

원전콘크리트의 결합재 조성성분을 고려한 단열온도상승값 예측 모델 개발

Modeling of the Adiabatic Temperature Rise of Concrete for Nuclear Power Plants With the Consideration of Binder Components

정 상 화* · 채 성 태** · 김 도 겐*** · 문 재 흠****

Jung, Sang-Hwa · Chae, Seong-Tae · Kim, Do-Gyeum · Moon, Jae-Heum

요 약

본 연구에서는 원전격납구조물과 같이 고품질의 대형 매스콘크리트의 설계, 시공, 품질예측 및 관리에 필요한 구조물 건전성 평가시스템 구축의 일환으로 수화열 예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 수화열 예측 프로그램은 국내에서 생산된 시멘트 및 결합재의 화학조성성분, 분말도와 같은 기초정보 및 배합정보를 입력하여 경시변화에 따른 수화발열량을 계산하는 방식으로서 기존의 연구결과를 바탕으로 개발되었다. 개발된 프로그램은 배합환경조건을 고려하여 초기배합온도 3종류(10, 20, 30℃)로 실험한 단열온도상승 실험 결과와 비교해 보았으며, 좋은 상관성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

keywords : 원전격납구조물, 수화열, 단열온도상승, 건전성 평가시스템

1. 서 론

콘크리트는 시멘트와 같은 결합재의 시간에 따른 수화반응에 의해 강도 등과 같은 역학적 특성을 가지게 된다. 이러한 수화반응은 발열반응으로써 초기재령에 있어서 발열상승치가 급격히 발생하게 되며 콘크리트 구조물 체적의 변화를 일으키게 한다. 이때 콘크리트 구조물이 외적으로 구속되어져 있거나 매스콘크리트와 같이 외기온도와 수화발열로 인한 내부온도차가 생길 경우 콘크리트 구조물에는 응력이 발생되게 되며 해당 시점에서 발생된 응력이 강도이상으로 발생될 경우 균열에 이르게 된다. 이러한 이유로 대형 매스콘크리트의 시공시 수화열 해석을 통한 결과를 가지고 온도균열을 방지하기 위한 단계별 시공을 수행하고 있으며, 이는 원전격납콘크리트 구조물의 경우에 있어서도 해당되는 사항이다. 한편, 콘크리트의 경우에 있어서는 시간에 따라 누적된 수화발열량과 강도 등과 같은 역학적 특성간에는 좋은 상관성이 존재하기 때문에 수화도 및 역학적 특성 경시변화 예측에 있어서도 수화열 해석이 이용되어질 수 있다.

콘크리트의 단열온도상승값 예측에 있어서 기존의 구조설계기준 및 시방서 상에서는 보통포틀랜드시멘트(OPC), 중용열포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트 1급 및 플라이애시시멘트 B종 등 4가지의 등급과 3가지 온도조건(10, 20, 30℃)으로만 분류하여 단위결합재량에 따른 예측식을 제시하고 있기 때문에 그 밖의 혼합시멘

* 한국건설자재시험연구원, 공학박사 jsh2593@kicm.re.kr

** 한국건설자재시험연구원, 공학박사 concre@kicm.re.kr

*** 한국건설기술연구원, 공학박사 dgkim@kict.re.kr

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

트의 단열온도상승치를 예측하는 데에는 한계가 있다. 이는 시멘트의 경우 주요한 화학조성물인 Alite(C₃S), Belite(C₂S), Aluminate(C₃A) 및 Celite(C₄AF) 등의 수화반응 속도 및 그 수화열이 모두 다르기 때문이며, 플라이애쉬 및 슬래그의 경우에 있어서도 각각 수화반응에 따른 수화열 발생현상이 다르기 때문이다. 이에 본 연구에서는 KISHI 등(KISHI, 1995)이 결합재 조성성분 각각의 수화반응을 고려하여 개발한 수화반응 모델인 Multi-component model을 기반으로 수화열 해석 프로그램을 구축하였으며, 원전콘크리트 배합 1종류를 가지고 단열온도상승시험을 수행, 그 결과값을 비교검토 하였다.

2. 단열온도상승 예측 프로그램

KISHI 등이 개발한 Multi-component model은 기본적으로 시멘트 및 결합재 각각의 화학조성물의 수화발열률을 통합하여 전체 수화발열률을 계산하는 방식을 취하고 있으며, 기본적인 공식은 다음과 같다.

$$H = C \times H_c \quad (1)$$

$$H_c = p_{C_3S}H_{C_3S} + p_{C_2S}H_{C_2S} + p_{SG}H_{SG} + p_{FA}H_{FA} + p_{C_3A}(H_{C_3AET} + H_{C_3A}) + p_{C_4AF}(H_{C_4AFET} + H_{C_4AF}) \quad (2)$$

$$= \sum p_i \times H_i$$

여기서, H : 단위 부피당 콘크리트 전체 발열량

C : 시멘트량

H_c : 시멘트의 수화 발열률 (Specific Heat Generation)

H_i : 각 클링커 성분의 수화 발열률

p_i : $\sum p_i = 1$ 에 해당하는 질량비

여기서 각 클링커 성분의 수화발열률 H_i 는,

$$H_i = \beta_i \mu \xi \gamma s_i H_{iT_0}(Q_i) \times \exp\left[-\frac{E_i(Q_i)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \quad Q_i = \int H_i dt \quad (3)$$

여기서, E_i : i 번째의 성분의 수화 활성화 에너지(Activation Energy)

R : 기체 상수

H_{iT_0} : 온도가 T_0 (293K=20°C)일 때 i 번째 성분의 기준 발열률 (Referential Heat Ratio)

$\frac{-E_i}{R}$: 열활성치 (Thermal Activity)

β_i : 수화된 생성물의 클러스터의 두께 증가에 따른 수화반응률의 감소

μ : 시멘트 구성성분의 영향

ξ : 수산화칼슘의 감소에 따른 포졸란 반응 감소치

s_i : 블레인 수치에 기반한 상대 분말도

γ : 플라이애쉬 및 유기혼화제의 존재에 의한 시멘트 및 슬래그 반응성 지연

Q_i : i번째의 성분의 총 누적발열량

이와 같이 Multi-component model은 결합재의 구성 및 화학조성물 각각의 수화반응 특성을 반영하는 방식으로 보다 정확한 수화반응 특성을 예측할 수 있는 모델로서 위 모델에 기반한 수화열 예측 프로그램을 개발하였으며, 단열온도상승치 예측 프로그램의 사용자 입력환경 예는 그림 1과 같다.

그림 1 수화열 예측 프로그램 입력환경

3. 실험결과와의 비교검토

본 연구에서 개발된 수화열 예측 프로그램의 검증을 위하여 배합초기온도를 3종류(10, 20, 30℃)로 변화하여 단열온도상승시험을 수행한 기존 실험결과(MAEKAWA, 2009) 중 표 1과 같은 원전콘크리트용 배합과 유사한 1종류를 선정하여 비교검토를 수행하였다.

표 1 배합표

f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	W/(C+P) %	단위 (Kg/m ³)					Ad. ((C+P)× %)
			W	C	Flyash	S	G	
40	25	39.3	157	320	80	639	1,129	0.25

그림 2에서 보이는 바와 같이 예측 프로그램과 실제 실험 결과와 좋은 상관성을 보이는 것이 확인되었다. 이와같이 개발된 프로그램을 적용하여 재료정보 및 배합정보가 주어질 경우 수화열로 인한 단열온도 상승치를 예측하는 것이 가능하리라 사료되지만 현재까지 개발된 프로그램은 각각의 결합재 분말에 대해 평균 분말도의 적용 및 평균적인 화학조성물비를 적용하기 때문에 실제결과와 약간의 차이를 보일 수밖에 없으며, 이를 개선하기 위한 프로그램 개선작업을 수행하고 있다.

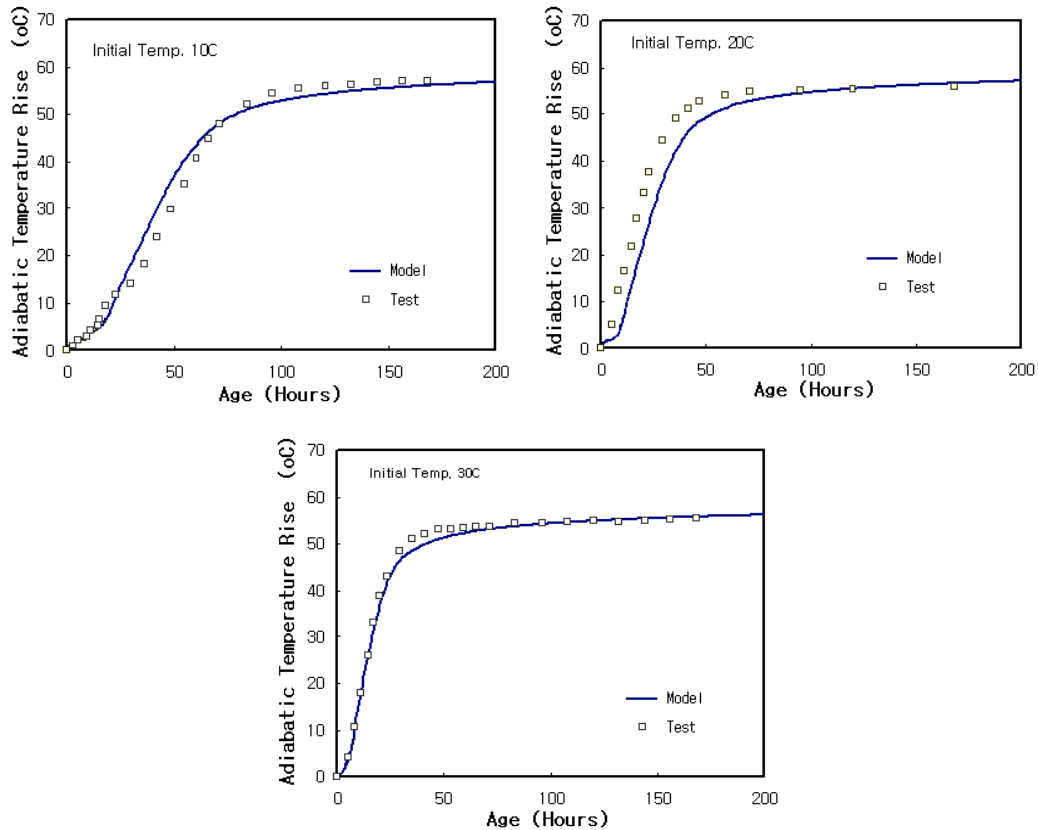


그림 2 단열온도상승치 (수화열 예측 모델 vs. 실험결과)

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 수화반응으로 인한 단열온도상승치 예측 프로그램을 개발하였으며, 기존의 실험결과와 좋은 상관성을 가짐을 보여주었다. 현재 보다 정확한 예측을 위하여 프로그램상에 적용한 모델식들의 검증 및 개선작업을 수행하고 있으며, 개발된 프로그램은 향후 콘크리트의 수화도 및 강도예측 모델 등의 활용 등에도 이용되어질 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 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*