

염소 함량에 따른 클링커 및 시멘트의 물성에 관한 연구

이영준 · 김남일 · 조정훈 · 서성관 · §추용식

한국세라믹기술원 에너지환경본부

A Study on the Characteristics of Clinker and Cement as Chlorine Content

Young-Jun Lee, Nam-Il Kim, Jeong-Hoon Cho, Sung-Kwan Seo and §Yong-Sik Chu

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech., Jinju 52851, Korea

요 약

본 연구에서는 클링커 및 시멘트의 염소 함량에 따른 특성 변화를 분석하기 위해, 혼합원료 제조 시 CaCl_2 를 첨가하여 클링커를 제조하였다. 이때 클링커 모듈러스는 LSF(Lime Saturation Factor) 92, SM(Silica Modulus) 2.5 및 IM(Iron Modulus) 1.5로 고정하였다. 또한 염소 함유 클링커를 사용하여 시멘트를 제조한 후 물리적 특성도 시험하였다. 염소 함량 증가에 따라 클링커의 free-CaO가 감소하였으며, 특히 염소 함량 0ppm 대비 2000ppm 조건에서 약 40% 감소하였다. 또한 chlormayenite 생성량도 증가하여, 2000ppm 클링커에서 최대 치인 3.4%가 존재하였다. Alite와 belite 생성량도 소폭 증가하였다. 모르타르의 3일 및 7일 압축강도는 염소함량 증가에 따라 상승하였으며, 이는 염소 성분에 의한 시멘트 수화촉진 영향으로 추정되었다. 특히 1000ppm 모르타르의 압축강도는 0ppm 모르타르 대비 약 20%가 상승하는 결과가 도출되기도 하였다.

주제어 : 염소, 염화칼슘, 클링커, 클로르메이어나이트, 압축강도

Abstract

In this study, a clinker was prepared using raw materials with CaCl_2 . The characteristics of the chlorine-added clinker and cement were analyzed. The clinker modulus were set to Lime Saturation Factor (LSF) 92, Silica modulus (SM) 2.5, and Iron Modulus (IM) 1.5. The physical properties of cement using the chlorine-containing clinker were characterized. As the chlorine content increased, the free-CaO content in the clinker decreased, and that in the 2000 ppm clinker was reduced by approximately 40% compared to that in the 0 ppm clinker. There was an increase in the amount of chlormayenite, with a content of up to 3.4% present in the 2000 ppm clinker. The amounts of alite and belite also slightly increased. The compressive strength of mortar at 3 days and 7 days increased as the chlorine content increased. This trend was presumed to arise from the effect of hydration, which was promoted by the presence of chlorine. The compressive strength of 1000 ppm mortar increased by approximately 20% compared to that of 0 ppm mortar.

Key words : chlorine, calcium chloride, clinker, chlormayenite, compressive strength

· Received : August 12, 2021 · 1st Revised : September 14, 2021 · 2nd Revised : September 30, 2021 · Accepted : October 5, 2021

§ Corresponding Author : Yong-Sik Chu (E-mail : yschu@kicet.re.kr)

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 115, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, 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 사용하고 있으며, 이는 연료 대체용 폐기물과 원료 대체용 폐기물로 구분할 수 있다. 연료 대체용 폐기물은 시멘트 제조과정 중 클링커 소성 공정에서 사용하는 유연탄을 대체하는 것이며, 폐타이어, 폐합성수지, 폐목재 및 재생유 등이 있다. Table 1과 같이 국내 시멘트 공장의 대체연료 사용량은 2015년 1,031 천 톤에서 2020년 1,720 천 톤으로 증가하였다¹⁾. 하지만 현재까지 대체연료 사용량은 유럽 등의 선진국과 비교하여 매우 낮은 수준이다. 예를 들어 독일은 대체연료 사용비율이 68%, 오스트리아 58%, EU 평균 46% 수준이나, 한국은 EU 평균의 절반 수준인 23%에 불과한 실정이다²⁾. 향후에는 국내 시멘트 공장의 대체연료 사용량도 선진국들과 유사한 수준으로 증가할 것이다.

시멘트 클링커 제조를 위해 석회석, 규석, 혈암, 철광석 등의 천연원료와 더불어 천연원료 대체용 폐기물들도 다양하게 사용되고 있다. 예를 들어 규석 대체용 폐주물사, 혈암 대체용 석탄재 및 하수슬러지, 철광석 대체용 제철·제강 슬래그 및 슬러지 등이 사용되고 있다³⁾. 이와 같은 대체원료 사용량도 Table 1과 같이 매년 증가하는 추세이다. 시멘트 공장에서 사용하는 대부분의 원·연료용 폐기물들은 염소성분이 함유되어 있으며, 이는 클링커 물성에 다양한 영향을 주고 있다. 일반적으로 염소 함량 300ppm 이하에서는 free-CaO와 응결 시간이 감소하고 강도가 소

폭 증진 되는 등의 클링커 소성성에 긍정적 영향을 준다고 알려져 있으나⁴⁾, 아직까지 염소 함량 300ppm 이상의 보통포틀랜드 시멘트(OPC)용 고염소 클링커에 관한 연구는 미미한 수준이다⁵⁾.

Hewlett 등은 CaO-SiO₂-Al₂O₃-CaCl₂계에서의 클링커링 특성을 연구하였다⁶⁾. CaO와 CaCl₂ 혼합물은 600°C에서 중간 생성물인 2CaO · SiO₂ · CaCl₂를 생성하고, 약 950°C에서 고온형으로 전환되지만, 이들 저온·고온 생성물은 수화 특성이 발현되지 않는다고 하였다. 더불어 Al₂O₃가 혼합될 경우에는 약 750°C에서 chloromayentic (11CaO · 7Al₂O₃ · CaCl₂)가 생성되며, chlormayenite는 1,300°C 이상에서도 안정적으로 존재한다고 보고하기도 하였다. Hancin 등은 시멘트 킬른 바이패스 더스트를 사용하여 클링커를 제조하였으며, 이때 belite(2CaO · SiO₂)와 mayenite(12CaO · 7Al₂O₃)는 약 900°C, alite(3CaO · SiO₂)는 약 1,200°C에서 생성되어, 기존 클링커 소성 온도인 1,450°C보다 크게 낮출 수 있다고 하였다. 더불어 1,100°C 소성 시에는 더스트에 존재하는 KCl과 mayenite가 관찰되고, 1,200°C에서는 mayenite만 관찰된다고 하였다⁷⁾. 하지만 이들 논문에서도 클링커 특성분석에 한정되어 있으며, 시멘트의 물리적 특성은 연구되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 클링커 제조과정에서 혼합원료 배합 중 염소 성분을 혼합하였으며, 제조된 클링커의 특성 분석과 더불어 최종 제품인 시멘트의 물리적 특성까지 분석·평가하고자 하였다.

Table 1. Waste usage status of domestic cement plant¹⁾ (Unit : 1,000 ton)

Waste	Kind	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	
Material	Clay	Fly ash	2,731	2,632	2,709	2,804	3,150	3,179	2,792
		Sludge (Organic)	399	510	356	328	435	727	883
		Sludge (Inorganic)	473	1,173	1,589	1,755	1,616	1,588	1,744
		etc	498	232	279	190	308	591	330
	Silica	Molding sand	529	559	573	654	563	606	610
	Subtotal	4,630	5,106	5,503	5,731	6,072	6,691	6,359	
Fuel		Waste tyre	224	244	258	263	286	275	186
		Waste plastic	680	698	784	858	915	1,016	1,407
		Waste rubber	30	39	51	115	70	76	88
		Waste wood	28	50	56	30	92	35	40
		Subtotal	962	1,031	1,150	1,266	1,363	1,402	1,720
	Total	5,592	6,137	6,653	6,997	7,435	8,093	8,079	

2. 실험 방법

고염소 함유 클링커 제조 및 물성 분석을 위해 Fig. 1과 같이 진행하였으며, 출발원료는 CaCO₃(JUNSEI 99.5%), SiO₂(SAMCHUN 99.0%), Al₂O₃(SAMCHUN 99.0%), Fe₂O₃(SAMCHUN 95.0%) 시약을 사용하였고, 염소 공급 원료는 CaCl₂(SAMCHUN 96.0%) 시약을 사용하였다.

상기 시약급 원료들을 사용하여 염소 함유 클링커와 시멘트를 제조하기 위해 모듈러스를 제어하였다. 이때 고염소 클링커 제조를 위한 모듈러스는 다음 식 (1), (2), (3)을 통해 계산하였으며, LSF(Lime Saturation Factor) 92, SM(Silica Modulus) 2.5 및 IM(Iron Modulus) 1.5로 제어하였다. 우선 염소 함유 클링커 제조를 위해 상기 5가지 원료를 혼합하였으며, 이때 볼밀(HT-1000, HAN TECH社, 한국)을 이용하여 30분간 혼합하였다. 이후 혼합이 완료된 혼합원료에 혼합수를 33.4% 첨가하여 성구(25g)를 제조하였다.

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

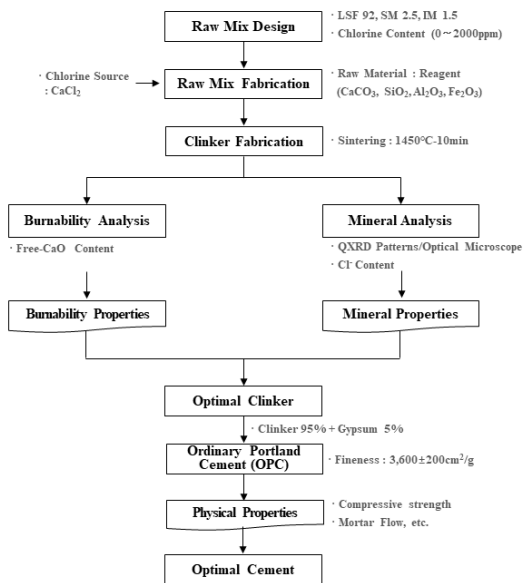


Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure.

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

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

제조된 성구는 24시간 동안 100°C 조건에서 완전히 건조한 후 소성하였다. 상온에서 전기로(HT-1630FL, HAN TECH社, 한국)에 장입된 성구는 승온속도 10°C/min로 900°C까지 승온한 후 30분간 유지하였으며, 이후 5°C/min로 1,450°C까지 승온하여 5분간 유지한 후 냉각하였다. 이와 같이 제조된 클링커는 소성성 분석을 위해 free-CaO 함량을 분석하였으며, 정량 X-선 분석기(D/MAX-2500, Rigaku社, 일본) 측정으로 클링커 광물 생성량을 평가하였다. 또한 클링커의 광물학적 특성 분석을 위해 광학현미경(DSX510, OLYMPUS社, 일본) 관찰도 수행하였다. 특히 클링커에 잔존하는 염소 함량을 측정하기 위해 연소 이온 크로마토그래피(AQF-2100H, MITSUBISHI社, 일본)를 사용하였다. 상기와 같이 제조된 클링커와 이수석 고를 중량비 기준 95:5로 배합한 후 진동밀(WTVM, 웅비기계社, 한국)을 사용하여 50분 동안 분쇄하였다. 이때 시멘트 분말도는 3,700±100cm²/g으로 제어하였으며, 분말도는 공기투과장치를 사용하여 측정하였다. 최종 제조 시멘트는 KS L ISO 679에 따라 압축강도 및 플로우 등을 시험하여 시멘트로의 적용 가능성을 분석·평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 클링커 특성 분석

본 연구에서는 클링커 염소 함량을 제어하기 위해 혼합원료 배합 시, 모듈러스는 LSF 92.0, SM 2.50, IM 1.50으로 고정하였으며 CaCl₂를 첨가하였다. 클링커의 염소 함량이 0ppm, 500ppm, 1000ppm 및 2000ppm이 되도록 CaCl₂를 첨가하였으며, CaCl₂에 존재하는 Ca는 LSF 계산에 포함되도록 제어하였다. 하지만 혼합원료에 첨가한 염소 함량 대비 클링커에 잔존하는 염소 함량은 대폭 감소하게 된다. 이는 혼합원료에 함유된 염소가 고온에서 휘발하여 클링커 내에는 미휘발 염소만이 잔존하기 때문이다. 따라서 클링커의 염소 함량을 분석하여 염소량의 잔존 여부 및 잔존량을 분석·평가하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 클링커 잔존 염소량은 최초 첨가량의 약 20%

Table 2. Remain chlorine content of clinker

Target Content	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm
Remain Content (ppm)	104 ppm	220 ppm	435 ppm
Remain Percent (%)	20.8%	22%	21.8%

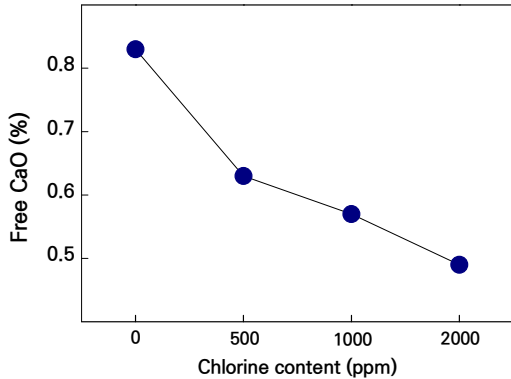
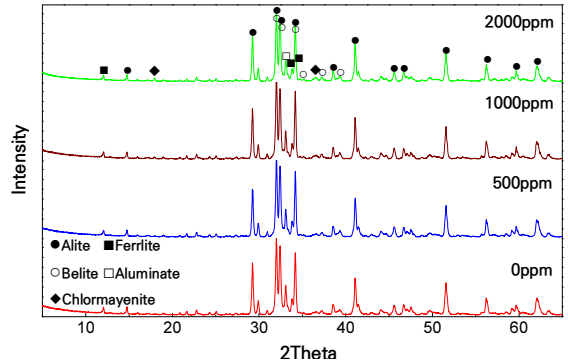


Fig. 2. Free-CaO content of clinker added CaCl₂.

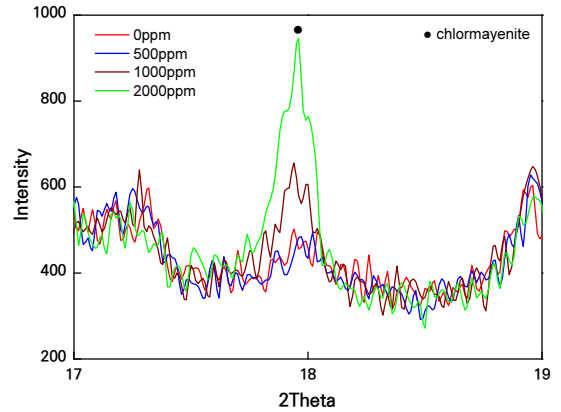
수준으로, 500ppm에서 104ppm, 1000ppm에서 220ppm 및 2000ppm에서 435ppm이 잔존하였다.

염소 함량을 0ppm에서 2000ppm까지 제어한 클링커 소성성 평가를 위해, free-CaO 함량을 분석하였으며, free-CaO 결과 값을 Fig. 2에 나타내었다. Free-CaO 함량은 염소 함량 증가에 따라 감소하는 특징이 발현되었다. 즉 염소가 첨가되지 않은 클링커의 free-CaO 함량은 0.83%이었으며, 500ppm 첨가 시 0.63%, 1000ppm 0.57%, 2000ppm 0.49%로 감소하였다. 이는 이전 문헌에서 보고한 바와 같이 염소성분의 광화제 역할에 기인하는 것으로 판단되었다. 즉 염소 화합물이 저온 영역에서 액상으로 변화하여 클링커 반응 과정의 고상-액상 반응을 가속화한다는 이론과 유사한 결과이다⁸⁾. 본 연구에서도 클링커의 소성성은 염소 함량 증가에 따라 좀 더 양호해질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 클링커들의 free-CaO 함량은 0.49%에서 0.83%로, 일반 클링커의 free-CaO 함량과 유사하였다. 따라서 클링커의 소성성만을 고려할 경우, 제조된 클링커는 양호한 것으로 판단되었다.

염소 함량에 따른 클링커의 XRD 패턴을 Fig. 3에 나타내었다. 모든 클링커의 XRD 패턴에서 4대 광물(alite, belite, aluminat, ferrite)이 검출되었으며, 특히 염소 함량 증가에 따라 alite 피크 강도도 소폭 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) Clinker added CaCl₂



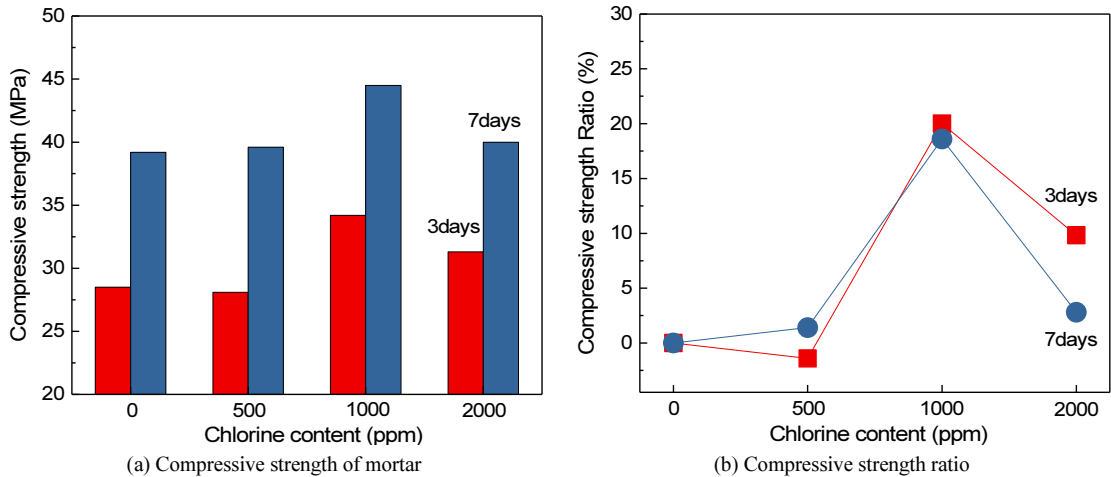
(b) Chlormayenite peak

Fig. 3. XRD Pattern of clinker added CaCl₂.

더불어 약 18°부근에 주피크가 존재하는 chlormayenite (11CaO · 7Al₂O₃ · CaCl₂) 피크 강도도 소폭 증가하는 경향을 나타내었다. Chlormayenite 피크 강도를 좀 더 자세히 관찰하기 위해 XRD 패턴 일부(15~20°)를 확대하여 Fig. 3(b)에 나타내었다. 염소 함량 증가에 따라 chlormayenite 피크 강도가 증가하는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있었으며, 또한 2000ppm 조건에서 가장 높은 피크 강도를 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 서론에서 언급한 바와 같이, Hewlett 등은 CaO-SiO₂-Al₂O₃-CaCl₂계에서의 클링커링 특성을 연구하여 약 750°C에서 chlormayenite(11CaO ·

Table 3. Mineral content of clinker added CaCl₂ (Unit : %)

Chlorine	Alite	Belite	Ferrite	Aluminate	chlormayenite
0 ppm	61.9	19.0	6.9	11.5	0.0
500 ppm	62.7	20.0	6.7	9.5	0.5
1000 ppm	63.3	20.2	4.5	8.8	2.9
2000 ppm	62.6	20.5	5.1	7.2	3.4

**Fig. 4.** Compressive strength and ratio of mortar.

7Al₂O₃ · CaCl₂)가 생성되며, chlormayenite는 1300°C 이상에서도 안정적으로 존재한다고 보고하였다⁵⁾. 본 연구에서도 클링커 XRD 패턴 관찰을 통해 상기와 같이 chlormayenite 결정 생성 및 상대적 생성량 등을 확인·유추할 수 있었으며, 이는 기존 연구자들과 유사한 결과이기도 하였다.

정량 X-선 분석기를 사용한 염소 함량별 클링커 광물 함량을 Table 3에 나타내었다. 염소 함량 증가에 따라 alite, belite 및 chlormayenite가 소폭 증가하였으며, aluminate는 소폭씩 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 3의 XRD 패턴 분석에서 도출된 염소 함량 증가에 따라 alite 및 chlormayenite 피크 강도가 증가한다는 결과와도 일치하는 것이다. 즉 free-CaO 분석, XRD 패턴 분석 및 정량 X-선 분석을 통해, 염소 함량 증가에 따라 소성성은 양호해지고, alite 및 belite 생성량이 소폭 증가한다는 공통점을 확인할 수 있었다.

3.2. 시멘트 물성 분석

클링커와 이수석고를 질량비 기준 95:5로 배합하여 시멘

트를 제조하였으며, 시멘트의 분말도는 0ppm 3,649cm²/g, 500ppm 3,661cm²/g, 1000ppm 3,775cm²/g 및 2000ppm 3,707cm²/g으로 제조하였다. 각각의 시멘트는 KS L ISO 679에 따라 압축강도와 플로우 등을 시험하였으며, 이때 모르타르 제조 배합비는 시멘트 450g, 표준사 1350g 및 혼합수 225g으로 고정하였다.

모르타르의 플로우 측정값은 0ppm 215mm, 500ppm 200mm, 1000ppm 201mm 및 2000ppm 199mm 수준이었다. 염소 함유 클링커로 제조된 시멘트(500~2000ppm)는 미함유 시멘트(0ppm) 보다 플로우 값이 감소(14~16mm)하였다. 이는 염소 성분에 첨가로 인한 Alite의 수화초기에 생성된 초기 수화물의 피막을 통하여 OH⁻이온과 Cl⁻이온의 상호화산 작용하여 Alite의 수화촉진⁹⁾과 aluminate의 에트링자이트 생성 및 프리렐렘(C₃A · CaCl₂ · 10H₂O) 생성이 좀 더 빠르게 이루어지기 때문으로 추정되었다^{10,11)}. 하지만 염소 함유 시멘트(500~2000ppm)는 염소 함량 증가에 따라 플로우 값에 큰 차이가 발생치 않았으며, 향후 체계적 연구를 통해 플로우 값이 유사하게 발현되는 이유를 검증해야 할 것으로 사료되었다.

Table 4. Increment and rate of increase of compressive strength

Target content	0 ppm	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm
Increment of compressive strength (N/mm ²)	9.3	11.6	10.1	8.7
Rate of increase of compressive strength (%)	31.2	41.4	30.1	27.8

3일 및 7일 모르타르 압축강도 값과 압축강도 변화율을 Fig. 4에 나타내었다. 염소함량 증가에 따라 Cl⁻이온이 OH⁻이온을 대체하고 Cl⁻이온은 Ca(OH)₂에서 OH⁻이온 분리를 조기에 발생시켜 시멘트 수화반응을 촉진시키며, 이에 따라 압축강도가 증진된 것으로 추정되었다. 500ppm 모르타르는 0ppm 모르타르와 유사한 압축강도 값을 발현하였으며, 이는 염소 500ppm 클링커 제조 시 소성 후 잔존 염소량(104ppm)이 매우 적기 때문으로 판단되었다.

1000ppm 모르타르의 압축강도는 큰 폭으로 상승하였으며, 이는 위에서 언급한 바와 같이 최적 염소 함량 수화 촉진 현상으로 추정되었다⁸⁾. 2000ppm 모르타르 압축강도는 0ppm 보다는 높으나, 1000ppm과 비교 시 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 압축강도 증진에 영향을 미치는 ‘염소 성분에 의한 수화촉진’과 압축강도 감소에 영향을 줄 수 있는 ‘aluminat 광물량 감소’(Table 3 참조)가 동시에 작용된 결과라고 추정되었다. Fig. 4(b)는 0ppm 모르타르 압축강도 값을 기준으로 압축강도 변화율을 나타낸 것이다. 압축강도 변화율은 0ppm 모르타르 대비 500ppm에서는 큰 차이가 없었으며, 1000ppm에서 약 20%, 2000ppm에서 약 3~19%의 상승률을 나타내었다. 양생일별(3일 및 7일) 압축강도 변화 추이를 확인하기 위해, Table 4와 같이 3일 압축강도 대비 7일 압축강도 증가량 및 증가율을 분석하였다. 500ppm 모르타르의 압축강도 증가율이 가장 높았으며, 염소 함량 500ppm 초과 시에는 오히려 압축강도 증가율이 감소하였다. 특히 2000ppm 모르타르에서 가장 낮은 증가율이 발현되어, 클링커 제조 시 염소 함량이 일정 수준 이상 첨가할 경우, 소성과정 중 액상 내 염소 성분이 많아 Alite 생성을 증진시키는 광화제 역할이 아닌 액상중에 석출되어 압축강도 저하와 콘크리트에 적용 시 염해 등의 부정적 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 선행연구의 결과를 통한 후속연구로 클링커 및 시멘트에 존재하는 염소 영향을 분석하기 위해, 혼합

원료 제조 시 CaCl₂를 첨가하여 클링커를 제조하였다. 이때 클링커 모듈러스는 LSF 92, SM 2.5 및 IM 1.5로 고정하였다. 또한 염소 함유 클링커를 사용하여 시멘트를 제조한 후 물리적 특성을 시험하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 염소 함량 증가에 따라 클링커의 free-CaO가 감소하였으며, 특히 염소 함량 0ppm 대비 2000ppm 조건에서 약 40%가 감소하였다. 따라서 염소성분이 클링커의 소성성 향상에 기여한다는 것을 알 수 있었으며, 이는 염소의 광화제 역할 때문으로 추정되었다.
2. 염소 함량 증가에 따라 chlormayenite 생성량도 증가하여, 2000ppm 클링커에서 최대치인 3.4%가 존재하였다. 또한 alite와 belite 생성량도 소폭 증가하였으며, 이는 기존 연구자들의 결과와 같이 염소 화합물이 저온 영역에서 액상으로 변화하여 클링커의 고상-액상 반응을 가속화했기 때문으로 판단되었다.
3. 3일 및 7일 압축강도는 염소함량 증가에 따라 상승하였으며, 이는 염소 성분에 의한 시멘트 수화촉진에 따른 영향으로 추정되었다. 특히 1000ppm 모르타르의 압축강도는 큰 폭으로 상승하였으며, 이는 0ppm 모르타르 대비 약 20%가 상승한 결과 값이기도 하였다.
4. 양생일별 압축강도 변화 관찰 시, 3일 압축강도 대비 7일 압축강도 증가량 및 증가율은 500ppm 조건에서 가장 높았으며, 특히 2000ppm 모르타르에서 가장 낮은 증가율이 발현되었다. 따라서 염소가 일정량 이상 존재 시 압축강도에 부정적 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측되었다.
5. 상기와 같이 클링커에 존재하는 염소는 클링커 광물 뿐 아니라 시멘트 물성에도 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 시멘트 제조공정에서의 염소 함량 제어는 최종 제품인 시멘트 품질에 충분히 영향을 줄 수 있을 것이라고 판단하였다.

References

1. Council Chungbuk, 2019 : The effect of waste recycling in the cement industry.
2. Tae Beom Min, Hyun Kuk Choi, Hyeong Cheol Kim, et al., 2019 : Use of Alternative fuels in Cement Manufacturing, Korean Recycled Construction Resources Institute, 14(1), pp.17-21.
3. Korea Cement Association, 2014 : Cement industry process characteristics and recycling of recycled resources, Korea Cement Association.
4. Makio Tamashita, 2011, JP. 1020127024910.
5. Ja-Hyung Choi, Sea Cheon Oh, 2019 : Removal of Chlorine from Municipal Solid Waste Fly Ash by using Acid and Alkaline Solution, J.Korea Soc, Waste Manag., 36(5), pp. 471-479.
6. Peter C. Hewlett, 2020 : Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Elsevier, pp.436-437.
7. 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.
8. Woo-Teck Kwon, Young-Hee Ki., Yong-Sik Chu, et al., 2005 : Effect of P_2O_5 and chloride on clinkering reaction, Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal, 7(1), pp.63-66.
9. S. Miyahara, A. Nakamura, E. Sakai, et al., 1999 : Hydration of Cement with KCl, Cement Science and Concrete Technology, 53, pp.58-63.
10. H. Kato and K. Yoshioka, 1998 : Influence of Sulfate Ion on the Fluidity of Cement Paste Containing Polycarboxylic Type Superplasticizer, Cement Science and Concrete Technology, 52, pp.144-151.
11. K. Negishi, Y. Malako, a. H. Sugaya, et al., 1998 : Effect of Polymorphism of Calcium Sulfate and Soluble Alkaries on Fluidity of Cement Paste Containing Polycarboxylic Acid type Superplasticizer, Cement Science and Concrete Technology, 52, pp.152-157.

이영준



- 경상대학교 건축공학과 학사
 - 현재 한국세라믹기술원 인턴연구원
-

김남일



- 경상대학교 건축공학과 학사
 - 한양대학교 건축공학과 석사과정 재학
 - 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
-

조정훈



- 국립안동대학교 응용신소재공학전공 학사
 - 부산대학교 재료공학과 석사과정 재학
 - 현재 한국세라믹기술원 학생연구원
-

서성관



- 숭실대학교 화학과 학사
 - 한양대학교 신소재공학과 박사
 - 현재 한국세라믹기술원 선임연구원
-

추용식



- 한양대학교 신소재공학과 박사
 - 라파즈한라시멘트 기술연구소 주임연구원
 - 현재 한국세라믹기술원 수석연구원
-