

## 매스 콘크리트의 수화열 및 온도 응력에 대한 영향 요인

### Factors for Hydration Heat and Thermal Stress in Mass Concrete



김진근\*



양은익\*\*

#### 1. 서론

최근 대형의 콘크리트 구조물이 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 결정되는 복합적인 결과이며, 과도한 온도 응력의 발생에 의해 구조물에 균열을 야기시키거나 잔류 응력으로 존재함으로써 매스 콘크리트 구조물의 안전성, 내구성 및 방수성에 악영향을 미치게 된다.

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 영향인자 등에 대하여 또한 많은 연구 결과가 보고되고 있다. 일반적으로 매스 콘크리트 구조물의 온도 응력

은 시멘트 수화열과 열방출에 의한 온도 변화가 심한 초기 채령에서 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 발생 메커니즘에 대한 이해를 폭 넓게 하고 온도 응력 예측을 위한 기본 자료를 제공하기 위하여, 매스 콘크리트 구조물의 온도 상승에 미치는 영향 요인, 구조물 내의 온도 분포에 미치는 영향 요인 및 온도 응력 발생에 미치는 영향 요인으로 구분하여 각 항목에 대하여 기존 연구 자료를 바탕으로 정리, 분석하였다.

#### 2. 수화열 상승 영향 요인

시멘트가 물과 완전히 반응하면 발열 화학 반응에

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 연구원

의해 120 kcal/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 유지하며 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.

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

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 1과 같이 많은 요인이 있으며 시멘트 종류, 단위 시멘트량 및 타설 온도의 세가지 요인이 지배적이라 할 수 있다. 최근에는 이 세가지 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( $H_H$ )을 예측할 수 있다.

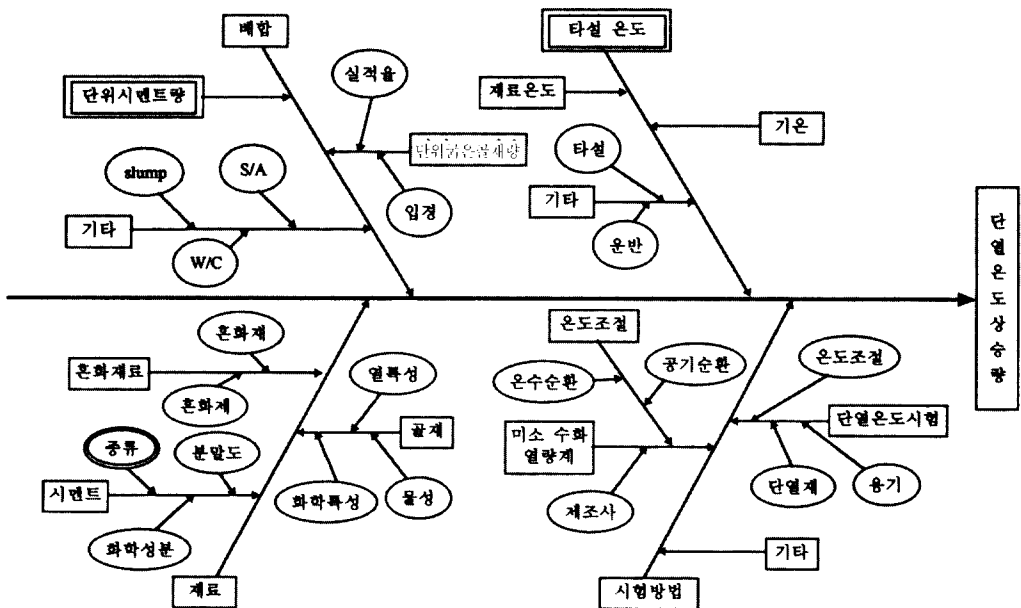


그림 1 콘크리트 단열 온도 상승에 미치는 요인 분류

$$H_T(kcal/kg) = 136(C_3S) + 62(C_2S) \quad (2)$$

$$+ 200(C_3A) + 30(C_4AF)$$

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 1은 각종 시멘트의 시간에 따른 수화열을 나타낸 예이다.

표 1 각종 시멘트의 수화열 (H<sub>T</sub>)

시멘트종류	수 화 열(kcal/kg)						
	3일	7일	28일	3개월	1년	6.5년	13년
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	-	-	-

표 1에서 알 수 있는 바와 같이 보통 포틀랜드 시멘트의 수화열은 조강시멘트에 비해 초기 발열 속도가 느리지만 장기적인 수화열은 거의 차가 없음을 나타내고 있다. 이에 비해 중용열이나 플라이애쉬 B종 시멘트는 수화열량과 발열 속도가 보통 포틀랜드 시멘트보다 낮게 나타난다.

## 2.2 단위 시멘트량의 영향

콘크리트 수화열에 의한 온도 상승의 원인이 되는 시멘트 수화 반응 열량은 콘크리트 배합의 단위 시멘트량에 직접적인 영향을 받는다. 일본 콘크리트 공학 협회의 온도 응력 연구 위원회에서는 수화열에 관한 기존 실험자료들을 분석하여 표 2와 같은 식을 제안하고 있으며, 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 최대 상승 온도(K)와 반응 속도(α)는 단위 시멘

표 2 콘크리트의 최대 상승 온도(K)와 반응 속도(α)에 대한 제안식

시멘트종류	K	α	외기기온
보통	$K=0.0831C+17.48$	$\alpha=0.00174C+0.097$	10°C
	$K=0.1108C+8.86$	$\alpha=0.00415C-0.271$	20°C
	$K=0.0961C+9.96$	$\alpha=0.00624C-0.499$	30°C
중용열	$K=0.0753C+10.26$	$\alpha=0.00092C+0.377$	20°C
고르	$K=0.1299C-0.56$	$\alpha=0.00174C+0.236$	
플라이애쉬	$K=0.1587C-7.18$	$\alpha=0.00286C-0.081$	

(C는 단위 시멘트량(kg/m<sup>3</sup>))

트량에 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 측정한 단열 온도 상승 실험 결과에 따르면, 최대 상승 온도(K)는 타설 온도가 높아지면 오히려 감소하지만, 반응 속도(α)는 온도에 비례하여 증가함을 나타내고 있다 (그림 2).

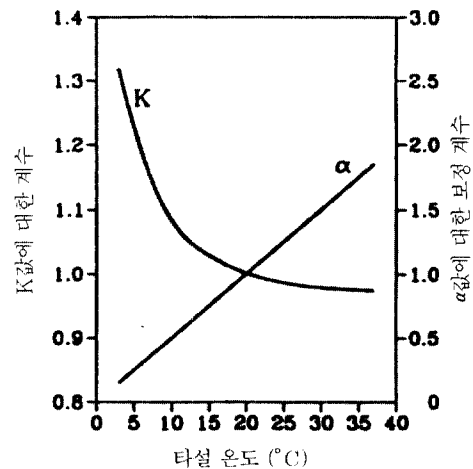


그림 2 타설 온도에 따른 K, α값의 변화 예

일반적으로 초기 온도 상승 속도가 증가할수록 초기 온도 균열 발생 확률이 커지므로 실제 시공에 있어서는 타설 온도에 대한 세심한 배려가 필요하다.

## 2.4 혼화재료의 영향

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

같이 지연 시간( $t_0$ )을 고려하는 식이 사용된다.

$$T = K / [1 - e^{-\alpha(t-t_0)^p}] \quad (3)$$

여기서,  $t_0, \beta$ 는 실험 변수

한편 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 실리카 흙과 같이 일정 시멘트 대체 결합재로서 사용되는 혼화재는 단위 시멘트량 감소에 따른 수화열의 저감 효과 뿐만 아니라 시공성 개선, 콘크리트 강도 및 내구성 증진에도 효과가 있음이 확인되고 있다. 다시 말하여 혼화재를 사용한 콘크리트는 최대 상승 온도(K)와 반응 속도( $\alpha$ )에 영향을 받으며, 혼화재 혼입율이 증가할수록 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 3).

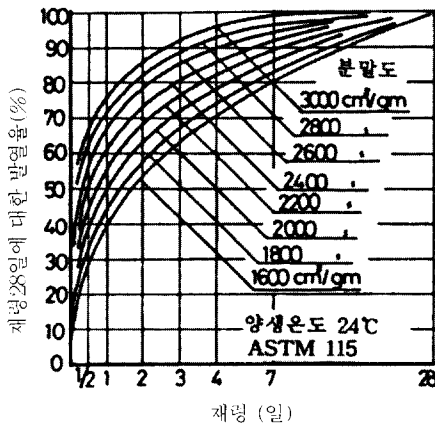


그림 3 시멘트의 분말도와 발열 속도

### 2.6 단열 온도 상승 시험 방법의 영향

매스 콘크리트 타설후의 수화열에 의한 온도 상승을 계산할 경우 널리 사용되는 단열 온도 상승 곡선

은 계산 결과에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나라 할 수 있다. 임의의 배합에서의 단열 온도 상승 곡선을 결정하는 방법으로는 실험적으로 구하는 방법이 널리 사용되고 있으나, 아직까지 규격이 정하여져 있지 않으므로 각종의 실험 방법이 제안되어 사용되고 있다. 그 결과 동일 배합이라 하더라도 실험 방법에 따라 실험 결과가 다르며, 각종 발표된 자료를 동일 선상에서 비교하는 것이 곤란한 문제점을 내재하고 있다.

현재 사용되고 있는 실험 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 감출을 위한 물리량 등을 들 수 있다.

### 3. 수화열 분포 영향 요인

시멘트 수화 반응에 의해 매스 콘크리트 부재내에 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(Q)에 의해 영향 받음을 알 수 있다.

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

여기서,  $T$  : 온도 변화율 ( $^{\circ}C$ )

$\lambda$  : 열전도율 ( $kcal/(m \text{ hr } ^{\circ}C)$ )

$C$  : 비열 ( $kcal/kg \text{ } ^{\circ}C$ )

$\rho$  : 밀도 ( $kg/m^3$ )

$Q$  : 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.

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

여기서,  $q$  : 단위시간, 단위면적, 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.

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

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 열특성치인 열전도율, 비열, 열전달율 등은 콘크리트 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 변화되며, 시멘트 종류, W/C비 또는 재령에 의한 변화는 비교적 작다.

한편 사용 골재의 성분이나 양에 관계없이 콘크리

트의 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 4와 같다.

표 3 각종 골재의 열적 특성치 예

골재 종류	밀도 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	열전도율 $\lambda$ (kg/m hr °C)	비열 C (kcal/kg °C)
석 영	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
장 석	2.555	2.00	0.194
대리석	2.704	2.11	0.209
현무암	2.695	1.47	0.183~0.204
사 암	-	-	0.17

표 4 각종 콘크리트의 열적 특성치 예

사용 골재	밀도 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	열전도율 $\lambda$ (kg/m hr °C)	비열 C (kcal/kg °C)
경 암	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
과문암	2340	1.8	0.22~0.23
현무암	2510	1.8	0.23
강자갈	2300	1.3	0.22

### 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 콘

크리트의 비열값은 표 3과 표 4에 함께 나타나 있다.

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

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 수분상태에 따라 크게 변하는 열전도율, 열확산율과 같이 콘크리트의 수분상태에 따라 민감하게 변화되므로 이에 대한 연구가 필요하다. 그러나 매스 콘크리트의 열전달율에 관한 연구는 열전도율 등과 같은 열특성 계수 연구에 비하여 미비한 상태이며, 외국의 경우에 있어서도 몇 연구자들에 의해 실시된 실험 결과에 지나지 않는 것이 현 실정이라 할 수 있다.

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

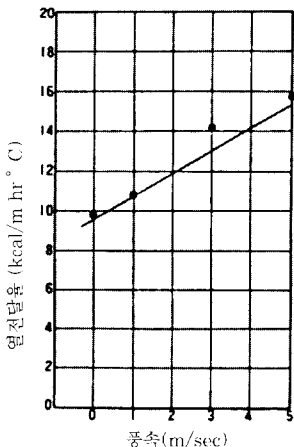


그림 4 풍속과 열전달율 관계 (大森川댐)

이기 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 산정하여, 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 4에 나타나 있다.

### 4. 수화열 응력 영향 요인

매스 콘크리트는 수화열과 열전달에 의해 내부 온도의 상승 저하가 일어나 각 위치에서 체적 변화를 일으키게 된다. 이러한 체적 변화는 콘크리트의 열팽창 계수와 온도 변화량에 의해 결정되는데, 앞에서 언급한 바와 같이 동일 단면에서의 온도 변화가 일정하지 않으며 또한 매스 콘크리트는 일반적으로 기초판, 또는 기설 콘크리트 등에 의해 체적 변화가 구속되므로 매스 콘크리트에는 온도변화에 따른 구속 응력이 발생하게 된다. 이러한 구속 응력은 구속 변형률과 탄성계수에 의해 결정되며 단면 위치에 따라 응력의 크기가 다르게 발생한다. 또한 온도 응력은 초기 재령에서부터 지속적으로 발생하는 것이므로 크립에 의해 응력 변화가 이루어 진다.

일반적으로 온도가 상승하는 구간에서는 압축응력이 발생하며 내부온도가 하강하기 시작함에 따라 압축응력이 저감되는데 재령에 따른 탄성계수의 차이에 의해 단위 온도 상승량에 따른 압축 응력 발생량보다 단위 온도 저하량에 따른 인장 응력 발생량이 크기 때문에 결국 온도 상승 하강 이력을 받는 매스 콘크리트에는 인장응력이 생기게 된다. 이러한 인장 응력이 콘크리트의 인장강도 보다 크게 발생하게 되면 매스 콘크리트에는 균열이 발생하게 되며 비록 균열이 발생하지 않는다 하더라도 잔류 인장 응력으로 남게 되어 구조물 거동에 영향을 미치게 된다.

이와 같이 매스 콘크리트 온도 응력에 미치는 영향

요인은 다양하기 때문에 온도 응력 발생 매커니즘을 명백히 하기 위해서는 각 영향 요인의 정량화와 종합적인 영향 평가가 필요하다.

#### 4.1 열팽창 계수

콘크리트를 구성하는 재료 중 시멘트 페이스트와 골재의 열팽창 계수는 크게 다르며, 시멘트 페이스트의 열팽창 계수는  $10 \sim 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  정도이며, 골재의 열팽창 계수는  $6 \sim 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  정도를 나타낸다. 따라서 콘크리트에 함유되는 골재량이 많아질수록 콘크리트의 열팽창 계수는 작아 지지만, 널리 사용되는 최대골재크기  $20 \sim 40\text{mm}$ 의 콘크리트의 골재 용적은 대부분  $0.65 \sim 0.7\text{m}^3/\text{m}^3$  정도이므로 함유 골재량의 변화에 따른 열팽창 계수 차이는 비교적 작다. 이에 반해 골재의 암질에 따른 열팽창 계수의 차이가 크기 때문에 콘크리트의 열팽창 계수는 골재의 암질에 큰 영향을 받게 된다. 골재의 암질에 따른 열팽창 계수와 이를 이용한 콘크리트의 열팽창 계수를 비교한 자료가 표 5에 나타나 있다.

표 5 암석 및 콘크리트의 열팽창계수

암석종류	실리카 함유량 (중량비%)	열팽창계수			
		암석		콘크리트	
		범위	평균	범위	평균
각암	94	7.38~12.96	11.88	11.34~12.24	13.14
규암	94	7.02~13.14	10.26	11.70~14.58	12.06
석영	94	-	-	9.0~13.14	-
사암	84	4.32~12.06	9.36	9.18~13.32	11.34
대리석	소량	2.16~16.02	8.28	4.32~7.38	10.62
규산질 석회암	45	3.60~9.72	8.28	8.10~10.98	10.62
화강암	66	1.80~11.88	6.84	8.10~10.26	9.54
휘석암	50	4.50~8.46	6.84	-	9.54
현무암	51	3.96~9.72	6.48	7.92~10.44	9.36
석회암	소량	1.80~11.70	5.58	4.32~10.26	8.64
결정질 골재	5~9.5	-	-	9.0~13.68	-

표 5에 나타난 실리카 함유량은 선정된 골재에 대한 값이며 동일 암석이라 하더라도 실리카 함유량은 산지와 결정상태에 따라 변화한다. 그러나 표 5에 나타난 바와 같이 골재의 열팽창 계수는 실리카 성분이 많을수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 열팽창 계수의 대략적 평가 수단으로써 실리카 함유량을 검토하는 것은 유효한 방법이라 할 수 있다.

콘크리트의 열팽창 계수는 응결 정도에 따른 영향

을 받는데, 특히 매스 콘크리트에서 문제가 되는 초기 재령의 경화 과정에서의 열팽창 계수는 굳은 콘크리트에 비해 크게 나타나고 일정 재령 이상의 재령에서는 거의 영향을 받지 않는다. 한편 시멘트의 종류, W/C비, 골재 치수 등의 배합상의 차이는 콘크리트의 열팽창 계수에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고되고 있다.

#### 4.2 구속정도

매스 콘크리트 구조물의 온도 변화는 구조물 자체의 체적 변화를 일으키며, 이러한 체적 변화가 구속되므로써 매스 콘크리트 구조물에는 구속 응력이 발생하게 된다. 이와 같이 변형 구속은 매스 콘크리트 구조물의 온도 응력 발생에 매우 큰 영향을 미치는 요인이며, 구속 정도에 따라 온도 응력의 크기가 결정되어 진다. 구속 조건은 크게 두가지로 분류할 수 있는데, 첫째로 매스 콘크리트의 온도 변화에 따른 체적 변화가 하부 지반, 기설 콘크리트 등에 의해 구속되는 외부 구속과, 둘째로 매스 콘크리트 구조물의 내외부 온도 분포 차이에 따라 발생하는 내부 구속을 들 수 있다.

외부 구속은 타설된 콘크리트와 기존 지반과의 접촉에 의해 이루어지며, 두 부재의 상대 치수, 탄성 계수비 등이 주요 영향 인자로 작용한다. 치수가  $L \times H$ 인 콘크리트 구조물이 기초에 의해 구속될 경우의 길이/높이비( $L/H$ )와 부재의 높이에 따라 변화하는 구속정도( $K_R$ )의 예를 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5에 나타나듯이  $L/H$ 비가 높을수록, 기초면에 가까울수록 부재에 발생하는 외부 구속 정도는 크게 됨을 알 수 있다.

이러한  $K_R$ 값을 사용하여 그림 5의 중앙선 임의의 지점에서의 체적 변화로 인해 발생하는 응력( $f$ )은 식 (8)과 같다

$$f = K_R \cdot \Delta_C \cdot E_C \quad (8)$$

여기서,  $\Delta_C$  : 구속이 없을 때의 체적 변화량

$E_C$  : 콘크리트의 탄성계수

이때 콘크리트와 지반의 강성 차이에 따른 구속정도( $K_R$ )의 변화는 식 (9)의 보정계수를 사용하여 고려할 수 있다.

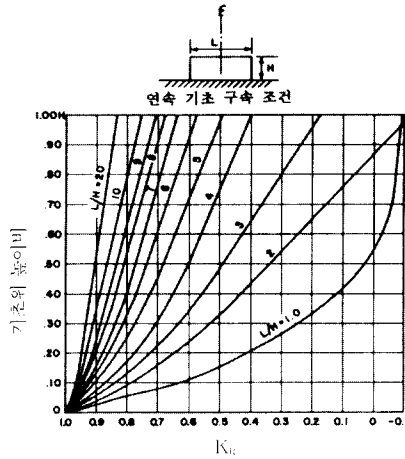


그림 5 길이-높이비(L/H)와 부재 높이에 따른 중앙선에서의 구속 정도

$$\text{보정계수} = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_f E_f}} \quad (9)$$

여기서,  $A_g$  : 콘크리트 접촉 면적  
 $A_f$  : 구속체 면적 ( $\leq 2.5 A_g$ )  
 $E_f$  : 구속체 탄성계수

내부 구속은 콘크리트 동일 단면내에서 체적 변화가 균일하지 않을 때 발생하는 것으로, 내부 온도가 표면 온도보다 높은 초기 매스 콘크리트 구조물에서 발생하기 쉽다. 즉 내부 구속 정도는 콘크리트 구조물의 내외부 온도 차이 정도에 의해 결정 되어 진다.

내부 구속과 외부 구속에 의해 발생하는 응력은 서로 독립적인 관계이므로, 콘크리트가 받는 전체 응력은 이들 두가지 응력을 대수합하여 구할 수 있다.

#### 4.3 탄성계수

매스 콘크리트 구조물에서의 수화열에 의한 온도 응력은 특히 초기 재령에서 문제가 되므로 탄성계수의 변화가 심한 초기 재령에서의 탄성계수 평가를 정확히 할 필요가 있다. 또한 탄성계수는 온도의 영향을 받으므로 초기 재령에서 내부 온도가 크게 상승·하강하는 매스 콘크리트에서는 이에 대한 영향을 고려해야 한다.

매스 콘크리트 구조물의 탄성 계수는 동일 온도 이력과 환경하에서 양생된 실험체에 대하여 직접 구하는 것이 가장 정확한 방법이나 이에 대한 실험이 곤

란할 경우에는 제안된 탄성계수 계산식을 채택하기도 한다. 일반적으로 탄성 계수는 압축 강도에 대한 함수로써 표현되며 ACI에서는 식 (10)을, CEB에서는 식 (11)을 사용하고 있다.

1) ACI model 식

$$E_c(t) = W^{1.5} 33 \sqrt{f'_{c(t)}} \quad (psi) \quad (10)$$

여기서,  $W$  : 콘크리트 단위 중량 ( $lb / ft^3$ )

$t$  : 재령 (일)

$f'_c(t)$  : 재령에 따른 콘크리트 압축강도 ( $psi$ )

2) CEB-FIP model 식

$$E_c(t) = EXP \left[ \frac{s}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right] E_{c,28} \quad (MPa) \quad (11)$$

$$E_{c,28} = 10,000(f_{cm})^{1.3}$$

여기서,  $t$  : 재령 (일)

$s$  : 시멘트 종류에 따른 계수

$E_{c,28}$  : 재령 28일에서의 콘크리트 탄성 계수 ( $MPa$ )

$f_{cm}$  : 재령 28일에서의 콘크리트 평균 압축 강도 ( $MPa$ )

한편 온도에 따른 탄성계수의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 보정식이 사용된다.

1) Bangash와 England의 model 식

$$E_c(T) = E_c \left( 1 - \frac{T-20}{137} \right) \quad (20 \leq T \leq 50) \quad (12)$$

$$E_c(T) = 0.78E_c \left( 1 - \frac{T-50}{341} \right) \quad (20 \leq T \leq 50)$$

여기서,  $T$  : 온도 ( $^{\circ}C$ )

2) CEB-FIP model 식

$$E_c(T) = E_c \cdot (1.06 - 0.003T) \quad (13)$$

3) 일본 콘크리트 표준 시방서 식

$$E_c(t) = \varphi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)} \quad (kg/cm^2) \quad (14)$$

여기서,  $E_c(t)$  : 재령 t일에서의 유효 탄성계수 ( $kg/cm^2$ )

$\varphi(t)$  : 온도 상승시의 효과를 고려하는 보정계수



$$= 0.73(t \leq 3)$$

$$= 0.73 + 0.135t(3 < t < 5)$$

$$= 1.0(t \geq 5)$$

$f'_c(t)$  : 콘크리트 압축강도 (kg/cm<sup>2</sup>)

#### 4.4 크리프

콘크리트 크리프 특성에 미치는 영향 요인으로서 재하 재령, 재하 기간, 재하 응력 수준 및 환경 온도 등을 들 수 있다. 매스 콘크리트와 같이 초기 재령의 높은 온도하에서 응력이 발생될 경우에는 이러한 영향 요인들 중 특히 재하 재령과 환경 온도의 영향을 정확히 평가할 필요가 있다.

일반적으로 주변 온도 상승에 따라 크리프 변형률이 증가되는 것은 널리 알려져 있다. 이러한 온도의존성을 어떻게 정량적으로 표현하는가 하는 것이 여러 연구자들에 의해 제안되고 있으며, 개략적인 내용을 나타내면 표 6과 같다.

표 6 크리프 온도 의존성 표현방법

방 법	개 요	비 고
온도 함수	$\epsilon_c = \phi(T)F(t) [\phi(20) = 1]$ $\phi(T)$ 상한치 있음	論 塚 Neville England
비회복 성분만의 온도의존	$I(T, t, \tau) = \frac{1}{E(T, \tau)} + \gamma(T)C_0(t, \tau) + g(t, \tau)$ 제2항은 flow성분을 나타내고 $r(T)$ 는 온도 함수에 해당	Jordan
유효 재령	$t_c = \frac{1}{30} \sum (T + 10) \Delta t$ 20°C를 기준으로 하는 등가재령	Rusch CEB
온도 유효성 단순 재료	$t' = t \cdot e^{qT} = t \cdot q(T)$ $t'$ : 등가재령 $\phi(T)$ : 이동함수 ln t에 대한 모든 곡선형이 동일하게 가정	Mutaddam Fahmi
등가 수화 재령	수화반응도에 따라 기준온도로 환산하는 등가재령	河 角 Bazant

표 6의 온도 함수법은 20°C를 기준으로 하는 크리프 식 F(t)에 온도에 의해 결정되는  $\phi(T)$ 를 곱하여 온도의 영향을 고려하는 것으로 일반적 방법이라 할 수 있다. 또한 20°C를 기준으로 하는 유효재령 를 사용하는 방법도 널리 알려져 있다.

한편 매스 콘크리트와 같이 초기 재령에서 크리프 변형률이 발생하는 경우에는 초기 재령 크리프 특성을 고려해야 한다. 그러나 지금까지 제안된 식들은

이러한 초기 재령의 특성을 충분히 고려한 자료를 제공하지 못하고 있는 실정이므로, 매스 콘크리트의 초기 재령 크리프 특성에 대한 연구는 향후 추진되어야 할 중요한 과제중의 하나라고 사료된다.

#### 5. 맺음말

매스 콘크리트 구조물에서의 온도 응력에 대한 연구는 댐 건설이 시작된 수십년 전부터 관심을 가지고 수행되어 왔으나, 온도 응력에 영향을 미치는 요인이 무수히 많고 또한 모든 요소에 대한 고려가 사실상 곤란하기 때문에 지금까지도 매스 콘크리트의 수화열에 의한 온도 분포와 온도 응력을 정확히 평가하기는 어려운 실정이다. 특히 온도 응력의 평가는 더 많은 확실한 요인들이 포함되기 때문에 더욱 어려운 실정이다.

그러나 지금까지 수행되어온 연구 결과에 의하면 각 영향 요인에 대한 분류, 평가법 및 영향 정도 등에 대한 분석이 가능하다. 따라서 이러한 연구 결과를 더욱 상세화 하고 적용함으로써 보다 실제에 근접하는 온도 응력 발생 경향을 유추할 수 있을 것으로 사료된다.

이 글에서는 이러한 각종 연구 결과에 의해 밝혀진 자료를 정리하여 매스 콘크리트 구조물에서의 온도 응력 발생 메커니즘을 명확히 하고 기본 자료를 제공하고자 하였다. 이 글이 매스 콘크리트에서의 수화열에 의한 온도 응력 발생에 대한 이해와 검토에 도움이 되기를 바라는 바이다.

#### 참고 문헌

1. ACI Committee 207, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, 1994
2. CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures (MC-90)", Thomas Telford, 1993
3. 日本土木學會, "コンクリート標準示方書(施工編)", 1991
4. 日本コンクリート工學協會, "マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム", 1982. 9