

# 개선된 미소면 모델을 적용한 매스콘크리트 기초슬래브의 초기균열거동 해석

## Early Age Cracking Analysis of Massive Concrete Base Slab with Enhanced Microplane Model

이 윤\*            김진근\*\*            우상균\*\*\*            송영철\*\*\*\*            이성태\*\*\*\*\*  
Lee, Yun            Kim, Jin Keun            Woo, Sang Kyun            Song, Young Chul            Yi, Seong Tae

### ABSTRACT

Early age cracking of concrete is a widespread and complicated problem, and diverse applications in practical engineering have focused on this issue. Since massive concrete base slab composes the infrastructure of other concrete structures such as pier, concrete dam, and high rise buildings, early age cracking of that is considered as a crucial problem.

In this study, finite element analysis (FEA) implemented with the age-dependent microplane model was performed. For a massive concrete base slab, cracking initiation and propagation, and deformation variation were investigated with concrete age. In massive concrete slab, autogenous shrinkage increases the risk of early age cracking and it reduces reinforcement effect on control of early age cracking. Gradual crack occurrence is experienced from exterior surface towards interior of the slab in case of combined hydration heat and autogenous shrinkage. FEA implemented with enhanced microplane model successfully simulates the typical cracking patterns due to edge restraint in concrete base slab.

### 1. 서 론

1930년대 대형 댐의 건설로 처음으로 소개되었던 매스콘크리트의 수화열에 의한 초기 온도균열 문제는 그동안의 수많은 연구를 통해 많은 부분이 진전되어 왔다. 구조물의 시공 초기에 발생하는 초기 균열은 향후 구조물의 사용성 및 내구성에 악영향을 미치므로, 이와 같은 초기균열의 예측 및 제어 방안에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되고 있다. 근래에 들어 콘크리트 구조물이 대형화, 고강도화 됨에 따라, 높은 단위시멘트량에 의한 수화열과 자기수축이 시공초기의 콘크리트 균열에 대한 중요 영향인자로 간주되고 있으며, 이를 고려한 균열 검토가 요구되고 있다. 현재까지 콘크리트 구조물에 대한 초기균열 해석은 시공초기에 콘크리트 구조물의 균열을 고려하지 않은 탄성해석이 주를 이루었으며, 인장응력이 인장강도를 초과하면 균열이 발생하는 것으로 간주하였다. 하지만, 콘크리트의 재

\* 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후 연구원

\*\* 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

\*\*\* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

\*\*\*\* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 수석연구원

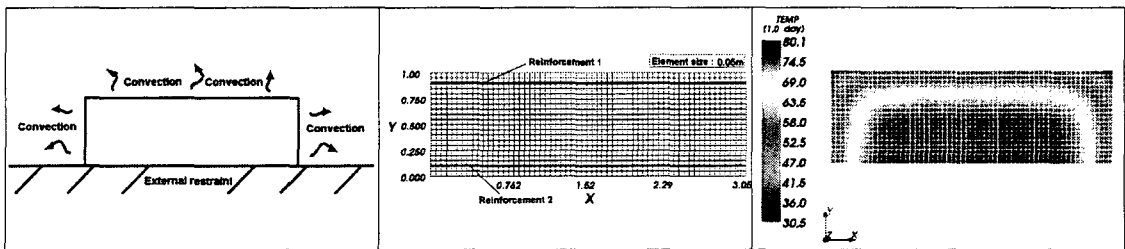
\*\*\*\*\* 정희원, 충청대학교 토목공학과 교수

료 물성값의 불확실성과 탄성해석의 한계로 인하여 이러한 해석결과를 실제 현장에 그대로 적용하기는 무리가 있으며, 보다 정확한 균열의 발생시기와 위치, 위험성 및 진전여부를 평가하기 위해서는 균열을 고려한 비탄성해석을 수행하여야 한다. 특히 원자력발전소나 콘크리트댐, 교각 및 초고층 빌딩의 하부 기초가 되는 매스콘크리트 기초슬래브의 경우, 그 상부구조의 중요도에 따라 균열발생여부가 향후 구조물의 안전성 및 내구성에 매우 중요한 영향을 끼치며, 따라서 이 연구에서는 초기균열의 영향인자인 콘크리트의 수화열과 자기수축을 고려하여 기초슬래브에 대하여 초기균열거동에 대한 수치해석을 수행하였다.

## 2. 매스콘크리트 기초슬래브의 초기균열 해석

### 2.1 해석 개요

수치해석은 KAIST에서 개발된 3차원 유한요소해석프로그램인 CONSA/HS를 기반으로 하여 수행하였다. 이 연구에서는 타설 후 콘크리트의 재령에 따른 재료특성변화를 고려하기 위하여 콘크리트의 수화도를 고려할 수 있도록 개발된 미소면 모델을 기반으로 하여 Fig. 1(a)와 같은 하단이 구속된 기초슬래브의 균열거동을 해석하고자 하였다.[1,2] 해석 대상 구조물은 두께가 1m이고, 길이가 3m인 기초슬래브 구조물이며, 대표단면을 선정하여 1방향 균열을 고려하였다. 균열발생 영향인자로는 수화열과 자기수축을 고려하였으며, Fig. 1(a)와 같이 슬래브의 상부와 측면으로 열이 단면 중심부에서 외기로 방출되는 것으로 간주하였다.



(a) 구속 및 대류조건

(b) 메쉬 모델링

(c) 1일 후 온도 분포

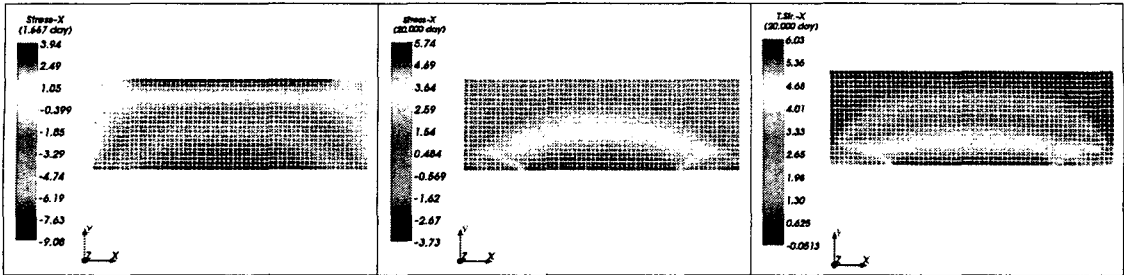
Fig. 1 구조물 해석 조건 및 메쉬 모델링

Fig. 1(c)는 콘크리트 타설 후 1일의 온도분포를 나타내고 있다. 콘크리트 내부에서 수화열에 의해 발생한 열이 슬래브의 상부와 측면으로 방출되므로 슬래브 중앙 내부에서 가장 온도가 높고 모서리 부분에서 온도가 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 기초슬래브 내부의 온도구배는 내부구속 효과를 일으키며, 이에 따라 타설 초기에 슬래브 표면에는 인장응력을 유발하게 된다.

### 2.2 수화열 및 자기수축에 의한 초기균열거동 해석

Fig. 2(a)와 Fig. 3(a)는 각각 무근, 철근콘크리트 슬래브의 타설 후 1.67일의 응력 분포를 보이고 있다. 타설 직후 콘크리트 내부의 온도 증가에 의해 슬래브 표면부에는 인장응력이, 내부에는 압축응력이 발생하며, 표면부의 인장응력은 콘크리트의 강도수준에 따라 슬래브의 표면부 균열을 유발시키는 원인이 될 수 있다. 무근과 철근콘크리트의 경우, 표면부의 최대인장응력은 각각 3.94, 3.72MP이며, 슬

래브 상단의 철근으로 인해 타설 초기의 인장응력이 감소하는 것으로 나타났다.

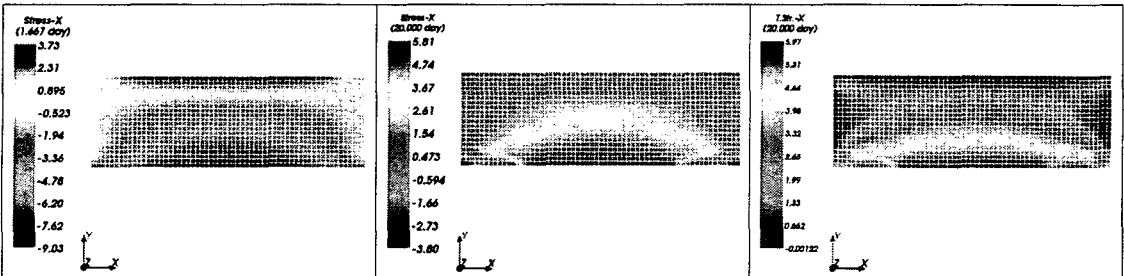


(a) 1.67일 후 X-응력

(b) 20일 후 X-응력

(c) 20일 후 주응력

Fig. 2 무근콘크리트 슬래브의 응력 분포



(a) 1.67일 후 X-응력

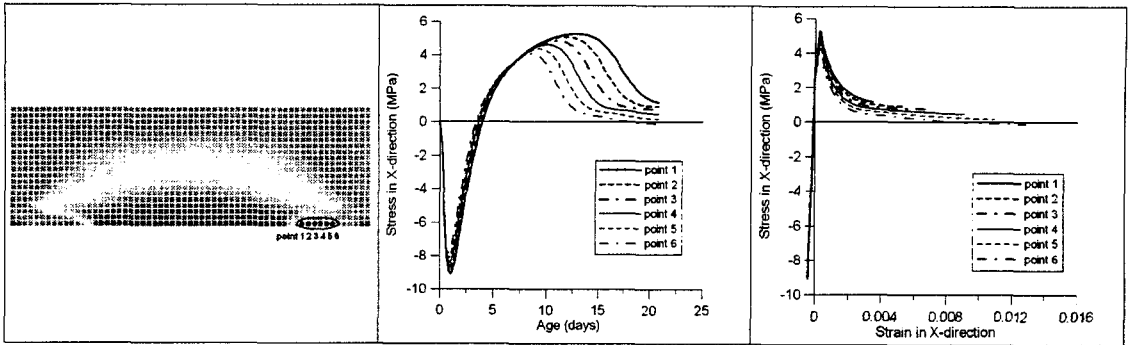
(b) 20일 후 X-응력

(c) 20일 후 주응력

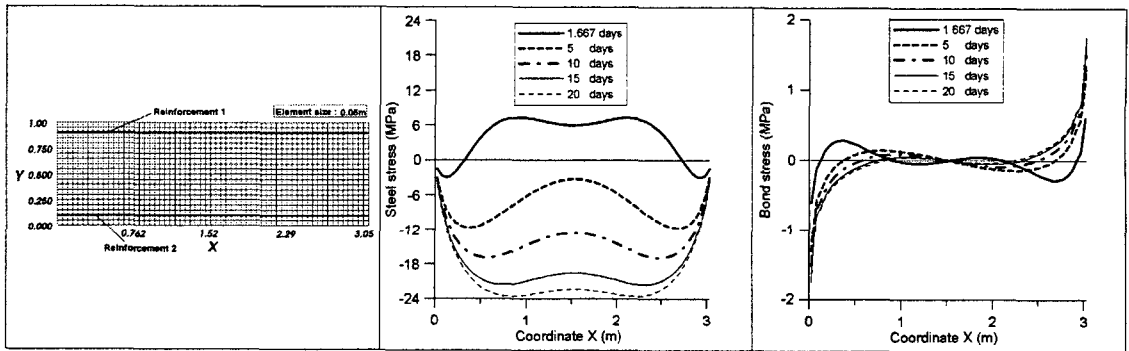
Fig. 3 철근콘크리트 슬래브의 응력 분포

Fig. 2와 Fig. 3의 타설 후 20일의 응력 분포를 보면, 슬래브 하단의 중앙부로부터 모서리에 걸쳐 인장응력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이로부터 타설 후 슬래브 하단부의 모서리부터 하단 구속부의 중앙부에 걸쳐 균열이 발생하여 진전하였음을 알 수 있다. 상부 철근에 의한 인장응력의 감소를 보인 1.67일의 경우와 달리 슬래브 중앙 하부의 인장응력 분포가 무근, 철근콘크리트의 경우에 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이와 같은 결과는 매스콘크리트 슬래브의 타설 후 초기에 나타나는 표면부 균열이 아닌 하단 구속부로부터 시작되는 균열의 경우에 슬래브 하단의 철근이 균열을 유발하는 인장응력의 감소에 도움이 되지 않음을 의미한다.

Fig. 4는 철근콘크리트 슬래브 하단부의 응력 이력을 나타내고 있다. Fig. 4(b)의 각 위치별 응력 이력을 보면, 슬래브 하단의 외측부에서 중앙부로 시간이 경과함에 따라 응력의 감소를 보이고 있으며, 이와 같은 결과는 슬래브 하단의 외측부에서 중앙부로 균열이 진전함을 나타낸다. Fig. 4(c)는 각 위치별 응력과 변형을 관계를 보이며, 각 위치별로 균열이 발생하여 진전함에 따라 인장응력이 감소하면서 변형률이 증가하는 인장연화작용을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5는 슬래브 상단부 철근 1의 응력 분포를 보이고 있다. 타설 직후 발생하는 슬래브 상단의 인장응력을 상단부 철근이 일부 부담하고 있으며, 이와 같은 결과는 타설 직후 슬래브 상단부의 철근에 의한 인장응력의 감소를 나타낸다.



(a) 응력 출력 위치 (b) 시간에 따른 X-응력 이력 (c) X-응력과 변형을 관계  
 Fig. 4 철근콘크리트 슬래브 하단부의 응력 이력



(a) 철근 배치 (b) 철근 응력 분포 (c) 부착 응력 분포

Fig. 5 슬래브 길이 방향에 따른 철근 1의 응력분포

### 3. 결론

이 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 재령을 고려할 수 있도록 개발된 미소면 모델을 적용한 유한요소해석 결과, 하단이 구속된 매스콘크리트 기초슬래브에서 타설 후 나타나는 초기균열거동을 효과적으로 모사하였다.
- 2) 기초슬래브 상단부의 철근은 타설 직후 발생하는 상단 표면부의 인장응력을 감소시키는 효과를 가져왔으나, 재령이 경과한 후 슬래브 하부로부터 발생하는 균열의 감소에는 그 효과가 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 이에 따른 기초슬래브 시공시 균열에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Bazant, Z. P., Caner, F. C, Carol, I., Adley, M. D., and Akers, S. A. "Microplane model M4 for concrete: I: Formulation with work-conjugate deviatoric stress." J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.126, No.9, 2000, pp.944-953.
2. 이윤, 김진근, 이성태, "재령효과를 고려한 미소면 모델을 적용한 매스콘크리트의 균열거동 해석," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 17, No. 2, pp.591-594, 2005.