

SENT시험편을 이용한 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재의 노치선단부 변형률 평가

강지웅*

대구한의대학교 보건학부

(2014. 6. 19. 접수 / 2014. 7. 17. 수정 / 2014. 8. 27. 채택)

The Strain Evaluation of the Notch tip Area for the CFRP/GFRP Hybrid Laminate Plate using the SENT Specimen

Ji Woong Kang*

Faculty of Health Science, Daegu Haany University

(Received June 19, 2014 / Revised July 17, 2014 / Accepted August 27, 2014)

Abstract : The aim of this work is conduct the study on light weight and structural performance improvement of the composite wind power blade. GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) pre-empted by CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), the major material of wind power blade, was identified the superiority of mechanical performance through the tensile and fatigue test. SENT(Single Edge Notched Tension) specimen fracture test was conducted on the specimen that laminated together 2 ply CFRP with 4 ply GFRP through DIC(Digital Image Correlation) analysis. The SENT specimen thickness and a_0/W ratio is 1.45 mm and 0.2, respectively. The fracture test accomplished with displacement control with 0.1 mm/min at the room temperature. The experimental apparatus used for the fracture test consisted of a 50kN universal dynamic tester and CCD camera connected to a personal computer (PC), which was used to record images of the specimen surface. Following data acquisition, the images and load-displacements were transferred to the PC, on which the DIC software was implement. The experiment and DIC analysis results show that CFRP/GFRP laminated composite exhibits improvement of the strength, compared with that of the existing blade material. This study shows the result that the strength of CFRP rotor blade of wind turbine satisfies through the experimental and DIC method.

Key Words : blade, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), composite, digital image correlation (DIC), fatigue, GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic), hybrid, SENT(Single Edge Notched Tension), wind power

1. 서론

최근 들어 유럽의 경우 7MW급 풍력발전 설비를 상용화하면서 발전용량과 함께 블레이드, 풍력터빈, 타워 등의 전체적인 대형화를 실현하고 있다. 국내 풍력발전 설비에 대한 대응 기술력은 타워와 터빈부의 경우 건축·토목기술이 전 세계적으로 1류에 속해 있으며, 기계설비부분의 기반기술력이 세계기술수준과 동등한 위치라 평가할 수 있어 후발주자로서의 위치이지만 충분한 경쟁력이 있는 것으로 평가된다. 하지만, 대형 블레이드의 설계 및 제작 기술력은 그에 미치지 못하는 실정으로 해외설계 및 주문제작 수준에 있는 단계이다. 블레이드의 대형화를 위해서는 풍하중과 자중 등을 고

려한 강도향상과 경량화의 실현이 필수적이라 할 수 있다. 블레이드는 GFRP와 같은 (유리)섬유강화 복합재료(FRP, Fiber Reinforced Plastic)를 주재료로 하여 제작되어지는데, 최근 들어 강도향상을 위해 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 등으로 보강을 시도하는 연구가 진행되고 있다¹⁾. 블레이드는 풍하중을 받으며 회전을 통해 전력을 생산하는 역할을 담당하기 때문에 블레이드의 종향 대변형이 발생된다. 또한 장시간 가동으로 인해 블레이드의 twisted-tip 부분에서 미세균열이 발생되어 매년 균열보강을 위한 유지보수가 필요한 실정이다. 따라서 강도향상을 위해 강도와 강성이 우수한 CFRP로 보강되었다 할지라도 균열발생을 고려한 균열선단부 영역에 대한 변형률 평가는 필수적인 연구

* Corresponding Author : Ji Woong Kang, Tel : +82-53-819-1803, E-mail : kangjw@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University, Hanui-daero, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 712-715, Korea

로 사료된다.

최근 들어 변형을 평가에 주로 사용되어져온 스트레인 게이지법의 단점인 온도 및 습도에 민감하고, 약한 전기저항 때문에 오차발생 가능성이 많으며, 증폭부가 필요하다는 점을 보완한 DIC(Digital Image Correlation) 기법의 적용이 증가하고 있다.

DIC기법은 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형율을 전 영역에 대해 평가할 수 있는 방법으로, 무작위로 분포되어 있는 그레이 세기 레벨(gray intensity levels)에 의해 디지털 이미지정보를 분석함으로써 변형 전·후 시험편의 변형율을 얻을 수 있는 방법이다.^{2,4)} 변형 전·후의 디지털 이미지 상관관계를 수학적으로 정의가 명확한 함수를 사용하여 규명함으로써 변형체의 관심 있는 전 영역에서 평가가 가능하다. 또한 디지털 이미지로써 시험편 표면의 스펙클 패턴(speckle pattern)을 CCD카메라에 의하여 얻을 수 있기 때문에 전형적인 시각적 측정과 비교하여 볼 때 훨씬 간편하여 자동적이고 비접촉 측정이 가능하다.⁵⁻⁶⁾ 또한 균질하지 않은 전 영역의 변형율을 파악 할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁵⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 풍력발전 블레이드의 강도향상과 경량화를 위해 보강된 CFRP와 주재료인 GFRP의 하이브리드(hybrid) 적층판에 대해 SENT(Single Edge Notched Tension)시험편을 이용하여 균열선단부에서 발생하는 변형율을 DIC기법을 적용하여 평가하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에 사용 된 실험재료는 평직CFRP(HD C520-14)와 일방향 GFRP(UD GFRP) 프리프레그(prepreg)를 사용하였다. 프리프레그의 섬유량은 Table 1에 나타내었다. 폭 1 m 의 원단으로 생산되는 프리프레그를 가로·세로 각각 250 × 250 mm 로 절단하여 적층한 후 시험편제작에 사용하였다. 평직 CFRP와 일방향 GFRP의 기계적 물성치를 평가하기 위해 사용되는 인장 시험편은 각각 2ply로 적층 되었다. 균열선단부 변형율 평가를 위한 SENT 시험편의 경우는 Fig. 1의 (b)와 같이 GFRP 4ply 와 CFRP 2ply로 적층 되었다. 적층된 프리프레그는 열성형기

Table 1. Specification of CFRP and GFRP

	Thickness(mm)	Fiber weight(g/m ²)	Prepreg weight(g/m ²)
CFRP	0.25±0.02	203±3	356~375
GFRP	0.24±0.02	302	475~485

(hot-press ; 국내 D사, 50MPa)에서 성형하였다. 적층된 프리프레그는 Hot press기에서 초기 온도를 120 °C 까지 상승시킨 이후 대략 2 분 간격으로 1 °C 씩 상승시켜 최종 성형온도를 130 °C 로 하였다. 또한, 압력은 게이지압력 5.7 MPa 로 하여 60 분간 압력을 유지하면서 성형하였다. 1 차 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 설정 압력을 유지하면서 대기 중에 최소 2 시간 이상 공냉시켰다. 성형된 CFRP와 GFRP 그리고 CFRP/GFRP 하이브리드(hybrid) 적층판은 Fig. 1의 (a)와 같은 형상과 치수로 ASTM D 3039를 참조하여 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 인장시험편으로 절단·가공하였다. 또한, 인장시험 시 시험기의 그림으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 양 끝단에 에폭시 수지계인 아랄다이트를 경화제로 1 : 1 의 중량비로 혼합하여 알루미늄 탭(두께: 2.0 mm) 을 부착하였다. 인장시험을 할 경우에 탭 부위는 응력집중에 의한 파손 및 박리가 발생하기 쉽기 때문에 이것을 방지하기 위해 탭에 30° 의 테이퍼 각을 주었다. 이 때 시험편과 알루미늄 탭의 접착면은 인장시험 동안 접착면의 슬립을 방지하기 위해 #100의 에머라페이퍼로 거친 가공을 하고, 연마된 접착 면은 아세톤으로 세정한 후 충분히 건조시켜 접착하였다. 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(국내 K사, HY-8000S)에서 100 °C 로 30 분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시키고 동시에 탭표면을 흡가공하여 시험편의 슬립을 최소화하였다. SENT 시험편의 노치는 길이 2.0 mm로 a/W비는 0.25로 하였다.

SENT시험편의 경우는 DIC기법에 의한 변형율 측정을 위해 시험편 양면의 표면에 백색 안료(KRYLON 미국 S사, FLAT type)를 일정거리에서 분사하여 균일하게 도포하고, 완전히 건조 후 다시 흑점 패턴을 형성시켰다. 완성된 패턴형상은 Fig. 2에 나타내었다.

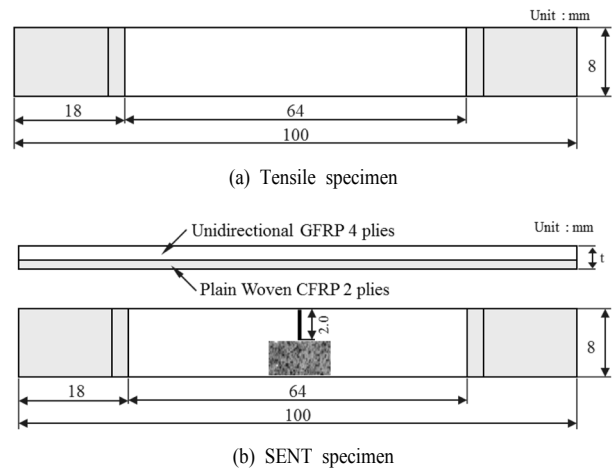


Fig. 1. Specimen configuration.

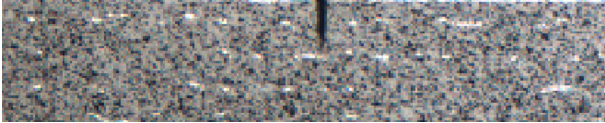


Fig. 2. Black speckle pattern for test.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시험기는 소형재료시험기(T.O.사, 5kN)를 사용하였으며, 인장 및 SENT 시험편 파괴실험은 1.0 mm/min의 변위제어로 상온에서 수행하였다.

DIC기법에 의한 변형을 측정에서 시험편의 CFRP면과 GFRP면에서 각각 나타나는 변위 및 변형율장의 측정을 위해 파괴실험 중 광섬유 조명기를 광원으로 사용하고, 1391×1039 pixel을 가지는 고해상도 CCD카메라(QICAM)로 변형영상을 일정간격으로 취득하였다.

기준 상태의 서브셋 pixel과 하중상태의 서브셋 pixel의 최적 매치 상태를 평가하는 기준이 되는 표준타겟의 이미지를 얻기 위해 표면에 원형의 점들이 2 mm간격으로 9×12개로 구성되어 있는 타겟의 이미지를 시험편과 동일한 위치에서 시험편의 형상을 얻은 경우와 동일한 카메라 조건으로 취득하였다. 또한 시험편 측면에서 발생하는 변위 및 변형율장의 측정을 위해 시험편 정면에 나타나는 변형영상을 취득한 경우와 동일한 실험조건 하에서 측면에 나타나는 변형영상을 일정간격으로 취득하였다. 획득된 변형영상은 DIC해석프로그램을 이용하여 평가하였다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

2.3 DIC 기법

DIC기법은 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형율을 전 영역에서 평가할 수 있는 방법으로 시험편 표면의 변형 전·후의 스펙클 패턴의 움직임의 변

화를 평가하여 변위장을 취득한다. 영상데이터의 스펙클 패턴으로부터 각 포인트의 변위에 대한 초기 기준 패턴에 대해 각 하중상태에서의 영상데이터에 대한 대응 패턴을 선택하여 선정한다.^{10,11)} 초기 기준 패턴으로부터 기준 상태의 서브셋 pixel과 하중이 부하된 상태의 서브셋 pixel의 최적 매치상태를 얻음으로써 x축 방향의 변위 U와 y축 방향의 변위 V를 평가할 수 있다. 최적매치는 서브셋을 나타내는 그레이 수준항으로 주어지는 에러함수를 최소화되도록 조정함으로써 얻어진다.¹²⁾ 이 방법은 임의로 분포되어 있는 그레이레벨 세기를 분석하여, 변형이 진행 된 다른 시간대의 두 개의 디지털 이미지 사이의 그레이레벨 강도를 최적화하는 것이다. Fig. 4에서와 같이 2차원 변형 상태 하에 있는 평판을 가정하면, 변형이 일어나는 동안 $P_0(x_1, x_2)$ 는 $\bar{P}_0(y_1, y_2)$ 로 이동하게 된다. 서브셋 S는 점 P_0 의 주위에서 균등한 변형이 일어나는 미소영역을 나타낸다. 이 때 S내의 $P(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ 를 고려해 볼 때 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\bar{y}_1 = \bar{x}_1 + u_1 + u_{1,1}\Delta x_1 + u_{1,2}\Delta x_2 \quad (3)$$

$$\bar{y}_2 = \bar{x}_2 + u_2 + u_{2,1}\Delta x_1 + u_{2,2}\Delta x_2$$

여기서 u_1 과 u_2 는 1, 2방향에서 $P_0(x_1, x_2)$ 의 변위를 나타낸다. $u_{\alpha,\beta}(\alpha, \beta=1, 2)$ 는 각각 $\partial u_\alpha / \partial x_\beta$ 와 $\Delta x_\alpha = \bar{x}_\alpha - x_\alpha$ 을 나타낸다. 표면의 변형 영역을 결정하기 위해서, 식(3)에서 나타나 있는 6가지의 파라미터 $u_1, u_2, u_{1,1}, u_{1,2}, u_{2,1}, u_{2,2}$ 를 얻음으로써 변형된 서브셋과 변형되지 않은 서브셋의 관심 영역(Region of Interest)에 대한 2차원적 디지털 이미지 상관관계를 적

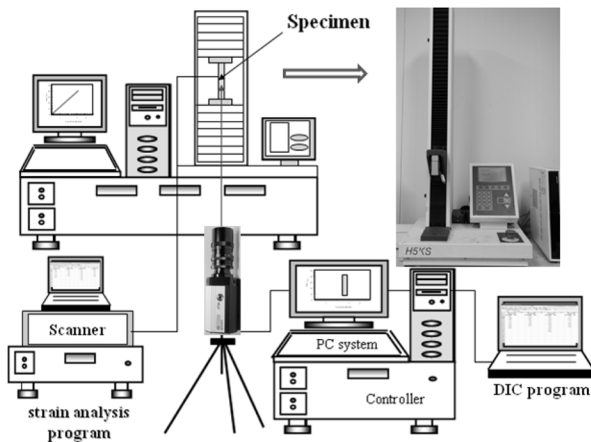


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

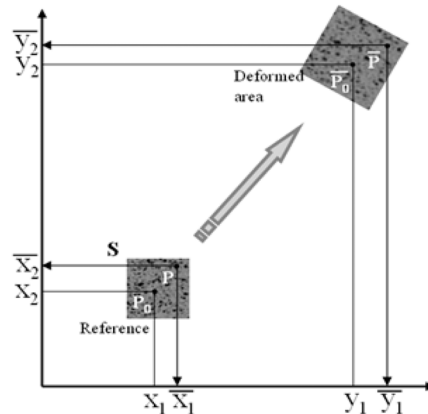


Fig. 4. The schematic local region deformation under the loading.

용한다.¹⁰⁻¹³⁾ 변형되지 않은 영역에서의 pixel은 변형된 영역에서의 non pixel 포인트 위치에 옮겨 질 수도 있기 때문에 변형된 이미지의 직사각형 영역에 놓여 있는 $P_0(y_1, y_2)$ 에서의 그레이레벨 세기를 얻어야 한다. 그레이레벨 세기의 계산은 변형된 이미지의 pixel 포인트에서 구한 세기값으로 부터의 보간법을 통해서 행해진다. 보간함수는 선형(bilinear)적, 입방(bicubic)적이다. 보간법으로 계산되어진 후 변형된 이미지와 변형되지 않은 이미지 사이의 pixel 세기를 비교한다.

$f\{P(x_1, x_2)\}$ 와 $g\{\overline{P}_0(y_1, y_2)\}$ 는 각각 변형된 형태와 변형되지 않은 형태에서의 서브셋 S의 세기이다. 이를 비교하기 위해 최소영역에 대한 상관관계계수 $C^9)$ 는 다음 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$C = \frac{\sum_{i,j=1}^n A(x_i, y_j) \sum_{i,j=1}^n B(x'_i, y'_j)}{\left[\sum_{i,j=1}^n A(x_i, y_j)^2 \sum_{i,j=1}^n B(x'_i, y'_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

P점의 변위는 P점 주위의 미소 서브셋 면적에 있어서 상관관계계수를 최소화하거나 변형 전·후의 그레이스케일 세기의 상호상관계수를 최대화함으로써 얻을 수 있다. 그레이스케일 세기는 변형 전·후에 불변이기 때문에 상관관계는 P점의 원위치와 미지의 변형 파라미터 S벡터에 의존한다. S벡터는 다음 식 (5)^{5,14)}와 같으며 오차함수를 최소화함으로써 최적의 S값을 얻을 수 있다.¹⁵⁾

$$S = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 변위속도 1.0 mm/min의 조건하에서 CFRP와 GFRP의 기계적 물성측정을 위해 수행된 인장실험으로부터의 하중-변위곡선이다. CFRP와 GFRP는 파단 시까지 안정적으로 선형적인 관계를 나타내었으며, CFRP는 변위 약 3 mm, 최대하중 6.78kN에서, GFRP는 변위 약 3.78 mm, 최대하중 4.43kN에서 파단되었다. 인장실험을 통해 얻어진 각각의 재료 특성치를 table 2에 나타내었다.

Fig. 6은 변위속도가 1.0 mm/min의 조건하에서 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재에 대한 SENT시험편의 파괴시험을 통해 얻어진 하중-변위곡선을 나타낸다. 파단 시까

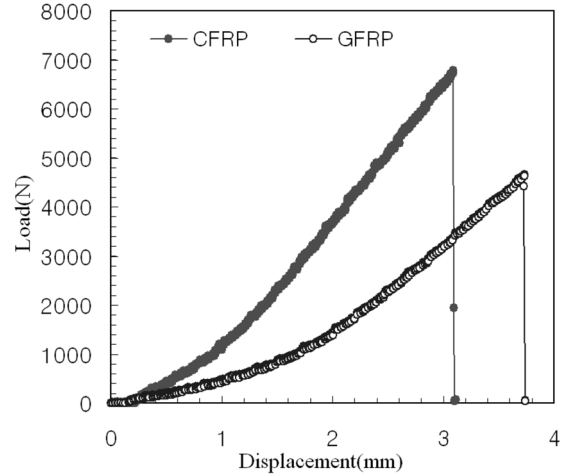


Fig. 5. A typical load–displacement curve acquired for unidirectional GFRP and plain woven CFRP under uniaxial tensile test.

Table 2. Mechanical properties for the plain woven CFRP and unidirectional GFRP

	Elastic modulus, E	Ultimate strength, σ_u	Poisson's ratio, ν
CFRP	54.3GPa	1,527MPa	0.1
GFRP	43.3GPa	1,102MPa	0.31

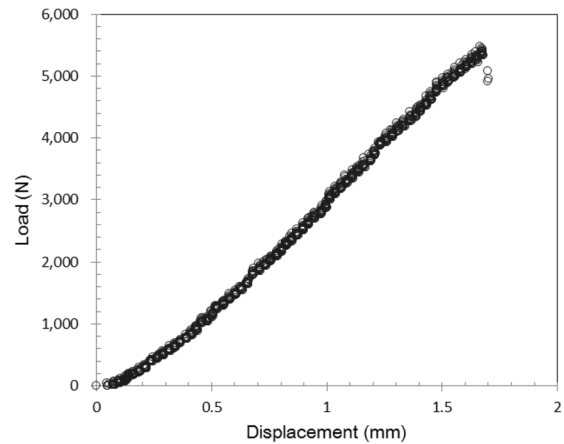


Fig. 6. A typical load–displacement curve acquired for GFRP_{4ply}/CFRP_{2ply} laminated composite with a notch under uniaxial tensile fracture test.

지 안정적으로 선형적인 관계를 나타내다 최대하중에 도달되기 전 약 98%의 하중에서 GFRP면의 섬유와 기지의 분리가 발생하였다.

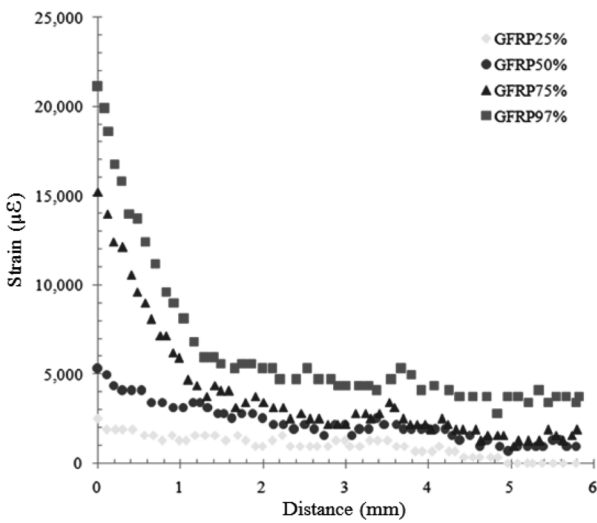
이 후 변위 1.69 mm, 최대하중 5.86kN에 도달했을 때 GFRP면에서 균열선단부 방향으로 미세 균열진전이 있는 후 수직방향으로 대규모의 섬유와 기지 분리가 발생하였으며, 약 0.1 mm의 변위 발생 후 완전파단되

었다.

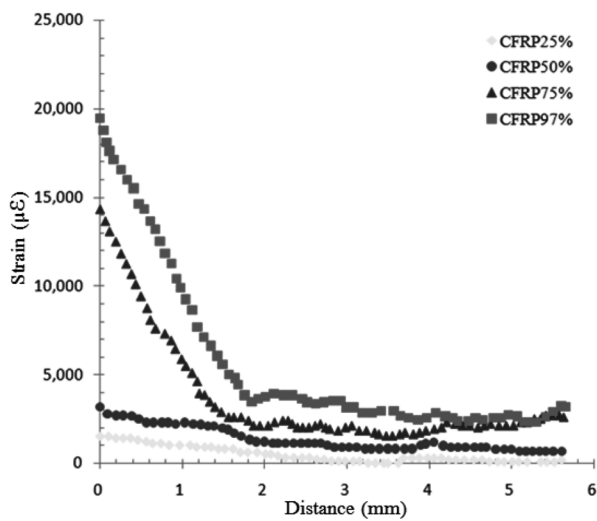
Fig. 7은 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재 SENT시험편의 파괴시험 시 파단하중의 25~97%사이에서 DIC기법을 통해 얻어진 GFRP면과 CFRP면에서 얻어진 ϵ_{yy} 값을 나타낸다.

Fig. 7(a)는 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재 SENT시험편에서 GFRP 표면의 노치 선단부에서 발생된 하중단계별 변형율(ϵ_{yy})의 분포를 나타내고 있다.

파단하중의 25, 50, 75 그리고 97%일 때 노치 선단부에서 발생된 변형율은 각각 2,510, 5,320, 15,210 그리고 19,170 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 노치선단부에서 최대 변형율이 발생하여 이후 선형적인 감소추세를 나타내



(a) GFRP surface



(b) CFRP surface

Fig. 7. An example of ϵ_{yy} strain variation in x direction at a distance of 5.6 mm from a notch tip.

다 노치선단부의 거리 약 1.35 mm 이후에서는 완만한 감소추세를 나타내었다. 또한, 완만한 감소구간에서는 균질재에서 나타나는 선형적 감소추세의 변형율 분포와는 달리 증가와 감소의 경향을 나타내는 불규칙한 분포를 나타내고 있다.

Fig. 7(b)는 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재 SENT시험편에서 CFRP 표면의 노치 선단부에서 발생된 하중단계별 변형율(ϵ_{yy})의 분포를 나타내고 있다.

파단하중의 25, 50, 75 그리고 97%일 때 노치 선단부에서 발생된 변형율은 각각 1,480, 3,210, 14,140 그리고 21,080 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 노치선단부에서 최대 변형율이 발생하여 이후 선형적인 감소추세를 나타내다 노치선단부의 거리 약 1.7 mm 이후에서는 완만한 감소추세를 나타내었다. 하지만 GFRP면에서 나타난 변형율 분포와 같이 완만한 감소구간에서는 증가와 감소의 경향을 나타내는 불규칙한 분포를 나타내고 있다. 이는 본 실험에 사용된 CFRP의 재료가 평직의 직물구조이므로 위사(weft)와 경사(warp)의 영향으로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재 SENT시험편에서 GFRP 표면의 노치 선단부 근방의 영역에서 발생된 하중단계별 변형율(ϵ_{yy}) 등고선 분포를 나타내고 있다.

하중단계는 23, 51, 75 그리고 98%로 선정하였다. 특히 98%의 하중단계에서는 파괴시험 중 최대하중에 도달 전에 GFRP면에서 섬유와 기지사이의 종(하중부하)방향 파손이 발생하였다.

Fig. 8의 23%의 하중단계에서는 GFRP가 일방향이므로 시험편 전면에서 고르게 변형율이 분포되었음을 알 수 있다. 하지만 하중단계 51%에서 부터는 노치선단부에 변형율이 집중되어지기 시작하여 하중단계가 증가

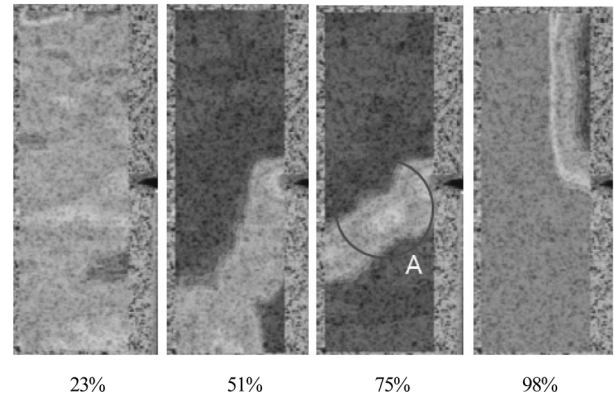


Fig. 8. ϵ_{yy} strain contours for GFRP surface of the CFRP/GFRP laminated composite obtained from DIC analysis at each percent of the maximum load.

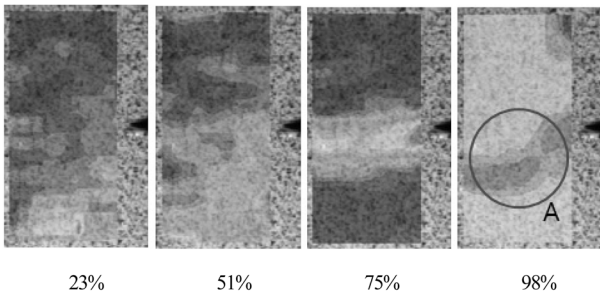


Fig. 9. ϵ_{yy} strain contours for CFRP surface of the CFRP/GFRP laminated composite obtained from DIC analysis at each percent of the maximum load.

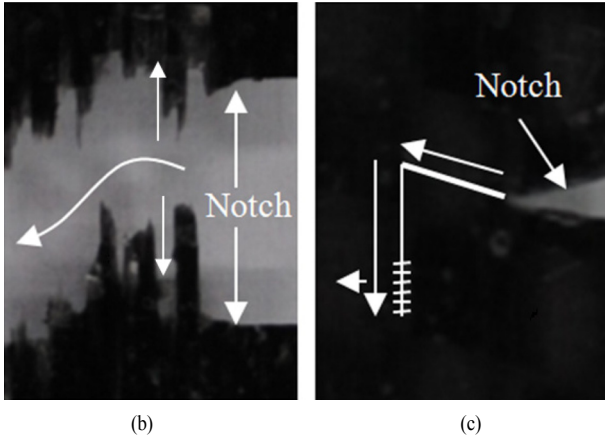
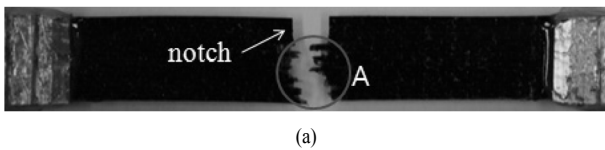


Fig. 10. The photo of the fracture at the last loading step of fracture test.

할수록 노치선단부에 변형율이 더욱 집중되었다. 하중 단계 98%에서는 섬유와 기지사이의 종방향 파괴가 발생되어 변형율이 전영역으로 집중된 형상을 나타내고 있다.

Fig. 9는 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재 SENT시험편에서 CFRP 표면의 노치 선단부 근방의 영역에서 발생한 하중단계별 변형율(ϵ_{yy}) 등고선 분포를 나타내고 있다.

하중단계는 GFRP면에서와 같이 23, 51, 75 그리고 98%로 선정하였다. 하중단계가 상승할수록 노치선단부에서 변형율이 집중되어 감을 알 수 있다. 특히 fig. 8에서 하중 75% 단계의 A영역과 fig. 9의 98% 하중단계에서의 A영역의 형상을 fig. 10의 실제 시험편 파괴형상과 비교했을 때 변형율 집중 등고선 형상과 파괴

형상이 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 SENT 시험편 파괴시험으로 인한 시험편 형상 및 파괴과정을 나타낸다.

Fig. 10 (a)에 나타난 바와 같이 A영역의 파괴형상과 fig. 8~9의 변형율 등고선의 형상은 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10 (b)는 GFRP면에서 발생한 파괴의 형상을 나타낸다. 파괴과정은 섬유와 기지사이의 종방향 파괴와 더불어 fiber bridging 현상을 보인 후 최종 파괴가 발생하였다.

Fig. 10 (c)는 CFRP면에서 발생한 파괴의 형상을 나타낸다. 직물구조 복합재료의 파괴기구는 이미 알려진 바와 같이 복잡한 구조와 과정을 가진다. 본 파괴시험에서 사용된 시험편은 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재이며, 특히 GFRP 4ply와 CFRP 2ply로 적층되었으므로 GFRP가 파괴에 미치는 영향이 컸을 것으로 판단된다. CFRP 면에서의 파괴는 최소 경사와 위사를 사선방향으로 진행된 파괴가 있는 후 경사방향의 종방향으로 파괴가 발생하였다. 이는 GFRP면에서 발생한 섬유와 기지사이의 파괴의 영향으로 판단된다. 이 후에 위사 방향에서 여러 가닥의 미세균열이 관찰된 후 최종파괴가 발생하였다.

5. 결론

본 연구에서는 풍력발전 블레이드의 강도향상을 위해 적용될 CFRP/GFRP 하이브리드 적층재의 변형율 평가를 위해 CFRP와 GFRP의 재료특성치를 구하였으며, SENT 시험편의 노치선단부 변형율 평가를 위해 DIC기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험으로 얻어진 재료 특성치를 통해 알 수 있는 바와 같이 GFRP보다 CFRP의 강도가 우수하여 블레이드의 보강재로 사용될 경우 경량화 및 강도측면에서 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 일방향 GFRP의 단점인 섬유와 기지의 분리현상을 CFRP의 소량적용을 통해서도 극단적인 파괴의 지연효과 및 강도향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 파괴형상과 변형율 등고선의 등고분포를 통해 알 수 있는 바와 같이 DIC기법은 파단이 발생 할 위치를 예측할 수 있어 실시간 평가기법에 확장 적용할 경우 재료 및 제품의 세부적인 손상 특징을 규명하는데 유용히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 블레이드의 경우 다양한 형태의 작용하중 환경에서 구동되어 지며, 주재료로 사용되어지는 적층복합

재의 경우 파괴기구가 복잡·다양하기 때문에 하중모드별 파괴시험 및 균열모니터링기법의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2012. 9~2013. 8의 기간 동안 대구한의대학교 기린연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J. -W. Kang, O. -H. Kwon, T. -K. Kim and S. -J. Cho, "Evaluation of Material Properties about CFRP Composite Adapted for Wind Power Blade by using DIC Method", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 17~23, 2010.
- 2) S. U. Yoon, K. Suk, S. H. Jo and K. S. Kang, "Non-destructive Reliability Evaluation of Electronic Device by ESPI", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol 21, pp. 630~633. 2001.
- 3) W. H. Peters, W. F. Ranson, M. A. Sutton, T. C. Chu and J. Anderson, "Application of Digital Image Methods to Rigid Body Mechanics", *Opt. Eng.*, Vol. 22, No. 6, pp. 738~742, 1983.
- 4) M. A. Sutton, W. J. Woltwr, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeil, "Determination of Displacement using an Improved Digital Image Correlation Method", *Image Vision Computer*, Vol. 1, No. 3, pp. 133~139, 1983.
- 5) Olivier De Almeida, Fabienne Lagattu and Jean Brillaud, "Analysis by a 3D DIC Technique of Volumetric Deformation Gradients : Application to Polypropylene/EPR/Talc Composites", *Composites : Part A(applied science and manufacturing)*, Vol. 39, pp. 1210~1217, 2007.
- 6) J. D. Helm, S. R. McNeill and M. A. Sutton, "Improved Three-dimensional Image Correlation for Surface Displacement Measurement", *Opt. Eng.* Vol. 35, No. 7, pp. 1911~1920, 1996.
- 7) T.A. Berfield, J.K. Patel, R.G. Shimmin, P.V Braun, J. Lambros and N.R. Sottos, "Micro- and Nanoscale Deformation Measurement of Surface and Internal Planes via Digital Image Correlation", *Society for Experimental Mechanics*, 2007.
- 8) W. H. Peter and W. F. Panson, "Digital Image Techniques on Experimental Stress Analysis", *Opt. Eng.*, Vol. 21, 1982.
- 9) M. A. Sutton, W. H. Wolter, W. F. Panson and S. R. McNeill, "Determination of Displacements using an Improved Digital Image Correlation Method", *Image Vision Computer*, 1983.
- 10) M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari, H. W. Schreier and J. J. Orteu, "The Effect of Out-of-plane Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurement", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, pp. 746~757, 2008.
- 11) E. Verhulp, B.van Rietbergen and R Huiskes, "A Three-dimensional Digital Image Correlation Technique for Strain Measurements in Microstructures", *Journal of Biomechanics*, Vol. 37, pp. 1313~1320, 2004.
- 12) R. Ambu, F. Aymerich and F. Bertolino, "Investigation of the Effect of Damage on the Strength of Notched Composite Laminates by Digital Image Correlation", *J. Strain Analysis*, Vol. 40, No. 5, 2005.
- 13) Jorge Abanto-Bueno and John Lambros, "Investigation of Crack Growth in Functionally Graded Materials using Digital Image Correlation", *Engineering Fracture Mechancs*, Vol. 69, pp. 1695~1711, 2002.
- 14) M. A. Sutton, Mingqi Cheng, W. H. Peters, Y. J. Chao and S. R. McNeill, "Application of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis", *Image and Vision Computing*, Vol. 4, No. 3, pp. 143~150, 1986.
- 15) J. D. Helm, "Digital Image Correlation for Specimens with Multiple Growing Cracks", *Society for Experimental Mechanics*, 2007.