

진동형 히트 파이프를 이용한 하계 매스 콘크리트의 수화열 냉각에 관한 실험적 고찰

양태진* · 김정훈** · 김종수†

(원고접수일 : 2006년 8월 3일, 심사완료일 : 2006년 10월 12일)

An Experimental Study on Cooling of Hydration Heat of Mass Concrete Structure using Pulsating Heat Pipe in Summer Season

Tae-Jin Yang* · Jeong-Hoon Kim** · Jong-Soo Kim†

Abstract : In process of reinforced concrete (RC) box structure, the heat of hydration may cause serious thermal cracking. In order to eliminate hydration heat of mass concrete, this paper reports results of hydration heat control in mass concrete structure using the pulsating heat pipe.

There were three RC box molds(1.2×1.8×2.4 m³) which shows a difference as compared with 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 serpentine type copper pipe with 10 turns (outer diameter: 4mm, inner diameter: 2.8mm). The working fluid was R-22 and its charging ratio was 40% by volume. The conditions such as the number of turns, the length and the pitch of the pulsating heat pipe and the size of concrete structure were changed. Based on these experiments, it was confirmed that this construction method using pulsating heat pipe was effective to remove hydration heat of mass concrete structure and thus it was possible to prevent harmful thermal crack and construction period and costs of concrete structure would be cut down.

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

	기호 설명	m	콘크리트 질량 [kg]
		T _s	PHP를 설치하지 않은 구조물의 온도 [°C]
Q	열량 [kW]	T _p	PHP를 설치한 구조물의 온도 [°C]
c _p	비열 [J/kg · K]		

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : jskim@pknu.ac.kr, Tel : 051) 620-1502

* 한국수력원자력

** 성균관대학교 기계공학부

$f_{sp}(t)$ 하루 동안의 인장강도
 $f_c(t)$ 수화열에 의한 내부 구조의 최대 온도응력
 i 중심부온도가 최고일 때, 중심부와 표면 온도차

1. 서 론

1.1 연구 목적 및 배경

콘크리트 기초부, 교각, LNG 탱크 등의 대형 구조물은 시공시 매스 콘크리트(mass concrete)의 수화열로 인한 온도 균열이 발생될 경우 구조물의 안정성 문제를 발생시키는 원인이 된다^[1]. 시멘트가 물과 완전히 반응하면 화학반응을 하게 되는데, 이때 반응열인 수화열이 발생하게 된다. 특히, 콘크리트는 열전도율이 낮기 때문에 경화되면서 발생하는 수화열이 외부의 노출 부위로 발산되는데 많은 시간이 필요하다. 수화열로 인한 온도 상승은 강도의 발현을 비롯해서 콘크리트의 성질에 영향을 미치며 또한 균열의 한 원인이라는 점이 특히 중요하다. 부재의 두께가 큰 매스 콘크리트(0.8~1.0m 이상)의 구조물에서의 수화 반응에 의한 발열량은 콘크리트의 내부와 표면 사이의 온도 차이를 발생시킨다^[2].

수화열에 의한 온도 증가를 억제하기 위해 현장에서 주로 사용되는 방법들은 배합수나 사용 골재를 냉각시키는 사전 냉각 공법, 파이프에 냉각수를 통과시키는 파이프 쿨링 공법과 같은 사후 냉각법, 그리고 근본적으로 콘크리트 자체의 발열량을 저감시키는 저발열 시멘트의 개발 등이 현재 주종을 이루고 있다^[3]. 그러나, 위 공법들은 시공과 공사기간, 비용 상의 문제가 있으며, 진동형 히트파이프를 이용한 수화열 제어 실험에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 타설시 진동형 히트 파이프(Pulsating heat pipe, 이하 PHP)^[4]를 이용하여 수화열 최대 상승 온도를 감하시키고, 콘크리트 구조물의 균열을 방지하기 위한 새로운 매스 콘크리트 냉각 방법을 제시하고 기초 설계 자료를 제공하고자 하였다. 이에 따른 기

초 연구로써 히트 파이프의 하계 수화열 제어 성능을 규명하고자 하였다.

1.2 종래 연구

Kim 등^[5]은 수화열에 의한 온도-응력 해석에 사용되는 온도 관련 물성치들이 해석 결과에 미치는 영향에 대해 연구하여, 비열이 열전도도에 비해 해석 결과에 많은 영향을 미치며, 비열이 크고 열전도율이 작을수록, 구조물에 발생하는 최대 상승 온도 및 최대 인장응력 값이 커진다는 것을 입증하였다.

Jung 등^[6]은 매스 콘크리트 구조물의 수화열 및 온도 응력 이력에 대한 해석에서 2회 이상 타설되는 대형 콘크리트의 경우 거푸집 제거 시점, 양생 방법 등에 대한 세심한 주의를 기울여 수화열 및 잔류 응력에 의한 균열 발생 등을 최대한 억제해야 한다고 결론지었다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서와 같이 실험 장치는 튜브와 튜브사이의 간격을 달리한 PHP를 내장한 공시체와 데이터 측정 시스템으로 구성된다. PHP는 외경 4mm, 내경 2.8mm 동관을 사용하여 루프형 히트 파이프로 제작하였고, PHP 내로의 작동 유체 충전에 앞서, 내부를 로터리 펌프(RP)와 디퓨저 펌프(DP)로 이루어진 고진공 시스템으로 5.0×10^{-5} torr.까지 진공하여, 90ml 충전 실린더(HGC-96, Taiatsu)를 사용하여 작동 유체 R-22를 히트 파이프 내부 체적의 40%(vol.)로 충전하였다. 이러한 PHP를 내장한 콘크리트 구조물의 거푸집은 $1.2 \times 1.2 \times 1.2$ m³, $3.6 \times 1.2 \times 1.2$ m³의 타설 공간을 확보하기 위해 0.05m씩 크게 제작하였고, 거푸집면의 바닥, 측면에 모두 0.05m 두께의 스티로폼으로 단열하였다. 그리고, 일사 영향으로 인한 표면 온도 상승을 막기 위해, 차광막을 설치하였다.

데이터 계측 시스템은 데이터 로그(DR-230, Yokogawa사)의 단자에 연결하여 RS-232C 통신을 통해 컴퓨터로 데이터 값을 받아들이도록 하였다. 온도 계측을 위해 T-type의 열전대를 사용하였으며, 온도 계측은 매 10분 간격으로 약 100 시간을 측정하였다.

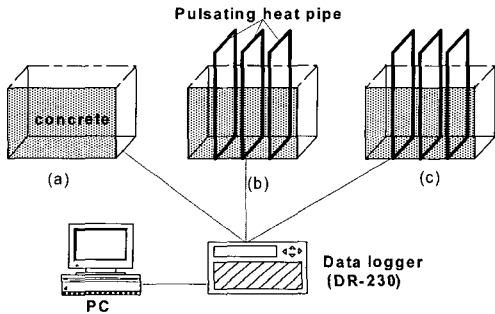


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구에서는 밀도 $2,300\text{kg/m}^3$, 비열 $1.046\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, 열전도도 $2.67\text{W/m}\cdot\text{K}$, 설계 강도 210kg/cm^2 의 보통 시멘트를 사용하였다. 콘크리트의 열전도율이 $2.67\text{W/m}\cdot\text{K}$ 로써 아주 낮음을 콘크리트표준시방서에서 확인할 수 있으며, 물과 시멘트의 비는 53%, 단위 시멘트량은 313kg/m^3 으로 하였다⁽⁷⁾. Table 1은 PHP 면적과 매스 콘크리트 구조물의 크기를 나타내며, Table 2는 실험 조건을 나타내고 있는데, PHP pitch는 PHP의 한 턴의 간격이며, 또한 Interval of PHP는 매스콘크리트 구조물에 설치된 PHP의 배열 간격을 의미한다. Table 1과 2에서, 1, 2, 3은 실험 기간을 나타내고 있는데 경남 김해에서, 1차 실험은 2004년 7월20일~23일까지, 2차 실험은 8월 5일~9일까지, 3차 실험은 9월 22일~24일까지 실험을 수행하였다는 것을 나타낸다. 또, A, B, C는 매스 콘크리트 구조물을 의미하는데, A 구조물은 PHP를 설치하지 않는 경우(1차 실험 제외), B, C 구조물은 PHP를 설치하고 이의 피치, 배치 간격, 응축부 면적 등을 변화시켰다. Fig. 2는 2차 실험의 열전대 설치 위치를 나타낸 것이다.

Table 1 Area of PHP & Size of Mass Concrete Structure

	Concrete structure	Condensing part(m ²)	Evaporating part(m ²)	Size of structure (W×L×H(m))
1	A	0.15	0.25	1.2×1.2×1.2
	B	0.45	0.25	
	C	0.85	0.47	
2	B, C	0.27	0.5	1.2×1.2×1.2
3	B	0.47	0.66	3.6×1.2×1.2
	C	0.77	1.3	

Table 2 Experimental Conditions

	PHP pitch (m)	Interval of PHP (m)	Mean ambient air temperature (°C)
1	A 0.2	0.3, 0.3, 0.3, 0.3	30
	B 0.1		
	C 0.05		
2	0.1	0.2, 0.4, 0.4, 0.2	29
		0.3, 0.3, 0.3, 0.3	
3	B 0.2	0.3, 0.3, 0.3, 0.3	22
	C 0.1		

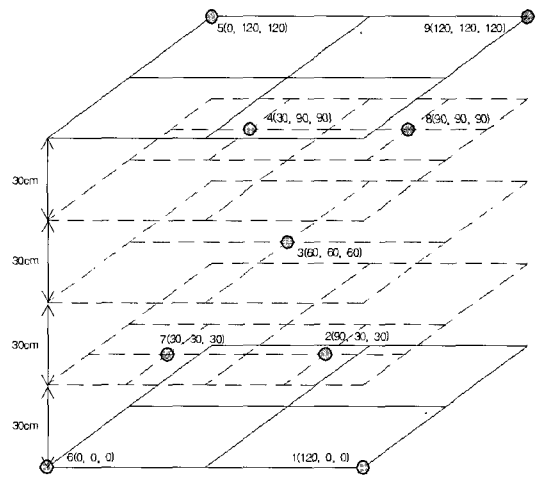


Fig. 2 Locations of thermocouples (2nd experiment)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Data reduction

매스 콘크리트 구조물의 제거된 열량 Q 는 식 (1)로 계산하여 구하였다^{(8)-⁽¹⁰⁾}.

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_s - T_p) \tag{1}$$

균열 발생에 대한 안정성의 척도를 온도 균열 지수라고 하며, 식 (2)와 (3)과 같이 표현할 수 있는데, 식 (2)는 정밀한 해석 방법으로, 식 (3)은 간이적 방법으로, 온도 균열 지수를 구하는 것으로, 본 연구에서는 식 (2)와 (3)의 결과 값이 거의 같은 것을 사전에 확인하였고, 식 (3)을 이용하여 온도 균열 지수 I_{cr} 를 구하였다⁽¹¹⁾.

$$I_{cr} = \frac{f_{sp}(t)}{f_i(t)} \tag{2}$$

$$I_{cr} = \frac{15}{i} \tag{3}$$

온도 균열 지수는 구조물의 중요도, 기능, 환경 조건 등에 대응할 수 있도록 선정하여야 하며, 철근이 배치된 일반적인 구조물에서의 표준적인 온도 균열 지수의 값으로 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 균열을 방지할 경우는 1.5, 균열 발생을 제한할 경우는 1.2 이상 1.5 미만, 유해한 균열 발생을 제한할 경우는 0.7 이상 1.2 미만이다.

3.2 매스 콘크리트 구조물의 온도 분포

각 매스 콘크리트 구조물의 중심부 온도를 비교하여 Fig. 3~Fig. 5에, 중심부의 최고 온도를 Table 4에 나타내었다. 최고 온도를 보면, A 구조물은 PHP를 설치하지 않았기 때문에 PHP를 설치한 B, C 구조물과 약 3.2°C~7.7°C까지의 온도차를 보였고, 중심부 온도는 약 33°C~67°C의 온도차를 나타내었다. 또한, 최고 온도 도달시간도 약 5시간 정도 더 소요됨을 알 수 있었다. PHP를 설치하였을 경우와 PHP를 설치하지 않은 경우의 중심부의 온도가 큰 차이를 보여, 수화열 생각에

PHP가 효과가 있음을 알 수 있었으며, 이를 통해 최고 온도 도달 시간을 단축시켜 공사 기간 단축에 기여할 것으로 판단된다.

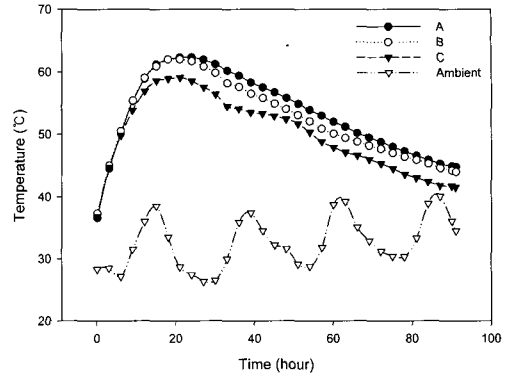


Fig. 3 Variation of core temperature (1st experiment)

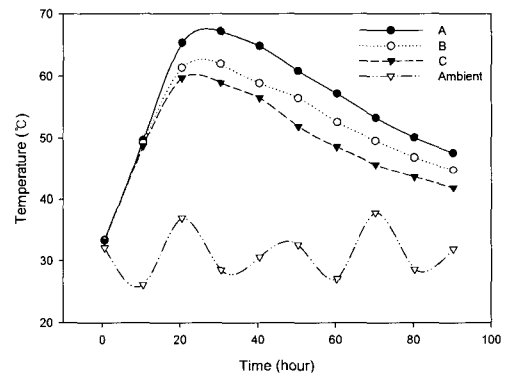


Fig. 4 Variation of core temperature (2nd experiment)

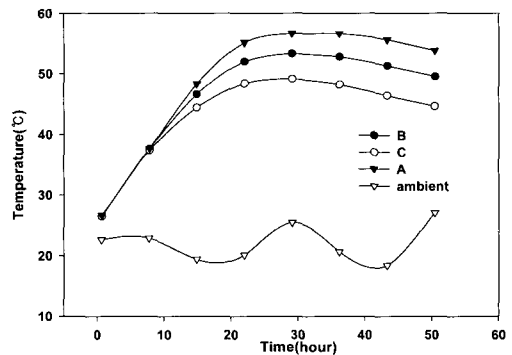


Fig. 5 Variation of core temperature (3rd experiment)

또한, Fig. 6~Fig. 8의 그래프의 표면과 중심부 온도와 식 (3)을 이용해 균열 지수를 짐작할 수 있다. 표면 온도와 중심 온도의 차이는 PHP를 설치하지 않았을 경우의 약 25℃에서 부터, PHP를 설치한 경우의 10℃까지 줄일 수 있었다. 식 (3)에서 i 는 중심부 온도와 표면부 평균 온도와의 차이 이므로 균열 지수는 0.6~1.5 범위가 됨을 짐작할 수 있다. 균열 지수가 클수록 균열 발생 확률이 낮아지므로 1.5 정도의 균열 지수는 현재 공사 현장에서 빈번히 사용되는 파이프 쿨링(봄·가을 균열 지수 약 0.9)보다 높은 균열 지수라 할 수 있고, PHP를 사용한 공법이 매스 콘크리트의 수화열 냉각에서 유효한 수단이 된다는 것을 보여 준다. 표면 온도는 콘크리트 표면으로부터 약 0.05m 가량 삽입하여 표면부 온도를 평균하여 나타낸 것이다.

Table 4 Maximum temperature and Maximum temperature reaching time

	Mass concrete structure	Maximum temperature (℃)	Maximum temperature reaching time(hour)
1	A	62.3	21.0
	B	62.0	18.0
	C	59.1	21.0
2	A	67.4	26.0
	B	62.5	22.0
	C	59.7	21.0
3	A	56.7	26.5
	B	53.1	26.6
	C	49.0	26.3

3.3 PHP의 제거 열량

또한, Fig. 9 그래프는 PHP를 설치하지 않는 구조물(A)와 PHP를 설치한 구조물(B, C)의 온도차와 식 (1)를 이용하여 제거된 열량을 계산한 값을 나타내었다. A 구조물과 비교하여 제거된 열량을 비교하면, 2차 실험에서는 B가 2.6kW, C가 4.1kW를 제거하였고, 3차 실험에서는 B가 1.3kW, C가 2.7kW를 제거하였다. 1차 실험은 PHP의 적용 가능성을 알아보기 위해 대조군이 없이 실험하였는데, PHP의 피치에 따라 냉각 성능의 차이가

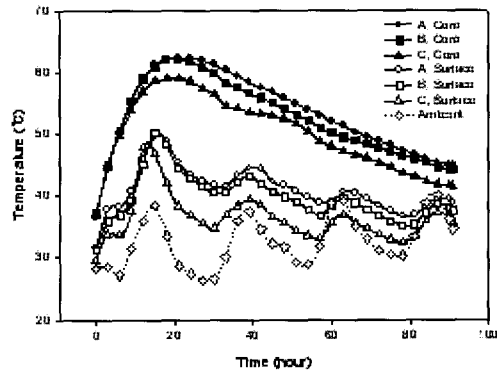


Fig. 6 Variation of core vs. surface temperature (1st experiment)

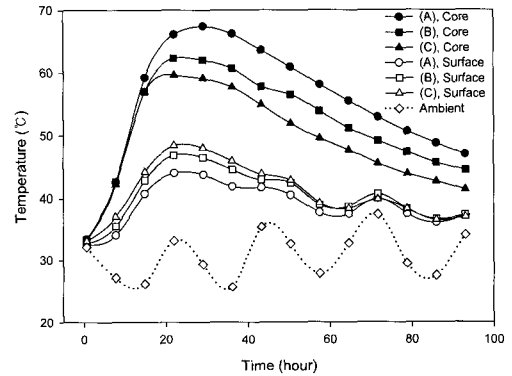


Fig. 7 Variation of core vs. surface temperature (2nd experiment)

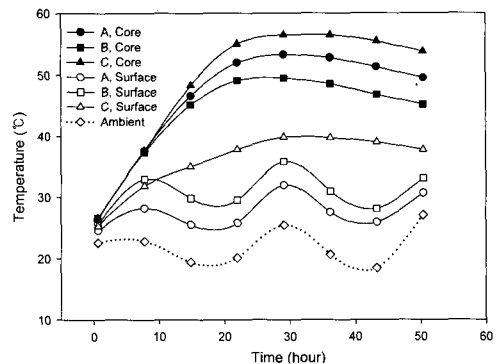


Fig. 8 Variation of core vs. surface temperature (3rd experiment)

를 알 수 있었고, 2차 실험에서는 PHP의 좌우 배치가 0.1m 틀려짐에 따라 냉각 성능의 차이가 컸었다. 3차 실험이 전체적으로 제거 열량이 낮은

것은 A 구조물의 크기가 1.2×1.2×1.2 m³으로 B, C 구조물의 1/3 크기 밖에 되지 않아 A 구조물의 수화열 발생이 적었기 때문에, B, C 구조물과의 온도차가 크지 않았다.

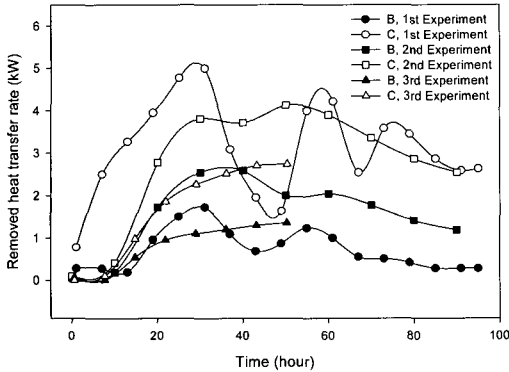


Fig. 9 Variation of removed heat rate

3.4 온도 균열 지수

본 연구의 목적인 PHP를 이용해서 균열지수를 얼마나 저감시킬 수 있는가에 대한 결과가 Table 5에 나타나 있다. PHP를 이용한 경우, 대부분이 계절에 관계없이 콘크리트 시방서의 균열 발생을 허용하지만 균열 폭이 과대하게 되지 않게 할 경우 0.7 이상의 조건을 잘 만족한다. 그리고 계절에 따라 하계의 경우 PHP의 피치를 좁게 두어야 한다는 실험 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 10을 이용하여 균열 발생 확률을 구하여 Fig. 11에 나타내었다.

Table 5 Index figure of thermal crack & probability of crack generation

	Mass concrete structure	Index figure of thermal crack	Probability of crack generation (%)
1	A	0.94	48
	B	1.15	35
	C	2.50	x
2	A	0.45	95
	B	0.71	72
	C	0.88	55
3	A	0.52	90
	B	0.75	70
	C	1.00	45

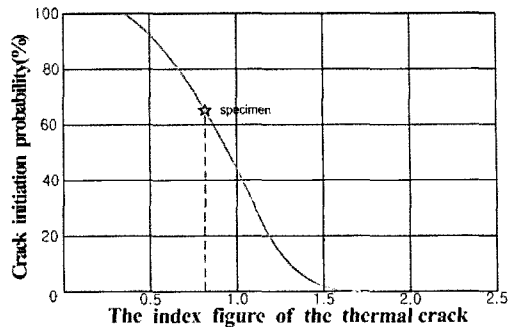


Fig. 10 Index figure of thermal crack

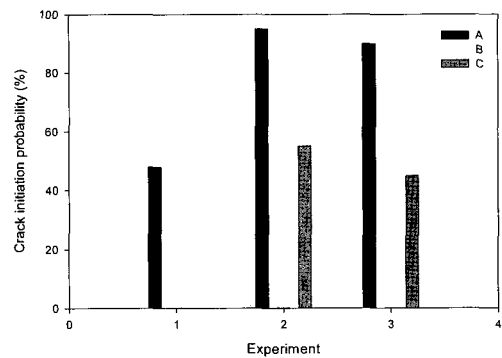


Fig. 11 Crack initiation probability to each experiment

4. 결 론

최근의 시멘트량 증대에 따른 콘크리트 구조물의 수화열 발생에 따른 온도 균열 예방을 위해 콘크리트 구조물의 수화열 냉각에 PHP를 적용하여, PHP 적용 여부와 PHP의 피치, 배치 간격, 응축부 면적 변화 등에 따른 비교 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PHP의 적용 가능성을 알아보기 위한 1차 실험에서 균열지수는 A구조물 0.94, B구조물 1.15, C구조물 2.5로서 세 구조물 모두 0.7이상의 균열지수를 보인다. 여기에서 PHP를 적용한 구조물의 경우, 하절기 타설 입에도 불구하고 유해한 균열발생을 제한하는 경우를 만족함을 확인할 수 있었다.

(2) 2차 실험에서는 PHP의 열 배치에 따라 성능을 평가하였다. PHP의 배열을 등 간격으로 한 C구조물의 경우에 균열지수는 0.88로, B구조물의 균열지수 0.71보다 더 유해한 균열 발생을 제한하

었다. 이 결과는 중앙부에서 집중적으로 발생하는 콘크리트의 발열 특성을 고려해 볼 때, PHP를 등간격으로 중심부에 집중한 B구조물에서 더욱 원활한 열전달이 이루어진 것으로 판단된다.

(3) PHP의 피치를 0.1m과 0.2m로 변화시킨 3차 실험에서 B, C 구조물의 균열지수는 0.75와 1.00으로 둘 다 유해한 균열 발생을 제한하는 수준을 잘 만족하였다. 특히, PHP의 피치를 0.1m로 제작한 C구조물의 경우가 냉각성능이 우수하였으며, 피치 간격이 작을수록 수화열 제거효과가 큰 것으로 나타났다.

(4) 이상의 결과로 부터 PHP 적용의 경우, 외기 온도 30℃가 넘는 여름에도 매스 콘크리트 구조물을 시공하여도 수화열 냉각이 가능하다는 것을 확인하였다.

(5) 이상의 결과에서, PHP를 이용한 공법이 수화열 제거에 효과가 있음을 확인할 수 있었으며, 그에 따라 매스콘크리트의 현장시공시 온도 균열의 발생 방지 및 양생 시간을 단축할 수 있으리라 예상된다.

참고문헌

[1] C. Y. Park, "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, 1997.

[2] C. H. Jung, "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, 2002.

[3] S. W. Cha, "Mathematical modeling of degree of hydration and adiabatic temperature rise", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 14, No.1, pp. 118-125, 2002.

[4] J. S. Kim, "Numerical Analysis of Pulsating Heat Pipe Based on Separated Flow Model", Journal of Mechanical Science and Technology,

Vol. 19, No. 9, pp. 1790-1800, 2005.

[5] 김광수, 차수원, "매스콘크리트 구조물의 수화열 및 응력해석의 민감도 분석", 한국산업안전학회지, 제 16권 제 4호, pp. 160-167, 2001.

[6] 건설교통부 콘크리트 표준시방서, 2000

[7] 정철희, 정영수, 전환석, "대형콘크리트 구조물의 타설 순서에 따른 수화열 해석", 대한토목학회, 제18권 제 I-1호, pp. 49-58, 1998.

[8] Yunus A. Cengel, Heat Transfer, International Edition, pp. 294-320, 1997.

[9] Jack P. Holman, Heat Transfer, Ninth Edition, McGraw Hill, pp. 756, 2004.

[10] Karl Stephan, Heat transfer in condensation and boiling, Springer-Verlag, pp. 7-65, 2004.

[11] J. G. Kim, A study on technology for the reduction of hydration heat in mass concrete, 1997

저 자 소 개



김종수(金鍾秀)

1955년 3월생, 1977년 부산수산대학교 식품공학과 졸업(학사), 1982년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사), 1988년 일본 와세다 대학교 기계공학과 졸업(박사), 2004~2006년 부경대학교 공과대학장, 현 부경대학교 기계공학부 교수



양태진(楊太振)

1977년 11월생, 2004년 부경대학교 냉동공조에너지시스템공학과 졸업(학사), 2006년 동대학원 냉동공조공학과 졸업(석사), 현 한국수력원자력 소속 연구원



김정훈(金正勳)

1968년 3월생, 1991년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업(학사), 1993년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사), 1996년 동대학원 냉동공학과 졸업(박사), 현 성균관대학교 기계공학부 연구부교수