



콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안

박찬기¹⁾ · 원종필^{1)*} · 강주원²⁾

¹⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 ¹⁾ 영남대학교 건축학부

(2004년 3월 5일 원고접수, 2004년 7월 15일 심사완료)

Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure

Chan-Gi Park¹⁾, Jong-Pil Won^{1)*}, and Joo-Won Kang²⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

²⁾ School of Architecture, Yeungnam University, Gyeongsan, 712-749, Korea

(Received March 5, 2004, Accepted July 15, 2004)

ABSTRACT

The corrosion of steel rebars has been the major cause of reinforced concrete deterioration. FRP(Fiber-reinforced polymer) rebar has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. However, FRP rebar 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. Therefore, the USA, Japan, Canada, UK, etc are using environmental reduction factor. Although difference design guidelines were drawn in many, including USA, Japan, Canada, UK, etc, recommendations and coefficients that could take into account the long-term behavior of FRP reinforcement were not well defined.

This study focuses on recommendation of environmental reduction factor of FRP rebar. Environment reduction factor were decided using durability test result. FRP rebars were subjected to twelve type of exposure conditions including alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water etc. The water absorption behavior was observed by means of simple gravimetric measurements and durability properties were investigated by performing tensile, compressive and short beam tests. Based on the experimental result, environmental reduction factor of hybrid FRP rebar(A), and (C) and CFRP rebar was decided as 0.85. Also, hybrid FRP rebar(B) and GFRP rebar were decided as 0.7 for the environmental reduction factor

Keywords : *alkaline, acid solution, corrosion, design guidelines, deionized water*

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 FRP 보강근의 사용이 증가되고 있다. 강도가 높으면서도 부식에 우려가 없는 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 보강재료로서 사용될 경우 강도/질량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며 적은 보강량으로도 큰 인장 보강효과를 발휘할 수 있고 밀도가 작아 운반 및 시공이 쉬운 장점이 있다^{1,2,4)}. 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립으로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다⁵⁻⁷⁾. FRP 보강근의 내구성에 대한 평가는 FRP 보강근이 널리 사용되고

있는 외국의 선진국을 중심으로 이루어져 왔으며 연구결과를 기본으로 하여 환경적 영향을 고려하는 환경영향계수를 도입하여 설계에 적용시키고 있다^{6,8,9,13)}. 그러나 적용하는 환경영향계수는 확립된 기준이 없이 각각 서로 다른 기준으로 사용하고 있다. 이와 같은 이유는 FRP 보강근의 생산방법, 품질기준 등이 명확히 제시되어 있지 않기 때문에 각 생산제품에 따라 그 특성이 차이가 발생하기 때문이다^{11,12,14,15)}. 또한 각국의 환경조건이 어느 정도 상이한 차이가 발생하기 때문에 적용하는 장소에 따라 내구성 저하특성이 다르기 때문이다^{1,2,6,8,13)}. 따라서 국내에서 생산된 FRP 보강근 역시 기존 제품과 상이한 생산방법을 적용하고 있으며 재료의 특성 또한 다르기 때문에 이를 고려한 환경영향계수를 결정하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 제조된 5가지 종류의 FRP 보강근을 축진 내구성 저하환경에 노출시켜 수분흡수 특성과 역학적 특성을 평가하여 기존에 외국에서 제시하고 있는 내구성 시험기준과 비교하여 환경영향계수를 결정하고자 한다.

* Corresponding author

Tel : 02-450-3750 Fax : 02-2201-0907

E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

2. 내구성 설계를 위한 환경영향계수

FRP 보강재료의 영향을 미칠 수 있는 주요 환경으로는 수분이 존재하는 환경, 알칼리 환경 등이 있다. 따라서 FRP 보강재료를 콘크리트 구조물에 적용하기 위해서는 내구성에 대한 충분한 검토가 이루어져 설계시 이를 반영하여야 한다. 외국의 경우 내구성 설계를 위하여 환경조건을 고려한 환경영향계수를 결정하여 설계시 적용하고 있다. 내구성에 대한 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 일본 토목학회

FRP 재료에 대한 일본 토목학회의 설계기준은 “Recommendation for design and construction of concrete structures using fiber reinforced materials”에 제시하였으며 Table 1과 같다.⁸⁾

2.2 캐나다 고속도로 교량 설계 기준 (CHBDC)⁶⁾

교량과 같은 구조물에 FRP를 적용하기 위한 캐나다의 설계기준은 1989년 캐나다토목학회의 기술위원회에서 제정하였다. 설계기준에서 가장 중요시한 내용은 RC 구조물 내에서 FRP 보강재료의 장기내구성에 대한 것이다. FRP 보강재료가 지속적인 하중을 받을 때 강도가 감소한다는 사실을 고려하여 캐나다의 설계기준에서는 프리스트레싱 재료가 아닌 일반 보강재료에서 최대응력을 $\phi_{FRP} \cdot F \cdot f_{pu}$ 로 제한하였다.

여기서, f_{pu} 는 FRP 보강근의 비강도(specific strength: FRP 보강근 강도의 5%)이며 ϕ_{FRP} 은 저항계수로 GFRP, AFRP, CFRP에서 각각 0.75, 0.85, 0.85이다. F계수는 강도 한계 계수로서 FRP 보강근의 활하중에 의해서 발생하는 응력과 고정하중에 의해서 발생하는 강도 R의 비이다. R의 값은 Table 2와 같다.

Table 1 Environmental factors (JSCE)⁸⁾

Bars	Environmental factor
GFRP(E-glass)	0.77
AFRP	0.87
CFRP	0.87

Table 2 Stress limiting factor for FRP reinforcement⁶⁾

R	0.5	1.0	2.0 or more
F for GFRP	1.0	0.9	0.8
F for AFRP	1.0	0.6	0.5
F for CFRP	1.0	0.9	0.9

FRP 재료의 응력 한계 값뿐만 아니라 강도감소의 값도 제시하고 있는데 GFRP, AFRP 및 CFRP에서 각각 0.60~0.75, 0.42~0.85, 0.76~0.85이며 이와 같은 값은 고정하중과 활하중의 비에 의존한다.

2.3 미국 콘크리트학회 (ACI)^{1,2)}

ACI는 FRP 보강재료의 장기적인 환경노출 후에 인장 강도의 감소를 고려하기 위하여 환경영향계수를 제시하였다. 환경영향계수는 FRP 보강재료의 생산자에 의해서 주어질 강도에 곱하여 설계극한인장강도 $f_{ju} = C_E \cdot f_{ju}^*$ 를 획득하는데 사용하였다. 여기서, f_{ju} 는 설계극한인장강도이며 C_E 는 환경영향계수, f_{ju}^* 는 생산자에 의해서 제시된 설계극한인장강도이다. 환경영향계수는 섬유의 종류와 노출 조건에 크게 의존한다. ACI에서는 두 가지의 환경조건을 고려하여 Table 3과 같은 환경영향계수를 제시하고 있다.

2.4 EUROCRETE-BISE¹³⁾

EUROCRETE-BISE는 콘크리트의 보강재료로서 FRP의 사용을 위한 설계기준을 제시하기 위하여 1993년 pan-European 연구를 시작하였다. 이 연구의 결과로 1996년 “Modification of design rules to incorporate non-ferrous reinforcement”를 출판하였으며 1999년에는 “Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement”를 출판하여 환경적 영향을 고려한 안전계수를 도입하였다.¹³⁾

Table 4는 FRP 보강재료의 종류에 따른 환경영향계수의 값을 나타낸다.

Table 3 Environmental reduction factor^{1,2)}

Exposure conditions	Bars	C_E
Enclosed condition space	CFRP	1.00
	GFRP	0.80
	AFRP	0.90
Unenclosed condition space	CFRP	0.90
	GFRP	0.70
	AFRP	0.80

Table 4 Environmental factors (EUROCRETE-BISE)¹³⁾

Bars	Environmental factor
GFRP(E-glass)	0.30
AFRP	0.50
CFRP	0.60

Table 5 Materials and environmental factors (Norwegian standard)¹³⁾

Bars	η_{it}	η_{env}
GFRP(E-glass)	0.8~1.0	0.5*
AFRP	0.7~1.0	0.9
CFRP	0.9~1.0	1.0

* The conversion factor for GFRP due to moist alkali environmental may be taken equal to 0.9 if the reinforcement is protected e.g. by rubber hose in unbonded pre-stressing systems

Table 6 Mix proportions of FRP rebars

Type of FRP bar	Fiber types (Percent of volume fraction, %)			
	PVA	E-glass	Aramid	Carbon
CFRP	5.0	-	-	100.0
GFRP	5.0	100.0	-	-
Hybrid(A)	-	-	73.0	27.0
Hybrid(B)	-	81.0	-	19.0
Hybrid(C)	-	51.8	34.6	13.6

2.5 노르웨이 기준¹³⁾

노르웨이의 기준인 NS 3473의 설계기준에서는 변환계수 η_{it} 는 일반대기온도의 건조한 환경에 장기간 노출된 FRP 보강재료의 강도감소를 나타내는 계수로 이 값은 노출시간 및 섬유 종류에 따라 결정되며 그 값은 Table 4와 같다. 그러나 Table 4의 η_{it} 값은 노출시간에 영향을 받지 않는 구조물에서는 1.0까지 증가하여 사용할 수 있다. 콘크리트 환경을 고려한 FRP 보강근의 인장강도의 파괴는 변환계수 η_{env} 로 설명할 수 있으며 그 값은 Table 5와 같다.

3. 시험계획 및 방법

3.1 시험재료

본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 제품 중 기준 FRP 보강근의 취성적 성질을 개선한 세가지 종류의 고연성 하이브리드 FRP 보강근과 CFRP 및 GFRP 보강근의 내구 특성을 평가하고 환경영향계수를 결정하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 FRP 보강근의 재료특성 및 모습은 Table 6 및 Fig. 1과 같다. CFRP 보강근 및 GFRP 보강근에 사용된 섬유 중 PVA 섬유는 보강근의 역학적 특성의 향상을 위하여 사용된 것이 아니라 표면에 리브(rib)를 구성하여 부착강도의 향상에만 목적이 있기 때문에 전체적인 섬유의 혼합률에는 포함하지는 않는다.

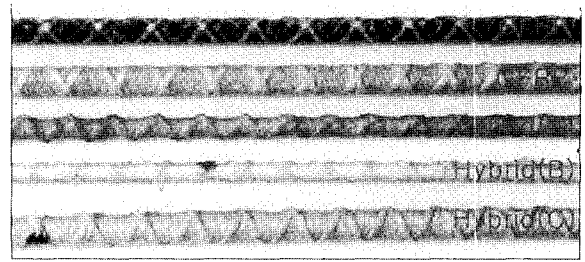


Fig. 1 Photo of FRP rebars

3.2 촉진 내구성 저하환경

FRP 보강근의 내구성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 12가지 환경조건을 고려하였다.

3.2.1 알칼리 환경(Alkaline: AL)

FRP 보강근의 알칼리 환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 pH 12.6의 0.16% Ca(OH)₂+1%Na(OH)+1.4%K(OH) 용액을 제조하여 FRP 보강근을 50일간 침지하였는데 이 기간은 Lintherland에 의한 촉진 내구성 저하 시험과 실제 자연노출 환경기간과의 관계에 따르면 35년간 노출기간에 해당한다.¹⁰⁾

3.2.2 산환경(Acid: AC)

FRP 보강근의 산에 대해 영향을 평가하기 위하여 pH 2.92의 0.6% 아세트산 용액에 FRP 보강근을 50일간 침지하였으며 알칼리 환경과 마찬가지로 실제 노출기간 35년과 같다.¹⁰⁾

3.2.3 염해환경(Salt: SA)

FRP 보강근의 염해에 대한 영향을 평가하기 위하여 3%의 NaCl 용액에 FRP 보강근을 50일간 침지하였으며 실제 노출기간 35년과 같다.¹²⁾

3.2.4 중성환경(Deionized water: DE)

FRP 보강근의 중성환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 pH 7~8수돗물에 FRP 보강근을 50일간 침지하였으며 실제 노출기간 35년과 같다.¹⁰⁾

3.2.5 건조-습윤 반복(Repeated wet-dry cycles: WD)

건조-습윤이 반복되는 환경에 노출된 FRP 보강근의 영향을 평가하기 위하여 FRP 보강근 시편을 약 60℃의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20℃ 물에 24시간 침지하는 조건을 1회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

3.2.6 장기오븐건조(Long-term oven dry: OD)

장기오븐 건조에 노출한 FRP 보강근의 영향을 평가하기 위하여 60 °C의 오븐에 50일간 노출시킨 후 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

3.2.7 동결-융해 반복

(Repeated freezing and thawing cycles: FT)

FRP 보강근의 동결융해 반복에 대한 저항성을 평가하기 위하여 KS F 2456에 따라 시험을 실시하였다. 이때 동결융해시험은 기중에서 동결되고 수중에서 융해되는 방법을 사용하였다. 또한 FRP 보강근이 콘크리트 내부에 설치된다는 것을 고려하여 기준 콘크리트 공시체를 제작하고 콘크리트 내부의 온도에 변화에 따른 한 사이클을 이루게 하였으며 시험시 온도는 콘크리트 공시체의 동결융해 반복시험과 동일하게 실시하였다.

3.2.8 황산염 침지(Sulfate solution immersion: SL)

FRP 보강근이 하수관거 등 황산염에 심한 영향을 받을 수 있는 환경에 노출되었을 때의 영향을 평가하기 위하여 Na₂SO₄ 10% 용액에 50일간 침지시켰다.

3.2.9 용빙제 환경(CaCl₂ immersion: CA)

FRP 보강근이 콘크리트 교량 상판 등에 적용시 겨울철에 용빙제로 사용되는 염화칼슘에 노출됨으로써 FRP 보강근의 성능저하가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP 보강근의 용빙제에 대한 영향을 평가하고자 4%의 염화칼슘용액에 50일간 FRP 보강근을 노출시킨 후 용빙제에 대한 영향을 평가하였다.

3.2.10 염해와 건조-습윤을 복합적으로 받는 환경

(Salt and repeated wet-dry cycles: S-WD)

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

3.2.11 염해와 동결-융해 반복을 복합적으로 받는 환경

(Salt and repeated freezing and thawing cycles: S-FT)

염해에 노출시킨 후 동결-융해 반복은 구조물이 염해와 동결-융해를 반복할 때 콘크리트 구조물의 파괴를 촉진시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려하여 FRP 보강근을 약 20 °C의 4% NaCl 용액에 24시간 침지시키고 -10 °C의 냉동고에서 24시간 동결시키는 것을 1회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

3.2.12 자외선 노출(UV radiation: UV)

FRP 보강근을 태양에 노출시키는 것은 자외선에 노출시키는 것을 의미한다. 자외선은 폴리머 재료에 영향을 미치는 것으로 알려져 왔으며 FRP 보강근의 표면에 주로 영향을 미친다. 콘크리트 부재에서 FRP 보강근은 콘크리트 덮개에 의해서 자외선 노출에 보호를 받는다. 그렇지만 자외선은 태양으로부터 보호를 받을 수 없는 외부에 노출된 장소에 사용되거나 FRP 보강근을 저장할 때 파괴를 발생시킬 수도 있다. 본 연구에서는 하이브리드 FRP 보강근의 자외선에 대한 영향을 평가하기 위하여 14일간 300~800 nm 스펙트럼 주파수대에서 $6.80 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 의 자외선에 노출시키는 방법을 사용하여 하이브리드 FRP 보강근의 자외선에 대한 저항성을 평가하였다.

3.3. 시험방법

3.3.1 수분흡수율

FRP 보강근의 수분흡수특성을 평가하기 위하여 4가지 화학적환경(알칼리, 산, 염해, 중성환경)에 노출시킨 시편을 5일마다 질량의 변화를 측정하는 방법으로 50일간 측정하였다. 수분흡수율을 측정하기 위한 시편은 길이는 Nanni 등이 사용하였던 방법으로 ISS 시험을 실시하기 위하여 제작한 시편을 이용하여 환경노출 후 재령에 따라 질량을 측정하고 노출기간이 완료되면 전단시험을 실시하는 방법을 사용하였다¹¹⁾. 따라서 시편의 길이는 50 mm로 하여 시편의 양쪽 직경으로 수분이 흡수되는 것을 방지하기 위하여 에폭시로 코팅하여 FRP 보강근의 표면으로만 수분흡수가 발생하도록 하였다. 수분흡수율은 식 1을 사용하여 계산하였다.

$$M = \frac{\text{습윤질량}(w) - \text{건조질량}(w_d)}{\text{건조질량}(w_d)} \times 100 \quad (1)$$

3.3.2 압축강도

본 연구에서 FRP 보강근의 압축강도시험은 FRP 보강근이 인장강도에 비하여 압축거동이 현저히 작기 때문에 압축부재에 사용될 경우 성능을 파악하고자 실시하였다. 또한 압축거동에 큰 영향을 미치는 매트릭스 수지의 축진 내구성 저하 환경에 노출 후 내구성을 평가하기 위하여 실시하였다. 시험시편의 길이는 직경의 2.5배로 결정하였는데 이와 같이 결정한 이유는 기존 연구자들의 연구결과에 나타난 바와 같이 시험결과의 변화의 정도가 가장 작은 결과를 나타내는 시험시편의 크기이기 때문이다.¹²⁾ 압축강도시험 모습은 Fig. 2와 같다.

3.3.3 전단(ISS: Interlaminar shear stress)

FRP 보강근의 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. 전단시험은 5 kN 용량의 UTM을 사용하여 하중재하속도 1.3 mm/min으로 시험을 실시하였다(Fig. 3)³⁾.

3.3.4 인장

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

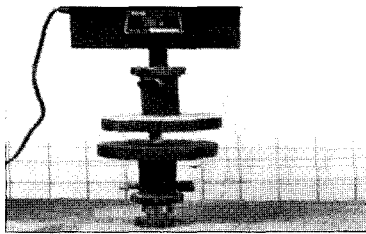


Fig. 2 Compressive strength test set-up

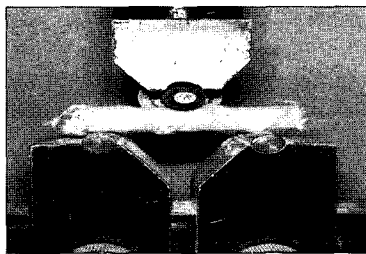
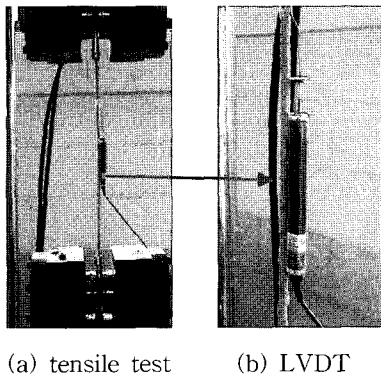


Fig. 3 Short beam test set-up



(a) tensile test (b) LVDT

Fig. 4 Tensile test set-up

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

여기서, f_u = 극한인장강도(MPa), A = 시편의 단면적(mm²)

또한 ACI 440에서는 FRP 보강근을 정착시키기 위해서 사용되는 강관의 내부직경은 보강근의 공칭직경 보다 적어도 10~14mm 정도 크게 하여야 된다고 규정하고 있다.²⁴⁾

본 연구에서는 이와 같은 규정에 따라 FRP 보강근 시험시편을 제작하였으며 인장시험은 250 kN 용량의 UTM을 사용하여 하중 재하속도 5 mm/min으로 시험을 실시하였다. FRP 보강근의 변형률을 측정하기 위해서 LVDT를 설치하였다(Fig. 4).

4. 시험결과

본 연구에서는 FRP 보강근의 축진 내구성 저하 환경에 노출 후 수분흡수, 압축, 전단 및 인장시험결과를 이용하여 기존의 ACI, JCI 등에서 제시한 환경영향계수와 Nanni가 제안한 내구성 시험기준 및 환경영향계수의 관계를 기본으로 하여 FRP 보강근의 환경영향계수를 결정하고자 하였다. Nanni는 ACI 환경영향계수를 고려하여 각종 내구성 저하 환경에 노출후 잔류 ISS 및 잔류 인장강도가 각각 65% 및 75% 이상을 만족할 때 CFRP 보강근의 경우 0.90, GFRP 보강근의 경우 0.70을 사용할 수 있다고 하였다. 또한 각 축진 내구성 저하 환경에 노출한 FRP 보강근의 잔류강도 시험방법과 결과를 제시하였다¹¹⁾.

또한 JCI에서 제시한 환경영향계수를 사용하기 위해서는 FRP 보강근이 실제 노출 조건을 고려한 축진 내구성 저하 환경에 노출 후 섬유 특성을 평가할 수 있는 잔류 인장강도는 75% 이상, 수지의 내구성을 평가하기 위한 시험결과는 잔류강도가 65% 이상이어야 사용할 수 있다고 규정하고 있다.⁸⁾

따라서 본 연구에서 ACI 및 JCI의 기준을 서로 비교 검토하고 Nanni 환경영향계수를 도출하기 위하여 사용하였던 축진 내구성 저하 시험결과를 기본 자료로 이용하여 환경영향계수를 적용하기 위한 범위를 잔류강도를 이용하여 산정하였다.

잔류강도의 범위는 유리섬유를 주요 구성섬유로 할 때와 아라미드섬유 및 탄소섬유를 주요 구성섬유로 할 때를 분리하여 산정하였는데 이는 유리섬유가 환경노출시 내구성에 대하여 탄소섬유 및 아라미드섬유보다 크게 영향을 받기 때문에 안전계수를 높이기 위한 것이다¹¹⁾. FRP 보강근의 환경영향계수를 결정하기 위하여 결정한 기준은 Table 7과 같다.

Table 7 Limited of environmental factor

Type of fiber	Residual compressive strength(%)	Residual Interlaminar shear strength(%)	Residual tensile strength(%)	Environmental factor
Glass	~50	~50	50~62	0.60
	50~64	50~64	63~74	0.65
	65~80	65~80	75~79	0.70
	80~90	80~90	80~89	0.80
	90~99	90~99	90~99	0.90
Carbon and aramid	~50	~50	50~62	0.70
	50~65	50~65	63~74	0.80
	65~89	65~89	75~89	0.85
	90~99	90~99	90~99	0.90
	100	100	100	1.00

4.1 수분흡수율

FRP 보강근의 수분흡수율에 대해서 명확하게 규정된 기준은 제시되지 않고 있다. 다만 ACI 440 위원회의 기준을 바탕으로 2001년 Nanni가 실시한 각종 내구성 실험을 통하여 아래와 같은 기준을 제시하고 있어 본 연구에서는 이와 같은 기준에 따라 FRP 보강근의 수분흡수율을 평가하였다.

· CFRP 보강근 및 GFRP 보강근의 흡수율은 각각 2.5%, 2.0%를 초과해서는 안된다.

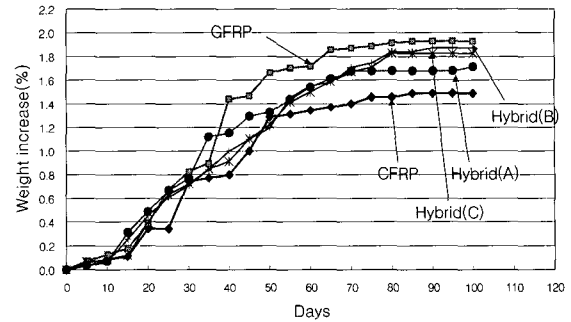
이때 수분흡수 특성 중 GFRP 보강근이 CFRP 보강근보다 수분흡수율의 규정을 엄격하게 제한하는 이유는 유리섬유를 사용한 GFRP 보강근이 탄소섬유를 사용한 CFRP 보강근보다 환경적 영향을 심하게 받아 내구성 저하가 크게 일어날 가능성이 높기 때문이다. FRP 보강근의 수분흡수 거동 시험결과는 Fig. 5와 같다. FRP 보강근의 수분흡수 특성을 살펴보면 유리섬유를 사용한 GFRP 보강근 및 하이브리드 FRP 보강근(B)가 가장 흡수율이 높았으며 탄소섬유 및 아라미드섬유를 사용한 CFRP, GFRP 보강근 및 하이브리드 FRP 보강근(A)와 (C)는 낮은 수분흡수 거동을 보여주었다. 그러나 모든 FRP 보강근은 수분흡수율이 2.0% 이하로 기준을 모두 만족하였다.

4.2 환경영향계수 결정

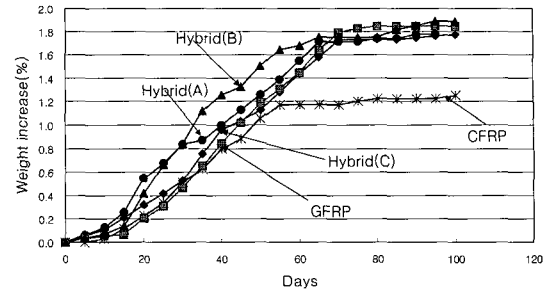
수분흡수율 시험결과 하이브리드 FRP 보강근과 CFRP 및 GFRP 보강근이 ACI 기준인 2.0% 이하의 흡수율을 모두 만족함으로써 수분흡수율은 FRP 보강근의 환경영향계수 결정에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 따라서 촉진 내구성 저하 환경에 노출 후 압축, 전단 및 인장시험 결과를 이용하여 환경영향계수를 결정하였다.

4.2.1 하이브리드 FRP 보강근(A)

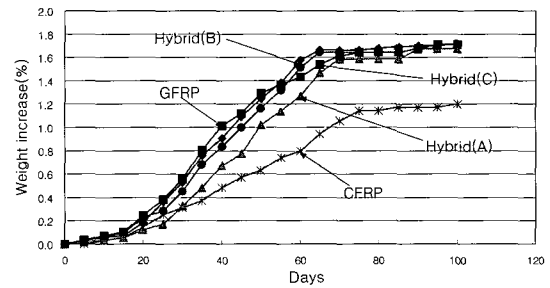
하이브리드 FRP 보강근의 환경영향계수의 결정을 위하



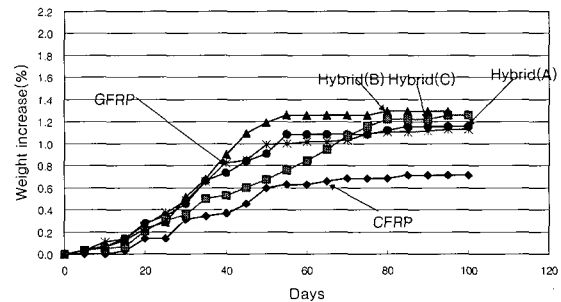
(a) Alkaline



(b) Acid



(c) Salt



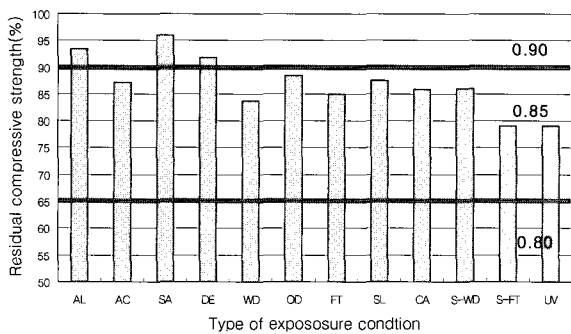
(d) Deionized water

Fig. 5 Water absorption test results of FRP rebars

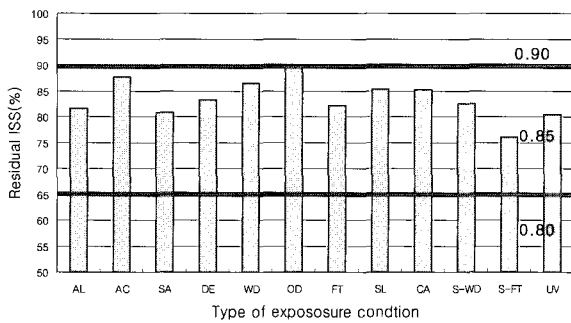
여 Table 7의 환경영향계수의 범위 중 탄소섬유와 아라미드섬유의 범위를 이용하였다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 보강근(A)가 탄소섬유와 아라미드섬유를 사용하여 구성되어 있기 때문이다.

하이브리드 FRP 보강근(A)의 촉진 내구성 저하 환경 노출 후 압축, 전단 및 인장 시험결과 잔류 강도가 모두

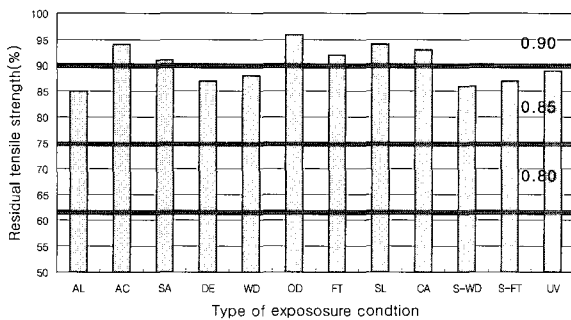
85% 이상을 나타내었다. 특히 탄소섬유와 아라미드섬유는 내구성이 우수한 재료이기 때문에 노출 환경조건 하에서 큰 영향을 받지 않은 것으로 판단된다. 환경영향계수 결정을 위한 하이브리드 FRP 보강근(A)의 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류 인장시험결과는 Fig. 6과 같다. 시험결과를 자세히 살펴보면 잔류 압축강도는 알칼리, 염해 및 중성환경에서 0.90의 환경영향계수의 범위를 나타내었으며 그밖에 모든 환경에서는 0.85의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 모든 환경에서 0.85의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 대부분의 환경에서 0.85의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요 구성요소로 하는 하이브리드 FRP 보강근(A)의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



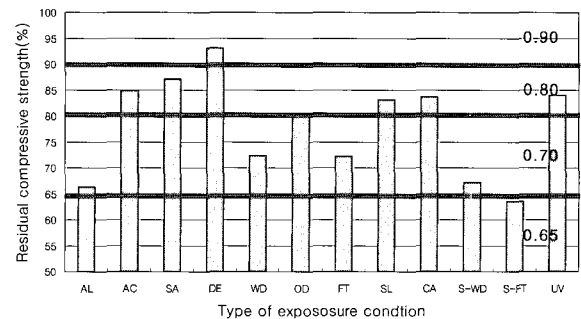
(c) Residual tensile strength

Fig.6 Durability test result of hybrid FRP rebar(A)

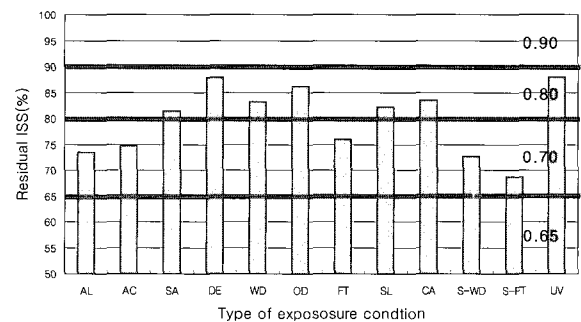
4.2.2 하이브리드 FRP 보강근(B)

하이브리드 FRP 보강근의 환경영향계수의 결정을 위하여 Table 7의 환경영향계수의 범위 중 유리섬유의 범위를 이용하였다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 보강근(B)가 주로 유리섬유를 사용하여 구성되어 있기 때문이다. 탄소섬유와 유리섬유를 주요 구성요소로 하는 하이브리드 FRP 보강근(B)의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류 인장시험결과는 Fig. 7과 같다.

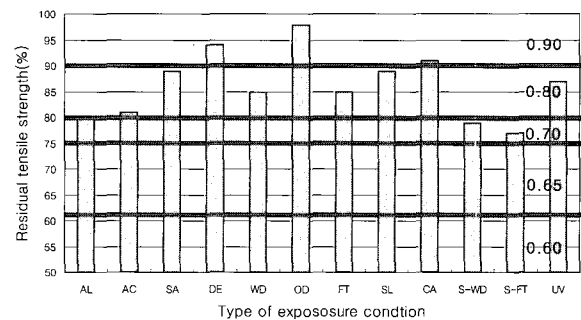
시험결과 하이브리드 FRP 보강근(B)는 유리섬유를 주요 구성섬유로 하기 때문에 아라미드섬유 및 탄소섬유를 주요 구성성분으로 하는 FRP 보강근과 비교하여 내구성이 약간 떨어지는 결과를 보여주었다. 그러나 대부분의 환경에서 모두 0.70 이상의 범위를 나타내었다.



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



(c) Residual tensile strength

Fig. 7 Durability test result of hybrid FRP rebar(B)

또한 ISS의 경우 대부분의 환경에서 0.70 및 0.80의 환경영향계수 범위를 나타내었고 압축강도에서 0.65의 환경영향계수의 범위를 나타내었던 염해와 동결-융해 반복을 복합적으로 받는 환경에서 역시 0.70의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 본 연구에서 평가된 압축강도와 ISS는 FRP 보강근을 구성하는 폴리머 수지의 영향을 평가하기 위한 것으로서 압축강도와 ISS가 상반된 결과를 보여주었지만 실제 값은 차이가 미소하고 압축강도 보다는 ISS가 폴리머 수지의 영향을 판단하는데 가산점이 있다고 판단되며 ACI 및 JCI 기준, Nanni의 촉진 내구성 저하 시험결과를 비교 분석한 결과 환경영향계수를 0.7로 결정하는 것이 타당하다고 판단하였다.

또한 잔류 인장강도의 경우 염해와 건조-습윤 반복 및 동결-융해 반복을 복합적으로 받은 환경에서도 환경영향계수는 0.70의 범위를 나타내었고 나머지 환경에서는 0.80 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유와 유리섬유를 주요 구성요소로 하는 하이브리드 FRP 보강근(B)의 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.

4.2.3 하이브리드 FRP 보강근(C)

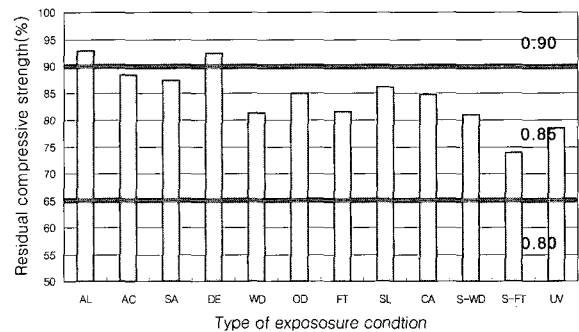
하이브리드 FRP 보강근의 환경영향계수의 결정을 위하여 Table 7의 환경영향계수의 범위 중 탄소섬유와 아라미드섬유의 범위를 이용하였다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 보강근(C)가 일부분 유리섬유가 포함되어 있지만 탄소섬유와 아라미드섬유를 주로 사용하였기 때문이다. 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요 구성요소로 하고 유리섬유를 일정량 혼합한 하이브리드 FRP 보강근(C)의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류 인장시험결과는 Fig. 8과 같다.

시험결과 하이브리드 FRP 보강근(C)는 하이브리드 FRP 보강근(A)와 마찬가지로 노출 환경조건에 대하여 매우 우수한 저항성을 가지고 있었다. 특히 일정량의 유리섬유를 혼입하여 가지고 있지만 내구성이 우수한 아라미드섬유가 유리섬유를 감싸는 형태를 가지고 있어 외부 환경조건에 의하여 큰 영향은 받지 않은 것으로 판단된다. 잔류 압축강도는 알칼리, 중성환경에 노출되었을 때 0.90의 환경영향계수 범위를 나타내었고 그밖에 환경에서는 0.85의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 또한 잔류 ISS의 경우 모든 환경에서 0.85의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 염해와 건조-습윤 반복 및 동결-융해 반복, UV 노출환경에서 0.85의 환경영향계수 범위를 나타낸 것을 제외하고는 모두 0.90 이상의 환경영향계수 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 FRP 보강근(C)의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.

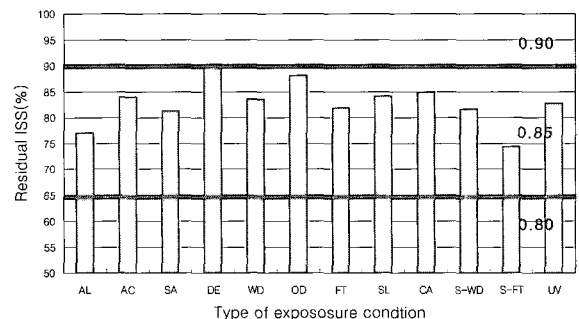
4.2.4 CFRP 보강근

CFRP 보강근의 환경영향계수의 결정을 위하여 Table 7의 환경영향계수의 범위 중 탄소섬유의 범위를 이용하였다. CFRP 보강근의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 9와 같다.

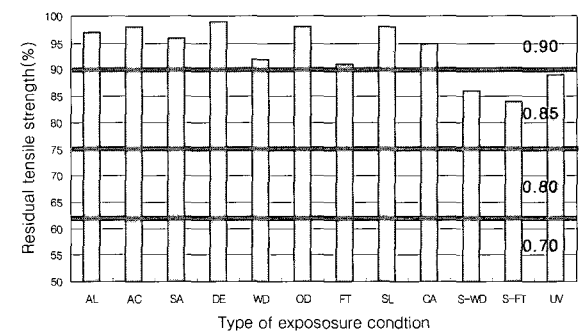
시험결과 잔류 압축강도 및 잔류 ISS는 고려한 환경에서 0.90의 환경영향계수의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.90 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 알칼리환경에서 0.85의 환경영향계수의 범위를 나타내었고 그 이외의 모든 환경에서는 0.90 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 CFRP 보강근의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength

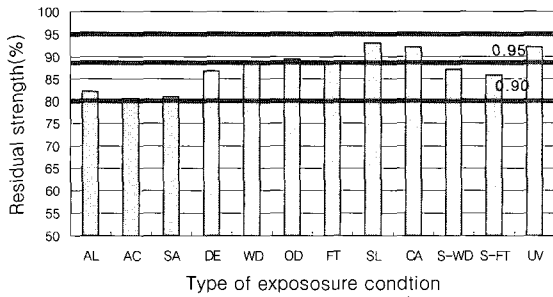


(b) Residual interlaminar shear stress

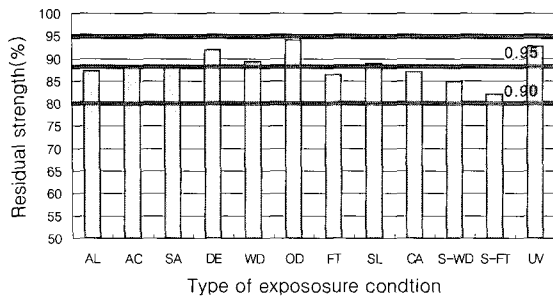


(c) Residual tensile strength

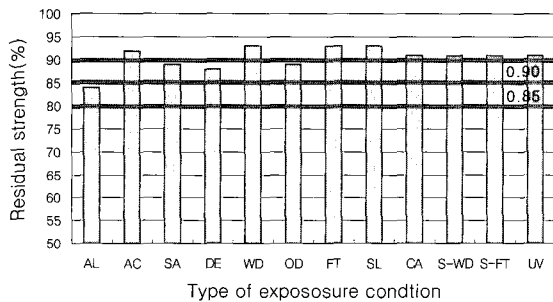
Fig. 8 Durability test result of hybrid FRP rebar(C)



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress

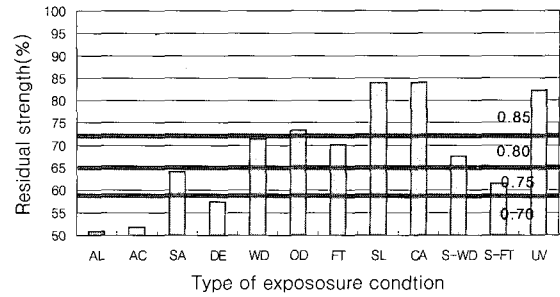


(c) Residual tensile strength

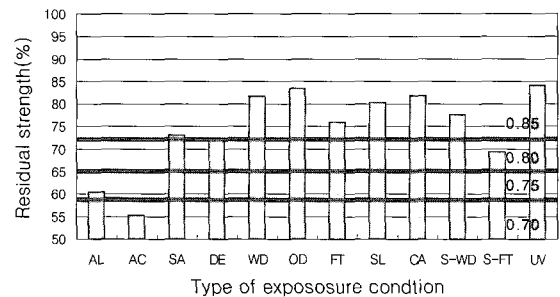
Fig. 9 Durability test result of CFRP rebar

4.2.5 GFRP 보강근

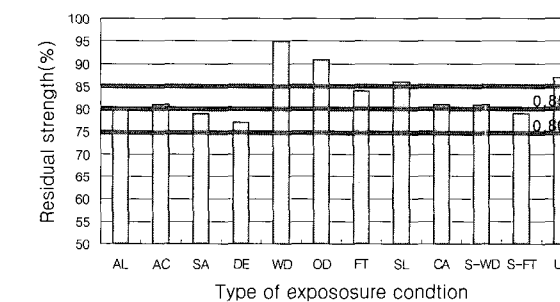
GFRP 보강근의 환경영향계수의 결정을 위하여 Table 7의 환경영향계수의 범위 중 유리섬유의 범위를 이용하였다. GFRP 보강근의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류 인장시험결과는 Fig. 10과 같다. 시험결과 잔류 압축강도는 알칼리 및 산환경에서 0.70의 환경영향계수의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.75 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 산환경에서 0.70의 환경영향계수의 범위를 나타내었으며 그 외의 환경에서는 모두 0.75 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 모든 환경에서 0.80 이상의 환경영향계수의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 GFRP 보강근의 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



(c) Residual tensile strength

Fig. 10 Durability test result of GFRP rebar

4.2.6 FRP 보강근의 종류에 따른 환경영향계수의 비교·분석

콘크리트의 노출환경을 고려하여 결정된 FRP 보강근의 종류에 따른 환경영향계수를 요약 정리하면 Table 8과 같다. FRP 보강근의 환경영향계수는 적용되는 구조물의 환경적영향과 사용재료의 종류 및 특성에 영향을 받기 때문에 직접적인 비교는 불가능하지만, 해외 각국에서 제시되어 있는 기준과 본 연구에서 제시한 기준을 비교함으로써 결정된 환경영향계수의 타당성을 평가하였다.

FRP 보강근의 경우 본 연구에서 제시한 환경영향계수는 ACI(0.90) 및 JCI(0.87)에서 제시한 값보다는 작으나 EUROCREE-BISE(0.60)에서 제시한 기준보다는 크다. 유럽의 경우 혹독한 환경에 노출될 가능성이 크기 때문에 작은 환경영향계수를 적용하고 있으며 상대적으로 미국의

Table 8 Environmental factor of FRP rebars

Type of FRP rebar	Environmental factor			
	This research	ACI	JCI	Eurocrete-Bise
Hybrid FRP rebar(A)	0.85	-	-	-
Hybrid FRP rebar(B)	0.70	-	-	-
Hybrid FRP rebar(C)	0.85	-	-	-
CFRP rebar	0.85	0.90	0.87	0.60
GFRP rebar	0.7	0.70	0.77	0.30
AFRP rebar	-	0.80	0.87	0.50

경우 이보다는 큰 값을 사용하여도 큰 문제가 없는 것으로 보여진다. 일본의 경우 국내의 환경과 가장 비슷하지만 4계절이 뚜렷한 국내의 환경특성상 약간 작은 값을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

이와 같은 값의 경우는 GFRP 보강근의 경우도 마찬가지며 다만 본 연구에서 제시한 값이 ACI 값(0.70)과 동일한 값으로 결정되었으며 JCI(0.77)에서 제시한 값보다는 현저히 작아 졌다는 것이다. 그러나 EUROCREE-BISE(0.30)에서 제시한 값보다는 현저히 크다. 이와 같은 이유는 환경적 영향과 재료특성에 따른 영향이 있다고 판단된다. 특히 본 연구에서 사용한 유리섬유가 미국회사의 제품으로 재료적 측면에서 ACI 기준에 더 근접할 수 있다고 생각된다.

하이브리드 FRP 보강근의 경우 (A)와 (C)는 아라미드 섬유가 주로 환경영향계수를 지배하며 (B)의 경우 유리섬유가 환경영향계수 결정에 주요한 역할을 한다. 따라서 하이브리드 FRP 보강근 (A)와 (C)는 AFRP 보강근의 환경영향계수와 비교할 수 있고 하이브리드 FRP 보강근(B)는 GFRP 보강근의 환경영향계수와 비교할 수 있다. 따라서 하이브리드 FRP 보강근 (A)와 (B)는 ACI(0.80)와 EUROCREE-BISE(0.50)의 AFRP 보강근의 환경영향계수보다는 크고 JCI(0.87)의 환경영향계수보다는 작은 값이 적용되는데 이는 일본과 국내 환경이 비슷하며 환경적 측면에서는 국내의 환경이 계절적 영향으로 혹독한 환경이 될 수 있기 때문에 약간 작은 값을 사용하는 것이 바람직하다. 또한 하이브리드 FRP 보강근의 제조에 사용된 아라미드섬유가 일본 회사의 제품으로 미국 제품 및 유럽에서 사용되고 있는 제품과 차이가 있기 때문이다.

하이브리드 FRP 보강근 (B)의 경우 GFRP 보강근과 마찬가지로 JCI 기준보다는 작고 ACI 및 EUROCREE-BISE 기준보다는 큰 값으로 결정되었는데 이와 같은 이유는 환경적 영향과 재료특성에 따른 영향이 있다고 판단된다. 특히 본 연구에서 사용한 유리섬유가 미국에서 생산된 제품으로 재료적 측면에서 ACI 기준에 더 근접할 수 있다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 보강재로서 12가지 축진 내구성 저하 조건을 고려한 FRP 보강근의 내구성을 압축, 전단 및 인장시험을 통하여 평가하였다. 또한 ACI, JCI 및 Nanni의 축진 내구성 저하 시험결과를 기본으로하여 환경영향계수를 결정하였다. 결정된 FRP 보강근의 환경영향계수를 콘크리트구조물에 적용하면 안전성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다고 판단되며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수분흡수율 시험결과 하이브리드 FRP 보강근 및 일반 FRP 보강근은 모든 축진 내구성 저하 환경에서 ACI 위원회에서 규정하고 있는 2% 이하의 수분흡수율을 보여주어 수분흡수에 의한 내구성 저하는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.
- 2) 하이브리드 FRP 보강근(A)의 환경노출 후 잔류강도결과는 모든 축진환경에서 매우 우수한 내구성을 보여주었으며 시험결과를 기본으로 환경영향계수는 0.85로 결정하였다.
- 3) 하이브리드 FRP 보강근(B)의 환경노출 후 잔류강도 시험결과는 알칼리 및 산환경에 노출 후 잔류강도가 가장 낮은 경향을 보여주었으며 특히 환경조건 및 재료 조건에 영향을 크게 받는 것으로 판단되어 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.
- 4) 하이브리드 FRP 보강근(C)의 환경노출 후 잔류강도결과는 모든 축진환경에서 매우 우수한 내구성을 보여주었으며 환경영향계수의 범위를 적용하여 분석한결과 0.85를 사용할 수 있을 것으로 판단하였다.
- 5) 축진내구성 저하시험을 기본으로한 환경영향계수 결정 결과 CFRP 및 GFRP 보강근은 각각 0.85와 0.70의 범위에 환경영향계수 범위를 만족하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. ACI Report 440R, "State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structure," Reported by ACI Committee 440, Detroit, MI, USA, 1996, pp.1~36
2. ACI, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars," American Concrete Institute Committee 440, Detroit, MI, USA, 2000, pp.1~78

3. ASTM, "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, USA, 1998.
4. 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
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. Canadian Standards Association, "Canadian Highways Bridge Design Code," Section 16, *Fiber Reinforced Structures*, 1996, 28pp.
7. Devalapura, R.K., Gauchel, J.V., Greenwood, M.E., Hankin, A., and Humphrey, T., "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, 1997, pp.83~90.
8. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," *Concrete Engineering Series*, No.23, 1997, 325pp.
9. Katsuki F and Uomoto T, "Prediction of Deterioration of FRP Rods Due to Alkali Attack;" *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 1995, pp.82~69.
10. 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 Concrete Research*, Vol.11, 1981, pp.455~466.
11. Nanni, A. and Francesco, M., "Mechanical properties and durability of FRP rods," *CIES 00-22*, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, U.S.A., 2001.
12. Salah U. Al-Dulaijan, Mesfer M. Al-Zahrani, Antonio Nammi, 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*, Dec. 1999, pp.1~25.
13. Sheard, P., Clarke, J., Dill, M., Hammersley, G., and Richardson, D., "Eurocrete-Taking Account of Durability for Design of FRP Reinforced Concrete Structures," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium*, Vol.2, Sapporo, Oct. 1997, pp.75~82.
14. Ssadatmzesh H and Tannous F, "Durability of FRP Rebar and Tendon," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium*, Vol.2, Sapporo, 1997, pp.107~114.
15. Vijay P.V., "Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars," PhD. thesis, Department of Civil Engineering West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA, 1999.

요 약

철근콘크리트 구조물의 주요 파괴 원인은 철근의 부식에 의한 것으로 철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 가능성이 있는 재료 중 FRP 보강근은 그 가능성이 높다. 그렇지만 이와 같은 FRP 보강근은 보강철근과 다른 파괴 메카니즘에 의하여 현저하게 성능이 저하될 가능성을 가지고 있다. 이와 같은 환경에는 알칼리 환경 등이 있다. 따라서 미국, 일본, 캐나다 등 많은 나라에서는 환경영향계수를 사용하고 있다. 그렇지만 환경영향계수는 각 나라마다 다르게 적용되고 있는데 이는 FRP 보강근에 대한 장기거동에 대하여 명확한 기준이 제시되어 있지 않기 때문이다. 본 연구에서는 FRP 보강근의 환경영향계수를 제안하는데 그 목표를 두고 있다. 환경영향계수는 내구성 시험결과를 기본으로 하여 결정하였다. FRP 보강근은 알칼리, 산, 염해 등을 포함한 환경조건에 노출하였다. FRP 보강근은 간단한 질량변화를 측정하여 수분흡수 거동을 평가하였으며 역학적 특성의 변화는 인장, 압축 및 전단시험을 통하여 평가하였다. 시험결과를 기본으로하여 하이브리드 FRP 보강근(A)와 (C) 및 CFRP 보강근은 환경영향계수를 0.85로 결정하였고 하이브리드 FRP 보강근(B) 및 GFRP 보강근은 0.70으로 결정하였다.

핵심용어 : 알칼리, 산용액, 부식, 설계지침, 중성용액