

폴트루전과 와인딩 기법을 혼합한 탄소-유리 하이브리드 복합재 보강근 설계

권진희* · 최수영** · 최진호* · 이상관*** · 박영환****

Design of Carbon-Glass Hybrid Composite Rebar by the Combined Pultrusion and Winding

Jin-Hwe Kweon, Soo-Young Choi, Jin-Ho Choi, Sang-Gwan Lee, and Young-Hwan Park

Key Words: Rebar, FRP, Composite, Carbon, Glass, Finite Element Analysis

Abstract

Presented is a preliminary design concept of the carbon-glass hybrid composite rebars for the application in the construction field. A glass fiber rod with indentation is used for the core of the rebar. Carbon fibers are placed over the glass core by pultrusion. To increase the mechanical locking force and bonding surface, carbon filament windings are added in the hoop direction over the carbon face. Finite element analysis and test were conducted to evaluate the effective stiffness and strength of the rods. The results show that the effective axial stiffness of the rebar with indentation are about 50 % of the straight rebar.

1. 서 론

콘크리트 속의 철근이 각종 환경적 요인에 의해 심각한 부식을 겪지 않을 수 없음을 이미 잘 알려진 사실이다. 우리 나라에서도 제설재나 해수환경 등의 영향으로 인한 심각한 철근부식 문제를 겪고 있다[1]. 기존 철근 보강근의 경우에 폭시 코팅을 하더라도 염화 콘크리트 환경하에서는 심각한 부식을 피할 수 없다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 이에 따라 선진 각국에서는 콘크리트 보강재인 철근의 내부식성 향상을 위한 많은 연구를 진행하고 있으며 그 대표적인 연구 중 하나가 FRP 보강근에 대한 연구이다[3-5].

국내에서는 최명선 등[6]이 블레이드 트루전법을 사용하여 콘크리트 구조물용 케블라-유리섬

유, 케블라-탄소섬유 강화 복합재료 보강근을 직경 3 mm와 10 mm로 제작하여 기계적 특성을 시험하였다. 이 연구에서는 코어부는 유리섬유 혹은 탄소섬유를 사용하고, 슬리브(sleeve)는 케블라를 사용하였다. 수지는 폴리에스트와 비닐에스트를 사용하였다. 연구결과 섬유체적율에 따라 보강근의 인장강도가 1300~1900 MPa에 달하는 것을 보여주었다. 그러나 리바의 강성과 강도는 섬유체적율뿐만 아니라 표면적과 기계적 마찰을 증가시키기 위한 요철의 영향을 매우 크게 받기 때문에 이에 대한 정확한 고찰이 필요하다고 할 것이다.

김지홍 등[7]은 국내에서 생산된 GFRP 리바에 대한 인장실험과 콘크리트 속에서의 굽힘실험을 수행하고, 설계인장강도는 약 600 MPa, 탄성계수는 약 26 GPa 정도가 됨을 보였다.

본 연구에서는 FRP를 이용한 새로운 콘크리트 보강근 제작방법을 제안한다. 기존의 연구들과 달리 본 연구에서는 폴트루전으로 제작한 GFRP 코어에 인공적인 요철을 만들고, 그 위에 CFRP 외피를 입힌 후 탄소섬유를 원주방향으로

* 경상대학교 기계항공공학부

** 경상대학교 대학원 항공공학과

*** 한국기계연구원 복합재료그룹

**** 건설기술연구원 구조연구부

보강하는 새로운 개념을 도입하였다. 보강근의 세부형상은 유한요소해석을 통해 최적화하였다. 실제 시편을 제작하여 인장실험을 수행하여 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. 보강근의 설계개념

기존의 FRP 보강근은 Fig. 1에 보인 바와 같이 주로 폴트루전으로 뽑아낸 GFRP 혹은 CFRP 봉에 원주방향으로 적당한 각도를 가진 섬유를 감는 형태로 제작하였다. 그러나 이러한 방법에서는 원주방향으로 나선형태로 보강한 보강층이 FRP 봉으로부터 쉽게 빠지거나 파손될 위험이 있었다. 또한 FRP 봉이 굳기 전에 원주방향 보강을 강하게 할 경우 봉의 길이 방향으로 섬유체적률이 일정치 않게 되는 문제점이 발생한다.

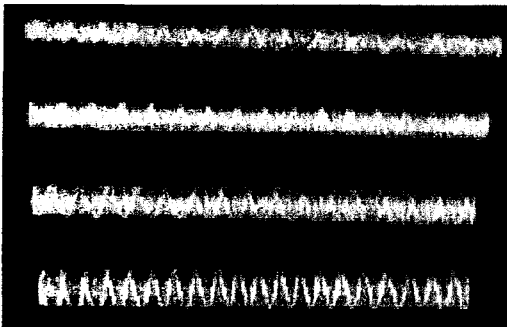


Fig. 1 FRP rebar samples

따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 FRP 봉의 길이방향 섬유 체적률 변화를 최소화하면서, 동시에 보강근의 표면적을 증가시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 보강근 돌기부를 상대적으로 크고 강하게 설계하여 보강근과 콘크리트와의 기계적 체결력을 증대시키고자 하였다.

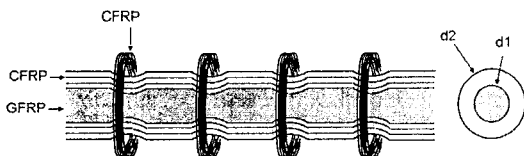


Fig. 2 Preliminary design of FRP rebar

Fig. 3에서 상세히 보인 바와 같이 보강근의

중앙에는 유리섬유로 된 코어를 요철을 가지도록 가공하여 배치한다. 시제품 단계에서는 GFRP 봉을 기계 가공하여 요철을 생성시키지만, 대량 생산의 경우에는 GFRP 봉을 폴트루전으로 뽑아낼 때 요철부를 프레스로 만드는 방법도 가능할 것이다. GFRP 코어는 하중을 지지하는 역할보다 주로 탄소섬유층의 요철을 유도하기 위한 목적으로 고안된 것이다.

GFRP 코어의 바깥에는 CFRP 보강면을 추가하게 된다. 추가된 탄소층이 굳기 전에 요철이 있는 부분에서 원주방향으로 탄소섬유를 보강한다. 이렇게 할 경우 탄소섬유층의 섬유체적률 변화를 최소화하면서도 콘크리트와의 접촉 및 기계적 결합을 위한 돌기부분을 생성할 수 있다. 동시에 콘크리트 속에서 원주방향 보강고리가 FRP 봉에서 빠져나가는 것을 방지할 수도 있게 된다. 이러한 개념에 의해 제작된 FRP 보강근 시제품은 Fig. 4에 보인 바와 같다.

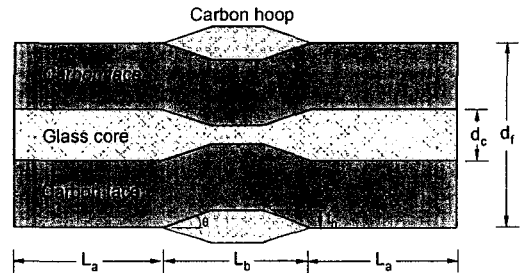


Fig. 3 Unit cell of FRP rebar

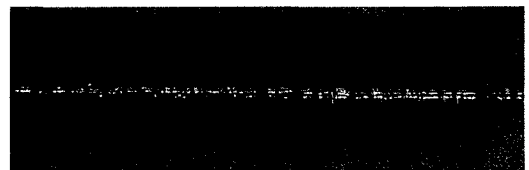


Fig. 4 Hybrid FRP rebar sample

그러나 어떤 모양으로 어느 정도의 요철과 돌기를 만드는 것이 콘크리트와의 체결력을 높이면서 보강근 자체의 강성과 강도저하를 줄일 수 있는 것인지는 다양한 해석을 통해 검토해보아야 한다. 가령 요철부의 깊이를 작게 할수록 탄소섬유의 휘어짐이 작아지게 되므로 결과적으로 강성과 강도의 저하도 줄어들게 될 것이다. 반면에 제작이 어려울 뿐만 아니라 요철부의 깊이가 너무 작을 경우 원주방향의 보강고리가 FRP 봉과 분리, 이탈될 가능성이 높아지게 될 것이다.

Table 1에는 네 가지 형태의 보강근에 대한 치수를 제시하였다. 길이의 단위는 mm이다

Table 1. Specimen dimension

Model	L_a	L_b	d_f	d_c	t_h	$\theta(deg)$
TM1	5.0	5.0	10	4.0	1.0	30
TM2	〃	〃	〃	〃	〃	25
TM3	4.5	6.0	〃	〃	〃	20
TM4	4.0	7.0	〃	〃	〃	20

3. 유한요소해석

시편 제작에 앞서 Table 1에 제시된 형상들에 대한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5는 모델 TM4에 대한 유한요소모델을 보인 것이다. 보강근은 축대칭으로 볼 수 있으므로 MSC/NASTRAN의 이방성 축대칭 요소인 CTRIAX6 요소를 사용하였다. 또한 보수적인 해석을 위해 탄소층과 원주방향 보강마디는 경계에서 서로 분리되어 있다고 가정하였다. 따라서 탄소층과 원주방향 보강층은 서로 접촉하고 있는 것으로 보고, MSC/NASTRAN의 접촉요소인 slideline 요소를 사용하였다. Slideline 요소를 사용할 경우 접촉면적의 변화를 고려해야 하므로 비선형 해석을 수행하게 된다. 보강근들의 강성을 정확히 예측하기 위하여 각 모델에 균일한 변위를 적용하여 해석을 수행하였다.

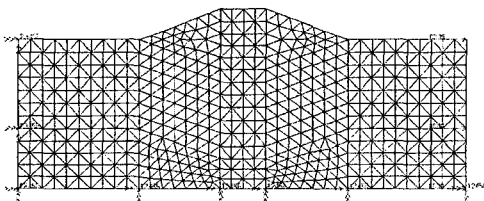
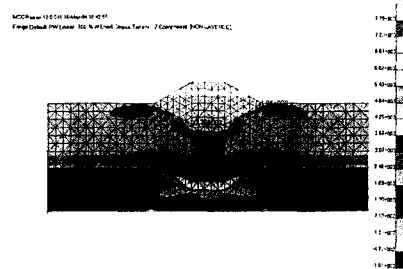


Fig. 5 A typical finite element model(TM4)

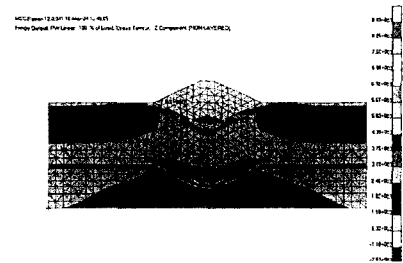
재료상수는 다음과 같다. $E_1=131$, $E_2=8.2$, $G_{12}=4.50$, $\nu_{12}=0.281$, $X_t=X_c=2000$, $Y_t=61$, $Y_c=71$, $S_{12}=70$.(이상 탄소섬유) $E_1=52.6$, $E_2=15.3$, $G_{12}=5.71$, $\nu_{12}=0.25$, $X_t=1510$, $X_c=688$, $Y_t=20.3$, $Y_c=62.4$, $S_{12}=74.1$.(이상 유리섬유) 강성의 단위는 GPa, 강도의 단위는 MPa이다.

4. 결과 및 토론

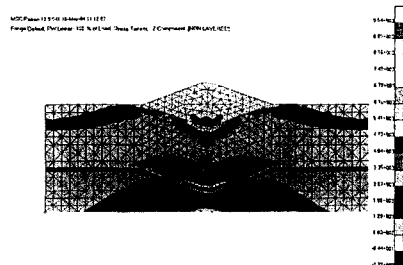
각 모델에 대한 유한요소해석의 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 대체로 원주방향 보강마디와 탄소섬유층이 만나는 부분에서 큰 응력이 걸리는 것을 볼 수 있다.



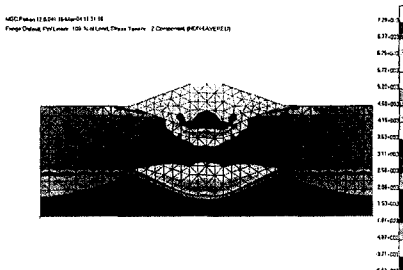
(a) TM1



(b) TM2



(c) TM3



(d) TM4

Fig. 6 Stress distribution in fiber direction

모델별 길이방향 유효강성과 응력집중의 효과는 Table 2에 정리하였다. 표에서 S/S₀는 돌기가 없는 경우의 표면적 대비 현재 보강근의 표면적의 비를 나타낸 것이다. E/E₀는 돌기와 요철이 없을 경우의 길이방향 강성(E₀) 대비 현재의 길이방향 유효강성의 비를 의미한다. σ_0 는 보강근 단면 전체에 가해진 평균응력이고 σ_{1max} 는 섬유방향 최대응력이다. σ_{2max} 는 기지방향 최대응력, τ_{max} 는 최대 전단응력을 의미한다.

Table 2. Finite element results

Model	S/S ₀	E _z /E ₀	σ_{2max}/σ_0	σ_{1max}/σ_0	τ_{max}/σ_0
TM1	1.08	0.426	3.95	1.22	0.527
TM2	1.07	0.473	4.06	1.15	0.438
TM3	1.07	0.539	3.83	1.06	0.330
TM4	1.15	0.545	2.89	0.891	0.261

직관적으로도 짐작할 수 있는 것처럼 요철의 크기가 작고 기울기가 완만할수록 유효강성비가 커지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 모델 TM4에 대한 해석결과가 가장 우수하게 나타나는 것을 알 수 있다. 요철의 깊이를 어느 정도까지 줄일 수 있을 지에 대하여는 콘크리트를 포함한 구조해석을 통해 최종적으로 결정해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 보강용 복합재 보강근에 대한 기본설계 개념과 제작방법을 소개하였다. 기존의 방법들에서와 달리 GFRP 코어에 인위적인 요철을 주어 탄소섬유층의 굴곡을 유도한 후 만입부에서 원주방향으로 탄소섬유를 보강하는 개념을 사용하였다. 유한요소해석 결과 요철의 형상과 치수를 정교하게 조절할 경우 유효강성비를 50 % 이상 확보할 수 있음을 발견하였다. 동일한 형상의 보강근에서 섬유의 굴곡으로 인한 응력집중으로 인해 탄소층의 유효강도는 굴곡이 없는 FRP 봉 대비 약 30 % 정도로 저하되는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 건설기술연구원 특정연구개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 윤한영, 김성수, 김홍삼, "우리나라 콘크리트 구조물의 철근 부식 현황," 콘크리트학회지, 제13권, 제5호, 2001, pp. 58-63.
- (2) Rasheeduzzafar and Dakhil, F. H., "Performance of Corrosion of Corrosion-Resisting Steels in Chloride-Bearing Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 5, 1992, pp. 439-448
- (3) Adimi, M. R., Rahman, A. H., and Benmokrane, B., "Durability of FRP Reinforcements under Tension-Tension Axial Cyclic loading," Proceedings of the First Int. Conf. on Durability of Fibre Reinforced Polymer Composites for Construction, Sherbrooke, August, 1998, pp. 653-647.
- (4) Arockiasamy, A., Amer, A., Shahawy, M., "Environmental and Long-Term Studies on CFRP Cables and CFRP Reinforced Concrete Beams," Proc. of the First Int. Conf. on Durability of Fibre Reinforced Polymer Composites for Construction, Sherbrooke, August, 1998, pp. 599-622.
- (5) Pantusu, A., Spadea, G., Swamy, R. N., "An Experimental Study on the Durability of GFRP Bars," Fiber Composites in Infrastructure, Proc. of the Second Int. Conf. on Fibre Composites in Infrastructure(ICCI'98), Vol. 2, Tucson, 1998, pp. 476-487.
- (6) 최명선, 광상목 외 4인, "브레이드-트루전법에 의한 콘크리트 구조물용 케블라-유리섬유 강화 복합재료 리바 특성," 한국복합재료학회 춘계학술발표회 논문집, 전남대학교, 2002. 5. 17, pp. 48-52.
- (7) 김지홍 윤순중 외 2인, "교량 바닥판 콘크리트의 시공을 위한 GFRP 근의 활용," 한국복합재료학회 춘계학술발표회 논문집, 호서대학교, 2003. 4. 18, pp. 152-156.