

CEMHYD-3D로 예측된 수화도를 기초로 한 고성능 콘크리트의 건조수축 모델제안

Development of Drying Shrinkage Model for HPC Based on Degree of Hydration by CEMHYD-3D Calculation Result

김 재 기*
Kim, Jae Ki

서 종 명**
Seo, Jong-Myeong

윤 영 수***
Yoon, Young-Soo

ABSTRACT

This paper proposes degree of hydration based shrinkage prediction model of 40MPa HPC. This model shows degree of hydration which is defined as the ratio between the hydrated cement mass and the initial mass of cement is very closely related to shrinkage deformation. In this study, degree of hydration was determined by CEMHYD-3D program of NIST. Verification of the predicted degree of hydration is performed by comparison between test results of compressive strength and estimated one by CEMHYD-3D. Proposed model is determined by statistical nonlinear analysis using the program Origin of Origin Lab. Co. To get coefficients of the model, drying shrinkage tests of four specimen series were followed with basic material tests. Testes were performed in constant temperature /humidity chamber, with difference moisture curing ages to know initial curing time effect. Verification with another specimen, collected construction field of FCM bridge, was given in the same condition as pre-tested specimens. Finally, all test results were compared to propose degree of hydration based model and other code models; AASHTO, ACI, CEB-FIP, JSCE, etc.

1. 서론

1907년도에 Hatt이 처음 건조수축을 관찰 한 이후 많은 시간이 흘렀으며 이 현상은 Glanville과 Pickett, McHenry, L' Hermite, Powers, Neville, Wittman 등에 의해 꾸준히 연구되었다. 그 결과로 다양한 이론들이 제안되고 또 그 예측식이 개발되었지만, 건조수축의 경우 다양한 내·외부적 원인에 지배되어 정확한 예측이 거의 불가능 한 실정이다. 이전의 연구를 바탕으로 제작된 각종 기준들에서는 수축의 예측식을 제안하고 있지만 개발 당시의 환경이 현재의 기술을 충분히 대표하고 있지 못한 과거의 실험을 바탕으로 하고 있어, FCM등 고성능 콘크리트를 사용하고 있는 구조물의 거동 예측이 더욱 어려운 실정이다. 고성능 컴퓨터의 보급으로 현재 수축은 그 현상을 실제 거동과 어떻게 일치시키느냐에 중심이 맞추어져 있으며 그러한 다양한 현상적 연구들이 진행되고 있다.

이에 따라 본 논문은 CEMHYD-3D에 의해 추정된 수화도에 기초한 40Mpa정도의 FCM에서 사용된 HPC의 수축모델을 제안하고자 한다. FCM 현장에서 수집된 각 시험체의 기초 자료를 바탕으로 NIST에서 제공하는 CEMHYD-3D는 수화도를 계산하여 예측 모델을 제안하였다.

*정회원, 삼성물산(주) 건설부문 주임

**정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

***정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

2. 수화도(Degree of Hydration)

수화도는 시멘트계 광물질의 수화 단계에 기초한 수화 과정을 나타내는 지수이며, 이는 콘크리트의 경화 단계를 나타낸다. 완전한 수화단계를 모든 시멘트 물질이 반응하여 안정화 된 단계로 가정하며, 이 과정으로 가는 중 시간 t 에 대한 수화도는 전체 수화 가능 반응물질과 현재 반응한 시멘트 물질의 중량비로 나타낼 수 있다. 즉 수화도 $\alpha(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(t) = \frac{t \text{에서 반응한 수화물의 중량}}{\text{최종수화반응물질의 질량}}$$

이전의 많은 연구를 통해 이 수화도는 시멘트계 물질의 입도, 화학성분, 외부 온습도 조건 등에 영향을 받는 것으로 밝혀져 있으며, 이 수화도와 각종 기초 물성 즉, 강도, 탄성계수 등과의 관계가 연구되어 수화도를 측정함으로써 콘크리트 거동의 예측이 가능해졌다.

3. CEMHYD-3D(수화도 예측 프로그램)

본 연구에서는 현장에서의 적용 편의성을 높이기 위해서, 수화도 예측프로그램을 사용하였다. NIST에서 제공되는 CEMHYD-3D는 시멘트계 물질의 조성구입도, 골재 입도 및 혼합물질과 외부 조건을 입력하여 수화도 및 각종 관련 물성을 예측하게 할 수 있는 프로그램이다. 이는 이전의 미세구조의 연구 결과를 종합하고 있으며, 실험적 검증을 통해 사용 가능성을 보여주고 있다.

4. 실험 및 결과

본 연구에서는 FCM 현장에서 타설된 40MPa의 HPC를 수집하여, ASTM 기준에 의거 실험을 수행하였다. 수집된 공시체의 배합표는 다음과 같으며 각 시험체는 다른 재령(3일, 28일, 90일)으로 구분하여 수중 양생하였다. 양생 재령별 기본 물성(탄성강도, 압축강도)을 얻기 위해 각 3에서 4개의 시험체의 압축 시험을 수행하였고, 각 배합과 재령별로 2개의 시험체로 표면 노출하여 23.0±10℃와 50±4% 습도의 항온 항습실에서 수축 시험을 수행하였다.

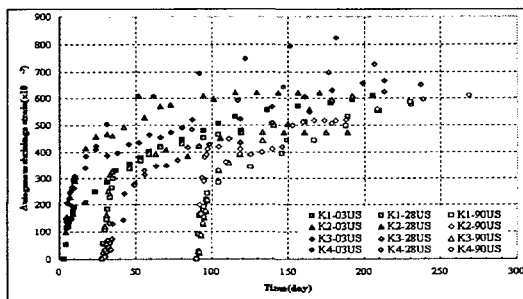


그림 1 노출 시험체의 건조수축 시험 결과

표 1 각 시험체의 배합 설계표

	Design Stress (MPa)	Max Agg. (mm)	w/c (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	Slump (cm)
K1 series	40	19	31.5	42	162	514	15
K2 series	40	19	32.0	42	168	522	15
K3 series	40	19	32.0	43	169	528	15
K4 series	40	19	32.8	42	160	471	16.5
K5 series	40	19	27.5	42	149	541	13.5

표 2 기본 물성 시험 결과

비고 재령 시험체군	Compressive strength (MPa)			Elastic Modulus (GPa)		
	3 일	28 일	90 일	3 일	28 일	90 일
K1 series	37.4	50.5	54.3	32.18	38.07	41.72
K2 series	37.2	52.4	55.6	27.92	33.04	36.20
K3 series	41.2	55.6	58.7	27.88	30.98	32.14
K4 series	33.7	55.5	56.1	23.06	27.29	29.90
K5 series	36.7	44.4	46.7	28.25	33.41	36.61

5. CEMHYD-3D해석 및 예측식 제안

현장 자료와 기존의 시험자료들을 바탕으로 CEMHYD-3D로 각 시험체 군을 분석하였다. 분석결과 시간에 따른 수화도 변화를 아래 그림과 같이 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 수화도 시험을 직접 수행하지 않고 수화도와 외부 영향 조건으로 나타나는 실제적 거동 예측을 위해 발현되는 재령별 압축강도와 예측 강도와의 분석을 통해 CEMHYD-3D의 예측 결과의 신뢰도를 보였다.

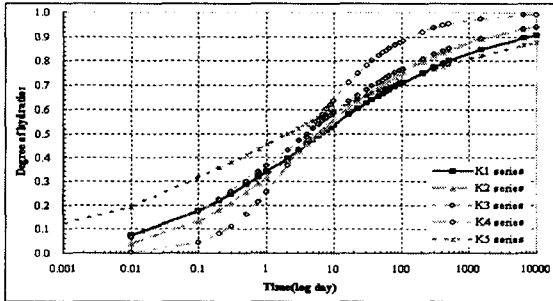


그림 2 시험체 군별 수화도

그림에서 보듯 발현되는 압축강도와 예측식의 값이 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 각 시험체의 재령에 따른 수축변형과 수화도는 영향 요소가 거의 유사하며, 실제 수축의 내부적 거동은 이 수화도에 지배된다. 따라서 이 수화도와 수축시험과의 관계를 찾아봄으로써, 그 예측식을 제안 할 수 있다. 기본적으로 지수함수 형태의 식을 기초로 하였으며, 각 계수는 재령 즉 양생 기간에 따른 함수로 하여 통계적 분석을 수행하였다. 통계 분석은 Origin 7.0 프로그램을 사용하였고, 그 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_{sh} = C_1 \left(k \frac{\alpha(t) - \alpha(t_i)}{1 - \alpha(t_i)} \right)^{C_2}$$

표 3 제안식 변수분석 결과

Parameters	Degree of hydration based function
C_1	t_i
C_2	$1.09(1/t_i)^{0.25}$
k	1,000

6. 예측식과 기존 기준식과의 비교

AASHTO-02, ACI-90, CEB/FIP-02 및 JSCE 등 각 시방 기준들이 제안하고 있는 각각의 예측식은 그림과 같이 HPC의 수축에 대하여 적절하지 않은 예측 결과를 보여주고 있다. 이는 실제 시공되고 있는 FCM 교량 등 다양한 구조물에서 위험한 결과를 야기 할 수 있다는 점에 주목해야 한다. 앞선 수화도와 수축간의 관계를 바탕으로 한 예측식과 실험값을 비교해 보면 예측식은 매우 정확한 결과를 보여준다.

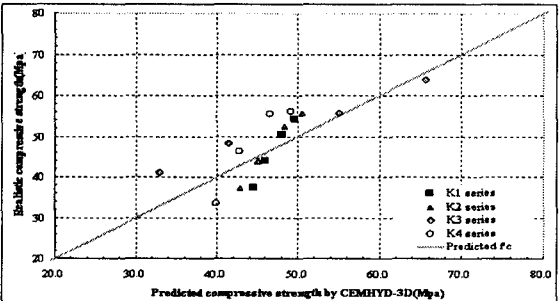


그림 3 CEMHYD-3D에 의한 압축강도와 시험값의 비교

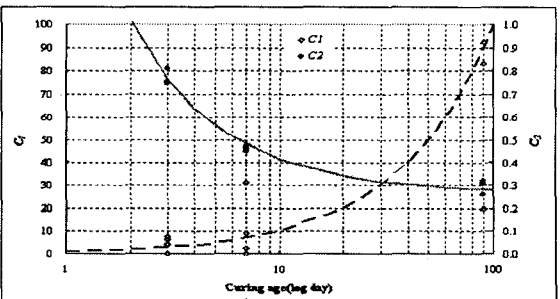


그림 4 해석 변수의 비선형 통계 해석 결과

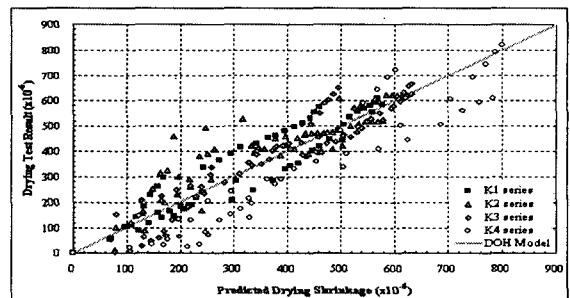


그림 5 제안 모델 예측식과 실험값의 비교

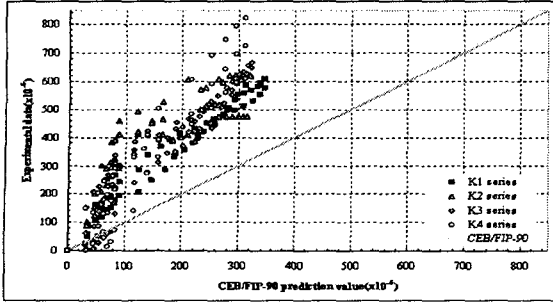


그림 6 시방기준 예측식과 실험값의 비교

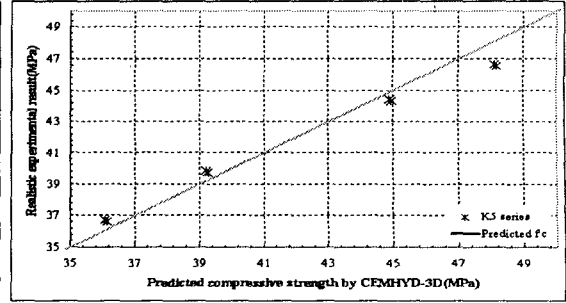


그림 7 CEMHYD-3D에 의한 예측 강도와 실험값의 비교

7. 수화도에 입각한 건조수축 예측식의 검증

제안된 식은 실험 결과를 바탕으로 제안되고 있어 다른 경우의 적용성이 의문시 된다. 이에 본 연구에서는 추가적인 1개 군의 실험을 이전의 실험과 같은 방법으로 수행하였다. 건조수축 실험 결과와 예측 모델과의 비교를 나타낸다. 또한 각 기준들과의 비교도 나타내고 있다. 그림에서 보듯 다른 기준에 비하여 제안된 델로 예측한 건조수축이 실제 거동과 유사하게 나타나고 있음을 보여주고 있어 제안된 모델식과 CEMHYD-3D의 수화도 예측이 적절함을 알 수 있다.

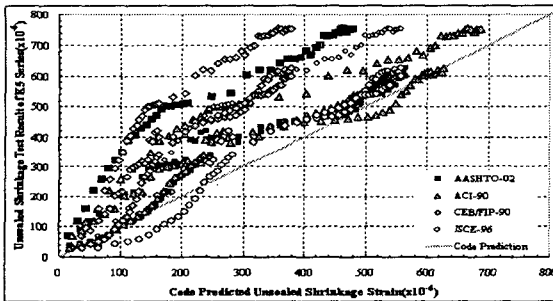


그림 8 각 시방기준 예측식과 실험값의 비교

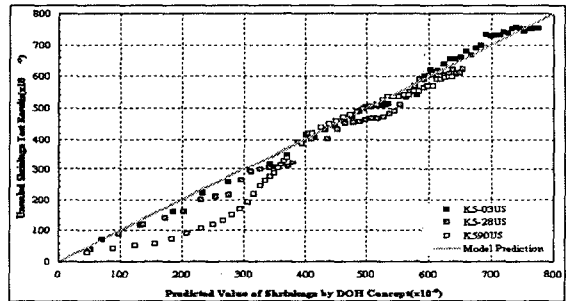


그림 9 제안 모델과 검증실험의 건조수축 비교

8. 결론 및 고찰

- 1) 내적 외적 수화 반응을 적절히 고려하고 있는 수화도에 기초한 건조수축 예측 모델은 건조수축 예측에 다른 시방기준과 비교하여 탁월한 정확성과 적용 가능성을 지니고 있다.
- 2) CEMHYD-3D의 예측 수화도는 강도의 예측과 수축 거동의 예측차원에서 볼 때, 비교적 정확한 값을 예측하고 있어 그 높은 효용성이 기대된다.
- 3) 추가적인 변수와 연구 및 수화도 측정 시험이 수반될 경우 보다 정확하고 합리적인 예측식이 개발 될 수 있을 것으로 기대된다.

7. 참고문헌

1. Zdeněk P. Bazant, "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future", Nuclear Engineering and Design 203,2003, pp.27 - 38
2. Neville, A. M., "Property of Concrete," Pitman, London and Marshfield, Mass., 1981, pp. 359-432.