

수축저감제를 사용한 콘크리트의 건조수축 예측에 관한 연구

Study on Prediction of Drying Shrinkage of Concrete using Shrinkage Reducing Agent

서 태 석

최 훈 제*

Seo, Tae-Seok

Choi, Hoon-Jae*

Hyundai E&C , 102-4, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea

Abstract

Shrinkage Reducing Agent(SRA) was developed in order to control drying shrinkage cracks in concrete, and the use of SRA is increasing since it can control drying shrinkage cracks and improve the quality of concrete structures. Although there are many types of prediction equations of drying shrinkage strain, there is no prediction method which can consider the effect of SRA up to the present. Therefore, it is impossible to predict the tensile stress generated by drying shrinkage of SRA concrete, and to investigate the quantitative serviceability limit state of SRA concrete. In this study, the drying shrinkage of SRA concrete was investigated by experiment and analysis in order to suggest the predictability of drying shrinkage of SRA concrete. As a result, AIJ model, ACI model, GL2000 model showed there was a correlation between the predicted values and the experimental values within the error range of $\pm 10\%$. However, CEB-FIP model and B3 model underestimated the experimental values.

Keywords : shrinkage reducing agent, prediction equations, drying shrinkage, SRA concrete, predictability

1. 서 론

콘크리트 미세공극 내의 수분증발에 의해 콘크리트의 체적은 감소하게 되며 이러한 현상을 건조수축이라 한다. 건조수축이 내부의 철근 또는 다른 구조 부재에 의해 구속을 받게 되면 콘크리트에 인장응력이 발생하게 되고, 콘크리트는 인장강도가 낮기 때문에 건조수축에 의해 발생한 응력은 균열을 유발시킬 수 있다[1,2,3,4]. 이러한 균열은 구조물의 지속 가능성, 내구성, 사용성 등에 영향을 미칠 수 있으므로 건조수축 균열을 제어하기 위한 대책 방안이 필요하다.

콘크리트 건조수축 균열을 제어하기 위하여 수축저감제(SRA)가 개발되었다. SRA는 콘크리트 미세공극의 표면장력을 작게 하여 수축량을 감소시키며[5,6,7,8], 첨가율에

따라 20~40%까지 수축저감효과가 있는 것으로 보고되고 있다[9]. 따라서 건조수축 균열제어를 통한 콘크리트구조물의 품질을 향상시키기 위하여 SRA의 사용이 증가되고 있지만, 건조수축을 예측하기 위한 다양한 식들이 존재함에도 불구하고 SRA의 영향을 고려할 수 있는 예측방법은 아직까지 없는 실정이다. 따라서 SRA 콘크리트의 건조수축에 의해 발생하는 인장응력을 정확히 예측할 수 없고, 콘크리트 구조물의 정량적인 사용성 한계의 검토가 불가능하다.

본 연구에서는 SRA 콘크리트의 정량적인 건조수축 변형을 예측 가능성을 제시하기 위하여 건조수축 실험값과 기존 모델에 의한 예측값과의 비교검토를 수행하였다. 기존 모델은 SRA의 영향을 고려할 수 없으므로, 실험결과에 근거하여 SRA 첨가율에 따른 보정값을 구하였고, 기존 모델에 보정값을 적용하여 건조수축변형을 실험값과 비교하였다. 본 연구에서는 ACI 모델[10], AIJ 모델[11], CEB-FIP 모델[12], B3 모델[10], GL2000 모델[10]에 의한 건조수축 예측값을 실험값과 비교하였다. 또한 SRA 콘크리트의 역학특성을 검토하였고, 응력거동 및 균열저항 특성을 검토하기 위하여 1축구속 수축시험도 실시하였다.

Received : May 10, 2016

Revision received : June 10, 2016

Accepted : June 17, 2016

* Corresponding author : Choi, Hoon-Jae

[Tel: 82-2-746-0250, E-mail: chj612@hdec.co.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

2. 실험 계획

2.1 콘크리트 배합과 재료

Table 1에 콘크리트 배합을 나타내었다. SRA 첨가율에 따른 수축특성을 검토하기 위하여 SRA 첨가율을 변수로 하여 콘크리트를 제작하였고, 물-바인더비(W/B)는 48.5%로 하였다. 콘크리트 슬럼프와 공기량은 목표치(슬럼프 $15 \pm 2.5\text{cm}$, 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$)를 만족하였으며, Table 2에 콘크리트 배합에 사용된 재료를 정리하였다. Table 3과 같이 본 연구에서 사용된 SRA는 글리콜 타입의 액상형 혼화제이며, 콘크리트 미세공극의 표면장력을 작게 하여 수축량을 감소시키는[5,6,7,8] 특징이 있다.

Table 1. Mixture proportions

Case	W/B	S/a	Unit weight (kg/m^3)				SRA (cement \times %)
			W	C	S	G	
SRA0.0	48.5	49.8	165	340	903	910	0.0
SRA0.3	48.5	49.8	165	340	903	910	0.3
SRA0.5	48.5	49.8	165	340	903	910	0.5
SRA1.0	48.5	49.8	165	340	903	910	1.0

* W(Water), C(Cement), S(Sand), G(Gravel)

Table 2. Properties of cement and aggregate

Ordinary Portland Cement	Specific gravity : 3.16	Specific surface area : $3300\text{cm}^2/\text{g}$
Coarse aggregate	Specific gravity : 2.62	Absorption capacity : 0.73%
Fine aggregate	Specific gravity : 2.61	Absorption capacity : 0.85%

Table 3. Properties of SRA

Main constituent	Density (g/cm^3)	Viscosity (cps)	Type	Color
Glycol-type	0.95 ± 0.1 (at 20°C)	200 ± 50 (at 20°C)	Liquid	White

* 1 cps(centipoise) = 0.01P = 0.001 Pa · s

2.2 시험체 및 시험방법

SRA 콘크리트의 건조수축 특성을 검토하기 위하여 JIS A 1129[13] 규정에 따라 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 각주형 시험체를 배합별로 3개씩 제작하였고(Figure 1), 시험편 내부에 매립형 변형률 게이지(Figure 2)를 설치하여 콘크리트의 건조수축 변형률을 자동 측정하였다. 매립형 변형률 게이지는 최대 $20000\mu\epsilon$ 까지 측정이 가능한 Tokyo Sokki Kenkyujo사의 PMFL-60-2LT 타입이며, 시험체 상하부의 불균등 건조수축을 방지하기 위해 시험체의 정중

양에 설치하였다. 또한 SRA 콘크리트의 균열저항 특성을 검토하기 위하여 1축구속 수축시험[14]을 실시하였다(Figure 3). 1축구속 수축시험체는 각주형 콘크리트 ($100 \times 200 \times 1500\text{mm}$)의 내부에 배근된 D32 철근에 의한 건조수축의 구속으로 콘크리트에 인장응력을 유발시키는 시험체이다. 철근이 받는 힘의 불균일성을 최소화하고 단부에만 구속을 주어 중앙부에 인장이 걸리게 하기 위하여 중앙 300mm 구간의 리브와 마디를 제거하였다[15]. 철근 변형률을 측정하기 위해 FLA-5-11-5L 타입의 철근변형률 게이지를 중앙부에 2개 부착하여 자동 계측하였다. SRA 콘크리트의 역학특성(압축강도, 탄성계수, 할렬인장강도)을 평가하기 위하여 각각 JIS A 1108[16], JIS A 1149[17], JIS A 1113[18]에 준하여 시험을 수행하였다. 모든 시험체는 시험체 제작 후 24시간 습윤양생을 실시하였고, 습윤양생 실시 후 항온 항습실(온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대 습도 $60 \pm 5\%$)에서 기건양생을 하였다.



Figure 1. Drying shrinkage specimen uniaxial restraint shrinkage specimen



Figure 2. Strain gauge

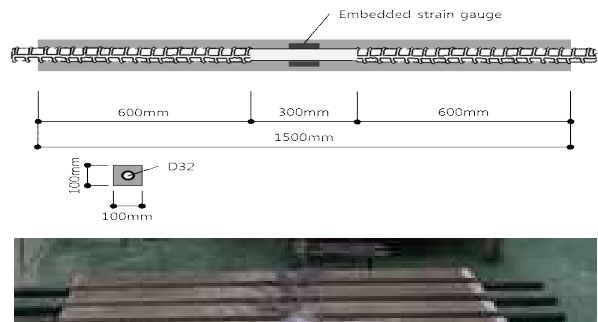
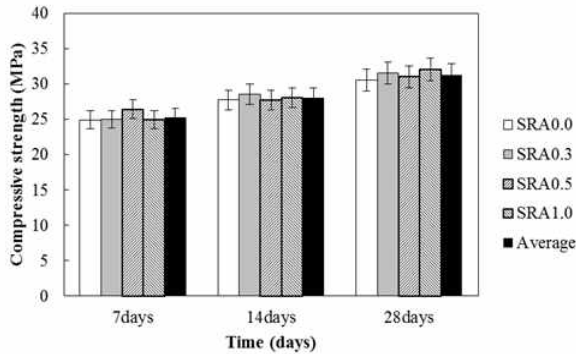


Figure 3. Uniaxial restraint shrinkage specimen

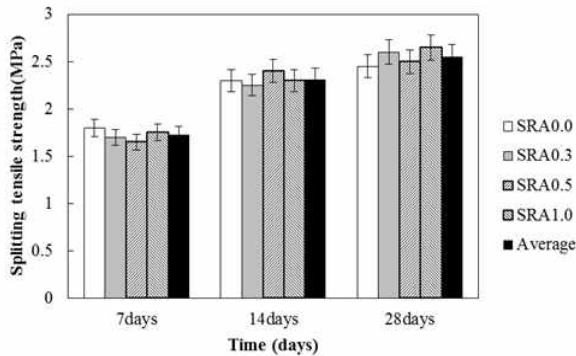
3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트 역학적특성

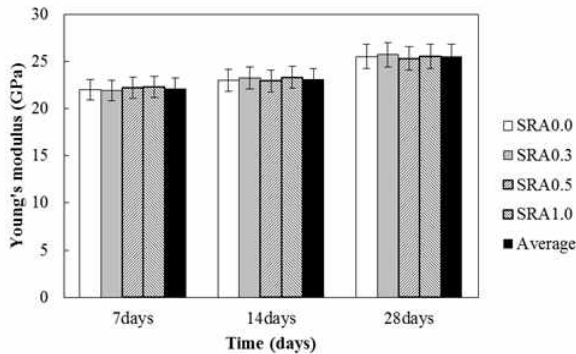
SRA 콘크리트의 역학적특성(압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수) 실험결과를 Figure 4에 나타내었다. SRA 첨가율에 따른 압축강도, 할렬인장강도, 탄성계수의 편차는 거의 없었으며, SRA 첨가율 1.5% 이하의 범위에서는 콘크리트의 역학적특성에 큰 영향을 미치지 않는다는 기존 연구결과와 동일한 결과를 나타내었다[8,19].



(a) Compressive strength



(b) Splitting tensile strength



(c) Young's modulus

Figure 4. Concrete mechanical properties

3.2 건조수축시험

재령 120일까지의 자유 건조수축 변형률 거동을 Figure 5에 나타내었다. 건조수축 변형률은 3개의 시험체에 대한 평균값으로 정리하였다. SRA 첨가율이 증가할수록 건조수축 변형률은 감소하였으며, SRA 0.5% 첨가로 17% 정도, SRA 1.0% 첨가로 30% 정도 건조수축량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(Figure 6). 일반적으로 SRA 1.0% 첨가가 사용되고 있지만, SRA 0.5% 첨가로도 일본 건축학회에서 제안하고 있는 고급 사양의 콘크리트(건조수축 최종 값 500~600 $\mu\epsilon$)[11]를 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

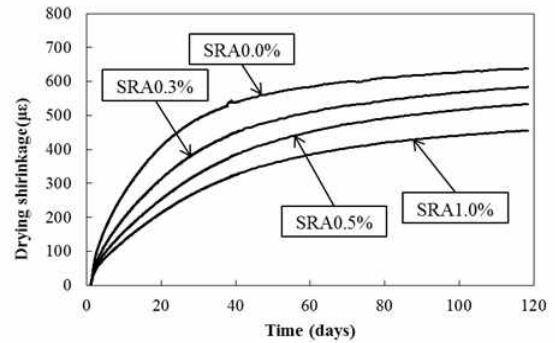


Figure 5. Free drying shrinkage strain

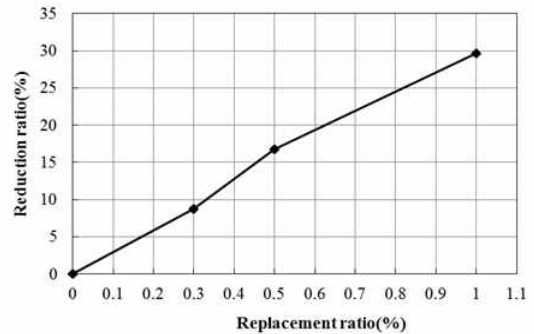


Figure 6. Shrinkage reduction ratio

3.3 1축구속 수축시험

SRA 콘크리트의 응력거동 및 균열저항 특성을 검토하기 위하여 1축구속 수축시험을 실시하였고, 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. 1축구속 수축시험체에 발생한 인장응력은 힘의 평형조건에 의해 식(1)으로 구할 수 있다. SRA0.3의 응력값은 재령 25일 이후에 SRA0.0과 거의 동일해 졌으나 SRA0.5, SRA1.0의 인장응력은 SRA0.0보다 각 14%, 25% 정도씩 감소하였다. Figure 7에는 콘크리트 할렬인장강도 실험값도 함께 나타내었다. 기존 문헌에 의하면 건조수축에 의한 균열은 할렬인장강도의 70% 수준에

도달했을 때 발생한다고 보고되고 있다[11,20]. SRA0.0와 SRA0.3은 재령 15일 에서 20일 사이에 균열이 관찰되었고, 이 균열들은 콘크리트 단면을 관통하지는 않았다. 반면 SRA0.5와 SRA1.0 은 균열이 발견되지 않았다. 건조 수축에 의한 균열제어를 위해서는 수축저감제가 최소 0.5% 이상 첨가되어야 할 것으로 판단된다.

$$\sigma_t = \frac{E_s \cdot \varepsilon_r \cdot A_s}{A_c} \quad \text{----- (1)}$$

여기에서 E_s 는 철근의 탄성계수, ε_r 은 철근의 변형률, A_s 는 철근 단면적, A_c 는 콘크리트 단면적이다.

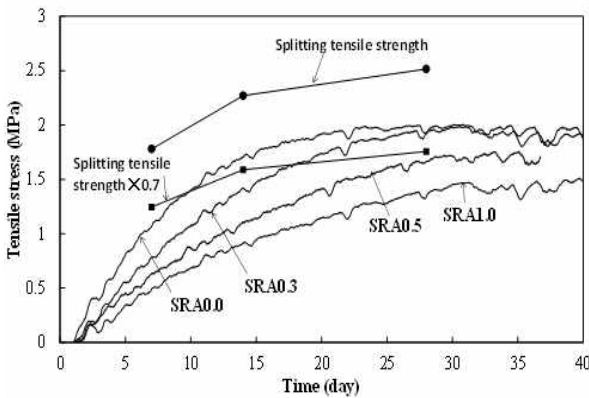


Figure 7. Progress of tensile stress due to drying shrinkage under uniaxial restraint

3.4 건조수축 예측식과의 비교

기존 건조수축 ε_{sh} 모델은 식(2)와 같이 시간함수 $f(t)$ 에 건조수축 최종값 $\varepsilon_{s\infty}$ 의 곱으로 제안되고 있으며, 건조수축 최종값은 콘크리트 압축강도, 시멘트 종류, 골재 종류, 양생 방법 등에 따른 보정값을 고려해서 구하는 형식으로 제안되어 있다(식(6)~식(17) 참조). 하지만 건조수축을 예측하기 위한 다양한 식들이 존재함에도 불구하고 SRA의 영향을 고려할 수 있는 보정값은 없는 실정이다. 따라서 SRA의 영향을 고려할 수 있는 보정값을 제시하기 위하여 본 연구에서 수행한 건조수축 실험결과에 근거하여 재령 120일에서의 SRA0.0의 건조수축 변형률에 대한 SRA 혼입 콘크리트의 건조수축 변형률의 비를 구하였고(식(3) 참조), 이로부터 회귀분석(Figure 8)을 통하여, 식(4)과 같이 SRA 영향을 고려할 수 있는 보정값을 도출하였다.

SRA 콘크리트의 수축 변형률 예측가능성을 검토하기 위하

여 기존의 건조수축 예측식인 ACI 모델(식(6),(7))[10], AIJ 모델(식(8)~(10))[11], CEB-FIP 모델(식(11),(12))[12], B3 모델(식(13)~(15))[10], GL2000 모델(식(16),(17))[10]에 실험결과로 구해진 보정계수 식(4)를 곱하여 식(5)와 같이 예측값 ε'_{sh} 을 구하였고, 이 예측값과 실측값을 비교하였다. Table 4에 각 모델 입력변수(배합, 시험체 형상, 실험결과 등)을 정리하였으며, 그 결과를 Figure 9에 나타내었다.

AIJ 모델, ACI 모델, GL2000 모델은 $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 전반적으로 양호한 상관관계를 보였지만, CEB-FIP 모델과 B3 모델은 예측값이 실측값을 과소평가 하는 것으로 나타났다. 특히 AIJ 2006에서는 CEB-FIP 모델 예측값이 실측값을 과소평가하는 것으로 보고되고 있다[11]. 예측값과 실측값의 비교결과로부터 AIJ 모델, ACI 모델, GL2000 모델에 수축저감특성을 고려할 수 있는 적절한 보정값을 고려한다면 SRA 콘크리트의 수축특성을 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 건조수축, 크리프와 같은 콘크리트 시간의 존특성에 대한 모델들은 재료 및 환경적 차이의 영향으로 인하여 실측값과 차이를 보이기 쉬우므로[11] 국내 조건에 적합한 재료와 환경조건을 변수로 하여 보다 많은 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

$$\varepsilon_{sh} = f(t) \cdot \varepsilon_{s\infty} \quad \text{----- (2)}$$

$$\alpha = \frac{\text{shrinkagevalueat theageof 120(SRA0.0\%,0.3\%,0.5\%,1.0\%)}}{\text{Shrinkagevalueat theageof 120(SRA 0.0\%)}} \quad \text{----- (3)}$$

$$\alpha = 1.0e^{-0.345x} \quad \text{----- (4)}$$

$$\varepsilon'_{sh} = f(t) \cdot \varepsilon_{s\infty} \cdot \alpha \quad \text{----- (5)}$$

여기에서 α 는 수축저감제 영향을 고려할 수 있는 보정계수, x 는 수축저감제 첨가율(%)이다.

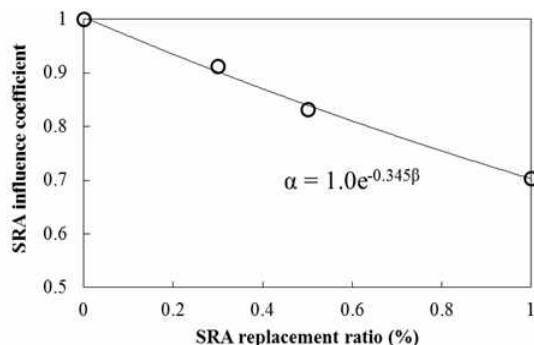


Figure 8. SRA influence coefficient

Table 4. Input value of model

Factor	Input value				
	ACI	AJ	CEB-FIP	B3	GL-2000
Content (kg/m ³)					
Cement	340	340	-	-	-
Water	-	165	-	-	-
Aggregate	-	910	-	-	-
Mineral admixture	-	1	-	-	-
Type I cement	-	1	5	1	1
Natural aggregate	-	1	-	-	-
S/a (%)	49.8	-	-	-	-
Air content (%)	4.9	-	-	-	-
Slump (mm)	175	-	-	-	-
f _{cm28} (Mpa)	30	-	30	30	30
V/S (mm)	22.2	22.2	-	22.2	22.2
2 A _c /u (mm)	-	-	50	-	-
Member shape factor	-	-	-	1.55	-
RH (%)	60	60	60	60	60
Curing condition	1.2	-	-	1.2	-

* ACI 모델

$$\epsilon(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} \cdot \frac{(t - t_0)^{0.6}}{35 + (t - t_0)^{0.6}} \quad (6)$$

$$\epsilon_{s\infty} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad (7)$$

여기에서 t는 재령일, t₀는 건조 개시일, r_{sh}는 골재종류, 시멘트 종류 및 혼화재 종류에 따른 보정계수이다.

* AIJ 모델

$$\epsilon(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{0.16(V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4(V/S)^{0.18}} \quad (8)$$

$$\epsilon_{s\infty} = kt_0^{-0.08} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \quad (9)$$

$$k = (11W - 1.0C - 0.82G + 404)\gamma \quad (10)$$

여기에서 t는 재령일, t₀는 건조 개시일, V는 콘크리트 체적, S는 외기에 접하는 표면적, h는 상대습도, W는 단위수량, C는 단위시멘트량, G는 단위굵은골재량, r는 골재종류, 시멘트 종류 및 혼화재 종류에 따른 보정계수이다.

* CEB-FIP 모델

$$\epsilon(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{0.035(2A_c/u)^2 + (t - t_0)} \right)^{0.5} \quad (11)$$

$$\epsilon_{s\infty} = 1.55[1 - (RH/100)^3][160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{28}/10)]10^{-6} \quad (12)$$

여기에서 t는 재령일, t₀는 건조 개시일, A_c는 콘크리트 단면적, U는 외기와 접하는 부재의 둘레길이, RH는 상대습도, β_{sc}는 시멘트 종류에 따른 보정계수, f₂₈은 28일 압축강도이다.

* B3 모델

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} (1 - h^3) \left(\tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_s}} \right) \quad (13)$$

$$\epsilon_{s\infty} = \alpha_1 \alpha_2 (0.019W^{21} (f_{28})^{-0.28} + 270) \quad (14)$$

$$\tau_s = 0.085t_0^{-0.08} f_{28}^{-0.25} \left[k_s 2 \left(\frac{V}{S} \right) \right]^2 \quad (15)$$

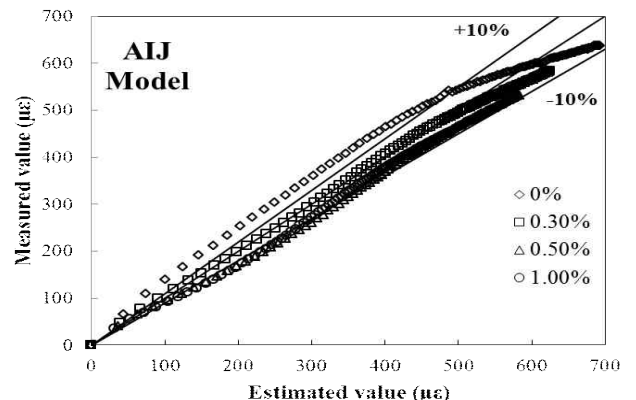
여기에서 t는 재령일, t₀는 건조 개시일, h는 상대습도, α₁는 시멘트 종류에 따른 보정계수, α₂는 양생방법에 따른 보정계수, W는 배합수, f₂₈은 28일 압축강도, k_s는 단면형상계수, V는 콘크리트 체적, S는 외기에 접하는 표면적이다.

* GL2000 모델

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} (1 - 1.18h^4) \sqrt{\frac{t - t_0}{t - t_0 + 0.15(V/S)^2}} \quad (16)$$

$$\epsilon_{s\infty} = 1000K \sqrt{\frac{30}{f_{28}}} \times 10^{-6} \quad (17)$$

여기에서 t는 재령일, t₀는 건조 개시일, h는 상대습도, V는 콘크리트 체적, S는 외기에 접하는 표면, K는 시멘트 종류에 따른 보정계수, f₂₈은 28일 압축강도이다.



(a) AIJ 모델

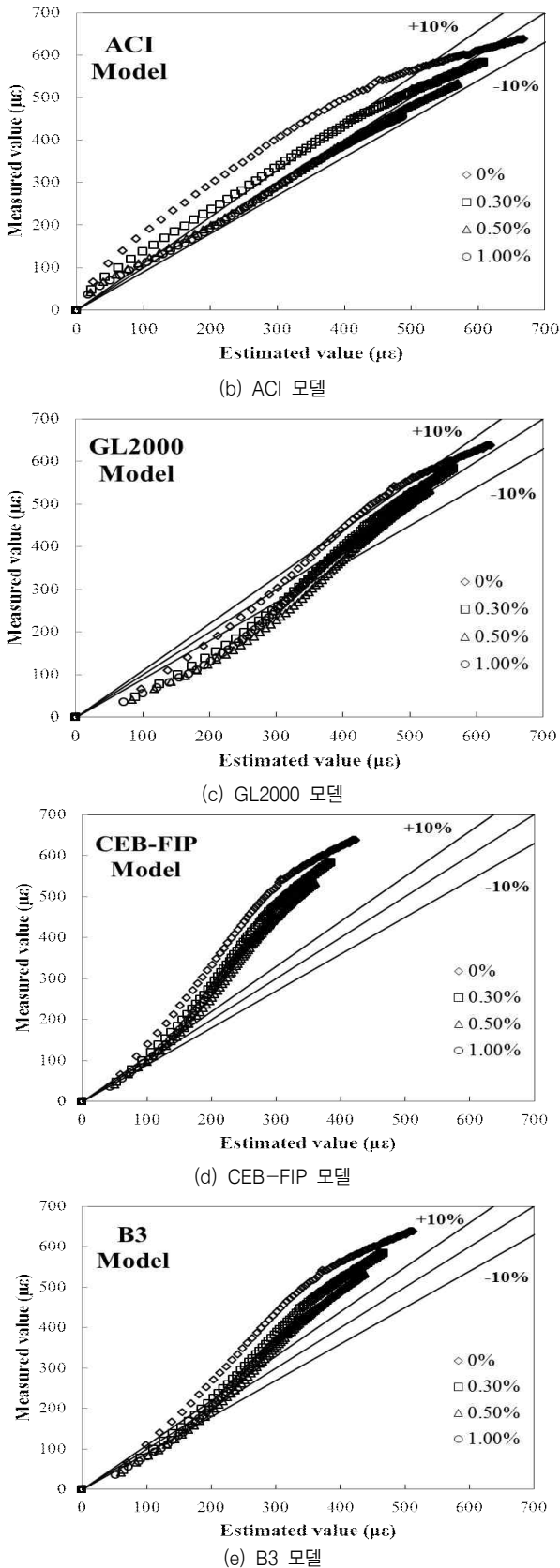


Figure 9. Comparison between experimental values and estimated values

4. 결 론

본 연구에서는 SRA 콘크리트의 건조수축 변형률 예측가능성을 제시하기 위하여 SRA 콘크리트의 건조수축 거동을 실험과 기존 모델과의 비교를 통하여 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) SRA 첨가율에 따른 콘크리트의 역학특성의 편차는 거의 없었으며, SRA 첨가율 1.5% 이하의 범위에서는 콘크리트의 역학특성(강도, 탄성계수, 할렬인장강도)에 큰 영향을 미치지 않는다는 기존 연구결과와 동일한 결과를 나타내었다.
- 2) SRA 첨가율이 증가할수록 건조수축 변형률은 감소하였으며 SRA 0.5% 첨가로 17% 정도, SRA 1.0% 첨가로 30% 정도 건조수축량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. SRA 0.5% 첨가라도 일본건축학회에서 제안하고 있는 고급 사양의 콘크리트(건조수축 최종값 500~600 $\mu\epsilon$)을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) SRA0.5, SRA1.0의 인장응력은 SRA0.0보다 각 14%, 25% 정도씩 감소하였다. SRA0.0과 SRA0.3은 재령 15일에서 20일 사이에 균열이 관찰되었고, SRA0.5와 SRA1.0은 균열이 발견되지 않았다. 건조수축 균열제어를 위해서는 수축저감제가 최소 0.5% 이상 첨가되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) SRA 콘크리트의 수축특성 예측가능성을 검토하기 위하여 기존 건조수축 모델(AIJ 모델, ACI 모델, CEB-FIP 모델, B3 모델, GL2000 모델)에 실험결과에 근거하여 구해진 수축저감제 첨가율에 따른 보정값을 적용하여 예측값과 실측값을 비교하였으며, 그 결과 AIJ 모델, ACI 모델, GL2000 모델은 $\pm 10\%$ 의 오차 범위 내에서 예측값과 실측값이 전반적으로 양호한 상관관계를 보였다. 반면, CEB-FIP 모델과 B3 모델은 예측값이 실측값을 과소평가 하는 것으로 나타났다. 향후 연구에서는 다양한 변수(수축저감제 종류, 혼입율, Size effect 등)을 고려한 많은 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

요 약

콘크리트 건조수축 균열을 제어하기 위하여 수축저감제

(SRA)가 개발되었다. SRA는 콘크리트 미세공극의 표면장력을 작게 하여 수축량을 감소시키며, 콘크리트의 품질향상을 위하여 SRA의 사용이 증가되고 있다. 하지만 건조수축을 예측하기 위한 다양한 모델이 존재함에도 불구하고, SRA의 영향을 고려할 수 있는 예측방법이 아직까지 없는 실정이다. 따라서 SRA 콘크리트의 건조수축에 의해 발생하는 인장응력을 정확히 예측할 수 없고, 콘크리트 구조물의 정량적인 사용성 한계의 검토가 불가능하다. 본 연구에서는 SRA 콘크리트의 정량적인 건조수축 변형률 예측가능성을 제시하기 위하여, 건조수축실험값과 기존 모델에 의한 예측값을 비교하였다. 기존 모델에는 SRA의 영향을 고려할 수 없으므로, 실험결과에 근거하여 SRA 첨가율에 따른 수축저감계수를 도출하였고 기존 모델에 수축저감계수를 적용하여 예측값을 구하였다. 그 결과 AIJ 모델, ACI 모델, GL2000 모델은 $\pm 10\%$ 의 오차범위 내에서 예측값과 실측값이 전반적으로 양호한 상관관계를 보였지만, CEB-FIP 모델과 B3 모델은 예측값이 실측값을 과소평가 하는 것으로 나타났다.

키워드 : 수축저감제, 건조수축, SRA콘크리트, 예측가능성

References

1. Seo TS, Ohno Y, Choi CS. Cracking due to drying shrinkage in a RC wall: Part 1: estimation by bond analysis, Magazine of Concrete Research, 2009 Oct;61(8):609-19.
2. Seo TS, Ohno Y, Choi CS. Cracking due to drying shrinkage in a RC wall: Part 2: Proposal of estimation equation, Magazine of Concrete Research, 2009 Oct;61(8):621-31.
3. Tao J, Caiyi C, Yizhou Z, Xuqian L. Effect of degree of ceramsite prewetting on the cracking behavior of LWAC, Magazine of Concrete Research, 2012 Aug;64(8):687-95.
4. Seo TS, Lee MS. Experimental study on tensile creep of coarse recycled aggregate concrete, International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015 Sep;9(3):337-43.
5. Bentz DP, Geiker MR, Hansen KK. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars, Cement and Concrete Research, 2001 Jul;31(7):1075-85.
6. Farshad R, Gaurav S, Jason W. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution, Cement and Concrete Research, 2008 May;38(5):606-15.
7. Shah SP, Karaguler ME, Sarigaphuti M. Effect of shrinkage reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete, ACI Materials Journal, 1992 May;89(3):289-95.
8. Erhan G, Mehmet G, Alaa M, Radhwan A, Zeynep A, Kasim M. Enhancement of shrinkage behavior of lightweight aggregate concretes by shrinkage reducing admixture and fiber reinforcement, Construction and Building Materials, 2014 Mar;54(3):91-8.
9. Sato K. Shrinkage reducing agent, JCI Concrete Journal, 2011 May;49(5):61-4.
10. ACI 209.2R-08. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, Detroit: American Concrete Institute; 2008. 45 p.
11. AIJ. Recommendations for practice of crack control in reinforced concrete structures (Design and Construction), Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 2006. Chapter 3, Performance Design, p. 53-7.
12. Comite Euro-International Du Beton, CEB-FIP Model Code 90, London: Thomas Telford Services; 1990. 437 p.
13. JIS A 1129, Method of test for length change of mortar and concrete, Japanese Standards Association, 2001. 5 p.
14. JCI Committee. Autogenous Shrinkage Committee Report, Japan Concrete Institute, 1997. 10 p.
15. Takeuchi M, Tanaka S, Sato R, Ohno Y. Evaluation of the Autogenous Shrinkage Stress of High Strength Concrete, Proceedings of Japan Concrete Institute; 1997 Jun 9; Tokyo, Japan, Tokyo (Japan) : Japan Concrete Institute; 1997, p. 751-6.
16. JIS A 1108, Method of test for length compressive strength of concrete, Japanese Standards Association, 2006. 7 p.
17. JIS A 1149, Method of test for static modulus of elasticity of concrete, Japanese Standards Association, 2010. 4 p.
18. JIS A 1113, Method of test for splitting tensile strength of concrete, Japanese Standards Association, 1999. 4 p.
19. Nmai C, Tomita R, Hondo F, Buffenberger J. Shrinkage: reducing admixtures, Concrete International, 1998 Apr;20(4):31-7.
20. Kanda K. Quantitative evaluation of shrinkage cracking initiation, Concrete Journal of the Japan Concrete Institute, 2005 May;43(5):60-6.