

산업부산물 활용을 위한 고 Al_2O_3 함량 OPC 클링커의 소성성 및 반응성에 관한 연구

Study on Burnability and Reactivity of High Al_2O_3 Content OPC Clinker for the Use of Industrial Waste

강봉희¹ · 최재원² · 기태경² · 권상진³ · 김규용^{4*}

Bong-Hee Kang¹ · Jaewon Choi² · Tae-Kyoung Ki² · Sang-Jin Kwon³ · Gyu-Yong Kim^{4*}

(Received August 5, 2020 / Revised September 11, 2020 / Accepted September 14, 2020)

This study evaluated the burnability and hydration reaction of clinker burned with high Al_2O_3 content OPC to apply large amounts of industrial by-products in the cement manufacturing process. Specifically, after preparing a clinker with a high C_3A content by burning the OPC raw material with a high content of Al_2O_3 in a laboratory electric furnace, the burnability of the clinker was evaluated through XRD Rietveld analysis and polarization microscopy, and clinker hydration reactivity was reviewed through the Isothermal conduction calorimetry analysis and the cement compressive strength. As a result, the kiln burning temperature for the production of high Al_2O_3 content clinker lower, and the compressive strength was equal to or higher than OPC. Therefore it was confirmed the possibility to manufacturing energy-saving high Al_2O_3 content clinker using a large amount of industrial by-products.

키워드 : 산업부산물, 생활폐기물, 고 Al_2O_3 시멘트, 재활용

Keywords : Industrial waste, Municipal waste, High Al_2O_3 content OPC, Recycling

1. 서론

시멘트 산업은 다량의 폐기물, 부산물을 시멘트 제조 원료로 사용함으로써 현대 사회의 자원 순환에 기여하고 있다. 이러한 부산물에는 Al_2O_3 가 다량 함유되어 있는 경우가 많으며, 다량의 부산물을 활용하여 제조한 클링커는 C_3A (aluminat) 광물의 함량이 높게 나타나는 특징을 가진다. 일반적으로 C_3A 함량이 높은 시멘트는 다량의 부산물을 활용할 수 있을 뿐 아니라 상대적으로 적은 에너지로 생산할 수 있다는 장점을 갖기는 하지만, 유동성 저하가 우려되고, 시멘트에서 가장 중요한 광물로 꼽히는 C_3S (alite) 광물의 양이 상대적으로 저하됨으로 인해 장기 강도 발현이 부족할 수 있다는 등의 단점으로 인해 사용에 제약을 받는다.

이런 일반적인 인식과는 달리 최근에는 C_3A 함량이 높은 시멘트라 하더라도 슬래그 미분말, 석회석 미분말 등 혼합재를 이용해

물성 저하를 제어하는 방법이 제안되는 등(Hagino 2012) 고 Al_2O_3 함량 시멘트를 적극적으로 활용함으로써, 시멘트 산업에서의 산업 부산물 활용을 증대하기 위한 시도가 계속되고 있다.

그러므로 본고에서는 국내 시멘트의 제조용으로 활용되는 원료에 Al_2O_3 표준시료를 단계적으로 첨가하고 소성해 소성성을 평가함으로써 국내에서 생산 가능한 고 Al_2O_3 함량 시멘트의 제조 가능성을 평가하고, 또한 제조한 시멘트의 반응성을 측정하여 산업부산물 활용을 증대할 수 있는 고 Al_2O_3 함량 시멘트의 제조를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 이론적 배경

시멘트 제조 공정 중에서 가장 중요한 단계인 소성 공정은 CaO 와 SiO_2 를 결합시켜 가능한 많은 C_3S (alite)를 만드는 것이 핵심으

* Corresponding author E-mail: gyuyongkim@cnu.ac.kr

¹아세아시멘트 기술연구소 수석연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

²아세아시멘트 기술연구소 선임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

³아세아시멘트 기술연구소 책임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Jecheon, 27125, Korea)

⁴충남대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea)

Table 1. Chemical composition and mineral composition of Portland cement and Eco-cement produced in Japan

Eco-cement(Japan)	Blaine(cm ² /g)	Chemical composition				Mineral composition			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	3,240	21.6	4.73	3.75	63.8	58.9	16.0	3.2	13.5
North Hokkaido Uni.	4,310	18.0	7.42	3.72	61.6	54.7	7.56	13.4	11.3
Tokyo University-1	4,220	17.1	6.98	3.79	62.0	59.0	4.5	12.1	11.5
Taiheiyo Cement	4,500	17.0	8.10	3.90	61.0	49	12	15	12
Tokyo University-2	4,380	17.9	7.60	4.10	61.7	47.3	15.7	13.2	12.5
UBE Cement	3,520	-	-	-	-	49.2	24.8	11.7	8.4

로, 중간 생성물인 C₂S(belite) 등의 광물은 대부분 Kiln의 가장 뜨거운 영역인 소성대에서도 완전히 녹지 않고 고체 상태로 남아있는 비율이 높다. 하지만 Al₂O₃, Fe₂O₃ 등은 Kiln 내에서 용융되어 액상으로 존재하면서 C₂S와 CaO가 반응하여 C₃S를 생성하는 반응을 더욱 빠르게 일어날 수 있도록 유도하는 이른바 용제(flux)의 역할을 한다(Winter 2009). 또한 Al₂O₃와 Fe₂O₃는 C₃S 광물이 생성되는 온도인 1,450°C에서는 액상으로 존재하다가, 이후에 실온으로 급냉되는 과정에서 C₃A와 C₄AF(ferrite)로 결정화되는데, 광학 현미경으로 관찰하면 C₃S, C₂S와 같은 결정의 사이 간극을 메우고 있는 형태로 관찰되기 때문에 간극질 상(interfacial phase)이라고 불리기도 한다.

최근 전 세계적으로 클링커의 소성 에너지를 저감하기 위한 연구가 진행되고 있는데, 이에 따라 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 Al₂O₃나 Fe₂O₃ 등의 함량을 증가시킨 시멘트(고 간극질상 시멘트)에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히 일본에서는 하수 슬러지 등과 같은 Al₂O₃ 함량이 높은 원료가 다량으로 사용되어 C₃A 함량이 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 높은 시멘트를 에코시멘트라 명명하고 규격화(2000년, JIS R 5214 Eco-cement)하는 등 산업부산물을 적극적으로 활용도록 장려하고 있다. Table 1은 일본에서 제조된 에코시멘트의 화학성분 및 광물구성을 분석한 결과이다(Anjo 2015).

일반적으로 C₃A의 증가는 콘크리트 및 모르타르의 유동성을 저하시키며, 석고가 충분히 첨가되지 않을 경우에는 PC계 유동화제를 흡착함으로써 혼화제의 사용량을 증가시킨다(Puertas 2005)고 여겨진다. 강도 측면에서는 초기 수화 반응을 통해 CaO/SiO₂ 비가 높고 공극률이 높은 구조의 C-S-H를 생성하여 강도에 불리하고, 장기 강도에 영향을 미치는 미수화 시멘트인 C₂S보다 시멘트 광물의 간극을 채워주는 간극상질인 C₃A, C₄AF이 잔존하여 장기 강도에 영향을 미친다(Isimori 2006)고 여겨지고 있다.

하지만 이러한 문제점을 개선하기 위한 최근의 연구결과를 종합하면, C₃A 함량을 증가시킨 시멘트에 고로 슬래그 미분말, 석회석 미분말 등을 적정수준 첨가함으로써 OPC와 동등한 수준의 유

동성 및 28일 압축강도를 얻을 수 있다(Misumi 2012; Hirao 2001; Hagino 2012; Hiroshi 2003)고 예측되고 있다.

따라서 본 연구에서는 산업부산물을 사용한 클링커의 고Al₂O₃화를 통한 에너지 절감형 시멘트 제조 가능성을 확인하기 위해, Al₂O₃ 함량이 높은 OPC 조합원료를 실험실 전기로에서 소성하여 C₃A 함량이 높은 클링커를 제조한 후 XRD 분석과 광학현미경을 활용해 클링커의 소성성을 평가하였다. 그리고 제조된 클링커에 혼화제를 첨가하여 얻어진 시멘트의 압축강도 및 미소수화열 측정을 통해 클링커 반응성을 평가하였다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 클링커 소성성 평가

고Al₂O₃ 함량 클링커의 소성성 평가를 위한 실험방법은 다음과 같다. 먼저 실험을 위해 클링커 제조용 조합원료(국내 A 시멘트사)를 Plain으로 선정하였다. 여기에 Al₂O₃ 분말 99% 순도의 표준 시료를 외할로 첨가하여 Al₂O₃ 함량을 증가시킨 조합원료를 제조하였다. Table 2는 조합원료의 배합사항을 나타낸 것이다.

Table 2. Composition ratio of raw materials for manufacturing cement clinker

Clinker	Composition ratio(%)	
	Clinker raw material	Al ₂ O ₃
Plain	100	-
C0.5	100	0.5
C1.0	100	1.0
C2.0	100	2.0

3.1.1 클링커 제조

각 시료는 원료의 균일성을 확보하기 위해 20g 실린더형 tablet(20mmD * 7mmL)으로 성형하였고, 이를 머플식 전기로

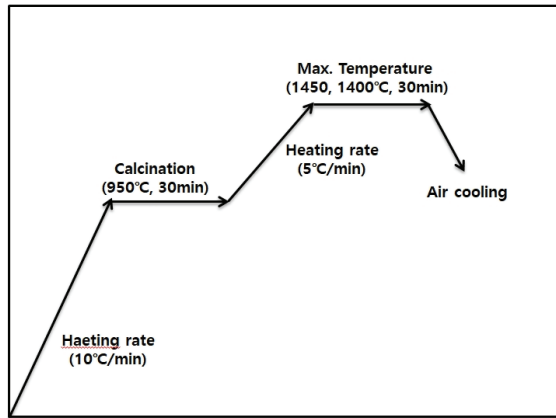


Fig. 1. Temperature history program of electric furnace experiment

Table 3. Chemical composition of clinker sintered at 1,450°C

Clinker	Chemical composition(%)							
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
Plain	3.9	21.0	5.2	3.1	61.3	2.5	2.2	0.7
C0.5	3.7	20.8	5.5	3.1	60.9	2.5	2.8	0.7
C1.0	3.6	20.7	5.8	3.1	60.4	2.5	3.0	0.7
C2.0	3.7	20.6	6.4	3.0	59.3	2.5	3.5	0.8

Table 4. Modulus and blaine of cement added SP and LSP

Clinker	Clinker modulus			
	LSF	SM	IM	Blaine(cm ² /g)
OPC	94.0	2.52	1.45	3,400
HA0.5	93.5	2.42	1.54	3,400
HA1	93.2	2.31	1.68	3,380
HA2	89.8	2.17	1.92	3,290

* LSF = $\text{CaO}/(2.8\text{SiO}_2+1.2\text{Al}_2\text{O}_3+0.65\text{Fe}_2\text{O}_3)$

* SM = $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$

* IM = $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$

(muffle furnace)에서 950°C까지는 10°C/min으로 승온한 후 30분간 탈탄산, 이후 5°C/min으로 최고온도까지 승온하였다. 최고온도는 1,450°C, 1,400°C의 2개 수준으로 최고온도에 도달 시 30분간 유지한 후 상온에서 급냉을 실시하였다. Fig. 1은 클링커 제조를 위한 전기로의 온도 프로그램을 도식화 한 것이며, Table 3은 1,450°C에서 소성된 각 클링커의 화학성분 분석결과를 나타낸 것이다. Table 4는 클링커의 주요 성분 분석결과를 토대로 하여 만든 지표인 클링커 modulus(LSF, SM, IM)와 분쇄한 클링커의 분말도를 나타낸 것이다. 일반적으로 LSF와 SM이 높을수록 더 많은 C₃S

가 생성될 수 있음을 의미하며, IM이 높을수록 더 많은 C₃A가 생성될 수 있음을 의미한다. Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 LSF 및 SM은 감소하고, IM은 증가하는 것을 나타낸다.

3.1.2 XRD Rietveld 정량분석

클링커의 소성성을 평가하기 위한 실험방법으로 XRD는 Rigaku사 DMAX2500 장비를 이용해 40kV, 250mA, Cu-Kα, 2θ 5~65° 조건에서 측정하였다. 분석된 결과의 정성 및 정량분석은 Rigaku사 PDXL2 소프트웨어를 활용해 Rietveld method를 적용하였다. 각 정량분석의 신뢰도로서 Rwp는 8.70~11.20, S는 1.90~2.45를 만족하였다.

3.1.3 광학 현미경 분석

광학 현미경(Olympus사 DSX510)을 이용해 클링커 광물을 육안 관찰함으로써 공정 측면에서의 클링커 소성성 평가를 실시하였다. 광학 현미경을 관찰하기 위해 클링커 시편을 에폭시로 고정하고 grinding 및 polishing하였으며, 증류수로 16초간, nital etching solution(1.5%)으로 6초간 etching하였다.

3.2 클링커의 반응성 평가

일반적인 포틀랜드 시멘트(OPC)는 클링커와 소량의 석고 및 첨가제로 구성되어 있다. 따라서 클링커의 반응성 평가를 위해 전기로에서 소성한 고Al₂O₃ 함량 클링커를 분쇄하고 소정의 석고를 혼합한 후, 여기에 슬래그미분말, 석회석미분말을 각각 5% 혼합하여 시멘트를 제조한 후 얻어진 시멘트의 반응성을 평가하고자 하였다.

3.2.1 클링커를 이용한 시멘트 제조

시멘트 중 SO₃ 함량 조절을 위한 석고 첨가량은 시멘트 반응성에 지대한 영향을 미치는 요인으로, 본 연구에서는 화학양론에 근거한 방법(Locher 1983)으로 C₃A 함량 증가에 따른 SO₃ 필요량을 산정하였다. Locher에 따르면, 시멘트에 필요한 SO₃량은 아래 식에 따라 산정할 수 있다.

$$\text{optimum \%SO}_3 = 1.841 + 0.095(\%C_3A) + 1.6364(\text{equivalent \%Na}_2\text{O}) \quad (1)$$

위 식에 따라 각 시멘트에 필요한 SO₃량을 산정해 석고첨가율을 결정하였으며, 1,450°C에서 소성한 클링커를 Blaine 분말도를 3,300±100cm²/g 수준으로 분쇄한 후, 별도로 분쇄한 석고, 슬래

Table 5. Mixing ratio of cement

Cement	Clinker(%)	Additives(%)		
		Gypsum	LSP	SP
OPC	OPC 86.9	3.1	5.0	5.0
HA0.5	C0.5 85.5	4.5		
HA1.0	C1.0 84.5	5.5		
HA2.0	C2.0 82.5	7.5		

Table 6. Chemical composition of cement added gypsum and chemical compsn of LSP and slag power

Clinker	Chemical composition(%)							
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
Plain	3.9	21.0	5.2	3.1	61.3	2.5	2.2	0.7
HA0.5	3.7	20.8	5.5	3.1	60.9	2.5	2.8	0.7
HA1.0	3.6	20.7	5.8	3.1	60.4	2.5	3.0	0.7
HA2.0	3.7	20.6	6.4	3.0	59.3	2.5	3.5	0.8
SP	-0.3	36.5	14.4	1.3	42.6	3.9	1.2	0.5
LSP	43.3	2.3	0.4	0.3	52.8	0.8	-	0.1

그분말(Slag Powder, 이하 SP), 석회석분말(Limestone Powder, 이하 LSP)을 혼합하여 시멘트를 제조하였고, 혼합비율은 Table 5와 같다. Table 6은 석고를 첨가한 시멘트의 화학성분과 혼합재로 사용된 SP와 LSP의 화학성분을 나타낸 것이다.

3.2.2 모르타르 플로우 및 압축강도

플로우 및 압축강도는 KS L ISO 679에 따라 진행하였으며, 1, 3, 7, 28일 재령의 모르타르 압축강도를 측정하였다.

3.2.3 시멘트 페이스트 미소수화열 분석

미소수화열 분석은 단열조건에서 미세한 온도변화를 측정해 수화발열량을 유추하는 단열온도시험으로서 Setaram사 C80 calorimeter를 이용해 W/C 133%, 30℃ 항온조건에서 48시간 동안 온도변화를 측정하고 이를 열량으로 환산하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 클링커의 소성성 평가

4.1.1 XRD Rietveld 정량분석

Fig. 2는 클링커의 XRD 분석결과이다. OPC의 주요 광물인 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF 외에도 lime(free CaO)가 생성된 것을 확인할 수 있으며, 이 외에도 미량의 periclase(free MgO), arcanite(K₂SO₄)가 생성된 것으로 확인되었다. C₃A는 대부분 cubic 형태로 orthorhombic 형태의 C₃A는 관찰되지 않았다.

XRD 분석결과를 바탕으로 XRD Rietveld법을 이용해 각 결정의 양을 정량 분석하였다. Table 7은 정량 분석결과를, Fig. 3과 4는 분석결과를 영역형 차트로 알기 쉽게 나타낸 것이다. 소성온도 1,450℃ 및 1,400℃ 모든 온도 구간에서 조합원료 중 Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 C₃S는 감소하고, C₃A는 증가하는 경향이 나타나는 것으로 확인되었다. 최고온도 1450℃의 경우뿐 아니라 이보다 저온인 1400℃에서 소성하였을 경우에도 Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 f-CaO 함량은 뚜렷하게 감소한다.

한편, f-CaO는 일반적으로 클링커의 소성성을 평가하기 위해 가장 많이 사용되는 지표 중 하나로, 동일한 조건이라면 f-CaO가 낮을수록 소성성이 뛰어난 것을 의미한다(Harrison 2014). 이는 클링커의 Al₂O₃ 함량 증가에 따라 클링커 소성에 필요한 에너지를 절감할 수 있음을 의미하기도 한다.

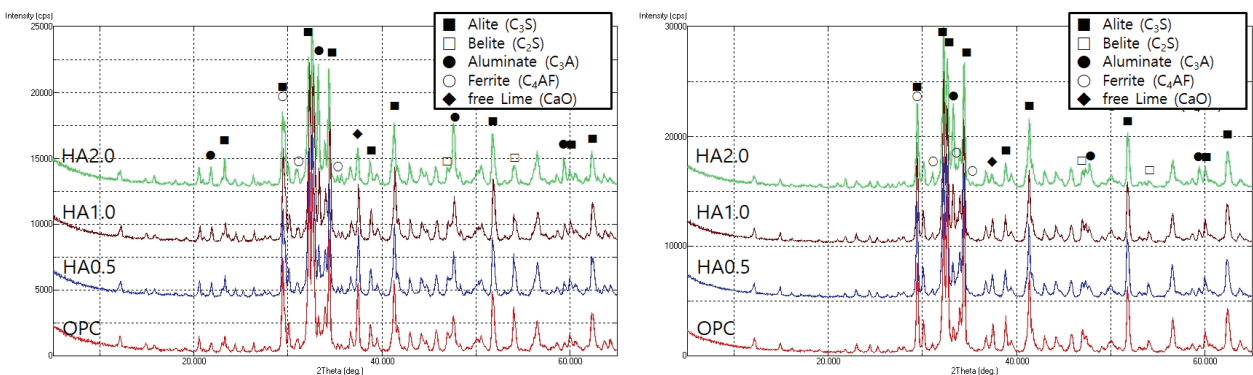


Fig. 2. XRD patterns of each clinkers(left : 1,400℃, right : 1,450℃)

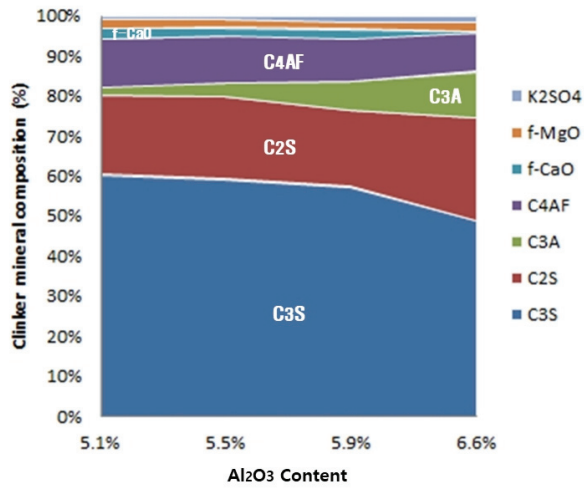


Fig. 3. Clinker mineral change with increasing Al₂O₃ content (Temp. 1450°C)

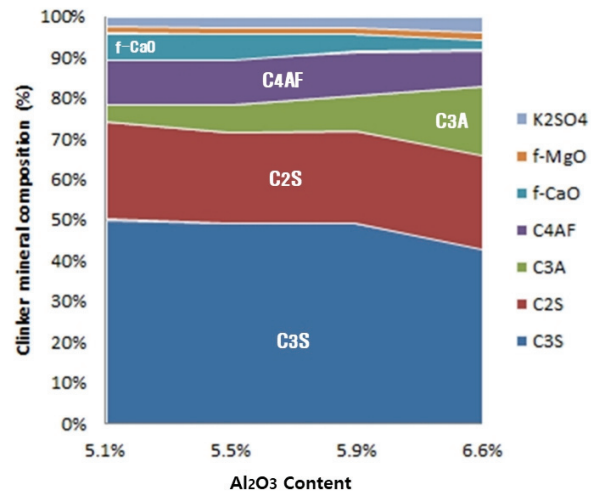


Fig. 4. Clinker mineral change with increasing Al₂O₃ content (Temp. 1400°C)

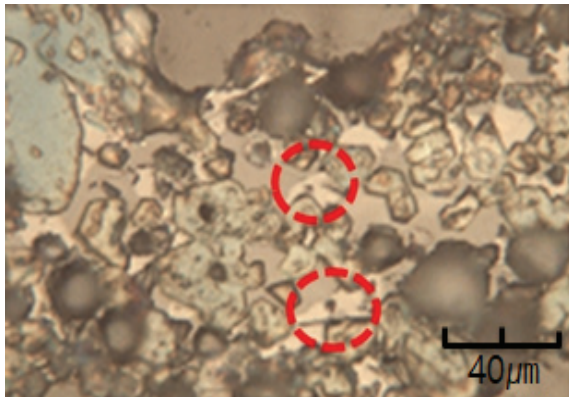


Fig. 5. polarization microscope observation of OPC Clinker(interstitial material)

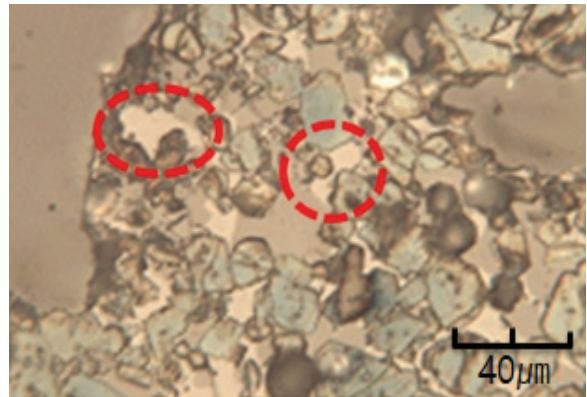


Fig. 6. polarization microscope observation of HA0.5 Clinker(interstitial material)

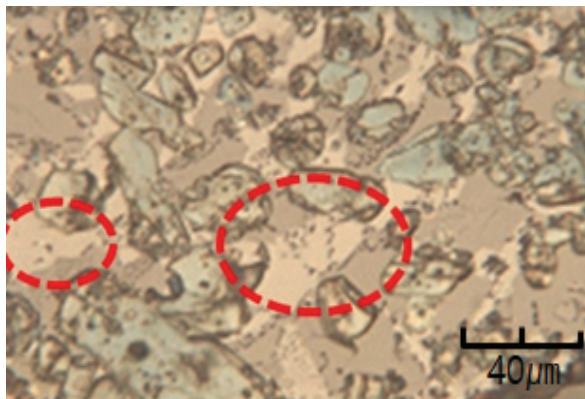


Fig. 7. polarization microscope observation of HA1.0 Clinker(interstitial material)

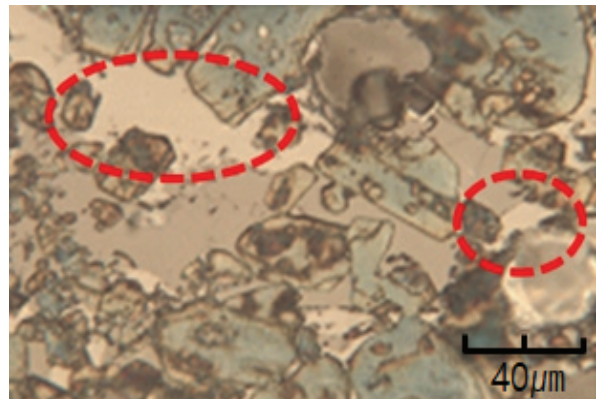


Fig. 8. polarization microscope observation of HA2.0 Clinker (interstitial material)

Table 7. Results of clinker's mineral analysis through XRD Rietveld method

Clinker	Temp. (°C)	Clinker mineral(%)						
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	f-CaO	f-MgO	K ₂ SO ₄
OPC	1,450	60.4	19.9	2.0	11.9	2.6	2.4	0.8
HA0.5		59.2	20.5	3.4	11.7	2.2	2.0	0.9
HA1.0		57.3	19.2	7.0	11.3	1.9	2.0	1.3
HA2.0		49.0	25.6	11.4	9.7	0.4	2.3	1.6
OPC	1,400	50.0	24.2	4.6	10.5	6.5	1.9	2.4
HA0.5		48.9	22.5	7.0	11.2	5.9	1.8	2.7
HA1.0		48.9	22.9	8.8	10.6	4.2	1.9	2.8
HA2.0		43.1	23.0	16.9	8.8	2.7	1.9	3.7

4.1.2 광학 현미경 분석

광학현미경은 클링커 내에 광물의 존재 상태 및 크기의 변화에 따라 소성 및 공정상태의 변화를 평가할 수 있는 장비로 시멘트 산업에 널리 사용된다. 따라서 Al₂O₃의 함량 변화에 따른 클링커의 변화를 관찰하기 위해, 전기로에서 1450°C에서 소성한 클링커 시편을 500배 배율 광학현미경으로 관찰하였다.(Fig. 5, 6, 7, 8)

그 결과 Plain의 경우, Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 클링커 주요 광물인 C₃S(길게 늘어진 육각형 모양의 입자)나 C₂S(구형의 입자) 결정은 10~60µm 범위에서 평균 크기 약 25µm로 존재하였으며, 큰 특이점을 찾기 어려웠다. 하지만, 광학현미경 이미지에서 C₃S 및 C₂S 입자 사이로 존재하는 밝은 부분의 간극질은 Al₂O₃ 함량이 높은 시료일수록 크기와 양이 확연히 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Al₂O₃ 함량이 증가할수록 간극질 결정의 양이 증가한 것은 더 많은 액상이 생성되어 C₃A량이 증가한다는 설명(Harrison 2014)과 부합하며, 3.1.1항의 XRD 리트벨트 분석결과와도 일치한다. 즉,

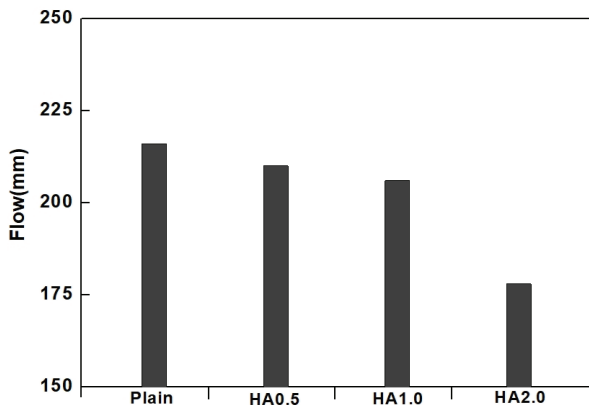


Fig. 9. Mortar flow test result of each clinkers

XRD와 현미경 분석 결과를 종합하면 Al₂O₃ 증가로 인한 액상량 증가 효과에 의해 클링커 소성성이 향상된 것으로 판단된다.

4.2 클링커의 반응성

4.2.1 모르타르 플로우 및 압축강도

Fig. 9, 10은 시멘트 플로우 및 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로, 클링커의 Al₂O₃ 함량이 증가할수록 플로우가 점차 감소하다가 HA2.0에서 큰 폭으로 저하되는 것으로 확인된다.

한편, 압축강도는 전반적으로 Plain(OPC)보다 높게 나타났다. Al₂O₃ 함량을 증가시킨 모든 시료의 초기 강도(1, 3일 재령)가 Plain보다 높게 나타났으며, 특히 Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 시멘트 중 C₃S 양이 감소하였음에도 불구하고, 28일 압축강도 역시 Plain보다 높게 나타나고 있다. 이는 Al₂O₃ 함량을 증가시켜도 여기에 LSP 및 SP 등 적절한 혼합재와 함께 사용하면 28일 강도가 오히려 향상된다는 여러 연구 결과와 일치하는 결과이다. 다만 HA2.0는 HA0.5나 HA1.0에 비해 28일 압축강도가 크게 증진되지 않은 결과를 나타내었다.

4.2.2 시멘트 페이스트 미소수화열 분석

Fig. 11은 시멘트의 수화열 곡선을 나타낸 것이다. Al₂O₃ 함량이 높은 HA1.0, HA2.0 시료에서는 C₃S(alite) 수화 곡선에 이어 제 3 피크가 뚜렷하게 나타나고 있다. Tenoutasse(1967)는 이 제 3 피크에 대해 석고(SO₃) 첨가량이 과다할 경우 나타나며, ettringite가 monosulfate로 변이되기 시작하는 시간과 일치한다고 하였으며, Lerch(1946)는 석고의 최적첨가량은 제 3 피크가 나타나지 않고, 그 이상 첨가해도 곡선이 현저하게 변화하지 않는 최소량으로서, 이 첨가량에서 최대강도와 최소수축을 나타낸다고 하였고,

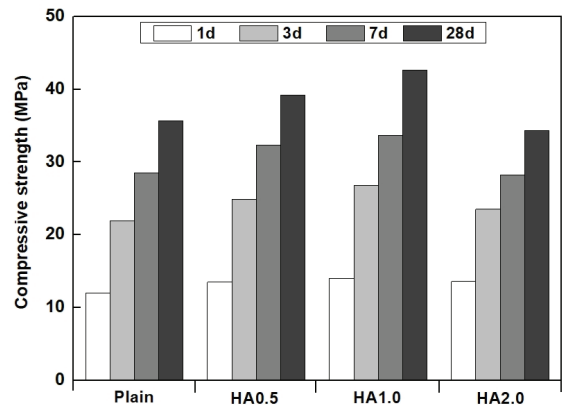


Fig. 10. Compressive strength

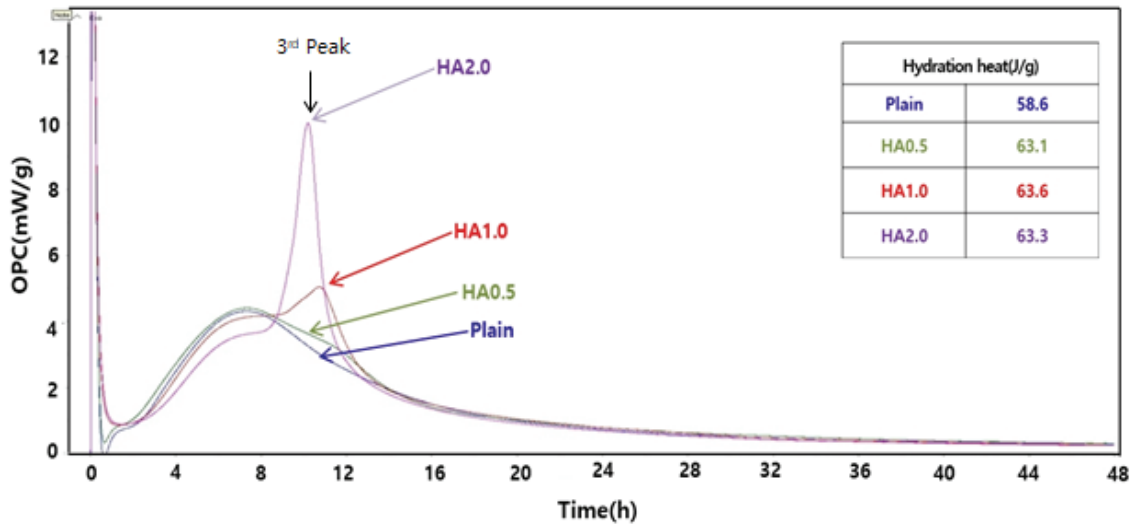


Fig. 11. Hydration heat of each clinkers by adiabatic temperature change test method

Kitada(1983)는 “제 3 피크는 시멘트 수화초기에 C₃A와 석고에 반응에 의해 생성되는 ettringite 상이 monosulfate 상으로 전이되면서 방출되는 열로서, 액상으로부터 SO₃가 모두 소비되면 나타난다.”고 하였다. C₃A량이 많은 HA1, HA2에서 제 3 피크가 발생한 것은 이러한 논문 결과와 일치한다. 이와 같이 제 3 피크가 발생한 경우 석고를 더 첨가시켜주는 것이 바람직하다고 평가되고 있으나 HA 시료의 경우 SO₃ 첨가량 3.5%에서 제 3 피크가 발생하였기 때문에 석고 첨가량을 증가시키면 KS에서 규정하고 있는 품질기준인 SO₃ 함량 3.5% 이하를 만족할 수 없게 된다. 다만 제 3 피크가 발생한 시멘트의 물리 및 내구특성에 대해서는 명확하게 알려진 바가 없어 추후 연구가 필요한 부분이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 산업부산물을 활용을 위한 고Al₂O₃ 함량 OPC 클링커의 소성성 및 반응성을 확인하였으며, 다음과 같은 실험적 결론을 도출하였다.

- 1) Al₂O₃ 함량을 증가시켜 제조한 시멘트는 조합원료 LSF, XRD를 이용한 f-CaO 및 광물조성, 현미경 관찰 결과 등으로 미루어 판단할 때, OPC보다 소성성 측면에서 유리하다고 평가할 수 있다. 즉, Al₂O₃ 함량 증가는 클링커 소성에 필요한 에너지 절감, 소성 온도 하락에 도움을 주는 것으로 평가된다.
- 2) Al₂O₃ 함량이 증가함에 따라 시멘트 중 C₃S 양이 감소하였음에도, 기존 OPC 대비 Al₂O₃를 0.5%, 1% 증량한 시멘트(LSP, SP 각 5%씩 첨가)의 초기 및 28일 강도가 OPC보다 높게

나타난다. 단, Al₂O₃를 2% 증량한 시료는 3일 이후 강도 증진이 둔화되어 28일 강도는 OPC와 유사한 수준으로 나타났다.

- 3) Al₂O₃ 1% 증량 수준에서는 현 OPC보다 C₃A 함량이 높은 시멘트를 만든다고 해도 압축강도, SO₃ 함량(3.5% 이하) 등 KS 품질 기준을 충분히 만족하는 시멘트를 제조할 수 있을 것으로 기대된다.
- 4) Al₂O₃를 2% 증량한 시멘트는 OPC에 비해 모르타르 플로우저하, 28일 강도 저하가 관찰되고, 석고의 KS 기준내 최대 첨가에도 불구하고 수화발열 제 3 피크가 발현되어 추후 물리 및 내구 특성에 관한 연구가 필요하다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한국산업기술평가관리원 소재부품기술개발 사업의 연구비 지원(과제번호 20010616)으로 수행되었습니다.

References

- Anjo, T. (2015). Design of low energy type general purpose cement, Lecture summary at the 66th Cement Technology Competition, **2108**, 144.

- Chromy, S. (1985). Assessment of reactivity and burnability of industrial cement raw meals by a kinetic method, Czech, Stavivo, **63**, 198.
- Chromy, S. (1985). Method for determination of reactivity and burnability of cement raw meal, Germany, TIZ Faichberichte, **109**, 654.
- Ghosh, S.N. (2002). Advances in Cement Technology, 2nd, Tech Books International, 34.
- Hagino, M. (2012). Fluidity and hydration characteristics of high-porosity cement, Lecture summary at the 66th Cement Technology Competition, **1122**, 48.
- Harrisson, A. (2014). Clinker liquid, International Cement Review, 8.
- Hirao, C. (2001). The effect of fine limestone powder on the flowability and strength expression of eco cement, Cement Concrete Papers, **55**, 97.
- Hiroshi, H. (2003). Effect of blast furnace slag fine powder on the fluidity and strength development of eco-cement, Journal of Cement Concrete, **57**, 97.
- Isimori, M. (2006). Microstructure and strength expression of eco cement paste, Cement Concrete, **60**, 142.
- Kitada, Y. (1983). C₃A concrete made from coal ash, Cement technology, **37**, 514.
- Lerch, W. (1946). The Influence of Gypsum on the hydration and properties of portland cement pasters, Proceedings – American Society for Testing Materials, **46**, 1252.
- Locher, F.W. (1980). Setting of Cement – Part II : Effect of adding calcium sulphate, ZKG, **33(6)**, 271.
- Locher, F.W. (1983). Setting of cement– I, II, III, IV, Zement-Kalk-Gips, **72(4)**.
- Misumi, H. (2012). Properties of concrete using high C₃A type cement, Lecture summary at the 66th Cement Technology Competition, **66**, 280
- Ost, B.W. (1974). American Ceramic Society Bulletin, **53(8)**, 579.
- Puertas, F. (2005). Polycarboxylate superplasticizer admixture : effect on cement hydration, Microstructure and Rheological Behavior in Cement Pastes, Advances in Cement Research, **17(2)**, 77–89.
- Sasaki, R. (2015). Effect of liquidity characteristics on the assembly degree of low-energy clinker with reduced firing temperature, Lecture summary at the 66th Cement Technology Competition, **2106**, 140.
- Tenoutasse, N. (1967). Studies on the kinetics of hydration of tricalcium aluminate in the presence of calcium sulfate and calcium chloride, ZKG, **10**, 459.
- Winter, N. (2009). Understanding Cement, UK, WHD Microanalysis Consultants Ltd., Suffolk, 32.

산업부산물 활용을 위한 고Al₂O₃ 함량 OPC 클링커의 소성성 및 반응성에 관한 연구

본 연구에서는 클링커의 고Al₂O₃화를 통한 에너지 절감형 시멘트 제조 가능성을 확인하기 위해, Al₂O₃ 함량이 높은 OPC 조합원료를 실험실 전기로에서 소성하여 C₃A 함량이 높은 클링커를 제조한 후 XRD 리트벨트 분석 및 광학 현미경을 통해 클링커의 소성성을 평가하고, 제조된 클링커에 혼합재를 첨가하여 얻어진 시멘트의 미소수화열 및 압축강도 측정을 통해 시멘트 반응성을 평가하고자 하였다. 그 결과 Al₂O₃ 함량을 일반 OPC보다 증가시켜 제조한 시멘트는 OPC에 비해 소성성이 뛰어나 시멘트 제조 에너지 절감에 기여할 수 있으며, OPC에 비해 C₃A(alite) 광물의 함량이 감소하였음에도 불구하고 압축강도가 오히려 향상되는 등 긍정적으로 작용할 수 있다. 유동성 저하, 수화열 증가와 같은 문제에 대해서도 석고 첨가량 및 분말도 조정, 혼합재 첨가와 같은 방법으로 제어할 수 있을 것으로 기대되어 적극적인 연구가 필요하다.