

연직파이프쿨링 공법에 의한 매스콘크리트 온도균열 제어

Thermal Cracking Control of Mass Concrete by Vertical Pipe Cooling Method

서태석¹ · 임창근^{2*} · 조윤구³Tae-Seok Seo¹ · Chang-Keun Lim^{2*} · Yun-Gu Cho³

(Received September 16, 2014 / Revised September 24, 2014 / Accepted September 25, 2014)

In case of the slender mass concrete like attached wall, retaining wall and bridge tower, the low heat cement and the control joint are mainly used for thermal cracking control. However, even if these cracking control methods are considered, it is impossible to control thermal cracks perfectly, because the external restraint is largely in these mass concrete. Because these cracks occurring in slender mass concrete members almost penetrate concrete member, the special cracking control is demanded in these mass concretes. The vertical pipe cooling method improving existing pipe cooling method was developed for the active thermal cracking control of slender mass concrete, and applied at the field attached wall. In results, the maximum temperature dropped more than 10°C by vertical pipe cooling method, and the cracks decreased about more than 50%.

키워드 : 온도균열, 세장한 매스콘크리트, 연직파이프쿨링 공법

Keywords : Thermal cracks, Slender mass concrete, Vertical pipe cooling method

1. 서론

최근에 토목, 건축 구조물들이 대형화 되면서 부피가 큰 매스콘크리트의 온도 균열이 문제가 되고 있다. 콘크리트가 경화하는 과정에서 온도변화에 의한 콘크리트의 팽창 및 수축이 구속을 받게 되면 콘크리트 내에 응력이 발생하게 되고, 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되면 균열이 발생하게 된다(KCI, 2009). 이러한 균열들은 콘크리트의 품질에 영향을 미치기 때문에 온도균열을 제어하기 위한 대책이 필요하다.

매스콘크리트의 온도균열을 제어하기 위한 방법 중에 파이프쿨링 공법은 콘크리트 타설 전에 파이프를 설치하여 냉각수를 통과시켜 내부에 발생하는 수화열을 낮추는 방법으로, 부재의 내부 온도를 빠른 시간에 저감시킬 수 있기 때문에 대규모 기초 콘크리트에 많이 이용되고 있다.

합벽, 옹벽, 교량 주탑과 같이 세장한 매스콘크리트 구조물의

경우 온도균열 제어를 위해 저발열 콘크리트 배합의 적용 및 균열 유발률의 설치 등이 주로 적용되고 있다. 하지만 이러한 대책이 적용되어도 세장한 매스 구조물들은 내부구속에 비해 외부구속이 크기 때문에 완벽한 균열제어가 불가능하고, 특히 균열이 발생하게 되면 거의 관통을 하기 때문에 온도균열제어를 위한 특별한 관리가 필요하다. 그럼에도 불구하고 사전대책 보다는 균열 발생 후에 보수하는 사후대책에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 합벽, 옹벽, 교량 주탑과 같이 세장한 매스콘크리트 구조물의 적극적인 온도균열 제어를 위하여 기존의 파이프쿨링 공법을 개선시킨 연직 파이프쿨링 공법을 개발하였으며, 해석적(Seo, 2014), 실험적(Seo, 2014) 연구를 통하여 본 공법의 타당성이 검토되었다. 본 공법은 ** 현장 우수조/중수조 합벽 콘크리트에 적용(2014.8.9~8.11)되었으며, 본 논문에 그 결과를 정리하였다.

* Corresponding author E-mail: cklim@hdec.co.kr

¹현대건설 연구개발본부 (Hyundai Engineering and Construction Co., Ltd, 17-6, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea)

²현대건설 연구개발본부 (Hyundai Engineering and Construction Co., Ltd, 17-6, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea)

³현대건설 연구개발본부 (Hyundai Engineering and Construction Co., Ltd, 17-6, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea)

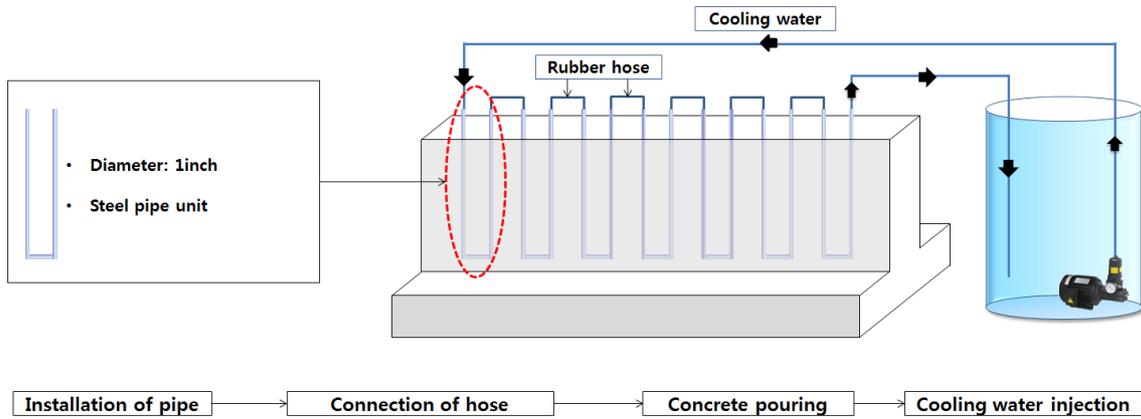


Fig. 1. Outline of vertical pipe cooling method

2. 기술 개요 및 적용위치

연직파이프쿨링 공법 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 지상에서 스틸 파이프를 U 자형으로 조립한 후, 파이프를 대상 구조물에 연직 방향으로 설치한다. 각각의 파이프는 고무호수로 연결하고 냉각수를 주입해서 콘크리트의 수화열을 저감시키는 공법이다. 본 공법의 특징은 기존 파이프쿨링 공법보다 시공성이 간편하고, 수직으로 길며 세장한 매스콘크리트 구조물의 온도균열 제어에 효과적이다.

**현장 지하 합벽 콘크리트 균열을 저감시키기 위하여 연직파이프쿨링 공법을 적용하였다. 적용 대상 콘크리트 부재는 지하 5층 우수조/중수조 합벽 콘크리트(두께: 800mm, 길이: 16,200mm, 타설높이: 3,200mm)이며, Fig. 2에 적용 위치를 나타내었다. 본 공법은 2014년 8월 9일부터 11일 까지 3일간 적용 되었다.

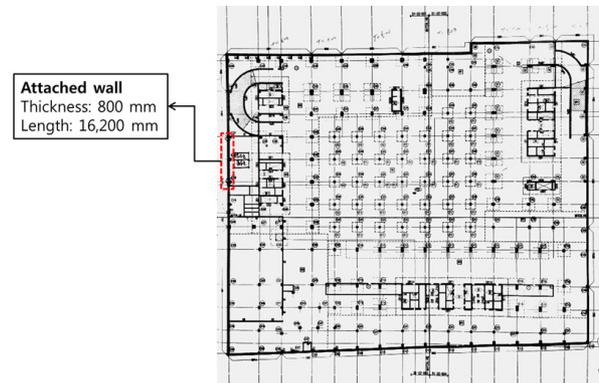


Fig. 2. Outline of vertical pipe cooling method

3. 해석적 검토

3.1 해석상의 설정조건

본 공법 적용을 위해 해석적 검토를 수행하였으며, 수화열해석 전용 프로그램인 DIANA를 이용하였다. Table 1에 해석에 적용된 콘크리트의 단열온도 특성을 정리하였고, 콘크리트의 단열온도 상승특성은 식(1)(KCI, 2009)을 이용하였다.

정수 K 및 a 는 기존의 실험자료(KCI, 2009)를 참고로 하였다. 콘크리트의 역학특성을 고려하기 위해서 시간에 따른 탄성계수식(2)(KCI, 2009)와 압축강도(식(3))(KCI, 2009) 예측식을 이용하였다. 콘크리트 타설온도는 및 외기온도는 30°C 일정으로 하였고, 거푸집은 현장의 공정을 참고로 하여 타설 후 3일에 탈형하는 것

Table 1. Adiabatic properties

f_{28} (MPa)	Unit Weight of Cement (kg/m^3)	Equation (1)	
		K	a
40	500	54.8	1.4

로 설정하였다. Table 2에 콘크리트 표준시방서(KCI, 2009)에 근거한 온도응력 해석조건을 정리하였고, 파이프쿨링 적용을 위한 해석조건을 Table 3에 정리하였다.

$$Q = K(1 - e^{-at}) \tag{1}$$

$$E_c(t) = \phi 47000 \sqrt{f_c(t)} \tag{2}$$

$$f_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} \times d_i \times f_{28} \tag{3}$$

Table 2. Analytical condition 1

Items	Concrete	Ground
Thermal Expansion Coefficient ($\mu/^\circ\text{C}$)	10	10
Thermal Conductivity ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)	2.70	3.45
Surface Heat Transfer Coefficient (W/m^2)	with Form	8
	without Form	14
Specific Heat ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	1.155	0.795
Poisson's ratio	0.18	0.30
Creep Reduction Factor (ϕ)	Until 3 days : 0.73 Until 5 days : 1 3 days ~ 5 days : Linear interpolation	-
Density (kg/m^3)	2300	2650
Young's Modulus (MPa)	Equation (2)	30000
Ambient temperature ($^\circ\text{C}$)	30 $^\circ\text{C}$	

Table 3. Analytical condition 2

Items	Input Data
Pipe External Diameter (mm)	25.4
Pipe spacing (mm)	700
Cooling Water Inflow Rate	20L/min
Cooling Water Temperature ($^\circ\text{C}$)	20
Water Flow Convection Coefficient ($\text{kJ}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{day}$)	33000
Water Flow Period	Until the concrete temperature reaches the maximum temperature

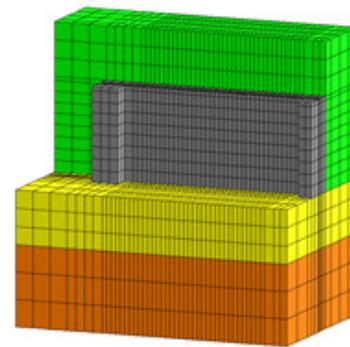
여기에서, K 는 최종 단열온도 상승량($^\circ\text{C}$), a 는 온도상승속도에 관한 실험계수, ϕ 는 크리프 영향계수, d 는 재령 28일과 91일 때의 콘크리트 강도 보정계수 1.11, f_{28} 은 재령 28일 에서의 콘크리트 압축강도(MPa), t 는 재령(일), $f_c(t)$ 는 재령 t 일 에서의 콘크리트 압축강도(MPa)를 의미한다.

3.2 해석모델링

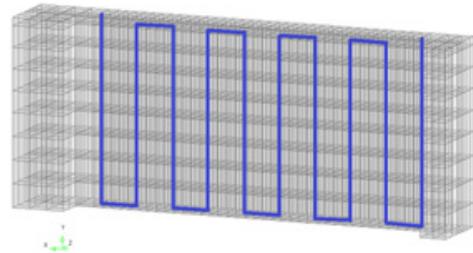
온도 및 응력 해석에서는 콘크리트, 지반, 열전달표면 및 쿨링파이프를 대상으로 모델링하였다. 콘크리트 및 지반에 대하여는 20절점 solid brick element로 모델링하였고, 열전달표면 및 쿨링파이프에 대하여는 각각 4절점 quadrilateral element, 2절점 cooling pipe element로 모델링하였다. 해석 모델링을 Fig. 3에 나타내었다.

3.3 해석결과

당 현장 합벽에 타설되는 콘크리트는 설계 기준강도가 40MPa

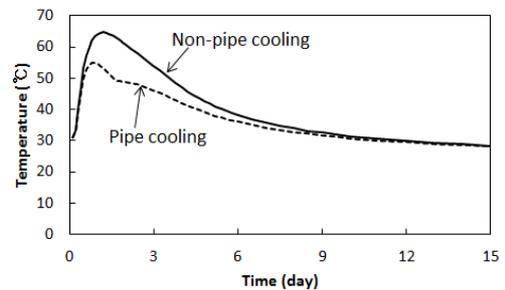


(a) Attached wall

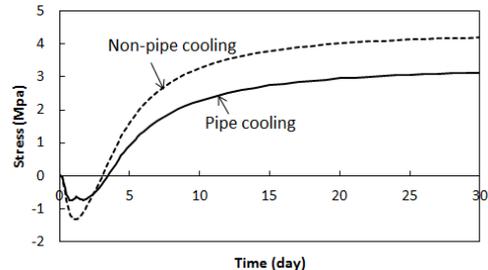


(b) Vertical pipe

Fig. 3. Outline of vertical pipe cooling method



(a) Temperature histories



(b) Stress histories

Fig. 4. Analytical results

로 고강도 콘크리트가 타설될 예정이어서 높은 수화열에 의한 균열발생이 우려되었으며, 해석결과에서도 중심부 최고 온도가 65 $^\circ\text{C}$ 이상으로 매우 높게 나타났다. 하지만 연직파이프쿨링 공법을

적용할 경우 온도를 10℃ 정도 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 응력도 25% 정도 낮출 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 4 참조).

4. 현장 적용

4.1 현장적용 개요

연직파이프쿨링 적용 상황도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 파이프 설치간격은 해석결과에 근거하여 700mm 로 하였다. 6t 용량의 물탱크에 냉각수를 주입한 후 콘크리트 타설 완료 4시간 후에 수중펌프를 이용하여 냉각수를 주입하였다. 주입시의 냉각수 온도는 28℃였다. 콘크리트 중심부 최고 온도는 재령 28시간 후에 도달하였고, 급격한 온도하강에 의한 인장응력의 증가를 방지하기 위하여 최고온도 도달 후에 냉각수 주입을 중단하였다.

4.2 수화열 거동

온도 계측 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 연직파이프쿨링 공법을 적용하지 않았을 경우 콘크리트 최대온도가 77℃ 까지 발생하였지만, 공법 적용을 통하여 최대온도를 10℃ 이상 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 냉각수의 온도가 최초 28℃에서 1일 후에 수화열에 의해 38℃까지 올라가는 것으로 계측되어 냉각수의 온도를 제어할 수 있는 공법을 제안할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.3 균열발생 상황

Fig. 8과 Fig. 9에 균열발생 조사 결과를 나타내었다. 연직파이프쿨링 공법을 적용하지 않은 콘크리트의 경우 높은 수화열 발생으로 인하여 전반적으로 많은 균열이 발생하였다. 균열폭은 허용 균열폭인 0.3mm(AlJ, 2006)를 초과하는 균열이 다량으로 발생하였으며, 특히 1mm 이상의 균열들도 다수 발생하였다. 그 이유는

고강도 콘크리트의 사용과 철근비 (0.16%)가 매우 낮게 설계되었기 때문인 것으로 판단된다. 기존 문헌에 의하면 고강도 콘크리트에서 수축거동의 구속에 의해 발생하는 균열은 일반강도 콘크리트보다 균열폭이 커진다고 보고하고 있으며(Ohno, 2005; Okada, 2006), 매스콘크리트 온도철근비는 0.25% 이상이 권장되고 있다(KCI, 2009). 연직파이프쿨링 공법을 적용한 구간에서도 균열이 발생하였지만, 적용하지 않은 곳과 비교하여 50% 정도 균열이 적



(a) Applied location



(b) Installation of pipe



(c) Installation of sensor



(d) Curing

Fig. 6. field application

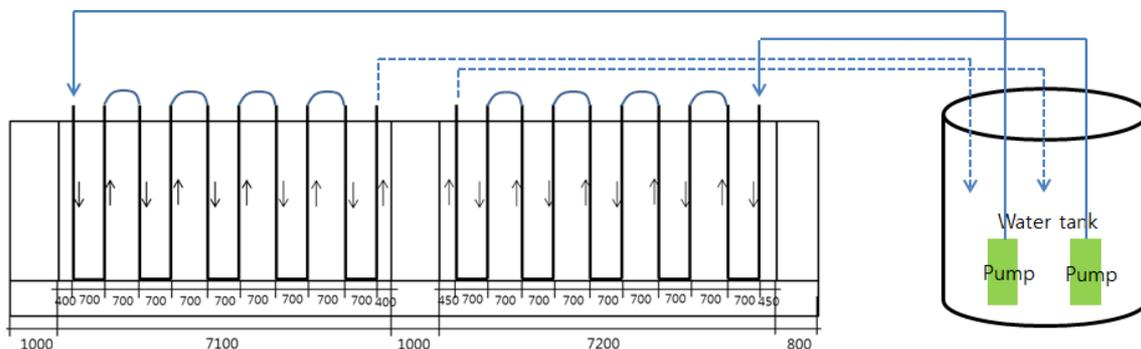
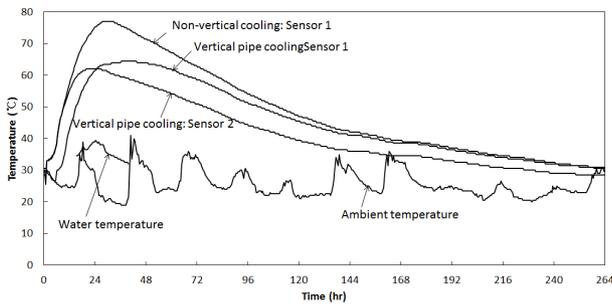
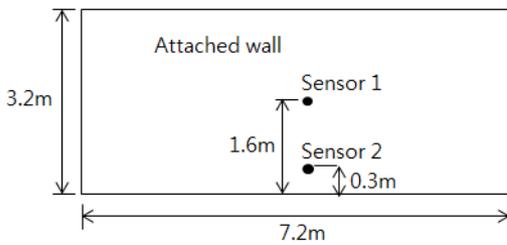


Fig. 5. Vertical pipe cooling



(a) Temperature histories



(b) Location of sensors

Fig. 7. Outline of vertical pipe cooling method

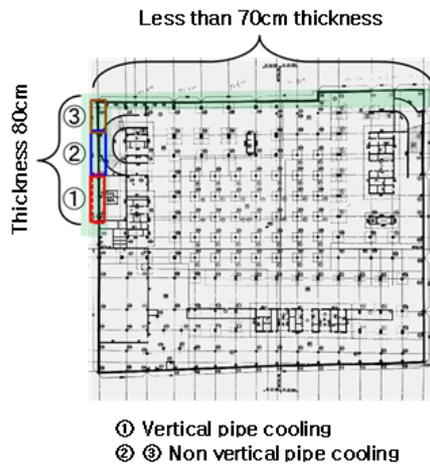
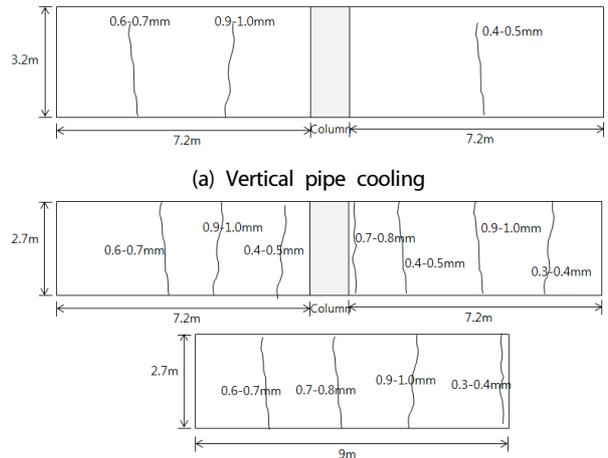


Fig. 8. Location of cracking investigation

게 발생하였다. 당 현장에 적용된 합벽 콘크리트는 수화열 저감을 위한 재료적인 대책이 강구되지 않았기 때문에 많은 균열이 발생하였다. 따라서 앞으로 타설될 구간에서는 온도균열을 최소화시키기 위한 대책 방안(배합변경, 균열유발줄눈 설치, 온도철근비 증대, 파이프쿨링 공법 적용 등)이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

합벽, 옹벽, 교량 주탑과 같이 세장한 매스콘크리트 구조물의



(b) Non vertical pipe cooling (Up: ②, Down: ③)

Fig. 9. Results of cracking investigation

적극적인 온도균열 제어를 위하여 기존의 파이프쿨링 공법을 개선시킨 연직파이프쿨링 공법을 개발하였으며, 현장 우수조/중수조 합벽 콘크리트에 적용(2014.8.9~8.11)한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 지상에서 파이프 유닛 (U-type)을 조립한 후 수직방향으로 파이프를 설치하기 때문에 쉽게 파이프를 설치할 수 있었다.
2. 연직파이프쿨링 공법을 적용하지 않았을 경우 콘크리트 최대 온도가 77°C 까지 발생하였지만, 공법 적용을 통하여 최대온도를 10°C 이상 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.
3. 연직파이프쿨링 공법이 적용된 우수조와 중수조에는 조사결과 균열이 50% 정도 적게 발생함을 확인할 수 있었다.

References

- Seo, T.S., Cho, Y.G., Lee, K.C., and Lim, C.K.(2014). Analytical study on thermal cracking control of mass concrete by vertical pipe cooling method, Journal of the Korea Concrete Institute, **26(1)**, 57-62.
- Seo, T.S., Lee, K.C., and Cho, Y.G.(2014). Experimental Study on hydration heat control of mass concrete by vertical pipe cooling method, Proceedings of the Korea Concrete Institute, **26(1)**, 911-912.
- KCI(2009). Concrete standard specification, Korea Concrete Institute.

AIJ(2006), Recommendation for practice of crack control in reinforced concrete buildings (design and construction), Architectural Institute of Japan,
Ohno, Y.(2005), Cracking in reinforced concrete walls, Concrete

Journal, **43(5)**, 113-117,
Okada, A.(2006), Cracking of concrete structures, architectural technology.

연직파이프쿨링 공법에 의한 매스콘크리트 온도균열 제어

합벽, 옹벽, 교량 주탑과 같이 세장한 매스콘크리트 구조물의 경우 온도균열 제어를 위해 저발열 콘크리트 배합의 적용 및 균열유발줄눈의 설치 등이 주로 적용되고 있다. 하지만 이러한 대책이 적용되어도 세장한 매스 구조물들은 내부구속에 비해 외부구속이 크기 때문에 완벽한 균열제어가 불가능하고, 특히 균열이 발생하게 되면 거의 관통을 하기 때문에 온도균열제어를 위한 특별한 관리가 필요하다. 합벽, 옹벽, 교량 주탑과 같이 세장한 매스콘크리트 구조물의 적극적인 온도균열 제어를 위하여 기존의 파이프쿨링 공법을 개선시킨 연직파이프쿨링 공법을 개발하였으며, 현장 우수조/중수조 합벽 콘크리트에 적용이 되었다. 그 결과 합벽의 중심부 최고 온도를 10도 이상 낮출 수 있는 것으로 나타났으며, 균열은 50% 이상 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.