

폴리실리콘 슬러지를 원료로 사용한 포틀랜드 시멘트 클링커의 특성

Properties of Portland Cement Clinker Using Polysilicon Sludge

이승헌^{1*} · 이세진¹ · 우양이¹ · 박정수¹

Seung-Heun Lee^{1*} · Se-jin Lee¹ · Yang-Yee Woo¹ · Jeoung-Soo Park¹

(Received December 18, 2014 / Revised December 24, 2014 / Accepted December 26, 2014)

This study reviewed the usability of sludge, a material that is additionally created when polysilicon (a solar light material) is produced, as the raw material for cement clinker. It was evaluated that when cement clinker is produced, the chloric component of polysilicon acted as a mineralizer in the firing process. In addition, the physical features of the produced cement were measured. The setting time of the produced cement was reduced as the amount of content of polysilicon sludge increased. Such results were drawn because the chloric component acted as hydration accelerator and enhanced the dissolution of calcium hydroxide that was formed by hydration of C_3S . Furthermore, for such reason, on the day 1, the compression strength of mortar increased as the content of polysilicon sludge increased. In day 3, 7, and 28, the tendency in which the compression strength increasing up to 5% of the amount of added polysilicon sludge was shown. It is because when clinker was produced, the chloric component increased the amount of C_3S mineral created, thus enhancing the compression strength after day 3.

키워드 : 시멘트 클링커, 폴리실리콘 슬러지, 염화물, 수화촉진

Keywords : Cement clinker, Poly-silicon sludge, Chloride, Accelerator

1. 서론

21세기의 큰 화두는 고갈되는 화석 연료원을 대체할 에너지원 개발이다. 대체 에너지원으로써 신·재생에너지원을 들 수 있다. 대체 에너지원 중 태양전지를 통한 태양광 발전의 보급은 기하급수적으로 늘 것으로 보고되고 있다. 실리콘 결정형 태양전지 원료로 사용되어 오고 있는 다결정 상태의 고 순도 실리콘, 즉 폴리실리콘(Polysilicon, Polycrystalline 또는 Poly-Si)의 연 생산 규모가 2005년 31,000 톤(주로 반도체 웨이퍼용 단결정 원료)에 불과하지만 2011년 태양광발전용으로 약 15만 톤/년의 실리콘 공급이 필요한 것으로 전망되어 약5배의 폴리 실리콘 생산 증대가 필요하다(Kim 2008). 국내 폴리 실리콘 생산업체의 경우 2010년경부터 세계적인 폴리실리콘 생산업체로 자리매김하고 있는 실정이며, 이에 따른 부산물로서 폴리실리콘 슬러지의 발생량도 증가하고 있는 추세이다.

폴리실리콘 슬러지는 다른 오니, 폐유, 폐알칼리, 폐고무, 폐합성수지 등의 특정 폐기물이 아닌 일반폐기물로 지정되어 있다. 폴리실리콘 슬러지와 같은 무기질계 원료들의 재활용 기술로는 고온 및 화학적 반응을 이용한 추출 및 가공, 또는 다른 원료와의 적절한 배합에 의한 제품의 원료 또는 연료로 사용하는 방법들이 있다. 그러나 재활용 기술로 처리하여 원료나 연료로 활용하기 위해서는 물리적 및 화학적 특성 검토가 필요하며, 원료나 원료로 사용했을 경우와 또는 분해 처리 시 오랜 기간 동안 안정화 된 제품이나 처리물이 유지되어야 할 것이다. 그리고 처리 기술에 필요한 가공비는 활용하기 위해서 검토해야 될 중요한 항목이다. 이러한 문제 때문에 국내의 경우, 처리하는 업체도 거의 전무하며, 흙과 혼합되어 매립되고 있는 실정이다.

매립 및 소각에 의한 폐기물 처리는 지하수 오염, 생태계 파괴, 공기오염 문제 등이 문제가 있으며, 이러한 문제 때문에 감량화, 재이용, 재활용으로 변경되고 있다. 미국 환경보전청(EPA ; Environ-

* Corresponding author E-mail: shlee@kunsan.ac.kr

¹국립군산대학교 신소재공학과 (Department of materials Engineering, Kunsan national University, Kunsan, 573-360, Korea)

ment Protection Agency)에서 시멘트 소성로를 이용한 재활용이 2차 오염의 발생없이 안정적으로 무해화 할 수 있다는 것이 인정된 이래 시멘트산업에서의 폐기물의 대량처리가 대안으로써 보편화 되고 있다(Lee et al, 2003).

폴리실리콘 슬러지를 시멘트 원료로 사용했을 경우, 문제가 될 수 있는 것은 폴리실리콘 슬러지에 함유되어 있는 염소 함유량이 문제가 될 수 있다. 철골콘크리트에서 높은 염소 성분은 철근을 부식시켜 열화현상이 발생시킨다(Yang et al, 2006). 폴리실리콘 슬러지의 염소 성분의 유입은 다음과 같다. 폴리실리콘은 품질이 좋은 규석이나 규사(SiO₂)와 코크스(C)를 아크전기로에서 반응시켜 얻어지는 약 99% 순도의 금속급 Si를 원료로 하여, 불순물을 기준으로 반도체급은 11 Nine 이상, 태양광 전지급 6 Nine 이상 순도를 높이기 위하여 실리콘 석출용 실란원료, 즉 Si-H-C기 화합물을 통한 가스화 공정 및 석출 공정을 거친다(Kim 2008). 따라서, 공정 처리 후 폴리실리콘 슬러지에는 염소 성분이 높게 남아 있게 된다. 국내는 시멘트의 함유된 염소 성분 규제 치는 없으나, 시멘트 각사에서 자체 관리하는 수준이며, 국외의 경우, 시멘트의 염소 이온량을 일본은 0.035%, 유럽은 0.10%으로 규제하고 있다. 국내의 경우, 콘크리트에서만 0.3kg/m³(콘크리트 총량)으로 제한하고 있다(Yang 2007).

따라서 본 연구에서는 산화칼슘과 이산화규소의 함량이 높은 폴리실리콘 공정 슬러지를 시멘트의 원료로 사용하는 데 실험실적으로 먼저 검토하는 데 의의가 있다. 폴리실리콘 슬러지를 시멘트 클링커 원료로 사용 시에 시멘트 클링커 광물형성과 소성성에 미

치는 영향을 살펴보았다. 또한, 제조한 시멘트를 가지고 압축강도와 응결특성 중심으로 고찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 사용원료

폴리실리콘 슬러지는 O사의 2공장에서 나오는 것을 사용하였으며, 석회석, 규석, 철광석, 플라이애시는 실제 시멘트 제조 시 사용하는 원료를 사용하였다. 화학조성은 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, Rigaku, Primus II, Japan), 염소의 함유량은 Mohr법으로 측정하였다. 각 원료의 화학성분표를 Table 1에 나타내었다. 폴리실리콘 슬러지의 화학조성 분석 결과 SiO₂ 성분이 44.1wt%, CaO 성분이 27.8wt%로 시멘트 제조 시 SiO₂의 주요 공급원인 규석질과 CaO의 공급원인 석회석을 일정량 대체하는 장점이 있다. 강열강량 값은 20.1wt%였다. 함수율은 61.5wt%로 원료로 사용하기 위해서 건분화 작업이 필요할 것으로 사료되었다. 따라서 100℃에서 건조 후 응집된 시료를 유발로 분산시켰다. 비표면적은 7122cm²/g로 측정되어 시멘트의 비표면적에 비해 크게 미분이었으며, 밀도는 1.95g/cm³로 측정되었다.

2.2 시멘트 클링커 원료 배합 및 소성조건

시멘트 클링커 모듈러스는 LSF(Lime saturation factor, 100× CaO/(2.8× SiO₂+1.18× Al₂O₃+0.65× Fe₂O₃)) : 91.0, SM(Silica modulus, SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃)) : 2.6, I, M(Iron modulus, Al₂O₃/Fe₂O₃) : 1.4의

Table 1. Chemical compositions of raw materials (Unit : wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I.	Cl
Limestone	7.8	2.9	1.94	47.8	2.0	0.7	0.0	35.5	N.D.
Silica stone	91.7	3.1	2.1	1.6	0.0	0.0	0.0	1.7	N.D.
Iron material	19.0	10.8	47.1	4.5	0.0	0.0	0.0	26.4	N.D.
Fly ash	50.2	20.3	7.7	10.7	3.4	0.0	0.0	6.9	N.D.
Poly-Si sludge	44.1	1.33	0.32	27.8	0.53	0.14	3.14	22.0	4.2

Table 2. Mix proportions of samples to manufacture cement clinkers (Unit : wt%)

Sort	Mixing ratio				
	Poly-Si sludge	Limestone	Silica stone	Iron ore	Fly ash
PC0	0.00	89.69	5.80	0.95	3.56
PC3	3.00	87.83	4.38	1.02	3.77
PC5	5.00	86.59	3.44	1.07	3.01
PC10	10.00	83.40	1.87	1.19	4.26

*N.D. : Non detected

기준으로 배합 하였고, 폴리 실리콘 슬러지 첨가율 0, 3, 5, 10wt%에 따른 각 원료에 대한 조합비와 샘플 명칭을 Table 2에 나타내었다. 조합원료는 볼밀로 혼합 및 분쇄하여 88 μ m 잔사 10wt%로 제어하였다. 시멘트 원료로써 폴리실리콘 슬러지 첨가량에 따른 배합상의 특징은 폴리실리콘이 다량 함유된 SiO₂, CaO원을 보충함으로써, 규석과 석회석을 일부 대체하였고, 이로 말미암아 Al₂O₃, Fe₂O₃원이 소량 증가하였다. 시멘트 클링커 소성 조건은 폴리실리콘 무첨가 배합에서 미반응 CaO(f-CaO)가 1wt% 이하가 되도록 하였다. 정해진 소성 시 승온속도는 10 $^{\circ}$ C/min로 석회석의 탈탄산화를 위하여 900 $^{\circ}$ C에서 30분 유지하였고, 최대소성온도는 1500 $^{\circ}$ C에서 30분 유지한 후, 1300 $^{\circ}$ C에서 급랭하여 시멘트 클링커를 제조하였다.

2.3 시멘트 클링커 특성 시험

폴리실리콘 슬러지를 원료로 하여 제조된 시멘트 클링커를 평가하기 위해서, f-CaO를 측정하여 소성성을 평가하였다. f-CaO 정량은 브롬크레졸그린 지시약에 의한 에틸렌 클리콜 추출법을 통하여 측정하였다. 제조 한 시멘트 클링커의 화학 성분은 XRF를 통하여 측정하였다. 제조한 시멘트 클링커의 광물상의 결정성을 살펴보기 위하여 XRD를 통하여 광물상을 평가하였다. 염소의 용출량은 시멘트 중의 수용성 성분 측정방법(JCAS 1-04: 2004)의 의해 이온크로마토그래피(Ion Chromatograph, DX300, 4000i, Dion-ex)로 측정하였다.

2.4 제조 시멘트의 물리적 특성 시험

시멘트를 제조하기 위하여 제조 클링커를 45 μ m 잔사율 약 10% (편차 1% 이내), 볼밀로 분말도 3200cm²/g(편차 100cm²/g 이내)가 되도록 분쇄 한 후, 시멘트 클링커의 초기 급결을 제어하기 위하여 시판용 시멘트의 SO₃의 평균 함유량인 약 2.0wt%의 함유량이 되도록 클링커에 시약급 이수석고(CaSO₄ · 2H₂O)를 첨가하여 시멘트를 제조하였다. 제조 시멘트는 응결 특성은 포틀랜드시멘트 규격인 KS L 5201의 응결시간 항목을 토대로 살펴보고, 제조 시멘트의 경화특성은 모르타르(mortar)를 제조하여 포틀랜드시멘트 규격인 KS L 5201로 압축강도 항목으로 측정하였다. 폴리실리콘 슬러지를 원료로 사용하여 제조 한 시멘트의 염소 성분의 함유

량을 Mohr법을 통하여 측정하였고, 시멘트 중의 수용성 성분 분석 방법(JCAS 1-04 : 2004)을 통하여 시멘트 중의 염소 용출량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 폴리실리콘 슬러지의 특성

폴리실리콘 슬러지의 염소 함유량과 용출량 그리고 물리적 특성을 Table 3에 나타내었다. 폴리실리콘 슬러지의 염소 함유량은 4.2wt%, 이중 염소 이온의 용출량은 3.5wt%로써 약 83.3wt% 정도가 가용성염 상태로 존재하였다.

Fig. 1은 폴리실리콘 슬러지의 XRD 측정 결과이고, CaO는 CaCO₃형태로 존재하였고, SiO₂는 23 $^{\circ}$ (2 θ)에서 Halo peak가 발견되어 비정질 SiO₂와 금속 Si, 그리고 α -Quartz로 존재하였다. 염소는 Halite(NaCl)로 형태로 존재하였다. Fig. 2는 폴리실리콘 슬러지 입자 형상 FE-SEM 관찰 사진이다. 일부 구형입자가 발견되었으며, 입형이 불규칙하고 응집되어 있었다. 폴리실리콘 슬러지 입자의 누적 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 입자의 분포는 3-40 μ m에 대부분 분포하였고, 평균입径은 10 μ m로 측정되었다. 폴리실리콘 슬러지의 중금속 항목에 대해서 폐기물 공정시험법에 의하여 주요 중금속과 유분 함량의 측정값을 Table 4에 나타내었다. 측정 결과, 모든 항목에 있어서 지정폐기물 이하의 값을 만족하는 것으로 측정되었다.

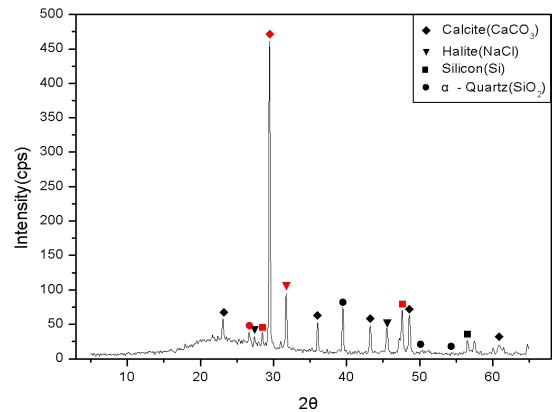


Fig. 1. XRD Pattern of poly-Si sludge

Table 3. Physical properties of poly-Si sludge

Finess (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Moisture content (wt%)	L.O.I. (wt%)	Cl leaching (wt%)
7122	1.95	61.5	20.1	3.5

*L.O.I. : Loss on ignition

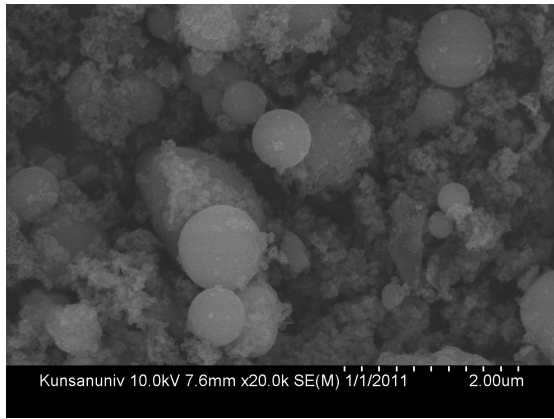


Fig. 2. Image of poly-Si sludge by FE-SEM

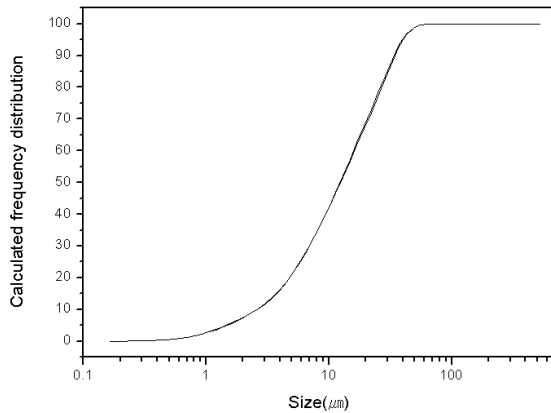


Fig. 3. Cumulative particle size distribution of poly-Si sludge

Table 4. Heavy metal contents of poly-Si sludge

	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Ad	Hg	Cd	Cr (VI)	Oil (wt%)
results	0.05	0.019	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.157

3.2 제조 시멘트 클링커 특성

에틸렌 클리콜 추출법에 의해 측정된 시멘트 클링커의 f-CaO 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 폴리실리콘 슬러지 첨가량이 증가할수록 f-CaO량이 감소하였다. 이는 폴리실리콘의 염소 성분의 영향으로 사료된다. 이러한 효과는 염소가 광화제로써 작용하여

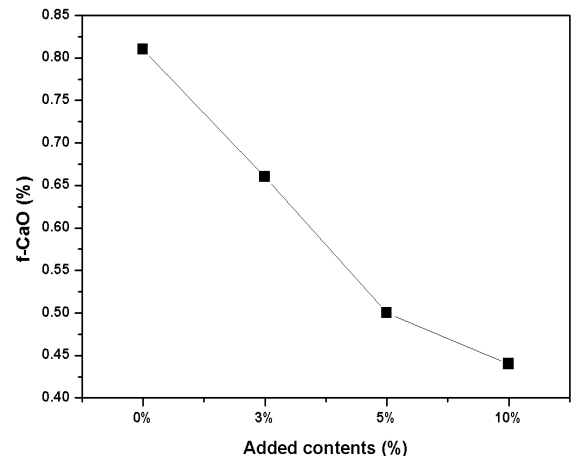


Fig. 4. Change of f-CaO according to amount of poly-Si sludge

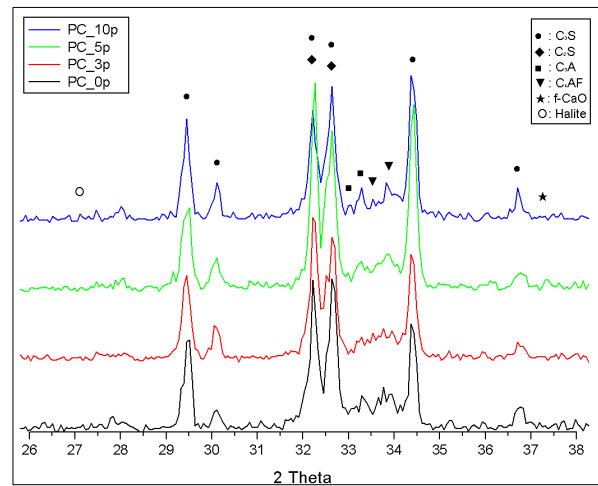


Fig. 5. XRD patterns of clinkers

f-CaO(유리석회)의 양을 줄이는 것으로 판단된다. 이는 이전 문헌의 보고와 같이 염소화합물이 보다 낮은 온도에서 액상으로 변하면서 클링커 반응에서 고상-액상 반응 가속화시키는 역할을 함으로써 f-CaO를 낮추는 것으로 판단된다(Kwon et al, 2005).

XRF에 의해 측정된 폴리실리콘 슬러지를 원료로 사용하여 제조한 시멘트 클링커의 화학 조성을 Table 5에 나타냈다. Bogue식을 통하여 제조 시멘트 클링커 광물의 구성비의 특징을 살펴보면 다

Table 5. Chemical compositions of sample clinkers (Unit : wt%)

Sort	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl (ppm)	Sum
PC0	22.60	5.17	3.39	65.43	3.23	0.08	0.24	0.06	n.d.	100.20
PC3	22.43	5.06	3.41	65.29	3.24	0.01	0.21	0.14	72	99.80
PC5	22.71	5.10	3.41	65.57	3.24	0.01	0.19	0.20	124	100.44
PC10	22.76	5.31	3.41	64.97	3.24	0.09	0.22	0.31	290	100.35

Table 6. The minreal compositions of sample clinkers calculated by bogue equation (Unit : wt%)

Sort	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
PC0	55.03	23.28	7.96	10.32
PC3	56.46	21.71	7.64	10.38
PC5	55.20	23.47	7.75	10.38
PC10	50.97	26.80	8.30	10.38

Table 7. Cl content and Cl leaching amount of the cement

Sort	Cl content	Cl leaching amount
A made cement (5 wt% poly-Si sludge)	124 ppm	4 ppm

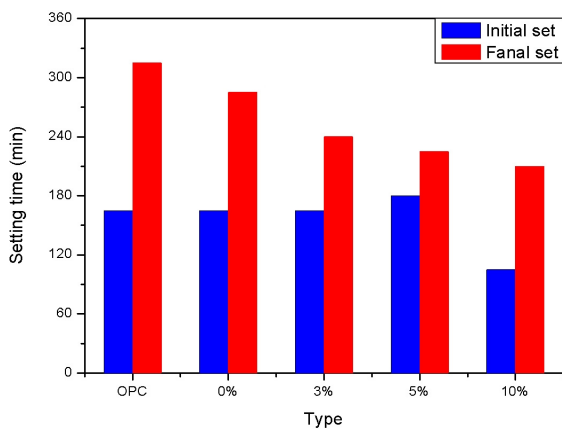


Fig. 6. Setting times of cements

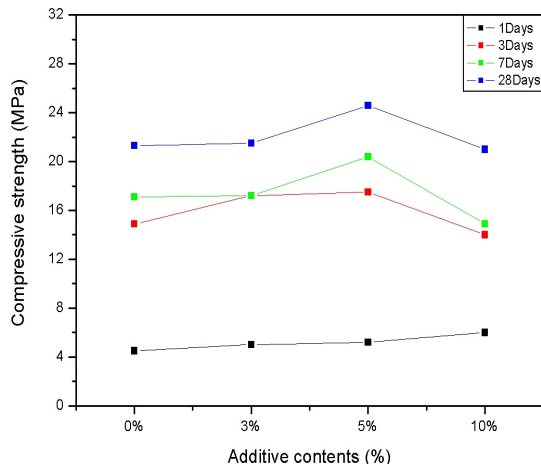


Fig. 7. Compressive strength of cements

음의 Table 7과 같다(Bogue 1947). 폴리실리콘 슬러지 첨가량이 5wt%까지는 시멘트 클링커 구성광물에 크게 변동이 나타나지 않은 것으로 산출되었다. 다만, 폴리실리콘 슬러지 첨가량을 10wt% 첨가하여 제조한 클링커에서는 C₃S의 광물의 생성량이 다른 시멘

트에 비해 약 4wt%가량 적은 것으로 산출되었다.

폴리 실리콘 슬러지를 시멘트 원료로써 제조한 클링커의 XRD 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 폴리실리콘 슬러지 5wt% 첨가 클링커에서 34.4°(2θ)에서 가장 큰 C₃S의 피크가 나타났으며 형상으로 볼 때 결정성이 가장 좋은 것으로 평가되었다(Yamaguchi et al. 1968). 또한 37.4°(2θ)의 f-CaO의 피크는 가장 낮게 측정되어 소성성이 가장 양호한 것으로 나타났다. 염소가 클링커 반응에서 C₃S을 증가시키고 f-CaO를 감소시킨다는 이전 문헌의 보고와 같은 결과를 보였다(Kwon et al. 2005). 이는 염소가 광화제(Mineralizer)로서 작용하여 f-CaO의 감소시키면서 물질균형을 이루기 위해서 클링커 광물 중 C₃S생성량을 늘린 것으로 판단된다. 그러나 폴리 실리콘 슬러지 10wt% 첨가 클링커에서는 폴리실리콘 슬러지 5wt% 첨가 클링커에 비해 C₃S의 피크 강도의 감소가 관찰되었다. 이 현상에 대해서는 추가 연구를 통하여 규명할 예정이다. 다만 물질 균형을 이루기 위해 다른 클링커 광물의 증가가 C₃S의 감소의 원인으로 예상된다. 간극상인 C₃A와 C₄AF 광물이 증가한 것을 XRD 회절 결과로 확인 할 수 있다. 또한 폴리실리콘 슬러지 10wt% 첨가 클링커에서만 Halite상이 관찰되었는데 그 이유는 소성과정에서 액상 중의 염분이 많아서 C₃S 광물을 증가시키는 광화제(Mineralizer)로서 작용하지 못하고, 액상 중에 석출하여 Halite상으로 남은 것으로 사료된다.

3.3 제조된 시멘트의 물리적 특성

3.3.1 응결 특성 평가

시판 시멘트와 응결시간을 비교하여 Fig. 6에 나타내었고, 제조 시멘트는 모두 규격의 초결 시간을 만족하였다. 폴리실리콘 슬러지 5wt%까지 첨가 한 제조 시멘트는 초결 시간에 있어서는 유사한 값으로 산출되었다. 폴리실리콘 슬러지 10wt% 첨가 시멘트에서 초결 시간이 비교적 단축되었다. 종결시간 항목도 모두 규격을 만족하는 것으로 나타났다. 특징으로는 시멘트 제조 시 종결시간에 있어서는 폴리실리콘 슬러지 첨가량이 증가할수록 종결시간이 짧아지는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 수화 촉진제로 알려진 염소 성분의 효과 때문이다. 염소의 수화촉진 메커니즘은 크

게 두 가지로 다음과 같다. 일반적으로 시멘트 수용액에서 Ca^{2+} 이온과 OH^- 이온이 결합하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 생성한다. C_3S 와 같은 시멘트 수화물은 토포화학적 반응과 액상으로 Ca^{2+} 이온과 OH^- 이온의 용해 속도에 조절된다. 이 때 Cl^- 이온은 OH^- 이온과 이온 교환을 통하여 대체되며, 수용액에서 Cl^- 이온은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에서 OH^- 이온의 분리를 좀 더 조기에 발생시켜 C_3S 와 같은 시멘트 광물의 수화반응을 촉진시킨다(Kondo et al, 1977). 또 다른 효과는 수화물 전구체의 촉진 효과이다. Cl^- 이온의 확산 속도는 같이 존재하는 양이온 보다 빠르며, 또한 무기물 전구체의 촉진 효과는 주로 음이온은 이동도에 의존하기 때문에 Cl^- 이온 확산 속도가 빠르기 때문에 수화속도가 더 촉진된다. 수화촉진을 하는 염소의 함량 범위는 NaCl기준으로 4wt% 이하까지로 촉진제로 작용한다고 알려져 있다(Lee 2002).

3.3.2 압축강도 평가

재령별 모르타르 압축강도 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 모르타르 경화체의 재령 1일 압축강도는 폴리실리콘 슬러지 첨가량이 증가할수록 강도가 증진되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 응결 특성에서 언급한 염소성분의 의한 수화물 촉진 효과의 결과이다. 염소 이온이 시멘트 클링커 광물 입자 주위의 수화물 층으로부터 OH^- 이온을 용해시켜 음이온의 상호 확산 작용이 증가되어 수화를 가속시켜 강도를 증진시킨 것이다.

재령 3, 7, 28일 압축 강도 값을 살펴보면, 폴리실리콘 슬러지 5wt% 첨가하여 제조한 시멘트는 첨가량에 따라서 강도 증진효과가 나타났다. 이러한 결과는 위의 시멘트 클링커의 XRD 결과에서 염소가 광화제(Mineralizer)로 작용하여 C_3S 광물의 생성량이 많아져서 강도를 증진시킨 것이다. 그러나 폴리실리콘 슬러지 10wt%를 첨가하여 제조한 시멘트는 폴리실리콘 슬러지를 무첨가 하여 제조한 시멘트보다 낮은 강도 값을 나타냈다. 이러한 결과는 폴리실리콘 슬러지 10wt% 함유된 시멘트 클링커의 XRD 분석결과에서 보듯이 C_3S 광물의 결정성과 생성량이 감소로 기인 된 것으로 판단된다. 또한 강도 저하의 원인으로는 염소에 의해 수화가 촉진되어 재령 3일 이전의 초기 재령 1일 강도는 상승시키나 그 이후의 재령 3, 7, 28일 강도에서는 초기 수화물의 급격한 생성으로 인해 초기 수화물층을 통한 물질이동이 방해되어 후기의 수화 반응이 억제되기 때문으로 생각된다. 따라서 폴리실리콘 슬러지의 염소 성분의 의해 시멘트 수화물 형성의 방해를 받지 않고, 수화물을 증진효과를 얻을 수 있는 원료 사용량의 최대량은 5wt%정도가 적절할 것으로 판단된다.

폴리실리콘 슬러지를 원료로 5wt% 배합되어 제조된 시멘트의 염소 함유량과 용출량을 검토하였다. 시멘트 제조시 염소 함유량이 4.2wt%인 폴리실리콘 슬러지를 5wt% 배합 할 경우, 총 배합에 있어서 폴리실리콘 슬러지 첨가에 따른 염소 함유량 최대 증가분은 1/20인 0.21wt%이다. 제조된 시멘트의 염소 함유량과 염소이온 용출량을 측정결과 Table 7에 나타내었다. 비교하여 측정 된 판매용 시멘트의 함유량과 용출량 이하의 값으로 산출되어 0.10wt%와 용출량 10ppm의 이하의 값을 나타냈다.

4. 결론

폴리실리콘 슬러지를 시멘트 원료로써 포틀랜드 시멘트 클링커를 제조하였을 때, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 폴리실리콘 슬러지를 시멘트 원료로써 시멘트 클링커를 소성하여 제조했을 때, 폴리실리콘 슬러지의 성분 중 염소 성분이 광화제로 작용하여, t-CaO를 낮추고 C_3S 광물상 생성에 기여하였다. 광화제 효과를 기대할 수 있는 시멘트 원료로 폴리실리콘 슬러지의 첨가량은 5wt% 첨가까지가 적절한 것으로 나타났다.
2. 폴리실리콘 슬러지를 시멘트 원료로써 사용하여 제조한 시멘트의 응결특성을 살펴본 결과, 폴리실리콘 슬러지가 첨가량이 증가할수록, 초결 시간에서는 5wt% 첨가까지는 거의 유사하였으며 10wt% 첨가에서는 초결 시간이 단축되었으며, 종결은 폴리실리콘 슬러지 첨가량에 따라 단축되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 폴리실리콘 슬러지 염소 성분이 포틀랜드 시멘트 광물의 수화를 촉진시켰기 때문이다.
3. 폴리실리콘 슬러지를 10wt% 첨가까지 시멘트 원료로 사용하여 제조한 시멘트의 압축강도 특성을 살펴본 결과, 재령 1일 압축강도는 폴리실리콘 슬러지의 염소 성분이 수화를 촉진하여 첨가량에 따라서 압축강도가 증진되었다.
4. 재령 3, 7, 28일 압축강도는 폴리실리콘 슬러지 5wt%를 원료로 제조한 시멘트의 압축강도가 가장 컸으며, 이러한 효과는 폴리실리콘 슬러지의 염소 성분이 광화제로써 작용하여 C_3S 광물의 생성량을 증가시켰기 때문이다.
5. 폴리실리콘 슬러지 10wt%를 원료로 제조한 시멘트의 압축강도는 증진되지 않고, 5wt%보다 약간 감소하는 현상을 나타냈다. 이러한 결과는 폴리실리콘 슬러지 10wt% 첨가 경우에는 시멘트 제조시 소성과정 중 액상 내 염소 성분이 많아서 C_3S 광물을 증가시키는 광화제로써 작용하지 못하고, 액상 중에 석출하여 압축강도 저하가 발생한 것으로 판단된다.

References

- Bogue, R.H. (1947). The Chemistry of Clinker Formation, Reinhold Publishing, Corp., 203–215.
- Kim, Y.H. (2008). Manufacture of solar cell polysilicon, Korean Chemical Engineering Research, **46(1)**, 37–49.
- Kondo, R., Daimon, M., Sakai, E., Ushiyama, H. (1977). Influence of inorganic salts on the hydration of tricalcium silicate, Journal of Applied Chemistry Biotechnology, **27**, 191–197.
- Kwon, W.T., Kim, Y.H., Chu, Y.S., Lee, J.K., Kim, I.S., Kim, S.Y. (2005). Effect of P_2O_5 and chloride on clinkering reaction, Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal, **7(1)**, 63–66.
- Lee, J.Y., Cha, C.S. (2003). Environmental preservation of cement industry, Cement, **158(4)**, 4–9.
- Lee, U.H. (2002). Effect of potassium chloride on cement quality, Korea Cement Symposium, **29**, 25–30.
- Yamaguchi, G., Takagi, S. (1968) Analysis of Portland Cement Clinker, 181–194.
- Yang, S.K. (2007). Consideration of rational management way for regulation on total quantity of chloride ion in concrete, Korea Cement Symposium, **34**, 160–167.
- Yang, S.K., Lee, J.Y. (2006). Critical chloride amount in concrete, Korea Cement Symposium, **33**, 230–236.

폴리실리콘 슬러지를 원료로 사용한 포틀랜드 시멘트 클링커의 특성

본 연구는 태양광 소재인 폴리실리콘 제조시 부산되는 슬러지를 시멘트 클링커의 원료로서 사용 가능성에 대해 검토하였다. 시멘트 클링커를 제조 할 때, 폴리실리콘의 염소 성분이 소성과정에서 광화제로 작용하여 f-CaO 생성량을 낮추고, 시멘트 클링커 광물 중 C_3S 생성량을 증가시킨 것으로 평가되었다. 또한 제조한 시멘트의 물리적 특성을 측정하였다. 제조 시멘트는 폴리실리콘 슬러지 함유량이 증가할수록 응결 시간을 단축시켰다. 이러한 결과는 염소 성분이 수화촉진제라서 작용해서 C_3S 의 수화에 의해서 생성된 수산화칼슘의 용해를 촉진하기 때문이다. 또한 이러한 이유로 재령 1일에서의 모르타르 압축강도는 폴리실리콘 슬러지 함유량이 많을수록 컸다. 재령 3, 7, 28일 압축강도는 폴리실리콘 슬러지 첨가량 5wt%까지 증진되는 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 클링커 제조 시 염소 성분이 C_3S 광물 생성량을 증가시킴으로 3일 이후 압축강도를 증진시킨 것이다.