

냉각수 순환 형태의 파이프 쿨링 공법의 설계

Design of Closed Loop Pipe Cooling System

박찬규* 왕인수** 구자중***
Park, Chan-Kyu Wang, In-Su Koo, Ja-Jung

Abstract

In order to control hydration heat in mass concrete, pipe cooling method has been widely used. The pipe cooling method leads to the decrease of curing period by lagging materials as well as the decrease of temperature difference between center and surface of mass concrete member. There are two methods in the pipe cooling system, which are open loop system and closed loop system. However open loop pipe cooling system cannot be applied to the mass concrete structures when cooling water supply is difficult. To control hydration heat of high strength mass foundation in the central area of city, closed loop pipe cooling system was developed to solve the cooling water supply. This paper reports the performance results of hydration heat control with closed loop pipe cooling system.

1. 서론

매스콘크리트 구조물에서 파이프 쿨링 공법은 콘크리트 부재 내의 수화열에 의한 높은 온도를 강제로 배출시켜 콘크리트 부재의 중심부와 표면부 온도차 저감과 함께 중심부의 온도를 빠르게 강하시킴으로써 콘크리트의 보온양생기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 파이프 쿨링 공법은 그 구성 형태에 따라 두 가지 종류로 구분할 수가 있는데, 냉각수의 순환형태에 따라 open loop system과 closed loop system으로 나눌 수가 있다. Open loop 시스템에서는 냉각수를 유출구에서 방류하는 반면, closed loop 시스템에서는 온도가 상승된 냉각수의 온도를 떨어뜨려 유입수로 재사용하게 된다. 기존에 국내에서도 토목구조물에 open loop system이 많이 사용되어져 왔다. 그러나 냉각수의 공급과 배출이 원활하지 않은 도심지 초고층 매트 기초공사에 파이프 쿨링을 적용할 때에는 open loop 시스템을 적용하기가 불가능한 경우가 발생하는데 그 이유는 대규모 파이프 쿨링 시 엄청난 냉각수의 공급이 문제가 되기 때문이며, 비록 냉각수 공급에 문제가 없다할지라도 높은 온도로 방류되는 높은 온도의 유출수는 환경적인 문제를 발생시킬 수 있는 여지가 있다.

따라서 이와 같은 문제점이 발생할 수 있는 현장에서는 적은 냉각수의 사용만으로도 파이프 쿨링을 할 수 있는 closed loop 시스템이 적용되어야 한다. 그러나 이에 대한 설계변수나 정확하고 세부적인 설계 매뉴얼이 국내의 자료나 ACI manual에 제시되어 있지 않아 이에 대한 연구와 적용실적의 축적이 필요하다. 본 연구에서는 도심지에서 건설되는 초고층 빌딩구조물과 같은 대형 매스 매트기초에 대한 수화열 제어의 방안으로서 냉각수 순환형 파이프 쿨링 시스템을 적용할 때 각각의 설계항목에 대하여 검토하고 실제 적용된 결과를 제시함으로써 향후 이와 유사한 공법을 적용하는 매스 콘크리트의 품질 향상에 대한 방안을 마련하고자 하였다.

* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원, 공학박사, 정회원

** 삼성 타워팰리스 3차 JV현장 소장, 정회원

*** 삼성 타워팰리스 3차 JV현장 부소장, 정회원

2. 일반 사항

2.1 매트 기초의 개요

본 연구에서 냉각수 순환형 파이프 쿨링 공법을 적용한 대상 구조물은 서울시 강남구 도곡동에 위치한 지하 6층 지상 69층의 초고층 주거용 건축물의 매트기초로서 두께 3.5m, 둘레의 길이는 217m, 설계강도는 400kg/cm²이며, 바닥면적은 2,320m²(702 평)로서 콘크리트 타설 물량은 약 8000m³에 이른다. 매트기초의 형태는 Fig. 1. 에 나타낸 바와 같다.

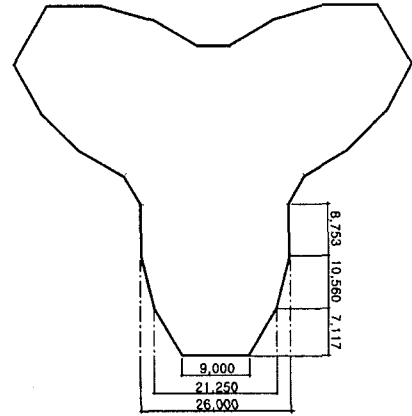


Fig. 1. 매트기초의 형상

2.2 대형 매트기초의 열적 특성

Fig. 2와 Fig. 3.은 당 현장의 매트 기초에 대하여 파이프 쿨링을 실시하지 않았을 때의 온도이력 온도응력 계산결과에 따른 온도균열지수를 보온양생기간의 함수로 나타낸 것이다. 이 때 온도해석 및 온도응력 해석에서는 단면의 폭이 26m인 한 단면을 선택하였으며, 콘크리트 배합비는 기존의 시공 경험에 근거하여 단위 결합재량은 470kg/m³(플라이애쉬 25% 치환), W/B=35.5%를 사용하였다. 보온양생의 정도는 근사적으로 중심부와 표면부의 온도차가 20~25℃ 정도가 되도록 하였다. Fig. 3.에서 알 수 있는 바와 같이 보온양생 중지시기가 짧을수록 표면부 전체의 평균적인 온도균열지수는 감소하는 것으로 나타났다. 매트기초의 중요성을 고려할 때 콘크리트 표준시방서에 나타난 바와 같이 균열발생을 제한할 경우의 온도균열지수인 1.2 이상을 만족하는 조건을 설정한다면, 보온양생기간은 대략적으로 40일 이상인 것으로 나타났다.

이와 같이 보온양생 기간이 긴 원인은 매트 기초의 두께가 3.5m로 매우 두껍고 콘크리트의 열전도율이 낮기 때문에 중심부의 열이 매우 서서히 방출되기 때문이다. 따라서 매트기초의 보온양생기간만 40일 정도 소요되기 때문에 이 기간을 단축시키면 그 만큼 공정단축에 유리하므로 중심부의 온도를 강제로 배출시키는 파이프 쿨링 공법의 적용이 유효한 것으로 판단되었다.

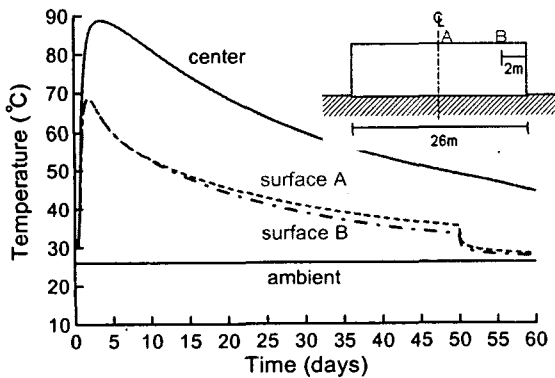


Fig. 2. 온도이력곡선

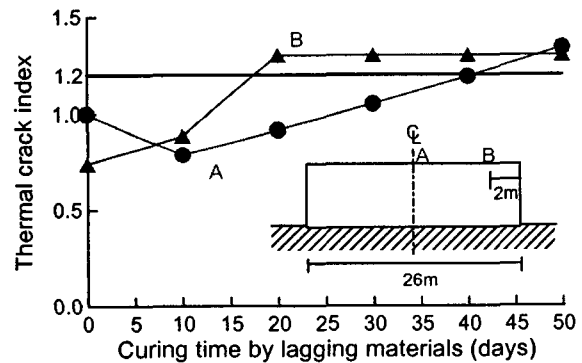


Fig. 3. 양생기간에 따른 온도균열지수

2.3 초유동 콘크리트의 적용

매트 기초의 콘크리트 타설량은 약 8,000m³로서 당일 타설 량으로는 국내 최대 규모를 가지고 있기 때문에 타설 효율을 극대화시킴으로서 약 14시간 내에 8,000m³를 타설 완료하여 소음 규제치가 상대적으로 강한 저녁시간 이전에 모든 타설이 완료될 수 있도록 계획하였다. 그러나, 일반 콘

크리트를 타설 할 경우에는 균등한 높이로 골고루 타설하여야 재료 분리나 콜드조인트(cold joint)를 방지할 수 있으므로 콘크리트 펌프 카의 붐(Boom) 위치를 자주 이동해야 하며, 또한 펌프 카 1대 당 3~4대의 진동 다짐 장비가 투입되어 다짐 작업을 병행하여야 하기 때문에 콘크리트 타설 시간은 상당히 지연되며, 사전 계획처럼 14시간 안에 콘크리트 타설을 완료하는 것은 거의 불가능하였다. 따라서, 타설 시간을 가능한 한 최소화하기 위하여 콘크리트의 유동성을 극대화함으로써 콘크리트 펌프 카의 부하를 줄여 시공 효율을 증대시키며, 진동 다짐이 필요없게 되어 결국 타설 시간을 단축시킬 수 있다는 점을 착안하였다. 이러한 측면에서 당 현장에서는 콘크리트 펌프 카의 붐을 이동하지 않고, 또한 진동 다짐 장비 없이도 콘크리트가 약 20m 정도를 재료 분리 없이 흘러갈 수 있는 초유동 콘크리트를 적용하는 것이 타설 시간을 최대한 단축시키는 최선의 방법이라고 결정하였다. 또한, 진동 다짐을 제거함으로써 소음 방지로 인한 민원 예방 측면에서도 최선일 수 있다는 판단 하에 무다짐 콘크리트를 적용하기로 결정하였다. 결과적으로 무다짐 콘크리트 매트 기초에 적용함으로써, 콘크리트 다짐 장비가 필요 없게 되며, 최소 30대 이상의 다짐 장비가 동시에 작동될 때의 소음없이 매우 조용하게 콘크리트 타설을 완료할 수 있었다.

당 현장에 적용된 초유동 콘크리트의 종류는 분체형 초유동으로서 일반적으로 결합재량이 많은 배합이며, 증점제는 사용되지 않는다. 그 결과 수화열에 의한 온도상승을 어느 정도 제어하기 위하여 결합재량의 25%에 해당하는 플라이애쉬를 치환하였다. 그런데 분체형 초유동 콘크리트가 아닌 슬럼프 18 또는 21cm 콘크리트의 압축강도를 재령 56일로 관리한다면 최적의 단위결합재량은 약 430~450kg/m³ 정도일 것으로 판단된다. 당 현장에 적용된 초유동 콘크리트가 비록 수화열에 의한 온도상승이 앞에서 언급한 일반적인 슬럼프 콘크리트보다 높다할지라도 사전에 검토된 수화열 해석에 근거하면 매트 기초에 우려할만한 온도균열을 발생시키지 않는 것으로 나타났다. 이러한 사전 검토가 또한 초유동 콘크리트의 적용에 밑받침이 되었다. 초유동 콘크리트에 대한 배합특성과 재령별 압축강도는 Table 1.에 나타낸 바와 같다.

Table 1. 콘크리트 배합 특성 및 재령별 압축강도

W/B (%)	결합재 (kg/m ³)	Gv (m ³ /m ³)	S/a (%)	F/A 치환율(%)	압축강도 (kg/cm ²)				
					3일	7일	14일	28일	56일
33.6	515	0.297	51.8	25	242	395	477	537	622

3. Closed loop pipe cooling system의 설계

3.1 최적 배관 형태의 결정

Closed loop pipe cooling system은 기본적으로 open loop pipe cooling system에 기초하여 설계를 실시하였다. 이 때 기본적으로 고려한 설계 조건은 다음과 같다. 파이프의 배관길이는 150m 정도로 하며, 파이프와 파이프의 최대 간격은 75cm 이하로 한다. 그리고 파이프의 직경이 1in.인 관을 사용하며, 냉각수의 통수량은 18 l/분(유속:0.6m/sec)로 한다. 이러한 기본적인 설계 변수에 대한 결정은 기존의 참고문헌을 바탕으로 결정되었는데, 특히 파이프의 길이는 가능한 짧게 유도하였다. 그 이유는 파이프의 길이가 길면 냉각수의 온도가 높아져 파이프의 말단 부분에는 온도저감량이 감소하기 때문이다. 이와 같은 기본 설계 방안을 기초로 최적의 파이프 쿨링 배관 간격을 계산하였다. 그리고 온도 해석에서는 최대 온도 이후에 온도를 단계적으로 떨어뜨리는 방법을 사용하여, 급작스런 온도하강에 따른 인장응력의 증가를 방지하였다. 이 때 고려된 주요변수는 양생기간, 온도균열지수 등이었으며, 배관 형태의 변수는 다음과 같다.

- Case 1 : 수직간격 70cm, 수평간격 70cm 높이 방향으로 2단 배열
- Case 2 : 수직간격 70cm, 수평간격 50cm 높이 방향으로 2단 배열
- Case 3 : 수직간격 75cm, 수평간격 70cm 높이 방향으로 3단 배열

- Case 4 : 수직간격 75cm, 수평간격 50cm 높이 방향으로 3단 배열

이와 같은 변수에 대하여 냉각수의 유입수 온도를 20℃, 유속을 0.6m/sec로 해석하였을 경우에 최적의 배관형태는 case 3인 것으로 나타났으며, 이 때 냉각수의 순환 및 중단시기를 결정하였다.

3.2 냉각수의 유속과 온도와의 관계

Open loop system에서는 보통 15~25℃의 냉각수의 유입온도를 거의 일정하게 유지할 수 있는 반면에, closed loop system에서는 냉각기의 냉각효율 및 구성형태에 따라 콘크리트를 통과하면서 온도가 상승된 냉각수가 당초의 유입된 냉각수 온도보다 높거나 낮을 수가 있다. 또한 유출수의 온도가 너무 높을 경우 냉각기의 용량도 커져야 하기 때문에 유출수 온도의 예측은 상당히 중요하다.

본 연구에서는 주어진 배관형태(case 3)에 대하여 유입수의 온도와 유속을 변화시키면서 1차 파이프 쿨링 중단 시 유출구의 냉각수 온도와 유입구의 냉각수 온도차를 계산하였는데, 그 결과가 Fig. 4.에 나타나 있다. 그 이유는 온도해석결과에서 이 시점에서 유출수의 온도가 가장 큰 것으로 나타났기 때문이다. 온도해석 시 시간간격은 4시간을 사용하였는데, 이후 실제 실행결과를 바탕으로 정밀해석을 수행한 결과 파이프 쿨링을 고려한 온도해석 시 시간간격은 이보다 더 작아야 하는 것으로 나타났다.

Fig. 4.에서 알 수 있는 바와 같이 유속이 증가할수록 두 지점의 온도차는 감소함을 알 수 있다. 그리고 유입수의 온도가 25℃와 30℃인 경우를 비교해보면 동일한 유속에서 두 지점의 온도차는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그 결과 냉각수의 유입지점과 유출 지점의 온도차는 근사적으로 냉각수의 유속의 함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

3.3 설계 유속의 결정

Closed loop system에서 주의 깊게 고려되어야 할 점은 냉각수의 온도를 떨어뜨리는 냉각기의 선정이다. 냉각기의 구매나 임대에는 큰 돈이 들므로 주의를 요하는데, 당 현장에서는 가장 경제적인 냉각 방법 중에 하나인 냉각탑을 사용하기로 결정하였다. 그런데 냉각탑은 높은 온도의 물을 대기온도(최대 외기 습구온도) 수준으로 떨어뜨릴 수 밖에 없으므로 시공 시기인 8월 초에 냉각수의 유입온도가 30℃ 이상일 것으로 판단되었다. 이 때 냉각탑은 냉각수의 최고 온도를 15℃(유입수 평균온도 30℃, 유출수 최고온도 45℃로 추정함)정도 떨어질 수 있게 선정을 하였다. 그리고 보다 안전한 설계를 위하여 유입수의 온도가 32℃(최대 외기온도 32℃라고 가정)일 때 유출수의 온도가 45℃를 넘지 않도록 유속을 결정하였는데, Fig. 4.에 근거하여 유속을 도출해보면 약 1.14m/sec가 된다. 따라서 파이프 내의 평균 유속은 최소한 이 값 이상으로 설계되어야 한다.

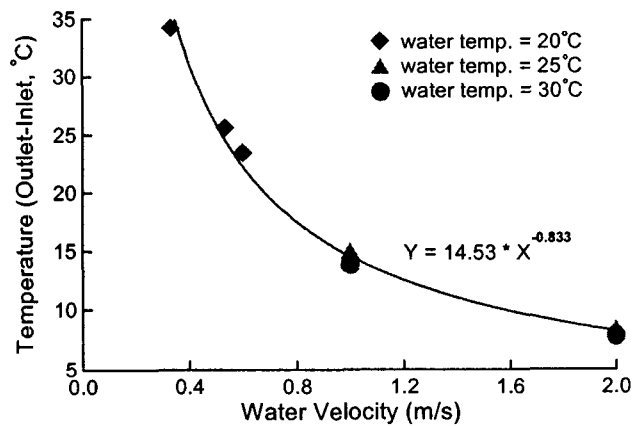


Fig. 4. 1차 통수 중단시 유속과 냉각수 온도차와의 관계

위에서 언급한 바와 같이 냉각탑을 사용하여 냉각수의 온도를 떨어뜨리는 것은 한계가 있는데, 특히 여름철에는 평균 외기온이 높기 때문에 유입수의 온도가 높아 온도 저감 효과가 떨어질 가능성이 많다. 이에 대한 것을 보정하기 위하여 8월의 일반적인 냉각수 25℃, 유속이 0.6m/sec 인 open loop system에서 파이프 내의 물의 온도분포를 먼저 계산하였다. 이와 같은 open loop system에서 유입구와 유출구의 평균최대온도와 같은 온도를 가지는 유속을 closed loop system에서 결정하였는데 유입구의 냉각수 온도가 30℃일 때 이 값은 1.23m/sec 정도가 도출된다. 따라서 현장에서는 이 유속 이상이 되

도록 모든 장비를 설정하였다.

3.4 Closed loop system의 구성

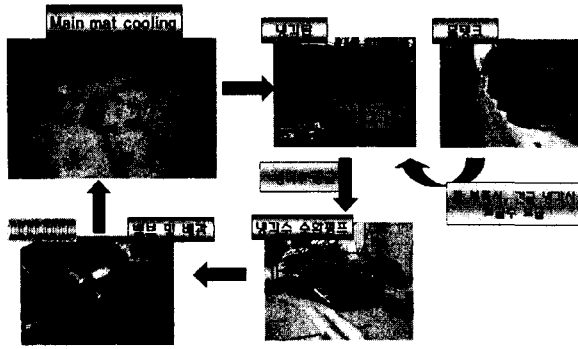


Fig. 5. Closed loop pipe cooling system

자동밸런싱 밸브를 사용하여 총 64개의 파이프에 항상 일정량의 유량이 흐르게 설계를 실시하였다. 이 때 사용된 자동밸런싱 밸브의 용량은 40LPM이다.

Table 2.은 각각의 파이프 공법을 당 현장에 적용했을 때의 경제성을 비교한 것이다. Table 2.에서 알 수 있는 바와 같이 냉각수의 공급이 원활하지 않은 지역에서 대규모 파이프 쿨링 공법을 적용할 경우에 있어서 closed loop system이 보다 경제적임을 알 수 있다.

Table 2. 파이프 쿨링 공법별 경제성 비교

구분	Open Loop Pipe Cooling System	Closed Loop Pipe Cooling System
1. 냉각수 공급시스템	- 물차 & 저수조 이용	- 냉각 탭 이용
2. 시수 사용량	- 시수 8,303ton (냉각후 배수량) - 물차 16대/DAY 임대: 5.5일사용 - 공사비: 62,000,000원	- 시수 20ton (배관내 충수량) - 물차 불필요 - 공사비: 30,000원
3. 장비류	- C/T & PUMP : 미사용 - 정유량 V/V(본공사시 재사용) - 물탱크(8TON): 5대 추가소요 - 공사비: 6,000,000원	- C/T 250CRT 2SET(임대) - PUMP 3SET(본공사시 재사용) - 정유량 V/V(본공사시 재사용) - 공사비: 9,000,000원
4. 배관공사	- MAIN 관경: 200A - MAIN 배관길이: 470M - 배관공사비: 68,000,000원	- MAIN 관경: 100A~200A - MAIN 배관길이: 360M - 배관공사비: 50,000,000원
5. 민원발생소지	- 있음(40℃이상 방류시 문제발생)	- 없음
6. 시공난이도	- 난이(물차 통행 어려움 예상)	- 편리(물차 통행 불필요)
7. 공사비	136,000,000원	59,000,000원
8. 공사비절감액	77,000,000원	

3.5 냉각수 및 콘크리트의 온도 측정 결과

Fig. 6.은 유출수의 온도와 냉각된 유입수의 온도를 1차 통수 중단까지 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 냉각된 유입수의 온도는 예측된 바와 같이 유출수의 온도가 상승함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 유입수의 온도는 외기온도의 평균값과 거의 비슷한 것으로 나타나 냉각탑을 이용할 경우 냉각된 유입수의 온도는 평균 외기온도 값을 수화열 해석 시 입력해야 됨을 알 수 있다. 그리고 측정된 유입수의 온도를 바탕으로 유출수의 온도를 시간 간격 별로 해석을 수행한 결과, Fig. 6.에서 알 수 있는 바와 같이 시간 간격이 작을수록 측정결과에 근접함을 알 수 있

다. 따라서 파이프 쿨링을 고려한 온도해석에서는 시간간격 설정에 주의를 요하는 것으로 나타났다.

그리고 Fig. 7.은 각 위치별 수화열에 의한 온도 측정값을 나타낸 것이다. 당 현장에서는 지속적인 통수에 의한 급작스런 수축을 방지하고 온도응력을 저감시키기 위하여 최대 상승온도 이후에는 단계적으로 온도를 떨어뜨리는 방법을 사용하였다. 그 단계는 3번의 통수 시작과 3번의 통수 중단으로 이루어졌으며, 총 보온양생기간은 10일이었다. Fig. 7(b)에서 알 수 있는 바와 같이 파이프와 파이프 사이 접에서는 통수를 중단 및 재통수에 따라서 온도가 계단 형태로 떨어지는 것으로 나타난 반면 표면부와 파이프 사이에서는 점진적인 하강곡선을 나타내었다.

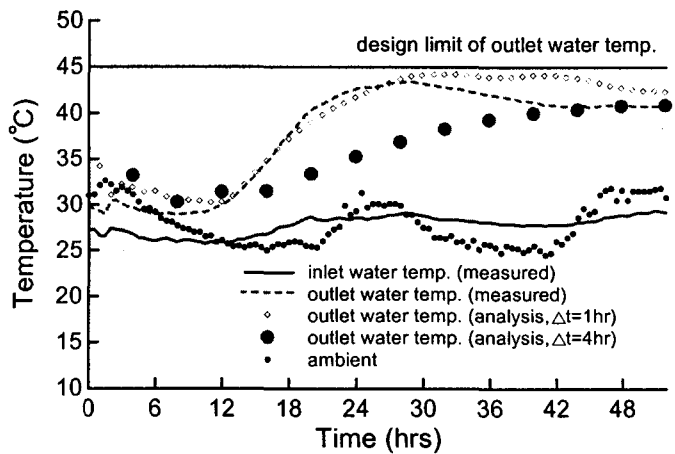
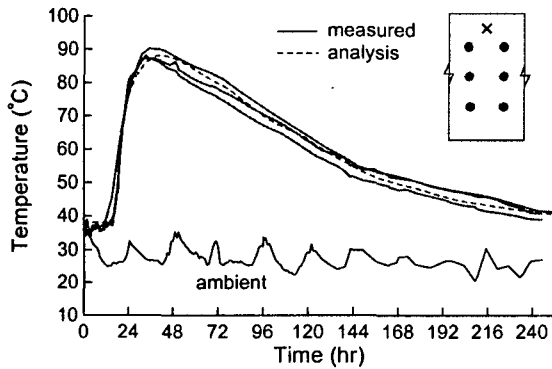
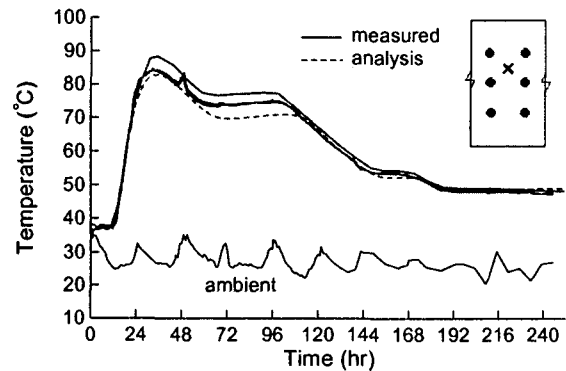


Fig. 6. 유입수 및 유출수의 온도



(a) 표면부와 파이프 사이



(b) 파이프와 파이프 사이

Fig. 7. 측정된 콘크리트 온도 및 해석 결과

4. 결론

본 연구에서는 매스 콘크리트 수화열 제어 시 사용되는 방법 중에 하나인 파이프 쿨링 공법에서 냉각수 순환형 파이프 쿨링 공법의 설계에 대한 전체적인 흐름을 제시하였다. 냉각수의 공급이 원활하지 않은 지역에서 냉각수 순환형 파이프 쿨링 공법은 매우 효과적이며, 또한 대규모 파이프 쿨링 시보다 더 경제성을 가지는 것으로 나타났다. 또한 별도의 냉동기가 필요 없이 냉각탑만으로도 온도가 상승된 냉각수를 유효하게 강하시킬 수 있는 것으로 나타났는데, 이 때의 냉각수 온도는 평균 외기 온도 수준인 것으로 판단된다. 그리고 부재의 두께가 매우 두꺼운 경우에 보온양생기간을 단축시키는데 있어서 파이프 쿨링 공법의 도입은 매우 유효한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. ACI Committee 207, "Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete,"(ACI 207.4R-80)(Revised 1986), ACI, 1986.
2. "콘크리트표준시방서," 한국콘크리트학회, 1999.
3. "Concrete Engineering Series 14/ 最新のマスコンクリト技術," 日本土木學會, 1996.