Resources Recycling
Vol. 32, No. 5, 2023, 62-69
https://doi.org/10.7844/kirr.2023.32.5.62
pISSN : 2765-3439 eISSN : 2765-3447

≫ 연구논문 ≪

시멘트 클링커 특성에 미치는 IM과 염소 함량의 영향 분석

이영준 · 염우성 · 서성관 · §추용식

한국세라믹기술원 탄소중립소재센터

Effects of IM and Chlorine Contents on Cement Clinker

Young Jun Lee, Woo Sung Yum, Sung Kwan Seo and §Yong Sik Chu

Carbon Neutrality Materials Center, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech.

요 약

시멘트 산업은 다양한 산업부산물을 시멘트 클링커용 원료 및 연료로 사용하고 있다. 이들 산업부산물은 대부분 염소를 함유하여 클링커 물성에 다양한 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 염소 함량을 제어한 클링커의 광물학적 특성, 특히 알라이트 및 벨라이트 광물 특성과 소성성을 검토하였다. 클링커의 소성성은 IM 변화와 무관하게 염소 함량 증가에 따라 좀 더 양호했으며, 특히 염소 함량 2,000ppm 조건에서 가장 양호한 결과가 도출되었다. 이때 Free-CaO 함량은 염소 함량 0ppm 대비 2,000ppm에서 약 37% 감소한 수준이었다. 알라이트 결정 크기는 염소 함량 증가에 따라 소폭 증가하였으며, IM 증가에 따라서는 작아지는 결과가 도출되었다. 알라이트의 XRD 피크 강도는 IM 1.5 및 1.7 조건에서 염소 함량 1,000ppm까지 증가하나, 2,000ppm에서는 소폭 감소하였다. 하지만 염소 함량 2,000ppm에서도 알라이트 피크 강도는 0ppm 보다 높은 값을 나타내었다. 상기의 결과로부터 IM과 염소 함량은 클링커 광물 크기를 변화시킬 수 있으며, 또한 XRD 피크 강도도 변화시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

주제어 : 산업부산물, 클링커, 염소 함량, 광물 크기, XRD 피크 강도

Abstract

The cement industry uses various industrial by-products as raw materials and fuel for cement clinker. Most of industrial by-products with chlorine can affect clinker properties. In this study, the mineralogical properties of clinker as chlorine content, especially alite and belite mineral properties and burnability were examined. The burnability of clinker was better as the chlorine content increased and the best results were obtained at clinker with 2,000ppm chlorine. Free-CaO content decreased by about 37% at 2,000ppm compared to 0ppm chlorine. Alite size increased slightly as the chlorine content increased, and became smaller as IM increased. XRD peak intensity of alite increased up to 1,000ppm chlorine content under IM 1.5 and 1.7 conditions, but slightly decreased at 2,000ppm. But alite peak intensity at 2,000ppm was higher than that of 0ppm. From the above results, it was confirmed that IM and chlorine content can change the clinker mineral size and also change the XRD peak intensity.

Key words : By-products, Clinker, Chlorine content, Mineral size, XRD peak intensity

· Received : October 16, 2023 · Revised : October 22, 2023 · Accepted : October 23, 2023

§ Corresponding Author : Yong Sik Chu (E-mail : yschu@kicet.re.kr)
Carbon Neutrality Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 06716, Korea

ⓒThe Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. 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.

1. 서 론

국내 시멘트 공장에서는 다양한 폐기물들을 시멘트 원·연료로 사용하고 있으며, 이들 폐기물 사용량은 1,720천 톤/'20년에 이르고 있다[1]. 시멘트 원료로는 폐주물사, 석탄재, 하수슬러지 및 제철·제강 슬래그 등이, 연료로는 폐타이어, 폐합성수지, 폐목재 및 재생유 등이 사용되고 있다[2,3]. 이들 원·연료의 대부분은 염소 성분을 함유하여 클링커 및 시멘트 물성에 다양한 영향을 미치며, 특히 염소 성분은 클링커 소성성과 클링커 광물 특성(크기, 함량 등)에도 영향을 줄 수 있다[4,5]. 클링커 광물은 크게 4가지로 대분할 수 있으며(4대 광물), 이는 알라이트, 벨라이트, 알루미네이트, 페라이트 등으로 표현되고 있다. 보통 클링커 광물의 약 50~60%를 차지하는 알라이트 결정은 시멘트 초기 강도를 좌우하며, 클링커 광물 중 약 20%를 차지하는 벨라이트는 28일 이후의 장기 강도에 영향을 줄 수 있다. 간극상인 알루미네이트와 페라이트는 클링커 광물의 약 20%를 차지하며, 이중 알루미네이트는 최종 시멘트의 응결시간 및 작업성 등을 좌우하는 특징도 있다[6]. 일부 연구자들은 Table 1과 같이, 광학현미경을 사용하여 클링커 광물 크기를 측정한 후 알라이트 및 벨라이트 크기별로 점수화 하여 압축강도 값을 예측하였으며, 이때 알라이트 크기는 15~20μm, 벨라이트는 25~40μm가 가장 적합하다고 발표하였다[7]. 즉 클링커 광물 크기는 최종 시멘트의 압축강도 등의 물성에도 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 더불어 클링커 광물 크기는 염소 함량에 따라서도 변화될 수 있으므로, 이에 대한 체계적 연구도 필요하다고 판단된다. Lee 등은 클링커 함유 염소량이 적정할 경우, 클링커 소성성이 양호해져 알라이트 생성이 촉진되고, 동일 염소 함량 조건에서는 IM이 낮아질수록 소성성이 양호해진다고 발표하였다[8]. 하지만 일부 연구자들은 시멘트의 염소 함량이 증가할수록 유동성 저하, 응결시간 감소 및 장기 압축강도 저하 등이 발생한다고 보고하였다[9,10].

Table 1. Example of optical quality factors for cement clinker[7]

Alite		Belite	
Size (μm)	Quality (Point)	Size (μm)	Quality (Point)
15~20	4	25~40	4
20~30	3	20~25	3
30~40	2	15~20	2
40~60	1	5~10	1

따라서 본 연구에서는 염소 함량을 제어한 클링커 제조 후, 클링커의 광물학적 특성, 특히 알라이트 및 벨라이트 광물 특성과 소성성을 검토하였다. 더불어 클링커 제조 시 IM 제어에 따른 광물 특성 변화도 분석하였다. 이후 IM 및 클링커 염소 함량과 클링커 광물(알라이트, 벨라이트 등) 특성과의 상관성을 도출하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이, 고염소 함유 클링커 제조 및 특성 분석을 위해 클링커 모듈러스 중 IM을 제어하였다. 각각의 모듈러스에 따라 혼합원료 제조 후 소성과정을 거쳐 클링커화 하였다. 제조된 클링커는 free-CaO를 측정하여 소성성을 분석하였으며, 클링커 주요 광물 크기 분석 및 광물들의 XRD 피크 강도를 분석하였다.

혼합원료 제조를 위해 $CaCO_3$(JUNSEI 99.5%), SiO_2(SAMCHUN 99.0%), Al_2O_3(SAMCHUN 99.0%), Fe_2O_3(SAMCHUN 95.5%) 시약을, 염소 공급 원료로는 $CaCl_2$(SAMCHUN 96.0%) 시약을 사용하였다. $CaCO_3$ 중 클링커 반응에 기여하는 CaO 함량 56%(CO_2 44%) 및 $CaCl_2$에 존재하는 Ca 함량 36%(Cl_2 64%)도 LSF, SM, IM 계산식(아래 식 (1)~(3))에 반영하였다. 이때 LSF(Lime Saturation Factor) 92, SM(Silica Modulus) 2.5, IM(Iron Modulus) 1.3, 1.5, 1.7로 제어하였다. 상기와 같이 염소

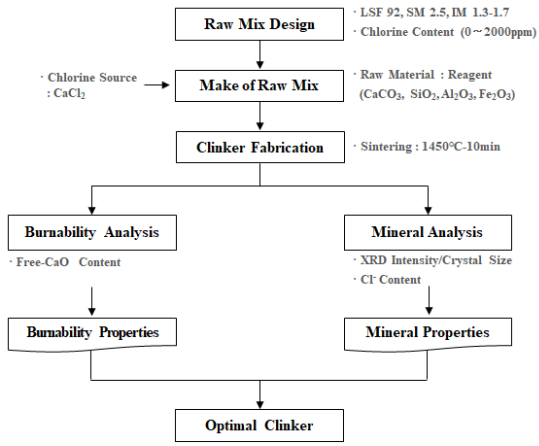


Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure.

함유 클링커 제조를 위해 $CaCl_2$를 사용하였으며, 이때 염소 함량은 0ppm, 500ppm, 1,000ppm, 2,000ppm이 되도록 혼합하였다. 최종 조합원료를 혼합하기 위해 볼밀(HT-1000, HAN TECH社, 한국)을 사용하여 30분간 혼합하였으며, 이후 혼합원료에 증류수를 33.4% 첨가하여 성구(25g)를 제조하였다.

$$LSF = \frac{CaO}{2.8 \times SiO_2 + 1.18 \times Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3} \times 100 \quad (1)$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

제조된 성구는 24시간 동안 100℃ 조건에서 항량 건조 후 소성하였다. 상온에서 전기로(HT-1630FL, HAN TECH社, 한국)에 장입된 성구는 승온속도 10℃/min로 900℃까지 승온한 후 30분간 유지하였으며, 이후 5℃/min로 1450℃까지 승온하여 10분간 유지한 후 냉각하였다. 이와 같이 제조된 클링커는 소성성 분석을 위해 에틸렌글리콜과 0.1N 염산을 사용하여 free-CaO 함량을 분석하였으며, X-선 회절분석기(Smartlab, Rigaku社, 일본)를 사용하여 클링커 4대 광물별 피크 강도(XRD peak intensity)를 분석하였다. 또한 클링커의 광물학적 특성 분석을 위해 광학현미경(DSX510, OLYMPUS社, 일본) 관찰도 수행하였으며, 이때 알라이트 및 벨라이트 결정 100개 이상을 분석하여 평균 크기 값으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 클링커 소성성 분석

Glasser 등은 조합원료의 소성온도별 클링커 4대 광물 함량 변화를 Fig. 2와 같이 표현하였다[11]. 석회석은 약 700~900℃에서 탈탄산 과정을 거친 후 미반응 생석회(CaO)로 변화되며, 900℃ 전후에서 CaO는 SiO_2와 반응하여 벨라이트($2CaO \cdot SiO_2$)로 변환되기 시작한다. CaO 양이 충분할 경우, SiO_2는 1200℃ 부근에서 대부분 벨라이트로 변화된다. 알라이트($3CaO \cdot SiO_2$)는 1,300~1,400℃에서 벨라이트와 잔존 CaO가 고상 반응하여 생성되며, 이때 반응속도는 대단히 느리게 진행된다. CaO-SiO_2계에 Al_2O_3나 Fe_2O_3가 공존하면 약 1,260℃ 이후 액상이 생성되며, 이들 액상은 벨라이트와 알라이트의 생성을 촉진한다. 상기의 모든 클링커링 반응과정을 거친 후 소성반응에 참여하지 않고 남아 있는 CaO를 free-CaO라고 한다. 이때 클링커링 반응에 참여하지 않은 free-CaO의 상대적 함량으로 소성성을 평가한다. Polysius社에서는 소성성 평가를 위해 소성 온도별 free-CaO 함량을 분석한 후 소성도(BI, Burnability Index)를 계산하나, 본 연구에서는 1,450℃에서의 free-CaO 함량만을 비교·분석하였다.

본 연구에서는 소성성 분석을 위해 염소 함량과 IM 변화에 따른 free-CaO 함량을 분석하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 모든 IM 조건(1.3~1.7)에서 염소 함량이 증가할수록 free-CaO 함량은 감소하였다. 특히 염소 함량 2,000ppm 클링커의 free-CaO 함량은 크게 감소하였다. 일례로 IM 1.3 조건에서 0ppm 0.79%, 2,000ppm 0.50%이었으며, 이는 0ppm 대비 2,000ppm에서 약 37% 감소한 수준이었다. 즉 염소 성분은 클링커 소성성 향상에 충분히 기여한다는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 염소가 광화제로 작용할 수 있다는 일반적 결과와도 일치하는 것이다. Lee 등은 염소 성분이 광화제로 작용하여 free-CaO 함량이 줄어든 것으로 판단하였으며, 이는 염소 화합물이

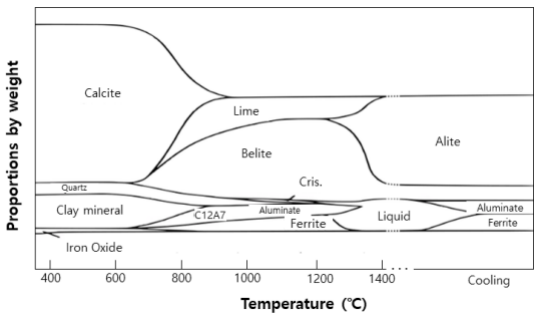


Fig. 2. Variations in phases during the formation of OPC clinker[11].

Table 2. Free-CaO content of clinker (Unit : %)

Chloride / IM	0 ppm	500ppm	1,000ppm	2,000ppm	Ave.
1.3	0.79	0.64	0.54	0.50	0.62
1.5	0.83	0.63	0.57	0.49	0.63
1.7	0.82	0.74	0.66	0.62	0.71

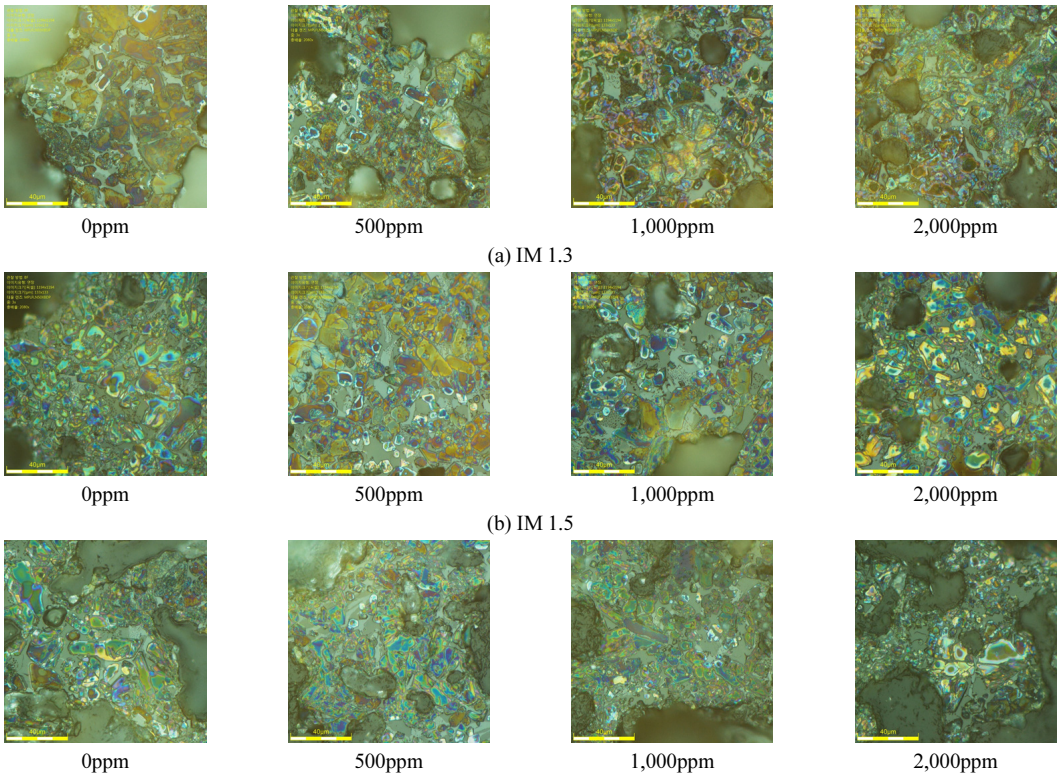


Fig. 3. Microstructure of clinker mineral used Optical microscope.

낮은 온도에서 액상으로 변화하여 클링커의 고상-액상 반응을 가속화시키기 때문이라고 발표하였다[8]. 또한 IM (Al_2O_3/Fe_2O_3) 상승에 따라 free-CaO 함량은 소폭 증가하였으며, 이는 IM이 상승할수록 Fe_2O_3가 감소하기 때문이다. 일반적으로 Fe_2O_3는 페라이트($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) 광물의 주요 구성 성분이며, 페라이트는 Fig. 2와 같이 알루미네이트($3Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) 보다 낮은 온도에서 액상화한다. 따라서 페라이트는 알라이트 생성에 좀 더 기여할 수 있으며, 이는 free-CaO 감소에도 좋은 영향을 줄 수 있는 이유이기도 하다.

3.2. 클링커 광물 특성 분석

서론에서 기술한 바와 같이, 클링커 광물 크기는 시멘트 물성에 영향을 준다고 알려져 있다[6,7]. 특히 알라이트와 벨라이트 크기는 시멘트 압축강도에 큰 영향을 줄 수 있으며, 알라이트는 초기 강도, 벨라이트는 28일 이상의 장기 강도에 영향을 준다고 알려져 있다. 이때 최적의 결정 크기는 알라이트 15~20μm, 벨라이트 25~40μm라고 하였으며, 즉 알라이트 크기가 20μm 보다 커질수록, 벨라이트는 25μm 보다 작아질수록 압축강도는 서서히 감소

Table 3. Mineral size of clinker

(a) Alite size (Unit : μm)

IM \ Chlorine	0ppm	500ppm	1,000ppm	2,000ppm	Ave.
1.3	18	19	20	20	19.3
1.5	16	17	18	19	17.5
1.7	16	16	18	20	17.5

(b) Belite size (Unit : μm)

IM \ Chlorine	0ppm	500ppm	1,000ppm	2,000ppm	Ave.
1.3	14	13	11	12	12
1.5	11	10	10	9	10
1.7	9	9	12	7	9

한다고 하였다[7]. 따라서 본 연구에서도 광학현미경을 사용하여 염소 함량에 따른 광물 형상 및 크기를 측정하였으며, 이를 Fig. 3 및 Table 3에 나타내었다. 일반적으로 알라이트 결정은 육각 판상 등으로 존재하며, 벨라이트는 원형/타원형 등으로 존재한다. 본 연구에서도 육각 판상의 알라이트 결정이 관찰되었으며, 일부 결정들은 알라이트 내부에 원형/타원형의 벨라이트가 관찰되기도 하였다. 이는 소성과정 초기에 생성된 벨라이트가 CaO와 반응하여 결정 표면부터 알라이트로 전이되어, 기존 벨라이트 내부까지 모두 알라이트로 전이되지 않았기 때문이다[12].

즉 CaO가 좀 더 공급되거나, 소성 온도 상승 및 소성 시간이 길어진다면 벨라이트 내부까지도 알라이트로 전이될 것으로 추정되었다. 일반적으로 벨라이트 광물은 조선(Striation)이 존재하며, 이는 벨라이트가 냉각과정에서 상변태를 하며 생성된다고 알려져 있다[13].본 연구에서 제조한 클링커에서도 벨라이트 조선이 관찰되었으나, 일반적으로 알려진 β형 벨라이트의 트윈 조선 보다는 일방형 조선이 관찰되었다. 이는 α'형 벨라이트로 존재하기 때문으로 추정되었으나, 향후 α'형 벨라이트를 증명하기 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료되었다. 또한 간극상으로는 회색의 알루미네이트와 흰색의 페라이트 광물이 모두 관찰되었으며, 이들 광물은 점(Dot) 형태의 작은 결정이 아닌 2~10μm 수준의 불규칙한 판상으로 관찰되었다.

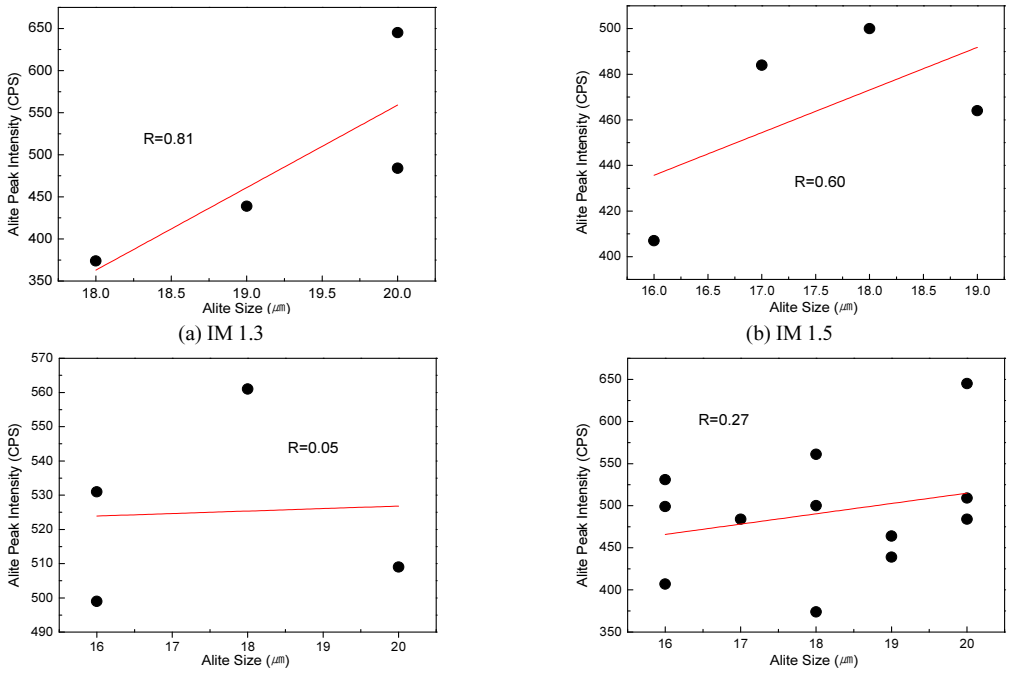
Table 3은 알라이트 및 벨라이트 광물의 결정 크기를 측정한 결과이다. 알라이트 크기는 모두 15~20μm 수준이었으며, 염소 함량 증가에 따라 결정 크기도 커지는 현상이 관찰되었다. 즉 IM 1.3에서는 0ppm-18μm에서 2,000ppm-20μm으로(11%↑), IM 1.7 조건에서는 0ppm-16μm에서 2,000ppm-20μm(25%↑)으로 증가하였다. 또한 IM 상승에 따라 알라이트 크기가 감소하여, 0ppm에서는 IM 1.3-18μm에서 IM 1.7-16μm으로, 500ppm에서는 IM 1.3-19μm에서 IM 1.7-16μm으로 감소하였다. 하지만 2,000ppm 조건에서는 IM 변화에 따른 알라이트 크기 변화가 관찰되지 않았다. 벨라이트 크기는 7~14μm 수준이었으며, 염소 함량 증가 및 IM 상승에 따라 소폭 작아지는 경향을 나타내었다. 이에 따라 향후 알라이트와 벨라이트의 반대 경향을 이해하기 위한 추가 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

X-선 회절분석기를 사용한 클링커 4대 광물별 XRD 피크 강도(XRD Peak Intensity, Count Per Second(CPS))를 관찰하였으며, 이를 Table 4에 나타내었다. 알라이트 광물의 주 피크는 약 32.1도, 벨라이트 32.7도, 알루미네이트 33.1도, 페라이트 33.9도에 존재하며, 본 연구에서도 유사한 각도에서 각각의 광물들이 관찰되었다. IM 1.3 조건에서는 염소 함량 증가에 따라 알라이트 피크 강도도 증가하는 경향(0ppm 374CPS → 500ppm 439CPS → 1,000ppm 484CPS → 2,000ppm 645CPS)을 나타내었다. IM 1.5 및 1.7 조건에서는 염소 함량 1,000ppm까지 알라이트 피크 강도가 증가한 후 2,000ppm에서 소폭 감소하였다. 하지만 염소 함량 2,000ppm에서도 0ppm의 알라이트 피크 강도 보다는 좀 더 높은 값이었다. 벨라이트 피크 강도는 IM 1.3 조건에서 염소 함량 증가에 따라 소폭 증가하는 경향이었으나, 1.5 및 1.7 조건에서는 경향성을 나타내지 않았다. 또한 알루미네이트와 페라이트 광물의 피크 강도도 경향성이 도출되지 않았다.

Table 4. XRD peak intensity of mineral (Unit : CPS)

IM	Mineral	0ppm	500ppm	1,000ppm	2,000ppm
1.3	Alite	374	439	484	645
	Belite	356	349	370	436
	Aluminate	144	136	157	162
	Ferrite	114	113	121	106
1.5	Alite	407	484	500	464
	Belite	366	396	342	346
	Aluminate	168	181	178	144
	Ferrite	101	105	114	101
1.7	Alite	499	531	561	509
	Belite	416	412	394	407
	Aluminate	168	181	178	144
	Ferrite	251	225	192	229

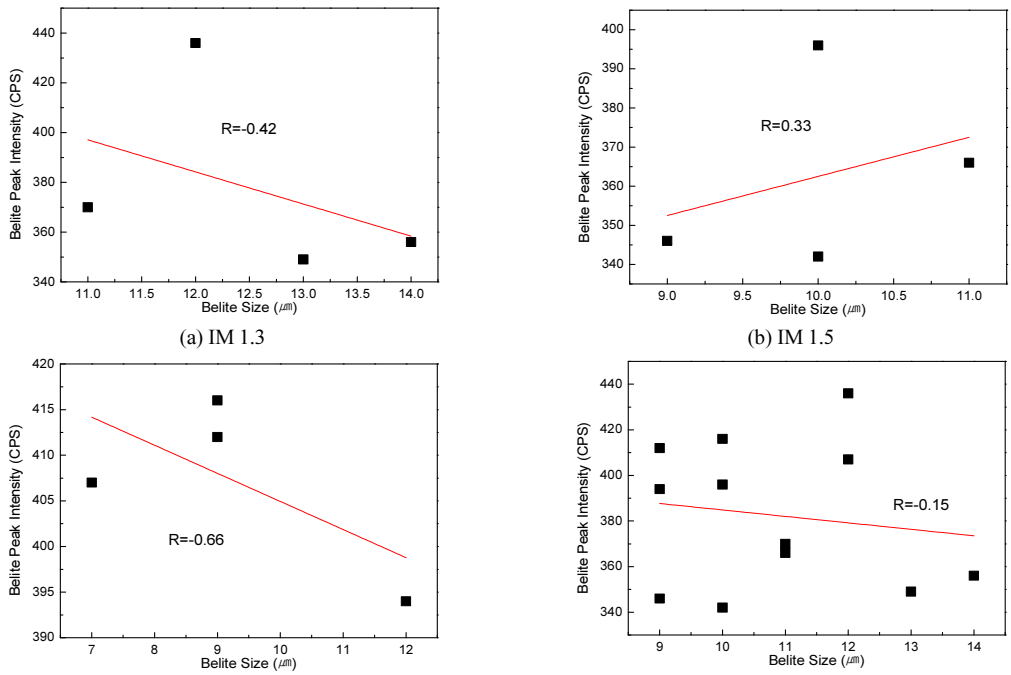
Figs. 4 및 5는 알라이트/벨라이트 크기와 XRD 피크 강도의 상관성을 도출한 결과이다. IM 1.3 조건에서는 염소 함량별 알라이트 크기와 XRD 피크 강도의 상관관계계수가 0.81로 매우 높았으며, IM 1.5 조건에서는 0.60, IM 1.7 조건에서는 0.05로 계산되었다. 더불어 염소 함량과 IM 조건을 모두 포함하여 계산한 경우, 알라이트 크기와의 상관관계계수는 0.27로 양의 상관성을 나타내었다. 즉 염소 함량/IM과 알라이트 XRD 피크 강도는 양의 상관성을 나타내나, IM이 높아질수록 알라이트 크기와의 상관성은 점차 감소하였다. 벨라이트 크기와 XRD 피크 강도



(a) IM 1.3 (b) IM 1.5

(c) IM 1.7 (d) IM 1.3~1.7

Fig. 4. Relationship between alite size and XRD peak intensity.



(a) IM 1.3 (b) IM 1.5

(c) IM 1.7 (d) IM 1.3~1.7

Fig. 5. Relationship between belite size and XRD peak intensity.

의 상관관계계수는 IM에 따라 양 또는 음의 상관성 등 다양한 경향(IM 1.3 –0.42, IM 1.5 +0.33, IM 1.7 –0.66)을 나타내었으며, 향후 상기 결과들에 대한 체계적 분석이 필요한 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 염소 함량에 따른 클링커 광물 특성 변화를 관찰하기 위해 $CaCl_2$ 첨가 및 IM을 변화시켜 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 클링커의 소성성은 IM 변화와 관련 없이 염소 함량 증가에 따라 좀 더 양호해졌으며, 특히 염소 함량 2,000 ppm 조건에서 가장 양호한 결과가 도출되었다. 이때 free-CaO 함량은 0ppm 대비 2,000ppm에서 약 37% 감소하였다.
2. IM 상승에 따라 클링커의 free-CaO 함량이 증가하는, 즉 소성성이 소폭 하락하는 결과가 도출되었다. 이는 상대적으로 페라이트가 감소하여 클링커링 반응이 늦어지고, 이에 따라 알라이트 및 벨라이트 생성도 늦어지기 때문으로 추정되었다.
3. 알라이트 결정 크기는 대부분 15~20μm 수준이었으며, 염소 함량 증가에 따라 결정 크기도 커지는 현상이 관찰되었다. 그러나 IM 증가에 따라서는 알라이트 크기가 소폭 작아지는 현상도 관찰되었다.
4. 알라이트의 XRD 피크 강도는 IM 1.5 및 1.7 조건에서 염소 함량 1,000ppm까지 증가하나, 2,000ppm에서는 소폭 감소하였다. 하지만 알라이트 피크 강도는 염소 함량 2,000ppm에서도 0ppm 보다 높은 값을 나타내었다.
5. 벨라이트 결정 크기는 염소 함량 및 IM 증가에 따라 소폭 감소하였으며, 특히 염소 함량에 따른 벨라이트 크기는 알라이트와 반대 경향이 발현되었다. 따라서 향후 이에 대한 체계적 분석이 필요할 것으로 사료되었다.
6. 상기의 결과로부터 IM과 염소 함량은 클링커 광물 크기를 충분히 변화시킬 수 있으며, 또한 XRD 피크 강도도 변화시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 즉 IM과 염소 함량은 최종 제품인 시멘트 물성에도 충분히 영향을 줄 수 있다는 것을 간접적으로 확인하였다.

References

1. Council Chungbuk, 2019 : The effect of waste recycling in the cement industry.
2. J.H. Oh, 2017 : Waste recycling in cement industry, Ceramist, 20(1), pp.103-118.
3. Korea Cement Association, Current status of circulating resources. http://recycling.cement. or.kr/, October 21, 2020.
4. Theodore Hanein, Yuki Hayashi, Claire Utton, et al.,2020 : Pyro processing cement kiln bypass dust: Enhancing clinker phase formation, Construction and Building Materials, 259, pp.1-12.
5. Marco Simoni, Theodore Hanein, Tristana Y. Duvallet, et al., 2021 : Producing cement clinker assemblages in the system: $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}SO_3\text{-}CaCl_2\text{-}MgO$, Cement and Concrete Research, 144, pp.1-10.
6. Tamino Hirsch, Thomas Matschei, 2023 : The hydration of tricalcium aluminate ($Ca_3Al_2O_6$) in Portland cement-related systems: A review, Cement and Concrete Research, 168, pp.1-21.
7. Donald H. Campbell, 1999, Microscopical examination and interpretation of portland cement clinker, 2nd Edition, pp.46-49.
8. Y.J. Lee, N.I. Kim, J.H. Cho, et al., 2021 : A Study on the Characteristics of Clinker and Cement as Chlorine Content, Resources Recycling, 30(5), pp.10-16.
9. M. Leela Sai Rangarao, Bulu Pradhan, 2022 : Effect of chloride and blend of chloride and sulphate salts on workability, early strength and microstructure of FA-GGBS geopolymer concrete, Materials Today, 65(8), pp.3907-3911.
10. J. Bai, S. Wild, B.B. Sabir, 2003 : Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MKbinder compositions exposed to synthetic seawater, Cement and Concrete Research, 33, pp.353-362.
11. Peter C. Hewlett, 2020 : Lea's Chemistry of Cement and Concrete, pp.436-437, 4th Edition, Elsevier.
12. Peter C. Hewlett, 2020 : Lea's Chemistry of Cement and Concrete, pp.73-78, 4th Edition, Elsevier.
13. R.I. Iacobescu, D. Koumpouri, Y. Pontikes, et al., 2011 : Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements, Journal of Hazardous Materials, 196, pp.287-294.

이 영 준

- 경상대학교 건축공학과 학사
- 한양대학교 건축공학과 박사과정 재학
- 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
- 당 학회지 제31권 3호 참조

염 우 성

- 인하대학교 토목공학 학사
- 인하대학교 토목공학 석사
- 울산과학기술원 도시환경공학 박사
- 현재 한국세라믹기술원 선임연구원

서 성 관

- 숭실대학교 화학과 학사
- 한양대학교 신소재공학과 박사
- 현재 한국세라믹기술원 선임연구원
- 당 학회지 제31권 3호 참조

추 용 식

- 한양대학교 신소재공학과 박사
- 라파즈한라시멘트 기술연구소 주임연구원
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원
- 당 학회지 제31권 3호 참조