

## 프리플레리스트 경량골재 콘크리트를 사용한 합성형 구조모듈 제작 및 성능 평가

# The Development of Steel-plate Concrete Panels with Preplaced Lightweight Aggregates Concrete

윤진영<sup>1\*</sup> · 김재홍<sup>1</sup>

Jin Young Yoon<sup>1\*</sup> · Jae Hong Kim<sup>1</sup>

(Received February 16, 2017 / Revised March 15, 2017 / Accepted March 16, 2017)

The steel-plate concrete(SC) is used in a form of module assembly construction in the outer wall of nuclear-power plant and LNG containment. Since the steel-plate concrete modules are generally manufactured from the plant, the weight of SC has significantly effect on the total construction cost in the aspect of shipment. Therefore, the use of lightweight aggregates concrete(LWAC), which fill the inside of SC module can be a solution. However, the amount of used lightweight aggregates(LWA) is limited in the use of current concrete mixing process due to the concrete quality problems and it also determines the allowable minimum density of LWAC. In this research, the preplaced casting method is applied because of increasing the volume fraction of LWA significantly, which results from the producing process of pre-packing the LWA in the formwork and filling the interstitial voids between LWA using cement paste grout. The density and compressive strength of selected preplaced LWAC were 1,600kg/m<sup>3</sup> and 30MPa and it was applied for the mock-up specimens of SC panel. It was used for the 3-point bending test for evaluating its structural performance. The results show that the preplaced LWAC can reduce the density of concrete with the adequate mechanical and structural performance.

**키워드** : 프리플레리스트 콘크리트, 프리팩트 콘크리트, 경량골재, 그라우트, 3점 휨 실험

**Keywords** : Preplaced concrete, Pre-packed concrete, Lightweight aggregates, Grout, 3-point bending test

## 1. 서론

최근 원자력발전소, 액체저장탱크 등 특수 구조물 제작에 있어, 강판 콘크리트(steel-plate concrete, SC)와 같은 합성형 구조를 이용한 모듈화 공법이 고려되고 있다(Kim et al, 2008; Yim et al, 2013). 합성형 구조모듈을 사전에 제작하여, 현장에서는 이를 조립하여 구조물을 시공하는 방식이다. 모듈화 공법 적용 시 구조모듈의 이송 편리성을 향상시키기 위해서는 채움 콘크리트의 경량화가 필요하다. 이 논문에서는 Fig. 1의 강판 콘크리트 패널(SC panel, SCP)과 같이 두 강판 사이 채움부가 좁고, 다량의 스테드 또는 타이바가 배치되는 합성형 구조모듈에 대해 검토하고자 한다. 대상 패널의 콘크리트 채움부 폭은 100~200mm이며, 스테드 또는

타이바의 순간격은 40~80mm이다. 이러한 조건은 슬럼프 플로가 500mm 이상인 고유동 콘크리트를 사용하여도, 채움성에 대한 추가적인 검토가 필요한 시공 위험부로 분류된다.

한편, 경량골재 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 밀도가 낮은 장점을 갖는다(Park et al, 2009; Kim and Jang 2011; Kim et al, 2011). 하지만 경량골재의 흡수율이 높아 콘크리트 배합의 품질 확보에 주의가 필요하다(Sim and Yang 2010; Kanadasan and Razak 2014; Nguyen et al, 2014). 또한, 고유동 경량골재 콘크리트의 경우 유동성을 확보하기 위해 부배합으로 설계되므로 사용할 수 있는 경량골재의 부피분율이 상대적으로 감소한다. 이로 인해 고유동 배합에 대해서는 단위용적질량이 1,900~2,000kg/m<sup>3</sup>정도 까지로 경량화의 한계가 있는 것으로 보고되었다(Kim et al, 2010;

\* Corresponding author E-mail: jaekim@unist.ac.kr

<sup>1</sup>울산과학기술원 도시환경공학부 (School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, 44919, Korea)

Bogas et al. 2012).

이 논문에서는 상기된 SCP 충전을 위한 단위용적질량(bulk density) 1,600kg/m<sup>3</sup>, 압축강도 30MPa 프리플레리스트 경량골재 콘크리트(preplaced lightweight aggregates concrete, preplaced LWAC)를 분석하고자 한다. 프리플레리스트 경량골재 콘크리트는, Fig. 2와 같이 거푸집에 경량골재를 미리 거치한(pre-packing) 후 시멘트 그라우트를 골재 사이 공극에 채워 콘크리트를 타설하는 방법이다(Yoon et al. 2015; Najjar et al. 2014). 이러한 프리플레리스트 시공법은, 경량골재의 프리패킹으로 콘크리트 내 부피분율이 크게 증가하여 경량성이 극대화되고, 동시에 SCP 채움성을 쉽게 확보할 수 있다. 따라서, 이 논문에서는 경량골재 부피비에 따른 콘크리트의 밀도 및 강도 변화를 비교 분석하였다. 또한, 그라



Fig. 1. Steel-plate panel modules



Fig. 2. Producing process for the preplaced LWAC

우트의 배합비를 조절하여 프리플레리스트 경량골재 콘크리트의 역학적 특성 개선을 위한 실험을 수행하였다. 개발한 프리플레리스트 경량골재 콘크리트의 현장적용성을 평가하기 위해 SCP 시편을 제작하고 휨강도 시험을 수행하였다.

## 2. 프리플레리스트 경량골재 콘크리트 제조

### 2.1 경량골재 특성

사용된 경량골재는 총 6종으로, 각 골재의 형상은 Fig. 3과 같고 재료 특성은 Table 1에서 정리하였다. 인공경량골재의 흡수율은 24시간 동안 수중에 침지시킨 후 표면의 수분을 닦아내고 측정하였다. 또한 105℃ 오븐에서 24시간 이상 건조시켜 절건 밀도(oven-dry specific density)와 절건 단위용적질량(oven-dry bulk density)을 측정하였다.

점토를 소성시켜 생산한 인공경량골재 L1은 구형으로 표면이

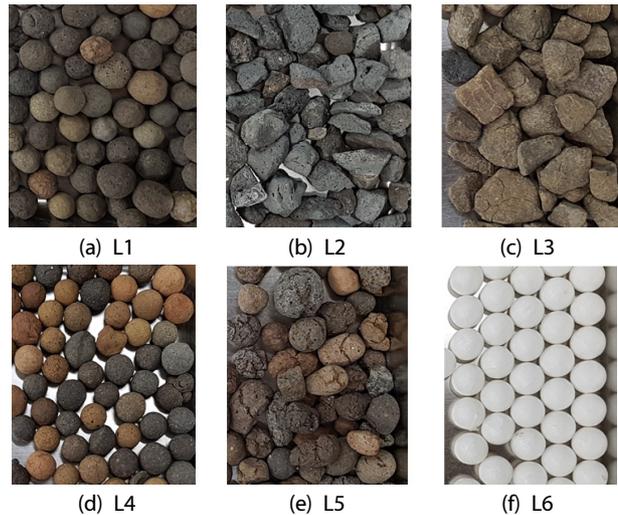


Fig. 3. The shape of lightweight aggregates

Table 1. The physical properties of lightweight aggregates

Label	Raw materials	Water absorption for 24 hours	Oven-dry specific density [kg/m <sup>3</sup> ]	Oven-dry bulk density [kg/m <sup>3</sup> ]	Packing density	Maximum size [mm]	Mean size [mm]
L1	Clay	17.0%	1,178	692	59%	12.4	10.3
L2	Shale	5.0%	1,358	769	57%	19.0	9.7
L3	Slate	9.7%	1,261	774	61%	19.0	10.2
L4	Clay	11.8%	1,330	816	61%	11.0	10.6
L5	Bottom ash	8.4%	1,280	798	62%	16.0	11.0
L6	Polystyrene	0%	35	19	57%	11.0	11.0

거칠고 내부에 많은 공극을 가지고 있다. L1의 24시간 흡수율은 24%로 다른 골재에 비해 상대적으로 높고, 절건 밀도와 절건 단위용적질량은 각각 1,178kg/m<sup>3</sup>과 692kg/m<sup>3</sup>으로 다른 골재에 비해 낮다. L1의 충전밀도(packing density)는 59%였고, 다른 경량골재도 60% 전후로 모두 비슷하였다. L1의 최대크기 및 평균크기는 각각 12.4mm와 10.3mm로 크기가 거의 일정하다. L2골재는 세일을 고온에서 소성시킨 후 파쇄시켜 제작되어 골재의 형상이 불규칙하다. 흡수율은 5%로 다른 골재에 비해 상대적으로 낮고 절건 밀도와 절건 단위용적질량은 각각 1,358kg/m<sup>3</sup>와 769kg/m<sup>3</sup>이다. 최대 골재크기는 19mm이며 평균 입자크기는 9.7mm로 다른 골재에 비해 상대적으로 넓은 입도분포를 가진다. L3는 점판암을 소성시킨 후 파쇄되었으며, L2와 비슷한 형상과 입도분포를 가진다. 흡수율은 9.7%이며, 절건 밀도와 절건 단위용적질량은 1,261kg/m<sup>3</sup>와 774kg/m<sup>3</sup>이다. 인공경량골재 L4는 L1과 같은 원료를 사용하였고 생산지가 같아 비슷한 형상을 가진다. L4의 흡수율 11.8%이며, 절건 밀도 및 절건 단위용적질량은 각각 1,330kg/m<sup>3</sup>, 816kg/m<sup>3</sup>이다. L5는 바텀애시를 원료로 하여 생산된 둥근 형태의 인공경량골재이며 절건 밀도와 절건 단위용적질량이 각각 1,280kg/m<sup>3</sup>와 798kg/m<sup>3</sup>이다. L6 골재의 경우 폴리스티렌 합성물로 밀도가 매우 낮으며, 크기가 11mm로 거의 일정하다.

## 2.2 그라우트 배합

프리플레이스트 경량골재 콘크리트 제작시 프리패킹되는 골재의 형상, 크기 입도분포 등에 따라 그라우트의 주입성능이 달라지므로, 사용된 골재의 입도에 따라 적합한 그라우트를 배합하는 것이 중요하다. 연구에 사용된 경량골재의 입도는 10mm 내외로 프리패킹 시 골재 간 간격이 좁으므로, 시멘트 페이스트 기반의 그라우트를 사용하였다. 또한 시멘트 그라우트의 주입성능 확보하기 위해 폴리카르본산계 고성능 감수제 사용량을 높여 유동성을 증진시켰다. 이때 사용된 시멘트는 국내 S사에서 제조된 1종 포틀랜드

시멘트로 비중과 분말도는 각각 3.15g/cm<sup>3</sup>와 335m<sup>2</sup>/kg였다. 시멘트의 화학조성 분석을 위해 XRF 분광법(X-ray fluorescence)을 사용해 분석하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 3은 시멘트 그라우트 1m<sup>3</sup> 제조 기준으로 작성한 배합비이다. 그라우트의 물-시멘트 비(W/C)는 0.20~0.42로 다양하며, 고성능 감수제의 양은 플로우콘 시험(KS F 4044)으로 측정된 유동성을 기준으로 조절하였다.

플로우콘 시험은 1,725±5mL의 그라우트가 플로우콘에서 빠져나가는 유하시간(flow time)을 측정하는 것으로 그라우트의 유동성을 평가하였다(Schwartzentruber et al. 2006). 또한, 그라우트를 800±10 mL의 실린더에 거치시킨 후 상부에 모이는 블리딩량을 측정하였고, 그 결과는 Table 4와 같다. 높은 물-시멘트 비를 갖는 G42의 유하시간은 14초로, 물의 유하시간인 8초와 큰 차이가 없었다. 그러나 G42는 상대적으로 많은 양의 배합수를 포함하고 있어 5시간 후 최종 블리딩량이 5.1%로, 상대적으로 높다. 그라우트의 물-시멘트 비가 낮아질수록 유하시간을 줄이기 위해 필요한 고성능 감수제의 양을 증가시켰다. 재료분리가 발생하지 않는 범위까지 최대한 유동성을 증가시켰음에도 불구하고, 그라우트별 유

Table 2. The oxide composition of portland cement

Composite	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
Cement	65.5%	17.7%	4.5%	3.4%	3.4%	3.3%	1.1%

Table 3. Mix proportions of grout

Grout mixtures	Grout mix proportion[kg/m <sup>3</sup> ]			
	W/C	Water	Cement	Superplasticizer
G42	0.42	569	1,354	4.1
G35	0.35	524	1,496	6.6
G30	0.30	485	1,617	11.5
G25	0.25	440	1,759	17.8
G20	0.20	386	1,929	31.3

Table 4. Fresh and hardened properties of grout

Grout	Bleeding test					Flow time[s]	Compressive strength [MPa]		Density[kg/m <sup>3</sup> ]
	0.5h	1h	2h	3h	5h		7day	28day	
							G42	1.0%	
G35	0.9%	0.9%	1.2%	1.9%	1.9%	24	56.0	76.3	2,070
G30	0.4%	1.0%	1.3%	1.3%	1.3%	40	70.5	84.1	2,130
G25	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	56	81.7	100.4	2,225
G20	0%	0%	0%	0%	0%	107	90.2	111.3	2,320

하시간은 물-시멘트비가 낮아질수록 길어졌다. 그에 따른 블리딩량은 점진적으로 감소하였다. 또한, 그라우트의 7일, 28일 압축강도는 50mm 입방형체 시편을 제작하여 측정하였고, 그 결과를 Table 4에 함께 정리하였다. G42의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 48.5MPa, 2,000kg/m<sup>3</sup>이며, 그라우트의 물-시멘트 비가 낮아질수록 압축강도와 밀도가 증가하여 G20의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 111.3MPa, 2,320kg/m<sup>3</sup>이다.

프리플레이트 경량골재 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해, 지름 100mm, 높이 200mm의 원주 공시체를 제작 하였다. 공시체 몰드에 인공경량골재를 프리패킹시킨 후, 그라우트를 공시체 상부에 주입하여(top-down) 시편을 제작하였다. 이때 바닥에서부터 그라우트가 채워지며 상대적으로 밀도가 낮은 골재가 떠오르게 되는데, 몰드의 윗부분에 철망을 설치하여 이러한 부립현상을 방지하였다. 모든 공시체는 온도와 상대습도가 각각 23℃와 95%로 유지되는 항온항습기에서 양생시켰다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 경량골재 부피비에 따른 콘크리트 밀도 변화

기존의 배합법과 달리 프리플레이트 콘크리트 배합은 골재를 프리패킹함으로써 콘크리트 골재의 부피분율을 극대화시킨다 (Malley and Abdelgader 2010). 이와 달리 일반적인 콘크리트 믹싱 방식은 경량골재 콘크리트를 제조 시 경량골재의 사용량에 한계가 있다. ACI 237에 따르면, 고유동 콘크리트는 골재분리를 방지하기 위해 굵은 골재의 사용량이 28~32% 정도로 제한된다. 따라서 경량골재 콘크리트 배합에 따른 경량골재의 부피 변화를 분석하기 위해 경량골재 콘크리트를 일반 슬럼프 배합, 고유동 배합, 프리플레이트 배합으로 제조하였다. 이때 경량골재 부피분율 변

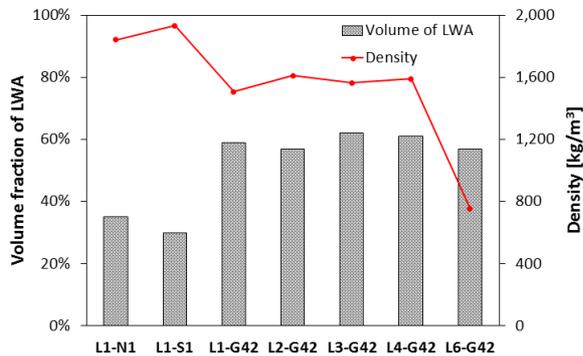


Fig. 4. The density change of LWAC with regard to the volume fraction and properties of LWA

화에 따른 밀도 변화는 Fig. 4에서 비교·분석하였다. 슬럼프 180mm 비교 시편 L1-N1은 물-시멘트비 0.42로, 시멘트대비 일반 잔골재, 경량 굵은골재 비율은 1:0.63:0.63이다. 슬럼프 플로 625mm인 고유동 배합 비교 시편 L1-S1의 물-시멘트 비는 0.35이며 시멘트 대비 일반 잔골재, 경량 굵은골재의 비율은 1:0.41:0.41이다.

슬럼프 배합 L1-N1과 고유동 배합 L1-S1 경량골재의 부피분율은 각각 35%와 30%로 상대적으로 경량골재의 사용량이 높은 L1-N1의 밀도가 1,840kg/m<sup>3</sup>으로 L1-S1의 1,930kg/m<sup>3</sup>에 비해 낮다. 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 경우, 모든 시편에서 경량골재의 부피분율이 약 60%에 이른다. 따라서 두 비교 시편과 동일한 경량골재를 사용한 L1-G42의 경우 밀도가 1,507kg/m<sup>3</sup>로 약 20%이상 감소하였다. 또한 제작된 프리플레이트 경량 콘크리트의 부피분율이 약 60%로 비슷하므로, 동일한 배합의 그라우트를 사용했을 때 경량골재의 재료적 특성에 따라 콘크리트 밀도가 결정된다. 특히, 폴리스티렌 L6의 경우 단위용적질량이 35kg/m<sup>3</sup> 매우 낮고 이를 사용한 L6-G42의 밀도는 755kg/m<sup>3</sup>로 물에 뜨는 콘크리트 시편 제작이 가능하다.

#### 3.2 프리플레이트 콘크리트 압축강도

그라우트의 물-시멘트비가 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 인공 경량골재 L4를 사용했을 때, 시멘트 그라우트의 물-시멘트 비율 0.20~0.42로 조절 시(G20~G42 사용) 측정된 원주 공시체의 7일, 28일 압축강도이다. L4-G42와 L4-G20의 재령 28일 압축강도는

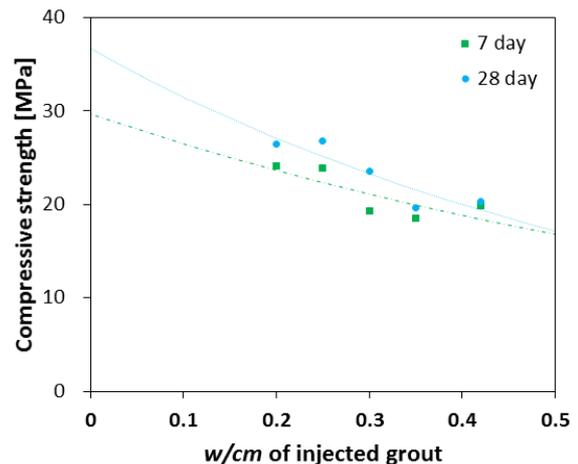


Fig. 5. The effect of grout W/C on the compressive strength development

각각 20.3 MPa와 26.4 MPa으로, 그라우트의 물-시멘트비가 감소함에 따라 압축강도가 증가하였다. 그러나 그라우트의 물-시멘트비에 따른 압축강도 증가율(Table 4에서 G42와 G20의 압축강도는 각각 48.5 MPa과 111.3 MPa)에 비해 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 압축강도 증진 효과는 다소 미미하였다. 이는 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 파괴가 프리패킹된 경량골재뼈대(pre-packed lightweight aggregates skeleton)에서부터 발생하므로, 주변 페이스트 매트릭스의 강도 증가에 따른 영향이 크지 않기 때문이다(Najjar et al., 2014). 이러한 효과는 강도발현 양상에서도 확인된다. 보통 콘크리트에서는 재령 7일에서 약 70% 정도의 압축강도가 발현되는 데 반해, 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 7일 압축강도는 28일 압축강도의 약 90%까지 측정된다. 시멘트 그라우트의 강도발현이 직접적으로 콘크리트의 강도 증진에 영향을 주지는 못하지만, 강도발현에 비해 상대적으로 빠른 그라우트의 탄성계수 증가가 콘크리트의 강도발현을 더욱 빠르게 한 것으로 추정된다. 그라우트 탄성계수의 콘크리트 강도발현에 대한

영향은 추후 미세역학적 모델링을 통해 분석하고자 한다.

프리플레이트 경량골재 콘크리트의 강도는 밀도와 마찬가지로 경량골재의 재료특성에 따라 크게 변하게 된다. Fig. 6(a)은 동일한 종류의 그라우트 G42(W/C=0.42)를 사용했을 때 경량골재 종류 L1, L2, L3, L4, L6에 압축강도의 비교 그래프이다. 모든 프리플레이트 콘크리트 내 경량골재의 부피분율은 57%~62%로 비슷하지만, 경량골재의 밀도, 흡수율, 형상, 입도, 원료 등의 차이가 있다. L1-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 20.3MPa, 1,507kg/m<sup>3</sup>이며, 이는 KCI 2종 경량 콘크리트 기준을 만족시키는 수준이다. L2-G42와 L3-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 33.0MPa, 33.0MPa과 1,610kg/m<sup>3</sup>, 1,560kg/m<sup>3</sup>으로 비슷한 결과를 보였다. 이러한 결과는 프리패킹된 L2, L3 골재의 밀도, 충전 밀도, 평균크기 등이 유사하기 때문이다. L1골재와 유사한 형상과 역학적 특성을 지닌 L4골재를 사용해 제작한 L4-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도가 20.3MPa, 1,590kg/m<sup>3</sup>으로 L1-G42와 비슷한 결과를 보였다. L6-G42의 경우, 앞서 설명한 바와 같이 밀도가 매우 낮아 물에 뜨는 콘크리트로 활용할 수 있지만, 압축강도가 매우 낮아 실제 현장 및 제품개발에 활용하는데 어려움이 있다. 동일한 종류 G30그라우트에 대한 L3~L5 경량골재를 사용한 프리플레이트 콘크리트의 압축강도 및 밀도 변화는 Fig. 6(b)와 같다. G30 그라우트를 사용한 프리플레이트 경량 콘크리트 또한 사용된 경량골재의 종류에 따라 압축강도가 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험을 통해 밀도 1,600kg/m<sup>3</sup>, 압축강도 30MPa급 프리플레이트 경량골재 콘크리트를 개발 가능성을 확인하였다.

### 3.3 프리플레이트 콘크리트 내 골재 단면 분석

프리플레이트 경량 콘크리트 제조 시 건조상태의 경량골재를 사용해 실험을 수행하였다. 따라서 높은 흡수율을 가진 경량골재에 의해 골재 내부로 물과 함께 시멘트 입자가 침투할 수 있다. 따라서 광학주사현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 경량골재-그라우트 매트릭스 간 결합을 관찰하였다.

경량골재 L4는 Fig. 7(a)와 같이 다공질 구조로 골재의 표면과 내부에 많은 공극을 가지고 있다. 제작한 프리플레이트 경량 콘크리트 L4-G20의 단면 SEM 분석결과는 Fig. 7(b)와 같다. 경량골재 내부 및 표면에 그라우트가 침투한 것을 확인할 수 있으며, 이는 높은 흡수율을 가지는 L4에 의해 그라우트의 배합수와 시멘트 입자가 함께 흡수된 것이다. 골재에 침투한 그라우트 중 표면에 존재하는 수화물은 골재를 감싸는 페이스트 매트릭스와 결합된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결합은 경량골재 표면에 전반적으로 분포

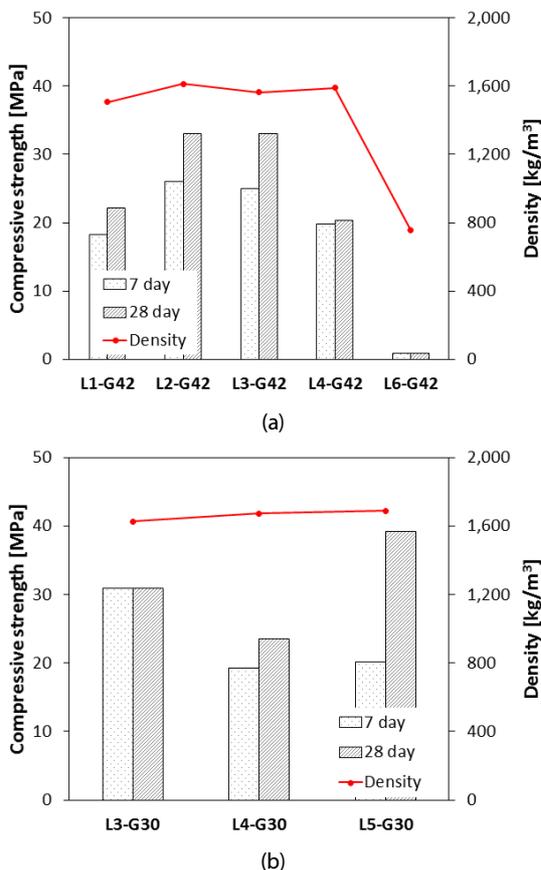


Fig. 6. The effect of LWA types on the density and compressive strength development of preplaced LWAC

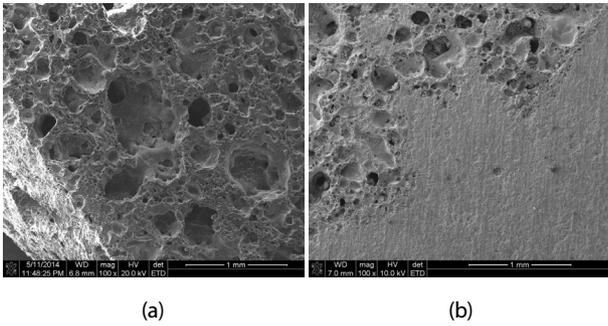


Fig. 7. The microscopic images of the cross-section of (a) L4 and (b) L4-G20

하고 있었으며, 경량골재와 그라우트 매트릭스가 맞물리게 되어 재료 간 결합력이 증가되는 효과가 있다(Lo and Cui, 2004). 이러한 이유로 경량골재-그라우트 매트릭스 간 결합력에 따라 프리플레이스트 경량 콘크리트의 역학적 특성이 변화하게 된다.

### 3.4 SCP 제작 및 휨강도 시험

앞선 실험을 통해 밀도 1,600kg/m<sup>3</sup>, 압축강도 30MPa 급 프리플레이스트 경량 콘크리트 개발 가능성을 확인하였고, L3-G30을 선정하여 SCP 시편을 제작해 3점 휨 실험을 수행하였다. 합성형 구조모듈 용 강판 콘크리트 패널 mock-up을 제작한 후 내부를 L3-G30 프리플레이스트 경량 콘크리트로 채웠다. 강판 패널의 크기는 Table 5와 같다. 6mm 두께의 강판을 사용한 A패널의 크기는 110×2,000×400mm이며 내부 스테드 간격은 90mm이다. 8mm 두께의 강판을 사용한 B패널의 크기는 200×2,000×400mm이며, 내부 스테드 간격은 110mm이다. 제작된 경량 패널에 대해 Fig. 8(a) 같이 3점 휨 실험을 수행하여 휨성능을 평가하였다. 또한 일반골재를 사용한 고유동 콘크리트(self-consolidating concrete, SCC)로 내부를 채운 패널에 대한 3점휨 실험을 수행하여 패널의 내부를 채운 콘크리트에 따른 휨성능 변화를 비교·분석하였다. 이때 고유동 콘크리트의 물-시멘트 비는 0.34로 밀도와 재령 28일 압축강도는 각각 2,300kg/m<sup>3</sup>, 63.0MPa이다. 고유동 콘크리트를 주입한 패널은 동일한 A패널을 사용한 시편과 B패널과 크기가 같지만 내부 스테드 간격이 100mm로 더 촘촘한 C 패널을 사용하였다.

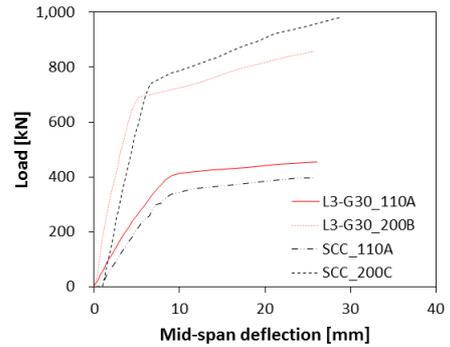
제작된 강판 콘크리트 패널 시편에 대한 3점 휨 실험 결과는 Fig. 8(b)와 같다. L3-G30과 고유동 콘크리트의 압축강도가 33.0MPa과 63.0MPa로 2배 가까이 차이 있지만, 강판 내부를 채운 콘크리트의 압축강도에 따른 강판 콘크리트 시편의 휨성능의 변화가 거의 없었다. 이때 L3-G30은 고유동 콘크리트에 비해 밀도가 30%이상 가벼

Table 5. The dimension of steel-plate panel for the 3-point bending test

Concrete filled SCP		Dimension of steel plate		
		Panel thickness [mm]	Size[mm]	Stud interval [mm]
L3-G30_110A	Preplaced	6	110×2,000×400	90
L3-G30_200B	LWAC	8	200×2,000×400	110
SCC_110A	SCC	6	110×2,000×400	90
SCC_200C		8	200×2,000×400	100



(a)



(b)

Fig. 8. (a) the 3-point bending test and (b) results for preplaced LWAC and SCC

워 실제 시편 제작 시 이송 편리성이 크게 향상될 수 있다. 제작된 패널 시편 중 휨강도가 우수한 L3-G30\_200B와 SCC\_200C는 상대적으로 두꺼운 강판을 사용했으며 시편의 두께도 상대적으로 크다. 시편의 두께가 커질 경우 내부를 채운 콘크리트의 양이 증가하여 콘크리트와 스테드 간 결합력이 향상되어 휨성능이 우수해진 것으로 평가된다. 또한 L3-G30\_200B에 비해 상대적으로 스테드가 많이 설치된 SCC\_200C는 우수한 탄성거동을 보였다.

## 4. 결론

강판 콘크리트 패널과 같은 합성형 구조모듈의 이송 편리성을

향상시키기 위해 내부를 채울 경량 콘크리트 개발에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 기존의 고유동 경량 콘크리트와 슬럼프 기반의 경량 콘크리트 배합에 비해 프리플레이스트 경량 콘크리트 배합의 경량골재 부피비가 상대적으로 높아 밀도가 낮다. 다양한 종류의 경량골재 및 그라우트 배합비를 개발해 프리플레이스트 경량 콘크리트의 밀도와 압축강도 변화를 분석하여 SCP 모듈에 적합한 최적배합비를 도출하였다.

실제 SCP 모듈 제작을 위해 밀도  $1,600\text{kg/m}^3$ , 압축강도 30MPa급 프리플레이스트 경량 콘크리트와 고유동 콘크리트를 사용해 SCP 내부를 충전한 후 제작된 시편에 대해 3점 휨 실험을 수행하였다. 두 시편의 휨 저항 성능에 큰 차이가 없었지만, 프리플레이스트 경량 콘크리트를 사용해 SCP의 내부를 채운 시편의 밀도를 30%이상 낮출수 있었다. 이러한 실험을 통해 우수한 성능의 프리플레이스트 경량 콘크리트를 사용해 내부를 채운 SCP의 개발이 가능한 것을 확인하였고, 추가적인 연구를 통해 SCP 모듈의 실제 현장 적용이 가능할 것으로 기대된다.

## References

- Bogas, J.A., Gomes, A., Gomes, M.G. (2012). Estimation of water absorbed by expanding clay aggregates during structural lightweight concrete production, *Materials and Structures*, **45**, 1565–1576.
- Kanadasan, J., Razak, H.A. (2014). Mix design for self-compacting palm oil clinker concrete based on particle packing, *Materials and Design*, **56**, 9–19.
- Kim, J.H., Lee, H.W., Lee, J.B., Kwak, S.S., Noh, S.H. (2008). Development of SC Structure and Modularization Technique for Nuclear Power Plant, Technical Report, S05NJ08–C2008–00, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd [in Korean].
- Kim, M. S., Jang, H. S., Kim, C. H., Baek, D. I. (2011). A study of the basic properties of lightweight aggregate concrete for offshore structures application, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, **25(1)**, 73–79 [In Korean].
- Kim, Y.J., Choi, Y.W., Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, **24**, 11–16.
- Kim, Y.T., Jang C.S. (2011). Production Technology, Property and Application of Artificial Lightweight Aggregates, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **23(5)**, 14–17 [In Korean].
- Lo, T.Y., Cui, H.Z. (2004). Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete, *Materials Letter*, **58**, 916–919.
- Malley, J. O., Abdelgader, H. (2010). Investigation into viability of using two-stage(pre-placed aggregate) concrete in Irish setting, *Front of Architecture and Civil Engineering in China*, **4**, 127–132.
- Najjar, M.F., Soliman, A.M., Nehdi, M.L. (2014). Critical overview of two-stage concrete: properties and applications, *Construction and Building Materials*, **62**, 47–58.
- Nguyen, L.H., Beaucour, A.L., Ortolà, S., Noumowe, A. (2014). Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, *Construction and Building Materials*, **51**, 121–132.
- Park, D.O., Sa, S.H., Kim, S.H., Ji, S.W., Choi, S.K., Seo, C.H. (2009). A study on the properties of lightweight aggregate concrete according to the pore structure and water absorption characteristics of lightweight aggregate, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **25(3)**, 85–92 [In Korean].
- Schwartzentruber, L.D., Le Roy, R., Cordin, J. (2006). Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self compacting concrete(SCC), *Cement and Concrete Research*, **36**, 1203–1213.
- Sim, J.I., Yang, K.H. (2010). Air content, workability and bleeding characteristics of fresh lightweight aggregate concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **22(4)**, 559–566 [In Korean].
- Yim, S.J., Lee, B.S., Bang, C.J. (2013). Experimental study of mock-up for modular of high-strength reinforcing bars to the nuclear power plant structures, *Journal of Architectural Institute of Korea*, **33(2)**, 615–616 [In Korean].
- Yoon, J.Y., Kim, J.H., Hwang, Y.Y., Shin, D.K. (2015). Lightweight concrete produced using a two-stage casting process, *Materials*, **8**, 1384–1397.

### 프리플레이트 경량 콘크리트를 사용한 합성형 구조모듈 제작 및 성능 평가

최근 원자력 발전소 및 LNG 탱크의 외벽을 제작하는데 있어 강판 콘크리트(steel-plate concrete, SC)와 같은 합성형 구조모듈(steel-plate concrete panel, SCP)의 사용이 증가하고 있다. SCP는 공장에서 생산 한 후 이송되므로, 이송에 드는 비용을 줄이기 위해 경량화가 필수적이다. 이때 경량골재 콘크리트를 사용해 SCP의 내부를 채워 밀도를 낮출 수 있지만, 현재 콘크리트 배합법은 콘크리트의 품질을 확보하기 위해 경량골재의 사용량이 제한되어 경량화에 한계가 있다. 본 연구에서 제안하는 프리플레이트 경량 콘크리트 배합법은 거푸집 내 경량골재를 먼저 채운 후(pre-packing) 그라우트를 주입하는 공법으로, 콘크리트의 품질확보 및 밀도를 낮출 수 있다. 다양한 종류의 경량골재 및 그라우트 배합을 사용해 실험을 수행하였고, 밀도  $1,600\text{kg/m}^3$ , 압축강도  $30\text{MPa}$ 급 프리플레이트 경량 콘크리트 배합비를 선정하여 SCP 시편을 제작하였다. 제작된 SCP 시편의 구조성능 시험을 위해 3점 휨 실험을 수행하였다. 고유동 콘크리트를 사용해 SCP의 내부를 채운 시편과 비교해 프리플레이트 경량 콘크리트를 사용해 제작된 SCP 시편은 비슷한 수준의 휨 저항 성능을 보였으며 밀도가 30% 이상 낮았다. 따라서 프리플레이트 경량 콘크리트를 사용해한 SCP 제작 시, 기존의 SCP와 비슷한 수준의 구조성능을 가지며 밀도를 낮춰 이송 비용을 감축할 수 있을 것으로 기대된다.