



최적 시험체 형상을 고려한 개선된 콘크리트 등방휨인장강도 시험법

지광섭¹⁾ · 김지환¹⁾ · 오홍섭^{2)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부 ²⁾진주산업대학교 토목공학과

Improved Biaxial Flexure Test (BFT) for Concrete with the Optimum Specimen Geometry

Gooangseup Zi,¹⁾ Ji-Hwan Kim,¹⁾ and Hongseob Oh^{2)*}

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

ABSTRACT For designing concrete structures, engineers are provided data from unidirectional flexure test in most cases. But real structural components such as pavements and deck panel are subjected to multiaxial stress throughout their body. Therefore, biaxial flexure test for concrete may be considered as a gage of the performance of concrete in service. In this paper, we propose the optimum biaxial flexure test (BFT) to measure the biaxial flexural strength of concrete. This method are an improved version of the ring-on-ring test which have been used extensively in the fields of ceramics and biomaterials. The optimum geometry of the test specimen was determined by using a three-dimensional finite element analysis. A series of test data obtained from the proposed test method is provided to show that the proposed optimum biaxial flexure test method can be used to identify the biaxial tensile strength of concrete.

Keywords : biaxial flexural test (BFT), tensile strength, crack, fracture

1. 서 론

콘크리트구조물이 대형화 및 고성능화됨에 따라 구조물의 형태가 다양화되면서 판 및 셸 형태와 같이 단면의 두께가 얇아지는 형태로 발전하고 있다. 또한 건설분야에서 섬유복합체(fiber reinforced composite)의 활용을 통한 고성능 구조체에 대한 개발이 증가하고 있다. 비균질성 재료인 콘크리트와 FRP 복합체의 사용상태 휨응력은 순수 일축 휨이 아닌 이축 휨 또는 휨-전단응력상태로 존재하게 된다.

특히 부재의 길이에 비해 두께가 얇은 판 또는 셸 형태 구조의 경우, 휨-전단 등의 복합응력보다는 이축휨응력이 지배적인 응력상태이다. 따라서 재료적, 기하적 특성에 기인한 이축휨응력을 평가하기 위한 연구가 의료분야 및 고분자 분야 등에서 많이 진행되어 왔다.¹⁻⁵⁾ 특히 의료용 재료로 사용되는 세라믹과 glass-ionomer cement의 경우에는 80년대부터 이축휨강도 특성에 관한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 다층판의 휨강도에 대한 이론적 정립 또한 체계적으로 이루어져 왔다.⁶⁻¹²⁾

지금까지 세라믹 및 의료용 재료 분야에서 적용되고 있는 이축 휨강도 실험 방법은 다음과 같이 크게 4가지 정도로 제시되어 있으며, 이중 ring on ring test는 orthopedic 알루미늄 세라믹의 강도 평가를 위한 ISO 6474 기준으로 인증되어 있다.¹⁰⁾

- 1) Ring on ring test
- 2) Ball on ring test
- 3) Ball on three ball test
- 4) Piston on ring test

Ring on ring test는 하중 가력점과 지지점이 모두 환으로 구성되어 있는 실험방법이고, ball on ring test는 가력점과 지지점이 각각 구와 환으로 구성되는 경우이다. 또한 ball and three ball test는 지지점이 3개의 구로 적용된 것이며, ring on on ring의 경우는 가력점이 원형의 집중하중으로 재하되는 실험방법이다.¹¹⁾

이축 또는 등방휨강도 실험방법이 기존의 일축실험방법보다 구조물의 재료적 물성을 보다 적절히 평가할 수 있는 장점은 이축휨실험이 일축실험에서 발생할 수 있는 단부조건에 의한 영향과 가력점과 지지점 사이에 발생할 수 있는 응력의 급격한 구배를 최소화할 수 있다는 것이다.^{9,11)} 따라서 이축휨강도를 적용하면 실제 모든 실제 구조물 또는 재료에서 발생하는 이축응력 상태를 설계에 충분히 반영할 수 있는 것이다.^{5,9,12,13)}

*Corresponding author E-mail : opera69@chol.com

Received April 6, 2009, Revised May 25, 2009

Accepted May 26, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

세라믹 또는 기타 의료용 재료의 경우는 판해석이 가능한 박판(thin-plate) 재료이나, 일반 콘크리트구조물의 경우는 프리캐스트 바닥판 또는 박판 콘크리트 포장과 같이 시간 또는 구속조건에 비해 두께가 확실히 얇은 경우를 제외하고는 박판으로 해석하기에 적절하지는 않으나, 점차 박판 구조체에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 또한 최근에 개발되고 있는 FRP 바닥판의 경우도 순수한 일축 휨부재로 설계하기에는 실제의 응력형태와 많은 차이가 있는 것이 사실이다.

Fig. 1은 콘크리트구조물에 흔히 발생하는 전형적인 이방향 균열 패턴이다.^① 현재까지의 일축 휨강도만을 고려하는 설계방법으로는 이와 같은 균열강도 및 균열발생 위험도를 충분히 평가할 수 없기 때문에 이 연구에서는 실험 및 이론적 해법을 통하여 콘크리트 재료에 적합한 이축 또는 이축휨강도 실험법 및 실험체의 표준제원을 제시하고자 한다.

관구조의 경우는 응력의 형태가 다양화됨에 따라 이축 휨인장응력에 대한 고려가 필수적이다. 필자는 이러한 점에 주목하고 기존의 일축휨인장시험법을 이축으로 확장한 이축휨인장시험법의 가능성을 콘크리트 재료분야에 최초로 도입하였다.¹⁷⁾ 이 시험법의 실험적 구현과 이에 의한 이방향휨인장 강도도 필자에 의해 보고된 바 있다.^{16,17)} 이 연구는 새로운 시험기법의 효용성과 문제점을 분석하여 최적의 시험체 구성 및 시험방법을 보완해서 제시하기 위하여 수행되었다. 현재까지 콘크리트 및 복합소재 분야에서 이축휨시험법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지는 않은 상태이다. 따라서 얇은 콘크리트 판의 이축 휨강도를 예측, 평가할 수 있는 시험법의 개발은 중요하며, 이에 대한 최적 시험법의 제시는 구조물의 성능 평가를 위한 중요한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

콘크리트 판의 응력상태는 판의 두께에 따라 휨과 휨-전단응력이 복합적으로 작용하는 것이 일반적이거나, 최근의 고성능콘크리트 재료의 경우는 판의 두께가 얇아 순수 휨응력이 지배적이며, 이때 판의 휨응력은 경계조건, 하중조건 등에 의하여 변하게 된다. 따라서 콘크리트 판의 이축휨강도 시험방법을 제시하기 위해서는 콘크리트 재료적 특성 등을 고려하여 시험체의 기하조건 및 크기효과

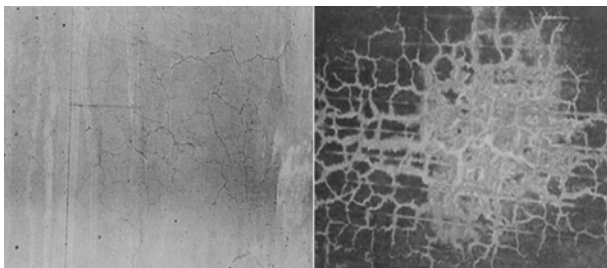


Fig. 1 Typical crack patterns caused by biaxial stress state on concrete surface

① 하중 재하로 인해 이러한 균열이 발생하지는 않지만, 건조수축 및 반복하중 등의 요인 때문에 발생하는 이축응력으로 인해 이와 같은 균열이 발생한다.

등에 대한 충분한 평가와 해석이 필수적이다. 이 연구에서는 휨강도에 대한 영향인자들에 대하여 실험 및 수치해석적 방법을 적용하여 최적 시험법을 제시하고자 하였다.

2. 원형 판의 이축휨강도

현재까지 이축휨강도 평가를 위해 가장 보편적으로 사용되고 이론이 잘 정립되어 있는 시험법은 Fig. 2에 나타난 것과 같은 ring on ring test이며, 작용 하중과 시험체의 하면에 발생하는 응력의 이론해는 아래와 같이 전개된다.^{10,12,14,16,17)}

Fig. 2와 같이 단순지지된 원반이 휨모멘트를 받을 때 미소변형에 대한 반경 r 과 접선 θ 방향의 응력은 중립축으로부터의 거리에 따라 비례하고, 식 (1)과 같이 휨강성에 반비례하게 된다.

$$\sigma_r = \frac{E(z - z_n)M_r}{(1 - \nu^2)D} \quad (1a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E(z - z_n)M_\theta}{(1 - \nu^2)D} \quad (1b)$$

여기서, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비, M_r 과 M_θ 는 각각 r 과 θ 방향의 단위길이 당 휨모멘트, $z_n = \frac{h}{2}$ 는 중립축의 위치이며, h 는 판의 두께이다. 휨강성 D 는 다음과 같이 주어진다.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

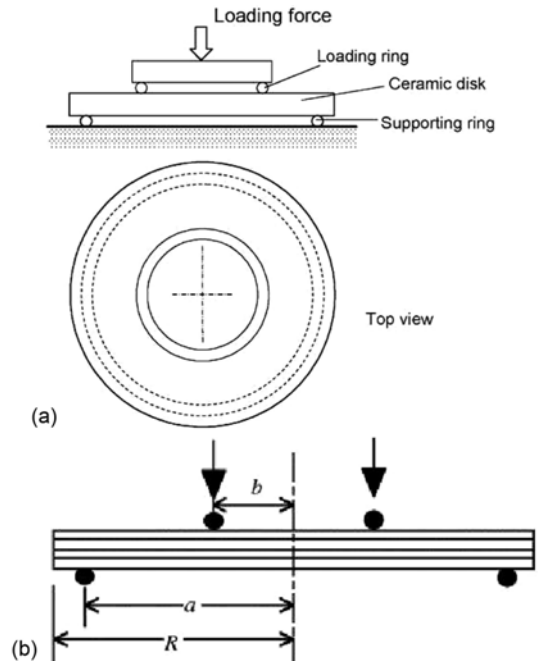


Fig. 2 Schematic drawing of the biaxial flexure test (BFT) which is also known as ring-on-ring test

작용 휨모멘트와 휨응력은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$M = \frac{P}{8\pi} \left[2(1 + \nu) \ln\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{(1 - \nu)(a^2 - b^2)}{R^2} \right] \quad (3)$$

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

여기서, P 는 작용하중, a , b , R 은 각각 중앙점부터 지지점 및 가력점까지의 거리, 판의 반지름이다. 판의 반지름과 지지점까지의 거리를 여유길이 $f=R-a$ 로 정의하면, 식 (4)와 같이 여유길이 f 가 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

3.1 1차 사전 실험

현재 콘크리트의 이방형휨인장 시험에 관한 KS 기준은 존재하지 않는다. 그러므로 콘크리트 판의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 일축휨강도 시험의 KS 표준공시체의 하중 가력점과 지지점의 비 및 순시간과 여유길이 f 가 유사하도록 원형 시험체를 제작하였다.

재료는 보통포틀랜드시멘트, 쇠석골재 및 일반 잔골재를 사용하였다. 콘크리트는 단위중량 31 kN/m^3 의 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 배합하였으며, 모든 시험체의 경우 28일 목표강도를 30 MPa로 설계하였다. 적용된 콘크리트 배합설계는 Table 1에 정리하였다.

일축휨강도 측정 실험체의 경우는 높이 \times 지름(순시간)이 각각 $30 \times 187.5(125) \text{ mm}$, $60 \times 375(250) \text{ mm}$ 와 $120 \times 750(500) \text{ mm}$ 인 원반형태의 실험체를 제작하였다. 재료 파괴의 연속성을 확보하기 위해 시험체의 두께는 최대 골재 치수의 5배 이상으로 하였다. 즉, 높이 30 mm의 실험체는 굵은골재 최대 치수를 5 mm로 하였으며, 높이 60 mm와 120 mm의 실험체는 각각 굵은골재 최대 치수를 10 mm와 20 mm로 사용하였다. 굵은골재의 단위중량은 26.68 kN/m^3 이며, 잔골재는 25.31 kN/m^3 인 골재를 사용하였다.

1차 사전실험의 변수는 Table 2에 정리하였다. 변수별 휨강도 실험체는 강도의 통계적인 분산을 고려하기 위해 각 32개를 제작하였으며, 압축강도 공시체는 3개를 제작하여 28일 이상 습윤양생하였다. 콘크리트의 압축강도는 휨강도 실험 전에 측정하였으며, 실험 결과는 Table 3에 정리하였다.

Table 1 Mix proportion for the 1st preliminary test

W/C (%)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Weight (kN)				SP	AE
				W	C	S	G		
35	120	5	39.45	1.90	5.43	6.30	10.17	0	0

구조물의 설계를 위한 콘크리트의 일축휨강도 또는 휨 파괴계수는 KCI¹⁸⁾에서 식 (5)와 같이 제시하고 있으며, 이축실험체의 휨강도와 이를 비교하였다.

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

전체적으로 실험체의 크기가 증가함에 따라 강도와 표준편차가 감소하는 경향을 나타내었으나, 모든 실험체의 최대휨강도가 휨파괴계수보다는 큰 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 실험체의 두께와 지간의 비는 0.24로서 기존 문헌¹¹⁻¹³⁾들의 판의 이축휨강도 실험에 적용되는 일반적인 두께의 비인 0.1 미만보다 크게 적용하였기 때문에 두꺼운 판으로서 순수 휨이 아닌 휨-전단복합응력이 발생한 것으로 판단된다. 또한 여유길이 f 가 너무 컸기 때문에 지지점부의 구속효과에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다.

3.2 2차 사전 실험

기존의 실험 결과 및 분석 결과를¹⁵⁻¹⁷⁾ 기초로 하여 콘크리트 강도, 골재 크기, 실험체의 크기 및 실험체 가력점과 지점간의 비율이 이축휨인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두 번째 실험을 실시하였다. 재료는 1차 사전 실험과 동일한 재료를 사용하였으며, 실험체의 변수는 Table 4에 정리하였다. 변수에 따라 실험체는 10개 이상 제작하였으며, 양생 28일 이후 압축강도 실험 후 휨 실험을 실시하였다. 콘크리트 압축강도는 각각 24, 33, 45 및 53 MPa로 설계하였으나 28일 양생 후 압축강도 실험 결과 34, 48, 56과 72 MPa의 압축강도가 얻어졌다. 배합설계시 의도했던 강도보다는 높은 강도가 얻어졌지만 이 시험의 목적상 정확한 압축강도를 대상으로

Table 2 Test variables for the 1st preliminary test

Height or thickness (mm)	Diameter (mm)	2a (mm)	2b (mm)	Compressive strength (MPa)
30	187.5	125	60	368
60	375	250	120	336
120	750	500	240	318

Note) 2a = diameter of the ring support, 2b = loading span

Table 3 The results of the 1st test

Series	Modulus of rupture (MPa)	Average biaxial flexural strength (MPa)	Standard deviation	COV
S	3.82	6.15	1.55	0.25
M	3.65	4.95	1.05	0.21
L	3.55	4.24	0.91	0.21

Table 4 The geometries of the specimens for the 1st and the 2nd tests

	h/a	f/a	b/a
The 1st test	0.48	0.50	0.52
The 2nd test	0.24	0.20	0.40

하지는 않는다. 또한 지점부의 마찰에 의한 구속조건의 영향을 판정하기 위하여 지점부를 원형으로 하는 경우와 사각형으로 하는 경우로 분리하여 실험을 수행하였다. 지점부부의 여유길이 f 와 지지점 거리 간의 비 f/a 를 1차 실험시의 0.5보다 작은 0.2로 하여 외부 구속효과를 최소화하고자 하였으며, 두께와 반지름의 비도 0.24로 기존의 문헌들과 유사하게 적용하였다. 1차 실험과 2차 실험시 적용된 실험체 형상 및 하중조건의 상관 관계는 Table 4에 정리하였다.

Fig. 3과 같이 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 실험하였으며, 실험 중 변위는 LVDT를 사용하여 데이터를 자동 저장하였다. 또한 소형 카메라를 시험체 하면에 장치해서 실시간으로 실험체의 균열유무를 관찰하였다. 전체 실험체의 실험 결과는 Table 6에 정리하였다.

33-M-10계열과 53-M-10계열의 실험체에서는 충분한 균열하중 결과를 획득하지 못하였다. 전체적으로 실험체의 균열은 가력점 내의 위치에서 균열이 발생한 후, 3개 이상의 방향으로 균열이 진전되며 파괴되는 양상을 보였다. 일차 실험 결과와 마찬가지로 실험체의 크기가 작을수록 측정강도가 커지는 것으로 확인되었다. 지점조건의 경우에도 원형지점보다 직사각형 지점의 경우가 구속효과 등에 의하여 강도가 약간 크고, 표준편차는 작게 나타났다. 콘크리트 강도 증가에 따라 이축휨강도도 증가하나 증가 폭은 점차 완만해지고, 대체적으로 보통강도 영역에서의 휨강도는 일축휨강도와 같이 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났다. 1차 실험 결과와 같이 설계기준 상의 휨파괴계수보다 크게 나타났으며, 강도가 낮을수록 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 골재 크기의 영향은 크지 않은 것으로 나타났으며, 지점조건에 따라 사각지점의 경우가 강도가 높게 관찰되었다. M series의 경우는 설계휨파괴 계수와 비교하여 1.35~1.52의 분포를 갖는 것으로 나타났으며, 표준편차의 경우는 1차 시험보다 약간 증가한 것으로 관찰되었다. 설계기준상 압축강도 평가시 허용되는 표준편차의 크기가 3내외인 것을 감안하면, 휨강도의 크기에 비하여 표준편차의 크기가 상당히 큰 것으로 판단된다.

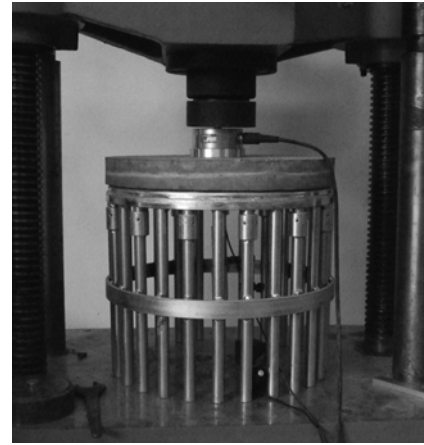


Fig. 3 Test set-up for the 2nd BFT test

Table 6 The results of the 2nd preliminary test

Series	Modulus of rupture (MPa)	Average biaxial flexural strength (MPa)	Standard deviation	COV
33-S-5	4.36	8.70	2.18	0.25
33-M-5	4.36	6.56	1.08	0.16
33-L-5	4.36	4.22	0.67	0.16
33-M-10	4.36	5.81	1.45	0.25
33-M-10-R	4.36	6.27	0.89	0.14
33-M-25	4.36	6.27	1.06	0.17
24-M-10	3.67	5.41	1.02	0.19
45-M-10	4.71	6.42	1.37	0.21
53-M-10	5.35	7.00	1.02	0.15

4. 최적 이방향 휨시험체(BFT specimen)제원

4.1 수치해석적 방법에 의한 표준 휨시험체

1차 실험과 2차 실험의 결과에 의하여 전체적인 원형판의 두께와 시험체의 크기는 이축휨파괴강도 측정에 적절한 것으로 판단되었으나, 순수휨응력을 발생시킬 수 있는 가력점간 거리와 지간의 비는 충분히 고려되지 못하

Table 5 Test variables for the 2nd preliminary test

Series	Compressive strength (MPa)	Size (h×d) (mm ²)	2a (mm)	2b (mm)	Number of specimens	Shape of support	Max. agg. size (mm)
33-S-5	48	30300	250	100	17		5
33-L-5	48	90900	750	300	20		5
24-M-10	34	60600	500	200	11		5
33-M-10	48	60600	500	200	11		10
33-M-10-R	48	60600	500	200	11		10
33-M-5	48	60600	500	200	12		5
33-M-25	48	60600	500	200	12		25
45-M-10	56	60600	500	200	9		10
53-M-10	72	60600	500	200	11		10

였다. 따라서 이 연구에서는 삼차원 탄성 유한요소해석^②을 통하여 실험체의 두께, 여유길이($f=R-a$), 시간과 하중재하점간의 상관관계에 대한 분석으로 보다 신뢰성 있는 실험체 제원을 제시하고자 하였다.

이축휨인장 시험체의 최적 구성을 도출하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 이방향 시험체와 일방향 시험체의 삼차원 유한요소해석을 실시하였다. 이방향 시험체와 일방향 시험체는 대칭조건을 이용해서 시험체의 사분의 일과 이분의 일만을 각각 모델링하였으며, 대칭조건이 적용된 면에서는 로울러 경계조건을 적용하였다. 해석을 위해 콘크리트의 탄성계수와 단위 중량 그리고 포아송비를 $E=34\text{ GPa}$, $\gamma=0.023\text{ kN/mm}^3$, $\nu=0.18$ 로 각각 가정하였으며, 실험을 위해서 반드시 필요한 이방향 시험체의 여유길이 f 와 두께 h 에 대한 지지점의 반지름의 비를 $f/a=0.05$, $h/a=0.24$ 로 고정하였다. 해석 시 각 시험체의 높이와 요소크기의 비는 일정하였다. Table 7은 수치해석을 위한 이방향과 일방향 휨인장 시험체의 시험체 높이와 요소크기의 비를 나타내고 있다.

Fig. 4는 이방향휨인장 시험체와 일방향휨인장 시험체의 삼차원 유한요소해석 결과이다. 이방향휨인장 시험체와 일방향휨인장 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. 이 응력은 하중이 재하되는 재하판 바깥 부위에서는 점진적으로 감

Table 7 Specimen and element size

Size	Height (mm)	Element size (mm)	Height/element size
S	30	5	6
M	60	10	
L	90	15	

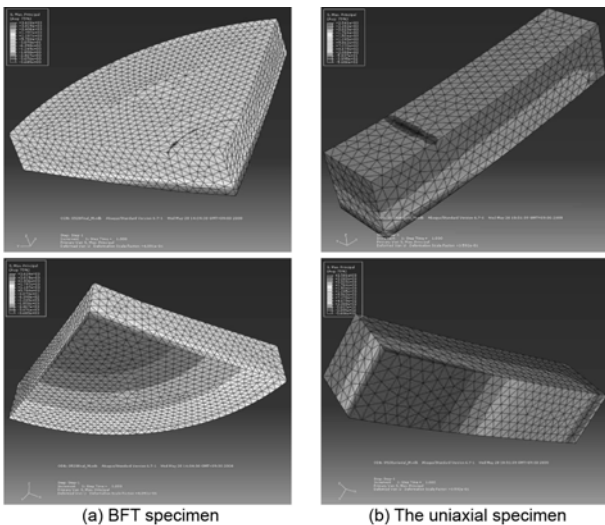


Fig. 4 Distribution of the principal stress on the bottom surface

^② 이 논문에서 수행한 유한요소 해석은 탄성해석으로서 탄성응력분포 분석 이외의 파괴하중 분석이나 변위 예측 등에는 사용될 수 없으나, 이 해석을 통해 식 (4)의 예측식 적합성은 검증할 수 있다.

소하였다. 즉, 이방향휨인장 시험체는 일방향휨응력시험에서 발생하는 응력구배와 비슷한 응력구배가 얻어졌으며, Fig. 5에서 알 수 있듯이 재하판 내부(2b구간)의 시험체 하면에서는 인장응력이 거의 동일함이 확인되었다.

Fig. 6은 이방향 휨인장 시험체에 대해 가력점과 지지점 크기 비율 b/a 에 따른 식 (4)에 의한 이론적인 해와 수치해석적인 해의 주응력 크기 비의 관계를 도시하였다. b/a 가 0.2에서 0.6사이에서는 이론적인 해와 수치해석적인 해와 그 크기 비가 거의 동일한 것으로 나타났으며, 이 중 b/a 가 0.25일 때 이론적인 해와 수치해석적인 해가 가장 일치함을 알 수 있었다.

해석 결과를 바탕으로 h/a 가 0.24이고 f/a 가 0.05인 이방향휨인장 시험체의 최적 구성을 Table 8에 도출하였으며, 여유길이 f 의 작용을 고려한 식 (4)에 의한 시험체의

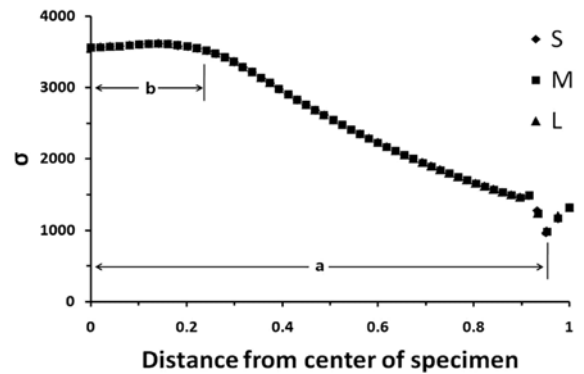


Fig. 5 The stress distribution on the bottom of a BFT specimen, the unit of stress is kPa and the distance is scaled with respect to a

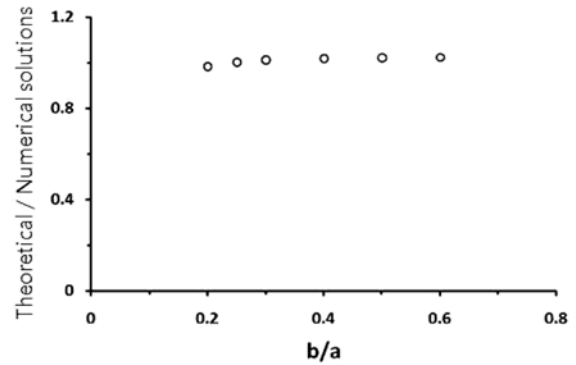


Fig. 6 The theoretical solution and the numerical solution for various b/a ratio

Table 8 The optimum geometry of the biaxial flexure test (BFT) specimens from the finite element analysis

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

이론적인 해와 최적 구성된 시험체의 수치해석적인 해의 크기 비를 Table 9에 나타내었다. 이론적인 해와 수치해석적인 해의 크기 비는 이방향 시험체와 일방향 시험체 모두 동일한 것으로 나타났다.

4.2 편심의 영향

이방향휨인장 시험을 실시 할 경우 하중 재하시 시편의 중앙과 가력장치의 중앙이 서로 일치하지 않을 때 발생할 수 있는 편심 오차가 커지면 응력분포가 불균일하게 되어 정확한 인장강도 획득이 어려울 수 있다. 따라서 적절한 인장강도를 얻기 위해서는 편심의 정도를 일정한 정도로 한정하여야 한다. 이를 검토하기 위해 최적 구성된 이방향 휨인장 시험체에 하중 재하판이 가력방향에 수직방향인 x축을 따라 편심이 작용할 경우의 편심 e 과 지지점과의 크기비 e/a 에 따른 응력변화를 수치해석을 통해 분석하였다.

Fig. 7은 편심이 작용한 시험체와 작용하지 않은 시험체의 삼차원 유한요소해석 결과를 비교하였다. Fig. 8은 편심이 작용한 시험체의 e/a 에 따른 시험체의 주응력 분포와 $2b$ 구간 끝점의 응력차를 각각 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 횡축 방향으로 편심이 증가함에 따라서 구간 끝점의 응력차가 점점 증가함을 알 수 있었다.

위와 같은 수치해석 결과를 종합해볼 때, 편심이 작용한 시험체의 $2b$ 구간 끝점의 응력차를 편심이 작용하지 않은 시험체 중앙점 응력의 10% 이내로 제한하기 위해서는 가력방향에 수직인 방향으로 e/a 가 3.5% 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.

5. 최적 실험체의 이축휨강도

사전 실험, 유한요소해석과 이론해에 대한 고찰을 통하여 콘크리트 재료에 적합한 이축휨강도 평가를 위한 표준시험체의 형상비를 제시하였으며, 이 장에서는 제시된 시험체의 구성을 적용하여 콘크리트의 휨강도를 평가하였다.

사전실험의 경우와 동일한 재료를 사용하여 콘크리트를 제작하였으며, 28일 목표강도는 35 MPa로 설계하였다. 콘크리트 배합설계는 Table 10과 같으며, 5개의 공시체에 대한 28일 압축강도는 평균 52.5 MPa로 측정되었다.

시험변수는 Table 11에 나타낸 것과 같이 시험체의 크기, 골재의 크기를 변수로 하였으며, 지점부의 마찰구속 효과를 평가하기 위해 각 시험체 수의 절반에 해당하는

Table 9 Comparison between the theoretical solution and the numerical solution of the BFT specimens

		Theoretical solution / numerical solution
Specimen Size	S	1.008
	M	1.003
	L	1.005

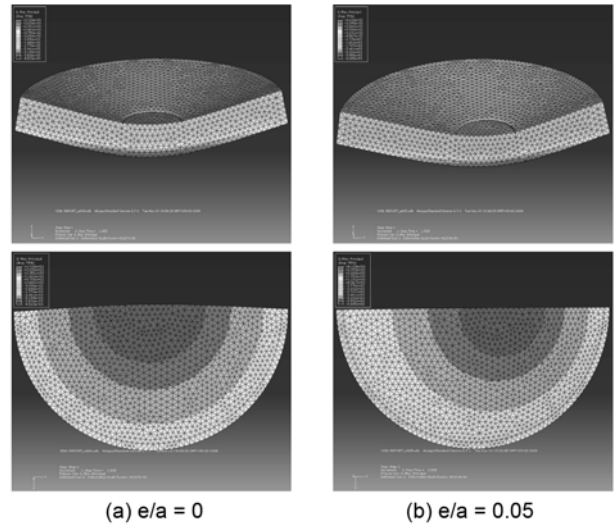


Fig. 7 Principal stress distribution of bottom surface subjected to eccentric loading

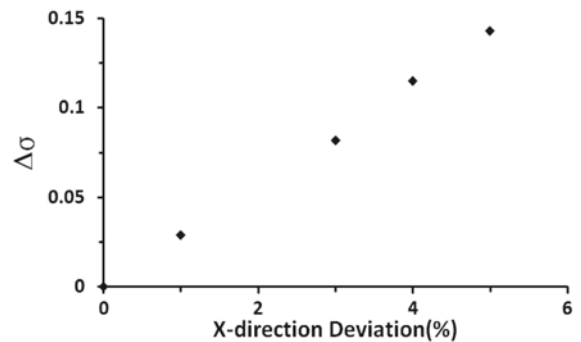


Fig. 8 The deviation of the stress due to the eccentricity of the loading point

시험체의 지점에 테프론 섬유를 적용하였다.

Table 12에는 실험 결과를 정리하였다. 테프론 섬유를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 약간의 강도 차이는 있으나, 이 논문에서는 구분해서 정리하지는 않았으며, 추

Table 10 Mix proportion

Design strength (MPa)	W	C	S	G	AE	SP	Filler
35	160	457	693	972	4.571	0.0	0.00

Table 11 Test variables

Series	Size ($h \times d$) (mm^2)	$2a$ (mm)	$2b$ (mm)	Support	No. of specimens
35-5 mm-25	30263	250	63		16
35-5 mm-50	60525	500	125		20
35-5 mm-75	90788	750	188		17
35-10 mm-50	60525	500	125		20
35-20 mm-50	60525	500	125		19
35-25 mm-50	60525	500	125		20

Table 12 Test results obtained from the proposed optimal BFT specimens

Series	Modulus of rupture (MPa)	Average biaxial flexural strength (MPa)	Standard deviation	COV
35-5mm-25	4.56	11.09	2.281	0.21
35-5mm-50		6.59	0.620	0.09
35-5mm-75		3.39	1.162	0.34
35-10mm-50		5.67	0.753	0.13
35-20mm-50		5.66	0.877	0.15
35-25mm-50		5.23	1.063	0.20

후 자세한 결과를 발표할 예정이다. 통계적 분산성은 실험체의 두께가 얇은 2차 실험과 3차 실험의 경우가 1차

의 경우보다 상대적으로 높게 나타났으며, 골재의 크기의 영향은 분산에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 강도의 경우는 골재의 크기가 작을수록 높게 판정되나, 10 mm 이상의 골재 크기에서는 골재 크기에 따른 추가적인 편차는 없는 것으로 판단된다. Fig. 9에는 각 기하조건의 변화에 따라 휨강도의 변화 정도를 나타내었다.

콘크리트 압축강도로 인한 실험 결과 판독의 오류를 제거하기 위해 식 (4)에 의해 산정된 휨강도를 압축강도의 제곱근으로 나누어, 즉, $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 로 정규화(normalize)하였다. 시험체 높이 h 와 가력점 a 의 관계에서는 h/a 가 작은 얇은 판이 강도가 약간 큰 것으로 나타났다. M series는 지점의측부의 여유길이의 영향이 크지 않은 것으로 나타났으나, 시험체의 크기가 큰 L series의 경우는 강도가 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지간과 가력점간의 관계에서도 유사한 결과를 나타내었다.

6. 결 론

이축 휨강도에 영향을 주는 인자를 확인하기 위해 일차 및 이차 예비 실험을 수행하였으며, 이 때 확인된 인자들의 영향을 삼차원 유한요소해석으로 평가하여 최적 실험체 형상을 제시하였으며 이를 활용하여 이방향 휨인장강도를 측정하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 시험체의 두께가 감소할수록 설계기준상의 휨파괴계수와 비가 감소하는 것으로 나타났으며, 높이 60 mm인 시험체의 경우 평균적으로 휨파괴계수의 1.2~1.5배로 나타났다. 그러나 표준편차를 고려할 경우 이방향 인장하중의 위험도가 설계휨파괴계수와 비슷하거나 낮아 파괴계수의 다축인장에 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) 이축휨실험시 발생할 수 있는 편심의 영향을 해석을 통하여 평가하였으며, 편심이 작용한 시험체의 구간 끝점의 응력차를 편심이 작용하지 않는 시험체의 중앙점 응력의 10% 이내로 제한하기 위해서는 가력방향에 수직인 방향으로 e/a 가 3.5% 이내가 되어야 하는 것으로 분석되었다.
- 4) 시험체 크기에 대한 영향을 분석한 결과 시험체의 크기가 증가할수록 강도는 반비례하였으며, 골재크기의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 따라서 실험 결과의 신뢰성과 실험의 용이성 등을 고려하면 높이 60 mm 정도의 실험체가 적절한 것으로 판단된다.
- 5) 얇은 판에 적용되고 있는 ring-on-ring 시험법에 의한 콘크리트의 이축휨강도 실험은 콘크리트 재료의

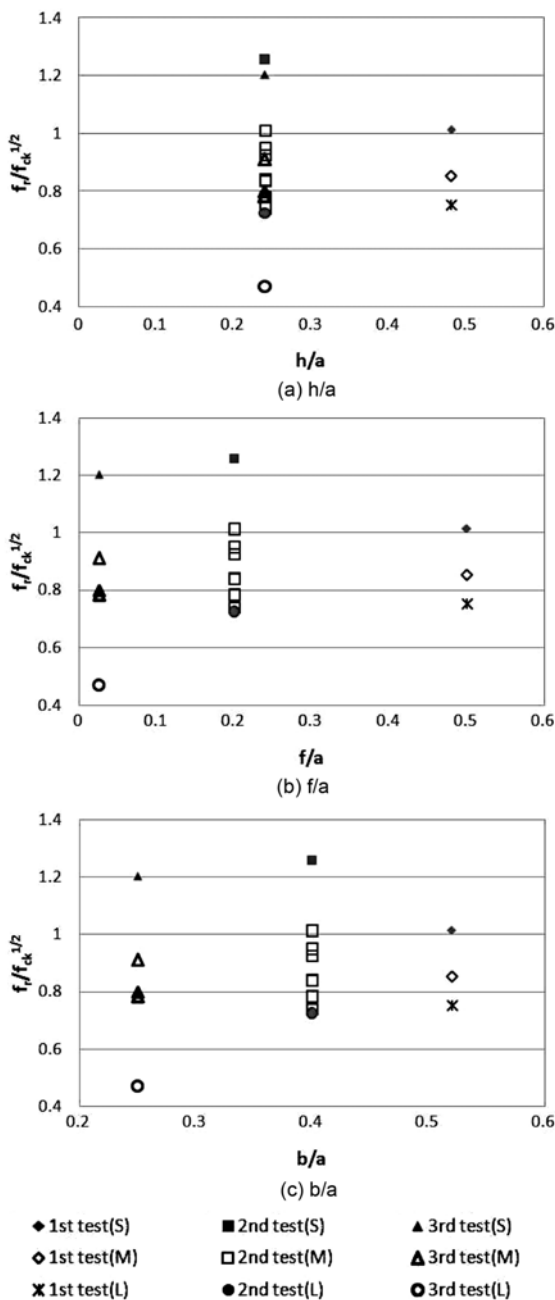


Fig. 9 Flexural strength variation upon geometric ratio

실제적 휨강도를 평가할 수 있음에도 시험절차가 상대적으로 복잡하고, 기하조건 및 표면조건 등에 의한 영향을 받을 수 있다. 따라서 규격화된 표준 시험법이 제시되기 위해서는 각 인자들에 대한 추가적인 실험이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단의 기초연구지원사업(D00793)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 저자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- Munz, D. and Fett, T., "Ceramics, Mechanical Properties, Failure Behaviour," Materials Selection, Springer, Berlin, 1999, 293 pp.
- Giovan, M. N. and Sines, G., "Strength of a Ceramic at High Temperatures under Biaxial and Uniaxial Tension," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 64, 1981, pp. 68~73.
- Fessler, H. and Fricker, D. C., "A Theoretical Analysis of the Ring-on-Ring Loading Disc Test," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 67, 1984, pp. 582~588.
- Solt'esz, U., Richter, H. and Kienzler, R., "The Concentric-Ring-Test and Its Application for Determining the Surface Strength of Ceramics, in High Tech Ceramics," Elsevier Science Publishers, 1987, pp. 149~158.
- Marshall, D. B., "An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics," *Ceramic Bulletin*, Vol. 59, 1980, pp. 551~553.
- Shetty, K. D., Rosenfield, A. R., McGuire, P., and Duckworth, W. H., "Biaxial Flexure Test for Ceramics," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 59, 1980, pp. 1193~1197.
- Shetty, K. D., Rosenfield, A. R., McGuire, P., Bansal, G. K., and Duckworth, W. H., "Biaxial Fracture Studies of a Glass Ceramic," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 64, 1981, pp. 1~4.
- Bhamra, G., Palin, W. M., and Fleming, G. J. P., "The Effect of Surface Roughness on the Flexure Strength of an Alumina Reinforced All-Ceramic Crown Material," *Journal of Dentistry*, Vol. 30, 2002, pp. 153~160.
- Saraf, M. N., Gupta, R. K., and Vishwanath, "Biaxial Flexural Strength and Estimation of Size on the Strength Properties of FRP Composites," *Defence Science Journal*, Vol. 40, No. 2, 1990, pp. 171~181.
- Hsueh, C. H. and Kelly, J. R., "Simple Solutions of Multilayered Discs Subjected to Biaxial Moment Loading," *Dental Materials*, Vol. 25, 2009, pp. 506~513.
- Higgs, W. A. J., Lucksanasombool, P., Higgs, R. J. E. D., and Swain, M. V., "Evaluating Acrylic and Glass-Ionomer Cement Strength Using the Biaxial Flexure Test," *Biomaterials*, Vol. 22, 2001, pp. 1583~1590.
- Kanchanasavita, W., Anstice, H. M., and Pearson, G. J., "Long-Term Flexural Strengths of Resin-Modified Glass-Ionomer Cements," *Biomaterials*, Vol. 19, 1998, pp. 1703~1713.
- Morrel R, McCormick, N. J., Bevan, J., Lodeiro, M., and Margetson, "Biaxial Disc Flexure-Modulus and Strength Testing," *British Ceramic Transactions*, Vol. 98, No. 5, 1999, pp. 234~240.
- Hsueh, C. H. and Luttrell, "Recent Advances in Modelling Stress Distributions in Multilayers Subjected to Biaxial Flexure Tests," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 278~285.
- 오홍섭, 지광습, "일축 및 이축 휨인장강도의 실험적 비교," 콘크리트학회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 139~146.
- 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*, Vol. 38, No. 6, 2007, pp. 751~756.
- 지광습, 오홍섭, 최진혁, "콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법," 대한토목학회 논문집, 27권, 5A호, 2007, pp. 753~758 .
- 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준" 한국콘크리트학회, 2008, 520 pp.

요 약 콘크리트를 설계하기 위해 설계자는 설계의 효율성을 위하여 일축휨강도에 기초한 설계를 하고 있지만, 포장체 및 바닥판과 같은 실제 구조요소의 응력상태는 재료전반에 작용하는 이축응력이 발생하게 된다. 따라서 콘크리트의 이축휨시험은 사용하중상태에서 콘크리트의 거동을 평가할 수 있는 중요한 설계인자로서 사용될 수 있다. 이 연구에서 저자들은 콘크리트 이축휨강도를 평가할 수 있는 BFT 시험법의 최적 구성을 제안하였다. 이 기법은 세라믹 또는 바이오 재료 분야에서 사용되어온 링온링 시험법을 콘크리트 재료에 적합하도록 수정, 제시한 것이다. 이를 위하여 유한요소해석과 정밀해에 대한 분석을 통하여 시험체의 형상과 시험법을 제시하였다. 제안된 방법에 의한 실험 결과, 이축휨실험을 통하여 콘크리트 재료의 휨강도를 충분히 판정할 수 있는 것을 증명할 수 있었다.

핵심용어 : 이축휨시험, 인장강도, 균열, 파괴