한국해양공학회지 제19권 제1호, pp 57~63, 2005 (ISSN 1225-0767)

하이브리드 섬유강화 복합재료 리바의 기계적 특성

한길영* 안동규* 이동기*
*조선대학교 기계공학과

Mechanical Characteristics of Hybrid Fiber Reinforced Composite Rebar

GIL-YOUNG HAN*, DONG-GUE AHN* AND DONG-GI LEE*
Department .of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

KEY WORDS: GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 유리섬유강화복합재료, Hybrid Rebar 하이브리드 리바, Braidtrusion 브레이드 트루젼, Pultrusion 펄트루젼

ABSTRACT: *The objective of this research is to investigate the mechanical characteristics of the hybrid fiber reinforced composite rebar, which is manufactured from a braidtrusion process. Braidtrusion is a direct composite fabrication technique, utilizing in-line brading and the pultrusion process. In order to obtain the mechanical behavior of the glass fiber, carbon fiber, and kevlar fiber, the tensile tests are carried out. The results of the fibers are compared with that of steel. Hybrid rebar specimens with various diameters, ranging from model size (3 mm) to full-scale size (9.5 mm), and various cross sections, such as solid and hollow shape, have been manufactured from the braidtrusion process. The tensile and bending tests for the case of the hybrid rebar, the conventional GFRP rebar, and the steel bar have been carried out. The results of the experiments show that the hybrid rebar is superior to the conventional GFRP rebar and the steel bar, from the viewpoint of tensile and bending characteristics.*

1. 서 론

최근 지하철, 터널, 고가도로, 교량 상판 등의 콘크리트 구조물이 공해등과 같은 열악한 환경으로 수명이 짧아지고 있으며, 바닷가에 설치된 교량들은 파도와 바람에 실려온 염분이 콘크리트 속으로 침투해 철근을 부식시킴으로써 수명을 단축하고 안전에 영향을 주고 있다는 지적이 대두되고 있다 (Ramakrishna, 1987).

섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Plastics : FRP)는 강에 비하여 비강도, 비강성, 비자성, 비전도성, 경량성 등이 우수하다. 특히 바닷물과 근접해 있는 곳의 구조물 건축, 전자적으로 중성을 요하는 곳, 절연을 요하는 곳, 염분에 과다 노출된 곳 등에서 FRP는 크게 각광을 받고 있다. 콘크리트 구조물용 강화재인 FRP리바(rebar)와 같은 섬유강화 복합재료가 여러기간 산업 분야에서 세계적으로 관심을 갖게 되었다.

한편 FRP는 강에 비하여 고가이며, 낮은 탄성계수, 취성재, 신소재로서 친밀성 결여등이 활용에 장애요소가 되고 있다. 그러나 고가인 문제점은 제조방법에 의하여 크게 영향을 받고 있으며 끊임없는 연구개발로 인하여 가격을 낮출 수 있는 기술이 개발되고 있다 (Chen and Carson, 1971). 취성재로서 낮은탄성계수에 대한 문제점들은 FRP재료의 공학적인 단점으로 앞으로 해결되어야할 과제로 고려되고 있다 (Ammon and Nets, 2000; Alsayed et al., 2000).

제1저자 한길영 연락처: 광주광역시 동구 서석동 375
062-230-7130 kybhan@mail.chosun.ac.kr

콘크리트 내에서 철의 부식을 막는 전통적인 방법은 아연을 도금하거나 에폭시를 입힌 리바를 사용하는 것이었다.

미국과 같은 선진국의 경우는 강의 부식에 대처하기 위한 여러가지 연구가 진행되고 있으며 많은 연구 결과가 발표되었다. Keesler and Powers(1998) 는 리바에 에폭시(epoxy)를 코팅하여 사용한 결과 사용중 리바에 여전히 부식이 심하게 나타나고 있음을 보고하였다. Rasheeduzzafar and Dakhil(1992)은 에폭시로 코팅한 리바를 높은 염화 콘크리트에서 실험한 결과 심각한 부식 문제를 발견했다. Nanni et al. (1994)과 Gibson and Christopher(1987)는 강(steel)에 에폭시를 모재로 한 아라미드 섬유를 브레이딩(braiding)한 바(bar)를 실험하여 응력-변형율 거동의 선형적임과 Hybrid화의 장점을 발표하였으나 코어(core)재인 steel에서는 여전히 부식이 진행됨을 지적하였다.

따라서 본 연구에서는 유리섬유의 1안, 2안, 3안의 섬유인장실험을 통하여 각 섬유의 파단하중과 변위를 측정하였으며, 성형후 리바의 인장강도를 측정하였다.

FRP리바의 취성인 문제점을 해결하기 위하여 하이브리드 구조로 설계한 유리-케블라섬유, 탄소-케블라섬유에 대해서도 얀 인장시험을 하였다. 기지(matrix)재료는 유리섬유와 친화력이 우수한 비닐에스터를 사용하여 직경ø3㎜인 FRP리바를 펄트루젼법으로 제작하여 인장실험을 통해서 파단하중, 변위를 측정하여 GFRP와 하이브리드 FRP의 연성을 비교하였다. 직경 ø8.5㎜, ø9.5㎜인 실축형GFRP리바와 내·외경이 각각 ø3㎜, ø8.5㎜인 중공형, ø3㎜, ø9.5㎜인 중공형 리바를 제작하여 3점

굽힘 실험을 실시하였다. GFRP의 하이브리드 섬유구조와 실축형, 중공형의 시험편을 제작하였으며 FRP리바의 취성을 개선하기위한 하이브리드 리바에 대해서 인장, 굽힘실험을 행하여 실험적으로 연구 하였다.

2. 시험편 제작 및 실험방법

본 실험에 사용된 강화재인 섬유는 한국화이버사의 유리섬유(ER 4400 FW)를 사용하였으며, 기지(matrix)재료는 열 경화성 비닐에스터(Vinylester)수지를 사용하여 브레이드트루젼(Braidtrusion)법으로 제작하였다. Fig.1에 브레이드트루전법의 개략도를 도시하였다. 성형후 인장강도를 측정하기 위하여 1안, 2안, 3안의 유리섬유, 1안의 탄소섬유, 1안의 케블라섬유를 절단하여 시험편을 제작하였다. 리바(rebar)는 유리섬유에 열경화성 비닐에스터 수지와 액체 경화제, 분말 경화제, 이형제, 첨가제를 적정의 비율로 혼합하여 섬유가 충분히 함침된후 금형을 지날수 있도록 분당 40㎝길이로 성형하였다. 금형의 온도는 100℃에서 약 5분간 예열하여 120℃에서 성형할 수 있도록 하였다. Fig.2에 브레이드트루젼 시스템의 사진을 도시하였다.

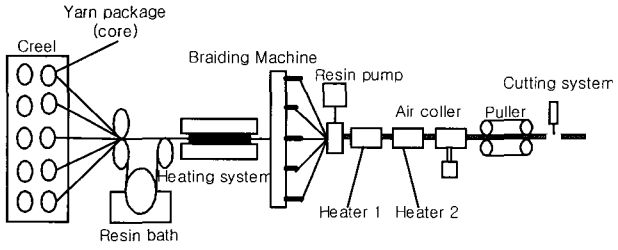


Fig. 1 Schematic of the braidtrusion Process

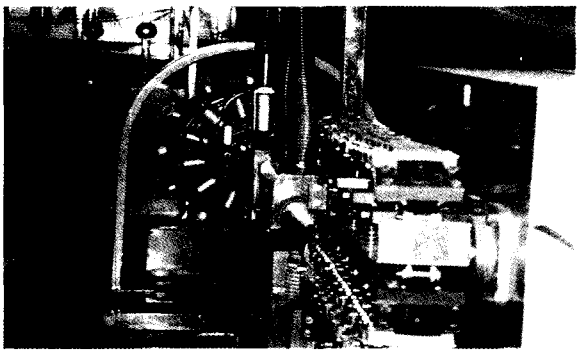


Fig. 2 Photograph of braidtrusion system

2.1 섬유얀인장 시험편

인장시험은 UTM(Instron 4206, 15ton)을 사용하였으며 크로스헤드 스피드는 2.54mm/min로 각 5개의 시험편을 제작하여 실험하였다. Fig.3에 시험기의 사진을 도시하였다.

성형 전 인장강도 및 하중-변위를 측정하기 위하여 유리섬유, 케블라섬유, 탄소섬유를 ASTM D-3379-75를 참조하여 시험편을 제작하였다.

Fig.4는 유리, 탄소, 케블라섬유의 인장강도를 측정하기 위한 인장 시험편을 사진으로 도시하였으며, 시험편의 치수와 형상은 Fig.5에 도시하였다.

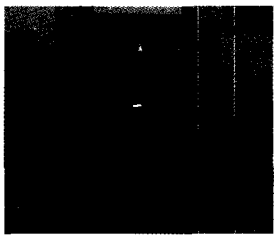
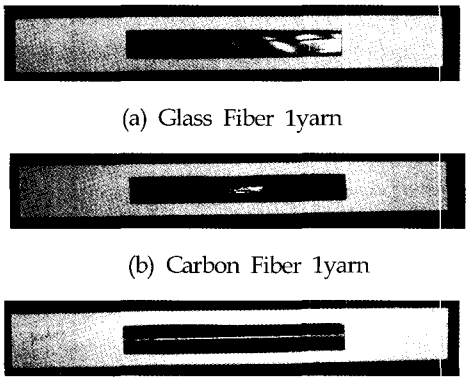


Fig. 3 Universal Test Machine(Instrong 4206, 15ton)



(a) Glass Fiber 1yarn

(b) Carbon Fiber 1yarn

(c) Kevlar Fiber 1yarn

Fig. 4 Photographs of yarn tensile specimen

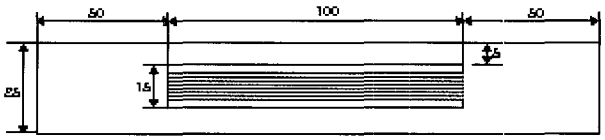


Fig. 5 Configuration of yarn tensile specimen

Fig. 6 Photographs of ø3mm tensile specimen

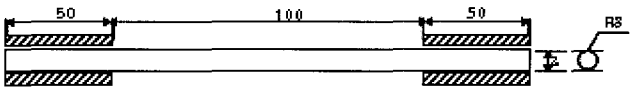


Fig. 7 Configuration of ø3mm Rebar tensile specimen

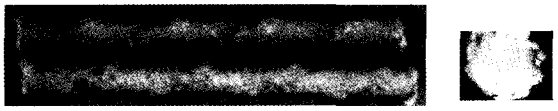
FRP 리바의 인장강도와 변위를 측정하기 위하여 펄트루젼법에의하여 브레이딩하지 않은 직경 ø3㎜인 GFRP리바와 하이브리드 섬유구조의 변위를 측정하기 위하여 유리-케블라 섬유, 탄소-케블라 섬유 구조의 직경ø3㎜인 하이브리드 리바를 제작하였다.

인장시험시 그립부에서 발생하는 슬립현상과 응력 집중을 피하기 위하여 시험편 양 끝단에 샌드페이퍼를 부착하여 시험편을 제작하였다.

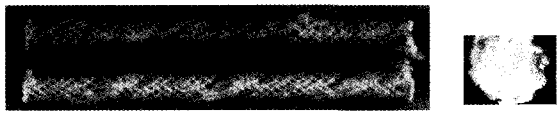
Fig.6은 직경ø3mm의 인장시험편을 사진으로 도시하였고, ASTM D3039규격을 참조하여 제작하였으며 Fig.7에 인장시험편의 형상을 도시하였다.

2.2 실축형 리바(Solid types Rebar)

실축형 GFRP리바는 직경 ø3mm, ø8.5mm, ø9.5mm으로 3종류로 제작하였다. 직경ø8.5㎜와 ø9.5㎜의 리바 굽힘시험편을 제작하여 3점 굽힘실험을 하였다. 굽힘 시험편은 ASTM D790 규격을 참조하여 제작하였으며 Fig.8에 시험편의 사진, Fig.9는 굽힘시험편의 형상을 도시하였다.



(a) ø8.5mm solid type



(b) ø9.5mm solid type

Fig. 8 Photographs of specimens of solid type

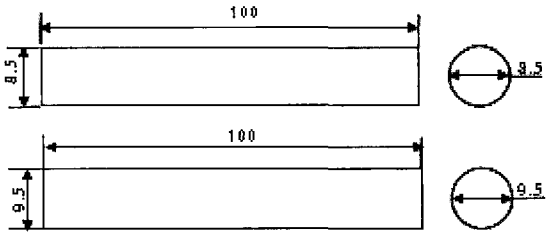
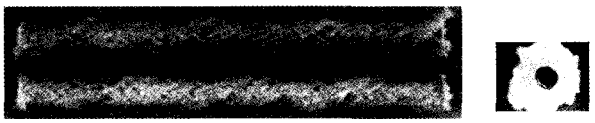


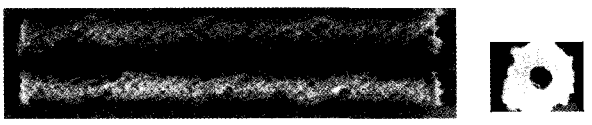
Fig. 9 Configuration of bending specimen

2.3 중공형 리바(Hollow types Rebar)

중공형 GFRP리바는 직경 ø8.5mm, ø9.5mm으로 내경이 ø3mm로 동일하며 Fig.10에 굽힘시험편의 사진을 도시하였고, Fig.11은 굽힘시험편의 형상을 도시하였다.



(a) ø8.5mm hollow type



(b) ø9.5mm hollow type

Fig. 10 Photographs of specimens of hollow type

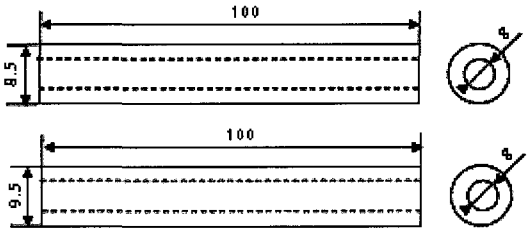


Fig. 11 Configuration of bending specimen

금형은 ø9.5mm, ø8.5mm, ø3mm의 세 가지이며, 중공형 리바를 성형하기 위하여 금형 앞부분에 맨드럴을 부착할 수 있는 지그를 제작하여 성형하였다. 각각의 지그와 금형을 Fig.12, Fig.13과 Fig.14 에 나타내었다.

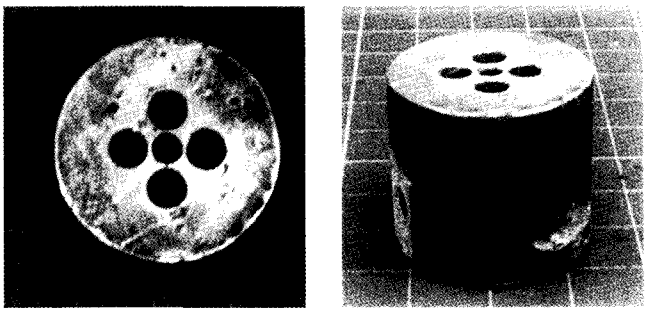


Fig. 12 Photograph of the zig for manufacturing hollow type rebar

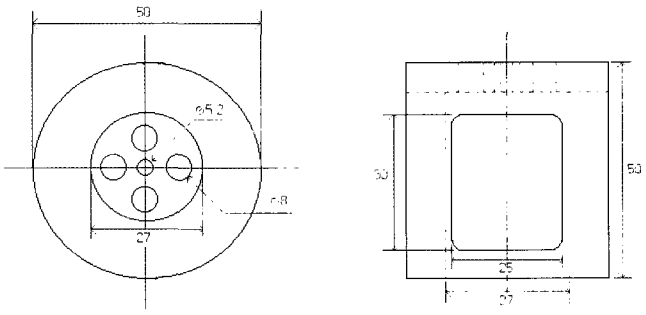


Fig. 13 Configuration of zig

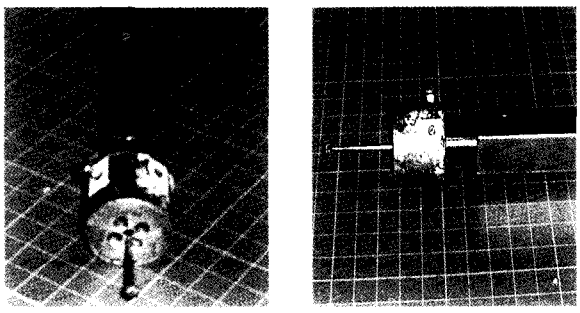


Fig. 14 Photograph of completely joined with zig

2.4. 연소법에 의한 섬유함유율 측정

ø8.5mm, ø9.5mm의 실축형과 외경이 ø8.5mm, ø9.5mm 내경이 ø3mm인 중공형 GFRP리바의 시험편의 섬유함유율은 브레이딩하지 않은 시험편을 전기로(Electric Furnace)를 사용하여 600℃에서 약 2시간 유지시킨 후에 1/10,000g까지 측정이 가능한 분석용 정밀전자저울(HR300)을 이용해 실온 상태에서 시험편의 중량을 측정하여 이들의 비를 백분율로 나타내었다. 이렇게 측정된 각 시험편의 섬유 함유율을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Fiber volume fraction of specimens

Yarns	Specimen	Volume fraction(%)	Type
16(Glass Fiber)	ø8.5mm	63.17	hollow
16(Glass Fiber)	ø8.5mm	71.08	solid
16(Glass Fiber)	ø9.5mm	68.17	solid
16(Glass Fiber)	ø9.5mm	59.74	hollow
18(Glass Fiber)	ø9.5mm	78.27	solid
18(Glass Fiber)	ø9.5mm	70.04	hollow
20(Glass Fiber)	ø9.5mm	83.04	solid
20(Glass Fiber)	ø9.5mm	75.61	hollow
2(Glass Fiber)	ø3mm	64.78	solid
6(Carbon Fiber)	ø3mm	50.89	solid

3. 결과 및 고찰

3.1 철근과 섬유얀의 인장 시험

Fig.15은 직경이 10mm인 철근의 인장시험 결과로서 파괴하중에서의 응력과 변위는 각각 약 55kgf/㎟, 25.7mm로 나타났으나 항복점에서의 응력과 변위는 각각 약 39.5kgf/㎟, 7.2mm로 나타났다.

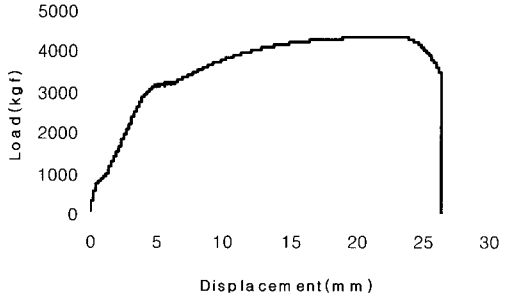
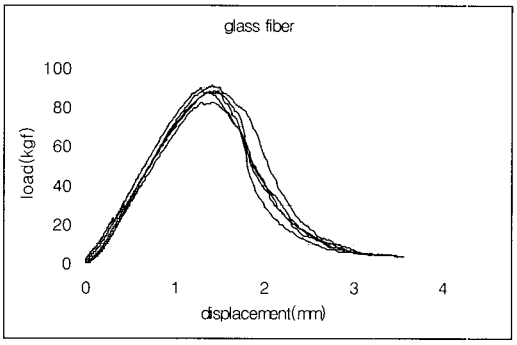


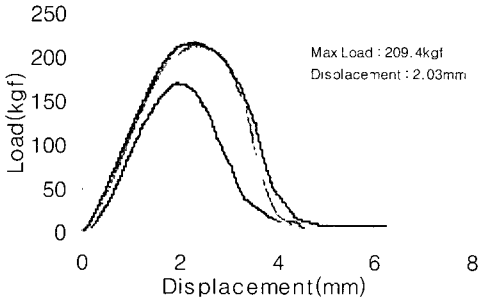
Fig. 15 Result of tensile test of steel bar

Fig.16의 (a), (b), (c)는 유리섬유 1얀, 2얀, 3얀을 각각 5회씩 인장시험한 결과를 나타낸 것으로 평균파단하중은 각각 약100kgf, 209kgf, 322kgf로 측정되었으며 변위는 각각 약 1.8mm, 2.03mm, 2.78mm로써 철근에 비해서 훨씬 취성인 특성을 보이고 있음을 알수 있다.

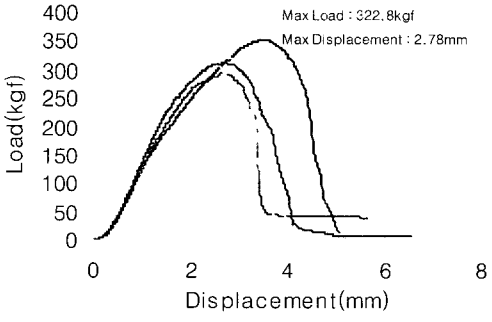
Fig.17은 유리, 탄소, 케블라 섬유의 인장 시험후 파단형상을 사진으로 도시하였으며, 파단하중에서도 섬유얀은 완전히 끊어지지 않는 얀 가교(yarn bridge)효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.



(a) Result of tensile test of 1yarn



(b) Result of tensile test of 2yarns



(c) Result of tensile test of 3yarns

Fig. 16 Result of tensile test of glass fiber[4400 TEX]

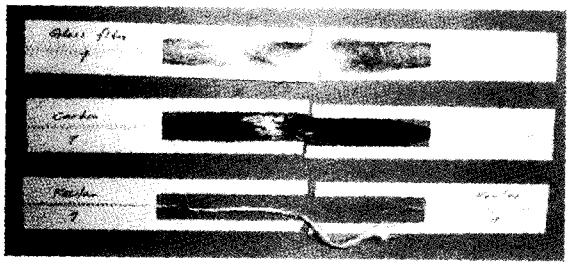
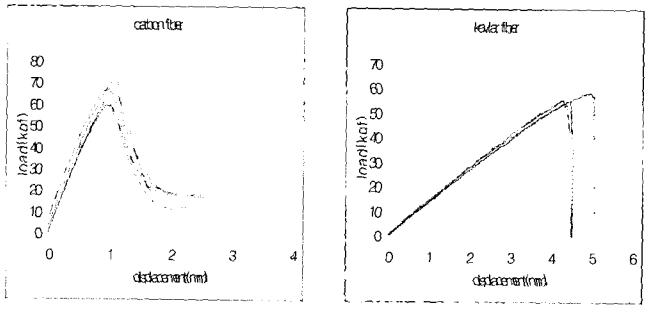


Fig. 17 Photographs of fracture shape after yarn tensile test (Glass, Carbon and Kevlar Fiber)



(a) Carbon[810 TEX] (b) Kevlar[340 TEX]

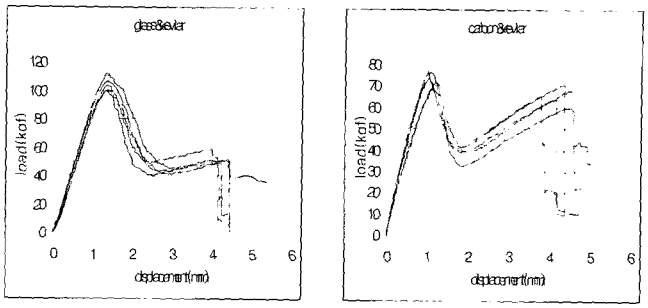
Fig. 18 Results of tensile test of Carbon and Kevlar fiber

Fig.18의 (a), (b)는 탄소, 케블라 섬유의 인장시험 결과로서, 탄소섬유와 케블라 섬유의 평균최대하중은 각각 65.14kgf, 56.38kgf로 측정되었으며, 최대하중점에서 변위는 각각 약1mm, 4.5mm로 측정되었다. 유리섬유 1안에 비해서 탄소, 케블라 섬유 1안의 최대 하중값이 낮게 나타난 것은 TEX(g/km)값이 서로 다른 섬유이기 때문이며, 케블라 섬유의 변위가 가장 높기 때문에 유리-케블라 섬유, 탄소-케블라 섬유와 같이 하이브리드 섬유구조로 제작한다면 유리섬유와 탄소섬유의 단점인 취성을 개선할 수 있을것으로 판단하였다.

3.2 하이브리드(hybrid) 섬유얀의 인장시험

Fig.19 (a), (b)는 각각 유리섬유 1얀과 탄소섬유 1얀에 케블라섬유 1얀으로 하이브리드한 섬유얀 시험편의 인장시험 결과이다. (a)의 유리-케블라 하이브리드 섬유얀의최대하중과 변위는 각각 104.37kgf, 1.41mm (b)의 탄소-케블라 하이브리드 섬유얀의 최대하중과 변위는 각각 73.2kgf, 1.1mm로 나타났다. 2종류의 하이브리드 섬유얀 인장시험 결과 유리, 탄소섬유의 파단하중점에 도달한 후에도 변위가 약 3mm이상 증가된 2차 변형이 일어나고 난후에 파단됨을 알수 있었다. 2차 변형후인 변위는 (a), (b) 각각 약 4.2mm, 4.5mm로 나타났다. 이는 케블라섬유가 유리, 탄소섬유보다 연성이 우수하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.20은 하이브리드 섬유얀 인장시험후 형상을 사진으로 도시하였으며, 파단 하중점에서도 섬유는 완전히 끊어지지 않는 얀 가교(yarn bride) 효과를 관찰할 수 있었다.



(a) Glass-Kevlar (b) Carbon-Kevlar

Fig. 19 Results of fiber yarn tensile test of Glass& Kevlar fiber and Carbon&Kevlar fiber

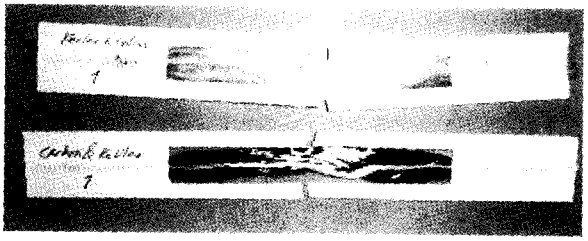


Fig. 20 Photographs of fracture shape after yarn tensile test (Glass-Kevlar and Carbon-Kevlar)

3.3 리바의 인장시험

Fig.21은 유리섬유를 강화재로 비닐에스터 수지를 기지재로 한 직경 ø3mm 리바의 인장시험 결과이고, Fig.22는 유리섬유와케블라섬유를 하이브리드한 직경 ø3mm 리바의 인장시험 결과이다. 하이브리드 리바가 하이브리드 하지 않은 GFRP리바에 비해 하중과 변위가 각각 약 9.3%, 23%가 높게 나타났다.

Fig.23 은 직경ø3㎜인 GFRP리바의 인장시험후 파괴된 사진을 도시하였다. 2종류 시험편 모두 마치 대나무가 파괴된 형상처럼 파괴되었으나 (a)탄소-케블라 하이브리드 시편이 (b)유리-케블라 하이브리드보다 더 취성 파괴된 형상을 관찰할 수 있었다.

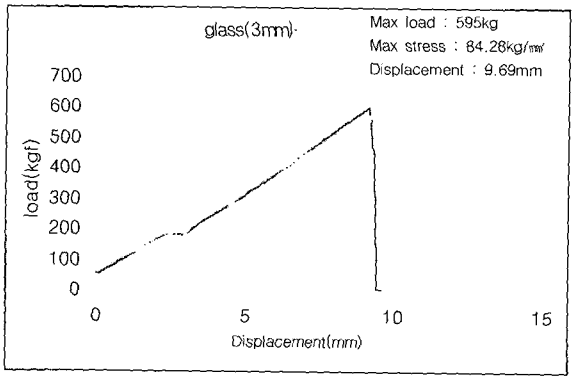


Fig. 21 Results of tensile test of FRP(Glass Fiber: Vinylester) Rebar(ø3mm)

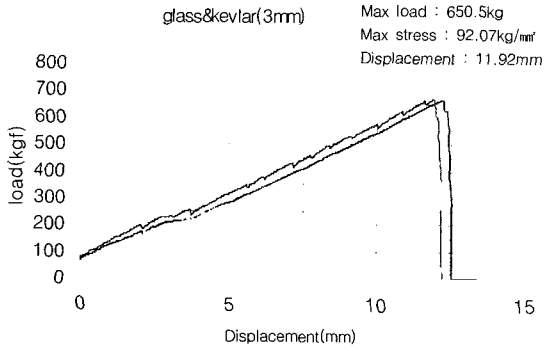
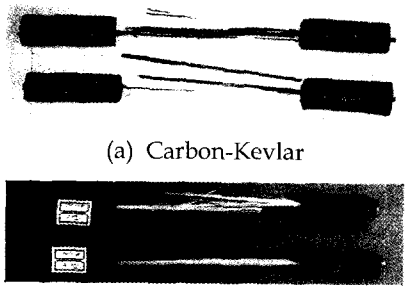


Fig. 22 Result of tensile test of Glass-Kevlar Hybrid FRP Rebar(ø3mm)



(a) Carbon-Kevlar

(b) Glass-Kevlar

Fig. 23 Photographs of fracture shape after ø3㎜ tensile test

3.4 철근과 실축형 리바의 굽힘강도

Fig.24은 직경ø10mm인 철근의 굽힘시험 결과로서 항복점에서의 굽힘 응력과 변위는 각각 70.71kgf/㎟, 3㎜로 측정되었다.

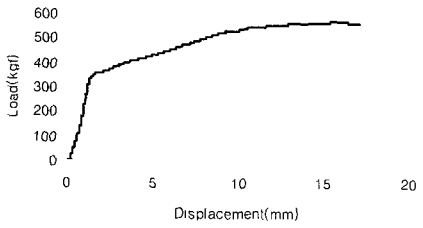
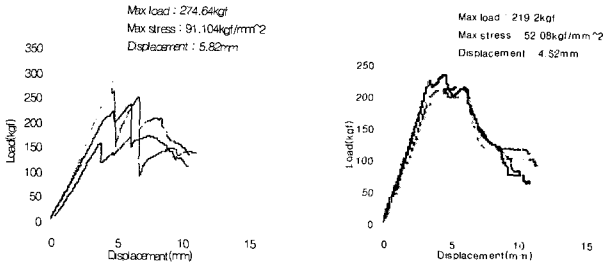


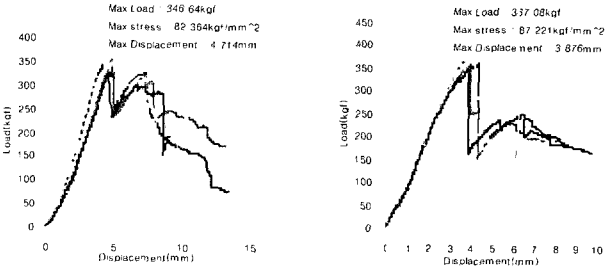
Fig. 24 Result of bending test of ø10mm steel bar

Fig.25(a), (b), Fig.26(a), (b)는 얀수의 변화에 따른 직경 ø8.5mm, ø9.5mm인 실축형 GFRP리바의 굽힘시험결과를 나타낸 것으로서 굽힘응력은 16얀의 ø8.5mm인 경우가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 Table 1의 결과와 같이 16얀 실축형 직경ø8.5㎜일 때의 섬유 함유율이 71.08%였다. 따라서 직경 ø8.5mm의 16얀, 섬유 함유율이 약70%의 경우가 가장 적합한 결과로 생각된다.



(a) ø8.5mm (b) ø9.5mm

Fig. 25 Result of bending test of ø8.5mm,ø9.5mm rebar solid type(16yarns)



(a) 18yarns (b) 20yarns

Fig. 26 Result of bending test of ø9.5mm rebar solid type (18yarns, 20yarns)

3.5 중공형 리바의 굽힘강도

Fig.27은 유리섬유 12얀 케블라섬유를 브레이딩한 직경 ø8.5mm, 내경이 3mm인 중공형 하이브리드 리바의 굽힘시험 결과로써 응력과 변위가 각각 60.12kgf/㎟, 3.22mm로 나타났다.

Fig.28과 Fig.29는 각각 유리섬유 18얀, 20얀 케블라섬유를 브레이딩한 직경 ø9.5mm, 내경이 3mm인 중공형 하이브리드 리바의 굽힘시험 결과로서 응력이 각각 76.49kgf/㎟, 73.56kgf/㎟ 변위가 각각 4.13mm, 2.75mm로 나타났다.

중공형 리바의 굽힘 응력과 변위는 ø9.5mm인 유리섬유 18얀인 중공형의 경우가 20얀인 중공형의 경우 보다도 약간 높게 나타났다. 이는 얀수가 직경이 ø9.5mm인 중공형은 18얀의 경우가 적합하기 때문으로 생각된다.

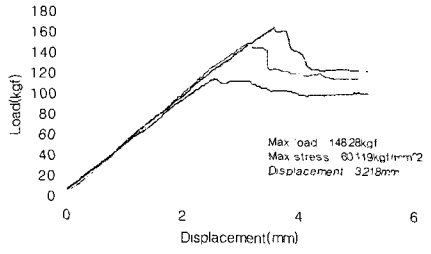


Fig. 27 Result of bending test of ø8.5mm rebar hollow type(12yarns)

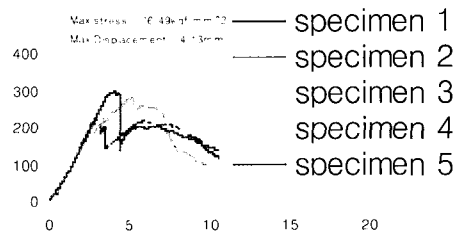


Fig. 28 Result of bending test of ø9.5mm rebar hollow type(18yarns)

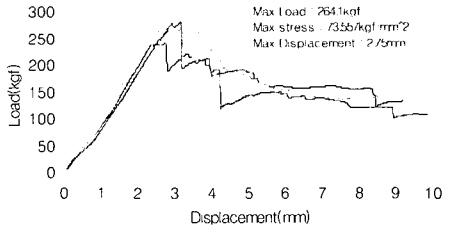


Fig. 29 Result of bending test of ø9.5mm rebar hollow type(20yarns)

4. 결 론

본 연구에서는 철근을 대체할 수 있는 경량, 내식성 복합재료인 유리-케블라섬유 강화 하이브리드 리바와 GFRP리바를 브레이드투루젼(Braidtrusion)법을 이용하여 직접 제작하고, 인장, 굽힘 시험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 섬유얀의 인장강도 시험에서 케블라섬유가 유리섬유와 탄소섬유에 비하여 약 4배 정도 큰 변위를 보였다.
2. 케블라-유리 섬유강화 하이브리드 직경 ø3mm인 리바의 변위가 하이브리드 하지 않은 GFRP 리바에 비하여 인장시험에서 약 23%이상 높게 나타남을 알 수 있었다.
3. 직경ø3mm인 실축형 GFRP리바와 유리-케블라 섬유강화 하이브리드 리바가 직경 ø10mm인 철근의 인장강도 보다 각각 약 1.5배와 1.7배정도 높게 나타남을 알 수 있었다.
4. 굽힘강도와 최대 하중에서의 변위는 직경ø8.5㎜ 16얀, 섬유함유율 약 70%의 실축형이 가장 우수하게 나타났으며, 철근보다 응력이 약 9%, 항복점에서 변위는 2.8mm가 더 우수함을 확인 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2000년도 조선대학교 교비 연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A., and Almusallam, T.H. (2000). "Performance of Glass Fiber Reinforced Plastic as a Reinforceing Material for Concrete Structures", Department of Civil Engineering, pp. 555~567

Ammon K. and Neta, B. (2000). "Molding the Effect of High Temperature on the Bond of FRP Reinforcing Bars to Concrete", Cement and Concrete Composites, Vol 22, pp 433-443.

Chen, W. and Carson, J.L. (1971). "Stress-strain Properties of Random Wire Reinfofced Concrete", ACI Journal, Procedings, Vol 68, No 12, pp 933~936.

Gibson, L.B. and Christopher, W.M.. (1987). "A Computer Analysis of Temperature and Pressure Distribution in a Pultrusion Die", 42nd Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastics Inc., February 2-6, Session 12-B

Keesler, R J, and Powers, R.G. (1998). "Corrosion of Epoxy-coated Rebar-Keys Segmental Bridge-Monroe Country", Report No.88-89 Florida Department of Transportation, Material office

Nanni, A., Henneke, M.J. and Okamoto. J. (1994). "Behavior of Concrete Beams with Hybrid Reinforcement," Construction and Building Materials, Vol 8, No 2, pp 89-95.

Ramakrishna V. (1987). Materials and Properties of Fiber Concrete, Madras, India.

Rasheeduzzafar, A., Dakhil, F.B. (1992). "Performance of Corrosion Reinforcing Steels in Chloride-Bearing Concrete," ACI Materials Jounal, Vol 89, No 5, pp 439-448

2004년 10월 12일 원고 접수
2004년 11월 23일 최종 수정본 채택