콘크리트 강도, 발현 속도 및 양생조건에 따른 자기수축 특성 비교

양은익^{1)*} · 신정호¹⁾ · 최윤석¹⁾ · 김명유¹⁾ · 이광명²⁾

¹⁾강릉원주대학교 토목공학과 ²⁾성균관대학교 사회환경시스템공학과

Comparison on Characteristics of Concrete Autogenous Shrinkage according to Strength Level, Development Rate and Curing Condition

Eun-Ik Yang,^{1)*} Jung-Ho Shin,¹⁾ Yoon-Suk Choi,¹⁾ Myung-Yu Kim,¹⁾ and Kwang-Myong Lee²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Gangneung-wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT In this study, autogenous shrinkage strain and prediction models of concrete specimens were compared with strength level and development rate. Also, concrete autogenous shrinkage under various curing conditions was investigated. The results showed that autogenous shrinkage increased as concrete strength increased. However, when the concrete strength was almost identical, the initial autogenous shrinkage of OPC was larger than BFS, but the final autogenous shrinkage of BFS was larger than OPC. Early wet curing reduced autogenous shrinkage strain. Especially, when the early wet curing was applied for more than 24 hours, final autogenous shrinkage was significantly reduced. The results showed that the existing EC2 models do not reflect concrete properties properly. Therefore, the revised model was proposed to better predict autogenous shrinkage.

Keywords : concrete autogenous shrinkage, compressive strength, strength development rate, curing condition, prediction model

1. 서 론

최근 교량의 장대화 및 빌딩의 고층화로 인해 고강도 콘크리트의 사용 실적이 증가하고 있다. 고강도 콘크리트는 단위 시멘트량이 많아서 지금까지의 일반강도 콘크리트에서는 고려하지 않았던 특성을 고려할 필요가 발생하게 된다. 이러한 특성 중에 중요한 요소 하나가 자기수축¹⁾이라 할 수 있다. 자기수축은 콘크리트가 수화하면서 일어나는 것으로 공극내의 상대습도가 감소하면서 체적 변화가 발생하는 것이다.²⁾ 일반강도 콘크리트에서의 자기수축은 중요시 되지 않지만 고강도 콘크리트가 되면 자기수축의 영향으로 인해 초기 균열 발생의 가능성이 커진다.³⁾

따라서 고강도 콘크리트의 자기수축을 적절히 예측하기 위하여 이미 CEB-FIP(Adv)⁴⁾모델, EC2⁵⁾모델, JCI⁶⁾모델 등 다양한 자기수축 예측모델이 제안되고 있다. 이에 비해 우리나라 구조설계기준⁷⁾에서는 건조수축 예측모델만 제시되어 있고 자기수축 부분은 언급되어 있지 않으며 개정되는 기준에서는 EC2 모델을 채택할 예정인 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 채택할 예정인 EC2 모델은 식이 간

단하여 적용성은 우수하나, 강도수준에 따른 특성을 충분히 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다. 더욱이 성능중심을 목표로 설계기준이 검토되고 있는 상황을 고려할 때 동일한 설계기준강도라 하더라도 사용하는 재료에 따른 강도발현속도를 반영할 필요가 있다. 또한 기존의 자기수축 실험에서는 콘크리트의 양생조건을 배제하고 밀봉된 시험체의 봉함양생조건에서 자기수축을 측정하여 부재의 자기수축을 과다하게 평가할 우려가 있으며, 부재의 양생조건에 따른 자기수축의 변화에 대한 자료를 제시하지 않고 있다.

따라서 이 논문에서는 4가지의 콘크리트 강도수준과 2가지 강도발현속도에 대하여 자기수축을 측정하고 다양한 양생조건⁹⁾을 적용하여 자기변형에 미치는 영향을 비교·검토 하였다. 또한 자기수축을 예측하는 기존 모델식과 비교하였으며, 실험 결과를 회귀·분석하여 EC2 모델의 재료상수를 새롭게 제안하고자 하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 변수

이 연구는 콘크리트의 자기수축 특성을 알아보기 위하여 4가지의 강도(24 MPa, 30 MPa, 40 MPa, 60 MPa)를 발현하는 콘크리트 배합(이하 OPC 콘크리트)과 시멘트양

*Corresponding author E-mail: eiyang@gwnu.ac.kr

Received June 30, 2011, Revised November 3, 2011,

Accepted November 22, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 Curing condition

의 50%를 고로슬래그로 대체한 배합(이하 BFS 콘크리트)을 대상으로 실시하였으며 Fig. 1과 같은 다양한 양생조건을 적용하여 수행하였다.

2.2 사용 재료 및 배합

이 연구에 사용된 시멘트와 고로슬래그의 물리적, 화학적 성질은 Table 1과 같다. 사용된 잔골재는 하천 모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 부순 골재를 사용하였다. 굵은 골재 최대 치수는 25 mm이며 배합에 사용된 골재의 특성은 Table 2와 같다. Table 3에 이 연구에서 사용한 콘크리트의 배합표를 나타내었다. 이 연구에 사용

Table 1 Physical and chemical properties of OPC and BFS

Material		OPC	BFS
Properties	Density (kg/m ³)	3.15	2.89
	Blaine (cm ² /g)	3,200	4,390
Chemical (%)	SiO ₂	21.36	29.2
	Al ₂ O ₃	5.03	13.9
	Fe ₂ O ₃	3.31	3.56
	CaO	63.18	56.06
	MgO	2.89	5.8
	SO ₃	2.3	2.6
	LOI	1.4	1.0

Table 2 Physical properties of aggregate

Type	Density (kg/m ³)	Absorption (%)	FM
Fine	2.48	1.01	2.64
Coarse	2.82	1.35	6.86

Table 3 Mix proportions of concrete

Strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	S	G	BFS
OPC-24	50	47	180	360	811	900	-
OPC-30	42	45	175	417	717	997	-
OPC-40	37	42	170	459	661	1,037	-
OPC-60	28	40	160	571	624	1,064	-
BFS-24	50	47	180	180	833	1,056	180
BFS-30	42	42	175	209	671	1,040	209
BFS-40	37	40	170	229	624	1,064	229
BFS-60	28	39	170	303	586	1,030	303

한 배합은 슬럼프 180~210 mm, 공기량 4.5 ± 1.5% 범위에서 사용되었다.

2.3 측정 방법

2.3.1 압축강도

콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해 KS F 2405(콘리트의 압축 강도 시험 방법)에 따라서 수행하였다. 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더를 사용하였으며, 측정 장비는 만능재료시험기(1,000 kN)를 사용하였다.

2.3.2 자기수축 측정

자기수축 측정을 위해 사용된 매립게이지는 양단 플랜지형 게이지이며, 100 × 100 × 400 mm의 각주형 아크릴 몰드 중앙에 매립게이지를 고정시켜놓고 온도보정을 위하여 매립게이지 중앙에 Thermocouple을 부착하였다. 몰드와 시험체간의 마찰을 최소화하기 위해 몰드의 옆면, 밑면에 테프론시트(1 mm)를 넣었고 옆면 밑면 측면에 폴리에스테르 필름(0.1 mm)을 넣어 시험체와 몰드가 접촉하지 않도록 하였다. 실험은 시편 탈형 후 Fig. 1과 같은 양생조건으로 20 ± 1°C, 60 ± 3%의 항온·항습실에서 수행하였다. 자기수축은 데이터로거를 사용하여 10분 간격으로 자동으로 측정하였다. 측정값은 3개 시험체의 평균값을 사용하였으며, Fig. 2는 실험용 몰드의 전경을 나타낸 것이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

측정된 설계 강도별 압축강도 및 강도 발현비율을 Table 4에 나타내었다. 측정 결과를 살펴보면 OPC만 사용한 콘크리트의 경우 3일 강도에서 설계 강도의 60%이상 발현되었으므로 조강 콘크리트로 판단되고, 고로슬래그를 50% 대체한 콘크리트의 3일강도가 40%이상 발현되었으므로 보통 콘크리트로 분류 된다.⁸⁾ 설계강도 60 MPa를 제외하고는 모두 목표강도에 도달하였다.

3.2 초기 팽창 변형률

이 연구에서는 공시체 타설 후부터 매립게이지를 이용

Fig. 2 Test mold and embedded gage

Table 4 Development rate of compressive strength

Ages Strength	3-day (MPa)	Rate (%)	7-day (MPa)	Rate (%)	28-day (MPa)	Rate (%)
OPC-24	18	77	20	84	24	100
OPC-30	25	83	28	92	31	100
OPC-40	27	67	33	83	40	100
OPC-60	40	67	48	81	57	100
BFS-24	11	46	19	78	29	100
BFS-30	15	49	26	86	36	100
BFS-40	19	45	29	73	41	100
BFS-60	28	48	41	69	58	100

Table 5 Maximum expansion strain for 1 day (unit: μ)

Strength Type	24 MPa	30 MPa	40 MPa	60 MPa
OPC	86 μ	46 μ	37 μ	18 μ
BFS	40 μ	32 μ	23 μ	15 μ

하여 콘크리트의 자기수축을 측정하였으며, 온도가 20°C 인 외기조건에서도 탈형 전까지 내부온도 상승에 따른 콘크리트의 체적변화가 발생하는 것으로 측정되었다.

일본콘크리트공학협회(JCI)⁹⁾의 자기수축위원회에서는 응력발생의 관점에서 자기수축 발현 시작점을 초결로 제안하였으므로, Table 5는 초결을 원점으로 하여 초기재령에서 발생한 시험체의 최대 팽창변형률의 평균을 나타내며 수화열에 의한 체적 변화를 보정한 값이다.

콘크리트의 열팽창 계수는 초기재령에서 수화정도에 따라 차이가 나타나며 측정 방법이 복잡하고 명확하지 않은 것으로 판단된다.¹⁰⁾ 따라서 콘크리트의 열팽창 계수를 10 μ 로 가정하고, 다음 식을 사용하여 보정을 하였다.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{sr} - (\alpha_s \times \Delta T)$$

여기서, ε_c : 콘크리트 변형률

α_s : 콘크리트 열팽창계수

ε_{sr} : 매립게이지 측정값

이러한 열팽창 보정을 하였음에도 팽창하는 것으로 나타나는 것은 초기재령 콘크리트의 열팽창 계수의 변동에 의한 영향과 콘크리트가 경화하는 과정에서 내부 잉여수의 보습효과로 자기수축 시작 전 미세하게 팽창시키는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편, 강도가 증가할수록 초기재령의 체적 팽창량이 감소하는 것으로 나타났으며 이것은 초기부터 자기수축이 활발하여 체적 팽창량이 비교적 감소되는 것으로 판단된다.

3.3 자기수축 시작점

효과적인 자기수축 시작점을 찾기 위하여 JCI⁹⁾에선 자기수축 시작점을 초결로 정의하고 있고, 몇몇 연구자들은 굳지 않은 콘크리트의 액성에서 소성상태로 변하는 시점을 찾기 위해 특수장비 또는 고가의 장비를 사용하

Fig. 3 Autogenous shrinkage strain at initial time

는 UPV검사,¹¹⁾ XRD검사¹²⁾ 등을 제시한바 있다. 또한 M. H. Zhang¹³⁾ 등의 논문에서는 수화열 보정을 하면 초결과 종결 사이가 자기수축 시작점이 될 가능성이 높다고 제시하고 있다.

Fig. 3은 이러한 자기수축 시작점을 판단하기 위하여 콘크리트 타설 후 초결에서 종결까지 일정한 열팽창 계수 $\alpha = 10 \mu$ 보정한 매립게이지 변형률을 나타낸 것이다. 변형률을 살펴보면 모든 시험체에서 초결 이후 팽창하는 것으로 나타나 자기수축의 시작점을 JCI에서 제안한 초결로 정하는 것이 적합하지 않은 것으로 판단된다. 즉 원점을 초결로 정하면 팽창하게 되어 자기수축을 과소평가하게 된다. 이것을 해결하기 위해 재령에 따른 열팽창 계수를 제안하는 연구가 발표된바 있으나,¹⁰⁾ 모든 배합의 경우에 적용하기 곤란하고, 또한 매번 열팽창계수를 측정하는 것이 곤란하므로 효과적으로 열팽창에 대한 오차를 가능한 줄이는 방법의 제안이 요구된다.

이런 연구들의 성과를 종합적으로 판단하여 볼 때, 자기수축 시작점에 대한 검토가 필요할 것으로 판단되며, 시작점을 단순히 초결로 정하는 근거보다는 합리적인 방법의 제안이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 매립게이지의 측정값과 시험체의 수화열 보정을 통하여 최대 팽창점을 자기수축의 시작점으로 사용하였으며 이것은 초기 자기수축의 오차를 간단하면서 효율적으로 감소시킬 수 있는 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 강도발현속도에 따른 자기수축

각 배합조건에 따라 발생하는 자기수축을 매립게이지

로 측정한 결과를 초결시간이 아닌 앞서 언급된 매립제 이지 최대 팽창점을 원점으로 하여 재령 60일까지 Fig. 4에 나타내었다. 변형률을 살펴보면 강도발현 속도에 관계없이 물-시멘트비가 작아질수록 콘크리트의 자기수축은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 실험 결과를 상세하게 살펴보면 OPC 콘크리트의 경우 최종 자기수축의 70%가량이 10일 이내에 발생하고 이후의 변화량 곡선의 기울기는 완만한 직선을 보이며 크게 변하지 않는 것으로 나타나는 반면, BFS 콘크리트는 60일까지 OPC 콘크리트보다 완만한 기울기를 보이거나 최종 자기수축에

Fig. 4 Autogenous shrinkage according to development rate of strength

서는 OPC 콘크리트보다 많이 수축하는 것으로 나타났다. 즉 동일한 콘크리트의 설계 강도를 나타내더라도 강도발현 속도에 따라 자기수축의 최종값과 발생비율이 변화하므로 이에 대한 고려를 반드시 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

한편, 고로슬래그를 대체한 BFS 콘크리트의 경우는 입자 표면이 고르지 못해 흡착되는 물의 양이 증가하여 수화에 필요한 물의 양이 감소하게 되어 배합 내에 잉여수가 많아 초기에 자기건조현상이 느리게 진행하며 또한

Fig. 5 Autogenous deformation according to curing condition

Fig. 6 Comparison of model code (OPC concrete)

Fig. 7 Comparison of model code (BFS concrete)

W/B가 낮은 경우 자기건조가 크기 때문에 자유수 감소로 인해 모세관 공극내의 부압력이 증가하여 자기수축이

Table 6 Autogenous deformation at 60 days (unit: μ)

Strength Type	OPC-30	OPC-60	BFS-30	BFS-60
Wrap	-97	-236	-130	-263
Wet(0.5)	-46	-208	-	-
Wet(1)	-14	-162	-93	-110
Wet(2)	-11	-150	-87	-107
Wet(3)	-	-	-89	-103
Wet(6)	-11	-145	-	-
Wet(27)	-9	-137	-	-

크게 발생한 것으로 판단된다.¹⁴⁾

3.5 양생조건에 따른 자기 변형

콘크리트의 초기재령 양생조건에 따른 자기변형 특성을 비교 분석 하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었고 Table 6은 60일에서의 최종 자기변형을 나타내었다.

결과를 살펴보면 모든 경우에 대하여 습윤양생을 실시함에 따라 자기변형의 저감효과가 있는 것으로 판단된다. 그러나 습윤양생 기간에 비례하여 감소하지는 않았으며, 최소 1일 이상 습윤양생을 실시하면 자기변형이 크게 감소하였다.

자기수축은 일반적으로 재령 초기에 크게 발생하게 되는데 초기 습윤양생은 콘크리트에 수분을 공급시켜 수축 저감효과가 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트의 응결 후 가능한 빠른 시기에 습윤양생을 24시간 이상 실시하는 것이 자기변형 저감에 크게 기여할 것으로 기대된다.

한편, BFS 콘크리트의 경우는 자기수축 시작점과 습윤양생 시작점의 차이가 적어서 초기에 팽창하는 것으로 나타났으며 이는 고로슬래그 미분말을 중량으로 치환하므로 단위용적당 분체량이 증가함에 따른 보습효과에 의해 내부잉여수가 증가하여 팽창하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

3.6 실험 결과와 모델코드의 비교

이 연구에서는 대표적인 콘크리트 수축 예측 모델 중 자기수축 부분만 봉함양생의 실험 결과와 비교하였다. 비교 대상은 CEB-FIP(Adv) 모델,⁴⁾ 콘크리트 구조설계기준에서 채택할 예정인 EC2 모델⁵⁾ 및 일본콘크리트공학협회(JCI) 모델이다.⁶⁾ Figs. 6과 7은 각 예측 모델과 비교한 결과를 나타낸 것이다.

결과를 살펴보면, 특히 EC2 및 CEB-FIP(Adv) 모델의 경우 물-시멘트 비가 낮을수록 실험 결과와의 차이가 더욱 커져 예측값의 신뢰도가 저하하였으나 3일 이후의 발생 경향은 잘 표현하는 것으로 나타났다. EC2 모델의 경우에는 강도발현의 영향이 배제되어 있으며, CEB-FIP(Adv)는 재료 및 강도발현 속도에 따른 상수(γ)가 주어져 있지만 큰 효과가 없는 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 JCI의 경우에는 자기수축의 예측값이 타 모델에 비해 근접하고 있으나 재령에 따라 지속적으로 증가하고 있으며 과다하게 예측하는 점, 그리고 시멘트 상수가 물-시멘트 비에 따라 다르고 또한 재령 및 재료에 따른 상수 a, b 등 계산식이 복잡하여 현장에서 적용하기 힘든 것으로 판단된다.

3.7 예측모델 개선 방안

봉함양생 조건에서의 자기수축 결과를 효과적으로 예측하기 위해 기존 EC2 모델을 수정·보완하여 제안하고자 하였다. EC2 모델과 이 연구에서 제안한 모델을 비교하여 나타내면 다음과 같다.

3.7.1 EC2 모델

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ca}(t) &= \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty) \\ \varepsilon_{ca}(\infty) &= 2.5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-0.2t^{0.5})\end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}f_{ck} &= \text{평균강도 (MPa)} \\ t &= \text{재령(일)}\end{aligned}$$

3.7.2 제안한 모델

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ca}(t) &= \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty) \\ \varepsilon_{ca}(\infty) &= \gamma(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-\alpha t^{0.5})\end{aligned}$$

여기서,

γ = 사용재료 상수 (OPC 5, BFS 6.5)

α = 강도발현 속도에 따른 상수 (OPC 0.5, BFS 0.3)

자기수축의 실험 결과와 EC2모델 결과를 비교하여 살펴보면 강도발현 속도 및 강도에 따라 크게 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 기존 EC2 모델에서는 이에 대한 고려사항이 포함되지 않아 이 연구에서는 4가지 강도와 2종류의 강도발현 속도에 따라 재료상수와 강도발현 속도에 대한 상수를 제안하였다. 보다 상세히 살펴보면 $\varepsilon_{ca}(\infty)$ (최종자기수축)과 $\beta_{as}(t)$ (재령)에 따른 함수의 곱으로 나타난다. $\beta_{as}(t)$ 는 재령에 따른 자기수축 발현 속도를 나타내며 OPC 콘크리트와 BFS 콘크리트가 각각 자기수축 발현 속도가 상이하여 이에 OPC 콘크리트의 경우는 초기재령에서 자기수축이 크게 발생하므로 함수의 상수를 0.5로 제안하였고 BFS 콘크리트는 초기 자기수축이 작기 때문에 0.3으로 제안하였다. 또한 최종 자기수축도 예측값이 작게 나타나므로 $\varepsilon_{ca}(\infty)$ 함수의 상수값도 재료 및 강도발현 속도에 관계없이 2.5였던 것을 OPC 콘크리트일 경우에는 5, BFS 콘크리트는 6.5로 각각 우리나라 재료상태에 맞게 상수를 제안하였다. 이러한 검토사항을 고려하여 제안된 모델값을 앞에서 도시한 Figs. 6과 7에 함께 나타내었다. Figs. 6과 7에 나타난 결과를 살펴보면, 초기재령 및 최종 자기수축을 효과적으로 예측하는 것으로 판단되므로 기존 EC2모델에 재료의 특성을 반영시켜 정도 높은 자기수축 변형률 예측이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 연구에서는 강도발현 속도 및 압축강도에 따라서 자기수축을 측정하고 다양한 양생조건을 적용하였으며 예측모델과 비교·검토 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 자기수축 변형률은 강도가 증가할수록 자기수축도 같이 증가하며, 동일한 설계기준강도라 하더라도 강도발현 속도에 따라서 자기수축 경향이 상이한 것으로 나타났다. 즉, 강도발현 속도가 빠른 OPC 콘크리트가 자기수축 발현 속도도 빠르지만 최종수축에서는 강도발현속도가 느린 BFS 콘크리트가 더 많이 발생하는 것으로 나타나며 이를 보완할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 2) CEB-FIP(Adv)와 EC2 모델의 예측값은 실측값에 비해 작게 나타나고 이에 비해 JCI 모델식은 복잡하고 과다하게 예측하고 재령에 따라 계속 증가하는

것으로 나타난다. 이 연구에서는 EC2 모델에 재료 상수 γ 와 강도발현속도에 따른 상수 α 를 각각 새롭게 제안하였다.

- 3) 초기 콘크리트의 수분 공급은 자기변형 저감에 크게 영향을 미치며 특히 24시간 이상 습윤양생을 실시하면 이후 최종 자기변형은 크게 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 자기수축 시작점을 초결로 하면 콘크리트의 초기 열팽창 계수가 일정하지 않고 초기열팽창 보정이 어려워 자기수축을 과소평가할 우려가 있으므로 시작점에 대한 다양한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 산하 한국건설교통기술평가원의 「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통 R&D 정책 및 인프라사업 (06-기반 구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pietro Lura, "Autogenous Shrinkage of High-Performance Cement Paste: An Evaluation of Basic Mechanisms," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 223~232.
2. 이창수, 박종혁, "공극내 상대습도, 모세관압력, 표면에너지 변화에 따른 콘크리트 자기수축," 콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 131~138.
3. Yang, Y., "Autogenous Shrinkage of High-Strength Concrete Containing Silica Fume under Drying at Early Ages," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 449~456.
4. CEB-FIP 2000, *Structural Concrete: Textbook on Behavior, Design and Performance*, Sprint Druck Stuttgart, Vol. 1, 1999, pp. 43~46.
5. EuroCode2, "Design of Concrete Structures," European Committee for Standardization, 2004, pp. 202~204.
6. Japan Concrete Institute, 自己收縮研究委員會 報告書, 2002, pp. 212~216.
7. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준 해설, 기문당, 2007, 523 pp.
8. 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준 (안)," 한국콘크리트학회, 2011, Version 4.
9. 양은익, 김일순, 이성태, 이광명, "콘크리트 건조수축 측정방법 및 예측모델에 대한 비교," 콘크리트학회 논문집, 22권, 1호, 2010, pp. 85~91.
10. Ahmed Loukili, "A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at an Early Age Considering Temperature History," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 6, 2000, pp. 915~922.
11. 이회근, 임준영, 이광명, 김범기, "플라이애쉬를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성," 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 622~626.
12. 김규용, 구경모, 이형준, 이의배, "시험체 크기 및 수화 지연 효과에 따른 초기재령 수화발열 및 자기수축 특성 분석," 콘크리트학회 논문집, 21권, 4호, 2009, pp. 481~488.
13. Zhang, M. H., "Effect of Water-to-Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on Autogenous Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, 2002, pp. 249~256.
14. Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., and Kim, G. Y., "Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1279~1285.

요 약 이 연구에서는 강도수준 및 강도발현 속도에 따른 콘크리트의 자기수축과 예측모델의 적용성을 비교하였고, 다양한 양생조건을 적용시켜 자기수축을 검토하였다. 연구 결과에 따르면 콘크리트가 강도가 증가할수록 자기수축이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 동일한 콘크리트 강도의 경우라도 강도발현 속도가 빠른 OPC의 경우 초기 자기수축은 크지만 최종 자기수축은 BFS의 경우가 더 큰 것으로 나타났다. 초기 습윤양생은 자기수축 저감에 영향을 미치며 특히 24시간 이상 습윤양생을 실시하면 최종 자기수축은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 기존의 EC2모델은 콘크리트 특성을 적절히 반영하지 못하는 것으로 나타났으며 자기수축을 보다 효과적으로 예측할 수 있는 수정 모델식을 제안하였다.

핵심용어 : 콘크리트 자기수축, 압축강도, 강도발현 속도, 양생조건, 예측모델