

복합환경인자에 의한 FRP 보강근의 성능저하 특성

A Degradation Characteristic of FRP Rebars Attacked by Combined Environmental Factors

오 홍 섭^{1)*} 문 도 영²⁾
Oh, Hong Seob Moon, Do Young

Abstract

In spite of high resistant to corrosion and its strength, over the last two decades, concerns still remain about the durability of FRP materials under severe environmental and thermal exposures. In this paper, authors experimentally examine the combined degradation by thermal and chemical attacks in heterogeneous FRP rebar be made up with various fibers and resins. Five types of Carbon, Glass and Hybrid FRP rebars had manufactured by different process and surface patterns are adopted for the experiments such as weight change, interlaminar shear strength, SEM and FT-IR analysis. FRP specimens were immersed in alkaline or distilled solution up to 150 days and then thermal exposed on 60, 100, 150 and 300°C for 30 minutes. From the test results, the degradation of FRP bars are influenced by the resin type and manufacturing process as well as the fiber, and ILSS of exposed FRP bar in solutions is slightly increased in initial stage and then decreased with the passing of immersed time. But, in this test, it is observed that the discrepancy of ILSS between degraded by alkaline solution and distilled water is negligible value.

Keywords : Chemical exposure, Durability, FRP, FT-IR, Interlaminar shear strength, Thermal exposure

1. 서 론

FRP 재료는 중량대비 높은 비강도와 부식저항성 등의 장점으로 인하여 철근의 대안으로 인식되어 왔으나, 알칼리 및 습도에 의한 물성저하와 온도 등에 대한 성능 변화 등에 문제가 꾸준히 제기되고 있다(문도영과 오홍섭, 2011; 원종필과 박찬기, 2004; Chen et al., 2007; Clarke and Sheard, 1998; Micelli and Nanni 2004; Sen et al., 2002).

FRP 보강근은 일반적으로 보강섬유를 수지가 있는 탱크에 침지시켰다가 인발(Pulltrusion)한 후 일정이상의 고온으로 수지를 경화시키는 공정으로 제작되며 제품에 따라 보강근의 부착성능을 향상시키기 위하여 수지 경화 전 또는 경화후 보강근의 표면에 추가적으로 섬유로 직조하거나 규사 등을 부착시키게 된다. 따라서 FRP 보강근의 내구성은 FRP의 혼입율, 수지의 종류, 제작과정의 정밀성 등에 의해 전혀 다른 내구특성을 나타낼 수 있다. 따라서 국외의 기준에서도 내구 특성을 특정값으로 표현하기보다는 보수적인 환경지수를 사용하여 내구설계에 적

용하는 경향이 있다(ACI 440-10R). FRP 재료의 내구 특성을 평가하기 위하여 지난 20 여년간 알칼리 또는 산 및 수분에 의한 영향, 자외선, 온도에 대한 중량변화와 강도 변화에 대한 많은 연구들이 수행되었다(Kim et al., 2008; Won and Park, 2006; Won et al., 2008). 일반적으로 E-glass 계열의 유리섬유는 알칼리 환경하에서 강도 및 내구성이 저하되는 반면, 탄소섬유는 저하정도가 상대적으로 작은 것으로 보고되고 있다(Uomoto, 2000). FRP 재료의 성능저하는 Fig. 1과 같이 외부의 화학적, 환

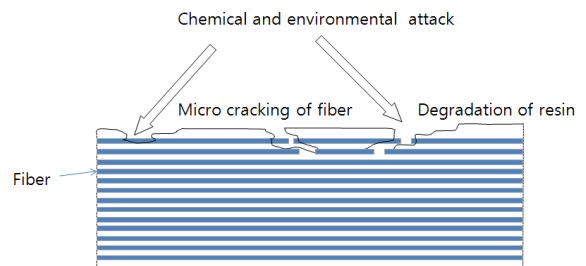


Fig. 1 Degradation of FRP rebar

1) 정희원, 경남과학기술대학교 토목공학과 교수, 교신저자
2) 정희원, 경성대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : hongseob@jinju.ac.kr 055-751-3299
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

경적 침식에 의하여 섬유를 보호하는 수지가 열화되면서 섬유가 화학적으로 부식되거나 침식을 받는 복합적인 상호작용에 의하여 손상을 받게 된다. 이와 함께 일시적인 화재 등과 같이 다양한 원인에 의하여 열을 받게 되는 경우에는 섬유와 수지의 손상이 가중되는 현상이 발생할 수 있다(Won et al., 2008).

본 연구에서는 국내외에서 사용가능한 FRP 보강근을 종류수와 알칼리에 폭로한 후 고온에 일시적으로 노출된 후의 보강근의 성능변화를 실험적으로 검증하고자 하였다. 이때 노출온도수준은 Bisby and Kodur(2007)의 실험연구 결과에 근거하여 선정하였다(Fig. 2 참조). 일반적인 수지의 유리전이온도는 100~150°C 정도로 보고되고 있기 때문에 노출온도는 60~300°C의 범위로 결정하

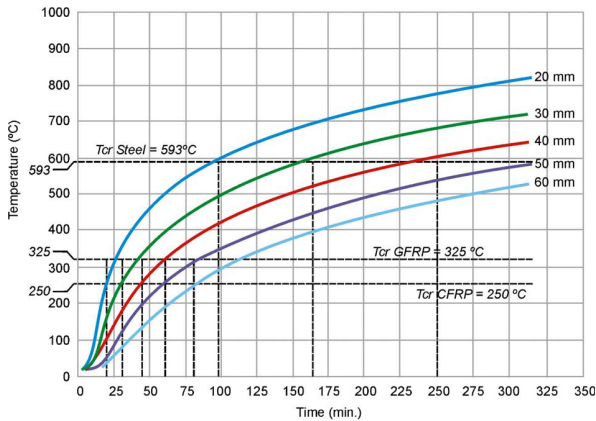



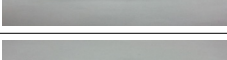
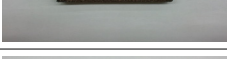


Fig. 2 Design guide for concrete slab exposed fire(Bisby and Kodur, 2007)

Table 1 Test conditions for various FRP rebars

Name	Diameter (mm)	Span to diameter ratio	Shape	FRP type (resin type)	Saturated solution	Duration (days)	Temperature (°C/min)
G1	9.53	5.25		Deformed type GFRP (epoxy resin)	Ca(OH) ₂ (pH 12.5) Distilled water (pH 7.0)	0 15 30 60 90 150	Room Temp. 60°C for 30min 100°C for 30min 150°C for 30min 300°C for 30min
G3	16	3.13		Surfaced braided type GFRP (vinylester resin)			
H1	9.5	5.26		Aramid&carbon Hybrid type FRP (vinylester resin)			
C1	6.5	7.69		Garnett coated CFRP (vinylester resin)			
C2	9.6	5.21		Garnett coated CFRP (vinylester resin)			

였다. 또한 Bisby and Kodur(2007)는 CFRP 보강근의 고온노출시 인장강도가 50% 저하되는 임계온도를 250°C로 실험적으로 제시하였으며, 30mm의 피복을 갖는 콘크리트 부재가 고온에 30시간 노출 되면, CFRP 보강근의 온도는 임계온도에 도달한다고 주장하였다. 본 연구에서는 FRP 보강근의 온도에 대한 영향을 고찰하기 위한 기초 연구로서 고온에 순간적으로 노출된 경우의 강도변화 특성을 평가 하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 실험대상 FRP 보강근

본 연구는 Table 1에 정리한 것과 같이 이형 GFRP, 표면이 섬유로 직조된 GFRP와 Hybrid FRP와 표면이 규사 등으로 침지된 GFRP와 CFRP를 대상으로 하였다. 보강근의 제조방법은 모두 인발성형방법으로 제작되었으며, 하이브리드 보강근의 경우, 내부는 탄소섬유로 외부는 아라미드 섬유로 제작되었다.

이형 GFRP 보강근의 수지는 열경화성 bisphenol-A 계의 에폭시 수지를 165°C에서 10분간 고압으로 경화하였다. 다른 FRP 보강근의 경우에는 모두 에폭시계 비닐 에스터 수지(Epoxy based Vinyl ester resin)를 사용하여 대략 200°C에서 2분 정도 고압으로 경화하였다.

Fig. 3과 4에는 보강근에 사용된 수지의 화학구조와 경화된 수지의 결합구조를 나타내었다. 일반적으로 화학적 침식에 의한 수지의 열화는 에스터 그룹과 염기와의 반응

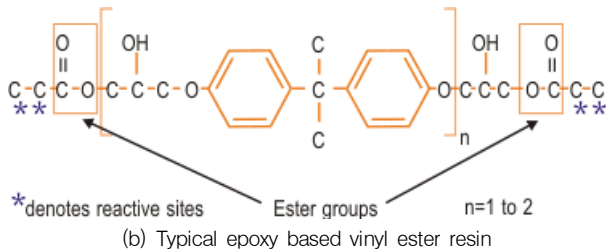
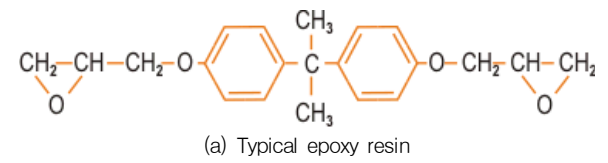


Fig. 3 Idealized chemical structures of resin

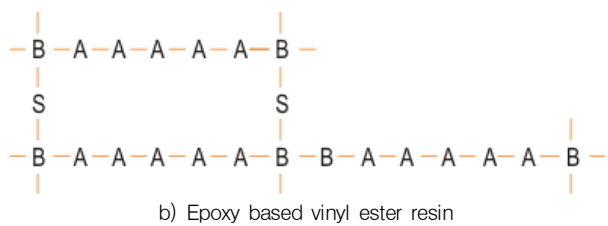
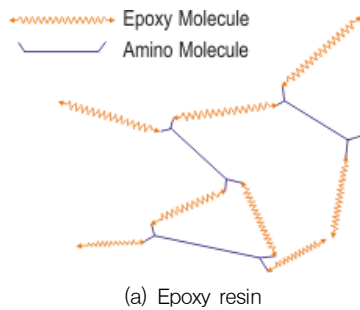


Fig. 4 Schematic representation of epoxy and vinyl ester resin (cured)

에 의하여 열화가 발생하는기 때문에 비닐에스터의 경우 상대적으로 화학적 열화에 취약한 특성을 갖는다. 에폭시 수지는 에폭시분자와 아미노 분자상의 3차원 결합에 의한 구조이며, 비닐에스터는 스티렌(styrene)의 촉매역할과 결합재 역할에 의하여 결정화되는 구조이다.

2.2 실험변수

FRP 보강근의 종류에 따른 화학 및 물리적 열화현상을 측정하기 위하여 GFRP 3종류(G1 9.53mm, G3 16mm), CFRP 2종류(C1 6.5mm, C2 9.6mm), Hybrid FRP 1종류(H1 9.5mm)로 총 5가지의 변수를 고려하였다. 또한 화학적 환경하에 노출시키기 위하여 pH 12.5의 $Ca(OH)_2$



Fig. 5 Immersed FRP rebars in solution

용액과 pH 7.0의 증류수에 각각 15, 30, 60, 90일과 150일 동안 침지하였다. 실험결과의 편차를 최소화하기 위하여 총 900개의 실험편을 변수 당 두 개의 실험편에 대하여 실험을 실시하였으며, 용액의 증발을 제한하기 위하여 Fig. 5와 같이 밀폐용기를 사용하였다. 그리고 각 실험편은 일정기간 용액에 담가둔 후 꺼내어 챔버에서 60°C, 100°C, 150°C, 300°C에 30분동안 노출시킨 후 흡수율과 ILSS(Interlaminar Shear Strength)를 측정하였다.

2.3 흡수율 및 중량변화율

각 FRP 보강근의 실험편을 50mm 크기로 절단한 후, 절단면에 의한 수분 및 용액침투 및 확산 영향을 배제하기 위하여 절단면에 에폭시레진을 도포하였다. 용액에 침지하기 전에 각 보강근별로 무손상의 경우는 5개의 실험편을 그리고 손상 및 침지일시별로 최소 2개의 실험편 중량을 1/1000g 정밀도의 저울로 측정하여 평균중량을 산정하였다. 이때 FRP 보강근의 기건상태의 중량을 초기중량(W_i)로 간주하였으며, 실험편은 각 용액에서 15일, 30일, 60일, 90, 150 및 300일간 침지한 후 실험편을 꺼내어 표면건조 포화상태에서 중량(W_{sat})을 측정하여 식 (1)에 의하여 흡수율을 측정하였다. 고온 노출 영향은 실험편을 고온챔버에 일정 시간 노출후 동일한 방법으로 중량(W)을 측정하여 식 (1)로부터 폭로 후 중량 변화율을 산정하였다. 고온 폭로시 챔버의 온도가 균등해질 수 있도록 일정시간 동안 온도를 유지시킨 후 실험편을 폭로하였다.

$$W(\%) = \frac{W_t \text{ (or } W_{sat}) - W_i}{W_i} \quad (1)$$

2.4 ILSS 실험

FRP 보강근은 알칼리 또는 증류수 폭로에 의하여 섬유

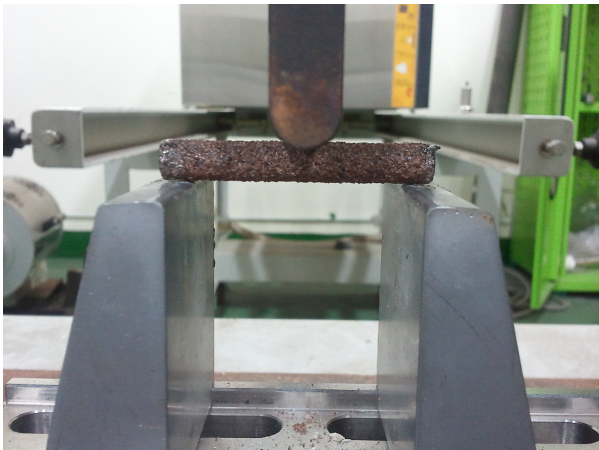


Fig. 6 Interlaminar shear strength test setup

와 레진간의 접착력 약화가 전단강도의 약화를 가져오기 때문에 내구성능을 평가하는 간편한 방법으로서 ASTM D4475에 규정된 ILSS(Interlaminar Shear Strength) 실험방법이 많이 사용된다. ILSS 실험방법은 Short beam test로 표현되기도 하며, ASTM에서는 실험편길이와 직경의 비를 3~6사이를 권장하고 있다(ASTM, 2002; Chen, 2007; Kim et al., 2008). 보통 실험편길이와 직경의 비(l/d)가 5 내외의 값을 갖도록 실험하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 실험편의 길이를 50mm로 고정하였으며, 각 실험편의 지간과 직경의 비는 3.13~7.69이다. 따라서 각 실험결과는 무손상 강도를 기준으로 강도비(손상 실험편의 평균강도/무손상실험편의 평균강도)에 대하여 분석하였다. ILSS은 회귀분석에 의한 경험식들이 제시되어 있으며, 본 연구에서는 ASTM(2002)에서 제시하고 있는 식 (2)를 사용하였다.

$$S = 0.849 \frac{P}{d_b^2} \quad (2)$$

여기서, S는 전단강도(MPa), P는 실험편의 파괴시 하중(N), d_b 는 실험편의 공칭직경을 나타낸다.

3. 실험결과 분석

3.1 중량 변화

Fig. 7에는 알칼리용액과 증류수에 각 실험편을 침지시킨 후 일정 기간이 지난후의 중량변화를 측정하여 흡수율

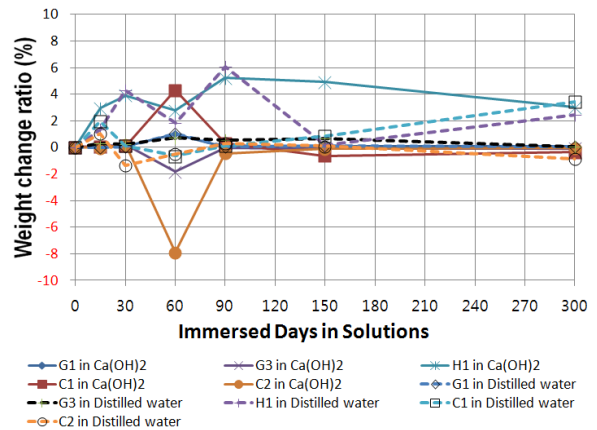


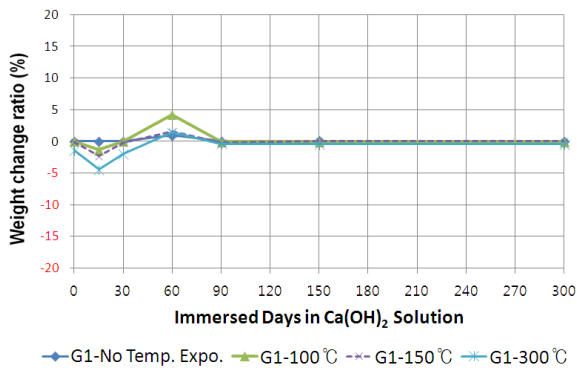
Fig. 7 Weight change ratio of immersed FRP rebars in solutions

또는 수지의 용해정도를 평가하고자 하였다.

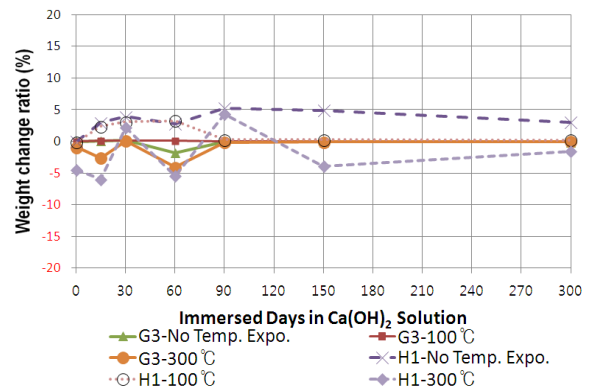
각 측정일의 실험편의 중량은 12개의 실험편에 대한 평균을 측정한 것이다. 대부분의 실험편의 경우 중량의 변화가 $\pm 2\%$ 내외로서 변화가 크지 않은 것으로 나타났으나, H1, C1과 C2 실험편의 경우는 중량 변화가 상대적으로 크게 나타났다.

전체적으로 알칼리 용액과 증류수 환경하에서 이형보 강근과 표면 직조된 유리섬유 보강근의 중량변화는 크지 않았다. 그러나 하이브리드 섬유는 섬유계면을 따라 수분의 침투와 알칼리 용액에 의한 반응이 상대적으로 용이하여 침지시간에 따른 중량이 증가되는 경향을 나타낸 것으로 판단되며, C1과 C2의 경우는 표면에 부착된 가넷 등이 침지 초기에 탈락됨으로서 중량이 감소하였다가, 시간이 경과함에 따라 알칼리 및 증류수가 FRP 내부로 침투하여 중량이 증가하는 것을 판단된다.

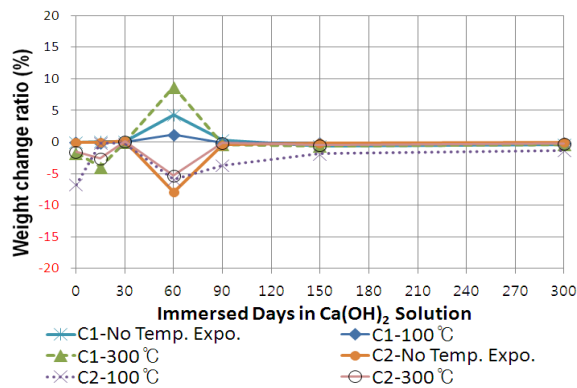
Fig. 8에는 30분동안 각 온도에 대하여 실험편을 노출 후의 중량과 초기 기건상태의 중량변화 정도를 나타내었다. 에폭시 수지로 제작된 G1 실험편의 경우에는 알칼리 용액에 침지후 고온에 폭로한 경우 90일 이후에는 중량 변화가 거의 없는데 반하여 증류수에 침지한 후 300°C에 노출한 경우에는 시간 경과에 따라 중량 감소가 점차 커지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 비닐에스터로 제작된 C2를 증류수에 침지한 경우에서도 관찰되었으며, 증류수 환경하에서 침식된 표면의 수지가 고온환경하에서 박락되었기 때문인 것으로 판단된다. 알칼리 환경하에서의 중량변화는 G3와 H1의 경우에는 최대 5% 내외로 나타났으며, C1과 C2의 경우에는 이보다 큰 8%내외로 관찰되었다. 그러나 전체적으로 90일 이후에는 중량변화가 점차 감소하는 것으로 나타났다. G3의 경우는 알칼



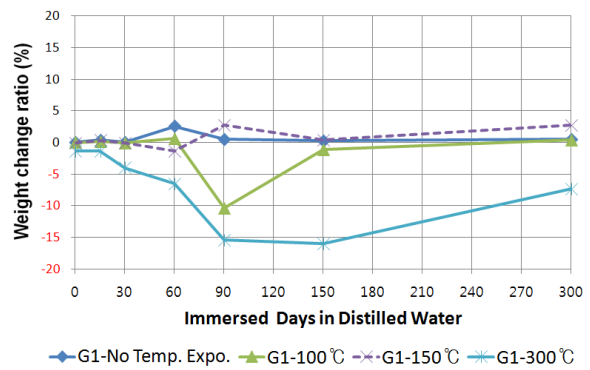
(a) G1 – epoxy resin



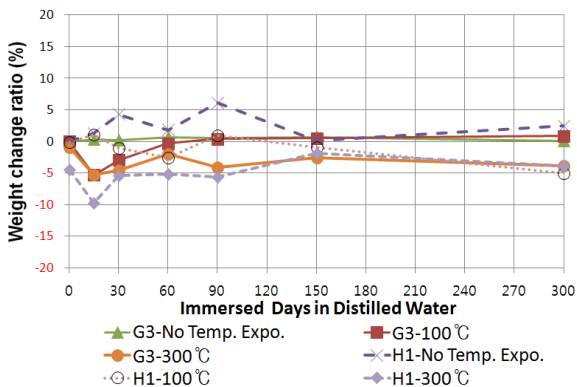
(b) G3 and H1 – vinyl ester resin



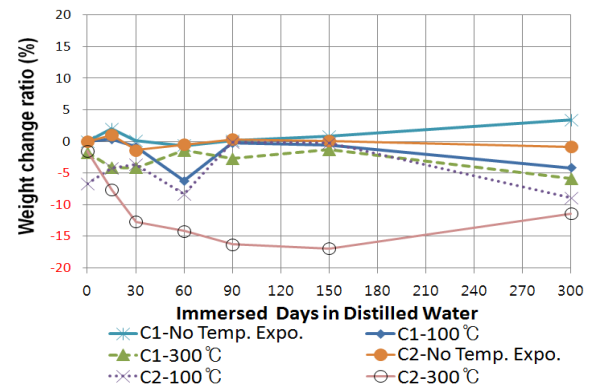
(c) C1 and C2 – vinyl ester resin



(d) G1 – epoxy resin



(e) G3 and H1 – vinyl ester resin



(f) C1 and C2 – vinyl ester resin

Fig. 8 Weight change ratio of FRP rebars exposed at high temperature after immersed in solution

리 폭로 후 온도노출에 대하여 증류수 폭로에 비하여 중량변화가 크지 않은 것으로 나타났으며, 증류수 환경하에서는 점차 중량이 감소하는 것으로 관찰되었다. H1의 경우에는 중량의 증가이 반복되는 형태를 나타냈으며, 증류수환경하에서 점차 중량이 감소되는 것으로 나타났다. 동일한 재료를 사용하고 직경만 다른 C1과 C2의 경우에는 알칼리 환경하에서 직경이 큰 C2의 경우에는 60일 침전시 중량이 감소하였다가 90일에 중량이 원상회복되는데 반

하여 C1의 경우에는 중량이 증가하였다가 원상회복되는 형태를 나타내었다. 그러나 증류수 환경하에서는 300°C 노출의 경우를 제외하고 전체적으로 중량이 감소하였다가 90일 이후 원상회복되는 것으로 관찰되었다.

고온노출 후의 중량변화에서는 알칼리 용액에 침지된 경우가 전체적으로 중량감소가 작은 것으로 나타났다. 이는 알칼리 용액이 보강근대로 확산된 후 고온노출시 수분은 증발하고 알칼리 결정이 섬유내에 존재하였기 때문인

것으로 판단된다. 이에 반하여 증류수에 침지된 경우는 비소페놀 A의 용출 및 표면 가넷의 탈락 등에 의하여 중량이 감소한 것으로 판단되며, 온도가 높을 수록 감소율이 커지는 것으로 나타났다.

그러나 이러한 중량 변화는 90일 이후에는 크게 변화가 없는 것으로 나타나, 90일 정도에 섬유심부까지 용액이 확산되었기 때문에 판단되며, 침지 초기에는 표면형태, 수지 종류 및 제작 방법에 따라 용액의 침투 정도에 따라 시험편 간의 중량변화 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.2 온도노출에 의한 ILSS 변화

ILSS(Interlaminar Shear Strength)은 알칼리 및 온도 등에 의하여 손상된 FRP 보강근내의 열화정도를 섬유와 수지의 계면전단강도로 평가하는 방법이다. FRP 보강근과 같이 일방향 섬유가 수지에 의하여 결합되는 이질재료의 경우에는 외부 침식에 의하여 섬유간의 결합 또는 섬유와 수지간의 결합이 Fig. 9와 같이 손상을 받게 된다. 따라서 ILSS 실험은 재료내의 결합과 손상정도를 평가할 수 있는 간편하고 효과적인 방법이다.

Fig. 10에는 알칼리 용액에 침전된후 ILSS 실험에 의해 파괴된 FRP 보강근의 형태를 도시하였다. 표면을 섬유로 감싼 G3와 H1의 경우에는 계면의 파단형태가 뚜렷하지 않으나, 다른 시험편의 경우에는 시편 길이방향으로 계면전단파괴가 뚜렷하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 온도에만 노출된 경우의 각 FRP 보강근의 ILSS 변화 정도를 나타내었으며, 각 시험편의 지간/직경의 비가 다르기 때문에 각 보강근의 무손상상태의 시험편 평균 강도를 기준으로 강도비로 비교하였다. 에폭시수지를 사용한 G1의 경우에는 온도 증가에 의하여 강도가 감소하는 경향을 나타내었으나, 300°C 노출후 약 17%의 강도 저하 현상을 나타내었다. 그러나 비닐에스터 수지가 사용되고 표면을 섬유로 감싼 H1의 경우에는 60°C 노출



Fig. 9 Micro-images of immersed FRP rebars by alkaline solution



(a) G1 in $Ca(OH)_2$ solution



(b) G3 in $Ca(OH)_2$ solution



(c) H1 in $Ca(OH)_2$ solution



(d) C1 in $Ca(OH)_2$ solution

Fig. 10 Typical failure patterns of FRP rebar

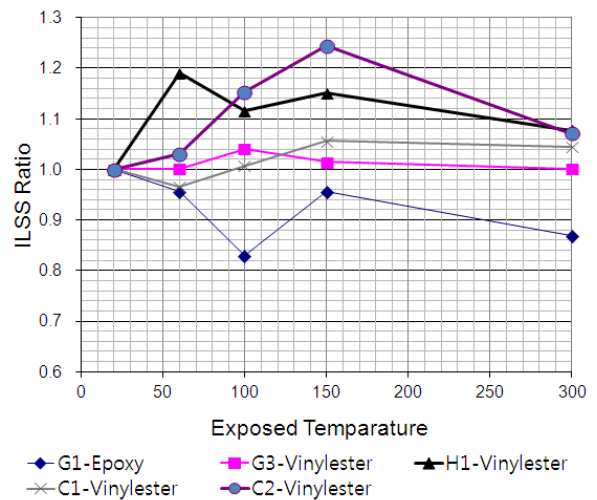


Fig. 11 Normalized strength ratio of FRP rebars under temperature exposure

후 강도가 20% 증가하였다가 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 300°C 노출후의 강도도 무순상 상태보다 높게 나타났다.

ϕ 9.6mm의 C2의 경우도 이와 유사한 경향을 나타내었으며, 비닐에스터 수지의 일반적인 유리전이온도(T_g)를 상회하는 150°C 노출시까지 강도가 24% 정도까지 증가한 후 300°C에서 감소하는 것으로 나타났다. G3와 C1의 경우도 순간적인 온도상승에 의한 손상은 거의 없는 것으로 관찰되었다.

이는 보강근내의 미경화된 수지가 고온 노출에 의해 추가 경화반응을 일으켜 크로스링크(crosslink) 구조로 변환되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 C1과 G1 실험편의 Fourier-transform infra-red spectroscopic(FT-IR) 분석 결과를 도시하였다. FT-IR분석은 화학조성물의 분자구조 및 조성형태를 평가하는데 많이 사용되는 분석방법으로 유화제인 스티렌(Styrene)의 파장은 696 cm^{-1} 이며, 비닐에스터의 주요 성분의 파장은 $1,740\text{ cm}^{-1}$ 이다(Hong and Woo, 1998; Cardona et al., 2007; Zhu et al., 2007). Fig. 12(a)의 경우 파장 1740 cm^{-1} 에서 실온과 300°C의 흡광도(absorbance)가 거의 동일한데 반하여 100°C의 경우에는 감소하고, 스티렌의 경우에는 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 300°C에서 추가 경화반응이 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 이에 반하여 Fig. 12(b)의 에폭시레진을 사용하여 165°C에서 10분간 양생된 G1의 경우, 이모노에스터(imino esters)의 구조적 재결합에 의하여 2-oxazolidones로 변화된 카르보닐기(carbonyls)를 나타내는 1750 cm^{-1} 의 흡광도가 100°C

에서 가장 낮게 나타난 반면 실온상태와 300°C가 높게 나타났다. 이는 G1의 유리전이온도와 유사한 100°C에 폭로되어 결합구조가 변화됨으로서 ILSS 결과 100°C의 강도가 가장 낮게 나타나게 된 원인으로 판단된다.

3.3 침지시간에 의한 ILSS 변화

Fig. 13과 14에는 알칼리 용액과 증류수에 침지된 시간에 따른 FRP 보강근의 ILSS 변화를 나타내었다. 모든 실험편의 경우 초기에는 약간의 강도 증진후 침지시간이 경과함에 따라 300일 침지후 최대 45%정도의 강도 저하현상을 나타내었다. 에폭시 레진이 사용된 G1의 경우에는 알칼리 용액에서 30일 경과후 강도비가 1.0 이하로 감소하였으며, 침지후 60°C와 100°C에 30분간 노출된 경우가 150°C 및 300°C 노출된 경우보다 강도저하 정도가 크게 나타났다. 온도노출이 없는 경우는 300일 경과후 30%정도의 강도 저하현상을 나타내었다. 비닐에스터 레진을 사용한 G3와 H1의 경우는 300일 동안 알칼리 용액 침지후 H1 100°C와 300°C 노출의 경우를 제외하고는 최대 15%정도의 강도 저하현상을 나타내었으며, 에폭시 레진의 경우와 같이 초기에 약간의 강도 증가현상도 나타내었다. H1-150°C와 H1-300°C를 제외하면 전체적으로 60일 이후부터 강도 감소율이 둔화되는 것으로 관찰되었다. C1과 C2의 경우에는 초기 알칼리 용액 폭로시 강도 증가정도가 크게 나타났으나, 30일 이후에는 강도비가 1.0 이하로 감소하여 300일 경과후 최대 45% 내외의 강도 감소를 나타내었다. 특히 다른 보강근과 달리 온도의 영향은 거의 받지 않은 것으로 관찰되었다. 증류수에

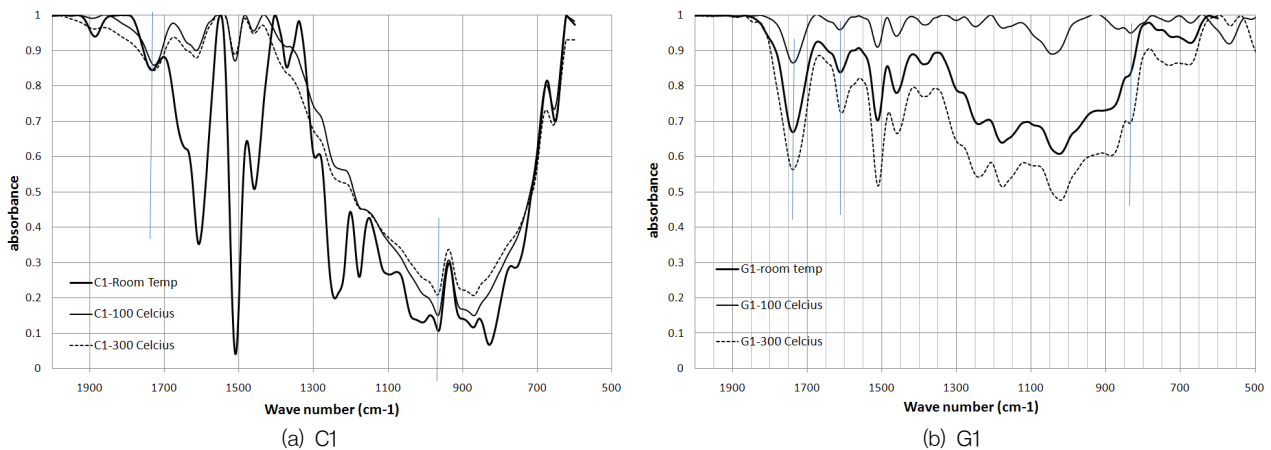
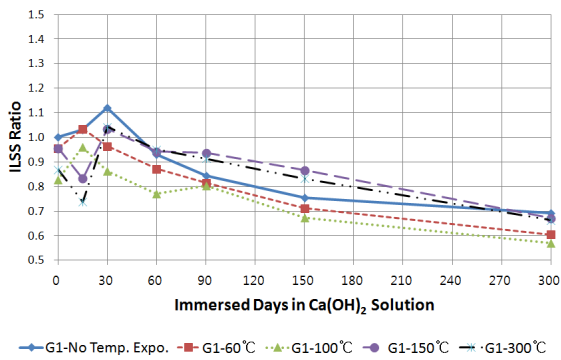
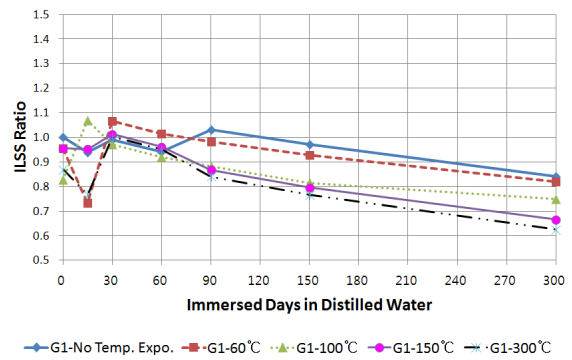


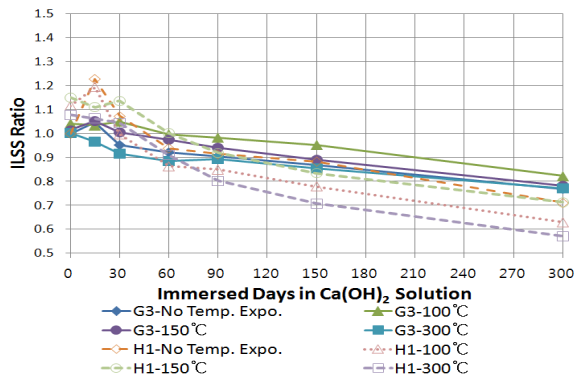
Fig. 12 FT-IR Spectrum of FRP rebar



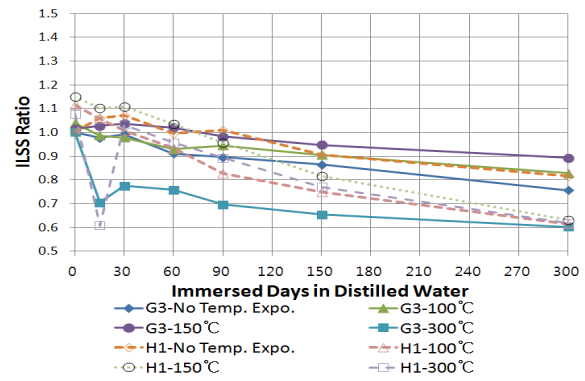
(a) G1 – epoxy resin



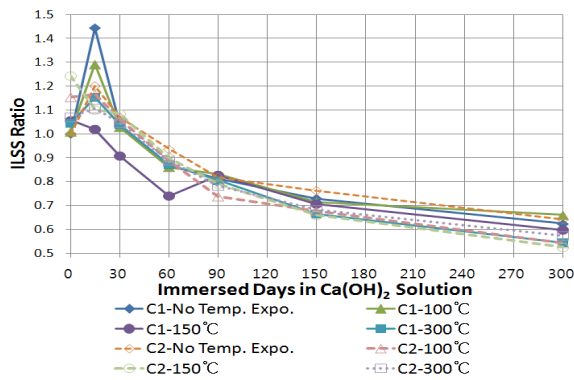
(a) G1 – epoxy resin



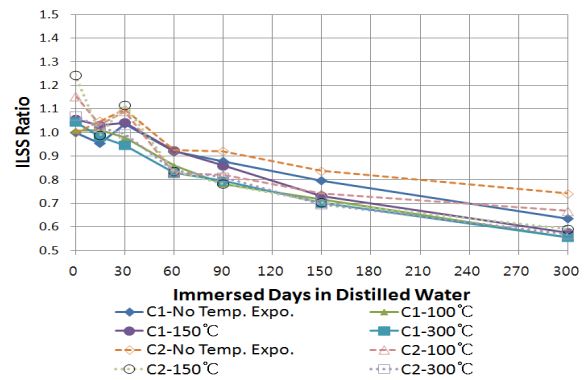
(b) G3 and H1 – vinyl ester resin



(b) G3 and H1 – vinyl ester resin



(c) C1 and C2 – vinyl ester resin



(c) C1 and C2 – vinyl ester resin

Fig. 13 ILSS variation of various FRP rebars in Ca(OH)_2 solution

Fig. 14 ILSS variation of various FRP rebars in distilled water solution

폭로된 경우에는 초기 강도 증가 현상의 거의 관찰되지 않았으며, 강도 저하 현상도 온도에 따라 편차가 상대적으로 크게 나타났다.

C1과 C2는 90일 이후 노출온도에 관계없이 선형적으로 감소하였으며, 300일 경화후 55~65% 정도로 강도가 저하되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 유리섬유보강근(G1, G3)의 경우가 탄소섬유보강근(C1, C2)의 경우와 비교하여 알칼리 환경과

중류수 환경하에서 강도저하 현상이 더 크게 나타나지는 않았으나, 침지후 온도 변화에 따른 강도변화 편차는 크게 나타났다.

G3와 H1의 경우 알칼리 또는 중류수 침지후 온도노출이 하지 않았을 때 용액에 관계 없이 300일 이후 10~40% 정도 강도가 감소한 것에 비하여 C1과 C2의 경우에는 온도의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

4. 결 론

논문에서는 고온조건이 알칼리 환경과 증류수환경에서 기손상을 받은 FRP 보강근의 내구성에 미치는 영향을 분석하였으며, 획득한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) G1 이형 GFRP보강근의 경우에는 알칼리 용액보다는 증류수환경에서 중량변화의 편차가 큰 것을 나타냈으며, 특히 고온의 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 나타났다.
- (2) 비닐에스터 수지를 사용한 G3와 H1의 경우에는 60일까지 중량변화 정도가 크게 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 변화정도가 감소하는 것으로 관찰되었다. 그러나 300°C 고온 폭로의 경우는 중량변화가 증가하는 것으로 나타났다. 탄소섬유 보강근의 역시 유사한 결과를 나타내었으며, 증류수 침지 후 300°C 노출된 경우에만 중량이 크게 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 중량변화의 경우 알칼리 용액에 침지된 경우보다 증류수에 침지된 시험편의 중량 감소가 전체적으로 크게 나타났으나, 이는 보강근내로 확산된 용액이 고온 노출후 수분증발에 의하여 알칼리 결정이 남았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 90일정도 이후에는 변수별로 중량변화는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (4) ILSS변화의 경우, 알칼리 및 증류수 침지 후 점차 강도가 감소하는 것으로 나타났으나, 초기 30일에서는 강도가 약간 증가하는 경우가 발생하였다. 또한 알칼리 용액과 증류수 환경에서 섬유의 종류에 따른 강도 감소의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 수지의 영향이 상대적으로 크게 관찰되었다.
- (5) 고온노출에 따른 보강근의 ILSS 변화는 에폭시 수지를 사용한 경우에는 고온노출 후 강도가 감소하는 것으로 나타났으나, 비닐에스터 수지의 경우는 150°C 정도의 노출후에는 강도가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이는 보강근 제조시 미경화된 수지성분이 고온에 의해 크로스링크되는 것으로 판단되며 제조 공정에 따라 온도의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 연구재단 연구비 지원(2010-0024085)에 의하여 수행되었습니다. 저자들은 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 문도영, 오홍섭, 알칼리저항 초단유리섬유를 리브에 사용한 유리섬유 보강근의 내구성능, Durability of GFRP rebar with Ribs containing Milled Alkaline Resistant Glass Fibers, 한국구조물진단유지관리공학회, 제15권 1호, 2011, pp.281-287.
2. 원종필, 박찬기, "콘크리트 보강용 FRP 보강근의 수분 민감성 및 열화 특성", 대한토목학회 논문집, vol. 24, No. 2A, 2004, pp.381-390.
3. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2003.
4. ASTM D4475, "Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
5. Bisby, L. A. and Kodur, V. K. R., "Evaluating the fire endurance slabs reinforced with FRP bars: Considerations for a holistic approach", *Composites Part B*, vol. 38, 2007, pp.547-558.
6. Cardona F., Rogers D. and Van Erp G., "Investigation by TGA-FTIR of the Effect of Styrene Content and Thickness on the UV-Curing of Vinylester Resins", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 20, No. 6, 2007, pp.601-615.
7. Chen Yi, Davalos J. F., Ray I, Kim Hyeong-Yeol, "Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures", *Composite Structures* 78, 2007, pp.101-111.
8. Clarke, J. L. and Sheard, P., "Designing Durable FRP Reinforced Concrete Structures", *Proceedings of the 1st International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite for Construction*. Sherbrooke, Quebec, Canada, 1998, pp.13-24.
9. Hong Shinn-Gwo and Wu Chung-Sheng, "DSC and FTIR analysis of the curing behaviors of epoxy/DICY/solvent open systems", *Thermo-chimica Acta* 316, 1998, pp.167-175.
10. Kim H. Y., Park Y. H., You Y. J., Moon C. K., "Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions", *Composite Structures* 83, 2008, pp.37-47.
11. Micelli F, Nanni A., Durability of FRP rods for concrete structure. *Construction and Building Materials* 18, 2004, pp.491-503.
12. Moon, D. Y., Sim J., Oh H., Benmokrane B., "An exploratory study of GFRP rebar with ribs containing milled glass fibers", *Composites Part B: Engineering*,

-
- vol. 39, No. 5, 2008, pp.882-890.
13. Sen, R., Mullins, G. and Salem, T., "Durability of E-Glass/ Vinylester Reinforcement in Alkaline Solution", ASI Structural Journal. vol. 99, No. 3, 2002, pp.369-375.
 14. Uomoto, T., "Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures", Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-3, J. L. Humar and A. G. Razaqpur, eds., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, 2000, pp.3-17.
 15. Won, J. and Park, C., "Effect of Environment Expose on the Mechanical and Bonding Properties of Hybrid FRP Reinforcing Bars for Concrete Structures", Journal of Composite Materials, vol. 40, No. 12, 2006, pp.1063-1076.
 16. Won, J., Lee S., Kim Y., Jang C. and Lee S. W., "The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar", Composites Part B: Engineering, vol. 39, No. 5, 2008, pp.764-772.
 17. Zhu J., Imam A., Roger, Crane K. L., Khabashesku V. N. and Barrera E. V., "Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength", Composites Science and Technology, vol. 67, No. 7-8, 2007, pp.1509-1517.
- (접수일자 : 2011년 8월 10일)
(수정일자 : 2012년 1월 9일)
(심사완료일자 : 2012년 2월 16일)

요 지

FRP 재료는 높은 부식저항성과 강도에도 불구하고 지난 20여년 동안 심각한 환경적 노출에 의한 재료의 성능저하에 대한 문제가 제기되어 왔다. 본 연구에서는 섬유와 수지로 구성된 이질재료인 FRP보강근이 온도와 화학적 노출을 복합적으로 받는 경우에 대하여 실험적으로 분석하였다. 각기 다른 형상으로 제작된 탄소, 유리 및 하이브리드 FRP 보강근 5종류에 대하여 중량변화, 계면전단강도(ILSS), SEM 및 FT-IR분석을 수행하였으며, 모든 FRP 실험편은 최대 150일까지 알칼리 용액과 증류수에 침지시킨 다음 60, 100, 150 및 300도의 온도에서 30분동안 노출하였다. 실험결과, 또한 FRP 보강근의 성능저하는 섬유의 종류뿐 아니라 수지의 종류와 제조과정에 따라 영향을 받는 것으로 관찰되었다. 침지 초기에는 ILSS 강도가 약간 증가한 후 시간경과에 따라 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 알칼리 용액과 증류수 용액에 의해 손상을 받은 ILSS의 차이는 무시할 수 있는 수준인 것으로 관찰되었다.

핵심 용어 : 화학적 노출, 내구성, FRP, FT-IR, 계면전단강도, 온도 노출
