

# 동절기 파이프 쿨링을 이용한 도심지 교각 기초 매스 콘크리트 수화열 제어 시공

- An Application of Thermal Crack Control Using Pipe-Cooling in Massive Concrete Foundation of Urban Bridge -



이주호\*  
Lee, Joo Ho



염종윤\*\*  
Yun, Jong Youn



배한욱\*\*\*  
Bae, Han Ug



우승민\*\*\*\*  
Woo, Seung Min

## 1. 서 언

최근 교량의 하부 구조 및 지하 구조물 등과 같은 매스 콘크리트 구조물을 많이 시공함에 따라 초기 재령 콘크리트의 균열 발생 사례가 자주 있으며, 이로 인해 이 분야의 관심이 증가하고 있다. 콘크리트의 경우 초기 재령에서의 균열 발생원인은 매우 다양하지만, 일반적인 매스 콘크리트 구조물일 경우에는 수화열에 의한 것이 가장 큰 원인이다. 따라서, 이에 대한 대책 방안으로 프리쿨링, 파이프쿨링, 저발열시멘트 사용 등에 의한 수화열 저감 및 그로 인한 온도균열 발생 확률의 저감 대책이 시행되고 있다.

롯데건설(주) 현장에서는 여러 수화열 제어 대책 방안 중, 파이프 쿨링에 관한 수화열 저감 대책 시공을 수행하였다. 냉각수 공급이 수월한 해안지역 또는 강주변 지역에서의 파이프 쿨링에 의한 수화열 제어가 수행된 다른 구조물과는 달리 동절기 도심지 내 교각 기초 구조물에 대해 시공

이 수행되었으며, 제반 여건의 제한성으로 일정량의 수량을 이용한 유입수와 유출수의 순환 시스템을 통해 파이프 쿨링을 수행하였다.

본 기사에서는 매스 콘크리트에 대한 수화열 제어 대책의 한 방안으로 성공적인 시공 사례를 기록한 동절기 도심지내의 교각 기초 구조물에 대한 파이프 쿨링 시공 사례를 소개하고자 한다.

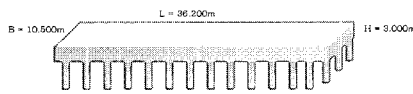


그림 1. 대상 구조물의 단면 제원

## 2. 구조물 개요

본 대상 구조물은 서울외곽순환(일산-퇴계원) 고속도로 5공구 현장 장암고가교 교각 P5 기초 구조물이다. 대상 구조물의 기초 형식은 강관 파일이며, 단면의 제원은 <그림 1>과 같이 길이 36.2m, 폭 10.5m, 높이 3m로써 전형적인 매스 콘크리트 구조물이다. 따라서, 수화열에 의한 온도균열의 발생 확률이 높으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

## 3. 파이프 쿨링 시공

### 3.1 파이프 배치

기초 구조물의 수화열에 대한 제어 대책으로 파이프 쿨링의 시공이 제안되어 높이 3m에 대해 2단으로 파이프를 설치하여 수화열에 대한 제어를 수행하였다. 파이프는 일반적인 파이프 쿨링 시공에 사용되는 X-L 파이프나 주름관 대신 강관 파이프를 사용하였으며, 내경 32mm, 두께 1.5mm의 파이프를 사용하여 기존 파이프(1inch = 2.54cm)보다 파이프 쿨링 효과를 높였다. 파이프의 배치도는 <그림 2>와 같다.

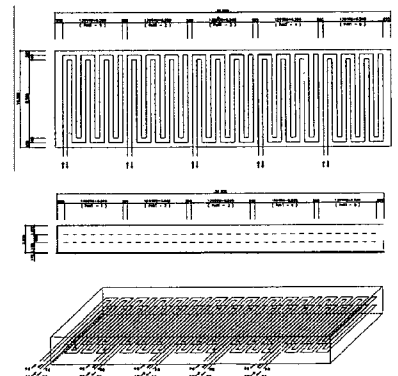


그림 2. 파이프 배치도

\* 정희원, 롯데건설(주) 기술연구소, 수석연구원  
\*\* 롯데건설(주) 기술연구소, 선임연구원  
\*\*\* 정희원, 롯데건설(주) 기술연구소, 선임연구원  
\*\*\*\* 정희원, 롯데건설(주) 기술연구소, 연구원

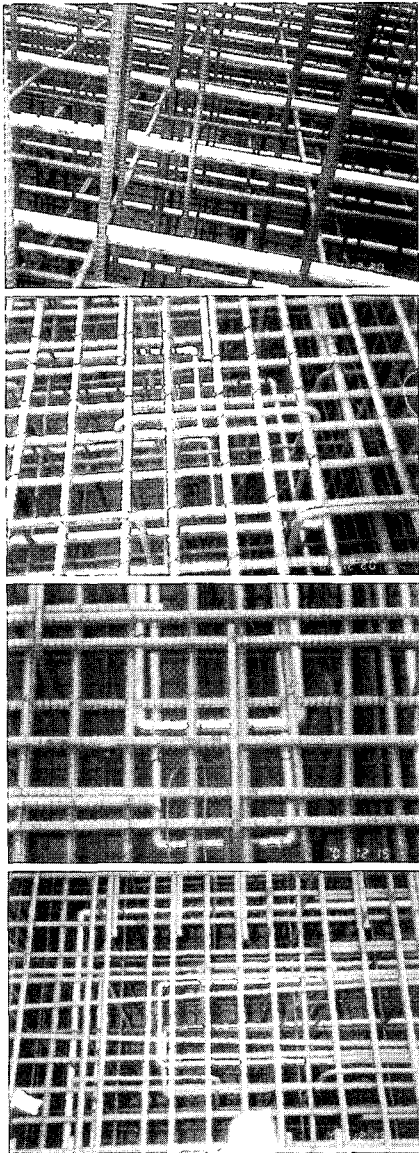


사진 1. 교각 기초 구조물에 철근 배근 및 파이프 배치 전경

파이프의 배치도에 의해 실제 시공된 파이프 배치 전경은 <사진 1>과 같다.

또한, 본 대상 구조물은 육상구간에 위치하여 파이프 쿨링을 위한 냉각수의 공급이 원활치 않으며, 냉각수의 유입 후 처리가 원활하지 않은 문제점이 있다. 이런 문제점의 해결을 위해 유출수의 재활용을 위한 순환장치가 설치되었다. 유출수의 온도

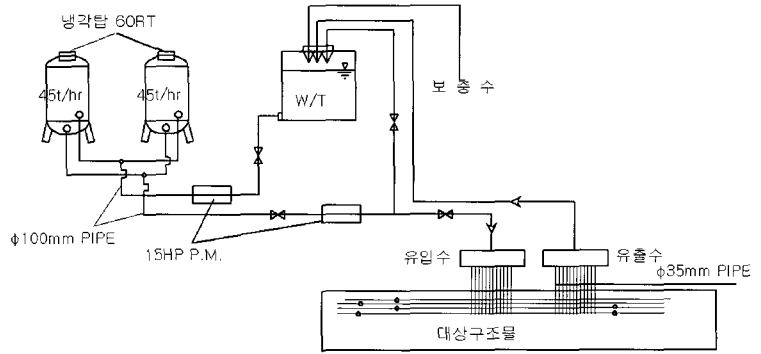


그림 3. 파이프 쿨링 냉각 장치 및 순환 장치 개략도

는 대략 40°C 정도로 추정되었으며, 실제 계측 결과도 이와 유사하였다. 따라서 유출수가 고온이므로 별도의 유출수의 온도하강

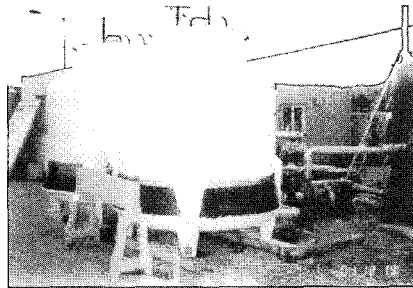


사진 2. 유출수 온도 하강을 위한 냉각 장치

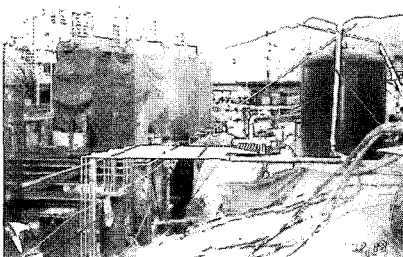
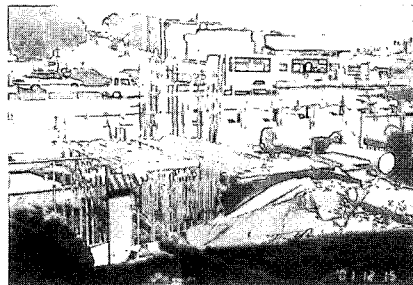


사진 3. 파이프 쿨링을 위한 냉각 장치 및 순환 장치 배치 전경

대책 없이는 유출수의 재활용이 불가하여 별도의 냉각기를 설치하였으며, 시공이 동절기임을 감안하여 일정시간동안 외부에 노출시켜 온도를 하강시키고, 또한 저온의 지하수를 혼합하여 유입수의 온도가 10 ~ 15°C로 일정하게 유지되도록 하였다. 이해를 돕기 위해 <그림 3>에 본 파이프 쿨링 시공을 위한 냉각 장치 및 순환 장치의 개략도를 나타내었으며, 유출수의 온도 하강을 위해 사용된 냉각 장치는 <사진 2>와 같다. <사진 3>은 파이프 쿨링을 위한 냉각 장치와 순환 장치 설치가 완료된 전경이다.

### 3.2 사용 재료

사용 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트 (Type 1)을 사용하였으며, 굵은 골재 최대 치수는 25 mm를 사용하였다. 기초 구조물에 사용한 콘크리트는 설계기준강도 270 kgf/cm<sup>2</sup>로 시방 배합 및 현장 배합은 <표 1>과 같다.

## 4. 수화열 계측 및 시공 관리

### 4.1 계측 방법

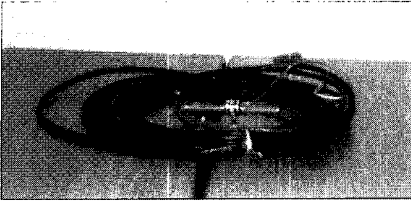
계측한 항목은 콘크리트 온도, 양생온도, 유입출수 온도, 콘크리트 변형률 등으

표 1. 대상 구조물의 시방 배합 및 현장 배합

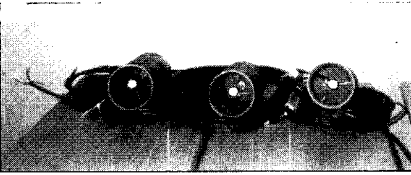
구분	설계기준강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	굵은골재의 최대치수(mm)	슬럼프 범위(cm)	공기량의 범위(%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	S/A (%)	S1 (kg/m <sup>3</sup> )	S2 (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	AE제 (kg/m <sup>3</sup> )
시방배합	270	25	15 ± 2.5	4.5 ± 1.5	185	409	45.1	45.1	461	307	943	1.23
현장배합					153	409	45.1	45.1	492	307	923	1.23



(a) 온도계



(b) 변형률계



(c) 무응력계

사진 4. 계측에 사용된 센서들

로써 증기양생과 파이프 쿨링의 시작 및 종료시점을 결정하고 구조물의 전체적인 수화열 발현하에서의 거동을 분석하기 위하여 계측되었다. 대상 구조물의 계측에 사용된 센서는 <사진 4>와 같은 온도센서 21개소, 매립형 변형률 센서 6개소, 무응력계 3개소로, 각각의 배치 현황은 <그림 4~6>과 같으며, 실제 온도센서, 매립형 변형률 센서, 무응력계의 설치 전경은 <사진 5~6>과 같다.

#### 4.2 시공 및 파이프 쿨링 수행

##### 4.2.1 콘크리트 타설 및 증기 양생

대상 구조물의 콘크리트 타설은 1회 일체 타설로 수행하였으며, 타설 완료직후부터 18°C 이상의 온도를 유지하면서 100시간까지 증기 양생을 실시하였다. <사진 7>은 대상 구조물에 콘크리트 타설 및 다짐 광경이며, <사진 8>은 타설 완료후, 증기 양생을 하는 전경이다.

##### 4.2.2 파이프 쿨링

파이프 쿨링은 상단 파이프가 매설된 직 후 15시간 경과시부터 70시간 동안 유

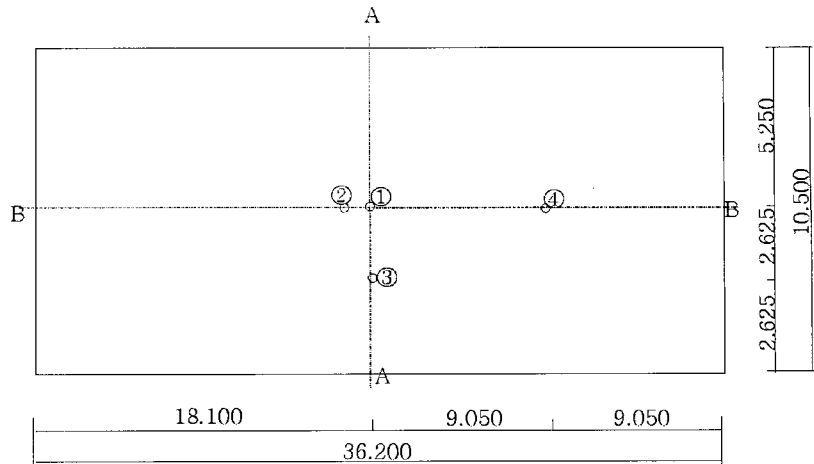


그림 4. 대상 구조물의 계측 위치 평면도

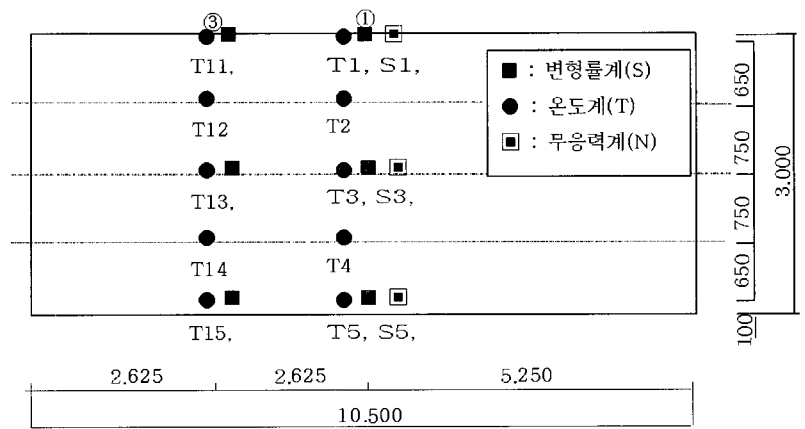


그림 5. 단면 A-A의 계측기 배치도

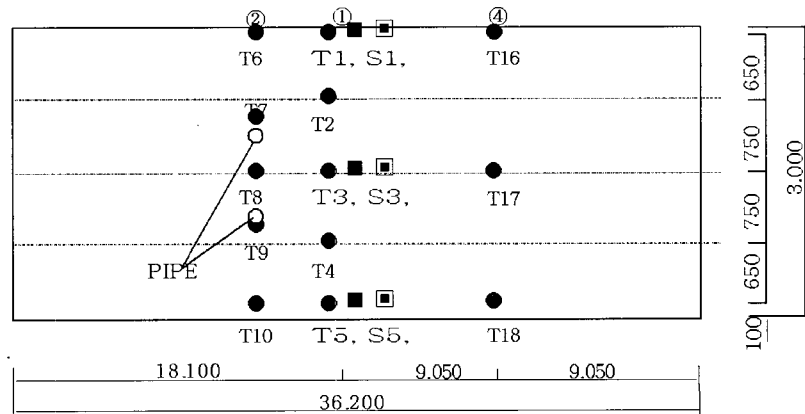


그림 6. 단면 B-B의 계측기 배치도



사진 5. 변형률계, 무응력계 설치 전경

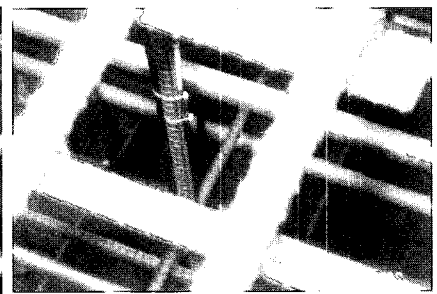


사진 6. 온도계 설치 전경

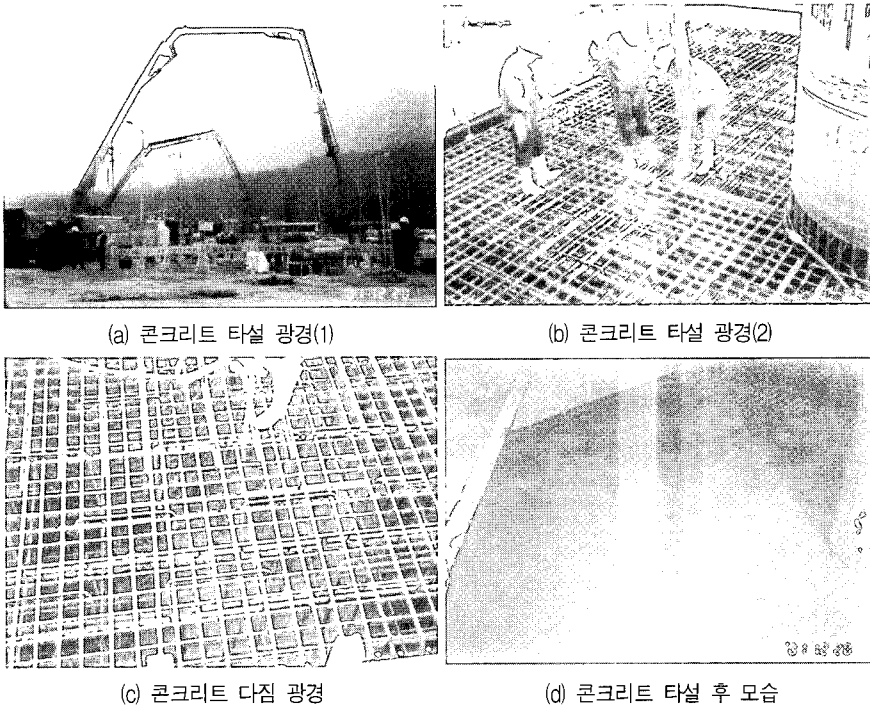


사진 7. 교각 기초 콘크리트 타설 및 다짐 광경

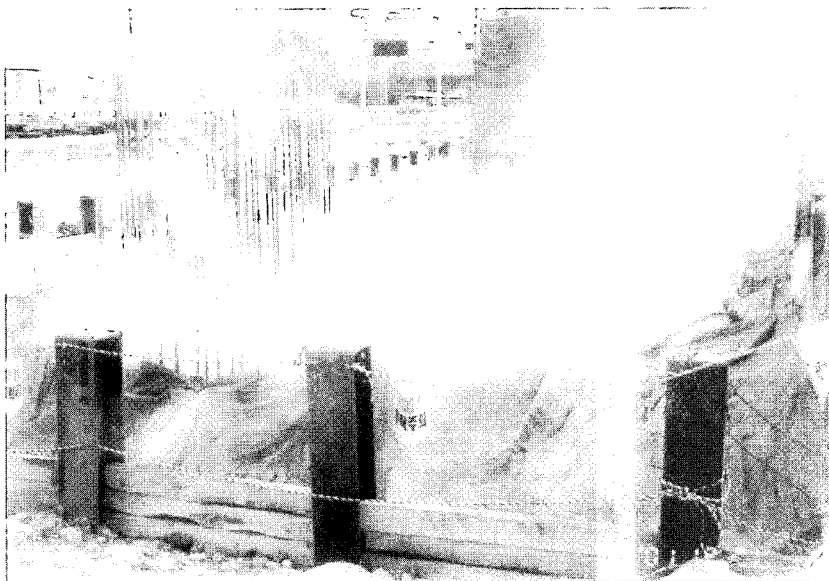


사진 8. 콘크리트 타설 후 증기 양생 광경

입수 온도 10 ~ 15°C를 유지하며 유입속도 110 cm/sec로 실시하였다. 양생 종료 후 콘크리트의 상면 온도는 증기 양생 및 보온 습윤 양생을 실시하여 5°C 이상을 유지시켰다.

4.2.3 시공 관리

1) 파이프 쿨링 시작 시점(타설 후 15 시간 경과시)

파이프 쿨링을 구조물의 타설 직후에 실시하게 되면 파이프 주변 콘크리트의 수화 반응을 억제하게 되므로, 파이프 주변의 콘크리트 온도가 25°C 이상 되는 시점에서 실시하도록 하였다. 시작 시점이 더 늦어지는 경우에는 최고 온도 상승을 저하시키는 역할이 감소되어 온도균열 발생 가능성이 높아질 수 있기 때문이다.

2) 파이프 쿨링 종료 시점(파이프 쿨링 실시 후 70시간 경과시)

최고 온도 도달 후에도 계속적으로 파이프 쿨링을 수행하게 되면 온도 하강이 급격하게 발생하므로 구조물 중앙부 및 하단부의 인장응력이 증대되게 된다. 따라서 최고 온도에서 약 25°C 하강하는 시점(본 시공사례에서는 파이프 쿨링 실시 후 약 70시간 경과시)에서 종료하도록 하였다. 계측 결과에 의하면 파이프 쿨링 종료 후 추가적인 온도상승은 없었다. 최고온도에서 파이프 쿨링을 즉시 중단하는 경우 추가적인 온도 상승이 우려되므로, 이에 대한 주의가 요망된다.

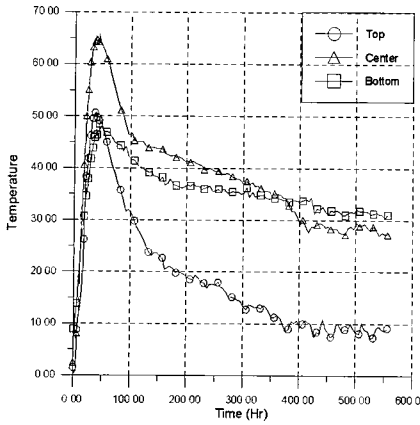
3) 증기 양생 종료 시점(타설 완료 후 100시간 이상 경과 후)

타설 완료 후 100시간이 경과한 시점에서 콘크리트의 최고 온도는 약 45°C 정도였다. 이 시점에서는 증기 양생을 종료 하여도 콘크리트의 인장강도가 80% 이상 발현된 상태이며, 대기온도와 평형을 이루어야 하는 온도차이가 상대적으로 적은 시점으로 콘크리트 상면 대기 온도를 5°C 이상으로 보온, 습윤 상태로 관리하면 표면에 발생하는 균열을 제어할 수 있을 것으로 판단하였다.

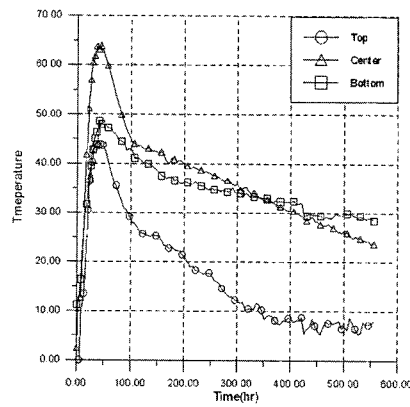
4.3 파이프 쿨링 효과

수화열 계측을 통해 본 시공 구조물의 파이프 쿨링에 의한 수화열 제어 효과를 확인하도록 한다. <그림 7>은 대표 단면 위치(<그림 4> 참조)에서의 온도 계측 결과, 변형률 계측 결과, 응력 계측 결과를 나타낸 것이다.

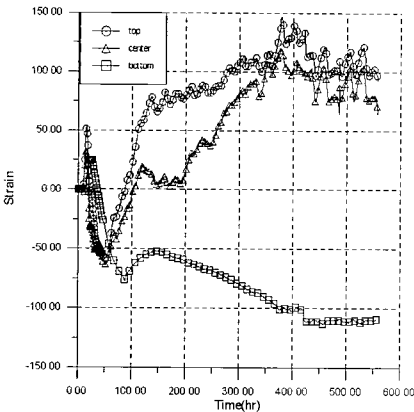
파이프 쿨링을 종료한 후 중앙부의 온도 하강이 급격히 둔화된 것으로 판단할 때 파이프 쿨링은 온도 제어에 효과가 있었던 것으로 나타났다. 응력 계측으로부터 대상 구조물은 외부구속의 영향보다는 내부구속의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 하부에 말뚝에 의해 지지되어 암반 또는 기타설 콘크리트에 지지되는 경우보다



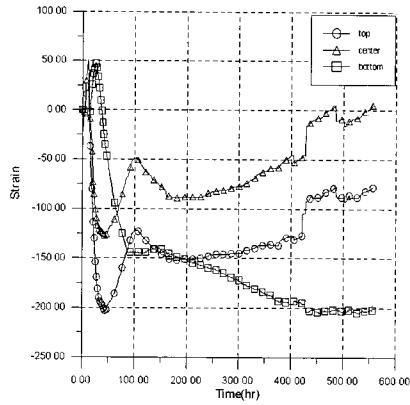
(a) 계측위치 ①에서의 온도 계측 결과



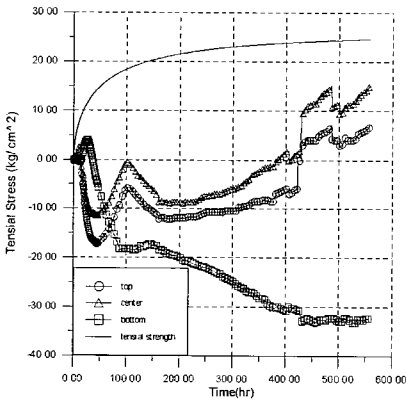
(b) 계측위치 ③에서의 온도 계측 결과



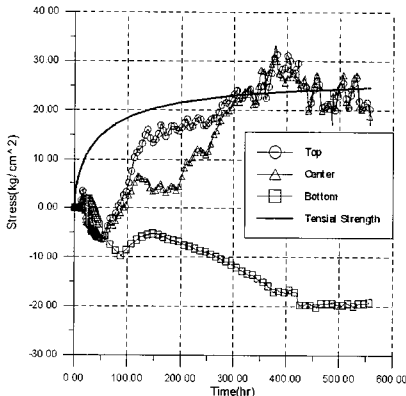
(c) 계측위치 ①에서의 변형률 계측 결과



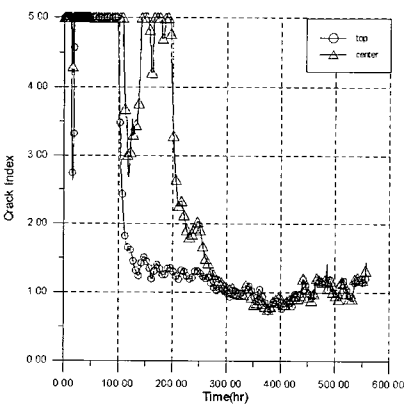
(d) 계측위치 ③에서의 변형률 계측 결과



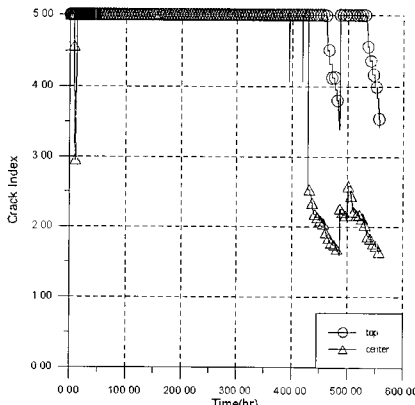
(e) 계측위치 ①에서의 응력 계측 결과



(f) 계측위치 ③에서의 응력 계측 결과



(g) 계측위치 ①에서의 온도균열지수



(h) 계측위치 ③에서의 온도균열지수

그림 7. 대표 단면 위치에서의 온도계측, 변형률 계측, 온도 계측 결과

외부구속효과가 적었기 때문이다. 최대인 장응력은 구조물 상면에서 나타났으며 중앙부에도 인장응력이 발생하였다. 그러나 계측 결과에 의해 최저 온도균열지수를 산정 하였을 때 모두 0.7 이상으로 시방서의 유해균열을 제한하는 범위 내였다. 실제로 시공이 완료된 후 균열 조사를 실시하였으나 수화열에 의한 온도균열로 추정되는 균열은 발견되지 않았다.

따라서, 본 시공은 도심지 내 육상구간이라는 지역적 한계성 및 동절기라는 계절적 한계성이 있었으나, 유출수를 재활용하는 파이프 쿨링 순환 시스템과 일반적인 파이프보다 시공성이 좋고 열전도 효과가 높은 3.2 cm 강관의 사용, 충분한 증기양생으로 콘크리트 수화열에 의한 온도균열의 발생을 방지 할 수 있었다.

## 5. 결 언

급변 교각 기초 콘크리트 공사에서 수화열 제어를 고려한 파이프 쿨링 공을 수행하여 수화열에 의한 온도 균열을 방지 할 수 있었다. 특히 대상 구조물은 동절기 도심지 내 육상구간에 시공된 기초 구조물로서 지역적 한계성을 극복한 유출수를 재활용하는 파이프 쿨링 순환 시스템을, 계절적 한계성을 극복한 증기양생으로 수화열에 관한 하나의 제어 대책 방안을 제시 하였다.

본 기사를 통해 향후 이와 같은 매스 콘크리트를 공사하고자 하는 설계자, 시공자들에게 수화열에 의한 온도 균열 제어 대책의 좋은 시공사례가 되어 좋은 품질을 달성 할 수 있도록 참고가 되었으면 한다. □