

라인 브레이딩 펄트루전을 이용한 하이브리드 섬유강화 복합재료 리바 제작에 관한 연구

(신용욱*, 한길영**, 이동기**, 심재기**, 오환교**)

A Study on the Manufacturing of Hybrid Fiber Reinforced Plastic Rebar Using In-Line Braiding and Pultrusion

(Yong-Wook Shin, Gil-Young Han, Dong-Gi Lee, Jae-Gi Sim, Whan-Gyo Oh)

Key Words: Rebar(리바), Fiber Reinforced Plastic(섬유강화 복합재료 : FRP), Steel Bar(철근), Hybrid FRP Rebar(하이브리드 FRP리바)

This paper describes the need for a ductile Fiber Reinforced Plastic(FRP) reinforcement for concrete structures. Using the material hybrid and geometric hybrid, it is demonstrated that the pseudo-ductility characteristic can be generated in FRP rebar. Ductile hybrid FRP bars were successfully fabricated at 4mm and 10mm nominal diameters using an hand lay up method. Tensile specimens from these bars were tested and compared with behavior of FRP rebar and steel bar

1. 서론

해양 환경에서 내식성과 내구성을 갖는 철근 및 철골대체용 복합소재 개발에 대한 필요성이 요구되고 있다. 섬유 보강 콘크리트는 선진국의 경우 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유, 자연섬유 등의 여러 형태의 섬유 보강 콘크리트가 다양한 분야에서 응용되어 그 역학적 우수성 및 경제성이 인정되고 있는 신소재이다. 기존 콘크리트에 비하여 우수한 물성과 경제성을 확보할 수 있는 섬유강화 콘크리트는 선진국에서는 광범위하게 사용되고 있으나 국내의 경우 아직 초보적인 단계로 연구자료나 실험적 자료들이 부족한 실정이다. 또한 연속섬유를 수지등의 집속재로 집속시킨 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastics ; FRP)을 콘크리트 부재의 보강재로 이용하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 적용섬유는 봉상(Rod) 및 케이블(Cable) 상으로

가공하여 철근-콘크리트와 프리 스트레스 콘크리트 (Prestressed Concrete; PSC) 등 구조부재의 보강재로서, 즉 철근 대체재 또는 PC강선 대체재용 긴장재로서 일부 적용되는 사례가 발표되고 있다¹⁾. 미국과 같은 선진국의 경우는 강의 부식에 대처하기 위한 여러 가지 연구가 진행되고 있으며, 많은 연구 결과가 발표되고 있다. Keeslar²⁾ 등은 리바에 에폭시(epoxy)를 코팅하여 사용한 결과 사용중 리바에 여전히 부식이 심하게 나타나고 있음을 보고하였다.

Rasheeduzzafar³⁾ 등은 에폭시로 코팅한 리바를 높은 염화 콘크리트에서 실험한 결과 심각한 부식문제를 발견하였다고 하였다.

Nanni⁴⁾ 등은 강(steel)에 에폭시를 모재로 한 아라미드 섬유를 브레이딩(braiding)한 bar를 실험하여 응력-변형률 거동이 선형적임과 Hybrid화의 장점을 발표하였으나 코어(core)체인 steel에서는 여전히 부식이 진행됨을 지적하였다. 그러나 탄소와 아라미드 섬유 강화 복합재료(FRP)는 강에 비해서 비강

* 조선대 대학원
** 조선대 공대

도가 뛰어날 뿐만 아니라 내식성이 우수한 재료임이 발표되었다. 이러한 우수한 장점이 있음에도 불구하고 콘크리트 구조물의 강화재로서 FRP선택은 고비용(High Cost), 신기술(New Technology)과의 친밀성 결여와 같은 이유로 사용이 지연되고 있다.

따라서 본 연구에서는 철근 대체용 복합재료를 제작하기 위하여 유리섬유, 케블라섬유, 탄소섬유에 에폭시를 함침시킨 직경 ϕ 4mm인 FRP 리바(Rebar)를 핸드레이어법으로 제작하여 인장강도를 실험을 통해 평가하였으며 탄소섬유/케블라섬유, 케블라섬유/유리섬유 비율 8:2, 7:3, 6:4의 비율로 하여 직경 ϕ 10mm인 FRP리바를 핸드레이어법(Hand lay up)과 라인브레이딩 펄트루전(In-Line Pultrusion Process)법으로 제작하였다. 연소법으로 섬유 함유율을 측정하고 인장실험을 행하여 철근과의 인장응력-변형률 거동과의 관계를 실험적으로 비교하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 강화재인 섬유는 한국화이버사의 유리섬유, 미국 듀퐁(Dupont)사의 케블라섬유, 일본 MITSUBISHI사의 탄소섬유를 사용하였으며 재료의 기본물성은 Table 1과 같다.

Table. 1 Mechanical properties of Materials

| Materials | Tensile strength (kg/mm ²) | Tensile Modulus (10 ³ kg/mm ²) | Elongation (%) | Density (g/cm ³) |
|----------------------|--|---|----------------|------------------------------|
| Carbon fiber (T-300) | 360 | 23.5 | 0.8 | 1.76 |
| Kevlar fiber | 280 | 7.28 | 0.18 | 1.44 |
| glass fiber | 150 | 7 | 0.15 | 2.55 |

본 연구에서는 콘크리트 구조물용 FRP 리바를 제작하기 위하여 유리, 케블라, 탄소섬유를 사용하였으며 기지(matrix)재료는 상온경화형 에폭시(epoxy)를 사용하여 핸드레이어법(Hand lay up)법과 라인 브레이딩 펄트루전(In line Breathing and Pultrusion Process)법으로 제작하였다. 리바(rebar)의 직경 ϕ 4mm인

경우 유리, 탄소, 케블라 각각의 섬유에 에폭시(epoxy)를 함침하여 제작하였으며, 직경 ϕ 10mm인 경우는 유리, 탄소, 케블라 섬유강화 복합재료(FRP) 리바와 탄소섬유/케블라 섬유, 케블라 섬유/유리섬유를 각각 8:2, 7:3, 6:4의 비율로 혼합한 하이브리드(Hybrid)형 구조로 하여 섬유를 수지에 충분히 함침시킨 후 리바제작용 금형에 충전하여 상온에서 24시간 유지시킨 후 탈형 하였다. 리바 제작용 금형(mold)은 금형제작용 실리콘(silicon)과 steel bar를 이용하여 제작하였으며 사진을 Fig.1에 도시하였다.

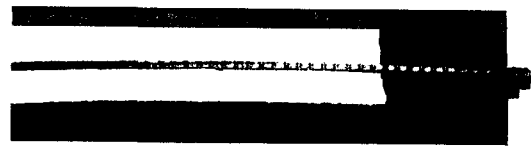


Fig.1 Photograph of FRP Rebar mold

라인 브레이딩 펄트루전법에 의한 FRP 리바 제작은 코어(core)부와 슬리브(Sleeve)부로 구성하고 일차적으로 코어재를 일방향 탄소 섬유, 슬리브재를 케블라섬유로 브레이딩 하였으며, Fig.2에 라인 브레이딩 펄트루전법의 개략도를 도시하였다.

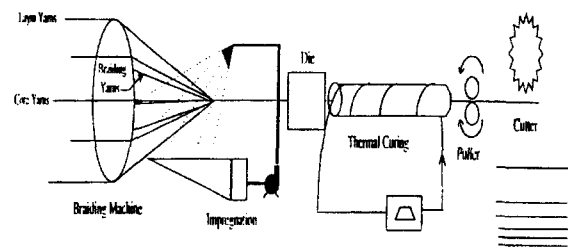


Fig.2 Schematic of the In-line Breathing and Pultrusion Manufacturing Process

FRP리바 시험편의 섬유함유율(fiber volume fraction)은 탄소 섬유 강화 복합재료(CFRP) 리바(rebar)와 유리섬유강화 복합재료(GFRP) 리바는 전기 오븐(oven)을 사용하여 600°C에서 2시간, 케블라 섬유강화 복합재료

(KFRP)리바는 400°C에서 2시간 유지시킨 후 정밀 전자 밸런스(balance)를 이용하여 중량을 측정하여 구하였으며 Table 2에 나타내었다.

Table. 2 Fiber Volume Fraction of FRP Rebar

| materials | Fiber Volume Fraction |
|------------------------------|-----------------------|
| CFRP Rebar (Φ 4mm) | 26.84% |
| GFRP Rebar (Φ 4mm) | 56.52% |
| KFRP Rebar (Φ 4mm) | 33.50% |

Fig. 3은 직경 ϕ 4mm인 FRP 리바 시험편 사진을 도시하였다. 시험편은 ASTM(D309)규격을 참조하여 제작하였으며, Fig.4에 시험편의 형상을 도시하였다.

Fig. 4와 같이 직경 ϕ 4mm인 시험편은 인장시험시 그립(grip)부의 응력집중을 피하기 위하여 Sand Paper를 감아서 그립(grip)부를 제작하였다.

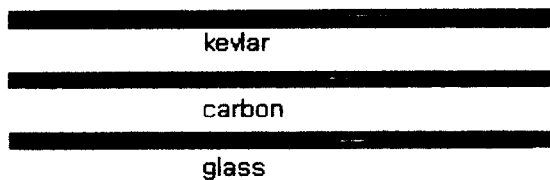


Fig. 3. Photographs of FRP Rebar tensile Specimen with nominal diameter ϕ 4mm

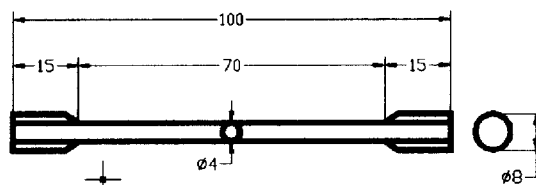


Fig. 4. Configuration of tensile Specimen with nominal diameter ϕ 4mm

Fig. 5는 핸드레이업법에 의해 제작한 FRP리바와 라인브레이딩 펄트루전법에 의해 제작한 FRP리바의 시험편 사진을 도시하였다. 인장시험시 grip부에서 발생하는 응력집중을

피하기 위하여 시험편의 양단에 탄소섬유를 길이 방향의 수직으로 감아서 탭(tap)을 만든 후 선반으로 테이퍼(taper)가공을 하였으며 연강을 시험편의 grip부와 함께 taper를 갖게 가공하였다. Fig. 6는 직경이 10mm인 인장시험편의 형상을 도시하였다.



Fig. 5 Photographs of FRP Rebar tensile Specimen with nominal diameter ϕ 10mm

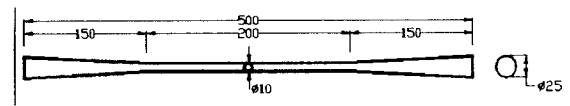


Fig. 6. Configuration of tensile Specimen with nominal diameter ϕ 10mm

ϕ 4mm 리바의 인장실험은 재료시험기(Instron 4206, 15ton)를 사용하였으며 ϕ 10mm 리바는 재료시험기(SimaJu 100ton)를 사용하였으며 Cross Head Speed는 각각 2mm/min, 1.5mm/min로 상온에서 실험하였다. 각 조건에 대해서 5개씩의 시험편을 제작하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 7는 직경이 4mm인 유리섬유 강화 복합재료 리바에 대한 인장실험의 결과로서 파괴하중과 응력은 각각 673Kgf, 54Kg/mm²를 나타내었으며 최대하중점에서 변형율은 6.04%를 보였다.

Fig. 8은 직경이 4mm인 케블라 섬유 강화 복합재료 리바에 대한 인장실험 결과이며 파괴하중과 응력은 각각 836Kgf, 66.5Kg/mm²를 나타내었으며, 최대 하중점에서 변형율은 10%를 보였다.

Fig. 9은 직경이 4mm인 탄소섬유 강화 복합재료 리바에 대한 인장실험 결과이며 파괴하중과 응력은 각각 1153Kgf, 92Kg/mm²를 나타내었으며, 최대 하중점에서 변형율은

7.4%를 보였다.

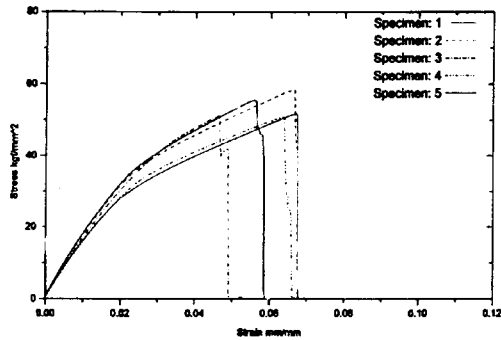


Fig. 7 Result of tensile test of GFRP Rebar (ø 4mm)

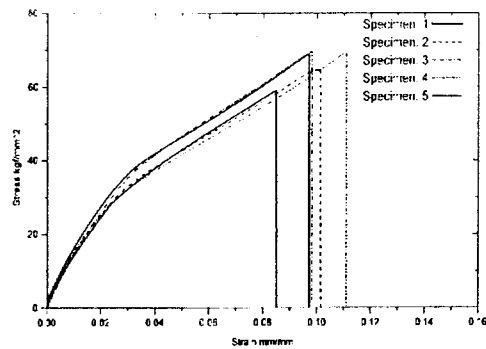


Fig. 8 Result of tensile test of kevlar FRP Rebar(ø 4mm)

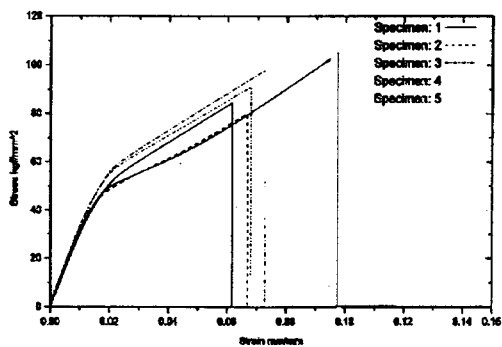


Fig. 9 Result of tensile test of CFRP Rebar (ø 4mm)

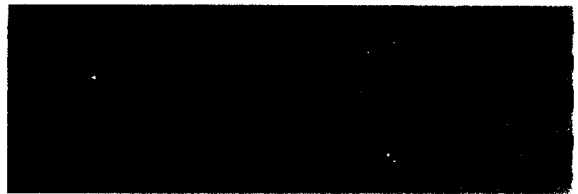
Fig.10은 직경 ϕ 4mm GFRP, CFRP, KFRP 리바의 인장실험후 파괴상태를 도시한 사진이다. 3종류 모두 대나무가 파괴된 형상과 유사한 파괴형태를 보였다.



(a) GFRP



(b) CFRP



(c) KFRP

Fig. 10 Tensile specimens of tensile after fracture

Fig. 11은 직경이 10mm인 유리섬유 강화 복합재료 리바와 케블라 섬유강화 복합재료에 대한 인장실험의 결과로서 파괴하중, 응력, 변형율은 각각 3610kg, 46 Kg/mm^2 , 13% 4250kg, 54.1 Kg/mm^2 , 15%를 나타내었다.

Fig. 12는 직경이 10mm인 탄소섬유강화 복합재료 리바에 대한 인장실험 결과이며 파괴하중, 응력, 변형율은 각각 9850kg, 125.4 Kg/mm^2 , 19.23%를 나타내었다.

Fig.13 직경이 ϕ 10mm인 CFRP 리바 인장실험 후 그립부의 파괴를 도시한 것으로서 인장하중이 9ton 이상이 되면 그립부의 하단측, 단면적이 작은 부분에서 먼저 파괴가 일어나고 평행부에서는 전혀 손상이 관찰되지 않았다. 따라서 정확한 인장강도를 측정할 수 없었다. 앞으로 CFRP 리바의 경우는 지그를 개발하여 그립부분에 대한 파괴가 먼저 일어나지 않도록 할 수 있는 연구가 이루어져야 될것으로 생각된다.

Fig. 14는 직경이 10mm인 C-KFRP하이브리드형 복합재료 리바에 대한 인장실험 결과이

며 섬유 구성 비율에 따라 파괴하중, 응력, 변형율은 8:2는 9960kg, 126.8 Kg/mm^2 , 19.8%, 7:3은 9100kg, 115.8 Kg/mm^2 , 20.6%, 6:4는 8860kg, 112.8 Kg/mm^2 , 21.6% 를 나타내었다. 탄소섬유의 비율이 높을수록 하중은 높게 나왔으며 케블라 섬유의 비율이 증가할수록 따라 변위가 많아짐을 알수 있었다.

Fig. 15는 직경이 10mm인 K-GFRP하이브리드형 복합재료 리바에 대한 인장실험 결과이며 섬유 구성 비율에 따라 파괴하중, 응력, 변형율은 8:2는 4430kg, 56.4 Kg/mm^2 , 17%, 7:3은 3990kg, 50.8 Kg/mm^2 , 14.5%, 6:4는 3720kg, 47.36 Kg/mm^2 , 12% 를 나타내었다.

Fig. 16는 직경이 13mm인 철근(Steel bar)에 대한 인장실험 결과이며 응력, 변형율은 각각 68.9 Kg/mm^2 , 16%를 나타내었다.

Fig.17 은 10mm 리바의 인장시험 시험편의 파단형태를 도시 하였다.

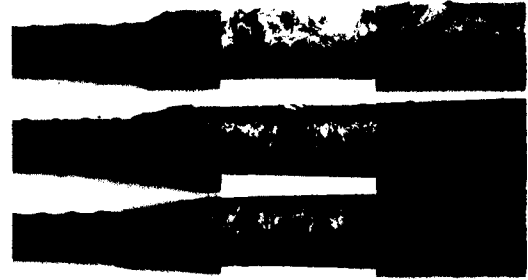


Fig.13 Grip Failure of tensile specimen (CFRP)

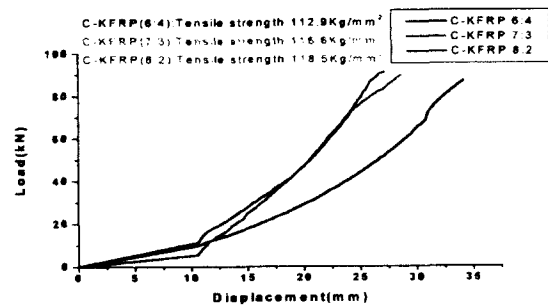


Fig.14 Comparison of tensile load and displacement of C-KFRP

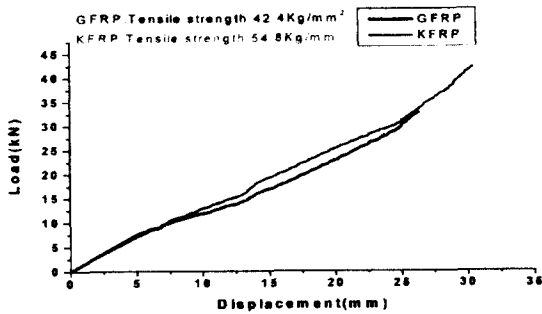


Fig.11 Comparison of tensile load and displacement of GFRP and KFRP

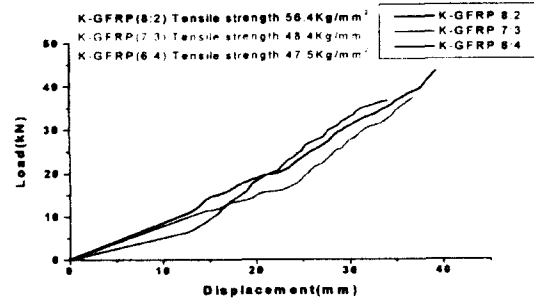


Fig.15 Comparison of tensile load and displacement of K-GFRP

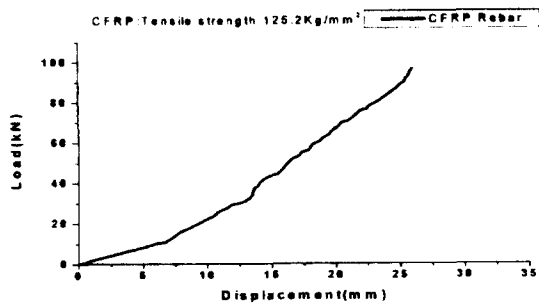


Fig.12 Tensile load and displacement of CFRP

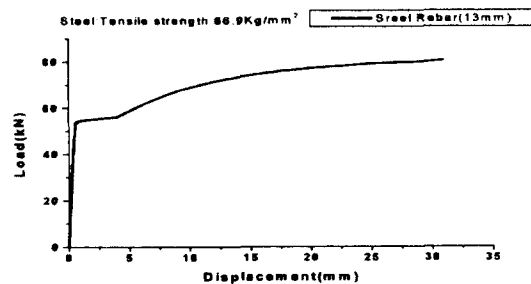


Fig.16 Diagram of Tensile load and displacement of Steel bar

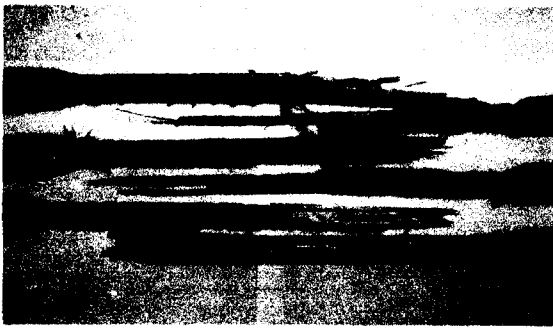


Fig. 17 Tensile specimens of tensile after fracture (KFRP, CFRP, GFRP)

4. 결론

하이브리드 섬유강화 복합재료리바의 물성을 실험적 연구를 통해서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직경이 4mm인 FRP 리바의 인장강도는 CFRP, KFRP, GFRP 리바순으로 각각 91.7 Kg/mm^2 , 66.5 Kg/mm^2 , 53.6 Kg/mm^2 였으며 ϕ 10mm 인 고장력 철근의(40 Kg/mm^2) 인장강도보다 높게 나타났으며 변형율은 KFRP, CFRP, GFRP 순으로 높게 나타났으며 각각 10%, 7.4%, 6% 임을 보였다.
2. 직경이 10mm인 하이브리드형 FRP 리바의 인장강도는 CFRP, KFRP, GFRP 리바순으로 각각 125.4 Kg/mm^2 , 54.1 Kg/mm^2 , 46 Kg/mm^2 였으며 변형율은 KFRP, CFRP, GFRP 순으로 높게 나타났으며 각각 19.23%, 15%, 13% 임을 보였다.
3. ϕ 10mm인 FRP리바가 ϕ 4mm인 rebar 보다 인장강도가 저하 되는 원인은 섬유함유율이 ϕ 10mm 보다 ϕ 4mm인 경우보다 낮고 핸드레이업법으로 제작할 경우 섬유의 배향과 섬유파단이 큰 원인으로 생각된다.
4. C-KFRP Rebar, K-GFRP Rebar의 경우 모두 8:2 비율이 인장강도가 가장 높게 나타남을 알수 있었다.

후 기

이 논문은 한국 과학재단 지정 지역 협력 연구 센터인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터의 2000년도 연구비 지원에 의해 수행하고 있으며 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, Development of Continuous Fiber Reinforced Cement Matrix Composite, 복합재료학회 하계 work shop, pp71-87, 1999
- (2) Keesler, R.J, and powers, R.G, Corrosion of epoxy-coated Rebars-keys segmental Bridge-Monroe County, Report No.88-89 Florida Department of Transportation, Materials office, Gainesville Florida,1998
- (3) Rasheeduzzafar, A, Dakhil, F, Bada Performance of Corrosion Reinfrcing Steels in Chloride-Bearing Concrete, ACI Materials Journal, Vol.89, No.5 pp 439-448.1992
- (4)Nanni,A,Henneke,M.J and Okamoto,J, Behavior of Concrete Beams with Hybrid Reinforcement.Construction and Building Materials, Vol.8, No.2, pp89-95.1994