

프리플레리스트 시공법을 이용한 경량 콘크리트 제조

Preplaced Lightweight Aggregates Concrete

* 이 기사는 한국건설순환자원학회 논문집에 게재된 학술논문을 발췌·요약하여 작성되었습니다.



윤진영 Jin Young Yoon
UNIST 도시환경공학부 박사과정
E-mail : jinyoung4408@unist.ac.kr



김재홍 Jae Hong Kim
UNIST 도시환경공학부 부교수
E-mail : jaekim@unist.ac.kr



김용혁 Yong-Hyok Kim
한국남동발전(주) 영흥발전본부
석탄회재활용연구센터
E-mail : yhkim@koenergy.kr

1. 서론

경량골재 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 밀도가 낮은 장점을 갖지만, 경량골재의 흡수율이 높아 콘크리트 배합의 품질확보에 주의가 필요하다[1]. 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 ~ 2,000 kg/m³ 정도까지로 경량화의 한계가 있는 것으로 보고되었다[2].

이 기사에서는 얇은 강판 콘크리트(steel-plate concrete) 패널과 같이, 진동다짐이 현실적으로 어려워 타설 시 고유동 배합이 필요한 부재의 경량화를 목적으로 프리플레리스트 경량골재 콘크리트(Preplaced Lightweight Aggregates Concrete, Preplaced LWAC)를 소개하고자 한다[3, 4]. 프리플레리스트 경량골재 콘크리트는, <그림 1>과 같이 거푸집에 경량골재를 미리 거치한(Pre-packing) 후 시멘트 그라우트를 골재 사이 공간에 채워 콘크리트를 타설하는 방법이다. 이러한 프리플레리스트 시공법은, 경량골재의 프리패킹으로 콘크리트 내부 부피분율이 크게 증가하여 경량성이 극대화되고, 거푸집 내부 채움성을 비교적 쉽게 확보할 수 있다.

밀도 1,600 kg/m³, 압축강도 30 MPa 프리플레리스트 경량골재 콘크리트를 목표로 프리플레리스트 경량골재 콘크리트를 시험 제조하였다. 다양한 경량골재 샘플을 이용하여, 경량골재 부피비에 따른 콘크리트의 밀도 및 강도 변화를 비교 분석하였다. 또한, 그라우트의 배

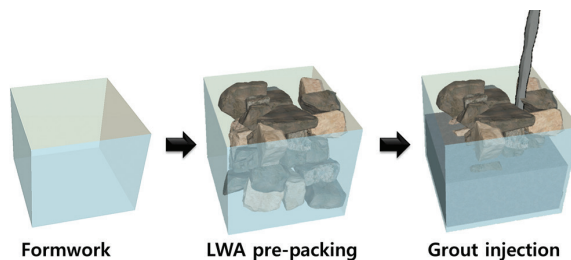


그림 1. 프리플레리스트 콘크리트 제작법

합비를 조절하여 프리플레이스트 경량골재 콘크리트의 역학적 특성 개선을 위한 실험을 수행하였다.

2. 경량골재 특성

시중에 판매 중인 경량골재 6종의 형상을 <그림 2>, 흡수율 및 밀도 등의 재료특성을 [표 1]에 나타내었다. 평균 크기 10 mm 내외의 경량골재 중 L2와 L3는 비정형의 입자이며, 나머지 골재들은 모두 구형 입자이다. 골재의 재료특성으로



그림 2. 경량골재 형상

[표 1] 경량골재 특성

구분	원료	24시간 흡수율	절건 밀도 [kg/m ³]	절건 단위용적 질량[kg/m ³]	충전밀도	최대크기 [mm]	평균크기 [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

[표 2] 포틀랜드 시멘트의 화학조성

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

는 폴리스티렌(Polystyrene)을 원료로한 L6골재를 제외한 경량골재들의 흡수율은 5 ~ 17 %로 다양했으나, 밀도, 충전 밀도와 크기는 유사한 수준을 보였다. 절건 밀도와 절건 단위 용적질량의 경우 각각 1,150 ~ 1,350 kg/m³, 700 ~ 800 kg/m³으로 유사한 수준을 보였다. 이때 각 경량골재의 충전밀도(Packing density)는 약 60 %로 거의 차이가 없었다. L6의 경우 폴리스티렌 볼의 한 종류로 물을 흡수하지 않고, 밀도가 매우 가벼운 것이 특징이다

3. 그라우트 배합

프리플레이스트 경량골재 콘크리트 제작시 프리패킹되는 골재의 형상, 크기 입도분포 등에 따라 그라우트의 주입성이 달라지므로, 사용된 골재의 입도에 따라 적합한 그라우트를 배합하는 것이 중요하다. 경량골재의 입도는 10 mm 내외로 프리패킹 시 골재 간 간격이 좁으므로, 시멘트 페이스트 기반의 그라우트를 사용하였다. 또한 시멘트 그라우트의 주입 성능 확보하기 위해 폴리카르본산계 고성능 감수제의 사용량을 높여 유동성을 증진시켰다. 이때 사용된 시멘트는 국내 S사에서 제조된 1종 포틀랜드 시멘트로 비중과 분말도는 각각 3.15g/cm³와 335m²/kg였다. 시멘트의 화학조성 분석을 위해 XRF 분광법(X-ray fluorescence)을 사용해 분석하였으며 그 결과는 [표 2]와 같다.

[표 3]은 시멘트 그라우트 1m³ 제조 기준으로 작성한 그라우트 배합비이다. 그라우트의 물-시멘트 비(Water/Cement, W/C)는 0.20~0.42로 다양하며, 물-시멘트 비에 따라 고성능 감수제 양을 조절하여 유동성을 확보하였다. 그라우트 배합에 대한 유동성 및 재료분리 위험도를 평가하기 위해 블리딩 시험과 플로우콘 시험(KSF 4044)을 수행하였고 [표 4]에 나타내었다. 높은 물-시멘트 비의 그라우트인 G42의 경우 플로우콘 유하시간이 14초로 물의 유하시간인 8초와 큰 차이가 없었다. 그러나 물-시멘트 비가 높은 그라우트의 경우 상대적으로 많은 양의 배합수를 포함하고 있어 5시간 후 최종 블리딩량이 5.1%로 상대적으로 높았다. 그라우트의 물-시멘트 비가 낮아질수록 유동성을 증진시키기 위해 고성능 감수제의 양을 증가시켰다. 재료분리가 발생하지 않는 범위까지 최대한 유동성을 증가시켰음에도 불구하고, 그라우트별 유하시간은 물-시멘트비가 낮아질수록 길어졌다. 그에 따른 블리딩량은 점진적으로 감소하였다. 또한, 그라우트의 7일, 28일 압축강도는 50mm 입방형체 시편을 제작하여 측정하였고, 그 결과를 [표 4]에 함께 정리하였다. 이때 그라우트의 물-시멘트 비가 낮아질수록 압축강도와 밀도가 증가하는 것이 특징이다.

[표 3] 그라우트 배합비

그라우트	그라우트 배합비 [kg/m ³]			
	W/C	물	시멘트	고성능 감수제
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

[표 4] 굳기 전·후 그라우트 재료 특성

그라우트	블리딩 시험					유하 시간 [s]	압축강도 [MPa]		밀도 [kg/m ³]
	0.5 시간	1.0 시간	2.0 시간	3.0 시간	5 시간		재령 7일	재령 28일	
G42	1.0%	1.4%	4.3%	5.1%	5.1%	14	38.6	48.5	2,000
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

4. 성능평가

4.1 샘플 제작

프리플레이스트 경량골재 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해, 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원주 공시체를 제작하였다. 공시체 몰드에 경량골재를 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 °C와 95 %로 조절하여 항온항습기에 양생시켰다.

4.2 밀도

기존의 배합법과 달리 프리플레이스트 콘크리트 배합은 골재를 프리패킹함으로써 콘크리트 골재의 부피분율을 극대화시킨다. 이와 달리 일반적인 콘크리트 믹싱 방식은 경량골재 콘크리트를 제조 시 경량골재의 사용량에 한계가 있다. ACI 237에 따르면, 고유동 콘크리트(Self-compacting concrete, SCC)는 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, 프리플레이스트 배합으로 제조하였다. 이때 경량골재 부피분율 변화에 따른 밀도 변화는 <그림 3>에서 비교·분석하였다. 슬럼프 180

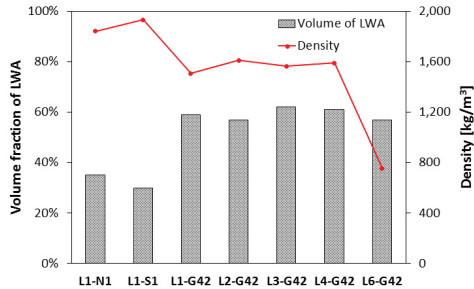


그림 3. 경량골재 부피비에 따른 콘크리트 밀도 변화

mm 비교 시편 L1-N1은 물-시멘트비 0.42로, 시멘트대비 일반 잔골재, 경량 굵은골재 비율은 1:0.63:0.63이다. 슬럼프 플로 625 mm인 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 $1,840 \text{ kg/m}^3$ 으로 L1-S1의 $1,930 \text{ kg/m}^3$ 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 $1,507 \text{ kg/m}^3$ 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 35 kg/m^3 매우 낮고 이를 사용한 L6-G42의 밀도는 755 kg/m^3 로 물에 뜨는 콘크리트 시편 제작이 가능하다.

4.3 압축강도

그라우트의 물-시멘트비가 프리플레이트 경량골재 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 분석한 결과는 <그림 4>와 같다. 인공경량골재 L4를 사용했을 때, 시멘트 그라우트의 물-시멘트 비를 0.20~0.42로 조절 시(G20~G42 사용) 측정된 원주 공시체의 7일, 28일 압축강도이다. L4-G42와 L4-

G20의 재령 28일 압축강도는 각각 20.3 MPa와 26.4 MPa으로, 그라우트의 물-시멘트비가 감소함에 따라 압축강도가 증가하였다. 그러나 그라우트의 물-시멘트 비에 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. 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.

프리플레이트 경량골재 콘크리트의 강도는 밀도와 마찬가지로 경량골재의 재료특성에 따라 크게 변하게 된다. <그림 5>는 동일한 종류의 그라우트 G42 (W/C=0.42)를 사용했을 때 경량골재 종류 L1, L2, L3, L4, L6에 압축강도의 비교 그래프이다.

프리플레이트 콘크리트 내 경량골재의 부피분율은

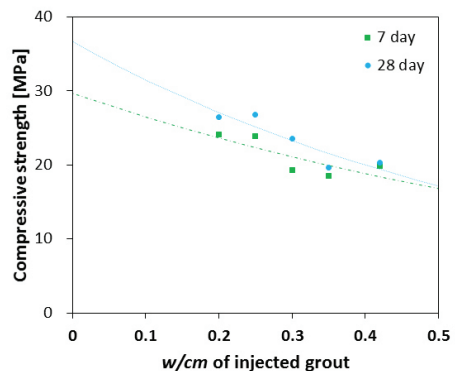


그림 4. 그라우트 물-시멘트 비에 따른 L4를 사용한 프리플레이트 콘크리트 압축강도 변화

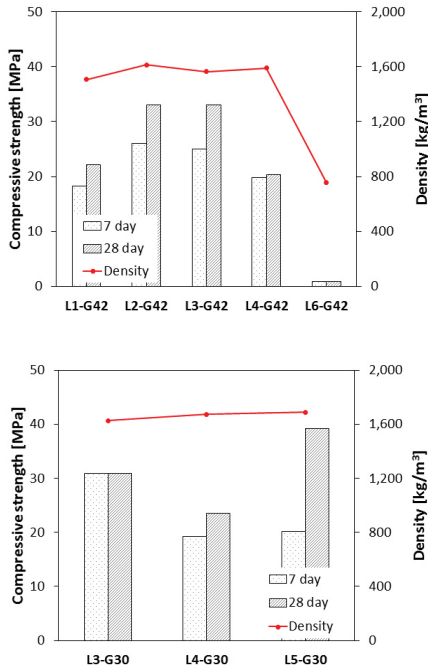


그림 5. 경량골재 종류에 따른 밀도와 압축강도 변화

57% ~ 62%로 유사하지만, 밀도와 압축강도 시험 결과에서 차이를 보였다. L1-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 20.3 MPa, 1,507 kg/m³이며, 이는 KCI 2종 경량 콘크리트 기준을 만족시키는 수준이다. L2-G42와 L3-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도는 각각 33.0 MPa, 33.0 MPa과 1,610 kg/m³, 1,560 kg/m³으로 비슷한 결과를 보였다. 이러한 결과는

프리패킹된 L2, L3 골재의 밀도, 충전밀도, 평균크기 등이 유사하기 때문이다. L1골재와 유사한 형상과 역학적 특성을 지닌 L4골재를 사용해 제작한 L4-G42의 재령 28일 압축강도와 밀도가 20.3 MPa, 1,590 kg/m³으로 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 <그림 5>와 같다. G30 그라우트를 사용한 프리플레이트 경량 콘크리트 또한 사용된 경량골재의 종류에 따라 압축강도가 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

경량골재 콘크리트는 배합 내 경량골재의 부피분율을 증가시킬수록 경량화를 극대화할 수 있다. 기존의 경량 콘크리트 배합에 비해 프리플레이트 경량 콘크리트 배합의 경량골재 부피분율이 상대적으로 높아 밀도가 더 낮다. 이 기사에서는 다양한 종류의 경량골재 및 그라우트 배합비를 개발해 프리플레이트 경량 콘크리트의 밀도와 압축강도 변화를 분석하여 밀도 1,600 kg/m³, 압축강도 30 MPa급 프리플레이트 경량골재 콘크리트 제조가 가능함을 확인하였다.

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)

참고문헌

1. Sim, J. I., and 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)
2. Kim, Y. J., Choi, Y. W., and Lachemi, M. (2010). Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. Construction and Building Materials, 24, 11-16.
3. Yoon J. Y., Kim, J. H., Hwang, Y. Y., and Shin, D. K. (2015). Lightweight concrete produced using a two-stage casting process. Materials, 8, 1384-1397.
4. Yoon, J. Y. and Kim, J. H. (2017), The development of steel-plate concrete panel with preplaced lightweight aggregates concrete, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, 5, 21-28. (in Korean)