

# CSL 모델을 이용한 삼차원 휨 인장 시험 해석

## Analysis of the Biaxial Flexure Tensile Test Using the CSL Model

강진구\*      지광습\*\*  
Kang, Jin Gu      Zi, Goangseup

---

### ABSTRACT

A new indirect tensile test method has been developed to measure the biaxial tensile strength of concretes. In this method, a circular plate is used as a new test specimen which is supported by an annular ring. This specimen is subjected to the external load through a circular edge. The CSL Model, a meso-level model, is used for the analysis of crack growth and its behavior of the new test concrete specimen. The model can describe not only the shear transmission and the confinement sensitivity of lattice connections but also a three-dimensional crack propagation and behaviors in concrete and other quasibrittle materials. The result of the crack shape of the CSL Model analysis is quite similar to that of the new biaxial indirect tensile test. However, unknown design parameters of the meso-structure model must be examined on the future.

### 요약

콘크리트의 이방향 인장강도를 측정하기 위한 새로운 직접 이방향 휨 인장 시험법이 제안되었다. 이 시험법은 원형 시험체와 원형 고리의 지지판 및 재하판이 사용된다. 본 논문은 새로운 이방향 휨 인장 시험법의 콘크리트 재료 거동과 균열 형상을 관찰하기 위해, 골재 단위 해석 모델인 CSL 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. CSL 모델은 기존의 메조-구조체 모델에 전단력의 영향을 추가한 모델로 콘크리트 재료의 삼차원 거동과 균열 양상을 해석할 수 있다. 또한 기존의 메조-모델보다 정밀한 해석이 가능하다. CSL 모델로 모델링한 결과, 실제 이방향 휨 인장 시험에서 관찰되었던 재료 거동과 균열 형상의 정밀한 해석을 수행하였다. 하지만 메조-구조체 모델의 알려지지 않은 설계변수에 대한 부분은 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

---

\* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 조교수

## 1. 서론

콘크리트의 거동과 파괴 형상을 구현하기 위해 지금까지 골재 단위 해석에 관한 많은 연구가 진행되었다. 콘크리트 내부 구조를 관찰하는 대상의 크기가 같은 순서대로 나열하면 원자(atomistic), 나노(nano), 마이크로(micro), 미니(mini), 메조(meso), 그리고 매크로(macro) 스케일 등으로 구분할 수 있다. 골재 단위 해석은 메조-스케일로서 콘크리트를 골재와 골재사이에 시멘트 풀이 채우고 있는 복합 재료(그림 1a)로 간주하여 해석한 것이다. 골재 단위로 모델링 된 콘크리트 재료 모델은 실제 거동과 흡사한 해석을 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 이방향 인장강도를 측정하기 위해 제안된 새로운 직접 휨 인장강도 시험(지광습의 2007)을 메조-스케일 구조체 해석 모델인 CSL 모델(Confinement-Shear Lattice Model; Cusatis의 2003)로 모델링하여 균열 양상을 관찰하였다. 논문의 구성은 제 1장의 서론에 이어, 제 2장에서는 CSL 모델에 대하여 간략한 설명을 하였고, 제 3장에서는 CSL 모델을 이용하여 새로운 이방향 직접 휨 인장시험을 모델링하였다. 제 4장에서는 본 논문의 결론을 도출하였다.

## 2. CSL 모델

본 연구에서 이용한 해석 모델은 CSL 모델이다. CSL 모델은 콘크리트 속의 서로 근접한 골재들 사이를 잇는 격자 메쉬(lattice mesh)를 생성시켜 축력 뿐 아니라 전단력의 영향도 고려한 모델(그림 1b)이다. 또한 기존의 메조 모델보다 정밀한 해석을 수행할 수 있다. 각 골재 요소마다 생성된 격자 메쉬는 골재들 사이의 강성, 강도 그리고 비탄성 거동을 지배한다. 모델에 직접적인 영향을 미치지 않는 가는 골재, 시멘트 풀 그리고 시멘트와 골재사이 접촉면에 대한 부분도 구성 법칙으로 가정하였다. 따라서 CSL 모델은 기존의 메조 모델보다 정밀한 해석을 수행할 수 있다.

해석하고자 하는 시편은, 다음 3단계를 걸쳐 콘크리트 메조-구조체의 골재와 격자 메쉬로 모델링하여 해석을 수행할 수 있다. (1) 전체 시편의 부피에 대하여 지정한 크기의 골재 입자를 서로 겹치지 않도록 시행착오법을 이용하여 임의로 생성시킨다. (2) 생성된 골재의 중앙을 잇는 들로네(Delaunay) 사면체로 격자 메쉬를 정의한다(그림 1c). 앞에서 정의된 각 사면체의 변은 근접한 골재들을 잇는 스트럿(strut)이 된다. (3) 한 개의 골재로부터 다른 한 개의 골재로 상호 작용하는 힘을 전달하는 접촉면을 정의하는 사면체들을 시편 전체 부피에 맞게 정의한다(그림 1d).

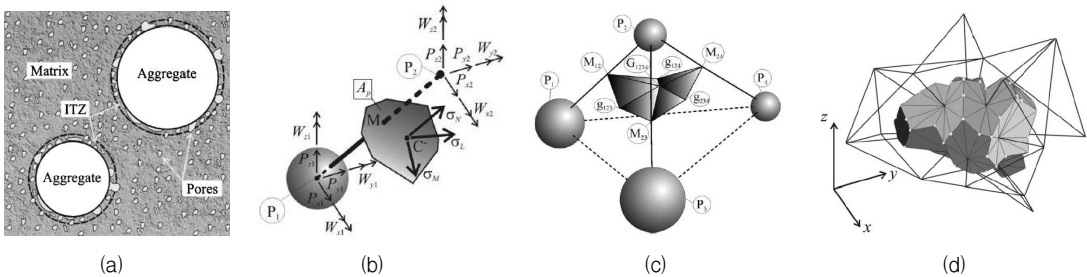
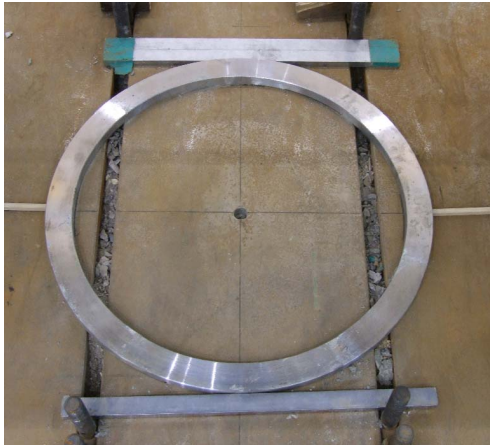


그림 1 CSL 모델의 스트럿(strut) 및 격자 메쉬(lattice mesh)

## 3. 이방향 휨 인장시험법 실험 및 CSL모델 해석

콘크리트의 인장강도를 측정하기 위해 기존의 단점들을 보완한 새로운 이방향 직접 휨 인장 시험법(Biaxial Flexure Test; BFT)이 제안되었다(지광습의 2007). BFT는 기존의 4점 재하시험에 근거하여

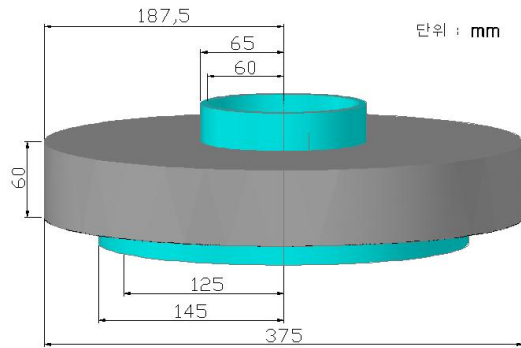
일축휨인장 시험을 입체화한 것이다. 그림 2a와 같이 원형지그를 제작하여 원형시편에 하중을 주었다 (그림 2b). 지그와 시편은 모두 원형이기 때문에 하중이 전달되는 거리가 모든 방향에서 일정하고 시편의 휨 모멘트는 일정하다. 그림 2c에서는 시편, 재하판, 지지판의 치수를 도시 하였다.



(a) The Annular steel support



(b) The BFT and The initial crack development



(c) The specimen and dimensions

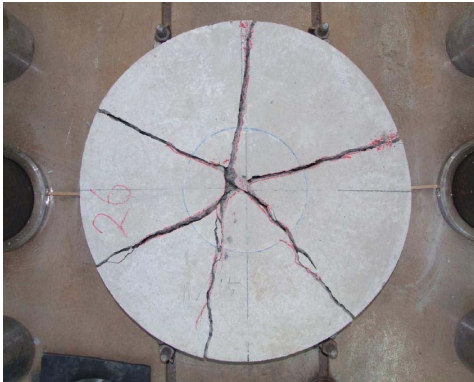
그림 2 이방향 휨 인장 시험(BFT)

골재의 최대 치수는 골재 사이즈로 인한 이방성 영향을 최소화하기 위해 10mm이하로 하였다. 실험에 사용된 콘크리트 시험체의 배합표는 표 1에 제시되었다. 시험체의 단위중량은 3.14t/m<sup>3</sup>이었으며, 실제 28일 강도는 31.8MPa으로 측정되었다. 하중재하는 변위제어로 1mm/min의 속도로 고정하여 파괴 시까지 선형 증가시켜 측정하였다.

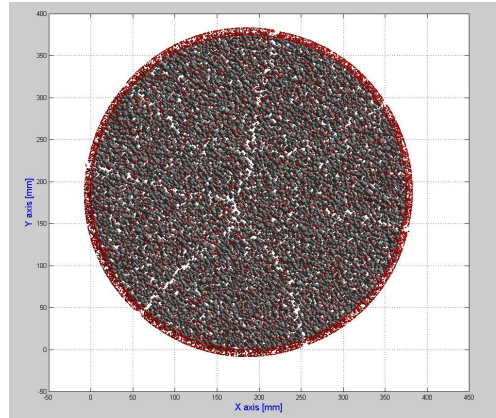
표 1 콘크리트 배합표

W/C (%)	slump [mm]	S/a (%)	air [%]	단위량 (kg)				SP	AE
				W	C	S	G		
35	120	39.45	5	193.9	553.9	642.4	1036.3	0	0

그림 3은 이방향 휨 인장 시험시편의 균열 형상을 도시한 것이다. 실제 실험(그림 3a)과 CSL모델 (그림 3b)로 모델링한 결과를 보면 같은 패턴의 균열 형상을 볼 수 있다. 하중이 재하 된 중심으로부터 시편 끝단으로 퍼지는 부채꼴 모양의 균열이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 균열이 일어나는 위치는 임의의 방향으로, 균열이 일어나지 않는 부분보다 강도가 낮은 다른 부분에서 발생하는 것으로 판단된다.



(a) BFT



(b) CSL Model

그림 3 시험체의 균열 형상

#### 4. 결 론

CSL 모델로 이방향 휨 인장 시험을 모델링하였다. CSL 모델링 결과, 실제 실험에서의 콘크리트 재료 거동과 균열 형상을 구현하였다. 하지만 해석 모델의 스케일 차이로 인해, 메조-스케일 구조체의 탄성계수 및 여러 가지 설계 변수들은 일반적으로 알려진 매크로 스케일의 물성치와 다르다. 이에 대한 명확한 상호 관계와 그 영향에 대해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기반구축사업 05 기반구축 D04-01과 건설핵심기술사업 05 첨단융합 B01의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Cusatis G., Bazant Z. P., Cedolin L., "Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: I. Theory", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 129, No. 12, pp. 1439-1448, 2003.
2. Cusatis G., Bazant Z. P., Cedolin L., "Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: II. Computation and validation", *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 129, No. 12, pp. 1449-1458, 2003.
3. Zi, G., Oh, H., "A novel indirect tensile test method to measure the biaxial tensile strength of concretes and other quasibrittle materials.", *Cement and Concrete Research*, -submitted
4. 지광습, 오홍섭, "콘크리트의 이방향 휨인장강도 시험법," 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집 제 19권 1호, 2007.