

GFRP 보강근의 성능 및 제작 효율화 방안

Enhancements in Performance and Manufacturing Efficiencies of GFRP Rebar

유 영 준¹⁾ 김 장 호^{2)*} 박 영 환³⁾ 박 지 선⁴⁾
You, Young Jun Kim, Jang Ho Park, Young Hwan Park, Ji Sun

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) reinforcing rebar with non-corrosive property is suggested as an alternative replacement to steel reinforcing rebar due to its enhanced durability and non-corrosive characteristics. Currently, a limited number of glass fiber reinforced polymer rebar (GFRP) are sold commercially due to their high cost, relatively low performances, and brittle failure characteristics. Therefore, the performance enhancements and cost reduction of GFRP rebar are needed to increase its applications in construction fields. The intent of this study is to develop high performance GFRP rebar by improving its tensile and shear properties. Also, in order to reduce manufacturing costs, factors such as material composition and manufacturing process were evaluated to improve manufacturing efficiency. Finally a GFRP rebar with enhanced material properties and less expensive than the GFRP rebar currently sold in the market was manufactured and evaluated for its application possibility in construction fields.

Keywords : Fiber reinforced polymer, GFRP, Rebar, Braidedtrusion, Tensile strength, Bond strength

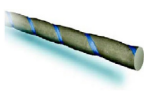
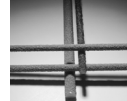
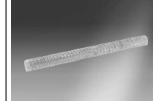
1. 서론

섬유강화폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP) 복합체 보강근은 철근-콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조물의 철근 부식문제를 해결할 수 있는 대안으로 부상하여 1960년대부터 FRP를 이용하여 철근 대체재로 활용하기 위한 노력이 시도되어 현재 다양한 형태의 FRP 보강근이 개발되어 상용화되었다(Table 1 참조).

그러나 현재까지도 FRP는 건설 구조물에 소극적으로 적용되고 있으며 주부재로 적용된 사례는 많지 않다. 높은 비강도, 뛰어난 내부식성, 비자기성 등 많은 장점을 가졌음에도 FRP가 건설 부재로써 널리 사용되고 있지 못한 원인으로서는 FRP가 강재에 비해 고가인 점과 소성거동을 보이는 강재와는 달리 FRP는 취성적으로 파괴되고 탄성계수가 1/4 정도(유리섬유의 경우)로 낮은 재료특성 등을 들 수 있다.

취성과 탄성계수가 낮은 재료특성은 보다 높은 인장성능을 가진 섬유를 혼합함으로써 개선할 수 있다. Jones and DiBenedetto (1994)는 탄소/탄소, 유리/유리, 아라

Table 1 Commercially available GFRP rebar (ISIS CANADA, 2001; www.concrete.org; Weber, 2005)

Product	ASLAN 100	V-ROD	ComBAR
Glass type	E	E	E-CR
Fraction	Vol.	60.3 %	75%
	Wt.	≥70%	87%
Resin	vinyl ester	vinyl ester	vinyl ester hybrid
Tensile strength (MPa)	690	708	1,365
Elastic modulus (GPa)	40.8	46.3	67.7
Shape			

Vol. : volume, Wt.: weight; diameter ≈ 12.7 mm

미드/탄소, 유리/탄소 섬유로 구성된 혼합 복합체에 대한 실험을 수행하여 신장률이 작은 섬유가 적은 양으로 잘 분포되어 있는 경우에 의사연성(pseudo-ductile) 거동

1) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원
2) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수, 교신저자
3) 정회원, 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구원
4) 정회원, 한국건설기술연구원 미래건축연구실 전임연구원

* Corresponding author : jhkim@yonsei.ac.kr 02-2123-5802

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 2월 29일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 확보할 수 있다고 하였다. 그러나 이러한 경우 제품 단가가 상승하게 되는 문제가 있다 (서대원 등, 2008; 최운철 등 2011; Cui and Tao, 2009).

또한 FRP 보강근을 철근 대체재로 활용하여 콘크리트 구조물을 건설할 경우, 구조물이 다양한 환경에 장시간 노출되면 보강근의 인장강도가 저하될 수 있기 때문에 ACI 440.1R-06 (2006)에서는 환경감소계수(외기에 노출된 콘크리트에 사용되는 유리섬유복합체 보강근인 경우 0.7)를 고려한 인장강도를 설계값으로 사용할 것을 권장하고 있다. 이와 더불어 FRP 보강근의 피로와 반복하중에 의한 파괴나 지속하중에 의한 크리프(creep) 파괴를 방지하기 위해 FRP 보강근이 받는 응력의 수준을 강화섬유 종류에 따라 제조자가 보증하는 인장강도(guaranteed tensile strength)의 20%~55% 정도로 규정하고 있기 때문에 장기거동에 대한 영향을 모두 고려할 경우 설계에 사용되는 FRP 보강근의 설계 인장강도는 보증 인장강도의 14%~16% 정도로 낮아지게 된다 (Nkurunziza et al., 2005). 이러한 경우 보증 인장강도가 700 MPa 정도인 유리로 제작된 섬유복합체(Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 보강근의 설계 인장강도는 콘크리트 휨부재에 일반적으로 사용되는 철근의 항복강도 값보다도 작게 되어 FRP의 장점 중 하나인 고강도 특성을 충분히 활용할 수 없다. 이와 같은 이유로 GFRP 보강근을 콘크리트 보강재로 활용하기 위해서는 초기 재료 특성인 인장강도의 수준을 높일 필요가 있다.

본 연구는 콘크리트 구조물의 보강재로 사용할 수 있는 GFRP 보강근의 고성능화 및 성능 효율화에 관한 것이다. 구체적으로는 주어진 재료와 조건 하에서 보강근 성능에 영향을 미치는 인자들의 효율성을 향상시킴으로써 GFRP 보강근이 높은 인장성능을 갖도록 하는 것이다. 이를 위해 GFRP 보강근을 구성하는 재료와 이를 제작하는 방법 등 보강근의 인장성능에 영향을 미치는 인자들에 대해 분석을 수행하여 개선 방안을 제안하였으며, 다양한 변수에 대한 인장시험을 통하여 그 성능을 비교·분석함으로써 개선 방안의 적절성을 검증하였다.

2. GFRP 보강근의 인장성능 고효율화 방안 연구

2.1 인장성능에 영향을 미치는 인자 - 구성 재료

2.1.1 섬유함유율

FRP 보강근은 유리, 탄소, 아라미드와 같은 강화섬유

로 제작되기 때문에 강화섬유의 인장강도는 RC 구조물 설계에 있어서 상당히 중요한 요소이며, 보통 45~70%의 섬유부피율을 가진다 (Micelli and Nanni, 2003).

섬유복합체의 축방향 평균 인장강도는 식 (1)과 같이 '혼합법칙'으로 구할 수 있다 (Daniel and Ishai, 1994).

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (1 a)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1 b)$$

여기서, σ_1 , σ_f , σ_m 는 각각 복합체, 섬유, 수지의 평균 축방향 인장강도이고, V_f , V_m 는 각각 섬유와 수지의 부피율이며, E_f , E_m 는 각각 섬유와 수지의 축방향 탄성계수이다.

복합체 단면 내에 공극이 없다고 가정하면 $V_f + V_m = 1$ 이며, 혼합법칙을 이용하여 GFRP 보강근의 인장강도를 계산할 경우 수지의 인장강도는 유리강화섬유에 비해 상당히 작기 때문에 종종 무시된다. 따라서 GFRP 보강근의 인장성능을 향상시키기 위해서는 기본적으로 정해진 단면 직경을 유지하면서 보강근 제작에 사용되는 섬유의 양을 늘려야 한다.

2.1.2 수지

수지는 섬유복합체의 제조과정 뿐 만 아니라 최종 제품의 기계적 특성에 상당한 영향을 미치기 때문에 적절한 수지를 선택하는 것은 섬유복합체 제작에 있어 가장 중요한 이슈 중 하나이다 (ISIS, 2001). 수지는 섬유를 코팅하여 마모로부터 보호할 뿐만 아니라 섬유들간에 응력을 전달하는 역할을 하는데 섬유의 강도를 온전히 발휘시키기 위해서는 수지의 극한 변형률은 섬유의 극한 변형률보다 큰 값을 가져야 한다 (Phillips, 1989). 수지에는 열경화성 수지와 열가소성 수지가 있는데 섬유복합체 제작에 주로 사용되는 것은 열경화성 수지이며, 이의 제품에는 폴리에스터(polyester)와 비닐에스터(vinyl ester), 에폭시 등이 있다.

수지 종류에 따른 보강근의 인장강도 변화를 살펴보기 위하여 직경 12.7 mm의 원형으로 제작된 FRP 보강근에 대한 인장강도 시험을 실시하였다. 시험은 수지를 제외한 모든 조건이 동일한 상태로 제작되었으며, 사용된 수지는 FRP 보강근 제작에 주로 사용되는 불포화 폴리에스터와 비닐에스터 두 종류가 고려되었으며, 섬유는 유리섬유와

Table 2 Tensile performance of Glass/Carbon round bar

Fiber/Resin	Specimen No.	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Glass/vinyl ester	1	939	46.5
	2	984	49.8
	3	980	46.2
	4	985	48.8
	Ave.	972	47.8
	COV	2.3%	3.7%
Glass/polyester	1	1,050	47.9
	2	971	48.8
	3	923	48.4
	4	988	48.3
	Ave.	983	48.4
	COV	5%	1%
Carbon/vinyl ester	1	1,389	116.5
	2	1,630	118.7
	3	1,344	109.3
	4	-	-
	Ave.	1,454	114.8
	COV	10.6%	4.3%
Carbon/polyester	1	1,370	113.4
	2	1,508	120.0
	3	1,429	112.4
	4	1,419	112.6
	Ave.	1,431	114.6
	COV	4.0%	3.2%

Ave. : Average, COV : coefficient of variation

탄소섬유로 고려하여 시험을 실시하였다.

인장시험을 실시한 결과(Table 2 참조) 비닐에스터 수지와 불포화 폴리에스터 수지를 사용한 경우에 대해 유리섬유 보강근의 평균 인장강도는 각각 972 MPa, 983 MPa, 탄소섬유로 제작된 보강근에 대해서는 각각 1,454 MPa, 1,431 MPa로 관찰되었다.

FRP 보강근을 유리섬유로 제작할 경우에는 폴리에스터 수지가, 탄소섬유인 경우에는 비닐에스터 수지가 섬유의 인장강도 발현을 다소 향상시키고 있으나 그 정도가 2% 이내로 아주 작기 때문에 불포화 폴리에스터와 비닐에스터 수지의 경우에는 FRP 보강근의 인장강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이는 강화섬유의 인장강도에 비해 수지의 인장강도가 상대적으로 아주 작기 때문이고(비닐에스터의 경우 약 73~81 MPa) (ISIS, 2001), 이러한 이유로 서술한 바와 같이 혼합법칙을 이용하여 FRP의 인장강도를 추정할 경우에 수지의 인장강도는 종종 무시된다.

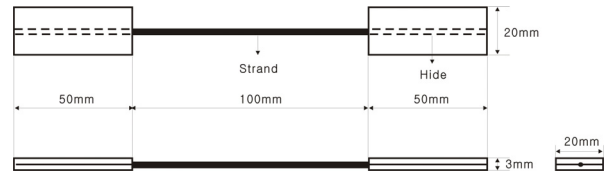


Fig. 1 Tensile specimen of strand type

Table 3 Tensile strength of GFRP by fillers

Filler	Ave. tensile strength (MPa)	Performance change ratio
-	2,098	reference
polyvinyl alcohol	2,220	106%
kaolin	1,316	63%
alumina powder	1,648	79%

2.1.3 충전제

FRP 제작시 충전제는 수지의 요변성(thixotropy), 건조수축을 조절하거나, 수지의 하중 전달 능력이나 재료특성을 개선하고, 무엇보다도 수지의 비용접감을 위해 종종 사용되는 재료이다 (Matthys, 2000).

FRP 보강근 제작에 사용되는 충전제 종류에 따른 GFRP의 인장성능 변화를 관찰하기 위해 폴리비닐 알콜(polyvinyl alcohol), 카오린(kaolin), 산화 알루미늄 분말(alumina powder) 등 총 3종의 충전제에 대해 Fig. 1과 같은 스트랜드(strand) 형태의 FRP 시편을 제작하여 인장시험을 실시하였다. 성능을 비교하기 위하여 충전제가 포함되어 있지 않은 경우를 기준으로 하였으며 각 케이스에 대해 10개씩의 시편을 제작하여 시험하였다.

Table 3에는 인장시험 결과를 나타내었다. 시험결과에서는 수지에 폴리비닐 알콜 충전제를 혼합하면 충전제가 혼합되어 있지 않은 경우에 비해 인장강도가 6% 향상되었고, 카오린과 산화 알루미늄 분말의 경우에는 20%~40% 정도 성능이 감소되었다. 충전제가 배합된 비율이 0.4% 정도인 점을 고려하면 충전제는 GFRP 스트랜드에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 제작하는 GFRP의 목적과 용도, 생산 단가 등을 고려하여 적절한 충전제를 선택할 필요가 있다.

2.2 인장성능에 영향을 미치는 인자 - 제작 방법

2.2.1 제작 공정

섬유를 인발하여 제작하는 인발성형(pultrusion) 공정은 가장 빠르고 경제적인 섬유복합체 제작공정 중 하나이

고, 프리스트레스 텐던(prestress tendon)이나 보강근과 같은 축방향 보강부재 제작에 가장 적합한 공정으로 인식되고 있어 대부분의 FRP 보강근은 이 공정으로 제작된다(Kalamkarov et al., 2000). 인발성형은 일정한 단면을 유지하면서 연속적으로 제품을 생산할 수 있는 장점이 있지만 제작된 보강근이 보강재로서의 역할을 수행하기 위해 가장 중요한 요소 중 하나인 돌기를 형성하는 것이 쉽지 않기 때문에 원형의 GFRP 바를 제작한 뒤 보강근의 표면에 규사를 코팅하거나 돌기를 형성하는 등 콘크리트와 같은 모재와의 부착성능 확보를 위한 추가 공정이 필요하게 된다.

이러한 문제점을 해결하고자 브레이딩(braiding)과 인발성형을 혼합한 “브레이딩-필트루전” 또는 “브레이드트루전(braidtrusion)”이라고 불리는 공정이 고안되었다(Ahmadi 등, 2009). 이 공정은 인발성형 공정 중간에 브레이딩 공정을 추가하여 보강근의 주부재인 섬유다발 심재(core)의 표면에 그물 형태의 외피를 형성하도록 한 것으로, 인발성형의 특징인 연속생산 및 일정 단면 유지와 브레이딩의 특징인 거친 표면 또는 외피를 동시에 만족시킬 수 있는 특징을 가지고 있다.

그러나 브레이드트루전 공정을 통하여 제작되는 보강근은 보강근의 심재를 형성하는 섬유다발이 상대적으로 느슨한 상태이기 때문에 섬유가 수지에 함침되면서 발생하는 단면 내 공극은 GFRP 보강근의 인장성능을 감소시킬 수 있다. Ahmadi et al. (2009)은 브레이딩으로 형성된 외피로 인해 보강근의 비틀림 강성이 외피가 없는 경우에 비해 1.5배 정도 향상되었으나 인장성능은 감소한다고 보고하였다. 따라서 인장성능을 감소시키지 않으면서 브레이딩과 인발성형 공정의 장점을 모두 취할 수 있도록 공정의 개선이 필요하다.

You et al. (2007)은 이 브레이드트루전 공정을 좀더 개선하여 2차 수지 함침조를 없애 공정을 간단히 하였으며, 일반 브레이딩에서는 동일한 다수의 실타래(bobbin)를 이용하기 때문에 보강근 표면이 다소 거칠지만 평평한 반면, 개선된 공정에서는 실타래에 감긴 섬유 스트랜드의 굵기를 다르게 하여 외피용과 돌기용 두 종류의 실타래를 이용하여 돌기가 형성되도록 하였다. 이 돌기용 섬유 스트랜드에는 소정의 인장력이 가해져 있어 섬유다발의 바깥 면을 감싸는 외피가 형성되기 전에 섬유다발을 조임으로 돌기형성과 동시에 섬유들 간의 결속력을 증진시키는 효과를 얻을 수 있다.

또한 보강근 단면을 원형으로 유지시켜주는 성형금형(pre-die)의 형상과 직경을 적절히 조절하여 수지에 함침된 섬유다발이 성형금형을 통과할 때 강하게 조여지게 하였다. 이로 인해 경화전에 유동적인 섬유들 간의 거리가 좁혀져서 경화 후에 보강근의 단면 내 공극이 감소하도록 하고 섬유들 간의 거리가 좁아짐으로 인해 잉여수지가 배출되어 재료를 절감하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 더불어 성형금형은 섬유다발의 진행을 억제하는 효과가 있어 인장기(puller)의 당김력과 이에 저항하는 힘으로 인해 강화섬유에는 소정의 프리텐션(pre-tension)이 도입되어 섬유의 배열상태가 호전된다. 본 연구에서는 이 공정에 의해 제작된 보강근에 대해 인장성능과 부착성능에 대해 평가하였으며 이에 대한 실험결과는 다음 절에서 서술하였다.

2.2.2 단면내 공극과 프리텐션

FRP 보강근 제작시 섬유다발이 수지에 함침되면서 공기가 연행되어 보강근 단면 내에는 공극이 발생하게 된다. 공극량이 증가하면 FRP의 기계적인 성질이 감소하는 것은 많은 선행 연구로부터 잘 알려진 사실이다(Ghiorse, 1993; Yoshida, 1993; Shih et al., 2001; Bank et al., 2003).

개선된 공정은 서술된 바와 같이 인발기에 의한 당김력과 성형금형과 섬유다발 사이의 마찰력을 이용하여 강화 섬유 다발에 프리텐션이 가해지도록 한 것이다. 프리텐션을 가하면 섬유가 느슨해지는 것을 방지할 수 있고 섬유에는 소정의 초기 응력이 도입된다. Djamaluddin et al. (2004)의 연구결과에서는 이러한 초기 응력이 수지 양을 감소시키고 코어 내부의 공기를 외부로 배출시키며, 섬유들 간의 결속성능을 향상시키는 등의 장점을 가지고 있고, 무엇보다 초기 응력이 해방되는 순간 보강근에는 압축응력이 발생한다고 하였다.

Fig. 2는 고인장성능 보강근 개발과정 중 시도된 여러 가지 제작방법에 의해 제작된 보강근의 SEM (Scanning Electronic Microscope) 촬영 결과이다. (a)는 주로 띠 형태로 섬유를 직조하는 일반적인 브레이딩 기계(수직방향으로 제작)를 사용하여 보강근을 제작한 경우로 이 경우에는 보강근 심재인 섬유다발에 프리텐션과 돌기용 스트랜드에 장력이 도입되지 않았다. (b)는 보강근이 수평 방향으로 제작될 수 있도록 브레이딩 기계를 개선하여 섬유다발에 프리텐션을 도입한 경우이고, (c)는 인발기의

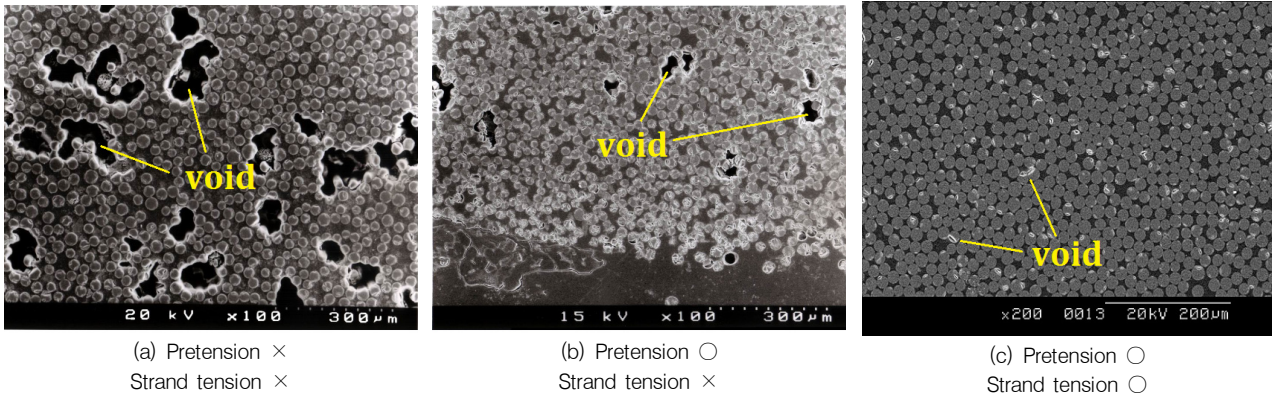


Fig. 2 Void in cross section of rebar

용량을 증가시켜 프리텐션을 크게 증가시키고 장치를 개선하여 돌기를 형성하기 위한 스트랜드에 장력을 도입한 경우이다.

Fig. 2에서 보듯이 이 두 가지 공정(프리텐션과 돌기의 장력)을 통해 GFRP 보강근 단면 내의 공극이 상당히 감소되고 있음을 관찰할 수 있었다. 단면내 공극감소는 섬유와 섬유 사이의 결속력 증가에 도움이 되고 섬유에 도입된 프리텐션은 섬유의 배열 및 상태를 호전시키기 때문에 강화섬유 본래의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 해주어 결과적으로 이 두 효과는 GFRP 보강근의 인장성능 향상에 기여하게 된다. 또한 공극감소로 단면 조직이 치밀해지기 때문에 수분과 같은 유해물질의 침투를 억제하여 장기내구성능 저하속도를 늦출 수 있다.

Fig. 2는 다양한 시도 중 제작된 보강근에 대해 촬영된 것이기 때문에 다양한 변수의 변화로 인해 직접적인 인장성능 비교는 수행하지 않았으나 각각의 인장시험 결과로부터 사용된 로빙(roving)(Fig. 4 참조) 수량에 대한 발현된 인장강도를 살펴보면 (b)와 (c)에 대해 각각 10.03 MPa/roving, 11.92 MPa/roving로 (c)의 경우가 우수한 성능을 나타내었다.

2.2.3 섬유의 배열 상태

유리섬유의 종류와 양, 제작방법이 결정된 후에는 섬유가 가지고 있는 본래의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 보강근을 제작하는 것이 중요하다. 일반적으로 E-glass의 인장강도는 3,500~3,600 MPa 이나 이를 사용하여 제작한 보강근은 700 MPa 정도로, 보강근에 함유된 섬유량을 고려하더라도 원섬유의 성능에 비해 약 20% 정도의 상당히 작은 인장성능을 나타내고 있다 (ISIS, 2001;

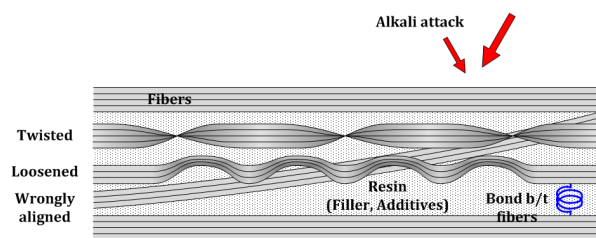


Fig. 3 Performance impediments of GFRP rebar

www.concrete.org).

제작이 완료된 GFRP 보강근의 인장성능이 원재료의 성능에 크게 못 미치는 이유에는 여러 가지가 있겠으나 제작측면에서만 살펴본다면 Fig. 3과 같은 사항들을 고려할 수 있다. 보강근의 심재를 형성하는 섬유 스트랜드는 제작 중에 꼬이거나, 느슨해지거나, 위치가 흐트러질 수 있다. 이럴 경우 FRP가 경화된 후에 이러한 섬유들은 인장력을 적절히 지탱하지 못할 수 있기 때문에 보강근의 성능 저하를 일으키게 된다. 또한 섬유배열이 똑바르게 된 경우에도 섬유들 간의 충분한 결속력을 확보하지 못한다면 외력에 의한 응력이 모든 섬유로 전달되지 않아 인장력에 대한 지지력이 낮아지게 된다.

인발성형 공정으로 GFRP 보강근을 제작할 때 사용되는 유리섬유 제품은 일반적으로 로빙(roving) 제품이다. 로빙은 연속섬유 여러 가닥을 묶어 만든 스트랜드를 다발 형태로 감아놓은 것으로 스트랜드는 — 형태의 단면을 가지고 있다(Fig. 4 (a)). GFRP 보강근 제작에는 수십 개 이상의 많은 수의 로빙이 필요하기 때문에 로빙들을 선반에 놓고 사용하게 된다. 때문에 로빙이 자유롭게 회전할 수 있도록 해주는 설비가 없는 경우에는 로빙의 심지 쪽에서부터 섬유를 추출하여 사용하고, 이로 인해 Fig. 4

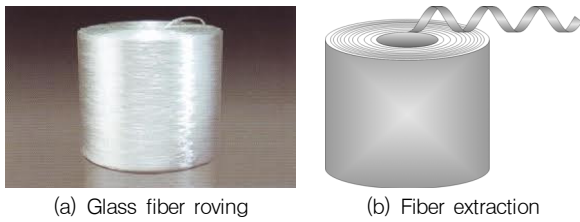


Fig. 4 Glass fiber roving and extraction

Table 4 Tensile strength of twisted fiber

Specimen No.	Twisted strand		Untwisted strand	
	Max. tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Max. tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
1	1,365	48.6	1,375	48.4
2	1,396	51.2	1,343	50.0
3	1,378	49.6	1,379	49.4
4	1,353	48.7	1,306	49.8
5	1,370	52.3	1,373	50.5
6	1,359	49.3	1,330	48.7
7	1,202	48.6	1,347	50.0
8	1,355	51.1	1,399	50.7
9	1,434	49.5	1,412	49.5
10	1,382	49.9	1,367	50.0
Ave.	1,359	49.9	1,363	49.7
σ	60	1.3	32	0.7
COV	4%	3%	2%	1%
Ave. -3σ	1,179	46.1	1,267	47.5

σ : standard deviation

(b)와 같이 섬유가 지속적으로 꼬인 상태로 진행하게 되므로 섬유 스트랜드의 꼬임은 제작이 완료된 보강근의 인장성능을 감소시키는 인자로 작용할 수 있다.

이러한 섬유 스트랜드의 꼬임이 인장성능에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 직경 6 mm의 보강근을 제작하여 인장강도 비교시험을 실시하였다. 서술한 바와 같이 보강근 제작에는 다수의 로빙(직경 12.7 mm의 경우 약 100개)이 사용되기 때문에 특수 설비가 없는 경우 스트랜드의 꼬임을 방지하는 것은 어렵기 때문에 본 시험에서는 수동으로 제어가 가능한 수준으로 직경을 설정하여 시편을 제작하였다. 보강근 제작 전에 로빙에서 소정의 길이만큼 스트랜드를 절단한 후 스트랜드가 꼬이지 않도록 정렬하여 고정된 뒤 시편을 제작하였으며 CSA (2002)를 준용하여 스트랜드의 꼬임이 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 10개의 시편을 준비하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험 결과 Table 4에서 보듯이 섬유 스트랜드가

꼬인 경우와 꼬이지 않은 경우의 평균 최대인장강도는 각각 1,359 MPa과 1,363 MPa이었다. 스트랜드가 꼬이지 않은 시편의 인장강도 향상율은 약 0.3% 정도로 변동계수(COV) 이내의 값이기 때문에 스트랜드의 꼬임을 방지함으로써 인장강도가 향상되었다고 할 수는 없으나 99.87% 신뢰도를 나타내는 보증 인장강도 값을 비교하면 약 8%의 성능변화가 관찰되었다.

GFRP 보강근은 다수의 스트랜드로 제작되기 때문에 직경이 커질수록 스트랜드 꼬임에 의한 영향이 커질 것이므로 직경 6 mm 보강근에 대한 8%의 인장강도 변화는 12.7 mm 직경의 보강근에 대해서는 더욱 명확하게 나타날 것으로 예상되므로 섬유 스트랜드의 꼬임 방지로 인한 인장성능 변화에 대해 고려할 필요가 있다.

3. 고성능 GFRP 보강근의 성능 평가

3.1 인장성능

앞에서 살펴본 바와 같은 인장성능에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 E-glass 섬유와 비닐에스터 수지를 주재료한 GFRP 보강근을 제작하였다(Fig. 5 참조). 인장성능 관찰을 위해 제작된 GFRP 보강근의 직경은 12.7 mm이며, 섬유함유율은 78.01% Wt., 61.65% Vol.이었다.

제작된 보강근의 인장성능을 살펴보기 위하여 CSA (2002)를 준용하여 총길이 1,308 mm, 계측길이 508 mm (직경의 40배)의 인장시편을 15개 제작하였다. 시편의 인장을 위해 시편 양 끝을 길이 400 mm인 강재 원형관에 삽입한 후 모르터를 충전하여 앵커를 형성하였다. 변형률 계측을 위해 보강근에는 3개의 변형률 게이지를 설치하였으며 1,000 kN의 UTM을 이용하여 약 450

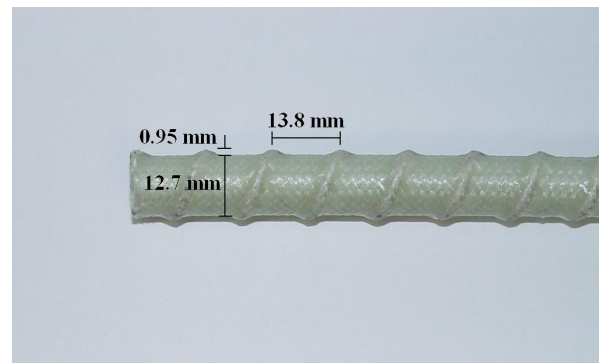


Fig. 5 GFRP rebar by improved fabrication process



Fig. 6 Tensile test

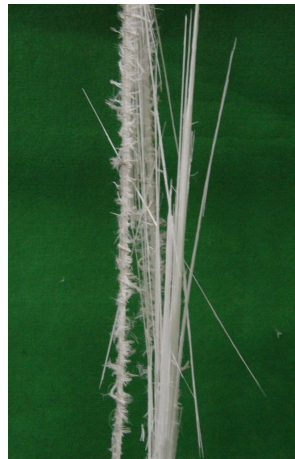


Fig. 7 Failure mode

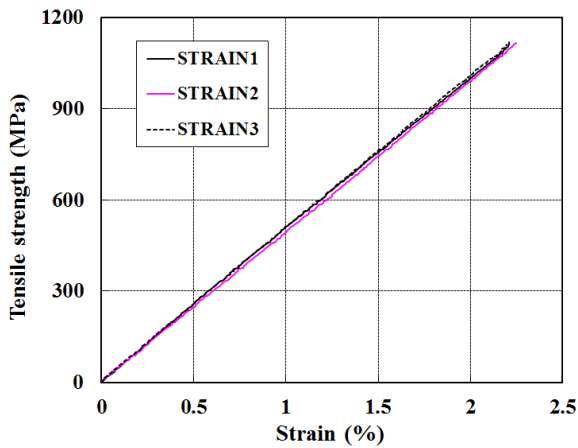


Fig. 8 Tensile strength-strain relationship example

MPa/min.의 속도로 인장을 실시하였다(Fig. 6 참조).

시험결과 GFRP 보강근 인장시편은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 최종적으로 빗자루와 같은 형상의 파괴형태를 나타내었다. 이는 섬유 자체가 파괴되기 전 섬유와 섬유 사이의 계면이 먼저 파괴되기 때문이다. 또한 Fig. 8의 그래프에서 보듯이 시편은 FRP의 전형적인 특징인 선형 거동을 나타내었다.

Table 5에는 각 시편별 최대 인장강도와 계측된 값과 최대 하중의 25%와 50% 사이의 응변-변형률 관계의 기울기로 구한 탄성계수를 나타내었다. 변동계수가 상당히 낮으므로 시험결과는 일관성이 있는 것으로 판단된다.

Table 5에서 계산된 평균탄성계수와 최대하중과의 관계로부터 구한 극한변형률(2.29%)과 계측된 극한변형률(2.27%)가 거의 일치하고 있어 제작된 보강근은 FRP의 특징인 선형 취성 특성을 잘 나타내고 있다.

Table 5 Tensile characteristics of high performance GFRP rebar

Specimen No.	Max. tensile strength (MPa)	Ave. elastic modulus (GPa)	Ave. ultimate strain (%)
1	1,147	48.4	2.33
2	1,104	50.0	2.20
3	1,144	49.7	2.31
4	1,182	48.5	2.44
5	1,153	49.5	2.31
6	1,123	51.3	2.15
7	1,112	50.7	2.21
8	1,150	48.3	2.32
9	1,118	49.5	2.24
10	1,125	47.7	2.34
11	1,137	49.5	2.24
12	1,118	48.8	2.28
13	1,166	49.2	2.36
14	1,096	48.1	2.22
15	1,108	51.1	2.12
Ave.	1,132	49.4	2.27
σ	24.4	1.1	0.1
COV	2.2%	2.2%	3.7%
Ave. -3σ	1,059	*	2.02

*average value for elastic modulus(ACI 440.1R-06, 2006)

제작된 GFRP 보강근의 평균 인장강도와 탄성계수는 각각 1,132 MPa과 49.4 GPa이었고, 보증 인장강도와 보증 극한변형률은 각각 1,059 MPa과 2.02%를 나타내었다. 이러한 성능은 동일한 E-glass로 제작되어 상용화된 기존 GFRP 보강근의 인장성능(약 700 MPa 수준)보다 40% 이상 향상된 값이다.

또한 제작된 보강근의 섬유함유율은 기존 GFRP 보강근과 비슷한 수준이지만 섬유부피율 대비 발현 인장강도를 살펴보면 제작된 보강근은 17.2 MPa/Vol.%로, 섬유부피율이 60.3%인 경우 708 MPa의 인장강도를 가지고 있는 상용화된 제품(Table 1 참조)에 비해 46% 정도 향상된 값을 나타내었다. 또한 이 값은 현존 제품 중 인장강도가 가장 높은 GFRP 보강근(Weber, 2005)의 18.2 MPa/Vol.%에 근사한 수준이다. 그러나 이 보강근은 인장강도가 E-glass보다 35% 정도 우수한 ECR-glass를 사용하였기 때문에 원섬유의 인장강도를 고려할 경우 사실상 시험에 사용된 보강근이 원섬유의 인장성능을 가장 효율적으로 발휘할 수 있도록 제작되었음을 알 수 있다. 또한 원형(prototype)으로 제작된 GFRP 보강근의 단위 길이당 생산단가는 외산 GFRP 보강근 수입가격의 약

125% 수준이기 때문에 경제성까지 고려하더라도 단위 금액당 발현 인장강도 비율은 20% 정도 향상된 값을 나타내므로 보강근이 효율적으로 제작되었음을 알 수 있다.

3.2 부착성능

RC 구조물에서 보강근의 역할은 콘크리트 부재가 받는 인장 또는 압축력의 일부를 담당하는 것으로, 이를 위해 전제되어야 하는 것은 보강근과 콘크리트가 일체로 거동을 할 수 있도록 하는 보강근의 부착성능이다. 보강근의 부착성능은 부재의 단기거동 뿐만 아니라 반복하중과 같은 장기거동에 대해 소요되는 성능을 얻기 위한 보강근의 최소 부착길이 등의 성능인자에 영향을 미친다(오홍섭 등, 2008). 이러한 부착성능은 보강근의 부착강도시험으로 평가할 수 있다.

제작된 고인장 GFRP 보강근에 대한 부착성능을 살펴 보기 위하여 현재 상용화되어 널리 이용되고 있는 GFRP 보강근(ASLAN, V-ROD) 2종과 철근에 대한 부착성능 평가를 실시하였다.

부착성능 평가는 ACI 440.3R-04 (2004)에서 제안한 표준시험법을 준용하여 한 면의 길이가 200 mm인 정육면체 콘크리트 블록에 보강근 지름의 5배의 길이가 매립되도록 하였다. 시험에 사용된 보강근의 직경은 12.7 mm이며, 재령 28일 콘크리트 압축강도는 33.6 MPa였다(Fig. 9 참조).

시험결과를 Table 6과 Fig. 10에 나타내었다. Table 6의 부착강도는 최대하중을 보강근이 매립된 표면적으로 나눈 값이며, Fig. 10의 슬립(slip)은 콘크리트 블록의 하중 반대방향 면과 보강근 사이의 상대슬립 값이다.

모든 시편에서 인발파괴(pull-out failure)가 발생하였으나 철근의 경우 2개의 시편은 항복하였다. 제작된 고인장 보강근은 돌기 생성시 스트랜드에 강한 장력이 도입되어 표에서 보듯이 기존 상용품에 비해 40% 이상 향상된 부착성능을 나타내었다.

철근 시편에서 항복파괴가 발생한 것으로 미루어 보아 제작된 콘크리트 블록은 철근과 강한 일체성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 이러한 조건에서 고인장 보강근의 부착강도가 철근이 항복하는 부착강도와 유사한 값을 나타내고 있으므로 고인장 보강근은 콘크리트와의 일체성을 확보하고 있음을 알 수 있고, 따라서 콘크리트 구조물용 보강근으로서의 역할을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판



Fig. 9 Bond test

Table 6 Bond test results [unit : MPa]

No.	ASLAN	V-ROD	STEEL	Specimen
1	12.5	12.0	17.2	21.3
2	14.0	16.1	19.8	18.5
3	15.1	11.5	20.1	18.9
Ave.	13.8	13.2	19.0	19.6

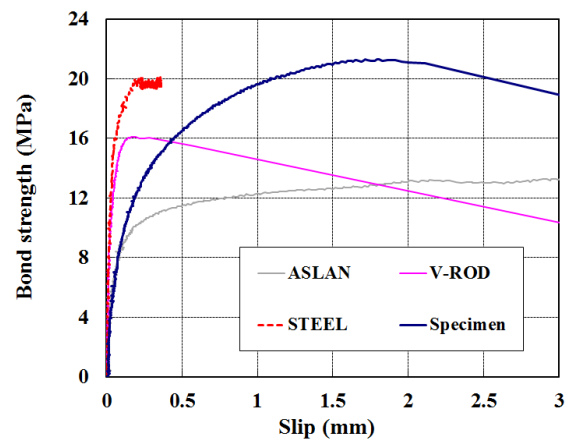


Fig. 10 Bond strength-slip relationship example

단된다.

4. 결론

본 연구에서는 정해진 조건하에서 공정 및 사용된 재료의 성능 발현 효율화를 통해 GFRP 보강근의 인장성능을 고성능화할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 재료측면에서 수지와 충전제 종류가 인장성능에 미치는 영향에 대해 실험적으로 평가하였으며, 제작측면에서 제작시 섬유 배열상태와 개선된 제작공정으로 생산된 보강

근의 인장강도와 부착강도를 평가하였다.

실험결과 수지 종류에 의한 FRP 복합체의 인장성능 변화는 거의 관찰되지 않았으나 충전제의 종류에 따라서는 충전제가 혼합되지 않은 경우에 대해 폴리비닐 알콜 충전제를 사용할 경우에는 6%가 향상되었으나, 카오린과 산화 알루미늄 분말의 경우에는 20%~40% 성능이 감소하는 것으로 나타났다.

제작측면에서 보강근 제작에 사용되는 섬유 스트랜드를 최대한 올바른 배열상태로 유지하면 그렇지 않은 경우에 비해 8% 정도(직경 6 mm인 경우) 인장강도 변화가 관찰되었으며, 보강근을 형성하는 심재에 프리텐션을 도입하고 돌기를 형성하는 섬유에 장력을 도입하여 제작된 보강근은 보증 인장강도가 1,059 MPa로 관찰되어 상용화되어 있는 외산 GFRP 보강근에 비해 40% 이상, 섬유 부피율 대비 46% 이상 향상된 인장강도를 나타내었다. 또한 부착강도 시험 결과 개선된 공정으로 제작된 보강근은 기존 상용 제품에 비해 40% 이상, 철근의 항복강도와 유사한 부착성능을 나타내어 콘크리트와의 일체성을 충분히 확보하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 서대원, 한범석, 신성우, "FRP bar를 주근으로 사용한 콘크리트 휨부재의 압축측 콘크리트 구축에 따른 거동", 구조물진단학회지, 제12권 3호, 2008, pp.110-118.
2. 문도영, 오홍섭, "알카리저항 초단유리섬유를 리브에 사용한 유리섬유 보강근의 내구성능", 구조물진단학회지, 제15권 1호, 2011, pp.281-287.
3. 오홍섭, 심종성, 강태성, "GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 피로 휨부착성능에 관한 실험적 연구", 구조물진단학회지, 제12권 1호, 2008, pp.101-108.
4. 최윤철, 박금성, 최현기, 최장식, "GFRP 보강근으로 접이음된 콘크리트 보의 보강비에 따른 거동특성", 구조물진단학회지, 제15권 1호, 2011, pp.67-76.
5. Ahmadi, M.S., Johari, M.S., Sadighi, M. and Esfandeh, M., "An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rods", eXPRESS Polymer Letters, vol. 3, No. 9, 2009, pp.560-568.
6. American Concrete Institute (ACI), Guide Test Methods for Fiber-Reinforced-Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI 440.3R-04, Committee 440, 2004.
7. American Concrete Institute (ACI), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-06, Committee 440, 2006.
8. Bank, L.C., Gentry, T.R., Thompson, B.P. and Russell, J.S., "A model specification for FRP composites for civil engineering structures", Construction and Building Materials, vol. 17, 2003, pp.405-437.
9. CSA Standard, Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, S806-02, 2002.
10. Cui, Y. and Tao, J., "A new type of ductile composite reinforcing bar with high tensile elastic modulus for use in reinforced concrete structures", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 36, 2009, pp.672-675.
11. Daniel, I.M. and Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University press, 1994, pp.72-85.
12. Djameluddin, R., Hino, S. and Yamaguchi, K., "Innovative Approach in Manufacturing and Application of CFRP rods with U-anchor for Concrete Structures", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS), 4th International Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2004.
13. Ghiore, S.R., "Effect of void content on the mechanical properties of carbodepoxy laminates", SAMPE Quarterly, vol. 24, No. 2, 1993, pp.54-59.
14. ISIS Canada, Design Manual 3: Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001.
15. Jones, K.D., DiBenedetto, A.T., "Fiber fracture in hybrid composite systems", Composites Science and Technology, vol. 51, No. 1, 1994, pp.53-62.
16. Kalamkarov, A.L., Georgiades, A.V., MacDonald, D.O. and Fitzgerald, S.B., "Pultruded fibre reinforced polymer reinforcements with embedded fibre optic sensors", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 27, 2000, pp.972-984.
17. Keesler, R.J. and Power, R.G., Corrosion of Epoxy Coated Rebars-Keys Segmental Bridge-Monroe County, Report No. 88-8A, Florida Dept. of Transportation, Materials Office, Corrosion Research Laboratories, Gainesville, Fla., 1998.
18. Matthys, S., "Structural Behavior and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement", Ph.D Thesis, Magnel Laboratory for Concrete research, Department of Structural Engineering, Ghent University, 2000.
19. Micelli, F. and Nanni, A., "Tensile characterization of FRP rods for reinforced concrete structures", Mechanics of Composite Materials, vol. 39, No. 4, 2003, pp.293-304.
20. Nkurunziza, G., Debaiky, A., Cousin, P. and Benmokrane, B., "Durability of GFRP bars: A critical review of the literature", Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 7, 2005, pp.194-209.
21. Phillips, L.N., Design with Advanced Composite Materials, Springer-Verlag, 1989.
22. Shih, C.H., Liu, Q. and Lee, L.J., "Vacuum-assisted resin transfer molding using tackified fiber preforms", Polymer Composites, vol. 22, No. 6, 2001, pp.721-729.
23. Weber, A., "BOND PROPERTIES OF A NEWLY DEVELOPED COMPOSITE REBAR, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)", eds. Chen and Teng, 2005.
24. Yoshida, H., "Influence of voids on the interlaminar shear strength of carbon fiber reinforced plastics", Advanced Composite Materials, vol. 3, No. 2, 1993, pp.113-122.

-
25. You, Y.J., Park, Y.H., Park, J.S. and Kim, K.H.,
"DEVELOPMENT OF FRP REBAR FOR CONCRETE
STRUCTURES IN KOREA", 8th International Symposium
on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete
Structures (FRPRCS-8), University of Patras, Patras,
Greece, 2007.
26. <http://www.concrete.org/students/AslanFRPREbar.pdf>
27. <http://www.concrete.org/students/Pultrall-V-Rod-Technical-Data-Sheet-for-2009-Competition.pdf>

(접수일자 : 2011년 10월 10일)
(수정일자 : 2011년 11월 15일)
(심사완료일자 : 2011년 11월 21일)

요 지

최근 고부식 환경에 놓여 있는 철근 콘크리트 구조물의 철근 부식 문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나로 뛰어난 내부식성을 가진 섬유복합체(Fiber Reinforced Polymer, FRP)로 제작된 보강근이 주목받고 있다. 유리섬유복합체로 제작된 보강근이 상용화된 상태이나 가격, 철근보다 낮은 탄성계수, 취성파괴 특성 등의 이유로 사용 실적은 많지 않은 것이 현실이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안 중 하나는 유리섬유복합체 보강근의 성능을 고도화하는 것이다. 성능 고도화를 통해 강도 대비 가격을 낮출 수 있으며, 인장성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구는 주어진 재료와 조건 하에서 보강근 성능에 영향을 미치는 인자들의 효율성 향상을 통한 고인장 성능 유리섬유복합체 보강근의 개발에 관한 것이다. 이를 위해 구성재료와 제작방법 등 유리섬유복합체 보강근의 인장성능에 영향을 미치는 인자들에 대해 분석을 수행하여 개선 방안을 제안하였으며, 이를 통해 보강근의 주재료인 유리섬유의 성능을 기존 제품보다 더욱 효율적으로 활용하는 보강근을 제작하였으며, 다양한 변수에 대한 인장시험을 통하여 그 성능을 비교·분석함으로써 개선 방안의 적절성을 검증하였다.

핵심 용어 : 섬유보강 폴리머, GFRP, 보강근, 브레이드트루전, 인장강도, 부착강도
