

레이저 초음파 기반 반사식 회전 검사 기법을 이용한 오토클레이브 가공 L 형 복합재 구조물의 모서리 검사

이영준* · 이정률*[†] · 홍성진**

Corner Inspection of Autoclave-cured L-shaped Composite Structure using Pulse-echo Rotation Scanning Scheme based on Laser Ultrasonic

Young-Jun Lee*, Jung-Ryul Lee*[†], Sung-Jin Hong**

ABSTRACT: In this paper, laser ultrasonic rotation scanning method was proposed to inspect and visualize defects in corner section of curved composite structure. L-shaped composite specimen with defects in its corner section were inspected using laser ultrasonic rotation scanning method. L-shaped specimens had artificial defects at three different depths to simulate delamination damage. All artificial defects were detected clearly in different time-of-flight according to their depths. Inspection result showed that the proposed method is suitable to inspect round corner section of curved composite structure without any special tools.

초 록: 본 연구에서는 곡면 복합재 구조물의 모서리에 위치한 결함을 검사하고 가시화하기 위해 제안된 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 소개한다. 모서리 부위에 결함이 위치한 L 형 복합재 구조물을 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 이용하여 검사하였다. L 형 시편은 층간분리 손상을 모사하기 위해 각기 다른 세 가지 깊이 위치에 인공 결함을 포함하고 있다. 모든 인공 결함이 각각의 위치한 깊이에 따라 다른 시간대에 선명하게 탐지되었다. 검사결과는 제안된 방법이 어떠한 특별한 도구 없이도 곡면 복합재 구조물의 모서리 부위의 검사에 적합하다는 것을 보여준다.

Key Words: 회전식 검사(Rotation Scan), 레이저 초음파(Laser ultrasonic), 곡면 복합재 구조물(Curved composite structure), 초음파 전파 영상화(Ultrasonic propagation imaging), 모서리 검사(Corner inspection)

1. 서 론

복합재료는 무게 대 강도 및 강성비가 매우 높고 피로와 부식에 대한 저항성이 강해 항공분야에서 그 수요가 갈수록 증가하고 있다. 복합재가 항공기에서 차지하는 비율이 증가함에 따라 복합재료로 만들어지는 구조물의 종류 역시 더욱 다양해지고 있다. 초창기에 복합재료는 주로 금속

재료로 가공이 어려운 항공기 외피 또는 무게 경감을 위한 부 구조물(secondary structure)의 제작에 주로 사용되었다. 하지만 최근에는 주요 하중을 지지하는 주 구조물(primary structure)의 제작에 복합재가 적용되는 사례가 증가하고 있다[1]. 주 구조물의 주된 역할은 공력 및 관성 하중에 의해 발생하는 인장, 압축, 굽힘 또는 비틀림 하중을 지지하고, 연결된 부 구조물로 하중을 분산시키는 것이다. 그러므로

Received 26 July 2018, received in revised form 5 September 2018, accepted 14 September 2018

*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: leejrr@kaist.ac.kr)

**Materials & Processes Team, Korea Aerospace Industries, LTD.

복합재 주 구조물은 하중을 지지하는 동시에 다른 구조물과의 연결이 용이하도록 대부분 L 또는 T 자 모양의 형태를 띤다[2,3]. 이러한 형태의 구조물들의 공통점은 모두 직각 또는 임의 각도의 모서리를 가지고 있다는 것이다. 모서리를 가진 형태의 구조물은 단순한 평판 형태보다 가공이 어려우며[4,5], 운영 중에도 응력집중에 의한 결함 발생 가능성이 매우 높다. 그러므로 제작부터 운영 단계의 전반에 걸쳐 신뢰성 있는 검사를 필요로 한다.

모서리 부위 검사에 가장 많이 사용되는 비파괴검사 방법은 위상배열(phased-array) 초음파 탐상 방식이다. 위상배열 초음파 방식을 이용한 모서리 검사 시에는 모서리 부위의 검사만을 위해 특별히 제작된 탐촉자를 필요로 한다[6,7]. 하지만 이러한 특수 제작된 탐촉자는 평판 검사에는 사용할 수 없을 뿐만 아니라, 모서리의 형상이 크게 달라지는 경우에도 사용이 제한된다. 예를 들어 모서리의 곡률이 탐촉자가 허용하는 범위보다 크거나 작을 경우 사용이 불가하며, 만약 모서리가 완전한 직각이 아닐 경우에도 사용이 제한된다.

본 연구에서는 L 형 구조물의 모서리 부위 검사를 위해 고안된 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 소개한다. 레이저 초음파 검사 방식은 비접촉 초음파 검사 방식의 하나로, 검사체와의 이격 거리가 수 센티미터 수준에 불과한 기타 비접촉 초음파 검사 방식과는 달리 수 미터 이상의 먼 거리에서도 검사가 가능한 완전한 비접촉식 검사 방식이다[8]. 이러한 비접촉 원거리 검사의 장점으로 인해 기존의 접촉식 검사 방식으로는 검사가 불가능한 고온 구조물이나 곡면의 검사에 매우 유리하다. 비록 레이저 초음파가 곡면의 검사에 유리하긴 하나, 모서리의 경우 매우 작은 곡률을 가지며 일반적인 곡면과 비교할 때 좁은 영역에서 각도의 변화가 상당히 크므로 일반적인 레이저 초음파 방식으로도 검사가 불가능하다. 이러한 제약을 극복하기 위해 레이저 초음파의 비접촉 원거리의 장점을 이용하면서 모서리의 작은 곡률 및 큰 각도 변화에 적용 가능한 회전식 검사 기법이 고안되었다. 복합재 구조물에 가장 많이 발생하는 층간분리 손상 모사를 위해 다양한 인공결함을 삽입한 L 형 시편을 제안된 검사 기법을 이용해 검사하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이저 초음파에 대한 기본적 원리 및 특징에 대해 간단히 기술한다. 이어서 3장에서는 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법에 대해 설명한다. 다음으로 4장에서는 회전식 검사 기법을 이용한 L 형 시편의 검사결과에 대해 다룬다.

2. 레이저 초음파

레이저 초음파는 Q 스위칭을 통해 생성된 펄스 형태의 레이저를 이용하여 구조물 내부에 초음파를 발생시키고 이를 또다른 레이저를 이용해 탐지하는 완전한 비접촉 초음

파 검사 방식으로 다양한 산업분야에서 매우 각광받고 있다. 레이저를 이용해 초음파를 생성하는 기본적인 원리는 다음과 같다. 먼저 Q 스위칭을 통해 생성한 펄스 형태의 초음파가 구조물의 표면에 조사되면[9], 레이저의 에너지가 구조물 표면에 흡수되어 순간적으로 매우 급격한 온도의 상승과 하강이 발생한다. 레이저의 에너지가 일정한 수준 이내로 유지되는 경우 이러한 순간적 온도 구배는 열탄성(thermoelastic) 현상을 일으키게 되며, 이때 다양한 형태의 초음파가 구조물 내부로 발진하게 된다. 비파괴검사에 널리 사용되는 벌크파(bulk wave) 및 램파(lamb wave)를 포함한 다양한 형태의 초음파가 발생할 뿐만 아니라, 펄스 레이저 빔의 펄스 폭에 따라 수십 Hz에서 크게는 수 GHz 단위의 광대역 주파수 성분을 갖는 초음파가 동시에 발진한다. 그러므로 검사자가 탐지하고자 하는 결함의 종류나 위치, 또는 검사체의 재질을 고려하여 원하는 종류의 특정 주파수에 해당하는 초음파를 선택적으로 수신할 수 있는 장점이 있다. 기존의 압전 센서를 이용한 접촉식 초음파의 경우, 탐촉자가 검사면에 완전히 접촉하거나 물과 같은 초음파 전달 매체가 중간에 있어야만 초음파의 발생 및 탐지가 가능하다. 곡면 구조물의 경우 수 센티미터 크기의 탐촉자가 곡면에 완전히 접촉될 수 없으므로 접촉식 방식으로는 곡면의 검사가 불가능하다. 하지만 레이저 초음파는 피검사체와 접촉하여야 하는 제약이 없으므로 곡면의 검사에 매우 유리하다[10].

레이저를 이용한 초음파의 탐지는 주로 연속된 형태의 레이저 빔을 이용해 간섭계를 구성하고 이를 통해 표면에서의 수직 방향의 변위 혹은 속도 변화를 측정하는 방식으로 이루어진다. 일반적으로 레이저 초음파라고 하면 초음파의 생성 및 탐지 모두 레이저를 이용하는 경우를 의미한다. 하지만 탐지하고자 하는 초음파의 종류 또는 검사 환경에 따라 접촉식 탐촉자와 레이저를 조합하여 사용하는 경우도 다수 있다. Fig. 1은 레이저를 이용한 다양한 초음파 검

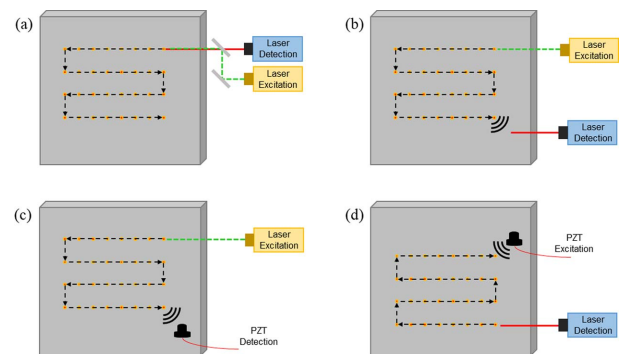


Fig. 1. Four different scanning configurations using laser: (a) laser excitation and detection of bulk wave, (b)~(d) laser excitation and detection, laser excitation and PZT detection, and PZT excitation and laser detection of surface wave or lamb wave

사 방식의 구성을 보여준다.

3. 회전식 검사 기법

래스터 스캔(raster scan) 기법은 대부분의 검사에서 가장 많이 사용되며 평판 구조물을 검사할 때 매우 유용한 검사 기법으로, 탐촉자가 가로 세로 방향으로 번갈아 이동하며 구조물을 검사하는 방식이다. 레이저를 이용하여 초음파를 탐지하는 경우 피검사체와 레이저 빔이 이루는 각도는 검사결과에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 평판 구조물을 래스터 스캔 기법으로 검사할 경우 수신 레이저는 항상 검사면에 수직으로 입사하고 동일한 경로로 반사되어 돌아온다. 하지만 검사면이 평평하지 않은 곡면일 경우 수신 레이저는 더 이상 수직으로 입사하지 않고 발생한 각도 차이만큼 다른 방향으로 반사된다. 레이저 빔과 검사면이 이루는 각도가 작을 경우에는 전혀 문제가 되지 않지만 각도가 커질수록 센서로 되돌아오는 빛의 양은 줄어들고 각도 차이가 일정 수준을 넘어서면 초음파의 수신이 불가능하게 된다. 초음파 수신이 가능한 입사각의 한계치는 피검사체의 재질이나 표면상태, 또는 피검사체와 레이저간의 거리 등에 따라 달라지나, 통상 $\pm 20^\circ$ 를 넘지 않는 것으로 알려져 있다.

래스터 스캔 방식으로 곡면을 검사할 때 발생하는 또다

른 문제점은 검사면과 레이저간의 검사거리(stand-off distance)가 지속적으로 변하게되어 검사면에 초점이 맞지 않으며, 이로 인해 수신되는 초음파의 신호대 잡음비가 감소하게 된다. 직각 구조물의 매우 작은 곡률을 갖는 모서리 부위를 래스터 스캔 기법으로 검사할 경우, 좁은 곡률구간에서 수신 레이저의 입사각은 $+45^\circ$ 에서 -45° 까지 변하고, 모서리 곡률 크기만큼의 검사거리 차이가 발생하게 된다. 그러므로 정상적인 초음파 수신에 불가능하게 된다.

레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법은 이러한 입사각과 초점거리 차이로 인해 발생하는 문제점을 해결하기 위해 고안되었다. 대부분의 기존 검사 방식들이 피검사체를 고정된 채 탐촉자나 탐지장치를 다양한 방향으로 움직여 검사하는 것에 반해, 회전식 검사 기법은 탐지장치인 레이저 헤드는 고정된 상태에서 피검사체를 회전시키며 검사한다. 이때 모서리를 가진 피검사체는 모서리의 곡률 중심을 기준으로 회전하게 된다. Fig. 2와 같이, 모서리 영역 전체에 걸쳐 가진 레이저와 수신 레이저 모두 피검사체에 항상 수직으로 입사하고 반사되며, 피검사체와 수신 레이저간의 거리 역시 일정하게 유지되므로 동일한 초점거리를 유지하게 된다.

4. 곡면 구조물 모서리 검사 결과

4.1 시편 및 검사 방법

회전식 검사 기법의 성능을 평가하기 위해 직각의 모서리를 가진 L 형 시편을 제작하였다. Fig. 3은 시편의 형상 및 삽입된 인공 결함을 보여준다. 탄소섬유/에폭시 UD prepreg 36장을 적층하고 autoclave를 이용하여 제작하였으며 경화 후 시편의 두께는 4.5 mm이다. 모서리 부위에 발생하기 쉬

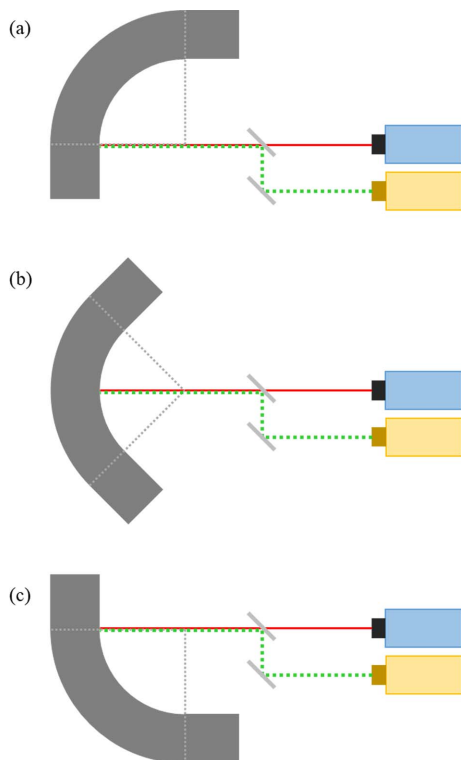


Fig. 2. Keep normal incidence and equal stand-off distances between lasers and inspection surface for entire corner section

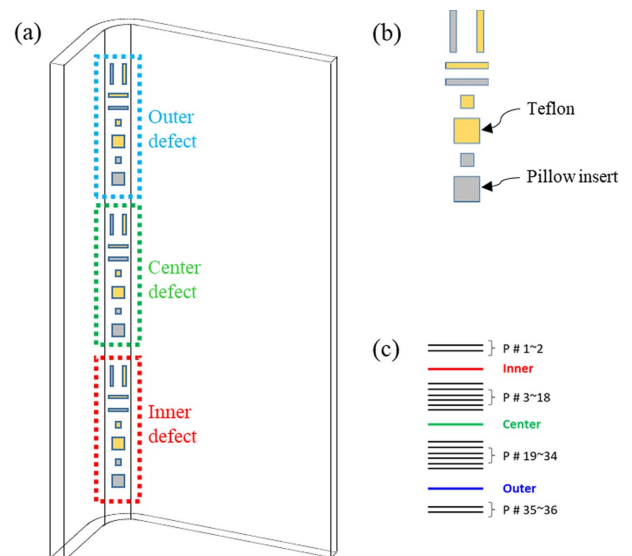


Fig. 3. L-shaped specimen: (a) specimen overview, (b) defect type and shape, and (c) stacking sequence

운 층간분리 결함을 모사하기 위해 두 종류의 인공 결함이 삽입되었다. 한 종류는 일반적인 테플론 테이프이고, 다른 한 종류는 4장의 티슈 페이퍼를 테플론 테이프로 감싸 공기층을 반드시 포함하도록 제작한 필로우 인서트(pillow insert)이다. 삽입된 결함은 12 mm 및 6 mm 길이의 정사각형 모양과 폭 3 mm, 길이 24 mm 의 얇고 긴 모양의 두 가지이며, 동일한 형태의 결함이 Fig 3(a)와 같이 서로 다른 높이의 세 층에 삽입되었다.

곡면 안쪽에서 가진과 수신을 함께 하는 펄스 에코 방식으로 검사하였다. 초음파 생성을 위한 가진 레이저는 1064 nm 파장의 Nd:YLF 레이저를 사용하였으며, 레이저 펄스의 펄스 폭 및 피크 파워는 각각 30 ns 및 11 kW로 펄스당 3.3 mJ의 에너지를 가진다. 초음파 수신을 위한 수신 레이저는 633 nm 파장의 HeNe 레이저를 이용하는 LDV를 사용하였으며, 수신된 초음파는 0.6~1 MHz 대역의 인라인 밴드 패스 필터를 거쳐 수집되었다. 모서리 부위는 반경 6.35 mm (0.25")의 곡률을 가지며 폭은 10 mm이다. 모서리 부위의 폭 10 mm와 인접한 좌우측 평면 각각 20 mm를 포함한 총 50 mm 폭을 검사하였으며, 각 스캐닝 포인트의 간격은 0.25 mm이다. 검사 순서는 우선 좌측 평면 20 mm를 라스터 스캔 기법으로 검사하고 이어지는 모서리 부위는 회전식 검사 기법으로, 이후 나머지 우측 평면 20 mm를 라스터 스캔 기법으로 검사하였다. 각 지점에서 수신된 초음파 신호는 초음파전파영상화(ultrasonic wave propagation imaging, UWPI) 기법으로 가시화되었다[11].

4.2 검사 결과

레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 이용한 검사결과 서로 다른 세 층에 삽입된 인공 결함은 Fig. 4(a)~(c)와 같이 검사결과 영상의 각각 다른 시간대에 두드러지게 탐지되었다. 검사면에 가장 가깝게 위치한 Fig. 4(a)의 경우 다른 결함들과 비교해 가장 두드러지게 탐지되며, (b)와 (c)로 갈수록 결함의 깊이가 검사면에서 멀어지고 그에 따라 초음파 신호의 감쇠하면서 결함 신호의 크기가 감소하는 것

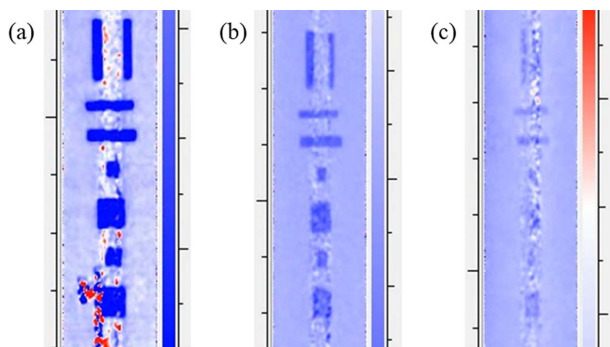


Fig. 4. Laser ultrasonic inspection result: (a) inner defect between 2~3 layer, (b) center defect between 18~19 layer, and (c) outer defect between 34~35 layer

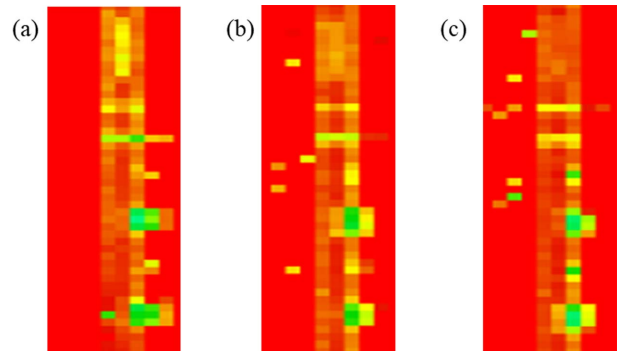


Fig. 5. Conventional C-scan inspection result: (a) inner defect between 2~3 layer, (b) center defect between 18~19 layer, and (c) outer defect between 34~35 layer

을 알 수 있다. 각 결함은 삽입된 층을 달리할 뿐 모두 같은 크기의 결함이 동일한 간격으로 삽입되었다. 하지만 각각 다른 층에 위치한 결함들의 높이는 동일하나 폭이 좁게 관찰되는 것을 알 수 있다. 검사면에서 가장 가깝게 위치한 Fig 4(a)의 결함은 정사각형의 형태로 실제 삽입한 인공 결함의 형태와 동일하나, 검사면과 결함의 위치가 멀어질수록 결함 폭이 좁게 나타나 직사각형처럼 관찰된다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 다음과 같다. 회전식 검사 기법은 시편의 모서리 부위를 곡률 중심을 기준으로 회전하며 검사한다. 비록 레이저가 고정된 상태에서 시편이 회전하였지만 이것은 마치 레이저의 발진부가 모서리의 곡률 중심에 위치한 상태에서 모서리 전체 영역에 대해 90° 회전을 하며 방사형으로 스캔하는 것과 같은 효과를 가진다. 이때 각 스캐닝 지점에서 발생한 초음파는 곡률 중심과 해당 지점을 연결한 선과 같은 방향으로 전파되어 되돌아온다. 그러므로 검사결과에서 나타나는 결함의 모양은 실제 위치한 결함을 곡률 중심을 향해 검사면에 투영한 것과 같으므로 결함의 폭이 실제보다 좁게 관찰된다. 일반적인 복합재 구조물 검사에 가장 많이 사용되는 물분사식 C-scan을 이용한 검사결과는 Fig. 5와 같다. 세 부위의 검사 결과 모두 결함이 존재한다는 것은 알 수 있으나, 결함의 모양이나 크기의 평가는 전혀 불가능하다. 즉, 결함의 판정이 불가능하다.

5. 결 론

복합재 주 구조물에 위치하는 모서리 부분의 검사를 위한 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 제안하였다. 기존에 모서리 검사를 위해 주로 사용되던 위상배열 초음파 탐상 방식은 다양한 형태의 모서리 검사에 적용되기 어려운 것에 반해 제안한 검사 기법을 이용하면 모서리 곡률의 크기나 각도 변화에 관계없이 검사가 가능한 장점이 있다.

제안된 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 이용해 모서리 부위에 인공 결함이 삽입된 L 형 복합재 구조물을

검사하였고, 모든 인공 결함을 성공적으로 탐지하였다. 회전식 검사 기법은 곡률 중심을 기준으로 방사형으로 스캔하는 것과 같은 효과를 가지며, 이로 인해 초음파의 전파 역시 방사형으로 전파하여 결함의 깊이에 따라 결함의 폭이 실제보다 좁게 관찰되었다. 검사 결과에서 알 수 있듯이 레이저 초음파 기반 회전식 검사 기법을 이용하면 모서리 부위의 검사를 위한 특별한 탐촉자나 치구 없이도 신뢰성 있는 검사가 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업” (과제번호 R0006462)으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

1. Kim, J.H., Han, J.S., Bae, B.H., Choi, J.H., and Kweon, J.H., “Manufacturing and Structural Analysis of Thick Composite Spar Using AFP Machine,” *Composite Research*, Vol. 28, No. 4, 2015, pp. 212-218.
2. Ishikawa, T., Matsushima, M., and Hayashi, Y., “Comparison of Numerical Analysis of Linear and Post-Buckling Behavior of CFRP T-Stiffeners with Experimental Results,” *Advanced Composite Materials*, vol. 7, no. 3, 1998, pp. 263-283.
3. Stickler P.B., and Ramulu M., Experimental Study of Composite T-Joints under Tensile and Shear Loading,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 15, No. 2, 2006, pp. 193-210.
4. Matsuo, T., Goto, T., and Takahashi, J., “Investigation about the Fracture Behavior and Strength in a Curved Section of CF/PP Composite by a Thin-Curved Beam Specimen,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2015, pp. 249-268.
5. Nhut, P.T., and Yum, Y.J., “Experimental Investigation of the Effect of Manufacturing and Working Conditions on the Deformation of Laminated Composite Structures,” *Composites Research*, Vol. 26, No. 4, 2013, pp. 265-272.
6. Habermehl, J., and Lamarre, A., “Ultrasonic Phased Array Tools for Composite Inspection during Maintenance and Manufacturing,” *Proceeding of the 17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, Oct. 2008, pp. 25-28.
7. Xu, N., and Zhou, Z., “Numerical Simulation and Experiment for Inspection of Corner-Shaped Components Using Ultrasonic Phased Array,” *Ndt & E International*, Vol. 63, 2014, pp. 28-34.
8. Scruby, C.B. and Drain, L.E., *Laser Ultrasonics – Techniques and Applications*, Adam Hilger, Bristol, UK, 1990.
9. Paschotta, Rüdiger. *Field Guide to Laser Pulse Generation*. Vol. 14, SPIE Press, Bellingham, 2008.
10. Dubois, M., and Drake, T.E., Dubois, Marc, and Thomas E. Drak, “Evolution of Industrial Laser-ultrasonic Systems for the Inspection of Composites,” *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 26, No. 3-4, 2011, pp. 213-228.
11. Lee, J.R., Ciang, 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 Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 1, 2011, pp. 167-175.