

콘크리트 구조물의 온도분포에 미치는 영향요소

김 진 근(한국과학기술원 토목공학과 교수)

1. 서 언

시멘트를 재료로 하여 제조되는 콘크리트는 여러 가지 장점을 갖고 있기 때문에 널리 사용되고 있으나, 균열이 쉽게 발생된다는 큰 단점을 갖는 재료이기도 하다. 이 글에서는 시멘트의 수화열에 의해 콘크리트 구조물에 균열을 발생시키는 영향요소들에 대하여 기술하고자 한다.

수화열에 의해 콘크리트 구조물에 균열이 항상 발생하는 것은 아니므로 최근까지 큰 관심의 대상이 되지 못하였다. 그러나 고강도 콘크리트의 사용으로 단위시멘트량의 증가, 대형 콘크리트 구조물의 빈번한 건설, 강도에만 관심을 갖는 설계자 및 시공자의 고정관념 등으로 수화열에 의한 초기 균열이 심각하게 나타나고 있다. 수화열에 의해 초기에 발생한 균열은 구조물의 안전성뿐만 아니라 내구성과 사용성에도 악영향을 미치므로 수화열에 대한 이해를 깊이하여 콘크리트 구조물의 균열 발생을 억제하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 콘크리트 구조물의 온도분포에 미치는 제 요소에 대한 이해가 선행되어야 한다.

2. 콘크리트 수화열의 영향 인자

시멘트가 물과 완전히 반응하면 발열 화학 반응에 의해 120cal/g 정도의 열이 발생하고, 콘크리트의 열전도율이 상대적으로 낮기 때문에 수화열은 매스 콘크리트에서의 내부온도를 상승시켜 내외부 온도 차이를 갖게 됨으로써 콘크리트의 균열발생 가능성을 높인다. 이 때 매스콘크리트의 온도상승 예측을 위해 단열온도상승 시험법이 널리 사용되고 있으며, 일반적으로 <식-1> 또는 <식-2>와 같은 지수형태의 함수로 나타낸다.

$$T = K [1 - e^{-\alpha t}] \quad \text{<식-1>}$$

$$T = K [1 - e^{-\alpha(t-t_0)}] \quad \text{<식-2>}$$

여기서, T : 시간 t 에서의 단열온도상승값(°C), K : 최대 단열온도상승값(°C), α : 반응속도, t : 재령(일), t_0 : 지연재령(일)이다.

지금까지 연구되어 온 결과에 따르면, 많은 요인이 콘크리트 단열 온도상승에 영향을 미치지만 시멘트 종류, 단위시멘트량, 콘크리트 타설온도 등의 세 가지 요인이 지배적이며, 이러한 세 가지 요인에 추가하여 혼화재료, 시멘트 분말도, 골재의 열특성, 단열온도 시험장치 등의 영향도 상당히 있다고 밝혀지고 있다. 이러한 각 요인의 영향에 대한 실험결과에 의해 나타난 사항을 간략히 기술하면 다음과 같다.

가. 시멘트 종류

시멘트의 수화열은 시멘트 구성성분에 의해 결정되며, 시멘트를 구성하는 주요 성분에 대한 수화열을 구하여 시멘트의 최종 수화열량을 예측할 수 있다. 즉 화학성분비가 다른 각종 시멘트는 서로 다른 수화발열량 및 반응속도를 나타내며, 동일 배합의 콘크리트라 하더라도

콘크리트의 단열온도상승량은 시멘트 종류에 따라 차이가 나게 된다. <표 1>은 각종 시멘트의 시간에 따른 수화열을 나타낸 한 예이다.

<표-1> 각종 시멘트의 수화열

시멘트 종류	수 화 열 (cal/g)						
	3 일	7 일	28 일	3 개월	1 년	6.5 년	13 년
보통	60.9	79.2	95.6	103.8	108.6	116.8	118.2
조강	75.9	90.6	101.6	106.8	114.2	120.6	120.6
중용열	46.9	60.9	79.6	88.1	95.4	98.4	100.7
플라이애쉬(B)	49.0	63.1	77.9	83.0	-	-	-

<표-1>에서 알 수 있는 바와 같이 보통포틀랜드시멘트의 수화열은 조강포틀랜드시멘트에 비해 초기발열속도가 느리지만 장기적인 수화열은 거의 차이가 없음을 나타내고 있다. 이에 비해 중용열포틀랜드시멘트나 플라이애쉬시멘트는 수화열과 발열속도가 보통포틀랜드시멘트보다 낮게 나타난다.

나. 단위시멘트량

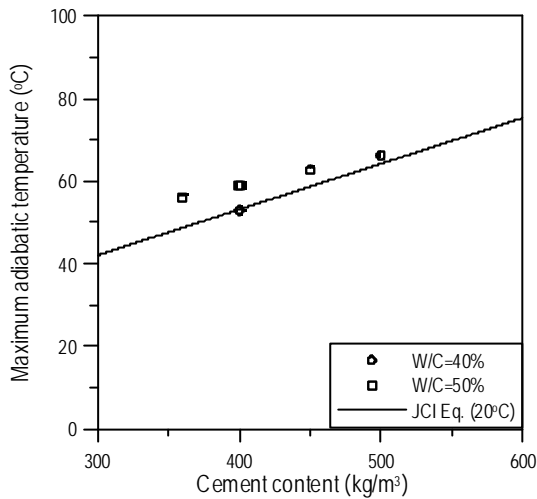
콘크리트 수화열에 의한 온도상승의 원인이 되는 시멘트 수화반응 열량은 콘크리트 배합의 단위시멘트량에 직접적인 영향을 받는다. 예를 들면, 동일 종류의 시멘트에 있어서도 제 품에 따라 편차는 있으나, 일본의 塚山에 의한 실험 결과에 따르면 타설온도 20℃의 경우 단위시멘트량 10kg/m³ 증가에 따라 최대 온도가 보통포틀랜드시멘트에서 1.1℃, 중용열포틀랜드시멘트에서 0.75℃, 플라이애쉬시멘트(B)에서 1.6℃, 고로시멘트(B)에서 1.3℃ 증가함을 보이고 있다. 한편 일본 콘크리트 공학협회의 온도응력 연구위원회에서는 수화열에 관한 기존 실험자료들을 분석하여 <표-2>와 같은 식을 제안하고 있으며, <표-2>에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 최대 단열온도상승값(K)과 반응속도(α)는 단위시멘트량(C)에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

<표-2> 콘크리트의 최대 단열온도상승값(K)과 반응속도(α)

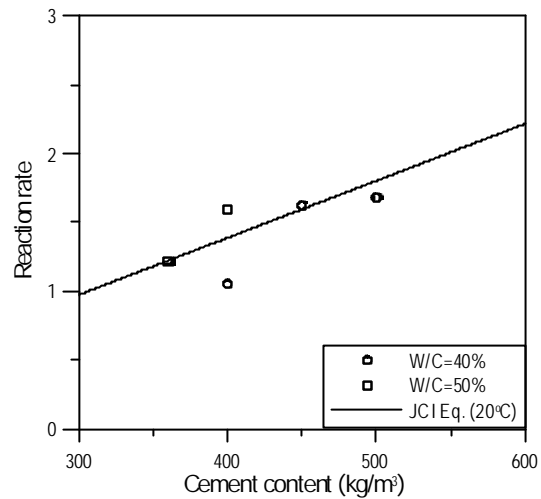
시멘트종류	K	α	주변온도
보 통	$K = 0.0831 C + 17.48$	$\alpha = 0.00174 C + 0.097$	10℃
	$K = 0.1108 C + 8.86$	$\alpha = 0.00415 C - 0.271$	20℃
	$K = 0.0961 C + 9.96$	$\alpha = 0.00624 C - 0.499$	30℃
중용열	$K = 0.0753 C + 10.24$	$\alpha = 0.000919 C + 0.377$	20℃
고 로	$K = 0.1299 C - 0.56$	$\alpha = 0.00174 C + 0.236$	
플라이애쉬(B)	$K = 0.1587 C - 7.18$	$\alpha = 0.00286 C - 0.081$	

한편, 국내 시멘트의 경우 단위시멘트량에 따른 최대 단열온도상승값과 반응속도를 분석한 결과 <그림-1>에 보인 바와 같은 결과를 보였다. <그림-1> (a)와 (c)에서 나타난 바와 같이 최대 단열온도상승값은 물/시멘트비에 상관없이 단위시멘트량이 증가함에 따라서 증가하고 있다. 이러한 경향은 일본콘크리트공학협회가 보통포틀랜드시멘트에 적용하기 위해 제안한 식(<표 2>참조, 20℃)과 잘 일치하고 있으며, 실험결과에 의하면 이 제안식은 1종 시

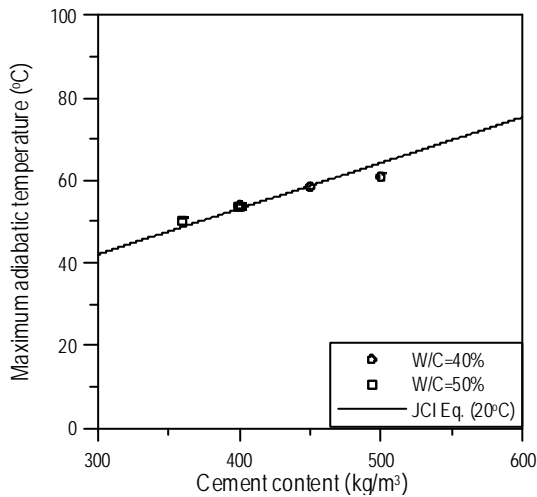
멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값뿐만 아니라 5종 시멘트 콘크리트의 실험결과와도 일치하고 있다. 따라서 이 모델식은 단위시멘트량에 따른 5종과 1종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값의 변화를 잘 묘사하고 있다고 볼 수 있다. <그림-1> (b)와 (d)는 단위시멘트량에 따른 반응속도의 변화 양상을 나타낸 그림이다. 앞의 최대 단열온도상승값의 경우와 같이 그 경향이 일본콘크리트공학협회의 제안식과 유사하다. 다만 5종 시멘트 콘크리트의 반응속도가 1종 시멘트 콘크리트보다 전체적으로 작은 값을 나타내고 있다.



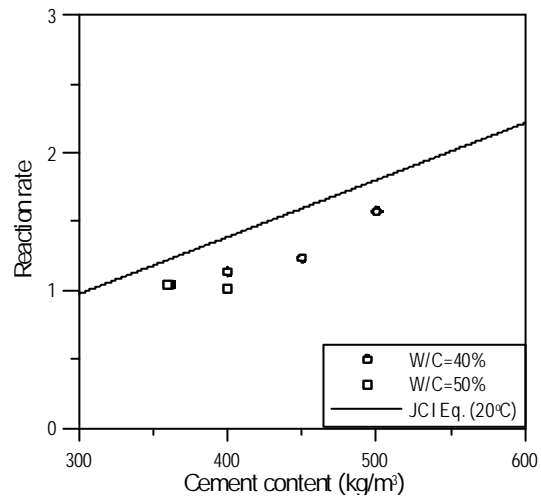
(a) 1종 시멘트의 최대 단열온도상승값의 변화



(b) 1종 시멘트의 반응속도의 변화



(c) 5종 시멘트의 최대 단열온도상승값의 변화



(d) 5종 시멘트의 반응속도의 변화

<그림-1> 콘크리트의 최대 단열온도상승값과 반응속도

다. 혼화재료

콘크리트의 시공성 향상을 위해 사용되는 유동화제, 지연제와 같은 혼화제는 수화반응을 일시적으로 억제하거나 지연시키므로 혼화제가 첨가되지 않은 콘크리트의 단열온도상승 특성과는 다른 양상을 나타낸다. 따라서 이러한 혼화제를 사용하는 경우에는 수화반응의 지연 효과를 고려할 수 있는 단열온도상승곡선이 채택되며, 일반적으로 앞의 <식-2> 또는 다음

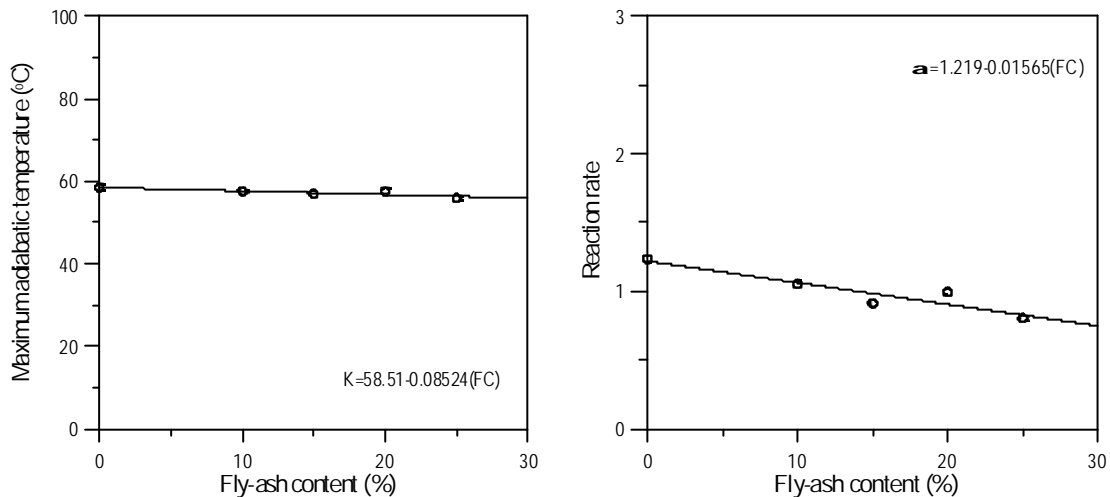
<식-3> 과 같이 지연시간(t_0)을 고려하는 식이 사용된다.

$$T = K [1 - e^{-\alpha(t-t_0)^n}] \quad \text{<식-3>}$$

여기서, β 는 실험변수이다.

한편 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카폼과 같이 일정 시멘트 대체 결합재로서 사용되는 혼화재는 단위시멘트량 감소에 따른 수화열의 저감효과로 인하여 최대 단열온도상승값과 반응 속도에 영향을 주며, 혼화재 혼입율이 증가할수록 두 값이 저하하는 경향을 나타낸다.

<그림-2> (a)와 (b)를 보면 플라이애쉬의 대체율에 따라서 최대 단열온도상승값과 반응 속도는 감소하는 것으로 나타나는데, 이러한 감소 경향은 최대 단열온도상승값의 변화에서 보다 반응속도의 변화에서 뚜렷히 나타나고 있다⁽³⁾. 이를 통하여 플라이애쉬의 첨가는 반응 속도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) 최대 단열온도상승값의 변화

(b) 반응속도의 변화

<그림-2> 플라이애쉬 대체율에 따른 최대 단열온도상승값과 반응속도

라. 콘크리트 타설온도

시멘트의 수화반응은 주변 온도에 크게 영향을 받으며, 주변 온도가 높을수록 수화 반응 속도는 빨라진다. 따라서 콘크리트의 타설온도가 높아질수록 초기의 콘크리트 온도상승은 커지게 된다(<표-2> 참조). 일반적으로, 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트에 대하여 타설온도를 변화시켜 가며 측정한 단열온도상승 시험결과에 따르면, 최대 단열온도상승값은 타설온도가 높아지면 오히려 감소하지만, 반응속도는 온도에 비례하여 증가함을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 타설온도가 높을수록 초기의 수화반응이 활성화되어 온도 상승은 빠르게 되지만 시멘트 입자 주위의 결정이 초기에 두꺼워져 시멘트 입자의 완전한 수화반응이 저해되기 때문에 최대 단열온도상승값은 오히려 낮은 값을 나타내는 것이다. 한편 초기 단열온도 상승속도가 증가할수록 온도 강하시의 탄성계수의 차이가 커져 초기 온도균열 발생 확률이 커지므로 실제 시공에 있어서는 타설온도에 대하여 세심하게 배려할 필요가 있다.

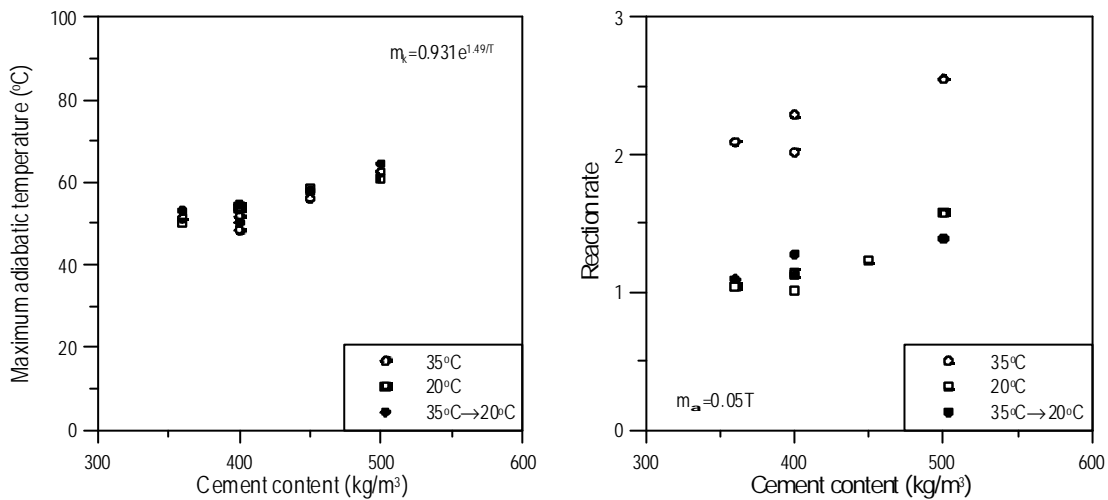
타설온도의 영향을 알아보기 위하여 35℃와 20℃의 타설온도를 갖는 5종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값과 반응속도를 비교하였다. 실험결과에 의하면 타설온도가 높아지면

최대 단열온도상승값은 감소하고 반응속도는 증가하며, 반응속도의 변화가 최대 단열온도상승값의 변화에 비해 큰 것으로 나타났다(<그림-3>(a),(b)). 이러한 결과는 이론적인 예상치와 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 <그림-3>에서 보는 바와 같이 타설온도 35°C 인 실험 결과를 최대 단열온도상승값과 반응속도의 보정식¹⁰⁾인 다음 <식-4, 5>를 이용하여 타설온도 20°C로 보정한 값은 타설온도 20°C의 실험값과 서로 유사하다는 것을 알 수 있다.

$$m_k = 0.931 e^{1.49/T} \quad \text{<식-4>}$$

$$m_a = 0.05 T \quad \text{<식-5>}$$

여기서, T 는 콘크리트의 타설온도이다.



(a) 최대 단열온도 상승값의 변화
(b) 반응속도의 변화
<그림-3> 타설온도(20, 35°C)에 따른 최대 단열온도상승값과 반응속도

마. 분말도

시멘트의 수화반응은 시멘트 입자와 배합수와의 접촉에 의해 이루어지는 것으로 배합수와 접촉하는 시멘트의 표면적이 증가할수록 수화반응속도는 증가한다. 즉 시멘트의 분말도가 클수록 배합수와 접촉하는 면적이 증가되므로 시멘트의 분말도에 비례하여 수화반응속도가 증가하게 된다. 특히 분말도의 효과는 초기수화반응에 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. ACI 207 위원회 보고에 의하면 동종의 시멘트에서도 분말도의 정도에 따라 수화발열속도가 크게 다른 것을 지적하고 있다.

3. 온도분포의 영향 인자

시멘트 수화반응에 의해 매스 콘크리트 부재내에 축적되는 열에너지는 매질내의 열전도, 서로 다른 매체간의 열전달과 열복사의 과정을 거치면서 열의 흐름이 안정되는 정상상태에 이를 때까지 전달되어 간다. 이러한 정상상태에 이르기 전 단계인 비정상 상태하에서는 콘크리트 각 부분의 열량 차이에 의해 온도가 서로 다르게 되어 동일 단면내의 온도분포가 변화하게 된다. 따라서 매스 콘크리트 구조물의 온도분포를 파악하기 위해서는 위에서 언급한

열전도, 열전달 및 열복사의 과정에 대한 정확한 이해가 필요하다.

열해석을 위해 사용되는 등방성 재료의 비정상 열전도 방정식은 <식-6>과 같이 표현되며, 각 부분의 온도변화는 콘크리트의 열전도율(λ), 비열(c), 밀도(ρ) 및 발열율(\dot{Q})에 의해 영향을 받는다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad \text{<식-6>}$$

여기서, T : 온도(°C), λ : 열전도율(kcal/m·hr·°C), c : 비열(kcal/kg·°C), ρ : 밀도(kg/m³), \dot{Q} : 단위시간, 단위체적당 공급되는 열량(발열율) (kcal/m³·hr)이다.

한편 콘크리트 부재의 표면과 접하는 경계면에서는 열전달과 열복사에 의한 열유속(heat flux)이 발생하며, 이러한 열유속은 <식-7>에 의해 나타낼 수 있다.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{<식-7>}$$

여기서, q : 단위시간, 단위면적당 이동되는 열량(열유속) (kcal/m²·hr), n : 외향법선이다.

이러한 열유속은 외기대류와 열복사에 의해 발생하기 때문에 식 (8)과 같이 외기대류(q^a)와 열복사(q^r)의 합 형태로 표현되고, 외기대류와 열복사는 각각 <식-9, 10>과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = q^a + q^r \quad \text{<식-8>}$$

$$q^a = h_a \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_a} = h_a (T_\infty - T_s) \quad \text{<식-9>}$$

$$q^r = \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_s^4) \quad \text{<식-10>}$$

여기서, q^a : 외기와 대류면(Γ_a)에 작용한 열흐름(kcal/m²·hr), q^r : 외기와 복사면에 작용한 열흐름(kcal/m²·hr), h_a : 외기대류계수(kcal/m²·hr·°C), T_s : 외기대류가 발생하는 지점의 절점온도(°C), T_∞ : 외기의 온도, ε : 표면의 방사율, σ : Stefan-Boltzmann 상수 (= 4.8×10^{-8} kcal/m²·°C⁴·hr)이다.

이상에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 열특성 값인 열전도율, 비열, 외기대류계수 등은 콘크리트 부재의 온도분포에 큰 영향을 미치므로, 정확한 온도해석을 위해서는 해석에 앞서 콘크리트의 열특성 값을 조사하여 둘 필요가 있다. 각 열특성 값의 특성에 대해 세부적으로 기술하면 다음과 같다.

가. 콘크리트 열전도율

콘크리트의 열적 성질은 콘크리트를 구성하고 있는 재료의 열적 성질에 의해 지배되며, 각 재료의 열적 특성값을 중량 비율로 평균한 값으로 나타낼 수 있다. 따라서 콘크리트의 열적 특성값은 중량과 용적에 있어 콘크리트의 70~80%를 점유하는 골재의 종류와 단위량에 의해 크게 변화되며, 시멘트 종류, 물/시멘트비 또는 재령에 의한 변화는 비교적 작다.

한편 사용 골재의 성분이나 양에 관계없이 콘크리트의 함수량에 따라 콘크리트의 열전도율은 영향을 받으며, 콘크리트의 함수량이 증가할수록 열전도율이 증가하고 경량콘크리트에

비해 일반 콘크리트 및 중량콘크리트의 경우가 함수비의 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다. 일반적인 골재를 사용한 콘크리트 열특성값의 예를 나타내면 각각 <표-3>과 같으며, 콘크리트의 열전도율에 미치는 영향인자에 대한 실험결과⁽⁵⁾를 요약하면 다음과 같다.

<표-3> 각종 콘크리트의 열적 특성값 예

사용 골재	밀도, ρ (kg/m^3)	열전도율, λ ($\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)	비열, c ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
경암	2430	3.0 ~ 3.1	0.21 ~ 0.23
석회암	2450	2.7 ~ 2.8	0.22 ~ 0.24
백운암	2500	2.8 ~ 2.9	0.23 ~ 0.24
화강암	2420	2.2	0.22 ~ 0.23
파문암	2340	1.8	0.22 ~ 0.23
현무암	2510	1.8	0.23
강자갈	2300	1.3	0.22

(1) 재령

콘크리트, 페이스트 및 몰탈의 열전도율이 재령에 따라 어떤 영향을 받는지를 알아보기 위해 시편이 완전습윤 상태이고 온도가 20°C인 경우에 대해 재령 3, 7, 14, 28일에 실험을 실시한 결과, 콘크리트, 페이스트 및 몰탈에 따라 열전도율은 뚜렷한 차이를 보이지만(그림 4(a)), 모든 시편에서 재령에 따른 열전도율의 변화는 나타나지 않고 있다. 이를 통해 콘크리트나 몰탈의 열전도율은 재령이나 강도증진에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

(2) 골재 함유량의 영향

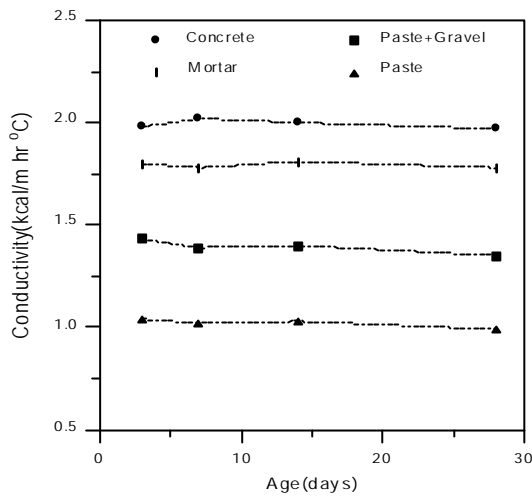
골재 함유량이 열전도율에 미치는 영향을 구명하기 위해 물/시멘트비, 잔골재율 및 시멘트의 종류를 일정하게 하고, 골재의 부피비(0, 0.21, 0.35, 0.49, 0.56, 0.63, 0.70), 시편의 온도(20, 40, 60°C) 및 함수상태(완전습윤, 완전건조)를 변화시켜 가며 실험을 실시한 결과, 콘크리트의 건조상태나 시편의 온도에 상관없이 골재의 사용량이 증가할수록 열전도율이 증가함을 알 수 있다(<그림-4>(b)). 이와 같은 현상은 골재의 열전도율이 다른 콘크리트 구성재료보다 크기 때문이며, 골재의 열전도율이 콘크리트의 열전도율에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(3) 물/시멘트비의 영향

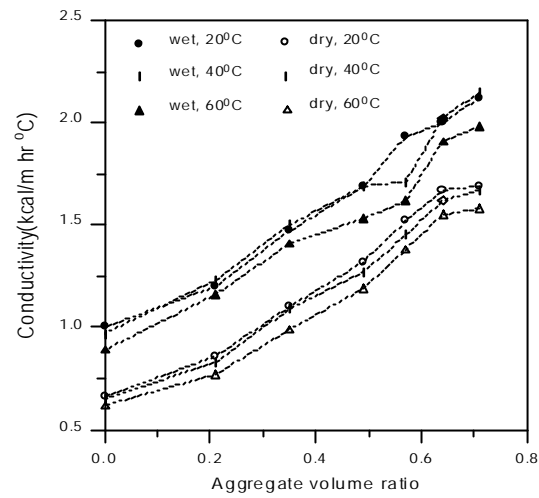
물/시멘트비에 따른 열전도율 변화를 알아보기 위해 시멘트의 종류를 일정하게 하고, 함수상태(완전습윤, 완전건조)와 시편의 온도(20, 40, 60°C)를 변화시켜 가며 페이스트 시편을 이용하여 실험을 실시한 결과, 시편의 온도나 페이스트의 함수상태에 관계없이 물/시멘트비가 증가할수록 열전도율이 줄어드는 것을 알 수 있다(<그림-4>(c)).

(4) 결합재 종류의 영향

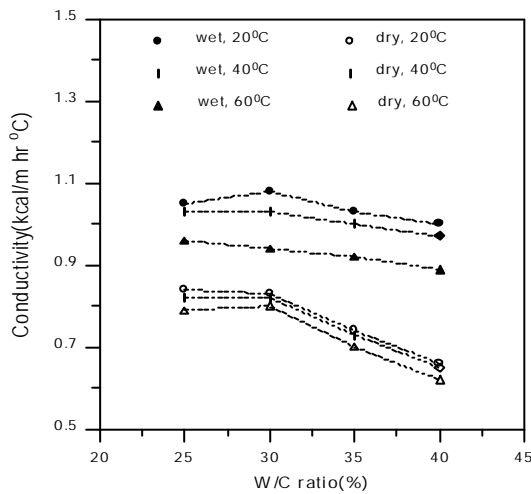
결합재의 종류에 따른 열전도율의 변화를 알아보기 위해 결합재의 부피비가 일정한 페이스트를 이용하여 실험을 완전 습윤상태인 20°C의 시편에 대해 실시하였다. <그림-4>(d)의 실험결과에 의하면 1종 시멘트와 5종 시멘트를 사용할 경우 비슷한 열전도율을 보였다. 그러나 플라이애쉬와 고로슬래그의 사용량이 증가할수록 열전도율이 줄어드는 것을 알 수 있다.



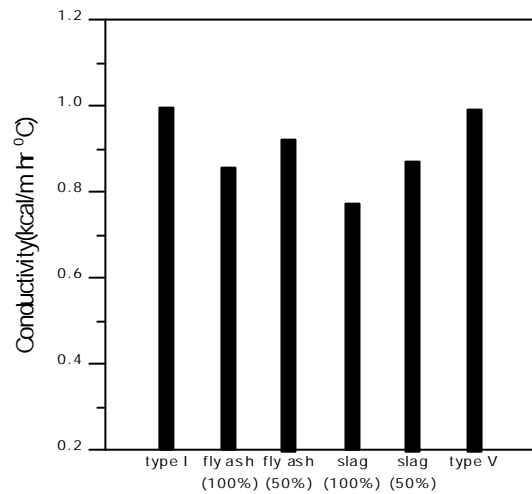
(a) 재령의 영향



(b) 골재 함유량 및 온도의 영향



(c) 물/시멘트비 및 함수상태의 영향



(d) 결합재 종류의 영향

<그림-4> 영향인자에 따른 콘크리트 및 페이스트의 열전도율

나. 콘크리트 비열

콘크리트 열특성값의 하나인 비열은 <식-11>과 같이 콘크리트내에 점유하는 각 재료의 질량 비율과 각 재료의 비열로부터 계산할 수 있으며, 또는 콘크리트에 가해진 열량과 온도 상승량으로부터 직접 측정하는 방법이 사용되기도 한다. 일반적인 골재를 사용한 콘크리트의 비열은 <표-3>에 함께 나타나 있다.

$$c_{co} = \frac{c_c C + c_w W + c_s S + c_g G}{C + W + S + G} \quad \text{<식-11>}$$

여기서, c_{co} , c_c , c_w , c_s , c_g : 콘크리트, 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은 골재의 비열, C , W , S , G : 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은 골재의 단위질량이다.

다. 대류계수

대류에 의한 열유속, q^a 는 공기의 이동에 관련되어 있다. 바람에 의한 열전달은 Newton의 냉각법칙에 따라 <식-12>와 같이 표현될 수 있다. 즉 대류에 의한 열유속은 콘크리트 표면 온도와 대기온도의 차이와 외기대류계수로 일컬어지는 h_a 에 비례한다.

$$q^a = h_a(T_\infty - T_s) \quad \text{<식-12>}$$

외기대류계수는 콘크리트의 수분 상태에 따라 크게 변하는 열전도율, 열확산율과 같이 콘크리트의 수분상태에 따라 민감하게 변화하나, 매스콘크리트의 외기대류계수에 관한 연구는 열전도율 등과 같은 열특성계수 연구에 비하여 미미한 상태이며, 외국의 경우에 있어서도 몇 연구자들에 의해 실시된 소수의 실험 결과뿐인 것이 현 실정이다.

현장 매스콘크리트의 외기대류계수는 일사량, 수분 증발, 잠열, 바람, 양생수 살포, 보온재 유무 등과 같은 많은 인자에 영향을 받으며, 시시각각으로 변하는 것이기 때문에 그 실태를 정확히 파악하기는 상당히 어렵다고 할 수 있다. 일본의 小澤은 현장실험의 결과를 분석하여 <식-13>을 제안하였다.

$$h_a = 9.60 + 1.12v \quad \text{<식-13>}$$

여기서, v : 풍속이다.

라. 복사계수

복사에 의한 열전달은 열복사(q^r)와 태양열복사(q^s)로 나눌 수 있다. 여기서 열복사는 Stefan-Boltzmann law를 이용한 식 (10)을 사용할 수 있으나, 유한 요소법으로 접근하기 위해서는 온도에 대한 미분방정식을 전개해야 하므로 <식-10>을 사용하기 힘들다. 따라서 온도가 일정한 범위 내에서는 <식-10>을 단순화시킨 <식-14>를 이용할 수 있다.

$$q^r = h_r(T_s - T_\infty) \quad \text{<식-14>}$$

여기서, h_r 은 복사 열전달계수($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)로서 Stefan-Boltzmann 상수와 재료의 표면 형상과 방사율에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 복사 열전달계수에 대한 기존의 연구는 거의 없으며 일부 연구자들에 의해 부분적으로 수행되었다. Mendes⁷⁾에 의하면 복사계수를 다음 <식-15>와 같이 단순하게 표현하고 있다.

$$h_r = \epsilon[4.8 + 0.075(T_\infty - 5)] \quad \text{<식-15>}$$

태양열복사는 콘크리트 표면에 흡수되는 열에너지로 나타나며 <식-16>과 같이 콘크리트의 흡수율과 태양열 조사량으로 표현할 수 있다.

$$q_s = \alpha_s G_s \quad \text{<식-16>}$$

여기서, α_s : 태양복사열에 대한 흡수율, G_s : 태양열 조사량($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$)이다. 여기서 언급한 방사율과 흡수율은 물질, 성상, 온도 등에 따라서 변하는 것으로 알려져 있는데, 콘크리트의 방사율은 0.6, 흡수율은 0.88 정도의 값을 갖는다.

4. 결 언

이 글에서는 수화열로 인하여 발생할 수 있는 콘크리트의 균열에 영향을 주는 여러 요소들에 대하여 국내외 실험자료를 통하여 살펴보았다. 지금까지 크게 고려하지 않았던 수화열에 의해 많은 균열이 발생하고 있으므로, 앞으로는 수화열에 영향을 주는 요인들에 대하여 보다 깊은 이해를 함으로써 콘크리트 품질 향상에 관심을 가져야 할 것으로 판단한다. 이는 시멘트를 생산하는 양회회사에서도 보다 낮은 단위시멘트량을 사용할 수 있는 시멘트를 개발하거나, 다양한 수화열 저감 시멘트 생산 등에 관심을 가져 콘크리트가 건설재료로서 보다 경쟁력을 갖출 수 있도록 하여야 할 것이다.