

수치분석을 통한 내부구속 매스콘크리트의 온도균열지수 결정

Determination of Thermal Cracking Index of Internal Restricted Mass Concrete Using a Numerical Analysis

서 기 영*

Seo, Ki-Young

김 희 성**

Kim, Hee-Sung

진 치 섭***

Jin, Chi-Sub

Abstract

The service life of concrete structure is to a great extent influenced by crack developed at early ages of concrete material. Especially, hydration heat is a main cause of thermal cracking at mass concrete structures. The thermal cracking of massive structure is analyzed of the thermal cracking index which was presented Concrete Standard Specifications. The thesis analyzed the thermal cracking index which considered various variable (cement type, height of casting, curing condition, concrete mixing temperature, the unit cement content) at internal restricted mass concrete. The analysis result is denoted increase and decrease rate of thermal cracking index whenever the variables change. The results is helped to understand thermal cracking every time structures is designed and constructed. And I think that it is useful economic and stable design of mass concrete structures.

요 지

콘크리트 구조물의 사용수명은 콘크리트의 초기에 발생하는 균열에 큰 영향을 받는다. 특히 매스콘크리트 구조물에서는 수화열이 초기 온도균열의 주요한 원인이 된다. 이러한 온도균열은 콘크리트 표준시방서에 제시된 온도균열지수를 통해 분석할 수 있다. 따라서 본 논문은 내부구속이 지배적인 매스콘크리트에서 여러 변수(시멘트종류, 타설높이, 양생조건, 타설온도, 단위시멘트량)에 따른 온도균열지수를 해석적으로 분석하였고, 분석결과는 변수의 변화에 따른 온도균열지수의 증감률로 나타내었다. 이러한 결과는 시공이나 설계시 온도균열을 파악하는 데 도움을 주어 경제적이고 안정적인 매스콘크리트 구조물의 설계에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

Keywords : Mass Concrete, Hydration Heat, Thermal Cracking Index

핵심 용어 : 매스콘크리트, 수화열, 온도균열지수

* 정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 동서대학교 건축·토목시스템공학부 전임강사

*** 정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

E-mail : aricari@pusan.ac.kr 051-510-1534

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2007년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

수화열에 의한 온도응력은 1930년대 대형 댐의 건설로 인해 처음 연구되었고, 그 이후에 많은 연구가 진행되고 있다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 특히 배합수나 사용골재를 냉각시키는 프리쿨링(pre-cooling) 공법과 파이프에 냉각수를 통과시켜 수화열을 감소시키는 파이프쿨링(pipe-cooling) 공법⁽⁴⁾⁽¹¹⁾ 또는 저발열 시멘트의 사용으로 콘크리트 자체의 발열량을 저감시키는 연구⁽⁶⁾⁽⁷⁾가 활발히 진행되어 왔다. 또한 콘크리트의 수화반응으로 인해 발생하는 열과 이를 발생시키는 인자들과의 관계를 규명하는 연구⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾는 수행되고 있으나 온도균열 정도를 파악할 수 있는 온도균열지수와 이에 영향을 미치는 인자들과의 관계에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

현행 콘크리트 표준시방서⁽³⁾에서는 매스콘크리트의 온도균열에 대한 평가를 온도균열지수로 하도록 되어 있고, 온도균열지수는 콘크리트의 인장강도와 수화열에 의해 생기는 온도응력의 비로써 구하는 정밀법과 구조물 내·외부 온도차를 이용해 구하는 간략식으로 구할 수 있다. 간략식은 수화열에 의한 균열발생 우려가 크지 않을 것으로 판단되는 곳에서 평가하도록 명시되어 있다. 그러나 간략식으로 구한 온도균열지수는 현장적용에 쉬운 장점이 있어 수화열에 의한 균열발생이 우려되는 곳에서도 사용되고 있는 실정이다. 하지만 수화열에 의해 발생하는 온도균열은 구조물의 시공 초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 특히 장기적인 내구성능 저하를 초래하기 때문에 매우 중요하게 다루어져야 한다. 따라서 매스콘크리트의 설계나 시공 및 관리단계에서는 간략식보다 정밀식으로 온도균열지수를 산출해 온도균열을 평가해야 한다. 또한 매스콘크리트 구조물에서는 구조물의 중요도나 기능 그리고 환경조건 등에 따라 요구되는 온도균열지수가 다르기 때문에 각기 다른 온도균열제어 대책을 제시해야 한다. 이를 위해선 중요위치에서의 정확한 온도균열지수를 산정해야 하고, 이렇게 산정된 온도균열지수를 통해 설계단계에서부터 시공목적에 부합하는 온도균열제어 방법을 제시해야 한다.

따라서 본 연구에서는 내부구속이 지배적인 매스콘

크리트의 시멘트종류, 타설높이, 양생조건, 타설온도, 단위시멘트량, 재료물성치 등을 고려해 구한 온도균열지수를 활용하여, 시공현장이나 설계시 쉽게 온도균열 정도를 파악할 수 있게 하여, 경제적이고 안정적인 매스콘크리트 구조물 설계가 가능하도록 하고자 한다.

2. 매스콘크리트에 관한 시방서 기준

콘크리트 표준시방서에서는 매스콘크리트로 다루어져야 하는 구조물의 부재치수를 넓이가 넓은 평판구조에서는 두께가 80cm이상, 하단이 구속된 벽체에서는 두께 50cm이상으로 규정하고 있다. 이러한 매스콘크리트의 온도균열에 대한 검토는 온도균열지수에 의해 평가하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 온도균열지수는 식(1)과 같다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (1)$$

$I_{cr}(t)$ = 재령(t)일 때 온도균열지수

$f_{sp}(t)$ = 재령(t)일 때 콘크리트 인장강도 (MPa)

$f_t(t)$ = 재령(t)일 때 온도응력의 최대값 (MPa)

수화열에 의한 균열발생 우려가 크지 않다고 판단되는 구조물의 경우 식(2)와 같이 간단한 방법으로 온도균열지수를 구해 평가할 수 있다.

$$I_{cr} = \frac{15}{\Delta T_i} \quad (2)$$

ΔT_i : 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차(°C)

또한, 온도균열지수는 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응할 수 있게 선정하여야 하며, 표준적인 온도균열지수 값은 다음과 같다.

- 균열발생을 방지하여야 할 경우 : 1.5 이상
- 균열발생을 제한할 경우 : 1.2 ~ 1.5
- 유해한 균열발생을 제한할 경우 : 0.7 ~ 1.2

3. 유한요소 해석 모델

3.1 유한요소해석 일반

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 MIDAS⁽¹²⁾를 이용하여 수화열에 관한 온도응력 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 모델은 Fig. 1과 같이 내부구속이 지배적인 구조물의 가장 전형적인 하부기초 구조물을 선택하였다. 부재크기는 가로×세로×높이가 각각 10×10×Dm로 하였으며, D는 현행 콘크리트 표준시방서에 매스콘크리트로 다루어지는 0.8m에서 1.2m까지 0.2m씩 증가시켰다. 지반은 사질토 지반으로 가정하였고, 열확산 범위를 고려하여 지반부분은 20×20×3m로 설정하였다.⁽⁴⁾ 재료의 물성값도 표준시방서에 제시되어 있는 값들을 기초로 하여 Table 1, 2과 같다. 대상구조물에 대해 3차원해석을 실시하였는데, 대칭성을 고려하여 해석시 1/4 크기에 대해서 해

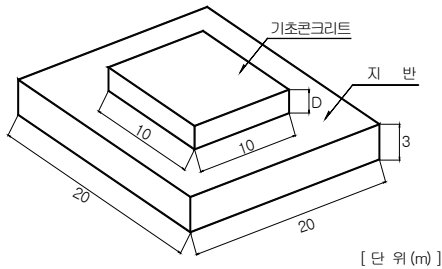


Fig. 1 수화열 해석모델

Table 1 재료의 열적특성

열적 특성	콘크리트	지 반
열전도율(W/m ² °C)	2.6~2.8	1.0~2.2
비열(KJ/kg°C)	1.05~1.26	0.84
대류계수(W/m ² °C)	14, 8, 6	14
타설온도(°C)	10, 20, 30	-

Table 2 재료의 역학적 특성

역학적 특성	콘크리트	지 반
설계강도(MPa)	24	-
탄성계수(MPa)	23000	-
열팽창계수	1.0 × 10 ⁻⁵	1.0 × 10 ⁻⁵
프와송비	0.18	0.2

석을 실시하였다. 1/4 대칭모델을 사용한 이유는 해석 시간의 단축뿐만 아니라, 결과 검토시 내부에 발생한 온도분포 및 응력분포를 확인하는 데도 편리하므로 효율적인 해석모델로 판단되었기 때문이다.

3.2 초기조건 및 경계조건

수화열 해석에 있어서 초기조건은 콘크리트의 타설 온도, 지반의 초기온도, 경계조건 등이 있다. 콘크리트의 타설온도는 각각 10, 20, 30 °C 일 때로 나누어서 해석하였고, 기초부가 타설되는 지반의 초기온도는 20 °C로 가정하였다. 경계조건은 구조물의 외부에 노출되는 표면부에서는 열전달 정도를 나타내는 대류계수에 의해서 정의하였고, 지반부의 경계조건은 지반스프링이나 고정지점을 사용하면 콘크리트에서 발생된 열이 지반으로 전달되는 것을 제대로 모사할 수 없어 지반도 비열과 열전도율을 가진 부재재질로 모델링을 하여 실제 거동과 근접하게 모델링하였다. 대류계수는 콘크리트 표준시방서에 제시되어 있는 값들 중 실제 현장에서 사용 빈도가 높은 거푸집이나 양생조건인 14, 8, 6 W/m²°C일 때로 나누어서 해석하였다. 그리고 사질토 지반의 열전도율은 IGSHPA(International Ground Source Heat Pump Association)⁽¹³⁾에서 제시된 범위의 값을 사용하였다.

4. 해석 결과

4.1 개요

온도균열지수에 영향을 미치는 인자들은 무수히 많다. 그러나 본 연구에서는 온도균열지수에 영향을 크게 미치는 시멘트종류, 타설높이, 양생조건, 타설온도, 단위시멘트량, 재료물성치 등의 변수를 변화시키며 해석하였다. 매스콘크리트의 수화열 해석결과는 각 절점마다 나타나므로 모든 절점의 온도응력과 인장강도를 검토한 후 가장 불리한 위치에서의 온도균열지수를 찾아야 한다. 그러나 일반적으로 매스콘크리트 해석시 가장 불리하게 여겨지는 부분은 구조물의 중심부분과 구조물의 표면부분이다.

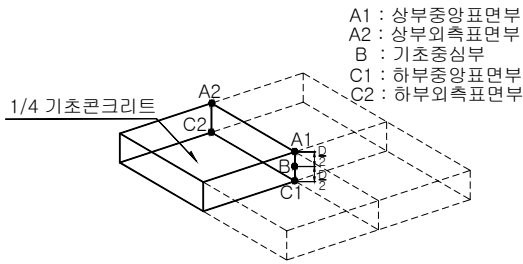


Fig. 2 수화열 해석위치

따라서 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 온도균열지수의 변동폭이 심하고 위험할 것으로 예상되는 5곳을 미리 정하고, 몇 번의 수치분석결과를 통해 각 위치별 대표절점을 상부외측표면부(A2), 기초중심부(B), 하부외측표면부(C2) 3곳으로 정하였다. 그리고 그 절점에서의 온도응력을 파악한 후 온도균열지수를 분석하였다. 상부중앙표면부(A1)는 A2 위치에서의 온도응력과 유사하지만 조금 작은 값을 가져 제외하였고, 하부중앙표면부(C1)는 다른 위치에 비해 온도균열지수가 높고, 변동폭이 작아 온도균열에 가장 유리 할 것으로 판단되어 제외하였다. 시멘트의 종류에 따라 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement)는 OPC로 표시하였고, 중용열포틀랜드시멘트(Moderate heat Portland Cement)는 MPC로 표시하였다. 또한, 단위시멘트량은 320, 330, 340 kg/m³으로 나누어 각각 해석하였다. 콘크리트의 비열 및 열전도율은 일반적으로 Table 2와 같이 일정한 범위를 가지므로 본 연구에서는 그 범위 중에서 MIN(열전도율 2.6, 비열 1.05), MID(열전도율 2.7, 비열 1.15), MAX(열전도율 2.8, 비열 1.26)로 나누어 해석하였다.

4.2 정밀식과 간략식에 의한 온도균열지수의 비교

Table 3은 2장에서 설명했던 콘크리트의 인장강도와 온도응력의 비(정밀식)를 통해 구한 온도균열지수와 구조물의 내·외부온도차(간략식)를 통해 구한 온도균열지수를 비교하였다. 이는 자주 사용되고 있는 간략식으로 구한 온도균열지수의 신뢰성이 어느 정도 인지를 파악하고, 간략식으로 구한 온도균열지수의 문

Table 3 온도균열지수의 비교

(a) 타설높이 1.0m일 때

타설온도	시멘트종류(대류계수)				
	MPC (8)	MPC (14)	OPC (6)	OPC (8)	
10℃	정밀식	2.11	2.08	1.59	1.46
	간략식	0.94	0.86	0.77	0.69
	ΔT_i (℃)	16	17.4	19.4	21.6
20℃	정밀식	1.71	1.62	1.41	1.26
	간략식	0.82	0.71	0.75	0.65
	ΔT_i (℃)	18.2	21.1	20	23
30℃	정밀식	1.42	1.31	1.32	1.16
	간략식	0.73	0.64	0.74	0.66
	ΔT_i (℃)	20.6	23.6	20.3	22.8

(b) 타설높이 1.2m일 때

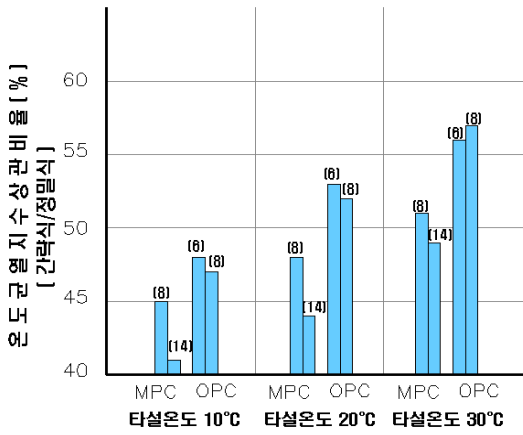
타설온도	시멘트종류(대류계수)				
	MPC (8)	MPC (14)	OPC (6)	OPC (8)	
10℃	정밀식	1.58	1.50	1.25	1.15
	간략식	0.79	0.75	0.67	0.60
	ΔT_i (℃)	18.9	19.9	22.5	24.9
20℃	정밀식	1.36	1.29	1.14	1.02
	간략식	0.71	0.62	0.64	0.56
	ΔT_i (℃)	21	24.2	23.4	26.8
30℃	정밀식	1.14	1.06	1.08	0.95
	간략식	0.60	0.55	0.65	0.58
	ΔT_i (℃)	24.9	27.1	23.1	26

제점이 무엇인지를 파악하기 위해 다양한 조건에서 두 식으로 구한 온도균열지수를 비교하였다.

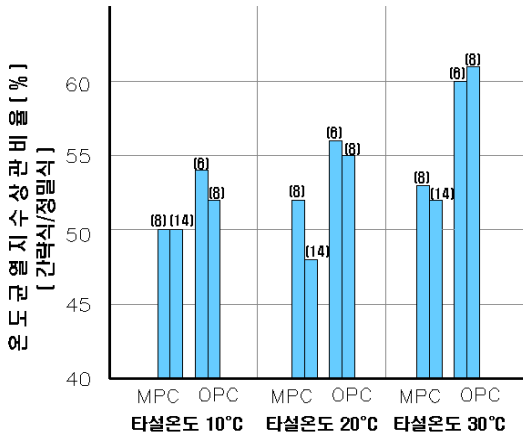
해석조건은 단위시멘트량이 330 kg/m³, 콘크리트의 비열 및 열전도율은 MID를 사용하였다. 시멘트종류는 OPC와 MPC를 사용했고, OPC와 MPC 뒤의 괄호안 숫자는 Table 1에서 제시된 구조물의 표면 양생조건에 따른 대류계수를 의미한다. ΔT_i 는 구조물의 내부온도가 최고일 때 내·외부 온도차를 표시하였다.

Fig. 3은 Table 3에서 제시된 정밀식과 간략식을 통해 구한 온도균열지수의 편차를 보여주는 그래프이다. 동일 조건에서 정밀식에 대한 간략식으로 구한 온도균열지수의 비율을 백분율로 표시하였다.

여러 조건에서의 정밀식과 간략식으로 구한 온도균열지수를 비교한 결과 OPC, MPC 경우에서 간략식이 정밀식으로 구한 온도균열지수의 상관 비율이 아주 낮게 나타났다. 또한 타설온도가 증가할수록, 타설높이가 커질수록 상관비율은 조금씩 높아지지만 전체적으로 낮음을 알 수 있다.



(a) 타설높이 1.0m일 때



(b) 타설높이 1.2m일 때

Fig. 3 정밀식과 간략식에 의한 온도균열지수 비교

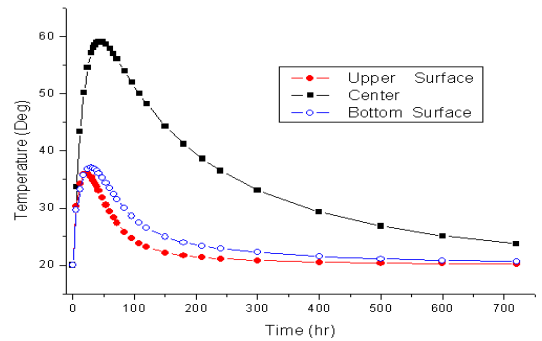
이와 같은 결과는 구조물의 내·외부 온도차가 최대라도 온도차가 발생하는 시기에 따라 콘크리트의 인장강도는 달라지기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 다시 말해 내·외부 온도차로 구하는 온도균열지수에는 시간에 관한 영향을 고려하지 않았기 때문에 신뢰성이 낮게 나타난다고 판단된다.

따라서 콘크리트 표준시방서에서 제시된 간략식을 통해 구하는 온도균열지수는 신뢰성이 낮으므로 사용을 제한하여야 하며, 추후 기존의 간략식에 시간에 관한 사항을 추가하면 신뢰성이 높은 온도균열지수를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

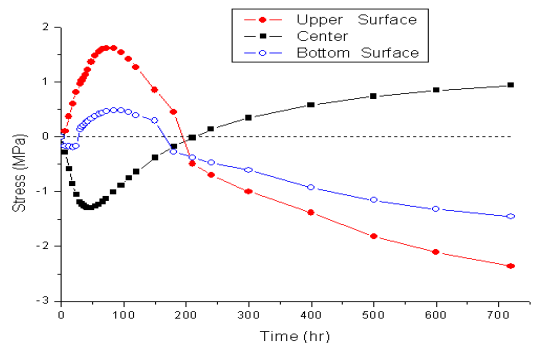
4.3 타설온도에 따른 온도균열지수의 변화

타설온도에 따른 온도균열지수의 변화를 알아보기에 앞서 본 논문의 해석 case의 온도분포와 온도응력 분포형태를 살펴보았다. 선택한 해석 case는 OPC를 사용하고, 타설온도가 20°C, 타설높이가 120cm일 때의 위치별 온도 및 온도응력 분포곡선을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)를 통해 내·외부 온도차는 상부표면부와 기초중심부에서 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)는 온도응력곡선의 형태가 초기재령에서는 상부와 하부표면부에서 인장응력이 발생하고 재령후기에서는 기초중심부에서 인장응력이 발생하는 내부구속이 지배적인 매스콘크리트의 응력곡선 형태임을 알 수 있다.



(a) 위치별 온도분포곡선



(b) 위치별 응력분포곡선

Fig. 4 온도 및 응력 분포곡선

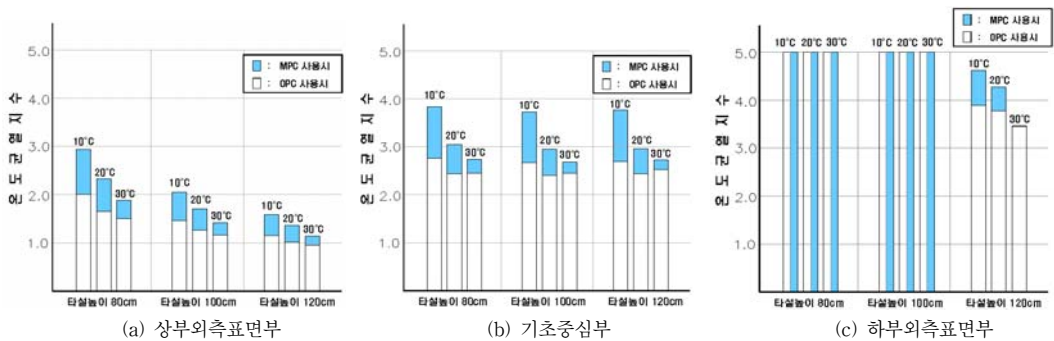


Fig. 5 타설온도에 따른 온도균열지수 비교

다음으로 Fig. 5는 타설온도에 따른 기초콘크리트의 위치별 온도균열지수를 알아보기 위해 단위시멘트량 330kg/m^3 , 콘크리트의 비열 및 열전도율 MID, 양생 및 거푸집에 따른 대류계수는 $8\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, 지반의 열전도율은 $1.0\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 고정하고 타설온도를 10, 20, 30 $^\circ\text{C}$ 로 변화시켰을 때 타설높이별 온도균열지수를 분석하였다.

일반적으로 타설온도가 낮아지면 온도변화에 영향을 미치는 온도상승속도가 낮아져서 온도응력의 발생속도를 늦추게 만든다. 따라서 수화열에 의한 온도응력의 발생시간이 늦어지는 반면, 인장강도는 증가하므로 온도균열지수는 증가할 것으로 판단된다. 타설온도에 따른 온도균열지수의 변동폭은 조건에 따라 조금씩 다르게 나타나겠지만 본 논문의 조건에서 타설온도에 따른 온도균열지수의 증감율을 살펴보면 다음과 같다.

상부의측표면부에서는 OPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 에서 20 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 온도균열지수는 대략 15%정도 감소하고, 20 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 8%정도 감소한다. MPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 씩 증가할 때 마다 온도균열지수는 대략 17% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

기초중심부에서는 OPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 에서 20 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 온도균열지수가 10%정도 감소하지만 20 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때에는 온도균열지수의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. MPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 에서 20 $^\circ\text{C}$, 20 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 온도균열지수는 각각 20%, 10% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

하부의측표면부에서는 타설높이가 80, 100 cm 일 때에는 타설온도에 상관없이 OPC, MPC 모두 온도균열지수가 5이상의 값을 나타내었고, 타설높이가 120 cm 일 때 OPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 에서 20 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 온도균열지수가 5%정도 감소하지만 20 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때에는 10% 정도 감소하는 것으로 나타났다. MPC 사용시 타설온도가 10 $^\circ\text{C}$ 에서 20 $^\circ\text{C}$, 20 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 로 증가할 때 온도균열지수는 각각 10%, 20% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 표준시방서에서는 여러 실험과 관측사례를 분석한 결과 온도균열지수가 2이상일 경우 온도균열 발생확률이 거의 없는 것으로 제시되어 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 논문에서는 온도균열지수가 5이상일 경우 일정하게 5로 표시하였고, Fig. 5(c)의 타설높이 80, 120 cm 경우처럼 OPC, MPC 모두 온도균열지수가 5이상 일 때는 그림과 같이 동일하게 5로 표시하였다.

4.4 단위시멘트량에 따른 온도균열지수의 변화

Fig. 6는 단위시멘트량에 따른 기초콘크리트의 위치별 온도균열지수를 구하기 위해 타설온도 20 $^\circ\text{C}$, 콘크리트의비열 및 열전도율 MID, 양생 및 거푸집에 따른 대류계수는 $8\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, 지반의 열전도율은 $1.0\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 고정하고 단위시멘트량을 320, 330, 340 kg/m^3 으로 변화시켰을 때 타설높이별 온도균열지수를 나타내었다.

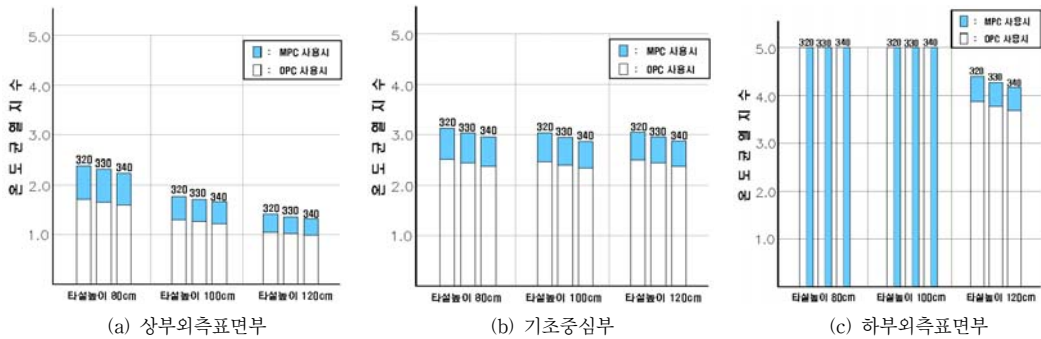


Fig. 6 단위시멘트량에 따른 온도균열지수 비교

콘크리트의 발열량은 시멘트와 물과의 반응으로 일어나므로 단위시멘트량이 증가하면 콘크리트의 발열량도 증가한다. 뿐만 아니라, 단위시멘트량이 증가하면 온도상승속도도 빨라져 초기 재령에서 높은 인장응력을 발생시켜 온도균열지수를 감소시킬 것으로 판단된다.

단위시멘트량의 변화에 따른 위치별 온도균열지수의 증감률을 살펴보면 다음과 같다. 상부외측표면부와 기초중심부에서는 OPC, MPC 모두 단위시멘트량이 10 kg/m^3 증가할 때마다 온도균열지수는 3% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

하부외측표면부에서는 타설높이가 80, 100cm 일 경우에는 모두 온도균열지수가 5보다 크게 나타나 일정하게 5로 표시하였고, 타설높이가 120cm 일 경우 단위시멘트량이 10 kg/m^3 증가할 때마다 OPC, MPC 모두 약 3%의 온도균열지수가 하락하는 것으로 나타났다.

따라서 단위시멘트량이 10 kg/m^3 증가하면 구조물의 위치에 상관없이 온도균열지수는 대략 3% 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

4.5 콘크리트의 비열 및 열전도율에 따른 온도균열지수의 변화

Fig. 7은 콘크리트의 비열 및 열전도율에 따른 기초콘크리트의 위치별 온도균열지수를 알아보기 위해 타설온도 20°C , 단위시멘트량 330 kg/m^3 , 양생 및 거푸집에 따른 대류계수는 $8 \text{ W/m}^2\text{C}$, 지반의 열전도율은 1.0 W/m^2 으로 고정하고 콘크리트의 비열 및 열전도율을 MIN, MID, MAX로 변화시켰을 때 타설 높이별 온도균열지수를 나타내었다.

콘크리트의 비열이나 열전도율처럼 실험을 통해 구하는 상수를 변수로 채택하여 분석한 이유는 매스콘크리트의 수화열 해석시 실험을 통해 구하는 상수의 변

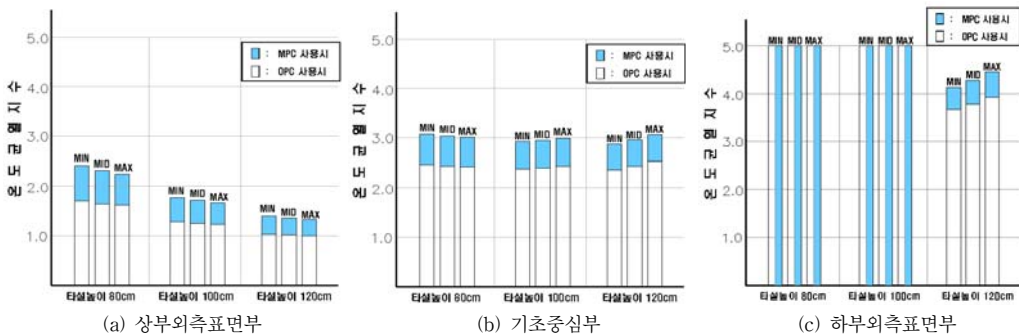


Fig. 7 콘크리트의 비열 및 열전도율에 따른 온도균열지수 비교

화에 따른 온도균열지수의 변동폭을 낮으므로써, 기존의 수화열 해석자료의 활용도가 커지고, 기존자료의 해석이나 실험과의 비교 분석이 용이할 것으로 판단되었기 때문에 실험을 통해 구하는 상수들의 변화에 따른 온도균열지수의 변동폭을 수치분석을 통해 알아보았다.

위치별 세부사항을 살펴보면, 먼저 상부외측표면부에서는 콘크리트의 비열 및 열전도율이 MIN에서 MID로, MID에서 MAX로 증가할 때마다 온도균열지수는 각각 3% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

기초중심부에서는 기초의 타설높이가 80 cm 일 때에는 콘크리트의 비열 및 열전도율이 MIN에서 MID로, MID에서 MAX로 증가하면 온도균열지수가 1% 정도 감소하지만, 100 cm 일 때에는 1%, 120 cm 일 경우에는 3% 정도 증가한다.

하부외측표면부에서는 콘크리트의 비열 및 열전도율이 MIN에서 MID로, MID에서 MAX로 증가할 때마다 온도균열지수는 각각 3% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

4.6 지반의 열전도율에 따른 온도균열지수의 변화

Fig. 8은 지반의 열전도율에 따른 기초콘크리트의 위치별 온도균열지수를 구하기 위해 타설온도 20℃, 단위시멘트량 330 kg/m³, 콘크리트의 비열 및 열전도율 MID, 양생 및 거푸집에 따른 대류계수는 8 W/m²℃로 고정하고 지반의 열전도율을 1.0, 1.6, 2.2

W/m²℃로 변화시켰을 때 타설높이별 온도균열지수를 나타내었다.

상부외측표면부에서는 OPC, MPC 사용시 모두 지반의 열전도율이 1.0에서 1.6으로 증가할 때에는 온도균열지수가 5% 정도 증가하고 열전도율이 1.6에서 2.2로 증가할 때에는 온도균열지수가 3% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

기초중심부에서는 지반의 열전도율이 1.0에서 1.6, 1.6에서 2.2로 증가할 때 온도균열지수는 타설높이가 80 cm 일 때에는 1% 증가하다가 타설높이가 100, 120 cm 일 때에는 각각 1%, 3% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

하부외측표면부에서는 OPC의 경우에는 지반의 열전도율이 1.0에서 1.6, 1.6에서 2.2로 증가할 때 5% 정도의 온도균열지수가 하락하는 반면 MPC의 경우에는 대략 2% 정도의 온도균열지수가 하락하는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과는 지반의 열전도율이 높아질수록 콘크리트 구조물과 지반과의 열이동이 더욱 원활하게 된다. 이로 인해 지반의 열전도율이 높아질수록 전체 발생하는 수화열 중에 지반으로 이동하는 수화열이 상대적으로 증가하게 되고 지반으로 증가된 수화열 만큼 상부표면부로의 이동량이 줄어들었기 때문이라 판단된다.

4.7 타설높이에 따른 온도균열지수의 변화

Table 4는 타설온도에 따라 OPC를 사용한 경우에

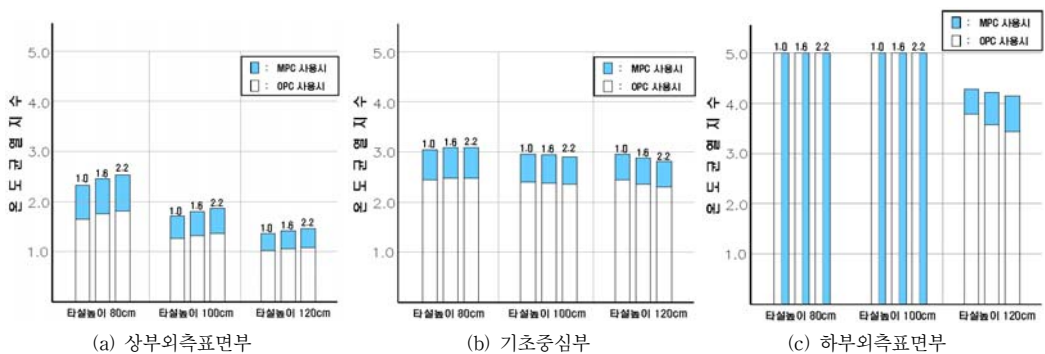


Fig. 8 지반의 열전도율에 따른 온도균열지수 비교

대한 MPC를 사용했을 경우 증가되는 온도균열지수의 비율을 나타내었다. 그리고 Table 5은 타설온도 20℃로 고정한 후 다른 변수들을 변화시켰을 때 OPC를

Table 4 타설높이별 온도균열지수 증가표 - I

위 치	타설높이			
	타설온도	80 cm	100 cm	120 cm
상부 외측 표면부	10 ℃	↑ 47 %	↑ 40 %	↑ 37 %
	20 ℃	↑ 41 %	↑ 36 %	↑ 33 %
	30 ℃	↑ 25 %	↑ 22 %	↑ 20 %
기초 중심부	10 ℃	↑ 39 %	↑ 39 %	↑ 40 %
	20 ℃	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 21 %
	30 ℃	↑ 11 %	↑ 9 %	↑ 8 %
하부 외측 표면부	10 ℃	-	-	↑ 19 %
	20 ℃	-	-	↑ 13 %
	30 ℃	-	-	↑ 1 %

Table 5 타설높이별 온도균열지수 증가표 - II

위 치	변수	타설높이			
		80 cm	100 cm	120 cm	
상부 외측 표면부	단위 시멘트량 (kg/m ³)	320	↑ 40 %	↑ 36 %	↑ 34 %
		330	↑ 40 %	↑ 36 %	↑ 33 %
		340	↑ 40 %	↑ 36 %	↑ 33 %
	콘크리트의 비열 및 열전도율	MIN	↑ 41 %	↑ 37 %	↑ 35 %
		MID	↑ 41 %	↑ 37 %	↑ 33 %
		MAX	↑ 39 %	↑ 36 %	↑ 33 %
	지반의 열전도율 (W/m ² ℃)	1.0	↑ 41 %	↑ 36 %	↑ 33 %
		1.6	↑ 40 %	↑ 36 %	↑ 34 %
		2.2	↑ 40 %	↑ 37 %	↑ 35 %
	기초 중심부	단위 시멘트량 (kg/m ³)	320	↑ 25 %	↑ 23 %
330			↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 21 %
340			↑ 24 %	↑ 23 %	↑ 21 %
콘크리트의 비열 및 열전도율		MIN	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 22 %
		MID	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 21 %
		MAX	↑ 24 %	↑ 23 %	↑ 21 %
지반의 열전도율 (W/m ² ℃)		1.0	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 21 %
		1.6	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 22 %
		2.2	↑ 25 %	↑ 23 %	↑ 22 %
하부 외측 표면부		단위 시멘트량 (kg/m ³)	320	-	-
	330		-	-	↑ 13 %
	340		-	-	↑ 13 %
	콘크리트의 비열 및 열전도율	MIN	-	-	↑ 13 %
		MID	-	-	↑ 13 %
		MAX	-	-	↑ 13 %
	지반의 열전도율 (W/m ² ℃)	1.0	-	-	↑ 13 %
		1.6	-	-	↑ 17 %
		2.2	-	-	↑ 20 %

사용한 경우에 대한 MPC를 사용했을 경우 증가되는 온도균열지수의 비율을 나타내었다. 또한 하부의측표면부에서는 타설높이가 80, 100cm일 경우 온도균열지수가 모두 5이상으로 나와 일정하게 5로 표시하였기 때문에 온도균열지수의 증가율을 표시하지 않았다.

Table 5에 제시된 여러 변수들이 변화할 때 온도균열지수의 증가율은 타설높이에 따라 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 이는 타설온도 20℃일 때의 온도균열지수 증가율과 일치한다. 따라서 시멘트종류의 변화에 따른 온도균열지수의 증가율은 타설온도에 따라 일정함을 알 수 있다.

그러나 하부의측표면부에서 지반의 열전도율의 변화에 따른 온도균열지수 증가율은 약간 다른 경향을 보여주는 데, 이는 지반의 열전도율은 하부의측표면부에 직접적인영향을 미치는 인자라 온도균열지수 증가율에 타설온도 뿐만 아니라 지반의 열전도율도 같이 고려되어야 하기 때문이라 판단되어 진다.

4.8 조건별 온도균열지수의 분포

콘크리트 표준시방서에서는 표준적인 온도균열지수를 크게 균열발생을 방지할 경우(1.5이상), 균열발생을 제한할 경우(1.2~1.5), 유해한 균열발생을 제한할 경우(0.7~1.2)로 구분하고 있다. 따라서 본 논문

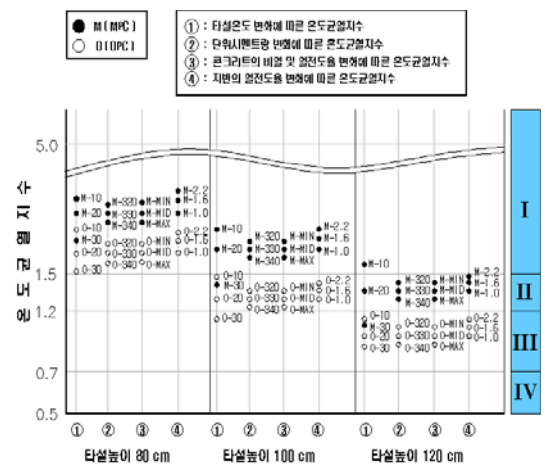


Fig. 9 CASE별 온도균열지수의 분포도(상부외측표면부)

에서는 온도균열지수가 1.5이상인 경우를 I 영역, 1.2~1.5인 구간을 II 영역, 0.7~1.2인 구간을 III 영역, 0.7미만인 구간을 IV 영역으로 구분하였다.

Fig. 9는 상부외측표면부에서의 온도균열의 정도를 파악하기 위해 앞 절의 조건별 온도균열지수를 하나의 그래프에 표시하였다.

상부외측표면부에서는 시멘트종류와 타설높이에 따라 온도균열지수의 영역구분이 이루어지는 것을 알 수 있다. 타설높이가 80 cm일 때에는 OPC, MPC 경우 모두 I 영역에 분포하고, 타설높이가 100 cm일 경우에는 MPC를 사용한 경우는 I 영역, OPC를 사용한 경우에는 II 영역에 온도균열지수가 분포함을 알 수 있다. 또한, 타설높이가 120 cm일 경우에는 MPC는 II 영역, OPC일 경우에는 III 영역에 온도균열지수가 분포함을 알 수 있다.

기초중심부, 하부외측표면부에서의 온도균열지수는 해석한 모든 경우에 1.5이상의 값을 가지므로 모두 I 영역에 해당하므로 따로 표시하지 않았다.

이상과 같이, 내부구속이 지배적인 매스콘크리트에서는 상부외측표면부가 가장 온도균열에 취약한 부분임을 알 수 있고, 온도균열을 제어하는 방법 중에 시멘트종류와 타설높이가 가장 먼저 고려되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 내부구속이 지배적인 매스콘크리트의 수화열 해석으로 구조물의 위치별 온도균열지수에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트 표준시방서에 제시된 내·외부 온도차를 통해 구한 온도균열지수는 시간에 대한 사항을 고려하지 못해 신뢰성이 낮으므로 사용을 제한해야 한다.
- 2) 타설온도의 증가에 따른 온도균열지수의 감소폭은 보통포틀랜드시멘트를 사용했을 경우보다 중용열 포틀랜드시멘트를 사용했을 경우 더욱 크게 나타났다. 따라서 수화열을 저감시킬 목적으로 저발열 시멘트를 사용할 경우 타설온도에 대해 좀더 세심

한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

- 3) 단위시멘트량이 10 kg/m³ 증가하면 구조물의 위치에 관계없이 온도균열지수는 3% 정도 감소한다.
- 4) 시멘트 종류의 변화에 따른 온도균열지수 증가 비율은 타설온도에 따라 일정하다.
- 5) 상부외측표면부가 온도균열에 가장 위험하고, 상부외측표면부에서의 온도균열을 제어하기 위해선 먼저 시멘트종류와 타설높이를 고려한 다음 타설온도를 제어하는 것이 가장 효과적인 방법일 것으로 판단된다.
- 6) 추후 기존의 온도균열지수를 구하는 간략식에 시간에 관한 보정계수를 적용하여 좀더 정확한 온도균열지수를 구하는 방법에 대한 연구와 이를 모형실험이나 현장계측 값과의 비교·검토 작업이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 최명성, 김운용, 이상균, 김진근, “양생조건·외기온도·비등효과를 고려한 콘크리트 외기대류계수의 결정”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.17, No.4, 2005, pp.551-558.
2. 이장화, “주변환경을 고려한 매스콘크리트의 온도이력 해석”, 공학박사 학위논문, 1995.
3. 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준 시방서”, 2003.
4. 김국한, “파이프 쿨링을 고려한 콘크리트 구조물의 수화열 해석에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 2001.
5. 정철현, 강석화, 정한중, 박칠림, 오병환, “매스 콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제6권, 제5호, 1994, pp.203-212.
6. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, “시멘트 및 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권, 제3호, 1995, pp.211-219.
7. Pane, “Hydration Kinetics and Thermomechanics of Blended Cement System”, degree of Doctor of Philosophy, 2001.
8. Fernando, A. B., Mendes, P. A., and Mirambell, E., “Heat of Hydration Effects in Concrete Structures”, ACI Materials Journal, Vol.89, No3, 1992, pp.139-148.
9. ACI Committee 207, “Mass Concrete”, Journal of ACI, ACI 207. 1R, 1996.

-
10. ACI Committee 207, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete", Journal of ACI, ACI 207. 2R, 1996.
 11. Hiromi Kawaraba, Tadao Kanokogi, and Tadaaki Tanabe, "Development of the FEM Program for the Analysis of Pipe Cooling Effects on the Thermal Stress of Massive Concrete", Transactions of JCI, Vol. 8, 1996, pp 125-130.
 12. MIDAS, "MIDAS Analysis & Design", 2000.
 13. IGSHPA, "Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems : Installation Guide", 1988.
- (접수일자 : 2006년 4월 14일)