

DIC에 의한 복합재료 변형측정 An Estimation of Deformation for Composites by DIC

권오현*† · 강지웅**

Oh-Heon Kwon*† and Ji-Woong Kang**

(접수일 : 2014년 02월 14일, 수정일 : 2014년 05월 29일, 채택확정 : 2014년 06월 09일)

Abstract: The estimation of deformation and strain for the twill-weave carbon fiber reinforced plastic composite(CFRP) during the test with a digital image correlation system were implemented experimentally. The carbon fiber reinforced plastic composites have been developed as the edge technology materials. The plain, twill and satin weave types are commonly used for the CFRP composites. Thus, it is essential to find the deformation characteristics for those types of CFRP more easily. Especially the DIC method can express the visual strain distributions at the full range of the interested areas in the structures. In this study, the mechanical properties of twill-weave CFRP composite and the variation of strains in a full field of the specimen were estimated. The experiments were performed under a tensile loading and 3-point bending test with strain gages. Futhermore the DIC deformation results were estimated for the comparison. The results showed the deformation and strain contours visually well in all region of the interested areas and so usefulness for the safety control of the structures.

Key Words : Twill-Weave, Carbon Fiber Reinforced Plastics, Digital Image Correlation, Strain Contours

1. 서 론

지난 수 십년간 섬유복합재료는 기계적 및 전기적 특성의 우수성으로 첨단재료로 각광받으며 발전되어 왔다. 특히 탄소섬유복합재료(Carbon fiber reinforced plastic composite: CFRP)는 일반 산업분야뿐만 아니라 비강성, 고 효율때문에 항공 우주공학 구조 재료로 널리 사용되어져 왔다.¹⁻²⁾ 능직은 평직에 비하여 날줄과 씨줄의 교차점이 많아 비교적 유연성을 가지고 있어 가공성이 우수하지만 다양한 방법으로 적층되어 사용될 때

구조의 복잡성 때문에 정확한 기계적 특성을 얻기가 어렵고³⁾ 구조물 가동 중에 발생하는 변형을 평가하기가 곤란하다. 특히 전기 저항식 변형율게이지에 의한 측정은 국부적 변형에 대한 값을 나타내고 있으며 섬유복합재료와 같은 경우에는 섬유의 방향에 따른 평균값으로 간주할 수 있다. 한편 유한요소법 등을 이용하여 전체적인 보완된 변형을 및 응력 등을 구할 수 있으나 모델링에 많은 노력이 할애된다. 따라서 보다 능률적인 변형율 측정법이 필요하게 되며 이미지 상관관계를 이용한 DIC (Digital image correlation)기법⁴⁾이 매

*† 권오현(교신저자) : 부경대학교 안전공학과

E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469

**강지웅 : 대구한의대학교 보건학부

*† Oh-Heon Kwon(corresponding author) : Department of Safety Engineering, Pukyong National University.

E-mail : kwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6469

**Ji-Woong Kang: Faculty of Health Science, Daegu Haany University.

우 유용하다. DIC 기법은 변위 및 변형율을 대상 구조물의 전체 영역에서 가동 중 평가할 수 있는 방법으로 표면의 변형 전·후의 움직임을 이용하며 비교적 평가가 간편하다. 본 연구에서는 2x2 능직 CFRP복합재료에 대한 변형을 보다 명확하고 광범위영역에서 평가하기 위하여 균질재료에 일반적으로 사용되는 전기 저항식 스트레인 게이지와 함께 DIC기법을 적용하였다. 시험편은 인장 시험편과 3점 굽힘 시험편을 사용하였으며 표면의 변형을 측정된 후 DIC 평가로 기계적 특성치와 시험편 전 관심영역에 대한 변형율의 변화를 얻고 그 유용성을 나타내었다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 능직 CFRP복합재료이며 프리프레그(Prepreg)는 현대카본(주)에서 생산되는 C 520-14를 사용하였다. 프리프레그의 섬유와 수지의 함유량은 Table 1에 나타내었다. 폭 1m의 원단으로 생산되는 프리프레그를 구입하여 가로, 세로 각각 250mm로 절단하여 적층한 후 시험편제작에 사용하였다.

Table 1 Composition of the prepreg

Material	Fabric weight (g/m ²)	Prepreg weight (g/m ²)	R/C (%)	Thickness (mm)	Weave
C520	203	365	45±1	0.25±0.02	2/2 Twill

능직 CFRP 복합재료의 기계적 물성치를 평가하기 위해 사용되는 인장 시험편용은 2장(ply) 적층하였으며, 3점 굽힘시험편용으로는 20장(ply)으로 적층한 후 열성형기 (Hot-press ; 국내 D사, 50 MPa)에서 성형하였다. 적층된 프리프레그는 열성형기의 초기 몰드 온도를 130℃까지 상승시킨 후 1℃/min 씩 상승시켜 최종 성형온도가 140℃를 유지하도록 하였다. 또한, 57.7MPa 게이지압력에서 60분간 유지하면서 성형하였다. 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 설

정된 압력에서 2시간 이상 공냉시켰다. 제작된 적층판의 최종 두께는 각각 0.5±0.03 mm 및 3.16±0.01mm 로 측정되었다. 성형된 능직 CFRP 복합재료 적층판은 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 ASTM D 3039⁵⁾를 기준으로 정밀 다이아몬드 블레이드를 사용하여 인장시험편으로 절단 가공하였다. 또한, 시험기 척으로부터 손상 및 미끄러짐을 방지하기 위하여 인장 시험편 양 끝단에 예폭시 수지계인 아랄다이트로 알루미늄 탭(두께 : 2.0mm)을 부착하였다. 탭 부위에 발생하기 쉬운 응력집중에 의한 파손을 방지하기 위하여 탭에 30°의 테이퍼 각을 주었다. 이 때 시험편과 알루미늄 탭의 접착면은 인장시험동안 미끄러짐이 발생하지 않도록 #100의 에머리-페이퍼로 거친 표면가공을 하고, 아세톤으로 세정한 후 충분히 건조시켜 접착하였다. 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(HY-8000S)에서 100℃로 30분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켰다. 또한 탭 표면을 흠 가공하여 시험편의 슬립을 완전 제거하였다. 인장시험편은 Fig. 1에 나타낸다.

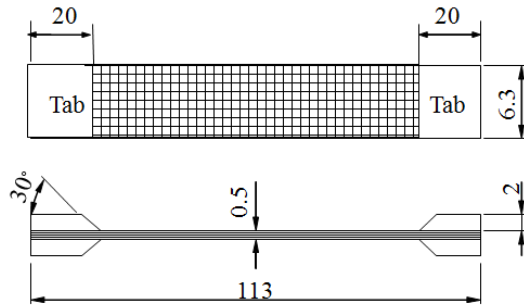


Fig. 1 Tensile specimen configurations(unit:mm).

또한 재료의 굽힘 강성을 평가하기 위하여서는 3점 굽힘 시험을 수행하였으며 사용된 시험편 형상과 셋업은 Fig. 2에 나타낸다. 3점 굽힘 시험편의 길이, 폭 및 두께는 각각 100mm, 10.19 mm, 및 3.16mm 이며 적층방향은 동일 방향을 채택하였다. 하중 지지점 스패ん 길이는 80mm로 선정하였다. 시험편은 DIC 측정을 위하여 백색 안료 (KRYLON 미국 S사, FLAT type)를 표면코팅기로 시험편 표면에 박막 균일도포하고, 완전히 건조

후 다시 흑색 안료를 분무 분사하여 백색 표면에 임의 크기의 흑점 패턴을 Fig. 3과 같이 형성하였다. 인장시험편의 경우는 전면에 형성하였고 3점 굽힘 시험편의 경우는 측면에 형성시켰다. 흑점 패턴의 밀도 및 크기는 가능한 균일분포가 되도록 하였다.

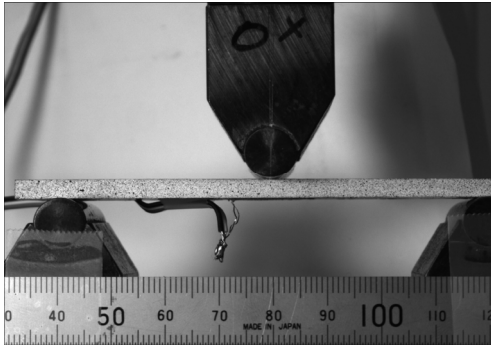


Fig. 2 Three points flexural test and jig setup.

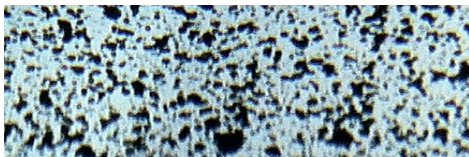


Fig. 3 A typical black speckle pattern for DIC.

2.2. 실험방법

능직 CFRP 복합재료의 탄성계수, 프아송비 및 인장강도 등 기본적인 기계적 재료 물성치 측정은 중축 2방향 변형률 게이지를 부착한 인장 시험편으로 상온에서 소형 만능재료시험기 (T.O.사, 5kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D-3039를 참고하여 1mm/min의 변위제어로 수행하였다. 변형율을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 시험편 표면에 부착한 후 Model 5100B Scanner(V사)를 이용하였으며, 이 때 얻어진 결과는 PC에 입력되고, 전용 데이터 처리 프로그램을 사용하여 신호를 분석하고 획득하였다. 3점 굽힘시험은 ASTM D-7264⁹⁾에 준하여 수행하였다. 또한 굽힘 시험편의 인장 쪽 배면 중앙에 스트레인 게이지를 부착하여 DIC 측정과 동시에 측정하였다. Fig. 4는 전체 실험장치 개략도이다. DIC기법에 의하여 시험

편의 표면에 나타나는 변위 및 변형율장의 측정을 위하여서는 인장 및 굽힘시험 중 시험편 변형 영상을 1391×1039 픽셀을 가지는 고해상도 CCD 카메라(QICAM)로 일정간격으로 취득하였다. 광원은 광섬유 조명기를 사용하였으며 획득된 변형영상은 DIC 가법을 이용하여 평가하였다.

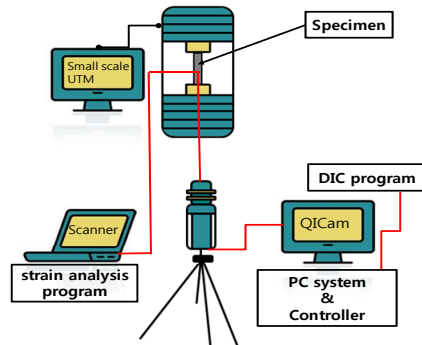


Fig. 4 Schematics of the experimental apparatus.

2.3. DIC 평가수법

DIC는 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형율을 전체 영역에서 실시간으로 평가할 수 있는 방법으로, 대상물 표면의 변형 전·후에 있어서의 흑점 패턴의 움직임을 비교 평가하여 변위장을 계산하고 변형율을 얻는다.⁷⁾ 이 방법은 시험편의 표면에 임의로 분포되는 명암도 세기를 분석하여, 변형이 진행 된 다른 시간대의 두 개의 디지털 이미지 사이의 명암도 세기를 최적화 하는 것이다. DIC기법을 이용한 전형적 평가방법은 다음과 같다. 우선 측정을 위한 관심영역을 지정하고 지정된 관심영역을 촬영하도록 2대의 CCD 카메라와 렌즈를 설치한다. 이때 렌즈 위치와 카메라의 설치하는 시험편 변형에 따라 초점변화를 고려하여 설정한다. 동일한 카메라를 나란히 배열하고 교정 타킷을 이용하여 2대의 카메라에 대한 교정을 실시한다. 이때 2대의 카메라에서 각각 촬영되는 이미지는 지연 시간없이 동시성을 유지하도록 한다. 다음에 시험편을 장착하고 실험을 수행한다. 이미지는 실험 변위속도를 고려하여 10초당 1매가 자동 획득되도록 하였다. 변형 이미지는 실험동안 N쌍이 얻어져 DIC평가에 사용된다. 평가

를 위하여 카메라 1에서 얻어진 최초의 이미지를 기준 이미지로 선정한다. Fig. 5에 나타내는 것처럼 초기 형태를 결정하기 위하여 카메라1에서 서브셋(subset)이 결정되고 카메라2에 대한 초기 이미지에서의 매칭 위치를 얻기 위하여 이미지 상관관계가 해석 수행된다. 상관관계 결과에서 얻어진 중심 위치를 이용하여 초기 물체형상을 나타내는 점의 집합을 얻고, 각 하중 단계에서 카메라 이미지의 상호 매칭과 점의 생성으로 변형된 시편 형상을 얻는다. 변형된 대상물의 변위를 결정하기 위하여서는 카메라1에서 서브셋이 결정되고 이미지 상관관계해석이 수행된다. 이 해석은 카메라2에 대한 초기 이미지에서의 매칭 위치를 얻고, 카메라1에 의해 관찰되는 것처럼 변형된 상태에서 매칭 위치를 결정할 수 있다. 또한 카메라2에 의해 관찰된 동일 변형 이미지에서의 매칭 위치를 알려주게 된다. 이 결과로부터 변형이후 각 점에 대한 변위벡터를 정의할 수 있다⁸⁾.

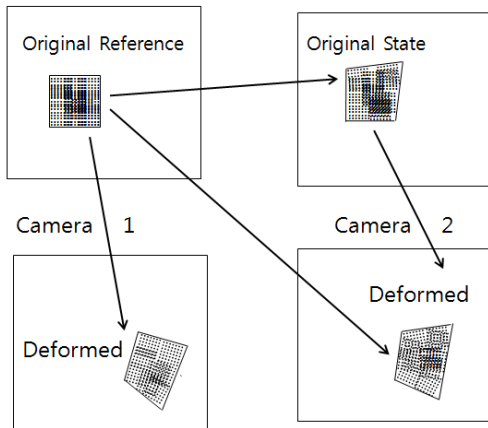


Fig. 5 Schematics of procedure to estimate deformations during before and after by 2 cameras.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장 및 굽힘 시험 결과

Fig. 6은 인장시험에서 얻어진 응력-변형률 관계곡선이다. 실험은 약 4.8kN 정도에서 정지하였으며 종 방향으로 부착한 스트레인 게이지로부터

변형률은 $1928\mu\epsilon$ 가 측정되었다. 탄성계수 E는 72GPa로 얻어졌다.

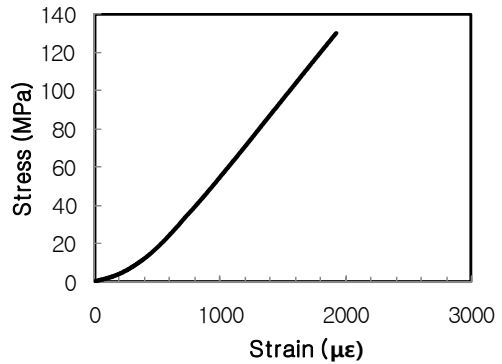


Fig. 6 The tensile stress-strain curve.

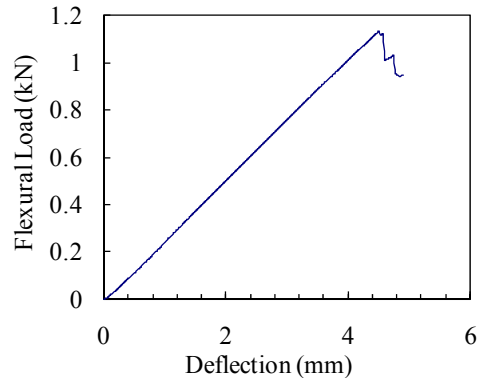


Fig. 7 The load-deflection curve under 3-points flexural bending test.

Fig. 7은 3점 굽힘시험에서 얻어진 하중과 변위(중앙부 처짐)의 관계를 나타낸 것이다. 얻어진 하중과 처짐값을 이용하여 보 이론에 의한 굽힘응력을 계산하고 배면의 변형률값을 이용하여 굽힘탄성계수를 구하면 57GPa를 얻는다. 종탄성계수에 비교하여 약 20.8%의 감소를 나타내고 있다.

3.2 DIC 평가 결과 및 고찰

Table 2는 인장시험편의 중심에서 측정된 변형률에 대한 등고선을 나타내며 하중변위 증가에 따른 변형률 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 변형률 등고선을 나타낸 영역은 시험편 중심

에서 가로 세로 47x74 픽셀 크기의 부분을 가지며 픽셀당 0.11mm 정도를 가진다. Fig. 8은 인장시험 도중 측정된 DIC에 의한 변형을 값과 저항 변형 율게이지를 이용하여 동시에 측정된 변형 율 값을 비교한 것이다. 변형율게이지의 측정값처럼 완전히 선형적으로는 얻어지지 않지만 매우 유사한 경향을 나타내었다.

Table 2 The strain contours in ϵ_{yy} values around a tensile specimen center point.

contour area: 47x74 pixels(9pixels/mm)								ϵ_{yy} strain contours
125	393	513	651	1095	1550	1654	1742	ϵ_{yy} ($\mu\epsilon$)
0.5	1.0	1.5	2.0	2.4	3.17	3.6	3.75	u(mm)

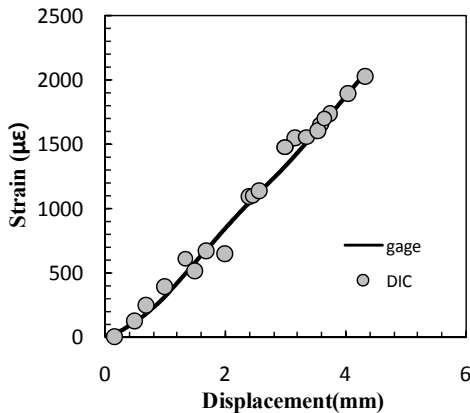


Fig. 8 The comparison of strains for the strain gage and DIC evaluation under the tensile test.

Fig. 8의 결과를 볼 때 스트레인 게이지를 부착한 위치에서의 측정 방향 스트레인뿐만 아니라 모든 위치의 전 영역에 있어서의 변형 율을 쉽게 평가할 수 있다.

Fig. 9는 3점 굽힘시험을 수행하여 DIC평가로 한 굽힘 변형 율을 등고선을 하중 증가에 따라 나타낸 것이다. 하중 증가에 따른 변형 율의 변화를 단면 전체 면적에 대하여 잘 나타내고 있다. 변형 율 등

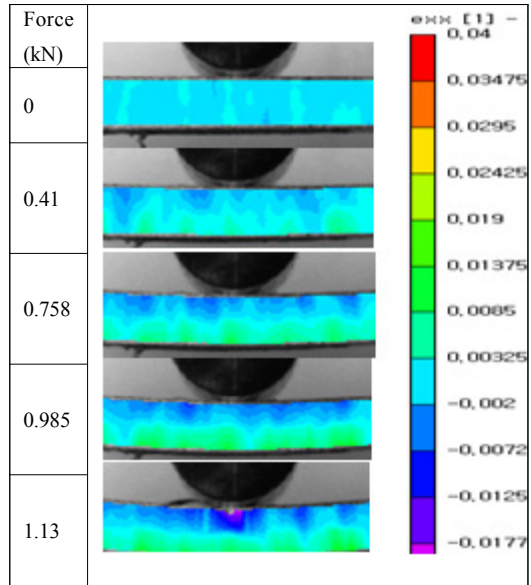


Fig. 9 The variation of the bending strain contours according to the load increase under the 3-points bending test.

고선에서 나타내는 것처럼 압축 변형 율보다 인장 쪽의 변형 율의 크기가 더 커짐에 따라 시험편 하단 인장부 중심 근처에서 먼저 미소 횡 균열이 나타나고 이어서 중심부에서 폭 방향으로 파손이 급격히 발생된 후 내부 두께 방향으로 균열이 진전하였다. 이러한 현상은 파단된 시험편의 사진(photo 1)에서 잘 파악된다. Fig. 10은 3점 굽힘 시험의 DIC 평가에 의한 굽힘 변형 율과 식(1)에서 주어지는 부하 하중으로부터 계산하여 얻어지는 굽힘 응력과의 관계를 나타낸 것이다.

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \quad (1)$$

여기서 M은 모멘트, I는 단면 관성 모멘트이고 y는 중립축에서의 거리를 나타낸다.

Fig. 10에서 원형 심별은 DIC로부터 얻어진 결과이며, 이 결과를 최소 자승법으로 기울기를 구하면 약 57.3GPa 인 굽힘 탄성 계수를 얻을 수 있었다. 얻어진 굽힘 탄성 계수 값은 배면에 부착한 변형 율 게이지로부터 구한 굽힘 탄성 계수와 매우 유사한 값을 나타내었다.

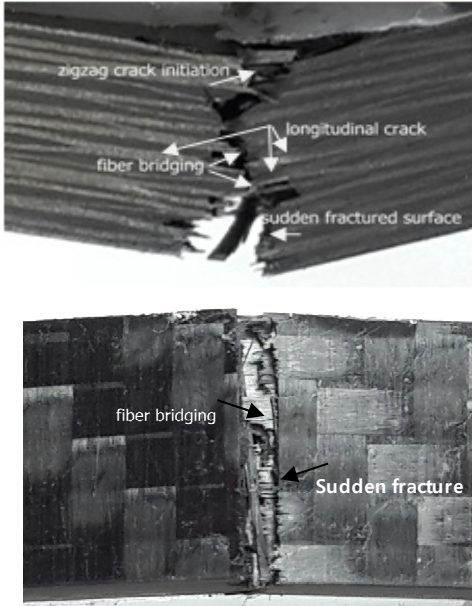


Photo 1 A front and bottom side of fractured specimen viewing the cracks and fiber bridging phenomena.

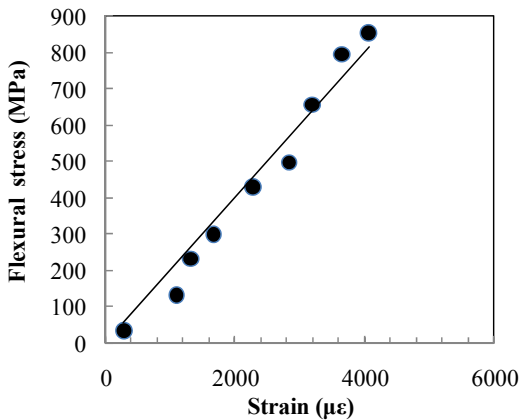


Fig. 10 The variation of the bending strain contours according to the load increase under the 3-points bending test.

Fig. 11(a),(b)는 하중이 가해지는 중심선을 따라 굽힘시험편 상단에서 하단까지 굽힘변형율의 변화의 예를 나타낸 것이다. (a)는 하중이 0.983kN에 도달하였을 때이며 (b)는 파단 직전 하중이 부하

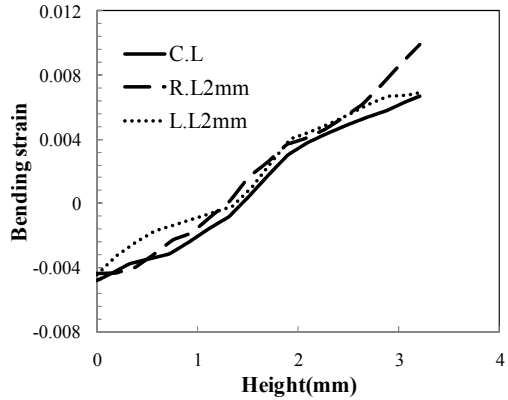


Fig. 11(a) The effect of variation in the bending strain ϵ_{xx} from the top to the down point under the 3-points bending test (at 0.983 kN force).

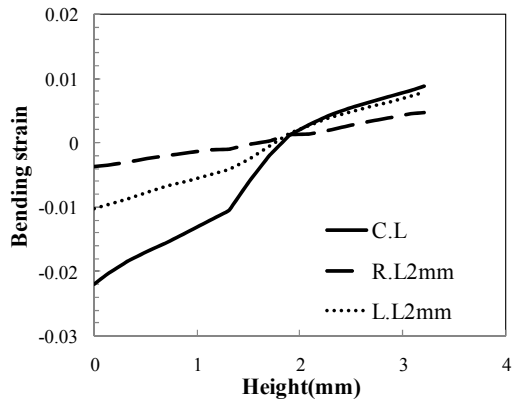


Fig. 11(b) The effect of variation in the bending strain ϵ_{xx} from the top to the down point under the 3-points bending test (at 1.13 kN force).

되었을 때의 변화를 나타낸다. Fig. 11에서 C.L은 중심선에서의 값이고, L.L2 및 R.L2는 C.L을 중심으로 좌우로 각각 2mm 떨어진 위치에서 상면으로부터 하부까지의 변화를 보여주고 있다. 상부의 압축상태에서 중립면을 지나 하부의 인장까지의 변형률변화를 잘 보여주고 있으며 중심선과 좌우 2mm 위치에서의 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 하중이 더욱 증가하여 파단 직전의 상태에

이르게 되면 Fig. 11(b)에서 보여주는 것처럼 중심선에서의 변화와 좌우 위치에서의 변화가 매우 다르게 발생됨을 알 수 있다. 특히 인장영역에서 보다 압축영역에서 더욱 더 좌우 편차가 나타났다. 이것은 압축응력이 가장 크게 작용되는 하중점 중심에 의한 영향으로 하부 인장부위에서 균열생성에 의한 급작파단이전에 이미 하중점 부위 좌우 위치에서 미소균열이 발생되었을 가능성이 있음을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 능직 CFRP복합재료를 이용하여 인장시험 및 3점 굽힘시험을 수행하고 DIC측정을 통하여 변형율을 평가한 후 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 능직 CFRP재료의 종방향 탄성계수는 인장시험을 수행하여 72GPa로 얻어졌다.

(2) 3점 굽힘시험에서 얻어진 굽힘탄성계수는 57GPa로 얻어졌으며, DIC평가에서 구한 결과와 거의 일치하였다.

(3) 상부의 압축상태에서 하부의 인장까지의 변형률변화는 중심선과 좌우 임의 위치에서의 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 파단 직전의 상태에 이르게 되면 중심선에서의 변화와 좌우 위치에서의 변화가 매우 다르게 발생됨을 알 수 있었다.

(4) DIC평가에 의하여 인장 및 굽힘시험에서 발생하는 변형 및 변형율은 시험편 표면 전 영역에 있어서 변화를 시각적으로 잘 나타내었으며 변형의 하중변화에 따른 영향을 파악하는데 유효하여 구조물 안전관리에 매우 유익함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

1. B. M. Glover, 2004, "History of development of commercial aircraft and 727 dreamliner", Aviation Engineering, Vol. 592, pp. 16-21.
2. M. Arai, Y. Noro, K. Sugimoto and M. Endo, 2008, "Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughness by carbon nanofiber interlayer", Composites Sciences and Technology, Vol. 68, pp. 516-525.
3. G. Anzelotti, G. Nicoletto and E. Riva, 2008, "Mesomechanic strain analysis of twill-weave composite lamina under unidirectional in-plane tension", Composite Part A, Vol. 39, pp. 1294-1301.
4. Y. S. Lee, 1992, "Study on heat transfer characteristics of R-22", MS thesis, Hankuk University, Seoul.
5. ASTM D3039, 2000, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Annual Book of ASTM Standards.
6. ASTM D7264, 2007, "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Annual Book of ASTM Standards.
7. M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeil, 1983, "Determination of displacement using an improved digital correlation method", Image Vision Computation, Vol. 1, No. 3, pp. 133-139.
8. D. Amodio, G. B. Broggiato, F. Campana and G. M. Newaz, 2003, "Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis", Vol. 43, No. 4, pp. 396-402.