

## 진동형 히트 파이프를 이용한 매스 콘크리트의 겨울철 수화열 제어 특성

양 태 진, 김 정 훈\*, 엄 치 선\*\*, 김 명 식\*\*\*, 김 종 수\*\*\*\*†

부경대학교 대학원, \*성균관대학교 기계공학부, \*\*보성종합건설, \*\*\*부경대학교 건설공학부, \*\*\*\*부경대학교 기계공학부

### Characteristics of Hydration Heat Control of Mass Concrete using Pulsating Heat Pipe in the Winter Season

Tae-Jin Yang, Jeung-Hoon Kim\*, Chi-Sun Youm\*\*, Myung-Sik Kim\*\*\*, Jong-Soo Kim\*\*\*\*†

*Graduate School, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea*

*\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea*

*\*\*Bosung Construction Co., Ltd., Gimhae 621-919, Korea*

*\*\*\*Division of Construction Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea*

*\*\*\*\*Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea*

*(Received June 5, 2006; Revision received December 15, 2006)*

**ABSTRACT:** In process of reinforced concrete (RC) box structure, the heat of hydration may cause serious thermal cracking. This paper reports results of hydration heat control in mass concrete using the oscillating heat pipe.

There were three RC box molds (1.2m×1.8m×2.4 m) which were different from each other. One was not equipped with pulsating heat pipe. The others were equipped with pulsating heat pipe. All of them were cooled with natural air convection. The pulsating heat pipe was composed of 10 turns of serpentine type copper pipe whose outer and inner diameters were 4 and 2.8 mm respectively. The working fluid was R-22 and charging ratio was 40% by volume. The temperature of the concrete core was approximately 55℃ in the winter without pulsating heat pipe. For a concrete with pulsating heat pipe, however, the temperature difference with the outdoor one reduced up to 12℃. The index figure of crack was varied from 0.75 to 1.38.

**Key words:** Pulsating heat pipe(진동형 히트 파이프), Hydration heat(수화열), Mass concrete (매스 콘크리트), Thermal crack(온도 균열)

#### 기 호 설 명

$A$  : 작동유체가 흐르는 유로 단면적의 합 [ $m^2$ ]  
 $c_p$  : 비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]

$D$  : 직경 [ $m$ ]  
 $k$  : 열전도율 [ $W/(m \cdot K)$ ]  
 $L$  : 히트 파이프 길이 [ $m$ ]  
 $l$  : 중발부와 응축부 사이의 평균 거리 [ $m$ ]  
 $m$  : 콘크리트 질량 [ $kg$ ]  
 $Q$  : 열량 [ $kJ$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

† Corresponding author

Tel.: +82-51-620-1502; fax: +82-51-611-6368

E-mail address: jskim@pknu.ac.kr

## 그리스 문자

- $\mu$  : 점도 [ $N \cdot s/m^2$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma$  : 표면장력 [ $N/m$ ]

## 하첨자

- adia* : 단열부  
*cond* : 응축부  
*eva* : 증발부  
*G* : 기체  
*h* : 수평  
*hp* : 히트 파이프 설치 시험체  
*in* : 내부  
*L* : 액체  
*sp* : 히트 파이프 미설치 시험체  
*v* : 수직

## 1. 서 론

### 1.1 연구목적 및 배경

최근 콘크리트 구조물의 경우 대형화 및 고강도화에 따라 사용 시멘트량이 증가하고 있다. 콘크리트 기초부, 교각, 원자로 격납구조물 및 LNG 탱크 등의 대형 구조물은 시공시 매스 콘크리트의 수화열로 인한 온도 균열이 발생될 경우 구조물의 안정성 문제를 발생시키는 원인이 된다.<sup>(1)</sup>

시멘트가 물과 완전히 반응하면 발열화학반응( $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ )을 하게 되는데, 이때 반응열인 수화열이 발생하게 된다. 특히, 콘크리트는 열전도율이 낮기 때문에 경화되면서 발생하는 수화열이 외부의 노출 부위로 발산되는 데 많은 시간이 필요하다. 수화열은 시멘트의 종류와 화학적 구성에 따라 달라지지만 미소 수화열량계에 의한 실험결과에 의하면 시멘트에서는 약 356 kJ/kg 정도의 수화열이 발생하게 된다. 이런 수화열로 인한 온도 상승은 강도의 발현을 비롯해서 콘크리트의 성질에 영향을 미치며 또한 균열의 한 원인이라는 점이 특히 중요하다. 일반적으로 두께가 얇고 공기 중에 접한 면이 많은 구조물은 내부에서 발생하는 열을 외부로 쉽게 발열시키기 때문에 문제가 발생되지 않지만, 부재의 두께가

큰(0.8~1.0 m 이상) 매스 콘크리트의 구조물에서는 수화반응에 의한 발열량은 콘크리트의 내부와 표면 사이의 온도차이를 발생시킨다.<sup>(2)</sup>

일반적으로 콘크리트에서 발생한 열이 외부로 발산하는 데 필요한 시간은 구조물의 최소 치수의 제곱에 비례하며, 동일 구조물에서 수화열에 의해 발생한 콘크리트의 온도차가 25~30℃ 정도에 도달하면 열용력에 의한 온도 균열이 발생한다. 특히, 수화열에 의해 발생한 인장응력은 경화 후에도 잔류응력으로 남기 때문에, 주변의 콘크리트에 구속조건으로 작용하게 되어 구조물의 균열, 안전성, 내구성 및 방수성에 영향을 미치게 된다.<sup>(3)</sup>

따라서, 매스 콘크리트 구조물의 시공시 발생하는 수화열을 제어하여 균열발생을 최소화할 수 있도록 콘크리트 타설시 진동형 히트 파이프를 이용하여 수화열 최대 상승온도를 강하시키고자 하였다. 콘크리트 구조물의 균열을 방지하기 위한 새로운 매스 콘크리트 냉각방법을 제시하고 기초 설계자료를 제공하고자 하였으며, 본 연구에서는 기초 연구로서 히트 파이프의 동계 수화열 제어성을 규명하고자 하였다.

### 1.2 종래 연구

수화열에 의한 온도 증가를 억제하기 위해 현장에서 주로 사용되는 방법들은 배합수나 사용골재를 냉각시키는 사전 냉각공법, 파이프에 냉각수를 통과시키는 파이프 쿨링 공법과 같은 사후 냉각법, 그리고 근본적으로 콘크리트 자체의 발열량을 저감시키는 저발열 시멘트의 개발 등이 현재 주종을 이루고 있다.<sup>(4)</sup>

사전 냉각이란 콘크리트 타설온도가 타설 후 콘크리트 온도변화에 영향을 크게 미치기 때문에 콘크리트 타설온도를 저하시킴으로써 구조물에서의 온도균열을 저감시키려는 방법이며, 콘크리트 재료온도로부터 배합온도 및 타설 콘크리트 온도까지의 온도 저감관리를 총칭한다. 이런 사전 냉각방법을 크게 분류하면 기본적으로 냉수, 냉풍, 얼음, 액체질소 등의 냉각 매체를 사용하여 콘크리트 재료를 개별적으로 냉각시키는 방법, 콘크리트의 제조시 또는 제조 후의 굳지 않은 상태에서 콘크리트를 직접 냉각하는 방법이다.

사후 냉각인 파이프 쿨링은 콘크리트 타설 전에 구조물 내에 파이프를 배치하고 타설 직후부

터 파이프에 냉각수를 순환시켜 콘크리트의 수화열을 저감시키는 공법으로 유효한 수단으로 인식되고 있다.<sup>(5)</sup>

그러나, 위 공법은 시공과 공사기간, 비용 상의 문제가 있으며, 진동형 히트 파이프를 이용한 수화열 제어실험에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 실험부는 공시체, 간격을 달리한 히트 파이프를 설치한 경우로 크게 3가지 실험조건으로 나누어져 있다. 각각의 온도계측은 데이터 로거(DR-230, Yokogawa 사)의 단자에 연결하여 RS-232C 통신을 통해 컴퓨터로 데이터값을 받아들이도록 하였고, T-type의 열전대를 사용하여 다점의 온도를 계측하는 것으로 구성되었다. 거푸집은 120 cm×180 cm×240 cm의 타설공간을 확보하기 위하여 125 cm×185 cm×245 cm 크기로 제작하였고, 거푸집면의 바닥, 측면에 모두 5 cm 두께의 스티로폼으로 단열하였다.

진동형 히트 파이프는 외경 4 mm, 내경 2.8 mm 길이 동관을 사용하였다. 실험의 비교대상인 (a) 구조물은 히트 파이프를 설치하지 않고 콘크리트만 타설하였다. (b) 구조물의 진동형 히트 파이프의 수직 길이는 240 cm로서, 중발부의 160 cm는

Table 1 Material properties<sup>(6-8)</sup>

Properties	Material	Concrete
Density (kg/m <sup>3</sup> )		2300
Specific heat (kJ/kg·K)		1.046
Thermal conductivity (W/m·K)		2.67
Cement unit weight (kg/m <sup>3</sup> )		313
Design strength (kg/cm <sup>2</sup> )		210

콘크리트 구조물 내에 삽입된 상태이고, 나머지 80 cm의 응축부는 구조물 외부에 돌출되어 있고, 피치 20 cm, 11턴의 비루프형 히트 파이프를 3열로 거푸집에 부착하였다. 중발부 대비 응축부 길이는 약 1 : 0.5로 1열당 응축부 전열면적은 0.136 m<sup>2</sup>이다. (c) 구조물은 중발부 대비 응축부 1 : 0.3이고 응축부 전열면적은 0.088 m<sup>2</sup>이고 다른 조건들은 (b)와 같다. 작동유체는 작동온도범위를 고려하여 R-22를 사용하였으며, 내체적비 40%를 충전하였다.<sup>(9-10)</sup>

### 2.2 실험방법

본 연구는 동계 시험부 내 온도 상승과 온도 분포라는 두 가지 중점사항을 두고 실험을 수행하였다. 특히 내부 구속의 영향에 의한 온도균열을 해석하고자 하였다. Fig. 2와 같이 온도측정을 위한 열전대를 설치하였다. 온도측정은 매 10분 간격으로 약 110시간을 측정하였다. 몰과 시멘트비는 53%, 시멘트량은 313 kg/m<sup>3</sup>로 하였다. 실험장소는 경남 김해였으며, 실험시기는 2005년 3월 8일부터 2005년 3월 14일까지 수행되었다.

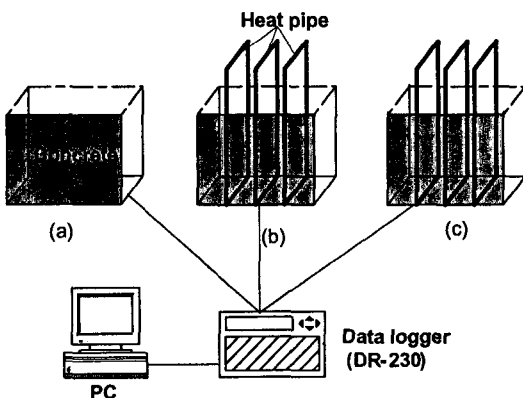


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

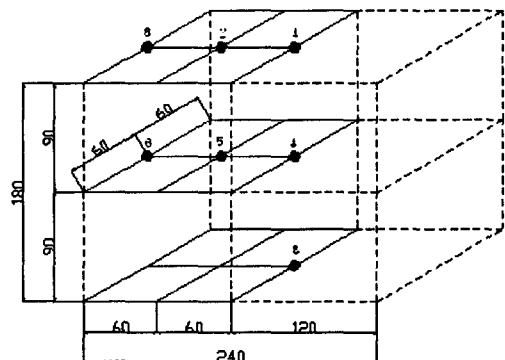


Fig. 2 Locations of thermocouples.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 수화열 측정결과

##### 3.1.1 히트 파이프에 의한 제거열량

Fig. 3은 3개의 실험조건에서 각각의 시간에 따른 중심 온도 변화를 나타내었다. 그 결과 (a)보다 (b)는 최고 온도가 약 14℃ 저감되었고, 최고 온도 도달시간은 약 8시간 단축되었으며, (c) 실험조건에서는 약 12℃가 저감되었고, 최고 온도 도달시간도 약 7시간 단축시킬 수 있었다. 따라서, 진동형 히트 파이프를 매스 콘크리트에 적용할 경우 수화열 저감과 공사기간 단축이 가능할 것으로 예측된다.

Fig. 4는 각 실험조건에서 히트 파이프 미설치 시험체인 (a) 구조물에 비교하여, 히트 파이프를 설치한 시험체에서의 시간에 따른 제거열량을 비교한 것이다. 콘크리트로부터 제거된 열량은 아래의 식(1)을 이용하여 산출하였다.<sup>(11)</sup>

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{sp} - T_{hp}) \quad (1)$$

여기서,  $T_{sp} - T_{hp}$ 는 PHP를 설치한 것과 설치하지 않은 구조물의 평균 온도차이다. 그 결과 (a)에 대하여 히트 파이프가 제거한 열량은 (b) 구조물은 최고 약 22,000 kJ이었고, (c) 구조물의 제거열량은 약 18,000 kJ이었다.

시간이 지날수록 제거열량이 커지는 것은 Fig. 3에서 알 수 있듯이, 각 시험체의 중심부 온도가 커지기 때문이다.

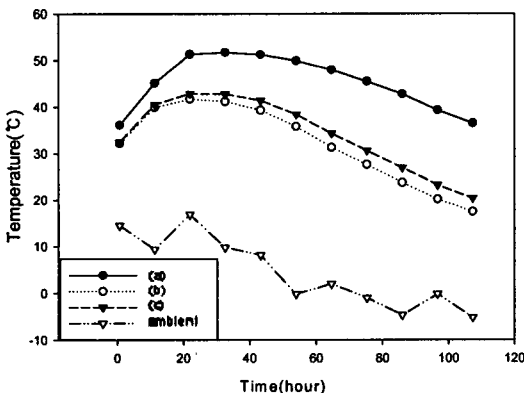


Fig. 3 Comparison of core temperature.

##### 3.1.2 히트 파이프 내 비등 및 응축 열전달계수

진동형 히트 파이프 내부의 열전달 과정은 핵비등(nucleate boiling) 양식으로 해석할 수 있다. Im<sup>(12)</sup> 등의 실험에서 열전달계수가 실험값과 가장 잘 일치하는 것으로 나타난 식을 본 실험에 적용하였는데, 증발부 상관식인 Rohsenow<sup>(13)</sup> 식(2), 응축부 상관식인 Nusselt<sup>(14)</sup> 식(3), (4)를 각각 적용하여 증발부와 응축부의 열전달계수를 구하여 Fig. 5에 나타내었다.

$$\Delta T_{sat} = \frac{h_{LG} C_{SF}}{c_{pL}} \left[ \frac{1}{\mu_L h_{LG}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_L - \rho_G}} \right]^{0.33} \times \left[ \frac{c_{pL} \mu_L}{k_L} \right]^{1.7} q^{0.33} \quad (2)$$

$$h_h = 0.58 \left[ \frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_G) k_L h_{LG}}{\mu_L (T_{adia} - T_{cond}) D_{IN}} \right]^{0.25} \quad (3)$$

$$h_v = \frac{h_h}{0.772 (L_{cond} / D_i)^{0.25}} \quad (4)$$

식(2)에서  $C_{SF}$ 는 관 표면처리와 유체에 관계되는 상수로서, 일반적으로 알려져 있지 않을 경우 0.013을 사용한다.

#### 3.2 수화열에 의한 균열해석

Fig. 5에서 예상과 다른 경향을 보이는 것은 열전달계수를 구하는데 특히 표면의 영향 등을 고려하지 않았기 때문에 좋은 결과값을 얻을 수는

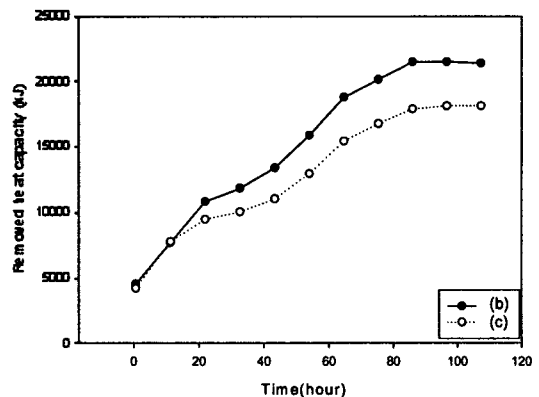


Fig. 4 Accumulation of removed heat capacity.

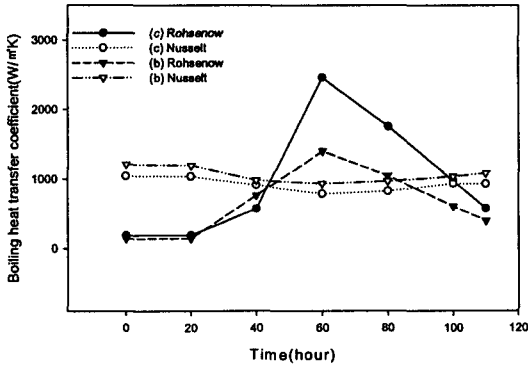


Fig. 5 Comparison of boiling and condensing heat transfer coefficient.

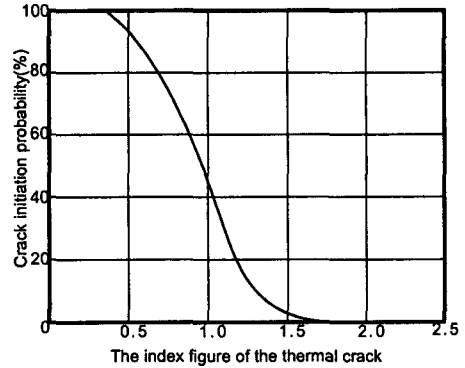


Fig. 7 Index figure of thermal crack.<sup>(16)</sup>

Table 2 Index figure of thermal crack

	$i$ (°C)	Index figure
(a)	20	0.75
(b)	8	1.875
(c)	11	1.36

없었지만, 본 실험에 적용된 진동형 히트 파이프의 대략적인 열전달계수값은 알 수 있었다.

원칙적으로 콘크리트의 인장 강도와 온도 응력의 비로써 온도 균열지수를 구해야겠지만, 본 연구에서는 간이적인 방법인 온도만으로 온도 균열지수를 구하였는데, 이 방법은 온도계산을 실시하여 그 결과를 바탕으로 균열발생에 대한 안정성을 구한다. 온도 균열지수는 아래의 식(5)로부터 구할 수 있으며,<sup>(15)</sup> 구조물에 따른 지수를 Table 2에 나타내었다.

$$\text{Index figure of thermal crack} = 15/i \quad (5)$$

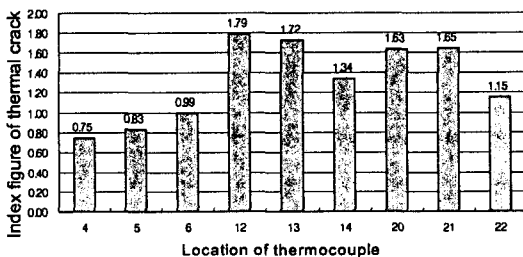


Fig. 6 Index figure of thermal crack with locations of thermocouples.

여기서,  $i$ 는 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차(°C)이다.

각 위치에서의 열전대를 이용하여 얻은 각 위치별 균열지수는 Fig. 6에 나타내었다. 4-6은 (a) 구조물의 중앙에서 표면 쪽의 균열지수이며, 12-14, 20-22는 각각 (b), (c) 구조물의 균열지수이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, (b)와 (c)의 균열지수는 큰 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다.

콘크리트 표준시방서에는 일반적인 구조물에서의 표준적인 온도 균열지수의 값을 균열을 방지할 경우 1.5, 균열발생을 제한할 경우 1.2 이상 1.5 미만, 유해한 균열발생을 제한할 경우 0.7 이상 1.2 미만으로 두고 있다. 따라서, (b) 구조물의 경우 균열을 방지하는 기준을 만족하며, (c) 구조물의 경우는 균열발생을 제한하는 기준을 잘 만족한다.<sup>(6)</sup>

일반적으로 사용되는 균열지수에 따른 발생 확률 그래프인 Fig. 7을 이용하여 균열발생 확률을 구한 결과, (a)의 균열발생 확률이 75%, (b) 구조물은 0%, (c) 구조물은 6%임을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동제의 매스 콘크리트 구조물에 진동형 히트 파이프를 적용한 수화열 제어 성능 실험 수행을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) (a) 구조물에 비해 (b) 구조물은 최고 온도 도달시간이 약 8시간 단축되었고, 최고 온도도 12°C 가량 낮아졌으며, (c) 구조물은 최고 온도 도달시간이 7시간 정도 단축되었고, 최고 온도도

약 10℃ 정도 감소되었다.

(2) (a) 구조물에 대하여 히트 파이프가 제거한 열량을 비교해 보면, (b) 구조물은 최고 약 22,000 kJ이었고, (c) 구조물은 최고 약 18,000 kJ을 각각 제거하였다.

(3) (a) 구조물의 균열발생 확률은 75%, (b) 구조물 약 0%로, (c) 구조물은 약 6%로 각각 나타났다.

(4) 본 연구 대상 구조물의 계측 및 해석으로 진동형 히트 파이프를 이용한 공법이 수화열 제거에 효과가 있음을 확인할 수 있었으며, 그에 따른 온도균열의 발생을 방지할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 부경대학교 발전기금재단(2005.11 ~ 2006.10)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Park, C. Y., 1997, A study on thermal stress by heat of hydration in mass concrete, Journal of the Research Institute of Industrial Technology, Vol. 16, pp. 206-212.
2. Oh, B.H. and Yoo, S.W., 1999, Thermal analysis and practical construction method for the hydration-induced crack control of underground concrete box structures, Journal of Korea Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. I-4, pp. 457-467.
3. Cha, S.W., 2002, Mathematical modeling of degree of hydration and adiabatic temperature rise, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 14, No. 1, pp. 118-125.
4. Jung, C.H., 2002, Control of thermal cracking by pipe-cooling system in double T-beam bridge, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 14, No. 1, pp. 53-60.
5. Kim, J.G., 1997, A study on technology for the reduction oh hydration heat in mass concrete structure, KAIST, Tongyang Inc., pp. 39-52.
6. Ministry of Construction & Transportation, 2000, Standard specifications of concrete.
7. ASHRAE, 2001, ASHRAE Handbook Fundamentals, Chap. 38, p. 3.
8. Holman, J.P., 2004, Heat Transfer, Ninth edition, McGraw Hill, p. 756.
9. Miyazaki, Y. and Akachi, H., 1996, Heat transfer characteristics of looped capillary heat pipe, Proceeding of the 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, pp. 378-383.
10. Lee, W.H., Kim, J.H., Kim, J.S. and Jang, I.S., 1999, The heat transfer characteristics of oscillating capillary tube heat pipe, 2th ed., Two-phase Flow Modeling and Experimentation, Vol. 3, pp. 1713-1718.
11. Yunus, A.C., 1997, Heat Transfer, International Edition, pp. 294-320.
12. Im, Y.B., 2003, Study on heat transfer characteristics of heat exchanger using oscillating heat pipe for low temperature waste heat recovery, Graduate School, Pukyong National University, pp. 47-49.
13. Hewitt, G.F., Shires, G.L. and Bott, T.R., 1994, Process Heat Transfer, CRC, pp. 423-466.
14. Karl, S., 1992, Heat Transfer in Condensation and Boiling, Springer-Verlag, pp. 7-65.
15. Faver, A.R., 1999, Reinforced Concrete Structure, 2th ed., pp. 509-513.
16. Cha, S.W., 2001, Construction techniques for crack control of underground box structures, Journal of the KIIS, Vol. 16, No. 4, pp. 153-159.