

이수석고 함량과 Iron Modulus 변화에 따른 염소 함유 시멘트의 특성에 관한 연구

이영준 · 김남일 · 조정훈 · 서성관 · §추용식

한국세라믹기술원 저탄소·디지털 전환사업단

A Study on the Characteristics of Chlorine-Containing Cement Depending on Changes in Gypsum and Iron Modulus

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

Low-carbon & DX R&D Division, Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech., Jinju 52851, Korea

요 약

본 연구에서는 시멘트 제조공정에서 염소를 함유한 폐자원을 활용하였을 때, 염소가 클링커뿐 아니라 최종 제품에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있는 최적의 조건을 제시하고자 염소 함유 시멘트의 물리적 특성을 분석하였다. 동일한 조건의 클링커를 이수석고 중량비 95:5 및 93:7로 분쇄 후 실험을 진행하였다. 또한 클링커 모듈러스를 IM 1.3, 1.5 및 1.7로 제어하여 클링커의 광물학적 특성과 물리적 특성을 동시에 분석하였다. 동일 염소 함량 조건에서 이수석고 함량이 증가할수록 3일 압축강도는 감소하였으나, 장기 압축강도 발현율은 증가하였다. 또한 플로우와 응결시간이 증가하는 것을 확인되었다. IM 감소에 따라 우수한 클링커 광물 특성이 발현되어 free-CaO 함량이 감소하고, alite 및 ferrite 광물이 소폭 증가하였다. 압축강도는 IM이 감소할수록 증가하였으며, IM 1.3의 경우 IM 1.7 대비 약 14%가 상승하였다. 이를 통해 시멘트 제조공정에서 폐자원을 활용하여 자원 절약, 에너지 절감 등의 환경적 측면과 아울러 최종 제품인 시멘트 압축강도 등의 성능 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 기대할 수 있었다.

주제어 : 염소, 클링커 모듈러스, 이수석고, 클링커, 압축강도

Abstract

The physical properties of chlorine-containing cement were analyzed to optimize the operational conditions when waste resources containing chlorine were used in the cement manufacturing process. Cement with clinker to gypsum weight ratios of 95:5 and 93:7 were manufactured. In addition, the iron modulus (IM) of clinker was set to 1.3, 1.5, and 1.7 to evaluate the burnability and physical properties of clinker. With constant chlorine content, increasing gypsum content resulted in a decrease in the 3 day-compressive strength, whereas the 28 day-compressive strength increased. In addition, flow and setting time also increased with increasing gypsum content. As the IM decreased, burnability was improved, free-CaO content decreased, alite and ferrite content increased, and compressive strength increased. In particular, the compressive strength of IM 1.3 was approximately 14% greater than that of IM 1.7.

Key words : chlorine, clinker modulus, gypsum, clinker, compressive strength

· Received : February 21, 2022 · Revised : May 10, 2022 · Accepted : May 15, 2022

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

Low-carbon & DX R&D 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.

Table 1. Waste usage status of domestic cement plant²⁾ (Unit : 1,000ton)

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	

1. 서 론

국내 소비시장의 변화와 산업구조 고도화 및 국민 소비 욕구 증대 등의 이유로 국내에서 발생하는 폐기물은 2013년 1.38억 톤에서 2018년 1.57억 톤으로 매년 증가하였다¹⁾. 이에 따라 Table 1과 같이, 국내 시멘트 공장에서는 다양한 폐기물을 사용하고 있으며, 2015년 1,031 천 톤에서 2020년 1,720 천 톤으로 증가하였다. 대체연료 크게 시멘트 제조 과정 중 클링커 소성 공정에서 사용되는 연료 대체 폐기물과 원료 대체 폐기물로 구분할 수 있다. 연료 대체용 폐기물은 시멘트 제조과정 중 클링커 연료로 사용되는 유연탄을 대체한 것으로 폐타이어, 폐합성수지, 폐목재 및 재생유 등이 있다. 클링커 제조를 위해 석회석, 규석, 혈암, 철광석 등의 천연원료와 더불어 폐주물사, 석탄재 및 하수슬러지 및 제철·제강 슬러그 등이 대체연료로 사용된다. 앞서 언급한 시멘트 공장에서는 사용되는 대부분의 폐기물은 염소 성분을 함유하고 있어, 클링커 및 시멘트 물성에 다양한 영향을 주고 있다.

예를 들어 Hewlett³⁾ 등은 CaO와 CaCl₂ 혼합물은 600°C에서 중간 생성물인 2CaO · SiO₂ · CaCl₂를 생성하고, 약 950°C에서 고온형으로 전환되지만 이들 저온·고온 생성물은 수화 특성이 발휘되지 않는다고 보고하였다. 더불어 Al₂O₃가 혼입될 경우에는 약 750°C에서 Chlormayenite (11CaO · 7Al₂O₃ · CaCl₂)가 생성되며, chlormayenite는 1,300°C 이상에서도 안정적으로 존재한다고 보고하였다. 또한, 선행연구를 통해 chlormayenite 생성은 광화제 역할을 하여

free-CaO 감소 및 초기 압축강도 증진 등의 클링커 소성에 긍정적 영향을 끼치는 것을 확인되었다⁴⁾. 그러나 염소 함량이 증가할수록 유동성 저하, 장기 압축강도 및 응결 시간 감소 등의 시멘트 품질에 좋지 못한 영향을 미친다고 알려져 있다⁵⁾. 이러한 유동성 저하와 응결시간 감소는 Iron Modulus(IM) 및 이수석고 함량 변화를 통해 aluminate (C₃A)의 생성과 반응속도를 제어하여 조절할 수 있는 것으로 확인되었다⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 CaCl₂를 첨가한 염소 함유 시멘트의 유동성, 응결시간 및 장기 압축강도 감소 등 물리적 성능에 미치는 영향을 보완하고자 이수석고 함량을 조절하여 시멘트를 제조하였다. 또한 클링커의 IM를 제어하여 클링커 내 결정질 광물의 광물학적 특성 분석과 더불어 최종 제품인 시멘트의 물리적 특성까지 분석·평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. 출발원료 및 클링커 모듈러스

본 연구에서는 고염소 함유 클링커를 제조하기 위해 CaCO₃(JUNSEI 99.5%), SiO₂(SAMCHUN 99.0%), Al₂O₃(SAMCHUN 99.0%), Fe₂O₃(SAMCHUN 95.5%) 시약을 사용하였으며, 염소 공급 원료로는 CaCl₂(SAMCHUN 96.0%) 시약을 사용하였다. CaCO₃의 강열감량은 약 44%로 계산하였으며, 반응에 기여하는 CaO는 56% 수준으로 계산하였다. CaCl₂는 Ca 함량이 36%, Cl₂ 함량은 64%이며, 소성 과정에서 CaCl₂는 클링커와 결합하므로 다음 식

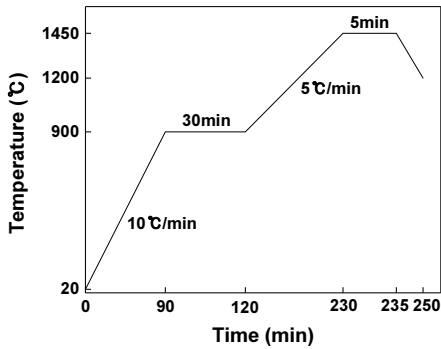


Fig. 1. Sintering program of clinker.

(1), (2) 및 (3)을 통해 클링커 모듈러스를 계산하였다.

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

$$\text{Silica Modulus} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$\text{Iron Modulus} = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

이때 상기 원료들을 볼밀(HT-1000, HAN TECH社, 한국)을 사용하여 30분간 혼합하였으며, 혼합이 완료된 혼합 원료에 혼합수 33.4%를 첨가하여 25g 성구를 제조하였다. 혼합수로는 불순물인 기름, 산, 알칼리, 염류, 유기물 등을 포함하지 않은 깨끗한 것을 사용해야 하며 증류수를 사용하였다. 제조된 성구는 24시간 동안 100°C 조건에서 완전 건조 후 소성하였다. 전기로(HT-1630FL, HAN TECH社, 한국)에 장입된 성구는 Fig. 1와 같이 상온에서 900°C까지 승온속도 10°C/min으로 승온한 후 30분간 유지하였다. 이후 5°C/min으로 1,450°C까지 승온하여 5분간 유지한 후 1,200°C에서 로출 후 냉각하였다. 최적의 시멘트 배합조건을 제시하고자 실험과정은 Fig. 2와 같이 진행하였다.

2.2. 이수석고 함량 제어

본 실험에서는 이수석고 함량에 따른 고염소 함유 시멘트의 물리적 성능을 확인하고자 염소 함량을 0ppm, 500 ppm, 1,000ppm 및 2,000ppm으로 제어하였으며, 클링커

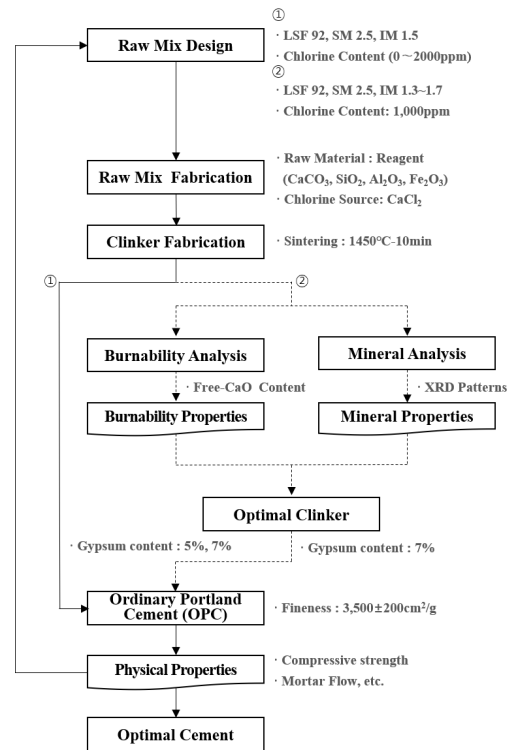


Fig. 2. Schematic diagram of experimental procedure.

Table 2. The blaine fineness of cement manufactured (Unit : cm²/g)

Chlorine content (ppm)	Blaine fineness	
	Gypsum 5%	Gypsum 7%
0	3,650	3,380
500	3,660	3,380
1,000	3,770	3,540
2,000	3,700	3,400

모듈러스는 LSF 92.0, SM 2.50, IM 1.50으로 고정하였다. 소성이 완료된 클링커는 이수석고와 중량비 95:5 및 93:7로 배합한 후 진동밀(WTVM, 웅비기계社, 한국)을 사용하여 50분간 분쇄하였다. 시멘트의 분말도는 KS L 5106 “공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법”에 따라 측정하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다.

제조 시멘트는 기초 물성 검토를 위해 KS L ISO 679 “시멘트의 강도 시험방법” 및 KS L ISO 9597 “시멘트의 응결 및 안정성 시험방법”에 따라 플로우, 압축강도 등의 물리적 성능을 분석하였다.

Table 3. Clinker modulus

Sample name	Clinker modulus		
	LSF	SM	IM
IM 1.3	92.0	2.5	1.3
IM 1.5	92.0	2.5	1.5
IM 1.7	92.0	2.5	1.7

2.3. IM 제어

IM 변화에 따른 고염소 함유 클링커의 소성성 및 광물학적 특성과 시멘트의 물리적 성능을 확인하고자 클링커 모듈러는 Table 3와 같이 제어하였다. 이때, 염소 함량은 선행연구를 통해 도출한 최적 염소 함량인 1,000ppm으로 고정하여 클링커를 제조하였다.

클링커의 소성성 분석을 위해 ASTM C 114에 따라 free-CaO 함량을 측정하였으며, 광물학적 특성 분석을 위해 X-선 회절분석기(SmartLab, Rigaku社, 일본)을 통한 XRD 패턴 분석을 수행하였다. 최종 시멘트를 제조하기 위해 클링커와 이수석고를 93:7로 배합 후 50분간 분쇄하였으며, 기초 물성시험을 통해 시멘트로의 적용 가능성을 분석·평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이수석고 함량에 따른 특성

3.1.1. 플로우 분석

Fig. 3은 시멘트 플로우 측정결과를 나타낸 것으로, 염소 첨가 시멘트는 염소 함량 0ppm 시멘트 대비 플로우가 14~17mm 감소하였다. 이는 tricalcium silicate(C₃S)의 수화초기 생성된 수화물의 피막을 통해 OH⁻이온과 Cl⁻이온의 상호확산 작용이 추가 발생하여 프리델염(C₃A · CaCl₂ · 10H₂O) 생성 촉진^{7,8)}으로 인해 염소를 첨가하지 않은 시

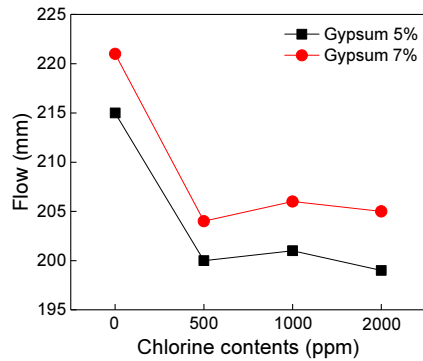


Fig. 3. The flow of cement mortar added gypsum.

멘트와의 유동성 차이가 발생한 것으로 추정된다. 특히, 동일 염소 함량의 모르타르 경우, 이수석고 함량 증가에 따라 시멘트 플로우가 4~6mm 증가하는 경향을 나타내었다. 석고 함량 증가로 인해 aluminat(C₃A) 입자표면에 에트링자이트(C₃A · 3CaSO₄ · 32H₂O)가 생성되어 초기 응결 지연을 통한 플로우 변화가 발생한 것으로 추정되었다.

3.1.2. 압축강도 분석

Table 4는 염소 함량 및 이수석고 함량에 따른 시멘트 모르타르의 3일, 7일 및 28일 압축강도를 나타낸 것이다. 이수석고 함량이 증가할수록 3일 압축강도는 감소하였으나, 양생일 증가에 따라 28일 압축강도 발현율은 증가하였다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트는 주수 직후 수분 사이에 C₃S, C₃A 및 free-CaO의 가수분해가 진행되고, 알루미늄 칼슘계 수화물 생성이 진행된다. 시멘트 내 석고 함량이 과다하면 에트링자이트가 다량 생성되며, 수화생성물의 치밀한 구조를 와해시켜 초기 강도 발현이 저하된다. 하지만 석고 함량이 적으면 에트링자이트의 모노설펀화 화가 급격하게 진행되어 액상 중 Ca(OH)₂의 농도를 저하

Table 4. Compressive strength of cement mortar as gypsum contents (Unit : MPa)

Chlorine content (ppm)	Compressive strength					
	Gypsum 5%			Gypsum 7%		
	3days	7days	28days	3days	7days	28days
0	28.5	39.2	54.5	27.1	38.7	54.2
500	28.0	39.6	56.0	27.9	41.1	58.0
1,000	34.2	44.5	59.1	28.7	43.3	62.9
2,000	31.3	39.9	54.7	31.2	41.5	60.5

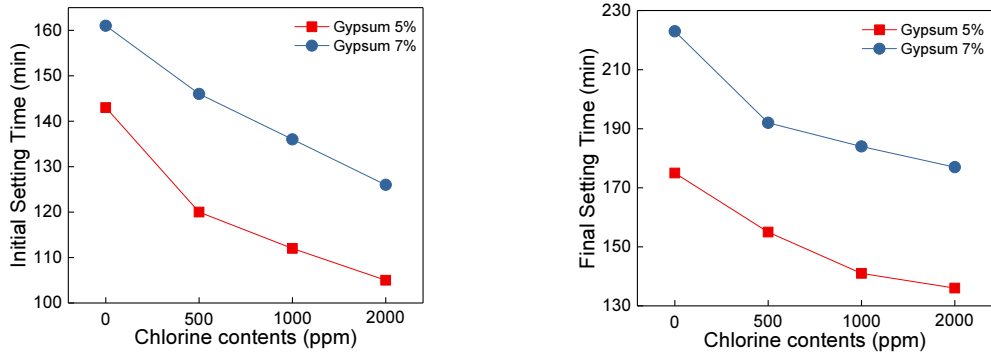


Fig. 4. Setting time of cement as gypsum contents.

시킨다. 이러한 액상 중의 SO_4^{2-} 의 부족과 $Ca(OH)_2$ 의 감소는 C_3S 와 C_3A 의 수화를 활발하게 진행하여 준안정상의 C-S-H상이나 C-A-H상의 생성을 촉진하고, 안정한 C-S-H상의 핵생성을 지연시키는 것으로 알려져있다⁹⁾. 이러한 이유로 초기재령에서 이수석고 함량이 적을수록 압축강도 발현이 증가하며, 재령이 증가할수록 이수석고 함량이 높을수록 압축강도가 증진되는 것으로 판단되었다.

3.1.3. 응결 분석

Fig. 4는 시멘트 응결시험 실험 결과를 나타낸 것이며, 이때 염소 함량에 따른 표준 주도 설정 후 응결시험을 진행하였다. 염소 함량이 증가할수록 초결 및 종결시간이 감소하였다. 이는 Cl^- 이온이 OH^- 이온을 대체하고 $Ca(OH)_2$ 에서 OH^- 이온 분리를 유도하여 발생한 현상으로 판단되었다¹⁰⁾. 이수석고 함량에 따른 응결시간의 차이는 이수석고 함량이 증가할수록 초결 및 종결시간이 18~48분가량 지연되는 것을 확인되었다. 이는 이수 석고 함량이 증가하여 액상 중 이용 가능한 SO_4^{2-} 가 증가하여 C_3A 입자표면에 에트링자이트를 더 많이 생성하여 응결시간이 지연된 것으로 판단되었다.

3.1.4. 안정도 분석

염소 및 이수석고 함량에 따른 안정도 시험 결과를 Table 5에 나타내었다. 염소 및 이수석고 함량에 따른 안정도는 큰 차이가 발생하지 않았으며, 전체적으로 양호한 것으로 확인되었다. 이는 클링커 제조과정에서 시약급 원료를 활용하여 클링커 내에 free-CaO 함량이 낮아 free-CaO의 수산화에 의한 팽창이 크게 발생하지 않은 것으로

Table 5. Autoclave expansion of cement as gypsum contents (Unit : %)

Chlorine content (ppm)	autoclave expansion	
	Gypsum 5%	Gypsum 7%
0	0.06	0.06
500	0.06	0.05
1,000	0.04	0.05
2,000	0.07	0.06

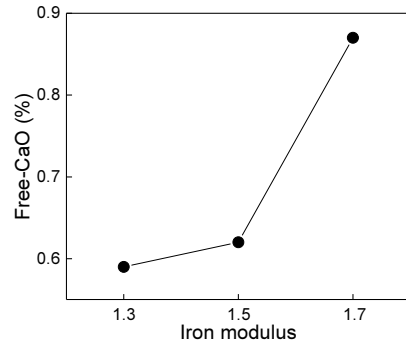


Fig. 5. Free-CaO content as iron modulus.

추정되었다.

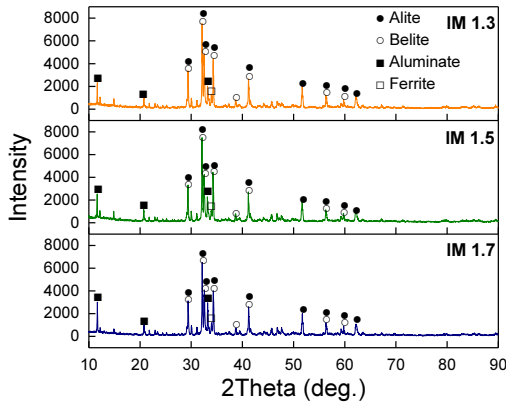
3.2. IM(Iron modulus) 변화에 따른 특성

3.2.1. 소성성 분석

클링커의 IM 변화에 따른 free-CaO 함량 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 1,450°C에서 소성한 클링커의 free-CaO 함량은 0.59~0.87%으로 일반 시멘트 공장 클링커의 free-CaO 함량과 유사하며, free-CaO 함량은 IM에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 IM이 감소할수록 원

Table 6. XRD peak Intensity as iron modulus (Unit : Counts per Second)

Iron modulus	Alite	Belite	Aluminate	Ferrite	Chlormayenite
1.3	7,531	4,870	2,031	1,318	276
1.5	7,484	4,234	2,287	1,083	245
1.7	6,505	4,083	2,953	995	240

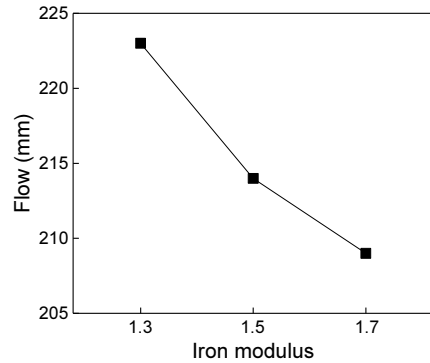
**Fig. 6.** XRD pattern as iron modulus.

료배합에 혼입되는 Fe_2O_3 가 증가하여 클링커 소성 과정에서 액상 생성 온도가 낮아지기 때문이다. 특히 소성 온도 저하에 따라 $C_3S(3CaO \cdot SiO_2)$ 의 생성을 촉진하여 소성성이 양호해지는 것으로 추정되었다¹¹⁾. 염소 함량이 일정한 경우, IM 감소에 따라 free-CaO가 감소하여 클링커 소성성이 더욱 우수해지는 경향을 발현하는 것으로 판단되었다.

3.2.2. XRD 분석

IM 제어 클링커의 XRD 피크 강도를 Table 6과 클링커 XRD 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. XRD 분석 결과, 모든 클링커의 XRD 패턴에서 4대 광물(alite, belite, aluminate, ferrite) 및 chlormayenite가 검출되었다. 특히 IM 증가에 따라 alite(32.1°) 및 ferrite(33.9°) peak intensity가 감소하고, aluminate(33.2°) peak intensity가 증가하였다.

이는 앞서 확인한 free-CaO 분석과 동일한 경향을 나타낸 것이다. IM이 증가할수록 Al_2O_3 혼입량이 증가하고, 이로 인해 칼슘실리케이트상에서 분해된 CaO 성분의 간극질로 이동이 증가하여 aluminate 결정화에 소모되기 때문으로 판단된다. 이러한 경향은 aluminate 함량의 영향을 받으며, 함량이 증가할수록 물질이동이 커지게 된다¹²⁾.

**Fig. 7.** Flow of cement as iron modulus.

더불어 상기의 물질이동으로 인해 alite의 생성이 감소하는 것으로 판단되었다.

3.2.3. 플로우 분석

IM변화에 따른 시멘트 모르타르의 플로우 값을 Fig. 7에 나타내었으며, IM이 증가할수록 플로우는 감소하고 최대 감소값은 14mm이었다. 이는 XRD 분석에서 확인한 바와 같이 IM 증가에 따라 초기 수화 활성이 높은 aluminate 함량 증가에 기인한 것으로 추정되었다.

3.2.4. 압축강도 분석

재령별 시멘트 모르타르 압축강도와 IM 변화에 따른 압축강도 변화율을 Table 7과 Fig. 8에 나타내었다. 재령별 압축강도는 IM 1.3에서 가장 큰 폭으로 상승하였으며, IM이 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 앞서 확인한 바와 같이 IM 변화로 혼합원료 배합 내 Fe_2O_3 혼입량은 증가하는 반면, Al_2O_3 혼입량은 감소하여 클링커 소성성 증가 및 alite 광물 생성량 증가에 의한 것으로 판단되었다.

IM 변화에 따른 재령별 압축강도 변화 추이를 확인하기 위해 Table 8과 같이 3일 압축강도 대비 7일 및 28일 압축강도 증가량 및 증가율을 분석하였다.

Table 7. Compressive strength as iron modulus (Unit : MPa)

Iron modulus	Compressive strength (MPa)		
	3days	7days	28days
1.3	31.1	44.8	65.2
1.5	28.7	43.3	62.9
1.7	27.7	39.6	57.1

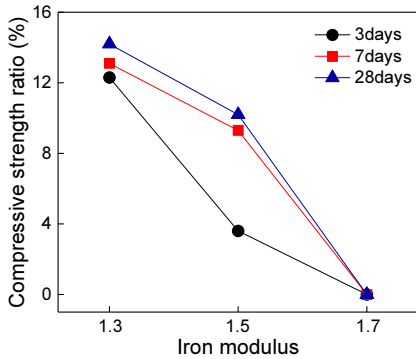


Fig. 8. Change rate of compressive strength as iron modulus.

Table 8. Increment & Increase rate of compressive strength depending on IM

Category	IM 1.3	IM 1.5	IM 1.7
Increment of 7 days compressive strength (N/mm ²)	13.7	14.6	11.9
Increase rate of 7 days compressive strength (%)	44.1	50.9	43.0
Increment of 28 days compressive strength (N/mm ²)	34.1	34.2	29.4
Increase rate of 28 days compressive strength (%)	109.6	119.2	106.1

압축강도 변화율은 IM 1.7 대비 IM 1.3에서 3일 압축강도 12.3%, 7일 압축강도 13.1%, 28일 압축강도 14.2%의 상승률을 나타내었다. 즉 염소 함량이 일정한 경우, IM이 낮을수록 압축강도에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 시멘트 제조공정에서 염소를 함유한 폐자원을 활용하였을 때, 염소가 최종 제품에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있는 최적의 조건을 제시하고자 염소 함유 시멘트의 물리적 특성을 분석하였다. 염소 함유 시멘트의 이수

석고 함량에 따른 물리적 특성을 분석하기 위해 클링커와 이수석고 중량비를 95:5 및 93:7로 제어하여 시멘트 제조 후 물리적 특성을 시험하였다. 또한 IM 변화에 따른 클링커의 광물학적 특성과 시멘트의 물리적 특성 분석하기 위해 클링커 모듈러스를 IM 1.3, 1.5 및 1.7로 제어하여 클링커 소성성 및 광물학적 특성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 이수석고 함량과 무관하게 염소 함량 증가에 따라 플로우는 감소하는 경향을 나타내었다. 반면, 이수석고 함량이 증가할수록 플로우는 최대 6mm 증가하였다. 이는 염소 이온의 프리텔럼 생성 촉진으로 인한 유동성 저하와 석고 함량 증가로 인해 C₃A 표면의 에트리징사이트 생성 촉진 및 초기 응결 지연을 통한 플로우 변화로 판단되었다.
2. 3일 압축강도는 이수석고 함량이 증가할수록 감소하였으나, 양생일 증가에 따라 압축강도 발현율이 증가하였다. 이는 이수석고 함량이 증가할수록 C₃A의 수화를 억제하고, 준안정상 C-S-H나 C-A-H 상의 생성이 지연되어 초기강도는 감소하나, 재령이 증가할수록 안정한 C-S-H 상으로 전환되어 압축강도 발현성이 증가하는 것으로 판단되었다.
3. IM이 낮을수록 클링커의 free-CaO가 감소하여 우수한 소성성과 광물 함량 특성을 발현하였다. Fe₂O₃ 증가에 따라 클링커 소성 과정 중 C₃S(3CaO·SiO₂)의 생성 촉진으로 인한 것으로 추정되었다. 또한 XRD 분석을 통해 IM이 감소할수록 alite 및 ferrite 피크 강도가 증가하고 aluminate 피크강도가 감소하는 것을 통해 free-CaO 분석과 동일 경향을 나타내는 것을 확인하였다.
4. 플로우 및 압축강도는 IM이 낮을수록 증가하고, IM 1.3에서 가장 우수하였으며, 이는 IM 변화로 혼합원료 배합 내 Fe₂O₃ 증가 및 Al₂O₃ 감소로 aluminate 광물 생성 감소와 alite 생성 증가에 의한 것으로 사료하였다.
5. 상기와 같이 클링커 내의 염소가 클링커 광물뿐만 아니라 시멘트의 물리적 성능에도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 클링커 모듈러스 및 이수석고 함량을 제어하여 염소가 최종 제품에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있는 최적의 조건을 제시하고자 하였다. 이는 염소를 함유한 폐자원을 시멘트 제조공정에서 활용하였을 때, 폐기물 처리, 에너지회수, 천연자원 절약 등의 기대효

과뿐만 아니라 최종 제품인 클링커·시멘트의 성능 향상을 기대할 수 있는 것으로 확인하였다.

References

1. Korea Waste Association, Waste statistics, http://www.kwaste.or.kr/bbs/content.php?co_id=sub0401, October 21, 2020.
2. Council Chungbuk, 2019 : The effect of waste recycling in the cement industry.
3. Peter C. Hewlett, 2020 : Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Elsevier, pp.436-437.
4. Young-Jun Lee, Nam-II Kim, Jeong-Hoon Cho, et al., 2021 : A Study on the Characteristics of Clinker and Cement as Chlorine Content, KIRR, 30(5), pp.10-16.
5. Eun-Seok Kim, Hong-ki Heo, Jong-Tae Jang, et al., 2002 : Characteristics of Cement Hydration by Chlorine Content, Cement Symposium, 29, pp.145-150.
6. Hyeon-II Jung, Wan-Ho Cha, Cheol-Min Kim, 2004 : A Study on the Optimum Gypsum Amount in Cement, 31, pp.59-68.
7. H. Kato and K. Yoshioka, 1998 : Influence of Sulfate Ion on the Superplasticizer, Cement Science and Concrete Technology, 52, pp.144-151.
8. K. Negishi, Y. Nakajima, 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.
9. Eui-Hak Lee, Jun-Yeong Jeon, Jin-Wook Kim, et al., 2000 : A study on the Effect of Plaster Form and Amount on the Quality of Cement Hardened Body, Cement Symposium, 27, pp.42-47.
10. Seung Tae Lee, 2015 : Evaluation on the Performance of Mortars Made with Calcium Aluminate Cement, KSMI, 19(6), pp.80-87.
11. Eui-Hak Lee, Jun-Yeong Jeon, Jin-Wook Kim, et al., 2005 : Study of Clinker Characteristics by Cooling Start Temperature and IM Change, Cement Symposium, 32, pp.49-56.
12. Bong-Hee Kang, Jae-won Choi, Tae-Kyoung Ki, et al., 2020 : Study on Burnability and Reactivity of High Al₂O₃ Content OPC Clinker for the Use of Industrial Waste, J Rec Const Resources, 8(3), pp.294-301.

이영준



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

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 책임기술원

추용식



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