

콘크리트 이축휨강도 평가를 위한 콘크리트 등방휨인장강도 시험체의 최적 구성

The Optimum Geometry of Biaxial Flexure Test Specimen for Concretes

김지환* · 오홍섭** · 지광습***

Kim, Jihwan · Oh, Hongseob · Zi, Goangseup

1. 서 론

최근 FRP 바닥판이나 플랫 플레이트와 같은 판 및 셸 형태의 단면 두께가 얇은 콘크리트 구조물이 점점 증가하는 추세에 있다. 이러한 부재의 길이에 비해 두께가 얇은 구조의 응력상태는 판의 두께에 따라 휨과 휨-전단응력이 복합적으로 작용하는 것이 일반적이다. 그러나 최근의 고성능 콘크리트 재료의 경우에는 순수휨응력이 지배적이며, 이때 판의 휨응력은 경계조건, 하중조건 등에 의하여 변하게 된다. 따라서 콘크리트 판의 이축휨강도 시험방법을 제시하기 위해서는 콘크리트 재료적 특성을 고려하여 시험체의 기하조건 및 크기효과 등에 대한 충분한 평가와 해석이 필수적이다. 본 연구에서는 콘크리트 이축휨강도 평가를 위한 영향인자들에 대하여 실험 및 수치해석적 방법을 적용하여 콘크리트 등방휨인장강도 시험체를 최적 구성하고자 하였다.

2. 원형 판의 이축휨강도

현재까지 이축휨강도 평가를 위해 가장 보편적으로 사용되고 이론이 잘 정립되어 있는 시험법은 그림 1에 나타난 것과 같은 ring on ring test이며, 작용 하중과 시험체의 하면에 발생하는 응력의 이론해는 아래와 같이 전개된다[1,3,5,7,8].

그림 1과 같이 단순지지된 원반이 휨모멘트를 받을 때 미소변형에 대한 반경 r 과 접선 θ 방향의 응력은 중립축으로부터의 거리에 따라 비례하고, 휨강성에 반비례하게 되고, 작용 휨모멘트와 휨응력은 각각 다음과 같이 표현된다.

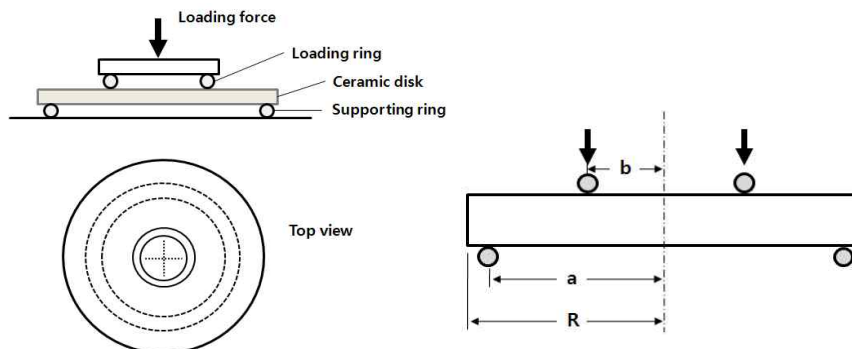


그림 2. ring-on-ring 시험법과 등방휨인장강도 시험법(BFT)

* 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 · 공학석사 E-mail : jihwan@korea.ac.kr - 발표자
 ** 정회원 · 진주산업대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : hongseob@hotmail.com
 *** 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 · 공학박사 E-mail: g-zi@korea.ac.kr

$$M = \frac{P}{8\pi} \left[2(1+\nu)\ln\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{(1-\nu)(a^2-b^2)}{R^2} \right] \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{3P}{4\pi h^2} \left[2(1+\nu)\ln\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{(1-\nu)(a^2-b^2)}{R^2} \right] \tag{2}$$

여기서 P 는 작용하중, a, b, R 는 각각 중앙 점부터 지지점 및 가력점까지의 거리, 판의 반지름이다. 판의 반지름과 지지점까지의 거리를 여유길이 $f=R-a$ 로 정의하면, 식 (2)와 같이 여유길이가 작을수록 단부구속에 의한 영향을 최소화할 수 있음을 알 수 있으며, 휨응력의 변동은 가력점과 지지점의 거리 비에 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다.

3. 사전 실험에 의한 강도특성 평가

콘크리트 판의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 원형판 시험체를 제작하였다. 재료는 보통포틀랜드 시멘트, 쇠골재 및 일반 잔골재를 사용하였으며, 콘크리트는 단위중량 31kN/m^3 의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 배합하였다. 재료 파괴의 연속성을 확보하기 위해 시험체의 두께는 최대 골재 치수의 5배 이상으로 하였으며, 문헌[2~4] 및 분석결과를[6~8] 기초로 하여 콘크리트 강도, 골재 크기, 실험체의 크기 및 실험체 가력점과 지점간의 비율이 이축 휨인장 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험을 실시하였다. 또한 지점부의 마찰에 의한 구속조건의 영향을 판정하기 위하여 지점부를 원형으로 하는 경우와 사각형으로 하는 경우로 분리하여 실험을 수행하였다.

전체적으로 실험체의 균열은 가력점 내의 위치에서 균열이 발생한 후, 3개 이상의 방향으로 균열이 진전되며 파괴되는 양상을 나타내었다. 실험체의 크기가 작을수록 측정강도가 커지는 것으로 확인되었으며, 지점조건의 경우에도 원형지점보다 직사각형 지점의 경우가 구속효과 등에 의하여 강도가 약간 크고, 표준편차는 작게 나타났다. 콘크리트 강도 증가에 따라 이축휨강도도 역시 증가하나 증가 폭은 점차 완만해지고, 대체적으로 보통강도 영역에서의 휨강도는 일축휨강도와 같이 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났다.

4. 최적 등방휨인장강도 시험체 (BFT specimen)제원

사전 실험의 결과에 의하여 전체적인 원형판의 두께와 시험체의 크기는 이축 휨파괴 강도 측정에 적절한 것으로 판단되었으나, 순수휨응력을 발생시킬 수 있는 가력점간 거리와 지점간의 비는 충분히 고려되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 탄성 유한요소해석을 통하여 실험체의 두께, 여유길이(f), 지점과 하중재하점간의 상관관계에 대한 분석을 통하여 보다 신뢰성 있는 실험체 제원을 제시하고자 하였다.

등방휨인장강도 시험체의 최적 구성을 도출하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 이방향 시험체와 일방향 시험체의 삼차원 유한요소 해석을 실시하였다. 본 논문에서 수행한 유한요소 해석은 탄성해석으로서 탄성응력분포 분석 이외의 파괴하중 분석이나 변위 예측 등에는 사용될 수 없으나, 이 해석을 통해 식 (2)의 예측식의 적합성을 검증하였다.

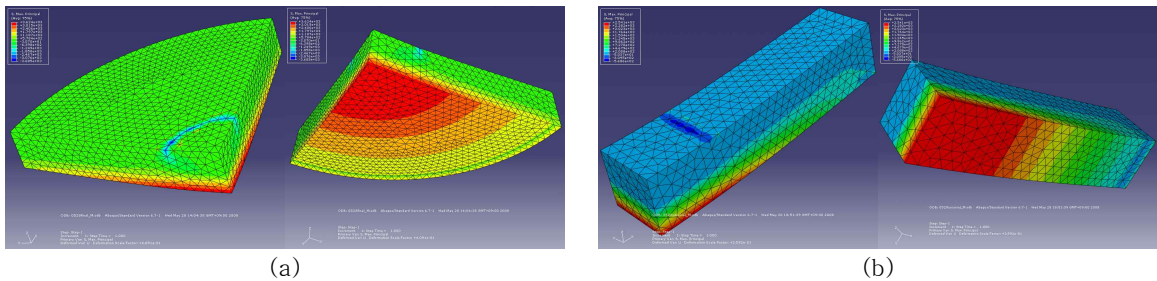


그림 2. 삼차원 유한요소 해석결과 (a) 등방휨인장강도 시험체, (b) 일방향 휨인장 시험체

그림 2는 등방휨인장강도 시험체와 일방향 휨인장 시험체의 삼차원 유한요소 해석결과이다. 등방휨인장강도 시험체와 일방향 휨인장 시험체 모두 상면에 하중이 직접 적용된 부분에는 압축응력이 발생하였고, 이 하중이 시험체로 전달되어 하면에 인장응력이 발생하였다. 시험체의 중앙부에서 주응력은 최대의 값을 가지고, 그 주변에서 거의 동일한 값을 보이는 것으로 확인되었다. 즉, 등방휨인장강도 시험체는 일방향 휨응력시험에서 발생하는 응력구배와 비슷한 응력구배가 얻어졌으며, 재하판 내부(2b구간)의 시험체 하면에서는 인장응력이 거의 동일함이 확인되었다.

해석 결과를 바탕으로 h/a 가 0.24이고 f/a 가 0.05인 등방휨인장강도 시험체의 최적 구성을 표 1에 도출하였으며, 이론적인 해와 수치해석적인 해의 크기 비는 등방휨인장강도 시험체와 일방향 휨인장 시험체 모두 동일한 것으로 나타났다.

표 2. 등방휨인장강도 시험체의 최적 구성

Size	h [mm]	$2a$ [mm]	$2b$ [mm]	f [mm]	h/a	f/a	b/a
S	30	250	63	6.5	0.24	0.052	0.252
M	60	500	125	12.5	0.24	0.05	0.25
L	90	750	188	19	0.24	0.051	0.251

5. 최적실험체의 이축휨강도

사전실험, 유한요소해석과 이론해에 대한 고찰을 통하여 콘크리트 재료에 적합한 이축휨강도 평가를 위한 표준시험체의 형상비를 제시하였으며, 본장에서는 제시된 시험체의 구성을 적용하여 콘크리트의 휨강도를 평가하고자 하였다. 시험체의 크기, 골재의 크기를 변수로 하였으며, 지점부의 마찰구속효과를 평가하기 위해 각 시험체 수의 절반에 해당하는 시험체의 지점에 테프론 섬유를 적용하였다.

표 2에는 시험결과를 정리하였다. 테프론 섬유를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 약간의 강도 차이는 있으나, 본 논문에서는 구분해서 정리하지는 않았으며, 추후 자세한 결과를 발표할 예정이다. 골재의 크기의 영향은 분산에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 강도의 경우는 골재의 크기가 작을수록 높게 판정되나, 10mm이상의 골재 크기에서는 골재 크기에 따른 추가적인 편차는 없는 것으로 판단된다.

콘크리트 압축강도로 인한 실험결과 판독의 오류를 제거하기 위해 식 (2)에 의해 산정된 휨강도를 압축강도의 제곱근으로 나누어, 즉, $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 으로 정규화(normalize)하였다. 시험체 높이 h 와 가력점 a 와의 관계에서는 h/a 가 작은 얇은 판의 경우가 강도가 약간 큰 것으로 나타났다. M series는 지점외측부의 여유길이의 영향이 크지 않은 것으로 나타났으나, 시험체의 크기가 큰 L series의 경우는 강도가 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지간과 가력점간의 관계에서도 유사한 결과를 나타내었다.

표 2. 최적 구성된 등방휨인장강도 시험체의 실험 결과

Series	modulus of rupture [MPa]	average biaxial flexural strength [MPa]	standard deviation	COV
35-5mm-25	4.56	8.72	1.884	0.22
35-5mm-50		6.59	0.585	0.09
35-5mm-75		3.39	0.723	0.21
35-10mm-50		5.67	0.807	0.14
35-20mm-50		5.66	1.203	0.21
35-25mm-50		5.78	1.135	0.20

6. 결 론

본 연구에서는 이축 휨강도에 영향을 주는 인자를 확인하기 위해 예비 실험을 수행하였다. 이 때 확인된 인자들의 영향을 삼차원 유한요소 해석으로 평가하여 최적실험체 형상을 제시하였으며 이를 활용하여 이축 휨인장 강도를 측정하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 시험체의 두께가 감소할수록 설계기준상의 휨과괴계수와 비가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 표준편차를 고려할 경우 이방향 인장하중의 위험도가 설계휨과괴계수와 비슷하거나 낮아 파괴계수의 다축 인장에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. 콘크리트 압축강도가 증가할수록 파괴계수와 비가 감소하는 것으로 나타났다.
2. 유한요소해석을 통하여 휨강도에 영향을 미치는 기하조건 등에 대하여 분석한 결과, h/a , f/a 및 b/a 가 각각 0.24, 0.05와 0.25일 때 이론해와 해석해가 가장 일치하는 것으로 나타났으며, 이 조건에 적합하도록 시험체의 형상을 제안하였다.
3. 시험체 크기에 대한 영향을 분석한 결과 시험체의 크기가 증가할수록 강도는 반비례하였으며, 골재크기의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
4. 얇은 판에 적용되고 있는 ring-on-ring 시험법에 의한 콘크리트의 이축휨강도 실험은 시험절차가 상대적으로 복잡하고, 기하조건 및 표면조건 등에 의한 영향을 받을 수 있다. 따라서 규격화된 표준시험법이 제시되기 위해서는 각 인자들에 대한 추가적인 실험이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0072714)

참고문헌

1. Hsueh CH and Kelly, JR, "Simple solutions of multilayered discs subjected to biaxial moment loading", Dental materials, 2009, Vol. 25, pp.506-513
2. Higgs WAJ, Lucksanasombool P Higgs RJED and Swain MV, "Evaluating acrylic and glass-ionomer cement strength using the biaxial flexure test", Biomaterials 2001, Vol. 22, pp.1583-1590
3. Kanchanasavita W, Anstice HM and Pearson GJ, "Long-term flexural strengths of resin-modified glass-ionomer cements", Biomaterials, 1998, Vol. 19, pp.1703-1713
4. Morrel R, McCormick NJ Bevan J, Lodeiro M and Margetson, "Biaxial disc flexure-modulus and strength testing", British Ceramic Transactions, 1999, Vol. 98, No..5, pp.234-240
5. Hsueh CH and Luttrell, "Recent advances in modelling stress distributions in multilayers subjected to biaxial flexure tests", Composites Science and Technology, 2007, Vol. 67, pp.278-285
6. 오홍섭, 지광습, "일축 및 이축 휨인장강도의 실험적 비교", 콘크리트학회 논문집, 2008, Vol. 20 No.2, pp.139-146
7. Zi, G., and Oh, H. "A novel indirect tensile test method to measure the biaxial tensile strength of concretes and other quasibrittle materials", Cement and Concrete Research, 2007, Vol. 38(6), pp.751-756
8. 지광습, 오홍섭, 최진혁, "콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법", 대한토목학회 논문집, 2007, Vol. 27(5A), pp.753-758