

# 혼합시멘트 수화모델을 이용한 콘크리트의 단열온도상승 예측에 관한 연구

## The Evaluation of Adiabatic Temperature rise in Concrete by Using Blended Cement Hydration Model

왕 소 용\*                      조 형 규\*\*                      이 한 승\*\*\*

Wang, Xiaoyong              Cho, Hyeong-Kyu              Lee, Han-Seung

### Abstract

Granulated slag from metal industries and fly ash from the combustion of coal are industrial by-products that have been widely used as mineral admixtures in normal and high strength concrete. Due to the reaction between calcium hydroxide and fly ash or slag, the hydration of concrete containing fly ash or slag is much more complex compared with that of Portland cement. In this paper, the production of calcium hydroxide in cement hydration and its consumption in the reaction of mineral admixtures is considered in order to develop a numerical model that simulates the hydration of concrete containing fly ash or slag. The heat evolution rates of fly ash- or slag-blended concrete is determined by the contribution of both cement hydration and the reaction of the mineral admixtures. Furthermore, the temperature distribution and temperature history in hardening blended concrete are evaluated based on the degree of hydration of the cement and the mineral admixtures. The proposed model is verified through experimental data on concrete with different water-to-cement ratios and mineral admixture substitution ratios.

키 워 드 : 혼합시멘트, 수화모델, 단열온도상승  
Keywords : blended cement, hydration model, adiabatic temperature rise

## 1. 서 론

고로슬래그와 플라이애시는 산업 부산물로서 고성능 콘크리트와 고강도 콘크리트의 개발 및 내구성 향상을 위해 오랫동안 사용되어온 무기 혼화제이다. 또한 에너지 절약과 자원 보존측면에서 경제적이고 친환경적인 이점을 지니고 있다.<sup>1)2)</sup>

콘크리트의 시멘트 수화반응은 일반적인 열의 양을 고려한 발열과정으로 상대적으로 낮은 열 전도성을 가지고 있기 때문에 초고층 건축물의 초기 매스 콘크리트의 경우 표면과 가까운 부분에서는 급격한 온도 변화가 나타나게 되고, 중심부에서는 높은 온도를 기록하게 된다.

본 연구에서는 혼화제를 사용한 매스 콘크리트 구조물의 온도 변화로 인한 균열 발생 확률과 온도 응력을 평가하기 위하여 시멘트 수화반응 모델링을 통한 단열온도상승을 예측하고자 하였다.

Tomozawa의 모델을 기초로 하여 수화생성물과 자유수 사이 접촉되는 면과 면 사이 부분의 축소와 자유수의 감소로 인한 수화

반응율의 감소를 고려한 2 성분계 콘크리트의 미세 구조 수화모델을 구축하게 되었고, 구축한 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 통한 실험결과와 모델을 통한 예측결과를 비교하였다.

## 2. 포트랜드 시멘트의 수화모델

수화반응 모델은 식 (1)과 같다. 식 (1)은 단일 시멘트 입자의 수화반응 과정을 설명한 Tomozawa 모델을 기본으로 구축되었다. 이 모델은 시멘트 수화반응의 전체과정을 단일 속도 식으로 표현한 것으로, 수화반응의 진행으로 인한 시멘트 입자의 주위에 형성된 초기피막과 수화생성물은 외부의 물과 새롭게 형성된 수화 생성물 간의 상호 확산속도와 미 반응 시멘트입자의 표면에서의 화학반응속도에 의해 수화반응속도가 결정되는 것으로 가정하였다.

$$\frac{d\alpha^j}{dt} = \frac{3C_{w\infty}}{(\nu + w_{ag})r_0^j \rho} \frac{1}{\left(\frac{1}{k_d} - \frac{r_0^j}{D_c}\right) + \frac{r_0^j}{D_c}(1-\alpha^j)^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{k_r}(1-\alpha^j)^{-\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

$$k_d = \frac{B}{(\alpha^j)^{1.5}} + C(r_0^j - r_t^j)^4 \quad (2)$$

\* 한양대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사  
\*\* 한양대학교 일반대학원 건축환경공학과 박사과정  
\*\*\* 한양대학교 ERICA캠퍼스 건축학부 부교수, 공학박사, 교신저자  
(erclee@hanyang.ac.kr)

$$D_e = D_{e_0} \ln\left(\frac{1}{a^j}\right) \quad (3)$$

여기서,

- $a^j$  : 주어진 시멘트입자의 수화도
- $j$  : 단일시멘트입자
- $\nu$  : 화학량론비
- $w_{ag}$  : 물리적결합수
- $\rho$  : 시멘트의밀도
- $r_0^j$  : 미수화시멘트입자의반경
- $D_e$  : 수화생성물의수분유효확산계수
- $C_{w\infty}$  : 수량감소를적용한수화물밖의물의집중농도
- $k_r$  : 시멘트의 유효반응률
- $k_d$  : 잠복기반응계수
- $D_{e_0}$  : 초기발산계수

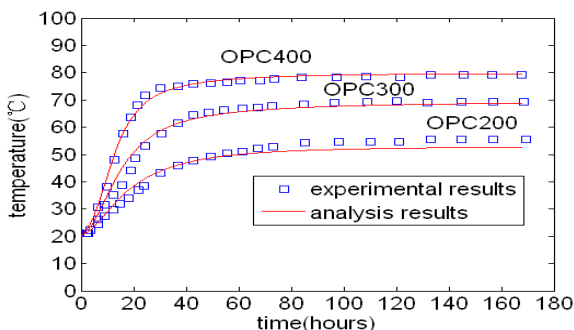
### 3. 혼화재 첨가 시멘트의 수화모델

본 예측 모델은 시멘트 수화반응과 혼화재의 반응 사이의 메커니즘과 유사하다. 두 반응 사이의 차이점을 고려한 혼화재의 반응을 시멘트 수화반응식으로부터 구축할 수 있었다. 플라이애시, 고로슬래그, 실리카 폼 혼합 시멘트의 수화반응 모델은 식 (4)와 같이 제안할 수 있다.

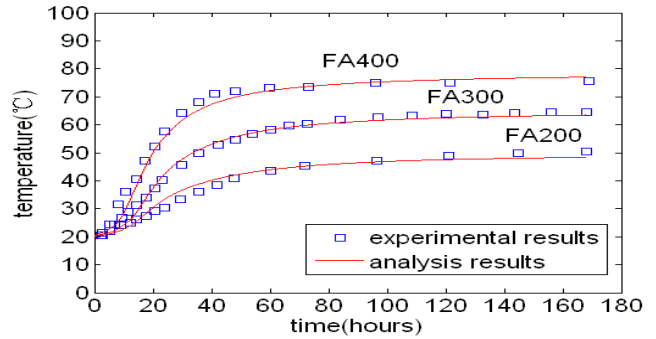
$$\frac{d\alpha_{FS}}{dt} = \frac{m_{CH}(t)}{P} \times \left[ \frac{w_{cap}}{w_0} \right]_{SL} \times \frac{3}{\nu_{FS} r_{FS} \rho_{FS}} \times \frac{1}{\left( \frac{1}{k_{dFS}} - \frac{r_{FS0}}{D_{eFS}} \right) + \frac{r_{FS0}}{D_e} (1 - \alpha_{FS})^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{k_{rFS}} (1 - \alpha_{FS})^{-\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

### 4. 콘크리트의 단열온도상승 예측

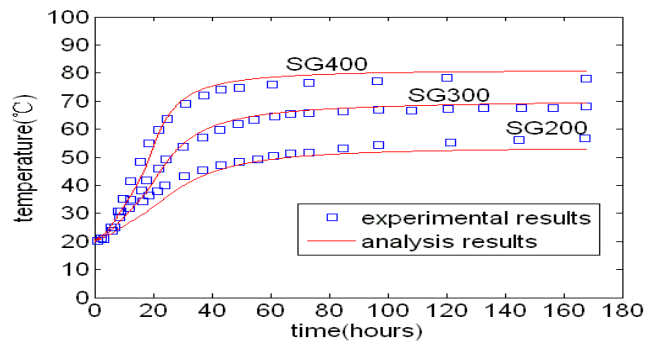
실험 결과와 단열온도상승 예측 값을 비교하여 그림 1에 나타내었고 물시멘트비가 낮을 때의 반응 완료시의 단열 온도 변화가 감소되는 것을 모델화 하였다.



a) OPC



b) FA



c) BS

그림 1. 단열온도상승 예측 및 실험결과 비교

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호 : 2010-0014051.

### 참고 문헌

1. Wang XY, Lee HS, A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash, Construction and Building Materials, Vol.23, No.2, pp.725~733, 2009
2. Wang XY, Lee HS, A model predicting carbonation depth of concrete containing silica fume, Materials and Structures, Vol.2, No.6, pp.691~704, 2009.4