

이미지 상관 기법을 이용한 풍력 발전 블레이드용 복합재료의 기공 결함 검출능[§]

김종일* · 허용학*† · 이건창*

* 한국표준과학연구원 에너지소재표준센터

Detectability of Pore Defect in Wind Turbine Blade Composites Using Image Correlation Technique

Jong Il Kim*, Yong Hak Huh*† and Gun Chang Lee*

* Center for Energy Materials, Korea Research institute of Standard and Science

(Received January 7, 2013 ; Revised July 31, 2013 ; Accepted August 2, 2013)

Key Words: Wind Turbine Blade(풍력 발전 블레이드), GFRP Composites(GFRP 복합재료), Strain(변형률), Pore(기공), Defect Detection(결함 검출), Image Correlation Technique(이미지 상관 기법)

초록: 풍력 발전 블레이드의 제조 및 운영 중에 발생하는 결함들은 블레이드의 수명과 안전성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 블레이드의 제조 과정에서는 박리, 기공, 주름, 모재 균열 등과 같은 결함이 발생한다. 본 연구에서는 이미지 상관 기법을 이용하여 변형률 분포를 확인함으로써 블레이드의 제조 과정에서 주로 나타나는 결함 중 하나인 기공 결함의 검출능을 조사하였다. 0°/±45°의 섬유 방향을 가진 4 Ply 로 적층된 GFRP 복합재 시험편에 인공적인 기공 결함을 삽입하여 기공의 크기 및 위치에 따른 검출 의존성을 조사하였다. 기공의 크기는 지름 1, 2, 3 mm 이며, 기공의 위치는 시험편 표면으로부터 0.5, 1.0, 1.5 mm 깊이에 삽입하였다. 부하된 시험 하중은 최대 200 MPa 이며, 이미지 상관 기법을 통해 변형률 분포를 획득하여 지름 2, 3 mm 의 기공과 깊이 0.5, 1.0 mm 의 기공 결함을 검출할 수 있었다.

Abstract: Defects that occur during the manufacturing process or operation of a wind turbine blade have a great influence on its life and safety. Typically, defects such as delamination, pore, wrinkle and matrix crack are found in a blade. In this study, the detectability of the pores, a type of defect that frequently occur during manufacturing, was examined from the full field strain distribution determined with the image correlation technique. Pore defects were artificially introduced in four-ply laminated GFRP composites with 0°/±45° fiber direction. The artificial pores were introduced in consideration of their size and location. Three different-sized pores with diameter of 1, 2 and 3 mm were located on the top and bottom surface and embedded. By applying static loads of 0-200 MPa, the strain distributions over the specimen with the pore defects were determined using image correlation technique. It was found the pores with diameter exceeding 2 mm can be detected in diameter.

1. 서 론

오늘날 세계의 풍력 발전 기술의 방향이 대형화 및 해상 풍력으로 전개됨에 따라 풍력 발전 블레

이드를 포함한 시스템의 신뢰성은 세계 시장 경쟁력 확보를 위해서 가장 중요한 요인으로 대두되고 있다. 특히 풍력 발전 분야에서 많은 연구가 진행되고 블레이드는 신뢰성을 극대화하기 위해 전략적 연구 분야로서 풍력 발전 기술의 주 연구 분야로 설정하고 있으며, 이러한 풍력 발전 블레이드의 운영 및 관리의 효율화를 위해 제작상의 결함 및 사용 중 발생하는 결함을 탐지하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

풍력 발전 블레이드는 공기역학적으로 최적화된

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, yhhuh@kriss.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

유선형의 단면 형상으로 블레이드에 작용하는 공력 하중에 충분히 강하고 안전하게 설계 제작되며, 블레이드의 각 부분의 공력 하중에 적합한 강성과 경량의 재료로 제작되고 있다. 이를 위해 대부분의 블레이드는 에폭시(epoxy)와 같은 모재(matrix)에 섬유 강화된 복합재(FRP composite)가 주 재료로 사용되고 있다. 따라서 풍력 발전 블레이드는 복합재료의 다양한 제작 공정상의 이유로 층간 분리(delamination), 기공(pore), 복합 층간의 주름(wrinkle), 섬유 방향을 따르는 모재 균열(matrix crack) 등의 결함이 발생할 수 있지만, 복잡한 구조로 인해 재료의 결함 상태를 파악하기가 쉽지 않다. 또한 재료 내부의 결함이 성장 과정을 거쳐 최종 파단에 이르게 되기 전에 미시적 결함의 검출이 곤란하다.⁽¹⁾

블레이드에 존재하는 결함을 탐지하기 위하여 다양한 기법들이 제안되었으며, 초음파, 열영상, 광섬유를 이용한 변형 측정, 음향방출 등이 개발되고 있다. 이미지 상관 기법은 이들 방법 중 하나로 최근 개발되고 있다. 이미지 상관 기법(Image correlation technique)은 디지털 카메라로 촬영된 구조물의 변형 전의 이미지와 변형 후의 이미지를 비교하여 구조물의 변형을 계산하는 방법이다. 따라서 이미지 보정 기법과 높은 공간 해상도(high-spatial-resolution)를 가진 카메라를 결합하면 대변형뿐만 아니라 마이크로 및 나노 스케일의 변형장을 실시간으로 평가할 수 있다.⁽²⁻⁵⁾

본 연구에서는 풍력 발전 블레이드의 재료 중 하나인 GFRP 복합재료의 기공 결함에 대해 이미지 상관 기법(Image correlation technique)을 이용하여 변형률을 측정하였다. 이를 통해 기공 주변의 국부적인 변형률 거동을 확인하였으며, 재료 표면의 이미지 정보를 이용하여 기공 결함의 탐지 가능성을 확인하였다.

2. 이미지 상관 기법에 의한 변형 측정

이미지 상관 기법은 측정하고자 하는 물체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형률을 물체 표면에서 취득한 이미지 정보를 전 영역(full-field)에서 평가할 수 있는 광학적 방법으로 시험편 표면의 변형 전과 후의 이미지 정보에서 스펙클 패턴(speckle pattern)의 움직임을 추적하여 변위장을 얻는다. 이는 Fig. 1에서 보여준 바와 같이 측정 영역의 기준 서브 이미지(reference sub-image)의 서브셋(subset) 픽셀(pixel)과 변형 후의 서브셋 픽셀을 이

미지의 상관관계의 최적 매치로 매핑하여 측정 영역의 변형 상태를 결정하게 된다. 즉, Fig. 1의 측정 영역의 P, Q 두 지점은 변형 후 P', Q'로 이동 변형되게 되어 다음과 같은 상관 관계로 위치가 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} x'_q &= x_q + u_p + \frac{\partial u_p}{\partial x} \Delta x_q + \frac{\partial u_p}{\partial y} \Delta y_q \\ y'_q &= y_q + v_p + \frac{\partial v_p}{\partial y} \Delta y_q + \frac{\partial v_p}{\partial x} \Delta x_q \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\Delta x_q = x_q - x_p$, $\Delta y_q = y_q - y_p$ 이고, u, v 는 x, y 방향으로 서브 이미지 중심의 이동을 의미한다. 다. 이미지 상관 기법에서는 이러한 측정 위치의 이동에 따른 두 관계 이미지의 디지털 픽셀(pixel)의 선명화를 극대화하고 관계된 이미지의 매핑 관계를 결정하면 된다. 이러한 상관계수는 변위벡터로 식 (2)와 같이 주어지고, 이는 비선형 최적화 알고리즘에 의하여 연산 반복(iteration)으로 결정되어진다.

$$\vec{V}_p = \left[u_p \quad v_p \quad \frac{\partial u_p}{\partial x} \quad \frac{\partial v_p}{\partial y} \quad \frac{\partial u_p}{\partial y} \quad \frac{\partial v_p}{\partial x} \right]^T \quad (2)$$

3. 실험 방법

3.1 시험편 및 기공 형성

본 연구에 사용한 재료는 풍력 발전 블레이드 복합재인 GFRP(Glass Fiber-Reinforced Plastic)으로 섬유의 적층 방향이 시험편 길이 방향(0°)에 대해서 $0^\circ / \pm 45^\circ$ 의 세 축으로 적층되어 있다. 복합재의 적층(laminate)은 E-glass/Epoxy 로 하였고, 4 Ply 로 적층하였다. 두께는 3.5 mm 이며 너비 24 mm, 길이 250 mm 의 판재형으로 제작하였다.

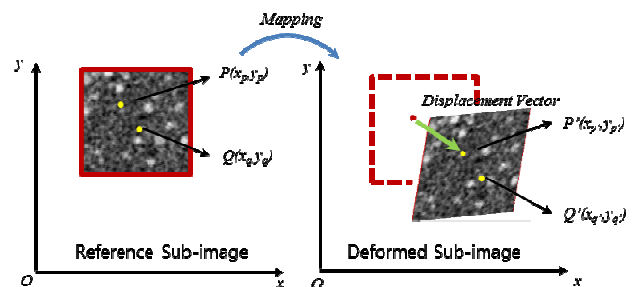


Fig. 1 Schematic illustration for correlating the images of a reference subset before deformation and a target (or deformed) subset after deformation

본 연구에서는 풍력 발전 블레이드에 존재할 수 있는 기공을 외부 표면 기공(external surface pore)과 내부 표면 기공(internal surface pore)로 구분하여 모사하였다. 기공 검출 능력을 정량화 하기 위하여 외부 표면 기공은 기공의 직경의 크기를 변화시켰고, 내부 표면 기공에서는 같은 직경에 대하여 측정 표면에서부터의 거리가 다른 즉 기공의 깊이를 변화시켰다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 표면 기공은 지름 1, 2, 3 mm의 각기 다른 크기의 기공으로 시험편에 위치시켰고, 내부 표면 기공은 Fig. 2(b)에 보여준 바와 같이 지름 3 mm의 기공을 내부 표면에 리가먼트(반구형 기공의 최대 깊이 지점과 시험편 표면간의 남은 거리)가 각각 0.5, 1.0, 1.5 mm 이 되도록 형성하였다. 시험편의 기공은 구형의 드릴을 사용하여 정밀 가공하였고 표면 기공 형성 후 표면 기공은 시험 복합재의 매트릭스와 동일한 에폭시 재질의 두께 0.1 mm 수준 박막으로 기공을 덮음으로 실 기공 형성 과정과 최대한 유사하게 형성시켰다.

이미지 상관 기법을 적용하기 위하여 하중 부하 전과 후의 변형률 이미지가 비교되어야 한다. 이

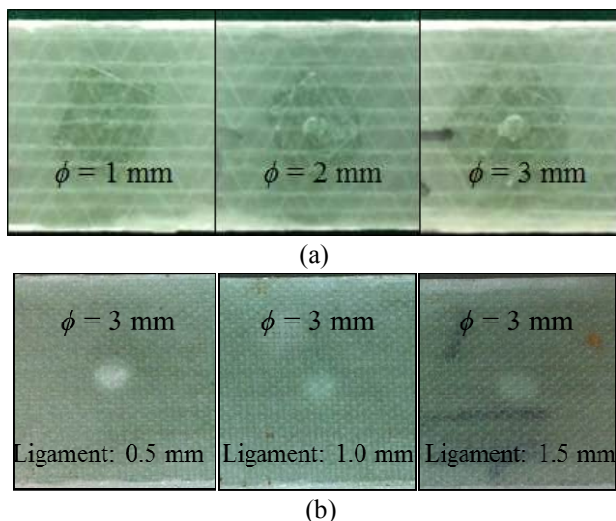


Fig. 2 Two different pore types prepared on the (a) surface and (b) inner surface of the specimen used in this test

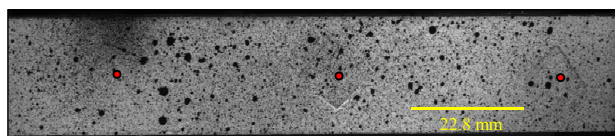


Fig. 3 Speckle pattern coated on the surface of the specimen with a layer of white paint and black speckles. (Red points present location for placing pores with different size and depth)

를 위하여 Fig. 3 과 같이 시험편 표면에 이미지 기준 패턴을 형성시켰다. 이미지 기준 패턴은 기공이 형성된 시험편에 백색 안료를 20 ~ 30 cm 거리에서 분사하여 균일 도포하여 완전히 건조시킨 후 다시 불규칙한 흑점 패턴을 형성하였다.

3.2 측정 시스템 및 시험 조건

Fig. 4 는 본 측정에 사용한 하중 부하 시스템(하중 용량 : 250 kN)과 변형률 측정 시스템(GOM, ARAMIS 5M)을 나타낸다.⁽⁶⁾ 본 연구에 사용한 ARAMIS 시스템은 두 대의 CCD(coupled charge device) 카메라로 시험편 표면의 3 차원 변형을 측정하여 면내 및 면외 변형을 결정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 ARAMIS 시스템의 기본적인 사양은 Table 1 에 나타내었다. 본 측정을 수행하기 전에 변형 측정 신뢰성을 확보하기 하여 이미지 거리가 표준 표정된 교정 패턴을 이용하여 두 카

Table 1 Specification of DIC system (ARAMIS) used in this measurement

Measuring volume	Camera resolution	Max. frame rate	Strain measuring range	Strain accuracy
10x8 mm to 5000x4150 mm	2448x2050 pixels	29 Hz	0.02 up to > 100%	Up to 0.01 %



Fig. 4 Photograph for tensile testing system and strain measurement system

메라의 이미지 측정을 교정하였다. 이를 위해 두 카메라 사이의 간격 86 mm, 각도 25°, 카메라와 피사체 사이의 거리 280 mm로 설정하였으며, 150 x 150 mm의 교정 패널을 이용하였다. 이미지 상관 해석을 위하여 25x25 픽셀(pixel)의 단위 면(facet)을 사용하였고 면 단계(facet step)은 15 픽셀로 하였다. 따라서 본 실험에서 사용한 이미지 센서는 5M 픽셀로 본 측정에서의 공간 해상도(spatial resolution)은 0.061 mm/pixel이다.

시험편의 변형에 따른 이미지 상관법에 의한 검출 민감도를 확인하기 위하여 인장 하중을 단계 하중 제어로 부하하였다. Fig. 2(a)에 나타난 표면 기공에 대한 검출을 확인하기 위한 시험편에서는 최대 60 MPa의 정적 단계 하중을 부하하였고, 내부 기공의 깊이에 따른 검출능을 확인하기 위한 복합재 시험편은 Fig. 2(b)과 같으며 최대 200 MPa의 정적 단계 하중을 부하하였다. 부하 하중 각 단계에서는 10 초동안 하중을 유지시켜 이미지 측정의 균일성을 확보하도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 이미지 상관 기법에 의한 변형률 측정

본 연구에서는 기공 결합은 이미지 상관 기법에 의한 변형률의 측정으로 기공 주위의 응력 집중 혹은 특이성의 특성을 이용하여 검출하게 된다. 이미지 상관 기법에 의하여 측정된 변형률은 이미지 상관 기법을 사용하기 위하여 3 차원 변형을 측정하게 되고 이를 위한 교정 패널을 사용하여 교정하였다. 본 연구에서는 이러한 측정의 결과를 변형률 게이지 측정 결과와 비교하여 측정 신뢰성을 확인하였다. Fig. 5는 변형률 게이지에서 측정된 응력-변형률 곡선과 이미지 상관 기법에 의하

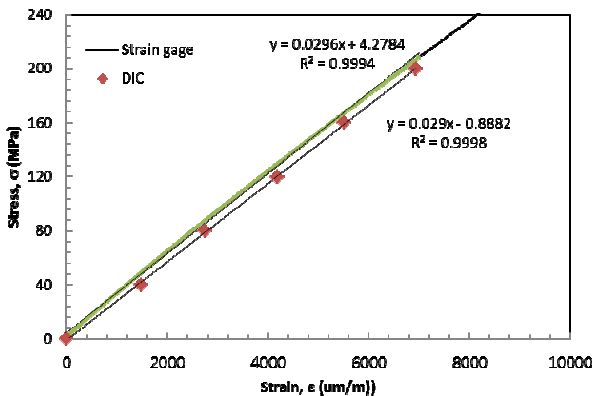


Fig. 5 The comparison of the strains by gage measurement and image correlation technique at the pure area of the specimen

여 측정된 응력-변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 2와 같은 시험편에 변형률 게이지를 앞면과 뒷면에 부착하여⁽⁷⁾ 작용 응력에 대한 변형률을 측정하였으며, 이미지 상관 기법에 의한 변형률은 Fig. 2의 시험편에 스펙클 패턴을 만들어 이미지의 이동을 변위로 계산하여 변형률을 측정하였다. Fig. 5는 본 연구에서 측정한 이미지 상관 기법에 따른 변형률의 분포를 기공이 포함된 시험편에서 얻은 것이다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 변형률 게이지에 의하여 측정된 탄성 계수는 29.6 GPa이며, 이미지 상관 기법에 의하여 얻어진 탄성 계수는 29.0 GPa이다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 이미지 상관 기법에 의한 변형률 측정은 변형률 게이지로 측정된 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 이러한 탄성 계수의 측정 일치성으로 본 이미지 상관 기법은 블레이드 복합재의 탄성 계수와 같은 인장 물성 측정에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 표면 기공 크기에 따른 검출 민감도

Fig. 6은 블레이드 복합재 표면에 존재하는 기공에 대한 이미지 상관 기법의 검출능을 나타낸다. 이미지 상관 기법에 의한 기공 검출능은 작용 하중과 기공의 크기에 의존성을 가지게 된다. 즉 기공 주위의 변형률의 크기 변화가 검출능에 영향을 미치게 되고 이는 이미지 상관 기법의 검출 해상도에 따라 그 성능이 결정되게 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 실 존재하는 기공에 대한 변형 분포를 이미지 상관 기법으로 형상화하여 이에 대한 검출능을 조사하였다. 표면에 존재하는 기공에 대하여 Fig. 1에 보여준 바와 같이 복합재 시험편에 기공의 직경이 1, 2, 3 mm인 반구형의 기공 형태를 표면에 위치시켰다. 시험편에 가해진 하중은 기공 결합이 포함되지 않은 단

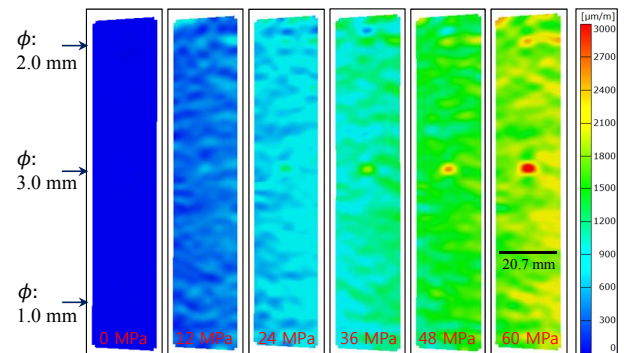


Fig. 6 ϵ_{yy} strain fields obtained by image correlation technique for the different sized pores

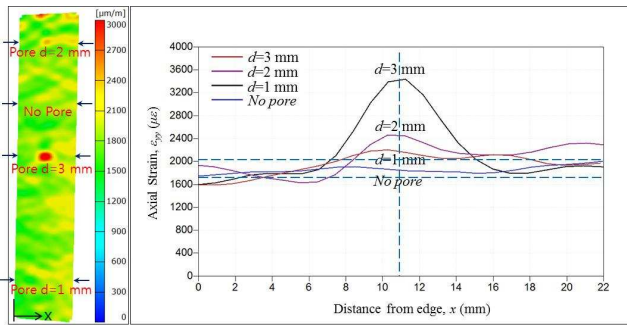


Fig. 7 Variation of ϵ_{yy} strain with the size of pores at nominal stress 60 MPa

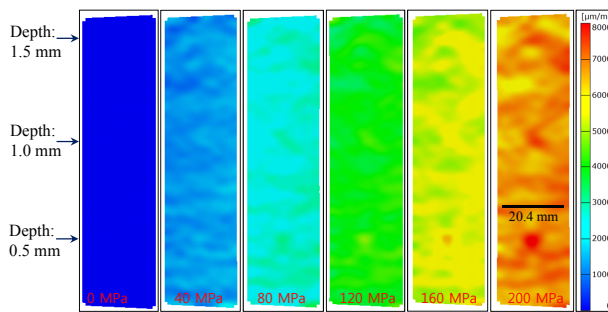


Fig. 8 ϵ_{yy} strain fields obtained by image correlation technique for the inner surface pores with different depth

면에서의 응력이 최대 60 MPa 까지 가하였으며, 5 단계로 구분하여 단계적으로 각 하중 수준에 대한 민감성을 확인하였다. 각 단계에서 기공의 존재에 따른 변형률의 분포를 Fig. 6 과 같이 얻었다. 변형률은 축 방향의 변형률, ϵ_{yy} 로 나타내었다. Fig. 6 에서 보여준 바와 같이 작용 하중의 증가에 대하여 시험편에 분포한 변형률은 기공이 포함되지 않은 단면에서 균일하게 얻어지고 있음을 볼 수 있다. 기공 크기 즉 직경에 대한 변형률의 차이는 Fig. 6 에서 보여준 바와 같이 지름 3 mm 의 기공은 하중의 초기 부하부터 주변의 변형률과 명확하게 구별될 수 있었다. 이에 비해 지름 2 mm 기공이 위치한 부분에서는 60 MPa 의 응력 상태에서만 기공 주변의 변형률의 구배가 상대적으로 작게 나타났으며, 지름 1 mm 의 기공이 위치한 부분에서는 모든 하중 상태에서 변형률의 구배를 확인하기 어려웠다. 이는 부하된 하중의 크기에 대해서 지름 1 mm 의 기공 결합에 의한 변형률의 변화가 본 연구에서 사용하고 있는 이미지 상관 기법의 측정해 상도의 범위 내에 있음을 의미한다.

Fig. 7 에는 블레이드 복합재 표면에 형성된 기공이 삽입되어 있지 않은 건전한 부분과 기공이 위치한 부분의 변형률 값을 시험편 폭 방향에 따

라 나타내었다. 부하된 하중은 최대 응력 60 MPa 이다. 기공이 포함되지 않은 단면에서의 축 방향의 변형률은 1,750 ~ 2,000 $\mu\epsilon$ 의 범위 내에 있었다. 직경이 3.0 mm 인 기공 주변에서는 최대 변형률이 3,310 $\mu\epsilon$ 으로 측정되고 있고 이는 기공에서 떨어진 위치에서의 변형률에 비하여 약 1,560 $\mu\epsilon$ 변형률 값의 차이가 나타났다. 이에 비해 직경 2.0 mm 인 기공에서는 약 740 $\mu\epsilon$ 의 변형률 값의 차이가 나타났다. 그러나 직경 1.0 mm 인 기공에서는 약 400 $\mu\epsilon$ 의 변형률 값의 차이가 나타났지만, 기공으로 인한 변형률 값의 차이로 판단할 수 없었다. 이와 같이 기공 크기에 따라 기공 검출 민감도는 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 이미지 상관 기법의 측정 해상도와 범위에 따라 그 검출능의 차이를 보일 수 있으나, 본 연구의 범위 내에서는 직경 2.0 mm 이하의 기공에서는 명확한 기공 유무를 판별하기 힘들었다.

4.3 표면 기공 깊이에 따른 검출 민감도

Fig. 8 은 블레이드 복합재 내부 표면 기공의 깊이가 다른 시험편에 대한 이미지 상관 기법에 의하여 얻어진 변형률 분포를 나타낸다. Fig. 6 과 같이 변형률 값은 시험편의 축 방향인 y 방향 변형률을 하중 부하 상태에서 나타내었으며, 시험편 전 영역에서의 변형률 값을 확인할 수 있다. 기공이 포함된 복합재 시험편에 변형률은 기공이 없는 단면에서의 응력이 최대 200 MPa 까지 부하하고, 최대 응력까지 5 단계의 하중 상태에서 기공의 검출 민감성을 조사하였다. 내부 표면에 존재하는 기공에 대하여 Fig. 6 에 보여준 바와 같이 검출 민감성이 좋은 직경 3 mm 의 기공에 해당하는 반구형 결함을 복합재 시험편에 기공 리가먼트(반구형 기공의 최대 깊이 지점과 시험편 표면간의 남은 거리)가 0.5, 1.0, 1.5 mm 가 되는 3 가지 유형으로 형성시켰다. Fig. 8 에서 보여준 바와 같이 작용 하중의 증가에 대하여 시험편에 분포한 변형률은 기공이 포함되지 않은 단면에서 균일하게 얻어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8 은 직경 3 mm, 리가먼트가 0.5 mm 인 기공이 상대적으로 명확하게 변형률의 구배를 보여준다. 이에 비해 기공 리가먼트 1.0 mm 인 기공에서는 공칭 응력 200 MPa 의 하중 부하 상태에서 뚜렷한 변형률 구배가 나타났으며, 기공 리가먼트 1.5 mm 인 기공에서는 모든 하중 부하 상태에서 변형률 구배를 통한 기공의 유무를 판별할 수 없었다.

Fig. 9 에는 내부 표면에 형성된 기공이 삽입되어 있지 않은 건전한 부분과 기공이 위치한 부분

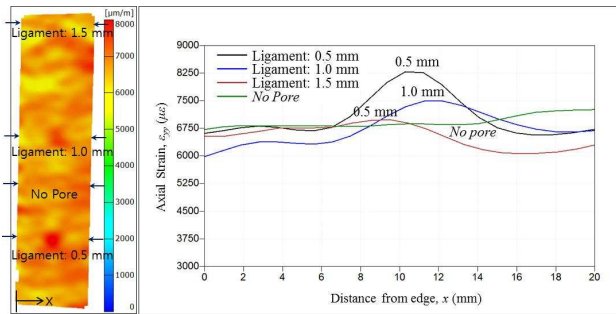


Fig. 9 Comparison of ε_{yy} strain variation with the pore ligaments at nominal stress of 200 MPa

의 변형률 값을 시험편 폭 방향에 따라 나타내었다. 부하된 하중은 최대 응력 200 MPa 이다. 기공이 포함되지 않은 단면에서의 축 방향의 변형률은 6,800 ~ 7,200 $\mu\epsilon$ 의 범위내에 있었다. 기공 리가먼트 0.5 mm 인 기공 주변에서는 최대 변형률이 8,250 $\mu\epsilon$ 으로 측정되고 있고 이는 기공에서 떨어진 위치에서의 변형률에 비하여 약 1,500 $\mu\epsilon$ 변형률 값의 차이가 나타났다. 이에 비해 기공 리가먼트 1.0 mm 인 기공에서는 약 800 $\mu\epsilon$ 의 변형률 값의 차이가 나타났다. 그러나 기공 리가먼트 1.5 mm 인 기공에서는 약 500 $\mu\epsilon$ 의 변형률 값의 차이가 나타났지만, 기공 주위에서의 분산된 변형률 분포 특성을 고려하면 이는 명확하게 구분할 수 있는 수준은 아니었다. 이와 같은 기공 리가먼트의 크기에 따라 기공 검출 민감도는 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 이미지 상관 기법의 측정 해상도와 범위에 따라 그 검출능의 차이를 보일 수 있으나, 본 연구에 범위 내에서는 직경 3 mm 의 기공에서는 기공 리가먼트가 1.0 mm 이상에서는 명확한 기공의 존재 유무를 판단하기 힘들었다.

5. 결론

본 연구에서는 이미지 상관 기법을 이용하여 하중 부하에 따른 풍력 발전 블레이드용 GFRP 복합재의 변형률을 측정하였고, 시험편의 기공 결합의 검출능을 조사하였다. 본 연구에서는 5M 픽셀을 가지고 있는 이미지 획득 시스템을 사용하여 부하 하중을 200 MPa 까지 부하하였다.

(1) 이미지 상관 기법을 사용하여 풍력 블레이드에 존재할 수 있는 표면 기공과 내부 표면 기공

의 검출이 가능하며 기공의 크기와 위치에 따른 민감도가 차이를 보이고 있다.

(2) 직경 2 mm 이상의 표면 기공 결합과 기공 리가먼트 1.0 mm 이상의 내부 표면 기공 결합은 이미지 상관 기법에 의하여 검출 가능하였다.

(3) 이미지 상관 기법을 이용하여 블레이드 복합재의 탄성 계수와 같은 인장 물성을 측정할 수 있다.

후 기

이 연구는 지식경제부에서 운영하는 신재생 에너지 기술개발사업의 지원을 받아서 수행되었습니다. (2010-N-WD09-P01)

참고문헌

- (1) Toft, H. S., Kim, B., Berring, P. and Sørensen, J. D., 2011, "Defect Distribution and Reliability Assessment of Wind Turbine Blades," *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 171~180.
- (2) Pan, B., Qian, K., Xie, H and Asundi, A., 2009, "Two-Dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement: A Review," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 20, TR 062001, pp. 17.
- (3) Revilock, D. M., Thesken, J. C., Schmidt, T. E. and Forsythe, B. S., 2007, "Three-Dimensional Digital Image Correlation of a Composite Overwrapped pressure Vessel During Hydrostatic Pressure Tests," NASA TM 214938.
- (4) Puri, A., McGuan, M. and Jensen, F. M., 2009, "Non-destructive Analysis of Wind Turbine Blade Structural Integrity," *Proceedings of PVP2009 77501*.
- (5) Kang, J. W., Kwon, O. H., Kim, T. K. and Cho, S. J., 2010, "Evaluation of Material Properties about CFRP Composite Adapted for Wind Power Blade by using DIC Method," *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 17~23.
- (6) GOM mbH, 2009, "ARAMIS User Manual," GOM mbH
- (7) Huh, Y. H., Kim, J. I., Kim, D. J. and Lee, G. C., 2012, "Temperature-Dependency of Tensile Properties of GFRP Composite for Wind Turbine Blades," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 9, pp. 1053~1057.