

# 열적성질을 고려한 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구

## The Effect of Thermal Properties on Temperature Development of Concrete

손명수*	박연동**	김 훈*
Shon, Myung-Soo,	Park, Yon-Dong,	Kim, Hoon
김호영*	이양수**	강석화***
Kim, Ho-Young,	Lee, Yang-Soo,	Kang, Suck-Hwa

---

### ABSTRACT

In this study, a predictive method which was modified from Kishi's model for the temperature development of concrete was developed by using mineral compounds of clinker and pozzolans. Temperature dependent heat generation of reaction was also considered. Specific heat considering the effect of mix proportion and temperature was calculated with experimental data in the literatures. Thermal conductivity considering the effect of mix proportion and temperature was experimentally investigated.

Through this research it was found that the developed method considering thermal properties accurately predicted adiabatic temperature rise of concrete without the experiment. It was also found that the thermal conductivity of concrete could be predicted by the volume ratio of each component of mix proportion and was independent of temperature within the normal climatic range.

---

### 1. 서론

기존의 온도해석에서는 콘크리트의 단열온도상승실험 결과를 기초로 구조물의 모든 지점에서 동일한 형태의 수화발열이 진행되는 것으로 가정하고 있다. 그러나 실제 구조물에서는 각 부위의 온도이력이 단열상태와는 다르므로, 보다 근사한 온도해석 결과를 얻기 위해서는 각 부위마다 실제와 동일한 상태에서 실험을 실시하고 그 결과를 해석에 이용하여야 한다. 그러나 모든 지점에 대하여 수화발열실험을 실시하기 어렵고, 특히 수화열뿐만 아니라 강도와 내구성 등을 함께 고려하여야 하는 배합설계단계에서는 모든 배합에 대하여 실험을 실시하는 것이 현실적으로 불가능하다. 즉, 배합특성과 온도이력에 따른 수화발열특성을 모사할 수 있는 수화발열모델과 해석프로그램이 필요하다.

콘크리트의 수화발열속도를 시멘트의 광물조성비, 혼화재료의 종류 및 특성과 치환율, 혼화제의 양

---

\* 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구실 연구원

\*\* 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구실 선임연구원

\*\*\* 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구실장

과 지연특성 등과 같은 배합특성과 온도의존성을 함께 고려하여 정의한 Kishi의 연구결과를 토대로, 콘크리트의 복잡하고 다양한 수화발열특성을 적절히 모사하는 복합수화발열모형을 제시하였다.<sup>(1)</sup> 아울러 콘크리트 온도해석에 필수적인 열특성치를 수화과정동안 일정한 값으로 정의하는 이제까지의 방법과는 달리 배합비와 온도를 고려한 열특성치를 제안하므로써 실제 구조물과 근사한 해석을 수행할 수 있게 하였다.

## 2. 콘크리트의 재료 및 열특성을 고려한 복합수화발열모형

### 2.1 광물조성을 고려한 시멘트의 수화발열속도

복합수화발열 모델에서 다루는 반응주체로는 알라이트( $C_3S$ ), 벨라이트( $C_2S$ ), 알루미늄네이트( $C_3A$ ) 및 페라이트상( $C_4AF$ )의 각 클링커 광물과, 혼화재료인 고로슬래그( $SG$ ) 및 플라이애쉬( $FA$ )를 적용하였다. 따라서 혼화재료를 포함시킨 결합재 전체의 발열속도  $H$ 는, 각 재료의 발열속도를 더하여 다음과 같이 나타낸다.

$$H = \rho_{C_3A}(H_{C_3AET} + H_{C_3A}) + \rho_{C_4AF}(H_{C_4AFET} + H_{C_4AF}) + \rho_{C_3S}H_{C_3S} + \rho_{C_2S}H_{C_2S} + \rho_{SG}H_{SG} + \rho_{FA}H_{FA} \quad (1)$$

### 2.2 수화발열속도의 온도의존성

각 광물의 반응과정을 온도가 일정한 조건에서의 발열속도인 기준발열속도와 온도의존성을 고려한 온도활성의 두가지 특성치로 표현하였다. 그리고 자유수, 수산화칼슘농도 및 플라이애쉬와 유기혼화제의 반응지연효과등의 상호의존성을 함께 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$H_i = \gamma_i \cdot \beta_i \cdot \lambda_i \cdot \mu_i \cdot s_i \cdot H_{i,T_0}(Q_i) \exp\left\{-\frac{E_i(Q_i)}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}, \quad Q_i \equiv \int H_i dt \quad (2)$$

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

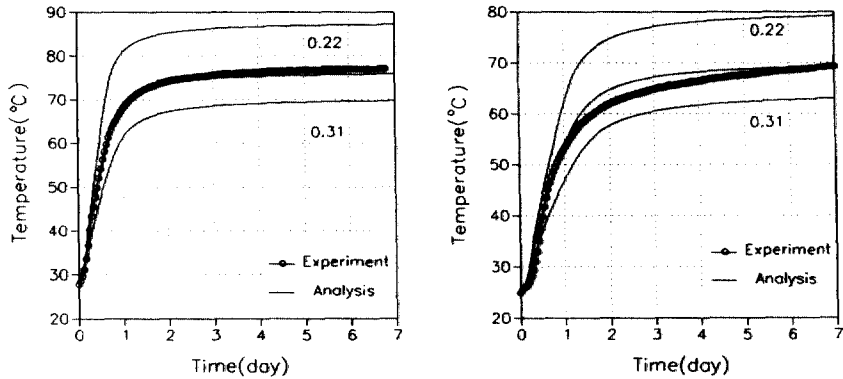
## 3. 콘크리트의 열특성치

### 3.1 비열

일반적인 콘크리트의 비열은  $0.22 \sim 0.31(\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 로 사용재료의 종류와 양뿐만 아니라, 수화열에 의한 온도변화에 의해서도 달라진다. 표1은 각 재료의 비열( $27^\circ\text{C}$ )을 나타내고 있다. 기존 연구결과<sup>(2)</sup>에 의하면, 콘크리트의 비열은 온도에 대하여 선형적으로 증가하며 그 변화율이 약  $0.837 \times 10^{-3}$ 인 것으로 나타나 있다. 따라서, 콘크리트의 비열을 시멘트(c), 물(w), 잔골재(s) 및 굵은골재(g)의 중량비를 이용하여 아래의 식 (3)과 같이 나타내었다.  $c_{p,com}$ 은 배합비에 따른 콘크리트의 비열이다.

$$c_{p,T} = 0.837 \times 10^{-3} (T - T_d) + c_{p,com} \quad (3)$$

여기서,  $c_{p,com} = \sum_i \omega_i c_{p,i}$ ,  $c_{p,i}$ ,  $\omega_i$ 는 각 재료의 비열과 중량비이고,  $T_d = 27^\circ\text{C}$  이다.



a) 보통 포틀랜드 시멘트                      b) 5종 포틀랜드 시멘트  
 그림 1. 단열온도상승에 대한 비열의 영향

그림1은 일반적으로 사용하고 있는 비열값(0.22~0.31)을 수화과정동안 일정하게 가정하였을 때와 배합비와 온도의 영향을 고려하였을 때의 단열온도상승을 비교하고 있다. 0.22와 0.31의 값으로 일정하게 가정한 경우, 최대온도점의 차이가 약 17~19℃로 나타나 매우 큰 범위의 오차가 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 그에 비하여 본 연구에서 제안된 식을 이용하는 경우에는 실험값과 매우 근사한 결과를 나타내고 있다.

### 3.2 열전도율

일반적으로 2.15~2.51(kcal/m · hr · ℃)의 범위를 가지는 콘크리트의 열전도율의 배합특성에 따른 변화를 파악하기 위하여 여러 가지 배합의 콘크리트에 대하여 열전도율을 측정하고, 배합비에 따른 콘크리트의 열전도율 예측식을 제안하였다.

#### 3.2.1 실험방법

콘크리트의 배합특성에 따른 열전도율의 변화를 분석하기 위하여 표3에 나타난 배합비를 사용하였다. 열전도율을 측정하기 위하여 사용된 기기는 Kemterm QTM-D3이다. 열전도율에 대한 온도의 영향을 파악하기 위하여 제작된 공시체를 10, 23, 40℃의 항온조에 투입하여 측정하였다. 실험에서 고려한 변수는 콘크리트의 물-시멘트비, 잔골재율, 페이스트의 단위용적 및 혼화재료의 치환율이다.

표 1. 콘크리트에 사용되는 각 재료의 비열

Material	Temperature(℃)	Specific Heat(kcal/kg · ℃)
Water	27	0.993
Cement	-	0.22
Granite	27	0.185
Sand	27	0.191

표 2. 각 재료의 열전도율

Material	Thermal conductivity(kcal/m · hr · °C)
Water	0.430
Cement	1.118
Slag	0.894
Fly ash	1.006
Granite	4.450
Sand	2.666
Air	0.0258

표 3. 열전도율 실험 배합표

Parameter, kg/m <sup>3</sup>	Mix number												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Water	180	150	210	180	180	150	210	175	169.2	163.1	179.1	178.2	177.3
Cement Type I	360	454	266	360	360	300	420	301	236	165	290	219	147
Slag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69	137	207
Fly ash	0	0	0	0	0	0	0	49	102	161	0	0	0
Fine agg.	806	806	806	1006	606	865	747	805	806	806	805	806	806
Coarse agg.	950	950	950	750	1150	1019	881	950	950	950	950	950	950

### 3.2.2 실험결과 및 분석

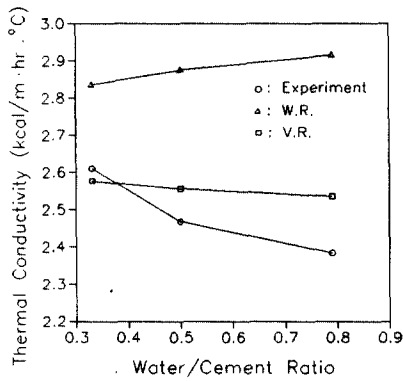
그림2는 배합특성에 따른 콘크리트의 열전도율 변화를 나타낸 것으로, 콘크리트의 열전도율은 페이스트의 부피가 일정할 때 물-시멘트비에 반비례하고, 골재의 부피가 일정할 때 잔골재율에 반비례하였으며, 물-시멘트비와 잔골재율이 일정할 때 페이스트의 단위용적에 따른 열전도율 변화는 거의 없다. 그리고, 혼화재료인 플라이애쉬와 슬래그가 첨가된 경우에는, 치환율이 증가할수록 열전도율은 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 온도영향에 대한 실험결과에서, 콘크리트의 열전도율은 10~40°C 범위에서는 온도에 대한 의존성이 나타나지 않았다.

실험결과를 바탕으로 콘크리트의 배합비에 따라 열전도율을 예측하기 위하여 각 재료의 비열과 단위용적을 이용한 식 (4)를 제안하였다<sup>(3)</sup>. 기존의 연구에서는 콘크리트의 열전도율도 비열과 마찬가지로, 각 재료의 중량비로 계산하여 사용하고 있다<sup>(4)</sup>. 비열은 단위중량을 단위온도만큼 증가시키는데 필요한 열량으로 각 재료의 중량비를 이용하여 콘크리트의 비열을 구하는 것이 타당하지만, 열전도율은 단위길이당 단위온도차에 의한 열량의 이동속도이므로, 각 재료의 부피비를 이용하여 콘크리트의 열전도율을 구하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

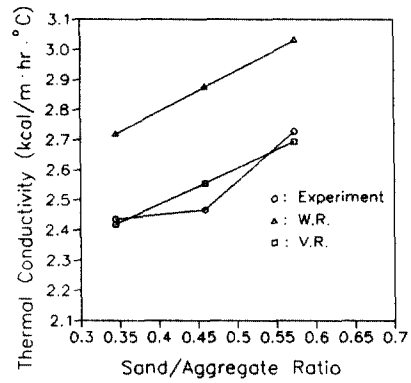
$$\lambda_{con} = \sum_i v_i \lambda_i \quad (4)$$

여기서,  $\lambda_i$ 는 콘크리트 및 각 재료의 열전도율,  $v_i$ 는 각 재료의 부피비이다.

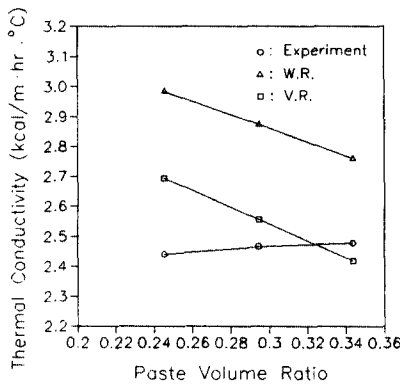
그림2는 중량비에 의한 예측값 및 본 연구에서 제안한 부피비에 의한 예측값을 실험값과 비교한 것이다. 그림2에서 보는 바와 같이, 부피비에 의한 예측값은 실험값과 유사한 결과를 나타내고 있으나, 중량비에 의한 예측값과는 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구에서 제안한 부피비에 의한 예측식은 물-시멘트비와 잔골재율의 경우에서 실험값에 비교적 근사한 예측을 하고 있으나 페이스트의 단위용적, 플라이애쉬 및 슬래그 치환율에 대해서는 약간의 오차를 가지는 것으로 나타났다.



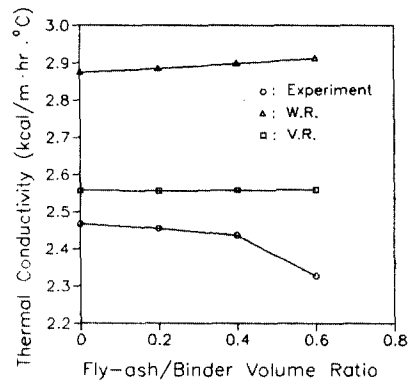
a) 물-시멘트비



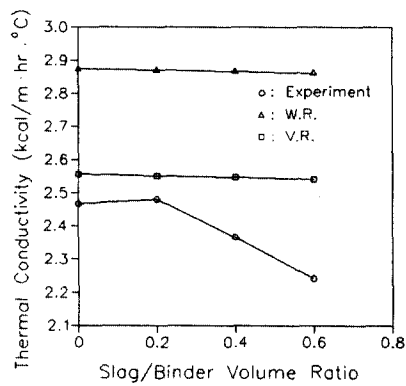
b) 잔골재율



c) 페이스트 부피비



d) 플라이애쉬 치환율



e) 슬래그 치환율

그림 2. 열전도율 실험값과 중량비와 부피비에 의한 예측값의 비교

#### 4. 결 론

열적성질을 고려한 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트의 배합특성과 온도이력을 고려한 복합수화발열모델을 콘크리트의 수화열해석에 사용함으로써, 배합설계단계에서 고려할 수 있는 여러 가지 배합에 대한 실험을 수행하지 않고 콘크리트의 구조물의 수화열 해석을 수행할 수 있는 방법을 제시하였다.
- 2) 수화과정동안 일정한 값으로 정의하여 사용하였던 콘크리트의 비열율, 배합특성과 콘크리트의 온도에 따라 적절하게 예측할 수 있는 수법을 개발하여, 콘크리트의 단열온도상승을 보다 정확하게 예측할 수 있었다.
- 3) 물-시멘트비, 잔골재율, 페이스트 부피비, 혼화재료 치환율에 따른 콘크리트의 열전도율 변화를 파악하기 위하여 여러 가지 배합의 콘크리트에 대하여 열전도율 실험을 실시하고, 각 구성재료의 부피비를 이용한 콘크리트 열전도율 예측식을 제안하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Kishi, T., Maekawa, K., "Hydration heat model for blended cement including blast slag and fly ash", 하이퍼퍼포먼스콘크리트의細孔組織構造と初期反應力に對する養生效果評價法, 平成7年度, No. 06555125, 1996, pp.79~88
2. 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
3. Mindess, S., Young, J. F., "concrete", Prentice-Hall, 1981, p.522
4. 佐藤英明, 佐谷靖朗, "マスコンกรีートの溫度應力に關する研究", 熊谷技報 第33號, 1983, pp.35~49