

국내 시범 생산 CFRP rod를 적용한 보 부재의 휨-전단 특성

최소영¹, 김일순², 최명성³, 양은익^{4*}

Characteristics of Flexural-Shear Behavior of Beam Using Demonstrated CFRP Rod

So-Yoeng Choi¹, Il-Sun Kim², Myoung-Sung Choi³, Eun-Ik Yang^{4*}

Abstract: Replacement of FRP rod as steel reinforcement has been attracted significantly to prevent the degradation of the concrete structure due to corrosion. So, the technology development to extend the structure's service life by improving FRP properties has been proceeded worldwide. Accordingly, it is necessary to develop Korea's CFRP rod and CFRP grid, including the manufacturing techniques to improve the properties of high-strength and high-stiffness. Moreover, the research should be conducted to evaluate the structural behavior of the beams using the CFRP rod or grid. This study investigates the flexural and shear behavior of reinforced concrete beam using demonstrated CFRP rod as reinforcement according to the reinforcement ratio and shear span to depth ratio. From the results, when the reinforcement ratio is out of a specific range, it is seemed that the effect on performance improvement of the beam using CFRP rod is cancelled or not significant. Meanwhile, when the CFRP rod was used as reinforcement, the possibility of shear failure occurred, even steel stirrups were installed in the beam with CFRP rod as tensile reinforcement according to the Korean Design Standard. Therefore, when the CFRP rod is used as tensile reinforcement in a beam, it should be prepared that a specific limitation of reinforcement ratio and an investigation against shear failure. Also, the ductility of the beam using the CFRP rod is determined by the deformation energy evaluation method. So, the ductility should be investigated by applying the deformation energy evaluation method that reflects the structural behavior of the beam.

Keywords: CFRP rod reinforced beam, Deformation energy, Failure mode, Flexural-Shear behavior, Reinforcement ratio, Shear span to depth ratio

1. 서론

FRP rod는 철근과 비교하여 우수한 물성(인장강도, 경량성, 내구성 및 염해 저항성)을 확보한 것으로 미국, 유럽 및 캐나다에서는 철근 대체재로 개발이 활발하게 진행되고 있다(Lee and Ahn, 2005; Kim et al., 2015). 그러나 우리나라에서 개발된 FRP rod에 관한 기술 수준과 실무 적용성은 해외보다 미흡한 실정이다. 이는 FRP rod 관련 기술의 도입이 늦고, 도입 초기에 수행된 연구들이 대부분 경량성, 고강도 및 비부식성에 초점을 맞춰 진행되었기 때문이다. 그러므로 한국형 FRP rod의 적용 확장을 위해서는 FRP rod의 비부식성, 내구성 등을 비롯하여 역학적 성능, 내화성, 경제성 등을 개선할 수 있도록 FRP rod 자체의 물성 개선이 수반되어야 한다. 또

한, FRP rod를 콘크리트 보강근으로 적용한 구조부재의 성능 평가 과정이 필요하다(Kim and Kim, 2018; Choi et al., 2021).

한편, FRP rod는 우수한 인장강도를 확보할 수 있는 장점이 있으나, 이를 휨보강근으로 사용한 보 부재는 철근 보 부재보다 낮은 전단 강도로 인해 전단 파괴가 발생할 수 있는 단점이 있다(Ahmed et al., 2010; Wegian and Abdalla, 2005; Tureyan and Frosch, 2002). 그러나, CFRP는 다른 FRP에 비해 높은 탄성계수와 인장강도를 확보할 수 있으며, 기존의 단점을 개선하면서 장점은 극대화 시킬 수 있도록 우리나라에서는 제조 및 가공 기술을 증진시킨 국산형 CFRP rod 및 CFRP grid의 생산과 이를 건설 산업에 적용하기 위한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있다(Choi et al., 2021; Jang et al., 2021; Cheon et al., 2021).

FRP 설계기준은 FRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재의 보강비가 균형보강비보다 작으면 FRP rod의 인장파괴, 반대일 경우 콘크리트 압축파괴의 두 가지 설계 형태를 모두 허용한다. 그러나 FRP rod에 대한 구조 설계 기준은 철근에 비해 낮은 탄성계수와 높은 인장강도를 갖는 재료 특성을 고려하여 균형보강비 이상의 보강비를 갖는 설계를 권장하고 있다(KCI, 2019; ACI, 2015; CSA, 2002; JSCE, 1997). 이는 FRP rod 보 부재를 콘크리트의 압축파괴로 설계할 경우, FRP rod

¹정희원, 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수, 공학박사
Kyoto University Guest Research Associate

²정희원, 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수, 공학박사

³정희원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수

⁴정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 정교수, 교신저자

*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Department of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University, Gangneung, 25457, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

보 부재가 제한적이거나 소성적인 거동을 나타낼 수 있기 때문이다(Benmokrane et al., 1996; Shin et al., 2006). 그러므로 FRP rod의 보강비는 FRP rod를 사용한 보 부재의 거동 평가를 위한 주요한 변수가 되며, 적절한 보강비에 대한 검토가 필요하다.

한편, 앞서 기술한 바와 같이 전단 거동에 취약한 FRP rod 보 부재의 경우, FRP rod를 보 부재의 보강근으로 적용하기 위해서는 전단 거동에 대한 검토가 요구된다. 특히, 전단 경간 비(이하, a/d)는 보 부재의 전단 거동에 영향을 미치는 핵심적인 요인으로, a/d의 범위에 의해 보 부재의 파괴형태와 하중전달 능력이 영향을 받는다. 또한, 보 부재의 연성 역시 부재가 파괴될 때 모멘트와 전단 사이의 상호작용으로 인해 a/d의 영향을 받을 수 있다(Kim et al., 2015). 따라서 본 연구는 국내 시범 생산 중인 CFRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재를 제작하여 보강비 및 a/d 변화에 따른 휨 및 전단 거동을 평가하여 CFRP rod를 사용한 보 부재의 적용 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용 재료

2.1.1 보강근

본 연구에서 사용된 보강근은 철근과 CFRP이며, 주철근은

Table 1 Mechanical properties of CFRP

Properties	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Diameter [mm]
CFRP	1,800	110	12.8

Table 2 Concrete mix proportions

W/B (%)	S/a	Unit weight [kg/m ³]			
		W	C	S	G
31.7	47.4	152	480	883	997

Table 3 Test variables for beam

Specimen ID	Type of reinforcement	a/d	Number of reinforcement	(ρ_f (ρ_s), %)	ρ_b (%)	$1.4\rho_b$ (%)	ρ_f/ρ_{fb}	Designed fracture mode
S-2.5-3	Steel rebar	2.5	3	1.242	2.685	3.759	0.46	Tensile failure
C-2.5-2	CFRP rod	2.5	2	0.841	0.15	0.21	5.61	Concrete crushing
C-2.5-3	CFRP rod	2.5	3	1.261	0.15	0.21	8.41	
C-2.5-4	CFRP rod	2.5	4	1.681	0.15	0.21	11.2	
C-1.5-3	CFRP rod	1.5	3	1.261	0.15	0.21	8.41	
C-3.5-3	CFRP rod	3.5	3	1.261	0.15	0.21	8.41	

Notation) Specimen ID: reinforcement type(S: steel, C:CFRP)-a/d-number of reinforcement, ρ_f (ρ_s): reinforcement ratio of CFRP(RC), ρ_b : balanced reinforcement ratio, ρ_f/ρ_{fb} : reinforcement ratio of CFRP(RC)/balanced reinforcement ratio

D13으로 항복강도 450 MPa인 것을 사용하였다. 또한, CFRP rod는 Table 1에 나타낸 바와 같은 물성을 갖도록 국내 A사에서 제작하였다. 한편, 주 보강근의 종류와 관계없이 모든 부재의 사인장 파괴를 방지하기 위한 전단 철근은 D10이며, 항복강도는 400 MPa이다.

2.1.2 콘크리트

본 연구에서 사용된 콘크리트는 레미콘을 통해 생산한 후, 보 부재 시험체와 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 실험체를 함께 제작하여 7일간 기중양생을 실시하였다. 부재 실험 종료 직후 압축강도 측정하였으며, 이때, LVDT를 설치하여 탄성계수도 함께 산정하였다(KSC, 2017(a); KSC, 2017(b)). 측정된 압축강도 및 탄성계수는 각각 31.1 MPa, 29.1 GPa이며, 본 연구에 사용된 콘크리트의 배합표는 Table 2와 같다.

2.2 실험 변수

2.2.1 보강비

CFRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재의 보강비는 RC 부재와 비교하기 위하여 RC 부재의 보강비보다 작은 경우, 유사한 경우, 큰 경우 3가지 수준으로 결정하였다(Table 3).

2.2.2 전단 경간 비 (a/d)

본 연구에 적용한 a/d는 1.5, 2.5 및 3.5로 a/d 변화에 따른 부재의 휨 및 전단 거동을 함께 평가하고자 하였다. Table 3에는 이에 관한 내용을 요약하여 나타내었다.

2.3 실험 방법 및 측정항목

시험체의 크기는 180(폭) \times 210(높이) \times 1,800(길이) mm로 제작하였으며, 부재 중앙에는 순수 휨 구간을 확보하고 순수 휨 구간을 제외한 구간에는 전단파괴를 방지하기 위해 KDS 14 20 22 기준에 따라 전단철근을 배치하였다(KDS, 2022).

한편, CFRP rod는 굽힘이 쉽지 않기 때문에 충분한 문힘 길

이를 확보하지 못할 경우, 뒤틀림 파괴가 발생할 가능성이 있다. 따라서 모든 시험체에는 CFRP rod의 특성을 고려하여 지점에서부터 부재 끝단까지의 거리를 부재의 높이만큼 확보하였다. 또한, 하중이 급변하는 구간에서의 급격한 파괴를 방지하기 위하여 하중 가력점으로부터 20 mm 이동하여 전단 철근을 설치하였다.

하중 가력은 4점 재하로 실시하였으며 보강근 및 전단 철근

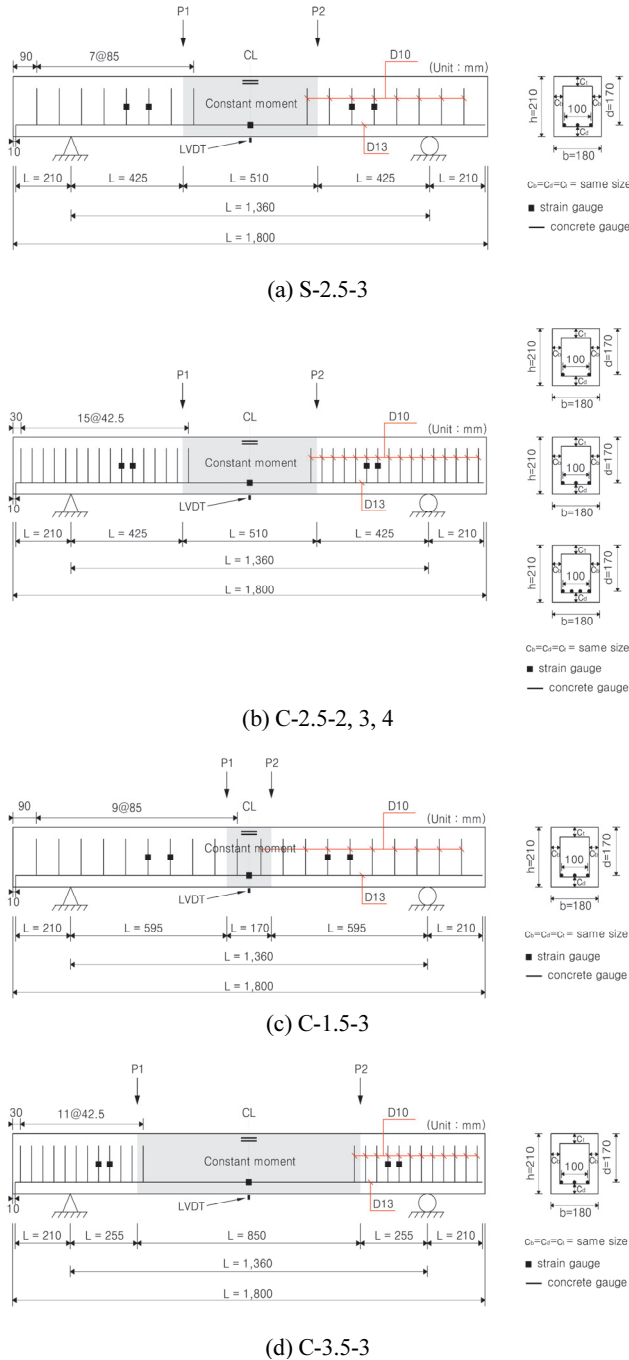


Fig. 1 Reinforcement details and cross section of beam

중앙에 변형률 게이지를 설치하여 각각의 변형률을 측정하였다. 콘크리트 변형률 게이지는 압축 연단으로부터 15, 25 mm 지점에 부착하였다. 한편, 하중 가력시 발생하는 부재의 처짐은 부재 중앙부 하단에 LVDT를 설치하여 계측하였으며, 실험 종료 후 부재에 발생한 균열 및 압괴 면적을 측정하였다. 각 실험 변수에 따른 부재의 단면은 Fig. 1와 같다.

3. 실험 결과

3.1 하중-처짐 관계

Fig. 2에는 부재 정중앙 하단부에서 얻은 처짐을 이용하여 결정된 하중-처짐 곡선을 나타내었다. Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이, S-2.5-3의 경우, 주 보강근인 철근의 항복 이후 하중의 큰 증가 없이 처짐이 증가하는 연성 거동을 보였다. 그러나 CFRP rod를 사용한 경우, 보강비 증가에 따른 강성 차이가 발생하였으며, 초기 균열 발생 이후 기울기 변화를 보이지만 뚜렷한 항복 구간이 없이 최대 하중에 도달하는 거동을 보여주었다. 이는 철근에 비해 매우 높은 인장강도를 나타내는 CFRP rod의 재료 특성과 CFRP rod 보 부재의 균형보강비가 철근 보 부재의 균형 철근비보다 낮은 값을 갖도록 설계되는 것에 영향을 받아 CFRP rod 보 부재는 철근 보 부재의 거동에 비해 취성적인 거동을 보인 것으로 판단된다(ACI, 2015). 또한, C-2.5-2의 경우, 낮은 보강비로 인해 최대 하중이 가장 작게 나타났으며, CFRP rod 보강에 따른 전형적인 취성거동을 나타내었다. 그러나 C-2.5-3의 경우에는 최대 하중 이후 유사 연성을 보이는 구간이 나타났으며, C-2.5-4 역시 최대 하중에 도달하기 전 하중-처짐 곡선의 기울기 변화가 발생하며 최대 하중 부근에서 전단 거동을 보였다. 따라서 보강비에 따라 하중-처짐 곡선에서 확인 가능한 파괴 형태는 상이한 것으로 판단된다.

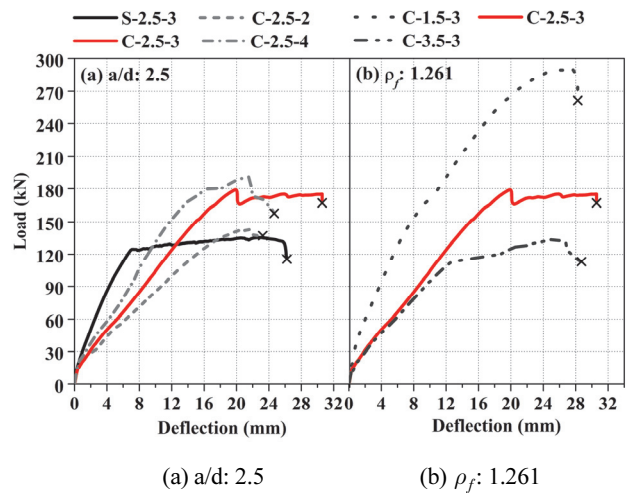


Fig. 2 Load-deflection curve

Table 4 Comparison experimental results of beam

Specimen ID	Initial crack point		Yielding point		Maximum point	
	P_{cr} [kN]	Δ_{cr} [mm]	P_y [kN]	Δ_y [mm]	P_u [kN]	Δ_u [mm]
S-2.5-3	24.3	0.71	124.4	7.08	135.4	22.9
C-2.5-2	22.0	0.67			142.7	21.5
C-2.5-3	15.3	0.48			179.1	19.9
C-2.5-4	22.2	0.63			191.5	21.3
C-1.5-3	35.4	0.83			291.0	27.5
C-3.5-3	14.3	0.44			133.6	25.4

Fig. 2(b)의 경우, a/d 2.5와 3.5의 경우에는 하중-처짐 곡선 후반부의 유사 연성 거동이 나타나는 휨에 의한 거동 특성이 나타났으나, a/d 1.5의 경우에는 전단에 지배적인 거동을 보여 주었다. 이는 철근 보 부재의 경우, a/d가 1과 2.5 사이에 존재 하면 전단력의 영향이 증가하여 전단파괴 발생하는 이유와 같은 것으로 판단된다. 그러므로 위의 결과를 종합하면, CFRP rod를 사용한 보 부재의 경우, 철근 콘크리트의 구조 설계 기준에 근거한 전단 철근을 배치하더라도 보강비에 따라 휨 및 전단 파괴 거동은 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, CFRP rod를 사용하더라도 a/d 변수는 보의 지배적인 거동 형태를 결정하는 것으로 나타났다.

한편, Table 4에는 S-2.5-3의 항복 하중 및 처짐을 포함하여 최대 하중과 그때의 처짐을 나타내었다. 그 결과, 보강비가 증가할수록 최대 하중이 증가하였으나, 보강비에 비례하여 증가하지 않는 것으로 나타났다. 그러므로 경제성을 고려한다면, 기존 철근비와 유사한 보강비가 적정한 것으로 보인다. 또한, 보강비가 동일한 경우, a/d가 감소함에 따라 최대하중이 크게 증가하였으며, a/d에 따라 휨, 전단 거동이 영향받는 것을 확인할 수 있다.

3.2 변형 에너지

연성은 철근 보 부재의 성능을 평가하기 위하여 사용되는 인자로 철근 항복점에서의 처짐과 극한 하중에서의 처짐의 비를 이용하여 평가한다. 그러나 CFRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재의 경우, 항복점이 존재하지 않기 때문에 처짐을 이용한 연성 거동을 평가할 수 없다. 따라서 FRP rod를 사용한 보 부재의 연성을 평가하는 방법이 제안되고 있다(Naaman and Jeong, 1995; Jaeger et al., 1995, 1997; Grace et al., 1998).

본 연구에서는 위에 제안된 방법 중에서 탄성에너지와 비탄성에너지의 합과 탄성에너지와의 비를 이용하여 연성지수를 계산하였다. 이 방법은 Naaman and Jeong이 제안하였으며, Fig. 3와 같이 하중-처짐 곡선 아래의 면적을 적분하여 계

Table 5 Comparison energy of beam

Specimen ID	Energy [at P_{max} , kN·mm]			Ductility Index		Energy absorption [at Δ_{max} , kN·mm]			
	E_{total}	E_{inel}	E_{el}	μ	$\frac{\mu}{\mu_{RC}}$	E	E_1	E_2	$\frac{E_2}{E_1}$
S-2.5-3	2596			3.24	1.00	2873			
C-2.5-2	1728	801	927	1.43	0.44	2126	1688	438	0.26
C-2.5-3	2027	671	1356	1.25	0.38	3873	1361	2512	1.85
C-2.5-4	2632	1232	1400	1.44	0.44	3207	1732	1475	0.85
C-1.5-3	5385	2453	2932	1.42	-	5400	5385	15	0.002
C-3.5-3	2408	1610	799	2.01	-	2790	818	1972	2.41

산된다. 계산된 에너지는 식(1)에 적용하면 연성지수를 산정할 수 있다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{total}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (1)$$

여기서, E_{total} 은 하중-처짐 곡선의 면적을 이용하여 계산된 전체 에너지, E_{el} 은 최대하중에 도달할 때 방출되는 탄성에너지, E_{inel} 은 최대하중 도달 이전에 소모된 비탄성에너지이다.

위의 식을 토대로 계산된 에너지와 연성지수는 Table 5에 나타내었으며, CFRP rod를 사용한 보 부재의 연성지수와 항복 처짐과 극한 하중에서의 처짐을 이용하여 결정된 S-2.5-3의 연성지수에 대한 비율도 S-2.5-3과 동일한 a/d를 갖는 부재에 한하여 함께 나타내었다. 그 결과, CFRP rod를 사용하면 철근 대비 38~44% 수준 정도의 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 이는 하중-처짐 곡선에서도 확인한 바와 같이 취성 거동을 보이는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 2에 나타난 하중-처짐 곡선에 나타난 거동 형태와 달리 C-2.5-3의 경우에는

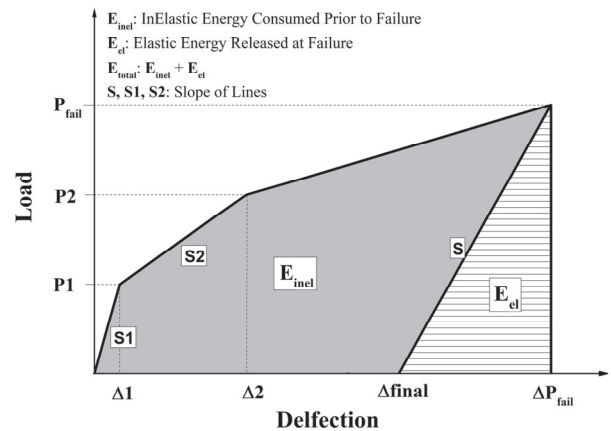


Fig. 3 Ductility index using area under the load-deflection curve (Naaman and Jeong, 1995)

유독 낮은 연성지수를, C-1.5-3의 경우에는 C-2.5-3보다 우수한 연성을 보였다. 이는 탄성에너지를 이용하여 연성지수를 결정할 경우, 최대 하중에 도달하기 전에 하중-처짐 곡선의 기울기 변화가 발생하지 않으면 적절하게 반영할 수 없음을 의미한다. 그러므로 C-2.5-3 및 C-3.5-3과 같이 유사 연성을 보이는 경우를 고려하기 위하여 Goldston이 제안한 흡수 에너지를 통한 연성 평가방법을 이용하고자 하였다. 흡수 에너지 역시 하중 처짐 곡선 아래의 면적을 이용하여 계산하나, Namman and Jeong이 제안한 방식과의 차이점은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 유사 연성 구간의 영향을 고려할 수 있다.

흡수 에너지(E)는 E_1 인 콘크리트 압축파괴로 인한 최대 하중에서의 에너지와 E_2 인 예비 용량의 합으로 계산할 수 있다 (Ebead and Marzouk, 2004; Saatci and Vecchio, 2009; Goldston et. al., 2016).

따라서 본 연구에서는 위와 방법과 유사하게 하중-처짐 곡선에서 하중-처짐의 관계가 선형적으로 증가하는 시점까지를 기준으로 E_1 과 E_2 를 산정하여 Table 5에 나타내었으며, E_1 과 E_2 의 비율도 함께 표기하였다. 그 결과, E_2/E_1 의 비율이 1 이상인 경우, 최대 하중에 도달할 때까지의 에너지가 최대 하중 이후의 에너지보다 더 큰 것을 의미하므로 하중 처짐 곡선에 나타난 바와 같이 유사 연성 구간을 갖는 시험체인 C-2.5-3 및 C-3.5-3의 하중-처짐의 선형 거동 이후의 유사 연성 거동을 반영할 수 있는 것으로 나타났다.

변형 에너지를 통한 부재의 연성 평가 결과, CFRP rod를 사용한 보 부재의 연성은 최대하중 도달까지의 거동 혹은 최대 하중 도달 이후의 거동을 반영하는 변형 에너지의 계산 방법에 따라 상이하게 평가됨을 확인하였다. 그러므로, CFRP rod 사용으로 인해 변형된 부재의 거동 특성을 반영하는 하중-처짐 관계를 이용하여 부재의 연성을 평가할 경우, 부재의 거동 형태에 따라 적절한 변형 에너지 계산 방법을 적용해야 하며,

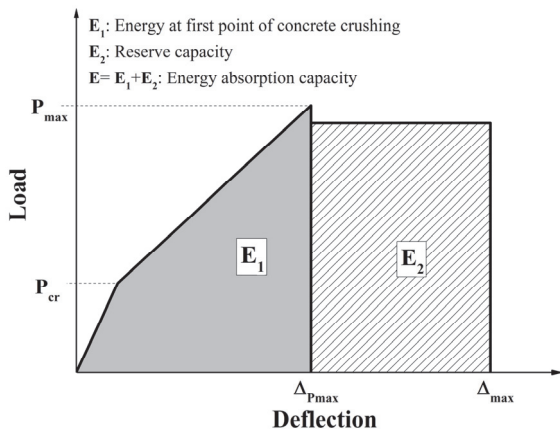


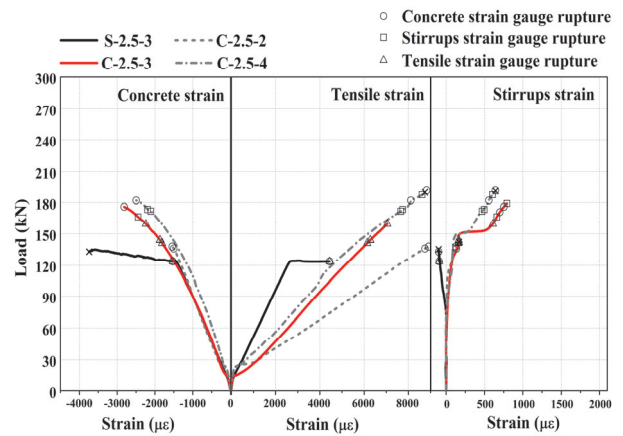
Fig. 4 Energy absorption capacity (E_1 and E_2) calculation (Goldston et. al., 2016)

CFRP rod를 사용한 보 부재의 거동 형태를 고려하여 효과적인 연성 평가를 위한 방안이 필요한 것으로 사료된다.

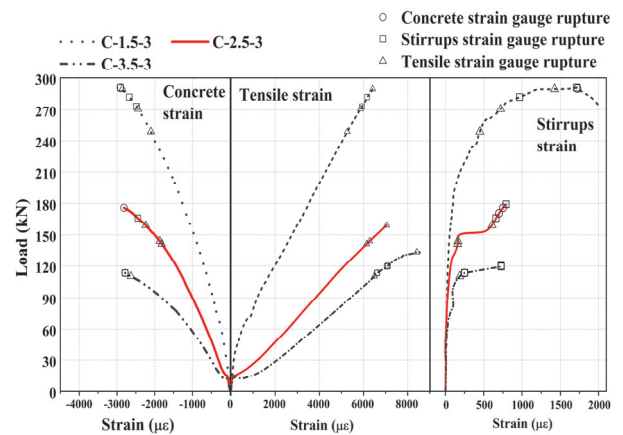
3.3 하중-변형률 관계

Fig. 5에는 시험체의 하중 증가에 따른 보강근, 전단 철근 및 압축연단으로부터 15 mm에 설치된 변형률 게이지를 이용하여 측정된 변형률과 하중 관계를 나타내었다. CFRP rod를 사용한 보 부재의 경우, 최대 하중에 도달할 때까지 인장 보강근 및 콘크리트의 변형률 곡선은 선형적으로 증가하였다.

Fig. 5(a)에 나타낸 S-2.5-3의 경우, 철근의 항복과 동시에 보강근과 콘크리트의 변형률이 증가하는 연성 거동을 보이고 전단 철근의 변형률 증가는 크지 않은 하중-처짐 곡선에서도 확인한 휨 거동을 보였다. 그러나, C-2.5-2의 경우, 최대 하중에 도달할 때까지 콘크리트 압축 연단에는 압괴가 발생하지 않았으며, 보강근의 변형률은 최대 하중까지 증가하였다. 또한, 전단 철근의 변형률도 점차 증가하기 시작하며 부재의 파



(a) a/d: 2.5



(b) ρ_f : 1.261

Fig. 5 Load-strain curve

단이 발생하였다. C-2.5-3은 최대 하중에 도달할 때까지 콘크리트의 변형률이 증가하나, 보강근에 발생한 슬립 등에 의해 게이지가 파단되었다. 그러나 실제로 보강근은 파단되지 않아 하중이 지속적으로 증가하고 최대 하중의 약 85% 수준에서 전단 철근의 변형률이 증가하는 전단 거동을 보였다. C-2.5-4의 경우, 최대 하중에 도달하기 전에 콘크리트 변형률 게이지의 파단이 발생한 것은 콘크리트 변형률 게이지 부착 위치에서의 균열 발생으로 인한 것이며, 보강근의 변형률은 최대하중에 도달할 때까지 선형적으로 증가하였고 최대하중의 약 72% 수준에서부터 전단철근의 변형률이 증가하는 전단 거동이 나타났다.

이러한 결과를 종합하면, CFRP rod를 사용한 보 부재의 보강비가 증가할수록 부재가 부담하는 전단력이 증가하였다. 따라서, 앞서 기술한 바와 같이 보강비에 의해 부재의 지배적인 거동이 변화하므로 보강비의 제한이 필요한 것으로 사료된다. 또한, 휨 저항 성능을 유지할 수 있도록 전단저항 성능을 확보해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에 나타난 C-1.5-3의 경우, 콘크리트 변형률 게이지가 극한 변형률에 도달하기 전에 최대 하중에 도달하였으며, 보강근의 변형률도 크지 않았다. 이와 달리, 전단철근의 변형률은 항복 변형률에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 하중-처짐 곡선에서 확인한 바와 같이 C-1.5-3은 전형적인 전단 거동을 보였다. 그러나, C-3.5-3의 경우, 하중-처짐 곡선에서 보인 유사 연성 역시 보강근의 변형률을 통해 확인되었으나, 하중-처짐곡선에서 확인하지 못한 전단 변형률의 증가도 함께 발생하여 점차 전단 거동을 보였다. 그러므로 부재의 거동을 정확하게 평가하기 위해서는 하중-처짐 및 하중-변형률 곡선 등, 부재의 거동을 확인할 수 있는 요인을 함께 비교 평가하여 부재의 최종 파괴형태를 결정해야 할 것으로 사료된다.

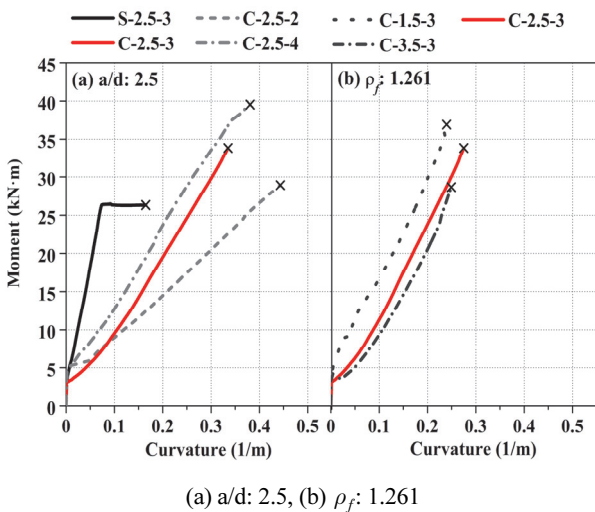


Fig. 6 Moment-curvature curve

3.4 모멘트-곡률 관계

Fig. 6에는 베르누이 가정을 통해 단면에서의 변형률은 선형적으로 분포하고 콘크리트와 보강근은 완전 부착 상태로 가정하여 결정된 모멘트-곡률 관계를 나타내었다.

Fig. 6(a)에 나타난 S-2.5-3의 경우, 초기 균열 발생 이후 약간의 기울기 변화가 발생하나 항복 이후 일정한 모멘트에 곡률만 증가하는 일반적인 관계를 나타내었다. 그러나, CFRP rod를 사용한 경우, 모두 S-2.5-3보다 낮은 휨 강성을 보이며, 곡률만 증가하는 구간은 나타나지 않았다. 이는 CFRP rod의 낮은 탄성계수로 인해 내부 유효 모멘트가 감소하고 큰 곡률이 발생하기 때문이며, 외력에 대한 취성 거동을 하기 때문으로 판단된다(Kara, et. al., 2015). 한편, 보강비가 증가할수록 휨 강성이 증가하는 것으로 나타났으나, 휨 강성의 비율은 보강비 증가량에 비례하지 않았으며, 적절한 보강비 수준 제시가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)의 경우, C-2.5-3과 C-3.5-3의 경우에는 거의 유사하나, a/d가 1.5인 C-1.5-3의 경우에는 가장 큰 휨 강성을 보였다. 이는 부재 내부의 모멘트는 동일하더라도 a/d가 다를 경우, 부재의 거동이 다르기 때문으로 판단된다.

3.5 균열 발생 특성 및 파괴형태

Fig. 7에는 부재 실험 종료 후 측정된 균열의 형상을 나타내었다. 그 결과, Fig. 7(a)인 S-2.5-3의 경우, 최종적으로 콘크리트 압축파괴가 발생하였으며 순수 휨 구간에서의 휨 균열, 지점에서 순수 휨 구간까지 휨-전단 균열이 나타나며, 사인장 균열은 발생하지 않는 전형적인 휨 파괴에 의한 균열 특성을 보였다.

Fig. 7(b, C-2.5-2)의 경우, 순수 휨 구간 내에서 휨 균열이 발생하나, 부재 상단으로까지 진전하지 못하며, 휨-전단 균열 및 복부 전단 균열이 다수 발생하였다. 이러한 경향은 보강비가 증가한 Fig. 7(c, C-2.5-3)에서도 나타났으며, 하중 가력점에서 지점까지 이어지는 전단 균열도 발생하였다. 그러나, C-2.5-4(Fig. 7(d))의 경우, 높은 보강비로 인해 충분한 휨 저항 성능을 발휘하여 사인장 균열이 발생하지 않고 콘크리트 압축 상단에 균열이 증가하였다. 한편, C-1.5-3의 균열은 하중이 하중 가력점에서 지점으로 바로 전달되고 전단 강도가 매우 높을 때 나타나는 a/d가 1 이하인 깊은 보에서 나타나는 균열과 유사하였다. 그러나 a/d가 1.5이고 충분한 전단 철근을 배치했음에도 불구하고 CFRP rod가 부담하는 하중이 증가하면서 이에 대한 반력이 콘크리트와 전단 철근에 작용하여 하중 가력점에서의 콘크리트 압축파괴와 사인장 균열을 동반하였다. C-3.5-3은 휨 균열 및 휨 전단 균열과 복부 전단 균열이 발생하였으며, 하중 가력점에서 콘크리트 압축파괴가 발생하였다.

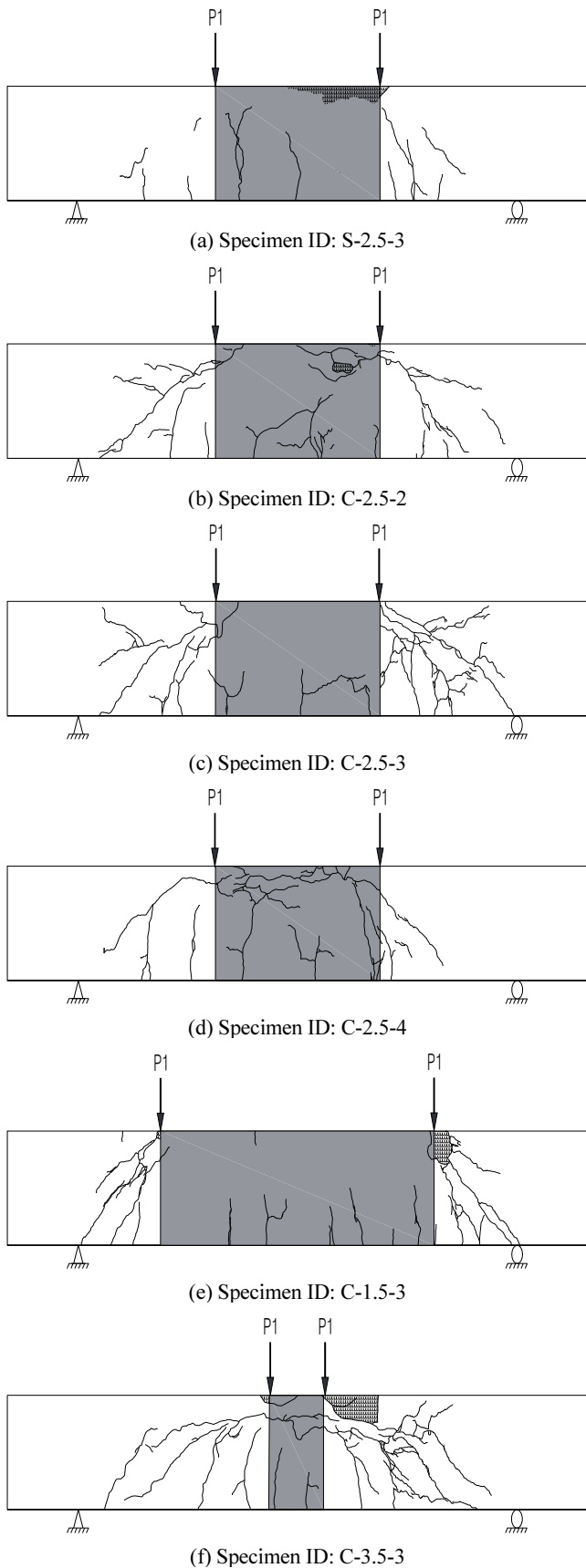


Fig. 7 Typical crack occurrence patterns

Table 6 Characteristics of crack in pure bending zone of beam

Specimen ID	Number of crack [ea]	Mean. crack spacing [mm]	Area of concrete crushing [mm ²]
S-2.5-3	4	162.2	5928.8
C-2.5-2	4	130.0	905.0
C-2.5-3	3	221.9	-
C-2.5-4	3	204.4	-
C-1.5-3	9	80.2	259.5
C-3.5-3	2	100.0	1489.0

Table 7 Real failure mode of beam

Specimen ID	S-2.5-3	C-2.5-2	C-2.5-3	C-2.5-4	C-1.5-3	C-3.5-3
Failure mode	F	D	D	S.C	S	S.C

Notation) F: Flexural Tension Failure, D: Diagonal Tension Failure, C: Concrete Crushing, S: Splitting Shear Failure, S.C.: Shear Compression Failure

한편, 순수 휨 구간에서의 균열 간격, 개수 및 콘크리트 압축파괴가 발생한 면적을 Table 6에 나타내었다. CFRP rod를 사용한 경우, 균열 개수는 보강비 증가에 따른 영향을 크게 받지 않았으며, 이것은 순수 휨 구간이 너무 적어 명확한 구분이 나지 않은 것으로 판단된다. 또한, a/d의 변화로 균열 개수, 간격에 대한 비례적인 경향은 나타나지 않았다.

하중-처짐 곡선, 하중-변형률 곡선 및 균열 형상을 고려하여 결정한 최종 파괴형태는 Table 7에 나타내었다. 그 결과, S-2.5-3은 하중-처짐 곡선, 하중-변형률 곡선 및 균열 형상 모두 설계된 파괴 모드인 휨에 의한 파괴형태를 보였다. 그러나 C-2.5-2의 경우, 하중-변형률 곡선에 나타난 보강근 파괴와 균열 형상에서 확인한 전단 균열로 인해 전단-인장파괴로 최종 파괴되었다. C-2.5-3은 하중-변형률 곡선에서 확인한 전단 거동과 지점에서 하중 가력점까지 이어지는 사인장 균열에 기인한 전단-인장파괴가 발생하였다. 한편, C-2.5-4의 경우, 하중-처짐 곡선 및 하중-변형률 곡선에는 전단파괴로 나타났으나, 균열 특성은 콘크리트 압축파괴의 특성이 보이므로 최종 파괴 모드는 전단-압축파괴로 결정하였다.

한편, C-1.5-3의 경우, 쪼갬-전단파괴가 발생하였으며, 하중-처짐 및 하중-변형률 곡선에서 나타난 전단 거동과 하중 가력점에서의 압력을 포함한 사인장 균열로 최종 파괴 모드를 결정하였다. C-3.5-3의 경우, 휨에 의한 부재의 파괴가 결정되기 전에 전단의 영향으로 먼저 부재가 파괴되면서 상단의 콘크리트 압축파괴가 발생하는 전단-압축파괴가 발생하였다.

위의 결과를 종합하면, CFRP rod를 보강근으로 사용하여 부재의 최종 파괴형태를 콘크리트 압축파괴로 설계하고 철근

콘크리트 기준에 근거하여 전단파괴 방지를 위해 전단 철근을 배치하더라도 부재의 최종 파괴형태는 설계 시 예상한 파괴형태와 달리 전단파괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구는 국내 시범 생산 CFRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재의 휨 및 전단 거동을 보강비 및 전단 경간비 변화에 따라 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. CFRP rod를 보강근으로 사용한 부재를 이용하여 휨 및 전단 거동을 평가한 결과, 적정 범위를 벗어나는 보강비를 사용한 부재의 성능 개선 효과는 미미한 것으로 나타나므로 보강비에 대한 제한이 필요하다.
2. 전단파괴를 방지하기 위하여 철근 콘크리트 구조기준에 근거한 전단 철근을 배근함에도 불구하고 CFRP rod를 사용할 경우, 전단파괴의 가능성이 발생하였다. 그러므로 이를 방지하기 위한 검토가 필요한 것으로 판단된다.
3. CFRP rod를 사용한 보 부재의 경우 순수 휨 구간에서 휨 균열은 부재 상단으로 진전되지 못하며, 복부 전단 균열과 사인장 균열 발생이 증가하는 경향이 나타났다.
4. CFRP rod를 사용한 부재의 연성은 에너지 산정방법에 따라 다르게 나타나므로 CFRP rod를 사용한 보 부재의 연성 평가는 하중-처짐 관계를 통해 적절한 변형 에너지 평가방법을 적용해야 할 것으로 판단된다.
5. 연구 결과를 종합하여 보면, 국내 시범 생산 중인 CFRP rod를 보 부재의 보강근으로 적용할 경우, 유사 연성 거동 및 충분한 변형에너지 확보가 가능하므로 적정 수준의 보강비를 충족하고 적절한 전단파괴 방지 대책을 마련한다면, CFRP rod는 보 부재 보강근으로의 적용 가능성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22CFRP-C163381-02).

References

1. ACI Committee 440 (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars(ACI 440.1R-15), American Concrete Institute, Michigan.
2. Ahmed, E. A., El-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B. (2010), Performance Evaluation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Beams, *ACI Structural Journal*,

- 107(1), 53-62.
3. Benmokrane B., Chaallal O. and Masmoudi R.(1996), Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 93(1), 46-55.
4. CSA Group (2002), Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-02), Canadian Standard Association, Toronto.
5. Cheon, J. H., Kim, K. M., and Shin, H. M. (2021), Analytical Approach to Evaluate the Nonlinear Behaviors of One-way Concrete Slab Reinforced with CFRP Grid Reinforcements, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(6), 218-226 (in Korean).
6. Choi, S. Y., Choi, M. S., Kim, I. S., and Yang, E. I. (2021), A Study on the Evaluation Method to Flexural-bonding Behavior of FRP-Rebar Concrete Member, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(5), 149-157 (in Korean).
7. Ebead, U., and Marzouk, H. (2004), Fiber-Reinforced Polymer Strengthening of Two-Way Slabs, *ACI Structural Journal*, 101(5), 78-86.
8. Grace, N. F., Soliman, A. K., Sayed, G. A., and Saleh, K. R. (1998), Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams, *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 186-194.
9. Goldston, W. M., Remennikov, A. M., and Sheikh, M. N. (2016), Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars under Static and Impact Loading, *Engineering Structures*, 113, 220-232.
10. Jaeger, L. G., Tadros, G., and Mufti, A. (1995). Balanced Section, Ductility, and Deformability in Concrete with FRP Reinforcement, *Research Rep. No. 2*, Industry's Center for Computer-Aided Engineering, Technical Univ. of Nova Scotia, Halifax.
11. Jaeger, L. G., Mufti, A. A., and Tadros, G. (1997), The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular-Section Reinforced Concrete Members, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Tokyo.
12. Jang, N. S., Kim, Y. S., and Oh, H. S. (2021), Analysis of Failure Behavior of FRP Rebar Reinforced Concrete Slab Based on FRP Reinforced Ratio, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(5), 173-181 (in Korean).
13. JSCE Research Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcing Materials (1997), Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.
14. Kara, I. F., Ashour, A. F., and Köroğlu, M. A. (2015), Flexural Behavior of Hybrid FRP/steel Reinforced Concrete Beams, *Composite Structures*, 129, 111-121.
15. KCI Committee 112 (2019), FRP Reinforcement Structural Design Guidelines (KCI PM112.1-19), Korea Concrete Institute, Seoul (in Korean).
16. Korean Design Standard (2022), Design Code for Shear and Torsion of Concrete Structures(KDS 14 20 22), Korea Construction Standard Center, Seoul (in Korean).
17. Korea Industrial Standards Commission (2017(a)), Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete(KS F 2405), Korean Agency for Technology and Standards, Seoul (in Korean).

18. Korea Industrial Standards Commission (2017(b)), Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio in Compression of Cylindrical Concrete Specimens(KS F 2438), Korean Agency for Technology and Standards, Seoul (in Korean).
19. Kim, S. E., and Kim. S. H.(2018), Flexural Behavior of Fiber Reinforced Concrete Beams with Hybrid Double-layer Reinforcing Bars, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(1), 199-207 (in Korean).
20. Kim Y. J., Hmidan A., and Yazdani S. (2015), Variable Shear Span-Depth Ratios for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Various Carbon Fiber-Reinforced Polymer Configurations, *ACI Structural Journal*, 112(5), 635-643.
21. Lee, S. H., Ahn, S. H. (2005), Flexural Behavior of Concrete Beam Members with Longitudinal FRP Rod Reinforcement, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 21(1), 67-74 (in Korean).
22. Naaman, A. E., and Jeong, S. M. (1995), Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, RILEM, London.
23. Saatci, S., and Vecchio, F. J. (2009), Effects of Shear Mechanisms on Impact Behavior of Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 106(1), 78-86.
24. Shin, S.W., Ahn, J. M., Han, B.S., and Seo, D.W. (2006), Effects of Reinforcement Ratio on Concrete Beams Reinforced with FRP Re-bars, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 22(2), 19-26 (in Korean).
25. Tureyen, K., and Frosch, R. J. (2002), Shear Tests of FRP-Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, 99(4), 427-434.
26. Wegian, F.M., and Abdalla, H. A. (2005), Shear Capacity of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymers, *Composite Structures*, 71(1), 130-138.

Received : 08/31/2022

Revised : 09/19/2022

Accepted : 09/26/2022

요 지 : 전 세계적으로 철근의 부식으로 인해 발생하는 철근 콘크리트 구조물의 성능 저하를 해결하기 위하여, FRP를 철근으로 대체하는 것은 상당한 주목을 받고 있으며, FRP 물성을 향상시켜 구조물의 사용 수명을 연장하기 위한 기술 개발이 진행되어 왔다. 이에 따라, 고강도 및 고강성을 갖는 국산형 CFRP rod와 CFRP grid의 개발 및 제조 기술이 필요하며, 이를 적용한 구조 부재의 거동을 평가한 연구가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 국내 시범 생산 CFRP rod를 보강근으로 사용한 보 부재의 휨 전단 거동을 보강비와 전단 경간비에 따라 검토하였다. 그 결과, 일정 범위를 벗어난 보강비를 사용할 경우, CFRP rod에 의한 성능 개선 효과가 상쇄되거나 효과가 크지 않는 것으로 나타났다. 한편, CFRP rod를 사용한 보 부재의 경우, 국내 구조 설계 기준에 근거하여 전단 철근을 배치하더라도 전단 파괴 가능성이 발생하였다. 그러므로 CFRP rod를 사용한 보 부재의 경우, 보강비 제한과 전단파괴를 방지하기 위한 검토가 필요한 것으로 판단된다. 또한, CFRP rod를 사용한 보 부재의 연성은 변형 에너지 평가방법에 따라 결정되므로, 보 부재의 구조 거동을 반영한 변형 에너지 평가법을 적용하여 연성을 평가해야 한다.

핵심용어 : CFRP rod 보 부재, 변형 에너지, 파괴모드, 휨 전단 거동, 보강비, 전단 경간비
