

탄소섬유보강폴리머의 인장시험시 변형으로부터 환산한 변형률 응답에 대한 연구

김윤곤^{1*}

Study on Strain Response Converted from Deformation in Tensile Test of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)

Yun-Gon Kim^{1*}

Abstract: In coupon test of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) as brittle materials, the converted strain derived from total deformation and effective length was introduced and its advantages were described. In general, measured value from strain gauge is used for determining the tensile properties of material, but it is not quite effective in CFRP because brittle material can not redistribute its stress and it only represents local behavior. For this reason, the converted strain response can be utilized effectively as a supplementary indicator, which evaluated the average value of tensile properties in brittle material and confirmed the strain measured by strain gauge. In addition, the converted strain clearly visualized 1) the effect of initial internal strain caused by fabrication errors and setup misalignment when applying gripping force and 2) post-response of partial rupture of CFRP caused by non-uniform strain distribution. non-uniform strain distribution.

Keywords: carbon fiber reinforced polymers, brittle material, coupon test, converted strain

1. 서 론

탄소섬유보강폴리머(CFRP, 이하 탄소섬유로 표기)는 강재에 비하여 비교적 고가이나, 성형성이 뛰어나며 단기간에 시공이 가능하여 주로 철근콘크리트 부재의 보수보강 공사시 활용되고 있다. (Kim, 2011) 하지만 취성특성을 가진 탄소섬유 적용시, 연성재료인 철근과 동일한 구조설계 관점으로 접근해서는 안 된다. 즉, 철근은 항복변형률을 초과할 경우 변형률과 상관없이 항복응력으로 강도를 산정할 수 있지만, 탄소섬유는 항복구간 없이 파단 시까지 선형 변형률-응력관계를 가진다는 점이다. 따라서 탄소섬유의 강도를 산정하기 위해서는 탄성계수가 적합하게 결정되어야 하고, 또한 해당시점의 변형률이 반드시 평가되어야 한다.

탄소섬유의 인장특성을 결정하는 데 철근보다 더 세밀한 고려가 필요하며, 또한 인장특성을 결정하는 데 있어서도 연성재료와 취성재료의 차이를 고려하여야 한다. 철근의 경우, 통상 3회의 직접인장시험만으로도 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있는 반면, 탄소섬유는 인장시험 결과의 편차가 커 다수결과의 통계처리를 통해 탄성계수 및 파단변형률을 결정한다.

통상적으로 인장시험은 변형보다는 스트레인 게이지로부터 직접 변형률을 측정한다. 그러나 스트레인 게이지는 국부적인 변형률을 측정하므로, 이 값이 전체변형률을 대표한다는 보장이 없다면, 이 스트레인 게이지의 측정결과를 신뢰하기 어렵다. 이러한 이유로 대표적인 탄소섬유의 인장시험인 ASTM D3039에 따르면 단일 시편에 다수 스트레인 게이지를 부착하고, 이 결과 값의 편차가 허용수준 이하인 경우에 유효한 것으로 판정한다. 작은 시편에 다수의 스트레인 게이지를 설치하는 것이 시간적, 경제적으로 불합리하지만, 스트레인 게이지의 결과 값을 신뢰하기 위한 조치이다.

본 연구에서는 취성재료인 탄소섬유의 인장시험 결과로부터 인장 물성 값을 산정할 때, 변형치를 계측하고 그 값과 응력 유효길이로부터 산정한 환산변형률을 계측하여 스트레인 게이지와 별도로 유의미한 결과를 도출하여, 탄소섬유 인장시험 결과의 신뢰성을 향상하는 보완책을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 인장시험

2.1.1 연성재료와 취성재료 인장특성에 따른 고려사항

재료의 인장특성은 변형률과 재하하중을 측정단면적으로 나눈 응력의 관계로 표현된다. 이 때 변형률은 스트레인 게이지

¹정회원, 대구대학교 건축공학과 조교수

*Corresponding author: yungonkim@daegu.ac.kr

Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

지로부터 직접 측정하거나, 두 특정위치 사이의 변형을 측정하고, 이를 두 측정점 거리로 나누는 환산 변형률로도 평가할 수 있다.

이형철근의 경우, 마디로 인해 단면적이 길이방향으로 일정하지 않기 때문에 그 단면의 변화를 고려하지 않는다면 환산변형률을 산정하는 것이 무의미하다. 또한 강제 인장시험의 경우, 시편 중앙부의 단면일정구간의 변형을 측정할 수 있다면 환산변형률을 구할 수 있지만, 이 구간에 변형계 설치하기 어렵고, 스트레인 게이지 결과만으로도 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있기 때문에 변형을 별도로 계측할 이유가 없다. 또한 만능시험장치(UTM) 자체에서도 변형을 계측할 수 있으나, 장비 자체변형이 포함되어 계측되므로, 시편 자체변형을 구분하기 어렵다. 또한 인장시험 초기에 그립과 시편 사이에서 미끌림(slip)이 발생하여 하중 증가 없이 장비(UTM) 변형만 증가하기도 하는데, 이 현상은 그립과 시편 사이의 맞물림에 의한 저항력이 충분할 때까지 지속된다. 이 미끌림은 시편과 그립부 사이에서 발생하기 때문에 국부 위치의 시편 변형만 측정하는 스트레인 게이지에서는 기록되지 않는다. 상기 이유로 대부분의 인장시험에서 변형률 계측 값을 사용한다.

반면 취성재료에서는 그립부의 미끌림에 의한 국부변형이 시편 전체로 재분배되지 않아 극한거동에 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 스트레인 게이지 계측위치에 따라 결과 값의 편차가 커서 단일 게이지의 결과를 대푯값으로 적용하기 어려워 탄소섬유의 인장시험은 철근에 비해 매우 복잡한 절차로 이뤄진다.

2.1.2 ASTM D3039

탄소섬유의 인장시험은 그 형태에 따라 많은 시험방법(KS F ISO 10406-2, ASTM D638, ASTM D4762, ASTM D7290 등)이 있으나, 직조된 시트 형태의 경우 대부분 ASTM D3039에 따른다. (ASTM D4762) 철근 시편시험은 단일 스트레인 게이지의 측정값을 사용하는 반면, 탄소섬유는 Fig.1과 같이

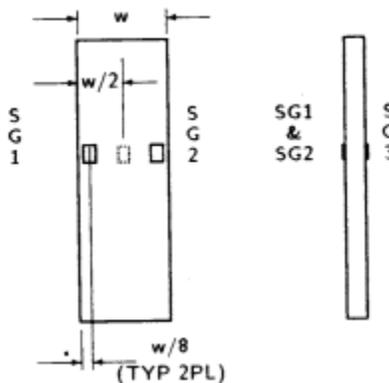


Fig. 1 Layout of strain gages specified in ASTM D3039

시편 전면 2개, 후면 1개의 스트레인 게이지를 부착하도록 권장한다. 이 세 측정값으로부터 시편의 면내, 면외 변형률 분포를 평가하여 유효실험 여부를 판단한다. 이로부터 변형률 분포가 시험결과 값에 편차를 일으키는 주요 원인을 판단할 수 있다.

2.2 시편제작 및 세팅

ASTM D3039에서는 인장시험 특성상 시험장비와 연결하는 그립부의 응력집중을 완화하기 위해 탭을 설치하는 것을 권장하는데, 특히 탄소섬유와 같이 일방향 인장특성을 가진 재료의 경우 탭의 역할이 더 중요하다고 기술하고 있다. 또한 파단 위치를 변형률 측정위치로 유도하기 위해 탭은 시편 중앙에서 단면크기를 점진적으로 증가하여 급격한 응력변화를 방지하였다. 본 연구에서는 Fig.2와 같이 시편을 A, B, C 부분으로 구분하여 제작하였다. A는 실험부, B는 시편의 섬유방향으로 연단 및 그립부 단면을 증가시켜 파단이 측정 구간에서 이뤄지도록 유도하고, C는 섬유방향의 직각방향으로 배치하여 섬유방향의 인장응력을 그립부에서 가급적 전체 섬유에서 작용하여 응력을 재분배하고, 인장력에 의한 하중분산을 유도하였다.

제조사 인장물성은 실제값과 규격값으로 구분되어 제공되는데, ACI 440-2R(2017)에 따르면 실제값(mean value)은 시편시험 결과의 평균에 해당하고, 규격값(specification value) 또는 설계값(design value)은 이 평균에서 표준편차를 고려하여 99.87% 이상의 신뢰도를 확보하는 값이다. Fig.3은 정규확률분포로 가정할 때 실제값과 규격값의 정의를 도식화한 것으로, 본 연구에서 사용한 탄소섬유의 실제값과 규격값은

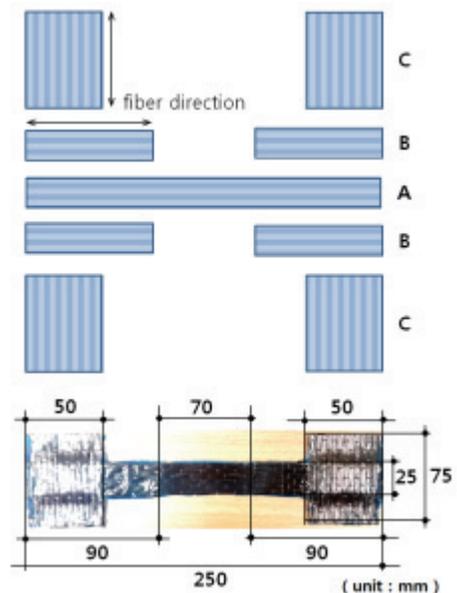


Fig. 2 Specimen configuration used in this study

제조사 제공기준 각각 4513 MPa, 3483 MPa 이다.

제조사 규격의 공칭두께는 0.11 mm, 폭은 50 cm 인 탄소섬유를 폭방향으로 절단하여 사용하였다. 일방향 탄소섬유는 일정량을 묶음형태로 직조되어 있으며, 총 128마디 중 6마디를 시편으로 사용하였고, 이는 폭 23.44mm에 해당한다. 시편 크기가 작을수록 제작과정에서 발생할 수 있는 오차가 시험 결과에 미치는 영향은 커지므로 탄소섬유의 절단, 섬유의 배치, 에폭시 레진 혼합 등의 과정에서 주의가 필요하다. 이에 6마디 폭의 시편을 1매, 2매, 3매로 하여 각각 20회 내외의 인장 시험을 수행하였다. 1매의 규격 기준으로 산정한 극한하중은 8.98 kN, 탄성계수는 2.31×10^6 MPa이며, 실제값 기준 극한하중은 11.6 kN, 탄성계수는 2.53×10^6 MPa이다. 이로부터 추정 가능한 파단변형률은 1.5~1.8%이며, 그립부 사이 150 mm를 인장유�효거리로 하면, 파단시 변형은 미끌림 등 시편 이외 변형을 제외하고 2.25~2.7 mm로 추정할 수 있다. Fig.4와 같이 제작된 시편은 그립부의 인장 미끌림이 발생하지 않도록 유압그립을 통해 적정 지압력을 가한 상태로 분당 0.5 mm의 변위제어 (약 0.003~0.004의 변형률에 해당)로 인장력을 가하여 시험을 수행하였다.

2.3 실험 결과

Table 1, Table 2, Table 3은 극한시점의 실험결과를 탄소섬유 매수에 따라 각각 정리한 것이다. 극한변위, 극한하중, 변형률 좌/우(left/right)는 계측치, 평균(avg.)은 좌/우측 변형률의 평균, 환산변형률(converted strain)은 극한시점 변위를 시편길이 150 mm로 나눈 값으로, 이 환산변형률과 측정변형률의 평균값을 비교하였다. 또한 각 변수의 평균(mean) 및 변동계수(CV, coefficient of variation)를 통해 응력결과의 변동성과 각 변수별 변동성을 평가하였다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6에서 각 시편의 파단시점의 변위/하중, 응력/변형률 관계를 제조사

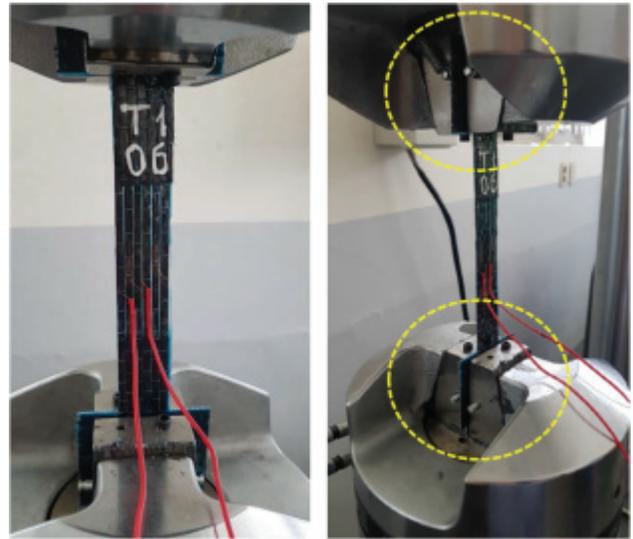


Fig. 4 Setup for CFRP tensile test

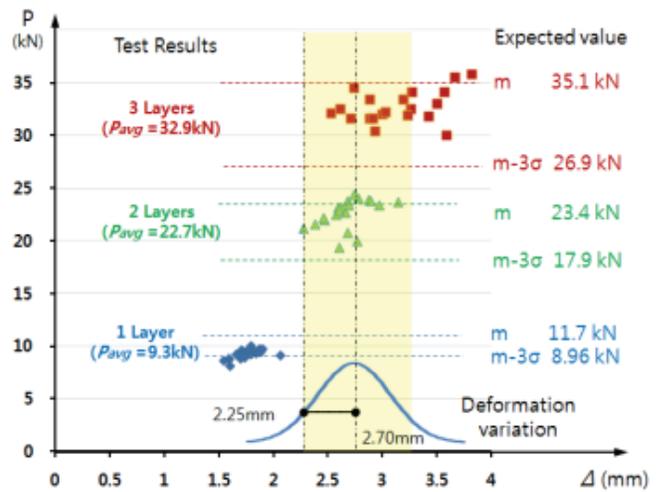


Fig. 5 Tensile force-deformation relationship of CFRP coupon series

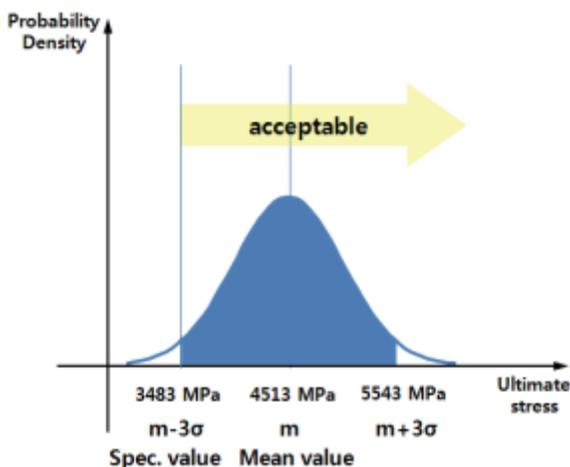


Fig. 3 Probability density of normal distribution for ultimate stress

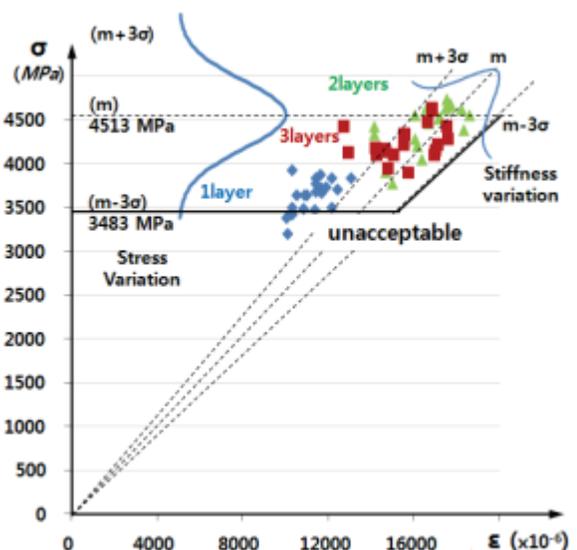


Fig. 6 Tensile stress-strain relationship of CFRP coupon series

Table 1 Summary of test results in T1 series (CFRP coupon of one layer)

| Test no. | Displ. (mm) | Ult. load (kN) | Strain ($\times 10^{-6}$ mm/mm) | | | Converted strain (B) | Stress (MPa) | Ratio (B/A) | Failure mode (rupture at once / sequentially) |
|----------|-------------|----------------|----------------------------------|-------|----------|----------------------|--------------|-------------|---|
| | | | Left | Right | Avg. (A) | | | | |
| T1-01 | 1.74 | 8.3 | 10409 | 7574 | 8992 | 11567 | 3219 | 1.29 | at once |
| T1-02 | 1.80 | 9.60 | 10766 | 12431 | 11599 | 11993 | 3724 | 1.03 | sequentially |
| T1-03 | 1.89 | 9.91 | 12750 | 11478 | 12114 | 12580 | 3844 | 1.04 | at once |
| T1-04 | 1.58 | 8.99 | 10440 | 11140 | 10790 | 10507 | 3487 | 0.97 | at once |
| T1-05 | 1.87 | 9.55 | 11865 | 12858 | 12362 | 12460 | 3704 | 1.01 | at once |
| T1-06 | 1.73 | 9.45 | 10455 | 12778 | 11617 | 11513 | 3665 | 0.99 | sequentially |
| T1-07 | 1.77 | 9.99 | 12538 | 10619 | 11578 | 11773 | 3875 | 1.02 | at once |
| T1-08 | 1.79 | 9.89 | 11846 | 10847 | 11347 | 11900 | 3836 | 1.05 | at once |
| T1-09 | 1.68 | 8.96 | 10960 | 11701 | 11331 | 11207 | 3475 | 0.99 | at once |
| T1-10 | 1.83 | 9.51 | 12014 | 10722 | 11368 | 12200 | 3689 | 1.07 | debond 1+at once |
| T1-11 | 1.71 | 9.39 | 8878 | 12033 | 10455 | 11393 | 3642 | 1.09 | at once |
| T1-12 | 1.78 | 9.39 | 11322 | 10568 | 10945 | 11893 | 3642 | 1.09 | at once |
| T1-13 | 1.59 | 8.27 | 8666 | 11403 | 10034 | 10573 | 3208 | 1.05 | at once |
| T1-14 | 1.73 | 9.62 | 13051 | 10626 | 11839 | 11500 | 3731 | 0.97 | sequentially |
| T1-15 | 1.58 | 8.84 | 9506 | 11029 | 10268 | 10507 | 3429 | 1.02 | sequentially |
| T1-16 | 1.86 | 9.90 | 14039 | 11959 | 12999 | 12380 | 3840 | 0.95 | at once |
| T1-17 | 2.49 | 9.02 | 12129 | 12082 | 12105 | 16600 | 3499 | 1.37 | at once |
| T1-18 | 1.72 | 9.03 | 9796 | 10745 | 10270 | 11453 | 3503 | 1.12 | at once |
| T1-20 | 1.70 | 9.74 | 10816 | 11923 | 11370 | 11307 | 3778 | 0.99 | at once |
| T1-21 | 2.05 | 9.29 | 6443 | 11875 | 9159 | 13653 | 3603 | 1.49 | at once |
| T1-22 | 1.78 | 10.13 | 9552 | 10955 | 10254 | 11853 | 3929 | 1.16 | at once |
| T1-23 | 1.53 | 8.73 | 9961 | 10056 | 10008 | 10227 | 3386 | 1.02 | sequentially |
| T1-24 | 1.65 | 9.38 | 10983 | 10646 | 10815 | 10987 | 3638 | 1.02 | at once |
| Mean | 1.74 | 9.34 | 10834 | 11219 | 11027 | 11827 | 3624 | 1.08 | |
| CV | 0.069 | 0.054 | 0.153 | 0.098 | 0.091 | 0.110 | 0.054 | 0.124 | |

Table 2 Summary of test results in T2 series (CFRP coupon of two layers)

| Test no. | Displ. (mm) | Ult. load (kN) | Strain ($\times 10^{-6}$ mm/mm) | | | Conv. strain (B) | Stress (MPa) | Ratio (B/A) | Failure mode (rupture at once / sequentially) |
|----------|-------------|----------------|----------------------------------|-------|----------|------------------|--------------|-------------|---|
| | | | Left | Right | Avg. (A) | | | | |
| T2-01 | 2.58 | 23.32 | 16550 | 17785 | 17168 | 17227 | 4523 | 1.00 | at once |
| T2-02 | 2.61 | 23.28 | 16682 | 17550 | 17116 | 17420 | 4515 | 1.02 | at once |
| T2-03 | 2.67 | 23.86 | 16762 | 18118 | 17440 | 17800 | 4627 | 1.02 | at once |
| T2-04 | 2.96 | 23.50 | 18356 | 18772 | 18564 | 19733 | 4558 | 1.06 | sequentially |
| T2-05 | 2.57 | 22.62 | 18253 | 18305 | 18279 | 17127 | 4387 | 0.94 | at once |
| T2-06 | 2.37 | 21.69 | 15884 | 16395 | 16139 | 15800 | 4207 | 0.98 | at once |
| T2-07 | 2.66 | 22.84 | 13739 | 14500 | 14119 | 17720 | 4430 | 1.26 | at once |
| T2-08 | 2.68 | 23.47 | 16762 | 15322 | 16042 | 17893 | 4552 | 1.12 | at once |
| T2-09 | 2.76 | 20.10 | 15015 | 14230 | 14623 | 18427 | 3898 | 1.26 | at once |
| T2-10 | 2.60 | 19.43 | 14042 | 15902 | 14972 | 17300 | 3768 | 1.16 | sequentially |
| T2-11 | 2.46 | 22.05 | 17256 | 14740 | 15998 | 16420 | 4276 | 1.03 | sequentially |
| T2-12 | 2.87 | 24.02 | 18207 | 17268 | 17737 | 19127 | 4658 | 1.08 | at once |
| T2-13 | 3.13 | 23.82 | 19044 | 17386 | 18215 | 20893 | 4620 | 1.15 | sequentially |
| T2-14 | 2.46 | 22.34 | 14178 | 14106 | 14142 | 16367 | 4333 | 1.16 | at once |
| T2-15 | 2.88 | 23.89 | 16580 | 16487 | 16534 | 19227 | 4633 | 1.16 | sequentially |
| T2-16 | 2.27 | 21.33 | 14408 | 15098 | 14753 | 15147 | 4137 | 1.03 | at once |
| T2-17 | 2.67 | 20.85 | 15562 | 17158 | 16360 | 17787 | 4044 | 1.09 | sequentially |
| T2-18 | 2.77 | 24.16 | 17709 | 17666 | 17687 | 18480 | 4686 | 1.04 | at once |
| T2-19 | 2.73 | 24.45 | 18168 | 16820 | 17494 | 18213 | 4742 | 1.04 | at once |
| T2-20 | 2.60 | 23.03 | 16567 | 16724 | 16646 | 17313 | 4466 | 1.04 | sequentially |
| Mean | 2.67 | 22.70 | 16486 | 16517 | 16501 | 17771 | 4403 | 1.08 | |
| CV | 0.076 | 0.062 | 0.096 | 0.087 | 0.084 | 0.076 | 0.062 | 0.08 | |

Table 3 Summary of test results in T3 series (CFRP coupon of three layers)

| Test no. | Displ. (mm) | Ult. load (kN) | Strain ($\times 10^{-6}$ mm/mm) | | | Conv. strain (B) | Stress (MPa) | Ratio (B/A) | Failure mode (rupture at once / sequentially) |
|----------|-------------|----------------|----------------------------------|-------|----------|------------------|--------------|-------------|---|
| | | | Left | Right | Avg. (A) | | | | |
| T3-01 | 2.87 | 31.8 | 17176 | 16715 | 16945 | 19153 | 4110 | 1.13 | at once |
| T3-02 | 2.99 | 32.2 | 16605 | 17358 | 16981 | 19907 | 4159 | 1.17 | sequentially |
| T3-03 | 3.42 | 32.0 | 9712 | 16121 | 12916 | 22767 | 4140 | 1.76 | debond 1+at once |
| T3-04 | 3.19 | 33.6 | 12733 | 18216 | 15475 | 21253 | 4344 | 1.37 | at once |
| T3-05 | 3.56 | 34.3 | 17917 | 17136 | 17527 | 23700 | 4431 | 1.35 | debond 2+at once |
| T3-06 | 3.26 | 34.3 | 13692 | 11697 | 12694 | 21707 | 4432 | 1.71 | debond 1+at once |
| T3-07 | 3.58 | 30.2 | 14790 | 16599 | 15694 | 23833 | 3905 | 1.52 | sequentially |
| T3-08 | 2.92 | 30.6 | 14576 | 14900 | 14738 | 19480 | 3955 | 1.32 | at once |
| T3-09 | 3.25 | 32.7 | 14231 | 16715 | 15473 | 21660 | 4230 | 1.40 | debond 1+at once |
| T3-10 | 2.73 | 34.7 | 16215 | 16962 | 16588 | 18187 | 4492 | 1.10 | at once |
| T3-11 | 3.82 | 36.0 | 15909 | 17745 | 16827 | 25433 | 4648 | 1.51 | sequentially |
| T3-12 | 2.60 | 32.6 | 16512 | 17676 | 17094 | 17353 | 4220 | 1.02 | sequentially |
| T3-13 | 3.50 | 33.2 | 17181 | 17964 | 17573 | 23300 | 4296 | 1.33 | debond 1+at once |
| T3-14 | 2.70 | 31.8 | 15270 | 14785 | 15027 | 17973 | 4114 | 1.20 | at once |
| T3-15 | 2.90 | 31.8 | 13707 | 14728 | 14217 | 19347 | 4115 | 1.36 | sequentially |
| T3-16 | 2.87 | 33.6 | 16020 | 15033 | 15526 | 19153 | 4342 | 1.23 | debond 1+at once |
| T3-17 | 2.52 | 32.3 | 14600 | 14593 | 14596 | 16813 | 4179 | 1.15 | sequentially |
| T3-18 | 3.22 | 32.1 | 13950 | 15329 | 14639 | 21487 | 4153 | 1.47 | sequentially |
| T3-19 | 3.02 | 32.4 | 13587 | 14741 | 14164 | 20127 | 4187 | 1.42 | sequentially |
| T3-20 | 3.66 | 35.7 | 15369 | 18294 | 16832 | 24393 | 4614 | 1.45 | debond 1+at once |
| Mean | 3.13 | 32.90 | 14988 | 16165 | 15576 | 20851 | 4253 | 1.35 | |
| CV | 0.119 | 0.046 | 0.125 | 0.103 | 0.093 | 0.119 | 0.046 | 0.144 | |

의 평균값, 설계값과 비교하고, 보강매수에 따른 실험결과의 편차를 분석하였다. 강도는 응력과 단면적의 곱이므로, 보강매수가 증가할수록 강도의 편차는 다소 증가하였으나(Fig. 5), 응력을 비교할 때 그 편차는 감소하였다(Fig. 6).

각 보강매수별 특징을 기술하면 탄소섬유 1매 (T1 시리즈) 시험은 총 25개 시편 중 비정상적으로 종료된 2개 시험 (-19, -25)을 제외한 23개 시험결과를 분석하였다. 파단변형률 평균은 약 1.1%로 제조사 규격 (1.5% 이상)에 비해 조기에 파단하였지만, 높은 탄성계수에 기인하여 응력 평균은 4253 MPa로 제조사 규격보다 상회하였다. 다만 규격값은 하한 기준이기 때문에 만족스런 결과라고 보기 어렵고, 이에 대한 분석은 2.4절에 기술되어 있다.

탄소섬유 2매 (T2 시리즈) 시험은 20개 시편의 인장시험결과 파단 변형률은 1.65%, 인장응력은 4403 MPa로 제조사 규격에 가장 근사한 결과를 보였으며, 실험결과를 통계적으로 분석하여 기준에서 요구하는 신뢰수준의 응력값 ($m-3\sigma$)은 3587 MPa로 제조사 규격을 만족하였다.

탄소섬유 3매 (T3 시리즈)의 인장시험결과 파단변형률은 1.56%, 파단응력은 4253 MPa로 2매 (T2 시리즈)보다 다소 감소하였다. 하지만, 동시에 파단변형률이 감소한 점을 고려하면 T2와 T3의 결과는 거의 유사하였다. 파단변형률 감소 원인은 최대인장력에 도달하기 전에 그림부근 계면에서 부착력을 상실하여 일시적으로 인장응력거리가 증가하면서 스트레인

게이지에서 계측된 변형률이 감소하였고, 또한 하중 계측치 역시 감소하여 역학적으로 일관된 결과를 보였으며, 더불어 계면부착력 상실 시점에서 일부 탄소섬유는 파단하였고, 이로 인한 강도손실이 일부 있었을 것으로 추정된다. 반면 환산 변형률은 계면부착력 상실 시점에서 변형이 증가하고, 실질적으로는 응력 유효거리가 증가하였을 것이나 이를 반영하기 어려워 상수 값을 적용하기 때문에 환산변형률과 계측변형률 평균값의 비가 크다.

2.4 환산변형률 응답을 통한 인장특성평가

2.4.1 스트레인 게이지 계측결과와 환산변형률 비교

Fig. 7은 T1-24 시험의 파단사진으로 상단 그림부 부근의 파단을 확인할 수 있다. 그림과 같이 세 스트레인 게이지 (Left/Right/Back)와 환산변형률 (Conv.)로 구분하여 각 응답을 기록하였고, Fig. 8과 같이 나타내었다. 전반적으로 이 시험은 전면 좌/우, 후면의 변형률과 환산변형률이 거의 일치하였다. (Fig. 8-(a)) 하지만 단일 스트레인 게이지 기록만으로는 그 결과에 대해 확신할 수 없었을 것이다. 예를 들면 T3-03 시험의 경우, 극한시점의 좌측 변형률은 0.97%, 우측 변형률은 1.61%로 1.5배 이상 차이 나는데, 이 같은 경우가 빈번히 발생한다. 만약 단일 스트레인 게이지의 계측 결과만 사용한다면, 국부변형률을 그대로 전체 값으로 잘못 판정할 수 있다. 더불어 복수의 스트레인 게이지를 사용할 때 시편의 면내, 면외 분포

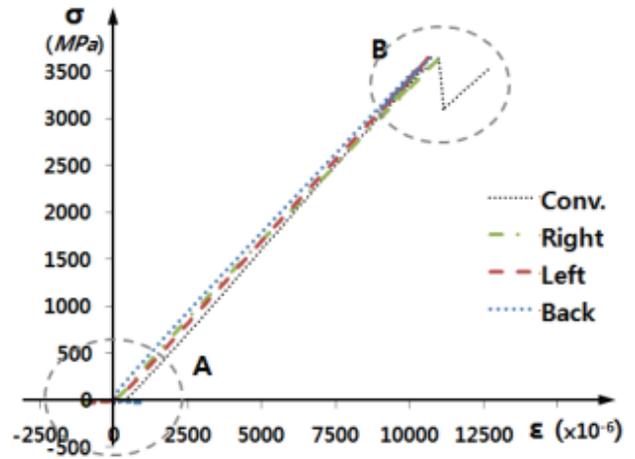


Fig. 7 Photos of T1-24 at failure

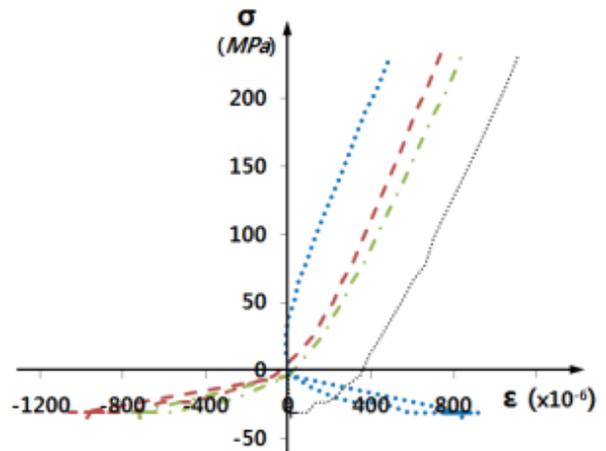
를 재하하중크기에 따라 검토할 수 있다. 마찬가지로 전체 변형을 유효거리로 나눈 환산변형률도 스트레인 게이지로부터 측정할 수 없는 응답을 기록하여 결과의 신뢰성을 향상할 수 있다. 더불어 앞서 기술한 두 가지 특성 -1) A구간 (인장력 재하 초기), 2) B구간 (파단변형률- 변형률 1%이상- 에 근접)-에 대하여 환산변형률은 스트레인 게이지와 차별화된 응답을 보여준다.

2.4.2 그립 세팅으로 인한 초기 변형 (A구간)

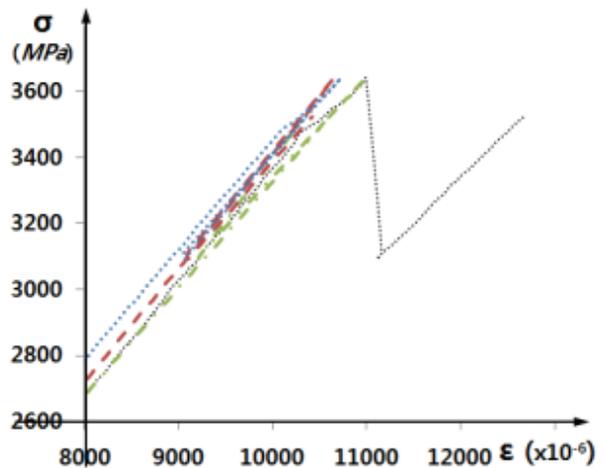
Fig. 8-(b)는 Fig. 8-(a)에서 A구간을 확대한 것으로 그립부 미끌림 방지를 위한 유압 재하시 발생한 초기 변형이다. 일시적으로 시편에 평균적으로 약 30 MPa 정도의 압축응력이 발생하였으며, 후면 게이지 (back)에서는 인장, 양측 전면 게이지 (left/right)에는 압축변형이 측정되었다. 이 초기변형은 시편에 직접 인장력을 가함에 따라 원상태로 복귀 후 재료의 탄성계수의 기울기를 가지고 변형하였다. 동시에 환산변형률의 경우, 각 전후면 스트레인 게이지가 원점이 되는 시점에 약 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 변형이 발생하였고, 이후 스트레인 게이지와 유사한 탄성계수가 기록되었다. 이 응답의 원인은 적층형태로 제작된 탄소섬유 시편의 경화 과정에서 면외변형이 있는 상태로 고정되어 시험 세팅시 그립부 유압으로 인해 한쪽 면에는 인장, 다른 면에는 압축변형이 발생한 것으로 보인다. 다만 이 변형에 의한 응력은 시편 전단면에서 서로 상쇄되었다. 이 초기 면내외 불균형은 시편에 직접 인장력(또는 변형)을 작용한 후 단면의 모든 탄소섬유가 인장을 받을 때까지 강도 증가 없이 변형만 증가하는 구간이 생긴다. 이 거동은 일반적으로 재료시험기 (UTM) 그립부에서 그립과 시편사이 미끌림과 유사하지만, 이 경우 게이지의 변형률이 발생하지 않는다. 반면 Fig.8-(b)는 그립에 의한 초기 인장응력과 압축응력 제거 후



(a) Converted strain vs measured strain (left/right/back)



(b) A region in Fig7-(a)



(c) B region in Fig7-(a)

Fig. 8 Tensile test results of CFRP coupon T1-24

인장변형이 발생하므로 UTM과 시편 사이의 미끌림이라 할 수 없다.

면외방향 초기변형은 극한 시점에서의 단면 내 응력분포의 불균형을 유발할 수 있다. 이로 인해 초기 인장변형을 가진 탄소섬유가 극한 변형률에 먼저 도달할 수 있다. 이 때 탄소섬유의 부분파단으로 인한 강도저감을 잔여 탄소섬유가 부담하지 못한다면, 초기 압축변형률 탄소섬유는 파단변형률에 미치지 못하고 결과적으로 단면의 인장강도가 제조사 제공 인장특성치보다 감소할 수 있다. 반면 탄소섬유 2매와 3매에서는 단면적의 증가에 따라 이러한 초기요인이 극한강도에 미치는 영향이 감소하여 상대적으로 인장강도의 분포가 감소하였을 수 있다. 이와 같이 시편의 제작품질 및 세팅오차로 인해 시험결과에 영향을 미칠 수 있다.

탄소섬유는 시편 두께가 얇아, 시편제작과정에서 면외방향 평활도를 확보하기 어려운 조건이다. 본 연구에서 사용한 시편의 경우 적층 제작으로 인해 양생 과정에서 불가피하게 미소한 면외변형을 가지게 된다. 이는 탄소섬유 보강매수가 증가할수록 그립부 보강매수가 증가하여 면외변형이 증가하지만, 동시에 파단강도 역시 증가하기 때문에 이로 인한 영향력은 서로 상쇄될 것으로 판단된다.

2.4.3 부분파단 (B 구간)

Fig. 8-(c)는 변위제어시 최대인장력에 이른 이후의 스트레인 게이지 계측값과 환산변형률을 나타낸 것이다. T1-24 시험의 경우, 일시파단이 아닌 일부 부분파단 후 거의 1차 최대인장강도에 근접한 2차 최대 인장강도에서 잔여 탄소섬유가 파단되는 형태의 거동을 보였다.

부분파단은 취성특성을 가진 탄소섬유에서 단면의 인장응력이 균일하지 않은 경우, 파단변형률에 이른 탄소섬유가 나머지보다 먼저 파단되며, 이러한 파괴형태는 비교적 빈번하게 발생한다. 변위 제어 시험의 경우 부분파단 시점에 변위 증가 없이 파단면의 기여 강도만큼 감소한다. 파단위치에 스트레인 게이지가 있다면 그 게이지는 손상될 것이고, 게이지가 파단위치와 탄소섬유 길이 방향에 위치한다면 변형률이 0이 될 것이다. 그 외의 게이지의 측정값은 변화는 없어야 하지만, 레진에 의해 일체화된 시편에서 탄소섬유 파단으로 인해 하중흐름이 변경되어 전체적으로 변형률이 다소 감소하는 경우도 있었다. 또한 스트레인 게이지 응답은 부분파단 시점에서 감소하였지만, 응력과 변형률이 탄성계수로 감소하며 그래프가 중첩되어 마치 하중을 일부 제거한 것과 같은 응답을 보이는 반면, 환산변형률 응답은 변형률 감소 없이 응력만 감소하였고, 다소 감소한 기울기(탄성계수)로 다시 변형률, 응력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 즉 게이지 응답에 비해 부분파단을 명확하게 가시화한다(Fig. 8-(c)).

육안으로 일시파단으로 판정되는 경우라도 실제로는 부분파단 후 잔여 탄소섬유가 부분파단으로 손실된 강도를 부담하

지 못하는 경우 연쇄작용으로 파단에 이를 수 있다. 즉 일시파단으로 분류되더라도 모든 탄소섬유가 동시에 파단 하였다고 간주하기는 어렵다는 것이다. 달리 말하면, 부분파단이 계속되는 경우는 비교적 파단단면이 전단면에 비해 작은 경우에만 가능하다는 의미다.

원칙적으로 부분파단이 일어난 경우, 유효단면적 감소를 고려하여 응력을 산정하여야 하며, 부분박리의 경우 환산변형률을 산정하기 위해서는 유효길이 증가를 감안하여야만 응력, 변형률의 정의에 부합할 것이다. 하지만 이는 강재의 변형연화구간에서 감소한 단면적으로 응력을 평가할 것인가(true stress), 초기단면으로 응력을 평가할 것인가(engineering stress)에 대한 논의와 유사하며, 초기 값을 기준으로 거동을 평가하는 것이 실제 일어난 현상을 파악하는데 더 부합된다.

3. 요약 및 결론

본 논문에서는 취성재료인 탄소섬유의 직접인장시험에서 스트레인 게이지의 계측과 병행하여 총 변형률과 유효길이를부터 유도한 환산변형률을 평가하는 것의 장점을 기술하였다. 환산변형률은 유효길이의 산정의 어려움과 측정장비 자체 변형을 분리하여 평가하기 어려움 등의 한계로 변형률을 정량적으로 산정하기 어려울 수 있으나, 변형률 계측 결과와 상호 보완적으로 활용할 수 있다. 특히 취성재료의 경우, 복합체의 거동이 재분배되어 평균화되지 않아, 국부 변형률을 측정하는 스트레인 게이지의 계측 결과가 전체를 대표할 수 없다. 따라서 모든 위치의 변형률을 계측할 수 없다면, 시편 전체의 거동이 평균화된 환산변형률을 계측함으로써 스트레인 게이지에서 획득된 국부 계측 결과와 비교를 통해 그 신뢰성을 향상할 수 있다.

스트레인 게이지는 제작 및 세팅 오차로 인해 그립부 유압 재하시 스트레인 게이지 인장/압축 변형을 유발하지만, 이는 전 후면의 국부변형으로 단면 전체적으로 상쇄되어 시편 전체의 평균화된 응답인 환산변형률은 발생하지 않는다. 더불어 환산변형률은 부분파단과 같은 국부적 한계상황에서 스트레인 게이지에서 기록되지 않는 응답을 기사화한다. 이와 같이 환산변형률은 탄소섬유 인장시험에 있어 기존의 변형률 계측 결과와 병행하여 다각적인 접근을 통해 복합적이고, 신뢰성을 향상한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 ‘생애 첫 연구(NRF-2017R1C1B5

018241)’의 재정지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

1. ACI Committee 440 (2004), Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures (ACI 440.3R-04), *American Concrete Institute*, 40.
2. 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.
3. ASTM D638 (2002), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *American Society for Testing Materials (ASTM International)*, 13.
4. ASTM D3039 (2007), Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *American Society for Testing Materials (ASTM International)*, 13.
5. ASTM D4762 (2011), Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials, *American Society for Testing Materials*, 21.
6. 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.
7. Bank, L. (2006), *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, Wiley, 560.
8. Fyfe Co. LLC (2010), *Quality Control Manual for the Tyfo Fibrwrap System*, Fyfe Co., 100.
9. Hughes Brothers (2011), Aslan 100 Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) Rebar Product Data Sheet, Hughes Brothers, 2.
10. 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*, 405.
11. KS F ISO 10406-2: 2015 (2015), Fibre-reinforced polymer(FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 2: FRP sheets, 32.
12. 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.
13. You, Y. et al. (2006), Establishment of test items, methods and criteria for certification of FRP strengthening technology, *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, 1014.

Received : 04/12/2019

Revised : 04/26/2019

Accepted : 05/27/2019

요 지 : 취성재료인 탄소섬유보강폴리머(CFRP)의 시편시험에서 총변형량과 유효길이로서 유도되는 환산변형률을 도입하고, 환산변형률의 장점을 기술하였다. 일반적으로 재료의 인장물성을 결정하기 위해 스트레인 게이지 측정값을 사용하지만, 취성특성을 가지는 CFRP에서는 항상 유효한 것은 아니다. 그 이유는 취성재료에서는 응력재분배를 할 수 없으며, 스트레인 게이지의 측정값은 국부거동만을 나타기 때문이다. 따라서 환산변형률은 취성재료의 인장인장특성의 평균값을 측정하고 변형률과 측정값을 검증하는 보조지표로서 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 환산변형률은 1) 제작 오차(편차)와 세팅 오차(정렬 불량)에 의해 발생하는 초기 내부 변형률에 기인한 영향과 2) 불균일 변형분포로 인한 부분파단 이후 거동을 명확히 가시화하는 장점이 있다.

핵심용어 : 섬유보강폴리머, 취성재료, 시편시험, 환산변형률
