

파이프 쿨링 공법 적용에 따른 벽체구조물의 온도균열 특성

Thermal Crack Characteristics of Concrete Walls with Pipe Cooling

박찬규*

Park, Chan Kyu

ABSTRACT

This paper reports the performance results of hydration heat control of mass concrete walls with pipe cooling system. The thickness of walls ranged from 0.9 to 2.2m. In order to investigate the effect of pipe cooling on the thermal and thermal crack characteristics, the pipe cooling was conducted for 42 walls, and the investigation of thermal cracks was conducted for 14 walls. Based on the investigation, the pipe cooling method decreased the peak temperature of about 13~20°C and the thermal crack width of about 30% for mass concrete walls.

1. 서론

매스콘크리트 구조물의 온도변화는 구조물 자체의 체적변화를 일으키며, 이러한 체적변화가 구속됨으로써 매스콘크리트 구조물에는 구속응력이 발생하게 된다. 구속조건은 크게 두 가지로 분류할 수가 있는데, 첫 번째는 매스콘크리트 구조물의 내·외부 온도분포 차이에 따라 발생하는 내부구속, 두 번째는 매스콘크리트의 온도변화에 따른 체적변화가 하부지반, 기타설 콘크리트 등에 의해 구속되는 외부구속을 들 수 있다. 이와 같은 구속 형태에 따라서 수화열 제어 방안도 어느 정도 달라지게 된다.

매스콘크리트 구조물 중에서 특히 벽체형 구조물은 외부구속이 매우 크기 때문에 발생하는 온도균열의 대부분이 관통균열이고 또한 온도제어가 효과적으로 이루어지지 않을 경우에는 내구성에 영향을 줄 정도의 폭을 가지는 균열이 발생할 가능성도 있다. 이러한 벽체형 매스콘크리트 구조물의 온도균열제어를 위해서는 콘크리트 부재 내부의 수화열에 의한 최대상승온도를 저감시키는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.

본 논문은 월드컵경기장 정거장에서 1999년 6월 19일부터 12월 28일까지 총 42개의 매스콘크리트 벽체 구조물에 대해 수화열에 의한 온도균열 제어를 위하여 파이프 쿨링을 실시한 결과를 요약한 것이다. 수화열에 의한 온도측정은 총 42개의 벽체에 대하여 모두 행하여졌으며, 수화열에 의한 온도균열의 조사는 총 14개의 벽체 구조물에 대하여 실시하였다.

* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원

2. 파이프 쿨링 시행계획

2.1 기본 시공 계획

월드컵경기장 정거장 매스콘크리트 벽체 구조물은 개략적으로 두께 2.2m, 1.7m 및 0.9~1.3m이며, 이에 대한 파이프 쿨링의 기본계획은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1 파이프 쿨링 기본 계획

항 목	내 용	항 목	내 용
배관 형태	두께 2.2m : 폭 방향으로 3열 배관	배관길이	가능한 짧게 설계(150m 이하)
	두께 1.7m : 폭 방향으로 2열 배관	사용수	15~20℃ 지하수를 사용
	두께 1.3m 이하 : 폭 방향으로 1열 배관	통수량	16liter/분 이상
파이프 종류	직경 1in.의 스테인레스 주름관	통수시점	타설 시부터
파이프 간격	50~70cm 범위 내에서 설치	통수기간	최대온도에서 5℃ 하강시점

2.2 파이프 쿨링에 대한 사전 검토

월드컵경기장 정거장에서 각 구간별로 콘크리트의 설계압축강도는 다른데, Sunken 구간과 집수정 구간의 설계강도는 270kg/cm²이고, 종점 구간과 연결통로 구간의 설계강도는 240kg/cm²이다. 이에 대한 콘크리트 배합비는 표 2에 나타난 바와 같다.

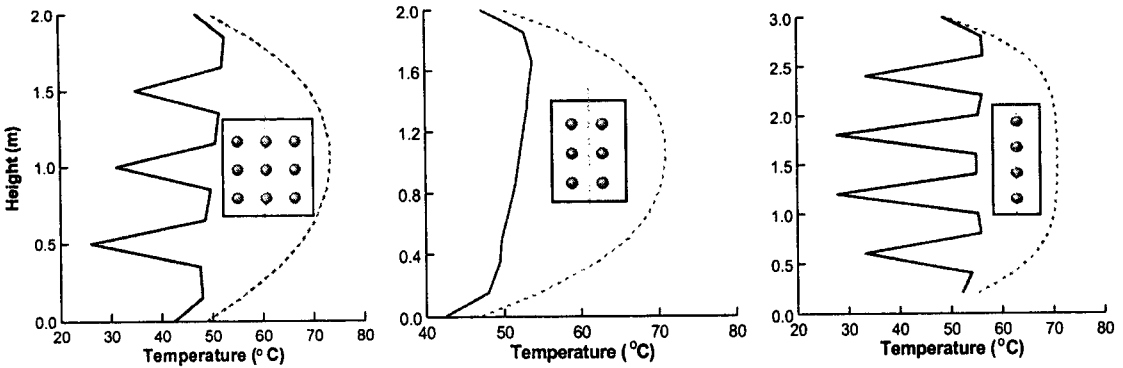
표 2 콘크리트 배합비

설계강도 (kg/cm ²)	W/C (%)	S/a (%)	단위 재료량(kg/m ³)		
			W	C	FA
270	47.2	45.3	195	380	33
240	50.8	47.0	189	348	26

파이프 쿨링을 실시하기에 앞서 사전에 설계된 파이프 배관 형태가 적절하고 소정의 콘크리트 품질을 만족할 수 있는가를 판단하기 위해서 사전 수화열 해석을 실시하였다. 검토된 해석 대상 구조물은 타설 길이가 가장 길고 파이프 배관 형태가 다른 세 가지 형태의 벽체 구조물을 선택하였다.

- Sunken 구간 type E 지하 3층 1단 우측 벽체(t=2.2m, h=2.0m, L=40m),
- Sunken 구간 type E 지하 3층 1단 좌측 벽체(t=1.7m, h=2.0m, L=40m)
- Sunken 구간 type E 지하 2층 1단 우측 벽체(t=1.2m, h=3.0m(실체는 2.7m), L=40m)

이러한 구조물에 대하여 표 2의 콘크리트 배합비에 기초한 열적 특성치를 추정하여 파이프 쿨링 유무에 따른 수화열에 의한 온도해석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 1에 나타난 바와 같다. 그림 1에서 물의 유입구는 하단부이고 물의 유출구는 상단부이다. 그리고 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 파이프 쿨링을 실시할 경우에 있어서 파이프 쿨링을 실시하지 않은 경우보다 중심부의 온도를 20℃ 정도 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 온도해석 결과를 바탕으로 온도응력해석을 실시한 결과, 파이프 쿨링을 실시하지 않았을 경우에는 온도균열지수가 0.47~0.53으로 콘크리트 표준시방서를 근거로 한다면 유해한 온도균열이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 파이프 쿨링을 실시함으로써 온도균열지수는 0.76~0.87로 개선되어 유해한 균열이 발생할 가능성은 적은 것으로 나타나 파이프 쿨링 공법이 온도 및 온도균열제어에 유효한 것으로 판단되었다.



(a) 두께 2.2m인 경우 (b) 두께 1.7m인 경우 (c) 두께 1.2m인 경우

그림 1 파이프 쿨링 유무에 따른 중심단면의 최대온도 분포(수화열 해석 결과)

3. 파이프 쿨링 시행결과

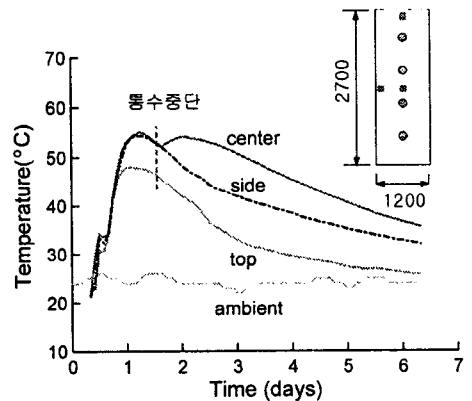
3.1 벽체에서의 온도이력 거동

3.1.1 통수중단 시기에 따른 온도이력

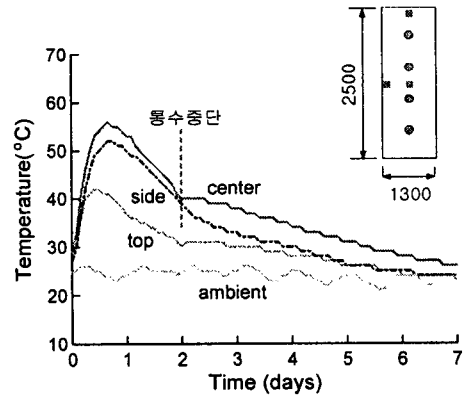
그림 2는 통수 중단시기에 따라 온도이력 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 중심부 최대온도에서 약 5°C 하강한 시점에서 통수중단을 실시한 경우는 중심부의 온도가 재상승했다가 서서히 떨어지는 반면, 중심부 최대온도에서 약 15°C 하강한 경우 통수중단을 실시한 경우에는 계속적으로 하강하는 것으로 나타났다. 매스콘크리트 부재에서 온도하강속도가 커지면 커질수록 온도균열 수나 폭이 증가하므로 가능한 온도하강속도를 줄여주는 것이 바람직하다. 이와 같은 관점에서 본다면, 그림 2(a)의 방법이 타당하므로 파이프 쿨링 시 통수중단 시기는 최대온도에서 5°C 하강한 시점이나 만나절이 경과한 시점이 타당한 것으로 판단된다.

3.1.2 경계 및 시공조건에 따른 온도이력

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 벽체의 수화열에 의한 상승온도는 주변의 경계조건에 크게 영향을 받을 것으로 나타났다. 일반적인 벽체 형태는 시공 도중에 대체적으로 벽체의 양면이 대기 중에 노출된다. 그러나 한쪽 면이 지반에 접한 벽체의 경우에는 열 흐름이 한쪽 면으로 밖에 이루어지지 않기 때문에 중심부의 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 그 이유는 지반의 흩이나 암반 등은 열전율이 매우 낮아 보온재 역할을 하기 때문이다. 또한 기존 지반에 접하여 벽체를 타설하는 경우에는 실제 설계된 벽체 두께보다 더 두껍게 콘크리트가 타설되어 실제 예측값



(a) Type E 지하 2층 1단 우측 벽체



(b) Type G 지하 1층 1단 우측벽체

그림 2 통수중단 시기에 따른 온도이력

보다 온도가 더 상승한다. 따라서 이러한 벽체에 대하여 파이프 쿨링을 실시할 경우에는 지반에 접한 면에 파이프를 더 배치하는 것이 타당하다.

3.1.3 각 월별 최대온도 도달시간

그림 4는 각 월별 중심부 최대온도 도달시간을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 여름철에서 겨울철로 갈수록 콘크리트의 타설온도는 점진적으로 감소하는 반면, 최대온도 도달시간은 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 타설온도가 낮아질수록 최고온도 도달시간이 증가하는 이유는 콘크리트의 수화반응이 느려지기 때문이다. 특히 콘크리트의 단열온도상승곡선에서 반응속도 값이 타설온도에 크게 영향을 받는데, 콘크리트 타설온도가 낮아질수록 반응속도 또한 감소하며 더불어 수화열에 의한 콘크리트 부재의 온도상승속도 또한 감소한다.

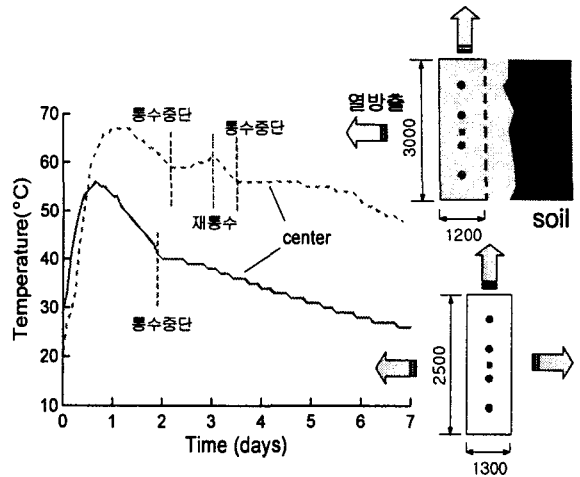


그림 3 경계 및 시공 조건에 따른 온도이력

3.1.4 중심부 최대온도 저감량

그림 [5]는 파이프 쿨링 실시에 따른 중심부 최대온도 저감량을 나타낸 것이다. 이 때 중심부 최대온도 저감량은 파이프 쿨링을 실시하지 않은 경우에 있어서 예측된 최대온도(6~8월 기준)에서 파이프 쿨링시 실측된 중심부 최대온도를 뺀 값이다. 그림에서 알 수 있는 바와 벽체 두께 2.2m의 경우는 그 평균 저감폭이 18°C로서 당초 예측되었던 저감폭 20°C에 근접한 것으로 나타났으나, 두께 1.7m의 경우에는 그 저감폭이 적은 것으로 나타났다.

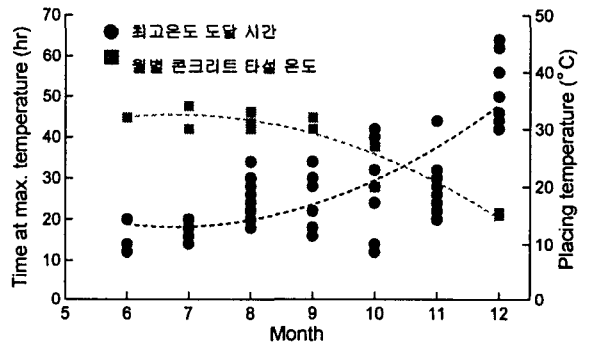


그림 4 각 계절별 최대온도 도달시간

3.2 벽체에서의 온도균열

3.2.1 두께 1.7m 벽체에서의 부벽이 온도균열에 미치는 영향

그림 6은 두께 1.7m 벽체에서 부벽에 해당하는 콘크리트 부재가 벽체의 거동에 미치는 영향을 타낸 것이다. 실제 시공 시 부벽과 벽체는 어느 정도의 기간을 두고 시공을 했는데, 대체적으로 이러한 시기는 벽체가 인장응력을 받고 있을 때 이루어졌다. 벽체가 인장응력을 받고 있을 때 부벽이 타설되면 초기에 부벽이 팽창하면서 벽체를 같이 팽창시킴으로써 갑작스럽게 인장응력이 증가하는 결과를 초래한다. 이러한 인장응력에 의하여 벽체에는 균열 수가 크게 증가하게 되고 균열 폭도 증가시키

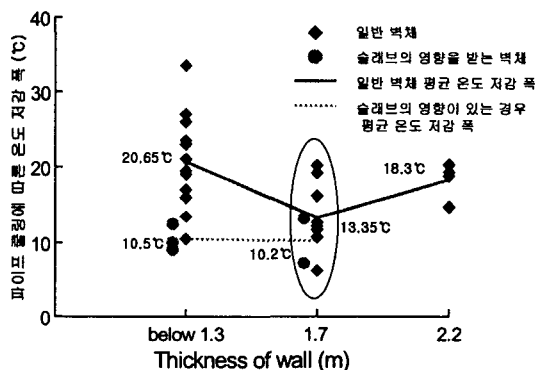


그림 5 파이프 쿨링 실시에 따른 온도저감량

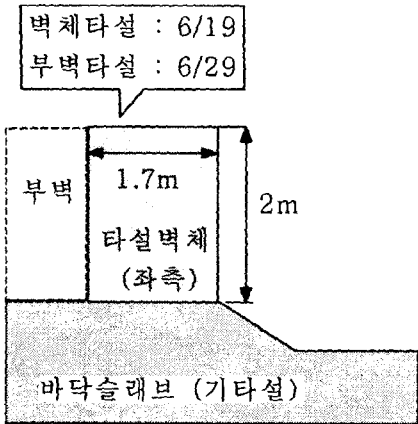
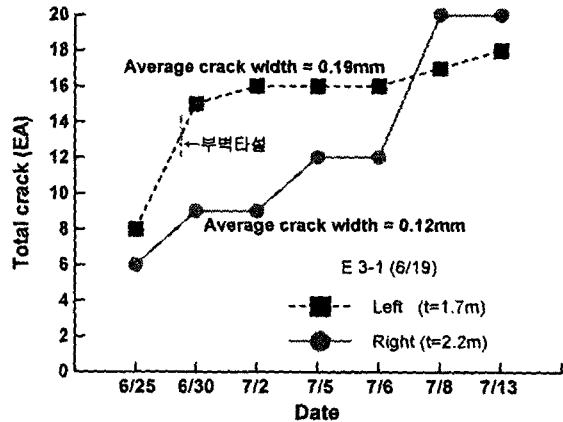


그림 6 두께 1.7m 벽체에서 부벽 타설에 따른 균열 개수와 폭의 변화



는 결과를 가져온다. 이러한 벽체는 주로 1.7m 벽체에 거의 해당되었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 같은 날 타설된 두께 2.2m 벽체는 균열 수가 시간이 지남에 따라 서서히 증가하는 것으로 나타난 반면, 부벽의 영향이 있는 1.7 벽체는 부벽이 타설된 직후에 갑작스럽게 균열 수가 크게 증가함을 알 수 있다. 그리고 균열 수가 대폭 증가된 이후에는 거의 균열 수가 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 부벽의 팽창 거동이 벽체 내에 존재하는 인장 저항력을 모두 소산시켰기 때문이다. 그리고 2.2m 벽체와 비교해 볼 때 평균 균열 폭도 큰 것으로 나타났다.

3.2.2 파이프 쿨링 실시에 따른 온도균열 폭

그림 7은 식 (1)을 바탕으로 파이프 쿨링을 실시하지 않은 경우에 예측되는 평균 균열 폭¹⁾과 측정된 평균 균열 폭을 바탕으로 균열 폭의 저감량을 벽체 두께 별로 나타낸 것이다. 파이프 쿨링을 실시하여 평균적으로 약 30% 정도 평균 균열 폭을 저감시킨 것으로 나타났다. 특히 2.2m의 경우에는 평균 균열 폭을 약 58% 정도 저감시키는 큰 효과를 나타냈다. 그러나 1.7m 벽체의 경우에는 앞서서도 설명한 바와 같이 부벽의 영향 때문에 큰 저감 효과를 나타내지는 못했지만 만일 부벽의 영향이 없었다면 두께 2.2m 벽체와 비슷한 효과를 나타냈을 것으로 판단된다.

$$W_{av} = 9.87 \times 10^{-3} B + 7.36 \times 10^{-3} L/H + 0.85 \times 10^{-3} f_c' - 0.106p + 6.72 \times 10^{-3} DT + 0.305 \times 10^{-3} C - 0.238$$

여기서 W_{av} : 평균 균열 폭(mm) ρ : 철근비(%)
 B : 부재 두께(m) DT : 타설 시 온도-외기온도(°C)
 L/H : 부재 길이와 높이 비 C : 환산 시멘트량(kg/m³)
 f_c' : 배합강도(kg/cm²)

(1)

3.3 콘크리트 배합설계에 대한 검토

표 1의 콘크리트 배합표에서 알 수 있는 바와 같이 수화열 저감에 도움이 되는 플라이애쉬 치환량이 약 8% 정도 밖에 되지 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 플라이애쉬 치환량이 10% 이하인 경우에는 수화열 저감 효과가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 플라이애쉬는 결합재량 대비 25% 이내에서 가능한 많이 치환하는 것이 바람직한데, 기존의 실험결과에 의하면 플라이애쉬를 20~25%

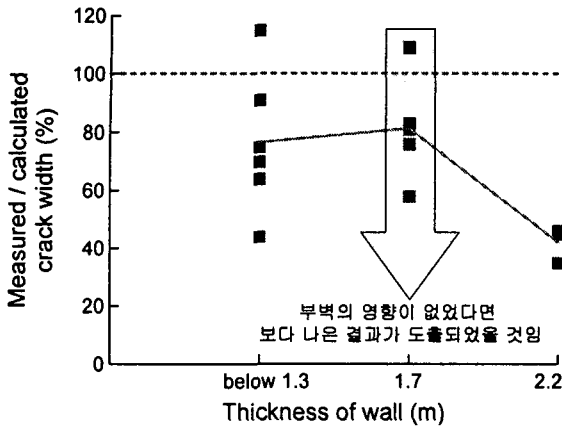


그림 7 파이프 쿨링 실시에 따른 균열 저감

정도 치환하면, 수화열에 의한 온도를 5~7℃ 정도 저감시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 효과는 콘크리트 타설온도를 5~7℃ 저감시키는 효과와 동일하기 때문에 그 영향은 대단히 크다고 볼 수 있다. 그러나 플라이애쉬를 다량 치환하면 초기 압축강도가 떨어지기 때문에 이를 극복하기 위하여 물-시멘트비를 낮추어야 하는데 이를 위하여 고성능 감수제를 사용한다. 이러한 고성능 감수제의 사용은 콘크리트 단가 상승의 한 요인이 된다. 비록 콘크리트의 단가가 상승한다 하더라도 그 중요도가 매우 큰 지하철 구조물에서는 정책적으로 고품질의 콘크리트를 적용할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

서울 지하철 월드컵정거장 정거장의 매스콘크리트 벽체의 온도균열 제어를 위하여 파이프 쿨링 공법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 파이프 쿨링을 실시한 경우의 평균 균열 폭은 그렇지 않은 경우의 평균 균열 폭보다 약 30% 줄어드는 것으로 나타났으며, 특히 두께 2.2m 벽체의 경우는 58% 정도 평균 균열 폭을 저감시킨 것으로 나타나 파이프 쿨링 공법이 대단면 벽체 구조물의 온도균열 제어에 매우 유효한 것으로 나타났다.
- 2) 두께 1.7m 벽체의 측면에 부벽의 매스콘크리트를 타설한 결과 균열 수와 평균 균열 폭이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 향후 이와 비슷한 구조물 형태를 설계할 경우에는 수화열에 의한 온도 거동을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 기존의 레미콘 콘크리트 배합설계를 검토한 결과 플라이애쉬 치환량이 적은 것으로 나타났다. 따라서 고성능 감수제를 사용하여 물-시멘트 비를 낮추고 플라이애쉬 치환량을 20~25% 늘린다면 수화열에 의한 온도를 상당히 저감시킬 수 있기 때문에 수화열에 의한 영향이 보다 낮은 콘크리트 구조물을 시공할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위해 협조해주신 서울지하철 건설본부 및 동명기술공단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 社団法人 日本コンクリート工學協會, "마스콘크리트의 온도응력研究委員會報告書, 온도應力ひびわれ幅算定方法についての提案," 1992. 9, p.123.