

# 고성능 콘크리트의 자기수축 예측모델에 관한 연구

## Prediction Model on Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete

유성원\*    소양섭\*\*    조민정\*\*\*    고경택\*\*\*\*    정상화\*\*\*\*\*  
Yoo, Sung-Won    Soh, Yang-Sub    Cho, Min-Jung    Koh, Kyung-Taek    Jung, Sang-Hwa

### Abstract

The autogenous shrinkage of high-performance concrete is important in that it can lead the early cracks in concrete structures. The purpose of the present study is to explore the autogenous shrinkage of high-performance concrete with admixture and to derive a realistic equation to estimate the autogenous shrinkage model of that. For this purpose, comprehensive experimental program has been set up to observe the autogenous shrinkage for various test series. Major test variables were the type and contents of admixture and water-cement ratio is fixed with 30%. The autogenous shrinkage of HPC with fly ash slightly decreased than that of OPC concrete, but the use of blast furnace slag increased the autogenous shrinkage. Also, the autogenous shrinkage of HPC is found to decrease with increasing shrinkage reduction agent and expansive additive. A prediction equation to estimate the autogenous shrinkage of HPC with admixture was derived and proposed in this study. The proposed equation show reasonably good correlation with test data on autogenous shrinkage of HPC with mineral and chemical admixture.

### 요 지

고성능 콘크리트의 자기수축은 초기균열을 유도할 수 있기 때문에 내구성 측면에서 매우 중요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 실험을 통해 혼화재료를 혼입한 고성능 콘크리트의 자기수축 특성을 분석한 후 예측모델을 제안하였다. 이를 위해 다양한 실험변수를 가진 시편에 대해 광범위한 실험을 수행하였다. 주요 실험변수는 혼화재료의 종류 및 혼입률로 설정하였으며 물-시멘트비는 30%로 고정하였다. 실험결과 플라이애시를 치환한 경우에는 자기수축량이 다소 감소하였으며, 고로슬래그를 사용한 경우에는 자기수축이 증가하였다. 또한, 수축저감제 및 팽창제의 혼입량이 클수록 고성능 콘크리트의 자기수축은 감소하는 경향을 보였다. 한편, 본 논문에서는 회귀분석을 통해 혼화재료를 사용한 고성능 콘크리트의 자기수축 예측식을 제안하였으며, 제안된 자기수축 예측식은 실험결과와 비교적 일치하였다.

**Keywords :** Autogenous Shrinkage, High-Performance Concrete, Prediction Equation, Mineral Admixture

**핵심 용어 :** 자기수축, 고성능 콘크리트, 예측식, 광물질 혼화재료

\* 우석대학교 토목환경공학과 부교수

\*\* 전북대학교 건축도시공학부 교수

\*\*\* 한국건설자재시험연구원 선임연구원

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\*\*\*\* 성균관대학교 Post-doc

E-mail : imysw@woosuk.ac.kr 011-9786-7367

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

최근 교량의 장대화 및 시공성 향상 등을 위해 고성능 콘크리트의 사용 실적이 차츰 증가하고 있으며, 이러한 고성능 콘크리트의 요구 성능을 만족시키기 위해서는 필연적으로 물-시멘트비가 작으면서 단위 시멘트 양이 많은 배합을 사용해야 한다. 그러나 콘크리트 배합시 물-시멘트비가 50%이하로 낮은 경우에는 배합수의 대부분이 시멘트에 고착된 상태로 존재하며, 이 경우 수화반응 동안에 화학적으로 결합되어 있는 물의 비부피(Specific volume)가 감소하므로 시멘트 페이스트의 부피 변화가 발생한다. 만약 부피의 수축이 제한되어 있고 추가적인 수분의 공급이 없다면 공극은 가장 큰 곳에서부터 점차로 비게 될 것이며, 이에 따라 수증기압 및 상대습도가 감소하게 된다. 이러한 현상을 자기건조라고 하며, 이로 인해 발생하는 콘크리트의 수축현상을 자기수축이라고 한다(Neville, 1995).

실제로, 콘크리트의 자기수축 변형률은 일반적인 물-결합재비를 가진 보통 콘크리트는 재령 1년인 경우에  $40 \times 10^{-6}$  정도, 재령 5년인 경우에  $100 \times 10^{-6}$  정도로 건조수축 변형률에 비해 상대적으로 작기 때문에 기존의 콘크리트 부재 설계에서는 고려할 필요가 없었다. 그러나 고성능 콘크리트와 같이 물-결합재비가 작고 단위 결합재량이 많은 콘크리트에서는 전체적인 수축량은 일반적인 수준의 콘크리트에 비해 감소하지만 전체 수축량 중에서 자기수축량이 차지하는 비중은 건조수축에 비해 오히려 크게 나타난다(CEB-FIP, 1999). 이 경우, 초기에 발생한 수축균열은 염소이온, 이산화탄소 가스, 물 등의 성능저하와 관련된 유해물질의 통로가 되기 때문에 결과적으로 고성능 콘크리트 구조물의 내구성이 일반콘크리트 구조물에 비해 저하될 가능성을 배제할 수 없게 된다. 따라서 고성능 콘크리트를 보다 많은 구조물에 안정적으로 적용하기 위해서는 설계과정을 통해 균열제어 측면에서 자기수축에 의한 변형을 고려할 필요성이 발생한다.

본 논문에서는 고성능 콘크리트에 대한 자기수축 실험을 수행한 후 이를 기존의 자기수축 예측 모델과 비교·검토하고자 하였다. 특히 결합재로 플라이애시 및 고로슬래그를 사용한 경우와 혼화제로서 수축저감제

및 팽창재를 혼입한 경우의 자기수축 특성을 검토하였으며, 이를 통해 고성능 콘크리트의 자기수축을 예측하기 위한 수정 모델을 제안하고자 하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료 및 배합

본 연구의 사용재료로서, 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재로서 잔골재는 충남 연기군 강모래(밀도  $2.67 \text{g/cm}^3$ , 조립율 2.55), 굵은 골재는 충북 옥산산 부순 굵은 골재(최대치수 25mm, 밀도  $2.63 \text{g/cm}^3$ , 조립율 6.87)를 사용하였다. 혼화제는 플라이애시(밀도  $2.13 \text{g/cm}^3$ , 분말도  $3.850 \text{cm}^2/\text{g}$ ) 및 고로슬래그 미분말(밀도  $2.91 \text{g/cm}^3$ , 분말도  $4.463 \text{cm}^2/\text{g}$ )은 국내산, 실리카 흙(밀도  $2.1 \text{g/cm}^3$ , 분말도  $240,000 \text{cm}^2/\text{g}$ )은 노르웨이 산을 사용하였다. 한편, 본 연구에 사용된 수축저감제 및 팽창재의 특성은 Table 1 및 Table 2에 제시되어 있으며, 자기수축 실험을 위해 사용된 콘크리트 배합은 Table 3 및 Table 4에 나타나있다. 이 경우 목표공기량  $4.5 \pm 1.5\%$ 를 확보하기위해 시멘트 중량비 0.042~0.065%의 AE제를 사용하였으며, 유동성 확보를 위해 시멘트 중량비 1.7~2.2%의 고성능 감수제를 사용하였다.

Table 3 및 4에서 기호 FA, BS, SR, EA는 각각 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 수축저감제 및 팽창재를 나타낸다.

Table 1 수축저감제의 특성

주성분	밀도 ( $\text{g/cm}^3$ )	고형분 (%)	형태	색상	용해성
글로콜즈계	3.18	31	분말	백색	가용성 분말

Table 2 팽창재의 물리·화학적 성질

비표면적 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	밀도 ( $\text{g/cm}^3$ )	강열감량 (%)	화학적 성분 (%)					
			CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	f-CaO
3100	2.93	1.4	70.2	0.4	4.7	17.3	2.8	51

Table 3 콘크리트 배합(광물질 혼화제)

W/B (%)	S/a (%)	혼화재료 (%)		단위중량(kg/m <sup>3</sup> )					
		FA	BS	W	B			S	G
					OPC	FA	BS		
30	45	0	0	175	583.3	0	0	714.7	847.3
		15	0		495.8	87.5	0	700.7	830.7
		30	0		408.3	175.0	0	686.7	814.2
		0	30		408.3	0	175.0	709.2	840.8
		0	50		291.7	0	291.7	705.5	836.4

Table 4 콘크리트 배합(수축저감제 및 팽창제)

W/B (%)	S/a (%)	혼화재료 (%)		단위중량(kg/m <sup>3</sup> )					
		SR	EA	W	C	SR	EA	S	G
30	45	0.5	0	175	580.4	2.9	0	714.7	847.3
		1.0	0		577.5	5.8	0	714.7	847.3
		0	5		554.2	0	29.2	713.7	846.2
		0	10		525.0	0	58.3	712.8	845.0

## 2.2 실험방법

본 실험에서 콘크리트의 혼합은 강제식 팬 믹서를 사용하였으며, KS F 2436에 준하여 응결시간을 측정하였다.

콘크리트의 자기수축 실험은 일본 콘크리트공학협회의 자기수축 위원회에서 제안한 방법에 따라 수행하였다(自己收縮研究委員, 2002). 시험체는 Fig. 1에 나타나있는 것처럼 양단 중심에 구멍이 뚫린 100×100×400mm의 철재 빔 몰드를 사용하여 제작하였으며, 게이지 플러그(Gauge plug)를 몰드 축에 일치하도록 30±5mm 정도 매입하였다. 또한 몰드의 바닥과 양단에 1mm 두께의 테프론 시트(Teflon sheet)를

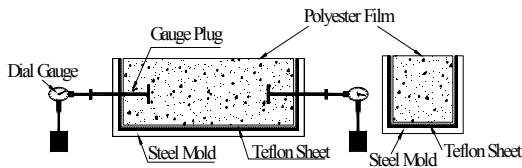


Fig. 1 자기수축 시험체 및 시험장치

깔아서 공시체의 이동이 몰드에 의해 구속을 받지 않게 하고, 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르 필름(Polyester film)으로 표면을 덮었다.

## 3. 실험결과 및 분석

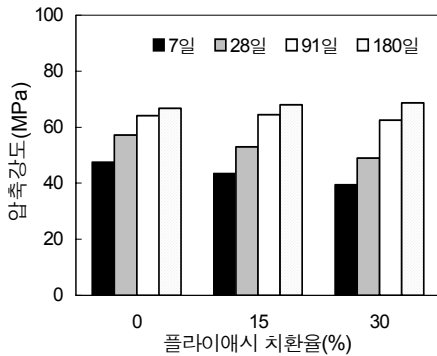
### 3.1 유동특성 및 압축강도

Table 5에는 혼화재료 종류 및 치환율에 따른 굳지 않은 콘크리트의 특성이 나타나있다. 이 경우 모든 실험변수에 대해 슬럼프는 26cm 내외로 나타나 일반적인 콘크리트에 비해 본 연구에 사용된 콘크리트 배합이 고유동성을 가진 것을 알 수 있다. 한편 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 초결은 OPC 콘크리트에 비해 지연되고, 수축저감제 및 팽창제를 사용한 콘크리트의 초결은 빨리 발생하는 것을 Table 5를 통해 알 수 있다.

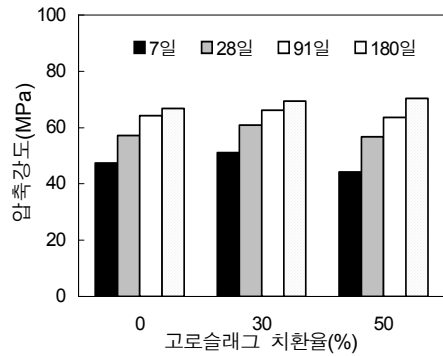
Fig. 2에는 혼화재료 혼입율에 따른 고성능 콘크리트의 압축강도 변화가 재령별로 나타나있다. 이에 따르면 28일 압축강도의 경우 플라이애시 및 고로슬래그를 혼입한 경우에는 49~60MPa, 수축저감제 및 팽창제를 혼입한 경우에는 55~60MPa 정도로 비교적 고강도를 나타낸다.

Table 5 굳지 않은 콘크리트의 특성

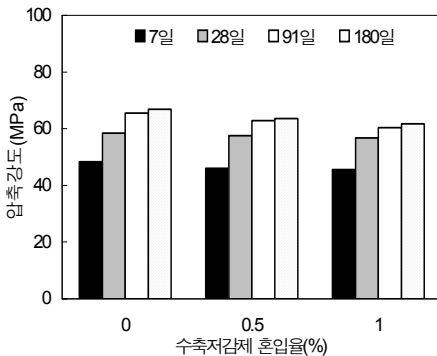
배합	항목	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	응결시간(KS F 2436)	
				초결 (hr:min)	종결 (hr:min)
OPC		26.0	4.5	11:00	12:27
FA15		26.3	4.0	12:30	15:13
FA30		27.0	4.3	15:42	18:30
BS30		26.3	3.7	11:19	13:39
BS50		27.0	4.4	11:56	15:26
SR0.5		26.0	5.0	9:31	11:30
SR1.0		25.4	5.0	9:16	11:23
EA5		26.3	4.6	10:30	12:48
EA10		26.5	4.7	9:23	12:08



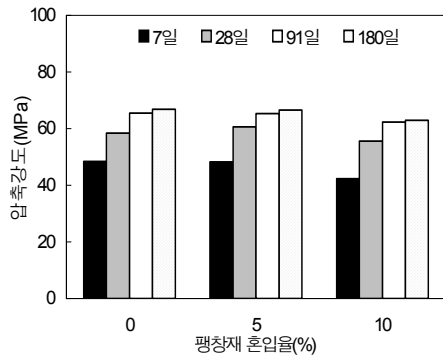
(a) 플라이애시 치환율에 따른 압축강도



(b) 고로슬래그 치환율에 따른 압축강도



(c) 수축저감제 혼입율에 따른 압축강도



(d) 팽창제 혼입율에 따른 압축강도

Fig. 2 혼화재료 치환율에 따른 압축강도

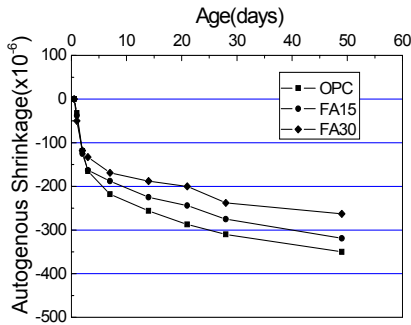
### 3.2 자기수축 특성

Fig. 3에는 혼화재의 종류 및 치환율이 자기수축에 미치는 영향이 나타나 있으며, 재령 49일에서 OPC 콘크리트의 자기수축 변형률은  $350 \times 10^{-6}$ 로 나타났다.

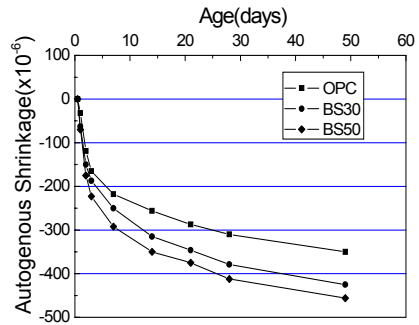
Fig. 3(a)를 보면 플라이애시 치환율이 15%, 30%인 경우 콘크리트의 자기수축 변형률은 각각  $319 \times 10^{-6}$ ,  $263 \times 10^{-6}$ 으로 OPC 콘크리트에 비해 감소하며, 치환율이 증가할수록 자기수축 변형률이 더욱 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 플라이애시를 사용하면 초기 수화반응이 지연되고 시간 경과에 따라 수화반응이 진행되더라도 콘크리트의 상대습도가 거의 변하지 않기 때문인 것으로 알려져 있다(고경택 외, 2003). 한편, Fig. 3(b)를 보면 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 치환율이 30%, 50%인 경우 콘크

리트의 자기수축 변형률이 각각  $425 \times 10^{-6}$ ,  $456 \times 10^{-6}$ 으로 OPC 콘크리트에 비해 증가하며, 치환율이 증가할수록 자기수축 변형률 증가가 더욱 커지는 것으로 나타났다. 이것은 고로슬래그를 사용하면 잠재수경성 반응에 의해 생성된 경화조직의 모세관장력이 증대하고 플라이애시와 반대로 수화반응의 진행에 따라 내부 습도가 크게 저하되어 자기 건조 현상이 크게 나타나기 때문으로 분석된다(고경택 외, 2003).

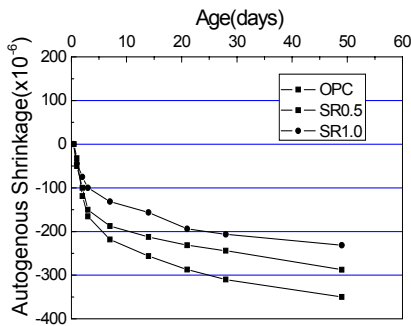
Fig. 3(c) 및 Fig. 3(d)는 각각 콘크리트 수축저감을 위해 수축저감제 및 팽창제를 사용한 경우 자기수축 변화량을 나타내고 있다. Fig. 3(c)에는 수축저감제를 사용할 경우 OPC 콘크리트에 비해 수축저감제 혼입률 0.5%인 경우 약 18%, 혼입률 1%인 경우 약 34%의 자기수축이 감소하는 것이 나타나 있다. 이때 수축저감제를 사용함으로써 자기수축이 감소하는 것은



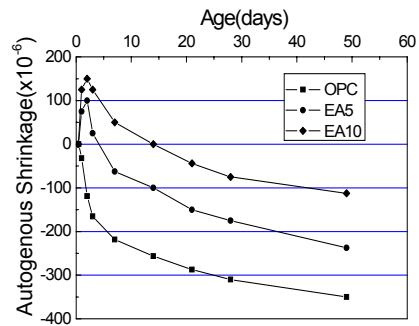
(a) 플라이애시 치환율에 따른 자기수축



(b) 고로슬래그 치환율에 따른 자기수축



(c) 수축저감제 혼입율에 따른 자기수축



(d) 팽창제 혼입율에 따른 자기수축

Fig. 3 재령에 따른 자기수축 변화량

콘크리트 경화체 공극 내부에 존재하는 수분의 표면장력을 저하시키는 물리작용 때문으로 판단된다. Fig. 3(d)는 팽창제를 혼입한 경우 재령 3일 이내에서는 콘크리트가 수축하지 않고 팽창하다가 그 이후에 수축현상이 발생하는 것이 나타나있다. 이 경우 팽창제 혼입률 10%인 경우 재령 49일에서의 자기수축 변형률이  $-110 \times 10^{-6}$  정도로 OPC 콘크리트에 비해 68% 정도의 자기수축 감소효과가 나타났다. 이처럼 팽창제를 혼입함으로써 자기수축이 감소하는 것은 자기수축이 발생하는 시기에 팽창성 물질인 에트링가이트 및 수산화칼슘을 생성하여 수축을 보상하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 자기수축 예측모델 제안

##### 4.1 기존자기수축 모델

콘크리트의 자기수축을 예측하기 위한 기존 모델은

시멘트 및 결합재의 종류, 물-결합재비 및 온도의 영향 등을 영향인자로 하는 Tazawa모델과 Jonasson모델(Miyazawa and Tazawa, 2001; Jonasson and Hedlund, 2000) 및 콘크리트의 28일 압축강도에 따른 RELEM과 CEB-FIB의 자기수축 예측모델(RILEM, 1997; CEB-FIP, 1999) 등으로 나눌 수 있다. 이들 모델 중에서 물-결합재비에 기초한 대표적인 예측모델인 Tazawa모델과 압축강도에 기초한 CEB-FIP모델은 다음과 같다.

##### i) Tazawa 모델

$$\epsilon_c(t) = \gamma \cdot \epsilon_{c0}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{c0}(W/B) = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} \quad (0.2 \leq W/B \leq 0.5),$$

$$\epsilon_{c0}(W/B) = 80 \quad (0.5 < W/B) \quad (2)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t-t_0)^b\} \quad (3)$$

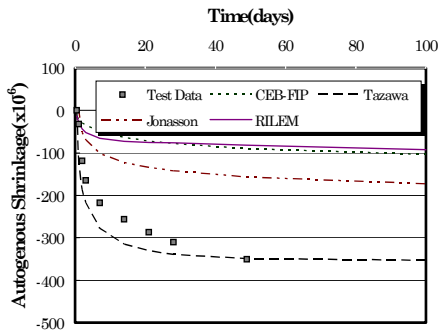


Fig. 4 기존 자기수축모델 및 실험결과

여기서,  $\epsilon_c(t)$ 는 재령  $t$ 에서의 자기수축변형률( $\times 10^{-6}$ )을 나타내며,  $\epsilon_{c0}$ ( $\times 10^{-6}$ ) 및  $\beta(t)$ 는 각각 최종자기수축 양과 시간에 따른 자기수축 변화를 나타내는 함수이다. 또한,  $\gamma$ 는 시멘트 종류의 영향 계수,  $t_0$ 는 초결 시점(Day)을 나타내며  $a, b$ 는 W/B에 따른 계수이다.

ii) CEB-FIP 모델

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{caso}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t) \quad (4)$$

$$\epsilon_{caso}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{2.5} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp\left(-0.2 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0.5}\right) \quad (6)$$

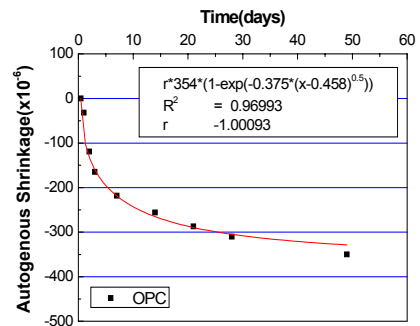
여기서,  $f_{cm}$ 은 평균압축강도(MPa),  $\alpha_{as}$ 는 시멘트 종류에 따른 계수로 OPC의 경우 700이며 일반적으로  $f_{cm0}$ 는 10MPa,  $t_1$ 은 1 day를 사용한다.

Fig. 4에는 시간에 따른 자기수축 변형률이 기존 예측모델 및 본 연구의 실험결과에 따라 나타나있으며, 이를 통해 Tazawa 모델에 의한 자기수축 예측 값이 비교적 본 실험결과와 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

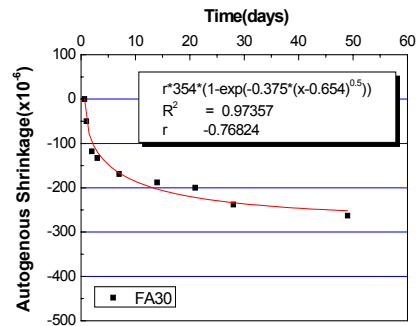
#### 4.2 광물질 혼화재를 혼입한 경우

Table 6 및 Fig. 5에는 Tazawa의 자기수축 예측

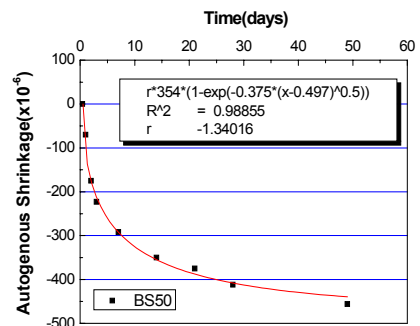
모델을 이용하여 제안된 플라이애시 및 고로슬래그를 혼입한 경우의 자기수축 예측식이 제시되어있다. Table 6에서 계수  $a, b$ 의 값을 각각 0.375, 0.5로 고정할 이유는 동일한 물-결합재비에 대해서는 자기수축 발현 과정은 동일하게 취급하고 계수  $\gamma$ 를 통해 시멘트 종



(a) 보통포틀랜드 시멘트 사용한 경우



(b) 플라이애시 30% 치환한 경우



(c) 고로슬래그 50% 치환한 경우

Fig. 5 광물질 혼화재 혼입시 Tazawa 모델을 이용한 자기수축 실험 회귀분석 결과

Table 6 광물질 혼화재 혼입시 수정 제안된 Tazawa 모델 계수  $\gamma$ , a, b

W/B(%)	배합	$\gamma$	a	b	R <sup>2</sup>
30	OPC	1.00	0.375	0.5	0.9699
	FA15	0.90	0.375	0.5	0.9691
	FA30	0.77	0.375	0.5	0.9736
	BS30	1.21	0.375	0.5	0.9837
	BS50	1.34	0.375	0.5	0.9886

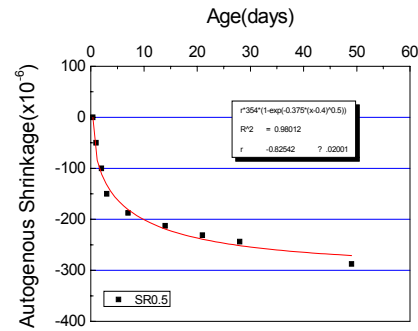
류에 따른 최종 자기수축량의 차이를 나타내는 것이 합리적인 것으로 판단되었기 때문이다. 이 경우 Tazawa는 계수 a, b의 값을 각각 0.6, 0.5로 제안하고 있으며, 식(4)~식(6)에서 알 수 있는 것처럼 동일한 형식으로 제안된 CEB-FIP의 경우도 자기수축 진행을 표현하는 계수 a, b는 모든 경우에 각각 0.2 및 0.5로 고정하고 있다. 그러나, 이들 계수를 직접적으로 이용하는 경우 Fig. 5에서 알 수 있는 것처럼 본 실험결과와는 다소

의 차이를 보인다. 그러므로, 본 연구에서는 계수 b를 0.5로 고정하고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 계수  $\gamma$ 를 1로 나타내기 위해 회귀분석을 통해 a=0.375로 결정하였다.

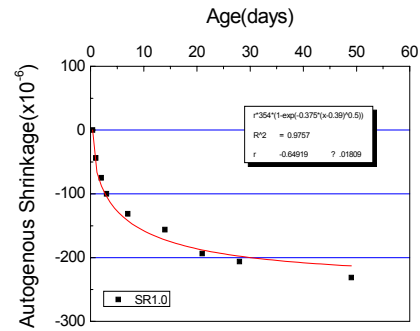
한편, Table 6에서 플라이애시를 15% 및 30%치환한 경우 계수  $\gamma$ 의 값은 각각 0.90 및 0.77을 나타내고 있으며 이것은 플라이애시 혼입에 따른 OPC 콘크리트에 대한 자기수축의 감소 정도를 정량적으로 표현한다. 또한, 고로슬래그 미분말의 치환율에 따라 계수  $\gamma$ 의 값은 각각 1.21, 1.34를 나타내고 있는데 이로부터 고로슬래그 미분말의 치환에 따른 자기수축의 증가 상태를 정량적으로 고려할 수 있다.

### 4.3 수축저감제 및 팽창재 혼입한 경우

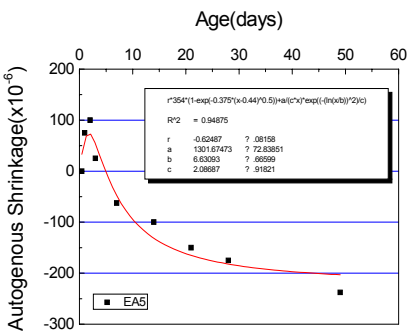
Fig. 6(a) 및 6(b)는 수축저감제를 혼입한 경우



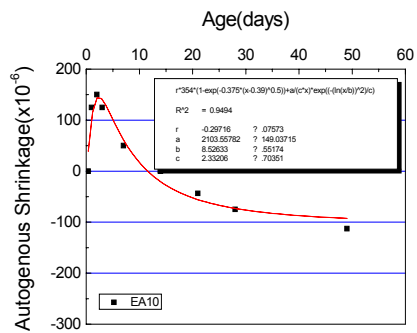
(a) 수축저감제 0.5% 혼입한 경우



(b) 수축저감제 1.0% 혼입한 경우



(c) 팽창재 5.0% 혼입한 경우



(d) 팽창재 10.0% 혼입한 경우

Fig. 6 수축저감제 및 팽창재 혼입시 Tazawa 모델을 이용한 자기수축 실험 회귀분석 결과

Table 7 수축저감제 및 팽창제 혼입시 수정 제안된 자기 수축모델 계수  $\gamma, l, m, n$

W/B(%)	배합	$\gamma$	$l$	$m$	$n$	$R^2$
30	SR0.5	0.83	-	-	-	0.9801
	SR1.0	0.65	-	-	-	0.9757
	EA5	0.62	1301.67	6.63	2.09	0.9488
	EA10	0.30	2103.56	8.53	2.33	0.9494

Tazawa모델을 이용한 자기수축 회귀분석결과를 나타내고 있으며, Table 7을 보면 수축저감제를 0.5% 및 1.0% 혼입한 경우  $\gamma$ 가 각각 0.83, 0.65로 나타나있다. 이것은 보통포틀랜드 시멘트의 경우 계수  $\gamma$ 가 1인 것과 비교하면 수축저감제를 사용했을 경우 17%, 35%의 자기수축저감 효과가 있다는 것을 정량적으로 보여준다.

한편 Fig. 3(d)를 통해 알 수 있는 것처럼 팽창제를 혼입할 경우 초기에 팽창 곡선이 나타나기 때문에 기존의 Tazawa 모델을 사용하여 시간에 따른 자기수축 양을 예측할 수 없다. 이에 따라, 본 논문에서는 팽창제를 혼입한 경우 고성능 콘크리트의 자기수축을 예측하기 위해 식(7)과 같이 Tazawa 모델과 Lognormal 곡선을 조합한 자기수축 모델을 제안하였다.

$$\epsilon_c(t) = \gamma \cdot \epsilon_{c0}(W/B) \cdot \beta(t) + \frac{L}{nx} e^{\frac{[-\ln \frac{t}{m}]^2}{n}} \quad (7)$$

여기서,  $\gamma$ 는 기존 모델과 동일하게 시멘트 및 혼화제 종류에 따른 변수이며,  $l, m, n$ 은 각각 곡선의 amplitude, center, width를 나타내는 값으로 두 번째 항은 팽창제 사용에 따른 Peak를 고려할 수 있도록 해준다. Fig. 6(c) 및 6(d)에는 팽창제를 혼입한 경우 회귀분석을 통해 제안된 자기수축 예측식(7)과 실험결과가 비교되어있다.

Table 7에는 수축저감제 및 팽창제를 혼입한 경우 수정 제안된 자기수축 모델의 계수 들이 제시되어 있다. 이 경우 식(3)에 있는 계수 a, b의 값은 물-시멘트 비가 30%인 경우 각각 0.375 및 0.5로 일정하므로 Table 7에는 각각의 경우에 대한 계수  $\gamma, l, m, n$ 만을 나타내었다.

Table 7에서 팽창제를 5%, 10% 사용한 경우  $\gamma$ 가 각각 0.62 및 0.30으로 나타났으며 이것은 보통포틀랜드 시멘트의 경우 계수  $\gamma$ 가 1인 것과 비교하면 팽창제를 혼입한 경우 혼입량에 따라 38%, 70%의 자기수축저감 효과가 있다는 것을 정량적으로 보여준다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙의 광물질 혼화제와 수축저감제 및 팽창제를 사용한 고성능 콘크리트의 자기수축 특성에 대해 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 혼화재료 종류 및 치환률에 따른 슬럼프는 26cm 내외로 나타났으며, 재령 28일에서의 압축강도는 49~60MPa의 고강도를 나타내었다. 이에 따라 본 연구에 사용된 콘크리트 시편은 고성능 콘크리트의 범주에 드는 것으로 판단할 수 있다.
- 2) 플라이애시는 치환율이 증가할수록 자기수축이 감소하는 경향을 나타내었으며, 고로슬래그는 치환율이 증가할수록 자기수축이 크게 증가하였다. 또한, 수축저감제 및 팽창제의 혼입량이 증가할수록 자기수축이 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 혼화재료를 사용한 고성능 콘크리트의 자기수축량을 예측하기 위해 Tazawa모델을 활용한 회귀분석모델을 수정·제안하였다. 이 경우 광물질 혼화제 및 수축저감제를 사용할 경우에는 계수  $\gamma$ 를 적절히 수정하여 기존 Tazawa모델을 적용함으로써 자기수축을 적절히 예측 가능하였다. 그러나, 팽창제를 사용할 경우에는 기존 Tazawa모델과 Lognormal 곡선을 조합한 새로운 모델을 구성하여 제시하였다.

## 참고문헌

1. 고경택, 박정준, 이종석, 김성욱, “광물질 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성”, 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No. 6A, 2003, pp.1133-1141.
2. 自己收縮研究委員, 콘크리트의自己收縮研究委員會報告書, 日本콘크리트工學協會, 2002.
3. CEB-FIP 2000, Structural Concrete : Textbook on



- 
- Behavior, Design and Performance, Vol. 1, Sprint-Druck Stuttgart, 1999, pp.43-46.
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 Aitcin, P. C., Paris, France, 2000.
  5. 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.
  6. Neville, A. M., Properties of Concrete, Addison Wesley Longman Limited, London, 1995, pp.425- 438.
  7. RILEM TC 119-TCE, "Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Age Recommendations", Materials and Structures, Vol. 30, No. 202, 1997, pp.451-464.

(접수일자 : 2005년 6월 30일)