

# 태양 복사열이 콘크리트 매트기초의 내부 온도분포에 미치는 영향에 관한 해석적 연구

## Analysis of the Effect of Solar Radiation on Internal Temperature Distribution in Concrete Mat Foundation

송 정 현

이 창 준\*

Song, Chung Hyun Lee, Chang Joon\*

Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

### Abstract

This research investigated the effect of solar radiation on the temperature distribution in concrete mat foundation. Zhang and Huang Model was utilized to estimate solar radiation heat at a given date and time. A one-dimensional finite element formula was derived with the fundamental laws of heat transfer and Galerkin method. Based on the formula, a one dimensional finite element analysis code was developed using MATLAB. Hydration heat analysis of mat foundation were conducted using the developed code. It was found that the solar radiation reduced the maximum temperature difference in mat foundation, and this temperature difference reduction was more prominent in case of summer season cast, a higher initial concrete temperature, and a thicker mat foundation depth. The research recommended that the solar radiation should be considered in hydration heat analysis of concrete mat foundation so as not to overestimate the maximum temperature difference in mat foundation.

Keywords : mat foundation, hydration heat analysis, solar radiation, bubble sheet

### 1. 서 론

일정 두께 이상의 콘크리트 매트기초는 결합재의 화학반응에 의한 내부 수화열을 주변 외기로 방출하는데 어려움을 겪게 되며, 이로 인해 매트기초의 중심부와 표면부 사이에 상당한 크기의 온도차가 발생한다. 이 온도차에 비례하여 매트기초의 중심부와 표면부는 부피팽창의 차이를 보이게 되며, 이로 인해 외부 구속 없이도 표면부에 인장응력을 발생시킬 수 있다. 표면부에 발생하는 인장응력은 콘크리트의

강도발현 정도에 따라 균열을 발생시킬 수 있다. 온도차에 의한 균열을 저감하기 위해서는 콘크리트 매트기초의 중심부와 표면부의 온도 차이를 최소화 시켜야 하며, 이를 위해 다양한 방법으로 표면부를 보온 양생한다. 표면부 보온양생을 위해 스티로폼, 모래 등을 많은 재료들이 사용되어 왔으며, 비교적 최근 국내에서는 버블시트를 사용하는 경우가 증가하고 있다[1,2,3].

매트기초 콘크리트의 수화열에 의한 온도 분포를 평가하기 위해서 열전달 해석을 수행해야 하며, 이때 일반적으로 결합재에 의해 발생하는 내부열량과 더불어 외기 대류에 의한 열손실에 대한 적절한 경계조건을 사용하여 수화열 해석을 수행한다. 표면부 보온양생 재료는 외기 대류에 의한 열손실과 직접적인 관계가 가지며, 재료의 종류와 두께에 따라 대류계수를 저감하는 방식으로 해석조건을 달리 부가한다.

대류계수와 더불어 중요한 해석가정으로 태양복사에 의한

Received : December 30, 2016

Revision received : January 6, 2017

Accepted : January 9, 2017

\* Corresponding author : Lee, Chang Joon

[Tel: 82-43-261-2429, E-mail: cjlee@cbnu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

열유입을 고려할 수 있다. 기존 문헌을 살펴보면, 전통적인 표면양생 재료의 경우를 포함하여 버블시트를 사용한 보온 양생의 경우, 태양복사에 의한 열유입을 고려하지 않은 열전달 해석을 통해 매트기초의 내외부 온도차를 평가를 하고 있다[4,5]. 이는 실제로 콘크리트 매트기초가 외기에 노출된 표면적이 큰 구조물임을 고려할 때 태양복사로 인한 열유입이 작지 않으며, 이를 고려하지 않은 해석결과는 실제 거동과 차이가 날 수 있음을 짐작할 수 있다. 특히 버블시트와 같이 반투명한 특성을 가지는 보온 양생 재료의 경우 태양복사에 의한 열량의 일부가 콘크리트 표면으로 직접 전달되기 때문에 수화열 해석시 태양복사에 대한 영향을 고려해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 버블시트를 이용하여 보온 양생하는 매트 기초의 수화열 해석을 수행하고, 태양복사가 매트 기초의 온도분포에 미치는 영향을 해석적으로 평가하였다.

## 2. 수화열 해석을 위한 열전달 모형

콘크리트 매트기초의 수화열해석을 위한 열전달 모형을 Figure 1 에 나타낸 바와 같다. 콘크리트 매트기초 내부에서 발생하는 수화열은 지반쪽으로 열전도에 의해 열 이동이 발생하며, 외기와 접한 콘크리트 표면에서는 공기의 대류 및 태양의 복사에 의한 열교환이 발생한다. 이외 콘크리트와 외기의 장파장 복사에 의한 열교환이 일부 있으나 본 연구에서는 고려하지 않았다.

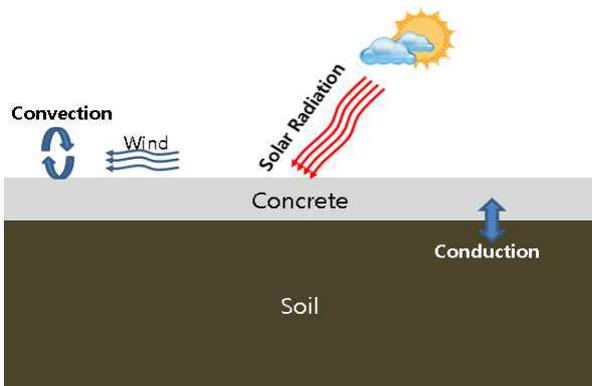


Figure 1. Heat transfer among mat foundation, soil and ambient.

### 2.1 열전도 모형

콘크리트 매트기초 내부 및 인접한 지반의 열전도 문제는 식(1)과 같은 1차원 비정상 열전도 문제의 열평형 편미분방

정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{----- (1)}$$

여기서,  $k$ =열전도율( $kcal/m \ hr \ ^\circ C$ ),  $T$ =온도( $^\circ C$ ),  $\rho$ =밀도( $kg/m^3$ ),  $c_p$ =비열용량( $kcal/kg \ ^\circ C$ ),  $G$ =단위시간 및 단위부피당 발생 열량( $kcal/m^3 \ hr$ )이다. 열전달 해석을 위해서는 식(1)의 열평형 방정식과 더불어 식(2)의 초기조건과 식(3)과 식(4)의 경계조건이 필요하다.

$$T = T_0 \text{ at } t = 0 \quad \text{----- (2)}$$

$$T = \bar{T} \text{ on } \Gamma_a \quad \text{----- (3)}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} l + \bar{q} = 0 \text{ on } \Gamma_b \quad \text{----- (4)}$$

여기서,  $T_0$  = 해석 영역에 정의된 초기온도,  $\bar{T}$  = 경계 영역  $\Gamma_a$ 에 정의된 경계 온도,  $\bar{q}$  = 경계영역  $\Gamma_b$ 에 정의된 경계 열류량,  $l$  = 경계영역  $\Gamma_b$ 상의 방향코사인이다. 표면에서의 경계 열류량  $\bar{q}$ 는 표면 대류로 인한 열류량( $q_{conv}$ )과 태양 복사로 인한 열류량( $q_{solar}$ )의 합으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{q} = q_{conv} + q_{solar} \quad \text{----- (5)}$$

### 2.2 콘크리트의 수화 발열량

콘크리트 매트기초 내부의 수화 발열량은 식(1) 열평형 방정식의 내부 발생 열량  $G$ 를 통해 고려할 수 있다. 콘크리트 매트기초와 같은 매스콘크리트의 내부는 수화열의 외기 방출이 아주 느리게 진행되기 때문에 열적 단열상태와 유사한 경향을 보인다. 따라서 발생 열량  $G$ 는 실제 타설되는 콘크리트의 단열 온도 상승 시험을 통하여 구할 수 있다. 단열 온도 상승 시험 결과는 식(6)의 단열온도 상승 곡선 특성을 나타내는 인자  $K$ 와  $\alpha$ 를 결정하는데 사용된다.

$$T = K \left( 1 - e^{-\frac{\alpha t}{24}} \right) \quad \text{----- (6)}$$

여기서,  $K$ =최대 단열 상승온도( $^\circ C$ ),  $\alpha$ =단열상승 형상 인자,  $t$ =시간( $hr$ )이다. 식(6)을 시간에 대해서 미분한 후

밀도와 비열용량을 곱하면, 단위시간(hr) 및 단위부피당 ( $m^3$ ) 발생열량  $G$ 를 식(7)과 같이 구할 수 있다[6].

$$G = \frac{1}{24} \rho c_p K \alpha e^{-\frac{\alpha t}{24}} \quad (7)$$

### 2.3 대류로 인한 콘크리트 표면 열손실

대류로 인한 콘크리트 표면 열손실은 식(8)과 같은 뉴턴의 냉각법칙을 이용하여 구할 수 있다.

$$q_{conv} = h_c (T_s - T_a) \quad (8)$$

여기서,  $q_{conv}$ =대류에 의한 열류량( $kcal/m^2 hr \text{ } ^\circ C$ ),  $h_c$ =열대류 계수( $kcal/m^2 hr \text{ } ^\circ C$ ),  $T_s$ =표면 온도( $^\circ C$ ),  $T_a$ =주변 공기온도( $^\circ C$ ) 이다.

식(8)의 열대류 계수  $h_c$ 의 경우 재료 특성뿐만 아니라 일사량, 수분증발, 잠열, 풍속, 양생수 살포, 보온재 유무 등에 의해 영향을 받는다. 콘크리트 표면에 보온재가 있을 경우, 보온재의 열적 물성 및 두께에 따라 콘크리트 표면 열손실에 주는 영향을 고려해야 한다. 매스콘크리트 수화열 해석에서는 일반적으로 보온재에 의한 영향을 대류계수를 저감시켜 해석에 고려한다.  $n$ 개의 층으로 구성된 보온재에 의해 저감된 대류계수는 다음의 식으로 산정할 수 있다[7].

$$h_c = \frac{1}{1/h_{air} + R_1 + R_2 \dots + R_n} \quad (9)$$

여기서,  $h_{air}$  = 최 외곽 보온재의 표면성질에 따른 대류계수,  $R_i$  =  $i$ 번째 보온층의 열저항( $m^2 hr \text{ } ^\circ C / kcal$ ) 이다. 각 보온층의 열저항은 열전도율( $k_i$ )과 두께( $t_i$ )를 곱한값의 역수로 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$R_i = 1/k_i t_i \quad (10)$$

### 2.4 태양 복사에 의한 열유입

태양복사를 평가하는 기준열량은 태양 상수  $1367 W/m^2$  ( $=1176 kcal/m^2 hr$ )로 나타내며, 이 값은 대기권 외각에서 측정되는 수치로 지구의 지표면에 도달하는 도중에 대기흡수, 산란 등 여러 가지 요인으로 인하여 지표면에 100% 도달하지는 못한다. 따라서 이들 영향 인자들을 고려해 지표면에

도달하는 태양복사량을 구하는 모형이 필요하며, 본 연구는 식(11)에서 보이는 Zhang and Huang 모형을 사용하였다 [8]. 이 모형은 태양의 고도, 운량, 상대습도, 건구온도, 및 풍속 등을 고려하여, 각 시각별 지표면 도달하는 태양복사량을 산정한다.

$$I = [I_0 \cdot \sin(h) \cdot c_0 + c_1 \cdot (CC) + c_2 \cdot (CC)^2 + c_3 \cdot (T_n - T_{n-3}) + c_4 \cdot \phi + c_5 \cdot v + d]/k \quad (11)$$

여기서,  $I$ =전 일사량( $kcal/m^2$ ),  $I_0$ =태양 상수값= 1176 ( $kcal/m^2 hr$ ),  $h$ =태양의 고도각,  $CC$ =운량(0~1),  $\phi$ =상대습도(%),  $T_n$ =건구온도( $^\circ C$ ),  $T_{n-3}$ =3시간전 건구온도( $^\circ C$ ),  $v$ =풍속( $m/sec$ ),  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, d, k$ = 측정 태양복사량 데이터 바탕의 회귀계수이다. 태양의 고도각  $h$ 는 식(12)를 따른다.

$$h = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (12)$$

여기서,  $\delta$ = 연중 해당일의 적위,  $\phi$ = 지역의 위도,  $\omega$ =일중 시각(1시간은  $15^\circ$ ).

식(11)에서 구한 지표면 도달하는 태양복사열은 콘크리트 표면에서 일정 부분만을 흡수하고 나머지는 반사한다. 따라서, 태양 복사에 의한 콘크리트 표면에 전달되는 열류량 ( $q_{solar}$ )은 표면 흡수율  $\epsilon$ 을 사용하여 식(13)과 같이 산정할 수 있다.

$$q_{solar} = \epsilon I \quad (13)$$

### 2.5 유한요소 및 유한차분 정식화

콘크리트에서 열전달 문제는 공간과 시간에 따른 온도예측 문제이다. 이를 수치해석을 통해 해결하기 위해서 공간에 대해서 유한요소 정식화를 하고 시간에 대해서는 유한차분 정식화를 수행 하였다.

요소 내 온도장  $T$ 를 형상함수  $N_i$ 와 절점 온도  $T_i$ 를 이용하여 보간 한 후, Galerkin의 방법을 사용하여 유한요소 정식화 한다. 열평형 미분 방정식 (1)의 Galerkin 표현은 다음과 같다[9].

$$\int_{\Omega} N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + G - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0 \quad (14)$$

위 식에서 첫 번째 항을 부분적분 하고, 식(4)의 경계조건 과 비교하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\int_{\Omega} k \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j d\Omega + \int_{\Omega} N_i N_j \rho c_p \frac{\partial T_j}{\partial t} d\Omega \quad \text{--- (15)}$$

$$= \int_{\Omega} N_i G d\Omega - \int_{\Gamma_b} N_i \bar{q} d\Gamma_b$$

여기서,  $\Omega$ =요소내부영역,  $\Gamma_b$ =요소경계 영역이며, 위 식 을 행렬 형식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$KT + C\dot{T} = f \quad \text{----- (16)}$$

여기서,  $K = K_{ij} = \int_{\Omega} k \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} d\Omega$ ,

$$C = C_{ij} = \int_{\Omega} N_i N_j \rho c_p d\Omega, \quad T = T_i = \text{절점온도},$$

$$\dot{T} = \dot{T}_i = \frac{\partial T_i}{\partial t} = \text{절점온도의 시간에 관한 미분},$$

$$f = f_i = \int_{\Omega} N_i G d\Omega - \int_{\Gamma_b} N_i \bar{q} d\Gamma_b.$$

유한요소 정식화된 식(16)에 포함된  $\dot{T}$ 는 절점온도의 시간( $t$ )에 대한 편미분 항이며, 따라서 식(16)의 연립 미분방 정식은 시간에 대한 후진 유한 차분식을 이용하여 다음식과 같이 정식화 하였다.

$$(C + \Delta t K)T^{m+1} = CT^m + \Delta t f^{m+1} \quad \text{----- (17)}$$

여기서,  $\Delta t$ =시간간격,  $T^m$ = 절점온도 벡터( $time = t$ ),  $T^{m+1}$  = 절점온도 벡터( $time = t + \Delta t$ ),  $f^{m+1}$ = 온도하중 벡터( $time = t + \Delta t$ ).

### 3. 해석변수 및 가정

식(17)을 바탕으로 MATLAB[10]을 이용하여 태양 복사 열을 고려한 수화열 해석 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램을 통해 태양복사가 콘크리트 매트기초에 온도분포 에 미치는 영향을 분석하였다. 분석에 사용된 주요해석 변수 로 매트기초의 두께, 콘크리트의 초기 타설 온도, 타설 시기 를 설정하였다. 해석에 필요한 환경 데이터는 모두 대전지역

의 기상데이터를 사용하였다. 콘크리트 타설 시각은 오전 6시로 고정하였다.

#### 3.1 재료의 열적 물성

수화열 해석을 위한 사용된 콘크리트와 토양의 기본 재료 물성을 Table 1에 보인다.

**Table 1. Material properties of concrete and soil**

	Concrete	Soil
Thermal conductivity (kcal/m·hr·°C)	1.4	0.45
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2300	2000
Heat capacity (kcal/kg·°C)	0.21	0.44

#### 3.2 매트기초의 두께 및 요소격자 크기

두께가 2, 3, 4m인 콘크리트 매트기초가 토양위에 타설되 는 경우를 고려하여 해석을 수행하였다. 콘크리트 매트기초 에서 토양으로 전달되는 영향의 변화를 최소화 하기위해 토 양부분의 두께는 7m로 충분이 크게 설정하였다. 유한요소 모형의 격자 크기는 0.001m로 설정하였으며, 따라서 콘크 리트 매트기초는 두께에 따라 각각 2000, 3000, 4000개, 토양 부분은 7000개의 1차원 유한요소로 구성하였다.

#### 3.3 초기 온도 조건 및 토양부 경계조건

식(2)의 초기 온도 조건  $T_0$ 에 따른 영향을 확인하기 위해 콘크리트 초기온도를 10, 15, 20°C 인 경우로 설정하여 해 석을 수행하였다. 토양의 경우 기상청[11]에서 제공하는 깊 이 5m 위치의 월 평균 지중온도(1981년-2010년)를 참고하 여, 하절기의 경우 14°C, 동절기의 경우 18°C 로 토양의 초기온도를 설정하였다. 식(3)의 온도 경계조건  $\bar{T}$ 의 경우에는 토양 부분 최하단부에, 하절기의 경우 14°C, 동절기의 경우 18°C 로 경계조건을 설정하였다.

#### 3.4 수화열

식 (7)의 단위시간 및 단위부피당 콘크리트 발열량  $G$ 는 중용열 시멘트 콘크리트를 기준으로 결합재  $C$ 가 400 kg/m<sup>3</sup> 사용된 것으로 가정하여, 콘크리트 표준시방서[6]에 서 제시하는 최대 단열 상승온도  $K$ 와 반응속도 $\alpha$ 의 계산식 (Table 2)을 사용하여 구하였다. Figure 2에 콘크리트 타설 온도가 10, 15, 20°C 인 경우의 단열온도 상승곡선을 보인

다. 타설온도 15℃ 인 경우는 10와 20℃ 인 경우의  $K$ 와  $\alpha$  을 보간하여 사용하였다.

Table 2. Estimation of  $K$  and  $\alpha$  for hydration heat

Cement Type	Casting Temperature (°C)	$T = K(1 - e^{-\alpha t})$			
		$K(C) = aC + b$		$\alpha(C) = gC + h$	
		$a$	$b$	$g$	$h$
Type 2	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279

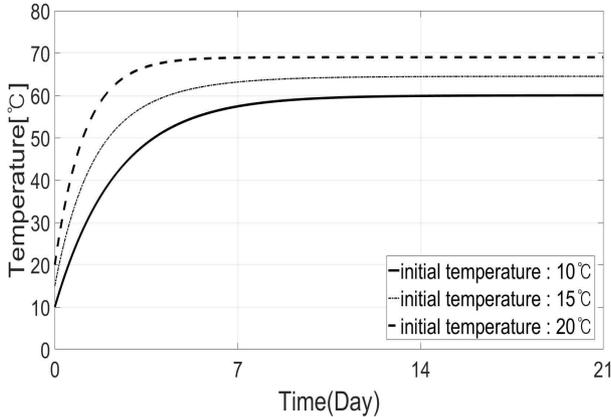


Figure 2. Evolution of adiabatic temperature of type 2 cement concrete (initial temperature = 10, 15, 20℃)

### 3.5 대류에 의한 열손실

표면 대류에 의한 열류량 손실 계산을 위해 식(8)을 이용하며, 이를 위해 표면대류 계수  $h_c$ 를 결정해야 한다. 본 연구에서는 본 연구에서는 두께가 8mm이고 열전도율이 0.0434 kcal/m hr °C 인 버블시트로 보온양생을 하는 경우를 고려하였다. 식(9)를 이용하여, 콘크리트 표면에 적용되는 대류 열전달 계수를  $h_c = 3.64 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$  로 계산하여 해석을 수행하였다.

대류에 의한 열손실 계산시 필요한 외기온도의 경우 기상청이 제공하는 대전지역의 30년 평균 기후데이터를 이용하였다. 식 (18)과 같이 해석하고자 하는 달의 평균 최고 온도와 최저온도를 이용하여, 최고 온도가 14시에 도달하는 사인 곡선으로 일일 온도 변화를 가정하였다.

$$T_a = -\frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t+4)\right) + \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} \quad (18)$$

여기서,  $T_a$  = 외기온도,  $T_{\max}$  = 해당 달의 평균 최고온도,  $T_{\min}$  = 해당 달의 평균 최저온도,  $t$  = 시간.

### 3.6 태양복사에 의한 열유입

태양 복사에 의한 열류량 경계조건  $q_{solar}$ 의 산정은 식(11)를 이용하여 지표면에 도달하는 일사량  $I$ 를 계산하고 이 값에 식(13)의 표면 흡수율  $\epsilon$ 을 곱하여 구할 수 있다. 식(11)에서 제시된 모형을 이용하기 위해서 필요한 회귀계수는 지역에 따라 다르며, 본 해석에서는 Seo and Ihm 등[12]의 연구에서 제시한 대전지역 회귀계수를 사용하였다. Table 3에 사용된 회귀계수를 보이며 Figure 3에 해당모형의 하지 및 동지의 지표면 태양복사량의 일중 변화량을 보인다.

Table 3. Model parameter for solar radiation (Daejeon)

Regression parameter	Value	Regression parameter	Value
$c_0$	0.6450	$c_4$	-0.0020
$c_1$	0.1070	$c_5$	0.0047
$c_2$	-0.4313	$d$	-5.4206
$c_3$	0.0245	$k$	1.0000

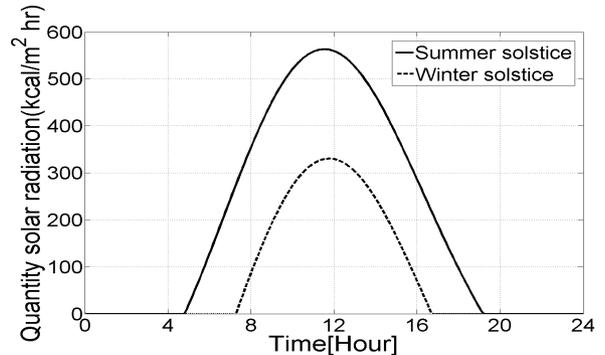


Figure 3. Quantity of solar radiation as a function of time in a day in summer and winter

태양 복사의 표면 흡수율  $\epsilon$ 은 콘크리트 표면의 습윤/건조 상태 및 보온재의 종류에 따라 다르다. 본 연구에서 고려하는 보온재인 버블시트는 반투명 재질로서 태양복사광의 일부를 투과 시키고 일부는 반사시킨다. 또한 버블시트를 투과한 태양광은 콘크리트 표면에 일부 흡수되고, 그 나머지는 또 다시 반사하여 버블시트 외부로 방출된다. 결국 버블시트를 설치한 콘크리트 재료의 표면에 흡수되는 태양광은, 버블시트 상부에서 태양광의 반사율을 측정하고, 그 반사율의 제한 비율만큼 흡수된다고 가정할 수 있다. 이를 고려하여 버블시트를 사용한 경우의 태양광이 콘크리트 표면에 흡수되는 양을 산정하기 위하여 Figure 4와 같은 표면 반사율 시험을 수행하였다.

표면 반사율 시험을 위해 콘크리트 표면에 버블시트(2m × 2m)를 설치하고, 태양광 반사율 측정을 위한 알베도 센서 (albedo meter Hukseflux SRA01[13])를 표면으로부터 0.5m 위치에 설치하였다. 콘크리트 표면이 습윤상태와 완전히 건조한 상태에 대해서 반사율을 각각 측정하였다. 버블시트 상부에서의 반사율은 콘크리트 표면이 습윤한 상태일 경우 47%, 완전히 건조한 상태일 경우 63%로 측정되었다. 따라서 버블시트를 사용한 경우 콘크리트 표면에서의 태양광 흡수율은 콘크리트 표면이 습윤한 상태일 때 53%, 건조한 상태일 때 37%로 가정할 수 있다.

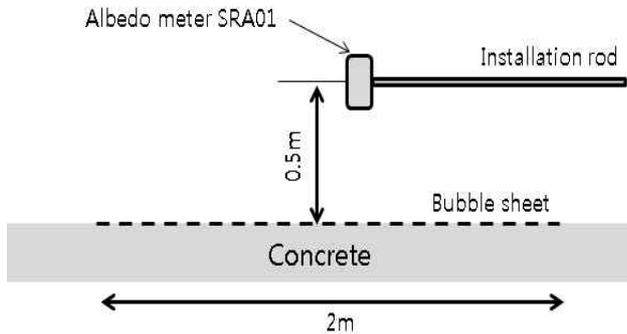


Figure 4. Albedo measurement setup for bubble-sheet on wet concrete surface.

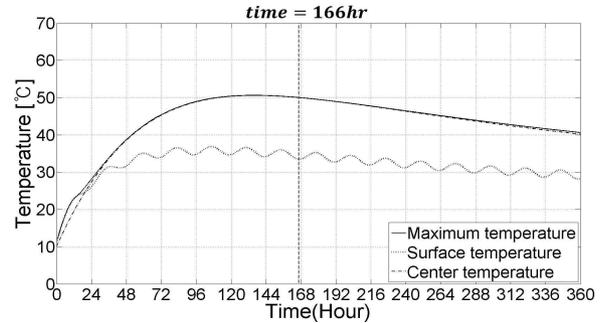
버블시트로 보온하는 콘크리트 매트기초의 표면은 타설 직후 완전한 습윤상태에서 재령이 증가함에 따라 건조한 상태로 변화하며, 따라서 콘크리트 표면의 태양광 흡수율은 53~37% 사이로 변화된다고 가정할 수 있다. 그러나 타설 후 콘크리트 표면의 습윤상태에서 건조상태로 변하는 시기를 특정할 수 있는 근거는 현재 확보하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 태양광의 흡수율이 큰 경우를 대상으로 분석하고자, 버블시트로 보온하는 경우 항상 콘크리트 표면은 습윤한 상태를 유지한다고 가정하여 해석을 수행하였다. 따라서, 해석에 사용된 콘크리트 표면의 태양광 흡수율은 모두  $\epsilon=53\%$ 로 고정하였다.

#### 4. 온도분포에 대한 해석결과

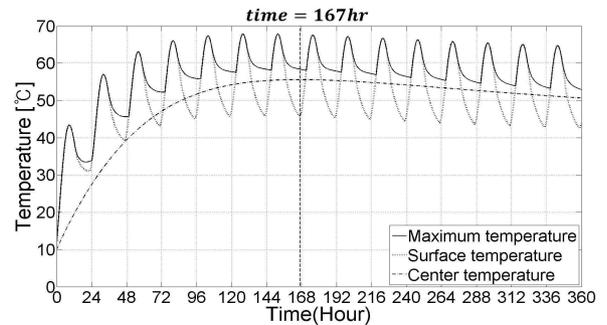
##### 4.1 시간에 따른 매트기초 내부 및 표면의 온도변화

Figure 5에 두께 2m, 초기 타설 온도 10℃, 타설시기가 하지(6월 21일)인 매트기초의 내부 최대온도, 표면온도, 중

심부 (깊이 1m) 온도를 나타내었다. Figure 5(a)는 태양 복사열을 고려하지 않은 수화열 해석 결과로 표면온도가 내부온도보다 항상 낮으며, 내부 최대 온도와 중심부 온도변화는 거의 일치한다. Figure 5(b)는 태양 복사열을 고려한 수화열 해석결과로 시간에 따른 내부 최대온도는 중심부 온도와 전혀 다른 이력을 가지며, 오히려 표면온도 이력과 상당 부분 중첩된다.



(a) No solar radiation

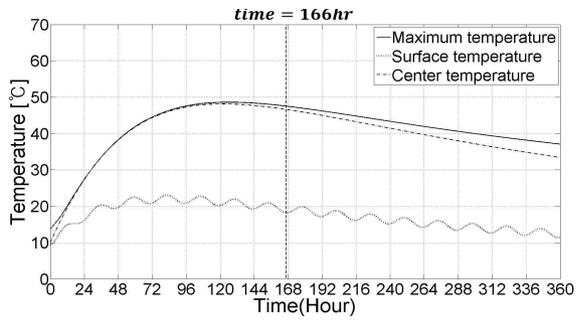


(b) Including solar radiation

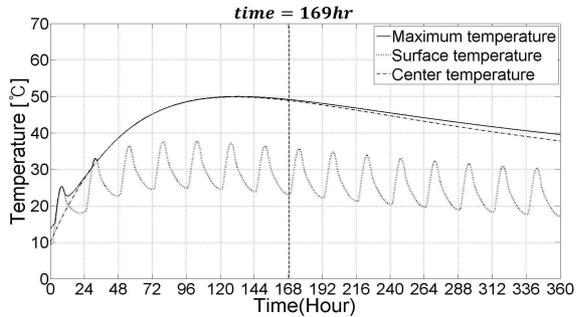
Figure 5. Internal and surfacial temperature of mat foundation as a function of curing time (casting at 21st of June)

Figure 6에는 타설 시기를 동지(12월21일)로 설정하고, 나머지 조건을 동일하게 (기초두께=2m, 타설온도=10℃) 고려한 수화열 해석결과를 보인다. Figure 6(a)는 태양 복사열을 고려하지 않은 결과로 표면온도가 내부온도보다 항상 낮으며, 중심부 온도와 내부 최대온도가 타설 직후부터 최대 온도 시점 (약 120시간)까지 거의 일치하나 이후 서서히 차이가 발생한다.

Figure 6(b)는 태양 복사열을 고려한 결과로, 타설 직후에는 태양 복사열 유입에 의해 표면부에 최대 온도가 발생하나 이후 내부 최대 온도와 중심부 온도 이력이 태양복사를 고려하지 않은 경우와 거의 유사하게 진행된다.



(a) No solar radiation



(b) Including solar radiation

Figure 6. Internal and surfacial temperature of mat foundation as a function of curing time (casting at 21st of December)

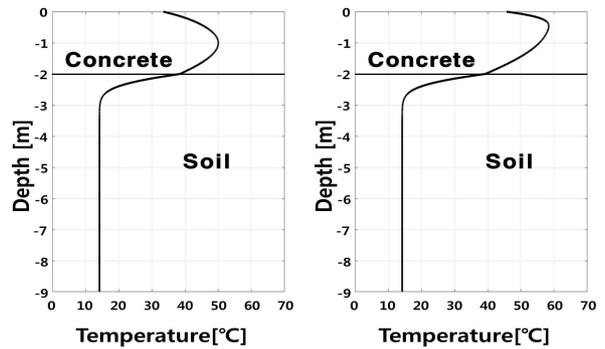
#### 4.2 매트기초 내부 온도 분포

Figure 7은 두께 2m, 초기 타설 온도 10°C, 타설시기가 하지인 매트기초의 수화열 해석결과로, 타설 후 기초 내부-표면부 온도차가 가장 크게 발생하는 시점에서의 내부온도 분포이다.

Figure 7(a)는 태양 복사를 고려하지 않은 경우의 해석결과로서 타설 후 166 hr 경과한 시점에서의 기초의 온도분포이다. 기초내부의 최대온도는 약 50°C, 기초표면 온도는 약 33°C로서 내부-표면 온도차는 약 17°C이다. 기초내부 최대 온도 발생위치는 중심부 근처(깊이 1m)이며 이 위치를 기준으로 비교적 대칭적인 상하부 온도 분포를 보인다. Figure 7(b)는 태양 복사를 고려한 경우의 해석결과로서 타설 후 167시간이 경과한 시점에서의 온도분포이다. 기초내부의 최대온도 약 58°C, 기초 표면온도는 약 45°C로서 내부-표면 온도차는 약 13°C이다. 최대온도가 발생하는 위치는 깊이 약 0.46m이며, Figure 7(a)에 보인 온도 분포의 대칭성은 더 이상 볼 수 없다.

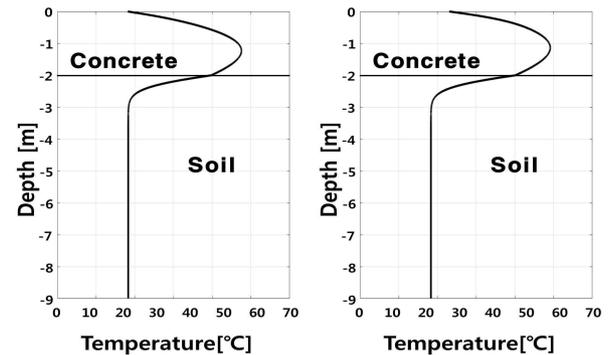
Figure 8은 두께 2m, 초기 타설 온도 10°C, 타설시기가 동지인 매트기초의 수화열 해석결과로, 타설 후 기초내부와 표면의 온도차가 가장 크게 발생하는 시점에서의 내부온도 분

포이다. Figure 8(a)는 태양 복사를 고려하지 않은 경우의 해석결과로서 타설 후 166 hr 경과한 시점에서의 기초의 온도분포이다. 기초내부의 최대온도는 약 47°C, 기초표면 온도는 약 18°C로서 내부-표면 온도차는 약 29°C이다. 해당 시간대의 최대 온도는 깊이 약 1.2m에서 발생하였다. Figure 8(b)는 태양 복사를 고려한 경우의 해석결과로서 타설 후 169 hr 경과한 시점에서의 온도분포이다. 기초내부의 최대온도 약 49°C, 기초 표면온도는 약 23°C로서 내부-표면 온도차는 약 26°C이다. 최대온도가 발생하는 위치는 깊이 약 1.1m 지점이다.



(a) No solar radiation (b) Including solar radiation

Figure 7. Temperature distribution at maximum temperature difference in concrete(2m, casting at 21st of June)



(a) No solar radiation (b) Including solar radiation

Figure 8. Temperature distribution at maximum temperature difference in concrete(2m, casting at 21st of December)

#### 4.3 매트기초 두께와 초기 타설온도의 영향

콘크리트 매트기초 수화열에 의한 기초내부 온도분포는 기초의 두께와 콘크리트 초기 타설 온도에 의해 영향을 받는다. 4.1절에서 보인 해석결과와 비교하여 기초두께 및 초기 타설 온도의 변화에 따라 태양복사열이 기초내부 온도분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 추가적인 해석을 수행하였다.

Figure 9에는 매트기초의 두께가 기초의 내부-표면부 최대온도차에 미치는 영향을 보인다. 해석에 사용된 가정은 매트기초 두께를 제외하고 모두 4.1절에서 사용된 가정과 동일하다. 먼저 태양복사를 고려하지 않은 경우를 보면, 동절기에 타설된 매트기초의 두께가 증가함에 따라 기초 내부-표면부 최대 온도차가 증가한다. 하절기 타설된 경우도 동일하게 증가하나 약 13~15°C 낮은 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보인다.

동절기에 타설된 매트기초에 태양복사를 고려할 경우, 태양복사를 고려하지 않은 경우보다 약 3~5°C 정도 낮게 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보인다. 반면 하절기에 타설된 매트기초에 태양복사를 고려할 경우 태양복사를 고려하지 않은 경우보다 약 4~10°C 정도 낮은 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보이며, 이는 동절기 보다 큰 감소폭이다.

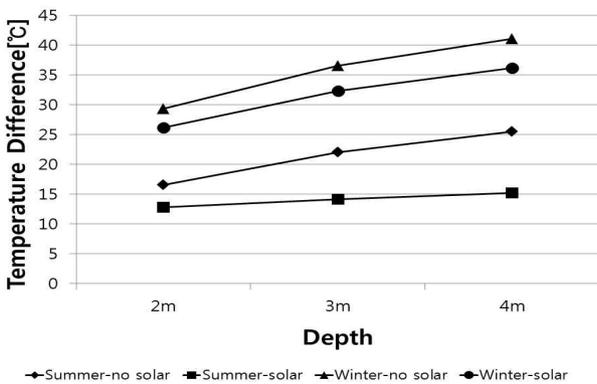


Figure 9. Maximum temperature difference(internal - surfacial) as a function of mat foundation thickness

Figure 10에는 콘크리트 초기타설 온도가 매트기초의 내부-표면부 최대온도차에 미치는 영향을 보인다. 해석에 사용된 가정은 콘크리트 초기 타설온도를 제외하고 모두 4.1절에서 사용된 가정과 동일하다. 우선 태양복사를 고려하지 않은 경우를 보면, 동절기에 타설된 매트기초의 초기 타설온도가 증가함에 따라 기초 내부-표면부 최대 온도차가 증가한다. 하절기 타설된 경우도 동일하게 증가하나 전체적으로 약 13°C 낮은 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보인다.

동절기에 타설된 매트기초에 태양복사를 고려할 경우, 태양복사를 고려하지 않은 경우보다 약 3°C 정도 낮게 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보인다. 반면 하절기에 타설된 매트기초에 태양복사를 고려할 경우 태양복사를 고려하지

않는 경우보다 약 4~6°C 정도 낮은 기초 내부-표면부 최대 온도차를 보이며, 이는 동절기 보다 큰 감소폭이다.

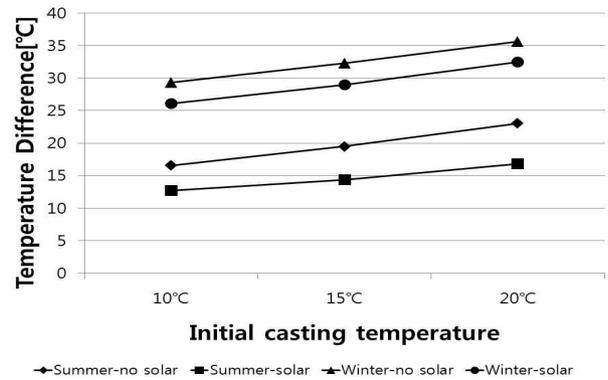


Figure 10. Maximum temperature difference(internal - surfacial) as a function of initial casting temperature

## 5. 온도분포에 대한 고찰

### 5.1 매트기초 내부 최고 온도 위치

태양복사는 기초내부 최고온도 위치의 변화에 영향을 준다. 일반적으로 매트기초 중심부 근방에서 최대온도를 유지하며, 이는 기초 상부 표면에서 유출되는 열량과 기초하부에서 토양으로 유출되는 열량이 유사한 경우 볼 수 있는 현상이다. 그러나 태양복사에 의한 추가적인 열량이 기초 상부 표면에 유입됨으로서 이 균형이 바뀌게 되고 최대 온도의 위치가 변화하게 된다. 이러한 현상은 Figure 5와 Figure 6에서 확인할 수 있다. 태양복사가 고려되지 않거나 (Figure 5(a), Figure 6(a)) 또는 태양복사량이 상대적으로 적은 동절기 (Figure 6(b)) 경우 기초내부 최대온도 이력은 기초 중심부의 온도이력이 유사하다. 즉 기초 중심부 근방이 최대 온도를 보이는 위치이다. 그러나 태양복사량이 많은 하지 타설의 경우 내부 최대온도는 중심부 온도와 전혀 다른 이력을 가지며, 오히려 표면온도 이력과 상당부분 중첩된다. 즉, 시간별 내부 최대온도의 위치가 중심부에서 표면쪽으로 이동 또는 표면에 위치하게 됨을 의미한다.

이러한 태양복사에 의한 최고온도 발생위치의 변화는 Figure 7과 Figure 8에서 더욱 명확히 확인할 수 있다. 하절기 타설의 태양복사를 고려하지 않은 경우(Figure 7(a)) 최고온도는 중심부에서 발생하고 이를 중심으로 거의 대칭인 온도분포를 보인다. 이에 반해 하절기 타설시 태양복사가

고려된 경우(Figure 7(b)) 최고온도는 거의 표면부 근방(깊이 0.46m)에서 발생하고 대칭적인 온도 분포가 바뀌었음을 확인 할 수 있다.

동절기 타설시 태양복사를 고려하지 않은 경우(Figure 8(a)) 최고온도 위치는 중심부에서 약간 아래쪽 위치(1.2m)에서 발생한다. 이는 하절기 외기온도가 낮아 토양으로 유출되는 열량에 비해 상부 표면에서 유출되는 열량이 상대적으로 더 크기 때문이다. 동절기 타설시 태양복사가 고려되면(Figure 8(b)), 최고온도의 위치가 태양복사를 고려하지 않은 경우에 비해 약간 상부로 이동되었음을 알 수 있다. 이는 추가적인 태양복사로 인한 상부 표면의 열량 유입으로 인한 영향이나, 하절기에 비해 열량 유입량이 작기 때문에 하절기에 보인 것과 같은 온도분포의 큰 변화는 볼 수 없다.

## 5.2 매트기초 두께에 따른 영향

기초 내부-표면부 온도차에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 외기로 유출되는 단위 시간당 열류량의 크기(열유속)이다. 즉 기초에서 유출되는 열유속 클수록 기초내부-표면부 최대 온도차이가 커진다. 이는 Figure 9에서 보이는 하절기 타설의 경우와 동절기 타설의 경우의 결과에서 확인할 수 있다. 동절기의 경우 하절기에 비해 외기온도가 훨씬 낮기 때문에 대류에 의해 유출되는 열유속의 크기가 커지며 (식(8) 참조) 이에 따라 기초 내부-표면부 최대 온도차이가 커진다.

매트기초 두께 증가에 따른 기초 내부-표면부 최대 온도차의 증가도 동일한 기구로 설명할 수 있다. 우선 태양복사가 고려되지 않은 경우만을 보면, 기초 두께가 증가함에 따라 외기 온도가 동일하더라도 콘크리트 기초 내부에서 발열되는 총열량이 더 많기 때문에 시간에 따라 상승 가능한 콘크리트 기초의 최대온도는 증가한다. 최대 온도를 보이는 시점 이후, 외기 온도 조건이 동일하더라도 기초의 온도가 높을수록 대류 (식(8)참조)에 의해 단위 시간당 유출되는 열량 또한 커지게 되며 따라서 기초 내부-표면부 온도차가 더 커지게 된다. 즉, 2m 기초보다 4m 기초의 내부-표면부 최대 온도차이가 더욱 커진다.

태양복사를 고려할 경우, 대류에 의해 외기로 유출되는 열유속과 더불어 태양복사에 의해 유입되는 열유속이 더해져 전체적으로 외기로 유출되는 열유속의 크기가 감소한다. 따라서 Figure 9에서 보듯이 태양복사를 고려한 경우가 태양복사를 고려하지 않은 경우보다 기초 내부-표면부 최대 온도차이가 감소하게 된다. 또한 이러한 현상은 동절기에 비해 태양

복사량이 더 많은 하절기에 좀 더 큰 차이를 보이게 된다.

## 5.3 매트기초 초기 타설온도 따른 영향

매트기초 초기 타설온도가 증가함에 따라 기초 내부-표면부 최대 온도차는 증가함 Figure 10을 통해 알 수 있다. 태양복사를 고려하지 않은 경우, 동일한 발열량을 가진 콘크리트의 초기타설 온도가 높을 경우 시간에 따라 상승 가능한 콘크리트 기초의 최대온도는 증가한다. 최대 온도를 보이는 시점 이후, 외기 온도 조건이 동일하더라도 기초의 온도가 높을수록 대류에 의해 단위 시간당 유출되는 열량 또한 커지게 되며 따라서 기초 내부-표면부 온도차가 더 커지게 된다.

태양복사를 고려할 경우 5.2절에서 설명한 기구와 유사하게 대류에 의해 외기로 유출되는 열유속과 더불어 태양복사에 의해 유입되는 열유속이 더해져 전체적으로 외기로 유출되는 열유속의 크기가 감소하며, 따라서 Figure 10에서 보듯이 태양복사를 고려한 경우가 태양복사를 고려하지 않은 경우보다 기초 내부-표면부 최대 온도차이가 감소하게 된다. 마찬가지로 이러한 현상은 동절기에 비해 태양복사량이 더 많은 하절기에 좀 더 큰 차이를 보이게 된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 버블시트를 이용하여 보온 양생하는 매트기초의 수화열 해석시 태양복사가 매트기초의 온도분포에 미치는 영향을 해석적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 태양복사에 의한 매트기초 표면부 열유입은 기초 내부의 최고 온도점 위치를 기초 상부로 이동시킨다. 최고 온도점 위치의 이동 정도는 태양 복사량이 적은 동절기에 비해 상대적으로 태양 복사량이 많은 하절기에 더욱 크게 나타난다.
- 2) 콘크리트 매트기초 수화열 해석시, 태양복사의 고려는 매트기초 내부-표면부 최대온도차를 감소시킨다. 이는 태양 복사가 매트기초 내부-표면부 온도차에 영향을 주는 주요 요인인 표면부 열유출 속도를 감소시키기 때문이다.
- 3) 태양 복사에 의한 매트기초 내부-표면부 최대온도차의 감소 정도는 일사량이 많을수록, 초기 타설 온도가 높을수록, 기초의 두께가 두꺼워 질수록 더욱 커진다.

태양복사를 고려하지 않은 콘크리트 매트기초 수화열 해석은 기초 내부-표면부 온도차를 과대하게 평가한다. 매트기초 수화열 관리 측면에서는 이를 보수적인 안전측 해석 결과로 볼 수 있으나, 부적절한 가정으로 과대평가된 내부-표면부 온도 차이를 줄이기 위해 행해져야 하는 부가적인 조치비용은 시공자가 부담하게 된다. 따라서 콘크리트 매트기초의 적절한 수화열 관리대책 수립시 정확한 수화열 해석을 위해서는 태양복사의 영향에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

## 요 약

태양 복사가 콘크리트 매트기초 내부 온도 분포에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 태양복사량 산정을 위해 Zhang and Huang 모델을 사용하였다. 열전달 방정식과 Galerkin 방법을 이용하여 1차원 열전달 유한 요소 정식화를 수행하였으며, MATLAB을 사용하여 유한요소 해석코드를 작성하였다. 작성된 해석코드를 바탕으로 태양복사를 고려한 콘크리트 매트기초의 수화열 해석을 수행하였다. 해석결과, 태양복사가 매트기초 내부-표면부 최대온도차를 줄여주는 효과를 보임을 확인하였다. 또한 이러한 효과는 하절기 타설시, 콘크리트 초기온도가 클수록, 그리고 매트기초의 두께가 두꺼울수록 더욱 뚜렷해짐을 확인 하였다. 본 연구는 콘크리트 매트기초의 수화열 해석시 해석결과의 과대평가를 피하기 위해서 태양 복사의 영향을 고려해야 함을 권고한다.

**키워드** : 매트 기초, 수화열 해석, 태양 복사, 버블 시트

## Acknowledgement

This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2014.

## Reference

- Hong SM, Efficiency of heat insulation curing method applying bubble sheets in field application [master's thesis]. [Cheongju (Korea)]: Cheongju university; 2010. 81-126 p.
- Kim TC, Kim J, Jeon CK, Shin DA, Oh SK, Characteristics of temperature history at each section of mat foundation concrete applying double bubble sheets. Proceedings of The Korean Institute of Building Construction Conference; 2016 May 19-21; Jeju(Korea). Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2016. p. 13-4.
- Kim J, Yoon JR, Jeon CK, Shin DA, Oh SK, Han CG. A case study on construction of cold weather mass concrete using double bubble sheets and hydration heat difference method. Proceedings of The Korean Institute of Building Construction Conference; 2006 Nov 18; Seoul ,Korea, Seoul, Korea: The Korea Institute of Building Construction; 2006. p. 15-8.
- Hwang IH, Yang KH, Evaluation of thermal stress reduction of mass concrete using the double bubble sheet insulation form. Proceedings of Korea Recycled Construction Resource Institute Conference; 2015 Apr 10; Daejeon ,Korea, Seoul, Korea: The Korea Recycled Construction Resource Institute; 2015. p. 57-59.
- Park YK, Song SB, Back BH, Han CG. Zero-crack construction on the fundamental mass concrete using double bubble sheets and applying low heat mixture. Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference; 2006 Nov 18; Seoul ,Korea, Seoul, Korea: The Korea Institute of Building Construction; 2006. p. 5-8.
- Korea Concrete Institute, Concrete Standard Specification, Seoul, Korea: Ministry of Land Infrastructure and Transport (Korea); 2009 Sep. p.178-92. Report No.:11-1611000-000789-14
- Kreider JF, Curtiss P, Rabl A. Heating and cooling of buildings: design for efficiency. 2nd ed, Boca Raton ,FL: CRC Press/Taylor & Francis; 2010. p.23-79
- Zhang Q, Huang J, Lang S. Development of typical year weather data for chinese locations. ;ASHRAE 2002 Annual Meeting; 2002 Jun 22-26; Honolulu, HI, Atlanta, GA, ASHRAE; 2002. p. 1063-78.
- Lewis RW, Nithiarasu P, Seetharamu KN. Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow. Hoboken, NJ: Wiley; 2004. p.38-100.
- The MathWorks ,Inc. Matlab primer Matlab [internet]. Natick, MA: Mathworks; 2016 May 9 [cited 2016 Jun 1]. 196p. Available from: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/get-start.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/get-start.pdf)
- Weather Data for Average 30 years(1981-2010, Korea) [internet]. Seoul(Korea): Korea Meteorological Administration, 1981-2010 [cited 2016 Apr 25]. Available from: [http://www.kma.go.kr/weather/climate/average\\_30years.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_30years.jsp)
- Seo DH, Ihm PC. Comparative solar models performance analysis for typical meteorological year development of korea, Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, 2010 Oct;12(1):147-54.
- Hukseflux, SRA01 albedometer user manual [internet]. Delft, Netherlands: Hukseflux; 2016 Mar 1 [cited 2016 Jun 20]. 35p. Available from: [http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product\\_manual/SRA01\\_manual\\_v1601.pdf](http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SRA01_manual_v1601.pdf)