

탄소보강근의 제조 조건에 따른 휨강도와 기공 특성과의 상관성 분석

김남일* · 권도영* · 추용식*[†]

Analysis of Correlation between Flexural Strength and Pore Characteristics on CFRP Rebar as Fabrication Method

Nam-Il Kim*, Do-Young Kwon*, Yong-Sik Chu*[†]

ABSTRACT: In this study, the fabrication conditions of CFRP rebar were controlled to derive the correlation between flexural strength and pore characteristics. The fabrication conditions of CFRP rebar were adjusted for presence or absence of rib, resin temperature, and curing furnace temperature. Flexural strength and pore characteristics of fabricated CFRP rebar were analyzed. The flexural strength of CFRP rebar was changed depending on the fabrication condition, such as the presence or absence of rib, the resin temperature, and the curing furnace temperature. It was confirmed that the flexural strength of CFRP rebar was significantly lowered when the rib was not wound. As a result of Nano X-ray CT analysis, the max. pore diameter was shown in CFRP rebar prepared at a resin temperature of 60°C. According to optical microscopic analysis, the maximum porosity was 6.89% in No. 1, and the minimum porosity was 2.88% in No. 7. The correlation coefficient between porosity used optical microscopy and flexural strength was -0.64, which was higher than the correlation coefficient between porosity or pore size used Nano X-ray CT and flexural strength.

초 록: 본 연구에서는 CFRP rebar의 휨강도와 기공 특성과의 상관성을 도출하기 위해 CFRP rebar의 제조 조건을 제어하였다. 이때 CFRP rebar의 제조 조건은 리브 유무, 수지 온도 및 경화로 온도 등을 조정하였으며, 제조된 CFRP rebar의 휨강도와 기공특성을 분석하였다. CFRP rebar의 휨강도는 리브 유무, 경화로 온도 및 수지 온도 등, 제조 조건에 따라 변화되었다. 특히 리브가 감겨지지 않은 경우, CFRP rebar의 휨강도 값이 크게 낮아진다는 것도 확인하였다. Nano X-Ray CT 분석 결과, 수지 온도가 60°C인 CFRP rebar에서 최대 기공 지름을 나타내었다. 광학현미경 분석 결과, 최대 기공율은 No. 1에서 6.89%, 최소 기공율은 No. 7의 2.88%이었다. 광학현미경을 통한 기공율과 휨강도의 상관관계계수는 -0.64이었으며, 이는 Nano X-Ray CT 기공율 및 기공크기와의 상관관계계수 보다 높은 값이었다.

Key Words: 휨강도(Flexural strength), 기공율(Porosity), 수지온도(Resin temp.), 리브(Rib), 상관관계계수(Correlation coefficient)

1. 서 론

철근은 우수한 탄성, 연성 및 소성 특성을 보유하여 콘크리트 구조물 강화를 위해 폭넓게 사용되고 있다[1-3]. 하지만 해안지역에서의 철근 사용은 부식 등에 의한 구조물 서

비스 수명을 단축시켜 사용 한계를 갖는다[4,5]. 또한 제설제에 의한 철근 부식은 건축물의 복구비용을 증가시키기도 한다. 최근 항공, 자동차, 해양 및 건축 산업에서의 지속적인 발달과 기술에 진보에 따라 재료의 경량화, 고강도, 비부식 특성을 갖는 신소재 개발에 대한 연구가 활발히 진행

Received 26 August 2022, received in revised form 10 October 2022, accepted 19 October 2022

*Carbon Neutral Material Center, Korea Institute of Ceramic Eng. and Tech.

[†]Corresponding author (E-mail: yschu@kicet.re.kr)

중이다[6-12]. 그 중에서도 Fiber reinforced polymer (FRP) 복합재료는 금속재료의 대체재로 활발히 사용되고 있는 실정이다. 건축 산업에서는 FRP rebar가 철근 부식 방지용 대체재로 새롭게 연구·적용되고 있다[13-15]. 특히 FRP rebar는 우수한 인장 강성, 경량성 및 내구성 등을 갖으며, 일부 콘크리트 구조물에는 이미 적용되고 있다. 그러나 FRP rebar는 연성이 부족하여, 최대 하중 도달시까지의 응력과 변형률은 선형특성을 유지하는 단점이 있다. FRP rebar를 사용한 콘크리트의 휨강도 특성은 많은 연구가 수행되었으며, 이때 콘크리트 휨강도는 크게 개선된다고 발표하였다[16,17]. 더불어 일부 연구자들은 연성이 낮은 FRP rebar의 단점을 개선하기 위해 철근을 혼합 사용하는 방식을 검토하였다[18]. 또한 철근의 장점인 연성을 유지하기 위해 철근(코어)과 FRP(표면)를 복합화하는 연구도 추진되었다[19].

FRP 복합체의 휨강도 특성 연구는 일부 연구자들에 의해 수행되었다. 하지만 대부분의 연구는 인발성형 방식의 rebar 형태가 아닌 레이업 방식을 적용한 직육면체로 제작되어 휨강도가 평가되었다[20]. 따라서 기존 FRP 복합체의 제조방법 및 형상은 철근(원형 또는 이형)과는 전혀 다른 방식으로, FRP rebar의 휨강도 특성 등을 정확히 평가하기 어려운 실정이다. 즉 철근 형상을 갖는 FRP rebar의 휨강도 특성 연구는 매우 미미한 상황이며, 특히 Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rebar의 휨강도와 기공의 상관성을 연구한 사례는 아직까지 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 CFRP rebar의 제조 조건에 따른 휨강도를 확인하기 위해 다양한 제조 조건을 검토하였으며, 이때 CFRP rebar의 기공 함량 및 크기 등을 분석하여 휨강도와의 상관성을 도출하고자 하였다. 특히 CFRP rebar의 기공 특성을 파악하기 위해 3차원 형상·특성 분석을 위한 X-Ray CT 촬영 및 단면 특성 분석을 위한 광학현미경 관찰·이미지 분석을 실시하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1의 인발성형기를 사용하여 CFRP rebar를 제조하였으며, 이때 폴리머는 국도화학의 에폭시 수지와 경화제를 혼합 사용하였다. 섬유류는 국내 H사의 24 K 탄소섬유와 중국 C사의 유리섬유 4,400 TEX를 사용하였다(탄소섬유는 CFRP rebar 코어, 유리섬유는 리브용). 본 연구에서 사용한 인발성형기는 탄소섬유 크릴, 수지 함침조, 리브 와인딩, 경화로 및 인발기로 구성되며, 이때 수지 함침조의 수지 온도 및 경화로 온도 등을 제어하여 CFRP rebar(지름 5 mm)를 제조하였다.

CFRP rebar 제조 조건은 Table 1에 나타내었으며, 수지 온도는 30°C에서 60°C까지 변화시켰다. 또한 경화로는 3개 구간으로 구분하여 100°C에서 195°C까지 제어하였다. 특히 No. 1은 리브를 감지 않은 제조 조건을, No. 2-7은 리브를 감아

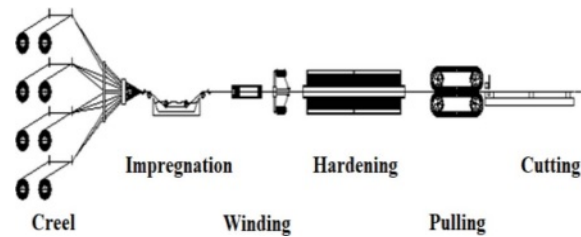


Fig. 1. Schematic diagram of pultrusion machine for manufacturing CFRP rebar

Table 1. Fabrication condition of CFRP rebar

No.	Impregnation Temp. (°C)	Hardening Temp. (°C)			Pultrusion speed (cm/min)	Hardening Time (min)
		1 Area	2 Area	3 Area		
1	30	170	175	170	24	5
2	30	170	175	170	24	5
3	30	190	195	190	24	5
4	45	100	150	150	6	15
5	60	100	150	150	6	15
6	45	100	150	150	3	30
7	45	100	170	170	3	30

*) No.1 : CFRP rebar without rib, No.2~7 : CFRP rebar with rib

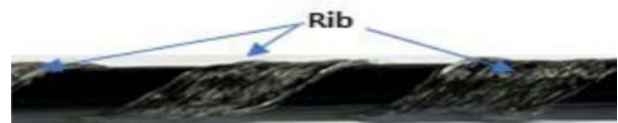


Fig. 2. View of CFRP rebar

준 CFRP 제조 조건을 나타낸 것이다. Fig. 1의 인발성형기 및 Table 1 제조 조건으로 제조한 CFRP rebar의 외관은 Fig. 2에 나타내었다.

각각의 제조 조건에 따라 인발 성형된 CFRP rebar의 3차원 특성분석을 위해 GE Sensing & Inspection Tech. (독일)의 X-Ray CT (Vtomex M 240D)를, 단면 기공특성 분석을 위해 Olympus(일본) 광학현미경 (DSXC-HRSU-RF)을 사용하였다. 휨강도 측정을 위해서는 (주)우진정밀(한국)의 100톤급 강도시험기를 사용하였다. 또한 수지류 및 섬유류 등의 분해온도를 측정하기 위해 사용한 열분석기는 Rigaku(일본) TG-DTA 8122이다. 상기 분석을 통해 기공과 휨강도 특성의 상관성을 도출하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휨강도 특성

각각의 제조 조건에 따른 CFRP rebar의 휨강도 측정 결

과를 Fig. 3에 나타내었다. 휨강도는 제조 조건에 따라 차이가 있었으며, 특히 리브의 존재 유무에 따라 크게 변화하였다. No. 1은 리브가 없는 CFRP rebar, No. 2는 리브가 감겨 있는 CFRP rebar이며, 리브 존재 시 휨강도는 약 25.6% (14.6 MPa → 18.3 MPa) 상승하였다. 수지 함침조 내의 수지 온도가 45°C에서 60°C로 상승 시에도 휨강도는 16.3 MPa에서 17.3 MPa로 향상되었다. 또한 경화로 온도 증가 및 경화로 유지시간 증가에 따라 휨강도는 상승하며, 특히 수지 온도 45°C, 경화로 최대온도 170°C 및 경화로 유지시간 30분 조건에서 가장 우수한 휨강도 특성(18.7 MPa)이 발휘되었다. Table 2는 각각의 제조 조건에 따른 휨강도 증진율을 나타낸 것이며, 리브 유무에 따른 강도 증진율이 가장 높게 발휘되었다. 더불어 CFRP rebar의 휨강도 값은 리브 유무, 경화로 온도, 경화로 유지시간 및 수지 함침조 온도 등에 따라 변화된다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 기공 특성 분석

CFRP rebar의 3차원 구조를 분석하기 위해 지름 5 mm, 길이 10 mm 크기로 X-Ray CT를 측정하였다. X-Ray CT 분석은 CFRP rebar의 종단면, 횡단면 및 3차원 구조로 분석하였으며, 분석 사진 일례(No. 2)를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 CFRP rebar에서 결함이 관찰되었으며, 결함 부피에 따라 결함 색상이 다르게 표현되었다. 즉 결함부피가 클수록 빨간색으로, 작을수록 파란색으로 나타내었다. CFRP rebar 결

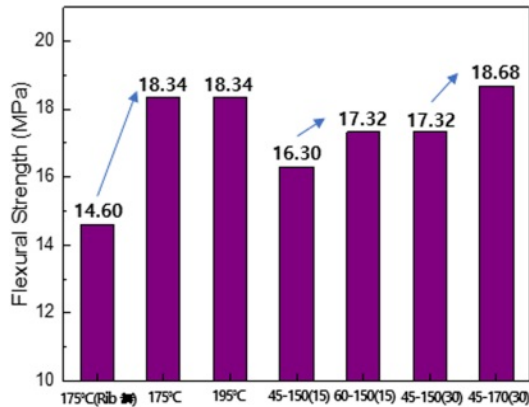
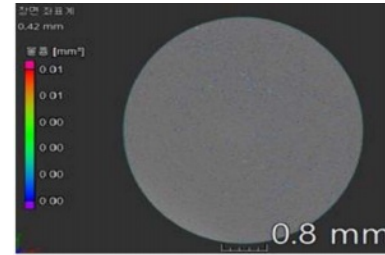


Fig. 3. Flexural strength of CFRP rebar

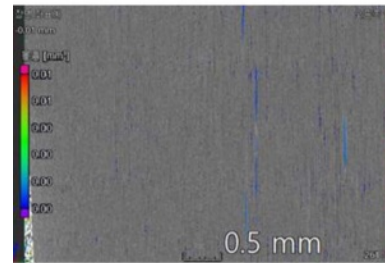
Table 2. Flexural strength increase ratio as manufacturing conditions of CFRP rebar

Factor	Flexural strength (MPa)		Increase ratio (%)
	Before	After	
Rib	14.6	18.3	+25.6
Impregnation Temp.	16.3	17.3	+6.3
Hardening Temp.	17.3	18.7	+7.9
Hardening Time	16.3	17.3	+6.3

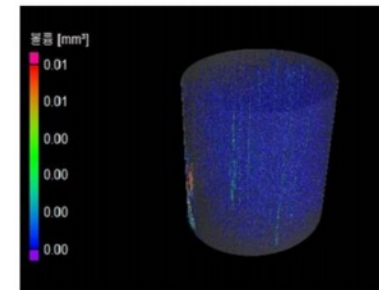
함은 rebar의 전부분에서 관찰되었으며, 특히 리브 접합부 등에서도 쉽게 관찰되었다. 예를 들어 Fig. 4(c) 3차원 사진 좌측 하단부에서 관찰되는 분홍색 및 녹색 부분은 리브가 접착된 부분에서 관찰되는 결함이다. 이는 수지가 함침되지 않은 리브(유리섬유)에서 수지가 함침된 메인 보강근(탄소섬유)의 수지를 흡수하여 결함이 생성되며, 이때 생성된 결함이 관찰된 것으로 추정되었다. 또한 (b) 종단면의



(a) Cross-section



(b) Longitudinal section



(c) 3 Dimension

Fig. 4. X-ray CT image of No.2 CFRP rebar

Table 3. Maximum pore size and porosity obtained by X-ray CT analysis

No.	Maximum pore volume (mm ³)	Maximum pore diameter (mm)	Porosity (%)
1	7×10^{-2}	0.51	2.47
2	1×10^{-2}	0.27	0.90
3	3.5×10^{-1}	0.87	1.05
4	1×10^{-3}	0.13	3.27
5	3.9×10^{-1}	0.91	2.49
6	7×10^{-4}	0.11	3.64
7	4×10^{-4}	0.09	3.22

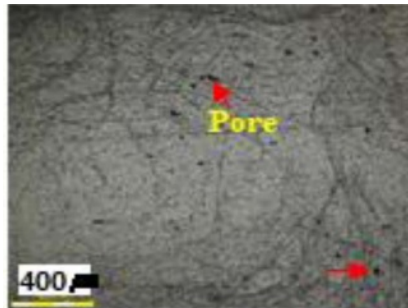
파란색 선 및 점선 모양 또는 (c) 3차원 구조에서의 녹색 선 및 점선 모양 결함은 탄소섬유 사이에서 발생하는 결함이며, 이는 수지 함침조에 함침된 탄소섬유들의 결합과정에서 섬유들이 완벽하게 접촉되지 못해 발생한 것으로 추정되었다. 상기 현상들은 No. 2 뿐만 아니라 모든 CFRP rebar에서 관찰되는 일반적 특징이기도 하다.

X-ray CT에서 관찰된 결함 중 최대 부피를 갖는 결함을 Table 3에 나타내었다. 이때 결함 부피를 구형의 기공 부피

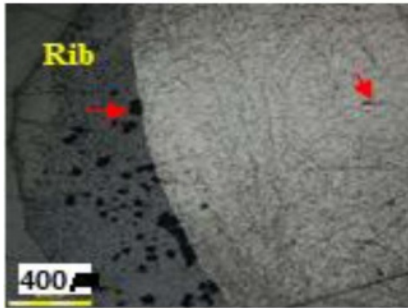
라고 가정하여 기공 지름을 계산하였으며, 또한 결함 비율을 기공율로 표시하였다(이하 결함을 기공으로 표시). 리브가 감겨져 있지 않은 CFRP rebar (No. 1)에 존재하는 기공들 중 최대 기공 부피는 0.07 mm^3 , 지름 0.51 mm , 기공율 2.47% 이었다. CFRP rebar 중 최대 기공 지름을 갖는 시료는 No. 5(0.91 mm)이었으며, No. 5 제조 시 수지 온도를 60°C 까지 상향시켰다. 이에 따라 CFRP rebar는 수지 함침조 통과 후(경화로 인입 전) 일부 경화 현상이 발생하였으며, 수지의 이상 경화 현상에 의해 CFRP rebar 내부의 거대 기공이 일부 채워지지 않은 것으로 추정되었다. 즉 CFRP rebar의 기공 크기 및 기공율은 제조 방법(수지 함침조 온도, 경화로 온도 및 유지시간 등)에 따라 변화되는 것으로 추정되었다.

CFRP rebar 단면의 기공을 분석을 위해 광학현미경을 사용하였다. 광학현미경으로 단면 사진을 촬영한 후 이미지 분석 프로그램(Olympus DSX)을 사용하여 기공 특성을 분석하였다. DSX 프로그램을 이용한 기공 분석은 기공 이미지 색상 값을 고정된 후 기공 이미지를 활성화하여 분석하였다. Fig. 5는 No. 2 CFRP rebar 단면을 촬영한 것이며, CFRP rebar 단면에는 기공과 탄소섬유 및 유리섬유 등을 관찰할 수 있었다. CFRP rebar 중앙부(a)에는 소량의 기공이 관찰되었으며, 리브 영역((b)-(d))에서는 거대 기공들이 다수 관찰되었다.

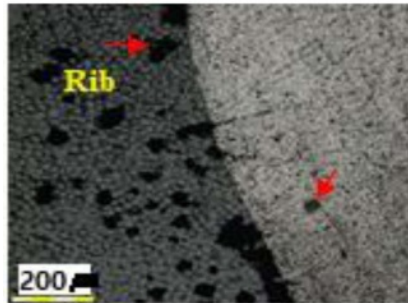
탄소섬유 지름은 약 $6.5 \mu\text{m}$ 수준이었으며, 리브로 사용된 유리섬유 지름은 약 $20 \mu\text{m}$ 전후로 관찰되었다. Nano X-ray CT 분석에서 언급한 바와 같이 리브는 수지 코팅을 진행하지 않기 때문에 다수의 거대 기공이 관찰되는 것이며, 일부 탄소섬유 코팅 수지가 유리섬유로 구성된 리브로 흡수된 것으로 추정되었다. CFRP rebar 단면 내 기공을 분석을 위해 Fig. 6와 같이 이미지 변형 작업을 실시하였으며, Fig. 6(b)와 같이 이미지 변형 후 흰색 부분을 기공으로 간주하였다. 더불어 기공율 계산값을 Table 4에 나타내었으며, 최대 기공율은 No. 1에서 6.89% , 최소 기공율은 No. 7의 2.88% 이었다. 더불어 광학현미경을 통해 도출된 기공율은 경화로 온도 조건, 수지 함침조 온도 및 유지시간에 따라 변화하는 것으로 추정되었다.



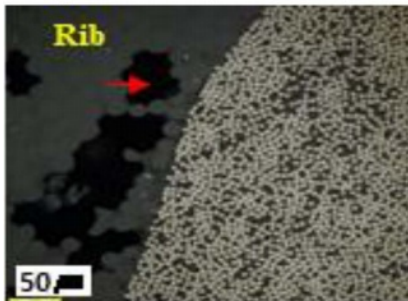
(a) Main rebar region (Scale Bar $400 \mu\text{m}$)



(b) Main rebar + Rib (Scale Bar $400 \mu\text{m}$)

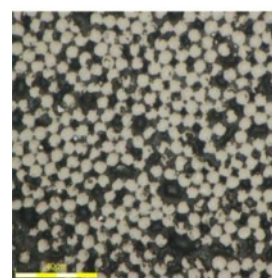


(c) Main rebar + Rib (Scale Bar $200 \mu\text{m}$)

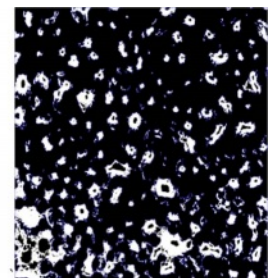


(d) Main rebar + Rib (Scale Bar $50 \mu\text{m}$)

Fig. 5. Optical microscope image of No. 2 CFRP rebar



(a) Before image treatment



(b) After image treatment

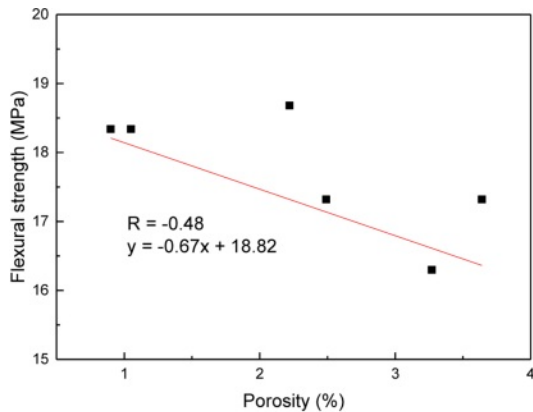
Fig. 6. Image process for porosity of No. 4 CFRP rebar

Table 4. Porosity obtained by optical microscope

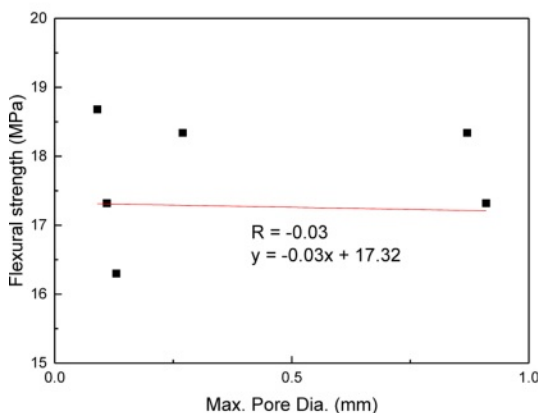
No.	1	2	3	4	5	6	7
Porosity (%)	6.89	5.02	6.64	6.51	5.12	5.24	2.88

3.3 휨강도 특성

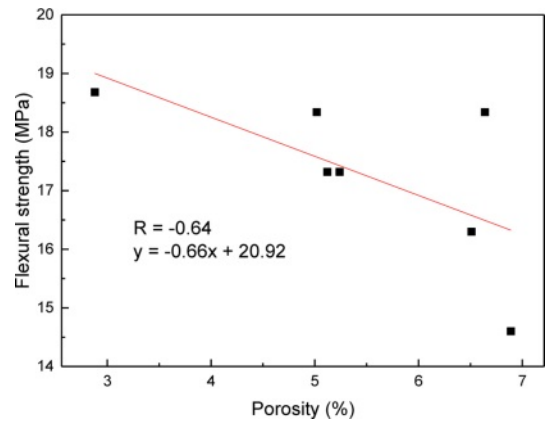
CFRP rebar의 X-ray CT 촬영으로 얻어진 기공특성과 휨강도의 상관성을 도출하여 Fig. 7에 나타내었다. 기공율과 휨강도의 상관관계계수(R)는 -0.48이었으며, 상관관계방정식은 $y = -0.67x + 18.82$ 이었다(y = 휨강도, x = 기공율). 최대 기공 지름과 휨강도의 상관관계계수는 -0.03, 상관관계방정식은 $y = -0.03x + 17.32$ 이었다(y = 휨강도, x = 최대 기공 지름). 일반적으로 상관관계계수(절대값)가 1-0.7 강한 선형관계, 0.7-0.3 뚜렷한 선형관계, 0.3-0.1 약한 선형관계라고 표현하고 있다[21]. 그러므로 기공율과 휨강도는 뚜렷한 선형관계, 최대 기공 지름과 휨강도는 약한 선형관계라고 평가할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 기공율이 휨강도에 일정 부분 영향을 줄 수 있으나, 최대 기공 지름은 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Porosity and flexural strength



(b) Max. Pore dia. and flexural strength

Fig. 7. Correlation between pore characteristics by X-ray CT and flexural strength**Fig. 8.** Correlation between pore characteristics by optical microscope and flexural strength

광학현미경을 사용하여 분석한 기공율과 휨강도의 상관성은 Fig. 8에 나타내었으며, 이들의 상관관계계수는 -0.64으로 계산되었다. 즉 광학현미경 사용 기공율과 휨강도의 상관성은 뚜렷한 선형관계이었으며, 이 값은 Nano X-ray CT 사용시 보다 상당히 높은 수치이기도 하였다.

즉 휨강도와 기공율의 상관성은 Nano X-ray CT 보다 광학현미경을 사용하여 분석할 경우, 좀 더 유효한 상관성이 도출되는 것으로 판단되었다. 이는 Nano X-ray CT 촬영(스케일 바 800-500 μm) 보다 광학현미경 사용(스케일 바 40 μm) 조건에서 좀 더 미세한 기공을 관찰할 수 있었으며, 이들 2개 분석법 간에는 기공율 차이가 매우 크게 도출되었다. 특히 Nano X-ray CT 보다 미세기공 관찰이 용이한 광학현미경 사용시 기공율이 상당히 높았으며, 이는 CFRP rebar에 수백 마이크로 수준의 기공 보다는 수십 마이크로 수준의 기공이 상대적으로 많이 존재하기 때문이다. 따라서 CFRP rebar의 휨강도는 기공량이 많은 수십 마이크로 수준의 기공에 좀 더 의존하는 것으로 추정할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP rebar의 제조 조건에 따른 휨강도를 측정하였으며, Nano X-ray CT 및 광학현미경 분석을 통해 기공 특성을 분석하였다. 이들 분석 장비를 통해 얻어지는 기공 특성과 휨강도의 상관관계계수 또한 계산하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) CFRP rebar의 휨강도는 리브 유무, 경화로 온도, 경화로 유지시간 및 수지 함침조 온도 등, 제조 조건에 따라 변화되었다. 특히 리브가 감겨지지 않은 경우, CFRP rebar의 휨강도 값이 크게 낮아진다는 것을 확인하였다.

2) CFRP rebar 내에 존재하는 기공은 수지가 함침되지 않은 리브에서 수지가 함침된 메인 보강근 수지를 흡수하여 생성되거나, 또는 탄소섬유들이 완벽하게 접착되지 못해

섬유 사이에 잔존 기공이 생성되는 것으로 판단되었다.

3) Nano X-Ray CT 분석 결과, 수지 함침조 온도가 60°C인 CFRP rebar에서 최대 기공 지름을 나타내었으며, 이는 CFRP rebar가 수지 함침조 통과 후(경화로 인입 전)의 일부 경화 현상이 발생하기 때문이다. 즉 CFRP rebar의 경화로 인입 전부터 수지가 빠르게 경화하여 CFRP rebar 내부의 거대 기공이 제거되지 않았기 때문으로 예측되었다.

4) 광학현미경을 통한 기공율과 휨강도의 상관관계계수는 -0.64이었으며, 이는 Nano X-Ray CT 기공율 및 기공크기와의 상관관계계수 보다 매우 높은 값이었다. 따라서 CFRP rebar의 휨강도 예측·평가를 위해서는 광학현미경을 통한 미세 기공 분석이 중요한 인자로 사료되었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 탄소 고분자 부식 제로 철근대체재 기술개발 사업 연구비 지원을 통해 수행되었습니다(Grant 22CFRP-C163388-02).

REFERENCES

1. Lou, T., Li, Z., and Pang, M., "Behavior of Externally Prestressed Continuous Beams with FRP/steel Rebars under Symmetrical/unsymmetrical Loading: Numerical Study," *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, 2022, e01196.
2. Benghida, D., "Concrete as a Sustainable Construction Material," *Key Engineering Materials*, Vol. 744, 2017, pp.196-200.
3. Gu, J.B., Wang, J.Y., and Lu, W., "An Experimental Assessment of Ultra High Performance Concrete Beam Reinforced with Negative Poisson's Ratio Steel Rebar," *Construction and Building Materials*, Vol. 327, 2022, 127042.
4. Fan, L., Teng, L., Tang, F., Khayat, K.H., and Chen, G., "Corrosion of Steel Rebar Embedded in UHPC Beams with Cracked Matrix," *Construction and Building Materials*, Vol. 313, 2021, 125589.
5. Dong, B., Liu, W., Zhang, T., Chen, L., Fan, Y., Zhao, Y., Yang, W., and Banthukul, W., "Corrosion Failure Analysis of Low Alloy Steel and Carbon Steel Rebar in Tropical Marine Atmospheric Environment: Outdoor Exposure and Indoor Test," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 129, 2021, 105720.
6. Choi, J.S., Park, S.J., and Kim, Y.H., "Comparison of Mechanical Properties on Helical/hoop Hybrid Wound HNT Reinforced CFRP Pipe with Water Absorption Behavior," *Composites Research*, Vol. 34, No. 3, 2021, pp. 174-179.
7. Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A., and Kara, F., "Investigation on the Performance of SiAlON Ceramic Drills on Aerospace Grade CFRP Composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 223, 2015, pp. 39-47.
8. Kim, K.S., Shim, Y.S., Kim, B.J., Meng, L.Y., Lee, S.Y., and Park, S.J., "Present Status and Applications of Carbon Fibers-reinforced Composites for Aircrafts," *Carbon Letters*, Vol. 11, 2010, pp. 235-242.
9. Hong, C.S., and Jun, W.J., "Fiber Reinforced Composite Material Application for Light Airplane," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 12, No. 2, 1984, pp. 3-8.
10. Slayton, R., and Spinardi, G., "Radical Innovation in Scaling up: Boeing's Dreamliner and the Challenge of Socio-technical Transitions," *Technovation*, Vol. 47, 2016, pp. 47-58.
11. Stig, F., "An Introduction to the Mechanics of 3D-Woven Fibre Reinforced Composites," Licentiate Thesis, KTH Engineering Sciences, 2009.
12. Yoon, C.M., Lee, D.W., Byun, J.H., Tran, T., and Song, J.I., "Study on Out-of-plane Properties and Failure Behavior of Aircraft Wing Unit Structures," *Composites Research*, Vol. 35, No. 2, 2022, pp. 106-114.
13. Attia, M.M., Ahmed, O., Kobesy, O., and Malek, A.S., "Behavior of FRP Rod Under Uniaxial Tensile Strength with Multiple Materials as an Alternative to Steel Rebar," *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, 2022, e01241.
14. Li, T., Zhu, H., Shen, J., and Keller, T., "Thermophysical and Thermomechanical Properties of Basalt-phenolic FRP Rebars Under High Temperature," *Construction and Building Materials*, Vol. 342, 2022, 127983.
15. Huang, L., Chen, J., Qu, J., and Dai, Q., "Modeling for Bond-constitutive Relationship of FRP Rebars to Concrete Matrix," *Construction and Building Materials*, Vol. 263, 2020, 120654.
16. Abbas, E.M.A., Ge, Y., Zhanag, Z., Chen, Y., and Sun, C., "Flexural Behavior of UHPC Beam Reinforce with Steel-FRP Composite Bars," *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 16, 2022, e01110.
17. Cao, X., Ren, Y., Zhanag, L., Jin, L., and Qian, K., "Flexural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams with Various Types of Rebar," *Composite Structures*, Vol. 292, 2022, 115674.
18. Abbas, H., Abadel, A., Almusallam, T., and Al-Salloum, Y., "Experimental and Analytical Study of Flexural Performance of Concrete Beams Reinforced with Hybrid of GFRP and Steel Rebars," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 138, 2022, 106397.
19. Ge, W., Han, M.Y., Guan, Z., Zhang, P., Ashour, A., Li, W., Lu, W., Cao, D., and Yao, S., "Tension and Bonding Behavior of Steel-FRP Composite Bars Subjected to the Coupling Effects of Chloride Corrosion and Load," *Construction and Building Materials*, Vol. 296, 2021, 123641.
20. Kim, H.S., Kim W.J., Jang, H.S., and Kwak, K.H., "A Study on the Change of Strength of FRP Member Immersed in Chemical Solution," *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 14, No. 6, 2010, pp. 117-123.
21. Wikipedia homepage, <http://ko.wikipedia.org> > wiki > correlation analysis.