

# 굽힘하중에서 탄소섬유 복합적층재의 균열 발생 측정에 관한 연구

이준혁\* · 권오현\*\*†

## The Investigation for Detection of Crack Initiation in the CFRP Laminates under Flexural Loading Test

Jun Hyuk Lee\* · Oh Heon Kwon\*\*†

### †Corresponding Author

Oh Heon Kwon  
Tel : +82-51-629-6469  
E-mail : kwon@pknu.ac.kr

Received : July 27, 2022  
Revised : September 30, 2022  
Accepted : October 21, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : Digital image correlation (DIC) is a method used to measure the displacement and strain of structures. It involves transforming and analyzing images before and after deformation using correlation coefficients from irregular light and shade on the surface of structures. In the present study, a microspeckle pattern was applied to the surface of a specimen to identify initial cracking. The test specimen constituted CFRP composites laminated on a curved Al liner. The specimen was manufactured by stacking 100 ply of CFRP prepregs in the 0° and 90° directions in a three-point bending test. The equivalent strain was evaluated through DIC analysis after monitoring deformation using a CCD camera. Fracture shape was observed using a microscope. The equivalent strain contour distribution was checked until the maximum load fracture occurred at the center of the test specimen. Variations in the strain indicated the initial occurrence and progression of microcracks. These results can be used to improve the accuracy of detecting micro crack initiation and to achieve structural stability.

**Key Words** : crack initiation, flexural loading, DIC evaluation, CFRP laminate

## 1. 서론

최근 수 십년 동안 첨단 섬유 복합재료가 자동차, 압력용기, 풍력발전기, 항공산업 및 기타 구조물 등 산업 전반에 걸쳐 적용되어 사용되고 있다. 일반적으로 산업분야에서 기계 및 설비의 안전성 확보를 위해 설비를 구성하는 재료의 기계적 특성을 측정하기 위한 여러 가지 방법이 연구되어져 왔다. 이러한 기계적 특성을 파악 및 평가하기 위해서는 구조의 재료 및 균열 발생을 측정하기 위한 변형률 측정이 반드시 필요하다<sup>1)</sup>.

특히 섬유 복합재료 구조물에서 미소 균열 발생의 측정은 구조물 안전성 평가에 중요한 수법으로 사용된다. 복합재료 중에서 탄소섬유를 이용한 탄소섬유 복합재료는 기계적 특성의 우수성과 보편성 때문에 매우 다양하게 사용되고 있다<sup>2-4)</sup>. 일방향(Unidirectional: 이하

UD) 탄소섬유 복합재료는 제조상의 편리성 때문에 여러 분야에 적용된다. 적용된 UD 탄소섬유 복합재료에 균열이 발생되면 방향성의 특성에 의해 파손에 크게 영향을 미치게 된다. 하지만 균열 발생 초기에는 매우 미소한 균열이 발생됨에 따라 균열성장의 특성을 평가하기가 용이하지 않다<sup>5)</sup>. 한편, 구조물에서 발생하는 변형율은 재료의 기계적 특성을 평가하는데 필수적으로 적용된다. 기존의 스트레인 게이지를 이용한 다양한 변형률 측정법<sup>6)</sup>들과 더불어 디지털 이미지 상관관계법(Digital Image Correlation: 이하 DIC)은 연속 촬영된 이미지의 상관관계를 이용한 효율적인 변형률 측정법으로<sup>7)</sup>, 비접촉 방식으로 구조물의 평가 영역에 대한 변형 및 동적 거동에 대한 이미지를 변형 전과 후로 비교하는 방식이다. 이런 DIC 기법은 1980년 Sutton<sup>8-11)</sup> 그룹에서 연구를 시작하여 이를 활용한 다양한 연구가 진

\*부경대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

\*\*부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

행되고 있다. 측정 대상의 표면에서 변형된 이미지를 획득한 후 측정표면의 회색조 밝기값(Gray intensity; 이하 GI)의 변화를 비교하여 평가하는 형식으로, 측정 대상 표면에 인공적인 랜덤 패턴(Speckle pattern)을 형성하여야 알고리즘 적용이 가능하게 된다. 따라서 명확한 스펙클 패턴의 값을 얻기 위해서 다양한 연구가 이루어 지고 있다<sup>12)</sup>. 선행연구<sup>13,14)</sup>를 보면 대부분 일반적인 스프레이 페인팅 기법으로 스펙클 패턴을 형성하여 DIC 평가를 하고 있으나 스프레이 도료 입자의 크기 축소에 한계가 있어 미소 균열을 측정함에 있어 상당한 제약이 따른다. 이러한 제약을 해소하고 미소균열 시험편 제작을 위하여 도료와 크실렌이 혼합된 용액이 점착된 실리콘 재료의 압입에 의하여 미소 랜덤 패턴을 시험편에 형성하였다.

따라서 본 연구에서는 UD 탄소섬유 복합재료를 이용한 3점 굽힘실험을 수행하고 DIC로 변형율을 평가한 후 시험편에서 발생하는 미소균열의 발생을 측정하는 기법을 제시하는 것을 목적으로 한다. 본 연구의 결과는 미소균열의 발생을 평가하는데 유용하게 적용될 것으로 여겨진다.

## 2. 기본 이론 및 평가 방법

### 2.1 DIC 기본

DIC는 변위와 변형의 구배장을 얻기 위하여 디지털 이미지 프로세싱기법을 사용하는 것이다. 기본 서브셋(subset)을 기준으로 하는 DIC의 원리는 서론에 제시한 다양한 참고문헌에 다수 설명이 되어 있으므로 여기서는 간략히 Fig. 1과 같이 나타낸다. 즉 변형 전 기준인 RI(Reference image) 서브셋과 변형된 DI(Deformed image) 서브셋 사이에서 동일 지점을 추적하는 방식이다. 초기 이미지에서 평가하고자 하는 위치를 포함하는 ROI(Region of Interest)를 N×N 픽셀의 사각 서브셋을 선택하고, 상관계수 값의 최댓값을 계산함으로써 변형된

이미지에서의 동일 위치를 얻을 수 있다. 여기서 기준 서브셋의 중심과 변형 서브셋 중심 사이에 주어지는 벡터는 관심 위치 P(x, y)가 가지는 변위벡터를 나타낸다. 상관관계 계수분포는 연속적으로 기준 서브셋을 찾고자 하는 서브셋으로 이동 시킨 후 각 위치에서 상관계수를 계산하여 얻게 된다. 상관계수분포에 대한 평가는 다음 식 (1)과 같은 ZNCC<sup>15)</sup>를 사용하면 된다.

$$c(u, v) = - \frac{\sum_{i=0}^n [f(x_i, y_j) - f_m] \cdot X[g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^n [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}} \quad (1)$$

여기서  $f(x_i, y_j)$ 와  $g(x'_i, y'_j)$ 는 기준 서브셋의  $(x_i, y_j)$ 에서와 대상 서브셋의  $(x'_i, y'_j)$ 에서의 GI의 값을 나타낸다. 또한  $u, v$ 는  $x, y$ 방향에서의 각각의 변위이며,  $u = x'_i - x_i, v = y'_j - y_j$ 는 기준 및 대상 서브셋에서 평균 GI를 의미한다.  $n$ 은 기준 서브셋에 포함된 픽셀 수이다.

### 2.2 DIC 스펙클 패턴

시험편 표면에 요구된 농도와 크기에 맞는 GI 스펙클 패턴을 표시하기 위하여 실리콘 스탬프 기법을 사용하였다. 실리콘 스탬프의 패턴은 기존의 연구<sup>16)</sup>에서 제시된 패턴을 이용하였다. 일반적으로 스펙클 패턴은 에어 브러스 또는 스프레이 페인팅 기법으로 생성된다. 그러나 이러한 방법은 임의 스펙클 패턴을 만들기 어렵고 특히 노치나 균열단 주위에 무작위로 큰 스펙클이 존재하게 되면 DIC 분석에서 오류를 초래할 수 있기 때문에 ROI 범위를 2.5 mm 이내로 하고, 초기 균열 성장 길이가 수백 um 이내로 예상되는 본 연구의 목적에 적당하지 않다. 스프레이 페인팅 기법에서는 바탕 표면을 백색 페인팅 처리 후 흑색 스펙클 패턴을 형성하지만 본 연구에서는 사용하는 시험편인 CFRP 복합재료 표면이 흑색이므로 직접적으로 백색 스펙클 패턴을 형성한다. 백색 패턴을 시험편의 ROI(Region of interest) 주변에 적용할 때 스탬프와 시험편 표면 사이의 응집력 효과 때문에 적절하고 분명한 패턴을 작성하기가 쉽지 않다. 우선 평가 영역인 ROI에 아세톤과 사포로 표면을 세척한 후, 스펙클 패턴이 각인된 실리콘 스탬프에 백색 페인트와 크실렌을 약 30% 비율로 혼합하여 도포한다. 여기서 크실렌은 페인트 도료의 경화를 지연하며 농도 조절을 위하여 사용된다. 이후 표면에 흑색의 스펙클 패턴이 시험편 표면에 형성되었음을 현미경을 이용하여 확인한다.

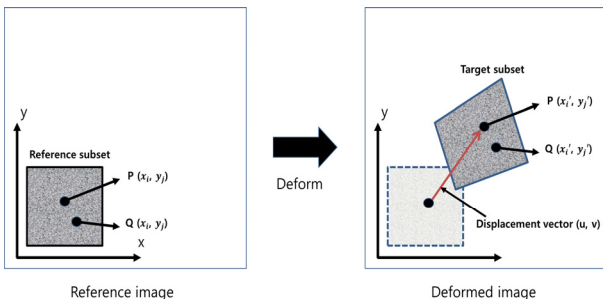


Fig. 1. Schematic of correlation analysis in reference(undeformed) and deformed subsets.

### 3. 시험편 제작 및 실험방법

#### 3.1 시험편 재료

본 연구의 시험편은 AL라이너에 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic: 이하 CFRP)가 적층된 구조의 시험편을 사용하였다. 선행 연구<sup>17)</sup>에서 사용된 하이브리드 적층 복합재 구조물인 수소연료전지 자동차의 TYPE III 연료저장용기를 상정하여 시험편 제작에 CFRP와 AL 합금을 적용하였다. CFRP는 국내 한국카본(주)에서 생산하는 Carbon Unidirection 50NS를 사용하였다. 알루미늄은 AL 6061-T6을 가공하여 사용하였다. Table 1은 시험편을 구성하는 CFRP Prepreg와 알루미늄 합금의 물성치를 나타낸다.

Table 1. Physical properties of CFRP and AL alloy

Carbon fiber prepreg				
Elastic modulus (GPa)	Resin Wt (g/m <sup>2</sup> )	Fiber Wt (g/m <sup>2</sup> )	Ultimate strength (GPa)	Thickness (mm)
130	34	55	2	0.055
Al 6061-T6				
Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Fatigue Strength (MPa)	Elongation thickness (1.6 mm %)
68	2.50	2.24	30.51	7.00

#### 3.2 CFRP 적층 및 시험편 제작

3점 굽힘실험에서 하중에 따른 균열의 진행 방향을 확인하기 위해 시험편을 두 가지 형태로 제작하였다. CFRP Prepreg(두께 : 0.055 mm)는 10 mm × 80 mm의 크기로 0°와 90° 방향으로 두 가지 형태로 제단 하였다. 적층 구조는 CFRP Prepreg를 0°와 90° 방향으로 다르게 조합한 형태로 적층하였다. 적층방식에 따라 각 시험편을 T1과 T2로 나누었다. T1은 시험편의 길이 방향을 섬유방향과 일치시켜 0° 방향으로 설정하고, [(0<sub>10</sub>/90<sub>20</sub>)<sub>3</sub>/0<sub>10</sub>]로 적층하여 총 100ply를 적층하였고,

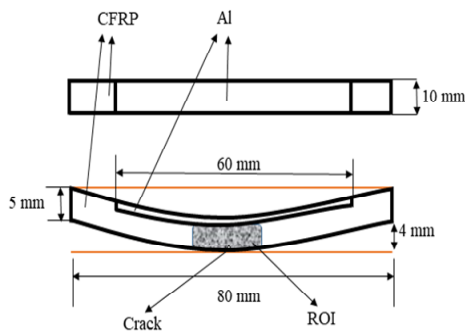


Fig. 2. The geometry of 3 point bending specimen.

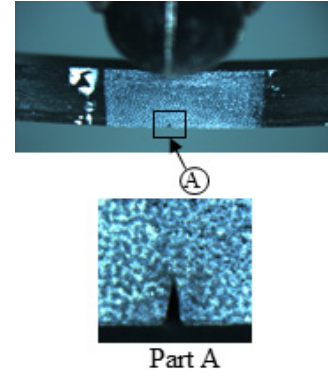


Fig. 3. The DIC pattern around the initial notch crack.

T2는 [(0<sub>10</sub>/90<sub>35</sub>)<sub>2</sub>/0<sub>10</sub>]로 0°와 90° 방향으로 100ply를 적층하였다. 적층재 최상단에는 10 mm × 60 mm의 알루미늄 라이너(두께 1 mm)를 적층한 후, 열 성형기에서 성형하였으며 제작된 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 모든 적층 시험편 두께는 5±0.1 mm로 동일하게 제작되었다. 초기 균열의 형상 및 DIC 패턴의 형태는 Fig. 3에 나타내었다. 하중이 집중되는 지점에서의 균열 형상은 시험편의 가운데 지점에 균열을 삽입하였으며, 초기 균열의 크기는 1 mm로 실험을 하였다.

#### 3.3 균열 발생 평가실험

시험편에서 발생하는 변위 및 변형율을 관심 영역에서 평가하기 위해서 대상물 표면의 변형 전·후의 이미지를 굽힘실험을 수행하는 시간동안 일정 간격으로 획득한다. 스펙클 패턴의 움직임을 기준으로 변위장을 계산하기 위해 측정 관심영역인 ROI을 지정하고, 이 부분이 촬영되도록 CCD 카메라(QImaging Ltd.)를 설치한다. 3점 굽힘실험은 만능인장시험기(Tinus-Olsen, H50KS)를 이용하여 ASTM D790-17<sup>18)</sup>에 따라 시험편 지점과 두께

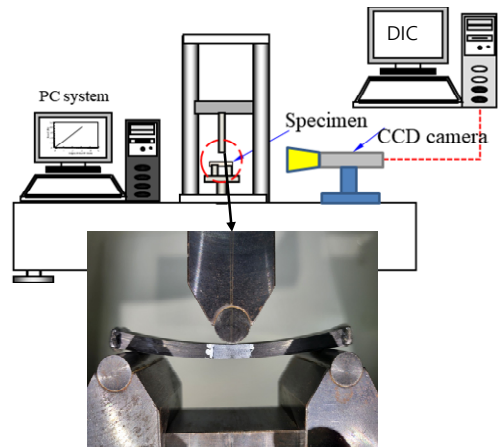


Fig. 4. The apparatus of the flexural loading test with a CCD camera for DIC analysis.

비를 16으로 정하여 하중속도 0.1 및 0.5 mm/min로 실험을 수행하였다. 실험중 이미지 획득은 2~5초 간격으로 저장하였다. 이와 같이 획득된 변형 이미지는 GOM사의 DIC 평가 프로그램을 활용하여 변형 전·후의 이미지 매칭을 위해 상관관계를 평가하였다. Fig. 4에는 3점 굽힘실험에 사용된 실험장치를 나타낸다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 노치 없는 시험편의 균열 발생

초기 균열을 삽입한 T1, T2 시험편을 평가하기 전에 초기균열을 삽입하지 않는 무노치(non-notch crack) 시험편(이하; NN)을 이용하여 굽힘시험을 수행하였다. 시험편은 앞서 설명한 T1 시험편의 적층 순서인  $[(0_{10}/90_{20})_3/0_{10}]$ 를 적용하였으며, 변위제어 속도를 0.5 mm/min 속도로 이미지 촬영 간격을 5초마다 진행하였다. Fig. 5는 굽힘하중-변위 관계를 나타낸다.

NN 시험편은 하중이 서서히 증가한 후에 급락하였으며, 균열이 급작하게 발생하였음을 알 수 있다. DIC 해석을 진행한 결과 이 지점에서 변형률 값이 급격하게 변화되는 것을 확인하였다.

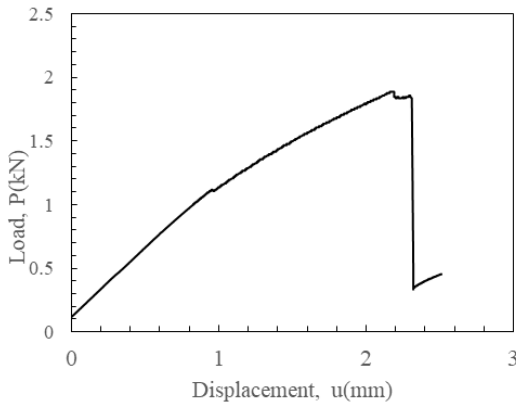


Fig. 5. The flexural loading and displacement curve without an initial notch crack(NN specimen).

Fig. 6은 NN 시험편에서 발생한 변형율을 DIC 해석으로 평가한 등가 변형률 등고선( $\epsilon_{eq}$ )을 나타낸다. 위의 NN시험편 실험에서 하중점 하부 시험편 하단에서 초기 균열이 발생될 것으로 예상했으나 Fig. 5(b)에서 보는 것처럼 불규칙적으로 하중점에서 미소 균열이 발생한 후 성장과 동시에 Fig. 6(c)에서 처럼 하단에서 1.832 mm 위치에서 순간적으로 계면 박리(interface delamination)가 시작되어 초기 균열 성장의 연속적 측정이 어렵다. 이러한 현상은 3개의 T1-NN 시험편에서 동일하게 나타났다. 박리된 계면은  $0_{10}/90_{20}/0_{10}$ 의 섬유 적층위치이며 2번째 길이 방향 섬유소가 적층된 곳으로 가로 방향 변형률의 증가에 의한 강도 특성이 균열 진전에 영향을 미치는 것으로 여겨진다.

##### 4.2 초기 균열 시험편의 균열진전 평가

Fig. 7은 초기균열을 가진 T1시험편의 굽힘하중과 변위 곡선을 나타낸다.

균열성장의 평가를 위하여 초기균열의 시작점을 명확

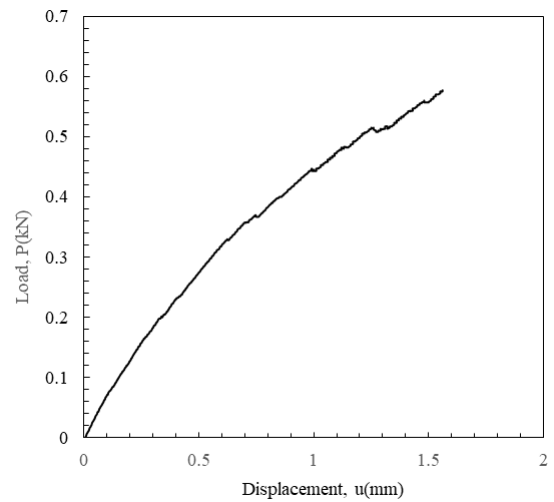


Fig. 7. The flexural loading and displacement curve with an initial notch crack(1mm length, T1 sequence).

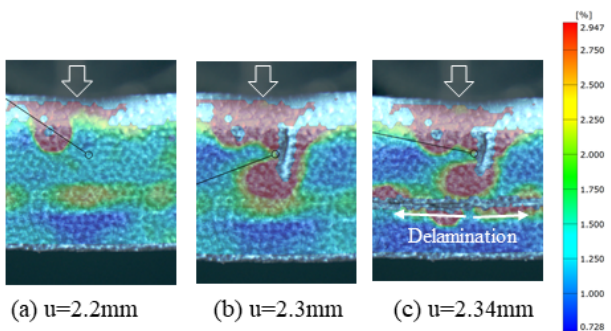


Fig. 6. The strain contours of NN specimen.

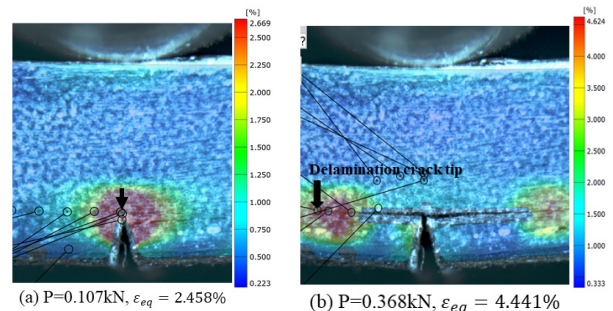


Fig. 8. The strain variation accompanying crack propagation from an initial crack(length 1mm, T1).

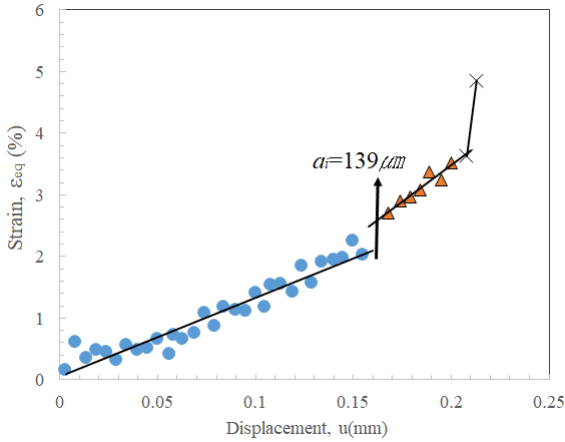


Fig. 9. The variation of the strain at the crack tip.

하게 확인할 수 있도록 T1시험편에 1 mm의 초기 균열을 삽입하고 변위제어 속도를 0.1 mm/min 속도로 이미지 촬영 간격을 3초마다 진행하였다. 그 외 조건은 4.1의 실험과 동일한 조건에서 실험을 진행하였다. Fig. 8은 균열발생 및 진전에 따른 변형율의 변화를 DIC 평가한 결과이다. 초기 노치균열 끝단에서 균열 발생이 시작되어 하단에서 1.345 mm 위치의 CFRP 적층 계면을 따라 적층분리(delamination)가 진행됨을 확인하였다.

Fig. 8(a)에서 초기 노치균열단에서 균열단 방향으로 139 μm의 미소 균열이 발생한 이후 즉시 0°방향 적층 계면을 따라 58.8 μm의 균열이 성장하였다. 이후 적층 분리가 계속되면서 연속적으로 균열이 성장하였다. Fig. 8(b)는 하중이 0.368 kN에서 발생한 균열을 나타내며 균열길이는 4.173 mm까지 성장하였다. Fig. 9는 균열발생에 따른 균열단에서의 등가 변형율의 변화를 나타낸다. 변위 0.161 mm 근방에서 등가 변형율이 급등하여 이후 증가율이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이때 불연속 점프가 일어나는 위치에서 균열의 생성 및 발생을 알 수 있다. 또한 기울기가 상승된 위치에서는 연속적인 적층계면의 박리가 진행되고 있음을 나타낸다.

### 4.3 시험편 적층 방향의 영향

시험편의 CFRP 적층 방향이 균열의 발생 및 진전에 미치는 영향을 확인하기 위하여 [(010/9035)2/010]로 적층한 T2 시험편을 사용하여 3점 굽힘실험을 진행하였다. 변위속도 0.1 mm/min, 이미지 획득시간 간격 2초로 수행하고 그 외 조건은 T1과 동일하게 진행하였다. 초기 균열 끝단에서 발생한 균열은 끝단 좌우로 진전되어 지는 것이 관찰되었으며 끝단에 위치한 계면을 따라 점진적으로 성장하였다. Fig. 10은 초기균열을 가진 T2 시험편의 굽힘하중과 변위 곡선을 나타낸다.

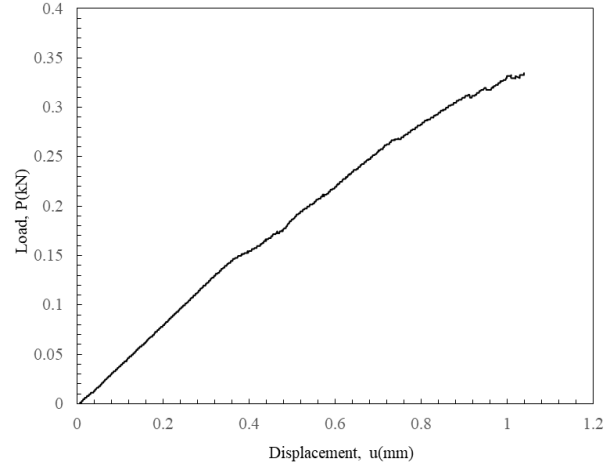


Fig. 10. The flexural loading and displacement curve with an initial notch crack(1mm length, T2 sequence).

Fig. 11은 최초로 발생한 균열 시작점을 확인하여 균열진전에 따른 등가 변형율의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 11(a)에서 보면 T1 시험편과 마찬가지로 초기 노치 균열단에서 먼저 균열단 방향으로 53 μm 정도의 미소 균열이 발생하고 등가 변형율은 3.13%가 생성되었다. 이후 등가 변형율이 10.68%까지 상승한 후 적층 계면방향으로 약 306 μm의 균열이 더 성장하였다. 0°방향 적층 계면에 도달한 균열은 이후 적층 분리가 계속되면서 Fig. 11(c)-(d)와 같이 연속적으로 균열이 성장하였다.

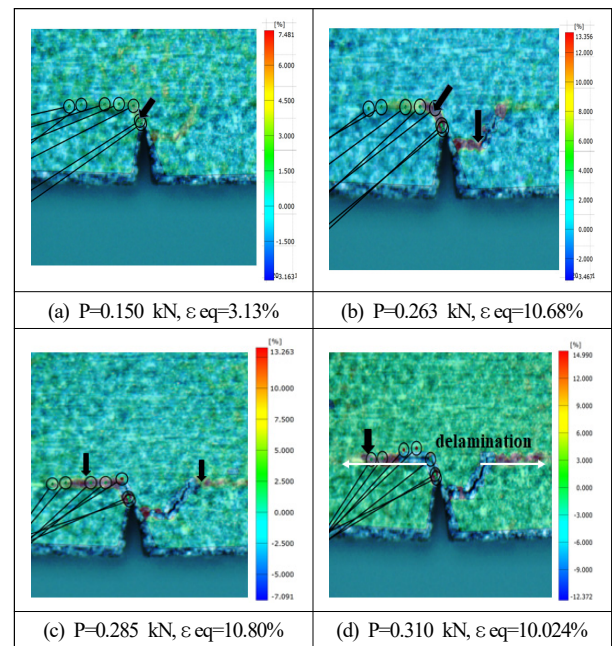


Fig. 11. The strain variation accompanying crack propagation from an initial crack(length 1 mm and time interval 2sec, T2).

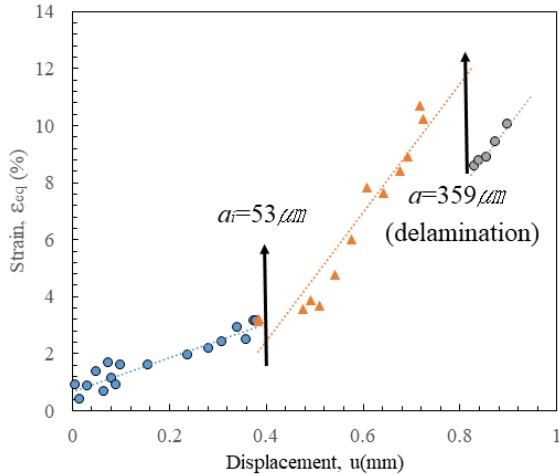


Fig. 12. The variation of the strain according to the crack extension.

Table 2. The comparison of T1 and T2 results.

Types	Maximum Displacement (mm)	Initial crack ( $\mu\text{m}$ )	Delamination length ( $\mu\text{m}$ )
T1	1.66	139	58.8
T2	1.04	53	359

Fig. 12은 T2에서 균열발생에 따른 균열단에서의 등가 변형율의 변화를 나타낸다. T1시험편의 경우와 유사하게 등가 변형율이 급등하여 증가율이 달라지는 불연속 점프가 일어나는 위치에서 균열이 생성되어 성장하는 것을 알 수 있다. T1 시험편과 비교하여 볼 때 단순 적층 두께의 차이에 따른 적층방향의 변화의 차이는 정량적 변화의 경향만 존재하며 정성적으로는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 복합재료의 특성을 강화하기 위해 적층두께의 변화와 동시에 섬유 방향의 변화가 필요함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 DIC해석을 이용한 미소균열의 측정을 평가하는 수법을 제시하기 위하여 UD 탄소섬유 복합재료에 3점 굽힘실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기 균열노치가 없는 시험편의 경우에는 불규칙적으로 하중점에서 미소 균열이 발생한 후 성장과 동시에 순간적으로 계면 박리가 시작되었다. 박리된 계면은 2번째 길이 방향 섬유소가 적층된 곳으로 가로 방향 변형율의 증가가 균열진전에 영향을 미쳤다.

(2) 초기 노치균열이 있는 경우에는 노치균열 끝단

에서 균열 발생이 시작되어 CFRP 적층 계면을 따라 적층분리현상이 진행되었다.

(3) 적층순서가 다른 T1, T2 시험편 모두에 있어서 각각 139  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  크기의 초기 미소균열발생이 평가 측정되었다.

(4) 균열의 성장은 등가 변형율이 급등하여 증가율이 달라지는 불연속 점프가 일어나는 위치에서 발생되는 것을 알 수 있다.

**Acknowledgement:** This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2021).

## References

- 1) J. Qiu, Y. Li, F. Xu, X. Hu and Y. Xiao, "Strain Induced Crack Initiation and the Subsequent Crack Propagation of Fiber-Reinforced Resin Composites", *Composites Part A*, Vol. 155, Article 106836, 2022.
- 2) Y. Yao, P. Shi, M. Chen, G. Chen, C. Gao, P. Boisse and Y. Zhu, "Experimental and Numerical Study on Mode I and Mode II Interfacial Fracture Toughness of Co-cured Steel-CFRP Hybrid Composites", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 112, Article 103030, 2022.
- 3) K. K. Chawla, *Composite Materials*, pp. 252-277, Springer, NewYork, 1998.
- 4) S. M. Song, J. W. Kang and O. H. Kwon, "Initial Crack Length Effect for the Interlaminar Mode I Energy Release Rate on a Laminated UHMWPE/CFRP Hybrid Composite", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 34, No. 3, pp. 1-7, 2019.
- 5) L. F. Varandas, A. Arteiro, G. Catalanotti and B. G. Falzon, "Micromechanical Analysis of Interlaminar Crack Propagation between Angled Plies in Mode I Tests", *Composites Structures*, Vol. 220, pp. 827-841, 2019.
- 6) A. S. Khan and X. Wang, *Strain Measurements and Stress Analysis*, pp. 30-87, Prentice Hall, NJ, 2001.
- 7) B. Pan, K. Qian and H. Xie and A. Asundi, "Two Dimensional Digital Image Correlation for in-Plane Displacement and Strain Measurements", *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, Article 062001, 2009.
- 8) 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 Measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46, pp. 746-757, 2008.
- 9) M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. Jang and M. Babai, "Effects of Subpixel Image Restoration on Digital Image

- Correlation Error Estimates”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, No. 10, pp. 870-877, 1988.
- 10) M. A. Sutton, M. Cheng, W. Peters, Y. Chao and S. R. McNeill, “Application on an Optimized Digital Image Correlation Method to Planar Deformation Analysis”, Image Vision Computers, Vol. 4, No. 3, pp. 143-150, 1986.
  - 11) O. H. Kwon, S. Xu and M. A. Sutton, “Evaluation of the Damage Mechanism in CFRP Composite using Computer Vision”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 686-694, 2010.
  - 12) S. Yaofeng and J. Pang, “Study of Optimal Subset Size in Digital Image Correlation of Speckle Pattern Images”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 45, pp. 967-974, 2007.
  - 13) O. H. Kwon, “Optimized Fabrication of FGMs and DIC Evaluation”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 5, pp. 27-32, 2011.
  - 14) J. Zhang, A. Sweedy, F. Gitzhofer and G. Baroud, “A Novel Method for Repeatedly Generating Speckle Patterns used in Digital Image Correlation”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 100, pp. 259-266, 2018.
  - 15) C. Ma, Z. Zeng, H. Zhang and X. Rui, “Variable Subset DIC Algorithm for Measuring Discontinuous Displacement Based on Pixel-Level ZNCC Value Distribution Map”, Measurement, Vol. 180, Article 109583, 2021.
  - 16) S. Bossuyt, “Optimized Patterns for Digital Image Correlation, Imaging Methods for Novel Materials and Challenging Applications”, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Vol. 3, pp. 239-248, Springer, NY, 2013.
  - 17) W. R. Park, S. M. Kim and O. H. Kwon, “Evaluation of Strength Variation of Domes and Cylinders with Different Winding Angle of Type III High Pressure Storage Vessel”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 35, No. 4, pp. 2049-2060, 2021.
  - 18) ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017.