Composites Research

Vol. 39, No. 5, 593-599 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.593
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

표면 탄소섬유 복합화에 따른 하이브리드 GFRP 보강근의 인장 탄성계수 및 파괴특성 평가

이상열*†

Evaluation of Tensile Modulus and Failure Characteristics of GFRP Bars Hybridized with Surface Carbon Fibers

Sang-Youl Lee*†

ABSTRACT: This study evaluates the tensile properties of D13 glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars incorporating carbon fibers near the surface and examines a material-level reinforcement area indicator. Five specimens were tested for each nominal mass-based carbon-content group of 0, 4.5, and 9.1%. The mean tensile modulus increased from 51.89 GPa to 56.75 and 62.45 GPa, representing gains of 9.36 and 20.36%, respectively. The hybrid groups retained 98.15 and 94.03% of the reference mean tensile strength, and 98.45 and 79.77% of its mean rupture strain. Recorded stress–strain curves and post-failure photographs indicate changes in load-carrying response and longitudinal splitting; they do not establish the sequence of microscopic interfacial damage. Under an idealized equal-axial-stiffness condition, the measured modulus ratios give calculated area reductions of 8.56 and 16.92%. These values are indicators for evaluating design possibilities, not verified reductions in reinforcement demand, member deflection, or crack width. Bond, member behavior, long-term performance, and the effects of constituent proportions and manufacturing conditions require further investigation.

초 록: 본 연구에서는 표면부에 탄소섬유를 복합화한 D13 GFRP 보강근의 인장특성을 평가하고, 동일 축강성에 기초한 재료 수준의 보강면적 지표를 검토하였다. 공칭 중량기준 탄소 함유량 0, 4.5 및 9.1%에 대해 군당 5개를 시험하였다. 평균 탄성계수는 51.89 GPa에서 56.75 및 62.45 GPa로 증가하여 기준군 대비 9.36 및 20.36% 향상되었다. 하이브리드군의 평균 인장강도 유지율은 각각 98.15 및 94.03%, 파단변형률 유지율은 98.45 및 79.77%였다. 응력–변형률 곡선 및 파단 사진에서 하중지지 거동의 변화와 종방향 섬유 분리를 확인하였으나 미시적 계면 손상의 선후관계는 규명하지 않았다. 동일 축강성을 가정한 계산상 보강면적 감소율은 8.56 및 16.92%였다. 이는 설계 가능성 검토 지표이며 실제 배근량, 처짐 또는 균열폭의 감소율을 의미하지 않는다. 부착성능, 부재 거동, 장기성능 및 구성재 비율과 제조조건의 영향에 대한 추가 검증이 필요하다.

Key Words: 하이브리드 보강근(Hybrid reinforcing bar), 탄소섬유(Carbon fiber), 인장 탄성계수(Tensile modulus), 사용성(Serviceability)

1. 서 론

GFRP 보강근은 기존 철근의 부식에 따른 콘크리트의 균열과 박리 문제를 줄이기 위한 대체재이다. 그러나 높은 인장강도가 곧 높은 사용성능을 의미하지는 않는다. 균열 이후 보강근의 축강성이 낮으면 동일 인장력에서 변형률이

Received 30 September 2026, received in revised form 12 October 2026, accepted 25 October 2026

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Gyeongkuk National University
†Corresponding author (E-mail: lsy@gknu.ac.kr)

증가하므로, 처짐과 균열폭을 제어하기 위해 강도설계상 필요한 양보다 많은 보강근을 배치할 수 있다. 따라서 본 연구는 최대강도의 증대보다 탄성계수의 개선을 우선하는 재료설계에 초점을 둔다.

Seo 등[1]은 강봉·강선을 배치한 D13 하이브리드 GFRP의 탄성계수 향상을 확인하였으며, Lee[2]는 섬유 체적분율에 따른 GFRP의 탄성물성과 기둥구조의 진동특성을 분석하였다. Xu 등[3]은 표면 카본층을 갖는 보강근과 콘크리트의 수중 부착내구성을 평가하였다. 저자의 선행연구[4]는 실물 GFRP 보강 궤도슬래브의 반복하중 거동을 다루었다. 최근 Jin 등[5]은 탄소섬유를 외곽에 분산 배치하거나 중심부에 집중 배치한 탄소·유리 하이브리드 FRP 보강근을 비교하여, 외곽 배치형이 중심 배치형보다 인장강도는 낮지만 연성은 높게 나타남을 규명하였다. 이러한 연구를 바탕으로 본 연구에서는 비금속 섬유로 구성된 표면 카본 하이브리드 보강근의 함유량별 인장특성을 비교하고, 측정된 탄성계수비를 동일 축강성에 기초한 보강면적 검토 지표로 연결하였다.

본 연구의 목적은 동일 개발계열의 D13 보강근에서 공칭 카본 함유량별 탄성계수, 인장강도 및 파단변형률을 비교하는 것이다. 무카본 기준군과 두 하이브리드군의 단기 축인장시험을 통해 강성 증가와 파단특성의 관계를 분석하고, 동일 축강성을 가정한 보강면적비와 인장저항비를 산정하였다. 연구범위는 보강근 자체의 재료시험과 이상화된 계산에 한정한다. 또한, 콘크리트 부재의 처짐, 균열폭, 그리고 부착성능·장기 거동은 실험으로 평가하지 않았으므로 사용성 개선의 실증 또는 실제 배근량 저감의 검증으로 해석하지 않는다.

2. 인장특성 및 비교 지표

2.1 인장물성 및 하중분담

인장응력 σ, 축변형률 ε 및 탄성계수 E의 기본 관계는 식 (1)과 같다. P와 A는 인장하중과 응력 산정단면적, ΔL과 L_g는 표점구간의 연신량과 초기 길이이다. 탄성계수는 제4장에 제시한 변형률 구간에서 응력-변형률 관계를 선형 회귀하여 얻은 기울기로 평가한다.

$$\sigma = \frac{P}{A},\ \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_g},\ E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{1}$$

탄성구간에서 탄소섬유와 유리섬유 복합영역의 변형이 적합하면 표면 탄소섬유가 축방향 하중을 분담하여 보강근의 유효 탄성계수를 높일 수 있다. 수지는 섬유 및 복합영역 사이의 응력을 전달한다. Fig. 1은 이러한 배치와 하중전달을 설명하는 개념도이며 실제 단면의 균일한 환형층이나 완전부착을 검증한 결과는 아니다.

파단에 가까워지면 이종 섬유의 한계변형률 차이, 계면

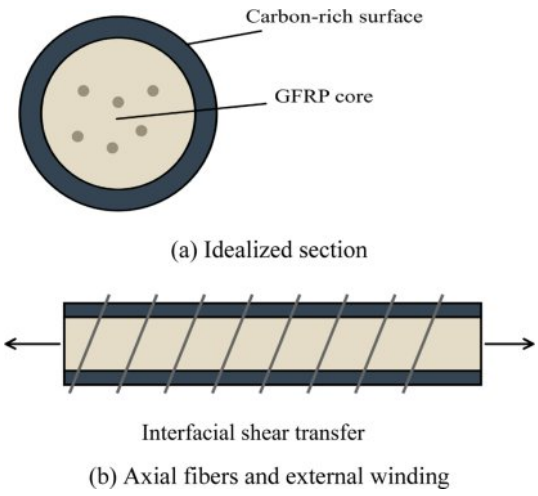


Fig. 1. Idealized surface hybridization and load transfer

손상 및 정착부 응력집중이 하중분담을 변화시킬 수 있다. 따라서 초기 탄성계수의 증가가 인장강도나 파단변형률의 증가를 보장하지 않는다. 본 연구에서는 구성재 체적분율과 계면 상수를 직접 측정하지 않았으므로 혼합법칙이나 계면 전단·슬립 관계를 이용한 정량적 예측은 수행하지 않는다.

2.2 동일 축강성에 기초한 비교 지표

기준군과 하이브리드군을 아래첨자 0과 h로 구분한다. 탄성계수와 보강면적을 각각 E와 A로 정의하면, 동일 축강성 $E_hA_h = E_0A_0$에 필요한 면적비는 식 (2), 면적 감소율 r_A는 식 (3)과 같다. 이는 같은 길이의 보강근에 대한 재료 수준의 비교이며 콘크리트 부재의 균열폭이나 처짐을 직접 예측하는 식은 아니다.

$$\frac{A_h}{A_0} = \frac{E_0}{E_h} \tag{2}$$

$$r_A = \left(1 - \frac{E_0}{E_h}\right) \times 100(\%) \tag{3}$$

면적 감소 후의 인장저항비 r_N는 평균 인장강도 f_u를 이용하여 식 (4)로 비교한다. 이 값은 평균 물성에 기초한 지표이며, 통계적 보증강도와 환경·장기 저감계수를 반영한 설계강도 또는 허용 이용률이 아니다.

$$r_N = \frac{A_h f_{u,h}}{A_0 f_{u,0}} = \frac{E_0}{E_h}\frac{f_{u,h}}{f_{u,0}} \tag{4}$$

3. 하이브리드 보강근 제작

공칭직경 D13 보강근을 제조 시 부여한 공칭 카본 중량 함유량에 따라 G0, H4.5 및 H9.1로 구분하였다. G0는 동일

개발계열의 무카본 기준군이며, H4.5와 H9.1은 표면부에 탄소섬유를 배치한 하이브리드군이다. 각 군에서 5개씩 총 15개 시험체를 평가하였다. 탄소섬유가 표면 둘레에 대칭적으로 고르게 배치되도록 4.5 및 9.1%의 제작 수준을 설정하였다. 이는 표면 복합화의 제작변수이며, 최적 함유량을 사전에 결정한 값은 아니다. 유리섬유 및 탄소섬유 원사를 공급하여 수지 함침, 성형, 와인딩 및 경화를 거쳐 제작하였다. Fig. 2는 H9.1의 제작과정을 보여준다. 본 논문에서 복합화는 탄소섬유를 유리섬유 및 수지계에 결합하는 제조과정을 뜻한다.

탄소섬유는 표면부에서 축방향 하중분담을 높이도록 배치하고, 외측 와인딩으로 섬유다발을 결속하였다. 전체 복합재 질량 기준의 탄소 질량분율은 탄소섬유 질량을 탄소섬유, 유리섬유 및 수지의 총질량으로 나눈 값이다. 섬유 질량 기준에서는 수지 질량을 제외한 총 섬유 질량을 분모로 사용한다. 본 시험의 공칭 함유량을 이 두 정의 중 하나로 확정하거나, 탄소 첨가에 따른 유리섬유 투입량의 유지 및 대체 정도를 정량화할 계량자료는 확보되지 않았다. 관찰된 물성 차이는 해당 제작군의 유효 물성 차이로 해석하며, 다른 제조변수와 분리된 탄소 함유량 단독의 인과효과로 일반화하지 않는다.

Fig. 3은 세 제작군의 경화 후 외관을 비교한 것이다. H4.5와 H9.1에서는 표면의 검은색 탄소섬유 영역과 외측 와인딩이 관찰되어 G0와 구분된다. 본 연구는 이와 같이 제작한 표면 복합화 보강근을 대상으로 카본 함유량에 따른 축방향 강성 변화와 파단특성을 비교하였다. 인장시험체에는

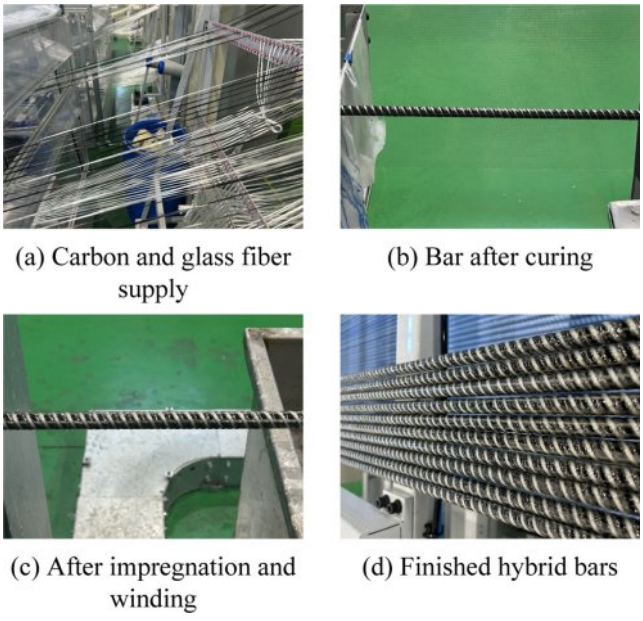


Fig. 2. Manufacturing of H9.1 hybrid GFRP bars: (a) fiber supply, (b) after curing, (c) after impregnation and winding, and (d) finished bars

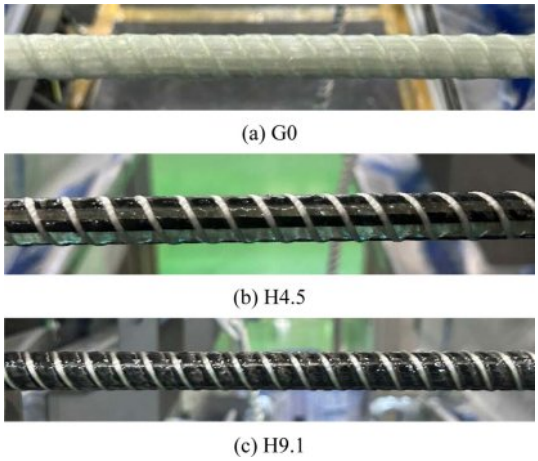


Fig. 3. Surface appearance after curing

양단 정착부를 적용하여 그립의 직접 압착에 따른 국부 손상을 줄이고, 시험하중을 보강근에 전달하도록 하였다. 중앙 계측구간에서 축방향 변형을 평가하였으며, 파단 후에는 섬유 분리와 정착부 인접 손상의 위치를 관찰하여 인장특성 분석에 함께 활용하였다.

4. 성능시험 및 분석

각 군 5개의 시험체에 대해 ASTM D7205/D7205M-21[6]에 따른 준정적 축인장시험을 수행하여 최대하중, 인장강도, 탄성계수 및 파단변형률을 평가하였다. 양단 정착부를 통해 하중을 전달하여 그립의 직접 압착을 피하고, 중앙 자유구간의 축방향 변형을 평가하였다. 자유길이는 정착부 사이의 거리, 표점거리는 변형 계측 구간의 길이로 구분한다.

D13(직경 13 mm)의 자유길이는 $L \geq \max(380\ \text{mm}, 40d) = 520\ \text{mm}$이다. 신율계 사용 시 중앙 표점거리는 104 mm(직경의 8배)이며, 정확도는 Class B-2이다. 재하는 파단까지 1~10 min이 소요되도록 하였으며, 제어방식별 기준속도는 변형률 0.01 min^{-1}, 응력 300 MPa/min이다. 탄성계수는 변형률 0.001~0.006(0.1~0.6%) 구간에서 최소제곱법으로 산정하였다. 이 구간은 응답 하부 절반에 해당하며, 파단변형률이 0.012 미만이면 상한을 파단변형률의 절반으로 낮춘다. 본 시험의 파단변형률은 모두 0.012 이상이다. 520 mm와 104 mm는 D13 환산 최소 기준값이며, 5.20 mm/min은 L = 520 mm에 대한 값이다. 실제 길이·계측기 형식·선택 제어방식과 정착부 치수·충전조건의 상세기록은 별도로 구분되어야 한다.

응력 산정단면적은 Table 1 최대하중을 인장강도로 나누어 역산한 약 126.68 mm^2이며, 이에 대응하는 등가 원형직경은 약 12.70 mm이다. 반면 직경 13.00 mm 원형단면의 면적은 132.73 mm^2이다. 따라서 D13은 직경급을 나타내며, 126.68 mm^2는 보고된 응력의 산정기준이다. 하중과 응력의

일관성은 확인되지만 이 역산값 자체가 실측 순단면적 또는 표면 리브를 포함한 단면적임을 입증하지는 않는다.

동일 하중·변형률 자료에서 산정단면적을 126.68 mm²에서 132.73 mm²로 변경하면 응력과 탄성계수는 126.68/132.73 ≈ 0.9544배, 즉 약 4.56% 감소한다. 최대하중과 계측 변형률은 변하지 않으며, 세 군에 같은 기준을 적용하면 강도비와 탄성계수비 및 이들 비로 계산한 면적 감소율은 유지된다. 다만 군별 실제 하중지지 단면이 다를 가능성은 이 계산으로 배제되지 않는다. 실제 축강성 및 설계값 산정에는 단면 측정방법과 군별 단면 자료의 확인이 필요하다.

4.1 탄성계수 향상과 반복시험 산포

Table 1은 개별 시험값, Table 2는 이 값으로 재계산한 평균과 표본표준편차 *s*이다. 평균비는 반올림 이전 값으로 계산하였다. 탄성계수는 G0의 51.887 GPa에서 H4.5의 56.746 GPa, H9.1의 62.452 GPa로 증가하여, 기준군 대비 증가율은 9.36 및 20.36%였다. 변동계수(CV)는 표본표준편차를 평균으로 나눈 백분율로 정의하였다.

탄성계수의 변동계수(CV)는 G0, H4.5 및 H9.1에서 각각 2.24, 3.27 및 1.63%였다. 개별 탄성계수 범위는 각각 50.741~53.293, 54.921~59.165 및 60.990~63.547 GPa로 세 군 사이에 중첩이 없었다(Fig. 4). 특히 H9.1은 가장 높은 평균 탄성계수와 가장 낮은 CV를 나타내어, 본 시험계열에서 강성 향상이 특정 시험체의 높은 값에 의존하지 않음을 보여준다. Fig. 5에서도 하이브리드군은 약 123~133 kN의 최대하중 범위에서 G0보다 높은 탄성계수 영역에 분포하였다. 즉, 카본 함유량 증가는 최대하중의 증가보다 탄성구간의 강성 증가로 뚜렷하게 나타났다.

Table 1. Individual tensile test results

ID	P_{max} (kN)	f_u (MPa)	E (GPa)	ε_u (%)
G0-1	135.65	1070.8	51.089	2.14
G0-2	137.90	1088.6	53.293	2.08
G0-3	130.08	1026.9	51.343	2.03
G0-4	130.78	1032.4	50.741	2.03
G0-5	136.44	1077.1	52.971	2.05
H4.5-1	131.91	1041.3	54.921	2.11
H4.5-2	133.12	1050.9	57.995	1.98
H4.5-3	129.05	1018.7	56.638	1.98
H4.5-4	132.77	1048.1	55.009	2.09
H4.5-5	131.61	1038.9	59.165	2.01
H9.1-1	130.29	1028.5	61.860	2.03
H9.1-2	125.78	992.9	60.990	1.55
H9.1-3	123.07	971.5	62.977	1.55
H9.1-4	124.55	983.2	63.547	1.57
H9.1-5	127.14	1003.7	62.886	1.54

Table 2. Mean ± sample standard deviation (n = 5)

Group	E (GPa)	f_u (MPa)	ε_u (%)
G0	51.89 ± 1.16	1059.2 ± 27.8	2.066 ± 0.046
H4.5	56.75 ± 1.86	1039.6 ± 12.7	2.034 ± 0.062
H9.1	62.45 ± 1.02	996.0 ± 21.7	1.648 ± 0.214

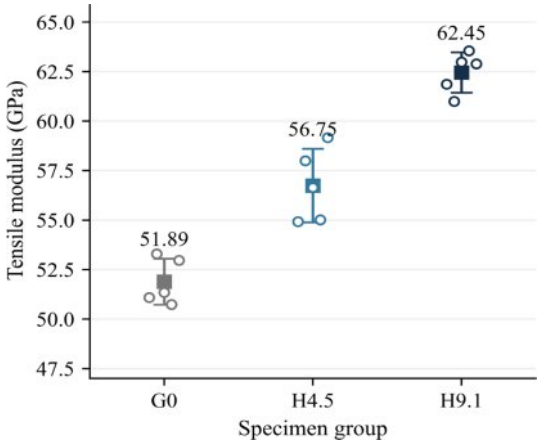


Fig. 4. Tensile modulus of the three groups. Open circles: specimens; squares and bars: mean ± s

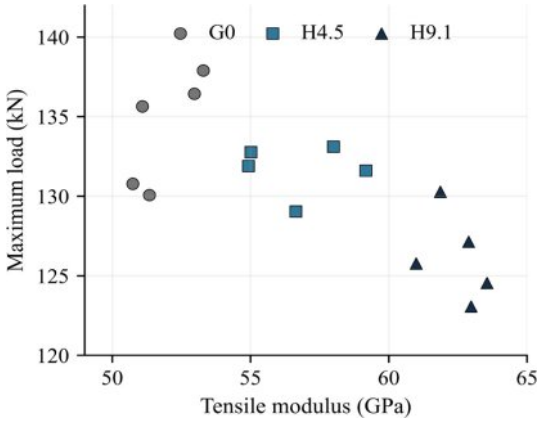


Fig. 5. Measured modulus and maximum load. Each point represents one specimen

4.2 인장특성과 강성 개선효과

평균 인장강도는 G0, H4.5 및 H9.1에서 각각 1059.16, 1039.58 및 995.96 MPa로, 기준군 대비 1.85 및 5.97% 감소하였다. 이에 비해 탄성계수는 9.36 및 20.36% 증가하였다. H4.5는 기준군과 유사한 평균 인장강도를 유지하면서 강성을 높였고, H9.1은 평균 인장강도 995.96 MPa를 확보하면서 가장 큰 강성 증가를 나타냈다. 이는 본 연구의 표면 카본 복합화가 GFRP 보강근의 축방향 강성 보완에 효과적으로 작용했음을 보여준다.

평균 파단변형률은 G0, H4.5 및 H9.1에서 각각 2.066, 2.034 및 1.648%로, 기준군 대비 감소율은 1.55 및 20.23%였다. H4.5에서는 강성 증가에도 파단변형률의 변화가 작았으나, H9.1에서는 파단변형률 감소가 뚜렷하였다. H9.1의 파단변형률 CV는 12.97%로 탄성계수 CV 1.63%보다 컸다. 특히 H9.1-1의 파단변형률은 2.03%인 반면 나머지 네 시험체는 1.54~1.57%에 분포하였다. 따라서 H9.1의 탄성구간 강성은 비교적 일관되지만, 파단변형률은 시험체별 국부 손상 및 정착부 영향에 더 민감했을 가능성이 있다.

Fig. 6의 파단 후 사진에서는 종방향 섬유다발 분리와 외측 벌어짐이 관찰되며, 일부 시험체는 정착부 출구에 인접한 국부 손상을 보인다. H9.1-1, H9.1-2 및 H9.1-3의 탄성계수는 각각 61.86, 60.99 및 62.98 GPa이나 파단변형률은 2.03, 1.55 및 1.55%로 차이가 있다. 초기 탄성구간에서는 표면 탄소섬유가 하중을 분담하여 강성을 높일 수 있는 반면, 이후 이종 섬유의 한계변형률 차이, 수지 매개 계면의 전단전달 및 국부 응력집중에 따라 손상이 발달할 가능성이 있다. 일부 섬유의 손상 또는 계면 분리로 하중이 재분배되면 초기 강성이 높더라도 최대 인장저항과 파단변형률은 감소할 수 있다. 그러나 파단 후 거시사진만으로 탄소섬유의 선행 파단 또는 탄소-유리 복합영역 사이의 선행 박리를 확정할 수 없다. 특히 정착부 인접 손상은 시험체의 고유 파괴특성과 정착의 영향을 분리하여 평가할 필요가 있음을 나타낸다.

Fig. 7은 세 시험군의 개별 응력-변형률 곡선을 보여준다. 시편 1, 2 및 3은 각각 G0, H4.5 및 H9.1에 대응한다. 군별 5개 곡선을 모두 제시하여 대표곡선 선택에 따른 편향



Fig. 6. Representative H9.1 specimens during testing and after failure. Panels (a, c): H9.1-1; (b, d): H9.1-2; (e, f): H9.1-3

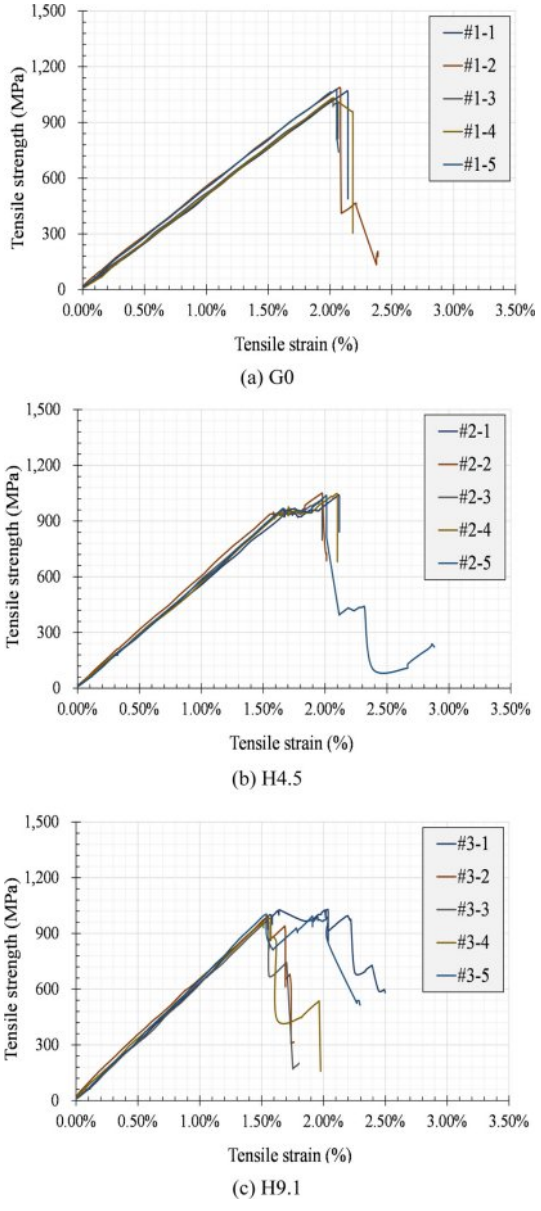


Fig. 7. Stress–strain curves for different specimens

을 줄였다. G0는 최대응력 부근까지 대체로 선형적인 응답을 나타내며, H4.5에는 약 1.6~1.9% 부근에서 기울기 변화와 응력 변동이 나타난다. H9.1은 약 1.5% 이후 일부 곡선에서 하중 저하와 재상승이 관찰되어 단일 직선으로 파단까지의 거동을 설명하기 어렵다. 이러한 변화는 손상과 하중 재분배 가능성을 시사하지만 계면박리, 섬유 파단 및 정착부 슬립의 기여를 구분하는 증거는 아니다. 곡선 종단이나 최대응력 이후 잔류 가지를 곧바로 파단변형률 또는 의사연성의 지표로 사용하지 않고, Table 1의 파단변형률과 구분하였다.

4.3 동일 축강성 기반 설계 가능성 검토

Fig. 8은 세 군의 평균 탄성계수, 인장강도 및 파단변형률을 G0의 해당 값으로 정규화한 결과이다. H4.5의 정규화 값은 각각 1.0936, 0.9815 및 0.9845로, 강도와 파단변형률을 기준군 수준에 가깝게 유지하면서 강성을 높였다. H9.1에서는 각각 1.2036, 0.9403 및 0.7977로 나타나 강성 증가와 파단변형률 감소가 함께 커졌다. 따라서 카본 함유량에 따른 효과는 탄성계수의 단조 증가와 파단특성의 변화로 구분된다.

H4.5에서 H9.1로 함유량을 높이면 탄성계수는 추가로 10.06% 증가하는 반면, 인장강도와 파단변형률은 각각 4.20 및 18.98% 감소한다. 특히 파단변형률 감소가 강도 감소보다 크게 나타나므로, 높은 카본 함유량의 효과를 강성 증가율만으로 판단하기는 어렵다. 본 시험범위에서 H4.5는 강도 및 파단변형률 유지와 강성 개선의 균형이 좋은 조합이며, H9.1은 더 높은 강성이 필요한 경우에 검토할 조합이다. 본 연구는 이 두 조합의 차이를 동일 시험계열에서 정량적으로 제시하였다.

Fig. 9는 식 (2)에 따른 동일 축강성 조건의 보강면적비이다. H4.5와 H9.1의 면적비는 각각 0.9144 및 0.8308이며, 식 (3)의 면적 감소율은 8.56 및 16.92%이다. 동일 보강면적과 인장력을 유지할 때 탄성변형률 감소율도 같은 값이지만, 면적을 줄여 축강성을 유지하는 경우와 면적을 유지하여 변형을 줄이는 경우는 서로 다른 비교조건이다. 두 효과를

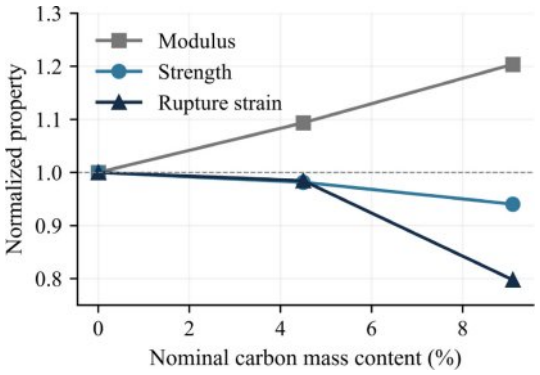


Fig. 8. Mean properties normalized by G0. Lines connect the three tested compositions

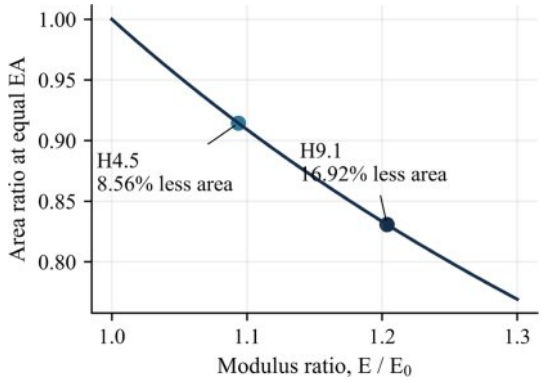


Fig. 9. Calculated area ratio under equal axial stiffness. The relation is not a measured structural response

동시에 확보한 것으로 해석하지 않는다. 식 (4)에 따른 면적 감소 후 평균 인장저항비는 각각 0.8975 및 0.7813이다. 따라서 감소된 면적은 동일 축강성을 만족하더라도 평균 인장저항까지 유지하지는 않는다. 이 값은 통계적 보증강도와 환경·장기 저감을 반영한 설계 허용값이 아니며, 실제 배근량 저감이나 부재 사용성 개선은 별도로 검증해야 한다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 표면 탄소섬유를 복합화한 D13 GFRP 보강근의 세 제작군에서 총 15개의 단기 인장시험 결과를 비교하였다. 재료시험 결과와 동일 축강성을 가정한 계산 결과를 구분한 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 평균 탄성계수는 G0의 51.89 GPa에서 H4.5의 56.75 GPa 및 H9.1의 62.45 GPa로 증가하여 각각 9.36 및 20.36% 향상되었다. 세 군의 개별 탄성계수 범위는 중첩되지 않았으며, H9.1은 가장 낮은 CV 1.63%를 나타냈다. 본 시험계열에서 표면 카본 복합화를 통한 축방향 강성 개선효과가 일관되게 확인되었다.

(2) H4.5는 기준군 대비 평균 인장강도 98.15%와 파단변형률 98.45%를 유지하면서 강성을 높였다. H9.1은 가장 높은 탄성계수를 나타냈으나, 인장강도와 파단변형률은 각각 기준군의 94.03 및 79.77%였다. 종방향 섬유 분리 및 정착부 인접 손상과 정규화 물성 비교를 통해, 탄성구간의 강성 향상과 파단특성을 함께 고려한 함유량 선정의 근거를 제시하였다.

(3) 동일 축강성 조건의 계산상 보강면적 감소율은 H4.5에서 8.56%, H9.1에서 16.92%였다. 평균강도비 및 동일 저감계수를 가정한 면적 감소 후 인장저항비는 각각 0.8975 및 0.7813이었다. 이 수치는 재료 수준의 설계 가능성 검토 지표이며, 실제 허용 배근량 저감이나 균열폭·처짐 개선을 검증한 값은 아니다.

(4) H4.5는 본 시험범위에서 강도·파단변형률 유지와 강

성 개선의 균형을, H9.1은 더 큰 강성 향상과 파단변형률 감소를 보였다. 세 함유량 수준의 비교만으로 최적 조성 또는 장기 사용성능을 확정할 수 없다. 거시적 섬유 분리와 단계적 하중 변화는 손상 기구를 검토할 근거이나, 계면박리의 선행 발생을 입증하지는 않는다.

실제 구조 적용을 위해서는 계량, 공정 및 시험 상세기록의 보완과 제작배치 확대, 단면 및 SEM 관찰, 계면, 부착시험이 필요하다. 이어 동일 사용하중의 콘크리트 부재시험과 지속, 반복하중 및 환경노출시험으로 균열, 처짐 및 파괴모드와 장기 거동을 검증하여야 한다. 본 연구의 기여는 시험한 D13 제작군의 강성 및 파단특성 차이와 조건부 면적 검토 지표를 제시한 데 있다. 아울러 사용성 설계 효과를 강조하기 위해서는 향후 콘크리트 보 부재시험, 부착시험 및 장기거동 검증이 추가될 필요가 있다.

후 기

이 논문은 국립경국대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Seo, D.-W., Park, K.-T., You, Y.-J., and Kim, H.-Y., “Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization,” *Engineering*, Vol. 5, No. 11, 2013, pp. 865-869. https://doi.org/10.4236/eng.2013.511105
2. Lee, S.-Y., “Natural Frequency Characteristics of GFRP Pole Structures for Civil Structures with Different Fiber-Volume Fraction,” *Composites Research*, Vol. 27, No. 2, 2014, pp. 66-71. https://doi.org/10.7234/composres.2014.27.2.066
3. Xu, G., Yu, Y., Pan, Y., and Li, B., “Durability of Bond between Carbon/Glass Hybrid Fiber-Reinforced Polymer (HFRP) Bar and Concrete in Water,” *Advances in Structural Engineering*, Vol. 26, No. 9, 2023, pp. 1752-1764. https://doi.org/10.1177/13694332231175391
4. Lee, S.-Y., “Fatigue Behaviors of High-Speed Track Slabs Reinforced by GFRP Composite Rebar: Full-Scale Experimental Verification,” *Journal of Composites Science*, Vol. 9, No. 11, 2025, 597. https://doi.org/10.3390/jcs9110597
5. Jin, Z., Xu, M., Pang, B., Cao, Y., and Wang, H., “Role of fiber distribution on tensile properties of hybrid fiber-reinforced polymer (HFRP) bars through experimental and numerical simulation study,” *Journal of Building Engineering*, Vol. 117, 2026, 114750. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114750
6. ASTM International, Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, ASTM D7205/D7205M-21, West Conshohocken, PA, 2021. https://doi.org/10.1520/D7205_D7205M-21
7. ACI Committee 440, Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary, ACI CODE-440.11-22, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023.
8. ASTM International, Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement, ASTM D7957/D7957M-25, West Conshohocken, PA, 2025.