

탄소저감형 친환경 콘크리트 개발

Development of carbon reduction eco-friendly concrete



정석만 Seok-Man Jeong
(주)위드엠텍
기술연구소 팀장
E-mail : jsm0829@withmtech.com



양완희 Wan-Hee Yang
(주)위드엠텍
상무이사
E-mail : yangwh@withmtech.com



기전도 Jun-Do Ki
롯데건설(주)
기술연구원 책임연구원
E-mail : kjd0131@lotte.net



김영선 Young-Sun Kim
롯데건설(주)
기술연구원 수석연구원
E-mail : youngsun.kim@lotte.net

1. 서론

최근 전 세계적으로 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45 % 이상 감축하고, 2050년경에는 탄소 중립 달성을 목표로 온실가스 감축을 위해 노력하고 있으며, 우리나라 역시 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년 대비 40 %를 감축하겠다는 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 제26차 UN 기후변화협약 당사국총회(COP26)에 제출하며 2050년도까지 탄소중립을 달성하겠다는 국가적 목표를 선언하였다^[1].

현재 우리나라는 이산화탄소의 배출량 증가율이 중국에 이어 세계에서 2번째로 높은 실정으로 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement 이하: OPC)를 전혀 사용하지 않거나, 사용량의 최소화가 가능한 지오폴리머, 알칼리 활성화 시멘트 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이는 탄소배출량 억제가 가능한 대안이 될 수 있으나, 경제적인 측면, 실용 가능성 측면에서 다소 제한이 있다.

최근에는 기존의 통상적인 방식과 차별화되는 재료적 방법으로 OPC의 사용량을 5 % 이하로 제한하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 고로슬래그 미분말을 기반으로 하여, 극소량의 포틀랜드시멘트와 칼슘설페이트를 자극제로 활용하여 구성되는데, 그 특징으로는 생산 과정에서 소량의 CO₂를 배출하고, 우수한 내구성과, 높은 체적안정성, 낮은 수화열 등의 장점이 있다^[2-5]. 특히, OPC를 100 % 사용한 콘크리트 대비 90% 이상의 탄소 배출량 저감이 가능하며, 공동주택 1,000 세대 기준 약 3,000톤의 이산화탄소 저감이 가능하다.

여기에서 주목하는 성능으로는 극히 낮은 수화 발열량이다. 현재 국내에서는 사회기반시설의 대형화 추세에 따라 매스 콘크리트의 수화열 제어에 대한 중요성이 더욱 커지고 있으며, 지금까지 수화열 및 이에 의해 유발되는 온도균열을 저감하기 위하여 현장에

서 많이 쓰이는 방법으로 콘크리트 배합의 개선이 있다. 이는 강도 요건이 충족되는 범위에서 단위시멘트량 저감, 2종 중용 열 시멘트 또는 4종 저열 시멘트의 사용, 플라이애시 혼입(2성분계 배합) 또는 플라이애시와 고로슬래그의 동시 혼입(3성분계 배합) 등으로 세분화될 수 있으나, 지역별로 배합이나 결합재 비율이 다르고, 각 원재료 품질변동으로 콘크리트 품질이 불균질하며, 온도 응력으로 균열 발생이 증가하는 등의 크고 작은 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 기사에서는 다양한 성능을 기반으로 OPC 사용량 최소화과 더불어 산업부산물의 적극적으로 활용하여 탄소배출량 감축 및 자원 선순환에 현실적인 대안이 될 수 있는 저탄소 친환경 혼합시멘트(Low Carbon Eco Binder 이하 : LCEB)의 기초특성과 더불어 실물모형실험을 통해 대형부재에서 LCEB가 콘크리트의 수화 발열에 미치는 영향에 대한 검토사항을 소개하고자 한다.

2 LCEB의 기초특성

2.1 실험계획

본 실험의 계획은 [표 1]과 같고, 모르타르 배합표는 [표 2]와 같다. 기존의 1종 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 2종 고로슬래그 시멘트(S/C) 그리고 저탄소 친환경 혼합시멘트(LCEB)를 각각 적용하여 이에 따른 기초특성 및 물리특성 변화를 검토하고자 일련의 실험을 실시하였다.

[표 1] 기초평가 실험계획

구분		내용		
Paste	Mixture	Binder	3	OPC ¹⁾ , S/C ²⁾ , LCEB ³⁾
	Test item	Fresh state	1	Setting time
Mortar	Mixture	Binder	3	OPC, S/C, LCEB
		B/S	1	1:3
	Test item	Fresh state	1	Flow
		Hardened state	1	Compressive strength (3, 7, 28 days)

- 1) OPC: Ordinary Portland Cement(1종 보통포틀랜드 시멘트)
- 2) S/C : Ordinary Portland Cement + 3종 Slag Powder (2종 고로슬래그 시멘트 : OPC 50% + Slag Powder 50%)
- 3) LCEB: Low Carbon Eco Binder(저탄소 친환경 혼합시멘트)

[표 2] 모르타르 배합표

구분	W/B (%)	Binder(%)				Sand (B:S)
		C1 ¹⁾	C2 ²⁾	C3 ³⁾	Sum	
OPC	50.0	100	-	-	100	1:3
S/C		-	100	-		
LCEB		-	-	100		

- 1) C1: OPC(1종 보통포틀랜드 시멘트)
- 2) C2: S/C(2종 고로슬래그 시멘트)
- 3) C3: LCEB(저탄소 친환경 혼합시멘트)

2.2 실험재료

실험재료는 아래의 [표 3]과 같은 3종류의 결합재를 혼입하여 페이스트 및 모르타르 배합을 진행하였다. OPC는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,427 cm²/g의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, S/C는 밀도 3.05 g/cm³, 분말도 4,012 cm²/g의 2종 고로슬래그 시멘트를 사용하였다. LCEB의 경우 고로슬래그 미분말을 기반으로 하여, 포틀랜드시멘트와 칼슘설페이트를 자극제로 사용하여 혼합 제조하였다. 이때 포틀랜드시멘트는 5% 이하로 사용되었고, 이렇게 제조된 LCEB의 밀도는 2.96 g/cm³, 분말도는 6,102 cm²/g이다.

[표 3] 결합재별 밀도 및 분말도

구분	색상	밀도(g/cm ³)	분말도(cm ² /g)
OPC	Dark Grey	3.15	3,427
S/C	Dark White	3.05	4,012
LCEB	White	2.96	6,102

2.3 실험방법

시멘트 페이스트는 KS L 5109 「굳지 않은 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법」에 준하여 혼합하였으며, 사전실험을 통하여 얻어진 결합재 각각의 표준주도에 따른 물 결합재 비를 적용하여 KS L ISO 9597 「시멘트의 응결 및 안정성 시험방법」에 준하여 비카트 침에 의한 시멘트 응결 시험은 실시하였다. 표준 모르타르 배합실험의 경우 KS L ISO 679 「시멘트의 강도 시험 방법」에 근거하여 실시하였으며, 시

멘트 플로의 결정은 KSL 5111 「수경성 시멘트 시험용 플로 테이블」에 준하여 측정하였고 결과는 준하여 측정하였다.

2.4 실험결과

LCEB의 기초특성 실험결과 [표 4] 및 <그림 1>과 같다. 페이스트 배합에서 결합재별 응결시간 측정결과 초결 및 종결은 OPC는 185, 335 min, S/C는 225, 375 min으로 측정되었다. LCEB의 경우 동일순서로 285, 530 min 측정되어 OPC 대비하여 초결 54.1%, 종결 58.2%씩 지연되는 현상을 확인하였다.

모르타르 배합의 경우 플로 측정결과로는 OPC, S/C, LCEB 순서로 205, 220, 235 mm 측정되어 유동성이 점차 증가하는 경향을 확인하였으며, 모르타르 압축강도의 경우 3, 7, 28일 재령의 순서로 OPC 19.1, 28.2, 43.6 MPa, S/C 17.4, 26.0, 44.9 MPa로 측정되었다. LCEB의 경우 15.2, 24.9, 45.8 MPa로 확인되어 초기 재령은 다소 낮게 측정되었으나, 28일 재령에서 OPC 대비 5.0% 수준으로 상회하였다.

[표 4] 결합재별 기초특성 평가결과

구분	Paste		Mortar		
	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
	initial	final	3 Days	7 Days	28 Days
OPC	185	335	19.1	28.2	43.6
S/C	225	375	17.4	26.0	44.9
LCEB	285	530	15.2	24.9	45.8

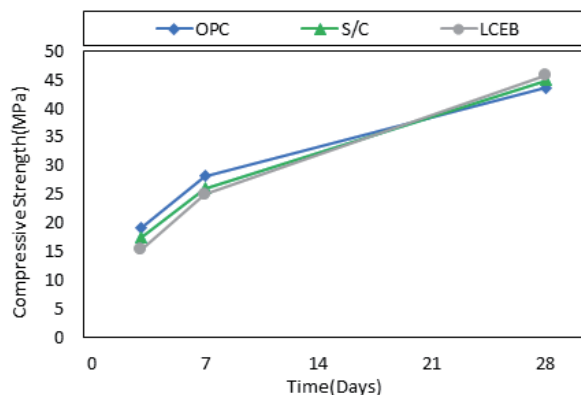


그림 1. 결합재별 모르타르 압축강도 측정결과

3. LCEB 콘크리트의 실물모형실험

3.1 실험계획

본 실험의 계획은 [표 5]와 같고, 콘크리트 배합표는 [표 6]과 같다. 콘크리트는 1종 보통포틀랜드시멘트(OPC), 2종 고로슬래그 시멘트(S/C), 3성분계 혼합시멘트(TBC) 그리고 저탄소 친환경 혼합시멘트(LCEB) 총 4가지의 결합재를 각각 혼합하여 제작하였다.

[표 5] 실물모형 실험계획

구분	구분		내용	
	Mixture	Binder	4	OPC ¹⁾ , S/C ²⁾ , TBC ³⁾ , LCEB ⁴⁾
Concrete	Mixture	S/a	1	49.0%
		Fresh state	1	Slump(mm), Air(%)
	Test item	Hardened state	1	Compressive strength (3, 7, 28 days), Heat of hydration(°C)

- 1) OPC : Ordinary Portland Cement(1종 보통포틀랜드 시멘트)
- 2) S/C : Ordinary Portland Cement + 3종 Slag Powder (2종 고로슬래그 시멘트 : OPC 50% + Slag Powder 50%)
- 3) TBC : Ternary Blended Cement(3성분계 혼합시멘트 : OPC 30% + Slag powder 50% + Fly Ash 20%)
- 4) LCEB : Low Carbon Eco Binder(저탄소 친환경 혼합시멘트)

[표 6] 콘크리트 배합표

구분	W/B (%)	S/a (%)	W	단위재료량(kg/m ³)						Ad. ³⁾ (B × %)
				Binder				Aggregate		
				OPC	S/C	TBC	LCEB	S ¹⁾	G ²⁾	
OPC	45.0	49.0	162	360	-	-	-	860	899	0.8
S/C	45.0	49.0	162	-	360	-	-	855	891	0.9
TBC	45.0	49.0	162	-	-	360	-	842	878	1.0
LCEB	45.0	49.0	162	-	-	-	360	850	889	1.0

- 1) S : Sand(세척사), 2) G : Gravel(자갈, 25mm 치수)
- 3) Ad. : Admixture(PC계 고성능 감수제)

콘크리트의 제조는 H 레미콘 사의 배치플랜트(B/P)에서 혼합되어 레미콘 차량으로 운반 후 특수제작 된 거푸집에 타설되었으며, 타설 된 콘크리트를 대상으로 기초특성 및 대형 부재에서의 수화발열량 변화를 검토하고자 하였다.

3.2 실험재료

본 실험재료의 시멘트는 밀도 3.14 g/cm³, 분말도 3,615 cm²/g의 1종 보통포틀랜드시멘트, 밀도 2.95 g/cm³, 분말도 6,224 cm²/g의 저탄소 친환경 혼합시멘트를 활용하였으며, 혼화제는 밀도 2.91 g/cm³, 분말도 4,415 cm²/g의 3종 고로슬래그와 밀도 2.24 g/cm³, 분말도 3,410 cm²/g의 2종 플라이애시를 사용하여 일정비율로 혼합 후 2종 고로슬래그시멘트와 3성분계 혼합시멘트로 제조하여 사용하였다.

3.3 실험방법

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험 방법」에 근거하여 측정하였으며, 공기량은 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 근거하여 측정을 실시하였다. 경화 콘크리트의 경우 KS F 2403 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」 규정에 근거하여 지름 100 mm, 높이 200 mm의 실린더 원형 공시체를 제작하여 표준양생 후 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 근거하여 재령에 따른 압축강도 측정을 진행하였다.

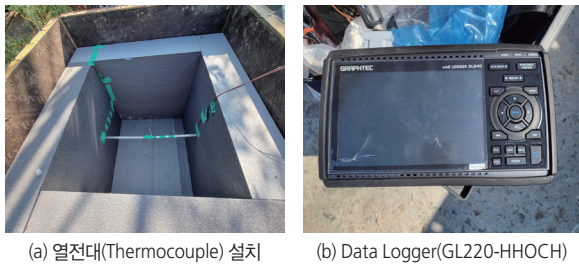


그림 2. 열전대 및 데이터로거의 설치

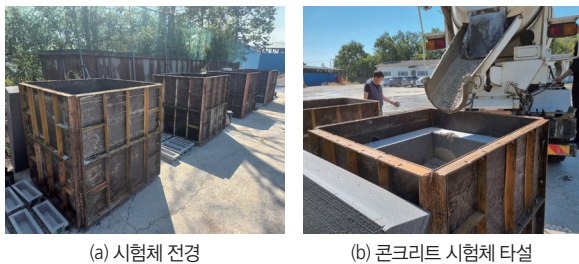


그림 3. 거푸집 준비 및 콘크리트의 타설

콘크리트 각 배합의 수화열 평가는 <그림 2>, <그림 3>과 같이 한 변의 길이가 1.2m의 정육면체 거푸집을 제작하였으며, 외부의 온도환경 조건으로부터 영향을 최소화 하기위한 일환으로 거푸집 내부 6면에 두께 0.2m 단열재(비드법 보온판 2종 1호)를 적용한 간이-단열온도상승실험 방법^[6]을 적용하였다.

궁극적으로 0.8 × 0.8 × 0.8m의 콘크리트 시험체 제작에 따른 수화발열량 측정을 목표로 하였으며, 수화열 온도는 중심부와 측면의 단열재 표면온도 측정을 위하여 각 부위에 열전대(Thermocouple Wire, TX-F JIS)를 설치 후 Data Logger(10 Channel, GL220 -HHOCH)를 사용하여 5분 간격으로 수화열을 계측하였다.

3.4 실험결과

콘크리트의 실물모형 실험결과 아래의 [표 7], <그림 4>와 같이 콘크리트의 기초특성 및 재령별 압축강도 측정결과를 나타내었으며, 대형부재에서의 콘크리트 적용 수화발열량 측정결과는

[표 7] 실물모형실험 결합재별 콘크리트의 기초특성

구분	Slump (mm)	Air (%)	Compressive strength(MPa)		
			3 Days	7 Days	28 Days
OPC	190	3.5	25.2	32.7	41.0
S/C	190	3.0	14.2	27.6	42.6
TBC	190	4.5	8.9	19.7	37.8
LCEB	180	3.8	8.7	21.1	37.9

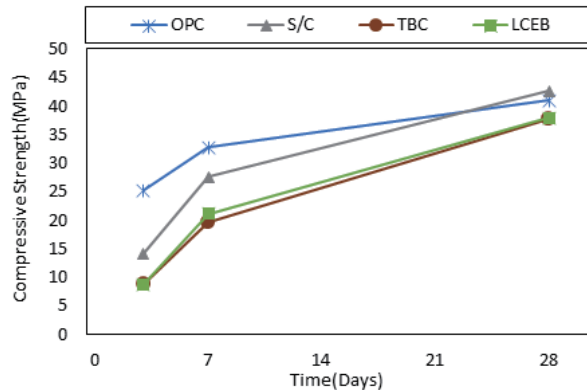


그림 4. 콘크리트의 실물모형실험 압축강도

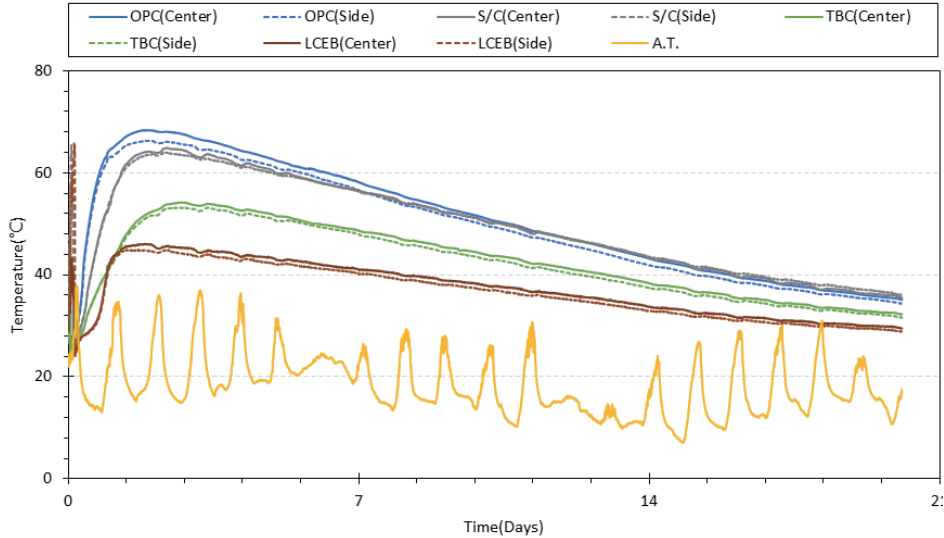


그림 5. 콘크리트의 실물모형실험 수화발열량

[표 8] 실물모형실험 결합재별 콘크리트의 수화발열량 측정결과

구분	측정 DATA			
	Center Point		Side Point	
	최고온도(°C)	도달시간(h:m)	최고온도(°C)	도달시간(h:m)
OPC	68.4	43:50	66.3	46:35
S/C	64.9	56:45	64.0	57:05
TBC	54.2	65:15	53.2	61:45
LCEB	46.1	44:00	45.0	40:15

[표 8], <그림 5>와 같이 중심부와 측면부의 최고온도 및 도달시간을 각각 정리하여 나타내었다.

결합재 별 콘크리트의 기초특성 결과로는 OPC, S/C, TBC, LCEB의 순서로 슬럼프의 경우 190, 190, 190, 180 mm로 측정되었으며, 공기량은 3.5, 3.0, 4.5, 3.8 %로 측정되었다.

콘크리트의 유동성의 경우 4개의 결합재 모두 유사한 경향을 확인하였으며, LCEB만 10 mm 정도 낮게 측정되었다. 공기량의 경우 KS 기준에서 제시하는 범위에 부합하는 결과를 확인하였다.

콘크리트의 압축강도 측정결과 OPC의 경우 3, 7, 28일 재령의 순서로 25.2, 32.7, 41.0 MPa로 측정되었으며, S/C는 14.2, 27.6, 42.6 MPa, TBC는 8.9, 19.7, 37.8 MPa로 측정되었다.

LCEB의 경우 동일한 재령일 순서로 8.7, 21.1, 37.9 MPa로 측정되어 OPC, S/C보다 모든 재령에서 낮게 측정되었다. 특이점으로는 OPC 대비 3일 재령에는 65.5 %, 28일 재령에서 7.6 %의 낮게 측정되었는데, 이는 재령이 경과함에 따라 압축강도 감소율이 점차 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, TBC 대비 3일 재령에는 2.2 % 근소한 차이로 낮게 측정되었으나, 7일, 28일 재령 순서로 각각 7.1 %, 0.3 % 높게 측정되어 7일 재령 이후 시점부터 TBC를 역전하는 경향을 확인할 수 있었다.

콘크리트의 실물모형실험에 따른 콘크리트의 수화발열량 측정결과로는 콘크리트 부재의 중심부 최고온도의 경우 OPC 68.4 °C, S/C 64.9 °C, TBC 54.2 °C, LCEB 46.1 °C로 나타났으며, 측면부의 최고온도는 OPC 66.3 °C, S/C 64.0 °C, TBC 53.2 °C, LCEB 45.0 °C로 확인되었다. 특이점으로는 국내 현장에서 기본적으로 활용되는 매스콘크리트 결합재인 TBC의 경우 중심부 최고온도 기준 최고온도 도달시간이 65시간 15분으로 OPC보다 약 21시간 25분정도 늦어지는 것을 확인하였는데, LCEB의 최고온도 도달시간이 동일 환경에서 44시간으로 OPC보다 10분 늦어지는 경향으로 유사한 최고온도 도달시간을 확인하였으며, 이러한 경향은 측면부에서도 유사하게 확인하였다. 이를 종합해보면 LCEB>TBC>S/C>OPC의 순서로 수화열 저감성능이 우수한 것을 확인하였으며, 중심부에서는 OPC > LCEB > S/C > TBC의 순

서로 측면부에서는 LCEB > OPC > S/C > TBC의 순서로 최고온도 도달시간이 빠른 것을 확인할 수 있었다.

4. 맺음말

산업부산물의 적극적인 활용이 가능한 저탄소 친환경 혼합시멘트(Low Carbon Eco Binder)의 기초특성과 콘크리트 적용에 따른 기초특성 및 대형 부재에서의 수화 발열량 평가에 대한 실험 사례를 소개하고자 하였다.

결합재별 기초특성 실험결과로는 LCEB의 경우 초결, 종결이 각각 285, 530 min 측정되어 OPC 대비 초결과 종결이 각각 54.1, 58.2 %씩 지연되는 현상을 확인하였다. 모르타르 배합의 경우 플로 측정결과로는 OPC, S/C, LCEB 순서로 205, 220, 235 mm 측정되어 유동성이 점차 증가하는 경향을 확인하였으며, 압축강도의 경우 LCEB는 3, 7, 28일 재령의 순서로 15.2, 24.9, 45.8 MPa로 확인되어 초기 재령은 다소 낮게 측정되었으나, 28일 재령에서 OPC 대비 5.0 % 수준으로 상회하였다.

이러한 실험결과를 기반으로 콘크리트의 실물모형실험을

목표로 하여 콘크리트 B/P TEST에 따른 대형 부재의 콘크리트의 수화발열량 측정을 실시하였고 그 결과 LCEB>TBC>S/C>OPC의 순서로 수화열 저감능력이 우수한 것을 확인하였으며, 중심부에서는 OPC > LCEB > S/C > TBC의 순서로, 측면부에서는 LCEB > OPC > S/C > TBC의 순서로 최고온도 도달시간이 빠른 것을 확인할 수 있었다.

본 기사를 통하여 확인한 저탄소 친환경 혼합시멘트 콘크리트의 우수한 수화열 저감 성능을 바탕으로 향후 낮은 수화열이 요구되는 대형부재의 매스콘크리트 현장에 적용 및 보급에 활용되기를 기대하며, 전 세계적으로 탄소중립을 목표로 하는 현 시점에서 본 기사와 같은 저탄소 친환경 혼합시멘트 및 콘크리트와 관련된 현실적인 측면의 추가적인 연구가 절실하다고 사료 된다. 나아가 매스콘크리트에 국한되지 않고, 저탄소 친환경 혼합시멘트의 다양한 성능을 기반으로 내구성이 요구되는 해안 및 수중콘크리트, 혹은 화학적 침식이 우려되는 산업용 구조물 등의 적용을 위한 추가적인 연구를 이어가 국내 현장적용을 목표로 하여 저탄소 친환경 혼합시멘트의 국내 보급화를 이루고 궁극적으로는 탄소중립에 기여하고자 한다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, (2021). Submit the increased '2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC)' to the Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, Article 3, Paragraph 1 of the Enforcement Decree of the Carbon Neutral Basic Act, press release.
2. M.B. Medellín; A. Fuentes; A. Gorokhovskiy; J. Escalante. "Early and late hydration of supersulphated cements of blast furnace slag with fluorgypsum." *Materiales de construcción*, 2015, p.3.
3. A. Gruskovnjak; B. Lothenbach; L. Holzer; R. Figi; F. Winnefeld. "Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement." *Advances in cement research*, 18, 2006, p.119-128.
4. M.B. Haha; G. Le Saout; F. Winnefeld; B. Lothenbach. "Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags." *Cement and Concrete Research*, 41, 2011, p.301-310.
5. D. Dutta; P. Borthakur. "Activation of low lime high alumina granulated blast furnace slag by anhydrite." *Cement and Concrete Research*, 20, 1990, p.711-722.
6. 온정권, 김영선, 문형재, 남정수, 김규용. "외기온도 및 시험체 크기를 고려한 콘크리트의 간이-단열온도 상승시험에 관한 실험적 연구." *한국건축시공학회지*, 21권, 6호, 2021, pp. 563-571.

담당 편집위원 : 이재하(한국해양대학교)