

강-PC 복합모듈러 골조의 합성보에 대한 구조성능 평가

이상섭¹ · 박금성^{2*} · 배규웅³ · 최윤철⁴

¹공학박사, 수석연구원, 한국건설기술연구원, ²공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원,
³공학박사, 선임연구위원, 한국건설기술연구원, ⁴공학박사, 교수, 청운대학교

Structural Performance Evaluation for Composite Beam Member of Hybrid Modules Frame with Steel-Precast Concrete

Lee, Sang Sup¹, Park, Keum Sung^{2*}, Bae, Kyu Woong³, Choi, Yoon Chul⁴

¹Ph.D. Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

²Ph.D. Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

³Ph.D. Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

⁴Ph.D. Professor, Chung Wun University, Incheon, 22100, Korea

Abstract - This study was performed in order to develop of the new modular construction system. For the modular construction method that is currently applied in the country, it is very expensive in terms of material costs and fire resistance because it uses only the steel C-type beam. In order to overcome this, and the practical application of new steel-PC hybrid module construction system. Improvement and development of the cross-section of the structural beam member in order to be carried out first. An experiment was carried out by making three specimens. Experiment result, the composite beam was dominated by the horizontal shear failure. It was evaluated through a nonlinear analysis and experimental & theoretical for the structural performance the composite beam member.

Keywords - Hybrid modular, Steel-concrete, Composite beam, Nonlinear analysis, Structural performance

1. 서론

건설산업은 기존 현장위주의 노동집약적인 건축공법에서 혁신적인 새로운 공법(건식화 및 프리캐브)으로의 패러다임 변화에 큰 관심을 가지고 있는 상황이다. 모듈러 공장생산건축은 기존 현장중심의 시공에서 탈피하여 건축이나 모듈을 공장에서 생산하여 현장으로 운반, 조립하여 건축물을 완공하는 시스템으로 공기단축, 건축물 폐기물 감소, 공사비 절감, 에너지 사용 절감 및 탄소배출 감소, 환경문제 해결, 품

질향상 등의 많은 장점을 가지고 있다^{[1],[2]}.

국내에 도입된 지금까지의 공법은 기술의 난이도, 설계기준의 강화, 사회적 여건 및 공업화 공법이라는 점에서 쉽게 현장에 적용되지 못하는 실정이며, 또한 기존 외국기술과^{[3],[4]}의 차별성이 크지 않고 강재만을 이용한 모듈골조의 경우, 내화나 재료비 측면에서 매우 고가이며, 재료 다양화를 통한 내화 및 안전성과 경제성 확보가 가능한 강-PC 복합모듈 기술개발이 절실히 필요하다.

효율적인 강-PC복합모듈 건축시스템의 실용화를 위해서는 중고층형 강-PC복합모듈을 구성하는 구조 부재 및 조인트의 상세 개발과 실대형 조합모듈 골조의 구조 및 내진성능^[5] 확보를 위한 실험과 이론해석 등의 전반적인 연구가 요구된다^{[6],[7],[8]}.

우선, 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 강-PC 복합모듈러 구조시스템을 구성하는 주요 구조부재를 개발하기 위한 목적으로 수행하였다. 강-PC 복합모듈 골조를 구성하는 구조 부

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 26, 2017; revised August 16, 2017; approved on August 16, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0370 Fax. +82-31-910-0392

E-mail. kspark1@kict.re.kr

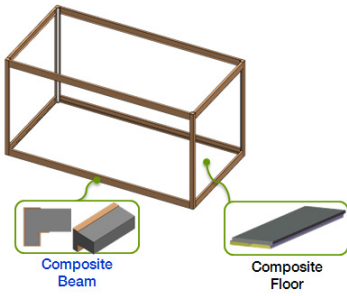


Fig. 1. Construction frame of steel-PC composite module

재인 합성보에 대하여 강판 절곡형 단면 형상을 제안하였다. 절곡형 합성보에 대한 비선형해석^[9] 연구에서는 기존 연구의 실험결과를 이용하여 검증한 해석모델을 이용하였다. 비선형 해석결과를 반영하여 절곡 강판 두께와 휨철근 유무에 따라 변수별로 실험체를 계획하여 구조성능 평가를 위한 휨실험을 수행하였다. 강-PC 합성보에 대한 설계방법에 따라 비선형해석 및 실험결과를 비교를 통해 강-PC 복합모듈 골조의 합성보 설계를 위한 자료로 활용하고자한다.

2. 강-PC 합성보의 실험

2.1 실험 개요

국내에서 모듈러 골조에 적용되고 있는 대부분의 보 단면의 형상은 기성 제품이나 강판을 C채널 단면 형태로 절곡하여 사용한다. C형 채널 단면의 경우, 모듈 바닥 내에 슬래브 설치시 슬래브 단부를 고정시키기 위한 보강재나 연결철물이 반드시 필요하며 강재 물량이 증가하는 요인이 된다. 본 연구에서는 비교적 얇은 박판 강재를 소정의 단면 형상으로 절곡하여 모듈 간 접합이 용이하며, 제작비용이 저렴할 뿐만 아니라 절곡형 단면 내부에 콘크리트를 타설하여 내화성능 확보에 기여하도록 보의 단면형상을 개선하였다.

개선된 강-PC 합성보에 대한 내력과 거동을 평가하기 위한 실험 및 이론과 비선형 해석적 연구를 통해 합성보의 구조성능 확보를 위한 연구를 수행하였다. 강-PC 합성보의 단면



Fig. 2. Concept of assembled composites

형태가 비대칭 형태로 단일 합성보로 휨성능을 평가하는 데에는 한계가 있어 아래의 Fig. 2와 같은 조립형태의 합성보로 대칭화하여 단순 휨가력 실험을 계획하였다.

2.2 재료시험

본 연구에 사용된 강재의 역학적 성능을 파악하기 위하여 KS B 0801의 금속재료 인장시험편 규정에 따라 강재 시험편을 제작하였고, 사용강재는 SM490을 사용하였다. 강판 절곡 형상의 경우, 비교적 잔류응력의 영향이 적은 플랜지와 웹에서 두께별로 각각 3개씩의 시험편을 절취 하여 시험편을 제작하였다. 시험은 1000kN 유압식 만능시험기(U.T.M.)를 사용하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험편 시험 방법에 의해 실시하였고, 시험결과 평균항복강도는 345MPa로 나타났다.

또한, 실험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 30MPa로 계획하였으며, 사용된 레미콘의 수에 따라 각각 3개씩 총 12개의 공시체를 제작하였다. 콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2405의 시험방법에 따라 1000kN 유압식 만능 시험기(U.T.M)를 사용하여 실시하였다. KS F 2403에 따라 제작한 공시체의 콘크리트 압축강도 시험결과, 평균 34MPa로 나타났다.

2.3 실험체 계획

본 연구에서는 강-PC 복합모듈을 구성하는 주요 구조 부재인 합성보의 형상을 강판 절곡형으로 개선한 것으로 합성

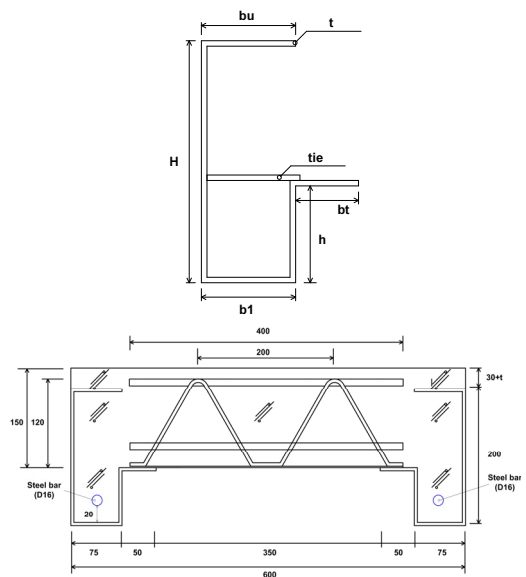
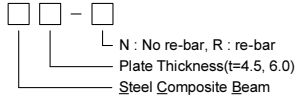


Fig. 3. Shape of composite beam

Table 1. List of test specimens

Specimen	H (mm)	h (mm)	bu (mm)	b1 (mm)	bt (mm)	t (mm)	L (m)
SCB4.5-N	200	80	75	75	50	4.5	5.9
SCB6.0-N	200	80	75	75	50	6.0	5.9
SCB4.5-R	200	80	75	75	50	4.5	5.9



보에 대한 내력 및 거동 평가를 위한 휨성능 실험 연구를 Table 1과 같이 계획하였다.

Fig. 3과 같이 강판 절곡형 합성보는 비대칭 단면 조립 형태의 보로 대칭화 하여 단순 휨가력 실험계획이 필요하였으며, 슬래브 유효폭을 고려하여 좌우 대칭 장선 합성보의 형태로 수정하고 반영하여 바닥판의 폭은 600mm로 계획하였다.

강판 절곡형 비대칭 합성보의 주요 변수로는 절곡 강판 두께(4.5mm, 6.0mm), 내화성능 고려한 합성보의 하단부에 휨보강근 유무로 하여 총 3개의 실험체를 계획하였으며, 강판 절곡형 합성보 단면의 벌어짐 방지를 위해 내측에 띠판을 일정한 간격으로 설치하였다.

2.4 가력 및 측정방법

강판 절곡형 비대칭 합성보의 휨성능 실험은 실제 하중 작용시의 대상 단면의 내하능력, 처짐 및 변형성상을 파악하기 위한 실험으로서 본 연구에서는 중앙부 정모멘트를 받는 실험체를 계획하였다. 가력은 단순보 형식의 2점 재하에 의해 정모멘트를 받도록 하였으며 전단파괴에 앞서서 휨파괴가 선행하도록 스펀 중앙부를 중심으로 양단부로 각각 L/4 지점에 4점으로 가력하였다.

가력방법은 변위제어를 하였으며, 가력속도는 0.05mm/sec로 가력하였다. Fig. 4와 같이 2,000kN 용량의 UTM을 사

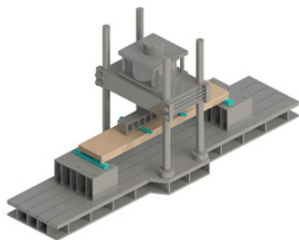


Fig. 4. Installation condition of the specimen

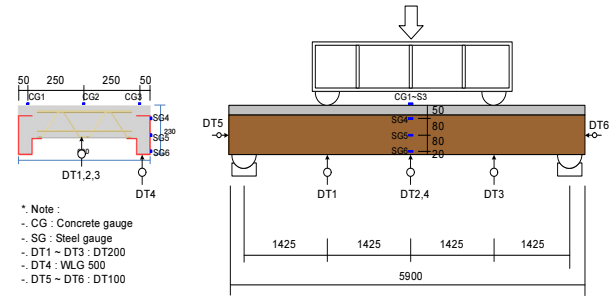


Fig. 5. Measuring position of strain gauge

용하여 2점 선형가력 하였다. 또한 가력시 가력지점에서의 국부변형을 방지하고자 가력지점부에 미끄럼방지용 고무판을 설치하였다.

측정 장치로는 합성보의 수직처짐과 스펀중앙부에서의 강재와 콘크리트의 변형을 및 합성보와 콘크리트 슬래브의 슬립을 측정하기 위해서 LVDT와 변형률 게이지를 측정장치로 사용하였다. 합성보는 단부에서의 슬립을 측정하였다(Fig. 5 참조).

3. 실험결과 및 분석

3.1 거동 및 파괴모드

Table 2에는 강-PC 합성보에 대한 실험체의 파괴모드를 정리하여 나타낸 것으로 합성보의 강판 두께와 휨 보강근의 유무에 따라서 서로 다른 파괴모드를 관측할 수 있었다. 강판 두께가 4.5mm인 실험체의 경우, 파괴는 강재의 항복과 가력부 콘크리트의 압괴로 시작되었다. 합성보의 파괴는 주

Table 2. Failure mode

Specimen	Destruction situation		Failure mode
	Overall behavior	Crack in the loading point	
SCB4.5-N			Flexure
SCB6.0-N			Flexure-shear
SCB4.5-R			Flexure-shear

로 휨에 의한 파괴였으며 경계면에서의 단부 슬립 발생 전후로 강성의 변화가 크지 않고 다소 큰 소성변형을 나타내었다.

SCB4.5-N 실험체의 경우, 강판두께가 4.5mm인 비대칭 단면 형상으로 합성거동이 가장 최적으로 나타나고 있으며 항복 이후 하중이 증가하면서 자연스럽게 중립축이 상부로 이동하면서 응력의 재분배가 원활하게 이루어져 국부적인 파괴나 큰 변형이 없이 단면 전체가 휨에 저항하는 매우 연성적인 거동을 나타내고 있다.

강판 두께가 6.0mm인 실험체와 강판 두께가 4.5mm이며 휨보강근을 배근한 실험체의 경우, 파괴는 상부 압축측 콘크리트 슬래브의 길이 방향의 균열과 함께 부착력을 상실한 후, 비대칭 강재보 압축측의 휨변형에 의한 좌굴이 진행되어 비교적 조기에 가력이 종료되었다. 파괴상황에서 보듯이 실험체의 전체거동은 충분한 휨변형이 발생하기 이전에 가력점 근방 및 단부에서 매우 큰 휨-수평전단파괴가 일어났다. 웹면에 특별한 전단연결재를 설치하지 않은 상태로 슬래브에서 초기균열 발생 이후에 강재면과 콘크리트 경계면을 따라 단부 슬립현상과 더불어 단부에서 면외 벌어짐 변형이 크게 증가하면서 급격히 파괴되는 거동을 나타내었다. 강판 두께 4.5mm인 실험체에 비해 내력과 강성이 크게 나타났으나, 연성은 저하하는 것으로 나타났다.

SCB4.5-N 실험체와 동일한 형상으로 보 하부에 배근된 휨보강근으로 인해 합성보의 강성과 내력은 다소 높게 나타났으며, 연성 측면에서는 다소 저하되는 것으로 나타났다. 이는 합성보의 전체적인 파괴거동이 휨파괴로 지배되지 못하고 SCB6.0-N 실험체와 같이 휨-수평전단파괴가 지배한 요인으로 판단된다.

SCB4.5-R 실험체와 SCB6.0-N 실험체의 경우에 슬래브의 가력부에서 보의 길이방향으로 인장균열이 발생한 후, 절곡 강재보와 콘크리트 슬래브 경계면의 부착력 상실로 인한 수평전단파괴로 경계면 분리 현상 및 단부 면외변형 증대로 조기에 가력이 종료되었다. 이 두 실험체에서 합성보의 내력 및 강성확보와 안정적인 연성파괴 거동을 유도하기 위해서는 경계면이나 보 내부에 전단 연결재를 설치할 필요가 있을 것으로 생각된다.

3.2 모멘트-처짐 관계

강-PC 복합모듈을 구성하는 강판 절곡형 합성보의 휨성능 평가를 실험결과를 Table 3에 정리하여 나타내었다. Table 3에서 실험 항복하중(P_y)값은 Fig. 6과 같이 하중-변

위 곡선에서 원점과 최대내력의 1/3되는 점을 연결한 선분(a)을 초기접선강성 값으로 하고, 이 선분과 변위축이 이루는 각의 1/3이 되는 선분을 원점에서 그은 후(b), 실험값과 외접하도록 평행 이동시켜 선분을 만들고(c), 처음에 그은 초기접선강성 선분과 만나는 접점을 평가한 값이다. Table 3에는 슬래브 실험결과를 정리한 것으로 여기서 초기강성(K_i), 균열 후 강성(K_{cr}), 초기균열 발생시 모멘트(M_{cr}), 실험 항복모멘트(M_y), 실험 최대모멘트(M_u), 항복시 중앙부 처짐(δ_y), 최대모멘트시 중앙부 처짐(δ_u)을 나타낸다.

Fig. 7은 각 실험체별 모멘트에 따른 스펙 중앙부의 처짐 관계를 나타낸 것이다. 절곡 강판 두께가 4.5mm이고 휨보강근을 배근하지 않은 SCB4.5-N 실험체의 경우, 비대칭 합

Table 3. Experimental results on bending performance

Specimen	eK_i (kN·m/mm)	eK_{cr} (kN·m/mm)	eM_{cr} (kN·m)	eM_y (kN·m)	eM_u (kN·m)	$e\delta_y$ (mm)	$e\delta_u$ (mm)
SCB4.5-N	1.58	1.08	18.87	63.74	75.78	68.97	132.71
SCB6.0-N	1.91	1.37	22.16	77.79	84.93	68.02	111.42
SCB4.5-R	1.75	1.26	20.25	67.82	77.04	63.72	99.31

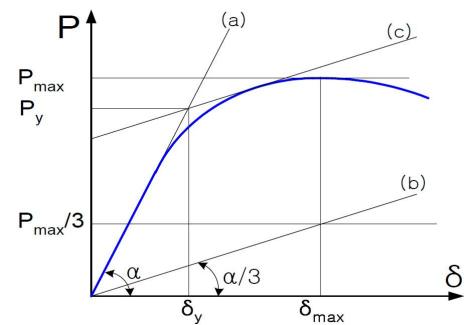


Fig. 6. Definition of yield load

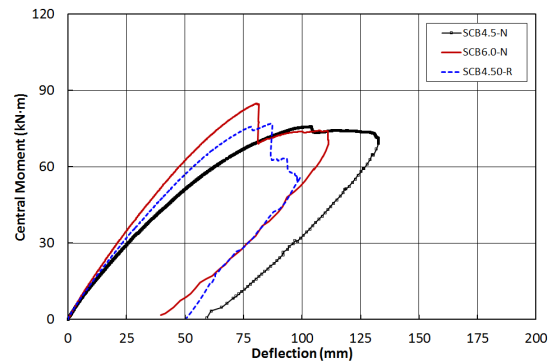


Fig. 7. Relation curve of moment-deflection

성보의 강성 값이 다른 합성보 실험체의 강성에 비해서 최소 10% 이상 작은 값을 나타내고 있다. 절곡 강판 두께가 같은 합성보에서 내부 휨보강근 여부에 따라 강성은 10% 이상, 내력은 3% 정도 다소 증가하는 경향을 보였다. 절곡 강판 두께가 두꺼운 경우에 강성은 21% 이상, 내력 측면에서 12% 이상 증가함을 알 수 있다. 시공시의 강성 값은 다소 차이를 나타내지만, 합성 후에는 전체적인 강성값의 차이는 크지 않고, 슬립발생을 전후로 강성값도 큰 변화를 나타내었다.

3.3 중립축의 위치변화

Fig. 8은 중앙부에서 합성보의 측면에 부착한 변형률 게

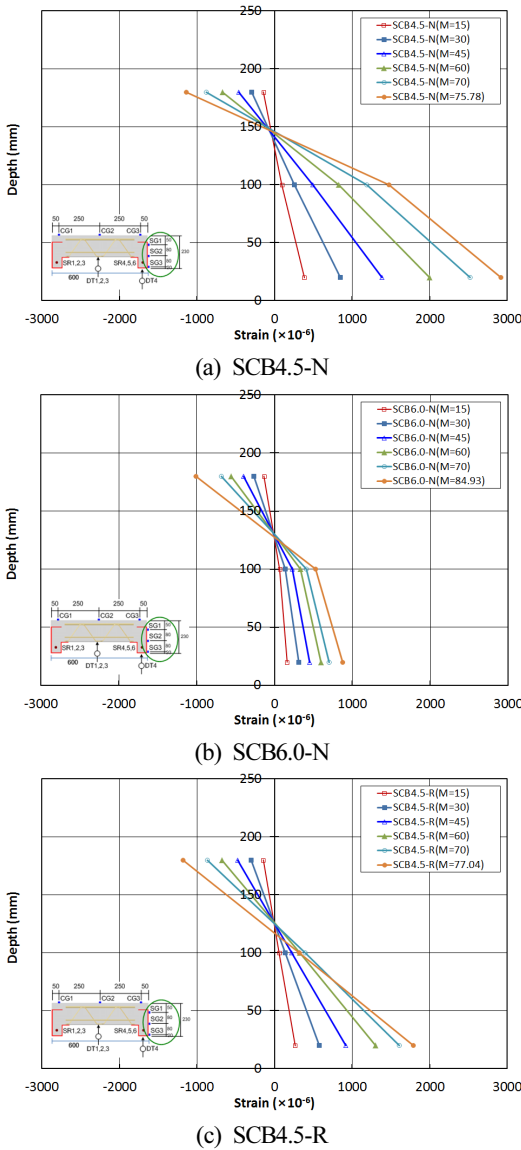


Fig. 8. Deformation distribution of beam depth

이지를 사용하여 측정된 합성보에서 춤에 따른 변형률의 분포를 보여준다. 이러한 변형률 분포로부터 실험시 합성보의 중립축의 위치 및 슬립을 전후로 한 합성보의 거동에 대한 정보를 얻을 수 있다. 기본 형상인 절곡 강판두께가 4.5mm인 SCB4.5-N 실험체의 경우, 변형률의 분포는 합성보의 춤을 따라서 선형적이고 콘크리트와 강재보 사이의 변형률의 전이는 비교적 상부로 이동하면서 연속적인 것을 알 수 있다. 이로부터 강-콘크리트 합성보의 경계면에서의 합성효과가 우수함을 알 수 있다.

하지만 절곡 강판 두께 증가와 휨철근이 배근된 합성보 실험체의 경우, 상부 콘크리트의 균열 발생을 전후로 하여 급격한 재료분리가 발생하고 있으며 변형률 또한 경계면에 불연속이 나타나고 있다. SCB6.0-N와 SCB4.5-R 합성보 실험체는 탄성구간에서의 중립축은 비교적 조기에 전단부착력 상실 및 단부 슬립증가와 변형증가로 인해 하부 플랜지 면에서 12.5cm 근처에서 나타났다. 이러한 합성보 실험체의 경우, 상부 슬래브의 전단파괴 발생 전까지 비교적 합성거동을 나타내고 있지만, 가력초기에 상대슬립 발생 하면서 최대 모멘트 이후 중립축이 급격히 하부로 이동하는 것을 알 수 있다.

이는 콘크리트 상부면의 전단파괴와 더불어 콘크리트와 강재의 경계면을 중심으로 급격한 수평전단파괴 거동 및 단부 슬립증대와 변형의 증가로 급격한 내력 감소현상이 나타나 합성보의 응력 재분배가 원활하지 않을 뿐만 아니라 이로 인해 연성적인 거동을 하지 못함을 알 수 있다.

3.4 하중-상대슬립 관계

Fig. 9은 합성보 실험체의 단부에서 측정된 모멘트-엔드 슬립을 나타내고 있다. 주요 변수에 따라 단부의 엔드슬립 발생 전후의 거동이 다르다는 사실을 알 수 있다. 절곡 강판

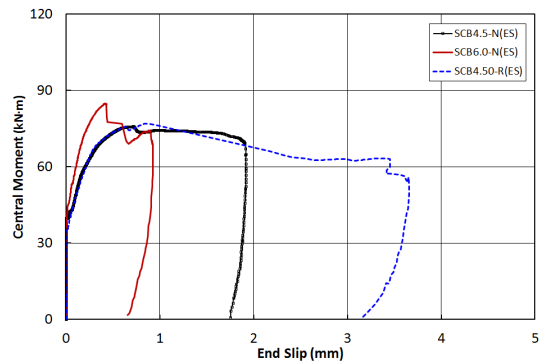


Fig. 9. Relationship between moment and slip

두께가 4.5mm인 실험체의 경우, 최대모멘트시의 측정된 슬립량이 1.0mm 이상 넘게 나타난 반면, 절곡강판 두께가 6.0mm인 실험체의 경우, 최대모멘트시의 슬립량은 1mm 이하로 나타나고 있다. 이는 절곡 강판 두께에 따라 단부슬립과 변형이 전체의 거동에 미치는 영향이 크다는 사실을 알 수 있다.

이러한 사실로부터 절곡강판 두께가 4.5mm인 실험체는 다소 연성적인 전단연결 효과를 가지고 있는 반면, 절곡강판 두께가 6mm인 실험체의 경우, 초기슬립 발생 모멘트는 매우 크게 나타나지만, 초기슬립 발생 후 모멘트의 증가가 거의 없이 단부 슬립량과 변형만 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

3.5 이론식과의 비교

콘크리트 슬래브의 최대압축강도와 철골보의 최대 인장강도를 얻기 위해서는 중립축이 강-콘크리트 경계면 근처에 위치하여야 가장 효율적이며 강재보가 항복하고 또한 콘크리트가 한계상황에 있다고 생각할 수 있다. 합성바닥구조의 이론 극한 하중은 소성모델에 의해 평가할 수 있다^{[10],[11]}.

Fig. 10과 같이 정모멘트를 받는 합성단면에서 중립축이 철골보의 웨브면에 있을 경우, 압축력 C 는 식 (1)과 같이 콘크리트의 슬래브와 웨브가 부담하는 압축력 $C_c (C_{cf} + C_{cw})$ 과 철골보의 상부플랜지와 웨브가 부담하는 압축력 $C_s (C_{sf} + C_{sw})$ 의 합으로 구할 수 있다.

$$C = C_{cf} + C_{cw} + C_{sf} + C_{sw} \quad (1)$$

인장력 T 는 식 (2)과 같이 강판 절곡된 철골보 웨브가 부담 하는 인장력 $T_{sw} (T_{sw1} + T_{sw2})$, 강판 절곡된 철골보 중간 및 하부플랜지가 부담하는 인장력 $T_{sf} (T_{sf} + T_{sb})$, 그리고 하부 철근이 부담하는 인장력 T_{sr} 의 합으로 구할 수 있다.

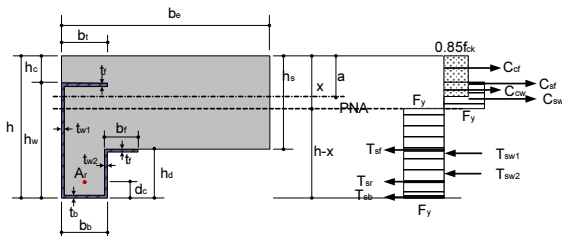


Fig. 10. Stress distribution of composite beams

Table 4. Comparison of experimental and theoretical results

Specimen	Test			Theory	Strength ratio	
	eM_{cr} (kN·m)	eM_y (kN·m)	eM_u (kN·m)	tM_u (kN·m)	$\frac{tM_u}{eM_y}$	$\frac{tM_u}{eM_u}$
SCB4.5-N	18.87	63.74	75.78	55.76	0.87	0.74
SCB6.0-N	22.16	77.79	84.93	71.64	0.92	0.84
SCB4.5-R	20.25	67.82	77.04	66.82	0.99	0.87

$$T = T_{sw} + T_{sf} + T_{sr} \quad (2)$$

여기서, $C = T$ 의 평형조건으로부터 압축축 상연에서 중립축까지의 거리 x 을 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$x = \left(\frac{F_y [b_f t_f + b_b t_b + (h - t_b) t_w + (h_d - t_f - t_b) t_w] + f_y A_r}{0.85 f_{ck} \beta_1 (b_e - t_w) + 2 t_w F_y} - \left(\frac{0.85 f_{ck} [(b_c h_c) - (b_e - t_w)(h_c + t_f) + (b_e - b_f) t_f]}{0.85 f_{ck} \beta_1 (b_e - t_w) + 2 t_w F_y} \right) - \left(\frac{F_y [b_t t_f - (h_c + t_f) t_w]}{0.85 f_{ck} \beta_1 (b_e - t_w) + 2 t_w F_y} \right) \right) \quad (3)$$

따라서 완전합성 단면의 극한 휨모멘트는 식(4)을 사용하여 구할 수 있다.

$$M = C_{sw} \frac{(x - h_c - t_f)}{2} + C_{cw} \left\{ (x - a) + \frac{(a - h_c - t_f)}{2} \right\} + C_{sf} (x - h_c - t_f / 2) + C_{sf} (x - h_c - \frac{t_f}{2}) + C_{cf} (x - \frac{h_c}{2}) + T_{sf} (h_s - x + \frac{t_f}{2}) + T_{sw1} (h - x - t_b) / 2 + T_{sw2} [(h_s - x) + (h_d - t_f - t_b) / 2] + T_{sr} (h - x - d_c) + T_{sb} (h - x - \frac{t_b}{2}) \quad (4)$$

Table 4는 3개의 강판 절곡형 합성보의 실험결과에 대한 실험 및 이론값의 휨모멘트를 정리하였다. 비교결과, 절곡 강판의 두께가 4mm이면서 하부 보강근이 없는 합성보의 경우, 실험 항복 및 최대 휨모멘트 값보다 이론 최대 휨모멘트 값은 각각 87%, 74%로서 이론 휨모멘트 값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 절곡 강판의 두께가 6mm이면서 내부 휨보강근이 없는 합성보의 경우에도 실험 휨모멘트 값보다 이론 최대 휨모멘트 값은 84~92%로서 비교적 실험값이 크게 나타남을 알 수 있었다.

4. 비선형 유한요소해석

4.1 해석 요소 및 해석 모델

강-PC 복합모듈을 구성하는 합성보에 대해 주요 변수에 따른 비선형 해석을 수행하여 실험적 거동과 비교 평가하여 구조적 안전성을 확인하고자 하였다.

Fig. 11과 같이 절곡된 강판에는 4절점 쉘 요소(S4R)를 적용하였고, 합성되는 콘크리트에는 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 적용하였다. 절곡된 강판과 충전 콘크리트 접촉면이 전단 연결재 없이 마찰로만 전단력에 저항하는 것을 구사하기 위해 ABAQUS(2010)^[12]에서 제공하는 갭 요소(Gap element)를 사용하였다. 갭 요소는 노드(Node)의 연결부에서 압축력은 전달하나 인장에는 저항할 수 없는 특징을 갖고 있다.

기존 연구에 따르면 강재 및 철근과 콘크리트 사이의 마찰계수는 약 0.3에서 0.6 사이의 값을 가지게 되며, 평균값으로 0.47을 제안하고 있다. 본 연구에는 강재 및 철근과 콘크리트 사이의 마찰계수는 0.47을 적용하였으며, 강재와 강재 사이의 마찰계수는 0.6을 사용하였다^[12].

본 연구에서 사용한 재료의 일축 응력-변형률 곡선은

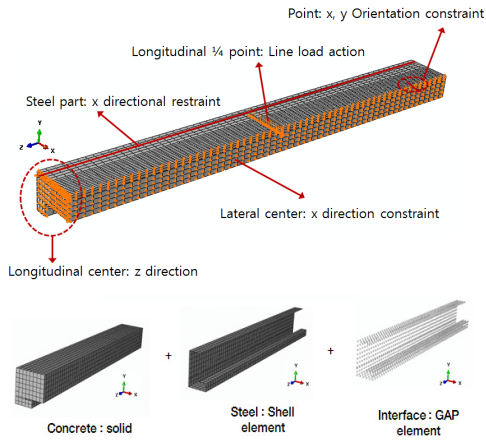


Fig. 11. Geometric nonlinear analysis model for composite beams

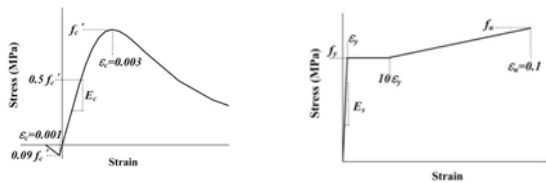


Fig. 12. Material analysis model

Fig. 12와 같다. 콘크리트의 일축 압축 응력-변형률 곡선은 Saenz(Saenz LP., 1964)의 제안식을 적용하였으며^[13], 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 의 50%까지는 탄성으로 가정하였다. 여기서 콘크리트의 탄성계수 E_c 는 4,700(MPa)이며(ACI, 2011), 콘크리트의 푸아송 비(ν_c)는 0.2을 적용하였다. 콘크리트의 인장 강도는 f_{ck} 의 9.0%로 가정하였으며, 콘크리트 인장 강도 발현 이후에는 Fig. 12와 같이 콘크리트의 인장 응력이 감소한다고 가정하였다. 본 연구에서는 Hue and Mo (2010)가 제안한 콘크리트의 인장 응력-변형률 곡선을 이용하였다^[14].

4.2 해석 결과 및 비교

하부에 인장철근이 없는 강판 4.5mm로 절곡된 합성보의 경우, 해석치에 대한 실험치의 비는 0.94[Test(212.7kN)/FEM(199)]로 비교적 잘 대응하는 것으로 평가되었다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 하중 작용부에 콘크리트 응력 집중현상이 발생하였으며, 실험체 중앙 압축부에는 설계강도 f_{ck} 에 도달하지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 강재 하부 인장부위는 항복하였으며, 하중 가력부 압축부분도 항복하였으나 중앙부 상부 플랜지면의 항복의 진행은 관찰되지 않았다.

하부에 인장철근이 없는 강판 두께가 6.0mm로 절곡된 합성보의 경우, 해석치에 대한 실험치의 비는 1.03[Test (238.4kN)/FEM(246.5)]로 비교적 잘 대응하는 것으로 평가되었다. Fig. 14에는 변형과 응력도 상황을 나타냈었다. 실험에서 발

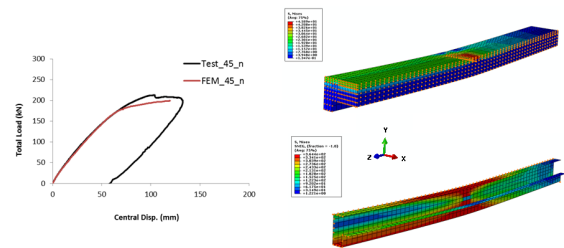


Fig. 13. Analysis result (SCB4.5-N)

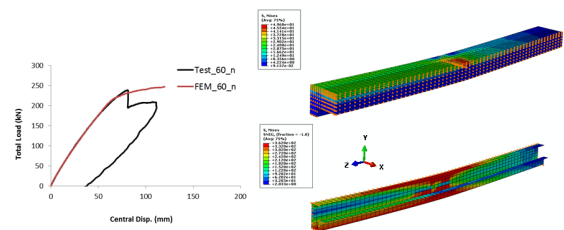


Fig. 14. Analysis result (SCB6.0-N)

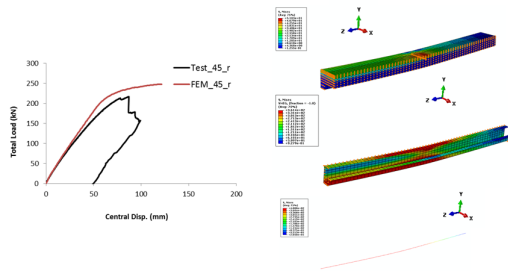


Fig. 15. Analysis result (SCB4.5-R)

생한 콘크리트의 극단적 전단 파괴는 해석에서 발생하지 않았으며, 강판 두께가 4.5mm인 실험체와 유사하게 하중 가력부에 콘크리트 응력 집중현상이 발생하였으며, 압축부는 설계압축강도 f_{ck} 에 도달 하지 않았다. 절곡 강재 인장부는 항복하였으며, 하중 가력부는 압축부와 마찬가지로 항복하였으나 중앙부의 상부 플랜지는 항복하지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 압축부가 항복을 하지 않은 것으로 보아 실험에서도 단면이 극한강도에 도달하지 않은 것으로 보인다.

강판 두께가 4.5mm이고, 합성보의 하부에 휨철근이 배근된 실험체의 경우, 실험에서 발생한 콘크리트의 극단적인 전단 파괴 현상은 해석에서 발생하지 않았다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 합성보의 인장부분의 강재 및 철근은 모두 항복한 것으로 나타났으며, 압축부는 항복에 도달하지 않는 상태였다. 따라서 합성보가 인장거동을 보여야 하지만, 전단에 의한 급격한 파괴 발생함 알 수 있었다. 이에 강판 절곡형 합성보의 안정적 거동을 확보하기 위해서는 수평전단에 대한 보강이 필요한 것으로 판단된다.

이상과 같이 강판 절곡형 비대칭 합성보에 대한 실험과 해석을 비교한 결과, 해석 모델은 초기강성과 극한 강도는 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 실험에서 발생한 극단적 전단 파괴는 해석에서 예측이 잘 되지 않았으며, 향후 해석 모델링에 대한 추가 검토가 필요한 것으로 생각된다. 압축부위가 항복하기 전에 수평전단 파괴가 발생하였으므로 이에 대한 전단 보강이 필요한 것으로 판단된다. 수평전단에 대해 보강이 되면, 극한 하중은 압축부위가 항복이 발생할 때까지 증가할 것으로 보인다.

5. 결론

강-PC 복합모듈을 구성하는 주요 부재인 강판 절곡형 비대칭 합성보에 대한 구조성능 평가를 위한 실험과 이론 및 해

석적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강-PC 복합모듈을 구성하는 강판 절곡형 비대칭 합성보는 강판 두께와 휨 보강근의 유무에 따라서 서로 다른 파괴모드를 관측할 수 있었다.
- (2) 강판 두께가 4.5mm인 실험체의 경우, 파괴는 강재의 항복과 가력부 콘크리트의 압괴로 시작되었으며 항복이 후 하중이 증가하면서 자연스럽게 중립축이 상부로 이동하면서 응력의 재분배가 원활하게 이루어져 국부적인 파괴나 큰 변형이 없이 단면 전체가 휨에 저항하는 매우 연성적인 거동을 나타내고 있다.
- (3) 강판 두께가 6.0mm인 실험체와 강판 두께 4.5mm이며 휨보강근이 있는 경우에는 충분한 휨변형이 발생하기 이전에 가력점 근방 및 단부에서 매우 큰 휨-수평전단 파괴가 일어나 강재면과 콘크리트 경계면을 따라 단부 슬립현상과 더불어 단부에서 면외 벌어짐 변형이 크게 증가하면서 급격히 파괴되는 거동을 나타내었다.
- (4) 강판 절곡형 합성보의 실험결과에 대한 실험 및 이론값의 휨모멘트 비교결과, 실험체 변수에 관계없이 실험 항복 및 최대휨모멘트 값보다 이론 최대휨모멘트 값은 각각 87~99%, 74~87%로써 실험값이 이론값보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.
- (5) 해석 모델은 초기강성 및 극한 강도는 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 실험에서 발생한 극단적 전단파괴는 해석에서 예측이 되지 않아 향후 모델링에 대한 추가 검토가 필요한 것으로 생각된다. 실험체 모두 인장부에서 먼저 항복이 발생하였으며, 압축부위가 항복하기 전에 수평전단 파괴가 발생하였으므로 이에 대한 전단 보강이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 주거환경연구사업 (17RERP-B082884-04)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Rogan, A.L., Lawson, R.M., Bates-Brkljac, N. (2000) Value and Benefits Assessment of Modular Construction. *The Steel Construction Institute*, London.

- [2] Tomas, U., Ganiron, J.R., and Mohammed, A. (2014) Prefabricated Technology in a Modular House, *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol.73, pp.51-74.
- [3] Lawson, R.M., Ogden, R.G., and Bergin, R., (2012) Application of Modular Construction in High-rise Buildings. *J Archit Eng ASCE*, Vol.18, No.2, pp.148-154.
- [4] Lawson, R.M. and Richards, J. (2010) Modular Design for High-rise Buildings, *Proc Inst Civ Eng Struct Build*, Vol.163, No.SB3, pp.151-164.
- [5] Annan, C.D., Youssef, M.A., and Naggar, M.H. (2009) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-braced Frames, *Eng Struct* 2009, Vol.31, pp.1435-1446.
- [6] 이상섭, 배규웅, 박금성(2016) 연결 강판 형상에 따른 모듈러 유닛 간 접합부의 거동 비교, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제6호, pp.467-476.
Lee, S.S., Bae, K.W., and Park, K.S. (2016), Comparison of Behavior of Connections between Modular Units according to Shape of Connector Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.467-476 (in Korean).
- [7] 이상섭, 박금성, 홍성엽, 배규웅(2015), 모듈러 골조의 각형강관 기둥과 C형강 보 접합부의 거동 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제5호, pp.471-481.
Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., and Bae, K.W. (2015) Comparison of Behavior of Connections between Modular Units According to Shape of Connector Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.471-481 (in Korean).
- [8] 이두용, 조봉호, 김태형, 하태휴(2016), 스트랩 브레이스를 갖는 내력벽식 모듈러건축 스틸스터드 벽체의 반복하중에 대한 거동 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제6호, pp.415-425.
Lee, D.Y., Cho, B.H., Kim, T.H., and Ha, T.H. (2016) Experimental Study on the Cyclic Behavior of Modular Building with Strap Braced Load Bearing Steel Stud Walls, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.415-425 (in Korean).
- [9] 박금성, 배규웅, 광명근, 김형도(2015), 강-PC 복합모듈 합성보의 해석적 평가, 한국전산구조공학회논문집, 한국전산구조공학회, 제28권, 제1호, pp.1-2.
Park, K.S., Bae, K.W., Kwak, M.K., and Kim, H.D., (2015), Analytical Evaluation of the Composite Beam for Steel-PC Hybrid Module, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.28, No.1, pp.1-2. (in Korean).
- [10] ACI 318-11, Farmington Hills, Michigan, 2011.
- [11] Lee, J. and Fenves, G.L. (1998) Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J Eng Mech ASCE* 1998, Vol.124, No.8, pp.892-900.
- [12] ABAQUS (2010) ABAQUS analysis user's manual version 6.9-2, Dassault Systemes Simulia corp, Providence, RI, USA.
- [13] Saenz, L.P. (1964) Discussion of 'Equation for the stress-strain curve of concrete' by P. Desayi, and S. Krishnan. *ACI J*, Vol.61, pp.1229-1235.
- [14] Hsu, T.T.C. and Mo, Y.-L. (2010) Unified Theory of Concrete Structures. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [15] 대한건축학회(2016), 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2016), 기문당
The Architectural Institute of Korea (2016), Korean Building Code and Commentary(KBC2016), Kimoon dang (in Korean).

기 호(Notation)

- ${}^e K_i$: 실험 초기강성(kN/mm)
 ${}^e K_{cr}$: 실험 균열 후 강성(kN/mm)
 ${}^e M_{cr}$: 실험 초기균열 발생시 휨모멘트(kN·m)
 ${}^e M_y$: 실험 항복모멘트(kN·m)
 ${}^e M_u$: 실험 최대모멘트(kN·m)
 ${}^t M_u$: 이론 최대모멘트(kN·m)
 ${}^e P_y$: 실험 항복하중(kN)
 ${}^e \delta_y$: 항복하중시 중앙부 처짐(mm)
 ${}^e \delta_u$: 최대하중시 중앙부 처짐(mm)
 A_r : 철근의 단면적(mm²)
 a : 콘크리트 등가응력 블록높이(mm)
 b_e : 합승슬래브 유효폭(mm)
 b_t : 상부 플랜지폭(mm)
 b_b : 하부 플랜지폭(mm)
 b_f : 중간 플랜지폭(mm)
 F_y : 강재 항복강도(MPa)
 f_y : 철근 항복강도(MPa)
 f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)
 h : 합성보 전체 층(mm)
 h_d : 하부 절곡된 층(mm)
 h_s : 콘크리트 슬래브 두께(mm)

h_c : 합성보 상부 토핑 높이(mm)

h_w : 합성보 웨브춤(mm)

t_f : 철골보 플랜지 두께(mm)

t_w : 철골보 웨브 두께(mm)

x : 압축측 상연에서 중립축까지 거리(mm)

β_1 : 0.85(콘크리트 강도 28MPa미만일 때)

요 약 : 본 연구는 새로운 모듈러 시스템을 개발하기 위한 목적으로 수행하였다. 현재 국내에서 적용되고 있는 모듈러 시스템은 C형 강재 보만을 사용하기 때문에 재료비와 내화 측면에서 매우 고가이다. 이를 극복하기 위하여 새로운 강-PC형의 복합모듈러 시스템을 개발하고자 하였다. 우선, 보 단면 형상을 개선하여 개발하기 위한 연구를 진행하였다. 3개의 실험체를 제작하여 휨성능 평가를 위한 실험을 수행하였다. 실험결과, 합성보는 수평전단 파괴에 의해 지배되는 것으로 나타났다. 또한, 비선형 유한요소해석을 수행하여 실험과 이론식과 비교를 통해 구조적 성능을 평가하였다.

핵심용어 : 복합모듈러, 강-콘크리트, 합성보, 비선형 해석, 구조성능
