

파이프쿨링을 실시한 대형 프리스트레스트 콘크리트 슬래브의 수화열 해석

Numerical analysis of temperature and stress distributions in a prestressed concrete slab with pipe cooling

주영춘* 김은겸** 신치범*** 조규영**** 박용남*****
Ju Young Chun, Kim Eun Kyum, Shin Chee Burm, Cho Kyu Young, Park Yong Nam

Abstract

It was analysed the effect of pipe cooling as a measure to avoid thermal cracks due to the heat of hydration during the curing process of a massive prestressed concrete (PSC) slab. PSC slab has a complex three-dimensional shape of which the maximal and minimal thicknesses of cross-section were 2.8 and 0.95 m, respectively. Steel pipes of which the diameter was 1 inch were employed for cooling. The horizontal and vertical distances between the contiguous pipes were 0.5 and 0.6 m, respectively. One to four layers of cooling pipe were arranged according to the thickness of cross-section. Temperature distribution was calculated by the program developed by the authors, of which the accuracy was verified on a few published papers by the authors. Based on the temperature analysis of the cross-section which had four layers of cooling pipe, the maximum temperature of concrete interior was 54.2°C and the maximum difference between the interior and surface temperatures of concrete was 14.0°C and, thereby, the thermal cracking index was 1.1. Upon the stress analysis, the thermal cracking index was 0.92 and the probability of thermal-crack development was 52%. Therefore, it was expected to make it possible to reduce the probability of thermal-crack development in a massive PSC slab by adopting pipe cooling.

1. 서론

콘크리트 구조물의 대형화 및 시공방법의 발전에 의한 대량 급속 시공의 증가에 의해 시멘트의 수화열에 의한 온도응력이 발생하여 콘크리트 구조물에 균열을 일으키거나 혹은 설계에 있어서 무시할 수 없는 영향을 주는 경우가 빈번히 일어나고 있다.

이러한 현상은 콘크리트 댐 또는 부재치수가 특별히 큰 콘크리트 구조물에서만 일어나는 특유한 것으로 생각하여 왔지만, 사용재료, 시공조건에 따라서는 비교적 치수가 작은 구조물에서도 유해한 균열이 발생하는 사례가 적지 않다.

매스콘크리트로서 다루어야만 하는 구조물의 치수는 구조형식, 사용재료, 시공조건에 따라 각각 달

* 정회원. 서울산업대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원. 서울산업대학교 토목공학과 교수

*** 정회원. 아주대학교 화학공학과 부교수

**** 정회원. 동아건설산업(주) 부장 (인천출장소)

***** 정회원. 인천국제공항공사 과장

라서 일반적으로 정하기 어렵지만, 콘크리트표준시방서에서 규정하고 있는 대체적인 표준으로서 넓이가 넓은 슬래브에서는 두께 80~100 cm 이상, 하단이 구속된 벽에서는 두께 50 cm 이상인 경우로 생각하고 있다. 그러나, 프리스트레스트 콘크리트 구조물 등과 같이 시멘트량이 많은 경우에는 얇은 부재라도 구속조건에 따라서는 매스콘크리트로서 다루어야 한다고 규정하고 있다.

본 연구는 3차원 형상을 가지는 매시브한 PSC 슬래브교에 대하여 콘크리트 시공시 발생되는 수화열에 의한 온도균열 저감을 위해 파이프 쿨링방법을 도입하여, 이들에 대한 온도해석 및 온도응력해석 결과를 정리한 것이다. 해석에는 3차원 온도해석 프로그램을 사용하였으며, 해석 결과에 대한 검토를 실시하여 파이프쿨링을 실시하여 수화열에 의한 온도균열 제어 대책 및 시공계획을 수립하였다.

2. 해석방법 및 콘크리트의 열적특성

2.1 콘크리트의 열적 특성 및 모델의 선정

해석 대상 PSC 슬래브에 사용된 콘크리트의 열적특성치는 표 1에 나타낸 바와 같다.

해석 대상 구조물은 PSC슬래브로서 지간 26.9 m, 폭 17.2m이고, 하면 형상은 지점부에서 두께 2.8m, 지간중앙에서 두께 0.95m인 매시브한 3차원 구조체로 이루어져 있다.

따라서, 한 지간을 한번에 모델링하여 해석을 실시할 경우 요소수가 너무 방대하게 되어 계산 시간이 길어지므로, 본 해석에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 지간방향으로 1블럭을 1.5 m씩 잘라 8개블럭에 대하여 단면형상별로 각각 온도 해석 및 온도응력해석을 실시하였다.

수화열 해석에는 5152개의 요소를 사용하였으며, 쿨링파이프의 수평간격은 50cm, 수직간격은 60cm로 일정하게 배치하였다.

표.1 해석에 사용된 콘크리트의 열적 특성치

콘크리트의 열적 특성		1종 시멘트
단열온도상승 특성치	$K(^\circ\text{C})$	52.6
	$a(h^{-1})$	1.332
밀도	$\rho(kg/m^3)$	2400
열전도율	$k(kcal/m h^\circ\text{C})$	2.1
비열	$C_p(kcal/kg^\circ\text{C})$	0.25

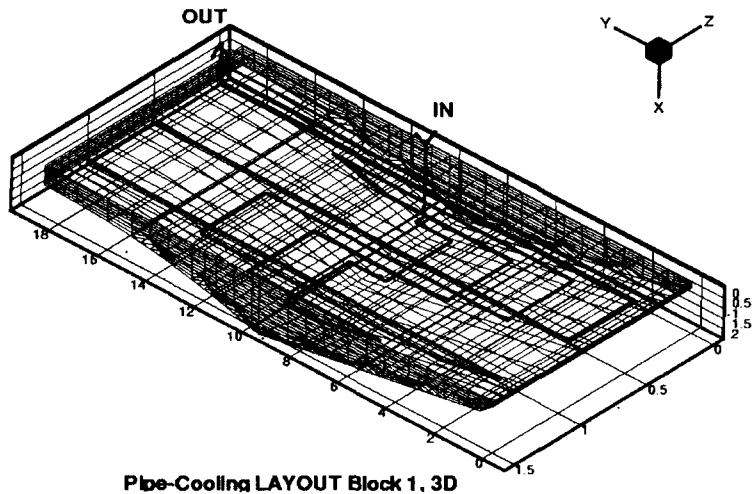


그림 1. PSC 슬래브의 쿨링파이프 Layout 및 유한요소 mesh

2.2 해석조건

외기온도는 콘크리트 치기시기를 8월로 설정하여 그 지역의 평균대기온도 $T_{air}=25.7^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며, 치기시 콘크리트 온도는 $T_i=20^{\circ}\text{C}$, 쿨링수의 수온은 15°C , 쿨링 시간은 48시간으로 설정하여 해석을 실시하였다. 또한 콘크리트 치기가 끝난 후에는 양생시트(두께 5mm)1장을 덮어 10일간 시트양생을 실시하는 것으로 하였다.

3. 콘크리트 온도 및 온도응력해석 결과

3.1 온도해석결과

그림 2는 해석 대상 PSC 슬래브의 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 콘크리트 내부 최고온도는 54.2°C 이고, 외부온도는 46.9°C 이며, 이에 따른 콘크리트 내부와 외부의 최대 온도차는 14.0°C 를 나타내고 있다. 이것을 온도균열지수로 계산하면 1.1이 되며 이에 따른 균열발생확률은 31%가 되어 수화열에 의한 온도균열 가능성이 적을 것으로 예상된다.

그림 3은 PSC 슬래브 두께 2.8m, 쿨링파이프는 4단으로 배치한 곳에서의 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 쿨링파이프 주변의 온도는 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 정도를 나타내고 있으며, 파이프간의 온도는 50°C 정도로서 파이프쿨링에 의한 온도저감효과를 잘 나타내고 있다.

그림 4와 그림 5는 PSC 슬래브 상면과 하면의 온도해석 결과를 3차원적으로 나타낸 것이다. 슬래브 상면의 온도는 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 정도를 나타내고 있으며, 하면의 경우도 거의 상면의 온도분포와 거의 동일한 범위에 있음을 알 수 있다.

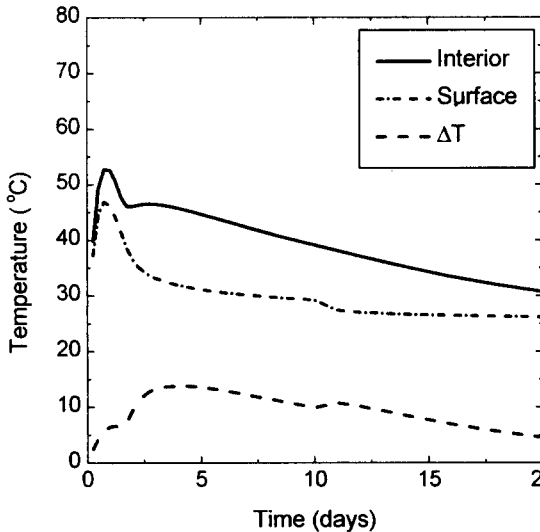


그림 2. 해석대상 PSC 슬래브의 온도해석결과

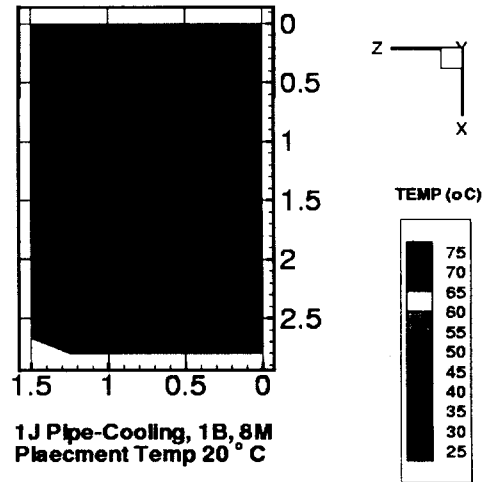


그림 3. 해석대상 PSC 슬래브 단면의 온도분포

3.2 응력해석

그림 6은 PSC 슬래브의 재령의 경과에 따라 수화열에 의한 온도응력 해석결과를 나타낸 것이다. 여기서 실선은 콘크리트의 활렬인장강도이며, 마크표식이 있는 선분은 콘크리트 표면 또는 쿨링파이프간의 온도응력 이력을 나타낸 것이다.

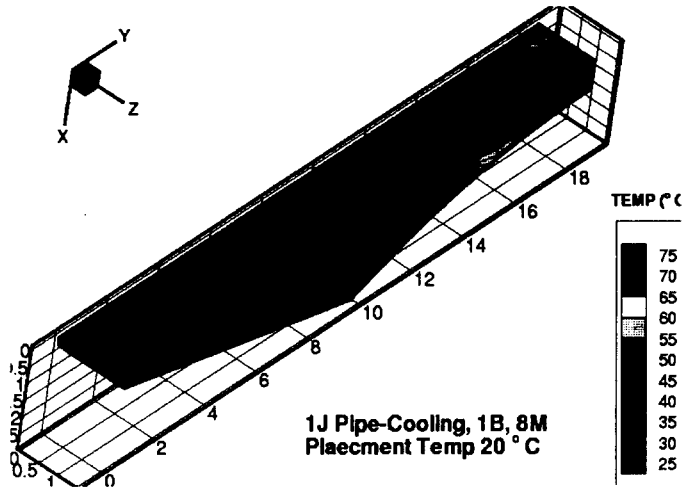


그림 4. 해석대상 PSC 슬래브 상면의 3차원 온도분포

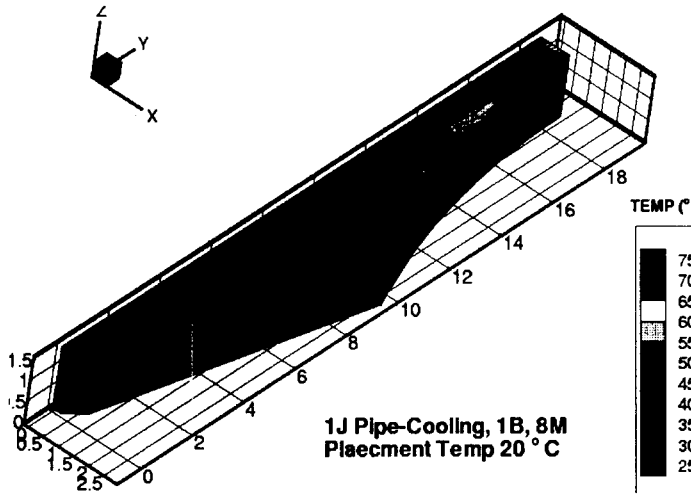


그림 5. 해석대상 PSC 슬래브 하면의 3차원 온도분포

인장응력이 가장 크게 발생되는 시점은 재령 3.5일이며, 이 때의 수화열에 의하여 발생되는 콘크리트의 인장응력은 14.1 kgf/cm^2 로서 콘크리트의 인장파괴강도 13.1 kgf/cm^2 를 다소 초과하고 있다. 재령 3.5일에서의 온도균열지수는 0.92, 균열발생확률은 52%로서 이 콘크리트 구조물의 수화열에 의한 온도균열발생 상태는 유해한 균열 발생을 억제할 수 있는 정도의 범위에 있음을 알 수 있다

그 이외의 재령에서는 전반적으로 콘크리트의 인장응력이 파괴강도 이하에 있어 균열발생 가능성은 훨씬 적어지고 있다.

그림 7은 콘크리트 인장응력이 최대가 되는 시점에서의 쿨링파이프 단면에 대한 온도응력 해석결과를 나타낸 것이고, 그림 8 및 그림 9는 동일한 시점에서의 슬래브 상면과 하면의 온도응력의 분포를

나타낸 것이다.

그림 7에서 쿨링파이프 주변에서는 압축응력이 발생하고 있으며, 단면의 상부와 하부 부근에서는 인장응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 일부 단면에서는 인장응력이 10~15 kgf/cm^2 를 나타내고 있으나, 그 값은 콘크리트의 파괴강도 이하의 값으로서 균열발생 가능성은 크지 않은 것으로 판단된다.

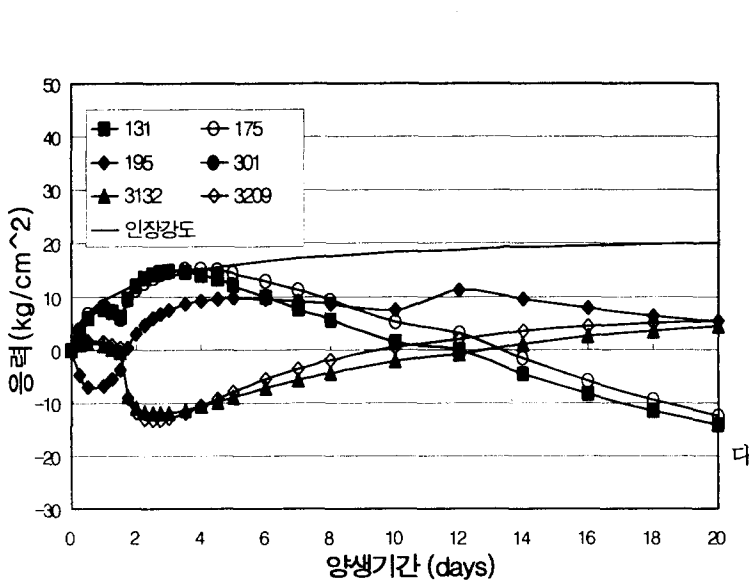


그림 6. 해석대상 PSC 슬래브의 온도응력 해석결과

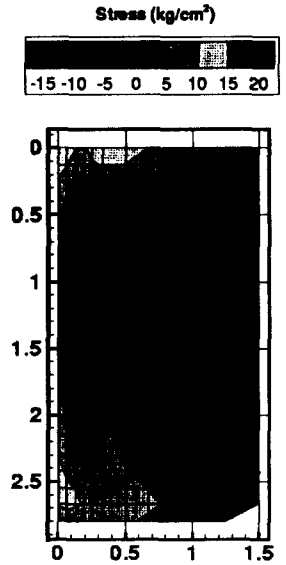


그림 7. 해석대상 PSC 슬래브 단면의 온도응력 해석결과

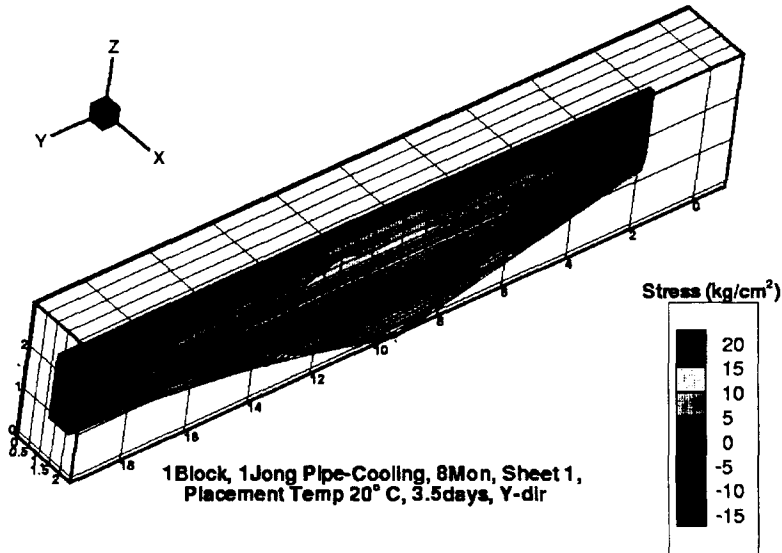


그림 8. 해석대상 PSC 슬래브 상면의 온도분포

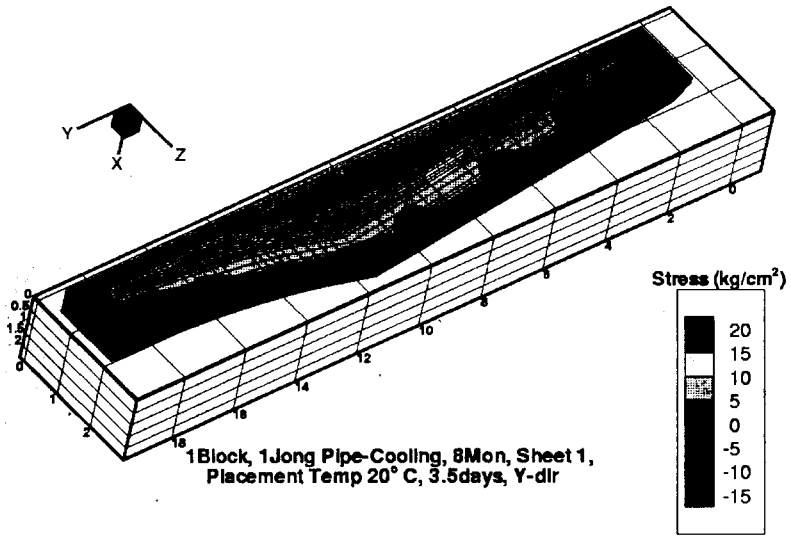


그림 9. 해석대상 PSC 슬래브 하면의 온도분포

참고문헌

1. 김은겸, 김래현, 신치범, 「유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발」, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호 1995, 12. p.p.167~175
2. 일본콘크리트공학협회, 「매스콘크리트 온도응력 연구위원회 보고서」, 1998년 4월
3. 김은겸, 신치범, 주영춘, 「매스콘크리트 교각의 수화열에 의한 온도 및 응력 거동에 대한 3차원 유한요소 해석」, 한국콘크리트학회 1998년 가을학술발표회 논문집, 제 10권 2호 1999. 11. p.p 928~933