

# 이축 하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 응답 및 파괴

## Stress-Strain Response and Fracture of a Plain Concrete in Biaxial Loading

이 상 근\*      송 영 철\*\*      권 용 길\*\*\*      한 상 훈\*\*\*\*  
Lee, Sang-Kuen    Song, Young-Chul    Kwon, Yong-Gil    Han, Sang-Hoon

### ABSTRACT

In this paper the biaxial failure criteria and stress-strain response for plain concrete are studied under uniaxial and biaxial stress (compression-compression, compression-tension, and tension-tension combined stress). The concrete specimens of a square plate type are used for uniaxial and biaxial loading. The experimental data indicate that the strength of concrete under biaxial compression,  $f_2/f_1 = -1/-1$ , is 17 percent larger than under uniaxial compression and the poisson's ratio of concrete is 0.1745. On the base of the results, a biaxial failure envelope for plain concrete that the uniaxial strength is  $398 \text{ kgf/cm}^2$  are developed. The biaxial failure behaviors for three biaxial loading areas are also plotted respectively. In addition, the characteristics of stress-strain response under biaxial compression are compared and verified with the experimental and analytical results.

### 1. 서 론

공학 구조물의 비선형 유한요소해석을 위해서는 기본적으로 구조물을 구성하고 있는 재료의 비선형 유한요소모델이 필요하다. 비선형 재료모델은 재료가 일축(uniaxial), 이축(biaxial) 그리고 삼축(triaxial) 상에서 형성되는 응력장에서 임의 조합하중에 의해 발생하는 파괴거동 즉, 탄성구간은 물론 탄성한도에 서 파괴점까지의 비선형 거동 구간에 대한 모든 거동 정보를 필요로 한다. 그러나, 재료에 대한 다축(multiaxial) 응력하에서의 파괴실험을 수행하기가 매우 어렵고, 하나의 재료에 대해 파괴거동 및 기준을 제시하기 위해서 만도 상당한 소요기간을 필요로 하기 때문에 일반적으로 과거의 실험적 경험데이터<sup>1-6)</sup>에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구는 건설분야의 주재료인 콘크리트를 대상으로 쉘구조물과 같이 이축 거동을 하는 콘크리트 구조물의 비선형 해석에 사용할 수 있는 이축 파괴포락선을 개발하기 위해 국내 처음으로 콘크리트 이축 응력실험을 수행하였다.

\* 정희원, 한전전력연구원 원자력연구실 선임연구원  
\*\* 정희원, 한전전력연구원 원자력연구실 책임연구원  
\*\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수

## 2. 시편제작

### 2.1 배합설계

실험에 사용한 콘크리트의 배합설계는 표 1과 같고, 사용된 골재는 굵은골재 최대치수 19mm인 쇄석과 강모래 그리고 1종 시멘트를 사용하였다.

표 1 콘크리트 배합설계

W/C (%)	S/A (%)	Air (%)	단위량(kgf/m <sup>3</sup> )				고유동화제		AE제	
			W	C	G	S	%(×C)	kgf/m <sup>3</sup>	%(×C)	kgf/m <sup>3</sup>
51.0	43.3	2.0	175	349	1004	768	0.8	2.792	0.01	0.005

### 2.2 시편제작 및 공칭강도

본 연구는 콘크리트에 대한 이축 재하가 가능하도록 시편 형상을 정사각 판형으로 제작하였다. 시편의 크기는 사용골재의 최대치수가 19mm인 점을 고려하여 두께가 골재 최대치수의 3배 이상이 되는 200(H)×200(W)×60(T)mm로 하였다. 판형시편은 이축 응력 실험시 하중을 받는 면에 추가적인 처리가 필요 없도록 정밀기계로 제작된 강재 몰드를 사용하여 제작하였다. 강재 몰드의 높이는 시편 두께보다 1mm 크게 제작하여 콘크리트 타설 후 침하로 인한 두께변화를 감안하였고 시편의 상면은 다이아몬드 연마기를 이용하여 0.1mm이하의 편평도를 유지토록 하였다. 원주형시편을 포함한 모든 판형시편에 대해 28일간 수중양생을 실시하였다. 판형시편의 일축 강도와 함께 콘크리트 원주형시편의 일축 강도를 측정하기 위해 판형시편과 별도로 원주형 시편을 제작하였으며 원주형 시편에 대한 7일과 28일일축압축강도와 쪼갬인장강도의 실험 결과는 표 2와 같다. 실험결과 콘크리트의 28일 강도는 배합설계시 목표강도로 설정했던 386 kgf/cm<sup>2</sup>를 약간 초과하는 405 kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 발현했다.

표 2 원주형 시편 강도실험 결과

시편치수 (mm)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		쪼갬인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )
	7일	28일	7일	28일	
∅100*200	289	405	33	49	3.09E+05

## 3. 이축 재하시스템

실험에 사용된 가력시스템은 압축-압축, 인장-압축, 그리고 인장-인장 응력 영역에서 응력비 조절이 가능하고 정해진 응력비가 일정하게 유지될 수 있도록 설계하였다. 강재 프레임을 비롯하여 200 tonf 용량의 유압실린더 1기와 100 tonf 유압실린더 4기 그리고 100 tonf 로드셀을 조합하여 그림 1과 같이 구성하였다. 여기서, 강재 프레임의 경우 예상 최대하중 재하시 최대 휨변형이 1.0×10<sup>-5</sup>mm이하가 되도록 설계하였으며, 이축 실험시 응력비( $f_2/f_1$ ) 제어가 가능함과 동시에 가력후 파괴시까지 일정한 응력비를 유지토록 하기 위하여 그림 1과 같은 단순보의 원리를 채택하였다. 그림 1의 단순보에서 위에

놓여 있는 유압실린더 Jack 1을 보를 따라 적절히 이동시킴으로서 다음 식에 의해 응력비를 제어하였다.

$$\frac{a}{b} = \frac{p_b}{p_a} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

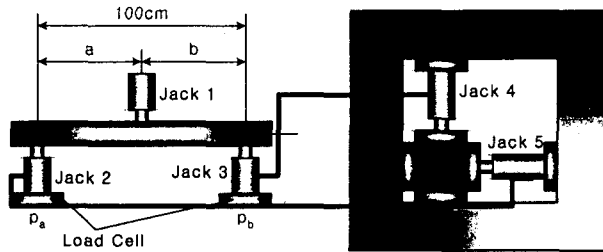


그림 1 이축 가력 유압시스템 구성도

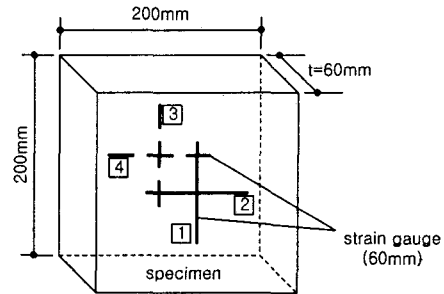


그림 2 strain gauge 위치

#### 4. 실험방법

판형시편을 이용한 일축 및 이축응력 실험은 압축-압축, 압축-인장, 그리고 인장-인장 재하 영역으로 구분하여 각 영역별로 4수준의 응력비  $\alpha (= f_2/f_1)$ 를 고려하여 실시하였다. 이 중 압축-압축 재하의 경우는 시편과 가압판 사이의 마찰로 인해 시편에 구속력이 발생하게 되어 강도가 과대 평가 되는 문제점이 등장하고, 압축-인장 재하의 경우는 시편이 압축에 의해 구속되기 때문에 직교 방향 인장력에 의한 시편의 인장변형이 제약받는 현상이 나타나게 된다. 따라서 본 연구는 이를 극복하기 위해 시편과 가압판 사이에 0.1mm두께의 폴리에틸렌(polyethylene) 계열 Teflon을 사용하였으며, 압축-인장 재하실험에 있어서는 Teflon을 두장씩 겹쳐 사용함으로써 마찰효과를 최소화하였다. 일축 및 이축 인장 실험은 시편에 일정한 분포하중으로 직접적인 재하가 가능할 수 있도록 에폭시(epoxy) 접착에 의해 부착력을 이용한 인장 재하방법을 적용하였다. 시편의 접착면에 약한 층을 이루고 있는 모르타 성분은 연마하여 제거한 후 에폭시를 접착하고 48시간 이상 경과된 후 실험을 실시하였다. 일축 및 이축 응력 실험에서 하중 재하속도는 평균  $20\text{kgf/cm}^2$ 를 일정하게 유지시켰으며 시편의 두 주축방향에 대한 변형률 측정을 위해 그림 2 와 같이 전면과 후면에 4개의 변형률 게이지를 운용하여 응력에 따른 시편의 주변형률 값을 동적 데이터 획득장비 TDS602를 이용하여 측정하였다.

#### 5. 실험결과 및 분석

사각 판형시편을 대상으로 기준강도  $f_c$  와 탄성계수  $E$  그리고 푸아송 비  $\nu$  등의 기본 물성값을 결정하기 위해 먼저 일축 압축강도 실험을 실시하였다. 판형시편의 일축 압축강도(기준강도,  $f_c$ )는 원주형 시편의 일축 압축강도(공칭강도,  $f_{ck}$ )  $405\text{ kgf/cm}^2$ 의 약 98%에 해당하는  $398\text{ kgf/cm}^2$ 이 얻어졌으며 이는 시편형상이 달라서 나타나는 강도차이에 기인한다. 일축 압축하의 응력-변형률 관계로부터 도출한 콘크리트의 탄성계수는  $3.01 \times 10^5\text{ kgf/cm}^2$  이었으며, 그림 3의 응력에 따른 푸아송 비의 관계로부터 푸아송 비 0.1745를 도출하였다. 그림 3의 경우 일반적으로 예상할 수 있는 일정구간의 뚜렷한 수직구

간이 나타나지 않아 명확하게 푸아송 비를 알 수 없기 때문에 비례 직선구간의 평균값을 계산하여 정하였다.

### 5.1 이축 파괴포락선

이축 재하실험을 통한 콘크리트의 이축 파괴포락선을 그리기 위해 하나의 이축 조합응력 영역에 대해 4수준의 응력비를 고려하였고, 하나의 응력비 당 4개의 시편을 운용하였다. 응력비( $\alpha$ )의 경우 이축 압축영역과 이축 인장영역은 0, 0.2, 0.5, 1을, 이축 압축-인장영역은 0.05, 0.1, 0.2, 0.3을 고려하였다. 이축 재하실험 결과 얻어진 주축방향 극한강도 값을 기준강도( $f_c$ )에 대한 상대강도 비로 환산하여 그림 4에 실선으로 도시한 이축 파괴포락선을 얻었다.

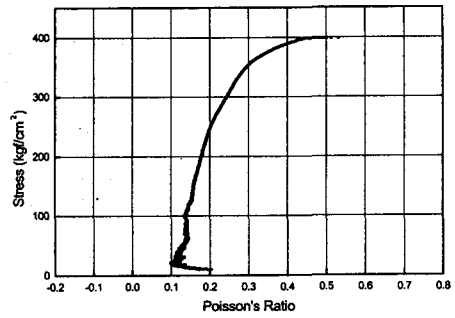


그림 3 이축 압축하의 응력-푸아송비 관계

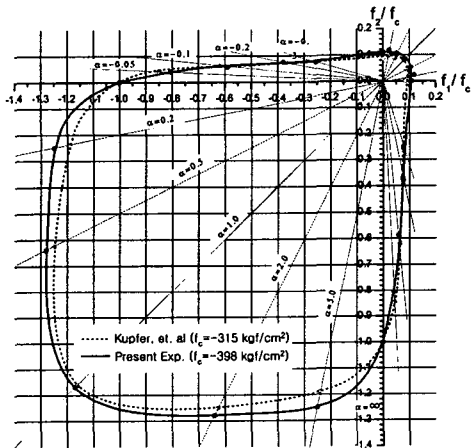


그림 4 본 실험 및 Kupfer<sup>1)</sup>에 의한 이축 파괴포락선 비교

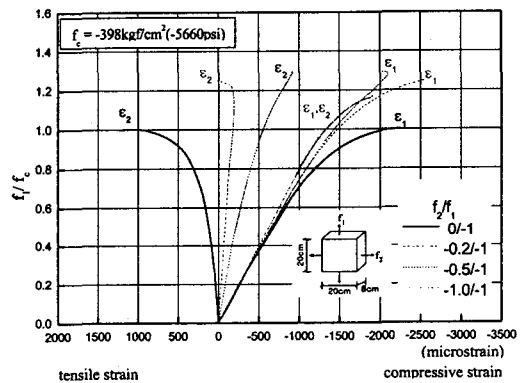


그림 5 이축 압축하의 응력변형률 관계

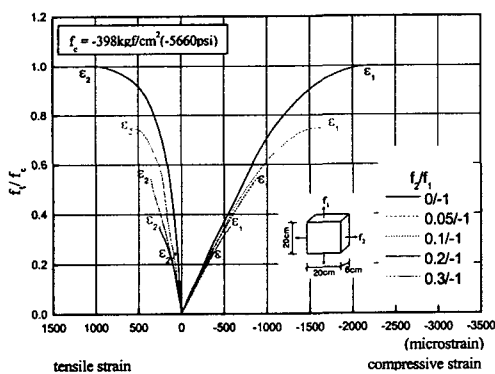


그림 6 이축 압축-인장하의 응력-변형률 관계

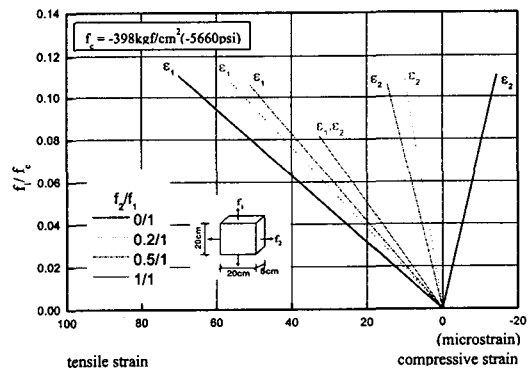


그림 7 이축 압축-인장하의 응력-변형률 관계

그림 4에서 알 수 있듯이 본 실험의 결과와 Kupfer<sup>1)</sup>의 파괴포락선이 유사한 형태를 보이고 있다. Kupfer<sup>1)</sup>의 경우 일축 압축강도( $\alpha=0$ )에 대한 이축 압축강도( $\alpha=1$ )의 비를 1.16으로 제시하여 이축 압축강도가 일축 압축강도보다 약 16%가 크다는 것을 피력하였는데 본 연구의 실험결과 역시 이와 거의 동일한 1.17의 값을 얻었다. 그림 5~7은 재하영역별 응력-변형률 거동을 응력비에 따라 도시하였다.

## 5.2 이축 압축하의 응력-변형률 응답 특성

본 실험에서 얻은 이축 압축하의 콘크리트 응력-변형률 관계를 다음과 같이 Liu<sup>7)</sup>가 제시한 이축 압축하의 콘크리트에 대한 해석적 응력-변형률 관계식에 적용함으로써 실험의 신뢰성을 검증하고 실험에 사용된 콘크리트의 강도를 기준으로 Liu의 해석식을 이용할 수 있는 방안을 제시하였다.

$$f = \frac{\epsilon E}{(1-\nu\alpha)\left[1 + \left(\frac{1}{1-\nu\alpha} \frac{E}{E_s} - 2\right)\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right) + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^2\right]} \quad (2)$$

여기서,

$f, \epsilon$  = 이축 재하에서의 응력과 변형률,

$E$  = 일축 재하에서의 콘크리트의 탄성계수,

$\nu$  = 일축 재하에서의 푸아송비,

$\epsilon_p$  = 이축 압축에 대해 주(major) 주축방향으로의 콘크리트 최대응력에서의 변형률,

$\alpha$  = 고려된 방향의 주응력(principal stress)에 대한 직교방향의 주응력 비,

$E_s = f_p/\epsilon_p$ ,

$f_p$  = 이축 압축에 대한 콘크리트의 극한강도이다.

위의  $\epsilon_p$ 의 경우, 본 연구의 이축 압축실험에서 얻어진 데이터들을 이용하여 도시한 그림 8로부터 얻을 수 있는 제안식 식(3)과 (4)를 이용하여 그 값을 도출 할 수 있다.

$$\alpha \leq 1, \quad \epsilon_p = 2500 \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\alpha > 1, \quad \epsilon_p = (800 + 9.0f_p) \times 10^{-6} \quad (4)$$

그림 9는 본 연구의 이축 압축실험에서 얻어진 실험적 응력-변형률 관계와 Liu<sup>10)</sup>가 제안한 식(2)에 의한 응력-변형률 관계를 비교한 것으로 실험 결과와 해석적 결과가 대체로 잘 일치됨을 볼 수 있다. 따라서, Liu<sup>10)</sup>의 제안식이 본 연구의 실험 데이터 및 앞에서 제안된 실험식들과 잘 접목될 수 있고 이를 토대로 본 연구의 결과가 충분히 신뢰성 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 무근 콘크리트(판형시편 일축 압축강도  $f_c = 398 \text{ kgf/cm}^2$ )를 대상으로 일축 및 이축 응력

실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 판형시편을 이용한 이축 압축-압축, 압축-인장, 그리고 인장-인장 재하실험을 통하여 실험적 이축 파괴포락선을 제시하였고, Kupfer가 제시한 파괴포락선과 비교함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였다.
- 2) 판형시편의 일축 압축강도에 대한 이축 압축강도의 비는 1.745로 나타났고, 일축 압축실험으로부터 콘크리트의 탄성계수는  $3.01 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  이었으며, 푸아송 비는 0.1745이었다.
- 3) 일축 인장강도는 일축 압축강도의 약11%로 나타났다.
- 4) 이축 압축하의 콘크리트에 대한 극한변형률과 극한응력과의 관계식이 제안되었으며, 실험적 응력-변형률 응답이 Liu<sup>7)</sup>가 제안한 해석식에 의한 응력-변형률 관계와 비교적 잘 일치함을 보였다.

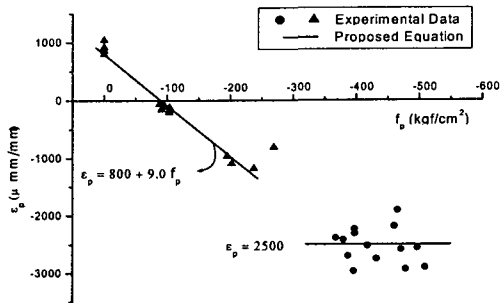


그림 8 이축 압축하의 콘크리트에 대한 극한변형률과 극한응력과의 관계

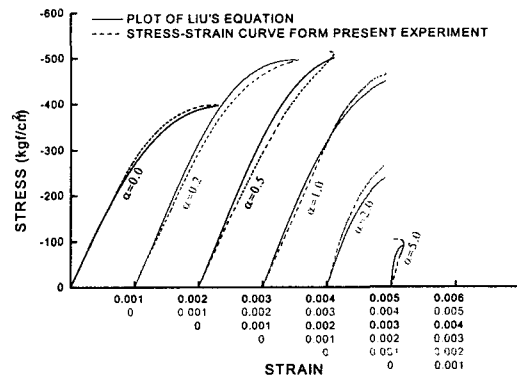


그림 9 이축 압축하의 실험적 응력-변형률 관계와 식(2)에 의한 해석적 응력-변형률 관계의 비교

#### 참고문헌

- 1) Kupfer H. and Hilsdorf, H. K., Behavior of Concrete Under Biaxial Stress, ACI Journal, Proceedings, 66(8), pp. 656-666, 1969.
- 2) Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., A Study of the Failure Mechanism of Concrete under Combined Stresses, Bulletin No. 185, Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1928.
- 3) Bellamy, C. J., Strength of Concrete under Combined Stress, "ACI Journal, Proceedings V. 58, No. 4, pp. 367-381, Oct. 1961.
- 4) Traina, L. A. and Mansour, S. A., Biaxial Strength and Deformational Behavior of Plain and Steel Fiber Concrete, ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, pp. 354-362, Aug. 1991.
- 5) Hussein, A. and Marzouk, H., Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses, ACI Materials Journal, Technical Paper, Vol. 97, No. 1, pp. 27-36, Feb. 2000.
- 6) Hussein, A. and Marzouk, H., Finite Element Evaluation of the Boundary Conditions for Biaxial Testing of High Strength Concrete, Materials and Structures, Vol. 33, pp299-308, June 2000.
- 7) Liu, T. C. Y., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Biaxial Stress-Strain Relations for Concrete", Journal of the Structural Div., Proceedings of the ASCE, pp. 1025~1034, 1972.