

# 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 2계 거동에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Second Order Behavior of Reinforced Concrete Columns under Biaxial Loading

이 수 곤<sup>\*</sup>      김 진 근<sup>\*\*</sup>      이 상 순<sup>\*\*\*</sup>      김 선 영<sup>\*\*\*\*</sup>      소 윤 호<sup>\*\*\*\*</sup>  
Lee, Soo-Gon      Kim, Jin-Keun      Lee, Sang-Soon      Kim, Sun-Young      So, Youn-Ho

### ABSTRACT

Studies on the second-order analysis of reinforced concrete columns have been chiefly dealt with symmetric sections under uniaxial loading. In practical situations, however, columns are subjected to biaxial loadings. Therefore, for more accurate prediction of the behavior of concrete columns under biaxial loading, the interaction between bending moments of major and minor axes should be considered. Recently Kim & Lee proposed a numerical method of predicting the behavior of concrete columns under biaxial loading.

In this paper, to investigate the behavior of concrete columns under biaxial loading and verify the validity of proposed method, a series of tests were carried out for sixteen tied reinforced columns with 100×100mm square and 200×100mm rectangular sections under various loading conditions. The length of columns was 1,300mm and the concrete strength was 28MPa. The boundary conditions at the both ends were hinged and end eccentricities were equal(40mm).

Proposed numerical analyses applied to the test piece were performed to predict behavior of concrete columns with square and rectangular sections under various loading conditions. Test results were also compared with those using the moment magnifier method in ACI code. The test results showed that the moment magnifier method is conservative.

### 1. 서론

철근콘크리트 기둥의 세장효과를 고려한 해석에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으나, 대부분의 기존 연구는 기둥부재의 변형된 형태를 가정하여 선형미분방정식의 해를 구하는 근사적인 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 실제 철근콘크리트 기둥은 길이방향으로 부재의 강성이 변하며, 특히 탄성한계를 넘어서면 처음에 가정한 변형형태와 상이하게 된다. 바꾸어 말하면 기존의 방법은 균열로 인한 부재의

- 1) \*정회원, 전남대학교 건축공학과 교수
- 2) \*\*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
- 3) \*\*\*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
- 4) \*\*\*\*정회원, 전남대학교 대학원 석사과정

강성이 변하는 점을 고려하지 못하였다. 이러한 문제점은 구조물의 수치해석에서 흔히 택하고 있는 유한요소법을 적용하면 해결될 수 있다. 몇몇 연구자들에 의해 기하학적 비선형 및 재료의 비선형을 고려한 해석기법이 제안되었다.<sup>1)</sup> 그러나 실제 대부분의 기둥이 2축 휨과 축력을 동시에 받고 있으므로 제안된 이들 해석기법은 이 경우에 적용할 수 없다. 최근에 2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 2계거동을 해석할 수 있는 기법이 제안되었으며,<sup>6)</sup> 본 연구에서는 제안된 해석기법의 타당성을 검토하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다.

지금까지 철근콘크리트 기둥에 대한 실험적 연구는 상당히 많이 수행되었으나, 대부분 1축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에 한정되었다. 따라서 본 연구에서는 2축 휨과 축력이 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 극한강도와 거동을 파악하고, 실험결과와 제안된 해석방법 및 ACI의 모멘트 확대계수법(moment magnifier method)의 결과와 비교·검토하였다.

## 2. 해석방법

압축 및 인장에 대한 거동이 동일하고 균질한 재료로 만들어진 기둥부재에, 단면의 도심에 축력이 작용하는 경우에는 곡률이 발생되지 않으며, 순수 휨이 작용하는 경우에는 단면의 도심에서 변형도가 발생되지 않는다. 그러나 철근콘크리트 부재의 경우에는 콘크리트의 압축과 인장거동이 동일하지 않으며, 철근과 콘크리트의 합성작용으로 외력에 저항하므로 강재와 같이 압축거동과 인장거동이 동일한 등방성 재료와는 달리 단면의 도심에 축력만 작용하는 경우에도 곡률이 발생할 수 있으며, 순수 휨이 작용하는 경우에도 도심에서 변형도가 유발될 수 있다. 따라서 재료의 압축거동과 인장거동이 동일하다는 가정하에서 유도된 대부분의 강성행렬은 철근콘크리트 구조물의 해석에는 적합하지 않다. Bazant 등<sup>2)</sup>은 이러한 축력과 휨모멘트의 상호 연관성을 고려한 강성행렬을 유도하였다. 그러나 이 방법은 단면이 대칭이 아닌 경우와 2축 휨과 축력이 동시에 작용하는 경우에는 적용할 수 없다. 왜냐하면 단면이 대칭이 아닌 경우에는 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여야 하는데 Bazant 등은 이를 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 2축 휨과 축력을 동시에 받는 대칭단면의 경우에도 일정 크기 이상의 하중이 부재에 작용하면 균열이 발생되고, 이로 인하여 단면이 비대칭이 되므로 이 경우에도 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하여야 한다. 최근에 이를 고려한 강성행렬과 해석방법이 제안되었으며,<sup>6)</sup> 본 연구에서는 이 방법으로 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

## 3. 실험

### 3.1 실험변수 및 실험상수

본 연구에서는 단면형상과 편심각을 실험변수로 하였다. 100×100mm의 정사각형 단면의 경우에는 편심각을 0, 30, 45° 로, 200×100mm의 직사각형 단면의 경우에는 0, 30, 45, 60, 90° 로 변화시켰다. 단면의 형상과 철근의 배근상태는 그림1과 같으며 철근비는 정사각형 단면의 경우에 2.85%(4-HD10)이고, 직사각형 단면의 경우에는 2.14%(6-HD10)이다. 콘크리트의 압축강도는 28MPa이고, 피복두께는 콘크리트의 표면으로부터 철근의 중심까지 23mm로 고정하였다. 편심은 변형된 모양이 단곡률이 되도록 그림과 같이 양단에서 동일하게 40mm로 하였다.

### 3.2 실험재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 조립율이 2.38이고 비중 2.56인 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 조립율이 6.23이고 비중이 2.58인 최대크기 13mm의 쇄석을 사용하였다. 사용된 콘크리트의 배합은 표1과 같다.

표1 배합설계

물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위 사용량 (kg/m <sup>3</sup> )			
		물	시멘트	잔골재	굵은 골재
60	40	180	450	652	1,009
					공기량 4%

주철근으로는 항복강도가 436MPa인 HD10을 사용하였으며, 띠철근으로는 항복강도가 165MPa인  $\phi$  5mm 철선을 사용하였다.

### 3.3 시험체 제작

시험체는 편심하중 재하를 용이하게 하고, 단부파괴를 방지하기 위하여 그림1과 같이 단부의 단면을 300×150mm로 확대하였다. 그리고 철근의 좌굴을 방지하고 단부를 보강하기 위하여 띠철근을 중앙부에는 100mm간격으로 단부에는 40mm간격으로 배근하였다. 불리딩으로 인한 강도저하를 방지하기 위하여 마감은 콘크리트 타설 1시간후에 실시하였으며, 24시간이 지난후에 탈형하여 양생실(온도 23±1℃)에서 수중양생을 실시하였다.

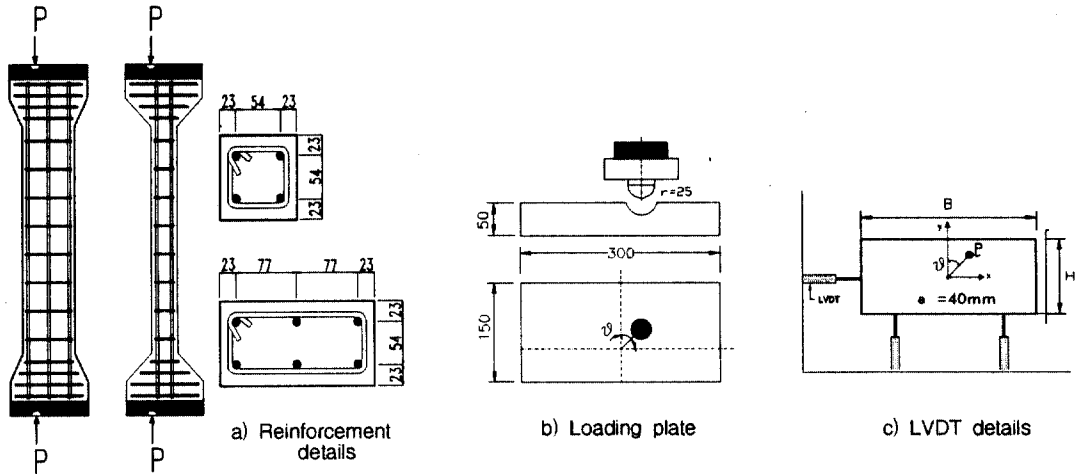


그림1 시험체 치수 및 단면형상

### 3.4 가력장치 및 재하방법

편심하중을 가하기 위하여 편심거리가 40mm이고, 편심각이 0, 30, 45, 60, 90° 인 위치에 그림1에서 보는 바와 같이 홈이 파여 있는 철판을 제작한 후, 이 철판을 시험체 단부에 볼트로 그림1과 같이 고정하고 가압장치를 사용하여 편심하중을 가하였다.

하중가력은 250ton용량의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Material Testing System (INSTRON 8506)을 사용하였다. 변위제어법에 의해 재하하였으며, 최대하중에 이르는 시간은 약 20분이 되도록 하였다.

기둥 중앙부의 횡변위를 측정하기 위하여 그림1에서 보는바와 같이 3개의 LVDT를 설치하였으며, 부재 중앙부의 변형도를 측정하기 위하여 철근에 strain gauge를 부착하였다.

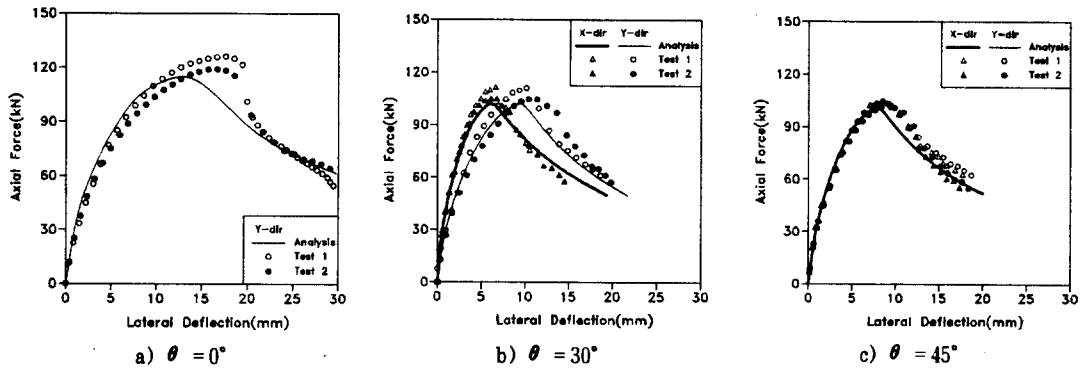


그림2 축력-횡변위 관계 (정사각형 단면)

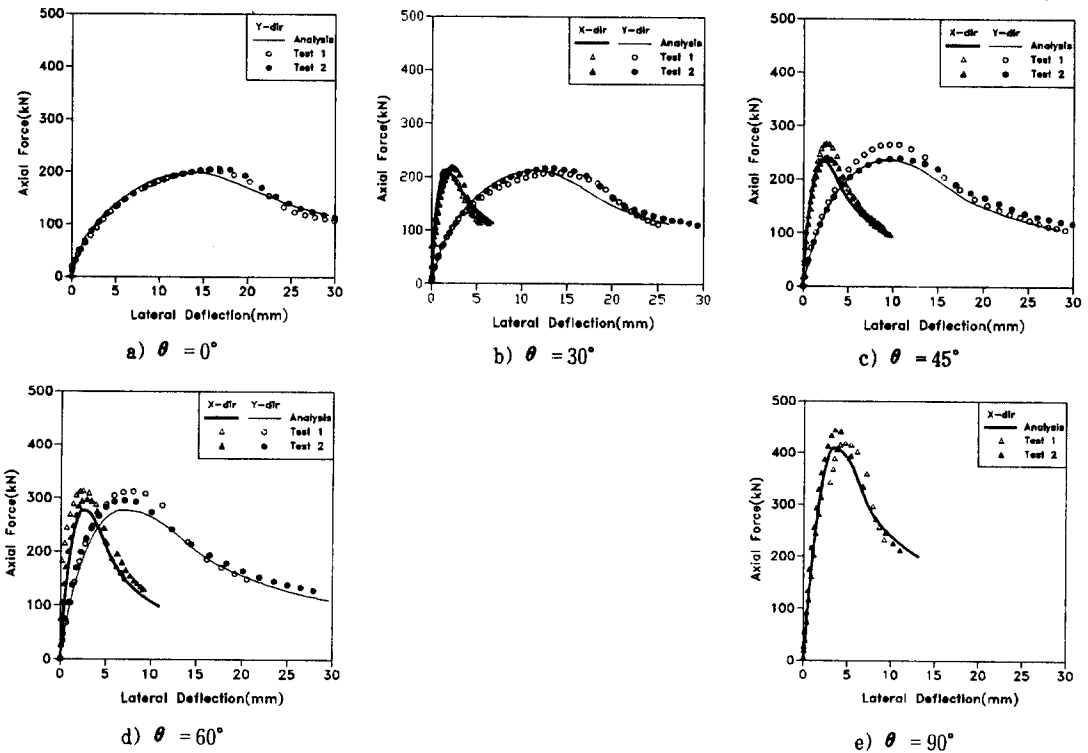


그림3 축력-횡변위 관계 (직사각형 단면)

#### 4. 결과 및 분석

ACI(318-95)에서는 세장비를 고려하기 위하여 모멘트 확대계수법을 제안하고 있다.<sup>3)</sup> 2축 휨과 축력을 동시에 받는 경우에는 각각의 주축에 대하여 모멘트 확대계수법을 적용하도록 제안하고 있다. 즉 각각의 주축방향의 좌굴하중으로부터 모멘트 확대계수를 계산하고 이를 1계탄성 해석을 통하여 계산한 모멘트에 곱하여 단면설계에 사용되는 확대 휨모멘트를 계산한다. 이때 모멘트 확대계수  $\delta$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - P_u/0.75P_{cr}} \geq 1 \quad (1)$$

여기서  $C_m$ 은 부재의 변형형상을 고려한 계수(단곡률, 복곡률 등),  $P_{cr}(\pi^2 EI/(kl_u)^2)$ 는 Euler의 좌굴하중,  $k$ 는 유효길이계수,  $l_u$ 는 기둥의 비지지장, 그리고  $EI$ 는 단면의 휨강성이다. 또한 ACI에서는 단면의 휨강성을 정확하게 모르는 경우에는 다음 식들 중에서 하나를 선택하여 사용하도록 권장하고 있다.

$$EI = \frac{0.4E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad (2)$$

$$EI = \frac{0.2E_c I_g + E_s I_{se}}{1 + \beta_d} \quad (3)$$

여기서  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수,  $I_g$ 는 철근을 무시한 콘크리트의 단면2차모멘트,  $E_s$ 는 철근의 탄성계수,  $I_{se}$ 는 기둥의 도심축에 대한 철근의 단면2차모멘트,  $\beta_d$ 는 콘크리트의 크리이프를 고려하기 위한 계수이다.

표2 해석 및 실험에 의한 최대하중 비교

specimen No.	b×h(cm)	$\theta$	$f'_c$ (MPa)	$P_{u,t}$ (kN)	$P_{u,t}/P_{u,a}^1$	$P_{u,t}/P_{u,a}^2$	$P_{u,t}/P_{u,a}^3$
AL0-1	10×10	0°	27.8	126	1.26	1.25	1.09
AL0-2			28.0	119	1.19	1.19	1.03
AL30-1		30°	26.7	112	1.27	1.27	1.09
AL30-2			27.5	104	1.18	1.18	1.01
AL45-1		45°	28.0	106	1.24	1.23	1.04
AL45-2			27.8	103	1.20	1.20	1.02
BL0-1	20×10	0°	26.1	204	1.11	1.14	1.02
BL0-2			28.6	206	1.12	1.16	1.03
BL30-1		30°	25.5	208	1.04	1.08	0.98
BL30-2			25.9	217	1.09	1.13	1.02
BL45-1		45°	27.9	266	1.10	1.15	1.13
BL45-2			25.9	239	0.99	1.04	1.01
BL60-1		60°	26.6	313	1.07	1.12	1.13
BL60-2			26.7	295	1.01	1.05	1.06
BL90-1		90°	27.1	418	1.10	1.10	1.02
BL90-2			28.3	443	1.16	1.16	1.08

$f'_c$ 는 콘크리트의 압축강도(MPa),  $\theta$ 는 편심각,  $P_{u,t}$ 는 실험에 의한 기둥의 극한 강도(kN),  $P_{u,a}^3$ 는 제안된 해석법에 의해 계산된 값(kN),  $P_{u,a}^1$ 과  $P_{u,a}^2$ 는 모멘트 확대계수법과 축력-휨모멘트도로부터 계산된 값(kN)

표2는 해석 및 실험에 의한 최대하중을 비교한 것이다. 표에서  $P_{u,t}$ 는 실험에 의한 기둥의 극한강도이고  $P_{u,a}^3$ 는 제안된 해석방법에 의해 계산된 값이다. 그리고  $P_{u,a}^1$ 과  $P_{u,a}^2$ 는 모멘트 확대계수법과 축력-휨모멘트도로부터 계산된 값이다. 축력-휨모멘트도는 Whitney의 유효직사각형 응력블록을 사용하여 계산하였다.  $P_{u,a}^1$ 과  $P_{u,a}^2$ 는 각각 단면의 휨강성을 식(2)와 식(3)에 의해 계산한 것이다. 그리고 본 연구에서는 하중지속시간이 짧으므로 크리이프의 영향을 고려하지 않았다. ( $\beta_d=0$ )

정사각형 단면의 경우 편심각에 관계없이  $P_{u,t}$ 가  $P_{u,a}^1$ 과  $P_{u,a}^2$ 보다 약 20%정도 큰 값을 보였다.

반면에 직사각형 단면의 경우에는 편심각이 0, 90° 인 경우에는 차이가 많이 나지만 45, 60° 인 경우에는 거의 차이가 나지 않았다. 그리고 제안된 해석방법은 2축 힘을 받는 철근콘크리트의 극한강도를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 그림5는 각각의 방법에 의해 계산된 값과 실험결과를 편심각도에 따라 나타낸 것이다.

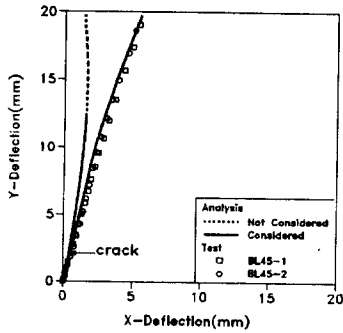
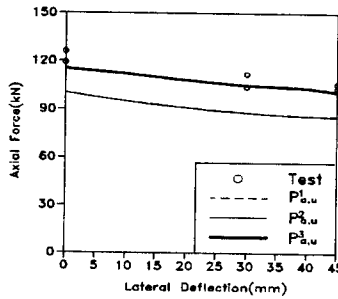
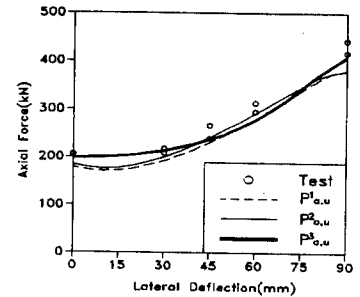


그림4 x방향과 y방향 변위의 관계



a) 정사각형 단면



b) 직사각형 단면

그림5 해석 및 실험에 의한 최대하중 비교

그림2와 그림3은 실험과 해석에 의한 기둥의 축력-횡변위 관계를 나타낸 것이다. 제안된 해석방법이 축력-횡변위 관계를 전반적으로 잘 예측함을 알 수 있다. 그림4는 직사각형단면에서 편심각이 45° 인 경우에 x방향과 y방향의 변위를 나타낸 것이다. 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려한 경우(실선)가 이를 고려하지 않은 경우(점선)보다 실제 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

- 1) 본 실험에 의하면, 제안된 해석기법은 기존의 해석방법에서 고려하지 않은 휨모멘트간의 상호 연관성을 고려하였으며, 이를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 철근 콘크리트 기둥의 2계 거동을 잘 예측하는 것으로 평가되었다.
- 2) 제안된 해석기법은 실험결과와 비교할 때, 철근 콘크리트 기둥의 극한강도 및 거동을 비교적 잘 예측하였다.
- 3) 본 실험결과에 의하면 ACI의 모멘트 확대계수법은 안전측인 것으로 판단된다. 그러나 직사각형 단면에서의 모멘트 확대계수법이 제안된 해석방법보다 기둥의 극한강도를 크게 평가하는 경우도 있다. 따라서 여기에 대한 보다 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. Kim, Jin-Keun and Yang, Joo-Kyoung, *Buckling Behavior of Slender High-strength Concrete Columns*, Engineering Structure, Vol.17, No.1, 1995, pp.39~51.
2. Bazant, Z.P., Pan, J. and Cabot, G.P., *Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.12, 1987, pp.2333~2347.
3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI, Detroit, 1995.
4. Bazant, Z.P., Cedolin, L. and Tabbara, M.R., *New Method of Analysis for Slender Columns*, ACI Structural Journal, Vol.88, No.4, July-Aug., 1991, pp.391~401.
5. Stephen J.Foster and Mario M.Attard, *Experimental Tests on Eccentrically Loaded High-Strength Concrete Columns*, ACI Structural Journal, Vol.94, No.3, May-June, 1997, pp.295~303.
6. 김진근, 이상순, 양주경, 장정수, 조성찬, 「2축 휨과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 기둥의 2계 거동 해석」, 콘크리트학회논문집, 제9권, 2호, 1997.4