

비정형 프리캐스트 초고강도 콘크리트 보의 설계 및 실험 평가

Design and Experimental Evaluations of Non-Uniform Precast Ultra High-Strength Concrete Beams

김 호 연*
Kim, Hoyeon

조 창 근**
Cho Chang-Geun

강 주 원***
Kang Joo-Won

Abstract

This paper presents the design, analysis, and experimental evaluations of precast reinforced UHPC (ultra high-performance concrete) beams with a new design concept of non-uniform flexural members. With outstanding mechanical properties of UHPC which can develop the compressive strength up to 200MPa, the tensile strengths up to 8~20MPa and the tensile strain up to 1~5%, a non-uniform structural shape of UHPC flexural beams were optimally designed using three-dimensional finite element analysis. The experiments were carried out and compared with the design strength in order to verify the performance of them. Proposed non-uniform UHPC beams were evaluated by a series of three-point beam loading test as well as estimated by design bending and shear strength of members. The newly designed UHPC beams show excellent performances not only in transverse load capacities but also in deformation capacities.

Keywords : Precast concrete, Non-uniform design, Ultra high-strength concrete, Three-point loading test

1. 서론

오늘날 우리나라에서 건설 재료 중 가장 광범위하게 사용되어 온 콘크리트는 첨단 복합 재료 및 활용 기술 등이 많은 연구자들에 의해 지속적으로 발전되고 있다¹⁾. 건축물의 고층화, 장경간화 및 장치간화에 대한 요구가 높아지면서 구조물에 대한 안정성, 내구성 및 경제성 등을 확보하기 위한 고성능·고강도 콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있다. 한편, 해외에서는 고성능·고강도 콘크리트의 기술 및 활용 범위가 넓어지고 있어 적용 건축물 사례는 일반화 되어 가고 있다^{2),3)}.

국내에서는 높은 압축 강도에 비해 인장 강도가 현저히 떨어지며, 응력집중으로 인해 국부적인 파괴와 갑작스러운 취성파괴의 위험성이 높은 기존 콘

크리트의 취약점을 개선시키고자^{4),5)}, PVA 또는 PP 섬유 등의 합성섬유를 혼입한 섬유 시멘트복합체가 개발되고²⁾ 그 중 강섬유를 혼입한 국내형 초고강도 콘크리트가 개발되어 건축 분야에서 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다⁶⁾.

현재 우리 주변에서 가장 흔하게 볼 수 있는 정형철근 콘크리트 구조물은 합리적인 구조 계획 및 설계에 따라 건축 구조의 3요소 중 기능과 구조 성능을 충분히 만족시킨다. 그러나 건축물의 비정형 및 건축미를 표현하기 위해서 1차적으로 주요 구조체가 구축된 이후 2차적으로 다양한 마감 재료를 활용하여 구조물의 외관을 다양하게 표현하거나 특수 콘크리트를 이용한 파사드를 활용하는 등 주요 구조 요소 외에 추가적인 비구조 요소 작업을 필요로 하는 인위적인 건축미가 표현된다.

본 연구에서는 휨 거동에 지배적인 영향을 받는 건축용 보 부재를 대상으로 초고강도 콘크리트의 80~200MPa 정도의 높은 압축 강도, 8~20MPa 정도의 인장 강도 및 1~5% 정도의 균열 후 고연성 인장 변형률 등 역학 및 성형 성능을 활용, 비정형 초고강도 콘크리트 휨 구조 요소를 제안하였다. 합리적

* 학생회원, 조선대학교 대학원, 박사과정
Architectural Engineering, Chosun University
** 교신저자, 정회원, 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Chosun University
Tel: 062-230-7023 Fax: 062-230-7155
E-mail: chocg@chosun.ac.kr
*** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University

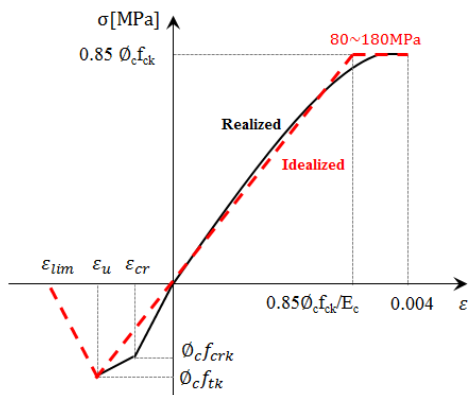
인 비정형 부재 단면 및 형상을 고려하고자 분포 하중을 받고있는 예제 부재의 내력을 분석하고 단면 및 길이 방향에 대한 형상(안) 개발을 시도하였다. 개발된 비정형 구조 부재의 성능을 검증하고자 철근 콘크리트 및 초고강도 콘크리트가 적용된 비정형 구조 부재의 해석적 및 실험적 성능 검증 평가를 실시하였다. 해석적 결과와 실험적 결과 분석을 통하여 초고강도 콘크리트 적용 비정형 휨 구조 요소의 효율적 설계 및 향후 실용화를 위한 비정형 콘크리트 구조 설계 및 상세 기술의 기초 연구로 응용하고자 한다.

2. 초고강도 콘크리트

2.1 초고강도 콘크리트의 재료 특성 및 모델

초고강도 콘크리트의 압축 및 인장 응력과 변형률 관계는 <Fig. 1>과 같으며, 한국콘크리트학회 초고강도 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침⁷⁾에서 제시하고 있다.

압축 측에서 초고강도 증진에 따른 소정의 안정성 확보를 위해 강도저감계수를 적용한다. 압축 강도 특성값 ϕ_c 는 0.90, 인장 강도 특성값 ϕ_t 은 0.80 값이며, 공시체 시험 결과와 실구조물과의 거동 차이를 반영하기 위해 공시체 압축 강도 f_{ck} 에 대해서 85%를 고려하도록 한다.



<Fig. 1> Stress-strain curve of K-UHPC

인장 측의 응력 및 변형률 관계에서 설계 인장 변형률 ϵ_c , 균열 발생시 인장 변형률 ϵ_u 과 극한 인장 변

형률 ϵ_{lim} 은 각각 식 (1), (2) 및 (3)으로 값을 구한다.

$$\epsilon_c = \phi_t f_{crk} / E_c \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \phi_t f_{tk} / E_c + w_u / L_{eq} \quad (2)$$

$$\epsilon_c = \phi_t f_{tk} / E_c + w_{lim} / L_{eq} \quad (3)$$

여기서,

- w_u : 균열 발생 후 변형률 경화 현상에 의해 인장 강도에 도달하는 균열 폭(= 0.3 mm)
- w_{lim} : 인장 응력이 더 이상 존재하지 않는 상태에서의 균열 폭(= 5.3 mm)
- E_c : 탄성계수(MPa)

E_c 는 고온습윤양생을 실시한 K-UHPC의 탄성계수로서 실험에 의해 값이 정해지지 않을 경우, 일반적으로 4.5×10^4 MPa를 사용하며, 등가점장 L_{eq} 는 다음의 식 (4)에 따른다.

$$L_{eq} / h_{beam} = 0.8 \left[1 - 1 / (1.05 + 6h_{beam} / l_{ch})^4 \right] \quad (4)$$

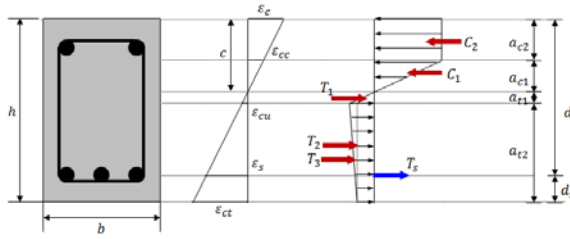
여기서,

- h_{beam} : 보의 높이
- l_{ch} : 특성 길이(= $G_F E_c / f_{tk}^2 = 1.01 \times 10^4$ mm)
- f_{tk} : 초고강도 콘크리트 인장 강도
- f_{crk} : 초고강도 콘크리트 균열시 강도

이때, K-UHPC⁷⁾의 균열 발생시 인장 강도 f_{crk} 및 인장 강도 f_{tk} 은 적절한 시험에 근거하여 사용할 수 있다.

2.2 초고강도 콘크리트 구조 부재의 설계 휨 강도 추정식

초고강도 콘크리트의 고강도 압축 및 인장에서의 응력-변형률 관계 및 인장 철근을 고려하여 초고강도 콘크리트 구조 부재 단면의 설계 휨 강도 추정식을 제시하였다. 부재 단면의 휨 응력 및 평형 관계는 <Fig. 2>에서 볼 수 있다.



〈Fig. 2〉 Flexure of reinforced UHPC beam

압축 영역에 발생하는 초고강도 콘크리트의 응력 분포를 고려한 압축력 C 는 식 (5)이며, 인장 영역에 발생하는 인장 철근과 초고강도 콘크리트가 부담하게 되는 인장력 T 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$C = \phi_c 0.85 f_{ck} a_{c2} b + \phi_c 0.85 f_{ck} (a_{c1} b / 2) \quad (5)$$

$$T = \phi_t f_{tk} a_{t1} B' / 2 + (\phi_t f_{tk} - f_k) a_{t3} B' / 2 + f_H a_{t3} B' + A_s f_y \quad (6)$$

여기서,

- a : 응력-변형구간 각각의 단면 폭
- c : 중립축($a_{c1} + a_{c2}$)
- A_s : 인장 철근 단면적
- f_y : 철근의 설계 항복 인장 강도
- ϵ_H : 단면 하단부에서의 설계 인장 변형률
- ϵ_s : 철근의 설계 인장 변형률

이때, 부재 단면에서의 하부 인장측 초고강도 콘크리트의 설계 인장 강도 f_k 는 식 (7)에서 구한다.

$$f_k = [(1 - (\epsilon_H - \epsilon_{tk}) / (\epsilon_{lim} - \epsilon_{tk})) \phi_t f_{tk}] \quad (7)$$

평형 조건에 따라 단면에서 발생하는 힘의 합력은 $\sum F = 0$ 이므로 $C - T = 0$ 이 성립된다. 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계에서의 오차 범위로 인해 정확성을 높이고자 압축 상연을 기준으로 부재 단면의 각각 응력 영역에서 발생하는 힘 강도를 식 (8) 및 (9)와 같이 추정한다. 최종적으로 구조 부재 단면의 공칭 휨 강도 M_n 은 식 (10)과 같이 유도할 수 있다.

$$M_c = \phi_c 0.85 f_{ck} a_{c2} b (a_{c2} / 2) + \phi_c 0.85 f_{ck} a_{c1} b / 2 (a_{c2} + a_{c1} / 3) \quad (8)$$

$$M_t = \phi_t f_{tk} a_{t1} B' / 2 (c + 2a_{t1} / 3) + (\phi_t f_{tk} - f_H) a_{t3} B' / 2 (c + a_{t1} + a_{t3} / 3) + f_H a_{t3} B' (c + a_{t1} + a_{t3} / 2) + A_s f_y (H - d_t) \quad (9)$$

$$M_n = M_c - M_t \quad (10)$$

2.3 초고강도 콘크리트 구조 부재의 설계 전단 강도 추정식

초고강도 콘크리트 부재의 설계 전단강도 V_d 는 식 (11)에 의해 산정될 수 있다⁷⁾.

$$V_d = V_{rped} + V_{fd} + V_{sd} \quad (11)$$

강섬유의 분담분을 제외하고 전단보강재를 이용하지 않은 보 부재의 전단강도 V_{rped} 는 식 (12)로 구한다.

$$V_{rped} = \phi_b (0.18 \sqrt{f_{ck}} b_w d) \quad (12)$$

여기서,

- b_w : 복부의 폭
- ϕ_b : 부재저감계수, 일반적으로 0.77

강섬유가 기여하는 전단강도 V_{fd} 는 식 (13)에서 산정한다.

$$V_{fd} = \phi_b (f_{vd} / \tan \beta_u) b_w z \quad (13)$$

여기서,

- f_{vd} : 초고강도 콘크리트의 사인장균열 직각 방향의 설계 평균 인장 강도
- β_u : 축 방향과 사인장균열 면에 발생하는 각도, 단, 30° 이상으로 함
- $\beta_u = 1/2 [\tan^{-1}(2\tau / (\sigma_{xu} - \sigma_{yu}))] - \beta_o$
- τ : 설계 단면력에 의한 평균 전단 응력
- σ_u : 축 방향 및 축 직각 방향의 평균 압축 응력

β_o : 축력을 받지 않은 경우의 사인장균열이 부재축으로부터 45° 경사진 직선이 되는 각도
 z : 압축 응력의 합력 작용위치로부터 인장강재도심까지의 거리, 일반적으로 $d/1.5$

전단보강재에 의한 전단강도 V_{sd} 는 식 (14)에서 산정할 수 있으며, 일반적으로 부재저감계수 ϕ_b 는 0.91이다.

$$V_{sd} = \phi_b [A_v d_{yvd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] d \quad (14)$$

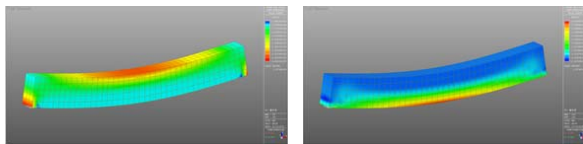
여기서,

A_v : 간격 s_s 로 배치된 전단보강재의 단면적

f_{yvd} : 전단보강재의 설계 항복 강도

α_s : 전단보강재가 보의 축 방향과 이루는 각도

3. 초고강도 콘크리트 적용 비정형 구조 부재의 설계(안)



(a) Compressive stress (b) Tensile stress

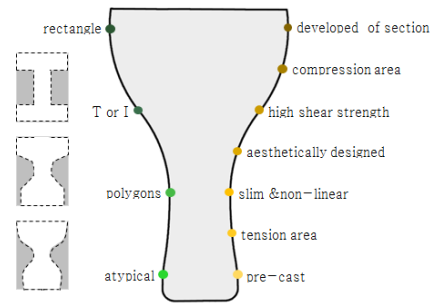
<Fig. 3> Bending performance

일반적인 정형 건축물은 매스 형태가 대부분으로 구조 재료의 사용에 따라 철근 콘크리트 구조 형식을 볼 수 있다. 철근 콘크리트 구조물의 부재 형상은 길이 방향으로 높이의 변화가 없이 사각형 단면을 갖는 직육면체 형상 설계가 대체적이다. 본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 강도 및 취성의 개선과 프리캐스트 시공 기술을 이점을 최대한으로 활용할 수 있는 곡선 또는 비정형 구조 부재의 형상 설계(안)를 제안하였다. 가상의 외력에 대하여 건축용 구조 부재의 길이 방향 및 단면에서 발생하는 휨 및 전단을 받는 힘의 역학적 거동을 고려함과 동시에 건축적 미적 효과를 살려 기존 직사각형 단면 형상을 개선시켜 곡선 및 비정형성을 갖는 구조 요소로 디자인하였다. <Fig. 3>은 Midas-gen 구조 설계

프로그램⁸⁾을 이용하여 등분포 하중을 받고 있는 단순지지 된 콘크리트 보의 역학적 거동 결과를 보여준다.

3.1 비정형 단면 형상의 구조적 디자인

구조 부재의 처짐은 휨에 지배적이며, 부재의 중앙에서 최대 휨모멘트가 양단 지점부에서 최대 전단력이 발생한다. 또한, 부재의 지점에서 중앙으로 갈수록 상부 측에서는 압축 응력이 하부 측에서는 인장 응력이 집중적으로 발생한다.



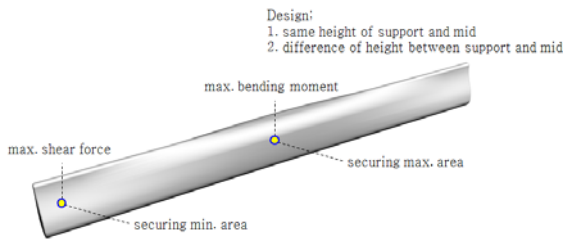
<Fig. 4> Design of non-uniform flexural section

휨이 가장 크게 발생하는 부재에서 중앙부를 기점으로 단면 상부에서는 초고강도 콘크리트의 높은 압축력이 활용할 수 있는 단면적을 극대화하여 효율적 휨 내력이 발휘하도록 한다. 하부 인장측은 초고강도 콘크리트의 높은 인장 강도 및 고인성 인장 변형률 특성을 활용하여 인장 응력을 부담하는 보강 철근의 배치 이외에 최소화 된 폭과 면적을 갖도록 형상화한다. 이와 같이 구조 요소 단면의 하부 폭은 상부 폭보다 상대적으로 작으면서 곡선의 건축미를 갖도록 하여 부재 단면을 형성하는 선의 흐름이 자연스럽게 역동적일 수 있도록 단면을 디자인 하였다. <Fig. 4>는 새롭게 된 부재 단면 개발을 위한 방향성 및 이에 대한 단면 형상을 보여준다.

3.2 비정형 솔리드 구조 부재의 디자인

새롭게 제안된 단면 형상을 고려하여 부재의 길이 방향으로의 휨 및 전단력 분포를 고려하여 전체적인 부재 형상을 구상하였다. 부재의 지점과 중앙부의 높이가 동일한 경우 또는 부재의 지점과 중앙

부의 높이가 상이할 경우에 대하여 휨모멘트의 영향이 크고 압축 응력 분포가 큰 중앙에서의 단면2차모멘트를 극대화 한다. 또한 지점부에서는 전단력의 영향을 고려하여 지점과 중앙부의 높이가 길이 방향으로 움직이는 선의 흐름이 자연스럽게 역동성을 갖도록 곡선을 이용하여 <Fig. 5>와 같이 솔리드 초고강도 콘크리트 적용 휨 부재를 디자인⁸⁾하였다.

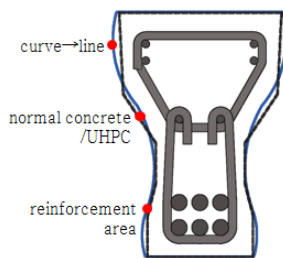


<Fig. 5> Designed solid member with UHPC

4. 초고강도 콘크리트 적용 프리캐스트 비정형 구조 부재의 성능 평가

4.1 초고강도 콘크리트 적용 프리캐스트 비정형 구조 부재 실험 계획

제안된 부재의 단면 및 전체적 형상 설계를 바탕으로 초고강도 콘크리트 적용 비정형 솔리드 휨 부재의 구조 성능 평가를 위한 실험을 수행하였다.



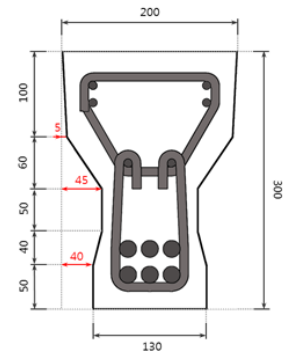
<Fig. 6> Sectional shape of specimens

처음에 계획한 비정형 솔리드 휨 부재를 제작하기에는 시공 방법 및 기간에 제약이 있어서 본 실험에서는 곡선을 직선화하여 <Fig. 6>과 같이 부재를 제작하였다. <Fig. 7>과 같이 기준 실험체 크기는 중앙부 단면의 상부폭 200mm, 하부폭 130mm, 단면 높이는 300mm으로 지점부와 중앙부의 높이가 동일하며, 부재의 순지간은 1,800mm이다. 보강 철

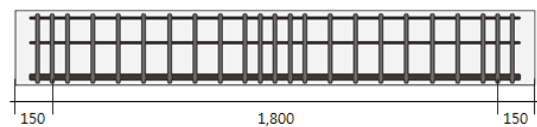
근의 항복 강도 f_y 는 400MPa으로 상부 압축 철근은 4-D10, 하부 인장 철근은 6-D22 배치하였으며, 전단파괴를 방지하고자 전단 철근은 D10을 길이 방향에 60mm 간격으로 배치하였다. 또한, 상부에서 140mm 위치에 중간 보강 철근 2-D6을 배치함으로써 전단 철근을 유연하게 연결하였다. 실험체 변수로는 인장 철근의 단면적과 초고강도 콘크리트 적용 실험체가 있으며, <Table 1>은 실험체에 대한 제원을 나열하였다. 기준 실험체는 일반 콘크리트가 적용된 RC01이며, 초고강도 콘크리트 적용 실험체는 UHPC01, UHPC02이다. UHPC01은 RC01과 동일한 제원을 가지고, UHPC02는 기준 실험체보다 인장 철근 단면적을 26% 정도 감소시킨 실험체이다.

<Table 1> Details of specimens

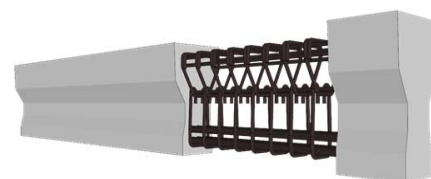
Specimen	Size (B*H) (mm)	Compression strength (MPa)	Reinforcement /Area (mm ²)
RC01	200	34	6D22/2,322
UHPC01	×	130	6D22/2,322
UHPC02	300		6D19/1,719



(a) Section size-1

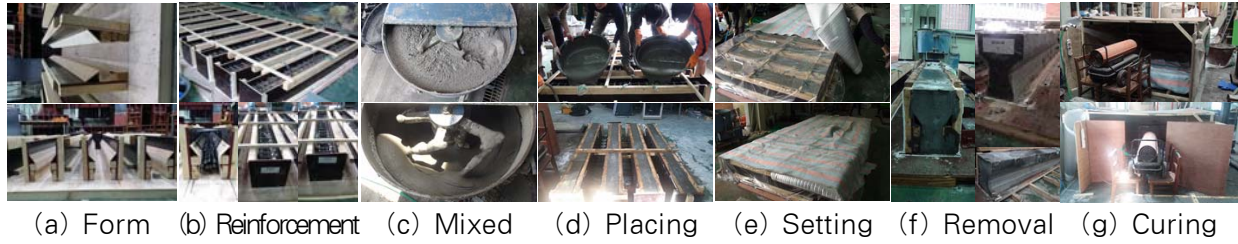


(b) Section size-2



(c) 3D

<Fig. 7> Details of beam specimens



〈Fig. 8〉 Manufactures of non-uniform R-UHPC beam

4.2 초고강도 콘크리트 적용 프리캐스트 비정형 구조 부재의 설계 강도 평가

앞 장에서 제시한 초고강도 콘크리트 적용 부재의 설계 강도 추정식을 이용하여 실험체의 설계 휨 및 전단 강도를 산정하였으며, 그 결과는 <Table 2> 와 같다. UHPC01의 설계 휨 강도는 218.28kN으로 RC01보다 약 1.08배 정도 높게 산정되었다. 인장 철근 단면적을 약 26% 줄인 UHPC02는 UHPC01보다 약 0.11배 작게 추정되었음에도 불구하고 기준 실험체보다 약 0.85배 높은 강도가 추정되었다. 또한 전단 철근을 배치하지 않은 UHPC01, 02의 설계 전단 강도는 257.27kN으로 전단 철근이 적용된 RC01보다도 약 0.27배 높은 강도가 산정되었다. 초고강도 적용 부재는 휨 성능뿐만 아니라 전단 성능을 개선하는데 효과적인 것으로 보여 진다.

〈Table 2〉 Analysis result of specimens

Specimen	Neutral axis (mm)	ϕM_n (kN·m)	ϕV_n (KN)	P (KN)
RC01	174.47	104.69	202.10	232.64
UHPC01	70.78	218.28	442.09 257.27 [Ⓢ]	485.10
UHPC02	63.92	193.97	442.09 257.27 [Ⓢ]	431.04

Ⓢ: No stirrup

4.3 초고강도 콘크리트 적용 프리캐스트 비정형 구조 부재의 실험 결과 평가

4.3.1 실험체 제작 과정

실험체 제작 과정은 <Fig. 8>과 같으며, 초고강도 콘크리트의 배합을 위하여 건설기술연구원에서 제공한⁸⁾ 기준배합표<Table 3>와 배합시방서를 따

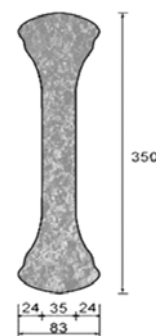
르도록 하였다. 타설 후 2일간 초기 습윤양생 및 거푸집 탈형을 실시한 이후, 시방서에서 고온증기양생으로 지침으로 하고 있지만 실험실 환경 제한으로 조건을 최대한 만족시키기 위해 충분한 수분과 평균 45°C 온도가 3일간 유지되도록 고온양생으로 대신하였으며, 이후 23일간 기중양생을 실시하였다.

〈Table 3〉 Mix design of UHPC(180MPa)

W/B	Unit mass(kg/m ³)						
	Water	Pre-mix	Sand	Fiber		Super-plasticizer	Deformer
				16 (mm)	20 (mm)		
0.20	197.1	1269.5	867.4	39	78	18.1	0.5

4.3.2 압축·인장 역학 실험 결과

본 연구에서 제조된 초고강도 콘크리트의 역학적 성능을 평가하기 위해 실험을 실시하였다.



(a) Specimen size (b) Direct tensile test

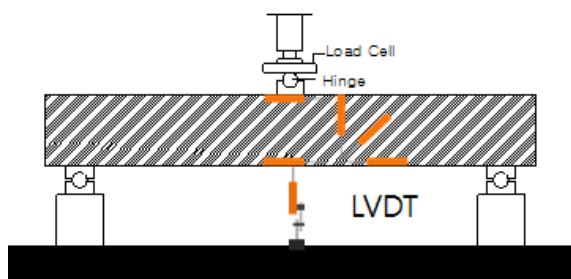
〈Fig. 9〉 Tensile test setup

지름과 높이가 100×200인 공시체 제작 및 채령 후 14일과 28일에 따른 초고강도 콘크리트의 압축 강도 시험을 실시하였다. 채령 14일 초고강도 콘크

리트의 평균 압축 강도는 126.77MPa, 28일에 대한 평균 압축 강도는 135.96MPa으로, 재령 14일을 기준으로 28일 평균 압축 강도는 약 6.76% 향상되었다. 건설기술연구원에서 배포한 180MPa 기준 배합 보다는 압축 강도가 떨어지는 것으로 보이며, 이는 양생 환경 요인으로 생각된다. 재령 28일에 대한 일반 콘크리트의 평균 압축 강도는 34.05MPa 측정되었다.

초고강도 콘크리트의 인장 성능 평가를 위한 인장 실험체 사이즈 및 1축 직접 인장 실험 방법은 <Fig. 9>와 같다. 재령 후 28일에 대한 초고강도 콘크리트의 1축 직접 인장 실험을 실시하였으며 그 결과, 평균 인장 강도는 약 12MPa 및 평균 인장 변형률은 5.12%의 고인성 거동 특성이 나타나는 것으로 보였다.

4.3.3 3점 재하 실험 방법



(a) Experimental plan



(b) Setting specimen

<Fig. 10> Three-point beam loading test

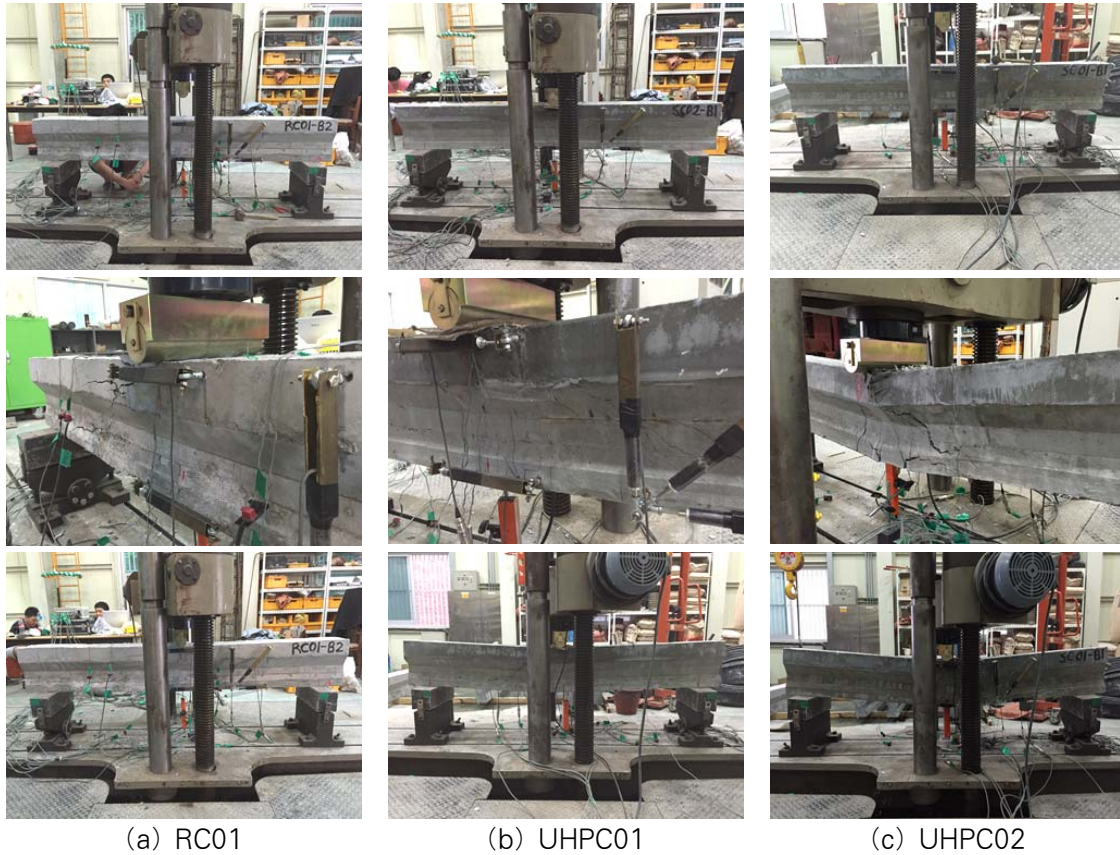
비정형 솔리드 실험체의 휨 성능을 검증하기 위해 1,000kN 용량의 UTM을 사용하였으며, 하중은 변위 제어 방식으로 부재가 내력을 상실할 때까지 가력되도록 하였다. 본 실험은 휨에 지배적인 조건을 유도하고자 단순지지 된 부재의 중앙에 하중을 가력하였다. 이때, 부재의 순지간은 1,800mm이며, 하중 가력점은 지점에서 900mm 되는 위치이다. 실

험체의 처짐, 곡률 및 변형률 측정하고자 변위계(LVDT) 및 변형률 게이지를 부착하였다. 부재의 수직 처짐을 측정하기 위해 실험체 중앙의 하부면에 있는 LVDT를 이용하였으며, 압축측 및 인장측의 주철근 변형률 게이지, 그리고 변위계의 측정값을 이용하여 휨 곡률을 추정하였다. 이상의 비정형 솔리드 실험체의 재하 실험 방법은 <Fig. 10>과 같다.

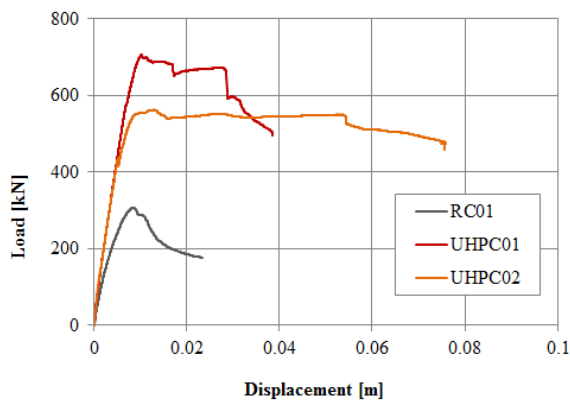
4.3.4 재하 실험 결과 및 분석

하중 재하에 따른 실험체별 실험 과정 및 균열 양상은 <Fig. 11>에서 보여준다. 일반 콘크리트가 적용된 기준 실험체 RC01은 하중이 점점 증가함에 따라 기준에 발생한 균열이 상부로 진전하고 균열 폭이 점차적으로 증가하였다. 인장 철근 항복 이후에는 균열 폭이 급격하게 증가하고 부재의 상부 중앙에 압축 파괴가 발생하면서 최종 휨 파괴에 이르렀다. UHPC01, 02는 RC01과는 다르게 하중이 증가하면서 실험체 표면에서는 초기 균열 주위로 육안으로는 쉽게 식별되지 않은 정도의 미세한 균열이 발생하였으며, 인장 철근 항복 이후 미세 균열 수가 증가하면서 연성 거동을 발휘하였다. 이후 부재는 다중 균열 패턴을 보이면서 최종 부재의 상부 중앙에서 압축 파괴에 도달하였다.

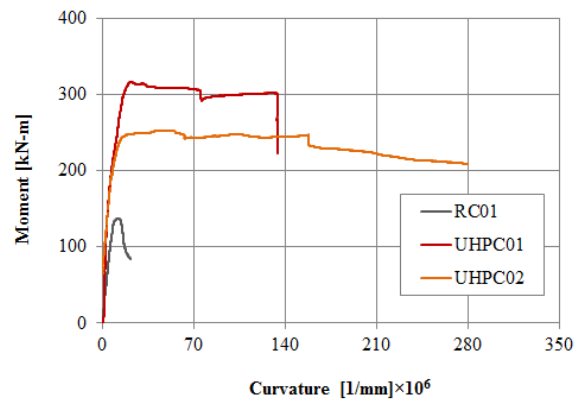
실험 결과에 따른 휨모멘트-곡률 관계곡선 및 하중-변위 관계곡선 그래프는 <Fig. 12~13>과 같으며, <Table 4>는 균열 발생시, 철근 항복시, 극한 하중시 및 부재 파괴시의 단계별 측정값을 나타내었다. 기준 실험체와 동일한 조건을 가진 초고강도 콘크리트 적용 UHPC01은 초기 균열 단계에서는 296.51kN으로 RC01보다 4.1배 정도 높은 내력이 나타났으며, 초기 균열 발생 이후 인장 철근 항복 및 극한 하중에서는 평균 2.32배 높은 내력이 측정되었다. 또한 최종 파괴에 이르렀을 때 기준 실험체보다 3.82배 높은 내력과 18% 정도의 더 큰 변위가 나타났다. RC01/UHPC01보다 인장 철근량을 줄인 UHPC02는 초기 균열 단계에서는 273.91kN으로 UHPC01의 92% 정도의 내력이 측정되었지만 RC01 보다는 3.75배 높은 내력이 발휘하였으며, 초기 균열 발생 이후 인장 철근 항복 및 극한 하중에서는 RC01보다 평균 1.8배 높은 내력이 발휘되었다. 또한 부재가 최종 파괴에 이르렀을 때는 RC01보다 3.13배



〈Fig. 11〉 Test results of specimens



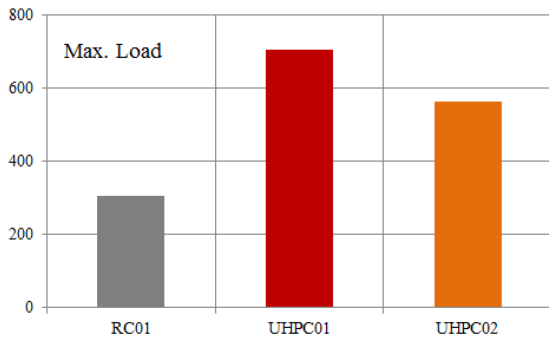
〈Fig. 12〉 Load-displacement curve



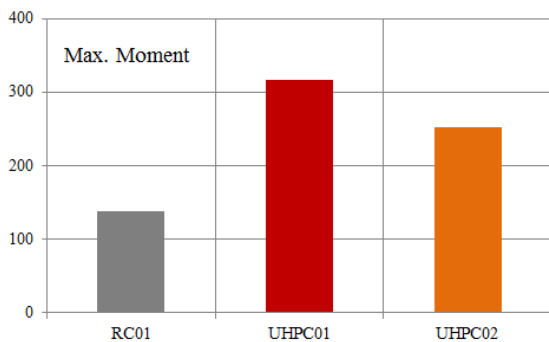
〈Fig. 13〉 Moment-curvature curve

〈Table 4〉 Test result of specimens

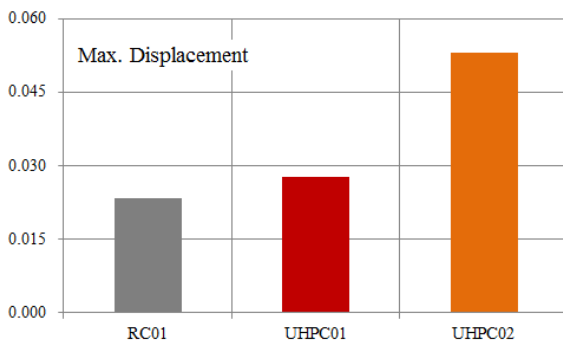
	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. value		Variation of load (%)	Ductility ratio	Secant stiffness (kN/mm)	Fracture	
	P_u (kN)	D (m)	P_u (kN)	D (m)	P_u (kN)	D (m)				P_u (kN)	D (m)
RC01	72.97	0.0011	245.88	0.0052	306.32	0.0084	-	-	-	175.67	0.0235
UHPC01	296.51	0.0033	578.37	0.0071	704.61	0.0102	130.02	0.212	171.33	671.11	0.0278
UHPC02	273.91	0.0030	436.18	0.0052	561.75	0.0129	83.44	0.537	294.83	548.97	0.0531



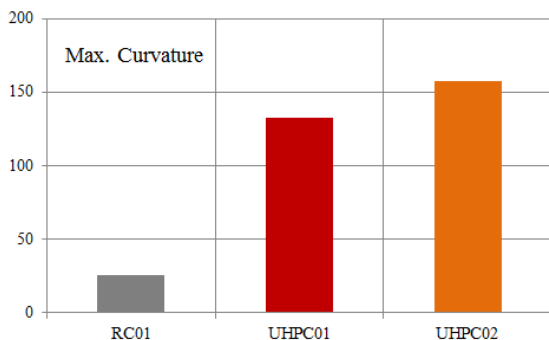
〈Fig. 14〉 Max. transverse load



〈Fig. 15〉 Max. bending moment



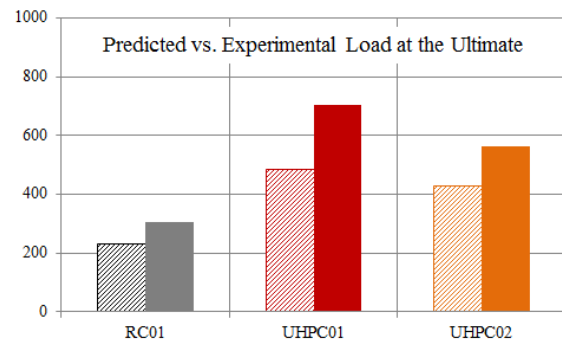
〈Fig. 16〉 Max. transverse displacement



〈Fig. 17〉 Max. bending curvature

정도 높은 내력과 126% 정도의 큰 변위가 측정되었으며, UHPC01보다 23% 정도 작은 내력이 발휘되었지만 90% 정도 더 큰 변위가 나타났다. 이는 UHPC02 대비 인장 철근량을 35% 증가시킨 초고강도 콘크리트 적용 UHPC01은 철근의 과보강을 원인으로 보고 부재의 연성 능력이 떨어진 것으로 판단된다. 〈Fig. 14~17〉은 각 실험체별로 측정된 극한 강도, 극한 휨모멘트, 최대수직변위 및 최대곡률값을 나타낸다.

〈Fig. 18〉은 극한 상태일 때 해석적 추정 강도 결과와 실험적 측정 강도 결과를 나타낸다. RC01과 UHPC02 부재는 해석 결과와 실험 결과가 비슷한 양상으로 예측되지만, RC01과 UHPC02는 해석 값과 실험 값의 차이가 30% 정도, UHPC01은 약 45%의 차이가 나타났다. 해석에 의한 정확한 예측 값을 추정하기 위한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.



〈Fig. 18〉 Load at the ultimate

5. 결론

초고강도 콘크리트 적용 프리캐스트 비정형 솔리드 휨 부재의 설계안을 제안하였다. 새롭게 개발된 비정형 부재의 구조적 성능을 검증하기 위해 실험을 실시하였으며, 그 성능을 해석적 결과와 비교하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고강도 및 균열 이후 고연성 인장 변형을 거동과 고유동 성질을 가진 초고강도 콘크리트의 특성을 최대한 활용하여 제안된 경량화 및 슬림화 된 비정형 솔리드 부재 설계는 구조적 기능성의 확보와 더불어 보통의 직사각형 단면을 가진 철근 콘크리트

트 부재보다 건축의 디자인 요소를 위한 활용성이 높을 것으로 보인다.

2) 휨에 지배적인 영향을 받는 비정형 솔리드 보를 대상으로 부재 단면에서의 평형 관계에 따라 합리적인 구조 설계가 가능하도록 하였다. 또한, 극한 상태에서 부재 단면의 설계 휨 강도 추정식을 제안하였다.

3) 비정형 솔리드 휨 부재의 구조적 성능 평가를 위해 실험을 실시하였다. 처음에 계획한 비정형성을 고려하여 실험체를 제작하기에는 환경적, 시공 방법 및 기간에 제약이 있어서 본 실험에서는 곡선을 최소한으로 직선화하여 실험을 수행하였다. 초고강도 콘크리트 적용 비정형 솔리드 보 부재는 기존의 철근 콘크리트 보 부재와 비교하여 높은 내력이 측정되었으며, 휨 변형 능력에서 우수한 것으로 평가되었다. 이는 초고강도 콘크리트가 적용된 부재의 경우 균열 발생 이후 다중 미세 균열 거동 특성으로 인해 휨 균열 제어 효과가 우수한 것으로 보여진다. 이 때문에 부재의 파괴 이전까지의 내력이 향상되며 안정적인 휨 변형 능력이 나타난 것으로 판단된다. 한편, 보강 철근을 과다하게 사용할 경우 부재의 연성 능력이 떨어져 갑작스런 취성파괴가 발생할 수 있다.

4) 본 연구에서 제안한 초고강도 콘크리트 적용 비정형 솔리드 휨 부재는 부재의 경량화, 슬림화 등의 이점으로 대공간 구조물 및 비정형 구조물에 적용 가능할 것으로 보여진다. 또한, 프리캐스트 시공 법에도 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설연구사업의 연구비지원(13건설연구A02) 및 2018년도 교과부 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2018R1A2B2003258)에 의한 결과의 일부임.

References

1. Cho, C. G., Kappos, A. J., Moon, H. J., & Lim, H. J., "Experiments and failure analysis

of SHCC and reinforced concrete composite slabs", Engineering Failure Analysis, Vol.56, pp.320~331, 2015

2. Laboratory for Advanced Construction Technology, "Hawkeye UHPC Bridge", 2016 form <http://www.lactiowa.org/>

3. Perez, F., Bernardi, S., Trucy, L., & Ferreira, L. (2015). New UHPC for the realization of complex elements. Proceedings of the 17th International Congress of the GRCA, Dubai, GRCA 2015 Congress, No.18, pp.1~15

4. Cho, C. G., Han, B. C., Moon, H. J., Lim, H. J., & Lee, S. J., "Flexural Experiments and Strength Evaluation of Cast-In-Placed SHCC and Reinforced Concrete Composite Slabs", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.29, No.4, pp.19~26, 2013

5. Cho, C. G., Lee, B. Y., Kim, Y. Y., Han, B. C., & Lee, S. J., "Flexural Behavior of Extruded DFRCC Panel and Reinforced Concrete Composite Slab", Advances in Materials Science and Engineering, Vol.2012, pp.1~8, 2012

6. Kim, B. S., Joh, C. B., Park, S. Y., Koh, G. T., Kwon, K. H., & Park, J. B. (2016). KICT's Application of UHPC to the First UHPC Cable Stayed Roadway Bridge. Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC, USA, No.97, pp.1~9

7. KCI, "Structures Design Recommendations for K-UHPC" Korea concrete Institute, Korea, 2012

8. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology: KICT, "Specifications of SUPER Concrete", 2014

- Received : April 24, 2018
- Revised : May 04, 2018
- Accepted : May 04, 2018