

부분 PC(Precast Concrete) 커플 합성거더의 휨 성능 평가

김선희¹ · 염경수^{2*}

¹연구소장, (주)액트파트너 기술연구소, ²기술대표, (주)액트파트너

Evaluation for Flexure Performance of Partial PC (Precast Concrete) Couple Composite Girder

Kim, Sun Hee¹, Yom, Kyong Soo^{2*}

¹Manager/Ph.D, ACT Partner Corp. Institute of Technology, Seoul, 04799, Korea

²Professional Engineer Architectural Structures/CTO, ACT Partner Corp., Seoul, 04799, Korea

Abstract - Typical construction methods for construction sites are RC and PC methods. We propose a new method to solve the problems of these two methods. It's a partial precast concrete couple composite girder (PP-CPG) technique. The proposed construction method involves pre-assembling steel-rebars at the factory, and designing them without form and temporary support. As a result, it is expected to improve economics and constructability. Bending experiment was conducted to verify structural performance. The subject variable is concrete block pephth (1/3, 2/3, full). As a result, PP-CPG has sufficient rigidity and strength, and its post-yield behavior is very stable. The PP-CPG maintained the girder shape of the channel even after yield step, providing sufficient flexural strength and a composite effect.

Keywords - Hybrid structure, Concrete block, Flexural capacity, Deflection, Ductility coefficient

1. 서론

1.1 연구배경

건설현장의 공법은 대표적으로 RC(reinforced concrete)와 PC(precast concrete)로 구분할 수 있다. 각 공법특성에 맞게 장점이 특화되어 있지만, 단점을 극복할 수 있는 기술력은 아직 과제로 남아 있다. RC공법의 경우 일체성을 확보하기 위해 접합 상세가 PC, S조에 비해 복잡하고, 시공공정이 길어 품질확보에 불리하다. 한편, PC공법의 경우 공장 생산으로 품질확보가 가능하나, 양중무게, 운반에 대한 부담과 공사시 지점조건이 단순하지이므로 현장사고에 위험요소가 크다.

World Economy Forum은 2018년 건설업을 첨단기술 중

Note.-Discussion open until August 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 06, 2021; revised on January 17, 2022; approved on January 21, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-3452-1891 Fax. +82-2-6008-1891

E-mail. actpartner@daum.net

심의 산업으로 재편할 10대 미래 핵심건설기술을 꼽았는데 그 중 1위가 프리캐브 및 모듈러 공법으로 보고되었다. Off-site construction(OSC)의 도입 및 활성화는 결국 현장의 생산방식을 자동화된 시스템으로 전환하는 것이므로 현장과 공장을 연결하는 전문 중소기업업체의 기술 확보와 역할이 매우 중요해지는 시점이다. 모듈러 공법은 기존 현장 중심의 건설 산업을 탈현장(off-site) 중심의 산업으로 유도하는 공업화 기술로, 미국과 일본, 유럽과 같은 선진 기술국에서는 이미 모듈러 공법을 활용한 주택시장이 일정 규모 이상을 차지하고 있다. 현장에서 발생하는 문제점(시공오차, 결함 등)을 원활하게 관리·감독할 수 있고, 공기와 비용을 절감

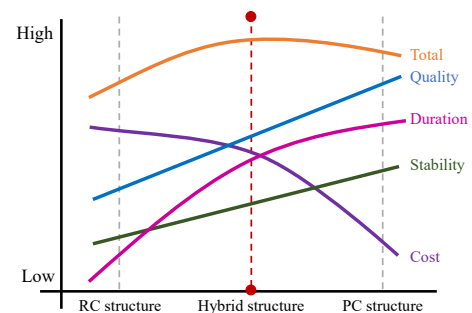
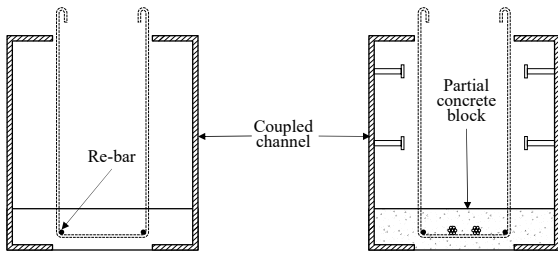


Fig. 1. Comparison of RC and PC method

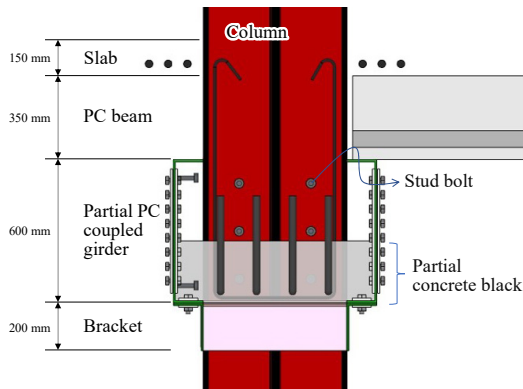
시키는 장점이 있다. 그로 인해 건축물의 품질을 향상시키는 장점을 충분히 확보할 수 있다. 따라서 소규모 적층식 모듈러 공법에 국한되지 않고 중·고층, 대공간용 프리팹(pre-fabricated) 공법이 개발되고 현장에 적용되는 구체적인 디테일이 마련될 필요가 있다.

1.2 부분 PC 커플 거더 공법 개발

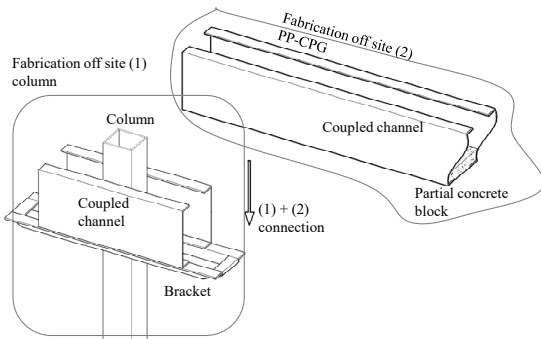
RC와 PC공법의 문제점을 극복하기 위한 방안으로 부분 PC 커플 합성거더 공법을 제안하며, 본 공법 형상은 Fig. 2와 같다. 공장에서는 마주보는 두 개의 채널(커플 거더)에 철근(하부근, 스테럽)이 조립되고 부분 콘크리트가 충전(보 전체 치의 약 1/3 - 1/4)되어 현장에 반입된다. 반입된 부분 PC



(a) Girder section



(b) Column to beam connection



(C) Construction procedure

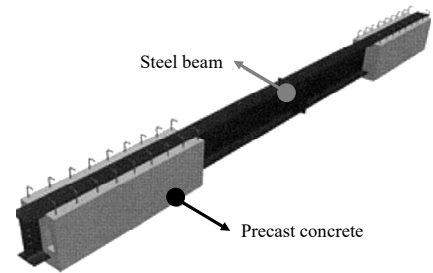
Fig. 2. PP-CPG concept

커플 거더는 기둥에 선(先)제작된 브라켓 위에 얹혀서 거더는 볼트접합되고, 슬래브 타설시 거더까지 동시 타설된다. 제안한 공법 명칭은 부분 합성 커플 거더로 PP-CPG(partial precast concrete coupled girder)이다.

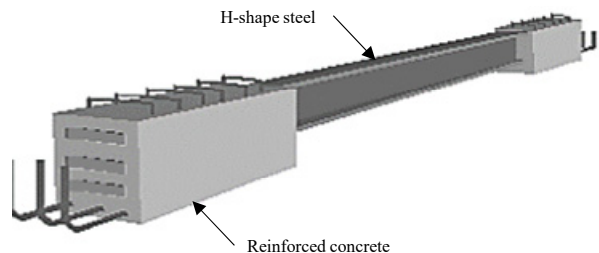
제안공법의 특징은 RC조의 거더를 부분 PC화하여 철근을 선조립하고, 거푸집, 동바리 생략이 가능하며, 현장작업이 최소화된다. 그로 인해 시공성이 향상되어 결과적으로 경제성이 확보되는 공법이다. 내부에 타설된 콘크리트 패널이 강성을 높여 공사 중 안전성이 향상된다. PC화로 품질은 확보되면서 단순 거치형 설치가 되어 공기가 매우 절감될 것으로 예상된다. 거더 단부가 연속화되어 있어 장스팬 고하중의 경우에도 시공시 처짐량을 줄이는 역할을 한다.

2. 부분 PC화된 거더의 선행연구

부분 PC화된 거더의 선행연구를 조사해 보면, PC화하는 구간을 단부 또는 중앙부로 나눌 수 있다. 단부 보강 복합구조 시스템을 분석해 보면 대표적으로 CPS합성보(Fig. 3)는 H형강의 웨브를 단부만 PC 콘크리트로 보강한 형태로 일반 H형강보와 동일한 보-기둥 접합부 상세가 가능하다. 즉 강재보와 상부 인장철근을 통해 단부모멘트를 저항하게 된다. 한편, 기둥 타입이 SRC인 경우로 국한되어 있으며, CFT 또는 폐단면의 기둥타입인 경우에는 접합상세에 대한 검토가



(a) CPS (composite precast concrete system)



(b) Hi-Beam

Fig. 3. Reinforcement with precast concrete in the end of beam

요구된다^[1]. 유사한 공법으로 Hi-Beam의 경우 역으로 H형강의 단부를 PC 콘크리트로 보강한 형상이다. RC 혹은 PC 기둥과의 보-기둥 접합부 상세가 가능하며, PC 거더와 유사한 형태를 갖추고 있다.

중양부 보강 시스템으로 대표적인 HRC(hybrid reinforced concrete system) 합성보의 경우(Fig. 4) 겔버 조인트를 도입하여 정 모멘트가 작용하는 중양부는 PC 콘크리트, 부 모멘트가 작용하는 단부는 강재보가 저항하도록 만들어졌다. 강재와 PC 콘크리트 사이에 다량의 스티드와 스티럽이 요구되며, PC 콘크리트의 양중 무게에 대한 부담이 있는 편이다. EPC 합성보는 PC 콘크리트 보 단부에 성형 강재를 매입(부착)하는 형태로 프리스트레스를 도입하여 작은 보로 적용되고 있다. 본 연구에서 제안하는 PP-CPG 시스템을 이러한 공법들과 비교하면, 단면의 변동구간이 없어 응력 전이가 매우 단조롭고 국소적인 변형이 우려되지 않으므로 전 단면의 성능 발휘가 가능할 것으로 예상된다. 또한 기존의 PC화된 합성보의 경우 기둥 타입이 철골 또는 RC기둥인 접합부 상세가 가능하지만 CFT(concrete filled steel tube, CFT) 또는 강관 기둥과 접합 구현이 상당히 복잡해진다. 반면, PP-CPG 시스템의 경우 기둥타입에 상관없이 접합 상세가 단조롭고 시공이 가능하다는 차별성을 두고 있다.

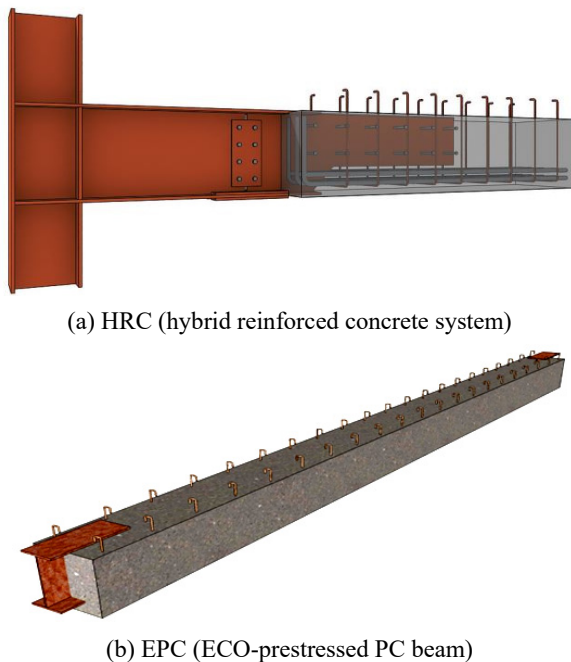


Fig. 4. Reinforcement with precast concrete in the center of beam

3. 휨 내력 성능실험

3.1 실험계획 및 개요

부분 합성 커플 거더는 공장에서 선 타설되는 콘크리트 블록이 있는 것이 특징이며 블록 깊이를 변수로 한 휨 내력과 거동을 파악하기 위한 실험을 계획하였다. 휨 부재는 총 3개로 Fig. 5와 같다. B60 실험체는 슬래브와 일체화된 합성 거더이고, B20과 B40 실험체는 슬래브와 일체화되기 전 시공하중을 받는 부분 PC 거더로 콘크리트와의 합성효과에 따른 휨 내력과 시공하중 상태의 처짐을 평가하고자 실험체를 계획하였다. 하부근은 4개씩 등 간격 배열하였으며, 직경 25 mm를 갖는 이형철근으로 제작되었다. 콘크리트와 채널의 합성효과를 위해 강관 측면에는 300 mm 간격으로 스티드 볼트를 설치하였다. B60 실험체의 경우 200 mm의 슬래브와 주 철근이 포함되었다.

마주보는 채널의 폭두께비 검토를 한 결과 Table 1과 같이 비구속 요소인 플랜지의 경우 비컴팩트 단면, 구속을 받는 웨브의 경우 컴팩트 단면으로 판별되었다. 강재의 항복 강도는 재료시험 결과로 산정되었다.

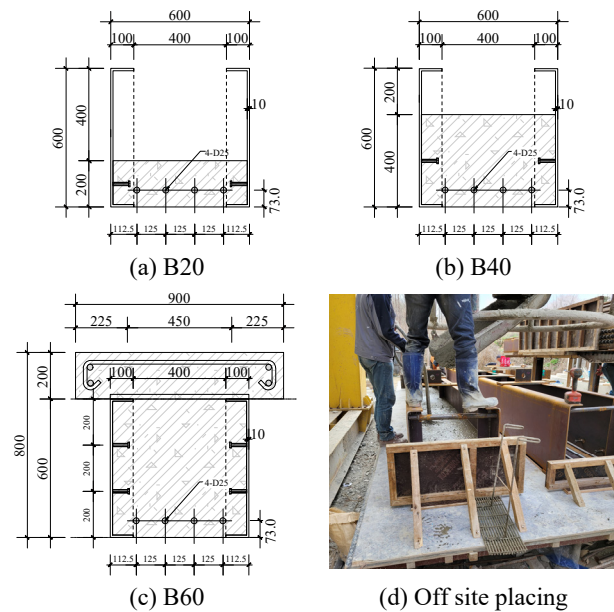


Fig. 5. Detail of bending specimens

Table 1. Results of width-thickness ratio check

Channel	λ_p	λ_r	Discriminant	B/t	Note
Flange	7	22	$\lambda_p < B/t < \lambda_r$	10	Non-compact
Web	84	128	$B/t < \lambda_p$	60	Compact

실험체의 휨 모멘트는 소성응력 분포상태를 Fig. 6과 같이 도식화하였으며, 소성 중립축이 콘크리트 블록에 위치한 경우를 가정하여 Table 2와 같이 각 힘과 중립축에서 떨어진 거리(모멘트 팔거리)를 수식으로 정리하였다.

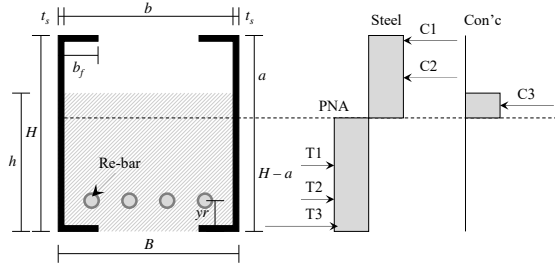


Fig. 6. Distribution of plastic stress

Table 2. The basis for calculation of plastic moment

Compression or tension members		Force	Moment arm
C1	Steel flange	$2(b_f t_s F_y)$	$a - (t_f/2)$
C2	Concrete	$0.85 f_{ck} b (h - (H - a))$	$(h - (H - a))/2$
C3	Steel web	$2(a t_s F_y)$	$a/2$
T1	Steel web	$2 t_s F_y (H - a)$	$(H - a)/2$
T2	Re-bar	$n(\pi D^2/4) F_{ry}$	$H - a - y_r$
T3	Steel flange	$2(b_f t_s F_y)$	$(H - a) - (t_f/2)$

각 실험체의 재원을 Table 3에 정리하였다. 표의 I_{Comp} 는 철골, 철근, 콘크리트로 구성된 전체 단면 2차모멘트이며, 그때의 중립축(PNA)은 하부를 기준으로 한 깊이이다. 소성모멘트(M_p)는 재료시험을 통해 얻은 결과를 반영한 예상값이다.

Table 3. Specimen list and property

Specimen type	Concrete depth (mm)	I_{Comp} ($\times 10^6 \text{ mm}^4$)	PNA (mm)	M_p (kN·m)
B20	200	743	226	1,180
B40	400	765	306	1,260
B60	600 + (slab)	2,383	550	2,381

부재의 전체 길이는 6.4 m이며(Fig. 7 참조), 지점부에 가력판과 지점판(두께: 20 mm)을 설치하였다. 가력은 3,000 kN UTM을 사용하여 변위제어하였으며, 0.05 mm/s의 속도로 가력되었다. 실험체 경계조건은 양단 단순 지지된 지간($L = 6 \text{ m}$)에 가력보를 사용하여 2점 가력하였다. 가력지점과 중앙부의 처짐을 측정하기 위해 실험체 하부에 3개의 변위계(LVDT)를 설치하였고, 측면에 콘크리트와 커플 채널의 슬

립을 평가하기 위해 수평 변위계(L4)를 추가하였다.

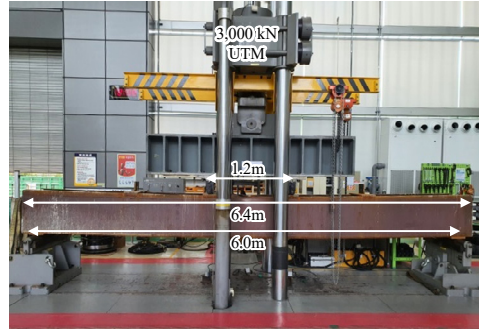


Fig. 7. Boundary condition

커플 채널 강판과 콘크리트 블록에 매입되는 하부근의 변형도를 측정하기 위해 Fig. 8과 같이 strain gauge를 13곳에 부착하였다. SG1~SG4까지는 철근, SG5~SG10까지는 강판 채널에 SG11~SG13은 콘크리트면에 부착되었다.

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계 압축강도 24 MPa로 계획하였으며, 총 5개를 제작하였다. 커플 채널 두께는 10 mm로 인장시험편을 채취하여 인장시험을 수행하였다. 강종은 SM355으로 시험수행은 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여 KS B 0802 금속재료 인장시험방법에 의해 진행되었다. 공시체의 콘크리트 압축강도와 강재의 인장 시험결과는 Table 4에 정리하였다.

3.2 파괴거동

부분합성 커플 채널 합성보의 파괴거동은 모두 휨 파괴로 중앙부 채널의 국부좌굴이 동반되었다. 항복시점에 좌굴양상이 매우 뚜렷하게 나타났으며 최대내력 이후에 내력이 떨어지면서 커플 채널과 콘크리트 블록이 이격되어 콘크리트 일부가 박리되었다. Fig. 9(a)와 같이 보 단부의 균열 분포를 보면 최대내력 이후부터 육안으로도 확인되었다. 커플 채널의 측면은 Fig. 9(b)와 같이 면외, 면내방향으로 좌굴모드가 발생되었으며 B60의 경우 처짐량이 40 mm를 초과하면서 강판 채널과 상부 슬래브의 이격이 발생되었다. 부분 PC 커플 합성거더는 마주보는 채널에 콘크리트가 공장에서 타설되어 거더 하부는 콘크리트면이 바로 노출된다. 최대내력 이후 하부면의 균열을 확인했을 때, Fig. 9(d)와 같이 수평균열이 중앙부에 다수 나타났으며 처짐량이 컸던 B60의 경우 비교적 균열크기가 크게 나타났다. 그럼에도 상부면의 균열과 비교했을 때, 크기와 양상이 양호하게 나타났으며 하부근의 역할이 반영되었을 것으로 판단된다.

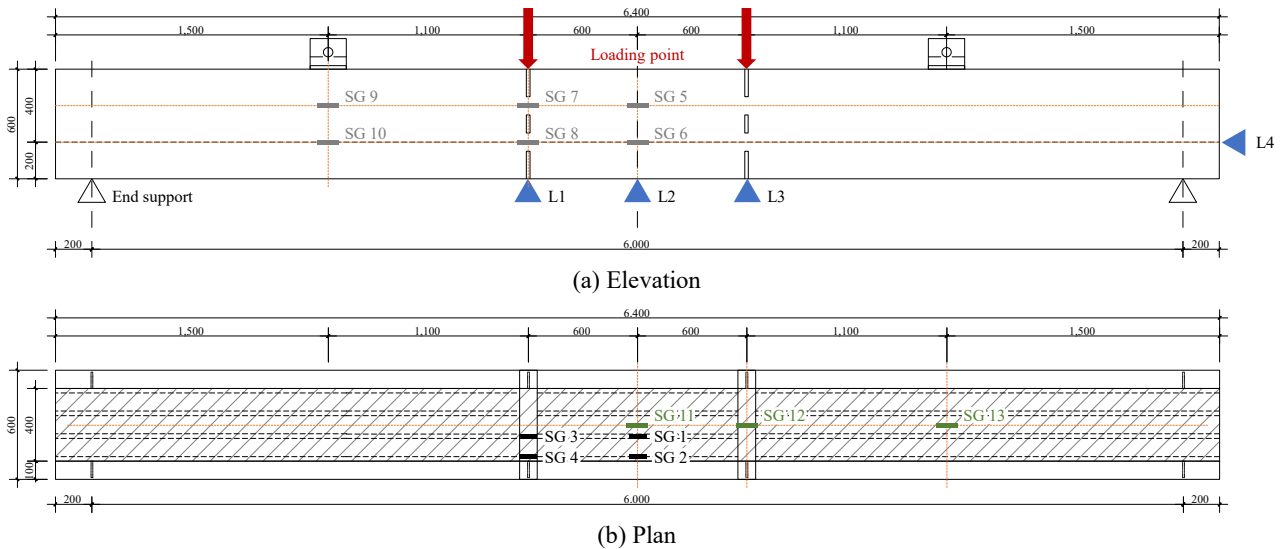


Fig. 8. Locations of LVDT and strain gauge (Unit : mm)

Table 4. Results of material test

Material type	Strain σ_{max} (MPa)	Strain ϵ_{peak} (MPa)	Elastic modulus E_c (MPa)	Steel (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strain (MPa)	Elastic modulus (MPa)
Concrete	26.5	0.0026	15,987	10	418	546	0.001447	288,874

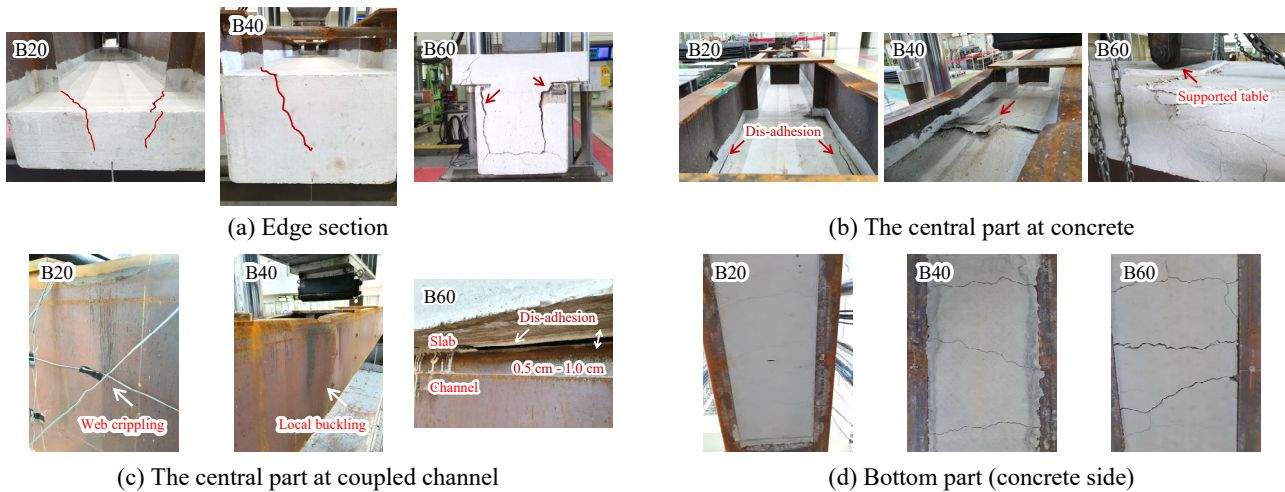


Fig. 9. Failure mode

4. 분석 및 고찰

4.1 콘크리트 블록 깊이별 휨 성능 검토

모멘트 회전각의 관계를 Fig. 10에 정리하였으며, 각 실험에서 도출된 소성모멘트(M_p), 항복모멘트(M_y), M_p 시점의 회전각(ϕ_{max})을 Table 5에 나열하였다. 가장 특이점은 B60 실험체의 항복모멘트 도달시점에 발생된 불규칙적인 거동

이다. 커널 채널 강판과 슬래브가 이격되면서 내력이 감소되었다. 그럼에도 소성모멘트까지 도달되어 곡률이 매우 완만하게 나타났다.

모든 실험체는 예상한 소성모멘트($M_{Thre.}$) 대비 1.0 이상 우수한 결과를 갖고 있으며 그 중 콘크리트 블록이 400 mm로 약 보 축의 2/3가 채워진 경우 가장 높게 평가되었다. 또한 합성단면의 단면2차모멘트가 유사한 B20과 B40의 경우 휨 성능 예상내력은 약 7%(1,260 kN vs. 1,180 kN) 정도

차이가 날 것으로 예상되었지만 실험결과는 15% 차이로 예상치보다 높았다. 콘크리트 블록 깊이가 전체 강판 폭의 1/3에서 2/3으로 커질 때, 항복 이후 소성모멘트에 도달하는 시점이 매우 유연하게 나타났으며 모멘트내력이 약 80% 떨어지는 실험종료 구간의 곡률은 상당히 유연하게 나타나고 있다. 위와 같은 결과는 커플 채널 강판에서 발생하는 좌굴 모드가 내부 콘크리트에 의해 완화되면서 연성적인 거동이 곡률에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 또한 부분 타설된 콘크리트는 마주보는 커플 채널이 형상을 유지하고 있어 일부 균열과 박리가 있음에도 충분한 응력 재분배가 되면서 전체 휨 성능이 확대된 것으로 판단된다.

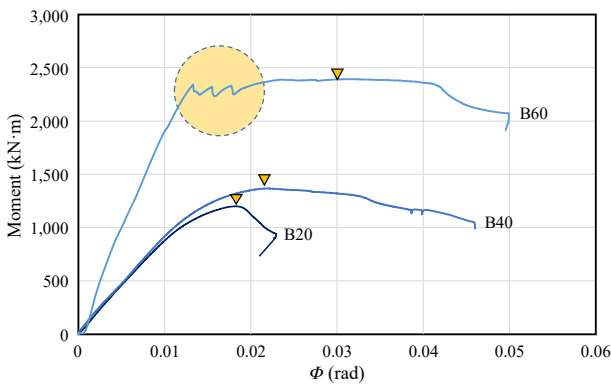


Fig. 10. Moment-rotation angle curve

Table 5. Comparison of flexural performance

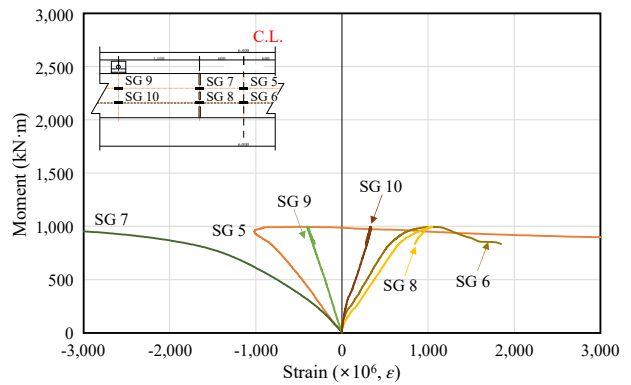
Specimen	$M_{Exp.}/M_{The.}$	Theory M_p (kN·m)	Experiment			
			M_p (kN·m)	M_y (kN)	M_y/M_p	ϕ_{max} (rad)
B20	1.01	1,180	1,192	1,045	0.88	0.018
B40	1.08	1,260	1,364	1,199	0.88	0.022
B60	1.00	2,381	2,393	2,261	0.94	0.030

4.2 커플 채널의 변형률 분포 및 중립축 검토

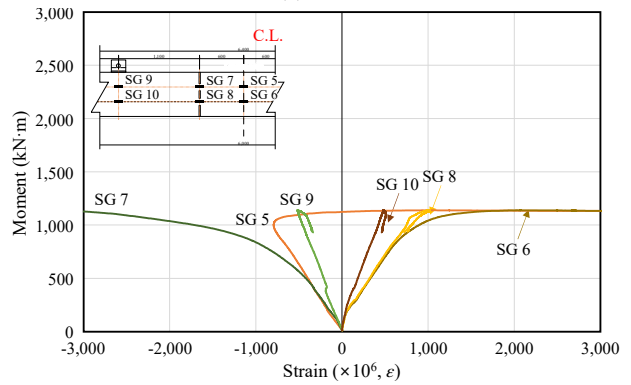
강판 채널 한 면에는 보 스패ن 길이에 중심을 기준으로 하여 strain gauge를 부착하였다. 각 실험체에 따른 하중-변형률 관계를 Fig. 11에 정리하였다. 부착위치는 Fig. 8(a)에 언급됐듯이 보 춤(600 mm)을 3등분하여, 가력점과 스패ん길이에 중심, 1/4지점에 부착되었다. 콘크리트 블록이 1/3과 2/3인 B20과 B40 실험체의 경우는 변형률 분포가 매우 유사하게 나타났다. 두 실험체의 중립축은 하부면에서부터 226 mm, 306 mm로 산정되었고, 중립축을 기준으로 상부측에 부착된 변형률 게이지(No. 5, No. 7, No. 9)는 압축변형, 하단측에 부착된 변형률 게이지(No. 6, No. 8, No. 10)는 인장변형을 나타

냈다. 변형률 게이지값이 항복변형률($\epsilon_y = 0.001$)이 도달하였고, 다소 인장변형(+)보다 압축변형(-)이 크게 나타난 것은 콘크리트 블록이 채워져 있는 강판 채널의 하부측은 좌굴모드가 유리한 조건이 되어 변형이 완화된 것으로 판단된다.

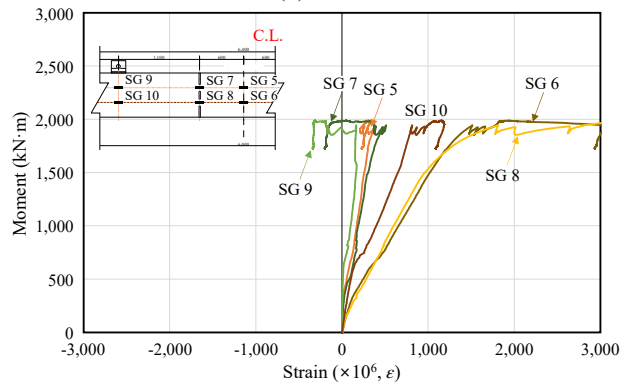
콘크리트 블록 깊이가 200 mm에서 400 mm로 증가될 때, 마주보는 커플 채널의 좌굴모드와 변형양상이 매우 유사한 것을 확인하였다. 한편 B60의 경우 중립축이 하부 면으로부터 550 mm이며, 부착된 변형률 게이지는 모두 인장변형이 발생하고 있으며, 중립축부터 거리가 멀수록 변형률도 비례적으로 증가되어 측정결과에 신뢰를 가질 수 있었다.



(a) B20



(b) B40



(c) B60

Fig. 11. Load-strain gauge relationship

4.3 단면2차모멘트와 처짐관계

각 실험체의 전단면2차모멘트(I_g), 중립축 하부 콘크리트를 무시한 균열단면2차모멘트(I_{cr}) 그리고 유효단면2차모멘트를 산정하여 Table 6에 정리하였으며 각 단면2차모멘트에 대응하는 모멘트력(M_g, M_{cr})을 산정하였다. 표의 M_p 는 실험에 의해 도출된 소성모멘트 내력이다. B60 실험체의 경우 슬래브를 포함한 경우(+slab)와 포함되지 않은 경우(-slab)로 나누어 산정하였다. 실제 실험 파괴거동에서 상부 슬래브와 커플 거더 강판의 이격이 확연하게 나타났으며 일체성에 대한 부분을 재평가하기 위해 나누어 분석하였다.

모든 실험체의 유효단면2차모멘트(I_e)는 전단면과 균열 단면2차모멘트 사이에 존재했으며, 단면이 가장 큰 B60의 경우 격차가 크게 나타났다. 각 단면2차모멘트에 최대내력(P_{exp})을 대입해 중앙부 처짐을 평가한 결과, Table 7과 같이 실제 발생한 처짐량은 각 실험체마다 상이하게 대응되었다.

B20의 경우, 전단면2차모멘트에 의해 산정된 처짐량(δ_g)보다 적게 측정되어, 예상되는 허용처짐량 대비 매우 안전측으로 평가되었다. B40의 경우 유효단면2차모멘트에 의해 산정된 처짐량(δ_e)과 거의 동등한 수준으로 나타나, 실제 휨 내

Table 6. Geometrical moment of inertia and plastic moment

Specimen	I_g	I_{cr}	I_e	M_g	M_{cr}	M_p
B20	743	673	702	1,367	1,016	1,192
B40	765	787	771	1,440	1,295	1,364
B60 (-slab)	1,620	1,213	1,414	1,899	1,500	-
B60 (+slab)	2,383	2,038	2,168	2,640	1,906	2,393

I_g : moment of inertia ($\times 10^6 \text{ mm}^4$), I_{cr} : critical moment of inertia ($\times 10^6 \text{ mm}^4$),

I_e : effective moment of inertia = $\left(\frac{M_{cr}}{M_g}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_g}\right)^3\right] I_{cr}$ ($\times 10^6 \text{ mm}^4$),

M_g : plastic moment for I_g ($\text{kN}\cdot\text{m}$), M_{cr} : plastic moment for I_{cr} ($\text{kN}\cdot\text{m}$), M_p : plastic moment (experiment results, $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Table 7. Comparison of deflection (Unit: mm)

Specimen	Experiment	Theory		
	δ_{max}	δ_g	δ_e	δ_{cr}
B20	44	57	60	63
B40	67	63	63	61
B60 (-slab)	73	52	60	70
B60 (+slab)	73	36	39	42

δ_g : deflection of across the gross section by calculation, δ_{cr} : deflection of across the critical section by calculation, δ_e : deflection of across the effective section by calculation

력은 전 단면보다 유효 단면적으로 설계 가능할 것으로 예상된다. B60의 경우 슬래브를 포함시킬 때 단면2차모멘트가 상대적으로 커져서 실제 처짐과 차이가 컸으나, 슬래브 없이 비교해 보면, 균열단면2차모멘트에 의해 산정된 처짐량(δ_{cr})과 잘 일치하였다. 단계 하중별 발생한 처짐량을 Fig. 12에 나타냈다. 하중의 단계에서 최대내력시점의 처짐량은 상당히 급격하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 앞에 서술된 단면의 효율성을 처짐관계와 비교해 보면, 최대내력에서의 처짐은 균열단면2차모멘트로 산정된 허용처짐량과 유사

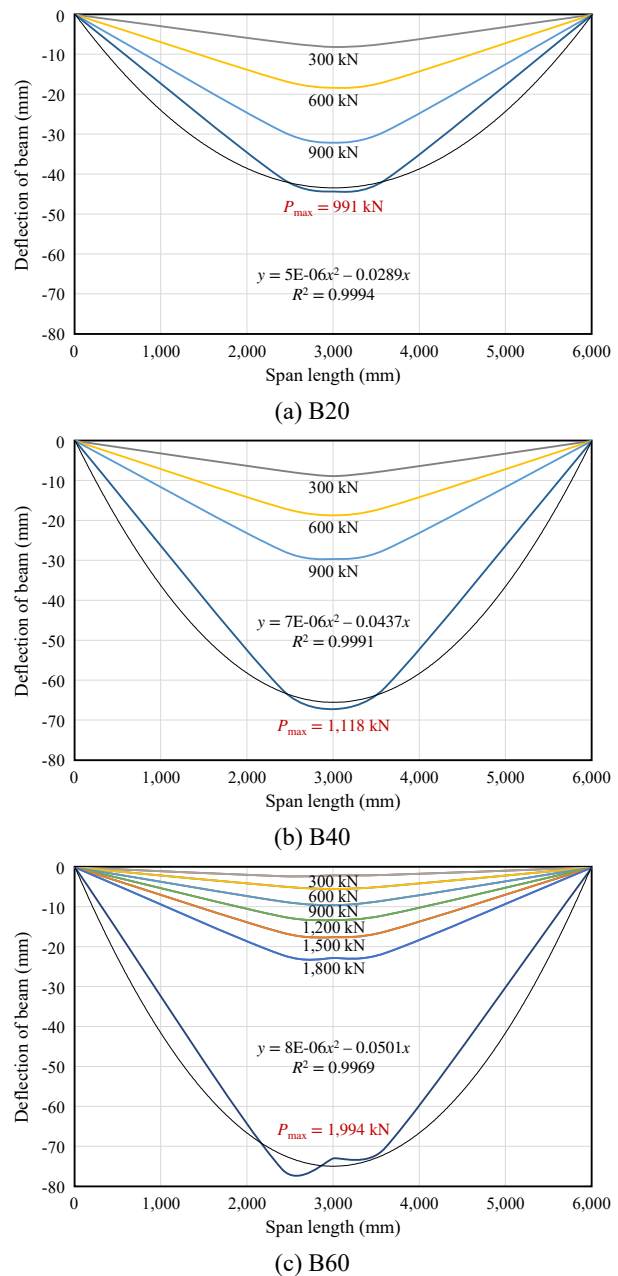


Fig. 12. Deflection according to step load

하게 나타났다. 또한 최대내력 도달 전 단계의 처짐량은 모두 전단면2차모멘트로 산정된 허용 처짐에 만족하고 있다. B60의 경우 항복 이후 최대내력에 도달할 때, 상부 슬래브와 일체성이 확보되지 않았고, 그로 인해 허용처짐량이 초과된 것으로 판단된다.

4.4 소성 변형능력

합성보 부재의 연성은 극한하중에 도달한 이후 하중저항 능력(load-carrying capacity)의 급격한 감소 없이 변형이 증가 또는 유지하는 능력을 나타내는 것으로 휨 부재를 설계할 때 고려해야 하는 중요한 요소 중의 하나이다. 극한회전각 대 항복회전각의 비를 연성계수로 정의하여 분석하였다. 항복회전각(θ_y)은 시험시 항복모멘트(M_y)에 상응하는 회전각으로 정의하였고, 극한회전각은 소성모멘트 이후 내력이 80% 저감된 시점의 회전각(θ_u)으로 정의하였다. 각 실험결과를 Table 8에 정리하였다. 모든 실험체의 항복회전각이 매우 유사하게 나타났다. 한편 B40과 B60의 연성계수는 3.5 - 3.7로 B20 대비 2배 이상의 결과를 나타냈다. 각 실험체의 강재(A_s)와 철근 면적(A_{sr})이 동일한 것을 감안할 때, 내부 콘크리트가 충전됨으로써 합성효과가 발휘된 결과로 판단된다. B40 실험체는 콘크리트 블록 깊이가 보 춤의 2/3 수준임에도 전체 합성된 실험체 B60의 연성계수보다 상위한 결과를 나타냈으며, 하중저항 능력이 상당히 우수하다고 판단된다. 즉, 부분 콘크리트가 강판 채널에 충전되어 구속될 경우, 충분한 연성적 거동을 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

$$\mu_\theta = \theta_u / \theta_y \quad (1)$$

Table 8. Ductility coefficient

Specimen	M_y/M_p	θ_y (rad)	θ_u (rad)	μ_θ
B20	0.88	0.0125	0.022	1.760
B40	0.88	0.0119	0.045	3.782
B60	0.94	0.0139	0.049	3.525

5. 결론

건설현장에 대표적인 공법인 RC, PC조의 단점을 극복하는 방안으로 부분 PC화된 커플 거더의 휨 성능 실험을 수행하였다. 실험체 변수는 콘크리트 블록 깊이(1/3, 2/3, full)로

현장에 적용가능성을 확인하기 위해 내력과 거동, 처짐, 연성계수를 분석하여 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 콘크리트 블록 깊이에 따른 휨 성능을 분석할 결과 모든 실험체는 재료시험을 반영한 예상내력보다 상위한 소성모멘트 내력을 갖고 있으며 그 중 2/3 콘크리트 블록으로 채워진 경우, 예상내력 대비 108%로 가장 높게 나타났다.
- (2) 모든 실험체가 예상내력 대비 상위한 결과는 마주보는 강판 채널이 형상을 유지하고 있어 내부 콘크리트가 일부 균열과 박리가 있음에도 충분한 응력재분배가 이루어지면서 휨 성능이 충분히 발휘된 것으로 판단된다.
- (3) 커플 채널의 변형을 분포 및 중립축을 검토한 결과 예상 소성 중립축을 기점으로 압축과 인장변형이 명확히 나타났으며, 상대적으로 상부 압축변형이 크게 나타났다. 위와 같은 결과는 콘크리트가 하부 부분 충전되어 하부 강판에서 발생하는 변형을 완화하면서 좌굴모드에 영향을 준 것으로 판단된다.
- (4) 하중의 단계에서 최대내력시점에 발생한 처짐량은 상당히 급격하게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 단면의 효율성을 처짐량 관계로 분석한 결과, 균열단면2차모멘트로 산정된 예상 처짐량과 유사한 것으로 나타났다.
- (5) 회전각에 의한 연성계수를 평가한 결과, B40 실험체는 콘크리트 블록 깊이가 보 춤의 2/3 수준임에도 실험체 중 가장 높은 3.78 값을 나타냈다. 즉, 부분 PC화된 합성거더는 콘크리트 합성 전의 시공단계에서도 충분한 강성과 내력이 확보되어 안정적인 거동을 기대할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 신진연구지원사업(NRF-2018R1C1B3009109) 연구수행자 조연과 지원으로 이뤄졌습니다.

참고문헌(References)

- [1] Architectural Institute of Korea (2004) *Concrete Filled*

- Tube(CFT) Structures*, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [2] Kim, S.B., Kim, S.S., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., and Kim, D.H. (2012) Study on the Flexible Strength of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.521-534 (in Korean).
- [3] Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2014) Seismic Performance of Built-up Concrete Filled Square Composite Column to Beam Connection with Through Diaphragm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp.431-439 (in Korean).
- [4] Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2014) Seismic Evaluation of Welded-Formed Square Column-Beam Connection for External Diaphragm Stress Path, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.311-322 (in Korean).
- [5] Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Choi, J.G. (2015) Flexural Capacity of the Composite Beam Using Angle as a Shear Connector, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.63-75 (in Korean).
- [6] Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code (KBC 2016) and Commentary*, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [7] KSSC (2016) *KBC2016 Design of Steel Structural*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [8] Salmon, C.G., Johnson, J.E., and Malhas, F.A. (2009) *Steel Structures: Design and Behavior* (5th Ed.), Prentice Hall, USA.
- [9] KSSC (2016) *Design Manual of Composite Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [10] Pam, H.J., Kwan, A.K.H., and Ho, J.C.M. (2001) Post-Peak Behavior and Flexural Ductility of Doubly Reinforced Normal- and High-Strength Concrete Beams, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.12, No.5, pp.459-474.
- [11] Lee, C.H., Ahn, J.K., Kim, D.K., Park, J.-H., and Lee, S.H. (2017) Seismic Performance Evaluation of Concrete-Filled U-Shaped Mega Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.2, pp.111-122 (in Korean).
- [12] Cho, S., and Kim, S. (2016) An Experimental Study on Bending Performance of HyFo Composite Beam, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.16, No.6, pp.9-19 (in Korean).
- [13] Choi, S.-K., and Kim, S.-B. (2008) Structural Performance and Heat Transfer Characteristics of the TSC Composite Beam in Fire, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.24, No.1, pp.27-35 (in Korean).
- [14] Park, K.-S. et al. (2019) *A Strategic Research of Modular Building Research*, KICT 2019-150, Korea Institute of Construction Technology, Korea (in Korean).

요약: 건설현장의 대표적인 공법인 RC, PC조의 단점을 극복하는 방안으로 부분 PC화된 커플 거더 공법을 제안한다. 제안된 공법은 RC조의 거더를 부분 PC화하여 철근 선조립, 거푸집 동바리 생략한다. 그로 인해 현장작업이 최소화되고, 시공성이 향상될 것으로 기대한다. 구조적 성능을 확인하기 위해 실대형의 중앙부 휨 실험을 수행하였다. 실험체 변수는 콘크리트 블록 깊이(1/3, 2/3, full)이다. 그 결과 부분 PC화된 합성거더는 충분한 강성과 내력이 발휘되었으며, 항복 이후 거동이 매우 안정적으로 나타났다. 부분 타설된 콘크리트는 항복 이후에도 커플 채널이 형상을 유지하고 있어 충분한 휨 내력이 발휘되면서 합성효과가 발휘된 것으로 판단된다.

핵심용어: 복합구조, 콘크리트 블록, 휨 성능, 처짐, 연성계수
