

# U-플랜지 트러스 복합보의 휨 내력에 대한 실험 연구

## Experimental Study on the Flexural Capacity of the U-Flanged Truss Hybrid Beam

오 명 호\*  
Oh, Myoung Ho

김 영 호\*\*  
Kim, Young Ho

김 명 한\*\*\*  
Kim, Myeong Han

### Abstract

U-flanged truss beam is composed of u-shaped upper steel flange, lower steel plate of 8mm or more thickness, and connecting lattice bars welded on the upper and lower sides. The hybrid beam with U-flanged steel truss is made in the construction site through pouring the concrete, and designated as U-flanged truss hybrid beam. In this study the structural experiments on the 4 hybrid beams with the proposed basic shapes were performed, and the flexural capacities from the tests were compared with those from the theoretical approach. The failure modes of each specimen were quite similar. The peak load was reached with the ductile behavior after yielding, and the failure occurred through the concrete crushing. The considerable increase of deformation was observed up to the concrete crushing. The composite action of concrete and steel member was considered to be reliable from the behavior of specimens. The flexural strength of hybrid beam has been evaluated exactly using the calculation method applied in the doubly reinforced concrete beam. The placement of additional rebars in the bottom instead of upper side is proposed for the efficient design of U-flanged truss hybrid beam.

*Keywords : U-flanged truss, Hybrid beam, Flexural capacity, Composite action*

## 1. 서론

국내에서 시공되는 도심의 상업용 및 사무용 건축물의 바닥 구조 시스템은 구조 성능, 시공성, 경제성 등을 최대한 끌어올리기 위해서 전통적으로 적용해 오던 바닥 공법에서 새롭게 개발된 합성보를 적용한 바닥 공법으로 점차 변화하는 추세이다. 바닥을 지지하는 부재인 보의 구조적인 성능을 효율적으로 향상시킴으로서 장스팬과 층고를 절감하거나, 공기 단축과 시공성을 개선하여 공사비를 혁신적으로 절감하려는 연구 개발이 꾸준히 진행되고 있으며, 다양한 결과들이 건설 현장에 활발하게 적용되고 있다<sup>1-6)</sup>.

슬래브 단변 방향의 경간이 6~8m이고 장변 방향의 경간이 12~15m인 바닥 모듈 시스템의 효율적인 시공을 위해서 기존의 H형강 합성보, 매립형 H형강 합성보, 춤이 깊은 딥 데크(Deep deck, 200mm 이상의 깊이를 갖는 데크) 등을 적용할 경우 강재보의 상부 플랜지에 데크를 설치하게 되므로 층고가 지나치게 증가한다. 이를 방지하기 위해서 철선 일체형 트러스 데크의 적용을 고려할 수 있으나, 이 경우에는 적정 경간이 4m 이내이므로 작은 보의 추가적인 설치가 필요하다. 딥데크와 노출형 U형 합성보를 적용하면 합성보의 강재량 증가로 인해서 경제성에 문제가 발생한다.

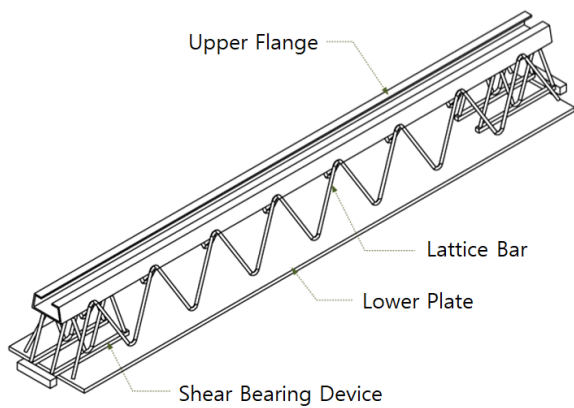
장스팬 바닥 구조의 대안으로 딥데크와 비대칭 H형강 합성보를 사용한 슬림 플로어 시스템을 고려할 수 있다. 그러나 적정한 보의 경간(슬래브 장변 방향의 경간)이나 바닥의 평면 모듈이 8m 내외이기 때문에 물류 및 저장 창고에서 발생하는 10~30kN/m<sup>2</sup>의 큰 적재 하중이나 10~15m의 장스팬 바닥 모듈에는 경제성과 시공성이 떨어져서 비효율적이다.

따라서 최근의 건설 추세인 장스팬 바닥 시스템

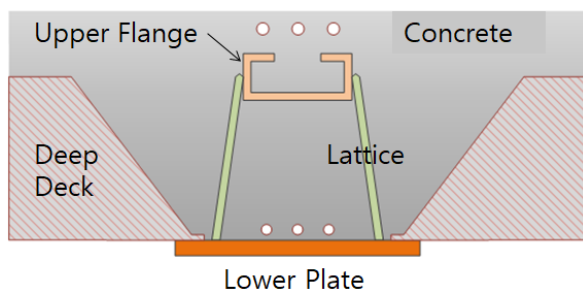
\* 정희원, 국립목포대학교 건축공학과 교수  
Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National Univ.  
\*\* 정희원, 엔테이지 대표  
NTAGE  
\*\*\* 교신저자, 정희원, 국립목포대학교 건축공학과 교수  
Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National Univ.  
Tel: 061-450-2456 Fax: 061-450-6454  
E-mail: mhk314@mkpo.ac.kr

을 가지는 중저층 규모의 상업 시설과 근린 생활 시설에서 추가적인 층고의 증가 없이 강도와 강성을 확보하고 현장 설치 및 조립에 소요되는 노무비를 획기적으로 절감할 수 있는 슬림 플로어 시스템을 구현할 수 있는 새로운 복합보 개발이 필요하다.

본 연구에서는 <Fig. 1>과 같이 개방 구조를 갖는 U형상의 상부 플랜지와 두께 8mm 이상의 하부 강판에 일정한 패턴으로 절곡한 양 측면의 래티스를 용접하여 연결하는 U-플랜지 트러스를 제안하였다. 이러한 U-플랜지 트러스는 공장에서 선조립되어 현장으로 반입되며, 크레인을 이용하여 기둥에 설치된다. U-플랜지 트러스 설치 후 데크를 배치하고, 콘크리트를 타설하여 <Fig. 2>와 같이 U-플랜지 트러스 복합보의 시공을 완료한다.



<Fig. 1> U-flanged truss



<Fig. 2> U-flanged truss hybrid beam

공장에서 선조립되는 U-플랜지 트러스는 시공 단계에서 발생하는 콘크리트 타설 하중과 작업 하중에 의한 횡좌굴 및 상부 압축에 효율적으로 저항할 수 있는 형상을 가지고 있으며, 시공이 완료된 이후에는 바닥에 작용하는 모든 수직 하중에 저항할 수

있는 합성보(U-플랜지 트러스 복합보)로서의 거동이 가능하다.

새로 개발된 형상의 U-플랜지 트러스와 콘크리트의 합성 거동이 예상되는 U-플랜지 트러스 복합보의 구조적인 성능을 검증하기 위해서는 실험적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 U-플랜지 트러스 복합보의 기본적인 실험체를 대상으로 단순보 가력 실험을 실시하고, 휨 모멘트 강도에 대한 실험 결과와 기존 이론식으로 산정된 강도를 비교하여 U-플랜지 트러스 복합보의 휨 내력을 평가한다.

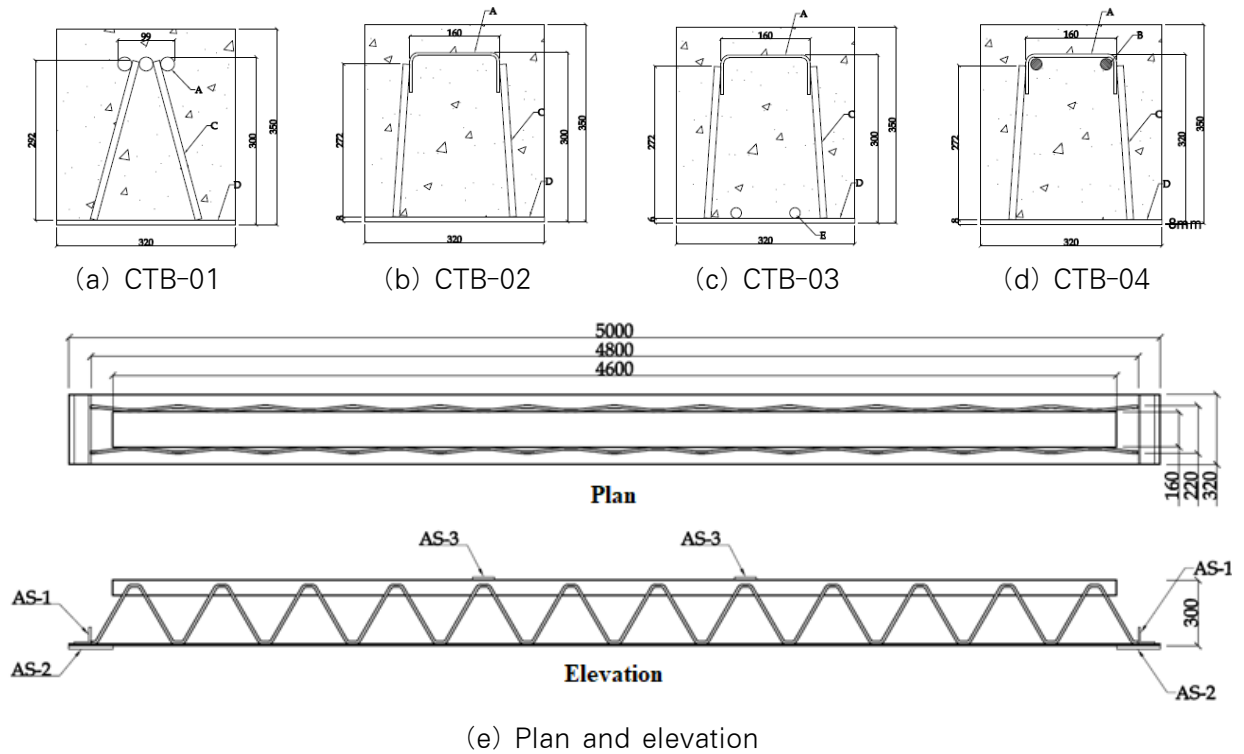
## 2. 실험 계획

### 2.1 실험체 계획

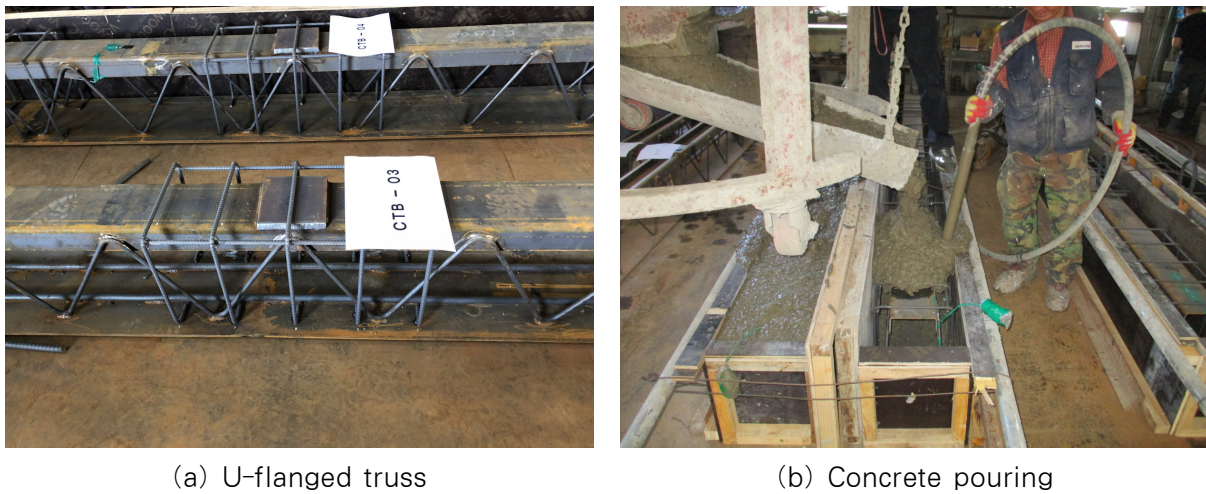
U-플랜지 트러스 복합보의 휨 내력을 평가하기 위해 총 4개의 실험체를 계획하였다. U-플랜지 트러스 복합보 실험체의 기본적인 형상은 <Fig. 3>에 나타내었다.

복합보 실험체의 강재 부분인 U-플랜지 트러스의 단면은 U형 성형 강판을 상부 플랜지로 이용하는 상현재, 거푸집 기능과 인장재 역할을 하는 두께 8mm 강판의 하현재, 상현재와 하현재를 연결하기 위해서 측면 좌우로 2열 배치된 강봉 래티스로 구성된다. 강봉 래티스의 절곡된 부분이 상현재의 측면과 하현재의 상부에 각각 용접된다. 트러스 제작 후 콘크리트를 타설하여 <Fig. 4>와 같이 U-플랜지 트러스 복합보를 제작한다.

시공 단계에서 복합보가 형성되기 이전의 U-플랜지 트러스에 대한 구조적인 거동과 성능 평가는 다른 연구에서 진행 중이며, 시공이 완료된 후 합성 거동을 나타내는 복합보에 대한 휨 내력 평가가 본 실험 연구의 주된 목적이다. 실험 변수는 <Table 1>과 같이 상현재의 형상과 철근 보강 여부이며, 2가지 변수가 휨 거동에 미치는 영향을 분석하기 위함이다. 모든 실험체의 크기는 높이(h) 360mm, 폭(b) 320mm 및 길이(L) 5,000mm로 계획하였다.



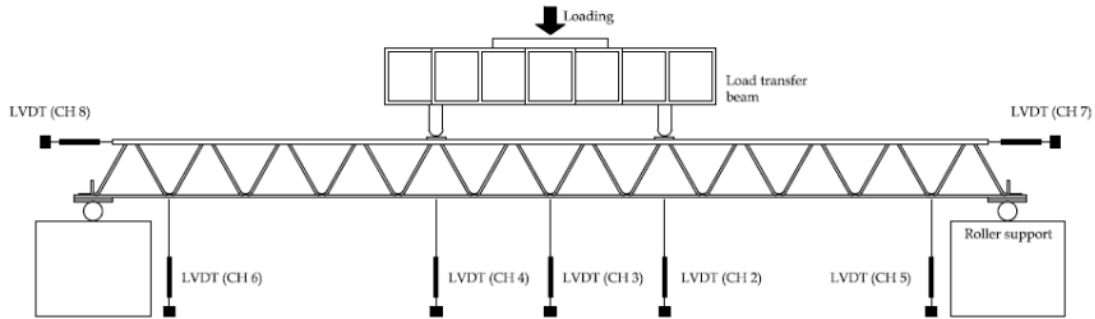
<Fig. 3> Section of U-flanged truss hybrid beam specimens



<Fig. 4> Manufacturing of specimens

<Table 1> Test specimens

Specimens ID	Upper chord	Upper reinforce	Lattice	Lower plate	Lower reinforce
CTB-01 CTB-R25-L8-P400	3-R25	×	2- $\phi$ 12@400	PL-320×8t	×
CTB-02 CTB-n6×-L8-P400	C-160×70×6t	×	2- $\phi$ 12@400	PL-320×8t	×
CTB-03 CTB-n6×-L6R-P400	C-160×70×6t	×	2- $\phi$ 12@400	PL-320×6t	2-D19
CTB-04 UTB-n6R-L8-P400	C-160×70×6t	2-D19	2- $\phi$ 12@400	PL-320×8t	×



〈Fig. 5〉 Experimental plan of U-flanged truss hybrid beam

## 2.2 가력 방법 및 측정 방법

U-플랜지 트러스 복합보의 휨 내력을 평가하기 위해서 양단을 단순 지지하고 2점 가력을 실시하였다. 실험체 세팅은 <Fig. 5>과 같이 계획하였으며, 하중 재하는 0.03mm/s의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 하중 재하에 따른 수직 방향의 변위를 측정하기 위해 실험체 하부에 변위계를 설치하여 계측하였다. 또한 하중 재하에 따른 실험체 주요 부위의 강재 및 콘크리트 변형률을 측정하기 위하여 변형률 게이지를 부착하였다. <Fig. 6>에 실험체의 세팅 상황을 나타내었다.



〈Fig. 6〉 Set-up of specimen

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 금속 재료 인장 강도 시험

실험체에 사용된 강재의 재료 성능을 확인하기

위해 인장 시험을 실시하였다. 시험편은 상현재로 사용된 직경 25mm 환봉, 성형 강판으로 사용된 두께 6mm 철판, 래티스로 사용된 직경 12mm 환봉, 하현재로 사용된 두께 6mm 및 8mm 철판에 대하여 제작하였다. 시험편은 KS B 0801을 준용하여 각각 3개씩 제작하였고, KS B 0802에 따른 인장 시험 결과의 평균값을 <Table 2>에 나타내었다.

〈Table 2〉 Material test results (steel)

	$F_y$ (MPa)	$F_u$ (MPa)	$E$ (GPa)
PL-6t	323.9	458.8	222.68
PL-8t	303.8	454.3	211.37
$\phi 12$	360.7	490.8	213.22
D19	422.6	531.6	214.43
$\phi 25$	426.0	530.7	213.17

### 3.2 콘크리트 압축 강도 시험

실험에 사용된 콘크리트에 대해서 압축 강도 시험을 수행하였다. 탄성 계수 산정을 위해서 공시체 측면에 각각 3개의 콘크리트 게이지를 부착하여 시험을 수행하였다. 압축 강도 및 탄성 계수에 대한 시험 결과를 <Table 3>에 나타내었다.

〈Table 3〉 Material test results (concrete)

Specimen	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
#1	31.8	22.6
#2	33.2	24.2
#3	32.2	23.4
Average	32.4	23.4



### 3.3 파괴 양상

CTB-01 실험체는 직경 25mm의 환봉 3개를 상현재로 설치하고, 하현재로 8mm 철판을 사용한 복합보 실험체이다. 재하 하중 58.0kN에서 초기 균열이 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 균열이 진전되었다. 최대 하중은 322.4kN으로 계측되었으며, 최대 하중 이후 상부 압축 콘크리트의 압괴로 하중이 감소하였다.

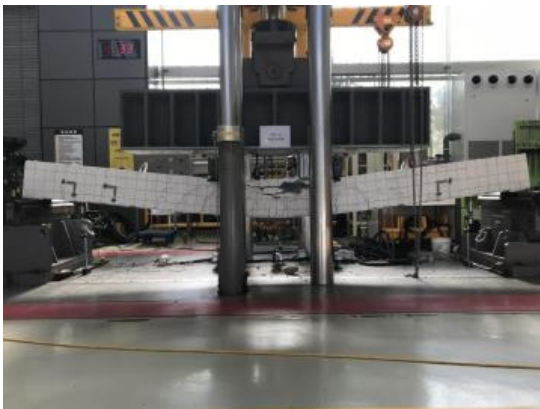
CTB-02 실험체는 6mm 성형 강판을 상현재로 설치하고, 하현재로 8mm 철판을 사용한 표준 복합보 실험체이다. 재하 하중 약 50kN에서 초기 균열이 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 균열이 진전되었다. 최대 하중은 299.5kN으로 계측되었으며, 최대 하중 이후 콘크리트의 압괴로 하중이 감소하였다.

CTB-03 실험체는 6mm 철판을 상현재로 설치하고 하현재로 6mm 철판을 사용하였으며, 19mm 철근을 이용하여 하부 인장축을 보강한 복합보 실험

체이다. 재하 하중 약 100kN에서 초기 균열이 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 균열이 진전되었다. 최대 하중은 343.1kN으로 계측되었으며, 최대 하중 이후 압축 콘크리트의 압괴로 하중이 감소하였다.

CTB-04 실험체는 6mm 철판을 상현재로 설치하고 하현재로 8mm 철판을 사용하였으며, 19mm 철근을 이용하여 상부 압축축을 보강한 복합보 실험체이다. 재하 하중 약 50kN에서 초기 균열이 발생하였으며, 하중의 증가에 따라 균열이 진전되었다. 최대 하중은 319.0kN으로 계측되었으며, 최대 하중 이후 압축 콘크리트의 압괴로 하중이 감소하였다.

<Fig. 7>에 각 실험체의 파괴 형상을 나타내었으며 모든 실험체가 유사하게 나타났다. 하부 강판이 항복하는 시점에서 실험체의 항복 강도가 관찰되었고, 항복 강도 이후 압축축 콘크리트의 압괴까지 안정적인 거동을 나타내며 최대 강도에 도달하였다. 최대 강도 이후에도 상당히 큰 변위까지 저항할 수 있는 연성적인 거동을 나타내었다.



(a) CTB-01 specimen



(b) CTB-02 specimen



(c) CTB-03 specimen



(d) CTB-04 specimen

<Fig. 7> Failure mode of specimens

### 3.4 힘-변위 관계

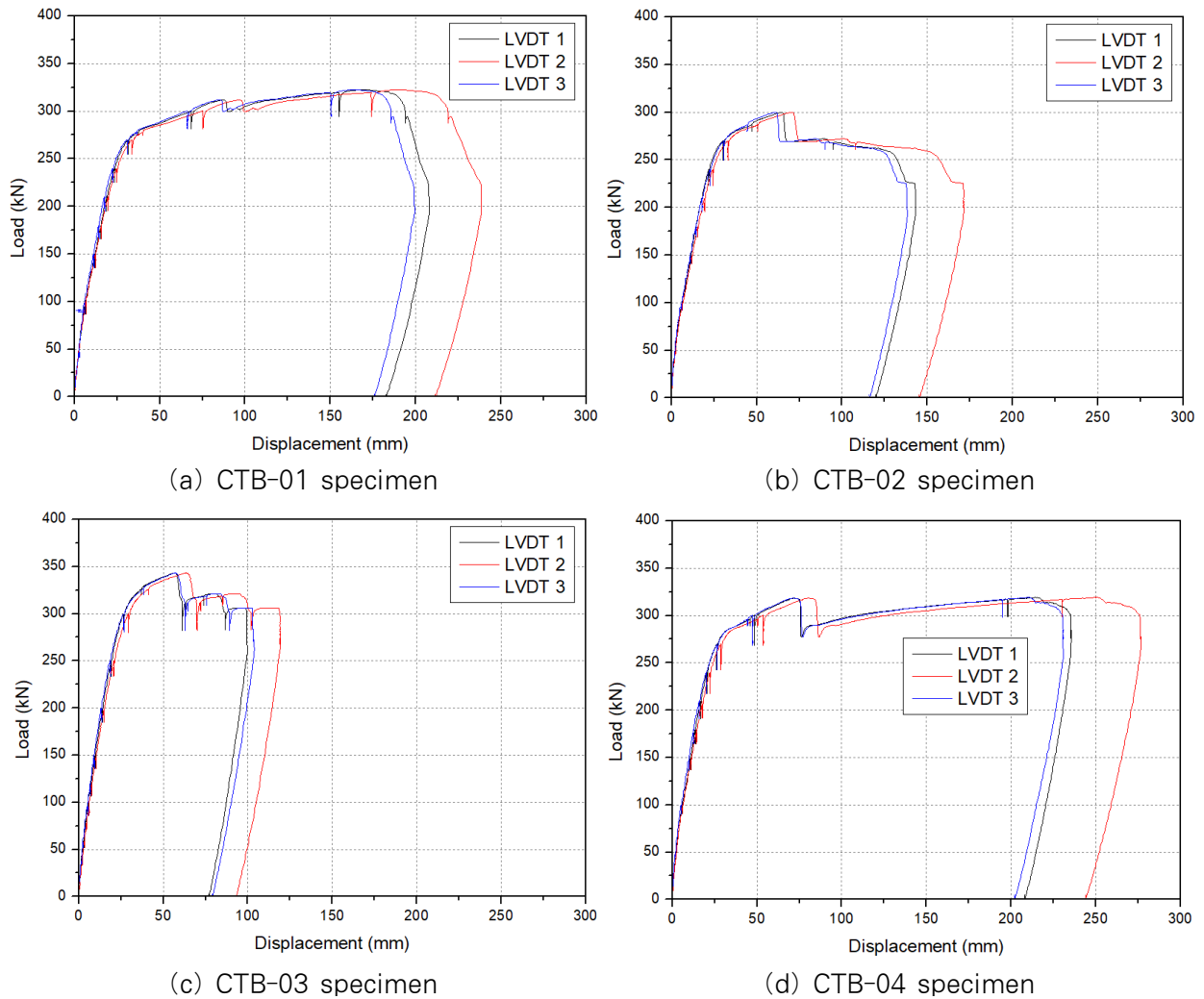
실험을 통해서 얻은 전체 실험체의 힘-변위 관계 곡선을 <Fig. 8>에 나타내었다. 그림에서 LVDT 1 과 3은 가력점 밑에 설치한 변위계이며, LVDT 2는 중앙점 밑에 설치한 변위계이다. 초기 균열이 발생하는 시점에서 실험체의 초기 강성 감소가 관찰되며, 이후 항복 강도에 도달할 때까지 안정적인 거동을 나타낸다. 하부 인장측에 보강 철근을 배치한 CTB-03 실험체는 초기 균열의 발생 시점과 초기 강성의 감소 시점이 약 100kN으로 다른 실험체가 50~58kN인 것에 비해서 상당히 지연되었음을 알 수 있다. 이는 U-플랜지 트러스 복합보의 휨 거동 파악에 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

전체적으로 실험체 항복 강도 이후에 변위의 증

가와 완만한 강도 증가를 보이며, 최대 강도 및 최대 변위까지 상당히 안정적인 연성 거동을 나타낸다. 최대 강도 시점 직후 소폭의 강도 감소는 상현재 강판과 압축 콘크리트 사이 슬립 발생에 의한 것으로 판단된다. 이에 대해서는 추후 수평 전단 실험을 통해서 더욱 명확한 분석이 이루어 질 수 있을 것으로 사료된다. CTB-01과 CTB-04 실험체는 최대 강도 이후 큰 변위를 나타내는데, 이는 압축 철근에 의해서 콘크리트의 압괴가 지연되기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.5 기존 설계식을 이용한 휨 강도 평가

전체 실험체에 철근 콘크리트 복합보의 휨 강도 산정법을 적용하여 이론적인 공칭 하중을 산정하였



<Fig. 8> Load-displacement relationships

다. 복근보 휨 강도 산정식은 다음과 같다<sup>7)</sup>.

복근보 압축 강재의 항복 조건은 식 (1)과 같고, 압축 강재가 항복할 경우 휨 강도  $M_n$ 은 식 (2)~(4)와 같이 산정한다. 아래 식에서  $A_s$ 는 인장 강재 단면적,  $A_s'$ 은 압축 강재 단면적,  $\beta_1$ 은 등가 직사각형 응력 블록 계수,  $b$ 는 부재 폭,  $d$ 는 인장 강재 중심에서 압축 연단까지의 거리,  $d'$ 은 압축 연단에서 압축 강재 중심까지의 거리,  $f_y$ 는 강재 항복 강도,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축 강도,  $a$ 는 등가 직사각형 응력 블록의 깊이를 나타낸다.

$$A_s - A_s' \geq \left( \frac{\beta_1 d'}{1 - f_y/600} \right) \left( \frac{0.85 f_{ck} b}{f_y} \right) \quad (1)$$

$$M_{n1} = A_s' f_y (d - d') \quad (2)$$

$$M_{n2} = (A_s - A_s') f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (4)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (5)$$

압축 강재가 항복하지 않는 경우 응력 블록의 깊이  $a$ 는 식 (6)을 이용하여 산정하며, 휨 강도는 식 (9)와 같이 산정한다. 아래 식에서  $E_s$ 는 강재 탄성 계수,  $\epsilon_s'$ 은 압축 강재 변형률을 나타낸다.

$$(0.85 f_{ck} b) a^2 + (0.003 E_s A_s' - A_s f_y) a - (0.003 E_s A_s' \beta_1 d') = 0 \quad (6)$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} a b \quad (7)$$

$$C_s = (E_s \epsilon_s') A_s \quad (8)$$

$$M_n = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (9)$$

이론적인 공칭 하중과 실험을 통해 구해진 최대 하중을 <Table 4>에서 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 U-플랜지 트러스 복합보의 휨 강도는 기존의 철근 콘크리트 복근보 휨 강도 산정법을 이용하여 비교적 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해서 U-플랜지 트러스 복합보에서 강재와 콘크리트의 합성 작용이 충분히 발생함을 알 수 있다.

철근 콘크리트 복근보에 대한 이론식을 복합보 실험체에 적용하는 과정에서 모든 실험체에서 압축 강재가 항복하지 않는 것으로 해석되었다. 따라서 U-플랜지 트러스 복합보의 유효한 설계를 위해서는 상부 압축측에 철근을 보강하는 것보다 상부 강재의 항복을 유도하기 위해 하부 인장측에 철근을 배근하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

<Table 4> Comparison of maximum loads

Specimens	Test	Theoretical	Ratio
	$P_{max}$ (kN)	$P_n$ (kN)	$P_{max}/P_n$
CTB-01	322.5	313.3	1.03
CTB-02	299.7	296.0	1.01
CTB-03	343.3	355.2	0.97
CTB-04	319.2	296.6	1.08

## 4. 결론

본 연구에서는 U-플랜지 트러스 복합보의 기본적인 실험체를 대상으로 단순보 가력 실험을 실시하고, 휨 모멘트 강도에 대한 실험 결과와 기존 이론식을 통해 산정된 강도를 비교하여 U-플랜지 트러스 복합보의 휨 내력을 평가하였다. 이를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 모든 실험체의 파괴 형상은 유사하게 나타났다. 하부 강판이 항복하는 시점에서 실험체의 항복 강도가 관찰되었고, 항복 강도 이후 압축측 콘크리트의 압괴까지 안정적인 거동을 나타내며 최대 강도에 도달하였다. 최대 강도 이후에도 상당히 큰 변위까지 저항할 수 있는 연성적인 거동을 나타내었다.

2) 최대 강도 시점 직후 소폭의 강도 감소가 관찰되었다. 이는 상현재 강판과 압축 콘크리트 사이의 슬립 발생에 의한 것으로 판단된다.

3) U-플랜지 트러스 복합보의 휨 강도는 기존의 철근 콘크리트 복근보 휨 강도 산정법을 이용하여 비교적 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해서 U-플랜지 트러스 복합보에서 강재와 콘크리트의 합성 작용이 충분하게 발생함을 알 수 있다.

4) U-플랜지 트러스 복합보의 유효한 설계를 위해서는 상부 압축측에 철근을 보강하는 것보다 상부 강재의 항복을 유도하기 위해 하부 인장측에 철근을 배근하는 것이 바람직하다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18CTAP-C142962-01).

### References

1. Chae, H. S., Ryoo, J., Chung, K. S., Moon, Y. M., & Cho, S. M., "Experimental Study on Structural Performance of End-reinforced Steel-beam system(Eco-girder)", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.22, No.6, pp.533~541, 2010
2. Heo, B. W., Bae, K. W., & Moon, T. S., "Flexural Capacity of the Encased(Slim Floor) Composite Beam with Deep Deck Plate", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.16, No.2, pp.235~245, 2004
3. Kim, D. B., Kim, Y. H., Oh, M. H., & Kim, M. H., "Experimental Study on the Flexural Capacity of the Concrete-Filled Composite Beam with Exposed Top Flange", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.17, No.4, pp.1~9, 2017
4. Kim, S. B., Hwangbo, C., Lee, T. K., Cho, H. S., & Kim, S. S., "The Shear Strength Evaluation of the New Shear Connector by Push-out Test", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.1, pp.1~10, 2014
5. Kim, Y. J., Bae, J. H., Ahn, T. S., & Jang, D. W., "Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors used in Composite Beams", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.26, No.3, pp.155~167, 2014
6. Lee, M. H., Oh, M. H., Kim, Y. H., Jeong, S. C., & Kim, M. H., "Experimental Study on the Shear Capacity of Slim AU Composite Beam", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.17, No.3, pp.99~105, 2017
7. MOLIT, "Korea Building Code", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016.

- Received : November 24, 2018
- Revised : December 12, 2018
- Accepted : December 12, 2018