



휨인장강도 평가 방법에 따른 콘크리트 원형패널의 휨거동에 관한 실험적 연구

김지환¹⁾ · 지광습^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학과

An Experimental Study on the Flexural Behavior of the Round Concrete Panels according to the Evaluation Method of Biaxial Flexural Tensile Strengths

Jihwan Kim¹⁾ and Goangseup Zi^{1)*}

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

ABSTRACT In this study, we conducted experiment and finite element analysis on the flexural behavior of the round concrete panels according to the evaluation method of biaxial flexural tensile strengths. The Round Panel Test (RPT) and the Biaxial Flexure Test (BFT) were used to determine the biaxial flexural strength of round plain concrete panels. In order to understand the stress distribution on the panels, we measured load-strain relationship at the center of the panels' bottom surface. Test results show that fracture pattern in RPT and BFT panels are similar, and the tensile stress distribution is uniform in all directions at the center of the bottom surface of the panels for both RPT and BFT. The distribution of stresses in two test specimens coincided with the analysis result. The average biaxial flexural strength of RPT is about 29% greater than those of the BFT. The coefficient of variations (COV) of the RPT and BFT for the biaxial flexure strength is 8%, 6%, respectively, which indicates that BFT method is useful and reliable for determining biaxial flexural strengths of the concrete.

Keywords : concrete, radial crack, biaxial stress state, isotropic tensile stress, biaxial tensile strength

1. 서 론

오늘날 건축·토목 분야에서 고강도 콘크리트(high-strength concrete), 섬유 보강 콘크리트(fiber-reinforced concrete)와 같은 고성능 콘크리트(high performance concrete)의 개발과 실용화는 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화 및 고성능화를 가능하게 할 뿐만 아니라 경제적, 친환경적 측면에서 큰 기여를 하고 있다. 그러나 높은 압축 강도에 비해 상대적으로 낮은 인장강도는 고성능 콘크리트를 사용한 구조물에서도 균열 발생을 야기 시키며, 균열로 인한 구조물의 내구성(durability) 및 사용성(serviceability) 저하를 가져온다.

고강도 콘크리트의 경우 보통 강도 콘크리트에 비해 자기수축(autogenous shrinkage)이 상당히 커서 초기 균열 발생 가능성이 크고, 내부 조직이 치밀하여 화재 발생시 고온에 의한 내부 수증기압이 상승하여 그 압력이 콘크리트의 인장강도보다 커지게 되면 콘크리트 구조물에는

폭렬(explosive spalling)이 발생한다.¹⁾ 이러한 폭렬 현상은 부재에 균열과 박리·박락을 야기 시킨다. Fig. 1(a)는 고강도 콘크리트의 내화 성능 실험 시 콘크리트 기둥 부재에 횡방향 균열 및 방사형 균열(radial cracks)이 발생하는 것을 보여 주고 있다. 또한, 콘크리트 구조물의 건조수축에 의한 균열 저항성을 증대시키기 위해 보강재로 섬유의 사용이 증가하고 있는 추세임에도 불구하고, 여전히 건조수축으로 인한 균열은 발생하고 있다. Fig. 1(b)는 콘크리트 구조물에 흔히 발생하는 전형적인 건조수축(drying shrinkage)에 의한 방사 균열을 보여 주고 있다.

이처럼 일반 콘크리트 구조물뿐만 아니라 고성능 콘크리트 구조물에서도 필연적으로 발생하는 균열을 예측하고 이에 대한 저항 성능을 평가하기 위해서는 무엇보다도 콘크리트의 인장강도에 대한 정확한 이해가 우선되어야 한다. 콘크리트의 인장강도를 평가하기 위한 시험으로는 직접 인장시험, 쪼갬 시험, 휨강도 시험 등이 있으며, 이 중 휨강도 시험에는 주로 보(bean) 시험체와 원형 패널(round panel) 시험체를 이용하는 시험이 있다.

보시험체는 직접 인장강도를 대신하여 무근 콘크리트의 휨인장강도 및 섬유 복합체의 휨인성을 평가하기 위해 주로 사용되고 있다.²⁾ 그러나 최근 콘크리트 재료의

*Corresponding author E-mail: g-zi@korea.ac.kr

Received February 22, 2011, Revised May 30, 2011,

Accepted July 5, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute



Fig. 1 Radial cracks caused by biaxial stress state on concrete surface

고성능화로 인해 구조적 특성상 내부에 발생하는 실제 응력 상태가 Fig. 2(a)와 같이 일방향 응력 상태(uniaxial stress state) 보다는 Fig. 2(b)와 같은 이방향 응력 상태(biaxial stress state)에 가까운 경우가 흔히 발생한다. 따라서, 설계 시 일방향 휨응력 상태가 발생하는 보 시험체에 의해 측정된 휨인장강도만을 고려하는 설계방법으로는 이방향 휨응력 상태의 구조물에서 발생하는 균열 강도 및 균열 발생 위험도를 충분히 평가하기에 적절하지 못하다.

또한, 보 시험체의 경우 최대 인장 응력이 발생하는 영역에 모서리가 포함되어 파괴 전 균열 생성이 모서리 부위에서 일어나 전체 두께로 전진되며 파괴되는 모서리 파괴(edge failures)를 야기시킬 수 있다.³⁾ 반면에 원형 패널을 이용한 휨강도 시험은 시험 시 원형 패널이 실제 구조물에서 발생하는 이방향 휨응력 상태에 놓이게 되어 이방향 휨인장강도를 측정하기에 적합할 뿐만 아니라, 최대 인장응력이 시편 중심부에 작용하여 시험체 모서리에는 응력이 거의 발생되지 않아, 휨인장강도에 영향을 주는 모서리 파괴를 배제할 수 있다.⁴⁾

현재 건설 분야에서 원형 패널을 적용하는 시험법에는 ASTM C 1550⁵⁾에서 규정하는 round panel test(RPT) 시험과 국내 연구진들에 의해 개발된 이방향 휨인장강도 시험(biaxial flexure test; BFT)^{6,7)}이 있다. RPT 시험은 섬유 보강 슛크리트(fiber-reinforced shotcrete) 및 섬유 보강 콘크리트(fiber-reinforced concrete)의 휨인성을 평가하기 위해 사용되고 있는 시험이고, BFT 시험은 무근 콘크리트의 이방향 휨인장강도를 평가하기 위하여 제안된 시험법이다.

이 연구에서는 RPT 시험법과 BFT 시험법에 따른 무근 콘크리트 원형 패널의 휨거동을 비교하기 위해, 삼차원 유한요소해석과 휨인장강도를 측정 실험을 수행하였

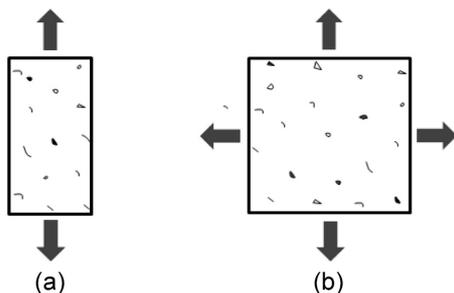


Fig. 2 (a) Uniaxial and (b) Biaxial stress states

으며, 실험 결과에 대한 고찰을 통하여 두 시험의 상관 관계를 유추하여 원형 패널을 이용한 이방향 응력 상태의 구조물의 거동 평가에 대한 기초를 제공하고자 한다.

2. 원형 패널을 이용한 휨인장강도 시험

2.1 ASTM C 1550 round panel test(RPT)

ASTM C 1550에서 규정하는 원형 패널을 이용한 RPT 시험은 호주의 RTA(roads and traffic authority)에서 규정하고 있는 Test Method T373(determination of the toughness of a fiber reinforced shotcrete mix-round determinate panel test)과 동일한 시험법이다.⁸⁾ RPT 시험은 두께 75 mm, 지름 800 mm의 원형 패널을 이용하여 섬유 보강 슛크리트 및 콘크리트의 휨인성을 평가하기 위한 시험으로, Fig. 3과 같이 원형 패널이 3개의 회전축으로 지지되며, 패널 중앙에 집중 하중을 재하하는 형식의 시험이다. RPT 시험은 유리 및 세라믹 분야에서 이방향 휨인장강도를 측정하기 위해 주로 사용되고 있는 piston on 3 ball 시험과 같은 원리의 시험이며, piston on 3 ball 시험은 ASTM F 394-78에 규정되어 있다.⁹⁾

RPT 시험은 시험 방법이 간단하고, 시험 결과의 분산성이 낮다는 장점을 가지고 있다. 그러나 균열이 지점 조건에 의해 지점과 지지점 사이에서 3조각의 일정한 방향과 형태로만 발생한다. 이는 균열 발생 방향이 미리 정해졌기 때문에 재료 결함의 통계적 특성이 미치는 영향을 적절히 고려하기에는 적합하지 않다.

2.2 이방향 휨인장강도 시험(biaxial flexure test, BFT)

BFT 시험은 콘크리트의 이방향 휨인장강도를 측정하기 위해 지광습 등⁶⁾과 Zi 등⁷⁾에 의해 최초로 도입되었다. BFT 시험은 유리 및 세라믹 분야에서 사용되어온 ring-on-ring^{10,11)} 시험을 콘크리트 재료에 적합하도록 수정, 제시한 것으로 Fig. 4와 같이 무근 콘크리트 원형 패널과 링 형태의 지지점 및 가력 장치로 구성된다.

BFT 시험은 원형 패널의 가력 장치 내 모든 방향에서 일정한 등방성 인장응력(isotropic tensile stress)이 형성되어 실제 구조물에서 발생할 수 있는 이방향 인장응력 상태를 가장 잘 평가할 수 있는 시험법이다. 그러나 시험

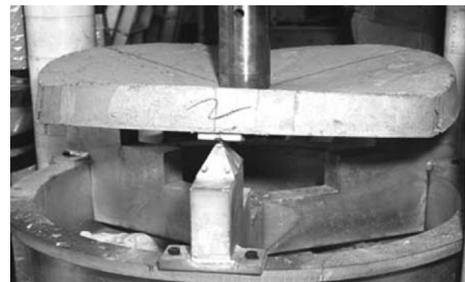


Fig. 3 Test set-up for the ASTM C 1550⁵⁾ round panel test

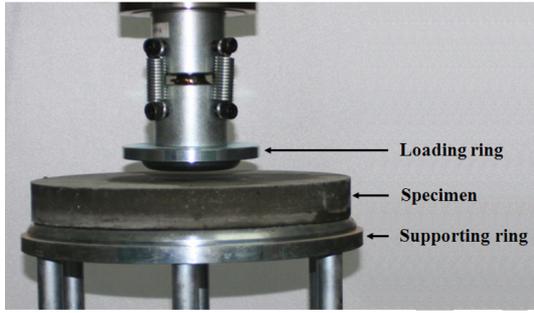


Fig. 4 Test set-up for BFT test

시 가력 장치, 원형 패널, 지점 장치의 원점이 완전히 일치하지 않거나, 패널의 표면 조건에 의해서 패널이 가력 장치 및 지점 장치와 완전하게 맞붙지 않을 경우, 패널에 작용하는 등방성 응력 분포가 한쪽으로 치우치게 된다. 응력 분포의 치우침은 원형 패널의 한 부분에 집중 응력을 발생시켜 정확한 강도 측정이 어려운 것으로 세라믹 분야에서는 알려져 있다.^{10,12)}

2.3 수치 해석적 방법에 의한 휨거동 평가

Weibull¹³⁾의 이론에 의하면 취성 재료의 강도는 최대 응력의 작용 면적에 따라 결정되는데, 이는 콘크리트 강도에 영향을 주는 미세 균열이나 공극 등과 같은 결점들의 확률적 분포(probability distribution) 때문이다. 이 이론을 적용하여 콘크리트 재료 분야에서는 Bažant¹⁴⁻¹⁶⁾에 의해 크기 효과(size effect)에 관한 연구가 진행되어 왔다.

Fig. 5는 RPT 시험체와 BFT 시험체의 삼차원 유한요소 해석 결과이다. 해석 결과, 두 시험체 모두 시험체 중앙에 최대 인장응력이 발생하나, RPT 시험체 보다는 BFT 시험체에서의 최대 인장응력 발생 면적이 상대적으로 더 넓은 것을 알 수 있다. RPT 시험체의 경우, 집중 하중에 의해 최대 인장응력이 작용하는 부위에 확률적으로 시험체의 강도에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 결점들이 적은 반면, BFT 시험체의 경우에는 링 형태의 가력 장치로 인해 가력 장치 내부에 동일한 최대 인장응력이 작용하기 때문에 확률적으로 강도에 영향을 주는 많은 결점들이 존재한다. 따라서 RPT 시험체 보다는 BFT 시험

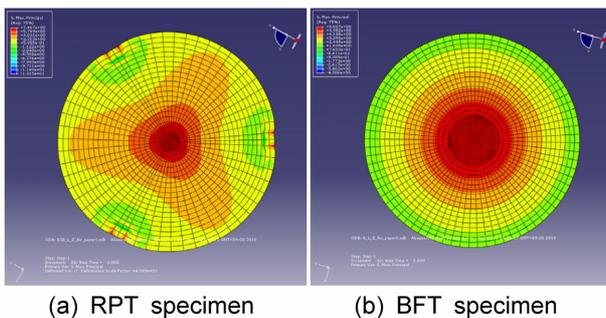


Fig. 5 The contour plot of the maximum principal stress on the bottom surface

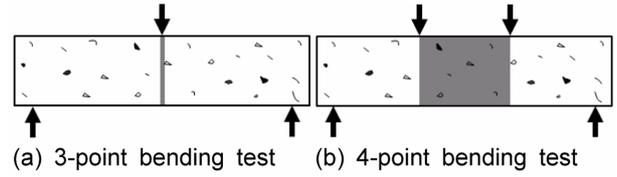


Fig. 6 The test design

체의 휨인장강도가 더 낮을 것으로 예측된다.

또한, Fig. 5(a)에서는 RPT 시험체의 주응력 분포가 3중 대칭(three-fold symmetry)인 것을 알 수 있으며, 이러한 응력 분포로부터 시험체의 일정한 위치에서 발생한 균열은 지점과 지점 사이의 일정한 방향으로 나아간다는 것을 예측할 수 있다. 그러나 BFT 시험체의 경우 등방성 응력분포로 인해 시험체 인장면의 가장 약한 지점에서 균열이 발생할 수 있으며, 그 균열은 모든 방향으로 진전이 가능한 것을 알 수 있다(Fig. 5(b)).

이러한 차이점들은 Fig. 6과 같이 보 시험체를 이용하여 콘크리트의 휨강도 측정에 사용되는 3점과 4점 휨시험의 논지와 유사하다. 기존의 많은 연구 결과에서 3점 휨 시험에 의해 측정된 콘크리트 휨 강도가 4점 휨 시험에 의한 강도보다 더 큰 것으로 나타났다.¹⁷⁾ 앞에서 언급한 바와 같이 3점 휨 시험체는 Fig. 6(a)와 같이 최대 모멘트가 한 지점에서만 발생하여, 확률적으로 최대 모멘트 부위에 포함될 결점의 수가 적어 높은 강도를 나타내는 것으로 나타났으며, 4점 휨 시험체는 Fig. 6(b)와 같이 가력점과 가력점 사이에 최대 모멘트가 일정하게 발생하여 그 구간 내에는 강도에 영향을 줄 수 있는 많은 결점들을 포함하고 있어 낮은 강도를 갖는 것으로 나타났다.¹⁸⁾

3. 실험 개요 및 방법

3.1 실험 개요

이 연구에서는 휨인장강도 평가 방법에 따른 무근 콘크리트 원형 패널의 거동을 비교 분석하기 위하여 RPT 시험과 BFT 시험을 적용하여 원형 패널의 휨인장강도 측정 실험을 수행하였다. RPT 시험체의 휨인장강도 평가를 위해 ASTM C 1550에서 규정하고 있는 시험법을 적용하였고, BFT 시험을 위해 지광승 외¹⁹⁾에 의해 최적 구성된 시험체의 두께 $h(\text{mm})$ 와 중앙점으로부터 지지점까지의 거리 $a(\text{mm})$ 의 비, $h/a=0.24$ 를 적용하여 두께 75 mm, 지름 657 mm 크기의 무근 콘크리트 원형 패널 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 시험체는 강도의 통계적인 분산을 고려하기 위해 각 시험법에 따라 13개씩 제작하였으며, 시편 번호에서 3과 B는 RPT와 BFT를 L은 두께 75 mm, 그리고 숫자는 각 시편의 일련 번호를 나타낸다. 시험체의 제원은 Table 1에 정리하였다.

이 실험을 위해 콘크리트의 28일 목표강도를 30 MPa로 설계하였으며, 실험에 사용된 두께 75 mm 시험체의 재료 파괴 연속성을 확보하기 위하여 굵은 골재는 최대치수

Table 1 The dimensions of the specimens

Specimens	h (mm)	Size (mm) (h × 2R)	2a (mm)	2b (mm)
RPT, BFT	75	75 × 657	625	156

8 mm인 부순 굵은 골재를 사용하였다.¹⁸⁾ 시험체의 평탄성 확보를 위해 철판을 이용하여 몰드를 제작하였으며, 12 mm 두께의 합판 위에 몰드를 놓고 콘크리트를 타설하였다. 균일한 시험체 제작을 위해 레미콘으로 타설을 한 후 48시간이 경과한 후 탈형하여 시험 수행 시까지 양생소에서 수중 양생을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 5개의 Ø100 × 200 mm 원주공시체를 제작하여 KS F 2405²⁰⁾ 기준에 의해 측정하였으며, 평균 33 MPa로 얻어졌다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트 배합설계는 Table 2에 정리하였다.

3.2 실험 방법

BFT 시험 시 시험체의 표면 조건으로 인해 가력 장치와 패널 그리고 지점장치 사이에 발생할 수 있는 비접촉 구간을 고려하여 Fig. 7과 같이 시험체의 아랫면에 고강도 공업용 석고를 사용하여 시험체에 균일한 하중이 전달되도록 하였다. 이는 KS F 2403²¹⁾ 기준의 압축강도 시험을 위한 원주형 콘크리트 공시체의 표면 마무리인 캐핑(capping)과 같은 목적을 가지며, 석고의 두께는 시험체 두께의 2%인 1.5 mm로 하였다. 또한 시험체와 가력장치 그리고 지점장치 사이에 균일한 하중 전달을 위하여 20 mm 두께의 고무판을 덧댄 후 실험을 실시하였으며, 마찰로 인한 구속 효과를 최소화하기 위하여 마찰계수가 0에 가까운 0.3 mm 두께의 폴리에틸렌(polyethylene) 계열 Teflon 섬유를 사용하여 실험을 수행하였다.

두 시험에 의해 원형 패널에 작용하는 응력 분포를 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 시험체의 중앙 아랫면에 2개의 60 mm 변형률 게이지를 직교하도록 부착하여 하중-변형률 관계를 측정하였다.

이 실험에서는 가력 장치, 시험체, 지점 장치의 원점 일치 를 위하여 가력 장치를 액츄에이터에 일체화 시켰고,

Table 2 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
		W	C	S	G
42	49	170	405	866	934

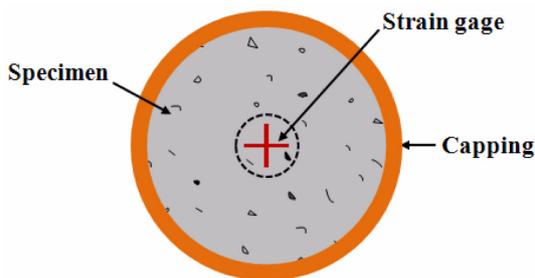


Fig. 7 The bottom surface of BFT specimen



(a) RPT (b) BFT

Fig. 8 Test set-up

가력 장치의 중심에 추를 매달아 지점 장치와 시험체의 원점이 일치하도록 하였다. 하중 재하는 100 kN 용량의 hydraulic actuator(STC-10D)를 사용하였으며, 데이터 수집은 TML(일본)사의 DATA LOGGER(TDS-303)을 사용하였다. RPT 시험과 BFT 시험 모두 분당 1 mm의 변위 제어(displacement control) 방식으로 하중을 가하였고, 원형 패널이 파괴될 때까지 하중을 재하하여 시험체에 가해지는 최대 하중을 측정하였다. Fig. 8은 각각 RPT 시험과 BFT 시험의 실험 전경이다.

4. 실험 결과 및 분석

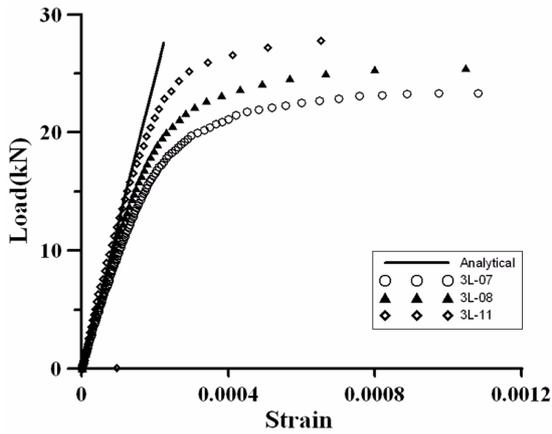
4.1 실험 결과

실험에 의한 BFT 시험체의 휨인장강도 산정은 판이론을 적용한 식 (1)을 사용하였다.^{6,22,23)}

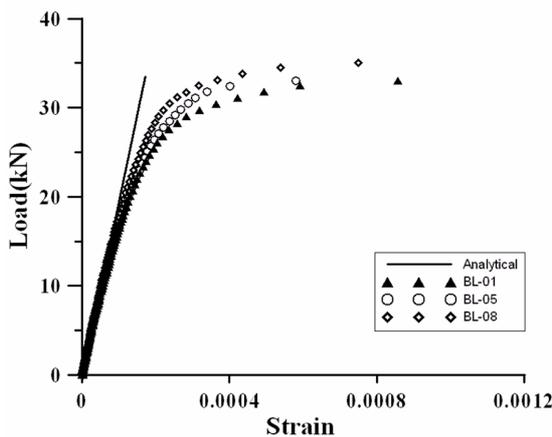
$$f_b = \frac{3P}{4\pi h^2} \left[2(1 + \nu) \ln\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{(1 - \nu)(a^2 - b^2)}{R^2} \right] \quad (1)$$

여기서, f_b 는 콘크리트 이방향 휨인장강도(MPa), P는 최대하중(N), h는 시험체 높이(mm)이며, a, b, R은 각각 BFT 휨시험체의 중앙 점부터 지지점 및 가력점까지의 거리(mm), 시험체의 반지름(mm)이다. ν 는 콘크리트 포아송비이다. 이 연구에서 ν 는 실험에 의해 측정된 0.184를 사용하였다. 기존 연구에서 식 (1)에 의한 이론적인 해와 유한요소해석에 의한 해가 동일한 것으로 확인 되었다.¹⁹⁾ 단, 위 식에 의해 계산된 휨인장강도는 실제 시험체에 작용하는 휨인장강도 보다 더 큰 것으로 판단되며, 이는 시험체의 소성 변형에 기인한다.²³⁾ 비슷한 예로 Westergaard 계산식을 이용한 도로포장해석 시 소성 변형이 예상되는 유효중 직하부에서는 계산된 응력을 감소시켜 사용되는 예가 있다.²⁴⁻²⁶⁾

RPT 시험법은 휨인장강도 산정을 위한 이론식이 아직 개발되지 않아 이 연구에서는 강도 산정을 위해 삼차원 유한요소해석 결과를 이용하였다. 해석 시 필요한 물성치는 실험에서 얻은 동일한 재료 물성치를 사용하였다. Fig. 9에는 두 시험의 실험과 해석 결과로 얻은 시험체 아랫면의 하중-변형률 관계를 비교하였다. 두 시험 모두



(a) RPT specimens



(b) BFT specimens

Fig. 9 Comparison between analytical and experiment for load-strain relationship

실험과 해석에서 얻은 초기 하중-변형률 관계가 일치하는 것으로 나타났으며, RPT 시험 보다는 BFT 시험의 결과가 더 안정적인 것을 확인할 수 있다. Table 3은 RPT 시험과 BFT 시험의 결과로 얻은 휨인장강도를 정리한 것이다. 시험결과로부터 RPT 휨인장강도가 BFT 휨인장강도 보다 약 29% 더 큰 것으로 나타났으며, 표준편차 역시 RPT 휨인장강도가 두 배 더 크게 나타났다.

Fig. 10은 RPT 시험체와 BFT 시험체의 대표적 파괴 형상을 나타내고 있다. 두 시험체 모두 이방향 인장 상태 하에서 나타나는 방사형 균열로 파괴되었다. RPT 시험체는 가력점을 중심으로 지점과 지점 사이에서 3조각으로 일정한 균열이 발생하였고, BFT 시험체는 가력 구간내의 최대 모멘트 영역 안에서 균열 발생과 함께 파괴되었다. BFT는 RPT와 달리 시험체의 균열 방향을 예측할 수가 없었다. 이는 재료 결함의 통계적 특성이 미치는 영향을 적절히 고려하기에 적합하다. 보 시험체를 이용한 일방향 휨시험의 경우 4점 휨시험이 이에 해당한다고 할 수 있다.

4.2 실험 결과 분석

Fig. 11은 시험 및 파괴 형상에 따른 원형 패널의 응

Table 3 Test results obtained from the RPT and BFT method

No.	Flexural strength (MPa)	
	RPT	BFT
1	6.87	5.57
2	6.43	5.80
3	8.15	5.13
4	6.99	5.43
5	7.02	5.60
6	8.32	4.96
7	6.36	5.97
8	6.94	5.93
9	7.42	5.36
10	7.32	5.49
11	7.60	6.03
12	-	5.48
13	-	5.85
Average	7.22	5.59
Standard deviation	0.60	0.31
COV	0.08	0.06



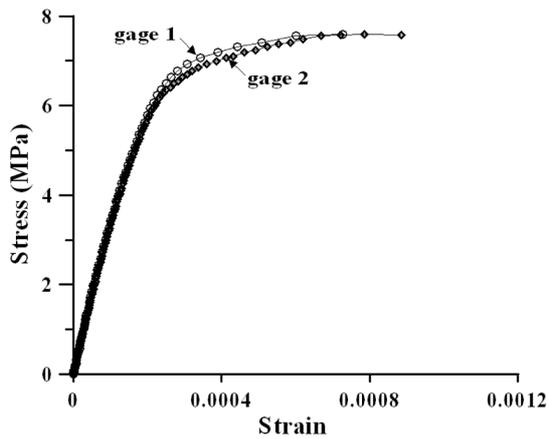
(a) RPT specimens



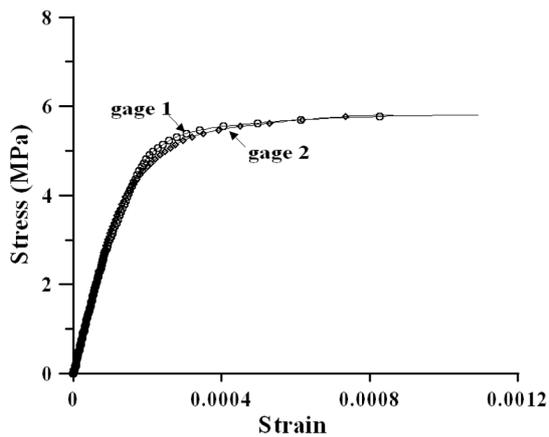
(b) BFT specimens

Fig. 10 The failure patterns

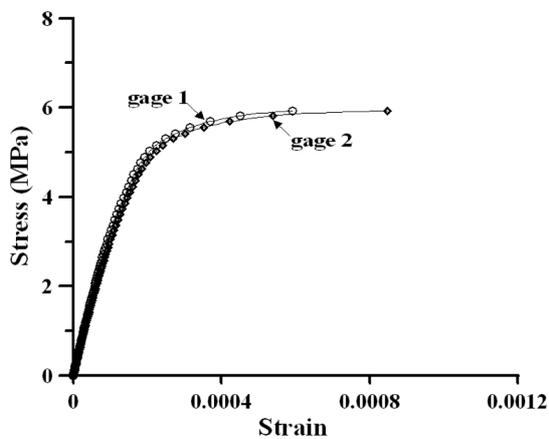
력-변형률 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 RPT 시험에 의해 정확히 3조각으로 파괴된 패널의 하중-변형률 곡선이며, Fig. 11(b)는 BFT 시험에 의해 3조각으로 파괴된 패널의 응력-변형률 곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 RPT 시험체와 BFT 시험체 모두 각각의 변형률 게이지에서 측정된 곡선이 거의 일치하는 것으로 보아 시험체 중앙 아랫면에는 등방성 휨인장응력이 작용하는 것으로 판명할 수 있다. Fig. 11(c)는 BFT 시험에 의해서 2등분된 시험체의 응력-변형률 곡선이다. 두 곡선 또한 일치하는 것으로 보아 시험체는 등방성 휨인장 응력 상태에 놓인 것을 확인할 수 있으며, 통계적인 결함의 분포



(a) RPT specimen (3 pieces)



(b) BFT specimen (3 pieces)

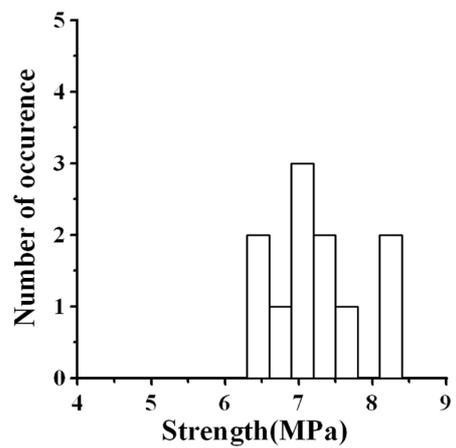


(c) BFT specimen (2 pieces)

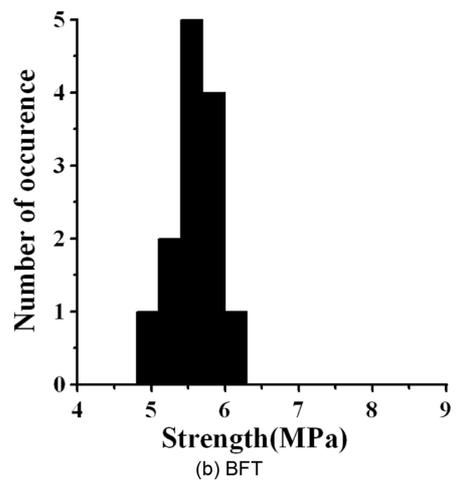
Fig. 11 Stress-strain relationship

에 따라 파괴형상이 3등분 또는 2등분이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 RPT 시험과 BFT 시험으로 얻어진 휨인장강도의 히스토그램 및 정규 분포 곡선을 나타낸 것이다. 두 시험 모두 정규 분포와 유사한 확률 분포를 보이는 것으로 나타났다. 기존 연구 결과에서 BFT 시험과 같은 ring-on-ring 시험의 경우 높은 분산성을 가지는 것으로 알려져 신뢰성 있는 실험 결과를 위해서는 많은 시험체들이 필요한 것으로 알려져 있지만, 이 실험에서는 RPT 휨인장강도의 변동계수(coefficient of variation)와 BFT의



(a) RPT



(b) BFT

Fig. 12 The histogram

변동계수가 각각 8%, 6%로 측정되어, 적은 양의 시험체로 신뢰할 수 있는 실험이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 ASTM C 1550 round panel test(RPT) 시험법과 biaxial flexure test(BFT) 시험법에 따른 무근 콘크리트 원형 패널의 휨거동을 비교하였다. 이를 위해 유한요소해석과 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) RPT 시험체와 BFT 시험체의 유한요소해석 결과 두 시험체 모두 시험체 중앙에 최대 인장응력이 발생하나, RPT 시험체 보다는 BFT 시험체에서의 최대 인장응력 발생 면적이 상대적으로 더 넓은 것을 알 수 있었다. 또한 RPT 시험체의 주응력 분포는 3중대칭(three-fold symmetry)이었으며, BFT 시험체의 응력 분포는 등방성 인장응력(isotropic tensile stress)이 형성되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 실험을 통해 최대 휨인장강도는 RPT 휨인장강도가 BFT 휨인장강도 보다 29% 더 큰 것으로 측정되었다.
- 3) 두 시험체는 동일한 파괴 형상을 보이는 것으로 관찰되었다. RPT 시험체는 가력점을 중심으로 지점과 지점사이에 3조각으로 일정한 균열 발생과 함께 파

괴되었으며, BFT 시험체는 가력 구간내의 최대 모멘트 영역 안에서 이방향 인장응력 상태 하에서 나타나는 방사형 균열로 파괴되었다. BFT 시험체의 균열 방향은 예측할 수가 없었다.

- 4) RPT 시험체와 BFT 시험체 모두 중앙 아랫면의 하중-변형률 관계는 모든 방향에 일정한 것으로 나타나, 시험 시 등방성 휨인장응력 상태에 놓이는 것을 확인할 수 있었다.
- 5) 기존 연구 결과에서 BFT 시험과 같은 ring-on-ring 시험은 높은 분산성을 가지는 것으로 지적되어 왔으나, 이 실험에서는 RPT 휨인장강도의 변동계수와 BFT 휨인장강도의 변동계수가 각각 8%, 6%로 측정되어, BFT 시험을 이용해 신뢰할 수 있는 이방향 휨인장강도 측정이 가능한 것으로 판단된다.
- 6) 이 연구를 통해서 이방향 휨응력 상태에 놓인 구조물의 설계 시 이방향 휨인장강도 측정을 위한 시험 방법으로 BFT 시험의 적용이 가능한 것으로 판단되며, 이를 위해서는 BFT 시험과 RPT 시험 그리고, 보를 이용한 4점 휨시험 간의 강도에 관한 상관관계 구명을 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2011-0003166)과 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발” (과제번호: 05첨단융합B01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Ali, F., “Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive Spalling than Normal Strength Concrete in Fire?,” *Fire and Materials*, Vol. 26, 2002, pp. 127~130.
2. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials* 3th Edition, The McGraw Hill, New York, 2006, pp. 72~75.
3. Ban, S. and Anusavice, K. J. “Influence of Test Method on Failure Stress of Brittle Dental Materials,” *J. Dent Res* 69, 1990, pp. 1791~1799.
4. Ritter, J. E., Jakus, K., Batakis, A., and Bandyopadhyay N., “Appraisal of Biaxial Strength Testing,” *J. Non-Cryst Solids*, 38-39, 1980, pp. 419~424.
5. ASTM C 1550, *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete (Using Centrally-Loaded Round Panel)*, ASTM, West Conshohocken, PA, 2002.
6. 지광습, 오홍섭, 최진혁, “콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법,” 대한토목학회 논문집, 27권, 5A호, 2007, pp. 753~758.
7. Zi, G., Oh, H., Park, and S. K., “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, 2008, pp. 751~756.
8. RTA (Roads and Traffic Authority of NSW) Specification T373, Round Determinate Panel Test, B-82, *Shotcrete Work*, 2000.
9. ASTM F 394-78 (Reapproved 1996), Standard Test Method for Biaxial Flexure Strength (Modulus of Rupture) of Ceramic Substrates, *American Society For Testing And Materials*, 1996.
10. Marshall, D. B., An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics, *American Ceramics Society*, Bulletin 59, 1980, pp. 551~553.
11. Fessler, H. and Fricker, D. C., “A Theoretical Analysis of the Ring-on-Ring Loading Disk Test,” *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 67, 1984, pp. 582~588(correction: 1988, 71(10), 904).
12. Willshaw, T. R., “Measurement of Tensile Strength of Ceramics,” *J. Am Ceram Soc.*, Vol. 51, No. 2, 1968, 111 pp.
13. Weibull, W., “A Statistical Theory of the Strength of Materials,” *Ingvetensk Akad. Handl.* 151, 1939, pp. 1~45.
14. Baant, Z. P. and Planas, J., “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials,” CRC Press, Boca Raton and London, 1997, pp. 437~486.
15. Baant, Z. P., “Probabilistic Modeling of Quasibrittle Fracture and Size Effect,” *Proc., 8th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Newport Beach, Calif., R. B. Corotis, G. I. Schueller, and M. Shinozuka, eds., Swets and Zeitinger, Balkema, 2001, pp. 1~23.
16. Baant, Z. P., “Probability Distribution of Energetic-Statistical Size Effect in Quasibrittle Fracture,” *Probab. Eng. Mech.*, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 307~319.
17. Wright, P. J. F., “The Effect of the Method of Test on the Flexural Strength of Concrete,” *Magazine of Concrete Research*, 11, 1952, pp. 67~76.
18. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, In: (3rd Ed. ed.), Pitman Pub. Ltd., London, 1991, pp. 174~175.
19. 지광습, 김지환, 오홍섭, “최적 시험체 형상을 고려한 개선된 콘크리트 등방휨인장강도 시험법,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 4호, 2009, pp. 523~530.
20. 한국산업규격, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, KS F 2405, 기술표준원, 1964.
21. 한국산업규격, 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법, KS F 2403, 기술표준원, 2005.
22. Vitman, F. F. and Pukh, V. P., “A Method for Determining the Strength of Sheet Glass,” *Zavodskaya Laboratoriya*, Vol. 29, 1963, pp. 863~867.
23. Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1959, pp. 63~67.
24. Westergaard, H. M., “New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields,” *ASCE Proceedings*, 1947, pp. 425~439.
25. Westergaard, H. M., “Analytical Tools for Judging Results of Structural Tests of Concrete Pavements,” *Public Roads*, Vol. 14, No. 10, 1933, pp. 185~88.
26. Westergaard, H. M., “Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis,” *Public Roads*, 7, 1926, pp. 25~35.

요약 이 연구에서는 휨인장강도 평가 방법에 따른 무근 콘크리트 원형패널의 휨거동을 비교하기 위해 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 이를 위해 ASTM C 1550 round panel test(RPT) 시험법과 biaxial flexure test(BFT) 시험법을 적용하여 콘크리트 원형패널의 휨인장강도를 측정하였으며, 두 원형패널에 작용하는 응력 분포를 알아보기 위하여 패널의 아랫면 중앙에 두 개의 변형률 게이지가 직교하도록 부착하여 하중-변형률 관계를 측정하였다. 실험 결과 RPT 시험체와 BFT 시험체의 파괴 형상은 유사하게 관찰되었으며, 두 시험체 모두 중앙 아랫면의 하중-변형률 관계 또한 모든 방향에 일정한 것으로 나타나, 시험 시 등방성 휨인장응력 상태에 놓이는 것을 확인할 수 있었다. RPT 시험에 의한 평균 휨인장강도가 BFT의 경우보다 29% 더 큰 것으로 나타났다. 두 시험체의 휨인장강도 분포 모두 정규분포를 보이는 것으로 나타났으며, RPT 휨인장강도의 변동계수(coefficient of variation)와 BFT의 변동계수는 각각 8%와 6%로 측정되었다. 이는 BFT 시험을 통하여 신뢰할 수 있는 이방향 휨인장강도 측정이 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트, 방사형 균열, 이방향 응력 상태, 등방성 인장응력, 이방향 인장강도