

재하상태에 따른 탄소섬유쉬트 및 강판의 전단 보강 효과

Shear Strengthening of Pre-loaded RC Beams Retrofitted with CFS & Steel Plate

김 주 연* 신 영 수** 홍 건 호***
Kim, Ju Yeon Shin, Yeong Soo Hong, Geon Ho

ABSTRACT

This paper was aimed to investigate the shear strengthening effect of the pre-loaded reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheet (CFS) & steel plate. Main test parameters were the magnitude of pre-loading at the time of the retrofit, the strengthening methods of carbon fiber sheet and a/d ratio. A series of seventeen specimens was tested to evaluate the corresponding effect of each parameters such as maximum load capacity, load-deflection relationship, load-strain relationship and failure mode. As a result, using the steel plate can increase the capacity of not only shear but also bending moment.

keywords : shear strengthening, pre-loaded, reinforced concrete, CFS, steel plate, retrofitted

1. 서론

국내에서 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물의 보강공법으로는 강판, 탄소섬유, 유리섬유 등을 부재 외부에 부착하는 부착식 보강공법들이 널리 사용되고 있는데 이중 작업성이 뛰어나고 재료의 부식 염려가 없는 탄소섬유와 재료구입이 용이하고 보강효과가 확실한 강판보강이 최근 보강재료로 널리 사용되고 있으며 이에 따른 연구도 많이 이루어지고 있다. 기존의 논문들을 살펴보면 이러한 보강공법들의 휨 성능 향상에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔지만, 취성파괴를 일으키는 전단 거동에 대해서는 아직 연구가 미흡한 실정이다. 뿐만 아니라 실제 구조물의 경우에는 하중이 지속적으로 작용하고 있는 가운데 보강이 이루어지므로 보강재료와 원부재 사이에서 초기변형율의 차이가 발생하게 되므로 이에 대한 고려가 보강 설계시 필요하게 된다. 따라서 실제 구조물과 유사한 환경에서 실험한 전단보강 효과에 관한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 보강재료, 보강시 재하수준과 탄소섬유 보강형식 (Jacket, Strip형), a/d 비등을 변수로 두어 하중이 가력된 상태에서 보강한 탄소섬유쉬트와 강판의 전단보강 효과를 알아보려고 한다.

2. 실험 계획 및 방법

* 성희원, 이화여자대학교 건축학과 석사과정

** 정희원, 이화여자대학교 건축학과 교수

*** 정희원, 호서대학교 건축학과 교수

본 연구에서는 보강시점에서 부재의 하중 재하정도에 따른 전단보강효과를 연구하기 위해 기본시험체의 최대 전단내력의 0%, 30%, 50%, 70%를 가력한 상태에서 강판과 jacket형과 strip형의 탄소섬유를 보강하였다. 시험체 크기는 20×35×230cm에 순지간186cm(a/d=2), 20×35×320cm에 순지간279cm(a/d=3)의 3등분점 재하로 단순보 상태에서 가력하여 재하상태에서 보강을 실시하였다. jacket형의 탄소섬유는 보중앙에서 31cm 떨어진 부분에서부터 길이 72cm씩 2점으로, strip형은 같은 위치에 10cm씩 번갈아가며 4줄(길이40cm) 2점으로 보강하였고 강판은 a/d=2일 때 보중앙에서 31cm 떨어진 부분에서부터 길이 72cm씩, a/d=3일 때 보중앙에서 36.5cm 떨어진 부분에서부터 길이 103cm씩 옆면에 보강하였다. 부재의 사용성 및 강성의 변화를 분석하기 위해 시험체의 중앙 및 1/4지점에 LVDT를 설치하여 수직 처짐을 측정하였으며 모멘트가 일정한 부재 중앙 측면에 스트레인 게이지 및 수평방향의 LVDT를 상·하에 설치하여 스트레인 게이지가 파단된 후에도 하중 증가에 따른 부재의 곡률변화를 관찰할 수 있도록 하였다. 또 CFS와 강판 보강 후 보강재가 부담하는 전단내력을 알아보기 위해 전단력이 일정한 부위에 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험에 사용한 재료의 물성은 표2와 같다.

표 1 시험체의 구성

구분	시험체치수 (cm)	주근		스티립	보강 재료	a/d 비	보강 형식	보강사 재하중력	비고
		상부근	하부근						
CON-NOS	20×35×230	2-D19	3-D25	-	-	2	-	-	전단무보강
CONTROL	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	-	2	-	-	기본시험체
CON-CFJ	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Jacket	-	무재하상태보강
CFLJ	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Jacket	0.3Vn	재하중보강
CFMJ	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Jacket	0.5Vn	재하중보강
CFHJ	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Jacket	0.7Vn	재하중보강
CON-CFS	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Strip	-	무재하상태보강
CFLS	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Strip	0.3Vn	재하중보강
CFMS	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Strip	0.5Vn	재하중보강
CFHS	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	CFS	2	Strip	0.7Vn	재하중보강
CON-SP2	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	강판	2	-	-	무재하상태보강
SPL2	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	강판	2	-	0.3Vn	재하중보강
SPM2	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	강판	2	-	0.5Vn	재하중보강
SPH2	20×35×230	2-D19	3-D25	D6@150	강판	2	-	0.7Vn	재하중보강
CONTROL3	20×35×320	2-D19	3-D25	D6@150	-	3	-	-	기본시험체
SPM3	20×35×320	2-D19	3-D25	D6@150	강판	3	-	0.5Vn	재하중보강
SPH3	20×35×320	2-D19	3-D25	D6@150	강판	3	-	0.7Vn	재하중보강

표 2 사용재료의 역학적 성질

콘크리트		철근		예폭시 (균열보수)		
압축강도	탄성계수	인장강도	탄성계수	압축강도	탄성계수	인장강도
311kgf/cm ²	2.55×10 ⁶ kgf/cm ²	3745kgf/cm ²	1.45×10 ⁶ kgf/cm ²	600kgf/cm ²	15-35×10 ⁶ kgf/cm ²	350kgf/cm ²
강판			탄소섬유			
두께	인장강도	탄성계수	두께	설계강도	인장강도	탄성계수
0.23cm	3063kgf/cm ²	1.8×10 ⁶ kgf/cm ²	0.011cm	11800kgf/cm ²	23600kgf/cm ²	2.35×10 ⁶ kgf/cm ²

3 실험결과 및 분석

3.1 시험체의 파괴 양상

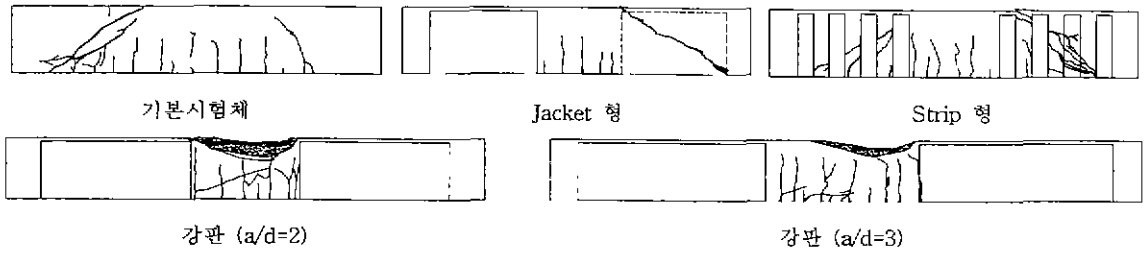


그림 1. 시험체의 파괴양상

대표적인 시험체의 균열의 형태는 그림1과 같다. CFS로 보강한 시험체는 전반적으로 초기에는 부재 중앙부에서 휨에 의한 균열이 발생하다가 점차적으로 지점주위에서 사인장균열이 발생하는 전단파괴 형태를 보여주고 있다. 이와는 달리 강판보강 시험체는 초기에는 부재 중앙부에서 휨에 의한 균열이 발생하기 시작하여 점차적으로 지점주위에서 가력점을 잇는 사인장균열이 발생하였다. 강판 보강 후에는 보중앙 부분에 휨에 의한 균열이 확장되면서 점차적으로 보의 상단부에 압축파괴가 발생하여 콘크리트가 떨어져 나가면서 전단이 아닌 최대 휨내력에 도달하는 전형적인 휨파괴를 하였다. 또 설계내력에 도달하기까지 시험체와 강판 사이의 탈락현상도 나타나지 않았다. 이는 강판이 충분히 전단보강이 되어 시험체가 휨파괴로 유도되었기 때문이라고 볼 수 있다. CFS로 보강한 시험체의 균열 발생후의 양상은 CFS와 콘크리트가 일체로 거동하다가 전단균이 항복한 후 균열을 잡아주는 탄소섬유가 항복하기 전에 계면파괴가 일어나 전단내력이 급격히 떨어지는 취성파괴 양상을 보였다. 그러므로 실험의 분석 결과 CFS의 보강효과 연구시 CFS의 인장강도 뿐 아니라 부착파괴에 관한 고려가 있어야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 보강시 재하 레벨별 CFS 보강 효과 비교 분석

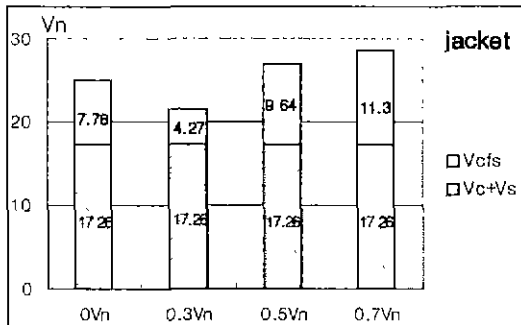


그림 2(a). CFS Jacket형

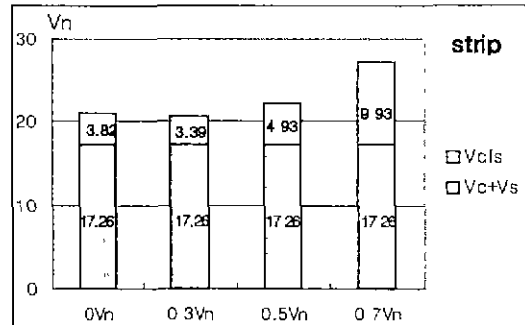


그림 2(b). CFS Strip형

위의 그림은 탄소섬유 Jacket형과 Strip형 각각에 대한 보강 효과를 비교한 것이다. 그림을 살펴보면 0.3Vn 시험체(CFLJ, CFLS)의 Vcfs값은 각각 4.27, 3.39로 0Vn 시험체인 CON-CFJ와 CON-CFS의 Vcfs값(7.78과 3.82)보다 작게 나타나고 있다. 반면 나머지 0.5Vn과 0.7Vn 시험체(CFMJ, CFMS, CFHJ, CFHS)는 0Vn 시험체보다 Vcfs값이 크며, CONTROL 시험체를 제외한 나머지 시험체들만을 비교하여보면 보강시 재하하중의 정도가 커질수록, 즉 0.3Vn, 0.5Vn, 0.7Vn으로 갈수록 Vcfs의 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 탄소섬유 보강 전 선행 가력에 의해 발생한 균열의 예측시 균열 보수

시, 재하레벨이 커져 균열의 폭이 커질수록 에폭시의 부착면적이 증가되어 균열 보수보강재의 부착강도가 향상되어 나타난 결과로 보강시 재하 레벨에 비례하여 내력 증가한다는 것을 알 수 있다.

3.3 보강 형식에 따른 CFS 보강 효과 분석

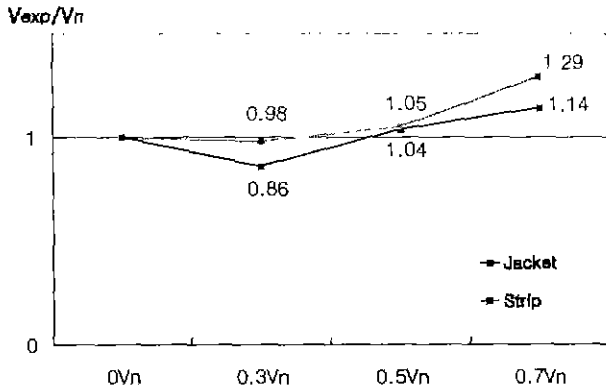


그림 3. CFS 시험체의 V(계산치) / V(실험치)

옆 그래프는 V_n 의 실험값(②)/계산값(①)의 비를 재하레벨별로 각각 비교한 결과이다. 그림을 보면 보강시 재하하중레벨이 30%, 50%, 70% 일 때 모두 Jacket 형식보다 Strip 형식이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 CFS 보강형식에 있어 Jacket 형식의 보강보다는 Strip 형식이 더 효율적이라는 것을 말하여준다. 이는 짧은 길이를 각각 끊어서 보강하는 Strip 형식에 비해 보다 넓은 면적을 한꺼번에 이어서 보강하는 Jacket 형식이 연속 전단 흐름(continuous shear flow)을 형성해 Strip 형식

에 비해 계면파괴가 먼저 발생하게 되기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 탄소섬유로 철근콘크리트보를 전단 보강을 할 때는 같은 양의 탄소섬유를 Strip 형식으로 보강하는 것이 작업성도 훨씬 뛰어날 뿐 아니라 Jacket 형식에 비해 작은 양으로 더 큰 보강 효과도 얻을 수 있다.

3.4 강판의 하중-처짐 곡선

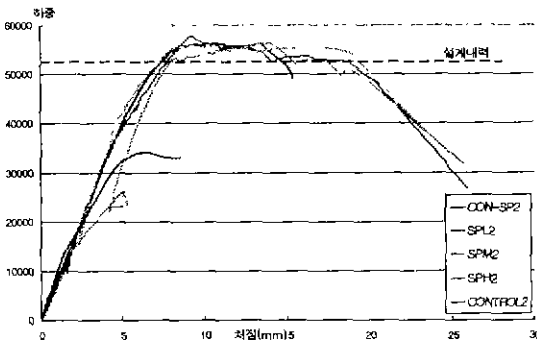


그림 4(a) a/d=2 일 때

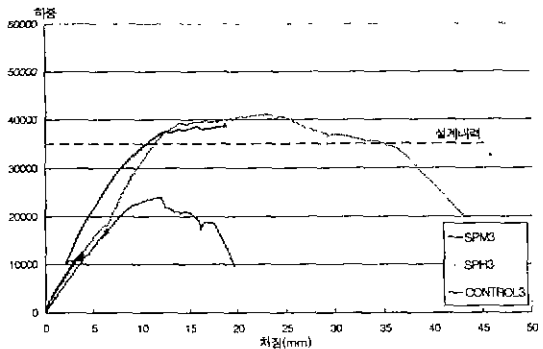


그림 4(b). a/d=3 일 때

강판 보강에 따른 부재의 하중-처짐 곡선은 위그림과 같다. 그림에서 나타나듯이 강판으로 보강된 시험체는 탄소섬유로 보강시 나타났던 취성파괴와는 다르게 최대 내력 이후 처짐량이 증가하면서 서서히 내력이 감소하는 전형적인 휨파괴 양상을 보여준다. 그리고 a/d의 비가 2와 3인 시험체 모두가 설계내력을 넘게 휨내력에 전다는 것으로 보아 강판의 전단보강이 시험체의 휨성능에도 영향을 미쳐 최대 내력이 증가된 것이라 할 수 있다. 여기서 초기 접선 기울기를 살펴보면 a/d의 비가 3인 경우의 시

험체는 모두 강판으로 보강한 뒤의 기울기가 기준시험체(CONTROL3)보다 큰 값을 나타낸다. 하중-처짐 곡선에서의 초기 접선의 기울기는 부재의 강성과 비례관계를 가지는데 이것으로 보아 강판의 전단 보강이 a/d 의 비가 클수록 시험체의 강성을 증진시키는 데 기여한다는 것을 알 수 있다. 또한 보강시 가력되어 있는 하중이 50%, 70%로 커질수록 강성도 증가해 보강시의 보의 손상정도가 심할수록 전단 보강된 강판이 휨강성에 기여하는 정도가 큰 것으로 분석할 수 있다.

3.2.3 강판 시험체의 변형을

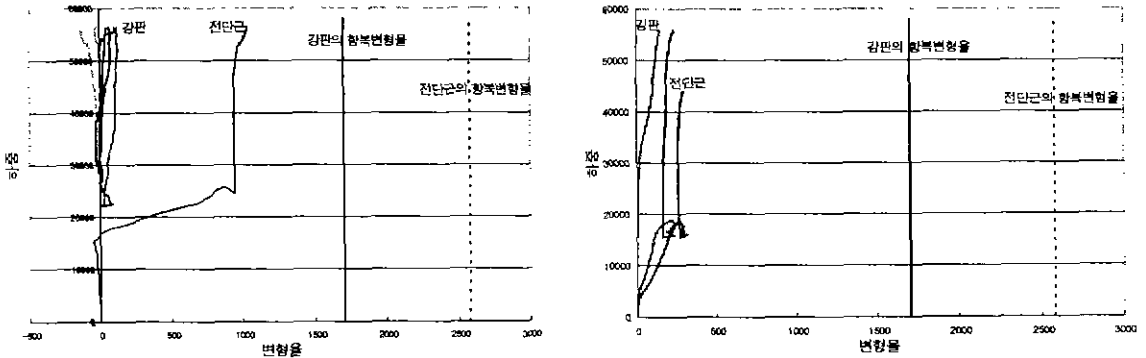


그림 5. 강판과 전단근의 변형률

윗 그림은 강판보강 시험체의 하중에 따른 스티럽과 강판의 대표적인 전단 strain 그래프이다. 각 그래프에서 보여지듯이 초기에 하중을 가력했을 때에는 스티럽만이 전단력을 받아 변형률이 증가하다가 강판을 보강한 후에는 스티럽은 거의 수직에 가까운 그래프를 나타내어 변형률의 변화가 없음을 보여주고 있다. 이는 보강후에 전단근의 변형률은 전혀 증가하지 않고 강판의 변형률만 증가한 것을 나타내는데 이것으로 보아 강판을 보강한 후에는 강판이 전단력을 모두 부담하고 있다는 것을 알 수 있다. 또 그림에서 보면 강판과 전단근 모두 항복하지 않았음을 알 수 있다. 이는 전단 보강이 충분히 되어 전단 파괴가 일어나기 이전에 미리 모두 휨에 의한 파괴를 일으켰기 때문이다.

3.5 강판보강 시험체의 곡률의 변화

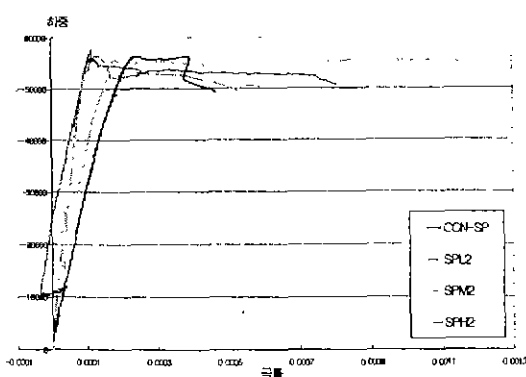


그림 6(a) $a/d=2$ 일 때

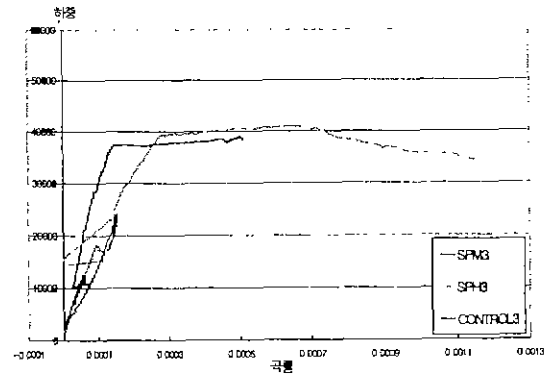


그림 6(b). $a/d=3$ 일 때

강판으로 보강한 시험체의 곡률의 변화는 윗그림과 같다. a/d의 비가 2인 계열의 시험체를 보면 최대 하중까지는 곡률의 변화가 매우 미세하다가 최대내력 이후 급격히 증가하는 양상을 보여준다. a/d의 비가 3인 계열의 시험체에서는 최대내력보다 약간 낮은 하중에서부터 곡률이 갑자기 증가하는 형태를 보여주고 있다. 하중-곡률 그래프에서 기울기는 강성을 나타내는데 그림 6(a)처럼 a/d의 비가 2인 시험체의 경우에는 보강시 재하되어있는 하중의 크기가 최대내력의 30%, 50%, 70%로 증가할수록 그래프의 기울기 즉, 강성이 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 3.4절에서와 마찬가지로 전단보강된 강판이 시험체의 강성을 증진시킨 것으로 분석할 수 있는데 보강시 손상의 정도가 클수록 강판 전단보강시 휨강성의 증진효과는 높아진다고 볼 수 있다. 이와같이 탄소섬유로 보강했을때와는 달리 손상을 입은 보 시험체에 강판을 전단으로 보강하였음에도 불구하고 휨강성의 증진효과를 볼 수 있는 것은 CFS는 일방향성으로 전단에 대하여 보강하였을 때 전단내력에만 저항하지만 강판은 방향성이 없어 전단 보강시 전단내력은 물론 휨성능에도 큰 영향을 미치기 때문이라고 할 수 있다. 그러므로 RC보를 강판으로 전단 보강할 때 그것이 휨내력에 관여하는 부분도 고려되어야한다.

4. 결론

본 연구의 실험 결과에 따라 얻은 결론은 다음과 같다.

1. CFS는 항복 강도까지 이르지 못한 상태에서 시험체와 보강재 사이에서의 부착파괴가 먼저 발생되므로 CFS의 전단보강효과는 CFS의 설계 인장강도 뿐 아니라 부착강도에 관한 고려도 필요하다.
2. CFS의 보강형식에 있어 넓은 면적을 연속적으로 보강하는 Jacket형식의 보강방법보다는 같은 면적이라도 불연속적으로 보강되는 Strip형식의 보강이 Shear Flow를 감소시켜 계면에서의 부착파괴 면적을 줄여주므로 더 효율적이라 볼 수 있다.
3. 강판으로 시험체를 보강한 후 전단근의 변형율은 거의 증가하지 않은 것으로 보아 강판이 충분히 보강되어 전단력을 부담한 것으로 볼 수 있다.
4. 강판보강 시험체 모두 휨설계내력 이상의 최대하중을 받은 것은 전단 보강된 강판이 보의 휨내력에도 영향을 미치기 때문이므로 이에대한 고려를 할 필요가 있다.
5. 강판 보강시 재하되어 있는 하중의 정도가 클수록 휨강성이 증가하였는데 이를 통해 손상이 심한 부재일수록 전단 보강된 강판이 휨내력에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원과 (주)한국 쇼본드 건설의 시험체 보강지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며, 관계자 여러분의 도움에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 홍상균, 은희창, 박기철, 정현수, "보강재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨·전단내력에 관한 실험적 연구", 한국구조물 진단학회, 제1권 제1호 1997.6, pp.65~72
- 2) 신성우, 반병렬, 이광수, 조인철, 남정희, "탄소섬유쉬트로 보강한 R/C보의 전단거동에 관한 연구", 한국구조물 진단학회, 제2권 제3호, 1998.7, pp.205~211
- 3) 심종성, 김규선, "FRP로 보강된 RC보의 전단보강효과 비교연구", 콘크리트학회지, 제 10권 4호 1998.8, pp.101~111