



알칼리활성 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형을 평가

양근혁^{1)*} · 서은아²⁾

¹⁾경기대학교 플랜트·건축공학과 ²⁾경기대학교 일반대학원 건축공학과

Evaluation of Shrinkage Strain of Alkali-Activated Slag Concrete

Keun-Hyeok Yang^{1)*} and Eun-A Seo²⁾

¹⁾Dept. of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 120-702, Korea

ABSTRACT The unrestrained shrinkage strain of alkali-activated (AA) slag concrete was examined and compared with design equations specified in code provisions and empirical equations proposed by Yang et al. The main parameters investigated were the water-to-binder ratio (W/B), unit water content and fine aggregate-to-total aggregate ratio (S/a). Test results revealed that shrinkage strain of AA slag concrete is nearly proportional to the W/B ratio, whereas its time function is independent of the W/B ratio. The shrinkage strain of AA slag concrete increased significantly when the unit water content is above 185 kg/m^3 , whereas it is marginally affected by the S/a ratio. The design equation of ACI 209 considerably overestimates the shrinkage behavior of AA slag concrete, whereas CEB-FIP equation tends to underestimate the shrinkage at the age more than 28 days. The empirical equation of Yang et al. is in better agreement with test results, showing that values of mean and standard deviation of error coefficients obtained from each specimen are 0.16 and 0.07, respectively.

Keywords : AA slag concrete, shrinkage strain, water-to-binder ratio, unit water content, time function

1. 서 론

저탄소 콘크리트에 대한 사회적 요구로 인해 알칼리활성(alkali-activated, AA) 콘크리트 개발에 대한 노력과 투자가 급증하고 있다. 특히 원재료(source material)로서 고로슬래그를 이용한 AA 콘크리트는 상온양생에서도 강도발현이 우수하여 플라이애쉬 기반의 AA 콘크리트에 비해 현장적용성이 우수하다.¹⁾ 또한 고로슬래그의 고부가가치를 위한 철강회사들의 전략적 접근은 AA 슬래그 콘크리트의 실용화에 대한 가능성을 높이고 있다.²⁾ 한편, AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률은 보통 포트랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)에 비해 높게 있음이 간헐적으로 지적되고 있어 중요한 약점으로 인식되고 있다. 하지만 다양한 변수에 의해 영향을 받는 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 거동에 대해서는 여전히 논쟁적이다. 뿐만 아니라 기존 실험들³⁻⁵⁾ 모르타르 및 페이스트 수준에서 수행되어 골재의 물리적 특성과 결합재

투입량에 의해 중요한 영향을 받는 콘크리트 건조수축 변형률을 합리적으로 평가할 수 있는 자료는 매우 미흡하다.

OPC 콘크리트와는 달리 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축은 사용 슬래그의 분말도와 활성화제의 종류, 농도 및 투입량에 의해 중요한 영향을 받는다.^{1,6)} 일반적으로 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축은 고로슬래그의 분말도와 활성화제의 농도 및 투입량의 증가와 함께 증가한다.⁷⁾ 더구나 활성화제에 포함된 실리카는 건조과정에서 증발하는 자유수를 많이 생성하는 실리카/칼슘 비가 높은 칼슘-실리케이트 겔의 형성을 유발한다.⁸⁾ 이로 인해 규산나트륨에 의해 활성화된 AA 슬래그 결합재는 OPC에 비해 높은 건조수축 변형을 보인다.⁸⁾ 한편 Kutti 등⁹⁾은 상대습도가 70% 이상인 환경에서 양생된 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축은 OPC 콘크리트와 비슷한 수준으로 있음을 보였다. 이와 같이 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축은 다양한 변수들에 의해 영향을 받음에도 불구하고 적절한 실험자료는 매우 부족하며 장기 건조수축 거동을 예측하기 위한 모델식도 아직 제시되지 않았다. 특히 AA 콘크리트를 이용한 구조부재의 장기변형 설계를 위해서는 설계기준¹⁰⁻¹²⁾에서 제시하는 건조수축 평가모델의 안전성이 우선 확인되어야만 하지만 이에 대한 유용한 데이터는

*Corresponding author E-mail : yangkh@kyonggi.ac.kr

Received April 9, 2013, Revised August 18, 2013,

Accepted August 27, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

없는 실정이다.

이 연구의 목적은 AA 콘크리트의 건조수축 변형률을 평가하고 설계기준¹⁰⁻¹²⁾ 및 제안모델⁸⁾의 비교를 통하여 그 적용성을 확인하는 것이다. 알칼리활성 결합재의 경제성과 현장적용성을 고려하여 Yang 등⁸⁾이 제시한 활성화제를 이용하여 압축강도 약 45 MPa 이하의 수준에서 단위수량, 물-결합재비 및 잔골재율을 변수로 17배합의 콘크리트에서 비구속 건조수축 변형률을 측정하였다. 측정된 건조수축 변형률 및 시간함수는 OPC 콘크리트에 기반한 ACI 209¹⁰⁾ 및 CEB-FIP¹¹⁾ 기준식과 AA 슬래그 콘크리트에 기반한 Yang 등⁸⁾의 제안모델과 비교하였다.

2. 실험

2.1 배합상세 및 재료특성

콘크리트의 건조수축에 중요한 영향을 미치는 단위수량 (W), 물-결합재비(W/B) 및 잔골재율(S/a)을 변수로 Table 1에 나타낸바와 같이 17배합을 실험하였다. AA 결합재를 위해 원재료인 고로슬래그를 7.5% $\text{Ca(OH)}_2 + 1\% \text{Na}_2\text{SiO}_3$ 에 의해 활성화 하였다. 물-결합재비가 변수인 그룹 I에서 W/B 는 0.25에서 0.60까지 변화하였으며, W 와 S/a 는 각각

185 kg/m^3 과 0.43으로 고정하였다. 그룹 II에서는 W 가 155 kg/m^3 에서 205 kg/m^3 까지 변화하였으며 W/B 와 S/a 를 각각 0.30과 0.43으로 고정하였다. 그룹 III에서는 S/a 가 0.35에서 0.50까지 변화하였으며 W 는 185 kg/m^3 이고, W/B 는 0.30으로 고정하였다.

잔골재와 굵은골재로서 각각 최대직경 5 mm 이하의 천연모래와 최대직경 25 mm의 부순자갈을 이용하였다. 사용된 모래와 부순자갈의 밀도는 각각 2.62와 2.6이며, 조립률은 각각 2.5와 6.3이다. 배합 시 이용된 골재들의 수분상태는 표면건조포화상태를 유지하였다.

결합재의 원재료로서 이용된 고로슬래그의 밀도와 비표면적은 각각 2.9와 4400 cm^2/g 이다. 활성화제들의 밀도와 최대입경은 Ca(OH)_2 의 경우 각각 2.24와 21.2 μm 이며, Na_2SiO_3 의 경우 각각 2.2와 1026.1 μm 이다. Na_2SiO_3 의 물비는 약 0.9이다.

2.2 양생 및 측정상세

모든 콘크리트의 배합은 0.3 m^3 용량의 강제식 믹서기를 이용하였다. AA 슬래그 결합재와 골재를 1분간 건비빔한 후 물을 첨가하여 추가 습식비빔 1분을 하였다. 압축강도와 건조수축을 측정하기 위한 모든 시험체는 콘크리트 타설 직후에 항온항습실(온도 $21 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 2\%$)에서 양생하였다.

콘크리트의 건조수축을 측정하기 위하여 $\text{O}150 \times 300 \text{ mm}$ 시험체에 전기저항 게이지를 매립하여 타설하였다. 모든 콘크리트는 재령 1일에 탈형하여 91일까지 건조수축 변형률을 측정하였다. 시험체의 건조수축 변형률은 데이터 로거를 사용하여 기록하였다. 경화 전 콘크리트에서는 초기 슬럼프와 공기량을 측정하였고, 경화 후 콘크리트에서는 28일 압축강도와 탄성계수를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

콘크리트의 일반적인 건조수축 예측모델들은 포물선형의 시간함수로써 노출시점(t_0)이후부터의 임의재령(t)에서의 건조수축 변형률을 제시하고 있으며, 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = T_{sh}(t, t_0) \epsilon_{sh\infty} \quad (1)$$

여기서, $T_{sh}(t, t_0)$ 와 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 은 각각 노출시점(t_0)을 고려한 임의재령(t)까지의 시간함수와 건조수축 변형률을 뜻하며 $\epsilon_{sh\infty}$ 은 극한 건조수축 변형률을 의미한다.

시간함수($T_{sh}(t, t_0)$)는 일반적으로 t 가 무한대로 접근하면 수렴하는 경향을 보인다. 건조수축변형률에 영향을 미치는 요인은 결합재의 종류와 초기 노출시점, 양생조건, 시험체의 모양 및 크기, 배합재료, 압축강도이다. 극한 건조수축 변형률은 특정시점(t_1)부터 건조수축을 기록하여 계산하거나 다양한 단기시험과 건조수축 예측모델

Table 1 Details of concrete mixes

Group	Specimen	W/B	S/a	Unit weight (kg/m^3)			
				B	W	S	G
I	1-25	0.25	0.43	740	185	619	814
	1-30	0.30		617		669	880
	1-35	0.35		529		704	927
	1-40	0.40		463		731	962
	1-50	0.50		370		769	1011
	1-60	0.60		308		793	1044
II	2-155	0.30	0.43	517	155	743	977
	2-165			550	165	718	945
	2-175			583	175	694	912
	2-185			617	185	669	880
	2-195			650	195	644	847
	2-205			683	205	619	815
III	3-35	0.30	0.35	617	185	544	1003
	3-40		0.40	617		622	926
	3-43		0.43	617		669	880
	3-45		0.45	617		700	849
	3-50		0.50	617		778	772

Note) The first and second parts of all specimen notations indicate the group class and type of alkali activators, respectively, while the third parts of the notations in groups I, II, and III give W/B ratio, unit water content and S/a ratio, respectively. For example, 1-25 in group I is a Ca(OH)_2 and Na_2SiO_3 -activated GGBS concrete with W/B ratio of 0.25.

을 사용하여 추정할 수 있다. 따라서 극한 건조수축 변형률은 $\epsilon_{sh}(t_1, t_0)/T_{sh}(t_1, t_0)$ 을 통해 결정되며 t_1 과 건조수축 변형률($\epsilon_{sh}(t, t_0)$)이 주어졌을 경우에는 다음 식에 의해 계산된다.⁵⁾

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{T_{sh}(t, t_0)}{T_{sh}(t_1, t_0)} \epsilon_{sh}(t_1, t_0) \quad (2)$$

Ojdrovic and Zarghamee¹²⁾은 측정오류와 영향변수의 다양성을 고려하였을 때 콘크리트의 노출이후 재령 28일을 특정 기준점으로 선정할 수 있음을 제시하였다.

3.1 일반적 거동

Table 2에는 실험 결과를 요약하였으며 Fig. 1은 각각의 실험변수에 따른 건조수축 변형률의 거동을 나타내었다. 수산화칼슘 기반 AA 슬래그 콘크리트의 시간에 따른 건조수축 변형률 곡선은 일반적인 OPC 콘크리트와 같이 포물선 경향을 보였다. 재령 초기의 건조수축 변형률은 수화반응과 수분의 증발에 의해 급격하게 일어났다. 또한 모든 배합에서 건조수축 변형률은 재령 14일 이내에 대부분 발생하였으며 재령이 증가함에 따라 건조수축 변형률의 기울기는 완만하였다.

재령 14일까지의 건조수축 변형률은 물-결합재비와 단위수량이 증가함에 따라 현저히 증가했지만 잔골재율의 영향은 미미하였다. 건조수축 변형률 증가율은 재령이

증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 재령 초기의 건조수축 변형률이 증가할수록 28일 이후의 건조수축의 증가비율은 감소하였다. 재령 14일의 건조수축 변형률은 28일 건조수축 변형률의 약 72~84%의 범위에 있었다. 반면에 91일 건조수축 변형률은 28일 건조수축 변형률의 20~50%만큼 증가하였다. 28일 건조수축 변형률에 대한 91일 건조수축 변형률의 비율은 물-결합재비와 단위수량이 감소함에 따라 증가하였다.

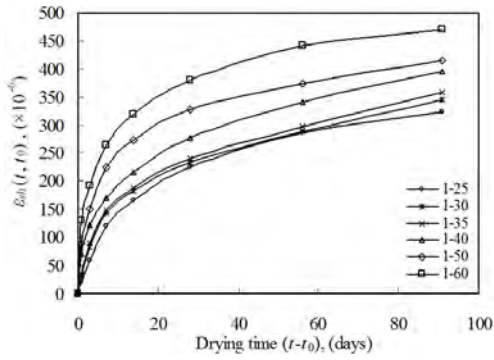
일반적으로 콘크리트의 건조수축 변형률은 굵은골재의 체적비에 의해 영향을 받는다. 이 배합의 경우, 잔골재율 0.35와 0.50일 때 콘크리트 단위용적당 굵은골재 체적비는 각각 38.5%와 29.6%로서 그 차이는 7% 이내에 있다. 이러한 이유로 잔골재율이 콘크리트 건조수축 변형률에 미치는 영향은 비교적 작게 나타났다.

3.2 건조수축 거동에 대한 시간함수

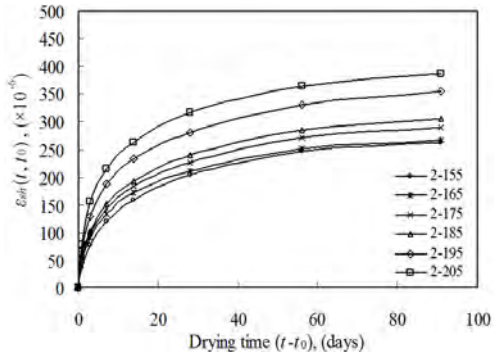
일반적으로 콘크리트의 건조수축은 상대습도가 높아짐에 따라 작아지며 물-시멘트비가 감소할수록 감소한다.¹³⁾ 이에 따라 콘크리트의 배합조건을 고려하지 않은 건조수축 예측모델의 경우에는 배합조건이 달라짐에 따라 실험 결과와 비교했을 때 큰 편차가 발생하기도 하는 문제점이 있다.¹⁴⁾ 이 연구에서는 AA 슬래그 콘크리트에서 시간함수의 적합성을 비교하기 위해 물-결합재비와 단위수량, 잔골재율을 변수로 콘크리트의 배합조건을 달리 하여 3가지 건조수축 예측모델의 건조수축거동에 따른

Table 2 Summary of test results

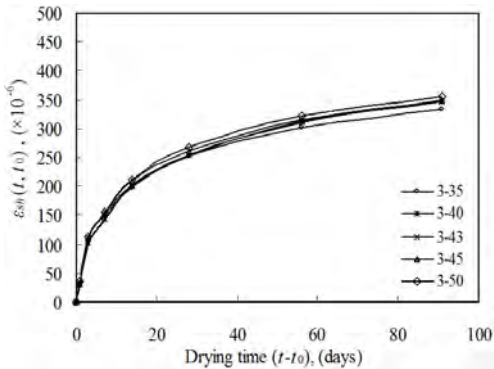
Group	Specimen	Test results									
		W (kg/m ³)	f _{ck} (MPa)	E _c (MPa)	ε ₀	ε _{sh} (×10 ⁻⁶) at different age (days)					
						1	3	7	28	56	91
I	1-25	2342	42.2	31465	0.00285	21	60	119	225	286	324
	1-30	2246	28.5	25287	0.00240	32	84	145	234	289	344
	1-35	2231	24.6	23515	0.00243	35	89	148	240	298	358
	1-40	2264	18.6	19724	0.00200	70	122	171	278	341	395
	1-50	2229	12.5	16552	0.00185	89	151	224	328	373	415
	1-60	2227	8.9	12945	0.00143	131	192	265	381	440	470
II	2-155	2326	32.3	28388	0.00247	46	96	150	254	308	328
	2-165	2275	29.9	25296	0.00239	62	114	168	264	315	335
	2-175	2283	32.7	26628	0.00259	69	123	179	284	338	362
	2-185	2246	30.5	25262	0.00245	77	128	189	299	355	381
	2-195	2251	31.3	25760	0.00263	85	160	236	350	412	443
	2-205	2234	30.0	24996	0.00250	95	195	270	395	456	485
III	3-35	2289	29.6	24514	0.00270	26	93	146	289	342	370
	3-40	2287	29.7	24137	0.00250	34	101	156	309	366	393
	3-43	2246	28.5	25262	0.00253	35	107	163	321	376	404
	3-45	2304	30.5	24077	0.00233	40	112	168	323	391	424
	3-50	2279	32.0	25973	0.00265	42	117	175	334	400	435



(a) Effect of W/B ratio (Group I)



(b) Effect of W_c (Group II)



(c) Effect of S/a ratio (Group III)

Fig. 1 Shrinkage behaviors of concrete specimens

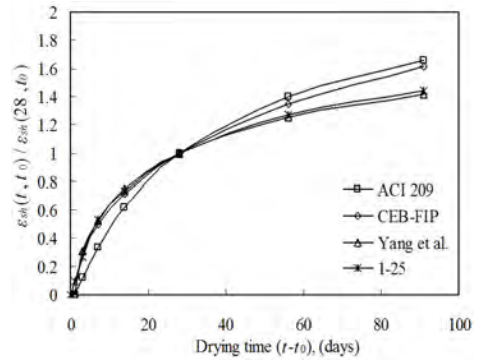
시간함수를 재령 28일을 기준으로 비교하였다(Fig. 2). 습윤 또는 기건양생된 콘크리트 건조수축의 시간함수 ($T_{sh}(t, t_0)$)는 모델코드나 선행연구자들의 연구에 의해 경험적으로 다음과 같이 제시하고 있다.

$$T_{sh}(t, t_0) = \frac{t-t_0}{35+(t-t_0)} : \text{ACI 209}^{10)} \quad (3)$$

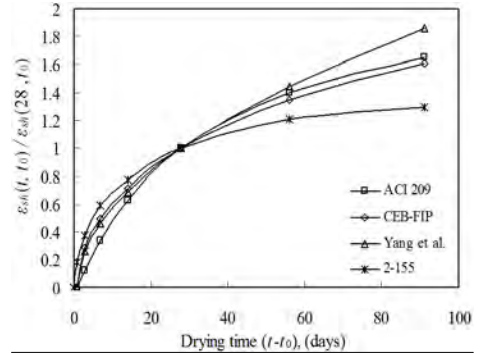
$$T_{sh}(t, t_0) = \left[\frac{t-t_0}{350(f(D))^2+(t-t_0)} \right]^{0.5} : \text{EB-FIP}^{11)} \quad (4)$$

$$T_{sh}(t, t_0) = \left[\frac{t-t_0}{k_1(V/S_A)^2+(t-t_0)} \right]^\beta : \text{Yang et al}^{8)} \quad (5)$$

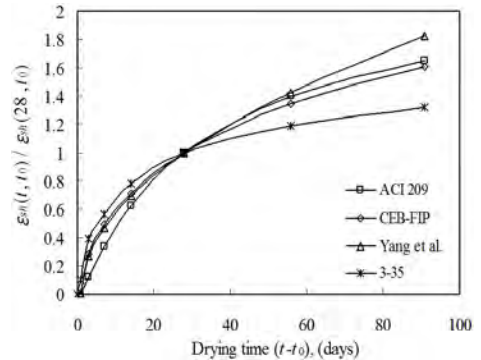
여기서, $f(D)$ 는 V/S_A 의 함수인데, V 는 대기와 접하는 부재



(a) W/B ratio



(b) W_c



(c) S/a ratio

Fig. 2 Relationship of time function and 28-day normalized shrinkage

의 체적이며, S_A 는 부재의 표면적이다. 또한 식 (5)에서 k_1 과 β 는 단위수량과 물-결합제비의 함수로서 식 (6)과 (7)에 의해 결정된다. 초기재령에는 k_1 이 증가할수록 건조수축 변형률은 감소하고 중장기 재령에서 β 값이 작아질수록 건조수축 변형률도 작아지는 경향을 보인다.

$$k_1 = 0.031 \left[W/B \cdot \left(\frac{W}{W_0} \right) \right]^{-0.75} \quad (6)$$

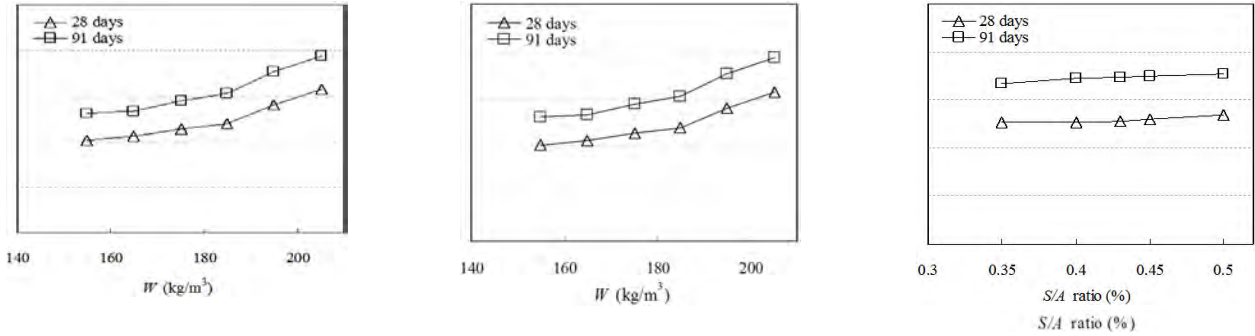
$$\beta = 0.45 \left[W/B \cdot \left(\frac{W}{W_0} \right) \right]^{-0.19} \quad (7)$$

여기서 W_0 는 단위수량에 대한 참고값으로서 100 kg/m^3 이다. ACI 209¹⁰⁾와 CEB-FIP 기준¹¹⁾은 일반 OPC 콘크리트

의 건조수축 예측모델이며 ACI 209 기준¹⁰⁾은 콘크리트의 부재크기를 고려한 예측식이며, 총 건조수축을 자기수축 응력과 건조수축응력으로 세분화하여 건조수축 변형률을 예측하였다. 반면에 Yang 등⁸⁾의 모델은 위의 모델들과 달리 알칼리활성 콘크리트에 대한 예측모델로서 알칼리활성화제의 종류, 단위수량, 물-결합재 비와 같이 콘크리트의 건조수축에 중요한 영향을 주는 요인들을 고려하였다.

ACI 209 기준¹⁰⁾은 다른 제안모델이나 실험 결과에 비

교했을 때 재령초기에는 낮게 예측하지만 28일 이후에는 재령이 증가함에 따라 과대평가하였다. CEB-FIP 기준¹¹⁾은 28일 이전에는 실험 결과와 비교했을 때 합리적으로 예측하고 있지만 28일 이후에는 다소 과대평가하는 경향을 보였다. Yang 등⁸⁾의 시간함수는 1-25와는 매우 비슷한 값을 보였다. 이는 Yang 등⁸⁾의 시간함수가 다른 모델과는 달리 콘크리트의 건조수축의 큰 영향요인인 단위수량과 물-결합재비를 고려했기 때문이다.

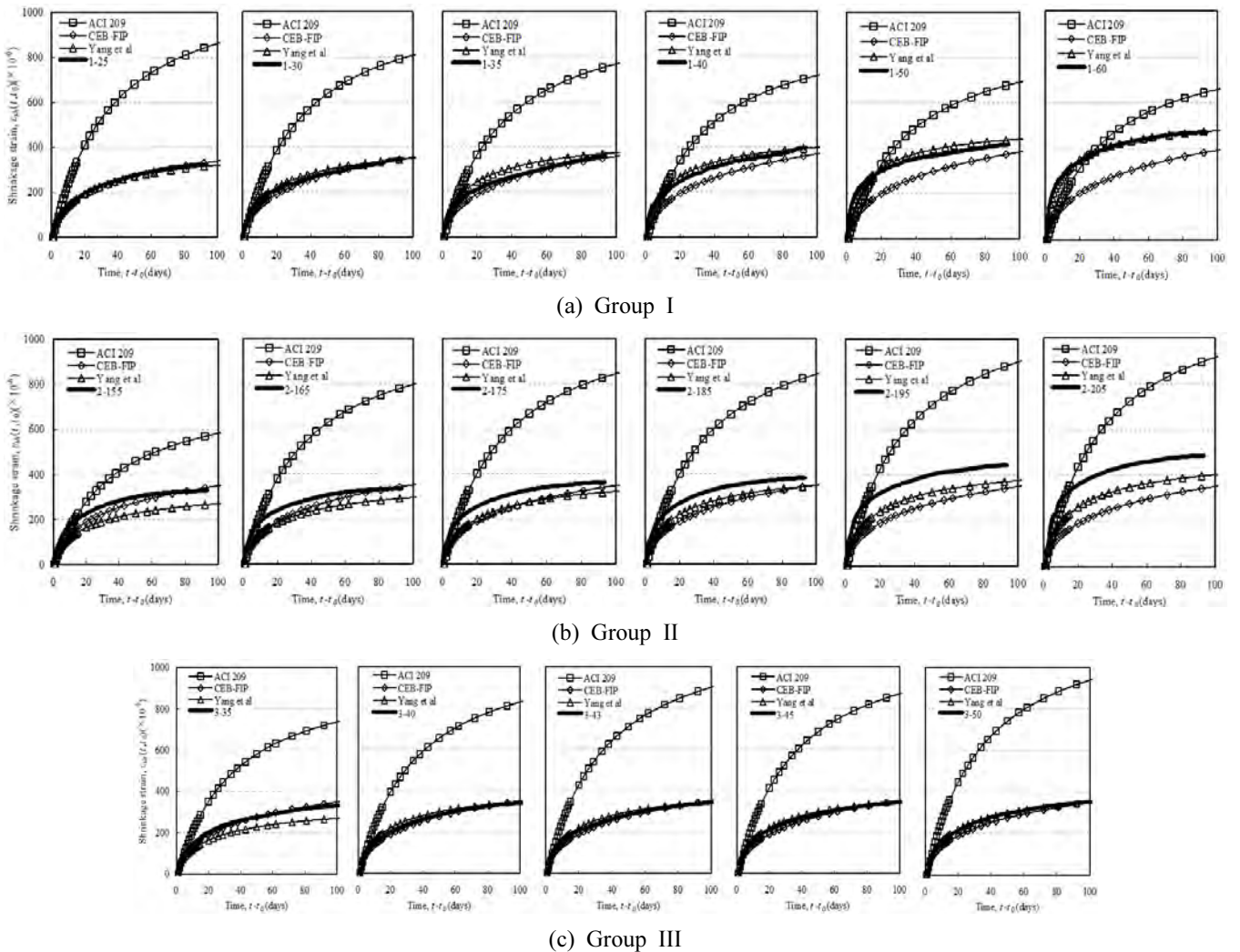


(a) Water-to-binder ratio

(b) Unit water content (kg/m^3)

(c) Fine aggregate-to-total aggregate ratio

Fig. 3 Effect of different parameters on 28-day and 98-day shrinkage strains



(a) Group I

(b) Group II

(c) Group III

Fig. 4 Comparison of measured and predicted shrinkage strains

3.3 28일 및 91일 건조수축 변형률

일반적으로 W/B 는 콘크리트의 건조수축에 지배적인 요인이다. 이는 W/B 가 높아질수록 페이스트의 모세관 공극률은 증가하고, 콘크리트 내의 공극량의 증가는 페이스트에 다량의 건조수축을 초래하기 때문이다.⁴⁾ 또한 OPC 콘크리트의 건조수축은 결합재의 단위용적이 60% 이상일 때 결합재의 구속효과로 인해 OPC 페이스트와 비교하여 약 80% 감소한다.¹³⁾ 반면에 단위수량의 증가는 결합재의 구속효과를 감소시켜 콘크리트의 건조수축을 증가시키는 요인이다.

Fig. 3과 4에는 실험변수에 따른 28일과 91일 건조수축의 변화를 나타냈다. AA 슬래그 콘크리트에서의 건조수축은 OPC 콘크리트와 비슷한 경향을 나타내고 있다. AA 슬래그 콘크리트에서의 28일 건조수축 변형률은 물-결합재비가 0.30에서 0.60으로 증가함에 따라 약 39% 증가하였으며 물-결합재비가 0.35를 기점으로 건조수축 변형률이 급격히 증가했다. 또한 단위수량이 155 kg/m³에서 205 kg/m³로 증가함에 따라 건조수축 변형률이 약 36% 증가하였고, 특히 단위수량 185 kg/m³ 이상에서 건조수축 변형률이 급격히 증가하였다. 반면에 잔골재율이 0.35에서 0.50으로 증가함에 따른 건조수축변형률은 다른 변수와 비교하여 변화의 정도가 작았다.

91일 건조수축 변형률은 28일 건조수축 변형률과 비슷한 경향을 나타내었다. 재령 28일에서 건조수축 변형률은 91일 값의 평균 75% 이상으로 건조수축 대부분이 28일 이전에 발생하였다. 실험 결과 콘크리트의 건조수축에 가장 지배적인 요인은 결합재량이었다.

4. 평가모델과 실험 결과의 비교

이 연구에서 측정된 실험 결과는 OPC 콘크리트의 측정값에 근거한 ACI 209¹⁰⁾ 및 CEB-FIP 기준¹¹⁾과 AA 슬래그 콘크리트의 실험값에 근거한 Yang 등⁸⁾의 모델을 비교하였다(Fig. 4). Table 3에는 각 실험체의 건조수축과 예측값으로부터 산정한 오차계수들의 평균과 표준편차를 나타내었다. ACI 209 기준¹⁰⁾은 모든 배합의 실험 결과와 비교하여 상당히 크게 예측하는 경향을 보였다. 특히 재령 7일 이후부터 과대평가하였으며 재령이 증가함에 따라 과대평가의 정도도 증가하였다. ACI 209 기준¹⁰⁾과 실험 결과의 비교로부터 얻은 오차계수의 평균과 표준편차는 각각 0.98과 0.33으로 실험 결과를 상당히 과대평가하였다. CEB-FIP 기준¹¹⁾은 Group I에서는 W/B 가 증가할수록 건조수축 변형률을 작게 예측하였으며 Group II에서도 단위수량이 증가함에 따라 과소평가 정도도 다소 증가하는 경향을 보였다. CEB-FIP 기준식¹¹⁾과 실험 결과의 비교로부터 얻은 오차계수의 평균과 표준편차는 각각 0.22와 0.10으로 ACI 209 기준¹⁰⁾에 비해 실험 결과를 정확히 예측하지만 재령 28일 이후에는 그 정확도가 낮아

Table 3 Comparison of statistical values of error coefficients calculated from each shrinkage curve

Specimen	ACI 209 ⁸⁾	CEB-FIP ⁹⁾	Yang et al ⁵⁾
Mean	0.98	0.22	0.16
Standard deviation	0.32	0.10	0.07

Note) The error coefficient =

$$\frac{1}{\epsilon_{sh}(t, t_0)_m} \sum \left[\frac{(\epsilon_{sh}(t, t_0)_{Exp} - \epsilon_{sh}(t, t_0)_{Pre})^2}{n} \right]^{1/2}$$

where $\epsilon_{sh}(t, t_0)_m$ is the mean of the measured shrinkage $\epsilon_{sh}(t, t_0)_{Exp}$ and $\epsilon_{sh}(t, t_0)_{Pre}$ are the experimental and predicted shrinkage strains, respectively, and n is the number of measured points.

졌다. 반면 Yang 등⁸⁾의 모델은 콘크리트 배합조건의 변화에 관계없이 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다. Yang 등⁸⁾의 모델과 실험 결과의 비교로부터 결정된 오차계수와 표준편차는 각각 0.16과 0.07이었다.

5. 결 론

이 연구에서는 물-결합재비, 단위수량 그리고 잔골재율을 실험변수로 하여 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률을 평가하였다. AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률을 합리적으로 평가하기 위한 모델을 확립하기 위해서는 양생조건 및 활성화제 종류와 투입량에 따른 건조수축 거동의 변화에 대한 자료들을 지속적으로 구축해야 할 필요가 있다. 이 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 물-결합재비가 증가할수록 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률은 증가하지만, 시간함수의 변화는 거의 없었다.
- 2) AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률 거동은 단위수량이 185 kg/m³ 이상일 때 급격히 증가하였다.
- 3) 잔골재율이 0.35에서 0.50으로 증가할 때 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률의 차이는 5% 이내로서 그 영향은 물-결합재비와 단위수량에 비해 현저히 작게 나타났다.
- 4) ACI 209의 시간함수는 28일 이후 실험 결과를 과대평가한 반면, CEB-FIP와 Yang 등의 모델은 실험 결과와 비교적 잘 일치하였다.
- 5) AA 슬래그 콘크리트의 건조수축에 대해 CEB-FIP 기준식은 재령 28일 이후 과소평가 정도가 증가하는 경향을 보였다. 반면 Yang 등의 모델은 각 변수가 건조수축 변형률에 미치는 영향을 합리적으로 반영하면서 실험 결과와 잘 일치하였다.

감사의 글

이 연구는 2013학년도 경기대학교 대학원 연구장학생 장학금 지원 및 2003년도 정부(미래창조과학부)의 재원

으로 한국연구재단-공공복지안전연구사업(No. 2013067519)의 지원을 받아 수행되었고, 이에 감사 드립니다.

References

1. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D., *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor and Francis, 2006, 376 pp.
2. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimoonang Publishing Company, 2011, pp. 123-144.
3. Palacios, M. and Puertas, F., "Effect of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Properties of Alkali-Activated Slag Mortars and Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 5, 2007, pp. 691-702.
4. Melo Neto, A. A., Cincotto, M. A., and Repette, W., "Drying and Autogenous Shrinkage of Pastes and Mortars with Activated Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 4, 2008, pp. 565-574.
5. Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., and Karahan, O., "Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 548-555.
6. Kim, G. W., Kim, B. J., Yang, K. H., and Song, J. K., "Strength Development of Blended Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, pp. 137-145. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.2.137>)
7. Cho, A. R., Yang, K. H., and Song, J. K., "Effect of Water-Binder Ratio on Shrinkage Strain of Alkali-Activated Slag Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 359-360
8. Yang, K. H., Cho, A. R., and Song, J. K., "Unrestrained Short-Term Shrinkage of Calcium Hydroxide-Based Alkali-Activated Slag Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No. 2, 2013, pp. 127-136.
9. Kutti, T., Berntsson, L., and Chandra, S., "Shrinkage of Cements with High Content of Blast-Furnace Slag, in Malhotra," *V. M. (Ed.), Proceedings of Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1992, pp. 615-625.
10. ACI 209R-92. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, *ACI Manual of Concrete, Practice Part 1: Materials and General Properties of Concrete*, 1994, 47 pp.
11. Comité Euro-International du Béton (CEB-FIP), *Structural Concrete : Textbook on Behaviour, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete (Fib), 1999, 224 pp.
12. Ojdovic, R. P. and Zarghamee, M. S., "Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Short-Term Tests," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 2, 1996, pp. 169-177.
13. Yang, E. I., Kim, I. S., Yi, S. T., and Lee, K. M., "Comparison of Measurement Methods and Prediction Models for Drying Shrinkage of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 85-91. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.1.085>)
14. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Addison Wesley Longman, 1995, 844 pp.

요 약 알칼리활성(alkali-activated, AA) 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률을 평가하고 설계기준 및 제안모델의 적용성을 확인하기 위하여 단위수량, 물-결합재비 및 잔골재율을 변수로 17배합의 콘크리트를 준비하였다. 측정된 시간함수 및 건조수축 변형률은 ACI 209 및 CEB-FIP 기준식과 Yang 등의 제안모델과 비교하였다. 실험 결과 AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률은 물-결합재비에 현저히 영향을 받았지만 물-결합재비에 대한 시간함수의 영향은 비교적 작았다. AA 슬래그 콘크리트의 건조수축 변형률은 단위수량 185 kg/m³ 이상일 때 급격히 증가하였다. 반면, 잔골재율이 AA 슬래그 콘크리트 건조수축에 미치는 영향은 미미했다. 실험 결과와 평가모델의 비교에서 ACI 209 식은 AA슬래그 콘크리트의 건조수축을 상당히 과대평가하였으며, CEB-FIP 기준식은 재령 28일 이후 과소평가 정도가 증가하는 경향이 있었다. 반면 Yang 등의 모델의 오차계수의 평균과 표준편차가 0.16과 0.07로서 실험 결과와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 알칼리활성 슬래그 콘크리트, 건조수축 변형률, 물-결합재비, 단위수량, 시간함수