

고염소 부산물을 이용한 특수시멘트 제조 특성

문기연 · 조진상 · 최문관 · §조계홍

한국석회석신소재연구소

Characteristics of Manufacturing for Special Cement Using High Chlorine by-product

Kiyeon Moon, Jinsang Cho, Moonkwan Choi and §Kyeong Cho

Korea Institute of Limestone and Advanced Materials

요 약

본 연구에서는 석회석, 임의의 산업부산물, 국내산 석탄재 및 시멘트 킬른더스트를 활용해 원료배합특성 및 소성조건에 따른 CCA 특수시멘트 제조특성을 조사하였다. 소성조건에 따른 CCA 특수시멘트 제조특성결과, 소성온도 1200°C에서 CCA 광물상(C₁₁A₇·CaCl₂) 합성량이 최대치를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 소성온도 1300°C에서는 CCA 광물상 합성량이 감소하는 것을 알 수 있었는데, 이는 염소성분 휘발에 의한 현상으로 보이며, CCA 광물상 합성에 기여했던 CaO-Al₂O₃ 화합물은 SO₃와 결합하여 yeelimite가 형성된 것으로 판단된다. 소성유지시간에 따른 CCA 특수시멘트 제조특성 결과, 대체로 소성시간이 길어짐에 따라 CCA 합성량이 증가하는 경향을 나타내었으나 소성시간 30 min 이상에서는 클링커의 용융현상이 확인되며, 클링커링 공정을 위해서는 소성시간 20 min 이내가 적당한 것으로 사료된다. 이로 미루어볼 때 CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 소성조건은 승온속도 10°C/min, 소성온도 1200°C, 유지시간 20 min으로 판단되며, 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트를 활용한 CCA 특수시멘트 제조가 용이한 것을 알 수 있었다.

주제어 : 고염소 산업부산물, 시멘트 킬른 더스트, CCA special cement, 순환자원

Abstract

This study aims to investigate the manufacturing process of calcium chloride-based special cement, i.e., CCA (calcium chloro aluminate, C₁₁A₇·CaCl₂), which uses limestone, by using one type of random industrial by-product, domestic coal ash, cement kiln dust. The manufacturing process of was examined in detail, and the results suggested that the amount of CCA synthesized increased with an increase in the firing temperature. The manufacturing process of CCA was investigated at 1200°C, which was determined as the optimum firing temperature. The results showed that in general, the amount of CCA synthesized tended to increase with an increase in the firing time; however, the clinker melted when the firing time was more than 30 min, thereby suggesting that a firing time of less than 20 min would be suitable for the clinkering process. The optimal firing conditions for manufacturing CCA were obtained as follows: heating rate of 10 °C/min, firing temperature of 1200 °C, and holding time of 20 min. The results also suggest that manufacturing CCA will be easier when high chlorine-containing cement kiln dust is used.

Key words : Industrial by-product containing high chloride, Cement kiln dust, CCA special cement, Alternative Materials

· Received : December 6, 2021 · Revised : December 21, 2021 · Accepted : December 22, 2021

§ Corresponding Author : Kyeong Cho (E-mail : khcho99@kilam.re.kr)

Research and Development Office, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Meapo-eup, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do 27003, 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

시멘트 킬른 더스트는 시멘트 제조공정에서 배출되는 대표적인 산업부산물로 시멘트 1톤 생산 시 약 50~200kg 이 배출된다. CaO, SiO₂ 및 Al₂O₃ 등 보통포틀랜드시멘트 클링커 제조 시 활용되는 원료물질과 유사한 화학성분을 나타내며 대부분 시멘트 클링커 제조공정 중 원료부분 순환자원으로 재활용되고 있지만, 페비닐, 페플라스틱, 오티류 및 페타이어 등의 생활폐기물 순환자원 활용량이 증가함에 따라 소성공정에서 배출된 다량의 염소성분이 비산분진에 응집하며 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트 배출량이 증가하는 추세이다⁴⁻⁵⁾. 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트를 원료물질 순환자원으로 활용할 경우 생산된 시멘트 클링커 내 다량의 염소성분에 의해 최종생산품인 시멘트의 품질확보가 어려울 수 있으며, 염소이온 용출에 의한 철근부식, 구조물 내구성 저하 및 백화현상 등의 문제가 발생할 수 있다⁶⁻¹⁰⁾. 또한, 소성공정 중 휘발된 염소성분이 소성로 동체에 부착하여 설비 운영에 불안정성을 야기할 수 있다. 순환경제 구축을 위한 국가정세에 따라 시멘트 산업에서 순환자원 활용량이 지속적으로 증가할 수밖에 없는 상황에서 이로부터 발생하는 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트의 실질적인 활용방안은 미비한 실정이며, 경제성 및 산업적용성을 고려한 대책이 마련되어야 하는 시점이다¹¹⁾.

본 연구에서는 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트 내 염소성분을 시멘트 클링커에 고용화하여 염소이온용출에 의한 안정성을 확보한 calcium chloro aluminate(CCA) 특수시멘트를 제조하고자 하였다. 특수시멘트 제조에 활용된 원료물질은 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트 및 석회석, 임의의 산업부산물 및 국내산 석탄재로 하였으며,

클링커 모듈러스에 따른 원료배합 및 소성조건에 따른 제조특성을 연구하였다. 특수시멘트 제조 여부는 염소이온이 시멘트 광물상에 고용화된 형태인 CCA 광물상 합성기준으로 하였으며, CCA 광물상을 주요광물상으로 한 특수시멘트의 제조특성 연구를 통해 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트의 실질적인 활용방안을 예측하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 원재료 특성

본 연구에서는 CCA 광물상 합성을 위한 배합원료로 고염소 함유 시멘트 킬른 더스트, 석회석, 임의의 산업부산물 및 국내산 석탄재 1종을 활용하였으며, Table 1 및 Fig. 1에 화학성분 및 광물상 분석결과를 나타내었다.

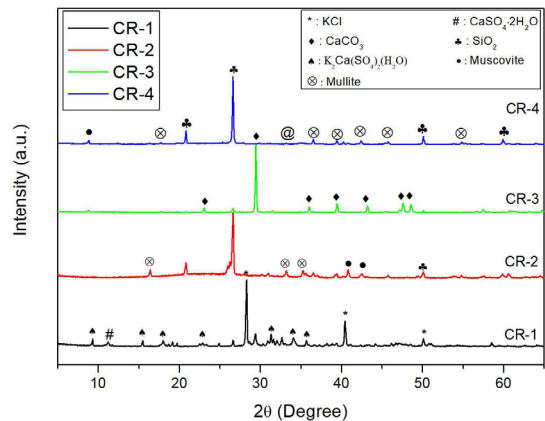


Fig. 1. XRD patterns of field raw materials for special cement. [Data Base Number] KCl : 01-075-0296, CaSO₄·2H₂O : 00-033-0311, CaCO₃ : 01-072-1652, SiO₂ : 01-070-3755, K₂Ca(SO₄)₂(H₂O) : 01-074-1118, Muscovite : 01-084-1305, Mullite : 01-073-1389

Table 1. Chemical composition of field raw materials for manufacturing special cement

(unit : mass%)

	CaO	K ₂ O	SO ₃	Cl	SiO ₂	PbO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CuO	Ig. loss
CR-1 ¹⁾	23.4	12.4	9.56	5.29	3.08	1.56	1.36	0.81	0.54	0.09	40.4
CR-2 ²⁾	3.37	1.57	0.61	-	54.5	0.56	25.3	9.70	1.18	0.02	-
CR-3 ³⁾	51.6	0.64	0.10	0.01	6.16	0.06	2.17	1.24	1.25	0.01	36.5
CR-4 ⁴⁾	1.92	2.73	0.28	0.08	65.9	0.38	18.0	7.43	1.38	0.38	-

¹⁾ Cement kiln dust (CKD)

²⁾ Industrial by-product

³⁾ Limestone

⁴⁾ Domestic ash

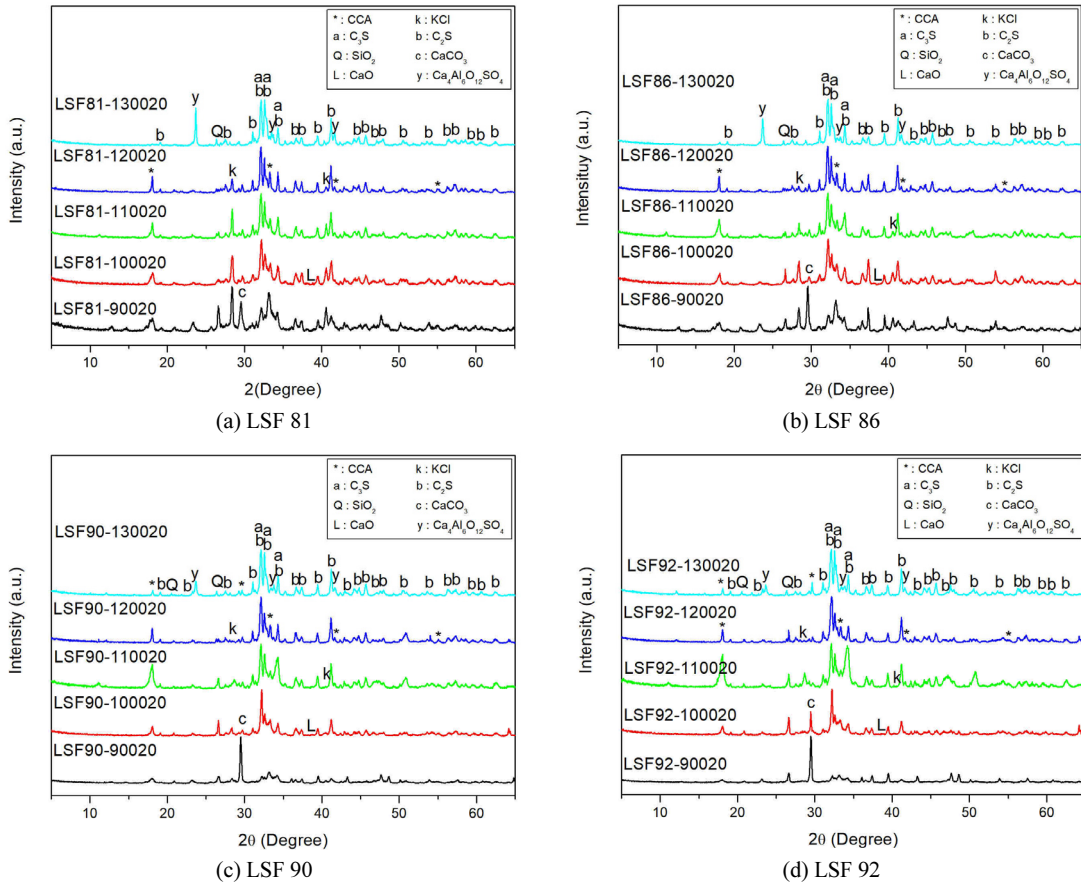


Fig. 2. XRD patterns of CCA special cement clinkers with calcination temperature.

[Data Base Number] CCA : 00-045-0568, KCl : 01-075-0296, C₃S : 01-070-1846, C₂S : 01-083-0465, SiO₂ : 01-086-2237, CaCO₃ : 01-081-2027, CaO : 01-077-2376, Ca₄Al₆O₁₂SO₄ : 01-071-0969

Table 1의 화학성분 분석결과, CR-1의 고염소 함유 시멘트 킬른 터스트의 염소함량은 5.29 mass%로 비교적 다량의 염소성분이 함유되어 있는 것을 확인 할 수 있었으며, CaO 23.40 mass%, SiO₂ 3.08 mass%, Al₂O₃ 1.36 mass%가 혼재되어 있는 것을 알 수 있었다. CR-2 샘플은 임의의 산업부산물로서 SiO₂, Al₂O₃ 및 Fe₂O₃ 성분이 고루 혼재되어 시멘트 수화광물상 합성에 용이할 것으로 판단되었으며, CR-3 샘플인 석회석은 CaO 51.60 mass% 및 SiO₂ 6.16 mass%로 증품위 석회석인 것을 알 수 있었다. 국내산 석탄재인 CR-4 샘플은 CaO 1.92 mass%, SiO₂ 65.9 mass%, Al₂O₃ 18.0 mass% 및 Fe₂O₃ 7.43 mass%로 비교적 SiO₂, Al₂O₃ 및 Fe₂O₃ 함량이 높은 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2의 광물상 분석결과, 유일하게 염소성분이 혼재되어 있던

CR-1 샘플의 경우, 주요광물상은 KCl, K₂Ca(SO₄)₂(H₂O), CaCO₃ 등으로 Table 1에서 확인할 수 있었던 염소성분이 KCl 광물상으로 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, CR-3 샘플의 경우 SiO₂ 및 mullite가 혼재되어 calcium silicate 및 calcium aluminate 수화광물상 생성에 기여도가 높을 것으로 예측되었다. CR-3의 주요광물상은 CaCO₃, SiO₂ 및 muscovite로 일반적인 증품위 석회석과 유사한 광물학적 특성을 나타내며 Table 1과 유사한 경향성을 파악할 수 있었으며, CR-4 샘플의 주요광물상은 SiO₂, muscovite, mullite 및 Fe₂O₃ 인 것을 알 수 있었다.

2.2. 클링커 모듈러스에 따른 원료배합

본 연구에서 제조하고자 하는 CCA 특수시멘트의 경

Table 2. Field raw materials mixing characteristics for manufacturing special cement

	Field raw materials (wt. %)				Clinker modulus			Sample name
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	LSF ¹⁾	SM ²⁾	IM ³⁾	
1	5	10	80	5	92	1.8	2.2	LSF 92
2	10	10	75	5	90	1.8	2.2	LSF 90
3	20	10	65	5	86	1.8	2.2	LSF 86
4	30	10	55	5	81	1.8	2.2	LSF 81

¹⁾ LSF (Lime saturation factor)

²⁾ SM (Silica modulus)

³⁾ IM (Iron modulus)

Table 3. Calcination condition for CCA special cement synthesis

Samples	LSF (80, 86, 90, 92)
Heating rate	10°C/min
Calcination temperature	(900, 1000, 1100, 1200, 1300)°C
Holding time	(10, 20, 30) min

우, CCA 광물상이 전체 시멘트 구성광물상 중 약 20~30 mass%에 해당하며 보통포틀랜드시멘트 대비 C₂S 및 C₃S와 같은 calcium silicate계 수화광물상 합성량이 낮다. 이에 보통포틀랜드시멘트와는 다소 상이한 배합특성을 나타내며, 본 연구에서는 Table 2와 같이 클링커 모듈러스를 적용해 원료배합을 실시하였다. 원료배합은 CCA 광물상 합성량이 최대가 되도록 설계하였으며, 이에 염소공급원인 CR-1 샘플의 배합비를 조정하여 원료배합 특성 및 클링커 모듈러스에 따른 CCA 특수시멘트 제조특성을 조사하였다.

각 배합원료들은 물 비 30 wt.%로 반죽하여 성구형태로 제조하였으며, 80°C 온도에서 24 h 건조 후 CCA 광물상 합성을 위한 소성원료로 활용하였다. CCA 광물상 합성을 위한 소성조건은 승온속도 10°C/min, 소성온도 900~1300°C, 유지시간 10~30 min으로 하였으며, Table 3에 CCA 특수시멘트 제조를 위한 소성시험 조건을 나타내었다.

3. 실험결과

Fig. 2는 CCA 특수시멘트 클링커 제조를 위한 원료물질의 배합특성 및 소성온도에 따른 광물상 분석결과를 나타내었다. 광물상 분석결과 배합특성에 관계없이 모든 샘플의 주요광물상은 CCA, C₃S, C₂S, Ca₄Al₆O₁₂SO₄ (yeelimite), CaCO₃ 및 미반응 CaO, SiO₂, KCl 인 것을 알

수 있었으며, 대체로 원료배합 중 염소성분이 높을수록 CCA 광물상 합성량이 증가하는 경향을 나타내었다. 배합 원료 중 염소성분 가장 높은 LSF 81 샘플의 경우 다량의 CCA 광물상과 함께 미반응 KCl이 잔존하는 것을 확인할 수 있었으며, 염소성분이 가장 낮은 LSF 92 샘플의 경우 LSF 81 샘플보다 상대적으로 C₂S 및 C₃S와 같은 calcium silicate계 수화광물성이 다량 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 광물상 분석을 통해 CCA 합성량을 명확하게 규명하기는 어렵지만, 피크 크기 및 기타 광물상과의 상관관계를 보았을 때 LSF 81 배합조건에서 CCA 광물상 합성량이 가장 높은 것으로 확인된다. 다만, 미반응 KCl이 잔존함에 따라 향후 이온용출에 의한 안정성을 고려할 경우^{12,13)}, 비교적 미반응 KCl 함량이 거의 없거나 낮은 LSF 86 및 LSF 90 배합이 CCA 특수시멘트 제조를 위한 적정 배합비 인 것으로 생각된다.

소성온도에 따른 CCA 광물상 합성특성 결과, 소성온도 증가에 따라 CCA 광물상 합성량이 증가하는 경향을 나타내었는데 약 1000°C 온도에서 CCA 광물상 합성이 시작되며 소성온도 1200°C에서는 CCA 광물상 합성량이 최대로 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 소성온도 1300°C에서는 1200°C 보다 CCA 광물상 피크가 낮게 측정되며, yeelimite 광물상이 급격하게 생성된 것을 알 수 있었다. 일반적으로 염소성분은 1100°C 내외의 온도에서 90% 이상 휘발되는 것으로 보고되고 있는데^{14,15)}, 본 연구 결과의 경우 약 1200°C 이상의 온도범위에서 염소성분이 휘발됨에 따라 합성되었던 CCA 광물상 결정성이 분해되며 CCA 합성량이 낮아진 것으로 사료된다. 이때 CCA 광물상 합성에 기여했던 CaO-Al₂O₃ 화합물이 원료 중 혼재되어 있던 SO₃와 재결정화하여 1300°C 온도범위에서 급격하게 yeelimite 광물상이 다량 생성된 것으로 판

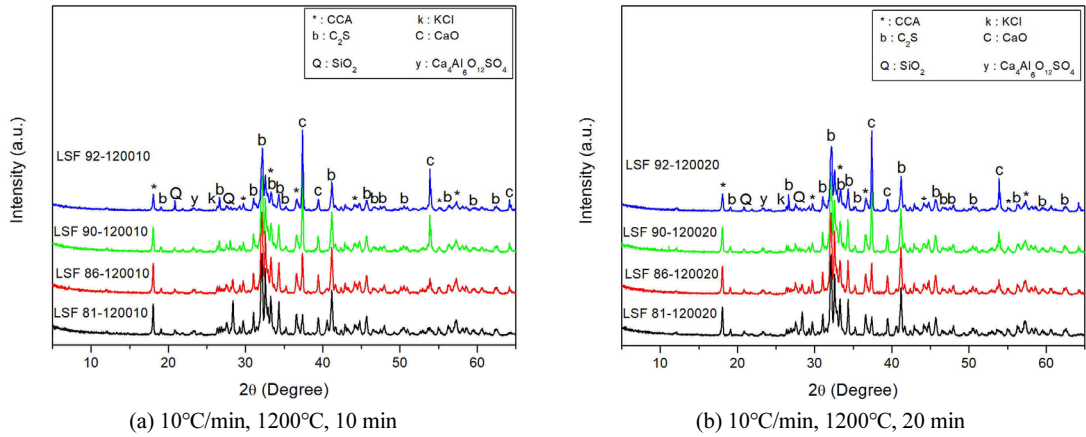


Fig. 3. XRD patterns of CCA special cement clinkers with calcination holding time.

[Data Base Number] CCA : 00-045-0568, KCl : 01-075-0296, C₂S : 01-083-0465, SiO₂ : 01-086-2237, CaO : 01-077-2376, Ca₄Al₆O₁₂SO₄ : 01-071-0969

Table 4. Quantitative analysis of rietveld method minerals for CCA special cement clinkers in 10°C/min, 1200°C, 10 min (unit : mass%)

	CCA	C ₂ S	Yeelimite	CaO	SiO ₂	KCl
LSF 81	29.2	55.2	9.1	-	-	3.9
LSF 86	29.1	55.6	5.6	3.5	0.9	1.7
LSF 90	27.3	52.8	2.6	9.5	1.5	1.4
LSF 92	26.2	52.2	-	13.6	2.7	0.9

Table 5. Quantitative analysis of rietveld method minerals for CCA special cement clinkers in 10°C/min, 1200°C, 20 min (unit : mass%)

	CCA	C ₂ S	Yeelimite	CaO	SiO ₂	KCl
LSF 81	29.9	55.7	9.3	-	-	2.8
LSF 86	29.3	57.3	5.8	2.3	0.8	1.3
LSF 90	27.7	56.4	3.4	6.3	0.9	0.8
LSF 92	25.7	53.5	3.5	10.7	1.8	0.6

단된다^{16,17}. 이러한 현상은 배합원료 중 상대적으로 염소 함량이 높은 LSF 81 및 LSF 86에서 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 이로 미루어볼 때 CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 소성조건은 1200°C 인 것으로 판단되며, 최적 배합비는 LSF 81 및 LSF 86으로 생각된다.

Fig. 3은 최적 CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 소성온도로 판단되는 1200°C에서 유지시간에 따른 광물상 분석결과이다. 분석결과, 대체로 소성시간이 길어짐에 따라 CCA 함성량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 소성유지시간 10 min보다 소성유지시간 20분에서 미반응 CaO 및 SiO₂ 잔존량이 더 낮으며, 내구성 증진에 기여

하는 CCA 및 C₂S 광물상 함성량이 더 높은 것을 알 수 있었다. 소성시간 30 min에서는 과소에 의한 클링커의 용융 현상이 발생하는 확인할 수 있었는데, Fig. 2의 결과로 미루어 볼 때 미반응 KCl이 상대적으로 다량 잔존함에 따라 KCl의 알칼리성에 의해 클링커링 온도가 저하되며 용융 현상이 발생한 것으로 보여진다^{18,19}.

Fig. 3의 광물상 분석결과를 토대로 광물상 함성량 및 혼합원료의 미반응 잔존량을 확인하고자 리트벨트(Rietveld) 정량분석을 실시하였으며, Table 4 및 Table 5에 분석결과를 나타내었다. 분석결과 LSF 값이 낮아질수록 미반응 CaO, SiO₂ 및 KCl이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. KS L

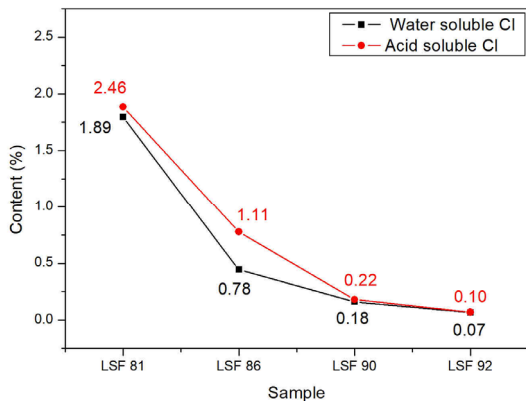


Fig. 4. Cl content in CCA special cement clinkers with water soluble and acid soluble method.

ISO 679에 준한 보통포틀랜드시멘트의 미반응 CaO 함량 5% 이하 규정을 고려할 때, CCA 특수시멘트 클링커 제조를 위한 적정 소성유지시간은 미반응 CaO 함량이 최소화 되는 20 min 내외인 것으로 생각되며, LSF 86 이하의 배합조건을 충족해야 하는 것을 알 수 있었다. CCA 광물상 함성량의 경우, 소성유지시간에 따른 차이가 크지 않았지만, C_2S 및 yeelimite의 경우, 소성시간 10 min 보다 소성시간 20 min에서 함성량이 더 높은 것을 확인할 수 있었으며, CCA 특수시멘트의 장기내구성을 고려할 때 최적 소성시간은 20 min 내외인 것으로 판단된다. 이는 상기 내용과 유사한 경향성으로 확인되며, 이에, CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 소성조건은 승온속도 $10^{\circ}C/min$, 소성온도 $1200^{\circ}C$, 유지시간 20 min인 것으로 판단된다.

CCA 특수시멘트 내 염소함량 고용화 특성을 확인하기 위해 수용성 및 산가용성 염화물 함량 측정을 실시하였으며, Fig. 4에 시험결과를 나타내었다. 시험결과, CCA 광물상 함량이 증가함에 따라 염소함량이 증가하며, 광물상 내 염소성분이 고용화 된 것을 확인할 수 있었다. CCA 특수시멘트 내 전체 염소함량 확인을 위해 실시한 산가용성 염화물 함량 측정결과, CCA 특수시멘트 제조 배합비에 따라 최소 0.1%~2.46% 가량의 염소성분이 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 보통포틀랜드시멘트의 경우 300 ppm 이하의 염화물 함량 관리가 실시되고 있는데^{20,21)}, CCA 특수시멘트의 경우 보통포틀랜드시멘트와 상이하게 내구성 증진에 기여할 수 있는 시멘트

광물상에 다량의 염소성분을 인위적으로 고용화 시킴에 따라 보통포틀랜드시멘트 대비 높은 염소함량을 나타내는 것으로 보여진다. 수용성 염화물 함량의 경우 0.07%~1.89%를 나타내며, CCA 광물상 함량 증가에 따라 수용성 염화물 함량이 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 산가용성 염화물 함량과 유사한 경향으로 보여진다. 수용성 염화물 함량의 경우 용출될 수 있는 이온의 함량으로 철근구조물에 적용 시 철근부식 및 방청효과를 야기할 수 있어 구조물의 내구성을 저하시킬 수 있다고 보고되고 있다. 다만, CCA 특수시멘트의 경우 다른 연구자들의 기 연구사례를 참고할 때 자체 광물학적 특성에 따라 조강성을 나타내는 무근 콘크리트용 특수시멘트로 활용성이 높아 이온용출과 관련된 문제에서 비교적 자유로우며, 자체 광물학적 특성에 따라 경화과정에서 프리델씨염의 형태로 염소이온이 고정화되기 때문에 건설재료로서 안정적인 활용이 가능하다는 연구사례가 있다. 이에 본 연구에서 제조한 CCA 특수시멘트의 경우에도 무근 콘크리트용 건설재료로서 활용이 용이할 것으로 생각되며, 고염소 함유 시멘트 킬른 테스트를 활용한 CCA 특수시멘트 제조용 이성 및 활용 방향성을 예측할 수 있었다.

4. 결 론

- 1) 배합원료 중 염소성분 혼합량이 증가함에 따라 CCA 광물상 함성량이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 다만, 배합성분의 화학양론비가 맞지 않을 경우 미반응 CaO 및 SiO_2 가 비교적 과량 잔존하는 현상을 나타내며 CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 배합비 선정이 요구되었다.
- 2) 소성온도 $1100^{\circ}C$ 일 경우, CCA 광물상 합성은 가능하지만 고상반응이 완전히 완료되기까지 다소 소성온도가 낮아 미반응 SiO_2 및 CaO가 비교적 다량 잔존하는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 소성온도 $1300^{\circ}C$ 일 경우, CCA 광물상 합성 온도보다 다소 높아 염소성분 휘발에 의해 소성온도 $1200^{\circ}C$ 보다 CCA 합성량이 낮은 것으로 생각된다. 이에 CCA 합성을 위한 최적 소성온도는 $1200^{\circ}C$ 로 판단된다.
- 4) CCA 합성을 위한 최적 소성온도 $1200^{\circ}C$ 기준에서 유지시간에 따른 소성특성을 조사한 결과, 소성 유지시간이 20 min 이상 지연될 경우 샘플 표면에 과소에 의

한 용융현상이 발생하는 것을 알 수 있었으며, 최적 소성시간은 20 min 이내인 것으로 생각된다.

- 5) CCA 특수시멘트 제조를 위한 최적 모둘러스는 SM 2.2, IM 1.8 기준 LSF 86 및 LSF 81 인 것으로 판단되며, 염소 고용화량이 최대 2.5% 이상으로 보통포틀랜드시멘트 대비 상당량 고용화 가능 한 것을 확인할 수 있었지만, 비례적으로 수용성 염화물함량 또한 높기 때문에 이온용출에 의한 경화체 안정성 평가가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20010616')

References

1. CEMBUREAU., 2020 : Cement the European Green Deal – Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, CEMBUREAU, pp.1-8.
2. Chatziaras, N., Psomopoulos, C., Themelis, N., 2014 : Use of alternative fuels in cement industry, 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, Skiathos island, Greece, 1, pp.521-529,
3. Waste Plastic Recycling And Market Activation Report, 2017 : Korea Environmental Industry & Techonology Instiute, pp.2093-2332.
4. Korean Social Trends, 2018 : Generation and Recycling of Waste Plastics, pp.263-269.
5. Eitimes, Sim, Y. B. <http://eitimes.kr/View.aspx?No=1394589>, November 30, 2021.
6. Saint-Jean, S.J., Jøns, E., Lundgaard, N., et al., 2005 : Chlorellestadite in the preheater system of cement kilns as an indicator of HCl formation, Cement and Concrete Research, 35(3), pp.431-437.
7. N.K.Ueno. H. Harada, and K.B. Sutou, 1999 : Chlorine Bypass System for Stable Kiln Operation and the Recycling of Waste, International Cement Review, pp.36-41.
8. S. Yokoyama, T. Nakano, Y. Tsuchida, et al. 1999 : Influence of Chlorine on Clinker Formation from Incinerated Ash of Urban Composite Waste, Cement Science and Concrete Technology, 53, pp.140-45.
9. Min, T.B., Choi, H.K., Kim, H.C., et al. 2019 : Use of alternative fuels in cement manufacturing, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 14(1), pp.14-21.
10. Han, J.M., Kang, B.H., Park, J.Y., et al. 2020 : The Foundation Performance of Selected Waste Plastic Wastes Used in Cement Manufacturing, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 29(6), pp.88-97.
11. Rahman, A., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., et al. 2013 : Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview, Procedia Engineering, 56, pp. 93-400.
12. Lee, C. S., Yoon, I. S, 2003 : Prediction of determination process for concrete considering combined deterioration of carboncation chloride ion, JKCL, 15(3), pp.902-912.
13. Lee, Y. S., Lee, H. S., 2016 : An experimental study on calibration for detecting chloride in cement paste rising ion-selective electrood, Korea Concrete Institute, 28(2), pp. 513-514.
14. Kim, W. S., Shin, Y. S., 2014. KR. 10-2013-0021831.
15. Choi, J. H., Oh, S. S., 2019 : Removal of Chlorine from Municipal Solid Waste Fly Ash by using Acid and Alkaline Solution, JKSWM, 36(5), pp.471-479.
16. Mokrá, J., Kulisek, K., Gazdij, D., et al., 2016 : Long-term observation of yeelimite clinker hydration in environment of saturated water vapour, Procedia Engineering, 151, pp. 94-99.
17. Skalamprinos, S., Galan, I., Hanein, T., et al., 2018 : Enthalpy of formation of ye'elimite and ternesite, J Therm Anal Calorim, 131, pp.2345-2359.
18. Inam Jawed, Jan Skalny., 1977 : Alkalies in cement: A review I. Forms of Alkalies and their effect on clinker formation, Cement and Concrete Research, 7(6), pp.719-729.
19. Urs Haeseli., 2011 : Reactions of alkalis, chlorine and sulfur during clinker production, Cement International, 9(3), pp.38-53.
20. Lee, J. H., Kim, D. K., 1996 : A Study on the Effects of Reclaiming – Fuel in Cement Kiln, KICT, pp.63-76.
21. Lee, Y.J., Kim, N.I., Cho, J.H., et al., 2021 : A Study on the Characteristics of Clinker and Cement as Chlorine Content, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 30(5), pp.10-16.

문 기 연

- 한국교통대학교 신소재공학과 박사과정
 - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 선임연구원
 - 당 학회지 제29권 5호 참조
-

조진상

- 강원대학교 지역기반공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 책임연구원
- 당 학회지 제29권 6호 참조

최문관

- 한국교통대학교 신소재공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 선임연구원
- 당 학회지 제29권 5호 참조

조계홍

- 광운대학교 대학원 화학공학과 공학박사
 - 현재 한국석회석신소재연구소 소장
 - 당 학회지 제29권 6호 참조
-