

# 불포화 공극 보정 수화도 모델을 이용한 콘크리트의 자기수축 예측

## Prediction of Autogenous Shrinkage on Concrete by Unsaturated Pore Compensation Hydration Model

이창수\* · 박종혁\*\*

Lee, Chang Soo · Park, Jong Hyok

### Abstract

To predict autogenous shrinkage of concrete, unsaturated pore compensation factor could be calculated by experiments of autogenous shrinkage of cement paste on the assumption that the differences between degree of hydration and strain rate of autogenous shrinkage are unsaturated pore formation rate. Applying unsaturated pore compensation factor on modified Pickett model considering contribution factor and non-contribution factor to autogenous shrinkage of concrete, experimental data and existing model were compared. From the results modified Pickett model was verified to present similar tendency between Tazawa model and experimental data, but CEB-FIP model might be corrected because this model uses ultimate autogenous shrinkage underestimated and the same autogenous time function of concrete material properties considering only compressive strength.

**Keywords** : *autogenous shrinkage, hydration model, unsaturated pore compensation factor, cement, concrete*

### 요 지

콘크리트의 자기수축을 예측하기 위해 기존 수화도와 자기수축의 진행 속도 차이를 불포화공극 생성 속도로 가정하고 시멘트 페이스트의 자기수축 실험을 통하여 물-결합재비에 반비례하는 불포화공극 보정계수를 산정할 수 있었다. 이를 자기수축 기여 성분과 미기여 성분이 고려된 변형 Pickett 모델을 이용하여 콘크리트의 자기수축을 예측하였으며, 실험값 및 기존 Tazawa 모델과 일치하는 경향을 나타내어 불포화공극 보정계수에 의한 자기수축 예측이 타당함을 알 수 있었다. 그러나 강도의 함수로 설정된 기존 CEB-FIP 자기수축 예측 모델의 경우 최종 자기수축률과 자기수축 발현 시간함수에 대하여 다소의 수정이 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 자기수축, 수화도 모델, 불포화 공극 보정계수, 시멘트, 콘크리트

### 1. 서 론

고강도 콘크리트의 개발과 함께 대두된 콘크리트의 자기수축 모델은 기존 수축량에 대한 시간함수의 내삽방법으로 정립되어 왔다. 이 중 시간에 따른 수축량 변화를 묘사하는 시간함수의 경우 이론적인 접근법보다는 실험결과에 대한 회귀분석적 방법에 근거를 두고 있다(Tazawa, 1993 : CEB-FIP, 1990). 그러나 과거 모세관압력, 분리압력 등의 콘크리트 내부 수분관련 수축 발생 메커니즘에 대한 다소 모호한 전개방식과는 달리 최근의 연구 결과를 통해 수화진행, 공극생성, 계면압력발생, 수축진행 등의 세부적인 메커니즘이 정립되어가고 있다(Hua, 1995 : Maekawa, 2003 : Lura, 2003, Nawa, 2004 : Franchoise, 2005). 따라서 이러한 수분관련 수축 발생 메커니즘에 근거를 둔 합리적인 자기수축 예측 모

델의 설정이 필요하다.

이러한 발생 원인적 자기수축 예측을 위해서 콘크리트 자기수축은 시멘트 수화와 함께 진행된다는 기본적인 가정을 전제로 할 때 기존 수화도 모델과의 연관성에 주목할 필요가 있다. 시멘트 수화가 일어날 때 시멘트 소모량과 가역적인 관계를 근거로 한 수화도 모델은 시간의존적 재료특성을 나타내는 콘크리트의 강도, 탄성계수, 발열함수 등에 적용되고 있다. 이와 유사한 메커니즘으로서 시멘트 수화에 따른 체적감소와 이에 따른 길보기 수축 현상인 자기수축 역시 수화도 모델의 적용 가능성을 내포하고 있다. 따라서 이 연구에서는 시멘트 수화진행 정도를 나타내는 수화도와 자기수축의 관계를 파악하고, 이를 골재, 미수화 시멘트, 잉여수의 수축 미기여 성분을 제거한 콘크리트 수축 모델을 설정하여 기존 모델, 실험값과 상호 비교하여 타당성을 검증하고자 한다.

\*정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail : csll@uos.ac.kr)

\*\*서울시립대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : mgibson@uos.ac.kr)

## 2. 연구방법

### 2.1 연구내용 및 연구흐름

콘크리트의 자기수축은 시멘트 페이스트의 수화과정에서 일어난다. 즉 Fig. 1, Fig. 2와 같이 시멘트 입자 주위의 배합수가 시멘트와 반응하여 시멘트 수화물 혹은 수화 조직체를 생성하면서 공극이 형성되며, 이 때 공극이 잉여수로 포화되어 있지 않다면 공극수-수화 조직체-기체가 형성하는 계면을 따라 계면압력이 발생하면서 수축이 진행된다. 이러한 메커니즘에 의한 시멘트 페이스트의 자기수축은 물-결합재비가 낮을수록 수화 잉여수가 작으므로 이른 재령에서 불포화 공극이 형성되면서 급속하게 진행된다. 그러나 수화의 경우 물-결합재비가 높을수록 수화에 소요되는 물의 지속적인 공급이 가능하므로 극한 수화도는 증가하게 된다. 즉, 물-결합재비에 따라 수화도와 자기수축 진행속도는 반대의 양상을 나타나게 되며 이는 생성된 공극의 포화도에 따라 결정된다. 따라서 이 연구에서는 수화도와 자기수축의 상대적인 속도 차이를 페이스트의 불포화 공극 생성 속도로 가정하고 이를 시멘트 페이스트의 자기수축 실험과 기존 수화도 함수의 보정을 통해 시멘트 페이스트의 자기수축 모델을 설정하고자 한다.

한편 콘크리트의 자기수축은 Fig. 3과 같이 설정된 페이스트 자기수축에서 수축 미기여 성분인 미수화 시멘트, 잉여수 혹은 공극수, 골재를 제거한 부분으로 나타낼 수 있으며 기존 자기수축 모델, 콘크리트 자기수축 실험값과의 비교를 통해 이 모델의 타당성에 대하여 논의하고자 한다.

이상에서의 연구내용 및 흐름을 정리하면 Fig. 4와 같다.

### 2.2 자기수축 모델링 및 불포화 공극 보정계수 산정 방법

외부와의 수분 이동이 차단된 상태에서 내부 수분 감소에 의한 수축은 시멘트, 배합수의 체적과 이들 수화물의 체적차이에 따른 수화수축과 가시적인 체적 변화에 따른 자기수축으로 구분할 수 있다(NISTIR, 1999). 균열발생의 원인으로서는 자기수축이 공학적으로 유효하며 식(1)과 같이 시멘트 페

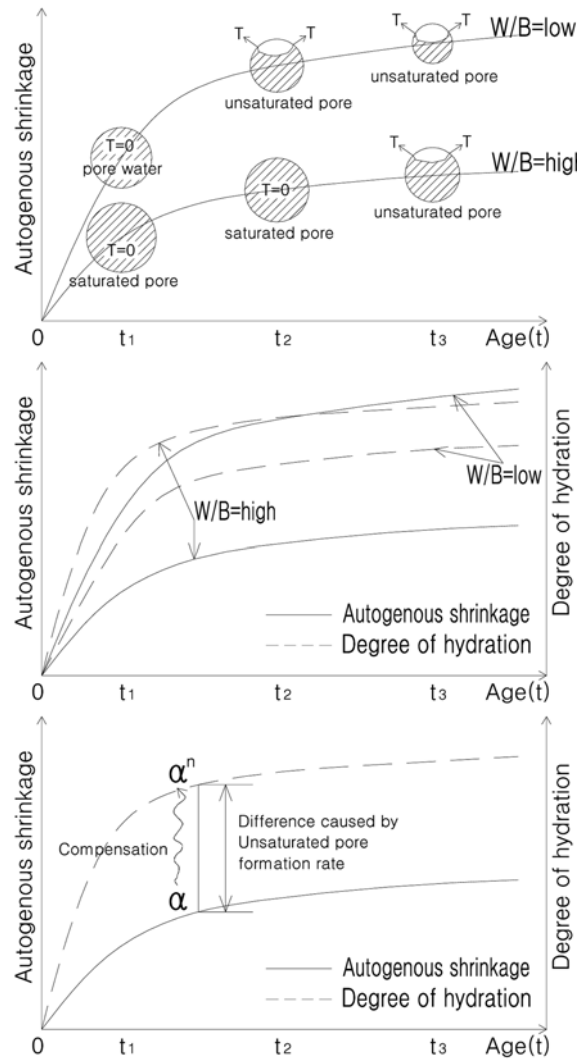


Fig. 2 Hydration and autogenous shrinkage process of cement paste

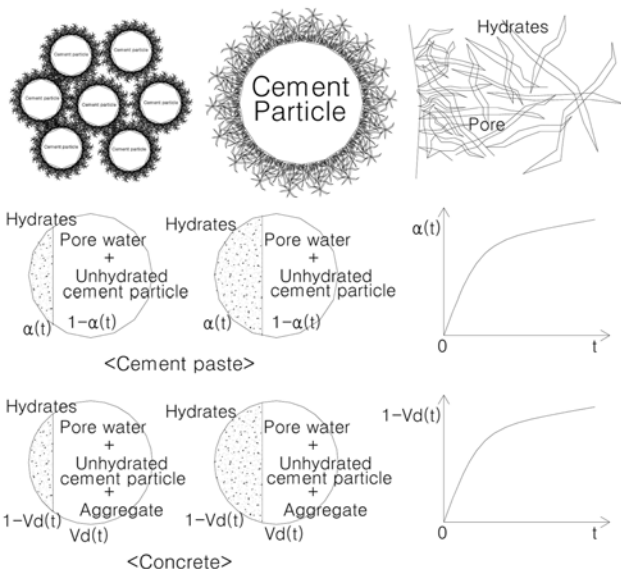


Fig. 1 Hydration process of cement paste and concrete

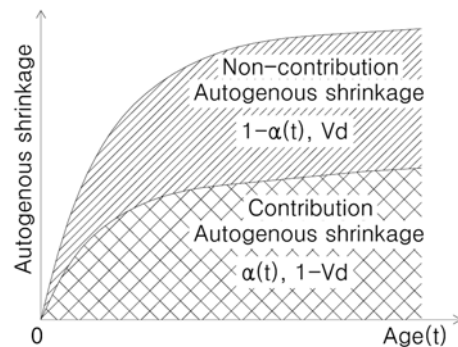


Fig. 3 Non-contribution and contribution part of autogenous shrinkage

이스트 자기수축에서 수축 미기여 성분을 제거함으로써 변형 Pickket 모델을 설정하고 수화도와 콘크리트의 자기수축을 연관할 수 있다(Pickett, 1956).

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{pas0} \times (1 - V_d) = \epsilon_{pas0} \times \left[ 1 - \left\{ (1 - \alpha(t))^n \frac{V_p}{V_c} + \frac{V_a}{V_c} \right\} \right] \quad (1)$$

- 여기서,  $\epsilon_{cas}(t)$  : 콘크리트 자기수축 변형률
- $\epsilon_{pas0}$  : 기준 페이스트 자기수축 변형률
- $\alpha(t)$  : 수화도
- $n$  : 불포화 공극 보정계수

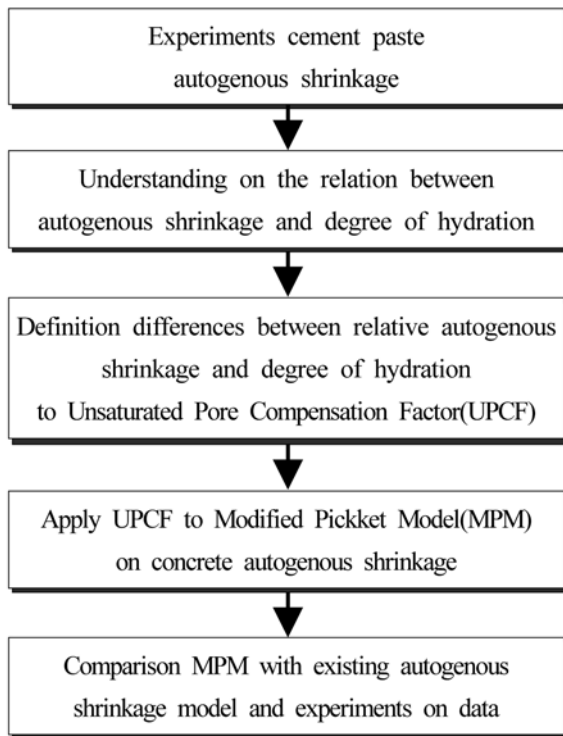


Fig. 4 Strategy flow of study

$V_p, V_a, V_c$  : 페이스트, 골재, 콘크리트 체적  
 $V^d$  : 콘크리트내 자기수축 미기여 체적

위의 모델식은 Fig. 3에서와 같이 일반적인 수화도를 나타내는  $\alpha(t)$ 와 실제 자기수축 발생 속도 차이를 수화도와 물-결합재비에 따른 불포화 공극 생성속도 차이로 가정하고 이를 불포화 공극 보정계수  $n$ 으로 정의하였다.

불포화 공극 보정계수  $n$ 을 구하기 위한 수화도  $\alpha$ 는 시멘트 광물 종류, 물-결합재비, 광물질 혼화제 치환율을 고려할

수 있는 이미 연구된 모델을 사용하였으며, 이에 대한 내용은 식(2)와 같다(Anton, 2002).

$$\alpha(t) = \alpha_u \exp\left\{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right\} \quad (2)$$

여기서,  $t$  : 등가재령  
 $\tau$  : 수화시간 매개변수  
 $\beta$  : 수화형상 매개변수  
 $\alpha_u$  : 극한 수화도

시멘트 페이스트의 자기수축은 식(1)에  $V_a=0, V_p/V_c=1$ 을 대입하면 식(3)과 같으며 불포화 공극 보정계수  $n$ 에 대하여 정리하면 식(4)와 같다.

$$\epsilon_{pas}(t) = \epsilon_{pas0} \alpha(t)^n \quad (3)$$

$$n(t) = \log_{\alpha(t)}(\epsilon_{pas}(t)/\epsilon_{pas0}) \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_{pas}(t)$ : 시멘트 페이스트 자기수축 변형률

식(4)에 식(2)와 실험에 의해 측정된 시멘트 페이스트의 자기수축량을 대입하면 시간에 따른 불포화 공극 보정계수를 산정할 수 있으며 이를 식(1)에 적용함으로써 콘크리트의 자기수축량을 예측할 수 있다.

### 2.3 자기수축 측정

기존 수화도 연구에 의하면 외부와의 수분이동이 차단된 상태에서 시멘트의 완전 수화를 이루기 위한 최소의 물-결합재비는 0.42정도로 알려져 있다. 즉, 최소 물-결합재비 0.42 이하에서는 완전 수화에 필요한 잉여수가 부족하여 미수화 시멘트 입자가 존재하게 되며, 자기수축의 측면에서는 불포화 공극의 생성이 커짐을 의미하게 된다. 또한 실용적인 배

Table 1. Chemical & physical properties of cement

Material	Item	Chemical composition (%)						Physical properties		
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ignition loss	Specific gravity	Blaine (m <sup>2</sup> /g)
Cement		20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	0.3450

Table 2. Cement paste mixture proportions

Mixture	Weight ratio		SP admixture (C×%)	Mini slump(mm)			Initial setting (h:m)	Hydration parameter					
	C	W		0 min.	30 min.	60 min.		C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	SO <sub>3</sub>	$\alpha_u$	$\tau$	$\beta$
OPC30	1	0.3	1.2	148	156	145	9:30	0.525	0.084	0.024	0.626	19.49	0.60
OPC35	1	0.35	0.9	142	151	147	8:15				0.663		
OPC40	1	0.4	0.6	146	149	145	8:30				0.694		

Table 3. Concrete mixture proportions

Mixture	Item	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (mm)	Initial setting (h:m)	28day compressive strength(MPa)
					W	C	S	G	SP (CB%)			
OPC30		190	30	48	156	520	750	825	1.2	160	12:15	53
OPC35		190	35	48	166	475	755	831	0.9	155	11:45	45
OPC40		190	40	48	180	450	748	823	0.6	155	11:30	42

합 측면에서 현재 고성능 콘크리트에 적용되는 물-결합재비는 0.30~0.40의 범위를 지니고 있다. 따라서 이 연구에서는 물-결합재비 0.30, 0.35, 0.40를 설정하고, 불포화공극 보정계수 산정을 위한 시멘트 페이스트 자기수축 실험과 이를 적용한 자기수축 모델 타당성 검증을 위한 콘크리트 자기수축 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트로서 물리·화학적 특성은 Table 1과 같으며 불포화 공극 보정계수 산정을 위한 시멘트 페이스트 배합과 특성은 Table 2와 같다. 유동성 확보를 위한 고성능 감수제는 유지, 조강 1:1의 혼합형으로 사용하였다. 이로 인해 응결 시간이 다소 지연되는 특성을 지니고 있으나 현재 고성능 콘크리트의 초기 슬럼프 손실을 억제하기 위한 유지형 혼화제의 적용이 주류를 이루고 있으므로 1시간 미니슬럼프 140~150 mm 수준에서 사용량을 조절하였다.

콘크리트 자기수축에 사용된 배합은 Table 3과 같으며 시멘트 페이스트와 골재 체적 비율에 따른 자기수축 영향을 배제하기 위하여  $V_d/V_c=0.6$ 의 일정한 수준을 유지하였다. 이와 같이 결정된 시멘트 페이스트와 콘크리트는 파라핀과 테프론 시트를 이용하여 외부와의 수분이동을 차단한 후 Fig. 5와 같이 매립형 변형률 게이지를 사용하여 초결시점부터 28일까지의 수축률을 측정하였으며 측정된 자기수축률은 식(5), 식(7)의 CEB FIP MC 1990, Tazawa 모델과 이 연구에서 설정한 식(1)과 비교하였다.

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{cas0}(f_{cm})\beta_{as}(t) \quad (5)$$

$$\epsilon_{cas0}(f_{cm}) = \alpha_{as} \left( \frac{f_{cm}/f_{cm0}}{6 + f_{cm}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \quad (6)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp\{-0.2t^{0.5}\} \quad (7)$$

여기서,  $f_{cm}$  : 평균 압축강도(MPa)

$f_{cm0}$  : 10MPa

$\alpha_{as}$  : 시멘트 종류 계수(700)

$$\epsilon_{as}(t, W/B) = \beta(t) \cdot \epsilon_{ult}(W/B) \quad (8)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp(-at)^b \quad (9)$$

$$\epsilon_{ult}(W/B) = 3070 \exp(-7.2 W/B) \quad (10)$$

여기서,  $\beta(t)$  : 자기수축 발현 시간함수

$\epsilon_{ult}(W/B)$ : 최종 자기수축률

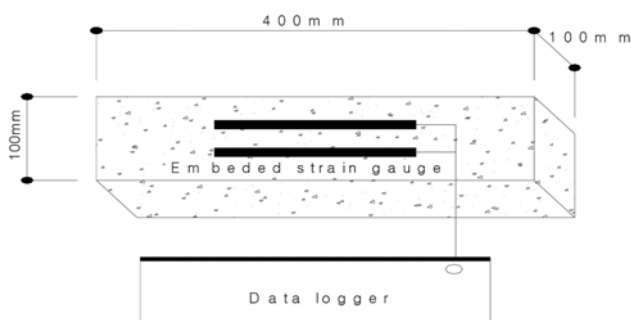


Fig. 5 Experimental method of autogenous shrinkage

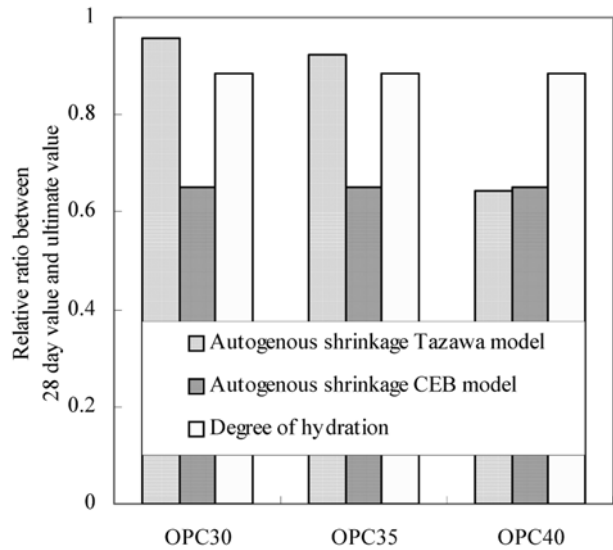


Fig. 6 Relative ratio between 28 day and ultimate value

한편 자기수축의 발현 시점과 측정기간에 관한 사항은 다음과 같은 두 가지에 대하여 연구의 범위를 한정하였다. 첫째, 측정 종료시까지 초기 블리딩수와 수화열에 의한 체적팽창 효과(열팽창계수  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )는 무시하였으며 실제 변형률 게이지에서 측정되는 측정값 중 수축이 진행되는 시점을 초결 시점에 적용하였다. 둘째, 수축기준량에 대해서는 본 연구의 초점이 수화도와 자기수축을 연관시키는 것이므로 Fig. 6과 같이 최종 수화의 약 90%, 최종 자기수축의 약 65~95%가 진행되는 28일을 실용적인 기준으로 설정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 시멘트 페이스트 자기수축 및 불포화 공극 보정계수

Fig. 7과 같이 시멘트 페이스트의 자기수축을 초결 시점부터 28일까지 측정된 결과를 살펴보면 OPC 30의 경우  $903 \times 10^{-6}$ , OPC 35는  $625 \times 10^{-6}$ , OPC 40은  $385 \times 10^{-6}$ 의 28일 자기수축률을 나타냈으며 물-결합재비가 낮을수록 초기재령에서의 수축 증가율이 커지는 경향을 나타내고 있다. 이는 물-결합재비가 낮을수록 공극생성과 함께 불포화 공극 생성이 빠르게 진행되어 계면압력이 초기재령에서 작용하는 것

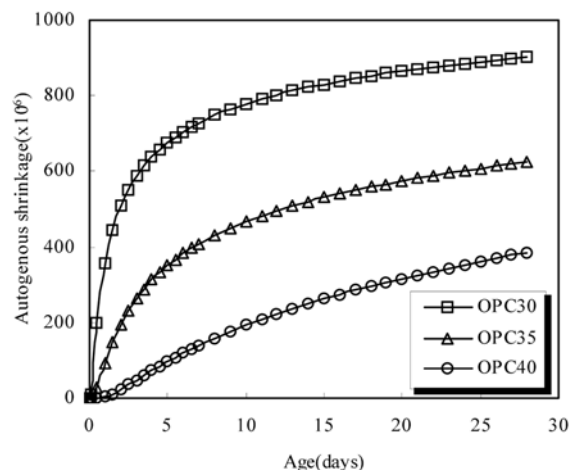


Fig. 7 Autogenous shrinkage of cement paste

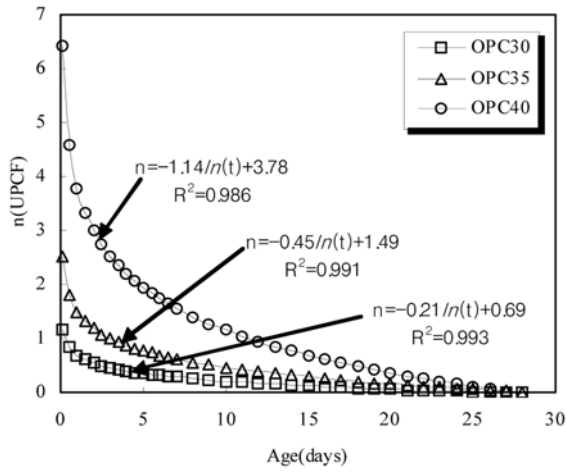


Fig. 8 Unsaturated pore compensation factor vs. time

으로 유추할 수 있다. 이러한 사항을 보다 자세히 분석하기 위하여 측정된 자기수축량과 식(4)를 이용하여 수화도와 실제 자기수축률 진행속도의 차이를 보정하는 불포화 공극 보정계수를 산정하여 Fig. 8, 9에 나타내었다. 먼저 Fig. 8을 살펴보면 불포화 공극 보정계수는 물-결합재비가 낮을수록 재령이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 물-결합재비가 낮고 재령이 증가할수록 생성된 공극내 잉여수의 포화도가 감소하여 실제 수화도와 자기수축 진행 속도와의 차이가 줄어들음을 의미한다. Fig. 9는 실제 수화도와 불포화 공극 보정계수를 적용한 수화도, 그리고 자기수축의 상대적인 속도를 비교하고 그 차이를 나타내었다. 사용된 불포화 공극 보정계수는 Fig. 8에서와 같이 산정된  $n$ 값을 회귀분석한 수식을 이용하였으며 기준 28일에 대한 상대적인 속도를 나타내었다. 먼저 불포화공극 보정계수에 의해 변형된 수화도를 나타내는  $\alpha(t)^n/\alpha(28)^n$  과 실제 자기수축 진행속도

$\varepsilon_{pas}(t)/\varepsilon_{pas}$  은 거의 일치하는 결과를 나타내어 불포화 공극 보정계수의 산정이 적절함을 의미하고 있다. Fig. 9에서 Difference는 일반적인 수화도  $\alpha(t)/\alpha(28)$  과 불포화 공극 보정계수를 사용한 변형 수화도  $\alpha(t)^n/\alpha(28)^n$  의 차이를 나타내며 물-결합재비가 감소할수록 작은 값을 보이고 있다. 상술하면 OPC30의 경우 초결 후 1일, OPC35는 2일, OPC40은 3일에서 최대 값을 나타낸 후 차이의 기울기가 감소하는 결과를 나타내었다. 즉 이 시기까지는 수화 진행속도가 자기수축 발생속도보다 빠르지만 이후부터는 내부 수분의 소모에 의한 불포화공극의 생성증가로 인해 자기수축의 진행속도가 더 빠르게 증가하는 것을 의미한다. 이러한 사실에 근거하여 내부 혹은 외부 양생의 적정 시기는 물-결합재비 0.3, 0.35, 0.4에 따라 각각 1일, 2일, 3일 이내에 이루어져 불포화공극의 생성을 억제함으로써 시멘트 페이스트가 균열에 저장할 수 있는 충분한 강도를 확보할 때까지 지속적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

Fig. 10은 Fig. 8에서와 같이 산정된 불포화공극 보정계수를 적용한 식(3)의 변형 수화도 모델과 식(2)의 기존 수화도 모델을 콘크리트 자기수축 예측식 (1)에  $V_a=0, V_p/V_c=1$ 을 대입하여 각각 시멘트 페이스트의 자기수축량을 비교하였다. 결과를 살펴보면 기존 수화도 모델을 적용한 경우 수화 진행속도와 자기수축의 진행속도 차이를 보정해주지 못하므로 실제 측정값과 큰 차이를 나타냈지만 불포화보정 공극계수를 적용한 경우 실험값과 일치하는 경향을 나타냄으로서 불포화공극 보정계수를 적용한 수화도 모델이 타당함을 알 수 있었다.

### 3.2 콘크리트 자기수축

OPC30, OPC35, OPC40에 대하여 시멘트 페이스트 자기수축 실험과 산정된 불포화 공극 보정계수를 식(1)의 변형 Picket 모델에 적용하고 기존 자기수축 모델식인 Tazawa

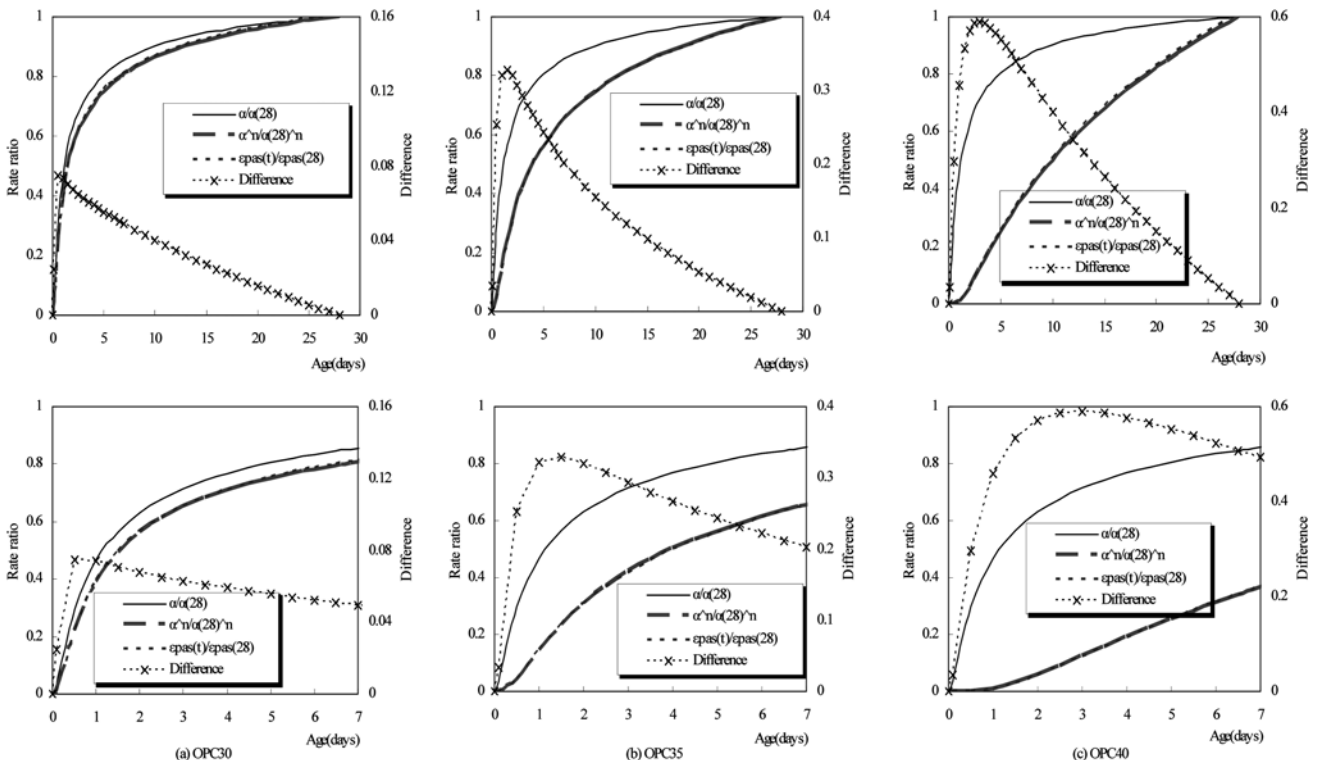


Fig. 9 Relative autogenous shrinkage and differences between relative degree of hydration and modified degree of hydration

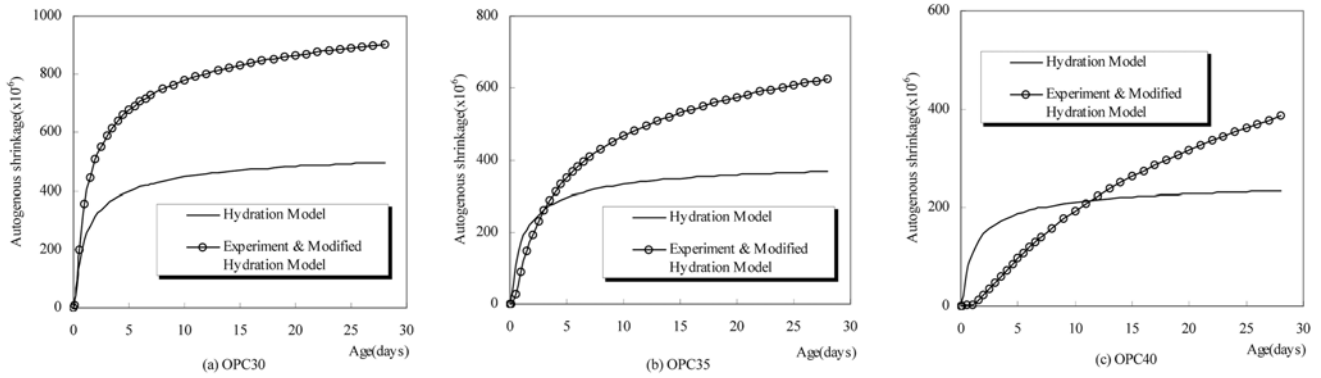


Fig. 10 Cement paste autogenous shrinkage experiments ,hydration model and modified hydration model

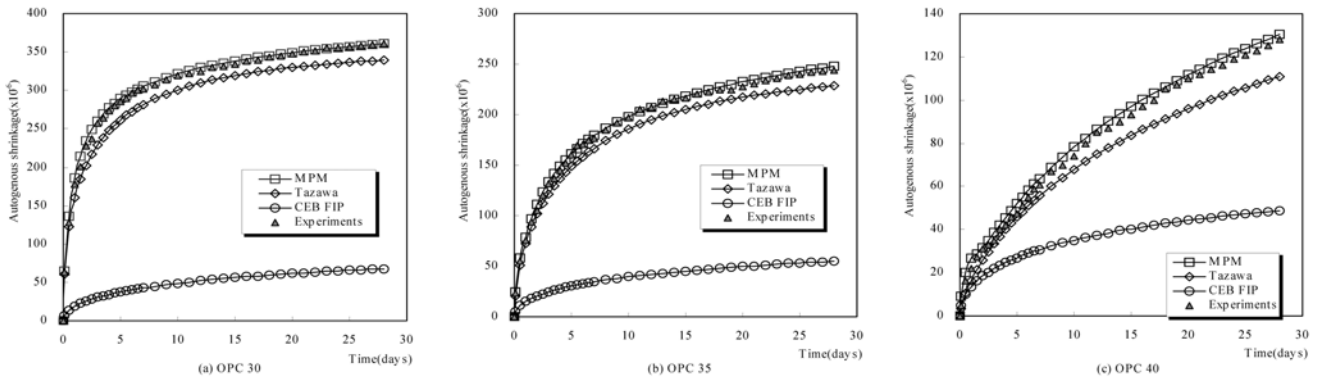


Fig. 11 Autogenous shrinkage experiments data and model predicts

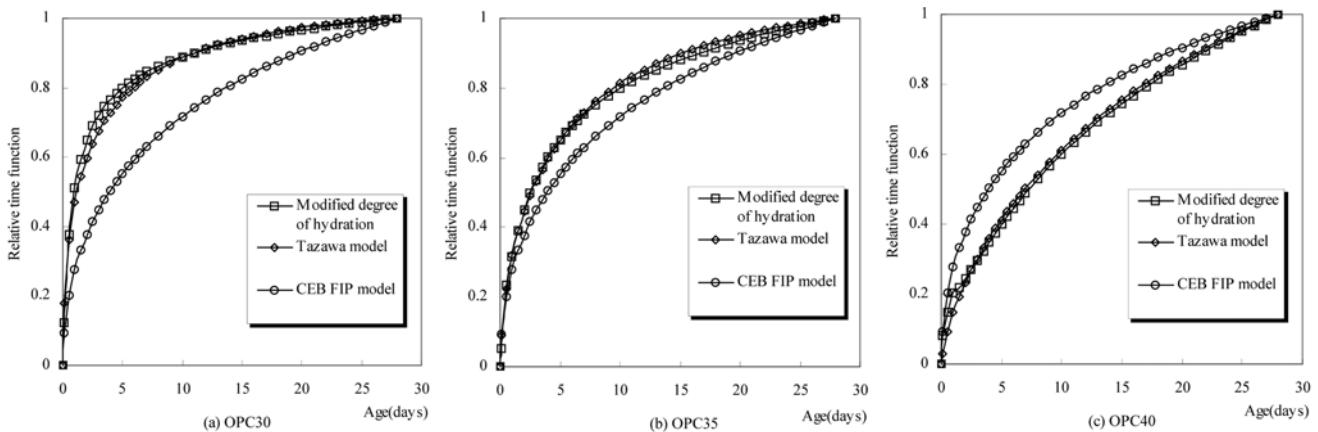


Fig. 12 Relative time function with various autogenous shrinkage predicts models

모델과 CEB FIP 모델, 그리고 콘크리트 자기수축 측정값을 Fig. 11에 나타내었다. 먼저 측정값을 살펴보면 28일 자기수축률은 OPC30, OPC35, OPC40에 따라 각각  $362 \times 10^{-6}$ ,  $244 \times 10^{-6}$ ,  $128 \times 10^{-6}$ 을 나타냈으며 물-결합재비가 낮을수록 이른 재령에서 급속한 자기수축률을 보이고 있다. 이는 앞 절에서의 시멘트 페이스트의 불포화 공극 생성속도와와의 연관성으로 설명할 수 있다. 즉, 물-결합재비가 낮을수록 시멘트 페이스트내의 불포화 공극이 이른 재령에서부터 생성이 되므로 수축 미기여 성분을 제거한 콘크리트의 자기수축도 동일한 현상을 나타나게 되는 것으로 판단된다.

각 모델과 실험값과의 결과를 비교하면 변형 Pickket 모델과 실험값은 거의 일치하며 Tazawa 모델은 실험값과 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 Tazawa 모델의 경우 자기수축 발현함수 계수에 불포화 공극 생성 속도에 대한 개념이 간접적으로 포함되어 있는 것으로 간주할 수 있으며,

측정값과 다소 차이는 변형 Pickket 모델의 경우 시멘트 페이스트와 골재 부피에 따른 수축 기여 성분과 수축 미기여 성분을 분리하여 고려할 수 있으나 Tazawa 모델은 일반적 배합에 한정된 것으로 생각될 수 있으며 변형 Pickket 모델이 Tazawa 모델에 비하여 보다 세부적인 배합특성을 고려할 수 있음을 나타낸다. 반면 CEB-FIP 모델은 실험값에 비하여 매우 작은 값을 나타내었으며 이에 대한 원인은 최종 자기수축량과 자기수축 발현 시간함수의 두 가지 측면에서 논의될 수 있다. 첫째, 최종 자기수축량의 경우 CEB-FIP 모델은 강도의 함수로서 실제 실험값에비하여 매우 과소평가된 값을 산정하고 있다. 그러나 자기수축의 발생 원인적 관점에서 강도보다는 물-결합재비와 수화도 그리고 불포화공극 생성 정도가 고려된 최종 자기수축량 산정 방법이 타당하다고 생각된다. 둘째, 자기수축 발현 시간함수의 경우 CEB FIP 모델은 Tazawa 모델의 물-결합재비 0.30~0.35에 해당하는

자기수축 발현 계수  $a=0.2$ ,  $b=0.5$ 의 특수한 경우로서 Fig. 12와 같이 모든 물-결합재비에 대하여 동일한 자기수축 발현 함수를 나타내게 된다. 즉, 물-결합재비가 낮은 경우 자기수축의 발현이 과소평가되며 물-결합재비가 높은 경우 과대 평가되는 경향을 보이고 있다.

이와 같은 자기수축 모델 비교를 통하여 실용적인 측면에서의 자기수축 예측은 Tazawa 모델이 적절할 것으로 판단되며, 발생 원인적이며 세부 배합 특성을 고려할 때에는 이 연구에서 도출한 불포화공극 보정계수가 고려된 변형 Pickett 모델이 보다 유효한 결과를 나타낼 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

기존 수화도 모델과 시멘트 페이스트 자기수축 실험을 통하여 불포화 공극 보정계수를 산정하고 이를 변형 Pickett 모델에 적용하여 콘크리트의 자기수축 실험값과 기존 모델과의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시멘트 페이스트의 수화도와 자기수축 진행속도의 차이를 불포화 공극의 생성속도로 가정하고, 기존 수화도 모델과 시멘트 페이스트의 자기수축 실험을 통해 불포화 공극 보정계수를 산정할 수 있었다.
2. 물-결합재비 0.30, 0.35, 0.40에 따라 불포화 공극 생성은 각각 1일, 2일, 3일 이내에 진행하게 되며 이에 따라 기체-액체-고체의 경계면이 형성되어 자기수축이 진행되는 것으로 판단된다.
3. 불포화 공극 보정계수를 수화도에 적용하여 변형 Pickett 모델을 산정하였고 콘크리트 자기수축 실험값과 기존 모델과의 비교를 통해 타당성을 검증하였으며, 실용적으로는 Tazawa 모델이, 배합 특성을 고려할 때에는 변형 Pickett 모델이 유효할 것으로 판단된다. 그러나 CEB-FIP 모델의 경우 강도에 의한 최종 자기수축량 설정과 일률적인 자기수축 발현 시간함수는 다소의 수정이 필요할 것으로 생각된다.

#### 부 록

(수화도 파라미터 설정)

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \exp\left(-\left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta\right)$$

여기서,

$\alpha(t_e)$  = 등가재령  $t_e$ 에서의 수화도

$\tau$  = 수화시간 매개변수

$\beta$  = 수화형상 매개변수

$\alpha_u$  = 극한 수화도

$$\tau = 66.78 p_{C_3A}^{-0.154} p_{C_3S}^{-0.401} Blaine^{-0.804} P_{SO_3}^{-0.758}$$

$$\exp(2.187 p_{slag} + 9.50 p_{FA} p_{FA-CaO})$$

$$\beta = 181.4 p_{C_3A}^{0.146} p_{C_3S}^{0.22} Blaine^{-0.535} P_{SO_3}^{0.558}$$

$$\exp(0.647 p_{slag})$$

$$\alpha_u = \frac{1.031w/c}{0.194 + w/c} + 0.5 p_{FA} + 0.30 p_{slag} \leq 1.0$$

여기서,

$p_{slag}$  = 슬래그 치환율

$p_{FA}$  = 플라이 애쉬 치환율

$p_{FA-CaO}$  = 플라이 애쉬 중 CaO 함유율

$p_{C_3A}$  = 시멘트 중  $C_3A$  함유율

$p_{C_3S}$  = 시멘트 중  $C_3S$  함유율

$p_{SO_3}$  = 시멘트 중  $SO_3$  함유율

$Blaine$  = 시멘트 비표면적( $m^2/kg$ )

$w/c$  = 물-결합재비

$$E = 22,100 f_E^{0.30} p_{C_3A}^{0.25} p_{C_4AF} Blaine^{0.35}$$

여기서,

$p_{C_4AF}$  = 시멘트 중  $C_4AF$  함유율

$f_E$  = 아래식과 같이 정의 되는 활성화 에너지 :

$$f_E = 1 - 1.05 p_{FA} \left(1 - \frac{p_{FA-CaO}}{0.40}\right) + 0.40 p_{slag}$$

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국교통기술평가원에서 위탁시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 06핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- CEB-FIP(1990), CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton, Lausanne.
- Francoise, B. and Folker, H. Wittmann (2005) role of disjoining pressure in cement based material, Cement and Concrete Research, (Article in Press).
- Hua, C., Acker, P., and Ehrlacher, A. (1995) Analysis and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1457-1468.
- Ivindra, P. (2001) Hydration Kinetics and Thermomechanics of Blended Cement Systems, Ph.D thesis, University of Michigan.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi T. (2003) Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 91-126.
- Lura, P. (2003) Autogenous deformation and internal curing of concrete, Ph.D thesis, Delft University of Technology.
- Nawa, T. and Horita, T. (2004) Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete, Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures, pp. 4-16.
- NISTIR 6295 (1999) Curing of High Performance Concrete : Report of the State of the art, United states Department of Commerce Technology Administration.
- Pickett, G. (1956) Effects of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage, ACI Journal, Proceeding V. 52, No. 5, pp. 581-590
- Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1993), Autogenous shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology, Creep and Shrinkage of Concrete, edited by Bazant, Z. P. E&FN Spon

(접수일: 2005.12.19/심사일: 2006.4.24/심사완료일: 2006.7.12)