

이 방향 탄소섬유 스트립을 사용하여 보강된 콘크리트 보의 거동에 대한 연구

김창혁^{1*}

Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Bi-directional CFRP Strips

Changhyuk Kim^{1*}

Abstract: Researches on strengthening and rehabilitation are important since structural capacity is degraded by deterioration or damage of structural members. An effective strengthening scheme such as an externally bonded Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) can improve the structural performance of a concrete structure in a cost-effective way. Therefore, many experimental studies on strengthening methods have been widely carried out. In regards to the shear strengthening of a concrete beam, variables of the experimental studies were the amount of CFRP, the angle of the strip, the width of the strip, and the interaction between the materials. However, there are insufficient researches on bi-directional CFRP layout compared to the previous researches. In this study, a total of ten concrete beams were designed and tested to evaluate the shear strengthening effect using CFRP strips. The effectiveness of strengthening was investigated based on the shear contribution of materials, strain distribution of stirrup, and the maximum shear capacity of specimens.

Keywords: Bi-directional layout, CFRP strengthening, shear strengthening, shear strengthening point

1. 서론

기존 콘크리트 구조물의 노후화가 진행됨과 함께 구조물의 구조 성능은 저하되기 때문에, 기존 건물의 보수 및 보강 작업이 필요하게 된다. 효율적인 보수 공법을 사용하면 더 적은 비용으로 콘크리트 구조물의 구조 성능을 기존 설계 강도보다 더 높게 발휘할 수 있도록 할 수 있다. 외부부착 탄소섬유 공법은 경량, 고강도, 내 부식성, 낮은 열 전도성 및 취급의 용이성과 같은 특성으로 인해 콘크리트 구조물을 빠르고 효율적으로 보강할 수 있는 공법이다.

탄소섬유를 사용하여 콘크리트 보의 전단보강에 관한 실험 연구는 많이 진행되었고 보고되었다. 대부분의 연구는 일 방향 탄소섬유를 사용하거나 부착 방지를 위한 앵커를 사용하지 않은 것이었다. Cao et al. (2005)은 완전히 감싸진 섬유 보강재를 사용하여 전단보강 효과를 검증하였다. 이 연구에서 사용된 섬유 보강공법은 실험 진행 전에 보강된 것이었으며, 앵커를 사용하지 않은 것이었다. Khalifa and Nanni (2000)의 연구에서는 섬유의 보강 방법, 섬유의 양 그리고 앵커의 효과

를 여섯 개의 보 실험체를 통하여 검증하였다. Bousselham and Chaallal (2008)은 전단 거동에 영향을 주는 스티럽의 간격과 섬유 보강재의 두께를 규명하였다. 이 실험에 사용된 탄소섬유의 방향성은 모두 일 방향이었으며 탄소섬유 앵커는 사용되지 않았다. 탄소섬유로 보강이 된 실험체의 경우 스티럽의 대부분은 항복하는 것으로 나타났다. Deniaud and Cheng (2003)은 연속 섬유 보강 시트를 사용하여 전단보강에 관한 실험 연구를 진행하였다. 실험을 통하여 스티럽이 과 보강되었을 때에는 섬유보강에 의한 효과가 크지 않다는 것을 확인하였다. Kim et al. (2014)의 연구는 탄소섬유의 부착 파괴를 방지하기 위하여 탄소섬유 앵커의 적용성을 검증하였다. 실험을 통하여 탄소섬유 앵커가 사용되면 탄소섬유 시트의 파단 변형률까지 도달하는 것을 알 수 있었다. Pellegrino and Modena (2006)는 탄소섬유와 스티럽의 상호 작용을 일 방향 탄소섬유 보강된 실험체를 사용하여 연구하였다. 실험에 근거하여 해석 모델을 제안하였으며, 전단보강에 있어서 스티럽의 중요성을 언급하였다. 이 이외에도 많은 선행 연구에서 섬유 보강 양에 관한 연구를 진행하였다. (Leung et al., 2007; Mofidi and Challal, 2011; Islam et al., 2005; Zhang and Hsu, 2005; Mofidi and Challal, 2014). 이 연구들을 통하여 콘크리트 보는 탄소섬유 시트를 사용하였을 때보다 스트립을 사용하였을 때 전단 보강 효과가 큰 것으로 확인되었다. 또한, 실험체 크기 효과의

¹정회원, 성균관대학교 박사 후 연구원

*Corresponding author: changhyuk@skku.edu

Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

영향은 명확하지 않았지만, 앵커의 부재로 인한 탄소섬유 재료의 탈락이 관측되었다. Kim et al. (2016, 2017)의 연구에서는 콘크리트 패넬을 사용하여 일 방향과 이 방향 탄소섬유 레이아웃의 보강 효과를 규명하였다. 이 방향 레이아웃으로 보강이 되었을 때, 균일한 변형률 분포를 얻을 수 있었다. 하지만 보 실험체를 사용한 전단보강 효과의 검증을 이루어지지 않았다.

콘크리트 보를 사용한 많은 실험연구를 통하여 탄소섬유를 사용한 전단보강의 효율성이 검증되었다. 대부분의 연구에서 고려된 변수는 다음과 같다. 탄소섬유의 양, 섬유의 각도, 탄소섬유의 부착을 방지하기 위한 앵커장치. 하지만 탄소섬유 앵커를 사용한 이 방향 탄소섬유 전단보강에 관한 연구는 많이 진행되지 않았다. 따라서 이 연구를 통하여 탄소섬유 앵커를 사용한 이 방향 전단보강의 유효성을 검증하고자 하였다. 총 10개의 콘크리트 보가 제작되었고 전단보강에 관한 다양한 변수들이 검증되었다. 실험체는 모두 휨 철근의 항복이 발생하기 전에 전단 파괴 모드가 발생하도록 설계되었다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 목적

이 연구에서는 외부부착 탄소섬유 공법을 사용하여 콘크리트 보의 전단보강 효과를 다음과 같은 세 가지 변수에 근거하여 검증하였다.

- (1) 전단보강 재료의 전단 기여도 - 동일한 탄소섬유 레이아웃 보강된 실험체에 두 가지의 스테리프 간격을 적용하여 두 재료의 상호 작용을 확인하였다.
- (2) 탄소섬유 레이아웃 - 동일한 탄소섬유 양을 사용하고, 일 방향과 이 방향 레이아웃의 전단보강 효과를 검증하였다.
- (3) 보강 시점 - 동일한 스테리프 배근과 탄소섬유 레이아웃을 사용하고, 보강 시점이 다른 실험체 비교를 통하여 보강 시점이 전단보강 효과에 미치는 영향을 검증하였다.

2.2 실험체 상세

이 실험 연구의 주된 목적은 이 방향 탄소섬유의 보강 효과와 보강 시점에 대한 검증이다. 이러한 변수를 검증하기 위하여 10개의 콘크리트 보 실험체가 제작되어 전단 실험이 진행되었다. Fig. 1은 이 연구에 사용된 실험체 표기법을 나타내고 있다. 첫 번째 글자는 탄소섬유의 레이아웃을 나타낸다. C는 무 보강 기준 실험체, U와 B는 각각 일 방향과 이 방향 탄소섬유 레이아웃을 의미한다. 두 번째 글자는 스테리프의 간격과 보수된 실험체를 의미한다. 100mm와 200mm의 스테리프 간격이

고려되었다. R 표시가 없는 실험체는 선 보강작업이 이루어진 실험체이며, R 표시가 있는 실험체는 후 보강 작업이 이루어진 실험체이다. 후 보강 실험체의 경우, 설계 하중의 60퍼센트까지 가력이 진행되었고, 그 이후 탄소섬유를 사용하여 보강작업이 이루어졌다.

콘크리트 보 실험체의 단면은 300×500mm이며 길이는 3,000mm이었다. 하중은 실험체의 중앙부에 작용하였으며, 전단에 의한 파괴 모드를 나타내도록 설계되었다. 실험체의 주철근은 D25를 사용하였고, 스테리프는 D6 철근을 사용하였다. 또한 실험체의 전단 경간 비율은 3.0으로 고정하였다. Table 1은 스테리프와 탄소섬유 스트립의 상세를 나타낸다.

콘크리트 보 실험체가 제작된 후 탄소섬유의 부착을 위하여 실험체의 표면은 연마되었고, 모든 모서리는 반경 13mm의 둥근 모서리처리가 되었다. 탄소섬유 스트립은 에폭시 프라이머 작업 이후에 전단 실험 구간에 부착되었다. 수직 방향 탄소섬유는 보 실험체 상부에서 겹침 이음을 하였고, 수평 방향 탄소섬유는 탄소섬유를 사용하여 탄소섬유 부착파괴를 방지할 수 있도록 하였다. 탄소섬유 앵커와 스트립의 면적 비율은 2.0이 되도록 탄소섬유 앵커의 양을 정하였다. 일 방향 보강 실험체에 사용된 수직 방향 탄소섬유의 양은 스테리프의 전

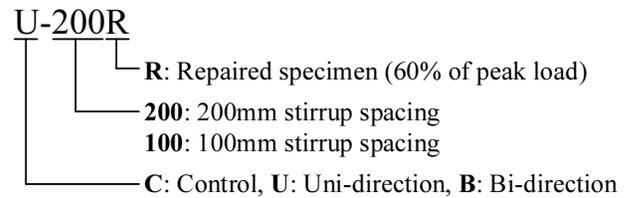


Fig. 1 Nomenclature of test specimens

Table 1 Test specimen details

	Stirrup		CFRP strip				
	f_f (MPa)	s (mm)	f_f (MPa)	w_{fv} (mm)	s_{fv} (mm)	w_{fh} (mm)	s_{fh} (mm)
C-200	340	200				N/A	
U-200				100	200		
U-200R	340	200	4,600	100	200		N/A
B-200				50	200	50	100
B-200R				50	200	50	100
C-100	340	100				N/A	
U-100				100	200		
U-100R	340	100	4,600	100	200		N/A
B-100				50	200	50	100
B-100R				50	200	50	100

단 강도와 거의 유사하게 정해서 전단 강도 기여도를 비교할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 이 연구에서 고려된 변수들의 차이를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 동일한 탄소섬유 레이아웃과 두 개의 스테럽 간격을 가진 두 개의 실험체 그룹이 제작되었다. 두 그룹에서 고려된 스테럽의 간격은 각각 200mm와 100mm이다. 이 실험체 그룹을 통하여 스테럽과 탄소섬유 재료의 전단 기여도를 검증할 수 있다. Fig. 2(b)는 동일한 탄소섬유의 양을 사용하고 두 개의 다른 탄소섬유 레이아웃을 사용하여 보강된 실험체를 나타낸다. 이때 사용된 스테럽의 양은 동일하며, 일 방향 레이아웃의 경우 탄소섬유의 폭과 간격은 각각 100mm와 200mm이다. 일 방향 레이아웃과 이 방향 레이아웃에 사용된 탄소섬유의 양은 동일하도록 이 방향 레이아웃에 사용된 수직과 수평 방향 탄소섬유의 폭은 50mm로 정하였다. 동일한 탄소섬유의 양이 사용되었을 때, 탄소섬유의 레이아웃의 영향을 검증할 수 있다. Fig. 2(c)는 탄소섬유 보강 시점의 영향을 검증하기 위한 실험체를 나타낸다. 첫 번째 그룹은 하중이 작용하기 전에 탄소섬유 보강작업이 이루어졌다. 두 번째 그룹은 탄소섬유 보강 없이 사용 하중 상태까지 먼저 가력되었고, 하중이 제거된 이후 탄소섬유를 사용하여 전단보강이 이루어졌다. 이 그룹을 통하여 탄소섬유 보강 시점에 관한 영향력을 검증할 수 있다.

2.3 실험 방법 및 장치

Fig. 3은 Linear Voltage Displacement Transducers (LVDTs), 탄소섬유에 부착된 스트레인 게이지와 가력점의 위치를 나타내고 있다. 가력점의 처짐을 측정하기 위해 두 개의 LVDT를 설치하였다. 탄소섬유에 부착된 스트레인 게이지는 예상 사인장

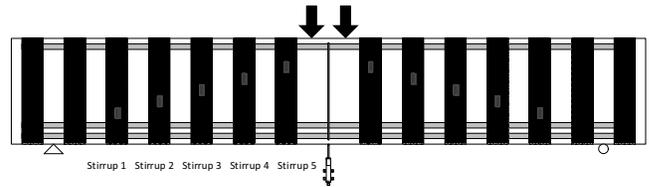


Fig. 3 Location of LVDTs and strain gages for CFRP strips

균열의 위치에 부착되었다. 스테럽의 변형률은 스테럽에 부착된 스트레인 게이지를 통해 계측하였다. 탄소섬유와 스테럽에 사용된 스트레인 게이지는 동일한 위치에 부착하여, 두 재료의 거동 비교를 할 수 있도록 하였다.

단조 가력 하중은 최대하중 이후 최대하중의 85퍼센트까지 가력되었다. 가력은 변위 제어로 이루어졌으며 속도는 0.01 mm/sec으로 진행되었다.

2.4 실험 재료

실험에 사용된 콘크리트의 설계 강도는 30MPa이었고 28일 강도는 28MPa로 측정되었다. Table 2는 실험에 사용된 철근의 재료실험 결과를 나타낸다. 스테럽과 주철근에 사용된 D6와 D25 철근의 항복강도는 각각 340과 660MPa이었다. Table 2에 표시된 재료 성질은 실험체의 전단과 휨강도 계산에 사용되었다. 탄소섬유는 ASTM D 3039에 따라 인장실험이 진행되었으며, 인장강도와 탄성계수는 각각 4,600MPa과 288,900MPa으로 측정되었다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 일반 사항

총 10개 실험체의 실험 결과는 Table 3에 나와 있다. ACI 318-14에 근거한 전단 강도와 측정된 최대 전단 내력을 정리하였으며, 두 값의 비율을 함께 표기하였다. 스테럽과 탄소섬유의 최대 변형률 값은 최대하중에서 측정된 것이다. 표에서 확인할 수 있듯이 탄소섬유 보강된 실험체는 탄소섬유 스테럽의 파단으로 인하여 파괴되었다. 전단 공간에 부착된 탄소섬유는 최대 하중 도달 직전에 파단하기 시작하였다. Fig. 4는 실험에서 관측된 두 파괴 모드를 나타내고 있다. 탄소섬유 보

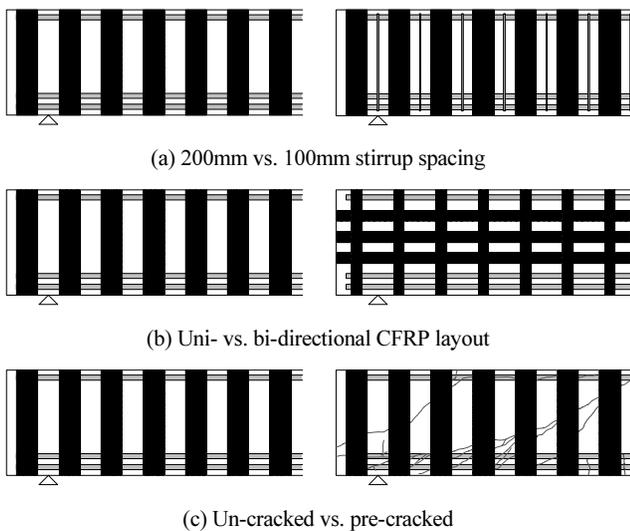


Fig. 2 Variables of test specimens

Table 2 Material properties

	Stirrup, D6	Longitudinal bar, D25
f_y (MPa)	340	660
ϵ_y	0.0023	0.0034
E (MPa)	148,000	195,000

강 작업 시 충분한 길이의 겹침 길이를 확보하였고, 탄소섬유 앵커를 사용하였기 때문에 탄소섬유 스트립의 부착 파괴는 발생하지 않았다. 스트레인 게이지 값을 통하여 전단 경간에 위치한 모든 스티럽이 항복한 것을 알 수 있었다.

3.2 스티럽과 탄소섬유의 전단 기여도

Fig. 5는 콘크리트, 스티럽과 탄소섬유에 의한 전단 기여도를 나타내고 있다. x-축과 y-축은 각각 전단 강도와 재료의 전단 기여도를 의미한다. 그림에서 파선으로 표시된 수직선은 스티럽의 항복 시작점을 나타낸다. 제일 아래에 위치한 그래프는 스티럽에 의한 전단 내력이고, 중간에 위치한 그래프는 탄소섬유에 의한 전단 내력이다. 콘크리트의 기여도는 실험체에 작용한 하중에서 스티럽과 탄소섬유의 전단 내력을 제거하여 계산하였다. 모든 실험체에서 전단 내력 기여도 경향은 유사하였기 때문에 대표적인 실험체 U-200과 U-100의 결과만 나타냈다. 콘크리트의 균열 이후(약 200 kN)에는 스티럽과 탄소섬유에 의한 전단 기여도가 높아지는 것을 알 수 있었다. 콘크리트의 균열 시작점은 스티럽 간격과 무관하게 발생하였다. 대부분의 스티럽은 최대 하중에 도달하기 전에

항복하였고, 탄소섬유 스트립의 전단 기여도는 스티럽의 항복과 동시에 더 증가하는 것을 확인하였다. 콘크리트의 전단 기여도는 스티럽의 간격이 작을수록 감소하였다. 하지만 탄소섬유의 전단 기여도는 스티럽의 간격이 작을수록 증가하였다.

각 재료의 전단 기여도는 Table 4에 나타났다. U-200의 경우, 탄소섬유의 양은 탄소섬유의 전단 기여도가 스티럽의 전단 기여도보다 약 18퍼센트 크게 설계되었다. 하지만 실험 결과 스티럽에 의한 전단 기여도보다 탄소섬유에 의한 전단 기여도가 약 35퍼센트 크게 측정되었다. 스티럽의 간격이 좁을 때는 $V_{f,test}/V_{s,test}$ 의 값이 $V_{f,ACI}/V_{s,ACI}$ 에 비교하여 큰 것을 알 수 있었다. 평균적으로 200mm 스티럽 간격이었을 때는 1.3배 차이가 났지만, 100mm 간격이었을 때는 2.3배 차이가 발생하였다. 이러한 결과는 탄소섬유에 의한 보강 효과가 전단보강근의 양에 따라 변화하는 것을 의미한다. 탄소섬유의 보강 효과는 전단보강근의 양이 더 많았을 때 큰 것을 확인하였다.

3.3 일 방향과 이 방향 탄소섬유 레이아웃

일 방향과 이 방향 레이아웃을 사용한 실험체를 통하여 전단보강에 대한 탄소섬유 레이아웃의 영향을 규명하였다. 스티럽에 발생한 변형률을 비교하여 탄소섬유 레이아웃의 전단

Table 3 Test results

	V_{ACI} (kN)	V_{test} (kN)	V_{test}/V_{ACI}	$\epsilon_{s,max}$	$\epsilon_{f,max}$	Failure mode
C-200	179	360	2.01	0.0147	-	Shear-compression
U-200	235	473	2.01	0.0133	0.0075	Strip fracture
U-200R	235	519	2.21	0.0150	0.0101	Strip fracture
B-200	207	379	1.83	0.0137	0.0081	Strip fracture
B-200R	207	419	2.02	0.0109	0.0079	Strip fracture
C-100	226	356	1.57	0.0131	-	Shear-compression
U-100	282	560	1.99	0.0163	0.0127	Strip fracture
U-100R	282	581	2.06	0.0163	0.0126	Strip fracture
B-100	254	471	1.85	0.0143	0.0102	Strip fracture
B-100R	254	496	1.95	0.0157	0.0104	Strip fracture



(a) CFRP strip fracture (b) shear failure

Fig. 4 Failure modes

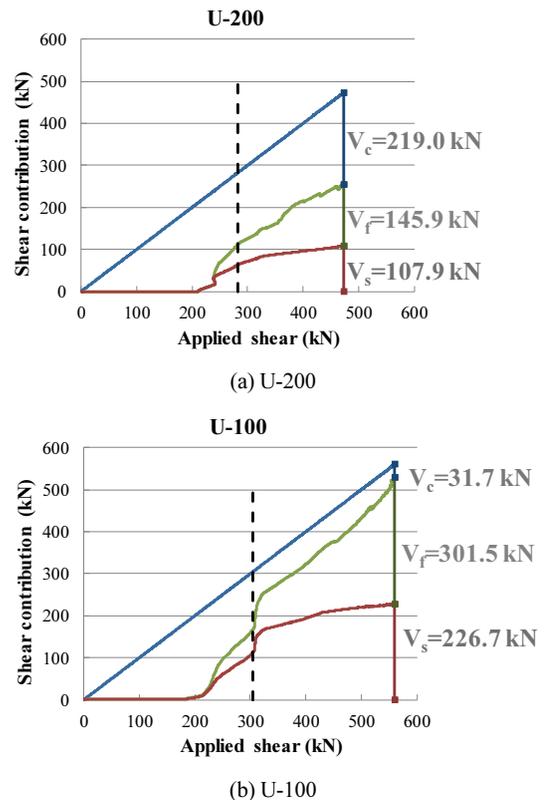


Fig. 5 Shear contribution of concrete, stirrup, and CFRP strip

Table 4 Shear contribution of materials

	$V_{c,test}/V_{c,ACI}$	$V_{s,test}/V_{s,ACI}$	$V_{f,test}/V_{f,ACI}$	$V_{f,ACI}/V_{s,ACI}$	$V_{f,test}/V_{s,test}$
C-200	1.96	2.13	-	-	-
U-200	1.66	2.29	2.63	1.18	1.35
U-200R	1.17	2.33	4.60	1.18	2.32
B-200	1.62	2.22	2.14	0.59	0.57
B-200R	1.86	2.17	2.56	0.59	0.69
C-100	1.24	2.04	-	-	-
U-100	0.24	2.41	5.44	0.59	1.33
U-100R	0.48	2.07	5.81	0.59	1.65
B-100	0.89	2.41	4.60	0.29	0.56
B-100R	0.86	2.41	5.62	0.29	0.69

보강 효과를 확인하였다. Fig. 6은 스티럽의 위치에 따른 스티럽의 변형률을 나타낸다. 200 kN부터 50 kN 단위의 전단력이 작용하였을 때의 변형률 분포를 비교하였다. 200 kN 이하의 전단력에서는 변형률이 거의 발생하지 않았기 때문에 표시하지 않았다. x-축과 y-축은 각각 스티럽의 위치와 변형률을 나타낸다. Stirrup 1은 실험체 왼쪽 반력점 부근의 스티럽 위치를 나타내고, Stirrup 5는 실험체 가력점 부근의 위치를 나타낸다. 스티럽에 부착된 스트레인 게이지의 위치는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 그림에 표시된 두꺼운 수평 실선은 스티럽의 항복 변형률을 나타낸다.

일반적으로 전단력이 약 300 kN를 넘을 때 스티럽의 항복은 시작하였으며, 모든 실험체의 스티럽은 항복하였다. 스티럽의 변형률 분포는 일반적으로 모든 실험체에서 유사하게 나타났기 때문에 Fig. 6에는 스티럽 간격이 200mm인 실험체를 나타냈다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 일 방향 레이아웃으로 보강되었을 때보다 이 방향 레이아웃으로 보강되었을 때 스티럽의 변형률이 더 작은 값을 나타내고 변형률이 고르게 분포한 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어서 U-200 실험체의 경우, 전단력이 250 kN을 넘었을 때 항복하는 스티럽이 발생하기 시작하였다. 하지만 B-200 실험체의 경우 전단력이 300 kN을 넘었을 때 스티럽이 항복하기 시작하였다. 또한 항복 이전의 변형률 분포를 보면, 일 방향 레이아웃으로 보강된 실험체에서는 특정 지점에서 변형률이 높은 것을 볼 수 있었지만, 이 방향 레이아웃을 사용한 실험체에서는 변형률의 분포가 고른 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 콘크리트 패널을 사용하여 일 방향과 이 방향 레이아웃의 보강 효과에 관한 연구에서도 확인할 수 있었다.

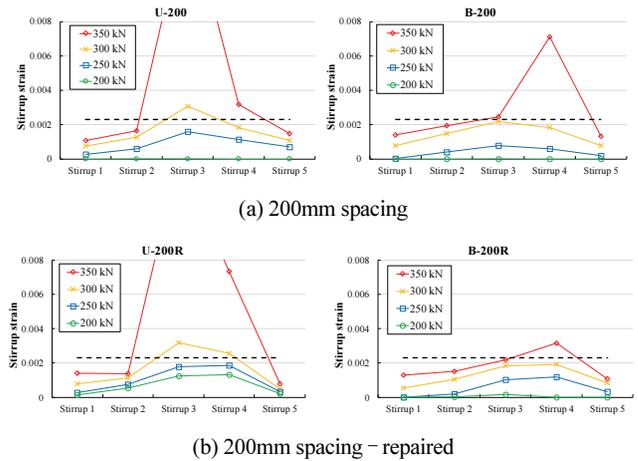


Fig. 6 Stirrup strains of the test specimens

3.4 보강 시점

동일한 스티럽 간격과 탄소섬유 레이아웃을 사용하여 보강 시점 검증을 위한 실험을 진행하였다. 실험체 명에 R이 없는 실험체는 선 보강작업이 이루어진 후 실험체가 파괴될 때까지 가력을 하였다. 실험체 명에 R이 표기된 실험체는 사용 하중 상태까지 가력이 진행된 후, 하중을 제거하고 보강 작업을 진행하였다. 그 이후 실험체가 파괴될 때까지 가력이 진행되었다.

Table 5에는 ACI 318-14 전단 설계식을 사용한 계산 결과와 실험 결과의 비교가 정리되어 있다. ACI 318-14의 전단 내력 평가식에는 보강 작업에 관한 변수가 고려되어 있지 않기 때문에 선 보강 실험체와 후 보강 실험체의 전단 강도가 동일하게 계산되었다. 하지만 실험 결과에 따르면 보강 작업의 시기에 따라 강도가 변화한 것을 알 수 있었다. 모든 실험체에서 최대 전단강도는 후 보강작업이 이루어졌을 때 선 보강작업이 이루어졌을 때보다 증가한 것을 확인하였다. 스티럽 간격이 200mm일 경우에는 내력이 평균 10.2퍼센트 증가하였으며, 간격이 100mm일 경우에는 평균 4.6 퍼센트 내력이 증가

Table 5 Increase of maximum shear force according to repairing point

	$V_{max,ACI}$ (kN)	$V_{max,test}$ (kN)	Increase of $V_{max,test}$ (kN)	Increase percentage
U-200	235	473	-	-
U-200R	235	519	46	9.8
B-200	207	379	-	-
B-200R	207	419	41	10.7
U-100	282	560	-	-
U-100R	282	581	21	3.8
B-100	254	471	-	-
B-100R	254	496	25	5.4

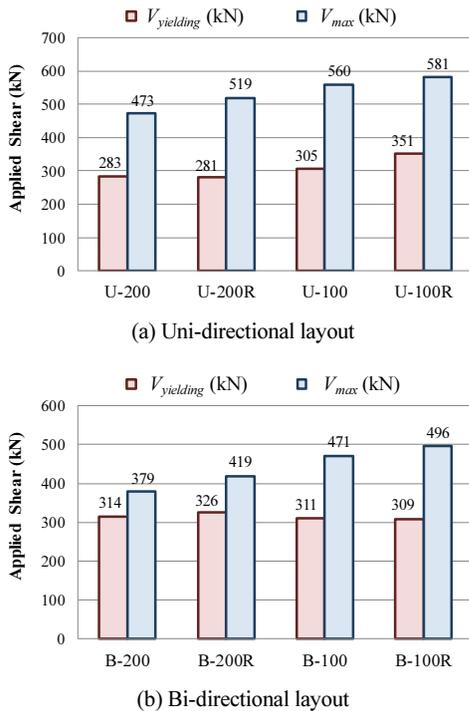


Fig. 7 Comparison of the yield and maximum strength

하였다. 스테럽 간격이 넓을 경우 탄소섬유에 의한 보강 효과가 더 큰 것을 확인하였다.

Fig. 7은 일 방향과 이 방향 실험체의 항복 강도와 최대 강도를 나타낸다. 후 보강작업이 이루어졌을 때 최대 강도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만 보강 작업의 시점이 스테럽의 항복 시점에 영향을 미치지 않았다. 후 보강작업이 이루어졌을 때 거의 동일하거나 근소한 항복강도 증가를 확인하였다.

4. 결론

외부부착 탄소섬유를 사용하여 전단보강의 효과를 검증하기 위하여 10개의 콘크리트 보 실험체가 제작되었다. 실험체는 다양한 변수를 반영하여 보강 작업이 이루어졌으며, 탄소섬유의 부착파괴를 방지하기 위하여 탄소섬유 앵커를 제작하여 부착하였다. 보강된 모든 실험체는 탄소섬유 파단에 의한 전단 파괴 모드를 나타냈으며 휨 파괴는 발생하지 않았다. 또한, 파괴하중에 도달하기 전까지 모든 실험체에서 탄소섬유 시트의 탈락은 관측하지 못하였다.

이 실험 연구를 통하여 스테럽과 탄소섬유 재료의 전단 기여도와 탄소섬유 레이아웃에 따른 전단보강 효과 그리고 보강 시점에 관한 효과를 검증할 수 있었다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유사한 전단 기여도를 갖도록 설계된 실험체 (U-200, U-200R)의 비교를 통하여 탄소섬유에 의한 전단 기여도가 스테럽에 의한 전단 기여도보다 약 84 퍼센트 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 탄소섬유에 의한 전단보강 효과는 스테럽의 양에 따라 변화하였다. 일반적으로 스테럽의 양이 더 많을 때, 탄소섬유의 전단보강 효과가 더 큰 것을 알 수 있었다.
- (2) 이 방향 탄소섬유 레이아웃을 사용하였을 때 스테럽의 변형률이 더 작은 값을 나타내고 변형률이 고르게 분포한 것을 확인할 수 있었다. 일 방향 레이아웃을 사용하였을 때는 특정 위치의 변형률이 높게 측정되었지만, 이 방향 레이아웃을 사용하였을 때는 균일한 분포를 확인하였다.
- (3) 보강 작업 시기에 따라 전단 강도가 변화한 것을 알 수 있었다. 최대 전단 강도는 후 보강작업이 이루어졌을 때 모두 증가한 것을 확인하였다. 후 보강작업을 통해 스테럽 간격이 200mm와 100mm일 경우에 내력은 각각 10.2 퍼센트, 4.6퍼센트 증가하였다. 이와 같은 현상은 균열 각도에 의한 전단보강 재료의 기여도가 변화한 것으로 판단된다. 하지만 보강 작업의 시점이 스테럽의 항복 시점에 영향을 미치지 않았다.
- (4) 탄소섬유 앵커를 사용하여 탄소섬유 보강 작업이 이루어졌을 경우, 파괴 하중에 도달하기 전까지 탄소섬유 시트의 탈락은 일어나지 않았다. 탄소섬유 앵커를 사용하였을 경우 효과적으로 부착 파괴를 방지할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 학문후속세대양성사업 (NRF-2016R1A6A3A11931420)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

Bousselham, A., and Chaallal, O. (2008), Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded FRP, *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 499-512.

Cao, S. Y., Chen, J. F., Teng, J. G., and Chen, J. (2005), Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps, *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 417-428.

Deniaud, C., and Cheng, J. J. R. (2003), Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Fiber Reinforced Polymer Sheets,

- Journal of Composites for Construction*, 7(4), 302-310.
- Islam, M. R., Mansur, M. A., and Maalej, M. (2005), Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, *Cement and Concrete Composites*, 27, 413-420.
- Khalifa, A., and Nanni, A. (2000), Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites*, 22, 165-174.
- Kim, C., Ghannoum, W. M., and Jirsa, J. O. (2016), Behavior of Reinforced Concrete Panels Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP), *ACI Structural Journal*, 113(5), 1077-1084.
- Kim, C., Jirsa, J. O., and Ghannoum, W. M. (2017), Performance of Concrete Panels Reinforced with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Materials, *Journal of Composites for Construction*, ASCE., 21(3), 04016100-1 - 8.
- Kim, Y., Quinn, K., Ghannoum, W. M., and Jirsa, J. O. (2014), Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams Using Anchored CFRP Materials, *ACI Structural Journal*, 111(5), 1027-1036.
- Leung, C. K. Y., Chen, Z., Lee, S., Ng, M., Xu, M., and Tang, J. (2007), Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP Strips, *Journal of Composites for Construction*, 11(5), 487-496.
- Mofidi, A., and Chaallal, O. (2011), Shear Strengthening of RC Beams with Externally Bonded FRP Composites: Effect of Strip-Width-to-Strip-Spacing Ratio, *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 732-742.
- Mofidi, A., and Chaallal, O. (2014), Effect of Steel Stirrups on Shear Resistance Gain Due to Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Strips and Sheets, *ACI Structural Journal*, 111(2), 353-362.
- Pellegrino, C., and Modena, C. (2006), Fiber-Reinforced Polymer Shear Strength of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study and Analytical Modeling, *ACI Structural Journal*, 103(5), 720-728.
- Zhang, Z., and Hsu, C. T. (2005), Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *Journal of Composites for Construction*, 9(2), 158-169.

Received : 06/27/2018

Revised : 06/27/2018

Accepted : 10/19/2018

요 지 : 기존 콘크리트 구조물의 노후화 또는 지진과 같은 외부 하중에 의하여 구조물의 구조 성능이 저하되기 때문에, 기존 건물의 보수 및 보강 연구는 중요하다. 외부부착 탄소섬유 보강 공법과 같은 효율적인 보수 공법을 사용하면 경제적으로 콘크리트 구조물의 구조 성능을 높일 수 있다. 따라서 외부부착 탄소섬유를 사용한 콘크리트 부재의 실험 연구는 많이 진행되었다. 특히, 콘크리트 보를 사용한 전단 보강에 관한 연구는 탄소섬유의 양, 부착 각도, 스트립의 폭, 그리고 재료간의 상호작용에 관한 것이었다. 하지만 선행된 연구에 비하여 탄소섬유의 이 방향 레이아웃에 관한 다양한 변수 연구는 부족한 상황이다. 따라서 이 연구에서는 이 방향 레이아웃 외부부착 탄소섬유 공법을 사용하여 콘크리트 보의 전단보강 효과를 검증하였다. 이 방향 레이아웃의 보강 효과는 스티럽과의 전단 기여도, 실험체의 전단 거동과 보강 시점에 따른 최대 내력의 비교를 통하여 이루어졌다.

핵심용어 : 이 방향 레이아웃, 탄소섬유 보강, 전단보강, 전단 보강 시점
