

## 변형률 분포를 가진 탄소섬유복합체의 인장특성에 대한 연구

김윤곤<sup>1\*</sup>

### Study on Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Laminate with Strain Distribution

Yun-Gon Kim<sup>1\*</sup>

**Abstract:** To investigate the relationship between strain distribution and tensile properties of brittle material, five types of tensile coupon of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) modified the tab portion in order to have a strain distribution including S0, SD1, SD2, SV1, SV2 were tested. The ultimate stress and strain of SD2 and SV2 which was intended to have larger strain distribution were smaller than those of SD1 and SV1, that was more clearly shown in the test results of the symmetric coupons (SV series) than the asymmetric coupons (SD series). In addition, the ultimate stress and strain of most coupons with strain distribution in this study were decreased when compared to the control group with uniform strain. These results were analyzed in various ways through 1) the average of the strain values directly measured by the strain gages, 2) the converted strain calculated by dividing the total deformation by the effective length, and 3) the ultimate effective strain derived from both the elastic modulus and the ultimate load. The values measured by strain gage indicates response of the local region precisely, but it does not represent the response from whole section. However, the converted strain and effective strain can supplement disadvantage of gage because they represent the average response of whole section. In particular, the effective strain can provide rupture strain conservatively, which can be utilized in practice, when the value obtained by strain gage was not effective due to gage damage or abnormal gage readings near ultimate load. This value provides a value that can be used even when partial rupture has occurred and is reasonably useful for specimens with strain distribution.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymers, coupon test, strain distribution, converted strain, effective strain

## 1. 서론

노후구조물의 증가함에 따라 유지관리 및 보수보강 수요가 증가하고 있다. 구조물을 철거하고 신설하는 것이 가장 이상적이거나, 해당 기간 동안 구조물의 기능을 수행할 수 없기 때문에, 매우 치명적인 결함이 있지 않다면 주기적인 점검 및 보수보강을 통해 구조물의 기능을 중단하지 않고 성능을 개선하는 경우가 많다. 즉, 보수보강의 경우 구조물의 기능 유지하며 시공하는 것이 최선이며, 기능이 일시중단 되더라도 그 시간을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 구조물 형상에 따른 제약이 적고, 단기간에 시공이 가능한 탄소섬유보강폴리머(CFRP)를 강재를 대신하여 인장재로서 적용하는 경우가 많다. 하지만 탄소섬유는 연성특성을 가진 강재와는 달리 취성 특성을 가지고 있어, 이에 따른 구조적 특성의 차이점을 인지하고 실무에 적용해야 한다.

구조적 측면에서 재료 특성을 결정하는 기본이 되는 인장 시험에 있어서도 강재의 경우 통상 3회 시험으로 신뢰성 높은 결과를 얻는 반면, 탄소섬유는 강재에 비하여 결과값은 편차가 크다. RC 구조물의 구조보강에 사용하는 탄소섬유 구조설계는 대부분 ACI 440.2R (2017)에 따르며, 여기서 인장물성은 20회 시험결과의 통계처리를 통해 파단강도 및 변형률을 결정한다. 또한 탄소섬유복합체의 인장시험표준인 ASTM D3039 (2017)에서는 단일 시편에 전면 2개, 후면 1개의 변형률계를 통해 시편 면내/외 변형률을 측정하여, 일정수준 이하인 경우에만 유효한 시험으로 판정할 것을 권고하는 등 강재에 비해 인장시험절차가 복잡하다.

인장시험 결과의 편차가 발생하는 요인은 시편제작 및 시험 세팅과정에서 이상조건을 충족하기 어렵기 때문이라고 추정할 수 있다. 따라서 직접인장시험에서 시편의 전단면에서 완전히 균일한 변형률 조건을 유지하기 현실적으로 불가능하며, 이는 연성, 취성 재료 모두 동일한 조건이라 할 수 있다. 그럼에도 시험결과의 편차가 강재에서 작고, 탄소섬유에서 크게 나타난다면, 이는 재료 특성에 기인하였다고 합리적으로 추정 가능하다. 또한 콘크리트를 비롯한 유리, 막 등 취성재료

<sup>1</sup>정회원, 대구대학교 건축공학과 조교수

\*Corresponding author: yungonkim@daegu.ac.kr

Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 물성시험 결과에서도 탄소섬유와 유사하게 편차가 크게 발생하여 통계처리를 통해 물성을 결정한다는 점 또한 연성/취성의 거동 특성에 영향을 미친다는 추정을 뒷받침한다.

실제로 변위제어 탄소섬유 인장시험에서 빈번히 시편의 부분파단 현상을 육안으로 확인할 수 있는데, 이는 전단면이 동시에 파단에 이르는 것이 아니라 일부 단면이 먼저 파단하여, 이로 인해 강도가 저하되고 이후 순차적으로 잔여단면이 파단에 이르는 것이며, 그 원인은 단면내 변형/응력 분포가 균등하지 않기 때문이다. 다만, 제작 및 세팅오차는 정량적으로 평가하기 어렵기 때문에 이로 인한 탄소섬유 인장시험 결과와의 상관성을 직접적으로 정량화하여 분석하기 어렵다. 하지만, 제작 및 세팅오차로 인하여 단면내 변형률 분포가 유발되고, 그 결과 인장강도에 영향을 미친다는 점은 분명하다.

이에 본 연구에서는 제작 및 세팅 오차로 발생할 수 있는 결과의 편차범위보다 큰 수준으로 직접적으로 변형률 분포를 가지도록 인장시험의 상세를 변경하고 이를 설계변수로 하여 취성재료의 특성으로 인한 인장물성의 영향의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 연구배경

탄소섬유복합체의 인장특성은 대부분 ASTM D3039의 시험방법에 따라 수행하고, 그 시험결과에 대하여 ACI 440.2R에서는 20회 정규확률분포로 고려하여 평균에 표준편차의 3배를 감하여 99%의 안전도를 확보할 수 있는 설계값을 사용한다. 또한 NCHRP 655보고서(2010)에서는 ASTM D7290(2011)에 의거하여 취성재료에 적합한 와이블 분포 (weibull distribution)에 따라 통계 처리하여 탄소섬유의 물성을 결정하도록 제안하였다. 이로부터 기본적으로 탄소섬유의 인장시험결과와 편차가 크며, 취성특성과 물리적 물성이 서로 연계되어 있음을 확인할 수 있다.

대부분의 탄소섬유 제품은 ASTM D3039에 따라 시험하여 인장강도의 평균값과 설계값을 구분하여 제공하고 있다. 또한 GFRP rebar의 경우, 그 직경별로 각각의 재료상수 및 파단강도를 제시하고 있는데 직경이 증가할수록 파단강도 및 변형률이 감소하는 특징을 보인다. (Bank, 2006) 반면 연성재료인 강재의 경우 단면의 크기와 관계없이 탄성계수와 항복강도가 일정한데, 이 또한 취성재료의 특성과 이와 같은 크기효과가 연계되어 있음을 반증한다. 즉, 단면 내 변형률 차이에 의해 요소 사이의 파단시점이 상이하고, 파단과 동시에 해당 요소가 부담하던 물성을 상실하는 경우, 요소의 수가 많아질수록 단면 전체가 등분포 변형률로 극한에 동시에 이르게 될

가능성이 감소하므로 확률적으로 물성이 감소할 가능성이 높다. 물론 이는 확률적 접근에 근거하고, 변형률 분포 등 강도 편차에 영향을 미치는 요인이 모두 동일 조건할 때 유효한 가정이다. 변형률분포를 가지는 경우에도 파단변형률에 먼저 도달한 일부섬유를 시발점으로 점진적으로 파단이 일어나더라도 그 진행속도가 빠르다면 일시파단으로 판정할 수 있으나, 실제로는 그렇지 못하다.

반면 연성특성을 가지는 강재는 제작 및 세팅 과정에서 변형률의 차이가 발생하여 탄소섬유와 동일하게 일부 단면에서 먼저 항복 변형률을 초과하여 소성구간에 진입한다고 하더라도 강도는 유지하면서 변형이 증가하기 때문에 잔여단면이 항복 변형률에 이르기까지 강도가 저하되지 않는다. 결과적으로 연성재료인 강재의 경우 변형률 분포가 다소 존재하더라도 전 단면이 항복 변형률을 초과하는 소성구간에서는 전 단면 강도를 얻게 되어 변형률 분포에 영향을 받지 않는다. 반면, 탄소섬유에서는 변형률 분포에 따라 전단면이 동시에 파단하지 않는 경우 시편의 파단강도는 개별 섬유의 인장강도의 산술합보다 항상 작게 되며, 변형률 분포의 편차에 따라 인장강도가 큰 영향을 받게 된다. (Kim, 2019(a))

이런 이론적 배경에 근거하여 단면두께를 증가하면서 탄소섬유 인장시험의 경향성을 파악하는 연구 (Kim, 2019(b))가 수행되었으나, 제작 및 세팅오차로 인한 결과 편차가 원 설계변수에 의한 경향성보다 크게 나타났으며, 이에 본 연구에서는 직접적으로 탄소섬유 변형률을 설계변수로 하여 제작 및 세팅오차보다 설계변수로 인한 결과 편차가 크도록 시편을 제작하여 변형률 분포와 파단강도의 상관성을 분석하고, 나아가 취성특성과 연계하였다.

### 2.2 인장시험계획

#### 2.2.1 시편제작

본 연구의 시편은 ASTM D3039를 기본적으로 참조하였으나, 단면내 섬유 사이의 변형률 분포를 유도할 수 있도록 탭부분을 Fig.1과 같이 5개 타입으로 나누고, 각 타입별로 5회 반복시험을 수행하였다. 원래 탭의 역할은 그립 근처에서의 응력집중을 막고, 시편중앙에서 파단하도록 유도하는 것이지만, 이에 덧붙여 본 연구에서는 가력장치에서는 시편 양단부 전단면에서 균일한 변형이 발생하더라도 탭 상세의 변경을 통하여 각 섬유의 유효길이를 다르게 하여 결과적으로 단면내 섬유의 변형률이 차이가 발생하도록 의도하였다. Fig.1에서 그립부를 제외한 총 길이는 150 mm이며, 탭부분은 양단에서 40 mm 구간을 기준으로 가감하여 평균적으로 중앙 70 mm 길이 구간에서 탭부분에 의해 보강되지 않도록 하여 등분포 변형률의 시편과 동일한 조건을 유지하였다. 각 타입별로는 S0타입 시편은 탭부분 길이를 한쪽 연단에서 30 mm에서

50 mm 로 증가시켰으나, 반대쪽에서 50 mm에서 30 mm로 감소하여 개별섬유 측면에서 탭이 적용되지 않은 길이는 모두 70 mm 로 일정하도록 설계하였다. S0타입은 SD1타입의 탭상세와 일치하지만 길이방향으로 양단부를 비대칭으로 하여 SD1와 비교 가능하며, 전체 시편의 참조군으로도 설정하였다. SD타입은 비대칭 변형률 분포를 가지며, Fig.1상에서 좌측에서 우측으로 탭부분 섬유길이를 SD1은 50 mm에서 90 mm로 증가하고, SD2는 30 mm에서 110 mm로 증가시켰다. 따라서 SD1과 SD2를 비교함으로써 변형률 분포의 크기에 따른 물성치를 분석할 수 있다. SV타입은 대칭 변형률 분포로, 비대칭 분포에 의해 예기치 않게 발생할 수 있는 시험조건을 배제하여 SD타입과 구분하였다. 단면 폭 중심에서 유효길이가 가장 길고 폭방향 양단부에서 가장 짧도록 하여, SV1는 중심부에서 90mm, 양단에서 50 mm 로 SD1과 같고, SV2는 110 mm에서 30 mm로 SD2와 같다. 결과적으로 단위폭당 변형률 편차를 보면 SV타입이 중심에서 양단까지의 변화이므로, SD 타입에 비하여 두 배 크지만, 전체적으로는 SV1은 SD1, SV2는 SD2와 동일한 변형률 분포를 가지기 때문에, 대칭/비대칭 조건에 따른 결과를 비교할 수 있다.

### 2.2.2 재료물성 및 시험체 세팅

본 연구에서 사용한 탄소섬유복합체의 제조사 제공 강도의 실제값 (mean value)과 규격값 (specification value)은 각각 4513 MPa, 3483 MPa이다. 여기서 실제값은 시편시험 결과의 평균에 해당하고, 규격값은 설계값 (design value)과 의미가 같으며, 안전율을 고려하여 적용해야 하는 실무 설계에서 적용하는 값이다. 일반적으로 일정량을 묶음형태로 직조되어 있는 탄소섬유 제품을 사용하였으며, 공칭두께는 0.11 mm, 폭은 50 cm로 표기되어 있었다. 직조된 묶음은 총 128마디이며, 이 중에서 12마디를 인장시편으로 사용하였고, 이는 약 47 mm 폭에 해당한다. 이 단면을 기준으로 산정한 인장시편의 설계값 기준의 극한하중은 약 18 kN, 탄성계수는  $2.31 \times 10^5$  MPa이며, 실제값 기준 극한하중은 23.2 kN, 탄성계수는  $2.53 \times 10^5$  MPa이다.

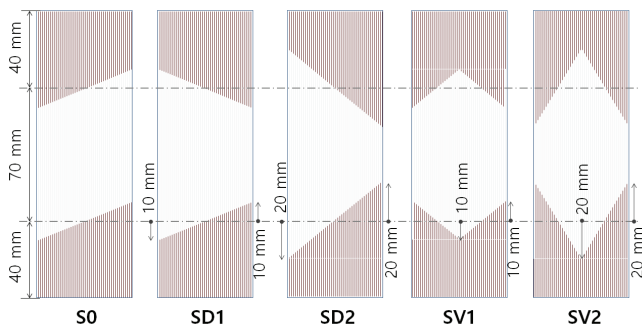


Fig. 1 Specimen design with different tab details

변형률계는 전면부 3개 (left, center, right), 후면 중앙부 (back) 1개를 부착하여 탭상세에 따른 면내 변형률 분포를 측정하고, 후면 변형률계를 통해 면외방향 불균형 응력분포를 병행하여 모니터링하였다. 이로부터 시편 변형률의 대푯값인 평균값은 전면부 3개소를 우선 평균하여 전면부의 대푯값으로 하고 이를 후면부와 산술평균하여 산정하였다.

제품에 표기된 극한하중과 탄성계수로부터 추정 가능한 파단변형률은 약 1.5~1.8%이며, 이 값은 그립부 사이 150 mm 를 인장유효거리로 가정하면, 파단시 변형은 2.25~2.7 mm로 추정할 수 있다. 하지만 가력장치에서 계측되는 변위는 그립부의 미끄러짐(slip) 및 장비변형값 등을 포함하고 있어 실제는 이보다 큰 변형이 생긴다. 별도의 변위계를 사용하여 변형을 측정할 수도 있지만, 재하과정에서 두 측정점을 추종하면서 변위계 자체변위를 발생하지 않도록 세팅하기 어렵고, 결과적으로 이 방법으로 계측한 결과의 신뢰성이 높지 않다. 따라서 별도 투입없이 쉽게 취득할 수 있는 장비변형값을 전체변위로서 모니터링하고 앞서 기술한 시편 외 변형요인을 고려하여 결과 분석하였다. 하중재하속도는 분당 0.5 mm의 변위 제어로 하였으며, 이는 약 0.003~0.004의 변형률에 해당하지만, 실제로는 가력장치 자체변형 등 기타 요인에 의해 변형률 증가속도는 다소 감소한다. (Fig.2)

시편 크기가 작을수록 제작과정에서 발생할 수 있는 오차가 시험결과에 미치는 영향이 커지기 때문에 탄소섬유의 절단, 섬유의 배치, 에폭시 레진 혼합 등의 과정에서 시험결과와의 편차를 주는 요인을 최소화하였다.

### 2.2.3 환산변형률

변형률계는 시편의 국소 부위의 응답을 계측하는 데 효과적이지만, 탄소섬유복합체의 경우 에폭시 혼합 및 섬유의 정렬상태 등 다수 요인으로 인하여 변형률계 부착 위치에 따라 계측값 편차가 크다. 특히 변형률계가 부착된 위치 또는 해당

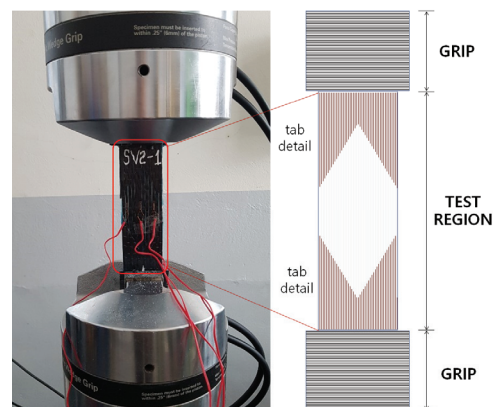


Fig. 2 Test setup and typical specimen detail (SV2)

섬유가 과단되는 경우 잔여단면이 그대로 응력을 부담하고 있더라도 변형률을 계측할 수 없다. 물론 복합체가 균질하게 제작되어 품질이 확보되어 등분포 변형률분포를 가진다면 한 계의 변형률계만으로 충분할 수 있다. 또한 측정 위치에 따라 변형률 값에 다소 차이가 나더라도 강재와 같이 항복변형률 이후에 강도를 유지하며 다른 요소가 항복하도록 응력재분배하여 결과적으로 시편강도에 미치는 영향이 미비하다면 변형률계의 위치 및 개수가 크게 중요하지 않다. 하지만 탄소섬유의 경우 과단과 동시에 내력을 잃어버리므로 요소간 재분배를 할 여지가 없고, 실제로 변형률계로 계측된 시편내 폭 및 길이 방향의 변형률이 무시할 정도로 작은 편차를 가지는 것이 아니기 때문에, 국소위치의 측정값으로부터 시편의 평균거동을 어렵다. 이에 시편 전체 변형을 계측하여 유효길이를 나타내는 환산변형률을 병행하여 전체단면의 평균화된 응답을 변형률계 계측값과 비교함으로써 변형률계의 모니터링 결과에 대한 대표성을 검증할 수 있다. (Kim, 2019(b))

반면 환산변형률은 앞서 언급한 바와 같이 그림부 미끌림 및 장비변형 등 시편의 측정부 이외 부분의 변형률을 포함하고 있으며, 변형률을 산정할 때 이용하는 유효길이가 역시 그림간 거리로 근사적으로 가정한 것이므로, 그 자체로 오차를 내

제하고 있다. 실제 유효길이는 박리 및 부부과단 등에 의해 변경되어 그 길이를 특정하기 어렵다. 또한 이를 기점으로 응력-변형률 기울기가 상이해지고, 결과적으로 시편에서 발생한 이벤트가 시각화되어 그래프로 표현된다. 반면 변형률계의 응답은 박리, 부분과단시 응력-변형률 선형관계를 그대로 유지하며, 해당위치의 응력이 감소한 만큼 변형률도 감소하기 때문에 그래프상으로는 박리나, 부분과단과 같은 이벤트를 확인하기 어렵다.

요약하면 환산변형률은 순수한 시편의 응력-변형률 응답은 아니나 시편 전체의 평균화된 응답으로 변형률계 응답과 비교함으로써 상호보완적으로, 인장시험중 나타난 이벤트를 시각화하는 장점을 가지고 있다.

## 2.3 실험결과

### 2.3.1 환산변형률과 (극한)유효변형률

Table 1은 각 시험의 과단시점의 변위, 하중 및 응력, 탄성계수, 변형률계로 계측한 최대 및 평균값 (A), 탄성계수로 추정된 극한변형률 (B), 환산변형률 (C)을 요약하였다. 극한응력은 극한강도에 시편단면적  $5.156 \text{ mm}^2 (= 0.11 \times 46.875)$  을 나눠 산정하며, 탄성계수는 ASTM D3039에 따라 각 시편의

**Table 1** Summary of tensile properties for all specimens in this study

Test no.	Displ. (mm)	Ult. load (kN)	Ult. Stress (MPa)	Stiffness (MPa)	Measured strain ( $\times 10^{-6}$ mm/mm)		Effective strain (B) ( $\times 10^{-6}$ mm/mm)	Ratio (B/A)	Converted strain (C) ( $\times 10^{-6}$ mm/mm)	Ratio (C/A)	
					max	average (A)					
S0	1	2.90	20.8	4025	288423	14900	12670	13956	1.10	19307	1.52
	2	3.42	19.9	3861	279329	14738	13729	13821	1.01	22807	1.66
	3	3.63	19.2	3720	291809	15345	12411	12748	1.03	24200	1.95
	4	3.44	20.8	4037	291001	13520	12472	13874	1.11	22920	1.84
	5	4.05	24.1	4665	292032	16275	15389	15976	1.04	27007	1.75
SD1	1	3.41	21.3	4128	303411	16363	14897	13605	0.91	22753	1.53
	2	4.25	23.0	4457	277231	20205	16829	16076	0.96	28360	1.69
	3	3.01	20.0	3874	310116	14110	13693	12492	0.91	20073	1.47
	4	3.13	20.2	3915	292377	13670	11846	13389	1.13	20887	1.76
	5	3.81	23.6	4584	311903	18320	15313	14698	0.96	25420	1.66
SD2	1	2.06	19.0	3692	301806	13809	11565	12234	1.06	13707	1.19
	2	3.20	20.6	3999	268631	13911	10889	14887	1.37	21327	1.96
	3	3.79	21.2	4108	281501	16117	14551	14595	1.00	25240	1.73
	4	3.73	19.1	3707	273375	14161	13200	13561	1.03	24853	1.88
	5	3.96	21.8	4232	298080	14458	11513	14197	1.23	26420	2.29
SV1	1	3.10	22.3	4334	297704	16185	15549	14557	0.94	20673	1.33
	2	2.83	21.3	4132	291609	14962	14349	14170	0.99	18847	1.31
	3	3.52	22.2	4314	291630	14236	13194	14793	1.12	23493	1.78
	4	3.68	21.8	4220	293662	15657	15350	14371	0.94	24553	1.60
	5	3.10	22.6	4374	296323	15865	14805	14760	1.00	20673	1.40
SV2	1	2.50	19.8	3833	287208	14173	13666	13346	0.98	16633	1.22
	2	3.17	19.6	3807	298381	17438	13995	12759	0.91	21147	1.51
	3	2.50	19.8	3833	283229	14173	13666	13533	0.99	16633	1.22
	4	2.63	19.4	3770	273766	12300	10367	13772	1.33	17560	1.69
	5	3.29	19.5	3791	279474	15315	14567	13565	0.93	21933	1.51

변형률 1000  $\mu\text{mm}/\text{mm}$ 부터 3000  $\mu\text{mm}/\text{mm}$  구간에서 산정하였다. 이 극한응력을 탄성계수로 나눠 유도할 수 있는 극한 변형률을 본 연구에서 (극한)유효변형률 (ultimate effective strain)로 명명하고, 이를 앞서 기술한 환산변형률(converted strain)과 비교하였다.

5개 상이한 탭 상세의 설계변수에 대한 시험결과이므로, 각 변수별로 구분하여 결과를 분석하였으며, 이는 Table 2와 2.3.2절에서 기술하였다. 이에 앞서 탭 상세와 상관없이 공통적인 변형률계 계측값 평균, 환산변형률 및 유효변형률을 비교분석하기 위해, Table 1은 각 시험의 유효변형률과 변형률계 계측 평균의 비 (B/A)와 환산변형률과 계측평균값의 비 (C/A)를 포함하였다. 변형률계 응답의 경우 최대강도 발현 이후 일부파단이 생기고, 잔여 단면에 의해 지지되는 시점에서 최대변형률이 계측되는 시험도 종종 발생하였지만, Table 1에 정리된 값은 모든 시험 결과에 있어 일관성을 유지하기 위해 개별 시험에서 최대강도시점에서 측정된 최대 변형률과 및 평균변형률을 명기하였다.

Table 1에 정리된 세 변형률을 분석하면 대체적으로 C/A가 B/A보다 크게 나타났는데, 구체적으로 평균, 표준편차를 구하면 B/A의 AVG.=1.04, STD.= 0.12, C/A의 경우 AVG.= 1.62, STD.=0.27이다. 즉, 유효변형률(B)은 변형률 평균(A)과 거의 유사하였으나, 환산변형률(C)는 나머지 방법에 비해 과도하게 크게 나타나 재료의 인장특성값으로써 활용하기 어렵다고 생각할 수 있다. 하지만 Fig. 3의 응력-변형률 응답에서 파단시점 뿐만 아니라 전체 하중에 대한 응답을 고려하면 환산변형률의 유효성을 확인할 수 있다. 2.2.3에서 언급한 것같이 변형률계 응답(average)은 재하과정에서 발생하는 이벤

트와 상관없이 응력-변형률 비례관계 유지하는 데 반하여, 환산변형률(converted) 응력-변형률 응답은 시편의 탭부분의 박리나 부분파단 발생시 변위제어 시험상태에서 변위(변형량)은 유지된 상태에서 하중(응력)만 감소하였다. 즉, 환산변형률은 그래프상에서 인장시편에 발생한 이벤트를 시각적으로 나타내어 거동 특성을 좀 더 쉽게 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3에서 재하 초기에 두 그래프의 기울기가 서로 일치하고 있다는 점에서 환산변형률에서 가정한 유효길이-양단 그림까지의 거리-가 충분히 유효하다는 점 확인할 수 있다. 즉, 환산변형률 응답은 극한시점에서 정량 지표로 고려하기 보다는 시편에서 발생한 이벤트를 파악하며, 시편 전체의 평균 거동을 나타내는 지표로서 변형률계의 국부응답의 신뢰성을 보완하는데 그 의의가 있다.

또한 유효변형률(B)과 변형률계 평균(A)이 거의 일치한다는 점은 변형률계가 부분파단으로 손상되거나, 국부적으로 비정상적으로 높은 변형률이 계측될 경우라고 하더라도 재하 초기에 산정한 탄성계수와 파단시 하중(응력)으로부터 유도한 (극한)유효변형률을 통해 유의미한 결과를 유추할 수 있으며, 나아가 이 값을 측정된 극한강도로부터 유도된 값이므로, 실질적으로 시편의 변형률 분포가 반영되어 평균화된 결과라는 점에서 유효하다.

요약하면, 환산변형률은 변형률을 직접 계측하는 것이 아니라 유효길이와 단면적을 이용하여 추정하는 것이기 때문에 이 두 값이 유효하지 않을 경우 재료의 변형률로서 무의미하지만, 박리 및 일부파단이 일어나기 이전까지의 환산변형률의 경우 시편에서 발생하는 박리 및 부분파단을 가시화할 수 있는 응답으로 활용 가능하다. 또한 유효변형률은 변형률계 응답이 극한

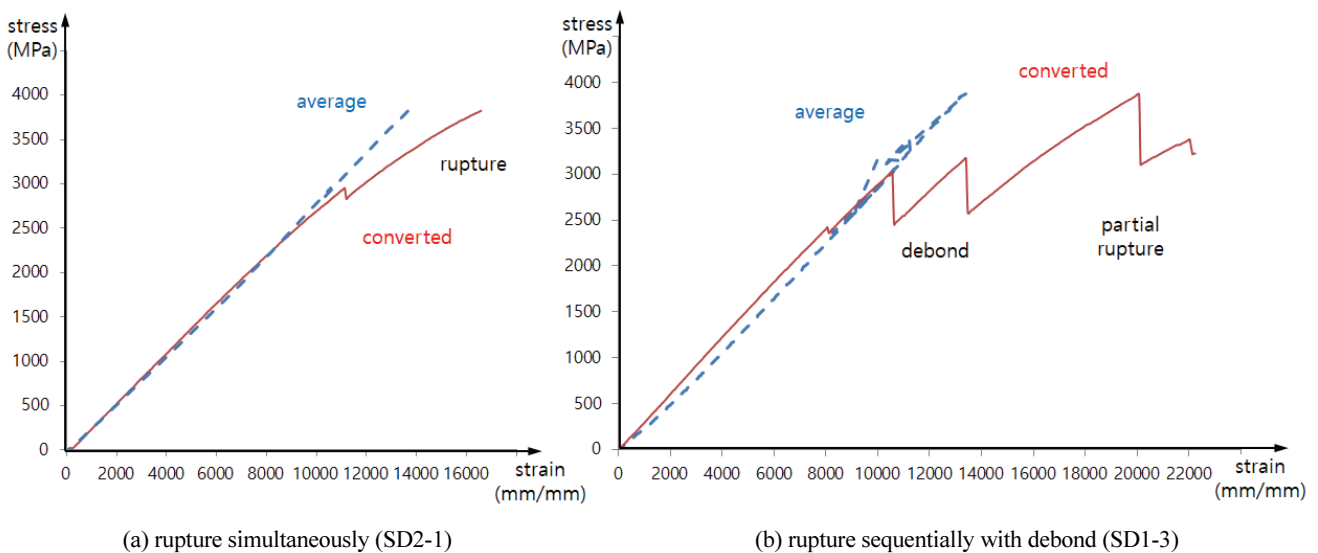


Fig. 3 Two typical stress-strain responses of specimen with respect to failure mode



하중 근처에서 다수 요인으로 유효하지 않는 경우에도 합리적으로 추정할 수 있는 값이며, 실무적으로도 변형률 분포를 고려하여 얻을 수 있는 전단면의 평균값으로서 적합하다.

### 2.3.2 파괴모드

Fig.4와 같이 타입과 관계없이 대부분의 시험에서 급작스런 취성파단이 발생하였고, 부분파단한 경우에도 이후 완전히 하중을 지지하지 못하는 시점까지 추가 변형하였기 때문에 시편의 파괴경과를 파단시 사진만으로는 확인하기 어렵다. 따라서 Fig.3과 같이 시편의 응력-변형률 응답을 분석하게 된다. Fig.3은 전형적인 탄소섬유 인장시편의 두 가지 파괴모드 응답을 나타내는데, (a)는 요소 일부분에서 파단이 시작됨과 거의 동시에 모든 단면에서 파단이 일어나는 경우인 반면, (b)는 첫 번째 요소의 파단 시점에서 전체 단면의 파단으로 진행되지 않고 파단된 단면에서 부담하던 하중만큼 하중이 감소한 후 잔여 단면이 파단에 이를 때까지 순차적으로 추가 변형하면서 두 번째 또는 그 이후의 피크하중을 보이는 경우이다. 이 때 시편의 최대하중은 처음 파단인 경우가 대부분이지만, 두 번째 피크에서 최대하중이 발현되는 경우도 있다. 또한 Fig.3-(b)에서 요소의 파단 이전 응력 2500~3000 MPa 구간에서 탭 부분의 박리(debond)가 발생하고, 이 구

간에 유효길이가 증가함에 따라 시편의 강성이 감소하여 동일 변위에서의 응력이 갑작스럽게 전이하여 감소하는 응답을 나타내었다. 박리가 일어난 시편에서 부분파단으로 연결되는 절대적인 상관성이 있다고 단정할 수 없으나, 박리에 의해 단면내 변형률 분포가 좀 더 커지고 복잡해지므로, 부분파단의 가능성은 더 높아질 것이라는 추정은 가능하다. 또한 박리가 발생하기 이전까지의 환산변형률(converted)에 의한 응답과 변형률계 평균(average)응답과 큰 차이를 보이지 않다가 박리 직후의 변형률계의 평균 응답 기울기(탄성계수)는 거의 유지되고 있으나, 환산변형률의 기울기는 감소하였다. 이는 탄소 섬유 탭 부분 및 그립부내 섬유 계면사이의 박리로 인해 유효길이가 길어졌다는 것을 뜻하며, 결과적으로 환산변형률이 증가하게 되는 요인이라는 근거를 뒷받침한다.

### 2.3.3 탭상세별 결과 분석

탭상세별 결과를 분석하기 위해서 모든 시험의 변형률계의 부착위치별 응답을 분석하였으며, Fig.5에서는 그 중 SV2-1 시험의 모니터링 결과를 나타내었다. 응력 2000 MPa 부근에서 중앙부(center)의 변형률은 약 6000  $\mu\text{mm}/\text{mm}$  인 반면 좌측(left)은 7300  $\mu\text{mm}/\text{mm}$ , 우측(right)은 6700  $\mu\text{mm}/\text{mm}$ , 뒷면(back) (중앙부)는 7800  $\mu\text{mm}/\text{mm}$  정도로 나타났는데, 이는 당초 SV타입 시편에서 의도한 것과 동일하다. 시험체 후면 중앙의 변형률이 전면에 비하여 크게 나타난 이유는 그립부 유압시 작용시부터 시편의 제작오차로 인한 내부평형상태를 이루기 위한 초기변형에 기인한 것으로 추정된다. 하지만 응력 3000 MPa에서 탭부분 박리가 일어나고, 왼쪽 변형률계의 변형률은 감소하고 나머지는 증가하였다. 또한 박리 이후의 위치별 변형률-응력 기울기 또한 박리 이전과 차이를 보이고 있어 박리로 전후 단면의 응력분포가 확연히 변화하였음을 확인할 수 있다. 즉, 시편의 중심에서 왼쪽 탭 구역에서 박리가 발생하였고 이후 과정에서는 왼쪽 섬유의 유효길이가 길어지며 시편 형상의 대칭성을 상실함에 따라 당초 의도한 변형률 분포를 얻지 못하였으며, 결과적으로 탭부분 상세에 따라 변형률 분포가 발생하였으나, 파단시점에서 변형률 분포 크기와 강도 및 변형률을 정량적으로 연계하기는 어려웠다. 본 연구의 대부분의 시편에서 이와 같이 박리가 발생하여 탭 상세에 따른 변형률계의 부착위치별 특징을 분석하는데 어려움이 있었으며, 특히 여전히 부착위치에 따라 변형률 초기값 및 증가값에 편차가 커서 이를 탭상세와 직접적으로 연계하기 어려웠다. 그럼에도 각 상세별로 극한응력치의 평균과 편차는 각 상세별로 경향성을 확인할 수 있었는데, 그 이유는 변형률 분포를 정량화하기는 어렵지만, 그 상대적인 분포의 크기는 비교적 탭부분 박리와 무관하게 유지되었으며, 또한 대칭/비대칭 조건은 박리이전까지 유지되어 가력되었기 때문으

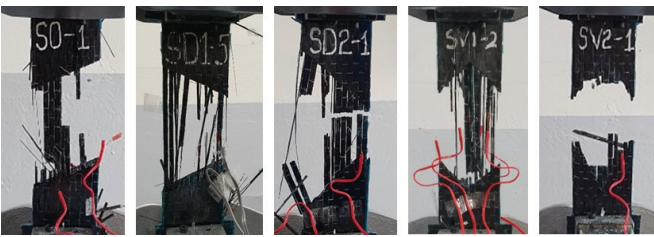


Fig. 4 Photos of specimen of five types at failure

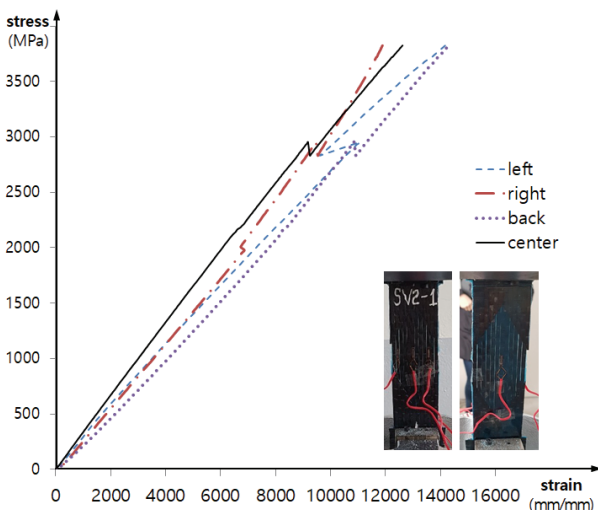


Fig. 5 Strain responses of gages on different location (SV2-1)

로 추정된다. 이에 Table 2 에서 각 상세별 주요물성치의 평균 및 편차를 요약하였으며, 극한하중과 변위는 별도로 Fig. 6를 통해 모든 시험결과의 분포를 시각화하였다.

(1) S0 타입

개별 섬유유리 유효길이는 모두 같지만, 단면 비대칭성에 의해 5개 모든 시험에서 탭부분에서 조기에 박리가 발생하였고, 이후 단면에서 변형률 분포 조건으로 가력되어 다른 쪽 연단에서 추가 박리하거나 부분파단이 발생하였다. 결과적으로 S0 타입은 등분포 변형률에 대한 대조군으로 보기 어려워, 동일 탄소섬유 물성 및 단면적 - 두께 두 배, 폭은 절반 - 의 기존 연구 (Kim, 2019(b)) 결과를 (Ref. / T2) 본 시험결과의 대조군으로 참조하였다.

(2) SD 타입

비대칭 변형률 분포에 의해 유효길이가 짧은 쪽 (Fig.4 의 우측)에서 먼저 파단하고, 긴 쪽 단부로 순차적으로 파단에 이를 것을 기대하였으나, 유효길이가 짧은 쪽 탭에서 박리가 선행되는 경우 유효길이가 길어지면서 변형률 분포가 상이해져

Table 2 Comparison of different tab details

	REF. (T2)	S0	SD1	SD2	SV1	SV2	
displ. (mm)	AVG.	2.67	3.49	3.53	3.35	3.25	2.82
	STD.	0.20	0.42	0.51	0.78	0.35	0.38
strength (kN)	AVG.	22.7	20.9	21.6	20.4	22.0	19.6
	STD.	1.41	1.87	1.64	1.24	0.50	0.14
Stiffness (MPa)	AVG.	-	288519	299007	284678	294186	284412
	STD.	-	5333	14381	14734	2757	9248
Stress (MPa)	AVG.	4403	4062	4191	3948	4275	3807
	STD.	272	362	319	241	98	27
Strain ( $\times 10^6 \text{mmmm}$ )	AVG.	16501	13334	14516	12344	14650	13252
	STD.	1391	1266	1866	1501	640	1654

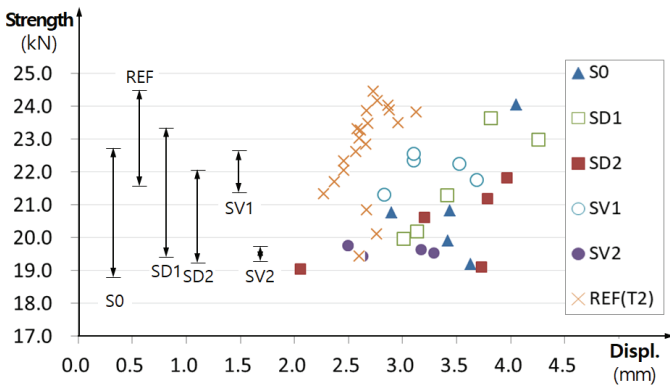


Fig. 6 Test results with tab details

일관된 결과를 얻지 못하였다. 이는 변형률 분포가 더 큰 SD2 타입에서도 SD1와 유사하였다. 다만 SD2의 강성, 파단강도/응력 및 파단변형률은 SD1에 비하여 대체로 감소하였는데 (Table 2), 이는 시편의 변형률 분포와 비례하여 물성치가 감소할 것이라는 본 연구의 이론적 접근과 일치한다. 하지만, SD1, SD2 타입 모두 시험결과의 편차가 크게 나타나고 있어 이를 확신하기에는 다소 무리가 있다.

(3) SV 타입

좌우대칭의 탭상세를 가진 SV타입은 양쪽 단부에서 중심 방향으로 파단이 진행하도록 의도하였으나, 좌우 중 한 쪽 탭에서 박리가 선행되는 경우 좌우대칭의 변형률 분포를 얻지 못하였다. 다만 박리가 일어나는 시점이나 빈도수가 SD타입에 비해 감소하여 결과의 편차가 확연히 감소하였다. (Fig. 6) 또한 Table 2에 정리된 것과 같이 SD2와 SV2는 SD1과 SV1보다 강성, 응력, 변형률이 모두 감소하는데, 그 경향성은 SD타입보다 SV타입에서 더 확연히 나타난다. 따라서 SV타입에서도 변형률 분포의 크기와 재료물성 사이의 상관관계가 있음을 더 분명히 확인하였다.

대조군인 T2와 변형률 분포를 가지는 본 연구의 모든 타입의 결과와 비교할 때, 대조군의 응력평균 및 극한변형률은 가장 크면서도 그때의 변형량은 가장 작은 것으로 나타났다. 그 이유는 본 연구의 시편의 폭이 대조군에 비해 넓고 변형률 분포를 가지고 있었기에 조기박리 및 부분파단이 일어날 가능성이 더 높고, 이로 인해 전체변형량은 증가하면서도 응력/변형률은 감소하고, 그 결과값의 편차 역시 증가한 것으로 추정된다. 무엇보다도 등분포 변형률을 가지는 대조군의 인장물성이 변형률 분포를 가지는 본 연구의 시험결과보다 크다는 점 역시 변형률 분포에 의해 인장응력 및 파단변형률이 감소된다는 결과로 볼 수 있다.

3. 요약 및 결론

본 연구에서는 탄소섬유시편의 탭 상세를 변경하여 섬유간 변형률 분포를 설계변수로 인장시험을 실시하여, 변형률 분포와 취성재료 물성과의 연계성을 분석하였으며, 이를 통해 얻은 주요결론은 다음과 같다.

- 탄소섬유의 변형률 분포가 큰 SD2, SV2타입의 인장시험 결과는 SD1, SV1타입보다 파단강도, 변형률 및 탄성계수가 감소하였다. 이는 연성재료와는 달리 응력재분배를 기대하기 어려운 탄소섬유의 취성특성에 따라 파

단 시점에서의 변형률 분포가 물성에 영향을 미치지 때문이다. 즉 변형률 분포가 클수록 파단시 실제로 파단되는 섬유비율이 작아지기 때문에 단면적이 동일한 시편에서도 인장물성은 대체로 감소하였다. 이는 탄소섬유가 탭 영역의 박리로 인해 당초 의도한 변형률 분포가 파단시까지 유지되지 않는 것임에도 결과적으로, 변형률 분포가 클수록 파단강도 및 변형률은 감소하였다.

- 2) SV타입 시험결과의 편차가 SD타입보다 작는데, 이는 SD타입의 경우 시편의 비대칭성으로 인한 불확실성이 SV 타입보다 크기 때문이므로, 변형률분포를 가지더라도 가급적 시편의 대칭을 유지하는 것이 바람직하다.
- 3) 인장시편이 부분파단으로 두 번째 혹은 그 이후 피크하중에서 최댓값을 가질 때, 기 파단단면의 기여분이 제외되므로 시편의 강도 최댓값은 단면 전체의 성능보다 감소한다. 이 때 이상적으로는 파단 단면적을 제외한 단면적으로 재료물성을 구해야 하지만 비현실적이므로, 파단응력 산정시 전단면 기준으로 하는 것이 합리적이며, 또한 실무적으로도 유용하다.
- 4) 변형률계 응답은 변형률을 직접 계측하므로 부착위치에서의 정확성은 높지만, 시편 전체 응답을 대표하기 어렵기 때문에, 전체 응답을 평균화한 지표인 환산변형률 응답을 통해 이를 보완할 수 있다. 환산변형률은 정량적으로 극한변형률을 산정하기 어렵지만, 변형률계 응답으로 가시화하기 어려운 박리 및 부분파단 유무를 확인하는데 유용하다.
- 5) 탄성계수와 극한하중으로 유도한 유효(극한)변형률은 극한시점에서 변형률계가 손상되거나 비정상적으로 계측되는 경우에 극한변형률을 추정할 수 있으며, 본 연구에서는 변형률계 평균값과 거의 일치하였다. 환산변형률의 경우 전단면의 평균거동을 나타내지만, 장비변형을 포함하고 박리 및 부분파단에 의해 유효길이의 변형을 고려하지 못 하지만, 유효변형률은 탄소섬유의 탄성 구간내 응력-변형률 선형관계에 의거하므로 실질적으로 시편의 유효한 극한변형률을 산정할 수 있다.
- 6) 부분파단이 일어나는 파괴모드의 경우 피크하중이 감소하므로 유효(극한)변형률은 실제 변형률계의 계측값보다 감소할 수 있다. 하지만, 부분파단 역시 실무적으로

고려해야 하는 파괴모드이므로, 감소한 유효변형률을 적용함으로써 강도 상한을 제한하여 적용할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 대구대학교 연구장학기금 지원에 의한 것임.

## References

1. ACI Committee 440 (2017), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17), *American Concrete Institute*, 110.
2. ASTM D3039 (2007), "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", *American Society for Testing Materials (ASTM International)*, 13.
3. ASTM D7290-06 (2011), Standard Practice for Evaluating Material Property Characteristic Values for Polymeric Composites for Civil Engineering Structural Applications, *American Society for Testing Materials*, 4.
4. Bank, L. (2006), *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, Wiley, 560.
5. Kim, Y. (2011), Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets and CFRP anchors, Ph.D Dissertation. *The University of Texas at Austin*, 23(3), 17-24.
6. Kim, Y. (2019a), "Evaluation and Modification of Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) as Brittle Material with Probability Distribution", *J Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 23(3), 17-24.
7. Kim, Y. (2019b), Study on Strain Response Converted from Deformation in Tensile Test of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP), *J Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, 23(4), 137-144.
8. NCHRP Report 655 (2010), Recommended Guide Specification for the Design of Externally Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements, *Transportation Research Board*, 118.
9. Weibull, W. (1951), A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Applied Mechanics*, *ASME*, 18, 293-297.

Received : 08/19/2020

Revised : 09/25/2020

Accepted : 10/29/2020



---

**요 지:** 취성재료의 변형률 분포와 인장물성과의 상관관계를 분석하기 위해 변형률 분포를 가지도록 텀부분을 변형한 5개 타입-S0, SD1, SD2, SV1, SV2 - 의 탄소섬유보강폴리머(CFRP) 인장시편군을 시험하였다. 변형률 분포가 큰SD2, SV2의 극한응력 및 변형률이 SD1, SV1 보다 작게 나타났는데, 이는 비대칭 형상의SD타입보다 대칭 형상의SV의 시험결과에서 더 분명하게 나타났다. 더불어 본 연구에서 사용한 변형률 분포를 가진 대부분의 시편의 극한 응력 및 변형률은 변형률 분포가 없는 대조군과 비교하였을 때 감소하였다. 이러한 결과는 1) 변형률계를 통해 직접 측정한 변형률의 평균값, 2) 전체변형량을 유효길이로 나눠 산정하는 환산변형률, 3) 탄성계수와 극한하중으로부터 유도하는(극한)유효변형률을 통해 각각적으로 분석되었다. 변형률계에서 측득된 값은 국소구간 응답을 정확히 나타내지만, 전단면의 응답을 표현하는 것은 아니다. 반면, 환산변형률과 유효변형률은 전단면의 평균거동을 나타내므로, 게이지의 단점을 보완할 수 있다. 특히 유효변형률은 극한하중 부근에서 변형률계 측정값이 게이지 손상이나 비정상적 계측값 등의 원인으로 유효하지 않을 때도 실무적으로도 사용할 있는 보수적인 파단 변형률을 산정할 수 있다. 이 값은 부분파단이 발생한 경우에도 사용할 수 있으며, 변형률 분포를 가지는 시편에서 합리적으로 유용하다.

**핵심용어 :** 탄소섬유보강폴리머, 시편시험, 변형률분포, 환산변형률, 유효변형률

---