

채널형 FRP빔으로 보강된 RC보의 전단거동에 관한 실험적 연구

홍기남

충북대학교 토목공학과

(2009. 3. 25. 접수 / 2009. 6. 3. 채택)

Experimental Study for Shear Behavior of RC Beam Strengthened with Channel-type FRP Beam

Ki Nam Hong

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received March 25, 2009 / Accepted June 3, 2009)

Abstract : A recent and promising method for shear strengthening of reinforced concrete(RC) members is the use of near surface mounted(NSM) fiber reinforced polymer(FRP) reinforcement. In the NSM method, the reinforcement is embedded in grooves cut onto the surface of the member to be strengthened and filled with an appropriate binding agent such as epoxy paste or cement grout. This paper illustrates a research program on shear strengthening of RC beams with NSM channel-type FRP beams which is developed in this study. The objective of this study is to clarify the role of channel-type FRP beam embedded to the beam web for shear strengthening of reinforced concrete beams. Included in the study are effectiveness in terms of spacing and angle of channel-type FRP beams, strengthening method, and shear span ratio. the study also aims to understand the additional shear capacity due to glass fiber reinforced polymer beams and carbon reinforced polymer beams. And another objective is to study the failure modes, shear strengthening effect on ultimate force and load deflection behavior of RC beams embedded with channel-type FRP beams on the shear region of the beams.

Key Words : shear strengthening, NSM method, channel-type FRP beam, strengthening effect, failure mode

1. 서론

철근콘크리트로 시공된 사회간접 시설은 시간의 경과에 따라 노후화가 진행되어 구조물의 성능이 저하된다. 국내·외적으로 공용기간이 경과되면서 노후화된 철근콘크리트 구조물이 증가함에 따라 강판이나 FRP(fiber reinforced polymer)등을 이용한 구조물 보강사례가 증가하고 있으며, 전체 건설시장 가운데 구조물 보수·보강 분야의 비중은 크게 증가하고 있는 실정이다. 특히 장기적인 관점에서 역학적인 특성뿐만 아니라 내부식성의 장점을 갖고 있는 FRP 섬유 보강재와 같은 복합 신소재가 기존의 강판대용으로 이용되면서 구조물의 유지관리 및 보수·보강 비용을 절감할 수 있게 되었다.

일반적으로 전단저항력이 저하된 철근콘크리트 보에 초과하중이 가해지면 급작스러운 취성파괴가 발생한다. 이는 구조물 사용자들이 예기치 못한 구

조물 붕괴시 대피할 수 있는 충분한 시간을 확보할 수 없기 때문에 안전성 측면에서 바람직하지 않으며, 충분한 전단보강을 통하여 연성적인 휨 파괴를 유도할 수 있도록 해야 한다^{1,2)}. 최근까지 적용되고 있는 전단보강 공법으로는 전단부위에 강판이나 FRP 판을 부착하는 공법이 주를 이루었지만 자중과 부식문제, 박리 등의 단점을 가지고 있으므로 이러한 단점을 극복할 수 있는 FRP를 이용한 보강기법에 관련된 연구가 많은 관심을 끌고 있는 실정이다. 국내·외적으로 FRP를 이용한 철근콘크리트 보의 전단보강관련 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있으며³⁻⁶⁾, FRP와 철근콘크리트 보 계면에서의 부착특성에 관한 연구도 활발히 수행되고 있다. 특히 최근에는 FRP 보강재를 콘크리트 표면에 삽입하는 NSM(Near Surface Mounted)공법이 국내·외에서 많은 관심을 끌고 있다.

그러나 기존의 FRP 보강재를 콘크리트 표면에 미리 형성한 홈에 삽입하는 공법에 관한 연구는 대부

분 휨보강에 대해서 수행되었다. 몇몇 연구자들에 의해서 수행된 전단보강 연구⁷⁻⁹⁾에서도 보강재의 폭과 두께가 작은 스트립을 사용하거나 봉을 사용하기 때문에 보강간격이 지나치게 좁아 시공성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서, 저자들은 유리섬유와 탄소섬유를 다방향으로 적층한 채널형 FRP빔을 플랜지 부분은 콘크리트에 삽입하고 웨브 부분은 표면에 부착하는 방법을 통하여 NSM공법의 단점을 보완하는 공법을 개발하였다. 본 연구에서는 개발된 FRP빔을 전단철근이 배근되지 않은 철근콘크리트 보에 적용하여 FRP빔의 전단보강 성능을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 사용재료

본 연구에서는 시험체 제작을 위해 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은골재는 25mm 이하를 사용하였다. 콘크리트의 목표압축강도는 32MPa로 설계하였으나, $\varnothing 100 \times 200$ mm 크기의 공시체를 제작하여 수중양생한 후 재령 28일에 측정된 압축강도는 34MPa로 나타났다. 인장철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD400을 사용하였다. 또한, 압축철근과 전단철근은 D10 철근을 사용하였으며, 인장철근으로는 D19를 사용하였다. 그 재료 특성값은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical properties of steel

Bar size	Es (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
D10	2×105	626.2	500.7
D19		622.2	498.7

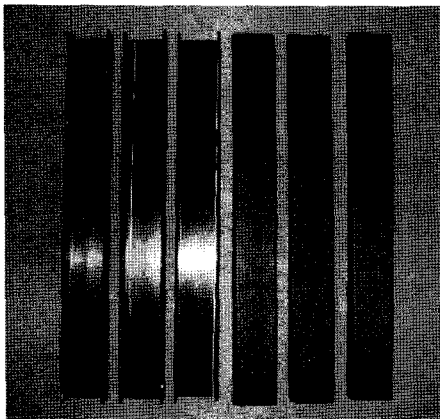


Fig. 1. FRP beams used as shear strengthening material.

Table 2. Mechanical properties of FRP

FRP	Es (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Ultimate strain (%)
CFRP	182,000	2,800	1.6
GFRP	76,000	2,500	4.2
Laminate	165,000	2,700~3,000	1.4

Table 3. Mechanical properties of epoxy

Epoxy	Compression strength(MPa)	Flexure strength (MPa)	Bonding strength (MPa)
resin200	80.3	42.2	3.0

실험에 사용한 FRP빔은 Fig. 1과 같이 국내 N사에서 개발된 제품으로서 두께는 4mm이며 웨브의 폭 50mm, 플랜지 길이 30mm의 채널형이다. 채널형 FRP빔은 탄소섬유와 유리섬유로 제작한 2가지 종류를 사용하였다. FRP빔과의 전단 보강성능 비교를 위해 사용한 탄소판은 두께 1.4mm이며, 폭은 100mm이다. FRP빔과 판소판의 역학적 성질은 Table 2에 나타내었다. 그리고 FRP빔과 CFRP판의 부착에 사용된 에폭시는 스위스 S사에서 생산된 제품으로서 재료 특성값은 Table 3과 같다.

2.2. 시험체 제작

실험체는 전단보강 효과를 검토하기 위하여 단면의 크기를 높이 400mm, 폭 250mm로 일정하게 하고, 길이 2,300mm 실험체 8개, 3,000mm 실험체 6개 총 14개의 직사각형 보를 제작하였다. 철근 배근은 인장철근으로 모든 실험체에 D19를 3개씩 배근하였으며, 전단철근이 없는 철근콘크리트 보에 대한 채널형 FRP빔의 전단보강 효과를 검토하기 위하여 우측면은 D10 철근을 100mm 간격으로 조밀하게 배근하였으며, 좌측면은 전단철근을 배근하지 않고 전단파괴가 발생하도록 유도하여 실험구간으로 설정하였다. 실험체의 전단보강은 28일 양생기간이 경과한 이후 실험변수에 따라 보강재를 보강하였다. 표면부착 실험체는 면처리 이후 에폭시를 도포하고 CFRP판을 부착하였다. 보강빔으로 보강되는 실험체는 흠파기 장비를 이용하여 깊이 30mm, 폭 7mm의 홈을 50mm 간격으로 형성한 이후에 에폭시를 홈에 충전 및 표면에 도포하고 보강빔의 플랜지부분을 삽입하여 보강하였다.

실험변수로는 전단스팬비(2, 3), 보강재료의 종류(CFRP, GFRP), 보강간격(200mm, 300mm), 보강방향(90°, 45°), 보강방법을 설정하였다. 일반적으로 전단스팬비는 전단보강이 없는 부재에서 가장 중요

Table 4. Test programs

Specimens	Beam length (mm)	Shear span ratio (a/d)	FRP	Dimension of RC beam b×h(mm)	Spacing of FRP beam (mm)	Angle of FRP beam (°)
CON-R3.0	3,000	3	-	250×400	·	·
CF-R3.0-HS200			CFRP		200	90
GF-R3.0-HS200			GFRP		200	90
CF-R3.0-HS300			CFRP		300	90
GF-R3.0-HS300			GFRP		300	90
CF-R3.0-BS300			CFRP		300	90
CON-2.3	2,300	2	-		·	·
CF-R2.0-HS200			CFRP		200	90
GF-R2.0-HS200			GFRP		200	90
CF-R2.0-HS300			CFRP		300	90
GF-R2.0-HS300			GFRP		300	90
CF-R2.0-CS300			CFRP		300	45
GF-R2.0-CS300			GFRP		300	45
CF-R2.0-BS300			CFRP		300	90

한 실험변수로 간주되고 있다. 전단보강된 부재에서도 전단스팬비는 중요한 변수로서 대체로 1.0~1.5 정도에서는 아치거동에 의한 복부 사압축대 파괴가 발생하므로 2~4 정도의 값을 실험변수로 선택하는 경우가 많다. 본 실험에서는 비교적 낮은 전단스팬비인 2와 3으로 전단스팬비를 선택하였는데, 이는 전단파괴를 유도하기 위해서는 비교적 낮은 값일 필요가 있기 때문이다. 실험체명은 CF-R2.3-CS300을 예로 들어 설명하면 CF는 탄소섬유, R2.0은 전단스팬비 2.0, C는 보강각도 45°(H 90°, B 표 면부착), S300은 보강간격 300mm를 의미한다. Table 4에 실험변수 및 실험체 상세를 나타내었다.

2.3. 실험방법

하중재하는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 500KN 용량의 유압잭을 통해 4점 재하 하였다. 하중은 예상 최대하중 80%까지는 하중제어방식, 그 이후부터는 변위제어 방식으로 작용시켰다. 각 하중단계에서의 철근과 CFRP판의 변형률을 측정하기 위해서 보 중앙부의 인장철근에 3개와 각 보강재의 중앙에 1개씩의 변형률 게이지를 부착하였다. 그리고 보의 중앙부에서의 처짐을 측정하기 위해서 최대 150mm의 변위까지 측정이 가능한 LVDT 2개를 설치하였다. 실험중에는 육안으로 시험체의 초기균열과 균열진행상황, FRP빔과 CFRP판의 탈락 등을 확인하여 기록하였으며, 실험 종료 후에도 각 시험체의 파괴모드를 사진촬영하고 균열도를 작성하였다.

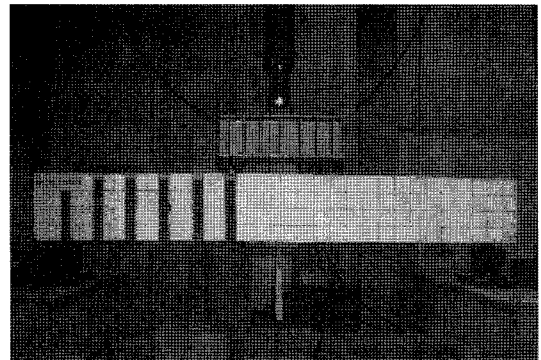


Fig. 2. Experimental set-up.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 파괴모드

Table 5에 실험결과를 정리하여 나타내었다. 전단스팬비가 3인 실험체에서는 CFRP빔을 300mm간격으로 보강한 GF-R3.0-HS300실험체의 전단내력이 기존 실험보다 약 42% 증가한 것으로 나타났다. 전단스팬비 2.0 실험체에서는 CFRP빔을 200mm 간격으로 수직 보강한 CF-R2.0-HS200실험체의 전단내력이 가장 크게 나타났다. Fig. 3에 CFRP빔으로 보강된 전단스팬비 3.0실험체의 최종 파괴사진을 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이 기준실험체 CON-3.0은 최대하중 이후 급작스러운 복부전단균열에 의해 전단파괴가 발생하였다. CFRP판을 표면 부착한 CF-R3.0-BS300실험체도 거의 CON-3.0실험체와 유사하게 최대하중 이후 CFRP판이 박락하면

Table 5. Test results

Specimens	Ultimate load(kN)	Shear strength(kN)	Increase ment ratio(%)	Maximum displacement(mm)	Ductility ratio
CON-R3.0	264.0	132.0	-	7.02	1.00
CF-R3.0-HS200	356.6	178.3	35	16.51	2.04
GF-R3.0-HS200	360.6	180.3	37	17.19	2.28
CF-R3.0-HS300	366.2	183.1	39	16.71	1.94
GF-R3.0-HS300	375.6	187.8	42	18.15	1.53
CF-R3.0-BS300	274.6	137.3	4	7.49	1.00
CON-2.0	498.6	249.3	-	8.65	1.00
CF-R2.0-HS200	567.2	283.6	14	12.13	1.54
GF-R2.0-HS200	546.4	273.2	10	9.98	2.71
CF-R2.0-HS300	514.4	257.2	3	7.91	1.00
GF-R2.0-HS300	513.8	256.9	3	8.31	1.00
CF-R2.0-CS300	558.6	279.3	12	14.19	1.73
GF-R2.0-CS300	559.4	279.7	12	13.26	2.11
CF-R2.0-BS300	466.2	233.1	-9	7.60	1.00

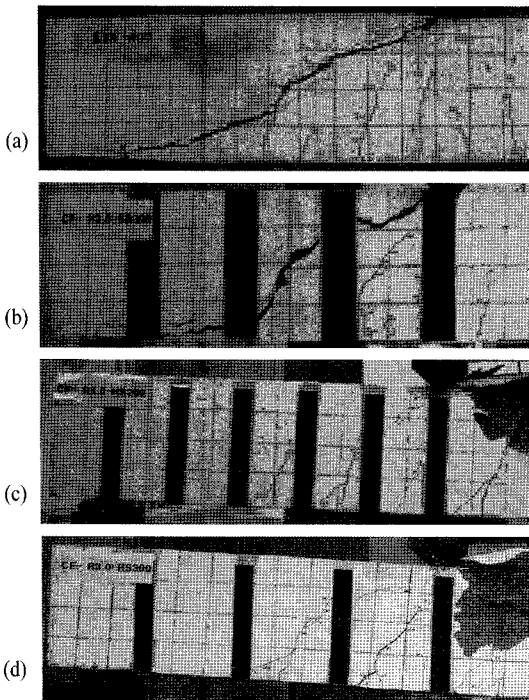


Fig. 3. Failure mode (a) CON-R3,0 (b) CF-R3,0-SB300 (c) CF-R3,0-HS200 (d) CF-R3,0-HS300.

서 급작스런 복부전단균열의 발생으로 매우 취성적으로 파괴되었다. CF-R3.0-HS300과 CF-R3.0-HS200 실험체는 초기 휨균열이 하중이 증가하면서 복부로 성장하였으나, 사인장 균열로 발전하지 못하고 인장철근이 항복한 이후에 재하판 사이의 콘크리트가 압괴하면서 처짐이 급격하게 증가하는 전형적인

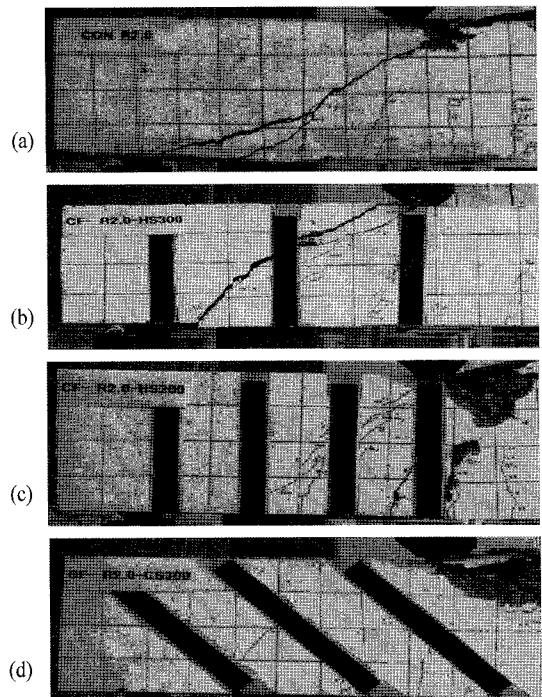


Fig. 4. Failure mode (a) CON-R2,0 (b) CF-R2,0-HS300 (c) CF-R2,0-HS200 (d) CF-R2,0-CS300.

휨파괴 거동을 나타내었다. 또한 전단스팬비 3.0 시험체에서는 CFRP빔과 GFRP빔을 적용한 보사이의 파괴거동 차이는 명확하게 나타나지 않았다. Fig. 4에는 전단스팬비가 2.0인 시험체의 실험 종료 후 전경을 나타내었다. 기준실험체 CON-R2.0은 최대 하중 이후 복부 사인장균열에 의해서 파괴되는 전

형적인 전단파괴를 나타내었다. CF-R2.0-HS300 실험체는 최대하중 이후 인장부에 발생한 휨균열이 CFRP빔 사이로 성장하다가 급작스럽게 복부에 사인장 균열이 발생하면서 취성적인 전단파괴 거동을 보였다. CF-R2.0-HS200 실험체는 인장부에 발생한 휨균열이 복부로 성장하였으나 CFRP빔에 의해 사인장균열로 발전하지 못하고 있다가 하중이 증가하면서 압축부 콘크리트가 압괴하면서 발생하는 휨압축파괴 거동을 보였다. CFRP빔을 45°로 300mm 간격으로 배근한 CF-R2.0-CS300은 보강빔의 보강간격이 동일한 CF-R2.0-HS300과는 다르게 인장부에 발생한 휨균열이 복부까지 성장하는 것을 보강빔이 제어하면서 최대하중 이후에도 전단균열이 발생하지 않고 인장철근의 항복이후 압축부 콘크리트의 압괴에 의해서 실험이 종료되었다. 또한 전단스팬비 2.0 실험체에서도 보강빔에 사용된 섬유종류에 따른 파괴모드 차이는 명확하게 나타나지 않았다.

3.2. 보강재 간격의 영향

FRP빔 삽입 간격에 대한 영향을 평가하기 위해 Fig. 5에 보강재 간격이 200mm, 300mm인 실험체의 결과를 기준실험체의 결과와 함께 나타내었다. 전단스팬비 2.0 실험체의 경우 보강간격이 300mm인 CF-R2.0-HS300 실험체의 최대하중이 567kN으로 무보강된 기준실험체 CON-R2.0와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. FRP빔 보강간격이 200mm인 CF-R2.0-HS200은 CF-R2.0-HS300과는 다르게 최대하중이 14% 정도 증가하였으며, 연성이 2.7로 매우 크게 증가하는 연성적 거동을 나타내었다. 전단스팬비가 3.0인 실험체에서는 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 보강빔의 간격이 200mm, 300mm인 CF-R3.0-HS200과 CF-R3.0-HS300 실험체 모두 약 40%정도의 최대하중이 증가하였으나, 연성은 CF-R3.0-HS200 실험체가 2.28로 우수한 것으로 나타났다. 즉, 보강빔의 간격에 대한 영향이 전단스팬비 변화에 따라

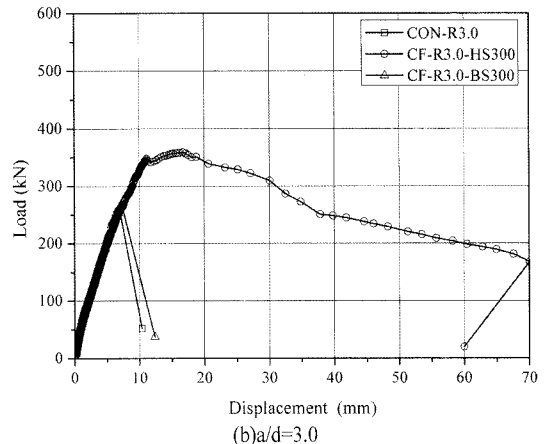
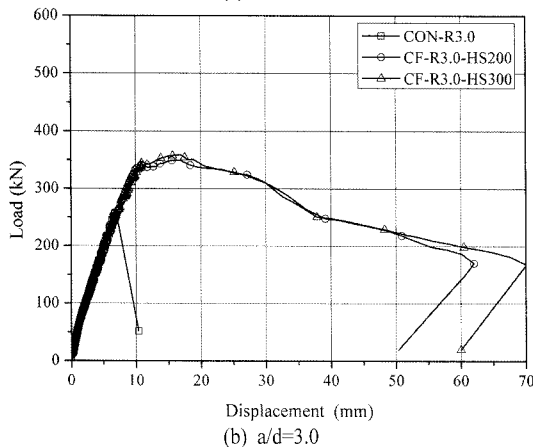
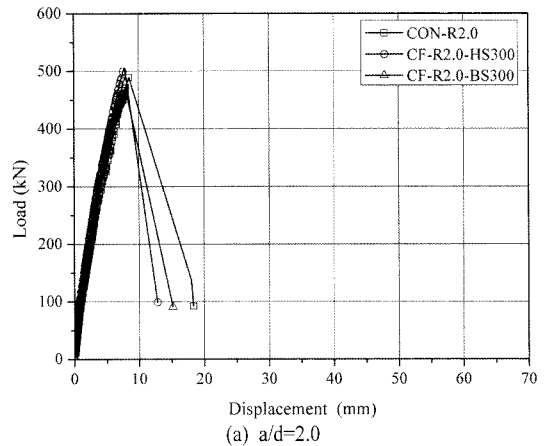
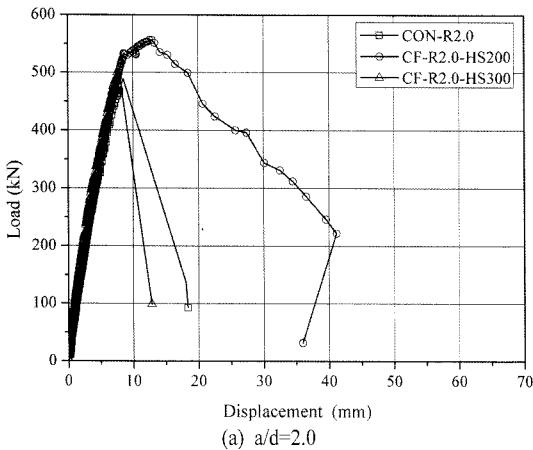


Fig. 5. Effect of spacing of FRP beams on the load-deflection curves.

Fig. 6. Effect of strengthening method on the load-deflection curves.

크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 보강방법의 영향

Fig. 6에 거의 동일한 CFRP 보강량을 300mm 간격으로 표면부착한 실험체와 흡입한 실험체의 실험결과를 전단스팬비별로 비교하여 나타내었다. Fig. 6(a)는 표면부착 실험체 CF-R2.0-BS300와 CFRP 빔으로 보강된 CF-R2.0-HS300 실험체의 하중이 최대하중 이후 급격하게 감소하는 경향을 보이며, 기준실험체 CON-R2.0과 비교하여 보강효과가 거의 없음을 보이고 있다. Fig. 6(b)는 표면부착한 CF-R3.0-BS300 실험체는 최대하중 이후 급작스럽게 보강재가 박락하면서 보강재의 전단 성능이 전혀 발휘되지 못하고 기준실험체와 동일한 최대하중을 나타냄을 보이고 있다. 반면에 CFRP빔을 삽입한 CF-R3.0-H300 실험체의 최대하중은 기준실험체와 비교하여 39% 증가하였으며, 최대하중 이후 연성이

크게 증가함을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 표면부착공법을 통한 전단보강은 보강효과가 전단스팬비에 관계없이 거의 발휘되지 못하는 반면, FRP 빔을 적용한 공법은 FRP빔을 300mm로 보강하여도 얇은 보에서는 전단보강효과가 매우 우수함을 확인할 수 있었다.

3.4. FRP빔 보강각도의 영향

Fig. 7에 보강재의 보강각도에 대한 영향을 평가하기 위해 FRP빔을 90°로 보강한 실험체와 45°로 보강한 실험체의 하중-변위관계를 비교하여 나타내었다. 90°로 FRP빔을 보강한 CF-R2.0-HS300와 GF-R2.0-HS300는 기준실험체 CON-R2.0의 결과와 비교하여 보강효과가 거의 나타나지 않음을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 반면 FRP빔의 보강간격이 300mm로 동일하지만 45°로 보강한 CF-R2.0-CS300과 GF-R2.0-CS300 실험체는 최대하중과 최대하중 이후의 거동에 있어서 전단보강 성능이 크게 향상되어 전단파괴가 발생하지 않고 휨파괴가 유도됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 7은 FRP빔 제작에 사용된 섬유종류에 따라 실험체의 전단성능이 크게 변화하지 않음을 보이고 있다.

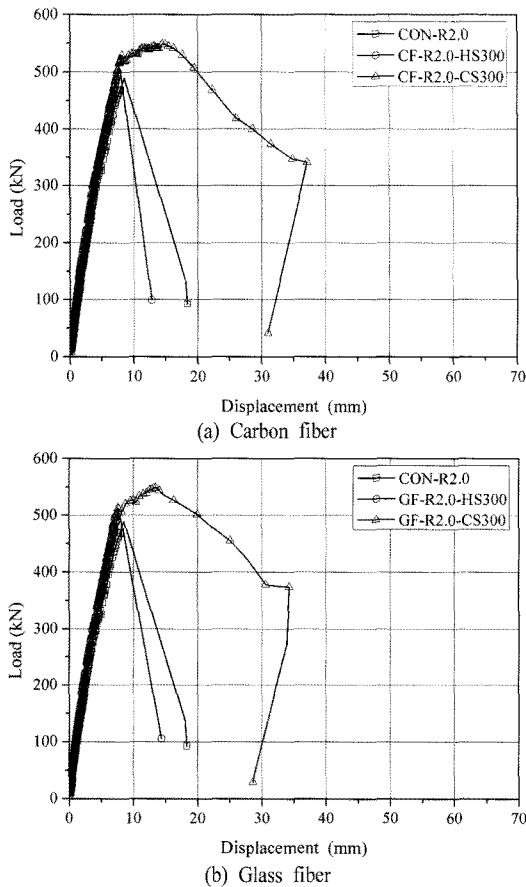


Fig. 7. Effect of kind of FRP fiber on the load-deflection curves.

3.5. 하중-FRP빔 변형률 관계

Fig. 8에 FRP빔에 부착한 변형률게이지로부터 얻은 변형률과 하중관계를 비교하여 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 변형률은 각 실험체의 FRP빔중에서 가장 큰 변형률이 발생한 위치의 실험값을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 모든 실험체의 FRP빔은 하중재하 초기에는 거의 변형률이 발생하지 않고, 복부전단균열이 형성되는 250kN 부근에서 변형률이 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 표면부착 보강한 CF-R2.0-BS300은 1125 $\mu\epsilon$ 까지 보강재의 변형률이 증가하다가 부착면에서의 부착파괴로 인해 변형률이 급격하게 감소하는 거동을 나타내 보강재의 재료성능이 거의 발휘되지 못하는 것을 확인할 수 있다. CF-R2.0-HS300 실험체는 사인장 균열의 발생을 보강빔이 제어하면서 보강빔의 변형률이 증가하다가 보강빔 사이에 국부적인 전단균열이 발생하여 전단파괴가 진행되면서 전단하중을 부담하고 있던 보강빔의 변형률이 점차 감소하는 snapback 현상을 나타내었다. 이들과는 다르게 CF-R2.0-HS200와 CF-R2.0-CS300 실험체는 FRP빔의 변형률이 각각 4549 $\mu\epsilon$ 과 6880 $\mu\epsilon$ 으로 매우 큰 전단하중을 부담하는 것으로 나타났다. 특히 45°로 보강

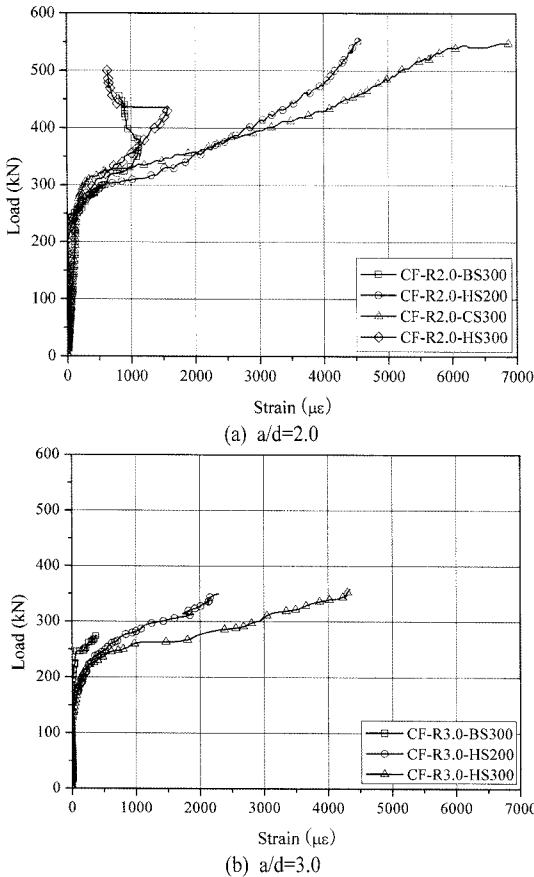


Fig. 8. Strains in the NSM FRP beams.

된 CF-R2.0-CS300 실험체는 보강간격이 300mm로 가장 크지만 FRP빔의 전단보강 효율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8(b)에 나타낸 전단스팬비 3.0 실험체도 하중 재하 초기에는 FRP빔의 변형률이 거의 발생하지 않고 있다가 150kN 하중을 지나면서 전단균열이 발생하고 변형률이 증가하기 시작하는 거동을 보이고 있다. 표면부착 보강한 CF-R3.0-BS300 실험체는 최대 변형률이 368 $\mu\epsilon$ 으로 부담하는 전단하중이 매우 미약한 것으로 나타났다. CF-R3.0-HS200과 CF-R3.0-HS300의 최대변형률은 각각 2294 $\mu\epsilon$ 과 4339 $\mu\epsilon$ 으로 나타나 전단스팬비가 큰 얇은 보의 경우 전단보강재의 간격이 넓을수록 부담하는 전단하중이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 유리섬유와 탄소섬유를 다방향으로 적층하여 제작한 채널형 FRP빔을 철근콘크

리트 보의 전단보강재로 활용한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 통해 FRP빔을 활용하는 경우 노후화된 RC 구조물의 전단파괴에 대한 안전성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 전단스팬비가 2.0인 실험체에서는 보강빔을 300mm 간격으로 45° 보강한 실험체와 수직으로 200mm로 배근한 실험체를 제외한 모든 실험체가 복부전단 균열에 의해 파괴되었으나, 전단스팬비 3.0 실험체에서는 표면부착한 시험체를 제외하고 인장철근의 항복이후 압축부 콘크리트의 압괴에 의해서 파괴되었다.

2) 전단스팬비가 2.0과 3.0인 실험체 모두에서 표면부착에 의한 전단보강 효과는 없는 것으로 나타났으나, FRP빔을 보강하는 경우 전단스팬비 2.0에서는 200mm 이하, 전단스팬비 3.0에서는 300mm 이하로 보강간격을 유지하는 것이 보강성능을 발휘하는데 유효한 것으로 나타났다.

3) 전단스팬비가 3.0 이상인 보에서는 보강빔을 수직으로 보강하여도 보강성능이 충분히 발휘되나, 전단스팬비 2.0 정도의 보에서는 보강재의 간격이 동일하더라도 보강재를 수직으로 보강하는 것보다 45° 보강하는 것이 보강효과가 훨씬 우수하게 발현되는 것으로 나타났다.

4) CFRP빔과 GFRP빔으로 보강된 실험체의 실험결과와 비교를 통하여 섬유 종류에 따른 전단보강 성능의 큰 차이가 발생하지 않았다.

감사의 글 : 이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2007).

참고문헌

- 1) J.A.O. Barros anol, S.J.E. Dias, "Near Surface Mounted CFRP Laminates for Shear Strengthening of Concrete Beams", Cement & Concrete Composites 28, pp. 276 ~292, 2006.
- 2) Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch, M. H., and Husain, M., "Strengthening of Shear-damaged RC beams by External Bonding of Steel Plate", Magazine of Concrete Research, Vol. 47, No. 173, pp. 329 ~334, 1995.
- 3) Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R.,

- “Shear and Flexural Strengthening of RC beams with Carbon Fiber Sheets”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 7, pp. 903~911, 1997.
- 4) Triantafillou, T. C., “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Epoxy-Bonded FRP Composites”, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, March-April, pp. 107~115, 1998.
 - 5) 홍상균, 은희창, 박기철, 정현수, “보강재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 · 전단내력에 관한 실험적 연구”, *한국구조물진단학회지*, 제1권, 제1호, pp. 65~73, 1997.
 - 6) 신성우, 반병렬, 이광수, 조인철, 남정희, “탄소섬유쉬트로 보강한 R/C보의 전단거동에 관한 연구”, *한국구조물진단학회지*, 제2권, 제3호, pp. 205~211, 1998.
 - 7) 김영식, 이형석, 박성무, “CFRP로 매립 보강된 RC 보의 전단 보강 효과에 관한 실험적 연구”, *한국구조물진단학회지*, 제9권, 제4호, pp. 187~194, 2005.
 - 8) 노경배, 진치섭, 장희석, 김희성, 황금식, “FRP Bar 콘크리트 보의 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도”, *한국구조물진단학회지*, 제10권, 제2호, pp. 76~82, 2006.
 - 9) 임동환, 남민희, “탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단거동”, *콘크리트학회지*, 제20권, 제3호, pp. 299~305, 2008.