



일축 및 이축 휨인장강도의 실험적 비교

오홍섭¹⁾ · 지광습^{2)*}

¹⁾진주산업대학교 토목공학과 ²⁾고려대학교 사회환경시스템공학과

The Experimental Comparison of the Uniaxial and Biaxial Tensile Strengths of Concretes

Hong-Seob Oh¹⁾ and Goang-Seup Zi^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

²⁾ Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT The characteristics of the biaxial flexural tensile strength of concretes was compared to that of the uniaxial strength. The uniaxial and biaxial strengths in this study were obtained from the classical modulus of rupture test and the biaxial flexural test recently developed by Zi and Oh and Zi et al., respectively. Three different sizes were considered to investigate the effect of the size of aggregates. To estimate the stochastic aspect of the strength, 32 specimens were used for each test. The average biaxial flexural fracture strength was about 20% greater than the uniaxial test. At the same time, the coefficient of variation for the biaxial test was 18% greater than the uniaxial test. This means that the probability of the biaxial cracking can be greater than the uniaxial cracking.

Keywords : biaxial flexural fracture strength, flexural tensile strength, new test method, experimental data

1. 서 론

콘크리트의 인장 특성에 기인하는 구조적 균열은 구조물의 사용 성능을 평가하기 위한 중요한 인자임에도 불구하고, 실험의 어려움과 결과의 분산성 등으로 인하여 아직까지 시험법과 강도 평가에 대한 이론이 정확히 정립되어 있지는 않다. 따라서 콘크리트구조물의 내하력 평가, 사용성 설계 및 균열 예측을 위하여 적용되는 콘크리트 인장강도는 설계기준 및 연구자들에 따라 직접인장, 할렬인장, 휨인장 등으로 정의된 강도가 사용되고 있다^{1,4)}.

그러나 교량의 바닥판뿐만 아니라, 콘크리트 포장 또는 활주로와 같은 탄성 지반 위의 슬래브, 콘크리트의 고강도화에 의한 판 또는 셸과 같은 두께가 얇은 판구조 등은 지금까지 정의되고 있는 일축 휨인장 또는 할렬인장 특성으로는 설명하기 어려운 응력 분포를 갖게 된다. 판구조는 구조적 특성상 면 외 하중에 의하여 발생하는 다축 인장응력이 발생하게 된다. 이것은 지금까지 사용되고 있는 일축 휨인장 특성과는 다른 인장 응력 분포로서 일축 휨인장 실험 결과를 적용하기에는 무리가 있음을 나타내는 것이다. 따라서 몇몇 연구자들에 의하여 철근콘크리트 판구조의 콘크리트의 2축 또는 다축인장응

력 특성을 해석하기 위한 실험 및 이론적 연구들이 진행되어 왔으나, 면 내 인장응력을 고려하기 위한 것들이기 때문에 두께가 얇은 판에서 발생하는 콘크리트의 등방성 순수휨인장의 경우에는 적용하기 어려운 것이 사실이며 다축 인장시험을 수행하는 것 자체도 매우 까다롭다⁵⁾.

본 연구에서는 최근에 지광습 외⁶⁾와 Zi and Oh⁷⁾에 의해 개발된 이방향 휨인장 시험법 (biaxial flexure test; BFT)을 적용하여 이축 인장강도를 측정하였으며, 이를 일축 휨강도 실험체의 실험 결과와 비교 분석하였다. 또한 이축과 일축 실험체에서 골재의 크기에 따른 휨파괴강도 편차 등을 고찰하고자 골재의 크기를 세 가지로 각각 다른 실험체 크기에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 실험체의 하중-변위관계, 파괴 형태 및 강도 등의 실험 결과에 대하여 분석하였다.

2. 등방성 휨인장 강도 실험 방법 (BFT)^{6,7)}

등방성 휨인장 시험체는 일축 휨인장 시험체를 입체화한 것이다. 일축 휨인장 시험체에서는 재하점 사이 구간에서는 휨모멘트가 일정하게 되어 보 이론에 따르면 재하점 사이의 시편하면에 일정한 응력이 형성된다. 이 구성을 삼차원으로 일반화하면 Fig. 1 (a)와 같은 구성을 고안할 수 있다. 따라서 일축 시험체와는 달리 원반형 시험체가 사용되고, 이 시험체는 고리형 지지판에 재하

*Corresponding author E-mail: g-zi@korea.ac.kr
Received April 13, 2007, Accepted October 26, 2007
©2008 by Korea Concrete Institute

3 콘크리트의 인장강도 특성

3.1 일축 인장강도 특성

콘크리트의 인장강도는 널리 알려져 있듯이 할렬인장강도 시험 또는 휨과계계수 시험을 적용하여 산정하고 있으며, 직접 인장시험의 경우는 실험법 및 결과의 부정확성 등으로 인하여 많이 사용되지는 않고 있다⁸⁾. 콘크리트의 인장강도는 Ahmad와 Shah⁹⁾의 연구에 보고된 것과 같이 재령과 압축강도가 증가할수록 인장강도와 압축강도의 비(f_t/f_{ck})는 감소하게 된다. 또한 골재의 영향을 크게 받기 때문에 쇄석골재를 사용하는 경우에는 상대적으로 인장강도가 크게 증가하는 것으로 나타난다. 일반적으로 압축강도에 대한 직접인장강도의 비가 0.07~0.11인데 반하여 할렬인장과 일축 휨인장의 경우는 각각 0.08~0.14와 0.11~0.23으로 보고되고 있다. 따라서 다양한 형태의 인장강도 측정식이 개발되어 사용되고 있으며, 그중 ACI318-05에서는 식 (1)과 같은 휨과계계수를 제안하고 있다¹⁰⁾. 할렬인장강도의 경우는 여러 이유로 인하여 경량콘크리트의 경우에만 적용할 수 있도록 제시하고 있다.

$$f_r = 0.62\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

여기서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, f_r 은 콘크리트 휨과계계수 또는 휨인장강도이다.

Ahmad and Shah⁹⁾의 회귀분석 결과에 의한 휨과계계수와 압축강도의 관계는 식 (2)와 같다.

$$f_r = 0.438(f_{ck})^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

실험 결과에 의한 일축 휨과계강도는 식 (3)을 적용하여 산정된다.

$$f_r = \frac{6M}{b'h^2} \quad (3)$$

여기서 M 은 외력에 의한 모멘트, b 는 실험체의 폭, h 는 실험체의 높이이다.

3.2 이축 인장강도 특성

본 시험체와 같이 원형으로 재하된 원판형 시험체를 Fig. 3과 같이 원형 판으로 근사화하면, Timoshenko 외¹¹⁾의 문헌에 잘 정립되어 있듯이 축대칭 탄성판의 미분방정식으로부터 재하하중과 응력과의 관계를 얻을 수 있다. 중첩의 원리를 이용하면 본 시험체를 순수 휨모멘트가 재하된 내부 판과 중앙에 원형 구멍이 있으며, 구멍의 가장자리에 모멘트와 전단력이 재하된 판으로 분해할 수 있다.

변위계의 연속성을 위해, 두 판은 연결부위에서 수직변위와 변위의 구배가 같아야 하는 적합조건을 풀면 모멘트 M 과 재하하중 P 의 상관관계가 얻어진다. 모든 방

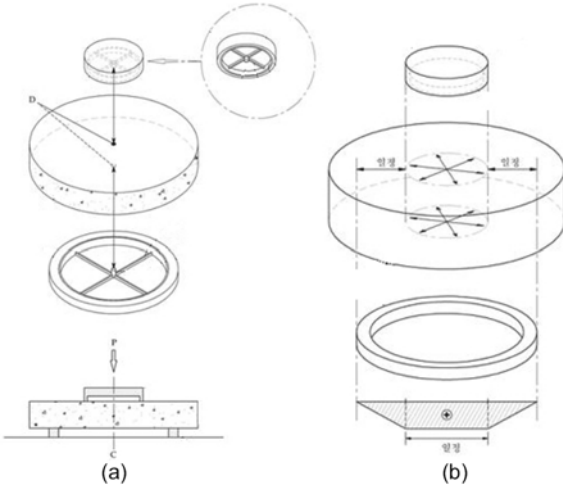


Fig. 1 (a) Apparatus of biaxial flexural test (b) Theoretical moment distribution of specimen

된다. 재하판 또한 원형이며, 재하판 끝단을 돌출시켜 시험체 표면에 원형으로 하중이 전달되도록 한다. 그림에서 D 로 표시된 시험체, 지지판, 재하판의 원점은 모두 일치한다. 지지판 끝에서 재하판 끝단까지의 거리가 모든 방향에서 일정하기 때문에 재하판 내부의 시험체의 휨모멘트는 모든 방향에서 동일하다 (Fig. 1 (b)).

Fig. 2에는 등방성 휨 시험체의 삼차원 유한요소해석 결과를 시험체의 변형 후 형상에 최대 주응력의 분포를 도시하였다. 대칭조건을 이용해서 시험체의 1/4 만을 모델링하였으며, 대칭조건이 적용된 면에서는 원주방향의 변위구속조건을 적용하였다. 상면에 하중이 직접 적용된 부분에는 압축응력이 발생하였으며, 유한요소해석상에는 아치작용에 의한 영향이 없이 외력이 시험체로 전달되어 하면에 휨인장응력을 발생시키는 것으로 해석되었다. 시험체의 중앙부에서 최대 주응력 값을 가지고, 그 주변에서 거의 동일한 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이 응력은 하중이 재하되는 재하판 바깥 부위에서는 점진적으로 감소하였다. 즉, 일축 휨응력 시험에서 발생하는 응력 구배와 비슷한 응력 구배가 본 시험체에서도 얻어졌으며, 재하판 내부의 시험체 하면에서는 인장응력이 거의 동일함이 확인되었다.

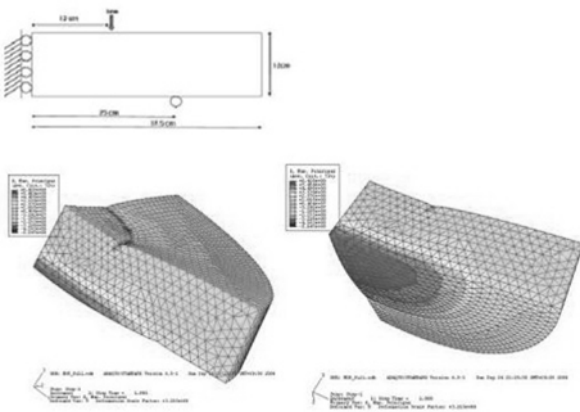


Fig. 2 FE analysis result on the biaxial flexural test

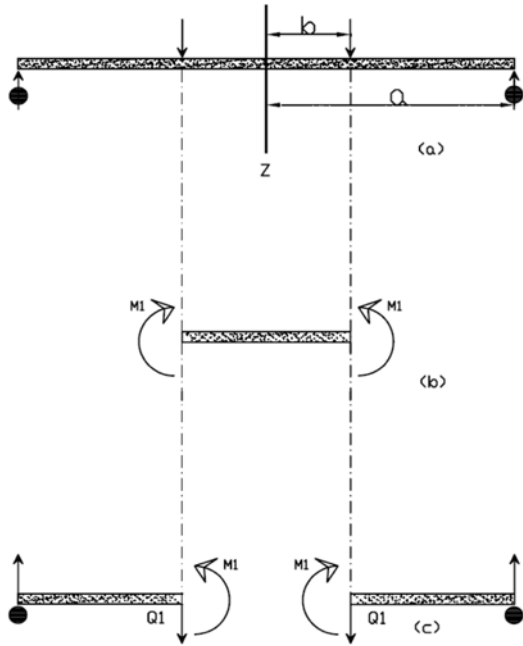


Fig. 3 Schematic analysis of circular plate using principle of superposition

향으로 모멘트가 일정하므로 하면의 응력은 방향에 상관 없이 다음 식으로 얻어진다^{6,7)}.

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

여기서 ν 은 포아송비, a 는 지지판의 반지름, b 는 재하판의 반지름, h 는 판의 두께이다.

응력은 지지판과 재하판의 크기 비 b/a 의 비선형 함수이다. 이방향 인장강도는 가해진 하중을 식 (4)에 대입 함으로써 손쉽게 구할 수 있다.

4. 실험 개요

4.1 사용 재료 및 실험체 제작

본 연구에서 콘크리트의 일축과 이축 휨인장강도를 실험

험적으로 측정하기 위하여 실험체를 제작하였으며 재료는 보통포틀랜드시멘트, 쇠골재 및 일반잔골재를 사용하였다. 콘크리트는 비중 3.14의 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 배합하였으며, 모든 시험체의 경우 28일 목표강도를 30 MPa로 설계하였다. 적용된 콘크리트 배합설계는 Table 1에 정리하였다.

일축 휨파괴강도를 평가하기 위하여 높이×길이 (순지간)이 각각 30 mm×60 mm×187.5 (125) mm, 60 mm×60 mm×375 (250) mm와 120 mm×60 mm×750 (500) mm의 세가지 형태로 제작하였다. 이축 휨파괴강도 측정 실험체의 경우는 높이×길이(순지간)이 각각 30 mm×187.5 (125) mm, 60 mm×375 (250) mm와 120 mm×750 (500) mm인 원반형태의 실험체를 제작하였다. KS F 2408 규정에 따르면 일축 휨인장 시험의 경우 3등분점을 구성하도록 되어 있다. 이축 휨인장 시험체에 동일한 비율을 적용할 경우 재하판 내부의 콘크리트가 너무 작게 되어 중앙 부분을 약간 증가시키고, 이를 일축 휨인장 시험체에도 동일하게 적용시켰다.

높이 30 mm의 실험체는 굵은골재 최대치수를 5 mm로 하였으며, 높이 60 mm와 120 mm의 실험체는 각각 굵은골재 최대치수를 10 mm와 20 mm로 사용하였다. 굵은골재의 비중은 2.72이며, 잔골재는 2.58인 골재를 사용하였다.

각 변수는 Table 2에 정리하였다. 변수별 휨강도 실험체는 강도의 통계적인 분산을 고려하기 위해 각 32개를 제작하였으며, 압축강도 공시체는 이축 실험체는 각 3개, 일축 실험체는 각 9개씩을 제작하여 28일 이상 습윤양생하였다. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405¹²⁾기준에 의하여 휨강도 실험 전에 측정하였으며, 실험 결과는 Table 2에 정리하였다.

4.2 실험 방법

일축 휨강도 측정을 위하여 KS F2408¹³⁾에 제시된 것과 같이 일축 실험체를 Fig. 4 (a)와 같은 형태로 실험대위에 거치시켜 하중을 재하 하였다. 지점으로부터 하중가력점까지의 거리는 실험체에 따라 각각 30 mm, 60 mm

Table 1 Concrete mix proportion

W/C (%)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Weight (kg)				SP (C×wt.%)	AE (C×wt.%)
				W	C	S	G		
35	120	5	39.45	193.9	553.9	642.4	1036.3	0	0

Table 2 Test variables

Notation	Specimen height (mm)	Size (mm) (H×W×L) (H×D)	Clear span (mm)	a (mm)	Compressive strength (MPa)
Uniaxial	3	30×60×187.5	125	30	31.55
	6	60×60×375	250	60	35.1
	12	120×60×750	500	120	28.4
Multiaxial	3	30×187.5	125	30	36.8
	6	60×375	250	60	33.6
	12	120×750	500	120	31.8

Note) H is a height of specimen, W is a width of specimen, L is a length of specimen, D is a diameter of specimen, and a is a distance from a loading point to a support.

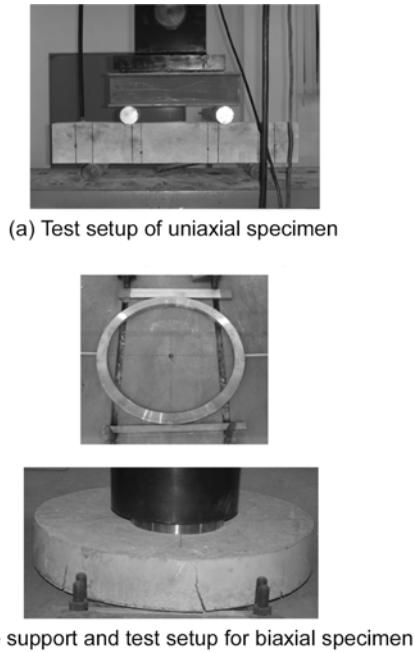


Fig. 4 Test setup

및 120 mm로 하여 이축 실험체와 동일한 거리에서 선 재하 되도록 하였다. 재하하중이 크지 않았기 때문에 일축 실험체는 screw jack을 사용하였으며, 일축 휨강도 측정에 관한 KS F 2408 규정을 준용한 하중가력속도 800 kN/min으로 파괴 시까지 하중을 선형 증가시켜 실험하였다. 실험체의 변위를 측정하기 어려웠기 때문에 하중-변위관계는 가력 장치의 변위로 측정 및 기록하였다.

실험체의 이축 휨강도를 정확히 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 지점 장치와 재하 장치를 제작하였으며, 시험체 크기에 따라 screw jack 또는 UTM을 사용하여 하중을 가력하였다. 제작된 링(ring) 형태의 지점은 실험체에 따라 지점중심간 거리가 각각 125 mm, 250 mm 및 500 mm이고, 폭은 모두 20 mm가 되도록 하였으며, 가력장치 또한 원형 선재하가 발생하도록 각각 지름 65 mm, 130 mm 및 260 mm에 폭 20 mm의 링에 재하부는 폭 20 mm의 원형 선 재하 장치를 제작하였다. 실험 시에는 재하장치, 실험체와 지점의 중심이 일치하도록 하여 실험체에 모든 방향으로 동일한 휨인장응력이 발생하도록 고려하였다. 이에 대한 보다 상세한 이론적 근거는 전술한 참고문헌^{6,7)}을 참조하기 바란다.

하중재하는 일축 휨강도 실험체와 동일하게 적용하였으며, 초기 휨균열 발생시의 하중과 변위를 육안으로 관찰하여 기록하였다. 각 실험체별 변위는 시험체의 변위를 측정하기 어려운 관계로 보수적인 해석을 위하여 일축 휨강도 실험과 같이 UTM의 가력 장치 변위를 적용하였다.

5. 시험 결과 및 고찰

일축 및 이축 휨 실험체의 대표적인 파괴 형태는 Fig. 5에 나타내었다. 일축 실험체의 경우는 모든 시험체가 가

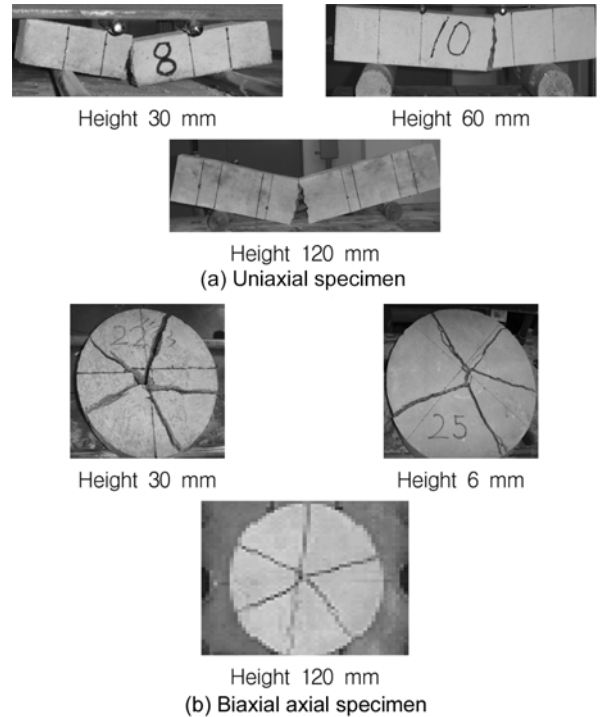


Fig. 5 Failure patterns of the specimen

력점안의 최대 모멘트 구간에서 하나의 초기균열이 발생한 후 거의 동일한 하중에서 균열이 진전된 후 파괴되었으며, 이축의 경우는 콘크리트 측면에서 관찰한 결과 1~3개의 초기균열이 발생한 후 Fig. 5 (b)의 형태로 파괴되는 것이 일반적이었으며, 초기균열의 발생 각도 또는 개수의 일관성은 없는 것으로 관찰되었다. 그러나 실험체의 크기가 증가함에 따라 상대적으로 균열이 개수가 증가하는 양상을 갖는 것으로 관찰되었다.

각 실험체의 휨파괴강도를 산정하기 위해 식 (3)과 (4)를 사용하였으며 Table 3에 정리했다. 또한 식 (1)과 (2)에 의한 일축 휨파괴강도를 제시하여 실험 결과와 비교하였다. 일축 휨파괴강도의 경우, 골재 크기 20 mm (실험체 높이: 120 mm)인 경우는 ACI의 식 (1)보다는 크게 측정되었으며, 식 (2)의 결과와는 거의 유사한 것으로 나타났다. 이에 반하여 골재 크기 5 mm (높이 30 mm)와 10 mm (높이 60 mm)의 경우는 식 (2)에 의한 결과도 실제 강도보다 작게 나타났으며, 휨인장강도 역시 실험체 크기뿐 만 아니라 골재의 크기에 대해서도 영향을 받는다는 것을 나타내는 것이다. 골재 크기에 따른 강도 변화의 영향은 본 실험 결과에 근거한 결과 식 (2)에 $(20 \text{ mm} / \text{굵은골재 최대치수(mm)})^{0.2}$ 를 곱하면 높이 30 mm (굵은골재 5 mm), 60 mm (굵은골재 10 mm) 실험체에 대하여 각각 이론적 휨파괴강도는 6.18 MPa과 5.58 MPa로 계산되는 것으로 나타나 실제 강도인 6.79 MPa, 5.22 MPa과 유사한 것으로 산정되었다. 그러나 이와 같은 관계는 제한된 실험 결과에 의한 것으로서 보다 정확한 분석을 위해서는 콘크리트 압축강도, 골재 크기 등에 대한 상세한 실험이 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

Table 3 Test results

No.	Height 30 mm				Height 60 mm				Height 120 mm			
	Uniaxial		Biaxial		Uniaxial		Biaxial		Uniaxial		Biaxial	
	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$	Flexural strength (MPa)	$f_r / \sqrt{f_{ck}}$
1	10.111	1.748	8.521	1.404	5.083	0.858	5.098	0.879	2.792	0.511	4.445	0.788
2	6.681	1.155	7.953	1.311	5.667	0.956	8.294	1.430	3.792	0.694	5.528	0.980
3	6.319	1.093	10.623	1.751	6.583	1.111	6.433	1.109	4.083	0.748	3.053	0.541
4	7.222	1.249	8.748	1.442	5.083	0.858	5.212	0.899	5.417	0.992	5.297	0.939
5	7.583	1.311	11.304	1.863	4.750	0.802	4.473	0.771	4.958	0.908	5.304	0.941
6	7.944	1.374	9.032	1.489	5.667	0.956	5.524	0.953	4.958	0.908	5.670	1.005
7	7.944	1.374	7.214	1.189	4.000	0.675	9.728	1.678	5.042	0.923	5.010	0.888
8	5.417	0.937	5.794	0.955	6.000	1.013	6.732	1.161	3.167	0.580	6.085	1.079
9	5.417	0.937	8.294	1.367	5.750	0.971	6.277	1.082	3.667	0.671	3.941	0.699
10	5.056	0.874	6.362	1.049	5.083	0.858	7.939	1.369	3.458	0.633	4.296	0.762
11	7.042	1.218	8.691	1.433	5.417	0.914	5.326	0.918	2.708	0.496	5.397	0.957
12	6.861	1.186	8.237	1.358	6.000	1.013	7.598	1.310	5.208	0.954	4.367	0.774
13	7.583	1.311	10.566	1.741	4.417	0.745	8.990	1.550	4.542	0.832	4.083	0.724
14	7.764	1.342	8.862	1.461	5.083	0.858	5.283	0.911	3.208	0.587	7.562	1.341
15	6.861	1.186	6.021	0.992	5.167	0.872	8.606	1.484	4.667	0.854	5.574	0.988
16	8.306	1.436	7.442	1.227	5.167	0.872	7.839	1.352	3.875	0.709	4.438	0.787
17	6.319	1.093	5.624	0.927	4.167	0.703	6.732	1.161	3.917	0.717	4.900	0.869
18	6.139	1.061	8.010	1.320	4.083	0.689	5.879	1.014	3.792	0.694	4.935	0.875
19	6.319	1.093	8.975	1.479	5.667	0.956	7.868	1.357	4.000	0.732	4.367	0.774
20	7.042	1.218	5.908	0.974	4.500	0.760	7.243	1.249	4.458	0.816	6.426	1.140
21	5.056	0.874	6.419	1.058	4.500	0.760	4.317	0.744	5.000	0.915	4.687	0.831
22	5.056	0.874	4.999	0.824	4.250	0.717	6.362	1.097	4.208	0.771	4.509	0.800
23	5.958	1.030	2.727	0.449	4.833	0.816	6.618	1.141	4.667	0.854	5.219	0.926
24	7.944	1.374	8.180	1.348	7.250	1.224	6.021	1.038	3.333	0.610	6.249	1.108
25	6.681	1.155	10.282	1.695	5.917	0.999	7.612	1.313	3.958	0.725	5.184	0.919
26	6.319	1.093	8.010	1.320	5.667	0.956	4.942	0.852	3.958	0.725	2.663	0.472
27	7.403	1.280	9.600	1.582	4.667	0.788	5.098	0.879	3.792	0.694	4.083	0.724
28	5.778	0.999	5.453	0.899	5.667	0.956	6.874	1.185			5.127	0.909
29							5.936	1.024			3.266	0.579
30											5.042	0.894
31											4.651	0.825
32											3.089	0.548
Eq. (1)	3.48				3.67				3.30			
Eq. (2)	4.37				4.7				4.08			
Average	6.790	1.174	7.780	1.282	5.222	0.881	6.581	1.135	4.097	0.750	4.826	0.856
Standard deviation	1.156	0.200	1.956	0.322	0.776	0.131	1.399	0.241	0.735	0.135	1.031	0.183

전체적인 실험 결과에서 일축 실험체에 비하여 이축 실험체의 휨파괴강도가 크게 나타났으며, 이는 일축 실험체에 비하여 이축 실험체의 균열 면의 개수가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 이에 비하여 이축 실험체의 초기 휨균열 강도는 일축 실험체의 휨파괴 강도보다 낮게 나타났으며, 다른 시험체에 비하여 초기 휨균열 발생 유무를 쉽게 판별할 수 있었던 높이 120 mm 이축 실험체의 휨균열강도는 일축 실험체 평균 휨균열강도 4.10 MPa 보다 크게 작은 평균 2.04 MPa로 나타났다.

각 실험체의 압축강도에 의한 강도 편차를 상쇄시키기

위하여 많은 연구들에서 사용된 것과 같이 측정된 휨파괴강도를 $\sqrt{f_{ck}}$ 로 나누었으며, 그 결과는 Table 3에 정리하였다. 모든 실험체에서 일축 휨파괴강도에 비하여 이축 휨파괴강도의 평균이 15~30% 이상 크게 나타났으며, 표준편차 역시 최대 61%에서 최소 36% 크게 나타났다. 휨파괴강도의 경우는 골재 크기와 실험체의 크기에 받는 영향이 그다지 크지는 않은 것으로 확인되었다.

표준편차가 일축에 비하여 이축의 경우가 크게 나타난다는 것은 동일한 응력에서 파괴되는 확률이 높아진다는 것을 의미하며, 이축 응력상태에 재하되는 구조물 설계

를 위해서는 보다 높은 안전율을 확보해야 할 것으로 판단된다.

Figs. 6과 7에는 각각 일축과 이축 실험체의 변수별 하중-변위 관계를 정리하였다. 일축 실험체의 경우 높이 30 mm와 60 mm 실험체의 경우는 대부분 초기 균열하중 이후 하중 증가 없이 변형 증가 후 다시 하중과 변형이 선형 증가하는 형태를 갖는 것으로 나타났으나, 실험체의 크기가 가장 큰 높이 120 mm 실험체의 경우는 거의 선형적인 거동을 하였다. 이에 비하여 이축 실험체의 경우는 높이 30 mm인 경우를 제외하고는 초기 균열하중 이후 하중 감소 후 다시 하중이 증가하는 형태를 나타냈으며, 특히 높이 120 mm 실험체의 경우에는 초기 균열하중이 보다 뚜렷하게 관찰되었다. 이와 함께 전체적으로 균열의 개수에 따라 하중 증가-감소횟수와 비례하는 것으로 나타났다.

Fig. 8에는 실험체 높이 (30 mm, 60 mm 및 120 mm)별 일축과 이축 실험체의 실험 결과를 $f_r / \sqrt{f_{ck}}$ 에 대하여 정리하였다. 그림에서 실선은 이축 실험체의 평균 휨과괴강도를 점선은 일축 실험체의 평균 휨과괴강도를 나타내는 것이다.

전체적으로 일축에 비하여 이축 실험체의 분산정도가 큰 것을 알 수 있으며, 평균 강도의 경우에는 Table 3에서도 확인할 수 있듯이 이축 실험체가 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나 분산 정도를 고려할 경우 실제 설계에 적용할 수 있는 휨과괴강도의 크기는 이축의 경우가 상

대적으로 낮을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9에는 일축과 이축 휨인장강도의 구간 별 빈도수를 백분율로 표시하였다. 구간 별 빈도수를 구하기 위해 누적 빈도수를 중앙차분법을 사용했다. 일축과 이축 휨인장강도 모두 정규분포로 모델이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 이축 휨 강도의 경우 분산이 일축 휨인장강도보다 큰 것으로 파악됨으로서 동일한 크기의 응력 조건에서 균열발생 확률이 이축이 더 클 수 있음을 나타내고 있다. 따라서 보다 정확한 파괴 확률 분석을 위해서는 추가적인 실험 및 해석에 의한 평가가 필요할 것이다.

6. 결 론

- 1) 본 연구에서는 일축 휨인장강도 특성과 이축 휨인장강도 특성에 많은 차이가 있음을 실험적으로 고찰하였다.
- 2) 일축 휨인장강도의 경우, 시험체의 크기와 굽은골재 최대 치수에 따라 강도 편차가 큰 것으로 나타나, 크기 효과 등에 대한 추가적인 실험 및 연구가 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 기존의 연구에서 인장강도의 경우, 일축과 이축 하중에 의한 인장강도의 변화는 없는 것으로 제시되고 있으나, 실험 결과 휨인장의 경우에는 일축과 이축 휨인장강도의 차이가 크고, 실험체 크기 등에 따라 변화 정도가 차이가 나는 것으로 관찰되었다.

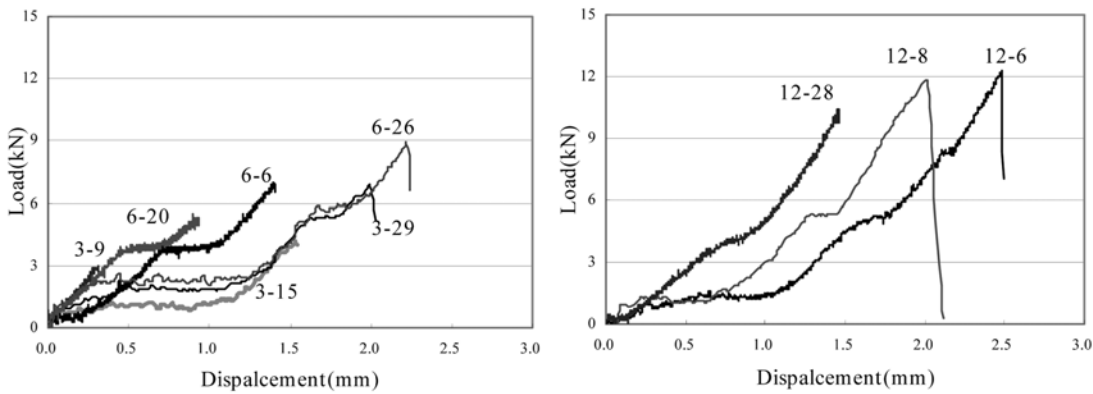


Fig. 6 Load and displacement relationship of uniaxial specimens

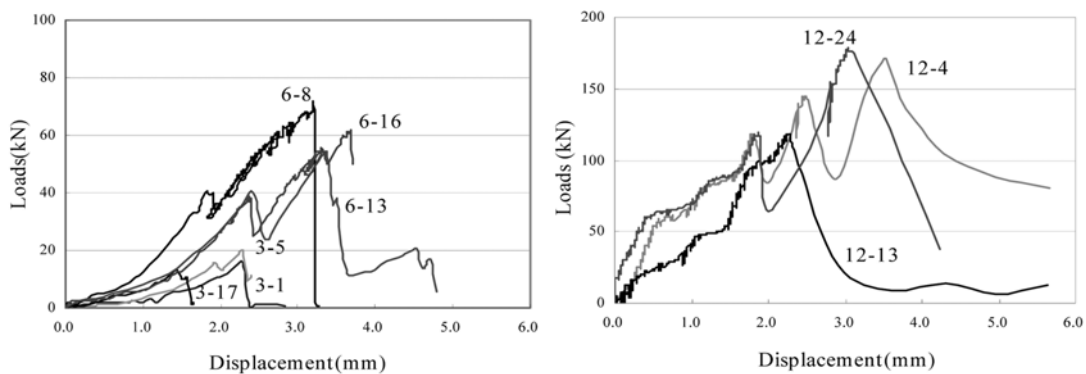


Fig. 7 Load-displacement relation of biaxial specimens

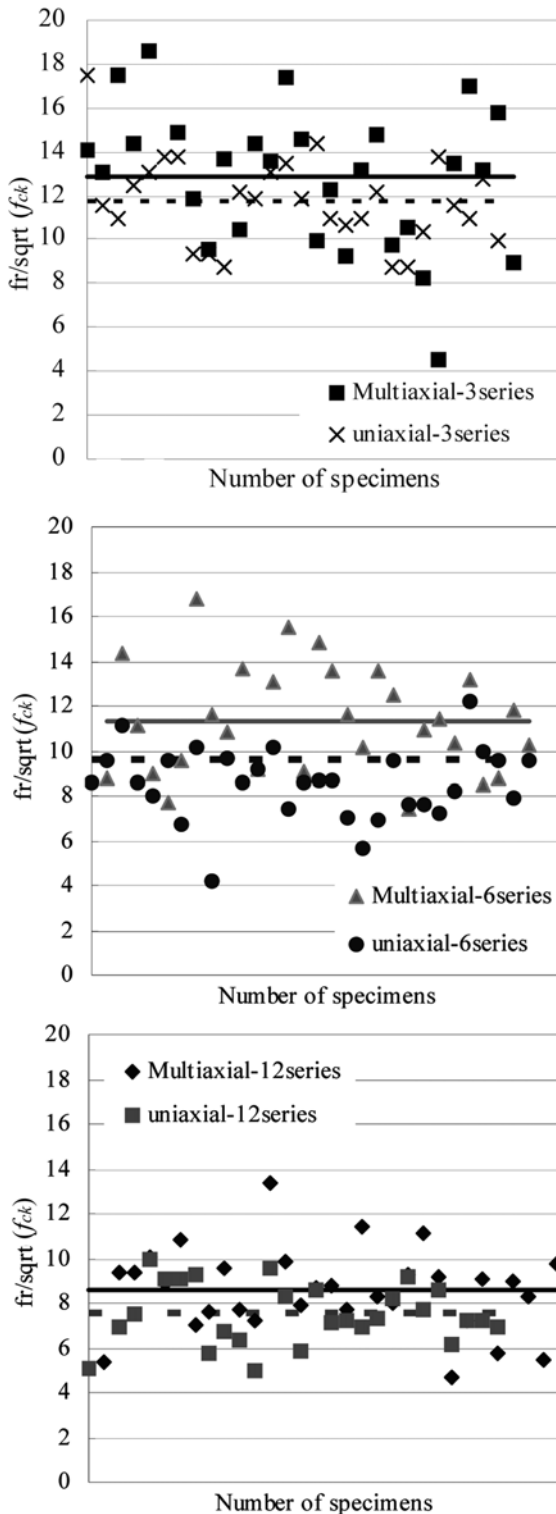


Fig. 8 Variation of the flexural strength of the specimens

- 4) 이축 휨인장강도의 분산은 일축보다 큰 것으로 파악되며, 이축 응력상태의 균열발생 확률을 산정할 때는 일축 강도를 직접 사용하기는 어려울 것으로 판단된다.
- 5) 인장강도의 경우, 콘크리트의 강도뿐만 아니라, 골재의 종류 및 실험체의 크기에 의해서도 많은 영향을 받기 때문에 보다 정확한 이축 휨인장응력과 이축 휨인장응력의 상관관계를 구명하기 위해서는 보

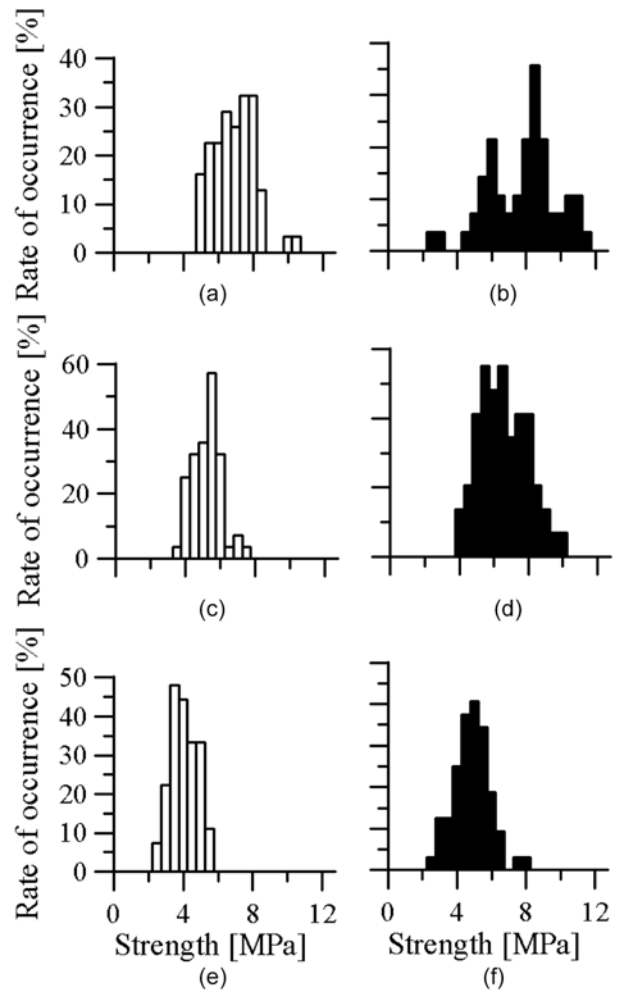


Fig. 9 Rate of occurrence of the tensile strengths; (a,b) uniaxial and biaxial strength for 30mm-height specimens, (c,d) uniaxial and biaxial strength for 60mm-height specimens, and (e,f) uniaxial and biaxial strength for 120 mm-height specimens, respectively

다 많은 실험적, 이론적 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D (05 기반구축 D04-01 과 05첨단융합B01) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P., Kazemi, M. T., Hasegawa, T., and Mazars, J., "Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis", *ACI Material Journal*, Vol.88, No.3, 1991, pp.325~332.
2. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, England, 1995.
3. Raphael, J. M., *Tensile Strength*, Concrete International, Vol.81, No.2, 1984, pp.158~65.
4. 안주옥, 서영갑, 최신 철근콘크리트 공학, 사이텍 미디어,

- 2004.
5. Polak, M. A. and Vecchio, F. J., "Reinforced Concrete Shell Elements Subjected to Bending and Membrane Loads", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.3, 1994, pp.261~268.
 6. 지광습, 오홍섭, 최진혁, "콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법", 대한토목학회 논문집, 27권, 5A호, 2007, pp.753~758.
 7. Zi, G, Oh, H., and Park, S. K., "A Novel Indirect Tensile Test Method to Measure the Biaxial Tensile Strength of Concretes and Other Quasibrittle Materials", *Cement and Concrete Research*, 2008-Submitted.
 8. Mindness, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete 2nd Edition*, Prentice Hall, NJ, USA, 2002.
 9. Ahmad, S. H. and Shah, S. P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete", *PCI Journal*, Vol.30, No.6, 1985, pp.92~119.
 10. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-2005/ACI 318R-05)*, American Concrete Institute, Detroit, 2005.
 11. Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, Engineering Mechanics Series, McGraw-Hill, Tokyo, 1989.
 12. 기술표준원, KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, 기술표준원, 1964.
 13. 기술표준원, KS F 2408 콘크리트 휨강도 시험 방법, 기술표준원, 2000.

요 약 본 연구에서는 콘크리트의 이축 휨인장 특성을 일축 휨인장 특성과 실험적으로 비교, 분석하였다. 이를 위하여 일축 휨인장강도는 현재 많이 사용되고 있는 콘크리트 휨강도 실험 방법을 사용하여 측정하였으며, 이축 휨강도의 경우는 지광습 외, Zi and Oh에 의해 제안된 새로운 이축 휨강도 실험 방법을 사용하였다. 골재의 크기에 따른 휨파괴 강도 변화를 분석하기 위하여 세 가지 크기의 실험체를 제작하였다. 또한 통계적 특성 분석을 위하여 각 변수별로 32 개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 평균 이축 휨파괴강도가 일축의 경우보다 20% 정도 큰 것으로 나타났으나, COV의 경우에는 이축의 경우가 18% 큰 것으로 해석되었다. 이는 이축 휨균열 확률이 일축 보다 클 수도 있음을 의미한다.

핵심용어 : 이축 휨파괴강도, 휨인장강도, 새로운 시험 방법, 실험 결과