

# 초고강도 섬유보강 콘크리트를 사용한 분절형 U거더 및 합성 U거더의 휨거동 Flexural Behavior of Segmental U-Girder and Composite U-Girder Using Ultra High Performance Concrete

이승재<sup>1</sup> · 타 샨<sup>1</sup> · 김성태<sup>2</sup> · 한상묵<sup>1\*</sup>Seung-Jae Lee<sup>1</sup> · Tsas-Orgilmaa Makhbal<sup>1</sup> · Sung-Tae Kim<sup>2</sup> · Sang-Mook Han<sup>1\*</sup>

(Received August 17, 2017 / Revised September 5, 2017 / Accepted September 7, 2017)

The flexural behavior tests of UHPC segmental U-girder and composite U-girder which has 160MPa compressive strength and 15.4m length were carried out. The test variables are volume fraction of steel fibers and slab over the U-girder. Each U-girder has longitudinal re-bars in web and lower flange. PS tendons which has 2 of 15.2mm diameter in upper flange and PS tendons which has 7 of 15.2mm diameter in lower flange were arranged and prestressed at onetime in U-girder connection stage. Enough strong prestressing force which applied to U-girder due to ultra high performance concrete strength can withstand the self weight and dead load in U-girder stage. By comparison with the brittle behavior of U-girder, composite U-girder showed the stable and ductile behavior. After the construction of slab over U-girder, flexural load capacity of composite U-girder can bear the design load in final construction stage with only one time prestressing operation which already carried out in U-girder stage. This simple prestressing method due to the ultra high strength concrete have the advantage in construction step and cost. The shear key which has narrow space has the strong composite connection between ultra high strength concrete U-girder and high strength concrete slab didn't show any slip and opening right before failure load.

**키워드** : 초고강도 콘크리트, 강섬유, 연성거동, 합성거더, U형거더**Keywords** : Ultra-high performance concrete, Steel fiber, Ductile behavior, Composite girder, U-girder

## 1. 서론

초고강도 섬유보강 콘크리트(이하 UHPFRC)는 높은 압축강도 및 인장강도, 작은 크리프 수축변형과 건조수축 변형량의 역학적 특성과 염화칼슘침해, 동결융해 및 중성화에 대한 뛰어난 내구적 특성을 가지고 있다. 또한 UHPFRC는 형태와 자중 면에서 기존의 콘크리트 구조물과 다른 새로운 경지를 여는 기하학적 차별성을 가지고 있다.

Pierr et al.(1999)는 1997년 길이 60m, 높이 3m의 트러스 상하 현재에 압축강도 200MPa UHPFRC를 사용하여 시공한 Sherbrooke 보도교에 대해 자세히 기술하였고, 2001년 길이 120m, 형고 1.3m 프리캐스트 아치형태의 서울 선유교 보도교를 시공하였으며, 2002년

길이 50m, 복부 두께 8cm, 슬래브 두께 5cm인 박스형태 UHPFRC 보도교 등 이전 콘크리트교로서는 구현하기 불가능한 날렵하고 내구성이 우수한 교량을 시공하였다. Jacques(2012)의 발표에 의하면 UHPFRC로서 최초의 차량교량인 2001년 Bourg-les-Valence 교량은 길이 20m, 도로폭 9m, 보도교폭 3m, 5개의 파이형 프리캐스트 거더로 구성되었다. 미국에서 시공된 UHPFRC교량에 대한 2006년 미국 아이오와주 Mars Hill 교량은 길이 33m, 형고 1.03m로서 기존의 트러스 차량교량을 대체하여 시공되었고, 2008년에는 미국 아이오와 주에 길이 15.2m, 형고 0.85m의 UHPFRC 파이형 Jakway Park 교량이 시공되었음을 Graybeal et al.(2008)의 논문에서 볼 수 있다. 이후 프랑스, 호주, 독일, 일본, 미국 등에 파이형 거더, I형 거더 형태의 날렵한 형상과 내구성이 우수한 장수

\* Corresponding author E-mail: smhan@kumoh.ac.kr

<sup>1</sup>금오공과대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk, 39177, Korea)<sup>2</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

명의 교량 등이 시공되었다.

UHPFRC의 압축강도 특성을 충분히 활용한 획기적 형태의 차량교량으로는 지난 69m 아치교량의 하현재를 형고 1.2m, 두께 60mm의 박스거더로 시공한 Austria의 Wild Bridge가 있다. UHPFRC 구조물은 형고 축소 및 자중을 경감시킬 수 있는 특징 외에 시공의 용이성, 우수한 내구성에 의한 장수명 구조물 특성을 가지고 있다(Wei-Fah et al, 2014).

UHPFRC 구조물은 형고가 작은 날렵한 형상을 구현할 수 있어 형하공간 확보가 필요한 도시 내의 과선교 또는 도로 위를 통과하는 교량, 고속도로 나들목의 입체교차로 등 형고가 낮고 시공기간이 짧으며, 내구성이 우수하고, 유지관리가 용이한 구조물에 적용할 수 있다.

본 논문은 초고강도 U형 콘크리트 박스 거더를 거치하여 1차 긴장을 실시하고 슬래브와 활하중을 부담할 수 있는 합성U형보의 시공단계에 대한 실험을 수행한 논문이다. 자중이 재하되는 단계의 U거더의 휨실험, 고정하중, 활하중이 재하되는 합성U거더에 대한 휨실험을 수행하여 그 적용성을 검증하고자 한다.

## 2. 실험

UHPFRC 거더는 압축강도 150MPa 이상, 강섬유 혼입률 2%를 가진 분체콘크리트로 구성되어 있어 휨철근 및 전단철근을 설치하지 않고 UHPFRC 압축력과 프리스트레스 강재의 안장력으로 내하력을 형성할 수 있는 구조물이다. UHPFRC구조물은 내구성이 월등하고 시간대비 형고를 강구조물 만큼 줄일 수 있으며, 자중을 기존 콘크리트 보의 1/2정도로 줄일 수 있다. 그러나 UHPFRC 구조물은 강섬유의 가격비중이 커서 기존의 프리스트레스 콘크리트 구조물보다 많은 장점이 있음에도 그 적용성의 한계를 가지고 있다. 초고강도 콘크리트 구조물은 보통 체적대비 2%의 강섬유를 혼입하여 연성거동을 확보하고 있다. 본 논문에서는 UHPFRC U형 거더의 경제적인 제작단가를 구현하기 위해 강섬유의 혼입률을 0.7%, 1.0%로 줄이고 하부 플랜지와 복부에 H13의 종방향 철근을 배근하여 구조물로서 거더의 유효성을 검증하고, UHPFRC U형 거더 상부에 슬래브를 타설하여 합성U형 거더에 대한 내하력 증가와 휨거동의 특성을 파악하고자 한다.

Table 1. Mixing portion of UHPFRC

Cement	Water	Silica fume	Sand	Silica flour	W/B	Super plasticizer	Steel fiber(vol %)
1	0.22	0.25	1.1	0.3	0.18	40 l/m <sup>2</sup>	0.7, 1

Table 2. Material properties of strand and rebar

Kind	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)
PS strand	1665	1997
Rebar	400	540

### 2.1 재료특성 3

본 실험에 적용하였던 초고강도 섬유보강 콘크리트 중량별 조성비는 Table 1과 같다. 초고강도 콘크리트의 압축 및 인장응력 영역에 연성거동 특성을 부여하기 위해 강섬유를 혼입하였으며 거더 제작 단가의 경제성을 도모하기 위해 0.7%, 1.0%의 강섬유와 철근을 병용하였다. 강섬유의 직경은 0.2mm, 길이 13mm로서 세장비는 65이고, 강섬유의 인장강도는 2500MPa이다. 체적대비 0.7%, 1.0% 강섬유를 혼입한 U거더를 UFS0.7, UFS1.0으로 각각 표시하고, 공시체의 압축강도는 각각 160.8MPa, 164.6MPa로 측정되었다. Table 2에 강연선의 항복강도, 인장강도 및 철근의 물성값을 표시하였다.

### 2.2 시험부재 제작

실험체는 3분절 초고강도 섬유보강 U형 거더로서 강섬유 혼입 비율과 종방향 철근에 따라 2가지 실험체 즉, UFS0.7, UFS1.0로 분류하며, UFS1.0 거더 상부에 슬래브를 타설한 합성거더를 CFS1.0로 표기하며 Table 3와 같이 실험체 특성을 나타낼 수 있다.

Fig. 1(a)는 총길이 15.4m의 U형 거더에 대한 3분절을 나타낸

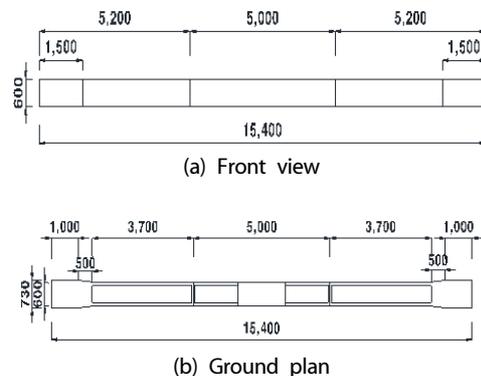


Fig. 1. U-shaped girder

Table 3. Kinds of UHPFRC U-girder and composite U-girder

Specimen	Volume of fraction of steel fiber(%)	Longitudinal steel reinforcement		Slab	No. of PS strands	
		Web	Lower flange		Upper	Lower
UFS0.7	0.7	○	○	×	4	14
UFS1.0	1.0	○	○	×	4	14
CFS1.0	1.0	○	○	○	4	14

정면도로서 단부분절은 5.2m이고 중앙분절은 5.0m로 구성되었으며, U형 거더의 높이는 600mm의 일정한 형태를 가지고 있다. Fig. 1(b)는 거더의 폭이 단부에서 730mm, 중앙단면에서는 600mm를 나타낸 평면도로서, 단부에서 1000mm 지점까지 폭 730mm의 전체 단면을 형성하다가 1000mm 지점부터 1500mm 지점까지 폭이 600mm인 중앙단면과 같은 단면을 형성하도록 변 단면 형태를 가지고 있다. 1500mm 지점부터 반대편 1500mm까지 U형 단면을 형성하고 있고, 분절면은 각각 100mm씩의 두께를 가지므로 분절 면에서는 200mm의 두께가 형성된다. Fig. 2(a)는 U형 거더의 단부 단면을 표시하였으며, 가로 730mm, 세로 600mm의 직사각형로서 단부에 정착구를 배치하기 위해서 중앙단면보다 큰 단면 형태를 가지고 있다. Fig. 2(b)의 중앙분절 중앙단면의 하부플랜지 및 복부의 철근 배근, 포스트텐션의 텐던 위치 및 U형 거더 내부의 공간형태를 도시하였으며, U형 단면을 형성하기 위해 EPS블록을 내부에 넣어 콘크리트를 타설하였다. U형거더의 중앙단면은 상부폭 600mm, 하부폭 500mm, 높이 600mm의 사다리꼴 형태를 가지고 있다. 하부 텐던은 15.2mm 7연선 7개씩 2개의 텐던에 배치하여 총 14개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 2800kN 도입하였고, 상부 텐던은 15.2mm 7연선 2개씩 2개의 덕트에 배치하여 총 4개의 강연선을 사용하여 포스트텐션 긴장력을 800kN 도입하였다. Fig. 3는 Fig. 1(a)의 높이 600mm U형 거더 상부에 높이 1200mm의 슬래브를 타설한 합성 U형 거더의 정면도를 나타내었다. Fig. 4는 단부에서 중앙부까지 1200mm의 일정한 폭을 가진 슬래브가 타설된 상태의 합성 U형 거더 평면도를 도시하였다. Fig. 5(a)는 합성 U형 거더의 단부 단면을 도시한 것으로 Fig. 2(a)의 단부 단면 상부에 높이 120mm 슬래브가 합성된 형태의 단면이다. Fig 5(b)는 합성 U거더의 중앙 단면을 나타낸 것으로 Fig 2(b)의 중앙 단면 상부에 슬래브를 합성한 상태를 도시한 것이다. Fig. 6은 U형 거더의 종방향 철근과 철근 간격재를 도시한 것으로 H13 5개를 복부에 배근하였고, 수직방향 철근은 단부 1500mm구간에서는 300mm 간격으로 5개를 배치하고 이후 1000mm 간격으로 배근하였다. 1000mm 간격의 수직 방향 철근은 전단력에 의한 사인장 균열선의 폭(유효깊이 d/2)300mm 보다 커서 균열에 대해 저항할 수 있는

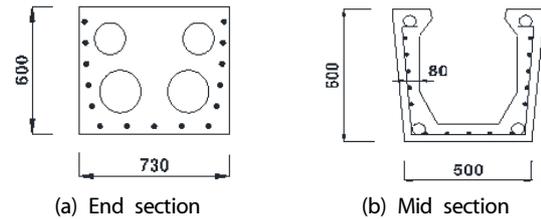


Fig. 2. Cross section of U-shaped girder(UFS0.7 & UFS1.0)

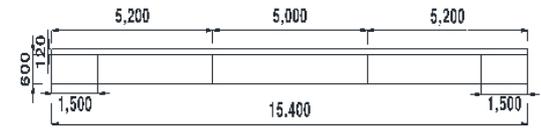


Fig. 3. Front view of composite girder

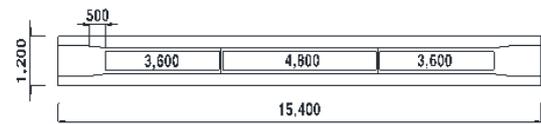


Fig. 4. Ground plan of composite girder

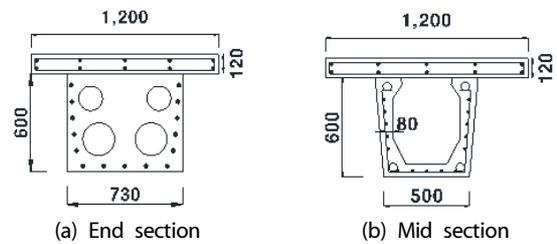


Fig. 5. Cross section of composite girder

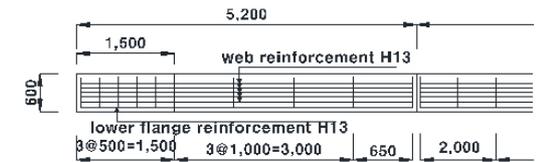


Fig. 6. Reinforcement of U-shaped and composite girder

범위를 벗어나기 때문에 전단철근역할을 할 수 없는 수직 간격재로 규정한다. 강섬유 혼입률 0.7%, 1.0% 가진 UHPFRC의 전단력은 역학



Fig. 7. Four point bending test

적으로 안정하나 최대 하중 이후 연성거동을 유도하기 위해 종방향 철근을 배근하였다. 북부에 설치된 전단키는 두께가 35mm이고, 하부 플랜지에 설치된 전단키는 두께가 20mm이 되도록 제작하였다.

### 2.3 실험 방법

Fig. 7과 같이 단순지지 경계조건으로 UHPFRC U거더에 대한 중앙 1000mm 간격을 뚫은 4점 재하 방법으로 휨 실험을 수행하였다. 1000kN 용량의 액추에이터를 사용하여 하중을 가하였다. 단면의 변형률 변화와 중립축의 변동을 측정하기 위해 보의 중앙단면에 7개씩 14개의 전기저항식 변형률게이지를 Fig. 7과 같이 부착하였으며, 하부 플랜지의 철근에 게이지를 부착하여 하면에서 철근의 변형상태를 측정하였다. 또한 중앙단면 하부에 LVDT를 배치하여 하중과 처짐 간의 관계를 측정하였다. 하중 증가에 따른 최초균열, 균열의 전이 양상을 측정하였으며, 측정된 LVDT 변형과 변형률게이지의 변형데이터를 분석하여 UHPFRC 분절형 U거더 및 합성 U거더의 거동 특성을 파악하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 하중과 처짐 간의 관계

강섬유 혼입률이 체적대비 0.7%, 1.0%이고, 하부플랜지, 북부에 종방향 철근을 배근한 U형 거더 즉, UFS0.7과 UFS1.0의 하중과 중앙단면에서 처짐간의 관계를 Fig. 8에 도시하였다. 하중 260kN까지 UFS0.7과 UFS1.0은 동일한 선형 하중-처짐 관계를 보이다가 하중이 커지고 중립축 이하 인장변형률이 증가함에 따라 인장응력이 큰 UFS1.0의 내하력이 증가함을 볼 수 있다. UFS0.7은 237kN에서 최초 균열이 발생하였으며, 최대하중 347kN에서 처짐 140mm 처짐 관계를 보이고 있다. UFS1.0은 268kN에서 최초균열이 발생하였으며, 최대하중 369kN에서 처짐 158mm가 발생하였

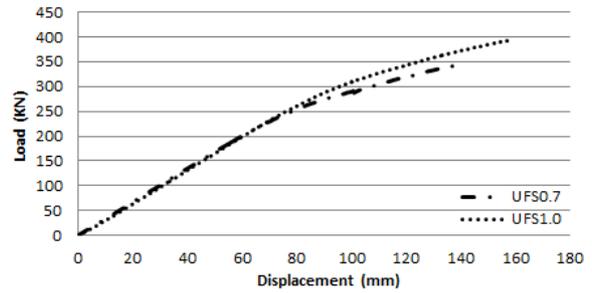


Fig. 8. Load-displacement relationship of UFS0.7 & UFS1.0

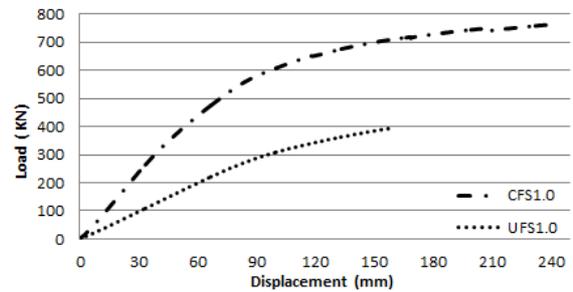


Fig. 9. Load-displacement relationship of CFS1.0 & UFS1.0

다. 강섬유 0.3%의 인장보강 효과와 압축강도 3.8MPa 증가효과로 UFS0.7보다 15%의 내하력 증가와 12.8%의 처짐이 증가하였다. Fig. 9에 도시한 바와 같이 U형 거더 상부에 높이 120mm, 폭 1200mm의 슬래브를 합성시킨 CFS1.0의 경우 385kN에서 최초 균열이 발생하였고, 이때까지 선형적 하중-처짐관계를 유지하였다. 이후 하부 플랜지 콘크리트의 균열로 중립축이 상승하면서 비선형 하중-처짐 관계를 형성하였으며, 처짐 220mm까지 하중 증가에 비해 처짐이 큰 연성거동을 보여주고 있다. 하중 760kN에서 처짐 243mm의 연성거동 후, 상부 슬래브가 압축파괴되는 현상을 보였다. 20cm 간격으로 전단키를 설치한 결과, 슬래브와 U거더 사이에 슬립현상은 보이지 않았다. CFS1.0 최대하중은 UFS1.0 최대하중보다 191% 증가되었으며, CFS1.0의 최대 처짐은 UFS1.0보다 154% 큰 연성거동을 보여주고 있다. UFS1.0은 하부플랜지 면적에 비해 U형 상부 면적이 작은 관계로 중립축이 중심에서 15cm하면에 위치하고 있어 하중이 증가함에 따라 콘크리트 상연의 응력이 비례적으로 커지고, 하중이 400kN일 경우 변형률이 4879 $\mu\epsilon$ 에 이르러 취성파괴 현상을 보였다.

### 3.2 중앙단면에서 변형률과 중립축의 변화

중앙단면의 전면부와 후면부에 각각 7개씩 14개의 변형률 게이지를 설치하였고, 이들 게이지 변형률의 평균값으로 중앙단면 7개

의 변형률 변화를 Figs. 10~12에 도시하였다. Fig. 10에서 UFS0.7의 경우 200kN까지 인장과 압축 변형률이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 하중 250kN에서 압축구역은 선형적 관계를 형성하나, 인장구역에서는 비선형 관계를 형성하다가 237kN에서 제일 하단부에 있는 7번째 변형률계까지 인장구역에 균열이 발생하여 7번째 계까지의 변형률이 감소하였다. 300kN에서 최대압축변형률이 4049 $\mu\epsilon$ , 347kN에서 최대압축변형률이 5827 $\mu\epsilon$ 이 진행되었으며, 인장구역에서 300kN, 347kN 하중 받을 시 6번째 계까지에서 3180 $\mu\epsilon$  인장변형이 진행되었다. 하부플랜지 면적에 비해 Fig. 2(b)

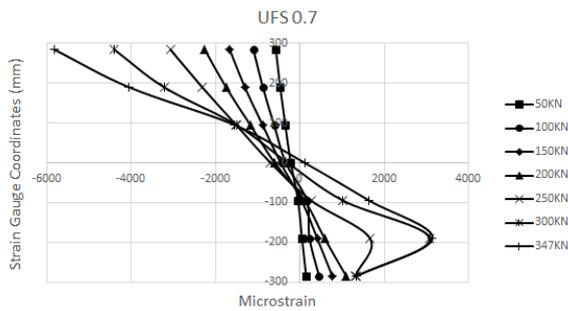


Fig. 10. Strain of the central cross section(UFS0.7)

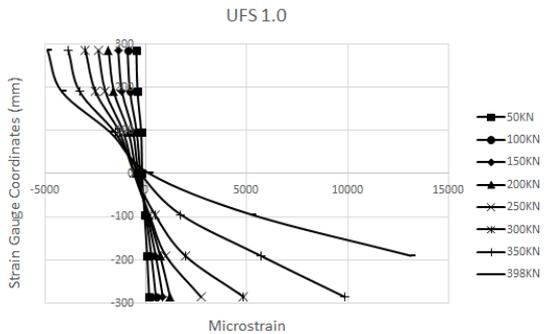


Fig. 11. Strain of the central cross section(UFS1.0)

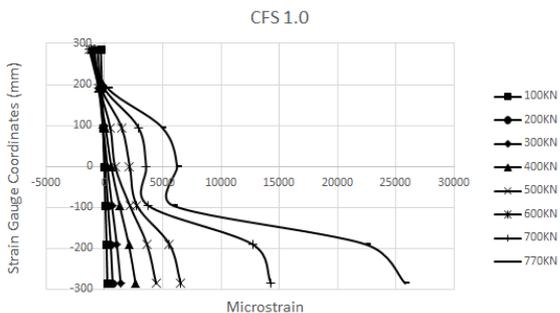


Fig. 12. Strain of the central cross section(CFS1.0)

와 같이 상부플랜지 면적이 작아 Fig. 13과 같이 하중 초기에는 단면의 중심이 상단에서 아래 방향으로 423mm에서 형성되었다가 최대 하중이 작용하는 347kN에서는 상단에서 293mm까지 중립축이 상승하였다. Fig. 11에서 UFS1.0의 경우 200kN까지 압축과 인장영역에서 변형률이 선형적인 관계를 형성하고 있으나, 하중이 증가할수록 압축구역의 비선형 거동이 증가되어 하중 400kN에서 상단압축변형률이 4879 $\mu\epsilon$ 까지 증가되었으며, 인장구역에서는 268kN에서 균열이 발생한 이후 인장변형률이 증가하여 350kN인 경우 하단 인장변형률이 9840 $\mu\epsilon$ 까지 증가되었으며, 398kN에서는 스트레인계이지가 절단되었다. Fig. 14와 같이 하중 초기에는 단면의 중심이 상단에서 아랫방향으로 451mm에서 형성되었다가 최대 하중이 작용하는 398kN에서는 상단에서 295mm까지 상승하

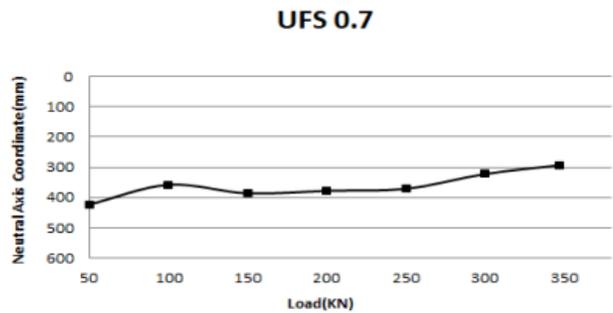


Fig. 13. Change of the neutral axis in central cross section(UFS0.7)

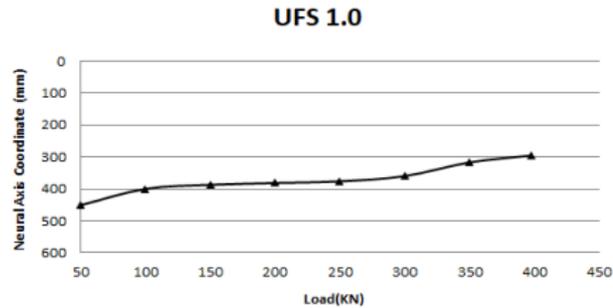


Fig. 14. Change of the neutral axis in central cross section(UFS1.0)

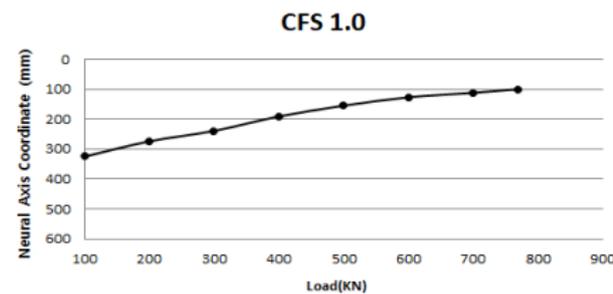


Fig. 15. Change of the neutral axis in central cross section(CFS1.0)

였다. 일축압축 공시체 시험과 달리 휨 압축에서는 압축변형률이 UFS0.7에서는 5827 $\mu\epsilon$ , UFS1.0에서는 4879 $\mu\epsilon$ 이 진행되어 최대 처짐이 140mm, 158mm로 각각 변형되었다. Fig. 12에서 CFS1.0의 경우 400kN까지 선형적 압축-인장 변형률관계를 형성하고 있다. 압축변형률은 770kN까지 상단에 1150 $\mu\epsilon$ 으로 선형적 관계를 가지고 있으나, 인장변형률은 500kN부터 비선형 인장변형률 특성을 가지며 770kN에서는 최하단에 25800 $\mu\epsilon$ 의 매우 큰 인장변형률을 나타내고 있다. Fig. 15과 같이 초기하중에서 중립축은 상단에서 아랫방향으로 325mm 형성되었다가, 파괴 시 중립축이 상단에서 100mm에 위치하고 있어 중립축 하부의 길이가 상대적으로 길어 최하단부에 변형률이 크게 발생한 것으로 판단된다. 압축변형률은 상부 슬래브와 합성단면 효과로 중립축이 높게 형성되어 변형률이 작게 발생하였다.

### 3.3 실험에 대한 고찰

초고강도 콘크리트 거더의 장점은 낮은 형고, 경량의 자중 및 월등한 내구성 등이 있지만 초고강도 섬유보강 콘크리트의 높은 가격이 사용성 확대의 큰 걸림돌이 되고 있다. 초고강도 콘크리트의 분체 가격보다 연성거동과 인장력 강화를 위해 사용하는 강섬유의 체적대비 혼입률이 2%인 경우 강섬유의 가격 구성 비율이 UHPFRC 가격의 50% 정도를 차지하여 경제성 확보에 큰 문제점이 되고 있다. 강섬유 비율을 줄이면서 초고강도 콘크리트 구조물의 연성거동 확보와 거동의 안정성을 도모하는 방법이 초고강도 섬유보강 콘크리트의 활용성 확대를 기하는 방향이 될 것이다.

Han(2015)은 초고강도 콘크리트 직사각형보에 강섬유를 2% 혼입한 거더와 강섬유 혼입률 0.7% 또는 1.0%와 철근 집합체를 병용한 직사각형 거더에 대한 휨 실험을 한 결과 강섬유 혼입률을 줄이고 철근과 병용한 거더가 철근을 배치하지 않고 강섬유 혼입률 2%만을 사용한 직사각형 거더 보다 최대하중 이후에 연성적 휨 파괴 거동 하는 것을 보여주었다. Park(2016)은 UHPFRC I형 거더에서 강섬유 혼입률 0.7%, 1.0%와 철근 집합체를 병용한 거더가 최대하중에 이르기까지 급격한 파괴보다는 변형이 증가되는 연성적 휨 파괴 거동에 대한 휨실험을 수행하였다.

본 실험에서 상부 슬래브와 합성단면을 구성하기 전 강섬유 혼입률 0.7% 및 1.0%를 사용한 UHPFRC U형 거더의 상부 플랜지는 하부 플랜지에 비해 면적이 작고, 하중 초기 중립축이 상단에서 0.67H~0.75H에 위치하고 있어 변형률이 크게 형성된다. 따라서 파괴하중 시 UFS0.7의 상단 변형률은 5827 $\mu\epsilon$ , UFS1.0은 4879 $\mu\epsilon$ 의 큰 휨 인장 변형률이 진행되었고, Figs. 16, 17과 같이 중앙단면

에서 휨 취성파괴 현상을 보여주고 있다. 즉, 하중-변위 기울기가 상승하는 국면 중 U형보가 가지는 최대하중에서 파괴되는 현상을 보였으며, 최대하중 이후 연성적 변형 현상은 없었다. 최대하중 상태에서 취성파괴가 발생하여 내하력이 급감하는 국면은 생략하고 최대하중까지의 관계를 도시하였다. UFS0.7의 처짐은 140mm, UFS1.0은 158mm 비교적 작은 처짐을 기록하였다. 합성보 CFS1.0은 슬래브와 U거더의 합성거동으로 인해 초기하중 상태에서 중립축이 상단에서 0.5H에 위치하고 슬래브 압축파괴 시의 중립축은 상단에서 0.17H까지 상승하여 초고강도 상단의 변형률은 1150 $\mu\epsilon$ 로서 매우 작은 압축변형을 한다. 전단키의 간격은 17cm로서 휨 파괴 시까지 슬립이 전혀 없는 충분한 합성단면 효과를 가지고 있



Fig. 16. Failure pattern of UFS0.7



Fig. 17. Failure pattern of UFS1.0



Fig. 18. Failure pattern of CFS1.0

다. 폭 1200mm, 두께 120mm의 슬래브를 결합시킴으로써 합성거더는 U거더에 비해서 2배의 초기강성을 가지고, 거의 두배의 최대 하중 내하력을 가지고, 1.67배의 초대 처짐을 가지며 Fig. 18와 같이 힘 파괴 거동을 보여주고 있다. 또한 종방향 철근에 수직방향으로 배근한 철근은 간격이 단부에선 500mm, 그 외 단면에선 1000mm로서 유효 높이의  $d/2$ 인 300mm를 초과하는 철근으로서 전단철근이 아닌 수직재 역할을 하고 있다. 전단철근을 배치하지 않았음에도 UHPFRC U형 거더와 합성 거더는 힘 파괴를 보여주고 있다.

거더는 상부플랜지 콘크리트 면적의 증가로 휨내하력 증가, 파괴 시 처짐의 증가 등 거더 자체로서의 안정적인 거동을 보여주고 있다. 박스 거더에 비해 U형 거더는 파괴 시 상대적으로 처짐이 작고 취성적 파괴거동을 보여주고 있으나, 합성단면 거더로 변화하기 전의 하중단계 즉, 자중과 슬래브자중을 부담하는 단계에서 구조물의 응력상태는 초고강도 콘크리트 특성을 이용하여 선형상태 범주 내에 있을 수 있도록 설계하기가 용이하다. 즉, 초고강도 콘크리트 설계기준강도  $f_{ck}$ 가 150MPa라면 UHPFRC U형 거더의 프리스트레스 도입 직후 하연 콘크리트 응력을 67.5MPa 만큼 긴장할 수 있고, 이 응력은 고정하중 및 활하중에 의한 하연의 인장응력을 부담할 수 있다. 사용하중이 작용하는 합성단면 단계에서 단면의 내하력이 증대되고 중립축이 상승하여 하중의 증가량은 작은데 처짐이 증가하는 연성거동을 보여주고 있다. 따라서 슬래브가 있는 교량 구조물에서 합성 단면 효과가 완전하도록 전단키가 배치되는 U형 거더는 박스거더에 비해 시공성 면과 경제성 면에서 장점을 가질 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 UHPFRC U형 거더의 하중에 대한 거동과 변형률 및 중립축 변화양상 등을 측정하였고, 슬래브를 시공한 후 합성 단면에서 하중에 대한 처짐 변화, 하중단계별 변형률 및 중립축 변화 등을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 체적대비 0.7%와 1%의 강섬유 혼입률을 가지며 종방향 철근과 병용한 초고강도 섬유보강 콘크리트 U형 거더 들이 선형적인 하중-처짐관계를 가지는 탄성응력구역에서 동일한 하중-처짐관계를 보이나, 하중이 증가하고 중립축 이하 인장변형률이 커지는 비선형 하중-처짐 구간에서는 강섬유 혼입률이 큰 보의 내하력이 증가하였다.
2. 간격이 큰 수직재를 배근하고 강섬유 혼입률 0.7% 또는 1.0%와 종방향 철근을 병용한 초고강도 섬유보강 콘크리트 U형 거더는

파괴 시 중앙단면 부분에서의 휨파괴 균열이 주로 발생하는 거동을 보였다.

3. 분절 U형 부재의 단부에 초고강도 섬유보강 콘크리트 다이아프램을 형성시키고, 간격이 촘촘한 전단키를 사용하여 합성단면을 구성한 결과 압축강도 40MPa의 콘크리트 슬래브와 압축강도 120MPa U형 거더 간의 슬립현상은 파괴 시까지 보이지 않았으며, 분절면간의 슬립현상도 발생하지 않았다.
4. 초고강도 섬유보강 콘크리트 U형 단면의 중립축은 단면의 하부에 형성되어 하중이 증가할수록 상연의 압축변형률이 하연의 인장 변형률보다 상대적으로 큰 값으로 진전되어 취성파괴 경향을 가지게 되나, 슬래브와 합성한 경우 중립축이 단면의 상부에 형성되어, 이 후 하중이 증가할수록 하부의 PS긴장재의 변형률이 증가하는 반면에 상연의 콘크리트 변형률은 상대적으로 작은 값으로 증가되어 취성파괴 가능성이 줄어들고, 파괴 시 처짐이 커지는 연성적 거동을 한다.
5. U형거더 단계에서 초고강도 콘크리트 압축강도 특성을 사용하여 1차의 프리스트레스 긴장으로 충분한 압축변형률을 줄 수 있고, 슬래브 타설 후 합성단면 상태에서 고정하중 및 활하중에 의한 하연의 인장변형률을 후속긴장 없이 부담할 수 있다는 점에서 2차 긴장이 생략되고 이에 따른 시공기간이 단축되는 등 시공 수월성과 경제성 면의 장점을 가지고 있다.

#### 감사의 글

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

#### References

Benjamin, A., Graybeal, B. (2008). UHPC in the U.S. Highway Transportation System, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 11-18.

Han, S. M., An, J.W. (2015). The ductile behavior test of ultra high performance fiber reinforced concrete rectangular beam by combination of the fiber and group of reinforcing bars, Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection, **19(3)**, 139-148 [in Korean].

Jacques, Resplendino. (2012). State of the art of design and

construction of UHPFRC structures in France, Plenary, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Park, J.Y., Han, S.M. (2016). The ductile behavior test of the ultra high performance fiber reinforced i beam by the combination of the fiber and group of reinforcement bars, Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection, **20(1)**, 18–24 [in Korean].

Pierr, Y., Blais, M.C. (1999). Precast, Prestressed Pedestrian Bridge—World’s First Reactive Powder Concrete Structure, September–October 1999, 60–71.  
Wai-Fah, Chen., Lian, Duan. (2014). Bridge Engineering Handbook, Superstructure Design, Second Edition, CRC, 316–317.

### 초고강도 섬유보강 콘크리트를 사용한 분절형 U거더 및 합성 U거더의 휨거동

압축강도 160MPa와 길이 15.4m를 가진 분절형 U거더와 합성 U거더의 휨거동 실험을 수행하였다. 실험 변수로는 강섬유 혼입률과 U거더 상부의 슬래브이다. U거더의 복부와 하부플랜지에 종방향 철근을 배근하였다. 상부플랜지에 2개의 15.2mm 강연선을 포함한 2개의 프리스트레싱 텐던 그리고 하부플랜지에 7개의 15.2mm 강연선을 포함한 2개의 프리스트레싱 텐던이 배치되고 U거더 접합 시 한차례 긴장 작업을 하였다. 초고강도 콘크리트 강도로 인해 U거더에 도입한 충분히 강한 프리스트레싱 긴장력은 U거더 시공단계에서 자중과 고정하중을 부담할 수 있다. U거더의 취성적 거동에 비해 합성 U거더는 안정적인 하중 처짐 관계를 보여주고 있다. U거더 상부에 슬래브를 시공한 후, U거더 접합 시 도입했던 프리스트레싱 긴장력에 의한 합성 U거더의 휨하중 내하력은 마지막 하중 단계에서 설계하중을 부담할 수 있다. 초고강도 콘크리트로 인한 간단한 프리스트레싱 방법은 시공단계와 공사비 면에서 장점을 가지고 있다. 간격이 작은 전단키는 초고강도 콘크리트 U거더와 고강도 콘크리트 슬래브간의 완전한 합성관계를 가져와 파괴하중 직전까지 슬립현상이나, 벌어짐 현상을 보이지 않았다.