

혼합원료의 경석 및 모듈러스 변동에 따른 품질·공정변화 검토

이용성* · 유창진 · 이의학 · 백용오

< 현대시멘트 >

1. 서 론

시멘트 킬른 소성공정에서 기존의 연료대신 사용되는 대체연료는 사회적으로 자원의 재활용이라는 점에서 환경보존이라는 의미가 있으며, 자원·에너지가 대량 소비되는 시멘트 산업에서는 제조원가의 저감이라는 유용한 효과를 갖게 한다. 시멘트 제조원가 저감에 영향을 주는 대체연료는 각 시멘트사가 품질·공정에 영향을 미치지 않는 범위에서 그 사용량은 향후 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 그렇지만 대체연료의 사용은 종류에 따른 열량 회수율, 연소되는 위치 및 연소시 상태·조건 등에 의해서 킬른의 소성분위기는 종전에 비하여 환원성 분위기로 바뀌기 쉽다. 이 경우 킬른 배기가스 중에 일산화탄소를 포함하지 않더라도 혼합원료 중 탄소 화합물이나 황 화합물과 같은 성분이 포함된 경우 또는, 입자내부에 산화상태를 유지할 수 없는 경우에 클링커 내부에서 국부적인 환원분위기가 발생한다^{1,2)}. 이와 같은 발생 요인을 원료적인 측면에서 살펴보면 보통 점토질이나 철질 부원료의 용도로 사용되는 재료, 그리고 혼합원료의 조성변화에 따라 발생된다. 이러한 점토질 부원료 중 경석은 탄소성분으로 인한 열량으로 소성공정에서 열원단위 저감에 효과가 있는 것으로 알려져 있으며³⁾ 실제 공정에서도 적용되어 왔다. 그렇지만 타 시멘트사와 마찬가지로 킬른에서 대체연료 사용량이 증가하고 있는 상황에서 경석 과다 사용시 시멘트 품질 및 공정(예열실 온도상승, coating 형성, 열원단위

등)에 미치는 영향성이 대체연료 사용이전과 비교하여 다소 차이가 발생한 것으로 여겨지나 기타 품질·공정상 다른 변수들과 복합적으로 발생하였기 때문에 정확한 요인을 파악하기가 쉽지 않았다. 따라서 본고에서는 킬른에서 대체연료 사용시 경석 배합비 변동을 주어 킬른에서 생산되는 클링커 품질 및 공정에 미치는 영향성을 검토하였다. 또한, 자체 석회석의 성분 중 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비가 낮은 관계로 경석 배합비 변동 차이를 위해 혼합원료의 모듈러스를 조정하였으며 이들 두 가지 요인이 품질 및 공정에 미치는 영향성을 각각적으로 검토하였다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험방법

2.1.1 출발물질

공정시험에 적용된 주·부원료의 화학성분을 <표 1>에 나타내었다. 경석의 소성온도에 따른 상변화를 알아보기 위해 자연건조 상태 및 950, 1200, 1450℃에서 10분 동안 소성시킨 경석을 X선 회절분석기(D-MAX 2200, Rigaku)를 이용하여 분석하였다. 또한, 온도 상승에 따른 흡열-발열 반응과 중량 변화율을 알아보기 위해 TG-DSC(STA 409, Netzsch)를 이용한 시차열중량 분석을 하였다.

<표 1> 공정시험 기간동안 적용된 혼합원료의 주·부원료 화학성분

구분	화학성분(%)									공업분석				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	L.O.I	K ₂ O	Na ₂ O	수분	휘발분	회분	고정탄소	발열량 (cal/g)
석회석	10.28	2.37	1.00	46.22	1.57	0.12	37.8	0.82	0.06					
철광석	16.18	9.05	60.6	8.27	6.95	0.2	5.52	0.18	0.08					
규 석	87.8	4.89	2.23	1.56	0.29	-	1.31	0.80	0.03					
Jaro.	7.66	10.63	31.37	6.11	0.28	28.5	-	0.03	-					
납 석	66.01	17.57	5.97	1.48	0.77	-	2.89	1.70	0.84					
경 석	49.25	21.91	3.19	2.97	0.60	1.19	18.25	1.46	0.08	0.45	7.03	80.92	11.53	1132

2.1.2 시료채취 및 시멘트제조

공정시험 기간동안 시간별로 수집된 클링커를 X선 형광분석기(System 3550, Rigaku)를 이용하여 화학분석을 하였으며, 시간별 시료를 일 종합하였다. 일 종합한 시료는 클링커의 SO₃ 함량 차이를 고려하여 석고를 일정량 첨가시킨 후 시료조제밀로 분쇄하였다. 이때 시멘트의 SO₃ 함량은 2.1±0.1%로 조정하였고 블레인은 3450±50cm²/g 수준이었다.

2.1.3 물성시험 및 기기분석

제조된 시멘트의 물리적 성질을 알아보기 위하여 주도·응결시간(KS L 5103), 모르타 압축

강도(KS L 5105) 실험을 하였으며, 시멘트 페이스트의 유동성을 확인하기 위하여 국내 D사의PNS계 고성능 AE감수제를 사용한 미니슬럼프를 측정하였다. 경석 배합비 변동 및 혼합원료의 모듈러스 변동에 따라 생산된 클링커의 미세구조를 광학전자현미경(DMRXP, Leica)을 이용하여 관찰하였으며, 클링커 색상 변화를 알아보기 위해 색도측정계(CR-200, Minolta)를 이용하였다.

<표 2> 공정시험기간 중의 경석배합비와 클링커 모듈러스

경석배합비	클링커 모듈러스			비고
	LSF	SM	IM	
1.0% ㉠	89.5	2.60	1.55	
2.5% ㉡	"	2.55	1.50	
3.0% ㉢	"	2.50	1.45	
3.5% ㉣	"	2.45	1.40	
3.0% ㉤	"	2.50	1.45	
2.5% ㉥	"	2.55	1.50	

2.2 공정시험조건

혼합원료의 경석 배합비 및 모듈러스를 변경시켜 #1 킬른(Onoda RSP Kiln, Ø5.2 × 75m,

<표 3> 동일한 석회석 품위 및 모듈러스에서 배합설계에 따른 경석배합비 변동

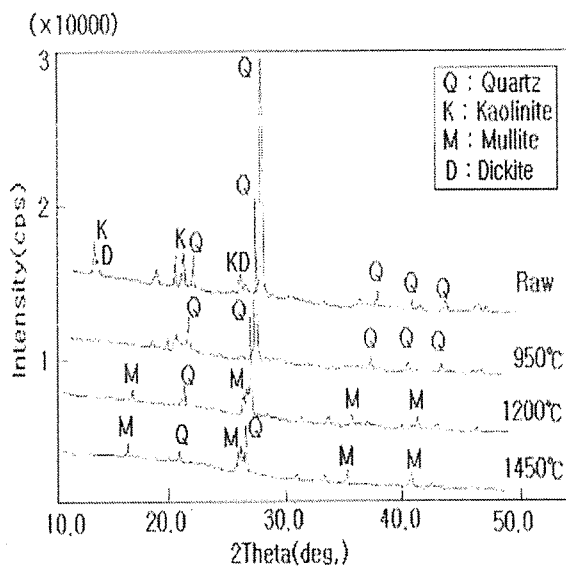
클링커 모듈러스			혼합원료 배합(%)					
LSF	SM	IM	경 석	납 석	석 회 석	규 석	철 광 석	Jaro.
89.5	2.60	1.55	2.00	2.12	91.27	2.71	1.50	0.40
			3.23	-	90.92	3.54	1.68	0.40

6000 TPD)에 적용하여 기간별로 클링커 품질 및 공정변화를 알아보았다. 시험기간 중 일정한 석회석 품위 및 클링커 모듈러스에서 경석 배합비 변동은 한계가 있기 때문에 클링커 모듈러스 중 실리카올(SM), 철올(IM)을 경석 배합비 변동에 따라 조정하였다(<표 2, 3>). 클링커 모듈러스의 조정은 품질, 공정에 따라 실제 조정 가능한 범위 내에서 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경석의 X선 회절분석 및 열분석 결과

자연 건조된 경석의 X선 회절분석 결과 대부분 quartz 결정으로 존재하였으며, kaolinite, dickite 등의 결정이 일부 검출되었다. 소성온도별 경석의 X선 회절분석 결과 1450°C까지 주 결정인 quartz가 잔존하였다. Mullite 결정은 1200°C에서 확인되었으며 1450°C까지 소성온도가 증가가 됨에 따라 mullite 결정의 피크 intensity는 증가하였다. 경석의 열분석 결과 발열반응 개시온도와 종료온도는 약 300~740°C의 범위에 걸쳐 두 차례의 발열피크를 나타내었다.



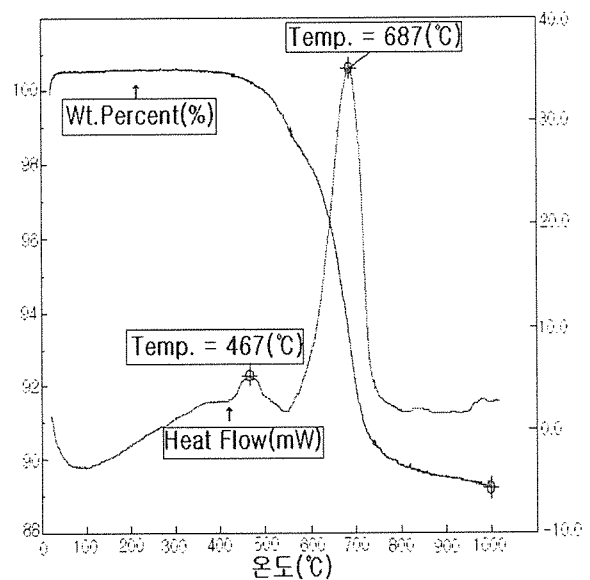
<그림 1> 경석의 X선 회절분석 결과

첫 번째 발열피크는 휘발분 연소에 의한 것으로 보이며 두 번째 발열피크는 고정탄소의 연소로 인해 발생된 것으로서 정점은 각각 약 467°C, 687°C 이었다. 온도를 1000°C까지 상승시켰을 때 발생한 경석의 중량 감소율은 약 10.8% 였다.

3.2 혼합원료의 배합 및 클링커 성분

3.2.1 혼합원료 변동

<표 4>는 공정 시험기간 중 혼합원료의 변동사항을 나타내었다. ㉠~㉢ 기간중 석회석 CaCO₃ 함량이 평균 82.3%로서 큰 변동이 없었으며, 혼합원료 중 Al₂O₃, SiO₂ 보충원인 경석 배합비 증가에 따라 경석과 비슷한 화학성분을 갖는 납석 배합비는 감소하였다. 혼합원료의 모듈러스 SM, IM 감소에 따라 규석 배합비는 감소하였고, 철광석 배합비는 증가하였다. ㉣ 기간의 경우 석회석 CaCO₃ 함량이 이전의 기간보다 다소 감소되어 ㉤의 동일 모듈러스를 갖는 기간과 비교할 때 납석, 규석 배합비는 다소 감소되었다. 공정 시험기간 동안 원료의 분말도는 비슷한 수준을 나타내었다.



<그림 2> 경석의 TG-DSC 분석 결과

<표 4> 기간별 원료 배합비 및 모듈러스 변화

구분	원료배합(%)						석회석 CaCO ₃ (%)	원료 모듈러스			원료잔사 88μm(%)	비고
	석회석	경석	납석	규석	철광석	Jaro.		LSF	SM	IM		
㉠	92.13	1.02	3.23	1.52	1.67	0.43	82.48	93.05	2.65	1.46	14.4	
㉡	91.40	2.50	1.95	2.15	1.58	0.42	82.19	93.63	2.62	1.42	13.6	
㉢	91.05	3.05	1.71	1.94	1.83	0.41	82.24	93.45	2.58	1.44	14.2	
㉣	90.67	3.45	1.29	1.90	2.27	0.41	82.39	92.52	2.49	1.31	13.8	
㉤	91.11	2.99	1.47	2.09	1.97	0.36	82.09	93.38	2.57	1.39	14.2	
㉥	92.39	2.51	1.17	1.94	1.62	0.37	81.25	93.10	2.60	1.45	14.8	

<표 5> 기간별 경석 배합비 변동에 따른 클링커 성분 및 모듈러스 변화

구분	경석 배합비 (%)	클링커 모듈러스			클링커 광물조성(%)				기타 화학성분(%)						§액상량 (%)
		LSF	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I.	Cl ⁻ (ppm)	
㉠	1.02	89.55	2.59	1.54	46.74	29.08	8.12	10.37	2.54	0.80	1.25	0.08	0.15	181	26.62
㉡	2.50	89.78	2.57	1.51	47.43	28.49	7.96	10.52	2.58	0.82	1.16	0.08	0.21	169	26.62
㉢	3.05	89.74	2.50	1.51	46.39	28.61	8.20	10.73	2.57	0.84	1.21	0.09	0.22	193	27.21
㉣	3.45	88.87	2.44	1.42	44.50	30.41	7.83	11.46	2.64	0.81	1.29	0.09	0.28	194	27.90
㉤	2.99	89.00	2.50	1.48	44.69	30.32	8.06	10.95	2.60	0.87	1.23	0.08	0.24	185	27.38
㉥	2.51	89.14	2.53	1.53	45.03	30.21	8.39	10.53	2.57	0.86	1.24	0.08	0.19	230	27.16

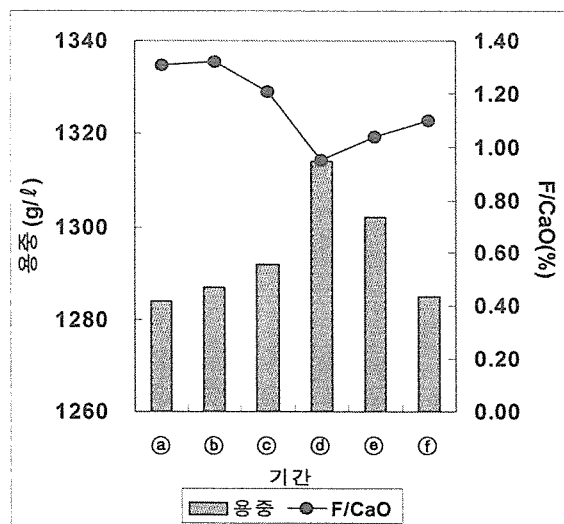
§ 액상량 : 1.13*C₃A + 1.35*C₄AF + MgO + Alkali(T.A.)

3.2.2 클링커 조성 및 소성성

<표 5>는 기간별로 클링커 성분 변화를 나타낸 것이다. 경석 배합비 변동시 혼합원료의 모듈러스를 조정하였기 때문에 클링커 광물조성은 기간별로 차이를 나타내었다. 특히, 경석 배합비가 높았던 기간에서 클링커의 C₄AF 함량 증가로 인하여 다른 기간에 비해서 액상량은 상대적으로 높았으며, 또한 강열감량도 높게 나타났다.

<그림 3>은 시험기간 동안의 기간별 클링커 소성성을 나타낸 것으로써 경석 배합비가 3.5%인 ㉣ 기간에 용중, F/CaO 함량이 가장 양호하게 나타났다. 이는 소성시 SM, IM 하락으로 인한 난소성 원료의 감소, 클링커 용액 생성량 증가로 치밀한 클링커를 형성한 결과로 사료된다. 또한, 이 기간에서 클링커의 소성성 향상은 다른 기간

에 비하여 훨씬 운전상태중 NO_x 값의 상대적 증가를 가져왔다(<표 6>).

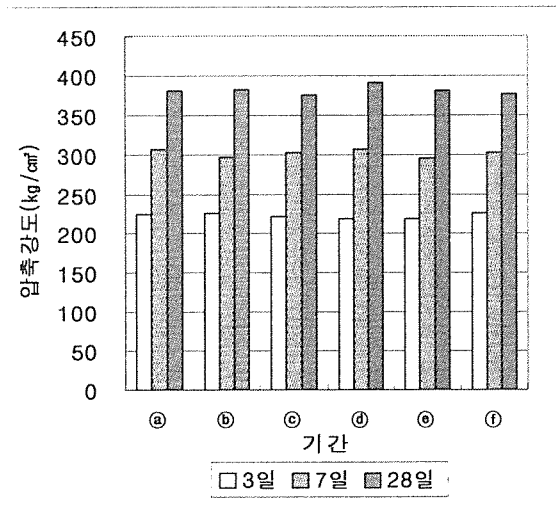


<그림 3> 기간별 클링커 소성성 측정결과.

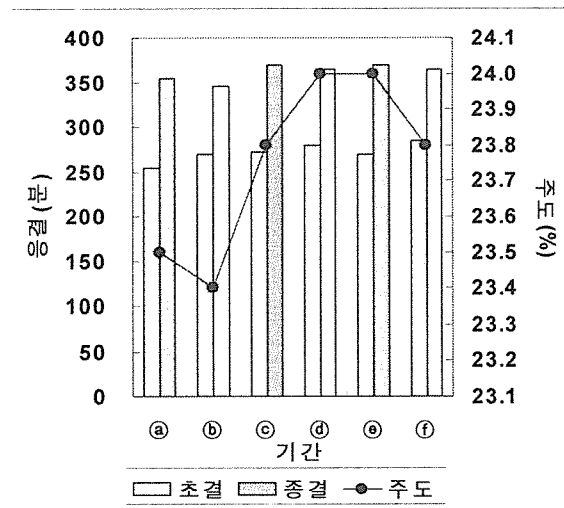
3.3 시멘트의 물리적 성질

3.3.1 시멘트 압축강도

경석 배합비 변동에 따른 기간별 압축강도 실험결과 재령 3, 7일은 큰 차이가 없었으며, 재령 28일 압축강도만이 경석 배합비가 3.5%인 ㉔ 기간에서 다른 기간에 비해 평균적으로 약 11kg/cm² 증가하는 것으로 나타났다(<그림 4>). 재령 28일 압축강도 증가는 경석 배합비 변동에 따른 영향성 보다는 클링커의 용중, F/CaO 함량을 고려할 때 치밀한 클링커 형성으로 인한 결과로 사료된다.



<그림 4> 기간별 시멘트 모르타 압축강도 측정결과

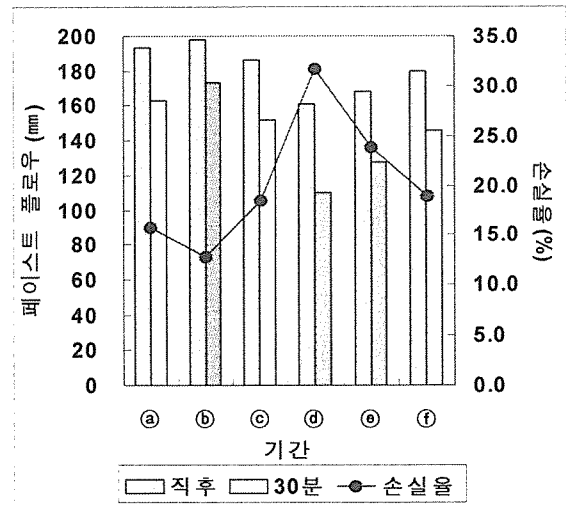


<그림 5> 기간별 시멘트 응결·주도

3.3.2 시멘트 페이스트의 응결·주도 및 유동성

<그림 5, 6>에 시멘트 페이스트의 응결·주도 및 유동성 실험결과를 나타내었다. 기간별로 시멘트 응결시간은 뚜렷한 경향성이 없었다. 기간별로 클링커의 용중 차이뿐만 아니라 모듈러스 조정에 의해 초기 수화반응에 영향을 미치는 C₃A 등의 클링커 광물조성이 차이가 발생하였지만, 클링커 SO₃, 알칼리 함량 및 클링커 성상 등이 기간별로 일정하게 나타나지 않은 결과로 사료된다. 반면에 경석 배합비가 3.5, 3.0%로 증가된 기간(㉔, ㉕)의 시멘트 주도는 다른 기간에 비하여 높게 나타났다.

시멘트 페이스트의 미니슬럼프 실험결과 경석 배합비가 3.5%인 ㉔ 기간에서 시멘트 페이스트의 직후 값은 약 160mm 였으며 경시변화에 따른 유동성 손실율은 32.0%로써 다른 기간의 평균 직후 값 185mm, 유동성 손실율 17.0%에 비하여 직후 뿐만 아니라 경시변화에 따른 유동성 저하가 크게 발생하였다(<그림 6>). 이것은 경석 배합비 증가에 따른 클링커 모듈러스의 SM 감소와 이 기간 발생 빈도수가 높았던 갈색 클링커에 의한 영향으로 사료된다. ㉔ 기간에서 클링커의 SM 감소는 간극질 상(C₃A+C₄AF)을 증가시켜 간극질 상에 혼화제 흡착을 우선적으로 크게 하고 상대적으로 C₃S, C₂S에 흡착되는 양을 적게 하기 때문에^{4,5)} 시멘트 페이스트의 유동성이 저하된 것으로 사료된다.



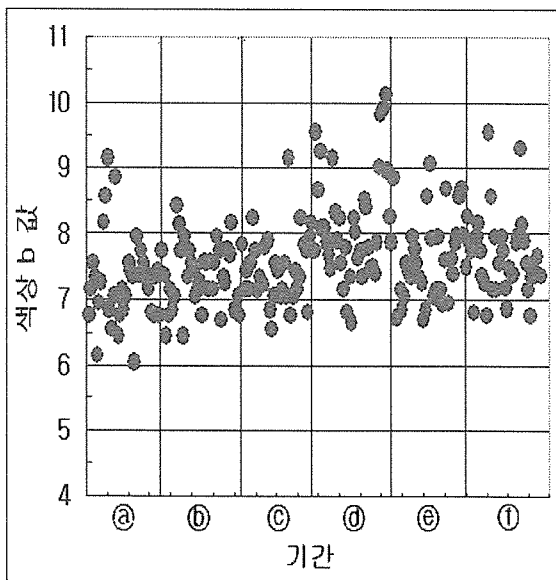
<그림 6> 기간별 시멘트 페이스트 플로우

또한, 클링커의 SM 감소는 정상적인 클링커의 알칼리 설페이트 형성 외에 클링커 칼슘실리케이트 상에 고용되는 알칼리 함량을 감소⁶⁾시킬 뿐만 아니라, ㉔ 기간에서 발생된 갈색 클링커는 클링커내 존재하는 알칼리를 불안정한 형태로 취하게 할 수 있다. 이것은 초기 수화반응성을 높여 시멘트 페이스트의 유동성 저하를 크게 한다.

3.4 클링커 색상 및 미세구조

3.4.1 클링커 색상

시멘트와 같이 채도가 낮고 변화가 적은 경우 R. S. Hunter Lab 공간에 의한 표현이 일반적으로 사용된다. L, a, b 공간에 의한 색은 L은 검정 ~ 하얀(0 ~ 100), a는 초록 ~ 빨강('a ~ 'a), b는 파랑 ~ 노랑('b ~ 'b)으로 표현된다. L, a, b 값의 증가는 밝고 적황색 계통으로 치우침을 뜻하며 이것은 흔히 말하는 갈색 클링커 현상이 심해졌다는 것을 의미한다^{7,8)}. 이중 변동 폭이 큰 b 값을 이용하여 공정시험 기간동안 클링커 색상을 비교하였다 (<그림 7>).



<그림 7> 기간별 클링커 색상 b 값.

<그림 7>에서 경석 배합비 및 모듈러스 변동에 따른 공정 시험기간 동안 경석 배합비가 3.5 ~ 3.0%로 증가되고 클링커 모듈러스 중 SM, IM이 감소된 ㉔, ㉕ 기간 동안 색상 b 값이 높아진 횟수가 많아졌다. 이 기간에 갈색 클링커 발생 빈도수가 다른 기간에 비하여 상대적으로 높았음을 알 수 있다. 갈색 클링커는 대부분 클링커 중심부가 갈색을 띠는 경우가 많았으며 발생 요인은 혼합원료 중 탄소 화합물이나 황 화합물과 같은 산화성 성분이 포함되어 국부적인 환원분위기를 형성하거나 클링커 입자내부에 산화상태를 유지할 수 있는 산소함량이 부족한 경우로 알려져 있다^{1,2)}. 전자의 경우 킬른의 대체연료 사용으로 소성분위기가 영향을 받은 상태에서 탄소성분을 함유한 경석 배합비 증가로 인해 갈색 클링커의 발생 빈도수가 증가된 것으로 사료되며, 계절적으로 킬른내 과잉산소가 부족한 하절기에 이러한 현상은 심해질 것으로 여겨진다. 후자의 경우 경석 배합비 증가 및 클링커 모듈러스의 SM, IM 감소, 클링커 용중 등의 소성성 실험 결과로 미루어 볼 때 다른 기간에 비하여 상대적으로 치밀한 클링커가 형성되었으며 또한, 이 기간에 클링커 크기가 다소 커졌음을 감안하면 냉각 중 간극상이 석출되는 과정에서 산소가 클링커 내부까지 쉽게 들어가지 못해 클링커 중심부에 갈색을 띄게 한 것으로 사료된다.

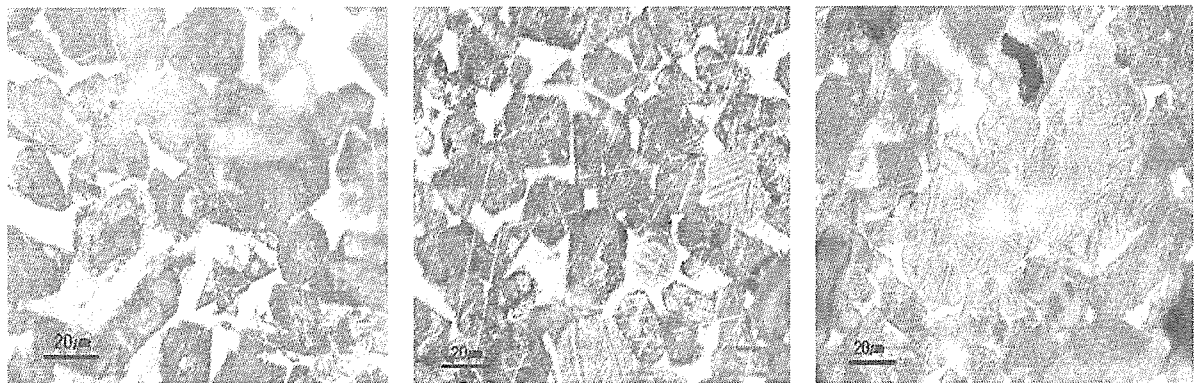
갈색 클링커 발생이 어떤 요인에 의해서 영향을 더 받았는지는 분명하지 않지만 어떠한 경우라도 갈색 클링커의 발생은 시멘트 품질에 영향을 미친다. 전술한 바와 같은 요인들로 의해 발생된 갈색 클링커는 클링커내 미량성분으로 존재하는 K₂O의 정상적인 알칼리 설페이트 형성을 방해하며, 냉각과정에서 기공벽에 쉽게 응축되어 조해성이 있는 K₂O-Al₂O₃ 계 화합물을 형성하기 쉽다^{9,10)}. 표 5에서 기간별로 분석된 클링커 성분중 강열감량이 ㉔ 기간에 가장 높게 나타난 것은 이런 영향으로 보이며, 이것은 시멘트 페이스트의 유동성 저하, 주도 상승을 초래한 것으로 사료된다.

3.4.2 클링커 미세구조

클링커 미세구조를 관찰한 결과 경석 배합비 변동 기간별로 Alite 등의 결정 형태, 크기는 큰 차이를 나타내지 않았다. 다만 경석 배합비가 3.5%로 증가되었고 클링커 모듈러스 중 SM, IM이 감소된 ㉔ 기간에서 생산된 클링커의 경우 흑색 부위는 간극질 상이 비교적 균일하게 분포된 결정들이 관찰된 반면 갈색 부위의 클링커에서는 간극질 상의 부족으로 인해 alite, belite 결정들의 용착이 뚜렷하게 관찰되었다. 전체 공정시험 기간동안 alite 등의 결정 경계면은 대체로 양호하게 나타나 클링커 냉각과정으로 인한 차이는 거의 없었던 것으로 보인다(<그림 8>).

3.3 소성공정변화

<표 6>에 경석 배합비 변동에 따른 기간별 킬른 상태를 나타내었다. 열원단위는 대체연료 사용비율을 포함하여 계산하였으며, 공정시험 기간동안 경석 배합비가 3.5%로 높았던 ㉔ 기간의 열원단위가 다소 감소하였다. 대체연료 사용비율, 열량의 차이로 인해 열원단위의 정확한 비교는 어렵지만 ㉔ 기간에서 경석 배합비 증가와 더불어 이소성성 혼합원료의 증가가 열원단위 감소에 일정 부분 기여한 것으로 사료된다. 이밖에 예열실 쪽에서 온도변화는 거의 발생하지 않았으며, soft coating 탈부착 현상이 발생하였고 압력 등의 변화가 일부 나타났지만 경석 배합비 변동에 의한 것인지 불분명하다.



㉔ : 경석배합비 1.02%

㉔ : 경석배합비 3.45% 흑색부위

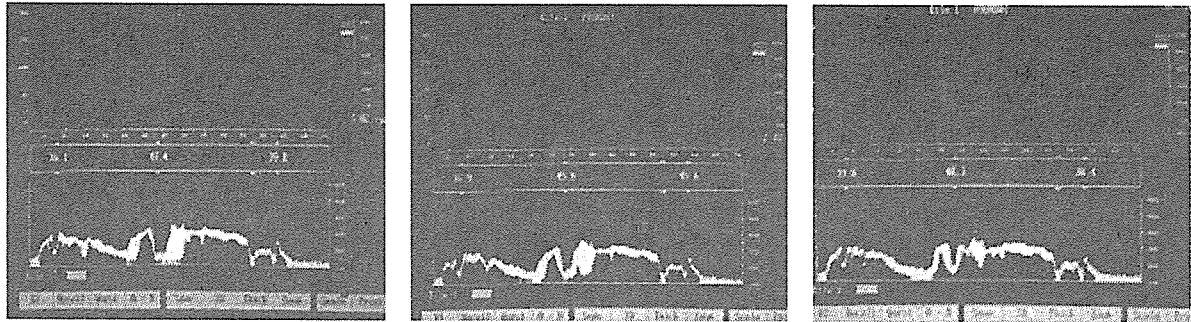
㉔ : 경석배합비 3.45% 갈색부위

<그림 8> 기간별 클링커 광학전자현미경 관찰결과.

<표 6> 기간별 경석 배합비 및 혼합원료 모듈러스 변동에 따른 #1 kiln 운전상태

구분	경석 배합비 (%)	열원단위 (대체연료 포함)	킬른 RPH	킬른 Amp.	예열실 온도(℃)					NOx (ppm)
					6단 (A)	6단 (B)	5단 (A)	5단 (B)	M.C.	
㉔	1.02	1.000	180	585 ~ 620	895	876	796	792	880	219
㉔	2.50	0.995	180	595 ~ 635	890	887	799	802	883	236
㉔	3.05	0.981	180	580 ~ 625	880	888	803	802	886	251
㉔	3.45	0.974	180	565 ~ 615	888	888	802	802	883	266
㉔	2.99	0.989	180	570 ~ 615	889	887	804	800	899	223
㉔	2.51	1.120	180	585 ~ 620	889	889	805	799	890	218

§ 열원단위 : ㉔ ~ ㉔ 기간의 열원단위(Kcal/kg-Cl') / ㉔ 기간의 열원단위(Kcal/kg-Cl')



㉑ : 경석 배합비 1.0% ㉔ : 경석 배합비 3.5% ㉒ : 경석 배합비 2.5%

<그림 9> 경석 배합비 변동 기간별 킬른의 온도 및 코팅 변화

<그림 9>는 경석 배합비 변동기간에 킬른의 온도 및 코팅 변화를 나타낸 것으로써 공정시험 전후로 31 ~ 39m 부근의 링이 점차 감소하였는데, 경석 배합비 증감에 의한 영향성 보다는 공정시험 기간이 길었으며 기간내 원료의 모듈러스 변동 및 킬른 운전상태에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

혼합원료의 경석 배합비 및 모듈러스 조정 에 따른 품질·공정 시험결과 다음과 같은 결 론을 얻을 수 있었다.

- 1) 동일한 석회석 품위를 유지하면서 경석 배합비를 증가시키기 위해선 혼합원료의 모듈러스 조정(SM↓, IM↓)이 필요 하였다. 경석 배합비 증가에 따른 혼합원료의 분말도는 큰 차이가 없었으며 클링커 액상량은 증가하였다.
- 2) 클링커 시멘트의 압축강도 실험결과 기간별로 재령 28일 압축강도만이 경석배합비가 3.5%이고 혼합원료의 SM, IM이 하락된 기간에서 다소 증가하였는데 다른 기간에 비해 상대적으로 치밀한 클링커 형성에 의한 결과로 판단된다.
- 3) 유동성 실험결과 앞선 동일 ㉑ 기간에서 시멘트 페이스트의 유동성 저하가 크게 발생하

였다. 이러한 요인은 클링커 모듈러스의 SM, IM 감소에 의한 간극질 상의 증가로 인한 혼화제흡착량의 증가, 갈색 클링커 형성으로 인한 클링커내 알칼리 존재형태 등의 요인으로 판단된다. 특히, 클링커내 알칼리 형태가 소성분위기, 냉각 등에 의해 너무 불안정하게 존재하여 클링커 강열감량이 크게 증가될 경우, 시멘트의 유동성뿐만 아니라 압축강도, 응결 등에도 악영향을 미칠 것으로 사료된다.

- 4) 갈색 클링커의 발생은 킬른에서 대체연료 사용과 더불어 자체 탄소성분을 갖는 경석 배합비 증가 또는 원료조성, 소성성 등의 요인으로 치밀한 클링커를 형성하였고 상대적으로 이 기간에 클링커 크기가 컸기 때문에 클링커 내부에서 국부적인 환원분위기가 발생한 결과로 사료된다.
- 5) 경석배합비 증가 및 혼합원료의 SM, IM을 감소시킨 기간동안 대체연료 사용비율, 열량의 차이로 인해 정확한 비교는 어렵지만 킬른의 열원단위 감소에 기여한 것으로 판단되며, 그 외 특별한 공정 trouble은 발생 하지 않았다.
- 6) 향후 원료에서 부원료의 종류·양 및 혼합원료의 화학조성 등을 선택할 때 킬른에서 대체연료 사용증가로 인한 소성분위기 등을 고려해서 시멘트 품질이나 공정에 미치는 영향을 면밀하게 검토한 후 사용 목적에 맞도록 적절하게 사용해야 할 것으로 판단된다.

< 참고문헌 >

1. H.M.Sylla, "Effect of reductive burning on the properties of cement clinker", Z.K.G. 12(1981)
2. H.S.Yang, H.C.Chen and R.F.Lee, "Possible origins of an abnormal yellow cored clinker with very high free lime content", World Cement, 27(5), pp.88-94 5(1996).
3. 최상홀 외, "시멘트 원료로서 폐·부산자원의 활용", 한국세라믹학회지, 22(3), pp.149-156 (1978)
4. Nawa et al, "Effect of alkali sulfate on the rheological behavior of cement paste containing superplasticizer" Proceedings of the 3rd CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixture in Concrete, Ottawa, pp405 (1989)
5. Basma Samet and Shondeep L. Sarkar, "Influence of C₃A content on the rheology of oversulfated and undersulfated cements" World Cement, 28(6), pp.76-81 2(1997).
6. S.N.Ghosh, "Advancec in cement technology", pp.203-264, Pergamon Press, (1983)
7. 최일규 외, "Clinker Nodule Size가 시멘트 물성에 미치는 영향", 시멘트 심포지엄, 24, pp.144-150
8. V.Johansen and U.H.jakobsen, "An Examination of clinker with Light Coloured Cores", World cement, 24(8), pp.32-37 (1993)
9. Basma Samet and Shondeep L. Sarkar, "Influence of kiln atmosphere on the development of clinker phase and distribution of alkalis", World Cement, 28(2), pp.77-82 2(1997).
10. 서일영 외, "시멘트 클링커 생성과정에 미치는 Potassium의 영향-III 불안정 알칼리의 상태 및 생성기구", 한국세라믹학회지, 22(3) pp.60-66 (1985)