

# 등가재령 방법에 의한 혼화재 치환 고강도 시멘트 모르타르의 자기수축 해석에 관한 연구

## A Study on the Estimation of Autogenous Shrinkage of High Strength Mortar incorporating Mineral Admixture by Equivalent Age Method

한 민 철\*

Han Min-Cheol\*

Department of Architectural Engineering, Cheong-Ju University, Sangdang-Gu, Cheong-Ju, 360-710, Korea

### Abstract

The objective of this study is to investigate an effect of curing temperature on autogenous shrinkage of high strength cement mortar with 0.15 of W/B incorporating fly ash and silica fume in terms of equivalent age. The contents of fly ash and silica fume are varied from 10% to 30%. Non linear regression model applying equivalent age was used to estimate the autogenous shrinkage evolution. To obtain apparent activation energy(Ea), setting time method by Pinto and existing method were calculated and compared respectively. Test results showed that use of silica fume increased autogenous shrinkage while use of fly ash decreased it. It was also found that poor agreements were obtained when Ea by setting time was applied. But, application of existing Ea resulted in a good agreement between calculated autogenous shrinkage and measured one.

Keywords : autogenous shrinkage, equivalent age, fly ash, silica fume, apparent activation energy

### 1. 서 론

고강도 콘크리트는 높은 압축강도 및 탄성계수 등 우수한 역학적 특성과 내구성을 보유한 반면, 재료 배합상 많은 양의 시멘트를 사용하고 고로슬래그 및 실리카폼과 같은 높은 분말도의 혼화재료를 다량 혼입함에 따라 수화초기 단계에서 자기수축이 크게 발생하는 문제점을 가지고 있다.

이러한 자기수축은 시멘트 사용량이 많은 고강도 콘크리트의 응결단계부터 경화초기단계에 걸쳐서 이루어지는 체적의 축소 현상으로 수화과정중 모세관수의 소모현상

및 이로 인한 세공내 상대습도 저하 등으로 인한 자기건조가 세공수의 인장응력을 유발하여 시멘트 경화체에 압축응력을 작용시키므로써 수축을 유발하는 것으로 알려져 있다[1,2].

자기수축의 영향요인으로는 물결합재비, 광물질 혼화재 종류 및 사용량 등이 있는데, 고강도 콘크리트 제조시 혼화재료의 사용이 필수적이므로 자기수축에 의한 균열 발생가능성은 매우 클 수밖에 없다. 따라서 이러한 자기수축을 설계단계에서 예측하고 정량적으로 평가할 수 있는 기법의 개발은 고강도 콘크리트의 균열안정성 확보차원에서 매우 중요한 사항이다.

특히, 콘크리트는 온도에 민감하게 반응하는 물질로서 건설공사 현장이 다양한 외기온 조건하에 노출되기 때문에 고강도 콘크리트 타설후 현장의 외기온 변화에 따라 수화과정에서 발생하는 자기수축량의 경우도 다양한 변화가 예상된다. 이러한 온도변화에 따른 자기수축의 영향

Received : December 24, 2013

Revision received : January 14, 2004

Accepted : January 21, 2014

\* Corresponding author : Han, Min-Cheol

[Tel: 82-43-229-8484, E-mail: twhan@cju.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

은 시멘트의 수화도와 관련하여 적산온도 개념을 이용하여 접근하는 연구가 최근 진행되고 있는데, Turcry et al.[3] 등은 10~40℃의 등온양생조건에서 적산온도에 의한 자기수축의 정량적 평가가 가능하다고 보고하고 있으며 실제온도 조건에서는 선펡창계수의 영향으로 등온양생 조건에서 측정된 자기수축과 예측에 의한 자기수축이 차이를 보이는 것으로 보고하고 있다. Tazawa et al.[4]은 수화온도와 자기수축의 상관성을 검토하고 다른 양생온도 조건에서 등가재령 방법에 의하여 콘크리트의 자기수축을 예측할 수 있다고 보고하고 있다. 또한 Loukli et al.[5]은 양생온도가 자기수축에 영향을 미치며 초기재령에서 온도의 영향을 고려하지 않을 경우 자기수축을 잘못 평가할 수 있음을 지적하고 있다. 아울러, Kim et al.[6]은 수정반응을 상수 모델을 이용하여 자기수축 해석을 진행한바 있는데, 이러한 등가재령 방법에 있어 온도민감도를 나타내는 변수인 겔보기 활성화 에너지(이하  $E_a$ )의 정확한 산정이 자기수축 예측의 정확성을 확보하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다.

그러나 이러한  $E_a$ 의 적용에 따른 자기수축의 영향을 정량적으로 평가한 연구는 현재까지 거의 보고된 바 없는 상황으로 자기수축 예측의 정확성 확보 차원에서 이에 대한 검토가 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 플라이애시와 실리카 폼을 치환한 고강도 시멘트 모르타르를 대상으로 치환률 변화에 따른 자기수축 특성을 고찰하고  $E_a$  적용방법에 따른 자기수축 예측 결과치를 비교 분석하므로써 향후 자기수축 예측 모델 구축에 기여하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 먼저 배합사항으로 고강도 영역을 상정한 물-결합재비 (이하 W/B) 15%의 시멘트 모르타르를 대상으로 목표 플로 200±10 mm를 만족하도록 시멘트와 모래의 비율 및 고성능 감수제의 량을 결정하였다. 혼화재료로서 플라이애시(이하 FA)와 실리카 폼(이하 SF)을 각각 10, 20, 30%로 치환하는 것으로 계획하였다. 양생온도의 경우 실무 현장에서

접하게 되는 저온 및 고온조건을 고려하여 5, 20 및 35℃의 3수준으로 계획하였다. 실험사항으로 굳지않은 상태에서 양생온도별 응결시간, 경화상태에서 양생온도별 자기수축량을 측정하는 것으로 하였으며, Table 2는 배합사항을 나타낸 것이다.

Table 1. Design of experiments

Test items		Variables
Mixture	W/B(%)	· 15
	Target flow (mm)	· 200±10
	Binder composition	· OPC+Silica fume · OPC+Fly ash
	Admixture contents	· 0, 10, 20, 30
	Curing temperature (°C)	· 5, 20, 35
Experiments	Fresh mortar	· Setting time
	Hardened mortar	· 2 Autogenous shrinkage (From initial set to 42days)

\* Plain mixture : OPC 100 %

Table 2. Mixture proportions of mortars

Mixtures	W/B (%)	Weight (kg/m <sup>3</sup> )					
		Water	Cement	Sand	FA	SF	SP agent
OPC		174	1161	1161	0	0	20.9
FA10		172	1029	1143	114	0	18.8
FA20		169	901	1126	225	0	18.0
FA30	15	166	776	1108	332	0	18.2
SF10		173	1042	1158	0	116	20.8
SF20		173	923	1154	0	231	19.6
SF30		172	805	1151	0	345	17.8

### 2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로서 먼저, 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 골재로서 잔골재는 충북 청원군 옥산산 강모래를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 4와 같다.

혼화재료로서 FA는 충남 보령화력산의 2종 FA를 사용하였는데, 그 물리적 성질 및 화학적 구성은 Table 5와 같다. 또한, SF의 경우 국내 P사 제품을 이용하였는데, 그 물리적 성질 및 화학적 구성은 Table 6과 같다. 혼화제로써 고성능 감수제는 국내 E사의 폴리칼본산계를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 7과 같다.

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Soundness (%)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial set	Final set	3 days	7 days	28 days
3.15	3206	0.15	229	404	22.0	28.9	38.9

Table 4. Physical properties of aggregates

Aggregates	F · M	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	0.08 mm sieve passing (%)
River sand	2.57	2.58	2.63	2.87

Table 5. Physical properties of fly ash

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Ig.loss (%)	Ratio of strength (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Moisture (%)	Water contents ratio (%)
2.22	3,850	4.2	92	67.5	0.2	100

Table 6. Physical and chemical properties of SF

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I (%)	Chemical composition(%)				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
2.20	200,000	1.51	96.40	0.26	0.12	0.38	0.1

Table 7. Physical properties of chemical admixture

Type	Main ingredient	Appearance	Color	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Superplasticizer	Polycarboxylate	Liquid	Light yellow	1.04

2.3 실험방법

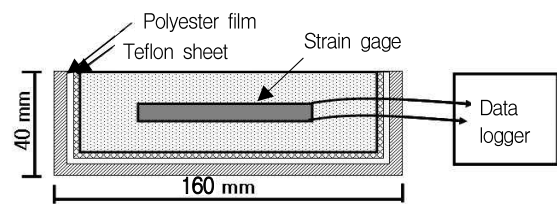
먼저, 모르타르의 혼합은 모르타르 전용 믹서를 사용해서 혼합하였고, 굳지 않은 모르타르의 실험으로 응결시간은 KS F 2436에 의거 실시하였는데, 몰드 성형후 5, 20, 35℃가 유지되는 챔버에서 양생하며 초결 및 종결시간을 측정하였다.

한편, 자기수축 길이변화율은 KS F 2586의 시험방법에 의거 실시하였는데, Figure 1과 같이 40×40×160 mm의 각주형 몰드의 바닥과 양단에 1 mm 두께의 테프론 시트(Teflon sheet)를 깔아서 시료의 자유로운 변형이 구속되지 않도록 하였다. 이후 중앙에 매립형 스트레인 게이지를 설치하여 공시체 제작 후 양생온도 5, 20 및 35℃와 상대습도 60±5%가 유지되는 챔버에서 양생하였는데, 데이터 로거에 의해 초결 이후의 자기수축 길이변화율을 측정하였다. 이때 자기수축 시험체는 각 배합당 3개

씩 제작하여 측정하였는데, 1일 경과 후 탈형하였으며, 보관시 발생할 수 있는 수분증발로 인한 건조수축 및 흡수로 인한 팽창을 막기 위해 폴리에스테르필름(Polyester film) 및 알루미늄 은박지로 감싸주었다.



1) Measuring autogenous shrinkage by data logger



2) Embedding strain gage

Figure 1. Specimen preparation for autogenous shrinkage

3. 실험결과 및 분석

3.1 응결시간

Figure 2는 FA 및 SF 치환률 변화에 따른 초결 및 종결시간을 양생온도별로 구분하여 나타낸 것이다.

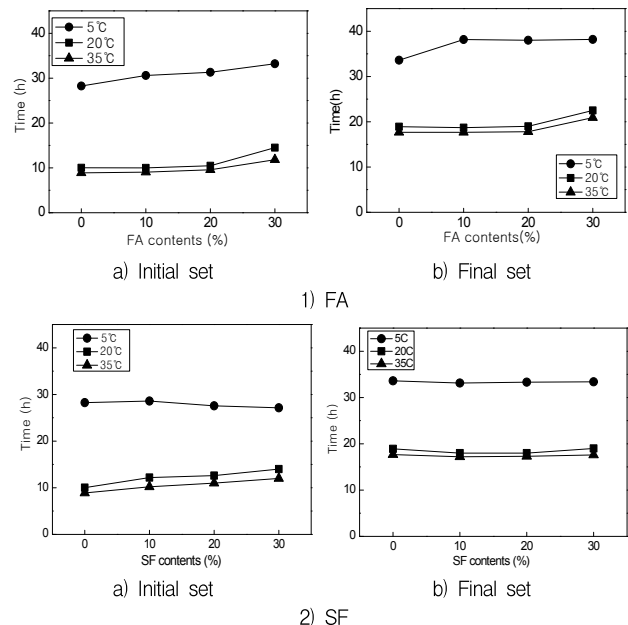


Figure 2. Setting time with FA and SF contents according to curing temperature

전반적으로 결합재 종류에 관계없이 플레인을 포함한 모든 배합에서 응결시간이 18~20시간 정도로 나타나 통상적인 응결시간 보다 상당부분 지연되는 것으로 나타났는데, 이는 본 연구에서 적용한 배합이 W/B 15%로서 단위시멘트량이 과다함에 따라 점성이 지나치게 커져 목표 플로를 확보하기위한 SP제의 사용량이 통상의 경우보다 2배이상인 2%내외로서 SP제 과다사용에 의한 응결지연 현상으로 판단된다. 또한, FA 및 SF 치환률이 증가할수록, 양생온도가 낮아질수록 응결시간은 약간 지연되는 것으로 나타났는데, 이는 전술한바와 같 배합설계시 낮은 W/B를 갖는 시멘트 모르타르의 유동성 확보를 위해 사용한 SP제량이 과다하여 플레인 배합도 이로 인한 응결지연이 나타나 FA 치환률 증가에 따른 응결지연 폭이 크지 않았기 때문으로 사료된다. SF의 경우도 FA의 경우와 유사한 경향을 보였으나 5℃의 저온조건에서는 FA보다 빠른 응결을 보였다. 한편, 양생온도별로는 기존의 연구결과와 동일하게 FA를 치환한 경우 저온조건인 양생온도 5℃에서는 20 및 35℃와 비교하여 10~15시간 정도의 응결지연이 나타나고 있음을 알 수 있었고 SF의 경우는 전술한 바와 같이 고온조건에서는 FA와 큰 차이가 없으나, 저온에서 3~5시간 정도 종결이 빨라지며 플레인과 비교하여도 큰 차이가 없어 저온에서의 SF 치환에 따른 응결지연 현상은 발생되지 않을 것으로 판단된다.

### 3.2 재령경과에 따른 자기수축

Figure 3은 FA 및 SF 치환률별 재령경과에 따른 양생온도별 자기수축 길이변화율을 측정 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 재령이 경과함에 따라 재령 3일 이전에 급속한 수축을 보이다가 이후 재령이 경과함에 따라 완만한 수축을 나타내고 있었다.

먼저, 혼화재 종류별로는 FA를 치환한 경우 치환률이 증가함에 따라 플레인보다 자기수축량이 감소되는 것으로 나타났는데, 이는 FA 치환률 증가에 따라 시멘트량이 비례적으로 감소하여 초기 수화반응이 지연되어 나타난 결과와 FA를 사용하여도 모세관 공극내의 상대습도가 거의 변하지 않아 재령이 경과하면서 수화반응이 진행되어도 자기건조가 크지 않기 때문에 수축량이 적어진 것으로 판단된다. 반면에 SF를 치환한 경우는 플레인 및 FA를 치환한 경우보다 전반적으로 양생온도에 관계없이 높은 수축량을 보이는 것으로 나타났다. 특히 SF 치환률이 높

을수록 양생온도가 높을수록 이러한 경향은 커지는 것을 알 수 있었다. 아울러 SF를 치환할 경우 FA 치환에 비하여 초기 3일 이내의 재령에서 보다 급격한 수축량을 갖는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 SF 치환에 따라 세공의 크기가 감소하고 이러한 세공 속 모세관수의 미니스커스 곡률 반경이 증가하여 모세관 장력이 커진 것과 세공내 상대습도가 크게 저하되어 자기건조가 크게 발생하게 된 원인으로 사료된다[1,7,8].

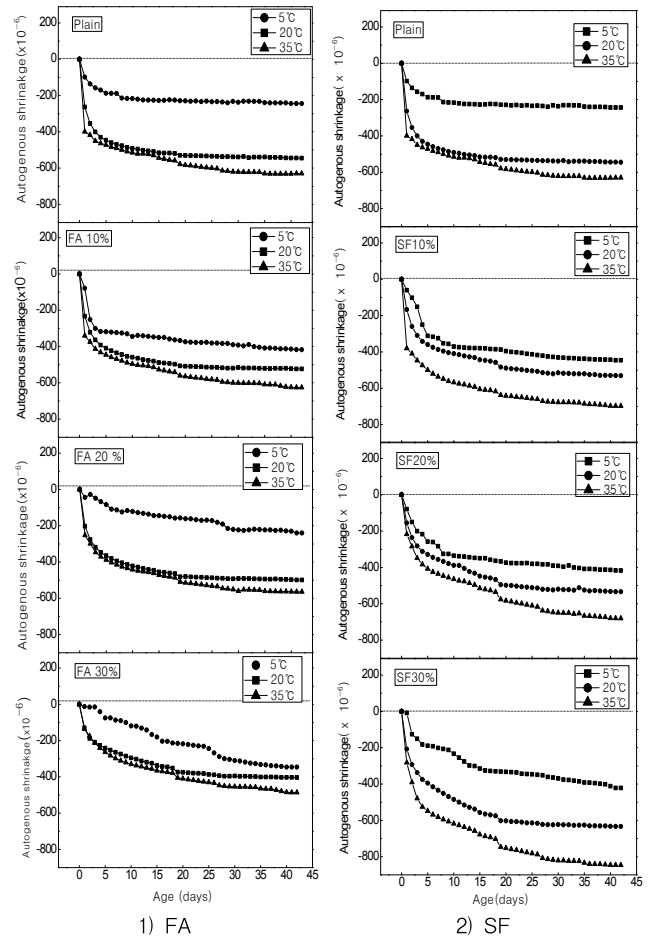


Figure 3. Autogenous shrinkage development with FA and BS contents depending on curing temperatures

한편, 양생온도별 자기수축 특성으로 양생온도가 증가할수록 전술한 바와 같이 자기수축량이 증가하는 것으로 나타났는데, 양생온도 20℃와 35℃를 비교할 경우 초기 재령에서는 큰 차이가 없으나 이후 재령이 경과함에 따라 35℃의 경우가 동일 재령에서 더욱 큰 수축량을 보이는 것으로 나타났다. 이는 자기수축과 관련하여 수화도의 영

향을 설명하는 과정에서 특정 수화도에서 양생온도가 다를 경우 자기수축량이 다르게 나타난다는 Turcry et al.[3]의 결과와 일치하는 것으로, 결국 자기수축은 수화도 뿐만 아니라 양생 온도에 의해서도 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 또한 양생온도 5°C의 경우 20°C나 35°C의 경우에 비해 자기수축량이 동일재령에서 상당히 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, FA를 치환한 경우 양생온도 5°C, 20°C 및 35°C에서 42일 자기수축량은 각각  $-234 \times 10^{-6}$ ,  $-544 \times 10^{-6}$ ,  $-630 \times 10^{-6}$ 로 나타났고, SF를 치환한 경우 각각  $421 \times 10^{-6}$ ,  $633 \times 10^{-6}$ ,  $845 \times 10^{-6}$ 로 나타났다.

### 3.3 등가재령에 의한 자기수축 해석

Tucry et al.[3]과 Kim et al.[6]은 전술한바와 같이 동일한 수화도에서 양생온도에 따라 자기수축량에 차이가 나타나고 있어 양생온도의 영향을 적산온도 방법으로 평가할 수 있을 것으로 보고하고 있다. 따라서 본 절에서는 3.2절에서 검토된 양생온도별 재령경과에 따른 자기수축을 등가재령방법(Eq.(1))으로 통계적 해석을 실시하므로써 등가재령 방법을 자기수축 예측에 적용할 수 있는지 여부와 아울러 수화도에 미치는 온도 민감도의 영향 요인인 겔보기 활성화 에너지( $E_a$ )의 영향이 자기수축 예측의 정확성에 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하고자 한다.

먼저, 본 연구에서 적용한 등가재령방법 모델식은 Eq.(1)과 같고 이 식에서의  $E_a$ 값은 전술한바와 같이 수화반

$$t_c = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \text{ ----- (1)}$$

여기서,

- $t_e$  : equivalent age(days@20°C)
- $T_r$  : absolute temperature at 20°C
- $E_a$  : apparent activation energy (KJ/mol · K)
- $T$  : absolute temperature(°K, 273+°C)

응속도에 미치는 온도의 민감도를 나타낸 것으로 기존의 문헌에 따르면 배합, 혼화재료 사용여부 및 강도수준 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한  $E_a$ 값을 두단계로 구분하여 각각 자기수축을 평가하였는데, 첫번째는 Pinto 등이 제안한 응결시간

을 이용하는 방법과 두 번째는 기존의 연구문헌에서 제시된 경화단계의  $E_a$ 값을 이용하는 것으로 하였다 [9]. 이는 자기수축의 발현이 초결시작부터 경화이후 초기단계에 걸쳐 진행됨으로 둘중 어떠한 단계의  $E_a$ 값을 고려하는 것이 보다 정확한 예측을 가능하게 하는지 확인하기 위하여 구별하였다.

응결시간을 이용한  $E_a$  산정은 먼저 초결과 종결시점에서의  $E_a$  값을 Arrhenius plot을 이용하여 산정한 후 자기수축 평가에 있어 종결이전까지는 초결시점의  $E_a$ 를 적용하고 종결이후부터는 종결시점의  $E_a$  값을 적용하였다. 한편, 경화단계의  $E_a$  산정은 기존 연구자의 결과치를 적용하였는데, 플레인 배합의 경우 Freisleben-Hansen Peder-son의 제안 값을 사용하였고, FA치환 배합의 경우 Kim et al.[6]의 제안 값인 42.07 KJ/mol 그리고 SF 치환 배합의 경우도 Kim et al.[6]의 제안 값인 40.26 KJ/mol을 사용하였다.

Table 8. Calculation of  $E_a$  by Arrhenius plot at setting stage

Mixtures	Setting	Regression coefficient		$E_a$ (KJ/mol)
		$\ln\left(\frac{1}{t_i}\right) = \ln A - B \cdot \frac{1}{T}$		
		lnA	B( $E_a/R$ )	
Plain	Initial	7.21	2887.6	24.01
	Final	2.35	1606.6	13.36
10%	Initial	7.71	3045.6	25.32
	Final	3.40	1926.2	16.01
FA 20%	Initial	4.24	1997.6	16.61
	Final	3.29	1895.9	15.76
30%	Initial	5.89	2579.8	21.45
	Final	1.82	1505.3	12.52
10%	Initial	6.02	2575.0	21.41
	Final	2.49	1638.8	13.62
SF 20%	Initial	5.06	2297.1	19.10
	Final	2.48	1638.6	13.62
30%	Initial	4.13	2041.1	16.97
	Final	2.33	1602.0	13.32

Table 8은 응결단계의  $E_a$  값을 산정하기 위한 Arrhenius plots의 결과[9]와 이를 토대로 산정된  $E_a$  값을 정리하여 나타낸 것이다. 전반적으로 플레인 배합의 경우 초결에서는 23.0 KJ/mol로 산정되었고 종결에서는 13.36 KJ/mol로 산정되었으며 FA 및 SF 치환에 따라 13~22 KJ/mol로 산정되었다. 한편 본 연

구에서는 등가재령에 의한 자기수축 해석을 위한 실험 식으로서 비선형 통계 분석모델의 일종인 지수함수모델(Eq.(2))을 이용하여 해석을 수행하였다. 비선형 회귀분석은 통계분석 상용 소프트웨어인 Origin 8.0을 이용하였다.

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + a \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{b}\right] \quad (2)$$

여기서,

$\epsilon_c(t)$  : autogenous deformation at age  $t \times 10^{-6}$ )

$\epsilon_0, a, b$  : constant

$t$  : equivalent age(days@20°C)

$t_0$  : equivalent age at initial set(days)

Figure 4는 등가재령에 따른 FA 및 SF를 치환한 시멘트 모르타르의 자기수축을 Eq.(2)의 지수함수모델을 이용하여 비선형 회귀분석한 결과를 나타낸 것이고 Table 9는 비선형 회귀분석 결과를 정리한 것이다.

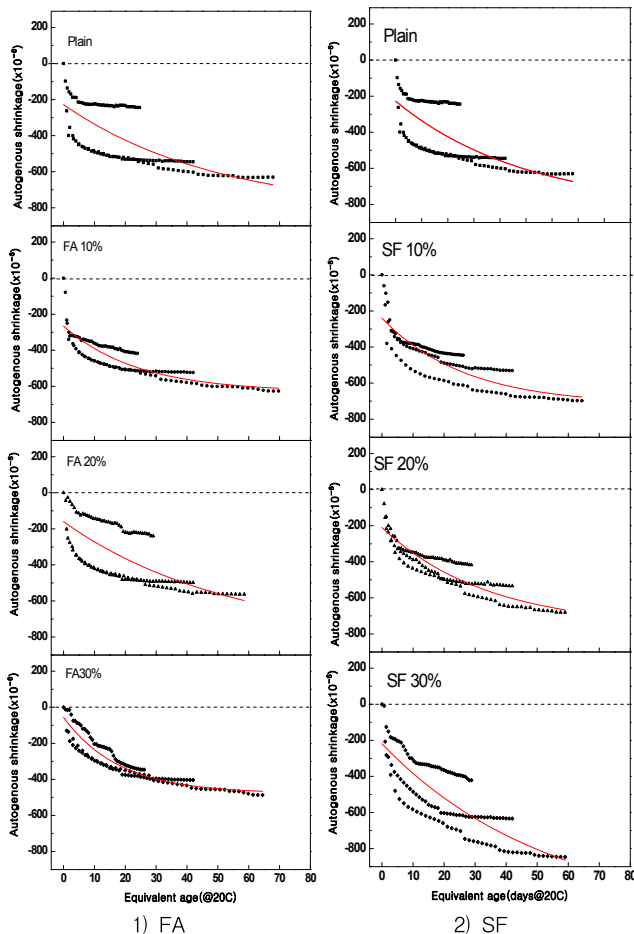


Figure 4. Estimation of autogenous shrinkage by  $E_a$  from setting time

전반적으로 양생온도 20°C와 35°C의 경우 동일 등가재령에서 유사한 자기수축값을 갖는 것을 확인할 수 있으나, 양생온도 5°C의 경우는 여타 양생온도에서의 자기수축값과 큰 차이를 보이고 있었다. 특히 초기 재령 2일 이전에는 양생온도에 관계없이 동일한 등가재령에서는 유사한 자기수축값을 갖는 것으로 나타났으나, 이후 등가재령이 경과함에 따라 5°C의 자기수축값이 다른 양생온도에 비하여 상당한 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 관련하여 Jensen et al.[9]은 낮은  $E_a$  값을 적용할 경우 초기단계에서 양생온도별 자기수축량은 큰 차이를 보이지 않으나 재령이 경과하여 후기로 진행될수록 양생온도별 편차가 커진다고 지적하고 있어 Table 8에서 적용한 응결단계  $E_a$  값인 12~25 KJ/mol을 적용한 경우 전 등가재령에 걸친 자기수축의 정확한 예측에는 한계가 있음을 확인할 수 있었다. 해석의 상관성도 결정계수값을 확인한 결과 0.4~0.8수준에 있음을 알 수 있었다.

반면에 Figure 5는 경화단계의  $E_a$  값을 적용하여 자기수축을 해석한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우 응결시간에 의한  $E_a$  값보다 경화단계  $E_a$  값이 크기 때문에 동일재에서도 등가재령은 Figure 4보다 크게 되어 Figure 5에서 보듯이 등가재령이 80일까지도 계산됨을 확인할 수 있다. 전반적으로 양생온도별 자기수축값의 편차가 전 등가재령에서 상당부분 감소함을 알 수 있는데, 이는 경화단계  $E_a$  값이 전 등가재령 영역에서 자기수축의 온도의존성을 보다 양호하게 설명하고 있음을 알 수 있다. 이는 Table 10에서도 확인할 수 있는 사항으로 전반적인 결정계수가 Table 9에 비해 높아진 것을 확인할 수 있었다.

Table 9. Regression coefficient by  $E_a$  from setting time

Mixtures	$\epsilon_0$	a	b	$R^2$
Plain	-827.32	599.74	50.18	0.499
FA10	-630.21	364.43	23.98	0.763
FA20	-824.86	664.65	54.60	0.476
FA30	-488.77	422.24	18.08	0.878
SF10	-720.30	479.80	26.70	0.740
SF20	-763.54	553.63	33.88	0.823
SF30	-827.32	599.74	50.18	0.499



Table 10. Regression coefficient by  $E_a$  from hardened stage

Mixtures	$\epsilon_0$	a	b	$R^2$
Plain	-632.17	470.62	17.92	0.757
FA10	-617.00	355.89	21.74	0.801
FA20	-606.96	500.48	24.98	0.657
FA30	-456.04	412.74	14.97	0.920
SF10	-677.74	436.48	22.13	0.860
SF20	-658.48	444.71	23.78	0.927
SF30	-845.11	678.60	24.41	0.904

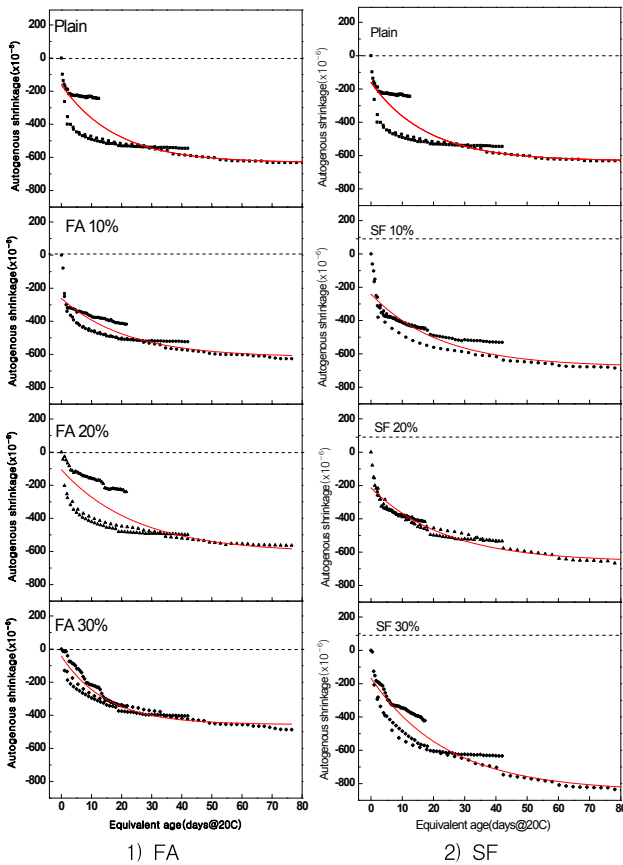


Figure 5. Estimation of autogenous shrinkage by  $E_a$  from hardened stage

이는 혼화재 치환의 경우 초기재령 단계에서는 시멘트 수화반응에 의한  $E_a$ 에 지배를 받지만, 이후 재령이 경과함에 따라 FA 혹은 SF의 포졸란 반응의 영향을 받게 되므로 이를 고려한  $E_a$ 가 재령 단계별로 반영되어야 함을 시사한다. 결국 이러한 사항이 고려된 Figure 5가 Figure 4보다 양호한 정밀도를 확보하고 있음을 보여주고 있다.

단, 본 연구범위에서는 등온양생조건의 실험실 실험을 통하여 얻어진 결과로서 실제 콘크리트의 수화반응에 의한 온도이력을 고려할 경우 이로 인한 온도변화로 야기되는 초기 선팽창계수의 영향을 반영한 연구가 추가적으로 수행되어야 보다 정확한 자기수축의 평가가 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FA 및 SF를 치환한 고강도 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 온도의존성의 영향을 평가하기 위하여  $E_a$ 를 달리한 등가재령 방법으로 자기수축을 해석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양생온도별 자기수축 특성으로 양생온도가 증가할수록 자기 수축량이 커지는 것으로 나타났는데, FA 치환의 경우 플레인보다 자기수축이 대체적으로 감소하나, SF의 경우 치환률이 증가할수록 양생온도가 높아질수록 플레인 및 FA 치환의 경우보다 자기수축량이 급격히 증가함을 확인하였다. 이는 SF 치환에 따른 세공구조의 밀실화와 이로 인한 세공장력의 증가에 기인된 것으로 사료된다.
- 2) 양생온도에 따른 자기수축량의 차이는 동일한 수화도에서 자기수축에 미치는 영향요인은 수화도 뿐만 아니라 양생온도의 경우도 해당될 수 있음을 시사하는 것으로써 이는 자기수축 해석에 등가재령 방법이 유효할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 본 연구범위에서 등가재령에 따른 자기수축의 해석에 있어 경화단계  $E_a$ 값을 이용할 경우 등가재령에 의한 자기수축 해석을 보다 정확하게 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 이를 위해  $E_a$  값의 올바른 선정은 해석의 정확성 확보에 큰 영향을 미치는데, 응결 및 초기단계의 경우 응결시간에 의해 얻어진 낮은  $E_a$  값으로 비교적 정확한 추정이 가능하지만 이후 재령이 경과함에 따라 배합의 특성을 고려한 경화단계의  $E_a$  값이 고려되어야 보다 정확하게 자기수축에 미치는 온도의존성의 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 토대로 본 연구범위에서는 양생온도변화에 따른 자기수축 해석을 등가재령 방법을 통해 수행할

수 있음을 확인하였고, 아울러 보다 정확한 해석을 위하여는 모든 재령에 걸쳐 배합 및 사용재료를 고려한 정확한  $E_a$ 값의 산정이 필요하며 향후 초기단계의 수화반응에 의한 열팽창에 대한 고려가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 요 약

본 연구에서는 양생온도변화에 따른 자기수축의 예측을 위하여 FA 및 SF를 치환한 시멘트모르타르를 대상으로 자기수축변화를 측정하고 이를 등가재령방법으로 해석하고자 하였다. 이를 위해 수화반응의 온도민감도를 고려하는  $E_a$ 의 변화에 따라 지수함수모델을 이용하여 자기수축 해석을 실시하였는데, 경화단계의  $E_a$ 를 이용할 경우 응결단계의  $E_a$ 를 사용한 경우보다 정확한 해석이 가능한 것으로 나타났는데, 이는 경화의 전단계에 걸친 수화의 온도민감도 영향을 반영한  $E_a$ 값에 기인된 결과로 사료된다.

**키워드** : 자기수축, 등가재령, 플라이애시, 실리카폼, 걸보기성화에너지

## Acknowledgement

This work was supported by the research grant of Cheongju University in 2012.

## References

1. Aitcin PC, Autogenous shrinkage measurement, Proceeding of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, In: Eichi Tazawa, editor, 1998 Sept; Hiroshima (Japan), Newyork (NY): E&FN Spon; c1999. p. 257-67.
2. Tazawa E, Miyazawa S, Kasai T. Chemical shrinkage and autogenous Shrinkage of hydrating cement paste, Cement and Concrete Research, 1995 Feb;25(2):288-92.
3. Turcry P, Loukili A, Barcelo L, Casabonne JM, Can maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age, Cement and Concrete Research, 2002 Nov;32:1443-50.
4. Tazawa E, Matuoka Y, Miyazawa S, Okamoto S. Effect of autogenous shrinkage on self stress in hardening concrete, International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages; 1994 Nov; Munchen (Germany), London (UK): E&FN Spon; 1994. p. 221-28.
5. Loukli A, Chopin D, Kheldj A, Touzo J. A New approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history, Cement and Concrete Research, 2000 Jul;30(7):915-22.
6. Chu IP, Kwon SH, Amin MN, Kim JK. Estimation of temperature effects on autogenous shrinkage of concrete by a new prediction model, Construction and Building Materials, 2012 Oct;35(10):171-82.
7. Holt E, Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages, Cement and concrete research, 2005 Mar;35(3):464-72.
8. Zhang MH, Tam CT, Leow MP. Effect of water to cementitious materials ratio and silica fume on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, 2003 Apr;33(3):1687-94.
9. Jensen OM, Hansen P. Influence of temperature on autogenous shrinkage deformation and relative humidity change in hardening cement paste, Cement and Concrete Research, 1999 Mar;29(4):567-75.