

히트파이프를 이용한 매스콘크리트의 수화열 제어에 관한 실험 연구

백동일*

*부경대학교 건설공학부

An Experimental Study on the Hydration Heat Control of Mass Concrete Using Heat Pipe

DONG-IL BAEK*

*Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Mass concrete 매스콘크리트, Heat pipe 히트파이프, Hydration heat 수화열, Thermal index 온도균열지수

ABSTRACT: In order to eliminate the hydration heat of mass concrete, this paper reports the results of hydration heat control in mass concrete using the OCHP (Oscillating capillary tube heat pipe). In the summarized results of the mock up experiments, distributing the heat pipe at 300 mm intervals based on the center of the test specimen was the most effective. A 200 mm turn interval for the heat pipe was measured to be the most appropriate, taking into account the reinforcement placing at the actual site. Therefore, when the hydration heat control method using the heat pipe developed in this study is applied, not only can construction efficiency & a reduction in the necessary construction time be expected, but so can outstanding economical effects.

1. 서 론

최근 경제발전을 위한 국가기반시설의 건설이 증대되면서 국가적인 사회간접자본(SOC)에 대한 투자수요가 증가하고 있고, 삼면이 바다로 둘러싸인 국내 지형적 조건상 대규모 해양 구조물의 건설이 필수적으로 증대되고 있는 실정이다. 이러한 대규모 해양구조물을 건설하기 위해서는 단면이 큰 매스콘크리트(Mass concrete) 구조물의 시공이 불가피하다. 그런데 매스콘크리트 공사에서는 콘크리트의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소가 수화열 처리 문제이다. 왜냐하면 매스콘크리트 구조물은 일반적으로 부배합으로 설계되기 때문에 다량의 시멘트를 사용하게 되고 이로 인해 높은 수화열이 발생하게 된다(권중현, 2000). 이러한 수화열은 콘크리트 내·외부의 온도차를 발생시켜 온도응력을 유발하게 되고, 이 온도응력이 콘크리트의 인장강도 이상일 경우 균열이 발생하게 된다. 일반적으로 콘크리트는 열전도율이 매우 낮아 콘크리트 내부에서 발생된 수화열을 외부로 방출시키기가 매우 어렵기 때문에 구조물 내부에서 구속되어 심각한 열응력을 발생시키게 된다. 이로 인해 온도균열이 발생할 확률이 매우 높다(강석화 등, 1996). 해양환경하에서 이러한 온도균열을 제어하지 않고 방치할 경우 염해의 영향으로 인해 육상에서 건설되는 콘크리트 구조물들 보다 훨씬 더 빠르게 열화되어 결국 심각한 손상을 입히게 된다.

이러한 수화열에 의한 온도균열의 문제는 콘크리트 댐과 같이 대체로 부재치수가 큰 콘크리트 구조물에서 흔히

일어나는 현상으로 알려져 왔는데 사용재료와 시공조건 등에 따라서는 비교적 부재치수가 작은 구조물에서도 발생하는 경우도 있다(ACI Committee 207, 1970). 이와 같이 매시브한 구조물뿐만 아니라 각종 콘크리트 구조물에 발생하는 온도균열을 제어하기 위한 대표적인 방법으로는 콘크리트 자체를 강제냉각시키는 파이프로쿨링공법, 수화열을 저감시키는 혼화재료를 첨가한 저발열형 시멘트 사용이 주류를 이루어 왔다. 그러나 저발열시멘트를 사용할 경우 콘크리트 배합 변경시 품질관리가 어렵고 재료비 단가가 상승하는 문제점이 있으며, 파이프로쿨링의 경우는 쿨링파이프, 수온조절장치, 유입수 저장시설 등의 별도 시설이 필요하며 계측 및 품질관리에 많은 비용과 인력이 소요되는 단점이 있다(이장화와 변근주, 1995).

따라서 본 연구에서는 간편한 시공성, 경제적인 공사비와 효율적으로 공기를 단축시킬 수 있는 공법을 개발하고자 히트파이프라는 열전달 매체를 콘크리트에 삽입하여 콘크리트 내부에서 발생하는 수화열을 감소시켜 콘크리트 내·외부 온도차를 저감시킬 수 있는 새로운 공법을 개발하여 현장에 적용하기 위한 기초 실험으로 콘크리트 표준시방서의 매스콘크리트 분류기준에 만족하는 모의부재를 제작하여 히트파이프의 배치 간격, 턴 간격, 시험체 크기 등을 변화시켜 온도저감 효과를 살펴보고 그 적용가능성을 확인해 보고자 한다(김명식 등, 2006; 백동일, 2007).

2. 사용재료

2.1 콘크리트

실험에 사용된 콘크리트는 근교 레미콘 회사의 일반적인 출

교신저자 백동일: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-620-1448 qt418@pknu.ac.kr

Table 1 Physical characteristic of concrete

Density (kg/m ³)	Specific heat (kcal/kg · °C)	Thermal conductivity (kcal/m · h · °C)	Design strength (MPa)	Slump (cm)	Gmax (mm)
2,300	0.25	2.3	21	12	25

Table 2 Properties of heat pipe and working fluid

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

하제품으로 현장에서 가장 많이 사용되는 강도규격으로 하였다. 사용 콘크리트의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.2 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 온도범위가 매우 넓다. 따라서 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서는 적절한 사용 온도 범위 내에서 작동유체가 열·물리적으로 안정 상태에 있고, 무독성 및 관 재료와의 상용성을 만족하는 것을 선택해야 한다. 이에 본 연구에서는 R-22를 선정하여 사용하였다.

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. 순환구조의 모식도는 Fig. 1과 같다.

3. 시험개요

3.1 시험체 제작

본 연구에 사용된 시험체는 콘크리트 표준시방서에 명기된 충족조건을 만족하도록 2가지 크기의 형태로 제작하였다. 첫째, 히트파이프의 배치간격 변화에 따른 수화열 저감효과를 살펴보기 위해 1,200×1,200×1,200mm의 크기로 하여 3개

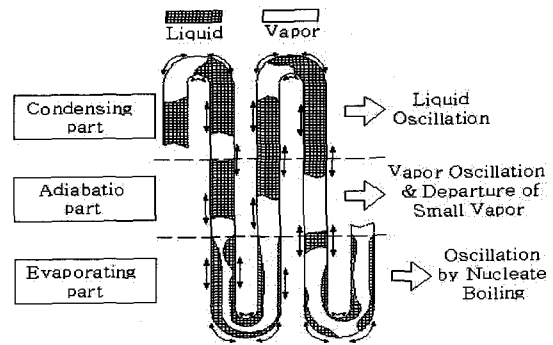


Fig. 1 Structure of oscillating capillary tube heat pipe

를 제작하였고, 둘째는 히트파이프의 턴 간격과 시험체 크기를 동시에 변화시켜 1,200×1,200×3,600mm의 크기로 3개를 제작하였다. 두 가지 모두 실험결과를 동일한 타설 및 양생조건에서 비교하기 위해 히트파이프를 설치하지 않은 시험체 1개와 히트파이프 설치를 달리한 2개의 시험체를 제작하였다. 거푸집은 합판거푸집을 사용하였고 콘크리트 타설 후 외부로 발산되는 열을 막기 위해 합판거푸집의 측면과 하부는 50mm 스티로폼으로 단열시켜 제작하였다.

3.2 히트파이프 배치간격 변화실험에 따른 수화열 제어 실험

히트파이프의 턴 간격을 100mm로 고정하고, 배치간격을 2가지(A-type : 200-400-400-200, B-type : 300-300-300-300)로 변화시켜 매스콘크리트에 매입하였을 경우 수화열 제어효과에 대해 실험을 하였다.

히트파이프의 배치간격은 Fig. 2, Fig. 3과 같이 간격을 달리하여 3열로 배열하였다. 사용된 히트파이프는 전체가 연결된 루프형을 사용하였고, 증발부 길이를 1,000mm, 응축부 길이를 500mm로 하였다.

이와 같이 제작한 3개의 시험체는 콘크리트 타설 후 바닥부, 중하부, 중앙부, 중상부, 표면부로 5등분하여 Fig. 4와 같이 각각 9개소의 열전대를 설치하여 시간경과에 따른 온도이력을 90시간 동안 측정하였다. 타설시 평균외기온도는 29℃를 나타내었고, 별도로 측정하여 기록하였다. 온도이력 측정은 DR-230 데이터로거를 이용하여 Fig. 5와 같이 측정하였다.

3.3 턴 간격 및 시험체 크기 변화에 따른 수화열 제어 실험

히트파이프의 턴 간격을 결정하기 위해 일반적으로 주요 구조물의 철근배근 간격이 100~200mm인 점을 감안하고, 히트파이프의 시공성을 고려하여 턴 간격을 100mm, 200mm 두 가지로 변화를 주어 실험을 수행하였다. 히트파이프의 배치간격은 그 간격을 300mm로 하였고, 동시에 시험체 길이를 3배로 확대하여 3,600mm로 제작한 후 온도제어 효과를 살펴보았다.

타설시 평균외기온도는 22℃를 나타내었다. 히트파이프의 설치상세도는 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

히트파이프 미설치 시험체의 열전대 설치는 Fig. 8과 같이 중심부 7개소와 표면부 1개소를 포함하여 총 8개소에 열전대를

설치하여 온도를 측정하였다. 그리고 히트파이프를 설치한 경우의 시험체는 상, 중, 하로 3등분하여 Fig. 9와 같이 각각 표면부 1개소를 포함하여 40개소에 열전대를 설치하여 온도를 세밀히 측정하였다. 이외에도 증발부와 응축부에 매입된 히트파이프 표면에 열전대를 각각 2개씩 설치하여 콘크리트 내부 온도변화가 히트파이프에 어떤 영향을 미치는지에 대해서도 측정해 보았다. 또한 외기온도는 별도로 측정하여 기록하였으며, 온도이력 측정은 DR-230 데이터로거를 이용하여 측정하였다.

3.4 온도균열지수 산정

매스콘크리트의 온도균열 발생에 대한 검토는 온도균열지수를 산정하여 그 값으로 평가하는 것을 원칙으로 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 온도해석만을 실시하여 식 (1)과 같이 간이적인 방법으로 온도균열지수를 산정하여 평가하였다.

$$I_{cr} = \frac{15}{\Delta T_i} \tag{1}$$

여기서, ΔT_i 는 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차(°C)를 나타낸다.(한국콘크리트학회, 2003)

그리고 식 (1)에 의해 산정된 온도균열지수를 통해 온도균열 발생 확률의 대략적인 관계를 알기 위해 콘크리트표준시방서에 제시된 Fig. 10을 통해 온도균열 발생확률을 검토해 보았다.

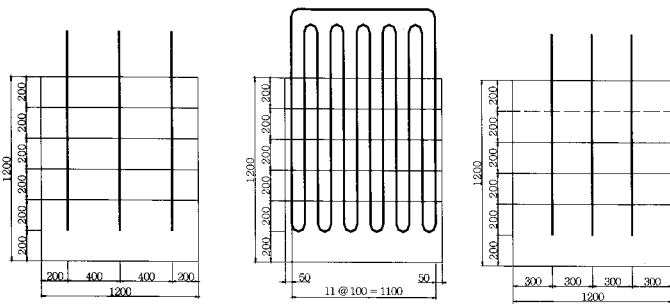


Fig. 2 The installation form of A-type

Fig. 3 The installation form of B-type

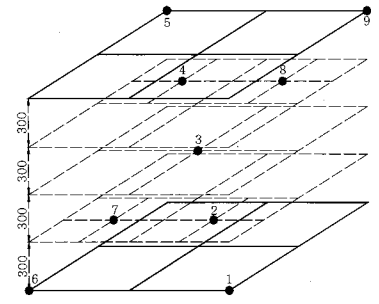


Fig. 4 The location of thermocouple

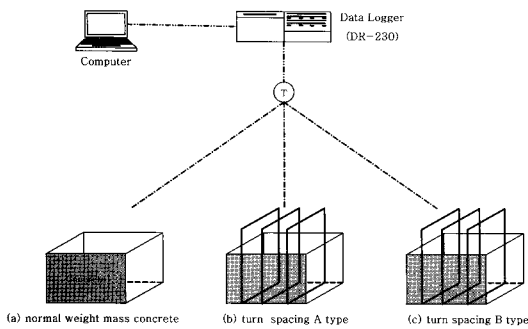


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

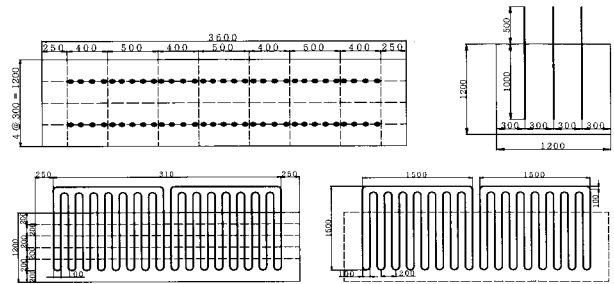


Fig. 6 The installation form of heat pipe(turn spacing, 100mm)

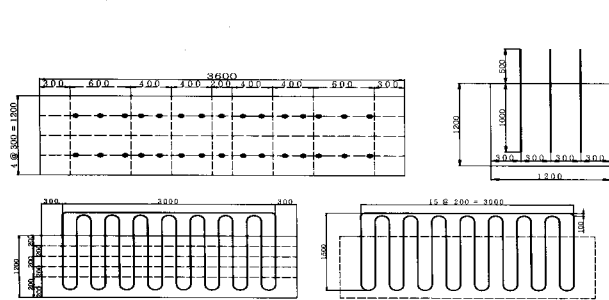


Fig. 7 The installation form of heat pipe(turn spacing, 200mm)

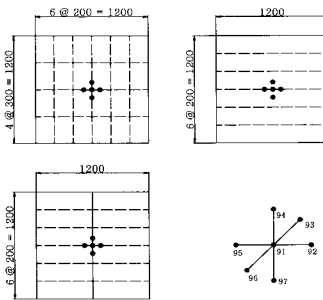


Fig. 8 Details of thermocouple without heat pipe

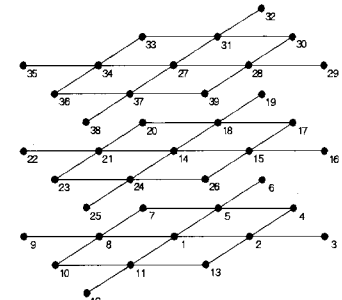


Fig. 9 Details of thermocouple using heat pipe

4. 실험결과 및 고찰

4.1 히트파이프 배치간격 변화실험 결과

히트파이프 미설치 시험체와 히트파이프 턴 간격을 100mm로 고정하고 배치간격을 A타입, B타입으로 제작한 시험체에서 시간경과에 따른 중심부와 표면부의 온도변화를 측정하는 결과는 Fig. 11~Fig. 13과 같다.

히트파이프를 미설치한 시험체의 경우 중심부 최고온도가 67.4°C이고 이때 표면부 온도는 33.7°C로서 내·외부 온도차는 무려 33.7°C를 나타내었다. 이와 비교하여 히트파이프 배치간격을 A타입으로 설치한 경우는 중심부 최고온도가 61.7°C이고 이때 표면부 온도는 38.5°C로서 내·외부 온도차는 23.2°C를 나타내었고, B타입으로 설치한 경우는 중심부 최고온도가 59.7°C, 이때 표면부 온도는 42.8°C로서 내·외부 온도차는 16.9°C를 나타내었다. 또한 중심부 최고온도는 Fig. 14에서 보면 히트파이프 미설치 시험체와 비교해서, A타입은 5.7°C, B타입은 7.7°C 저감 효과를 보였다. 그 내용을 Table 3에 정리하였다.

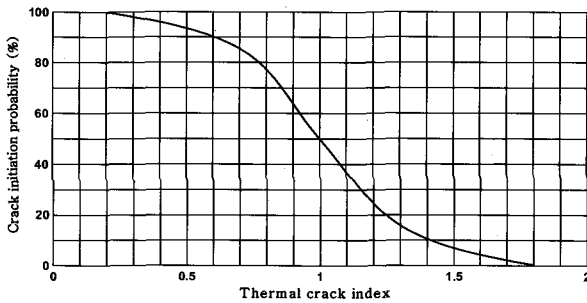


Fig. 10 Thermal crack index and crack initiation probability (KCI, 2003)

따라서, 히트파이프를 미설치한 시험체에 비해 히트파이프를 설치한 경우 중심부와 표면부의 온도차를 A타입은 10.5°C, B타입은 16.8°C 감소시켰다. 그리고 A타입보다 B타입이 중심부 최고온도와 내·외부 온도차 감소에 훨씬 더 효과가 있는 것으로 나타났는데, 이는 A타입의 히트파이프가 표면부쪽으로 B타입보다 100mm 이동 매설되어 중심부에서 많이 발생하는 열을 효율적으로 제거하지 못한 결과로 보인다.

Fig. 15에서 온도균열지수를 통한 균열발생확률을 살펴보면 히트파이프를 미설치한 시험체의 경우 온도균열지수는 0.45, 균열발생확률이 95%로 나타나 온도균열이 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다. 이에 비해 히트파이프 배치간격 A타입의 경우 온도균열지수가 0.65, 균열발생확률이 88%로 나타나 히트파이프 미설치 시험체에 비해 균열발생확률을 7% 저감시켰고, B타입의 경우는 온도균열지수가 0.89, 균열발생확률이 66%로 히트파이프 미설치 시험체에 비해 균열발생확률을 29%나 감소시킬 수 있었다. 또한, 히트파이프를 B타입으로 설치한 경우는 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 값 0.7 이상으로 나타나 미설치 시험체에 비해 상대적으로 월등한 제어 효과를 나타내었다.

이와 같은 결과로 볼 때 히트파이프 배치간격은 시험체 중심부를 기준으로 300mm 간격으로 배열하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

4.2 히트파이프 턴간격 및 시험체 크기변화 실험 결과

히트파이프의 턴 간격을 결정하기 위해 히트파이프의 배치간격은 300mm로 고정하고, 철근배근상태를 고려하여 100mm, 200mm로 변화하여 콘크리트 타설 후 시간경과에 따른 중심부와 표면부의 온도변화를 측정하는 결과는 Fig. 16~Fig. 18과 같다.

히트파이프 미설치 시험체의 경우 중심부 최고온도가 56.7°C이고 이때 표면부 온도는 28.8°C로서 27.9°C의 내·외부 온도차를 나타내었다.

Table 3 Temperature properties according to placement spacing of heat pipe

Specimen	T_a (hr)	T_{max} (°C)	T_s (°C)	ΔT (°C)	I_{cr}	C_{ip} (%)
None heat pipe	28	67.4	33.7	33.7	0.45	95
A-type	23	61.7	38.5	23.2	0.65	88
B-type	20	59.7	42.8	16.9	0.89	66

Table 4 Temperature properties according to turn spacing of heat pipe

Specimen	T_a (hr)	T_{max} (°C)	T_s (°C)	ΔT (°C)	I_{cr}	C_{ip} (%)
None heat pipe	35	56.7	28.8	27.9	0.54	93
Turn spacing 200	29	53.2	31.7	21.5	0.70	85
(mm) 100	26	49.8	34.8	15.0	1.00	50

이와 비교하여 히트파이프 턴 간격이 200mm일 경우 중심부 최고온도가 53.2°C이고 이때 표면부 온도는 31.7°C로서 내·외부 온도차는 21.5°C를 나타내었다. 턴 간격 100mm의 경우는 중심부 최고온도가 49.8°C, 이때 표면부 온도는 34.8°C로서 내·외부 온도차는 15.0°C로 나타났다. Fig. 19은 턴 간격 변화에 따른 중심부 온도변화를 나타낸 그림으로 턴 간격이 100mm일 때가 200mm일 때 보다 평균 5°C 저감되었다.

또한 중심부 최고온도는 히트파이프 미설치 시험체와 비교해서, 턴 간격 200mm일 때 6.4°C, 턴 간격 100mm일 때는 13.0°C 저감효과를 보였다. 그 내용을 Table 4에 정리하였다.

이외에도 Fig. 20, Fig. 21에 나타난 바와 같이 콘크리트 내부 온도변화가 히트파이프에 미치는 영향에 대해 히트파이프 증발부와 응축부에 직접온도를 측정해 본 결과 증발부의 경우 히트파이프의 턴 간격 200mm 보다 100mm일 때가 빠른 열전달로 인해 콘크리트 내부온도 감소로 이어지고 히트파이프 자체의 온도도 낮은 것으로 나타났다. 응축부의 경우도 마찬가지로 턴 간격 100mm일 때가 빠른 시간 내에 열을 발산함으로서 낮은 온도분포를 보였다.

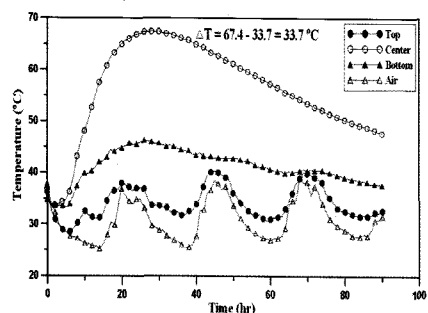


Fig. 11 Temperature variation of specimen without heat pipe

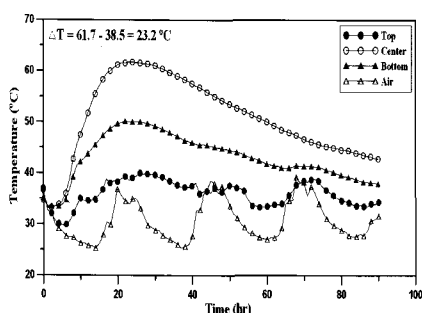


Fig. 12 Temperature variation of specimen with A-type heat pipe

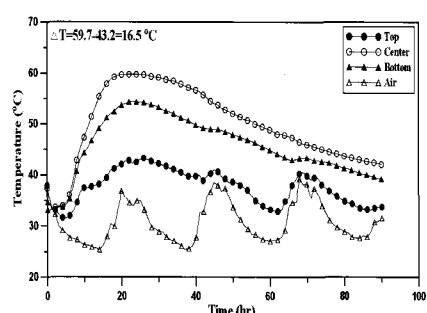


Fig. 13 Temperature variation of specimen with B-type heat pipe

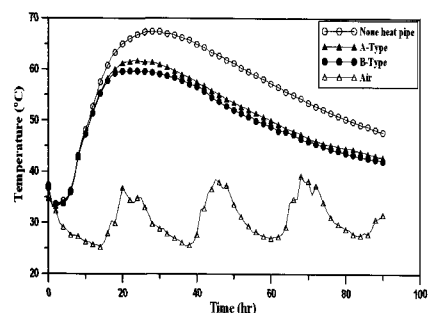


Fig. 14 Temperature variation of core part

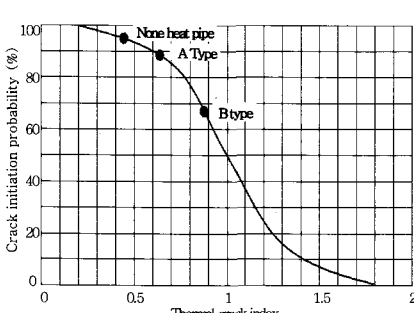


Fig. 15 Thermal crack index and crack initiation probability

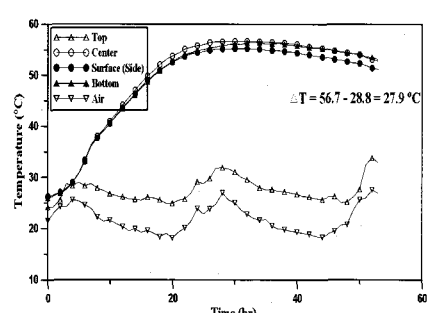


Fig. 16 Temperature variation of specimen without heat pipe

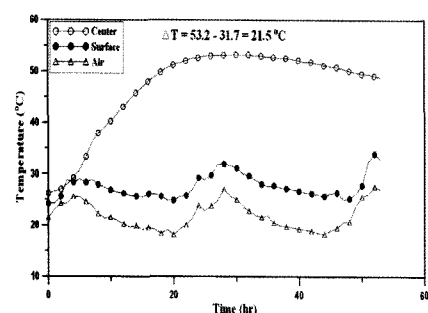


Fig. 17 Temperature variation of specimen using heat pipe (turn spacing, 200mm)

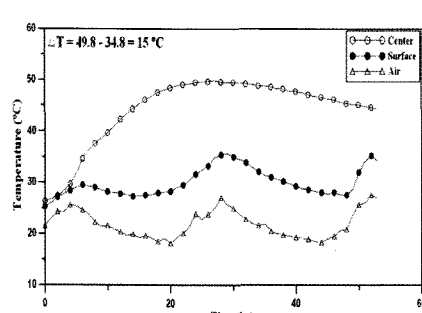


Fig. 18 Temperature variation of specimen using heat pipe (turn spacing, 100mm)

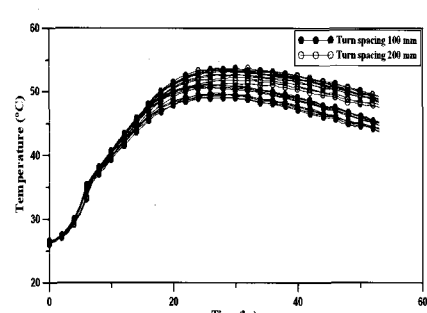


Fig. 19 Temperature variation of core part by variation of turn spacing

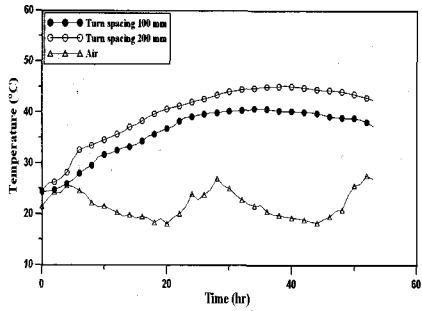


Fig. 20 Temperature variation of condensing part by variation of turn spacing

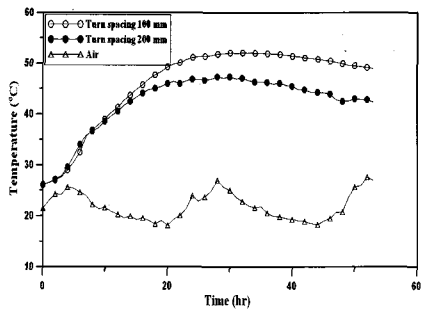


Fig. 21 Temperature variation of evaporating part by variation of turn spacing

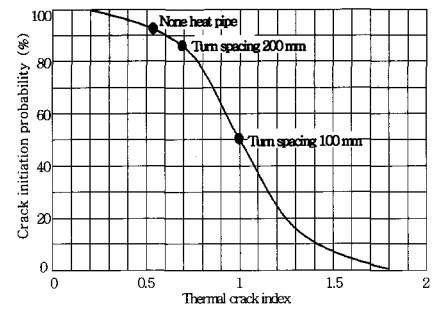


Fig. 22 Thermal crack index and crack initiation probability

Fig. 22에서 온도균열지수에 의한 균열발생확률을 살펴보면 히트파이프 미설치 시험체의 경우 온도균열지수는 0.54, 균열 발생확률이 93%로 온도균열이 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다. 이에 비해 히트파이프 턴 간격 200mm의 경우 온도균열지수가 0.70, 균열발생확률이 85%로 8%정도 저감하였고, 턴 간격 100mm의 경우 온도균열지수가 1.0, 균열발생확률이 50%로 미설치 시험체에 비해 43%를 감소할 수 있었다. 또한 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 값 0.7 이상으로 나타나 미설치 시험체에 비해 상대적으로 월등한 제어효과를 나타내었다. 정리해 보면 시험체 크기가 증가해도 히트파이프가 중심부에서 발생하는 열을 충분히 제거하는 것으로 나타났다. 또한 턴 간격 100mm일 때가 턴 간격 200mm일 때 보다 균열발생확률이 월등히 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 수화열 저감효과는 턴 간격 100mm일 때가 더 효과적인 것은 사실이나, 턴 간격 200mm일 때도 온도균열지수가 0.7로 유해한 균열을 방지할 수 있는 수준으로 나타났고, 현장에서 철근배근상태를 고려해 본다면 턴 간격 200mm가 더 적합할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 실험에서는 콘크리트 표준시방서에서 정하는 매스콘크리트의 기준을 만족하는 모의부재를 제작한 후 열전달 매체인 히트파이프를 배치간격과 턴간격, 시험체 크기 등을 변화시켜 시험체에 설치한 후 수화열을 측정해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 히트파이프의 배치간격을 중앙을 기준으로 300mm, 400mm으로 변화시켜 실험한 결과 300mm(B-type)으로 설치한 경우가 콘크리트 중심부에서 발생한 수화열을 효율적으로 제거하는 것으로 나타났다.

(2) 히트파이프의 턴 간격을 100mm와 200mm로 변화시켜 실험한 결과 두 가지 모두 온도균열지수가 0.7 이상으로 나타나 수화열 저감에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 실제 현장에서 일반적인 철근배근상태를 감안한 시공성과 경제성을 고려해 본다면 턴 간격 200mm가 더 적합할 것으로 판단된다.

(3) 시험체의 길이를 1,200mm에서 3,600mm로 3배로 증대시켜 수화열을 측정해 본 결과 3,600mm에서도 히트파이프가

분한수화열 저감효과가 있는 것으로 나타나 대형 스크크리트에서도 충분히 적용가능할 것으로 판단된다.

(4) 최고온도 도달시간이 히트파이프를 설치하지 않은 경우 보다 대략 10시간 정도 빠른 것으로 나타나 거푸집 해체 시기 등의 공기 단축에도 효과가 있을 것으로 판단된다.

(5) 따라서, 본 연구에서 제시한 히트파이프를 이용한 수화열 저감 방법을 통해 저발열시멘트 및 파이프 쿨링 등의 종래 공법의 복잡한 시공과정, 부대시설 설치 및 과다한 공사비 등을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

(6) 향후, 본 연구에서 수행하지 못한 히트파이프의 배치간격 및 턴 간격 등의 다양한 실험을 통해 데이터 베이스를 구축할 필요가 있다.

참 고 문 헌

강석화, 정한중, 박칠림 (1996). "매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토", 한국콘크리트학회논문집, 제8권, 제5호, pp 111-122.
 권중현 (2000). "플라이애쉬를 사용한 수중불분리성 콘크리트의 수화열에 관한 연구", 한국해양공학학회논문집, Vol 14, No 4, pp 30-34.
 김명식, 백동일, 염치선, 배원만, 김강민 (2006). OCHP를 이용한 매스콘크리트의 수화열 제어 연구", 2006년 한국구조물진단학회 봄 학술발표회지, pp 493-496.
 백동일 (2007). 히트파이프를 이용한 매스콘크리트 수화열 제어공법 개발, 부경대학교 박사학위논문.
 이장화, 변근주 (1995). "매스콘크리트의 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석 연구", 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, pp 337-346.
 한국콘크리트학회 (2003). 콘크리트 표준시방서, pp 257-287.
 ACI Committee 207 (1970). Mass Concrete for Dam and Other Massive Structure. ACI Proc, Vol 6, April, pp 7-17.

2007년 4월 20일 원고 접수

2007년 10월 26일 최종 수정본 채택