

# 최적실험체 제원에 의한 콘크리트의 일축 및 이축 휨인장강도

## Uniaxial and Biaxial Flexural Strength of Plain Concrete using Optimum Specimen Configuration

오홍섭\* · 지광습\*\*

Oh, Hongseob · Zi, Goangseup

### Abstract

Because the concrete crack that is the reason of the serviceability and durability degradation of concrete structure can be arisen from either the stress magnitude and gradient or other structural and material defects, the crack strength of concrete is hard to accurately evaluate. Especially, stress-state in concrete plate components such as rigid pavement and long span slab is biaxial flexure stress, and the flexural strength of those component may be different than the traditional rupture modulus of concrete subjected to uniaxial stress. In this study, an experimental investigation to assess of mechanical behavior under uniaxial and biaxial flexure stress is conducted and the proposed optimum specimen configuration is adopted. From the test, the modulus of rupture under uniaxial and biaxial stress are decreased as the size of aggregate or specimen is larger. And biaxial flexure strength of concrete specimens is varied from 39.5 to 99.2% as compared with that of uniaxial strength, and the biaxial strength of specimen with 20mm aggregate size is only 76% of uniaxial strength.

**Keywords :** *biaxial flexure strength, modulus of rupture, proposed optimum specimen configuration*

### 요 지

콘크리트 구조물의 사용성과 내구성 저하의 원인이 되는 균열은 응력의 크기, 응력구배 및 기타 구조적 재료적 원인 등에 의하여 발생하기 때문에 콘크리트의 균열강도를 정확히 예측하기는 매우 어렵다. 특히 판구조의 경우 기존의 일축휨강도에 의한 균열평가가 실제 구조물의 균열강도와 상이할 수 있다. 본 연구에서는 이축휨인장강도 평가에 적합한 시험체 제원을 적용하여 일축과 이축휨강도 특성을 비교, 평가하였다. 실험결과 골재의 크기 및 실험체 크기의 증가에 따라 일축 및 이축 휨강도 모두 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 일축휨강도에 비하여 이축휨강도가 일축휨강도의 39.5~99.2%로서 전반적으로 낮은 강도를 갖는 것으로 평가되었으며, 특히 20 mm 골재를 사용한 경우에는 76%정도로 고찰되었다.

**핵심용어 :** 이방향 인장강도, 최적 시험체 형상, 휨 파괴 강도

### 1. 서 론

콘크리트 기술의 발전에 따라 대다수 구조물의 수명이 진통적 의미의 내하력에 대한 안전성뿐만 아니라 내구성 또는 사용성에 의해 크게 지배되는 형태로 변화되고 있다. 특히 다양한 형태의 박판 및 셸구조의 개발과 적용은 사용성에 대한 중요성을 더욱 부각시키고 있다. 또한 구조와 재료의 고성능화로 인하여 기존의 설계개념 및 설계식만으로는 충분히 해결할 수 없는 문제들이 발생하고 있으며, 새로운 접근방법들이 연구, 개발되고 있는 상태이다(김성수 등, 2008; CEB-FIP, 1990; Fib, 1999).

건설분야에서 많은 연구가 진행되고 있는 초장대, 초고층 구조물의 실용화를 위해서는 재료의 고강도 및 고성능화, 경량화를 통한 다양한 형태의 박판구조의 적용이 필수적이며,

장경간화된 박판구조의 거동은 면내 또는 면외 다축응력에 의한 휨거동이 지배적이게 된다(Polak과 Vecchio, 1994; Zi와 Oh, 2007). 따라서 장지간 PSC 및 RC 슬래브 부재의 사용성 평가를 위해서는 실제적인 응력 상태를 고려한 균열 평가가 필수적이다. 그러나 x-, y-축 응력비의 변화에 따른 휨균열강도의 변화 정도는 아직까지 실험적으로 명확하게 규명되어 있지 않으나, 일축 휨강도 및 이축휨강도보다 작거나 비슷할 것임을 기존의 순수인장에 관한 연구 및 실험 결과 등을 통하여 유추할 수 있다(지광습 등, 2007; 오홍섭과 지광습, 2009). 그러나 콘크리트의 이축휨강도와 일축휨강도 사이의 역학적 특성과 통계적 분산성 및 균열발생의 위험도에 대한 구체적인 결과들은 아직 충분하지 않다.

본 연구에서는 이축휨실험방법을 기존 일축실험체와 유사하면서도 실험시 구속조건, 복합응력 등과 같은 여타 불필요

\*정회원 · 교신저자 · 국립진주산업대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : opera69@chol.com)

\*\*정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (E-mail : g-zi@korea.ac.kr)

한 영향인자의 간섭이 최소화된 상태에서 순수 휨응력만이 평가될 수 있도록 하고자 하였으며, 현장에서의 적용성 역시 고려하고자 하였다.

표준일축휨강도실험은 50 mm 이하의 골재를 사용할 경우 콘크리트내 골재의 적절한 분포와 실험의 정확도를 위하여 실험체의 높이와 폭을 1515 cm로 제시하고 있으며, 45 cm 이상의 순지간을 3등분하여 하중을 재하한 후, 휨균열이 하중재하점 외부에서 발생할 경우 실험결과를 제외하도록 하고 있다(안주옥과 서영갑, 2004; 기술표준원, 2000). 기존의 연구에서 일축휨강도실험법과 유사한 지간/두께의 비가 0.24 이고, 하중재하위치와 지지점간의 비가 0.5인 원반형실험체를 제작하여 강도특성을 분석한 결과 전체적으로 일축휨강도에 비하여 이축의 경우가 낮게 나타났으며, 균열하중과 최대강도가 다르게 나타나는 경우가 다수 발생하였다(오홍섭과 지광습, 2009). 실험결과에 대한 기본적인 분석과 순수휨응력 평가를 위한 실험체의 제원을 제시하기 위하여 유한요소해석 및 추가실험을 실시하였으며, 그 결과 높이와 지간의 비와 가력점과 지간의 비는 각각 0.1과 0.25 내외이고, 지지점 외부의 여유길이를 최소화하는 것이 콘크리트의 이축순수휨강도를 판정할 수 있는 것으로 연구되었다(지광습 등, 2009).

본 연구에서는 제안된 실험방법에 의한 이축휨강도와 일축휨강도의 특성을 실험적으로 분석 평가하고자 하였다. 콘크리트의 역학적 성질은 실험체 크기 및 형상비와 같은 제원 뿐만 아니라 골재 입경, 콘크리트의 압축강도 및 하중속도 등에 의해서도 크게 영향을 받기 때문에 일축 및 이축휨과 같이 동질성과 이질성을 모두 갖고 있는 역학적 특성을 비교, 평가하기 위해서는 가급적 형상비와 같은 2차 인자들에 대한 간섭을 최소화하고 주영향 인자들에 대해 독립적으로 평가하여야 한다. 본 연구에서는 일축과 이축휨의 특성차이를 평가하기 위하여 동일한 콘크리트 강도와 동일한 형상비를 적용하여 실험체 크기와 골재의 크기에 대한 강도 특성을 비교, 평가하였다.

콘크리트의 일축휨강도 특성은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 실험결과에 대한 확률적 안전율을 적용한 회귀분석에 의해 식 (1)과 같이 콘크리트구조설계 기준(2008)에 제시되어 있다. 식(1)에 의한 휨파괴계수는 보통강도의 일반콘크리트 영역에 대한 것이며, 최근 연구되고 있는 고강도 또는 고성능콘크리트에 대한 휨파괴계수는 식 (1)에 의한 값보다는 작을 것으로 예측되나 아직 제시되어 있지 않은 상태이다. 또한 CEB-FIP MC90 (1993)에서는 파괴역학적 접근을 통하여 식 (2)와 같이 제시하고 있다. 일반적으로 휨인장강도는 실험체의 크기의 영향을 크게 받으며, 특히 실험체의 높이의 영향을 많이 받기 때문에 CEB-FIP의 경우에는 실험체 높이의 영향을 고려하였다. 지간과 골재 크기의 영향은 실험 결과 등에 근거한 계수  $\alpha_{fl} = 1.5$  을 사용하여 간접적으로 적용하였다.

실험에 의한 일축휨강도는 식 (4)에 의해 산정할 수 있으며, 이축휨의 경우에는 판이론을 적용하여 식 (5)으로 계산할 수 있다(Timoshenko 등, 1989; Higgs 등, 2001; Hsueh와 Kelly, 2009).

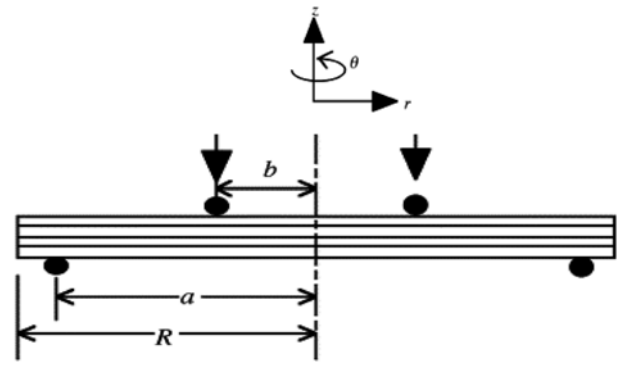


Fig. 1 A schematic showing the diametrical section through the axis of symmetry of a disk specimen

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$f_r = f_t \frac{1 + \alpha_{fl} \left(\frac{h_b}{h_o}\right)^{0.7}}{\alpha_{fl} \left(\frac{h_b}{h_o}\right)^{0.7}} \quad (2)$$

$$f_t = f_{cimo} \cdot \ln(1 + f_{ck}/f_{cmo}) \quad (3)$$

$$f_{ur} = \frac{6M}{b'h^2} \quad (4)$$

$$f_{br} = \frac{3P}{4\pi h_n^2} \left[ 2(1 + \nu_c) \ln\left(\frac{a}{b}\right) + \frac{(1 - \nu_c)(a^2 - b^2)}{R^2} \right] \quad (5)$$

$$(z = 0, r \leq b)$$

여기서  $f_{ck}$ 는 콘크리트 평균압축강도(MPa),  $f_r$ 는 이론적 휨과괴계수(MPa),  $f_t$ 는 평균적인장강도(MPa),  $h_b$ 는 실험체 높이(mm),  $h_o = 100$  mm,  $\alpha_{fl}$ 은 특성길이 계수 1.5,  $f_{cmo} = 2.12$  MPa,  $f_{cimo} = 10$  MPa,  $f_{ur}$ 은 콘크리트 일축휨파괴계수(MPa),  $f_{br}$ 은 콘크리트 이축휨파괴계수(MPa),  $b'$ 는 일축휨실험체 폭,  $M$ 은 외력에 의한 모멘트,  $h$ 는 실험체 높이이며,  $P$ 는 작용하중,  $a, b, R$ 는 각각 중앙 점부터 지지점 및 가력점까지의 거리, 판의 반지름이다.  $\nu_c$ 는 콘크리트의 포와송비이다. Fig. 1에는 식 (5)의  $R, a, b$ 에 대한 도식적 정의를 나타내었다.

판의 반지름과 지지점까지의 거리를 여유길이로 정의하면, 식 (5)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(Higgs 등, 2001; Hsueh와 Kelly, 2009).

## 2. 휨인장강도 실험

이축휨강도를 평가하기 위하여 이론 및 실험적 방법으로 Table 1과 같은 최적형상비를 제안하였다(지광습 등 2009).

Table 1. Optimum aspect ratio for biaxial flexural strength of concrete

	$h/a$	$f/a$	$b/a$
Aspect ratio	0.24	0.05	0.25

Table 2. Mix proportion of concrete (unit: N, MPa)

W	C	S	G	AE	SP	Strength	Standard Deviation
1600	4570	6930	9720	45.71	0.0	52.48	3.02

Table 3. Test variable for uni and biaxial flexural strength

(unit : mm)

Variables	Configuration (H(×W)×L or D)	a	b	Max. aggregate size	No. of specimens	
					Uniaxial	Biaxial
No.2(U)-5-25	3.0×3.0×26.3	12.5	3.15	5	20	
No.2-5-25	3.0×26.3	12.5	3.15	5		16
No.2(U)-5-50	6.0×6.0×52.5	25	6.25	5	20	
No.2-5-50	6.0×52.5	25	6.25	5		20
No.2(U)-5-75	9.0×9.0×78.8	37.5	9.4	5	17	
No.2-5-75	9.0×78.8	37.5	9.4	5		17
No.2(U)-10-50	6.0×6.0×52.5	25	6.25	10	40	
No.2-10-50	6.0×52.5	25	6.25	10		20
No.2(U)-20-50	6.0×6.0×52.5	25	6.25	20	15	
No.2-20-50	6.0×52.5	25	6.25	20		19
No.2(U)-25-50	6.0×60×52.5	25	6.25	25	18	
No.2-25-50	6.05×2.5	25	6.25	25		20

Note: a and b are a distance(or radius) to support and the loading point, respectively

제안된 실험체는 전단응력과 단부구속효과 등을 최소화하고 순수휨응력이 발현되도록 기존의 일축휨실험체와 비교하여 실험체 높이 및 가력점과 지점의 비를 1/2 정도로 감소시켰으며, 단부 여유길이를 최소화하였다.

본 연구에서는 동일한 조건에서 일축과 이축휨강도의 특성을 평가하고자 하였으므로, 기존 연구에서 제시된 Table 1의 형상비를 적용하여 이축휨실험체를 제작하였고, 일축실험체의 경우도 동일한 형상비를 적용하였다. 사용재료는 보통포틀랜드 시멘트, 쇠석골재 및 일반잔골재를 사용하였으며, Table 2와 같이 동일한 배합설계를 적용하였다.

굵은골재의 최대치수는 변수에 따라 5, 10, 20 및 25 mm를 사용하였다. 각 배합별 압축공시체를 최소 5개 준비하여 28일 동안 수중양생한 후 KS 기준에 따른 실험결과 압축강도와 표준편차는 각각 52.48 MPa과 3.02 MPa로 판정되었다.

실험은 각각 실험체의 크기와 굵은골재 최대치수에 대한 영향을 분석하고자 하였다. 실험체의 크기는 실험체 두께를 3 cm, 6 cm와 9 cm로 고정하고, Table 1의 형상비에 따라 지간 및 하중재하점을 결정하였으며, 골재의 크기는 5 mm골재를 기준으로 10 mm, 20 mm 및 25 mm 골재를 두께 6 cm 실험체에 적용할 경우의 휨인장 강도변화 정도를 평가하고자 하였다.

과괴역학적 측면에서 실험체 두께 또는 높이는 굵은골재 최대치수의 최소 3~6배 이상 되어야 하는 것으로 인식되고 있다(김성수 등, 2009). 그러나 제안된 실험체의 형상비에 따라 실험체를 설계할 경우 25 mm 골재에 대한 실험체의 최소두께는 75 mm~150 mm 정도 되어야 하며, 이에 대한 실험체의 지름은 지점외부길이(여유길이)를 고려하여 최소 630~1260 mm 이상 되어야 한다. 이 경우 실험체의 크기 및 중량의 문제로 인하여 건설현장에서의 적용이 거의 불가능하기 때문에 본 연구에서는 현장적용이 가능한 실험체 크기에서 골재의 크기에 따른 휨인장강도 변화 정도를 실험적으로 분석하고자 하였다. Table 3에는 실험변수에 대하여 정리하였으며, Fig. 2에는 일축실험체와 이축실험체의 실험전경

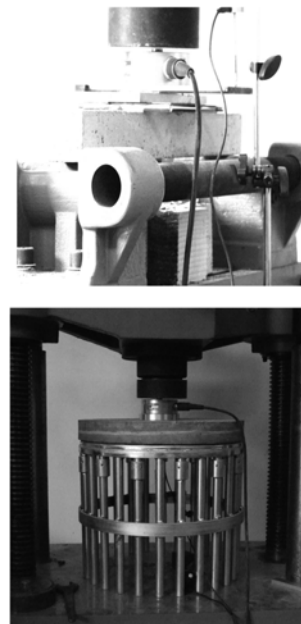


Fig. 2 Test setup

정리하였다.

실험체는 변수에 따라 20개씩 제작하였으며, 실험방법은 Fig. 2에 나타내었다. 일축휨실험체의 경우는 기존의 일축휨강도 시험법과 동일한 방법을 적용하였으며, 다축실험체의 경우는 원형지점위에 시험체를 위치시키고, 원형 가력판을 시험체 위에 놓고 하중을 가력하였다. 이때 원형 지점과 원형 가력판의 중심이 일치하도록 하였다.

지점의 마찰에 의한 구속효과의 영향을 평가하기 위하여 실험체 중 10개에는 지점에 테프론 섬유를 사용하여 마찰구속을 최소화하였으며, 나머지 10개에 대해서는 테프론 섬유를 적용하지 않은 상태에서 실험을 수행하였다. 하중재하는 만능재료시험기를 사용하였으며, 변위는 실험체 중앙부에 LVDT를 설치하여 파괴시까지 측정하였다. 실험체 균열은 실험체 하부에 소형카메라를 설치하여 하중가력동안 균열의 발생형태와 발생하중을 관찰하였다.

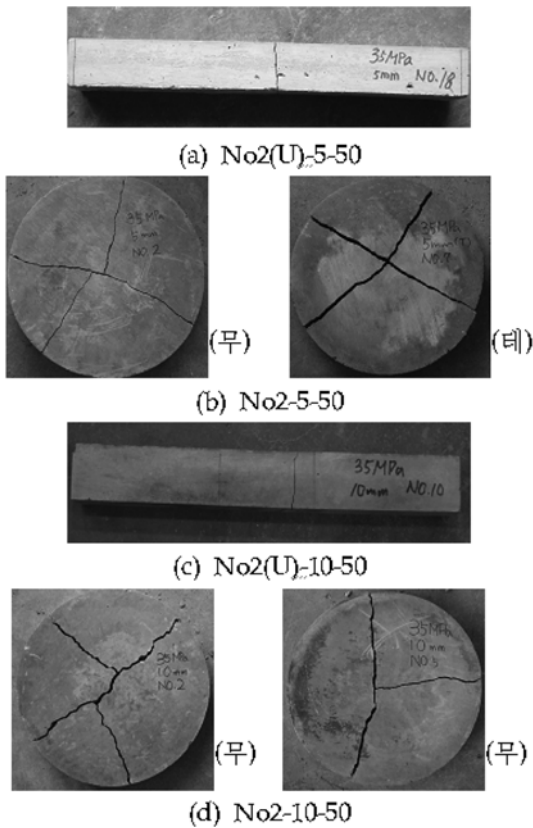


Fig. 3 Typical failure patterns

### 3. 힘인장강도 결과분석

#### 3.1 파괴형태

Fig. 3에는 일축 및 이축실험체의 대표적 파괴형상을 나타내었다. 이전의 연구와 유사하게 일축실험체의 경우는 1개의 균열 생성후 파괴되었으며, 하중가력점 외부에 균열이 발생한 실험체는 결과 분석시 제외하였다. 전체적으로 이축 휨실험체의 최종 파괴형상은 3~4개의 균열이 발생한 후 파괴되는 것으로 나타났으며, 테프론 섬유를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우의 파괴형상의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 특히 일부 실험체에서 1개 또는 5개 이상의 균열에 의한 파괴가 발생하였다.

#### 3.2 응력-변위관계

Fig. 4에는 No.2-10-50실험체의 응력-변위 관계상의 각 변곡점에서의 균열 변화 형태를 동영상자료를 사용하여 도시하였다. 초기 균열발생전까지는 선형적인 응력-변위관계를 나타낸 반면, 균열발생후 급격한 응력저하 및 상승과 함께 추가 균열이 발생하였고, 최종적인 잔류응력은 최대하중의 10~20%내외였다.

초기균열은 첫 번째 변곡점에서 발생하나 동영상 상에서 육안으로 확인가능한 균열은 두 번째 변곡점에서 확인할 수 있었고, 추가균열의 경우는 골재맞물림 및 지점구속효과 등에 따라 Fig. 4의 두 번째 고점에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 전체적으로는 응력-변위 관계상의 최종적인 고점에서 모든 균열 형태가 완성되고, 마지막 저점 이후 균열 폭 증가 등에 의해 파괴되는 형태로 나타났다. 따라서 이축휨응력을 받는 콘크리트 재료의 휨강도의 경우는 최대강도가 아

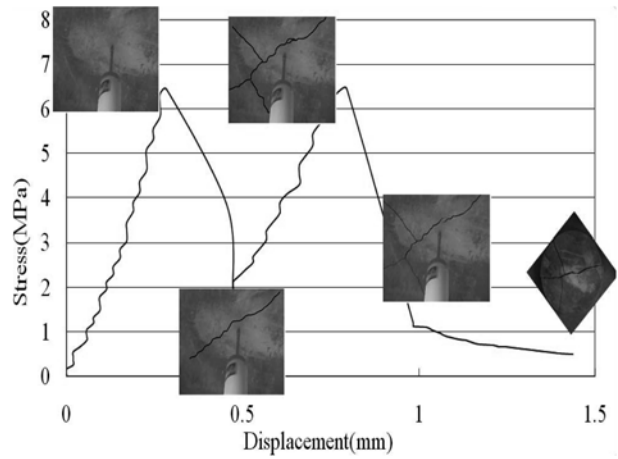


Fig. 4 Crack propagation pattern of No2-10-50

닌 첫 번째 균열강도를 휨강도로 정의하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 각 변수에 대한 실험결과 분석을 통하여 이축 휨인장강도에 대한 예측식 제안이 가능할 것이다.

Fig. 5에는 동일한 변수들에 대한 일축과 이축실험체의 대표적인 응력-변위관계를 도시하였다. 전반적으로 초기 강성은 일축과 이축의 경우가 유사한 것으로 나타났으며, 초기 균열시 처짐도 대략 0.5 mm 내외로서 크게 차이는 없는 것으로 판단된다. 그러나 균열후 거동은 일축실험체가 모두 균열 발생후 곧바로 파괴되는 것에 비하여 이축실험체는 응력의 고점이 한 개 이상이었으며, 일축실험체에 비하여 상대적인 비탄성 거동을 하는 것으로 관찰되었다. 일축 실험체는 변수와 관계없이 휨 파괴시 1 MPa 정도까지 급격하게 응력이 저하되었으며, 약간의 연화현상후 최종 파괴되었다.

No.2-5-25계열 이축실험체(Fig. 4(a))의 경우, 전반적으로 0.2 mm 내외에서 초기 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 균열 후 1-2차례의 응력감소-상승을 반복한 후 0.8~1 mm 정도에서 최종 파괴되었다. 최종 파괴시 잔류응력은 대략 최대강도의 20% 내외이며, 몇몇 실험체의 경우는 구속효과에 의하여 일정 응력이 지속되는 것으로 관찰되었다.

No.2-5-50계열(Fig. 5(b))의 이축실험체의 경우는 실험체 크기가 작은 No.2-5-25 계열보다 응력이 작게 나타났고, 초기 강성(응력/변위)의 경우도 작은 것으로 관찰되었다. 그러나 초기 균열시의 변위는 큰 차이가 없었으며, 몇몇 실험체에서 초기 균열후 응력의 즉각적인 감소 없이 강성이 크게 감소하면서 변위가 증가하는 현상이 나타났다. 이는 균열부 골재 맞물림 등에 의해 균열 후 일정 강도가 발현되었기 때문인 것으로 판단된다.

No.2-5-75계열(Fig. 5(c)) 이축실험체의 응력-변위 관계는 강도가 실험체 크기 증가에 따라 감소한 것을 제외하고, 전체적인 응력-변위 형상은 25 cm와 50 cm 계열과 유사하게 나타났다.

골재의 크기를 10 mm, 20 mm와 25 mm를 사용한 경우에 대한 응력-변위 곡선은 Fig. 5(d)~(f)에 나타내었다. 초기균열 응력과 최대 균열응력 모두 동일한 크기의 실험체에서 골재가 커질수록 강도가 작게 나타났으며, 균열 후의 거동은 골재의 입경이 큰 경우가상대적으로 연성적인 응력변화 형태를 나타내었다.

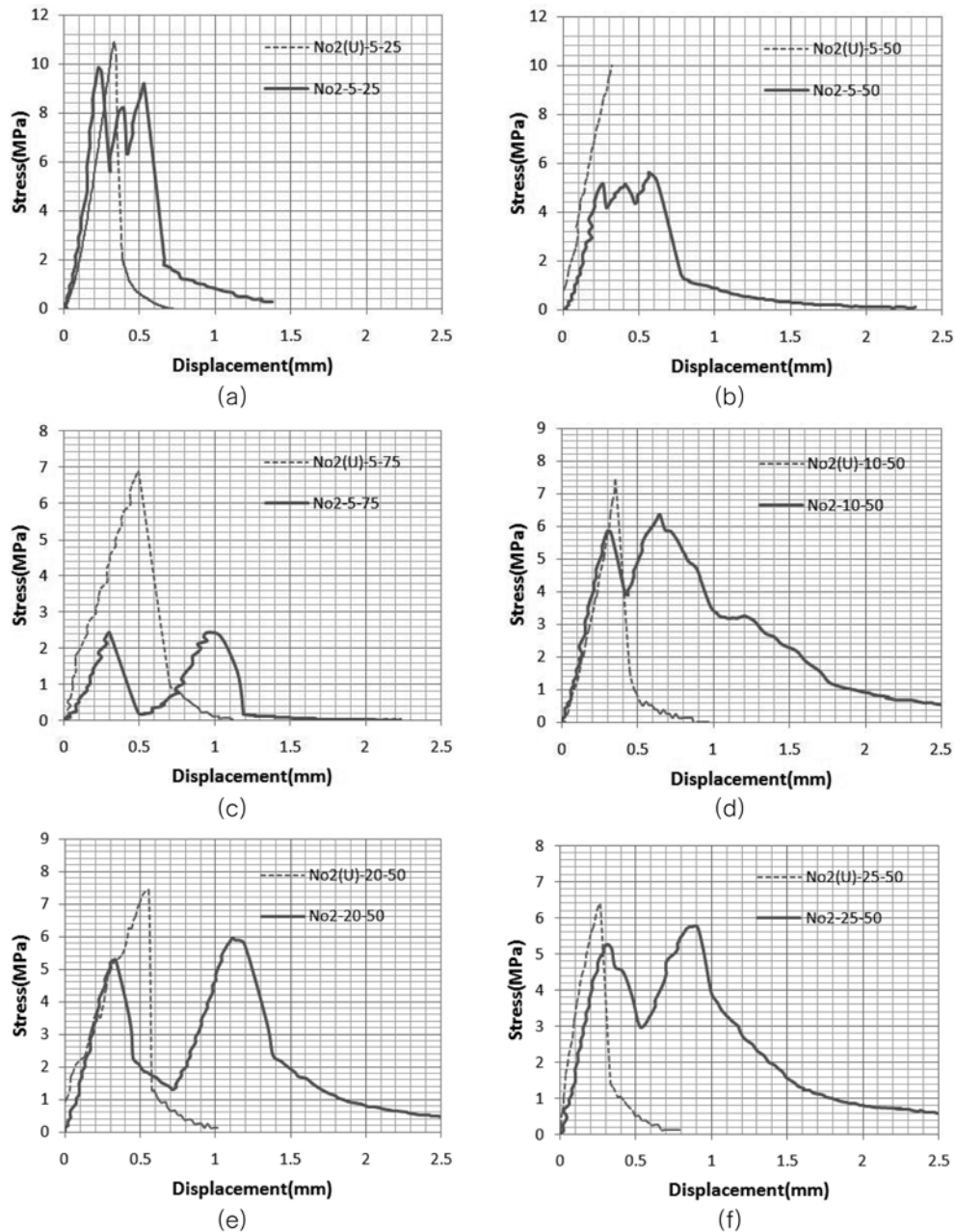


Fig. 5 Typical stress-displacement relationship of uni and bi-axial flexural specimen

Table 4. Summary of test results

Specimen	Theory (MPa)		Test (MPa)							
			Uni-axial (MPa)		Biaxial Strength					
	Strength <sup>①</sup>	St.Dev.			Cracking Strength			Max. Strength		
Strength <sup>②</sup>			St.Dev.	②/①	Strength <sup>③</sup>	St.Dev.	③/①			
No.2-5-25	4.56	9.9	9.99	1.01	9.91	1.88	0.99	11.06	2.28	1.11
No.2-5-50		7.59	7.92	0.93	6.32	0.59	0.8	6.59	0.62	0.83
No.2-5-75		6.67	7.45	0.58	2.95	0.72	0.4	3.39	1.16	0.46
No.2-10-50		7.59	8.00	1.12	5.35	0.81	0.67	5.67	0.75	0.71
No.2-20-50		7.59	6.72	0.56	5.13	1.20	0.76	5.66	0.88	0.84
No.2-25-50		7.59	6.03	0.50	5.54	1.20	0.92	5.78	1.13	0.96

25 mm 골재를 사용한 실험체의 경우에는 테프론 지점의 경우가 전반적으로 완만한 응력의 상승과 하강 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 상대적으로 높은 잔류응력 상태에서 파괴에 이르는 것으로 관찰되었다.

### 3.3 휨강도

Table 4에는 각 시험변수별 설계기준상의 휨강도와 일축과 이축실험체의 평균 휨균열강도, 최대강도 및 표준편차를 정리하였다. 모든 실험결과가 콘크리트 설계기준상의 휨강도

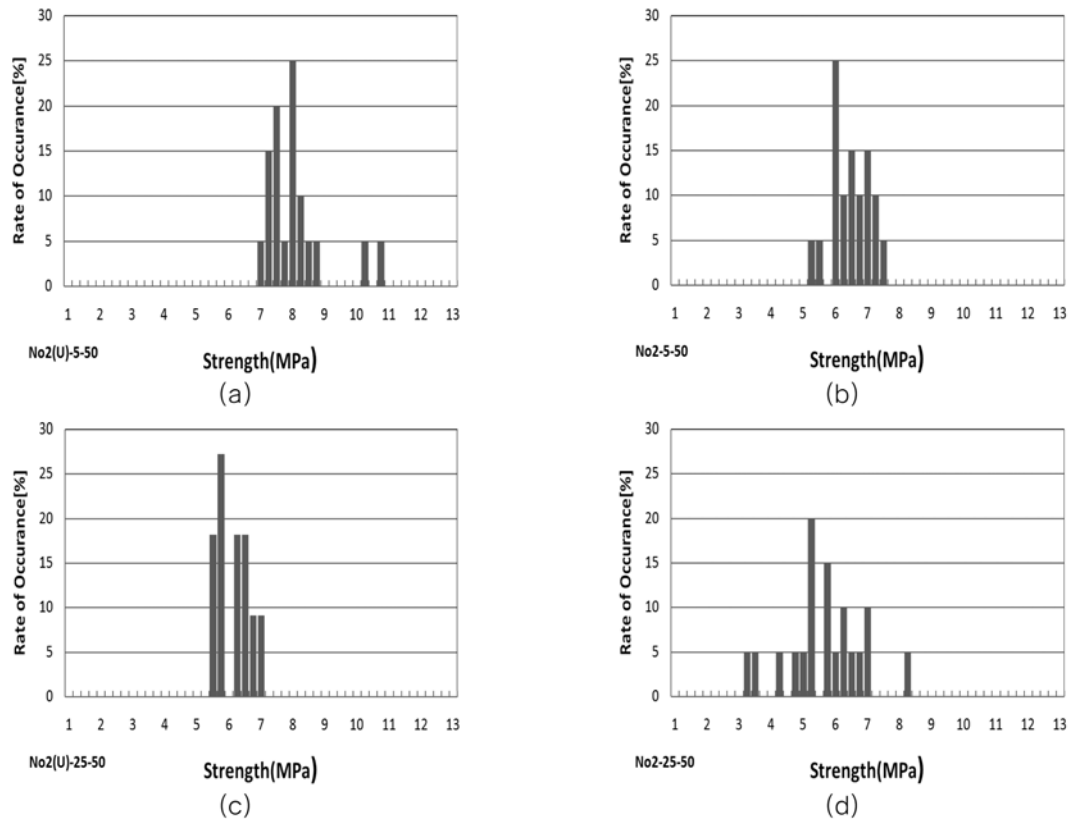


Fig. 6 The histogram of the uniaxial and biaxial flexural strengths for the experiment

보다는 높게 나타났으나, MC90의 경우에는 지름 25 cm 실험체를 제외하고는 모두 작게 나타났고, 대체적으로 국내 기준보다는 상대적으로 근사적으로 예측되었다. 이는 콘크리트 설계기준이 반영형적 실험식인데 반하여, MC90의 경우는 파괴역학적 접근에 의한 실험체 형상에 대한 영향이 고려되었기 때문인 것으로 판단된다.

실험결과 이축실험체의 휨균열강도는 실험체 하부에 균열이 발생했을 때의 강도를 의미하며, 응력-변위관계와 카메라에 의해 측정된 결과를 조합하여 산정하였다. 실험결과 대부분의 경우 응력-변위 곡선의 첫 번째 변곡점에서 균열이 발생하는 경우가 많았으며, 이를 본 연구에서는 균열강도로 정의하였다. 변수별 총 20개의 실험체를 제작하였으나, 편심 등의 실험과정의 오류 등으로 인한 것을 제외하고는 모든 실험체의 결과를 정리, 평가하는데 사용하였다. 이축휨실험은 지점부의 마찰 또는 구속조건에 따라 강도의 편차가 발생할 수 있다. 따라서 구속효과정도를 평가하기 위하여 지점부에 테프론 섬유를 적용한 경우에 대하여 평가하였으며, 전체적으로 적용하지 않은 경우보다 휨강도와 표준편차가 다소 작은 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 그 차이가 크지 않아 강도 평가시 동일하게 취급하였다.

콘크리트 압축강도 52.58 MPa에 대한 콘크리트 구조설계 기준(2008)상의 설계휨파괴계수는 4.56 MPa로서 이축실험체로서 지름이 75 cm인 No.2-5-75를 제외하고는 일축과 이축 실험체 모두 설계휨강도보다는 높은 휨 강도를 갖는 것으로 나타났다. 특히 실험체 크기가 가장 작은 No.2-5-25 계열의 일축 및 이축 휨강도가 각각 9.99 MPa와 11.06 MPa(균열강도 10.31 MPa)로서 가장 높게 나타났으며, 실험체 길이가 50 cm인 경우는 골재의 크기에 따라 일축의 경우는 6.03~8.00 MPa의 변화를 갖는 반면 이축실험체의 경우는 5.66~6.59 MPa

의 값을 갖는 것으로 관찰되었다.

실험체 길이(지름) 25 cm를 제외하고는 일축에 비하여 이축실험체의 휨강도가 낮은 것으로 나타났으며, 표준편차는 크게 평가되었다. Fig. 6에는 골재크기 5 mm와 25 mm인 경우의 일축실험체와 이축실험체의 휨강도 분포를 도시하였다. 모든 실험체에 대한 빈도분포 곡선을 제시하지는 않았으나, 전체적으로 정규분포를 나타내었으며, 분산정도는 이축 실험체가 상대적으로 크게 관찰되었다.

Table 4에 나타난 것과 같이 일축휨실험체와 달리 이축실험체의 경우는 균열강도와 최대강도의 차이가 발생하게 된다. 이는 일차 균열 발생 후 재료 및 실험체 기하조건과 지점조건 등의 영향으로 하중이 증가함에 따라 발생하는 현상이다. 특히 이축실험체의 경우, 균열하중 전까지의 거동은 탄성적이나, 균열발생 이후는 비탄성적인 응력 상승과 저하 현상을 반복하게 된다. 따라서 콘크리트 인장강도 측면에서 초기 균열 강도를 콘크리트의 이축휨강도로 정의하는 것이 보다 합리적이고, 신뢰성 있는 공학적 기준으로 사용될 수 있을 것이다.

### 3.3.1 실험체 크기의 영향

휨강도에 대해 실험체의 크기가 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험체 순지간 25 cm, 50 cm 및 75 cm의 실험체에 대하여 휨강도를 측정하였으며, 굵은 골재 최대치수는 5 mm로 고정하였다. 전체적으로 실험체의 크기가 작을수록 강도가 크게 나타났으나, 표준편차 역시 크게 나타나 실험체크기가 작을수록 강도에 대한 불확실량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이축실험체의 경우, 지간 50 cm 보다 지간 75 cm의 경우가 표준편차가 크게 나타났으나, 의미가 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 실험체크기에 따른 변화량이 순지간

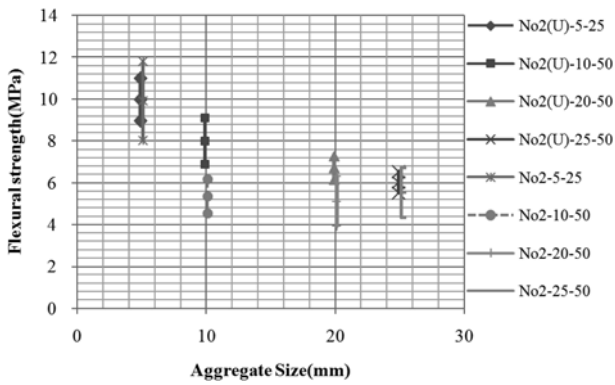


Fig. 7 Flexural strength on the various aggregate size

50 cm와 75 cm에서 감소하는 것으로 나타나 현장적용성을 고려한 적절한 실험체의 지름은 개략적으로 50 cm 내외가 적절한 것으로 판단된다.

### 3.3.2 골재 크기의 영향

Fig. 7과 같이 일축실험체의 경우 골재의 크기가 증가함에 따라 휨 강도는 저하되고, 표준편차는 감소하는 경향을 나타냈으며, 골재크기 20 mm와 25 mm의 경우는 감소폭이 작아지는 것으로 관찰되었다. 그러나 지간이 50 cm인 경우 이축 실험체의 경우는 골재의 크기에 따른 강도저하현상이 거의 나타나지 않았으며, 편차 역시 대동소이하게 조사되었다. 이는 면적이 넓은 이축실험체에서 골재가 실험체 내에 충분히 분산될 수 있었기 때문에 골재 크기의 영향이 상대적으로 감소한 것으로 판단되며, 따라서 지간 50 cm, 높이 6 cm 정도의 이축실험체의 경우, 굵은 골재 최대치수를 20 mm 정도로 하여도 실험 결과의 신뢰성 및 휨강도의 대표성에는 크게 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

일축 및 이축 휨강도 평가결과를 통하여 도출된 실험 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 일축 및 이축실험체 모두 실험체 및 골재 크기 증가에 따라 휨강도가 저하되는 것으로 나타났으며, 전반적으로 이축실험체의 휨강도가 일축의 경우보다 작게 산정되었다.
2. 이축실험체의 경우 균열강도와 최대강도가 약간의 차이가 있는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 콘크리트 인장부의 균열 발생이 사용성과 재료적 구조성능을 상실하는 것으로 판단하여 균열강도를 콘크리트의 이축휨강도로 정의하였다.
3. 실험체 크기가 휨강도에 미치는 영향은 일축에 비하여 이축실험체가 큰 것으로 나타났으며, 이는 실험체의 불확실 인자의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 이에 반하여 골재 크기의 영향은 이축실험체의 경우 미소한 것으로 나타났다. 따라서 현장적용시 적절한 실험체의 크기 효과에 대한 분석이 필요한 것으로 판단된다.
4. 이축실험체의 휨균열강도의 경우 일축휨강도와 비교하여 최저 39.5%에서 99.2%까지 변화하고, 20 mm 골재를 사용한 크기 50 cm 실험체의 경우도 일축휨강도의 76.4% 정도로서 기존의 휨파괴계수식으로는 콘크리트의 이축휨

인장강도에 대한 정확한 평가 및 구조물의 사용성과 안전성 확보가 어려운 것으로 판단된다.

5. 휨인장강도 이론치와 실험결과를 분석한 결과 국내설계기준의 경우는 이론값이 크게 과소평가되는 경향이 나타났으며, 파괴역학적 근거에 의한 MC90의 경우에는 실제 결과와 경향은 유사하나 약간 과소평가됨으로서 일축 및 이축 휨강도 평가에 보다 적합한 기준식이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 기초연구지원사업(D00793과 2009-0064233)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 저자들은 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 기술표준원(2000) KS F 2408 콘크리트 휨강도 시험방법.  
 김성수, 박광필, 이정배(2008) 성능중심형 고내구성 콘크리트의 배합설계, 한국콘크리트학회 2008년도 가을 학술발표논문집, 한국콘크리트학회, Vol. 20, No. 2.  
 김성수, 류재석, 이승태, 정호섭(2009) 토목재료학, 구미서관.  
 안주옥, 서영갑(2004) 최신 철근 콘크리트 공학, 사이텍 미디어.  
 오홍섭, 지광습(2009) 일축 및 이축 휨인장강도의 실험적 비교, 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, Vol. 20, No. 2, pp. 139-146.  
 지광습, 오홍섭, 최진혁(2007) 콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권 제5A호, pp. 753-758.  
 지광습, 김지환, 오홍섭(2009) 최적 시험체 형상을 고려한 개선된 콘크리트 등방휨인장강도 시험법, 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, Vol. 21, No. 4, pp. 523-530.  
 한국콘크리트학회(2008) 콘크리트구조설계기준.  
 CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993  
 Fib (1999) *Structural Concrete: Text book on Behavior, Design and Performance*, International Federation for Structural Concrete  
 Hsueh, C.H. and Kelly, J.R. (2009) Simple solutions of multilayered discs subjected to biaxial moment loading, *Dental materials*, Vol. 25, pp. 506-513.  
 Higgs, W.A.J., Luksanasomboon, P., Higgs, R.J.E.D., and Swain, M.V. (2001) Evaluating acrylic and glass-ionomer cement strength using the biaxial flexure test, *Biomaterials* Vol. 22, pp. 1583-1590.  
 Polak, M.A. and Vecchio, F.J. (1994) Reinforced concrete shell elements subjected to bending and membrane loads, *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 3, pp. 261-268.  
 Saraf, M.N., Gupta, R.K., and Vishwanath (1990) Biaxial flexural strength and estimation of size on the strength properties of FRP composites, *Defence Science Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 171-181.  
 Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S. (1989) *Theory of Plates and Shells*, Engineering Mechanics Series, McGraw-Hill, Tokyo.  
 Zi, G. and Oh, H. (2007) 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, pp. 751-756.

(접수일: 2009.12.1/심사일: 2010.1.3/심사완료일: 2010.2.4)