

## 콘크리트 보강용 FRP 리바의 촉진환경 노출후 인장 및 부착 특성

### Effect of Accelerated Aging on the Tensile and Bond Properties of FRP Rebar for Concrete

박찬기\* · 원종필\*\*

Park, Chan-Gi · Won, Jong-Pil

#### Abstract

The main objective was to evaluate the tensile and bond properties of FRP rebar and durability performance after exposure of accelerated aging condition. Five types of FRP rebar include CFRP ISO, GFRP Aslan, AFRP Technora, CFRP(D) and GFRP(D) rebars used in tensile and bond tests. Tensile test results of CFRP(D) and GFRP(D) were shown to possess acceptable tensile and durability performance compared with CFRP ISO, GFRP Aslan, and AFRP Technora. Also, bond test results indicated that CFRP(D) and GFRP(D) rebars showed an ability to improve the bond strength.

*Keywords : Accelerated environmental exposure, Bond, Durability, FRP rebar, Tensile strength*

#### I. 서 론

철근콘크리트 구조물은 콘크리트와 철근의 복합재로서, 역학적으로 인장에 약한 콘크리트를 철근이 보강하며 내구성 면에서 부식되기 쉬운 철근을 콘크리트가 보호함으로써 서로 상대의 결점을 보충한 훌륭한 구조체이다.<sup>1),2)</sup> 그러나 수분이나 염해나 중성화 등을 포함한 각종 환경에 노출됨으로써 철

근이 부식하여 철근콘크리트 구조물에서도 조기에 파괴되는 경우가 상당수 있다는 것이 밝혀지고 있어 큰 문제로 대두되기 시작하였다.<sup>1),2)</sup> 즉, 철근콘크리트 구조물의 내구성을 확보하는데 철근의 부식이 중요하다는 것을 널리 인식하게 되었다.<sup>1),2)</sup> 철근의 부식이 촉진될 수 있는 유해한 환경에는 콘크리트가 중성화 또는 내부로 수분침투가 발생하여, 철근이 부식 진전될 수 있는 환경이다.<sup>3),4),10),12)</sup> 특히, 철근부식에 영향을 주는 환경에 노출된 구조물의 대표적인 것으로 수리구조물과 해양구조물을 들 수 있다. 이와 같은 수리구조물 및 해양구조물은 콘크리트 구조물로서 중요한 사회간접 시설들이며, 수리·해양구조물들의 신규공사 및 유지관리 등은

\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 과정

\*\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

\*\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750

Fax: +82-2-2201-0907

E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

사회적인 중요한 관심사로 대두되어 왔다.

즉, 철근의 부식을 방지하기 위하여 에폭시도막 철근, 투수성이 낮은 콘크리트 사용, 콘크리트 덮개의 증가 및 방청제, 전기방식법 등이 사용되고 있다. 그러나 근본적으로 보강철근의 부식을 방지하지는 못하였다.<sup>1),2),8),13)</sup>

현재 이와 같은 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결하기 위하여 미국, 유럽, 일본 등 여러 선진국에서는 FRP 리바를 이용하여 교량, 수리구조물 등에 적용하는 연구가 빠르게 진행되고 있으며, 많은 구조물에 적용실적을 가지고 있다. FRP 리바는 보강섬유(탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등)를 수지로 결합시켜 제조한 것으로 부식에 대한 문제를 해결할 수 있는 우수한 재료로 보강철근과 비교하여 재료 자체적 특성상 취성적 성질과 전단 및 휨하중에 대하여 취약한 단점을 가지고 있다.<sup>5),6),9),10)</sup> 현재 FRP 리바의 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있다. 특히 FRP 리바의 생산방법을 변화시켜 전단 및 휨에 대한 저항성을 향상시키는 연구를 통하여 상당한 휨 및 전단에 대한 저항성을 확보하였다.<sup>1),2),8)</sup> 국내의 경우 FRP 리바에 대한 연구는 내구성이 저하된 콘크리트 구조물에 보수·보강재로 적용하기 위한 것이 대부분을 차지하고 있다. 특히, 국내의 경우 지금 까지 신규 콘크리트 구조물에 FRP 리바를 보강재로 적용하기 위한 연구는 거의 없었으며, 또한 보수·보강재로 FRP 리바를 적용하기 위한 연구 역시 외국에서 제조한 제품을 대부분 사용하기 때문에 보강된 구조물의 구조성능을 파악하기 위한 휨해석에 대한 연구가 주를 이루고 있다.<sup>11),12)</sup> 그러나 철근콘크리트 구조물의 부식에 대한 문제점을 해결하기 위해서는 콘크리트 구조물의 신규 건설시 철근을 대체할 수 있는 FRP 리바를 휨보강재로 적용하는 것이 바람직하며, 기술경쟁력 및 가격경쟁력을 확보하기 위해서는 국내에서 FRP 리바를 개발, 생산하는 것이 필요하다. 그러므로 FRP 리바를 국내에서 개발하여 생산하고, 개발된

FRP 리바에 대한 물리·역학적 특성과 내구성능 및 부착성능을 평가해야 한다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 FRP 리바의 인장성능 및 부착성능을 평가하였다. 특히, 콘크리트 보강재로 FRP 리바가 노출될 수 있는 내구성 저하 환경에서의 성능을 검토하였다. FRP 리바에 대한 인장특성, 부착성능 및 내구성에 대한 기준은 지금까지 FRP 리바에 대한 많은 연구 성과가 있는 외국에서도 일정한 기준이 없이 사용되고 있다. 즉, 각 생산제품마다 생산방법 및 사용재료의 특성이 다르기 때문에 일정한 기준을 적용하지 못하고 있다. 따라서 FRP 리바에 대한 연구가 매우 부족한 국내의 실정으로 볼 때 FRP 리바의 성능에 대한 우수성을 평가하는 것은 매우 어렵다.<sup>6),9),11),12)</sup>

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 고려하여 외국에서 널리 사용되고 있는 제품 중 각 사용재료에 따라 한 가지 종류의 FRP 리바를 선택하여 국내에서 개발된 FRP 리바의 시험결과를 비교 하여 FRP 리바의 인장, 부착 및 내구성능을 평가하고자 한다.

## II. 사용재료 및 시험방법

### 1. 사용재료

#### 가. FRP 리바

국내에서 개발된 FRP 리바의 인장, 내구성능 및 부착특성을 평가하기 위하여 국내 D사에서 생산된 2가지 종류의 FRP 리바와 외국에서 생산된 3가지 종류의 FRP 리바에 대하여 시험을 실시하였다. 특히, FRP 리바는 사용재료에 따라 그 특성이 다르기 때문에 성능 비교는 각각 사용된 재료에 따라 실시하여야 한다. 국내 D사에서 생산된 FRP 리바는 첫 번째로 탄소섬유를 주요 구성재료로 사용한 CFRP 리바와 유리섬유를 주요 구성재료로 사용한 GFRP 리바가 있으며, 각각의 FRP 리바의 성능을 비교하기 위하여 CFRP 리바로는 캐나다 Purall 사의 ISO CFRP 리바, GFRP 리바로는 미국의 Aslan

GFRP 리바를 선택하였다. 또한, 국내에서는 아라미드섬유의 가격이 너무 비싸 경제성 때문에 적용하기 어려우나 일본 등 외국에서 지속적인 연구와 적용실적이 있는 아라미드섬유를 주요 구성재료로 사용하고 있는 일본의 Technora AFRP 리바를 선택하여 인장, 부착 및 내구성 특성을 평가하였다. 사용된 FRP 리바의 특성은 Table 1과 같으며, 표면형상은 Fig. 1과 같다. 또한 시험에 사용된 모든 FRP 리바의 섬유와 수지의 혼합비는 70%: 30%이며, 국내 D사에서 생산된 CFRP 리바 및 GFRP 리바에 사용된 PVA 섬유는 전체섬유의 혼합비에는 포함되지 않고 단지 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위하여 표면처리에만 사용하고 전체 섬유의 혼합비에는 제외하였다.

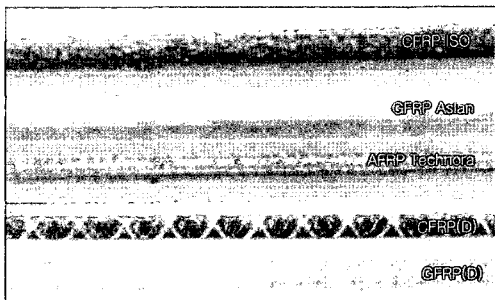


Fig. 1 Photo of FRP rebars

## 2. 내구성 저하환경

본 연구에서는 국내에서 개발된 FRP 리바의 인장, 부착 및 내구성을 평가하기 위하여 계절변화에 따른 자연적인 내구성 저하환경을 모형화하였다. 이와 같은 환경을 자세히 설명하면 다음과 같다.

### 가. 기준환경(Control)

내구성 저하환경 노출 후 FRP 리바의 인장 및 부착성능 저하 정도를 평가하기 위하여 기준환경을 설정하였다. 기준환경은 인장시험의 경우 일반적인 대기환경에서 시험시 까지 노출하는 것으로 하였고, 부착시험은 공시체를 제작한 후 1일간의 초기 양생 후  $23 \pm 2$  °C의 물에서 28일간 수중양생을 실시하는 것으로 설정하였다.

### 나. 건조-습윤 반복(WD)

FRP 리바는 수분조건에 따라 매우 민감하게 반응을 한다. 특히 지속적으로 수분에 접촉해 있는 환경조건과 더불어 FRP 리바의 표면이 습윤상태와 건조상태를 반복하여 받는 환경에 노출되었을 때 FRP 리바는 파괴의 가능성이 크다. 본 연구에서는 건조-습윤이 반복되는 환경에 노출된 FRP 리바의 성능을 평가하기 위하여 약 60 °C의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20 °C 물에 24시간 침지하는 조건을 1회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하였다.

Table 1 FRP rebar types

Type of FRP rebar	Manufactures	Fibers	Resin	Diameter (mm)	Section	Surface deformation patterns
CFRP	D: Korea	Carbon +PVA	Vinylester	6.5	Circular	braiding ribbed
	ISO: Canada	Carbon	Epoxy	9.4	Circular	sand-coated
GFRP	D: Korea	Glass E +PVA	Vinylester	8.3	Circular	braiding ribbed
	Aslan: U.S.A	Glass E	Vinylester	9.4	Circular	wrapped and sand-coated
AFRP	Technora: Japan	Aramid	Vinylester	7.4	Circular	ribbed

**다. 장기오븐건조(OD)**

FRP 리바를 구성하는 재료의 열팽창계수가 다르기 때문에 고온이 지속적으로 작용하면 FRP 리바는 섬유와 매트릭스 수지의 열적 부적합성에 의해서 파괴가 발생할 수 있다. 특히, 여름철에 콘크리트 구조물을 장기간 온도가 상승되어 유지하는 환경에 노출되는 경우가 많기 때문에 중요하게 고려될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 60 °C의 오븐에 50일간 노출시킨 후 영향을 평가하였다.

**라. 동결-융해 반복(FT)**

FRP 리바의 동결융해반복에 의한 파괴의 가능성은 FRP 리바 재료자체의 파괴와 FRP 리바와 콘크리트의 접착면의 파괴로 고려될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 FRP 리바의 동결융해반복에 대한 영향을 평가하기 위하여 KS F 2456에 따라 실험을 실시하였다.

**마. 염해와 건조-습윤을 복합적으로 받는 환경 (S-WD)**

염해에 노출시킨 후 건조-습윤 반복은 바다에 접해 있는 해양 콘크리트 구조물의 경우 파도 및 조석간만의 차에 의하여 건조와 습윤이 반복된다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려하여 FRP 리바를 약 60 °C의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20 °C의 3% NaCl 용액에 24시간 침지하는 조건을 1회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

**바. 염해와 동결-융해 반복을 복합적으로 받는 환경 (S-FT)**

염해에 노출시킨 후 동결-융해 반복은 바다에 접해 있는 해양 콘크리트 구조물의 경우 직접적으로 바다에 접해 있거나 근접해 있기 때문에 염분이 운반됨으로써 구조물이 동결과 융해를 반복할 때 콘크리트 구조물의 파괴를 촉진시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려하여 FRP

리바를 약 20 °C의 4% NaCl 용액에 24시간 침지시키고 -10 °C의 냉동고에서 동결시키는 방법으로 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

**3. 시험방법**

**가. 인장특성**

FRP 리바의 인장거동을 평가하기 위하여 ACI 440에서 제시하고 있는 기준에 따라 인장시험을 실시하였다.<sup>1),2)</sup> 인장시험은 변위를 조절할 수 있는 25KN 용량의 UTM을 사용하였으며, FRP 리바의 변형률을 측정하기 위해서 LVDT를 설치하였다.

**나. 부착특성**

본 연구에서는 FRP 리바의 부착성능을 최적화하기 위하여 ACI 440위원회가 제시하고 있는 직접 부착시험을 실시하였다. 현재 FRP 리바의 부착성능을 측정하기 위한 시험방법에는 일반적으로 두 가지 방법이 사용되고 있다.<sup>1),2),6)</sup> 첫 번째 방법은 직접부착시험으로 ACI 440위원회를 비롯한 많은 연구자들이 사용한 방법이다. 두 번째 시험방법은 1991년 Faza와 1998년 B. Tighiouart 등에 의해서 사용된 RILEM 기준에 따른 것으로 콘크리트 보를 이용한 시험방법이 등이 있다.<sup>6)</sup> FRP 리바의 직접부착시험방법은 ACI 440에서 제정한 FRP 로드 및 슈트의 시험방법에 대한 기준에 따라 일반적으로 실시한다. 시험방법은 150×300 mm의 원추형 콘크리트 공시체 또는 콘크리트 블록을 이용하여 일정한 길이의 FRP 리바를 정착시킨 후 일정기간의 양생 기간을 거친 후 UTM을 이용하여 FRP 리바를 인발하는 실험을 실시하여 하중과 변위를 측정하는 방법을 선택하였다.<sup>1),2)</sup> 이와 같은 방법으로 FRP 리바의 부착시험을 실시하면 리바 주위의 콘크리트는 압축응력을 받게 된다. 실제 휨부재에서 리바 주위의 콘크리트가 인장을 받는 경우와 정반대의 현상이 발생한다. 만약 콘크리트가 인장을 받는다면 FRP 리바 주위의 콘크리트 압축은 일반

적으로 균열의 발생을 억제한다고 한다. 결과적으로 직접부착시험은 실제의 부착응력보다 큰 결과를 나타낸다.<sup>1),2),6)</sup> 직접부착시험의 이와 같은 비 현실적인 결과로 인하여 새로운 부착시험방법을 개발하려는 연구가 이루어졌다. 그러나 직접부착시험이 부착거동을 평가하는데 비록 실제 조건과 다르지만 일반적으로 부착응력을 결정하는데 널리 사용되어 왔다.<sup>1),2),6)</sup> 보 부착시험은 직접부착시험을 대치할 수 있는 시험방법이다. 보 부착시험에서 리바의 주위 콘크리트는 인장을 받는다.<sup>1),2),6)</sup> 이와 같은 결과로 FRP 리바 주위의 콘크리트에서는 인장미소균열이 발생하여 부착강도를 감소시킨다. 결과적으로 보부착시험이 실질적인 구조물의 조건을 반영한다고 할 수 있다.<sup>6)</sup> 그러나 보 부착시험을 공시체의 제작 및 시험에 많은 시간과 주의가 필요하다.<sup>6)</sup> 보 시험에 사용되는 FRP 리바의 1/2을 보 공시체에 정착시키기 위해서 몰드를 제작하여야 하며 시험도중에 발생할 수 있는 전단력을 고려해야 한다. 또한 보 시험은 일반적인 UTM을 사용할 수 없으며 시험 플레임을 제작하여 설치 한 후 규정된 하중을 재하 하여 시험을 실시한다.<sup>6)</sup> 따라서, FRP 리바의 부착특성을 비교하기 위한 연구의 대부분은 ACI 440위원회가 제시하고 있는 직접부착시험을 실시하고 있다. 본 연구에서도 역시 국내에서 생산된 FRP 리바와 해외에서 사용되고 있는 FRP 리바의 부착성능을 평가하기 위하여 것으로 직접 부착시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 부착시험용 배합설계는 Table 2와 같다.

부착시험공시체는  $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 의 원추형 콘크리트 공시체를 이용하여 FRP 리바 직경의 5배를 매립하여 제작하였다. 시험은 28일간의

Table 2 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	SP* (kg/m <sup>3</sup> )
45	60	202.5	450	1000	600	2.52

\* SP: superplasticizer

양생 후 25 KN 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였는데 하중 재하속도는 5 mm/min로 시험을 실시하였다. 시험결과와 하중과 변위를 직접 측정하여 식 (1)로 부착강도를 결정하였다.<sup>1),2)</sup>

$$\tau = \frac{P_{\max}}{2\pi rL} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\tau$  = 부착강도,  $P_{\max}$  = 최대부착하중,  $r$  = FRP 리바의 직경,  $L$  = FRP 리바의 정착길이이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 인장특성

##### 가. 인장-변형률 거동

FRP 리바 공시체의 응력-변형률 관계는 보강철근과 다른 변형률이 증가하면, 응력과 변형률이 선형적으로 증가하다가 급격한 파괴를 발생시키는 취성적 거동을 하였다(Fig. 2). 보강철근의 인장거동은 항복응력에 도달 한 후 철근이 항복하고 극한응력에 도달하여 파괴되기 전까지 지속적으로 변형률이 증가하는 연성거동을 한다. 그러나 FRP 리바는 극한강도에 도달하기 전까지 선형적으로 변형률이 증가하는 경향을 보여주며, 인장강도는 보강철근에 비하여 매우 높다. FRP 리바의 취성적 성질은 콘크리트 구조물에 휩보강재로 적용시 안전성에 문제를 주기 때문에 이러한 특성을 고려하여 콘크리트

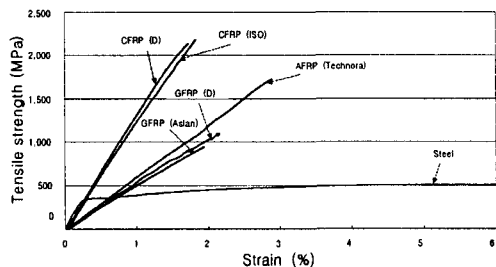


Fig. 2 Tensile strength-strain behavior of FRP rebars

에 보강재로 사용시 강도감소계수는 보강철근(0.85)보다 작은 0.7 정도를 사용하고 있다.<sup>1),2),11)</sup>

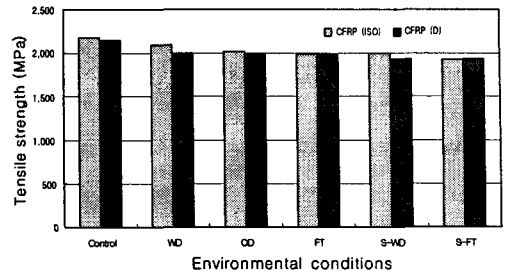
국내 D사에서 생산된 FRP 리바와 해외에서 적용되고 있는 FRP 리바의 인장거동 시험결과를 살펴보면 ISO CFRP 리바의 인장강도는 2,179.5 MPa로 가장 높게 나타났다. 국내에서 생산된 CFRP 리바의 인장강도는 2,135.5 MPa로 ISO CFRP 리바와 비교하여 작은 값을 나타내었다. 또한 국내에서 생산된 GFRP 리바는 인장강도 892.4 MPa이며 Aslan GFRP 리바의 인장강도 892.4 MPa 보다 높은 값을 보여주었다. 또한 AFRP 리바의 인장강도는 1,800 MPa 정도를 나타내었다. 이와 같은 결과를 살펴볼 때 국내에서 생산된 FRP 리바의 경우 외국에서 생산된 제품과 비교하여 인장성능이 크게 떨어지지 않기 때문에 콘크리트 구조물에 적용하는데는 큰 문제가 없다. 이는 국내에서 생산된 FRP 리바의 주요 구성재료가 Table 1에서 볼 수 있는 것과 같이 동일하고 재료의 구성비 역시 같기 때문이다.

나. CFRP 리바

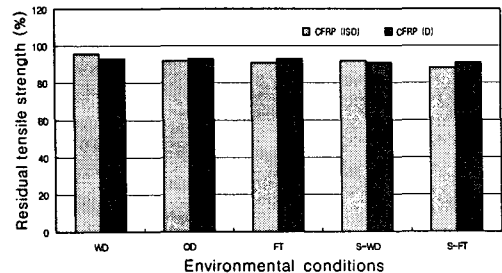
국내에서 개발된 탄소섬유를 주요 구성재료로 하는 CFRP(D) 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 해외에서 사용되고 있는 CFRP ISO 리바와의 내구특성을 비교한 결과 모든 내구성 저하환경에 노출 후 인장강도는 국내 개발 및 해외에서 사용되고 있는 CFRP 리바 모두 약 90% 이상의 잔류강도를 보여줌으로써 외부환경에 거의 영향을 받지 않았다 (Fig. 3). 이는 CFRP 리바의 제조에 사용된 탄소섬유와 비닐에스터 수지가 모두 내구성이 우수한 재료로 환경에 대한 저항성이 우수하며, 국내에서 개발된 CFRP 리바의 생산시 생산방법의 차이에 의한 결함이 거의 발생하지 않았기 때문이다.

다. GFRP 리바

유리섬유를 주요 구성재료로 사용하는 GFRP(D) 리바 및 GFRP Aslan 리바의 내구성 저하환경 노

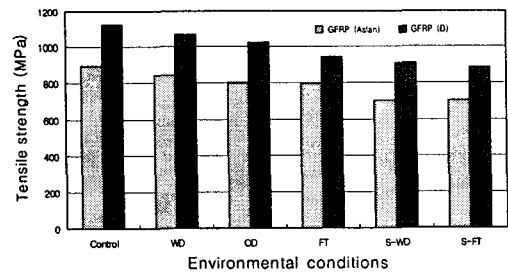


(a) Tensile strength

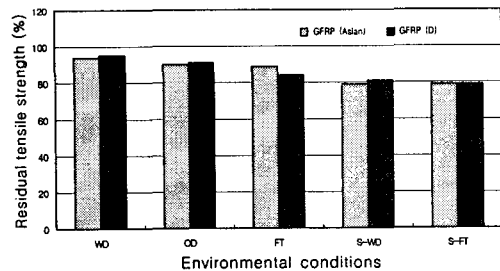


(b) Residual tensile strength

Fig. 3 Tensile test results of CFRP rebar after environmental exposure



(a) Tensile strength



(b) Residual tensile strength

Fig. 4 Tensile test results of GFRP rebar after environmental exposure

출후 인장시험결과는 Fig. 4와 같다. 시험결과 모든 환경에서 GFRP 리바가 모두 약 80% 정도의 잔류 인장강도를 나타내었다. 이는 국내에 제조된 GFRP(D) 리바 및 GFRP Aslan 리바 모두 제조에 사용된 재료의 특성이 모두 같고, 제조상에서 큰 문제점이 발생하지 않았기 때문이다. 그러나 GFRP 리바의 잔류 인장강도가 CFRP 리바와 비교하여 작게 나타남으로써 CFRP 리바 보다는 적용시 이를 고려한 설계를 필요로 한다. 즉, 탄소섬유가 유리섬유 보다 각종 환경에 노출 후 내구성이 우수하기 때문에 나타난 재료적인 요인에 의한 결과이므로 재료에 대한 강도감소계수를 결정하여 적용 하는 것이 바람직하다.

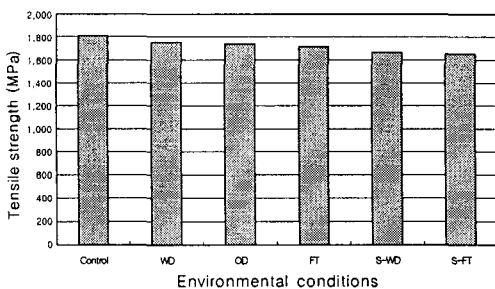
라. AFRP 리바

AFRP 리바의 내구성 저하환경 노출후 잔류인장 강도 시험결과는 Fig. 5와 같다. 시험결과 AFRP

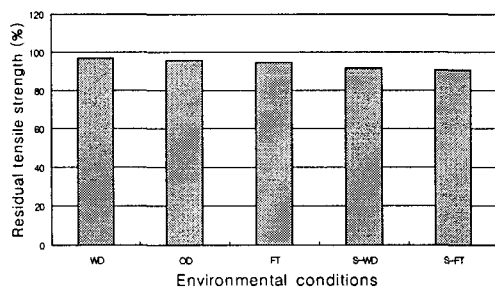
리바는 내구성이 우수하다고 알려진 아라미드섬유와 비닐에스터 수지를 사용해서 제조되었기 때문에 성능의 감소가 거의 나타나지 않는 우수한 내구성을 가지고 있음을 알 수 있었다. AFRP 리바는 아라미드섬유의 가격이 비싸 국내에서 개발하는데 한계점 있다. 그러나 이와 같은 경제성의 문제를 해결할 수 있다면 콘크리트 구조물에 적용시 매우 우수한 내구성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 부착강도

FRP 리바는 보강철근과 달리 콘크리트와 부착강도가 매우 낮은 단점을 가지고 있다. 이는 FRP 리바가 플라스틱 재료의 특성을 가지고 있기 때문에 콘크리트와 마찰력이 충분히 발휘하지 못하기 때문이다. 현재 FRP 리바의 부착력을 향상시키기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 이와 같은 연구 중의 대부분은 FRP 리바의 표면의 형상을 변화시켜 콘크리트와 기계적 마찰력을 증가시키기 위한 연구이다.<sup>1),2),9),10)</sup> 국내에서 생산된 FRP 리바는 Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 표면을 PVA 섬유를 이용하여 격자 모양으로 제작함으로써 부착성을 향상시키고자 하였으며, 본 연구에서는 이와 같은 표면 특성을 가지고 있는 국내 생산 FRP 리바의 부착성을 평가하기 위하여 부착시험을 실시하였다. 이때 부착시험을 위하여 사용된 콘크리트의 압축강도는 부착강도와 밀접한 관계가 있다. 즉, 압축강도가 증가하면 부착강도도 증가한다. 따라서,



(a) Tensile strength



(b) Residual tensile strength

Fig. 5 Tensile test results of AFRP rebar after environmental exposure

Table 4 Compressive strength of concrete

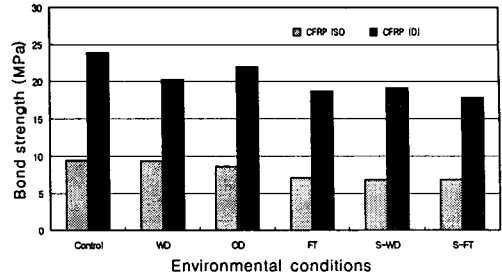
Specimens No.	Compressive strength (MPa)
1	36.1
2	37.7
3	37.5
4	37.4
5	37.9
Mean	37.3

본 연구에서는 FRP 리바가 충분한 부착강도를 발휘할 수 있도록 하기 위하여 콘크리트 배합을 실시하였으며 압축강도시험결과 Table. 4와 같이 37.3 MPa의 강도를 나타내었다.

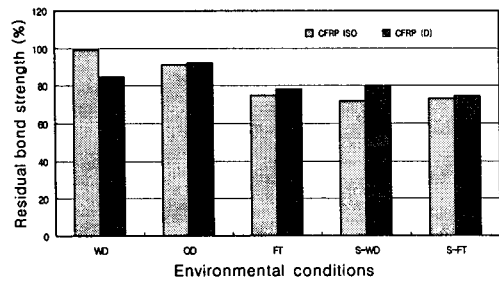
가. CFRP 리바

내구성 저하환경에 노출후 CFRP 리바의 부착거동 시험결과는 Fig. 6과 같다. CFRP 리바는 사용된 재료인 탄소섬유와 비닐 에스터 수지가 내구성이 우수한 재료로 알려져 있어 재료 자체의 내구성은 매우 우수하다. 그러나 콘크리트 모체와 FRP 리바사이의 부착거동은 재료자체의 내구성도 중요한 변수이지만 부착성능을 증가시키기 위하여 사용된 표면처리층과 FRP 리바 모체와의 계면층에 영향을 더 크게 받는다. 따라서 부착거동은 재료자체의 내구성과 다른 경향을 나타낼 수 있다. CFRP 리바의 부착시험결과 표면이 규사코팅된 CFRP ISO 리바의 경우 일반기준환경에서 9.48 MPa를 나타내 표면을 브레이딩공정을 도입하여 제조한 국내제품인 CFRP 리바(23.9 MPa) 보다 작게 나타났다. 이는 표면에 규사코팅된 CFRP ISO 리바의 경우 양생시 규사와 비닐에스터수지의 계면에 수분이 침투하여 접촉계면의 결합력을 약화시켰으며, 규사코팅층과 FRP 리바 모체와의 부착계면 역시 분리가 쉽게 발생하였기 때문이다. 이에 반해, 국내에서 생산된 CFRP 리바의 경우 표면을 섬유를 이용하여 제작하는 브레이딩공정을 도입하여 rib을 형성시킴으로써 규사코팅 FRP 리바에서 발생할 수 있는 규사와 수지와의 분리를 방지할 수 있었고, 적절한 두께의 브레이딩 층을 형성시킴으로써 FRP 리바 모체와 표면처리층과의 일체화도 달성할 수 있어 분리에 의한 파괴가 현저히 감소하였기 때문이다. 또한 표면 처리에 사용된 PVA 섬유가 친수성 섬유로 콘크리트와 재료자체의 화학적 부착력이 우수하기 때문에 부착력 향상에 큰 도움을 주었다.

CFRP ISO 리바의 내구성 저하환경 노출후 잔류부착강도시험결과는 동결-융해 반복(74.8%),



(a) Bond strength



(b) Residual bond strength

Fig. 6 Bond performance of CFRP rebars after accelerated environmental exposures

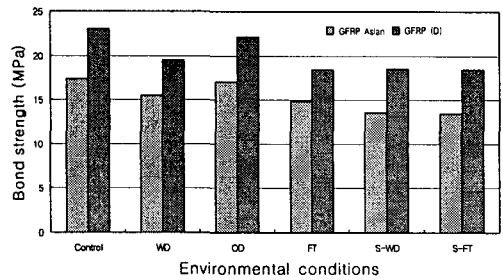
염해와 건조-습윤 반복(72.0%) 및 염해와 동결-융해 반복(73.2%)을 받는 환경에서 기준환경과 비교하여 약 70% 대의 잔류강도를 나타내어 부착강도의 저하가 크게 나타났다. 그러나 건조-습윤 반복(99.1%) 및 장기오븐건조(91.3%)의 경우 90% 이상의 부착강도를 나타내 거의 영향을 받지 않는 결과를 나타내었다. 이는 건조-습윤 반복 및 장기 오븐건조는 CFRP ISO 리바의 부착표면에 코팅된 규사코팅 층의 분리에 큰 영향을 미치지 못한 반면 동결-융해 반복의 경우 표면에 규사와 수지에 수분이 침투한 후 동결될 때 팽창하면서 규사코팅을 파괴하는 작용이 현저하게 나타났기 때문이다. 또한 일반 물보다는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용한 용액이 수지의 파괴를 더욱더 현저하게 발생시키기 때문에 염해와 동결-융해반복 및 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 환경에서 부착강도의 저하는 더 크게 나타났다. 이에 반해 국내에서 생산된 CFRP 리바의 경우



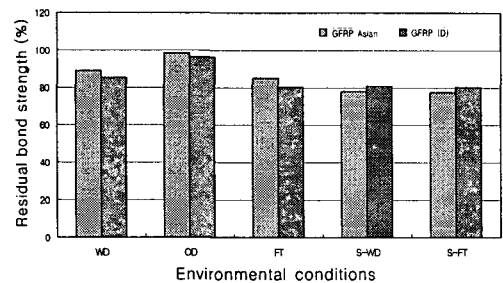
환경 노출 후 시험결과의 경향은 CFRP ISO 리바의 결과와 비슷하지만 건조-습윤 반복(84.7%) 환경을 제외하고는 약간 더 우수한 잔류 부착강도를 나타내었다. 국내에서 개발된 CFRP 리바의 경우 건조-습윤 반복 환경에서 부착강도의 저하가 크게 나타난 이유는 표면처리에 사용된 PVA 섬유가 건조와 습윤을 반복하면서 열팽창계수의 차이가 탄소 섬유와 다르기 때문에 FRP 리바 모체와 표면처리층 섬유의 계면에 약간의 공극을 발생시켜 이 공극에 수분이 습윤시 수분의 침투로 인한 분리가 CFRP ISO 리바 보다 크게 발생하였기 때문이다. 그러나 전체적으로 기준환경에서의 부착강도가 국내에서 생산된 CFRP 리바가 CFRP ISO 리바 보다 우수하기 때문에 전체적인 부착강도는 더 높게 나타났다.

나. GFRP 리바

내구성 저하환경에 노출시킨 후 GFRP 리바의 부착시험결과는 Fig. 7과 같다. GFRP 리바의 구성재료 중 유리섬유가 내구성 저하환경 노출후 매우 낮은 내구성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 GFRP 리바의 부착거동은 유리섬유의 재료 자체의 내구성도 중요하지만, GFRP 리바의 표면형상 및 표면을 구성하고 있는 재료의 특성에도 큰 영향을 받는다. GFRP Aslan 리바는 표면이 섬유를 이용하여 나선형웹의 형상과 규사코팅의 복합적인 형상을 가지고 있다. 따라서, 규사코팅과 나선형웹에 의한 부착성능 형상을 동시에 얻을 수 있도록 설계되어 있다. 이에 반해 국내에서 생산된 GFRP 리바의 표면은 PVA섬유를 이용한 브레이딩 rib의 형상을 가지고 있다. 부착시험결과 GFRP Aslan 리바(17.4 MPa)의 부착강도 보다는 국내에서 생산된 GFRP 리바(23.9 MPa)의 부착강도도 더 우수한 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 GFRP 리바의 부착시험시 규사가 수지층과 분리되어 쉽게 탈락되고, 나선형 웹 역시 유리섬유를 사용하였기 때문에 알칼리성인 콘크리트에 의하여 어느 정도 파



(a) Bond strength



(b) Residual bond strength

Fig. 7 Bond performance of GFRP rebars after accelerated environmental exposures

괴되기 때문이다. 이에 반해 국내에서 생산된 GFRP 리바의 경우 브레이딩공정을 통한 제직공법이므로 규사의 탈락과 같은 현상이 발생하지 않으며, PVA 섬유를 사용하기 때문에 콘크리트의 알칼리 환경에서 우수한 저항성을 가지고 있다. 내구성 저하환경에 노출 후 GFRP Aslan 리바의 성능평가 시험결과 염해와 건조-습윤 반복(77.7%) 및 염해와 동결융해 반복(77.52%)을 복합적으로 받는 환경에서 기준환경과 비교하여 잔류부착강도가 70%의 저항성을 나타내었을 뿐 나머지 환경에서는 80% 이상의 잔류부착강도를 나타내어 내구성 저하환경에 노출 후 성능감소가 크지 않았다. 국내에서 생산된 GFRP 리바의 경우 모두 80%이상의 잔류 부착강도를 나타내어 내구성 저하환경에 노출이 부착 성능저하에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 이는 국내에서 생산된 GFRP 리바의 표면처리에 사용된 섬유가 PVA 섬유로 내구성이 우수하기

때문에 유리섬유를 표면처리 섬유로 사용한 GFRP Aslan 리바와 비교하여 부착성능에 미치는 효과가 작기 때문이다. 또한 CFRP 리바와 비교하여 GFRP 리바의 부착성능의 저하가 크지 않은 이유는 부착성능은 FRP 리바에 사용된 섬유도 중요하지만 표면처리 방법에 영향을 받기 때문이다. 따라서 국내에서 생산된 FRP 리바의 표면처리 방법이 해외에서 사용되고 있는 CFRP 리바 및 GFRP 리바에 비하여 우수한 방법이라 할 수 있다.

다. AFRP 리바

AFRP 리바의 내구성 저하환경 노출후 부착강도 시험결과를 Fig. 8과 같다. 시험결과 AFRP 리바의 잔류부착강도는 염해와 동결융해반복 및 염해와 건조습윤 반복을 받는 환경에서 약 12 MPa 정도로 약간 크게 감소하였고, 동결융해 반복을 받는 환경에서는 약 13 MPa 정도를 나타내었으며, 다른 환

경에서는 기준환경과 비교해서 크게 부착강도가 감소하지는 않았다. 즉, 염해와 동결-융해, 염해와 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 환경에서는 잔류 부착강도가 약 70%를 나타내었고, 동결융해 반복을 받는 환경에서는 약 80%, 이밖에 다른 환경에서는 90% 이상의 값을 보여주었다.

IV. 결 론

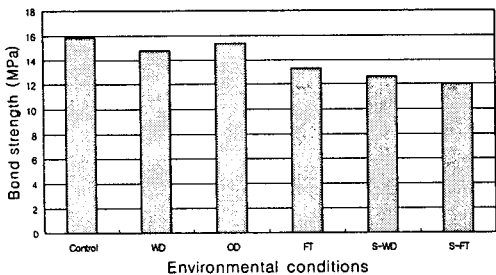
본 연구는 국내에서 생산된 2가지 종류의 FRP 리바를 수리 및 해양콘크리트 구조물의 철근대체 보강재로 사용하기 위하여 해외에서 생산된 3가지 종류의 FRP 리바와 비교시험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 인장시험결과 FRP 리바는 선형거동을 하는 취성 거동을 함을 알 수 있었다. 따라서 연성거동을 하는 보강철근(0.85)에 비하여 강도감소계수를 작은 값(0.7)을 사용하여 안전성을 충분히 확보하여야 한다.

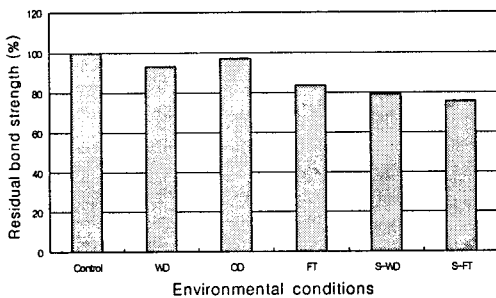
2. 인장강도는 국내에서 생산된 제품과 해외에서 생산된 제품이 거의 동일한 결과를 나타내어 해외에서 사용되고 있는 FRP 리바가 실제 콘크리트 구조물의 보강재료로 사용되고 있는 현실을 고려할 때 콘크리트 구조물에 충분한 적용성을 확보할 수 있다.

3. 내구성 저하환경에 노출 후 인장강도 시험결과 국내외에서 생산되고 있는 모든 CFRP 리바와 AFRP 리바는 모두 80% 이상의 우수한 성능을 발휘하였으나, GFRP 리바의 경우 염해와 동결-융해 반복 및 건조-습윤 반복을 받는 환경에서 약 70% 정도의 잔류 인장강도를 나타내었다. 따라서, GFRP 리바의 경우 콘크리트 구조물의 적용시 노출환경에 대한 안전계수를 충분히 고려하여야 한다.

4. 국내에서 개발된 CFRP 및 GFRP 리바의 부착시험결과 해외에서 생산된 제품보다 부착강도가 크게 나타났다. 이는 FRP 리바의 부착강도는 표면처리방법에 따라 크게 영향을 받는데 국내에서 생



(a) Bond strength



(b) Residual bond strength

Fig. 8 Bond performance of AFRP rebars after accelerated environmental exposures

산된 FRP 리바의 표면처리에 사용되었던 브레이딩 방법이 해외에서 사용되고 있는 표면규사코팅, 나선형 웹과 규사코팅 및 보강철근과 동일한 rib을 주는 방법에 비하여 효과적이라는 것을 의미한다.

5. 내구성 저하환경에 노출 후 부착시험결과 국내에서 개발된 FRP 리바에 비하여 해외에서 사용되고있는 FRP 리바의 강도저하가 크게 나타났다. 이는 국내에서 개발된 FRP 리바의 표면처리에 사용된 PVA 섬유가 내구성이 우수하고, 적용된 표면처리방법이 효과적이어서 외부환경에 대한 영향을 작게 받은 반면, 해외에서 사용되고 있는 FRP 리바의 경우 수분의 침투로 규사의 탈락, 유리섬유의 절단 및 표면굴곡의 전단파괴 등이 복합적으로 발생하였기 때문이다.

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

### References

1. ACI Report 440R, 1996, State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structure, reported by ACI Committee 440, Detroit, MI, USA
2. ACI 440H, 2000, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars, American Concrete Institute Committee 440.
3. Bakis, C. E., Freimanis, A. J., Gremel, D., and Nanni, A., 1998, Effect of Resin Material on Bond and Tensile Properties of Unconditioned and Conditioned FRP Reinforcement Rods, Proceedings of the First international Conference on Durability of Composites for Construction, B. Benmokrane, and H. Rahman, Eds., Sherbrooke, Quebec, pp.525-535.
4. Bank, L.C., Puterman, M., and Katz, A., 1998, The Effect of Material Degradation on Bond Properties of FRP Reinforcing Bars in Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, pp.232-243.
5. Freimanis, A.J., Bakis, C. E., Nanni, A., and Gremel, D., 1998, A Comparison of Pullout and Tensile Behaviors of FRP Reinforcement for Concrete, Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, Vol. 2, pp.52-65.
6. Defreese, J.M., 2001, Glass fiber reinforced polymer bars as the top mat reinforcement for bridge decks, Master thesis, Department of civil engineering, Virginia polytechnic institute and state university, Blacksburg, Virginia, U.S.A.
7. Nanni A., Rizkalla, S., Bakis, C.E., Conrad, J.O., and Abdelrahman, A. A., 1998, Characterization of GFRP Ribbed Rod Used for Reinforced Concrete Construction, Proceedings of the International Composites Exhibition (ICE-98), Nashville, Tennessee, pp.16A/1-6. 26
8. Park, C. G, and Won, J. P, 2004, Tensile Behavior and Fracture Properties of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 46, No. 1, pp.41-51
9. Park, C. G, and Won, J. P, 2004, Bond Performance of FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures after Chemical Environmental Exposure, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 46, No. 3, pp.73-81
10. Park, C. G, Won, J. P, and Yoo, J. G, 2003, Long-Term Effect of Chemical Environments on FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement, Journal of the Korean Concrete Institute, Vol. 15, No. 6, pp.811-819

11. Park, C. G, Won, J. P, and Kang, J. W, 2004, Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure, Journal of the korean concrete institute, Vol. 16, No. 4, pp.529-539
12. Won, J. P, and Park, C. G, 2004, Moisture Sensitivity and Aging Properties of Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bar for Concrete Structures, Journal of the korean society of civil engineers, Vol. 24, No. 2A, pp.381-390
13. Won, J. P, and Park, C. G, 2004, Development of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar and Prediction Model of Tensile Behavior, Journal of the korean society of civil engineers, Vol. 24, No. 3A, pp.491-50