

GFRP 리바의 내구성에 관한 연구 A Study on the Durability of Glass Fiber Reinforced Plastics Rebars

문창권 · 김형열 · 박영환
C. K. Moon, Y. H. Kim and Y. H. Park

Key Words : Glass Fiber Reinforced Polymer(유리섬유 강화 고분자), Rebar(리바), Environment Condition(환경 조건), Degradation(열화).

Abstract : The mechanical properties of glass fiber reinforced polymer reinforcing bars(rebar) in various environment conditions such as moisture, chloride, alkali and freeze-thaw actions at temperature ranging from room temperature(25℃) to high temperature of up to 80℃ have been studied. The test results indicated that tensile strength and interfacial shear strength of GFRP bar were decreased with the increasing of temperature and holding time of each environment condition. The degradation in alkali environment. was more serious than those in the other environments.

1. 서 론

현재까지 콘크리트 구조물에서 가장 중요한 강화재로 철근이 오래 동안 사용되어 왔다. 하지만 최근 대형 구조물의 수요증가와 함께 열악한 환경에서 건설된 구조물의 내구성에 관심이 증대되면서 구조물 건설에도 비강도 및 비탄성뿐만 아니라 환경에 대한 내구성 등이 우수한 재료들의 수요가 요구되고 있다. 그래서 비강도 및 비탄성이 우수한 GFRP 리바가 철근의 대체 재료로서 관심을 끌고 있다. 이 재료는 철근에 비해서 4배나 가볍고 강도도 더 크며 부도체로서 부식에도 강한 재료이다.

그러나 현재 GFRP 리바가 미국, 캐나다 등에서 건설재료로 활용되고는 있으나 다른 건설재료에 비하여 장기적으로 축적된 환경에 대한 내구성 데이터가 부족하여 내구성에 관련된 특성은 잘 알려지지 않고 있는 실정이다.

GFRP 재료의 특수한 환경에서의 내구성 특성을 파악하기 위해서는 먼저 GFRP 재료의 환경에 대한 열화과정을 이해하는 것이 필요하며, 크게 매트릭스 열화¹⁾, 섬유 및 계면²⁾의 열화로 구분 할 수 있다.

콘크리트 구조물에 적용되는 GFRP 리바의 내구

성환경인자로는 수분(moisture), 염화물(chloride), 알칼리(alkali), 동결융해(freeze-thaw), 온도(temperature), 하중(stress), 자외선(UV) 등을 생각할 수 있으며, 이러한 독립적인 인자 이외에 두 가지 이상의 인자가 복합적으로 작용하는 경우 열화과정을 촉진시킬 수 있다^{1), 3,4)}.

GFRP 리바를 사용하는 콘크리트 구조물의 내구성을 파악하기 위해서는 먼저 예상되는 환경에서 리바의 내구성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

또한, 콘크리트 구조물의 내구연한 및 공용수명이 100년 이상인 것을 감안하여 내구성 영향인자별 촉진시험을 실시하고, 그 결과로부터 장기적인 리바의 내구특성을 추측할 수 있는 방법도 고려해야 된다.

그래서 본 연구는 외국에서 철근대용으로 상용화된 콘크리트용 GFRP 리바를 사용하여 여러 가지 환경인자 별 내구성 시험을 실시하고, 그 결과를 비교 검토하여 콘크리트용 GFRP 리바 개발의 기초 자료로 삼기 위한 것이다.

2. 실 험

2.1 시험편

본 연구의 내구성 시험에는 외국에서 상용화되어 가장 활용실적이 많은 두 종류의 GFRP 리바를 사용하였다. 제작 사는 Aslan사(미국)와 Isorod사(캐나다)였으며, 공급받은 GFRP 리바의 섬유 체적 함

접수일 : 2005년 1월 31일
문창권(책임저자) : 부경대학교 신소재 공학부
E-mail : moonck@pknu.ac.kr Tel : 051-620-1654
김형열, 박영환 : 한국건설기술연구원 구조연구부

유율은 각각 55.8 및 55.1 vol.%였다. 섬유 체적 함 유율은 소각로에서 450°C로 18시간 열처리하여 수 지를 모두 열분해 시킨 후 섬유의 중량을 정밀저울 에 달아서 구하였다. 그리고 Aslan사 및 Isorod사 의 공급받은 GFRP 리바의 인장강도는 각각 692.8 및 660.6 MPa이었고 탄성계수는 38.5 및 42.7GPa 이었다.

인장 시험편은 900mm, 3점 굽힘 short beam 전단 시험편은 60mm, 현미경 관찰용 시험편은 10mm의 길 이로 다이아몬드 절단기로 제작하였다.

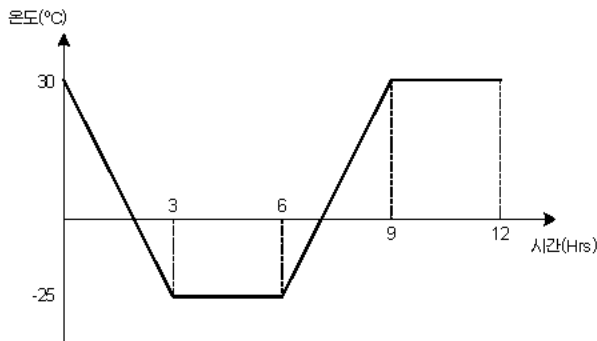


Fig. 1 Schematic of freeze-thaw cycle

2.2 내구성 시험방법

내구성 시험은 GFRP 리바를 수분, 염화물, 알칼 리 및 알칼리 분위기에서 동결융해 등의 각 환경 인자에 일정기간 노출시키는 것으로 행하였고 촉진 인자로서 시험온도는 상온(25°C), 40°C 및 80°C이 며, 내구성 시험은 항온 수조에서 행하였다. 항온수 조 내부에는 순환펌프가 설치되어 수조내부의 온도 를 일정하게 유지하도록 하였다. 수분환경을 제외 한 다른 환경인자의 시험은 Fig. 2와 같이 1m 길 이의 강관파이프로 제작된 용기에 내구성 환경 인 자별의 용액과 GFRP 리바를 넣은 후, 완전밀봉을 위하여 실리콘 테이프와 에폭시를 사용하였다.

환경 인자별 시험조건은 다음과 같다. 수분환경 은 완전 습윤 상태로 수돗물을 사용했으며, 염화물

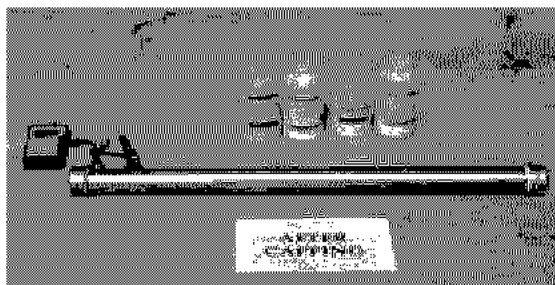


Fig. 2 Capping for durability

은 3%의 염화 나트륨(천일염) 용액을 사용했다. 알 칼리 환경은 수산화칼륨(KOH) 1.4%, 수산화나트륨 (NaOH) 1.0%, 그리고 수산화칼슘(Ca(OH)2) 0.2% 를 수돗물에 용해시켜 pH지수가 13.0인 강알칼리 용액을 만들어 사용했으며, pH지수는 20분간 교반 후에 측정을 했다. 동결융해환경은 pH지수가 13.0 인 강알칼리 분위기에서 Fig. 1과 같이 하루에 2사 이클 행하였다.

2.3 횡단면 현미경 관찰

내구성 영향인자별 FRP 매트릭스 수지, 섬유 및 매트릭스 수지-섬유의 계면에 발생하는 현상을 과 약하기 위하여 주사형 전자 현미경(SEM) 관찰을 하였다. 시험편은 Isorod사의 것과 Aslan사의 것, 두 종류를 No condition, 수분 90일, 염화물 90일, 알칼리 75일 및 알카리 분위기에서 동결 융해를 60 일 시킨 것을 사용하였다.

전자현미경 관찰용 시험편은 각 시험편에서 길이 10mm 정도를 절단하여 sandpaper로 연마한 후에 알 루미나 분말로 polishing한 후에 표면에 금을 코팅 하여서 사용하였다.

그리고 광학 현미경 관찰용의 시험편은 전자 현 미경 시험편과 같은 방법으로 연마를 하여 관찰 했 으며, 횡단면의 파단 상태도 관찰했다.

2.4 인장시험

GFRP 리바를 수분, 염화물, 알칼리 및 알칼리 분위기에서 동결융해 등의 각 환경 인자에 일정기 간 노출시킨 시험편의 인장시험은 ASTM D3916⁵⁾ 을 적용했으며, 종류별 5개의 시험편을 사용하였다. 그리고 인장강도의 환경에 대한 보유율은 다음 식 으로 계산했다⁶⁾.

$$\text{Retention (\%)} = \frac{\text{Tensile Strength (conditioned)}}{\text{Tensile Strength (unconditioned)}} * 100$$

2.5 굽힘시험

섬유와 수지의 계면 전단강도를 구하기 위하여 Short beam 3점 굽힘시험을 행했으며, 길이 80mm 의 시험편을 각 조건 당 10개씩을 다이아몬드 절단 기로 제작하여, span 길이 60mm, cross head speed 2mm/min로 굽힘시험을 행하였다. 그리고 계면 전 단 강도는 원형단면이므로 다음 식으로 계산을 하 였다.

< 그림 7.2 > 내구성 시험 시편(개

$$\tau = 8P_{max}/3\pi D^2$$

식에서 P_{max} 는 최대하중이고 D 는 시험편의 직경을 나타낸다.

2.6 파단면 관찰

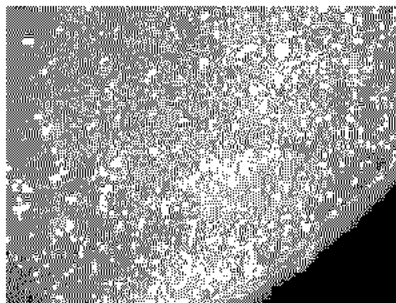
굽힘시험 후 횡단면을 광학현미경으로 크랙의 방향을 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

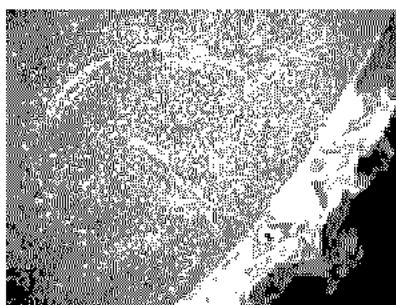
3.1 횡단면 관찰

Fig. 3은 GFRP 리바의 횡단면 광학 현미경 사진으로 core와 skin구조로 되어 있는 것을 알 수 있다. Isorod 사의 것이 원주 부분의 시멘트 층(skin 구조)이 Aslan 사의 것 보다 더 두꺼운 것을 알 수 있으며, 그 두께는 약 0.5mm였다.

Fig. 4는 여러 가지 열악한 환경 인자에 일정시간 침지시킨 후의 Aslan 사 GFRP 리바의 대표적인 횡단면 전자 현미경 사진이다. 환경 인자에 따른 섬유와 수지계면에서의 별 차이는 없는 것으로 판단되지만, 염화물 90일 것은 섬유 원주의 부분이 많이 파단 된 것과 60일의 동결 융해는 조금 파단 된 것을 볼 수 있다. 물론 이것은 똑 같은 조건으



(a) No condition(Aslan)



(b) No condition(Isorod)

Fig. 3 Optical microphotographs of transverse section of GFRP Rebar

로 시험편을 연마 시에 발생한 것으로, 염화물 90일 것은 계면 부분의 섬유가 좀 취약해 진 것이라고 생각 할 수 있다.

Fig. 5는 여러 가지 열악한 환경 인자에 일정시간 침지시킨 후의 Isorod사 GFRP 리바의 대표적인 횡단면 전자 현미경 사진이다. 이것 역시 환경인자에 따른 섬유와 수지계면에서 별 차이는 없는 것으로 판단되지만, 염화물 90일과 동결융해 60일의 것은 섬유의 원주부분이 많이 파단 된 것을, 동결 융해 60일의 것이 염화물 90일보다 더 많이 파단 된 것을 볼 수 있다. 이것도 Aslan의 전자현미경 사진

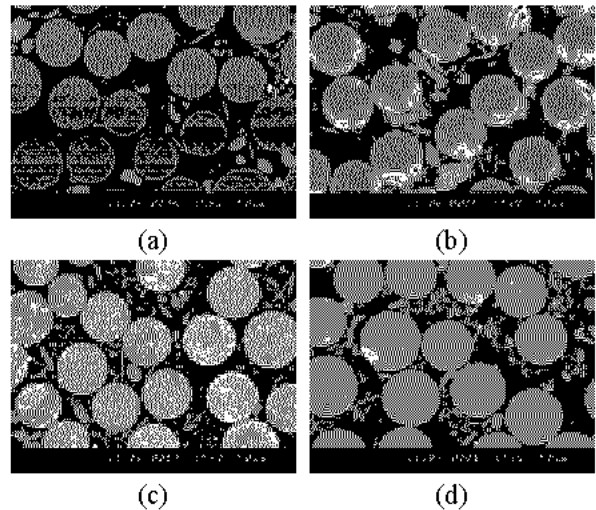


Fig. 4 SEM photographs of Aslan GFRP Rebar (a) moisture of 90 days (b) chloride of 90days (c) alkali of 75days (d) freeze-thaw of 60 days

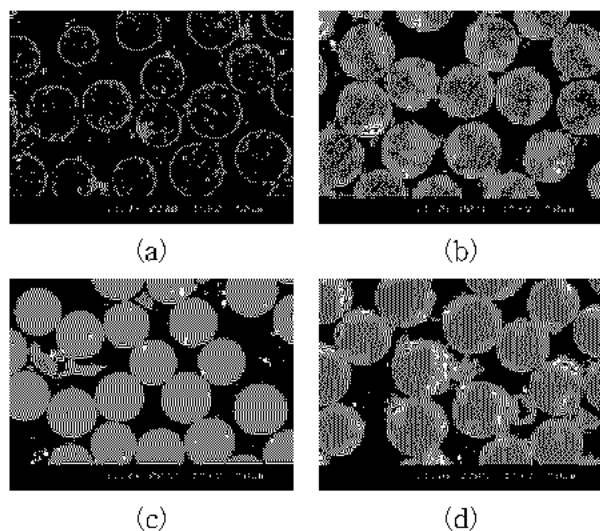


Fig. 5 SEM photographs of Isorod GFRP Rebar (a) moisture of 90 days (b) chloride of 90days (c) alkali of 75days (d) freeze-thaw of 60 days

에서 전술한 이유와 같다고 생각된다. 특히 염화물 90일과 동결융해 60일의 조건에서는 계면 부분의 섬유가 많이 취약해 진 것이라고 생각할 수 있다.

3.2 인장실험

Fig. 6은 두 종류의 GFRP 리바를 완전 습윤 상태에서 30일에서 90일까지 온도별로 침지시킨 이후의 인장시험의 결과를 나타낸 것으로, 두 종류의 GFRP 리바 모두 온도와 침지시간이 증가함에 따라 인장강도는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 온도와 침지시간에 따라 다르지만 Aslan은 약 7~24%, Isorod는 5~51%의 인장강도의 감소가 나타났다. Aslan의 경우는 온도에 큰 영향을 받고 있지 않지만, Isorod의 경우는 25℃와 40℃에 컨디셔닝 시편의 결과는 큰 차이가 없었으나, 80℃에서 컨디셔닝 시편의 경우 인장강도가 급격하게 감소되었음을 알 수 있다.

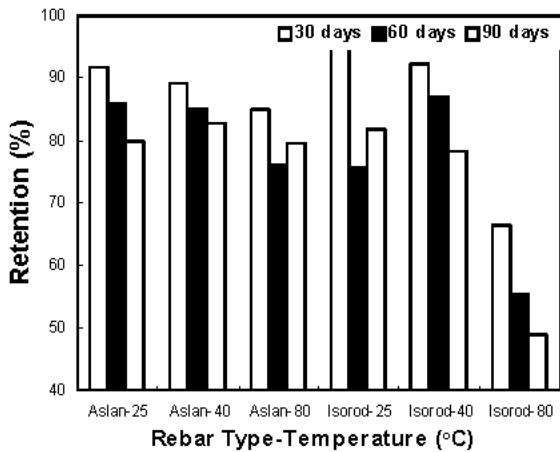


Fig. 6 Retention of tensile strength in moisture environment

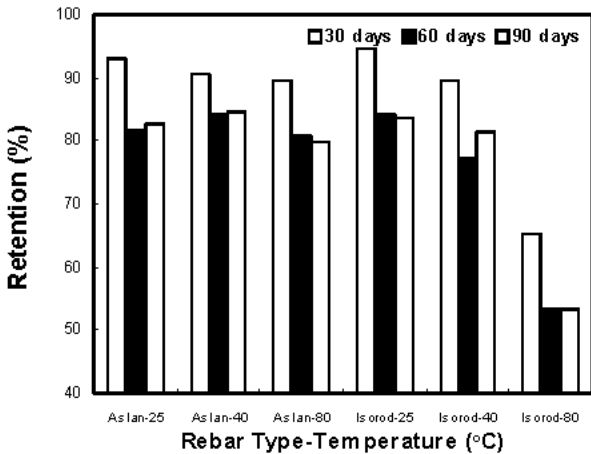


Fig. 7 Retention of tensile strength in chloride environment

Fig. 7은 GFRP 리바를 3% 염화나트륨용액에서 30일에서 90일까지 컨디셔닝한 이후의 인장강도 보유율을 나타낸 것이다. 그림에서 온도와 침지시간에 따라 다소 다르지만 Aslan은 약 7~20%의 인장강도 감소가 있었으며, Isorod는 5~47%의 인장강도 감소가 나타났다. Fig. 6과 7을 비교하면, 수분과 염화물이 GFRP 내구성이 미치는 온도와 침지시간의 영향은 전반적으로 유사한 것으로 판단된다. 그리고 Isorod가 Aslan에 비하여 고온에서 수분의 영향을 크게 받았던 것을 알 수 있다. 이것은 리바의 원주방향의 시멘트 표면층(skin 구조, Fig.3 참조)의 두께가 서로 달라 고온에서 열응력의 영향으로 Isorod사 리바의 두꺼운 표면층이 취약하게 된 원인이라고 생각된다.

Fig. 8은 GFRP 리바를 강알칼리 용액에서 30일에서 75일까지 컨디셔닝한 이후의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 30일 컨디셔닝한 것 중에서 25℃와 40℃에서 Aslan은 약 25~36%, Isorod는 6~20%의 인장강도 감소가 나타났으며, 80℃에서는 Aslan은 34%, Isorod는 37%의 인장강도의 감소가 있었다. 60일 컨디셔닝한 것은 저온과 고온에서 모두 더욱 심한 열화가 있었다. Fig. 6과 7 및 8을 비교하면 GFRP 리바의 종류와 관계없이 알칼리의 영향이 매우 심각하다는 것을 알 수 있고, 컨디셔닝 일수가 증가하면서 인장강도 감소율을 더욱 더 증가될 것으로 추정된다.

한편, 알칼리 컨디셔닝 과정에서 리바와 알칼리용액의 화학반응으로 인하여 높은 압력의 가스가 발생되었으며, 그 결과 80℃에서 컨디셔닝한 Isorod의 경우 가스와 함께 알칼리용액이 누출된 것이 확인되었다. 따라서 향후 알칼리 시험용 용기는 가스를 배출할 수 있는 용기로 교체하는 것이 필요하다고 판단된다.

Fig. 6~8에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 설정한 내구성 영향인자별로 GFRP 리바의 열화 및 품질저하 정도의 차이는 있었으나, 모든 영향인자에 대하여 현저한 GFRP 재료성질의 변화를 확인할 수 있었다. 특히, 인장강도에 있어서는 수분 및 염화물에 비하여 알칼리의 영향이 가장 크게 나타났으며, 30일 컨디셔닝한 것은 GFRP 종류에 구분 없이 80℃의 온도에서 34~37%의 인장강도 감소가 확인되었다.

본 연구에서는 온도를 GFRP 열화의 촉진인자로 사용하였으며, 온도는 25℃, 40℃, 80℃로 적용하였

다. 실험결과에 따르면 내구성 영향인자와 관계없이 온도의 상승은 GFRP의 열화를 촉진시켜 내구 특성에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전반적으로 25°C와 40°C에서 컨디셔닝한 시편의 재료 시험결과는 큰 차이가 없었으나, 고온인 80°C에서 컨디셔닝한 시편의 경우 인장강도가 급격하게 감소되었음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 두 종류의 GFRP 리바를 30일, 60일 및 110일간 동결 용해 사이클 시킨 이후의 인장시험의 결과를 나타낸 것으로, 두 종류의 GFRP 리바 모두 30일 이후에는 인장강도는 감소했지만 적용시간이 증가함에 따라 큰 변화는 없는 것을 알 수 있다.

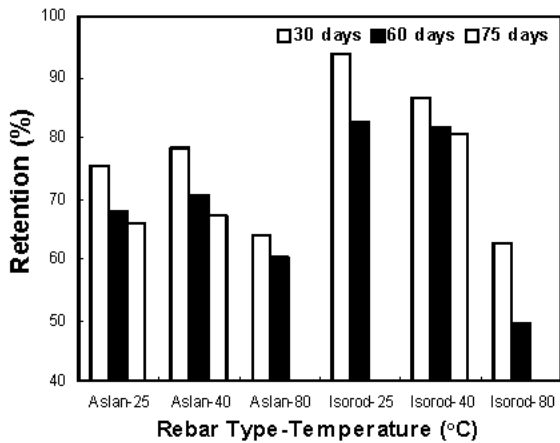


Fig. 8 Retention of tensile strength in alkali environment

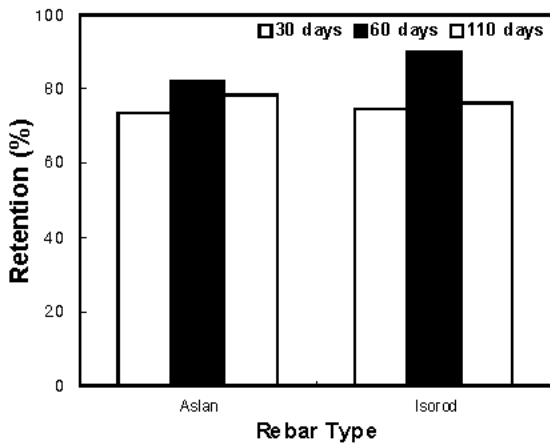


Fig. 9 Retention of tensile strength in freeze-thaw environment

3.3 굽힘시험

Fig. 10은 여러 가지 환경 인자에 일정시간 컨디셔닝한 시편의 short beam 3점 굽힘시험의 결과

인 계면 전단강도를 나타낸 것이다. 계면전단 강도는 컨디셔닝한 것은 본래의 것보다 많이 감소하고 있는 것을 알 수가 있다. 이것은 섬유와 수지의 계면에서 용액의 swelling에 의해 수지부분이 가스화되어 계면접착이 많이 열화 된 것으로 생각된다. 섬유와 수지의 계면 전단강도의 감소는 인장강도 감소의 주요한 원인이 된다.

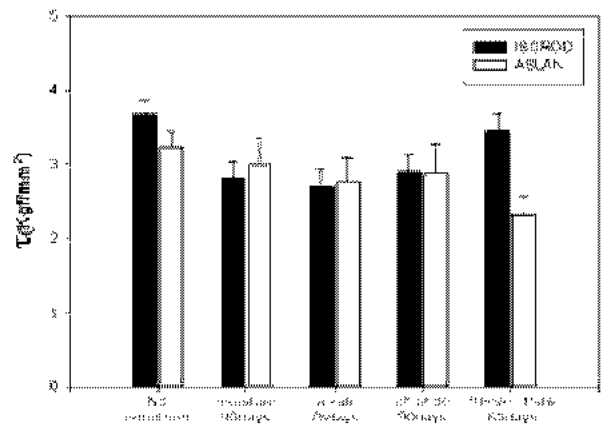


Fig. 10 Interlamina shear strength

이론상으로 장섬유 강화 일방향 복합재료에서의 섬유방향의 강도는 주로 강화섬유의 강도가 지배하므로 계면전단강도의 대소는 복합재료의 강도에 다소 영향은 있지만 큰 영향은 미치지 못하지만, 단섬유 강화 복합재료에서의 기계적 성질은 계면 전단강도의 대소에 크게 영향을 받는다. 만약 장섬유 강화 복합재료에서 섬유가 어떤 열악한 환경 조건으로 많은 곳에 손상(damage)을 입는다면 단섬유(short fiber) 강화 복합재료로 될 수 있고, 이 경우에 기계적 성질은 계면전단 강도의 대소에 크게 영향을 받을 것이다.

유리섬유가 수분과 접촉하면 유리섬유의 알칼리 성분이 수분의 수소이온과의 교환반응에 의해 수분에 용출되며 이러한 용출현상에 의해 유리섬유는 알칼리에 의해 손상된다. 환경이 알칼리 분위기라면 유리섬유의 손상은 더욱 심할 것이다. 그리고 유리섬유와 에폭시 수지의 계면은 수분의 침투로 인한 화학적 손상뿐만 아니라 이로 인해, 계면에 미소균열 등이 발생되어 그 계면영역 전체의 손상으로 발전한다. 그러므로 수분환경에서 침지한 유리섬유 복합재료의 인장강도 감소는 수분의 침투에 의해 유리섬유 자체의 손상으로 섬유 인장강도의 감소와 섬유와 매트릭스 수지간의 계면열화가 주된 원인이라고 말할 수 있다. 바꾸어 말하면, 장섬유

강화 복합재료가 수분의 침투에 의해 섬유길이 방향으로 많은 곳에 유리섬유가 손상을 입어, 결국 단섬유 강화 복합재료가 되어 섬유와 수지의 계면 열화는 강도의 저하를 더욱 촉진시켰다고 볼 수 있다.

그리고 고분자 복합재료에서 수분의 흡수는 수지의 자유체적(free volume)내로 물분자의 확산, micro 및 macro void에서의 모세관현상에 의한 침투로 이루어지며, 확산속도의 양은 수분의 온도, 시험편의 표면적과 질량의 비율, 수지의 특성에 따라 다르다. 그리고 고분자와 수분자의 친화력, 분자사슬 간에 존재하는 -OH(hydroxyl)기의 숫자와 밀접한 관계가 있으며, 시험편 취급 시 생길 수 있는 미세 흠(micro-scratch) 등도 영향을 미친다. 또 많은 양의 수분의 흡수는 수지의 팽창으로 인해 섬유에 인장응력을 발생시켜 섬유와 수지 계면의 debonding 및 섬유파괴와 같은 영구손상을 일으킬 수 있다.

3.4 파단면 관찰

Fig. 11은 short beam 3점 굽힘시험 후의 대표적인 횡단면 마크로 사진이다. 두 종류 시험편의 환경조건에 따른 크랙의 방향을 분류하면 Aslan사의 것은 하중방향과 직각방향의 크랙(horizontal crack)이 지배적으로 많았고 Isorod사의 것은 하중방향과 같은 방향의 크랙(vertical crack)이 지배적인 것을 알 수 있다.

Isorod사의 크랙 방향이 하중방향과 같은 것은 전술한 것과 같이 GFRP 리바의 원주방향에서 시멘트 층이 두꺼워 굽힘하중을 받으면 먼저 하중을 받는 취약한 시멘트 층에서 크랙이 발생하여 원주방향의 섬유를 파괴하기 보다는 약한 섬유와 수지의 계면으로 크랙이 전파되어 파괴가 발생했기 때문이라고 사료된다.

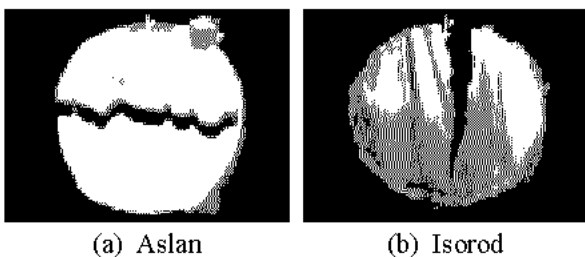


Fig. 11 Microphotographs of transverse section of GFRP Rebar after 3-point bending test

사실 short beam 3점 굽힘에서는 바른 data를 얻기 위해서는 Aslan의 것과 같이 하중방향의 수직방향으로 크랙이 전파되어야 하지만 하중방향으로 크랙이 전파된 것도 하중의 수직방향으로 최대의 전단응력이 작용할 때 크랙이 발생 전파한 것이므로 그 하중으로 전단강도를 계산하여도 무방하다고 보고되고 있다⁷⁾.

4. 결 론

여러 가지의 환경조건에 대한 GFRP 리바의 내구성을 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 인장강도와 계면전단강도는 각 환경조건에서의 침지시간과 온도의 증가에 따라 감소했다.
- 2) 알카리 환경조건에서의 열화가 다른 환경조건에서의 열화보다 온도와 침지시간에 관계없이 더 심각하게 발생했다.
- 3) 열악한 여러 가지의 환경조건에서 인장강도가 저하된 이유는, 수분 및 용액에 의하여 섬유자체의 손상(damage)으로 장섬유가 단섬유화된 것과, 수분 및 용액의 침투에 의한 섬유와 수지의 계면 전단강도의 열화가 인장강도의 저하를 더욱 촉진시켰다고 사료된다.

참고문헌

1. Deijke, V., 2001, Durability of FRP Reinforcement in Concrete. PhD Thesis, Chalmers University of Technology. Sweden.
2. Bradshaw, R. D. and Brinson, L. C. 1997, "Physical Aging in Polymer Composites: An Analysis and Method for Time Aging Time Superposition," Polymer Engineering and Science, 31(1), 31-34.
3. Gangara, H. V. S., Vijay, P. V., 1997, Aging of Structural Composites under Varying Environmental Conditions. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures : Proc. 3rd Intl. Sym. Vol. 2, Sapporo, Oct. pp. 91-98.
4. Uomoto, T., 2000, Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures. Proc. 3rd Concrete on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, pp. 3-20

5. American Society for Testing and Materials, 2002, "Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass Fiber Reinforced Plastic Rod(ASTM D3916-02)", Annual Book of ASTM Standard, Vol. 08.03.
6. 한국건설기술연구원, 2004, FRP 복합재료 보강재 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발, 1차년도 최종보고서.
7. Francesco Micelli and Antonio Nanni, 2004, Construction and Building Materials, 18, pp. 491-503.