

## 횡방향철근 구속효과를 고려한 철근콘크리트 기둥의 축력-모멘트 상관도

### PM Interaction Diagram of RC Columns considering Confinement Effect of Transverse Steels

손혁수\*

양병홍\*\*

윤철균\*\*\*

이재훈\*\*\*\*

Son, Hyeok-Soo Yang, Byung-Hong Yoon, Cheol-Kyun Lee, Jae-Hoon

#### ABSTRACT

The flexural strength and ductility capacity of reinforced concrete columns are largely dependent on the amount of transverse steel. However, current design code does not specify the confinement effect of transverse steels in strength calculation. A non-linear moment-curvature analysis of RC column sections was conducted in order to develop PM interaction diagram considering transverse reinforcement effects. In this paper, a more reasonable application method of PM interaction diagram considering transverse steel amounts is introduced and proposed, based on moment-curvature non-linear analysis. Also, we proposed simplified method to use easily in practical design.

#### 1. 서론

철근콘크리트 기둥은 축력과 휨의 합성작용에 저항하는 구조요소로서 콘크리트 압축강도, 철근 항복강도, 축방향철근량, 횡방향철근량, 축력 등에 의해 거동이 달라진다. 즉, 철근콘크리트 기둥은 이와 같은 다양한 변수들에 의해 강도 및 연성능력이 좌우되므로 기둥의 강도해석시 이러한 변수들의 영향을 충분히 고려하여야 한다.

특히 철근콘크리트 기둥의 내진설계에서는 횡방향철근량 및 상세에 따라 기둥의 강도 및 연성능력이 좌우되므로 강도계산시 횡방향철근의 구속효과에 의한 영향을 고려하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 현행 국내의 콘크리트 구조설계기준과 도로교설계기준을 비롯하여 ACI 318 등 외국의 설계기준에서는 횡방향철근의 종류에 따라 강도감소계수를 다르게 적용하여 설계강도를 산정하고 있으나 횡방향철근량에 따른 강도의 변화는 고려하지 않고 있다.

물론, 내진설계에 있어서도 현행 설계기준에서 규정하고 있는 강도해석 방법을 사용하는 경우 지진하중에 대한 강도검토의 목적에서는 안전측인 결과를 제공하지만, 성능설계(capacity design)

\* 정회원, 서영기술단 구조설계실/구조2팀, 과장, 공학박사

\*\* 서영기술단 구조설계실/구조3팀, 부장

\*\*\* 서영기술단 구조설계실/구조2팀, 상무

\*\*\*\* 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

에 따른 설계지진력 산정의 관점에서는 오히려 비안전측인 설계결과를 제공할 수도 있다. 또한, 구조해석 프로그램의 지속적인 발전, 재료의 품질향상, 설계기술 및 시공기술의 발전을 감안하는 경우 강도점토의 차원에서 안전측인 설계만을 고수하기 보다는 부재의 실제 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 방법이 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 횡방향철근의 구속효과를 고려한 철근콘크리트 기둥의 강도해석 방법을 제안하고 제안방법에 따른 강도해석 결과와 현행 설계기준에서 규정하고 있는 방법에 의한 강도 해석결과를 비교, 분석하였다.

## 2. 철근콘크리트 기둥의 강도해석에 관한 설계기준

표 1은 철근콘크리트 기둥의 강도해석에 관한 설계기준을 비교하여 나타낸 것으로서 기둥 강도 해석의 기본적인 개념(평형조건과 변형률의 적합조건)은 동일하지만, 콘크리트 및 철근의 설계강도, 콘크리트 압축연단의 최대변형률, 직사각형 응력블럭 깊이변수 및 설계강도(design strength) 산정을 위한 강도감소계수는 설계기준별로 다소 차이를 나타내고 있다.

표 1 철근콘크리트 기둥의 강도해석에 관한 설계기준 비교

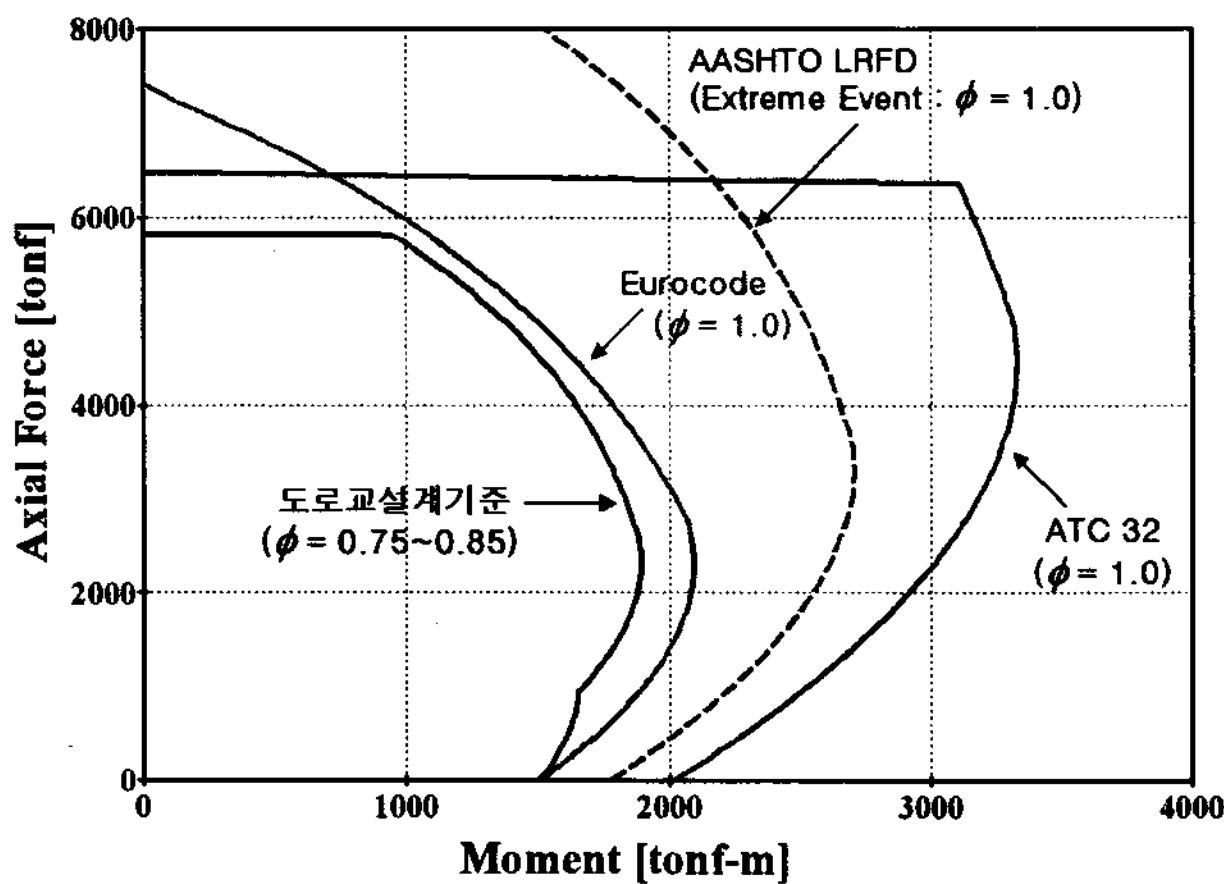
	도로교 설계기준 (ACI 318-02)	AASHTO LRFD	ATC 32		Eurocode 2 & 8
			상시하중	지진하중	
콘크리트 설계강도 <sup>1)</sup>	$f_{ck}$	$f_{ck}$	$f_{ck}$	$1.3f_{ck}$	$\frac{f_{ck}}{1.5}$
철근 설계강도 <sup>2)</sup>	$f_y$	$f_y$	$f_y$	$1.1f_y$	$\frac{f_y}{1.15}$
콘크리트 극한변형률	0.003	0.003	0.003	0.004	0.0035
응력블럭 깊이계수 <sup>3)</sup>	0.85~0.65	0.85~0.65	0.85~0.65	0.85~0.65	0.80
강도감소 계수 <sup>4)</sup>	· 띠철근: 0.70 · 나선근: 0.75 · 보: 0.85	· 띠철근: 0.75 · 나선근: 0.75 · 보: 0.90	· 원형철근: 0.75 · 사각철근: 0.75 · 보: 0.90	1.0	1.0
횡방향철근의 구속효과	언급 없음	참조 1	참조 2		참조 3
비 고	AASHTO Standard와 근본적으로 동일	지진하중에 대한 강도감소계수는 1.0 사용	· 지진하중에 대해서는 재료의 실제 예상강도 등을 고려하여 보다 합리적인 설계기준 제안.		· 재료안전계수 사용 · 비구속콘크리트와 구속콘크리트의 응력-변형률 관계 제시

1)  $f_{ck}$  : 원주형 공시체의 28일 압축강도를 기준으로 한 콘크리트 설계기준강도.  
 2)  $f_y$  : 철근 항복강도, 철근의 응력-변형률 관계는 탄성-소성의 bi-linear 모델 사용.  
 3) 콘크리트 응력-변형률 관계는 어떤 형상으로든지 가정할 수 있으나, 일반적으로 등가직사각형 응력분포를 사용.  
 4) ACI 318-02의 강도감소계수는 철근의 순인장변형률을 기준으로 압축지배영역과 인장지배영역으로 구분하여 적용.

▶ 참조 1 : 구속콘크리트의 경우 0.003 이상의 콘크리트 극한변형률 사용 가능. 그러나, 구체적인 방법론에 대해서는 규정하고 있지 않음.  
 ▶ 참조 2 : Ductile column의 경우 콘크리트의 구속효과를 고려한 응력-변형률 곡선과 철근의 변형경화를 고려한 모멘트-곡률 해석을 통해 단면강도를 결정할 수 있다.  
 ▶ 참조 3 : 구속콘크리트의 단면강도 해석을 위한 콘크리트 응력-변형률 모델을 제시하고 있으므로, 횡방향철근의 구속효과를 고려한 단면강도 해석이 가능하다.

표 1에 나타낸 것과 같이 도로교설계기준, ACI 318-02 및 AASHTO Standard 설계기준의 경우에는 횡방향철근의 구속효과를 고려한 강도해석에 대해서는 특별한 언급이 없는 상태이다. AASHTO LRFD 설계기준에서는 콘크리트가 구속되어 있는 경우 0.003 이상의 콘크리트 압축연단 변형률을 사용할 수 있도록 언급하고 있으나 구체적인 기준은 제시하고 있지 않은 상태이다. ATC-32의 경우에는 상시하중과 지진하중에 대한 단면강도 해석을 구분하여 지진하중에 대해서는 재료의 예상강도 사용, 구속콘크리트 모델 및 철근의 변형경화를 고려한 모멘트-곡률 해석에 대해서 언급하고 있으며 특히, Eurocode의 경우에는 횡방향철근의 구속효과를 고려한 구속콘크리트의 응력-변형률 관계를 설계기준에 구체적으로 제시하고 있다.

그림 1은 설계기준별 철근콘크리트 기둥의 강도해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.



- 원형단면 : 지름 2.0m
- 콘크리트강도 : 300kgf/cm<sup>2</sup>
- 철근항복강도 : 4,000kgf/cm<sup>2</sup>
- 축방향철근비 : 0.02 (2%)
- 횡방향철근 : 나선철근
- ATC 32 : 지진하중( $\phi=1.0$ )
- AASHTO LRFD : 지진하중( $\phi=1.0$ )
- Eurocode : 직사각형 응력블럭 사용 ( $\phi=1.0$ )

그림 1 설계기준별 철근콘크리트 기둥의 강도해석 결과 비교 - 설계강도

### 3. 횡방향철근의 구속효과를 고려한 강도해석

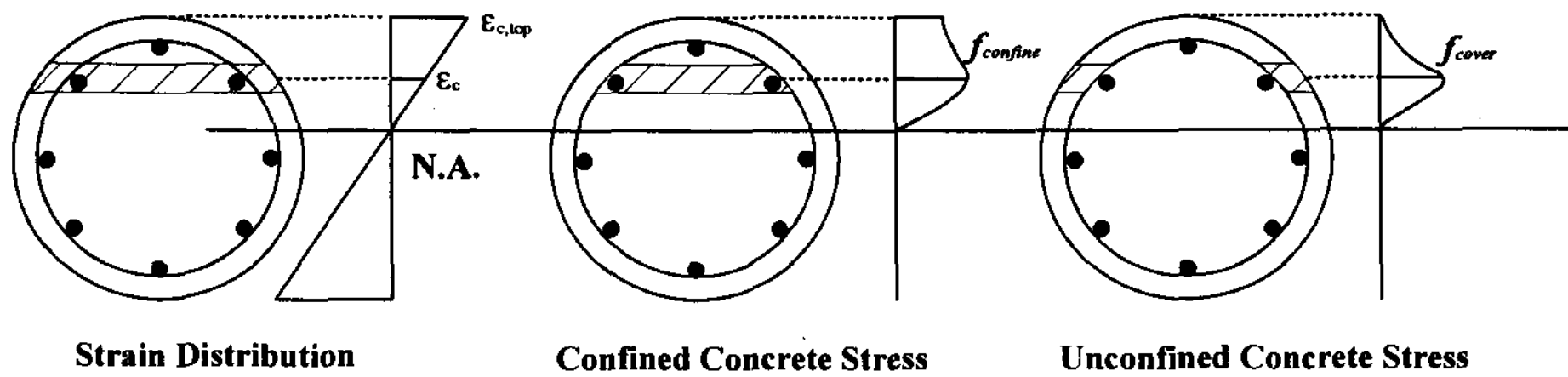
철근콘크리트 기둥은 철근과 콘크리트의 재료적인 비선형성 및 구조물의 특성에 따른 기하적인 비선형성으로 인하여 비선형 거동을 보이게 되며, 철근콘크리트 기둥 단면의 비선형 거동은 모멘트-곡률 곡선으로 나타낼 수가 있다. 즉, 횡방향철근의 구속효과에 의한 철근콘크리트 기둥의 강도증가 및 연성능력은 기둥 단면의 모멘트-곡률 해석을 통해서 구할 수 있다.

#### 3.1 모멘트-곡률 비선형해석

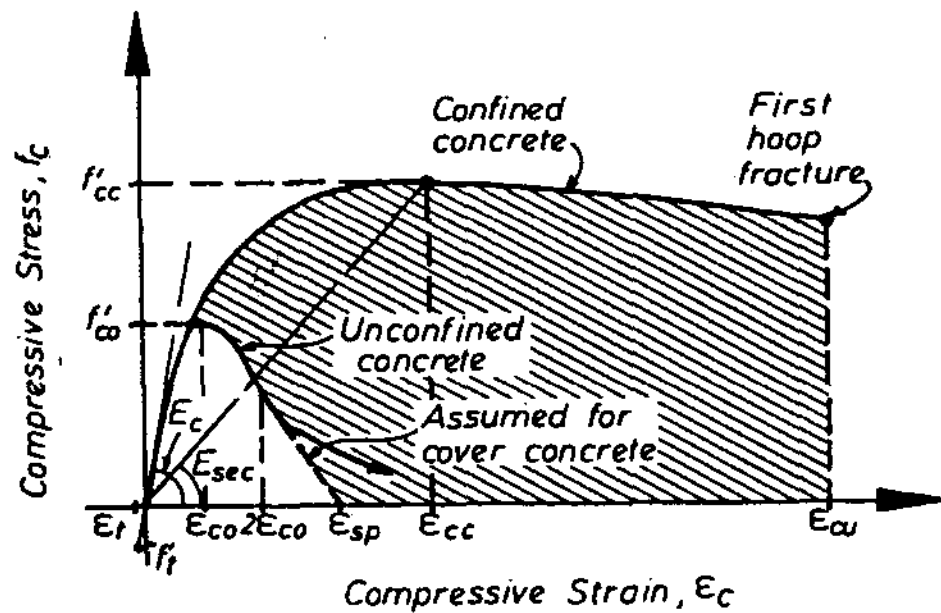
모멘트-곡률 해석은 해석에 사용되는 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 모델에 따라 그 해석결과가 달라질 수 있으므로 재료모델의 선정에 주의를 기울여야 한다. 즉, 철근콘크리트 부재의 비선형해석시 해석대상 구조물의 직접적인 실험결과를 바탕으로 재료의 비선형성을 정확하게 고려한 모델을 사용하는 것이 가장 이상적이고 중요하지만 이러한 방법은 현실적으로 불가능하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 응력-변형률 모델로서 원형단면 및 사각형단면 모두에 사용할 수 있고 현재 가장 널리 사용되는 Mander 등이 제안한 모델을 적용하였으며 철근의

경우에는 철근 인장실험 결과와 비교적 잘 일치하는 Shima 등이 제안한 철근모형을 사용하여 모멘트-곡률 해석을 수행하였다.

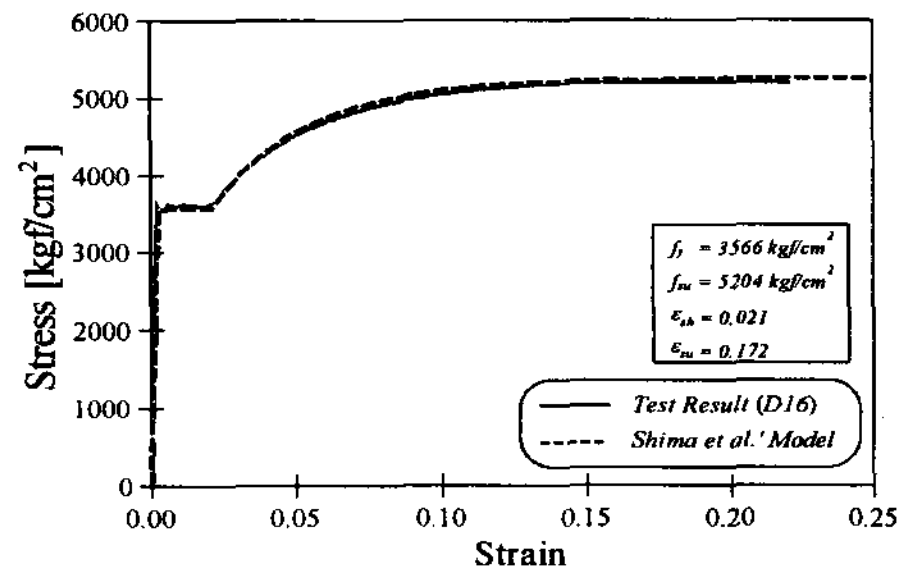
- ① 커버콘크리트와 심부콘크리트의 모델을 각각 적용 (그림 2(a))
- ② 커버(cover)콘크리트 : Mander 등의 비구속(unconfined)콘크리트 모델 (그림 2(b))
- ③ 심부(core)콘크리트 : Mander 등의 구속(confined)콘크리트 모델 (그림 2(b))
- ④ 철근 : bi-linear 모델 또는 철근의 변형경화를 고려한 모델  
 (철근의 변형경화를 고려하는 경우에는 철근 인장실험 결과와 비교적 잘 일치하는 Shima 등이 제안한 철근모형을 사용, 그림 2(c))



(a) 커버콘크리트와 심부콘크리트의 콘크리트 응력분포



(b) 콘크리트 모델



(c) 철근 모델 (변형경화를 고려하는 경우)

그림 2 모멘트-곡률 해석에 사용된 재료모델

### 3.2 모멘트-곡률 비선형해석 결과를 이용한 PM 상관도 구성

횡방향철근의 구속효과에 의한 철근콘크리트 기둥의 강도증가 및 연성능력은 3.1에 설명한 기둥 단면의 모멘트-곡률 해석을 통해서 구할 수 있다. 즉, 그림 3과 같이 일정한 축력에 대해 모멘트-곡률 해석을 수행하여 해석결과의 최대모멘트를 단면의 휨강도로 산정하였으며, 각 축력에 대한 모멘트-곡률 해석결과를 조합하여 축력-모멘트 상관도를 구성하는 방법을 적용하였다.

- ① 일정한 축력에 대해 기둥 단면의 모멘트-곡률 비선형해석 수행.
- ② 모멘트-곡률 해석결과에서 최대모멘트를 계산.
- ③ 축력을 변화시키면서 ①~②의 과정을 반복 수행.
- ④ ③의 모멘트-곡률 해석결과를 조합하여 축력-모멘트 상관도 구성.

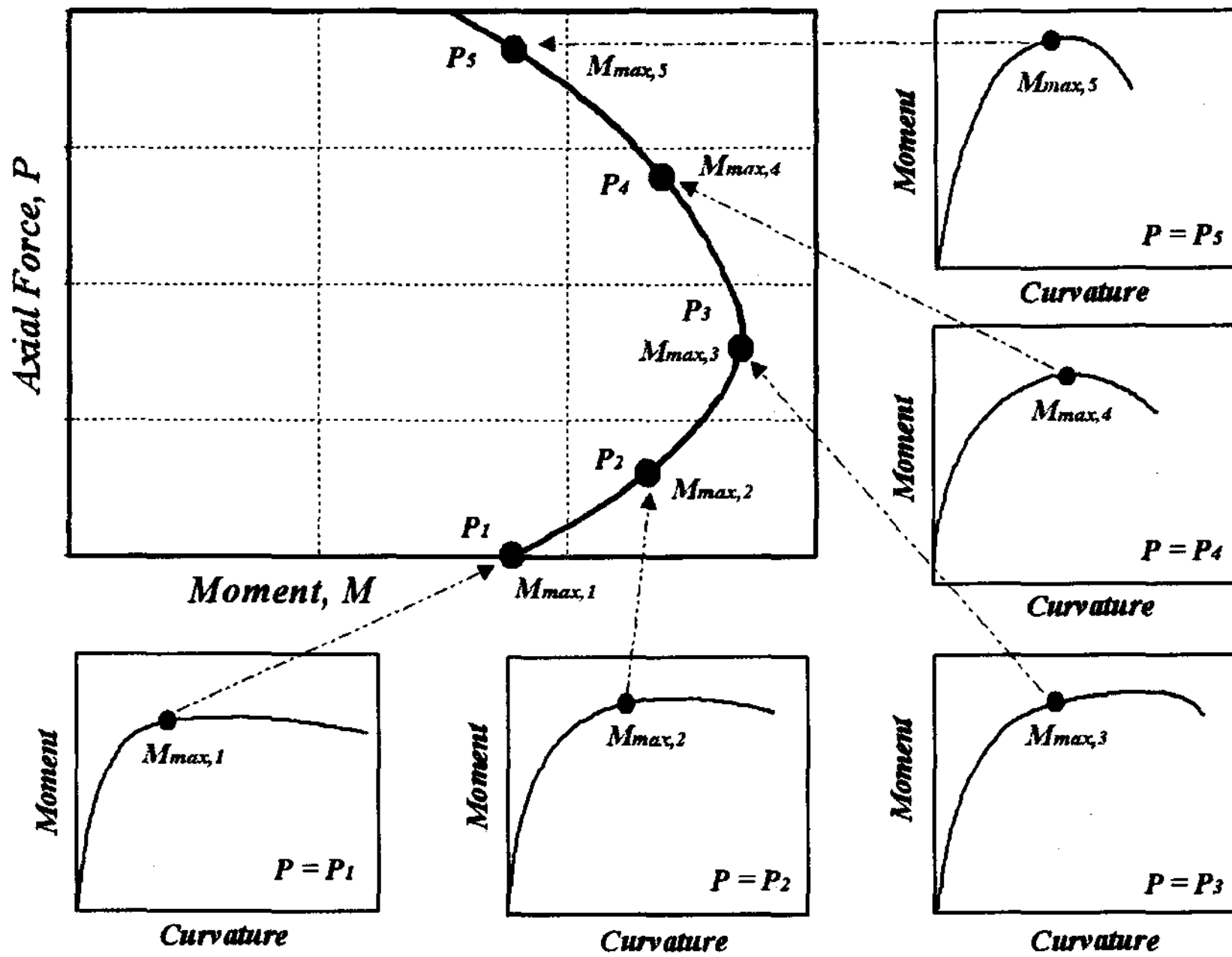


그림 3 모멘트-곡률 비선형 해석결과를 이용한 PM 상관도 구성

즉, 그림 3에 나타낸 것과 같이 직사각형 응력블럭을 사용한 일반적인 강도해석보다 복잡한 비선형해석을 반복해서 수행해야 하는 번거로움이 있지만 횡방향철근량에 따른 콘크리트의 구속효과를 고려함으로써 기둥의 단면강도 해석을 합리적으로 수행할 수 있고 보다 경제적인 설계결과를 제공할 수 있을 것이다. 물론 이러한 해석을 설계자가 수계산으로 수행하기에는 상당한 시간과 노력이 필요하게 되므로 본 연구에서는 모멘트-곡률 비선형해석 결과를 이용한 PM 상관도 해석 프로그램인 [PMCON]을 개발하였다.

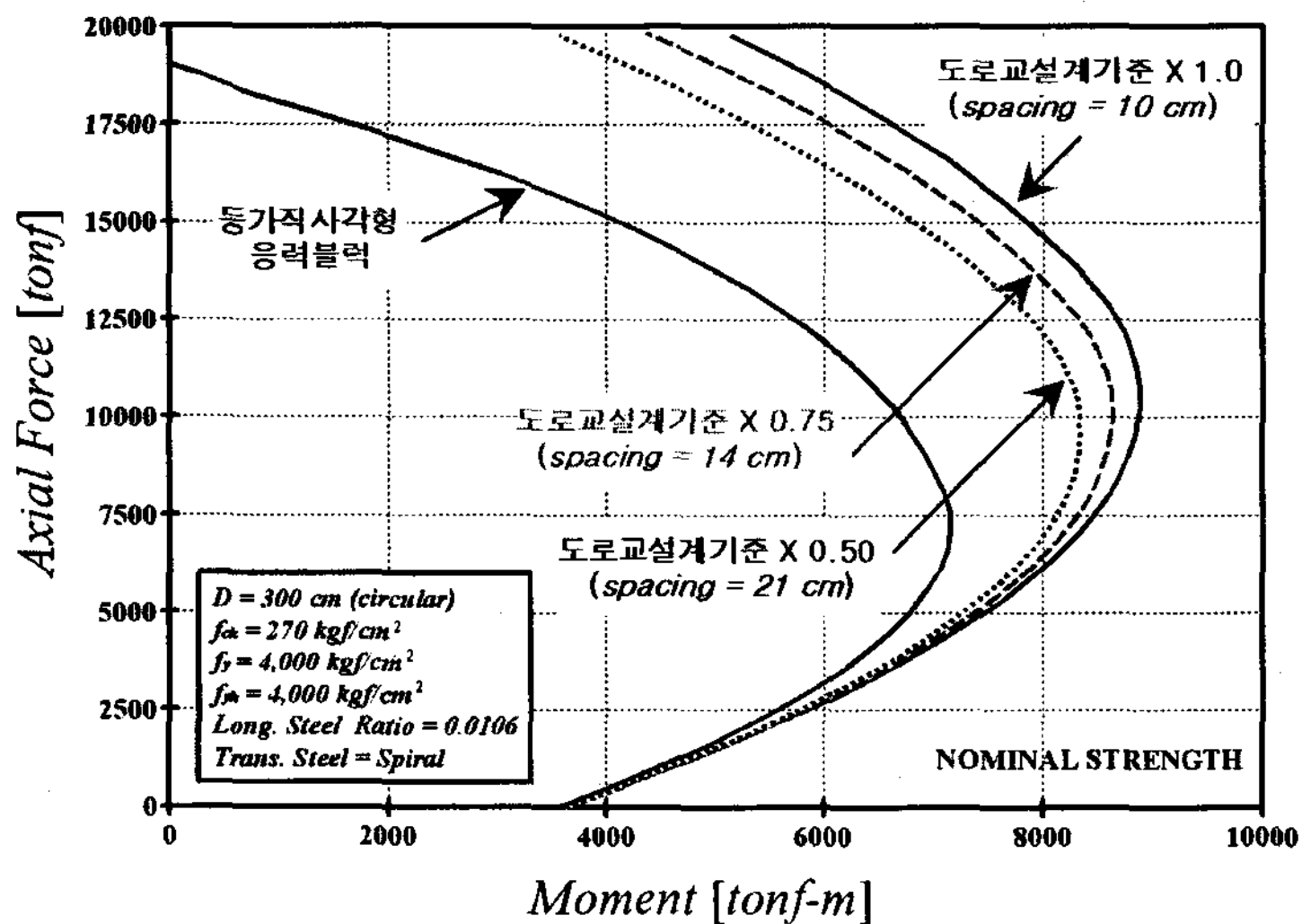


그림 4 모멘트-곡률 비선형 해석결과를 이용한 PM 상관도 해석결과 비교

그림 4는 직경 300cm의 원형 나선철근 기둥에 대해 [PMCON]을 사용한 해석결과를 나타낸 것으로서 등가직사각형 응력블럭을 사용한 해석결과와 비교할 때 횡방향철근의 구속효과에 의해 단면강도가 증가하는 것을 나타내고 있다. 또한, 횡방향철근량이 증가할수록 단면강도가 증가하는 경향을 나타내며 축력이 클수록 횡방향철근 구속효과에 의한 강도증진 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

### 3.3 횡방향철근 구속효과를 고려한 PM 상관도 - 간편해석법

횡방향철근의 구속효과를 고려한 PM 상관도 해석을 위해서는 전술한바와 같이 직사각형 응력블럭을 사용한 일반적인 강도해석보다 복잡한 비선형해석을 반복해서 수행해야 하는 번거로움이 있다. 따라서, 실무에서 보다 간편하게 횡방향철근의 구속효과를 고려한 기둥의 단면강도 해석을 위해 다음과 같은 간편해석법을 사용하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 즉, 간편해석법은 횡방향철근량에 따른 콘크리트 강도 증가량을 계산하여 등가직사각형 응력블럭을 사용하는 일반적인 해석방법을 그대로 적용(콘크리트 설계기준 강도를 증가시켜서 해석하는 방법)하는 것으로서,

- ① 기둥 단면의 횡방향철근량 계산.
- ② Mander 등이 제안한 구속콘크리트 모델(그림 2(b))의 구성방정식 식(1)을 이용하여 구속콘크리트 강도 계산.

$$f_{cc}' = f_{co}' \left( 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_i'}{f_{co}'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co}'} - 1.254 \right) \quad (1)$$

- ③ 콘크리트 설계기준 강도 대신 ②에서 계산된 구속콘크리트 강도를 이용하여 기둥 강도해석 수행.

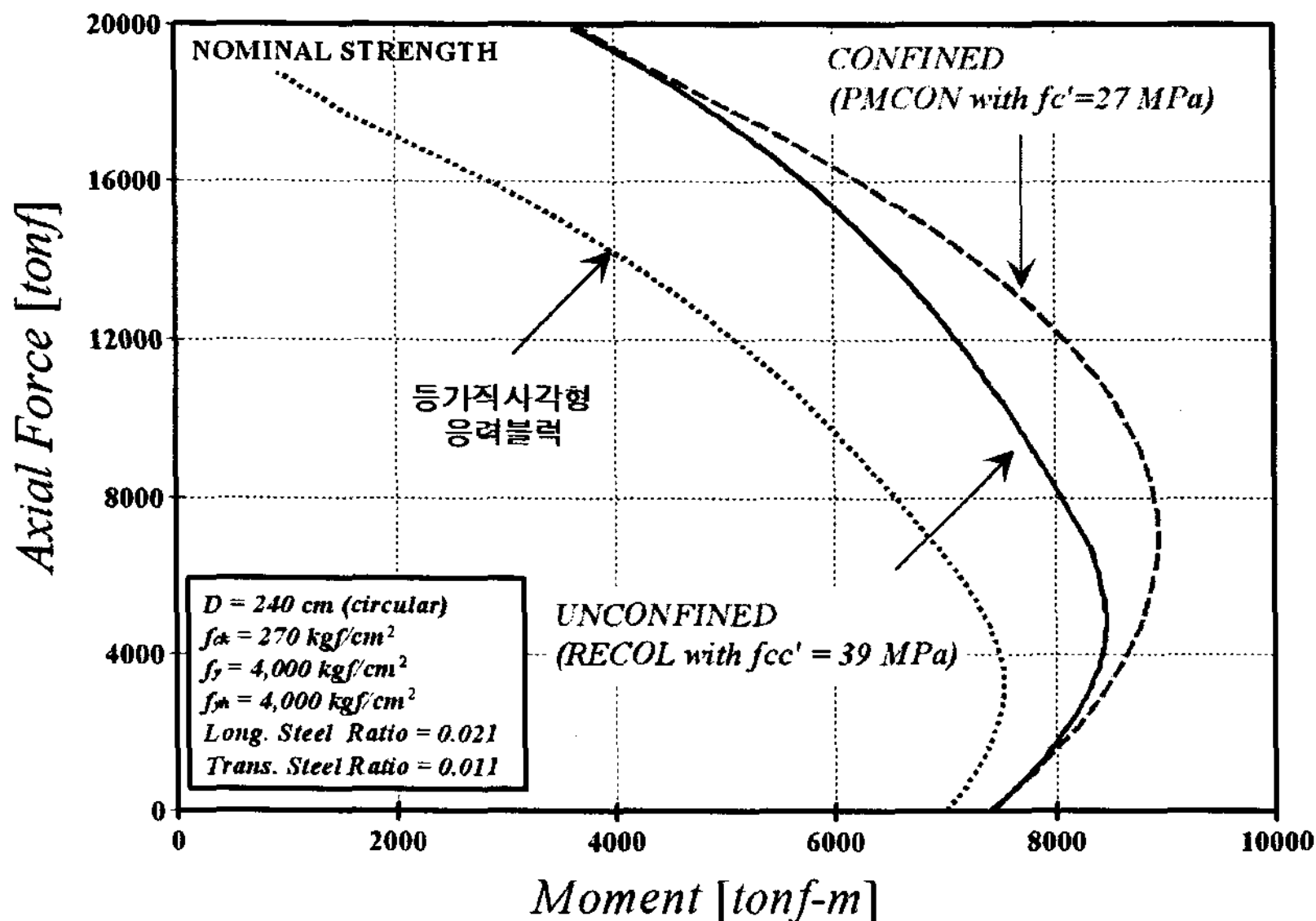


그림 5 PM 상관도 해석결과 비교 - 간편해석법

이러한 간편해석법은 정확한 해석결과라고 볼 수는 없지만 기존에 사용하고 있는 기둥강도 해석 프로그램(예를들어, RECOL, PCACOL 등)을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 그림 5에 나타낸 것과 같이 일반적인 직사각형 응력블럭을 사용한 해석과 비교할 때 횡방향철근의 구속효과를 고려할 수 있으므로 합리적이며, 모멘트-곡률 비선형해석 결과를 이용한 해석결과보다 전반적으로 작은 값을 나타내므로 안전측인 해석결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 기둥의 단면강도 해석에 관한 각국의 설계기준을 비교, 분석하고 횡방향철근의 구속효과를 고려한 단면강도 해석법의 소개 및 방법론을 제안하였으며 실무 설계에서 적용할 수 있는 간편해석법을 제안하였다. 특히 내진설계된 철근콘크리트 기둥의 단면강도 해석시 본 연구에서 제안한 횡방향철근의 구속효과를 고려한 단면강도 해석법을 적용하는 경우 보다 합리적이며 경제적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 내진성능평가(공칭강도를 기준으로 항복상태를 정의하는 경우)를 위한 공칭강도(nominal strength)의 산정 및 초과강도(overstrength) 산정시 합리적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
2. 손혁수, "심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구", 박사학위논문, 영남대학교, 2002년 6월.
3. 손혁수, 이재훈, "철근콘크리트 교각의 연성도 평가를 위한 비선형해석", 한국지진공학회논문집, 제7권, 제4호, 2003년 8월, pp. 39 - 49.
4. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 16-th edition, Washington, D.C., USA, 1995.
5. AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2nd edition, Washington, D.C., USA, 1998.
6. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, ACI 318-02, ACI 318R-02, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
7. ATC-32, *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, Applied Technology Council, California, USA, 1996.
8. Eurocode 8 Part 2, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures - Bridges*, European Committee for Standardization, 1996.
9. Mander, J. B., Priestley M. J. N. and Park R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1804-1826.
10. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., "Micro and Macro Models for Bond behavior in Reinforced Concrete," *Journal of the Engineering, University of Tokyo(B)*, Vol. 39, No. 2, 1987, pp. 133~194.