



수화열을 고려한 콘크리트 지하차도 적정 시공법 분석

Investigation of Optimal Construction Procedures for Concrete Underpass Structures Considering Heat of Hydration

안 주 옥* 김 성 민** 김 동 련***
An, Zu Og Kim, Seong-Min Kim, Dong Ryun

Abstract

This paper describes the methods to propose the optimal material properties and construction steps that prevent cracks due to the thermal stresses induced by the hydration heat under the construction of the concrete underpass structures. To achieve the goal of this study, the heat transfer theories were employed and the three-dimensional finite element model of the underpass structure was developed and used for the structural analyses. If the volume of the concrete member that is placed at one time is significantly large, the member is assumed to be the mass concrete and is easy to induce cracks. In order to minimize the cracks during the construction, two different methods can be utilized: one is to arrange the construction steps optimally and the other is to change the materials to reduce the probability of the crack occurrence. In this study, the analyses were performed by considering the changes in material properties with time, the characteristics of the hydration heat generation for cements and admixtures, the volume of the concrete placement at one time, and the environmental conditions.

Keywords : concrete, underpass, hydration heat, finite element, crack, thermal stress

요 지

본 연구에서는 콘크리트 지하차도 시공 시 수화열에 의한 열응력 분포 특성을 분석하여 시공 재료와 시공 과정에 따른 균열 발생 여부를 분석하여 설계 시에 균열을 억제할 수 있는 재료 특성과 시공 단계를 제시하는 방법에 대하여 연구하였다. 이러한 분석을 위해 열전달 이론을 도입하여 지하차도의 3차원 유한요소해석 모델을 개발하여 구조해석을 수행하였다. 1회 타설하는 콘크리트 부재의 부피가 지나치게 크면 매스콘크리트가 되기 때문에 수화열에 의한 균열이 발생하기 쉬우며 이러한 균열을 억제할 수 있는 방법으로는 크게 시공 단계를 적절하게 배치하는 것과 또는 이러한 균열을 방지할 수 있도록 재료 특성을 바꾸어 시공하는 것으로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 위해 콘크리트 재료 성질의 시간에 따른 변화 특성, 시멘트 종류 및 첨가제 유무에 따른 수화열 발생 특성, 시공 단계에 따른 구조물의 크기, 외부 환경조건 등을 고려하여 분석을 수행하였다.

핵심용어: 콘크리트, 지하차도, 수화열, 유한요소, 균열, 열응력

* 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수, 교신저자(E-mail: seongmin@khu.ac.kr)
*** 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정 졸업 (현재 한국중합기술개발공사 구조부 근무)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

일반국도 및 고속국도 등 고급 고속화도로의 활발한 건설에 따라 이러한 도로가 서로 교차하는 구간을 지하차도나 고가도로를 이용하여 입체화하는 것이 교통 흐름에 지장을 초래하지 않기 때문에 일반적인 추세가 되었다. 지하차도는 일반적으로 절개지에 콘크리트로 박스형 구조물을 제작한 후 상부를 성토하며, 그 위로 다시 도로 등이 통과하도록 하기 때문에 사용측면에서는 터널과 비슷하나 시공측면에서는 터널과는 완전히 다르다 할 수 있다. 이와 같은 지하차도 등의 콘크리트 박스형 구조물은 점점 대형화 되어 가고 있어 매스콘크리트로 구분되어지고 있으며 고강도, 고내구성을 필요로 하기 때문에 콘크리트 타설 초기에 수화열에 의한 온도균열이 발생하여 구조물의 성능을 저하시키지 않도록 설계 및 시공 시에 특별한 주의를 기울여야 하는 실정이다.

콘크리트는 타설 후에 수화 반응에 의해 열이 발생하며 이때 발생한 열은 구조물의 온도를 상승시키게 된다. 일반적으로 온도가 상승하여 최대 온도 근처에서 콘크리트 구조물이 경화를 하게 되며 이때의 온도를 영점응력온도(zero stress temperature)라 부른다(Schindler, 2002; Nam et al., 2006). 경화된 고체 콘크리트는 온도가 감소하게 되면 이러한 영점응력온도와 현재의 온도와의 차이에 의해 수축을 하게 되며 이러한 수축이 구속조건에 의해 자유롭게 일어나지 못하게 되면 인장응력이 발생하게 된다. 또한 이러한 영점응력온도는 콘크리트 부재의 외부와 내부에서도 서로 달라지기 때문에 비록 외부구속이 존재하지 않더라도 내외부의 온도 변화에 의해 응력을 발생시킬 수 있게 된다. 이러한 이유에서 발생된 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 다다르게 되면 균열이 발생하게 된다. 이렇게 시공 초기에 발생한 온도균열은 균열폭이 초기에는 매우 미소해 보일지라도 시간이 경과함에 따라 그 폭이 커지게 되며 따라

서 구조물의 성능, 즉 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 품질을 크게 저하시키게 된다.

본 연구의 목적은 콘크리트 지하차도 등의 박스형 콘크리트 구조물의 시공 시 수화열에 의한 열응력 특성을 분석하는 것이다. 이를 위해 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였으며 열전달 이론을 도입하였다. 지하차도 시공 시 수화열에 의한 응력은 콘크리트 타설을 1회에 어느 정도 규모로 하느냐에 따라 차이를 보이게 된다. 따라서 1회에 과도한 분량의 콘크리트를 타설했을 경우에는 균열이 발생할 수 있게 되므로 시공 시 단계별로 나누어 콘크리트를 타설함으로써 수화열에 의한 균열을 방지할 수 있게 하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 시공 단계에 따라 발생하는 열응력을 분석하여 균열 발생 확률이 높을 때는 이를 방지할 수 있는 여러 가지 방법을 고려하여 추가 분석을 수행하였다. 이러한 구조해석을 위해서 콘크리트의 재료성질이 시간에 따라 변화하는 특성 및 수화열 발생 특성, 그리고 시공 단계에 따른 구조물의 크기, 외부 환경조건 등을 모두 고려하였다.

2. 구조해석 모델

콘크리트 박스 형태의 지하차도에 대한 시공 시의 수화열에 의한 응력 분포를 분석하기 위하여 그림 1에 보인 바와 같은 형태의 지하차도를 이용하여 모델링을 수행하였다. 모델은 지하차도의 좌우 형태가 대칭이므로 한쪽 만 구성하는 대신 이러한 대칭면에서는 외부 대기로 대류가 생기지 않도록 경계조건을 지정하였다. 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 해

석한 결과를 보여주며 거의 같은 해석 결과가 나오는 것을 알 수 있다.

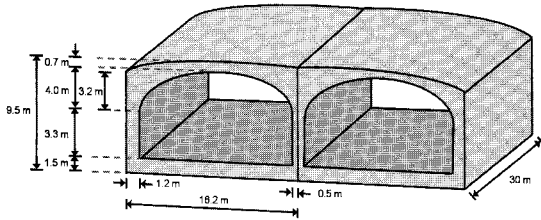


그림 1. 콘크리트 박스형 지하차도

본 해석에서 사용한 조건 및 재료 특성은 표 1에 나타내었다. 콘크리트의 단열온도상승 특성은 식(1)과 같이 지수형태의 함수로 나타내며 표 1에 나타난 단열온도 상승량과 반응속도에 따라 단열온도상승 특성을 표현하게 된다(한국표준협회, 2005).

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

여기서 Q_{∞} 는 최종 단열 온도 상승량(℃)이며 r 은 온도 상승 속도에 관한 계수이며 t 는 재령시간(일)이며 $Q(t)$ 는 재령 t 일에서의 단열 온도 상승량(℃)을 나타낸다. 본 연구에서는 우리나라의 콘크리트 시방서에서 제시하는 콘크리트의 단열온도상승 곡선을 구하기 위한 계수의 표준값을 사용하였다(한국콘크리트학회, 2003).

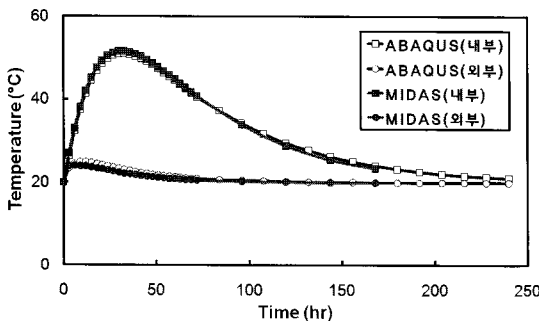


그림 2. 온도이력 해석 결과 비교

단열온도상승곡선을 구하게 되면 구조해석 시에 이를 이용하여 콘크리트 구조물에 수화열에 의한 열

표 1. 해석에 사용된 재료 특성

해석조건 및 재료특성		입력값	
타설시 외기온도(℃)		20	
타설시 콘크리트온도(℃)		14(프리쿨링)	
콘크리트 설계기준강도(MPa)		30	
콘크리트 탄성계수(MPa)		25299	
콘크리트 인장강도(MPa)		2.89	
포아송비		0.167	
시멘트 종류		삼성분계시멘트+한일시멘트+플라이애시20%	
단열온도상승량 - Q_{∞} (℃)		39.97	
반응속도계수-r		0.413	
콘크리트 열적특성	밀도(kg/m ³)	2650	
	열전도율(kcal/m·h·℃)	2.6	
	비열(kcal/kg·℃)	0.18	
	열팽창계수(/℃)	5.56e-6	
	대류계수-외기(kcal/m ² ·h·℃)	12	
	대류계수-철제거푸집(kcal/m ² ·h·℃)	12	
지반특성	탄성계수(MPa)	55000	
	포아송비	0.2	
	단위중량(t/m ³)	2.65	
	열전도율(kcal/m·h·℃)	2.6	
		비열(kcal/kg·℃)	0.18

하중을 가할 수 있게 된다. 콘크리트 부재의 내외부에 일정하게 가해지는 등분포 열하중의 크기는 콘크리트의 비열과 밀도 그리고 고려하는 시간에서의 단열온도상승곡선의 기울기를 곱하여 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{열하중} = \text{콘크리트비열} \times \text{밀도} \times \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

3. 열응력 발생 특성 분석

본 연구에서는 지하차도의 시공을 여러 단계별로 나누어서 수행하는 것을 가정하여 이러한 시공 시에 균열이 발생할 지에 대하여 구조해석을 수행하였으

며 우선 시공을 6단계에 걸쳐 수행한 경우에 대한 해석 결과에 대하여 설명한다. 시공 단계는 그림 3에서 보여주는 바와 같이 먼저 바닥판 전체를 타설한 후 15일간 양생을 한다. 그리고 벽체를 상하부로 나누어서 타설하는 것을 목표로 하여 우선 하부의 벽체를 종방향 전체 길이에 걸쳐 타설하고 16일의 양생 기간을 거치게 한 후 상부 벽체를 타설한다. 그 후 다시 15일 간의 양생 후에 지붕을 타설한다. 지붕은 3단계에 걸쳐 분리 타설을 하며 각각의 타설 후에 8일 간의 양생 기간을 가지도록 하여 시공을 수행한다.

각 시공 단계별로 타설한 콘크리트 구조물의 중앙 내부에서의 시간에 따른 온도 변화를 분석하여 그림

4에 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.

이러한 온도의 변화는 구조물에 응력을 발생시키게 되며 시공 단계별로 최대 응력이 발생할 때의 응력 분포를 그림 5에 나타내었다. 그림의 응력 분포에

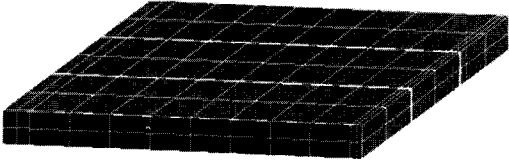
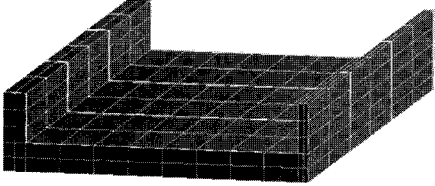
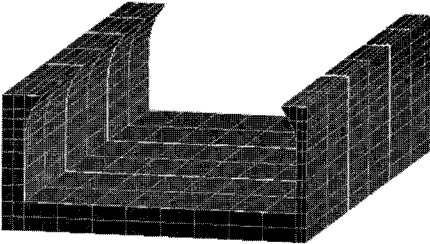
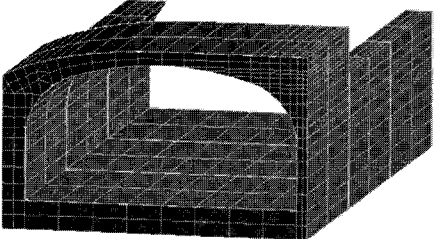
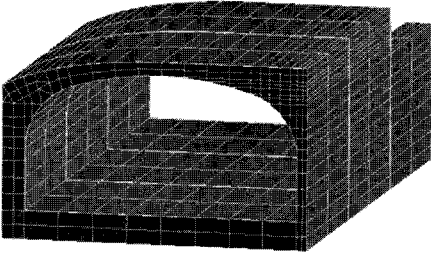
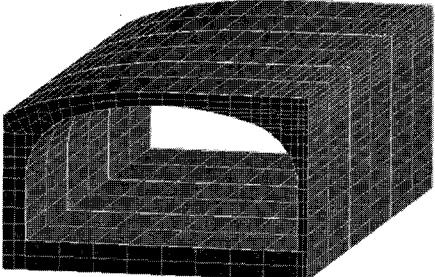
<p>시공 1단계 (바닥판 30m)</p> 	<p>시공 2단계 (시공1+벽체 하부 30m)</p> 
<p>시공 3단계 (시공2+벽체 상부 30m)</p> 	<p>시공 4단계 (시공3+지붕 10m)</p> 
<p>시공 5단계 (시공4+지붕 10m)</p> 	<p>시공 6단계 (시공5+지붕 10m)</p> 

그림 3. 시공 단계에 따른 모델링

서 붉은색으로 갈수록 인장 응력이 큰 부분이며 푸른색으로 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 6은 위에서 선정한 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 인장

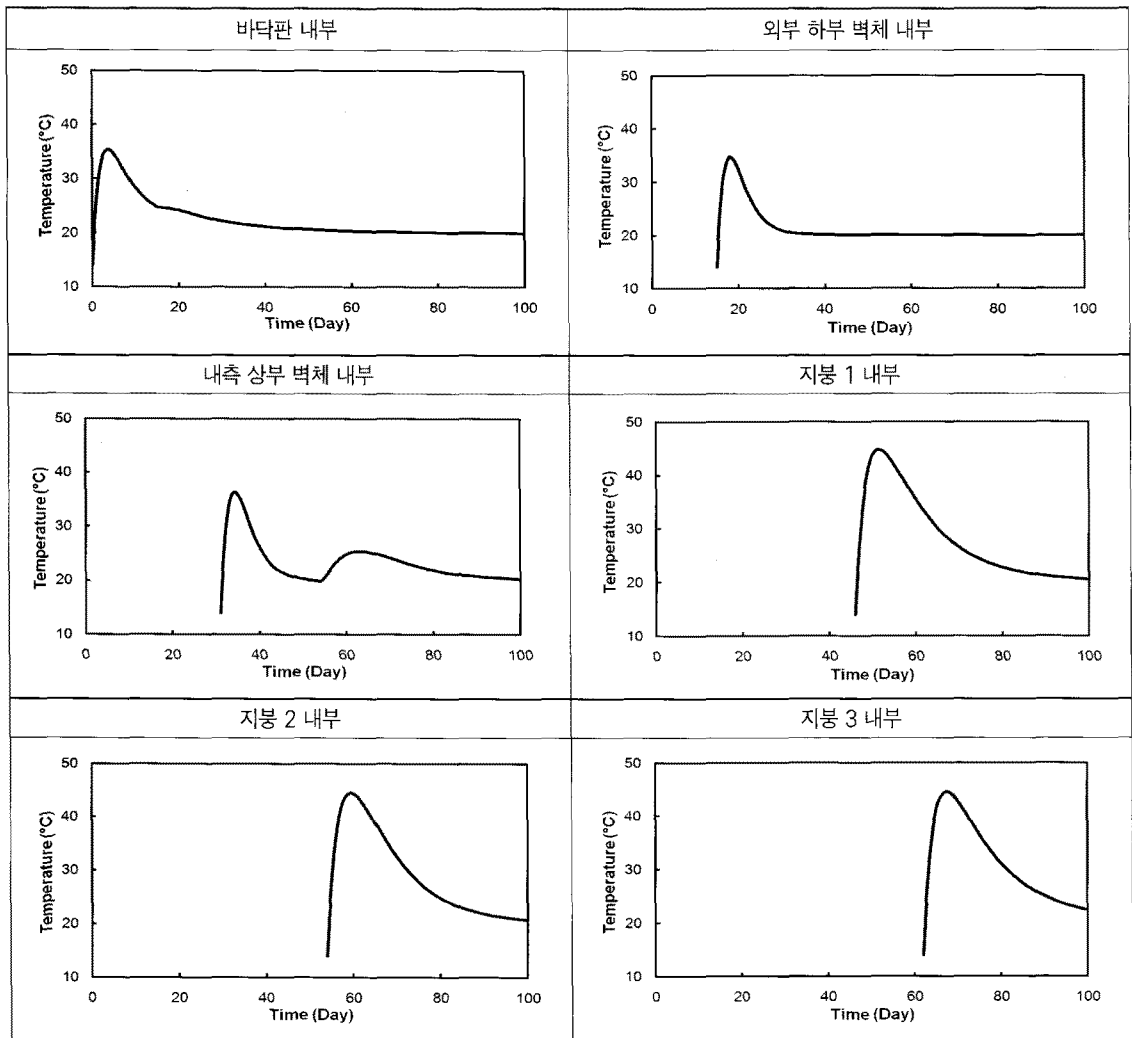


그림 4. 시공 단계별 온도 이력

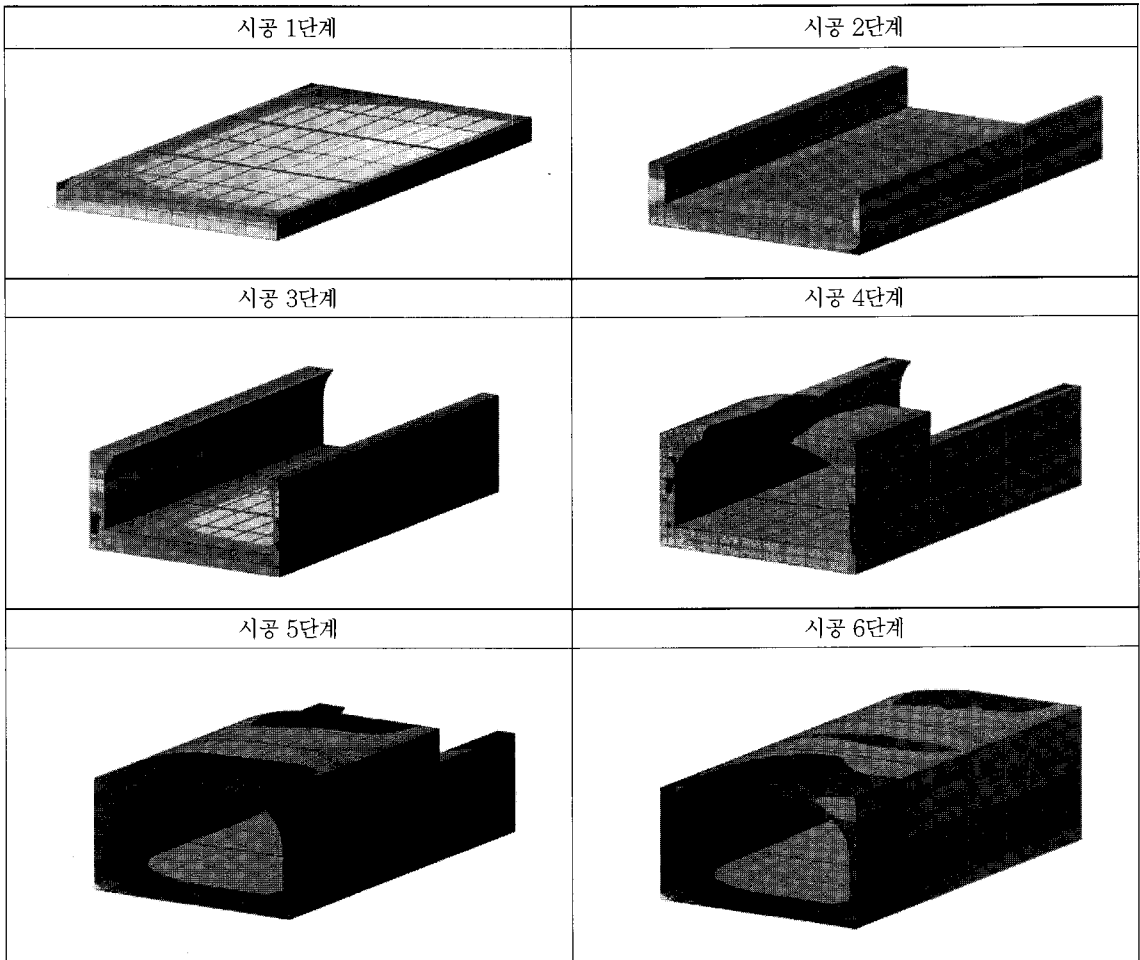


그림 5. 시공 단계별 온도 응력 분포

강도에 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.

균열의 발생 확률 여부를 보다 세밀하게 분석하기 위하여 지하차도 지붕의 내부와 표면에 대하여 온도 균열지수가 시간에 따라 변화하는 양상을 그림 7에 나타내었다. 온도균열지수는 식(3)에서와 같이 인장강도와 최대인장응력과의 비를 나타내는 지수이며 온도균열지수가 1보다 작으면 균열이 발생할 확률이 높

은 것이며 온도균열지수의 값이 클수록 균열이 발생하기 어려운 것을 의미한다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (3)$$

여기서, $f_{sp}(t)$ 는 재령 t 일에서의 콘크리트 인장강도를 나타내며, $f_t(t)$ 는 재령 t 일에서 수화열에 의해 발생한 부재의 온도 인장응력의 최대값을 나타낸다. 이미 언급한 바와 같이 그림에 보인 두 경우는 모두 온도균열지수가 1보다 크므로 균열이 발생하지 않을 것으로 분석된다.

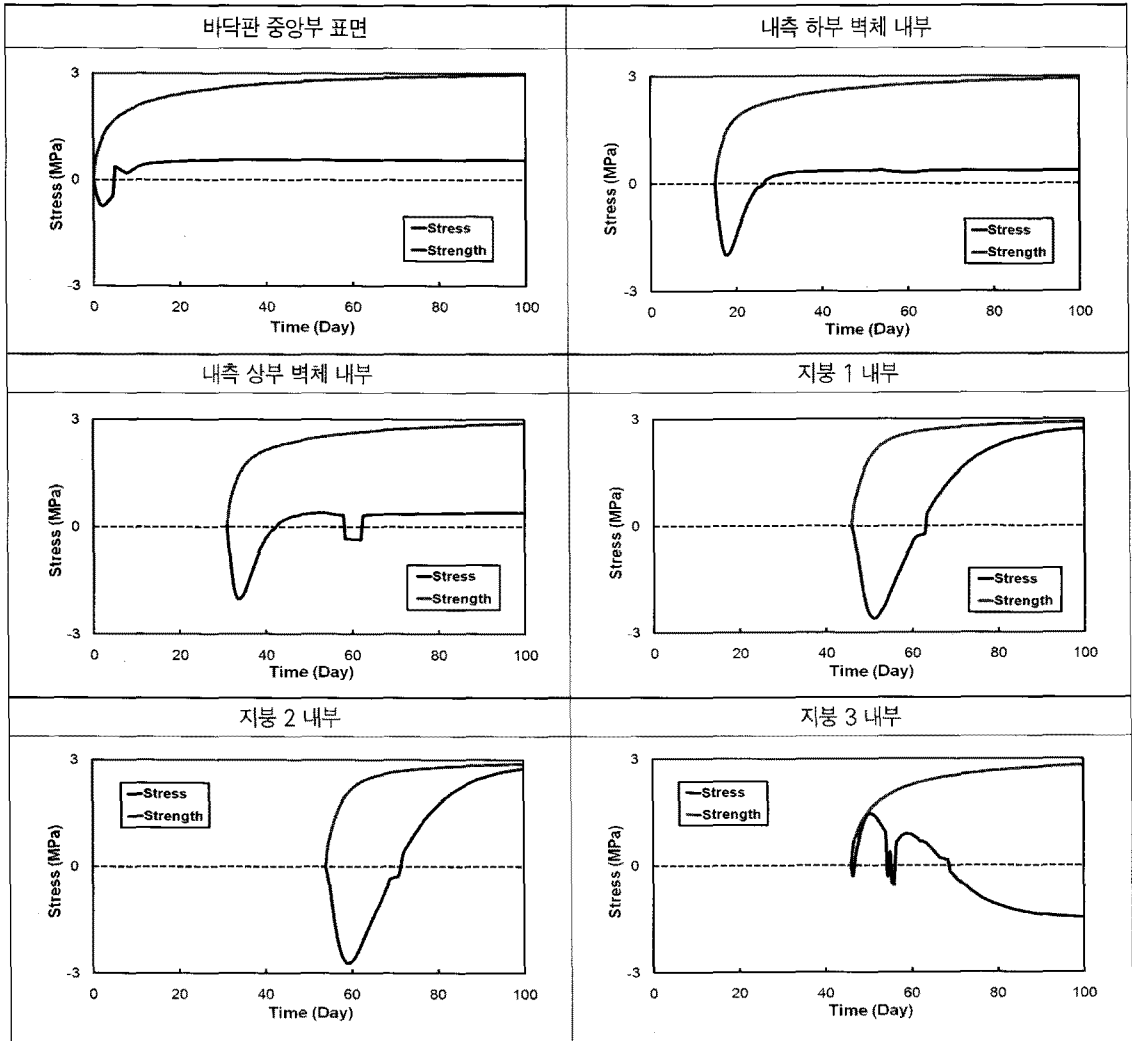


그림 6. 위치별 온도 응력 이력

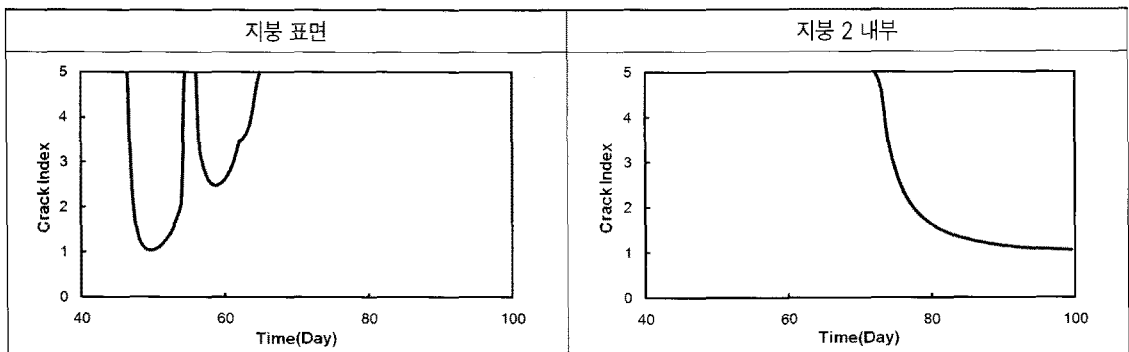


그림 7. 온도균열지수

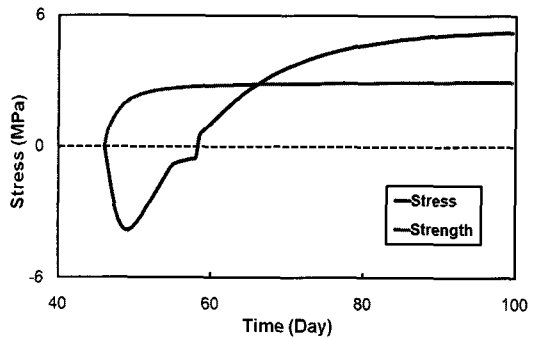
4. 조건에 따른 열응력 비교 분석

위에서 분석한 구조해석의 경우는 제안한 재료 특성 및 시공 단계에 따라 시공했을 때 수화열에 의한 균열이 발생하지 않는 경우이다. 따라서 위의 조건과 다른 재료 특성 및 시공 단계를 고려한 조건으로 시공할 경우에 대해서도 구조해석을 수행하여 조건에 따른 열응력 및 균열 발생여부의 차이에 대하여 비교 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지의 서로 다른 조건을 고려하였다.

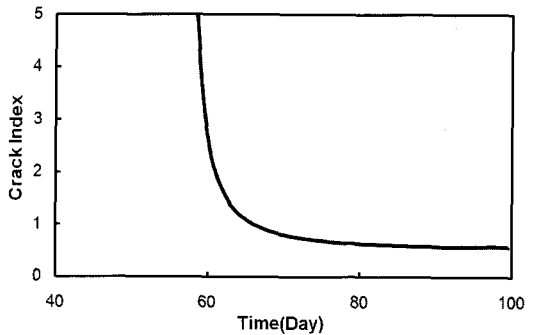
- Case 1: 시공 단계는 동일하나 플라이애시를 첨가하지 않은 일반 시멘트 사용
- Case 2: 지붕을 3단계가 아닌 2단계로 만 나누어 타설
- Case 3: 벽체 높이를 일괄 타설하는 대신 종방향으로 2단계에 걸쳐 타설하고 지붕도 2단계에 걸쳐 타설

우선 앞에서 보여준 경우와 일치하는 시공 단계를 거치지만 시멘트에 플라이애시 등을 섞지 않은 일반 시멘트를 사용했을 경우에 대하여 구조해석을 수행하였다. 일반 시멘트를 사용할 경우에는 단열온도 상승량을 54.73도 그리고 반응 속도 계수는 0.98을 적용하였다. 해석 결과는 표 2와 그림 8에서 보여 준다. 플라이애시를 시멘트에 첨가하여 사용하지 않고 일반 시멘트를 사용하면 표 2에 나타난 바와 같이 바닥판, 상부 벽체, 지붕에서 모두 온도균열지수가 1보다 작게 되어 하부 벽체를 제외하고는 모든 타설 시

에 균열이 발생하게 될 것으로 예상된다. 특히 그림 8에서 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.



(a) 인장응력



(b) 균열지수

그림 8. Case 1의 지붕 내부에서의 인장응력 및 균열지수

다음의 경우는 플라이애시 사용 등 재료 특성은 동일하나 지붕을 3단계에 걸쳐서 타설하지 않고 2단계에 걸쳐 타설하는 경우에 대한 해석을 수행하였다.

표 2. Case 1: 일반시멘트 사용

Case 1 (일반시멘트 - 14℃ 프리쿨링)				
타설	타설 길이	크랙발생 여부	균열 위치	균열지수
바닥판	30m	Yes	바닥판 내부	0.802
벽체 하부 (높이2.6m)	30m	No	-	-
벽체 상부 (높이3.0m)	30m	Yes	벽체 내부	0.784
지붕	10m+10m+10m	Yes	지붕 내부	0.565

표 3. Case 2: 지붕 2단계 타설

Case 2 (플라이애쉬 - 14℃ 프리쿨링)				
타설	타설 길이	크랙발생 여부	균열 위치	균열지수
바닥판	30m	No	-	-
벽체 하부 (높이2.6m)	30m	No	-	-
벽체 상부 (높이3.0m)	30m	No	-	-
지붕	15m+15m	Yes	지붕접합부모서리	0.991

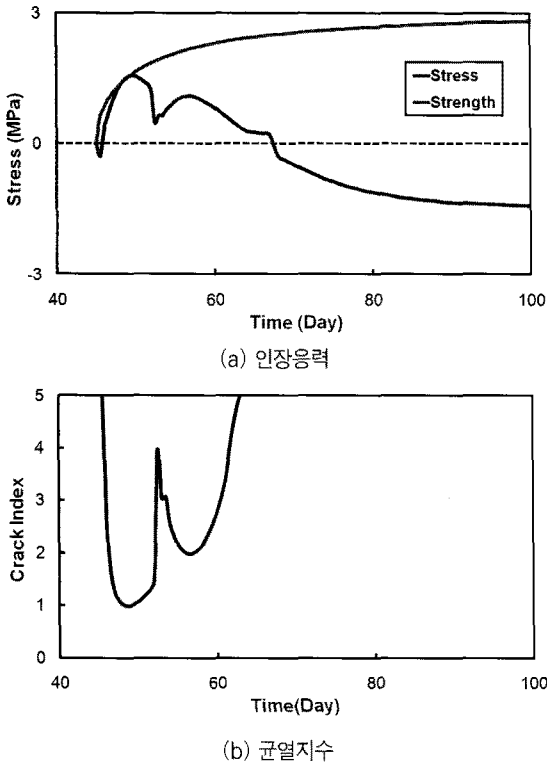


그림 9. Case 2의 지붕 접합부 모서리에서의 인장응력 및 균열 지수

표 3과 그림 9에서 볼 수 있듯이 이 경우에는 지붕과 벽체의 접합부 모서리에서 지붕 타설 초기에 인장응력이 인장강도에 다다르게 되어 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 결과

표 4. Case 3: 종방향으로 2단계에 걸쳐 벽체 및 지붕 타설

Case 3 (플라이애쉬 - 14℃ 프리쿨링)				
타설	타설 길이	크랙발생 여부	균열 위치	균열지수
바닥판	30m	No	-	-
벽체 (높이 3.3m)	15m+15m	No	-	-
지붕	15m+15m	Yes	지붕 내부	0.963

를 표 4와 그림 10에 나타내었다. 이 경우에는 타설 후 상당한 시간이 경과한 후에 지붕의 내부에서 콘크리트의 인장응력이 인장강도에 다다르게 되어 균열이 발생할 확률이 높아지는 것을 알 수 있다.

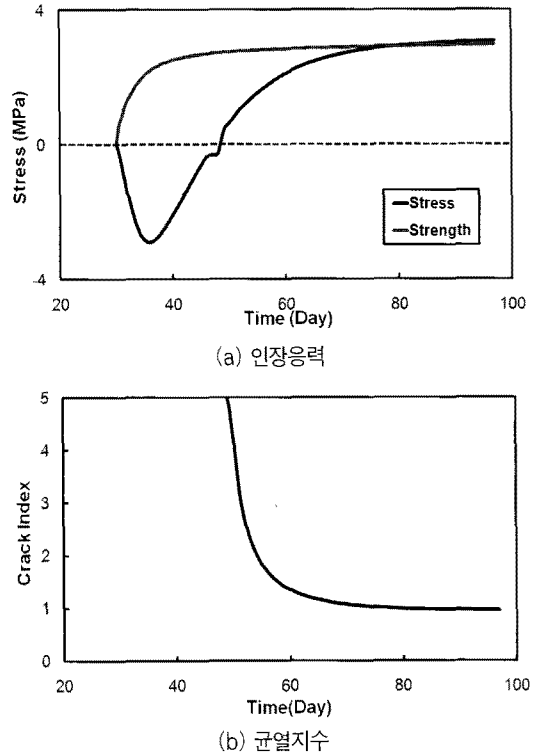


그림 10. Case 3의 지붕 내부에서의 인장응력 및 균열지수

따라서 본 연구 분석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 여러 가지의 다른 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.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 박스 형태의 모양을 가진 지하차도를 시공할 때 콘크리트 타설 후에 발생하는 수화열에 의한 콘크리트 부재의 열응력 특성을 분석



하여 균열을 발생시키지 않는 재료의 선택 또는 시공 단계의 선정을 할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 열전달 이론을 도입하고 가상의 지도차도의 3차원 유한요소해석 모델을 개발하여 구조해석을 수행하였다. 이러한 구조해석에서는 콘크리트의 재료 성질이 시간에 따라 변화하는 특성, 시멘트 종류 및 첨가제 유무에 따른 수화열 발생 특성, 시공 단계에 따른 구조물의 크기, 콘크리트 타설 온도, 그리고 외부 환경조건 등을 고려하여 분석을 수행하였다.

본 연구 결과 1회에 타설하는 콘크리트 부재의 부피가 커지면 매스콘크리트가 되기 때문에 수화열이 매우 높게 발생할 수 있으며 이에 의한 균열이 발생하기 쉽게 되므로 이러한 균열을 억제할 수 있도록 설계 및 시공을 하여야 한다. 그러기 위한 방법으로는 크게 시공 단계를 적절하게 배치하여 부재가 가급적 매스콘크리트가 되지 않도록 하는 방법과 또는 수화열의 발생이 크지 않도록 시멘트에 첨가제 등을 첨가하여 균열을 방지할 수 있도록 재료 특성을 바꾸어 시공하는 방법이 있다는 것을 해석을 통해 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 예로 보여준 여러 경우 이외에도 콘크리트 타설 온도의 변경 또는 그늘을 이용하여 외부 대기 기온을 낮추는 방법 등등 여러 가지의 방법을 고려하여 시공 시 균열의 발생을 억제할 수 있는 최적의 설계 및 시공법을 제시하는 것이 지하차도의 장기 공용성에 있어 매우 중요시 된다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

- 한국콘크리트학회 (2003). “콘크리트 표준 시방서”, 건설교통부.
- 한국표준협회 (2005). “KS M 5121, 포틀랜드 시멘트의 수화열 시험 방법”, 한국표준협회.
- ABAQUS (2006). *User's Manual Version 6.6*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
- MIDAS IT (2006). *MIDAS/CIVIL Computer Program*, MIDAS IT.
- Schindler, A. K. (2002). “Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages,” *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin.
- Nam, J. H., Kim, S. M., and Won, M. C. (2006). “Measurement and analysis of early-age concrete strains and stresses: continuously reinforced concrete pavement under environmental loading,” *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No. 1947, National Research Council, pp. 79-90.

접 수 일: 2009. 4. 13

심 사 일: 2009. 4. 16

심사완료일: 2009. 5. 15