

스트란드형 유리섬유 강화 복합재료의 특수환경에 대한 내구성 시험

이승렬 · 김부안 · 문창권
부경대학교 신소재공학부

Durability Test on E-Glass Fiber Reinforced Composites of Strand Type in Specific Environment

SEONG-RYUL LEE, BU-AN KIM AND CHANG-KWON MOON
Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Specific Environmental Condition 특수환경조건, Durability 내구성, E-glass fiber/vinylester resin composites E-glass/vinylester resin 복합재료, Interface 계면, Strand type 스트란드형, Weight gain 무게변화률, Tensile strength 인장강도

ABSTRACT: The effect of various environmental conditions on the durability of E-glass fiber/vinylester resin composites has been investigated using the tensile test specimen of strand type. It was found that the durability test method performed by the strand type specimen was more convenient and reliable than other conventional test method. The weight gains increased with the immersion time in both water and alkaline solution, and the weight gains at 80°C. were much bigger than those at 20°C in both conditions. The tensile strength decreased with the pass of immersion time in all aqueous solution, and the tensile strength at 80°C in alkaline solution decreased very steeply at beginning of immersion time. The decrement of tensile strength according to the immersion time in various environmental conditions was mainly caused by the degradation of interface and the damage of glass fiber surface.

1. 서 론

최근 건축구조물의 유지관리 및 성능을 최적화하기 위하여 새로운 건설재료의 개발과 적용이 요구되고 있는데, 섬유강화 플라스틱(Fiber reinforced plastics: FRP)은 기존의 구조물 재료에 비하여 비강도, 비탄성 및 내 부식성이 등이 매우 우수하여 그 대체 재료로서 기대되고 있다. 현재 외국에서 철근 대체재로서 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 FRP 보강근의 개발이 활발히 진행 중에 있으며, 우리나라에서도 한국건설 기술 연구원등에서 2003년부터 열악한 외부환경에 노출. 가설되는 콘크리트 구조물의 보강근으로 기존재인 철근을 대체할 수 있는 FRP 보강근의 개발 및 적용기술에 대해서 연구를 진행 중에 있다(김형열 등, 1999).

한편, FRP재료는 철근과 같이 산화 및 환원 등에 의한 부식 작용을 일으키지는 않으나, 유해한 특정 환경요소에 노출되는 경우 가수분해와 같은 화학적 반응으로 인하여 열화가 일어나 기계적 성질의 감소가 발생할 수 있다. 일반적으로 FRP는 주변의 온도와 습도, 자외선 및 강한 pH 환경에 의해 열화 되는 성질을 가지고 있으며(Chin et al., 1997), 특히 수분은 FRP의 매트릭스 수지를 가수분해시키고 체적팽창을 야기 시켜 균열을 발생시

키고 팽윤(Swelling)된 수분은 매트릭스와 섬유의 계면에서 복합재료의 화학적 결합을 분리시켜 접합강도(Bonding strength)를 저하시키기도 한다. 수분으로 인한 섬유, 매트릭스 수지 및 계면 등이 열화 되어 복합재료의 기계적 성질이 저하하는 것은 잘 알려져 있다(문창권과 구자삼, 1998; 김제현과 문창권, 1998; Gautier et al., 1999; Karbhari and Zhang, 2002).

그러나 최근 구조물의 경량화와 수명 연장을 위해 섬유강화 플라스틱의 적용이 활발해지고 있으며, 그 중에서 최근에는 (Glass fiber reinforced plastic) rebar가 일반 콘크리트 보강용 철근에 비하여 내식성이 뛰어나 콘크리트 구조물에서의 사용에 시험되고 있다(Abbasi and Hogg, 2005). 이는 기존의 철근이 가지는 무거운 무게로 인한 치수의 한계를 극복하기 위함과 동시에, 내 부식성을 높여 구조물에 대한 유지 보수비를 감소시킴으로서 경제적인 효과를 기대할 수 있기 때문이다(김덕현, 1999).

섬유강화 복합재료의 내구성에 대한 최근의 연구로는, GFRP laminates를 이용한 수분환경에서 침지시간과 온도가 미치는 영향(Liao et al., 1998; Miyano et al., 2004), GFRP rebar의 다양한 열화환경에서의 내구성에 관한 시험 등이 있다. 하지만, 기존의 시험법에서는 인장 시험편의 직경이 14mm, 길이가 약 900mm 정도로, 시험편 제작 및 시험장치의 대형화로 인한 재료시험 결과의 심한 편차가 나타나는 단점이 있다(문창권 등, 2005).

따라서 본 연구에서는 기존의 시험법보다 시험편 제작 및 시

교신저자 문창권: 부산광역시 남구 용당동 산100번지

051-620-1654 moonck@pknu.ac.kr

협방법이 용이한 스트란드형(Strand type)의 GFRP를 제작하여, 환경에 대한 내구성 시험에의 적용 가능성을 검토했으며, 여러 가지 특수 환경조건에서의 침지시간이 복합재료의 계면 및 기계적 성질에 미치는 영향 등을 비교 검토 하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편 제작

본 연구에서 사용된 강화 섬유는 E-glass fiber(ER270FW, 한국 화이버(주))였고, 매트릭스는 비닐에스테르 수지로, 주제는 RF1001(Cray valley Co.)를, 경화제는 Methyl ethyl ketone peroxide(MEKPO), 촉진제는 Cobalt 염을 사용하였다.

Strand type의 인장 시험편을 만들기 위해 주제와 경화제 및 경화 촉진제를 각각 100:1:0.4의 비율로 충분히 혼합하였다. 혼합된 수지는 진공오븐을 이용하여 상온에서 10분간 탈포시켜 Resin bath에 준비하였다.

준비된 Resin bath에 유리섬유 Bundle을 Roller의 가이드를 이용하여 Fig. 1과 같이 함침 시킨 후, 유리 Orifice에 통과시켜 섬유 함유율이 40~50 wt.%가 되도록 잉여수지를 제거하였다. 함침된 유리섬유 Bundle을 Wire frame에 감아 상온에서 24hr 경화시킨 후 열처리로서 80℃ 2hr, 120℃ 2hr 후 경화시켜 Fig. 2와 같이 양단에 종이 Tab을 부착시켜 인장 시험편을 제작하였다. 그리고 시험편의 상태가 양호한 시험편만을 선별하여 인장시험을 행하였다.

2.2 내구성 시험

내구성 시험은 제작된 스트란드형의 시험편을 수분 환경(중

성 환경) 및 알칼리 환경 등의 조건에 일정기간 침지시키는 것으로 행하였고, 이때 시험온도는 항온 오븐을 이용하여 상온(25℃) 및 80℃의 두 가지 조건으로 하였다. 스트란드형 시험편의 환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 사용된 각 환경조건의 용액으로, 수분환경은 pH 7~8의 정수된 수돗물을 사용하였으며, 알칼리 환경에 사용된 용액은 pH 12~13의 0.16% Ca(OH)₂ +1% NaOH +1.4% KOH 용액을 제조하여 사용하였다.

2.3 무게 변화율

제작된 스트란드형 시험편을 내구성 시험조건에 따라 수분 환경 및 알칼리 환경의 용액에 일정시간 침지시킨 후, 그 무게 변화율을 측정하였다.

이때, 무게 변화율은 각 조건별로 3개의 기준 시험편을 정하여 0, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 150일 간격으로 측정했다. 그리고 시험편의 무게 측정 시에 표면의 수분을 제거한 후 0.0001g의 정밀도를 가지는 전자저울(AT400, Mettler)을 사용하여 측정하였다. 무게 변화율(%)은 (1)식으로 구하였다.

$$\Delta(\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, Δ 는 무게 변화율, W_i 는 일정시간 침지 후의 시험편의 무게, W_0 는 침지 전 80℃에서 72시간 건조시킨 시험편의 초기무게이다.

2.4 인장시험

인장 시험편은 Fig. 2와 같이 Strand type 시험편의 양단에 종

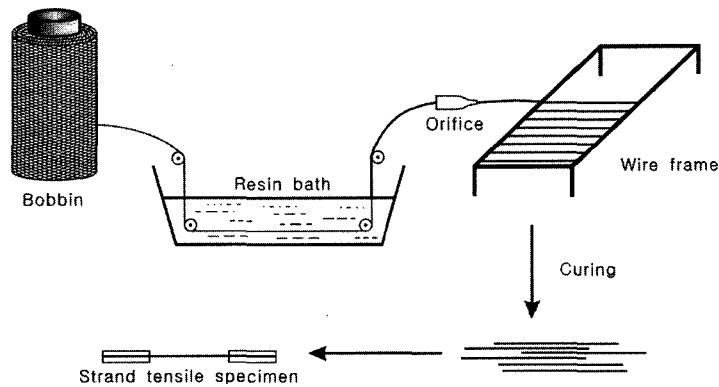


Fig. 1 Making processes of tensile specimen

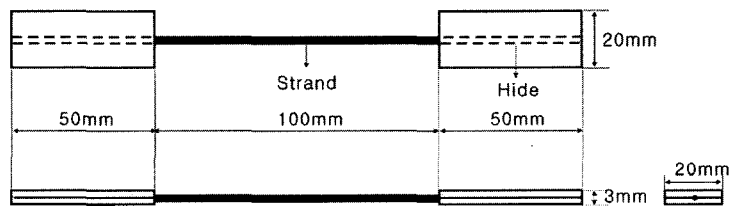


Fig. 2 Schematic of tensile specimen

이 Tab을 접착제로 부착하여 제작하였으며, 인장시험은 Micro 350, Testometric Materials Testing Machines의 인장 시험기에서 실시하였으며, 이때 Cross head speed는 2mm/min로 게이지 길이(Gauge length)는 100mm로 하였다.

또한, 인장 시험기의 상하 시험편 고정부에 마찰계수가 큰 천연 소가죽을 부착하여 Chucking할 때에 스트랜드 형 시험편의 접촉부분의 손상과 응력집중을 최소화하였다.

인장 시험은 상온에서 행하였으며 시험에 사용된 각 조건별 시험편의 수는 10개로 하였다. 인장강도의 계산은 수지가 섬유에 비해 인장강도가 매우 작으므로 수지의 기여 분은 무시하고 최대 인장하중을 스트랜드 섬유다발의 단면적만으로 나누어서 구하였다. 그리고 스트랜드 섬유다발의 단면적은 선밀도를 밀도로 나누어서 구하였다.

2.5 파단면 관찰

스트랜드 형의 인장 시험편은 인장시험 실시 후, 금으로 Coating하여 주사식 전자 현미경에서 그 파면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유리섬유/비닐에스테르 수지 복합재료의 무게변화를

Fig. 3은 E-glass fiber/vinylester resin 복합재료를 여러 가지 환경조건에 따라 일정기간 침지 시킨 후 침지시간에 따른 무게 변화율을 나타낸 것이다. 침지 온도가 20°C인 경우, 수분 환경이나 알칼리 환경에서의 침지시간에 따른 무게 변화율은 큰 차이는 보이지 않았지만, 수분 환경에서의 무게 변화율이 침지시간의 전체 기간에서 알칼리 환경에서보다 조금 크게 나타난 것을 알 수 있다. 그리고 침지온도가 80°C인 경우, 수분 환경과 알칼리 환경의 무게 변화율의 차이는 30일까지는 상온에서의 차이와 거의 같았지만, 30일 이후부터는 수분환경과 알칼리 환경의 무게 변화율의 차이는 점차 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 전체적으로 수분 환경에서의 무게변화율이 알칼

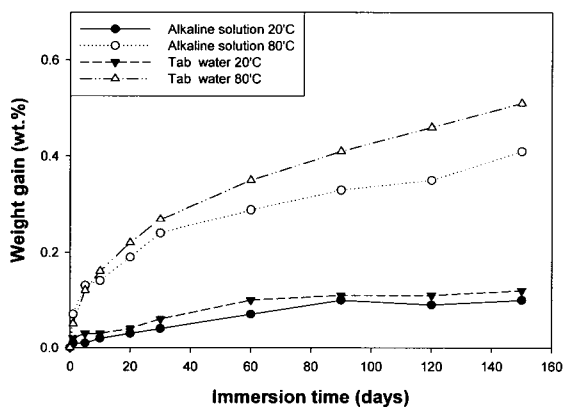


Fig. 3 Weight gain of the glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in various water environments

리 환경에서의 무게 변화율보다 조금 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 알칼리 환경으로 만들기 위해서 사용한 시약 중, Na와 Ca 등의 구조형성 이온들에 의하여 물이 구조화 되어 그 점도가 증가된 결과라고 생각되어진다.

그리고 각 환경 조건에서 온도가 높은 경우의 무게 변화율이 온도가 낮은 경우에 비해 매우 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 섬유강화 복합재료에서의 수분흡수는 주로 복합재료 제조 시 발생하는 Macro, Micro void와 같은 결합에의 수분의 침투 및 매트릭스 수지에서의 자유체적(Free volume)으로 수분의 확산, 섬유와 수지 사이의 계면을 통한 수분의 확산 등에 의하여 일어나는데, 수용액의 온도가 높은 경우 Micro void와 자유체적의 팽창 및 수분 자체의 점도감소로 인하여 무게 변화율이 크게 나타난 것으로 생각된다.

3.2 유리섬유/비닐에스테르 수지 복합재료의 인장강도의 측정

Fig. 4는 E-glass fiber/vinylester resin 복합재료의 여러 가지 환경조건에서 침지시간에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 인장강도는 모든 환경조건 하에서 전반적으로 침지시간에 따라 감소하고 있으며, 같은 종류의 수용액에서는 침지온도가 높은 시험편의 인장강도의 감소가 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 수분흡수로 인한 무게 변화율이 증가할수록 인장강도는 감소하고 있다는 것을 의미한다. 특히, 알칼리 환경의 시험편이 수분환경에 비하여 강도의 감소가 급격하다는 것을 알 수 있다.

그리고 다른 조건에 비해서 20°C 수분 환경에서의 인장강도는 침지시간에 따라 크게 저하하는 경향을 보이지 않았다. 그러나 80°C 수분 환경에서의 인장강도는 침지 10일까지는 급격하게 감소하다가 30일까지는 서서히 감소하였고, 그 후에는 거의 변화가 없었지만 전체적으로 20°C에서의 인장강도의 감소 폭 보다는 크게 나타나는 것을 보이고 있다.

20°C 알칼리 환경에서는 침지시간이 경과함에 따라 인장강도가 지속적으로 감소하는 경향으로 보였으며, 침지시간이 45일

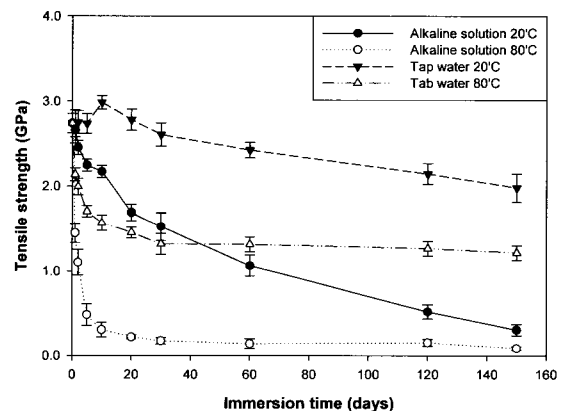


Fig. 4 Tensile strength of the glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in various water environments

후에는 80℃의 수분 환경에서의 강도보다 감소가 더 컸으며, 침지시간 150일 부근에서는 80℃ 알칼리 환경에서의 인장강도의 값에 가까울 정도의 강도 저하특성을 보였다. 따라서 본 연구에 사용된 복합재료의 시스템은 수분 환경 보다 알칼리 환경에서 더욱 더 취약하다는 것을 의미한다고 생각된다.

한편, 유리섬유가 수분과 접촉하면 유리섬유의 알칼리 성분이 수분의 수소이온과 교환반응에 의해 수분에 용출되며 이러한 용출 현상에 의해 유리섬유는 침식되어진다. 특히 알칼리 환경에 접촉했을 경우 알칼리 이온에 의한 유리섬유의 손상은 더욱 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(문창권 등, 2005). 따라서 80℃ 알칼리 용액에서의 시험편의 급격한 인장강도 저하는 매트릭스 수지와 유리섬유 사이의 계면부분 손상 보다는, 유리섬유 자체의 알칼리 이온에 의한 손상에 의하여 더 큰 영향을 받았기 때문으로 사료된다.

그리고 전체적으로 수분환경에 비하여 알칼리 환경에서의 인장강도 감소가 크게 나타나는 것은 복합재료의 매트릭스 수지가 알칼리의 영향에 의해 손상됨과 동시에 유리섬유 자체 손상의 복합적인 것에 의한 것으로 생각된다. 이는 매트릭스로 사용된 Vinylester resin이 비교적 내식성이 뛰어난 것으로 알려져 있지만(Sagi-Mana et al., 1998; Gellert and Turley, 1999), 일반적인 열경화성 수지의 성질이 산과 알칼리에 취약한 것을 고려해 볼 때, 매트릭스 수지도 알칼리의 영향을 많이 받았던 것으로 생각된다.

그리고 시험편 길이 900mm와 직경 12.7mm로 행하고 있는 기존 시험편에서의 인장강도의 변동계수가 8~17%(한국건설기술연구원, 2004; Francesco and Antonio, 2004)인데 비하여, 본 연구에 사용된 Strand형 시험편의 인장강도의 변동계수는 3~6%로 나타났다. 따라서 Strand형의 시험편이 제작과 취급에 유리할 뿐만 아니라 그 강도 값의 신뢰성 또한 높다고 생각된다.

3.3 파단면 관찰

Fig. 5는 내구성 시험을 하기 전 인장 시험편의 파단면을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 것으로, 섬유와 매트릭스 수지의 계면접착상태가 양호할 때 발생하는 수지의 Hackle이 섬유에 날카롭게 부착된 것을 볼 수 있다. 이것은 내구성 시험 전에는 섬유와 수지와의 계면접착 상태가 양호하다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 20℃ 수분 환경에서 5일, 60일 및 150일 동안 침지시킨 스트란드형 시험편의 인장 파단면으로, (a)에서는 Fig. 5에서 보이는 Hackle이 날카롭게 부착되어 있는 것을 볼 수 있으나, 침지 시간이 길어짐에 따라 (a)와 비교하여 섬유에 부착된 Hackle의 모양이 둔화되어 가며, 그 양도 감소하고 있는 것으로 보여 진다. 이것은 침지시간에 따라 섬유와 수지의 계면접착이 서서히 열화 되어가는 것을 의미하는 것으로, Fig. 4에서 보인 침지시간에 따른 인장강도가 감소한 경향을 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 7은 80℃의 수분 환경에서 5일, 60일 및 150일 동안 침지시킨 시험편의 인장 파단면으로, (a)에서는 섬유에 매트릭스 수지가 부착된 것은 조금 보이고 있지만, Hackle은 거의 볼 수 없으며, (b), (c)에서는 섬유에 부착된 수지도 거의 보이지 않는

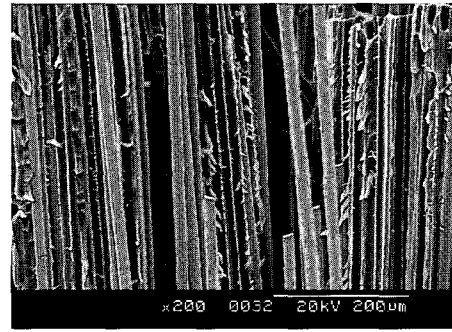


Fig. 5 SEM photograph of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites (no condition)

다. 이것은 침지시간에 따라 그 계면이 급격히 열화된 것을 보여주며, Fig. 4에서 인장강도의 감소가 30일 까지 급격히 일어난 것을 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 8은 20℃의 알칼리 환경에서 5일, 60일 150일 동안 침지한 시험편의 인장 파단면으로, (a)에서는 20℃의 수분 환경에 비하여 Hackle의 양이 현저하게 적은 것을 알 수 있으며, (b)에서는 섬유에 부착된 수지도 보이지 않으며 (c)에서는 Pull-out된 섬유길이가 매우 짧게 나타나, 알칼리 성분에 의한 계면 열화 및 유리 섬유 자체의 손상으로 인한 파단이 발생한 것으로 생각된다. 이러한 것은 동일 온도 조건(20℃)의 수분 환경에 비하여 알칼리 환경이 복합재료의 기계적 성질에 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 80℃의 알칼리 환경에서 5일, 60일 및 150일 동안 침지한 시험편의 인장 파단면으로, (a)에서는 섬유에 부착된 수지의 Hackle을 거의 찾아 볼 수 없고 계면과 매트릭스 수지의 열화 및 섬유의 손상도 많이 일어난 것으로 보이며, (b), (c)에서 알 수 있듯이 침지시간이 길어짐에 따라 계면과 수지의 가소화 및 섬유자체가 더욱 심하게 손상된 것을 볼 수 있다. 이것은, 높은 온도와 알칼리 환경 조건이 복합적으로 작용하여 계면과 수지 및 섬유의 열화를 가속화 한 것으로 생각되며, 침지시간이 10일까지의 인장강도 감소가 다른 환경 조건에 비하여 매우 급격하게 일어난 원인으로 생각된다.

Fig. 10은 각 시험환경에서 150일 동안 침지한 시험편의 파단면에서의 유리섬유를 확대한 전자 현미경 사진이다. (a)에서는 섬유와 매트릭스의 박리가 완전히 일어나지 않은 것으로 보이며, 섬유의 손상이 거의 없어 보인다. (b)에서는 매트릭스가 많이 가소화 되어 계면부분 및 매트릭스 수지 부분에서 파괴가 동시에 일어난 것으로 보인다. (c)에서는 섬유표면이 알칼리 환경에 많이 침식된 것으로 보이며, (d)에서는 섬유 축과 수직 방향으로 크랙이 많이 보이고, 섬유 표면도 매끄럽지 못해 섬유 자체가 많이 손상된 것으로 보인다.

이상으로 수분 환경에서 인장강도의 저하는 주로 계면의 열화에 의한 것으로 생각되며 알칼리 환경조건에서 인장강도의 심각한 저하는 수지와 계면뿐만 아니라 섬유자체의 심각한 손상 등으로 인한 것으로 생각된다.

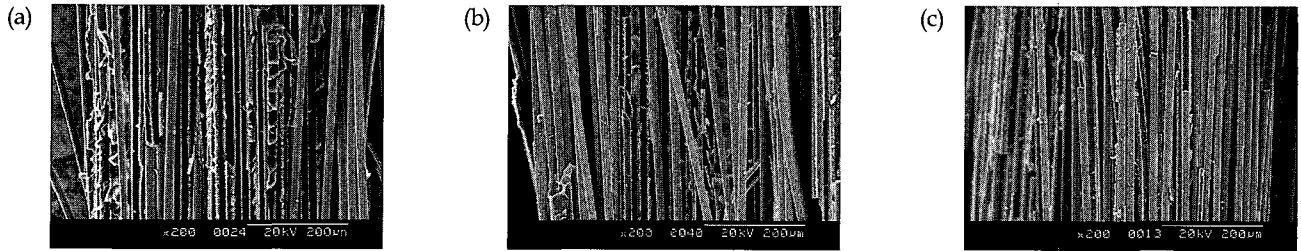


Fig. 6 SEM photographs of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in tap water environment at 20°C: (a) 5 days, (b) 60 days, (c) 150 days

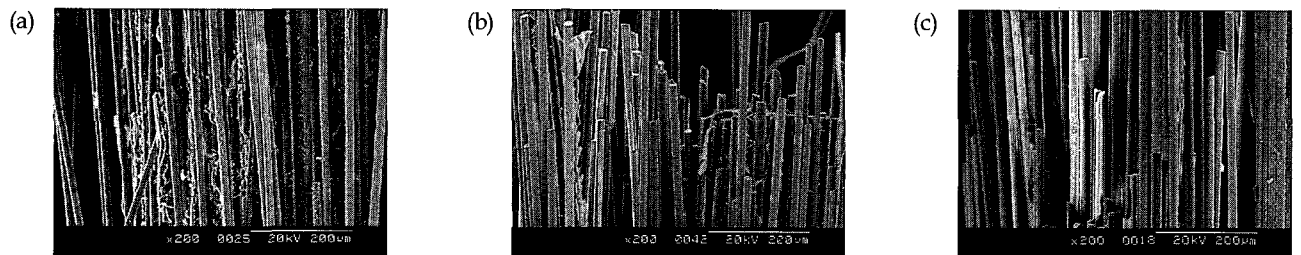


Fig. 7 SEM photographs of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in tap water environment at 80°C: (a) 5 days, (b) 60 days, (c) 150 days

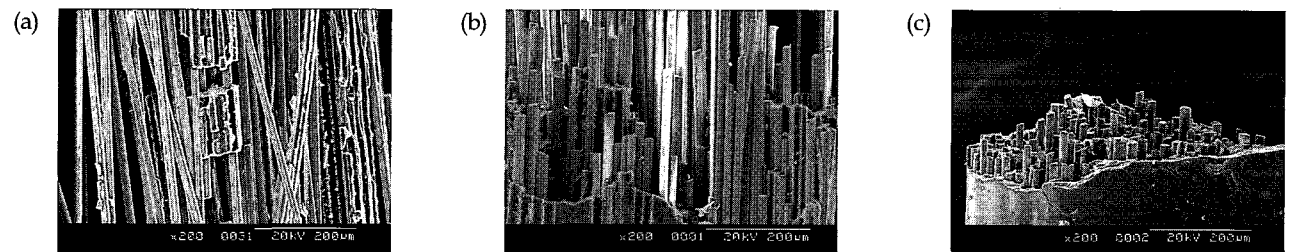
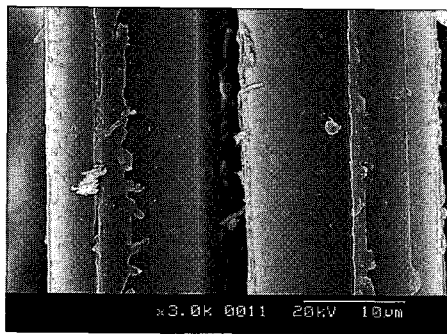


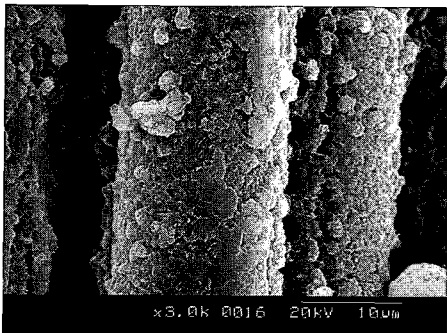
Fig. 8 SEM photographs of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in Alkaline solution environment at 20°C: (a) 5 days, (b) 60 days, (c) 150 days



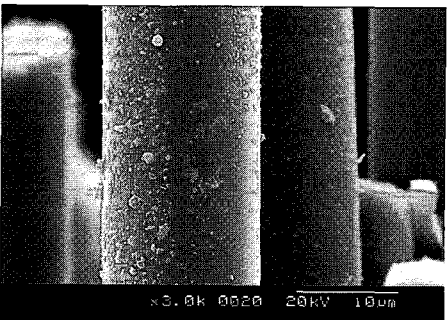
Fig. 9 SEM photographs of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites as a function of immersion time in Alkaline solution environment at 80°C: (a) 5 days, (b) 60 days, (c) 150 days



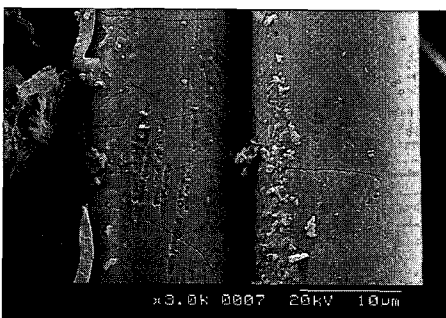
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 SEM photographs of tensile fracture surface of E-glass fiber/vinylester resin composites of 120 days immersion time: (a) in deionized water environment at 20°C, (b) in deionized water environment at 80°C, (c) in alkaline solution environment at 20°C, (d) in alkaline solution environment at 80°C

4. 결 론

스트란드 형의 E-glass fiber/vinylester resin composites 인장 시험편을 제작하여 20°C 및 80°C의 수분 및 알칼리 환경에서 내구성 시험을 실시하여, 계면 및 기계적 성질에 대한 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Strand형 시험편을 이용한 내구성 시험은 기존 시험법에 비하여 간편하고 시험 결과의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 침지시간에 따른 무게변화율의 변화는 수분 및 알칼리 환경에서 모두 증가하였으며, 온도가 높은 경우의 무게변화율이 더 높게 나타났다. 그리고 수분환경이 알칼리 환경보다 온도와 관계없이 조금 높은 값을 보였다.

(3) 인장강도의 변화는 침지시간에 따라 모든 환경조건에서 감소하는 경향을 보였으며, 20°C 수분환경의 경우는 침지전과 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 80°C의 알칼리 환경의 경우 급격하게 감소하였다.

(4) 인장강도 감소의 원인은 수분 환경에서는 유리섬유와 비닐에스테르 수지의 계면열화에 의한 것이 주된 원인이며, 알칼리 환경에서는 계면 및 매트릭스의 열화는 물론, 특히 섬유자체의 손상에 의한 것이 주된 원인인 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 김덕현 (1999). "21세기의 복합재료의 신진개 방향", 고분자 과학과 기술, 제10권, 제1호, pp 4-19.
- 김제현, 문창권 (1998). "장기간의 수분흡수가 유리섬유강화 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향", 한국섬유공학회지, 제35권, 제5호, pp 310-308.
- 김형열, 유영준, 박영환, 박종섭, 유영찬, 김금환 (2001). "GFRP보강근의 내구특성," 2004년 대한토목학회 정기학술대회 논문집 문창권, 김형열, 박영환 (2005). "GFRP 리바의 내구성에 관한 연구", 한국동력기계공학회지, 제9권, 제2호, pp 50-56.
- 문창권, 구자삼 (1997). "흡수에 의한 FRP의 내구성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제11권, 제2호, pp 48-56.
- 한국건설 기술연구원 (2004). "FRP 복합재료 보강재 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술개발," 1차년도 보고서
- Abbasi, A. and Hogg, P. J. (2005). "Temperature and Environmental Effects on Glass Fiber Rebar: Modulus, Strength and Interfacial Bond Strength with Concrete", Composites, Vol 36, No 2, pp 394-404.
- Chin, J. W., Nguyen, T. and Aouadi, K. (1997). "Effect of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Plastic(FRP) Materials Used in Construction", J. Comp. Tec. Res., Vol 19, No 4, pp 205-213.
- Francesco, M. and Antonio, N. (2004). "Durability of FRP Rods for Concrete Structures", Construction and Building Materials., Vol 18, pp 491-503.

- Gautier, L., Mortaigne, B. and Bellenger, V. (1999). "Interface Damage Study of Hydrothermally Aged Glass-fiber-reinforced Polyester composites", *Comp. Sci., Tech.*, Vol 59, No 7, pp 2329-2337.
- Gellert E. P. and Turley D. M. (1999). " Seawater Immersion Aging of Glass-fiber Reinforced Polymer Laminates for-Marine Applications", *Composites Part A: Vol 30*, pp 1259-1265.
- Karbhari, V. M. and Zhang, S. (2002). "E-Glass/Vinylester Composites in Aqueous Environments-I:Experimental Results", *Appl. Comp. Mater.*, Vol 10, No 3, pp 19-48.
- Liao, K., Schultheisz, C. R. and Hunston, D. L. (1998). "Effects of Environmental Aging on the Properties of Pultruded GFRP", *Composi: Part(B)*, Vol 30, No 9, pp 485-493.
- Miyano, Y., Nakada, M. and Sekine, N. (2004). "Accelerated Testing for Long-term Durability of GFRP Laminates for Marine Use", *Composites: Part(B)*, Vol 35, No 4, pp 497-502.
- Sagi-Mana, D., Narkis, M., Siegmann, A., Joseph, R. and Dodrik, H. (1998). "The Effect of Marine Environment on a Vinyl Ester Resin and Its Highly Filled Particulate Quartz Composites", *J. of Appl. Polym. Sci*, Vol 69, No 11, pp 2229-2234.

2006년 2월 14일 원고 접수

2006년 4월 17일 최종 수정본 채택