

콘크리트의 순수 등방성 휨인장강도 시험법

A New Test Method for Pure Isotropic Flexural Tensile Strength of Concretes

지광섭* · 오홍섭** · 최진혁***

Zi, Goangseup · Oh, Hongseob · Choi, Jinhyek

Abstract

Proposed is a new test method to measure the biaxial tensile strength of concretes or other quasibrittle materials. One of the most novel features of the method is that only one actuator is used unlike other biaxial tensile test methods. This method is a three dimensional version of the classical modulus of rupture test. The specimen for the test is a circular plate loaded by a circular edge and supported by another circular edge. They have the same center point. The moment within the circular edge on which the applied load is constant in any direction. The biaxial tensile strength of a concrete was measured using the new flexure test method. From the test result, biaxial tensile strength of circular plates is lower than the strength from the traditional theory on the modulus of rupture strength suggested by ACI 318-05. The biaxial tensile strength of concrete is significantly scattered, and its standard deviation is about quadruple of that of uniaxial strength allowed in ACI 318-05. Therefore, to establish on the characteristic of biaxial tensile strength which may be influenced by aggregates, size effect and compressive strength of plain concrete, further experimental and theoretical researches are required.

Keywords : *Biaxial flexure test (BFT), indirect tensile strength, new test method, modulus of rupture, quasibrittle materials*

요 지

콘크리트나 기타 준취성 재료의 이방향 인장강도를 쉽게 측정할 수 있는 새로운 휨시험법을 제안하였다. 기존의 이방향 인장시험법에서는 네 개의 가력기가 필요한 것과는 달리, 전통적인 휨인장강도 시험법의 삼차원 버전인 이 시험법에서는 단지 하나의 가력기 만 필요하다. 이 시험법에서 원형 시편이 사용되며, 이 시편은 각기 다른 반지름의 원형 모서리로 재하 및 지지된다. 시편, 재하 및 지지 원의 중심은 서로 일치하며, 하중이 재하되는 원형모서리 내부의 모멘트는 어느 방향으로든 일정하다. 본 논문에서 제안된 시험법을 이용해서 콘크리트의 이방향 인장강도를 측정하였다. 실험결과 ACI318-05에서 제시된 일축 휨인장강도보다 이축휨인장강도가 작은 것으로 나타났다. 실험결과와 분산성이 대단히 컸으며, 실험결과 표준편차 또한 ACI318-05에서 허용하고 있는 일방향 실험체 표준편차의 4배인 것으로 관찰되었다. 따라서 이축휨인장강도 특성에 대한 정확한 이해를 위해서는 골재의 종류, 크기효과 및 압축강도 등 이축휨인장강도에 영향을 미치는 인자들에 추가적인 실험과 해석이 필요하다.

핵심어 : 이방향 휨인장강도 시험, 간접 인장시험법, 신 시험법, 휨 파괴 강도, 준취성재료

1. 서 론

콘크리트의 대표적인 역학적 특성 중 하나는 인장강도가 압축강도의 1/8에서 1/10정도에 불과한 점이다. 그러므로 동일한 크기의 외력이 작용할 때, 인장응력에 노출된 콘크리트가 먼저 파괴된다. 대부분의 철근 콘크리트 구조설계법에서는 인장응력에 저항하기 위한 최소보강철근 배근 규정을 명시하고 있으며, 내하력 산정시 콘크리트가 갖는 인장 저항능력은 무시하고 있다(건설교통부 2003). 하지만, 사용성 측면에서 과도한 균열발생을 억제하거나 균열폭을 제어하기 위해서는 콘크리트의 인장강도를 고려하도록 하고 있다. 예외

적으로 무근 콘크리트 구조체의 안전성의 경우에는 콘크리트의 인장강도로서 부재의 내하성 및 사용성을 평가하도록 하고 있다.

콘크리트의 인장강도를 측정하기 위해 널리 사용되는 시험법으로는 직접 인장법, 휨인장시험법, 할렬시험법 등이 있다(안주옥과 서영갑 2004). 인장시험시 목적하는 비는 순수한 재료강도의 산정이나, 시험방법 및 시험체 형상에 기인한 시험체 내부의 급격한 응력구배 현상이 필연적으로 발생하게 된다. 따라서 실제 측정되는 강도는 순수한 재료 강도가 아닌 시험체의 공칭강도(nominal strength)가 된다. Bazant와 공동연구자들에 따르면, 시험체에서 측정되는 공칭강도는 시

*정희원 · 교신저자 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (E-mail : g-zi@korea.ac.kr)

**정희원 · 국립진주산업대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : hongseob@hotmail.com)

***국립진주산업대학교 토목공학과 석사과정

형체의 재료적 특성 이외에 크기와 형상에도 영향을 받는다 (Bazant 1984 외 다수, 최근 발견된 세 번째 형태의 크기효과는 Zi 외(2003) 참조). 직접 인장시험의 경우 이 응력구배를 최소화시켜 최대한 내부 응력을 균질하게 만들어서 시험을 수행하는 것이 관건이며, 이는 매우 까다로운 것으로 알려져 있다. 응력구배 제어의 어려움으로 인하여 미리 해석되고 설계된 응력 구배를 적용하여 인장강도를 간접적으로 산정하는 방법을 적용할 수 있으며, 휨인장시험법이 이에 해당한다. 휨인장시험법은 4 점 재하의 휨 시험체를 이용하기 때문에 탄성 보이론에 의하면 시편 상부에서 하부까지 선형의 응력 구배를 가지게 된다. 따라서 잘 알려진 휨 응력공식으로부터 휨 인장강도를 쉽게 얻을 수 있다.

상기한 시험법들이 가정하고 있는 일축 인장거동과는 달리 외부하중으로 인해 콘크리트 내부에 발생하는 실제 응력상태는 매우 복잡하므로 다축 응력상태를 고려하는 것이 합리적이다. 하지만 다축 응력상태의 최대응력을 측정하기 위해서는 다수의 재하장치와 매우 복잡한 실험 장비가 필요하게 된다(예, Muzyka 2002). 다축방향 응력조건에 대한 강도는 일축 강도와 실험적인 관계를 이용해서 추정하는 것이 보통이며, 매우 대략적인 추정치를 얻기 위해 28일 압축강도를 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 최근 다양한 종류의 콘크리트가 개발되고 있으나, 이들 새로운 콘크리트에 대한 기존의 보통 콘크리트를 대상으로 개발된 실험식의 적용 타당성 및 유효성에 대한 연구와 근거는 아직 충분하지 않은 상태이다.

또한 콘크리트 구성방정식의 개발을 위해서는 삼축방향의 거동과악이 매우 유용하지만, 여러 가지 공학적인 응용목적에서는 벽, 슬래브 등의 이차원적인 구조요소가 주로 쓰이기 때문에 이축방향의 거동, 특히, 강도 특성을 얻는 것이 보다 간편하고, 유용하다. 심지어 이축시험에서도 매우 복잡한 설비가 필요하며, 이축인장시험의 경우는 특정 방향으로 파괴가 국부적으로 집중(localization)되기 때문에 매우 섬세한 장비조작이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트의 이축인장강도를 손쉽게 측정할 수 있는 새로운 시험법을 개발하여 그 이론적 근거와 구성을 소개하였으며, 실험 예를 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장의 서론에 이어 제 2장에서는 본 논문에서 제안하는 시험체를 설명하였고, 제 3장에서는 재하하중과 인장강도 간의 상관관계를 얻기 위한 해석적인 해를 제시하였다. 제 4, 5장에서는 각각 제안된 시

험법에 의한 콘크리트 휨인장강도 실험과 결과를 간략히 제시하였다. 제 6장에서는 본 시험법이 적용될 수 있는 분야를 간략히 제시하였으며, 제 7장에서는 본 논문의 결론을 도출하였다.

2. 순수 등방성 휨인장시험체

순수 등방성 휨인장시험체는 그림 1에 도시된 바와 같은 기존의 4점 재하시험에 근거한 일축 휨인장시험체를 입체화한 것이다. 일축 휨인장시험체에서는 재하점 사이 구간에서는 휨 모멘트가 일정하게 되어 보이론에 따르면 재하점 사이의 시편하면에 일정한 응력이 형성된다. 이 구성을 삼차원으로 일반화하면 그림 2a와 같은 구성을 고안할 수 있다. 일축 시험체와는 달리 원반형 시험체가 사용되고, 이 시험체는 고리형 지지판에 재하된다. 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 휨 모멘트는 일정한 것으로 추정할 수 있다(그림 2b). 이에 대한 이론적 근거는 이후 수치해석결과와 다음 장의 해석적인 해에 제시되었다.

그림 3은 앞서 본 논문에서 논의하고 있는 순수 등방성

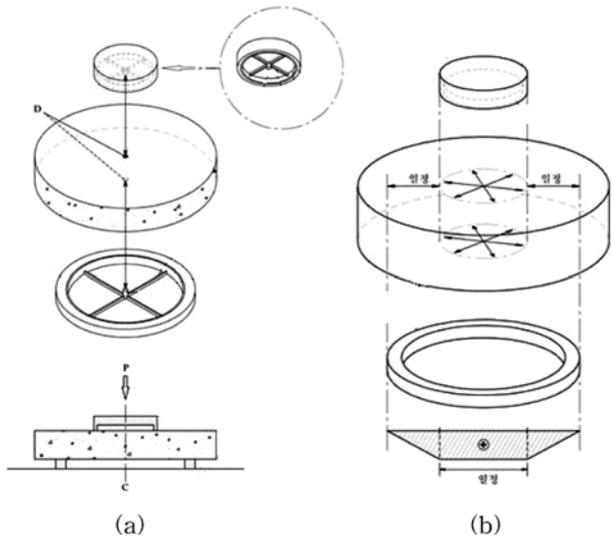


그림 2. (a) 순수 등방성 휨인장 시험체 구성, (b) 휨 모멘트 분포

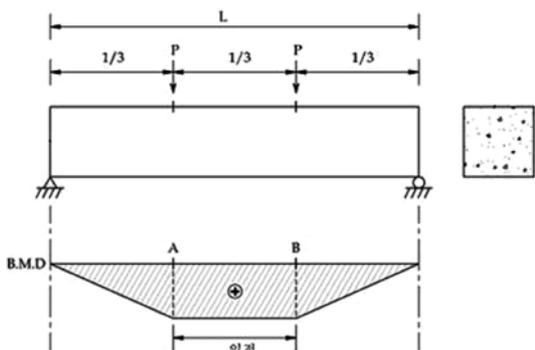


그림 1. 일축 휨인장 시험체 구성

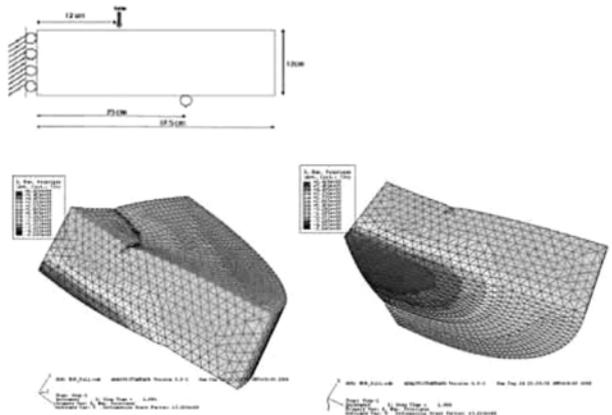


그림 3. 삼차원 유한요소 해석결과

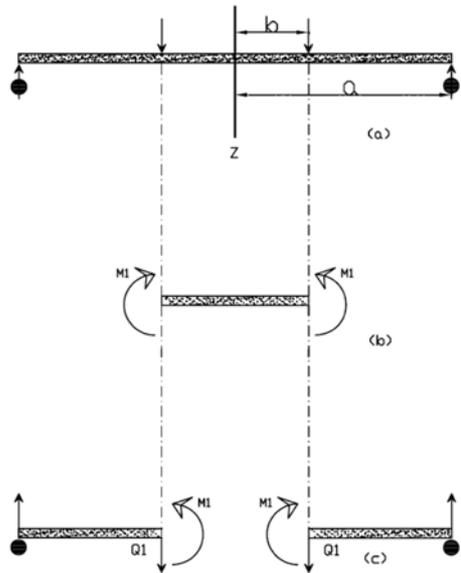


그림 4. 중첩의 원리를 이용한 원형 판의 해석

휨인장시험체의 삼차원 유한요소 해석결과이다. 대칭조건을 이용하여 시험체의 사분의 일 만 모델하였으며, 대칭조건이 적용된 면에서는 로올러 경계조건을 적용하였다. 상면에 하중이 직접 적용된 부분에는 압축응력이 발생하였으며, 이 하중이 시험체로 전달되어 하면에 인장응력이 발생하였다. 본 시험체의 변형 후 형상에 최대 주응력의 분포를 도시하였다. 시험체의 중앙부에서 최대 주응력은 최대의 값을 가지고, 그 주변에서 거의 동일한 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이 응력은 하중이 재하되는 재하판 바깥 부위에서는 점진적으로 감소하였다. 즉, 일축 휨응력시험에서 발생하는 응력구배와 비슷한 응력구배가 본 시험체에서도 얻어졌으며, 재하판 내부의 시험체 하 면에서는 인장응력이 거의 동일함이 확인되었다.

3. 해석적인 최대 응력치

전장에 기술한 바와 재하 하중과 최대 응력과의 관계를 삼차원 수치해석적 방법을 사용할 수도 있으나, 실무적 측면에서는 해석적인 해를 사용하는 것이 보다 효과적이다. 본 시험체와 같이 원형으로 재하된 원판형 시험체를 원형 판으로 근사화하면, 축대칭 탄성판의 미분방정식으로부터 재하하중과 응력과의 관계를 얻을 수 있다. 중첩의 원리를 이용하면 본 시험체를 순수 휨 모멘트가 재하된 내부 판(그림 4b)과 중앙에 원형 구멍이 있으며, 구멍의 가장자리에 모멘트와 전단력이 재하된 판(그림 4c)으로 분해할 수 있다. 이 두 문제의 해석적인 해는 Timoshenko와 Woinowsky-Krieger (1989)의 탄성판이론에 잘 정립되어 있다.

원 문제의 연속성을 위해, 두 판은 연결부위에서 수직변위 w 와 변위의 구배 $\partial w / \partial r$ 가 같아야 한다. 이 두 조건과 앞서 언급한 두 판의 해를 연결해서 풀면 다음과 같은 모멘트 M 와 재하하중 P 의 상관관계가 얻어진다.

$$M = \left\{ \frac{(1-\nu)[1-(b/a^2)]}{8\pi} - \frac{(1+\nu)\log(b/a)}{4\pi} \right\} P \quad (1)$$

여기서 ν =포아송 비, a =지지판의 반지름, b =재하판의 반지름이다. 단순 지지된 원형 판은 정정 구조이기 때문에 식 (1)

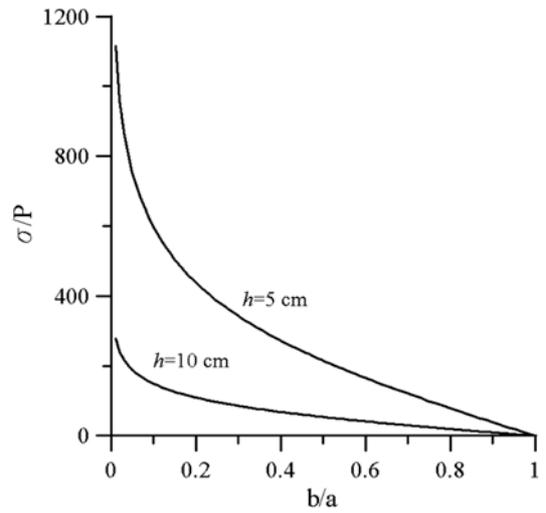


그림 5. 재하판과 지지판 크기 비율에 따른 응력대 하중 비

의 모멘트는 탄성계수 등 재료 강성과는 독립적이다. 모든 방향으로 모멘트가 일정하므로 하면의 응력은 방향에 상관없이 다음 식으로 얻어진다.

$$\sigma = \frac{6M}{h^2} \quad (2)$$

여기서 h =판의 두께이다. 위의 두 식으로부터 가해진 하중 P 와 응력 σ 사이의 관계는 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

그러므로 응력은 지지판과 재하판의 크기 비 b/a 의 비선형 함수이다. 그림 5에는 포아송 비를 0.18로 가정하고, 두께가 5 cm와 10 cm인 두 개의 시험체에 대해 b/a 와 응력 간의 관계를 도시하였다. 이방향 인장강도는 가해진 하중을 식 (3)에 대입함으로써 구할 수 있다. 참고로, 일축 휨인장 시험시 작용하중과 응력 사이의 관계는 다음과 같이 하중 재하점의 구간과 지지점 간의 길이 비에 선형의 관계를 갖는다.

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

여기서 시험체 지점 간의 간격은 $2b$ 이고, 하중 재하점간의 간격은 $2a$ 이며, w =시험체의 폭이다.

식 (3)의 작용하중과 응력 간의 관계에서 지지판 끝단의 여유길이의 작용은 무시하였다. 하지만 이 여유길이가 길어지면 경계조건에 영향을 미치므로 추후 연구에서는 이의 영향을 고려할 수 있는 보정항에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 실험개요

4.1 사용재료 및 실험체 제작

본 연구에서 콘크리트의 이방향 휨인장강도를 실험적으로 측정하기 위하여 실험체를 제작하였으며 재료는 보통포틀랜드 시멘트, 쇠석골재 및 일반잔골재를 사용하였다. 굵은골재의 최대치수와 단위중량은 각각 20 mm와 2.72 t/m³이며, 흡수율과 조립율은 각각 2.9%와 6.6%으로 측정되었다. 잔골재의 비중은 2.58 t/m³이다.

표 1. 콘크리트 배합표

W/C (%)	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)	S/a (%)	단위량 (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

콘크리트는 단위중량 3.14의 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 배합하였으며, 배합강도는 38 MPa, 28일 목표강도를 30 MPa로 설계하였다. KS L 5108 기준에 준한 배합후 응결 시간은 3시간 25분이고, KS F 2405에 의한 실제 28일 강도는 31.8 MPa로 측정되었다. 적용된 콘크리트 배합설계는 표 1에 정리하였다. 이축 휨강도를 측정하기 위하여 지름 75 cm, 높이 12 cm인 원형 콘크리트 판 실험체를 총 32개 제작하여 28일이상 습윤양생을 실시하였다.

4.2 실험방법

실험체의 이축 휨인장강도를 정확히 측정하기 위하여 전편에서 제시된 실험방법에 준하여 그림 6과 같은 지점장치와 재하장치를 제작하였으며, UTM을 사용하여 하중을 가력하였다. 제작된 링 형태의 지점은 지점중심간 거리가 50 cm 이고, 폭이 2 cm가 되도록 하였으며, 가력장치 또한 원형 선재하가 발생하도록 지름 26 cm, 폭 2 cm의 링 형태로 제작하였다. 실험시에는 재하장치, 실험체와 지점의 중심이 일치하도록 하여 실험체에 등방의 이축 휨인장 응력이 발생하도록 고려하였다. 하중재하는 일축휨강도 측정에 관한 KS F 2408 규정을 준용하여 하중가력속도는 800 kN/min으로 고정하여 파괴시까지 하중을 선형 증가시켜 측정하였으며, 초기 휨균열 발생 시의 하중과 변위를 육안으로 관찰하여 기록하였다. 각 실험체별 변위는 시험체의 변위를 측정하기 어려운 관계로 보수적인 해석을 위하여 기존 문헌에 나타난

것을 적용하여 UTM의 가력장치 변위를 적용하였다. 또한 각 실험체의 하중-변위 관계 역시 가력장치의 변위를 사용하였다.

5. 실험결과 및 고찰

전체 실험결과는 그림 7과 표 2에 정리하였으며, 대표적인 실험체별 하중-변위 관계는 그림 7에 나타내었다. 표 2에서 빈칸은 측정시 처짐의 확인이 어려웠던 부분을 의미하는 것이다. 초기 균열하중은 최소 45 kN부터 최대 142.9 kN 까지 분포하였으며, 파괴 하중역시 최소 75 kN부터 181 kN 으로 변동폭이 크게 나타나 기존 압축강도 및 일방향 휨인장 강도 실험결과 등과는 큰 차이가 있는 것으로 확인되었다. 그림 6에서 점선은 초기 균열하중의 평균값을 실선은 최대하중의 평균값을 의미하는 것이다. 실험결과에 의한 균열하중과 최대 하중에서의 표준편차는 각각 26.30과 29.05로

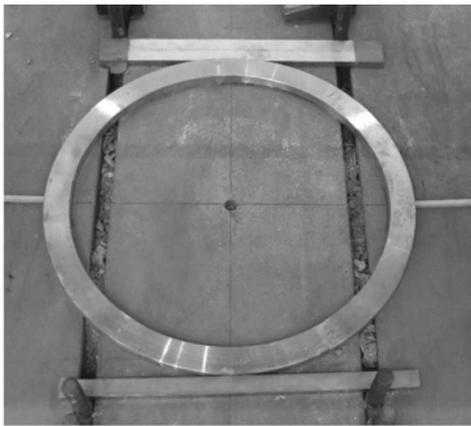


그림 6. 실험체 지점 형상 및 실험 전경

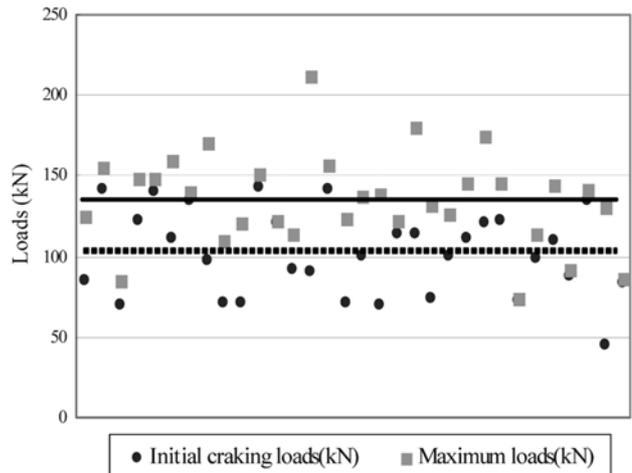


그림 7. Biaxial tensile strength distribution of specimens

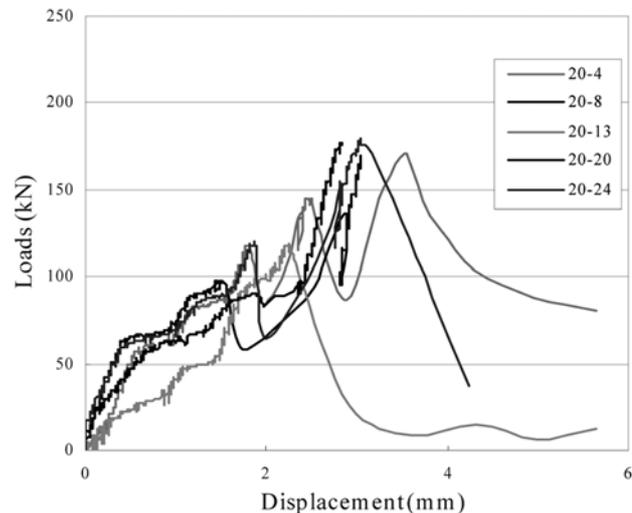


그림 8. Loads displacement relationship

표 2. 실험결과 요약

시편 번호	초기 균열각	초기균열 하중(kN)	초기균열 처짐(mm)	파괴하중(kN)	파괴처짐(mm)	파괴형상	시편 번호	초기 균열각	초기균열 하중(kN)	초기균열 처짐(mm)	파괴하중(kN)	파괴처짐(mm)	파괴형상
1		85.		125.2	10.2		17		101.	4.65	138.	6.4	
2		142.9	5.6	155.7	13.72		18		71.	4.2	139.	8.3	
3		70.0		86.	7.945		19		115.		123.	7.5	
4		122.7	4.21	149.2	8.22		20		114.	3.5	181.	6.5	
5		140.2	6.72	149.4	10.36		21		74.	7.35	132.	8.4	
6		112.3	4.97	159.7	9.62		22		101.	3.2	127.	6.4	
7		135.1	3.92	141.1	10.12		23		112.	4.5	147.	8.4	
8		98.6	4.16	171.4	5.5		24		121.	2.0	176.	3.5	
9		71.4	3.08	111.	5.11		25		123.	3.18	146.	6.9	
10		72.	10.2	121.	11.3		26		73.		75.	2.7	
11		143.	8.0	152.	11.5		27		99.0	3.9	115.0	6.3	
12		121.	3.12	123.	10.5		28		111.	3.75	144.4	5.20	
13		93.	1.82	115.	2.27		29		89.		92.	5.4	
14		91.	3.780	213.	4.23		30		135.8	3.5	142.	3.9	
15		142.	4.09	157.	6.24		31		45.	1.2	131.	3.5	
16		72.	4.2	125.	6.0		32		84.	5.4	87.		
							평균		102.53		135.94		
							표준편차		26.3		29.05		

계산되었다. 이는 ACI에서 규정하고 있는 콘크리트 압축강도의 허용표준편차 7.0MPa의 4배에 달하는 것으로서 이축 휨인장에 대한 불확실인자가 압축 또는 휨인장에 비하여 더욱 많다는 것을 의미하는 것이며, 또한 설계시 보다 보수적인 고려가 필요하다는 것을 나타내는 것이다. 각 실험체의 초기균열각은 표 2에 도시하였으며, Kupfer, Hilsdorf와 Rusch의 연구에서 밝힌 것과 같이 방향과 개수 등에 있어 다양성을 갖는 것으로 나타남으로서, 이축응력상태가 적절히 발생한 것으로 판단된다.

하중변위 관계와 육안으로 관찰된 균열 발생 시의 하중을 비교할 때 균열하중은 하중-변위관계에서 기울기가 처음 급격히 변화하는 점이며 평균적으로 65 kN 정도인 것으로 판단된다. 이후 대부분의 실험체가 일정정도 하중 증가없이 변위가 증가하다가 다시 하중이 증가하는 형태를 갖는 것으로 나타났다. 이는 초기 균열 발생 후 재하하중이 균열이 발생되지 않은 부분으로 재분배되면서 하중이 증가하는 과정이다. 이 하중 증가는 새로운 균열이 발생할 때마다 급격히 감소되고 다시 증가하는 과정을 2-3번 반복하였다. 최대 하중 이후 취성적인 최종 파괴에 이르는 것으로 관찰되었다.

식 (3)에 의한 초기 균열발생시의 평균 이축 휨인장응력은 2.34 MPa로 산정되었다. 반면 콘크리트 일축 압축강도를 이

용한 ACI318-05의 일축 휨인장강도는 3.5 MPa, 그리고 Ahmad와 Shah (1985)의 회귀분석 결과에 의한 일축 휨인장강도와 활렬 인장강도는 각각 4.4 MPa와 2.04 MPa로 계산된다. 이는 이방향 휨인장 균열강도의 경우, ACI318-05의 일축 휨인장 강도보다는 작고 회귀분석의 활렬 인장강도보다는 큰 것을 의미한다. 일반적으로 휨인장 강도가 사용성능 평가를 위하여 사용된다는 점을 고려할 때 초기 이축 휨인장 강도가 보수적으로 적용되고 있는 ACI 기준의 일방향 휨인장강도의 67% 정도로 계산됨으로서 기존의 설계 가정들이 실제 거동과는 큰 차이를 가질 수 있음을 보여준다. 또한 이 결과는 Kupfer, Hilsdorf와 Rusch(1965)의 일축인장과 이축인장의 강도를 거의 유사하다는 결과와도 배치되는 것으로 보다 많은 실험과 연구가 필수적인 것으로 판단된다.

6. 적용가능 분야

본 시험법은 이방향 인장응력에 노출되어 있는 모든 구조체에 직접적으로 적용이 가능하며 현 시점에서, 1. 이방향 슬래브, 2. 포장 구조체, 3. 건조수축 균열, 4. 온도균열, 5. 보강용 FRP 슈트의 양방향 인장거동 등에 직접 적용이 가

능할 것으로 예상된다. 특별히 Batdorf와 Crose (1974)의 손상이론에 의하면 양방향 재하조건에 의해 손상이 훨씬 빠르게 증가하므로 손상이 점진적으로 누적되는 양방향 피로문제에서는 일방향 거동으로 예측된 피로수명과는 상이할 것으로 판단된다.

7. 결 론

1. 순수 등방성 휨인장 강도를 단 한 개의 가력기를 이용해서 측정할 수 있는 새로운 시험법을 개발하였다. 본 시험법은 기존 일축 휨 인장시험법을 삼차원으로 일반화한 시험법이다.
2. 본 연구에서 제안한 시험법의 효과적인 사용을 위해 작용하중과 응력과의 상관관계를 원형 탄성판이론을 이용해서 유도하였다. 이 이론에 따르면 지지판과 재하판의 크기 간의 상관관계는 선형이 아니며 비선형 관계를 갖는다. 시험체의 지지점 이후의 여유길이의 작용은 추후 연구에서 고려되어야 할 것으로 판단된다.
3. 기존의 연구결과를 고찰한 결과, 동일한 이축인장을 받는 콘크리트의 균열은 방향성을 예측할 수 없는 것으로 나타났다. 본 연구의 실험 결과에서도 이와 같은 경향을 나타내었다.
4. 제안된 이축 휨인장 실험방법을 적용하여 무근 콘크리트 판의 휨강도를 실험적으로 평가하였으며, 그 결과 일축 휨인장 또는 할렬인장강도에 대하여 기존의 설계기준들에서 허용하고 있는 것보다 상대적으로 큰 분산성을 갖는 것으로 나타났다.
5. 인장강도의 경우, 콘크리트의 강도뿐만 아니라, 골재의 종류 및 실험체의 크기에 의해서도 많은 영향을 받기 때문에 보다 정확한 일축휨인장응력과 이축휨인장응력의 상관관계를 규명하기 위해서는 보다 많은 실험적, 이론적 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D (05건

설핵심 D11 and 05첨단융합 B01) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2003) 콘크리트구조설계기준. 한국콘크리트학회.
 기술표준원(1964) KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법.
 기술표준원(2000) KS F 2408 콘크리트 휨강도 시험방법.
 기술표준원(2002) KS L 5108 비이커 침에 의한 수경성 시멘트의 응결 시간 시험 방법.
 안주옥, 서영갑(2004). 최신 철근 콘크리트 공학. 사이텍 미디어.
 ACI Committee 318 (2005) Building code requirements for reinforced concrete and commentary (ACI 318-2005/ACI 318R-05), American Concrete Institute, Detroit; 2005.
 Ahmad, S.H. and Shah, S.P. (1985) Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete. *PCI Journal*, Vol. 30, No. 6, pp. 92-119.
 Batdorf, S.B. and Crose, J.G. (1974) A statistical theory for the fracture of brittle structures subjected to nonuniform polyaxial stresses, *Journal of Applied Mechanics ASME*, Vol. 41, No. 2, pp. 459-464.
 Bazant, Z.P. (1984) Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 110, pp. 518-535.
 Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., and Rusch, H. (1969) Behaviour of concrete under bi-axial stresses, *ACI Vol. J66*, No. 8, pp. 656-666.
 Muzyka, N.R. (2002) Equipment for testing sheet structural materials under biaxial loading. Part 2. Testing by biaxial loading in the plane of the sheet. *Strength of Materials*, Vol. 34, No. 2, pp. 206-212.
 Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S. (1989). *Theory of Plates and Shells*, Engineering Mechanics Series, McGraw-Hill, Tokyo.
 Zi, G. and Bazant, Z.P. (2003) Eigenvalue method for computing size effect of cohesive cracks with residual stress, with application to kink-bands in composites. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 41, No. 13-14, pp. 1519-1534.

(접수일: 2007.3.26/심사일: 2007.6.18/심사완료일: 2007.7.18)