

## 석회석의 분말도가 시멘트의 물리적 특성 및 환경에 미치는 영향

# Effect of Limestone Fineness on Physical Properties and Environmental Impact of Cement

강인규<sup>1</sup> · 김진만<sup>2\*</sup> · 신상철<sup>3</sup> · 김건우<sup>1</sup> · 안태윤<sup>4</sup>

In-Gyu Kang<sup>1</sup> · Jin-Man Kim<sup>2\*</sup> · Sang-Chul Shin<sup>3</sup> · Geon-Woo Kim<sup>1</sup> · Tae-Yun An<sup>4</sup>

(Received January 29, 2024 / Revised February 19, 2024 / Accepted February 21, 2024)

Since the cement industry generates more than 60 % of CO<sub>2</sub> during the clinker production process, supplementary cementitious materials are used worldwide to reduce CO<sub>2</sub> efficiently. Mainly used supplementary cementitious materials such as blast furnace slag and fly ash, which are used in various industries including the cement industry, concrete admixtures, and ground solidification materials. However, since their availability is expected to decrease in the future according to the carbon neutrality strategy of each industry, new supplementary cementitious materials should be used to achieve the cement industry's goal for increasing the additive content of Portland cement. Limestone is a material that already has a large amount in the cement industry and has the advantage of high grinding efficiency, so overseas developed countries established Portland limestone cement standards and succeeded in commercialization. This study was an experimental study conducted to evaluate the possibility of utilizing domestic PLC, the effect of fineness and replacement ratio on the physical properties of cement was investigated, and the environmental impact of cement was evaluated by analyzing CO<sub>2</sub> emissions.

**키워드** : 탄소중립, 석회석, 클링커, 포틀랜드 석회석 시멘트, 분말도

**Keywords** : Carbon neutrality, Limestone powder, Clinker, Portland limestone cement, Fineness

## 1. 서론

최근 세계 각국에서는 2050 탄소중립(Carbon neutrality)이라는 세계 공동의 목표를 달성하기 위해 국가적 차원에서 다양한 전략을 수립하고 있으며 이러한 목표를 뒷받침하기 위해 에너지, 건물, 농·축산 및 교통을 포함한 각국의 모든 분야에서는 국가 정책 방향에 대응하기 위한 다양한 노력을 하고 있다(GOV.KR 2020).

시멘트는 세계에서 많이 사용되는 재료 중 하나로 지금까지 현대 문명 구축에 필수적인 재료였으며 앞으로의 사회기반시설 확충을 위해서는 없어서는 안 될 중요한 재료이다. 하지만, 시멘트 반제품인 클링커를 생산하는 공정에서 석회석의 탈탄산 반응으로 인해 다량의 CO<sub>2</sub>가 발생하며, 킬른의 소성 과정에 필요한 열원을

얻기 위해 연료를 연소하는 과정에서 추가적인 CO<sub>2</sub>가 발생한다. 이러한 이유로 인해 시멘트 산업은 전 세계 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 7%를 점유하는 탄소 다 배출 산업으로 분류되고 있으며, 국내의 경우 산업계 총 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 13%를 차지한다고 보고되고 있다. 따라서 2050 탄소중립을 달성하기 위해서는 시멘트 산업의 변화가 필수 불가결하며, 탄소 배출량 삭감을 위한 다양한 연구개발이 수행되고 있다(Andres et al. 2017).

시멘트 산업의 CO<sub>2</sub> 배출량을 저감시킬 수 있는 방법은 크게 연료 전환과 원료 전환으로 구분할 수 있다. 이중 원료 전환, 즉 시멘트 생산 시 가장 많은 배출 비중을 차지하는 클링커의 사용 비율을 감소시키는 것은 CO<sub>2</sub> 배출 저감을 위한 가장 효율적인 방법이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 세계 각국의 시멘트 산업은

\* Corresponding author E-mail: [jmkim@kongju.ac.kr](mailto:jmkim@kongju.ac.kr)

<sup>1</sup>국립공주대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

<sup>2</sup>국립공주대학교 그린스마트건축공학과 교수 (Department of Green Smart Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

<sup>3</sup>국립공주대학교 친환경콘크리트연구소 연구교수 (Eco Friendly Concrete Research Center, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

<sup>4</sup>국립공주대학교 건축공학과 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

Copyright © 2024 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

시멘트 대체 재료(SCM, Supplementary Cementitious Materials)를 사용하여 클링커의 사용 비율을 저감시키기 위해 노력하고 있으며, 정부 차원에서는 폭넓은 SCM을 사용할 수 있는 표준을 제·개정함으로써 친환경 시멘트 제조를 위한 제도적 환경을 구축하고 있다(Lothenbach et al, 2011).

클링커를 대체하기 위한 SCM은 전 세계적으로 철강 산업에서 부산물로 배출되는 고로슬래그(GGBFS, Ground Granulated Blast Furnace slag)와 발전 산업의 부산물인 플라이애시(FA, Fly Ash)가 대표적으로 사용되고 있다. 현재 「KS L 5201 포틀랜드시멘트」(KSA 2021)에도 시멘트의 조성물로 고로슬래그, 플라이애시 및 포졸란 중 한 재료를 5 % 이내까지 그리고 석회석을 5 %까지 사용할 수 있도록 규정하고 있으므로 국내 포틀랜드시멘트 혼합재 함량은 최대 10 %이다(KSA 2021). 국내 시멘트 산업에서는 2050년까지 혼합재 함량을 10 % 증가시켜 최대 20 %의 혼합재 함량을 가진 포틀랜드시멘트를 제조하는 것을 목표로 설정하였다(PCCNGG 2021).

전통적으로 사용되는 고로슬래그와 플라이애시는 시멘트 산업 뿐만 아니라 콘크리트 산업의 혼화재료, 지반 고화재 등의 경쟁산업에서도 활용되고 있어 시멘트 산업에서의 활용량에 제한을 받고 있다. 또한 고로슬래그는 수화활성도가 비교적 높아 사용량을 증대하는 것에 어려움은 적지만, 플라이애시는 수화 활성도가 낮을 뿐만 아니라 사용하는 연료에 따라 품질의 변동이 크기 때문에 최종적으로 생산되는 시멘트의 품질에 악영향을 미칠 수 있다. 더욱 철강산업에서 탄소중립을 실현하기 위해 기존 고로공정을 전기로 및 수소 환원 공정으로의 변화시키고자 하는 계획과 발전 산업에서 석탄화력 발전을 점진적으로 폐쇄하고자 하는 계획이 실현되면서 고로슬래그와 석탄화력 플라이애시의 발생량은 점진적으로 줄어들 것이기 때문에 시멘트 산업이 목표로 하는 혼합재 함량 20 %를 이 두 재료로 충족시키기에는 어려움이 따를 수 있다(Birol 2018; GOV.KR 2020).

한편, 석회석의 경우 저렴한 비용과 높은 가용성으로 인해 고로슬래그와 플라이애시가 가진 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 활용될 수 있으며, 클링커 생산 시 사용되는 고품질의 석회석 이외에 상대적으로  $\text{CaCO}_3$  함량이 낮은 석회석을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 석회석 미분말을 크링커와 혼합한 시멘트를 만드는 방식으로 사용할 경우에는 별도의 소성 과정을 거치지 않아 크링커 대체량에 상당하는  $\text{CO}_2$  배출량을 줄일 수 있기 때문에 석회석 미분말은 탄소중립 관점에 매우 부합하는 재료라 할 수 있다(Wang et al, 2018). 석회석 미분말의 시멘트에 대한 활용 연구는 최근 유럽과 북미를 중심으로 이루어져 왔으며, 다양한 연구 덕분에

에 유럽의 경우 최대 35 %, 북미의 경우 최대 15 %의 석회석을 포함하는 혼합시멘트인 포틀랜드 석회석 시멘트(PLC, Portland Limestone Cement)를 표준으로 제정하게 되었다(ASTM 2021; CEN 2011; CSA 2018). PLC는 유럽과 북미의 내수시장에서 도로, 건물 등 모든 구조물에 포틀랜드시멘트를 대신하여 사용되어 콘크리트의  $\text{CO}_2$  배출량 경감에 크게 기여하고 있다(Favier et al, 2018).

석회석에 대한 초기 연구에서는 석회석 미분말은 반응성이 없고 단순히 충전재 역할로만 작용한다고 보고되어 왔다(Shalan et al, 2016; Isaia et al, 2003; De Schutter 2011; Senhadji et al, 2014). 하지만 최근 연구 결과에 의하면, 석회석은 충전재 역할 이면에서 초기  $\text{C}_3\text{S}$ 의 대표적인 수화물인 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이 성장할 수 있는 핵종(Nucleation effect)의 역할을 하여  $\text{C}_3\text{S}$ 의 수화를 촉진시킨다는 충전 효과(Filler effect)에 대한 연구가 다수 보고되고 있다(Berodier and Scrivener 2014; Schöler et al, 2017; John et al, 2018; Kadri et al, 2010; Soroka and Stern 1976; Rode et al, 2009). 또한 석회석은  $\text{C}_3\text{A}$ 와의 반응을 통해  $\text{CO}_3\text{-AFm}(\text{CO}_3\text{-Alumina ferric oxide mono})$  상인 헤미카보알루미네이트(Hemicarboaluminate)와 모노카보알루미네이트(Monocarboaluminate)를 형성하여 모노설포알루미네이트(Monosulfoaluminate)의 형성을 억제하고 에트린자이트(Etringite)를 안정화시키는 화학반응 메커니즘을 가지고 있다(Lee et al, 2011; Mindess 2003; Pan et al, 2019; Zajac et al, 2014). 이와 같이 석회석은 직접 수화 반응하진 않지만, 시멘트 수화반응 기구 내에서 직·간접적으로 반응에 참여한다. 클링커를 상대적으로 반응성이 낮은 석회석으로 치환하는 것은 일부 희석 효과(Dilution effect)를 수반할 수 있지만(Escalante-Garcia et al, 1998; Das et al, 2014), 시멘트 구성재료 중 15 %까지의 석회석 사용은 포틀랜드시멘트와 동등한 성능을 나타낸다는 다수의 연구가 보고되고 있다(Adu-Amankwah et al, 2017).

최근 연구에 의하면 석회석의 활용으로 인해 발생하는 희석 효과는 석회석의 물리적 특성 개질을 통해 보상할 수 있다고 보고되고 있으며 이를 위한 가장 효율적인 방법으로는 석회석의 고분말화가 거론되고 있다(Aqel and Panesar 2016; Briki et al, 2021). 석회석은 클링커를 비롯한 다양한 SCM 대비 피분쇄성이 높아 추가적인 에너지 투입으로 인해 발생하는  $\text{CO}_2$  측면에서도 이점이 있다(Hooton et al, 2007). 현재 석회석의 분말도가 시멘트의 공학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 대부분 해외를 중심으로 이뤄지고 있으며, 국내의 경우에도 일부 연구 사례가 존재하지만, 해외 사례 대비 충분하지 않다. 특히, 1종 보통포틀랜드시멘트 분말도 대비 2배 혹은 그 이상으로 고분말화된 석회석에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.

Table 1. Overview of experiments

Classification		Experiment level	Test item
Binder type	Control group	• Ordinary Portland cement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flow</li> <li>• Mortar temperature</li> <li>• Setting time</li> <li>• Compressive strength</li> <li>• Drying shrinkage</li> <li>• Environmental impact</li> </ul>
	Experimental group	• Additive changed ordinary Portland cement	
Replacement ratio of limestone powder (%)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5(9.75)</li> <li>• 10(14.5)</li> <li>• 15(19.25)</li> </ul>	
Fineness of limestone powder (cm <sup>2</sup> /g)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3,440(LL, low fineness limestone)</li> <li>• 6,640(ML, middle fineness limestone)</li> <li>• 13,390(HL, high fineness limestone)</li> </ul>	

이에 본 연구에서는 국내에서 생산되는 석회석을 시멘트의 혼합재로 활용하는 비율을 높이기 위한 목적으로 수행하는 일련의 연구의 일부로 석회석의 분말도가 시멘트의 물리적 특성 및 환경에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 석회석의 낮은 반응성을 고려하여 치환율과 분말도에 따른 시멘트 모르타르의 경화 전·후 기초 특성을 검토하였으며, CO<sub>2</sub> 기반 환경 영향 평가를 수행하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

Table 1과 Table 2는 본 연구의 실험 계획과 실험 배합을 나타낸 것이다. 석회석의 분말도와 치환율에 따른 영향을 평가하고자 각각의 수준과 혼합 비율을 조절하여 실험을 계획하였다. 치환율은 1종 보통포틀랜드시멘트를 대상으로 5, 10, 15 % 치환하였다. 하지만 현행 시판 중인 포틀랜드시멘트에는 이미 고로슬래그 혹은 플라이애쉬와 석회석이 혼합재로 혼합되어 있다. 시멘트사에 따라 포틀랜드시멘트 제조 시 혼합재의 종류와 혼합량이 일부 상이할 수 있으나, 대부분 고로슬래그와 석회석이 사용되고 있다. 따라서 이러한 점을 고려하여 「KS L 5201 포틀랜드시멘트」(KSA 2021)에 따라 고로슬래그와 석회석이 각각 5 % 포함되어 있다고 추정하여 결합재를 구성하는 원료의 비율을 Table 3에 나타내었다.

또한 석회석의 분말도를 3,440, 6,640, 13,390 cm<sup>2</sup>/g의 3수준으로 설정하여 분말도에 의한 영향을 평가하였다. 측정 항목으로는 경화 전 상태에서 플로우, 모르타르 온도, 응결시간을 측정하였으며 경화 후 압축강도 및 건조수축을 측정하였다.

본 연구에서는 「KS L ISO 679 시멘트 시험방법 강도측정」(KSA 2022a)에 준하여 결합재와 표준사의 비율을 1:3, W/B는 0.5로 설정하여 기계적 혼합 방법을 통해 모르타르를 제작 후 시멘트의 물리적 특성을 평가하였다.

Table 2. Composition of binders

Sample	W/B (%)	Unit weight (g, based on mold)			
		Water	OPC*	Limestone	Sand
Plain	50	225	450.0	0.0	1,350
LL5			427.5	22.5	
LL10			405.0	45.0	
LL15			382.5	67.5	
ML5			427.5	22.5	
ML10			405.0	45.0	
ML15			382.5	67.5	
HL5			427.5	22.5	
HL10			405.0	45.0	
HL15			382.5	67.5	

\* : Ordinary Portland Cement

Table 3. Composition of raw materials assumed based on KS

Sample	Composition of raw materials (%)			
	Clinker + Gypsum	GGBFS*	Limestone	
OPC**	90	5	5	
Replacement ratio of limestone (%)	5	85.5	4.75	9.75
	10	81	4.5	14.5
	15	76.5	4.25	19.25

\* : Ground Granulated Blast Furnace Slag

\*\* : Ordinary Portland Cement

### 2.2 사용 재료

본 연구에 사용되는 시멘트는 「KS L 5201 포틀랜드시멘트」(KSA 2021) 기준에 부합하는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 국내 C사에서 생산되는 분말화된 석회석을 사용하였다. 시멘트와 석회석은 각각의 사용 비율에 맞게 혼합한 후 충분한 건비빔하였다. 사용된 잔골재는 ISO 기준에 부합하는 표준사를 사용하였다.

본 연구에 사용한 결합재의 물리·화학적 특성을 Table 4에 나타내었으며, PSA(Particle Size Analysis)를 통해 측정된 입도 분포를 Fig. 1에 나타내었다. XRD(X-Ray Diffraction) 분석을 통해 측정된 석회석의 주 광물 상은 Calcite로 확인되었으며, 석회석의 CaCO<sub>3</sub> 함량은 약 95~97 %로 고순도의 석회석을 확인하였다. 석회석의 분말도와 치환율이 증가함에 따라 혼합된 최종 시멘트의 분말도가 증가하는 것을 확인하였으며 결과를 Table 5에 나타내었다.

### 2.3 실험 및 평가 방법

#### 2.3.1 물리·화학적 실험

모든 실험은 20 °C, RH 60 %의 항온·항습 조건에서 실시하였으며, 사용 결합재 및 배합수 또한 동일한 조건에서 보관하였다. 모르타르를 기계적으로 혼합 후 즉시 「KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법」(KSA 2022b)에 준하여 플로 테이블을 15초 동안에 25회 낙하시켜 플로우를 측정하였다. 모르타르의 초기 수화 특성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 발포스티렌으로 300×300×300 mm 크기의 간이 단열 박스를 제작하고 중심부에 100×100×100 mm 공간을 두어 모르타르를 타설한 후 K type의 열전대를 사용하여 1분 간격으로 모르타르 온도를 측정하였다. 응결 시험은 「KS F 2436 관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험 방법」(KSA 2022c)에 따라 측정하였으며 관입 저항이 3.5 MPa와 28 MPa이 될 때의 시간을 각각 초결과 종결 시간으로 측정하였다.

압축강도 시험을 위해 「KS L ISO 679 시멘트 시험방법 강도측정」(KSA 2022a)에 따라 40×40×160 mm의 각주형 몰드를 활용하여 시험체를 성형하였으며 24시간 기건양생 후 탈형하여 20±1 °C 수조에

Table 4. Physical and chemical properties of raw materials

Sample		OPC	LL	ML	HL
Properties					
Physical	Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.14	2.66	2.75	2.74
	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3,710	3,440	6,640	13,390
	D(4,3) (μm)	13.061	15.451	6.414	2.305
Chemical (%)	CaO	65.6	52.7	53.3	54.5
	SiO <sub>2</sub>	17.5	1.3	0.2	0.1
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.1	0.7	0.1	0.0
	MgO	2.6	1.4	0.9	0.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5	0.5	0.2	0.2
	SO <sub>3</sub>	3.6	0.1	0.0	0.0
LoI	1.3	41.5	41.8	42.8	

Table 5. Fineness of the blended binders

Fineness (cm <sup>2</sup> /g)								
LL			ML			HL		
5	10	15	5	10	15	5	10	15
3,708	3,753	3,797	3,875	4,200	4,367	4,499	5,160	5,859

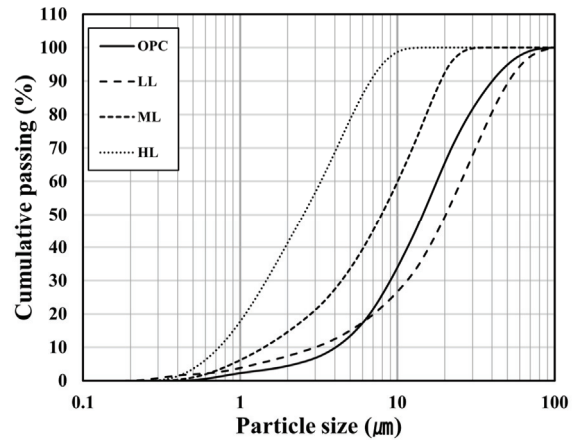


Fig. 1. Particle size distribution of raw materials

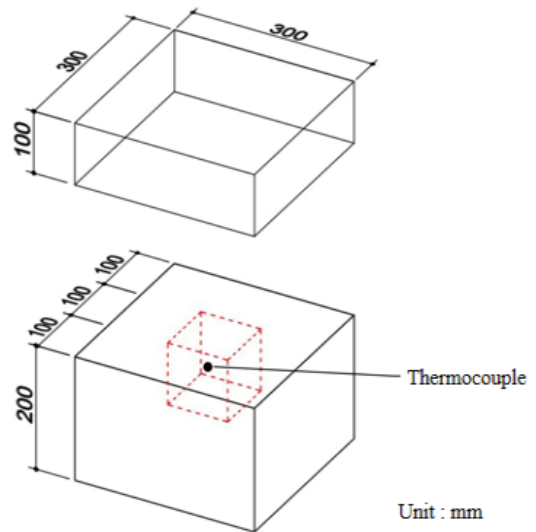


Fig. 2. Insulated box for measuring mortar temperature

서 양생하였다. 압축강도 측정은 최대 30 ton의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 재령 1, 3, 7, 28일에 측정하였다. 건조 수축을 평가는 「ASTM C596- 18 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement」(ASTM 2018)의 시험방법에 준하여 실험을 진행했으며, 25×25×285 mm의 각주형 몰드에 한 배합당 3개의 시험체를 성형하였다. 시험체는 항온·

항습 조건으로 24시간 양생하였으며, 탈형 후 48시간 동안의 수중양 생을 거쳐 Vernier Calipers를 사용하여 시험체의 초기 길이를 측정 후 7일 간격으로 28일까지의 수축량을 계산하였다.

### 2.3.2 환경 영향 평가

석회석을 OPC에 최대 15 %까지 대체한 시멘트의 친환경성을 정량적으로 평가하기 위해 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 수행하였으며, 이는 제품의 전과정에서 원료, 에너지, 화학물질 등의 투입과 폐기물, 오염물질, 재활용 등의 산출 흐름을 규명하고 잠재적인 환경 영향을 평가하는 기법이다(Chau et al, 2015; Manjunatha et al, 2021). 환경 영향 평가는 전과정 software인 SimaPro 9.5.0.1의 Ecoinvent3 database를 활용하여 원료 추출, 화석 연료 생산 및 전기 생산 등의 데이터를 수집하였다. 전과정 평가는 크게 4가지 단계로 구성되어 있으며, Fig. 3과 같이 목적 및 범위 설정(Goal and scope definition), 전과정 목록 분석(Life cycle inventory analysis), 전과정 영향 평가(Life cycle impact assessment), 결과해석(Interpretation)에 따라 진행하였다(Rosyid et al, 2020; Stafford et al, 2016).

본 연구의 목표는 석회석을 OPC에 최대 15 %까지 치환 시 환경에 미치는 영향을 평가하는 것이며, 기능 단위(Functional unit)는 Table 2에 나타난 배합 비율에 따라 시멘트 1 ton 생산 시 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량으로 정의하였다. 시스템 경계(System boundary)는 사용 및 폐기 단계를 제외한 시멘트 생산부터 출고까지(Cradle-to-gate)로 설정하였다. 여기에는 원료의 추출과 가공, 대체 연료 공급 등 시멘트를 생산하는 데 필요한 작업이 포함된다.

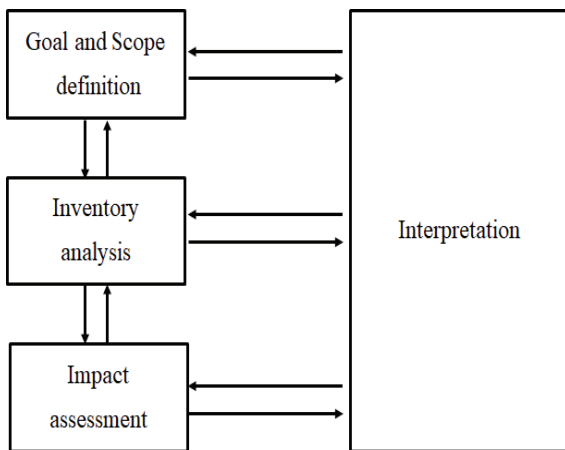


Fig. 3. Schematic diagram for life cycle assessment

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 플로우(Flow)

Fig. 4는 석회석의 분말도와 치환율에 따른 시멘트 모르타르의 플로우 실험 결과를 나타낸 것이다. 측정 결과, 석회석을 대체 사용할 경우 모든 배합에서 Plain 대비 플로우가 소폭 개선되었지만, 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 전체적으로 석회석이 고분말화 됨에 따라 플로우 개선 효과는 감소하였지만, 동일한 분말도 내에서 치환율이 증가할 경우 플로우 개선 효과는 증가하는 경향을 보였다. Plain과 유사한 분말도를 가지는 LL 배합에서 약 8 %의 가장 높은 개선 효과를 나타냈으며, Plain 대비 분말도가 약 1.8배, 3.6배 높은 ML과 HL 배합에서도 각각 최대 5.8 %, 3.1 %의 개선 효과를 보였다.

Lee et al.(2003)의 연구 결과에 의하면 분말 재료의 입도 분포는 충전율과 관련이 있으며 충전율은 유동성에 영향을 미쳐 입도 분포가 좁을 경우 큰 입자 사이의 공극이 증가하여 공극 내 물이 증가하고, 입도분포가 넓은 경우 작은 입자들이 공극을 채움에 따라 공극 내 물의 양이 감소하게 된다. 이때 석회석의 사용은 혼합된 최종 시멘트의 입도 분포를 개선하여 유동성이 향상된다고 보고하였다(Sakai et al, 1997). 또한 직접적으로 수화 반응에 참여하지 않는 석회석의 반응 특성에 따라 자유수가 증가하게 되며 이는 유동성 향상에 영향을 미친다. 따라서 석회석을 SCM으로 사용하여 OPC의 일부를 치환 시 석회석의 입도 분포 개선 효과와 자유수의 증가로 인해 동등 이상의 유동성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 분체계 재료의 반응성을 향상시키기 위한 가장 효율적인 방법이 분말도의 증가라는 점을 착안하였을 때 석회석을 고

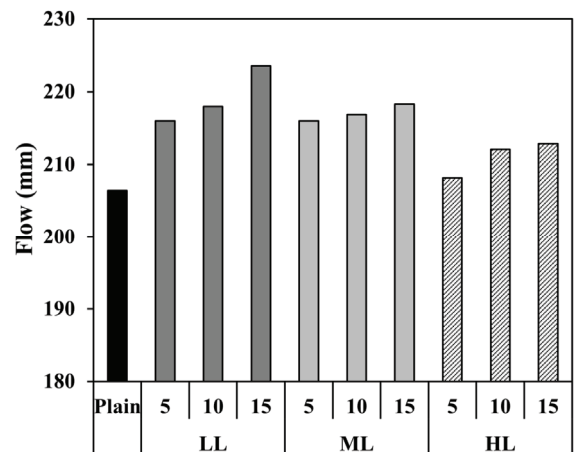


Fig. 4. Effect of fineness and replacement ratio of limestone powder on fluidity

분말화 하여 사용하는 것은 반응성 측면과 작업성 측면 모두에서 긍정적인 영향을 가져올 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2 모르타르 온도(Mortar temperature)

시멘트의 수화 반응 특성을 분석하기 위해 모르타르의 온도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 배합에서 유사한 온도 곡선 경향을 보이고 있으나 석회석의 분말도와 치환율에 따라 온도 상승 기울기와 최고 온도는 차이를 나타냈다. 전체적으로 초기 약 3.5시간 동안 일정한 온도 범위를 유지하였으며, 이후 가파른 기울기로 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 이는 C<sub>3</sub>S의 수화 반응이 본격적으로 시작되어 Portlandite와 C-S-H의 침전이 이뤄지고 있음을 의미한다. 이러한 C<sub>3</sub>S의 수화 반응에 따른 온도 상승은 사용된 석회석의 분말도에 따라 차이를 보였다. 가장 고분말도인 HL의 경우 Plain 대비 온도 상승이 가장 빨랐으며, ML은 유사하였고 LL은 지연되는 것으로 나타났다. 또한 ML과 LL은 치환율에 따른 차이가 크지 않지만 HL의 경우 치환율이 증가함에 따라 온도 상승 속도가 더 빠른 것으로 나타났다.

HL을 사용한 배합에서 Plain 대비 빠른 온도 상승은 석회석이 초기 C<sub>3</sub>S의 수화물인 C-S-H가 성장할 수 있는 핵종의 역할을 하여 C<sub>3</sub>S의 수화를 촉진시킨 것으로 추정된다(Lothenbach et al. 2008). 또한 치환율의 증가에 따른 결과는 석고 소비 이전에 수화 반응에 참여하지 않는 석회석의 반응 특성상 충전 효과에 의한 물-클링커 비율 증가로 인해 수화 생성물의 침전을 위한 공간의 가용성의 증가로 설명할 수 있다. 반면, LL을 사용한 배합에서 Plain 대비 수화온도 상승의 지연이 발생한 것은 OPC 대비 낮은 분말도를 가지는 석회석의 사용으로 인해 석회석이 가진 효과보다는 클링커 비율 감소로 인한 희석 효과가 더 지배적으로 작용한 것으로 생각된다.

최고 온도에 도달한 시간은 모든 배합에서 약 13시간으로 석회석의 분말도와 치환율에 따른 전체적인 경향은 유사한 것으로 나타났다지만, 분말도가 낮아지고 치환율이 증가함에 따라 최고 온도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. LL을 사용한 배합에서는 치환율이 증가함에 따라 최고 온도가 Plain 대비 약 6.2~11.7% 감소하였으며, ML과 LL에서도 각각 4.9~10.9%, 3.1~6.6% 낮은 것으로 나타났다. 모든 배합에서 조건에 관계 없이 Plain 대비 최고 온도가 낮게 나타났지만, 석회석의 분말도가 높을수록 그 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

석회석의 대체는 반응에 참여하는 총 클링커 양의 감소로 인해 희석 효과가 발생하며, 수화온도에도 영향을 미친다. 하지만 석회

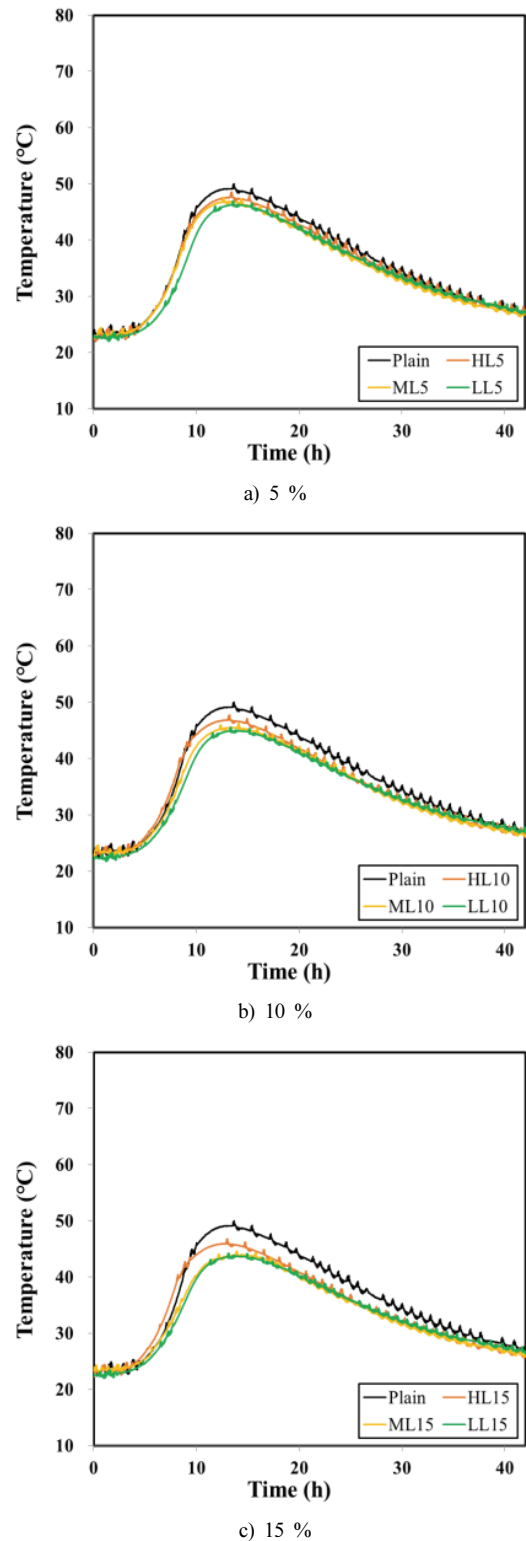


Fig. 5. Effect of fineness and replacement ratio of limestone powder on mortar temperature

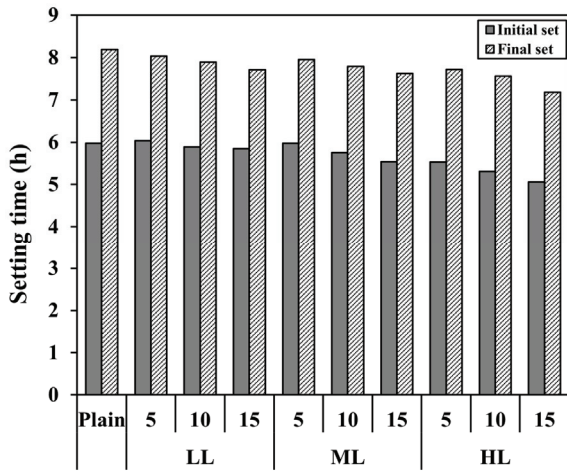


Fig. 6. Effect of fineness and replacement ratio of limestone powder on setting time

석의 고분말화와 같은 품질 개선을 통해 이러한 희석 효과를 일부 보상할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.3 응결 시간(Setting time)

Fig. 6은 모르타르를 대상으로 측정한 응결 시간 측정 결과를 나타낸 것이다. 초결은 약 5.1~6.0시간, 종결은 약 7.2~8.2시간으로 나타났으며, 석회석의 분말도와 치환율이 증가함에 따라 초결 및 종결 시간은 Plain 대비 단축되는 것으로 나타났다. LL을 사용한 배합의 경우 치환율 증가에 따른 응결 시간의 감소가 크지 않았지만, ML과 HL의 경우 뚜렷한 응결 시간 감소를 확인하였다. 특히, 고분말도인 HL의 배합에서 가장 큰 응결 단축을 보였으며 Plain 대비 초결과 종결 시간에서 약 1시간의 단축이 나타났다. 초결이 발생한 후 종결에 이르는 시간은 약 2시간으로 모든 배합에 있어 큰 차이를 나타내지 않았다.

시멘트의 초결과 종결은 각각 유도 기간 이후 C<sub>3</sub>S의 수화가 가속화되는 시점 이후와 가속화 중에 발생한다. 응결 시험 결과를 모르타르 온도 결과와 비교해 보았을 때, C<sub>3</sub>S의 수화가 가속화되는 시점인 약 3.5시간 이후 5~6시간에서 초결이 발생했으며 이후 가속화 중인 7~8시간에서 종결이 나타났다. 이때 초결과 종결이 발생한 시점에서 모르타르 온도는 LL과 ML의 경우 Plain보다 낮거나 유사하였다. 반면, HL의 경우 치환율이 증가함에 따라 최대 3 °C 높은 모르타르 온도를 나타냈다. 시멘트의 응결은 초기 반응성과 관련이 있으며 반응성이 높을 경우 수화 반응 과정에서 방출된 열로 인해 모르타르의 온도가 상승하게 된다. 즉, 모르타르 온도가 높다는 것은 빠른 수화 반응이 일어났다는 것을 의미한다(Wang

et al, 2018). 따라서 고분말도의 석회석 사용으로 인해 발생한 빠른 초기 수화가 응결에도 영향을 미친 것으로 생각된다.

### 3.4 압축 강도(Compressive strength)

석회석의 분말도 및 치환율에 따른 압축강도 측정 결과 및 Plain 대비 상대압축강도를 Table 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 전체적인 강도 특성은 석회석의 치환율이 증가함에 따라 강도는 감소하였지만, 분말도를 증가시킬수록 강도 발현성은 증가하는 것으로 나타났다.

고분말도인 HL을 사용한 실험의 경우, 치환율 10 %까지 모든 재령에서 Plain 대비 약 90 % 이상의 높은 강도 발현을 나타냈다. 특히, 5 % 치환율 조건에서는 재령 7일과 28일에 각각 102.6, 103.3 %로 Plain 대비 높은 강도 발현을 보였다. 또한 치환율 10 % 조건에서 재령 28일 상대압축강도는 99.1 %로 Plain과 동등한 강도 발현을 나타냈다.

한편 ML과 LL을 사용한 시험체의 경우, 치환율과 관계없이 재령 1일에서 Plain 대비 85 % 이하의 낮은 강도 발현을 나타냈으며 LL의 경우 최대 40 %의 강도 손실을 보였다. 치환율 10 %까지는 ML과 LL에서 재령 28일 압축강도가 약 90 % 수준으로 나타났

Table 6. Result of relative compressive strength based on plain and compressive strength (compressive strength are given in parentheses)

Sample	Relative compressive strength, % (compressive strength, MPa)			
	1 day	3 day	7 day	28 day
Plain	100.0 (20.1)	100.0 (37.5)	100.0 (45.9)	100.0 (51.5)
LL5	72.4 (14.6)	88.9 (33.3)	90.5 (41.5)	97.4 (50.1)
LL10	67.6 (13.6)	86.0 (32.2)	84.2 (38.6)	89.2 (45.9)
LL15	60.0 (12.1)	78.1 (29.3)	82.4 (37.8)	83.1 (42.8)
ML5	84.5 (17.0)	89.3 (33.5)	94.5 (43.4)	100.0 (51.5)
ML10	74.3 (14.9)	87.9 (32.9)	90.7 (41.6)	95.0 (48.9)
ML15	66.8 (13.4)	83.6 (31.3)	83.6 (38.3)	86.3 (44.4)
HL5	96.4 (19.4)	99.4 (37.3)	102.6 (47.0)	103.3 (53.2)
HL10	89.6 (18.0)	92.3 (34.6)	95.2 (43.6)	99.1 (51.0)
HL15	82.1 (16.5)	86.7 (32.5)	88.4 (40.5)	88.0 (45.3)

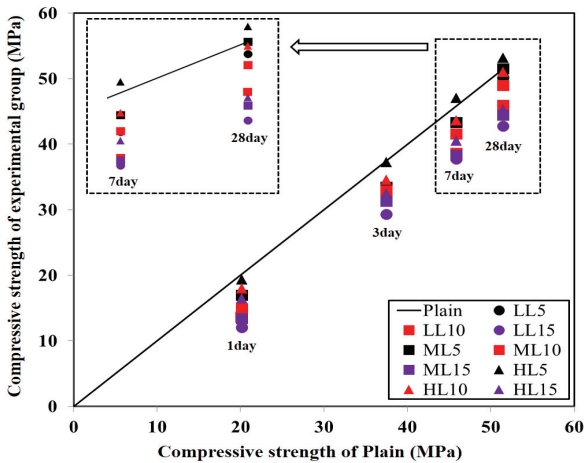


Fig. 7. Effect of fineness and replacement ratio of limestone powder on compressive strength (The linear line indicates the compressive strength of the Plain)

며 ML5와 LL5의 경우 재령 28일에서 각각 100, 97.4 %로 Plain과 동등한 수준의 강도 발현을 나타냈다. 반면, 15 % 범위에서는 HL과 같이 여전히 약 88 % 이하의 강도 발현을 보였다.

석회석은 고로슬래그나 플라이애시와 같이 시멘트 강도 발현에 직접적으로 높은 기여율을 가진 재료가 아니기 때문에 OPC를 다량의 석회석으로 대체한 시험체의 강도 감소는 클링커 함량 감소에 따른 희석 효과에 의한 당연한 결과이다(Ramezani pour et al, 2009). 하지만 석회석은 충전 효과와 핵종 효과를 통해 초기 재령에서 시멘트 수화에 간접적으로 긍정적 영향을 미치며 (Berodier and Scrivener 2014; Schöler et al, 2017), C<sub>3</sub>A 혹은 알루미늄과의 반응으로 CO<sub>3</sub>-AFm 상의 수화물을 형성하여 강도 발현에 불리한 영향을 미치는 일부 희석 효과를 상쇄시키는 역할을 한다(Zajac et al, 2014). 또한 분말도를 증가시킬 경우 이러한 효과를 보다 기대할 수 있다(Briki et al, 2021). 하지만, 초기 C<sub>3</sub>S의 수화를 촉진시키는 등 석회석이 가진 긍정적인 반응 메커니즘에도 불구하고 1일 재령의 강도발현은 상당히 낮은 것으로 나타났다. 이는 희석 효과로 인해 초기 생성된 칼슘실리케이트 및 알루미늄이 수화물이 아직 치밀한 시멘트 매트릭스를 구성하지 못한 이유로 생각된다. 한편, 3일 이후의 강도 발현의 증가는 석회석이 시멘트의 공극 용액(Pore solution)으로 천천히 용해되어 C<sub>3</sub>A와의 반응을 통해 CO<sub>3</sub>-AFm 상의 수화물을 형성하여 재령 3일 이후의 강도 발현에 기여한 것으로 판단된다(Moon et al, 2017).

상기 실험 결과를 바탕으로 OPC 대비 분말도가 높은 석회석을 활용할 경우 최대 10 % 치환율 수준까지는 희석 효과로 인해 발생하는 강도 발현 저하를 어느 정도 보상할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.5 건조 수축(Drying shrinkage)

건조수축은 모르타르 비빔 후 7일 간격으로 28일까지 측정하였으며 결과를 Table 7에 나타내었다. 건조 수축 변형은 재령 7일에 0.009~0.013 %의 수축이 발생했으며 재령 14일에는 0.022~0.031 %로 7일까지의 수축 폭과 유사하였다. 이후 재령 28일까지의 수축은 14일 대비 완만하게 진행되었으며 최종적으로 0.033~0.041 %로 나타났다. 석회석을 사용한 경우 Plain 대비 발생했지만, 수축률은 0.002~0.009 % 이내 수준으로 석회석의 사용이 건조 수축에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 생각된다. 일반적으로 시멘트가 완전히 수화하는 데 필요한 수량은 약 25 %로 보고되고 있으며, 입자 간의 겔(gel)수로서 15 %의 물이 시멘트 수화에 관여한다. 이외의 수량은 자유수로서 유동성에 기여한다. 이때 시멘트와 결합하지 않은 물은 공극으로 남아 강도 저하, 수축, 균열 등의 원인으로 작용한다(Meddah et al, 2014). 이러한 관점에서 석회석은 수화 반응에 참여하지 않는 재료로 간주할 수 있으며 이에 따라 w/c가 증가하여 건조수축이 증가한 것으로 생각된다.

Table 7. Result of drying shrinkage

Sample	Drying shrinkage (%)			
	7 day	14 day	21 day	28 day
Plain	0.009	0.022	0.029	0.033
LL5	0.013	0.028	0.034	0.039
LL10	0.013	0.029	0.035	0.040
LL15	0.013	0.031	0.036	0.041
ML5	0.010	0.027	0.032	0.036
ML10	0.011	0.027	0.032	0.036
ML15	0.012	0.027	0.032	0.037
HL5	0.010	0.026	0.031	0.036
HL10	0.011	0.027	0.032	0.036
HL15	0.011	0.028	0.033	0.037

### 3.6 환경 영향 평가(Environmental Impact)

시멘트 공장에서 생산된 시멘트는 콘크리트 공장으로 운송되며 콘크리트용 혼화재료 및 골재와 혼합되어 최종적으로 건설 현장에 활용된다. 시멘트가 최종적으로 사용되기까지는 추가적인 재료 및 운송 단계에서의 CO<sub>2</sub>가 포함된다. 본 연구에서는 시멘트 공장에서 최종적으로 생산된 시멘트만을 대상으로 평가하였으며, 여기에 추가로 석회석에 대한 CO<sub>2</sub> 배출량을 고려하였다. 석회석은 모든 시멘트 공장에서 이미 보유하고 있는 재료이므로 운송에 대한 CO<sub>2</sub>는 배제하였으며 분쇄 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>만을 고려하여 평가를



수행하였다.

Table 8은 OPC와 석회석에 대한 CO<sub>2</sub>eq kg/m<sup>3</sup>, 대상 국가 및 인용 출처를 정리하여 나타낸 것이다. OPC의 경우 본 평가에 활용된 소프트웨어 내 Ecoinvent3 database를 활용하였으며, 석회석의 경우 Leeuwen et al.(2016)이 2015년 Huber Engineered Materials로부터 제공 받은 입자 크기 따른 석회석의 탄소 배출량 데이터를 인용하여 활용하였다. 본 연구에 사용된 석회석의 경우 입자 크기가 각각 2.3 μm(HL), 6.4 μm(ML), 15.5 μm(LL)로 인용한 석회석과 유사한 입자크기를 가지고 있어 탄소 배출량 평가에 적합하다고 판단하였다.

Table 9는 석회석의 분말도와 치환율에 따라 배합된 최종적인 시멘트와 각각 재료의 CO<sub>2</sub>eq kg/m<sup>3</sup>를 나타낸 것이다. OPC를 석회석으로 대체할 경우 치환율이 증가함에 따라 총 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 석회석의 분말도가 증가함에 따라 원료로 사용된 석회석의 추가적인 분쇄 과정에서 발생한 CO<sub>2</sub>로 인해 총 CO<sub>2</sub> 배출은 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

Plain을 기준으로 각각 배합의 CO<sub>2</sub> 감축률은 5 % 치환 시 약

**Table 8. Information on CO<sub>2</sub> emissions of the production of raw materials**

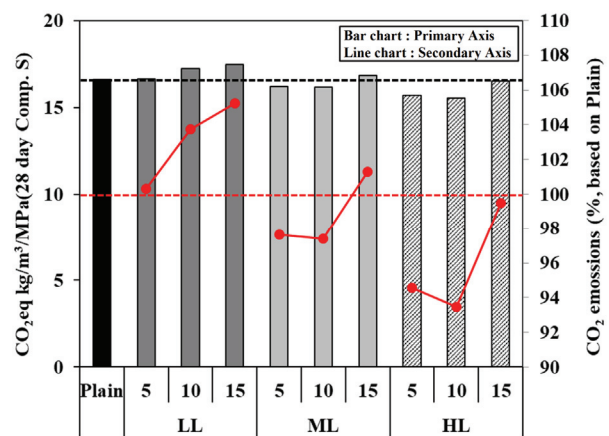
Material	Kg-CO <sub>2</sub> eq /m <sup>3</sup>	Country	Source
OPC	855	EU without Switzerland	Ecoinvent3
LL-15 μm	1.4	USA	R. V. Leeuwen et al. (2016)
ML-8 μm	2.9		
HL-4.5 μm	10.6		

**Table 9. Information on CO<sub>2</sub> emissions of manufactured cements**

Sample	CO <sub>2</sub> eq kg/m <sup>3</sup>			CO <sub>2</sub> reduction ratio
	Raw materials		Total	
	OPC	LS		
Plain	855	-	855.00	0.00
LL5	835	0.08	835.08	2.33
LL10	791	0.17	791.17	7.47
LL15	747	0.25	747.25	12.60
ML5	835	0.16	835.16	2.32
ML10	791	0.32	791.32	7.45
ML15	747	0.48	747.48	12.58
HL5	835	0.54	835.54	2.28
HL10	791	1.09	792.09	7.36
HL15	747	1.63	748.63	12.44

2.3 %, 10 %와 15 %에서는 각각 약 7.5, 12.5 %로 나타났다. 석회석을 고분말화하여 사용할지라도 총 CO<sub>2</sub> 배출에 미치는 영향은 0.15 % 이내로 크지 않는 것으로 나타났다. 석회석을 분쇄하는 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>는 최대 7.5배의 큰 차이를 보이지만, 최종적으로 석회석이 혼합된 시멘트에서 OPC가 차지하는 비율은 약 99 % 이상으로 석회석의 분쇄에 대한 영향은 매우 낮음을 확인할 수 있었다. 이는 시멘트 클링커가 환경에 미치는 영향이 매우 큰 재료라는 것을 의미하며, 반대로 석회석이 매우 친환경적인 재료라는 것을 뜻한다.

Fig. 8은 CO<sub>2</sub> 배출량을 동일한 물리적 성능 수준에서 비교하기 위해 재령 28일 압축 강도를 기준으로 Total CO<sub>2</sub>eq kg/m<sup>3</sup>을 MPa로 정규화한것과 Plain 대비 상대적인 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타낸 것이다. Plain을 포함한 모든 시멘트는 15~17 CO<sub>2</sub>eq kg/m<sup>3</sup>/MPa 수준이었으며 석회석의 분말도와 치환율에 따라 차이를 보였다. 저분말도 석회석인 LL의 경우 치환율이 증가함에 따라 Plain 대비 CO<sub>2</sub> 배출량이 높아지는 것으로 나타났으며 15 %에서 CO<sub>2</sub>가 5.2 % 많이 배출되는 결과를 나타냈다. LL에서는 3가지 치환 조건 모두 Plain 대비 높은 CO<sub>2</sub> 배출량을 보여 저분말도의 경우 15 %까지 대체할지라도 CO<sub>2</sub> 저감 측면에서는 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 중간분말도와 고분말도인 ML과 HL에서는 치환율 10 %까지 CO<sub>2</sub> 배출량이 Plain 대비 각각 2.6 %, 6.5 % 낮은 것으로 나타났다. 이는 석회석의 분말도를 높이기 위한 분쇄 과정에서 추가적인 CO<sub>2</sub>가 배출될지라도 고분말화된 석회석이 시멘트 수화에 미치는 긍정적인 영향으로 인해 일부 희석 효과가 보상되고 이는 강도 발현에 긍정적인 영향을 미쳐 Plain보다 많은 CO<sub>2</sub>를 감축할 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 15 % 대체 조건에서 HL의 경우 Plain과 동등한



**Fig. 8. CO<sub>2</sub>eq emissions for the same physical performance level (Based on compressive strength at 28 days)**

수준으로 나타났지만, ML의 경우 희석 효과가 더 크게 작용하여 1.3 %의 CO<sub>2</sub>가 더 배출되는 결과를 나타냈다. 따라서 28일 압축 강도를 기준으로 동일한 물리적 성능에서 CO<sub>2</sub>를 평가한 결과, 저 분말도 수준보다는 중간 분말도 이상에서 10 % 대체하는 것이 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이는 측면에서 가장 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 PLC의 활용 가능성을 평가하기 위해 석회석의 분말도가 시멘트의 물리적 특성 및 환경에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. OPC에 석회석을 대체하여 사용할 경우 석회석의 분말도와 치환율에 관계없이 OPC 대비 동등 이상의 유동성을 나타냈으며, 고분말도의 석회석을 사용할지라도 충분한 작업성을 확보할 수 있을 것으로 나타났다.
2. 고분말도의 석회석의 사용은 초기 C-S-H 성장을 위한 핵종의 역할을 하여 OPC 대비 초기 모르타르 온도 상승을 가속시키는 것으로 나타났다. 다만, 클링커가 석회석으로 희석됨에 따라 최고 온도는 모든 배합에서 OPC 보다 낮게 나타났다.
3. 석회석 분말도와 치환율이 증가함에 따라 응결이 빨라졌으며 최대 1시간 단축되는 것으로 나타났다. 이는 모르타르 온도 결과와 비교하였을 때 초기 수화 촉진에 따른 결과로 생각된다.
4. 석회석의 대체는 치환율이 증가함에 따라 희석효과로 인해 압축 강도가 저하되는 결과가 나타났다. 하지만 석회석의 분말도를 증가시킬 경우 10 % 치환율까지는 OPC와 동등하거나 높은 압축 강도를 보였다. 따라서 석회석의 분말도를 증가시키는 것이 공학적 측면에서 희석 효과를 가장 효율적으로 줄일 방법이라 판단된다.
5. 건조 수축 변형은 OPC를 반응성이 낮은 석회석으로 대체함에 따라 수화반응에 기여하지 않는 자유수의 증가로 인해 OPC보다 약간의 수축이 더 발생했지만, 수축률의 차이는 매우 미미하여 건조 수축에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.
6. CO<sub>2</sub> 배출량을 기반으로 환경 영향을 평가한 결과, 석회석은 분쇄 과정에서 추가적인 CO<sub>2</sub> 배출을 수반하지만, 그 영향은 크지 않아 OPC에 석회석을 15 % 대체 시 약 12.5 %의 CO<sub>2</sub>를 저감시킬 수 있음을 확인하였다.
7. 재령 28일 압축 강도를 기준으로 동일한 물리적 성능에서의

CO<sub>2</sub> 배출량을 평가한 결과, 석회석을 고분말화 하는 것이 CO<sub>2</sub> 감축 측면에서는 더 효과적이며 10 %까지의 대체 수준이 CO<sub>2</sub> 감축 효과를 최대화할 수 있는 최적 수준으로 나타났다.

시멘트 산업의 탄소중립을 위해서는 혼합재를 활용하여 시멘트 내 클링커의 비율을 낮추는 것이 현실적으로 가장 바람직한 방법의 하나이며, 이상의 결과로부터 본 연구에서 활용된 석회석이 탄소중립 관점에 매우 부합하는 재료임을 확인할 수 있었다. 다만, 석회석은 다른 SCM 대비 반응성이 낮아 치환율이 증가함에 따라 희석효과를 수반하기 때문에 많은 연구자들은 적정 치환 범위를 최대 15 % 이내로 제안하였으며 본 연구에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 석회석의 희석 효과는 원료 자체의 품질 개선을 통해 일부 상쇄시킬 수 있으며 이러한 관점에서 본 연구에서는 피분쇄성이 높은 석회석의 장점을 활용하여 분말도의 개선을 통한 시멘트의 물리적 특성과 환경 영향 평가를 수행하여 유의미한 결과를 확인하였다. 하지만 석회석이 가진 반응 효과를 극대화시키기 위해서는 다른 SCM과의 복합 사용 및 화학 혼합제 적용 등의 추가적인 검토가 필수적으로 이뤄져야 할 것으로 생각되며, 이를 통해 석회석의 함량을 증가시킨 시멘트의 품질이 입증된다면 기존의 혼합재를 대체하기 위한 향후 주요 혼합재로서 석회석의 역할이 시멘트 산업의 탄소중립에 기여하는 바가 클 것으로 판단된다.

#### Conflict of interest

None.

#### 감사의 글

이 연구는 공주대학교 2021년 하반기 연구년 사업에 의하여 연구되었음. 또한, 이 연구는 2023년도 산업통상부의 재원으로 한국산업기술평가관리원-탄소중립산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00263550).

#### References

- Adu-Amankwah, S., Zajac, M., Stabler, C., Lothenbach, B., Black, L. (2017). Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements, *Cement and Concrete Research*, **100**, 96-109.
- Andres, A., Marland, G., Boden, T., Bischof, S. (2017). National CO<sub>2</sub> Emissions From Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture and

- Gas Flaring : 1751–2014, US Department of Energy.
- ASTM International (2021). ASTM C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
- ASTM International (2018). ASTM C596 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- Aqel, M., Panesar, D.K. (2016). Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler, *Construction and Building Materials*, **113**, 359–368.
- Berodier, E., Scrivener, K. (2014). Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C–S–H, *Journal of the American Ceramic Society*, **97(12)**, 3764–3773.
- Birol, F. (2018). Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry, International Energy Agency.
- Briki, Y., Zajac, M., Haha, M.B., Scrivener, K. (2021). Impact of limestone fineness on cement hydration at early age, *Cement and Concrete Research*, **147**, 106515.
- Canadian Standards Association (2018). CSA A3001 Cementitious Materials for Use in Concrete.
- Chau, C.K., Leung, T.M., Ng, W.Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings, *Applied Energy*, **143**, 395–413.
- Das, S., Aguayo, M., Dey, V., Kachala, R., Mobasher, B., Sant, G., Neithalath, N. (2014). The fracture response of blended formulations containing limestone powder: evaluations using two-parameter fracture model and digital image correlation, *Cement and Concrete Composites*, **53**, 316–326.
- De Schutter, G. (2011). Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete, 36th Conference on Our World in Concrete & Structures : Recent Advances in the Technology of Fresh Concrete, 49–54.
- Escalante-Garcia, J.I., Sharp, J.H. (1998). Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part ii, blended cements, *Cement and Concrete Research*, **28(9)**, 1259–1274.
- European Committee for Standardization (2011). EN 197-1 Cement – Part 1 Composition, Specifications and Uniformity Criteria for Common Cements.
- Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., Habert, G. (2018). A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry—Technology Assessment for Full Decarbonisation of the Industry by 2050, ETH Zurich.
- Hooton, R.D., Nokken, M., Thomas, M.D.A. (2007). Portland-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis For CSA A 3000, Cement Association of Canada, 6–7.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., Moraes, R. (2003). Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, **25(1)**, 69–76.
- John, E., Matschei, T., Stephan, D. (2018). Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – a review, *Cement and Concrete Research*, **113**, 74–85.
- Kadri, E.H., Aggoun, S., De Schutter, G., Ezziane, K. (2010). Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration, *Materials and Structures*, **43**, 665–673.
- Korea Standard Association (2021). KS L 5201 Portland Cement [in Korean].
- Korea Standard Association (2022a). KS L ISO 679 Cement—Test Methods—Determination of Strength [in Korean].
- Korea Standard Association (2022b). KS L 5105 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar [in Korean].
- Korea Standard Association (2022c). KS F 2436 Standard Test Method for Setting Times of Concrete Mixture by Penetration Resistance [in Korean].
- Lee, J.K., Chu, Y.S., Song, H. (2011). Effect of limestone powder on hydration of  $C_3A-CaSO_4 \cdot 2H_2O$  system, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **48(6)**, 584–588 [in Korean].
- Lee, S.H., Kim, H.J., Sakai, E., Daimon, M. (2003). Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, **33(5)**, 763–768.
- Leeuwen, R.V., Kim, Y.J., Sriraman, V. (2016). The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete, *Journal of Civil Engineering Research*, **6(4)**, 104–113.
- Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Research*, **38(6)**, 848–860.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011). Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, **41(12)**, 1244–1256.
- Manjunatha, M., Preethi, S., Mounika, H.G., Niveditha, K.N. (2021). Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement based materials, *Materials Today: Proceedings*, **47(13)**, 3637–3644.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003). *Concrete*, Pearson.
- Moon G.D., Oh, S.W., Jung, S.H., Choi, Y.C. (2017). Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and

strength development of PLC concrete, *Construction and Building Materials*, **135**, 129–136.

Meddah, M.S., Lmbachiya, M.C., Dhir, R.K. (2014). Potential use of binary and composite limestone cements in concrete production, *Construction and Building Materials*, **58**, 193–205.

Pan, S.Y., Lai, B., Ren, Y. (2019). Mechanistic insight into mineral carbonation and utilization in cement-based materials at solid-liquid interfaces, *RSC Advances*, **9(53)**, 31052–31061.

Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth (2021). 2050 Carbon Neutral Scenario [in Korean].

Ramezani-pour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani M., Moodi, F. (2009). Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, *Cement and Concrete Composites*, **31(10)**, 715–720.

Rode, S., Oyabu, N., Kobayashi, K., Yamada, H., Kühnle, A. (2009). True atomic-resolution imaging of (1014) calcite in aqueous solution by frequency modulation atomic force microscopy, *Langmuir*, **25(5)**, 2850–2853.

Rosyid, A., Boedisantoso, R., Iswara, A.P. (2020). Environmental Impact Studied using life cycle assessment on cement industry, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **506(1)**, 012024

Sakai, H., Hoshimo, S., Ohba, Y., Daimon, M. (1997). The fluidity of cement paste with various types of inorganic powders, *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, 19–26.

Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., Haha, M.B., Zajac, M., Ludwig, H.M. (2017). Early hydration of SCM-blended Portland cements: a pore solution and isothermal calorimetry study, *Cement and Concrete Research*, **93**, 71–82.

Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M., Khelafi, H. (2014). Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar, *Powder Technology*, **254**, 314–323.

Shalan, A., Kahn, L.F., Kurtis, K., Nadelman, E. (2016). Assessment of High Early Strength Limestone Blended Cement for Next Generation Transportation Structures : Final Report, Georgia Department of Transportation.

Soroka, I., Stern, N. (1976). Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, **6(3)**, 367–376.

Stafford, F.N., Dias, A.C., Arroja, L., Labrincha, J.A., Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study, *Journal of Cleaner Production*, **126**, 159–165.

The Government of the Republic of Korea (2020). 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea Towards a Sustainable and Green Society, Seoul, 6–128 [in Korean].

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., Ou, Z. (2018). A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures, *Construction and Building Materials*, **181**, 659–672.

Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., Lothenbach, B. (2014). Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Composites*, **46**, 99–108.

**석회석의 분말도가 시멘트의 물리적 특성 및 환경에 미치는 영향**

시멘트 산업은 클링커 생산 과정에서 약 60 % 이상의 CO<sub>2</sub>가 발생하며 이러한 많은 양의 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 저감 시키기 위해 범세계적으로 시멘트 대체 재료가 활용되고 있다. 대표적으로 활용되는 시멘트 대체 재료는 고로슬래그와 플라이애시가 있으며, 이들은 시멘트 산업을 비롯한 콘크리트용 혼화재료, 지반 고화재 등 다양한 산업에서도 활용되고 있다. 하지만, 각 산업의 탄소중립 전략에 따라 향후 이들의 가용성은 낮아질 것으로 전망되고 있기 때문에 시멘트 산업의 보통포틀랜드시멘트 혼합재 함량 증대 목표를 달성하기 위해서는 새로운 시멘트 대체 재료를 활용해야 한다. 석회석은 이미 시멘트 산업에서 다량 보유하고 있는 재료로 가용성 측면에서 장점이 있으며 분쇄효율이 높아, 해외 선진국에서는 이미 포틀랜드 석회석 시멘트를 표준으로 제정하여 상용화하고 있다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 국내 PLC의 활용 가능성을 평가하기 위해 석회석의 분말도와 치환율이 시멘트의 물리적 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 탄소중립 관점에서 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하여 시멘트의 환경 영향 평가를 수행하였다.