

화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 장기 효과

박찬기¹⁾ · 원종필^{1)*} · 유정길¹⁾

¹⁾ 건국대학교 지역건설환경공학과

(2003년 5월 2일 원고접수, 2003년 10월 15일 심사완료)

Long-Term Effect of Chemical Environments on FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement

Chan-Gi Park¹⁾, Jong-Pil Won^{1)*}, and Jung-Kil Yoo¹⁾

¹⁾ Dept. Rural Engineering Rural Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

(Received May 2, 2003, Accepted October 15, 2003)

ABSTRACT

The corrosion of steel reinforcing bar(re-bar) has been the major cause of the reinforced concrete deterioration. FRP(Fiber-reinforced polymer) reinforcing bar has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. However, FRP re-bar is prone to deteriorate due to other degradation mechanisms than those for steel. The high alkalinity of concrete, for instance, is a possible degradation source. Other potentially FRP re-bar aggressive environments are sea water, acid solution and fresh water/moisture.

In this study, long-term durability performance of FRP re-bar were evaluated. The mechanical and durability properties of two type of CFRP-, GFRP re-bar and one type of AFRP re-bar were investigated; the FRP re-bars were subjected to alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water. The mechanical and durability properties were investigated by performing tensile, compressive and short beam tests. Experimental results confirmed the desirable resistance of FRP re-bar to aggressive chemical environment.

Keywords : acid solution, alkaline, corrosion, deionized water, FRP re-bar, salt solution

1. 서 론

사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물, 교량 구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱더 심각한 실정으로 그에 대한 방지대책이 많이 요구되어 오고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다.^{1,2)}

현재 보강 철근의 부식에 대한 문제점을 해결하고자 개발된 재료 중 FRP 보강근(fiber reinforced polymer re-bar)은 콘크리트 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 우수한 재료로서 그 사용 가능성이 매우 높다. FRP 보강근은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁻⁴⁾

이러한 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 고가이며 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립화로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다.³⁻⁶⁾ 또한 기존에 제시되어 있는 FRP 보강근에 대한 대부분의 연구는 크리프, 응력부식, 피로, 환경적 피로, 화학 및 물리적 열화현상에 대한 것에 집중되어 왔다. 그러나 이와 같은 대부분의 연구는 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 것이 아니라 항공산업 및 군수산업에 적용하기 위한 연구로 콘크리트의 보강재료로 사용되는 FRP 보강근과는 근본적인 차이가 있다.⁴⁻⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 콘크리트 보강용으로 FRP 보강근을 개발하고 개발된 FRP 보강근이 콘크리트 구조물의 보강재료로 적용되어 장기적인 환경조건에 노출되었 때의 내구성능을 평가함으로써 FRP 보강근의 내구성에 대한 기초적인 자료로 활용하고자 하며 이를 통하여 장기적으로 환경영향계수를 결정할 수 있는 자료로 사용하고자 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 FRP 보강근을 4가지 종류의 화학적 열화환경에 노출시킨 후의 장기 내구성능을 평가하였다.

* Corresponding author
Tel : 02-450-3750 Fax : 02-2201-0907
E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

2. 자연적인 열화와 촉진열화 관계에 대한 기존 연구 결과

일반적으로 콘크리트 구조물에 필요한 공용연수는 50년 이상이지만 현재 FRP 보강근의 열화성능에 대한 측정결과는 몇 년간이 전부이다. 따라서 FRP 보강근에 대한 내구성의 평가는 촉진열화 시험에 의하여 평가될 수 있다. 그러나 실제 조건의 공용연수와 촉진조건에서 시간과의 관계는 명백하지 않은 상태이다. FRP 보강근의 공용연수를 예측하기 위한 기존의 연구결과를 살펴보면 Katsuki와 Uomoto는 Fick's 법칙을 이용하여 GFRP 보강근의 파괴를 모형화 하였다.⁷⁾ 즉, 서로 다른 길이의 GFRP 보강근을 알칼리 용액에 침지시킨 후 EPMA(electron probe microscope analyser)를 사용하여 나트륨(Na)의 관입 깊이를 결정하였으며 알칼리의 확산계수를 동일한 식을 이용하여 계산하였다. 이를 위한 기본적인 가정으로 GFRP 보강근은 나트륨의 관입되는 깊이까지 섬유 및 매트릭스 수지가 파괴되기 때문에 이 부분은 강도를 발현하지 못하는 것으로 하였다. 즉 전체 단면적에서 강도를 발현할 수 있는 단면적이 감소하는 것으로 강도의 감소를 계산할 수 있다고 하였다. 이를 이용하여 40 °C의 온도와 1.0 M 농도를 가진 NaOH 용액에 침지한 촉진열화 시험을 실시한 GFRP 보강근의 강도감소를 예측하였다. Ssadatmanesh와 Tannous는 다양한 FRP 텐던의 인장강도 감소를 예측하였다.⁸⁾ 그들은 텐던의 강도 손실을 예측하는데 Fick's 법칙을 사용하였다. Fick's 법칙을 이용한 접근방법은 FRP 텐던내에 알칼리 이온의 침투를 추정하는 것이다. 그러나 Fick's 법칙을 이용한 이와 같은 접근 방법은 현재 개발된 FRP 보강근에 적용하는데는 약간의 문제점이 있다. 왜냐하면, 과학기술의 발달로 FRP 보강근의 결합재료로 사용되는 폴리머 재료와 보강섬유의 품질이 매우 높아졌기 때문이다. 현재 이와 같은 문제점을 고려하여 FRP 보강근의 공용연수를 예측하는데 많이 사용되는 방법은 시간-온도와의 관계를 이용한 방법이 있다.⁹⁾ 이 방법의 주요 접근 방법은 실제 구조물의 노출조건을 시간변환계수를 이용하여 결정하고 결정된 시간변환계수를 이용하여 노출온도 및 노출기간을 결정하는 것이다. 이와 같은 접근 방법의 사용상 장점은 비교적 장기간(약 10년간) 노출된 실제 구조물에서 얻을 수 있는 결과를 결정된 온도와 시간을 사용하면 짧은 시간 내에 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

그러나 이 방법 역시 사용상의 한계는 있다. 이 방법을 처음 제안한 Litherland는 이 식을 개발할 때 유리섬유보강 콘크리트의 공용연수를 예측하기 위해서 개발하였기 때문이다. 즉, 이 방법의 처음 도입은 FRP 보강근에 적용하기 위해서가 아니라 유리섬유보강 콘크리트에 적용하기 위한 것이기 때문이다.⁹⁾ 따라서 명백하게 Litherland의

접근방법이 타당하다고 할 수는 없지만 현재까지 이루어진 대부분의 연구가 같은 방법에 따라 이루어져 왔기 때문에 본 연구에서도 이와 같은 방법에 따라 촉진열화 와 자연열화의 관계를 정립하였다. Litherland 등의 식은 온도와 화학적 반응 또는 확산과의 관계로 주어졌으며 식 1과 같다.⁹⁾

$$N/C = 0.098e^{(0.0558T)} \quad (1)$$

여기서,

N=자연열화기간, C=촉진열화기간, T=촉진온도(°F)

식 1에서 온도 T는 60 °C로 하였으며 촉진시험기간은 식 1을 기본으로하여 50일 및 100일로 결정하였다. 이 촉진열화시험기간은 실제구조물에 적용하면 35년 및 70년과 일치하는 기간이다.

3. 시험재료 및 방법

3.1 시험재료

본 연구에서는 기존 해외에서 상용화되어 있는 FRP 보강근이 섬유의 일방향 배열에 의하여 압축 및 전단하중을 받을 때 섬유의 배열 방향에 따라 쪼개짐에 의한 파괴가 일어나는데 이를 방지하기 위하여 FRP 보강근의 표면을 3차원제직(3D-braiding)기법을 이용하여 처리하는 공정을 도입하여 제작하였다.

본 연구에서 개발한 FRP 보강근의 제조에 생산된 섬유 및 매트릭스 수지의 특성은 Table 1과 같으며 혼합비는 Table 2와 같다. 이때 PVA 섬유는 직접적으로 FRP 보강근에 인장특성에 영향을 미치지 않고 표면에 3차원제직에만 사용됨으로써 전단 및 압축하중을 받을시 쪼개짐에 의한 파괴를 방지하도록 하였다. 따라서 직접적으로 혼합비에 포함하지 않았으며 CFRP 및 GFRP 보강근에 동일하게 5%로만 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of fibers used in parametric studies

| Mechanical properties | Matrix (Vinylester) | Fiber types | | |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|-------|--------|
| | | E-glass | PVA | Carbon |
| Yield stress (MPa) | 90 | 1,840 | 2,254 | 1,896 |
| Elastic modulus (GPa) | 3.4 | 75 | 59.8 | 244 |
| Ultimate strain (%) | 5 | 2.64 | 5 | 1.2 |
| Fiber density (gm/cm ³) | - | 2.62 | 1.3 | 2 |
| Fiber diameter (10 ⁻⁶ m) | - | 16.5 | 14 | 10 |

Table 2 Mix proportions of FRP re-bars

| Type of FRP re-bar | Fiber types (percent of volume fraction, %) | | | Matrix (percent of volume fraction, %) |
|--------------------|---|-----|--------|--|
| | E-glass | PVA | Carbon | Vinyl ester |
| CFRP re-bar | - | 5 | 70 | 30 |
| GFRP re-bar | 70 | 5 | - | 30 |

FRP 보강근의 생산을 위하여 본 연구에서는 압출, 브레이딩/필라멘트 와인딩의 세가지 공정으로 구성된 생산시스템을 이용하였다(Fig. 1). 각 공정을 살펴보면 다음과 같다. 압출공정의 경우 FRP 보강근의 모체를 생산하는 단계이며 두 번째로 브레이딩/필라멘트 와인딩 과정은 FRP 보강근의 부착력 및 섬유 방향 배열로 인한 압축 및 전단하중이 작용시 섬유와 매트릭스 수지가 분리되어 발생하는 쪼개짐 파괴를 방지하여 압축 및 전단하중의 작용시 쪼개짐 파괴에 대한 저항성을 증가시키기 위한 공정이다.

본 연구에서는 개발된 FRP 보강근의 역학적 특성 및 내구성능을 비교 평가하기 위하여 현재 외국에서 사용되고있는 제품으로 표면을 규사 코팅한 CFRP 보강근(캐나다 ISO Rod), 규사코팅과 나선형 wrap을 표면에 처리한 GFRP 보강근(미국 Aslan re-bar) 및 폴리머 매트릭스를 이용하여 이형철근과 동일한 형태로 표면을 처리한 AFRP 보강근(일본 Technora)와 비교 시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 FRP 보강근의 모습은 Fig. 2와 같다.

3.2 촉진열화환경

FRP 보강근의 내구성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 콘크리트 보강재료로서 FRP 보강근이 받을 수 있는 화학적 환경을 기존의 연구자들에서 제시된 환경조건을 참고로 다음과 같은 4가지를 고려하였다.^{4,10)} 각 용액의 온도를 60 °C로 하여 재령 50일 및 100일간 침지하는 방법을 사용하였다.

3.2.1 알칼리 환경

FRP 보강근의 콘크리트에 보강재로 사용되면 콘크리트 내의 pH는 약 12~13 정도로 필수적으로 알칼리 환경에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 환경을 고려하여 pH12.6의 0.16%Ca(OH)₂+1%Na(OH)+1.4%K(OH) 용액을 제조하여 FRP 보강근을 침지하였다.⁴⁾

3.2.2 산환경

FRP 보강근의 산에 대한 영향을 평가하기 위하여 pH 2.92의 0.6% 아세트산용액에 FRP 보강근을 침지하였다.⁴⁾

3.2.3 염해 환경

FRP 보강근의 염해에 대한 영향을 평가하기 위하여 3%의 NaCl 용액에 FRP 보강근을 침지하였다.¹⁰⁾

3.2.4 중성 환경

FRP 보강근의 중성환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 수돗물에 FRP 보강근을 침지시키는 방법을 사용하였다.⁴⁾

3.3. 시험방법

FRP 보강근의 내구성능을 평가하기 위하여 4가지 화학적 촉진열화 환경에 노출 시킨 후 압축강도, 인장특성, 전단특성 시험을 실시하였다.

3.3.1 압축강도

본 연구에서 FRP 보강근의 압축강도시험은 FRP 보강근의 압축거동과 내구성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 시험시편의 길이는 직경의 2.5배로 결정하였는데 이와 같이 결정한 이유는 기존의 연구자들의 연구결과에 나타난 바와 같이 시험결과의 변화의 정도가 가장 작은 결과를 나타내는 시험시편의 크기이기 때문이다.¹⁰⁾ Fig. 3은 압축강도시험 모습이다.

3.3.2 전단(ISS: Interlaminar shear stress)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.¹¹⁾ 전단시험은 허용용량

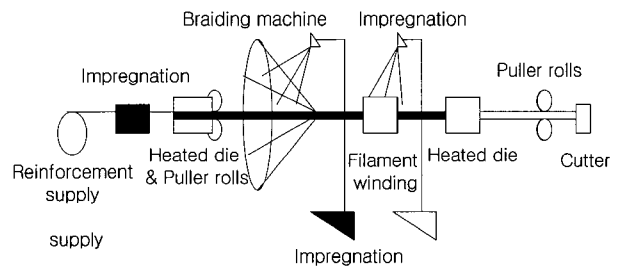


Fig. 1 Manufacturing systems of FRP re-bar

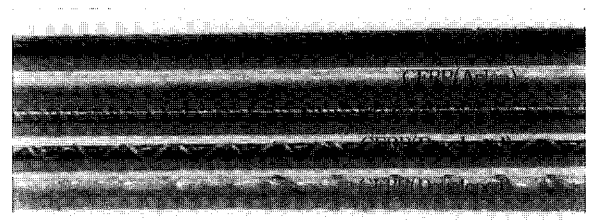


Fig. 2 Photo of FRP re-bars

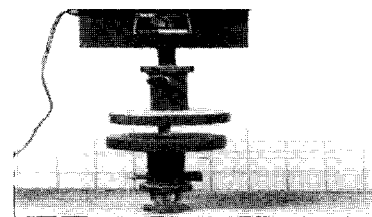


Fig. 3 Compressive strength test set-up

5 ton의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 사용하여 변위의 속도를 1.3 mm/min로 하여 시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 FRP 보강근 시험용 공시체의 배열은 Fig. 4와 같으며 Fig. 5는 전단시험 모습이다.

3.3.3 인장특성

본 연구에서는 인장거동을 평가하기 위하여 ACI 440에서 제시하고 있는 기준에 따라 인장시험을 실시하였다.^{2,12)} ACI 440 K에서는 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.^{2,12)}

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

여기서, f_u = 극한인장강도 (MPa),
 A = 공시체의 단면적 (mm^2)

또한 ACI 440에서는 FRP 보강근을 정착시키기 위해서 사용되는 강관의 내부직경은 보강근의 공칭직경 보다 적어도 10~14 mm 정도 크게 하여야 된다고 규정하고 있다.²⁴⁾ 이와 같은 규정에 따라 결정한 FRP 보강근의 인장 시험공시체의 치수는 Table 3 및 Fig. 6과 같다. 이와 같이 치수가 결정된 FRP 보강근 인장시험 공시체는 변위를 조절할 수 있는 25 ton 용량의 UTM을 사용하여 재하속도 5 mm/min으로 하여 시험을 실시하였으며 FRP 보강근의 변형률을 측정하기 위해서 LVDT를 설치하였다(Fig. 7).

4. 시험결과

FRP 보강근의 내구성에 대한 명확한 평가 기준은 지금까지 제시되고 있지 않았다. 따라서 FRP 보강근이 상용화되어 있는 많은 국가에서는 각 국가의 환경조건에 맞게 환경영향계수를 결정하여 설계에 적용하여 사용하고 있다. 그러나 직접적으로 환경영향계수를 결정하기 위한 내구성의 기준은 제시되어 있지 않다. 다만 ACI 440 위원회의 규정과 실험결과를 기본으로하여 2001년 Nanni는 각종 축진환경에 환경영향계수와 인장 및 ISS의 관계를 아래와 같이 제시하였다.³⁾

- CFRP 보강근의 환경영향계수는 0.90을 사용한다.
- GFRP 보강근의 환경영향계수는 0.70을 사용한다.
- 제안된 축진열화환경에 노출시킨 FRP 보강근의 인장 강도는 75%이하로 감소하여서는 안된다.
- 제안된 축진열화환경에 노출시킨 FRP 보강근의 ISS는 65%이하로 감소하여서는 안된다.

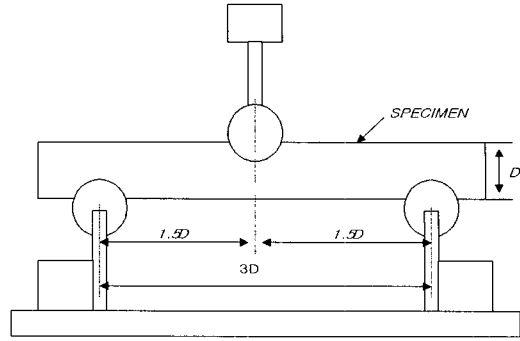


Fig. 4 Span configuration for 3D span¹¹⁾

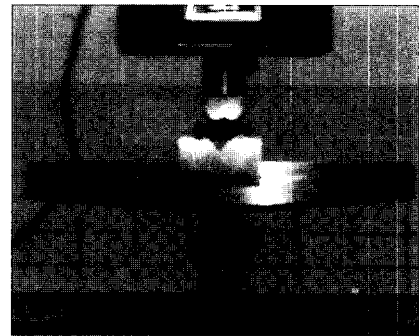


Fig. 5 Shear test set-up

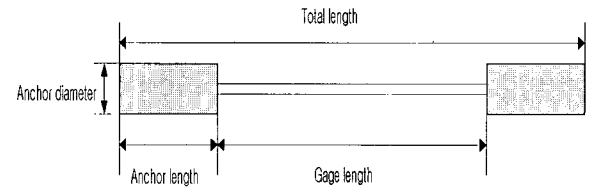


Fig. 6 Tensile strength test specimen

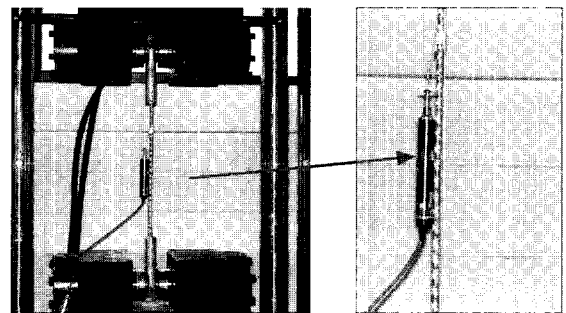


Fig. 7 Tensile test set-up

Table 3 Length and diameter specifications(unit:mm)

| Type of re-bar | Bar size | Gage length | Anchor length | Total length | Anchor diameter |
|-----------------|----------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| CFRP(ISO rod) | 9 | 400 | 300 | 1000 | 25.4 |
| CFRP(Developed) | 6 | 300 | 300 | 900 | 25.4 |
| GFRP(Aslan) | 9 | 400 | 300 | 1000 | 25.4 |
| GFRP(Developed) | 6 | 300 | 250 | 800 | 25.4 |
| AFRP(Technora) | 7.4 | 300 | 300 | 900 | 25.4 |

따라서 본 연구에서는 위의 제시된 규정에 따라 잔류 인장강도와 잔류 ISS를 기준으로 내구성을 평가하였다. 또한 본 연구에서 개발한 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근이 기존 FRP 보강근의 섬유 방향 배열로 인한 쪼개짐 파괴를 방지하여 압축 및 전단에 대한 성능을 증가시킨 것으로 ISS 시험과 함께 압축강도 시험을 추가적으로 실시하여 개발된 FRP 보강근의 성능 향상에 대한 신뢰성 있는 자료를 확보하고자 하였다. 따라서 FRP 보강근의 압축강도 기준 역시 이와 같은 관점으로 잔류강도 65%를 기준으로 하였다.

4.1 압축강도

4.1.1 기준공시체

기준 공시체의 압축강도 시험 결과 개발된 CFRP 보강근이 477.6MPa으로 가장 우수한 결과를 보여주었으며 그 다음으로 개발된 GFRP 보강근이 415.7MPa을 보여주어 ISO CFRP 보강근(193.1MPa)와 Aslan GFRP 보강근(319.6MPa) 및 AFRP(136.5MPa) 보강근 보다 우수한 결과를 보여주었다(Fig. 8). 이와 같은 결과는 FRP 보강근의 제조시 압축하중을 받을 때 쪼개짐에 의한 파괴를 방지하기 위하여 표면을 3차원 제직공정을 사용하였기 때문이라 사료된다.

4.1.2 CFRP 보강근

개발된 FRP 보강근 및 ISO CFRP 보강근을 촉진환경 하에 노출 시킨 후의 잔류압축강도 시험결과는 Fig. 9와 같다. 50일 노출후 시험결과는 모든 환경조건에서 잔류강도가 90% 이상을 나타내는 매우 우수한 결과를 보여주었으며 100일 노출후 역시 80% 이상의 높은 잔류강도를 보여주었다. 이와 같은 결과로 보아 CFRP 보강근의 압축강도는 각 촉진환경에서 내구성이 매우 우수한 결과를 보여주었다.

4.1.3 GFRP 보강근

개발된 GFRP 보강근 및 Aslan GFRP 보강근의 압축강도 시험결과를 살펴보면 50일간의 노출 후 잔류강도는 모두 70% 이상으로 나타났다. 특히 개발된 GFRP 보강근은 염해환경(73%)를 제외하고는 모두 80% 이상의 높은 잔류강도를 나타내었다(Fig. 9). Aslan GFRP 보강근의 경우 대부분의 환경조건에서 70%정도로 기준을 만족하지만 개발된 GFRP 보강근 보다는 환경조건에 대한 내구성이 약간 감소함을 알 수 있었다. 100일간의 노출후 압축강도 시험결과는 대부분의 환경조건에서 65%의 잔류강도 기준을 만족하지 못하는 결과를 보여주었는데 특히 개발된 GFRP 보강근에서는 알칼리환경과 산환경에서 잔류강도 50% 정도를 보여주었고 Aslan GFRP 보강근에서는 알칼리와 염

해에서 50% 정도의 잔류강도를 보여주어 이와 같은 환경에 노출시 공용연수 등을 충분히 고려한 후 적용할 필요가 있다고 판단된다.

4.1.4 AFRP 보강근

AFRP 보강근의 촉진환경 노출후 압축강도 시험결과는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 시험결과를 살펴보면 50일간의 노출후 모든 환경에서 80% 이상을 보여주었으며 100일간의 노출후에도 75% 이상의 잔류강도를 보여주어 평가기준인 잔류강도 65% 이상을 모두 만족시키는 결과를 보여주었다. 따라서 AFRP 보강근은 내구성이 매우 우수하다고 할 수 있다.

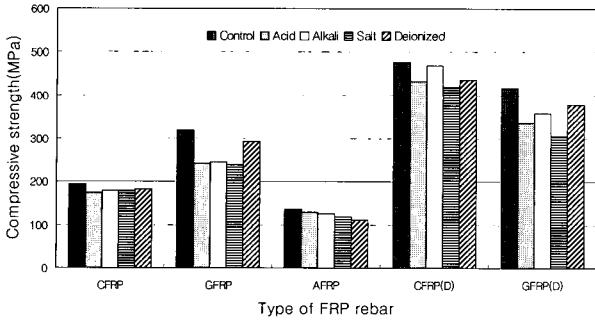
4.2 전단특성

4.2.1 기준공시체

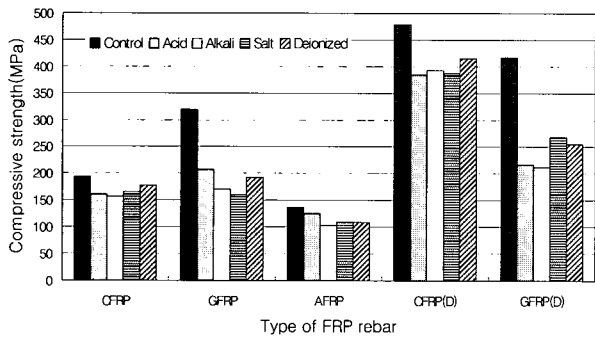
FRP 보강근 공시체의 ISS(Interlaminar shear stress)와 변위의 관계를 살펴보면 개발된 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근은 파괴후 ISS의 감소가 바로 발생하지 않고 일정 구간동안 약간 상승하는 결과를 보여주었다. 그러나 ISO CFRP 보강근 및 Aslan GFRP 보강근은 보강근의 쪼개짐에 의한 파괴가 발생하기 때문에 ISS가 쪼개짐 파괴가 발생한 후 지속적으로 감소하는 경향을 보여주었다. 또한 AFRP 보강근은 표면의 돌출부를 섬유로 감싼 다음 폴리머 매트릭스로 코팅을 실시하였기 때문에 개발된 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근과 마찬가지로 파괴 후 어느정도 강도가 감소한 후 약간 상승하다가 최종적으로 파괴되는 경향을 보여주었다. 그러나 표면을 처리한 섬유의 양과 형상으로 인하여 큰 ISS의 증가는 보여주지 않았다(Fig. 10). FRP 보강근의 ISS는 FRP 보강근의 생산방법과 매트릭스 수지에 의하여 큰 영향을 받는다. 이와 같은 이유는 일반적으로 FRP 보강근의 생산에 사용되는 압출성형(Pultrusion)방법의 경우 섬유가 일방향으로 배열되어 생산되기 때문에 전단하중을 받을 경우 섬유와 매트릭스 수지의 분리에 의한 쪼개짐 파괴가 주로 발생하기 때문이다. 따라서 개발된 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근은 이와 같은 FRP 보강근의 단점을 해결하기 위하여 FRP 보강근의 표면에 3차원제직을 통하여 섬유와 매트릭스의 분리에 의하여 발생할 수 있는 쪼개짐을 최소화하여 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근에서 전단강도가 각각 76.8MPa과 70.1MPa으로 ISO CFRP 보강근(46.7MPa), Aslan GFRP(53.2MPa) 보강근 및 AFRP 보강근(39.7MPa)보다 우수한 결과를 보여주었다(Fig. 11).

4.2.2 CFRP 보강근

개발된 CFRP 보강근 및 ISO CFRP 보강근의 잔류강도 시험결과는 Fig. 12와 같다. 잔류강도 시험결과를 살펴보

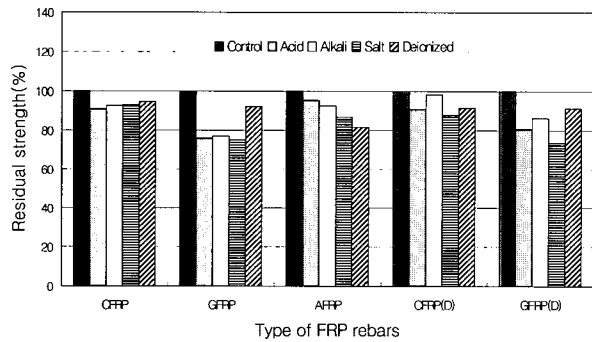


(a) After 50 days

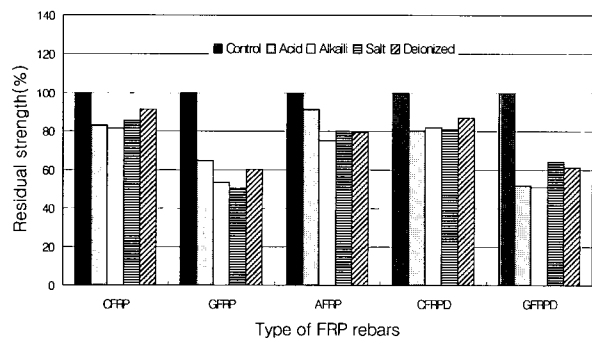


(b) After 100 days

Fig. 8 Compressive strength of FRP re-bars:
(a) after 50 days, (b) after 100 days



(a) After 50 days



(b) After 100 days

Fig. 9 Residual compressive strength of FRP re-bars:
(a) after 50 days, (b) after 100 days

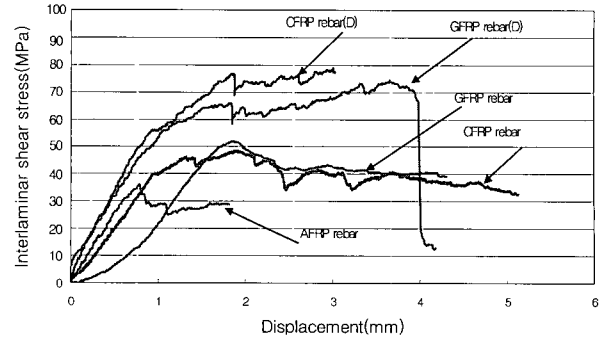
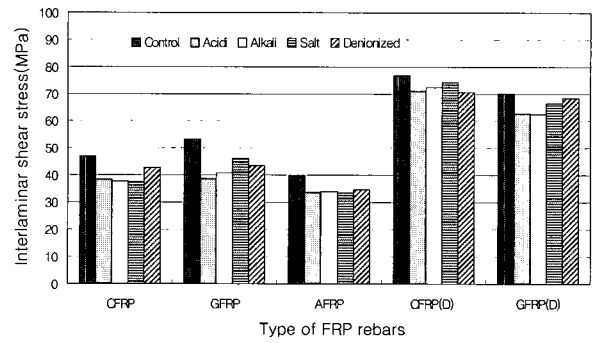
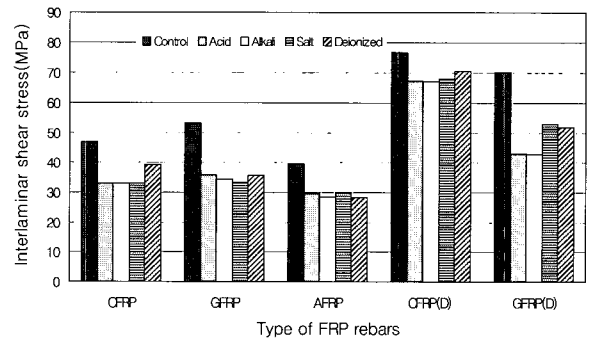


Fig. 10 ISS-Displacement curve of FRP re-bars



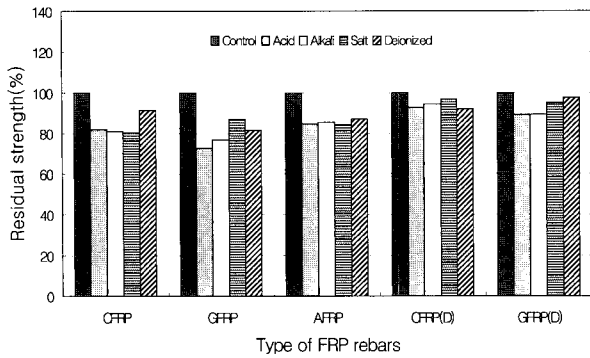
(a) After 50 days



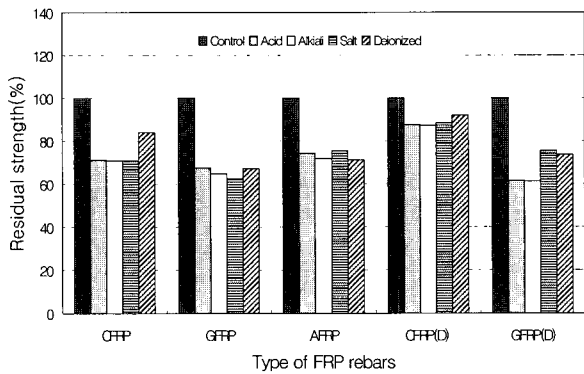
(b) After 100 days

Fig. 11 Interlaminar shear stress of FRP re-bars:
(a) after 50 days, (b) after 100 days

면 50일간 노출후 개발된 CFRP 보강근은 모두 90% 이상의 잔류강도를 가지고 있으며 ISO CFRP 보강근은 80% 이상의 잔류강도를 보여주었다. 이는 평가 기준인 잔류강도 65%를 모두 만족하는 결과로서 내구성이 우수하다고 할 수 있다. 또한 개발된 CFRP 보강근은 ISO CFRP 보강근보다 우수한 내구성을 보여주었다. 100일간의 노출후 전단시험결과를 살펴보면 개발된 CFRP 보강근은 80% 이상 ISO CFRP 보강근은 70% 이상의 잔류강도를 보여주어 100일간의 노출 역시 평가 기준을 만족하는 결과를 보여주었다. 또한 개발된 CFRP 보강근이 ISO CFRP 보강근보다 우수한 내구성을 보여주었다.



(a) After 50 days



(b) After 100 days

Fig. 12 Residual interlaminar shear stress of FRP re-bars : (a) after 50 days, (b) after 100 days

4.2.3 GFRP 보강근

축진환경에 50일간 노출후 개발된 GFRP 보강근의 ISS는 모두 80% 이상의 잔류강도를 가지고 있으며 Aslan CFRP 보강근은 70% 이상의 잔류강도를 보여주었다.(Fig. 11) 이는 평가 기준인 잔류강도 65%를 모두 만족하는 결과로서 내구성이 우수하다고 할 수 있다. 100일간 노출 후 전단시험결과를 살펴보면 개발된 GFRP 보강근은 산환경 및 알칼리 환경에서 60% 정도의 잔류강도를 나타내었으며 Aslan GFRP 보강근은 알칼리환경 및 염해환경에서 60%를 나타내어 잔류강도가 약간 떨어지는 값을 보여 주어 평가 기준인 잔류 ISS 65%를 모두 만족시키지 못하는 결과를 보여주었다(Fig. 11). 따라서 콘크리트 구조물에 적용시 이를 고려하여야 한다.

4.2.4 AFRP 보강근

AFRP 보강근의 축진환경에 노출 후 잔류 전단강도를 살펴보면 50일간의 노출후에 잔류 전단강도는 모두 80% 이상으로 매우 우수한 결과를 보여주었으며 100일간의 노출 후에도 70% 이상의 잔류강도를 나타내어 평가기준을 상회하는 매우 우수한 내구성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다.

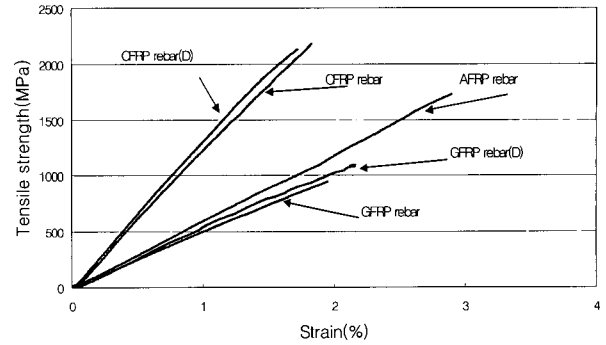


Fig. 13 Tensile strength-strain behavior of FRP re-bars

4.3 인장특성

4.3.1 기준공시체

FRP 보강근 공시체의 응력-변형률 관계는 변형률이 증가하면 응력과 변형률이 선형적으로 증가하다가 급격한 파괴를 발생시키는 취성적 거동을 하였다(Fig. 13). FRP 보강근의 인장거동 시험결과를 살펴보면 ISO CFRP 보강근의 인장강도는 2,179.5 MPa으로 가장 높게 나타났다. 개발된 CFRP 보강근의 인장강도는 2,135.5 MPa으로 ISO CFRP 보강근과 비교하여 작은 값을 나타내었다. 또한 개발된 GFRP 보강근은 인장강도 892.4 MPa이며 Aslan GFRP 보강근의 인장강도 892.4 MPa 보다 높은 값을 보여주었다. 또한 AFRP 보강근의 인장강도를 나타내었다(Fig. 14).

4.3.2 CFRP 보강근

개발된 CFRP 보강근 및 ISO CFRP 보강근의 잔류인장강도 시험결과를 Fig. 15와 같다. 잔류인장강도 시험결과를 살펴보면 50일간 노출후 개발된 CFRP 보강근 및 ISO FRP 보강근의 잔류인장강도가 모두 90% 정도의 우수한 저항성을 보여주었다. 또한 100일간의 노출 후 잔류인장강도는 80% 이상을 나타내었다. 이와 같은 결과는 평가기준인 잔류인장강도 75%를 모두 만족시키는 것으로 CFRP 보강근은 환경조건에 대한 내구성이 매우 우수하다고 하겠다.

4.3.3 GFRP 보강근

개발된 GFRP 리마 및 Aslan GFRP 보강근의 잔류인장강도 시험결과 50일간 노출후의 인장강도는 기준 공시체와 비교하여 80%이상의 우수한 잔류강도를 나타내었다. 또한 100일간의 노출후의 잔류강도는 개발된 GFRP 보강근 및 Aslan GFRP 보강근 모두 잔류강도 75% 이상을 만족시켜 평가 기준을 만족하였다(Fig. 15).

4.3.4 AFRP 보강근

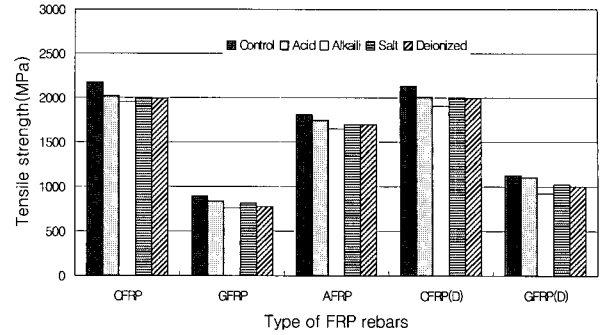
AFRP 보강근의 축진환경에 노출 후 잔류인장강도를

살펴보면 50일간의 노출후에 잔류인장강도는 모두 90% 이상으로 매우 우수한 결과를 보여주었으며 100일간의 노출후에도 80% 이상의 잔류강도를 나타내어 평가 기준 보다 높은 매우 우수한 내구성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다(Fig. 15).

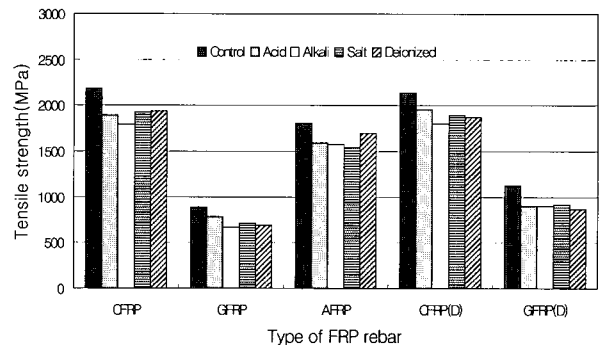
5. 결 론

본 연구는 콘크리트 구조물의 철근부식으로 인한 문제를 해결하고자 철근대체재료로서 사용 가능성이 높은 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근을 개발하고 개발된 FRP 보강근 및 현재 해외에서 사용하고 있는 FRP 보강근들의 역학적 특성 및 화학적 열화환경에 의한 내구성을 촉진 열화시험을 통하여 평가하였다. 촉진열화시험은 Litherland에 의해서 제의된 자연열화와 촉진열화와의 관계식을 이용하여 자연열화기간 35년, 70년을 기준으로하여 50일 및 100일간 노출하였다. 시험 결과는 2001년 Nann 등이 제안한 내구성 시험기준 및 환경영향계수와 비교 분석하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 개발된 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근의 압축강도 및 전단시험 결과 현재 사용되고 있는 CFRP ISO 보강근, GFRP Aslan 보강근 및 AFRP Technora 보강근과 비교하여 우수한 강도특성을 나타내었다. 이와 같은 결과는 기존 FRP 보강근이 쪼개짐 파괴에 의하여 주로 파괴가 발생하는데 본 연구에서 개발한 FRP 보강근은 섬유 표면의 3차원 제작처리를 실시하여 섬유의 일방향 배열로 인한 FRP 보강근의 쪼개짐 파괴를 방지하였기 때문이다.
- 2) 개발된 CFRP 보강근 및 CFRP ISO 보강근, AFRP Technora 보강근을 촉진환경하에 노출시킨 후 압축, 전단 및 인장시험을 통하여 평가한 내구성은 모두 평가기준을 모두 만족하였다. 따라서 환경영향 계수 0.9의 사용이 가능하다.
- 3) 개발된 GFRP 보강근 및 Aslan GFRP 보강근의 촉진 환경에 노출후 실시한 내구성 시험결과 개발된 GFRP 보강근 및 Aslan GFRP 보강근은 50일간의 노출 후에는 압축, 전단, 인장성능 모두 평가 기준을 모두 만족하는 결과를 보여주었으나, 100일간의 노출후에는 개발된 GFRP 보강근의 경우 압축성능에서 산 및 알칼리에 대하여 만족하지 못하는 결과를 보여주었으며 Aslan GFRP 보강근은 압축성능이 알칼리 환경과 염해환경에서 평가기준을 만족하지 못하는 결과를 보여주었다. 따라서 50일간의 노출기준으로 볼 때에는 환경영향계수 0.7을 적용할 수 있으나 100일 기준으로는 0.7을 적용할 수 없다. 따라서 GFRP 보강근은 내구년환을 기준으로 환경영향계수를 각기 다르게 적용하여 사용하여야 한다.

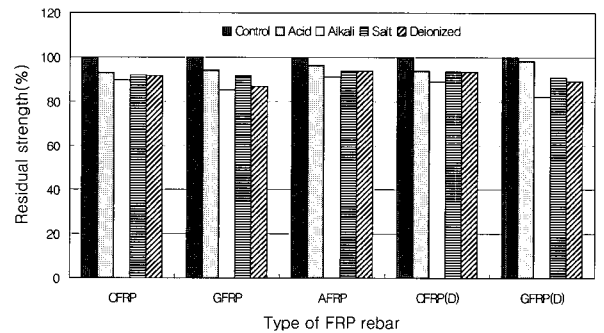


(a) After 50 days

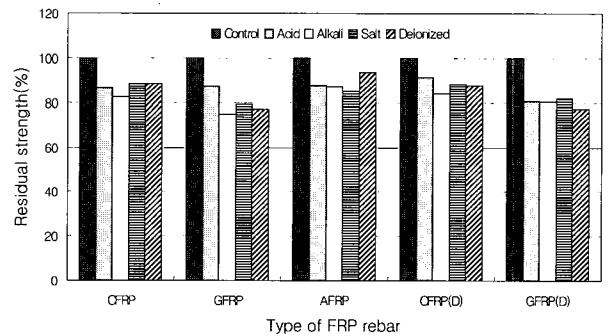


(b) After 100 days

Fig. 14 Tensile strength of FRP re-bars : (a) after 50 days, (b) after 100 days



(a) After 50 days



(a) After 100 days

Fig. 15 Residual tensile strength of FRP re-bars : (a) after 50 days, (b) after 100 days

이와 같은 결과로 본 연구에서 개발한 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근의 역학적 특성은 기존 FRP 보강근 제품과 비교하여 우수하며 내구성능 역시 평가기준을 기준과 비교할 때 현재 사용되고있는 FRP 보강근 제품과 비교하여 거의 동등하거나 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 동원건설(주)의 연구비 지원에 의한 결과물이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 440, "State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structure," ACI Report 440R, Detroit, MI, USA, 1996.
2. ACI, Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars," ACI Report 440H, Detroit, MI, USA, 2000.
3. Nanni, A., Francesco, M., "Mechanical properties and durability of FRP rods," CIES 00-22, Darpartment of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, U.S.A., 2001.
4. Salah U. Al-Dulaijan, Mesfer M. Al-Zahrani, Antonio Nanni, Charles E. Bakis, and Thomas E. Boothy, "Effect of Environmental Pre-conditioning on Bond of FRP Reinforcement to Concrete," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1999, pp.1~25.
5. Chin J.W., Aouadi K., and Nguyen T., "Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction," *Journal of Composites and Technology Research*, Vol.19, No.4, 1997, pp.205~213.
6. Devalapura, R.K., Gauchel, J.V., Greenwood, M.E., Hankin, A., and Humphrey, T., (1997) "Long-Term Durability of GFRP Composites in Alkaline Environments," Proc. 3rd Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, Sapporo, Japan, October 14-16th, Vol.2, pp.83~90. ASTM, (1996B), American Society for Testing and Materials, ASTM D 4475 Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By The Short Beam Method, November.
7. Katsuki F, Uomoto T, "Prediction of Deterioration of FRP Rods Due to Alkali Attack," Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1995, pp.82~69.
8. Ssadatmznes H and Tannous F., "Durability of FRP re-bar and Tendon," Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of ther Third International Symposium, Sapporo, Vol.2, 1997, pp.107~114.
9. Litherland, K.L., Oakley, D.R., and Proctor, B.A., "The Use of Accelerated Ageing Procedures to Predict the Long Term Strength of GRC Composites," *Cement and Cocnrete Research*, Vol.11, pp.455~466.
10. Vijay P.V., "Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars," PhD. thesis, Department of Civil Engineering West Virginia University, Morgantown, West Verginia, USA, 1999.
11. ASTM, (1996B), American Society for Testing and Materials, ASTM D 4475 Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By The Short Beam Method, November.
12. Castro, P.F. and Carino, N.J., "Tensile and Non-Destructive Testing of FRP bars," *J. Comp. Constr.*, Vol.2, No.1, February, 1998, pp.17~27.

요 약

철근의 부식은 철근크리트 구조물의 주요파괴 원인이다. 철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 가능성이 있는 재료 중 FRP 보강근은 그 가능성이 높다. 그렇지만 FRP 보강근은 보강철근과 다른 파괴 메카니즘으로 의하여 현저하게 성능이 저하될 가능성을 가지고 있다. 이와 같은 환경에는 알칼리, 산, 염해 및 물과 수분 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP 보강근의 화학적 환경하에서의 내구성능을 평가하고자 하였으며 사용된 FRP 보강근은 2가지 종류의 CFRP 보강근 및 GFRP 보강근, 한가지 종류의 AFRP 보강근으로 알칼리용액, 산용액, 염해환경 및 중성용액에 노출시켰다. FRP 보강근의 역학적 특성 및 내구특성은 인장, 압축 및 전단시험을 통하여 평가하였으며 시험결과 FRP 보강근은 매우 혹독한 화학적 환경에서 우수한 내구성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 산용액, 알칼리, 부식, 중성수, FRP 보강근, 염해용액