한국정밀공학회지 제 33 권 제 6 호 pp. 459-467 June 2016 / 459
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 33, No. 6, pp. 459-467 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.6.459
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

◆ 특집 ◆ 탄소섬유복합재 가공시스템

고속 라인 스캔 방식을 이용한 CFRP 가공 홀 표면 및 내부 결함 검사

Measurements of Defects after Machining CFRP Holes Using High Speed Line Scan

김택겸 [1,✉], 경대수 [1], 손운철 [1], 박선영 [1]
Teaggyum Kim[1,✉], Daesu Kyung[1], Unchul Son[1], and Sun-Young Park[1]

1 기가비스(주) 기술연구소 (Research & Development Center, GigaVis Co., Ltd.)
✉ Corresponding author: tgkim@gigavis.com, Tel: +82-31-615-2250

Manuscript received: 2016.5.9. / Revised: 2016.5.25. / Accepted: 2015.5.27.

Using a line scan camera and a Galvano mirror, we constructed a high-speed line-scanning microscope that can generate 2D images (8000 × 8000 pixels) without any moving parts. The line scanner consists of a Galvano mirror and a cylindrical lens, which creates a line focus that sweeps over the sample. The measured resolutions in the x (perpendicular to line focus) and y (parallel to line focus) directions are both 2 μm, with a 2X scan lens and a 3X relay lens. This optical system is useful for measuring defects, such as spalling, chipping, delamination, etc., on the surface of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) holes after machining in conjunction with adjustments in the angle of LED lighting. Defects on the inner wall of holes are measured by line confocal laser scanning. This confocal method will be useful for analyzing defects after CFRP machining and for fast 3D image reconstruction.

KEYWORDS: Carbon fiber-reinforced plastics (탄소 섬유 복합 플라스틱), Line scan image (라인 스캔 이미지), Inspection of CFRP hole defects (CFRP 홀 결함 검사), Laser scan confocal method (레이저 스캔 공 초점 방법), Inner hole inspection (홀 내부 검사)

1. 서론

항공기에서는 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 등의 복합재뿐만 아니라, CFRP와 금속재 (Titanium or Aluminum)를 결합한 CFRP/Metal Stack 부품이 사용되고 있고, 최근 이러한 이종재질부품 대응이 가능한 hole가공 시스템 개발과 CFRP Hole 가공 불량 감소 및 생산비용 절감을 위해 전수검사를 할 수 있는 측정기술이 요구되고 있다. 하지만 CFRP 홀 가공에 대한 보고는 많이 있으나,[1-5] 측정기술에 대해서는 보고된 바가 거의 없다.

기존 검사 방법의 경우, 기술적 한계 때문에 전수검사가 매우 어려운 까닭에 단순히 현미경으로 이미지를 측정하거나,[6] SEM 이나 초음파 이미지 측정 등으로 가공 홀 불량을 판별하였다.[1] 하지만 SEM 이미지는 불량을 자동으로 판별하기에는

Copyright ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

뜯김이나 돌출 등의 불량과 주변의 명암대비 (Contrast)가 낮고, 초음파 이미지는 명암대비뿐만 아니라 분해능도 낮아 가공 품질을 정확하게 판별하기 어렵다. 또한 위의 두 방법은 검사시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. CFRP 가공 홀의 불량 유무를 기존 자동 광학 검사 (AOI, Automatic Optical Inspection) 방법으로 검출하는 데 어려움이 있는 이유는 CFRP 자체의 특성에 있다. CFRP 표면은 코팅 처리되어 광택이 좋고, 투명한 코팅면 아래에 흑색을 띄고 있다. 따라서 홀 불량이 반사광이나 산란광에 반영되어 보여지기란 쉽지 않다. 일반적으로 자동 광학 검사는 검사 제품에 광원을 조사하여 반사광이나 산란광의 세기를 측정함으로써 불량 유무를 판별한다. 따라서, 검사 가능 여부는 가공 홀의 들뜸(홀 주변이 가공에 의해 부풀러 올라온 현상)이나 뜯김 (Chipping) 등의 불량을 조사 광원을 이용하여 그 주변과 차별화 된 반사광이나 산란광 등의 신호를 얻어낼 수 있는가에 달려있다.

CFRP 가공 홀 불량 검사에서 가장 어려운 검사 항목은 홀 내부의 부스러기나 균열 등을 검출하는 것인데, 기존의 자동 광학 검사로는 쉽지가 않다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 고속 3D 검사 방법이 가장 타당해 보이지만, 기존 3D 검사 방법(공 초점 방식, SEM, 초음파)은 검사시간의 한계 등 극복해야 할 문제가 많이 있다. 검사시간을 극복할 수 있는 방법 중 하나로 간섭계(모아레) 방법이 있긴 하지만, CFRP 표면 자체의 특성 때문에 이 또한 적용이 쉽지 않고, 홀 내부의 결함은 검출이 더욱 어렵다.

한편, 레이저 스캔 공 초점 방식 (Laser Scan Confocal Method)은 검사시간의 한계만 극복하면 좋은 검사 방법이 될 수 있다.[7-10] 공 초점 방식의 장점은 SEM 이나 초음파 방식에 비해 시료에 대해 접근성이 좋아 자동 검사가 가능하며, CFRP표면처럼 반사나 산란 신호의 변화가 표면 상태를 대변하지 못하는 경우에 특히 유리하다. CFRP처럼 표면에 광택이 있는 제품의 경우 불량 유무와 상관없이 미세한 표면 변화에도 측정 이미지가 크게 다를 수 있다. 일반 자동 광학 검사인 2D측정 방식과 다르게 공 초점 방식은 정밀 3D 측정 방법으로서, CFRP 가공 홀에서 발생하는 결함인 들뜸이나 뜯김을 검출하는 데 매우 유리하다.

본 연구의CFRP 가공 홀 결함 검사에는 레이저 스캔 공 초점 방식의 장점을 최대한 이용하면서 속도의 한계를 극복할 수 있는 레이저 스캔 라인 공 초점 방식을 적용하였다. 이 방식은 여러 문헌에서 보고된 적이 있기는 하지만 인 라인 공정에 사용되었다는 보고는 많지 않다. 이 방식은 검사 속도를 높이기 위해 일반 공 초점 방식에서 사용하는 점 (Point) 방식을 사용하지 않고 라인 (Line) 방식을 사용한다. 라인 스캔 방식은 산업계에서 일반 카메라에 주로 쓰이는 면적 (Area) 스캔 방식보다 많이 사용되고 있는데, 그 이유는 카메라의 자체 측정 속도는 거의 비슷하나 인 라인 검사에서 이동 시간 (Tack Time)이 최소화 되기 때문이다. Table 1에 측정 방식에 따른 측정 시간 및 높이 분해능 (Z-Resolution)을 비교하였다.

Table 1 Comparison of measurements

Methods	Measurement times (16M image)	Z-Resolution (FOV: 15mm)
Moire interferometer*	1sec (3D)	1 μm
Laser scan confocal	1s (2D)	1 um
Laser line scan confocal	0.05s (2D)	10 μm
Area camera	0.05s (2D)	-

*Moire interferometer cannot be applied to CFRP-hole inspection.

레이저 광원을 실린더 렌즈를 사용하여 쉽게 라인 빔으로 만들고, 시료에 라인 빔으로 스캔을 한다. 시료에 스캔 되는 라인 빔의 상을 광학 렌즈를 이용하여 라인 카메라에 촬상시켜서 이미지를 측정한다. 일반적으로 2D 이미지는 광원을 시료에 조사한 후 그 이미지를 광학 렌즈를 사용하여 면적 카메라 (Area Camera)에 촬상시켜 이미지를 획득하지만, 라인 스캔 방식은 라인을 촬상하고 그 위치를 이동 시켜 라인 이미지를 축적하여 2D 이미지를 획득한다.

산업용 자동 광학 검사 설비는 광학렌즈, 라인 카메라, 광원, 그리고 시료를 이동시키는 스테이지로 구성되어 있다. 광원은 라인 빔이 사용되는 경우도 있고 면 광원이 사용되는 경우도 있는데, 설령 라인 빔이 사용되더라도 아주 좁은 (Narrow) 광원은 사용하지 못하고 있다. 그 이유는 광원으로 LED를 사용하여 라인 카메라의 픽셀 크기에 대응되는 크기의 라인 빔을 만들기가 쉽지 않기 때문이다. 만약 라인 빔 광원을 사용한다면 광원의 광효율을 아주 크게 높일 수 있고, 이 때 사용되는 라인 빔의 선 폭은 0.1 - 1 mm 수준이다.

광원으로 LED를 사용하지 않고 레이저 광원을 사용하면 충분히 선 폭이 좁은 라인 빔 광원을 시료 상에 조사할 수 있다. 충분히 좁은 선 폭의 라인 빔을 시료에 조사하여 라인 이미지를 측정했을 경우에 얻을 수 있는 최대의 장점은 높이 분해능을 갖는 이미지를 획득할 수 있다는 것이다. 즉, 일정한 높이 별로 빠르게 2D 이미지를 축적하여 3D 이미지를 구현할 수 있게 된다. 빠른 3D 이미지를 획득하기 위해서는 빠른 2D 이미지가 필수적이다. 일반 산업용 자동 광학 검사는 넓은 면적의 2D 이미지를 측정이 필요하기 때문에 광학계가 고정되어 있고 스테이지 위에 제품을 장착시켜 스테이지가 빠르게 이동하는 방식으로 스캔이 이루어 진다. 또는, 시료는 고정시킨 채 카메라가 장착된 광학계를 빠르게 이동시키며 스캔하는 경우도 있다. 하지만 이러한 방식은 넓은 면적의 2D 이미지를 빠르게 획득하는 것은 가능하겠지만, 측정 위치를 고정시킨 상태에서 높이 변화에 따른 빠른 2D 이미지를 반복 측정해야 하는 3D 이미지 측정 방식에는 적용할 수 없다.

라인 빔 스캔 공 초점 방식을 적용하기 위해서는 라인 빔 광원, 라인 카메라, 그리고 고속 빔 스캐너가 필요하다. 고속 빔 스캐너의 역할은 시료와 라인 카메라는 고정되어 있고 스캔 위치를 이동시켜주는 역할을 한다.

본 논문에서는 홀 주변의 표면 결함 검사와 홀 내부의 결함 검사를 두 가지 방법으로 나눠서 적용하였다. 두 방법 모두 라인 카메라, 광학 렌즈, 그리고 고속 스캐너를 사용하였고, 차이점은 첫 번째 방법은 라인 빔을 사용하지 않고 일반 LED조명을 이용하여 조명 각도에 따라 2D 이미지를 선택적으로 획득하여 불량을 검사하였고, 두 번째 홀 내부 결함 검사에서는 라인 빔을 사용하여 높이 분해능을 갖는 2D 이미지를 고속으로 획득하였다.

2. 광학 검사 모듈

광학 검사 모듈은 광학계 부분과 광학계와 관련된 하드웨어인 스캐너, 그리고 라인 카메라로 구성되었다.

2.1 광학계

광학계는 스캔 렌즈 (Sill Optics, S5LPJ04993)와 릴레이 렌즈 (Sill Optics, S5LPJ04993) 그리고 광원 (Cree, RLW-100-32-MOR)으로 구성되었다. CFRP 가공 불량 홀 검사용 광학 모듈은 측정시간은 빠르면서 가공 홀 주변의 표면 불량(들뜸, 뜯김, 홀 직경크기 등)과 홀 내부의 불량(섬유 잔사, 돌출, 테이퍼 각도 등)을 모두 검출할 수 있어야 한다.

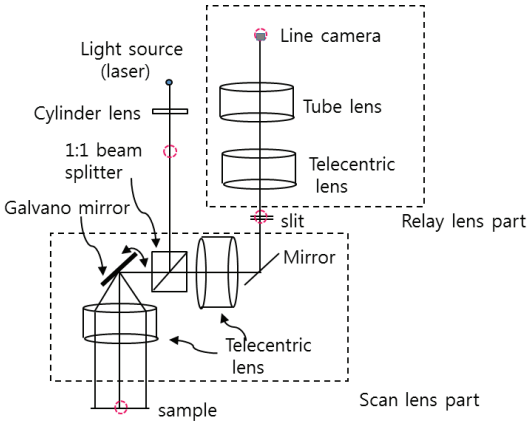


Fig. 1 Block diagram of the optical module for defect inspections of machined CFRP holes

Fig. 1은 CFRP 가공 홀 검사용 광학모듈의 전체를 보여주는 컨셉도이다. 광학모듈 구성의 스캔 렌즈는 텔레센트릭 렌즈 (Telecentric Lens) 2개(초점거리, F=40 mm, 90 mm)와 그 사이에 존재하는 조리개 (Aperture Stop) 위치에 스캐너를 배치시킴으로써 구성된다. 스캔 렌즈 광학계로 시료 (CFRP 가공 홀)의 이미지가 1차 이미지 서클 (Image Circle)에 결상 되고 그 위치에 슬릿 (Slit)을 설치하여 높이 분해능의 정밀도를 증가 시키고 외부 광 노이즈를 최소화 시킨다. 릴레이 렌즈는 1차 이미지 서클에 결상된 이미지를 라인 카메라에 전달하는데, 릴레이 광학계와 1차 이미지 서클 사이의 거리를 변화 시키면 그 배율 또한 바꿀 수 있다.

스캔 렌즈 광학계는 두 개의 텔레센트릭 렌즈 사이에 갈바노 미러 (Cambridge, 6320H)가 삽입되어 있다. 광원(레이저)에서 출발한 빔이 실린더 렌즈에 의해서 한쪽 방향으로만 포커싱되어 좁은 라인 빔이 생성되고, 이 빔이 1:1 빔 분할기 (Beam Splitter)에 의해서 텔레센트릭 렌즈 쪽으로 반사되고, 이 렌즈에 의해 측정시료에 다시 포커싱되어 좁은 라인 빔이 형성된다. 라인 빔의 선폭이 좁을수록 1차 이미지 상에서 좁은 라인 이미지가 형성되므로 높은 높이 분해능을 얻을 수 있다. 시료에 형성된 라인 빔에 의한 이미지 빔 신호(산란, 반사)는 다시 첫 번째 텔레센트릭 렌즈에 의해 수집

되고, 이 빔은 갈바노 스캔 미러에 의해 반사되어 빔 분할기를 통과하여 두 번째 텔레센트릭 렌즈에 의해 1차 이미지 상에 라인 이미지 형태로 상이 형성된다.

일반적으로 텔레센트릭 렌즈는 레이저 가공 등에서 많이 사용되는 렌즈다. 현미경 (Microscope)에서는 현미경 렌즈 (Objective Lens, 무한 광학렌즈)를 텔레센트릭 렌즈라고 할 수 있다. 현미경은 현미경 렌즈와 튜브 (Tube) 렌즈를 사용하여 시료의 이미지를 고배율로 볼 수 있게 하는데, 위의 광학계에서 사용되는 텔레센트릭 렌즈는 현미경의 현미경 렌즈와 같은 무한 광학렌즈이나, 현미경 렌즈는 조리개 위치가 렌즈에 있고 텔레센트릭 렌즈의 조리개 위치로부터 일정한 거리만큼 떨어져 있다.

광원에서 출발한 빔은 라인 빔 생성 광학계에 의해 칼날처럼 시료 표면에 형성된다. 스캔 미러가 동작을 하지 않으면 시료에 한 줄의 라인 빔이 형성되고, 이 라인 빔의 이미지는 1차 이미지 상(슬릿 위치)에 한 줄의 이미지로 결상된다. Fig. 1에서처럼 광원 부분의 좁은 라인 빔, 시료위치, 1차 이미지 상은 서로 상관되어 있는 이미지 상들이다. 일반적으로 이것을 이미지 결합 상 (Image Conjugate Phase)이라고 한다. 높은 분해능을 얻기 위해서는 이들 상에서 모두 좁고 균일도가 높은 상을 형성하는 것이 중요하다.

이미지 상에서 면적 카메라로 이미지를 촬상하여도 한 줄의 라인 빔 이미지 정보밖에 받을 수 없다. 따라서 시료의 이미지를 획득하기 위해 라인 카메라를 사용하였다. 스캔 미러가 일정한 각도로 움직일 때 시료의 위치에서 라인 빔만 움직인다 (측정 시료는 스캐너에 의해 스캔 된다). 광원 출발 부근의 좁고 균일도 높은 라인 빔과 1차 이미지 상 지점의 빔은 스캔 미러의 움직임과 무관하게 고정된 위치에서 라인 빔을 형성한다. 즉 갈바노 스캐너에 의해서 측정 시료에서 라인 빔이 스캔 되지만 1차 이미지는 고정된 위치에서 측정 시료의 스캔 라인의 정보를 담고 있다. 이것이 가능하기 때문에 라인 카메라로 면적 카메라처럼 2D 이미지를 촬상 할 수 있는 것이다.

일반적으로 이미지 품질은 광학 렌즈의 분해력 (Resolution Power)과 왜곡 정도, 그리고 카메라의 해상도 (Pixel Number)에 의해서 결정된다. 또한 분해력은 렌즈의 초점 거리 (Focal Length)와 광원의 파장(λ), 그리고 광원의 품질 (M^2)로 나타낼 수 있다. 자동 광학 장비에서는 렌즈나 광학계의 분해력 정도를 *NA* (Numerical Aperture, 개구수)로 표현한다.

$$\mathrm{NA} \cong \frac{1}{2} \times \frac{d}{F} \tag{1}$$

$$Spot\ \ size = \frac{M^2}{2NA}\lambda \tag{2}$$

식(1)의 *NA*는 렌즈의 분해력을 나타낼 때 사용되며, *d*는 빔의 크기 (Diameter), *F*는 초점거리 (Lens Focal Length)이다. 식(2)의 M^2 는 빔의 질 (Quality)을 나타내는 상수이고 Spot Size는 렌즈에 의한 상에서의 빔 크기를 나타내며, 이미지 측면에서 분해력을 의미하므로 큰 *NA*값을 가질수록 이미지 분해력이 좋다. 일반적으로 F가 적을수록 고분해능이나, 렌즈가 시료를 볼 수 있는 영역 (FOV, Field of View)이 작아진다. 따라서 좋은 렌즈일수록 넓은 FOV와 높은 분해력, 그리고 낮은 왜곡을 가진다. 본 연구에서는 목표를 FOV 15 mm, 해상력(해상도) 2.5 um로 설정하였다. 이 목표를 달성하기 위해서 광학계 전체에서 가장 중요한 것이 스캔 렌즈 광학계다. 따라서 스캔 렌즈 광학계에서 높은 이미지 분해력을 얻기 위해 짧은 초점거리 (F=40 mm), 큰 빔 크기 (d=10 mm), 그리고 렌즈의 대칭성을 고려하였다.

릴레이 렌즈는 슬릿 사용을 가능하게 하여 높이 분해능의 향상을 가능하게 하며, 스캔 렌즈에서 시료의 이미지 상을 1차 이미지 상에 전달하여 배율만 변화시키고 나머지는 그대로 2차 이미지에 전달하는 것이다. 스캔 렌즈에 의해 형성된 이미지를 그대로 전달하기 위해서는 튜브의 구경이 상당히 중요하다. 상용되는 튜브 렌즈는 18mm 또는 24mm가 일반적이나, 본 연구의 광학계에서는 넓은 FOV를 위해서 텔레센트릭의 구경 크기가 60mm인 렌즈를 사용하였다.

2.2 스캔 미러 및 카메라

광학 모듈에 사용되는 스캔 미러는 모터와 이것을 제어할 수 있는 컨트롤러, 컨트롤러에 제어 신호를 줄 수 있는 아날로그 신호 발생장치, 그리고 아날로그 신호를 제어하는 소프트웨어가 필요하다. 아날로그 신호 제어 소프트웨어는 스캔 미러 제어 신호와 라인 카메라 제어 신호를 동기화 시키기 위하여 라인 카메라 제어용 디지털 신호를

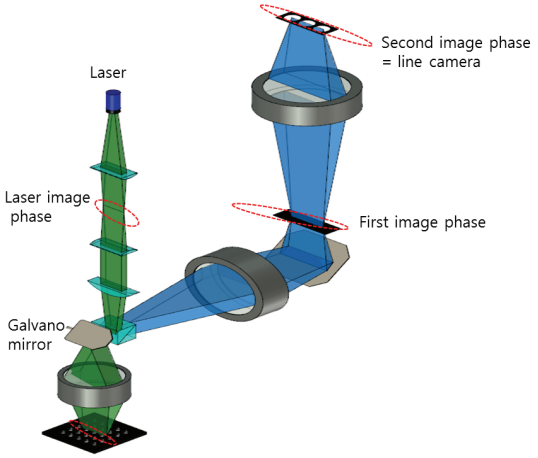


Fig. 2 A visualized 3D CAD image of the optical module for defect inspections of machined CFRP holes

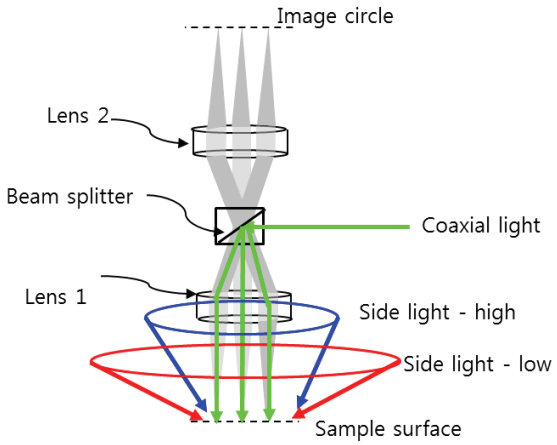


Fig. 3 Block diagram of the scan-lens part in the optical module

동시에 함께 발생시킨다.

고속 빔 스캐너로는 갈바노 미러, AOD (Acoustic Optic Deflector), EOD (Electric Optic Deflector), 폴리곤 미러, 공명 미러 등이 사용되고 있다. 하지만 본 연구에서는 반사형 스캐너만이 가능하다. 그 이유는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 시료에 라인 빔 형태로 조사된 빔이 Fig. 3의 lens 1을 통하여 스캔 미러에 반사될 때 스캔 미러의 각도에 무관하게 동일한 광축으로 반사되어 1차 이미지 상에서 슬릿을 사용할 수 있게 할 뿐 아니라, 라인 카메라도 사용할 수 있게 하기 때문이다. AOD나 EOD는 위치 정밀도가 높고 스캔 속도가 빠르지만 투과형이라 사용할 수가 없다. 투과형 스캐너는 반사형과 다르게 스캔 각도에 따라 시료의 스캔 위치에 따라 반사되어 오는 신호의 각도가 모두 달라서, Fig. 2처럼 1차 이미지 상과 각각 다른 위치에 상이 맺힌다. 폴리곤 미러와 공명 미러는 반사형이면서 속도가 빠르지만 조리개의 크기가 작아 이미지 분해력을 떨어뜨린다. 본 연구에 가장 적합한 고속 스캐너인 갈바노 미러의 경우, 스캔 속도는 다른 스캐너들 보다 떨어지지만, 반사형이면서 빔 입구의 크기도 가장 크기 때문에 고분해능 이미지 획득에 유리하다. 고속 스캐너 선정에서 고려해야 할 사항은 조리개 크기, 스캔 속도 그리고 정밀 제어가 가능해야 한다는 점이다. Fig. 2에서 사용되는 스캐너의 스캔 속도는 스캔 각도에 따라 다르지만, 일반적으로 100 Hz - 1000 Hz 이다.

반사형 고속 스캐너인 폴리곤 미러와 공명 미러는 외부의 아날로그 신호나 디지털 신호 없이 자체로 구동하는 즉, 수동 방식의 스캐너이므로, 외부 신호의 동기화가 거의 불가능하기에 라인 카메라와 동기화를 시킬 수 없다. 이와 달리 갈바노 미러의 제어는 능동방식이고 반응시간도 빨라 라인 카메라의 디지털 신호와 정확히 동기화 시킬 수 있다. 본 연구논문의 차별화된 기술은 일반적인 광학 시스템과 달리 스캔 미러와 라인 카메라를 사용하였다는 데 있다. Fig. 2에서와 같이, 측정 시료 위치에 라인 빔이 스캔 미러에 의해서 스캔되지만, 측정시료에서 반사나 산란되어 lens 1 (Fig. 3)을 통과하여 오는 빔들은 스캔 미러의 어떠한 각도에서도 동일한 경로이기 때문에, 최종 이미지 상인 2차 이미지 상 위치에 라인 카메라를 사용할 수 있다. 본 연구의 기술처럼 면적 카메라 대신 라인 카메라를 사용하여 2D 이미지를 획득했을 시의 장점은 첫째, 고속 측정이 가능하고, 둘째, 높은 해상도의 이미지를 획득할 수 있으며, 마지막으로 높은 높이 분해능이 가능하다는 것이다. 갈바노 미러의 역할을 정리하자면 일단 라인 카메라의 사용을 가능하게 하며 1차 이미지 상에 슬릿을 사용하여 3차원 이미지를 획득 높은 높이 분해능을 얻을 수 있게 한다.

이미지 측정을 위해서는 이미지 측정 모듈(예, Camera)이 필요하다. 3D 이미지 측정을 위해서는 2D 이미지가 필요하고, 2D 이미지를 위해서는 라인 이미지가 필요하며, 라인 이미지는 Pixel 하나 하나의 정보가 모여서 형성된다. 일반적으로 이미

지 측정이라고 하면 2D 이미지 측정을 말하고, 2D 이미지 측정에는 점 측정 방식, 1D 라인 측정 방식, 2D 면적 측정 방법이 있다. 점 측정 방식의 대표적인 예가 공 초점 측정 방법이다. 이 방법은 시료 위치 한 점에 대응되는 한 픽셀의 정보를 모아서 픽셀 데이터를 축적해서 2D 이미지를 구성한다. 예로, 해상도 1000 x 1000의 2D 이미지라면 10^6점을 시간에 따라 위치를 변화시키면서 각각 측정한다. 여기서 사용되는 검출기는 PMT 센서, 포토 다이오드 센서 등이다. 이러한 센서들은 0차원 검출기이며, 감도가 좋아서 미약한 신호를 검출하는데 유리하고, 핀 홀을 사용할 수 있는 위치 분해능과 높이 분해능이 뛰어나지만, 측정 속도가 떨어지는 단점이 있다. 1D의 라인 측정 방식은 라인 카메라(라인 CCD or CMOS 카메라)를 사용하여 미약한 신호를 검출하는데 유리하고, 슬릿을 사용할 수 있어 위치 분해능이나 높이 분해능도 뛰어나다. 다만, 신호 검출력이나 분해능은 점 방식보다는 떨어진다. 본 연구에서는 이러한 장점을 고려하여 1D 라인 방식을 채택하였다. 마지막으로 2D의 면적 측정 방법은 시스템 구성이 간단하고 쉬우나 감도, 분해능, 속도 등에서 많은 제약이 있다.

2.3 광원

Vision용 렌즈와 카메라를 사용하여 이미지를 측정하기 위해서는 광원이 필요하다. 하지만, 광원을 어떻게 사용하느냐에 따라 전혀 다른 이미지가 측정된다. 완벽한 평면에서의 패턴 이미지(예 glass 위 얇은 금속 패턴)인 경우는 동축 광원은 필요하고 측광은 전혀 필요하지 않다. 이런 경우, 동축 광원 없이 측광만으로는 어떠한 이미지도 얻을 수 없다. 반대로 완벽한 평면이 아닌 경우(대부분의 시료), 동축광을 사용할 때와 측광을 사용할 때 서로 다른 이미지가 얻어 질 수 있다. 특히 측광의 경우, 그 광원의 높이에 따라서 전혀 다른 이미지가 얻어지기도 하기 때문에, CFRP가공 홀 주변을 검사하기에는 부적합하다. 그 이유는 CFRP는 검은색의 표면 위에 아주 광택이 좋은 물질이 도포되어 있는 상태여서, 동축 광원을 사용했을 때 시료의 가공 상태에 따라 이미지가 다른 것이 아니라, 미세한 조명 각도나 표면의 3D 상태에 따라서도 다른 이미지를 보여줄 수 있기 때문이다.

CFRP 가공 홀 불량을 검출하기 위해서 레이저 라인 공 초점 방식을 사용하여 3D 이미지로 분석하면 쉽게 해결할 수 있다. 본 연구에서는 조명의 각도를 변화시켜서 홀 주변의 들뜸이나 뜯김 등의 표면 불량을 검출할 수 있도록 광원을 동축(luminous, CBT-90 Green), 고각 (CREE, RLW-100-32-MOR), 저각 (CREE, RLW-100-32-MOR)으로 분리하여 선택적으로 사용하였다. 홀 내부 불량의 경우는 광원을 선택적으로 사용해도 검출할 수 없기에, 3D 형식인 높이 분해능을 향상 시켜 높이 별로 2D 이미지를 획득함으로써 그 위치의 불량을 검출할 수 있는 방법을 사용하였다.

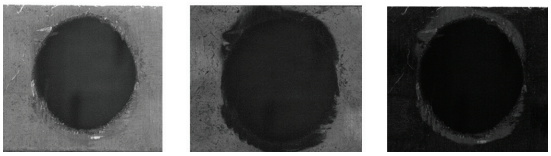
3. 검사 시간

CFRP 가공 홀 검사는 홀 표면 및 내부 검사가 동시에 가능해야 한다. 본 연구에서는 홀 표면은 조명의 각도에 따른 2D 이미지 분석을 통하여 결함을 검출하였고, 홀 내부 결함 검사는 3D를 위한 라인 빔 공 초점 방식으로 진행하였다. 3D 검사는 추가 연구를 진행할 예정이다. 먼저 표면 2D 이미지 측정 시간은 갈바노 미러의 스캔 속도와 라인 카메라의 프레임 속도에 의해 결정된다. 본 연구에 사용되는 갈바노 미러의 스캔 속도는 100Hz이며, 2D 이미지 한 장당 대략 5ms 이다. 라인 카메라 (Dalsa, LA-CM-08K08A)의 픽셀 수가 8000이며 측정 최대 프레임은 80,000 frames/s 이다. 따라서 해상도 8000 x 8000인 2D 한 장 측정 시간은 0.1s 이다. 즉, 최대 2D 측정 속도는 10 frames/s이다. 홀 내부의 3D측정을 위해서는 2D 이미지가 필요하며, 이 때, 2D 이미지 해상도는 6000 x 500으로 정했다. 이 경우, 2D 이미지 측정속도는 (80,000/500) = 160 frames/s이다. 2D 이미지 160장을 사용하여 3D 한 장을 구현한다고 하면, 3D 측정 시간은 대략1초가 된다. 현재의 결과는 조명 밝기의 한계로 인해 홀 내부3D 이미지를 구하지 못했다. 추후 연구에서 개발할 예정이다.

4. 측정 이미지

4.1 홀 표면 결함

Fig. 4에서처럼 CFRP 가공 홀 주변의 광원의 각도에 따라 전혀 다른 2D 이미지가 얻어진다. 즉, 광원의 각도를 선택적으로 조절하면서 이미지를 측정하면 홀 가공 불량 검사가 가능하다. 광원의 각도를 선택하여 검사가 가능한 불량 항목은 홀 가공 유무, 홀 크기, 홀 진원도, 가공 뜯김 등의 결함이다.



(a) (b) (c)

Fig. 4 Images acquired by illuminating CFRP holes with co-axial and side lights (a), only a co-axial light (b), and only a side light (c)

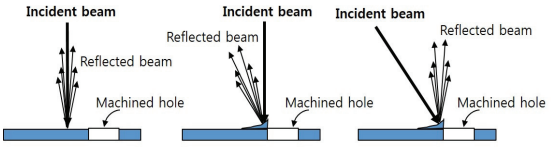
4.1.1 광택 좋은 제품

Fig. 4처럼 광택이 있는 제품(산란보다 전반사가 큰 경우)은 전반사 (Specular Reflection)에 해당되며 이 경우 특정한 각도(측면 광)에서만 이미지 상에 빔이 도달하게 된다. 측정 제품의 표면 광택이 떨어지면 Spread(반사) 되므로 측광인 경우 이미지 상에 빔이 아주 약하게 도달하게 되어 이미지 측정이 어렵다.

Fig. 4는 표면 광택이 좋은 CFRP를 측정한 것으로 Fig. 4(a)는 동축광 및 측광, Fig. 4(b)는 동축광, Fig. 4(c)는 측광을 사용하여 획득한 이미지들이다. Fig. 4(a)는 홀 이미지의 윤곽과 함께 전체적인 이미지를 보여주고 있지만, 들뜸이나 뜯김 불량을 판별하기 어려운 이미지다. Fig. 4(b)의 경우는 홀의 가공 형태를 전혀 판별할 수 없고, Fig. 4(c)는 가공의 영향으로 홀 주변에 들뜸이 있다는 것을 보여주고 있다. Fig. 4의 이미지로는 홀 주변의 들뜸 정보는 알 수 있지만 뜯김 불량은 판단할 수 없다. 추가로 연구가 더 진행 되어야 하며, 표면 3D 이미지 측정이 절대적으로 필요한 이유이기도 하다.

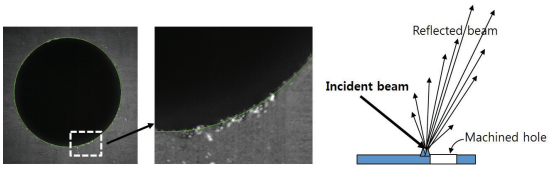
Fig. 5는 광원의 각도에 따라 서로 다른 이미지가 얻어진 (Fig. 4) 이유를 설명하는 그림이다. 홀 가공에 영향을 받지 않은 영역은 수직(동축)으로 빔이 입사될 때 수직으로 반사가 잘되어 카메라에 전달이 잘 되고 (Fig. 5(a)), 홀 가공에 의해 표면에 들뜸이 발생하면 이로 인하여 홀 주변의 표면이 경사를 가지게 된다 (Fig. 5(b)). 이 때 동축 빔은 오히려 카메라에 반사되어 도달하지 못하고 경사진 입사 광이 오히려 받은 광량을 카메라에 전달하게 된다 (Fig. 5(c)).

Fig. 6은 측광을 사용하여 측정한 이미지이고 시료 면과 광원의 각도는 45도 이하이다. 광원이 저각 일수록 돌출 (Spalling) 불량 (Fig. 6(b)에서 진한 화이트로 보이는 부분)은 크게 확대되어 보인다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)에서 돌출 부분이 있는 지점



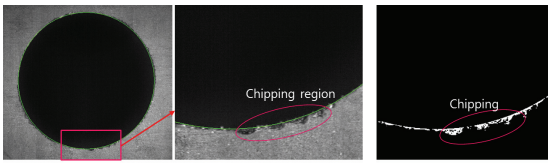
(a) (b) (c)

Fig. 5 Specular reflections by the vertical incident beams to the CFRP surface (a), the vertical incident beams to the delaminated CFRP surface (b), and the side incident beams to the delaminated CFRP surface (c)



(a) (b) (c)

Fig. 6 An image acquired by side incident beams to the delaminated CFRP surface (a), the magnified image of (a) to show the spalling defects of CFRP holes (b), and an illustration to show spalling defects (c)



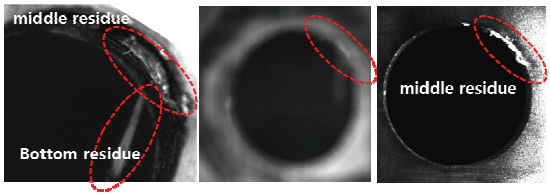
(a) (b) (c)

Fig. 7 An image acquired by the side incident beams to the delaminated CFRP surface (a), the magnified image of (a) to show the chipping defects of CFRP holes (b), and an image to show only chipping defects by image processing (c)

을 확대한 것이고 Fig. 6(c)는 그 원리를 설명한 것이다. 즉, 광원의 입사각이 저각이 될수록 산란에 의해 시료의 수직 방향으로 빔의 세기가 증가 된다.

4.1.2 표면 광택이 약한 제품

표면의 광택이 부족한 제품(전반사보다 산란이 큰 제품)의 경우 Fig. 4처럼 조명 각도에 의한 들뜸 정보를 정확하게 반영하지 못하기 때문에 더욱 표면 3D 검사가 필요하다.



(a) (b) (c)

Fig. 8 Images acquired with microscope by inclining the CFRP holes to observe defects of inner holes (a), with a Galvano mirror, a line camera, and LED light at center focusing (b), and with a Galvano mirror, a line camera, and narrow line beam system at center focusing (c)

Fig. 7은 갈바노 미러와 라인 카메라, 그리고 측면 고각 입사광(각도 60 - 70도)으로 뜯김이 잘 표현이 되도록 한 것이다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 부분 이미지를 확대한 것이고 Fig. 7(c)는 뜯김만 표현이 되도록 영상 처리한 그림이다. 측면 고각의 입사광에서 이처럼 뜯김이 잘 표현이 되는 것은 뜯김 결함이 주변과 높이 차이로 구별되므로 조명 각도에 따라 표현이 다르게 된다.

4.2 홀 내부 결함

갈바노 미러와 라인 카메라를 사용한 라인 공초점 측정을 CFRP홀 가공 결함 검사에 적용한 이유에는 여러 가지 있겠지만, 가장 중요한 이유는 홀 내부 결함 검사를 하기 위함이다.

Fig. 8(a)는 CFRP 가공 홀을 경사지게 하여 고배율 현미경으로 측정한 이미지이다. Fig. 8(a)는 홀 직경이 6 mm이고 깊이가 6 mm 인 홀에서 깊이 방향으로 중간(3 mm)위치에 돌출 결함이 보이며 가장 아래 부분에서 미절삭 섬유 (Uncut Fiber)가 보인다. Fig. 8(b)는 갈바노 미러와 라인 카메라가 결합된 광학계에서 광원으로 라인 빔이 아닌 일반 LED 조명을 사용하여 측정한 이미지이다. 광학 렌즈의 초점위치를 표면에 위치했을 때 선명한 이미지를 얻을 수 있지만 초점위치를 깊이 방향으로 3 mm 이동 시켜 이미지를 촬영한 결과 홀 중간에 존재하는 돌출 결함의 어떠한 이미지도 획득할 수 없었다. Fig. 8(c)는 갈바노 미러와 라인 카메라 그리고 라인 빔을 사용한 라인 빔 공 초점 광학계에서 초점의 위치를 깊이 방향으로 3 mm 이동 시켜 홀 중간에 존재하는 돌출 결함을 촬영한 이미지를 보여준다. 그리고 초점 위치와 멀리 떨어져 있는 바닥의 미절삭 섬유 결함은 촬영되지 않았다. Fig. 8의 결과 라인 빔 공 초점 광학계의 초점위치를 변화 시켜 3D 촬영을 하면 내부 결함 불량을 검출을 쉽게 할 수 있을 것이라는 것을 보여준다.

5. 결론

CFRP 홀 가공 시스템의 불량 감소 및 생산비용 절감을 위해 전수 검사할 수 있는 측정 기술이 요구되고 있기에 검사 설비의 검출력 뿐만 아니라 측정 시간 또한 매우 중요한 이슈이다. 본 연구에서는 가공 홀 표면은 갈바노 미러와 라인 스캐너 그리고 조명 각도를 이용하여 들뜸과 뜯김 결함을 검사하였고, 홀 내부 뜯김 결함은 갈바노 미러와 라인 스캐너 그리고 레이저 라인 빔을 이용한 라인 빔 공 초점 방식을 이용하여 검사하였다. 들뜸 결함 검사의 경우 CFRP 표면이 광택이 있는 경우 동축 조명에서는 주변보다 어둡게 나오며, 저각 경사 조명에는 주변보다 밝게 나온다. 뜯김 불량의 경우 고각의 경사 조명에서 주변보다 어둡게 나온다. 추가로 연구되어야 할 것은 표면 결함을 완벽하게 검출하기 위해서 표면 결함 검사도 조명 각 조절 방식이 아닌 빠른 3D 측정 기술 개발이 필요하고, 홀 내부 결함 검사를 위해서는 더욱이 3D 측정 기술 개발뿐만 아니라 내부 벽면을 좀 더 자세히 보기 위한 광학계 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 시스템산업미래 성장동력사업의 일환으로 수행하였습니다. [10053248, 과제명: 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발].

REFERENCES

1. Zhang, H. J., Chen, W. Y., Chen, D. C., and Zhang, L. C., “Assessment of the Exit Defects in Carbon Fiber-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling,” Key Engineering Materials, Vol. 196, pp. 43-52, 2001.
2. Faraz, A., Biermann, D., and Weinert, K., “Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool wear Criterion in Drilling CFRP Composite Laminates,” International Journal of Machine Tools &Manufacture, Vol. 49, No. 15, pp. 1185-1196, 2009.
3. Lachaud, F., Piquet, R., Collmbet, F., and Surcin, L.,

"Drilling of Composite Structure," Composite Structures, Vol. 52, No. 3-4, pp. 511-516, 2001.
4. Shyha, I., Soo, S. L., Aspinwall, D., and Bradley, S., "Effect of Laminate Configuration and Feed Rate on Cutting Performance When Drilling Holes in Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 8, pp. 1023-1034, 2010.
5. Durao, L. M. P., Goncalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., Albuquerque, V. H. C., Vieira, A. A., et al., "Drilling Tool Geometry Evaluation for Reinforced Composite Laminates," Composite Structures, Vol. 92, No. 7, pp. 1545-1550, 2010.
6. Feito, N., Diaz-Alvarez, A., Cantero, J. L., and Miguelez, H., "Experimental Analysis of Special Tool Geometries When Drilling Woven and Multidirectional CFRPs," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 35, No. 1, pp. 33-55, 2016.
7. Lin, P. C., Sun, P.-C., and Fainman, Y., "Single-Shot Depth-Section Imaging through Chromatic Slit-Scan Confocal Microscopy," Applied Optics, Vol. 37, No. 28, pp. 6764-6770, 1998.
8. Im, K-B., Han, S., Park, H., Kim D., and Kim, B-M., "Simple High-Speed Confocal Line-Scanning Microscope," Optics Express, Vol. 13, No. 13, pp. 5151-5156, 2005.
9. Sheppard, C. J. R. and Mao, X. Q., "Confocal Microscopes with Slit Apertures," Journal of Modem Optics, Vol. 35, No. 7, pp. 1169-1185, 1988.
10. Botcherby, E. J., Booth, M. J., and Wilson, T., "Real-Time Slit Scanning Microscopy in the Meridional Plane," Optics Letters, Vol. 34, No. 10, pp. 1504-1506, 2005.