

원전콘크리트의 미세공극구조 경시변화 예측 모델 개발

Modeling of the Time-Dependent Changes of Micro Pore Structures in Concrete for Nuclear Power Plants

김 주 형* · 정 상 화** · 문 재 흠***

Kim, Joo-Hyung · Jung, Sang-Hwa · Moon, Jae-Heum

요 약

본 연구에서는 원전격납구조물과 같이 고품질을 요하는 콘크리트의 내구성설계 및 관리에 필요한 구조물 건전성 평가시스템 구축의 일환으로 콘크리트 미세공극구조 형성 예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 미세공극구조 형성 예측 프로그램은 콘크리트의 강도 등과 같은 역학적 특성 및 유해이온 확산거동 예측에 활용되는 부분으로서 기존의 연구결과로부터 개발된 모델식들을 바탕으로 개발되었다. 개발된 프로그램은 콘크리트 시험체로부터 구하여진 MIP 실험결과와 비교해 보았으며, 상관성을 검토하였다.

keywords : 원전격납구조물, 수화열, 단열온도상승, 건전성 평가시스템

1. 서 론

콘크리트는 시멘트와 같은 결합재의 시간에 따른 수화반응에 의해 강도 등과 같은 역학적 특성을 가지게 된다. 이때 생성되는 수화물 간에는 불규칙한 공극이 존재하게 되며, 콘크리트를 전체적으로 보았을 때의 공극률은 콘크리트의 강도 등과 같은 역학적 특성 뿐만 아니라 염화물 이온 등과 같은 유해물질의 침투특성에도 직접적인 관련을 가지게 된다. 따라서 콘크리트의 역학적 및 내구성과 관련된 현상을 보다 정확히 예측하기 위하여서는 경시변화에 따른 콘크리트 미세공극구조 발현거동을 정량화 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 Kishi가 개발한 복합수화발열모델(Kishi, 1995)을 기반으로 한 수화도의 함수로 정식화한 Chaube의 공극구조 형성모델(Chaube, 1996)을 사용하여 미세공극구조 발현 예측 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램의 해석결과와 실제 콘크리트 시험체의 공극률을 MIP를 통하여 측정한 결과치와 비교 검토를 수행하였다.

2. 미세공극구조 발현 예측 프로그램

Chaube는 공극구조 형성모델을 제시함에 있어서 시멘트 페이스트는 평균적인 대표경 r_0 를 가진 분체 입자로 구성되어 있다고 가정하였으며, 분체 입자간의 평균간격 s 를 수분과 분체의 비 ω_o 와 분체의 분말

* 한국전자재시험연구원, 공학석사 kjhmole@kicm.re.kr

** 한국전자재시험연구원, 공학박사 jsh2593@kicm.re.kr

*** 한국전자재시험연구원, 공학박사 mjh4190@kicm.re.kr

도 BF 및 분체 비중 ρ_p 로 구하는 공식을 제시하였다.

$$s = 2r_o \left[\{G_o(1 + \rho_p \omega_o)\}^{1/3} - 1 \right] \quad (1)$$

$$G_o = 0.79(BF/350)^{0.1} \quad G_o \leq 0.91$$

한편, 수치해석상의 편의를 위하여 Chaube는 입자간의 중심간 평균간격 l 을 가지고 고화가능 공간을 반경 r_{eq} 의 구체로 치환하였다.

$$r_{eq} = \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/3} l = \kappa l \quad (2)$$

이와 같은 입자모델을 구성하고, 수화시 생성되는 공극을 겔공극, 모세관공극 및 층간공극으로 분류하였으며, C-S-H겔 입자가 보유하는 공극률은 0.28의 값으로 일정하다고 가정하였다. 또한 겔공극 및 층간공극은 수화생성물 입자에 포함되어 있으며, 이에 반해 모세관공극은 외부에 생성된 C-S-H 겔입자 또는 C-H 결정이 차지하지 않는 공간으로 보았다. 이상의 가정으로 겔입자의 체적 V_s (m^3/m^3)는 각 시멘트 조성광물의 수화도 평균값 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 및 수화한 단위분체중량당의 결합수량 β (kg/kg)로부터 구하여지며, 여기서 수화에 관련된 변수인 수화도 α 와 결합수량 β 는 Kishi의 복합수화발열 모델로부터 도출할 수 있다.

$$V_s = \frac{\alpha W_p}{1 - \phi_{ch}} \left(\frac{1}{\rho_p} + \frac{\beta}{\rho_u} \right) \quad (3)$$

여기서, W_p : 단위체적당 시멘트의 중량(kg/m^3)
 ρ_p : 분체 밀도(kg/m^3)
 ρ_u : 반응후 수화생성물에 결합되는 물의 비중($1.25 \times 10^3 kg/m^3$)
 ϕ_{ch} : 겔 특성공극률 0.28

겔입자의 공극률은 층간공극과 겔공극의 합으로서 층간공극의 공극률 ϕ_{lr} 및 겔공극의 공극률 ϕ_{gl} 은 다음과 같이 구해진다.

$$\phi_{lr} = (t_w s_l \rho_g) / 2, \phi_{gl} = V_s (\phi_{ch} - \phi_{lr}) \quad (4)$$

여기서, t_w 는 층간 공극의 두께 (2.8 \AA), s_l 은 층간 공극의 고유 표면적 (포틀랜드 시멘트의 경우 $500 \sim 600 m^2/g$), ρ_g 는 겔생성물의 건조밀도 = $\rho_p \rho_w (1 + \beta)(1 - \phi_{ch}) / (\rho_w + \beta \rho_p)$ (km^3/m^3), 이며 보다 자세한 내용은 본 지면에서는 생략토록 하였다.

최종적으로 모세관 공극의 공극률 ϕ_{cp} 는 다음과 같다.

$$\phi_{cp} = 1 - V_s - (1 - \alpha) (W_p / \rho_p) \quad (5)$$

이와 같이 공극구조 형성모델에 있어서 겔공극률과 모세관공극률 예측모델을 살펴보았으며, 상기의 모델은 시멘트 결합재의 수화반응, 즉 수화도에 따라 생성되는 수화입자의 생성모델이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 위 모델에 기반한 미세공극구조 발현 예측 프로그램을 개발하였으며, 미세공극구조 발현 경시성을 반영하기 위하여 Kichi가 제안한 복합수화발열모델을 통한 수화도 예측모델을 사용하였다. 본 프로그램의 사용자 입력환경 예는 그림 1과 같다.

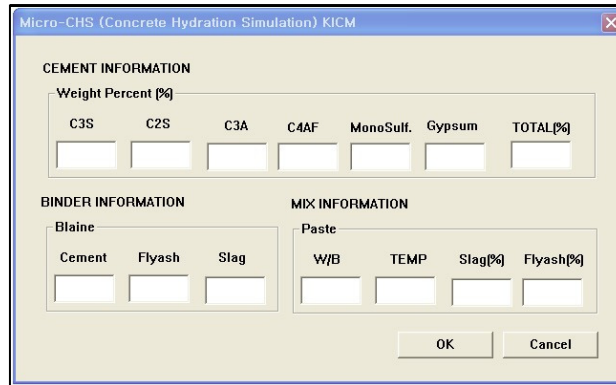


그림 1 수화열 예측 프로그램 입력환경

3. 실험결과와의 비교검토

본 연구에서 개발된 미세공극구조 예측모델은 실제 시멘트 결합재의 수화반응물 생성시의 복잡한 관계를 설명하기 위하여 여러 가지 가정사항이 포함되어 있기 때문에 실제 콘크리트의 공극률과는 어느정도 차이점을 보일 수 밖에는 없다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램의 검증에 위하여 표 1과 같이 제작된 콘크리트 시험체의 재령 90일 시점에서 MIP 실험을 통한 공극률 측정을 수행하였으며, 프로그램 예측결과와 비교검토를 수행하였다.

표 1 배합표

f _{ck} (MPa)	G _{max} (mm)	W/(C+P) %	단위 (Kg/m ³)				
			W	C	Slag	S	G
24	25	50	180	270	90	804	935

그림 2에서 보이는 바와 같이 실제 실험에서 구하여진 공극률과 프로그램상의 예측값과는 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 MIP시험 자체가 가지는 시험방식상의 내재오류와 모델정립상에 있어서 적용된 가정사항이 모든 실제현상을 그대로 정립화 하는 것은 불가능하기 때문으로 사료된다. 그러나 본 연구에서 개발된 모델은 공극구조의 정확한 예측 보다는 콘크리트라는 복합체의 미세조직구조 발현성상의 정립화 및 건전성평가 시스템에의 활용을 목적으로 하기 때문에 어느정도 이상의 상관성을 보여준다면 개발 목적을 충족시켜 주리라 판단된다.

향후, 다양한 배합조건 및 재령조건을 고려한 추가적인 실험적 연구를 통한 실험결과와의 분석 및 이를 통

한 프로그램상의 모델식 개선으로 보다 좋은 상관성을 가지는 모델을 개발하고자 한다.

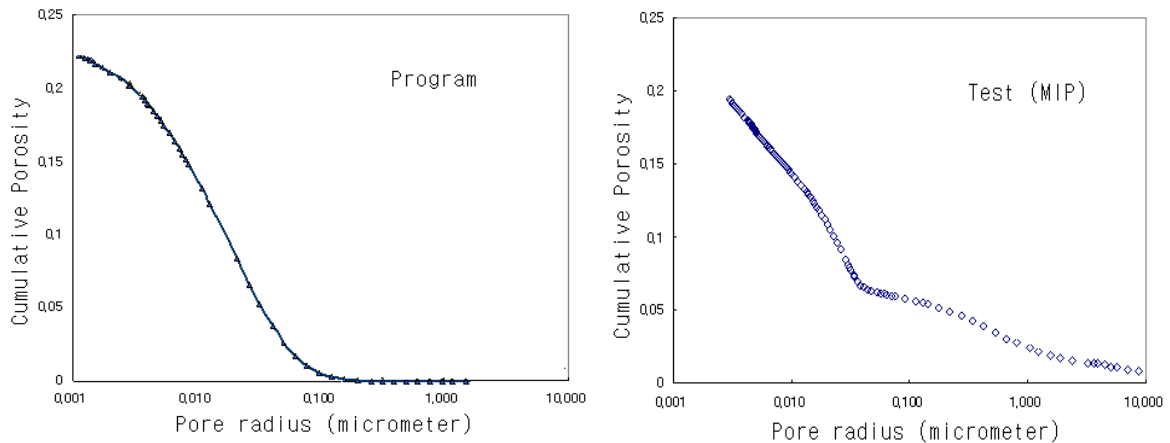


그림 2 미세공극구조 발현모델 vs. 실험결과 (공극률)

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 수화반응으로 인한 미세조직구조 발현 예측 프로그램을 개발하였으며, 실험결과와 비교검토를 수행하였다. 현재 보다 정확한 예측을 위하여 프로그램상에 적용한 모델식들의 검증 및 개선작업을 수행하고 있으며, 개발된 프로그램은 향후 콘크리트의 강도예측 모델 및 내구성 예측 모델 등에서의 활용에 이용되어질 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- CHAUBE, R.P.** (1996) Simulation of Moisture Transport, Hydration and Microstructure Formation in Cementitious Materials, *Ph.D. Dissertation, The University of Tokyo*
- KISHI, Toshiharu** (1995) Multi-component Model for Hydration Heating of Portland Cement, *Translation from Proceedings of JSCE, No. 526, Vol. 29*
- MAEKAWA, Koichi, ISHIDA Tetsuya, KISHI Toshiharu** (2009) Multi-scale Modeling of Structural Concrete, *Taylor & Francis*