

풍력발전기 블레이드 적용 CFRP 복합재료의 DIC 방법에 의한 재료특성치 평가

Evaluation of Material Properties about CFRP Composite Adapted for Wind Power Blade by using DIC Method

강지웅 · 권오현 · 김태경 · 조세진
J. W. Kang, O. H. Kwon, T. K. Kim and S. J. Cho

(접수일 : 2010년 5월 11일, 수정일 : 2010년 8월 10일, 채택확정 : 2010년 8월 16일)

Key Words : Wind Power(풍력), Blade(블레이드), CFRP(탄소섬유강화플라스틱), Mechanical Properties(재료특성치), DIC(디지털이미지상관계수), 4-Point Bending(4점굽힘시험), Strain Contour(변형율등고선).

Abstract : In recent, the capacity of a commercial wind power has reached the range of 6 MW, with large plants being built world-wide on land and offshore. The rotor blades and the nacelle are exposed to external loads. Wind power system concepts are reviewed, and loadings by wind and gravity as important factors for the mechanical performance of the materials are considered. So, the mechanical properties of fiber composite materials are discussed. Plain woven fabrics Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) are advanced materials which combine the characteristics of the light weight, high stiffness, strength and chemical stability. However, Plain woven CFRP composite have a lot of problems, especially delamination, compared with common materials. Therefore, the aim of this work is to estimate the mechanical properties using the tensile specimen and to evaluate strain using the CNF specimen on plain woven CFRP composites. For the strain, we tried to apply to plain woven CFRP using Digital Image Correlation (DIC) method and strain gauge. DIC method can evaluate a strain change so it can predict a location of fracture.

1. 서 론

국가 신 성장 동력산업의 하나인 풍력발전은 무한한 자원을 이용하는 지속적인 청정에너지자원으로 오래전부터 많은 관심을 가져오고 있으나 최근 들어 화석에너지의 고갈로 국내외적으로 적극적 투자 및 개발이 이루어지고 있다. 현재 상용화가 가능한 풍력발전의 크기는 3 MW를 넘어서고 있다. 풍력발전용량이 대형화됨에 따라 초대형 블레이드제작기술의 향상과 더불어 고 신뢰성 및 유지보수성이 요구된다. 특히 대형화에 따른 기술적 문제점중의 하나로 중량대비 강도상의 문제가 대두되고 있으며 블레이드 중량과 하중의 증가로 증속기의 빈

번한 파손을 초래하고 있다¹⁾. 아시아의 경우, 중국이 이미 자국의 기술력보유를 토대로 풍력발전기술력 및 그 규모가 아시아 1위를 차지하고 있다. 반면에 현재 국내 기술력은 블레이드(blade)설계 및 제작에 있어서는 해외기업으로 부터의 구조설계가 완료된 도면대로 생산하는 소극적인 외주제작형태가 많아 국내기술력보유가 상당히 미비한 실정이다. GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 주재료로 하는 블레이드 및 나셀(nacelle) 외장부에 대해서 2000년대 초반부터 유럽 등의 풍력발전 선도국에서는 외형의 규모가 대형화 됨에 따라 경량화와 구조적 강도향상을 동시에 만족시킬 수 있는 방안에 대한 각종 연구가 진행 중에 있으며 구조재료로서 CFRP를 사용하여 자중을 고려한 강도향상 연구가 필수적으로 대두된다^{2,3)}. CFRP복합재료의 비강성과 비강도는 항공기 재료로 쓰이는 대표적인 금속인 알루미늄보다 5~6배정도 크지만 탄소섬유 등으로 구성되는 복잡한 강화구조를 가지기 때문에 재료의

권오현(교신저자) : 부경대학교 안전공학부
E-mail : kwon@pknu.ac.kr Tel : 051-629-6469
강지웅 : 부경대학교 방재연구소
김태경 : 부경대학교 대학원
조세진 : 부경대학교 안전공학부

손상거동을 파악하기가 쉽지 않다 또한, 기지와 섬유사이의 재료 비연속성 때문에 기지균열(matrix crack), 섬유파단(fiber failure), 섬유와 기지간의 박리(fiber/matrix debonding), 섬유균열(fiber crack), 섬유뽑힘(fiber pull-out) 및 적층분리(delamination) 등이 발생되기 쉽다⁴⁾. 게다가 재료내부의 결함이 성장과정을 거쳐 최종과단에 이르게 되는 과단기구와 초기에 발생하는 미시결함의 검출이 곤란하다.

따라서 본 연구의 목적은 블레이드부의 경량화와 강도향상을 위해 국내 G사에서 적용한 CFRP복합재에 대하여 재료특성치를 구하는 것과 동시에 변형손상거동을 조사하고 변형을 측정에 있어서 변형에 따른 재료표면의 영상정보를 이용하여 대상 구조물 전 영역에 걸친 변형율을 얻어 블레이드 신뢰성획득에 기여하고자 하는데 있다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 평직 CFRP복합재료이며 프리프레그(prepreg)는 한국카본(주)에서 생산되는 CF 3327 를 사용하였다. 프리프레그의 섬유와 수지의 함유량은 Table 1 에 나타내었다. 폭 1m의 원단으로 생산되는 프리프레그를 구입하여 가로·세로 각각 250×250 mm로 절단하여 적층한 후 시험편제작에 사용하였다.

Table 1 Composition of the fiber and resin in prepreg

Material	CF 3327 EPC
Fiber Wt(gr/m ²)	205
Resin Wt(gr/m ²)	148
Resin Content(%)	42±2
Total Wt(gr/m ²)	353
t(mm)	0.27

평직 CFRP 복합재료의 기계적 물성치를 평가하기 위해 사용되는 인장 시험편은 6 ply로 적층되었다. 절단된 프리프레그는 CNF시험편의 초기균열 a_0 을 삽입하기 위해 22 ply와 23 ply사이에 길이 a_0/L 비가 0.4가 되도록 두께 80 μm 의 테프론과 두께 16 μm 의 알루미늄 박판을 정중앙부에 삽입하였다.

총 30 ply를 적층한 후 열성형기(hot-press ; 국내 D사, 50MPa)에서 성형하였다. 적층된 프리프레그는 열성형기에서 초기 온도를 135 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승시

킨 이후 대략 2분 간격으로 1 $^{\circ}\text{C}$ 씩 상승시켜 최종 성형온도를 140 $^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 또한, 압력은 게이지 압력 57.7 MPa로 하여 60분간 압력을 유지하면서 성형하였다. 1차 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 설정 압력을 유지하면서 대기 중에 최소 2시간 이상 공냉시켰다. 제작된 적층판의 최종 두께는 1.0 ± 0.1 mm이다.

성형된 CFRP복합재료 적층판은 Fig. 1과 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 예폭시 수지계인 아랄다이트를 경화제로 1:1의 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 에머리-페이퍼로 거친 가공을 하고, 연마된 접착 면은 아세톤으로 세정한 후 충분히 건조시켜 접착하였다. 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(국내 K사, HY-8000S)에서 100 $^{\circ}\text{C}$ 로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시킴과 동시에 탭표면을 흡가공하여 시험편의 슬립을 최소화하였다.

내부균열의 모드II 층간파괴거동을 평가하기 위하여 CNF시험편을 사용하였다. 실험은 4점 굽힘시험을 채택하였으며 완성된 시험편 형상은 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다.

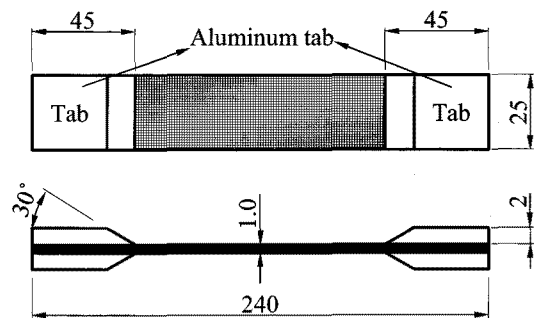


Fig. 1 Tensile specimen configurations

제작된 시험편은 DIC(Digital image correlation) 측정을 위하여 통풍이 잘 되는 곳에서 백색 안료(KRYLON 미국 S사, FLAT type)를 20~30 cm 거

리에서 분사하여 시험편 표면을 균일도포하고, 완전히 건조 후 다시 흑점 패턴을 형성하였다. 형성된 흑점 패턴의 한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 인장시험편의 경우는 전면에 형성하였고 4점 굽힘시험편의 경우는 측면에 형성시켰다. 흑점패턴의 밀도 및 크기는 측정결과에 영향을 미치지 않는 범위에서 가능한 세밀하게 균일분포가 되도록 하였다.

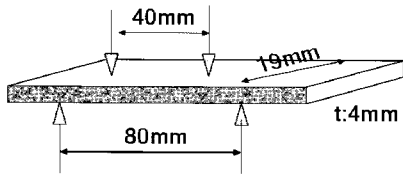


Fig. 2 Four point flexural specimen configuration

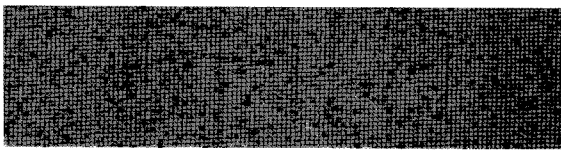


Fig. 3 The typical black speckle pattern for DIC method

2.2. 실험방법

평직 CFRP 복합재료의 탄성계수, 프아송비 및 인장강도 등 기본적인 기계적 재료 물성치 측정은 종횡 2방향 변형률 게이지를 부착한 인장 시험편으로 상온에서 만능동적 시험기(H사, 50 kN)와 소형 만능재료시험기(T.O.사, 5kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D 3039를 참고하여 0.1 mm/min의 변위 제어로 수행하였다. 세로 가로방향 변형율을 측정하기 위하여 Model 5100B Scanner(V사)를 이용하였으며, 이 때 얻어진 결과는 PC에 입력되고, 전용 데이터 처리 프로그램을 사용하여 신호를 분석하고 획득하였다. Fig. 4는 실험장치 개략도이다. DIC기법에 의하여 시험편의 표면에 나타나는 변위 및 변형율장의 측정을 위하여서는 인장시험 중 시험편 변형 영상을 1391×1039 픽셀을 가지는 고해상도 CCD카메라(QICAM)로 일정간격으로 취득하였다. 광원은 광섬유 조명기를 사용하였으며 획득된 변형 영상은 DIC 해석프로그램을 이용하여 평가하였다. 영상데이터의 스펙클 패턴으로부터 각 점의 변위에 대한 초기 추측치는 각 하중상태에서의 기준 영상 데이터에 대한 대응 패턴을 선택하여 선정되었다. 초기 추측치로 부터 기준 상태의 서브셋 픽셀과 하중상태의 서브셋 픽셀의 최적 매치상태를 얻음으로

써 U, V 변위를 평가하여 변형율을 얻을 수 있다. 최적매치는 서브셋을 나타내는 그레이 수준 향으로 주어지는 오차함수를 최소화되도록 조정함으로써 얻어진다.

2.3. DIC수법

DIC는 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형율을 전장에서 실시간으로(full-field real time) 평가할 수 있는 방법으로 시험편 표면의 변형 전·후의 스펙클 패턴의 움직임을 평가하여 변위장을 얻는다.⁵⁾

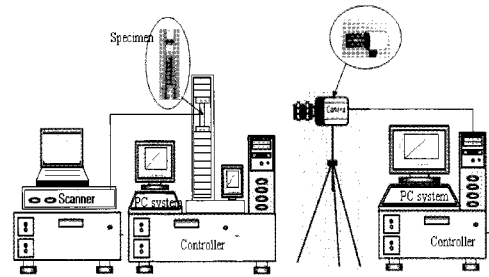


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

이 방법은 시험편의 표면에 임의로 분포되어 있는 그레이레벨 강도(intensity gray levels)를 분석하여, 변형이 진행 된 다른 시간대의 두 개의 디지털 이미지 사이의 그레이레벨 강도를 최적화 하는 것이다.

시험편의 균일한 국부 미소영역 서브셋을 지정하여 임의의 점 A의 인접 점 B의 변형 전 좌표계(x, y)와 변형 후 좌표계(x', y')가 다음 식(1)으로 얻어진다. 여기서, u, v는 기존 점의 변위성분을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} x' &= x + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ y' &= y + v + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 두 개의 변화하기 쉬운 임의의 점 A(x, y)에 대한 변형 후의 점 B(x', y')에 대한 상관관계계수는 다음 식 (2)에 의해 주어진다.

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

A점의 변위는 A점 주위의 미소 서브셋 면적에

있어서 최소자승상관계수를 최소화하거나 변형 전후의 그레이스케일 강도의 상호상관계수를 최대화함으로써 얻어질 수 있다.

그레이스케일 강도는 변형 전후에 불변이기 때문에 상관관계는 A점의 원위치와 미지의 변형 파라미터 S 벡터에 의존한다. S 벡터는 다음 식 (3)과 같으며 오차함수를 최소화함으로써 최적의 S 값을 얻을 수 있다.^{6,7)}

$$S(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (3)$$

3. 재료특성평가 결과

평직 CFRP 적층 복합재료의 전형적인 인장시험에 대한 결과로서 응력 - 변형률 선도를 Fig. 5에 나타내었다. 응력 - 변형률 선도는 거의 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 얻어진 기계적 재료 특성치는 Table 2에 나타내었다.

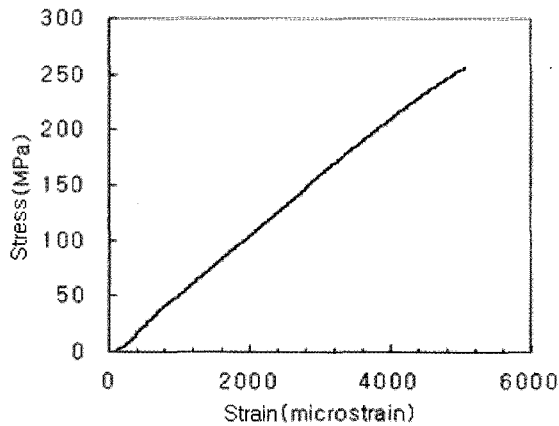


Fig. 5 A typical stress-strain curve acquired for a plain woven CFRP composite under uniaxial tensile test

Table 2 Mechanical properties of tensile specimen

Tensile modulus, E	53 GPa
Ultimate strength, σ_u	800 MPa
Elongation	1.0 %
Poisson ratio, ν	0.1

Fig. 6에 DIC 수법에 의하여 얻어진 변형률 등고선을 나타내었다. 변형률의 값은 수직변형률이며 시험편 전 영역에 대한 변화를 볼 수 있다. 시험편에 보여지는 변형률 등고선의 분포는 균질재와는 약간

다른 양상을 나타내고 있는데 초기 하중에서부터 약 1000 μm 미만의 미소 변형률영역에서는 경사방향으로 탄소섬유소의 교차와 기지인 에폭시의 낮은 탄성계수 영향으로 인하여 섬모양의 등고선이 전체적으로 발생되고 있다. 이후 변형률의 변화는 안정적으로 성장하여 시험편 중심으로 밴드모양을 이루면서 변형률이 상승하고 있는 것을 나타낸다.

Fig. 7은 변형률게이지 측정에서 얻어진 수직변형률과 DIC방법에 의하여 얻어진 등고선에서 시험편 중심부의 수직변형률의 값을 비교한 것이다.

1000 μm 이하에서는 하향측정되고 있는 경향이 있으나 이후 다소 편차가 발생됨에도 불구하고 전체적으로 볼 때 DIC방법에 의한 변형률값은 변형률게이지측정에 의한 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이것을 고려해 볼 때 DIC방법의 특징은 영상을 획득하는 카메라렌즈의 성능과 촬영조건에 따라 다소 오차가 발생할 수는 있으나 관심대상 전 영역에 대한 전반적 변형률을 측정하는데는 매우 우수한 특징을 나타낸다고 여겨진다.

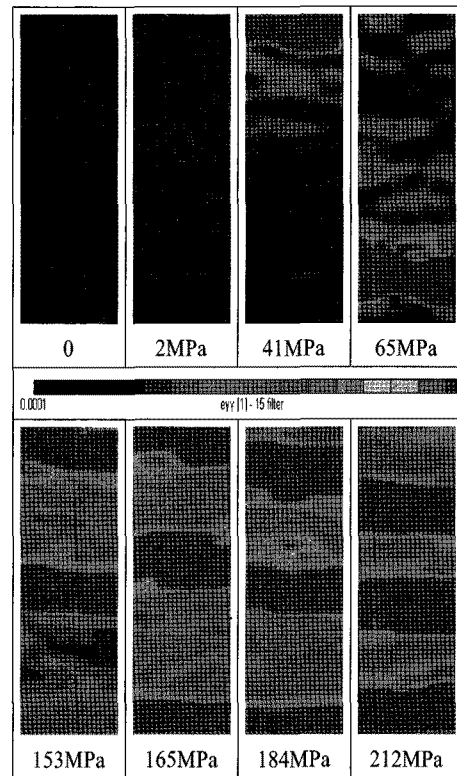


Fig. 6 The ϵ_{yy} strain fields by DIC method at each stress step

Fig. 8은 4점 굽힘시험에서 얻어진 굽힘하중과 변위와의 관계를 나타낸다. 파단지점까지 하중과 변위

는 선형적인 관계를 유지하고 있다. 시험은 시험편 단면 내부중앙에 종방향으로 $a_0/L=0.4$ 의 비율로 테프론을 삽입하여 초기균열의 역할을 대행하였으며 1 mm/min 하중속도로 변위제어하였다. 시험편 하단부 중앙지점에서의 변형율을 DIC방법을 이용하여 측정하였다.

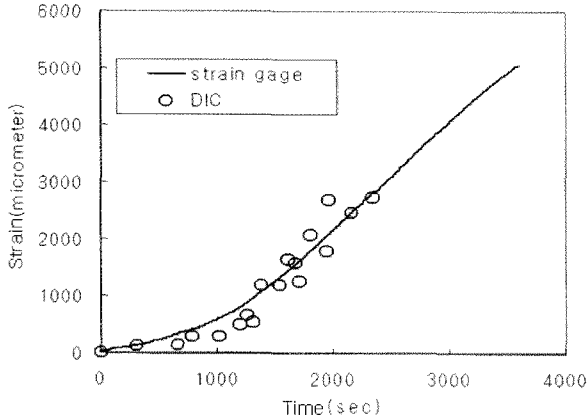


Fig. 7 The comparison of the strains by gage measurement and DIC method at the center of the specimen

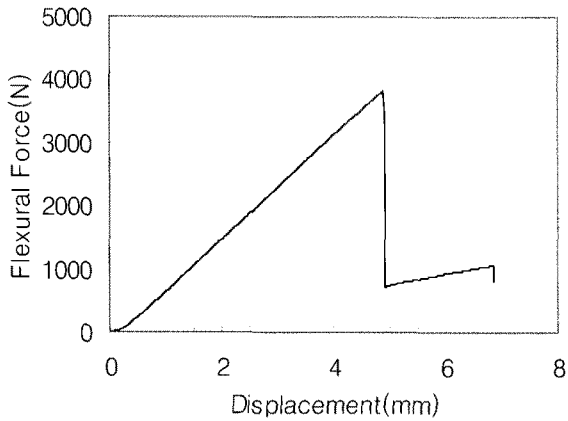


Fig. 8 The relationship of the flexural force and displacement

Fig. 9는 DIC법으로 추출한 단면의 ϵ_{xx} 의 값의 변화를 나타낸 것이다. 각 변형율 등고선은 각각 주어진 단계에서의 변형정보를 보여주고 있으며 전 영역에서 변형율의 변화를 잘 나타내고 있다. 4점굽힘시험은 하중접촉점의 형태나 접촉지지점의 자유도 등의 경계조건에 따라 매우 민감하게 작용한다⁸⁾. 본 실험에서는 굽힘이 진행됨에 따라 하단부 중앙 지점에서 좌측으로 약간 비껴난 지점에서 최대인장 변형율이 발생되어 굽힘하중이 증가함에 따라 변형

율의 값도 점차 증가하고 있다. Photo. 1에서 알 수 있듯이 최대변형율이 발생하는 지점에서 파단이 발생되어 좌우로 박리현상이 나타나고 있다. DIC에서 얻어진 결과와 사진의 최종 파단사진의 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

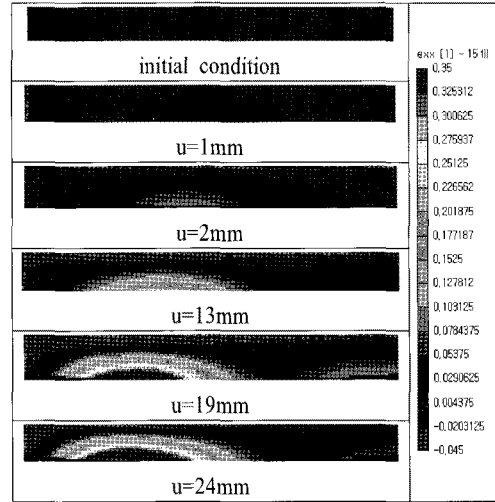


Fig. 9 Strain field contours according to the displacement step

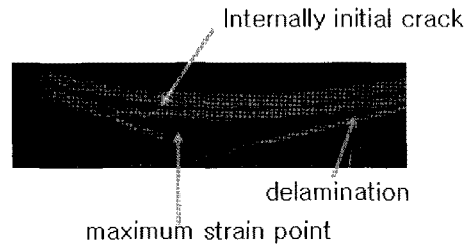


Photo. 1 The photo of the fracture with delamination at the last loading step of 4-point flexural bending test

탄성이론에 의하면 인장이 발생하는 면에서의 굽힘탄성계수 E_b 와 굽힘응력은 다음 식으로 주어진다⁹⁾.

$$\sigma = \frac{3P(L-l)}{2bh^2} \quad (4)$$

여기서 P는 하중이고 b, h, L 그리고 l은 각각 폭, 높이, 상하부 스패길이를 나타낸다. 또한 DIC측정에 의한 변형율을 식(4)에 적용하면 굽힘탄성계수는 다음 식(5)에 의해 얻어진다.

$$E_b = \frac{3P(L-l)}{2\epsilon bh^2} \quad (5)$$

여기서 ϵ 은 길이방향 변형율을 나타낸다.

Fig. 10은 4점 굽힘시험 동안에 주어진 하중을 이용하여 식(4)에 의한 응력값과 DIC에 의해 구해진 변형율과의 관계를 나타낸 것이다. 식(5)에 의하여 굽힘탄성계수를 구하면 2.1 GPa를 얻었다.

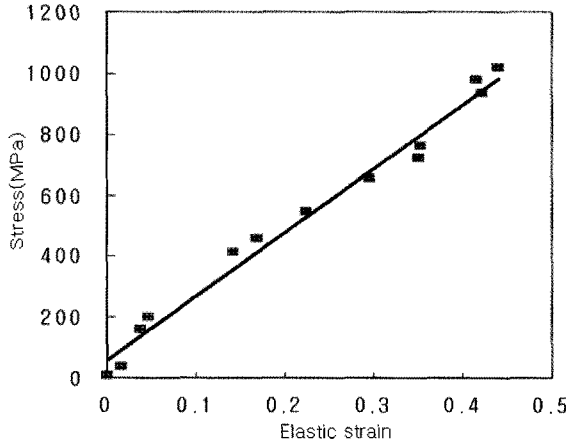


Fig. 10 Comparison of behavior curve obtained by DIC strain and by theory stress

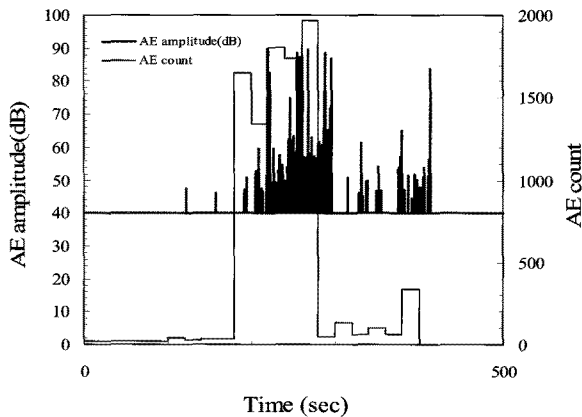


Fig. 11 The relationship AE amplitude and AE counts with time

Fig. 11 은 4점굽힘시험 동안에 AE 센서를 시험편 우측 상단 표면에 부착하여 얻어진 AE 카운트와 진폭의 결과를 시간축에 대하여 나타낸 것이다. AE 측정에는 PAC-AEDSP16 시스템과 공진주파수를 가진 R15센서를 사용하였다. 얻어진 AE 신호는 해석처리프로그램인 MISTRAS-2001을 사용하여 분석하였다. AE 카운트는 시험편에 가해지는 손상의 정도를 나타내는 것으로 AE 카운트의 증가는 손상 빈도의 증가를 의미한다¹⁰⁾. Fig. 11에서 보면 160 초 근방에서 1600이상의 카운트가 처음 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 이 지점부터 AE진폭 역시 대량으

로 발생되기 시작하며 89 dB 까지 급격히 상승하고 있다. AE진폭은 손상에 대한 크기를 나타내는 것으로 시험편 내부에 존재하는 초기균열부위의 손상이 시작되고 있음을 나타낸다. 카운트 및 진폭의 변화는 거의 유사한 형태로 나타나고 있으며 280 초 부근까지 내부 변화가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이것은 초기 균열 단으로 부터 wrap (0)방향으로 손상이 발생된 후 섬유교차지점인 weft 방향으로 일부 진행됨에 따라 AE 신호가 증가 감소를 오르내리며 지속적으로 weft 방향으로 진행하여 적층분리가 발생되고 있음을 나타낸다. 이후 일부 남은 섬유소의 파단을 동반하다가 최종 파단에 이르게 되는 것을 나타낸다. 이것은 DIC측정에 의한 경향과 유사한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드부의 경량화와 강도향상에 사용되는 CFRP복합재에 대하여 인장실험 및 4점 굽힘실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 53 GPa의 탄성계수 등을 얻었으며 DIC방법을 이용한 변형율과 변형율계이지 측정에서 얻어진 수직변형율의 값을 비교하여 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (2) DIC방법에 의해 획득한 전 영역의 변형율 등고선은 균질재와는 약간 다른 양상을 나타내어 초기 하중에서부터 약 1000 μm 미만의 미소 변형율영역에서는 경사방향으로 탄소섬유소의 교차와 기지인 에폭시의 낮은 탄성계수 영향으로 인하여 섬모양의 등고선이 전체적으로 발생하였다.
- (3) 4점 굽힘시험에 의한 굽힘탄성계수는 2.1 GPa를 얻었으며 DIC 각 변형율 등고선은 각각 주어진 단계에서의 전 영역 변형율 변화를 잘 보여주어 굽힘손상평가에 적용가능하였다.
- (4) 본 연구에서 적용한 DIC 및 AE기법을 풍력발전설비에 확장적용할 경우 구조물 평가에 유용히 사용될 수 있을 것으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구

참고문헌

1. Dayton A. Griffin, 2001, "WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1-Composite Blades for 80-to 120-Meter Rotor", NREL/SR-500-29492.
2. Gunjit S. Bir and P. Migliore, 2004, "Computerized Method for Preliminary Structural design of Composite for Two-and Three-Blade Rotors", NREL/TP-500-31486.
3. J. Selwin Rajadurai et al., 2008, "Finite element analysis with an improved failure criterion for composite wind turbine blades", *Forsch Ingenieurwes*, Vol. 72, pp. 193~207.
4. M. Arai et al., 2007, "Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nano fiber", *JSME Annual Meeting*, pp. 667~668.
5. Standard test method for "Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.", *ASTM D 3039*, 2000.
6. D. Lecompte, A. Smits and S. Bossuyt, 2006, "Quilty assessment of speckle patterns for digital image correlation", *Optics and lasers engineering*, Vol. 44, pp. 1132~1145.
7. S. R. Mcneil, W. Peters and M. A. Sutton, 1987, "Estimation of stress intensity factor by digital image correlation", *Engineering fracture mechanics*, Vol. 28, pp. 101~112.
8. G. Quinn, 1990, "Flexure strength of advanced structural ceramics", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 74, pp. 2037-2066.
9. H. Maikuma, J. W. Gillespie and J. M. Whitney, 1989, "Analysis and experimental characterization of the center notch flexural test specimen for mode II interlaminar fracture", *Journal of composite materials*, Vol. 23, pp. 756~786.
10. Yu-Sung Yun and Oh-Heon Kwon, 2006, "The evaluation of interlaminar fracture toughness and AE characteristics in plain woven CFRP composite with ENF specimen",