

전영역 펄스-에코 초음파전파영상화 시스템의 CN-235의 도색된 샌드위치 조종면 In-situ 비파괴평가 기술

홍승찬* · 이정률*[†] · 박종운**

Nondestructive Evaluation Technique of Painted Sandwich Control Surfaces of CN-235 using Full-field Pulse-echo Ultrasonic Propagation Imaging System

Seung-Chan Hong*, Jung-Ryul Lee*[†], Jongwoon Park**

ABSTRACT: In this paper, a novel ultrasonic propagation imaging system, called a full-field pulse-echo ultrasonic propagation imaging (FF PE UPI) system is introduced. The system nondestructively inspected targets with two-axis translation stage. The coincident laser beams for ultrasonic sensing and generation are scanned and pulse-echo mode laser ultrasounds are captured. This procedure makes it possible to generate full-field ultrasound in through-the-thickness direction as large as the scan area. Structural inspection results in the form of full-field ultrasonic wave propagation videos are introduced, which are painted sandwich control surfaces. In addition, the inspection results of FF PE UPI system are compared with conventional ultrasonic testing methods such as waterjet and portable C-scan.

초 록: 본 연구에서는 전영역 초음파전파영상화 시스템이라 불리는 새로운 초음파전파영상화 장치를 소개한다. 본 시스템은 비파괴적으로 구조를 2 축 선형 이동 스테이지 기반으로 검사한다. 일치된 초음파 센싱과 가진 레이저 빔이 구조를 스캔하며 동시에 펄스-에코 모드 레이저 초음파를 수집한다. 이 과정은 스캔영역만큼 큰 두께 방향의 전영역 초음파를 생성하는 것을 가능하도록 한다. 본 시스템을 사용하여 실제로 운용 중인 알루미늄 허니콤 구조 기반의 CN-235의 도색된 샌드위치 조종면을 검사 및 평가하고 구조 검사 결과로써 전영역 초음파전파 영상을 소개하였으며 기존 초음파 탐상 기법의 결과와 비교하여 성능 및 민감도를 검증하였다.

Key Words: 비파괴 평가(Nondestructive evaluation), 레이저 초음파(Laser ultrasonic), 복합재 손상(Composite damage), 펄스-에코 모드 레이저 초음파(Pulse-echo mode laser ultrasound), 전영역 초음파전파영상화(Full-field pulse-echo ultrasonic wave propagation imaging), 손상 가시화(Damage visualization)

1. 서 론

최근 비파괴 평가는 제조 과정 중 품질 평가 모니터링 및 운용 중 손상을 검사하기 위하여 다양한 실구조 검사에 적

용되고 있다. 그래서 와전류 검사, X-ray 등 다양한 비파괴 평가 방법들이 실구조를 검사 및 모니터링을 하기 위해 사용되고 있다. 최근에는 초음파 탐상 시험(ultrasonic testing, UT)이 구조의 내부 결함 탐지, 인체 유해성 등의 측면의 이

Received 1 July 2016, received in revised form 21 October 2016, accepted 21 October 2016

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

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

**ATRI, Air Force Logistics Command, Korea Air Force

점 때문에 널리 사용되고 있다. UT의 결과로써, C-스캔은 탐지된 결함에 대하여 정량적인 결과를 제시하여 많은 연구에 활용되고 있다[1,2]. 전형적인 C-스캔 기법에는 일반적으로 물분사 C-스캐너와 같은 비접촉 검사 방식을 사용하고 있다. 그러나 기존 C-스캔 기법들은 트랜스듀서와 구조 사이의 거리가 제한적이며 효과적인 초음파 전달을 위한 커플런트 혹은 물분사를 사용하는 단점이 있다.

최근에는 레이저 초음파 발생기를 구조 표면에 조사하여 다양한 모드의 초음파를 발생하는 원리를 사용하여 다양한 분야에서 연구를 진행하고 있다. 또한, 많은 연구자들이 비접촉 센싱 레이저를 사용하여 커플런트가 없이 접근이 용이하지 않은 영역에서 초음파를 센싱을 목적으로 연구하고 있다[3,4].

본 연구에서는 비파괴 검사 장치로서 새로운 초음파 전파영상화 시스템인 전영역 펄스-에코 초음파 전파영상화(full-field pulse-echo ultrasonic propagation imaging, FF PE UPI) 시스템을 소개한다. FF PE UPI 시스템은 2축 선형 이동 스테이지와 가진 및 센싱 레이저에 의해 스캔영역 전역의 펄스-에코 모드의 레이저 초음파를 생성 및 센싱한다. 검사영역에서 수집된 신호들은 실시간으로 전영역 초음파 전파영상화(full-field pulse-echo ultrasonic wave propagation imaging, FF PE UWPI) 기법을 기반으로 처리되고 그 결과로써 스캔영역에서 하나의 전영역 초음파의 전파과정 및 구조 내 결함을 가시화 및 평가한다.

본 시스템을 사용한 in-situ 비파괴평가 기술을 기반으로 실구조를 검사하고 구조에 포함된 결함에 대한 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 실제로 운용 중인 CN-235 항공기의 페인트 도색된 샌드위치 조종면 구조를 검사하고 획득한 결과를 기반으로 기존의 비파괴 검사 방법인 물분사 C-스캔 및 휴대용 C-스캔의 결과와 비교하여 본 시스템을 비파괴 평가의 도구로써 검증하였다.

2. 전영역 펄스-에코 초음파 전파영상화 시스템

2.1 메커니즘

FF PE UPI 시스템은 레이저 가진과 센싱을 기반으로 커플런트를 사용하지 않기 때문에 기존 UT 시스템과 다른 새로운 비파괴 검사 장치이다. Fig. 1(a)와 같이, FF PE UPI 시스템은 일치된 가진 및 센싱 레이저 빔을 통해 구조의 한 쪽 면에서 2축 선형 이동 스테이지 기반으로 래스터 주사 패턴으로 구조를 검사한다. Fig. 1(b)와 같이, Q-스위칭 레이저를 사용한 가진 레이저는 구조의 표면에 가진 레이저를 조사하고 레이저가 조사된 표면에서는 열탄성(thermoelastic) 메커니즘에 의해 다양한 모드의 초음파가 생성이 된다[5]. 센싱 레이저는 가진 레이저가 조사된 동일한 위치에 레이저를 조사하여 가진 레이저에 의해 생성되는 레이저 유도 초음파 중에서 두께 방향의 펄스-에코 모드 레이저 초음파

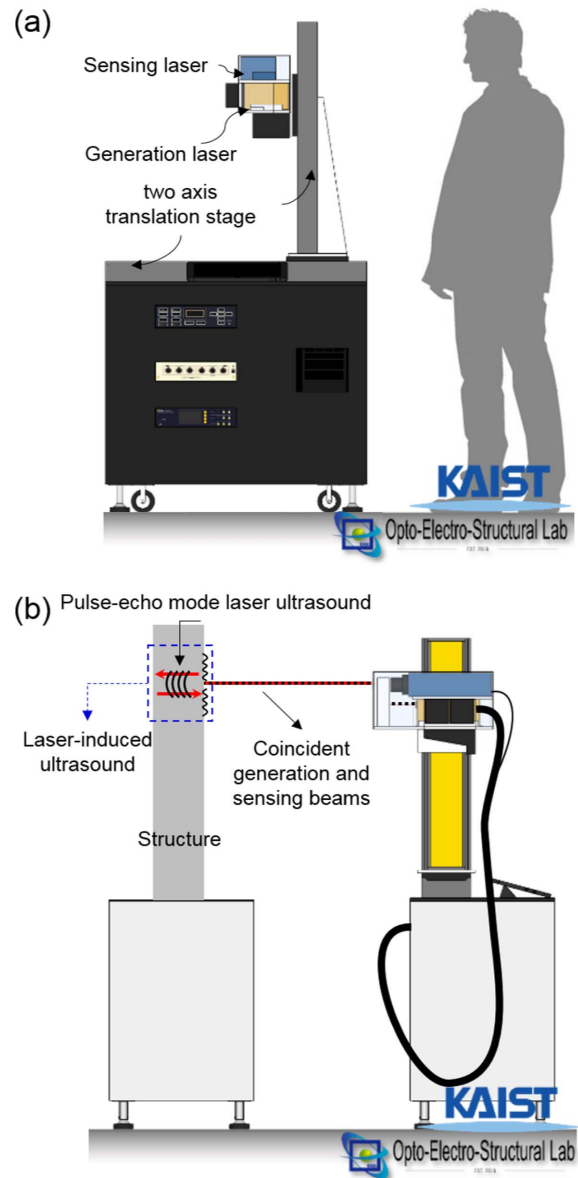


Fig. 1. Full-field pulse-echo laser ultrasonic propagation imaging system: (a) configuration and (b) mechanism

를 수집한다. 본 센싱 원리는 스캔영역 전역에서 반복되며 FF PE UWPI 기법을 통해 스캔영역만큼 큰 하나의 전영역 초음파를 가시화할 수 있다[6]. 소개된 시스템은 행가에 실제 응용장비로써 소형 장비로 재구성되고 있는 중이다.

2.2 전영역 펄스-에코 초음파 전파영상화 기법

FF PE UPI 시스템을 사용한 검사를 완료한 후에 스캔영역 전역에서의 두께 방향의 하나의 전영역 펄스-에코 모드 레이저 초음파 전파과정을 FF PE UWPI 기법을 기반으로 영상을 통해 가시화된다. Fig. 2와 같이, 스캔영역 전역의 모든 스캔 포인트에서 모든 펄스-에코 모드 레이저 초음파 신호들은 FF PE UPI 시스템을 기반으로 실시간으로 수집된

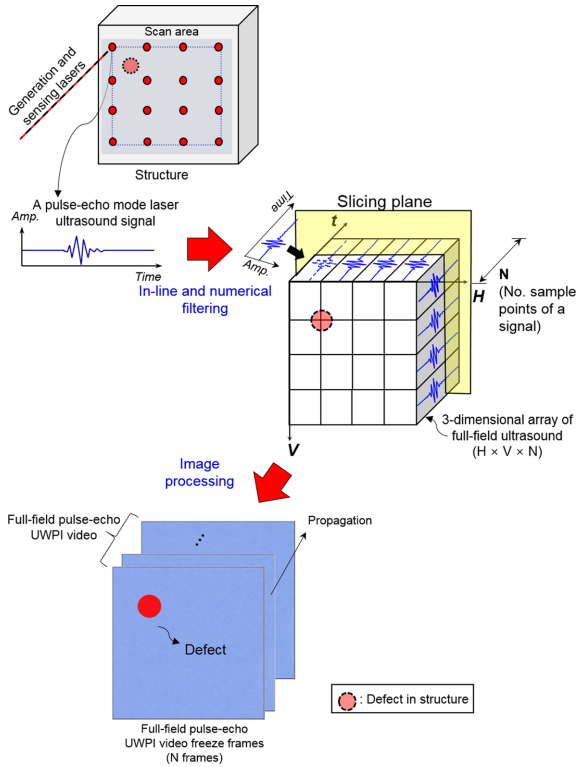


Fig. 2. Full-field pulse-echo ultrasonic wave propagation imaging algorithm

다. 수집되는 신호는 각각 실시간으로 인라인 및 수치적 필터링을 통해 원하는 주파수 대역의 초음파 신호를 수집한다. 수집된 신호들은 수집됨과 동시에 즉시 스캔영역과 같은 크기의 하나의 전영역 초음파로써 3차원 배열에 재배열된다[7]. 본 기법은 스캔 과정과 동시에 처리되기 때문에 스캔 과정이 종료된 후에 즉시 결과가 생성된다. 그 결과로, FF PE UWPI 영상은 실시간으로 3차원 배열의 데이터를 사용하여 이미지 처리를 거친 후에 시간 축을 따라 하나의 전영역 초음파의 전파 과정을 가시화한다. FF PE UWPI 영상은 특정 시간 포인트에서의 두께 방향의 전영역 초음파의 전파위치로 구성된 프레임으로 구성되어 있다. 프레임의 개수는 펄스-에코 모드 레이저 초음파 신호의 샘플 포인트 개수이며 결함을 평가하기 위해 전체 프레임 내에서 슬라이싱 면을 통해 결함이 위치한 FF PE UWPI 스냅샷을 생성한다.

3. CN-235의 도색된 샌드위치 조종면 비파괴 평가

FF PE UPI를 비파괴 평가의 도구로써 검증 및 평가하기 위해서 Fig. 3과 같이 현재 운용 중인 공군 CN-235의 도색된 샌드위치 조종면을 검사대상으로 사용하였다. 샌드위치 조종면 구조는 알루미늄 스킨과 Nomex 허니콤 코어로 구

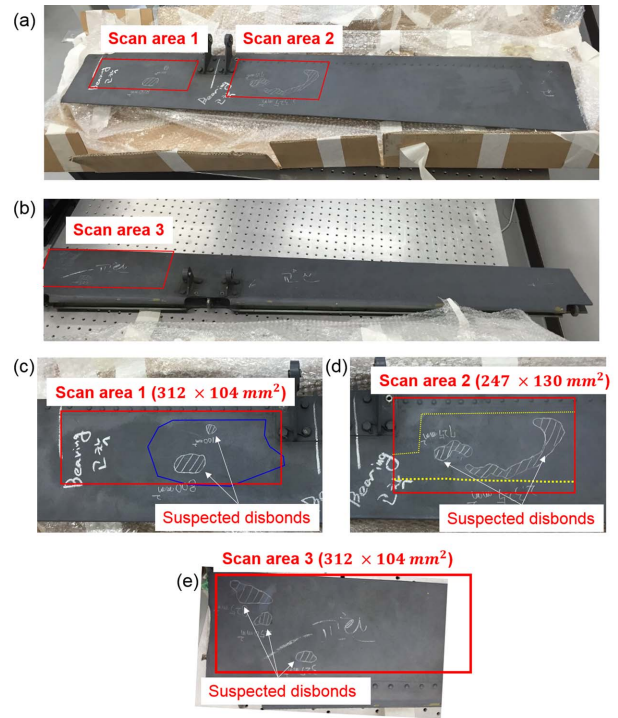


Fig. 3. Painted sandwich of control surface in CN-235 : (a) control surface 1 including scan area 1 and 2, (b) control surface 2 including scan area 3, (c) scan area 1, (d) scan area 2 and (e) scan area 3

성된 알루미늄 허니콤 샌드위치 구조이며 표면에 페인트 도색이 되어있다. Fig. 3(b) 및 3(c)와 같이, 샌드위치 조종면 표면에는 탭핑 검사 기반으로 판단한 접착 분리가 의심되는 영역이 표시되어 있으며 접착 분리 의심 영역을 포함하는 $312 \times 104 \text{ mm}^2$ 의 스캔영역 1과 $247 \times 130 \text{ mm}^2$ 의 스캔영역 2를 FF PE UPI 시스템을 기반으로 검사하였다. 500 Hz의 레이저 펄스 반복 속도(Pulse repetition rate, PRR), 4.53 mJ의 펄스 에너지 및 50-200 kHz 인라인 밴드 패스 필터 및 수치 필터 범위에서 신호를 수집 후 결과를 획득하였다. 또한, 스캔영역 1과 스캔영역 2와 유사한 영역을 휴대용, 물분사 C-스캐너로 검사한 결과를 FF PE UWPI 영상과 비교하여 FF PE UPI 시스템을 검증하였다.

Fig. 3(c)의 스캔영역 1의 검사의 결과로써, Fig. 4(a)의 FF PE UWPI 스냅샷을 포함하는 흑백 스케일의 FF PE UWPI 영상을 획득하였다. 또한 Fig. 4(b)와 (c)와 같이, 본 시스템의 성능 검증을 위하여 휴대용 C-스캔 결과와 물분사 C-스캔 결과를 획득하였다. Fig. 4(c)와 같이, 휴대용 C-스캔 결과는 수동검사의 원인으로 정밀도가 많이 떨어져 상대적으로 FF PE UWPI 결과 및 물분사 C-스캔 결과와 비교하여 접착분리의 가시성이 현저히 떨어짐을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 4(a)와 (b)와 같이, $20.077 \mu\text{s}$ 에서 FF PE UWPI 스냅샷과 물분사 C-스캔 결과는 탭핑 검사 결과 기반의 접착 분리 의심 영역 및 접착 분리를 수리한 레진 영역을 포함한

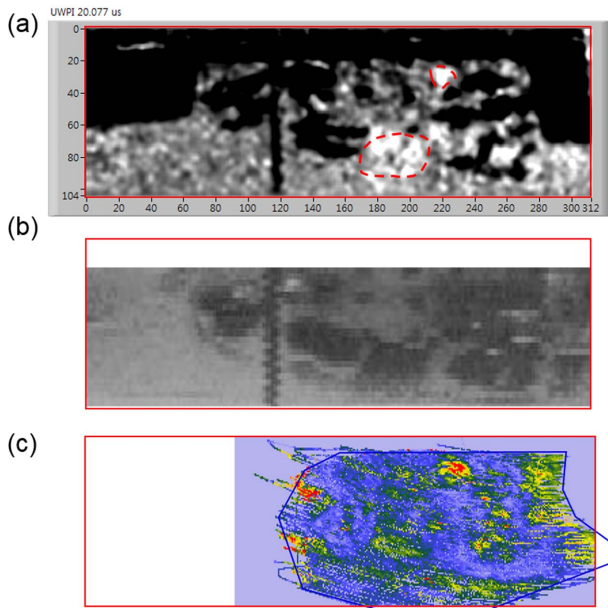


Fig. 4. Inspection results of scan area 1: (a) a full-field pulse-echo UWPI video freeze frame at 20.077 μ s, (b) a waterjet C-scan image and (c) a portable C-scan image

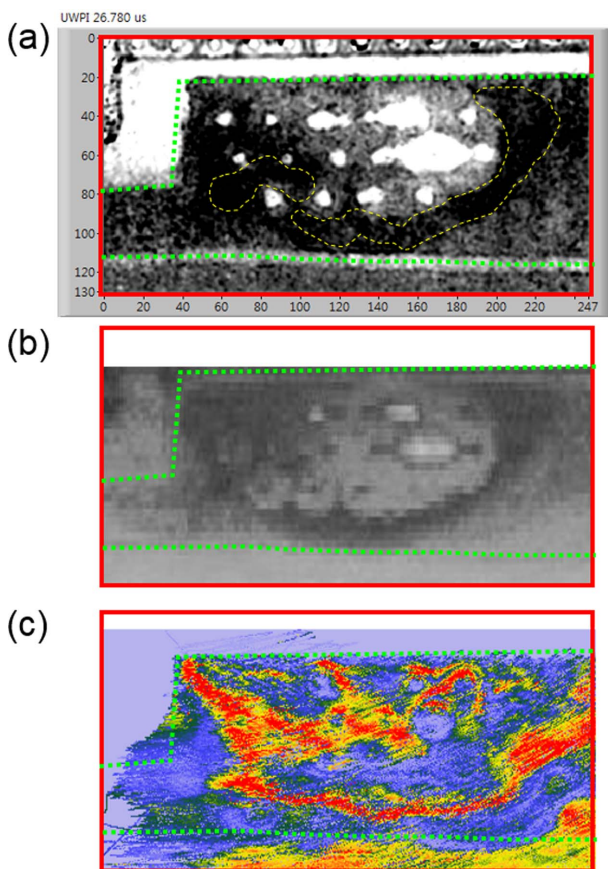


Fig. 5. Inspection results of scan area 2: (a) a full-field pulse-echo UWPI video freeze frame at 26.780 μ s, (b) a waterjet C-scan image and (c) a portable C-scan image

전체적인 결과가 유사하다. 하지만, Fig. 4(a)의 FF PE UWPI 결과 내에서 접착 분리 영역이 점선 영역 부분의 탭핑 검사 기반 접착 분리 의심 영역과 일치함을 확인할 수 있으며 접착분리를 가시화하기 위한 가시성은 FF PE UWPI 스냅샷이 더 나은 민감도를 제공함을 확인할 수 있다.

FF PE UPI 시스템을 사용한 Fig. 3(d)의 스캔영역 2의 검사의 결과로써, Fig. 5(a)과 같이 흑백 스케일의 FF PE UWPI 영상을 획득하였으며, 또한, Fig. 5(b)와 (c)와 같이, 휴대용 C-스캔 결과와 물분사 C-스캔 결과를 획득하여 FF PE UWPI 결과와 비교하였다. Fig. 5(c)와 같이, 휴대용 C-스캔 결과는 검사 영역 내 적색영역으로써 전반적으로 접착분리가 분포하고 탭핑 검사 결과 영역과 유사한 부분이 있지만 장치의 특성상 결과의 정확도가 떨어지고 또한 FF PE UWPI 스냅샷과 물분사 C-스캔 검사 결과와 상이한 부분이 많다. Fig. 5(a)과 같이, 26.780 μ s에서의 FF PE UWPI 스냅샷은 Fig. 5(b)의 물분사 C-스캔 결과와 스캔영역 전반에서의 결과가 유사하며 탭핑 검사 기반의 접착분리 의심영역을 접착분리로써 가시화하며 이는 물분사 C-스캔의 결과에서도 동일하다. 가시성에 대한 선명도는 부분에서는 수리 레진영역 및 구조 내부 가시화 측면에서 FF PE UWPI 스냅샷이 물분사 C-스캔 결과보다 뚜렷함을 확인할 수 있다.

FF PE UPI 시스템을 사용한 Fig. 3(e)의 스캔영역 3의 검사의 결과로써, Fig. 6(a)-(c)와 같이 흑백 스케일의 FF PE UWPI 영상, 물분사 C-스캔 결과와 휴대용을 획득하였다. Fig.

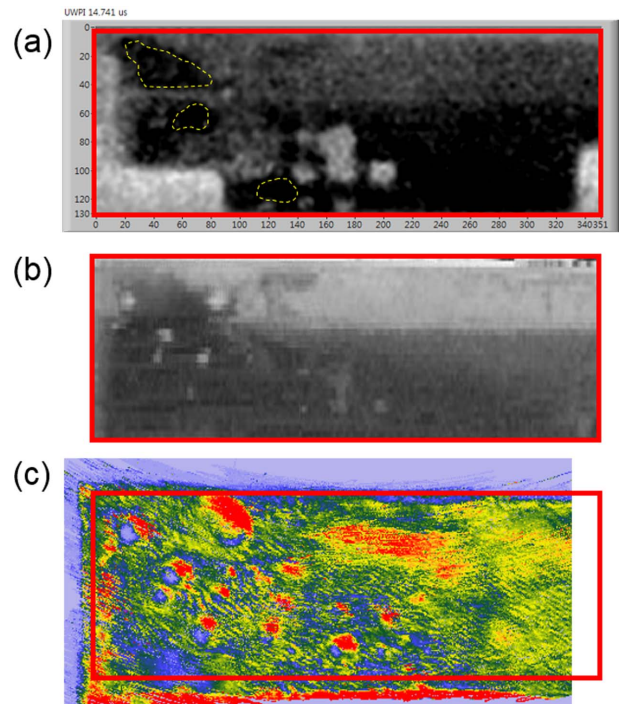


Fig. 6. Inspection results of scan area 3: (a) a full-field pulse-echo UWPI video freeze frame at 14.741 μ s, (b) a waterjet C-scan image and (c) a portable C-scan image

6(c)의 휴대용 C-스캔 결과는 스캔 영역 내 전반적으로 수리 레진 영역으로 추정되는 적색 영역이 다수 분포되는 것이 특징이지만 Fig. 6(a)-(b)에서 스캔 영역이 상하부로 나뉘는 현상은 나타나지 않으며 또한 탭핑 검사 결과 기반의 접착분리 의심영역에서 접착분리가 분포하지 않는다. Fig. 6(a)-(b)의 결과는 스캔영역 내 구조 내부 가시화가 유사하게 나타난다. 또한 탭핑 검사 결과 기반의 접착분리 의심영역에서도 접착분리가 나타나지만 더 넓은 영역에서 접착분리가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

모든 검사 결과 및 비교 결과로써, FF PE UPI 시스템은 실 구조인 페인트 도색된 CN-235 샌드위치 조종면 검사에 대해서 결함을 가시화하기 위한 신뢰할 수 있는 검사 장치로 충분한 민감도를 제공함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 비파괴 검사 기법들과 다른 새로운 비파괴 검사 장치인 FF PE UPI 시스템을 소개하였으며 본 시스템을 사용하여 CN-235의 도색된 샌드위치 조종면 검사 및 결함 가시화를 통한 in-situ 비파괴평가를 수행하였다. FF PE UPI 시스템은 가진 및 센싱 레이저 빔이 일치되어 2 축 선형 이동 스테이지를 통해 레스터 주사 패턴 검사 방식의 완전 비접촉 비파괴 검사 장치로 두께 방향의 펄스-에코 모드 레이저 초음파를 가진 및 센싱한다. 검사 완료 직후에는 실시간으로 FF PE UWPI 기법 기반으로 스캔영역 전역에서 결함을 가시화하는 FF PE UWPI 영상을 생성한다. 소개된 FF PE UPI 시스템을 사용하여 도색된 샌드위치 조종면 구조를 검사하였으며 검사결과로써, FF PE UWPI 영상을 획득하여 구조 내 접착분리의 결함을 가시화하였다. 또한 샌드위치 조종면 구조의 검사 결과로 획득한 FF PE UWPI 영상을 물분사 및 휴대용 C-스캔 결과와 비교하였으며 그 결과 결함 가시화를 위한 신뢰할 수 있는 in-situ 비파괴평가 장치로 충분한 민감도를 제공함을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 FF PE UPI 시스템은 기존 초음파 탐상 시험 기법에 비교하여 특히 실제로 운용 중인 샌드위치 조종면 구조의 검사를 통해 충분한 성능 및 민감도를 제공하기 위해 in-situ 비파괴평가를 통해 운용 중인 실구조를 실시간으로 검사 및 손상 평가를 가능하게 할 수 있다. 특히

본 시스템은 현장에서 실시간 유지 및 보수가 높은 항공기 산업 분야에 적용이 될 수 있으며 제조 공정상 신뢰성을 위한 결함 검출 프로세스에도 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 수행된 과학기술국제화사업(2011-0030065)과 우주기술개발사업(NRF-2016M1A3A1A02020766) 및 민군겸용기술개발사업 일환으로 복합재 Lattice(격자) 구조체 기술개발(15-CM-MA-12)의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

1. Song, S.W., Lee, C.H., Byun, J.H., Um, M.K., and Hwang, B.S., "Impact Performance of 3D Orthogonal Composites by Automated Tape Placement Process," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 3, 2005, pp. 38-46.
2. Yashiro, S., Takatsubo, J., and Toyama, N., "An NDT Technique for Composite Structures Using Visualized Lamb-wave Propagation," *Journal of the Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 15, 2007, pp. 3202-3208.
3. Dhital, D., Lee, J.R., Park, C.Y., and Flynn, E.B., "Laser Excitation and Fully non Contact Sensing Ultrasonic Propagation Imaging System for Damage Evaluation", *Proceeding of SPIE 8343, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2012*, San Diego, California, United States, Mar. 2012, 83430D.
4. Sohn, Y., and Krishnaswamy, S., "Interaction of a Scanning Laser-generated Ultrasonic Line Source with a Surface- Breaking Flaw," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, No. 1, 2004, pp. 172-181.
5. Scruby, C.B., and Drain, L.E., *Laser Ultrasonics - Techniques and Applications*, Adam Hilger, Bristol, UK, 1990.
6. Hong, S.C., Lee, J.R., and Park, J.W., "Korea Air Force Standard NDE Coupon Test of Full-Field Pulse-Echo Laser Ultrasonic Propagation Imaging System," *Proceeding of IEEE SENSORS 2015*, Nov. 2015, pp. 25-28.
7. Chia, C.C., Lee, J.R., and Shin, H.J., "Hot Target Inspection Using a Welded Fibre Acoustic Wave Piezoelectric Sensor and a Laser-ultrasonic Mirror Scanner," *Journal of Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 12, 2009, 127003.