

콘크리트 구성재료의 수화발열 및 열적특성을 고려한 단열온도상승 예측에 관한 연구

The estimation of adiabatic temperature rise of concrete considered hydration heat generation and thermal properties of constituents

손명수* 감석화** 이양수*** 박연동**** 김훈*****
Shon, Myung-Soo, Kang, Suck-Hwa, Lee, Yang-Soo, Park, Yon-Dong, Kim, Hoon

ABSTRACT

In this study, the estimation method of adiabatic temperature rise of concrete was developed by using hydration heat generation of mineral compounds of clinker and pozzolans. Specific heat considered the effects of mix proportion and temperature was calculated with experimental data. The adiabatic temperature rise calculated by developed method were compared with experiments in which many types of cement and admixtures were used. As the results of this study, it was found that the developed method could calculate adiabatic temperature rise of concrete accurately without the experiment.

1. 서론

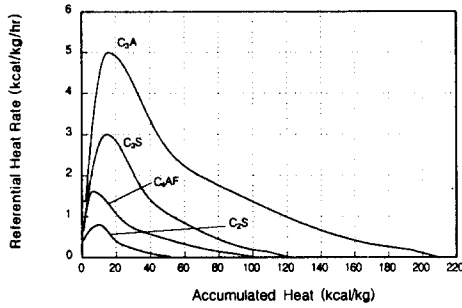
매스콘크리트 구조물의 수화열 해석에 사용되는 콘크리트의 단열온도상승식은, 직접 단열온도상승 실험을 실시하고 그 결과를 식 (1)과 같은 지수함수로 회귀분석하거나 기존에 제안된 모델식을 사용하여 최대상승온도(K)와 반응속도(α)를 이용한 지수함수의 형태로 사용하고 있다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

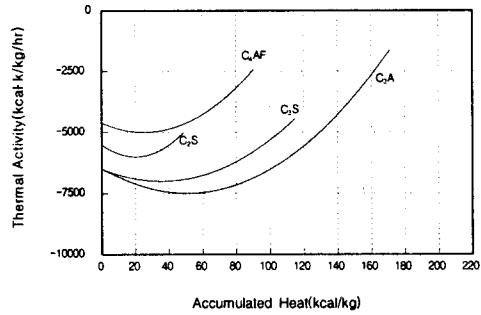
그러나, 수화열뿐만 아니라 강도와 내구성 등을 함께 고려하여야 하는 배합설계 단계에서의 모든 배합에 대하여 실험을 실시하는 것은 현실적으로 불가능하다. 즉, 콘크리트의 배합 및 열적특성을 고려하여 수화발열특성을 예측함으로써, 배합설계 단계에서부터 구조물의 강도와 내구성을 함께 고려할 수 있는 수화발열모델과 해석프로그램이 필요하게 되었다.

콘크리트의 수화발열속도를 시멘트의 광물조성비, 혼화제의 종류 및 특성과 치환율, 혼화제의 양과 자연특성 등과 같은 배합특성과 온도의존성을 함께 고려하여 정의한 Kishi¹⁾의 연구결과를 토대로, 각 광물의 온도활성모델과 광물조성비의 차이에 따라 수화발열특성이 달라지는 여러 시멘트의 수화발열

* 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 연구원
** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀장
*** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀 선임연구원
**** 정회원, 한국도로공사(주) 방화대교 현장
***** 정회원, 동양시멘트(주) 삼척공장 품질관리팀



(a) 기준발열속도



(b) 온도활성

그림 1 시멘트 4대 광물의 반응에 설정한 기준발열속도와 온도활성

모델을 수정하여 복잡하고 다양한 수화발열특성을 적절히 모사하는 복합수화발열모델을 제시하였다. 또한, 콘크리트의 배합 및 열적특성과 온도에 따라 달라지는 구성재료의 비열을 고려하여 콘크리트의 단열온도상승을 정확하게 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 단열온도상승시험을 통해 얻어진 실험 결과와 비교·검토를 실시하였다.

2. 콘크리트의 재료 및 열적특성을 고려한 복합수화발열모델

2.1 광물조성을 고려한 시멘트의 수화발열속도

본 연구에서 개발한 복합수화발열 모델에서 다루는 반응주체로는 알라이트(C_3S), 벨라이트(C_2S), 알루미네이트(C_3A) 및 페라이트상(C_4AF)의 각 클링커 광물을 반응주체로 하고 있으며, 발열속도 H 를 각 재료의 발열속도를 더한 식 (2)와 같은 형태로 가정하였다. 그리고, Kishi는 기준발열속도 모델을 적산발열량에 따라 1차함수로 설정한데 반하여, 본 연구에서는 광물조성비의 차이에 따른 변화를 고려하여 그림 1의 (a)와 같이 2차함수 및 지수함수의 형태로 수정하였다.

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

여기서, H_{C_3S} , H_{C_2S} , H_{C_3A} , H_{C_4AF} : C_3S , C_2S , C_3A 및 C_4AF 의 발열속도, H_{C_3AET} 및 H_{C_4AFET} 는 에트링자이트 생성 반응에 대한 발열속도이고, p_{C_3S} , p_{C_2S} , p_{C_3A} , p_{C_4AF} : C_3S , C_2S , C_3A 및 C_4AF 의 시멘트 전체에 대한 중량비를 나타낸다.

2.2 수화발열속도의 온도의존성

본 연구에서는 각 광물의 반응과정을 온도가 일정한 조건에서의 발열속도인 기준발열속도와 온도의존성을 고려한 온도활성의 두가지 특성치로 표현하였다. 직선적인 형태로 제안한 각 광물의 온도활성모델을 콘크리트의 단열온도상승 실험의 역해석으로 구해진 시멘트의 온도활성과 유사한 형태인 그림 1의 (b)와 같이 수정하여, 수화가 진행됨에 따라 감소하는 반응성을 적절히 모델링하였다. 그리고 자유수, 수산화칼슘농도 및 플라이애쉬와 유기혼화제의 반응지연효과 등의 상호의존성을 함께 고려하여 식 (3)과 같이 정식화하였다.

$$H_i = \gamma_i \cdot \beta_i \cdot \lambda_i \cdot \mu_i \cdot s_i \cdot H_{i,T_0}(Q_i) \exp\left\{-\frac{E_i(Q_i)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}, \quad Q_i \equiv \int H_i dt \quad (3)$$

여기서, E_i 는 광물 i 의 활성화에너지, R 은 기체상수, H_{i,T_0} 는 기준 온도 T_0 에서의 광물 i 의 기준발열 속도이고 적산발열량 Q_i 의 함수이다. $\gamma_i, \beta_i, \lambda_i, \mu_i, s_i$ 는 반응의 상호의존성을 나타내는 계수이다. 콘크리트 전체의 발열속도는 복합수화발열모델에서 주어진 시멘트 단위중량당의 반응속도에 단위시멘트량을 곱한 값으로 정의한다.

3. 콘크리트의 비열

콘크리트에 사용되는 물, 시멘트 및 골재 등은 비열값이 다르기 때문에 굵은골재의 종류가 달라지거나 물-시멘트비 및 단위 시멘트량이 달라지는 경우에는 콘크리트의 비열도 변화하게 된다. 또한 콘크리트의 비열은 온도가 증가함에 따라 2차함수의 형태로 증가한다. 본 연구에서는, Boulder Dam²⁾ 실험결과 및 예측 시스템을 응용하여 사용재료의 중량비를 이용한 콘크리트의 비열 예측식을 제안하고, 수화열 해석 프로그램에 정식화하였다. Boulder Dam 연구에서 제안한 기여도를 이용하여 온도에 따라 변화하는 각 재료의 비열을 식 (4)~(7)과 같이 2차함수로 설정하였고, 각각의 중량비를 곱하여 온도에 따른 콘크리트 비열 예측식을 식 (8)과 같이 제시하였다.

$$c_w = 1.0 \quad (4)$$

$$c_c = 1.890 \times 10^{-5} \cdot t^2 - 1.359 \times 10^{-4} \cdot t + 1.484 \times 10^{-1} \quad (5)$$

$$c_s = 1.157 \times 10^{-5} \cdot t^2 + 2.957 \times 10^{-4} \cdot t + 1.669 \times 10^{-1} \quad (6)$$

$$c_g = 1.337 \times 10^{-5} \cdot t^2 - 4.756 \times 10^{-4} \cdot t + 1.855 \times 10^{-1} \quad (7)$$

$$c_{con} = c_w \cdot p_w + c_c \cdot p_c + c_s \cdot p_s + c_g \cdot p_g \quad (8)$$

여기서, c_{con} : 콘크리트의 비열, c_w : 물의 비열, c_c : 시멘트의 비열, c_s : 잔골재의 비열, c_g : 굵은골재의 비열, t : 콘크리트의 온도(°C), p_w, p_c, p_s, p_g : 각각 물, 시멘트, 잔골재 및 굵은골재의 중량비이다. 시멘트 및 잔골재의 비열은 각각의 기여도를 회귀분석하여 설정하였으며, 굵은골재는 종류마다 기여도가 각각 다르므로 그 평균값을 회귀분석하여 설정하였다.

4. 단열온도상승량에 대한 해석치와 실험치의 비교

4.1 검증에 사용된 단열온도상승 실험자료

본 연구에서는 콘크리트의 단열온도 상승량에 대한 해석치와 실험치를 비교·검토하기 위하여 당 연구소에서 보유하고 있는 단열온도상승시험기(MIT-686-0 Concrete Calorimeter)에 의한 측정결과를 이용하였다. 비교·검토를 위해서는 표 1과 같이 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트로 고정된 상태에서 타설온도를 3종류, 단위시멘트량을 3종류로 변화시켜가면서 검증을 실시하였다. 검증에 사용된 시멘트의 광물조성 및 콘크리트 배합은 표 2 및 표 3과 같다.

표 1 단열온도상승실험의 변수

영향 인자	시멘트의 종류	타설온도(℃)	단위 시멘트량(kg/cm ²)
실험 변수	보통 포틀랜드 시멘트	10, 20, 30	200, 300, 400

표 2 단열온도상승실험에 사용한 포틀랜드 시멘트의 광물조성

종 류	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	석고	Blain 비표면적 (cm ² /g)
보통 포틀랜드 시멘트	47.2	27.0	10.4	9.4	3.9	3380

표 3 단열온도상승실험에 사용한 콘크리트의 배합

구 분	물-시멘트비 (%)	단 위 량 (kg/cm ²)				AE 감수제 (C×%)
		물	시멘트	잔골재	굵은골재	
OPC400	39.2	157	400	658	1129	0.25
OPC300	49.3	148	300	765	1129	0.25
OPC200	78.5	157	200	862	1089	0.25

4.2 해석치와 실험치의 비교 및 분석

본 연구를 통해 개발한 해석프로그램을 이용하여 계산한 값과 시험기를 통하여 측정한 결과를 비교하여 그림 1~3에 나타내었다. 단위 시멘트량이 200 kg/m³ 및 300 kg/m³인 경우에는, 타설온도에 관계없이 최종 온도상승량 뿐만 아니라 타설 후 1~2일에 발생하는 급격한 단열온도상승량의 변화를 매우 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

단위 시멘트량이 400 kg/m³인 경우에는, 타설온도에 따라 실험치와 해석치가 다소 오차를 나타내고 있다. 타설온도가 10℃ 및 20℃인 경우에 나타난 타설 후 1~2일에서의 온도차는 단위 시멘트량의 증가에 따른 초기 수화발열속도를 적절히 예측하기 못하여 나타난 결과로 판단된다. 타설온도가 30℃인 경우에 최종 온도상승량에서 나타나는 오차는, 수화발열량을 온도로 환산하기 위한 비열모델을 온도에 따른 2차함수로 설정하였기 때문에, 고온의 경우 비열값을 실제보다 높게 추정하여 상대적으로 낮은 온도증가량을 예측한 것으로 판단된다. 따라서, 타설온도가 높고 단위 시멘트량이 많은 경우에 대해서는 비열모델의 수정과 단위 시멘트량이 증가에 따른 영향을 추가적으로 고려하여야 할 것으로 판단된다.

일반적인 콘크리트 구조물의 경우에 최대온도상승은 타설 후 1~2일에 발생하고, 이때 발생하는 내·외부의 온도차이에 의해 콘크리트의 내부에는 압축응력이 발생하고 외부에는 인장응력이 발생하게 된다. 따라서, 수화열에 의한 균열을 방지하기 위해서는 구조물의 온도분포를 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하며 특히, 반응 초기의 급격한 온도상승을 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 실험결과와 비교·분석해 본 결과, 타설온도가 높고 단위 시멘트량이 많은 경우에 대하여 보완한다면, 본 연구에서 제안한 수화발열모델은 이와 같은 조건을 만족시키는 예측 모델이 될 것으로 판단된다.

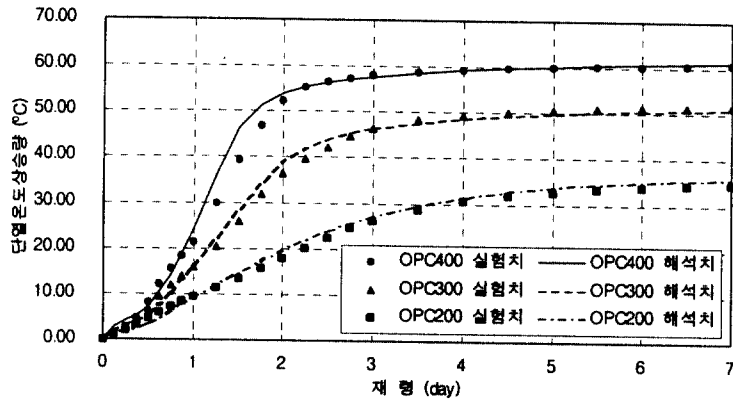


그림 2 타설온도 10°C인 경우의 해석치와 실험치의 비교

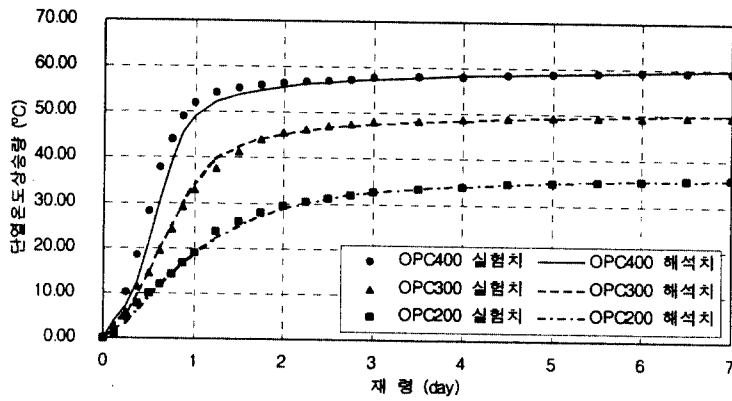


그림 3 타설온도 20°C인 경우의 해석치와 실험치의 비교

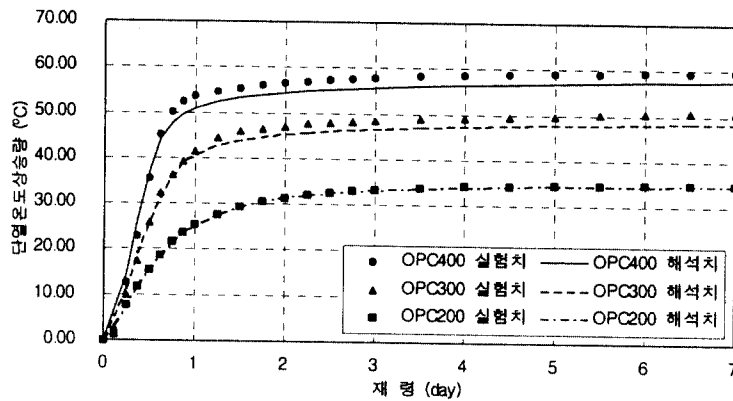


그림 4 타설온도 30°C인 경우의 해석치와 실험치의 비교

5. 결 론

콘크리트 구성재료의 수화발열 및 열적특성을 고려한 단열온도상승 예측에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 배합특성과 온도이력을 고려한 복합수화발열모델을 개발하여, 배합설계단계에서 고려할 수 있는 여러 가지 배합에 대하여 단열온도상승실험을 수행하지 않고서도 콘크리트의 수화발열량을 정확하게 예측할 수 있는 수법을 제시하였다.
- 2) 적산발열량에 따라 1차함수로 제안된 시멘트 각 광물의 기준발열속도 모델을 광물조성비의 차이에 따른 변화를 고려한 2차함수 및 지수함수의 형태로 수정하여, 각 광물간의 상호의존성을 적절히 모델링하였다.
- 3) 직선적인 형태로 제안된 각 광물의 온도활성모델을 콘크리트의 단열온도상승 실험의 역해석으로 구해진 시멘트의 온도활성과 유사한 형태로 수정하여, 수화가 진행됨에 따라 감소하는 반응성을 적절히 모델링하였다.
- 4) 수화발열과정동안 일정한 값으로 정의하여 사용하였던 콘크리트의 비열을, 배합특성과 콘크리트의 온도에 따라 적절하게 예측할 수 있는 수법을 개발하여, 콘크리트의 수화발열량을 정확하게 예측하였다.

참 고 문 헌

1. Kishi, T., Maekawa, K., "Hydration heat model for blended cement including blast slag and fly ash", 하이パフォーマンス콘크리트의細孔組織構造と初期反應力に對する養生効果評價法, 平成7年度, No. 06555125, 1996, pp.79~88
2. U.S. Bureau of Reclamation, "Thermal Properties of Concrete," Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII-Cement and Concrete Investigations, Bulletin 1, U. S. Bureau of Reclamation, 1949, pp. 29-59.
3. 細谷繁好, 松原 篤, "水和初期におけるセメントの水和熱とコンクリートの斷熱溫度上昇について", セメント技術年報, 第24號, 1970, pp.120~125
4. 佐藤英明, 佐谷靖朗, "マスコンクリートの溫度應力に關する研究", 熊谷技報 第33號, 1983, pp.35~49