

## 시공단계를 고려한 교각기초의 수화열해석

박 원 태<sup>1\*</sup>

### A study of the Heat of Hydration Analysis Underground Pier Footing by Constrution Stages

Weon-Tae Park<sup>1\*</sup>

**요 약** 최근 들어 매스콘크리트 구조물의 해석에 대한 연구가 증가 추세에 있다. 대형 콘크리트 구조물은 일괄 타설하지 않고 분할하여 타설하기 때문에 서로 다른 발열특성 및 시간의존적 특성을 지닌 콘크리트로 구성된 구조물이 된다. 따라서 실제 구조물과 근접한 수화열해석 모델을 만들기 위해서는 시공단계를 고려한 모델이 필요하다. 본 연구에서는 교각 기초의 온도균열을 방지하기 위하여 열응력 검토를 실시하였으며, 이때 기초는 보통 콘크리트를 사용하고 12 m×14 m의 면적과 3 m 높이를 가지는 것을 모델로 하였다. 2단계로 분할하여 타설된 기초구조물에 대해서 시공단계별 해석을 수행하고 그 결과를 분석합니다.

**Abstract** Lately, massive concrete structures are increasingly built. Mass concrete structures are cast in many stages with construction joints. Individually constructed segment exhibit different heat source properties and time dependent properties. As such construction stages must be incorporated in a heat of hydration analysis model to truly reflect a real construction process. Thermal stress analysis is conducted to find the way of controlling the thermal crack of pier footing mat in this paper. The footing mat model for the analysis is 12 m×14 m area and 3 m height. This study show the process of construction stage and analyzes the results for a foundation structure constructed in 2 stage pours.

**Key Words** : Construction stages, Thermal stress, Heat of hydration

#### 1. 서 론

최근들어 콘크리트 구조물중 단면이 큰 대형콘크리트 구조물이나 고강도 및 고내구성 콘크리트의 필요성이 증가함에 따라 초기재령에서 발생하는 많은 수화열이 내부에 축적됨으로써 구조물내에 잔류응력 및 내외부구속에 의한 균열발생 가능성이 높게 된다. 특히 교량의 콘크리트 기초 및 교각구조물, 댐구조물, 발전소의 기초구조물, 원자력 발전소의 기초구조물의 시공에 있어서 단시간에 많은 양의 콘크리트를 타설하게되므로 수화열의 발생이 필연적이며, 외부로의 열전달이 잘 이루어지지 않고 내부에 축적되어 과도한 열응력을 발생시킨다. 이와 같이 구조물의 온도변화에 따라 생기는 온도응력이 구조물에 균열을 일으키거나 혹은 구조물설계에서 무시할 수 없는 영향을 주는 경우가 빈번히 일어나고 있다.

이러한 온도 균열은 보통 그 폭이 크고, 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물 시공초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리단계에서 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 또한 대형 콘크리트구조물은 일괄타설 하지 않고 분할하여 타설하기 때문에 서로 다른 발열특성 및 시간 의존적 특성을 지닌 콘크리트로 구성된 구조물이 된다. 따라서 실제구조물과 근접한 수화열 해석모델을 만들기 위해서는 시공단계를 고려한 모델이 필요하다. 본 연구에서는 교각기초의 수화열에 의한 균열을 제어하기 위하여 가장 일반적인 크기의 기초 구조물을 대상으로, 2단계로 분할하여 타설된 기초 구조물에 대하여 시공단계별 해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

#### 2. 수화열에 의한 열전달 및 열응력 해석

국내에서 매스콘크리트의 수화열에 대한 수치해석연구로서 크리프와 각 요소의 온도에 따른 탄성계수를

<sup>1</sup>공주대학교 천안공과대학 건설환경공학부  
\*교신저자: 박원태(pwtac@kongju.ac.kr)

적용한 유한요소법과 온도 크리프 건조수축과 재령을 함께 고려한 유한요소 프로그램이 개발되었다[1-5]. 그리고 매스콘크리트의 응력해석에 앞서 선행되어야 할 온도 해석패키지가 개발되었다. 본 연구에서는 콘크리트부재의 온도 및 온도응력의 해석에 MIDAS/CIVIL6.1.1 프로그램에 의한 유한 요소해석기법을 사용하여 수화열과 온도 응력해석 하였다[6].

**2.1 열전달해석을 위한 유한요소 정식화[8-12]**

식(1)은 열전달해석에 사용되는 기본평형방정식이고, 해석결과는 각 시간별 절점온도가 된다[4].

$$C'T + (K + H) T = F_g + F_b + F_q \quad (1)$$

여기서,

$$C = [\rho(N_i N_j dx dy dz)] \quad (1a)$$

$$K = \left[ \int_v \left[ K_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dx dy dz \right] \quad (1b)$$

$$H = [h N_i N_j dS_h] \quad (1c)$$

$$F_q = \int N_i Q dx dy dz \quad (1d)$$

$$F_h = \int h T_s N_i dS_h \quad (1e)$$

$$F_g = - \int q N_i dS_q \quad (1f)$$

여기서,

- $\rho$  : 밀도
- $C$  : 비열
- $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  : 열전도률
- $h$  : 대류계수
- $Q$  : 발열량
- $q$  : 열속

**2.2 열응력 해석을 위한 유한요소 정식화[6],[8-12]**

열전달 해석에서 얻어진 절점온도분포와 시간과 온도에 따른 재질의 변화, 시간에 따른 건조수축, 시간과 응력에 따른 크리프를 고려하여 매스 콘크리트의 각 단계별 응력을 계산한다.

**2.2.1 온도와 시간에 의한 등가재령, 적산온도 콘크리트의 경화과정에서 발생하는 재질 특성의 변**

화는 온도와 시간의 함수형태로 나타나게 된다. 이러한 현상을 반영하기 위해 등가재령과 적산온도라는 개념을 사용하였다. 등가재령은 CEB-FIP MODEL CODE를 사용하였고, 수축도 이론에 근거한 적산온도는 Ohzagi 식을 사용하였다.

**CEB-FIP MODEL CODE 에서의 등가재령**

$$t_{eq} = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \left[ 13.56 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (2)$$

여기서,

- $t_{eq}$  : 등가재령 (days)
- $\Delta t_i$  : 각 해석 단계에서의 시간간격 (days)
- $T(\Delta t_i)$ : 각 해석 단계에서의 온도 (°C)
- $T_0$  : 1

**Ohzagi 식에 의한 적산온도**

$$M = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \beta \cdot \{T(\Delta t_i) + 10\} \quad (3)$$

여기서,

- $\beta = 0.0003 \{T(\Delta T_i) + 10\}^2 + 0.006 \{T(\Delta T_i) + 10\} + 0.55$
- $M$  : 적산온도 (°C)
- $\Delta t_i$  : 각 해석 단계에서의 시간간격 (days)
- $\Delta T_i$  : 각 해석 단계에서의 온도 (°C)

**2.3 해석에 사용된 콘크리트 물성치[2], [6]**

**2.3.1 압축강도 및 인장강도**

콘크리트시방서, ACI CODE, CEB-FIP MODEL CODE 등에서 제안하고 있는 압축강도 및 인장강도 발현곡선은 식(4), 식(5), 식(6)과 같다.

**콘크리트 시방서 제안식**

중용열포틀랜드시멘트의 경우, 재령에 따른 압축강도 및 인장강도 발현곡선은 식(4)와 같다.

$$F_{cu}(t) = \frac{t}{a + bt_{eq}} F_{cu}(91) \quad (4a)$$

$$F_{sp}(t) = c \sqrt{F_{cu}(t)} \quad (4b)$$

여기서,

- $F_{cu}(t)$  : 재령 t에서 압축강도
- $F_{sp}(t)$  : 재령 t에서 인장강도
- $a, b$  : 시멘트 종류에 따른 계수 ( $a=6.2, b=0.93$ )

$F_{cu}(91)$  : 재령 91에서 압축강도

**ACI CODE 제안식**

$$F_{cu}(t) = \left( \frac{t}{a + bt_{eq}} \right) F_{cu}(28) \quad (5)$$

여기서,

$F_{cu}(t)$  : 재령 t에서 압축강도  
 a, b : 시멘트 종류에 따른 계수  
 $F_{cu}(28)$  : 재령 28일에서 압축강도

**CEB-FIP MODEL CODE 제안식**

$$F_{cu}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t_{eq}/t} \right)^{1/2} \right] \right\} F_{cu}(28) \quad (6)$$

여기서,

s : 시멘트 종류에 따른 계수  
 $F_{cu}(28)$  : 28일 압축강도  
 $t$  : 1 day

**Ohzagi 제안식**

$$F_{cu}(t) = F_{cu}(28) \cdot y \quad (7)$$

여기서,

$y = ax^2 + bx + c$   
 $x = 2.389 \ln \left( \frac{M}{3.5} \right) - 1.0$   
 a, b, c : 콘크리트 종류에 따른 계수  
 $F_{cu}(28)$  : 28일 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)

**2.3.2 탄성계수**

식(8)는 콘크리트 시방서에서 제안하고 있는 콘크리트 탄성계수이다.

$$E_c(t) = \varphi(t) \times 15,000 \sqrt{f_{cu}(t)} \quad (8)$$

여기서,

$E_c(t)$  : 재령 t에서의 유효탄성계수(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\varphi(t)$  : 온도상승시 크리프영향이 커짐에 따른 탄성계수에 대한 보정계수  
 재령 3일까지 :  $\varphi(t) = 0.73$   
 재령 5일 이후 :  $\varphi(t) = 1.0$   
 $F_{cu}(t)$  : 재령 t에서 압축강도 (kg/cm<sup>2</sup>)

**2.3.3 단열온도 상승곡선[2]**

콘크리트 단열온도 상승특성은 콘크리트를 친후 콘크리트 내부의 온도변화를 해석하기 위한 기본적인 정수이며, 일반적으로 식(9)을 사용하여 구한다. 콘크리트

**표 1.** 식(9)에서의 및 의 표준값

타설 온도	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-m})$			
	$Q_{\infty}(C) = aC + b$		$r(C) = gC + h$	
	a	b	$g(\times 10^{-3})$	h
10	0.11	6.0	0.3	0.303
20	0.10	9.0	1.5	0.279
30	0.11	9.0	2.1	0.299

**표 2.** 사용재질 및 열특성 데이터

		기초하부	기초상부	지반
비열(kca/kg °C)		0.25	0.25	0.2
비중(kgf/m <sup>3</sup> )		2500	2500	1800
열전도률(kcal/m hr °C)		2.3	2.3	1.7
대류계수(kcal/m <sup>2</sup> hr °C)	외기 노출면	12	12	12
	철재 거푸집	12	12	-
외기온도(°C)		20, 30	20, 30	-
타설온도(°C)		20, 30	20, 30	-
91일 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		270	270	-
압축강도 발현계수		a=4.5, b=0.95	a=4.5, b=0.95	
91일탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )		$2.7734 \times 10^5$	$2.7734 \times 10^5$	$1.0 \times 10^4$
열팽창계수(°C)		$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
프아송비		0.18	0.18	0.2
단위시멘트량(kgf/m <sup>3</sup> )		320	320	-
발열함수계수		k=41, a=0.759	k=41, a=0.759	-

표준시방서의 단열온도 상승식은 다음과 같다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (9)$$

여기서,

- $Q_{\infty}$  : 최종 단열온도 상승량
  - $Q(t)$  : 재령 t일에서의 단열온도 상승량(°C)
  - $r$  : 온도상승속도에 관한 계수
  - $t$  : 재령(일)
- 식(9)에서의  $Q_{\infty}$  및  $r$ 의 표준값은 표 1과 같다.

### 3. 해석결과

콘크리트의 배합은 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용한 배합으로 가정하였으며 타설 시의 기온과 콘크리트 온도는 봄가을 및 여름의 경우 각각 20°C와 30°C로 보

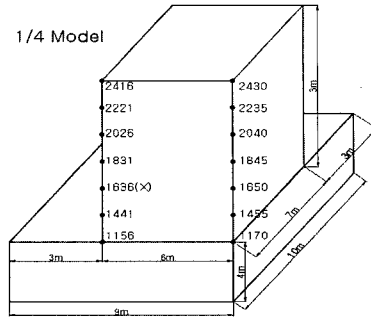
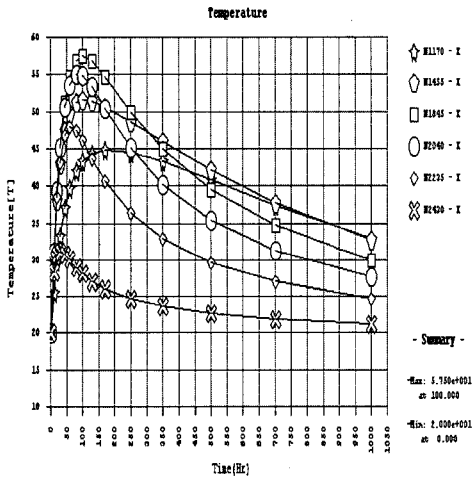


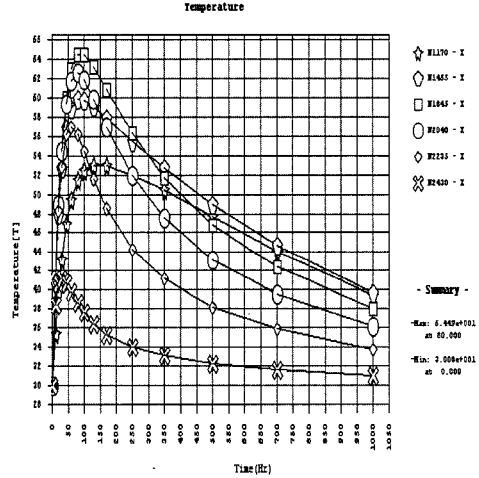
그림 1. 시공단계별수화열해석모델(1/4 대칭 모델)

고 콘크리트 표준시방서를 참고하여 콘크리트의 열적 특성 및 사용재질을 표 2와 같이 가정하였다.

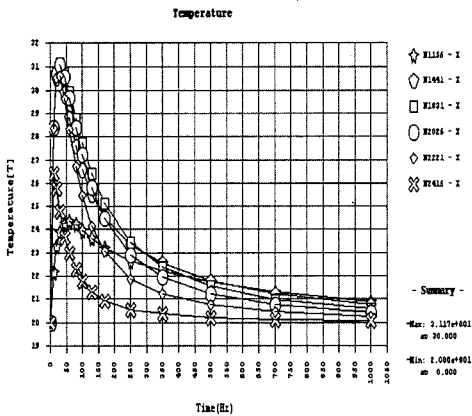
수치해석 예로 교각 기초의 모델은 그림 1과 같은 1/



절점1170 - 절점2430

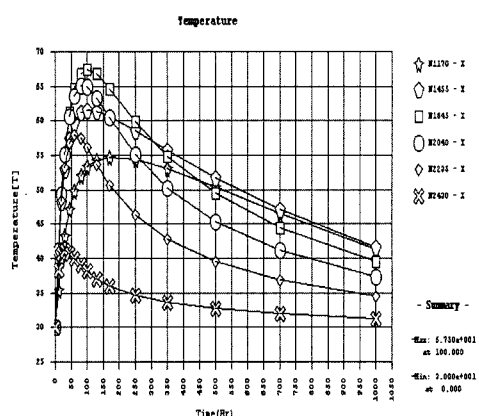


절점 1170 - 절점 2430



절점1156 - 절점2416

(a) 봄 & 가을



node 1156 - node 2416

(b) 여름

그림 2. 표면부와 내부의 온도이력그래프(타설높이 3 m)

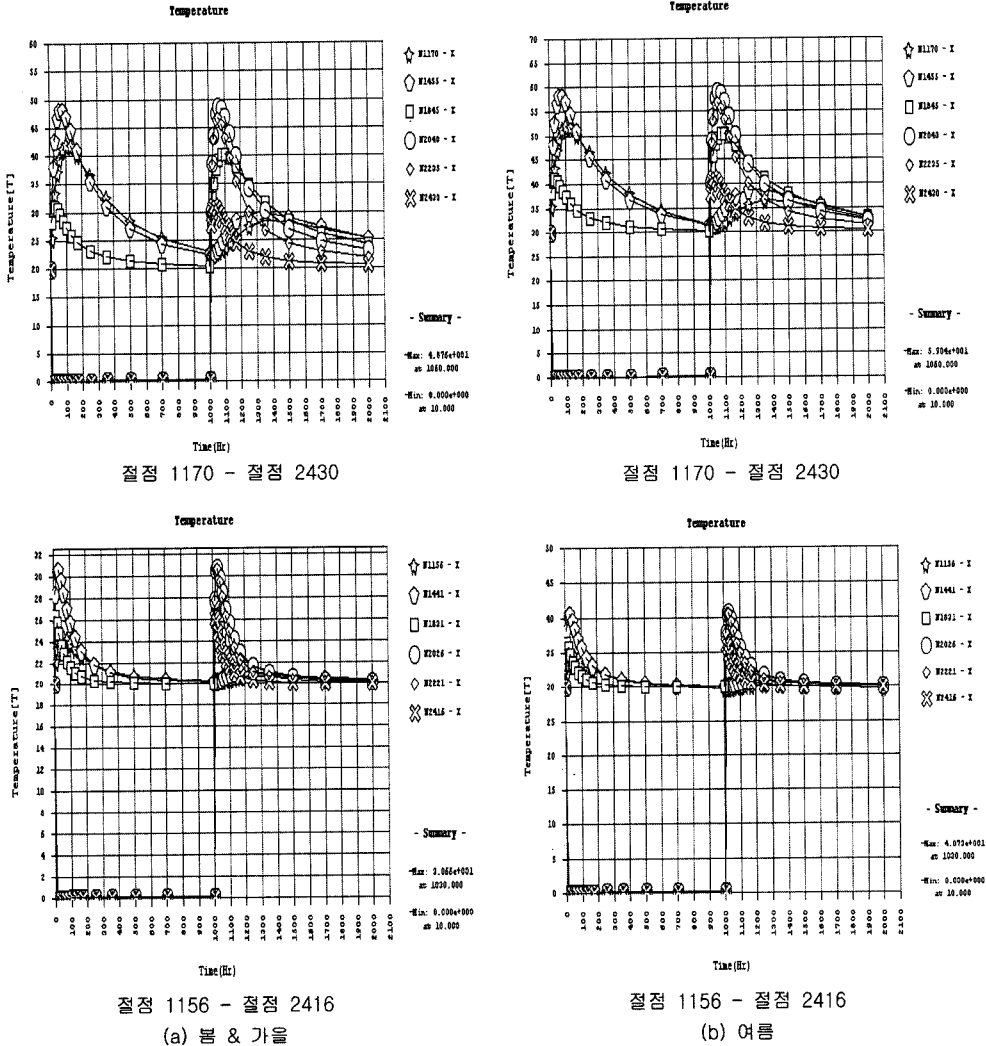


그림 3. 표면부와 내부의 온도이력그래프(시공단계, 타설높이 1.5 m)

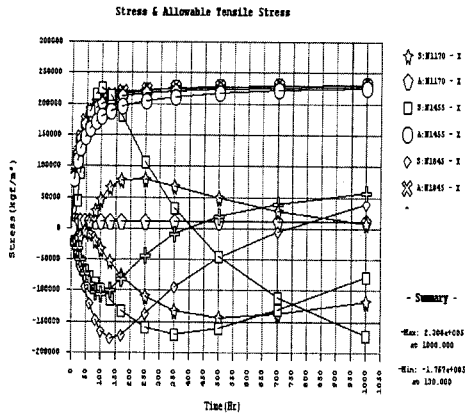
4모델을 사용하여 해석을 수행하였으며, 12 m×14 m의 넓이와 높이 3 m의 크기를 가지는 기초매트를 검토 대상으로 하였으며 전체를 한번에 타설한 경우와 높이를 1.5 m씩 나누어 타설한 경우의 온도해석 및 온도응력 해석 지점을 나타낸 것이다.

### 3.1 수화열해석결과

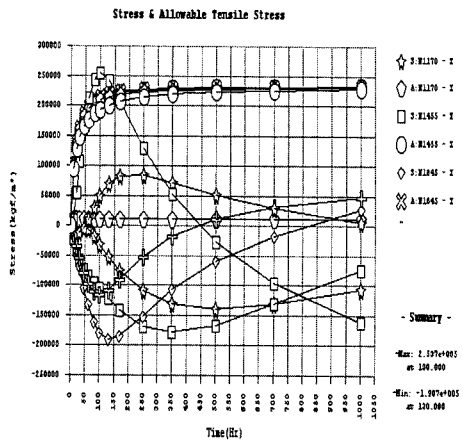
그림 2와 그림 3은 교각기초에 대하여는 타설 높이를 각각 3 m와 1.5 m로 하였을 때의 온도해석 결과를 나타낸 결과이다. 그림 2에서 전체를 한번에 타설하여 타설높이를 3 m로 한 경우 봄과 가을에는 최고온도의 발생시기가 콘크리트 타설후 약 100시간이 경과하였을 때 부재의 중심부에서 발생하며 이때의 온도58°C는 정

도로 예상된다. 여름철의 경우에도 최고온도의 발생시기와 그 위치는 같으며 최고온도는 68°C에 이를 것으로 예상된다. 타설 높이를 1.5 m로 나누어 타설하였을 때의 온도해석 결과인 그림 3에서는 최고온도의 발생시기가 부재중심부에서는 약 50시간 경과 후이며, 부재 중심부에서의 온도는 봄 가을과 여름의 경우 각각 49°C와 59°C로 추정되어 타설 높이를 3 m로 한 경우에 비하여 최고 온도는 약 10°C 저하 되는 것으로 나타났다.

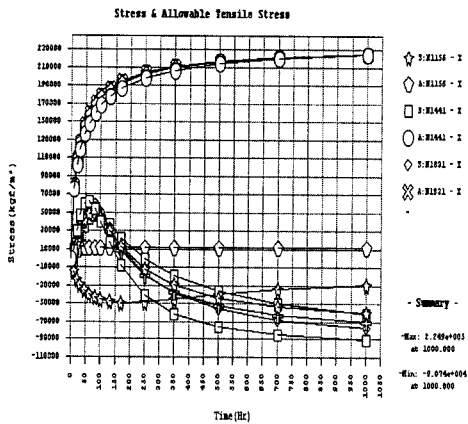
일반적으로 콘크리트의 최고온도와 대기온도와의 차이가 20°C 이하인 경우에는 균열이 발생할 가능성이 적고, 온도차가 30°C 이상인 경우에는 균열이 발생할 가능성이 많은 것으로 보고 되고 있다[7]. 이상



절점 1170 - 절점 2430

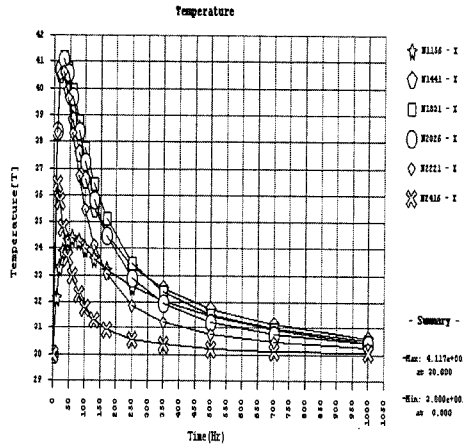


절점 1170 - 절점 2430



절점 1156 - 절점 2416

(a) 봄 & 가을



절점 1156 - 절점 2416

(b) 여름

그림 4. 표면부와 내부의 응력이력 그래프(타설높이 3 m)

의 온도해석 결과를 보면 타설 높이를 3 m에서 1.5 m로 낮게 하는 것 만으로 교각기초의 열응력에 의한 균열제어가 가능한지를 명확히 하기는 어렵고 온도응력의 해석결과에 의해 이를 평가하는 것이 필요하다고 판단된다.

### 3.2 온도응력 해석결과

#### 3.2.1 전체를 한번에 타설한 경우의 온도응력

그림 4은 타설높이를 3 m로 하였을 때의 온도응력 해석결과로서 지반에 기초 매트를 타설한 경우에 대한 해석결과를 나타낸 것이다.

봄과 가을에 지반에 기초 매트를 타설하였을 때 온도응력의 발생은 최고온도 도달이후부터 인장응력이 증가하며 콘크리트 타설후 약 6일 후부터 부재 외곽에서의 균열발생이 예상된다 여름철의 온도응력의 발생은 최고

온도 도달 이후부터 인장응력이 증가하며, 콘크리트 타설 후 약 8일 이후부터 부재의 외곽에서의 균열발생이 예상된다. 봄가을의 경우와 비교하면 외부의 온도가 높은 관계로 내외부의 온도차가 적어지므로 온도응력의 감소효과가 있으나 양생시 주의를 기울이지 않을 경우 급속한 수분증발에 의한 표면 균열이 발생할 우려가 높다. 결국 타설 높이를 3 m로 한 본 예의 기초매트는 계절에 관계없이 균열발생의 가능성이 높으며 것으로 해석되었다.

#### 3.2.2 2회로 나누어 타설한 경우의 온도응력

그림 5은 지반에 기초매트를 타설한 경우에 대한 온도응력 해석결과이며 타설높이를 1.5 m로 분할타설 하였을 때에 대한 결과이다.

그림 5을 보면 전 재령에서 온도응력이 콘크리트의

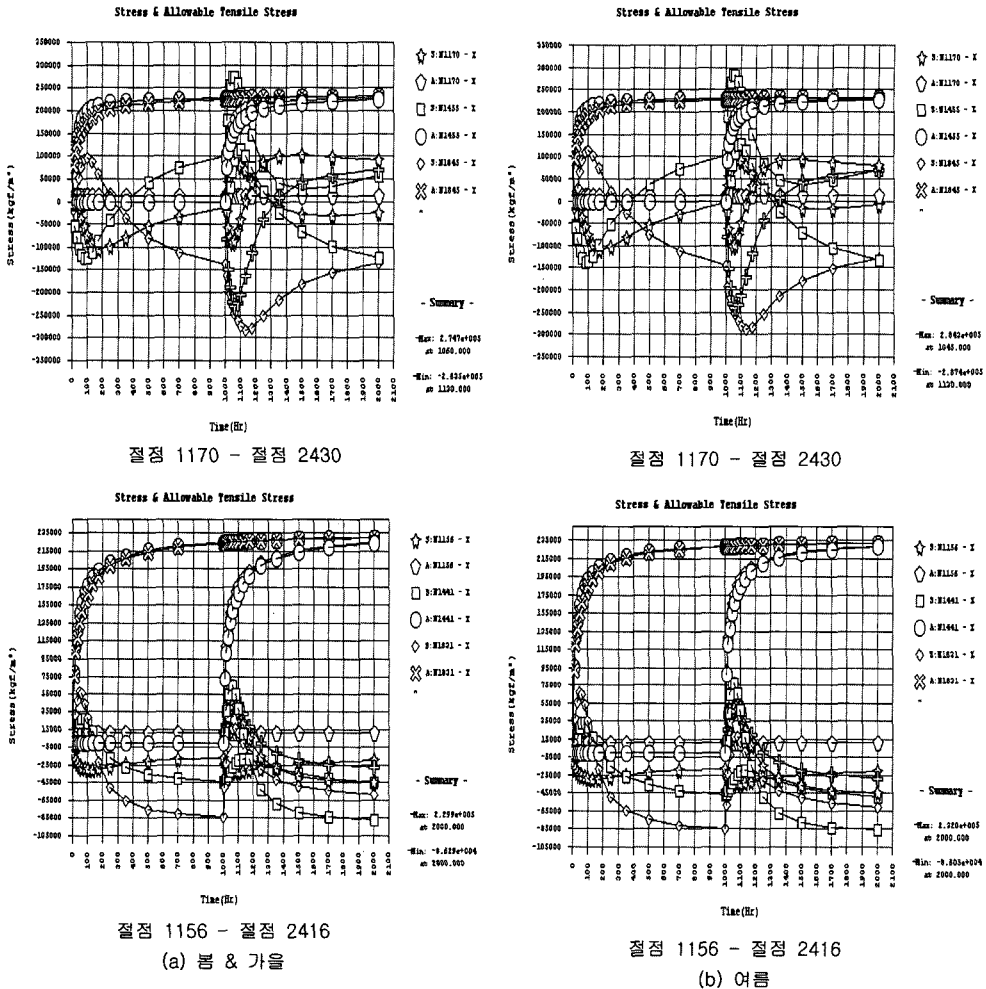


그림 5. 표면부와 내부의 응력이력 그래프(시공단계, 타설높이 1.5 m)

인장강도를 하회하는 것으로 나타나 타설높이를 1.5 m로 하고 기초 매트를 지반위에 타설한 경우에는 온도균열이 발생지 않을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

교각기초의 수화열에 의한 균열을 제어하기 위한 방안을 고찰하기 위하여 12 m × 14 m의 넓이와 높이 3 m의 크기를 가지는 기초매트를 대상으로 콘크리트의 수화열에 의한 온도 및 온도응력을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다

1. 타설 높이를 3 m로 하여 콘크리트를 타설한 경우 부재 중심부에서 최고온도의 발생시기는 콘크리트 타설

후 약 100시간이 경과하였을 때이며, 이때의 온도의 봄과 가을에는 58°C 여름철은 68°C에 이를 것으로 예상된다.

타설 높이를 1.5 m로 분할 타설 하였을 때는 최고온도의 발생시기가 타설 후 약 2일 경과 후이며, 타설 높이를 3 m로 한 경우에 비하여 최고 온도는 약 9°C 저하되는 것으로 나타났다.

2. 타설 높이를 3 m로 하여 지반에 기초매트를 타설 하였을 때 봄과 가을에는 콘크리트 타설 후 약 150시간 이후부터, 여름철에는 콘크리트 타설 후 약 180시간 이후부터 부재의 외곽에서의 균열발생이 예상된다.

3. 타설 높이를 1.5 m로 분할 타설하고 기초매트를 지반위에 타설하는 경우에는 온도 균열이 발생하지 않을 것으로 예상된다.

### 참고문헌

- [1] 오병환, 백신원, 조양희 “매스콘크리트 구조의 열응력 해석에서의 크리프 및 건조수축효과”, 대한토목학회논문집, 제15권 제1호, pp. 97-106, 1995.
- [2] 건설교통부, “콘크리트 표준시방서”, 1996.
- [3] 오병환, 유성원, “철근콘크리트 지하박스구조물의 수화열 온도균열제어를 위한 해석 및 적정 시공기법 연구”, 대한토목학회논문집, 제19권 제1-4호, PP. 457-467, 1999.
- [4] 차수원, “지하철 박스 구조물의 수화열해석 및 온도 균열 제어방안”, 한국산업안전학회지, 제16권, 제4호, pp. 153-159, 2001.
- [5] 김광수, 차수원, “매스콘크리트 구조물의 수화열 및 응력해석의 민감도 분석”, 한국산업안전학회지, 제16권, 제4호, pp. 160-167, 2001.
- [6] 강영주의 57인, “Midas Civil User's Manual Volume III”, MIDAS Information Technology Co., Ltd. 2003.
- [7] 최재진, “교대 기초의 온도균열제어에 관한 연구”, 천안공업대학논문집, 제27집, pp. 295-302, 2003.
- [8] K. J. Bathe, “Finite Element Procedures”, Prentice-Hall, pp. 50=75, 1975.
- [9] E. Hinton & D. R. J. Owen, “Finite Element Programming”, Academic Press, pp. 68-94, 1977.
- [10] William Weaver, Jr, Paul R. Johnston, “Finite Element Analysis”, Prentice-Hall, Inc., pp. 103-141, 1984.
- [11] O. C. Zienkiewicz & R. L. Talyor, “The Finite Element Method: Basic Formulatim and Linear Problems”, Vol.I, MPG Books Ltd., pp. 140-161, 2000.
- [12] Dary L. Logan, “A first course in the Finite Element Method Basic”, Brooks/cole, pp. 559-602, 2002.

박 원 태(Weon-Tae Park)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산대학교 토목 공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 3월~현재 : 공주대학교 건설 환경공학부 부교수

<관심분야>

구조공학, 강구조공학, 복합재료