

# 수치해석을 이용한 이방향 휨인장 시험체의 특성분석

## Numerical investigation of The characteristics of Biaxial Flexure Specimens

김지환\* · 지광습\*\* · 강진구\*\*\* · 오홍섭\*\*\*\*

Kim, Ji-Hwan · Zi, Goang-seup · Kang, Jin-Gu · Oh, Hong-seob

### ABSTRACT

This paper presents the numerical investigation of the characteristics of biaxial flexure specimens for the Biaxial Flexure Test(BFT) which was recently developed to measure the biaxial tensile strength of concrete. Using FEM, the effect of size and eccentricity on the specimens was evaluated. The parameters such as radius of the support and the loadings, thickness and free length were studied. The results of the FE analysis were entirely consistent with the predictive solution, when  $b/a > 0.4$ ,  $h/a < 0.6$  and the thickness of the specimens were increased. On the other hands, when  $b/a > 0.4$ , those with lesser free length showed good results. To limit the difference between the stresses at the end points of  $2b$  as the specimen was sustained and the stress at the center point of the specimen are not over 10%, lateral eccentricity was analyzed to be in the limits of 3%.

**Keywords:** Biaxial flexure specimen · Tensile strength · Concrete · Eccentricity · Cracks

### 1. 서론

콘크리트 균열은 구조물의 사용성(serviceability)과 내구성(durability)을 저하시키는 요인 중 하나이다. 교량의 바닥판, 콘크리트 포장 또는 활주로, 탄성지반위의 슬래브와 같은 두께가 얇은 판의 구조적 균열, 다축구속된 콘크리트표면 등은 보 또는 일방향 슬래브에 발생하는 일방향 휨균열과는 달리 구조물의 경계조건 및 크기 등에 따라 불규칙한 균열 즉, 이방향 균열이 발생한다. 이와 같은 이방향 인장균열 특성은 일방향 인장균열 특성과는 서로 다르며, 이방향 인장강도로 설명하는 것이 보다 합당하나 해석과 시험의 용이성 때문에 직인장, 할렬인장, 휨인장 시험을 통해 얻어지는 일방향 인장강도를 적용해오고 있다(Bazant 외 1991, Raphael 1984, 안주옥과 서영갑 2004).

본 논문에서는 최근에 이방향 인장강도를 보다 간편하고 경제적으로 분석하기 위해 개발된 이방향 휨인장 시험체(지광습 외 2007)의 형상 및 크기 효과를 규명하겠다. 또한 시험체의 작용하중과 응력과 관계를 알아보기 위해 개발된 응력 산정식의 적용범위, 하중 재하 시 편심의 영향에 따른 강도 편차 등을 각종 변수로 선택하여 수치해석을 통해 이방향 휨인장 시험체의 특성을 비교 분석하고, CSL 모델에 의한 이방향 휨 시험체의 균열과 시험체의 균열 패턴을 모사하고자 한다.

\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회 환경공학과 석사과정 Email: jihwan@korea.ac.kr

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

\*\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회 환경공학과 석사과정 Email: jjg81@naver.com

\*\*\*\* 정회원 · 국립진주산업대학교, 토목공학과, 조교수 Email: hongseb@hotmail.com

## 2. 이방향 휨인장 시험체의 크기 효과

콘크리트 구조물의 기하학적 특성이 구조물의 강도특성에 영향을 미친다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 시험체가 가지는 구조적인 특성 때문에 시험체 내부의 응력구배 발생이 불가피하므로 동일한 물성의 콘크리트에 대해 다른 모양으로 만들어진 강도실험결과는 일반적으로 큰 차이를 나타내며, Bazant와 Zi에 따르면, 동일한 형태의 시험체에서 측정되는 공칭강도(nominal strength)는 시험체의 재료적 특성 이외에 크기와 형상에도 영향을 받는다(Bazant 1984; Zi 외 2003, 외 다수). 하지만 이러한 연구결과들은 일방향 휨인장강도의 크기효과에 대한 내용들이며, 이방향 인장상태의 균열강도의 크기효과에 관한 연구는 아직 국내외적으로 이루어진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 이방향 휨인장 시험체의 각종 변수 등 크기효과에 따른 거동을 분석하였으며, 이방향 휨인장 시험법의 작용하중과 응력과의 관계를 알아보기 위해 보 이론에 근거하여 개발된 응력산정식(지광습 외 2007)의 적용 범위에 대해 수치해석을 수행하였다.

$$\sigma = \frac{3}{4\pi h^2} \{ (1-\nu)[1 - (b/a)^2] - 2(1+\nu)\log(b/a) \} P \quad (1)$$

여기서 시험체 지점 간의 간격은  $2b$ 이고, 하중 재하점간의 간격은  $2a$ 이며,  $h$ 는 시험체의 두께,  $P$ 는 하중,  $\nu$ 는 포와송비이다.

선행연구에서 시편 중앙으로부터 가력점과 지지점의 상호비율( $b/a$ )에 따른  $2b$  구간의 응력을 수치 해석한 결과  $b/a < 0.4$ 인 경우에는  $2b$ 구간의 주응력이 일정하지 못한 것으로 해석되어 각종 변수 등 크기효과에 따른 거동을 분석 시  $b/a > 0.4$ 인 시험체만을 대상으로 수치해석을 실시하였다.

표 1과 그림 1,2에서 확인 할 수 있듯이 식 (1)과 기존 연구에 사용된 시험체의 형상이 충분한 정확도를 가지고 있음을 확인하였으며, 해석 결과  $b/a < 0.4$ 인 경우는 시험체 두께와 지지점의 크기비( $h/a$ )가 감소할수록 식 (1)에 의한 응력값에 일치를 하였지만,  $b/a > 0.4$ 인 경우는  $h/a$ 가 증가할수록 일치함을 알 수 있었다. 또한, 여유길이와 지지점의 크기비( $f/a$ )의 결과를 보면  $f/a$ 가 감소할수록 식 (1)과 일치하였다.

표. 1 이방향 휨인장 시험체의 삼차원 유한요소 해석 결과

단위: MPa

		가력점과 지지점의 크기비( $b/a$ )				
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
응력산정식		0.680	0.537	0.413	0.300	0.196
두께와 지지점의 크기비( $h/a$ )	0.2	0.591	0.451	0.341	0.242	0.159
	0.3	0.615	0.475	0.363	0.263	0.171
	0.4	0.633	0.485	0.368	0.266	0.173
	0.5	0.661	0.505	0.369	0.266	0.177
	0.6	0.686	0.525	0.393	0.280	0.181
여유길이와 지지점의 크기비( $f/a$ )	0.10	0.633	0.495	0.380	0.277	0.179
	0.15	0.623	0.485	0.371	0.268	0.173
	0.20	0.615	0.475	0.363	0.263	0.171
	0.25	0.609	0.468	0.357	0.259	0.166
	0.30	0.604	0.461	0.352	0.253	0.164

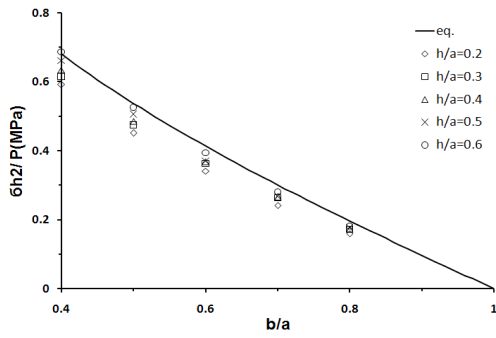


그림. 1 시험체의 두께에 따른 적용범위

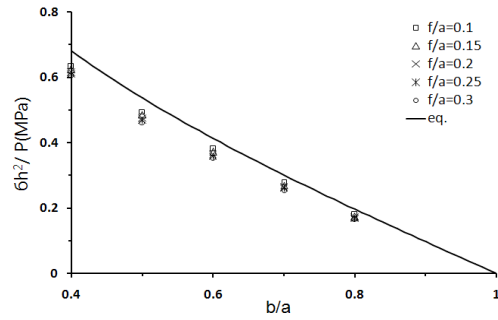


그림. 2 시험체의 여유길이에 따른 적용범위

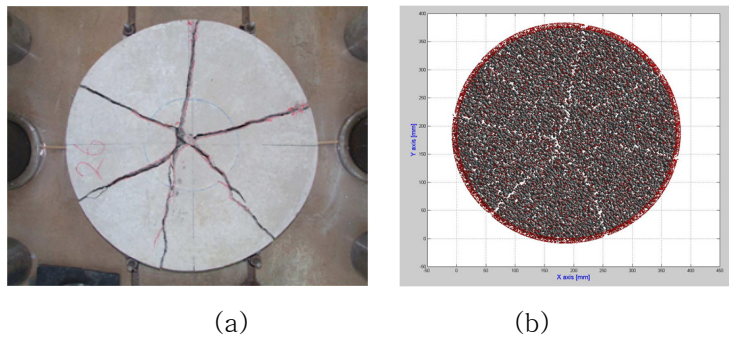


그림. 3 (a) 실험 후 균열 양상 (b) CSL 모델 해석 결과 시험체의 균열 양상

그림 3은 이방향 휨 시험 후 시험체의 균열 형상(a)과 콘크리트 골재 단위 해석 모델인 CSL 모델 (Confinement-Shear Lattice Model; Cusatis의 2003)로 모델링하여 시험체의 균열(b)을 모사한 것이다. CSL 모델에 의한 이방향 휨인장 시험체의 균열해석 결과 시험체의 균열 패턴과 같음을 확인하였다.

### 3. 이방향 휨인장 시험체의 편심 효과

이방향 휨인장 시험을 실시 할 경우 하중 재하 시 시편의 중앙과 가력장치의 중앙이 서로 일치하지 않을 시 발생할 수 있는 편심 오차가 커지면 응력분포가 불균일하게 되어 정확한 인장강도 산정이 어

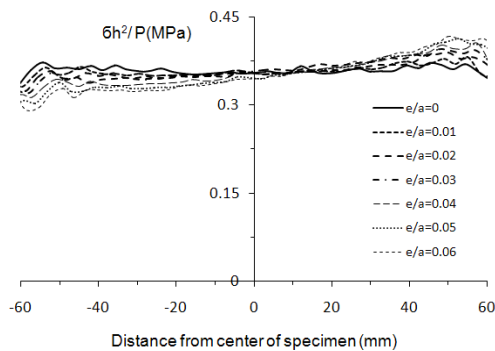


그림. 4 시험체 2b구간 내의 응력 분포

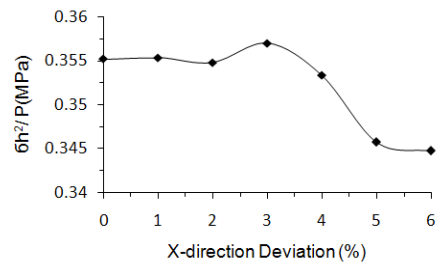


그림. 5 시험체 중앙에서의 e/a에 따른 응력

려운 것으로 사료되었다. 적절한 인장강도를 얻기 위해서는 편심의 정도를 일정한 정도로 한정하여야 할 것이다. 이를 검토하기 위해 이방향 휨인장 시험체에 하중 재하관이 가력방향에 수직방향인 x축을 따라 편심이 작용할 경우의 편심과 지지점과의 크기비( $e/a$ )에 따른 응력변화를 수치해석을 통해 분석하였다. 그림 4와 5는  $a = 100\text{mm}$ ,  $b = 60\text{mm}$ ,  $f = 20\text{mm}$ ,  $h = 30\text{mm}$  인 시험체의 2b구간 내의 거리에 따른 응력변화와 시편중앙 점에서  $e/a$ 에 따른 응력을 각각 나타낸다. 그림에서도 알 수 있듯이 x축 방향으로 편심이 증가함에 따라서 2b구간 끝점의 응력차가 점점 증가함을 알 수 있었다.

위와 같은 수치해석 결과를 종합해볼 때, 편심이 작용한 시험체의 2b구간 끝점의 응력차를 편심이 작용하지 않는 시험체의 중앙점 응력의 10% 이내로 제한하기 위해서는 가력방향에 수직인 방향으로  $e/a$ 가 3% 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 이방향 휨인장 시험체의 형상 및 크기 효과와 하중 재하 시 편심의 영향을 삼차원 유한 요소해석을 통하여 해석하였다.

1. 시험체가  $b/a > 0.4$ 인 경우의 해석 시에는  $h/a$ 가 증가할수록, 여유길이와 지지점의 크기비( $f/a$ )가 감소할수록 응력산정식에 의한 응력값에 점점 일치함을 알 수 있었다.
2. CSL 모델에 의한 이방향 휨 시험체의 균열해석 결과 시험체의 균열 패턴과 같음을 확인하였다.
3. 편심이 작용한 시험체의 2b구간 끝점의 응력차를 편심이 작용하지 않는 시험체의 중앙점 응력의 10% 이내로 제한하기 위해서는 가력방향에 수직인 방향으로  $e/a$ 가 3% 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기반구조사업 05 기반구축 D04-01과 건설핵심기술사업 05 첨단융합 B01의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Bazant, Z. P., Zi, G., and McClung, D. (2003). "Size effect law and fracture mechanics of the triggering of dry snow slab avalanches." *Journal of Geophysical Research* 108(B2), 2119-2129.
2. Bazant, Z. P., Kazemi, M. T. (1991). Size effect in Brazilian split-cylinder tests: measurements and fracture analysis, *ACI Material Journal*, 88(3): 325-332.
3. 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.
4. Raphael, J. M. (1984). Tensile strength, *Concrete International*, 81(2): 158-165.
5. Zi, G., and Bazant, Z. P. (2003). "Eigenvalue method for computing size effect of cohesive cracks with residual stress, with application to kink-bands in composites." *International Journal of Engineering Science* 41(13-14), 1519-1534.
6. 안주옥, 서영갑. (2004). 최신 철근 콘크리트 공학. 시이텍 미디어.
7. 지광습, 오홍섭, 최진혁. (2007). 콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법. *대한토목학회논문집*, 27(5A): 753-758.