

# P- $\Delta$ 효과를 고려한 RC 기둥의 극한저항력 산정

## Ultimate Resisting Capacity of RC Columns Considering P- $\Delta$ Effect

곽 효 경†

김 진 국\*

김 한 수\*\*

Kwak, Hyo-Gyoung

Kim, Jin-Kook

Kim, Han-Soo

(논문접수일 : 2001년 7월 11일 ; 심사종료일 : 2002년 2월 24일)

### 요 지

이 논문에서는 철근콘크리트 장주의 극한저항력을 효과적으로 산정할 수 있는 설계 관계식이 제안되었다. 철근콘크리트 기둥의 거동은 여러 설계변수들의 영향을 받는데 특히 콘크리트의 강도, 철근비, 세장비 및 편심 등에 의해 크게 영향을 받으므로 설계식의 제안을 위해 위의 4가지 변수들을 변화시켜가며 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석을 수행하였다. 콘크리트의 균열 등을 포함한 재료의 비선형성을 고려하기 위해 적층단면법이 사용되었으며, P- $\Delta$  효과를 구현하기 위하여 기하강성행렬이 고려되었다.

해석결과로부터 각 변수의 변화에 따른 철근콘크리트 기둥의 저항력의 변화를 비교하였으며 이를 토대로 회귀분석 모델을 제안하였다. 또한 회귀분석을 수행하여 철근콘크리트 장주의 극한저항력을 효과적으로 산정할 수 있는 회귀분석식을 제안하였고, 기존의 설계기준과 비교하여 제안식의 효율성을 검증하였다.

**핵심용어** : 극한저항력, 세장비, 철근콘크리트 기둥, P- $\Delta$  효과, 강도저감계수

### Abstract

In this paper, an analytical model to predict the resisting capacity of slender RC columns is introduced. Material and geometric nonlinearities are taken into account, and the layer approach is adopted to simulate the different material properties across the sectional depth. On the basis of the obtained numerical analysis results, an improved design equation as a function of concrete strength, slenderness ratio, steel ratio and eccentricity for slender RC columns, which can be used effectively in the preliminary design stage, is introduced. Finally, P-M interaction diagrams constructed by the introduced equation are compared with the ACI method with the objective of establishing the relative efficiencies of the introduced equation.

**Keywords** : P- $\Delta$  Effect, Slenderness, RC Column, Ultimate Resisting Capacity, Resisting Capacity Reduction Factor

### 1. 서 론

기둥은 축력과 휨을 받는 부재로 세장비에 따라 단주와 장주로 구분하게 되는데 부재에 하중(P)이 작용

하면 부재의 길이에 따른 모든 단면에서 거의 동일한 응력 분포를 나타내는 단주와 달리 장주의 경우 세장비(L/r)에 따른 횡방향 변위( $\Delta$ )의 증가로 인한 추가적인 모멘트가 발생하게 된다. 즉 작용하는 외력과 더불어

† 책임저자, 정회원 · 한국과학기술원 건설환경공학과 부교수  
전화: 042-869-3621; Fax: 042-869-3610  
E-mail: khg@kaist.ac.kr

\* 한국과학기술원 건설환경공학과 박사과정

\*\* 현대건설 기술연구소 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

P- $\Delta$  효과에 따른 2차 모멘트의 발생과 장기적으로는 콘크리트의 크리프 변형 등 시간 의존적 거동에 의한 기둥의 저항력 감소가 유발된다. 이와 같이 세장비가 큰 철근콘크리트(RC) 기둥은 좌굴 및 크리프 등의 2차적인 효과에 의한 영향을 크게 받는 대표적인 구조부재중 하나이다. 그러나 최근 들어 고강도 콘크리트의 개발과 공간의 효율적인 사용을 위한 구조물의 고층화, 세장화 추세에 따라 세장비가 상대적으로 큰 장주의 설계가 빈번해지고 있고 철근콘크리트 장주의 거동분석에 관한 많은 실험 및 해석적 연구가 이루어지고 있다.<sup>1)~4)</sup>

Kim 등<sup>2),3)</sup>은 적층단면법을 사용하여 재료 및 기하 비선형 등을 고려한 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석 기법을 개발하였으며, 실험을 수행하여 얻은 결과와 비교하여 개발된 해석기법의 타당성을 검토하였다. 해석 및 실험결과로부터 ACI 모멘트 확대계수법은 고강도 콘크리트 장주에 대해서는 안전측이 아니며, 콘크리트의 강도가 기둥의 극한강도에 미치는 영향은 기둥의 세장비가 증가할수록 감소하고 콘크리트의 강도가 커질수록 세장 기둥의 좌굴파괴 가능성이 증가한다는 것을 확인하였다. 또한 철근비를 증가시킬 경우, 기둥의 극한강도 증가량은 단주보다는 장주에서 보다 크게 나타나는 것을 확인하였다. Bazant 등<sup>1),5)</sup>은 구조물의 변형 시 거동형상이 sine 곡선 형태를 갖는다는 가정 하에 힘의 평형조건과 변위의 적합조건 등을 이용하여 세장비를 고려한 철근콘크리트 기둥의 극한 저항력 산정에 관한 연구를 수행하였는데, 설계상의 적용을 위해 기둥의 파괴는 일정한 편심을 갖는 하중이 작용할 때 임계단면에 발생하는 축력과 휨모멘트 관계에서의 최대값으로 정의하였다. 해석을 통한 ACI 방법과의 비교 연구에서 ACI 방법이 항상 보수적이지는 않다는 것을 확인하였다. 참고문헌 [6]에서는 철근콘크리트 기둥의 재료 및 기하비선형 해석을 수행하였으며 해석결과를 토대로 기둥의 설계관계식을 제안하였다. 또한 제안식에 의한 방법과 ACI 설계기준에 의한 방법을 비교하여 제안식의 효율성을 검증하였다. 그러나 참고문헌 [6]의 제안식은 세장비와 철근비를 변수로 하는 함수로 편심 등의 영향을 단순화하여 고려하였으며, 콘크리트 강도의 경우 장주의 설계에 주로 사용되는 고강도 콘크리트를 기준으로 제안되었을 뿐 강도의 변화에 의한 영향을 고려하지 못한 관계로 철근콘크리트 기둥의 저항력을 평가하는데 한계가 있다.

이 논문에서는 참고문헌 [6]의 설계관계식 적용시의 한계점들을 보완하기 위해 철근콘크리트 기둥의 설계에서

주로 고려되며, 기둥의 극한하중에 크게 영향을 주는 설계 변수<sup>7)</sup> (세장비, 철근비, 콘크리트 강도, 편심)들을 모두 고려하여 수치해석을 수행하였고 각 설계변수들의 영향을 효과적으로 고려할 수 있는 회귀분석모형을 제안하였다. 또한 해석결과와 제안된 회귀분석모형을 토대로 철근콘크리트 장주의 극한저항력을 효과적으로 산정할 수 있으며 설계상의 적용이 용이한 회귀분석식을 제안하였다.

## 2. 수치모델링

### 2.1 재료모델

이 논문에서 압축측 콘크리트의 경우 Park 이 제안하고 Scott 등이 수정한 응력-변형률 관계를 사용하였다.<sup>8)</sup> 이 모델은 간편하면서도 스테럽 등의 횡보강 철근에 따른 영향을 효과적으로 고려함으로써 해석의 정확성을 기할 수 있는 장점을 가지고 있어 수치해석시 널리 사용되고 있다. 인장측 콘크리트에서의 응력-변형률 관계는 균열 발생 이후의 변형연화(strain softening) 영역을 선형분포로 단순화하여 하중 증가에 따른 미세균열(microcracks)의 발달을 모사하도록 하였다.<sup>9),10)</sup> 철근의 경우 소성영역을 적절한 기울기를 가진 직선(bilinear model)으로 모델링하여 변형경화(strain hardening) 현상을 고려하도록 하는 모델을 사용하였으며<sup>10),11)</sup> 콘크리트와 철근의 모델에 대한 보다 자세한 내용은 참고 문헌 [6]에서 살펴볼 수 있다.

### 2.2 해석방법

구조물의 수치해석은 축 방향 일축응력상태를 기본으로 하는 보 요소를 사용하였으며, 각 단면에서의 영향을 효과적으로 모사하기 위해 부재의 두께방향으로 가상의 철근과 콘크리트 층으로 가정한 적층단면법을 사용하였다.<sup>12)</sup> 변형 전에 평면인 모든 요소의 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 평면유지의 가정이 사용되었으며, 철근콘크리트 장주의 경우 상대적으로 긴 길이로 인해 전단 변형에 따른 영향이 극히 작기 때문에 지배방정식의 구성 시 전단 변형률의 영향을 추가적으로 고려하지 않았다. 또한 기하비선형 거동을 고려하기 위해 축 방향 변형률을 축 방향 변위에 따른 선형 항과 회전각 변화에 따른 2차의 비선형 항의 합으로 표현하였다. 이와 같은 가정에 따라서 보 요소의 임의의 위치에서 응력-변형률 관계로부

터 부재력을 산정하고, 이를 가상일의 원리에 적용하여 강성행렬 및 평형방정식을 구성할 수 있다.

이 논문에서는 하중증가에 따른 구조거동을 파악함에 있어서 작용하는 외부하중을 몇 개의 단계(increment method)로 나눈 후 각 하중단계에서 반복해석(iteration method)을 통해 수렴된 결과를 산정하는 복합법(combined method)을 사용하였으며, 각 하중단계의 첫번째 반복 해석에서만 강성행렬을 재구성하였다. 한편 각 해석단계에서의 수렴여부를 판단하기 위해 사용된 수렴조건은 전체 구조계에서 불균형 하중의 최대 수직력과 최대 모멘트를 구하여 각각의 수렴한계값 (tolerance)과 비교하는 방법을 사용하였다. 해석방법에 관한 보다 자세한 유도과정 및 내용은 참고문헌 [6]에 명시되어 있다.

### 3. 철근콘크리트 장주의 거동 특성

철근콘크리트 기둥은 축력과 휨이 동시에 작용하는 부재로 기둥의 극한저항력은 축력과 휨모멘트의 상호 작용에 의해 결정되어지며, 파괴가 일어날 때의 축력과 모멘트들을 선으로 연결하여 나타낸 그림을 P-M 상관도(P-M interaction diagram)라 한다. P-M 상관도는 기둥의 거동 특성에 따라 크게 두 부분으로 나누어 지는데, 축력이 상대적으로 크며 P-M 상관도상의 음의 기울기를 가지는 영역( $e < e_b$ )에서는 콘크리트의 압축파괴에 의해 기둥의 파괴가 일어나게 되며, 축력이 상대적으로 작고 모멘트가 큰 P-M 상관도상의 양의

기울기를 가지는 영역( $e > e_b$ )에서는 콘크리트에 인장 균열이 발생되고 철근의 인장 항복에 의해 기둥의 파괴가 일어나게 된다. 이때 압축지배에 의한 파괴와 인장 지배에 의한 파괴의 경계에서의 축력과 모멘트를 균형 상태의 하중( $P_b, M_b$ )이라 하고, 축력에 대한 모멘트의 비를 균형상태의 편심  $e_b = (M_b/P_b)$ 이라 한다. 즉 철근 콘크리트 기둥의 저항력을 나타내는 P-M 상관도는 균형상태의 하중, 압축지배를 나타내는 영역, 인장지배를 나타내는 영역에 의해 그 모양이 결정되어지는데 각각의 영역은 철근콘크리트 기둥의 거동에 영향을 주는 여러 설계변수들에 의해 결정된다.

기둥의 설계에 일반적으로 고려되는 설계변수로는 콘크리트의 강도, 철근비, 철근의 강도, 세장비, 편심 등 여러 가지를 들 수 있는데, 특히 Mirza<sup>7)</sup>에 의하면 기둥의 거동에 크게 영향을 줄 수 있는 설계변수로는 편심, 세장비, 철근비, 콘크리트 강도 등을 들 수 있다. 우선 세장비와 편심의 변화에 따른 기둥의 거동을 살펴보면, 동일한 단면을 갖는 부재를 세장비 및 편심을 변화시켜가며 해석한 결과, 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 기둥의 극한저항력은 세장비가 커짐에 따라 감소하며, 편심이 균형상태의 편심에 근접한 값을 갖는 경우 극한강도의 감소 정도가 상대적으로 커지고 편심이 균형상태의 편심보다 커지거나 작아지면 극한강도의 감소 정도가 조금씩 줄어드는 현상을 나타내는 것을 알 수 있다.<sup>14)</sup>

한편 철근비 및 콘크리트 강도에 의한 영향에 대해서는, 그림 2의 (a)와 (c) 또는 (b)와 (d)로부터 볼

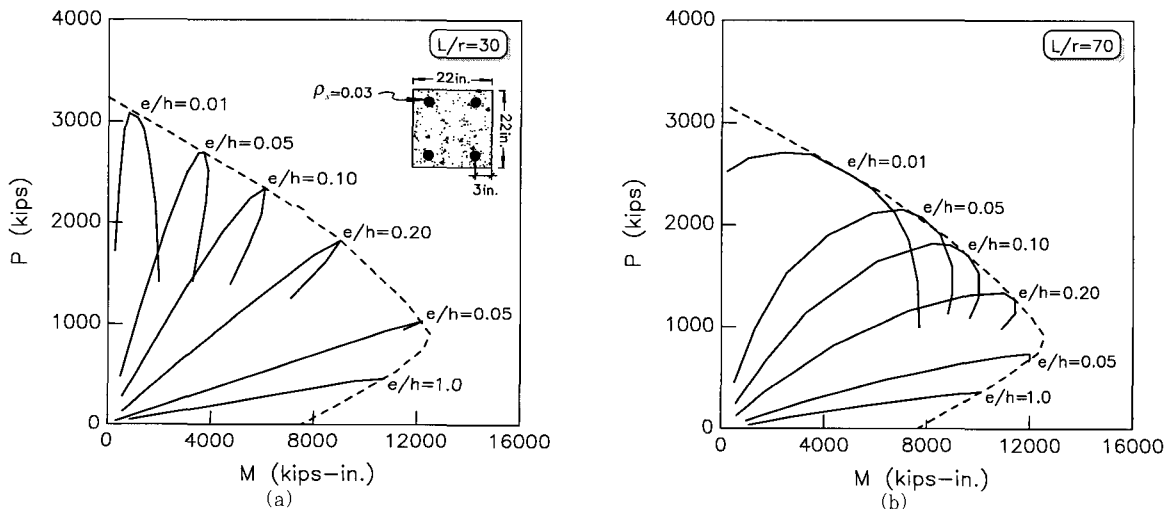


그림 1 세장비 및 편심의 변화에 따른 기둥의 P-M 상관도<sup>13)</sup> (1in=2.54cm, 1kips=0.4536kgf)

수 있는 바와 같이 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 장주효과에 의한 저항력 감소 정도가 증가하고, 그림 2의 (a)와 (b) 또는 (c)와 (d)로부터 철근비가 증가함에 따라 저항력 감소 정도는 상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다.<sup>3)</sup> 그림 2에서 ( $P_{10}$ ,  $M_{10}(=P_{10} \cdot e)$ )은 세장비 10의 단주에 일정한 편심( $e$ )으로 하중이 작용될 때의 파괴하중을 나타내며, ( $P_{100}$ ,  $M_{100}(=P_{100} \cdot e + P_{100} \cdot \Delta)$ )은 세장비 100의 장주에 일정한 편심( $e$ )으로 작용된 하중에 의해 파괴가 일어날 때 부재 중앙에 발생하는 축력과 모멘트의 크기를 나타낸다. 따라서 장

주효과에 의한 저항력의 감소 정도는  $P_{100}/P_{10}$ 로 표현될 수 있다. 즉, 기둥의 거동특성을 통해 살펴본 바와 같이 참고문헌 [6]에서 단순화시켰거나 고려하지 못한 콘크리트 강도와 편심의 변화에 따른 영향이 상대적으로 크게 나타나며, 강도 및 편심의 영향을 효과적으로 고려하지 않을 경우 실제 설계에 적용 시 기둥의 저항력을 과대 또는 과소 평가하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 콘크리트 강도, 철근비, 편심, 세장비를 변화시켜가며 철근콘크리트 기둥의 수치해석을 수행하고 그 결과를 토대로 위의 4가지 변수들을

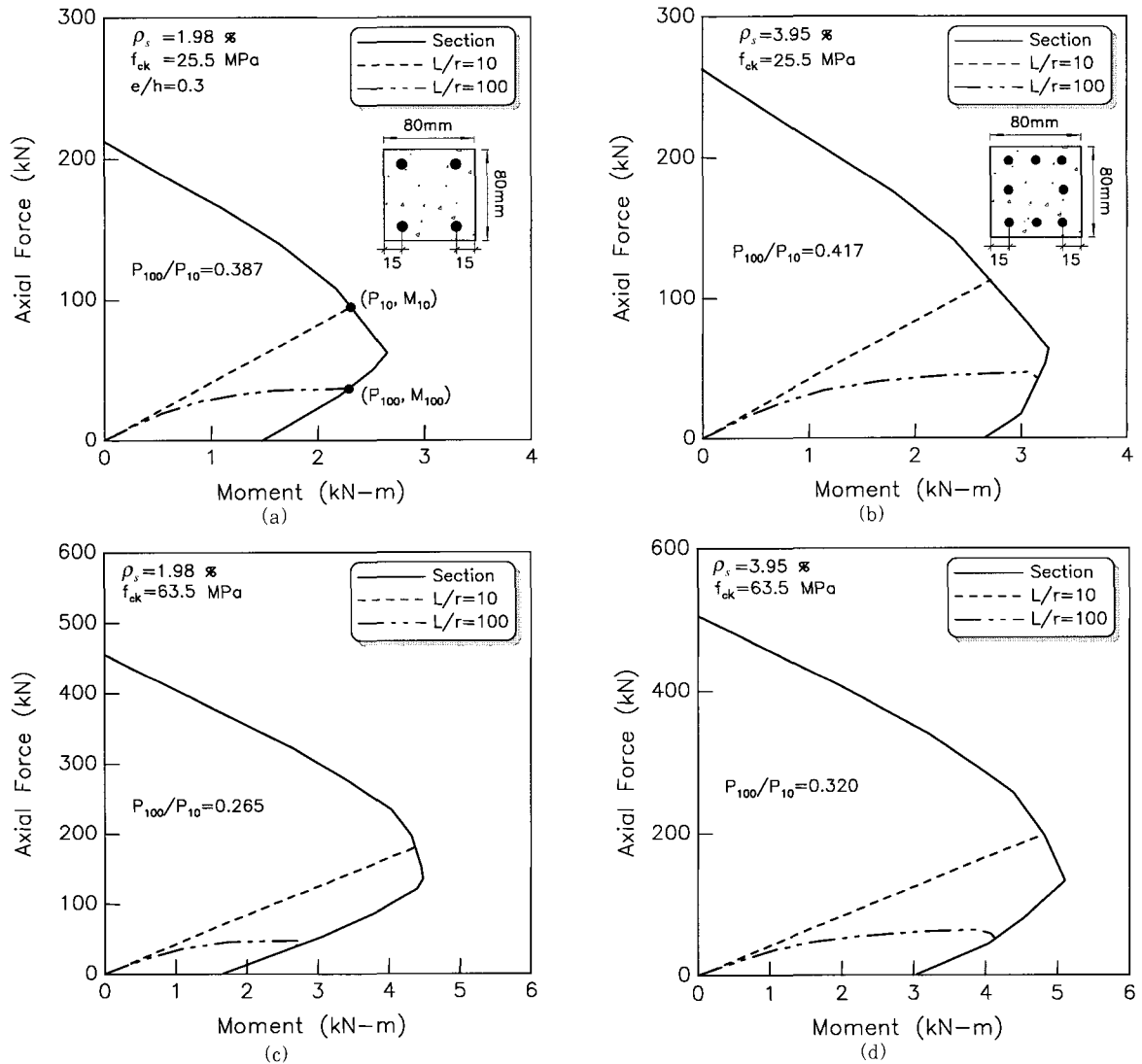


그림 2 콘크리트 강도 및 철근비의 변화에 따른 P-M 상관도<sup>3)</sup> 수치해석

고려하는 수정 설계관계식을 제안하고자 한다.

#### 4. 수치해석

##### 4.1 RC 기둥의 수치해석

이 논문에서는 제안된 해석모델의 검증에 위해 Bazant 등<sup>8)</sup>이 수행한 해석결과와 Kim 등<sup>3)</sup>이 수행한 실험 및 해석 결과와의 비교 연구가 이루어졌다. Bazant 등과의 해석결과와의 비교는 참고문헌 [6]에서 살펴볼 수 있다. Bazant 등은 힘의 평형조건과 변형의 적합조건 등을 이용하여 세장비를 고려한 철근콘크리트 기둥의 극한 저항력 산정에 관한 연구를 수행하였으며, 연구 결과는 콘크리트 기둥의 P-Δ 효과를 고려한 수치해석 시 많은 연구자에 의해 제안된 모델의 검증에 위해 널리 인용되고 있다. 또한 Kim 등에 의한 실험 및 해석 결과와의 비교는 표 1을 통하여 볼 수 있다.

이 논문에서는 철근콘크리트 장주의 극한 저항력을 효과적으로 산정하기 위한 관계식을 구성함에 있어 요구되는 다양한 설계변수의 변화에 따른 RC 기둥의 거동특성을 살펴보고자 한다. 철근콘크리트 기둥의 극한 저항력에 영향을 줄 수 있는 설계변수로는 콘크리트의 강도, 철근비, 편심, 세장비, 철근의 강도, 콘크리트 피복두께 등을 들 수 있다. 그러나 실제 기둥단면의 설계 시 모든 설계변수들을 고려하기에는 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에, 단면의 극한 저항력에 비교적 큰

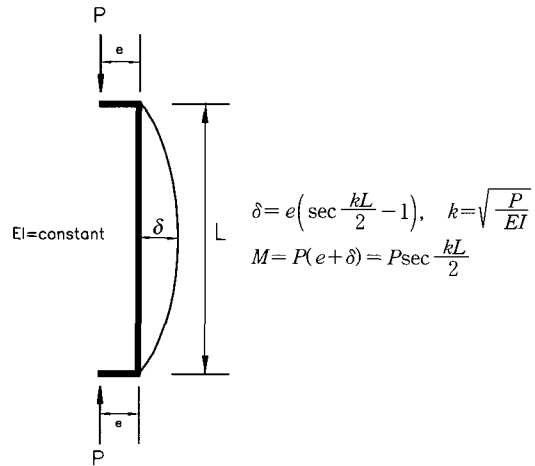


그림 3 해석 부재

영향을 주며 설계 시 일반적으로 고려되는 설계변수인 콘크리트의 압축강도(250, 300, 400, 500 kgf/cm<sup>2</sup>), 철근비(0.02, 0.04, 0.06, 0.08), 편심( $e_{min}$ , 0.25 $e_b$ , 0.5 $e_b$ , 0.75 $e_b$ ,  $e_b$ , 1.2 $e_b$ , 1.5 $e_b$ ), 세장비(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70)를 변화시켜가며 해석을 수행하였다.<sup>7)</sup> 또한 철근은 구조물의 설계시 일반적으로 사용되는 SD40을 기준으로 탄성계수는  $E_s = 2.0 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>로, 강도는  $f_y = 4000$  kgf/cm<sup>2</sup>로 각각 가정하였고, 피복두께는  $d' = 0.1h$  ( $h$ 는 단면의 높이)로 가정하였다. 해석에 사용된 기둥은 양단 힌지 조건으로 단일 곡률을 가지며, 철근이 대칭으로 분포된 정방형 단면을 기준단면으로 설정하였다(그림 3 참조). 기둥의 세장비는  $L/r$ 로

표 1 Kim 등<sup>3)</sup>에 의한 기둥의 극한강도 실험결과와의 비교콘크리트

콘크리트 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	세장비 (L/r)	실험결과(Ton) (a)	해석결과(Ton)(Kim 등) (b)	해석결과(Ton)(이 연구) (c)	Ratio = (b)/(a)	Ratio = (c)/(a)
259.9	60	6,493	6,636	6,600	1.02	1.02
		6,697			0.99	0.99
	100	3,894	3,772	3,780	0.97	0.97
		3,568			1.06	1.06
647.3	60	10,479	10,499	10,400	1.00	0.99
		11,570			0.91	0.90
	100	4,608	4,975	4,840	1.08	1.05
		4,852			1.03	1.00
878.7	60	12,446	11,774	11,840	0.95	0.95
		12,610			0.93	0.94
	100	5,535	5,331	5,520	0.96	1.00
		5,596			0.95	0.99

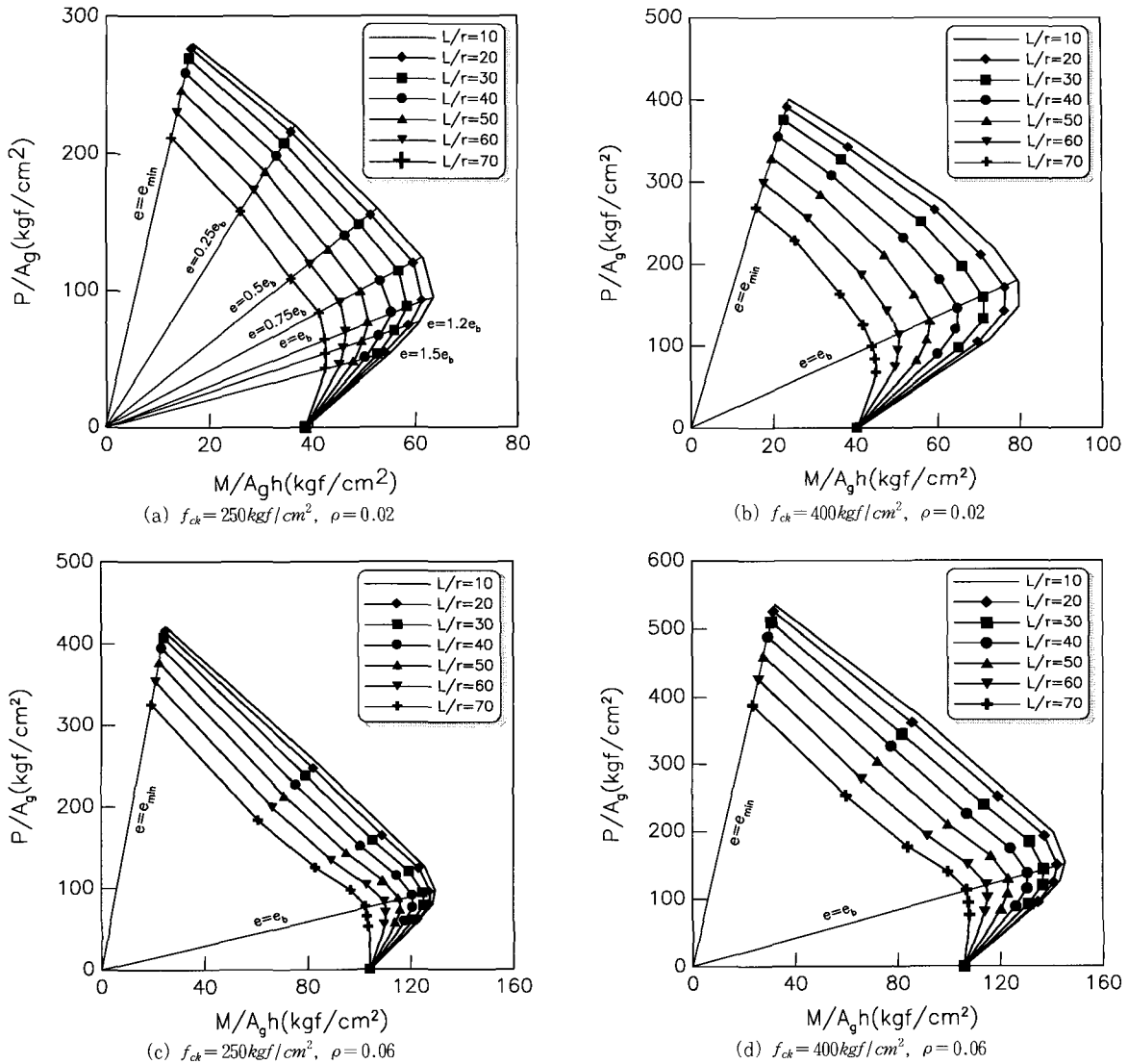


그림 4 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석 예

정의하였으며,  $r = h/\sqrt{12}$ ,  $h=50\text{cm}$  으로 설정하였다. 그림 4의 해석결과를 통해 살펴볼 수 있는 바와 같이 편심이 균형편심( $e_b$ )에 이를 때까지는 편심 및 세장비의 증가에 따라 저항력의 감소가 현저하게 발생함을 알 수 있다. 또한 철근비가 커짐에 따라 강성이 커지므로 인하여 저항력 감소가 상대적으로 작게 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 3의 탄성거동에 의한 관계식에서 알 수 있는 바와 같으며, 비선형 거동을 하는 철근콘크리트 기둥의 거동특성을 통해서도 어느 정도

의 유사성을 발견할 수 있다. 그러나 편심이 균형편심( $e_b$ ) 이상이 되면 저항력 감소 정도가 작아지는데, 이는 균형상태의 편심( $e_b$ )을 전후해서 기둥 부재의 파괴가 압축지배에서 인장지배에 의한 파괴로 전이되기 때문이다. 그리고 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 저항력 감소의 정도가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 고강도 콘크리트가 취성재료로 에너지 흡수능력이 상대적으로 떨어지기 때문이다. 따라서 탄성좌굴이론을 토대로 철근콘크리트 장주의 극

한 저항력을 산정하는 데는 한계가 있으며 이를 설계에 적용 시, 경우에 따라 안전하지 못한 설계가 이루어질 가능성을 내포하게 된다. 따라서 설계상의 일반적인 적용을 위해 콘크리트 강도, 철근비, 편심, 세장비 등의 설계변수 변화를 고려한 비선형 해석을 통해 철근콘크리트 장주의 극한 저항력 산정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4.2 모델식의 제안

이 논문에서 모델식의 제안을 위해 고려한 설계변수는 앞에서 언급한 바와 같이 기둥의 극한저항력에 가장 큰 영향을 미치는 콘크리트의 압축강도, 철근비, 편심, 세장비의 4개로 설정하였다. 그러나 철근콘크리트 장주의 거동은 재료의 비선형성(material nonlinearity)과 구조계의 비선형성(geometric nonlinearity)으로 인하여 그 거동이 복잡하기 때문에 하나의 식으로 나타내기에는 한계가 있어 참고문헌 [6]와는 달리 각각의 편심 ( $e_{min}$ ,  $0.25e_b$ ,  $0.5e_b$ ,  $0.75e_b$ ,  $e_b$ ,  $1.2e_b$ ,  $1.5e_b$ )에서 강도저감계수식을 제안하는 방법을 택하였으며, 그 이외의 편심에서는 선형보간 방법을 통해 설계시 임의의 편심에 따른 철근콘크리트 장주의 극한 저항력을 산정하도록 하였다. 또한 여기서 제안된 식은 양단에 동일한 모멘트 작용으로 인한 단일 곡률을 갖는 경우를 토대로 구성된 것으로 단일 곡률을 갖는 기둥의 설계시 적용될 수 있다.

이 논문에서는 작용 모멘트를 확대시켜 설계에 반영하는 ACI 설계기준과는 달리 장주효과에 의해 축력과 모멘트에 의한 저항력이 일정 비율로 각각 감소한다는 개념을 토대로 모델식이 제안되었으며, 이를 위해 강도저감계수  $F$ 가 도입되었다.<sup>6)</sup> 여기서  $F$ 는 단주에 대한 장주의 저항력의 감소비로, 그림 5에 표시한 바와 같이 강도저감계수는  $F = (\overline{OC} - \overline{OA}) / \overline{OC}$ 로 정의할 수 있다.

특히 임의의 편심하중에 대응하는 장주의 저항력 ( $\overline{OA}$ )은 설계변수 값에 따라 변화하게 되므로 강도저감계수  $F$ 는 각 편심에 대하여 세장비, 철근비, 콘크리트 강도의 함수  $F = f(f_{ck}, L/r, \rho)$ 로 나타낼 필요가 있다. 따라서 각 설계변수의 변화에 따른 해석 결과를 토대로 회귀분석을 통한 강도저감계수  $F$ 에 대한 회귀분석모델을 제안하였다.

앞의 연구<sup>6)</sup>에서 살펴본 바와 같이 강도저감계수  $F$ 는 세장비 및 철근비에 대해 각각 2차 다항식 형태로

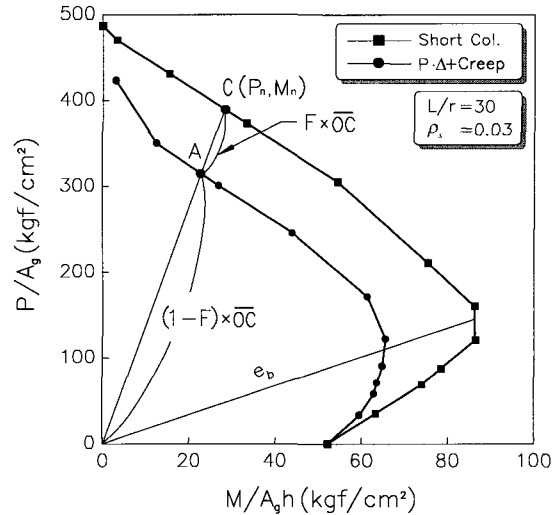


그림 5 강도저감계수  $F$ 의 정의<sup>6)</sup>

표현될 때 비교적 높은 정확도를 갖는  $F$ 값의 회귀분석식을 정의할 수 있었다. 한편 콘크리트 강도의 경우 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 동일 편심에 대응하는 강도저감계수  $F$ 는 압축강도가 증가함에 따라 그 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 철근비가 작고 세장비가 큰 경우 그 증가폭이 상대적으로 크게 나타나며 2차 다항식 형태를 띄게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 설계변수의 영향을 고려함에 있어 각 설계 변수에 대하여 2차 다항식 형태로 모델링 하였으며, 각 변수들의 상호 연관효과를 고려하기 위해 각 변수들의 곱의 항을 포함한 식(1)의 형태로 회귀식을 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 F = & a1 + a2 \cdot (f_{ck}/100) + a3 \cdot \rho + a4 \cdot (L/100r) \\
 & + a5 \cdot (f_{ck}/100)^2 + a6 \cdot \rho \cdot (f_{ck}/100) \\
 & + a7 \cdot (\rho)^2 + a8 \cdot (L/100r) \cdot (f_{ck}/100) \\
 & + a9 \cdot (L/100r) \cdot \rho + a10 \cdot (L/100) \quad (1)
 \end{aligned}$$

3개의 변수로 표현되는 2차 다항식 형태의 회귀분석모델을 토대로 회귀분석을 수행하여 각 편심에 대한 계수값들을 표 2에 표시하였으며 얻어진 회귀분석식의 적합성을 나타내는 지표인 상관계수( $R^2$ )를 살펴보면, 0.99에서 1.00의 높은 상관계수값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉 구성된 회귀분석식이 강도저감계수를 효과적으로 묘사하고 있음을 알 수 있다.

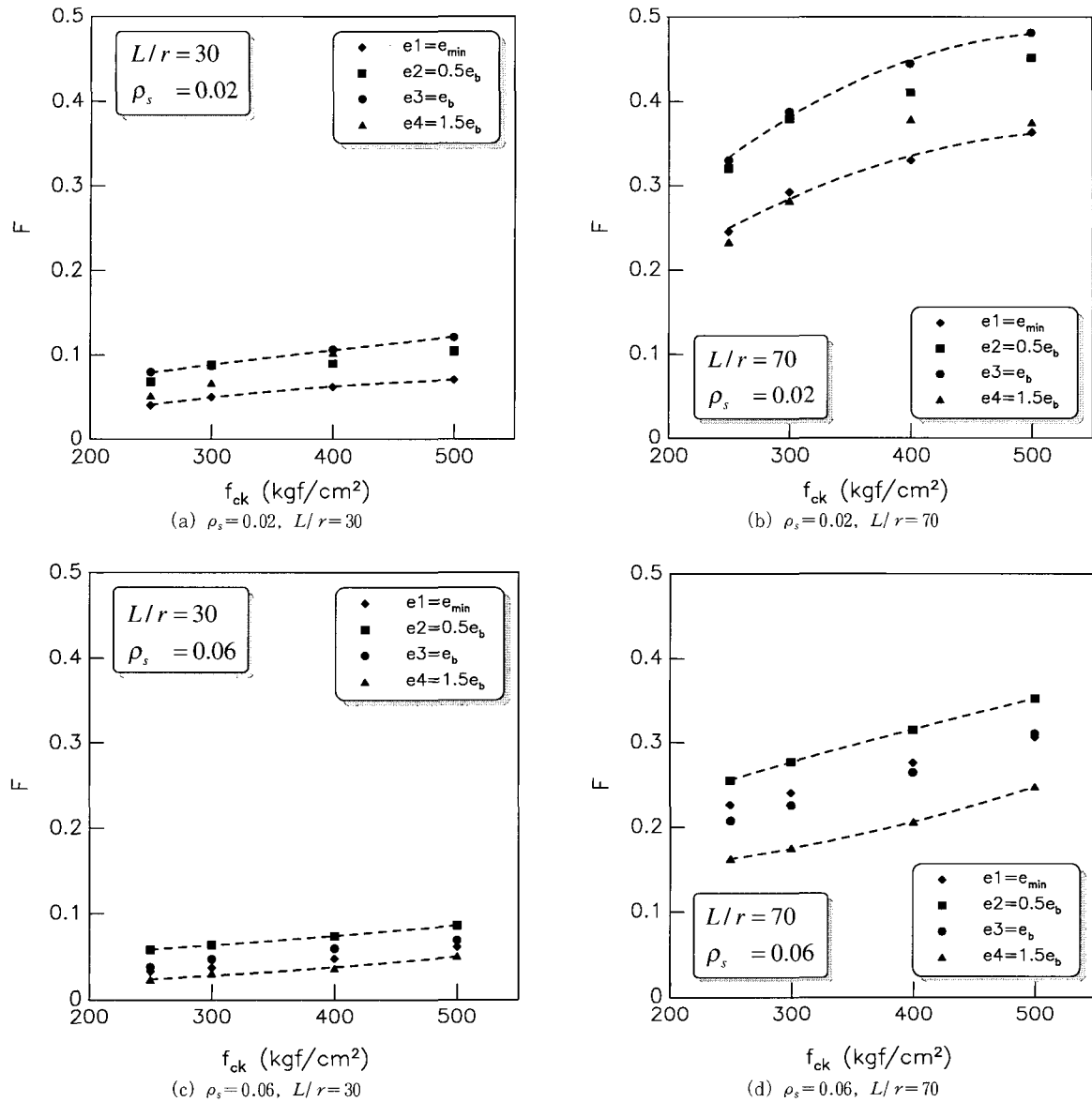


그림 6 콘크리트 압축강도에 따른 강도저감계수 F

### 4.3 ACI 설계기준과의 비교

철근콘크리트 장주의 설계시 널리 사용되고 있는 ACI 설계기준<sup>13)</sup>은 탄성좌굴이론을 토대로 콘크리트의 균열에 따른 강성저하 현상을 식(2)의 간략식에 따라 반영하고 있으며 다음의 식으로 정의하고 있다.

$$M_c = \delta \cdot M \quad (2)$$

$$\text{여기서 } \delta = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{0.75P_c}} \geq 1.0, \quad P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2},$$

$EI = (0.2E_c I_g + E_s I_{se})$   $\delta$ 는 모멘트 확대계수를,  $M_c$ 는 확대 모멘트를 각각 나타낸다.

또한 ACI 설계기준식은 모멘트 확대계수식에 강도 감소계수 0.75를 사용하고 있으며, 콘크리트의 재료비선형성과 균열 등의 효과를 고려하기 위하여 기둥의 좌



표 2 제안된 강도저감계수  $F$

Coeff.	$e_{min}$	$0.25e_b$	$0.5e_b$	$0.75e_b$	$e_b$	$1.2e_b$	$1.5e_b$
a1	-0.0235	-0.0445	-0.0588	-0.0488	-0.0418	-0.0702	-0.0702
a2	0.0075	0.00658	0.00901	0.00843	0.00657	0.0233	0.0223
a3	0.261	0.576	0.494	-0.111	-0.318	-0.206	0.333
a4	-0.115	0.0504	0.0169	0.210	0.203	0.188	0.0855
a5	-0.00116	-0.00139	-0.00182	-0.00142	-0.00087	-0.00254	-0.00237
a6	-0.112	-0.0596	-0.0893	-0.142	-0.181	-0.261	-0.274
a7	3.81	-0.837	3.56	11.80	17.10	17.0	11.10
a8	0.0632	0.0551	0.00718	0.0803	0.0845	-0.0841	0.0831
a9	-1.81	-1.38	-0.351	-4.71	-5.97	-5.80	-4.63
a10	0.547	0.443	0.00372	0.334	0.367	0.342	0.301
R <sup>2</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99

굴하중을 구할 때 강성을 식(2)와 같이 적용시키도록 하고 있다. 강도감소계수 0.75는 Mirza<sup>15)</sup> 등의 연구에 의한 결과를 토대로 만들어진 것인데, Mirza 등에 의한 연구는 콘크리트강도를 5000psi로 한정시켰고, 세장비의 경우 10, 20, 30에 대하여 고려하였으며, 철근비의 경우 0.012에서 0.033의 적은 영역에 대하여 수행된 것으로 세장비, 철근비, 콘크리트강도가 큰 경우에 대하여 효과적으로 고려하지 못하고 있다. Mirza<sup>7)</sup>에 의하면 식(2)도 편심이나 세장비 등, 설계변수의 영향을 효과적으로 고려하지 못하고 있어 편심이 클 경우 안전하지 못한 결과를 줄 수도 있다.

제안된 모델식과 ACI 설계기준 그리고 해석결과를 P-M 상관도상에 나타내어 그림 7에서 비교하였다. 제안된 모델식은 그림 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 콘크리트 강도와 철근비가 상대적으로 작은 경우이거나 또는 그림 7(g), (h)에서와 같이 콘크리트 강도와 철근비가 상대적으로 크며 편심이 비교적 큰 경우 약간의 오차가 발생하기는 하지만 그 이외의 경우에는 전 영역에 걸쳐 철근콘크리트 장주의 극한 저항력을 효과적으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면 ACI 설계기준에 의한 방법은 세장비, 철근비 그리고 콘크리트 강도가 상대적으로 큰 경우 기둥의 저항력을 과소 또는 과대 평가하고 있음을 알 수 있다(그림 7의 (a)에서 (h) 참조). 특히 철근비가 비교적 작고 세장비가 큰 경우 기둥의 저항력을 과소평가 하고 (그림 7의 (a)에서 (d) 참조) 설계에 적용 시 과다한 설계를 하게 되며, 철근비가 비교적 크고 세장비가 큰 경우 그림 7의 (e)에서 (h)까지의 그래프에서 볼 수 있듯이 기둥의 저항력

을 과대평가하는 경향을 보이며 때에 따라서 안전하지 못한 설계를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 이는 이미 앞에서도 언급한 바와 같이 ACI 설계기준의 배경이 되는 연구가 세장비 10에서 30, 철근비 0.01에서 0.04의 경우를 토대로 이루어지는 등 일부 한정된 경우에 대해서 이루어졌으며, 비선형성을 나타내는 철근콘크리트 기둥의 거동을 탄성좌굴식을 토대로 표현하는데 있어서의 한계성 등으로 인한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 철근콘크리트 장주의 극한 저항력에 영향을 줄 수 있는 설계변수(세장비, 철근비, 편심, 콘크리트강도)들을 변화시켜가며 해석을 수행하였고 그 결과를 토대로 각 설계변수들의 영향을 효과적으로 고려할 수 있는 회귀분석모델을 제안하였다. 나아가 회귀분석을 토대로 설계 시 간편하면서도 비교적 정확히 RC 기둥의 저항력을 산정할 수 있는 설계관계식을 제안하였다. 철근콘크리트 기둥은 재료비선형 및 기하비선형 거동으로 인해 저항력의 감소가 유발되는데 콘크리트 압축강도가 크고 철근비가 작은 기둥에서 상대적으로 저항력 감소가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 철근콘크리트 장주의 정확한 저항력 산정을 위해서는 보다 정확한 수치해석법의 사용과 이를 토대로 한 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 기둥의 저항력은 주로 콘크리트 압축강도, 철근비, 편심, 세장비 등의 설계변수에 의해 영향을 받는데 이 논문

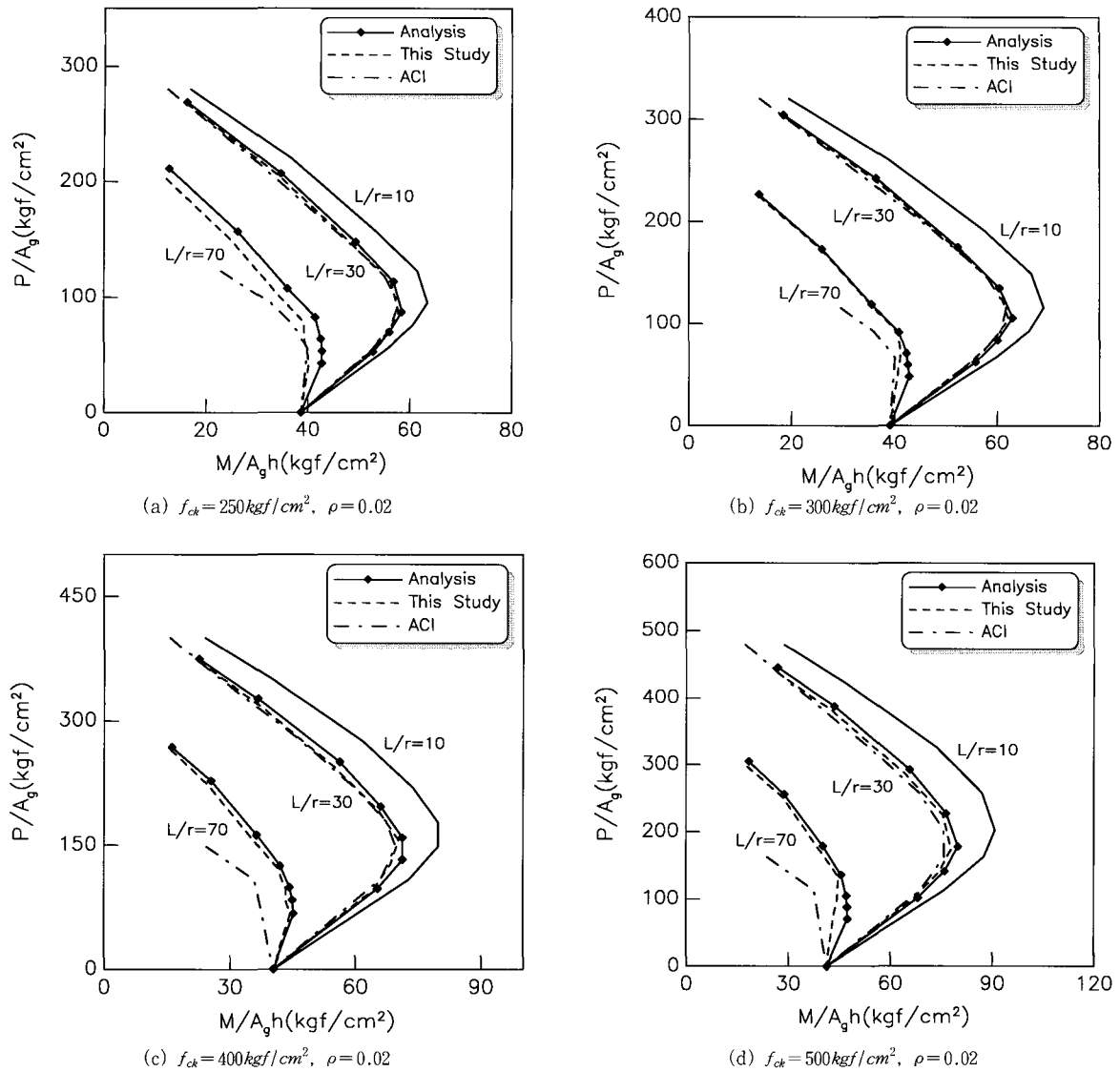
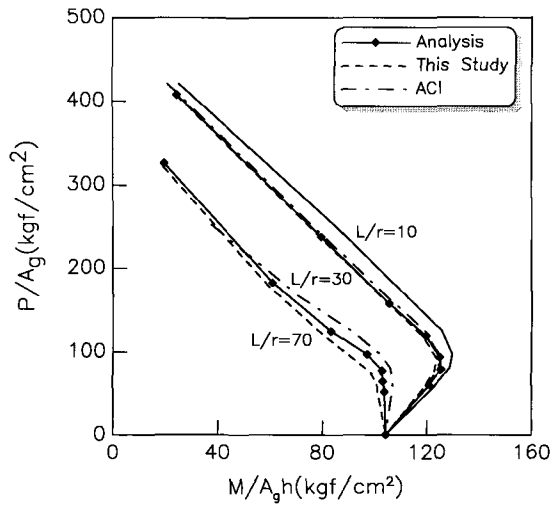


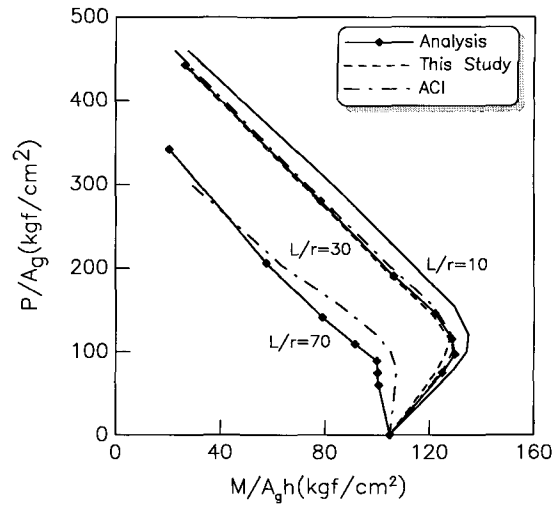
그림 7 제안식의 비교(continue)

서 정의된 강도저감계수는 편심을 제외한 다른 설계 변수들에 대해서는 2차 다항식 형태로 표현하였을 때 효과적으로 저항력 감소를 묘사할 수 있는 것을 알 수 있었으며 이를 토대로 강도저감계수의 회귀분석 관계식을 제안하였다. 따라서 철근콘크리트 장주의 설계시 제안된 관계식을 토대로 초기 단면을 설정한 후 정밀한 해석을 통해 RC 기둥의 저항력을 결정한다면 보다 효율적인 설계가 될 것으로 판단된다. 한편, ACI 설계

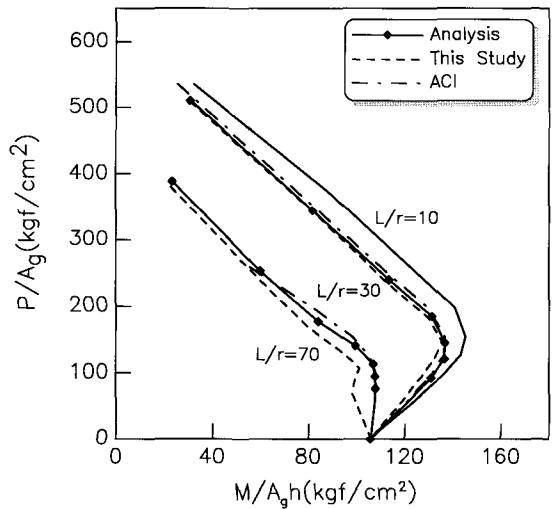
기준은 여러 한정된 조건 하에 탄성좌굴식을 토대로 구성된 관계로 RC 기둥의 저항력을 산정함에 있어 콘크리트 강도, 철근비, 세장비, 편심 등의 영향을 효과적으로 고려하지 못하고 있으며, 세장비가 큰 RC 기둥의 저항력을 과소 또는 과대 평가하는 정도가 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 세장비가 큰 RC 기둥의 설계에 적용하는 데에는 한계가 있다.



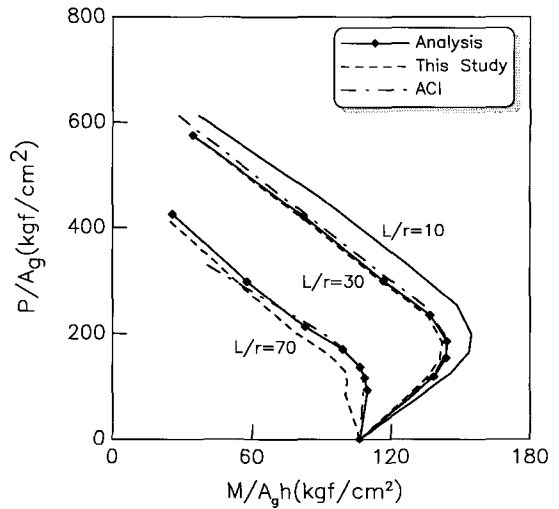
(e)  $f_{ck} = 250 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\rho = 0.06$



(f)  $f_{ck} = 300 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\rho = 0.06$



(g)  $f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\rho = 0.06$



(h)  $f_{ck} = 500 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $\rho = 0.06$

그림 7 제안식의 비교(continue)

참고 문헌

1. Bazant, Z. P., Xiang Y., "Inelastic Buckling of Concrete Column in Braced Frame", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 5, 1997, pp.634~642
2. Kim, J. K., Lee, S. S., "The Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Force and Biaxial Bending", *Engineering Structures*, Vol. 23, 2000, pp.1518~1528

3. Kim, J. K., Yang, J. K., "Buckling behaviour of slender high-strength concrete columns", *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 1, 1995, pp.39~51
4. Yalcin, C., Saatcioglu, M., "Inelastic analysis of reinforced concrete columns", *Computers & Structures*, Vol. 77, No. 5, 2000, pp.539~555
5. Bazant, Z. P., Cedolin, L., Tabbara, M. R., "New Method of Analysis for Slender Columns", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 4, 1991,

- pp.391~401
6. 박효경, 김진국, “철근콘크리트 장주의 극한저항력”, 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 3-A호, 2001, pp.413~424
  7. Mirza, S. A., “Flexural Stiffness of Rectangular Reinforced Concrete Columns”, *ACI Structural Journal*, ACI, Vol. 87, No. 4, 1990, pp.425~435
  8. Scott, B. D., Park, R., Priestley, M. J. N., “Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates”, *ACI*, Vol. 79, No. 1, 1982, pp.13~27
  9. Bazant, Z. P., Oh, B. H., “Deformation of Progressively Cracking Reinforced Concrete Beams”, *ACI*, Vol. 81, No. 3, 1984, pp.268~278
  10. Kwak, H. G., Filippou, F. C., *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads*, Report No. UCB/SEMM-90/14, Univ. of California, Berkeley, 1990
  11. Tanner, J. A., *An Experimental Determination of Bond Slip in Reinforced Concrete*, M. S. Thesis, Cornell Univ., Ithaca, N. Y. November, 1971
  12. Kwak, H. G., Seo, Y. J., “Long-term Behavior of Composite Girder Bridge”, *Computers & Structures*, Vol. 74, No. 5, 2000, pp.583~599
  13. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*(ACI 318-99), American Concrete Institute, Detroit, 1999
  14. Bazant, Z. P., Cedolin, L., *Stability of Structures*, Oxford, Oxford, 1991
  15. Mirza, S. A., Lee, P. M., Morgan, D. L., “ACI Stability Resistance Factor for RC Columns”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 9, 1987, pp.1963~1976