

# CSL 모델을 이용한 초기재령 콘크리트의 거동 해석

## Modeling of Early Age Concretes Using a CSL Model

지 광 습\* · 정 진 규\*\*

Zi, Goangseup · Jung, Jinkyu

---

### ABSTRACT

The confinement-shear lattice(CSL) model for hardened concretes developed by Cusatis is extended for early age concretes. The uniaxial behaviors available in the literature for 3 to 28 days were simulated by the CSL model to identify the change of the model parameters for various ages. The change with respect to the age was interpolated based on the chemomechanics to develop the extended version of CSL model..

**Keywords:** meso model, confinement-shear lattice model, early age concrete

---

### 1. 서 론

구조물을 해석하는 모델은 스케일(scale)에 따라 구조체 모델, 연속체 모델, 메소 모델 등으로 구분할 수 있다. 이 중 메소 모델은 토목 구조물을 해석하는 모델 중 가장 작은 단위의 해석 모델로서 콘크리트 구조물과 콘크리트 재료 거동의 정밀한 해석에 주로 사용된다. 이 모델은 두 골재와 시멘트 페이스트 사이의 상호작용을 비선형적으로 모델한 것으로, 보다 많은 골재로 구성된 콘크리트 구조물로 확장시켜 모델을 적용한다. 이런 형태로 모델링(modeling)된 콘크리트는 거의 가상의 콘크리트로 취급하여 거동 및 파괴를 연구할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 인장균열과 모드 I 파괴는 비교적 정확하게 모사하지만, 압축거동과 변형열화 중 발생하는 스냅백(snapback) 현상을 모사하지 못하는 한계점을 가지고 있다. Cusatis는 이를 해결할 수 있는 CSL(Confinement-Shear Lattice) 모델을 개발하였는데, 이 모델은 두 골재를 연결하는 스트럿이 축방향 힘 뿐만 아니라, 전단력을 함께 전달하며, 스트럿의 축방향 힘과 전단력으로 인한 거동은 스트럿 주위를 감싸고 있는 매트릭스(matrix)의 직각방향 구속압력에 영향을 받는다는 점에서 기존의 모델들과 차별된다. 또한 격자 스트럿의 전단거동을 도입함으로써 콘크리트의 내부 마찰거동도 반영할 수 있다. 위와 같이 가정된 조건들로 인해 콘크리트의 강성, 강도, 비탄성 거동을 모델할 수 있으며, 식에 직접적으로 나타나지 않는 시멘트 페이스트, 작은 골재, 시멘트-골재 접촉면 등의 영향을 고려할 수 있다.

본 논문에서는 CSL 모델의 기본적인 역학을 검토하고, CSL 모델을 초기재령 콘크리트에 적용한 결과를 분석하였다.

---

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수 Email: g-zi@korea.ac.kr

\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

## 2. CSL 모델

콘크리트 시편에 대한 기하학적 형상을 모델하기 위한 알고리즘은 다음과 같은 세 단계 과정으로 이루어진다.

1. 먼저 생성된 골재와 겹치지 않게 시행착오법을 통해 시편 전체에 랜덤하게 골재 입자를 생성시킨다.
2. 생성된 각 격자점들을 Delaunay 사면체로 연결하여 격자 메시(mesh)를 만드는데, 이때 사면체의 모서리는 인접한 골재 입자들을 연결하는 스트럿이 된다.
3. 이웃한 골재들 사이의 힘의 전달은 스트럿 상의 한 접촉점에서 발생한다. 힘이 전달되는 접촉면은 그림 1a와 같고, 모든 거동을 그림 1b와 같이 한점에 집중시킨다.

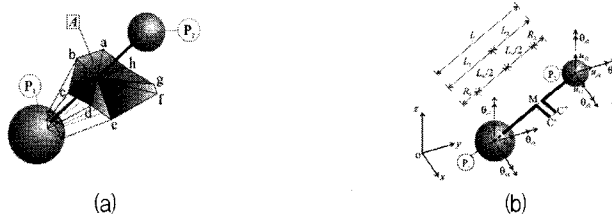


그림 1. (a) 인접 골재 간의 접촉면, (b) 스트럿의 기하학적 형상 및 자유도

스트럿과 접촉면으로 구성된 면을 스테리트에 수직인 방향으로 투영시킨 면과 스테리트로 구성된 국부 좌표계(local system)에서 변형률 벡터의 성분은 단위 벡터  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{l}$ ,  $\mathbf{m}$ 을 사용하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_N = \frac{\mathbf{n}^T [\mathbf{u}_C]}{L}; \quad \varepsilon_L = \frac{\mathbf{l}^T [\mathbf{u}_C]}{L}; \quad \varepsilon_M = \frac{\mathbf{m}^T [\mathbf{u}_C]}{L}$$

유효응력  $\sigma$ 는 유효변형률  $\varepsilon$ 의 함수로서 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sigma = E\varepsilon, \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_b(\varepsilon, \omega)$$

여기서,  $\sigma_b(\varepsilon, \omega)$ 는 소성론의 항복면과 유사한 개념인 응력 경계조건이며, 다음과 같다.

$$\sigma_b(\varepsilon, \omega) = \sigma_0(\omega) \exp\left\{ \frac{K(\omega)}{\sigma_0(\omega)} \left\langle \chi(\varepsilon, \omega) - \frac{\sigma_0(\omega)}{E} \right\rangle \right\}$$

여기서,  $\omega$ 는 수직변형률과 수평변형률 간의 상호작용을 나타내는 변형률이고,  $\tan \omega = \varepsilon_N / \sqrt{\alpha} \varepsilon_T = \sigma_N \sqrt{\alpha} / \alpha_T$  인 관계가 있다. 함수  $\sigma_0(\omega)$ 는 그림 2와 같이 탄성영역의 경계를 나타내고 다음과 같다.

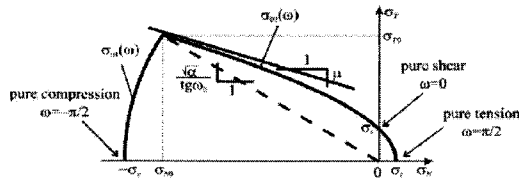


그림 2. meso-level에서의 탄성영역

$$\sigma_0(\omega) = \begin{cases} \sigma_{01}(\omega) & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ \sigma_{02}(\omega) & \text{for } \omega \geq \omega_0 \end{cases}$$

강도감소함수인  $\chi(\varepsilon, \omega)$ 는 파괴로 인한 손상의 비회복을 모델하며, 다음의 식으로 나타낸다.

$$\chi(\varepsilon, \omega) = \begin{cases} \varepsilon & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ \varepsilon \frac{\omega}{\omega_0} + \varepsilon_{\max} \left[ 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right] & \text{for } \omega_0 < \omega < 0 \\ \varepsilon_{\max} & \text{for } \omega \geq 0 \end{cases}$$

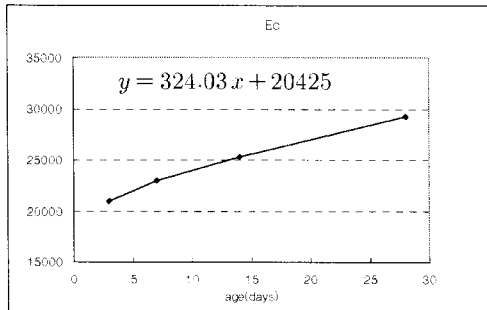
그림 2b에 나타난 초기 기율기인  $K(\omega)$ 는 경계조건을 지배하며, 다음과 같다.

$$K(\omega) = \begin{cases} K_c \left[ 1 - \left( \frac{\omega + \pi/2}{\omega_0 + \pi/2} \right)^{n_c} \right] & \text{for } \omega \leq \omega_0 \\ -K_t f(\lambda) \left[ 1 - \left( \frac{\omega - \pi/2}{\omega_0 - \pi/2} \right)^{n_t} \right] & \text{for } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

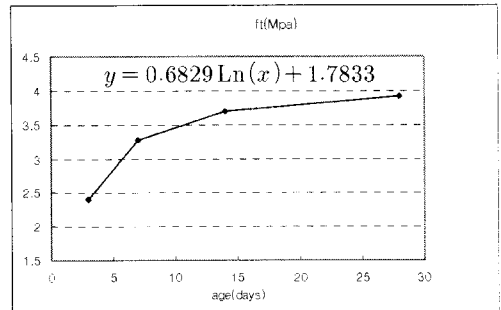
### 3. 초기재령 콘크리트 적용

초기재령의 콘크리트 물성은 급격하게 변화하기 때문에, 시간에 따라 모델변수들 또한 변화해야 한다. CSL 모델은 경화한 콘크리트에 적용할 수 있는 모델이므로, 초기재령 콘크리트를 모사하기 위해서는 CSL 모델변수들 시간의존적 형태로 수정해야 한다. 이를 위해 기존의 3일, 7일, 14일, 28일 재령에서 일축압축 실험을 실시한 데이터(이윤, 2006)를 근거로 CSL 모델의 변수들을 적절히 변화시켜가며 실험 결과와 모델 결과가 거의 일치하도록 조정하였다.

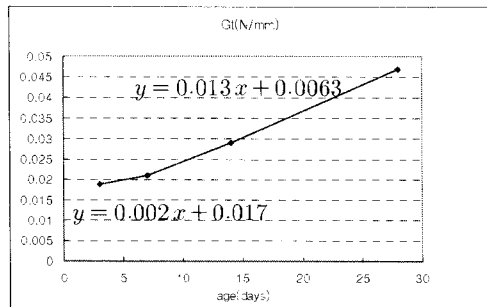
주요 모델변수들의 변화는 그림 3과 같고, 재령별 실험 데이터와 CSL 모델 결과는 그림 4에 나타내었다.



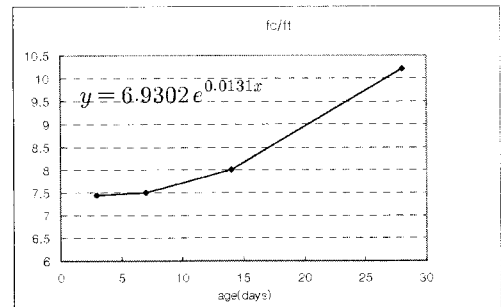
(a) the elastic property of matrix



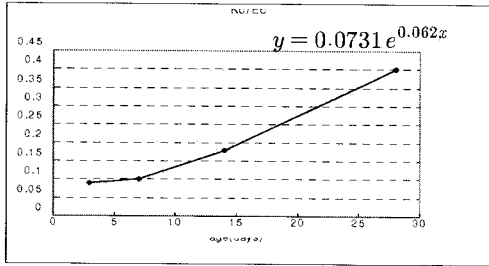
(b) meso-level tensile strength



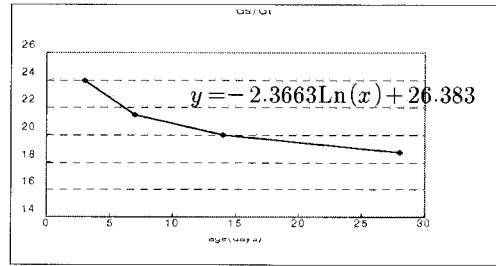
(c) meso-level fracture energy for mode I



(d) meso-level compressive strength



(e) material constant governing the nonlinear compressive and shear-compressive behavior



(f) meso-level fracture energy for mode II

그림 3. 재령에 따른 모델변수의 변화

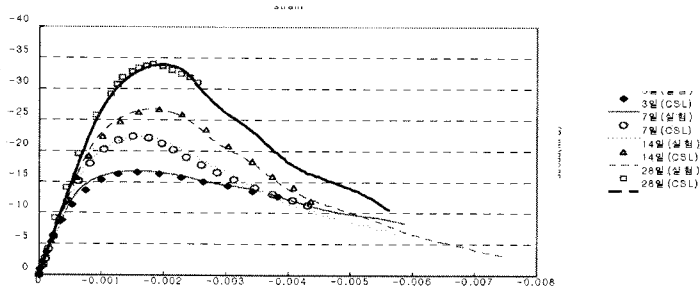


그림 4. 실험 데이터와 수정된 변수 적용한 CSL 모델 결과 비교

#### 4. 결론 및 추후연구방향

기존의 메조 모델이 가지고 있던 한계를 해결한 CSL 모델을 이용하여 일축압축 상태의 초기재령 콘크리트 거동을 모사하였다. 이를 위해 CSL 모델변수를 변화시키며 기존의 실험 데이터와 일치하는 결과가 나오도록 조정하였고, 그 결과 일축압축 상태의 초기재령 콘크리트를 모사하기 위한 시간에 따른 모델변수의 변화를 회귀분석을 통해 추적할 수 있었다. 추후 일축압축상태 이외에 Brazilian Test, 3점 재하 휨 실험을 실시하고 그 결과를 CSL 모델을 이용한 초기재령 콘크리트의 해석 결과와 비교하여, 보다 다양한 조건에 있는 초기재령 콘크리트에 적용할 수 있는 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설기술기반구축사업인 (05기반구축D04-01)과 건설핵심기술연구개발사업인 (05건설핵심 D11)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin (2006) Two-scale study of concrete fracturing behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, 74(1-2) pp.3~7.
- Gianluca Cusatis, Zdenek P. Bazant, Luigi Cedolin (2003) Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: I. Theory. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS-ASCE*, 129(12) pp.1439~1448 .
- 이윤 (2006) 개선된 미소면 모델을 이용한 콘크리트 구조물의 초기거동 해석, 한국과학기술원 박사논문.