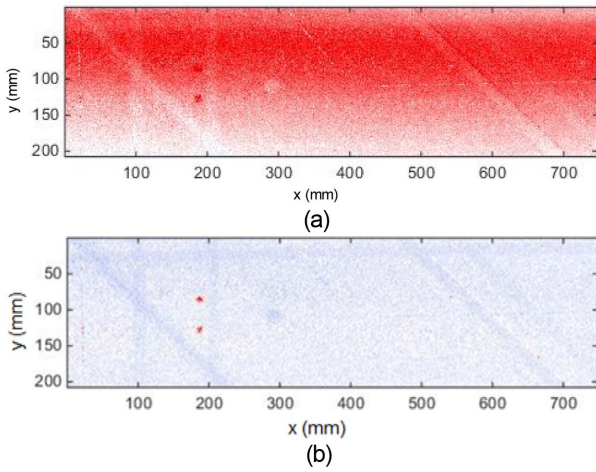


Fig. 13. Results of CFRP wing panel (a) before curvature compensating algorithm applied, (b) after curvature compensating algorithm applied

면 두 신호 크기 사이에서는 아래의 식 (2)와 같은 관계식이 성립한다.

$$A(x, y, t_{tar}) = a \times A(x, y, t_{ref}) + b \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 임의의 계수로 기준 프레임과 목표 프레임에서의 초음파 신호 크기의 관계를 설명하며 기준 프레임과 목표 프레임의 시간에 따라 달라질 수 있다.

$E(x)$ 가 x 의 평균, $V(x)$ 가 x 의 분산을 의미할 때, 위의 관계식에서 식 (3)이 유도될 수 있다.

$$a = \left(\frac{V(A(t_{tar}))}{V(A(t_{ref}))} \right)^{0.5} \quad b = E(A(t_{tar})) - a \times E(A(t_{ref})) \quad (3)$$

여기서 계수 a 와 b 를 계산하여 두 프레임에서의 신호 크기를 맞춰주면 결함 및 손상이 발생한 부분만 신호 크기가 달라지게 된다. CFRP wing 패널 시편의 결과에서 이를 적용시키면 Fig. 12와 같이 나타난다. 이 때 상수값은 $a = 0.8092$, $b = 267.2481$ 이었다.

이렇게 신호크기가 같아진 두 개의 프레임에서 신호 크기의 차이를 구해 이미지로 나타내면 손상이 있는 부분만 강조가 가능하며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이로 인해 곡률에 의해 손상이 가려지면 곡률 보상 알고리즘을 통해 이를 해결할 수 있음을 확인하였다.

3. 유도파 초음파전파 영상화 시스템 적용

3.1 유도파 초음파전파 영상화 시스템

유도파 초음파전파 영상화 시스템은 깊이 방향으로 전파되는 초음파를 측정하는 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템과 달리 판이나 표면에 가이드되어 퍼지는 초음파를

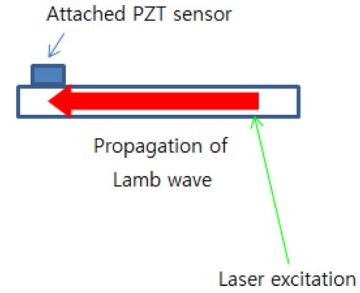


Fig. 14. Principle of guided wave ultrasonic propagation imaging system using PZT sensor

측정하여 영상으로 전파과정을 가시화해주는 시스템이다. Fig. 14는 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템 중 압전소자 센서를 사용할 때의 개념도를 나타내었다. 초음파를 측정하는 방식에는 압전소자 센서를 부착하거나 Laser Doppler Vibrometer를 통한 방식등이 있다. 복합재 격자 구조의 경우, 좀더 신호대 잡음비가 좋은 압전소자 센서를 사용하였다. 이 시스템의 경우 초당 최대 20,000점까지 고속 검사가 가능하다. 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템은 Lee 등[9]에 의해 필라멘트 와인딩 방식으로 제작된 수소연료탱크의 비파괴검사를 통해 그 성능을 확인할 수 있었다. 또한, Bae 등[10]에 의해 개발된 다중 소스 초음파전파 영상화를 통해 검사영역의 확장이 가능하다. 또한 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템의 검사 결과는 Lee 등[11]에 의해 개발된 가변시간창 진폭 가시화 알고리즘으로 손상 및 결함 가시화를 할 수 있다. 이 알고리즘은 초음파전파영상에서 관찰하고자 하는 시간 구간을 설정한 뒤, 그 시간 구간에서의 신호를 절대값을 취하여 더해 이미지로 결과를 나타내는 것으로 Chia 등[12]에 의해 비행기의 복합재 날개 구조의 검사에 적용되어 그 성능이 확인되었다. 소개한 유도파 초음파전파 영상화 시스템으로 복합재 격자 구조의 리브 구조에 존재하는 층간분리형 결함을 가시화하는 실험을 수행하였다.

3.2 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템의 복합재 격자 구조 검사 결과

Fig. 15에 유도파 초음파전파 영상화 시스템으로 복합재 격자 구조를 검사하는 모습을 나타내었다. 그리고 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템으로 검사한 복합재 격자 구조 시편과 검사 영역을 Fig. 16에 나타내었다. 하나의 압전소자 센서로는 초음파의 감쇄로 인해 검사할 수 있는 영역에 한계가 생기기 때문에 노란색으로 표시된 곳에 압전소자 센서를 설치하여 두 센서를 함께 연결해 다중 소스 초음파전파영상을 결과로 얻었다. 그리고 그 결과에서 하나의 스냅샷을 Fig. 17에 나타내었다.

Fig. 17에서의 결과를 보면 노란색의 원으로 표시한 곳이 압전소자 센서의 위치이며 센서에 가까운 위치의 경우, 신



Fig. 15. Inspection of composite lattice structure using guided wave ultrasonic propagation imaging system

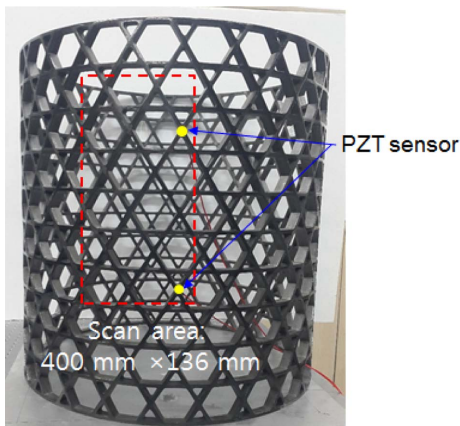


Fig. 16. Rib structure of composite lattice structure

호 크기가 매우 커 그 주변에 존재하는 결함은 잘 관찰되지 않는다. 하지만 압전소자로부터 일정거리가 떨어졌는데도 진한 색으로 나타나는 곳들이 발생하는데, 초음파전파영상만 가지고는 구별이 힘들어 가변시간창 진폭 가시화 알고리즘을 적용시켜 그 결과와 실제 육안으로 관찰 가능한 결함이 있는 위치와 비교하여 Fig. 18에 나타내었다. 그림에 표시된 부분은 실제로 층 사이가 분리되었거나 떨어진 곳으로 4번의 경우, 빨강색 나타난 부위가 모두 떨어진 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템을 통해 복합재 격자 구조의 리브 구조에 나타난 결함을 확인할 수 있는 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내 복합재 격자 구조 기술 개발에 맞춰

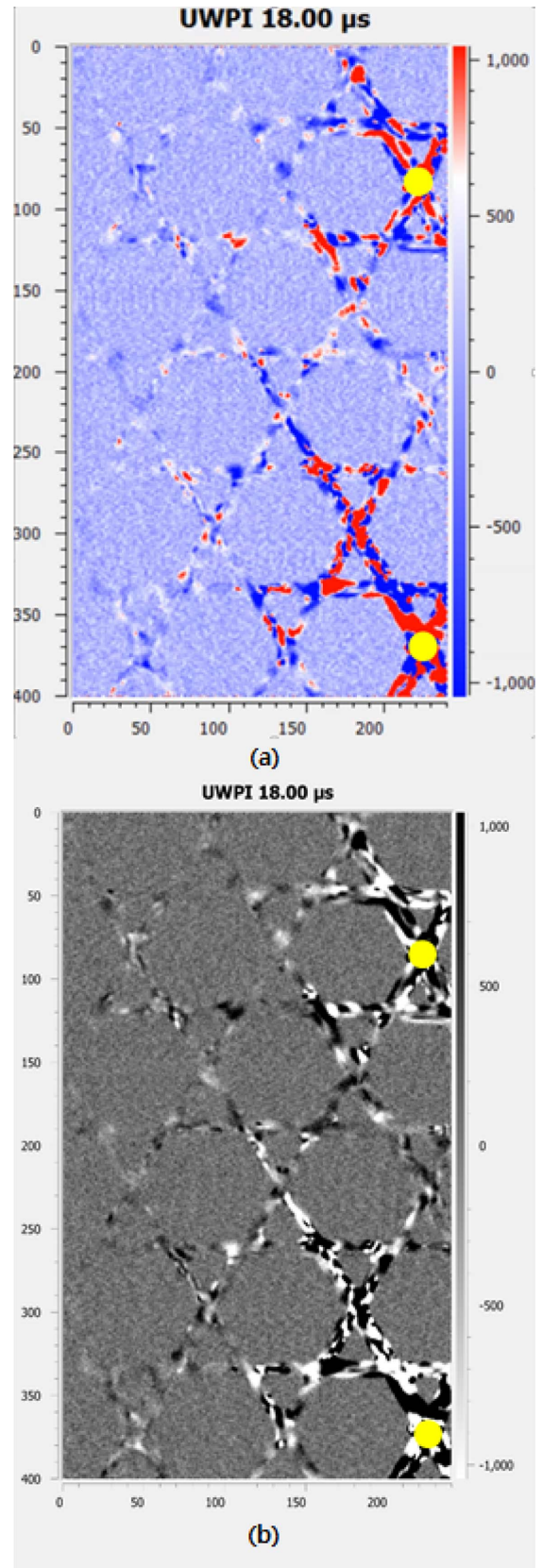


Fig. 17. Ultrasonic wave propagation image results of rib structure of composite lattice structure in 18.00 ms (a) in color scale, (b) in grayscale

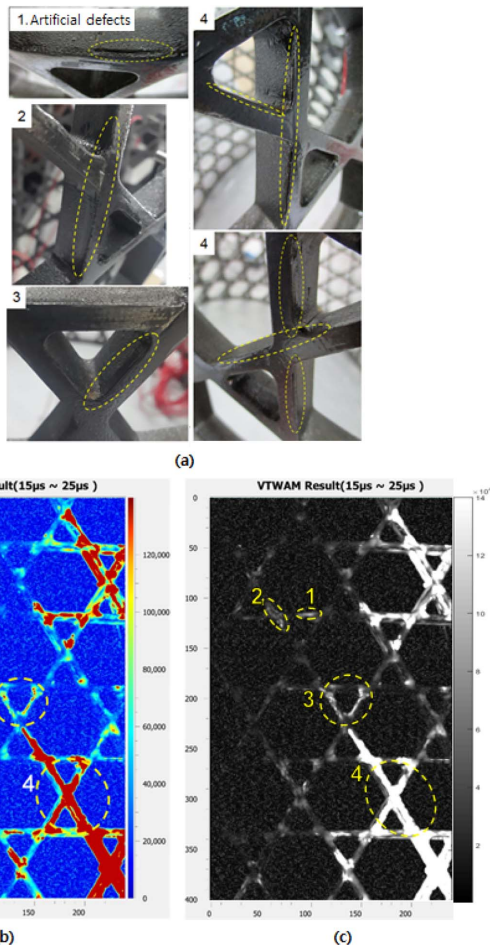


Fig. 18. (a) Defects in rib structure of composite lattice structure, results of various time window amplitude mapping algorithm of rib structure of composite lattice structure (b) in color scale, (c) and in grayscale

이를 빠르고 정밀하게 검사하기 위한 비파괴검사 기법으로 레이저 초음파전파 영상화 시스템을 적용시키기 위한 연구를 하였다. 복합재 격자 구조에서 발생할 수 있는 결함을 크게 리브 구조와 스킨 구조 사이의 접착분리 결함과 리브에서 발생할 수 있는 결함으로 나누어, 리브 구조와 스킨 구조 사이에서 발생하는 결함을 검사하기 위해 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템이 적용되었고, 리브 구조 내부에서 발생한 결함을 검사하기 위해 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템을 적용하였다. 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템을 통해 스킨 구조에 쌓인 리브 구조를 관찰할 수 있음을 확인하였으며, 검사 중, 검사 시간을 줄이기 위해 검사 주파수 영역의 최적화를 위한 밴드 디바이더를 개발하였다. 밴드 디바이더를 알루미늄 샌드위치 패널 시편 검사에 적용시켜 그 성능이 충분함을 확인하였다. 또한 펄스에코 초음파전파 영상화 시스템이 곡물 구조를 검사할 때 결함 및 손상 영역이 가려지는 것을 해결하기 위해 곡물 보상 알고리즘을 개발했으며, 그 성능을 CFRP wing 패널 시

편 검사 결과에 적용시켜 확인하였다. 또한 유도파 기반 초음파전파 영상화 시스템을 통해 복합재 격자 구조의 리브 구조 내부에 존재하는 결함들을 확인할 수 있었으며, 가변 시간창 진폭 가시화 알고리즘을 통해 결함의 가시화를 할 수 있었다. 이와 같은 결과들을 통해 레이저 초음파전파 영상화 시스템을 통해 복합재 격자 구조에 발생한 결함들을 검사할 수 있는 가능성을 충분히 확인하였으며, 지속적인 개발을 통해 앞으로 국내 복합재 격자 구조 기술 개발 과정에서 구조의 제작 단계에서부터 고속 정밀 비파괴검사를 시행할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업 일환으로 복합재 Lattice (격자) 구조체 기술개발(15-CM-MA-12)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Petrokovskiy, S., Polinovskiy, V., and Bukhvalov Y., "Virtual Development of Composite Lattice Structures for Space Vehicles," 2007 EMEA Virtual Product Development Conference, 2007.
2. Amano, M., Arai, T., and Takeda, N., "Various Damage Detection in Advanced Grid Structure by Monitoring of Guided Waves with Embedded Fiber Bragg Grating Sensors," Proceeding of the 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, 2007.
3. Higgins, J., and VanWest, B., "NDE and Repair of Damaged Minotaur Fairing Shell," *Composite Structures*, Vol. 67, 2005, pp. 189-195.
4. Hong, S.C., Abetew, A.D., Lee, J.R., and Ihn, J.B., "Three Dimensional Evaluation of Aluminum Plates with Wall-thinning by Full-Field Pulse-Echo Laser Ultrasonic," *Optics and Lasers in Engineering*, Sep. 2016.
5. Chong, S.Y., and Lee, J.R., "Development of Laser Ultrasonic Propagation Imaging System with Twenty-kilohertz Scanning Frequency for Nondestructive Evaluation Applications," Proceeding of Advances in Structural Health Management and Composite Structures, Jeonju, Korea, Vol. 1, 2014, pp. 18-1.
6. Hong, S.C., Lee, J.R., and Park, J., "Nondestructive Evaluation Technique of Painted Sandwich Control Surfaces of CN-235 using Full-field Pulse-echo Ultrasonic Propagation Imaging System," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 288-292.
7. Abetew, A.D., Hong, S.C., and Lee, J.R., "Investigation of Aluminum Plate Damage Visualization by Through-the-thickness Ultrasound Generated and Detected by Lasers," Proceeding of the 14th International Conference on Structures under Shock and Impact, Crete, Greece, 2016, pp. 27-36.
8. Shin, H.J., Park, J.Y., Hong, S.C., and Lee, J.R., "In situ Non-destructive Evaluation of an Aircraft UHF Antenna Radome

- Based on Pulse-Echo Ultrasonic Propagation Imaging,” *Composite Structures*, Vol. 160, Jan. 2017, pp. 16-22.
9. Lee, J.R., Jeong, H., Chung, T.T., Shin, H., and Park, J., “Damage Visualization of Filament Wound Composite Hydrogen Fuel Tank Using Ultrasonic Propagation Imager,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 4, 2015, pp. 143-147.
 10. Bae, D.Y., and Lee, J.R., “Development of Single Channeled Serial-connected Piezoelectric Sensor Array and Damage Visualization Based on Multi-source Wave Propagation Imaging,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 27, No. 13, 2016, pp. 1861-1870.
 11. Lee, J.R., Chia, C.C., Park, C.Y., and Jeong, H., “Laser Ultrasonic Anomalous Wave Propagation Imaging Method with Adjacent Wave Subtraction: Algorithm,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, 2012, pp. 1507-1515.
 12. Chia, C.C., Lee, J.R., Park, C.Y., and Jeong, H., “Laser Ultrasonic Anomalous Wave Propagation Imaging Method with Adjacent Wave Subtraction: Application to Actual Damages in Composite Wing,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, 2012, pp. 428-440.