

등가재령방법에 의한 혼화재 종류별 콘크리트의 압축강도 증진해석

Estimation of the Compressive Strength of the Concrete incorporating Mineral Admixture based on the Equivalent Age Method

한민철*

Han, Min-Cheol

한천구**

Han, Cheon-Goo

Abstract

This paper is to investigate the effect of the curing temperature on strength development of concrete incorporating cement kiln dust (CKD) and blast furnace slag (BS) quantitatively. Estimation of the compressive strength of the concrete was conducted using the equivalent age equation and the rate constant model proposed by Carino. Correction of Carino model was studied to secure the accuracy of strength development estimation by introducing correction factors regarding rate constant and age. An increasing curing temperature results in an increase in strength at early age, but with the elapse of age, strength development at high curing temperature decreases compared with that at low curing temperature. Especially, the use of BS has a remarkable strength development at early age and even at later age, high strength is maintained due to accelerated pozzolanic activity resulting from high temperature. Whereas, at low curing temperature, the use of BS leads to a decrease in compressive strength. Accordingly, much attention should be paid to prevent strength loss at low temperature. Based on the strength development estimation using equivalent age equation, good agreements between measured strength and calculated strength are obtained.

키워드 : 혼화재, 킬른더스트, 등가재령, 강도증진, 양생온도

Keywords : mineral admixture, cement kiln dust, equivalent age, strength development, curing temperature

1. 서론

현재 건설공사용 레미콘 생산에 있어 물성개선, 경제성 성취 목적으로 주로 이용되고 있는 혼화재로는 플라이애쉬(이하 FA)와 고로슬래그 미분말(이하 BS) 등이 있다.

그런데, 이러한 FA 및 BS와 같은 혼화재를 사용한 콘크리트의 성상에 대해서는 이미 국내외적으로 많은 연구가 진행되어 충분한 연구실적을 보유하고 있으며 전세계적으로도 다수의 실용화 실적이 보고되고 있다.¹⁾

최근 펄자 등은 시멘트를 생산하는 과정 중 클링커를 소성하는 과정에서 발생하는 시멘트 킬른더스트(이하 CKD)의 활용방안에 대한 일련의 연구를 진행한 바 있다.²⁾ CKD는 시멘트 제조공정에서 석회석 등 원료를 분쇄한 후 클링커 소성과정에서 발생하는 비산분진을 포집한 미세입자를 말하는데, 생산량은 시멘트 총 생산량의 7~10% 정도로서 미국의 경우 일년에 약 4천1백만톤 정도가 발생되어 이중 3천3백만톤 정도는 매립되고 75만톤 정도만이 재활용되는 것으로 보고되고 있다.³⁾ 우리나라의 경우 정확한 통계치는 제시되고 있지 않고 있으며 과거에는 대기중으로 방출하여 환경오염의 주범이 되었으나, 현재는 백필터 등으로 포집하여 대부분 킬른에 재투입하여 사용하고 있는 실정이다.

일반적으로 FA 및 BS는 저온환경에서 응결지연으로 인한 초기강도 발현의 문제점이 지적되고 있는데 비하여, CKD는 검토 결과 주성분이 탄산칼슘으로 저온에서의 응결지연은 거의 발생하지 않고, 초기강도 발현에도 효과가 있는 것으로 나타나 향후 결합재로서의 활용성이 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 전술한 BS 및 CKD 등의 혼화재를 사용한 콘크리트의 응결 및 강도발현에 미치는 온도의존성에 대한 정량적 평가를 위하여 등가재령 방법을 이용하여 양생온도에 따른 콘크리트의 강도증진 해석을 실시함으로써 실무조건에서 혼화재를 사용한 콘크리트의 효율적인 압축강도 관리방법을 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 우선 배합사항으로는 W/B 45%에 대하여 CKD 및 BS를 각각 OPC에 10%로 치환하는 것으로 하였고, 이때 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 각각 150 ± 20 mm, $4.5 \pm 1.5\%$ 가 되도록 SP제 및 AE제를 조절하여 배합설계를 실시하였다. 여기서, CKD 치환율은 기존의 연구결과에 따르면 10%이상 치환할 경우 압축강도 저하현상이 발생할 우려가 있어 10%로 결정하였다.

한편, 양생온도의 경우 실무현장에서 일반적으로 접하게 되

* 정희원, 청주대학교 건축공학부 전임강사, 공학박사

** 정희원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

는 조건을 고려하여 5, 20, 35℃의 3수준으로 계획하였다.
표 2는 콘크리트의 배합사항을 나타낸 것이다.

표 1. 실험계획

실험요인					실험사항	
W/B (%)	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)	혼화제 종류 및 치환율	양생 온도 (℃)	굳지않은 콘크리트	경화 콘크리트
45	150±25	4.5±1.5	• OPC • CKD (10%) • BS (10%)	5 20 35	슬럼프 슬럼프 플로우 공기량 단위용적질량 응결시간	압축강도

표 2. 콘크리트의 배합사항

기호	W/B (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	SP/C (%)	AE/C (%)	질량배합(kg/m ³)			
						C	B	S	G
OPC	45	175	43	0.10	0.002	389	0	728	999
CKD				0.30	0.003	350	38.9	726	996
BS				0.30	0.004	350	38.9	727	998

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 국내산 A사의 보통포틀랜드시멘트로서 그 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간 (분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,265	0.15	210	300	22.0	28.9	38.9

CKD는 국내산 A사에서 시멘트 제조과정중 발생한 미립분을 백필터로 포집한 것을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 4와 같다. 한편, BS는 포항제철소산을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 5와 같다.

표 4. CKD의 물리적 성질 및 화학성분

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	LOI	SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
2.67	8,200	38.58	9.65	3.70	1.54	43.60	1.40	0.77	0.35	0.06

표 5. BS의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	화학성분(%)			
		MgO	SO ₃	강열감량	염화물 이온
2.89	4,650	5.90	2.78	0.5	0.001

골재로써 잔골재는 세척사를 사용하였고, 굵은골재는 경기도 광주산 25mm 부순골재를 사용하였는데, 각각의 물리적 성질은 표 6과 같다.

표 6. 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm ³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	0.08mm체 통과량(%)
잔골재	2.58	2.89	1.12	1,614	1.15
굵은골재	2.58	6.73	1.20	1,584	0.10

혼화제로서 고성능 감수제는 국내산 D사의 나프탈렌계, AE제는 빈졸계를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 7과 같다.

표 7. 고성능 감수제의 물리적 성질

주성분	상태	색상	PH	밀도 (20℃)	점도 (mPas)	표준사용량(C×%)
나프탈렌계	액상	암갈색	7±2	1.02	13.2	0.5

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저, 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하여 혼합하였다.

슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였고, 슬럼프 플로우우는 KS F 2594의 규정에 따라 실시하였으며, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409, 응결시간은 몰드 제작후 종결 완료시까지 5, 20 및 35℃가 유지되는 기중 양생조에서 배치하여 KS F 2436에 의거 측정하였다.

한편, 압축강도는 KS F 2403의 규정에 의거 공시체를 제작하여 KS F 2405 규정에 따라 측정하였는데, 공시체의 양생방법은 공시체 제작후 양생온도 5, 20, 35℃가 유지되는 양생실에 공시체를 1일간 보관 후 탈형하고, 동일한 온도조건의 수중양생조에서 측정재령까지 양생하였다.

3. 이론적 고찰

3.1 적산온도

적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도와 시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시하는 함수로서, 일정기준온도 이상에서의 양생온도와 시간함수의 조합을 의미한다. (식(1) 참조)

$$M = \int_0^t H(T) dt \quad (1)$$

여기서,

M : 적산온도(℃·day)

H(T) : 적산온도 함수

적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형 관계식인 식 (2)와 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응속도식 (3)을 이용한 적산온도식인 등가재령식으로 표현되는데, 등가재령은 식(4)와 같이 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20℃)에서의 양생시간을 의미한다. 등가재령식은 식 (5)에 제시되어 있다.

1) 온도와 재령에 의한 선형 적산온도

$$M = \int_0^t (T_c - T_0) dt \quad (2)$$

여기서,

- M : 적산온도 (°C · day)
- T_c : 시간 t 동안의 온도 (°C)
- T₀ : 기준온도 (일반적으로 -10°C)

2) Arrhenius의 화학 반응속도에 의한 적산온도

$$k_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서,

- k_T : 속도상수
- A : 빈도계수
- E_a : 결빙기 활성화 에너지 (KJ/mol)
- R : 가스 상수 (8.314J/mol · K)
- T : 절대온도 (° K, 273+°C)

$$t_e = \frac{\int_0^t H(T) dt}{H(T_r)} \quad (4)$$

여기서,

- H(T) : 양생온도 T에서의 적산온도 함수
- H(T_r) : 양생온도 20°C에서의 적산온도 함수

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \quad (5)$$

여기서,

- t_e : 등가재령 (일)
- T_r : 20°C에서의 절대온도 (293° K)
- T : 양생온도 T₀에서의 절대온도 (° K, 273+°C)

3.2 콘크리트의 강도증진해석 모델

본 연구에서 적용한 강도증진 해석모델은 등가재령을 이용하는 쌍곡선 모델인 Carino 모델식을 적용하였다.

양생온도에 따른 콘크리트의 강도증진해석을 위하여는 강도와 적산온도와의 관계가 필요한데, 적산온도에 의한 강도증진 해석은 적산온도에 의하여 온도와 재령의 복합적인 효과가 정량화된 후 적산온도를 강도의 환산 지수로 적용되기 시작하였다.

Bernhardt⁴⁾는 콘크리트의 임의재령 t에서의 강도발현율 dS/dt 는 강도 S와 온도 T의 함수로 가정이 될 수 있는데(식 (6) 참조), 경험적 근거에 의거하여 아래 식(7)과 같은 관계식을 제시하였고, 콘크리트의 상대강도가 콘크리트의 미수화된 부분의 크기와 비례하며 시멘트의 수화시 이를 지표화하는 비례상수로서 반응율 상수(k)를 도입하였다(식 (8)참조).

$$dS/dt = f(S) \cdot k(T) \quad (6)$$

여기서, f(S) : 강도 함수

k(T) : 온도 함수

$$f(S) = Su[1 - (S/Su)]^2 \quad (7)$$

여기서, S_u : 무한재령에서의 한계강도

$$\frac{d(S/S_u)}{dt} = k\left(1 - \frac{S}{S_u}\right) \quad (8)$$

여기서,

- S : 콘크리트강도
- S_u : 한계강도
- k : 반응율 상수(rate constant)

한편, Carino⁵⁾는 쌍곡선함수의 회귀모델은 지수함수보다 정확한 예측값을 얻을 수 있음을 밝혀냈고, 시멘트의 수화반응 과정시 잠재기(dormant period)를 설명할 수 있는 세 번째 변수를 도입하여 다음과 같은 모델을 제시하였다. 이 식에서 강도 증진은 t₀에서 시작되며 응결기간 동안의 점진적인 강도증진은 고려되지 않는다. 여기서 S_u, k_r, t₀는 최소제곱법에 의한 회귀 분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{S_u k_r (t - t_0)}{1 + k_r (t - t_0)} \quad (9)$$

여기서,

- S : 재령 t에서의 강도
- S_u : 한계강도
- k_r : 반응율 상수(rate constant)
- t : 재령
- t₀ : 강도증진이 시작되는 재령

본 연구에서는 시멘트 개개입자의 수화도는 시간 및 rate constant의 함수와 지수함수 관계로 가정하고 Carino 모델식을 수정하여 식 (10)과 같은 식을 도입하므로써 강도증진해석을 실시하였다.

$$S = \frac{S_u [k_r (t - t_0)]^{\frac{1}{\alpha}}}{1 + [k_r (t - t_0)]^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (10)$$

여기서 : α : 실험상수

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 1 및 그림 2는 굳지않은 콘크리트의 실험결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제조한 콘크리트의 경우 배합설계를 실시한 것이므로 목표 슬럼프 150±20 mm, 목표공기량 4.5±1.5 % 에 모두 만족하였는데, 목표슬럼프를 만족하기 위한 고성능 감수제 사용량은 CKD 및 BS의 경우 공히 OPC를 사용한 경우보다 증가하였는데, CKD의 경우 입자가 각이 지고 공극충전에 의한 용적증가로 과도한 점성이 발생하여 유동성이 저하함에

따라 고성능 감수제 사용량이 증가한 것으로 판단된다.

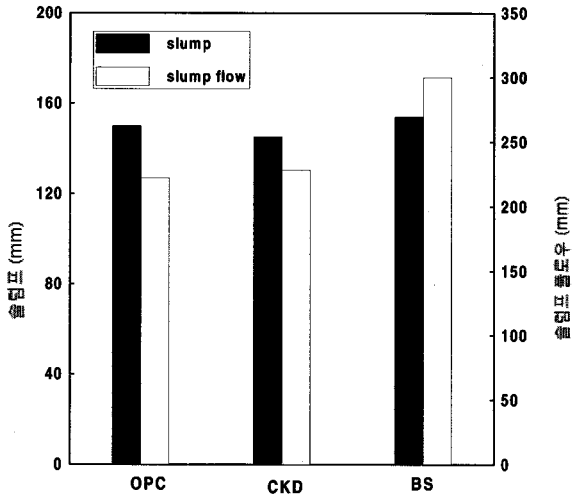


그림 1. 혼화제 종류별 유동성

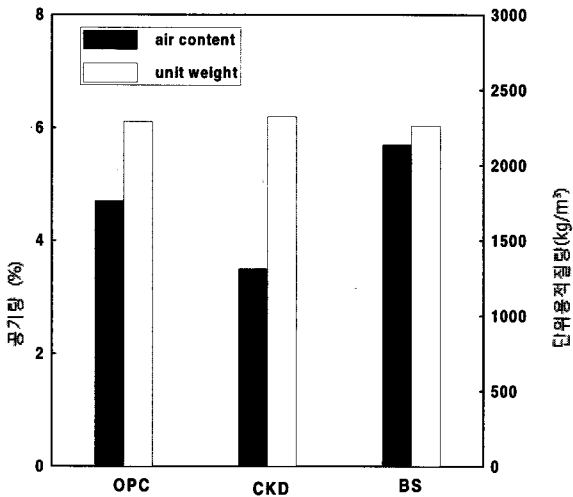


그림 2. 혼화제 종류별 공기량

4.2 응결특성

그림 3은 양생온도별 시간경과에 따른 관입저항값을 나타낸 것이다.

전반적으로 양생온도가 높아질수록 응결시간은 촉진되는 것을 볼 수 있었는데, 양생온도 20°C 및 35°C의 경우 OPC에 비해

여 혼화제를 사용한 경우 약간 지연되는 것으로 나타났으나, 큰 차이는 아닌 것으로 분석되며, 혼화제 종류별로는 상호간에 큰 차이를 보이지 않았다.

그러나 양생온도 5°C의 경우 OPC에 비하여 CKD를 사용한 경우 3시간, BS를 사용한 경우 8시간 정도 응결이 지연되어 저온환경에서 혼화제를 사용할 경우 응결이 크게 지연되는 것으로 나타났다. 단 CKD를 사용한 경우에는 지연폭이 여타의 경우보다 짧은 것으로 나타났는데, CKD를 치환할 경우 OPC에 비해 단위 시멘트량 감소에 기인한 응결시간 지연 및 CKD의 탄산칼슘에 의한 초기 수화반응을 촉진시키는 두가지 반응의 복합작용으로 인해 응결지연 폭이 다소 작은 것으로 사료되며, BS를 치환한 경우는 저온환경에서의 잠재수경성 반응을 일으키는 자극제의 발생이 늦어짐에 기인하여 응결이 크게 지연된 것으로 판단된다.

따라서 본 연구결과에 의해 실무현장에서 BS를 사용할 경우 특히 저온환경에서는 응결시간 지연에 따른 고려가 필요할 것으로 사료된다.

4.3 압축강도 특성

그림 4는 양생온도별 혼화제를 치환한 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 재령이 증가할수록 양생온도가 높을수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 혼화제 종류에 따라서는 양생온도 20°C의 경우 초기재령에서는 OPC, CKD, BS의 순서로 압축강도가 크게 나타났으나, 28일 재령에서는 OPC, BS, CKD 순으로 나타났는데, BS의 경우 재령 7일 이후부터 강도가 증가하여 28일에서는 플레인과 거의 차이가 없는 것을 알 수 있었다.

한편 양생온도별로는 양생온도가 높아질수록 혼화제 종류에 관계없이 초기압축강도는 증가하나, 이후 재령이 경과할수록 강도증진이 둔화됨을 알 수 있는데, 35°C의 경우 OPC 및 CKD는 14일 전후에서 20°C의 강도보다 저하하는 강도역전(cross-over effect)이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

그러나, BS의 경우 고온에 의해 촉진된 잠재수경성반응에 기인하여 여타의 경우보다 높은 강도발현을 나타냈으나, 5°C에서는 고온양생 조건의 경우에 비하여 초기강도발현이 낮은 뿐만 아니라, 재령이 경과하여도 강도발현폭이 크지 않아 저온조건에서 BS의 사용에 주의가 필요할 것으로 사료된다.

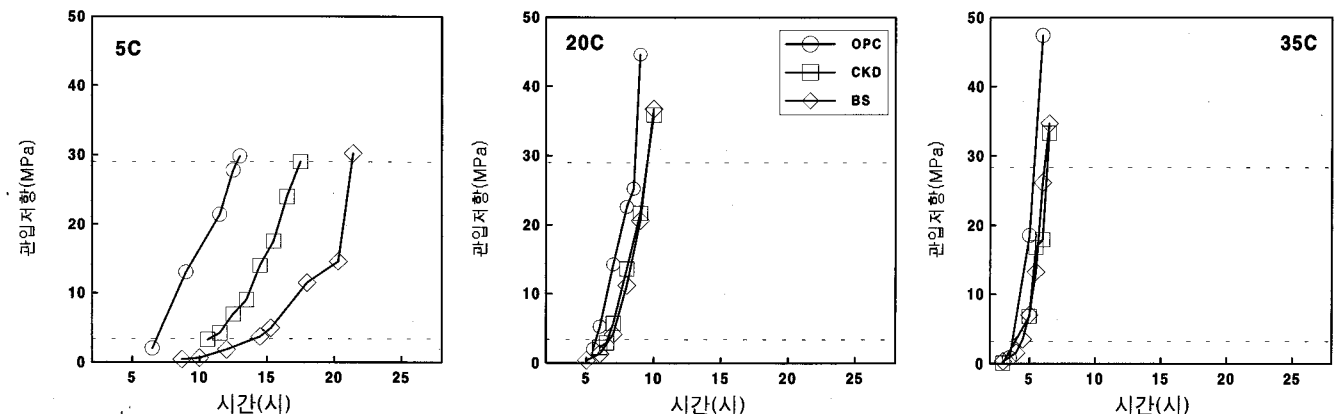


그림 3. 양생온도별 혼화제 치환 콘크리트의 시간경과에 따른 관입저항

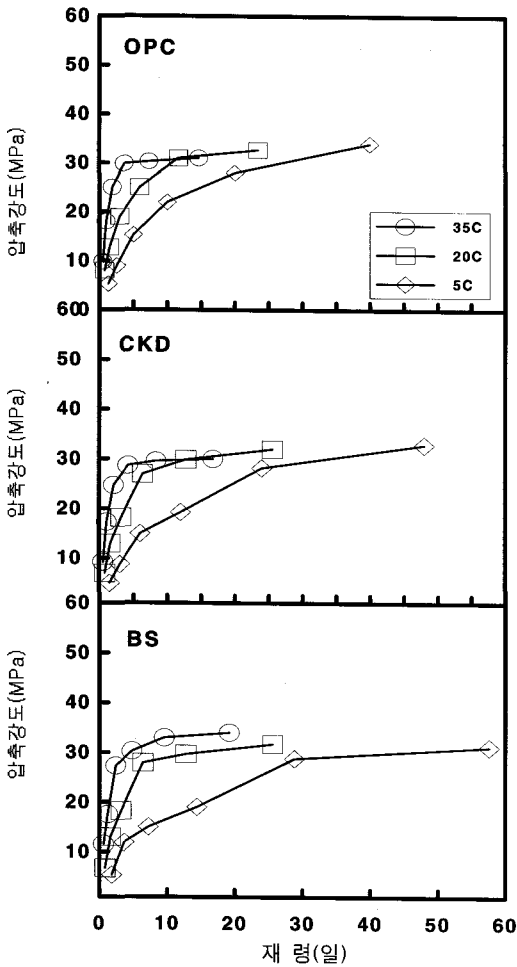


그림 4. 양생온도별 혼화재 치환 콘크리트의 재령경과에 따른 압축강도

4.4 Carino 모델에 의한 압축강도 증진 해석

본 연구에서 수행한 압축강도증진해석은 등가재령(식(5))에 의한 Carino 모델식을 이용하였는데(식 (9)), 이를 적용하기 위해서는 먼저 rate constant (k)를 산정해야 하고, 이는 아래의 Arrhenius 함수식 (11)을 이용하여 산정할 수 있다.

이식에서 k는 온도가 화학반응속도에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는 것으로서 k와 온도의 관계는 올바른 등가재령식을 결정하는 핵심적인 요소가 된다.

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

여기서,

- k : rate constant
- A : 빈도계수
- E_a : 결보기 활성화 에너지(KJ/mol)
- R : 가스 상수(8.314J/mol · K)
- T : 절대온도(° K)

그림 5는 본 연구에서 산정된 rate constant kT와 양생온도의 관계를 나타낸 것으로, 양생온도가 증가할수록 kT는 지수함수 형태로 증가하고 있는데, 이는 기존의 연구와 동일한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

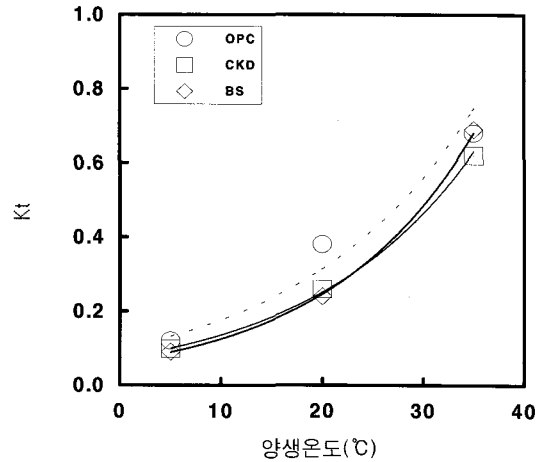


그림 5. kT와 양생온도의 관계

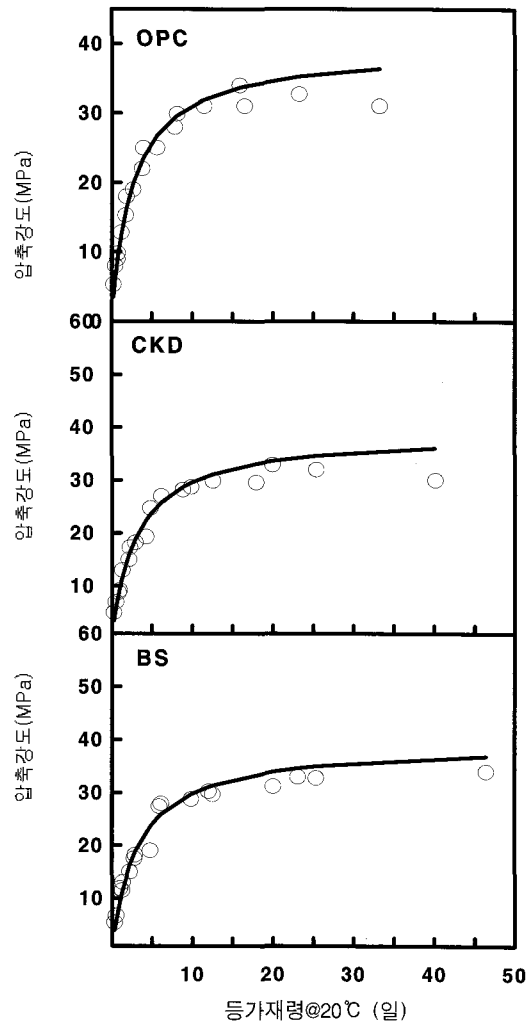


그림 6. 등가재령에 따른 압축강도 증진해석 결과

다음으로는 산정된 k를 이용하여 결보기 활성화 에너지(E_a)를 계산해야 하는데, E_a는 콘크리트에 미치는 온도의 민감도를 나타내는 것으로서 등가재령식 산정에 있어 표준온도조건에서의 콘크리트 특성을 실제 양생온도의 특성으로 변환하기 위해 사용된다.

표 8. Carino 모델식에 의한 회귀분석결과

혼화재	종결시 등가 재령	E _a (kJ/mol)	실험상수		
			S _u	k _T	결정계수
OPC	0.242	41.05	39.24	0.320	0.971
CKD	0.263	43.80	38.88	0.263	0.956
BS	0.271	47.11	38.95	0.261	0.960

이를 위하여 본 연구에서는 식 (11)의 Arrhenius함수를 이용한 ASTM C 1074의 방법으로 산정하였다.

표 8에 ASTM C 1074 방법에 의하여 산정된 E_a값을 나타내었는데, OPC의 경우는 41.05KJ/mol, CKD의 경우는 43.80KJ/mol 그리고 BS의 경우는 47.11KJ/mol로 산정되었다.

이상의 절차로부터 양생온도별 등가재령을 산정한 후 Carino 모델식에 의하여 강도증진해석을 실시한 결과를 그림 6 및 해석모델식의 실험상수 값을 표 8에 나타내었다. 전반적으로 해석치가 측정치를 전 재령에 걸쳐 양호하게 추정함을 알 수 있었는데, 단, 후기재령으로 진행될수록 해석치가 측정치를 과대하게 평가하는 것으로 나타났다. 한편, 결정계수의 경우는 혼화재의 종류에 관계없이 0.95 이상의 높은 값을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 7은 Carino 모델식에 의한 해석치와 측정치를 상호 비교한 것으로 전반적으로 해석치와 측정치간의 양호한 결과를 보여주고 있는 것으로 사료된다.

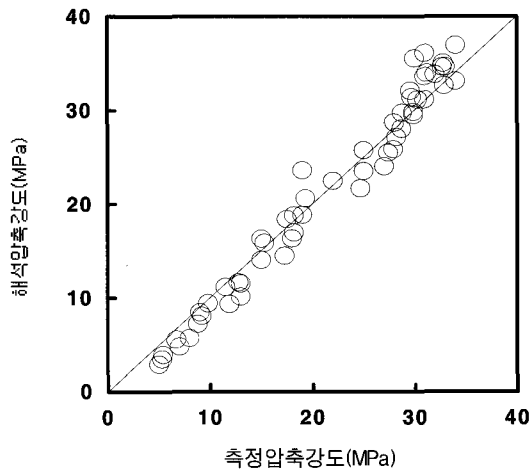


그림 7. 측정압축강도와 해석압축강도의 상호비교

4.5 수정 Carino 모델식에 의한 강도증진해석

앞 절에서는 Carino 모델식에 의한 강도증진해석결과에 대한 내용을 언급하였는데, 전반적으로 양호한 추정결과를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

본 절에서는 기존 Carino 모델식에 있어서 rate constant와 재령의 함수가 강도발현에 미치는 영향을 지수함수형태로 가정하는 방법으로 식 (10)과 같은 식을 제안하여 강도증진해석을 실시하였다.

그림 8은 수정 Carino 모델식에 의한 강도증진해석결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서 확인할 수 있듯이 초기등가재령에

서 뿐만 아니라 이후 후기 등가재령에서도 해석 압축강도가 측정 압축강도를 양호하게 추정함을 알 수 있는데, 그림 3과 비교하여 기존 Carino 모델식에 나타나는 후기재령에서의 해석압축강도가 측정치보다 과대평가되는 부분을 상당부분 보정하고 있음을 확인 할 수 있다.

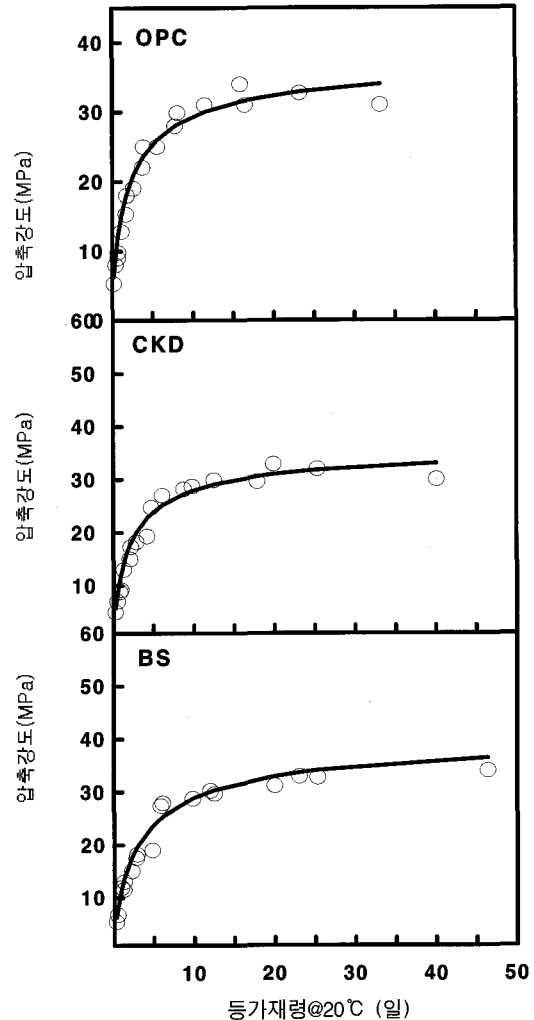


그림 8. 등가재령에 따른 압축강도 증진해석 결과

표 9는 수정 Carino 모델식의 회귀분석결과를 나타낸 것으로서 전반적으로 OPC를 사용한 경우는 기존의 Carino 모델식보다 결정계수가 약간 저하하는 경향을 보였으나, CKD 및 BS를 사용한 경우는 결정계수가 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

표 9. 수정 Carino 모델식에 의한 회귀분석결과

혼화재	종결시 등가재령	E _a (kJ/mol)	실험상수			
			S _u	k _T	α	결정계수
OPC	0.242	41.05	37.84	0.490	1.28	0.965
CKD	0.263	43.80	36.00	0.447	1.20	0.963
BS	0.271	47.11	38.95	0.261	1.43	0.965

그림 9는 수정 Carino 모델식에 의한 해석압축강도와 측정 압축강도를 상호 비교한 것이다. 전반적으로 저강도 영역에서는 해석압축강도가 약간 큰값을 갖는 것으로 나타났으나 이후

높은 강도 영역에서는 측정치와 해석치 간에 큰 차이는 없는 것을 알 수 있었다.

이상을 토대로 본 연구에서는 혼화재 종류별 등가재령개념에 의한 압축강도증진 해석을 실시하였는데, 기존의 Carino 모델식에 있어서 강도발현에 미치는 온도의 영향을 고려하는 rate constant와 재령을 지수함수형태로 수정하여 강도증진해석을 수행한 결과 특히 BS 및 CKD를 사용한 경우 결정계수가 향상되는 것으로 나타났고, 후기재령에서 압축강도추정의 정밀도도 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 수정 Carino 모델식을 실무 혼화재 사용콘크리트의 압축강도관리에 이용할 경우 보다 효과적이고 양호한 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

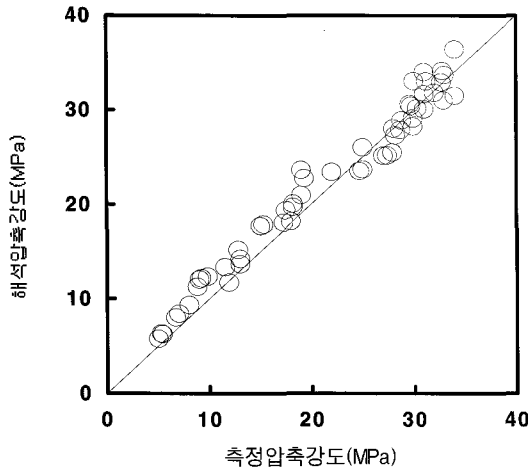


그림 9. 측정압축강도와 해석압축강도의 상호비교

5. 결 론

본 연구에서는 혼화재를 사용한 콘크리트의 양생온도에 따른 강도증진해석을 등가재령 방법에 의하여 수행하였는데, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 압축강도 특성으로 혼화재 종류에 관계없이 양생온도가 높아질수록 초기재령 압축강도는 증가하는 것으로 나타났고, 특히 BS를 치환한 경우 재령이 경과하여도 촉진된 잠재수 경성반응에 기인하여 높은 강도를 유지하는 것을 알 수 있었다. 반면 저온에서는 OPC 및 CKD의 경우 초기압축강도는 BS에 비하여 비교적 높게 나타났고, BS는 재령이 경과해도 강도증진폭이 크지않은 것으로 나타났다.
- 2) 등가재령방법을 이용하여 강도증진해석을 수행한 결과 혼화재 종류에 관계없이 해석치가 측정치를 양호하게 추정하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 기존의 Carino 모델식에 있어서 rate constant와 재령을 지수함수형태로 수정하여 강도증진해석을 수행한 결과 혼화재 사용 콘크리트의 경우 기존의 Carino모델식보다 향상된 결정계수값을 갖는 것을 확인 할 수 있었고, 후기재령에서의 압축강도 추정 정밀도가 향상되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. V.M Malhotra, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proc. of fifth International Conference, ACI SP-153, pp.1~1200, 1995
2. 한천구, 김성수, 황인성, 차천수, 시멘트 킬른더스트의 물성 및 이를 사용한 시멘트 모르타의 공학적 특성, 대한건축학회논문집 구조계, 20권 11호, pp.83~91.2004
3. M.M.Shoaib, MM.Balaha and A.G. Abdel-Rahman, Influence of cement kiln dust substitution on the mechanical properties of concrete, Cement and concrete research, Vol.30, pp.371~377, 2000
4. Bernhardt, Hardening of concrete at different temperatures, RILEM Symposium on Winter Concreting, Institute for Building Research, 1956
5. Carino, N. J., Maturity Method; Theory and Application., Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984
6. Freisleben Hansen, P., Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, pp.19~34, 1977
7. Guo Chengju, Maturity of Concrete, Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI, Materials Journal, Vol.86, No.4, pp.341~353, 1989
8. Kjellsen, K.O, Heat curing and post-heat curing regimes of high performance concrete ; influence of microstructure and C-S-H composition, Cem. Concr. Res., Vol.26, No.2, 295~307
9. Escalente-Garcia, J. I. and Sharp, J. H., The micro-structure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, Cem. Concr. Res., Vol.31, pp. 695~702
10. Alexander, K., M., Taplin, J., H., Concrete strength, paste strength, cement hydration and maturity rule, Australian Journal of Applied Science, Vol.13, pp.277~284, 1962
11. Kjellsen, K., O., Detwiler, R., J., Later-age strength prediction by a modified maturity model, ACI Material Journal, Vol.90, No.3, pp.220~227, 1993
12. Carino, N., J., Temperature effects on the strength-maturity relation of mortar, Report No. NBSIR 81-2244, National Bureau of Standards, Washington, D.C., pp.90~105, 1981
13. Klieger, P., Effect of mixing and curing temperature on concrete strength, ACI Journal , Vol.55. No.6, pp.1063~1081, 1958
14. Price, W. H., Factors influencing concrete strength, ACI Journal, Vol.47, No.2, pp.417~432, 1951
15. Jonasson, J. E., Early strength growth in concrete- preliminary test results concerning hardening at elevated temperatures, Proc. of 3rd International RILEM symposium on winter concreting, pp.249~254, 1985
16. 김진근, 문영호, 양주경, 송영철, 양생온도에 따른 콘크리트 장기 강도예측, 한국콘크리트학회 논문집, 10권 3호, pp.153~163, 1998.6
17. 한상훈, 김진근, 박연동, 새로운 겔보기 활성화 에너지 함수에 의한 플라이애시 콘크리트의 압축강도 예측, 한국콘크리트학회 논문집, 13권 3호, pp.237~243, 2001
18. Carino N. J. and Tank R. C., Maturity functions for concretes made with various cements and admixtures, ACI materials journal, pp.188~196, 1992
19. 한천구, 한민철, 적산온도방식의 콘크리트 강도증진해석에 의한 기온보정강도의 검토, 대한건축학회 논문집 구조계, 15권 11호, pp.71~78, 1999. 11.