

콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장 및 파괴 특성

Tensile Behavior and Fracture Properties of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement

박 찬 기* · 원 중 필**

Chan-Gi Park · Jong-Pil Won

Abstract

FRP re-bar in concrete structures could be used as a substitute of steel re-bars for that cases in which aggressive environment produce high steel corrosion, or lightweight is an important design factor, or transportation cost increase significantly with the weight of the materials. But FRP fibers have only linearly elastic stress-strain behavior; whereas, steel re-bar has linear elastic behavior up to the yield point followed by large plastic deformation and strain hardening. Thus, the current FRP re-bars are not suitable concrete reinforcement where a large amount of plastic deformation prior to collapse is required.

The main objectives of this study in to evaluate the tensile behavior and the fracture mode of hybrid FRP re-bar. Fracture mode of hybrid FRP re-bar is unique. The only feature common to the failure of the hybrid FRP re-bars and the composite is the random fiber fracture and multilevel fracture of sleeve fibers, and the resin laceration behavior in both the sleeve and the core areas. Also, the result of the tensile and interlaminar shear stress test results of hybrid FRP re-bar can provide its excellent tensile strength-strain and interlaminar stress-strain behavior.

Keywords : Corrosion, Core, Fracture mode, Hybrid FRP re-bar, Interlaminar shear stress, Sleeve fiber, Tensile behavior

I. 서 론

철근 부식에 의한 철근콘크리트 구조물의 구조성능 저하는 기존 보강철근의 단점을 극복 할 수 있는 새로운 대체재료를 개발하기 위한 많은 연구로 이어지고 있다.^{1),4)} 미국의 경우 총 580,000개의 교량 중에 180,000개의 교량이 결함이 발견되어 즉시 보수 및 보강이 필요하며 이와 같은 양은 전

* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과
** 건국대학교 지역건설환경공학과
** Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750
Fax: +82-2-2201-0907
E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

체 교량 구조물의 약 31% 정도로 노후화의 주요 원인은 보강 철근의 부식에 의한 것으로 보고되었다.⁴⁾ 현재 미연방 도로국에서는 연간 교량 구조물의 보수에 소요되는 예산은 약 2억달러(한화: 2,400억원/년)로 추정하고 있으며 고속도로 및 고속도로 교량의 유지관리 및 보수를 위한 비용으로 해마다 3억 1천만달러(한화: 약 3,720억원/년)를 사용하고 있다.⁴⁾ 또한 기타 일반 도로의 유지관리 및 보수비용으로 연간 2억 1천 5백만달러(한화: 약 2,580억원/년)를 사용하고 있는 것으로 알려지고 있다.⁴⁾ 캐나다 연방 도로국은 콘크리트 구조물의 보수 중 보강철근의 부식에 의한 파괴로 인한 것이 절반 이상이라고 보고하였다.⁴⁾ 일반적으로 수분과 직접적으로 접촉해 있는 수리구조물(농업수리구조물 등)은 교량 구조물에 비하여 더 열악한 상황에 처하게 된다. 따라서 철근의 부식에 의한 내구성 저하는 더욱더 크게 발생하게 된다. 이와 같이 철근 부식에 의한 내구성의 감소는 콘크리트 구조물의 수명감소와 더불어 매우 큰 사회적 문제로 대두되고 있다. 현재 보강철근의 대체 재료 중 FRP 보강근은 경량이고, 강도가 우수하며, 각종 환경조건에서의 내구성이 우수하다고 알려져 그 사용 가능성이 가장 높다.^{1),2)} 그러나 일반 FRP 보강근(CFRP 보강근, GFRP 보강근, AFRP 보강근 등)은 고가이며, 취성적 성질과 내구성에 대한 충분한 검증 및 설계 기준의 미비로 사용상의 한계를 가지고 있다.^{1),3),5),7),8),11)} FRP 보강근의 취성적 성질은 신규 철근콘크리트 구조물의 보강재료 사용되었을 경우 사용성 및 안전성에 매우 큰 영향을 미치는 특성으로 해결해야 할 주요한 관심사이다.^{3),5),7),8),11)} FRP 보강근의 취성적 특성을 해결하고자 연구되고 있는 것이 변형률이 서로 다른 섬유를 조합하여 소성변형구간을 확보하는 연구이다.^{3),5),7),8),11)} 복합재료 분야에서 소성변형구간은 초기 파괴가 발생한 후 최종 파괴가 발생할 때까지 거동을 소성변형 구간으로 정의하고 있다. 하이브리드 FRP 보강근은 변형률이 작은 섬유가 파괴된 후 변형률이 큰

섬유가 파괴될 때까지 하중에 저항하는 구간을 소성변형 구간으로 하여 개발된 FRP 보강재료로서 콘크리트 구조물에 적용시 보강철근과 같이 3% 이상의 변형률과 소성변형구간을 동시에 얻을 수 있어 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있다. 하이브리드 FRP 보강근의 파괴특성은 일반 FRP 보강근과 다르게 발생하는데 하이브리드 FRP 보강근의 중앙에 위치한 코어 FRP 보강근이 파괴된 후 슬리브를 구성하는 섬유가 하중에 저항하면서 파괴가 발생한다. 즉 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동은 파괴특성과 밀접한 관계가 있다. 현재 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동특성과 파괴특성과의 관계에 대한 연구는 매우 부족한 실정으로 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동을 이해하기 위해서는 반드시 파괴특성과의 관계를 이해하여야 한다.

본 연구에서는 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동과 파괴특성을 규명하기 위하여 2가지 종류의 하이브리드 FRP 보강근 및 현재 사용되고 있는 GFRP 보강근의 인장시험 및 전단시험을 실시하여 인장거동, 파괴특성 및 파괴 모드를 평가하고자 한다.

2. 고연성 하이브리드 FRP 보강근/GFRP 보강근

하이브리드 FRP 보강근의 인장 거동 및 파괴특성을 평가하기 위하여 2가지 종류의 하이브리드 FRP 보강근 및 한가지 종류의 GFRP 보강근을 비교 실험하였다. 본 연구에서 사용한 2가지 종류의 하이브리드 FRP 보강근은 압출성형/브레이딩/필라멘트 와인딩 공법으로 생산된 제품으로 구성재료 및 특성은 Table 1과 같다. 또한 GFRP 보강근은 미국 Huges brothers의 제품으로(제품명: Aslan GFRP 보강근) 콘크리트 모체와 부착성능을 향상시키기 위하여 보강근의 표면을 규사코팅과 나선형 wrap을 표면에 처리하였으며 그 특성은 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용된 하이브리드 FRP 보강근 및 GFRP 보강근의 표면형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Mix proportion, manufacturing process and matrix resin of FRP rebar

Type of hybrid FRP rebar	Matrix resin	Manufacturing process	Sleeve fiber (Fiber volum fractio, %)		Core fiber (Fiber volum fractio, %)
			E-glass	Aramid	Carbon
Hybrid(A)	Vinyl ester	Pultrusion/braiding/ Filament winding	-	73.0	37.0
Hybrid(B)	Vinyl ester	Pultrusion/braiding/ Filament winding	51.8	34.6	13.6
GFRP Aslan	Vinyl ester	Pultrusion	70.0	-	-



Fig. 1 Photo of FRP re-bars

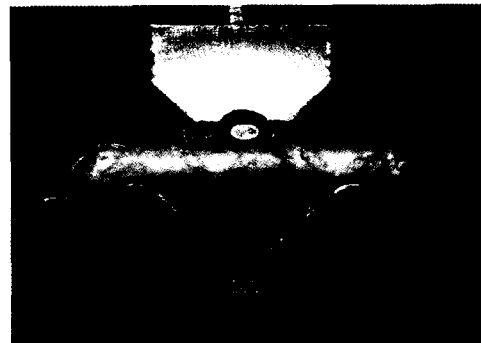


Fig. 2 Interlaminar shear stress test set-up

3. 시험방법

본 연구에서는 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 성능을 평가하기 위하여 전단(Interlaminar shear stress) 및 인장성능을 평가하였으며, 그 결과는 현재 해외에서 널리 사용되고 있는 미국 Hughes brothers 사의 GFRP 보강근의 성능과 비교 분석하였다.

가. 전단 특성

전단특성을 평가하기 위하여 ASTM D 4475 (Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by in Short-Beam Method)의 방법을 사용하였다.²⁾ 전단시험은 허용용량 50 KN의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 사용하여 변위의 속도를 1.3 mm/min로 하여 시험을 실시하였다.

본 연구에서 사용한 FRP 보강근 시험공시체와 시험장치의 모습은 Fig. 2와 같다.

나. 인장특성

고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동을 평가하기 위하여 ACI 440에서 제시하고 있는 기준에 따라 인장시험을 실시하였다. ACI 440에서는 FRP 보강근의 시험길이는 직경의 40배 이상으로 규정하고 있으며, 최소 시험길이 역시 100 mm 이상으로 규정하고 있다. 또한 정착길이(L_g)는 식 2에 따라 결정하며 최소 정착길이는 250 mm 이상으로 규정하였다.1)

$$L_g = \frac{f_u A}{350} \dots\dots\dots (2)$$

Where, f_u = Ultimate strength, MPa
 A = Area, mm²

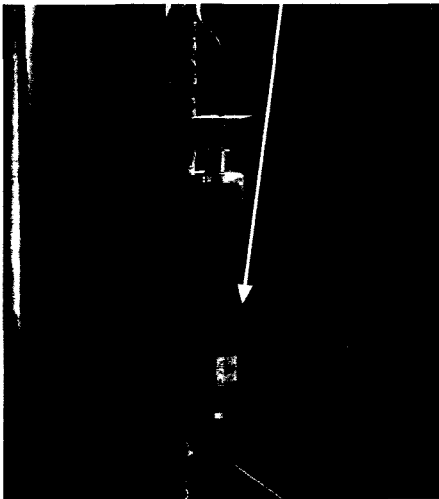
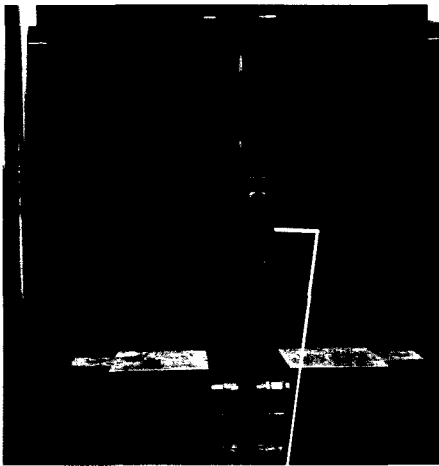


Fig. 3 Tensile test set-up

ACI 440에서는 FRP 보강근을 정착시키기 위해서 사용되는 강관의 내부직경은 보강근의 공칭직경보다 적어도 10~14 mm 정도 크게 하여야 된다고 규정하고 있다.¹⁾ 고연성 하이브리드 FRP 보강근 인장시험용 공시체는 변위를 조절할 수 있는 250 KN 용량의 UTM을 사용하여 시험재하속도 5 mm/min으로 하여 시험을 실시하였으며 FRP 보강근의 변형률을 측정하기 위해서 LVDT를 설치하였다(Fig. 3).

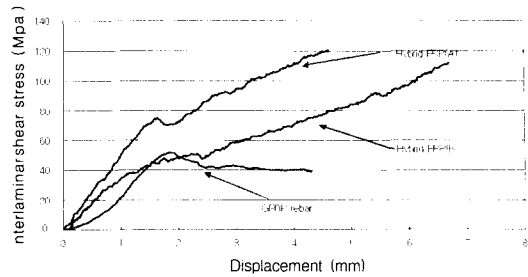


Fig. 4 Interlaminar shear stress-displacement behavior of FRP re-bars

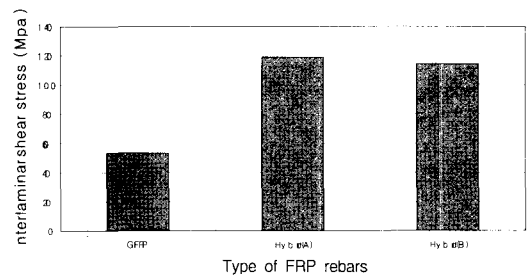


Fig. 5 Interlaminar shear stress of FRP re-bars

4. 실험 결과

가. 전단특성

고연성 하이브리드 FRP 보강근의 전단특성 시험 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. Fig. 4의 ISS (Interlaminar shear stress)와 변위와의 관계를 살펴보면 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 경우 변위가 지속적으로 증가함에 따라 ISS 역시 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존 FRP 보강근이 섬유 방향 배열을 통한 성형 압출과정에 의한 생산으로 섬유의 방향으로 쪼개짐 파괴가 발생하는데 비하여 고연성 하이브리드 FRP 보강근은 쪼개짐 파괴가 아닌 섬유의 지압에 의한 파괴가 발생하기 때문이다(Fig. 5). 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 ISS 시험결과를 살펴보면 GFRP 보강근의 ISS가 53.2 MPa인데 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 ISS는 각각 119.0 MPa(A) 과 114.5 MPa(B)를 나타내었다. 이와 같은 결과는 FRP 보강근의 파괴가 섬유와 매트릭스수지의

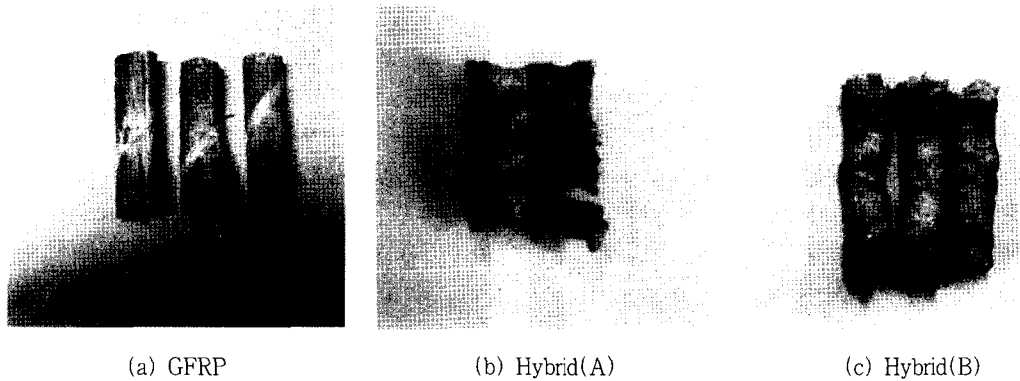


Fig. 6 Shear failure modes of hybrid FRP re-bars

재료적 파괴가 아닌 섬유와 매트릭스 수지의 부착 표면에 분리에 의한 쪼개짐 파괴가 주로 발생하였기 때문이다. 쪼개짐 파괴의 주요 원인은 매트릭스와 섬유의 부착강도와 FRP 보강근의 생산시 섬유를 한쪽 방향으로 배열하고 매트릭스 수지로 결합시키는 방법을 사용함으로써 섬유의 배열된 길이 방향으로 받는 하중에는 강하나 섬유배열 방향의 수직방향으로 작용하는 하중에는 매우 약한 특성을 나타낸다. 그러나 하이브리드 FRP 보강근은 섬유의 배열을 일방향이 아닌 격자 모양으로 제작하는 3-D 브레이딩 방법을 사용함으로써 섬유와 매트릭스 수지의 분리에 의한 쪼개짐 파괴를 방지할 수 있어 궁극적으로 섬유와 매트릭스가 파괴될 때까지 하중에 저항하기 때문에 ISS를 증가시킬 수 있었다. 고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)이 상대적으로 고연성 하이브리드 FRP 보강근 (B)보다 ISS가 큰 이유는 하이브리드 FRP 보강근(A)가 유리섬유보다 상대적으로 변형률 및 강도가 큰 아라미드섬유를 포함하고 있기 때문이다(Fig. 6).

나. 인장특성

고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장시험결과는 GFRP 보강근 공시체와 달리 3% 이상의 소성변형 구간을 확보할 수 있다. GFRP 보강근의 응력-변형률 관계는 변형률이 증가하면 응력도 선형적으로

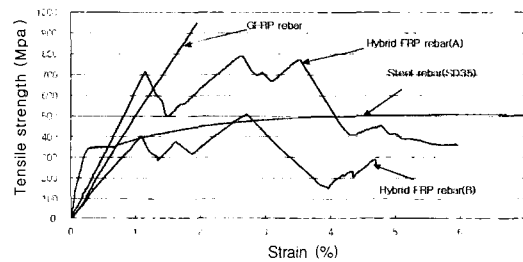


Fig. 7 Tensile strength-strain behavior of FRP re-bars and steel re-bar

로 증가하다가 급격한 파괴를 발생시키는 취성적 거동을 하였다(Fig. 7). 고연성 하이브리드 FRP 보강근과 보강철근의 인장거동을 비교하면 보강철근에 비하여 안정적이지는 않지만 적어도 3% 이상의 소성변형구간을 확보할 수 있었다. 특히 고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)의 경우 보강철근보다 높은 강도 이상을 유지하면서도 약 3% 이상의 변형률을 나타내었다. 고연성 하이브리드 FRP 보강근(B) 또한 강도는 작지만 계속해서 하중이 증가하는 모양을 나타내었다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 보강근의 경우 변형률을 증가시키기 위하여 사용된 아라미드섬유 및 유리섬유의 특성에 따른 것이다. 아라미드섬유는 강도 및 변형률이 모두 커 탄소섬유의 파괴가 발생할 때 생기는 충격에 의해 저항하는 능력이 강하지만, 유리섬유의 경우 탄소섬유가 파괴할때 발생하는 충격에 많은 영향

을 받기 때문이다. 따라서 슬리브를 구성하는 섬유 중 일부를 유리섬유를 사용한 고연성 하이브리드 FRP 보강근(B)이 모든 섬유를 아라미드섬유로 사용한 고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)보다 낮은 강도를 나타낸 것이라 판단된다.

고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)는 항복강도(735.9MPa) 및 극한강도(765.7MPa)가 매우 높은 값을 보여주었으며 고연성 하이브리드 FRP 보강근(B)는 항복강도가 434.7(MPa)를 나타내었고 극한강도는 446.5(MPa)를 나타내었다(Fig. 8(a)). 이와 같은 강도 값은 실제적으로 GFRP 보강근의 극한강도 보다는 작지만 고연성 하이브리드 FRP 보강근이 보강철근을 대체하기 위한 것으로 개발되었기 때문에 적절한 강도의 보강철근을 고려 대체

할 수 있을 것이라 판단된다. 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 변형률 특성을 살펴보면 GFRP 보강근과 다르게 항복변형률과 극한변형률을 모두 가지고 있는 특성을 보여주었다. 특히 고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)와 (B)는 소성변형구간 3% 이상을 목표로 한 본 연구의 결과를 만족하였다.

GFRP 보강근의 파괴형상은 섬유의 일방향 배열에 영향을 받아 파괴될 때 완벽하게 파괴되는 형상이었다. 그러나 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 파괴형상은 인장강도가 증가할수록 파괴되는 부분에서 보강 철근과 비슷하게 국부적인 단면적 감소가 발생하면서 지속적으로 하중에 저항하다가 파괴되는 형상이었다(Fig. 9).

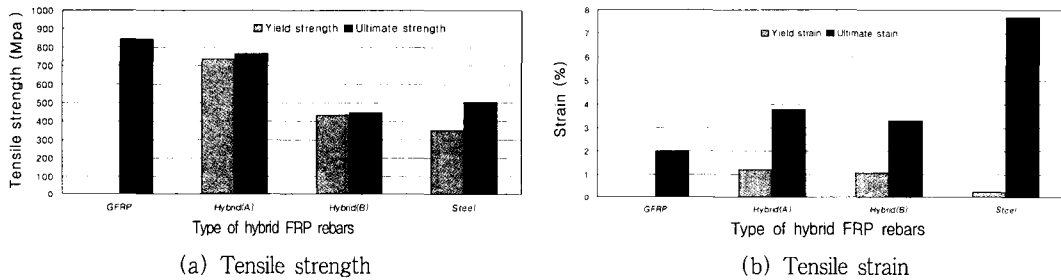


Fig. 8 Tensile behavior of hybrid FRP re-bars

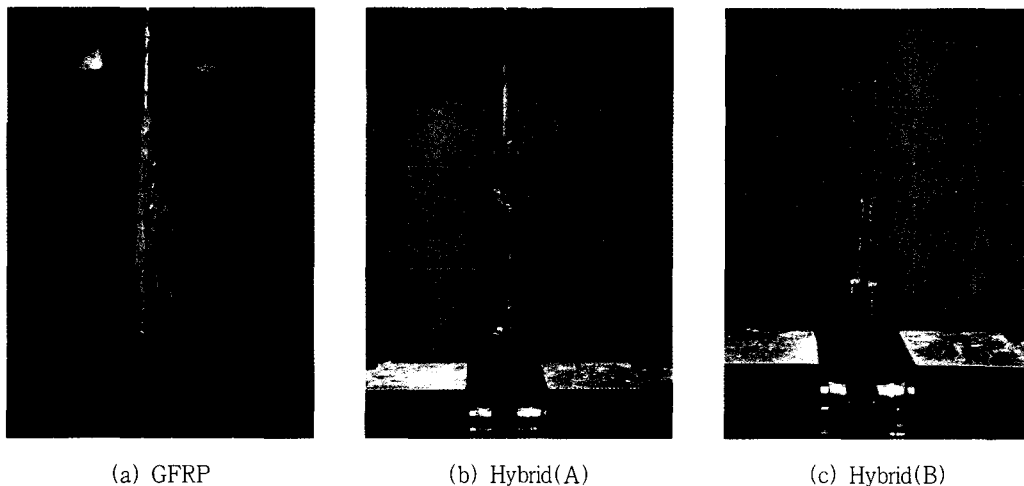


Fig. 9 Tensile failure modes of FRP re-bars

5. 하이브리드 FRP 보강근의 파괴 모드

하이브리드 FRP 보강근의 파괴 모드를 분석하기 위해서는 섬유와 매트릭스 수지 사이의 하중 전달 과정을 이해하여야 한다. 보강철근과 같은 균질성 재료의 파괴분석은 재료의 방향성에 영향을 받지 않기 때문에 쉽게 분석할 수 있다. 그러나 하이브리드 FRP 보강근의 파괴분석은 보강근이 서로 다른 방향성을 가진 섬유로 구성되어 있고, 하중이 작용하는 방향이 섬유의 길이 방향이기 때문에 매우 복잡하다. 기존 FRP 복합소재의 파괴 모드 분석은 복합체 산업 분야에서 가장 널리 사용되는 방법인 라미네이트 복합체를 이용하여 해석할 수 있다. 하이브리드 FRP 보강근을 라미네이트 복합체의 관점에서 보면 코어 FRP 보강근은 방향각이 0°인 내부 적층판이며, 슬리브를 구성하는 브레이딩 및 필라멘트 와이딩 섬유는 브레이딩 각을 가진 외부 적층판으로 가정할 수 있다. 하중이 작용하면 FRP 보강근의 유효강성에 비례하여 코어 라미네이트에 의해서 인장력이 전달되고 슬리브 라미네이트에 의해서 인장력과 평면 전단력(in plane shear)이 전달된다.¹⁰⁾ 따라서 연속적인 섬유 라미네이트 복합체에서 발생 가능한 파괴 모드는 인장파괴 모드와 평면 전단파괴(in plane shear fracture) 두 가지로 요약할 수 있다.¹⁰⁾ 유리섬유와 탄소섬유는 섬유의 단면적이 감소하지 않고 파괴가 발생하는

완벽한 취성 파괴가 발생하며 아라미드섬유는 단면적의 감소가 발생하면서 파괴되는 연성파괴의 경향을 보여준다. 아라미드섬유의 경우 완벽한 파괴가 발생하기 전에 현저하게 국부적인 단면감소와 넥킹(necking)현상이 발생한 후 파괴된다.¹⁰⁾

인장파괴 모드는 섬유가 어떠한 방법으로 파괴되는지를 설명할 수 있으며 세가지 모드로 정의할 수 있다. 첫 번째는 섬유의 약한 연결에 의해서 파괴가 지배받는 weakest link 모델이며 두 번째는 cumulative weakening 모델이며, 세 번째는 fiber break propagation 모델이다. 첫 번째 파괴 모델인 weakest link 모델은 섬유의 첫 번째 파괴 즉시 섬유의 길이 방향의 수직 방향으로 결합이 성장하여 평면파괴가 발생한다. 파괴는 섬유의 체적비가 매우 높고, 매우 취성적인 매트릭스 내에서 강한 부착력을 가지고 있을 때 발생하는 파괴 모드이다(Fig. 10).⁹⁾ Cumulative weakening 모델은 섬유의 결합이 불규칙하게 분포되어 있고 결합의 크기 역시 불규칙하게 여러 부분에서 발생한다. 결합은 섬유의 길이 방향에 따라 많은 부분에서 불규칙하고 자유롭게 성장하여 섬유를 파괴시킨다(Fig. 11). 섬유의 파괴는 지속적으로 발생하며 작용 하중은 인접한 다른 섬유로 재분배된다. 복합체의 최종 파괴는 하중 전달을 더 이상 할 수 없을 정도까지 단면적을 통과하는 결합층의 성장하여 약해질 때 발생한다.⁹⁾ Fiber break propagation 모델은

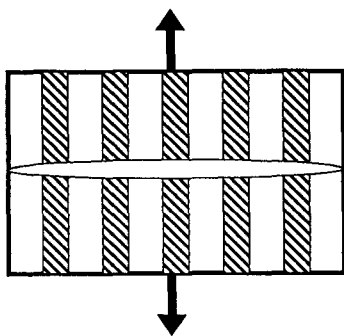


Fig. 10 Weakest link failure model⁹⁾

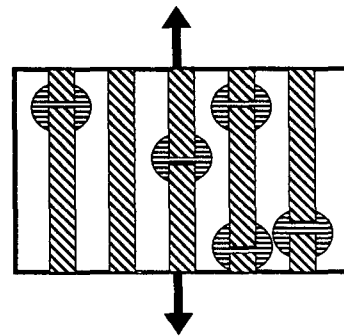


Fig. 11 Cumulative weakening model⁹⁾

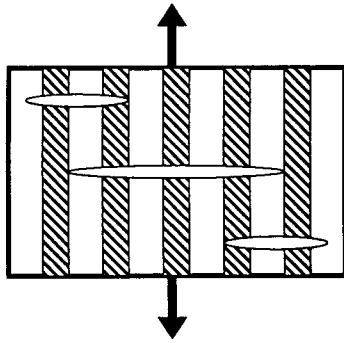


Fig. 12 Fiber break propagation model¹²⁾

파괴의 초기 단계에서는 cumulative weakening 모델과 비슷하지만, 결합은 응력집중 효과에 의해서 결합이 발생한 섬유에서 바로 이웃한 섬유로 전달되며, 파괴되는 국부적인 파괴가 발생한다. 최종 파괴모드는 복합체가 더 이상 하중을 지탱할 수 없을 정도로 복합체의 단면을 통과하는 파괴가 형성되었을 때 발생한다(Fig. 12).¹²⁾

하이브리드 FRP 보강근의 외부 슬리브를 구성하는 섬유는 방향성이 크기 때문에 인장력이 작용하면 인장력 뿐만 아니라 평면 전단력(in plane shear stress)에도 영향을 받는다. 방향성을 가진 고탄성의 탄소섬유와 에폭시 적층판의 역학적특성(인장강도, 전단강도 등)은 플리에(plies) 모서리 방향의 요소로서 각도가 증가할수록 Fig. 13에서와 같이 궁극적으로는 감소한다. 따라서 하이브리드 FRP 보강근 내에서 슬리브를 구성하는 섬유는 인장력에 의해서 파괴되기전에 심한 전단회전(in-plane shear rotation)이 발생하게 된다. 탄소섬유와 에폭시 수지적층판의 수평방향의 전단파괴는 찢어짐에 의하여 수지가 파괴되는 모드이다. 이와 같은 수지의 파괴모드는 적층판의 인장파괴와 전혀 다르다. 인장파괴 내에서 수지의 파괴는 분리에 의해서 발생한다. 적층판의 파괴에 대한 미소구조연구 또한 섬유가 밀실하게 위치한 장소에서 가로균열이 집중되는 것을 관찰할 수 있으며 이 부분에서 가로 균열이 성장한다.

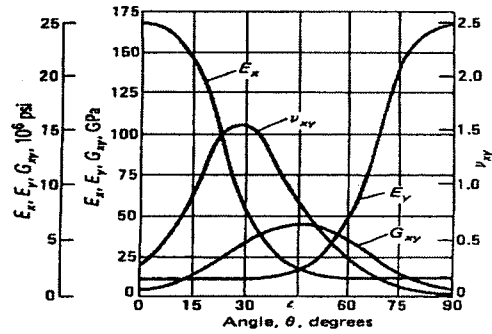


Fig. 13 Elastic constants for high-modulus graphite-epoxy laminar with different fiber orientation⁶⁾

하이브리드 FRP 보강근은 파괴 즉시 많은 양의 에너지를 발산하며 응력-변형률 곡선이 즉시 회복되는 경향을 볼 수 있다(Fig. 7). 이와 같은 현상은 하이브리드 FRP 보강근의 파괴되는 지점에서 섬유에 축압축력이 작용하여 섬유의 비틀림이 발생하기 때문이다. 하이브리드 FRP 보강근(A)의 경우 아라미드섬유가 슬리브를 구성하기 때문에 완벽한 파괴가 발생하기 전에 섬유의 국부적인 쪼개짐 또는 큰 신장이 발생하는 경향에 의해서도 직접적으로 영향을 받는다. 하이브리드 FRP 보강근의 인장 시험시 코어 FRP 보강근에 발생하는 인발력으로 인해 chinese finger 효과가 발생하여 코어 FRP 보강근에는 압축력이 전달된다.¹⁰⁾ 작용하는 인발력이 증가하게 되면 슬리브를 구성하는 브레이드 섬유는 보다 많은 인발력이 전달되게 된다. 재하되는 하중이 작은 단계에서 chinese finger 효과는 매트릭스 수지에 어느 정도 구속을 받게 된다.¹⁰⁾ 그러나 인발력이 증가하였을 때 수지의 강도는 평면 전단력에 의해서 약해지며, 이와 같은 현상은 섬유를 재배열하게 한다. 따라서 코어 FRP 보강근은 인장력과 횡축 압축력을 동시에 받게 된다. 하이브리드 FRP 보강근의 파괴는 슬리브를 구성하는 섬유의 불규칙적인 파괴, 코어를 구성하는 섬유의 일반적인 파괴 및 슬리브와 코어 FRP 보강근에 사용된 매트릭스 수지의 찢겨짐 파괴 등이 복합적으로 발생한다. 하이브리드 FRP 보강근을 구성하는 섬유

와 매트릭스 수지의 부착은 보강근의 파괴를 견딜 수 있도록 충분히 강하다. 하이브리드 FRP 보강근의 파괴는 인장과 전단이 동시에 발생하여 파괴가 발생하게 된다. 탄소섬유로 구성된 코어 FRP 보강근의 파괴는 weakest link 모델과 fiber break propagation 모델과 비슷한 형태로 결합이 발생한 약한 지점으로부터 발생하여 점차적으로 전체 보강근으로 확장되어 가고 이때 매트릭스 수지는 슬리브를 구성하는 브레이딩 섬유에 의해서 발생하는 평면 전단력에 의해 회전과 변형이 발생하게 된다. 또한 코어 FRP 보강근에는 코어 내부의 매트릭스 수지가 극심한 찢김이 발생한 것으로 보아 평면전단력 뿐만 아니라 횡축 압축력 또한 존재한다는 것을 알 수 있다. 슬리브를 구성하는 섬유는 cumulative 모델과 같이 지속적으로 파괴가 발생하면서 하중을 계속적으로 전달하는 동시에 하이브리드 FRP 보강근이 완벽한 파괴가 발생할 때까지 소성변형구간을 확보하도록 한다. 이때 아라미드섬유로 슬리브를 구성할 경우 아라미드섬유의 특성상 국부적인 단면 감소와 신장 및 섬유의 꼬개짐 등에 의하여 파괴가 발생하여 하중을 계속적으로 전달하는 역할이 강하며 유리섬유를 슬리브로 구성할 경우 유리섬유의 특성 상 섬유의 신장과 단면적의 감소 없이 발생하는 취성 파괴의 경향을 나타내어 하중의 전달력이 급격하게 감소되어 소성변형 구간의 확보가 쉽지 않은 특성을 나타낸다. 이와 같은 파괴형상은 Fig. 14~15에 나타내었다. Fig. 14는 하이브리드 FRP 보강근(A)의 파괴 형상으로 슬리브를 구성하는 아라미드섬유가 꼬인상태에서 단면적의 감소가 발생하는 상태로 파괴되는 경향을 보여주었다. 하이브리드 FRP 보강근(A)가 하중의 증감을 지속적으로 발생시키는 이유도 섬유의 결합이 크게 발생하는 부분부터 단면적 감소가 지속적으로 발생하고, 코어 FRP 보강근이 파괴되는 부분에서 단면적 감소가 발생하면서 꼬임이 커지기 때문에 이와 같은 형상이 발생했다는 것을 알 수 있다.



Fig. 14 Fracture surface of hybrid FRP re-bar(A)

코어 FRP 보강근을 구성하는 탄소섬유가 급격한 취성파괴로 인해 하중의 감소가 일차적으로 크게 난다. 이후 슬리브를 구성하는 아라미드섬유가 하중에 저항하기 때문에 아라미드섬유의 파괴형상에 지배를 받게 되는데 아라미드섬유의 파괴형상은 일정한 단면으로 파괴되지 않았다. 즉, 표면에 노출되는 섬유의 길이로 볼 때 보강근의 길이 방향으로 불규칙하게 단면감소와 섬유의 비틀림 등이 복합적으로 발생하여 점차적으로 파괴되는 경향을 보여줌으로써 하중의 증감을 지속적으로 발생시킨다. 하이브리드 FRP 보강근(A)의 결합제로 사용되는 비닐에스터수지는 혹독한 균열과 표면의 벗겨짐 등이 발생하였는데, 이는 슬리브를 구성하는 섬유가 인장과 평면 전단을 동시에 받았기 때문이다. 하이브리드 FRP 보강근(B)의 파괴형상은 슬리브를 구성하는 섬유로 아라미드섬유와 유리섬유가 동시에 취성적 특성과 연성적 특성이 동시에 나타남을 알 수 있다. 즉 비교적 취성인 유리섬유가 섬유의 기하학적 형상에 의해서 어느 정도 변형률을 가지고 파괴되면 섬유의 기하학적 형상뿐만 아니라 재료적 특성이 우수한 아라미드섬유가 단면적 감소, 신장 및 찢김의 현상을 발휘하면서 지속적으로 하중에 저항하여 파괴됨을 알 수 있다. 따라서 슬리브중 유리섬유의 파괴평면은 비교적 매끈하여 취성파괴가 발생하였다는 것을 알 수 있고, 아라미드섬유는 연성 파괴가 발생함을 알 수 있다(Fig. 15).

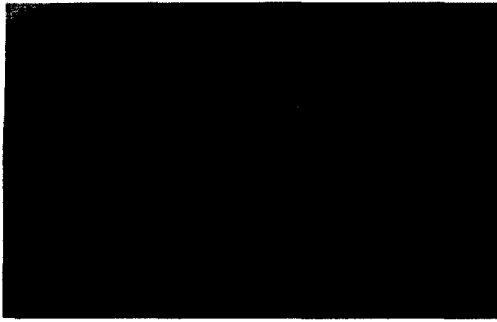


Fig. 15 Fracture surface of hybrid FRP re-bar(B)

5. 요약 및 결론

본 연구는 FRP 보강근 보강재의 단점인 취성적 성질을 개선하여, 3% 이상의 소성변형구간을 갖는 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장거동 특성 및 파괴특성을 평가하기 위한 것으로서, 연구결과는 기존의 GFRP 보강근과 비교 평가하였다. 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전단시험결과 고연성 하이브리드 제조시 변형률을 증가시키기 위하여 사용된 유리섬유, 아라미드섬유에 의한 영향은 크지 않았으나 강도 및 변형률이 모두 우수한 아라미드섬유가 유리섬유를 사용하였을 때보다는 성능 향상이 나타남을 알 수 있었다.

2. 인장강도 특성 결과 고연성 하이브리드 FRP 보강근(A)와 (B)는 목표로한 3% 이상의 소성변형률을 만족하는 결과를 보여주었다.

3. 하이브리드 FRP 보강근의 특성상 소성변형구간은 변형률을 증가시키기 위하여 사용된 아라미드섬유 및 유리섬유에 의하여 큰 영향을 받는데 아라미드섬유를 사용한 FRP 보강근이 아라미드섬유와 유리섬유를 동시에 사용하였을 때 보다 우수한 인장 거동 특성을 보여주었다. 이는 아라미드섬유가 유리섬유에 비하여 강도, 탄성계수, 변형률 특성이 모두 우수하여 코어를 구성하는 섬유로 사용된 탄소섬유의 파괴시 그 충격에 의한 저항성이 우수하기 때문이다.

4. 하이브리드 FRP 보강근의 파괴모드는 슬리브를 구성하는 섬유의 불규칙적인 파괴, 코어를 구성하는 섬유의 일반적인 파괴 및 슬리브와 코어 FRP 보강근에 사용된 매트릭스 수지의 찢겨짐 파괴 등이 복합적으로 작용하여 발생한다.

5. 슬리브를 구성하는 섬유는 지속적으로 파괴가 발생하면서 하중을 계속적으로 전달하는 동시에 하이브리드 FRP 보강근이 완벽한 파괴가 발생할 때까지 소성변형구간을 확보하도록 한다. 이때 아라미드섬유로 슬리브를 구성할 경우 아라미드섬유의 특성상 국부적인 단면감소와 신장 및 섬유의 찢겨짐 등에 의하여 파괴가 발생하여 하중을 계속적으로 전달하는 역할이 강하다. 그러나 아라미드섬유와 유리섬유를 같이 슬리브로 구성할 경우 유리섬유가 파괴면이 매끄러운 취성 파괴의 특성으로 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 특성에 영향을 미치지만 아라미드섬유가 이를 어느 정도 보완해주어 3% 이상의 변형률과 소성변형 구간을 갖는 우수한 거동을 나타낼 수 있었다.

본 연구는 농림기술개발사업에 의하여 수행된 결과의 일부이며 참여기업인 동원건설(주)에 감사 드립니다.

References

1. ACI. 2000. "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars", American Concrete Institute Committee 440.
2. ASTM D 4475. 1996. "Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By The Short Beam Method", November
3. Bakis, C. E., and Terosky, J. A. 1996. "Smart Pseudo-Ductile, Reinforcing Rods for Concrete: Manufacture and Test", Proc. 1st Int. Conf. On Composites in Infrastructures, ICCI 96, Tucson, Arizona: 95-108.

4. Hearle, J. W., Grosberg, P. and Backer, S. 1969. "*Structural mechanics of fibers, yarns and fabrics*", John-wiley-interscience, New York.
5. Humphreys, E. A. 1993. "Properties Analysis of Laminates", Engineered Materials Handbook, Vol. 1: Composites, ASTM International. 218-235
6. Jiang, C. 1998. "*Manufactureing and Process Modeling of FRP re-bars By A Combind Pultrusion/ Filament Winding Process*", M. S. Thesis, University of Missouri-Rolla. USA
7. Krishnamoorthy, P. k., Belarbi, A., Chandra-shekhara, K., and Watkins, S. 1998. "*Hybrid Composite re-bars for Smart Concrete Structure*", Proceeding of SPIE Smart Structures and Materials Conference, Vol.3043, March. 65-71
8. Nanni, A. 1993. "*Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Properties and Applications*", Elsevier Pub. Co. Inc., NY: 167-188.
9. Rosen, W. B. 1965. "Mechanics of Composites Strengthening", Fibre Composite Materials, ASTM, Metals Park, Ohio
10. Smith, B. W. 1993) "Fractography for Continuous Fiber Composites", Engineered Materials Handbook, Vol. 1: Composites, ASTM International. 787-793
11. Tamuzs V., and Tepfers, R. 1995. "*Ductility of Non-Metallic Hybrid Fiber Composite Reinforcement for Concrete*", Proceeding of the Second International RILEM Symposium, Ghent, Belgium, August. 18-25
12. Zweben, C., Rosen, B. W. 1970. "A Statistical Theory of Material Strength with Application to Composite Materials", Journal of Mechanics Physics Solids, Vol. 18 189-206