

# 콘크리트 지하차도 시공 과정에 따른 균열 발생 분석

## Numerical Analysis of Cracking in Concrete Underpass Structures Due to Construction Steps

황성재\* · 김동련\*\* · 안주옥\*\*\* · 김성민\*\*\*\*

Hwang, Seong Jae · Kim, Dong Ryun · An, Zu Og · Kim, Seong-Min

### 1. 서 론

콘크리트 지하차도와 같이 부피가 큰 박스형 콘크리트 구조물은 매스콘크리트로 구분될 수 있기 때문에 시공 초기에 수화열에 의한 온도 균열이 발생할 수 있다. 이러한 초기 균열은 콘크리트 지하차도 구조물의 성능 저하를 가져오게 되며 궁극적으로는 구조물의 조기 파손을 유도하게 된다. 따라서 본 논문은 콘크리트 지하차도의 시공단계 및 재료 특성에 따라 수화열과 연관된 균열의 발생 여부를 분석하였다. 이를 위해 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였으며 열전달 이론을 도입하였다. 구조해석에서는 콘크리트의 재료성질이 시간에 따라 변화하는 특성 및 수화열 발생 특성, 그리고 시공 단계에 따른 구조물의 크기, 외부 환경조건 등을 모두 고려하였으며 시공 단계에 따라 발생하는 열응력을 분석하여 균열 발생 확률이 높을 때는 이를 방지할 수 있는 여러 가지 방법을 고려하여 추가 분석을 수행하였다.

### 2. 수화열 구조해석

콘크리트 박스 형태의 지하차도에 대한 시공 시의 수화열에 의한 응력 분포를 분석하기 위하여 그림 1에 보인 바와 같은 형태의 지하차도를 이용하여 모델링을 수행하였다. 구조해석 모델은 상용유한요소해석 프로그램인 MIDAS (MIDAS IT, 2004)를 이용하여 구성하였으며 모델 및 해석 결과의 정확성을 검증하기 위하여 다른 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2006)를 이용하였다. 그림 2는 단순한 벽체의 내부 중앙부와 외부 표면에서의 수화열에 의한 온도의 변화를 두 가지의 프로그램을 이용하여 해석한 결과를 보여주며 거의 같은 해석 결과가 나오는 것을 알 수 있다.

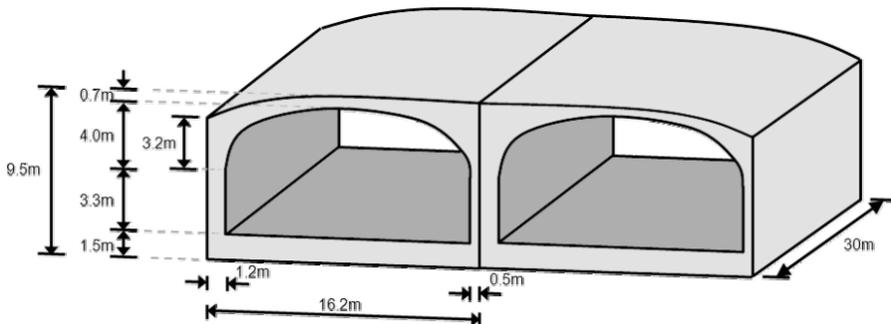


그림 1. 콘크리트 박스형 지하차도

\* 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail: allnok@khu.ac.kr) - 발표자  
\*\* 비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정 졸업(현재 한국종합기술개발공사 근무) · 공학석사(E-mail: right-to-censor@hanmail.net)  
\*\*\* 정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail: zoan@khu.ac.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 경희대학교 토목공학과 부교수·교신저자 · 공학박사(E-mail: seongmin@khu.ac.kr)

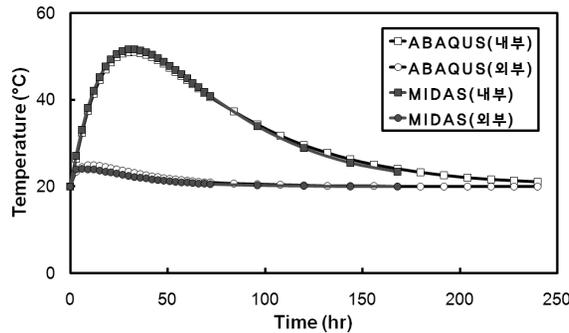


그림 2. 온도이력 해석 결과 비교

### 3. 열응력 발생 특성 분석

본 연구에서는 지하차도의 시공을 여러 단계별로 나누어서 수행하는 것을 가정하여 이러한 시공 시에 균열이 발생할 지에 대하여 구조해석을 수행하였으며 시공을 6단계에 걸쳐 수행한 경우에 대한 분석하였다.

각 시공 단계별로 타설한 콘크리트 구조물의 중앙 내부에서의 시간에 따른 온도 변화를 분석하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 수화열에 의해 콘크리트의 온도가 타설 초기에 급격히 상승하는 것을 알 수 있으며 최대 온도에 다다른 후에 서서히 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 시공 3단계인 내측 벽체의 상부 내부의 온도 변화를 살펴보면 최대 온도 이후에 온도가 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 시공 5단계인 중앙 부분의 지붕을 타설할 때 발생한 수화열이 전달됨에 따라 발생한 현상이다.

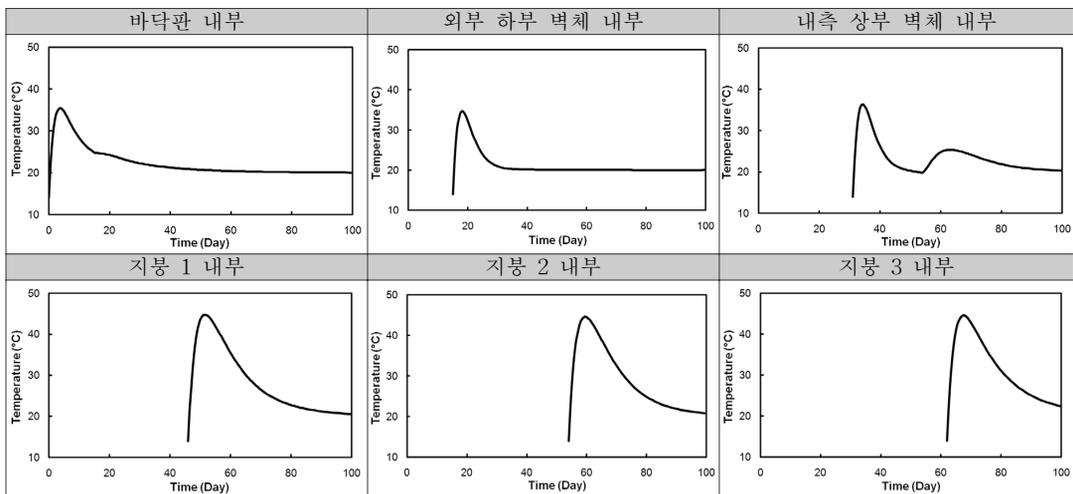


그림 3. 시공 단계별 온도 이력

이러한 온도의 변화는 구조물에 응력을 발생시키게 되며 시공 단계별로 최대 응력이 발생할 때의 응력 분포를 그림 4에 나타내었다. 그림의 응력 분포에서 빨강색으로 갈수록 인장 응력이 큰 부분이며 파랑색으로 갈수록 인장 응력이 작은 부분이다. 이러한 인장 응력이 시간에 따라 변화할 때 동일 시간에서의 콘크리트의 인장강도에 비해 커지게 되면 그곳에서 균열이 발생하게 된다. 따라서 균열의 발생 여부를 파악하기 위하여 각 단계별로 인장 응력이 크게 발생하는 위치를 선정하여 시간에 따른 변화를 조사할 필요가 있다. 균열 조사 위치로는 바닥판의 중앙부 표면, 내측 상하부 벽체의 내부, 지붕의 내부와 표면을 선정하였다.

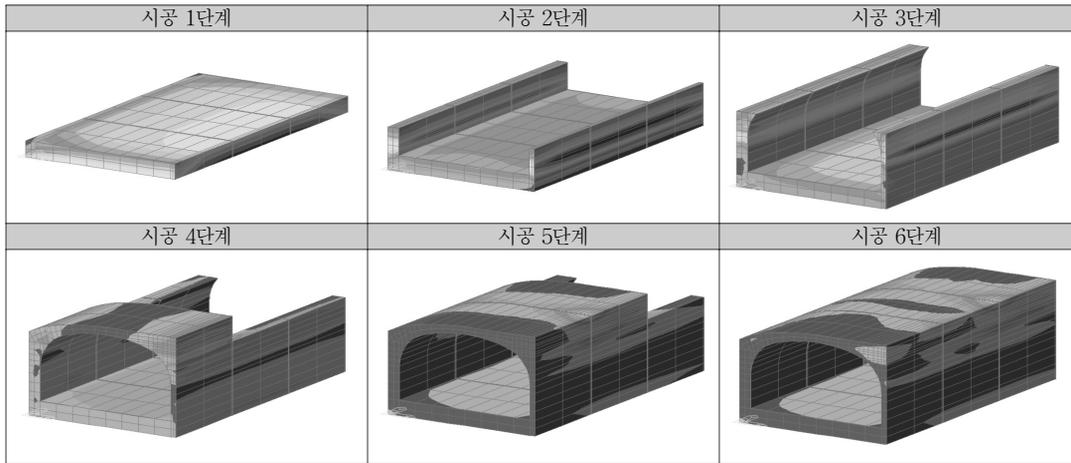


그림 4. 시공 단계별 온도 응력 분포

그림 5는 위에서 선정된 위치에서의 시간의 변화에 따른 인장응력 및 인장강도의 변화를 보여 준다. 응력은 타설 직후에는 모든 경우에서 압축응력의 증가를 보여 주다가 시간이 지남에 따라 인장응력이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 바닥판 및 상하부 벽체에서의 인장응력의 크기는 인장강도에 비해 크게 작은 것을 알 수 있다. 하지만 지붕의 내부는 인장응력이 서서히 증가하여 시간이 많이 지나면 인장강도 근처까지 근접하는 것을 알 수 있다. 지붕의 표면에서는 초기의 인장응력의 증가가 급격하여 초기의 인장강도에 거의 다다르게 되지만 그 후 응력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 해석 결과에서 알 수 있듯이 어느 경우에도 인장응력이 인장강도를 초과하지 않았으므로 이러한 시공 단계에 따라 시공을 하면 균열이 발생할 확률이 작게 된다.

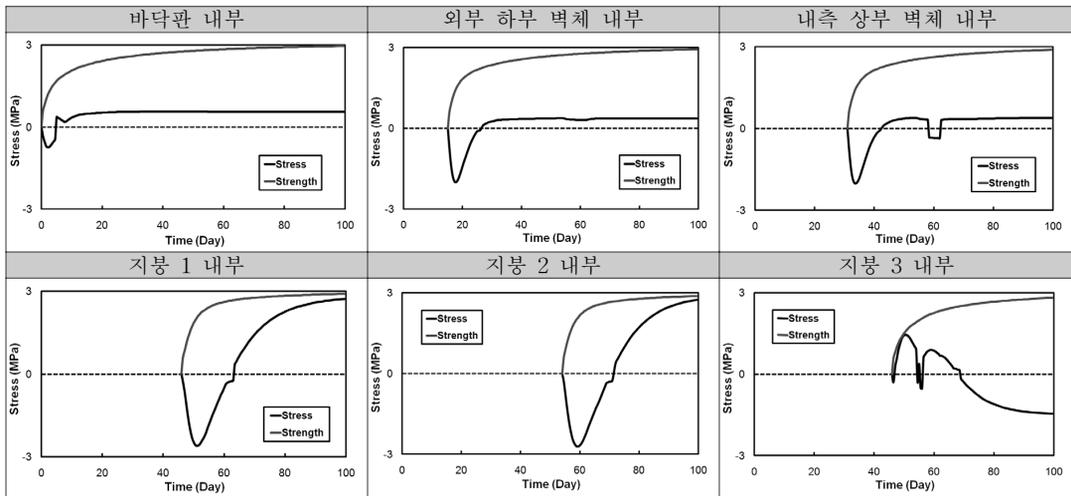


그림 5. 위치별 온도 응력 이력

위에서 보여준 구조해석은 제안한 재료 특성 및 시공 단계에 따라 시공했을 경우 수화열에 의한 균열이 발생하지 않는 경우이다. 이러한 경우 뿐 만 아니라 다음과 같은 여러 가지 다른 경우의 재료 특성 및 시공 단계에 대하여도 구조해석을 수행하여 균열의 발생 여부를 분석하였다.

- Case 1: 시공 단계는 동일하나 플라이애시를 첨가하지 않은 일반 시멘트 사용
- Case 2: 지붕을 3단계가 아닌 2단계로 만 나누어 타설
- Case 3: 벽체 높이를 일괄 타설하는 대신 종방향으로 2단계에 걸쳐 타설하고 지붕도 2단계에 걸쳐 타설

해석 결과는 그림 6에서 보여 준다. 플라이애시를 시멘트에 첨가하여 사용하지 않고 일반 시멘트를 사용하면 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 지붕의 내부에서는 인장응력이 인장강도에 비해 상당히 커지게 되어 균열지수가 약 0.5까지 감소하게 되어 균열 발생 확률이 매우 커지게 된다. 다음은 플라이애시 사용 등 재료 특성은 동일하나 지붕을 3단계에 걸쳐서 타설하지 않고 2단계에 걸쳐 타설하는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 경우에는 지붕과 벽체의 접합부 모서리에서 지붕 타설 초기에 균열이 발생할 확률이 높게 되는 것을 알 수 있다. 또 다른 경우로는 벽체를 상하부로 나누어 타설하지 않고 벽체 높이를 일괄 타설하는 대신 종방향으로 2단계에 걸쳐 타설하고 지붕도 2단계로 나누어 타설하는 경우에 대하여 구조해석을 수행하였으며 이 경우에도 균열이 지붕의 내부에서 발생할 확률이 높은 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 보여준 바와 같이 여러 경우에 대하여 수화열에 대한 응력 분석을 구조해석을 통해 수행함으로써 콘크리트 박스형태의 지하차도 시공 시에 균열을 방지할 수 있도록 적절한 재료를 선택하고 또한 합리적인 시공 과정을 설계할 수 있는 것을 알 수 있다.

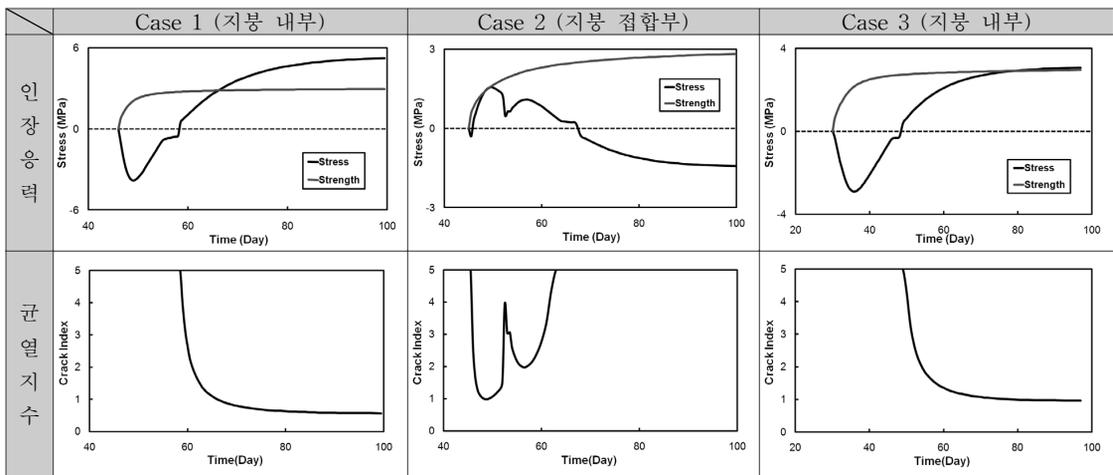


그림 6. 경우에 따른 인장응력 및 균열지수

#### 4. 결론

연구 결과 1회에 타설하는 콘크리트 부재의 부피가 커지면 수화열이 매우 높게 발생할 수 있으며 이에 따라 균열이 발생하게 되므로 이러한 균열을 억제할 수 있도록 설계 및 시공을 하여야 한다. 균열 방지 방법으로는 시공 단계를 적절하게 배치하여 부재가 가급적 매스콘크리트가 되지 않도록 하는 방법과 과도한 수화열의 발생을 방지하도록 시멘트에 첨가제 등을 첨가하여 재료 특성을 바꾸어 시공하는 방법이 사용될 수 있음을 해석을 통해 입증하였다.

#### 참고 문헌

1. ABAQUS (2006). User's Manual Version 6.6, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
2. MIDAS IT (2006). MIDAS/CIVIL Computer Program, MIDAS IT.