

하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성

Mechanical Properties of Hybrid FRP Rebar

박찬기* · 원종필**

Park, Chan-Gi · Won, Jong-Pil

Abstract

Over the last decade fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement consisting of glass, carbon, or aramid fibers embedded in a resin such as vinyl ester, epoxy, or polyester has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. But reinforcing rebar for concrete made of FRP rebar has linear elastic behavior up to tensile failure. For safety a certain plastic strain and an elongation greater than 3% at maximum load is usually required for steel reinforcement in concrete structures. The same should be required for FRP rebar. Thus, the main object of this study was to develop new type of hybrid FRP rebar. Also, this study was evaluated to the mechanical properties of Hybrid FRP rebar. The Manufacture of the hybrid FRP rebar was achieved by pultrusion, and braiding and filament winding techniques. Tensile and interlaminar shear test results of Hybrid FRP rebar can provide its excellent tensile strength-strain behavior and interlaminar stress-strain behavior.

Keywords : Aramid fiber, Carbon fiber, Glass fiber, Hybrid FRP rebar, Tensile behavior, Interlaminar shear stress

I. 서론

현재 사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물 교량구조물 등과 같이 수분에

직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서의 철근의 부식으로 인한 문제는 유지관리가 우수한 새로운 보강재료의 개발을 요구하고 있다.^{9),10),11)} 현재 수분과 접촉해 있는 콘크리트의 내구성 저하의 대부분은 콘크리트 내의 철근의 부식으로 인한 것이며 철근의 부식은 콘크리트 구조물 재료에 포함된 염화물과 외부환경조건, 높은 습도 및 온도 그리고 철근 콘크리트 구조물이 수분과 접촉하는 위치하였을 때 공기 등이 주원인이 된다.^{4),5),6),7)} 이러한 관점에서 대부분의 구조물이 수분과 접해 있는 수리 구조물 특히 농업용수 등의 공급을 목적으로

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

로 건설된 각종 농업 수리 콘크리트 구조물의 내구성 성능 저하의 주요원인은 철근 부식으로 인한 성능 저하에 의한 것이라 할 수 있다. 콘크리트내의 철근 부식에 대한 메커니즘은 1920년대 이후에 많은 조사가 이루어졌으며 현재까지 부식을 억제하기 위한 여러 가지 연구결과가 이루어져 왔다. 그러나 부식을 제어하기 위한 여러 가지 방법 즉 콘크리트 조성을 치밀하게 하는 방법과 콘크리트 덮개의 증가, 폴리머 콘크리트의 사용 및 에폭시로 도막 처리한 철근을 사용하는 방법 등을 사용했지만 장기 내구성 측면에서는 큰 성과를 거두지 못하였다.^{4),5),6),7)} 이러한 이유로 철근을 대신할 다른 대체재료의 요구는 점점 더 증가하게 되었으며 그 결과로 FRP 리바(Fiber reinforced polymer rebar)가 개발되었다. FRP 리바는 강도가 높으며 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.^{4),5),6),7)} 그러나 불행하게도 현재 개발된 FRP 리바는 보강철근이 가지고 있는 휨보강을 위한 인성을 가지고 있지 못하며 섬유 방향 배열에 따른 섬유와 섬유사이의 계면 분리의 발생으로 전단에 취약한 단점을 가지고 있다.^{4),5),6),7)} Fig. 1에서 볼 수 있듯이 FRP 리바는 선탄성적인 응력-변형률 거동을 가지고 있는데 반해 보강철근은 초기항복점까지는 선

탄성적인 거동을 보여주지만 이후 큰 소성변형과 변형경화거동을 보여준다.

보강철근의 항복 후에 발생하는 소성변형은 휨부재의 파괴가 발생하기 전에 지속적으로 하중을 전달함과 동시에 큰 처짐을 발생시킨다. 콘크리트 구조물에서 보강철근이 갖는 소성변형 구간이 없다면 작은 파괴하중의 증가에도 어떠한 사전경고도 없이 급격한 파괴 즉 취성파괴를 발생시킨다. 또한 지진 하중, 풍하중, 차량하중 등 동적하중을 받는 구조물의 설계에서 소성변형 메커니즘은 꼭 필요한 것으로 재료의 변형에 의한 에너지의 발산과 반복하중에 의한 구조물에 부과된 에너지의 많은 양을 흡수하는데 사용된다.³⁾ 따라서 현재 개발된 FRP 재료는 파괴 전에 많은 양의 소성변형이 필요한 콘크리트 보강재료로서는 적당하지 않다.^{4),5),6),7)} 따라서 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 FRP 리바의 문제점인 취성적 성질을 개선하여 콘크리트의 휨보강에 필요한 인성을 확보하는 한편 섬유의 3방향 배열을 통한 전단에 대한 저항성을 증가시킬 수 있는 하이브리드 FRP 리바를 개발하며 그에 따른 역학적 특성을 평가해 보고자 한다.

II. 하이브리드 FRP 리바의 생산 시스템 개발

1. 하이브리드 FRP 생산시스템 개발

FRP 리바의 생산에 일반적으로 사용되는 방법은 성형압출(pultrusion)과 필라멘트 와인딩(filament winding), 브레이딩(braiding)과정 등이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 세가지 생산시스템의 장점을 이용하여 소성변형 및 전단강도가 우수한 하이브리드 FRP 리바 생산시스템인 압출/브레이딩/필라멘트 와인딩 시스템을 개발하였다. 이와 같은 생산방법을 자세히 설명하면 다음과 같다.

가. 압출성형(Pultrusion)³⁾

성형압출과정은 건설재료로 사용하기 위한 FRP 리바를 제조하는데 가장 널리 이용되는 방법으로

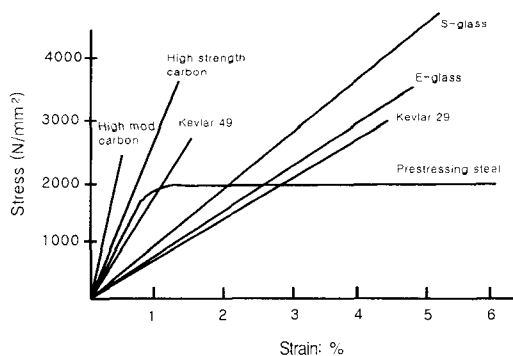


Fig. 1 Stress-strain characteristics of current FRP rebar's compared to steel^{4),5),6),7)}

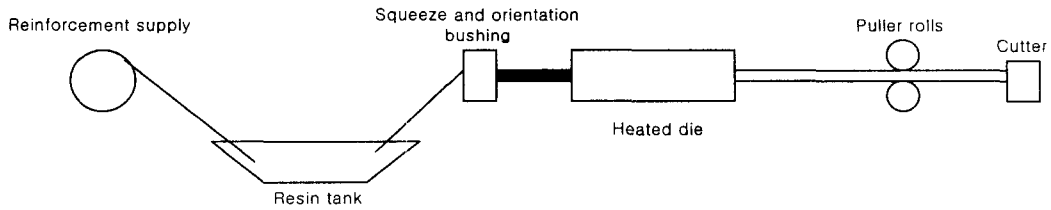


Fig. 2 The pultrusion process^{3),11)}

자동공정에 의하여 FRP가 생산된다. Fig. 2는 가장 널리 사용되는 성형압출 과정의 모양을 보여준다. 생산공정은 첫 번째로 섬유꾸러미에서 섬유가 자동적으로 풀려 풀리머 탱크로 이동한다. 이때 섬유는 한가지 종류일 수도 있고 하이브리드 효과를 이루기 위하여 여러 가지 섬유꾸러미를 설치할 수도 있다. 풀리머탱크에서 풀리머를 함침한 섬유는 초기에 일정한 모양을 형성시키는 틀을 통과하여 가열판으로 이동한다. 가열판에서는 열경화성 폴리머가 사용되었을 경우 양생을 촉진시키며 섬유의 함량이 많을 때는 폴리머의 침투를 촉진시켜 FRP 리바의 모양의 형성을 촉진시킨다. 압출기는 일정한 형상을 가진 FRP 리바의 표면 형상을 주는 역할과 FRP를 압착하여 밀어내는 역할을 한다. 마지막으로 압출기를 통과한 FRP 리바를 일정한 크기로 잘라낸다. 압출성형방법에 의해서 가장 많이 생산되는 재료는 유리섬유와 폴리에스터수지를 사용

한 GFRP 리바이다. 또한 아라미드와 탄소섬유도 에폭시, 비닐에스터 등 열경화성수지를 사용하여 압출과정을 통하여 다양한 단면적과 형상을 가진 AFRP 리바와 CFRP 리바를 생산할 수 있다. 압출 성형과정은 FRP 리바를 생산하는 매우 빠른 공정이며 섬유의 체적비가 높은 리바를 제조할 때 효과적인 방법이다.

나. 필라멘트 와인딩(filament winding)공정^{3),11)}

필라멘트와인딩 공정은 간단하면서도 다목적으로 사용될 수 있는 방법이다. 즉 FRP 리바의 모양과 크기를 다양하게 제조할 수 있고 서로 다른 폴리머와 섬유를 사용할 수 있으며 가장 우수한 역학적 특성을 보여줄 수 있게 섬유의 방향도 선택할 수 있다. 적절한 필라멘트와인딩의 설계를 위해서는 복합체의 설계, 폴리머의 특성 및 생산과정에 대한 상당한 수준의 공학적 지식 및 기술이 필요하다.

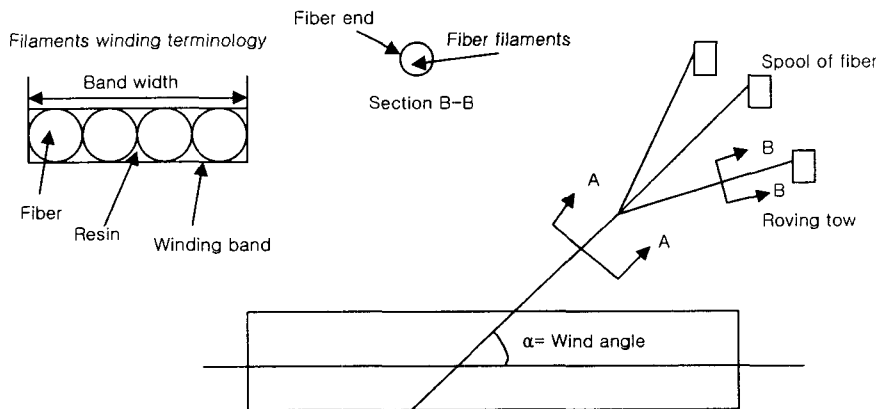


Fig. 3 The filament winding process^{3),11)}

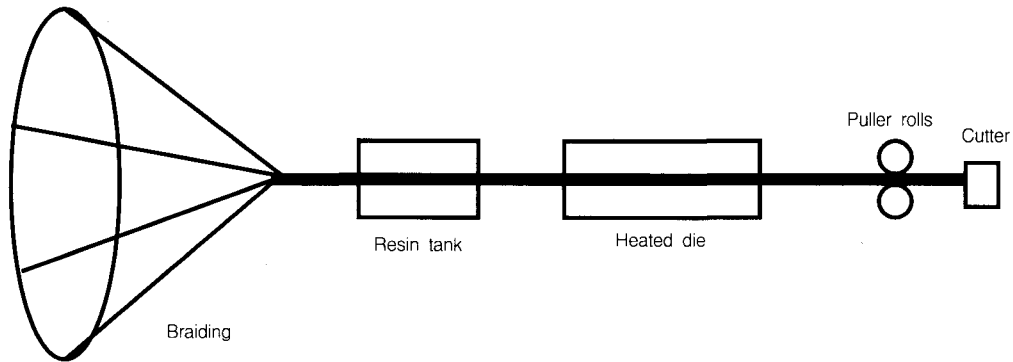


Fig. 4 The schematic of Braiding process^{3),11)}

필라멘트와인딩 과정의 모양은 Fig. 3과 같다. 생산공정은 실린더 모양의 축이 다양한 속도로 회전하면서 섬유가 실린더 모양의 회전축을 감아 외부형상을 만든다. 필라멘트와인딩 공정은 압출공정에 비하여 가격이 비싸지만 자동화를 통한 생산량을 증대시켜 이를 어느 정도는 해결할 수 있다. 필라멘트 와인딩 공정은 대부분의 섬유에 대해 적용이 가능하고 다양한 와인딩각도를 선택할 수 있어 콘크리트의 보강재료용으로 만들었을 때 부착특성을 향상시킬 수 있다.

다. 브레이딩(braiding) 과정

브레이딩과정은 FRP 리바를 제조할 때 2차원 및 3차원 제직을 통하여 전단에 대한 저항성과 강도를 증가시킬 목적으로 개발한 시스템이다. 이 방

법은 브레이딩, 폴리머함침, 양생, 압출, 절단의 5 단계의 생산방법으로 구성된다. 브레이딩방법은 FRP 리바를 생산하기 쉽고 다양한 섬유를 사용함으로써 강도 및 인성확보에 유리한 방법이며 이 방법의 일반적인 생산과정은 Fig 4와 같다.

라. 압출(pultrusion)/브레이딩(braiding)/필라멘트 와인딩(filament winding) 시스템

본 연구에서의 하이브리드 FRP 리바 생산과정은 압출과정과 브레이딩, 압출과정, 필라멘트 와인딩 과정의 장점을 결합하여 개발하였다. 이와 같은 공법은 다양한 종류의 보강섬유를 조합할 수 있으며 표면 및 내부형상을 변화를 통한 하이브리드 FRP 리바를 제작할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바는 탄성계수 및 변형률 등과 같은 역학적 특성을 최적

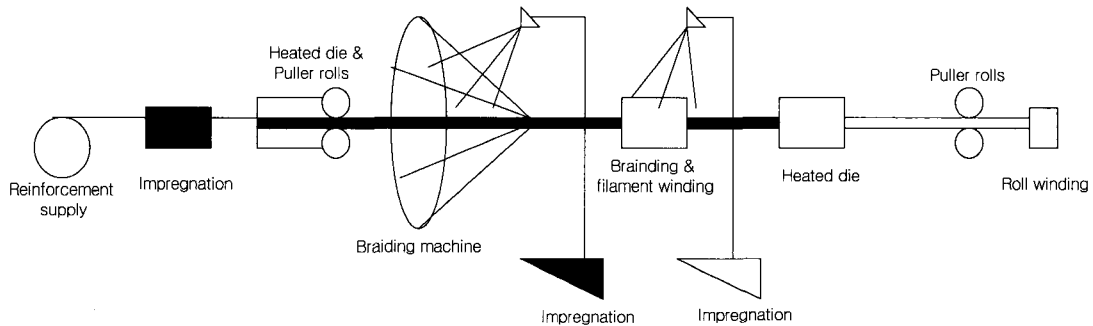


Fig. 5 Manufacturing systems of hybrid FRP rebar

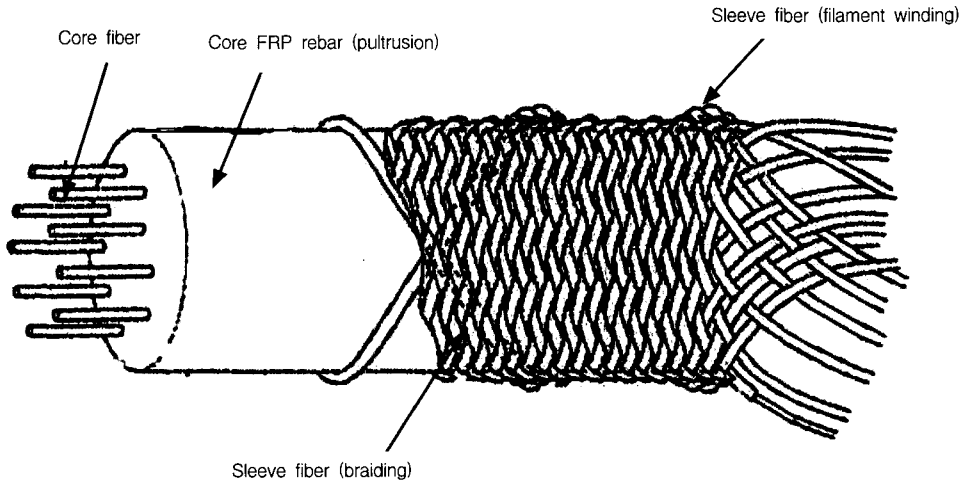


Fig. 6 Schematic of hybrid FRP rebar

으로 발휘 할 수 있는 제조시스템으로 Fig. 5는 개발된 제조 시스템의 개념도를 나타낸다.

본 제조시스템을 자세히 설명하면 압출공정의 경우 하이브리드 FRP 리바의 코어 FRP 리바 부분을 생산하는 단계로 이 과정은 슬리브를 구성하도록 하는 공정인 브레이딩 과정시 섬유가 매우 조밀하게 제작되기 때문에 코어로 사용되는 탄소섬유의 폴리머 매트릭스의 함침이 어렵기 때문에 이를 해결하기 위하여 구성하였다. 브레이딩 과정은 하이브리드 FRP 리바의 변형률을 증가시키기 위한 슬리브를 제작하는 과정이며 마지막으로 필라멘트와 인딩 과정은 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시키기 위하여 FRP 리바의 표면에 굴곡을 주는 공정이다. 이와 같은 공정으로 생산된 하이브리드 FRP 리바의 구조적인 개념도는 Fig. 6과 같으며 생산된 하이브리드 FRP 리바의 형상은 Fig. 7과 같다.

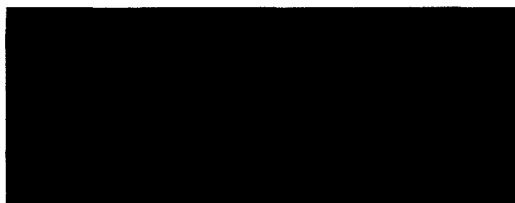


Fig. 7 Photo of hybrid FRP rebar

III. 실험계획 및 방법

1. FRP 리바

인장시험을 통한 하이브리드 FRP 리바의 인장강도 및 응력-변형률 거동, 탄성계수를 평가하기 위하여 본 연구에서 개발한 FRP 리바 제조시스템으로 생산한 하이브리드 FRP 리바, GFRP 및 CFRP 리바에 대한 인장특성 시험을 실시하였으며 시험결과를 비교·분석하기 위하여 해외에서 상용화되어 있는 AFRP 리바(일본 Tejin사의 Technora), GFRP 리바(미국 Hughes Brothers사의 Aslan 리바), CFRP 리바(캐나다 Pultrall사의 ISO Rod)에 대한 인장특성 시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 FRP 리바의 형상은 Fig. 8과 같다.

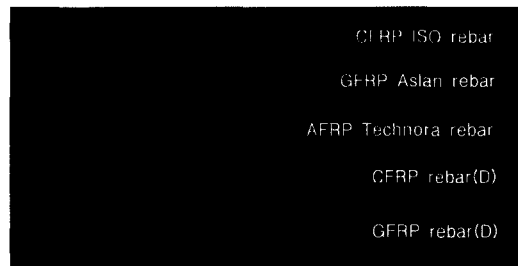


Fig. 8 Photo of FRP rebar

2. 실험방법

가. 인장특성

FRP 리바가 매우 취성적인 재료이며 보강철근과 비교하여 인장강도가 매우 높은 특성과 횡방향으로 매우 약한 압축, 인장 및 전단강도를 갖는 특성 때문에 정확한 인장성능을 평가하기 위해서는 효과적인 FRP 리바의 정착방법을 사용하는 것이 매우 중요하다. 성형압출된 FRP 리바의 횡방향의 역학적 특성은 대략 길이방향의 역학적 특성에 1/10 정도이다. 또한 정착장치내의 응력집중은 정착부분 내에서 FRP 리바의 국부적인 파괴를 발생시킨다. 따라서 FRP 리바의 인장특성 시험은 이와 같은 모든 사항을 고려하여 정착장치를 적용하여야 한다. 본 연구에서는 ACI 440K(1999)의 FRP 리바 및 슈트의 인장시험방법에 따라 시험을 실시하였다. ACI 440K에서는 리바의 길이 및 정착길이에 대한 기준을 제시하고 있는데 시험길이는 리바 직경의 40배 이상으로 규정하고 있으며 최소 시험길이 역시 100 mm 이상으로 규정하고 있다. 또한 정착길

이(L_g)는 식 1에 따라 결정하며 최소 정착길이는 250 mm 이상으로 규정하였다.^{1),8)}

$$L_g = \frac{f_u A}{350} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, f_u = 극한인장강도, MPa

A = 공시체의 단면적, mm²

한편 ACI 440K는 FRP 리바를 정착시키기 위해서 사용되는 강관의 내부직경은 리바의 공칭직경보다 적어도 10~14 mm 정도 크게 하여야 한다고 규정하고 있다. 이와 같은 규정에 따라 결정된 FRP 리바의 인장시험공시체의 치수는 Table 1과 같으며 준비된 공시체의 구조는 Fig. 9와 같다.

인장 시험용 FRP 리바 공시체의 양생은 7일간 23 ± 2℃, 50 % R.H.의 항온항습실에서 기건양생을 실시하였다. 시험은 25 ton 용량의 변위제어용 UTM을 사용하였으며 시험속도는 5 mm/min의 속도로 하였다.

Table 1 Length and diameter specifications

Type of rebar	Rebar size (mm)	Gage length (mm)	Anchor length (mm)	Total length (mm)	Anchor diameter (mm)
Carbon(ISO rod)	9	400	300	1000	25.4
Carbon(Developed)	6	300	300	900	25.4
Glass(Aslan)	9	400	300	1000	25.4
Glass(Developed)	6	300	250	800	25.4
Armaid(Technora)	7.4	300	300	900	25.4
Hybrid(Developed)	6	300	300	900	25.4

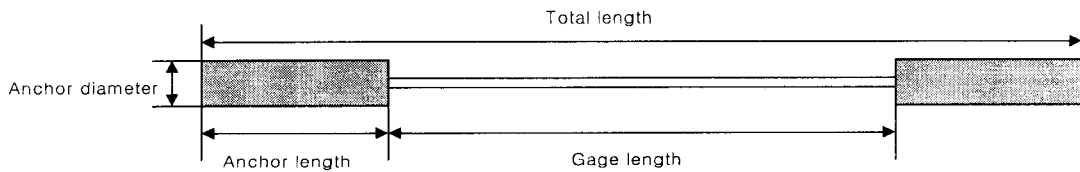


Fig. 9 Schematic of tensile test specimen

나. 전단특성

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⁾ ASTM D 4475의 방법에 의한 실험결과는 설계과정에 직접적으로 사용할 수 없으나 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바와 기존 상용화된 FRP 리바의 전단특성을 비교하기 위하여 사용하였다. ASTM D 4475의 SBT시험은 허용용량 5 ton의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 사용하여 변위의 속도를 1.3 mm/min로 하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 FRP 리바 시험공시체와 실험장치의 대략적인 설명은 Fig. 10과 같다.

수평전단파괴에 영향을 미칠 수 있는 휨효과를 제거하기 위하여 시험공시체의 길이는 5.4 cm(5D)로 하였으며 시험공시체는 온도 23±2 °C와 상대습도 50±5%의 항온항습실에서 24시간동안 동일한 내·외적인 환경조건을 만든 후 시험을 실시하였다. SBT 시험후 ISS(Interlaminar Shear Stress)는 다음과 같은 식 2를 사용하여 계산하였다.

$$S = 0.849 \frac{P}{D^2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S : 내부결합 전단응력(Interlaminar shear stress: kgf/cm²)

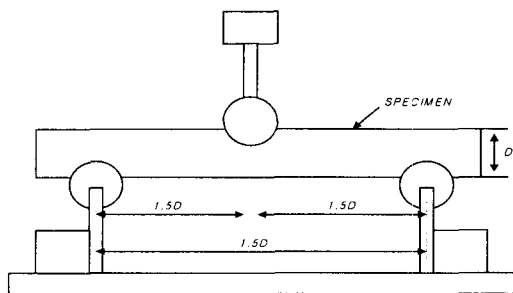


Fig. 10 Span configuration for 3D span

P : 파괴하중(kgf)

D : 리바의 직경(cm)

III. 실험결과 및 고찰

1. 인장특성

가. CFRP, GFRP 및 AFRP 리바

CFRP 리바는 파괴되기 전까지 선형적인 거동을 보여 주었으며 인장강도 특성 결과는 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다. CFRP ISO rod의 경우 인장강도가 19,263 kgf/cm²으로 가장 큰 강도를 보여주었으며 변형률은 1.66%으로 나타났다. 또한 본 연구에서 개발한 CFRP 리바의 경우 인장강도는 18,400 kgf/cm²으로 나타났다. 또한 변형률은 1.71%를 나타냈다. GFRP 리바의 경우 파괴되기 전까지 선형적인 거동을 한다. 즉 GFRP의 최고강도에서 급격한 취성파괴가 발생하는 경향을 보여주었다. GFRP 리바의 강도결과를 살펴보면 Aslan GFRP 리바의 경우 인장강도가 8,650 kgf/cm²으로 나타났으며 변형률은 2.26%임을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 GFRP 리바의 경우 인장강도는 10,570 kgf/cm²으로 높은 강도를 보여주었으며 변형률은 3.08%으로 나타났다. AFRP 리바의 실험결과는 CFRP 및 GFRP 리바와 마찬가지로 파괴가 발생할 때까지 선형적인 거동을 하는 취성적인 거동을 보여주었으며 Technora 리바의 인장특성을 살펴보면 인장강도는 18,580 kgf/cm²이며 변형률은 3.46%이었다. 실험결과를 CFRP 및 GFRP 리바와 비교하면 CFRP 리바 보다는 인장특성이 감소하나 GFRP 리바와 비교하면 우수한 결과를 보여주었다.

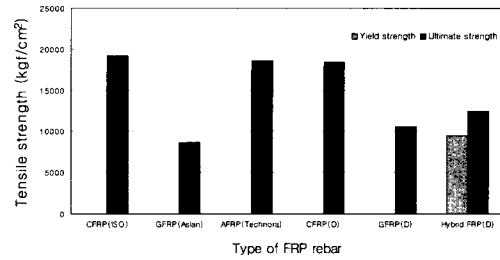
나. 하이브리드 FRP 리바

본 연구에서 개발된 하이브리드 FRP 리바의 인장특성은 위에서 설명한 CFRP, GFRP, AFRP 리

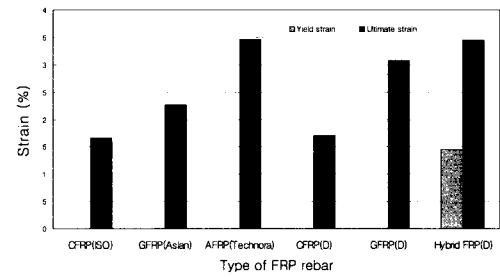
바와 전혀 다른 거동을 보여주었다 (Fig. 11). 하이브리드 FRP 리바는 변형률이 작은 섬유가 파괴된 후 변형률이 큰 섬유가 하중에 저항하기 때문에 변형률이 큰 섬유가 파괴된 후 변형률이 작은 섬유가 파괴될 때까지 소성변형구간을 발생시켰다. 하이브리드 FRP 리바의 항복강도는 9466 kgf/cm²이며 항복변형률은 1.45%, 극한강도는 12,434 kgf/cm²이며 극한변형률은 3.45%로 3%이상의 높은 소성변형률을 보여주었다 (Fig. 12).

2. 전단실험결과

FRP 리바의 횡방향 특성은 FRP 리바의 섬유가 길이방향으로 일정하게 배열됨으로써 매트릭스수지에 영향을 받는다. 따라서 길이방향에 비하여 횡방향 강도는 매우 약한 특성을 가지고 있다. FRP 리바가 횡방향으로 힘을 받을 때 대부분의 파괴는 내부계면의 분리에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 하이브리드 FRP 리바의 제조 과정에서 1방향 배열이 아닌 3차원 배열의 제조 공법을 적용하여 하이브리드 FRP 리바를 생



(a) Tensile strength



(b) Strain

Fig. 12 Tensile properties of FRP rebar: (a) tensile strength, (b) strain

산하였으며 생산된 하이브리드 FRP 리바의 전단특성을 평가하였다.

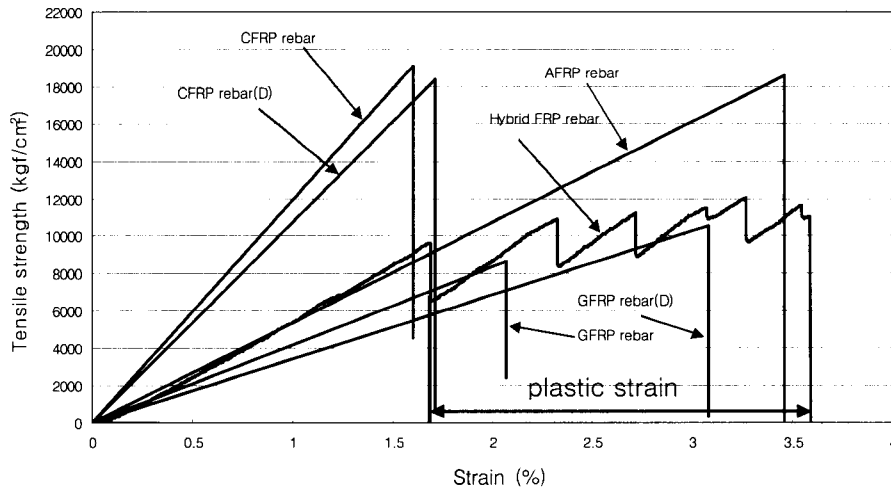


Fig. 11 Tensile strength-strain behavior of FRP rebar

가. CFRP 및 GFRP 리바

ISO CFRP 및 Aslan GFRP 리바의 SBT 시험 결과는 리바의 수직 및 횡방향으로 균열이 발생하면서 계면의 분리에 의한 파괴가 발생하였다. 계면의 분리에 의한 파괴는 수직 및 횡방향 균열이 발생하여 파괴되는 경향을 보여주었다. 본 연구에서 개발한 CFRP 및 GFRP 리바는 ISO CFRP 및 Aslan GFRP 리바와 약간 다른 거동을 보여주었는데 그 이유는 본 연구에서는 CFRP 및 GFRP 리바의 표면에 전단강도를 증가시키기 위하여 3차원 제직을 실시하였기 때문에 전단파괴후 급격하게 파괴되는 것이 아니라 표면에 3차원 제직의 영향으로 일정한 변형률이 증가한 후 파괴되는 경향을 보여주었기 때문이다. 실험결과는 Fig. 13과 Fig. 14와 같다.

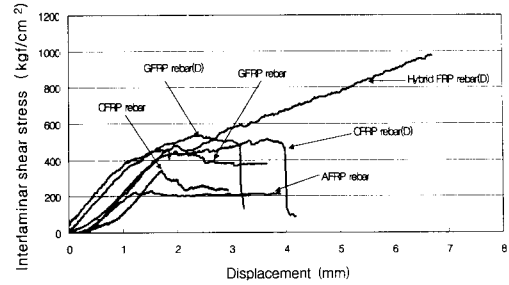


Fig. 13 Load-displacement curve of FRP rebar

나. AFRP 리바 (Technora rebar)

Technora AFRP 리바의 SBT 시험결과는 리바의 수직 및 횡방향으로 균열이 발생에 의한 리바의 계면의 분리에 의한 파괴보다는 리바의 지압에 의한 파괴가 주로 발생하였다. 즉 지압 파괴는 하중에 의한 집중응력이 작용하여 리바가 파괴된 후 아라미드 섬유가 지속적으로 하중을 유지하였다. Technora AFRP 리바의 전단강도 특성은 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다.

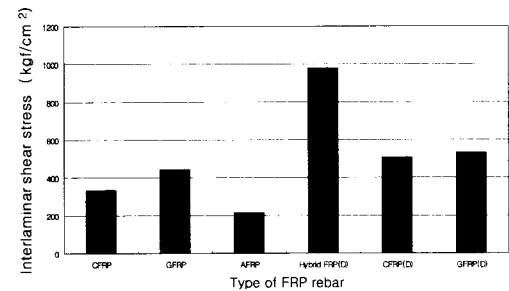


Fig. 14 Result of interlaminar shear stress

다. 하이브리드 FRP 리바

하이브리드 FRP 리바는 변형률이 작은 섬유의 초기 파괴후 변형률이 큰 섬유가 응력에 저항하며 지속적으로 응력이 증가하다가 내부계면의 파괴 없이 지압파괴에 의하여 최종적으로 파괴가 발생하는 경향을 보여주었다. 하이브리드 FRP 리바의 전단강도 특성은 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다.

생하기 전까지 선형적인 거동을 하는 취성적 성질을 가지고 있다. 이와 같은 취성적 성질은 콘크리트 구조물의 보강재료로 사용되어 급격한 파괴에 의한 안정성에 문제를 가지고 있어 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 상용 FRP 리바의 취성적 성질을 개선하여 3% 이상의 소성변형구간을 갖게 하여 콘크리트 구조물에 안정성을 확보하고 내진설계 등 다양한 구조물에 확대 적용하기 위하여 새로운 하이브리드 FRP 리바를 개발하여 역학적 특성을 평가하였으며 그결과를 요약하면 다음과 같다.

IV. 결 론

현재 외국에서 상용화된 FRP 리바는 파괴가 발

1. 본 연구에서는 기존 FRP 리바의 취성적 성질을 개선할 소성변형구간을 갖는 하이브리드 FRP 리바 생산시스템을 개발하였다.
2. CFRP, GFRP, AFRP 리바 및 본 연구에서 개발한 CFRP, GFRP 리바는 파괴전까지 선형적인 거동을 하는 취성적 성질을 가지고 있었다.
3. 개발한 하이브리드 FRP 리바는 3% 이상의

소성변형 구간을 가지고 있어 지진하중, 풍하중, 차량하중 등 동적하중을 받는 콘크리트 구조물의 설계에 사용되어 안전성 및 신뢰성 확보에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

5. FRP 리바의 전단강도 실험결과 CFRP, GFRP 리바는 내부 계면의 분리에 의한 수직균열 수평균열이 발생하여 파괴되는 경향을 보여주었다. 이와 같은 결과는 리바의 생산방법이 일방향으로서 섬유를 배열하는 특성에 기인하는 것이다.

6. AFRP 리바의 전단특성은 하중 집중에 의한 지압파괴가 발생한 후 응력이 일정하게 유지되다가 파괴되거나 또는 지압파괴 후 약간의 응력의 증가한 후에 파괴되는 두가지 경향을 보여주었다. 이와 같은 결과는 아라미드 섬유의 파괴가 넥킹(necking)현상에 의해서 주로 발생하기 때문에 부가적으로 아라미드 섬유가 하중에 저항하기 때문이다.

7. 하이브리드 FRP 리바의 전단 특성은 재료 자체의 파괴변형률이 작은 섬유가 파괴변형률에 도달하여 파괴된 후 재료자체의 파괴변형률이 큰 섬유가 섬유의 파괴가 발생할 때 까지 지속적으로 응력에 저항하기 때문에 계속해서 응력이 증가하는 경향을 보여주었다. 이와 같은 결과는 리바의 제조방법이 3차원으로 제작되어 내부계면에 의한 분리를 막기 때문에 전단파괴는 지압응력에 의한 파괴가 발생하도록 했기 때문에 변형률이 큰 섬유가 지속적으로 하중에 저항 할 수 있기 때문이다.

8. 하이브리드 FRP 리바의 전단강도는 CFRP, GFRP, AFRP 리바 보다 매우 높은 우수한 결과를 보여주었다. 따라서 기존 상용 FRP 리바의 전단에 대한 취약한 단점을 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구는 농림기술개발사업에 의하여 수행된 연구결과의 일부임.

References

1. ACI. (2000). *Guide for the Design and Con-*

struction 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., Nanni, A., 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. Benmokrane, B., and Masmoudi, R. (1996). *FRP C-Bar as Reinforcing Rod for Concrete Structures*. Proc. Of Advanced Composite Materials in Bridges and Structure 2nd International Conference, Ed. M. M. El-Badry, Montreal, Quebec, Canada, August

5. Castro, P. F., and Carino, N. J. (1998). *Tensile and Non-Destructive Testing of FRP bars*. J. Comp. Constr., Vol. 2, No. 1, February: 17-27

6. EN ISO/F-DIS 527-4. (1996 A). *Plastics - Determination of tensile properties. Part 4-Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*.

7. EN ISO/F-DIS 527-5 (1996 B). *Plastics - Determination of tensile properties. Part 5 -Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*.

8. Erki, M. A., and Ritzkalla, S. H. (1993). *Anchorage for FRP Reinforcement*. Concrete Int., Vol. 15, No. 6: 54-59.

9. Faza, S., and Ganga Rao, H. (1993). *Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete , Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Properties and Applications*, A. Nanni Ed., Elsevier Pub. Co. Inc., NY: 167-188.

10. Ferry, J. D. (1961). *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

11. A. Nanni (1993). *Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Properties and Applications*. Elsevier Pub. Co. Inc., NY: 167-188.