



## 매스콘크리트의 수화열 저감을 위한 히트파이프의 현장적용성에 관한 연구

백동일<sup>1)\*</sup> · 김명식<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 건설공학부

## Application of Heat Pipe for Hydration Heat Control of Mass Concrete

Dong-II Baek<sup>1)\*</sup> and Myung-Sik Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**ABSTRACT** In order to raise efficiency in construction, construction period, construction costs etc. that have been problematic in the methods of hydration heat reduction thus far, this study has developed a new method. The principle of the developed construction method involves the laying of a heat conducting medium such as the heat pipe in the concrete, and through the fast conduction of heat by the heat pipe, the hydration heat occurring within the mass concrete is transferred to the exterior by which the internal hydration heat is reduced. If the study results of the onsite test are summarized, on application of existing hydration heat reduction methods, the highest temperature was reached in about 2~4 days, but when the heat pipe of this study was used, the period was reduced to within 24 hours. Moreover, when the thermal crack index was calculated with the method using the heat pipe as developed in this study, a value of 1.2 or higher was revealed, which is a level that can restrict the occurrence of cracks. Therefore, when the hydration heat control method using the heat pipe as developed in this study is applied, not only the effects of construction efficiency and reduction in construction period, but also outstanding economical effects can be expected.

**Keywords :** mass concrete, hydration heat, heat pipe, working fluid, thermal crack

### 1. 서 론

최근 경제발전을 위한 국가기반시설의 건설이 증대되면서 국가적인 사회간접자본 (SOC)에 대한 투자수요가 증가하고 있다. 예를 들면 신국제공항, 고속철도, 대규모 해양구조물, 장대교량, LNG 지하저장탱크, 초고층 빌딩의 대형기초 등과 같이 토목 및 건축 구조물의 대형화 추세가 가속화되고 있다. 대형 토목 및 건축 구조물을 건설하기 위해서는 단면이 큰 매스콘크리트 (mass concrete) 구조물의 시공이 불가피하다. 이러한 매스콘크리트 공사에서 콘크리트의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소 중 하나가 시멘트의 수화열에 의해 발생하는 온도균열이다. 매스콘크리트는 경화 중에 시멘트의 수화열이 축적되어 콘크리트의 내부온도가 상승한다. 이 때, 콘크리트 부재 표면과 내부와의 온도차나 부재 전체의 온도가 하강할 때의 수축변형 구속 등에 의해 응력이 생겨 균열발생을 초래한다. 이와 같이 콘크리트 타설 후 수화반응으로 인하여 수화 발열 과정에서 콘크리트 내부의 온도는 높아져 팽창하지만 표면은 외기온도에 의해 냉각되기 때문에 변형이 거의 없다. 즉, 중앙부와 표면부의 변형률이 다

르기 때문에 응력 (내부구속)이 발생하여 표면균열이 생성된다. 또한 1~2일 지난 후 냉각 과정에서는 콘크리트의 체적은 수축하지만 이것이 기초에 구속되어 콘크리트의 하부가 응력 (외부구속)을 받게 되어 균열이 발생되며, 일반적으로 외부구속에 의한 균열은 구조물을 관통하는 균열로 구조물에 구조적인 문제를 발생시키기 때문에 매스콘크리트에서의 온도균열은 신중히 검토되어야 하는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 또한 수화열에 의한 온도균열의 문제는 콘크리트 댐 또는 부재 치수가 특별히 큰 콘크리트구조물에만 일어나는 특유한 것으로 생각하여 왔지만, 사용 재료, 시공 조건에 따라서는 비교적 치수가 작은 구조물에서도 유해한 균열이 생기는 사례가 적지 않다.<sup>3,4)</sup> 이와 같은 온도균열의 제어 대책으로서는 적절한 재료, 배합설계, 비비기 온도 및 양생 방법을 선정하는 것에 의해 균열발생을 방지하려고 하는 입장이 주된 것이었다. 그러나 수화열에 의한 온도응력 및 온도균열은 구조 형식, 경계조건, 재료, 배합, 시공, 양생, 기상 조건 등의 복합적인 영향을 받으므로<sup>4,5)</sup> 균열발생을 완전히 방지하려고 할 경우 불합리하거나 비경제적인 설계 및 시공이 될 우려가 있다.

이러한 매스콘크리트에서 발생하는 수화열을 억제하기 위해서는 사전냉각법, 사후냉각법 및 저발열형 시멘트를 사용하는 방법 등이 있다. 여기서 사전냉각법은 배합수

\*Corresponding author E-mail: qt418@pknu.ac.kr  
Received May 21, 2007, Accepted January 4, 2008  
©2008 by Korea Concrete Institute

나 사용 골재를 냉각시키는 공법이고, 사후냉각법은 파이프에 냉각수를 통과시키는 파이프쿨링공법 등이며 저발열형 시멘트의 사용은 근본적으로 콘크리트 자체의 발열량을 저감시키는 방법이다. 그 중에서도 재령 초기에 내부온도 최대치를 낮추는 목적과 부재 전체의 평균온도를 빠른 시간에 구조물이 놓이는 곳의 평균적인 온도까지 강하시킬 목적으로 대규모 콘크리트 공사에서는 파이프쿨링공법이 많이 사용되어 왔다. 이 파이프쿨링공법은 타설콘크리트의 배합 변경이 없어 별도의 품질시험이 불필요하고, 수화열 저감 효과가 분명하다는 장점은 있으나, 쿨링파이프 설치, 유입수 저장 시설, 수온 조절 장치 등 부대시설 설치로 인한 고비용의 공사비가 소요되고 계측 및 수온 제어장치 관리 등의 품질관리가 요구되며, 시공 과정이 복잡하다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 시공이 간편하고 효율적인 공기 단축과 경제적인 공사비에 착안하여 히트파이프라는 새로운 열전달 매체를 매스콘크리트 속에 삽입하여 콘크리트 내부에서 발생하는 수화열을 외부로 빠르게 발산시켜 수화열로 인한 온도균열을 방지하는 새로운 냉각 방법을 제시하고자 한다<sup>6-8)</sup>. 또한 종래의 대표적 수화열저감공법인 파이프쿨링과 간접비교를 통해 매스콘크리트 수화열저감공법의 기초 설계 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 히트파이프를 이용한 수화열 저감 실험

#### 2.1.1 사용 재료

실험에 사용된 현장 타설 콘크리트는 근교 레미콘 회사의 일반적인 출하 제품으로 현장에서 가장 많이 사용되는 강도규격으로 하였다. 사용 콘크리트의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 히트파이프

본 연구에 사용된 히트파이프는 진동세관형 히트파이프 (oscillating capillary tube heat pipe, 이하 OCHP)를 사용하였다. 이 OCHP는 현재 각종 산업에 활발히 이용되고 있으며, 일반적인 제원은 Table 2와 같다. 또한 히트파이프 내에 주입하여 열을 수송하는 작동유체는 적용 온도 범위가 매우 넓으며, 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서는 사용 온도 범위 내에서 작동유체가 열·

**Table 1** Physical characteristics of concrete

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Cement content (kg/m <sup>3</sup> )	Design strength (MPa)	Slump (mm)	G <sub>max</sub> (mm)
2,300	382	21	120	25

**Table 2** Properties of heat pipe and working fluid

Heat pipe			Working fluid		
Type	Quality of material	Inside/external diameter (mm)	Type	Component	Packing ratio (%)
OCHP	Copper	2.8/4.0	R-22	Freon	40

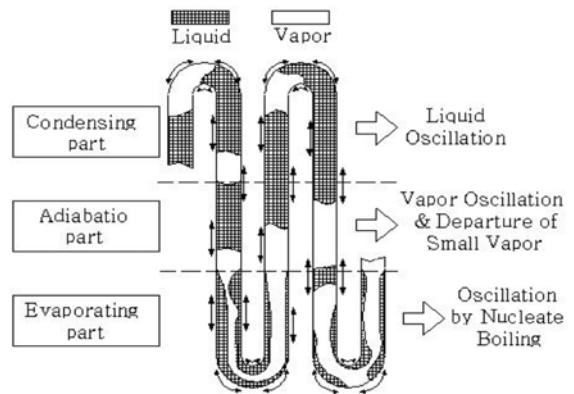
물리적으로 안정 상태에 있고, 무독성 및 관 재료와의 상용성을 만족하는 작동유체를 선택해야 한다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 조건을 만족하는 R-22를 선정하여 실험하였다.

#### 2.1.3 히트파이프의 작동 원리

히트파이프의 기본적인 작동은 파이프 내의 작동유체 및 증기포의 불규칙적인 루프 내 순환 또는 축방향 진동에 의한 것이며, 작동유체의 순환은 가열부에서 계속적으로 발생하는 고온 고압의 증기포가 냉각부 부근에서 응축됨에 따라 저온 저압화하고 다시 가열부로 귀환하여 열을 수송하게 된다. 이때 열량 수송의 대부분은 작동유체의 축방향 진동에 의한 것이다. 순환 구조의 모식도는 Fig. 1과 같다.

#### 2.1.4 대상 교각

대상 교각은 Fig. 2와 같이 부산근교에서 현재 건설중에 있는 D공사 현장의 교각 기초를 대상으로 실험을 수행하였다. 대상 교각 기초 콘크리트의 크기는 B = 7,800 mm,



**Fig. 1** Structure of oscillating capillary tube heat pipe



**Fig. 2** Foundation concrete of pier

L = 13,000 mm, H = 2,200 mm에 이르는 전형적인 마스크 콘크리트로 설계되어 있다. 이에 현장에서 2개소의 교각 기초 콘크리트를 대상으로 선정하여 한 개소는 히트파이프를 설치하지 않았고, 다른 한 개소는 히트파이프를 설치한 후 콘크리트를 타설하고 일정기간 온도계측을 실시하여 수화열 저감 효과를 상호 비교 하였다.

### 2.1.5 실험 방법

본 연구의 실험 대상 구조물인 교각 기초는 매시브한 콘크리트구조물임에도 불구하고 설계상 일괄적으로 타설하게 되어 있어 수화열로 인해 유해한 균열의 발생이 우려되는 조건이다. 따라서 교각 기초의 콘크리트타설 및 양생 시 발생하는 수화열을 최대한 억제하기위해 Fig. 3의 히트파이프 설치 평면도와 같이 콘크리트가 타설되는 전 구간에 히트파이프를 설치하였다.

설치된 히트파이프의 응축부는 콘크리트 타설 작업의 편리성을 위해 측면부 쪽으로 유도하여 노출시키는 방법을 채택하였다. 그리고 콘크리트 외부에 노출되어 열을 방출하는 히트파이프의 응축부 길이는 수차례의 모의부재 실험을 통해 콘크리트의 타설 위치별로 수화발열의 특성에 따라 달리 제작하여 설치하였다. 수화열이 가장 많이 발생할 것으로 예상되는 증발부는 증발부의 0.5배로 설치하였고, 측면부는 중심부보다 상대적으로 열 방산이 빠를 것으로 예측되어 히트파이프 응축부 길이를 증발부의 0.3배로 제작하여 설치하였다. 사용된 히트파이프는 작업의 편리성을 위해 비루프형을 사용하였고, 그 세부 설치도는 Fig. 4와 같다.

수화열 계측을 위한 열전대 설치는 Fig. 5와 같이 직사각형인 교각 기초가 상·하, 좌·우가 대칭이므로 전 교각단면의 1/4 부분에 대해서만 중심부를 포함하여 측면부 등 5개 구역(A구역~E구역)으로 나누어 수화열 계측용 열전대를 설치하였다. 그리고 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 구역의 열전대 설치는 수직 방향으로 콘크리트 하부 (ch 1, ch 4, ch 7, ch 10, ch 13), 중심부 (ch 2, ch 5, ch 8, ch 11, ch 14) 및 표면부 (ch 3, ch 6, ch 9, ch 12, ch 15) 등으로 나누어 콘크리트 각 위치별로 수화열을 계측하였다. Figs. 7, 8은 히트파이프 설치 및 콘크리트타설 후 사진이다.

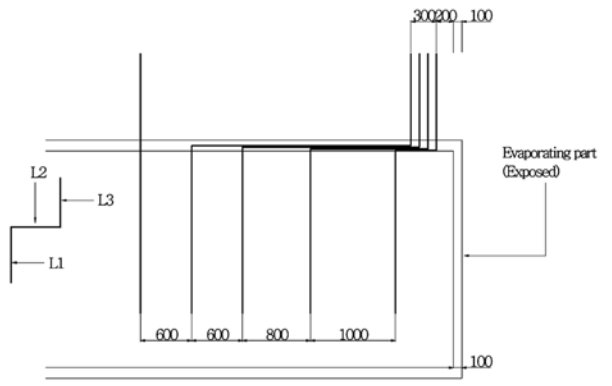
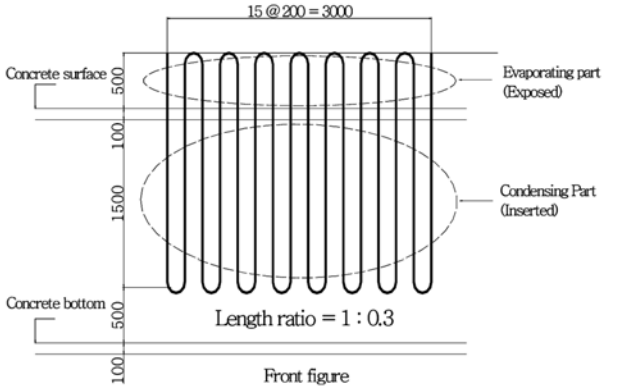
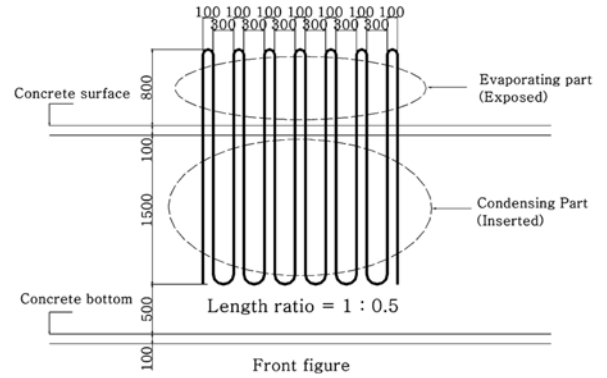


Fig. 4 Details of heat pipe installation

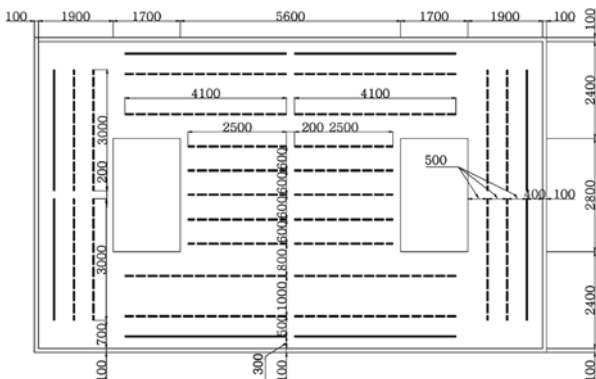


Fig. 3 The installation plan of heat pipe

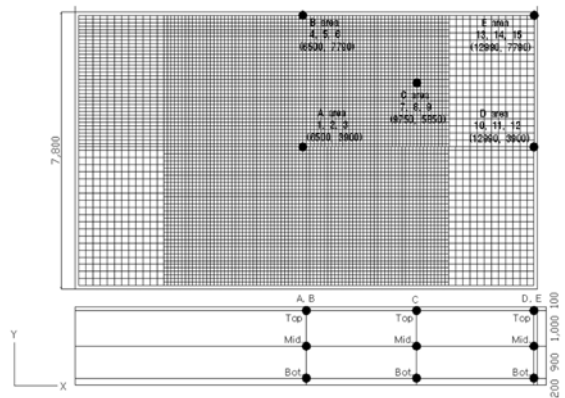


Fig. 5 The installation plan of thermocouple

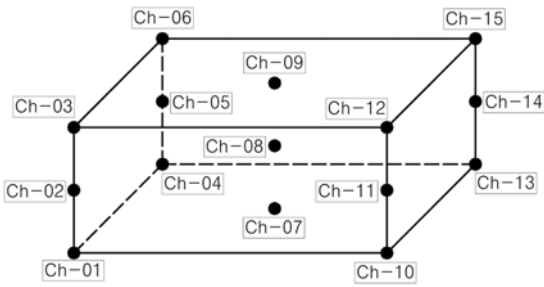


Fig. 6 Constituent diagram of thermocouple installation

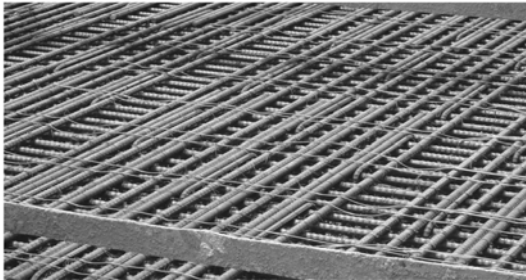


Fig. 7 Photograph of heat pipe field installation

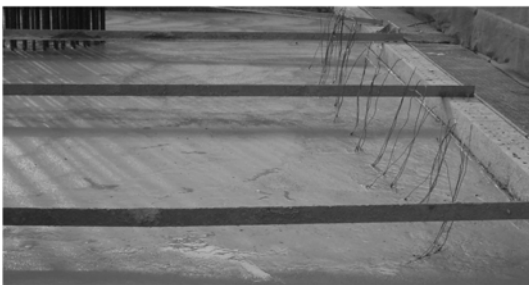


Fig. 8 Photograph after concrete casting

## 2.2 저발열 시멘트 사용과 파이프쿨링에 의한 수화열 저감 실험

히트파이프의 수화열 저감 효과와 비교하기 위해 종래의 대표적 수화열제어공법으로 많이 사용되고 있는 저발열 시멘트와 파이프쿨링을 동시에 적용한 경우에 대해 온도 변화를 관찰하여 수화열에 대한 저감 효과를 온도 균열지수와 균열발생 확률을 중심으로 검토해 보고자 한다. 대상 현장은 부산 지역에서 시공 중에 있는 현장에서 수화열 저감 공법으로 저발열 시멘트와 파이프쿨링공법을 병행하여 시공 중인 교각 기초 콘크리트를 대상으로 온도계측을 실시하였다.

이 결과를 참조하여 히트파이프를 이용하여 현장에 적용한 결과와 비교, 검토하고자 한다. 비록 두 현장의 시공방법이나 타설 환경이 달라 직접적인 상호 비교는 할 수 없으나, 각각의 수화열 저감 효과를 간접 비교하고 히트파이프 사용의 우수성을 확인하고자 한다.

### 2.2.1 수화열 측정 방법

수화열 측정은 대상 현장의 교각 기초콘크리트를 대상

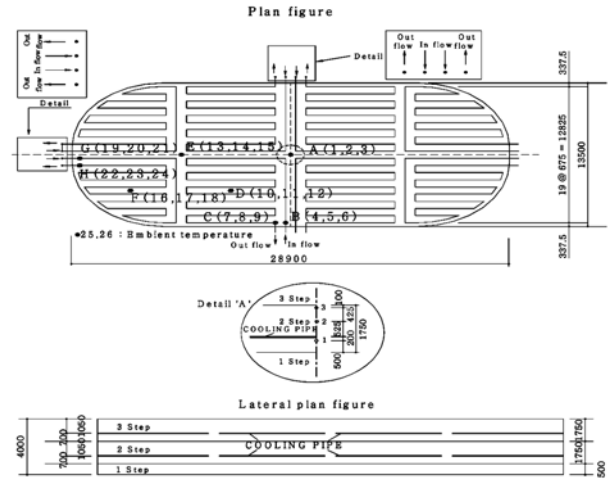


Fig. 9 The thermocouple installation plan & detail chart of pier (unit : mm)

으로 하였다. 교각의 크기는 전체 높이가 4,000mm로 Fig. 9의 측면도에서 보는 바와 같이 기초콘크리트를 3단으로 나누어 타설 하도록 설계되어 있다. 여기서 1단의 높이는 500 mm, 2단과 3단은 각각 1,750 mm이다. 그리고 1단은 일반콘크리트 타설 방법으로 설계되어 있고, 2단과 3단은 저발열 시멘트를 사용한 콘크리트 타설 전에 쿨링 파이프를 배치하고, 타설 직후부터 파이프에 냉각수를 주입하여 콘크리트 수화열을 저감시키는 파이프쿨링을 실시하도록 설계되어 있다. 이에 온도계측은 2단과 3단에서 실시하여 분석하였다. 본 연구에서는 교각의 형상이 타원형이고 상·하, 좌·우가 대칭이므로 온도계측을 실시하기 위해 전 교각단면의 1/4 부분에 대해서 중심부를 포함하여 냉각수 유입부, 유출부 등으로 다시 8개 구역(A구역 ~ H구역)으로 나누어 온도계측용 열전대를 설치하였다. 그리고 각 구역에는 상세 'A'와 같이 수직 방향으로 콘크리트 표면부 (열전대 3번), 상하 중심부 (열전대 2번), 파이프쿨링 주변부 (열전대 1번) 등으로 나누어 각각의 온도 변화를 계측하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 히트파이프를 이용한 수화열 저감

#### 3.1.1 온도 변화 특성

대상 교각 기초 콘크리트에서 발생하는 수화열 온도 계측은 앞에서 설명한 바와 같이 직사각형 평면의 1/4부분을 A구역에서 E구역까지 총 5개 구역으로 나누어 온도 계측을 하였다. 히트파이프 설치 유무에 따른 온도 변화는 Figs. 10과 11에 나타내었고, 각 구역의 온도 변화 특성과 온도 계측 결과와 변화 특성을 Tables 3, 4에 정리하였다.

가장 온도가 높을 것으로 예상되는 A구역과 C구역의 중심부 최고온도 변화는 히트파이프를 설치한 경우가 일반 타설 콘크리트에 비해 20°C 정도 저감 효과를 보였다.

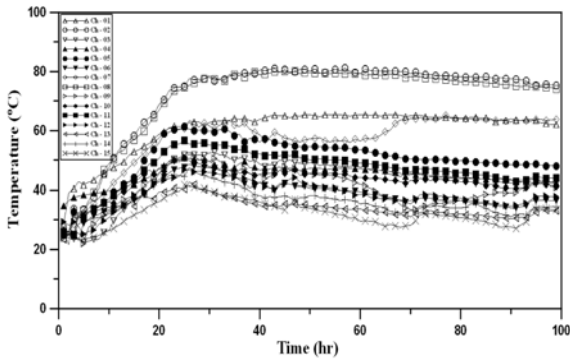


Fig. 10 Temperature variation of foundation without heat pipe

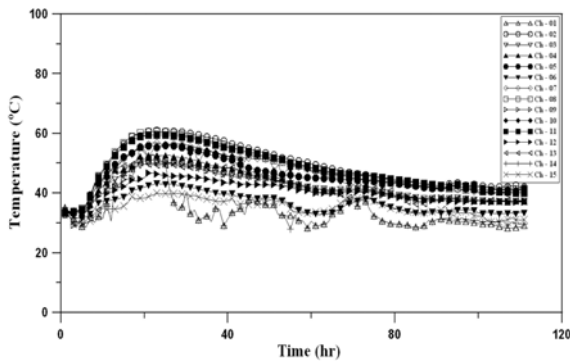


Fig. 11 Temperature variation of foundation using heat pipe

Table 3 Temperature and mechanical properties of mass concrete without heat pipe

Area	$T_a$ (hr)	$T_{max}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I_{cr}$	$C_{ip}$ (%)
A	57	81.2	47.5	33.7	0.45	96
B	25	61.4	47.6	13.8	1.09	38
C	47	80.1	47.1	33.0	0.45	96
D	25	56.7	44.7	12.0	1.25	20
E	26	47.4	36.2	11.2	1.34	13

Table 4 Temperature and mechanical properties of mass concrete using heat pipe

Area	$T_a$ (hr)	$T_{max}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I_{cr}$	$C_{ip}$ (%)
A	23	61.0	50.0	11.0	1.36	11
B	22	56.0	42.8	13.2	1.14	30
C	23	60.6	50.9	9.7	1.55	5
D	22	59.5	46.7	12.8	1.17	27
E	19	55.2	2.7	12.5	1.20	25

또한 최고온도 도달시간도 24시간 이내로 줄어들어 공기단축의 효과가 예측되었다.

### 3.1.2 온도균열지수 및 균열발생 확률

매스콘크리트의 온도균열발생에 대한 검토는 온도균열지수를 산정하여 그 값으로 평가하는 것을 원칙으로 하고 있다<sup>5)</sup>. 따라서 본 연구에서는 온도 해석만을 실시하여 식 (1)과 같이 간이적인 방법으로 온도균열지수를 산

정하여 평가하였다.

$$I_{cr} = \frac{15}{\Delta T_i} \quad (1)$$

여기서  $\Delta T_i$ 는 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차 (°C)를 나타낸다. 그리고 식 (1)에 의해 산정된 온도균열지수를 통해 온도균열발생 확률의 대략적인 관계를 알기 위해 콘크리트표준시방서<sup>8)</sup>에 제시된 Fig. 12를 통해 온도균열발생 확률을 검토해 보았다.

히트파이프를 미설치한 기초콘크리트의 중심부 A구역과 C구역에서 온도균열지수가 0.7 미만으로 유해한 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 히트파이프를 설치하여 수화열제어공법으로 시공한 기초콘크리트의 중심부 A구역과 C구역의 온도균열지수는 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 균열을 제한할 수 있는 정도의 수준인 1.2 이상~1.5 미만으로 나타나 수화열 저감 효과가 탁월함을 알 수 있었다. 나머지 측면부에 위치한 B, D, E구역도 온도균열지수가 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 0.7 이상으로 나타나 수화열에 의한 온도균열발생이 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 히트파이프를 사용하여 수화열을 제어할 경우 콘크리트 구조물 내부에서 발생된 수화열을 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 특이하게 D구역과 E구역에서 미소하지만 히트파이프를 설치한 경우가 오히려 온도균열지수가 낮아 균열발생확률이 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 뚜렷하게 알 수는 없으나 최고온도 도달 시간과 중심부 최고온도 측정 결과를 분석하여 추측해보면, A, C구역같이 외기와 접하지 않는 경우는 히트파이프의 성능이 효과적으로 발휘되어 최고온도 도달시간과 중심부 최고온도를 저감시키는 결과를 보이고 있다. 그러나 B, D, E구역은 콘크리트에 비해 상대적으로 열전달률이 좋은 강제거푸집과 외부환경이 근접하고 있어 히트파이프의 영향을 적게 받아 나타난 결과로 추측된다.

## 3.2 저발열 시멘트 사용과 파이프쿨링에 의한 수화열 저감

### 3.2.1 2단

교각 2단 콘크리트타설 이후의 외기온도는 열전대 25번 (ch 25), 열전대 26번 (ch 26)으로 160시간을 측정하였

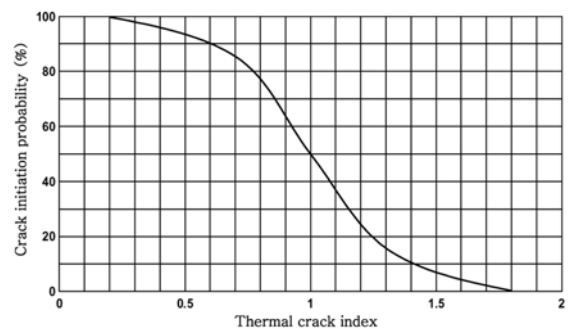


Fig. 12 Thermal crack index and crack initiation probability

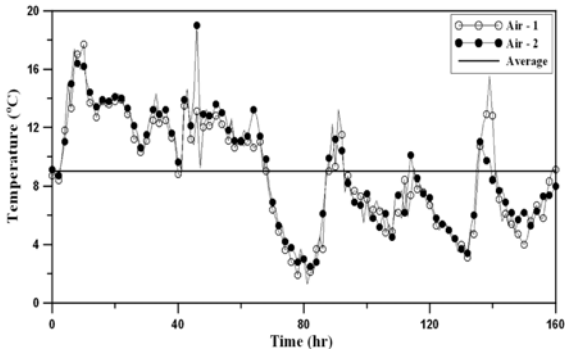


Fig. 13 Ambient temperature variation of pier 2 step

으며, Fig. 13에 나타내었다. 계절적으로 겨울이고, 위치가 해변가임에도 불구하고 기온이 0°C 이하로 떨어진 적은 없었고, 측정기간의 평균기온은 약 9°C 정도였다.

각 구역별 온도 변화를 정리하여 최고온도 도달시간, 중심부 최고온도, 이때의 표면부 온도와 온도차를 기준으로 온도균열지수를 산정한 후 균열발생확률을 구하여 Table 5에 정리하였다.

전체적인 온도 변화를 살펴보면 최고온도 도달시간은 40~54시간으로 2일 정도 소요되는 것으로 나타났으며, 중심부 최고온도는 가장 중심부에 위치한 A구역에서 43.5로 가장 높게 측정되었다.

해당 구조물의 타설 콘크리트는 저발열 시멘트를 사용하고 콘크리트타설 후 파이프쿨링을 실시하여 시공하였다. 따라서 수화열에 의한 균열발생 우려가 그리 크지 않다고 판단하여 온도해석만을 실시하였고, 식 (1)과 같은 간이적인 방법으로 온도균열지수를 구한 후 Fig. 12를 통해 균열발생 확률을 추정하여 안정성을 평가해 보았다. 그 결과 온도균열지수는 전체적으로 균열발생을 제한할 수 있는 수준의 1.2 이상으로 나타났고, 균열발생 확률은 E구역에서 23%로 가장 높게 나타났다. 또한 다른 구역은 거의 수화열에 의한 온도균열이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 특히 수화열이 가장 많이 발생할 것으로 예상되었던 A구역의 온도균열지수는 1.88, 균열발생 확률은 0%로 나타나 수화열 제어가 효과적으로 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 그 이유는 저발열 시멘트의 지연된 수화반응으로 콘크리트 내부온도가 크게 상승하지 않았고, 이와 병행하여 쿨링파이프의 냉각수가 내부 온도를 저감시켜 발생한 것으로 판단된다.

Table 5 Temperature and mechanical properties of pier 2 step

Area	$T_a$ (hr)	$T_{max}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I_{cr}$	$C_{ip}$ (%)
A	54	43.5	35.5	8.0	1.88	0
B	40	29.4	19.7	9.7	1.55	0
C	50	31.4	21.5	9.9	1.52	6
D	45	38.1	26.7	11.4	1.32	15
E	52	43.2	30.8	12.4	1.21	23
F	49	39.2	29.8	9.4	1.60	0
G	41	30.2	22.9	7.3	2.05	0
H	40	29.2	22.7	6.5	2.31	0

### 3.2.2 3단

교각 3단의 온도계측은 2단과 동일한 위치에서 같은 열전대 번호로 계측을 실시하였다. 외기온도 변화는 Fig. 14에 나타내었다. 3단의 외기온도 측정 기간 내에서는 영하로 떨어진 날이 2일 있었다. 측정 기간은 2단에서는 경과시간 160시간까지 측정하였으나 3단에서는 140시간까지만 계측하였다. 계측 기간 동안의 평균외기온도는 3.7°C였다.

각 구역별로 측정된 온도 변화를 살펴보면 중심부 A 구역을 비롯하여 전 구역에서 최고온도 도달시간이 다소 늦어졌고, 중심부 최고온도도 낮아졌다. 또한 콘크리트 표면부의 온도도 전체적으로 낮았다. 온도 변화를 통해 온도균열지수를 산정한 후 균열발생 확률을 구하여 Table 6에 정리하였다.

기초 2단의 결과와 비교해 보면 최고온도 도달시간은 평균 17시간 정도 길어졌으며, 중심부 최고온도도 평균 10.8°C 낮게 나타났다. 이는 2단의 양생기간 중 평균외기온도가 9°C였으나, 3단의 경우는 그보다 5°C 낮은 3.7°C로 나타나 수화발열에 영향을 미친 것으로 예측되었다. 또한 3단의 양생기간 중에 외기온도가 이틀간 영하로 떨어져 표면부 온도를 저하시켰다. 그 결과 내·외부 온도차가 2단보다 커졌다. 이러한 온도 변화 영향으로 인하여 온도균열지수가 2단에 비해 다소 낮게 나타났고, 균열발생 확률은 더 높게 추정되는 결과를 보였다. 그러나 교각 기초 3단에 대한 전체적인 온도균열지수는 최소 1.0 이상으로 나타나 유해한 균열을 제한할 수 있는 수준으로 평가되었다. 2단에 비해서 수화열 저감 효과가 약간

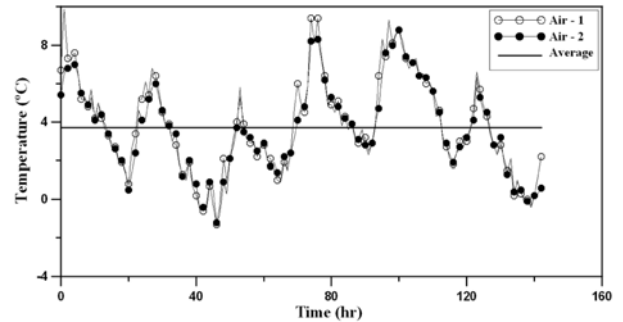


Fig. 14 Ambient temperature variation of pier 3 step

Table 6 Temperature and mechanical properties of pier 3 step

Area	$T_a$ (hr)	$T_{max}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I_{cr}$	$C_{ip}$ (%)
A	72	33.1	20.4	12.7	1.18	23
B	49	22.9	11.3	11.6	1.29	16
C	73	25.3	11.3	14.0	1.07	40
D	74	27.6	19.5	8.1	1.85	0
E	74	29.5	16.6	12.9	1.16	24
F	54	26.9	14.9	12.0	1.25	20
G	74	18.0	9.3	8.7	1.72	0
H	38	14.3	8.5	5.8	2.59	0

떨어지고는 있으나, 계절상 동절기에 시공되어 저온으로 인한 양생에 어려움이 있는 점을 감안한다면 그 효과는 뛰어나다고 할 수 있다.

### 3.3 수화열제어공법의 간접 비교

본 연구에서 실제 현장 계측 조건이 상이하여 직접적인 비교는 할 수 없지만, 각 현장에 적용된 공법의 효과를 간접적으로 비교하여 히트파이프를 이용한 수화열제어공법의 우수성을 검증해 보고자 한다. 간접비교를 위해 각 공법이 적용된 대상 구조물에서 가장 중심부 온도가 높을 것으로 예측되는 최 중앙부를 비교 대상으로 하였으며, 그 결과를 다음 Table 7에 정리하였다.

먼저 최고온도 도달시간을 살펴보면 저발열 시멘트와 파이프쿨링공법을 병행한 경우 2~3일 정도로 나타났고, 이와 비교하여 히트파이프를 이용한 수화열제어공법을 사용한 경우는 최고온도 도달시간을 1일 (24시간) 이내로 단축시키는 결과를 나타내었다. 이는 거푸집 해체 시기 등 공기를 대폭 단축시킬 수 있고, 공기단축으로 인해 공사비를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

또한 계측된 온도를 이용하여 온도균열지수와 균열발생 확률을 비교해 보면 저발열 시멘트와 파이프쿨링공법과 병행한 경우는 온도균열지수가 평균 1.53으로 산정되었고, 균열발생확률은 평균 12%로 나타났다. 그리고 히트파이프를 이용한 수화열제어공법은 온도균열지수가 1.36이고, 균열발생 확률이 11%로 나타나 타 공법과 마찬가지로 수화열에 대해 우수한 제어 효과를 발휘하고 있음을 간접적으로 알 수 있었다.

종합적으로 정리해 보면 저발열 시멘트 사용과 파이프쿨링을 병행한 경우 그리고 히트파이프를 이용한 수화열제어공법 모두 온도균열지수가 1.2 이상으로 나타나 콘크리트표준시방서에서 규정하고 있는 균열발생을 제한할 수 있는 수준임을 알 수 있었다.

그러나 저발열 시멘트 사용 공법의 복잡한 공정이나 파이프쿨링공법의 부대시설 설치, 유지관리에 따른 공사비 상승과 비교해 본다면 히트파이프를 이용한 수화열제어공법이 새로운 콘크리트 냉각 방법으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 히트파이프를 이용하여 매스콘크리트의 중심부에서 발생하는 대량의 수화열을 간편하게 제어할

**Table 7** Comparison of temperature and mechanical properties according to construction method

Construction method	$T_a$ (hr)	$T_{max}$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I_{cr}$	$C_{it}$ (%)
Low heat cement + pipe cooling	2nd	54	43.5	35.5	8.0	1.88
	3rd	72	33.1	20.4	12.7	1.18
Heat pipe	23	61.0	50.0	11.0	1.36	11

수 있는 공법을 제시하고 현장에 직접 적용함으로써 수화열에 대한 영향을 최소화하고자 하였다. 또한 종래의 대표적 공법인 저발열 시멘트 사용과 파이프쿨링을 병행한 경우와 간접 비교를 통해 우수성을 검증해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 히트파이프를 사용한 경우 일반 타설 콘크리트에 비해중앙부 (A구역)의 최고온도를 20°C 이상 감소시켜 온도균열을 유발하는 내·외부 온도차를 10°C 내외로 저감시키는 효과를 보였다,
- 2) 이로 인해 일반 타설 콘크리트 최 중앙부의 온도균열지수 (균열발생 확률)를 산정해 본 결과 0.45 (96%)로 나타났고, 히트파이프를 사용한 경우 1.36 (11%)으로 나타나 수화열로 인한 온도균열발생 억제에 현저한 개선 효과를 보였다.
- 3) 기존의 대표적인 수화열제어공법 (저발열 시멘트+파이프쿨링)과 온도균열지수 (균열발생 확률)를 통해 간접 비교해 본 결과 수화열에 대한 제어 효과가 충분히 발휘되고 있음을 알 수 있었다.
- 4) 온도 특성 외에 시공성의 경우 저발열 시멘트의 사용은 배합이 변경될 경우 별도의 품질시험 및 장기적인 내구성에 대한 검증 등의 품질관리가 곤란하고, 파이프쿨링은 콘크리타설 전 파이프 설치, 유입수 저장 시설, 수온 조절 장치 등의 별도 시설이 필요하며, 그로 인해 공기지연의 어려움이 있는 반면 히트파이프의 경우는 삽입 형태의 간편한 시공과 타설 후 품질관리가 간단한 장점이 있었다.
- 5) 위의 결론들을 종합적으로 평가해 볼 때, 본 연구에서 제시한 히트파이프를 이용한 수화열제어공법을 적용할 경우 매입 형태의 간단한 설치로 시공성이 뛰어나고 저발열형 시멘트를 사용할 경우의 복잡한 배합설계나 파이프쿨링공법과 같은 부대시설 설치 및 관리에 따른 과다한 비용 등을 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 강석화, 정한중, 박철립, “매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토”, 콘크리트학회논문집, 8권, 5호, 1996, pp.111~122.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서-제7장 매스콘크리트, 한국콘크리트학회, 2003, pp.257~287.
3. ACI Committee 207, “Mass Concrete for Dam and Other Massive Structure”, *ACI Proc.*, Vol.6, April 1970, pp.7~17.
4. 오병환, 백신원, “대형 콘크리트구조물의 수화열 예측 및 균열 제어 연구”, 콘크리트학회논문집, 7권, 1호, 1995, pp.97~108.
5. 이장화, 변근주, “매스콘크리트의 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석 연구”, 대한토목학회논문집, 15권, 2호, 1995, pp.337~346.
6. 백동일, 히트파이프를 이용한 매스콘크리트 수화열 제어 공법 개발, 부경대학교, 박사학위논문, 2007, pp.143~176.

7. 백동일, 김명식, 이문식, 김강민, 엄치선, “진동세관형 히트파이프(OCHP)를 이용한 매스콘크리트의 수화열제어에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp.409~412.
8. 엄치선, 배원만, 김명식, 백동일, 김강민, “OCHP를 이용한 매스콘크리트의 수화열제어의 현장적용에 관한 연구”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 18권 1호, 2006, pp.413~416.

---

**요약** 종래의 수화열 저감 공법에서 문제가 되었던 시공성, 공기, 공사비 등의 효율성을 높이기 위해 새로운 공법을 개발하였다. 개발된 공법의 원리는 히트파이프라는 열전달 매체를 콘크리트에 매입하고, 이 히트파이프의 빠른 열전달을 통해 매스콘크리트 내부에서 발생된 수화열을 콘크리트 외부로 발산시켜 내부 수화열을 저감시키는 공법이다. 현장 실험을 통한 연구 결과를 요약하면, 기존의 수화열저감공법 적용 시 최고온도 도달시간이 2~4일 정도 소요되지만, 본 연구의 히트파이프를 사용할 경우 24시간 이내로 단축시키는 효과를 얻을 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발된 히트파이프를 사용하는 공법으로 온도균열지수를 산정해 본 결과 균열발생을 제한할 수 있는 수준인 1.2 이상으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 히트파이프를 이용한 수화열 제어공법을 적용할 경우 시공성 및 공기단축뿐만 아니라 경제성도 뛰어날 것으로 기대된다.

핵심용어 : 매스콘크리트, 수화열, 히트파이프, 작동유체, 온도균열지수