Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol.28, No.4, August 2024, pp.13-20
https://doi.org/10.11112/jksmi.2024.28.4.13

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

수정압축장이론에 의한 탄소보강근-콘크리트 부재의 면내전단강도 평가

강수태[1*], 양은익[2], 최명성[3]

Evaluation of In-plane Shear Strength of CFRP Rebar-Concrete Member Using Modified Compression Field Theory

Su-Tae Kang[1*], Eun-Ik Yang[2], Myung-Sung Choi[3]

Abstract: In this study, when subjected to in-plane shear such as a shear wall, the behavior characteristics of a concrete member using CFRP rebars were investigated when the longitudinal reinforcement ratio was kept constant at 2.96% and the transverse reinforcement ratio was changed from 0.30 to 2.98%. The evaluation was conducted based on MCFT theory and analyzed by comparison with the case of concrete members using steel rebars. When the reinforcement ratio ranged from 0.30 to 1.19%, concrete members employing CFRP rebars exhibited higher shear strength compared to those using steel rebars. In contrast, at high reinforcement ratios of 1.79 and 2.98%, it was observed that the shear strength of the member with CFRP rebar was lower compared to the member with steel rebar. Maximum shear strain was observed to be higher for members reinforced with steel rebars at lower reinforcing bar ratios, while for ratios of 0.97% and above, CFRP rebars resulted in higher maximum shear strain. As the reinforcement ratio increases, the use of CFRP rebar instead of steel rebar results in a greater increase in maximum shear strain. By analyzing the difference in strain in the reinforcing bar as well as the difference in principal strain in the element caused by differences in the mechanical properties of the steel rebar and CFRP rebar, the shear strength and shear strain when using steel rebar and CFRP rebar with different reinforcement ratios can be compared and analyzed.

Keywords: In-plane shear, Carbon fiber, CFRP rebar, Shear strength, Modified compression field theory

1. 서 론

지금까지 콘크리트 구조물의 대부분은 철근을 보강재로 사용하는 철근 콘크리트 구조물의 형태로 만들어져 왔다. 압축에 비해 인장에 약한 콘크리트의 역학적 단점을 철근으로 보완함으로써 다양한 작용력에 대해 콘크리트와 철근의 복합작용으로 효율적으로 저항할 수 있도록 함으로써 콘크리트의 효용성을 크게 향상시켰다. 이처럼 철근은 보강재로서 콘크리트 구조물에서 충실한 역할을 수행하지만, 부식에 취약한 점과 높은 밀도로 인해 구조물의 총중량을 증가시키는 등의 약점도 가지고 있어서, 콘크리트 구조물의 내구성과 경제성에 제약적 요인으로 작용하기도 한다(Angst et al., 2012; Abbas and Shafiee, 2020; Han et al., 2021). 이러한 관점에서 철근의 대체재로서 가볍고 강도가 높으며 부식에 매우 강한 섬유보강 폴리머(Fiber Reinforced Polymer, FRP) 보강근에 대해 크게 주목하고 있다(Oh et al., 2008; Nanni et al., 2014).

FRP 보강근은 사용되는 섬유의 종류에 따라 여러 가지로 분류되는데, 대표적으로 유리섬유(Glass fiber)를 사용한 GFRP, 탄소섬유(Carbon fiber)를 사용하는 CFRP, 아라미드섬유(Aramid fiber)를 사용하는 AFRP 보강근 등이 있으며, 이 중에서 CFRP 보강근은 매우 높은 강도와 강성을 나타내어 고강도 보강이 필요한 경우에 많이 사용되고 있다.

철근 대체재로서 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 휨, 전단, 부착 등의 다양한 구조적 거동 특성에 대하여 그동안 많은 연구가 진행되어 왔으나, 여전히 명확하게 규명되지 않은 부분들이 남아있다(Mahroug et al., 2014; El Ghadioui et al., 2020; Choi et al., 2021). 특히 전단거동의 경우 휨거동에 비해 상대적으로 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재에 대한 실험적 연구가 충분하지 않으며, 관련 설계기준에서는 철근에 비해 작은 FRP의 강성으로 인한 차이를 고려하여 기존의 철근 콘크리트의 전단설계 모델식을 약간 수정한 형태로 사용하고 있다(ACI Committee 440, 2015; AASHTO, 2017; CSA, 2012; JSCE, 1997).

한편, 철근 콘크리트 구조물의 전단파괴 메커니즘은 지금까지 다양한 이론적 방법으로 규명하고자 노력해 왔다(Ritter,

[1]정회원, 대구대학교 건축공학과 교수, 교신저자
[2]정회원, 강릉원주대학교 건설환경공학과 교수
[3]정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수
***Corresponding author:** stkang@daegu.ac.kr
Department of Architectural Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2024년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2024년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2024 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1899; Mitchell and Collins, 1974, Vecchio and Collins, 1986). 그 중에서 Vecchio and Collins(1986)이 제안한 수정압축장 이론(Modified Compression Field Theory, 이하 MCFT)은 균열이 발생한 콘크리트 부재에서의 적합조건, 평형조건 및 재료의 구성방정식을 토대로 한 응력장 해석방법으로, 철근콘크리트 부재의 전단거동 예측에 많이 사용되고 있다(Park, 1999; Bentz et al., 2006). 이와 같은 해석방법은 철근 대신 FRP 보강근의 재료특성을 고려함으로써 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 전단거동 특성도 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

그러한 관점에서 이 연구에서는 전단벽과 같은 면내 전단을 받는 경우에 대해, CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 거동특성을 MCFT 이론에 기반하여 평가하고, 철근을 사용한 콘크리트 부재의 경우와 비교하여 분석하고자 하였다.

2. 수정압축장 이론

수정압축장 이론은 1986년 Vecchio, F.J.와 Collins, M.P.에 의한 철근콘크리트 패널실험 결과에 근거하여 기존의 압축장 이론으로부터 제안되었는데, 지금까지도 여전히 정확한 거동 예측 결과를 보여주고 있다(Vecchio and Collins, 1988; Feng et al., 2021). 원래의 압축장 이론에서는 콘크리트가 균열이 생긴 후에는 인장응력은 받을 수 없다고 가정하였다. 그러나 실제로는 인장응력이 작용하고 있음을 많은 실험을 통해 확인하였으며, 그래서 수정압축장 이론에서는 전단응력의 정확한 예측을 위해 균열 이후에 콘크리트가 받는 인장응력을 고려하고 있다.

2.1 기본가정

수정압축장 이론은 다음과 같은 사항들을 가정하고 있다.

(1) 외부 하중작용에 의한 콘크리트 미소 요소에 작용하는 전단응력과 수직응력은 균일하게 분포한다.
(2) 콘크리트의 응력-변형률 관계는 균열이 발생한 요소의 평균 응력-변형률 관계로 나타낸다.
(3) 콘크리트 요소에서의 주응력 방향과 주변형률 방향은 동일하다.
(4) 콘크리트와 보강근은 상호간 부착슬립이 전혀 발생하지 않는 완전부착상태로 고려한다.
(5) 보강근에 작용하는 응력은 축방향 응력만 고려하고, 전단응력은 고려하지 않는다.

2.2 평형조건

Fig. 1과 같이 콘크리트 요소에 x 및 y 방향으로 보강근이 직교 격자형태로 배치되어 있고, 요소의 모서리 평면에 작용하는 응력은 각각 수직응력 f_x, f_y와 전단응력 v_{xy}로 구성된 응력상태를 고려한다. x 및 y 방향 보강근의 보강근비를 각각 ρ_x, ρ_y로 나타내고, 보강근에 작용하는 응력을 각각 f_{sx}와 f_{sy}로 나타내면, 힘의 평형조건으로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$f_x = \rho_x f_{sx} + f_{c1} - v_{xy}\cot\theta \tag{1}$$

$$f_y = \rho_y f_{sy} + f_{c1} - v_{xy}\tan\theta \tag{2}$$

$$v_{xy} = (f_{c1} + f_{c2})/(\tan\theta + \cot\theta) \tag{3}$$

여기서, f_{c1}과 f_{c2}는 콘크리트에 작용하는 주응력을 나타낸다.

2.3 적합조건

세 가지 변형률 구성요소 ϵ_x, ϵ_y 및 γ_{xy}를 알면 변형률에 대한 모어 원(Mohr's circle) 을 통해서 다른 방향의 변형률을 구할 수 있으며, Fig. 2에 나타낸 ϵ_x 및 ϵ_y와 주변형률 ϵ_1 및 ϵ_2 사이의 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_x + \epsilon_2)}{\tan\theta} \tag{4}$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_2 \tag{5}$$

$$\tan^2\theta = \frac{\epsilon_x + \epsilon_2}{\epsilon_y + \epsilon_2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_y}{\epsilon_1 - \epsilon_x} \tag{6}$$

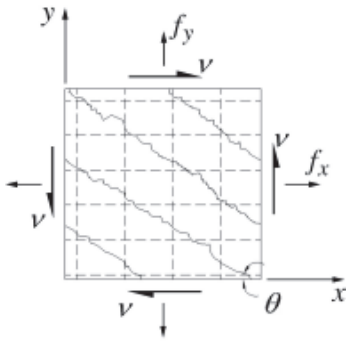


Fig. 1 Stresses in element

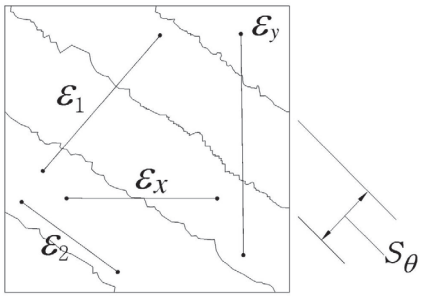


Fig. 2 Average and principal strains in element

2.4 응력-변형률 관계

요소에 작용하는 평균 응력과 철근과 콘크리트의 평균 변형률을 연결하기 위한 보강근 및 콘크리트의 평균 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

철근의 경우, Fig. 3(a)와 같은 이선형 응력-변형률 관계를 적용할 수 있으며, 콘크리트에 대해서는 Fig. 3(b)와 같은 압축 응력-변형률 곡선 형태를 가진다. 콘크리트의 주압축응력은 주압축변형률 ϵ_2뿐만 아니라 함께 하는 주인장변형률 ϵ_1의 함수이기도 하다. 따라서 압축에 수직인 방향으로 높은 인장변형률을 받게 되는 콘크리트는 일축 압축시험을 통해 구한 응력-변형률에 비해 낮은 강도를 나타낸다. 이러한 점을 고려한 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계식은 식 (7)과 나타낼 수 있다.

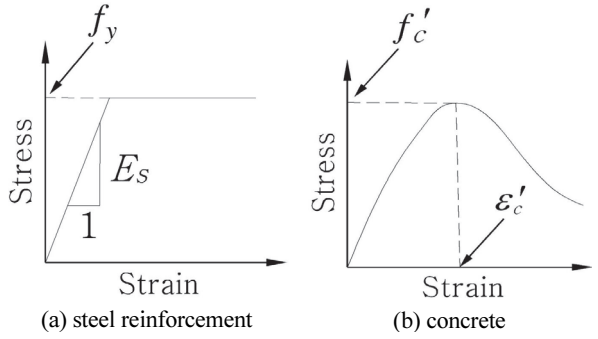
$$f_{c2} = \frac{f_c'}{0.8 + 0.34\epsilon_1/\epsilon_c'}\left[2\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'}\right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c'}\right)^2\right] \tag{7}$$

그리고 콘크리트의 인장 응력-변형률 관계는 균열발생 이전에는 선형탄성 거동으로 고려하며, 균열발생 이후에는 다음의 관계식을 적용할 수 있다.

$$f_{c1} = \frac{0.33\sqrt{f_c'}}{1 + \sqrt{500\epsilon_1}} \tag{8}$$

2.5 균열면에서의 응력

앞서 언급한 응력 및 변형률은 평균값에 관한 것으로, 요소에 작용하는 실제 균열이 발생하면 보강근의 인장응력은 평균보다 높지만 균열 중간에는 평균보다 낮다. 반면에 콘크리트 인장응력은 균열에서 0이 되고 균열 사이의 중간에서는 평균보다 높다. 이축 응력을 받는 요소의 궁극적인 하중 저항 능력은 균열을 가로질러 인장력을 전달하는 보강근에 의해 좌우될 수 있기 때문에 이러한 국부적인 변화에 대한 고려는 중요하다. 균열면에 작용하는 응력상태는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며,



(a) steel reinforcement (b) concrete

Fig. 3 Stress-strain relationships of steel reinforcement and concrete

균열면에 작용하는 전단응력을 v_{ci}, 압축응력을 f_{ci}, 균열면에서 x 및 y방향 보강근에 작용하는 응력을 각각 f_{sxcr}과 f_{sycr}라고 하면, f_{sxcr}과 f_{sycr}는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$f_{sxcr} = \left(f_x + v_{xy}\cot\theta + v_{ci}\cot\theta\right)/\rho_x \le f_{\max,x} \tag{9}$$

$$f_{sycr} = \left(f_y + v_{xy}\tan\theta - v_{ci}\tan\theta\right)/\rho_y \le f_{\max,y} \tag{10}$$

여기서, $f_{\max,x}$와 $f_{\max,y}$는 각각 x, y방향으로 보강근에 작용할 수 있는 최대응력을 의미하며, 철근의 경우에는 항복강도에 해당한다.

균열면에 작용하는 전단응력 v_{ci}는 균열폭(w), 골재의 최대치수(a) 등을 포함한 다음 식을 만족하여야 한다(Walraven, 1981).

$$v_{ci} \le \frac{0.18\sqrt{f_c'}}{0.31 + 24w/(a+16)} \tag{11}$$

위의 식에서 균열폭, w는 균열면에서의 평균 균열폭을 주인장변형률(ϵ_1)과 균열간격(s_θ)의 곱 형태로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, s_θ는 식 (13)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$w = \epsilon_1 s_\theta \tag{12}$$

$$s_\theta = \frac{1}{\dfrac{\sin\theta}{s_{mx}} + \dfrac{\cos\theta}{s_{my}}} \tag{13}$$

위 식에서 s_{mx}와 s_{my}는 각각 x방향 보강근과 y방향 보강근의 균열 제어특성을 나타내는 값이다.

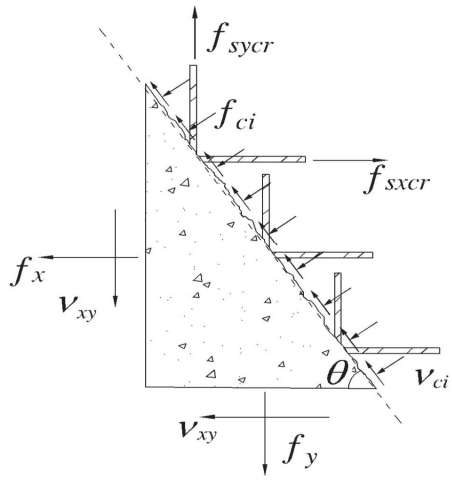


Fig. 4 Local stresses at a cracked plane

3. 해석방법 및 조건

3.1 해석방법

면내 전단을 받는 콘크리트 부재의 거동특성에 대한 MCFT에 근거한 해석과정은 콘크리트 요소에 작용하는 인장방향의 주변형률(ϵ_1)을 단계적으로 증가시키면서, 각 단계의 주변형률을 유발하는 응력을 계산하는 과정으로 진행된다. 이축 하중을 받는 멤브레인 요소의 전단거동을 결정하는 해석절차는 Fig. 5와 같다. 해석 알고리즘에 따라 matlab 소프트웨어를 이용하여 면내 전단거동 해석 프로그램을 개발하였으며, Vecchio and Collins(1986)와 Bentz et al.(2006)에서 제시된 철근콘크리트 판요소에 대한 면내전단거동에 관한 기존 실험결과와의 비교를 통해 해석 프로그램의 정확성을 검증하였다. Bentz et al.(2006)에서는 다양한 철근비의 멤브레인 요소에 대한 면내

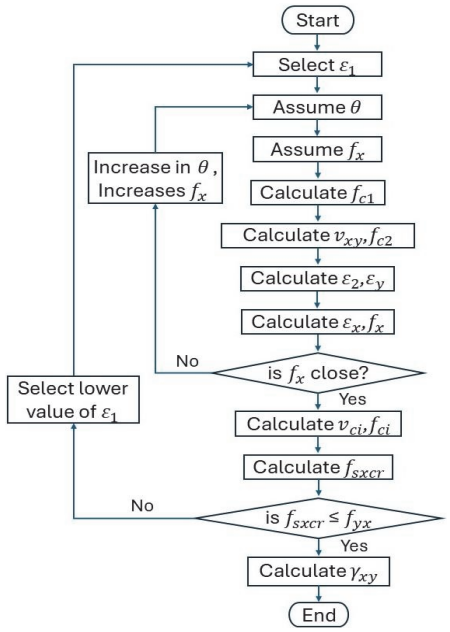


Fig. 5 Algorithm flowchart for in-plane shear analysis

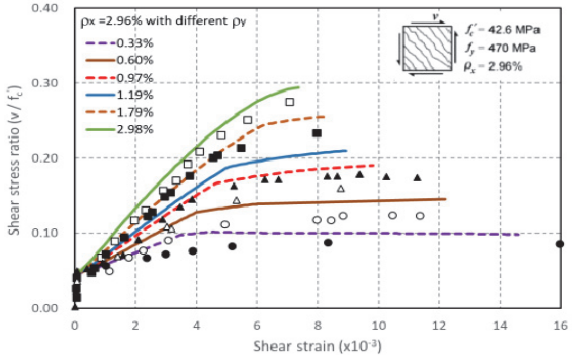


Fig. 6 Comparison of analytical results with Bentz et al.(2006)

전단실험의 결과와 MCFT 해석 결과를 비교하여 제시하였는데, 그들이 적용한 실험결과는 x방향 철근비가 2.96%로 일정하고, y방향 철근비가 각각 0.33, 0.60, 0.97, 1.19, 1.79, 2.98%인 총 6가지 경우에 대한 것이다. Fig. 6은 Bentz et al.(2006)에서 제시된 실험결과와 이 연구에서 적용한 해석 프로그램을 통해 얻어진 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다.

3.2 해석조건

Bentz et al.(2006)에서 고려한 실험결과와 동일한 콘크리트 부재를 대상으로 해석을 실시하였으며, 다만 철근을 보강근으로 사용한 경우와 함께 CFRP 보강근을 사용한 경우를 적용하여 검토하였다. 그들이 고려한 실험에서 콘크리트의 압축강도(f_c')는 42.6MPa이며, 철근은 항복강도 470MPa을 나타내었다. 이 실험에서와 동일한 콘크리트 압축강도와 동일한 크기 및 보강근비를 가진 CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재에 대하여 면내전단 거동에 대한 해석을 실시하였으며, 그 결과를 철근을 사용한 콘크리트 부재의 경우와 비교하였다.

비교해석을 위해 적용한 철근 및 탄소보강근의 물성값은 Table 1과 같다. 철근은 완전탄소성 거동을 하는 것으로 가정하였으며, 탄소보강근은 인장강도에 도달할 때까지 탄성거동을 하는 것으로 고려하였다.

4. 해석결과 및 분석

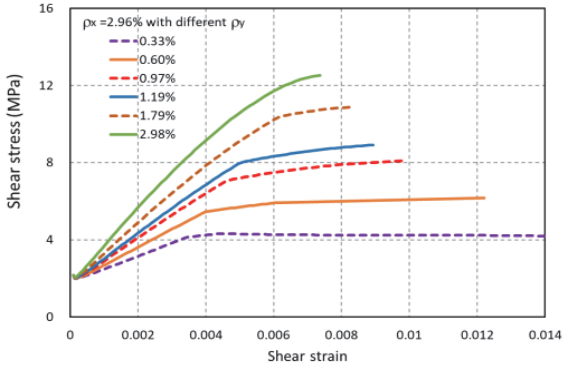
Fig. 7(a)와 (b)는 각각 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대한 면내 전단거동의 해석결과를 보여주고 있다. 그 결과를 살펴보면, 면내전단강도의 경우에는 낮은 횡보강근비에서는 동일한 보강근비의 철근을 사용한 경우에 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우가 더 큰 전단강도를 보이는 반면, 횡보강근비가 높은 경우에서는 철근을 사용한 경우가 CFRP 보강근을 사용한 경우보다 더 높은 전단강도를 나타내고 있다. 면내전단강도 도달 시의 전단변형률에서도 이와 유사한 경향이 보이며, 낮은 보강근비에서는 철근을 사용한 경우가 더 큰 전단변형률을 나타내며, 높은 보강근비에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우가 좀 더 큰 전단변형률 값을 나

Table 1 Mechanical properties of steel and CFRP rebars

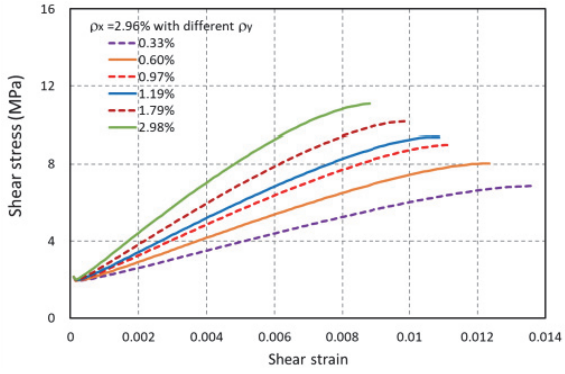
Type	Steel rebar	CFRP rebar
Yield strength [MPa]	470	-
Yield strain	0.00235	-
Tensile strength [MPa]	-	2,300
Ultimate tensile strain	-	0.01769
Elastic modulus [MPa]	200,000	130,000

타내고 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 8과 Fig. 9로 나타낸 각기 다른 횡보강근비를 가진 멤브레인 요소에서 철근과 CFRP 보강근을 사용한 경우의 면내전단강도와 그 때의 전단변형률을 직접 비교한 결과를 보면 쉽게 확인할 수 있다. 면내전단강도를 비교한 Fig. 8에서 횡보강근비가 2.98%일 때 철근을 사용한 경우에는 전단강도가 12.52MPa인데 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우에는 11.09MPa로 전단강도가 10% 넘게 저하되는 것을 볼 수 있으며, 반면에 횡보강근비가 0.33%로 작을 때에는 철근을 사용한 경우에는 전단강도가 4.17MPa인 것에 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우에는 6.86MPa로 전단강도가 60% 넘게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 최대 전단응력에서의 전단변형률을 비교하여 나타낸 것으로, 횡보강근비가 2.98%일 때 철근을 사용한 경우 전단변형률이 0.0074인데 반해 CFRP 보강근을 사용한 경우에는 0.0088로 전단변형률이 20%에 가까이 증가된 전단변형률을 나타내고 있는 반면에, 횡보강근비 0.33%일 때에는 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우의 전단변형률이 각각 0.0146, 0.0137로 CFRP 보강근을 사용한 경우가 6% 정도 더 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 철근에 비해 상대적으로 작은 값의 CFRP 보강근의 탄성계수로 인한 것이다.

Fig. 10에서는 횡보강근비(ρ_y)가 0.33%일 때 철근을 사용한 경우에 대해 종방향 및 횡방향 철근의 인장변형률(ϵ_x 및 ϵ_y)을 Fig. 10(a)와 (b)로 나타내었으며, 콘크리트에 작용하는 압축 응력-변형률($f_{c2}-\epsilon_2$) 곡선을 변형률 함수로 구해지는 압축강도 곡선과 함께 Fig. 10(c)로 나타내었다. 그리고 횡보강근비(ρ_y)가 0.33%일 때 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대한 보강근의 인장변형률(ϵ_x 및 ϵ_y), 그리고 $f_{c2}-\epsilon_2$ 곡선을 Fig. 11(a)-(c)로 나타내었다. ρ_y=0.33%에서 철근을 사용한 경우에는 종방향 철근은 파괴될 때까지 항복에 도달하지 않으며 횡방향 철근이 먼저 항복한 이후에 콘크리트의 압축응력이 변형률의 함수로 제시되는 압축강도에 도달하여 파괴될 때까지 큰 변형률 증가를 보이고 있다. Fig. 10(c)에서 보는 바와 같이, 압축강도는 약 10.9MPa을 나타내고 그 때의 압축변형률은 약 0.0017이다. 한편 Fig. 11에 나타낸 CFRP 보강근을 사용한 경우에는 종방향 보강근 및 횡방향 보강근 모두 극한변형률까지 도달하지 않으며, 파괴시 횡방향 인장변형률이 철근을 사용한 경우에 비해 훨씬 작게 나타난다. 이러한 차이로 인해서 철근을 사용한 경우에 더 큰 전단변형률을 나타내며, 이와 같은 결과는 전단변형률에 관한 식 (4)-(6)으로부터도 확인할 수 있을 것이다. 또한 Fig. 11(c)에서는 압축강도가 약 14.2MPa



(a) for the cases reinforced with steel rebars



(b) for the cases reinforced with CFRP rebars

Fig. 7 In-plane shear stress-strain behaviors obtained from MCFT analysis

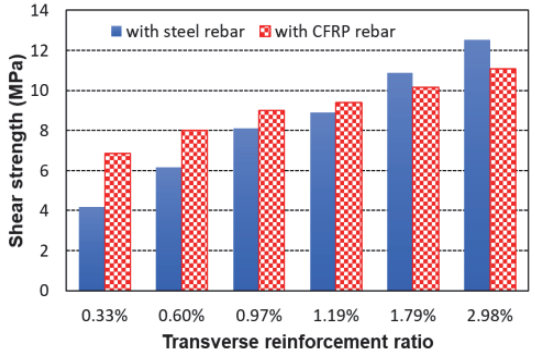


Fig. 8 Comparison of in-plane shear strengths for steel and CFRP reinforced members for different transverse reinforcement

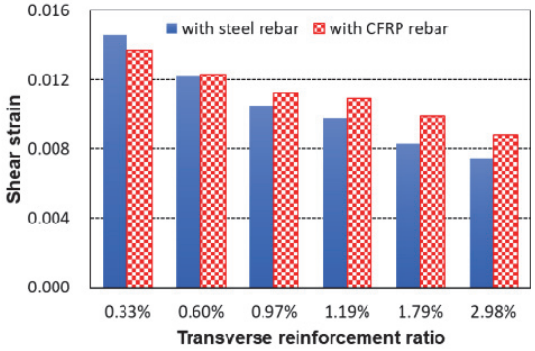
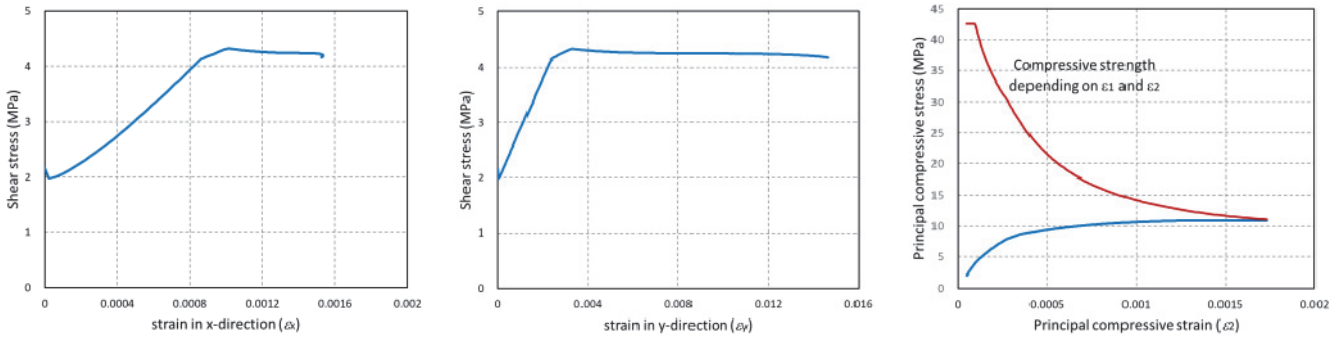
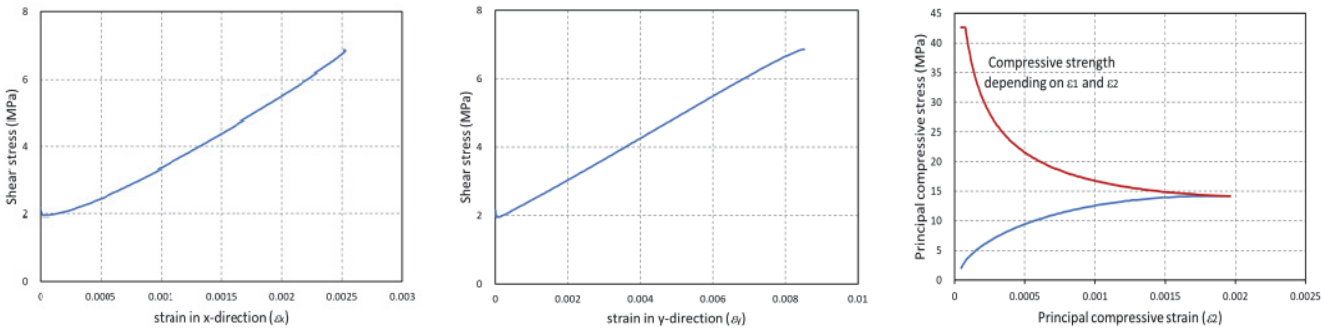


Fig. 9 Comparison of in-plane shear strengths for steel and CFRP reinforced members for different transverse reinforcement



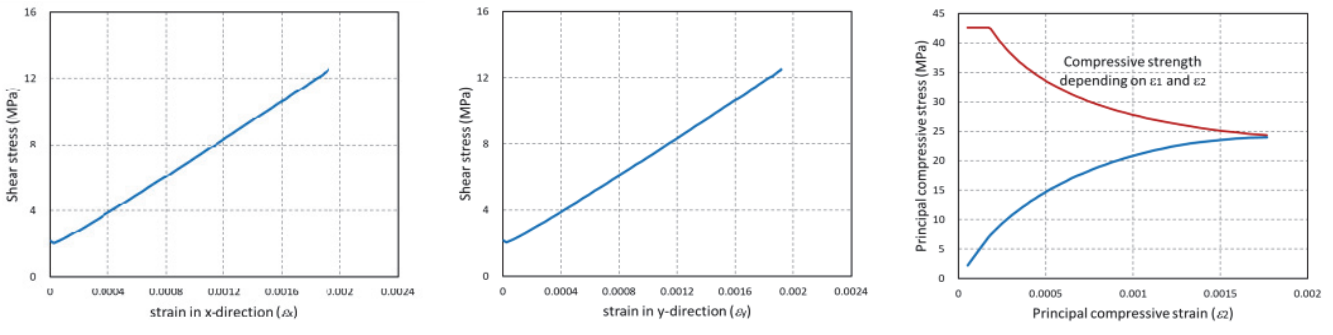
(a) ϵ_x (b) ϵ_y (c) $f_{c2} - \epsilon_2$ curve

Fig. 10 Tensile strain of steel rebar in x- and y-dir., and $f_{c2} - \epsilon_2$ curve of concrete in steel reinforced member with ρ_y=0.33%



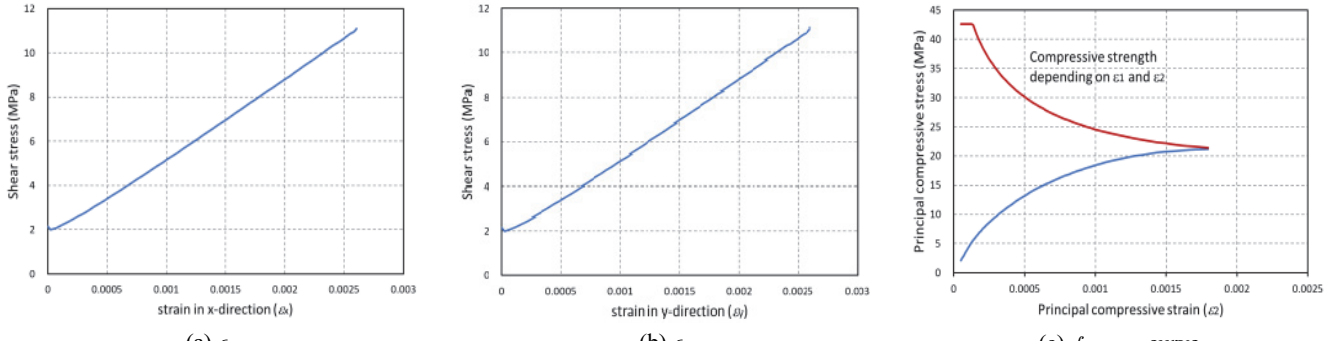
(a) ϵ_x (b) ϵ_y (c) $f_{c2} - \epsilon_2$ curve

Fig. 11 Tensile strain of CFRP rebar in x- and y-dir., and $f_{c2} - \epsilon_2$ curve of concrete in CFRP reinforced member with ρ_y=0.33%



(a) ϵ_x (b) ϵ_y (c) $f_{c2} - \epsilon_2$ curve

Fig. 12 Tensile strain of steel rebar in x- and y-dir., and $f_{c2} - \epsilon_2$ curve of concrete in steel reinforced member with ρ_y=2.98%



(a) ϵ_x (b) ϵ_y (c) $f_{c2} - \epsilon_2$ curve

Fig. 13 Tensile strain of CFRP rebar in x- and y-dir., and $f_{c2} - \epsilon_2$ curve of concrete in CFRP reinforced member with ρ_y=2.98%

이며 그 때의 압축변형률은 0.0019 정도임을 확인할 수 있는데, 식 (3)을 고려할 때 철근을 사용한 경우에 비해 훨씬 높은 압축강도가 결국 상대적으로 높은 면내전단강도로 나타났다고 판단할 수 있다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 횡보강근비(ρ_y)가 2.98%일 때의 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대한 종방향 및 횡방향 철근의 인장변형률(ϵ_x 및 ϵ_y)과 콘크리트에 작용하는 압축 응력-변형률($f_{c2} - \epsilon_2$) 곡선을 보여주고 있다. 철근을 사용한 경우 파괴 시 종방향 및 횡방향 철근의 인장변형률은 0.0019 내외로 모두 항복상태에 도달하지 않으며, 콘크리트 압축강도는 24.3MPa, 그 때의 압축변형률은 0.0018 정도이다. CFRP 보강근을 사용한 경우에는 파괴 시 종방향 및 횡방향 철근의 인장변형률은 0.0026 내외이고, 콘크리트 압축강도는 21.4MPa, 그 때의 압축변형률은 0.0018 정도이다. 앞서 설명한 같은 방식으로, 철근을 사용한 경우에 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우에서 더 크게 나타난 ϵ_x 및 ϵ_y가 식 (4)-(6)에 근거하여 높은 전단변형률 결과와 관련이 있음을 알 수 있으며, 상대적으로 낮은 파괴 시 압축강도로부터 CFRP 보강근을 사용한 경우에서 상대적으로 낮은 면내전단강도를 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 전단벽과 같은 면내 전단을 받는 경우에 대해, CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 거동특성을 MCFT 이론에 기반하여 평가하고, 철근을 사용한 콘크리트 부재의 경우와 비교하여 분석하고자 하였으며, 그 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 종방향 보강근비를 2.96%로 일정하게 하고, 횡방향 보강근비를 0.30에서 2.98%까지 변화시켰을 때, 철근 및 CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 패널의 면내 전단거동을 MCFT에 기반한 해석을 통해 평가하였다.

(2) 보강근비 0.30에서 1.19% 사이에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우가 철근을 사용한 경우보다 높은 전단강도를 보였으며, 그 이상의 1.79% 및 2.98%에서는 상대적으로 낮은 전단강도를 나타내었다.

(3) 최대전단변형률은 낮은 보강근비에서 철근을 사용한 경우가 더 크게 나타났으며, 0.97% 이상에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우에 더 크게 나타났으며 보강근비가 커질수록 철근 대비 전단변형률 증가율이 더 크게 나타났다.

(4) 작은 보강근비 범위에서 횡보강근의 변형이 크게 발생하였을 때, CFRP 보강근에서는 철근과 달리 항복 없이 큰 응력전달이 가능하여 주변형률에 의존적인 압축강도를 높게 확보하여 전단강도가 높게 나타난 반면, 철근은 항복 이후 큰 변형률을 동반하여 철근 대비 CFRP 보강근을 사용한 경우에 더 큰 전단강도 및 작은 최대전단변형률을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

(5) 높은 보강근비 범위에서는 철근의 항복이 발생하지 않으며 철근에 비해 작은 CFRP 보강근의 탄성계수로 인하여 보강근에서의 큰 인장변형률이 발생하게 되어 철근 대비 CFRP 보강근을 사용한 경우에 더 작은 전단강도 및 큰 전단변형률을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163381).

References

1. Angst, U. M., Hooton, R. D., Marchand, J., Page, C. L., Flatt, R. J., Elsener, B., Gehlen, C., and Culikers, J. (2012), Present and Future Durability Challengers for Reinforced Concrete Structures, *Materials and Corrosion*, 63(12), 1047-1051.
2. Han, M. S., Park, J. H., Lee, J. H., and Min, J. Y. (2021), Analysis of structural safety for rebar exposure and corrosion in PSC I-girder bridge slab, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 67-74. (in Korean)
3. Abbas, M., and Shafiee, M. (2020), An Overview of Maintenance Management Strategies for Corroded Steel Structures in Extreme Marine Environments, *Marine Structures*, 71, 102718.
4. Oh, H. S., Sim, J. S., and Kang, T. S. (2008), An Experimental Study on the Fatigue Flexural Bonding Characteristic of Concrete Beam Reinforced with GFRP Rebar, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 12(1), 101-108. (in Korean)
5. Nanni, A., De Luca, A., and Zadeh, H. J. (2014), Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, CRS Press, FL, USA, 35-63.
6. Mahroug, M. E. M., Ashour, A. F., and Lam, D. (2014), Tests of Continuous Concrete Slabs Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Bars, *Composite: Part B*, 66, 348-357.
7. El Ghadioui, R., Proske, T., Tran, N.L., and Graubner, C. (2020), Structural Behaviour of CFRP Reinforced Concrete Members Under Bending and Shear Loads, *Materials and Structures*, 53, Article No. 63.
8. 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 of Structural Maintenance and Inspection*, 25(5), 149-156. (in Korean)
9. 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, Farmington Hills, MI., USA.

10. AASHTO (2017), Bridge design guide specifications for gfrp-reinforced concrete bridge decks and traffic railings(AASHTO LRFD-17), AASHTO, Washington, DC, USA.
11. Canadian Standards Association(CSA) (2012), Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers (CSA-S806-12). CSA Group, Mississauga, Ontario, Canada.
12. Japan Society of Civil Engineers(JSCE) (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials(JSCE-1997), JSCE, Tokyo, Japan.
13. Ritter, W. 1899. Die Bauweise Hennebique, Schweiserische Bauzeitung, Zurich, Switzerland.
14. Mitchell, D., and Collins, M. P. (1974), Diagonal compression field theory - a rational model for structural concrete in pure torsion, *Journal of the American Concrete Institute*, 71, 396-408.
15. Vecchio, F. J., and Collins M. P. (1986), The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal, American Concrete Institute*, 83(2), 219-231.
16. Park, S. Y. (1999), Prediction of Shear Strength of R/C Beams using Modified Compression Field Theory and ACI Code, *KCI Concrete Journal*, Korea Concrete Institute, 11(3), 5-17.
17. Bentz, E. C., Vecchio, F. J., Collins, M. P. (2006), Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements, *ACI Structural Journal*, 103(4), 614-624.
18. Vecchio, F. J., and Collins M. P. (1988), Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory, *ACI Structural Journal*, 85(4), 258-268.
19. Feng, W., Feng, H., Zhou, Z., and Shi, X. (2021), Analysis of the Shear Capacity of Ultrahigh Performance Concrete Beams Based on the Modified Compression Field Theory, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, Article IN 5569733, 15 pages.
20. Walraven, J. C. (1981), Fundamental Analysis of Aggregate Interlock, *Journal of the Structural Division*, 107(11), 2245-2270.

Received : 05/29/2024
Revised : 06/22/2024
Accepted : 06/24/2024

요 지 : 이 연구에서는 전단벽과 같은 면내 전단을 받는 경우에 대해, 종방향 보강근비를 2.96%로 일정하게 하고, 횡방향 보강근비를 0.30에서 2.98%까지 변화시켰을 때, CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 거동특성을 MCFT 이론에 기반하여 평가하고, 철근을 사용한 콘크리트 부재의 경우와 비교하여 분석하고자 하였다. 보강근비 0.30에서 1.19% 사이에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우가 철근을 사용한 경우보다 높은 전단강도를 보였으며, 그 이상의 1.79% 및 2.98%에서는 상대적으로 낮은 전단강도를 나타내었다. 최대전단변형률은 낮은 보강근비에서 철근을 사용한 경우가 더 크게 나타났으며, 0.97% 이상에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우에 더 크게 나타났으며 보강근비가 커질수록 철근 대비 전단변형률 증가율이 더 크게 나타났다. 철근 및 CFRP 보강근의 기계적 성질 차이로 인해 발생하는 보강근에서의 변형률 차이 및 요소에서의 주변형률 차이 분석을 통해 보강근비 변화에 따른 철근 및 CFRP 보강근을 사용한 경우의 전단강도 및 전단변형률 변화를 비교하여 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 면내전단, 탄소섬유, 탄소보강근, 전단강도, 수정압축장이론