

가열온도에 따른 CFRP Rebar의 인장 및 압축 성능 평가

Evaluation of Tensile and Compressive Performance of CFRP Rebars according to Heating Temperatures

이재희¹ · 유성원^{2*}

Jae-Hee Lee¹ · Sung-Won Yoo^{2*}

(Received January 3, 2024 / Revised January 10, 2024 / Accepted January 12, 2024)

The demand for FRPs that are corrosion-free and have an excellent tensile strength-to-weight ratio. However, there is a lack of research on the mechanical properties of FRP in the form of rebars, especially the changes in performance due to heating. Therefore, in this paper, 60 tensile and compression specimens of CFRP rebars with a diameter of 12 mm were fabricated and subjected to direct tensile and direct compression tests, and their performance was evaluated according to the heating temperature. It was found that as the heating temperature increases above 300 °C, the performance decrease becomes larger due to the burning of epoxy. The compressive strength was found to be much lower than the tensile strength, but the modulus of elasticity was found to be the same in tension and compression.

키워드 : CFRP, 가열, 인장거동, 압축거동, 직접인장시험, 직접압축시험

Keywords : CFRP, Heating, Tensile behavior, Compressive behavior, Direct tensile test, Direct compressive test

1. 서론

기존의 철근-콘크리트 구조물은 외부환경에 노출된 후 시간이 지남에 따라 철근의 부식으로 인해 성능이 저하되고, 이는 구조물의 수명에 영향을 끼친다(Wang and Kodur 2005). 구조물의 수명을 연장시키기 위한 대안으로 내식성이 강한 FRP를 활용한 철근 대체제 연구가 활발하게 진행 중이다.

내식성을 가진 철근대체제를 제조하기 위해서는 반응성이 낮은 원료의 사용이 필수적이다. 대부분의 FRP가 비금속성 물질을 원료로 하며, 고분자 경화재와 함께 사용하기에 강한 내화학성 및 내식성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그중에 탄소섬유로 제작한 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)는 일반 철근대비 낮은 탄성계수에도 불구하고, 내식성과 높은 중량 대비 강도 등의 장점을 가지고 있어 여러 분야에서 활발히 연구되고 있다(Sun et al. 2023).

Wang and Kodur(2005)에 의하면 압축성능이 인장성능보다

낮다고 알려져 있으며, CFRP 소재의 보강재 임계온도는 약 250 °C로 이보다 높은 고온에 노출될 경우 경화재로 사용되는 에폭시가 유리전이온도에 도달하게 되면서 강도가 급격히 저하되는 것으로 제시하고 있다. 또한 에폭시가 완전히 연소될 경우 압축성능이 극단적으로 감소되어 압축성능에 대한 실험이 불가능한 것으로 확인되었다. 이러한 이유들로 이전까지 ACI Committee 440(2015)의 규정에서는 rebar형태의 CFRP를 압축보강재로 사용하는 것을 권장하지 않고 있었으나 보강재 및 에폭시 등의 연구로 인해 성능이 향상되어 국제법규에서 압축부재에 대한 FRP 사용이 허가되었다. 하지만 이전까지 사용되지 않았기에 주목받지 못했던 압축(AINajmi and Abed 2020) 및 인장(Ei-Tahan and Galal 2013)의 직접 시험에 대한 연구가 부족하여 활발한 연구가 부족한 실정이다.

이러한 이유로 본 논문에서는 국제 시험규정을 참고하여 D12 규격의 CFRP Rebar에 대한 실험 환경 및 보조 도구를 조성하고, 규정에 따른 인장 및 압축 시편 60여개를 제작하였다. 가열온도 상온, 150 °C, 300 °C, 450 °C를 변수로, 인장 및 압축 시험을

* Corresponding author E-mail: imysw@gachon.ac.kr

¹가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea)

²가천대학교 토목환경공학과 교수 (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea)

직접 수행하였다. 가열시간은 표준화재로 1~3시간의 내화시간이 요구되기에, 승강온도 5 °C/mm의 속도로 목표온도에 도달한 후 3시간 가열한 후 상온에 냉각하였다. 이후 데이터 로거에 연결한 Strain Gauge를 시편에 부착하고 2,000 kN의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 가열된 CFRP Rebar의 물성을 구하였다. 가열온도 상승에 따른 CFRP 보강재의 기계적 특성 변화를 파악하고 직접 인장 및 압축 시험 방법을 평가하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 CFRP Rebar

본 연구에서 사용한 CFRP Rebar은 국내 N사에서 제조된 D12 CFRP Rebar을 사용하였다. 이 제품은 펄트르전 공법으로 제조되었으며, 조성은 탄소섬유 75 %, 비스페놀 A형 에폭시 수지, 4-메틸-1,2-카르복실산 무수물 10 %, 헥사하이드로-4-메틸프탈산 무수물 4 %, 네오데칸산 2,3-에폭시프로필 에스테르 4 % 등으로 이루어져 있다. 고분자 매트릭스 복합재료의 인장특성 공식 인증 시험에서 인장강도 3,310 MPa, 인장탄성계수 235 GPa, 결합재인 비스페놀 A형 에폭시 수지는 인장강도 550 MPa 수준이다.

2.2 실험계획 및 부재 형상

CFRP Rebar의 기계적 특성을 평가하기 위해서는 CSA-S806, ASTM D7205, ASTM D695 등과 같은 CFRP를 위한 실험규정이 요구된다. 본 실험에서는 직접인장시험에 ASTM D7205, 직접압축 시험에 ASTM D695를 참고했으며, 가열온도에 따른 특성 변화를 평가하기 위한 실험변수로는 CFRP Rebar 가열온도 4수준(상온, 150 °C, 300 °C, 450 °C)이며, 인장시험체는 1수준(900 mm), 압축 시험체 길이 2수준(2D : 압축강도 측정용, 4D : 탄성계수 측정용)이다. 실험시편은 총 60개(3×4=12개, 5회 반복)이며, 실험변수는 Table 1, 시험체 형상은 Fig. 1, 2에, 실험 Setup은 Fig. 3, 4에 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 인장 및 압축 시험체는 2,000 kN 규격의 UTM을 사용하여 수행하였다. 이때 인장시험체는 CFRP Rebar의 그립부 파단을 방지하기 위하여 앵커와 철판을 설치한 후 실험을 진행하였으며, 압축시험체는 압축시험체 상부에 헤드를 설치하여 진행하였다. 이때 Strain Gauge를 부착하고 하중재하 속도는 0.1 mm/min였으며, CFRP Rebar 시험체의 중앙부 변형률을 측정하고 연결된 데이터 로거를 통해 측정된 재하 하중값과 변형률값을 저장하였다.

Table 1. Test variables

Specimen	Length (mm)	Heating temperature
Tensile	900	Room, 150 °C, 300 °C, 450 °C
Compression	24, 48	Room, 150 °C, 300 °C, 450 °C

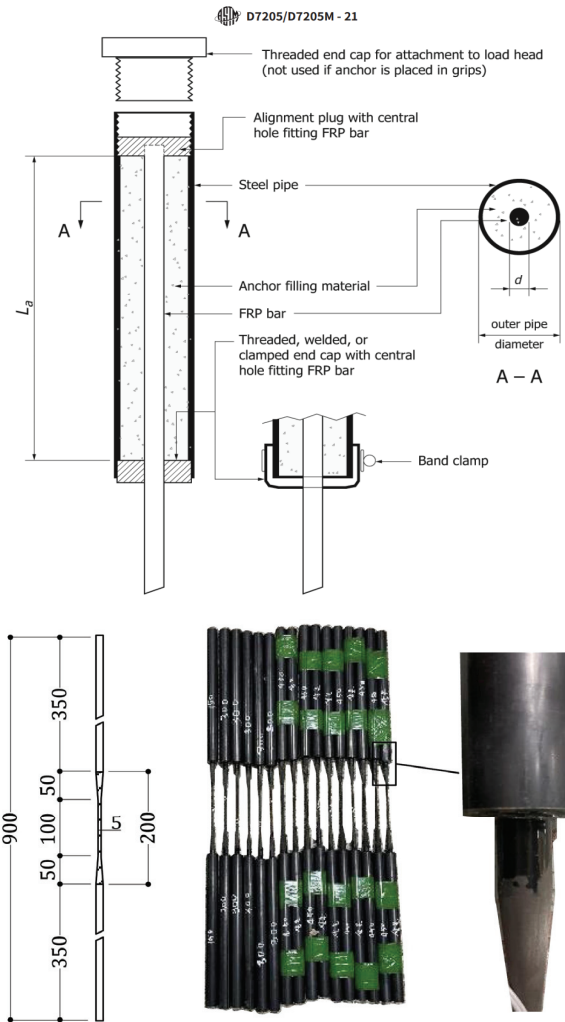


Fig. 1. Shape of tensile specimen



Fig. 2. Shape of compressive specimen

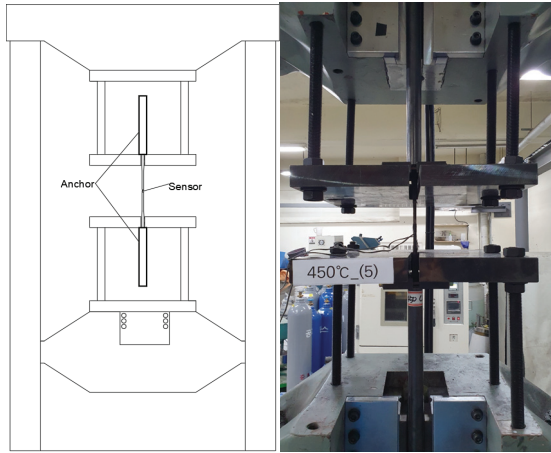


Fig. 3. Tensile test setup

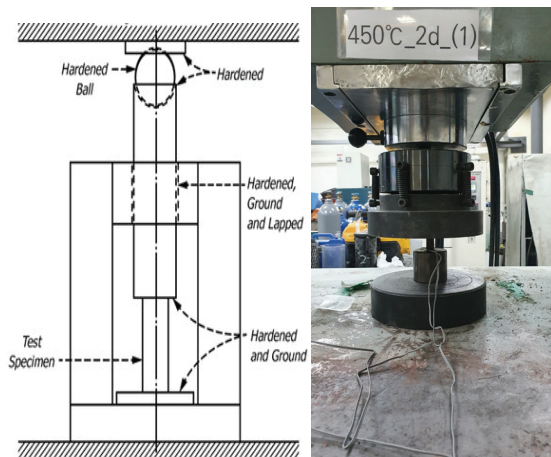


Fig. 4. Compressive test setup

3. 실험결과 및 분석

3.1 인장강도, 탄성계수, 하중-변형률관계

직접인장실험을 통해 가열한 CFRP Rebar의 기계적 특성 및 파괴형상을 파악하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타난 탄성계수는 실험을 통해 측정된 하중-변형률관계 값에서 산정되었다. 하중-변형률관계 그래프는 Fig. 5에 나타내었으며, 연성파괴를 보이는 일반 철근과 다르게 취성파괴 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Tensile property of CFRP Rebar

Label	Room	150 °C	300 °C	450 °C
Tensile strength (MPa)	1999.0	2253.8	1275.1	1100.4
Elastic modulus (GPa)	167.05	190.87	164.16	-

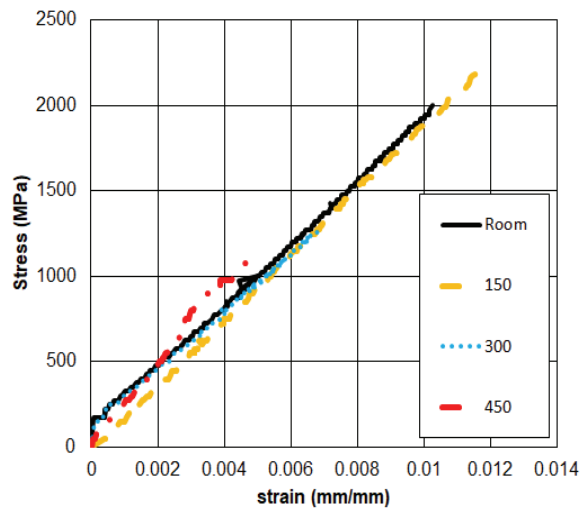


Fig. 5. Tensile stress-strain relationship as a function of heating temperature

가열 시 300 °C 이상의 온도에서 CFRP Rebar의 인장강도 및 탄성계수의 저하가 관찰되었다. 다만, 가열온도 150 °C에서 12 % 가량의 강도 상승 및 14 % 가량의 탄성계수 상승이 나타났다. 가열 온도 450 °C에서는 CFRP Rebar 에폭시의 완전연소 및 강도 45 % 감소와 같은 극단적인 성능 저하가 발생하였다. 에폭시의 완전연소로 안정적인 하중전달이 불가능하여 선형적인 관계를 얻을 수 없어 탄성계수값을 산정하지 못하였다. 가열온도 450 °C에서 에폭시가 완전연소된 CFRP Rebar의 형상은 Fig. 6에 나타내었다.



Fig. 6. CFRP resin loss due to high temperature in tensile test object

Table 3. Compressive property of CFRP Rebar

Label	Room	150 °C	300 °C	450 °C
Tensile strength (MPa)	333.0	336.0	274.4	-
Elastic modulus (GPa)	166.1	175.4	167.8	-

3.2 압축강도, 탄성계수, 하중-변형률관계

직접압축실험을 통해 가열한 CFRP의 기계적 특성 및 파괴형상을 파악하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타난 탄성계수는 실험을 통해 측정된 하중-변형률관계 값에서 산정되었다. 하중-변형률관계 그래프는 Fig. 7에 나타내었다.

가열 시 300 °C 이상의 온도에서 CFRP Rebar의 압축강도 저하 현상을 관찰할 수 있었으나 인장강도와는 다르게 감소폭이 18%로 크지 않았다. 다만, 압축에서도 가열온도 150 °C에서 가교도 증가에 따른 강도 증가도가 1%로 이 나타났으나 인장보다는 증가 폭이 낮은 것으로 나타났다. 가열온도 450 °C에서는 CFRP Rebar 에폭시의 완전연소로 형상을 갖추지 못하였기에 실험이 불가능 하였다. 에폭시가 완전연소된 CFRP Rebar의 형상은 Fig. 8에 나타내었으며, Fig. 8의 좌측 사진은 압축하중 가력 전의 정면 형상이며, 우측 사진은 위에서 쳐다본 평면 형상으로 실험이 불가능한 형상이다.

즉, 가열온도 150 °C까지는 이전 연구에서도 발견할 수 있었던 내용과 유사하게(Ismail et al. 2021; Zanjanijam et al. 2023), 가교도 증가에 의해 강도 및 탄성계수의 향상이 발생하였다. 압축의 경우 효과가 인장에 비해 효과가 적게 나타났다.

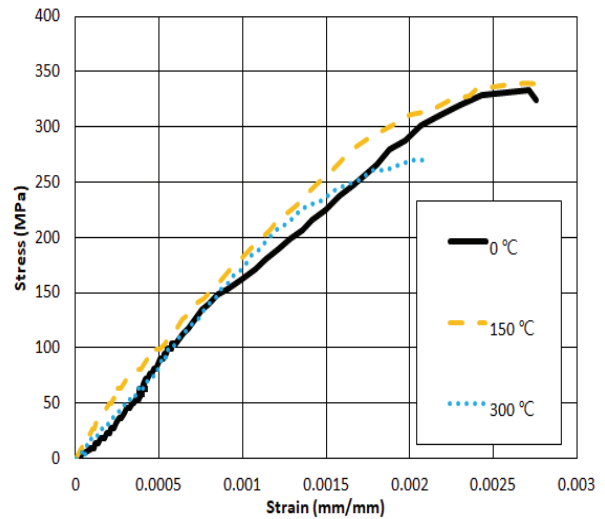


Fig. 7. Compressive stress-strain relationship as a function of heating temperature



Fig. 8. CFRP resin loss due to high temperature in compressive test object

한편, CFRP Rebar의 압축강도는 인장강도의 약 16% 수준인 것으로 나타났으며, 압축 및 인장 거동 시의 탄성계수는 유사하게 나타났다.

4. 가열온도 - 강도, 탄성계수 추정식

4.1 가열온도-강도

가열한 CFRP Rebar의 직접인장 및 압축실험을 통해 얻어진 압축 및 인장강도 값과 가열온도간의 관계를 수치적으로 모델링하기 위하여 2차 함수로 회귀분석하였다. 이때, 450 °C의 강도시험

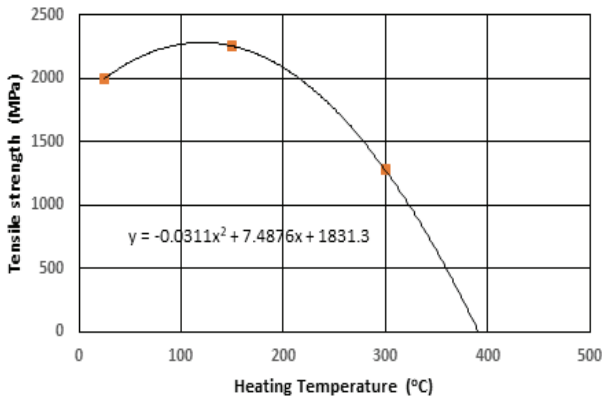


Fig. 9. Heating temperature - tensile strength model

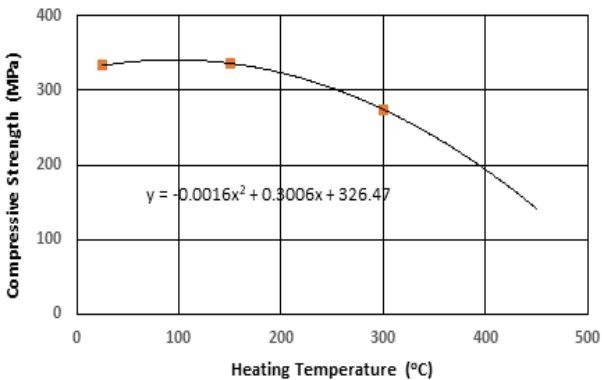


Fig. 10. Heating temperature - compressive strength model

결과는 다소 신뢰성이 저하되는 이유로 배제하였으며, 이러한 이유로 세 점을 가지는 2차함수이므로 상관계수는 의미가 없어 제시하지 않았으며, 그 결과는 Fig. 9, 10에 나타내었다.

Fig. 9, 10에서 알 수 있듯이 제시된 인장강도 및 압축강도의 모델들은 가교도 증가에 따른 강도 증가구간과 가열손상에 의한 강도 감소구간으로 나뉘지며, 강도 증가가 가능한 최고온도가 150 °C로 구성되어 있다. 가열온도를 좀 더 촘촘히 하여 가교도 증가에 의한 최대 강도를 구한다면 좀 더 정확한 예측을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

한편 본 논문에서 제시한 가열온도 - 강도 추정식을 기존 연구와 비교하기 위하여 다각도로 문헌조사를 수행하였으나, 유사 연구사례가 없어 그 결과를 비교분석하지 못하였다.

4.2 가열온도-탄성계수

가열한 CFRP Rebar의 직접인장 및 압축실험을 통해 얻어진 압축 및 인장 시의 탄성계수 값과 가열온도간의 관계를 수치적으

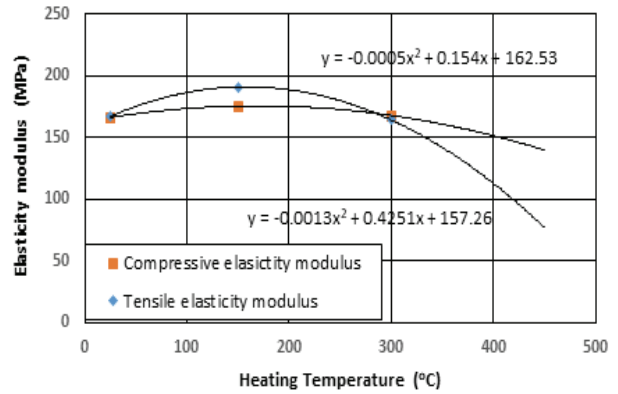


Fig. 11. Heating temperature - elasticity modulus model

로 모델링하기 위하여 2차 함수로 회귀분석하였으며, 역시 세 점을 가지는 2차함수이므로 상관계수는 의미가 없어 제시하지 않았으며, 그 결과는 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 제시된 인장 및 압축 시의 탄성계수 모델들은 앞서 기술한 강도 모델과 동일한 형상을 가지는 것으로 나타났다.

한편 본 논문에서 제시한 가열온도 - 탄성계수 추정식 역시 기존 연구와 비교하기 위하여 다각도로 문헌조사를 수행하였으나, 유사 연구사례가 없어 그 결과를 비교분석하지 못하였다.

5. 결론

본 논문에서는 가열된 CFRP Rebar의 직접인장시험 및 직접압축시험을 수행하여 가열온도 별 인장강도, 압축강도 및 각각의 탄성계수 특성변화를 확인하였다. 일련의 본 연구에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 300 °C 이상에서 가열온도가 증가함에 따라 CFRP Rebar 에폭시의 연소로 인해 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있었지만, 가열온도에 따른 강도 증감폭은 인장축에서 더 크게 나타났다.
2. 인장, 압축에서 동일하게 취성파괴를 확인할 수 있었으며, CFRP Rebar의 압축강도는 인장강도의 16 % 수준으로 낮았으나 탄성계수는 인장, 압축에 상관없이 동일한 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
3. 가열온도 150 °C까지는 가교도 증가로 인해 기계적 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 가교도 증가로 인한 성능증가는 압축보다 인장에서 더 두드러지게 나타났다.

- 4. 가열온도 450 °C에서 CFRP Rebar의 임계온도에 도달하여 물성이 급격히 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 인장시험에서는 탄소섬유가 인장력을 받아낼 수 있었던 것과 대비되게, 압축에서는 에폭시가 연소된 후 시험 자체를 진행 할 수 없었다.
- 5. 가열온도와 인장강도, 압축강도 및 탄성계수간의 수치 모델을 제시하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 RS-2021-KA163381)으로 수행되었음.

References

ACI Committee 440 (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars (ACI 440.1R-15), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

AlNajmi, L., Abed, F. (2020). Evaluation of FRP bars under compression and their performance in RC columns, *Materials*,

13(20), 4541.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2016). ASTM D7205: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2023). ASTM D7695: Standard test method for compressive properties of rigid plastics., ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.

El-Tahan, M., Galal, K. (2013). New thermoplastic CFRP bendable rebars for reinforcing structural concrete elements, *Composites Part B: Engineering*, **45(1)**, 1207–1215.

Ismail, A.S., Jawaid, M., Hamid, N.H., Yahaya, R., Hassan, A., Asim, M., Supian, A.B.M. (2021). Effect of curing temperature on mechanical properties of bio-phenolic/epoxy polymer blends, *Journal of Polymers and the Environment*, **30**, 878–885.

Sun, Y., Ji, J.H., Zhu, H., Dong, Z.Q., Zhang, P., Yan, M., Soh, C.K. (2023). Flexural behaviours of pretensioned prestressed concrete-UHDC composite beams reinforced with CFRP bars, *Composite Structures*, **322**, 117385.

Wang, Y.C., Kodur, V. (2005). Variation of strength and stiffness of fibre reinforced polymer reinforcing bars with temperature, *Cement and Concrete Composites*, **27(9-10)**, 864–874.

Zanjanijam, A.R., Wang, X., Ramezani, M., Holberg, S., Johnson, P.A. (2023). Phenolic resin/coal char composites: curing kinetics and thermal/mechanical performance, *Polymer*, **281**, 126103.

가열온도에 따른 CFRP Rebar의 인장 및 압축 성능 평가

최근 부식이 없고 중량 대비 인장강도가 우수한 FRP에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 CFRP Rebar 형태의 FRP의 기계적 특성 연구, 특히 가열에 따른 성능 변화와 압축에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 직경 12 mm CFRP Rebar로 60개의 인장 및 압축 시험체를 제작하여 직접인장시험 및 직접압축시험을 실시하고, 가열온도에 따른 성능을 평가하였다. 가열온도가 300 °C 이상으로 상승할수록 CFRP Rebar의 에폭시가 연소하여 성능 저하가 커지는 것으로 나타났다. 압축강도는 인장강도 보다 크게 작은 것으로 나타났으나, 탄성계수는 인장과 압축에서 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.