



강섬유로 보강된 초고성능 콘크리트의 휨 거동에 대한 실험 연구

양인환^{1)*} · 조창빈²⁾ · 강수태²⁾ · 김병석²⁾

¹⁾군산대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원 구조교량연구소

An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete

In-Hwan Yang,^{1)*} Chang-Bin Joh,²⁾ Su-Tae Kang,²⁾ and Byung-Suk Kim²⁾

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

²⁾ Dept. of Structures & Bridges, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT In this study, the flexural behavior of steel fiber reinforced ultra high performance concrete (UHPC) was investigated. It presents experimental results of steel fiber reinforced UHPC with steel fiber content of 2% by volume and steel reinforcement ratio of less than 0.02. This study aims at providing more information about UHPC beams in bending in order to establish a reasonable prediction model for flexural resistance and deflection in structural code in the future. The experimental results show that UHPC is in favor of cracking behavior and ductility of beams, and that the ductility indices range from 6.29 to 10.44, which means high ductility of UHPC. Also, the flexural rigidity of beam whose cast is begun from end of beam is larger than that of beam whose cast is begun from midspan of beam. This result represents that the flexural rigidity is affected by the placing method of UHPC.

Keywords : ultra high performance concrete, flexural rigidity, ductility, crack, deflection

1. 서 론

최근 들어 구조물의 장대화, 고층화, 대형화에 따라 콘크리트 재료에 고강도, 고성능, 고내구성 등 다양한 성능이 요구되고 있다. 그러나 기존의 시멘트계 재료로만 구성된 일반 콘크리트는 인장강도 및 휨강도가 낮고 파괴시 취성적인 성질을 보이므로, 최근에 요구되는 콘크리트의 다양한 성능을 만족시키는데 한계가 있다. 따라서 기존 콘크리트의 이러한 단점을 개선하기 위하여 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) 또는, 초고성능 시멘트 복합체(ultra high performance cementitious composite)로 일컬어질 정도로 성능이 개선되고 있다.^{4,5)} 대표적인 초고성능 콘크리트로는 유기섬유를 적용한 ECC(engineered cementitious composite)³⁾와 강섬유를 사용한 RPC(reactive powder concrete) 등이 있다.

강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 콘크리트의 처짐 및 휨강도 특성, 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 알려진 바 있다.⁶⁻⁹⁾ 그러나 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료실험을 통한 재료특성 연구¹⁰⁻¹⁴⁾에 비해 구조적 거동에 관한 연구^{15,16)}는 상대적으로 미비한 실정이며, 우리나라의 콘크리트구조설계기준을 포함한 대부분의 해외 설계기준에도 설계기법이 제한적인 상황이다. 또한, 기존에 제안된 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도 산정식은 초고성능 콘크리트가 아닌 일반적인 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도 산정을 대상으로 하고 있으며,¹⁷⁾ 연구 대상 인장철근비가 0.015 이상인 휨 부재를 주된 대상으로 하고 있어 철근비가 낮고 강섬유가 일정부분 인장보강근 역할을 하는 강섬유보강 초고강도 또는 초고성능 콘크리트의 휨강도를 예측하는 데 한계가 있다. 또한 강섬유보강 콘크리트 휨 부재의 휨강도 평가를 위한 기존 국내외 여러 연구자의 연구 실험체에 대한 구조변수 분석 결과에서 평균 인장철근비는 0.023을 나타내고 있다.¹⁶⁾ 더욱 정밀한 휨강도 산정식을 개발하기 위해서는 철근비 0.02이하의 낮은 철근비에 대한 강섬유보강 초고성능 콘크리트의 휨 거동에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 0.02 이하의 낮은 철근비를 갖는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 정적 재하 실험을 수행하여 휨 거동 특성을 파악하고자 하였다. 이 연구에서의 초고성능 콘크리트는 굽은골재를 사용하지

*Corresponding author E-mail : ihyang@kunsan.ac.kr

Received May 4, 2009, Revised August 28, 2009

Accepted September 1, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

않고 2% 부피비의 강섬유를 혼입하여 180 MPa 이상의 압축강도를 발현하고 인성을 크게 향상시킨 초고성능 건설재료이다. 이 연구의 목적은 압축강도 180 MPa를 상회하는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 부재 실험을 통하여 초고성능 콘크리트의 균열 및 파괴, 처짐, 휨강도, 연성도 등의 기본 거동 특성을 파악하는 데 있다.

2. 실험 계획

2.1 재료 특성

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

낮은 물-결합재비에 의한 소요의 작업성을 확보하기 위해 고성능감수제를 사용하였으며, 고형성분 30%, 밀도 1.06 g/cm³의 폴리카르본산계의 고성능 감수제를 사용하였다. 또한, UHPC에서 사용되는 충전재(filler)는 구성입자 평균입경이 10 μm 정도이고 SiO₂ 98% 이상, 밀도 2.60 g/cm³의 재료를 사용하였다. 인성을 향상시키기 위해 사용된 강섬유는 밀도 7,500 kg/m³, 항복강도 2,500 MPa, 직경 0.2 mm, 길이 13 mm의 고탄성 강섬유를 사용하였다. Table 1에 UHPC의 배합비를 주요 구성재료에 대해 중량비로 나타내었다.

강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체의 압축실험을 수행하여 획득하였다. 실험 시 콘크리트를 4회로 나누어 타설하였으며, 매회 10개의 공시체를 제작하였다. 압축강도 실험 시 하중재하는 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였다. 압축시험 시에 공시체 원주 둘레로 3개의 LVDT를 설치하여 하중재하시 압축변형을 측정하였다(Fig. 1). 실험 시 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 UHPC의 응력-변형을 관계 곡선을 획득하였으며, 이로부터 압축강도와 탄성계수를 산정하였다. 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 압축응력-변형을 곡선은 일반 콘크리트와는 다르므로 미국 FHWA에서는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 응력-변형을 곡선에서 극한 압축강도의 10% 및 30%에 해당하는 특성값을 이용하여 탄성계수를 산정하도록 제안하고 있다.¹⁸⁾ 각 타설별 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 평균값을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mix proportion (weight ratio)

| Water-binder ratio | Cement | Silica fume | Filler | Fine aggregate | Water-reducing admixture |
|--------------------|--------|-------------|--------|----------------|--------------------------|
| 0.2 | 1 | 0.25 | 0.3 | 1.1 | 0.02 |

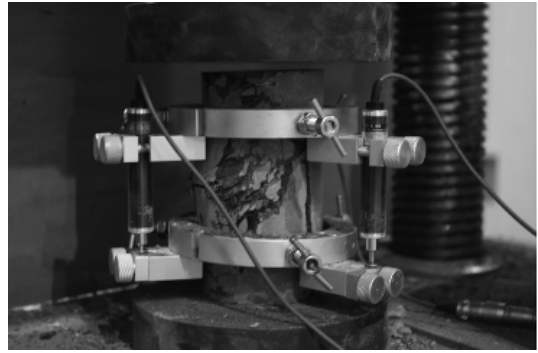


Fig. 1 Compressive strength test

또한 실험부재에 사용된 철근은 공칭직경 13 mm인 D13 철근이며, 인장 실험 결과 항복강도는 약 560 MPa로 나타났다.

2.2 실험체 계획

이 실험에서는 직사각형 단면형상을 가진 14개의 부재를 제작하였다. 이를 위해 구조 실험체는 철근이 없는 경우를 기본으로 하고(실험체 NR), 철근 개수 및 철근 층의 개수를 조절하여 철근비를 각각 다르게 하였다. 직사각형 단면에서 철근을 배치한 부재는 D13 철근을 1층으로 2열 배근한 경우(실험체 R12), 1층으로 3열 배근한 경우(실험체 R13 및 실험체 R13C), 1층으로 4열 배근한 경우(실험체 R14), 2층으로 2열 배근한 경우(실험체 R22), 2층으로 3열 배근한 경우(실험체 R23)로 구분하였다. 실험체의 명칭부여는 Fig. 2와 같다.

실험체의 길이는 2,900 mm가 되도록 제작하였다. 각 부재는 동일한 제원에 대하여 2개씩 제작하였다. 단면에서 인장철근의 위치는 부재 하단으로부터 각각 35 mm 및 75 mm 위치하도록 배근하였다.

UHPC의 타설은 두가지 방법으로 수행하였다. R13C 부재를 제외한 모든 부재는 부재의 끝단에서부터 UHPC를 타설하였다. R13C 부재는 중앙에서부터 콘크리트를 타설하였다. R13 부재와 R13C 부재는 부재의 제원은 동일하다. 하지만, R13 부재는 부재 끝단에서부터 콘크리트를 타설하고, R13C 부재는 부재중앙에서부터 콘크리트를 타설하여 UHPC 타설 방법이 다르다. UHPC 타설 방법을 Fig. 2에 나타내었으며, 구체적인 실험체 제원을 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다.

2.3 실험체 제작

실험체는 다음과 같은 공정으로 이루어졌다. 먼저 철

Table 2 Material properties of UHPC

| Material properties (MPa) | Batch 1 | Batch 2 | Batch 3 | Batch 4 |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Compressive strength | 190.9 | 192.2 | 196.1 | 196.7 |
| Elastic modulus | 46,418 | 46,680 | 45,530 | 46,818 |

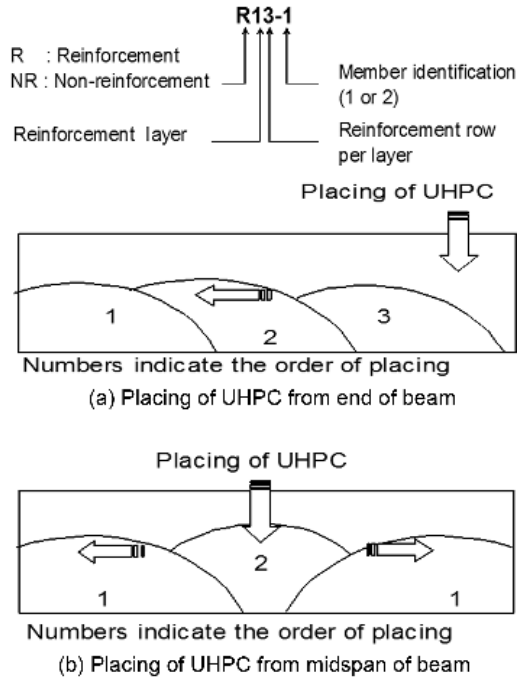


Fig. 2 Procedure for placing of UHPC

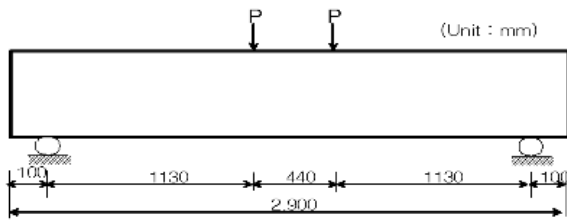


Fig. 3 Dimension of test beam

재 거푸집을 사용하여 실험체 거푸집을 제작하였다. 거푸집 조립 후, 철근을 정해진 위치에 배근 하였으며, 변형률을 측정하기 위하여 철근용 변형률계이기를 부착하였다. 철근 변형률계이기는 지간의 중앙에 위치한다. UHPC 배합은 전용 믹서기를 통해 이루어졌다. 다짐은 주파수 200 Hz~240 Hz의 콘크리트용 고주파 진동기를 이용하여 다짐을 실시하였다. 실험체 타설 후 양생은 자체 제작한 증기 양생기를 사용하여 90±5°C의 온도로 3일간 양생을 실시하고 이후 실험재령 시까지 20°C 습윤양생을 실시하였다.

Table 3 Parameters used in experimental tests with UHPC mixture

| Specimen | NR-1,2 | R12-1,2 | R13-1,2 | R13C-1,2 | R14-1,2 | R22-1,2 | R23-1,2 |
|--------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cross section | | | | | | | |
| Reinforcement | - | 2-D13 1 layer | 3-D13 1 layer | 3-D13 1 layer | 4-D13 1 layer | 2-D13 2 layer | 3-D13 2 layer |
| A_s (mm ²) | - | 253.4 | 380.1 | 380.1 | 506.8 | 506.8 | 760.2 |
| $A_s / (bh)$ | - | 0.0060 | 0.0090 | 0.0090 | 0.0120 | 0.0131 | 0.0196 |
| Placing procedure | End | End | End | Midspan | End | End | End |

2.4 실험 방법

이 실험에서는 액추에이터(actuator)를 사용하여 Fig. 5와 같이 4점 재하방식으로 하중을 단계적으로 재하하여 실험을 수행하였다. 시편의 양쪽 단부로부터 100 mm 위치에 강제 롤러를 설치하여 시편의 지지점으로 하였으며, 지점 사이의 거리는 2,700 mm로 하였다. 하중 가력점은 시편의 중심에서 각각 220 mm 떨어진 곳에 위치하여, 가력점 사이의 거리는 440 mm로 하였다. 따라서 두 가력점 사이의 440 mm 구간에서 순수 휨(pure bending)이 작용하도록 설치하였다. 강제 가력보를 액추에이터와 실험체 사이에 놓고 하중을 재하하였다. 액추에이터를 2.0 mm/min의 속도로 변위제어 방식으로 재하하였다. 작용하중은 액추에이터에 부착된 로드셀에 의해 측정하였다. 각 실험부재에 변위계(LVDT), 콘크리트 변형률 게이지, 철근 변형률계이기를 부착하여 변형률 및 변위를 분석하였다. 작용하중에 대한 처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부와 하중 재하점 위치에 각각 변위계 설치하였다. 철근과 콘크리트의 변형률은 각각 철근변형률 게이지와 콘크리트 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 콘크리트 변형률 게이지는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 중앙 단면의 부재 측면에 5개를 부착하여 높이에 따른 위치별 단면의 변형률을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 균열 및 파괴 양상

부재의 균열 및 파괴양상을 파악하기 위해 파괴 시까

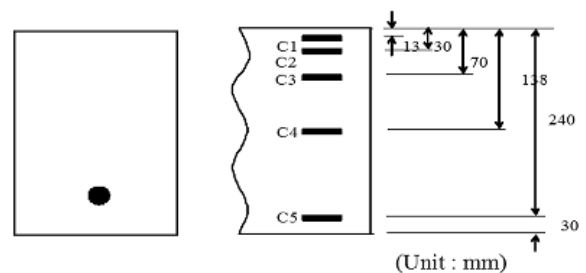


Fig. 4 Location of concrete strain gauges

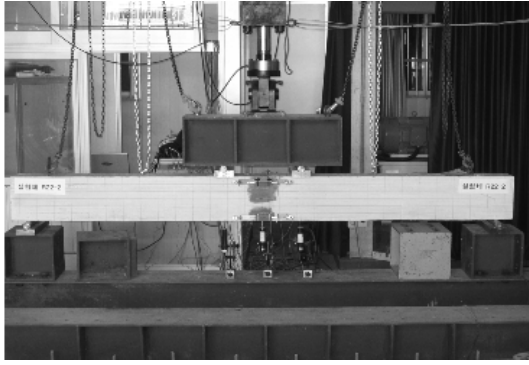


Fig. 5 Test set-up

지 하중을 재하하여 각 하중단계에 따른 균열진전 양상을 고찰하였다. 대표적으로 부재 R23-2의 파괴양상을 Fig. 6에 나타내었다. 또한, 대표적으로 Fig. 7에 부재 NR-2의 하중 재하에 따른 균열진전양상을 나타내었다.

초기에 하중이 선형으로 증가하는 동안 균열은 관찰되지 않는다. 초기균열단계에서 여러 개의 미세균열(micro crack)이 발생하고, 초기균열은 넓은 간격으로 분포한다(Fig. 7(a)). 초기균열 이후, 하중증가에 따라 이미 발생되어 있는 균열과 균열 사이에 새로운 미세균열이 발생한다. 하중이 증가함에 따라 대부분의 균열은 부재의 상연으로 지속적으로 진전되지만, 균열폭의 변화를 육안상으로 판별할 수는 없는 정도이다. 극한하중에 도달할 때 일부 균열의 균열폭이 증가하고 나머지는 균열폭이 거의 일정한 상태로 파괴에 이르는 양상을 보였다. 초기 미세균열은 하중재하점 사이 즉, 휨모멘트가 일정한 구간의 부재 하단에서부터 발생한다. 부재의 하단에서 발생한 균열은 하중이 증가함에 따라 상단으로 향하여 거의 수직으로 진전되는 양상을 나타내고 있으며, 이는 전형적인 휨균열 진전 양상을 나타낸다. 파괴양상은 모든 부재가 극한상태에서 휨 파괴 형상으로 파괴되었다.

한편 각 실험체 별로 초기균열 발생하중은 비슷하나, 초기균열 이후 극한하중에 도달할 때까지 뚜렷한 하중부담능력을 나타낸다. 초기균열에서 극한상태까지의 하중부담능력은 균열의 진전 속도를 늦추어 급격한 균열의 성장을 억제하고 있는 양상을 나타낸다. 이는 콘크리트에 함유되어 있는 강섬유가 균열발생 후에 지속적인 가교역할(bridging effect)을 하여 균열성장을 억제하는데 효과적이기 때문이라 판단된다.

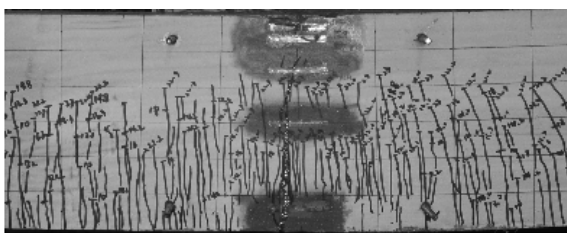


Fig. 6 Flexural failure of UHPC beam (R23-2)

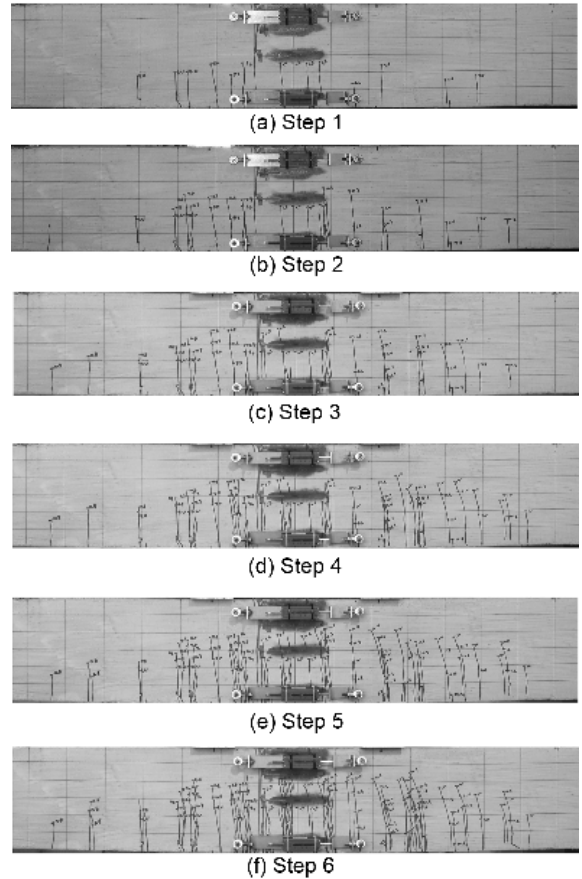


Fig. 7 Crack patterns of beam (NR-2)

3.2 하중-처짐 곡선

하중 단계별로 부재 지간중양에서 LVDT에 의해 측정된 처짐량을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 또한, 각 부재의 하중-처짐곡선을 Figs. 9에서 15까지 나타내었다. 부재 중에서 부재 R13C-2의 실험 결과는 실험 착오로 인해 실험 결과에 나타내지 않았으며, 부재 R23-1의 실험 결과는 극한하중 자료까지 획득하지 못하였다. Table 4에 초기균열하중, 항복하중 및 극한하중을 나타내었다. 초기균열하중은 하중-처짐곡선에서 초기 선형구간 종점에서의 하중값으로 산정하였으며, 항복하중은 철근이 항복할 때의 하중이며, 극한하중은 하중-처짐곡선의 최대 하중으로 산정하였다. 초기균열 단계까지 처짐은 하중에 비례하여 선형으로 증가한다. 초기균열 이후 처짐량은 비선형으로 증가하며, 이후 하중은 극한하중까지 증가한다.

부재별 초기균열하중은 61.0 kN~69.8 kN으로써, 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 부재 R23-1의 균열하중은 61.0 kN으로써 최소 균열하중을 나타내며, 부재 R22-1의 균열하중은 69.8 kN으로써 최대 균열하중을 나타낸다. 부재 R22-1의 균열하중은 부재 R23-1의 균열하중보다 14% 큰 값을 나타내고 있다. 반면에 극한하중은 부재별로 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. NR 실험체가 가장 낮은 하중에서 파괴를 보이고 있는데, 이는 별도의 철근으로 보강하지 않았기 때문이다.

Table 4 Test result of cracking and ultimate load

| Member | Initial cracking | | Yielding state | | Ultimate state | | Ductility index | |
|--------|------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | P_{cr} (kN) | Δ_{cr} (mm) | P_y (kN) | Δ_y (mm) | P_u (kN) | Δ_u (mm) | $\frac{\Delta_u}{\Delta_{cr}}$ | $\frac{\Delta_u}{\Delta_{cy}}$ |
| NR-1 | 61.9 | 1.84 | - | - | 121.7 | 10.00 | 5.43 | - |
| NR-2 | 63.3 | 1.90 | - | - | 129.5 | 15.03 | 7.91 | - |
| R12-1 | 69.3 | 2.30 | 73.0 | 2.43 | 154.0 | 15.99 | 6.95 | 6.58 |
| R12-2 | 69.4 | 2.26 | 71.0 | 2.31 | 147.4 | 14.54 | 6.43 | 6.29 |
| R13-1 | 69.5 | 2.04 | 69.6 | 2.05 | 172.6 | 15.14 | 7.42 | 7.39 |
| R13-2 | 65.0 | 1.82 | 65.3 | 1.84 | 188.6 | 19.21 | 10.55 | 10.44 |
| R13C-1 | 67.2 | 2.16 | 72.5 | 2.50 | 163.1 | 18.18 | 8.42 | 7.27 |
| R14-1 | 62.6 | 1.85 | 73.7 | 2.30 | 206.2 | 22.03 | 11.91 | 9.58 |
| R14-2 | 67.8 | 2.16 | 73.1 | 2.38 | 206.8 | 19.62 | 9.08 | 8.24 |
| R22-1 | 69.8 | 2.19 | 72.4 | 2.27 | 189.4 | 16.23 | 7.41 | 7.15 |
| R22-2 | 67.0 | 2.21 | 68.6 | 2.30 | 187.1 | 17.23 | 7.80 | 7.49 |
| R23-1 | 61.0 | 1.88 | 77.1 | 2.49 | - | - | - | - |
| R23-2 | 69.4 | 2.20 | 87.0 | 3.06 | 233.0 | 20.82 | 9.46 | 6.80 |

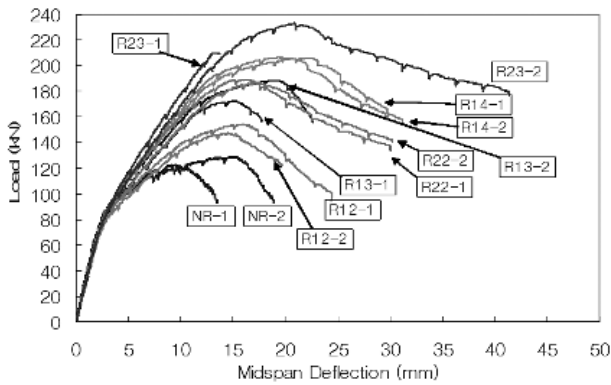


Fig. 8 Comparison of load-deflection curves

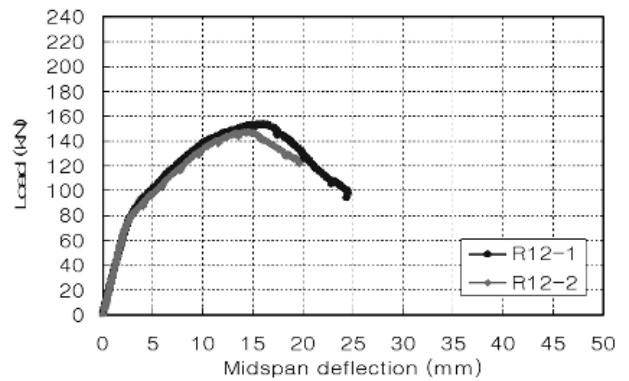


Fig. 10 Load-deflection curve (R12-1, R12-2)

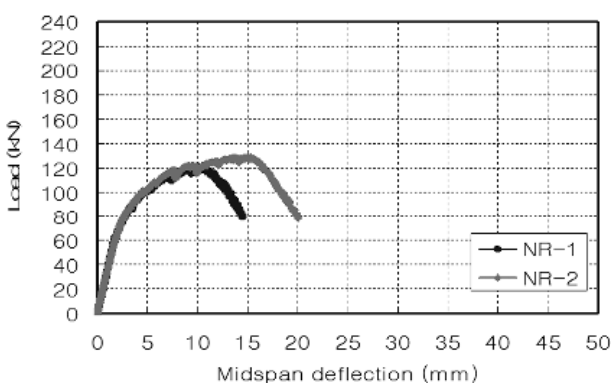


Fig. 9 Load-deflection curve (NR-1, NR-2)

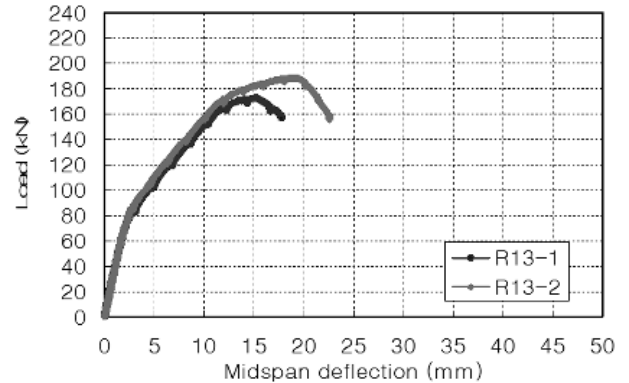


Fig. 11 Load-deflection curve (R13-1, R13-2)

Fig. 11에 UHPC를 부재의 단부에서부터 타설한 부재 (R13-1, R13-2)의 하중-처짐곡선을 나타내었으며, Fig. 12에 UHPC를 부재의 중간중양에서부터 타설한 부재(R13C-1)의 하중-처짐곡선을 나타내었다. 부재 R13-1과 R13-2의 초기균열하중은 각각 72.0 kN, 65.3 kN이고, 부재 R13C-1의 초기균열하중은 67.2 kN으로써 초기균열하중은 유사

한 값을 나타낸다. 반면에 부재 R13-1과 R13-2의 극한하중은 각각 172.6 kN, 188.6 kN이고, 부재 R13C-1의 극한하중은 163.1 kN으로써 R13-1과 R13-2의 극한하중값보다 작다. 부재 R13-2의 극한하중은 부재 R13C-1의 극한하중보다 15% 정도 큰 값을 나타낸다. 따라서, 부재의 단면제원 및 철근비가 동일할지라도 UHPC의 타설 방법

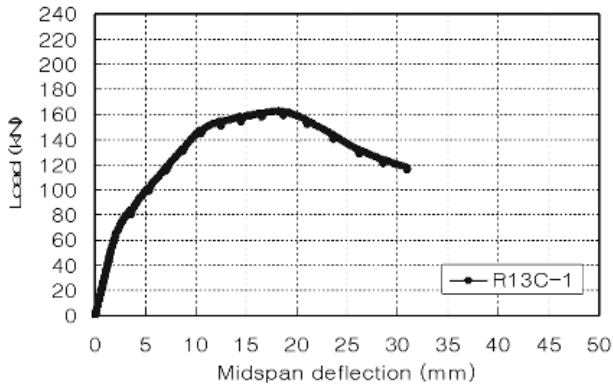


Fig. 12 Load-deflection curve (R13C-1)

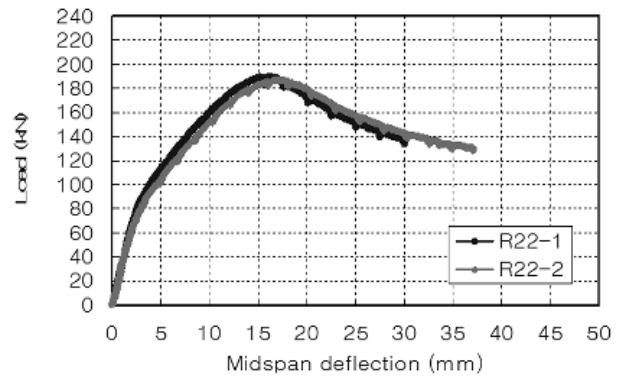


Fig. 14 Load-deflection curve (R22-1, R22-2)

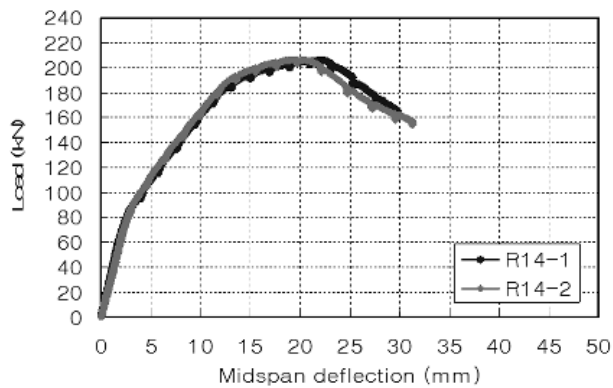


Fig. 13 Load-deflection curve (R14-1, R14-2)

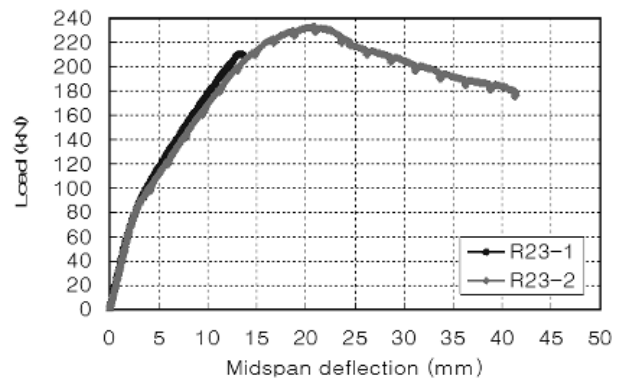


Fig. 15 Load-deflection curve (R23-1, R23-2)

에 따라 극한하중은 차이가 나타나며, 단부타설 방법이 중앙타설 방법보다 유리한 것으로 나타난다. 단부타설은 부재 한쪽 끝단에서 다른 한쪽 끝단으로 유동성에 의해 타설되며, 최대휨모멘트가 발생하는 지간의 중앙에서는 유동성에 의해 강섬유는 부재의 종방향 즉, 휨인장응력과 평행한 방향으로 배열될 가능성이 클 것으로 판단된다. 반면에, 중앙타설은 부재의 중앙에서 좌우로 UHPC를 타설하므로 부재의 지간 중앙에서 강섬유의 배열이 부분적으로 교란될 가능성이 있다. 이러한 타설 방법의 차이에 따른 강섬유 배열 차이의 가능성이 극한하중의 차이를 유발한다고 사료된다.

한편 콘크리트 구조물의 연성은 구조 부재 또는 구조 시스템이 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. 이 연구에서는 식 (1)과 같이 처짐에 근거하여 연성지수를 정의하여 각 부재의 연성 특성을 고찰하였다.

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

여기서 μ : 부재의 연성지수

Δ_u : 부재의 극한하중에서의 처짐

Δ_y : 부재의 항복하중에서의 처짐

단 부재 NR-1과 NR-2는 무근 부재이므로 철근의 항복하중에서의 처짐(Δ_y) 대신 균열하중에서의 처짐(Δ_{cr})을 이용하여 간접적으로 연성능력을 고찰하고자 하였다.

철근비가 0.006일 때 2개의 부재(R12-1 및 R12-2)의 연성지수 산술평균값은 6.44이고, 철근비가 0.009일 때 2개의 부재(R13-1 및 R13-2)의 연성지수 산술평균값은 8.92이고, 철근비가 0.012일 때 2개의 부재(R14-1 및 R14-2)의 연성지수 산술평균값은 8.91로 나타나고 있다. 이는 철근비 증가에 따른 연성 능력의 향상을 나타내고 있다. 초고강도 콘크리트의 연성지수에 관한 기존 연구 결과는 초고강도 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위한 최소 연성지수로써 4.0 이상의 값을 제안하고 있다.¹⁹⁾ 이 실험 결과는 철근을 배근한 경우에 철근비가 0.006일 때 최소연성지수를 나타내며, 모든 부재는 4.0 이상의 연성지수를 나타낸다. 이 실험 결과에서의 부재의 큰 연성능력은 강섬유의 균열이후의 가교작용(bridging effect)에 의한 것으로 판단된다.

3.3 하중-변형률 관계

콘크리트 변형률계지와 철근 변형률계지에서 측정된 변형률을 바탕으로 하중-변형률 관계를 파악하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 강섬유를 혼입한 초고성능 콘크리트 보의 휨 거동 특성을 파악하기 위한 실험 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 주요 실험 연구 결론을 도출하였다.

- 1) 균열 및 파괴 양상 고찰을 통하여 강섬유는 초기균열 이후 극한하중에 도달할 때까지 균열의 진전속도를 늦추는 양상을 나타내며, 이는 콘크리트에 함유되어 있는 강섬유가 부재의 연성파괴를 유도하는데 효과적이기 때문이라고 판단된다.
- 2) 철근비가 동일할 지라도 콘크리트의 타설 방법에 따라 휨 파괴강도는 차이가 발생하며, UHPC를 부재의 단부에서부터 타설한 방법이 중앙에서부터 타설한 방법보다 유리한 것으로 나타난다. 이러한 차이는 UHPC의 타설 방법에 따라 강섬유의 배열이 영향을 받기 때문이라 사료된다.
- 3) 철근비가 0.006일 때의 연성지수의 산술평균값은 6.44를 나타내며, 철근비가 0.012 일때의 연성지수의 산술평균값은 8.91을 나타내고 있어, 4.0 이상의 충분한 연성을 확보하고 있음을 확인하였다. 따라서 이 연구의 강섬유 보강 초고성능 콘크리트는 낮은 철근비에서도 철근의 항복 이후 휨 파괴시까지의 연성 거동에 효과적임을 알 수 있다.
- 4) 강섬유만으로 보강된 부재의 초기균열단계에서의 처짐에 대한 극한상태에서의 처짐비는 5.43 및 7.91을 나타내고 있어, 부피기준 2%의 강섬유 보강만으로도 균열제어 및 초기균열 이후 부재의 연성 거동에 효과적임을 나타낸다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 군산대학교 신임교수 연구비 지원 및 한국건설기술연구원의 기관과유사업인 “초고성능 콘크리트 활용 원천기술 개발” 과제의 지원을 받았고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 초고성능 시멘트 복합체를 이용한 교량 거더 개발, 한국건설기술연구원, 2005, pp. 14~22.
2. 강수태, 박정준, 고경택, 김성욱, “UHPC를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨강도 평가,” 한국구조물진단학회지, 12권, 5호, 2008, pp. 81~90.
3. 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*, Osaka, 2002, pp. 105~122.
4. 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, pp. 22~45.

대표적으로 부재 NR-2와 R12-1의 하중-변형률 곡선을 Figs. 16, 17에 각각 나타내었다. 하중-변형률 곡선에서 음수의 변형률은 압축변형률을 나타내고 양수의 변형률은 인장변형률을 나타낸다. 하중이 증가함에 따라 콘크리트 변형률계이지 C-1과 C-2 위치에서의 콘크리트는 압축변형률을 나타내고, C-4와 C-5 위치에서의 콘크리트는 인장변형률을 나타낸다.

C-3은 부재 단면의 상연에서 하연 방향으로 1/4 위치에 있다. C-3 위치에서의 변형률은 압축변형률에서 인장변형률 영역으로 변화한다. 이는 단면 하단으로부터 인장균열의 전진과 더불어 중립축이 단면 상단으로 이동하기 때문으로 판단된다. C-4 위치는 단면의 도심과 일치한다. 따라서, 초기단계에서의 C-4 위치는 중립축과 일치하므로 변형률이 0에 가까운 값을 나타낸다. 이후 중립축이 단면 상단으로 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. 초기균열 이후에도 C-5 위치 변형률은 급격하게 변화하지 않는다. 이는 일반 콘크리트의 인장변형률 특성과는 뚜렷하게 구분되는 특성이다. 강섬유 보강 초고성능 콘크리트에서는 균열 이후에도 강섬유가 시멘트 매트릭스 내부에서 인장변형에 대한 저항 능력을 나타내고 있기 때문으로 판단된다.

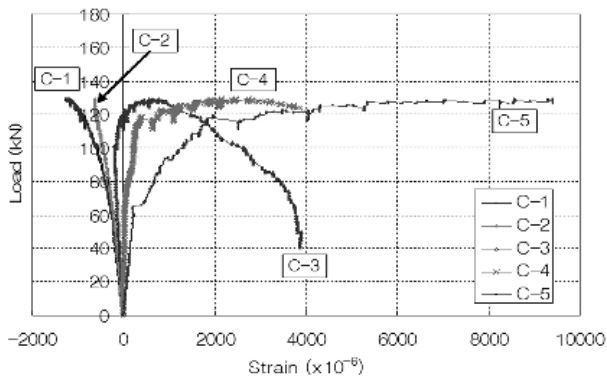


Fig. 16 Load-strain curve (NR-2)

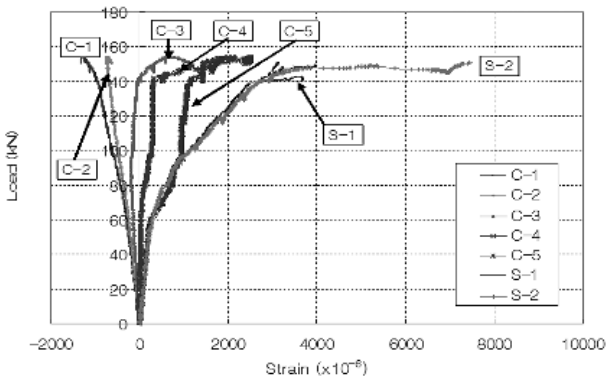


Fig. 17 Load-strain curve (R12-1)

5. Yuguang, Y., Walraven, J., and Uijji, 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.
6. 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.
7. Chunxiang, Q. and Patnaikuni, I., "Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams in Bending," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 21, 1999, pp. 73~81.
8. 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.
9. 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.
10. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "Proposed Classification of HPFRC Composites Based on Their Tensile Response," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 5, 2006, pp. 547~555.
11. 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.
12. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, US Department Transportation, Federal Highway Administration, 2006, pp. 23~93.
13. 이주하, 양준모, 이승훈, 윤영수, "강섬유보강 초고강도 콘크리트의 확대타설을 통한 기동하중전달 성능향상," 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 209~216.
14. 강수태, 김윤용, 이방연, 김진근, "섬유의 방향성이 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 휨거동 특성에 미치는 영향," 콘크리트학회 논문집, 20권, 6호, 2008, pp. 731~739.
15. 김우석, 박윤근, 김주범, "강섬유 보강 콘크리트 보의 휨내력 예측식의 제안," 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp. 361~370.
16. 오영훈, 김정해, "전단보강이 없는 강섬유보강 콘크리트 휨부재의 휨 및 전단강도의 평가," 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 257~267.
17. American Concrete Institute, "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI 544.4R-88, ACI Manual of Concrete Practice*, Detroit, 1988, pp. 544.4R-1~544.4R-18.
18. Federal Highway Administration, *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, Federal Highway Administration, 2006, pp. 23~49.
19. Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J., "Flexural Ductility of Ultra High Strength Concrete Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 4, 1989, pp. 394~400.

요약 이 연구에서는 강섬유로 보강된 초고성능 콘크리트(UHPC)의 정적재하 실험을 통하여 UHPC를 적용한 구조부재의 휨거동 특성을 파악하고자 하였다. 부피비 2%의 강섬유를 혼입하여 철근비가 0.02 이하인 부재의 실험을 통해 주요 휨거동 특성을 파악하였다. 이 연구 결과는 추후 UHPC의 처짐산정 및 휨강도 산정 모델링에 주요한 기초 실험자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 강섬유 보강 UHPC는 균열제어에 효과적이며, 연성지수는 6.29~10.44 범위에서 산정되고 있어 우수한 연성거동 특성을 나타낸다. 또한 단부타설 방법으로 제작한 UHPC 보의 휨강도는 중앙타설 방법으로 제작한 UHPC의 휨강도보다 크게 나타나고 있으며, 이는 타설 방법에 의한 강섬유 배열 특성이 휨강도에 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

핵심용어 : 초고성능 콘크리트, 휨강성, 연성, 균열, 처짐