

고강도 플라이 애쉬 콘크리트의 자기수축 예측 모델

이회근¹⁾ · 이광명^{1)*} · 김 우²⁾

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾전남대학교 토목공학과

(2002년 10월 2일 원고접수, 2003년 1월 14일 심사완료)

Prediction Model for Autogenous Shrinkage of High Strength Fly Ash Concrete

Hoi-Keun Lee¹⁾, Kwang-Myong Lee^{1)*}, and Woo Kim²⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chonnam University, Kwangju, 500-757, Korea

(Received October 2, 2002, Accepted January 14, 2003)

ABSTRACT

Autogenous shrinkage, a significant contributor of early-age cracking of high strength concrete (HSC), must be avoided or minimized from an engineering point of view. Therefore, it is necessary to study how to reduce and to predict autogenous shrinkage with respect to the control of early-age cracking. In this study, autogenous shrinkage of HSC with various water-binder ratio (W/B) ranging from 0.50 to 0.27 and fly ash content of 0, 10, 20, and 30% were investigated. Based on the test results, thereafter, a prediction model for autogenous shrinkage was proposed. Test results show that autogenous shrinkage increased and more rapidly developed with decreasing the W/B. Also, the higher fly ash contents, the smaller autogenous shrinkage. In particular, even if much autogenous shrinkage occurs at very early-ages, stress may not be developed while the stiffness of concrete is low. In order to consider the change of concrete stiffness, the transition time referred as stiffening threshold, was obtained by monitoring of ultrasonic pulse velocity evolution and considered in the autogenous shrinkage model. From a practical point of view, the proposed model can be effectively used to predict autogenous shrinkage and to estimate stress induced by autogenous shrinkage.

Keywords : high strength concrete, autogenous shrinkage, prediction model, fly ash, ultrasonic pulse velocity

1. 서 론

콘크리트 기술의 발전으로 인한 고강도 콘크리트(high strength concrete, HSC)의 등장은 구조용 재료로서의 콘크리트 성능과 경쟁력을 향상시키는 계기가 되었으며, 최근 구조물의 고층화 및 대형화 추세에 따라 HSC에 대한 관심과 사용이 증가하고 있다. HSC는 주로 고층 빌딩의 기둥, 프리캐스트 콘크리트 거더, 도로 포장, 해양 구조물, 각종 플랜트 등 토목의 전 분야에 걸쳐 그 사용 범위가 점차 확대되어 가고 있다. 그러나, HSC는 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, NSC)보다 초기 균열 발생 가능성이 높으며, 그 원인 중의 하나가 자기수축이라고 알려져 있다^{1,2)}. 자기수축은 시멘트가 수화함에 따라 일어나는 화학적수축(chemical shrinkage)으로 인하여 시멘트 풀 내에 공극이 생성되며, 계속된 수화로 공극내의 상대습도가 점차 감소하는 현상, 즉 자기건조(self-desiccation)에

의해 발생한다. 이러한 상황은 물-결합재비(water-binder ratio, W/B)가 낮고 시멘트량이 많으며 다양한 혼화재를 함유한 HSC에서 더욱 더 중요하다.

Pailler 등¹⁾은 W/B가 낮은 콘크리트는 자기수축이 구속되었을 때 2~3일 이내에 균열이 발생하는 것으로 보고 하였다. 따라서, 재령 초기에서의 콘크리트 균열 제어와 내구성 확보를 위해서는 자기수축에 대한 이해와 보다 정확한 예측이 요구된다.

지금까지 자기수축을 예측하기 위하여 다양한 모델들^{3~7)}이 제안되었으며, 그 중에서 Tazawa³⁾는 자기수축 발생의 가장 큰 영향 인자인 W/B에 따른 최대 자기수축 변형률과 시간에 따른 자기수축의 발현을 나타내는 계수, 그리고 시멘트 종류를 나타내는 계수의 곱으로 자기수축량을 구하였다. 그러나, W/B에 따른 자기수축의 최대값을 얻기가 어렵고, 특히 초결 이후의 자기수축을 고려하고 있으나 HSC의 초결 시간을 결정하기가 쉽지 않다.

이밖에, Jonasson 모델⁴⁾과 CEB-FIP 모델⁵⁾은 자기수축의 주요한 인자로 각각 W/B와 압축강도를 사용하였으며, Jonasson 모델은 재령 1일 이후의 자기수축을 예측하고 있다.

* Corresponding author

Tel : 031-290-7516 Fax : 031-290-7549

E-mail : leekm79@dreamwiz.com

공학적인 측면에서는 자기수축의 크기 자체보다는 자기수축으로 인해 발생하는 응력과 이로 인한 균열 발생 여부에 더 많은 관심이 있다고 할 수 있다. 재령 초기에 큰 자기수축이 발생했다 하더라도 콘크리트의 강성(탄성계수)이 작으면 응력은 발생하지 않는다. 따라서, 콘크리트의 강성이 발현되는 시점부터 자기수축으로 인해 발생한 응력이 균열 발생에 영향을 미친다고 볼 수 있으며, 재령 초기에서의 응력 발생과 균열 발생 여부를 예측하기 위해서는 강도 또는 탄성계수 등의 역학적 성질이 중요한 인자가 된다⁸⁾.

따라서, 본 연구에서는 초음파 속도(ultrasonic pulse velocity, UPV)의 모니터링 결과를 이용하여 UPV의 증가 시작 시점을 콘크리트 강성의 발현 시점으로 고려하여 Tazawa 모델을 수정, 제안하였다. 이밖에도 자기수축의 최초 측정 시작 시점과 초결 시간 등을 각각 고려하여 서로 비교하였다.

2. 실험 연구

2.1 개요

네 종류의 W/B를 갖는 일반 콘크리트 배합(OPC)과 시멘트량의 20%를 플라이 애쉬로 대체한 배합(FA20)에 대한 기존의 실험결과⁹⁾이외에, 플라이 애쉬의 대체율이 자기수축에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 자기수축 모델링에 사용하였다.

2.2 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위해 사용된 시멘트와 플라이 애쉬의 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1과 같으며, 잔 골재와 굵은 골재, 그리고 고성능 감수제(HRWR)는 기수행된 실험⁹⁾에서 사용된 것과 동일한 재료를 사용하였다.

Table 1 Physical properties and chemical compositions and of cement and fly ash

Material		Cement	Fly ash
Physical properties	Specific gravity	3.15	2.27
	Blaine (cm ² /g)	3,450	3,375
Chemical composition (%)	SiO ₂	20.7	56.7
	Al ₂ O ₃	5.2	21.2
	Fe ₂ O ₃	3.0	6.0
	CaO	62.4	6.7
	MgO	4.7	1.4
	SO ₃	2.4	0.1
	Loss on ignition	1.36	3.44

Table 2는 본 연구에서 사용한 12가지의 콘크리트 배합비로, Mix 1~4와 7~10은 기존에 사용한 배합으로 이 배합에 대해서는 추가적인 보완실험이 수행되었으며, Mix 5, 6, 11, 12는 새로 추가된 배합을 나타낸다. Table 2에서, Mix 1~4까지는 일반 콘크리트 배합(OPC)을, Mix 5~12까지는 시멘트량의 10%, 20%, 30%를 플라이 애쉬로 대체한 콘크리트 배합(FA10, FA20, FA30)을 각각 나타낸다. W/B가 0.35 이하인 콘크리트 배합에는 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)가 사용되었다.

2.3 실험 방법

아직까지 자기수축 측정 방법에 관한 표준화가 이루어지지 않고 있어 연구자들마다 다소 상이한 방법으로 자기수축을 측정하고 있으나, 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 일본 콘크리트학회에서 제안한 방법¹⁰⁾으로 본 연구에서는 LVDT를 사용하는 방법을 채택하고 아울러 매립게이지를 이용하여 자기수축을 측정하였다.

콘크리트의 자기수축은 재령 24시간까지는 100×100×400 mm의 빔볼드 양단에 LVDT를 설치하여 콘크리트의

Table 2 Mixture proportions of concrete per m³

Mix type	Mix no.	Water (kg)	Cement (kg)	Fly ash (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	AE water reducer (B×%)	HRWR (B×%)	W/B
OPC	1	185	370	-	754	969	0.5	-	0.50
	2	158	450	-	672	1061	-	1.5	0.35
	3	155	500	-	626	1074	-	2.0	0.31
	4	148	550	-	617	1060	-	2.4	0.27
FA10	5	155	450	50	620	1064	-	2.0	0.31
	6	148	495	55	612	1049	-	2.4	0.27
FA20	7	185	296	74	744	956	0.5	-	0.50
	8	158	360	90	661	1043	-	1.5	0.35
	9	155	400	100	614	1054	-	2.0	0.31
FA30	10	148	440	110	605	1038	-	2.4	0.27
	11	155	350	150	608	1044	-	2.0	0.31
	12	148	385	165	598	1027	-	2.4	0.27

길이변화를 측정하였으며, 몰드 제거 이후부터는 매립게이지를 이용하여 자기수축 변형률을 측정하였다. 최초 측정은 콘크리트 배합 후 6시간부터 이루어졌으며, 세부적인 사항은 기존 연구⁹⁾에서와 동일하다.

콘크리트 강성의 발현 시점을 추정하기 위해 기존에 사용한 UPV 모니터링 시스템¹¹⁾을 이용하여 배합 직후부터 UPV를 측정하였으며, 콘크리트 배합에서 굵은 골재만을 제외하여 모르타르를 제조한 후 KS F 2436에 따라 각 배합의 초결 시간을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 성질과 압축강도

Table 3은 본 연구에서 사용한 모든 콘크리트의 슬럼프, 플로우, 공기량, 초결 시간(t_i), UPV 발현 시작 시간(t_A)과 재령 1, 3, 7, 28일에서의 평균 압축강도를 나타낸다. 모든 배합의 슬럼프는 190 mm 이상이었으며, 공기량은 1.4~5.0%이었다. FA 콘크리트의 초결 시간은 OPC보다 지연되었으며, W/B가 동일한 경우 플라이 애쉬 대체율이 증가할수록 더욱더 지연되는 경향을 나타내었다. 재령 28일에서의 압축강도는 OPC의 경우, W/B가 0.50에서 0.27로 감소함에 따라 각각 31.1, 47.1, 55.5, 66.2 MPa이었으며, 모든 FA 콘크리트의 28일 압축강도는 OPC에 비해 낮게 나타났다. 강도실험결과로부터, Mix 1과 7은 보통강도 콘크리트(NSC)로, 나머지 배합들(Mixes 2~6, 8~12)은 고강도 콘크리트(HSC)로 분류하였다.

3.2 콘크리트의 초음파 속도와 강성의 발현

Fig. 1은 전형적인 초음파 속도의 발현 곡선을 나타낸다. UPV는 콘크리트의 상태변화, 즉 유체에서 고체로 변하면서 나타나는 콘크리트의 내부미세구조를 잘 반영하

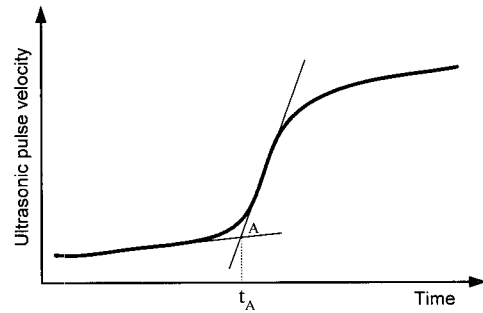


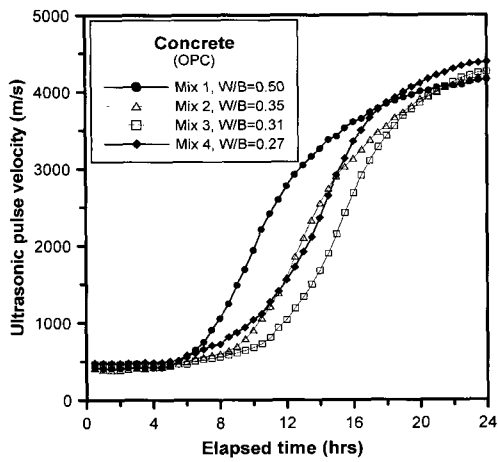
Fig. 1 Schematic representation of typical evolution of ultrasonic pulse velocity

로, UPV가 증가하기 시작하는 순간(Fig. 1의 A점)을 콘크리트의 강성이 발현하기 시작하는 시점으로 간주할 수 있다.

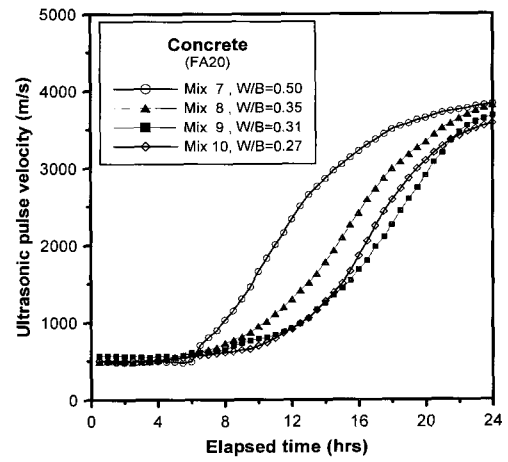
Fig. 2와 Fig. 3은 12가지 콘크리트에 대해 배합 후 처음 24시간 동안의 UPV 변화를 모니터링한 결과를 나타낸다. UPV 발현 특성을 간단하게 살펴보면, 전체적으로 Fig. 1과 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 배합 후 수 시간동안에는 모든 배합에서 일정하면서도 느린 UPV를 나타내다가 시간이 지나면서 점점 증가하기 시작하여 OPC 콘크리트의 UPV가 FA 콘크리트에서보다 빨리 발현되는 경향을 나타내었다. 또한, Fig. 3에서 보듯이, W/B가 동일할 때 플라이 애쉬의 대체율이 증가할수록 UPV의 발현속도가 느리게 나타났다. 이처럼 초기재령에서 HSC 배합의 UPV 발현이 늦어지는 이유는 응결지연의 효과가 있는 HRWR의 사용 때문인 것으로 판단되며, 여기에 플라이애쉬가 함께 사용됨으로써 OPC보다 FA 콘크리트 배합에서 UPV 발현률이 더욱 더 지연된 것으로 사료된다. Fig. 1에 나타낸 방법대로 Fig. 2와 Fig. 3으로부터 구한 t_A 를 Table 2에 나타내었으며, t_A 가 t_i 보다 약 2.2~5.5 시간 정도 빠른 것으로 나타났다.

Table 3 Properties of tested concrete

Mix type	Mix no.	Slump (cm)	Flow (cm)	Air content (%)	t_A (hr:min)	t_i (hr:min)	Compressive strength (MPa)			
							1 day	3 days	7 days	28 days
OPC	1	19.0	41×40	5.0	6:00	8:10	9.6	20.3	25.3	31.1
	2	21.0	45×45	4.8	9:50	12:30	21.8	37.7	43.0	47.1
	3	22.5	55×53	2.4	11:40	14:50	25.0	42.8	49.4	55.5
	4	23.0	54×55	2.0	10:00	12:45	30.3	48.1	58.3	66.2
FA10	5	22.0	55×53	2.0	12:40	15:05	20.0	38.3	47.8	53.4
	6	22.5	60×62	1.7	10:20	13:10	24.3	43.9	53.1	63.6
FA20	7	19.0	42×40	4.7	6:00	9:40	6.1	16.1	20.7	29.3
	8	23.5	56×58	3.3	10:00	15:30	14.0	29.3	37.4	45.9
	9	24.5	58×63	2.1	12:10	17:00	14.2	35.0	40.7	52.6
	10	24.0	63×62	1.6	12:20	16:25	13.4	38.9	45.6	62.4
FA30	11	23.5	56×55	1.7	15:50	19:10	5.6	28.2	36.5	49.3
	12	24.5	63×65	1.4	15:30	17:30	4.7	30.8	41.1	55.8

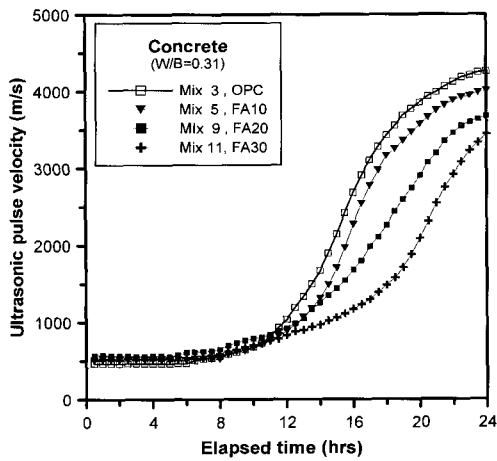


(a) OPC concrete

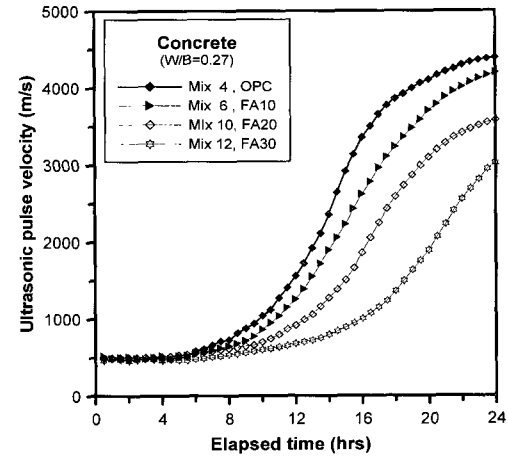


(b) FA20 concrete

Fig. 2 Evolution of UPV for OPC and FA20 concretes with various W/B

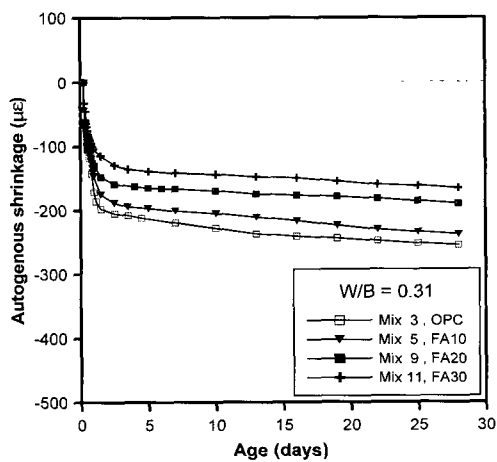


(a) W/B=0.31

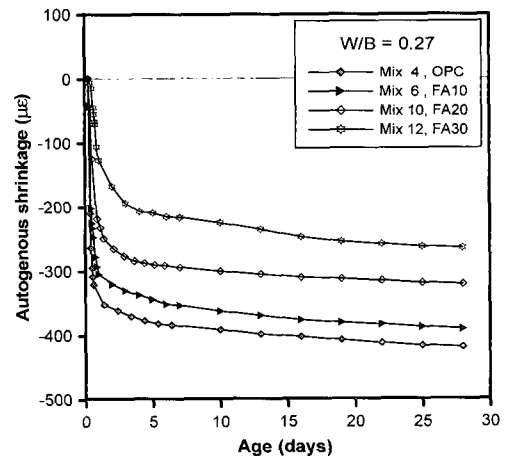


(b) W/B=0.27

Fig. 3 Evolution of UPV for concrete having various fly ash contents at the same W/B



(a) W/B=0.31



(b) W/B=0.27

Fig. 4 Effect of fly ash content on autogenous shrinkage

3.3 플라이 애쉬 대체율이 자기수축에 미치는 영향

Fig. 4는 W/B가 각각 0.31과 0.27인 HSC 배합에 대해 플라이 애쉬 대체율이 각각 0%, 10%, 20%, 30%일 때, 배합 후 6시간부터의 자기수축 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이, 플라이 애쉬 대체율이 증가함에 따라 자기수축이 감소하는 경향을 나타내었으며, 재령 28일을 기준으로 OPC에 비해 FA10인 경우에는 약 6.7%, FA20인 경우에는 약 19.4~25.5%, FA30인 경우에는 약 34.9~36.8% 정도의 자기수축 감소율을 보였다. 플라이 애쉬 사용에 따른 자기수축 감소 이유는 기존의 결과⁹⁾에서 언급한 바와 같이, 플라이 애쉬의 입자 형태와 포졸란 반응의 특성으로 설명할 수 있다.

4. 자기수축 모델의 제안

4.1 모델

본 연구에서는 자기수축 실험결과와 UPV 모니터링에 의한 콘크리트 강성의 발현 시점(t_A)과 재령 28일에서의 자기수축량을 고려하여 Tazawa 모델을 수정, 제안하였다. Tazawa 모델과 본 연구에서 제안한 모델을 비교하여 나타내면 다음과 같다.

i) Tazawa 모델³⁾

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{\infty}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{\infty}(W/B) = 3070 \exp[-7.2(W/B)] \quad (2)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp[-a(t - t_i)^b] \quad (3)$$

ii) 제안한 모델

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{28}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (4)$$

$$\epsilon_{28}(W/B) = 600 \exp[-4.9(W/B)] \quad (5)$$

$$\beta(t) = \exp\left\{a\left[1 - \left(\frac{28 - t_A}{t - t_A}\right)^b\right]\right\} \quad (6)$$

여기서,

- $\epsilon_{as}(t)$ = 재령 t에서의 자기수축 변형률
- $\epsilon_{\infty}(W/B)$ = W/B에 따른 최대 자기수축 변형률
- $\epsilon_{28}(W/B)$ = 재령 28일에서의 자기수축 변형률
- $\beta(t)$ = 시간에 따른 자기수축 발현 속도
- γ = 사용한 시멘트 또는 혼화제에 따른 계수
- a, b = W/B와 플라이 애쉬에 따른 실험 상수
- t_i = 초결 시간
- t_A = UPV 증가 시작 시간

식 (4)~(6)에서 보듯이, 본 연구에서 제안한 모델에서는 재령 $t < t_A$ 일 때는 자기수축이 0이고, $t = t_A$ 일 때 자기수축이 발현하기 시작하며 $t > t_A$ 일 때의 자기수축이 실제 응력 발현에 기여하는 자기수축으로 고려하고 있다.

또한, 본 연구에서는 식 (6)의 t_A 대신에 최초 자기수축 측정 시점(t_s , 본 연구에서는 0.25 day)과 Tazawa 모델에서와 마찬가지로 초결 시간(t_i)을 각각 사용하여 세 가지 시간에 따른 자기수축의 변화를 서로 비교하였으며, t_s , t_i 인 경우에서의 $\epsilon_{28}(W/B)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{28}(W/B) &= 6711 \exp[-10.3(W/B)] \quad \text{for } t_s \\ &= 505 \exp[-4.6(W/B)] \quad \text{for } t_i \end{aligned} \quad (7)$$

자기수축 실험결과를 토대로 식 (4)에서의 계수, γ 와 식 (6)의 상수 a와 b를 결정하여 Table 4에 나타내었다. Fig. 5~7에는 W/B가 각각 0.35, 0.31, 0.27인 고강도 OPC(Mix 2~4)와 FA20 콘크리트(Mix 8~10)에 대해 세 가지 시간, 즉 t_i , t_A , t_s 를 적용했을 때의 재령 175일까지의 자기수축 실험 결과와 Table 4의 상수값과 식 (5), 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 얻은 예측 결과(그림에서 실선으로 표시)를 서로 비교하여 각각 나타내었다. 이밖에 FA10(Mix 5, 6)과 FA30 콘크리트(Mix 11, 12)에 대한 실험 결과는 Fig. 4에 주어져 있으므로 여기에서는 생략하였다.

세 가지 시간에 대한 각각의 상수들의 영향정도를 살펴 보면 다음과 같다. 우선, 최초 자기수축 측정 시점인 t_s 의 경우(Table 4(a))를 보면, W/B가 동일할 때 플라이 애쉬 대체율이 증가함에 따라 γ 가 감소함을 나타내었는데, 이는 플라이 애쉬가 자기수축을 감소시키며 그 정도는 플라이 애쉬 사용량에 비례함을 의미한다. 또한, 고강도 콘크리트에서 W/B가 낮아짐에 따라 a는 대체로 감소하였으며, b는 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, UPV 증가 시작 시간인 t_A 의 경우(Table 4(b))에는 t_s 인 경우에 비해 γ 가 다소 작아지는 경향을 나타내었다. 특히, Fig. 5~7에서 t_s 인 경우와 t_A 인 경우에서의 자기수축을 비교해 보면, t_A 인 경우에 동일한 재령에서 자기수축이 현저하게 줄어들었으며, 이러한 경향은 W/B가 낮을수록 더욱더 크게 나타났다. 예를 들어 W/B가 각각 0.35(Mix 2), 0.31(Mix 3), 0.27(Mix 4)인 OPC 배합의 경우, t_s 인 경우에 비해 재령 28일에서의 감소율이 각각 40.7%, 52.4%, 63.2%를 보였다.

마지막으로, 초결 시간인 t_i 의 경우(Table 4(c))를 보면, 상수들이 전체적으로 t_A 인 경우와 유사한 경향을 나타내었으며, t_A 에서의 자기수축과 거의 비슷하였다. 실제 응력 발현에 기여하는 자기수축은 t_A 또는 t_i 인 경우이나, 관입 저항 시험에 의한 HSC의 t_i 를 결정하는 것이 쉽지 않으므로 비파괴적 방법에 의해 보다 쉽게 얻을 수 있는 t_A 를

Table 4 Coefficient, γ , in Eq. (4) and constants, a and b, in Eq. (6)

(a) t_s (the first measurement time, 0.25 day)

W/B	γ				a				b			
	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30
0.50	1.00	-	0.87	-	0.20	-	0.30	-	0.65	-	0.85	-
0.35	1.00	-	0.81	-	0.99	-	0.70	-	0.10	-	0.17	-
0.31	1.00	0.86	0.70	0.60	0.45	0.20	0.42	0.20	0.17	0.36	0.27	0.33
0.27	1.00	0.95	0.77	0.64	0.13	0.13	0.05	0.10	0.34	0.37	0.70	0.66

(b) t_A (the beginning time of UPV development)

W/B	γ				a				b			
	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30
0.50	1.00	-	0.65	-	0.16	-	0.18	-	0.88	-	1.24	-
0.35	1.00	-	0.62	-	1.06	-	1.53	-	0.17	-	0.16	-
0.31	1.00	0.92	0.62	0.60	0.98	0.48	1.20	1.14	0.20	0.32	0.25	0.19
0.27	1.00	0.89	0.75	0.69	0.41	0.33	0.36	1.08	0.27	0.36	0.35	0.22

(c) t_i (initial setting time determined by KS F 2436)

W/B	γ				a				b			
	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30	OPC	FA10	FA20	FA30
0.50	1.00	-	0.65	-	0.13	-	0.16	-	1.04	-	1.35	-
0.35	1.00	-	0.64	-	1.11	-	1.96	-	0.18	-	0.15	-
0.31	1.00	0.97	0.64	0.58	1.00	0.75	1.43	1.47	0.20	0.27	0.20	0.15
0.27	1.00	0.87	0.78	0.73	0.44	0.62	0.40	1.30	0.28	0.25	0.33	0.17

사용하는 것이 편리하다. 또한, 본 연구에서 제안한 모델은 식 (5)와 같이 재령 28일에서의 자기수축 변형률을 사용함으로써 최종 자기수축 변형률을 사용하는 식 (2)에 비해 기준값을 결정하기가 쉬우며, Fig. 5~7에서 보듯이 28일 이전 재령뿐만 아니라 28일 이후 재령에서의 자기수축 예측이 가능함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, W/B가 낮을수록 자기수축은 아주 이른 재령에서 크게 발생하기 때문에 자기수축의 측정 시점에 따라 그 크기가 좌우된다. 최근, Brooks와 Megat¹²⁾는 동일한 콘크리트에 대해 자기수축의 측정 시점을 초결 시간과 재령 24시간으로 각각 달리하여 자기수축을 측정 한 결과, 측정 시점에 따라 자기수축이 크게 달라짐을 보고한 바 있다. 또한, 자기수축의 크기보다는 자기수축에 의한 응력의 발생 시점을 정확히 판단하는 것이 공학적인 측면에서 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서 사용한 UPV 모니터링을 통해 주어진 콘크리트 배합의 강성 발현 시점(t_A)을 예측 모델에 반영함으로써 보다 실질적인 자기수축 예측이 가능할 것으로 사료된다.

4.2 실험결과와 기존 모델과의 비교

본 실험결과 중에서 W/B가 0.31(Mix 3)과 0.27(Mix 4)

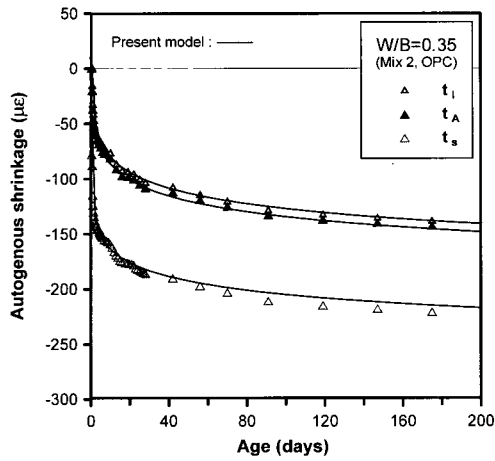
인 OPC 콘크리트의 자기수축 실험결과와 기존의 예측 모델 중에서 Tazawa 모델³⁾, Jonasson 모델⁴⁾, CEB-FIP 모델⁵⁾에 의한 예측 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Jonasson 모델(식 (8))과 CEB-FIP 모델(식 (9))은 각각 다음과 같다.

$$\epsilon_{as}(t) = [-0.65 + 1.3(W/B)]10^{-3} \cdot \exp\left[-\left(\frac{5}{t-1}\right)^{0.3}\right] \quad (8)$$

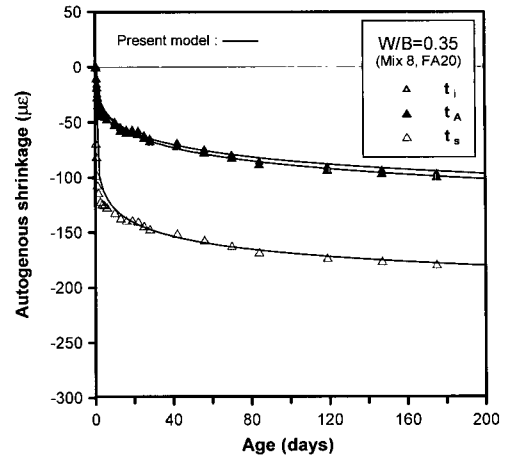
$$\epsilon_{as}(t) = -\alpha_{as} \left[\frac{f_c'(t)/10}{6 + f_c'(t)/10} \right]^{2.5} \cdot [1 - \exp(-0.2\sqrt{t})] \quad (9)$$

여기서, $f_c'(t)$ 는 재령 t에서의 압축강도(MPa), α_{as} 는 시멘트 종류에 따른 계수(1종 시멘트의 경우에는 700), t는 재령(일)을 나타낸다.

Fig. 8에서 solid symbol은 t_A 일 때의 자기수축 실험결과를, hollow symbol은 t_s 일 때의 자기수축 실험결과를 각각 나타낸다. Fig. 8에서 보듯이, 세 모델 중에서 Jonasson 모델⁴⁾(일점쇄선)이 본 실험결과와 가장 유사한 경향을 나타내었으며, CEB-FIP 모델⁵⁾(점선)은 자기수축을 다소 작게 예측함을 알 수 있다. 특히, Tazawa 모델(실선)은 t_A 보다는 오히려 t_s 일 때의 자기수축 결과에 가까운 경향을 나타내었다. 또한, Tazawa 모델은 다른 모델

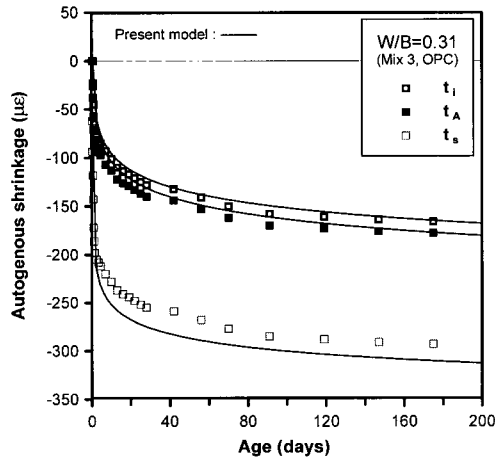


(a) OPC

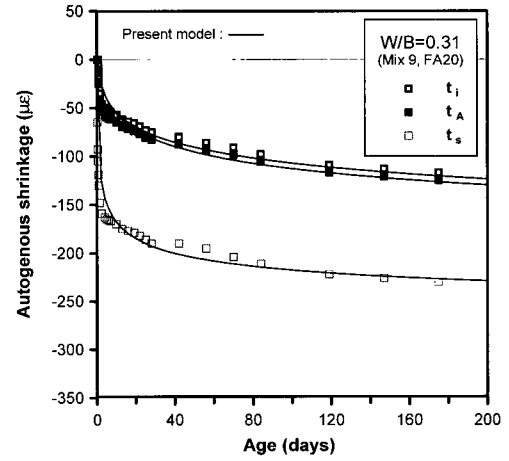


(b) FA20

Fig. 5 Predicted vs. measured autogenous shrinkage (W/B=0.35)

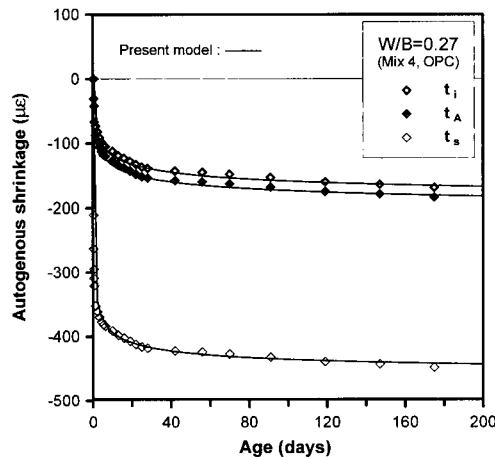


(a) OPC

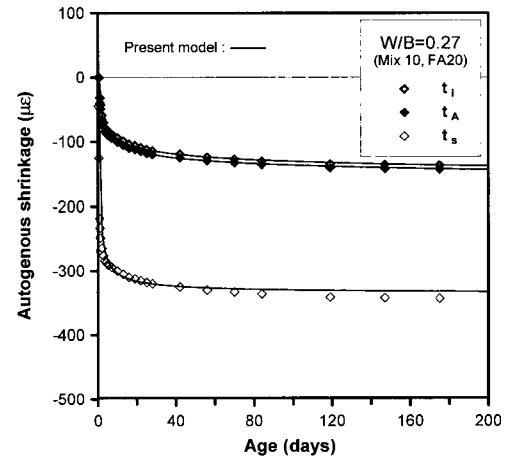


(b) FA20

Fig. 6 Predicted vs. measured autogenous shrinkage (W/B=0.31)

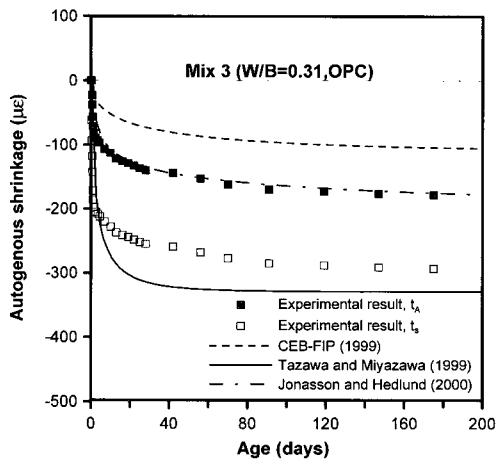


(a) OPC

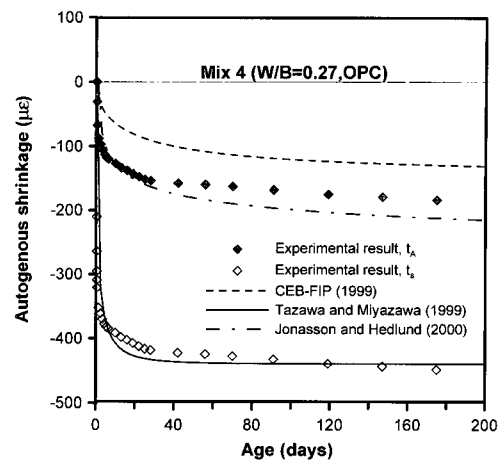


(b) FA20

Fig. 7 Predicted vs. measured autogenous shrinkage (W/B=0.27)



(a) W/B=0.31



(b) W/B=0.27

Fig. 8 Comparison of experimental results and predicted results by previous models

에 비해 자기수축이 이른 재령에 크게 발생하여 장기 재령으로 가면서 자기수축이 빨리 안정화되는 경향을 나타내었다.

5. 결 론

자기수축 예측 모델로 초음파 속도 모니터링 결과를 이용하여 Tazawa 모델을 수정 제안한 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 고강도 콘크리트 제조시 플라이 애쉬를 사용하면, 콘크리트의 자기수축이 감소하며 그 정도는 플라이 애쉬 사용량에 비례하는 것으로 나타났다. 따라서, 초기 강도 저하를 고려하여 적절한 양의 플라이 애쉬를 사용하면 고강도 콘크리트의 초기 균열의 주요한 원인인 자기수축을 어느 정도 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구에서 사용한 초음파 속도 자동 모니터링 시스템을 이용하여 배합 직후부터 콘크리트의 초음파 속도 발현 곡선을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 콘크리트 강성의 발현 시점을 간접적으로 조사할 수 있었다. 이 방법은 자기수축으로 인해 실제 콘크리트 구조물에 발생하는 응력을 예측하는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.
- 3) 재령 28일에서의 자기수축량과 초음파 속도 모니터링에 의해 결정된 콘크리트 강성의 발현 시점을 고려하여 여기론에 제안된 Tazawa 모델을 수정, 제안하였다. 추후, 자기수축 응력에 대한 실험적인 연구와 수치해석적인 연구가 이루어진다면 본 연구에서 사용한 모델링 방법이 고강도 콘크리트의 초기 균열 제어에 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 특정기초연구(1999-1-311-004-3) 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Paillere, M., Buil, M., and Serrano, J. J., "Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No.2, 1989, pp.139~144.
2. Bentz, D. P., Geiker, M. R., and Hansen, K. K., "Shrinkage-Reducing Admixtures and Early-Age Desiccation in Cement Pastes and Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.7, 2001, pp.1075~1085.
3. Miyazawa, S. and Tazawa, E., "Prediction Model for Shrinkage of Concrete Including Autogenous Shrinkage, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials," *Proceedings of Sixth International Conference*, Elsevier Science Ltd., 2001, pp.735~746.
4. Jonasson, J. and Hedlund, H., "An Engineering Model for Creep and Shrinkage in High Performance Concrete," *Proceedings of International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Shrinkage 2000, Edited by Baroghel-Bouny, V. and Aïtcin, P. C., Paris, France, 2000.
5. CEBFIP 2000, *Structural Concrete: Textbook on Behavior, Design and Performance*, Vol.1, Sprint-Druck Stuttgart, 1999, pp.43~46.

6. Dilger, W. H. and Wang, C., "Creep and Shrinkage of High Performance Concrete," Creep and Shrinkage Structural Design Effects, Edited by Al-Manaseer, A., SP-194, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, pp.361~379.
7. de Larrard, F. and Le Roy, R., "The Influence of Mix Composition on Mechanical Properties of High Performance Silica Fume Concrete," *Proceedings of Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Turkey, Istanbul, 1992, pp.965~986.
8. Bentur, A., "Comprehensive Approach to Prediction and Control of Early-Age Cracking in Cementitious Materials," Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, *Proceedings of Sixth International Conference*. Edited by Ulm, F. -J., Bazant, Z. P., and Wittmann, F. H., Elsevier Science Ltd, 2001, pp.589~598.
9. 이회근, 임준영, 이광명, 김병기, "플라이 애쉬를 함유한 고성능 콘크리트의 자기수축," 콘크리트학회논문집, 제14권 2호, 2001, pp.249~256.
10. Technical Committee Reports in Japan Concrete Institute, "Test Method for Autogenous Shrinkage and Autogenous Expansion of Cement Paste, Mortar, and Concrete," *Autogenous Shrinkage of concrete*, Ed. by Tazawa, E., E&FN Spon, London and New York, 1999, pp.56~59.
11. 이회근, 이광명, 김영환, 임현준, "초음파 속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정," 비파괴검사학회지, 제22권 3호, 2002, pp.292~303.
12. Brooks, J. J. and Megat, J. M. A., "Effect of Metakaolin on Creep and Shrinkage of Concrete," *Cement & Concrete Composites*, Vol.23, 2001, pp.495~502.

요 약

고강도 콘크리트의 초기 균열 제어를 위해서는 균열 발생의 주요 원인인 자기수축에 대한 실험과 예측, 그리고 감소 방안에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 물-결합재비가 0.50~0.27이고 플라이 애쉬 대체율이 0, 10, 20, 30%인 콘크리트의 자기수축을 측정하였으며, 실험결과를 토대로 예측 모델을 제안하였다. 실험 결과, 물-결합재비가 낮아짐에 따라 자기수축이 증가하였으며, 재령 초기에서 자기수축 발현률이 크게 증가하였다. 또한, 플라이 애쉬 대체율이 증가할수록 자기수축이 감소하는 결과를 얻었다. 비록 재령 초기에 큰 자기수축이 발생했다 하더라도 콘크리트의 강성(탄성계수)이 낮은 동안에는 응력은 발생하지 않게 된다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 강성의 변화를 고려하기 위해 초음파 속도 발현 특성으로부터 콘크리트 강성의 발현 시점을 간접적으로 조사하여 이를 자기수축 모델링에 사용하였다. 실용적인 측면에서, 본 연구에서 제안된 모델은 자기수축과 이로 인해 발생한 응력을 예측하는 데에 유효하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 자기수축, 예측 모델, 플라이 애쉬, 초음파 속도