



힘을 받는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 구조 거동

양인환¹⁾ · 김경철^{1)*} · 조창빈²⁾

¹⁾군산대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원 인프라구조연구실

Structural Behavior of Hybrid Steel Fiber-Reinforced Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending

In-Hwan Yang,¹⁾ Kyoung-Chul Kim,^{1)*} and Chang-Bin Joh²⁾

¹⁾Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

²⁾Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT This paper concerns the flexural behavior of hybrid steel fiber-reinforced ultra high performance concrete (UHPC) beams. It presents experimental research results of hybrid steel fiber-reinforced UHPC with steel fiber content of 1.5% by volume and steel reinforcement ratio of less than 0.02. This study aims at providing realistic information about UHPC beams in bending in order to establish a reasonable prediction model for flexural resistance in structural code in the future. The experimental results show that hybrid steel fiber-reinforced UHPC is in favor of cracking resistance and ductility of beams. The ductility indices range through 9.2 to 15.2, which means high ductility of UHPC. Also, the flexural capacity of beam which contains stirrups in pure bending zone is similar to that of beam which does not contain stirrups in pure bending zone. This result represents that the flexural capacity is not affected by the presence of stirrups whose spacing is 150 mm in bending zone.

Keywords : ultra high performance concrete, hybrid steel fibers, flexural capacity, ductility, crack

1. 서 론

콘크리트 구조물의 장대화, 고층화, 대형화에 따라 콘크리트 재료의 고강도, 고성능, 고내구성 등의 여러 성능이 요구되고 있다. 그러나, 기존의 시멘트계 재료로만 구성된 일반콘크리트는 인장강도와 휨강도가 낮고 파괴 시 취성적인 성질을 나타내고 있어, 최근에 요구되는 여러 성능을 만족시키는데 한계가 있다. 기존 콘크리트의 이러한 단점을 개선하기 위해 콘크리트에 섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트에 대한 여러 연구가 국내외에서 진행되었다.¹⁻⁴⁾ 섬유 중에서 강섬유를 혼입한 강섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 인성, 연성, 피로 및 충격에 대한 저항능력을 향상시킨다. 강섬유 보강 콘크리트는 초고강도의 발현, 인성의 증대 등을 통해 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC) 또는, 초고성능 시멘트 복합체(ultra high performance cementitious composite)로 일컬어질 정도로 성능이 증대되고 있다.⁵⁻⁸⁾

강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 콘크리트의 처짐 및 휨강도 특성을 향상시키고, 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있다.⁹⁻¹²⁾ 그러나, 기존의 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 연구^{1,5,8-13)}는 주로 단일섬유로 보강된 초고성능 콘크리트에 대해 수행되었으며, 두가지의 서로 다른 섬유를 혼입한 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 구조거동 특성에 관한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 우리나라의 콘크리트 구조설계기준을 포함한 대부분의 해외 설계기준에도 설계기법이 제한적인 상황이다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 또한, 기존에 제안된 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도 산정식은 초고성능 콘크리트가 아닌 일반적인 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도 산정을 대상으로 하고 있으며,^{17,18)} 연구대상 인장철근비가 0.015 이상인 휨 부재를 주된 대상으로 하고 있어 철근비가 낮고 강섬유가 일정부분 인장보강근 역할을 하는 강섬유 보강 초고강도 또는 초고성능 콘크리트의 휨강도를 예측하는 데 한계가 있다. 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 더욱 정밀한 휨강도 예측을 개발하기 위해서는 철근비 0.02이하의 낮은 철근비에 대한 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 휨 거동에 대한 연구가 필요한 실정이다.

*Corresponding author E-mail : popping6069@naver.com

Received September 15, 2014, Revised October 15, 2014,

Accepted October 20, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

따라서, 본 연구에서는 0.02 이하의 낮은 철근비를 갖는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 정적 재하 실험을 수행하여 휨 거동 특성을 파악하고자 하였다. 본 실험연구에서는 압축강도 180 MPa를 상회하는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 부재 실험을 통하여 초고성능 콘크리트의 균열 및 파괴 특성, 처짐 특성, 휨강도 특성 등의 기본 거동 특성을 고찰하였다.

2. 실험계획

2.1 재료특성

본 연구에서의 초고성능 콘크리트는 굵은 골재를 사용하지 않고 1.5% 부피비의 하이브리드 강섬유를 혼입해서 180 MPa 이상의 압축강도를 발현하고 인성을 크게 향상시킨 초고성능 건설재료이다.

본 연구에서 적용한 UHPC의 매트릭스는 미세 균열이나 공극을 최소화하기 위하여 조적을 매우 치밀하게 구성하는 특징이 있다. 이를 위해 미세 입자들을 일정 범위 내에서 입도분포를 가지도록 구성하였다. 배합에 적용한 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트이며, 반응성 분체로 지르코늄을 사용하였다. 잔골재는 입도 0.5 mm 이하의 모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다.

물-결합재 비는 0.2를 적용하였다. 낮은 물-결합재비에 의한 소요의 작업성을 확보하기 위해 밀도 1.06 g/cm^3 의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 또한, UHPC에서 사용되는 충전재(filler)는 구성입자 평균입경이 $10 \mu\text{m}$ 정도이고 SiO_2 98%이상, 밀도 2.60 g/cm^3 의 재료를 사용

하였다. 길이가 19 mm인 강섬유를 부피비 기준 1.0%, 길이가 16 mm인 강섬유를 부피비 기준 0.5%로 혼입하여 전체 부피비 1.5%의 하이브리드 강섬유를 적용하였다. 강섬유의 밀도는 7500 kg/m^3 이고 항복강도는 2500 MPa이다. Table 1에 UHPC의 배합비를 주요 시멘트에 대한 구성재료의 중량비로 나타내었다.

휨 부재 제작 시에 배치(batch) 별로 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 원주형 공시체의 압축강도실험을 통하여 UHPC의 압축강도를 파악하였으며, 각 배치의 UHPC의 압축강도를 Table 2에 나타내었다. 또한, 실험부재에 사용된 철근은 공칭직경 13 (D13) 또는 16 mm (D16) 철근이며, 항복강도는 420 MPa이다.

2.2 실험 부재 계획

본 연구에서는 단면폭은 200 mm, 높이는 250 mm인 직사각형 단면형상을 갖고 길이가 3300 mm 인 7개의 보 부재를 제작하였다. 실험 부재의 변수는 휨철근 비, 순수 휨 구간에서의 스티럽 배근 여부 및 UHPC 타설방법이다.

휨철근이 없는 경우를 기준으로 휨철근비 0.02 (2%) 이 내에서 하이브리드 강섬유 보강 UHPC 보의 휨 거동 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 부재는 철근이 없는 경우를 기본으로 하고(보 B-R0), 휨 철근의 개수를 2가닥, 3가닥 및 4가닥으로 조절하여 휨 철근비를 각각 다르게 구성하였다.

단면에서 하단인장철근은 순회복 두께가 30 mm 되도록 배근하였다(Fig. 1).

하중을 4점하중재하법으로 가력하여 하중 재하점 사이 구간에서 순수 휨구간을 계획하였다. 순수 휨구간에는 스티럽을 배근할 필요가 없으나, UHPC 타설 시 스티럽의 강섬유 배열에 대한 영향과 이에 의한 휨 거동 영향을 파악하기 위하여 부재 B-R2-S의 순수 휨구간에 스티럽을 150 mm 간격으로 배근하였다(Fig. 1(b)). 또한, 모든 실험부재의 순수 휨구간 좌·우 구역에는 D10 스티럽을 150 mm 간격으로 배근하여 전단파괴를 방지하였다.

Table 1 Mix proportion (weight ratio)

Water-binder ratio	Cement	Zirconium	Filler	Fine agg.	Water-reducing admixture
0.2	1.0	0.25	0.3	1.1	0.02

Table 2 Parameters used in experimental tests with UHPC mixture

Beam	f_{ck} (MPa)	Test parameters			
		Rebar ratio		stirrup spacing (mm)	Method of placing
		Rebar	Ratio		
B-R0	177.8	-	0.0000	-	End
B-R1	182.9	2-D13	0.0059	-	End
B-R2	186.2	3-D13	0.0089	-	End
B-R2-S	186.2	3-D13	0.0089	150	End
B-R2-C	182.9	3-D13	0.0089	-	Midspan
B-R3	179.9	4-D13	0.0119	-	End
B-R4	181.9	3-D16	0.0155	-	End

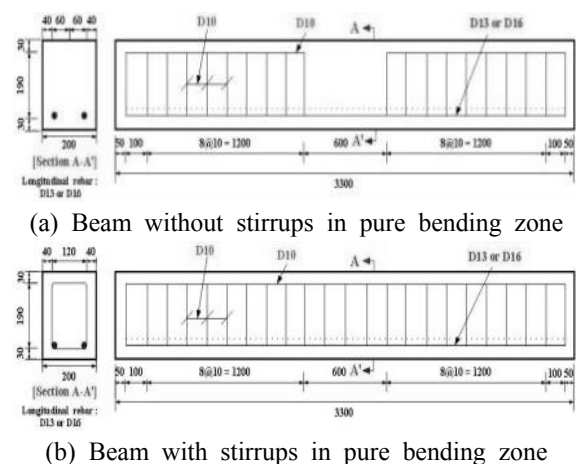


Fig. 1 Dimension of test beam

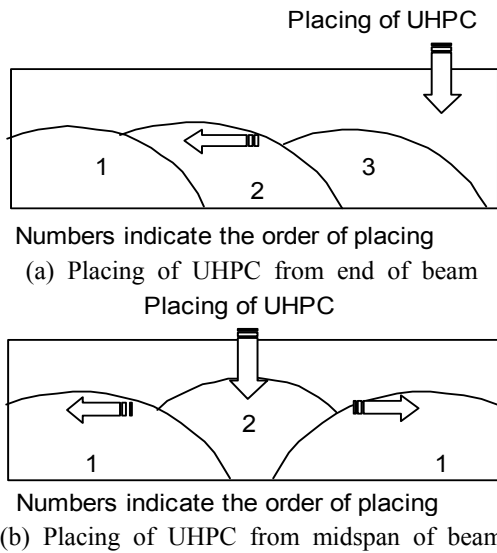


Fig. 2 Procedure for placing of UHPC

UHPC의 타설은 두가지 방법으로 수행하였다. B-R2-C 부재를 제외한 모든 부재는 부재의 끝단에서부터 UHPC를 타설하였다. B-R2-C 부재는 지간 중앙에서부터 콘크리트를 타설하였다. B-R2 부재와 B-R2-C 부재는 휨철근 상세는 동일하다. 다만, B-R2 부재는 부재 끝단에서부터 콘크리트를 타설하고, B-R2-C 부재는 지간 중앙에서부터 콘크리트를 타설하여 콘크리트 타설 방법이 다르다. UHPC 타설방법을 Fig. 2에 나타내었다.

실험부재는 다음과 같은 공정으로 이루어졌다. 거푸집 조립 후 철근을 배근하였으며, 각 부재의 하중에 따른 철근변형률을 측정하기 위하여 순수 휨구간 내의 인장철근에 철근변형률게이지를 부착하였다. UHPC 타설 후 36시간동안 습윤양생을 수행하였다. 습윤양생 후에 콘크리트 부재를 증기양생장치에서 $90\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 72시간 양생을 실시한 후 실험재령 시까지 기건양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 액츄에이터(actuator)를 사용하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 4점 재하방식으로 하중을 단계적으로 재하하여 실험을 수행하였다. 시편의 양쪽 단부로부터 150 mm 위치에 강제 로울러를 설치하여 시편의 지지점으로 하였으며, 지점 사이의 거리는 3000 mm로 하였다. 하중 가력점은 시편의 중심에서 각각 300 mm 떨어진 곳에 위치하며, 가력점 사이의 600 mm 구간에서 순수 휨(pure bending)이 작용하도록 계획하였다. 다만, 실험 사정상 부재 B-R2-S의 하중 가력 구간은 800 mm로 설정하였다. 강제 가력보를 액츄에이터와 실험부재 사이에 놓고 하중을 재하하였다. 액츄에이터를 1.5 mm/min의 속도로 변위제어 방식으로 재하하였다.

실험자료를 측정하기 위한 계측센서는 콘크리트변형률 게이지, 철근변형률 게이지, 부재 처짐 측정용 LVDT 및

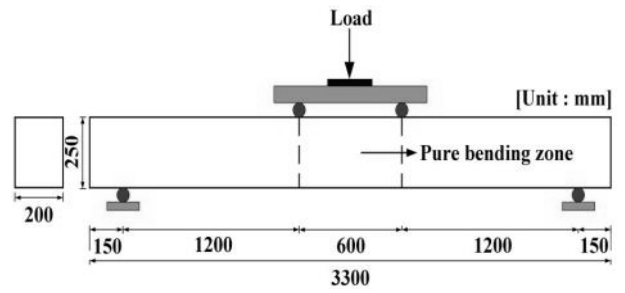


Fig. 3 Dimension of test setup

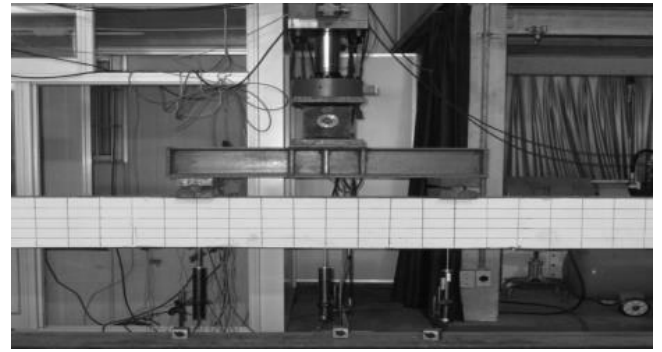


Fig. 4 Test setup

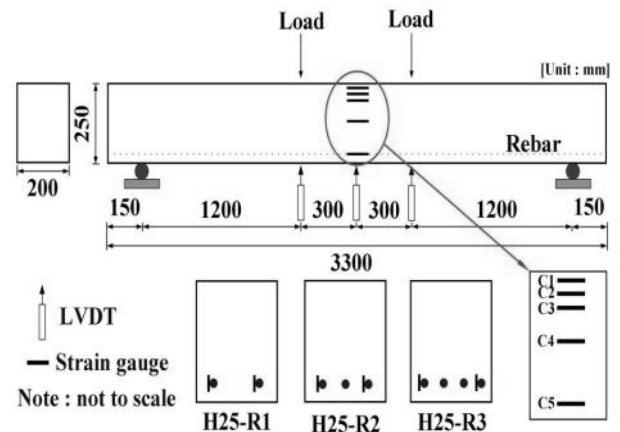


Fig. 5 Location of strain gauges

로드셀 등 4가지로 구성하였다. 부재의 계측시스템 구성도를 Fig. 5에 나타내었다. 5개의 전기저항식 변형률게이지를 지간중앙위치의 부재측면에 부착하여 단면 내 콘크리트 종방향 변형률을 측정하였다. 철근 변형률 게이지를 순수 휨구간의 철근에 부착하여 철근변형률을 측정하였다. 또한, 부재의 중앙단면과 하중재하점에 변위계(LVDT)를 설치하여 부재의 처짐을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 및 파괴 양상

부재의 균열 및 파괴양상을 파악하기 위해 파괴 시까지 하중을 재하하여 각 하중단계에 따른 균열진전 양상

을 고찰하였다. 대표적으로 부재 B-R4의 하중 재하에 따른 균열진전양상을 Fig. 6에 나타내었다.

초기하중단계에서 처짐의 증가에 따라 몇 개의 초기 균열이 발생한다. 초기 균열 단계에서 균열 사이의 간격은

넓게 분포한다. 초기 균열은 미세균열(micro crack)로써 균열폭은 육안으로 거의 관찰하기가 힘든 정도이다. 초기 균열 이후, 하중증가에 따라 기존의 균열과 균열 사이에 새로운 미세 균열이 발생한다. 초기 미세 균열은 순수 휨 구간의 하단에서부터 발생한다. 부재의 하단에서 발생한 균열은 하중 증가에 따라 부재 상단으로 균열이 수직으로 진전되는 전형적인 휨균열 양상을 나타낸다. 하중이 증가함에 따라 다수의 미세균열 중 하나의 균열폭이 급격하게 증가하여 주균열(major crack) 상태로 진전한다. 주균열 발생 단계에서 부재는 거의 최대하중(극한하중) 상태에 도달한다(Fig. 7). 최대하중 도달 이후 휨 균열은 부재의 상연으로 계속해서 진전한다. 최종적으로 부재 상연에서 콘크리트 압쇄현상이 발생하였으며, 부재는 휨 파괴가 발생하였다.

일반 콘크리트와 달리 UHPC는 강섬유가 균열 발생 후에 지속적인 가교역할(bridging effect)을 하여 균열성장을 억제하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.^{4,10)} 이 실험연구에서 부재 별로 초기균열 발생하중은 비슷하나, 초기 균열 이후 극한하중에 도달할 때까지 뚜렷한 하중부담능력을 나타낸다. 초기균열에서 극한상태까지의 하중부담능력은 강섬유 가교역할로 인해 급격한 균열 성장을 억제하였기 때문이라고 판단된다.

3.2 휨 거동 특성

Table 3에 초기균열하중과 극한하중 실험결과를 나타내었다. 초기균열하중은 하중-처짐곡선에서 초기 선형구간 종점에서의 하중값으로 산정하였으며, 극한하중은 하중-처짐곡선의 최대하중으로 산정하였다. 초기균열단계까지 처짐은 하중에 비례하여 선형으로 증가한다.

부재별 초기균열하중은 39.1~49.5 kN으로써, 큰 차이를 나타내지 않는다. 부재 B-R2-C의 균열하중은 39.1 kN으로써 최소 균열하중을 나타내며, 부재 B-R4의 균열하중은 49.5 kN으로써 최대 균열하중을 나타낸다.

한편, 극한하중은 휨철근량에 따라 부재별로 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 부재 B-R0, B-R1, B-R2, B-R3 및 B-R4의 휨 철근비는 0, 0.59, 0.89, 1.19 및 1.55%이다. Table 3에서 보는 바와 같이 휨철근량 증가에 따라 휨강도는 증가하고 있다. 부재 B-R0 ($\rho=0\%$)의 극한 휨모멘트는 32.2 kN-m으로써 가장 낮은 휨성능을 나타내는데, 이는 별도의 휨철근을 배근하지 않았기 때문이다. 반면에, 부재 B-R1 ($\rho=0.59\%$), B-R2 ($\rho=0.89\%$), B-R3 ($\rho=1.19\%$) 및 B-R4 ($\rho=1.55\%$)의 극한 휨모멘트는 각각 66.9, 78.8, 88.3 및 91.0 kN-m이다.

대표적으로 휨철근이 없는 부재 B-R0와 휨철근을 배근한 부재 B-R2의 휨거동 특성을 살펴보면 다음과 같다. 부재 B-R0의 하중-처짐 곡선을 Fig. 8에 나타내었으며, 곡선 위의 숫자는 해당 하중단계에서의 최대균열폭을 나타낸다.

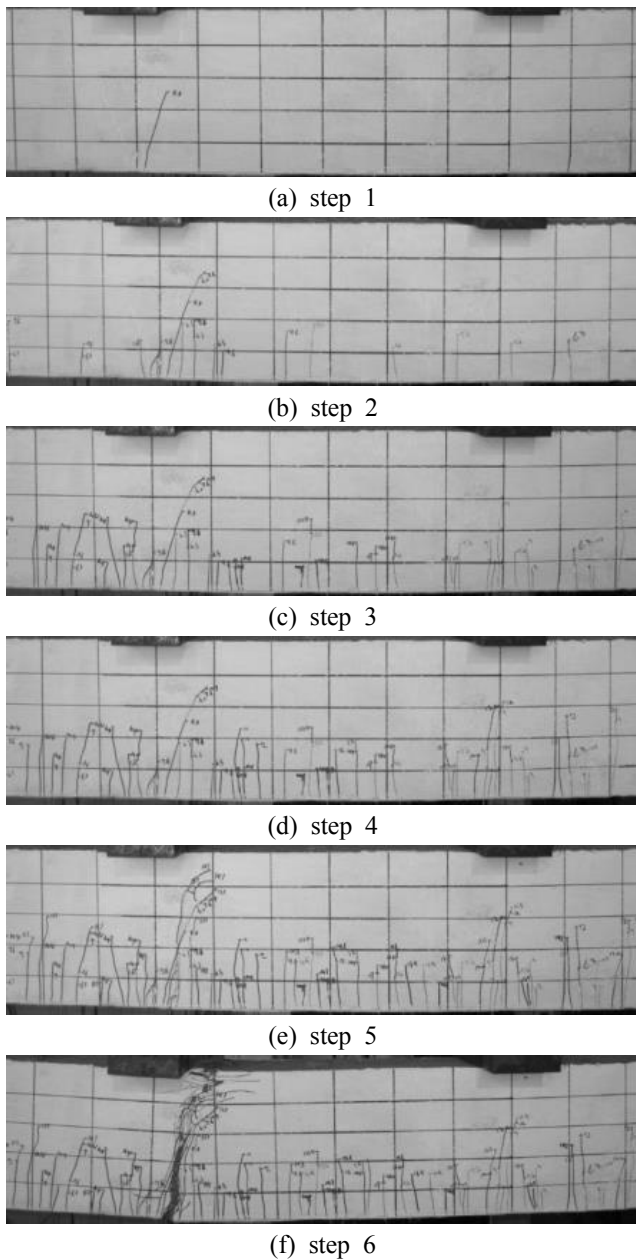


Fig. 6 Crack patterns of beam B-R4



Fig. 7 Flexural failure of beam B-R4

Table 3 Test result of cracking and ultimate load

Beam	Initial cracking			Ultimate state			Ductility index
	P_{cr} (kN)	M_{cr} (kN-m)	Δ_{cr} (mm)	P_u (kN)	M_u (kN-m)	Δ_u (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{cr}}$
B-R0	46.5	27.9	2.10	53.7	32.2	7.16	3.4
B-R1	41.1	24.7	1.94	111.5	66.9	17.78	9.2
B-R2	40.8	24.5	1.83	131.3	78.8	21.15	11.6
B-R2-S	45.9	25.2	1.85	141.5	77.8	19.64	10.6
B-R2-C	39.1	23.4	1.71	133.3	80.0	25.93	15.2
B-R3	41.0	24.6	1.67	147.2	88.3	23.53	14.1
B-R4	49.5	29.7	2.32	151.7	91.0	35.24	15.2

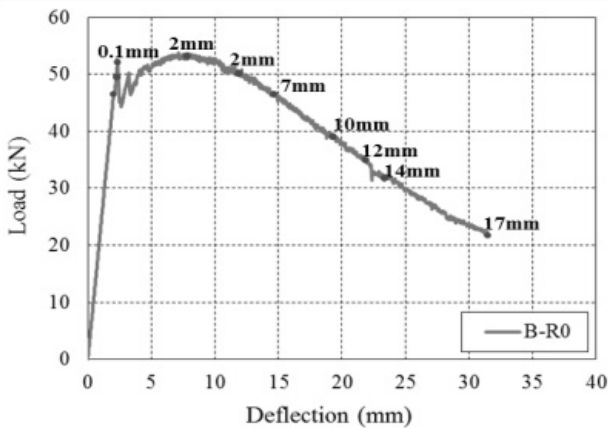


Fig. 8 Load-deflection curve (B-R0)

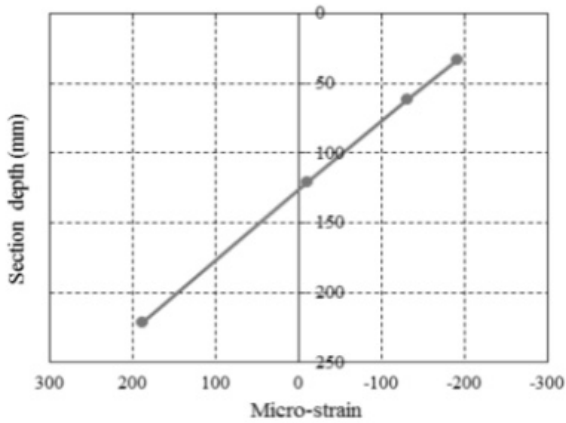


Fig. 9 Load-concrete strain curve (B-R0)

부재 B-R0의 초기균열하중(P_{cr})은 46.5 kN (M_{cr} =27.9 kN·m) 이고, 이때의 지간중양 단면의 처짐(Δ_{cr})은 2.10 mm 이다. 초기 균열이 발생함과 거의 동시에 하중이 약간 감소한다. 초기 균열은 순수 휨구간에서 2개가 발생하였으며, 초기 균열폭은 0.1 mm이다. 초기균열 단계에서의 단면의 콘크리트변형률 분포 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 부재 하연의 콘크리트 인장변형률은 235×10^{-6} m/m로 나타나며, 이는 UHPC의 인장강도($f_t = 10$ MPa, $E_c = 45000$ MPa)에 대응하는 변형률과 일치한다. 초기균열 발생이후 하중은 다

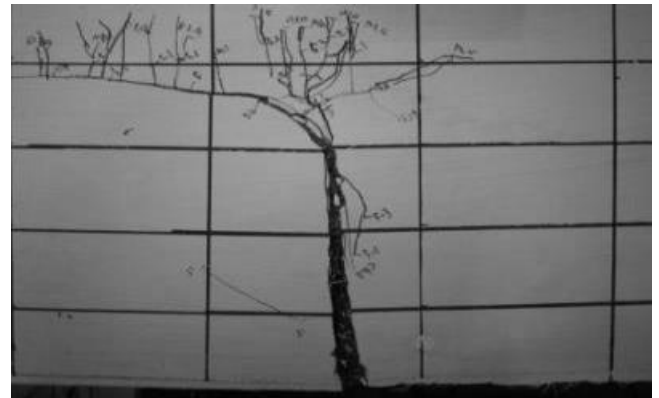


Fig. 10 Major crack (B-R0)

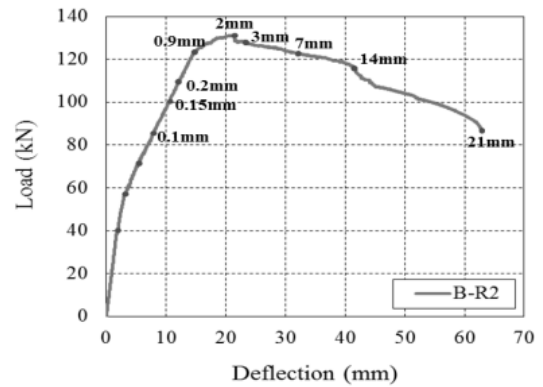


Fig. 11 Load-deflection curve (B-R2)

시 비선형으로 증가한다. 이러한 현상은 초기 균열 이후 강섬유의 균열 저항성능과 UHPC의 변형률 경화 현상에 기인하기 때문이다. 최대 하중 도달 시 까지 균열폭은 거의 증가하지 않는다. 최대 하중에 도달하였을 때, 균열폭은 2.0 mm로 크게 증가한다. 최대 하중 이후 특정 균열폭이 증가하여 주균열(major crack)로 진전되는 형상을 나타내었다(Fig. 10). 극한하중(P_u)은 53.7 kN (M_u =32.2 kN·m)이며, 이때 처짐(Δ_u)은 7.16 mm로 측정되었다.

최대하중 도달 이후 휨 모멘트는 점진적으로 감소하며, 이와 더불어 다른 균열에 비하여 주균열 폭은 급격하게 증가한다. 최종상태에서 발생한 주균열의 균열폭은 17 mm

이며, 주균열 단면의 상연에서 콘크리트 압쇄 현상(crushing)이 발생하였다.

부재 B-R2의 하중-처짐 곡선을 Fig. 11에 나타내었다. 부재 B-R2의 초기균열 하중(P_{cr})은 40.8 kN ($M_{cr}=24.5$ kN·m)이고, 이때 처짐은 1.83 mm이다. 초기 휨 균열 발생 후 휨강성은 감소하나, 하중은 계속해서 증가한다. 초기균열 이후 하중이 증가함에 따라 초기균열 이외의 추가의 휨 균열이 발생하여 균열개수가 증가한다. 부재는 초기 균열 이후에도 지속적으로 하중을 부담하며, 이러한 현상은 일반 콘크리트 보의 휨거동과 달리 UHPC 보에서는 섬유유리 균열저항성에 의한 변형률경화 효과 때문이다. 최대 극한하중은 131.3 kN ($M_u=78.8$ kN·m)이며, 이때 처짐은 21.15 mm, 최대 균열폭은 2.0 mm이다.

Fig. 12에서 콘크리트변형률 계이지와 철근변형률 계이지에서 측정한 변형률을 바탕으로 하중-변형률 관계를 나타내었다. 하중-변형률 곡선에서 음수의 변형률은 압축변형률을 나타내고 양수의 변형률은 인장변형률을 나타낸다. 하중이 증가함에 따라 콘크리트 변형률 계이지 C-1과 C-2 위치에서의 콘크리트는 압축변형률을 나타내고, C-4와 C-5 위치에서의 콘크리트는 인장변형률을 나타낸다.

C-3는 부재 단면의 상연에서 하연 방향으로 단면 높이의 1/4 위치에 있다. C-3 위치에서의 변형률은 압축변형률에서 인장변형률 영역으로 변화한다. 이는 단면 하단으

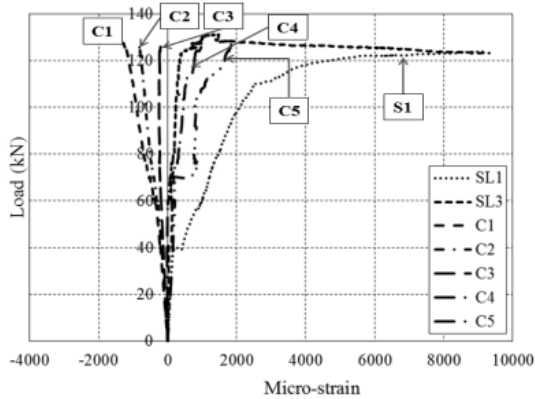


Fig. 12 Load-strain curve (B-R2)

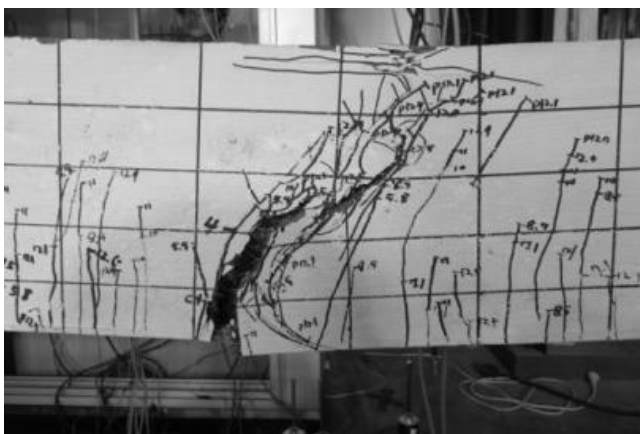


Fig. 13 Flexural failure (B-R2)

로부터 인장균열의 전진과 더불어 중립축이 단면 상단으로 이동하기 때문이다. C-4 위치는 단면의 도심과 일치하고, 하중 초기단계에서의 C-4 위치는 중립축과 일치하므로 변형률이 0에 가까운 값을 나타낸다. 이후, 중립축이 단면상단으로 변화함에 따라 C-4 위치는 인장영역에 포함되어 인장변형률을 나타낸다. C-5 위치 변형률은 초기 선형구간 이후 비선형구간을 나타낸다. 선형구간 종점에서의 하중값은 하중-처짐 곡선에서의 선형구간 종점 하중값과 거의 일치한다.

한편, 철근의 항복변형률은 2000×10^{-6} m/m이며, Fig. 12의 철근변형률은 최대하중 도달 전에 이미 항복변형률에 도달한 것을 나타낸다. 이는 UHPC 보의 휨강도는 철근의 항복보다는 UHPC의 인장강도에 지배되는 것을 나타낸다.

최대하중 도달 이후, 초기균열 중 한 개의 균열폭이 눈에 띄게 증가하여 주균열(major crack)로 발전하였다. 주균열은 단면 상연으로 전진하고 균열폭도 급격히 증가한다. 이러한 현상은 극한하중 상태까지 강섬유의 가교 역할로 인해 하중 분담 능력은 증가하나, 극한 하중 이후에는 주균열에서의 균열폭 확대에 따른 강섬유의 가교 역할이 감소하여 부재의 휨강도가 감소한다고 판단된다. 주균열의 상연에서 최종적으로 콘크리트 압쇄(crushing) 현상이 발생하였으며, 이때의 주균열폭은 21 mm이다(Fig. 13). 콘크리트의 압쇄 이후 휨인장 철근의 절단 파괴음이 발생하였다.

3.3 타설방법과 스테럽의 휨거동 영향

B-R2 부재는 부재의 단부부터 UHPC를 타설하여 제작하였으며, B-R2-C 부재는 시간중양단면부터 UHPC를 타설하여 제작하였다. B-R2 부재와 B-R2-C 부재의 하중-처짐 비교곡선을 Fig. 14에 나타내었다.

B-R2 부재와 B-R2-C 부재의 초기균열 휨모멘트는 각각 24.5와 23.4 kN·m이다. 또한, B-R2 부재와 B-R2-C 부재의 극한 휨모멘트는 각각 78.8와 80.0 kN·m이다. B-R2 부재와 B-R2-C 부재의 초기 균열휨모멘트와 극한휨모멘트는

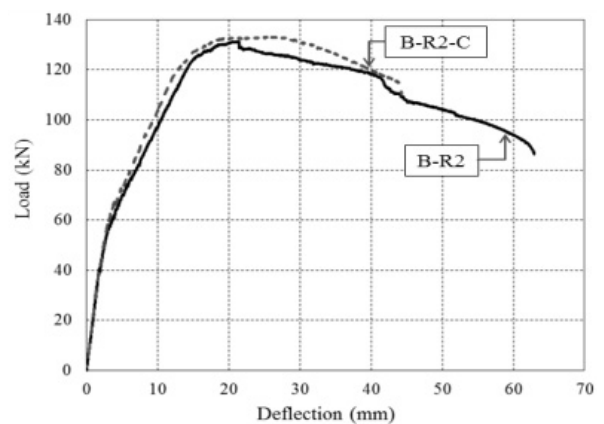


Fig. 14 Load-deflection curves (B-R2, B-R2-C)

서로 유사한 값을 나타낸다. 실험결과는 타설방법에 따라 휨강도가 영향을 받지 않았으며, 이는 타설 방법에 의해 강섬유배열이 크게 영향을 받지 않는 것을 의미한다.

그러나, 기존의 연구결과^{1,4)}는 휨강도 측면에서 단부타설방법이 중앙타설방법보다 유리한 것으로 나타난다. 단부타설은 부재 한쪽 끝단에서 다른 한쪽 끝단으로 유동성에 의해 타설되며, 최대휨모멘트가 발생하는 지간중앙에서는 유동성에 의해 강섬유는 부재의 축방향 즉, 단면 내 휨인장 응력과 평행한 방향으로 배열될 가능성이 크다. 반면에, 중앙타설은 부재의 지간중앙에서 강섬유의 배열이 부분적으로 교란될 가능성이 있다.

이 연구의 실험결과와 기존 연구결과와 다소 다르게 나타났으며, 추후 더욱 상세한 실험연구가 필요한 부분이라고 판단된다.

B-R2 부재와 B-R2-S 부재의 초기균열모멘트는 각각 24.5와 25.2 kN-m이며, 이때의 처짐은 각각 1.83과 1.85 mm이다. 또한, 두 부재의 극한휨모멘트는 각각 78.8과 77.8 kN-m이며, 이때의 처짐은 각각 21.2 및 19.6 mm이다. 부재 B-R2-S의 극한 휨모멘트와 B-R2의 극한 휨모멘트는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 실험결과는 순수 휨구간 내 150 mm 간격의 스티럽 배열은 UHPC의 극한 휨강도에 거의 영향을 나타내지 않은 것을 나타낸다. 스티럽이 UHPC 타설 시에 강섬유 배열을 교란시키지 않은 것으로 판단된다.

3.4 연성 지수

콘크리트 구조물의 연성은 구조 부재 또는 구조시스템이 탄성영역을 벗어나 소성영역에서 파괴에 도달할 때까지 변형을 확보하는 능력 즉, 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 나타내는 척도로서 사용될 수 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 정량화할 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐, 회전각, 또는 곡률을 바탕으로 표현할 수 있다. 일반콘크리트와 달리 UHPC는 초기균열 이후 단계부터 변형률경화에 따른 연성능력을 나타낸다. 이 연구에서는 식 (1)과 같이 부재의 균열 및 극한상태에서의 처짐에 근거하여 실험부재의 연성지수를 계산하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_{cr}} \quad (1)$$

여기서, μ : 부재의 연성지수

Δ_u : 부재의 극한하중에서의 처짐

Δ_{cr} : 부재의 균열하중에서의 처짐

철근이 없는 경우(부재 B-R0)의 연성지수는 3.4로써, 일반콘크리트와 달리 UHPC는 휨철근이 없어도 큰 연성을 나타낸다. 철근비가 0.0059일 때(B-R1)의 연성지수는 9.2이고, 철근비가 0.0089일 때(B-R2)의 연성지수는 11.6이

다. 또한, 철근비가 0.0119와 0.0155일 때(B-R3와 B-R4)의 연성지수는 각각 14.1과 15.2이다. UHPC는 철근비 증가에 따른 연성능력의 향상을 나타내고 있다. 본 실험결과에서의 부재의 큰 연성능력은 하이브리드 강섬유의 균열 이후의 큰 가교작용(bridging effect)이 효과적임을 나타낸다.

4. 결 론

이 연구에서는 하이브리드 강섬유를 혼입한 초고성능 콘크리트 보의 휨 거동 특성을 파악하기 위한 실험연구를 수행하였으며, 주요 실험연구 결론은 다음과 같다.

- 1) 하이브리드 강섬유는 초기 균열 이후 극한하중에 도달할 때까지 균열의 발생을 억제하는 효과를 나타내며, 이는 부피기준 1.5%의 하이브리드 강섬유 보강만으로 부재의 균열제어 및 연성파괴를 유도하는 데 효과적임을 나타낸다.
- 2) 단부타설방법과 지간중앙타설방법을 적용한 부재의 휨강도는 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 타설 방법에 의해 강섬유 배열이 크게 영향을 받지 않는 것을 의미한다. 선행연구결과는 UHPC를 단부에서부터 타설한 방법이 지간중앙에서부터 타설한 방법보다 유리한 것으로 나타나므로, 추후 더욱 상세 실험연구가 필요한 부분이라고 판단된다.
- 3) 철근이 없는 부재의 연성지수는 3.4이며, 0.02 이하의 낮은 철근비에서도 연성지수는 9.2~15.2를 나타낸다. 따라서, 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 낮은 철근비에서도 연성 거동에 효과적임을 알 수 있다.
- 4) 순수 휨구간 내 스티럽의 배열은 UHPC의 극한 휨강도에 뚜렷한 영향을 나타내지 않는다. 따라서, 이 실험에 적용한 150 mm 간격 정도의 스티럽 배근은 하이브리드 강섬유 보강 UHPC 타설 시에 강섬유 배열을 교란시키지 않은 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Yang, I.H., Joh, C.B., Kang, S.T., and Kim, B.S., "An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 6, 2009, pp. 737-744.
2. Yang, I.H. and Joh, C.B., "Prediction of Flexural Capacity of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Strength Concrete

- Beams”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3A, 2010, pp. 317-328.
3. Yang, I.H., Joh, C.B., and Kim, B.S., “An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Prestressed Girders”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 777-786.
 4. Yang, I.H., Joh, C., and Kim, B.S., “Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending”, *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue 11, No. 2010, pp. 3478-3487.
 5. Yang, I.H., Joh, C.B., and Kim, B.S., “Flexural Strength of Large Scale Ultra High Performance Concrete Prestressed T-Beams”, *Canadian Journal of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 11, 2011, pp. 1185-1195.
 6. Li, V.C. and Fischer, G., “Reinforced ECC - An Evolution from Materials to Structures”, *Proceedings of the 1st fib congress - Concrete Structures in the 21st Century*, pp. 105-122, Osaka, 2002.
 7. DAfStB, *State-of-the-art Report on Ultra High Performance Concrete - Concrete Technology and Design, draft 3*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton/German Association for Reinforced Concrete, Berlin, Germany, 2003.
 8. Yuguang, Y., Walraven, J., and Uji, J.D., “Study on Bending Behavior of an UHPC Overlay on a Steel Orthotropic Deck”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008, pp. 639-646.
 9. Si-Larbi, A., Ferrier, E., and Hamelin, P., “Flexural Behavior of Ultra High Performance Concrete Reinforced with Short Fibers and CFRP Rebars”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, 2008, pp. 661-672.
 10. Chunxiang, Q. and Patnaikuni, I., “Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams in Bending”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, pp. 73-81.
 11. Manfred, T. and Jens, G., “Bending Design of Steel-Strengthened UHPC”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, 2008, pp. 523-532.
 12. Casanova, P. and Rossi, P., “Analysis of Metallic Fibre-Reinforced Concrete Beams Submitted to Bending”, *Materials and Structures*, Vol. 29, No. 190, 1999, pp. 354-361.
 13. Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W., “Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response”, *Materials and Structures*, Vol. 39, 2006, pp. 547-555.
 14. American Concrete Institute, “Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete”, *ACI 544.4R-88*, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, 1988.
 15. Kim, W.S., Kwak, Y.K., and Kim, J.B., “Prediction of Flexural Capacities of Steel-Fiber Reinforced Concrete Beams”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp. 361-370.
 16. Federal Highway Administration, *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, 2006, pp. 23-49.
 17. Kooiman, A.G., “Modelling the Post-Cracking Behavior of Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design Purposes”, *HERON*, Vol. 45, No. 4, 2000, pp. 275-307.
 18. Kang, S.T., Kim, Y.Y., Lee, B.Y., and Kim, J.K., “Fiber Orientation Impacts on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, 2008, pp. 731-739.

요 약 본 연구에서는 하이브리드 강섬유로 보강된 초고성능 콘크리트(UHPC)의 휨거동 특성을 파악하고자 하였다. 부피비 1.5%의 하이브리드 강섬유를 혼입하여 철근비가 0.02 이하인 부재의 실험을 통해 주요 휨거동 특성을 파악하였다. 본 연구결과는 추후 UHPC의 휨강도 산정 모델링에 실제적인 기초실험자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 하이브리드 강섬유 보강 UHPC는 균열제어에 효과적이며, 연성지수는 9.2~15.2 범위에 분포하고 있어 우수한 연성거동 특성을 나타낸다. 또한, 순수 휨 구간 내에 스티럽을 배근한 부재의 휨강도는 스티럽을 배근하지 않은 부재의 휨강도와 유사하며, 이 실험연구의 150 mm 간격 정도의 스티럽 배근은 강섬유 배열 및 휨강도에 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 하이브리드 강섬유, 휨성능, 연성, 균열