

XRD 및 편광현미경에 의한 클링커 광물의 정량분석

임영수* · 김백송 · 정현일

(아세아시멘트(주) 기술연구소)

1. 서 론

Clinker의 물성 즉 피분쇄성, 강도, cement의 용결거동 등에 많은 영향을 주는 clinker의 주요 4대 광물-C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF-의 함량을 XRD 및 편광현미경을 이용하여 정량하는 방법을 정립하려는 노력이 오래전부터 연구되어 왔다¹⁻¹¹⁾.

지금까지는 화학분석 결과로 부터 Bogue 식을 이용하여 clinker 각 광물의 조성을 계산하는 것이 보편화 되었으나, 이는 몇가지의 가정이 전제되어 일률적으로 적용하는 것은 오차가 발생하므로 XRD와 편광현미경에 의하여 clinker를 구성하고 있는 각 광물의 함량을 좀더 정확하게 분석함으로써 clinker의 물성을 파악하는데 크게 기여하게 될 것이다.

그러나 XRD에 의한 clinker 광물의 정량시는 peak의 중복, XRD(X-Ray Diffractometer) 시료제조시 결정들의 orientation, back ground 처리 등의 제반 사항들이 문제시 되고 있다. 이러한 제반 문제점 등을 보완하고, 편광현미경에 의한 정량법^{10, 11)}을 상호 보완한다면 clinker 광물의 정량은 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 가능한한 공장생산 clinker와 유사한 화학성분을 갖도록 clinker 표준광물을 합성하였으며, 각 광물을 함량별로 혼합하고, XRD(내부 표준물질 : KBr) 및 편광현미경에 의해 Alite와 Belite, Calcium Aluminate, Calcium ferrite상(이하 각각 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF로 표기)에 대

한 각 함량별 측정 결과로서 검량선을 작성하였다. 이 때 작성된 검량선을 지금까지 사용했던 방법인 Bogue 식에 의한 값과 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구의 실험방법은 Fig. 1에 Flow chart로서 나타내었다.

본 연구의 클링커 표준광물 합성용 출발원료는 특급시약(일제, 순정화학(주))을 사용하여, Table 1과 같은 혼합비로 각 광물을 혼합하였다.

Table 1. Mixing Ratio of Raw Materials for Clinker Standard Minerals

Composition (%) Minerals	SiO ₂	Al ₂ -O ₃	Fe ₂ -O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
C ₃ S	24.44	1.27	0.59	72.38	1.21	0.15	0.11	0.05
C ₂ S	32.04	2.17	1.13	63.07	0.76	0.19	0.35	0.35
C ₃ A	5.89	27.88	7.62	53.78	2.20	-	0.90	1.75
C ₄ AF	3.87	24.67	21.43	44.97	4.23	-	0.37	0.50

먼저 알칼리성분을 증류수로 용해시킨후 각 혼합원료를 마노유발에서 3시간동안 충분히 혼합하였으며, 일축가압성형기(HERZORG, Model : HTP40)를 이용하여 약 0.25kg/cm²의 압력으로 ϕ3.70 × h1.75cm의 pellet을 제조하여 표준광물 합성용 시편으로 하였다.

혼합·성형된 시편은 tube furnace(독일, LINDBERG, Max. Temp. : 1700°C)에서 각 광물에

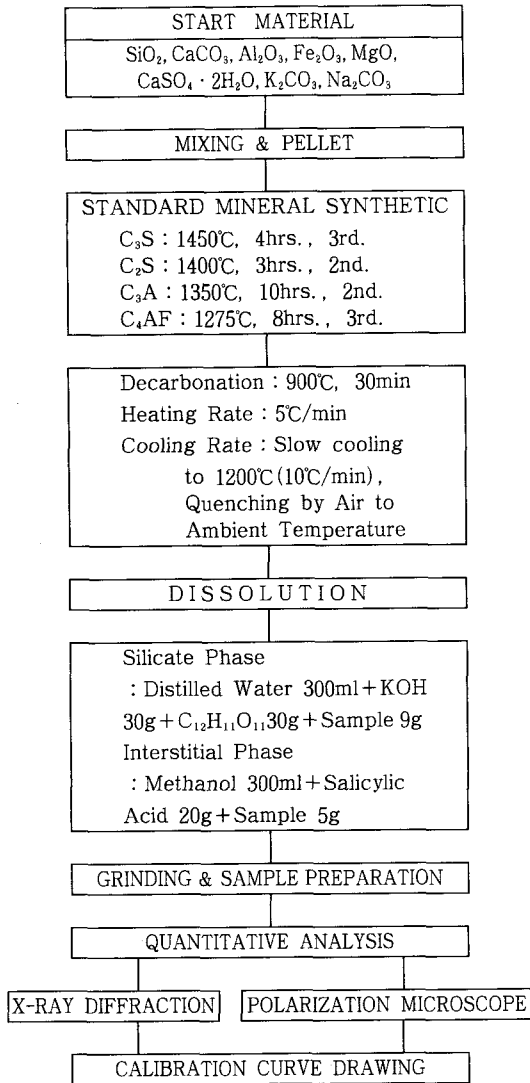


Fig. 1. Flow chart of experiment procedure for sample preparation and measurement.

대한 생성기구를 고려하여 소성온도 및 유지시간을 설정하였고, 합성된 각 광물은 free-lime이 최소화 되고, 다른 광물이 나타나지 않을 때까지 소성횟수를 증가시키면서 합성하였으며, 이는 XRD와 편광현미경으로서 확인하였다.

이때 합성된 각 광물들은 clinker 광물의 dissolution 방법으로서 silicate상과 간극질상을 분리·추출하였다.

Silicate상(C₃S, C₂S)은 300ml의 증류수에 30g의

potassium hydroxide와 30g의 sucrose(C₁₂H₁₁O₁₁)를 용해시킨 용액에 시료 9g을 첨가하고 95°C heater 위에서 1분 동안 stirring, 여과하여 65°C에서 건조한 후 얻어진 잔분을 silicate 광물정량용 시료로 하였다. 간극질상(C₃A, C₄AF)은 300ml methanol과 20g의 salicylic acid를 용해시킨 용액에 시료 5g을 첨가하여 2시간 동안 stirring한 후 여과·건조하고 남은 잔분을 정량분석용 시료로 하였다¹²⁾.

그 결과 Dissolution 전의 각 클링커 표준광물은 C₃S : 98.3%, C₂S : 98.8%, C₃A : 99.1%, C₄AF : 98.5% (C₃A 포함)인 표준광물이었다.

Dissolution에 의해 취해진 각 광물은 마노유발에서 분쇄하여 125 μ m 체를 통과시킨 후 Table 2와 같이 각 광물을 함량별로 혼합한 후 XRD 및 편광현미경으로 정량분석을 행하였다.

Table 2. Mixing Ratio of Clinker Standard Minerals for Quantitative Analysis

	Weight of Component (g)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	KBr
C ₃ S	40	0.400	0.334	0.086	0.180	0.050
	45	0.450	0.310	0.082	0.164	0.050
	50	0.500	0.276	0.076	0.148	0.050
	55	0.550	0.246	0.074	0.130	0.050
	60	0.600	0.220	0.066	0.114	0.050
C ₂ S	15	0.624	0.150	0.096	0.130	0.050
	20	0.586	0.200	0.094	0.120	0.050
	25	0.550	0.250	0.090	0.110	0.050
	30	0.514	0.300	0.086	0.100	0.050
	35	0.476	0.350	0.084	0.090	0.050
C ₃ A	5	0.550	0.250	0.050	0.150	0.050
	10	0.520	0.236	0.100	0.140	0.050
	15	0.490	0.224	0.150	0.136	0.050
	20	0.460	0.216	0.200	0.124	0.050
C ₄ AF	5	0.616	0.276	0.058	0.050	0.050
	10	0.582	0.264	0.054	0.100	0.050
	15	0.554	0.246	0.050	0.150	0.050
	20	0.512	0.240	0.048	0.200	0.050

XRD에 의한 정량분석은 SIEMENS(독일, Mo-

del : D500) 사의 X선 회절분석장치를 사용하였으며, 그 측정조건은 다음과 같다.

Item	Codition
Target	Cuk α
Filter	Ni
Voltage	40KV
Ampere	25mA
Scanning Speed	0.05sec

정량분석은 Table 2와 같은 혼합비로 혼합한 시료 1g에 대하여 KBr 0.05g을 내부표준물질로 혼합, XRD 측정을 행하였다. Table 3에 나타낸 것과 같이 C₃S, C₂S, C₃A 및 C₄AF 광물정량에 사용한 Peak는 각각 $2\theta = 51.4-52.2^\circ$, $2\theta = 30.8-31.3^\circ$, $2\theta = 33.1-33.5^\circ$, $2\theta = 32.6-34.0^\circ$ 이었다. 각 peak의 면적은 XRD에 부착된 computer를 이용하여 back ground를 처리하고, 각 광물의 peak 면적과 내부표준물질인 KBr Peak ($2\theta = 26.7-27.3^\circ$)의 면적비를 구하였으며, 5회 반복 실험한 평균치로 검량선을 작성하였다.

Table 3. Selected Peak Position of Clinker Standard Minerals

Minerals	d-Value	(hkl)	Scanning Angle (2θ)
C ₃ S	1.76	(440)	51.40-52.20
C ₂ S	2.87	(121)	30.80-31.30
C ₃ A	2.69	(044)	33.10-33.50
C ₄ AF	2.65	(141)	33.60-34.00
KBr	3.29	(200)	26.70-27.30

Table 2와 같이 혼합한 시료에 대해, 편광현미경(독일, LEITZ社, Model : ORTHOPLAN)을 이용하여 Point counting method(x250, 121점 grid)로 C₃S, C₂S, C₃A+C₄AF를 각각 10회씩 측정한 후 그 평균값으로 검량선을 작성하였다. 이때 간극질상인 C₃A와 C₄AF는 각각을 구분하여 측정하기가 곤란하여 C₃A+C₄AF에 대한 검량선을 작성하였다.

3. 표준광물 합성 결과

3.1 C₃S 표준광물의 합성

C₃S 표준광물의 합성은 1450°C에서 4시간씩 3회 반복 합성하였고, Fig. 2, 3에 XRD 분석 결과 및 반사현미경 사진을 나타내었다.

XRD 측정결과 1, 2회 소성한 C₃S 표준광물은 β -C₂S와 free-lime peak ($2\theta = 37.32^\circ$)가 나타났으나, 3회 소성시에는 이들 광물의 peak는 거의 나타나지 않고, C₃S peak만 나타났다.

반사현미경 관찰결과, 1회, 2회 소성한 C₃S 표준광물에서는 XRD 측정결과에서 나타났듯이 미반응 belite와 free-lime 군정이 다량 관찰되었다. 3회 소성한 시료에서는 대부분 alite 결정만이 관찰되었지만, 공장제 clinker에 비해 자형(euhedral)의 alite 결정은 많지 않았다. 공장제 clinker에서의 alite는 액상을 매개로한 재결정화로 자형의

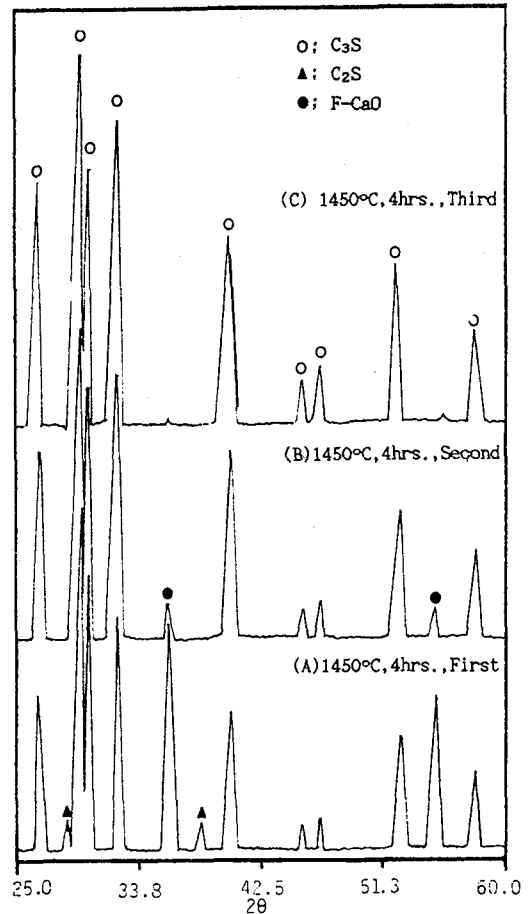
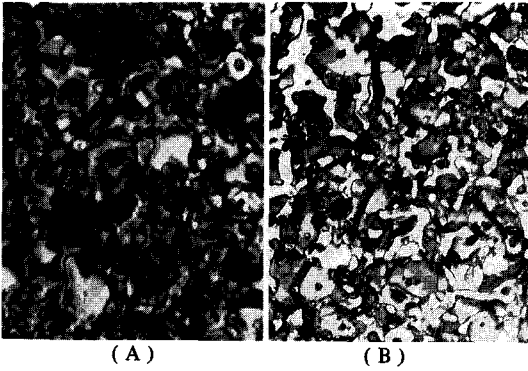


Fig. 2. XRD patterns of synthetic C₃S standard minerals.



(A) 1450°C, 4 hrs., Second (B) 1450°C, 4 hrs., Third
 Fig. 3. Refraction microscope observation photograph of synthetic C_3S standard minerals.

alite 결정생성이 용이하지만, 실험에서는 액상량이 적어 결정면들이 불완전하게 되어 반자형(sub-hedral)의 alite가 많이 생성된 것으로 생각된다.

3.2 C_2S 표준광물의 합성

C_2S 표준광물은 1400°C에서 3시간씩 2회 반복하

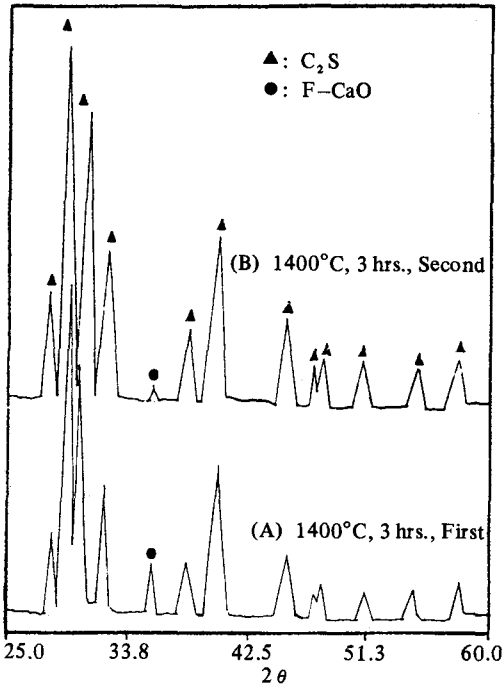
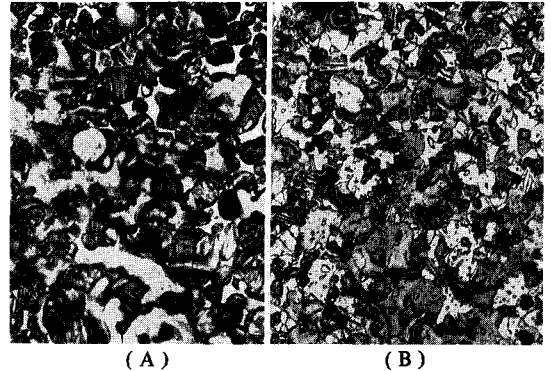


Fig. 4. XRD patterns of synthetic C_2S standard minerals.



(A) 1400°C, 3 hrs., First (B) 1400°C, 3 hrs., Second
 Fig. 5. Refraction microscope observation photograph of synthetic C_2S standard minerals.

여 합성하였으며, Fig. 4, 5에 XRD 분석결과 및 반사현미경 사진을 나타내었다.

XRD 측정결과에서는 2회 소성시 1회때보다 free-lime peak ($2\theta = 37.32^\circ$) Intensity가 감소하였으나, 완전히 사라지지는 않았다. 이것은 3회 소성시에도 소량 존재하였으므로 2회 소성분을 정량 분석용 시료로 하였다.

반사현미경 관찰결과, XRD 측정결과에서 나타났듯이, 1회 소성한 시료에서도 다른 광물은 거의 존재하지 않았고, C_2S 결정만이 관찰되었다. 1회 소성시 구형의 belite가 다량 관찰되었으나, 2회 소성결과에서는 belite 결정표면에 lamella 구조만 관찰되고, 대부분 alite 때와 마찬가지로 반자형의 결정으로 생성되었다.

3.3 C_3A 표준광물의 합성

C_3A 표준광물 합성은 1350°C에서 10시간씩 2회 반복소성하였으며, Fig. 6, 7에 XRD 분석결과 및 반사현미경 사진을 나타내었다.

XRD 측정결과 C_3A 표준광물은 1회 소성시 free-lime ($2\theta = 37.32^\circ$) peak가 나타났으나, 2회 소성시는 단독의 C_3A peak만이 나타났다.

반사현미경 관찰결과, C_3A 표준광물은 1회 소성한 Sample의 경우 기공이 많고, 완전한 합성이 이루어지지 못해 반사광 시료제조가 불가능하였다. C_3A 광물은 공장제 clinker중 미량존재로 관찰이 용이하지 않지만, 단독의 표준광물 합성으로 표면

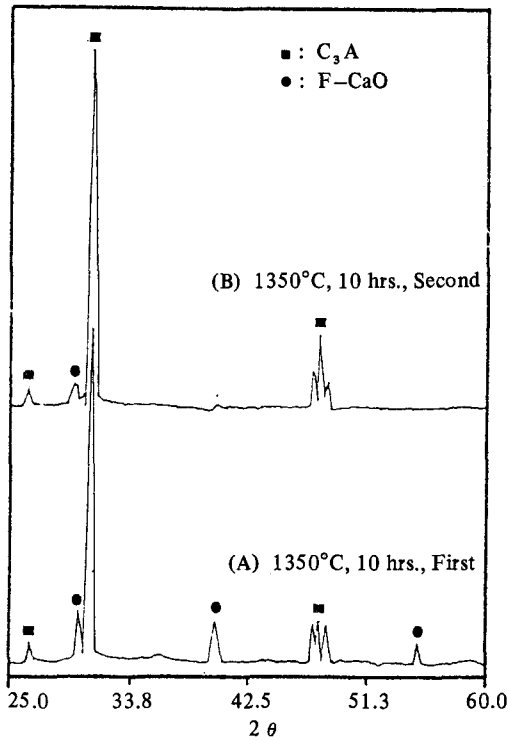


Fig. 6. XRD patterns of synthetic C_3A standard minerals.

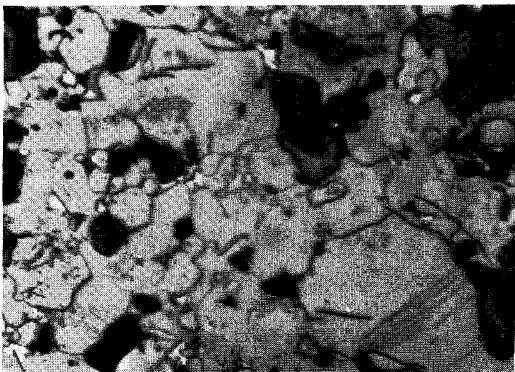


Fig. 7. Refraction microscope observation photograph of synthetic C_3A standard minerals. (1350°C, 10 hrs., Second)

이 육각관상형 결정임을 관찰할 수 있었다.

3.4 C_4AF 표준광물의 합성

C_4AF 표준광물의 합성은 1275°C에서 8시간씩 3회 소성하였으며, Fig. 8, 9에 XRD 및 반사현미경

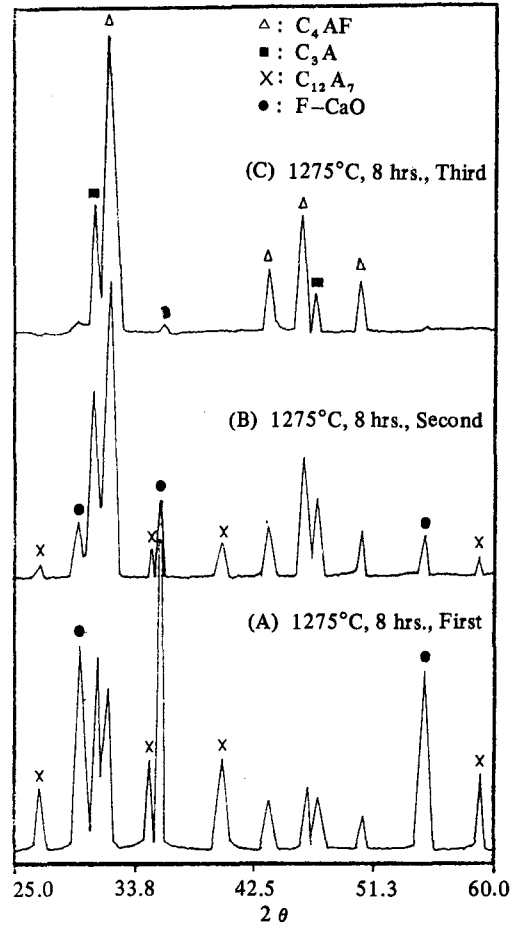


Fig. 8. XRD patterns of synthetic C_4AF standard minerals.

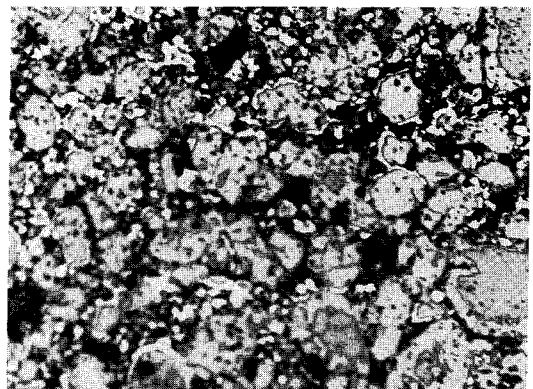


Fig. 9. Refraction microscope observation photograph of synthetic C_4AF standard minerals. (1275°C, 8 hrs., Third)

사진을 나타내었다.

C_4AF 표준광물 합성결과, 1회 소성 경우 C_4AF , C_3A ($2\theta = 33.08^\circ$), $C_{12}A_7$ ($2\theta = 33.40^\circ$) peak가 나타났고, 소성횟수 증가로 $C_{12}A_7$ peak는 나타나지 않았으나, C_3A peak는 계속적으로 존재하여 C_4AF 단독광물의 합성은 불가능하였다.

C_4AF 의 경우도 C_3A 에서와 같이 1, 2회 소성한 시료는 기공이 많고, 완전한 합성이 이루어지지 못해 시편을 제작할 수 없었고, 3회 소성후 반사광 시료를 만들 수 있었다. XRD 측정결과에서도 나타났듯이 현미경 관찰결과, C_4AF 결정은 C_3A 결정과 결정간에 주로 생성되어 있었고, C_3A 표면에도 상당히 많이 산재하고 있었다.

일반적으로 clinker 광물의 합성에서는 냉각과정 중 액상으로 부터 C_3A 와 C_4AF 고용체가 석출되고, 더욱 냉각하면 C_6A_2F 와 C_3A 결정상을 석출하면서 공용점에 이른다. 따라서 액상에서 석출된 ferrite 고용체의 조성은 비교적 Al_2O_3 성분이 높은 C_6A_2F - C_4AF 의 범위에 있는 것으로 알려져 있다¹³⁾. 따라서, C_4AF 는 C_3A 와 함께 합성되어 소성 횟수가 증가되어도 단독의 C_4AF 만이 합성되지는 않은 것으로 생각된다.

4. 표준광물의 정량분석 결과 및 고찰

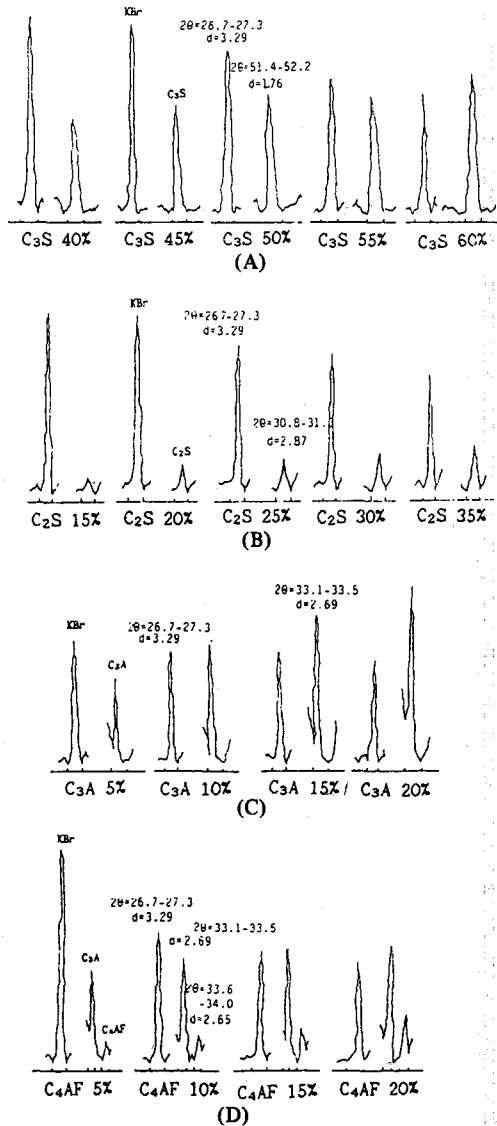
4.1 표준광물의 정량분석 결과

4.1.1 XRD에 의한 정량분석

XRD에 의한 각 합성 clinker의 함량별 측정결과에 대한 peak intensity를 Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 보는 바와같이 각 광물에 대한 각 광물의 함량이 증가함에 따라 각 광물의 peak intensity는 증가하는 경향으로 나타났고, 내부표준물질인 KBr peak intensity는 상대적으로 감소하는 경향이였다. 따라서 각 광물의 peak 면적/내부표준물질의 peak 면적비는 함량증가에 따라 일정하게 증가하였으며, 각 광물의 중량비와 peak 면적비 간에는 각 광물 공히 거의 직선에 가까웠다.

각 광물 peak 면적/내부표준물질 peak 면적비와 각 광물의 중량비로 최소자승법을 이용하여 검량선을 작성하였으며, Fig. 11에 X축에는 각 광물의



(A) C_3S (B) C_2S (C) C_3A (D) C_4AF

Fig. 10. XRD patterns with content change of synthetic standard minerals.

중량비율, Y축에는 면적비를 나타내었다.

5회 반복시험을 통하여 작성된 각 광물의 검량선 식과 상관계수는 다음과 같다.

$$C_3S : y = 0.0714x - 2.4444 \quad r = 0.98$$

$$C_2S : y = 0.0102x - 0.0929 \quad r = 0.98$$

$$C_3A : y = 0.0631x - 0.1949 \quad r = 0.97$$

$$C_4AF : y = 0.1807x - 0.5679 \quad r = 0.97$$

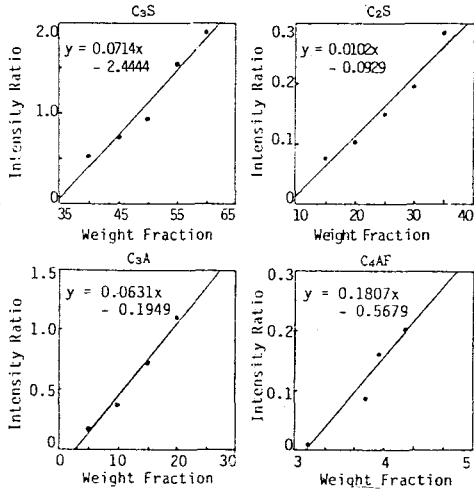


Fig. 11. Calibration curves of clinker standard mineals by XRD.

C₄AF에 대한 검량선은 앞에서 언급한 바와같이 C₄AF 단독광물의 함성이 어려웠기 때문에 C₃A 함량을 구하고 잔량의 함량으로 C₄AF 검량선을 작성하였는데, 예상보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

4.1.2 편광현미경에 의한 정량분석

편광현미경에 의한 clinker 표준광물의 정량분석 결과를 Fig. 12에 나타내었으며, 시험결과 C₃S 경우 XRD에 의해 작성된 검량선보다 오차가 큰 것으로 나타났다. 이것은 C₃S 결정의 경우 파쇄시 결정의 깨어짐으로 현미경에 의한 counting이 어려웠기 때문인 것으로 판단되며, C₃A와 C₄AF의 경우에는 결정구분이 어려워 silicates 결정을 제외한 나머지를 C₃A+C₄AF로 counting 하였기 때문에 오차가 커진 것으로 생각된다.

3회 반복시험을 통하여 작성된 각 광물의 검량선 식과 상관계수는 다음과 같다.

$$C_3S : y = 0.5620x - 7.1400 \quad r = 0.96$$

$$C_2S : y = 0.3620x + 1.6100 \quad r = 0.98$$

$$C_3A + C_4AF : y = 0.3604x + 2.6779 \quad r = 0.95$$

4.2 공장제 Clinker의 광물 정량분석 결과

시료는 당 공장 kiln에서 생산된 clinker를 사용하였으며, 화학분석 결과로 Bogue 식을 이용,

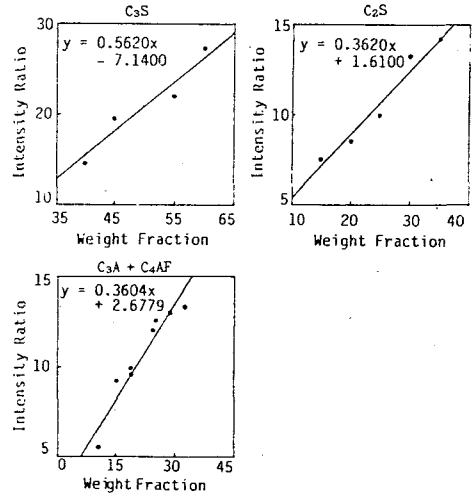


Fig. 12. Calibration curves of clinker standard minerals by polarization microscope.

clinker 광물조성의 함량을 계산하였고, XRD 및 편광현미경에 의해 작성한 검량선을 이용하여 각 광물의 함량을 구한 후, 각 결과를 비교하여 보았다.

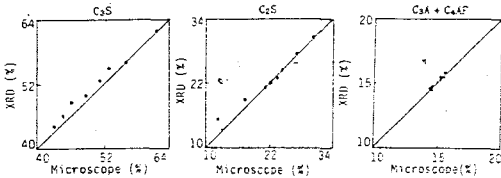
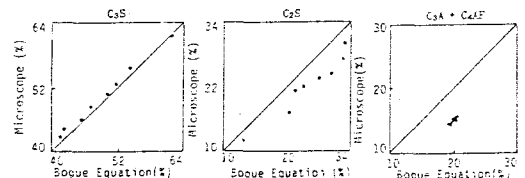
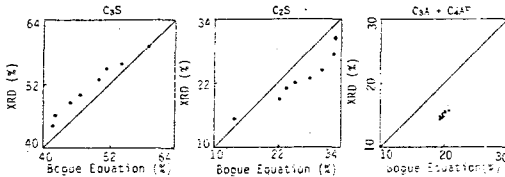
Table 4에 당 공장에서 생산된 클링커의 화학성분 분석결과를 나타내었다. 화학분석 결과 free-lime은 0.47~1.20% 범위에 있었고, 강열감량은 0~0.30%의 범위내에 있었다.

공장생산 clinker에 대한 XRD, 편광현미경 및 Bogue 식에 의한 각 광물의 정량분석 결과는 Table 5와 같다. 또한 Table 5의 결과로 XRD와 편광현미경 분석결과, XRD와 Bogue 식에 의한 분석결과, 편광현미경과 Bogue 식에 의한 분석결과를 Fig. 13, 14, 15와 같이 비교하여 보았다. 각 광물 공히 XRD와 편광현미경에 의한 정량분석 결과는 유사하게 나타났으나, XRD와 편광현미경에 의한 정량분석치와 Bogue 식에 의한 결과는 잘 일치하지 않았다.

Bogue 식은 clinker 광물의 생성온도에서 원료의 화학성분 사이에 완전한 결합이 이루어지고, 냉각시 평형상태가 이루어져 완전한 광물의 결정이 생성된다는 가정하에서 만들어진 식이기 때문에, 실제 이러한 조건이 kiln 내에서 충족되기는 어렵고, 특히 간극질의 경우 냉각과정중 급냉에 의해 액상이 모두 결정으로 되지않고, 유리상으로 존재하기 때문에 Bogue 식에 의해 얻어진 C₃A+C₄AF 함량보

Table 4. Chemical Compositions of Production Clinker by Asia Cement

Composition (%) Sample No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Free-CaO	Ig.-loss
A	22.41	5.69	3.22	63.93	2.55	0.57	1.36	0.09	0.97	0.18
B	22.44	5.76	3.27	64.18	2.52	0.49	1.23	0.11	0.62	0.00
C	22.40	5.50	3.24	64.29	2.56	0.43	1.25	0.16	0.63	0.17
D	22.10	5.61	3.19	64.47	2.54	0.58	1.24	0.12	0.53	0.15
E	21.98	5.53	3.17	64.89	2.45	0.54	1.26	0.06	1.09	0.12
F	21.80	5.47	3.07	64.88	2.55	0.68	1.33	0.08	1.20	0.14
G	21.97	5.30	3.13	65.32	2.46	0.34	1.15	0.08	0.72	0.25
H	21.08	5.46	3.05	65.91	2.29	0.51	1.29	0.11	0.47	0.30

**Fig. 13. Comparison of minerals composition of factory production clinker determined by XRD and polarization microscope.****Fig. 15. Comparison of minerals composition of factory production clinker determined by polarization microscope and their potential composition by bogue equation.****Fig. 14. Comparison of minerals composition of factory production clinker determined by XRD and their potential composition by bogue equation.**

다 XRD, 편광현미경으로 구한 C₃A+C₄AF 함량이 적었다⁴⁾.

이상의 결과에서와 같이 공장생산 클링커에 대해서도 XRD와 편광현미경에 의한 정량분석이 Bogue 식을 이용한 결과보다 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Table 5. Minerals Composition of Factory Production Clinker Determined by XRD and Polarization Microscope and their Potential Composition by Bogue Equation

Item Minerals Sample NO.	X R D				Microscope			Bogue Equation			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A+C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
A	44.39	30.29	8.51	6.92	42.99	30.31	15.81	41.71	32.78	10.56	9.80
B	46.17	27.35	8.89	6.94	45.28	27.06	15.95	42.19	32.51	10.66	9.95
C	48.91	24.49	8.21	6.90	46.20	24.34	15.29	44.90	30.35	10.02	9.85
D	50.05	22.83	8.36	7.07	48.65	23.54	15.67	46.82	28.04	10.40	9.71
E	52.69	22.42	8.33	7.00	51.15	22.16	15.21	50.12	25.21	10.22	9.65
F	54.89	21.29	8.28	6.37	52.98	21.27	14.39	51.59	23.58	10.23	9.34
G	57.04	19.15	8.08	6.45	57.29	17.26	14.85	54.12	22.16	9.68	9.52
H	62.04	13.76	8.24	6.51	61.57	12.82	14.26	61.84	13.78	10.24	9.28

5. 결 론

(1) Clinker 표준광물의 합성결과 C_3S , C_2S , C_3A 의 경우는 미량의 free-lime이 잔존할 뿐 상당히 양호한 각 광물 단독의 결정형태로 합성되었지만, C_4AF 는 광물생성 mechanism의 특성상 단독광물이 아닌 C_3A 광물과 함께 합성되었다.

(2) XRD에 의한 clinker 표준광물의 함량별 정량분석 결과, 함량이 증가함에 따라 각 광물의 검량선 작성용 선정 peak의 면적이 증가하였으며, 작성한 검량선은 거의 직선으로 나타났다.

(3) 편광현미경에 의한 표준광물의 함량별 정량분석 결과, C_3S 와 C_2S 는 관찰이 용이하였으나, C_3A 와 C_4AF 는 구별이 어려워 각각을 counting 하지 못하여, 간극질상($C_3A + C_4AF$)에 대해 검경을 했으며, 각 광물에 대한 검량선은 XRD에서와 같이 거의 직선으로 나타났다.

(4) 공장제 clinker에 대한 정량분석 비교결과, C_3S 함량은 Bogue 식보다 XRD와 편광현미경에 의한 정량분석치가 높았고, C_2S 는 낮게 나타났으며, 간극질(C_3A , C_4AF)의 함량은 Bogue 식에 의한 결과의 경우가 XRD 및 편광현미경에 의한 분석결과보다 상당히 높게 나타났다.

(5) Bogue 식에 의한 이론적인 clinker 광물의 계산법은 소성도와 각 광물에 있어서 미량성분(K_2O , Na_2O , MgO , etc.)에 의한 계산치의 정확도가 떨어지게 되는데, 본 XRD와 편광현미경에 의한 정량분석법을 이용하면 보다 정확하고, 실질적인 clinker 광물의 함량을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

〈참 고 문 헌〉

1. 小野田セメント株式會社 宗田 義明, "X線回折による クリンカー 鑛物の 定量", 七技年報 XXIX 昭50, pp. 39~42.
2. Se-Kyung Chang, Jhun Rhee and Ki-Sung Han, "Quantitative Analysis of Mineral Composition in Portland Cement Clinker by X-ray Diffraction", J. Kore. Cera. Socie., Vol. 23, No. 2, pp. 64~70 (1986)
3. Leslie J. Struble, "Quantitative Phase Analysis of Clinker Using X-ray Diffraction", Ceme. Conc. and Aggre., CCAGDP Vol. 13, No. 2, pp. 97~102 (1991)
4. L. S. Zevin, G. S. Margolina and J. M. Flanbaum, "On The Determination of Belite in Clinker by X-ray Method", Ceme. and Conc. Rease., Vol. 7, pp. 103~104 (1977)
5. G. Goswami, B. N. Mohapatra and J. D. Panda, "Charactrization of Burning Condition of Cement Clinker by X-ray Diffractometry", Ceme. and Conc. Rease., Vol. 21, pp. 1176~1179 (1991)
6. S.L. Sarkar, "Automated Method of Determining Tricalcium and Dicalcium Solicate Phase in Portland Cement Clinker by X-ray Powder Diffractometry", Indian Concrete Journal, pp. 391~398 (1977)
7. 山口悟限, 田中一好, 梶井基彦, "セメント クリンカーの 自記 X線 分析 ピーク의 解析と 鑛物の 定量", セメント 技術年報 XⅢ, 31 pp. 31~33 (1959)
8. 小野吉雄, 飯山敏道, "アリット相의 X線 回折による 研究", 小野田セメント株式會社 研究資料
9. Stuzman P., Lenker S., Kanare J., "Standard Cement Clinker for Phase Analysis", International Cement Microscopy Association, pp. 154~168 (1989)
10. 田中太郎, 内藤隆一, 小野吉雄, "顯微鏡觀察による ボルトランド セメント中の 베리ット", 小野田セメント株式會社
11. Y. Ono, "Microscopical Estimation of Burning Condition and Quality of Clinker", Central Research Laboratory of Onoda Cement, Japon
12. 요업공학원드북, VII. 시멘트, pp. 1626~1634
13. W. A. Gutteridge, "on The Dissolution of The Interstitial Phase in Portland Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 9, pp. 319~324 (1979)
14. F. M. Lea, "The Chemistry of Cement and Concrete", pp. 135~149, Chemical Publishing Company, NY (1971)