

## 초고강도 콘크리트 바닥판과 역T형 강재 합성보의 휨 성능 평가

유성원<sup>1</sup>, 조창빈<sup>2\*</sup>, 최광호<sup>3</sup>

# An Evaluation of Flexural Performance of Composite Beam with Ultra High Performance Concrete Deck and Inverted T-Shaped Steel Girder

Sung-Won Yoo<sup>1</sup>, Chang-Bin Joh<sup>2\*</sup>, Kwang-Ho Choi<sup>3</sup>

**Abstract:** In this paper, when the composite beam is made with UHPC deck and steel girder, the steel girder takes the form of the inverted-T shape without top flange because of high strength and stiffness of UHPC deck. There is no evaluation by experiment and analysis about the shear connector behavior on the web of steel girder and flexural behavior of inverted-T shape composite beam. By this reason, this study compares between experiment and analysis by using tension softening model of UHPC on the basis of flexural test results of 16 members considering compressive strength of UHPC, spacing of stud and thickness of deck as variables. The results of tensile strength of UHPC by inverse analysis were 6.57 MPa(in case of 120 MPa) and 9.57 MPa(in case of 150 MPa). In case of the test members with small stud spacing, the results of analysis and test were close clearly, and the test members with thick deck and low UHPC compressive strength also similar, but effects were small. As it compared between analysis and experiment totally, the results of analysis and experiment agree well. So the tension softening model of UHPC is reasonably reflected on the real behavior of composite beam of UHPC.

**Keywords:** Composite beam, Inverted-T shape, Shear connector, Tension softening, UHPC

## 1. 서 론

최근에는 높은 콘크리트의 압축강도 및 인장강도 등을 확보하기 위하여 강섬유 보강 초고강도콘크리트(Ultra High Performance Concrete : UHPC)에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(John and George, 2010; Kang and Ryu, 2004).

특히 UHPC 바닥판과 강재 거더를 이용하여 합성보를 구성할 때, UHPC 바닥판의 높은 강도와 강성으로 인하여 강재 거더 상부 플랜지의 역할이 거의 불필요할 것으로 예상되어 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 합성보 구성 시에 강재 거더의 상부 플랜지를 없앤 역T형 거더를 적용하였다(Yoo et al., 2014).

Fig. 1과 같은 역T형 거더와 UHPC 바닥판을 이용하여 합성보를 구성할 경우에 대한 구체적인 거동평가 즉, 강재 복부에 설치되는 전단연결재에 대한 거동, 역T형 강거더 합성보의 휨거동 특성 등은 현재까지 실험 및 이론적으로 평가된 적이

거의 없는 실정이다.

이러한 이유로 본 논문에서는 UHPC 압축강도, 전단연결재 간격, 바닥판 두께 등을 변수로 하여 역T형 거더와 UHPC 바닥판을 이용한 합성보 16 개를 제작하여 전단연결재의 거동, 휨거동 실험을 수행(Yoo and Suh, 2015)하였으며, 각 실험 부재 제작 시에 사용된 압축강도 수준에 따른 UHPC의 재료적 실험을 동시에 진행하였다.

본 논문에서는 본 연구진이 기존에 제시한 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장연화 거동 모델링 기법(Yoo et al., 2015)을 이용하여 실험 부재들에 대하여 해석을 수행한 후, 해석결과와 실험결과와의 비교·분석을 통하여 전단연결재 간격에 따른 특성을 평가하고자 하였다. 한편 연구진이 기존에 제시한 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장연화 거동 모델링

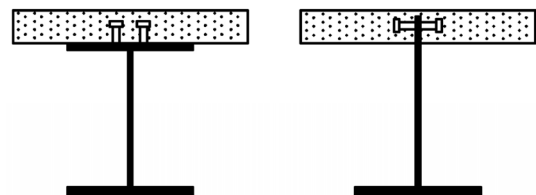


Fig. 1 Schematic diagram of conventional and inverted-T composite girder(Yoo et al., 2014)

<sup>1</sup>정회원, 우석대학교 토목환경공학과 교수

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 인프라연구실 수석연구원, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, 남서울대학교 건축공학과 교수

\*Corresponding author: cjoh@kict.re.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 3월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

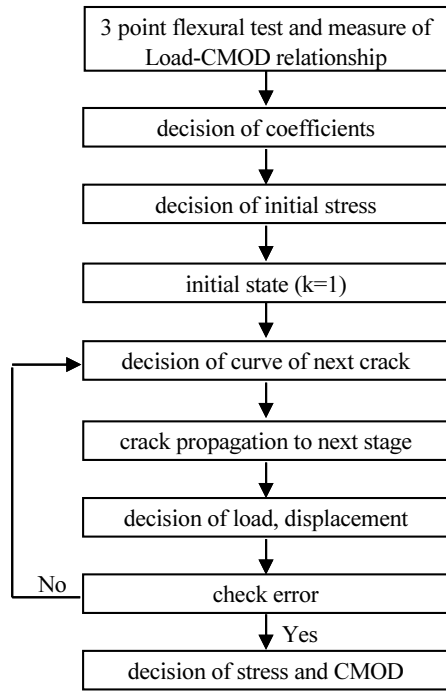


Fig. 2 Flow chart of modeling of tension softening curve(Yoo et al., 2015)

기법의 순서도를 Fig. 2에 나타내었다.

## 2. UHPC의 재료 모델링

### 2.1 UHPC 배합 및 실험 제원

UHPC 설계기준강도는 120, 150 MPa 두 종류이며, 실험 부재를 제작할 때 동시에 타설되는 UHPC 공시체를 이용하여 압축 및 인장 재료실험을 수행하였으며, 실험결과를 재료모델링에 활용하였다. 사용된 강섬유는 직경이 16.3, 19.5 mm 직선형이며, 물리적 성능을 Table 1에 나타내었다

제작된 공시체를 이용하여 압축강도 재료실험을 수행할 때 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 압축응력-변형률 관계 곡선을 획득하였으며 이로부터 압축강도와 탄성계수를 산정하였다. 또한, 휨인장 거동을 파악하기 위하여 Photo 1과 같이 노치(notch)를 갖는 휨인장 실험용 시편을 제작하여 3점 하중재하법에 의해 휨인장 실험을 수행하였다. 휨인장시편은 100 mm(가로) × 100 mm(세로) × 400 mm(길이)의 사각 프리즘 형상으로 제작하였다. 노치는 지간 중앙에 10 mm 깊이로 내었다. 클립 게이지를 설치하여 하중 재하 단계별로 노치의 균열 개구변위(CMOD)를 측정하였으며, 이로부터 하중-CMOD 곡선을 획득하였다.

Table 1 Physical properties of steel fiber

ID	density [kg/m <sup>3</sup> ]	length [mm]	yield strength [MPa]	ratio to concrete [volume %]	
				diameter[mm]	
				19.5	16.3
120	7,800	13	2,500	1.0	-
150	7,800	13	2,500	1.0	0.5

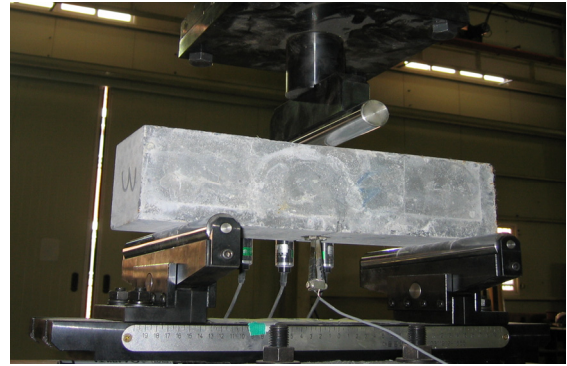


Photo 1 Flexural tensile test by 3 point loading

### 2.2 압축거동 모델링

실험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 2에 나타내었으며, 압축강도 실험결과는 Table 3에 나타내었다. 압축거동은 압축파괴가 일어나기까지 거의 선형거동을 나타내며, 압축강도에 도달한 이후에는 급격한 파괴형태를 보였다.

Tue et al.(2004)는 UHPC가 보통강도 또는 고강도 콘크리트에 비해 응력-변형률 관계에서 극한변형률까지 거의 선형관계를 나타내는 것으로 보고하고 있으며, 본 실험에서도 동일하게 나타났다. 따라서, 콘크리트의 압축응력-변형률 관계

Table 2 Concrete mix proportion

ID	W/B [%]	Unit weight[kg/m <sup>3</sup> ]					steel fiber [mm]	
		W	Premix binder	S	P	A	19.5	16.3
120	23	221	1,259	847	17.7	0.7	78	-
150	20	197	1,288	866	24.4	0.9	78	39

W : water, S : sand, P : plasticizer, A : antifoaming agent  
Premix binder : cement, zirconium, blast furnace slag, filler, expansion agent, reduction agent of shrinkage

Table 3 Mechanical properties of concrete

ID	fcu' [MPa]	Ec [MPa]	ε <sub>u</sub>
120	126.5	36,737	0.00344
150	143.4	39,123	0.00367

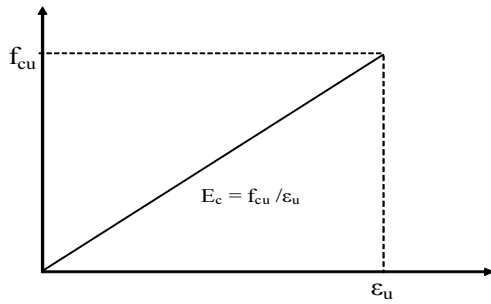


Fig. 3 Modelling of compressive stress-strain

를 Fig. 3와 같이 극한변형률  $\epsilon_u$ 와 압축강도  $f_{cu}$ 에 의한 선형관계의 응력-변형률 관계로 모델링하였다.

### 2.3 인장거동 모델링

AFGC(2002)에서는 노치를 낸 시편의 3점 재하 휨인장실험을 통해 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 이로부터 인장응력-CMOD 관계를 산정할 것을 제안하고 있어, 본 연구에서도 단면해석에 사용되는 인장응력-변형률 관계 곡선을 산정하기 위해 우선 3점 휨인장 실험으로부터 측정된 하중-CMOD 관계를 이용하여 역해석을 수행한 후, 인장응력-CMOD 곡선을 산정하였다. 하중-CMOD 곡선은 전술한 바와 같이 10 mm 깊이의 노치를 갖는 휨인장 실험 측정 결과를 사용하였다.

범용 해석프로그램인 MIDAS CIVIL에 의한 역해석 수치해석모델을 Fig. 4에 나타내었으며, 해석모델은 1,076개 삼각형 요소, 좌우대칭으로 모델링하였다. Table 4 및 Fig. 5, 6에 역해석에 의해서 얻어진 인장강도, 변형률 값을 나타내었다. 수치해석에 의한 인장강도( $f_{tj}$ )값은 120 MPa의 경우, 6.57 MPa, 150 MPa의 경우, 9.57 MPa로 나타났다.

Fig. 6과 Table 4에서의 탄성변형률  $\epsilon_e$ 는 초기균열이 발생하는 시점에서의 변형률을 나타내고,  $\epsilon_{0.3}$ 은 균열개구변위가 0.3 mm일 때의 변형률을 의미하며,  $\epsilon_{1\%}$ 는 균열개구변위가 시편 높이의 1%에 해당할 때의 변형률을 나타낸다.  $\epsilon_{lim}$ 은 인장

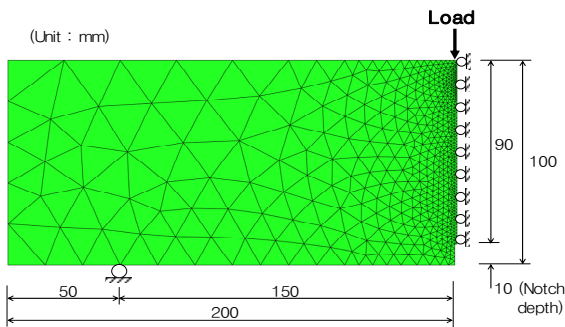


Fig. 4 Numerical analysis model of flexural tensile specimen for inverse analysis

Table 4 Tensile data by inverse analysis(unit : MPa)

ID	$f_{tj}$	$\epsilon_e$	$\epsilon_{0.3}$	$\epsilon_{1\%}$	$\epsilon_{lim}$	$\sigma_{bt}$	$\sigma_{1\%}$
120	6.57	0.00015	0.00195	0.00615	0.02925	6.48	6.22
150	9.57	0.00024	0.00204	0.00624	0.02685	9.11	7.73

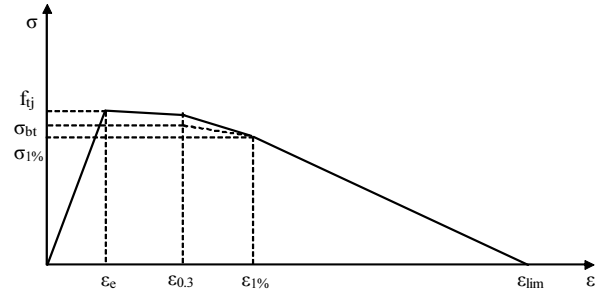


Fig. 5 Tensile stress-strain relationship

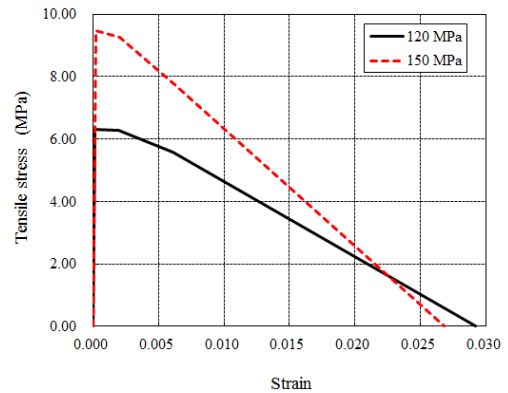


Fig. 6 Model of tensile stress-strain relationship

응력이 0이 될 때의 한계변형률을 의미하며,  $\sigma_{bt}$ 와  $\sigma_{1\%}$ 는 각각  $\epsilon_{0.3}$ 과  $\epsilon_{1\%}$ 에 대응하는 인장응력을 나타낸다.

## 3. UHPC 합성보의 휨거동 실험(Yoo and Suh, 2015)

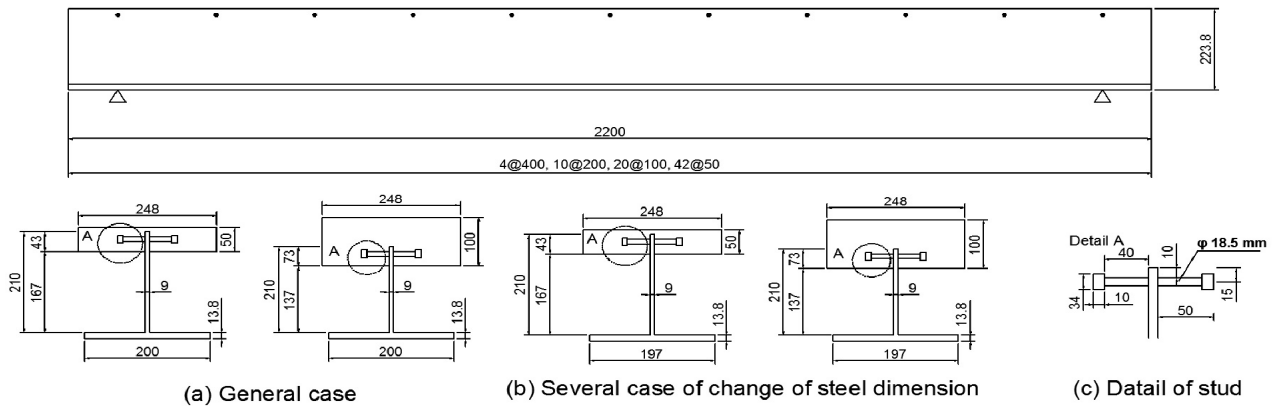
### 3.1 실험변수 및 부재 형상

본 연구진은 UHPC 역T형 강합성보의 휨거동 실험에 대한 연구결과(Yoo and Suh, 2015)를 이미 발표하였으므로 본 논문에서는 해석에 필요한 실험 내용만을 기술하였다.

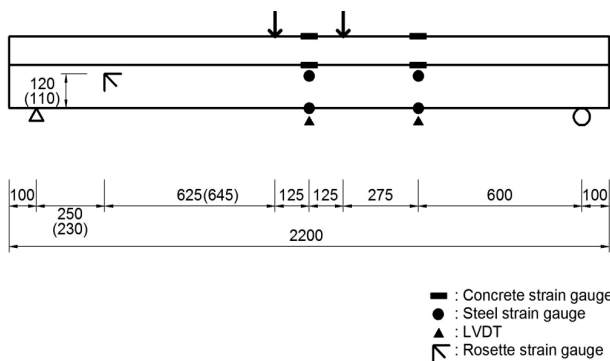
실험변수로는 UHPC 압축강도 120, 150 MPa 2 수준, UHPC 바닥판 두께 50, 100 mm 2 수준 및 전단연결재 간격 50, 100, 200, 400 mm 4 수준으로 총 16개이다. 실험변수는 Table 5에, 실험체의 제원은 Fig. 7, 8에 나타냈다.

**Table 5** Test variables

ID	Concrete compressive strength [MPa]	Steel fiber mix ratio(volume) [%]	Slab thickness [mm]	Stud spacing [mm]	Steel dimension	Moment of inertia [mm <sup>4</sup> /m]	
120f-50-50	120	19.5 mm	50	50	see Fig. 8(a)	648,204,096	
120f-50-100			50	100		608,431,093	
120f-50-200			50	200		606,338,700	
120f-50-400			50	400		624,077,520	
120f-100-50		1.0 %	100	50	see Fig. 8(a)	668,005,509	
120f-100-100			100	100		631,827,808	
120f-100-200		0.5 %	19.5 mm	100	200	see Fig. 8(b)	629,097,682
120f-100-400				100	400		644,004,858
150f-50-50	150		19.5 mm	50	50	see Fig. 8(a)	614,037,639
150f-50-100				50	100		577,958,206
150f-50-200		50		200	571,715,499		
150f-50-400		50		400	584,448,794		
150f-100-50		+ 16.3 mm	100	50	see Fig. 8(a)	633,091,651	
150f-100-100			100	100		598,844,031	
150f-100-200		0.5 %	16.3 mm	100	200	see Fig. 8(b)	593,981,057
150f-100-400				100	400		604,406,484



**Fig. 7** Section dimension of test member[Unit : mm]



**Fig. 8** Test setup[Unit : mm]

### 3.2 전단연결재 및 강재

전단연결재는 몸통직경 18.5, 머리직경 34 및 높이 50 mm 로 항복 및 극한강도 371, 472 MPa 이며, 강재는 SM490재질 을 사용하였으며, 항복 및 극한강도는 397, 550 MPa 이다.

## 4. 변형률적합조건에 의한 해석

### 4.1 단면해석기법(Yoo et al., 2015)

부재의 하중-처짐 등의 해석을 수행하기 위해 단면해석기

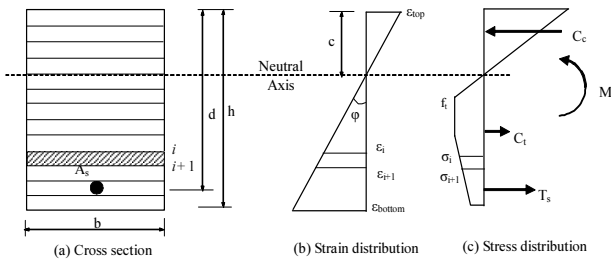


Fig. 9 Distribution of stress and strain

법을 적용하였으며, 단면은 적층단면으로 모델링하였다. 부재 단면은 여러 개의 층으로 분할되며, 부재 단면에 걸쳐 변형률은 선형으로 분포한다고 가정하였으며, Fig. 9에 단면의 변형률 및 응력분포를 나타내었다. 해석단계마다 단면 내의 곡률을 증분시켜, 중립축 위치를 가정하여 단면 내의 변형률 분포를 식 (1)에 의해서 산정한 후, 재료모델링에서 콘크리트 및 강재의 각 층 응력을 산정한 후, 각 층에서의 단면력을 산정할 수 있으며, 모든 층에서 식 (2)와 같이 평형상태를 만족해야 하

므로 식 (3)과 같이 모멘트를 계산한다.

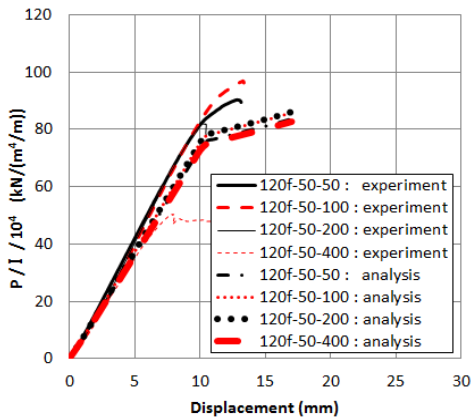
$$\begin{aligned} \epsilon_{top} &= c \phi \\ \epsilon_{bot} &= (h - c) \phi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\int_{A_c} \sigma_c dA_c + \int_{A_s} \sigma_s dA_s = 0 \quad (2)$$

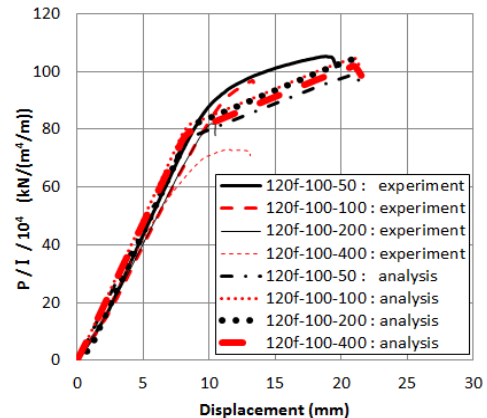
$$M = \int_{A_c} \sigma_c y dA_c + \int_{A_s} \sigma_s y dA_s \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는 콘크리트 응력이며,  $\sigma_s$ 는 강재 응력이다.

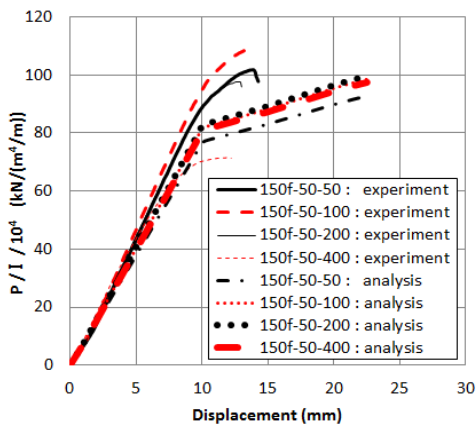
일반적인 철근 콘크리트 해석 시에는 콘크리트의 인장저항을 무시하나, 강섬유 보강 콘크리트의 경우에는 인장강도가 무시하기에는 큰 이유로 본 논문에서는 실험에서 구해진 인장연화곡선을 이용하여 인장력을 고려한 해석에 의미가 있다.



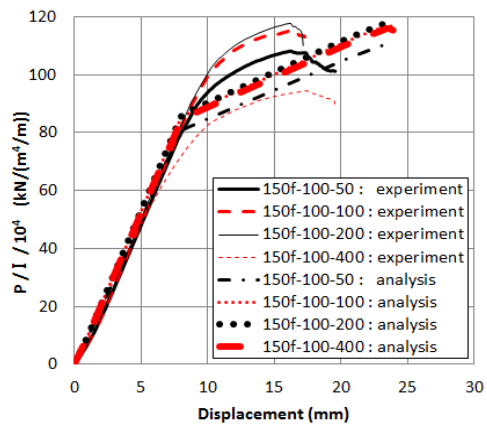
(a) UHPC compressive strength = 120 MPa, slab thickness = 50 mm



(b) UHPC compressive strength = 120 MPa, slab thickness = 100 mm



(c) UHPC compressive strength = 150 MPa, slab thickness = 50 mm



(d) UHPC compressive strength = 150 MPa, slab thickness = 100 mm

Fig. 10 Load-displacement relationship

## 4.2 해석결과

### 4.2.1 하중-처짐 관계

각 실험 부재의 하중-처짐 관계에 대한 실험 및 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 실험 결과, 바닥판두께가 증가하고 전단연결재의 간격은 감소할수록 실험체의 극한하중은 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 실험체에서 콘크리트 상연에 압축파괴가 발생된 이유로 강섬유량 차이에 의한 콘크리트의 인장강도 영향을 파악할 수는 없었다.

해석결과는 콘크리트와 강재가 완전히 일체거동을 하는 것으로 가정한 결과임을 감안할 때 실험결과와 해석결과는 비교적 유사한 거동을 하는 것으로 나타났으나, 전단연결재 간격이 좁아 콘크리트와 강재가 완전 일체거동을 하는 경우에는 해석결과보다는 실험결과가 크게 나타났다. 이는 강재의 재료모델이 항복이후 변형경화현상을 반영하지 않은 것과 콘크리트의 재료모델링 오차가 어느 정도 나타난 현상으로 추정된다. 또한 전단연결재 간격이 넓어서 전단연결재 탈락 후 비합성 거동을 하는 실험 부재와 해석결과의 차이는 전단연결재 간격이 넓을수록 더 크게 나타났다.

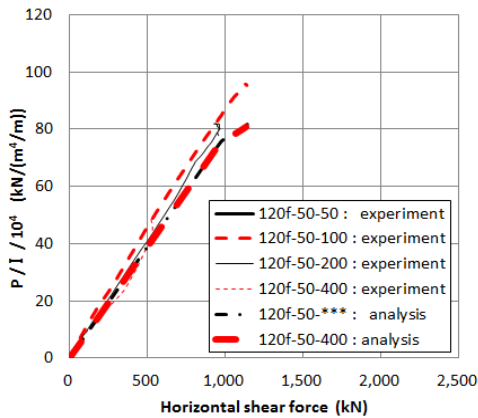
### 4.2.2 하중-수평전단력 관계

각 실험 부재의 하중-수평전단력 관계에 대한 실험 및 해석결과를 Fig. 11과 Table 6에 나타내었다.

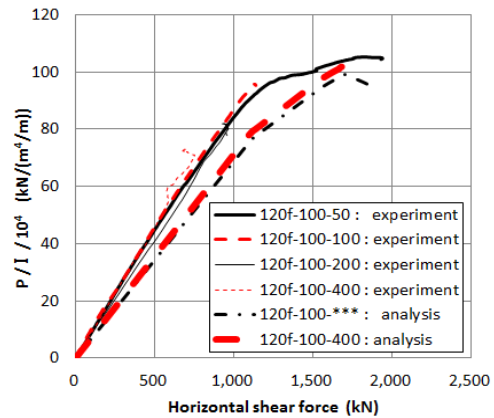
이때, 바닥판에 작용하는 수평전단력은 실험 및 해석에서 얻어진 바닥판 콘크리트의 상하연 변형률 값에 콘크리트 단면적과 탄성계수를 곱하여 계산한 결과이다. 수평전단력은 전단연결재의 위치에 작용하는 힘으로 전단연결재의 저항력과 비교하면 부재의 합성거동 여부를 파악할 수 있는 지표이다. 해석은 콘크리트와 강재가 완전 일체 거동하는 경우이므로 전단연결재 간격과 무관한 값을 가진다.

전단연결재 간격이 좁을수록 실험결과와 해석결과가 명확하게 근접하는 것으로 나타났으며, 바닥판 두께가 두꺼우며 UHPC 압축강도가 작을수록 실험결과와 해석결과가 근접하나, 이 영향은 다소 작은 것으로 나타났다.

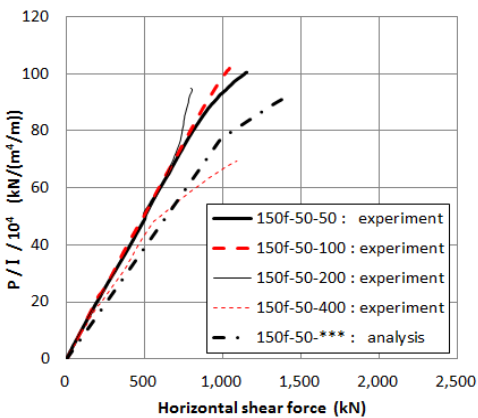
Yoo and Suh(2015)는 전단연결재의 정적강도와 Eurocode-4 및 AASHTO LRFD에 의해서 계산된 전단연결재의 정적강도의 비교를 비교한 결과, Eurocode-4의 경우가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 반면에, AASHTO LRFD의 경우는 다소



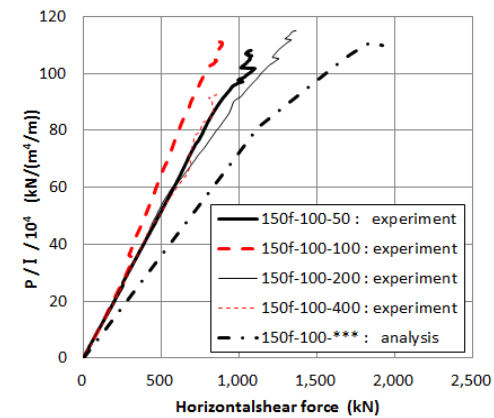
(a) UHPC compressive strength = 120 MPa, slab thickness = 50 mm



(b) UHPC compressive strength = 120 MPa, slab thickness = 100 mm



(c) UHPC compressive strength = 150 MPa, slab thickness = 50 mm



(d) UHPC compressive strength = 150 MPa, slab thickness = 100 mm

Fig. 11 Load-horizontal shear force relationship

**Table 6** Comparison of tested ultimate horizontal shear force and analyzed resistance load

ID	tested horizontal shear force (kN)	analyzed horizontal shear force (kN)	test / analysis
120f-50-50	1,386		1.21
120f-50-100	1,138	1,141	1.00
120f-50-200	965		0.85
120f-50-400	533	1,132	0.47
120f-100-50	1,937		1.04
120f-100-100	1,399	1,866	0.75
120f-100-200	1,016		0.54
120f-100-400	753	1,828	0.41
150f-50-50	1,151		0.77
150f-50-100	1,041	1,488	0.70
150f-50-200	803		0.54
150f-50-400	1,089		0.73
150f-100-50	1,100		0.57
150f-100-100	900	1,918	0.47
150f-100-200	1,365		0.71
150f-100-400	852		0.44
average	-	-	0.70

과대하게 평가하는 것으로 보고하고 있다.

본 논문에서 제시하고 있는 실험 및 해석결과의 자료가 계속적으로 축적되어진다면, 이들을 이용하여 기존 설계식의 수정도 필요할 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 UHPC의 인장연화거동을 고려한 재료모델링 및 이를 적용한 보 부재 단면의 모멘트-곡률 해석기법을 이용하여 UHPC 압축강도, 전단연결재 간격 및 바닥판 두께 등을 변수로 한 역T형 거더와 UHPC바닥판 합성보 16개의 실험결과와 비교하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 역해석에 의한 인장연화곡선에서 UHPC의 인장강도는 6.57 MPa(120 MPa의 경우) 및 9.57 MPa(150 MPa의 경우)를 나타내고 있으며, 이는 일반 콘크리트의 인장강도에 비해 현저히 큰 값을 나타낸다.
- 2) 전단연결재 간격이 좁을수록 실험결과와 해석결과가 명확하게 근접하는 것으로 나타났으며, 바닥판 두께가 두꺼우며 UHPC 압축강도가 작을수록 동일한 경향이나, 이 영

향은 다소 작은 것으로 나타났다.

- 3) 실험결과와 해석결과를 종합적으로 비교하면, UHPC 합성보의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있으므로 재료 실험으로부터 산정된 인장연화곡선은 UHPC의 실제 거동을 합리적으로 반영한다고 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

1. Association Française du Génie Civil (AFGC) (2002), Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances, Association Française du Génie Civil, SETRA, France, 24-56.
2. John, H., and George, S. (2010), The Implementation of Full Depth UHPC Waffle Bridge Deck Panels, Federal Highway Administration Highways for Life Technology Partnerships Program, New York, 9-12.
3. Kang, S.T., and Ryu, G.S. (2011), The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC), *Journal of Korea Concrete Institute*, 23(1), 67-75 (in Korean).
4. Tue, N.V., Schneider, H., Simsch, G., and Schmidt, D. (2004), Bearing Capacity of Stub Columns Made of NSC, HSC and UHPC Confined by a Steel Tube, *Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete ; Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 339-350.
5. Yoo, S.W., Ahn, Y., Cha, Y., and Joh, C. (2014), "Experiment of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Deck and Inverted-T Steel Girder," *Journal of Korea Concrete Institute*, 26(6), 761-769 (in Korean).
6. Yoo, S.W., and Suh, J. (2015), A Study on the Experiment of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced UHPC and Inverted-T Steel Considering Compressive Strength Level, *Journal of Korea Concrete Institute*, 27(6), 677-685 (in Korean).
7. Yoo, S.W., Yang, I., and Jung, S. (2015), Analysis of Flexural Behavior of Composite Beam with Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete Deck and Inverted-T Shaped Steel with Tension Softening Behavior, *Journal of Korea Concrete Institute*, 27(2), 185-193 (in Korean).

Received : 08/13/2015

Revised : 08/31/2015

Accepted : 09/15/2015



---

**요 지** : 본 논문에서는 UHPC 바닥판과 강재 거더를 이용하여 합성보를 구성할 때, UHPC 바닥판의 높은 강도와 강성으로 인하여 합성보 구성 시에 강재 거더의 상부 플랜지를 없앤 역T형 거더를 적용하고자 하였다. 그러나 현재까지 강재 복부에 설치되는 전단연결재에 대한 거동, 역T형 강거더 합성보의 휨거동 특성 등은 실험 및 이론적으로 평가된 적이 거의 없는 실정이다. 이를 위하여 UHPC 압축강도, 전단연결재 간격 및 바닥판 두께 등을 변수로 하는 역T형 거더와 UHPC 바닥판 합성보 16개의 휨거동 실험결과를 근간으로 하여 실험결과와 UHPC의 인장연화 거동을 고려한 재료모델 해석결과를 비교하였다. 역해석에 의한 인장연화곡선에서 UHPC의 인장강도는 6.57 MPa(120MPa의 경우) 및 9.57 MPa(150MPa의 경우)를 나타내고 있으며, 전단연결재 간격이 좁을수록 실험결과와 해석결과가 명확하게 근접하는 것으로 나타났으며, 바닥판 두께가 두꺼우며 UHPC 압축강도가 작을수록 동일한 경향이나, 이 영향은 다소 작은 것으로 나타났다. 따라서 실험결과와 해석결과를 종합적으로 비교하면, UHPC 합성보의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있으므로 재료 실험으로부터 산정된 인장연화곡선은 UHPC의 실제 거동을 합리적으로 반영한다고 판단된다.

**핵심용어** : 합성보, 역T형, 전단연결재, 인장연화, UHPC

---