

혼화재 종류가 콘크리트의 공학적 특성 및 건조수축에 미치는 영향

Effect of Mineral Admixture Types on the Engineering Properties and the Drying Shrinkage of the Concrete

한 민 철*

Han, Min-Cheol

Abstract

In this paper, the engineering properties and estimation of drying shrinkage of concrete incorporating fly ash (FA), blast furnace slag (BS) and cement kiln dust (CKD) were discussed. FA, BS and CKD contents ranged from 0% to 20%. Water to binder ratio (W/B) also ranged from 40 to 50 %, with a 5% interval. For estimating drying shrinkage, an exponential model proposed by the author was applied. According to results, the use of FA, BS and CKD resulted in a decrease of flowability and air contents. As expected, the use of admixtures also decreases the early age strength of concrete, while at later age, due to a pozzolanic reaction of FA and BS, the compressive strength was recovered to a value comparable with that of plain concrete. For drying shrinkage, the use of admixtures led to an increase in the drying shrinkage of concrete. The exponential model suggested by the author showed good agreement between the calculated and experimental values both at early age and at later age

Keywords : Mineral admixture, Concrete, Drying shrinkage, Fly ash, Blast furnace slag, Cement kiln dust

1. 서 론

최근 전세계적으로 환경오염이 심각해짐에 따라 환경오염 방지에 대한 대책을 마련하고 있고, 우리나라의 경우도 정부에서 저탄소 녹색성장을 추구하는 환경 친화적인 정책기조를 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라 산업현장에서도 이러한 기조에 부응하여 이미 각종 산업부산물이나 산업폐기물을 효율적으로 재활용하는 방안을 다각도로 검토하고 있는데, 레미콘 산업의 경우도 환경 파괴문제와 자원의 유효한 재활용이라는 문제를 해결하기 위하여 더 많은 초점이 맞춰져서 관리되고 있는 것이 현실이다.

한편, 폐기물 자원의 재활용과 관련하여 레미콘용 시멘트의 대체재로서 각광을 받는 것으로 고로슬래그(이하 BS)와 플라이애시(이하 FA)가 있으며, 최근에 국내의 일부 시멘트사 등에서는 시멘트 제조 과정 중 발생하는 시멘트 킬른더스트(이하 CKD)를 혼화재로서의 사용성 여부를 검토하고 있는데, CKD의 발생량은 시멘트 연간 생산량의 7~15% 정도로 과거 집진기가 설치되기 이전에는 대기 중으로 방출되어 환경오염 및 주변 민원의 주요한 원인이 되기도 하였으나, 현재 대부분의 시멘트 공장에서는 시멘트 킬른에 재투입하여 사용하고 있는 실정이다. 이러한 CKD의 주성분은 시멘트의 생산과정 중 발생하는 것이기 때문에 시멘트의 주원료와 동일한 탄산칼슘(CaCO₃)으로 시멘트 수화물에 전혀 피해가 없고, 분말이 매우 미세하므로 콘크리트에 치환하여 사용하게 되면 굳지 않은 상태에서는 응결속진, 블리딩 저감 및 수화열저감,

경화상태에서는 특히 저온에서의 초기강도 발현 등 제반 공학적 특성의 향상이 기대되고 있다.¹⁾

그런데 이러한 혼화재의 사용이 건조수축과 같은 콘크리트의 체적안정성에 미치는 영향에 대한 충분한 검토가 아직 부족한 실정으로서, 통상적으로 FA, BS 혹은 CKD를 사용할 경우 일부 연구자들은 콘크리트의 건조수축이 저감된다고 보고하고 있으나, 다른 연구자는 반대의 경향을 보고하는 등 연구자별로도 다소 상반되는 결과를 제시하고 있을 뿐만 아니라 이들 사용에 따른 정량적인 연구결과 제시가 미흡한 실정이다.^{2)~8)}

따라서, 본 연구에서는 실무에서 주로 사용되고 있는 혼화재료 중 FA, BS 및 CKD를 선별하여 이들의 치환률에 따른 콘크리트의 기초적 물성 및 건조수축 특성을 분석하고 이를 토대로 건조수축 해석을 실시하여 혼화재가 콘크리트의 공학적 특성 및 건조수축에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고 콘크리트의 배합사항은 표 2와 같다. 먼저, 배합사항으로 콘크리트의 일반강도 수준을 고려하여 물-결합재 비(이하 W/B) 40, 45 및 50%의 3수준에 대하여 목표 슬럼프 150±15 mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 플레인 콘크리트를 배합설계한 후, 혼화재 종류로 CKD, FA 및

*청주대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

BS의 3 수준에 대해 각각 10와 20%로 치환하며 단위수량 및 잔 골재율은 혼화재 종류에 관계없이 플레인과 동일하게 적용하는 것으로 한다.

실험사항으로 굳지않은 콘크리트에서 슬럼프, 슬럼프 플로우, 공기량 및 단위용적질량을 측정하는 것으로 하고, 경화 콘크리트에서는 재령경과에 따른 압축강도와 건조수축 길이변화를 측정하는 것으로 한다.

2.2 사용재료

먼저, 시멘트는 국내산 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하며, 물리적 성질은 표 3과 같다. 골재로서 굵은 골재는 인천 향동 25 mm 부순 골재를 사용하였고, 잔골재는 충북 옥산 강모래를 사용하였는데, 물리적 성질은 표 4와 같다.

혼화제로서 CKD는 국내산 A시멘트사의 프리히터에서 발생

되는 것을 포집하여 사용하였는데, 화학성분 및 입자크기는 표 5 및 그림 1과 같다. FA는 충남보령 화력발전소에서 사용된 유연탄의 재를 집진한 것으로 물리적 성질은 표 6과 같다. BS는 선철 제조과정에서 발생한 부산물을 포집한 것으로 물리적 성질은 표 7과 같다. 고성능 감수제는 폴리칼본산계로서 물리적 성질은 표 8과 같다.

표 1. 실험계획

요인		변수	
배합	W/B(%)	3	40, 45, 50
	목표슬럼프(mm)	1	150±15
	공기량(%)	1	4.5±1.5
	혼화재 종류	3	CKD, FA, BS
	혼화재 치환률	3	0, 10, 20
실험	굳지않은 콘크리트	3	·슬럼프 ·공기량 ·단위용적질량
	경화콘크리트	2	·압축강도 (28, 91일) ·건조수축(180일까지)

표 2. 배합사항

기호	W/C (%)	W (kg/m³)	S/a	SP/C (%)	AE/C (%)	질량배합 (kg/m³)						
						C	B	S	G			
Plain	40	175	42	0.88	0.029	438	0	684	993			
CKD10				0.95	0.030	394	44.0	681	989			
CKD20				1.00	0.033	350	87.5	679	985			
FA 10				1.00	0.032	394	44.0	678	984			
FA 20				1.00	0.038	350	87.5	672	975			
BS 10				0.95	0.033	394	44.0	683	991			
BS 20				0.95	0.035	350	87.5	681	989			
Plain				45	175	43	0.75	0.026	389	0	717	999
CKD10							0.85	0.028	350	38.9	715	996
CKD20							0.85	0.030	311	77.8	712	992
FA 10	0.90	0.030	350				38.9	711	991			
FA 20	0.95	0.033	311				77.8	706	984			
BS 10	0.95	0.030	350				38.9	716	998			
BS 20	0.95	0.030	311				77.8	715	996			
Plain	50	175	43.5				0.70	0.020	350	0	765	982
CKD10				0.85	0.022	315	35.0	737	1,006			
CKD20				0.85	0.024	280	70.0	735	1,003			
FA 10				0.85	0.028	315	35.0	734	1,002			
FA 20				0.90	0.032	280	70.0	729	995			
BS 10				0.85	0.030	315	35.0	738	1,008			
BS 20				0.85	0.029	280	70.0	737	1,006			

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,415	0.06	236	340	24.4	30.3	38.9

표 4. 골재의 물리적 성질

골재	밀도 (g/cm³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m³)	0.08mm체 통과율 (%)
잔골재	2.58	2.89	1.12	1,614	1.15
굵은골재	2.58	6.73	1.20	1,584	0.10

표 5. CKD의 화학적 특성

LOI	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	K₂O	Na₂O	중간입경 (µm)
36.13	11.46	4.34	1.62	43.02	1.58	0.77	1.14	0.09	5.69

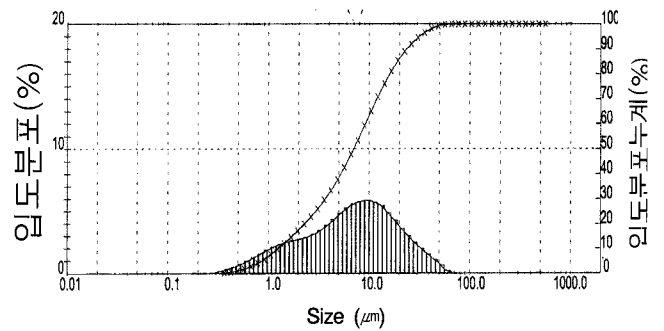


그림 1. CKD의 입도

표 6. FA의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	LOI (%)	압축강도비 (%)	SiO₂ (%)	습분 (%)	단위수량비 (%)
2.22	3,850	4.2	92	67.5	0.2	100

표 7. BS의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	화학적 특성 (%)			
		MgO	SO₃	LOI	염화물(%)
2.91	4,463	5.90	2.78	0.5	0.001

표 8. 고성능 감수제의 물리적 성질

계열	색상	밀도 (20°C)	점도 (mPas)	권장사용량 (C×%)
폴리칼본산계	암갈색	1.05	15.0	0.5~3.0

2.3 실험방법

실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 이용하였고, 슬럼프는 KS F 2402, 공기량은 KS F2421에 의거하여 측정하였다. 건조수축에 의한 길이변화 시험용 공시체는 탈형 후 20±3℃의 수중에서 1주일간 양생한 다음 20±3℃, 상대습도 60%조건的高考에서 실험계획된 소정기간 동안 양생을 실시하였다. 압축강도는 KS F 2405의 방법에 의거 실시하고, 건조수축에 의한 길이변화 시험은 KS F 2424 규정의 모르타 및 콘크리트의 길이변화 시험 방법 중 다이알 게이지 방법으로 탈형 후를 기준으로 각 재령에서 실시하여 건조수축 길이변화를 측정하였다.

3. 건조수축 및 건조수축 모델에 대한 이론적 고찰

3.1 건조수축 해석 모델

건조수축 모델은 대표적으로 Bazant-Panula, Branson 등이 연구를 통하여 정립하였는데, Bazant의 경우 공극 내 상대습도의 분포 및 시간당 감소량 등을 분석하여 해석모델을 제시한 바 있다.

먼저, CEB-FIP에서는 건조수축 해석모델로서 식 (1)과 같이 제시하고 있는데, 이 모델에서는 압축강도 및 상대습도를 고려하는 것이 특징적이라고 할 수 있다.

1) CEB-FIP-1990 모델

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s(t - t_0) \quad (1)$$

$$\epsilon_{sh\infty} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (2)$$

$$\epsilon_s(f_{cm}) = 160 + 10\beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \quad \beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \quad (3)$$

$$\beta_s(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{350(D/D_0)^2 + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.5} \quad D = 2A_c/u \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_{sh}(t, t_0)$: 건조수축 예측치($\times 10^{-6}$)

$\epsilon_{sh\infty}$: 최종건조수축 추정치($\times 10^{-6}$)

$\beta_s(t - t_0)$: 건조수축시간 의존함수

t : 재령 $t_1=1$, t_0 : 건조개시시간(일)

$\epsilon_s(f_{cm})$: 건조수축변형의 강도 의존성 함수

β_{sc} : 시멘트종류에 의한 계수

$\beta_{sc} = 5$: 보통시멘트 혹은 조강시멘트

f_{cm} : 재령 28일의 압축강도, $f_{cm0} = 10N/mm^2$

β_{RH} : 습도의존성 함수, RH : 상대습도

D : 부재의 가상 두께, $D_0=100mm$, $D=2A_c/u$

A_c : 부재의 단면적(mm^2)

u : 외기에 접한 부분의 둘레(mm)

2) ACI-209 모델

ACI-209모델은 간단한 쌍곡선 함수형태를 띄고 있는데, 이는 Branson의 연구결과를 토대로 제안된 것으로 최종 건조수축량의 산정에 있어 각종 배합, 재료 및 환경요인에 의한 보정치를 고려

하도록 하고 있다.

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{35+t} \epsilon_{sh} \quad (5)$$

$$\epsilon_{sh} = 780 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \gamma_4 \cdot \gamma_5 \cdot \gamma_6 \cdot \gamma_7 \cdot \gamma_8 \quad (6)$$

여기서, ϵ_{sh} : 최종 건조수축량($\times 10^{-6}$)

γ : 보정계수

3) 일본토목학회 모델

일본토목학회 모델의 경우 최종 수축량을 산정 할 습도와 체적면적비를 고려하고 재령의 영향을 반영할 경우 등가재령을 고려하도록 하고 있다.

$$\epsilon'_{cs}(t - t_0) = [1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})] \cdot \epsilon'_{sh} \quad (7)$$

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log W - 5[\log(V/S)/10]^2 \quad (8)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (9)$$

여기서, ϵ'_{sh} : 최종수축변형 ($\times 10^{-6}$)

$\epsilon'_{sh}(t, t_0)$: 콘크리트의 재령 t_0 로부터의 수축량 ($\times 10^{-6}$)

RH : 상대습도 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

V : 체적 (mm^3)

S : 외기온에 접한 표면적 (mm^2)

V/S : 체적표면적 비(mm) ($100mm \leq V/S \leq 300mm$)

t_0 및 t : 건조개시시간 및 건조중 콘크리트유효재령(일)

Δt_i : 온도 T에서 유지된 기간의 일수

T_0 : 1℃

4) Kiyohama 모델

Kiyohama 모델은 기존의 ACI-209 모델에 시멘트페이스트와 골재의 특성치를 반영한 모델을 제시하였다.(식(10) 참조)

$$\epsilon_{sc}(t, t_0) = \epsilon_{sc\infty} \cdot \frac{t - t_0}{0.27(V/S)^{1.4} + (t - t_0)} \quad (10)$$

여기서, $\epsilon_{sh\infty}$: 최종 건조수축량($\times 10^{-6}$)

V/S : 체적 면적비(mm)

t : 재령(일)

t_0 : 건조개시 재령(일)

4. 실험결과 및 분석

4.1 혼화재 종류가 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

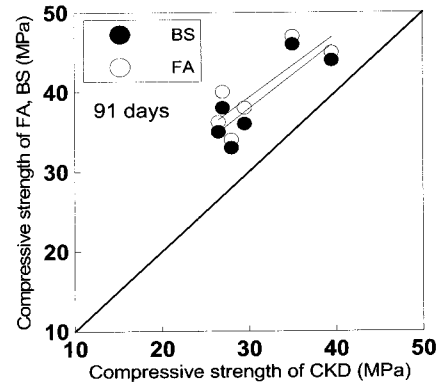
표 9는 실험변수에 따른 굳지 않은 콘크리트의 실험 결과치를 나타낸 것이다.

혼화재 종류별 콘크리트의 유동성은 목표 슬럼프를 만족하도록 배합설계를 실시한 것이므로 목표 슬럼프 150±15 mm의 범위를 대부분 만족하였다. 한편, 목표 슬럼프를 만족하기 위하여 고성능 감수제(이하 SP제)량을 변화시켰는데, CKD, FA 및 BS를 치환한 경우 W/B가 커질수록 배합수의 증가로 인하여 SP제량을 감소시

켜 주었으며, 혼화재 종류에 따라서는 SP제 사용량이 대부분 0.1% 이하의 차이로 보아 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한 혼화재 치환율이 증가할수록 미립분의 증가로 인한 유동성의 저하로 SP제량이 증가하도록 배합설계를 실시하였다.

표 9. 균사얇은 콘크리트의 실험결과

W/B (%)	배합	슬럼프 (mm)	슬럼프플로우 (mm)	공기량 (%)	단위용적 질량(kg/m ³)
40	Plain	162	260	4.8	2,323
	CKD10	164	275	4.2	2,331
	CKD20	170	269	4.8	2,310
	FA 10	150	254	3.1	2,342
	FA 20	170	268	3.7	2,328
	BS 10	168	260	3.9	2,336
	BS 20	135	250	5.3	2,287
45	Plain	145	253	5.7	2,281
	CKD10	165	275	5.4	2,281
	CKD20	130	250	5.8	2,283
	FA 10	150	248	3.2	2,361
	FA 20	130	245	3.3	2,348
	BS 10	163	269	5.3	2,320
	BS 20	165	242	5.3	2,305
50	Plain	147	253	4.4	2,334
	CKD10	150	250	4.3	2,339
	CKD20	150	243	4.8	2,322
	FA 10	140	233	3.6	2,336
	FA 20	152	240	3.9	2,335
	BS 10	158	263	4.8	2,326
	BS 20	163	243	5.6	2,276



3) 재령 91일

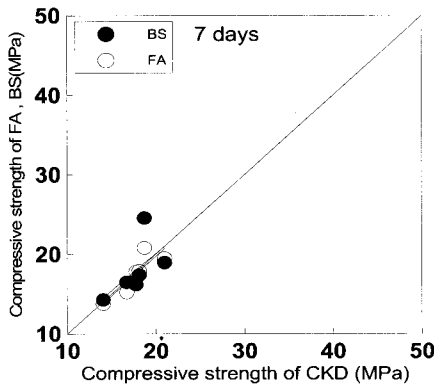
그림 2. 혼화재 종류별 압축강도 비교

한편, 콘크리트의 공기량은 유동성과 마찬가지로 배합설계를 실시하였으므로 목표 공기량 4.5±1.5%의 범위를 모두 만족하였다. 공기량과 관련한 AE제량은 혼화재를 치환한 경우 W/B가 커질수록 감소하는 것으로 나타났고, 혼화재 종류에 따라서는 FA를 치환한 경우에서 AE제량이 가장 많이 증가하였는데, 이는 FA 중의 미연탄소분에 의한 AE제의 흡착에 기인한 결과로 분석된다. 또한 혼화재의 치환률이 증가할수록 AE제의 사용량도 증가하는 것으로 나타났다. BS를 치환한 경우와 CKD를 치환한 경우는 치환률에 따른 일관된 경향을 보이지 않고 있으나 미립자의 영향으로 목표 공기량을 확보하기 위해서는 AE제 사용량을 증가시킬 필요가 있다.

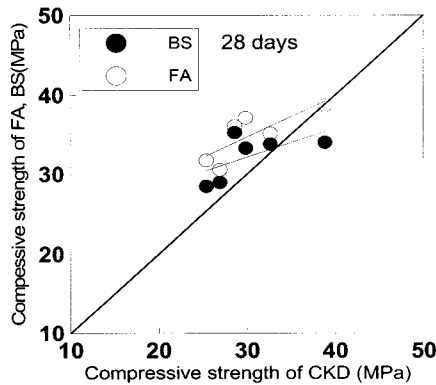
그림 2는 CKD 치환 콘크리트의 압축강도와 FA 및 BS 치환 콘크리트의 압축강도를 재령 7일, 28일 및 91일로 구분하여 비교한 것으로 전반적으로 W/B가 작을수록 재령이 증가할수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다.

혼화재 종류에 따라서는 CKD를 치환한 경우 재령 7일에서는 거의 유사한 강도 발현을 나타내었고, 28일 및 91일에는 플레인보다 저하하는 경향을 나타내었으며, 혼화재 치환율이 증가할수록 강도는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 초기에서는 CKD의 탄산칼슘 및 알칼리 성분에 의해 초기 수화반응이 촉진된 것으로 사료되나, 재령이 증가함에 따라 CKD는 직접적인 반응을 일으키는 반응성 물질이 아니기 때문에 강도발현이 작은 것으로 분석되며, 치환률이 증가할수록 시멘트 감소로 인하여 압축강도는 크게 저하한 것으로 나타났다. FA를 치환한 경우 재령 7일에서는 플레인보다 유사한 강도발현 성능을 보였지만 재령 28일 및 91일에서는 플레인보다 강도가 증가하는 것으로 나타났고, 특히 재령 91일에서는 치환률이 증가할수록 강도는 증가하였는데, 이는 재령이 경과함에 따라 FA의 포졸란 반응에 의한 것으로서, C-S-H겔의 생성으로 인한 강도증진효과로 분석된다.

또한, BS를 치환한 경우 재령 7일에서는 플레인보다 비교할 때, 다소 증가하거나 유사한 강도 발현 성능을 보였지만, 재령 28일 및 91일에서는 혼화재 치환률이 증가할수록 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 초기에는 슬래그와 물의 접촉이 차단되어 반응을 하지 않지만 알칼리나 황산염에 의해 박막이 파괴되면서 불용성의 물질이 석출되어 경화하기 시작하는 잠재수경성 반응에 의하여 강도가 증가한 것으로 분석된다.



1) 재령 7일



2) 재령 28일

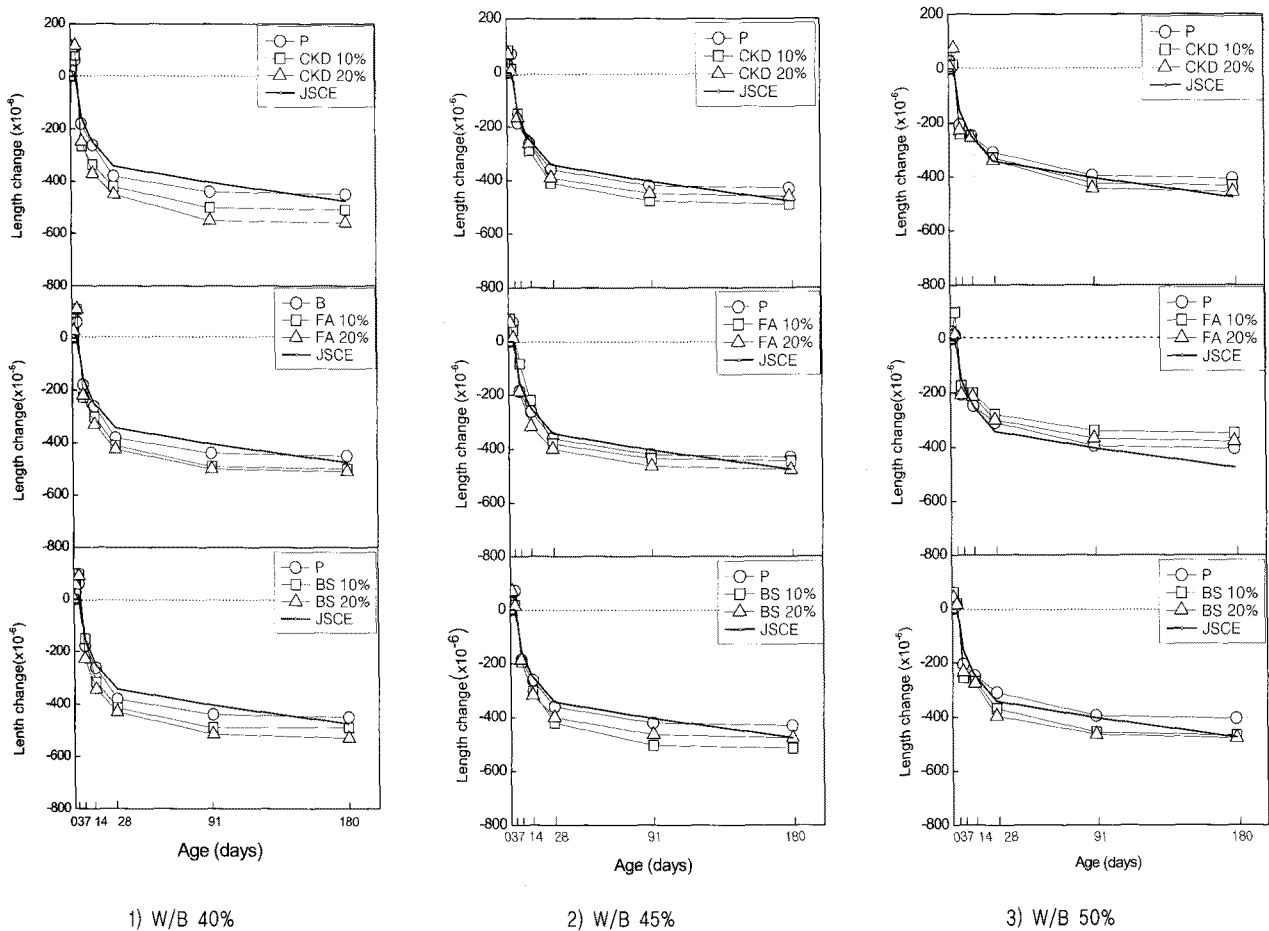


그림 3. 혼화재 종류별 재령경과에 따른 건조수축

4.2 혼화재 종류가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향

그림 3은 재령경과에 따른 W/B 및 혼화재 치환률별 콘크리트의 건조수축량과 일본 토목학회의 해석 모델을 이용한 해석결과를 나타낸 것이다. 재령경과에 따른 건조수축 특성으로서 수중양생을 실시한 7일 동안은 수화반응에 의하여 길이가 팽창하고 있으나, 7일 이후 대기조건으로 옮겨진 경우 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 수분증발에 기인하여 건조수축 길이변화율이 급격히 증가하는 것으로 나타났는데, 대부분 재령 91일까지 급격한 건조수축을 보이다가 그 이후에는 완만한 수축경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 그리고 재령 180일에서는 대략적으로 혼화재 종류 및 치환률에 따라 차이가 있으나 $400 \sim 600 \times 10^{-6}$ 정도의 수축량을 갖는 것을 알 수 있었다.

한편, 혼화재 종류별로는 플레인과 비교하여 FA, BS 및 CKD를 치환한 경우 공히 건조수축 길이변화율이 0~20% 정도 크게 나타났고, 혼화재 종류에 따라서는 FA를 치환한 경우 플레인 배합보다 건조수축이 10~15% 범위에서 증가 혹은 감소하는 것으로 나타났으며, CKD 및 BS를 치환한 경우가 플레인보다 다소 크게 나타났는데, 이는 치환된 혼화재료의 밀도차이에 의한 단위결합재 체적의 증가로 인해 수축에 저항하는 역할을 하는 굵은 골재의 양이 상대적으로 적어진 것과 혼화재료의 분말도가 큰 것에 기인하여 플레인 배합에 비해 건조수축이 증가

한 것으로 사료된다. 한편, 혼화재 치환율에 따라서는 치환율이 증가할수록 미립분의 첨가로 인하여 건조수축이 증가하는 것을 알 수 있었다.

일본토목학회의 해석모델에 의한 해석결과 전반적으로 배합별로 건조수축 측정치와 상이한 결과를 보이고 있었는데, 이는 결국 혼화재 치환에 따른 영향을 충실히 반영하지 못함을 시사해준다.

4.3 콘크리트의 건조수축 해석

본 절에서는 4.2절에서 측정한 재령경과에 따른 건조수축량을 기존의 해석모델을 이용하여 정량적으로 평가하였는데, 본 절에서 적용한 건조수축해석모델은 일본 토목학회의 모델식 (8) 및 (9) 참조)과 유사한 지수함수 모델로서 비선형 회귀분석을 통해 혼화재료 및 배합의 요인이 고려된 실험상수를 구하게 된다. 적용된 해석 모델식은 식 (11)과 같다.

즉, 기존의 일본토목학회식은 건조수축 해석을 위한 고려요인으로서 재령과 최종 수축량을 산정하는 식에서 콘크리트의 단위수량, 상대습도, 노출면적비등만을 고려하고 있으며 혼화재료의 영향은 별도로 고려하지 않고 있어 그림 3에서와 같이 혼화재 종류별 수축량의 차이를 모사하기 어려운 상황이다. 따라서 본 절에서는 일본 토목학회의 건조수축 해석모델에 있어 영향요인을 보다

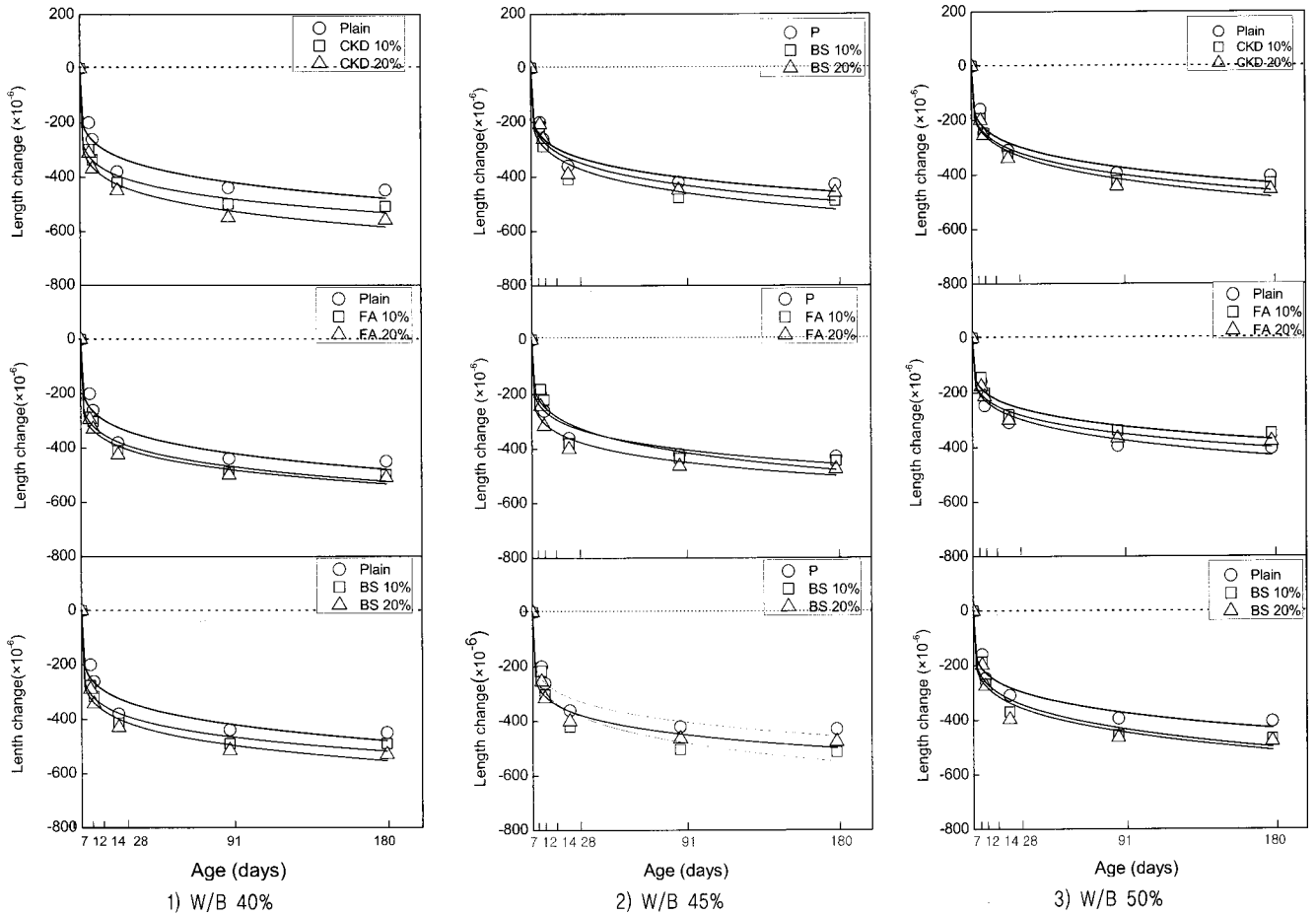


그림 4. 지수함수모델을 이용한 혼화재 종류별 콘크리트의 건조수축 해석

정확하게 판단하고자 비선형회귀 분석을 통해 재반실험상수를 산정한 후 이들 값의 변동을 확인하였다.

$$\epsilon_{sh}(t-t_0) = [1 - \exp(-b(t-t_0)^c)] \cdot \epsilon_{sh\infty} \quad (11)$$

- 여기서, $\epsilon_{sh\infty}$: 최종수축변형 ($\times 10^{-6}$)
- $\epsilon'_{sh}(t, t_0)$: 콘크리트의 재령 t_0 로부터의 수축량 ($\times 10^{-6}$)
- b, c : 실험상수(재료요인에 의한 값)
- t : 재령(일)
- t_0 : 건조개시 재령(일)

그림 4는 본 연구에서 제시한 지수함수 모델을 이용한 건조수축해석 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 모든 재령에 걸쳐 해석치가 실험치를 매우 양호하게 추정함을 알 수 있었고 특히 혼화재로 치환에 따른 수축량의 변동에 대한 영향을 충실히 반영하고 있었다.

결국 본 연구에서 보는 바와 같이 동일한 단위수량 및 배합조건이라 할지라도 혼화재 종류 및 치환률에 따라서 건조수축량이 모든 재령에서 다르게 평가되고 있음을 알 수 있었는데, 기존의 일본토목학회식을 포함한 일부 모델식에서는 혼화재의 영향을 고려할 수 있는 변수가 고려되지 않아 정확한 추정에 어려움이 있을 것으로 판단되며 이러한 혼화재료의 영향을 고려하는 변수의 도입을 검토할 필요성이 제기된다.

표 10은 비선형 회귀분석에 의한 본 연구에서 검토한 지수함

수 모델의 실험 상수 값을 나타낸 것이다. 전반적으로 최종 수축량($\epsilon_{sh\infty}$)값은 배합비 및 혼화재 종류 그리고 치환률별로 다르게 계산되었는데, 일본 토목학회 모델식이 최종수축량과 실험상수 값이 혼화재 종류나 치환률 그리고 강도수준에 관계없이 고정되어 있으나, 표 10의 결과에 따르면 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 아울러 해석한 결과치의 결정계수는 0.90이상의 양호한 상관성을 갖고 있음을 확인 할 수 있었다.

표 10. 회귀분석에 의한 실험상수

혼화재 치환률 (%)	실험 상수	W/B(%)								
		CKD			FA			BS		
		40	45	50	40	45	50	40	45	50
0	$\epsilon_{sh\infty}$	-430	-454	-519	-430	-453	-519	-430	-454	-519
	b	0.108	0.115	0.126	0.11	0.102	0.139	0.108	0.115	0.110
	c	2.76	3.35	3.06	5.85	2.22	3.34	5.74	3.321	3.016
	R^2	0.987	0.968	0.971	0.987	0.968	0.971	0.987	0.968	0.971
10	$\epsilon_{sh\infty}$	-379	-407	-439	-457	-511	-544	-476	-508	-523
	b	0.114	0.12	0.136	0.105	0.108	0.128	0.113	0.117	0.109
	c	3.09	4.25	4.40	5.27	2.485	3.48	5.22	3.12	3.23
	R^2	0.995	0.962	0.952	0.967	0.987	0.988	0.934	0.955	0.938
20	$\epsilon_{sh\infty}$	-523	519	-588	-565	651	-676	-576	-596	-645
	b	0.097	0.107	0.119	0.104	0.101	0.14	0.099	0.110	0.13
	c	2.362	2.87	2.73	5.10	2.32	3.35	5.13	2.31	3.12
	R^2	0.968	0.981	0.926	0.958	0.963	0.981	0.965	0.959	0.983

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 사용되고 있는 FA, BS 및 CKD의 치환률 변화에 따른 콘크리트의 기초적 물성과 건조수축에 대한 일련의 실험 및 해석을 진행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 혼화재 치환에 따른 압축강도는 FA나 BS를 사용한 경우 초기 압축강도가 플레인보다 저하나 CKD를 사용한 경우 초기 압축강도 저하폭이 FA나 BS보다는 적은 것으로 나타났으며, 장기재령에서는 FA와 BS의 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응에 의해 플레인보다 높은 압축강도를 발휘함을 알 수 있었다.
- 2) FA, BS 및 CKD를 치환한 경우 공히 건조수축 길이변화율이 플레인 배합보다 10~20% 정도 크게 나타났고, FA를 치환한 경우 플레인 배합보다 건조수축이 10~15% 범위에서 증가 혹은 감소하는 것으로 나타났으며, CKD 및 BS를 치환한 경우가 플레인보다 다소 크게 나타났는데, 이는 치환된 혼화재료의 밀도차이에 의한 단위결합재 체적의 증가로 인해 수축에 저항하는 역할을 하는 굵은 골재의 양이 상대적으로 적어진 것과 혼화재료의 분말도가 큰 것에 기인하여 건조수축이 증가한 것으로 사료된다.
- 3) 본 연구에서는 지수함수 모델식을 이용하여 건조수축해석을 실시하였는데, 전반적으로 해석치가 실측치를 양호하게 추정하는 것을 알 수 있었으며, 기존의 해석모델은 건조수축의 영향요인으로 단위수량과 상대습도, 대기노출면적비등을 고려하고 있는데, 추가적으로 혼화재료의 영향을 고려할 필요성이 제기되었다.

참 고 문 헌

1. 건축구조설계기준, 대한건축학회, pp.176~180, 2005
2. 일본토목학회, 콘크리트標準示方書, 2002
3. 최한태, 윤영수, 이만섭, PSC 박스거더 교량에 사용된 세그먼트 콘크리트의 크립 및 건조수축에 관한 실험적 연구, 한국 콘크리트 학회 논문집, 제11권 제3호, pp.23~33, 1999. 6.
4. 한천구, 김성수, 황인성, 차천수, 시멘트 킬른더스트의 치환방법에 따른 콘크리트의 공학적 특성, 대한건축학회 논문집 구조계, 제20권 제4호, pp.93~101, 2004.4
5. 한천구, 한민철, 콘크리트의 배합요인이 건조수축에 미치는 영향, 대한건축학회논문집 구조계, 제19권, 제2호, 2003.2
6. 清原千鶴, 永松淨也, 佐藤嘉昭, 三橋博三, 複合理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ豫則式, 日本建築學會論構造系論文集, No.590, pp.9~16, 2005
7. ACI Manual of Concrete Practice, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI-209, 1986
8. CEB-FIP Model Code 1990, Comite Euro-International Du Beton, pp.53~58, 1990
9. Kiyosh Eguchi, Kohji Teranishi, Prediction Equation of Drying Shrinkage of Concrete Based on Composite Model, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.483~493, 2005
10. Zednek P, Bazant, L, Panula, Practical Prediction of Time Dependent Deformation of Concrete, Part 1: shrinkage, materiaux et constructions Vol.11, pp.307~316, 1978
11. Zednek P, Bazant, Prediction of Concrete Creep and Shrinkage : Past, Present and Future, Nuclear engineering and Design, Vol.203, pp.27~38, 2001

(접수 2009. 8. 31, 심사 2009. 9. 18, 게재확정 2009. 9. 25)

요 약

본 연구에서는 실무에서 주로 사용되고 있는 FA, BS 및 CKD 치환률에 따른 콘크리트의 기초적 물성 및 건조수축에 미치는 영향을 분석하고 이를 토대로 건조수축 해석을 실시하여 혼화재가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다. 실험변수로서 혼화재 치환률은 0~20%수준으로 결정하였고, W/B는 40~50%의 수준으로 결정하였다. 건조수축해석을 위해 지수함수모델을 적용하였다. 연구결과에 따르면, 혼화재 치환율이 증가함에 따라 유동성 및 공기량이 감소하였으며 초기압축강도가 저하됨을 확인 하였다. 건조수축 특성으로 혼화재 치환률이 증가함에 따라 건조수축은 증가하는 경향을 보였으며, 건조수축 해석결과 지수함수 모델이 측정치를 양호하게 추정함을 알 수 있었고, 혼화재의 영향을 고려할 필요성이 제기되었다.

키워드 : 혼화재, 건조수축, 플라이애시, 고로슬래그, 시멘트 킬른더스트