

# 콘크리트 구조물에서 수화열

김진근

(한국과학기술원 토목공학과 교수 工博)

## 1. 서론

최근 대형 콘크리트 구조물(mass concrete structures)이 건설됨에 따라 이러한 대형 콘크리트 구조물에서 발생하는 수화열에 의한 온도 응력으로 인한 균열이 관심을 모으고 있다. 매스 콘크리트 구조물에서의 온도 응력은 많은 영향 요인에 의해 결정되며, 과도한 이러한 온도 응력의 발생에 의해 구조물에 균열을 야기시키거나 잔류 응력으로 존재함으로써 매스 콘크리트 구조물의 안전성, 내구성 및 방수성에 악영향을 미치게 된다. 그런데 종래에는 콘크리트 구조물에서 강도만이 유일한 고려 항목이었으며, 사용성과 내구성등은 거의 무시되다시피 하였다. 그러나 최근에 이르러 구조물의 대형화, 특수 구조물의 등장, 고강도 재료의 사용 등으로 강도에 못지 않게 사용성과 내구성의 중요성이 부각되고 있다.

콘크리트의 수화열도 이와 같이 20여년 전까지만 해도 오직 댐 콘크리트에서만 문제가 되었고, 거의 모든 대형 토목구조물에서 문제가 되지 않았다. 그러나 현재 우리나라에서 건설되고 있는주요 구조물, 즉 고속도로상의 교량구조물, 고속전철 구조물, 원자력발전소의 콘크리트 구조물 등등 모든 대형 콘크리트 구조물에서 수화열에 의한 제반 문제의 검토가 필요한 실정이다.

지금까지 이러한 온도 응력에 의한 문제점을 명백히 하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며, 매스 콘크리트 구조물의 온도 변화, 온도 변화에 따른 콘크리트 물성 변화 및 온도 응력 발생에 미치는 영향 인자 등에 대하여 또한 많은 연구 결과가 보고 되고 있다. 미국, 유럽, 일본 등에서는 이에 관련된 연구가 지난 15여년간 집중적으로 연구되었으며, 국내에서도 최근 5여년간 학계와 업계의 관심 속에서 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 매스 콘크리트 구조물의 온도 응력은 시멘트 수화열과 열방출에 의한 온도 변화가 심한 초기 재령에서 급격히 발생하며, 이러한 온도 응력에 대한 응력 발생 메커니즘을 정확히 이해하고 적절한 사전 조치를 취하므로써 균열 발생을 억제하거나 온도 응력 수준을 낮출 수 있다.

이 글에서는 매스 콘크리트 구조물의 온도 응력 예측을 위한 기본 자료를 제공하기 위하여 매스 콘크리트 구조물에서 수화열 발생의 영향 요인에 대한 각 항목 별로 기존 연구 자료를 바탕으로 정리·분석만하고, 다음 기회가 있으면 구조물 내의 온도 응력에 미치는 영향요인에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 수화열 발생 요인

시멘트가 물과 완전히 반응하면 발열 화학

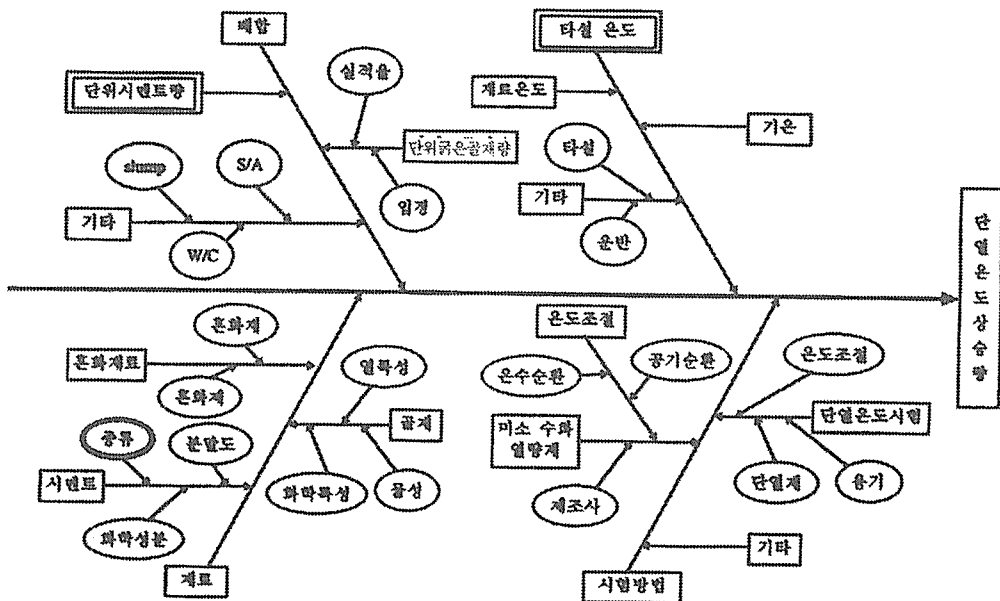
반응에 의해 120kcal/kg 정도의 열이 발생하고, 콘크리트의 열전도율은 상대적으로 작기 때문에 매스 콘크리트에서의 수화열은 내부 온도를 상승시키게 된다. 일반적으로 이러한 온도 상승량은 미소 수화 열량계를 사용한 시멘트 수화열 측정법이나 콘크리트 단열 온도 상승 시험법으로 판정한다. 미소 수화 열량계는 시멘트의 수화 발열 특성을 측정하기 위한 기기로서 시멘트와 물을 일정한 온도 조건하에서 반응시켜 발생하는 열량을 측정한다. 이 방법은 소량의 시료로서 각 배합에 대한 비교 실험이 가능하지만, 시료의 온도가 무시되므로 실제의 매스 콘크리트 온도 상승량을 예측하기에는 적절하지 않다고 지적되고 있다. 이에 비해 단열 온도 상승 시험법은 대상 콘크리트에 대한 단열 상태를 유지하면서 발생하는 온도 상승량을 측정하는 방법으로 매스 콘크리트 온도 상승 예측에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 콘크리트 단열 온도 상승은 식 (1)과 같은 지수 형태의 함수로 나타내며, 최대 상승 온도치(K)와 반응 속도( $\alpha$ )로서 단열 온도 상승 특성을 나타낸다.

중요도가 큰 구조물에 대해서는 실험을 통하여 단열온도 상승식의 변수를 측정하는 것이 좋으나, 각각의 구조물마다 실험을 행하는 것은 현실상 어려우므로, 단위시멘트량 및 타설시의 온도등을 실험변수로 하여 최대상승 온도치(K)와 반응속도( $\alpha$ )를 구하는 기존의 모델식을 이용할 수도 있다.

$$T = K[1 - e^{-\alpha t}] \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서, T : 시간 t에서의 단열 온도 상승치 (°C)
- K : 최대 상승 온도치 (°C)
- $\alpha$  : 반응 속도
- t : 재령 (일)

상술한 방법들에 의해 지금까지 연구되어 온 결과에 따르면, 콘크리트 단열 온도 상승에 미치는 요인은 [그림 1]과 같이 많은 요인



(그림 1) 콘크리트 단열 온도 상승에 미치는 요인 분류

이 있으나 시멘트 종류, 단위 시멘트량 및 타설 온도의 3 요인이 지배적이라 할 수 있다. 최근에는 3 요인에 추가하여 혼화재료, 시멘트 분말도, 골재의 열특성, 단열 온도 시험 장치 등의 영향도 상당히 있다고 지적되고 있다. 이러한 각 요인의 영향에 대한 실험 결과와 문헌 조사에 의해 나타난 사항을 간략히 기술하면 다음과 같다.

### 2.1 시멘트 종류의 영향

콘크리트의 단열 온도 상승은 시멘트의 수화열량 및 반응 속도의 영향을 받는다. 시멘트의 수화열은 시멘트 구성 성분에 의해 결정되며, 식 (2)와 같이 시멘트를 구성하는 주요 성분에 대한 수화열을 구하여 시멘트의 최종 수화열량( $H_T$ )을 예측할 수 있다.

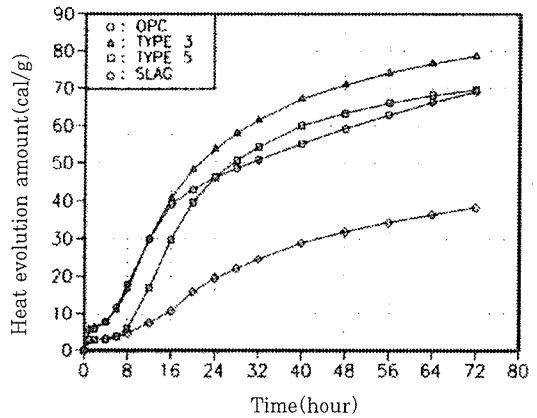
$$H_T(\text{kcal/kg}) = 136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, ( )는 시멘트에 대한 중량비

즉, 화학 성분비가 다른 각종 시멘트는 서로 다른 수화 발열량 및 반응 속도를 나타내며, 동일 배합의 콘크리트라 하더라도 콘크리트의 단열 온도 상승은 시멘트 종류에 따라 차이가 나게 된다. [표 1]은 각종 시멘트의 시간에 따른 수화열을 나타낸 예이다.

[표 1]과 [그림 2]에서 알 수 있는 바와 같이 보통 포틀랜드 시멘트의 수화열은 조강시멘트에 비해 초기 발열 속도가 느리지만 장기적인 수화열은 거의 차이가 없다. 이에 비해 중용열이나 플라이애쉬 B종 시멘트는 수화열량과 발열 속도가 보통 포틀랜드 시멘트보다 낮게 나타난다.

시멘트는 종류에 따라 화학성분비가 다를 뿐 아니라, 동일한 시멘트라고 하여도 일정한 범위내에서 상이한 화학성분비를 가지므로 수화발열이 달라진다. 예를 들면  $C_3A$ 는 수화반응 초기에 거의 모든 물질들이 반응하고 24시간 이내에 수화반응을 완료하는 반면  $C_2S$ 는 서서히 수화반응이 일어난다. 수화 초기에는 시멘트와 물의 혼합이 원활하므로, 시멘트의 화학성분비가 수화반응의 주요 영향인자이다. 그러나 반응 후기로 가면 점차로 CSH



(그림 2) 시멘트 종류에 따른 영향

(표 1) 각종 시멘트의 수화열 ( $H_T$ )

시멘트종류	수화열(kcal/kg)						
	3 일	7 일	28 일	3개월	1 년	6.5 년	13 년
보 통	60.9	79.2	95.6	103.8	108.6	116.8	118.2
조 강	75.9	90.6	101.6	106.8	114.2	120.6	120.6
중 용 열	46.9	60.9	79.6	88.1	95.4	98.4	100.7
플라이애쉬B종	49.0	63.1	77.9	83.0	-	-	-

겔층이 시멘트입자의 주위에 형성되어 물과 시멘트의 접촉이 어려워진다. 따라서 반응 후기로 갈수록 CSH겔층을 통과하는 물의 확산 속도에 의하여 수화반응이 영향을 받게 되며, 시멘트의 화학성분비의 영향은 줄어든다.

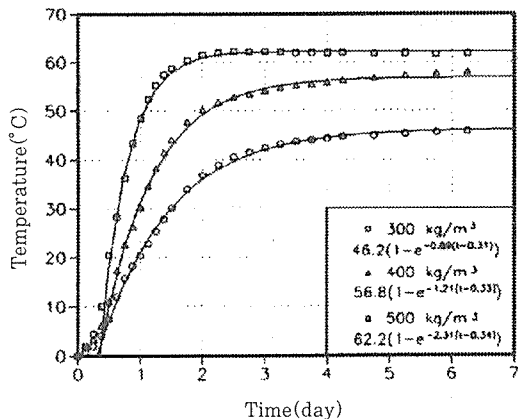
최근에 일본을 중심으로 C<sub>2</sub>S의 성분은 50% 이상으로 하고 C<sub>3</sub>S의 성분은 20% 수준으로 그리고 C<sub>3</sub>A 성분은 5% 이하로 한 벨라이트계 시멘트 개발에 관한 연구가 크게 진척되어 있다.

## 2.2 단위 시멘트량의 영향

콘크리트 수화열에 의한 온도 상승의 원인이 되는 시멘트 수화 반응 열량은 콘크리트 배합의 단위 시멘트량에 직접적인 영향을 받

[표 2] 콘크리트의 최대 상승 온도(K)와 반응 속도( $\alpha$ )에 대한 제안식

시멘트종류	K	$\alpha$	외기온도
보 통	$K=0.0831C+17.48$	$\alpha=0.00174C+0.097$	10℃
	$K=0.1108C+8.86$	$\alpha=0.00415C-0.271$	20℃
	$K=0.0961C+9.96$	$\alpha=0.00624C-0.499$	30℃
중 용 열	$K=0.0753C+10.26$	$\alpha=0.00092C+0.377$	20℃
고 로	$K=0.1299C-0.56$	$\alpha=0.00174C+0.236$	
플라이애쉬	$K=0.1587C-7.18$	$\alpha=0.00286C-0.081$	



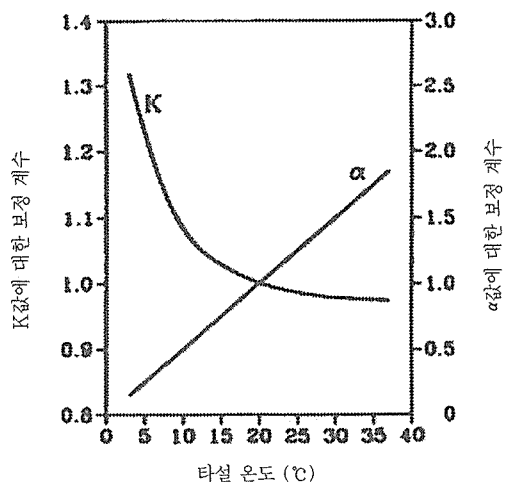
[그림 3] 단위 시멘트량의 영향 (1종 시멘트)

는다. 일본 콘크리트 공학 협회의 온도 응력 연구 위원회에서는 수화열에 관한 기존 실험 자료들을 분석하여 [표 2]와 같은 식을 제안하고 있으며, [표 2]와 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 최대 상승 온도(K)와 반응 속도( $\alpha$ )는 단위 시멘트량에 비례하여 증가함을 나타내고 있다.

## 2.3 타설 온도의 영향

시멘트의 수화 반응은 주변 온도에 크게 영향을 받으며, 주변 온도가 높을수록 수화 반응 속도는 빨라진다. 따라서 콘크리트의 타설 온도가 높아지면 높아질수록 초기의 콘크리트 온도 상승은 커지게 된다. 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 대하여 타설 온도를 변화시켜 가며 측정된 단열 온도 상승 실험 결과에 따르면, 최대 상승 온도(K)는 타설 온도가 높아지면 오히려 감소하지만, 반응 속도( $\alpha$ )는 온도에 비례하여 증가함을 나타내고 있다(그림 4).

일반적으로 초기 온도 상승 속도가 증가할수록 초기 온도 균열 발생 확률이 커지므로



[그림 4] 타설 온도에 따른 K,  $\alpha$ 값의 변화 예

실제 시공에 있어서는 타설 온도에 대한 세심한 배려가 필요하다.

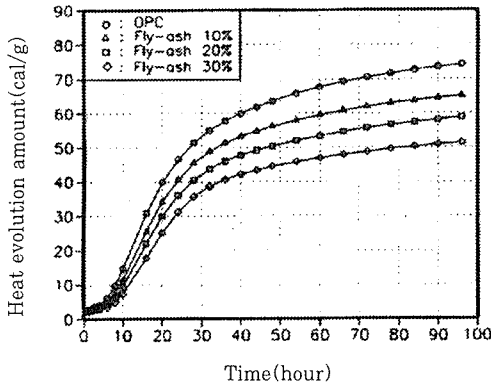
## 2.4 혼화재료의 영향

콘크리트에 사용하는 혼화재료는 혼화제와 혼화재로 구별할 수 있다. 콘크리트의 시공성 향상을 위해 사용되는 유동화제, 지연제와 같은 혼화제는 수화 반응을 일시적으로 억제하거나 지연시키므로 혼화제 무첨가의 콘크리트 단일 온도 상승 특성과는 다른 양상을 나타낸다. 따라서 이러한 혼화제를 사용하는 경우에는 수화 반응의 지연 효과를 포함하는 새로운 단일 온도 상승 곡선이 채택되며, 일반적으로 식 (3)과 같이 지연 시간( $t_0$ )을 고려하는 식이 사용된다.

$$T = K \left[ 1 - e^{-a(t-t_0)^\beta} \right] \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $t_0$ ,  $\beta$ 는 실험 변수

한편 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카 흙과 같이 일정 시멘트 대체 결합재로서 사용되는 혼화제는 단위 시멘트량 감소에 따른 수화열의 저감 효과 뿐만 아니라 시공성 개선, 콘크리트 강도 및 내구성 증진에도 효과가 있음

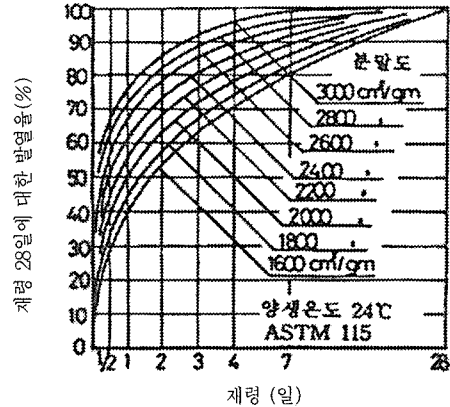


(그림 5) 플라이애쉬 치환율에 따른 영향

이 확인되고 있다. 다시 말하여 혼화제를 사용한 콘크리트는 최대 상승 온도(K)와 반응 속도( $\alpha$ )에 영향을 주며, 혼화제 혼입율이 증가할수록 [그림 5]에서 볼 수 있듯이 두 값이 저하하는 경향을 나타낸다.

## 2.5 분말도의 영향

시멘트의 수화 반응 속도는 시멘트의 분말도가 클수록 증가한다. 즉 분말도가 클수록 배합수와 접촉하는 면적이 증가되므로 수화 반응 속도가 증가하게 된다. 특히 분말도의 효과는 초기 수화 반응에 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. ACI 207 위원회 보고에 의하면 동종의 시멘트에서도 분말도의 대소에 의해 수화 발열 속도가 크게 다른 것을 지적하고 있다[그림 6].



(그림 6) 시멘트의 분말도와 발열 속도

## 2.6 단일 온도 상승 시험 방법의 영향

매스 콘크리트 타설후의 수화열에 의한 온도 상승을 계산할 경우 널리 사용되는 단일 온도 상승 곡선은 계산 결과에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나라 할 수 있다. 임의의 배합에서의 단일 온도 상승 곡선을 결정하는 방

법으로서 실험적으로 구하는 방법이 널리 사용되고 있으나, 아직까지 규격이 정하여져 있지 않으므로 각종의 시험 방법이 제안되어 사용되고 있다. 그 결과 동일 배합이라 하더라도 시험 방법에 따라 시험 결과가 다르며, 각종 발표된 자료를 동일 선상에서 비교하는 것이 곤란한 문제점을 내재하고 있다.

현재 사용되고 있는 시험 방법은 시험체를 단열 상태로 유지하는 방법이 공기 순환식인가 물 순환식인가에 따라 크게 2가지로 구분할 수 있다. 두 방법의 차이는 순환시키는 매체가 기본적으로 다르기 때문에 발생하는 단열 상태 응답 속도, 정밀도에 의해 나타낼 수 있다. 한편, 각 시험 방법의 차이로는 시험체 크기, 시험체 주위의 단열재 유무, 단열 상태 조절 방법, 온도 검출을 위한 물리량 등을 들 수 있다.

### 3. 수화열 분포 영향 요인

시멘트 수화 반응에 의해 매스 콘크리트 부재 내에 축적되는 열 에너지는 매질내의 열전도, 서로 다른 매체간의 열전달과 열복사의 과정을 거치면서 열의 흐름이 안정되는 정상 상태에 이를 때까지 전달되어 간다. 이러한 정상 상태에 이르기 전 단계인 비정상 상태하에서는 콘크리트 각 부분의 열량 차이에 의해 온도가 서로 다르게 되어 동일 단면내의 온도 분포가 변화하게 된다.

따라서 매스 콘크리트 구조물의 온도 분포를 파악하기 위해서는 위에서 언급한 열전도, 열전달 및 열복사의 과정에 대한 정확한 이해가 필요하다.

열 해석을 위해 사용되는 등방성 재료의 비정상 열전도 방정식은 식 (4)와 같이 표현되며, 각 부분의 온도 변화는 콘크리트의 열전도율( $\lambda$ ), 비열( $C$ ), 밀도( $\rho$ ) 및 발열율( $\dot{Q}$ )에

의해 영향을 받는다.

$$\rho C = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $\frac{\partial T}{\partial t}$  : 온도 변화율 ( $\Delta T$ )

$\lambda$  : 열전도율 (kcal/(m hr °C))

$C$  : 비열 (kcal/(kg °C))

$\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$\dot{Q}$  : 단위시간, 단위체적당 공급되는 열량 (발열율) (kcal/(m<sup>3</sup> hr))

한편 콘크리트 부재의 표면과 접하는 경계면에서는 열전달과 열복사에 의한 열유속 (heat flux)이 발생하며, 이러한 열유속은 식 (5)에 의해 나타낼 수 있다.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $q$  : 단위시간, 단위면적당 이동되는 열량 (열유속) (kcal/(m<sup>2</sup> hr))

$n$  : 외향 법선

그리고 콘크리트 부재의 수화열 해석시 콘크리트 표면에서의 열복사에 의한 열유속은 무시하는 경우가 많으며, 열전달에 의해 발생하는 열유속은 식 (6)을 사용하여 열전달 효과만을 고려하는 것이 일반적이다.

$$q = h(T - T_{sur}) \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $h$  : 열전달율 {kcal/(m<sup>2</sup> hr °C)}

$T$  : 콘크리트 표면 온도(°C)

$T_{sur}$  : 외기 온도 (°C)

이상에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 열 특성치인 열전도율, 비열, 열전달율 등은 콘

크리트 부재의 온도 분포에 큰 영향을 미치므로, 정확한 온도 해석을 위해서는 해석에 앞서 콘크리트의 열특성치를 조사하여 둘 필요가 있다.

### 3.1 콘크리트 열전도율

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

[표 3] 각종 골재의 열적 특성치 예

골재종류	밀도 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	열전도율 $\lambda$ (kcal/m hr °C)	비열 C (kcal/kg °C)
석영	2.635	4.45	0.175
화강암	-	2.50~2.65	0.171~0.188
백운암	-	3.54~3.70	0.192~0.200
석회석	2.670~2.700	2.29~2.78	0.179~0.202
장석	2.555	2.00	0.194
대리석	2.704	2.11	0.209
현무암	2.695	1.47	0.183~0.204
사암	-	-	0.17

[표 4] 각종 콘크리트의 열적 특성치 예

사용골재	밀도 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	열전도율 $\lambda$ (kcal/m hr °C)	비열 C (kcal/kg °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

한편 사용 골재의 성분이나 양에 관계없이 콘크리트의 함수량에 따라 콘크리트의 열전도율은 영향을 받으며, 콘크리트의 함수량이 증가할수록 열전도율이 증가하고 경량 콘크리트에 비해 일반 콘크리트 및 중량 콘크리트의 경우가 함수비의 영향을 크게 받는 것으로 보고되고 있다.

일반적으로 사용하는 골재의 열특성치와 각 골재를 사용한 콘크리트 열특성치의 예를 나타내면 각각 [표 3], [표 4]와 같다.

### 3.2 콘크리트 비열

콘크리트 비열이란 콘크리트 단위 무게 (kg)당 단위 온도(°C)를 변화시키는데 필요한 열량(kcal)의 크기로, 열전도율과 달리 매질내의 온도 분포에 의해 결정되는 것이 아니고 매질의 평균 온도에 의해 결정된다.

전술한 바와 같이 콘크리트 열특성치의 하나인 비열값은 식 (7)과 같이 콘크리트내에 점유하는 각 재료의 중량 비율과 각 재료의 비열값으로부터 계산할 수 있으며, 또는 콘크리트에 가해진 열량과 온도 상승량으로부터 직접 측정하는 방법이 사용되기도 한다. 일반적인 골재의 비열값과 각 골재를 사용한 콘크리트의 비열값은 [표 3]과 [표 4]에 함께 나타나 있다.

$$C_{co} = \frac{C_c C + C_w W + C_s S + C_g G}{C + W + S + G} \dots\dots\dots (7)$$

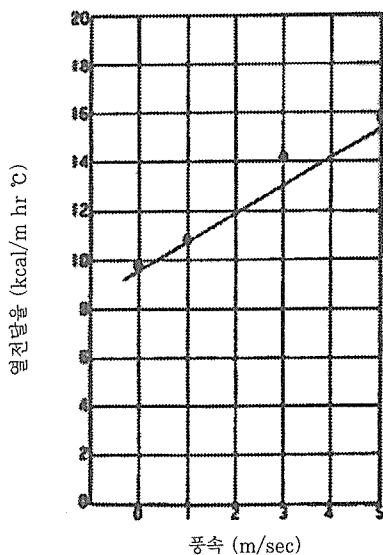
여기서,  $C_{co}$ ,  $C_c$ ,  $C_w$ ,  $C_s$ ,  $C_g$  : 콘크리트, 시멘트, 배합수, 세골재, 조골재의 비열  
 $C$ ,  $W$ ,  $S$ ,  $G$  : 시멘트, 배합수, 세골재, 조골재의 단위 중량

### 3.3 열전달율

매스 콘크리트의 수화열에 의한 온도 분포를 해석적으로 정확히 추정하고자 할 경우에는 열전도율, 단열 온도 상승 곡선 등의 열적 특성치 외에 매스 콘크리트와 대기와의 열전달율을 정확히 설정하여 둘 필요가 있다. 특히 열전달율은 콘크리트 표면 부근의 온도 분포에 크게 영향을 미친다.

그리고 열전달율은 콘크리트의 함수상태에 따라 크게 변하는 열전도율, 열확산율과 같이 콘크리트의 함수상태에 따라 민감하게 변화하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 그러나 매스 콘크리트의 열전달율에 관한 연구는 열전도율 등과 같은 열특성 계수 연구에 비하여 미미한 상태이며, 외국의 경우에 있어서도 몇 연구자들에 의해 실시된 실험 결과에 지나지 않는 것이 현실이라 할 수 있다.

현장 매스 콘크리트의 열전달율은 일사량, 수분 증발, 잠열, 바람, 양생수 살포, 보온재 유무 등과 같은 많은 인자의 영향을 받으며,



(그림 7) 풍속과 열전달율 관계 (大森川댐)

시시각각으로 변하는 것이기 때문에 그 실태를 정확히 파악하기는 상당히 어렵다고 할 수 있다. 따라서 일반적으로 열전달율을 산정하고자 할 경우에는 동일 현장을 대상으로 하여 각각 타설시의 양생조건이 크게 변화하지 않는다고 가정하여, 각 현장조건에 대한 열전달율을 그 현장의 고유한 열적 특성치로써 취급한다. 다시 말해 콘크리트의 열전달율에 미치는 요인으로서 현장의 평균 풍속과 인위적으로 만들어진 양생 조건만을 고려한다.

풍속이 콘크리트의 열전달율에 미치는 영향에 관한 연구는 몇 연구자에 의해 수행되었으며, 가장 대표적인 예로서 일본의 大森川댐의 결과를 들 수 있다. 이 연구결과에 의해 얻어진 풍속과 콘크리트 열전달율과의 관계가 [그림 7]에 나타나 있다.

### 4. 수화열 저감 대책

이와같이 매스콘크리트 시공시에 문제가 되는 수화열에 의한 균열, 잔류응력 등을 피하기 위해서는 수화반응시 발생하는 수화열을 줄이는 것이 좋은 해결책일 수 있다. 그러나 이는 간단히 해결될 문제가 아니며 또한 많은 경제적 비용이 요구될 수도 있다.

따라서 수화열 저감 대책으로는 시공성, 경제성 등을 고려하여 선냉각법(pre-cooling method)과 후냉각법(post-cooling method)이 널리 채택되고 있는데, 선냉각법이란 콘크리트 제조시에 사용하는 방법이고 후냉각법이란 콘크리트 구조물 시공시에 사용하는 방법이라고 볼 수 있다. 이외에도 배합 설계 단계에서 배합비를 조정함으로써 수화열을 줄일 수 있는 방법도 있다. 아래 기술한 여러 방법 중 몇몇 방법을 동시에 사용하는 경우가 많으나 이 장에서는 각 저감 방법에 대하여 간단히 기술하고자 한다.



## 4.1 배합설계단계

### (1) 단위시멘트량

수화열이란 시멘트의 수화과정 중 발열에 의한 것이므로 수화열 저감 방법중 가장 적극적인 방법이 단위시멘트량의 저감이라고 볼 수 있다. 그러나 소요강도와 소요작업성이 있으므로 단위시멘트량을 무작정 줄일 수는 없는 일이다. 따라서 이러한 소요강도와 소요작업성을 확보하면서 시멘트량을 줄이는 대책을 세워야 하는데, 예컨대 단위수량도 함께 줄여 강도를 확보하고 이로인해 떨어지는 작업성은 사용 골재의 비와 크기를 조정하고 유동화제를 사용하여 확보하도록 하는 방법이 있을 수 있다.

### (2) 결합재의 종류

앞서 기술한 바와 같이 포틀랜드 시멘트 중에도 수화발열 현상이 서로 상이하다. 즉 수화열에 의한 문제 해결을 위하여 2종의 중용열 포틀랜드 시멘트 또는 4종의 저열 포틀랜드 시멘트 등이 있다. 물론 이러한 시멘트를 사용하면 1종의 보통 포틀랜드시멘트보다도 강도 발현이 늦어져 설계 재령의 조정이 요구될 수도 있다.

최근에는 수화열을 저감시키기 위하여 이러한 보통 포틀랜드 시멘트에 포졸란 계통의 플라이 애쉬, 고로 슬래그 등을 첨가하여 만든 저발열 시멘트에 관한 연구와 화학 성분 자체를 바꾼 즉  $C_3S$  성분 대신에 다량의  $C_2S$  성분을 갖는 벨라이트 시멘트 개발에 관한 연구도 2장에서 기술한 바와 같이 크게 진척되고 있으며, 일본 등에서 부분적으로 사용되고 있다.

## 4.2 제조단계(선냉각법)

### (1) 배합수 냉각

수화열을 줄이는 방법으로는 콘크리트를

만들 때 그 자체의 온도를 낮추는 방법이 있을 수 있는데 그 하나의 방법으로서 배합수의 온도를 낮추는 것이다. 이 방법에는 배합수를 크게 냉각시키는 방법( $2^{\circ}C$ 이하로)과 냉각수 대신에 얼음을 이용하는 방법이 있을 수 있다. 물 1kg이  $1^{\circ}C$  올라가는데 소요되는 열량은  $4.18kJ$ 이고, 얼음을 사용하는 경우 1kg의 얼음이 물로 변하는데  $334kJ$ 의 열량이 요구된다. 따라서 얼음을 사용하는 경우가 보다 효과적일 수 있으나, 이때에는 콘크리트 비빔 동안 얼음이 다 녹도록 비빔시간을 길게 하여야 한다.

### (2) 골재 냉각

골재의 비열에 비하여 물의 비열이 크기 때문에 물의 냉각에 의한 콘크리트의 냉각이 효과적일 수 있으나 골재의 부피가 물의 부피보다 훨씬 크기 때문에 적절한 골재 냉각을 하지 않는 이상 물만의 냉각으로 그 효과는 한정적일 수 밖에 없다.

골재의 냉각법에는 여러 방법이 있을 수 있으며, 소극적인 방법이 될 수 있으나 골재의 저장에 있어 일사광선에 노출시키지 않고 그늘에서 저장 운반하도록 하고, 가능하다면 물을 뿌려 골재를 식혀 사용하는 것이다. 최근에는 보다 적극적인 방법으로 골재 사일로의 압력을 떨어뜨려 상온에서 골재 표면수를 기화시켜 그 기화열로 인해 골재의 온도를 강제적으로 떨어뜨리는 방법을 사용하기도 한다.

## 4.3 시공단계(후냉각법)

### (1) 파이프 쿨링

수화열 저감 대책중 적극적 방법으로서 또 효과가 큰 경우가 이 파이프 쿨링 방법이다. 파이프 재질은 보통  $2.5cm$  직경의 알루미늄 또는 강관을 이용하며 그 간격등은 콘크리트의

---

1회 타설고와 배합, 그리고 구속정도 등에 따라 적절히 선택하여야 한다. 그리고 파이프의 길이는 대개 150~350m 정도가 적당하며 냉각수는 분당 15l 정도의 양을 사용한다. 이때 파이프 클링을 계속 시행하는 것 보다는 최대 온도 발생이 일어나는 시점 직후 중단하는 것이 온도 응력에 유리한 경우가 많다.

## (2) 표면 보온

수화열에 의한 균열 발생은 매스콘크리트의 내외부 온도차이에 의한 것이므로 그 차이를 줄이기 위하여 거푸집등에 의한 표면 보온으로 그 문제를 어느 정도 저감시킬 수 있다. 그러나 구조물의 구속정도에 따라 이 방법은 유·불리가 있을 수 있으므로 그 채택에 주의가 요망된다.

## 5. 맺는말

콘크리트 구조물에서의 균열은 대부분 시공

초기에 발생하는 경우가 많으며, 그 원인 분석과 원인에 따르는 정량화는 재량이 상당한 균은 콘크리트에 비해 매우 힘들다. 이 수화열의 문제도 그러한 균열발생의 여러 요인 중 오직 하나의 요인에 불과하다. 그러나 이의 정확한 예측은 아직도 많은 연구가 필요하며, 또 다른 요인에 대한 정량화에 대한 연구도 시급한 것으로 보인다.

최근에 콘크리트 구조물에서 균열의 문제는 실제로 문제 이상으로 심각하게 받아들여지고 있다. 그 책임의 일부는 콘크리트와 관련이 있는 우리의 책임으로써 우리가 너무 사용성과 내구성 등에 관심을 갖지 않고 오직 강도에만 매달려 왔기 때문이라고 본다. 이제 부터는 콘크리트는 물만 부으면 만들어진다는 생각에서 벗어나 콘크리트를 진실로 이해하고자 하는 마음이 앞서야 고품질의 콘크리트를 만들 수 있고, 우리가 그에 걸맞은 대우를 받을 수 있다고 생각한다.