

Quantitative Interpretation of Cooling Rate of Clinker and It's Effects on the Cement Strength Development

Chang Bum Kim and Sung Churl Choi*[†]

Research Center of Ssangyong Cement Industrial Co.,Ltd, Daejeon 305-804, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received March 14, 2007; Accepted April 20, 2007)

클링커 냉각속도의 정량적 해석 및 냉각속도가 시멘트 강도발현에 미치는 영향고찰

김창범 · 최성철*[†]

쌍용기술연구소

*한양대학교 신소재공학부

(2007년 3월 14일 접수; 2007년 4월 20일 승인)

ABSTRACT

To evaluate the cooling rate of clinker quantitatively, several clinkers with different cooling rate were made in the laboratory. The X-ray diffraction pattern of Ferrite 002 reflection were measured and the parameters were calculated by using split type pseudo-Voigt function. The X-ray diffraction patterns of the Ferrite phase in the clinkers from cement manufacturing plant were analyzed by using the parameters and the analysis program was developed to calculate the cooling rate quantitatively. The cooling rate coefficients of the clinkers were calculated by using the profile fitting method of the program and the influence of cooling rate on strength was evaluated. The results show that there is a close relation between the cooling rate of clinker and the strength of cement.

Key words : Ferrite phase, X-ray diffraction pattern, Profile fitting, Cooling rate coefficient, Clinker particle size, Compressive strength

1. 서 론

클링커의 출발원료 화학조성이나 생성 광물 함량을 결정하는 여러 성분의 비율을 일정하게 유지하여도 얻어진 클링커, 시멘트의 강도발현 특성은 달라지게 된다. 이것은 클링커를 구성하는 광물의 특성이 소성 및 냉각 과정에서 열적 이력이나 소성 분위기 등 여러 조건에 의해 변화되기 때문으로 추정되지만, 그 복잡성 때문에 이와 관련된 많은 연구들이 단편적인 현상의 파악에 그치고 있어 실제 상업적 클링커의 제조시에 강도발현 특성이 양호한 클링커를 얻기 위한 소성 및 냉각조건을 파악하기가 수월치 않다. 그러나 클링커 특성의 형성에 크게 관여하는 소성 및 냉각 등의 공정상태를 이해 하는데 필요한 인자들을 정량적으로 해석하여 지수화 할 수 있다면 실제 제조공정 조건의 능동적인 제어가 가능해 질 것으로 기대된다.

클링커 특성에 미치는 여러 공정요인 중에서 클링커의

냉각속도는 alite와 belite와 같은 클링커 구성광물의 미세 조직에 영향을 미치고, 이로 인한 강도발현 특성이 변화하는 것은 잘 알려져 있다.¹⁻³⁾ 이러한 광물의 미세조직에 대한 평가는 현미경 관찰을 이용하는 Ono법^{4,5)}이 대표적인 예이다. 그러나 동일한 공정상태에서 생성한 클링커라 할지라도 입자크기, 입자 내·외부 등에 따라 냉각속도는 크게 달라지므로 상업적 생산 클링커는 다양한 냉각상태를 가진 클링커 입자들의 집합체라고 할 수 있으며, 그 중 일부 클링커 박편시료에 대한 현미경 분석을 실시하는 경우 클링커 특성의 대표성 확보가 어려워 현미경 관찰만으로는 냉각상태와 특성, 공정의 관계에 대한 총량적인 해석이 충분치 않은 문제점이 있다. 이의 대체 방안으로 분말X-선 회절법⁶⁾은 시료의 대표성을 확보하는 측면 및 분석오차가 적은 결과를 도출할 수 있다는 측면에서 현미경법의 단점을 해결할 수 있는 유용한 수단으로 판단된다.

본 논문에서는 다양한 냉각상태를 가지고 있는 공장 클링커의 총량적인 냉각속도를 지수화 하기위한 수단으로서 냉각속도를 달리한 실험실적 클링커를 제조하여 X-선 회절 특성을 분석하고 split형 모형함수를 사용한 parameter를 도출하였으며, 이를 이용하여 실제 공장생산 클링커의 생성광물 중 ferrite상의 X-선 회절 패턴을 분해함으로써

[†]Corresponding author : Sung-Churl Choi

E-mail : choi0505@hanyang.ac.kr

Tel : +82-2-2220-0505 Fax : +82-2-2291-6767

클링커의 냉각속도를 정량적으로 산출하는 방법을 프로그램화 하였다. 또한 작성된 프로그램을 이용하여 profile fitting법⁷⁾으로 산출한 공장 클링커의 냉각속도 지수가 시멘트 강도발현에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용원료

Profile fitting에 의한 ferrite상 회절패턴 분해를 위한 profile 함수중의 parameter를 도출 하여 프로그램에 적용하기 위하여 냉각속도를 각각 달리한 실험실적 클링커를 제조하였다. 클링커 원료는 공장 클링커의 조성구와 유사한 클링커 제조를 위해 공장생산 조합 원료를 사용하였으며, modulus조정을 위해 석회석과 규산질 원료를 소량 보정하여 사용하였고, MgO 함량에 따른 ferrite peak의 반가폭 영향을 살펴보기 위해 MgO를 특급시약을 사용하여 보정하였다. Table 1은 클링커 제조를 위해 사용한 조합원료의 화학성분을 나타낸 것이다.

2.2. 클링커 제조

전기로를 이용하여 간극질 생성상태를 달리한 클링커를 제조하였다. 먼저 일정한 크기로 성구한 클링커 원료를 900°C에서 30분 동안 하소 후, 1500°C까지 30°C/min의 승온속도로 승온하여 5분간 유지한 후 1450°C까지 40°C/min로 낮추어 1450°C에서 40분간 유지하였다. 소성 완료후에는 Table 2에서와 같이 냉각속도를 서로 달리하여 각각 급냉(A클링커), 중냉(D클링커), 서냉(F클링커) 클링커를 제조하여 특성을 분석하였다.

2.3. XRD측정

Ferrite상의 X-선 회절 측정용 시료는 클링커 분말을 maleic acid(C₄H₄O₄, EP) 처리하여 간극질을 농축한 것을

사용하였으며, 측정에 사용한 X-선회절 분석기는 Philips사의 PW 1710 generator를 사용하였다. 사용 X-선은 CuK α , 관전압 및 관전류는 40 kV, 30 mV, 발산 및 산란slit는 1.0°, 수광slit는 0.3 mm로 하였고, ferrite상 020의 회절선 측정은 2 θ =11.0°~12.7°의 범위를 스텝 스캔 하였으며, 0.02°의 간격으로 4초간 행하였다. 측정회수는 fitting의 정밀도를 높이기 위해 동일시료에 대해 6회 반복 측정된 데이터의 평균치를 profile fitting의 데이터 값으로 하였다.

2.4. X-선회절 pattern의 profile fitting

클링커를 구성하는 주요광물인 alite, belite, aluminate, ferrite상의 미세조직이 응결, 압축강도 등 시멘트 특성을 지배하는 대표적 특성치라는 것은 주지의 사실이다. 따라서 시멘트 특성을 예측, 관리하기 위해서는 클링커 구성광물의 미세조직을 정확히 판정할 필요가 있다. 이러한 판정법으로 각 클링커 광물의 미세조직에 영향을 미치는 클링커 냉각속도를 ferrite상의 회절선의 변화로부터 판정하는 방법 즉, profile fitting법을 이용하여 다양한 속도로 냉각된 각 구성광물의 집합체로 되어있는 클링커 및 시멘트중의 ferrite상의 X-선 회절 패턴을 사전에 선정해 둔 냉각속도가 다른 여러 실험실 클링커의 X-선 회절 profile로 분해함으로써 그 적분강도 비율로부터 냉각속도를 판정하는 방법에 대해 검토하였다.

Profile fitting법은 Fig. 1과 같이 peak 위치나 형상이 다른 회절선이 서로 겹쳐있는 평균화된 클링커 및 시멘트 중의 ferrite상 020의 X-선 회절 패턴을 상호 냉각속도가 상이한 A, D, F peak 성분들로 분리함으로써 ferrite상(C₄AF)의 생성상태를 평가하여 냉각지수를 산출하는 방법이다.

이러한 원리를 이용하여 ferrite상의 X-선 회절 패턴의 변화를 정량적으로 해석하기 위해 profile fitting법에 의해 background와 각 회절선으로 분리하는 컴퓨터 프로그램을 작성하였다. 프로그램 작성시 ferrite상의 회절패턴 분해를

Table 1. The Chemical Composition of Raw Mixture and Modulus

Chemical composition (%)								Modulus			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI	LSF	HM	SM	IM
14.49	3.43	1.99	41.95	1.77	0.92	0.43	34.42	91.1	2.11	2.67	1.72

Table 2. Sintering and Cooling Condition of Clinker

Sintering and cooling condition			
Sintering condition	30°C/min		40°C/min
	900°C(30 min) → 1500°C(5 min) → 1450°C(40 min)		
Cooling rate	Rapid (A)	Air quenching 1450°C → Room Temperature	
	Moderate (D)	200°C/min	Air quenching 1450°C → 1250°C → Room Temperature
	Slow (F)	20°C/min	Air quenching 1450°C → 1100°C → Room Temperature

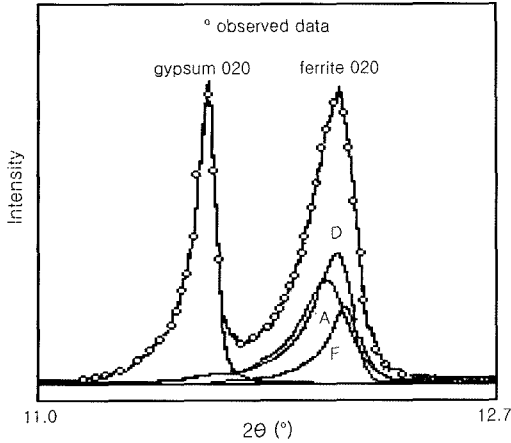


Fig. 1. The example of X-ray decomposition of ferrite 020⁸⁾.

위해 적용한 profile 함수는 split형 pseudo-Voigt 함수⁹⁾로써 이 함수는 peak 정점의 저 각도측과 고 각도측을 따로따로 정의하고 있으며, 저 각도측의 식은 각도×(2θ)의 함수로써 다음과 같이 정의할 수 있다.⁷⁾

$$P(x)_{low} = \frac{(1+A)[\eta_{high} + (1-\eta_{high})(\pi \ln 2)]^{1/2}}{\eta_{low} + (1+\eta_{low})(\eta \ln 2)^{1/2} + A[\eta_{high} + (1-\eta_{high})(\pi \ln 2)]^{1/2}} \times \left\{ \eta_{low} \frac{2}{\pi W} \left[1 + \left(\frac{1+A}{A} \right)^2 \left(\frac{x-T}{A} \right)^2 \right]^{-1} + (1-\eta_{low}) \frac{2}{W} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[- \left(\frac{1+A}{A} \right)^2 \ln 2 \left(\frac{x-T}{W} \right)^2 \right] \right\} \quad (x \leq T)$$

- 여기서 W : Full-Width at half-maximum
- η_{low}, η_{high} : Component ratio of Lorentz and Gauss function in the part of low and high angle (Ratio of Lorentz function component)
- A : Ratio of Full-Width at half-maximum in the part of low and high angle (W_{low}/W_{high})
- T : Angle of the peak(2θ)

마찬가지로 고 각도측의 $P(x)_{high}$ 는 η_{low} 와 η_{high} 를 바꿔 넣고, A 를 $1/A$ 로 하면 얻을 수 있다. 모함수에서 background를 $BG(x)$, 각 회절선의 적분강도(integrated intensity)를 I_i 로 하면, $Y(x) = BG(x) + \sum(I_i \times P(x)_i)$ 가 계산에 의해 그려지는 회절패턴이 된다. 따라서 작성된 프로그램을 이용하여 상기 함수에 의해 측정으로부터 얻은 적분강도 $Y(x)_{obs}$ 와 계산으로부터 얻은 적분강도 $Y(x)_{cal}$ 와의 잔차 제곱합을 최소화 하는 해 찾기로 profile fitting을 실행하였다. 프로그램에서 background 함수는 일차식으로 하였고, $K\alpha_1$ 과 $K\alpha_2$ 의 회절강도는 1:0.497로 profile은 동일하게 적용하였으며 fitting의 적합성 정도 R_{wp} 는 다음식으로 정의하여 fitting의 정확도에 대한 척도로 활용하였다.

$$R_{wp} = 100 \left\{ \sum w_i [P(x)_{obs} - P(x)_{cal}]^2 \times [\sum w_i P(x)_{obs}^2]^{-1} \right\}^{1/2}$$

where, $w_i = P(x)_{obs}^{-1}$

2.5. 압축강도시험

냉각속도가 서로 다른 클링커의 강도특성을 평가하기 위하여 클링커에 화학 이수석고를 SO_3 의 wt%가 2.0%가 되도록 첨가한 후, 실험실 분쇄 밀을 사용하여 분말도는 Blaine치가 $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이 되도록 분쇄한 후 KS L 5105에 의하여 압축강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제조클링커의 미세조직

Fig. 2는 2.2항에 나타낸 바와 같이 냉각속도를 달리하여 클링커의 냉각속도를 달리하여 제조한 클링커의 간극상에 대한 미세조직 관찰 결과이다.

냉각속도의 차이에 따라 alite 및 beilte상의 간극에 소성시 용액상으로 존재하던 간극상(aluminate상+ferrite상)의 미세조직 발달이 상이한 것을 확인할 수가 있다. 간극상 중 비교적 흑색으로 관찰되는 aluminate상의 미세조직이 냉각속도가 빨라짐에 따라 매우 치밀하게 생성되며, 냉각속도가 느릴수록 aluminate상의 미세조직이 크게 생성하는 것이 확인되었다. 이는 클링커 냉각속도에 따른 간극상의

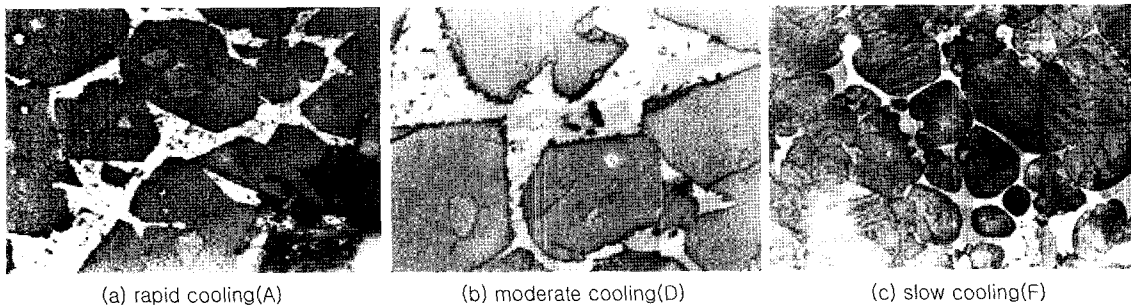


Fig. 2. Microstructures of interstitial phase of clinker with different cooling rate.

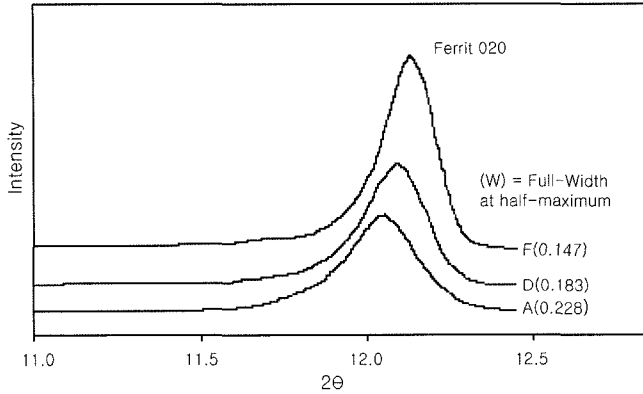


Fig. 3. The variation of X-ray pattern of ferrite phase by cooling rate.

핵 생성 및 결정성장 속도의 차이에 기인한 것으로 판단되며, 이러한 광물생성 특성차이가 시멘트의 특성차이에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 한편 이상의 클링커를 사용하여 X-선 회절분석을 통한 profile fitting을 위한 parameter 도출을 행하였다.

3.2. Parameter 도출 및 profile fitting

Fig. 3는 냉각속도를 달리하여 제조한 실험실적 클링커(A, D, F)에 대한 ferrite상 020의 분말 X-선 회절 패턴 변화를 비교하여 나타낸 그림이다. 급냉된 클링커(A) 일수록 회절선이 broad화하고 반가폭 값(W⁰)이 커지며 peak 위치(2θ)가 저 각도측으로 이동하였다. 반대로 서냉된 클링커(F) 일수록 회절선이 sharp하고 반가폭 값(W⁰)이 작아지며 peak 위치가 고 각도측으로 이동하였다. 이와 같이 냉각속도에 따라 ferrite상의 격자정수(peak 위치)나 결정성(peak 형상)이 변하는 것을 알 수 있으며, 이러한 ferrite상의 회절선의 계통적인 변화로부터 ferrite상의 회절선이 클링커의 냉각속도의 지표가 되고 냉각속도에 의해 변화하는 간극질이나 belite의 미세조직과 깊게 관계되어 있는 것으로 판단된다.¹⁰⁾

실제 상업적으로 생산되는 공장 클링커는 클링커 입자의 크기 및 부위, 즉 표면부 및 내면부 등에 따라 서로 다른 냉각상태를 갖는 집합체라 할 수 있다. 따라서 공장 클링커는 ferrite상의 회절패턴이 실제로는 격자정수나 결정성 등이 서로 다른 ferrite상의 회절선에 의해 형성되어 있다고 할 수 있다. 따라서 사전에 냉각상태에 따라 간극질의 석출상태를 달리하는 클링커(A, D, F)의 parameter를 도

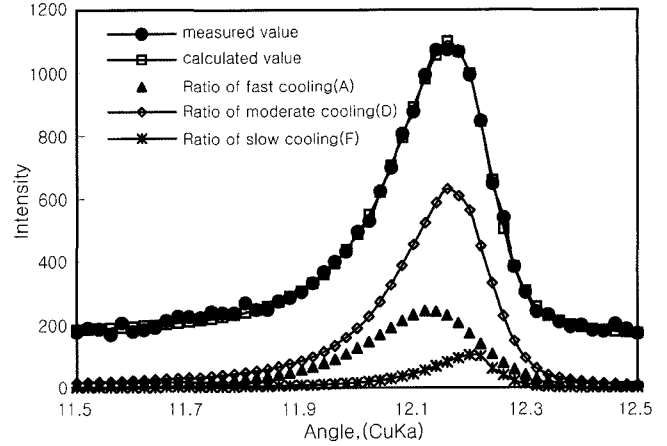


Fig. 4. The example of profile fitting of ferrite phase of clinker.

출함으로써, peak위치나 형상이 서로 다른 회절선이 겹쳐 있는 평균화된 공장 클링커 및 시멘트의 ferrite상 020의 회절패턴을 분해할 수 있게 된다. 결국 실험실적으로 제조한 클링커중 급냉 클링커인 A클링커 성분의 적분강도비를 산출할 수 있으며, 산출된 적분강도 비율을 지수화함으로써 공장 클링커의 냉각상태를 정량적으로 해석하는 것이 가능하게 된다.

냉각속도를 A, D, F(급냉, 중냉, 서냉)로 하여 제조한 클링커 각각에 대해 3.3항의 XRD 측정 조건으로 측정된 후, 작성된 프로그램을 이용하여 ferrite상 020의 회절선 profile fitting을 실행함으로써 Table 3에 나타낸 바와 같이 각 클링커에 대한 split형 모형함수중의 parameter값을 도출 하였다.

상기의 간극질 석출상태가 서로 상이한 클링커에 대해 도출한 parameter를 이용하여 평균화된 공장 클링커 및 시멘트중의 ferrite상의 회절 패턴을 각각 A, D, F성분의 적분강도 비율로 분해할 수 있었다. 프로그램에 의한 profile fitting시에는 상기 parameter치와 회절 peak 위치(2θ)의 간격을 고정하고 다만 2θ의 절대값은 가변인자로 하여 실측 데이터로 fitting하게 하였다. fitting의 정확도를 나타내는 R_{wp}는 3% 전후에서 수행되었으며, 다수의 평균화된 클링커에 대해 ferrite상의 fitting을 시행한 결과 분해후의 A, D, F의 회절선의 강도비는 여러 가지로 변화하였고, 예를 들면 급냉 클링커 A의 비율(이하 냉각지수로 표기)은 10~50%의 범위에서 변동하였다.

한편 MgO, K₂O 등 미량성분의 함량에 따른 반가폭 변화가 예상되어 MgO 및 K₂O 함량을 변화시켜 실험실적으로 제조한 클링커에 대해 profile fitting을 시행하여 이

Table 3. Values of Parameters In Split Type Pseudo-Voigt Function

Sample	W(°)	η _{low}	η _{high}	A	Peak angle Difference(°)
A Clinker	0.228	0.848	0.583	1.549	(A~D Clinker) 0.042
D Clinker	0.183	0.867	0.552	1.909	
F Clinker	0.147	0.894	0.466	2.141	(D~F Clinker) 0.036

들의 반가폭 변화를 살펴본 결과 공장 클링커 수준인 MgO 2.7~3.3%, K₂O 1.0~1.7% 범위에서 함량 증가에 따른 반가폭 변화는 무시할 정도로 작게 나타났다. 따라서 본고에서는 평균화된 공장 클링커의 profile fitting시 이들 미량 성분들의 영향은 보정하지 않았다.

결과적으로 냉각속도를 달리하여 제조한 클링커의 parameter를 도출하고, 작성된 프로그램을 이용하여 profile fitting을 실행하여 급냉 클링커 A의 성분 비율인 냉각지수를 산출함으로써 평균화된 공장 클링커의 냉각상태를 정량적으로 평가하는 것이 가능하였다. 따라서 냉각조건에 따라 다양하게 변화되는 공장 클링커의 냉각상태를 정량적으로 평가하고, 이들 냉각상태가 클링커 및 시멘트의 특성에 미치는 영향에 대한 평가의 기법으로 활용할 수 있을 것으로 기대되었다. Fig. 4는 작성된 프로그램을 활용하여 실시한 클링커의 profile fitting의 결과를 나타낸 것으로 실제 ferrite상의 X선 측정치에 의한 결과와 A, D, F 성분의 적분강도 비율에 의한 계산치가 일치

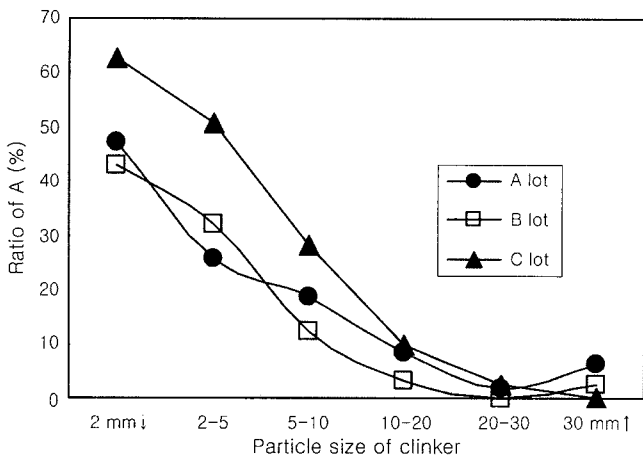


Fig. 5. Relationship between particle size of clinker and cooling rate coefficient.

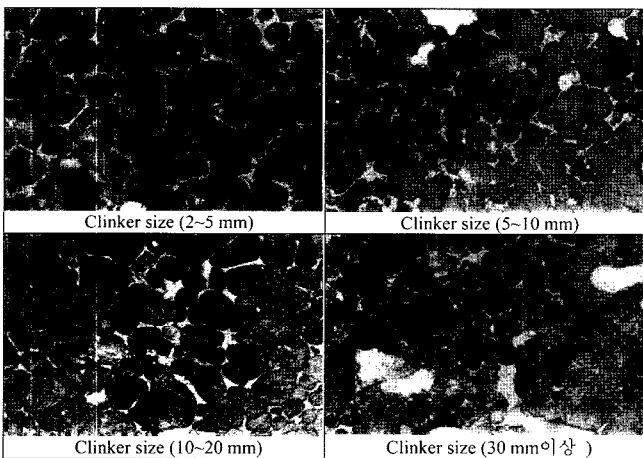


Fig. 6. Microstructures of clinker with different clinker particle size.

하고 있음을 확인할 수 있다.

3.3. 클링커 입자크기와 냉각지수의 관계

공장제조 클링커의 입자크기와 profile fitting에 의해 산출한 냉각지수와와의 상관관계를 살펴보기 위해 S사 Y공장의 클링커 시료를 입수하여 일정 입자크기 구간으로 채분리한 후, 각 입자크기별 클링커에 대해 냉각지수를 산출하였다. 분석은 생산lot별로 채취한 세 종류의 클링커 시료를 대상으로 하였다. Fig. 5는 클링커 입자크기별 profile fitting에 의해 산출한 적분강도A의 비율, 즉 냉각지수와와의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 6은 클링커 입자크기별 광물발달 상태를 현미경으로 관찰한 결과이다.

클링커 입자크기별 냉각지수 산출 결과 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 클링커 입자 크기가 작을수록 냉각지수가 높게 나타났다. 이는 클링커의 입자 크기가 작을수록 소성 후 냉각속도가 빨라지기 때문에 나타나는 현상이며, 동일 시료에 대해 Fig. 6의 광물조직 관찰 사진을 비교해 보면, 클링커 입자 크기가 작을수록 belite광물의 결정외각이 clear하며, 간극질의 석출 상태도 fine한 반면 입자 크기가 클수록 belite의 결정외각에 일부 분해현상이 나타나고 간극질의 결정크기도 coarse해 지는 것으로 볼 때 클링커 입경 크기가 작을수록 냉각 속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이와 같이 profile fitting에 의한 냉각지수 산출 결과와 클링커 입자 크기 및 미세조직 관찰 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 공장 클링커의 냉각속도가 입자 크기와 상관관계가 크다는 것을 증명하고 있는 동시에 클링커의 ferrite상에 대한 X선회절 패턴 분해법이 클링커의 냉각속도 및 그것에 따라 변화하는 간극질 결정생성상태를 정량적으로 평가하는 방법으로 적합함을 보여주는 결과로 판단된다.

3.4. 클링커 냉각지수와 압축강도의 관계

입자 크기별 클링커 시료에 대하여 KS L 5105 방법으로 측정된 28일 양생후의 몰탈 압축강도와와의 상관성을 분

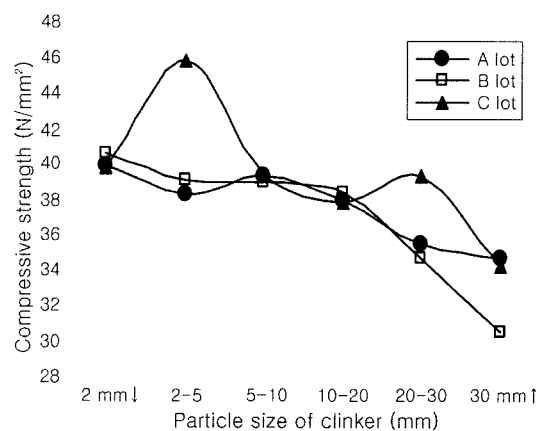


Fig. 7. Relationship between particle size of clinker and compressive strength of cement.

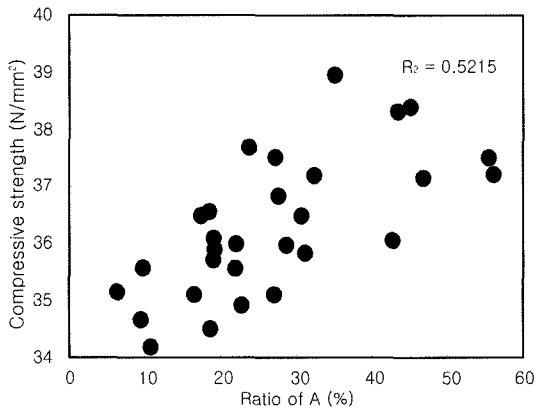


Fig. 8. Relationship between cooling rate coefficient and compressive strength of cement.

석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 클링커 입자 크기와 압축강도 사이에는 강도발현 특성 변화의 산포 요인이 크게 내재된 공장제조 클링커 임에도 불구하고 매우 큰 상관성을 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 클링커의 입자 크기가 작을수록 클링커 소성 후 냉각이 빠르게 진행됨으로써 클링커 구성광물의 생성특성이 양호해졌으며, 이로 인한 클링커 광물의 수화활성 증대가 압축강도특성의 증진으로 나타난 결과로 판단된다.

또한 다양한 클링커 입자크기 및 냉각속도가 상이한 집합체로 구성된 공장 클링커의 냉각속도와 압축강도와의 상관성을 살펴보았다. 비교 대상으로는 공정조건에 따라 수시로 특성이 변동되는 클링커를 채취하여 분석하였다. 시료 채취 시에는 입자크기에 치우침이 없도록 주의하였으며, 분석은 채취 시료를 일정량 축분하여 사용하였다.

Fig. 8은 채취한 공장 클링커의 냉각지수와 압축강도와의 상관성을 보여주는 그림이다. 분석결과 공장 클링커의 냉각상태의 변동이 강도와의 상관성이 상당히 큰 결과로 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이와 같이 공정의 조건에 따라 수시로 변동하는 클링커의 냉각상태를 객관적으로 정량화할 수 있는 분석기법을 활용함으로써 클링커 및 시멘트의 압축강도 발현특성을 예측하고 판단할 수 있는 지표로 활용이 가능할 것으로 보인다.

4. 결 론

냉각속도를 변화시켜 간극질의 결정상태가 달라 지도록 클링커를 제조하여 이들 클링커의 분말 X-선의 profile fitting방법을 검토하였다. 이를 위해 pseudo-Voigt함수를 이용한 profile fitting 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램을 이용하여 공장 클링커의 냉각지수를 산출하였으며, 이들 냉각지수가 압축강도 발현특성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 냉각속도를 달리한 ferrite상 회절선의 형상은 냉각속

도 상승에 따라 broad화 하고 반가폭이 증가 하였으며, 회절peak의 위치가 저각도 측으로 이동하였다. 결국 냉각속도에 따라 클링커 광물 중 ferrite상의 회절선의 peak위치나 형상이 크게 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

2. Ferrite상의 생성상태를 달리하는 실험실적 클링커를 제조하여, 각 X선 회절pattern 의parameter를 도출함으로써 이들 parameter를 이용한 profile fitting 프로그램을 작성하였으며, 작성된 프로그램을 이용하여 냉각속도를 달리하는 여러 집합체로 구성된 공장 클링커에 대해 냉각지수를 정량적으로 산출할 수 있었다.

3. 클링커 입자 크기별 냉각지수를 비교해 본 결과, 입자크기가 작을수록 냉각지수가 크게 나타났으며, 입자 크기에 따른 냉각지수가 시멘트 압축강도와의 상관성이 상당히 큰 것으로 나타났다. 또한 평균화된 공장 클링커에 대한 냉각지수와 압축강도와의 상관성도 큰 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

1. J. C. Taylor and L. P. Aldridge, "Full-Profile Rietveld Quantitative XRD Analysis of Portland Cement, Standard XRD Profiles for the Major Phase Tricalcium silicate," *Powder Diffraction*, **8** [3] 138-44 (1993).
2. H. Moller, "Standard Less Quantitative Phase Analysis of Portland Cement Clinkers," *World Cement*, **26** [9] 75-84 (1995).
3. A. I. Boikova, "Chemical Composition of Raw Materials as the Main Factor Responsible for Composition Structure and Properties of Clinker Phase," *Proc 8th ICCG*, **1** 19-33 (1986).
4. Y. Ono, "Microscopic Analysis of Clinker," pp. 1-11, Hawaiian Seminar on Microscopy of Clinker, 1975.
5. Y. Ono, "Microscopy for the Quality Control of Cement," *J. Res. Onoda Cement Co.*, **32** [104] 110-12 (1980).
6. G. J. Stanisz, J. M. Holender, and J. Soltys, "X-Ray Diffraction Profile Analysis of Powdered Samples," *Powder Diffraction*, **4** [2] 70-3 (1989).
7. H. Toraya, "Array-Type universal Profile Function for Powder Pattern Fitting," *J. Appl. Cryst.*, **23** 485-491 (1990).
8. M. Ichikawa and Y. Komukai, S. Ikeda, "Estimation of Clinker Cooling Rate by XRD Pattern Decomposition of Ferrite Phase and It's Correlation with Strength Development," *JCA Proceedings of CEMENT & CONCRETE*, **49** 8-13 (1995).
9. M. Ichikawa, S. Ikeda, and Y. Komukai, "Measurement of The Phase Ratio of M3 to M1 of Alite and It's Influence on Strength Development," *JCA Proceedings of CEMENT & CONCRETE*, **48** 76-81 (1994).
10. Y. Ono, "Microscopical Estimation of Burning Condition and Quality of Clinker," 7th International Congress on the Chemistry of Cement, II 1206-11 (1980).