

혼화재 치환 콘크리트의 압축강도 증진해석

Estimation of Compressive Strength of Concrete Incorporating Admixture

주 은 희* 배 장 춘* ○한 민 철** 손 명 수*** 전 현 규*** 한 천 구****
 Joo, Eun-Hee Pei, Chang-Chun Han, Min-Cheol Sohn, Myoung-Soo Jeon, Hyun-Gyu Han, Cheon-Goo

Abstract

This paper investigates the effect of curing temperature on strength development of concrete incorporating cement kiln dust (CKD) and blast furnace slag (BS) quantitatively. Estimation of compressive strength of concrete was conducted using equivalent age equation and rate constant model. 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.

키 워 드 : 혼화재, 킬른더스트, 등가재령, 강도증진, 양생온도

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

1. 서 론

현재 건설공사용 레미콘 생산에서 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 진행되었고, 아울러 최근 본 연구팀에서는 시멘트를 생산하는 과정 중 클링커를 소성하는 과정에서 발생하는 시멘트 킬른더스트(이하 CKD)의 활용방안에 대한 일련의 연구를 진행한 바 있다. 일반적으로 FA 및 BS는 저온환경에서 응결지연으로 인한 초기 강도 발현의 문제점이 지적되고 있는데 비하여, 본 연구팀에서 검토 중인 시멘트 킬른더스트는 주성분이 탄산칼슘으로 저온에서의 응결지연은 거의 발생하지 않고 초기강도 발현에도 효과가 있는 것으로 나타나 향후의 활용성이 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 BS 및 CKD 등의 혼화재를 사용한 콘크리트의 응결 및 강도발현에 미치는 온도의존성에 관한 정량적 평가를 하고자 등가재령 방법을 이용하여 양생온도에 따른 콘크리트의 강도증진해석을 실시하되로서 실무에서 CKD의 적극적 활용에 기여하고자 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 배합설계하였다.

표 1. 실험계획

W/B (%)	실험요인				실험사항	
	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)	혼화재 종류 및 치환율	양생온도 (°C)	굳지않은 콘크리트	경화 콘크리트
45	150 ± 20	4.5 ± 1.5	·OPC ·CKD (10%) ·BS (10%)	5 20 35	·슬럼프 ·슬럼프 ·플로우 ·공기량 ·단위용적 ·질량 ·응결시간	·양생온도별 ·압축강도

한편, 양생온도의 경우 실무현장에서 일반적으로 접하게 되는 조건을 고려하여 5, 20, 35°C의 3수준으로 계획하였다.

표 2는 콘크리트의 배합사항을 나타낸 것이다.

* 정회원, 청주대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원

*** 정회원, GS건설 기술연구소 선임연구원

**** 정회원, GS건설 기술연구소 선임연구원

***** 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수

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				0.10	0.002	389	0	728	999
CKD	45	175	43	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 보통포틀랜드시멘트(밀도:3.15g/cm³, 분말도: 3,265cm²/g), CKD는 국내산A사(밀도:2.67g/cm³, 분말도:8,200cm²/g), BS는 포항제철소산(밀도:2.89g/cm³, 분말도:4,650cm²/g)을 사용하였다.

잔골재는 인천 중국 항동산 세척사(표견밀도:2.58 g/cm³, 흡수율:1.12%), 굵은골재는 경기도 광주산 25mm 부순골재(표견밀도:2.58g/cm³, 흡수율:1.2%)를 사용하였고, 혼화제로 고성능감수제는 국내산 D사의 나프탈렌계, AE제는 빈줄계를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저, 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하여 혼합하였다. 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였고, 슬럼프 플로우는 KS F 2594 의 규정에 따라 실시하였으며, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409, 응결시간은 몰드 제작후 종결완료시까지 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. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

표 3은 굳지않은 콘크리트의 실험결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 배합설계를 실시한 것이므로 목표 슬럼프 150±20mm, 목표공기량 4.5±1.5%에 모두 만족하였다.

3.2 응결특성

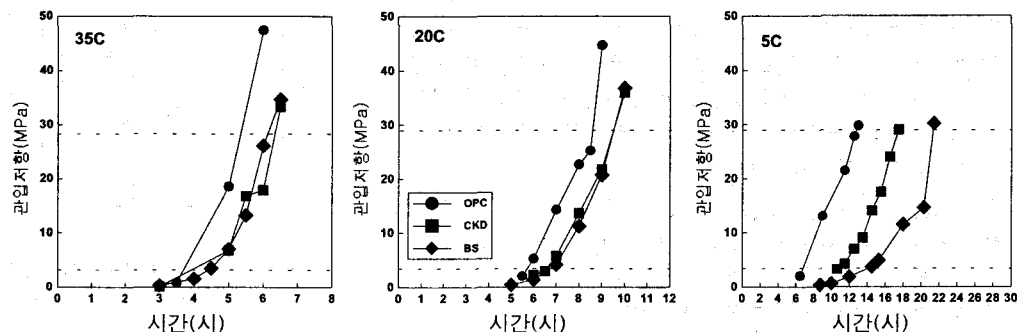


그림 1. 양생온도별 혼화제 치환 콘크리트의 시간경과에 따른 관입저항

표 3. 굳지않은 콘크리트의 실험결과

구분	항목	슬럼프 (mm)	슬럼프 플로우 (mm)	SP/C (%)	공기량 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)
CKD	145	228	0.30	3.5	2,322	
BS	154	300	0.30	5.7	2,263	

그림 1은 양생온도별 시간경과에 따른 관입저항값을 나타낸 것이다. 전반적으로 양생온도가 높아질수록 응결시간은 촉진되는 것을 볼 수 있었는데, 양생온도 20℃ 및 35℃의 경우 OPC에 비하여 혼화제를 사용한 경우 약간 지연되는 것으로 나타났으나, 큰 차이는 아닌 것으로 분석되며, 혼화제 종류별로는 상호간에 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 양생온도 5℃의 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 잠수수경성 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.

3.3 압축강도 특성

그림 2는 양생온도별 혼화제를 치환한 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것이다. 전반적으로 재령이 증가할수록 양생온도가 높을수록 강도는 증가하는 것으로 나타났다. 혼화제 종류에 따라서는 양생온도 20℃의 경우 초기재령에서는 OPC, CKD, BS의 순서로 압축강도가 크게 나타났으나, 28일 재령에서는 OPC, BS, CKD 순으로 나타났고, BS의 경우 재령 7일 이후부터 강도가 증가하여 28일에서는 플레인과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

한편 양생온도별로는 양생온도가 높아질수록 혼화제 종류에

관계없이 초기압축강도는 증가하나, 이후 재령이 경과할 수록 강도증진이 둔화 됨을 알 수 있는데, 35℃의 경우 OPC 및 CKD는 14일 전후에서 20℃의 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℃에서는 고온양생 조건의 경우에 비하여 초기강도발현이 낮을 뿐만 아니라, 재령이 경과하여도 강도발현폭이 크지 않아 저온조건에서 BS의 사용에 주의가 필요할 것으로 사료된다.

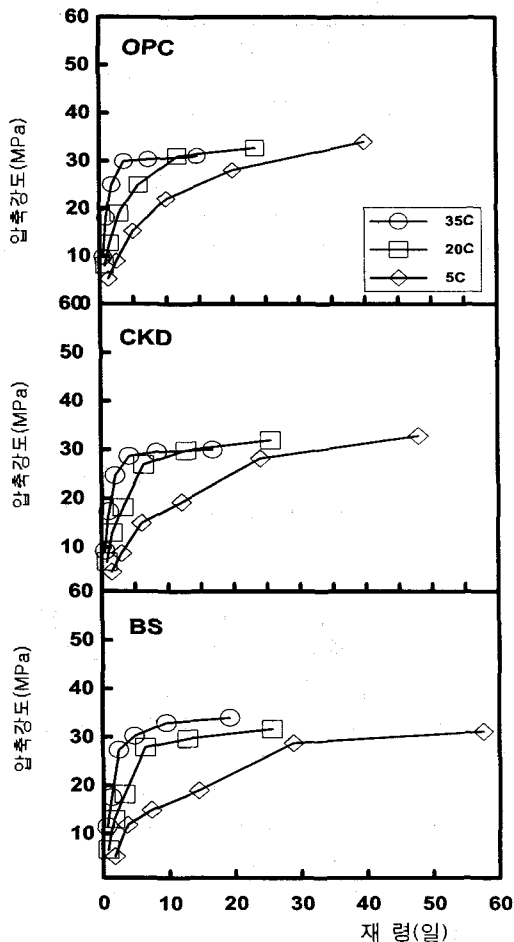


그림 2. 양생온도별 혼화재 치환 콘크리트의 재령경과에 따른 압축강도

3.4 압축강도증진 해석

1) 등가재령 및 강도증진 해석모델

본 연구에서는 온도가 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 고려하는 방법으로 강도증진해석을 수행하였는데, 이를 위해 Arrhenius 화학반응속도식을 이용한 등가재령식을 사용하였다. 등가재령은 식(1)과 같이 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20℃)에서의 양생시간을 의미한다.

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{Ea}{R} \cdot \left(\frac{1}{Tr} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

t_e : 등가재령 (일)

- Ea : 결보기 활성화 에너지 (KJ/mol)
- R : 기체상수 (8.314J/mol·K)
- Tr : 20℃에서의 절대온도 (293° K)
- T : 양생온도 T_o 에서의 절대온도(° K, 273+℃)

한편, 강도증진해석 모델은 Carino가 제안한 rate constant (kT)모델식을 적용하였다.식 (2) 참조)

$$S = \frac{S_u k_T (t_e - t_{or})}{1 + k_T (t_e - t_{or})} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, S_u : 한계강도(MPa)

k_T : 표준온도에서의 rate constant

t_e : 등가재령(일)

t_{or} : 표준온도시 종결시점에서의 등가재령(일)

2) 혼화재 종류별 강도증진해석 결과

식 (2)의 강도증진 모델식을 적용하기 위해서는 먼저 rate constant (kT)를 산정해야 하는데, 이는 식(3)을 이용하여 산정할 수 있다. kT는 온도가 강도발현율에 미치는 영향을 나타내는 것으로 kT와 온도의 관계는 올바른 적산온도식을 결정하는 핵심적인 요소가 된다.

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

여기서,

k_T : rate constant

A : 빈도계수

Ea : 결보기 활성화 에너지(KJ/mol)

R : 가스 상수(8.314J/mol·K)

T : 절대온도(° K, 273+℃)

다음으로는 산정된 kT를 이용하여 결보기 활성화 에너지 (Ea)를 계산해야 하는데, Ea 는 콘크리트에 미치는 온도의 민감도를 나타내는 것으로서 등가재령식 산정에 있어 표준온도조건에서의 콘크리트 특성을 다른 양생온도의 특성으로 변환하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 식 (3)의 Arrhenius함수를 이용한 ASTM C 1074의 방법으로 산정하였다.

그림 3은 본 연구에서 산정된 kT와 양생온도와의 관계를 나타낸 것으로, 양생온도가 증가할수록 kT는 지수함수 형태로 증가하고 있는데, 이는 기존의 연구와 동일한 결과이다.

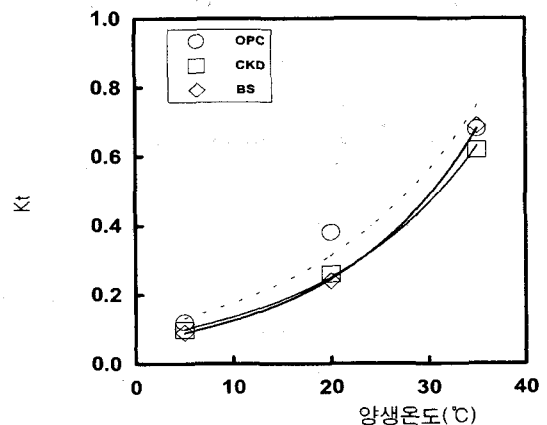


그림 3. kT와 양생온도의 관계

표 4는 상기의 kT 와 양생온도와의 관계를 식 (3)에 대입하여 E_a 를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 OPC와 CKD는 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있으나, BS를 사용한 경우는 여타의 경우보다 높은 E_a 를 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 아울러 rate constant 모델에 의한 강도증진해석결과를 표 4에 나타냈다. 해석모델식은 혼화재 종류에 관계없이 0.950 이상의 높은 결정계수를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

표 4. Rate constant 모델식에 의한 회귀분석결과

혼화재	종결시 등가재령	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

그림 4는 표 4의 회귀분석결과를 이용하여 등가재령 변화에 따른 압축강도 증진해석결과를 나타낸 것이다.

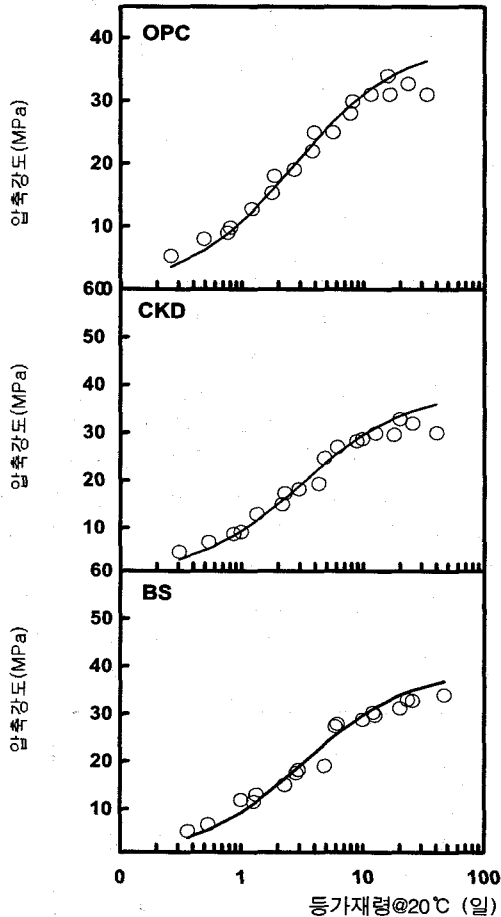


그림 4. 등가재령에 따른 압축강도 증진해석 결과

전반적으로 혼화재 종류에 관계없이 해석 압축강도가 측정 압축강도를 양호하게 추정하는 것으로 나타났으나, 장기의 등가재령으로 진행될수록 해석 압축강도와 측정압축강도간의 차이가 커짐을 확인할 수 있었다.

그림 5는 해석치와 결과치를 상호 비교한 것으로 전반적으로 양호한 해석결과를 보여주고 있는 것으로 사료된다.

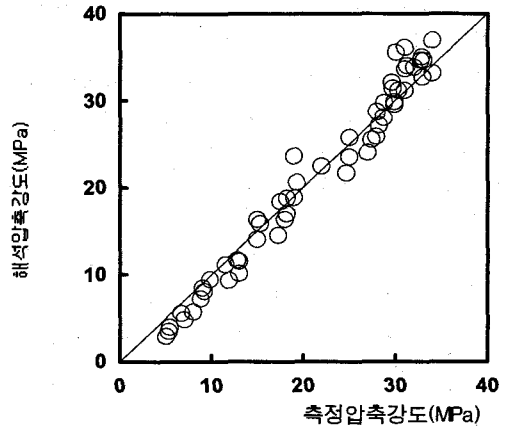


그림 5. 측정압축강도와 해석압축강도의 상호비교

이상을 토대로 혼화재 종류에 따른 등가재령을 이용한 압축강도증진해석을 실시하였는데, 이를 실무의 혼화재 사용콘크리트의 압축강도판리에 이용할 경우효과적인 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 혼화재를 사용한 콘크리트의 양생온도에 따른 강도증진해석을 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 잠재수경성반응에 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 있었고, 실무에서 본연구의 결과를 이용할 경우 혼화재를 사용한 콘크리트의 양생온도에 따른 보다 양호한 강도 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.