《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 5, October 2020, pp. 205-212 ISSN : 1225-6285(Print)
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.5.205 ISSN : 2287-321X(Online)

# Development of Digital-Image-Correlation Technique for Detecting Internal Defects in Simulated Specimens of Wind Turbine Blades

Kyung Min Hong[1] and Nak Gyu Park[2†]

[1]*Division of Electronics Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea*
[2]*Division of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54896, Korea*

(Received July 3, 2020; Revised July 22, 2020; Accepted July 23, 2020)

In the performance of a wind turbine system, the blades play a vital role. However, they are susceptible to damage arising from complex and irregular loading (which may even cause catastrophic collapse), and they are expensive to maintain. Therefore, it is very important both to find defects after blade manufacturing is completed and to find damage after the blade is used for a certain period of time. This study provides a new perspective for the detection of internal defects in glass-fiber- and carbon-fiber-reinforced panels, which are used as the main materials in wind turbine blades. A gap or fracture between fiber-reinforced materials, which may occur during blade manufacturing or operation, is simulated by drilling a hole 5 mm in diameter in the middle layer of the laminated material. Then, a digital-image-correlation (DIC) method is used to detect internal defects in the blade. Tensile load is applied to the fabricated specimen using a tensile tester, and the generated changes are recorded and analyzed with the DIC system. In the glass-fiber-reinforced laminated specimen, internal defects were detected from a strain value of 5% until the end of the experiment, while in the case of the carbon-fiber-reinforced laminated specimen, internal defects were detected from 1% onward. It was proved using the DIC system that the defect was detected as a certain level of strain difference developed around the internal defects, according to the material properties.

Keywords: Digital Image Correlation, Non-contact inspection, Wind blade, Internal defects
OCIS codes: (040.1490) Cameras; (110.2970) Image detection systems; (120.4290) Nondestructive testing; (160.2290) Fiber materials

# 풍력 블레이드 모의 시편의 내부 결함 검출을 위한 이미지 상관법 기술 개발

**홍경민[1] · 박락규[2†]**

[1]전북대학교 전자공학부
㊞ 54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

[2]전북대학교 기계설계공학부
㊞ 254896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

(2020년 7월 3일 받음, 2020년 7월 22일 수정본 받음, 2020년 7월 23일 게재 확정)

풍력 터빈 시스템의 성능에서 블레이드는 매우 중요한 역할을 하지만 복잡하고 불규칙적인 하중에 의한 손상에 취약하며 유지보수 비용도 많이 든다. 따라서 블레이드 제조를 완료한 후에 결함을 찾아내고 일정 기간 사용한 후에 블레이드 손상을 찾아내는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 풍력 터빈 블레이드의 주재료인 유리섬유와 탄소섬유 패널에서 내부 결함을 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 블레이드 제조 또는 작동 중에 발생할 수 있는 복합재료의 섬유 파단을 모사하기 위해 적층된 재료의 중간층에 직경 5 mm의 홀을 가공한 후에, 비접촉 측정 기술인 이미지 상관법(digital image correlation, DIC)을 사용하여 내부 결함을 검출하였다. 인장시험기를 사용하여 가공된 시편에 인장 하중을 가하면서 이미지 상관법 시스템으로 변화되는 시편의 이미지를 저장하고 분석하였다. 유리섬유 복합재료 시편에서는 인장 하중 방향으로 5%의 변형률부터 내부 결함이 검출되었으며 탄소섬유의 경우에는 1%의 변형률부터 내부 결함이 검출되었다. 재료 특성에 따라 내부 결함 주변에 일정 수준의 변형률 차이가 발생함에 따라 결함이 검출됨을 이미지 상관법 시스템으로 증명하였다.

Keywords: 이미지 상관법, 비접촉 검사, 풍력 블레이드, 내부 결함
OCIS codes: (040.1490) Cameras; (110.2970) Image detection systems; (120.4290) Nondestructive testing; (160.2290) Fiber materials

†E-mail: parker2920@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8346-2638
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

## I. 서 론

풍력 에너지는 환경 친화적이며 지속적인 생산이 가능하기 때문에 전체 재생 에너지의 상당 부분을 차지하고 있다[1-4]. 또한 풍력 발전의 용량이 점차 증가하고 있으며 사용되는 블레이드의 길이도 점점 길어지고 있다[5-7]. 풍력 블레이드는 바람을 에너지로 변환해주는 핵심 부품이며 최근에는 비용을 절약하기 위해 바람과의 접촉 표면이 증가하고 점점 얇아지고 있다[8,9]. 블레이드는 풍력 발전기의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 부품이며 풍력 발전기에서 발생하는 사고 중에 블레이드의 고장으로 인한 사고가 약 20% 정도 발생하고 있다[10,11]. 따라서 블레이드 제조 후나 현장에서 작동 중에 검사하여 결함과 같은 고장의 원인을 찾는 것이 매우 중요하다.

풍력 발전기 성능을 향상시키는 효과적인 방법은 블레이드의 무게를 줄이는 것이다. 대용량의 풍력 블레이드는 주로 경량의 섬유강화 복합재료를 기반으로 제작되며 최근에는 블레이드의 무게를 줄이고 강도를 높이기 위해 유리 및 탄소섬유 강화 패널을 특정 구조로 배열하고 수지와 결합하여 제작하고 있다. 블레이드 제작 과정에서 재료를 연결하는 부분의 박리 및 섬유 파단과 같은 결함이 발생할 수 있다.

이러한 결함을 검출하기 위해 초음파, 진동, 음향 방출, 열화상 카메라 등을 기반으로 하는 검사 기술들이 사용되었다. 또한, 음향 방출, 초음파, 머신 비전 검사 기술은 온라인 모니터링과 접목시켜 활용할 수도 있다[12]. 블레이드의 손상 감지 및 결함 진단을 위해 새롭게 개발된 센서에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Ochieng et al.[13]은 풍력 블레이드 모니터링을 위한 지상 기반의 레이더 기술을 연구하였으며 Li et al.[14]은 블레이드 고장을 방지하고 신뢰성을 높이기 위해 광섬유와 압전 센서 개발 및 손상 감지 방법을 연구하였다. Raišutis et al.[15]과 Amenabar et al.[16]은 풍력 블레이드 검사에 대한 비파괴 검사 기술의 강점과 약점에 대해 보고하였다.

이미지 상관법 계측 방법은 CCD 카메라를 이용하여 외력에 의한 물체의 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 분석하여 변위 및 변형률을 측정할 수 있는 비접촉·비파괴 기술로서[17], 1980년대 미국 사우스 캐롤라이나 대학의 연구진에 의하여 처음 개발된 이후 접촉식 센서의 단점을 극복하고 대체 가능한 기술로서 발전해왔다. 기존의 접촉식 변위 센서에 비해 물체의 형상, 표면상태, 온도에 영향을 받지 않고 측정이 가능할 뿐만 아니라 측정 물체의 전면적 측정이 가능하여 외력에 의한 결함의 진전 모드 및 응력 분포를 계측할 수 있는 장점을 가지고 있다[18,19].

본 논문에서는 비접촉·비파괴 검사 기술인 이미지 상관법을 이용하여 블레이드 내부에서 발생할 수 있는 섬유 파단 결함을 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 블레이드 제조 또는 작동 중에 발생할 수 있는 복합재료의 섬유 파단을 모사하기 위해 적층된 재료의 중간층에 직경 5 mm의 홀을 가공한 후에 인장시험기로 인장 하중을 가하면서 CCD 카메라로 변화되는 시편(유리섬유와 탄소섬유 복합재료)의 이미지를 촬영하였다. 이미지 상관법 시스템으로 인장 하중에 따라 변화된 이미지를 분석하여 시편 전체에 대한 변형률 분포를 얻을 수 있으며 내부 결함 주변에 변형률 차이가 발생함에 따라 결함의 존재 유무를 판단할 수 있었다.

## II. 실험 구성 및 방법

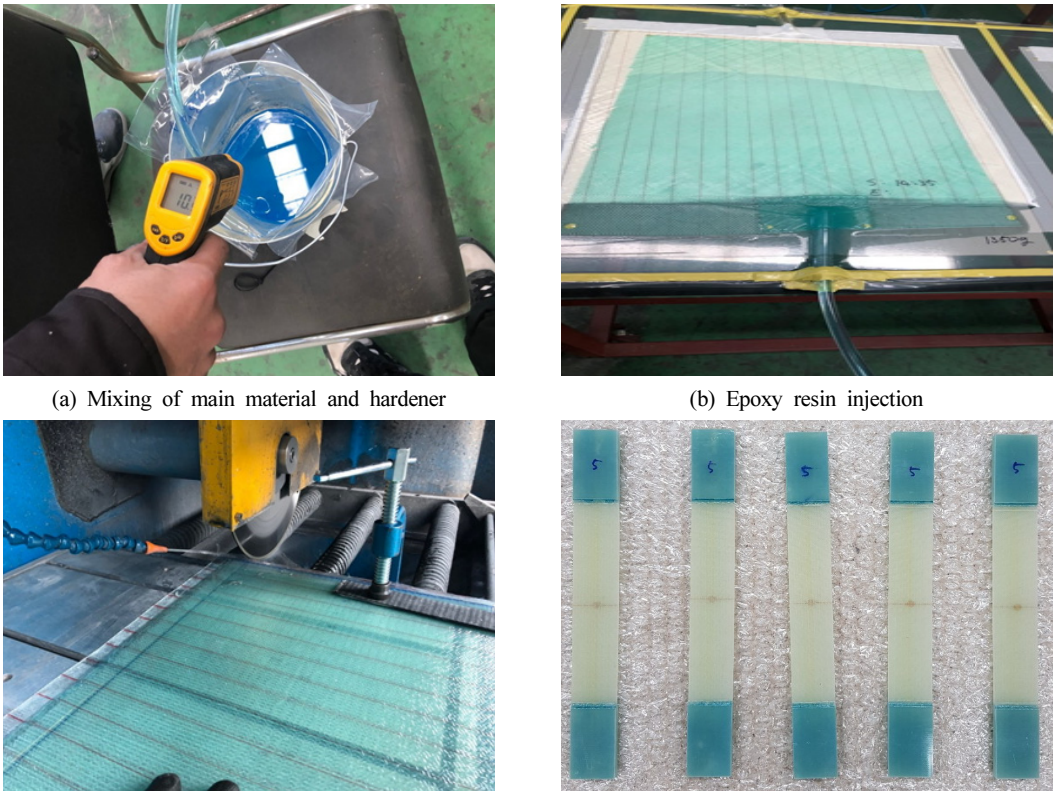
### 2.1. 시편 제작

풍력 블레이드의 재료로는 비금속 재료와 함께 비강도 및 비강성이 우수한 고강도 섬유(즉, 유리섬유 또는 탄소섬유) 복합재료가 사용된다. 블레이드 제작에 일반적으로 많이 사용되는 유리섬유와 탄소섬유를 재료로 선정하였으며, 실제 블레이드 제조 공정인 RIM (resin infusion method)을 적용하여 복합재료 시편을 제작하였다. 그림 1은 복합재료 시편을 제작한 업체인 핀코(Finnko)로부터 제공받은 사진이며, 인장 실험을 위한 유리섬유 복합재료 시편의 제조 공정에 대해 나타내고 있다. 그림 1(a)와 같이 에폭시 수지(주제&경화제)를 혼합하고, (b) 혼합된 에폭시 수지를 유리섬유에 주입한 후, 약 60°C 온도의 오븐에 넣고 약 3시간 동안 경화시킨다. 그림 1(c)와 같이 진공 필름을 제거하고 인장 시편의 규격(DIN EN ISO 527-5)에 맞게 절단하고, (d) 시편 위쪽과 아래쪽에 인장시험기 지그에 물릴 수 있는 탭을 부착하여 완성한다.

표 1은 시편 제조에 사용된 에폭시 수지 및 경화제의 사양을 나타내고 그림 2는 인장 시편의 치수와 내부 결함을 나타내고 있다. 그림 2에 표시된 것과 같이, 시편은 세 장의 섬유강화 패널을 적층하여 제작하였다. 섬유 파단 결함을 모사하기 위해서 적층되는 패널의 중간층에 직경 5 mm의 원형 홀을 정가운데에 뚫어서 시편을 제작하였다. 인장 시편의 폭은 25 mm이고, 이 폭의 1/5 크기인 5 mm의 원형 결함을 가공하여 인장 하중이 가해지면서 결함이 없는 부분과의 변형률 편차가 발생할 수 있도록 제작하였다. 시편의 폭에 비해 결함의 크기가 너무 크거나 작으면 변형률 편차가 발생하지 못하기 때문이다.

### 2.2. 이미지 상관법 시스템 구성

이미지의 상관관계를 비교하는 방법은 카메라로 촬영된 이미지의 명암 값을 이용하게 된다. 일반적으로 많이 사용하는 8 bit 디지털 카메라의 경우, 0에서 255의 단계로 명암 값을 구분하기 때문에 같은 명암 값을 갖는 화소(pixel)가 무수히 많게 된다. 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 서브셋(subset) 이미지를 이용하여 외력에 의한 물체의 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 비교한다. 서브셋 이미지는 상관관계 비교를 위한 최소 명암 분포의 최소 단위이며, $(2n+1)\times(2n+1)$의 크기를 갖는 정사각형 형태의 작은 이미지를 의미한다. 즉, 변형 전 이미지에서 사용자가 찾고자 하는 지점을 선택하면 선택 지점을 중심으로 하는 $(2n+1)\times(2n+1)$의 정사각형 형태(그림 3의 빨간색으로 표현된 정사각형)의 서브셋 이미지가 설정된다. 여기에서 n은 사용자가 설정하고자 하는 정수 값($n=1,2,3\cdots$)을 의미한다. 외력에 의한 물체의 변형 전



(a) Mixing of main material and hardener

(b) Epoxy resin injection

(c) Specimen cutting

(d) Tensile test specimen

**Fig. 1.** Fabrication process of the used specimen.

**Table 1.** Specifications of epoxy resin and hardener

| Item | Epoxy resin (measured at 25°C) | Hardener (measured at 25°C) |
|---|---|---|
| Equivalent weight (g/eq, EEW) DIN EN SSO3001 | 165-175 | - |
| Total amine value (mgKOH/g) KD-AS-201-01 | - | 500-600 |
| Density (g/mL) DIN EN ISO1675 | 1.1-1.2 | 0.9-1.0 |
| Color (gardner) KD-AS-025-01 | 0.5 Max | 0.5 Max |
| Viscosity (cps) DIN EN ISO 2555 | 900-1100 | 5-50 |

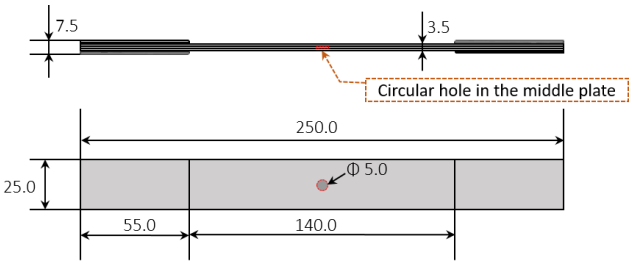



**Fig. 2.** Dimensions of the used specimen.

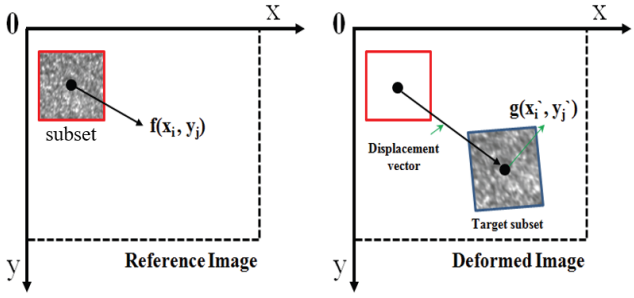



**Fig. 3.** Schematic illustration of the principle for measuring the displacement using the DIC.

이미지에서 분리한 서브셋 이미지를 기준 서브셋(reference subset) 이미지라 하며, 변형 후 이미지에서 분리한 서브 셋 이미지를 변형 후 서브셋(deformed subset) 이미지라고 한다[20]. 그림 3은 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 변위 측정 원리를 나타낸 그림이다. 그림에서 $f(x_i, y_j)$은 변형 전 이미지에서 분리한 기준 서브 셋 이미지의 명암 값을 나타내며, $g(x_i^{'}, y_j^{'})$는 변형 후 이미지에서 분리한 변형 후 서브 셋 이미지의 명암 값을 나타낸다. 변형 전 이미지에서 추출된 서브 셋 이미지와 변형 후 이미지에서 추출된 변형 후 서브 셋 이미지 간의 상관관계를 비교하여 상관관계가 가장 높은 지점의 좌표를 이용하여 외력에 의한 변위 변화를 측정하게 된다[21-23].

CCD 카메라로 촬영된 이미지에서 관심 영역(region of interest, ROI)은 변위 및 변형률을 측정하기 위한 영역을 나타낸다. 이미지는 카메라의 사양에 따라 수천에서 수억 개의 픽셀로 이루어진다. 촬영된 이미지의 모든 영역을 분석하기에는 많은 시간이 소요되고 불필요한 부분까지 해석을 하는 경우도 있다. 그렇기 때문에 불필요한 계산 시간을 피하기 위해 변위 및 변형률 측정이 필요한 영역을 ROI로 설정한다.

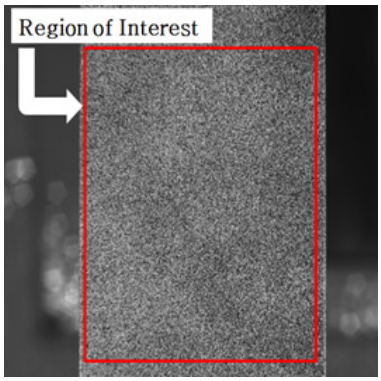



**Fig. 4.** Example of ROI.

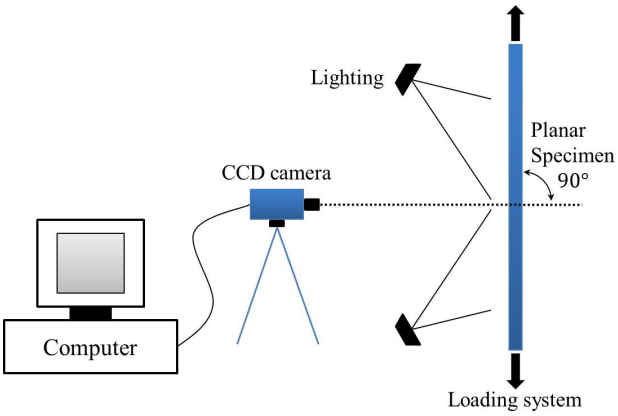



**Fig. 5.** Schematic diagram of the digital image correlation measurement system.

설정된 관심 영역에서 기준이 되는 참조 이미지와 변형 후의 이미지 사이에서 상관관계를 비교하여 변위를 측정한다. 그림 4는 촬영된 이미지에서 ROI 설정의 한 예를 보여준다. 그림과 같이 ROI를 설정하면 설정된 영역에서만 상관관계를 계산하므로 전체 이미지를 분석하는 것보다 불필요한 계산량이 줄어들기 때문에 효과적이다.

그림 5, 6은 인장시험기와 CCD 카메라를 이용한 이미지 상관법 측정 시스템 구성을 나타내고 있다. 인장 시험이 진행되는 동안 CCD 카메라로 변형되는 시편의 이미지를 촬영한다. 인장시험기의 크로스헤드 속도는 1 mm/min으로 설정하여 인장 시험을 진행하였고 CCD 카메라는 초당 10장의 이미지를 촬영하면서 컴퓨터 HDD에 저장하였다. 이렇게 저

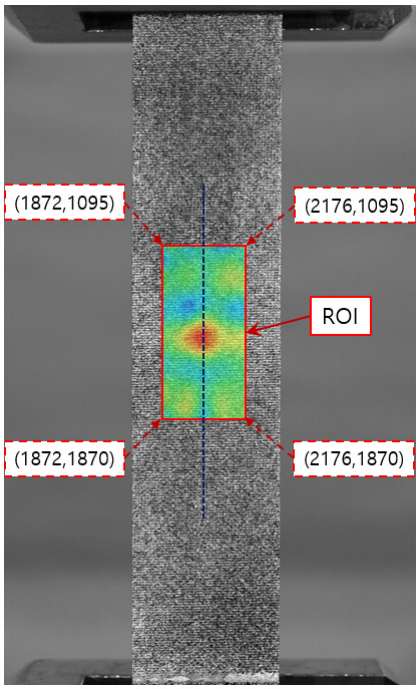



**Fig. 7.** Position of the camera image on specimen and ROI setting.

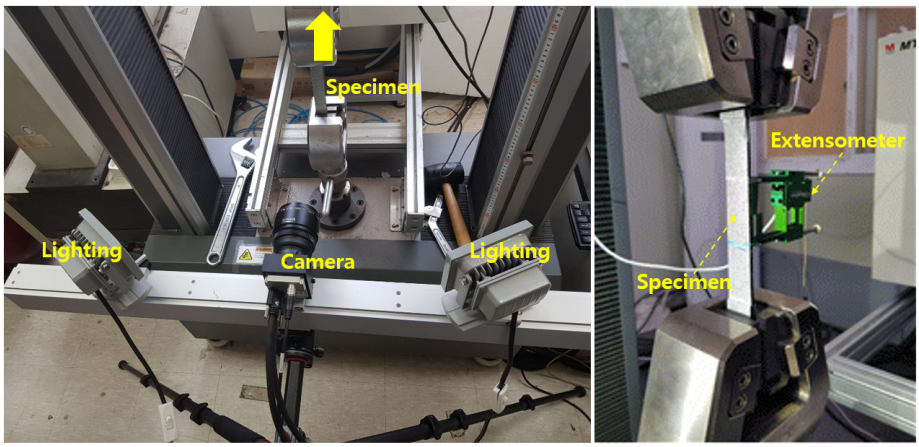



**Fig. 6.** Experimental tensile test set-up.

장된 이미지를 분석하면, 0.1초마다 시편의 변형 결과를 볼 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 특정 시간 또는 특정 하중에서의 변형 결과를 쉽게 분석할 수 있다.

그림 7은 촬영된 시편 이미지에서 관심 영역(ROI)에 대한 각 꼭지점의 좌표 값을 나타냈으며 촬영된 전체 이미지에서 관심 영역인 304×775 pixel 만큼만 분석하여 변형률 결과를 도출하였다. 이와 같이 관심 영역을 설정하여 불필요한 영역을 제거하면 이미지 상관관계 분석 시간을 절약할 수 있다.

## III. 실험 결과 및 분석

그림 8은 유리섬유 복합재료의 인장시험 결과인 응력-변형률 곡선과 각 지점별로 관심 영역의 변형률 이미지를 보여주고 있다. 변형률이 최대 13%까지 선형적으로 증가하는 동안 응력은 450 MPa까지 증가하고 있다. 시편에 가해지는 인장하중이 증가함에 따라 변화되는 시편의 이미지를 CCD 카메라로 초당 10장씩 촬영하고 저장하였다. 이미지 상관법 알고리즘을 사용하여 저장된 이미지를 분석함으로써, Y 방향(인장 하중이 작용하는 방향)의 변형률 분포를 얻을 수 있고 각 지점에 맞춰 내부 결함의 변형률 결과를 표현하였다. (a) 26.3 MPa, (b) 65.3 MPa, (c) 115.7 MPa, (d) 175.0 MPa, (e) 238.4 MPa, (f) 306.7 MPa, (g) 379.2 MPa 각각의 응력에서 변형률 분포 결과를 얻었다. 변형률이 약 4%가 될 때까지는 내부 결함이 나타나지 않았지만, 약 5% 이상에서는 계속적으로 내부 결함을 검출할 수 있었다.

그림 9는 탄소섬유 복합재료의 인장시험 결과인 응력-변형률 곡선과 각 지점별로 관심 영역의 변형률 이미지를 보여주고 있다. 변형률이 최대 13%까지 선형적으로 증가하는 동안

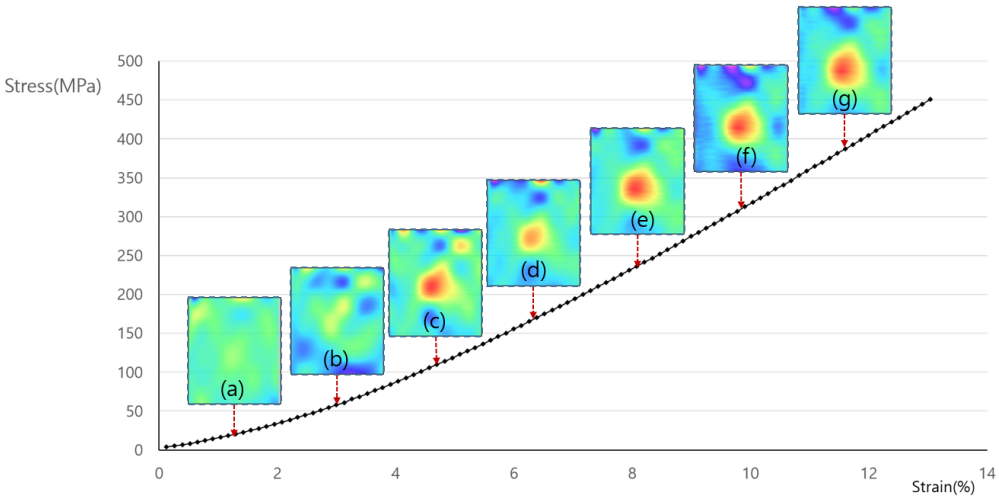



**Fig. 8.** Stress curve and detection images of the glass fiber laminated specimen.

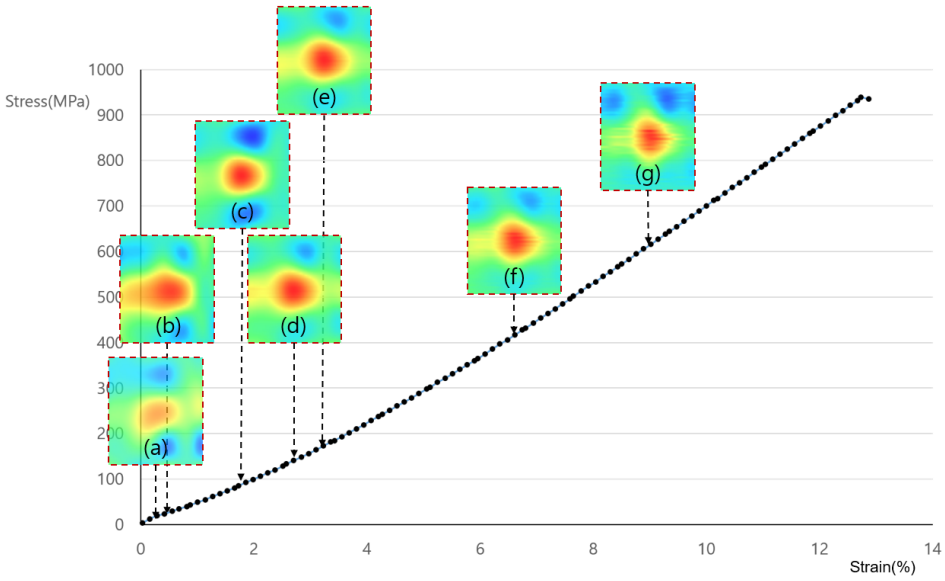



**Fig. 9.** Stress curve and detection images of the carbon fiber laminated specimen.

응력은 930 MPa까지 증가하고 있다. 탄소섬유의 강도가 유리섬유보다 더 강하다는 것을 확인할 수 있다. 유리섬유 측정과 동일하게 초당 10장씩 이미지를 저장하였다. 그림 9의 (a)에서 볼 수 있듯이, 탄소섬유 복합재료의 경우, 유리섬유보다 훨씬 초반에 내부 결함이 검출되었다. 내부 결함이 맨 처음 검출되었을 때의 변형률은 0.328%이며, 유리섬유보다 훨씬 작은 응력에도 내부 결함이 검출됨을 의미하고 있다. 인장시험이 끝날 때까지 계속적으로 내부 결함을 검출할 수 있었고 상대적으로 뚜렷한 결함 패턴을 볼 수 있었다. 각각 변형률 분포 이미지의 응력값은 (a) 20.6 MPa, (b) 33.2 MPa, (c) 97.3 MPa, (d) 133.8 MPa, (e) 174.9 MPa, (f) 408.4 MPa, (g) 680.6 MPa이다.

그림 10은 (a)유리섬유와 (b)탄소섬유 복합재료의 내부 결함이 검출된 이미지를 보여주고 있다. 그림은 이미지 상관법 시스템에서 설정한 관심 영역의 전체 이미지를 보여주고 있으며 두 패턴 모두 내부 결함이 뚜렷하게 나타났다. 그림 11은 유리섬유 내부 결함의 변형률 분포 이미지에서의 라인 프로파일을 보여주고 있으며, 검출된 결함 패턴은 비교적 규칙적으로 나타나고 있다. 인장 하중을 증가시키면서 촬영하고 저장된 200-3500번째 이미지의 픽셀 좌표에 따른 변형률 결과이다. 그림에서 X 축은 직경 5 mm 원형 결함의 가운데를 수직(그림 10(a) 참고)으로 설정한 라인 프로파일 좌표이며 Y 축은 각 픽셀 좌표에서의 변형률 값이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 200번째 이미지부터 중앙 부분의 변형률 값이 다른

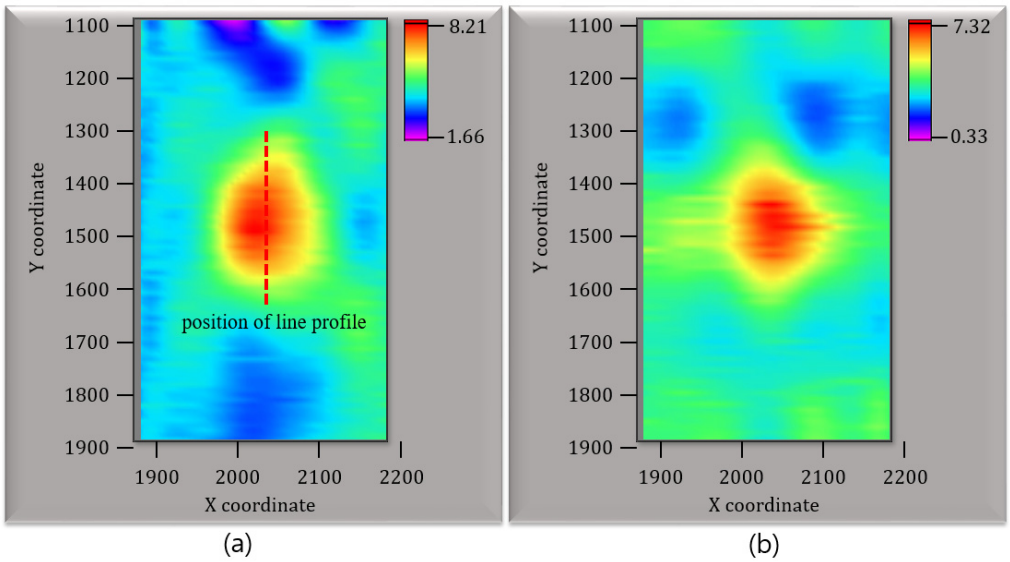



**Fig. 10.** Detection images of defects. (a) Glass fiber at 380 MPa. (b) Carbon fiber at 618 MPa.

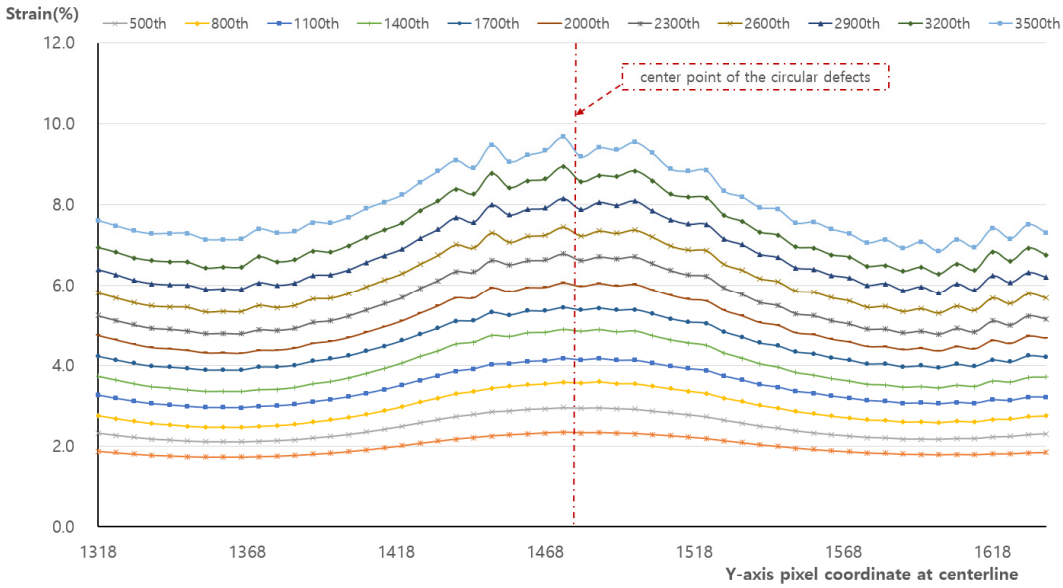



**Fig. 11.** Line-profiles of the detection image in glass fiber specimens.

부분보다 상대적으로 더 크다. 즉, 결함의 중심 부분에서의 변형률이 가장 크다는 것을 의미하며 이러한 결과를 토대로 결함의 위치를 파악할 수 있게 된다. 이 현상은 인장 하중이 증가함에 따라 더욱 두드러지고 있으며 3,500번째 이미지에서 변형률 최대값과 최소값의 차이는 약 3% 정도이다.

## IV. 결 론

풍력 블레이드는 풍력 발전기의 핵심 구성 요소이며 제조 및 유지보수 비용이 많이 든다. 많은 연구원들이 블레이드의 결함을 찾아내기 위해 다양한 방법을 적용했으며, 그 연구 결과는 블레이드의 기계적 특성을 향상시키는데 크게 기여하였다. 본 논문에서는 풍력 터빈 블레이드의 주재료인 유리섬유와 탄소섬유 복합재료의 인장 시편 내부에 인공적인 원형 결함을 가공하였으며, 그 결함을 비접촉·비파괴 검사 기술인 이미지 상관법으로 검출할 수 있었다. 재료의 특성에 따라 변형률 편차가 발생하여 내부 결함이 검출될 수 있는 응력의 크기가 상이했으며, 유리섬유보다 강도가 강한 탄소섬유에서 작은 응력에도 내부 결함이 검출됨을 확인할 수 있었다. 강도가 강한 재료에서 결함이 존재할 시, 작은 응력에도 결함 부위에서 변형률 차이가 커지기 때문이다.

또한, 본 논문에서 제안한 이미지 상관법 기술은 시간 변화에 따른 시편 표면 전체의 변형률 분포를 이미지화하여 나타낼 수 있는 장점이 있다. 향후에는 이미지 상관법의 해석 속도와 측정 정밀도 향상에 중점을 둔 추가 연구가 필요하며, 이러한 성능이 향상된다면 실제 풍력 블레이드의 내부 결함을 검사하기 위한 기술로서 더 발전할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2020R1I1A1A01066374)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20183030029070).

## References

1. A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, and V. H. Krishna, “A review on small scale wind turbines,” Renewable Sustainable Energy Rev. **56**, 1351-1371 (2016).
2. H. D. M. de Azevedo, A. M. Araújo, and N. Bouchonneau, “A review of wind turbine bearing condition monitoring: state of the art and challenges,” Renewable Sustainable Energy Rev. **56**, 368-379 (2016).
3. X. Chen, R. Yan, and Y. Liu, “Wind turbine condition monitoring and fault diagnosis in China,” IEEE Instrum. Meas. Mag. **19**, 22-28 (2016).
4. M. Fatehi, M. Nili-Ahmadabadi, O. Nematollahi, A. Minaiean, and K. C. Kim, “Aerodynamic performance improvement of wind turbine blade by cavity shape optimization,” Renewable Energy **132**, 773-785 (2019).
5. S. Steve, R. Klaus, and H. Kenneth, *Global Wind Report - Annual Market Update 2017* (14 February 2018), Distributed by Global Wind Energy Council. https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf.
6. W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, Y. Feng, and Y. Qiu, “Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges,” Wind Energy **17**, 673-693 (2014).
7. J. Chen, Q. Wang, W. Z. Shen, X. Pang, S. Li, and X. Guo, “Structural optimization study of composite wind turbine blade,” Mater. Des. **46**, 247-255 (2013).
8. X. Chen, X. Zhao, and J. Xu, “Revisiting the structural collapse of a 52.3 m composite wind turbine blade in a full-scale bending test,” Wind Energy **20**, 1111-1127 (2017).
9. J. Zhang, L. Guo, H. Wu, A. Zhou, D. Hu, and J. Ren, “The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid-structure interaction,” Ocean Eng. **84**, 14-19 (2014).
10. J.-S. Chou, C.-K. Chiu, I.-K. Huang, and K.-N. Chi, “Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads,” Eng. Failure Anal. **27**, 99-118 (2013).
11. W. Y. Liu, B. P. Tang, J. G. Han, X. N. Lu, N. N. Hu, and Z. Z. He, “The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review,” Renewable Sustainable Energy Rev. **44**, 466-472 (2015).
12. N. Beganovic and D. Söffker, “Structural health management utilization for lifetime prognosis and advanced control strategy deployment of wind turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results,” Renewable Sustainable Energy Rev. **64**, 68-83 (2016).
13. F. X. Ochieng, C. M. Hancock, G. W. Roberts, and J. L. Kernec, “A review of ground-based radar as a noncontact sensor for structural health monitoring of in-field wind turbines blades,” Wind Energy **21**, 1435-1449 (2018).
14. D. Li, S.-C. M. Ho, G. Song, L. Ren, and H. Li, “A review of damage detection methods for wind turbine blades,” Smart Mater. Struct. **24**, 033001 (2015).
15. R. Raišutis, E. Jasiuniene, R. Šliteris, and A. Vladišauskas, “The review of non-destructive testing techniques suitable for inspection of the wind turbine blades,” Ultrasound **63**, 26-30 (2008).
16. I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, and J. Aurrekoetxea, “Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades,” Composites Part B **42**, 1298-1305 (2011).
17. B. Pan, K. Qian, H. Xie, and A. Asundi, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review,” Meas. Sci. Technol. **20**, 062001 (2009).
18. J. D. Helm, “Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks,” Exp. Mech. **48**, 753-762 (2008).

19. J. Abanto-Bueno and J. Lambros, “Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation,” Eng. Fract. Mech. **69**, 1695-1711 (2002).
20. B. Pan, W. Dafang, and X. Yong, “Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation,” Opt. Lasers Eng. **50**, 586-592 (2012).
21. H. Shi, H. Ji, G. Yang, and X. He, “Shape and deformation measurement system by combining fringe projection and digital image correlation,” Opt. Lasers Eng. **51**, 47-53 (2013).
22. H.-S. Kim, D. Tserendolgor, D.-S. Kim, H.-C. Lee, and S.-H. Kim, “Automatic alignment of a collimating mirror by using phase image correlatio,” Korean J. Opt. Photon. **22**, 30-34 (2011).
23. Y.-S. Kim and T. Kim, “Evaluation of the speckle noise in optical scanning holography,” Korean J. Opt. Photon. **25**, 142-145 (2014).