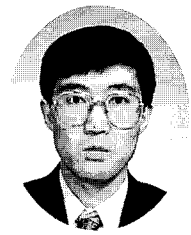


현수교 앵커구체의 수화열 관리

- Control of Hydration Heat for Anchor Block in Suspension Bridge -



이두재*



이성범**

1. 서 언

일반적으로 현수교는 타정식 현수교와 자정식 현수교로 분류하고, 현수교를 구성하는 주요 요소로는 주케이블, 주탑, 보강형, 앵커구체로 구분한다. 자정식 현수교와 타정식 현수교의 주된 차이점은 주케이블을 지지하는 시스템의 차이에 있다. 즉, 자정식 현수교의 경우는 주케이블의 장력을 보강형이 지지하고, 타정식 현수교의 경우는 앵커구체라고 하는 거대한 콘크리트 덩어리가 지지한다.

본 광안대로 현수교의 경우는 타정식 현수교로서 주케이블에서 작용하는 거대한 장력을 앵커구체가 지지하도록 설계되어 있다.

앵커구체의 주된 기능은 케이블 및 보강 트러스로부터 전달되는 수직, 수평 하중을 지지하며, 또한 케이블을 정착시킴으로써 케이블이 충분한 장력을 받을 수 있도록 하는 기능과 함께 현수교와 연결되는 접속

교량의 지점 역할도 하게 된다. 본 현장과 같은 중력식 앵커구체의 경우는 그 자중이 많이 나가고, 크기 또한 방대한 매스 콘크리트 구조물이기 때문에 수화열 관리가 가장 중요한 문제로 부각되었다.

따라서 본고에서는 앵커구체 콘크리트 구조물의 타설 현황 및 시공시 수화열 관리를 위해 수행한 방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 광안대로 현수교 공사 수행 현황

앵커구체 콘크리트 타설 현황에 대한 설명을 하기 전, 현재까지 수행된 현수교 구간의 공사 진행 상황을 설명하고자 한다.

앵커구체와 주탑 기초부에 대한 공사는 완료되었고, 현재는 앵커구체부와 주탑 가설이 진행 중에 있다. 앵커구체와 주탑 가설이 완료 된 후에 케이블의 가설이 진행되며, 마지막으로 보강형 트러스의 가설로 모든 공사가 완료된다.

* 동아건설산업(주) 부산 광안출장소 대리

** 동아건설산업(주) 부산 광안출장소 부장

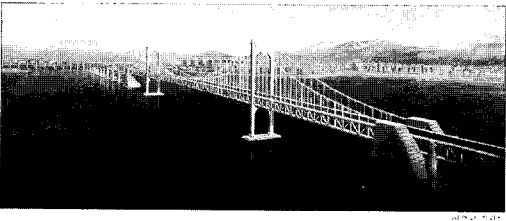


그림 1. 광안대로 전경 및 현수교 조감도

2.1 주탑 가설 현황

주탑 가설에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

주탑의 높이는 105 m이며, 가설 방법은 대블록 공법으로 주탑을 모두 3블록으로 나누어 가설하며, 가설 시 3,000톤급 floating crane을 사용한다.

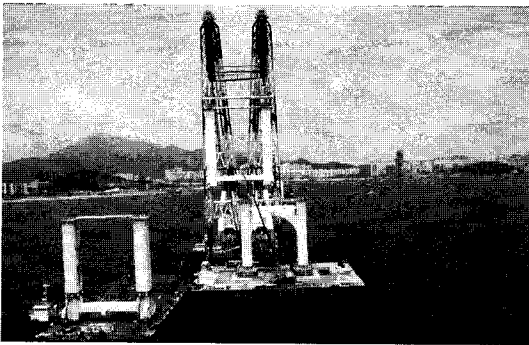


그림 2. 주탑 하단 블록 가설 전경

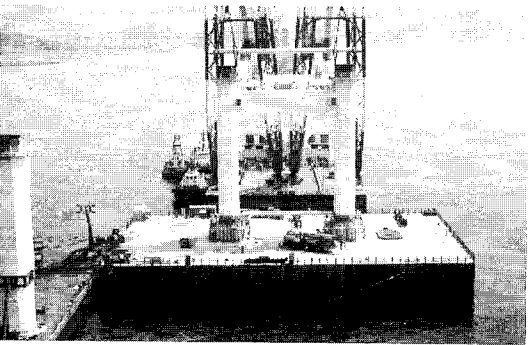


그림 3. 주탑 중단 블록 가설 전경

현재 주탑부의 공사 진행 상황은 하단과 중단 블록 까지 가설이 완료된 상태에 있다. 주탑 블록의 운송은 만톤급 바지(barge)를 이용하여 제작 공장에서 현장 까지 운송하였다.

2.2 케이블 가설 현황

케이블 가설 공사는 올해 하반기부터 시작될 예정에 있으며, 가설 방법은 A/S 공법을 이용한다. 케이블 가설 순서를 개략적으로 설명하면, 먼저 파일럿(pilot) 로프를 설치하고, 이를 이용하여 캐트위크를 가설한 후에 주케이블을 가설하고, 마지막으로 행거를 설치한다. 본 현장에서는 케이블 가설 공사가 아직 진행되지 않은 상태에 있기 때문에, 일본의 Rainbow Bridge의 케이블 가설 공사 전경을 예로 사용하였다.

2.3 트러스 가설 현황

트러스의 가설은 내년 상반기에 시작될 예정에 있다. 트러스는 현재 제작 중에 있으며 일정한 크기를 갖는 소블록으로 제작 현장에서 조립한다. 소블록으로 조립한 후 바지를 이용하여 현장으로 운반·가설된다. 트러스는 총 59개의 소블록으로 제작될 예정이며, 트러스는 직하조공법을 이용하여 가설된다.

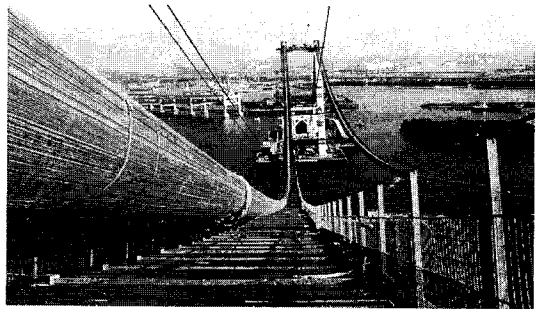


그림 4. 캐트위크 가설 상황(Rainbow Bridge)

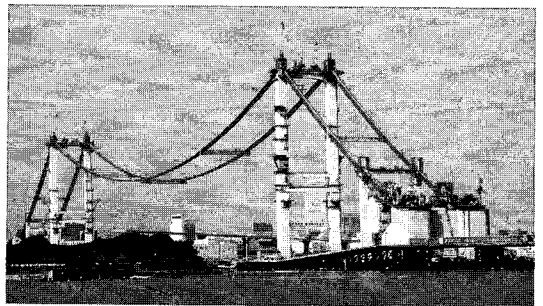


그림 5. 주케이블 및 캐트위크(Rainbow Bridge)

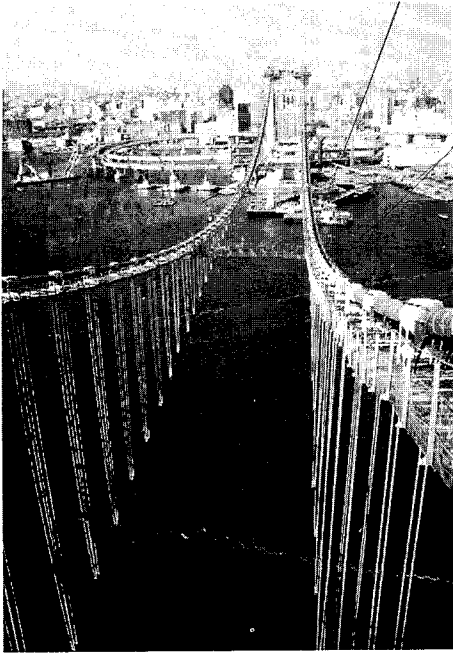


그림 6. 주케이블 및 행어(Rainbow Bridge)

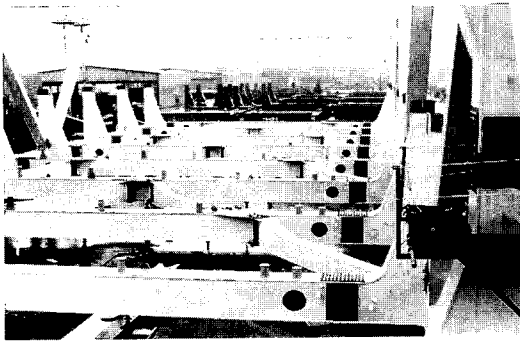


그림 7. 트러스 면재 지조립 전경

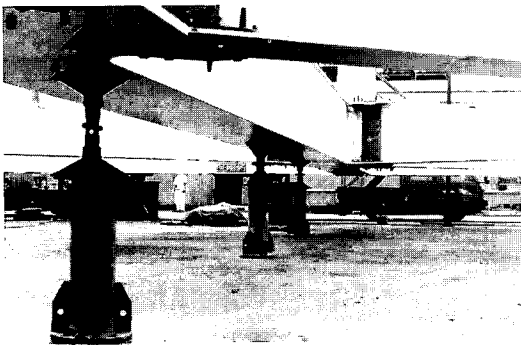


그림 8. 지조립 중인 트러스의 지지대

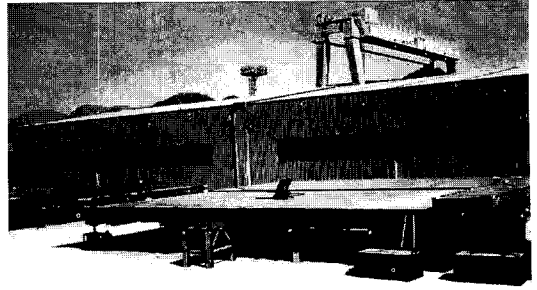


그림 9. 강상판

2.4 앵커구체 가설 현황

앵커구체 수화열 관리 방안은 뒤에서 좀더 자세하게 언급하고 여기서는 콘크리트 타설 현황을 간략히 소개하고자 한다.

앵커구체는 <그림 1>의 조감도에 보이는 것과 같이 양쪽에 2개가 있다. 앵커구체 1(조감도에서 가까이 보이는 것)은 1999년 하반기에 타설이 시작되었고, 앵커구체 2의 경우는 2000년 초에 타설이 시작되어, 두 개 모두 올 하반기에 타설 완료를 목표로 시공하고 있다. 현재까지 콘크리트 타설은 앵커구체 1의 경우 총 25단 가운데 16단, 앵커구체 2는 8단까지 진행되고 있다.

3. 앵커구체 콘크리트 수화열 관리

일반적으로 수화열 제어 대책으로는 타설 블록이나 타설고 조절, 균열 유발 줄눈 등의 설치, 수화 발열량이 적은 시멘트의 사용, 프리쿨링 공법이나 파이프 쿨링 공법 등이 사용되며, 이 중 한 가지 방법보다는 여러 가지 방법이 병용되어 사용되고 있다.

3.1 앵커구체 기초 케이스

이미 타설이 완료된 앵커구체 하부·기초 케이스 구조물은 매스 콘크리트 구조물로서 시공시 수화열로 인한 균열 제어가 문제였다.

따라서 수화열 문제를 해결하기 위하여 타설에 사용할 시멘트의 선정, 최적의 타설 블록과 타설고의 결정, 가장 효과적인 쿨링 방법 등에 대한 복합적인 검토를 수행하였다.

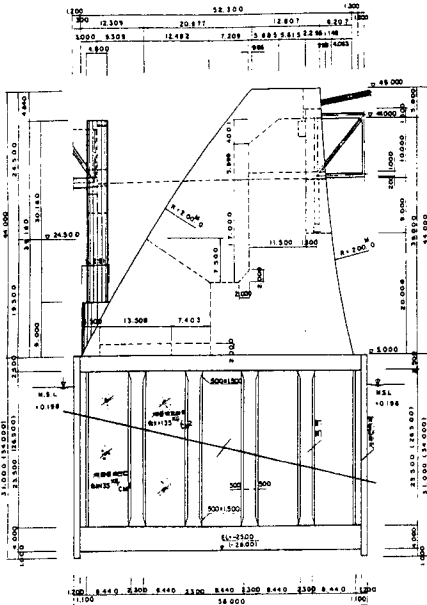


그림 10. 앵커구체 측면도

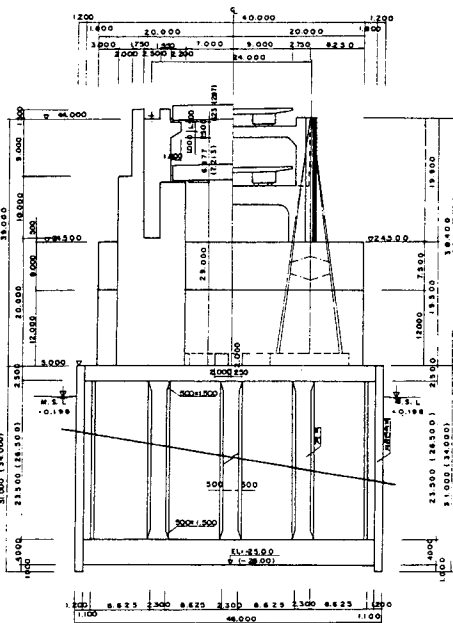


그림 11. 앵커구체 정면도

하부 기초 콘크리트 구조물에 사용할 시멘트의 선정을 위해 여러 가지 종류의 시멘트를 사용하여 물리, 화학적 실험을 수행하였고, 모형 타설 실험 등을 통하

여 3성분계 혼합형 저발열 시멘트를 사용하는 것으로 최종적으로 결정하였다.

하부 기초 케이슨의 경우 동아건설산업(주)에서 개발한 수화열 해석 전용 프로그램을 이용하여 혼합형 저발열 시멘트, 타설 블록과 타설고, 파이프 쿨링 등을 고려한 수화열 해석을 실시하였다.

수화열 해석 결과와 공기를 토대로 최적의 타설 블록과 타설고를 결정하여 시공하였고, 시공 결과는 아주 양호하게 나타났다. 이는 시공 전에 수화열에 의해 발생하는 균열을 제어하기 위한 조치들이 타당하였다는 것을 입증하는 것이다.

앵커구체 기초 케이슨의 콘크리트 타설량은 1의 경우 45,487 m³, 2의 경우는 57,171 m³였다.

앵커구체 1의 기초 케이슨 콘크리트 타설은 1999년 12월, 2의 경우는 2000년 3월에 성공적으로 완료하였다.

3.2 앵커구체

〈그림 10〉, 〈그림 11〉은 앵커구체 측면도와 정면도를 나타내고 있고, 설계 압축 강도는 240 kgf/cm²이다.

(1) 시멘트

앵커구체에 사용한 시멘트는 4성분계 혼합형 저발열 시멘트로 초기 강도(7일 강도 150 kg/cm² 이상)가 높으면서, 수화 발열량이 적은 시멘트의 필요성에 따라 개발되었다. 이는 기초 케이슨에 사용한 3성분계 혼합형 시멘트와 다른 종류의 시멘트가 필요하다는 것을 의미하는 것이었다.

이에 따라 개발된 4성분계 혼합형 저발열 시멘트는 물리·화학적 실험을 거쳐 선정되었다. 4성분계 혼합형 저발열 시멘트에 사용된 혼화 재료는 시멘트, 플라이 애쉬, 고로 슬래그, 석분 등이다.

(2) 콘크리트 생산 및 타설

앵커구체 1, 2에 타설할 콘크리트의 양은 각각 2만 5,703 m³이며, 앵커구체가 해상에 위치한 관계로 해상 B/P선을 이용하여 콘크리트를 타설하고 있다. 해상 B/P선의 용량은 200 m³/h, 120 m³/h, 60 m³/h으로 상황에 따라 2~3대를 병용하여 타설하며 타설 시간은 투입되는 B/P선 수에 따라 다르지만 보통 10~20시간이 소요된다.

(3) 배합비

W (kgf/m ³)	B (kgf/m ³)	W/B (%)	S/a (%)	S (kgf/m ³)	G (kgf/m ³)
158	364	43.4	43	751	1057

* W/B : 물/결합제비

(4) 양생 및 연속 타설

거푸집 탈형은 콘크리트 타설 후 약 3~4일 후에 행하며, 거푸집 탈형 후 급속한 건조 방지 및 양생촉진을 위하여 양생포를 덮고 외부에서 수분을 공급하였다. 콘크리트의 연속 타설 시점은 공기 및 해석 결과를 토대로 하여 8~10일 간격으로 하였다.

(5) 콘크리트 블록 분할

앵커구체의 타설고 및 타설 블록은 시공성, 공기와 수화열 해석 결과를 고려하여 결정하였다.

타설 블록은 높이에 따라 길이가 변화하기 때문에 타설 블록의 크기가 변화하며, 타설고도 1~3m로 높이에 따라 변화하고 있다.



그림 12. 시공 중인 앵커구체(측면)

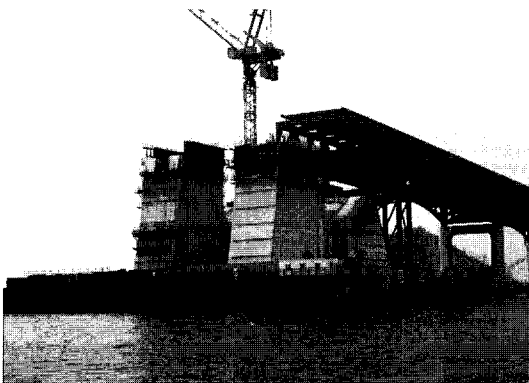


그림 13. 시공 중인 앵커구체(정면)

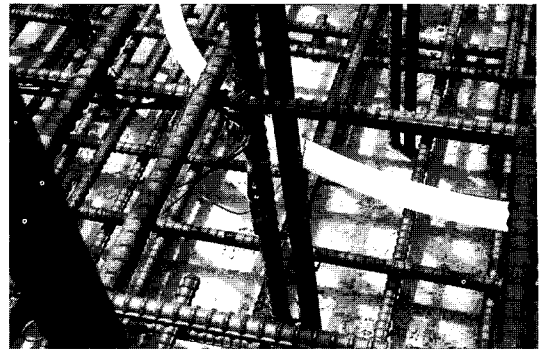


그림 14. 계측기 설치 장면

타설 블록은 모두 24단으로 나누어 타설하고 있으며, 참고로 콘크리트 타설량이 가장 많은 곳은 앵커구체 3단으로 약 2,200 m³가 소요되었고 타설 시간은 약 15시간 소요되었다.

하절기의 수화열 관리를 위하여 프리쿨링과 파이프 쿨링을 실시하고, 타설고에 따라 파이프 쿨링의 단수를 1~3단까지 변화시켰다. 쿨링 시간은 보통 최고 온도에 도달한 후 12시간~1일을 더 쿨링하는 것이 균열 제어에 가장 효과적이므로 파이프 쿨링 기간은 4일을 원칙으로 하였으나, 시공성을 고려하여 4~6일 동안 실시하였다.

4. 앵커구체 수화열 계측

앵커구체 콘크리트 구조물 계측의 주요 목적은 해석 결과의 타당성을 비교 검증하고, 또한 균열 제어를 위해 설정한 온도 범위에 실제 온도가 분포하는지를 검토하여 균열 발생 유무를 사전에 예측하고자 하는 것이다. 따라서 계측값이 시공 전에 결정한 일정 범위의 온도(온도로만 판단 : 20 ℃ 이내)를 벗어날 경우는 균열 발생 확률이 높아지는 것이므로 시공 방법 등의 변경 및 현장 여건에 맞는 수화열 재해석등을 통해 좀더 타당한 균열 제어 방법을 도출하고자 하였다. 온도에 대한 현재까지의 계측 결과를 살펴보면 내·외부 온도차는 10 ℃ 내외로 균열 발생 확률이 낮은 것으로 나타났다.

최초 계측기는 3월 초에 설치하였으며, 계측기는 매립형 온도계를 사용하였다.

4.1 온도 측정 결과

현재까지 계측된 데이터 중 일부 계측 분석이 끝난

앵커구체 1의 2, 3단 온도 계측 결과 데이터를 중심으로 설명하고자 한다.

앵커구체 1의 2단, 3단의 최고 온도 발생량은 25.23℃, 28.04℃로 나타났다. 해석치와 실측치를 비교한 결과, 실측치가 잘 모사하고 있다

앵커구체 1의 2단에서는 타설 후 약 3일만에 최고 온도인 25.2℃에 도달하였고, 최고 온도에 도달한 이후 온도가 서서히 하강하다 3단 타설을 기점으로 콘크리트 내부 온도가 서서히 증가하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 3단을 타설한 시점이 2단을 타설한 후 10일 정도임을 알 수 있다.

2단 타설 후 5~8일 사이에 표면부의 온도 하강 폭이 큰데, 이는 당시 외기 온도가 상당히 낮아 표면부가 외기 온도의 영향을 받아 발생한 것으로 판단됐다.

그러나, 3단 타설 후 약 5~6일이 경과한 후 부터는 2단의 온도가 25℃ 정도로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 2단의 경우 연속 타설 시점 전이나 후 모두 내·외부 온도 차가 10℃ 내외임을 알 수 있다.

앵커구체 3단의 경우도 2단과 최고 온도 발생량에서 차이가 있을 뿐 2단과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 3단 역시 내·외부 온도 차가 10℃ 내외임을 나타내고 있다.

이는 초저발열 시멘트의 사용, 프리쿨링, 파이프 쿨

앵커구체 1구체 타설리프도

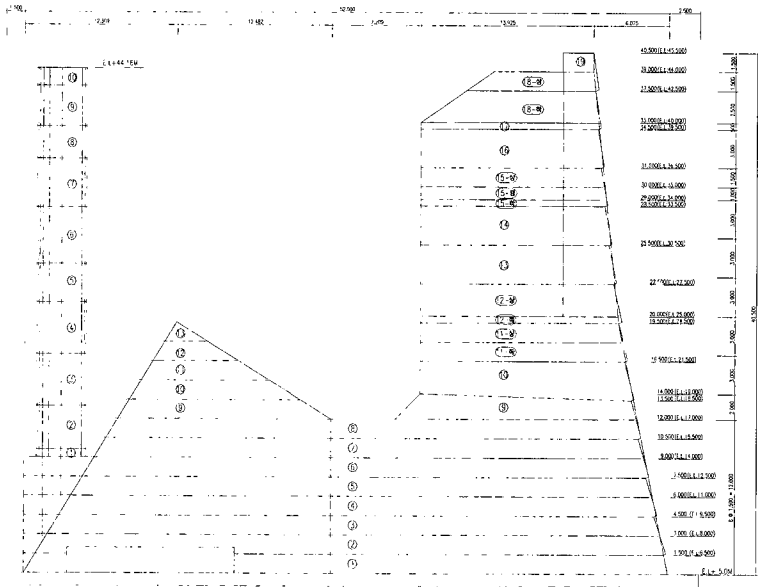


그림 15. 앵커구체 블록 분할도

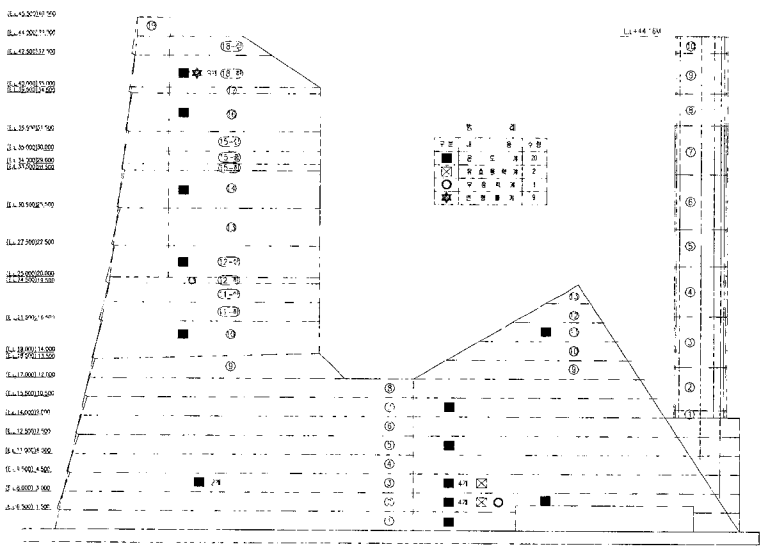


그림 16. 온도 계측기 설치도

링 등 균열 제어를 위해 선정한 여러 가지 방법들이 균열 제어에 효과가 있었음을 나타내는 것이다.

냉각 배관도

PLAN - LIFT 1

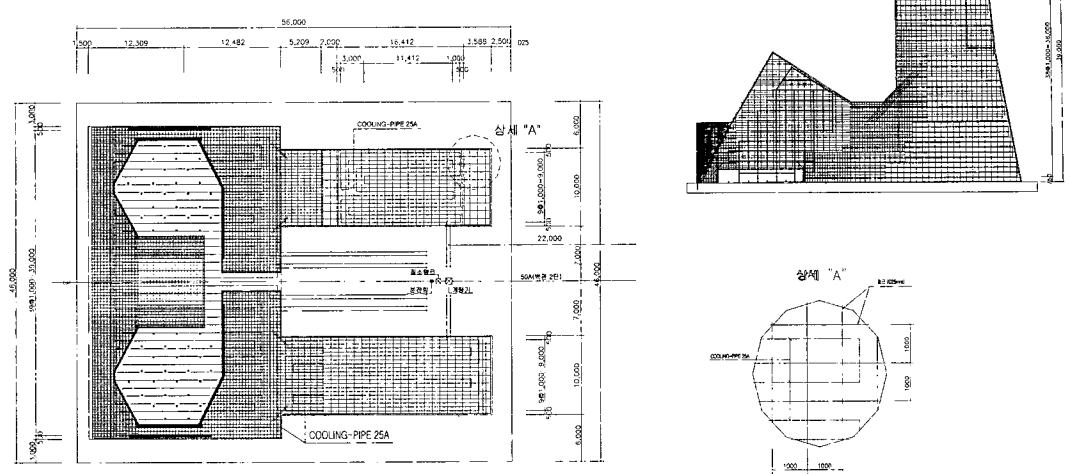


그림 17. 쿨링 파이프 배관도

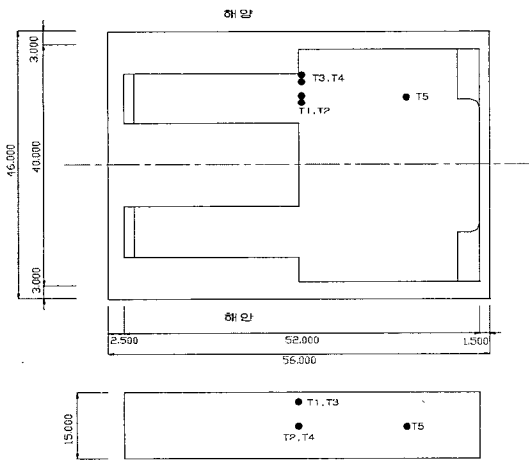


그림 18. 앵커구체 1의 2단 계측기 설치 위치

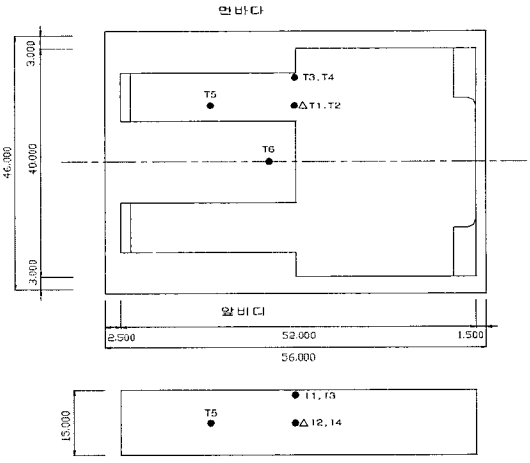


그림 19. 앵커구체 1의 3단 계측기 설치 위치

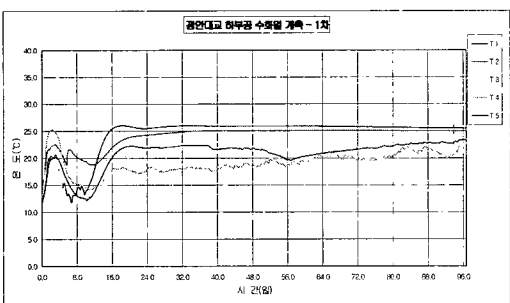


그림 20. 앵커구체 1의 2단 온도 계측 결과

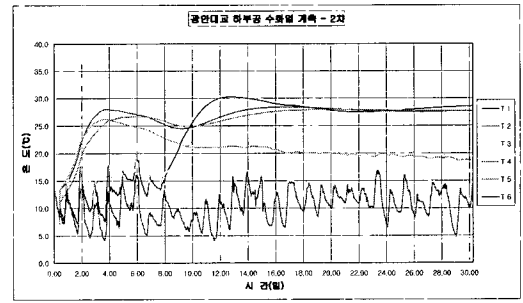


그림 21. 앵커구체 1의 2단 온도 계측 결과

5. 결론

순수 국내 기술진에 의해 시공되는 최초의 현수교 공사로 많은 기술적인 어려움을 극복하면서 예정대로 시공하고 있다.

특히, 매스 콘크리트 구조물인 앵커구체는 케이블의 장력을 지지하는 중요 매스 콘크리트 구조물로, 수화열에 의한 균열 발생은 구조물의 구조적인 기능 손실을 초래하므로 균열 제어가 중요한 문제였다. 따라서 시공 전에 수화 발열량이 근본적으로 적은 시멘트의 개발·선정, 공정 등을 고려한 최적의 타설 블록, 타설고의 결정, 효과적인 쿨링 방법의 결정이 요구되었다.

따라서 이와 같은 여러 가지 변수를 이용한 수화열 해석을 실시하였고, 이 해석 결과에 따라 최적의 타설 블록과 타설고, 쿨링 방법, 쿨링 단수 등을 결정하였다.

수화열 해석 결과 온도 및 온도 응력은 만족할 만한 결과를 주었고, 따라서 이를 검증하기 위하여 온도 계측기를 설치하여 실제 발생하는 온도를 계측하였다.

해석 결과는 계측 결과를 잘 모사하였고, 계측 결과 내·외부 온도 차가 10℃ 내외로 되어 균열 발생 확률이 적게 됨을 알 수 있었다.

실제 균열 발생 유무를 관측한 결과 눈에 띄는 균열은 없었다. 따라서 지금까지 수행한 앵커구체 콘크리트 타설은 성공적이었다고 말할 수 있겠다. ▣