



인발성형된 이형 GFRP 보강근과 GFRP 보강 콘크리트 부재의 크리프 거동

유영준¹⁾ · 박영환¹⁾ · 김형열¹⁾ · 최진원²⁾ · 김장호^{2)*}

¹⁾한국건설기술연구원 인프라구조연구실 ²⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Creep Behavior of Pultruded Ribbed GFRP Rebar and GFRP Reinforced Concrete Member

Young-Jun You,¹⁾ Young-Hwan Park,¹⁾ Hyung-Yeol Kim,¹⁾ Jin-Won Choi,²⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{2)*}

¹⁾Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

²⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT Fiber reinforced polymer (FRP) has been gathering interest from designers and engineers for its possible usage as a replacement reinforcement of a steel reinforcing bar due to its advantageous characteristics such as high tensile strength, non-corrosive material, etc. Since it is manufactured with various contents ratios, fiber types, and shapes without any general specification, test results for concrete members reinforced with these FRP reinforcing bars could not be systematically used. Moreover, since investigations for FRP reinforced members have mainly focused on short-term behavior, the purpose of this study is to evaluate long-term behaviors of glass FRP (GFRP) reinforcing bar and concrete beams reinforced with GFRP. In this paper, test results of tensile and bond performance of GFRP reinforcing bar and creep behavior are presented. In the creep tests, results showed that 100 years of service time can be secured when sustained load level is below 55% of tensile strength of GFRP reinforcing bar. A modification factor of 0.73 used to calculate long-term deflection of GFRP reinforced beams was acquired from the creep tests for GFRP reinforced concrete beams. It is expected that these test results would give more useful information for design of FRP reinforced members.

Keywords : FRP, rebar, creep, pultrusion, long-term deflection

1. 서 론

섬유복합체(fiber reinforced polymer, 이하 FRP)는 철근에 비해 높은 비강도를 갖고 경량이면서 비부식성 재료라는 특징으로 인해 이상적인 철근 대체재로 주목 받고 있다.^{1,2)}

그러나 현재 FRP로 제작된 보강근은 철근과 달리 일반적으로 수용되는 고정된 형태가 존재하지 않고 각 개발자의 의도에 따라 다양한 재료와 성분비, 형태 등으로 제작되기 때문에 이에 대한 성능평가 데이터에 근거한 FRP 보강 콘크리트 부재의 거동특성 평가는 제한적일 수 있다.³⁾ 또한 FRP 보강 콘크리트 부재의 휨거동에 대한 평가는 주로 단기거동 측면에 집중되어 이루어져 왔고 장기거동에 대한 실험 데이터는 많지 않은 실정이다.^{1,4,5)}

콘크리트 부재의 장기거동 특성 중 대표적인 것은 크리프 특성이다. 철근 보강 보에 대한 크리프 데이터는 방대한 반면 FRP 보강근으로 보강된 콘크리트 구조부재의 크리프 특성에 대한 자료는 많지 않은 실정이다.⁶⁾

몇몇 연구로부터 FRP와 철근 보강 부재의 크리프에 의한 장기처짐 곡선은 유사한 형태이기 때문에 FRP 보강 콘크리트 부재의 장기처짐을 추정하는 방법은 철근 보강 콘크리트 보의 접근법과 동일한 것으로 인식되고 있다.⁷⁾ 그러나 철근에 대한 장기처짐 예측식은 FRP 보강 콘크리트 부재의 실제 장기처짐을 과대평가하기 때문에,⁸⁾ 이를 보완하기 위해 철근으로 보강된 보의 장기처짐 예측식에 수정계수 0.6을 적용하는 식이 현재 ACI 440¹⁾에 채택되어 있다. 하지만 일각에서는 이 식에는 FRP 보강근의 크리프 영향이 고려되지 않았기 때문에 경우에 따라 부적절한 장기처짐값이 산출될 우려가 있는 것으로 보고하고 있다.⁹⁾

이 연구는 철근과 유사한 형상을 가진 인발성형된 유리섬유복합체(glass fiber reinforced polymer, 이하 GFRP) 보강근 및 이로 보강된 콘크리트 부재의 크리프 특성을

*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr
 Received September 26, 2012, Revised January 23, 2013,
 Accepted February 21, 2013
 ©2013 by Korea Concrete Institute

구명하기 위한 것이다. 이를 위해 먼저 철근과 유사한 외형을 가진 인발성형된 GFRP 보강근의 단기성능(인장, 부착)을 평가한 후 GFRP 보강근의 크리프 특성을 조사하기 위해 일정 크기의 하중을 재하하여 그 거동을 관찰하였다. 또한 이를 콘크리트 부재에 활용하기 위한 소요 데이터를 구축하고자 지속하중에 대한 FRP 보강 콘크리트 보의 장기처짐을 약 1년간 계측하여 FRP 보강 콘크리트 보의 장기처짐 예측에 사용되는 수정계수 값을 제안하고자 한다.

2. 연구 배경

2.1 GFRP 보강근

FRP를 구성하는 주된 재료인 강화섬유에는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등 다양한 섬유가 존재하지만, 콘크리트 부재용 FRP 보강근은 일반적으로 경제성을 고려하여 유리섬유로 제작된다.³⁾ 또한 FRP를 제작하는 여러 방법 중 FRP 보강근 제작에는 주로 인발성형(pultrusion) 공정이 이용된다.¹⁰⁾ 이 공정은 일정한 단면을 가진 일방향 부재를 연속적으로 제작할 수 있어서 다른 공정에 비해 생산성이 우수하다.

원형 단면을 가진 막대기 형태의 FRP가 보강근으로서의 역할을 수행하기 위해서는 기본적으로 FRP 자체가 충분한 인장성능을 가져야 하며 콘크리트 내에서 콘크리트가 받는 외력이 FRP에 충분하고 적절하게 전달되어야 한다. 이러한 외력전달 성능은 보강근의 표면 상태 또는 형상에 의해 결정되는데 철근에는 일반적으로 돌기가 형성되어 있는 것에 반해 FRP 보강근의 경우에는 돌기, 규사 코팅 등 다양한 표면 상태 또는 형상이 존재하고,¹⁰⁾ 이에 따라 콘크리트와의 부착거동과 성능이 달라진다.

Joh 등¹¹⁾은 이러한 표면 상태 또는 형상은 FRP 보강 보의 처짐에 영향을 미친다고 하였다. 브레이딩된 보강근과 이형 보강근으로 보강된 보의 처짐 증가량은 나선형 마디를 가진 보강근으로 보강된 보보다 각각 10% 적고, 10% 많다고 보고하였다.

2.2 GFRP 보강근의 크리프

재료가 지속하중 하에서 변형률이 증가하는 현상을 크리프라 하며, 크리프는 대부분의 재료에서 발생한다. 또한 모든 구조재료는 장시간 일정한 하중을 받게 되면 갑자기 파괴될 수 있는데, 이러한 현상을 크리프 파괴(creep rupture)라고 한다.¹⁾

FRP 재료의 크리프 파괴는 높은 응력(CFRP의 경우 강도의 85% 재하시 100년 지속¹⁾)을 지속적으로 받고 있는 상태에서 섬유 모체에서 섬유의 파단과 미세균열이 발생하여 서로 떨어지게 되고 파괴전까지 손상이 누적되어 파괴되는 것으로 정의된다. FRP 보강근의 주재료인 강화

섬유와 레진 중에서 강화섬유보다는 레진이 크리프와 파괴에 지배적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹²⁾

고품질의 보강근인 경우 크리프에 의해 추가적으로 발생하는 변형률은 초기 탄성 변형률의 3% 정도이며, 탄소섬유보다는 아라미드와 유리섬유가 크리프 파괴에 더욱 취약한 것으로 알려져 있다. 크리프 파괴 시간은 탄소섬유복합체(carbon fiber reinforced polymer, 이하 CFRP), 아라미드섬유복합체(aramid fiber reinforced polymer, 이하 AFRP), GFRP의 순서로 짧아지는 것으로 보고되고 있다.^{13,14)}

Yamaguchi 등¹⁵⁾은 직경 6 mm의 AFRP, CFRP, GFRP 보강근에 대해 22±1℃의 온도에서 응력수준을 다르게 하여 크리프 파괴에 대한 광범위한 시험을 실시하였다. 약 400일이 경과하였을 때 CFRP의 경우에는 인장강도 보유율(strength retention)이 약 95%, AFRP의 경우에는 약 66%, GFRP의 경우에는 약 60% 수준으로 파악되었다. 철근은 인장강도의 75% 수준의 응력을 받는 상태에서는 그 성능을 유지할 수 있는데, GFRP 보강근의 경우에는 일반적으로 60% 수준으로 인식되고 있다.¹⁶⁾ 섬유 종류에 따라 다르지만 재하된 응력 수준에 따른 파괴시간의 관계인 크리프 파괴시간 곡선은 거의 직선인 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

2.3 FRP 보강 콘크리트 보의 장기처짐

Brown⁷⁾은 FRP와 철근 보강 부재의 시간에 대한 처짐 곡선이 기본적으로 동일한 형태이기 때문에 FRP 보강 콘크리트 부재의 장기처짐을 추정하는 방법은 기본적으로 철근 보강 콘크리트 보의 접근법과 동일하다고 하였다. ACI 318-05¹⁷⁾에 의하면 크리프와 건조수축에 의한 장기 처짐값은 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta_{ep+sh} = \lambda(\Delta_i)_{sus} \quad (1a)$$

$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} \quad (1b)$$

여기서, Δ_{ep+sh} 는 지속하중하 크리프와 건조수축에 의한 추가 처짐, $(\Delta_i)_{sus}$ 는 지속하중에 의한 초기 처짐, λ 는 장기 추가처짐에 대한 계수, ξ 는 지속하중에 대한 시간경과 계수, ρ' 는 압축철근비이다.

현재 ACI 440¹⁾에서는 압축철근이 없는 FRP 보강 콘크리트 부재의 장기처짐 값은 Brown,⁷⁾ Kage 등,⁸⁾ Vijay와 GangaRao¹⁸⁾의 연구 결과로부터 다음 식과 같이 수정계수 0.6을 적용하여 계산하는 것으로 제안하고 있다.

$$\Delta_{ep+sh} = 0.6\xi(\Delta_i)_{sus} \quad (2)$$

위 식은 FRP 보강 콘크리트 부재의 경우 초기 처짐이

RC 보에 비해 크지만 초기 처짐 이후 장기적으로 증가되는 처짐량은 RC 보에 비해 상대적으로 크지 않음을 의미하는 것으로 사료된다.

Laoubi 등¹⁹⁾은 직경 9.54 mm GFRP 보강근으로 보강한 콘크리트 보에 대한 장기 재하실험을 실시하였다. 균열 모멘트의 1.4배에 해당하는 하중을 장기 재하하여 계측한 결과에 의하면 식 (2)는 FRP 보강 콘크리트 부재의 장기처짐 값을 과대평가한다고 하였다. Yousef 등²⁰⁾은 직경이 10 mm인 GFRP 보강근으로 보강한 보에 대해 장기 재하실험을 실시한 결과 장기처짐 증가량은 초기 처짐에 비해 90일에 0.07, 180일에 0.095, 1년에 0.152배인 것으로 보고하였다. Yousef 등⁵⁾은 콘크리트 보에 직경 9.5, 12.7, 15.9 mm인 GFRP 보강근을 매립하여 장기 재하실험을 실시하였다. 1년 뒤 각 직경별 전체 처짐은 초기 처짐에 비해 약 44%, 39%, 44% 증가한 것으로 보고하였다. 이 증가량은 식 (2)에 의한 값($0.6 \times \xi(1년 경과시 1.4) = 0.84$)의 절반 수준이다. Aguíñiga와 Estrada²¹⁾는 식 (2)는 전체 처짐에 FRP 보강근의 크리프가 기여하는 영향이 고려되지 않았고, 수정계수 0.6은 Brown⁷⁾이 수행한 실험 결과에만 적절하게 제안되었다고 하였다. 수정계수 0.6을 사용하여 장기처짐을 계산하면 CFRP 보강 보의 처짐에 대해서는 350%, GFRP 보강 보에 대해서는 360% 과대평가하는 결과가 발생하게 된다고 하였다.

그러나 Gross 등²²⁾은 지속하중이 가해지기 전에 균열이 발생하지 않은 보에 대해 식 (2)는 지속하중에 대한 시간경과계수를 상당히 과소평가할 수 있다고 하였고, Vijay⁶⁾는 수정계수 0.6에 대해 이 값이 너무 보수적이라고 하였고 0.75를 제안한 바 있다.

3. 실험 계획

3.1 GFRP 보강근의 성능

이 연구에서 사용된 보강근은 E-glass 섬유와 비닐에스터 수지를 주재료로 제작된 GFRP 보강근으로 개선된 인발성형 공정²³⁾으로 제작되었으며 Fig. 1에서 보듯이 철근과 유사한 형태의 돌기를 가지고 있다.

보강근의 기본적인 역학성능을 알아보기 위하여 인장과 부착시험을 수행하였다. 시험법은 CSA²⁴⁾ 방법을 준용하였으나, 부착시험의 경우에는 제시된 제원의 콘크리트

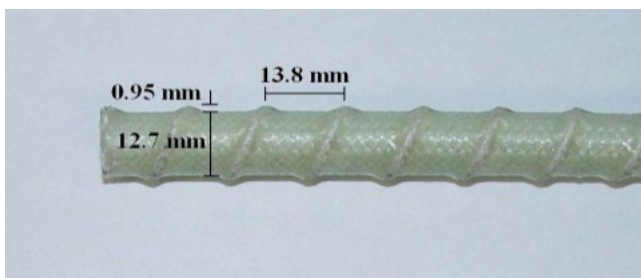


Fig. 1 Braided deformed GFRP rebar

블록이 할렬 파괴되어 이보다 큰 크기의 제원을 제시하고 있는 ACI 440²⁵⁾을 준용하여 실험을 실시하였다.

인장시편 중앙의 계측길이는 508 mm(보강근 직경의 40배), 양끝의 그립길이는 380 mm이다. 그립은 원형 강관 내에 보강근을 거치하고 팽창 모르타르를 충전한 후 양생하여 제작하였다. 총 15개의 시편에 대해 1000 kN 용량의 UTM을 이용하여 인장시험을 실시하였으며, 변형률 게이지를 설치하여 변형률을 계측하였다.

부착시험은 한 변의 길이가 200 mm인 콘크리트 블록 내에 보강근이 직경의 4배만큼 매립되도록 시편을 제작한 후 이를 인발하는 방법으로 수행하였다. 성능 비교분석을 위해 현재 상용화되어 있는 GFRP 보강근 2종(Aslan100, V-Rod)과 철근에 대해서도 시편을 제작하였으며 시편은 각 보강근 종류별로 3개씩 제작하여 시험하였다. 콘크리트 블록의 재령 28일 압축강도는 33.6 MPa이었다.

3.2 인발성형된 이형 GFRP 보강근의 크리프 시험

FRP 보강근에 지속하중을 재하하기 위해 Fig. 2와 같이 Lever arm type의 재하장치를 제작하였다.

인장시편이 레버와 맞닿는 부분에는 구면의 받침을 설치하였으며, 구면좌의 원활한 활동을 위하여 구면 및 구면 받침에 크롬도금을 실시하였고 그리스를 도포하였다.

장치의 하중 증폭비를 확인하기 위하여 크리프 시험 전 로드셀을 이용하여 재하하중에 따라 시편이 거치되는 위치에 가해지는 하중을 계측하였으며 확인된 하중 증폭비는 60배였다. 보강근의 변형률을 계측하기 위해 전기 저항식 변형률 게이지를 보강근에 설치하였으며, 장기계측의 경우 게이지의 내구성 저하로 인하여 계측이 실패할 경우를 대비하여 LVDT를 추가로 설치하였다.

GFRP 보강근에 가해진 지속하중은 최대인장강도의 85%, 70%, 60%, 50%이었고, 실험은 온도와 습도를 일정하게 유지할 수 있는 항온항습실(온도: 23℃±2℃, 습도: 50%)에서 실시하였다. 계측은 파괴가 발생할 때까지 지속되었으며 파괴가 발생하지 않은 인장시편에 대해서는 1200일 이상 계측을 실시하였다.



Fig. 2 Creep test device for GFRP rebar

3.3 GFRP 보강 콘크리트 보 시편

GFRP 보강근으로 보강된 콘크리트 보의 성능평가를 위해 폭 200 mm, 높이 300 mm 단면에 길이가 3000 mm 인 직사각형 보를 제작하였다. 전단파괴를 방지하기 위하여 D10 스티럽 철근을 100 mm 간격으로 보의 양단에 배근하였으며, 휨거동에 대한 전단 철근의 구속효과를 최소화하기 위해 재하구간에는 스티럽을 배근하지 않았다. 철근덮개는 GFRP 보강근 직경의 2.5배이다(Fig. 3 참조).

실험변수는 보강비로써 균형보강비(ACI 440¹⁾의 식 8-3)를 기준으로 과소보강 1종(0.25%), 과대보강 3종(0.50%, 0.75%, 1.10%)으로 총 4종의 콘크리트 보를 제작하였다. 콘크리트의 28일 압축강도는 50 MPa이었다.

실험체는 각각 GRC-0.25%-U-L1, GRC-0.50%-O-L1, GRC-0.75%-O-L2, GRC-1.10%-O-L2로 “GRC-보강비-보강상태(under-reinf., over-reinf.)-재하하중 종류”의 형식으로 명명하였다. L1과 L2는 각각 14 kN, 23 kN으로 균열하중의 1.1배와 1.7배에 해당하는 하중이다.

3.4 GFRP 보강 콘크리트 보의 크리프 실험

콘크리트 보에 일정한 하중을 장기간 재하하기 위해 재하장치를 제작하였다. 재하장치는 지렛대의 원리를 이용하여 하중을 37배 확대시키도록 설계되었다(Fig. 4 참조). 실험체를 거치하기 전 재하용 추의 무게를 240 N까지 단계적으로 증가시켜가면서 확대되는 하중의 크기를 측정하였다. 평균 증폭률은 36.62배였으며 표준편차가 0.66으로 양호한 작동 상태를 나타내었다. 추 무게에 따른 재하하중의 크기를 확인한 후 GFRP 보강 콘크리트 보 시편들에 대해 Fig. 4와 같이 재하를 실시하였다. 이

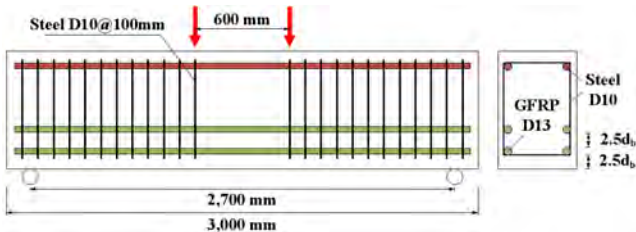


Fig. 3 Test beams and section details



Fig. 4 Sustained load frames

실험체들은 약 30일간 외기상태에서 양생된 후 평균습도 50%, 온도 23±2℃의 항온항습실 내에 재하된 상태로 보관되었다.

4. 실험 결과

4.1 GFRP 보강근의 성능

GFRP 보강근은 Fig. 5에서 보듯이 선형 거동 후 파괴되는 FRP의 전형적인 재료특성을 나타내었으며 최종 파괴형상은 빗자루와 같은 형태이었다. 15개 시편에 대해 도출된 평균인장강도는 1132 MPa이었고, 평균값에서 표준편차의 3배 값을 뺀 보증 인장강도¹⁾는 1059 MPa이었으며 평균탄성계수는 49.4 GPa이었다.

보강근의 부착거동은 Fig. 6에서 보듯이 표면 상태와 형상에 따라 각각의 특징을 가지고 있었다. 철근 부착시편에서 할렐파괴는 관찰되지 않았고 최대하중 이후 UTM의 변위만 계속 증가하는 것으로 보아 철근은 약 20 MPa에서 항복한 것으로 판단된다. 이 연구에서 사용된 보강근은 강도 측면에서는 기존 GFRP 보강근보다 우수한 성능을 나타내었으나 미끄럼(slip) 측면에서는 철근과 V-ROD보다 더 많은 증가량을 나타내었다.

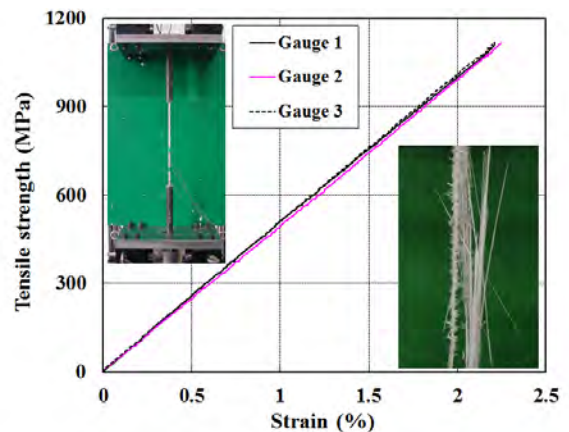


Fig. 5 Sample result of tensile tests

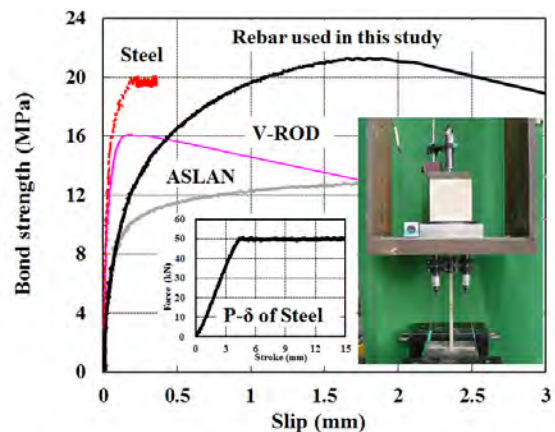
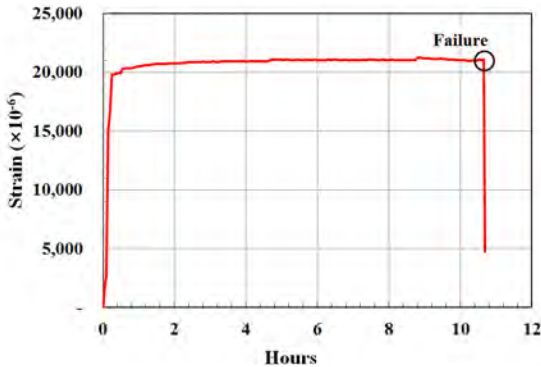


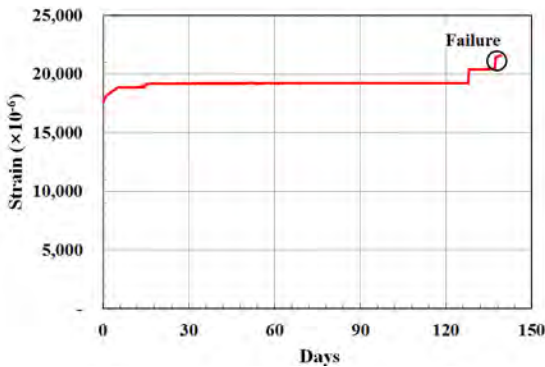
Fig. 6 Sample result of bond tests

4.2 GFRP 보강근의 크리프 거동

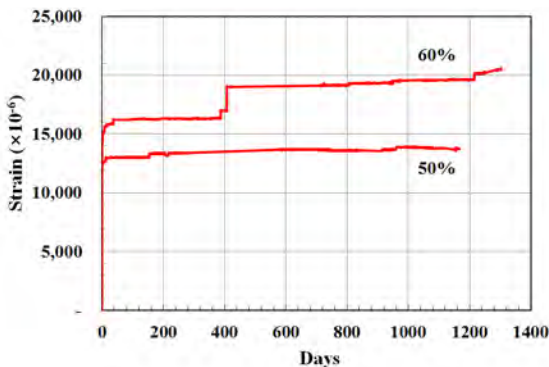
GFRP 보강근의 크리프 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 가해진 지속하중이 인장강도의 85% 수준인 경우에는 재



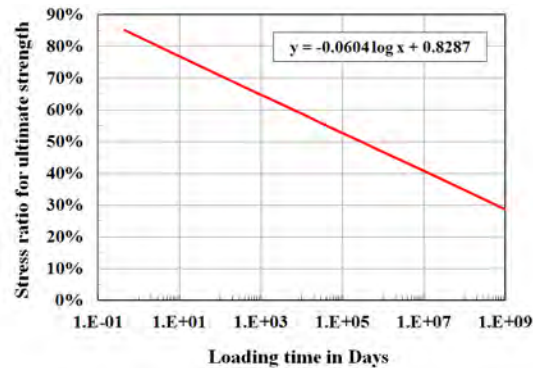
(a) Load ratio: 85% (failed)



(b) Load ratio: 70% (failed)



(c) Load ratio: 50% and 60% (no failure)



(d) Creep-rupture for various stress levels

Fig. 7 Creep test results of GFRP rebar

하초기 변형률이 급격히 증가하여 약 19800 micro strain 에 도달하였고, 약 11시간 만에 파괴가 발생하였다.

하중비가 70%인 경우에는 재하시간 약 5일까지 변형률이 급격히 증가하였으나 이후에는 증가량이 거의 관찰되지 않았으며 약 141일에 갑자기 파괴되었다. 이때의 변형률은 18532 micro strain으로 인장파괴 변형률의 약 80%에 해당하는 변형률이다. 하중비가 60%인 경우와 50%인 경우에도 초기 변형률이 급격히 상승하다가 완만해지는 경향을 나타냈었다.

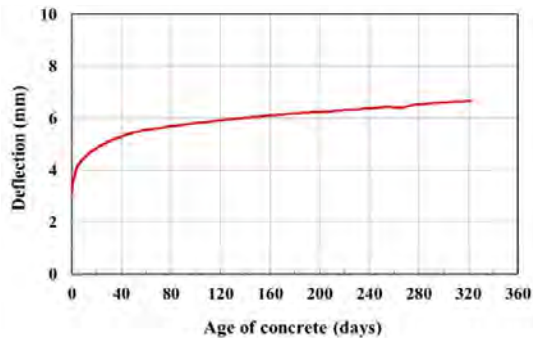
다만, 초기 변형률 대비 변형률 증가율이 완만해지는 시점은 약 20일 정도로 하중비가 70%인 경우에 비해 더 많은 시간이 소요되었으며, 약 3년간의 계측기간 동안 파괴가 발생하지 않았다. 다만 하중비가 60%인 경우에는 그림에서 보듯이 약 400일 정도에서 급격한 변형률 증가가 계측되었다. 이는 보강근을 구성하고 있는 섬유 다발 중 일부가 파괴되어 파괴되지 않은 섬유 다발이 부담하는 변형률이 증가했기 때문으로 사료된다. 비록 계측기간 동안 크리프 파괴는 관찰되지 않았으나 약 1200일 근처에서 또다른 계단형태의 변형률 거동이 관측된 것으로 미루어 보아 하중비가 60%인 경우에는 멀지 않은 시간에 파괴가 발생할 것으로 예측된다.

보강근이 지속적으로 받는 응력의 크기와 파괴 시간으로부터 크리프 파괴 곡선을 도출할 수 있다. 이 실험에서는 하중비가 85%와 70%인 경우에 대해서는 크리프 파괴가 발생하였고 60%와 50%인 경우에는 파괴가 발생하지 않았으나, 서술한 바와 같이 기존의 연구¹⁴⁾로부터 FRP의 응력수준-크리프 파괴시간 곡선은 거의 직선이기 때문에 하중비가 85%와 70%인 두 계측점에 대해 크리프 파괴 곡선을 Fig. 7(d)와 같이 도출할 수 있다. 이 곡선으로부터 콘크리트 구조물의 수명을 100년으로 가정하는 경우 보강근에 재하할 수 있는 지속하중의 크기는 인장강도의 약 55% 수준이다.

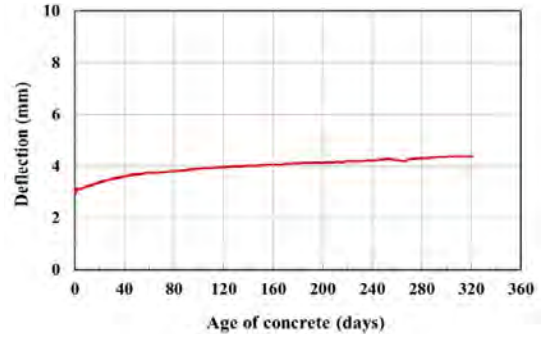
4.3 GFRP 보강 보의 크리프 거동

Fig. 8과 Table 1에는 GFRP 보강 보에 대한 크리프 시험 결과를 나타내었다. FRP가 지속하중을 받게 되면 일반적으로 4단계의 응답거동을 나타내게 된다. 1단계는 시편의 초기 변형이 급격히 증가하는 단계이고, 2단계는 응답율이 급격히 감소하는 단계이며, 3단계는 안정된 응답을 보이는 단계, 마지막 단계는 응답이 갑자기 증가하여 파괴되는 단계이다. GRC-0.50%-O-L1 시편을 제외하고는 이 실험 결과에서도 이런 거동 특성이 잘 관찰되었다. GRC-0.50%-O-L1의 경우에는 지속하중 재하장치를 구성하고 있는 여러 개의 힌지 부분에서 기계적인 마찰 구속이나 실험체 제작 오류로 인해 처짐이 원활하게 계측되지 않은 것으로 판단된다.

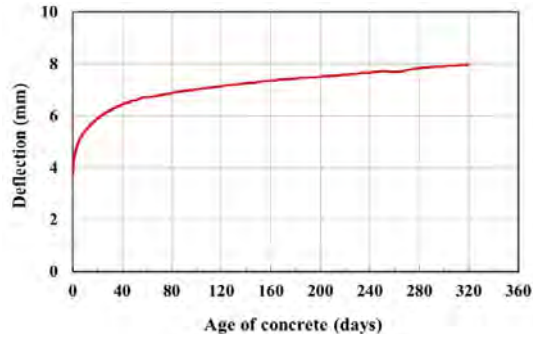
Table 1에는 기간별로 계측된 처짐량과 초기 처짐 대비 증가된 처짐량의 비인 λ , 지속하중에 대한 시간경과



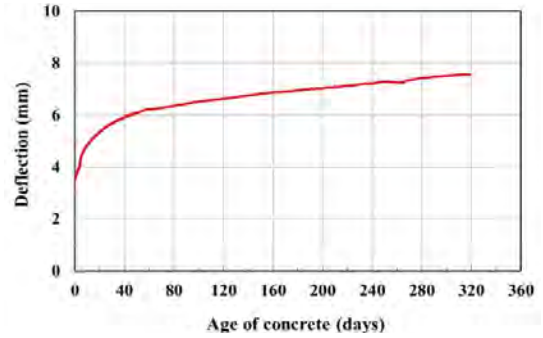
(a) GRC-0.25%-U-L1



(b) S-0.50%-O-L1



(c) S-0.75%-O-L2



(d) S-1.10%-O-L2

Fig. 8 Creep test results of GFRP reinforced beams

Table 1 Creep test results of GFRP reinforced beams

Specimen	Stress level to tensile strength of GFRP rebar	Days	Deflection (mm)	λ	ξ	Modification factor
GRC-0.25%-U-L1	23%	0	3.09	-	-	-
		90	5.74	0.86	1.00	0.86
		190	6.20	1.01	1.20	0.84
		320	6.64	1.15	1.36	0.85
GRC-0.50%-O-L1	12%	0	2.93	-	-	-
		90	3.84	0.31	1.00	0.31
		180	4.11	0.40	1.20	0.34
		320	4.38	0.49	1.36	0.37
GRC-0.75%-O-L2	13%	0	3.76	-	-	-
		90	6.98	0.86	1.00	0.86
		180	7.45	0.98	1.20	0.82
		319	7.97	1.12	1.36	0.83
GRC-1.10%-O-L2	11%	0	3.53	-	-	-
		90	6.45	0.83	1.00	0.83
		180	6.95	0.97	1.20	0.81
		319	7.56	1.14	1.36	0.84

계수 ξ 를 나타내었다. Table 1에서 보듯이 GFRP 보강 콘크리트 보는 보강비와 재하하중의 크기에 따라 초기 처짐량은 다르지만 이에 대한 장기처짐량의 비 λ 는 거의 동일한 것(평균 0.99, 표준편차 0.12)으로 나타났다.

전형적인 크리프 거동을 나타내지 않은 시편 GRC-

0.50%-O-L1을 제외하고는 보강비와 재하하중의 크기에 관계없이 수정계수가 평균 0.84로 거의 일정한 것으로 나타났다으며 이 연구의 보 시편 상부에는 압축 철근이 있으므로 압축보강비를 고려하는 경우(식 (1b) 참조) 수정계수는 0.73이 된다. 따라서 FRP 보강 콘크리트 보가 평균

습도 50%, 온도 23±2℃의 항온상태에서 장기 재하된 경우 ACI 440.1R-06의 장기처짐 계산식에 사용되는 수정계수 0.6은 보수적인 것으로 사료된다.

5. 결 론

이 연구에서는 GFRP 보강 콘크리트 부재의 장기거동 평가용 데이터를 구축하기 위해 이형 GFRP 보강근의 단기성능과 크리프 실험을 약 3년간 수행하였다. 또한 이로 보강된 콘크리트 보에 대한 장기처짐을 약 1년간 계측하였다. 이 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) GFRP 보강근에 인장강도의 85% 수준의 응력이 지속적으로 가해진 경우 보강근은 약 11시간 만에 파괴되었으며, 70% 수준인 경우에는 약 141일에 파괴가 발생하였다. 그러나 60%와 50% 수준인 경우에는 하중이 3년간 지속되었음에도 파괴가 발생하지 않았다.
- 2) GFRP 보강근의 크리프 시험 결과에 의해 도출된 재하하중비와 파괴시간 그래프로부터 내구연한 100년을 만족하기 위한 재하하중비는 약 55%이다.
- 3) GFRP 보강 콘크리트 보는 보강비와 재하하중의 크기에 따라 초기 처짐량은 다르지만 초기 처짐량 대비 장기처짐량의 비는 거의 동일한 것으로 나타났다.
- 4) FRP 보강 콘크리트 보가 평균습도 50%, 온도 23±2℃의 항온상태에서 장기 재하된 경우 ACI 440.1 R-06의 장기처짐 계산식에 사용되는 수정계수 0.6은 보수적이며, 이 실험에서는 0.73인 것으로 관찰되었다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “콘크리트 부유식 해상 인프라 건설기술 개발” 과제를 통해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 440, “ACI 440.1 R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars,” *American Concrete Institute*, 2006, pp. 6-8, 124.
2. Choi, D. W., Ha, S. S., and Lee, C. H., “Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 3, 2007, pp. 323-331.
3. Sim, J. S., Oh, H. S., Ju, M. K., and Lim, J. H., “New Suggestion of Effective Moment of Inertia for Beams Reinforced with the Deformed GFRP Rebar,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 185-191.
4. Seo, D. W., Han, B. S., and Shin, S. W., “Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 763-771.
5. Youssef, T., Benmokrane, B., El-Gamal S., and El-Salakawy, Y. E., “Deflection and Strain Variation of GFRP-Reinforced Concrete Beams After One Year of Continuous Loading,” *In: Proceeding of 9 International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Sydney, Australia, 2009, pp. 1-4.
6. Vijay, P. V., *Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars*, Ph.D Thesis, West Virginia University, 1999, pp. 2-3, 166-169.
7. Brown, V. L., “Sustained Load Deflections in GFRP-Reinforced Concrete Beams,” *In: Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, Vol. 2, 1997, pp. 495-502.
8. Kage, T., Masuda, Y., Tanano, Y., and Sato, K., “Long-Term Deflection of Continuous Fiber Reinforced Concrete Beams,” *In: Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, 1995, pp. 251-258.
9. Trejo, D., Aguiñiga, F., Robert, L. Y., Ray, W. J., and Peter, B. K., “Characterization of Design Parameters for Fiber Reinforced Polymer Concrete Systems,” Report 9-1520-3, *Texas A&M University and Texas Transportation Institute*, 2003, 115 pp.
10. ISIS Canada, *Design Manual 3: Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers*, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001, pp. 5-16.
11. Joh, O., Wang, Z., and Goto, Y., “Long-Term Deflection Fiber Reinforced Polymer Concrete Beams,” *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, ACI International, 1999, pp. 577-590.
12. Karbhari, V. M., Chin, J. W., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J. J., Sorathia, U., and Reynaud, D., “Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No. 3, 2003, pp. 238-247.
13. Iyer, S. L. and Anigol, M., “Testing and Evaluating Fiber Glass, Graphite and Steel Cables for Pretensioned Beams,” *Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Proceedings of the Specialty Conference*, ASCE, 1991, pp. 44-56.
14. Uomoto, T. and Nishimura, T., “Deterioration of Aramid, Glass, and Carbon Fibers Due to Alkali, Acid, and Water in Different Temperatures,” *Fourth International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (SP-188)*, ACI International, 1999, pp. 515-522.
15. Yamaguchi, T., Kato, Y., Nishimura, T., and Uomoto, T., “Creep Model of FRP Rods Based on Fiber Damaging Rate,” *In: Proceedings of the First International Conference*, 1998, pp. 427-438.
16. Rahman, A. H., Kingsley, C. Y., and Crimi, J., “Behavior of FRP Grid Reinforcement for Concrete Under Sustained

- Load,” In: *RILEM Proceedings(FRPRCS 2)*, 1995, pp. 90-99.
17. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2005, 123 pp.
 18. Vijay, P. V. and GangaRao, H. V. S., “Creep Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars,” *International Conference (CDCC'98)*, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1998, pp. 661-667.
 19. Laoubi, K., El-Salakawy, E., and Benmokrane, B., “Creep and Durability of Sand-Coated Glass FRP Bars in Concrete Elements under Freeze/Thaw Cycling and Sustained Loads,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, Issue 10, 2009, pp. 869-878. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.014>)
 20. Yousef, A. A. and Tarek, H. A., “Creep Effect on the Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Subjected to Different Environments,” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 7, 2007, pp. 1510-1519. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.008>)
 21. Aguiñiga, F. and Estrada, H., “Creep Induced Deflections of Concrete Elements Reinforced with Polymer Composite Bars,” *Architectural Engineering Conference (AEI) 2006*, Omaha, Nebraska, United States, 2006, pp. 1-11.
 22. Gross, S., Yost, J., and Kevgas, G., “Time-Dependent Behavior of Normal and High Strength Concrete Beams Reinforced With GFRP Bars Under Sustained Loads,” *High Performance Materials in Bridges*, ASCE, 2003, pp. 451-462.
 23. You, Y. J., Park, Y. H., Park, J. S., and Kim, K. H., “Development of FRP Rebar for Concrete Structures in Korea,” *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Patras, Greece, 2007, pp. 440-441.
 24. CSA Standard, *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, Canadian Standards Association, S806-02, 2002, pp. 106-115.
 25. ACI Committee 440, *ACI 440.3R-04. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, 2004, pp. 10-11.

요 약 섬유복합체(FRP)는 비부식성 재료라는 특징으로 인해 이상적인 철근 대체재로 주목 받고 있다. 그러나 현재 FRP 보강근은 철근과 달리 일반적으로 수용되는 고정된 형태가 존재하지 않고 다양한 재료와 성분비, 형태 등으로 제작되기 때문에 이에 대한 성능평가 데이터에 근거한 FRP 보강 콘크리트 부재의 거동특성 구명은 상당부분 제한될 수 있다. 더군다나 FRP 보강 콘크리트 부재의 휨거동에 대한 평가는 주로 단기 거동 측면에 집중되어 이루어져 왔다. 이 연구는 GFRP 보강근 및 이를 사용하여 보강된 콘크리트 부재의 장기거동을 평가하기 위한 것으로, 먼저 철근 대체용으로 개발된 GFRP 보강근에 대한 성능평가 결과를 제시하였고, 이의 크리프 거동 특성에 대한 3년간의 예측 결과를 제시하였다. 실험 결과 인장강도의 약 55% 이하의 하중이 지속적으로 재하되는 경우에는 100년 이상의 내구연한을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 GFRP 보강 콘크리트 보의 장기거동을 약 1년간 관찰하였으며 이로부터 FRP 보강 부재의 장기처짐 계산식에 사용되는 수정계수 값 0.73을 도출하였다. 따라서 이 연구로부터 도출된 GFRP 보강근 및 이로 보강된 콘크리트 보의 단기 및 장기 거동 특성값은 FRP 보강 콘크리트 부재의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 섬유복합체, 보강근, 크리프, 인발성형, 장기처짐