



GFRP Rebar 보강 콘크리트 보의 급속노화환경에서의 휨 거동에 관한 연구

박연호¹⁾ · 최 열^{2)*}

¹⁾텍사스 주립대(알링턴) 토목공학과 ²⁾경북대학교 건축토목공학부

Flexural Behaviors of GFRP Rebars Reinforced Concrete Beam under Accelerated Aging Environments

Yeon-Ho Park¹⁾ and Yeol Choi^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas 76013, USA

²⁾School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

ABSTRACT The use of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcing bars in concrete structures has been increased as an alternative of steel reinforcement which has shown greater vulnerability to corrosion problem. However, the long-term performance of concrete members with FRP reinforcement is still questioned in comparison to the used of steel reinforcement. This study presents the results of an experimental study on the long-term behaviors of GFRP (glass fiber reinforced polymer) bar reinforced concrete beams after exposed to accelerated aging in an environmental chamber with temperature of 46°C (115°F) and 80% of relative humidity up to 300 days. The objectives of this research was to compare strength degradation and change of ductility between GFRP reinforced concrete beams and steel reinforcement beams after accelerated aging. Two types (wrapped and sand-coated surface) of GFRP bars and steel were reinforced. in concrete beams. Test results show that the failure modes of GFRP bar reinforced concrete beams are very similar with traditional RC beams, and the change of load-carrying capacity of steel reinforcing concrete beam is greater than that of GFRP bar reinforcing concrete beam under the accelerated aging. Test result also shows that the use of GFRP reinforcing in concrete could be introduced more brittle failure than that of steel reinforcing for practical application. The deformability factor up to compression failures indicates no significant variation before and after exposure of accelerated aging.

Keywords : long-term behavior, GFRP, rebar, acceleraated aging, deformability

1. 서 론

2009년도 미국토목학회의 사회기반 시설(ASCE report card for America's infrastructure) 조사보고서에 따르면 미국 전역에서 조사된 교량(bridges)의 약 27% 정도가 철근 콘크리트 부재에서 철근(steel reinforcement)의 부식(corrosion)으로 인하여 교량에 구조적으로 결함이 발생되어 있거나 교량으로써의 적합한 기능에 문제가 있는 것으로 조사되었다.¹⁾ 일반적으로 수많은 철근콘크리트 구조물은 열악한 자연환경(기후) 또는 겨울철 제설재(de-icing) 물질 등에 노출되면 철근의 부식으로 인하여 철근콘크리트 구조물의 성능이 저하되어 기대되는 철근콘크리트 구조물의 수명에 도달하지 못하는 것으로 알려져 있다. 이러한

철근콘크리트 구조물의 환경에 의한 철근부식의 문제점을 보완하거나 해결하고자 지난 30여년전부터 건설분야에 새롭게 등장한 섬유보강 복합(fiber reinforced polymer composites, FRP) 재료를 이용한 보강근에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2,3)} 이러한 노력의 하나로 섬유보강 복합 재료를 이용한 다양한 형태의 콘크리트 보강근(rebar)을 생산하여 전통적으로 콘크리트의 보강근으로 사용되고 있던 철근의 대용으로 사용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.^{4,5)} 한편, 콘크리트 부재용 FRP 보강근은 타 산업에 소요되는 FRP 재료에 비하여 많은 양이 요구되기 때문에 철근과 비교하여 경제성 및 물리적 성능에 대한 충분한 연구가 필요로 한다. 이에 따라 건설분야에서는 주로 타 섬유에 비하여 상대적으로 경제성이 높으면서도 토목 및 건축에 적합한 여러 가지 재료적 특성을 가지고 있는 유리섬유보강 복합(glass fiber reinforced polymer composite, GFRP) 재료를 가장 많이 사용하고 있는 실정이다.

Almusallam³⁾ 등은 GFRP(glass fiber reinforced polymer)

*Corresponding author E-mail : choiyeol@knu.ac.kr

Received July 24, 2012, Revised October 23, 2012,

Accepted January 14, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

라미네이트(laminates)로 보강한 총 99개의 150×150 mm 크기의 철근콘크리트 보 시험체를 소금 물, 일반 물에 약 2주간 침전시키고 난 후 다시 2주간 밖에서 건조시키며 12개월 동안 반복적으로 노출시키거나 자외선 차단 코팅(coating)과 코팅을 하지 않은 경우에 대하여 직간접으로 햇볕에 노출시킨 후의 철근콘크리트 보의 장기 거동(long-term behavior) 및 내구성(durability)에 대한 연구를 행하였다. 실험 결과 GFRP로 보강한 철근콘크리트 보의 휨강도와 내구성은 여러 가지 노출환경에 대하여 뚜렷한 감소현상이 발견되지 않는다.

Leung⁶⁾ 등은 75(폭)×75(높이)×300(길이) mm를 가지는 콘크리트 보 시험체에 각각 50(폭)×1(두께)×240(길이) mm의 철판과 50(폭)×1.2(두께)×240(길이) mm를 가지는 CFRP(carbon fiber reinforced plastic)를 부착한 후 물에 침전, 습윤/건조 반복환경, 일정한 습윤조건 및 가열/냉열 반복환경에 각각 노출시킨 후의 휨 강도에 대한 연구를 행하였다. 실험 결과 물에 장기간 노출시킨 시험체의 중앙 처짐 및 하중저항 능력은 감소하는 것으로 나타났으며, CFRP 보강 콘크리트보다 철판 보강 콘크리트 보의 하중저항 능력이 약간 높은 것으로 나타났다. 또한 시험체의 부착강도는 부착재료 및 부착정도의 혼합효과에 의하여 좌우됨을 보고 하였다.

Mufti⁷⁾ 등은 캐나다에 있는 다섯 곳의 교량에서 GFRP 보강근(E-섬유+비닐에스터 결합) 콘크리트 부재에서 채취한 코어 공시체를 이용하여 GFRP 보강근의 자연환경 노출에 대한 영향을 optical microscopy(OM), scanning electron microscopy(SEM), energy dispersive x-ray(EDX), differential scanning calorimetry(DSC)와 Fourier transformed infrared spectroscopy(FTIS) 방법을 사용하여 조사하였다. 공시체 시험 결과 서로 다른 자연 노출환경에 노출된 공시체 내에 보강된 GFRP 보강근은 자연노출환경에서 5-8년 지난 후에도 아무런 성능저하가 없었으며, 콘크리트와 GFRP 보강근 사이의 결합력도 여전히 유지하고 있는 것으로 조사 되었다. 또한 이 기간 동안 시험체가 건조-습기, 동결융해 및 제설용 소금 등에 반복적으로 노출되었지만, 보강된 GFRP 보강근에 대한 영향은 거의 없는 것으로 조사 되었다.

Davalos¹¹⁾ 등은 고강도 콘크리트에 보강된 FRP 보강근의 재료적 성능저하 및 콘크리트와 보강근 사이의 부착력에 대한 연구를 행하였다. 서로 다른 4가지 형태의 보강근 표면상태(헬리컬리, 모래코팅 및 샌드블래스트 코팅)에 따라 서로 다른 3가지의 서로 다른 환경조건(28일 양생 후 90일간 상온, 90일간 60℃ 물에서 숙성 및 30일간 건조-습윤 반복)에서 양생하였다. 실험 결과 고강도 콘크리트에서의 부착력은 콘크리트 압축강도에 의한 영향은 없으며, 부착력은 보강근의 표면상태에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 아울러, 부착력에 미치는 환경의 영향 조사 결과 CFRP 보강근은 약 4-10%, GFRP 보강근은 0-20%정도 감소하는 것으로 조사되었다.

또한 건조-습윤 반복 환경조건에서는 콘크리트의 미세균열과 아울러 GFRP 보강근의 저하로 인하여 부착력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Vijay¹⁰⁾은 GFRP 복합재료로 만들어진 보강근(rebar)을 알칼리 환경과 염분환경에 노출한 후 일정한 하중을 가하거나 가하지 않은 상태에서의 보강근의 강도 및 강성 특성에 대한 연구를 실행하였다. 실험 결과 알칼리 환경에 노출된 GFRP 보강근의 성능저하가 염분에 노출된 경우보다 높게 나왔으며, 콘크리트에 내재된 GFRP 보강근의 수명은 콘크리트의 피복으로 인하여 더욱더 늘어나는 것으로 조사 되었다.

하지만, 이러한 GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재에 대한 장기 환경변화에 대한 콘크리트 부재의 거동에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 아울러 철근이 보강된 콘크리트 부재와의 직접적인 비교연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 기존에 단순인장시험에 국한되었던 급속노화 실험 대상 범위를 재하하중상태의 콘크리트 보로 확대하여 휨 실험을 수행하였다. 하중재하(sustained loading) 후 GFRP 보강근 및 철근이 보강된 콘크리트 보를 자연 노출환경을 모방(simulation)한 급속 숙성실(accelerated chamber)에서 300일간 숙성(aging)한 후, 휨 거동 특성에 기반하여 GFRP 및 철근 보강 콘크리트 보의 강도감소(strength degradation)와 연성(ductility)변화 특성을 비교하였다.

2. 실험 개요

이 연구에서는 두가지 형태의 GFRP 보강근과 철근을 보강한 콘크리트 보를 급속 환경숙성 실험실에서 0일, 100일 및 300일 동안 숙성시킨 후의 파괴모드, 하중-처짐 곡선 및 균열에 대한 실험을 통하여 각 보강 콘크리트 보 부재의 거동을 비교하고자 하였다.

2.1 재료

이 실험에서 사용된 콘크리트 배합은 미국의 ASTM C150에서 규정한 Type I/II 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적 특성을 Table 1에 나타냈다. 잔골재로는 최대치수가 6 mm이고, 비중 2.62, 조립률 2.70, 함수율 1.79, 그리고 흡수율이 0.73인 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재로는 최대치수가 19 mm이고, 비중이 2.67, 조립률이 6.82 그리고 흡수율이 0.90인 쇄석골재를 사용하였다.

Table 1 Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Fineness (m ² /kg)	Setting time (min)		f _{ck} (MPa)		
		Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	363	114	351	25.0	30.9	33.8

Table 2 Mixing design of concrete

W/B	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Crushed stone (kg/m ³)
0.46	120	202	60	862	1038

Table 3 Physical properties of GFRP rebar

FRP bar type	Type-A		Type-H	
Size (mm)	D13 (#4)	D16 (#5)	D13 (#4)	D16 (#5)
Tensile strength (MPa)	690	655	1300	1259
Elastic modulus (GPa)	40.8	40.8	60.0	64.1
Strain (%)	1.5	1.5	2.42	2.24

또한 시험체에 사용되는 콘크리트의 28일 압축강도는 약 28 MPa(4000 psi)이 되도록 배합설계를 하였으며, 충분한 시공성(workability)을 얻기 위하여 감수제인 포졸란(pozzolith 80)을 첨가하고 로터리 형식의 배합믹서를 사용하였다. Table 2에 이 실험에서 사용한 콘크리트의 배합설계를 나타내었다.

또한 콘크리트 보 시험체의 보강근(rebar)으로는 항복강도가 약 410 MPa인 이형철근과 이형철근 형태의 GFRP 보강근(Type-A, vinyl ester matrix E-glass FRP rebar)과 표면에 모래로 코팅한 고 탄성계수의 GFRP 보강근(Type-H, high modulus of vinyl ester matrix E-glass FRP rebar)을 사용하였다. Table 3에 이 연구에서 사용된 2가지의 GFRP 보강근에 대한 물리적 특성을 각각 나타냈다.

2.2 보 부재 시험체

콘크리트 보 시험체로는 크기가 200(폭)×300(높이)×1800(길이) mm를 가지는 총 18개의 보 시험체를 제작하였다. 또한 보강근의 종류, 형태와 보강면적을 비교하기 위하여 철근 및 GFRP 보강근을 각각 2개(균형 보강비: 1.08(GA), 2.28(GH), 265 mm²)와 3개(균형 보강비: 2.05(GA), 4.70(GH), 402 mm²)를 배근하였다. 각각의 보 시험체에는 간격이 120 mm에서 180 mm를 가지는 D-10 mm 철근으로 전단보강을 하였다. 따라서 이 연구에서는 두 가지 보강근 재료(철근 및 GFRP), 두 가지의 GFRP 보강근 형태(type A와 H)와 두 가지 보강근 면적(265 mm²와 402 mm²)을 고려한 보 시험체를 각각 0일, 100일과 300일 동안 급속 숙성 환경조건에 노출하는 변수를 고려하였다. 실험체 변수가 보강량으로 설정된 이유는 ACI 4401R-06에 따르면 ρ_{fb} (균형 보강비)와 1.4 ρ_{fb} 에 따라 강도 감소계수가 변화하기 때문이다. 또한 이 연구에서 명명된 시험체는 다음과 같다. 즉, GA 혹은 GH 혹은 S는 보강근의 재료적 특성을 나타내며, 2 혹은 3은 보강된 보강근의 개수

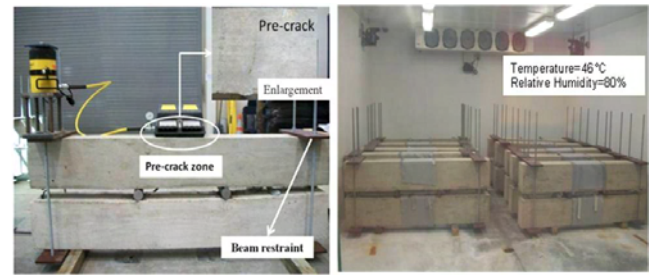


Fig. 1 Environmental chamber and loading

를 나타내며, 0, 100과 300은 급속환경에서의 숙성 시간을 나타낸다. 예를 들면, GA2-13-100 시험체는 콘크리트 보에 직경 13 mm인 Type A의 GFRP 보강근이 2개가 보강되어 100일 동안 급속환경실에서 숙성한 시험체임을 말한다. Fig. 1에 이 연구에서 행한 하중재하 및 급속숙성 실험실(chamber)의 그림을 나타냈다.

2.3 급속숙성(accelerated aging) 환경 조건 및 하중 재하

이 실험에서는 자연상태에서의 보강 콘크리트 보 시험체의 노출환경을 어떻게 정하는 것이 실험에서 고려해야 할 가장 중요한 사항의 하나이다.^{15,16)} 따라서 이 실험에서는 보 시험체의 노출환경을 미국 북 텍사스(North Texas) 지역에 노출되는 철근 및 GFRP 보강근 콘크리트 보 부재를 고려하고자 하였다. 북 텍사스 지역의 극한 자연환경은 비교적 여름에 발생되며, 지난 30년간 북 텍사스 지역 여름에 발생한 극한 환경은 평균 최고온도 46°C(115°F)와 최대 상대습도 80%로 조사되어 이러한 환경조건에서 약 50년간 철근 및 GFRP 보강근 콘크리트 보가 노출되었다고 가정하였다. 이러한 장기적 자연 노출환경을 모방(simulation)한 급속숙성 환경실에서의 노출시간을 구하기 위하여 이 연구에서는 Vijay⁹⁾가 연구한 자연 노출환경 기간과 실험실 급속숙성기간과의 관계에 대한 연구 결과를 사용하였다. 이 연구에서 얻어진 실험실에서의 급속숙성 시간과 이에 해당하는 자연노출환경에 대한 결과는 Table 4와 같다. 따라서 이 연구에서 고려한 북 텍사스 지역의 극한 여름온도를 고려한 실험실에서의 급속숙성 기간 300일이 자연환경 노출에서의 약 50년과 비슷한 것으로 나타났다.

모든 시험체는 하중을 가하기전에 철근 봉을 이용하여 Fig. 1에서와 같이 보 양단을 고정하였으며, 가해진 장기 하중은 기본 시험체(상온의 철근 및 GFRP 보강근 콘크리트 부재)의 극한 휨 강도(P_u)의 25%에 해당하는 하중을 ASTM C1018의 4점 가력시험에 의하여 하중을 가하였다. 또한 모든 시험체는 Vishay 계측장비가 부착된 MTS에서 실시되었으며, 재하 하중은 0.2 mm/분으로 일정한 변위에 의해서 가하였으며, 변형률을 얻기 위하여 보 시험체의 중앙에 LVDT를 설치하였다. 시험체의 순수 휨

Table 4 The relation between accelerating and natural exposing times by Vijay's equation

Temperature 46°C (115°F) and Humidity 80%		
Accelerated exposure in Lab (day)	Equivalent-natural exposure by Vijay (day)	Equivalent-natural exposure by Vijay (year)
100	5999	16.4
200	11998	32.9
300	17997	49.5

Note) The anticipated natural aging were calculated from Vijay's equation of $N = C \times 0.098e^{0.0558T}$ (T: °F)

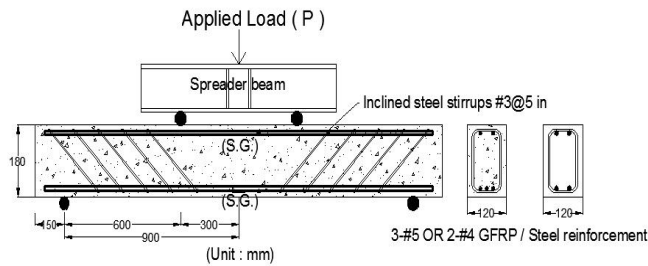


Fig. 2 Details of concrete specimen

모멘트 지역에서 시험체 균열의 간격과 크기를 매 5 kN 간격으로 측정하였다. Fig. 2에 이 실험에서 행한 보 시험체 상세를 나타냈다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 파괴모드와 균열

GFRP 및 철근 보강근을 사용한 콘크리트 보 시험체를 자연환경을 고려한 급속 숙성실(accelerated chamber)에서 0일, 100일 및 300일을 노출한 후의 휨 파괴모드는 대략 세 가지로 요약할 수 있었다. 첫 번째 파괴모드는 시험체 GA2-13-0와 GA2-13-100에서 보여진 GFRP 보강근의 휨 파괴(rupture)와 동시에 보의 상부 콘크리트의 압괴(crushing)가 동시에 일어나는 균형파괴이고, 두 번째 파괴모드는 GA2-13-300에서 보여진 보강된 GFRP 보강근이 먼저 휨 파괴(rupture)가 일어나는 인장지배 단면 파괴 형태이고, 세 번째 파괴모드는 나머지 시험체 대부분에서 보여진 상부 콘크리트의 압축파괴가 먼저 일어나는 압축지배 단면 파괴의 형태이다. 이러한 파괴 형태를 분석해보면, GFRP 보강근의 보강 단면적이 상대적으로 작은 단면 (2-D13mm)에서는 균형파괴 또는 인장파괴 형태가 나타났으며, 상대적으로 큰 단면적이 보강된 (3-D16 mm)와 고 탄성계수 GFRP 보강근의 경우에는 보의 상부 콘크리트의 압괴파괴가 먼저 일어난 압축지배 파괴형태가 보여졌다. 이러한 GFRP 보강근이 보강된 콘크리트 보의 파괴형태는 철근보강 콘크리트 보의 파괴형태와 유사

하게 보강근의 단면적과 재료의 특성에 따라 다른 파괴 양상을 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 다양한 자연 환경에 장기간 노출되는 GFRP 보강근을 보강한 콘크리트 보 부재의 파괴형태는 철근을 보강한 콘크리트 보의 파괴 모드와 매우 비슷한 양상을 나타낸다고 사료된다. 또한 Table 5에 이 실험에서 얻어진 균열하중, 극한하중, 균열처짐, 극한처짐 및 파괴형태를 요약하여 나타냈다. Table 5에서 GFRP 보강근이 보강된 콘크리트 보 부재의 Δ_u/Δ_{cr} 값은 노출기간에 관계없이 비교적 일정한 값을 나타내지만, 철근보강 콘크리트 보의 Δ_u/Δ_{cr} 값은 노출기간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 GFRP 보강근 콘크리트 보의 파괴형태는 철근보강 콘크리트 보의 파괴형태보다 환경노출에 비교적 낮은 것으로 사료된다. 또한 Fig. 3에서는 이 실험에서 얻어진 시험체의 극한 상태에 따른 균열발생 과정을 나타냈다. GFRP 보강근 콘크리트 부재에서 균열은 보 단면의 주 응력(principle stress)이 최대가 될 때에 시작 되었으며, 이러한 균열은 주로 휨에 의해서 발생하는 수직균열이며, 전단 응력이 0이 되는 지역에서 발생 되었다. 이러한 초기 균열들은 하중이 점진적으로 가해질 때에는 급격하게 압축 단면 영역으로 확산되며, 균열의 길이는 약 63 mm에서 98 mm가 되는 것으로 조사 되었다. 철근이 보강된 경우에는 하나의 휨 균열이 깊게 압축단면으로 전이되어 콘크리트의 압축파괴가 일어났으며, 마찬가지로 급속숙성 기간에 따른 파괴형태의 변화를 보여주지 못하였으며, 균열의 간격은 하중을 증가하거나 노출 기간을 증가시켰을 때 감소하였다. 하지만, 하중이 156 kN(35 kips) 이상에서는 균열의 간격이 대략 일정하게 나타났다. 이 하

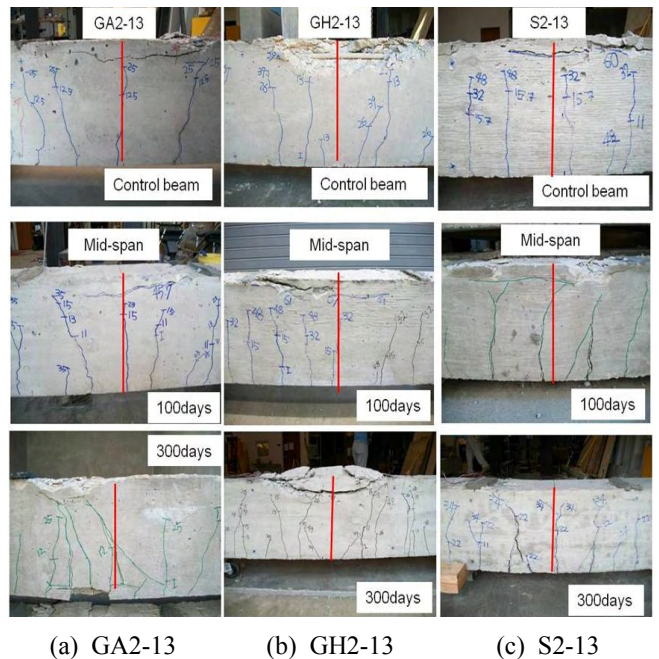


Fig. 3 Failure modes of GFRP and steel reinforced concrete beams

Table 5 Experimental bending moments and displacements at cracking, service and ultimate stages

Specimen no.	M_{cr}	M_u	Δ_{cr}	Δ_u	Failure mode
	kN-m	kN-m	mm	mm	
GA2-13-0	16.1	63.1	1.245	26.746	Balanced
GA2-13-100	15.7	61.0	1.295	27.457	Balanced
GA2-13-300	15.2	56.6	1.372	28.143	FRP-rupture
GA3-16-0	16.0	84.8	0.737	17.551	Concrete crushing
GA3-16-100	15.9	84.2	0.864	18.847	Concrete crushing
GA3-16-300	15.6	77.8	0.991	21.311	Concrete crushing
GH2-13-0	14.7	72.8	1.199	24.654	Concrete crushing
GH2-13-100	14.4	69.4	1.194	25.908	Concrete crushing
GH2-13-300	14.3	63.6	1.092	26.318	Concrete crushing
GH3-16-0	16.3	100.1	0.533	15.773	Concrete crushing
GH3-16-100	15.8	96.9	0.686	16.993	Concrete crushing
GH3-16-300	15.7	84.4	0.787	20.752	Concrete crushing
S2-13-0	15.0	49.4	0.787	31.013	Concrete crushing
S2-13-100	14.8	47.9	0.635	33.553	Concrete crushing
S2-13-300	12.0	39.3	0.533	40.945	Concrete crushing
S3-16-0	15.1	74.4	1.143	17.452	Concrete crushing
S3-16-100	15.0	73.0	0.838	17.577	Concrete crushing
S3-16-300	12.0	67.3	0.787	29.083	Concrete crushing

중 수준을 넘어서는 균열의 수가 변화 없이 기존의 균열 길이가 증가하는 것으로 나타났다. 균열의 간격은 하중을 증가하거나 급속 숙성 기간이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한 3- D16 보강 단면과 비교해 보면, 보강 단면적이 작은 경우가 균열 간격이 많은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 급속 숙성기간을 증가시켰을 때 적은 보강 단면적의 강성이 비교적 많이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과는 작은 보강근 단면적을 가지는 부재의 강도/강성의 감소가 더 크게 일어나는 비슷한 결과가 Treo et al.(2009)에서도 나타났다.^{8,16)}

또한 모든 GFRP 보강근 콘크리트 보 시험체의 균열모멘트 값은 모든 숙성기간에서 비슷한 값을 나타내고 있어 GFRP 보강근 콘크리트 보의 균열은 숙성기간에 비교적 영향을 받지 않는 것으로 판단되며, 보강단면적의 차이에 대하여서도 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만, 이 실험에서는 비교적 작은 GFRP 보강단면적(각각 265와 402 mm²)을 사용하였으므로 이에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 하지만, 철근 보강 콘크리트 보 시험체의 균열모멘트 값은 숙성기간 100일(자연 노출환경 약 30년) 정도까지는 차이가 없으나, 숙성기간 300일(자연 노출환경 약 50년)에서는 약 20%정도가 감소하는 것으로 나타나, 철근 보강 콘크리트 보의 균열모멘트는 자연 환경노출 기간에 영향을 받으며, 궁극적으로 보의 균열 및 파괴형태에도 영향을 미치는 것으로 사료된다.

3.2 하중-처짐 거동

Fig. 4, 5에 GFRP 및 철근 보강근이 보강된 콘크리트 보 시험체에 대한 하중-중앙 처짐 곡선들을 나타냈다. Fig. 4, 5를 비교해 보면, 고탄성계수(GH) 및 많은 보강단면적(402 mm²)의 GFRP 보강근 시험체가 파괴 시 최대하중이 일반적인 GFRP 보강근 시험체 보다 높게 나타나며, 최대하중에 대한 처짐값은 보다 작은 값을 나타냄을 보여주고 있다. 또한 숙성기간에 대한 하중-처짐의 거동은 GFRP 보강근 콘크리트 보 시험체는 0일, 100일 및 300일에서 비교적 변화가 적으나, 철근 보강 콘크리트 보 시험체의 하중-처짐 거동은 숙성기간 300일에서 GFRP 보강근 시험체보다 변화가 큰 것으로 나타났다. 따라서 일반적으로 GFRP 보강근 콘크리트 보의 하중-처짐 거동이 철근 보강 콘크리트 보의 하중-처짐 거동 보다 주어진 자연 노출환경에 영향을 받지 않는 것으로 판단되며, 철근의 부식 등으로 인한 철근콘크리트 보의 성능 저하에 따른 대안의 하나로 GFRP 보강근을 사용할 수 있다고 사료된다. 초기균열 후 강성(post cracking stiffness)은 길이방향 보강근(longitudinal reinforcement)의 강성에 영향을 받기 때문에 철근 보강 실험체가 GFRP 보강 실험체 보다 큰 초기균열 후 강성을 보였으며 이는 300일의 숙성기간 이후에도 변화가 없었다. 또한 ρ_b (균형 보강비)이상의 보강비에서 보강비율이 클수록 연성 거동을 보이지 않은 실험 결과는 실험에서 사용된 콘크리트 압축강도가 33.8 MPa로 다른 연구에서 사용된 고강도 콘크리트(60 MPa) 보다 압축강도가 작기 때문으로 사료된다. 이는 2-D13

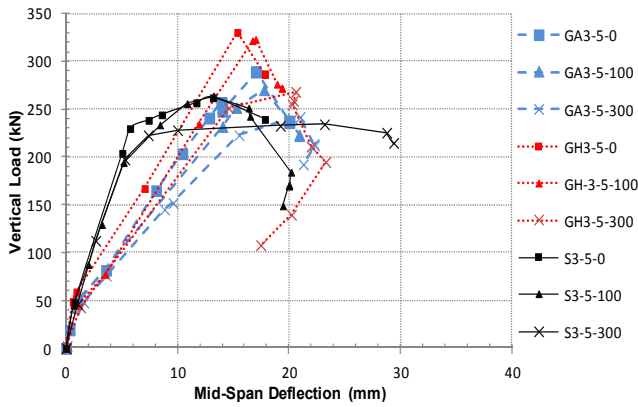


Fig. 4 Load-deflection curves (with 3-D16 mm)

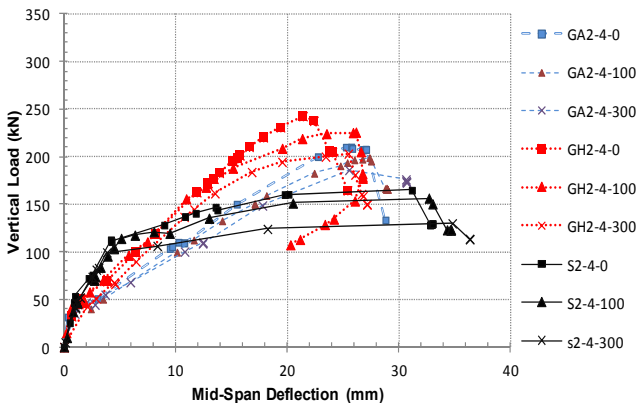


Fig. 5 Load-deflection curves (with 2-D13 mm)

GFRP 보강 보에서 3-D16 GFRP 보강 보(beam)보다 연성적 거동처럼 보이는 결과를 나타내며, 이는 GFRP 보강시 고강도 콘크리트를 사용해야하는 역설적 증거로 보인다. 또한 하중-처짐 곡선에 보듯이, 같은 단면적을 사용한 GFRP 시험체의 최대하중이 철근의 경우보다 대체로 높게 나타나 부재의 강성에도 적합한 것으로 나타나고 있으나, 최종 파괴 시에 따른 처짐 값은 비교적 작은 값을 보여주고 있어, GFRP 재료를 콘크리트의 보강근으로 사용할 때에는 철근의 경우보다 높은 취성파괴(brittle)를 유도할 수 있어 이에 대한 적절한 설계가 요구된다고 할 수 있다.

3.3 연성 거동

일반적인 철근콘크리트 부재의 연성은 연성재료의 항복 후의 변형에 대한 에너지 흡수 능력을 나타낸다. GFRP 보강근은 뚜렷한 항복거동이 없는 경우이므로, GFRP를 사용할 경우에는 일반적인 연성 평가를 적용하기에는 무리가 있다.

따라서 많은 연구와 설계 기준들은 pseudo-ductility(모조-연성도)라 부르는 기준을 사용하고 있다. GFRP 보강근 콘크리트 보 시험체에 대한 pseudo-ductility(모조-연성도) 연구는 Bakis¹²⁾ 등에 의하여 수행되어 왔으며, 이러한 값들은 변형도 지수(deformability index)라 불리는 값으로

측정될 수 있음을 보여 주었다. 여기에서 변형도란 보강된 FRP 보강근이 휨 파괴되기 직전의 곡률(curvature) 혹은 변위(displacement)를 측정하여 구할 수 있다. 또한 이러한 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재에 대한 pseudo-ductility(모조-연성도)에 대해서는 서로 다른 여러 가지 모델이 제시되어 있어서 모두가 신뢰할만한 접근방법이 아직까지는 미흡한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 여러 가지 모델 중의 하나인 Jaeger 지수(Jaeger index)라 불리는 변형도 모델에 기반을 둔 모멘트-변형(moment-deformation)법으로 모멘트의 강도효과와 연성의 곡률의 영향을 고려한 방법을 채택하여 연성거동을 알아보고자 하였다.¹⁴⁾ 이 연구에서 사용된 Jaeger 지수는 아래의 식 (1)로 나타 낼 수 있다.

$$\mu_E = \left(\frac{\phi_u}{\phi_{0.001}} \right) \times \left(\frac{M_u}{M_{0.001}} \right) \quad (1)$$

윗 식에서 M_u 와 ϕ_u 는 극한상태에서의 모멘트와 곡률이며, $M_{0.001}$ 와 $\phi_{0.001}$ 각각 정상 상태에서의 모멘트와 곡률을 나타낸다. 따라서 식 (1)은 극한상태에서의 연성과 정상 상태(service stage)에서의 연성 차이를 나타낸다. Jaeger 지수를 사용하기 위해서는 극한상태에서의 모멘트-곡률 관계와 정상상태에서의 모멘트-곡률 관계를 사용하게 된다. 이 연구에서는 보강된 콘크리트 보 시험체의 압축 변형률이 0.001에 해당하는 값을 압축 콘크리트의 상부에서의 비탄성 변형의 시작 값으로 사용한다. Table 6에서는 식 (1)을 이용하여 이 연구에서 얻어진 변형도 지수(deformability factor) 값들을 나타냈다. 철근 및 GFRP 보강 콘크리트 보 시험체에 대한 값들을 비교해 보면 그 값들은 어느 정도 차이가 있음을 알 수 있었다. 즉, 철근 보강 콘크리트 시험체의 변형도 지수값은 속성 기간이 증가할수록 증가하였지만, GFRP 보강근 콘크리트 보 부재는 대체로 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, GFRP 보강 보의 재령기간에 따른 변형도 지수 감소는 처짐 증가에 따른 곡률의 증가분보다 강도감소에 따른 M_u 의 증가가 크기 때문으로 사료되며, 철근 보강 보의 재령기간에 따른 변형도 지수 증가는 GFRP 보강 보와 비교했을 경우, 상대적인 처짐 증가가 원인이라 사료된다. 이 연구에서 얻어진 철근 보강 콘크리트 부재에 대한 변형도 지수 값이 10.2인 것이 에너지를 기반으로 하는 변형도 모델에서 얻어진 Vijay의 연구값과 유사함을 알 수 있었다. 하지만, 전체적으로 Jaeger 모델에 기반한 변형도 지수값은 Vijay의 에너지 기반을 모델로 한 값들과 유사하지 않음을 알 수 있었다.

하지만 변형도 지수를 계산하는 방법은 서로 일치하지 않지만, 이 연구에서 사용한 Jaeger에 의해서 얻어진 값들은 노출환경의 기간 및 보강 단면적의 양에 대하여 일정한 값들을 보여주었다. Jaeger 지수를 채택한 캐나다 ISIS에 따르면 변형도 지수는 최소 4.0 이상이어야 한다고 명시되어 있고, 또한 이 연구에서 얻어진 Jaeger의 변

Table 6 Change of deformability factor

Specimen no.	Deformability factor	Normalized DF	Specimen ID	Deformability factor	Normalized DF
GA2-13-0	7.69	1.00	GA3-16-0	9.88	1.00
GA2-13-100	7.52	0.98	GA3-16-100	9.67	0.98
GA2-13-300	7.14	0.93	GA3-16-300	9.55	0.97
GH2-13-0	10.22	1.00	GH3-16-0	11.82	1.00
GH2-13-100	9.53	0.93	GH3-16-100	11.65	0.98
GH2-13-300	9.14	0.89	GH3-16-300	10.90	0.92
S2-13-0	12.05	1.00	S3-16-0	19.29	1.00
S2-13-100	12.49	1.04	S3-16-100	19.50	1.01
S2-13-300	12.82	1.06	S3-16-300	19.69	1.02

형도 지수값은 최소 변형도 지수요건인 4.0 보다 상당히 높은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 아울러 고탄성계수 GFRP(type-H) 보강 GFRP 콘크리트 보 부재의 변형도 지수값이 Type-A 보강 GFRP 콘크리트 부재보다 높음을 알 수 있었다.

4. 결 론

이 연구에서는 서로다른 두가지 형태의 GFRP 복합재료 보강근과 철근을 보강한 총 18개의 콘크리트 보 시험체를 각각 0일, 100일 및 300일 동안에 자연 노출환경을 인위적으로 고려한 급속환경 실험실에서 숙성 시킨 후의 파괴형태, 하중-처짐 거동 및 연성에 대하여 알아보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 시험체의 경우, 급속노화 환경에서의 숙성기간이 길어질수록 강도 감소가 관찰되었으며, GFRP 보강근이 보강된 콘크리트 보의 강도 감소율보다 철근 보강된 콘크리트 보의 강도 감소율이 큰 양상을 나타내었다. 즉, 300일간의 급속노화 환경 노출 후 GA2-13, GH2-13, S2-13은 각각 12%, 13%, 21%의 극한 하중 감소를 보이며, GA2-16, GH2-16, S2-16은 8.3%, 11.2%, 12.5%의 감소를 나타냈으며 보강비율이 작을수록 외부환경에 영향을 많이 받았다. 그리고 GA2-13을 제외한 GFRP 보강 콘크리트 보의 파괴형태는 과철근 보강 보의 파괴형태와 같이 콘크리트 압괴 파괴가 관찰되었으며, 이는 300일간의 급속노화 숙성기간 후에도 변화가 없었다.
- 2) GFRP 재료를 콘크리트의 보강근으로 사용할 때에는 철근의 경우보다 높은 취성파괴(brittle)를 유도할 수 있어 이에 대한 적절한 설계가 요구된다고 판단되었으며, 고강도 콘크리트 사용 시 상대적 연성 거동을 유도할 수 있기 때문에 ACI440과 ISIS 등 미국과 캐나다 기준에서 제시한 균형보강비 이상의 설계방법이 적절한 설계임을 알 수 있었다.
- 3) 철근 보강 콘크리트 보 시험체의 변형도 지수값은 숙성 기간이 증가할수록 증가하였지만, GFRP 보강

근 콘크리트 보 시험체는 대체로 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 GFRP 보강 보의 재령기간에 따른 변형도 지수 감소는 처짐 증가에 따른 곡률의 증가분보다 강도 감소에 따른 M_u 의 증가가 크기 때문으로 사료되며, 철근 보강 보의 재령기간에 따른 변형도 지수 증가는 GFRP 보강 보와 비교했을 경우, 상대적인 처짐 증가가 원인임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 2010년도 기초연구사업(기본 유형 D)에 의해 지원되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASCE, Report Card for America's Infrastructure, *American Society of Civil Engineers*, 2009, pp. 75-76.
2. ACI-440.1R-06, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, pp. 1-87.
3. Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A., Alsayed, S. H., and Mosallam, A. S., "Durability and Long-Term Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites," *Proceedings International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Vol. 2, 2001, pp. 1579-1588.
4. Bank, L. C., Gentry, T. R., and Barkatt, A., "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of FRP Composite Structures-Environmental Effects," *Journal of Reinforce Plastics and Composites*, Vol. 14, 1995, pp. 559-587.
5. Karbhari, V. M. and Helbling, C. S., "Environmental Durability of E-glass Composites under the Combined Effect of Moisture," *Temperature and Stress, Conference on Durability and Sustainability of FRP Composites for Construction*, 2002, pp. 247-258.
6. Leung, H. Y., Balendran, R. V., and Lim, C. W., "Flexural Capacity of Strengthened Concrete Beams Exposed to Different Environmental Conditions," *Proceedings*

- International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2001, Vol. 2, Hong Kong, pp. 1597-1606.
7. Mufti, M., Benmokrane, B., Banthia, N., and Newhook, J., "Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures," *7th International Conference on FRPRCS*, 2005, SP-230-77, pp. 1361-1377.
 8. Trejo, D., Gardoni, P., and Kim, J., "2009, Long-Term Performance of GFRP Reinforcement, Technical Report 0-6069-1," *Texas Transportation Institute*, 2009, Texas, USA, pp. 231-242.
 9. Vijay, P. V. and GangaRao, H. V., "Accelerated and Natural Weathering of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars," *4th International Conference on FRPRCS*, 1999, pp. 605-614.
 10. Vijay, P. V. and GangaRao, H. V., "Bending Behavior and Deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members," *ACI Structural Journal*, 2001, Vol. 98, pp. 834-842.
 11. Davalos, J. F., Chen, Y., and Ray, I., "Effects of FRP Bar Degradation on Interface Bond with High Strength Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 8, 2008, pp. 722-730. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.006>)
 12. Bakis, C. E., Nanni, A., and Terosky, J. A., "Self-monitoring, Pseudo-Ductility, Hybrid FRP Reinforcement Rods for Concrete Applications," *Composite Science and Technology*, Vol. 61, Issue 6, 2001, pp. 815-823. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00184-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00184-6))
 13. El-Salakawy, E., Benmokrane B., and Desgagne, G., "FRP Composites Bars for the Concrete Deck Slab of Wotton Bridge," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 30, Issue. 5, 2003, pp. 861-870.
 14. Jaeger, L. G., Mufti, A. A., and Tadros, G., "The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular-Section Reinforced Concrete Members," *Proceeding of 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Vol. 2, 1999, pp. 551-559.
 15. Park, C. G., Won, J. P., and Kang, J. W., "Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16 No. 4, 2004, pp. 529-539.
 16. Choi, Y. C., Park, K. S., Choi, C. S., and Choi, H. K., "Bond Properties of GFRP Rebar in Fiber Reinforced Concrete (Engineered Cementitious Composite)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 6, 2011, pp. 809-815.

요 약 철근콘크리트(reinforced concrete) 구조부재에서 철근의 부식으로 인한 문제점을 개선하고자 섬유보강 복합재료(FRP) 보강근(rebar)을 사용하는 것에 대한 연구가 꾸준히 진행되어져 오고 있다. 하지만 이러한 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 환경에 대한 장기거동에 대한 연구가 아직도 미흡한 수준이다. 이 연구는 GFRP(glass fiber reinforced polymer) 보강근을 사용한 콘크리트 부재를 온도 약 46°C와 습도가 80%인 인위적인 실험실에서 최대 300일까지 노출시킨 후의 장기 거동에 대한 실험적 연구를 제시하였다. 비교를 위하여 두가지 서로 다른 GFRP 보강근과 철근을 보강한 콘크리트 보 시험체를 제작하였다. 실험 결과, 장기 노출환경에서도 GFRP 보강근을 보강한 콘크리트 보 시험체의 파괴형태는 철근 보강 콘크리트 보 시험체와 매우 유사한 파괴형태를 나타내었으며, 노출 시간에 따른 하중저항 감소값은 철근이 보강된 경우가 GFRP 보강근이 보강된 경우보다 하중저항 감소값이 크게 일어났다. 또한 GFRP 보강근 보강 콘크리트 보 시험체를 설계할 시에는 철근 보강보다 취성파괴에 대한 충분한 대비가 요구됨을 알 수 있었다. 그리고 압축파괴에 대한 변형도 계수(deformability factor)는 모든 경우에서 노출시간에 관계없이 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 장기거동, 유리섬유보강 복합재료, 보강근, 노출속성기간, 변형도