

내구특성 파악을 위한 GFRP 보강근의 촉진실험 연구

Accelerated Test Program for Durability Characteristics of GFRP Rebars

김 형 열* 유 영 준* 박 영 환*
Kim, Hyeong-Yeol You, Young-Jun Park, Young-Hwan

Abstract

This paper presents the durability characteristics of commercially available GFRP rebars under various environmental conditions. Two types of GFRP rebars were tested by using an accelerated aging method. A total of 264 rebar specimens were conditioned up to 132 days in the moisture, chloride, alkaline, and freeze-thaw environmental conditions. The durability characteristics of conditioned rebars were obtained by comparing the tensile strength, horizontal shear strength, and elastic modulus between the unconditioned and conditioned GFRP rebars. The test results indicated that the mechanical properties of GFRP were significantly reduced after conditioning. Long-term degradation of GFRP rebars was also estimated using the results of a short-term durability test.

요 지

본 논문에서는 다양한 환경인자에 노출된 상용 유리섬유강화(GFRP) 보강근의 내구특성에 대하여 기술하였다. 촉진실험방법을 이용하여 2종류의 GFRP 보강근에 대하여 내구성 실험을 실시하였다. 총 264개 시편을 염화물, 알칼리, 동결융해 상태에 최고 132일간 노출시켰다. GFRP 보강근의 내구특성은 촉진 실험된 보강근의 인장강도, 수평전단강도, 탄성계수를 원래 상태의 보강근의 결과와 비교하여 파악하였다. 실험결과에 따르면 촉진 실험된 GFRP 보강근의 재료적 특성은 심각하게 감소되었다. 단기 내구성 실험결과를 이용하여 GFRP 보강근의 장기 열화특성을 추정하였다.

Keywords : FRP, Rebar, Durability, Accelerated Testing

핵심 용어 : FRP, 보강근, 내구성, 촉진실험

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부

E-mail : hykiml@kict.re.kr 031-910-0582

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

섬유강화폴리머(Fiber Reinforced Polymers: FRP)는 기존 건설재료인 동일한 중량을 갖는 강재와 콘크리트에 비하여 고강도인 재료이며 강재와 같이 산화 및 환원반응에 의한 부식이 발생하지 않는 고내구성 재료로 알려져 있다. 이러한 재료적 장점으로 인하여 제3세대 건설재료인 FRP 복합재료가 고내구성이 요구되는 구조물 건설에 효과적인 대안으로 제시되고 있다. 현재 국내외에서 FRP를 보강재 또는 구조재료로 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서도 고강도인 FRP를 철근 대체재로서 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 섬유강화폴리머 보강근의 개발 연구가 진행 중에 있다.⁽¹⁾

FRP를 구성하는 주재료는 섬유와 레진이고, 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유가 강화재로 주로 사용되고, 레진은 비닐에스터 계통이 사용된다. 콘크리트 구조물에 적용되는 보강근의 기본적인 요구조건은 우수한 역학적 성능과 고내구성이며, 콘크리트 구조물의 보강근으로 개발되는 FRP 보강근은 최소한 콘크리트의 내구성에 상응하는 고내구성이 요구된다. 그러나 일반적으로 고내구성 재료로 알려져 있는 FRP재료가 유해한 환경요소에 노출되는 경우 가수분해와 같은 화학적 반응으로 인하여 재료적 열화와 역학적 성질의 감소가 발생할 수 있다. 따라서 FRP 보강근을 사용하는 콘크리트 구조물의 내구성을 파악하기 위해서는 먼저 사용하중 및 환경에 의한 FRP 보강근의 내구특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. FRP 보강근의 장기적인 내구성을 파악하기 위해서는 내구성 영향인자별 축진실험을 통한 내구성시험이 필요하게 된다.

본 연구는 열악한 환경에 건설되는 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 FRP 보강근의 개발 연구과제의 일환으로 FRP 복합재료의 장기적인 내구특성을 파악하기 위해서 수행되었다. FRP 보강근의 내구성을 정량적으로 평가하기 위하여 외국에서 상용화 생산된 2종류의 GFRP 보강근을 선정하였고, 총 264개 시편을 염화물, 알칼리, 동결융해 상태에 최고 132일간 노출시켰다. 내구특성을 파악하는데 필요한 기본적인 내구성 실험방법인 축진실험방법에 근거하여 내구성 실험

을 실시하고 그 결과를 분석하였다. GFRP 보강근의 내구특성은 축진실험된 보강근의 인장강도, 수평전단강도, 탄성계수를 원래 상태의 보강근의 결과와 비교하여 파악하였다. 또한, 축진실험 결과를 이용하여 GFRP 보강근의 장기적인 내구특성을 추정할 수 있는 해석적 모델을 제안하였다.

2. FRP의 열화 미케니즘

FRP 내구성에 영향을 주는 주요 환경인자는 수분, 염화물, 알칼리, 동결융해작용, 자외선 등으로 알려져 있다. 레진에 수분이 흡수되면 폴리머를 가소화(Plasticization)시키고 부풀음 현상으로 인하여 매트릭스의 박리와 균열을 발생시키게 된다. 매트릭스가 열화되면 섬유와 섬유간의 하중전달 미케니즘이 약화되어 FRP의 역학적 성질이 변하게 되며, 매트릭스에 발생한 균열과 공극을 통하여 유해한 화학물질이 섬유-매트릭스 경계면까지 확산될 수 있다. 이 경우 섬유의 열화가 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾⁽³⁾

일반적으로 FRP 보강근의 경제성을 확보하기 위하여 다른 섬유강화제에 비하여 가격이 낮은 유리섬유를 사용하는 GFRP 보강근이 외국에서 상용화 생산되고 있는데, 유리섬유는 수분과 알칼리 환경에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 유리섬유가 수분을 흡수하면 리칭(Leaching) 작용으로 인하여 유리섬유에 포함된 이온이 수분으로 침출되고, 에칭(Etching) 작용에 의해서 유리섬유를 구성하는 실리카가 파괴된다. 결과적으로 유리섬유 표면은 침식되고 가수분해작용의 부산물로 생성되는 젤타입의 수산화실리온이 섬유표면에 축적되어 섬유-매트릭스 계면을 약화시키므로 GFRP 보강근의 인장강도 등이 감소할 수 있게 된다.

특히 GFRP 보강근이 pH 지수가 13정도인 콘크리트 내부에 매립되는 경우, 알칼리 이온은 유리섬유의 침식작용을 가속화시키고 유리섬유에 흡집을 발생시켜 유리섬유의 단면감소를 유발하고 새로운 침식작용이 발생할 수 있는 환경을 조성하게 된다.⁽⁴⁾ 또한 우리나라와 같이 뚜렷한 동절기가 있는 지역에 건설되는 콘크리트 구조물은 매년 최소한 100 사이클 이상의 동결융해작용(Freeze-Thaw Action)을 받을 수 있게 된

다. 동결융해의 영향은 폴리머와 같은 FRP 재료의 자체뿐만 아니라 FRP와 콘크리트 경계에 있는 수분의 동결작용에 의한 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾

3. 내구성 특성 파악을 위한 촉진시험법

현재 FRP 재료가 건설분야 특히 콘크리트 부재의 보수·보강 분야에 적용되고는 있으나 콘크리트의 장기적인 내구년한까지 사용된 실적이 없기 때문에 FRP의 장기적인 내구성을 파악하기 위해서는 촉진시험법이 필요하게 된다. 촉진시험법은 온도와 같은 촉진시험인자를 적용하여 열화기간을 단축시키는 시험법으로서 시험결과를 이용하여 사용수명에 상응하는 FRP의 장기적 거동을 예측하는 시험이다. 기존 연구에서 다양한 촉진시험방법이 제안되고 있으나, 시험결과에 영향을 미치는 인자와 변수의 조합이 거의 무한하기 때문에 일반적인 방법론 정도가 규정되고 있는 실정이다.⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ 특히 어떠한 촉진시험방법도 FRP의 장기적인 내구성을 추정하기 위해서는 반복적인 시험이 요구되며, 앞서 언급한 바와 같이 장기적인 데이터가 없기 때문에 촉진시험 결과를 검증할 수 있는 방법 또한 없는 실정이다. 본 연구에서 수행된 문헌조사⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾에 따르면 현재까지 GFRP 보강근의 내구성 특성을 파악하는데 적용할 수 있는 국제적인 표준시험법이 없는 것으로 파악되어, 시험법을 실험방법으로 정의하였다.

내구성 실험에 사용된 FRP 보강근은 외국에서 상용화 생산되어 가장 활용실적이 많은 2가지 종류의 GFRP 보강근(구성재료 : E-glass, Vinylester)로 설정하였으며, 제품명은 Aslan(이하 G1으로 표기)과 Isorod(이하 G2로 표기)로서 규격과 본 연구에서 평가한 보강근의 역학적 성질과 섬유함유량(중량비)을 Table 1에 나타내었다. 섬유함유량은 제작사에서 제

공하는 자료에 없는 관계로 보강근 시편을 450°C에서 18시간 연소시킨 후 섬유의 중량을 측정하여 파악하였다.

본 연구에서는 내구성 영향인자별 미치는 영향을 독립적으로 파악하기 위하여 보강근을 영향인자별 환경에 노출시키는 내구성 실험법을 적용하였다. 콘크리트 구조물의 내구년한이 100년 이상 것을 감안하여, 장기적인 보강근의 내구성 특성을 분석할 수 있도록 내구성 영향인자별 촉진시험을 실시하고, 그 결과로부터 장기 특성을 분석할 수 있도록 실험계획을 수립하였다.

본 실험에서 선정된 촉진인자는 온도로서, 관련문헌^{(4)-(6),(9)} 분석을 통하여 상온(25°C)이외에 40°C와 80°C 온도를 적용하였다. 컨디셔닝 기간을 설정하기 위해서는 촉진 기간과 실제 기간의 관계를 파악할 수 있어야 하나, 앞서 기술한 바와 같이 이 관계는 촉진시험에 적용된 FRP 재료, 온도, 내구성 영향인자에 영향을 받기 때문에 일반화된 경험식은 없는 실정이다. 본 연구에서는 촉진기간에 따른 FRP의 열화 및 품질 저하 현상을 파악하기 위하여 촉진기간을 약 130일로 설정하였다.

시편의 컨디셔닝 방법은 실험기간 동안 특정한 내구성 영향인자 또는 환경에 시편을 노출시키는 방법이다. 본 연구에서 적용한 각 내구성 영향인자별 컨디셔닝방법은 Table 2에 요약하였다.

Table 2 GFRP 보강근 종류별 컨디셔닝 조건

조 건	컨디셔닝 방법	기간
수분	수돗물에 침지 온도 : 25°C, 40°C, 80°C	132일
염화물	3% NaCl용액에 침지 온도 : 25°C, 40°C, 80°C	132일
알칼리	pH 13.0 강알칼리 용액에 침지 온도 : 25°C, 40°C, 80°C	75일
동결융해	pH 13.0 강알칼리 용액에 침지 온도 : -25°C 30°C	110일

Table 1 GFRP의 물리적 특성

구분	공칭직경	인장강도	탄성계수	수평전단강도	섬유함유량(%)
Aslan (G1)	12.7mm	690 MPa	40.8 GPa	36.8 MPa	73.3
Isorod (G2)	12.7mm	569 MPa	42.0 GPa	42.3 MPa	69.1

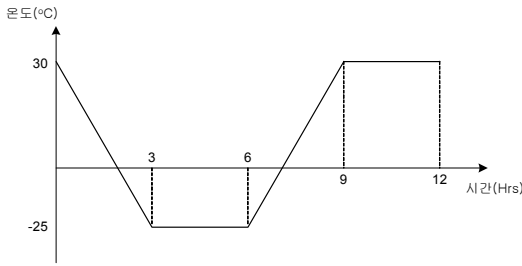


Fig. 1 동결융해 1사이클 구성

수분과 염화물 환경을 모사하기 위하여 수돗물과 3% NaCl(천일염)용액을 사용하였으며, 콘크리트 내부의 알칼리 환경(pH 13)을 모사하기 위하여 KOH 1.4%, NaOH 1.0%, Ca(OH)₂ 0.2%를 수돗물에 용해시켜 강알칼리 용액을 제조하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 동결융해실험에 적용된 온도는 -25°C -30°C로서 동결융해 시험기에서 1일 1사이클이 진행되도록 설정하였다. 각 시편의 길이는 약 900 mm로 절단하였고, 동결융해실험용 시편을 제외한 시편은 각 컨디셔닝 조건에 해당하는 용액과 시편 3개를 직경 50mm 아연도 강관에 넣은 후 썰링재로 캡핑하여 25°C, 40°C, 80°C 항온수조에 소요기간동안 침지시켰다.

내구성 영향인자별 내구성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 소요기간동안 컨디셔닝된 보강근 시편을 3일 동안 대기 건조시킨 후 SEM(주사식 전자현미경)으로 열화된 단면을 관찰하였고, 역학적 성질의 변화를 파악하기 위하여 인장강도, 수평전단강도, 탄성계수를 측정하였다. 인장강도와 수평전단강도는 각 ASTM D 3916 시험법⁽¹⁰⁾과 ASTM D 4475 시험법⁽¹¹⁾을 적용하여 측정하였고, 탄성계수는 인장강도 시험에서 보강근에 스트레인게이지를 부착하여 구

한 응력-변형률관계로부터 추정하는 방법과 하중-변위 곡선으로부터 추정하는 방법을 동시에 적용하였다. 인장강도와 탄성계수측정에 사용된 시편수량은 컨디셔닝 조건별 3개이고, 수평전단강도측정에 사용된 시편수량은 컨디셔닝 조건별 8개이다. 단, 수평전단강도는 80°C에서 90일간(알칼리 조건의 경우 40°C온도, 60일간) 컨디셔닝된 시편만을 대상으로 측정하였다.

4. 내구성실험 결과 분석

4.1 시편 단면관찰

Fig. 2(a)와 2(b)는 각각 알칼리 용액에서 30일간 컨디셔닝된 보강근 G1과 G2 시편의 표면을 보여주고 있다. Fig. 3(a)에는 컨디셔닝을 하지 않은 보강근 G2의 횡단면을 SEM으로 1,000배 확대하여 촬영한 결과를 나타내었고, Fig. 3(b)은 80°C 알칼리용액에 90일간 침지시킨 보강근 G2의 횡단면을 보여주고 있다. 각 조건별로 컨디셔닝된 보강근의 단면을 SEM으로 촬영한 결과, 유해물질의 확산작용으로 인하여 유리섬유의 표면이 손상되어 있는 것을 알 수 있었다.

이러한 섬유-레진 경계층(계면) 손상은 SEM관찰을 위해 알루미늄 분말을 이용한 시편의 폴리싱 과정에서 발생되었으나, 비컨디셔닝 시편 또한 동일한 방법으로 폴리싱 하였으므로 손상의 직접적인 원인은 섬유-레진 계면의 열화라고 추정된다.

4.2 인장강도 특성

Fig. 4(a)에는 수돗물에 최장 132일간 침지된 시편의 인장강도 보유율 나타내었다. 그림에서 알 수 있

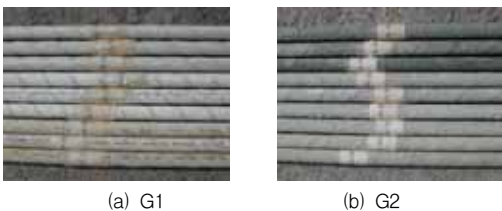


Fig. 2 30일 컨디셔닝 후 시편의 표면

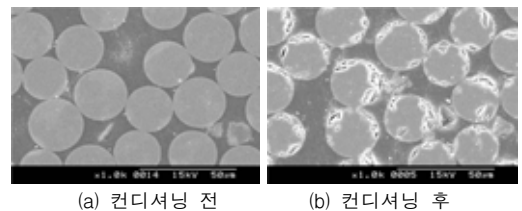


Fig. 3 주사식 전자현미경 관찰(G2)

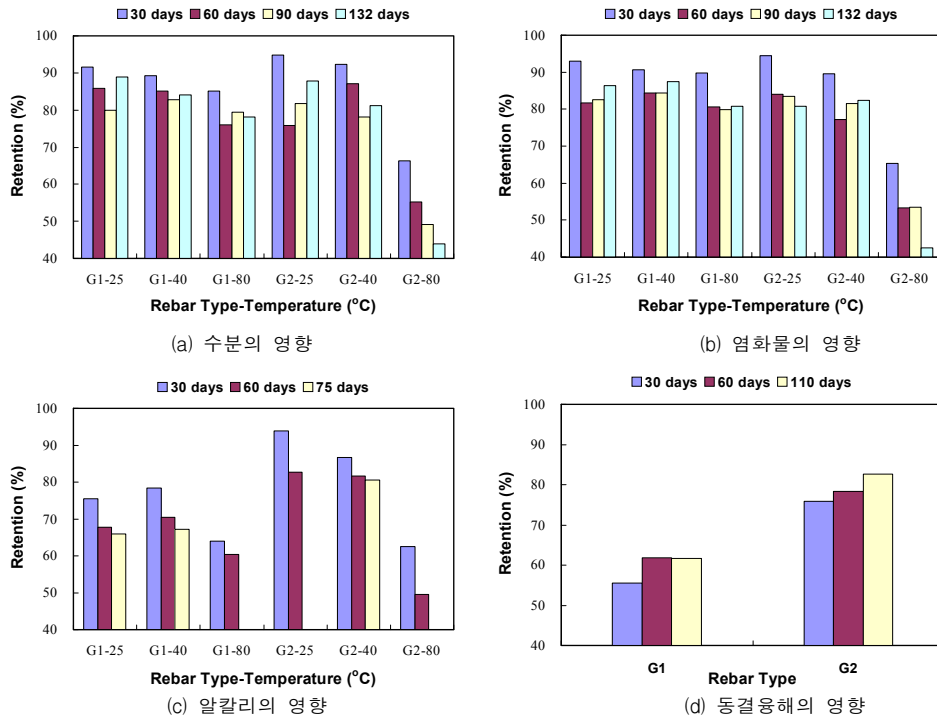


Fig. 4 컨디셔닝조건별 인장강도 보유율

듯이 FRP 보강근은 온도와 컨디셔닝 기간이 증가할 수록 인장강도가 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있으며, G1 시편의 경우 최고 24%의 인장강도 감소가 나타난 반면에 보강근 G2 시편의 경우 최고 56%의 인장강도 감소가 발생하였다. 기존 연구결과에 따르면 비닐에스터의 레진은 수분확산이 최초 30일 이내에 90%이상 완료되는 것으로 알려져 있으나, 보강근 G2는 컨디셔닝 기간이 증가함에 따라 인장강도의 변화가 지속적으로 발생하여 수분확산작용이 비교적 느리게 진행되는 것으로 판단된다.

Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 염화물 조건에서 가장 132일간 컨디셔닝된 보강근의 인장강도 변화 특성은 수분에 의한 특성과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 해수, 제설제 등에 포함되어 있는 염화물 이온이 GFRP 보강근의 내구성에 미치는 영향은 수분과 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 4(c)는 알칼리 조건에서 가장 75일간 컨디셔

닝된 GFRP 보강근의 인장강도 실험결과를 보여주고 있다. G1의 경우 인장강도가 최고 40% 감소되었으며, G2의 경우에는 최고 50%가 감소되었다.

당초 알칼리 조건에 대해서도 최고 120일까지 컨디셔닝을 실시하고자 하였으나, 실험과정에서 GFRP 보강근과 알칼리용액의 화학반응으로 인하여 개스와 함께 알칼리용액이 캡핑재 밖으로 누출되어 75일 만에 컨디셔닝을 중단하게 되었고, 알칼리 용액누출이 확인된 시편의 결과는 분석에서 제외하였다. Fig. 4(d)에는 동결융해시험기에서 최고 110일간 컨디셔닝한 시편의 인장강도 보유율을 나타내었으며 G1의 경우 최고 44% 인장강도 감소가 나타났다.

한편, 순수한 알칼리 영향을 파악하기 위하여 Fig. 5에는 알칼리 조건의 실험결과에서 수분 조건의 실험결과를 제외한 결과를 정리하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 G1 보강근은 G2 보강근에 비하여 알칼리 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

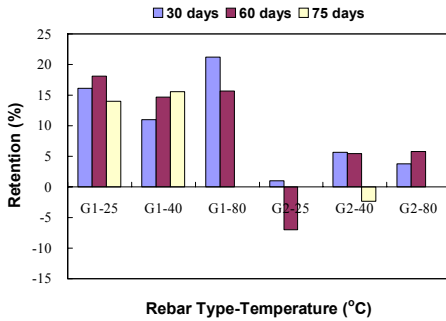


Fig. 5 인장강도 보유율(순수한 알칼리의 영향)

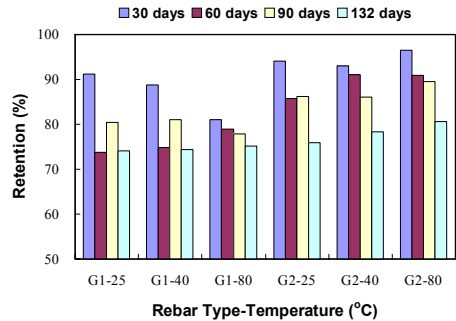


Fig. 6 탄성계수 보유율(염화물)

4.3 탄성계수 및 수평전단강도 특성

본 실험의 결과에 따르면 유해한 환경에 노출된 GFRP 보강근의 탄성계수 감소효과는 전반적으로 인장강도에 비하여 작은 것으로 나타났다. 수분과 염화물에 노출된 보강근의 경우 탄성계수 감소특성이 유사하였으며, Fig. 6에 나타난 것과 같이 염화물의 경우 온도와 기간에 따라 차이는 있었으나 G1 보강근은 최고 26%가 감소하였고, G2 보강근은 최고 24% 감소하였다. 특히, 일부 시편의 경우 컨디셔닝 기간이 증가할수록 탄성계수가 증가하는 경향이 있었는데 이는 유리섬유의 열화로 인하여 연신율이 감소하기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 7에는 내구성 영향인자별로 80°C에서 90일간(알칼리의 경우 40°C에서 60일간) 컨디셔닝된 시편의 수평전단강도 보유율을 나타내었다. G1 보강근의 전단강도 감소율은 최고 30%까지 감소되었으며, G2 보강근의 경우 최고 24% 감소가 발생하였다. 계면전단강도 감소의 원인은 레진이 용액에 의해서 부풀어(Swelling) 계면이 가소화되었기 때문으로 판단되며, 결과적으로 이러한 유리섬유와 수지의 계면 전단강도 감소는 보강근의 인장강도 및 탄성계수의 감소원인으로 작용한 것으로 판단된다.

5. 인장강도 감소 추정모델

실험결과에 따르면 내구성 영향인자와 관계없이 높은 온도는 FRP의 열화를 촉진시켜 내구특성에 지대

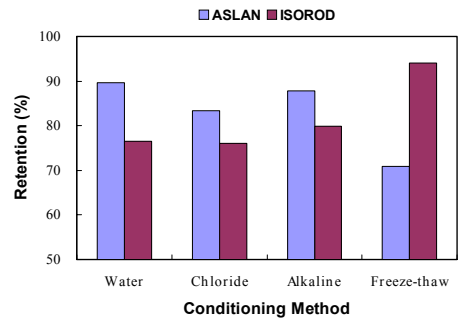


Fig. 7 전단강도 보유율

한 영향을 미치는 것에 나타났다. 전반적으로 25°C와 40°C에 컨디셔닝한 시편의 재료시험 결과는 큰 차이가 없었으나, 고온인 80°C에서 컨디셔닝한 시편의 경우 인장강도가 급격하게 감소되었음을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 축진실험방법에 의한 내구성실험 결과를 이용하여 G1 보강근의 장기적인 인장강도 감소 경향을 추정하였다. 인장강도 감소 추정을 위한 해석적 모델을 유도하기 위해 적용한 재료시험 결과는 염화물 조건에서 컨디셔닝된 시편의 결과를 활용하였으며, 각 온도에 대하여 강도감소율을 동일하게 나타내기 위하여 Fig. 8에 나타난 것과 같이 온도별 인장강도 보유율을 로그시간과의 관계로 나타내었다.

온도별로 특정한 인장강도 보유율에 도달하는데 소요되는 상대적인 기간을 파악하기 위하여 인장강도 보유율 80%에 도달하는 온도별 소요기간을 Table 3에 나타내었다.

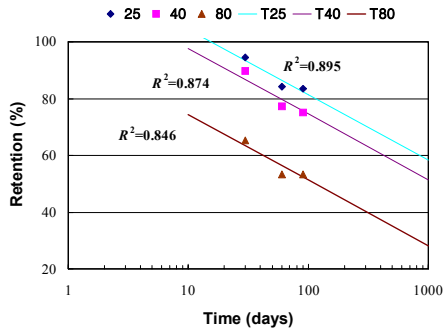


Fig. 8 시간과 온도에 따른 인장강도 보유율

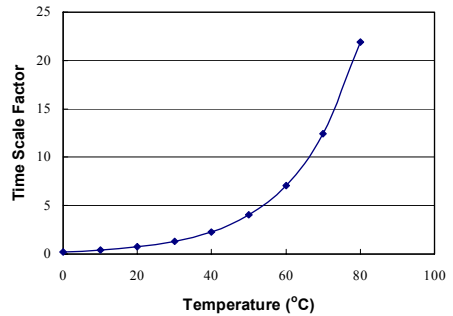


Fig. 9 실제 온도와 TSF 관계

Table 3 온도별 Time Shift Factor

온도	TSF	강도보유율 80%에 도달하는 기간
25°C	1	122일
40°C	2.22	55일
80°C	22.18	5.5일

25°C 온도에서 인장강도 보유율 80%에 도달하는데 소요되는 기간을 각 온도별 결과로 나누어 일명 TSF (Time Shift Factor)를 구할 수 있으며, 25°C 온도를 기준으로 임의의 온도에 해당하는 TSF는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$TSF = 0.2383 e^{0.0565T} \quad (1)$$

여기서, T는 실제 온도(°C)를 나타낸다.

Fig. 9에는 실제 온도와 TSF 관계를 그림으로 나타내었으며, 본 내구성시험에서 80°C 온도에서 132일 간 컨디셔닝한 시편의 시험결과를 실제 기간으로 환산하면 약 8년에 해당하는 것으로 추정된다. 그러나 보다 신뢰성있는 강도감소 예측모델을 제안하기 위해서는 최소한 축진기간을 6개월 이상으로 설정하는 것이 필요하다고 판단되며 이에 대한 추가 연구를 수행 중에 있다.

6. 결 론

내구성 영향인자별로 컨디셔닝된 시편에 대하여 제한적 범위내에서 수행된 GFRP 보강근의 내구성 실험 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

내구성 영향인자별 FRP 보강근의 내구특성에 차이는 있었으나 컨디셔닝 기간과 온도가 증가할수록 역학적 성질이 크게 감소하였으며, 특히 인장강도의 감소가 뚜렷이 나타났다. 전반적으로 수분과 염화물에 의한 내구특성의 변화는 유사하게 나타났으나, G2 보강근의 경우 최고 57%의 인장강도 감소를 나타냈다. 알칼리에 의한 인장강도 감소특성은 유사하였으며, G1 보강근의 경우 30일부터 인장강도 감소가 25%로 나타났다고 G2의 경우 인장강도가 최고 50% 감소하였다.

내구성 영향인자에 노출된 FRP 보강근의 탄성계수 변화는 인장강도에 비하여 적게 나타났으며, 일부 시편의 경우 컨디셔닝 기간이 증가할수록 탄성계수가 증가하는 현상을 보였다.

한편, 수평전단강도 측정에서 모든 영향인자에 대하여 전단강도의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 이는 유리 섬유와 폴리머 경계층의 열화로 인하여 계면전단강도가 감소된 것으로 추정된다.

본 연구에서 수행된 실험에서는 각 영향인자별 시편의 수량을 인장강도시험용 시편 3개, 전단강도시험용 시편 8개로 제한하였으나, 인장강도의 경우 시편의 수량이 신뢰할만한 실험결과를 확보하는데 부족하였다고 판단되며 향후 실험에서는 최소한 5개 이상의 시편을 대상으로 재료시험을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 본 연구에서는 축진온도를 최고 80°C로 설정하였으나 폴리머의 열화로 인하여 최고 온도를 약 60°C 정도로 제한하는 것이 필요하다고 판단된다.

특히, 일부 시편의 경우 온도와 컨디셔닝기간이 증가함에도 불구하고 재료적 성질이 증가하는 경향을 나

타내는 경우가 있었으나, 수평전단강도를 제외한 재료적 성질의 경우 앞서 언급한 바와 같이 실험결과 정리에 이용된 데이터가 충분하지 못하여 그 원인을 밝혀 내지 못하였다.

본 내구성실험에서 수행한 132일 컨디셔닝기간은 실제 사용 연수로 약 8년(25℃ 기준)에 해당하는 것으로 추정되나 촉진기간이 비교적 짧았기 때문에 신뢰성은 부족하다고 판단된다. 본 실험결과에 따르면 FRP 보강근은 유해한 환경으로부터 FRP 재료를 보호할 수 있도록 재료와 단면을 구성하여야 할 것으로 판단되며, 본 연구진은 이와 관련된 연구를 진행 중에 있다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종보고서, 2004.
2. Gangarao, H.V.S. and Vijay, P.V. "Aging of Structural Composites under Varying Environmental Conditions." Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proc. 3rd Intl. Sym. Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 91-98.
3. Uomoto, T. "Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures." Proc. 3rd Concrete on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, 2000, pp. 3-20.
4. Vijay, P.V. Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars. PhD Dissertation, West Virginia University. 1999.
5. Dejke, V. Durability of FRP Reinforcement in Concrete. PhD Thesis, Chalmers University of Technology. Sweden. 2001.
6. Bank, L.C., Gentry, T.R., Barkatt, A., Prian, L., Wang, F. and Mangla, S.R. "Accelerated Aging of Pultruded Glass/Vinyl Ester Rods." Proc. 2nd Intl. Conf. on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, 1998, pp. 423-437.
7. Hayes, M.D., Garcia, K. Verghese, N., and Lesko, J. "The Effect of Moisture on the Fatigue Behavior of a Glass/Vinyl Ester Composite." Proc. 2nd Intl. Conf. on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, 1998, pp. 1-12.
8. Porter, M.L., Mehus, J., Young, K.A., O'Neil, E.F., and Barnes, B.A. "Aging for Fiber Reinforcement in Concrete." Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proc. 3rd Intl. Sym. Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 59-66.
9. Steckel, G.L., Hawkins, G.F., and Bauer, J.L. "Environmental Durability of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Columns." Proc. 2nd Intl. Conf. on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, 1998, pp. 460-475.
10. ASTM D 3916, Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rods. 2002.
11. ASTM D 4476, Standard Test Method for Flexural Properties of Fiber Reinforced Pultruded Plastic Rods. 2003.

(접수일자 : 2005년 1월 30일)