



헤디드 바, 고장력 철근 및 CFRP 바로 전단보강된 세장 고강도콘크리트 보의 전단 거동 평가

양준모¹⁾ · 권기연¹⁾ · 최홍식²⁾ · 윤영수^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 ²⁾충청대학 건설교통과

Shear Behavior of Slender HSC Beams Reinforced with Stirrups using Headed Bars, High Strength Steels, and CFRP Bars

Jun-Mo Yang¹⁾, Ki-Yeon Kwon¹⁾, Hong-Shik Choi²⁾, and Young-Soo Yoon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Dept. of Civil & Transportation Engineering, Chung Cheong University, Cheongwon 363-792, Korea

ABSTRACT If conventional reinforcements are used for high-strength concrete (HSC) structures, a large amount of the reinforcement must be required to compensate for the brittleness of HSC and make the best use of HSC. This raises some structural problems such as steel congestion and an increase in self-weight. Therefore, alternative reinforcing materials and methods for HSC structures are needed. In this study, four full-scale beam specimens constructed with HSC (100 MPa) were tested to investigate the effect of the different shear reinforcements on the shear behavior. These four specimens were reinforced for shear stirrups with normal and high strength steels, headed bars, and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars, respectively. In addition, steel fibers were added to the HSC in the two of the specimens to observe their beneficial effects. The use of high strength steels resulted in the improvement of the shear capacity since the shear resistance provided by the shear reinforcements and the bond strength were increased. The specimen reinforced with headed bars also showed a superior performance to the conventional steel reinforced specimen due to the considerably high anchorage strength of headed bar. CFRP bars used in this research, however, seemed to be inadequate for shear reinforcement because of the inferior bond capacity. The presence of the steel fibers in concrete led to remarkable improvement in the ductility of the specimens as well as in the overall cracks control capability.

Keywords : shear capacity, high-strength concrete, high tension steel, headed bar, CFRP bar

1. 서 론

근래에 들어 구조물이 초고층화, 대형화, 특수화됨에 따라 콘크리트의 고강도화는 국내외적으로 적극적인 연구가 이루어져 오고 있고 최근 들어 실구조물에 적용하는 사례도 늘고 있다. 이러한 콘크리트의 고강도화는 그에 상응하는 상향된 하중에서 전단균열이 예상되고 따라서 더 많은 양의 전단철근이 요구되게 된다. 기존의 일반 강도의 전단 보강 철근을 고강도콘크리트 (HSC) 부재에 사용하게 되면 그에 상응하는 인장력을 얻기 위해 밀실한 배근이 불가피해져 설계 및 시공상의 문제를 초래할 수 있다. 이러한 문제점 해결을 위한 대안으로 헤디드 바, 섬유, 고장력 철근, FRP (fiber reinforced polymer) 바 등을 이용한 하이브리드 보강이 제시되고 있다.

작은 직경의 여러 개의 스테럽을 대체하기 위해 해양 구조물에 최초로 적용된 헤디드 바는 기존 철근보다 짧은 정착길이, 전단저항 성능 향상, 내진성능 향상 등의 장점을 가지고 있어 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, ASTM A 970에 용접형 헤디드 바 표준제작규준이 제시되었다¹⁻⁷⁾. 섬유는 콘크리트의 균열 제어 및 균열발생 후의 안정적 거동을 위하여 일반 구조물, 해안 구조물, 방호벽, 터널 라이닝 등에 광범위하게 사용되고 있는 보강 재료이다^{8,9)}. 고장력 철근은 고강도콘크리트에 상응하는 높은 항복강도를 가진 철근으로, 균열폭이 크게 나타나고, 철근과 콘크리트 간의 힘 전달 성능은 향상되지 못한다는 연구 보고가 있다. 이러한 단점의 보완 및 실용화를 위한 다각적인 연구가 진행되고 있는 추세이다¹⁰⁾. 또한 FRP 바는 우수한 부식 저항성, 고강도를 가지고 있으며 강도/중량비가 매우 커 신규 구조물 및 내하력이 저하된 콘크리트 구조물의 보강에 효과적이라는 장점을 가지고 있지만, 일반 철근이 가지고 있는 휨보강을 위한

*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr
Received March 5, 2007, Accepted August 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

인성을 가지고 있지 못하며 재료의 가격이 비싸 사용이 한정적으로 이루어지고 있다¹¹⁻¹³⁾.

본 연구에서는 헤드드 바, 고장력 철근, FRP 바 및 강섬유보강콘크리트 (SFRC)를 사용하여 각각 다르게 전단 보강된 고강도콘크리트 보의 전단 실험을 수행하였고, 이를 통해 고강도콘크리트의 전단 거동에 대한 각 보강 재료의 특성과 문제점을 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험 계획

본 연구에서는 일반 철근, 헤드드바, 고장력 철근, CFRP (carbon fiber reinforced polymer) 바를 전단철근으로 사용하여 총 4개의 시험체를 제작하였으며, 설계기준강도 100 MPa의 고강도콘크리트를 사용하였다. 고장력 철근 및 CFRP 바를 전단 철근으로 사용한 시험체의 경우는 큰 균열폭의 제어를 위해 한 쪽 (N)에 강섬유 (지름 : 0.8 mm, 길이 : 35 mm)를 체적당 1% 혼입하였고, FRP 바의 취성적인 특성을 고려하여 CFRP 바를 전단철근으로 사용한 시험체의 경우는 일반 철근과 CFRP 바를 교대로 배근하였다. 4개 시험체 별 전단 보강 특징을 Table 1에 나타내었다.

모든 시험체에서 전단파괴를 유도하기 위해 휨 철근비 (ρ)가 0.0302인 과대 철근 보로 설계하였다. 시험체의 총 길이는 4,550 mm, 순 전단지간은 1,725 mm이며, 전단 흐름의 메커니즘이 주로 보작용에 의해서 전달되는 일반 보를 모사하기 위해 전단지간-유효깊이 비(a/d)는 2.875를 택하였다. 또한 전단철근 간격(s)은 $d/2$ 인 300 mm로 정하였다. 국부 지압파괴를 방지하기 위해 하중 재하 부와 지점 부에 강판을 설치하였고, 주철근의 정착길이 확보를 위해 양단에 375 mm씩 여유 길이를 두었다. 단면 형상, 치수, 전단철근의 배치 등 시험체 상세를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1(b)와 같이 배근된 전단 철근의 중앙부 양쪽에 철근 스트레인지지를 부착하였으며 휨철근의 경우에는 아랫단 철근 4개중 가운데 2개 철근에 각각 5개의 스트레인지지를 부착하였다.

변위는 11개의 linear variable differential transducer (LVDT) 와 게이지 스티드, 콘크리트 스트레인지지를 이용하여 측정하였다. 지점부의 변위와 보 중앙의 변위를 LVDT로 측정하여 실제 보의 처짐을 구하였으며, 주 인장 변형률

Table 1 Test specimens

Specimen	Shear reinforcement
SN	Normal strength open stirrup
SNH	Normal strength headed bar
SH	High strength open stirrup with SFRC in the left half of the member
CFRP	Alternating normal strength steel stirrups and CFRP bars with SFRC in the left half of the member

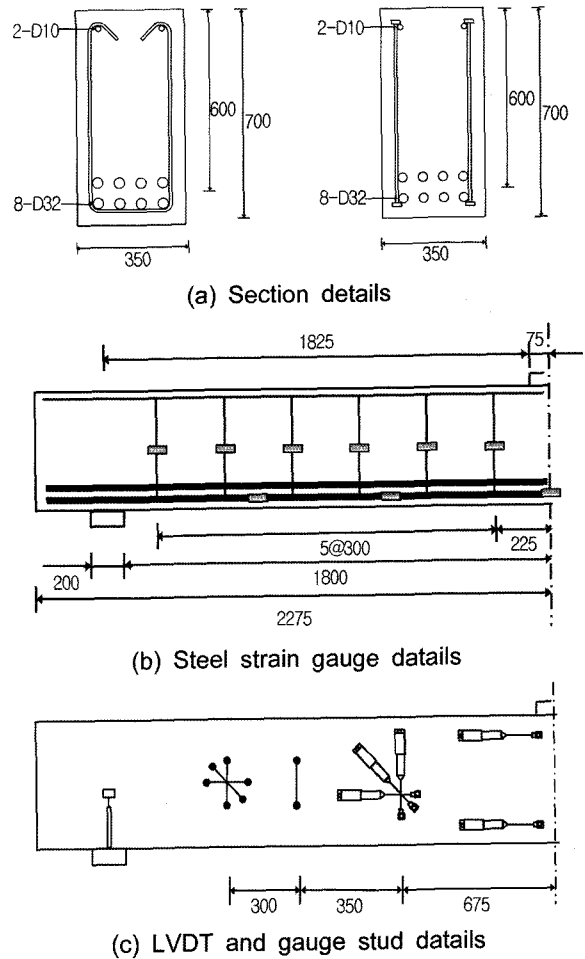


Fig. 1 Reinforcement and instrumentation details (mm)

을 구하기 위해 전단균열이 지나갈 것으로 예상되는 지점에 LVDT 로셋 (rosette)을 설치하여 구조체의 연성 평가가 가능하도록 하였다. 또한 보에 발생하는 곡률을 측정하기 위해 LVDT를 보의 중간에 가로로 설치하였다 (Fig. 1(c)). 가력 장치는 Fig. 2와 같이 2,000 kN 용량의 액츄에이터 (actuator)를 사용하였으며 1점 가력을 하였다.

2.2 전단보강 재료 및 콘크리트 특성

시험체 제작에 사용된 고강도콘크리트의 배합 상세는 Table 2에 나타내었고, 실험 당일 측정된 콘크리트의 압축, 쪼갬인장, 휨강도 실험 결과의 평균값은 Table 3에

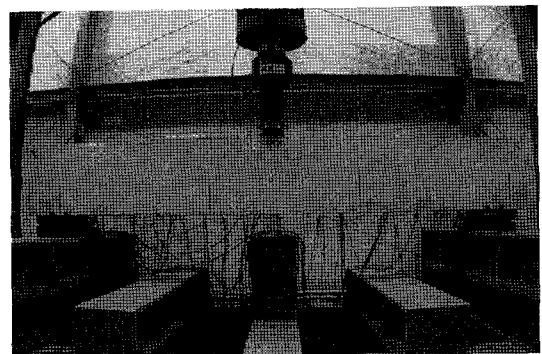


Fig. 2 Test setup

Table 2 Mix proportion

w/b	s/a	Unit weight (kg/m ³)						
		W	C	FA	SF	S	SP	AE
0.22	0.40	160.0	5,45.0	109.1	72.7	574.0	14.6	0.436

Note) W : water content, C : cement content, FA : fly ash content, SF : silica fume content, S : sand content, SP : superplasticizer content, AE : air-entraining agent content

Table 3 Mechanical properties of concrete (age of 28 days)

	f_{ck} (MPa)	f_{sp} (MPa)	f_r (MPa)
HSC	97.00	3.81	5.67
SFRC	96.25	6.84	8.27

Note) f_{ck} : average compressive strength of concrete, f_{sp} : average splitting tensile stress, f_r : average modulus of rupture

정리하였다. 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 와 쪼갬인장강도 f_{sp} 는 100×200 mm의 공시체로 측정하였고, 150×150×550 mm 시편을 제작하여 4점 휨 실험을 통해 휨강도 f_r 을 결정하였다.

전단 보강 재료로는 SD350, SD500, CFRP 바를 사용하였고, 주철근은 SD400을 사용하였다. 각 보강 재료 물성치의 평균값은 Table 4에 나타내었다. 본 실험에 사용된 헤디드 바의 상세는 Table 5와 같고, 전기용접으로 헤드와 철근을 접합하여 제작하였으며 제작된 헤디드 바의 모습은 Fig. 3과 같다.

Table 4 Reinforcement properties

Bar designation	f_y (MPa)	ϵ_y	f_u (MPa)	ϵ_u	τ_0 (MPa)	Slip (mm)
SD350	375	0.0019	525	0.0402	25.52	0.37
SD400	428	0.0022	735	0.0413	-	-
SD500	569	0.0029	754	0.0425	27.74	0.18
CFRP bar	N/A	N/A	2041	0.0174	11.97	1.87

Note) f_y : yield stress, ϵ_y : yield strain, f_u : ultimate tensile stress, ϵ_u : rupture strain, τ_0 : bond strength, slip : corresponding slip at peak load from the pullout tests

Table 5 Detail of Headed bar

Bar diameter (mm)	Head diameter (mm)	Head thickness (mm)	Head area (mm ²)
9.53	31	11	754.39

Table 6 Test results and predictions

Specimen	V_{cr} (kN)	V_y (kN)	V_y/V_{cr}	V_{test} (kN)	V_{MCFT} (kN)	V_{test}/V_{MCFT}	V_{ACI} (kN)	V_{test}/V_{ACI}
SN	250	301	1.20	384	437.1	0.88	451.7	0.85
SNH	265	296	1.12	630	495.7	1.27	451.7	1.39
SH	288	378	1.31	603	504.1	1.20	507.0	1.19
CFRP	237	342	1.44	467	520.5	0.90	465.1	1.00

Note) V_{cr} : shear force at cracking, V_y : shear force at the first yielding of stirrup, V_{test} : measured shear capacity, V_{MCFT} : shear capacity predicted by MCFT, V_{ACI} : shear capacity predicted by ACI

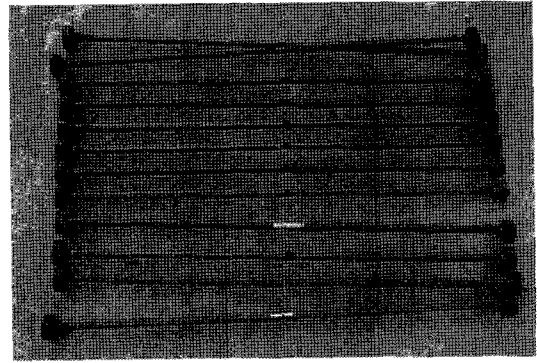


Fig. 3 Headed bar

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전단 거동

각 시험체의 전단 실험 결과 측정된 콘크리트의 전단 균열 발생시 전단력 (V_{cr}), 전단철근 항복시 전단력 (V_y), 극한전단력 (V_{test})을 Table 6에 나타내었다. 또한 수정압축장이론 (modified compression field theory, MCFT¹⁶)에 기초한 전단 및 휨에 대한 단면 해석 프로그램인 RESPONSE 2000¹⁵과 ACI 318-05 code¹⁷를 사용하여 각 시험체의 극한전단력을 예측한 추정치 (V_{MCFT} , V_{ACI}) 역시 Table 6에 나타내었다. CFRP 바는 재료의 특성상 항복 구간이 없으므로 ACI 440.1R-06¹¹에서 추천하는 바와 같이 허용 사용 응력 하에서 CFRP 바의 변형률 0.004를 항복 상태로 간주하여 V_{ACI} 를 구하였다. 또한 Fig. 4는 실험 종료 후 각 시험체의 사진 및 균열 양상을 보여주고 있다.

일반 철근을 전단철근으로 사용한 시험체 SN의 경우 최초 전단균열은 전단하중 250 kN에서 발생하였으며 301 kN에서 최초의 전단철근 항복이 나타났다. 384 kN에서 압축 철근의 좌굴 현상, 콘크리트 피복 탈락 현상, 전단철근의 파단 현상, 하중 재하점 부근의 콘크리트 압축파괴 현상을 보이면서 종국 파괴가 일어났다. 동시에 전단균열이 주인장철근을 가로지르는 지점에서 전단-활렬균열이 발생하였는데, 이는 고강도콘크리트에서 골재 상호간의 부착력 격감으로 인해 종방향 인장철근에 보다 큰 다운웰 힘이 집중되기 때문에 발생하는 것으로 취성적인 전단파괴를 유도할 수 있는 하나의 요인이다¹⁸. 압축철근의 좌굴 현상은 U자형 갈고리 전단철근의 정착이 제대로 이루어지지 않아 발생된 것으로 생각되고, 이 때문

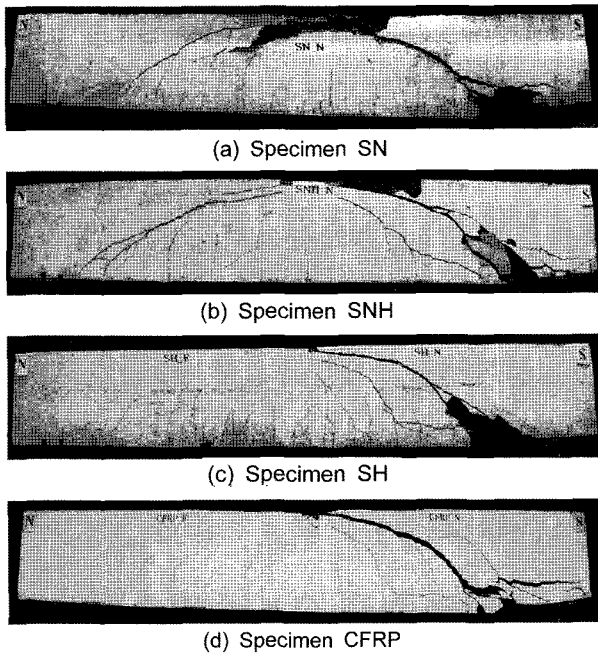


Fig. 4 Crack patterns at failure

에 갈고리가 바깥쪽으로 꺾여 콘크리트 표면을 뚫고 나오는 현상과 콘크리트 피복 탈락 현상이 생긴 것으로 판단된다. 측정된 극한 전단력은 예측된 V_{MCFT} , V_{ACI} 보다 12%, 15% 낮게 나타났다. 이는 전단철근의 정착 손실, 미세 비틀림 작용, 물러 지점의 밀림 현상 등의 복합적인 원인 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5 (a, b)에서 시험체 SN에 나타난 압축 철근의 좌굴, 전단철근의 파단 모습을 보여주고 있다.

헤디드 바를 전단철근으로 사용한 시험체 SNH의 경우 265 kN의 전단하중에서 최초 전단균열이 발생하였고, 296 kN

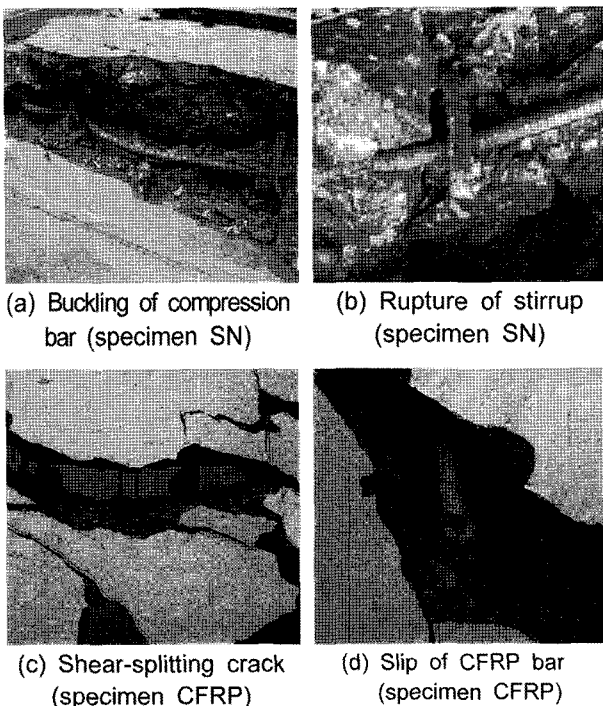


Fig. 5 Failure patterns

에서 최초 전단철근 항복이 나타났으며, 1.12의 다소 낮은 V_y/V_{cr} 을 보였다. 전단철근의 항복 이후 83 kN의 작은 추가 전단하중에 중국 파괴를 보인 시험체 SN과는 달리 시험체 SNH는 전단철근이 항복한 이후 334 kN의 큰 추가 전단하중이 가해진 후 630 kN에서 중국 파괴를 보였다. 측정된 전단력은 예측된 V_{MCFT} , V_{ACI} 보다 27%, 39% 높게 나타났다. 이는 헤디드 바 사용에 따른 전단철근의 정착력의 증가와 정착길이 감소 효과 때문인 것으로 판단된다. 전단철근의 정착력 증가는 콘크리트에 가하는 구속력을 증가시키며, 정착길이의 감소는 항복시까지 전단력에 저항할 수 있는 유효한 전단 철근의 개수를 증가시킨다¹⁹⁾. 용접된 헤드와 철근의 접합부에서 파괴가 나타났고, 압축철근의 좌굴 현상은 나타나지 않았다. 이를 통해 헤디드 바의 정착부가 압축철근의 좌굴 방지에 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

고장력 철근을 전단철근으로 사용한 시험체 SH의 경우 강섬유가 혼입되지 않은 부분(S)에서는 288 kN의 전단하중에서 최초 전단균열이 발생하였고, 전단철근이 378 kN에서 최초 항복하였으며, 큰 V_y 때문에 다소 높은 1.31의 V_y/V_{cr} 을 보였다. 강섬유가 혼입된 부분 (N)에서는 전단균열이 거의 나타나지 않았고, 전단철근의 항복도 나타나지 않았다. S부분에서 603 kN의 전단하중에서 중국 파괴를 보여 시험체 SNH 다음으로 높은 극한 전단력을 보여주었다. 측정된 극한 전단력은 V_{MCFT} , V_{ACI} 의 예측치보다 각각 20%, 19% 높게 나타났다. 이는 고장력 전단철근의 사용으로 전단철근이 저항하는 전단력 (V_s) 부분의 직접 증가와 부착력의 증진 때문이다. 일반적으로 고강도 콘크리트 부재에서는 콘크리트에서 보강재로의 전단력 전달이 급속히 이루어지는데, 이러한 급속한 전단력의 전달을 고장력 철근의 높은 항복강도로 제어가 가능하다고 판단된다. 또한 강재의 항복강도의 증진은 극한 부착응력에는 거의 영향을 주지 못하지만 슬립량의 감소를 통해 궁극적으로는 부착응력을 상승시킨다고 알려져 있다. 이로 인해 종방향 철근의 확실한 구속 효과를 발휘하고 종방향 철근의 장부작용을 증진시켜 전체 구조물의 전단강도 증진에 기여하게 된다.

일반 철근과 CFRP 바를 교대로 전단 배근한 시험체 CFRP의 경우 최초 전단균열이 237 kN의 전단하중에서 관찰되었고, 342 kN에서 일반 전단철근이 최초 항복하였으며, 낮은 V_{cr} 때문에 다소 높은 1.44의 V_y/V_{cr} 을 보였다. 강섬유를 혼입한 부분 (N)에서는 전단균열이 거의 나타나지 않았고, 전단철근의 항복도 나타나지 않았다. 467 kN의 전단하중에 도달하였을 때 강섬유가 포함되지 않은 S부분에서 일반 전단철근의 파열이 일어나면서 중국 파괴를 보였고, 예측된 V_{MCFT} 보다 10% 낮은 극한전단력을 보여주었다. 이는 기존 연구^{20,21)}와 유사한 결과로 CFRP 바의 낮은 부착력 및 낮은 수직 방향 강도 때문인 것으로 판단된다. CFRP 바의 부착강도는 Table 4에 측정된 바와 같이 SD350의 46.9%, SD500의 43.2% 정도로 매우 낮아 콘크리트와의 일체 거동을 상실하게 되고 CFRP 바

자체 성능을 발휘하지 못하게 된다. 그러므로 FRP 바를 보강 재료로 사용하기 위해서는 표면 형태 및 처리 방법의 개선을 통하여 부착강도를 높일 필요가 있다. 또한 전단균열이 종 방향 인장철근을 가로지르는 지점에서 전단-할렬균열이 발생되었다. Fig. 5(c)와 (d)에 시험체 CFRP의 전단-할렬균열과 CFRP의 슬립 모습을 보여주고 있다.

3.2 중앙 처짐

Fig. 6은 각 시험체에 대하여 전단력에 따른 중앙부 처짐을 나타낸 것이다. 시험체 SN과 시험체 SNH를 비교해 보면 외부에서 가해지는 전단력이 약 300 kN일 때 까지 두 시험체는 거의 동일한 양상을 보이다가 그 이후 시험체 SN은 처짐량이 이전에 비해 급속히 증가하여 전단력이 약 340 kN일 때 약 9 mm의 중앙 처짐이 발생하며 384 kN의 전단력에서 약 12 mm의 처짐량을 보이면서 종국 파괴에 이르게 된다. 반면 시험체 SNH는 전단력이 약 460 kN일 때 약 9 mm의 중앙 처짐이 발생하고 630 kN의 전단력에서 약 17 mm의 처짐량을 보이면서 종국 파괴에 이르게 된다.

이는 정착부의 차이에 따른 처짐 양상을 보여주는 것으로 U자형 갈고리 전단철근을 사용한 시험체 SN은 약 340 kN의 전단력에서 전단철근이 항복함과 동시에 갈고리 정착부의 정착력이 손실되어 전단철근에 충분한 변형이 발생하기 이전에 전단철근이 탈락하여 부재 자체의 강성이 저하되고 중앙 처짐이 급격히 증가하는 것으로 판단된다. 반면 정착부가 헤드로 이루어진 시험체 SNH는 전단철근이 항복한 후에도 변형을 경화화 함께 정착력을 계속 유지하게 된다. 따라서 전단철근의 충분한 변형이 발생할 수 있게 되고 전단철근 사이의 충분한 응력 재분배를 유도하게 되어 항복 이전의 처짐 양상과 유사한 양상으로 처짐량이 서서히 증가하면서 최대 하중까지 진행되고 보다 더 큰 최종 처짐값을 나타내게 되는

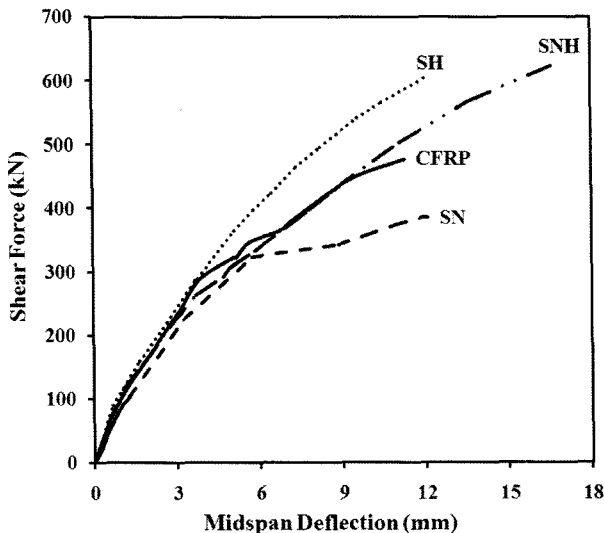


Fig. 6 Shear force vs. midspan deflection

것이다.

정착부가 동일한 시험체 SN과 시험체 SH의 처짐 양상 비교를 통해 전단철근의 항복강도가 중앙 처짐에 미치는 영향을 살펴보았다. 항복강도의 차이만 고려하기 위해 시험체 SH는 강섬유를 포함하지 않은 S부분만 고려하였다. 최종 중앙 처짐 값은 2개의 시험체 모두 약 12 mm로 거의 동일하였으며 외부에서 가해지는 전단력이 약 300 kN인 지점 이후에 두 시험체의 처짐 양상이 달라지기 시작하였다. 시험체 SN의 경우 전단철근의 항복 이후 갈고리 정착부의 정착력이 손실되면서 급격한 처짐량의 증가를 보인 반면, 시험체 SH의 경우 378 kN에서 전단철근이 항복하지만 정착력의 손실 없이 처짐과 유사한 처짐 양상을 보였다. 결국 동일한 하중 하에서 고장력 철근을 전단철근으로 사용한 경우의 중앙부 처짐이 더 작게 나타났다. 이는 더 큰 항복강도를 가지는 고장력 철근의 재료적 성질과 항복강도의 증가에 따른 콘크리트와의 슬립량 감소에 의한 부착력 증가가 그 원인인 것으로 생각된다.

시험체 SN과 시험체 CFRP의 처짐 양상을 비교해보면 시험체 SH의 경우와 마찬가지로 최종 중앙 처짐 값은 2개의 시험체 모두 약 12 mm로 거의 동일하였고, 약 300 kN의 전단력 이후 두 시험체의 처짐 양상이 달라지기 시작하였다. 시험체 CFRP는 일반 전단철근과 CFRP 바가 동시에 전단력에 저항하여 시험체 SN보다 더 큰 하중에서 일반 전단철근이 항복하였고, 항복 이후에도 갈고리 정착부의 정착력 손실 없이 일반 전단철근과 CFRP 바가 동시에 전단력에 저항하였다. 그러나 일반 전단철근의 항복 이후 변형률의 급격한 증가에 따라 CFRP 바의 부착력이 손실되고 슬립이 발생하여 시험체 SN의 기울기보다는 크지만 시험체 SH의 기울기보다는 작은 양상을 보였다.

3.3 주인장 변형을 및 전단철근 변형

Fig. 7은 전단보강 종류에 따라 전단력과 주인장 변형을 사이의 관계를 나타낸 것으로 전단균열이 지나갈 것으로 예상되는 지점에 설치된 LVDT 로켓을 통해 구하였으며, 각 시험체들의 균열 발생 전, 균열 발생 이후 그리고 보강재 항복 이후의 단계별 거동을 확인할 수 있다. 전단철근 정착력의 급격한 손실을 보인 시험체 SN이 가장 취성적인 거동을 보였고, 각 시험체의 전단 거동 및 중앙 처짐 분석에서 관찰된 바와 같이, 전단 보강재의 정착 성능 향상 및 강도증진에 의해서 연성거동을 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 강섬유의 혼입 여부에 따라 시험체의 좌우를 분리 타설한 시험체 SH, 시험체 CFRP의 주인장 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 두 시험체 모두 강섬유를 포함한 부분(N)의 주인장 변형률이 포함하지 않은 부분(S)에 비해 상당히 작게 나타났다. 이는 N 부분은 강섬유의 혼입을 통해 콘크리트의 균열이 제어되기 때문에 S

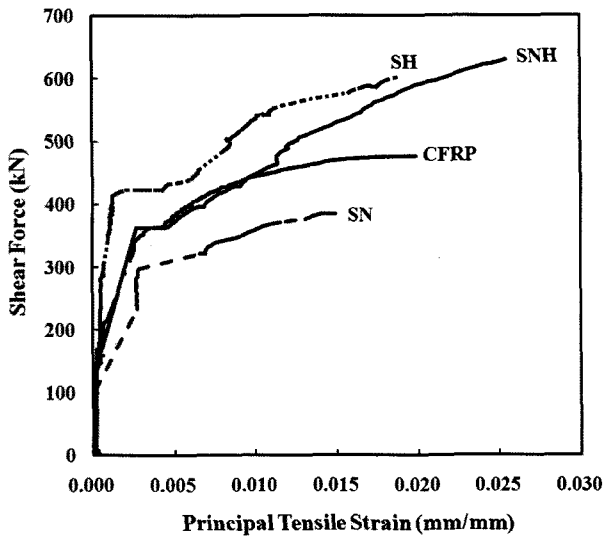


Fig. 7 Shear force vs. principal tensile strain

부분에서 먼저 콘크리트 전단 균열이 발생하고, S 부분으로 응력이 집중되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 강섬유가 혼입되지 않은 부분의 균열 때문에 강섬유가 혼입된 부분의 주인장변형률이 증가하지 못하고 오히려 줄어드는 현상까지 나타났다.

Fig. 9는 전단력-전단철근 (주요 전단균열면)의 변형률 관계를 보여준다. 시험체 SNH와 시험체 SH의 전단철근은 항복 이후 철근의 변형률 경화와 함께 전단철근 사이의 응력 재분배 현상이 발생하고 하중에 대한 철근의 분담이 제대로 이루어져 콘크리트의 하중 분담을 줄여 주었다. 반면 시험체 SN은 전단철근 사이의 응력 재분배가 이루어지지 않고 어느 특정 전단철근에 응력 집중 현상이 발생하였다. 10번 전단철근만이 항복 이후 변형률 경화를 보여주다가 갑작스런 정차력 손실로 인해 다른 전단철근과의 응력 재분배가 이루어지지 않고 급작스럽게 파괴되었다. 또한 시험체 CFRP의 경우를 살펴보면, 전단철근 사이의 응력 분배가 조금은 나타났지만, 일반

강도 전단철근 S7, S9, S11은 항복하지 않았고 CFRP 바가 사용된 S8, S10은 변형률 0.0057까지 보여주고 파괴되었다.

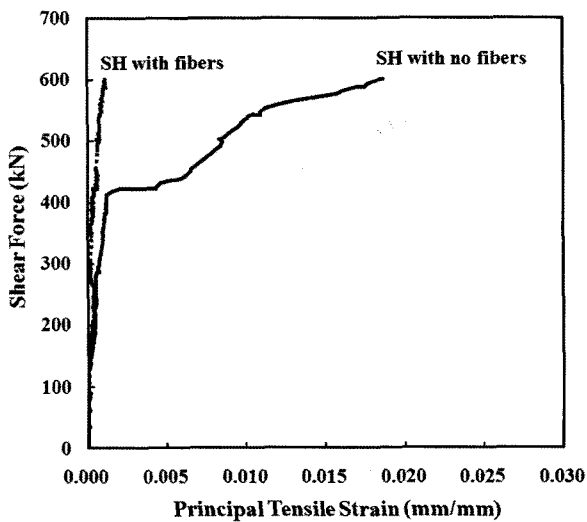
3.4 균열 검토

4개의 시험체 모두 초기 하중 단계에서는 시험체 중앙에서 약간의 휨균열이 발생한 뒤 하중이 점점 증가하면서 사인장 균열이 진전되어 파괴되는 전형적인 전단 파괴가 발생하였다. Fig. 4에 종국 파괴 시 균열 양상이 나타나 있다.

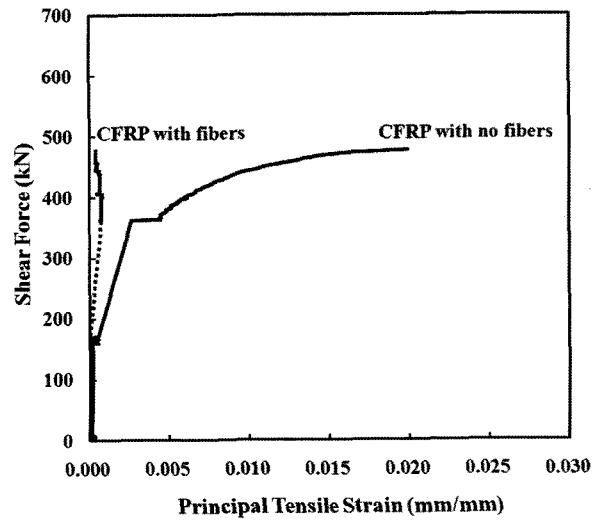
모든 시험체의 종국 전단파괴를 이끄는 주 전단균열은 부재의 오른쪽 부분 (S, 롤러지지)에서 발생하였다. 전단균열이 발생하고 그 균열 폭이 커짐에 따라 시험체 S부분의 롤러지점이 조금씩 오른쪽으로 밀리는 현상이 종국 전단파괴에 영향을 주었을 것이라고 판단된다. 또한 시험체 SH와 CFRP는 강섬유를 혼입하지 않은 부재의 우측부에서 더 큰 균열이 발생하였고 바로 이 부분에서 종국 전단파괴가 발생되었다.

Fig. 10는 전단보강재 종류별로 전단력에 따른 최대 전단균열폭을 나타낸 것이다. 또한 전단력 단계별 처짐량이 달라 균열폭 비교시 곡률 차이가 생기므로 중앙 처짐과 최대 전단균열폭과의 관계를 Fig. 11에 나타내었고, 정략적인 비교를 위해 중앙 처짐이 각각 4, 6, 10 mm일 때 최대 전단균열폭을 Fig. 12에 나타내었다.

일반강도의 전단철근을 사용한 시험체 SN과 SNH의 경우는 중앙 처짐이 변화함에 따라 최대 전단균열폭도 서서히 증가하는 반면 고장력 철근을 사용한 시험체 SH와 CFRP 바를 전단철근으로 사용한 시험체 CFRP는 중앙 처짐이 변화함에 따라 급격하게 최대 전단균열 폭이 증가한다. 시험체 SH의 경우는 큰 변형까지 저항하는 고장력 전단철근 성능 때문인 것으로 생각되고, 가장 큰 최대 전단균열폭을 보인 시험체 CFRP의 경우는 CFRP의



(a) Specimen SH



(b) Specimen CFRP

Fig. 8 Influence of SFRC on shear force-principal tensile strain responses

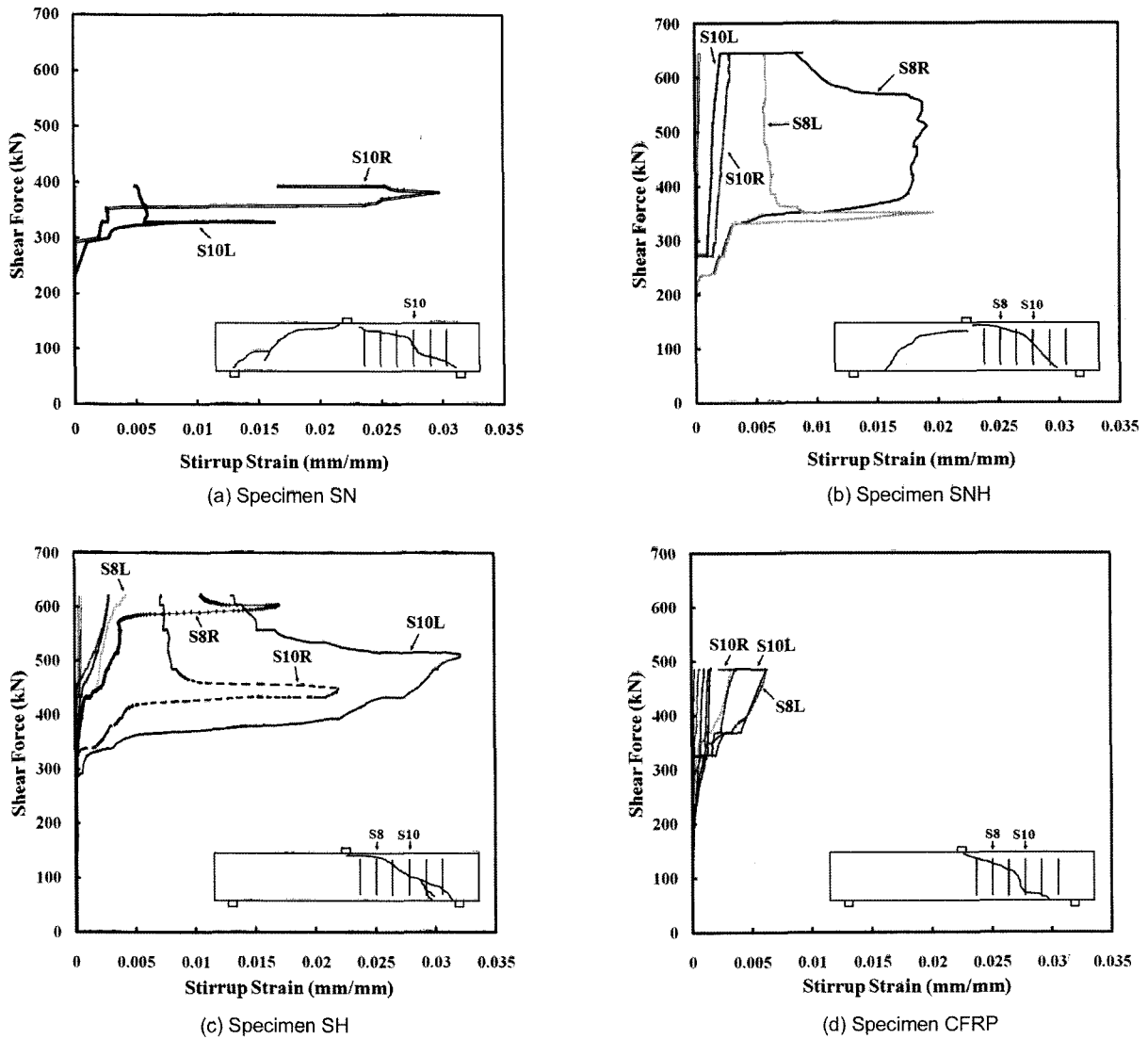


Fig. 9 Shear force vs. strain responses of stirrups for specimens

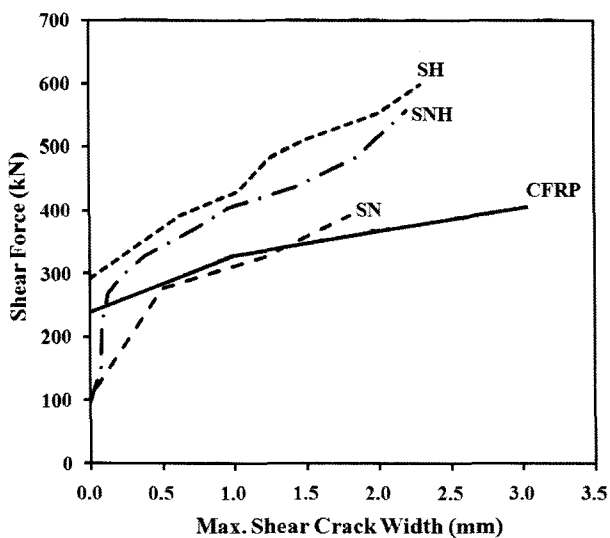


Fig. 10 Maximum shear crack width vs. shear force

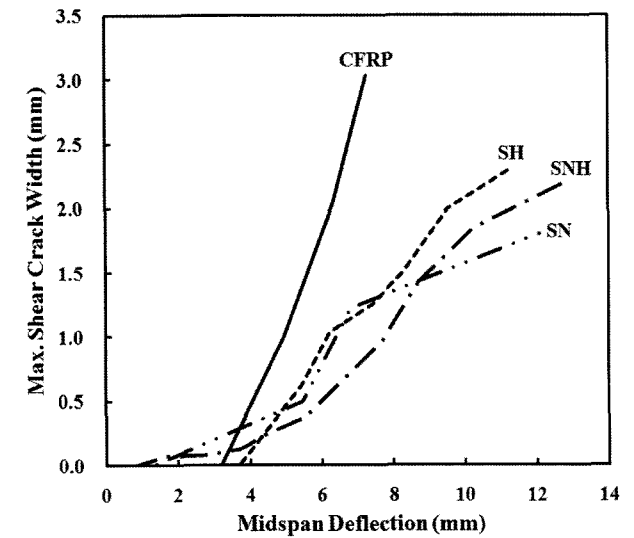


Fig. 11 Maximum shear crack width vs. midspan deflection

낮은 부착력 때문인 것으로 판단된다.

고장력 철근 및 CFRP 바의 균열 폭 제어를 위한 방법으로 시험체 SH와 시험체 CFRP에 강섬유를 혼입하여

실험하였고, 균열폭에 대한 강섬유의 영향을 Fig. 13에 나타내었다. 강섬유를 혼입한 경우 혼입하지 않은 경우보다 훨씬 작은 최대 균열폭을 보여주었다. 강섬유는 콘

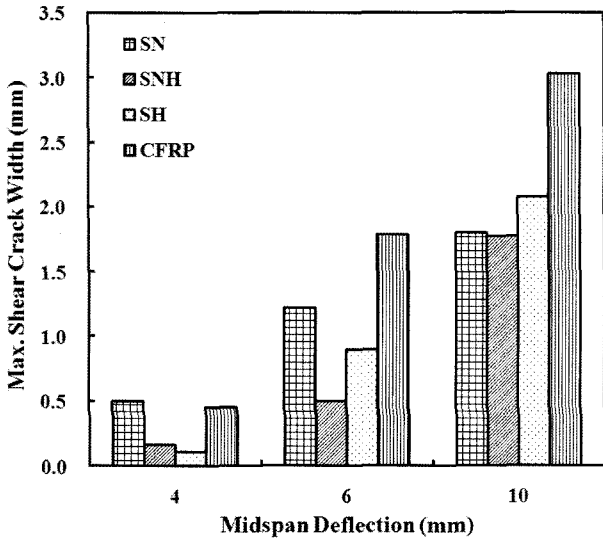
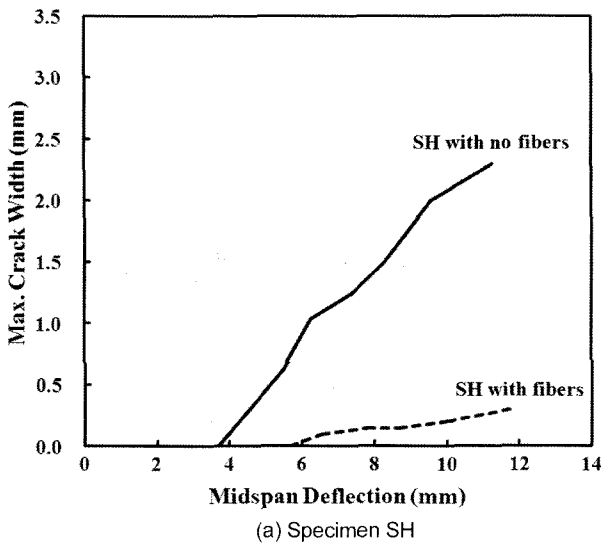
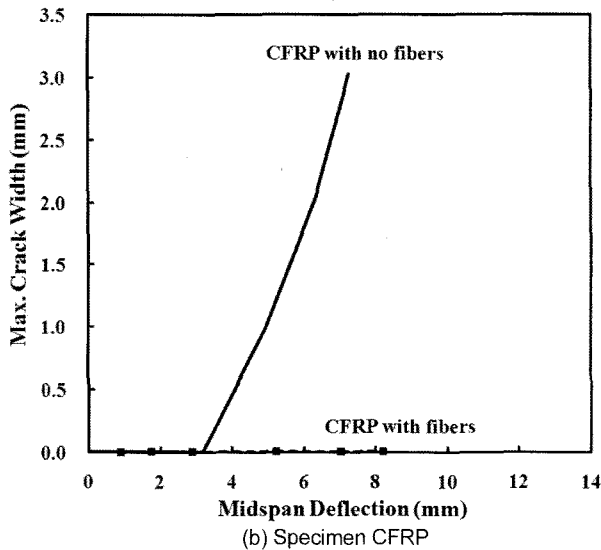


Fig. 12 Maximum shear crack width on specific deflection



(a) Specimen SH



(b) Specimen CFRP

Fig. 13 Influence of SFRC on max. crack width

크리트에 혼입되면 섬유 함유의 부착 이탈에 필요한 부가 에너지를 필요로 하게 되며 그를 통해 균열폭의 증가를 억제하는 성능을 가지고 있기 때문이다. 이를 통해 고장력

철근 및 CFRP 바를 고강도콘크리트 부재의 전단 보강 재료로 사용할 때 발생 가능한 큰 균열 폭을 강섬유를 통해 제어할 수 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 강섬유를 혼입하지 않은 부분 (S)의 전단 균열이 확장되면서 강섬유를 혼입한 부분 (N)의 균열을 달아 더 이상 균열이 확장되지 못한 것으로 판단되어 강섬유 혼입에 대한 평가는 다소 과장된 평가로 생각된다.

또한 ACI에서는 큰 균열폭의 문제 때문에 항복강도가 420 MPa를 넘는 고장력 철근을 전단철근으로 사용하지 못하도록 규정하고 있다¹⁷⁾. 본 연구에서는 569 MPa의 항복강도를 가지는 고장력 전단철근을 사용하여 다소 큰 균열폭을 보였지만 강섬유를 통해 균열폭의 제어가 가능할 것으로 판단된다.

한편 Table 7에 사용하중 하의 균열폭을 정리하였다. ACI 기준에서, 전단보강이 된 경우 사용하중 하의 전단력은 ACI 기준에서 허용하는 공칭전단력의 60%로 추정하였기 때문에 사용하중은 Table 6에 정리한 공칭전단력 V_{ACI} 의 60%로 계산하였다. 사용하중 하의 균열폭을 살펴보면 시험체 SN과 시험체 CFRP가 허용균열폭보다 더 큰 균열폭을 보인 것으로 나타났다.

ACI 318-05에서는 아래 식 (1)으로 최소 전단철근규정을 개정하였다¹⁷⁾.

$$A_{v, \min} = 0.062 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w s}{f_{yt}} \geq \frac{0.35 b_w s}{f_{yt}} \quad (1)$$

여기서, $A_{v, \min}$: 전단철근 최소 단면적 (mm^2)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도 (MPa)

b_w : 복부의 폭 (mm)

s : 전단철근의 간격 (mm)

f_{yt} : 전단철근의 항복강도 (MPa)

본 실험은 전단 보강 재료의 차이에 따른 전단거동 양상을 파악하기 위해 전단철근의 단면적과 간격을 고정하고 전단과파가 일어나도록 설계되었기 때문에, 시험체 SH를 제외한 모든 시험체에 사용된 전단철근의 양이 개정된 ACI 최소 전단철근규정을 만족하지 않았고, 이 때문에 시험체 SN과 시험체 CFRP가 허용균열폭보다 더 큰 사용하중 하의 균열폭을 나타낸 것으로 보인다. 또한 시험체 CFRP는 매우 낮은 부착력 때문에 발생된 큰 슬립으로 인하여 전단균열폭이 급격히 증가하여 허용균열폭보다 더 큰 사용하중 하의 균열폭을 보인 것으로 판

Table 7 Crack widths at service load

Specimen	V_{service} (kN)	W_{service} (mm)
SN	271	0.40
SNH	271	0.13
SH	304	0.05
CFRP	279	0.45

Note) V_{service} : service load, W_{service} : maximum crack width at service load

단된다. 반면 시험체 SNH는 헤디드 바의 높은 정착력 때문에 ACI에서 규정한 최소 전단철근량을 만족하지 못함에도 불구하고 사용하중 하의 균열폭 규정을 만족하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도콘크리트를 사용한 부재의 전단 성능 향상을 위하여 고장력 철근, 헤디드 바, CFRP 바, 강섬유를 이용한 전단 실험을 실시하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일반 철근을 전단철근으로 사용한 시험체 (SN)는 U 자형 전단철근의 갈고리 정착부의 정착력이 떨어져 전단철근의 항복 이후 급격한 종국 파괴에 이르렀고, 예측치보다 낮은 극한전단력을 보였다. 또한 갈고리 정착부의 정착력 손실을 통한 압축철근의 좌굴, 전단철근의 파단, 콘크리트 피복 탈락, 전단-할렬균열 현상을 보였으며 중앙 처짐이 급격하게 증가하는 거동을 나타냈다.
- 2) 헤디드 바를 전단철근으로 사용한 시험체 (SNH)는 헤디드 바의 우수한 정착력 때문에 항복 이후 지속적으로 하중에 저항하는 모습을 보여주었고, 예측치보다 27% 높은 극한전단력을 나타내었다. 중앙 처짐은 급격한 변화없이 서서히 진행되었지만 종국 파괴 시 매우 큰 중앙 처짐을 보여주었고, 사용하중 하의 균열폭 규준을 만족하였다.
- 3) 고장력 철근을 전단철근으로 사용한 시험체 (SH)는 큰 항복강도와 부착력의 증진 때문에 예측치보다 20% 높은 극한전단력을 보여주었다. 서서히 증가하는 중앙 처짐의 양상을 보여주었고, 사용하중 하의 균열폭 규준보다 작은 균열폭을 나타냈다. 강섬유를 혼입한 부분 (N)에서는 주인장 변형률의 증가 및 균열폭의 증가가 거의 나타나지 않았다.
- 4) 일반 전단철근과 CFRP 바를 교대로 전단 배근한 시험체 (CFRP)는 CFRP 바의 낮은 부착력 때문에 CFRP 바 자체 성능을 발휘하지 못하고 큰 슬립량과 급격한 균열폭의 증가를 보이면서 예측치보다 낮은 극한 전단력을 보이면서 종국 파괴되었다. 강섬유를 혼입한 부분 (N)에서는 주인장 변형률의 증가 및 균열폭의 증가가 거의 나타나지 않았고 오히려 주인장 변형률이 감소하고 균열폭이 줄어드는 현상이 나타났다.
- 5) 전단보강 재료의 변화를 통해 전단강도를 증진시키는 방법은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 V_s 부분을 직접 증가시키는 방법이고, 다른 하나는 콘크리트와의 부착력, 정착력을 증가시키는 방법이다. V_s 부분의 직접 증가는 고강도 재료의 사용으로 얻을 수 있으며 부착력 및 정착력의 증진은 정착 부분의 개조와 고강도 재료의 사용, 표면 형태 및 처리 방법의 개선 등으로 얻을 수 있음을 확인

하였다.

- 6) 고장력 철근을 사용하여 전단 보강을 한 경우, 부재의 연성은 보통 강도의 철근으로 전단보강을 한 경우와 거의 유사하므로 고강도콘크리트 부재의 전단 보강 재료로 적용이 가능하며 강섬유를 통한 균열폭 제어 시 이를 더 극대화시킬 수 있다.
- 7) 고강도콘크리트 보의 취성적인 특성에 기인한 콘크리트에서 보강재로의 급속한 전단력 전달은 헤디드 바, 고장력 철근을 전단보강재로 사용함으로써 제어할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Berner, D. E., Gerwick, B. C., and Hoff, G. C., "T-Headed Stirrup Bar", *Concrete International*, May, 1991, pp.49~53.
2. ASTM, Standard Specification for Headed Steel Bars for Concrete Reinforcement, *A970/ A970M-98*, West Conshohocken, Pa., 1998. 6pp.
3. Devries, R. A., Jirsa, J. O., and Bashandy, T., "Anchorage Capacity in Concrete of Headed Reinforcement with Shallow Embedments", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.5, 1999, pp.728~736.
4. Berner, D. E. and Hoff, G. C. "Headed Reinforcement in Disturbed Strain Regions of Concrete Members", *Concrete International*, Jan. 1994, pp.48~52.
5. Wallace, J. W., "Headed Reinforcement A Viable Option", *Concrete International*, Dec. 1997, pp.47~53.
6. Wallace, J. W., McConnell, S. W., Gupta, P., and Cote, P. A., "Use of Headed Reinforcement in Beam-Column Joints Subjected to Earthquake Loads", *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.5, 1998, pp.590~606.
7. Kim, Y. H., Yoon, Y. S., Cook, W. D., and Mitchell, D., "Repeated Loading Tests of Concrete Wall Containing Headed Shear Reinforcement", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.130, No.8, 2004, pp.1233~1241.
8. Bentur, A. and Mindess, S., *Fiber-Reinforced Cement Composites*, Elsevier Applied Science, London, 1990, pp.1~11.
9. Balaguru, P. N. and Shah, S. P., *Fiber-Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1992, pp.2~8.
10. Bernardi, S. and Mesureur, B., "Study of High-Strength Concretes Reinforced With High-Strength Reinforcement: Study of Bonding Laws and Cracking in Static System", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.491~499
11. American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars", *ACI 440.1R-06*, Farmington Hill, Mich., 2006, 44pp.

12. American Concrete Institute (ACI), "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures", *ACI 440.3R-04*, Farmington Hill, Mich., 2004, 40pp.
13. Nanni, A., Ed., *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures : Properties and Applications, Developments in Civil Engineering*, Vol.42, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1993, 450pp.
14. Yoon, Y. S., Cook, W. D., and Mitchell, D., "Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium and High-Strength Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.5, 1996, pp.576-584.
15. Bentz, E. C. and Collins, M. P., "RESPONSE 2000", Version 1.05, University of Toronto, 2000.
16. Collins, M. P. and Mitchell, D., Adebear, P., and Vecchio, F. J., "A General Shear Design Method", *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.1, 1996, pp.36-45.
17. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, *ACI 318-05 and ACI 318M-05*, American Concrete Institute, Detroit, Mich. 2005, 436pp.
18. Azizinamini, A., Stark, M., Roller, J. J., and Ghosh, S. K., "Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.5, 1993, pp.554-561
19. Frosch, R. J., "Behavior of Large-Scale Reinforced Concrete Beams with Minimum Shear Reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.6, 2000, pp.814-820.
20. Yost, J. R., Gross, S. P., and Dinehart, D. W., "Shear Strength of Normal Strength Concrete Beams Reinforced with Deformed GFRP Bars", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.5, No.4, 2001, pp.268-275.
21. 박현영, 장희석, 김명석, 김희철, "FRP Bar를 휨 및 전단 보강근으로 사용한 콘크리트 보의 전단강도", 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 17권, 1호, 2005, pp.399-402.
22. 윤영수, 철근콘크리트 역학 및 설계, 도서출판 새론, 2005, pp.197-257.

요 약 일반 강도의 철근을 고강도콘크리트 구조물에 사용하는 경우, 고강도콘크리트의 취성을 보완하고 그 성능을 십분 활용하기 위해서는 많은 양의 철근이 요구된다. 이는 곧 철근의 과밀 배근이나 자중의 증가와 같은 구조, 시공상의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 고강도콘크리트 부재에 적합한 새로운 보강 재료 혹은 공법이 필요한 것이다. 이에 본 연구에서는 100 MPa의 고강도콘크리트를 사용하여 4개의 실물크기 보 시험체를 제작하고, 전단보강재를 달리하여 전단 거동에 대한 효과를 관찰하기 위해 실험을 수행하였다. 4개의 시험체는 각각 일반 철근, 고장력 철근, 헤디드 바, CFRP 바를 전단 스티럽으로 사용하였으며, 이 중 2개의 시험체에는 강섬유를 콘크리트에 혼입하여 그 효과를 관찰하였다. 고장력 철근의 사용은 전단철근에 의한 전단력과 부착력의 증가로 인해 전반적인 전단 성능의 향상을 가져왔다. 헤디드 바로 전단 보강된 부재의 경우에도 헤디드 바의 상당히 높은 정착강도로 인해서 우수한 전단 거동을 보였다. 하지만 본 실험에서 사용된 CFRP 바의 경우, 부착력이 매우 떨어져 전단보강재로서 적합하지 못한 것으로 나타났다. 강섬유 보강 콘크리트를 통해 부재의 연성 및 균열 제어 능력이 향상되었다.

핵심용어 : 전단 성능, 고강도콘크리트, 고장력 철근, 확대머리철근, CFRP 철근