

# 스트럿-타이 기법에 의한 초고강도 콘크리트 비정형 트러스 구조 디자인

## Structural Design of Ultra High-Strength Concrete Non-Uniform Truss Using Strut-Tie Approach

김 호 연\*      조 창 근\*\*      양 혜 주\*\*\*      김 민 지\*\*\*      채 윤 하\*\*\*      최 종 성\*\*\*  
Kim, Hoyeon      Cho Chang-Geun      Yang, Hea-Joo      Kim, Min-Ji      Chea, Youn-Ha      Choi, Jong-Sung

### Abstract

In current research, it was attempted a preliminary design and evaluation of non-uniform ultra high-strength concrete (UHSC) truss members. UHSC used here has the compressive strength of 180 MPa, the tensile strength of 8 to 20 MPa, and the tensile strain after cracks up to 2%. By the three-dimensional finite element stress analysis as well as strut-tie approach on concrete solid beams, the non-uniform truss shape of UHSC truss was designed with the architectural esthetic concept. In a series of examples, to compare with conventional concrete members, the proposed UHSC truss members have advantages in capabilities of the slender design with minimum weight with high performances under transverse loadings as well as the aesthetically non-uniform design for spatial structures.

*Keywords : Concrete truss structures, Non-uniform design, Ultra high-strength concrete, Strut-tie model*

## 1. 서론

오늘날 대형 및 고층 건축물들에 대한 수요가 커지면서 구조물의 장시간화에 대한 안정성, 내구성 및 경제성 등을 확보하는 구조 재료 기술에 대한 연구가 진전되고 있다<sup>1)</sup>. 건설 재료 중 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트는 높은 압축강도에 비해 인장강도가 현저히 떨어지며, 응력집중으로 인해 국부적인 파괴와 갑작스러운 취성파괴가 일어날 수 있는 큰 취약점을 가지고 있다. 이러한 기존 콘크리트의 단점을 개선시키고자 첨단 복합 재료 및 활용 기술 등의 지속적인 개발로 PVA 또는 PP 섬유 등의 합성 섬유를 혼입한 섬유 시멘트복합체가 개발되고

있으며<sup>2)</sup>, 그 중 강섬유를 혼입한 국내형 초고강도 콘크리트가 개발되어 건축 분야 활용을 위한 연구가 활발하게 진행 중이다<sup>3)</sup>.

일반적으로 사람들에게 가장 익숙한 건축물 형상은 매스디자인의 조합으로 이루어진 정형 건축물일 것이다. 과거의 정형적 철근 콘크리트 구조물은 합리적인 구조 설계에 의해 건축 구조의 3요소 중 기능과 구조 성능을 충분히 만족시킬 수 있었다. 그러나, 건축물의 특색 및 건축미를 표현하기 위해서 1차적으로 주요 구조체가 구축된 이후 2차 작업으로 다양한 재료들을 활용하여 외관적인 특징을 나타내거나 특수 콘크리트를 이용한 파사드를 적용하는 등 주요 구조 요소 외에 비구조 요소에서 추가적인 작업을 통해서 건축미가 표현되었다.

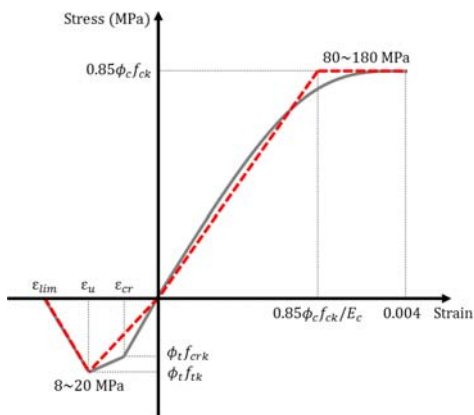
본 연구에서는 80~200MPa 정도의 초고강도 압축강도, 8~20MPa 정도의 인장강도, 그리고 1~5% 정도의 균열 후 고연성 인장변형률 능력을 갖는 초고강도 콘크리트의 역학 및 성형 성능을 활용<sup>4)5)</sup>, 비정형 초고강도 콘크리트 공간 트러스 구조 요소의 제안 및 설계 기술에 대한 기초 연구를 시도하였다. 건축

\* 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  
\*\*\* 학생회원, 조선대학교 건축공학, 학사과정  
Architectural Engineering, Chosun University

용 구조 부재를 대상으로 합리적인 비정형 부재 단면 및 형상안을 고려하여, 휨보다는 전단 거동에 지배적인 영향을 받는 경우에 한정하여 트러스 메커니즘의 원리를 이용한 콘크리트 부재의 스트럿-타이 해석법에 기준하여 비정형 트러스 형상안의 개발을 시도하였다. 개발된 비정형 구조 부재의 성능을 검증하고자 기존 형상의 철근 콘크리트 부재와의 비교 예를 통해 초고강도 콘크리트를 적용한 비정형 부재와의 평가 검증을 수행하였다. 해석적 결과의 비교 및 분석을 통하여 콘크리트 계의 비정형 공간 트러스 요소의 효율적 설계 및 향후 실용화를 위한 비정형 콘크리트 구조 설계 및 상세 기술의 도입적 연구로 응용하고자 한다.

## 2. 초고강도 콘크리트

### 2.1 초고강도 콘크리트의 재료 특성 및 모델



(Fig. 1) Stress-strain curve of K-UHPC

한국콘크리트학회는 초고강도 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침을 제시<sup>6)</sup>, 보통 콘크리트와 달리 압축 및 인장 축에서 초고강도 콘크리트의 응력 및 변형률 관계를 <Fig. 1>과 같이 정의하고 있다.

압축 축에서 초고강도 증진에 따른 소정의 안정성 확보를 위해 강도저감계수를 적용하였다. 압축강도 특성값  $\phi_c$  및 인장강도 특성값  $\phi_t$ 은 각각 0.91과 0.80 값을 적용, 공시체 시험 결과와 실구조물과의 거동 차이를 반영하여 공시체 압축강도  $f_{ck}$ 에 대해서 0.85배를 적용한다.

인장 축의 응력 및 변형률 관계에서 설계인장변형률  $\epsilon_c$ , 균열 발생 시 인장변형률  $\epsilon_u$ 과 극한인장변형률  $\epsilon_{lim}$ 은 각각 식 (1), (2) 및 (3)으로 정의된다.

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

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

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

여기서,

$w_u$  : 균열 발생 후 변형률 경화 현상에 의해 인장강도에 도달하는 균열 폭(= 0.3 mm)

$w_{lim}$ : 인장응력이 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  $4.5 \times 10^4$  MPa를 사용한다. 이때, 등가검장  $L_{eq}$ 는 다음의 식 (4)로 산정한다.

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

여기서,

$h_{beam}$ : 보의 높이

$l_{ch}$  : 특성 길이(=  $G_F E_c / f_{tk}^2 = 1.01 \times 10^4$  mm)

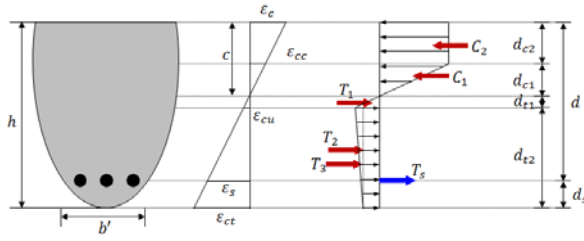
$f_{tk}$  : 초고강도 콘크리트 인장강도

$f_{crk}$  : 초고강도 콘크리트 균열시 강도

K-UHPC의 균열 발생 시 인장강도  $f_{crk}$  및 인장강도  $f_{tk}$ 은 적절한 시험에 근거하여 사용할 수 있다.

### 2.2 초고강도 콘크리트 부재의 휨강도

초고강도 콘크리트 적용 부재 단면에 대한 설계 휨강도 추정을 제시하였다. 앞 절의 초고강도 콘크리트의 고강도 압축 및 인장에서의 응력-변형률 관계 및 인장철근을 고려할 경우 비정형 부재 단면의 휨 응력 및 평형관계를 <Fig. 2>와 같이 나타낼 수 있다.



<Fig. 2> Flexure of reinforced UHPC beam

이때 압축 영역에 발생하는 초고강도 콘크리트의 응력 분포를 고려한 축 합력은 식 (5)와 같이 정의될 수 있다.

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

인장 영역에 발생하는 인장철근과 초고강도 콘크리트가 부담하게 되는 인장력의 합은 식 (6)과 같이 정의된다.

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

여기서,

- $a$  : 응력-변형 구간 각각의 단면 폭
- $c$  : 중립축( $a_{c1} + a_{c2}$ )
- $A_s$  : 인장철근 단면적
- $f_y$  : 철근의 설계항복인장강도
- $\varepsilon_H$  : 단면 하단부에서의 설계인장변형률
- $\varepsilon_s$  : 철근의 설계인장변형률

이때, 비정형 단면의 상부폭  $B$ 와 하부폭  $B'$  값에 따라 그려지는 곡선의 수식에 관계하여 각 구간에서의 면적을 산정한다. 하지만 본 논문에서는 곡선 방정식에 따라 산정하지 않고 임의적으로 나타내었다. 또한 인장축 초고강도 콘크리트의 설계인장강도  $f_k$ 는 식 (7)과 같이 산정한다.

$$f_k = \left[ (1 - (\varepsilon_H - \varepsilon_{tk}) / (\varepsilon_{lim} - \varepsilon_{tk})) \phi_t f_{tk} \right] \quad (7)$$

단면에서 발생하는 힘의 합력은  $\sum F = 0$  이므로  $C - T = 0$ 이 성립된다. 중립축  $c$  산정 시, 초고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계에서의 오차 범위로 인해 정확성을 높이고자 압축 상연을 기준으로 압

축 및 인장 영역에서 각각 발생하는 휨강도를 식 (8) 및 (9)와 같이 추정한 후, 최종적으로 전체 단면에 대한 공칭 휨강도  $M_n$ 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 보의 전단강도

초고강도 콘크리트 부재의 설계 전단강도  $V_d$ 는 식 (11)에 의해 산정될 수 있다<sup>4)</sup>.

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

강섬유의 분담분을 제외한 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
- $\phi_b$  : 부재저감계수, 일반적으로 0.77

강섬유가 부담하는 전단강도  $V_{fd}$ 는 식 (13)에 의한다.

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

여기서,

- $f_{vd}$  : 초고강도 콘크리트의 사인장균열 직각 방향의 설계평균인장강도
- $\beta_u$  : 축 방향과 사인장균열 면에 발생하는 각도,

단, 30°이상으로 함

$$\beta_u = 1/2 [\tan^{-1}(2\tau/(\sigma_{xu} - \sigma_{yu}))] - \beta_o$$

- $\tau$  : 설계 단면력에 의한 평균전단응력
- $\sigma_u$  : 축 방향 및 축 직각 방향의 평균압축응력
- $\beta_o$  : 축력을 받지 않은 경우의 사인장균열이 부재축으로부터 45° 경사진 직선이 되는 각도
- $z$  : 압축응력의 합력 작용 위치로부터 인장강재 도심까지의 거리, 일반적으로  $d/1.5$

전단보강재에 의한 전단강도  $V_{sd}$ 는 식 (14)로 구한다.

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

여기서,

- $A_v$  : 간격  $s_s$ 로 배치된 전단보강재의 단면적
- $f_{yv}$  : 전단보강재의 설계항복강도
- $\alpha_s$  : 전단보강재가 보의 축 방향과 이루는 각도
- $\phi_b$  : 부재저감계수, 일반적으로 0.91

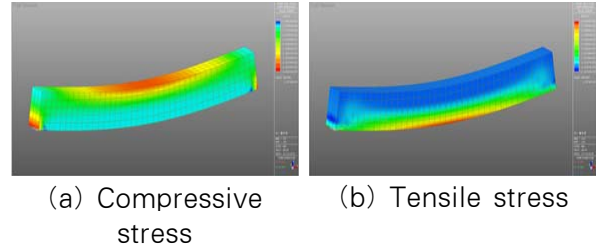
### 3. 초고강도 콘크리트 비정형 트러스의 구조적 디자인

#### 3.1 비정형 단면 형상의 구조적 디자인

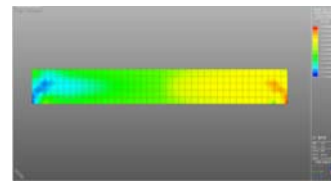
현대 건축에서 철근 콘크리트 부재는 전형적인 직사각형 단면 형상으로 설계되는데, 앞에서 소개된 초고강도 콘크리트는 강도 및 취성의 개선으로 프리캐스트화 할 경우 구조 부재를 곡선 또는 비정형 형상으로 설계 및 제작하는데 유리한 장점이 있다. 휨 및 전단을 받는 부재 길이 방향 및 단면에서의 힘의 흐름과 건축적 미적 효과를 살려 기존 직사각형 형상을 탈피한 곡선 및 비정형성을 갖는 구조 요소로 디자인을 시도하였다.

일반적인 등분포하중을 받는 단순지지 된 콘크리트 보를 고려해보자. <Fig. 3>과 같이 처짐은 휨에 지배적이며, 부재의 중앙에서 최대 휨모멘트가 발생하고, 지점에서 지간 중앙으로 갈수록 단면 상연에서 압축응력이 커지며, 중앙부 단면 하연에서는 큰 인장응력이 받는다. 또한, 양단 지점부에서 가장 큰

전단응력이 발생한다. <Fig. 4>와 같이 전단응력은 중앙에서 지점으로 갈수록 크게 받게 된다.



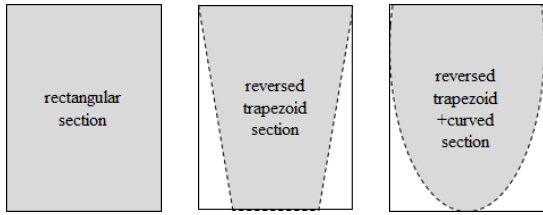
<Fig. 3> Bending performance



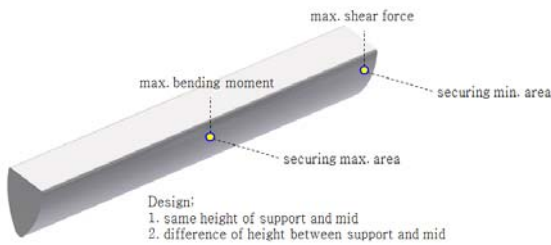
<Fig. 4> Shear performance

이상과 같은 응력 조건에서 초고강도 콘크리트를 적용하는 경우, 내측 중앙부 단면 상연에서 높은 압축력의 부담을 초고강도 콘크리트 단면 극대화하여 효율적 휨 내력을 발휘하도록 할 수 있다. 더불어 단면 하연의 인장축은 인장응력을 부담하는 철근의 배치 이외에 초고강도 콘크리트의 높은 인장강도 및 고인성 인장변형률 특성을 활용하여 상연에 비해 상대적으로 최소화 된 하단부 폭과 면적을 갖도록 고려할 수 있다. 따라서 단면의 하부 폭은 상부 폭보다 상대적으로 좁게 하고, 구조 요소의 디자인에서 역동성을 갖도록 하기 위해 직선 요소를 탈피하여 곡선적 건축미를 갖도록 중앙 단면의 기본 구상을 <Fig. 5>와 같이 디자인하였다.

중앙 단면 형상의 기본 구상을 기준으로 부재 길이 방향으로의 휨 및 전단력 분포에 따른 길이 방향의 형상 디자인을 구현하였다. 부재의 지점과 중앙부의 높이가 전체적으로 동일한 경우 또는 휨모멘트의 영향이 크고 압축응력분포가 큰 중앙에서는 단면2차모멘트를 극대화시키고, 지점부에서는 전단력의 영향을 고려하여 지점과 중앙부의 높이가 길이 방향에 따라 곡선적으로 변화되도록 <Fig. 6>과 같이 구상할 수 있다.



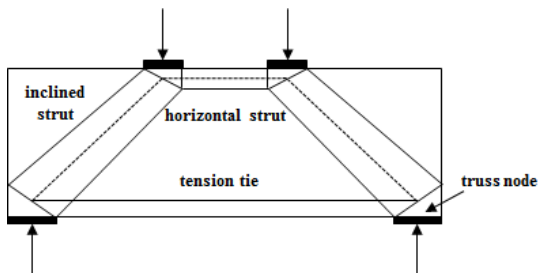
〈Fig. 5〉 Developed section shape



〈Fig. 6〉 3D image for non-uniform solid beam

### 3.2 스트럿-타이 해석법

철근 콘크리트 구조 부재에 적용된 하중 및 지지 조건으로 인해 실제 발생하는 압축력인 Strut과 인장력을 받는 Tie로 응력 영역을 구분하고, 이 3개 또는 그 이상의 힘들이 만나는 절점 Node로 구성된다. 접합부는 개념적 편접합으로 이상화시켜 Strut과 Tie의 힘이 절점을 통해 전달되어 절점에서의 평형 조건과 소성이론을 이용, 트러스 매커니즘을 일반화 한 스트럿-타이(Strut-Tie) 모델이 제안되었다<sup>7,8)</sup>. 깊은 보인 경우 스트럿-타이 모델은 <Fig. 7>과 같이 구성할 수 있다.



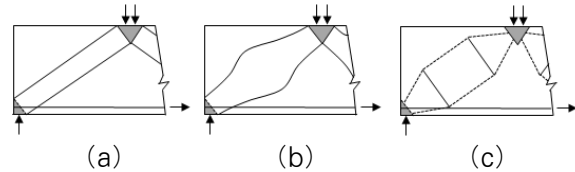
〈Fig. 7〉 Strut-tie model

스트럿-타이 모델 부재 설계는 시공의 용이성, 부재의 평형성, 재료의 연성과 부재의 사용성 등을 고

려한다. 부재에 작용하는 하중의 의한 힘의 전달 경로를 시각적으로 나타내며, 절점 영역에서는 평형 조건과 항복 조건을 고려하여 안전 조건을 만족하도록 한다. 압축 응력장을 대변하는 경사진 Strut은 균열의 진행 양상을 예측함으로써 예측한 균열 양상과 평행하게 배치할 수 있으며, Tie는 철근의 일반적 배근 상황을 참고로 하여 배치할 수 있다. 이때, Tie는 보강철근일 수도 있고, 긴장재 또는 콘크리트 인장응력장일 수 있다.

#### 3.2.1 압축대

스트럿-타이 모델에서 Strut은 압축대 방향에서 압축력을 가지는 콘크리트의 압축응력장이다.



〈Fig. 8〉 Compression field theory idealized form

<Fig. 8 (a)>는 같은 프리즘 Strut은 압축응력장의 가장 간략화 한 이상화 형태로서, 일반적으로 균일하고 평행한 응력계도를 가지는 응력장의 모델에 사용한다. <Fig. 8 (b)>는 Strut의 단면적이 변화하는 병모양 Strut이며, <Fig. 8 (c)>는 설계를 간략하게 하기 위해 병모양 Strut으로 이상화 할 수 있다.

콘크리트 Strut의 공칭축강도  $F_n$ 는 식 (15)와 같으며, Strut에 평행하고 압축항복응력을 갖는 철근을 포함하는 Strut의 공칭축강도  $F_n$ 는 식 (16)과 같다.

$$\phi F_n = \phi f_{cs} A_{cs} \quad (15)$$

$$\phi F_n = \phi (f_{cs} A_{cs} + \phi_{ss} f_{ss} A_{ss}) \quad (16)$$

여기서,

$A_{cs}$  : 콘크리트 Strut 단면적

$A_{ss}$  : 철근 Strut 단면적

$f_{cs}$  : 콘크리트 Strut 유효압축강도( $0.85\beta_s f_{ck}$ )

$f_{ss}$  : 철근 Strut 응력

$\phi$  : Strut 강도감소계수(0.75)

유효계수  $\beta_s$ 은 Strut의 형태에 따라 결정할 수 있고 <Table 1>과 같다. 콘크리트 질량에 관한 수정계수  $\lambda$ 는 일반 콘크리트의 경우 1.0, 모래 경량 콘크리트의 경우 0.85, 전경량 콘크리트인 경우 0.75이다.

<Table 1> Strut coefficient,  $\beta_s$

Strut geometry and location	Reinforcement crossing a strut	$\beta_s$
Struts with uniform cross-sectional area along length	N.A.	1.0
Bottle-shape strut	Satisfying	0.75
	Not satisfying	$0.6\lambda$
Struts located in tension members or the sention zones of members	N.A.	0.4
All other cases	N.A.	0.6

소성론의 하한경계이론에 따라 절점 영역의 Strut 설계축강도  $\phi F_n$ 은 계수하중에 의한 Strut과 Tie의 단면력 또는 절점 영역의 한 면에 작용하는 단면력  $F_u$ 보다 이상의 조건에 만족해야한다.

### 3.2.2 인장대

인장대의 Tie 단면력은 힘의 작용선에 대칭으로 위치한 철근에 의해 저항되며, 필요한 철근의 양은 Tie의 단면력으로부터 산정할 수 있다. 이상적으로 Tie는 극한하중 상태에서 항복에 도달하도록 해야 한다. 연성 파괴 메커니즘 상태를 보장하기 위하여 콘크리트의 파괴에 앞서 Tie는 항복해야 한다.

Tie의 공칭축강도  $F_{nt}$ 는 식 (17)과 같다.

$$\phi F_{nt} = \phi(A_{st}f_y + A_{pt}(f_{pc} + \Delta f_p)) \quad (17)$$

여기서,

- $A_{st}$  : 철근 Tie 단면적
- $A_{pt}$  : 프리스트레스 강재 Tie의 단면적
- $f_y$  : 철근 Strut 항복강도
- $f_{pc}$  : 프리스트레스 강재의 유효강도
- $\Delta f_p$  : 계수하중에 의한 프리스트레스 강재의 강도 증가량
- $\phi$  : Tie 강도감소계수(0.75)

절점 영역의 Tie 설계축강도  $\phi F_{nt}$ 은 계수하중에 의한 Strut과 Tie의 단면력 또는 절점 영역의 한 면에 작용하는 단면력  $F_u$ 보다 이상의 조건을 만족한다. 보강 철근과 연결되는 삼각형 모양의 콘크리트 절점 영역으로 구성되어 있다. Tie를 둘러싸는 삼각형 콘크리트 폭은 유효폭  $w_t$ 이라고 하며, ① 인장철근이 1열 배치되는 경우 철근 Tie의  $w_t$ 은 타이 철근 도심에서 콘크리트 표면까지 거리의 2배 ② 다열 철근이 배치되는 경우 절점 영역의 응력을 정수압 상태로 고려할 경우 철근 Tie의 유효폭 상한값은 식 (18)에 의해 추정된다.

$$w_{t,max} = F_{nt}/(f_{cc} b_s) = F_{nt}/(0.85\beta_n f_{ck} b_s) \quad (18)$$

여기서,

$b_s$  : 스트럿의 두께

## 4. 초고강도 콘크리트 비정형 트러스의 구조적 디자인 및 해석 평가

앞 장에서 소개된 부재 단면 및 길이 방향의 응력 분포 개념, 스트럿-타이 해석법, 건축미를 고려한 비정형 디자인 개념, 그리고 초고강도 콘크리트의 재료적 특성을 반영하여 새로운 비정형 트러스의 구조적 디자인을 시도하였다. 스트럿-타이 모델과 초고강도 콘크리트의 압축 스트럿 매커니즘의 효과<sup>9)</sup>를 극대화하여 스트럿의 유효 폭 및 기타 요소들을 고려하였다. <Fig. 9>와 같이 이는 솔리드 단면의 부재에서 필요없는 많은 부분의 콘크리트 체적을 제거한 트러스 콘크리트 구조로서, 구조적 장점, 미적 효과, 그리고 경량화의 노출형 비정형 초고강도 콘크리트 공간 트러스 부재의 구조 디자인(안)을 제시해 준다.

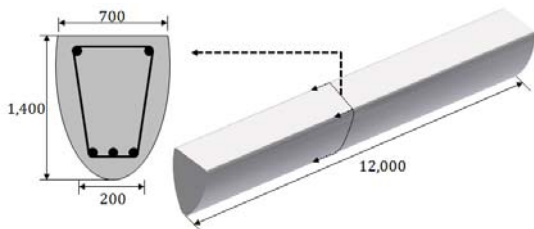


<Fig. 9> Developed non-uniform UHPC truss

4.1 솔리드형 초고강도 콘크리트 비정형 보의 설계 예

솔리드형의 철근 및 초고강도 콘크리트 비정형 보의 설계 및 휨강도 산정 예를 수행, 직사각형 단면의 보통 콘크리트 보와 비교 평가하도록 했다.

<Fig. 10>과 같이, 적용 예에 고려된 부재는 중앙부 단면의 상부폭 700mm, 하부폭 200mm, 단면 높이 1,400mm 곡선형의 비정형 단면을 갖고 있다. 부재의 순지간은 12m로서 단순지간이다. 철근의 항복강도  $f_y$ 는 500MPa으로 상부 압축철근은 2-D13, 하부 인장철근은 9-D35으로 배근하고, 전단철근은 D13철근이 부재 길이 방향에 130mm 간격으로 배근되었다. <Table 2>에서 솔리드형 비정형 보의 예에 대한 제원을 나열하였다. 사용된 초고강도 콘크리트의 설계기준강도는 180MPa이다. RC01은 30MPa의 보통 콘크리트를 사용한 직사각형의 등단면 철근 콘크리트 보, UHPC1은 비정형 초고강도 콘크리트 적용 보, 그리고 UHPC2는 비정형 초고강도 콘크리트 적용 보인데, 앞의 비정형 보와 달리 단면 규격을 변경하여 단면의 상부폭은 600mm, 하부폭은 200mm, 높이는 800mm를 고려한 경우이다.



<Fig. 10> Non-uniform solid R-UPHC beam

보통 콘크리트 보 및 비정형 초고강도 콘크리트 보에 대한 설계 휨 및 전단강도에 대한 산정 결과를 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 2> Date of specimens

Specimen	Section size (B*B'*H)(mm)	Design strength of concrete(MPa)
RC1	700×1,400	30
UHPC1	700×200×1,400	180
UHPC2	600×200×800	180

<Table 3> Analysis of RC/UHPC1A,B

Specimen	Neutral axis (mm)	$\phi M_n$ (kN·m)	$\phi V_{nt}$ (C+F*) (kN)	$\phi V_n$ (kN)
RC1	280.01	4,392	540	943
UHPC1	72.91	5,512	6,047	6,614
UHPC2	91.31	3,050	2,700	3,021

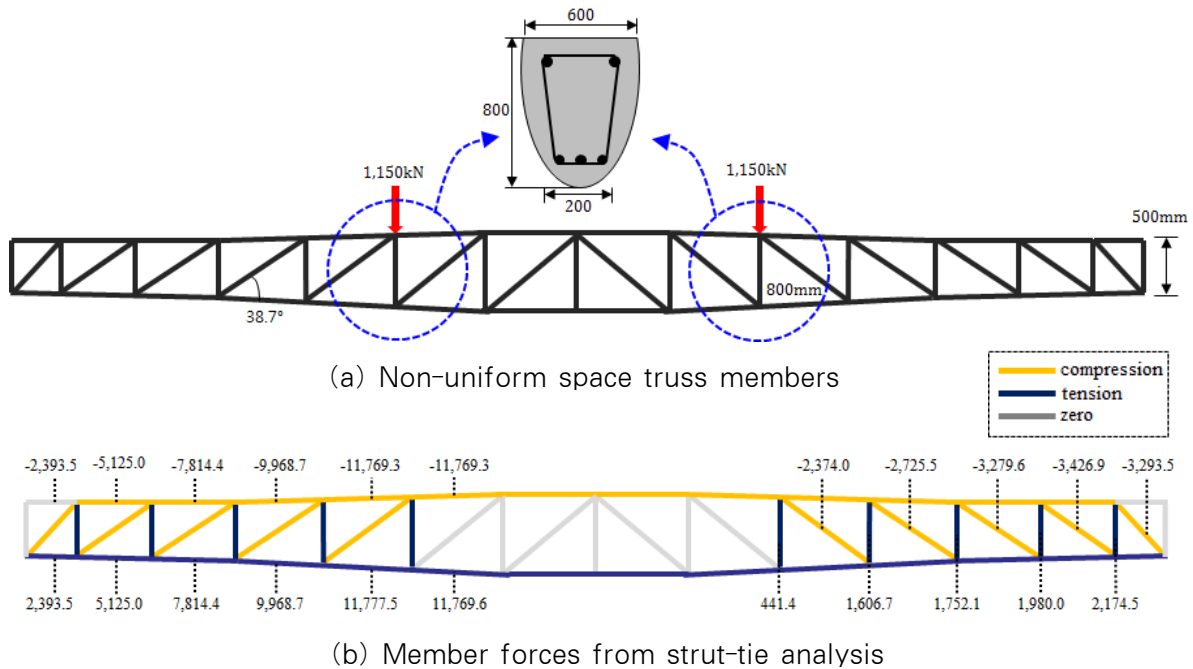
C+F\*: Design shear strength without stirrup

기준 예제 RC1의 설계휨강도는 UHPC1보다 약 79% 낮은 값으로 산정되었으며, 단면이 작은 UHPC2보다 약 44% 높은 휨강도로 산정되었다. 전단강도는 전단철근의 사용 유무 모두에 대해 비교하였다. 전단철근을 고려하지 않은 경우 UHPC1 보의 설계 전단강도는 6,614kN으로 RC1보다 약 7배, 그리고 UHPC2보다 약 2.2배 높은 전단능력을 가졌다.

솔리드형 최적화된 비정형 초고강도 콘크리트 적용 보에 비해 높은 휨강도로 부재의 비정형화 및 슬림화에 유리하고, 초고강도 콘크리트에 혼입된 강섬유의 전단기여분이 우수하여, 전단철근을 최소화 할 수 있는 설계 결과를 보여주었다.

4.2 초고강도 콘크리트 적용 비정형 공간 트러스 부재의 설계 예

앞 절의 솔리드형 단면을 갖는 UHPC1 보에서 진전하여 스트럿-타이 개념에 의한 비정형 트러스로 구조 디자인을 수행, 철근 및 초고강도 콘크리트로 설계된 비정형 트러스 보에 대한 디자인 예를 제시하였다. <Fig. 11>과 같이, 작용하는 수직하중이 1151.5kN인 경우로 고려, 스트럿-타이 모델에 의해 최적화 된 형상은 길이 방향으로 지점부에서의 단면 높이가 최소화 되고 중앙부에서 단면의 높이가 최대화 되는 비정형 스트럿-타이 구조로 형성되도록 하였다. 스트럿-타이 형상의 지점부 높이는 500mm, 중앙부의 높이는 800mm로 선정되었다. 스트럿-타이 모델링 된 사재는 압축재인 하우트러스 형태로 선정되었다. 스트럿-타이 해석으로 산정된 각 스트럿 및 타이의 부재력은 <Fig. 8 (b)>와 같다.



〈Fig. 11〉 Strut-tie modeling of UHPC beam

스트럿-타이 해석에 의해, 34MPa의 보통 콘크리트 보 RC2 및 180MPa 초고강도 콘크리트를 적용한 보 TUHP 각각에 대해 스트럿 및 타이의 유효폭  $w_t$  을 산정한 결과 <Table 4>와 같이 추정되었다.

중양에서 지점부로 갈수록 스트럿의 부재력은 감소하였으며, 지간 중앙부의 상부에 위치한 스트럿은 11,769.3kN의 최대 압축력을 받는 것으로 추정되었다. 해당 스트럿에 대해 초고강도 콘크리트를 적용한 TUHP 보의 경우 유효폭은 284.9mm로 추정된 반면, 보통 콘크리트를 적용한 RC2 보의 유효폭은 1508.3mm로 추정되었다.

이는 TUHP의 경우 RC에 비해 최대 압축력을

받는 스트럿의 경우 약 5.29배의 유효폭이 작게 추정되어, 스트럿-타이 해석을 근거로 설계된 초고강도 콘크리트 트러스 구조로 디자인 형상화 한 경우 각 트러스 부재의 단면 치수를 최소화 한 슬림화 된 설계를 제시할 수 있다. 이를 근거로 스트럿-타이 해석에 의한 본 예제 적용 보에 대한 비정형의 초고강도 콘크리트 트러스의 구조디자인 결과를 <Fig. 12>와 같이 제시하였다. 본 설계 결과는 초고강도 콘크리트로 제작 가능한 비정형 형상의 특성과 더불어 슬리드형 콘크리트 부재의 불필요한 요소를 제거하여 전체 중량을 줄인 경량화 및 슬림화가 가능한 콘크리트 적용 트러스 구조로 제시되었다.

〈Table 4〉 Effective width predicted from strut-tie analysis(mm)

U (kN)	RC2 $w_t$	TUHP $w_t$	L (kN)	RC2 $w_t$	TUHP $w_t$	D [(kN)	RC2 $w_t$	TUHP $w_t$	V (kN)	RC2 $w_t$	TUHP $w_t$
-2,393.5	306.7	57.9	5,125.0	656.8	124.1	-3,293.5	422.1	80.0	2,174.5	278.7	52.6
-5,124.6	656.7	124.0	7,814.4	1001.5	189.2	-3,426.9	439.2	83.0	1,980.0	253.8	47.9
-7815.0	1001.5	189.2	9,968.7	1277.5	241.3	-3,279.6	420.3	79.4	1,752.1	224.5	42.4
-9,968.7	1277.5	241.3	11,777.5	1508.7	285.1	-2,725.5	349.3	66.0	1,606.7	205.9	38.9
-11,769.3	1508.3	284.9	11,769.6	1508.3	284.9	-2,374.0	304.2	57.5	441.4	56.6	10.7

U: Upper chord force, L: Lower chord force, D: Diagonal member force, V: Vertical member force,  $w_t$ : Effective width





〈Fig. 12〉 Design result of non-uniform UHPC truss from strut-tie approach

## 5. 결론

초고강도 콘크리트의 활용으로 구조 부재의 기능적 구조 성능뿐만 아니라 콘크리트가 갖는 조형미의 특징을 가질 수 있어 곡선적인 비정형의 건축미를 갖는 콘크리트로 설계 시공된 비정형 트러스 구조의 디자인을 제시, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

보통 콘크리트와 달리 초고강도 콘크리트의 높은 압축강도와 인장강도 및 균열 이후의 고연성 인장 변형률 거동으로 인해 기존 직사각형 등단면의 철근 콘크리트 부재에서 보다 경량화 및 슬림화된 비정형의 부재 설계를 통해서도 높은 설계 휨강도 및 전단강도를 발휘할 수 있었다.

보통 콘크리트 적용된 보의 예를 통해 비정형 형상을 고려한 초고강도 콘크리트의 적용에 따른 스트럿-타이 해석법에 의한 스트럿 형상 최적화를 통해 초고강도 콘크리트를 적용한 비정형 공간 트러스 구조의 설계를 시도하였다. 기존 철근 콘크리트 보에서 제시될 수 없는 초고강도 콘크리트 스트럿의 유효폭 최소화 설계를 통해 트러스 구조화 함으로서 경량화 및 슬림화 된 초고강도 콘크리트 트러스 부재로 설계가 가능하도록 하였다. 추정된 트러스 단면이 지나치게 작을 경우 철근을 통한 강도 확보를 위해 초고강도 콘크리트의 최소 면적을 확보하도록 한다. 제시된 초고강도 콘크리트의 트러스 구조는 성형성 및 유동성의 장점으로 인해 곡선적인 비정형 미를 갖는 노출 콘크리트의 대공간 트러스 구조로의 활용이 가능할 것이다.

초고강도 콘크리트 적용에 따른 비정형 공간 트러스 적용 건축물은 구조적으로 높은 성능이 확보될 뿐만 아니라 구조 부재의 경량화, 슬림화로 구조물의 장스팬 및 고층 건축물에 경제적인 것으로 판단된다. 기존의 강재 트러스 구조와 더불어 초고강

도 콘크리트 활용으로 전단 지배 및 응력 교란 영역 등의 구조 설계 영역에서 활용도의 장점으로 비정형적 공간 구조 계획에 설계 가능하다.

## 감사의 글

이 논문은 조선대학교 『2017학년도 학부생 새싹형 연구인재 지원프로그램(학부 장학금 사업)』의 지원을 받아 연구되었음.

## 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. 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
3. Joh, C. B., Kim, B. S., Hwang, H. H., Choi, K. K., & Choi, S. H., "Punching Shear Strength of Deck Slabs Made of Ultra High Performance Concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.15, No.4, pp.221~231, 2011
4. Yoo, S. W., Ahn, Y. S., Cha, Y. D., & Joh, C. B., "Experiment of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Deck and

- Inverted-T Steel Girder", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.26, No.6, pp.761~769, 2014
5. John, H., & George, S. (2013). The Implementation of Full Depth UHPC Waffle Bridge Deck Panels(Report No. FHWA-HIF-13-031). USA: Federal Highway Administration.
  6. KCI, "Structures Design Recommendations for K-UHPC" Korea Concrete Institute, Korea, 2012
  7. ACI, "American Concrete Institute (2014) Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14)", Farmington Hills, Michigan, USA, 2014
  8. MOLIT, "Strut-Tie Model", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, 2016
  9. Schlaich, J. & Schäfer, K., "Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models", Structural Engineer, Vol.69, No.6, pp.113~125, 1991
- 
- Received : March 25, 2018
  - Revised : April 11, 2018
  - Accepted : April 12, 2018