

초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널의 휨 거동 평가

Evaluation of Flexural Behavior of Lightweight Precast Panel with Ultra High Performance Concrete

김경철¹ · 고경택^{2*} · 안기홍³ · 손민수⁴ · 김병석⁵

Kyoung-Chul Kim¹ · Kyung-Taek Koh^{2*} · Gi-Hong An³ · Min-Su Son⁴ · Byung-Suk Kim⁵

(Received July 1, 2020 / Revised August 13, 2020 / Accepted August 13, 2020)

In this study, flexural tests of precast concrete panels according to the thickness of cross-sectional and the with or not of reinforcement were carried out in order to develop and assess of a lightweight precast concrete panel using ultra high performance concrete. For the test, four panels were fabricated, and consisted of one normal concrete panel and three ultra high performance concrete panels. As a test result, it was found that the plain precast panel using ultra high performance concrete had a lower flexural performance than the reinforced normal concrete panel, regardless of the cross-sectional size. The flexural performance of the hollow-sectional precast panel applying ultra high performance concrete, is improved by 150% compared to that of the reinforced normal concrete panel. That is, through additional performance verification and optimization of the cross-sectional design of the panel, the ultra high performance concrete precast panel can be made lighter. Also, the practical use of lightweight precast panels with ultra high performance concrete can be available through evaluation on shear, joint connection and anchoring, etc.

키워드 : 초고성능 콘크리트, 경량 고강도 패널, 프리캐스트, 휨 거동

Keywords : Ultra high performance concrete, Lightweight high strength panel, Precast, Flexural behaviors

1. 서론

최근 국내 콘크리트 구조물의 고층화·장경간화·대형화에 따라 다양한 공법과 기술이 개발되어 적용되고 있다. 특히, 건설현장에서 근로시간이 주 52시간과 레미콘 85제 시행으로 공기단축을 위해 프리캐스트 콘크리트 제품에 대한 관심이 높아지고 있다. 프리캐스트 콘크리트 제품은 구조적인 성능과 함께 경량화가 요구된다. 콘크리트의 경량화를 위해 자중을 줄이는 것이 가장 중요하다. 자중을 줄이는 방법으로 경량 콘크리트와 고강도 콘크리트의 적용이 가장 효율적으로 판단된다.

경량 콘크리트는 경량 골재를 사용하는 방법(Choi and Kim

2018; Ji et al. 2019; Aslam et al. 2016; Lo et al. 2007; Tajra et al. 2019)과 기포 콘크리트를 사용하는 방법(Lee et al. 2018; Han and Han 2017; Oren et al. 2020)으로 크게 대별된다. 또한, 경량 콘크리트를 활용하여 부재 또는 구조물에 적용하려는 연구가 다수 진행되고 있다. Kim and Lee(2013)는 경량기포콘크리트(auto-claved lightweight concrete: ALC) 외장재 패널을 활용하여 2층 규모(높이 8,000mm)의 실 구조물과 동일하게 시공한 다음 개구부가 없는 종벽구법에 대해 실물모형시험을 수행한 바 있다. Yoon and Kim(2017)은 거푸집 내 경량골재를 먼저 채운 후 그라우트를 주입하는 프리플레이스트 공법을 적용하여 휨 성능을 검증하였고, Lee et al.(2015)는 경량 콘크리트 패널의 휨 성능을 보완하

* Corresponding author E-mail: ktgo@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 특화기술연구팀 박사후연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 특화기술연구팀 선임연구위원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 복합신소재연구센터 수석연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁴한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 특화기술연구팀 수석연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁵한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 위원장 선임연구위원 (Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

기 위하여 콘크리트 표면에 기존 석고보드 대신 시트지를 부착하여 경량 패널의 적합성을 평가하였다.

고강도 콘크리트는 프리캐스트 부재의 두께를 줄여 자중을 감소시킬 수 있으며, 경량 콘크리트에 비해 내구성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 특히, 최근 120MPa 이상의 압축강도와 5MPa 이상의 직접인장강도를 가진 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)가 개발되면서 다양한 분야에 활용되고 있다(Koh et al. 2018; Kim et al. 2012; Park and Kim 2016). 일반 교량뿐만 아니라 콘크리트 사장교의 상부구조, 건축물에는 현장 타설 쉘 구조에 적용되고 있다(KICT 2020a; KICT 2020b). 초고성능 콘크리트를 프리캐스트 콘크리트 분야에 적용하는 연구로는 주로 교량 거더와 바닥판에 적용하는 연구(Honarvar et al. 2016; Voo et al. 2015; Russel and Graybeal 2013; Perry and Seibert 2013; Kim et al. 2015), 건축 내외장 패널에 적용하는 연구(Park et al. 2017; Miccoli et al. 2015; Mueller et al. 2016; Kang et al. 2016)가 대부분이다. 이와 같이 초고성능 콘크리트를 적용한 프리캐스트에 대한 연구는 주로 내외장재와 교량을 대상으로 하고, 건축 부재와 관련된 연구는 거의 전무한 상태이다. 향후 공기 단축과 미관·내구성 관점에서 건축부재용 초고성능 콘크리트 프리캐스트 제품이 많이 적용될 가능성이 높다.

따라서 본 연구에서는 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 개발의 일환으로 단면 두께와 철근 배근 유무에 따른 패널을 제작하여 힘 재하 실험을 수행하였다. 또한, 비교를 위해 일반 콘크리트의 패널에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다.

2. 휨 성능 평가

2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서 사용된 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널의 주재료는 Table 1에 나타난 설계기준압축강도 120MPa급 초고성능 콘크리트 배합을 적용하였다(KICT 2020a; KICT 2020c). 이 배합에 사용되는 재료로는 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15g/cm³, 비표면적 3,413cm²/g), 실리카퓌름(밀도 2.10g/cm³, 비표면적 240,000cm²/g), 고로슬래그미분말(밀도 2.91g/cm³, 비표면적

4,463cm²/g), 충전재(석회석 미분말, 밀도 2.70g/cm³, 비표면적 6,325cm²/g, CaO 54.07%) 등으로 구성된 프리믹싱 결합재, 모래(밀도 2.62g/cm³, SiO₂ 90% 이상, 평균입경 0.5mm 이하), 폴리카르복산계 고성능 감수제(밀도 1.04g/cm³, 고흥성분 30%), 액상형 수축저감제(글로콜계, 밀도 1.036cm²/g)를 사용하였다. 또한, 직선형상의 강섬유(직경 0.2mm, 길이 19.5mm, 인장강도 2,000MPa 이상)를 사용하였고, 강섬유의 혼입률은 초고성능 콘크리트의 체적에 대해 1.0%를 적용하였다. 일반 콘크리트 패널에 사용된 콘크리트는 호칭강도 24MPa의 레디믹스트 콘크리트를 적용하였다. 콘크리트 타설 시 초고성능 콘크리트 배합의 슬럼프 플로는 723mm, 공기량 3.2%이고, 일반 콘크리트의 슬럼프는 118mm와 공기량 4.2%로 각각 측정되었다.

2.2 프리캐스트 콘크리트 패널

본 연구에서 사용된 실험 패널은 크게 일반 콘크리트 패널과 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널로 각각 구분하였다. 실험 부재의 주요변수는 콘크리트 종류, 단면 크기 그리고 철근 유무로 설정하였고, Table 2에 실험 부재의 특성을 각각 나타내었다. 일반 콘크리트 패널 N24-R1은 콘크리트 벽체 설계기준(KDS 14 20 72 : 2016)과 공동주택 구조설계지침(SHCC 2012) 기준에 따라서 패널 두께와 철근량을 선정하였다. 패널 두께는 200mm이고, 압축과 인장 철근량은 각각 380.0mm²(3-D13)로 동일하게 적용하였으며, 피복두께는 40mm를 사용하였다.

초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널은 크게 속단면과 속빈 단면으로 구분된다. 속단면 패널은 공통적으로 철근을 배근하지 않았고, SC120-R0-1은 N24-R1과 동일한 두께로 제작하였다. 또한, SC120-R0-2 패널의 두께를 140mm로 감소시켜 패널 두께에 대한 영향과 순수 초고성능 콘크리트만의 휨 성능을 평가하고자 하였다.

Fig. 1(d)에서 보는 바와 같이 속빈 단면 패널 SH120-R1은 N24-R1 패널과 동일한 철근량을 사용하였다. 또한, 콘크리트 두께는 102mm로 하였으며, 패널 전체 단면 두께를 200mm로 설정하였다. Fig. 2와 같이 속빈 단면 부재에 610×98mm의 압출법 단열

Table 1. Mix proportion of UHPC

f_{ck} (MPa)	Target slump flow (mm)	W/B	Content per unit volume(kg/m ³)					
			Mixing water	Pre-mixing binder※	Sand	Steel fiber	Super plasticizer	Shrinkage reducing agent
120	700±100	0.23	210	1,180	847	78	17	7

※ Pre-mixing binder: OPC+Silica Fume+Blast Furnace Slag+Filler(materials containing CaCO₃)

Table 2. Details of test panels

Series	Panels	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Cross section (mm)	Rebar details					Cover depth (mm)
					Compression	Tension	Reinforcement ratio		Yield strength (MPa)	
							Compression	Tension		
NC	N24-R1	27	1.8*	680×200	3@D13	3@D13	0.0032	0.0032	426	40
SC	S120-R0-1	132	7.3**	680×200	-	-	-	-	-	-
	S120-R0-2	132	7.3**	680×140	-	-	-	-	-	-
	SH120-R1	132	7.3**	680×200	3@D13	3@D13	0.0035	0.0035	426	25

cf) NC : Normal concrete panel
SC : UHPC lightweight panel

* Splitting tensile
** Direct tensile

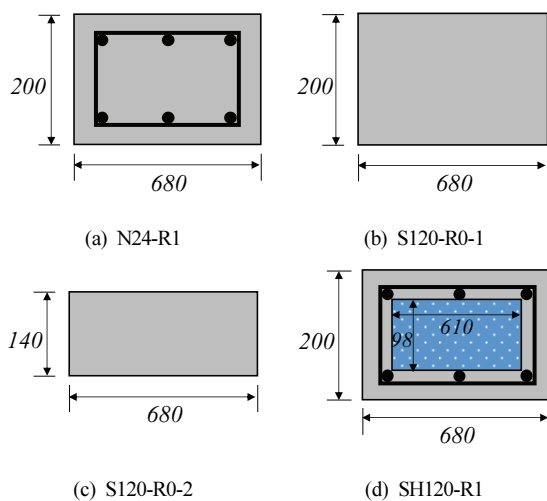


Fig. 1. Dimension of the panel



Fig. 2. Shape of SH120-R1

재를 삽입하였다. 사용된 단열재는 경제적이고 에너지 효율성이 뛰어난 것으로 알려져 있다(You et al. 2011). 또한, KCI(2019)에서 규정하고 있는 피복두께 25mm를 적용하였다. 일반 콘크리트 패널 N24-R1의 자중은 3.33kN이고, 초고성능 콘크리트를 적용한 경량

프리캐스트 패널인 SH120-R1의 자중은 1.99kN으로써, 실제 콘크리트의 사용량을 감소시켜 약 40%의 경량화를 이루었다.

콘크리트 타설 후 온도 20±2℃에서 1일 동안 양생포를 사용하여 습윤양생을 수행하였다. 거푸집 제거 후 일반 콘크리트 패널은 60±10℃, 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널은 90±5℃에서 각각 2일 동안 고온 증기양생을 실시하였다. 또한, 콘크리트 패널 제작 시 일반 콘크리트(NC)와 초고성능 콘크리트(SC)의 압축강도 측정용 원주형 공시체와 할렬인장강도 및 직접인장강도 시편을 각각 3개씩 제작하였다.

Table 2에서 나타낸 것처럼 NC와 SC의 콘크리트 평균압축강도는 27MPa과 132MPa로 측정되었다. NC의 평균 할렬인장강도는 1.8MPa이고, SC의 평균 직접인장강도는 7.3MPa로써, 일반 콘크리트의 취성 거동의 단점을 보완하기 위해 개발된 초고성능 콘크리트의 직접인장강도는 연성 거동으로 유도하기 위한 중요한 변수임을 나타낸다.

2.3 실험 방법

콘크리트 패널의 휨 성능 평가 실험은 용량 3,000kN의 가력장비(UTM)를 활용하여 Fig. 3과 같이 패널 중앙을 기준으로 200mm 구간에 4점 하중재하 방식으로 하중을 재하하였다. 패널의 계측장치는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 콘크리트 변형률 게이지와 변위 측정 장비(LVDT)로 구성하였다.

실험 부재의 상단, 중간 및 하단면에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였고, 하중 가력 지점에 50mm 용량의 변위계를 설치하여 처짐을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

하중 단계별 부재의 중앙에서 측정된 처짐을 이용하여 하중-처



Fig. 3. Test setup

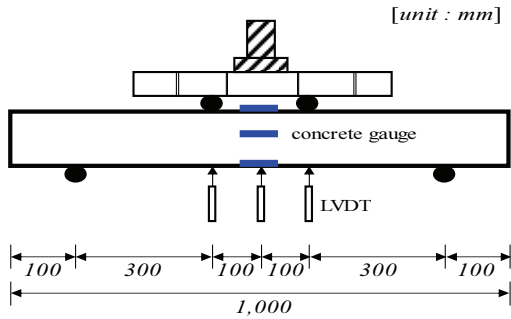


Fig. 4. Instrumentation used for the panel

Table 3. Test results of flexural performance of panels

Member	Flexural test results					
	Initial cracking		Yielding state		Ultimate state	
	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)
N24-R1	78.7	1.2	200.9	3.0	244.1	10.3
S120-R0-1	79.0	1.3	-	-	182.7	1.8
S120-R0-2	78.1	1.4	-	-	143.9	3.1
SH120-R1	78.8	1.2	363.0	3.9	374.5	5.1

짐 관계를 비교하였다. Table 3에 초기균열, 항복 및 극한하중의 측정값을 나타내었다. 초기균열 하중(P_{cr})은 초기 선형구간 종점에서의 하중값과 육안으로 관찰된 초기균열을 이용하여 하중값을 산정하였다. 하중이 지속적으로 증가한 후 비선형 거동을 나타내는 시점이 항복하중(P_y)상태이며, 극한하중(P_u)은 하중-처짐 관계에서 최대하중으로 산정하였다.

Fig. 5에서 철근이 배근되지 않은 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 S120-R0-1과 동일한 조건에 패널 두께를 140mm로 감소시킨 S120-R0-2의 하중-처짐 관계를 분석하였다. 패널 S120-R0-1과 S120-R0-2의 P_{cr} 은 각각 79.0kN과 78.1kN이

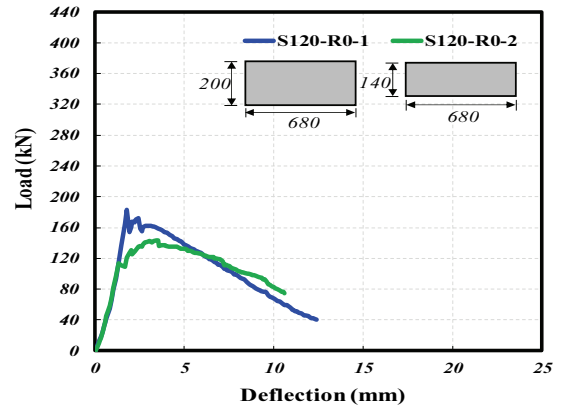


Fig. 5. Load-deflection curve according to depth of UHPC panels

고, Δ_{cr} 은 1.3mm와 1.4mm로 측정되었다. 철근이 배근되지 않은 패널의 특성상 항복하중은 검토하지 않았다. 부재 중앙 단면에서 미세한 초기 균열이 발생하였다. 이후 하중이 점진적으로 증가하여 P_u 는 182.7kN과 143.9kN이고, 이때의 Δ_u 는 1.8mm와 3.1mm로 각각 측정되었다.

패널 두께 200mm인 S120-R0-1과 패널 두께 140mm인 S120-R0-2는 패널 두께가 감소함에 따라 극한하중은 대략 20% 정도 감소하는 것으로 나타내었다. 초기에 발생된 균열이 부재 상연을 따라 수직으로 진전되는 전형적인 휨 균열 패턴을 나타내었다. 극한하중의 차이는 있지만 패널의 두께에 상관없이 철근이 배근되지 않아도 강섬유의 가교 역할로 인하여 하중이 서서히 감소하는 것으로 나타난다. 패널의 최종 파괴 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3에서 나타낸 것처럼 일반 콘크리트 패널 N24-R1과 동일한 두께 단면을 갖는 S120-R0-1 패널의 극한하중은 각각 244.1kN과 182.7kN으로서 대략 25%로 S120-R0-1 패널이 작게 측정되었다. 이는 역학적 성능이 뛰어난 초고성능 콘크리트를 사용하더라도 충분한 휨 성능을 확보하기 위해서는 철근 배근이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 동일한 두께를 갖는 일반 콘크리트 패널 N24-R1과 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 SH120-R1에 대해 하중-처짐 관계를 나타내었다. 패널 N24-R1과 SH120-R1의 P_{cr} 은 각각 78.7kN과 78.8kN이고, 이 때 Δ_{cr} 은 1.2mm로 동일하게 측정되었다.

N24-R1 패널은 하중이 선형으로 증가한 후, 비선형 거동을 나타내는 시점인 항복하중 상태에서 P_y 는 200.9kN이고, Δ_y 는 3.0mm로 측정되었다. 하중은 비선형 형태로 서서히 증가하며 하중 부담 능력은 철근이 지속적으로 저항하는 형태를 나타내는 것으로 판단된다. 극한하중상태에서 P_u 는 244.1kN이고, Δ_u 는

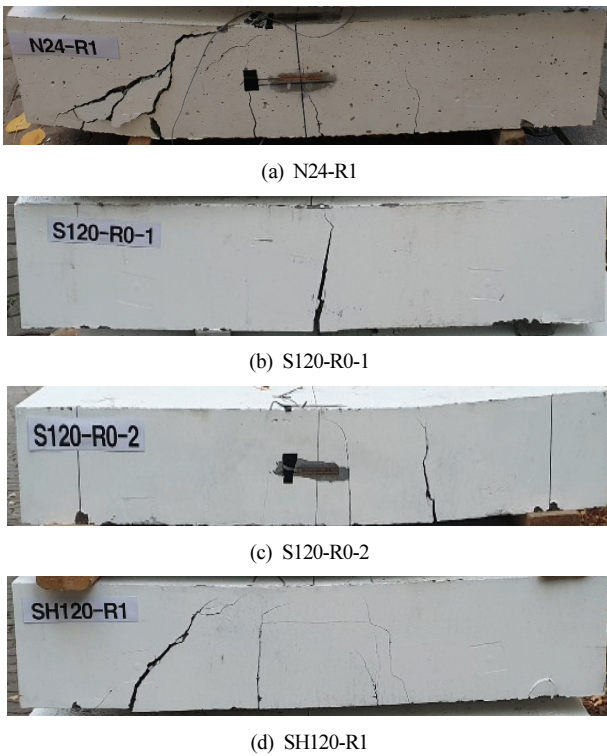


Fig. 6. Failure mode of panels

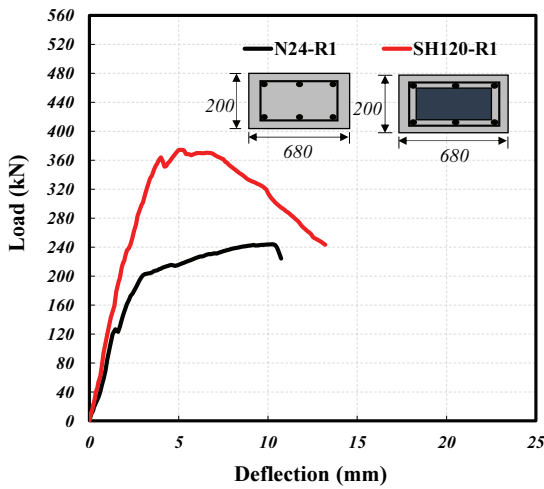


Fig. 7. Comparison of load-deflection curve according to normal concrete panel and UHPC panel

10.3mm로 측정되었고, 극한하중 이후 하중은 더 이상 증가하지 않고 처짐만 증가하는 거동 형태를 나타내었다. 이후, 최종 파괴 형상은 부재 상면인 콘크리트 압축영역에서 콘크리트 압괴에 의한 파괴가 관찰되었다(Fig. 6(a)).

초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 SH120-R1의 극한하중상태에서 P_u 는 374.5kN이고, 이때의 처짐 Δ_u 는 5.1mm로 측정되었다. 이후, 처짐은 증가하지만 주 균열의 균열폭이 확대됨에 따라 하중 부담 능력은 서서히 감소한다. 이후, 강섬유의 가교 역할에 의해 처짐이 증가하더라도 하중은 급격히 저하되지 않고 서서히 감소하는 연성거동의 형태를 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 개발의 일환으로 단면 두께와 철근 배근 유무에 따른 패널을 제작하여 휨 성능을 평가하였다. 또한 일반 콘크리트 패널에 대해서도 동일한 실험을 수행하여 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 순수 초고성능 콘크리트만을 적용한 속찬 단면 패널의 휨 성능을 비교한 결과, 단면 두께 140mm의 패널은 단면 두께 200mm 패널에 비해 약 20%정도 휨 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 단면 두께 200mm를 갖는 철근으로 보강한 일반 콘크리트 패널 대비 순수 초고성능 콘크리트 패널의 휨 성능은 약 25%정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 초고성능 콘크리트를 사용하더라도 철근 배근 및 보강재의 설치가 필요한 것으로 분석되었다.
- 2) 철근 보강 초고성능 콘크리트를 적용한 속빈 단면 패널은 철근 보강 일반 콘크리트 패널에 비해 휨 성능이 150% 향상되고, 40% 정도의 무게가 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 초고성능 콘크리트를 사용한 경량 프리캐스트 패널을 실제 구조물에 적용하기 위해서 철근 보강과 단면 두께에 대해 더욱 상세한 검토를 통해 단면 최적화가 필요하고, 휨 성능 외에 전단과 연결 상세에 대한 추후 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(북한 인프라 현대화 시나리오에 기반한 맞춤형 특화기술 개발 및 건설기준 연계방안 수립) 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Aslam, M., Shafiq, P., Jumaat, M., Lachemi, M. (2016). Benefits of using blended waste coarse lightweight aggregates in structural lightweight aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, **119**, 108–117.
- Choi, H.B., Kim, J.M. (2018). Fundamental properties of lightweight concrete with dry bottom ash and fine aggregate and burned artificial lightweight aggregates as coarse aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 267–274 [in Korean].
- Han, S.Y., Han, M.C. (2017). Properties and mock-up test of lightweight foamed concrete based on blast furnace slag by crack reducing admixture, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **17(6)**, 507–515 [in Korean].
- Honarvar, E., Sritharan, S., Rouse, M., Aaleti, S. (2016). Bridge decks with precast UHPC waffle panels: a field evaluation and design optimization, *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, **21(1)**, 1–13.
- Ji, G.B., Mun, J.H., Yang, K.H. (2019). Evaluation of reproducibility for mechanical properties of lightweight concrete using bottom ash aggregates and foam, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **7(3)**, 202–209 [in Korean].
- Kang, T.H., Kim, S.H., Kim, M.S., Hong, S.G. (2016). Impact resistance of UHPC exterior panels under high velocity impact load, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **28(4)**, 455–462 [in Korean].
- KCI. (2012). *Concrete Structure Design Code and Commentary*, Seoul, Korea: Korea Concrete Institute(KCI) [in Korean].
- KCI. (2016). *Concrete Wall Design Code(KDS 14 20 72 : 2016)*, Seoul, Korea: Korea Concrete Institute(KCI), 4 [in Korean].
- KCI. (2019). *The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete*, Seoul, Korea: Korea Concrete Institute(KCI), 18, 21, 44–49 [in Korean].
- KICT. (2020a). *Development of Manufacturing Technologies, Material Models and Guidelines for SUPER Concrete with 80MPa~180MPa of Compressive Strength*, Final Report, KAIA & MOLIT [in Korean].
- KICT. (2020b). *Development of Low Cost, Long Life and High Quality Structures Applying SUPER Concrete*, Final Report, KAIA & MOLIT [in Korean].
- KICT. (2020c). *The Fabrication and Quality Control Guidelines for Fiber Reinforced SUPER Concrete*, [in Korean].
- Kim, B.S., Kim S., Kim, Y.J., Park, S.Y., Koh, K.T., Joh, C. (2012). “R&D activities and application of ultra high performance concrete to cable-stayed bridges,” *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 865–872.
- Kim, H., Lee, H.D., Ryu, G.S., Joh, C.B., Koh, G.T., Kim, B.S., Keierleber, B. (2015). “Design and fabrication of precast pi-girder using new ultra high performance concrete for accelerated bridges construction,” *The 95th Transportation Research Board Annual Meeting*, 1–3.
- Kim, Y.H., Lee, Y.S. (2013). Performance evaluations of mock-up tests for ALC panel curtain wall in building exterior, *Journal of the Korean Digital Architecture and Interior*, **13(4)**, 25–32 [in Korean].
- Koh, K.T., Ryu, G.S., Ahn, K.H., Park, S.H. (2018). Utilization of recycled materials in ultra high performance concrete, *Magazine of RCR, Korean Recycled Construction Resources Institute*, **13(1)**, 8–13 [in Korean].
- Lee, H.S., Jeon, J.W., Jo, M., Kee, S.H., Han, D. (2018). Influence of rheological properties of lightweight foamed concrete on preventing foam collapse, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **6(4)**, 304–310 [in Korean].
- Lee, S.H., Choi, J.H., Baik, Y.S., Baik, H., Jeong, M.Y. (2015). Development and performance evaluation of exterior insulation precast concrete wall for commercialization, *Journal of the architectural institute of korea planing&Design*, **31(9)**, 129–136 [in Korean].
- Lo, T.Y., Tang, W.G., Cui, H.Z. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment*, **42(8)**, 3025–3029.
- Miccoli, L., Fontana, P., Silva, N., Klinge, A., Cederqvist, C. (2015). Composite UHPC–AAC/CLC facade elements with modified interior plaster for new buildings and refurbishment, *Materials and production technology, Journal of Facade Design and Engineering* **3(1)**, 91–102.
- Mueller, U., Portal, N.W., Chozas, V., Flansbjerg, M., Larazza, I., Silva, N.D., Malaga, K. (2016). Reactive powder concrete for facade elements – a sustainable approach, *Journal of Facade Design and Engineering*, **4(1–2)**, 53–66.
- Oren, O.H., Gholampour, A., Gencel, O., Ozbakkaloglu, T. (2020). Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, **238**, 117774.
- Park, S.Y., Kim, B.S. (2016). State-of-the-art of ultra-high

- performance concrete bridges, Magazine of the Korea Concrete Institute, **28(1)**, 31–35 [in Korean].
- Park, Y.M., Kim, H.W., Park, K.H., Kim, S.J. (2017). Study on construction example of free formed curved facade using external UHPC panels – focused on the remodeling construction of Samsung-dong KEB Hana Bank, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **17(1)**, 64–65 [in Korean].
- Perry, V.H., Seibert, P.J. (2013). Fifteen Years of UHPC Construction Experience in Precast Bridges in North America, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013, 229–238.
- Russel, H., Graybeal, B. (2013). Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, FHWA-HRT-13-060.
- Seoul Housing and Communities Corporation. (2012). Structural Design Guidelines for Apartment Housing, Seoul, Korea, 18 [in Korean].
- Tajra, F., Elrahman, M.A., Lehmann, C., Stephan, D. (2019). Properties of lightweight concrete made with core-shell structured lightweight aggregate, Construction and Building Materials, **205**, 39–51.
- Voo, Y.L., Foster, S.J., Voo, C.C. (2015). Ultra high-performance concrete segmental bridge technology: toward sustainable bridge construction, Journal of Bridges Engineering, ASCE, **20(8)**, 1–12.
- Yang, I.H., Joh, C., Kim, B.S. (2010). Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, Engineering Structures, **32**, 3478–3487.
- Yoo, Y.C., Kim, J.H., Kim, H.R., Choi, K.S. (2011). Flexural behavior of insulated concrete sandwich wall panels reinforced with glass fiber-reinforced polymer shear grids by using different types of insulation, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **27(11)**, 60–70 [in Korean].
- Yoon, J.Y., Kim, J.H. (2017). The development of steel-plate concrete panels with preplaced lightweight aggregates concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **5(1)**, 21–28 [in Korean].

초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널의 휨 거동 평가

본 연구에서는 초고성능 콘크리트를 적용한 경량 프리캐스트 패널 개발의 일환으로 단면 두께와 철근 배근 유무에 따른 패널의 휨 재하 실험을 수행하였다. 일반 콘크리트 패널 1개와 초고성능 콘크리트를 사용한 경량 프리캐스트 패널 3개로서 총 4개의 패널을 제작하였다. 초고성능 콘크리트를 사용하고 철근을 보강하지 않은 패널은 단면 크기와 상관없이 일반 콘크리트 패널에 비해 휨 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 초고성능 콘크리트를 적용한 속빈 단면에 콘크리트 양을 감소시킨 패널은 일반 콘크리트 패널에 비해 휨 성능이 150% 향상되었다. 이는 초고성능 콘크리트를 사용한 프리캐스트 패널의 단면 최적화 설계를 통해 더욱 경량화가 가능할 것으로 판단된다. 초고성능 콘크리트를 사용한 경량 프리캐스트 패널을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 전단 성능과 연결 상세에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.