

## 초음파전파영상화 시스템을 이용한 필라멘트 와인딩 복합재 수소 연료 탱크의 손상 가시화

이정률\*<sup>†</sup> · 정효미\*\* · 트루옹 탄 충\* · 신혜진\*\* · 박재윤\*

### Damage Visualization of Filament Wound Composite Hydrogen Fuel Tank Using Ultrasonic Propagation Imager

Jung-Ryul Lee\*<sup>†</sup>, Hyomi Jeong\*\*, Truong Thanh Chung\*, Hejin Shin\*\*, Jaeyoon Park\*

**ABSTRACT:** This paper proposes laser ultrasonic technique for the impact damage inspection of hydrogen fuel tank and proves that the impact damage can be visualized using an ultrasonic wave propagation imager with an easy detachable sensor head as an impact damage inspection tool for hydrogen fuel tanks. Also the performances of the proposed ultrasonic propagation imager support it can be implemented in real-world technology when the hydrogen car becomes popular.

**초 록:** 알루미늄 혹은 플라스틱 라이너에 탄소섬유를 감아서 성형하는 복합재 압력용기가 수소 자동차의 수소 연료 탱크로 사용이 확대됨에 따라 사용 시 안전에 대한 규정 제정이 필요하며 그 규정을 뒷받침 할 수 있는 검사 장비와 기술 역시 개발되어야 한다. 자동차에 장착하기 전에 제작결함 평가를 통해 수소 자동차에 장착되어야 하고, 취급 중 발생하는 이벤트에 대해서도 고속 자동화 검사를 통해 자동차 정비소의 정비인력, 즉 비파괴평가 전문가가 별도의 교육을 받지 않았어도 즉시 충격과 같은 손상을 평가할 수 있어야 한다. 위 요소는 수소자동차의 대중화를 위해 매우 중요한 기술적 허들이다. 본 연구에서는 수소연료탱크의 충격손상을 검사하는 방법으로 레이저 초음파 기술을 제안하며 충격손상을 탈·부착형 센서헤드를 가진 초음파전파영상화 시스템으로 가시화할 수 있음을 증명한다. 또한 제안한 초음파전파영상화 시스템의 성능은 수소자동차가 대중화되더라도 현장기술로 채택될 수 있음을 뒷받침한다.

**Key Words:** 수소연료탱크(Hydrogen fuel tank), 손상가시화(Damage visualization), 충격손상(Impact damage), 초음파 전파영상화 시스템(Ultrasonic Wave Propagation Imager)

## 1. 서 론

수소는 기존 가솔린에 비해 3배에 가까운 에너지를 만들어 낼 수 있다. 또한 무한정 얻을 수 있는 친환경 에너지라는 점에서 기존의 화석 연료를 대체할 수 있는 에너지원으로

로 각광받고 있다[1]. 하지만 자동차 연료로 사용하기 위해서는 기체인 수소를 충분히 저장시킬 수 있는 방법이 필요하기 때문에 저장 방식에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

수소 연료를 저장하는 방식에는 액화 방식, 수소 저장 합금 방식, 고압으로 압축하여 저장하는 방식이 있다. 액화 방

Received 29 June 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 28 August 2015

\*Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea

\*<sup>†</sup>Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea, Corresponding author (E-mail: [leejrr@kaist.ac.kr](mailto:leejrr@kaist.ac.kr))

\*\*Department of Aerospace Engineering and the Engineering Institute-Korea, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

식의 경우, 수소를 액화시키기 위해 많은 에너지가 필요하다는 단점이 있다. 수소 저장 합금 방식의 경우 수소가 결합할 수 있는 합금을 제작하여 수소를 저장하는 방식이다. 이 경우, 합금이 고가이며 저장 합금은 매우 무겁다는 단점이 있다. 반면 고압으로 용기에 저장하는 방식은 가볍고 강도가 높은 탄소 복합재료로 만든 용기에 약 700 bar의 압력으로 압축하여 저장하는 방식으로, 앞에 제시된 방식들의 단점을 보완하고 있다[2]. 용기를 만드는 방식에 따라 그 종류를 나눌 수 있으며 그 중 알루미늄/플라스틱 라이너에 탄소 복합 섬유를 감아 만든 Type 3의 용기가 많이 사용된다[3,4]. 최근 국내에서도 한 자동차관련 대기업에서 앞의 Type 3의 용기를 장착해 수소 연료 탱크로 사용한 수소 자동차를 발표하기도 했다.

수소 연료 탱크의 구조 건전성 평가는 수소 자동차의 상용화를 위해 반드시 필요한 과정이다. 수소 연료 탱크의 건전성 평가는 모사 시험 과정에서 용기의 내부와 외부에 설치한 다양한 센서를 이용한 손상 모니터링 및 X-ray 촬영 등을 통해 이루어진다. 그러나 용기 내부로 삽입되는 센서의 경우 크기에 제한이 있고 외부 관찰 센서의 경우 초음파를 기반으로 손상 신호를 획득하나 정확한 손상 위치와 크기를 탐지하기 위해서 많은 수의 센서가 필요하다는 단점이 있다. 또한 X-ray 촬영은 사전 준비에 따른 시간 지연과 방사성 물질 취급 문제, 전문 검사 인력 필요 등의 한계를 가지고 있다. 수소 자동차의 대중화를 위해서는 자동차정비소에서 취급이 가능한 수준의 높은 요구 조건이 대두될 가능성도 높다.

초음파 전파 영상화 기법[5-8]은 본 논문에서 제시하는 쉬운 탈·부착이 가능한 센서헤드를 사용해 결함 및 손상의 위치와 크기를 빠르고 정확하게 탐지하는 장점을 가지며 탄소 복합재 항공기 날개의 충격 손상 및 층간분리[9-11], 유리섬유 복합재 풍력 터빈 블레이드의 디본딩 결함[12,13] 등의 검출에 대한 선행연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 수소 자동차에 사용되는 수소 연료 탱크에 가장 흔하게 발생할 수 있는 충격손상을 모사하여 상용 C 스캐너와 초음파 전파 영상화 시스템으로 손상가시화를 수행해 그 결과를 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 알루미늄 - 탄소 복합재 수소 연료 탱크

수소 연료 탱크의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 가장 안쪽은 알루미늄 라이너(Aluminum Liner)이며 그 위로 탄소 섬유 기반 필라멘트와인딩 공법에 의해 만들어졌다.

실험에 사용할 수소 연료 탱크에는 Fig. 2와 같이 표면에 충격을 가해 손상을 모사하였다. 충격 손상은 Fig. 3과 같이 2kg의 추를 탱크 표면 1860 mm 높이에서 가이드를 통해 망치 위로 자유 낙하하여 탱크 표면에 약 36 J의 에너지를 가해 충격 손상을 모사하였다.

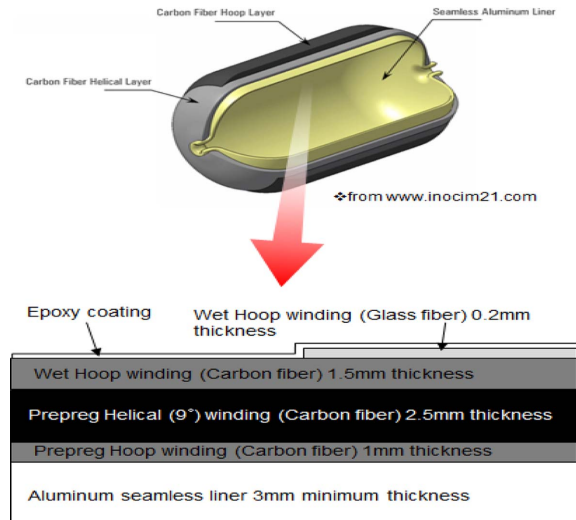


Fig. 1. Structure of Hydrogen fuel tank

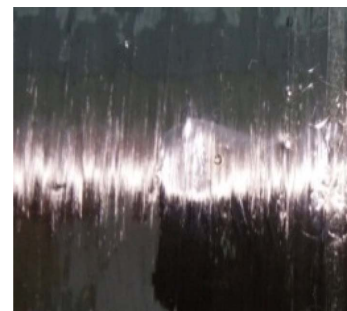


Fig. 2. 36-J impact damage on tank surface

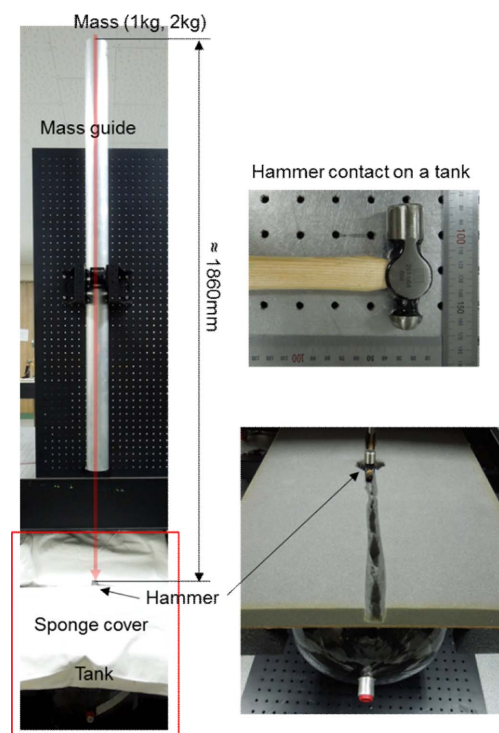


Fig. 3. Process of generating 36-J impact damage

## 2.2 초음파 전파 영상화 시스템을 사용한 구조 건전성 평가

초음파 전파 영상화 시스템은 최대 20 kHz의 펄스반복속도로 수소 연료 탱크의 표면에 초음파 생성 스캐닝을 수행하고 연료 탱크 표면에 부착된 초음파 센서를 통해 초음파 신호를 수집하여 영상으로 처리한다.

초음파 전파 영상화 시스템의 구조는 Fig. 4와 같다. 레이저 빔을 검사 영역에 일정 간격으로 조사하며, 각 레이저 입사 지점에서 발생한 초음파 신호를 수집한다. 수집한 초음파 신호를 검사영역에 대한 영상 및 이미지로 시각화하여 손상의 위치 및 크기를 검출할 수 있다.

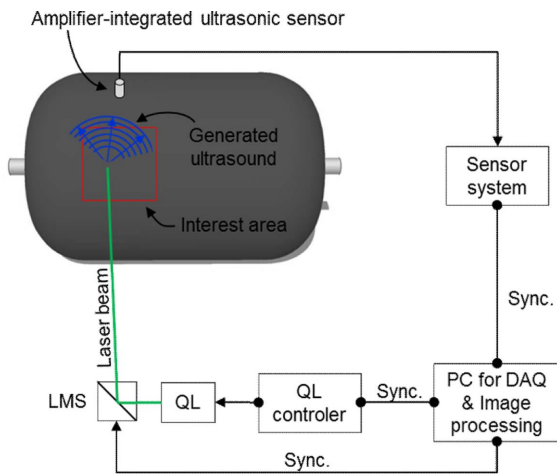


Fig. 4. Schematic diagram of Ultrasonic wave Propagation Imaging System

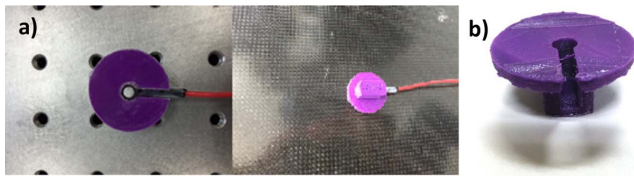


Fig. 5. Detachable sensor heads, a) for flat and, b) for curved surfaces

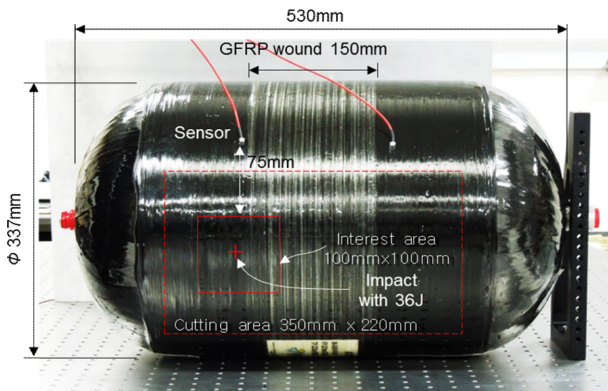


Fig. 6. Aluminum liner/filament wound composite fuel tank as a specimen

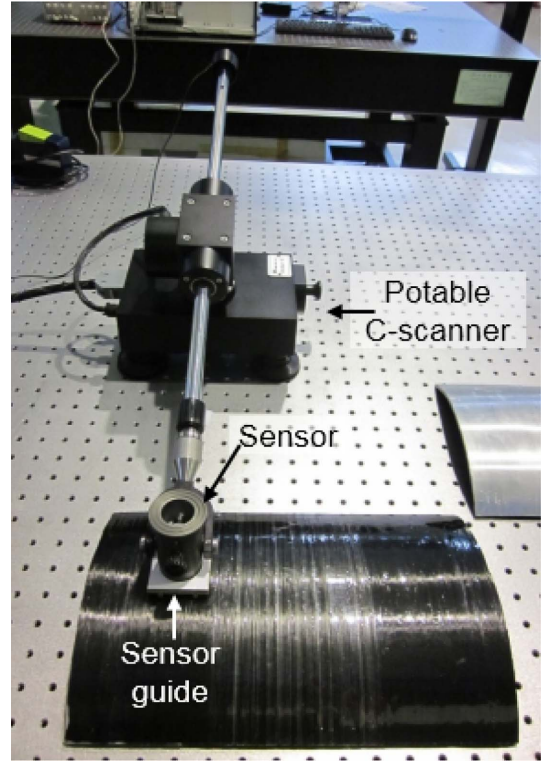


Fig. 7. Detection with commercial C-scan system

한편, 초음파 전파 영상화 시스템에 사용할 센서는 Fig. 5에 보듯이 커플런트를 이용해 탈·부착이 편리한 센서 헤드를 제작하여 사용하였다.

Fig. 6는 시편으로 사용한 수소 연료 탱크를 보여주고 있으며 충격 손상을 생성하여 레이저 스캐닝을 수행하였다. 충격 손상은 시편의 표면에 36 J의 에너지로 충격을 가하여 생성하였다. Fig. 6에 나타난 스캐닝 영역에 대해 레이저 스캐닝을 진행하였고 충격 손상 가시화 결과를 검증하기 위해 Fig. 6에 점선으로 표시된 절단 선을 따라 잘라내어 후면 라이너의 손상을 육안으로 확인할 수 있도록 하였다.

## 2.3 상용 C 스캐너를 사용한 구조 건전성 평가

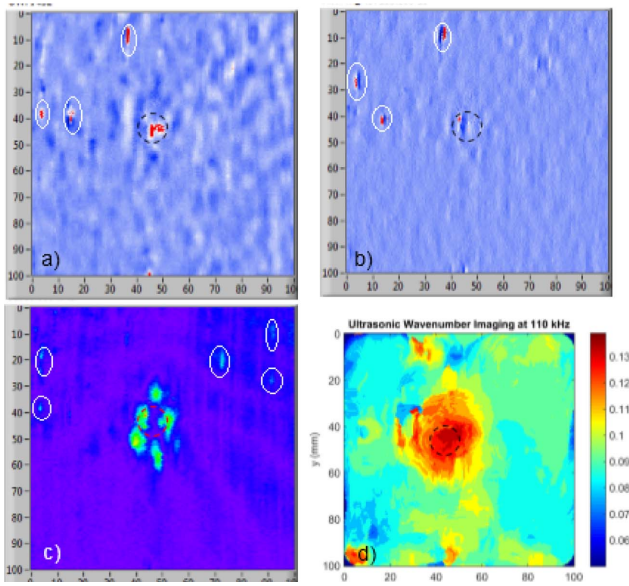
Fig. 6에서 점선으로 표시된 절단 선을 따라 잘라낸 연료 탱크의 표면을 상용 C 스캐너를 사용하여 충격 손상을 검출하기 위해 Fig. 7와 같이 검사를 진행하였다. 중심주파수 5 MHz 프로브와 곡률검사를 위해 플라스틱 센서가이드를 제작하여 곡률검사를 시도하였다.

## 3. 결과 및 고찰

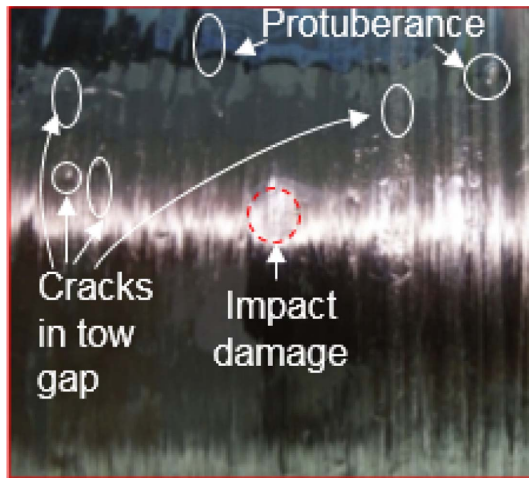
### 3.1 초음파 전파 영상화 시스템을 사용한 충격 손상 검출 결과

초음파 전파 영상화 시스템의 다중 손상 가시화 알고리즘으로 충격 손상을 포함하는 영역에 대한 손상 가시화한





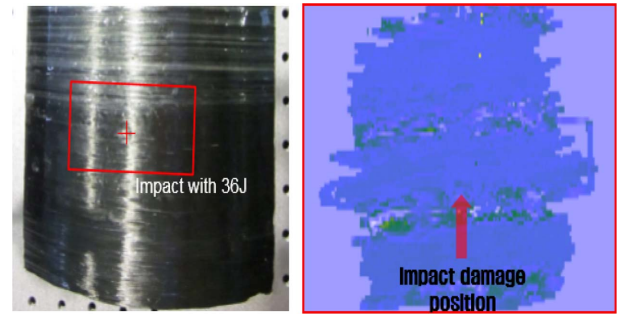
**Fig. 8.** Impact damage detection, a) UWPI result at 172.8 us, b) AWPI result at 159.6 us, c) USI result at 60 kHz, d) UWI at 110 kHz



**Fig. 9.** Surface of the interest area

결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8a), b), c), d)는 각각 초음파 전파 영상화(Ultrasonic propagation imaging, UWPI), 주파수 분할 초음파 전파 영상화(Ultrasonic spectral imaging, USI), 기형파 전파 영상화(Anomalous wave propagation imaging, AWPI), 초음파 파수 영상화(Ultrasonic wavenumber imaging, UWI) 알고리즘을 사용한 결과로, 스캐닝 영역에서 신호 강도가 높게 나타나는 부분을 추적하여 스캐닝 영역 가운데 위치하는 충격 손상을 확인하였고, 그 외에 스캐닝 표면의 돌기와 필라멘트 와인딩 틈 사이에 발생한 미세 균열들이 각 위치에서 가시화됨을 확인하였다.

충격 손상 가시화 결과 검증을 위해 연료 탱크의 일부를 절단하여 육안 검사를 수행해 그 결과를 Fig. 9에 나타냈으



**Fig. 10.** Commercial C-scanning result

며 알루미늄 라이너의 충격 위치에서 외부 충격에 의한 변형을 확인하였다.

### 3.2 상용 C 스캐너를 사용한 충격 손상 검출 결과

상용 C 스캐너를 사용해 충격 손상 검출 실험을 진행하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 충격 손상이 상용 C 스캐너로 검출되지 않았다. 이는 상용 C 스캔 시스템은 평면에 최적화되어 있기 때문에 곡면을 가지는 연료 탱크의 표면에서 발생한 충격 손상을 검출하지 못하기 때문으로 판단되며 프로브와 센서가이드 재설계가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 초음파 전파 영상화 시스템과 상용 C 스캐닝 시스템을 사용하여 충격손상을 모사한 알루미늄-탄소 복합재 수소 연료 탱크에 대해 손상가시화를 수행하였다. 상용 C 스캐닝 시스템은 곡면에 대해 충격을 검출하지 못하는 반면, 곡률검사에 제약이 없는 초음파 전파 영상화 시스템의 경우 다중 손상 가시화 플랫폼을 통해 충격손상의 위치와 크기를 정량적으로 검출하였으며, 초음파 전파 영상화 기법으로 알루미늄-탄소 복합재 수소 연료 탱크의 손상가시화가 가능함을 입증하였다. 이동 가능한 상용 C-scan 장비의 경우 자동차에 탑재된 복합재 연료 탱크를 검사하기 위해 각 차량마다 센서의 접근성을 최적화시킨 장비의 형태가 요구된다. 이에 반해 초음파 전파 영상화 시스템의 경우 탱크 표면에 비접촉 레이저 스캐닝으로 검사를 수행하기 때문에 검사장비의 접근성에 제약이 없어, 각 차량마다 장비의 교체 없이 범용적으로 사용이 가능하다. 수소자동차의 대중화를 위해 수소 저장 탱크의 손상검출 시스템과 기술은 매우 중요하기 때문에 본 논문에서 제시한 결과는 큰 의미를 갖는다고 판단된다.

## 후 기

This research was supported by Leading Foreign Research Institute Recruitment Program (2011-0030065)

and Space Core Technology Development Program (2013-042548) through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning.

## REFERENCES

1. Kim, M.S., *Age of Hydrogen Technology Innovation*, Salim Pub. Co., Republic of Korea, 2005
2. Han, W.H., Choi, J.S., and Choi, J.H., "Trends of Hydrogen Energy Technology Development and Application to Ship," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 16, No. 3, 2010, pp. 313-320.
3. Kim, C.K. and Kim, D.H., "Strength Safety Evaluation of Composite Pressure Container for Hydrogen Fuel Tanks," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 30-34.
4. Lee, K.M., Park, J.S., Lee, H.G., and Kim, Y.S., "A Study on Analysis Method to Evaluate Influence of Damage on Composite Layer in Type3 Composite Cylinder," *Composites Research*, Vol. 23, No. 6, 2010, pp. 7-13.
5. Lee, J.R., Chia, C.C., Park, C.Y., and Jeong, H.M., "Laser Ultrasonic Anomalous Wave Propagation Imaging Method with Adjacent Wave Subtraction: Algorithm," *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, No. 5, 2012, pp. 1507-1515.
6. Lee, J.R., Chia, C.C., Shin, H.J., Park, C.Y., and Yoon, D.J., "Laser Ultrasonic Propagation Imaging Method in the Frequency Domain based on Wavelet Transformation," *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 49, No. 1, 2010, pp. 167-175.
7. Lee, J.R., Chong, S.Y., Jeong, H.M., and Kong, C.W., "A Time-of-flight Mapping Method for Laser Ultrasound Guided in a Pipe and its Application to Wall-thinning Visualization," *NDT&E International*, Vol. 44, No. 1, 2011, pp. 680-691.
8. Lee, J.R., Cho, C.M., Park, C.Y., Truong, T.C., Shin, H.J., Jeong, H.M., and Flynn, E.B., "Spar Disbond Visualization in In-service Composite UAV with Ultrasonic Propagation Imager," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 45, 2015, pp. 180-185.
9. Chia, C.C., Lee, J.R., Park, C.Y., and Jeong, H.M., "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.
10. Lee, J.R., Chia, C.C., Park, C.Y., and Jeong, H.M., "Laser Ultrasonic Anomalous Wave Propagation Imaging Method with Adjacent Wave Subtraction: Algorithm," *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, 2012, pp. 1507-1515.
11. Chia, C.C., Jeong, H.M., Lee, J.R., and Park, G., "Composite Aircraft Debonding Visualization by Laser Ultrasonic Scanning Excitation and Integrated Piezoelectric Sensing," *Structural Control & Health Monitoring*, Vol. 19, 2012, pp. 605-620.
12. Lee, J.R., Shin, H.J., Chia C.C., Dhital, D., Yoon, D.J., and Huh, Y.H., "Long Distance Laser Ultrasonic Propagation Imaging System for Damage Visualization," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, 2011, pp. 1361-1371.
13. Jeong, H.M. and Lee, J.R., "Investigation of Mobile Ultrasonic Propagation Imager as a Tool for Composite Wind Blade Quality Control," *Composite Structures*, Vol. 133, 2015, pp. 39-45.