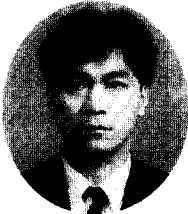


## 기계기초 매스콘크리트의 온도제어를 위한 시공사례

### An Example of Temperature-Controlled Construction for Massive Concrete in Machine Foundation



허택녕\*



이제방\*\*



손영현\*\*\*

#### 1. 서론

최근 비약적인 경제발전에 힘입어 장대교량, 항만, 댐, 도로, 원자력 발전소 등과 같은 대규모 기간구조물의 건설이 증가하고 있으며, 대형화 및 고강도화되는 추세에 있다. 특히, 전술한 구조물을 매스콘크리트로 가설하면 초기재령시에 수화열로 인한 균열발생의 가능성이 매우 높기 때문에 효율적인 매스콘크리트의 개발과 매스콘크리트 구조물의 설계기술 및 시공방법이 중요한 연구대상으로 등장하게 되었다. 따라서 본 고에서는 현대중공업이 시공하고, 현대건설 기술연구소에서 기술지원한 가로 52.6 m, 세로 14.4 m, 높이 8.5 m인 기계기초 매스콘크리트의 시공 및 온도관리에 대하여 소개하고자 한다.

#### 2. 공사개요

현대중공업이 울산에 건설중인 터빈 발전기공

장은 총 17개의 매스콘크리트 기계기초를 포함하여 토목공사가 한창 시공중에 있으며, 모든 공사가 완공되는 1996년말에는 세계 최대의 터빈 발전기 공장으로 부상하게 될 것이다. 본 공사의 시공은 현대중공업 건설사업부에서 구조설계는 현대엔지니어링에서 각각 담당하고 있다.

#### 3. 매스콘크리트의 온도제어

매스콘크리트의 경우 대기중, 기초지반, 기존구조물 등으로 방출되는 열량에 비해 시멘트의 수화작용에 따른 발열량이 상대적으로 크기 때문에 콘크리트 내부의 온도가 상승하게 된다. 이때 부재 치수에 따라 중심부와 표면부의 온도차가 커지게 되면, 상승한 온도가 하강하면서 발생하는 표면부 혹은 접속부의 수축변형이 압반이나 기존 구조물 등에 의해 구속될 때 구속된 위치로부터 온도균열이 발생한다. 이와 같은 온도균열은 콘크리트의 내부열이 완전히 방출하거나 대부분의 수축변형이 발생된 후에는 더 이상의 발전이 없고 정지되는 균열이다. 그림 1에 본 공사에서 수행된 온도균열의 제어과정을 도시하였다.

\* 현대건설 기술연구소 선임연구원  
 \*\* 정희원, 현대건설 기술연구소 연구원  
 \*\*\* 현대건설 기술연구소 연구원

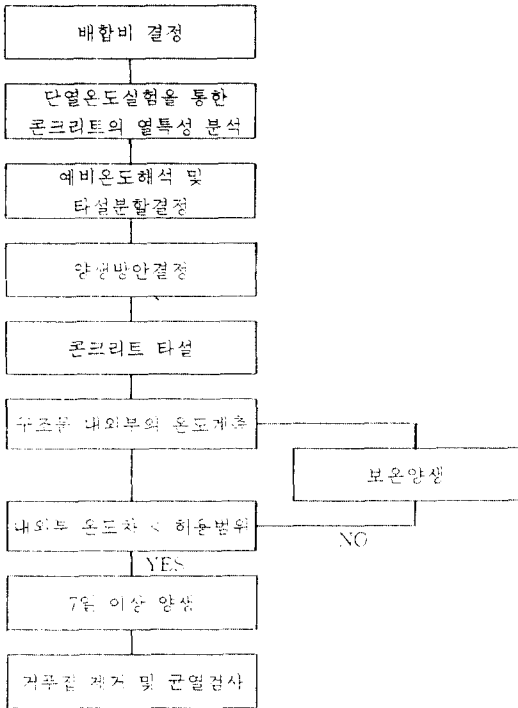


그림 1 온도균열의 제어과정

#### 4. 배합비

기계기초 매스콘크리트가 비록 고강도를 필요로 하지는 않지만 적당한 워커빌리티의 확보, 소요강도, 내구성, 수밀성을 확보하는 범위 내에서 온도상승요인이 최소가 되도록 배합비를 선정하였다. 또한 본 기계기초는 완공후 수평정밀도가 기초의 허용침하량으로 환산하여 약 5 $\mu$ m인 고정밀도를 요구하고 있고, 고내구성, 내마모성, 내충격성 등이 설계조건에 포함되어 있기 때문에 이를 충족시키기 위하여 강섬유를 사용하였다. 본 기계기초에 사용된 배합표는 표 1과 같다.

표 1 기계기초 매스콘크리트의 배합표

설계강도	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )						W/C
(kg/cm <sup>2</sup> )	시멘트	물	잔골재	굵은골재	강섬유	혼화재	(%)
240	350	193	907	814	39	3.5	55

#### 5. 단열온도 상승실험

전 절에서 산정된 배합비에 대한 콘크리트의 열

특성치를 파악하고, 보다 정확한 콘크리트의 온도 분포를 예측하기 위하여 단열온도 상승실험을 수행하였다. 실험결과로 부터 식(1)과 같은 단열온도 상승곡선식을 얻어 온도해석에 사용하였다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) = 53.4(1 - e^{-0.41t}) \quad (1)$$

여기서 t 는 재령(일), Q(t)는 재령 t에서의 단열온도상승량(°C), Q<sub>∞</sub>는 종말단열온도 상승량, r 은 온도상승속도를 제어하는 계수이다.

#### 6. 분할타설높이 및 온도해석

콘크리트의 타설은 공사작업일정, 기계도입일정과 공기 등을 고려하고 기존의 온도해석한 결과를 참고하여 그림 2에 도시한 바와 같이 4개층으로 나누었다. 이때 주된 고려사항은 콘크리트의 내외부 온도차이므로 온도해석을 통하여 내외부 온도차를 계산하고, 계산된 내외부 온도차가 30°C 내에 들어오도록 분할타설높이를 결정하였다.

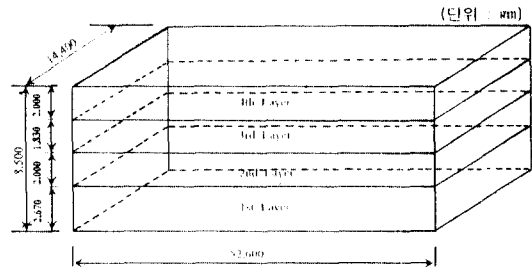


그림 2 층별분할타설

콘크리트내의 온도상승에 영향을 미치는 인자들과 실제 현장에서 일어날 수 있는 시공요인들을 최대한 고려하여 온도해석을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 초기재령시에 수화열에 의한 온도균열을 제어할 수 있는 시공방안을 수립하였다. 특히 본 공사는 겨울철인 2월 12일에 타설되었으므로 콘크리트의 타설온도, 거푸집의 종류, 설치방법, 존치기간 및 제거시기 등을 중요한 고려대상으로 선정하였다.

기계기초는 좌우가 대칭이기 때문에 중앙을 중

심으로 좌우대칭의 열흐름형태를 보인다. 따라서 기계기초 1층의 반만을 2차원 평면변형을 요소로 모형화하였으며, 대칭면은 열흐름이 존재하지 않은 단열면으로 가정하였다. 현장의 대기온도는 오후 2시에 최고온도 13℃, 새벽 2시에 최저온도 -3℃로 가정하였고 식(2)와 같은 사인함수로 모형화하였다.

$$T = 8.0\sin\left\{\frac{\pi(16+t)}{12}\right\} + 5.0 \quad (2)$$

기계기초의 온도해석에 사용된 콘크리트와 지반의 열특성치는 표 2 에, 거푸집 제거시기와 표면부 및 측면부의 열전달율은 표 3에 각각 나타내었다. 온도해석에 고려된 해석기간은 콘크리트 타설 시점인 오전 9시부터 시작하여 거푸집 제거후인 400시간(약 16.6일) 까지이며, 본 온도해석에 사용된 프로그램은 범용유한요소 프로그램인 Diana 이다.

표 2 기계기초 콘크리트와 지반의 열특성

	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	열전도율 (kcal/mh℃)	비열 (kcal/kg℃)	열용량 (kcal/m <sup>3</sup> ℃)
콘크리트	2400	2.3	0.27	648
지 반	1600	1.3	0.45	720

표 3 기계기초 콘크리트의 열전달율

거푸집 제거시기 (일)	상부의 열전달율 (kcal/m <sup>2</sup> h℃)	측면의 열전달율 (kcal/m <sup>2</sup> h℃)
12	3.5	3.5

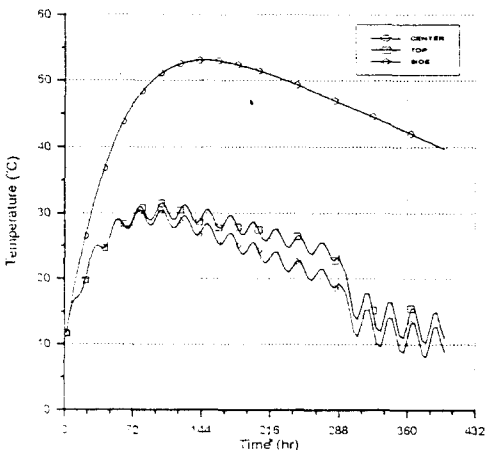


그림 3 계산된 온도이력곡선

그림 3 에는 전술한 해석조건에 대한 기계기초 중심부, 표면부와 측면부의 온도이력을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 중심부의 최대상승온도는 52.5℃까지 도달할 것으로 내외부의 최대 온도차는 30℃를 넘지 않을 것으로 예측되었다.

## 7. 양생방안

온도균열의 주된 요인이 되는 콘크리트의 내외부 온도차를 최소화하기 위하여 단열효과가 큰 거푸집을 사용하였다. 즉 그림 4에 도시한 바와 같이 거푸집 내면에 단열재를 부착하고 외면은 목재합판으로 감싸서 이중단열효과를 지니도록 하였다.

또한 거푸집을 제거할 때에도 급격한 온도하강을 방지하기 위하여 열풍기등과 같은 가열장비를 이용하여 주변온도를 충분히 높여준 상태에서 방수 및 보수작업을 수행하였으며 50mm의 발포 스티로폴을 덧대고 벽면을 마감 처리하였다.

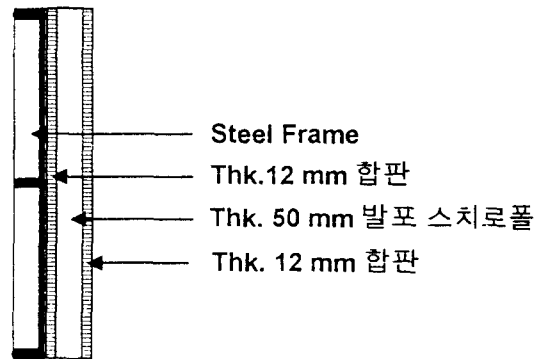


그림 4 이중단열 거푸집

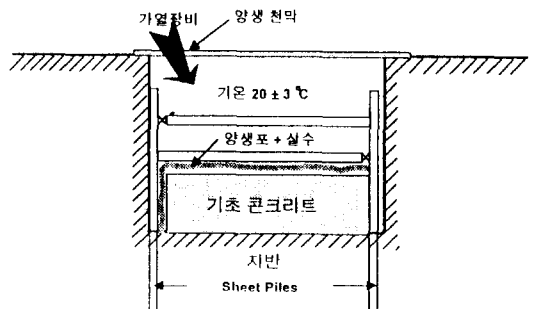


그림 5 보온 및 습윤양생

콘크리트의 양생 또한 온도균열을 방지하기 위하여 그림 5와 같은 보온 및 습윤상태를 12일간 지속하였다.

### 8. 콘크리트 타설

그림 2에 도시한 1층에 타설된 콘크리트의 물량은 총 2022m<sup>3</sup>이며, 콘크리트 타설은 2대의 펌프카, 12대의 진동기와 경사슈트 등을 이용하여 24시간 동안 타설하였다. 이때 펌프카의 파이프 조작을 용이하게 하기 위하여 구석부터 타설하여 소요두께를 한꺼번에 만들게 하였으며, 타설중 특기할 사항은 강섬유가 제대로 분산되지 않는 강섬유 뭉치 (steel fiber ball) 가 발생하여 펌프카의 파이프를 막히게 하는 경우가 종종 발생하였다. 사진 1에는 콘크리트의 타설광경을 나타내었다.

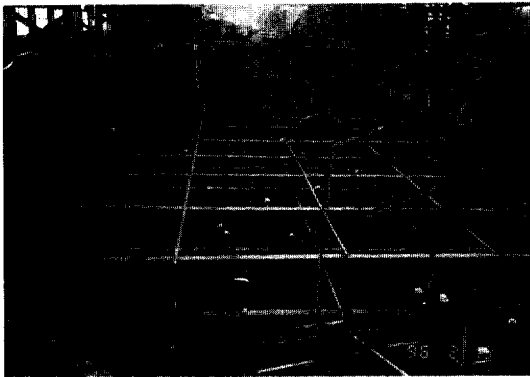


사진 1 콘크리트의 타설광경

### 9. 온도계측 및 관리

기계기초의 온도관리를 위하여 온도계이치를 매립하고 온도계측을 수행하였다. 그림 6에는 1층 타설부분에 매립된 온도계이치의 매립위치, 사진 2에는 매립된 온도계이치를, 사진 3에는 측정장비를 각각 나타내었으며, 대기온도를 포함하여 총 9개소의 온도를 매 30분마다 자동으로 측정하였다.

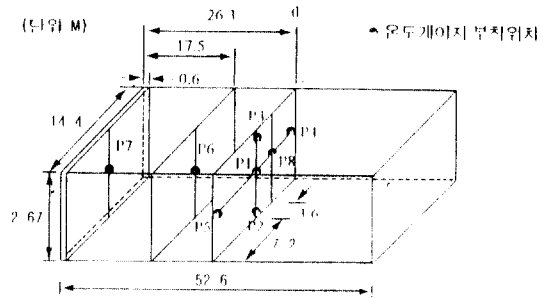


그림 6 온도계이치의 매립위치

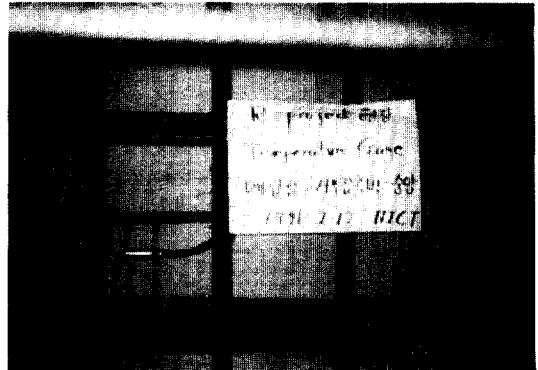


사진 2 매립된 온도계이치

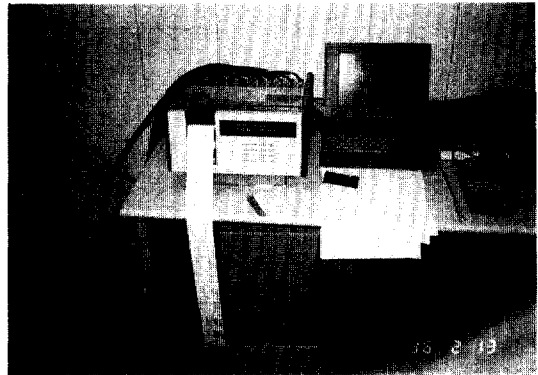



사진 3 온도측정장비

표면부, 중심부와 측면부에서 측정된 온도를 그림 7에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 표면부의 최대온도는 66℃ 까지 상승하였으며, 표면부와 중심부의 최대 온도차이는 약 30℃였다. 온도해석을 통하여 예측된 최대 상승온도는 52.5℃, 내외부의 최대 온도차는 30℃로 측정된 최대 상승온

도는 온도해석치에 의한 상승온도와 다소의 차이를 보이고 있다. 이는 콘크리트를 타설했던 2월 12일이 겨울철 날씨치고는 너무 더운 20℃까지 올라 온도해석시 가정한 대기온도 5℃와의 차이때문인 것으로 판단된다. 10일간 계속적으로 온도측정을 수행하면서 콘크리트의 내외부 온도차이가 30℃를 유지하도록 온도관리를 수행하였다.

12일 이후 거푸집을 제거하고 기계기초 주위를 보행하면서 균열을 조사한 결과, 수화열에 의한 온도균열은 발견되지 않았다.

## 10. 결 론

본 기계기초 매스콘크리트는 전술한 온도제어 과정을 통하여 완벽한 시공을 할 수 있었다. 따라서 매스콘크리트의 온도균열을 제어할 수 있는 시공방법으로 추천한다. 또한 매스 콘크리트의 내외부 온도차를 30℃이내로 제어하고 충분한 양생관리를 병행하면 수화열에 의한 콘크리트의 균열을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 

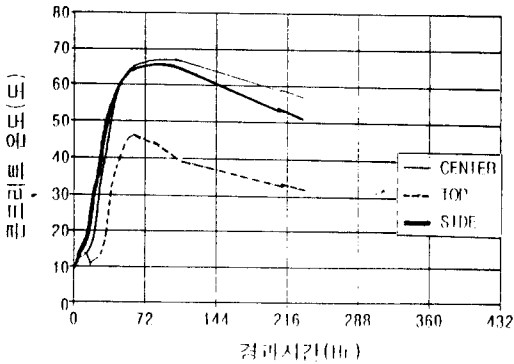


그림 7 측정된 온도이력곡선