



## 스틸재킷 보강 철근콘크리트 기둥의 변위기반 내진 성능 개선 설계 방법

정인규<sup>1)</sup> · 박문호<sup>2)</sup> · 조창근<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>안동과학대학 건설정보과 <sup>2)</sup>경북대학교 건축토목공학부 <sup>3)</sup>조선대학교 건축학부

## Seismic Performance Improved Design of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Steel Jackets Using Displacement-based Design

In-Kju Jung,<sup>1)</sup> Moon-Ho Park,<sup>2)</sup> and Chang-Geun Cho<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Construction Information, Andong Sci. and Col., Andong 760-709, Korea

<sup>2)</sup>School of Arch. & Civil Eng., Kyungpook Natl. Univ., Daegu 702-842 Korea

<sup>3)</sup>School of Architecture, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**ABSTRACT** In this study, a procedure of performance-based design for the seismic retrofit of reinforced concrete columns strengthened by steel jackets has been presented. In order to predict the target displacement of retrofitted columns, a nonlinear analysis of reinforced concrete columns retrofitted with steel jackets has been developed based on a segmental model with the fiber cross-sectional approach. The seismic displacement level of retrofitted columns is estimated both by the direct displacement-based design method and by the displacement coefficient method. In examples of seismic retrofitted columns, the current seismic retrofit procedure gives good results in improvements of displacement levels and displacement ductilities of retrofitted columns.

**Keywords** : steel jacket, displacement-based design, seismic retrofit, reinforced concrete column

### 1. 서 론

21세기에 들어 인도네시아 및 중국에서의 강진에 의한 지진 및 피해가 증가하고, 강진의 피해는 성능 기반 내진설계 및 구조 성능 개선에 관심을 고조시킨다.

최근 구조물에 관한 내진설계 시, 기존의 강도설계 개념보다 성능설계 개념의 필요성이 크게 부각되게 되었으며, 구조물이 충분한 강도를 가지면서 적절한 변형 능력과 에너지 소산 능력을 갖도록 설계한다. 중간규모 이하의 지진에서는 구조물이 손상을 입지 않는 탄성거동 하에서, 큰 규모의 지진에 대해서는 일부 손상을 입더라도 붕괴가 유발되지 않도록 하는 내진설계 개념으로 변하는 추세이다. 성능에 기초한 설계는 예상되는 지진하중에 대하여 구조물이 허용할 수 있는 적절한 피해정도 및 성능치를 미리 설정하고 이를 달성할 수 있도록 구조물을 설계하는 방법이다. 이 방법으로는 주로 변위를 구조물의 성능값으로 고려하는 변위-기반 설계법(displacement-based design method)이 주로 알려져 있다. 변위에 기초한 설계법 중 빌딩 구조물에 비교적 효율적으로 적용이 가능한 방법들은 역량 스펙트럼, 변위계수법, 및 직접 변

위기반설계법 등이 있다.

변위-기반설계법으로서 비탄성 정적 해석을 이용한 대표적인 내진 성능 평가 및 설계 방법으로는 역량스펙트럼방법(capacity spectrum method, CSM)과 변위계수법(displacement coefficient method, DCM)이 있다.<sup>1-3)</sup> 역량스펙트럼은 Freeman<sup>4)</sup>이 제안한 방법으로 요구 및 역량스펙트럼을 작성하여 건축물의 목표 변위 성능을 산정하는 방법으로 북미의 ATC-40<sup>1)</sup>에서 채택하고 있다. 변위계수법은 미연방재난관리국에서 빌딩구조물 내진 성능설계를 위해 제안한 방법으로서, FEMA-273<sup>2)</sup>에 의하면 구조물의 탄성 변위 응답에 수정계수들을 곱하여 비탄성 응답 변위를 산정하는 방법이다. 직접 변위-기반설계법(direct displacement-based design method, DDM)은 Kowalsky 등<sup>5)</sup>이 제안한 방법으로 성능 목표에 따라 설정된 설계 목표변위를 비탄성 변위응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 성능 목표를 효과적으로 만족시키는 설계 방법이다. 이 방법은 Qiang Xue<sup>6)</sup>에 의해 비탄성 구조물에 대한 직접변위설계에 적용되었고, Lin 등<sup>7)</sup>이 직접 변위-기반설계법을 이용 빌딩건축물의 수동감쇠장치 설계에 적용하였다. Chopra와 Goel<sup>8)</sup>은 변위 연성도를 적용한 비탄성 스펙트럼을 이용하여 직접 변위기반설계법을 제안하였는데, 이로 인해 구조물의 비탄성 거동과 최대 변위를 보다 정확히 예측가능하게 하였다.

국내에서 과거에 지어진 철근콘크리트 건축물의 경우

\*Corresponding author E-mail : chocg@chosun.ac.kr

Received May 25, 2009, Revised August 7, 2009,

Accepted November 24, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

내진 설계에 대한 기준이 미비하거나 낮은 기준에서 설계된 경우가 많은 실정이고, 성능 설계 이전에 지어진 건축물의 경우에는 구조물이 가진 정확한 성능을 평가하기가 힘들다. 하지만 기존 구조물에 대한 내진 성능 향상을 위해서는 예상되는 지진에 대해 구조물이 가진 성능을 평가하고 이에 따른 성능 개선이 필요하다. 철근콘크리트 구조물에 대한 내진 보강 방법으로는 Chai<sup>9)</sup>와 Chai 등<sup>10)</sup>이 강관 피복에 의한 콘크리트 기둥의 내진 보강, Lin 등<sup>7)</sup>의 에너지 소산형 수동감쇠기 적용, 조창근<sup>11,12)</sup> 및 조창근 등<sup>13)</sup>은 FRP 보강에 의한 철근콘크리트 기둥의 내진 성능 설계에 관해서 연구하였다. 한편 이승조 등<sup>14)</sup>은 고강도 콘크리트 충전 강관 기둥의 내력 특성에 관해서 검토하였으며, 김성남 등<sup>15)</sup>은 내부구속 강관 충전 기둥에 대한 내진 성능 평가에 관해서 연구를 수행하였다.

이 연구는 성능설계방법에 의해 기존 철근콘크리트 기둥에 대하여 내진 성능을 개선하고자 스틸재킷(steel jacket)에 의한 철근콘크리트 기둥의 변위-기반 내진 성능 개선 설계 방법을 제시하는데 목적이 있다. 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 설계 변위 추정을 위해 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 부재의 비선형 층상화 셰그먼트 해석 모델을 제시하고, 성능 기반 설계에 의한 성능 개선 설계를 위하여 목표 성능 변위 및 설계 지진 가속도 조건에 대해 직접 변위-기반설계방법 및 변위계수법에 의한 내진 성능 개선 설계 방법을 제시하였다.

## 2. 직접 변위-기반설계법에 의한 성능 개선 설계

스틸재킷으로 보강된 철근콘크리트 기둥부재의 내진 성능 개선을 위해 Chopra 등<sup>8)</sup>이 소개한 비탄성 스펙트럼에 의한 직접변위기반 설계법의 기본 개념을 개선한 스틸재킷 보강의 내진 성능 개선 설계 방법을 제시하였다.

직접 변위-기반설계법의 적용을 위해 이 연구에서는 Newmark 등<sup>16)</sup>이 제안한 탄성 설계 스펙트럼에 대하여 연성비  $\mu$ 로부터 산정되는 식 (1)의 항복강도감소계수  $R_y$ 에 의해 비탄성 설계스펙트럼을 적용하였다. 이때 연성비에 따른 항복 감소 계수와 고유주기  $T_n$ 은 Fig. 1과 같고, 작성된 비탄성 변위 설계 스펙트럼은 Fig. 2와 같이 묘사되는데, 이를 이용 목표 변위에 대한 고유주기를 산정할 수 있다.

$$R_y = \begin{cases} 1 & T_n < T_a \\ \sqrt{2\mu - 1} & T_b < T_n < T_{c'} \\ \mu & T_n < T_c \end{cases} \quad (1)$$

비선형 단자유도시스템의 성능치 평가를 위하여, Fig. 3과 같이 비선형 해석에 의한 하중-변위 관계로부터 유효 등가 활선강성  $k_{sec}$ 을 산정할 수 있다. 여기서  $k$ 는 탄성 영역의 강성,  $\alpha k$ 는 항복영역의 강성,  $\alpha$ 는 항복 후 강성비,  $V_y$ 는 항복강도,  $\Delta_y$ 는 항복변위,  $\Delta_m$ 은 최대 변위로서

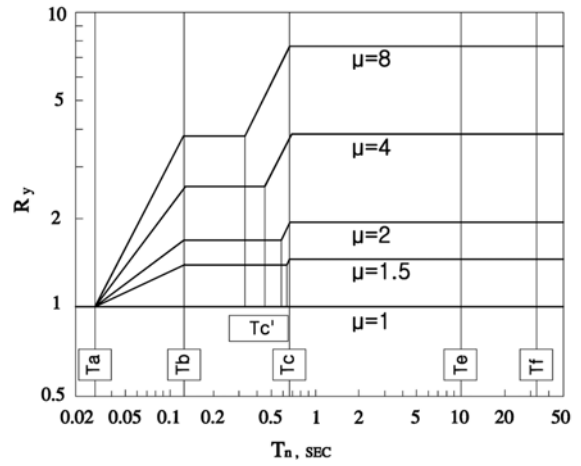


Fig. 1 Reduction factor for yielding strength

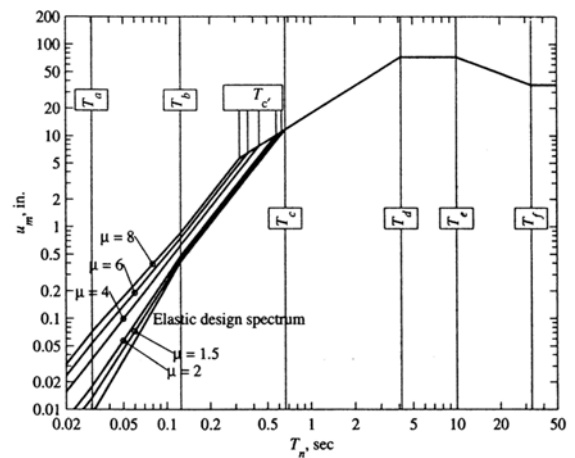


Fig. 2 Inelastic displacement spectrum

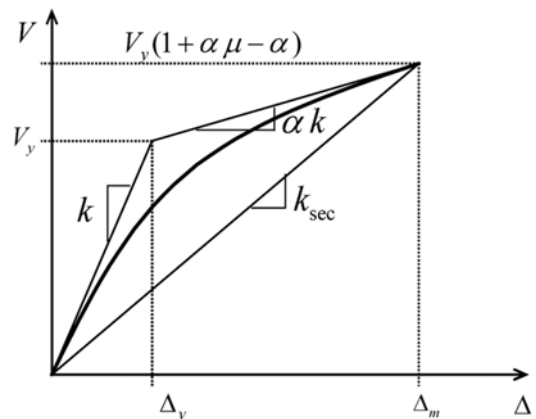


Fig. 3 Effective stiffness

최대강도  $V_y(1 + \alpha\mu - \alpha)$ 에 대응하고,  $\mu = \Delta_m / \Delta_y$ 는 변위 연성비가 된다. 이 경우 등가고유주기  $T_{eq}$ 는 선형 탄성일 경우 시스템의 고유주기  $T_n$ 으로부터 다음 식과 같이 고려한다.

$$T_{eq} = T_n \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (2)$$

등가유효감쇠비  $\zeta_{eq}$ 는 비탄성 시스템과 등가 선형시스템의 진동주기에서 에너지 소산을 고려하여, Fig. 4와 같이 Chopra 및 Goel<sup>8)</sup>이 제시한 다음 식을 사용하였다.

$$\zeta_{eq} = \frac{2(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\pi\mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} \quad (3)$$

따라서 등가 선형 시스템의 총 유효감쇠비는 선형 시스템의 유효감쇠비  $\xi$ 와  $\zeta_{eq}$ 의 합으로 다음 식과 같게 된다.

$$\overline{\zeta_{eq}} = \xi + \zeta_{eq} \quad (4)$$

### 3. 스틸재킷 보강 철근콘크리트 기둥의 비선형 층상화 세그먼트 해석 모델

스틸재킷 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 변위기반 내진성능개선 설계를 위해서는 비선형 휨 해석 모델이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 기둥 부재에 대한 비선형 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계 예측의 층상화 휨 해석 모델을 개발하였다.

압축력을 받는 구속 및 비구속 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Fig. 5와 같이 Mander 등<sup>17)</sup>의 콘크리트 구성 관계로 고려, 콘크리트의 응력은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$f_c = \frac{f'_{cc} xr}{r - 1 + x} \quad (5)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - \frac{2f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (6)$$

여기서  $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$ ,  $r = E_c / (E_c - E_{sec})$ ,  $f'_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대 압축강도로 식 (6)과 같이 정의되고,  $f'_c$ 는 비구속된 콘크리트의 최대 압축강도,  $f'_l$ 은 유효횡구속 응력으로 최대 유효횡구속력  $f_l$ 에 감소계수  $k_e$ 를 적용하여 산정한다. 또한,  $\epsilon$ 은 축 방향 변형률,  $\epsilon_{cc}$ 는 구속된 콘

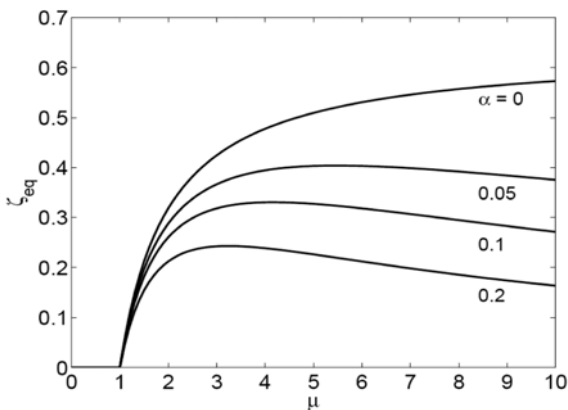


Fig. 4 Effective damping

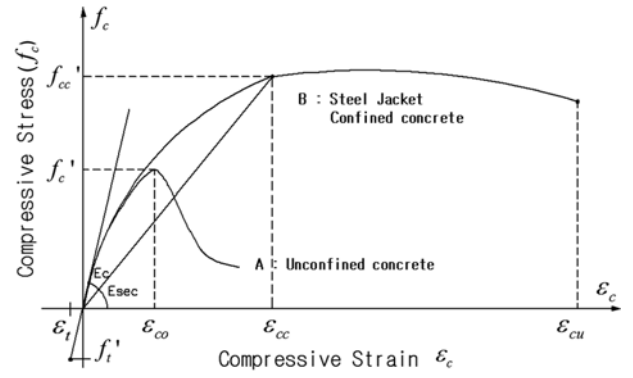


Fig. 5 Stress-strain curve of concrete

크리트가 최대강도를 발휘할 때의 변형률,  $E_c$ 는 비구속 콘크리트의 접선계수,  $\epsilon_{cc}$ 는 비 구속된 콘크리트의 최대강도에 해당하는 변형률  $\epsilon_c$ 의 함수로 정의된다.<sup>18)</sup>

재료의 비선형의 응력-변형률 관계를 정확히 고려하기 위해 Fig. 6과 같이 단면을 각 재료로 층상화 단면 분할하여 단면의 강재, 철근, 및 콘크리트 층에 대한 응력과 변형률을 계산한 후 이를 합하여 전체단면의 모멘트와 곡률의 관계를 산정하였다. 재료 비선형으로 인해 층상화 단면의 축력 및 모멘트-곡률 관계는 반복 수렴 계산 절차로 수행된다. 강재 및 철근의 경우 항복까지는 탄성 거동을 하다가 항복 이후 완전 소성 거동을 하는 것으로 가정하였다.

각 단면에 대한 층상화 해석 이후 부재 길이에 따른 기둥부재의 거동 해석을 위해 Fig. 6과 같이 길이방향으로 세그먼트 분할하여 수치적분에 의해 스틸재킷 보강 철근콘크리트 기둥부재의 비선형 하중-변위 관계 해석이 가능토록 하였다. 길이방향의 각 세그먼트의 거동은 휨 곡률과 각 세그먼트 끝단에서의 모멘트 및 축력에 의한 힘으로 표현되고, 따라서 기둥부재의 임의 세그먼트 길이  $\Delta x$ , 임의절점에서의 처짐각  $\theta_i$ , 길이방향 임의  $i$ 절점에서의 위치  $x_i$ 에서의 처짐  $\delta_i$ 는 휨곡률  $\phi(x)$ 로부터 다음과 같이 유도되며, 이는 수치적분에 의해 산정된다.

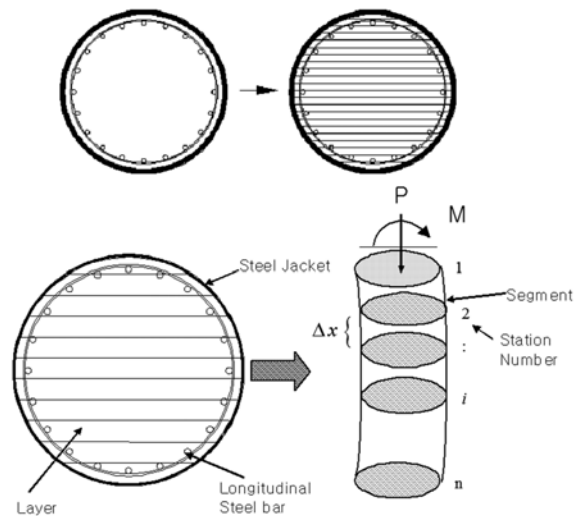


Fig. 6 Fiber segment model for jacketed RC columns

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \theta_{i-1} \Delta x - \int_{x_{i-1}}^{x_i} x \phi(x) dx \quad (7)$$

이상과 같이 스틸재킷 보강 철근콘크리트 기둥 부재의 비선형 층상화 및 세그먼트 해석 모델을 제시하였으며, 부재의 비선형 해석 알고리즘은 Fig. 7과 같다. 이 모델은 휨 지배 거동을 하는 기둥을 주요 대상으로 한 것으로서, 전단경간비가 작거나 지진에 의하여 휨에 비해 상대적으로 큰 전단력을 받는 경우는 부가적으로 전단거동을 반영한 비선형 해석을 적용하여야 할 것이다.

#### 4. 성능에 따른 스틸재킷의 설계

##### 4.1 휨 연성에 필요한 스틸재킷의 설계

휨 연성 능력 향상에 필요한 스틸재킷의 두께는 단면의 형상, 휨 연성 능력, 콘크리트의 압축강도 등을 고려하여 산출할 수 있다. 스틸재킷 보강 부재의 소성힌지 길이  $L_p$ 는 다음과 같이 고려할 수 있다.<sup>18)</sup>

$$L_p = g + 0.044 f_y d_{lb} \quad (8)$$

여기서  $g$ 는 재킷(jacket) 피복층과 부재 지점부의 간격,  $d_{lb}$ 는 종방향 주철근의 지름,  $f_y$ 는 종방향 주철근의 항복응력을 나타낸다. 식 (8)로부터 소성 휨곡률  $\phi_p$ 와 최대요구 휨 곡률  $\phi_m$ 은 각각 다음 식과 같이 정의되고, 등가 이선형상의 항복곡률  $\phi_y$ 는 비선형 휨 해석에 의해 작성된 비선형 모멘트-곡률 곡선을 이원선형화한 경우 두 곡

선의 면적이 같은 경우의 항복점으로 산정된다.

$$\phi_p = \theta_p / L_p \quad (9)$$

$$\phi_m = \phi_y + \phi_p \quad (10)$$

원형 스틸재킷 단면의 직경을  $D$ 로 가정하면, 스틸재킷의 유효 체적비 및 요구 극한 압축변형률  $\epsilon_{cm}$ 은 각각 다음과 같게 된다.<sup>18)</sup>

$$\rho_s = 4t_j/D, t_j \ll D \quad (11)$$

$$\epsilon_{cm} = 0.004 + \frac{5.6 t_j f_{yj} \epsilon_{sm}}{D f'_{cc}} \quad (12)$$

여기서  $t_j, f_{yj}, \epsilon_{sm}$ 은 각각 스틸재킷의 두께, 항복응력, 및 최대변형률을 나타내고, 구속된 콘크리트의 최대압축강도  $f'_{cc}$ 는 식 (6)에서 결정된다. 따라서 휨 연성에 필요한 스틸재킷 보강의 두께  $t_j$ 는 위 식으로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$t_j = \frac{0.18(\epsilon_{cm} - 0.004) D f'_{cc}}{f_{yj} \epsilon_{sm}} \quad (13)$$

##### 4.2 전단 보강에 필요한 스틸재킷의 설계

기둥부재의 공칭전단강도가 초과되는 휨 강도에 의한 최대 전단강도보다 작은 경우에는 전단에 대한 보강이 필요하다. 연성설계에 의한 붕괴안전을 고려하여 기둥부재의 소성힌지 구역의 휨강도는 높게 평가하고 전단강도는 낮게 평가하여 전단보강에 필요한 두께를 결정하도록 하였다.

스틸재킷 보강 전 기둥의 설계 전단강도로부터 강도감소계수  $\phi_s$ 를 적용, 기둥의 휨 강도에 의해 추정된 최대 전단강도  $V_0$ 보다 작은 경우 보강해야 할 전단강도는 다음과 같이 고려토록 하였다.

$$\phi_s V_{sj} \geq V_0 - \phi_s (V_c + V_s + V_p) \quad (14)$$

여기서  $V_c$ 는 콘크리트에 의한 공칭전단강도,  $V_s$ 는 전단철근에 의한 공칭전단강도,  $V_p$ 는 압축력에 의한 공칭전단강도를 나타낸다. 콘크리트의 전단강도  $V_c$ 는 아래 식과 같이 변위연성계수  $\mu_{\Delta}$ 값에 따라 결정되는 강도감소계수  $\kappa$  및 유효단면적  $A_e$ 로 결정된다.

$$V_c = \kappa \sqrt{f'_c} A_e \quad (15)$$

여기서 원형단면인 경우  $\kappa$ 는 Priestley 등의 값을 고려한다.

원형단면 기둥의 전단철근의 공칭전단강도  $V_s$ 와 압축력에 의한 공칭전단강도  $V_p$ 는 각각 다음과 같다. 여기서  $D'$ 는 심부 콘크리트의 지름으로 외부 후프철근의 중심

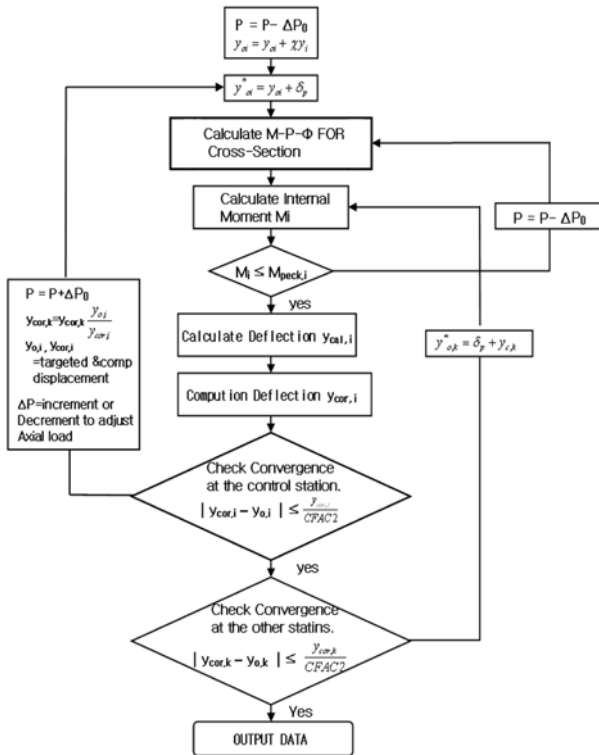


Fig. 7 Fiber & segment algorithm of jacketed RC column

간 거리를 나타내고,  $\alpha$ 는 기둥의 중심축과 압축 스트럿이 이루는 각도이다.

$$V_s = \frac{\pi A_h f_{yh} D'}{2s} \cot \theta \quad (16)$$

$$V_p = P \tan \alpha \quad (17)$$

원형단면 기둥을 스틸재킷으로 보강한 경우 전단강도는 재킷(jacket) 층의 간격  $s=1$ , 단면적을  $A_h=t_j$ 로 띠철근에 등가로 고려하여 강진 작용시 전단에 의한 부재의 파손을 방지하기 위해 재킷에 의한 피복의 항복응력  $f_{yj}$ 의 수준까지 설계에 적용하였다. 따라서 스틸재킷으로 저항할 수 있는 전단내력은 다음과 같이 된다.

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j f_{yj} D \cot \theta \quad (18)$$

여기서  $\theta$ 는 기둥부재의 모서리에서 반대쪽 모서리로 진전되는 사인장균열이 기둥의 축방향과 이루는 각도로 일반적으로 안전측 평가를 위해  $45^\circ$ 로 사용한다.

위 식들로부터 전단저항에 필요한 스틸재킷의 두께는 다음과 같이 산정된다.

$$t_j \geq \frac{V_0/\phi_s - (V_c + V_s + V_p)}{0.5 \cdot \pi \cdot f_{yj} \cdot D \cdot \cot \theta} \quad (19)$$

### 4.3 스틸재킷의 보강 범위

스틸재킷 보강의 범위는 기둥바닥 영역의 위험 소성영역으로 콘크리트의 전단강도가 감소하는 영역과 같다. 축하중의 비가  $P/(F'_{ce}A_g) \leq 0.3$ 에서는 Fig. 8과 같이 재킷의 보강범위는 기둥바닥에서부터 그림에서와 같은 높이까지 계산된 스틸재킷 두께  $1.0t_j$ 를 보강하고, 그 위 높이가 만큼은 계산된 재킷의 두께의 50%인  $0.5t_j$ 의 두께로 보강을 한다. 또한 축하중의 비가  $P/F'_{ce}A_g \geq 0.3$ 인 경우 보강범위를 50% 확대하여 보강토록 하였다.

### 4.4 변위 기반 내진설계 알고리즘

앞 장에 소개된 변위-기반 설계 방법 및 스틸재킷 보강 설계 개념을 적용 철근콘크리트 기둥에 대한 직접 변위-기반 내진성능개선 설계 절차를 Fig. 9와 같이 제시하였다. 이 절차는 다음과 같이 요약된다. ① 시스템의 항복변위  $u_y$ 를 가정한다. ② 기둥의 변형능력을 고려하여 소성회전각  $\theta_p$ 를 가정한다(일반적으로 0.02). ③ 설계 변위( $u_m$ )와 연성도( $\mu$ )를 각각 다음 식으로 결정한다.

$$u_m = u_y + u_p = u_y + h\theta_p \quad (20)$$

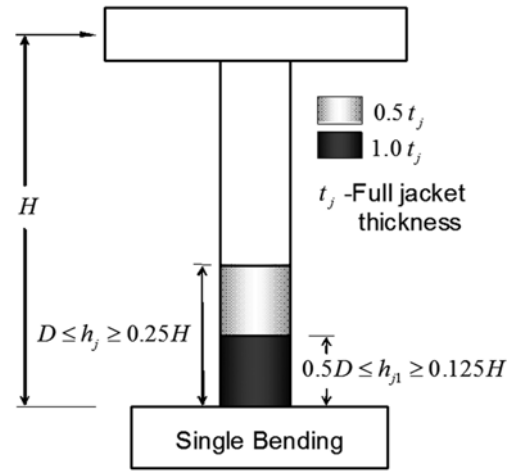


Fig. 8 Retrofit length by jacket

$$\mu = u_m/\mu_y \quad (21)$$

- ④ 비탄성 설계스펙트럼으로부터 설계 지진가속도에 대한 목표변위  $u_m$ 에 대응하는 고유주기  $T_n$ 을 산정하다. ⑤ 산정된 고유주기  $T_n$ 으로부터 시스템의 유효강성  $k = (2\pi /$

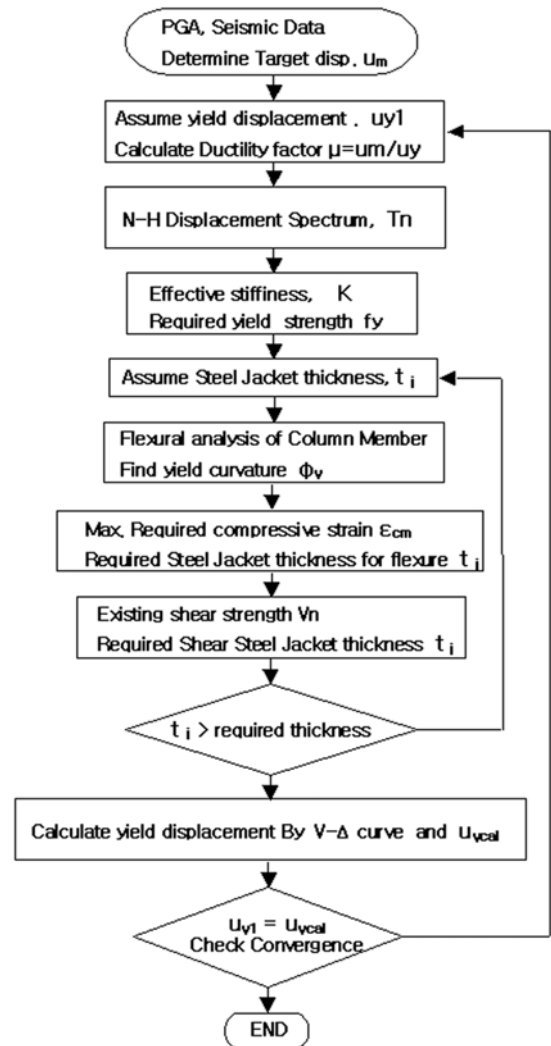


Fig. 9 Retrofit procedure by DDM

$T_n^2 m$ 을 산정한다. ⑥ 요구강도  $f_y = ku_y$ 를 결정한다. ⑦ 요구항복강도에 대한 스틸재킷 보강 두께  $t_f$ 를 결정한다. 보강 두께는 휨 및 전단 강도 조건을 만족한다. 스틸재킷 보강된 철근 콘크리트 기둥부재에 대한 비선형 휨 해석을 수행, 유효강성 및 항복변위  $u_y$ 를 산정한다. ⑧ 초기에 가정한 항복변위와 계산된 항복변위를 비교하여 수립된 결과를 얻을 때까지 이상의 과정을 반복한다.

### 5. 스틸재킷 보강 단일 기둥 내진성능개선 적용 예

스틸재킷보강 철근콘크리트 단일 기둥에 대한 내진성능 개선을 위한 성능설계 예를 적용 보강 전후의 내진성능 개선의 타당성을 검토하였다. 대상 구조물은 Fig. 10과 같다. 철근콘크리트 기둥부재의 높이 6,000 mm, 지름 1,500 mm, 주철근은 32#13(D40)으로 항복응력은 440 MPa, 락철근은 #6(D19)으로 항복응력은 400 MPa이다. 콘크리트의 설계기준강도는 30 MPa, 작용축력은 8,000 kN이다. 스틸재킷의 항복강도  $f_{yi} = 276$  MPa, 최대 변형률  $\epsilon_{sm} = 0.15$ 이다.

설계지진가속도 PGA 값이 각각 0.5 및 0.8 g인 경우를 고려하여 기둥 최상층부에서의 목표변위를 300 mm로 설정 재킷보강에 의한 직접 변위-기반 설계법에 의한 내진성능설계 예를 수행하였다.

Figs. 11 및 12는 보강 전 철근콘크리트 기둥에 대한 비선형 휨 해석 결과 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계이다. 그림에서 처럼 보강전 대상 기둥은 인장철근 항복에

의한 항복모멘트 및 항복변위가 각각 16,300 kN-m 및 38.5 mm로 추정되었다. 보강 전 기둥의 설계지진가속도 0.5 g에 대한 성능평가 결과 Table 1에서처럼 성능변위가 190 mm로서 변위연성비가 4.94로 평가되었다.

설계지진가속도 0.5 g에 대해 최상층부의 목표 성능 변위 300 mm에 대한 스틸재킷 보강에 의한 변위-기반 성능 개선 설계를 수행한 결과 최종 보강 설계 기둥의 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계가 각각 Figs. 13 및 14와 같이 수립되었다. 설계 재킷의 두께 및 길이는 Fig. 15와 같이 기초에서 높이 750 mm까지는 두께 9.5 mm, 그 위 높이 750 mm까지는 두께 4.8 mm로 결정되었다.

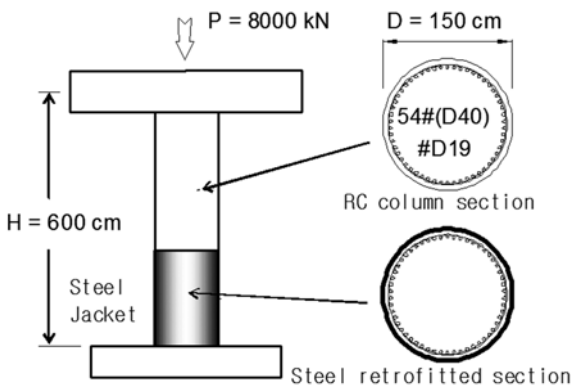


Fig. 10 Design examples of column

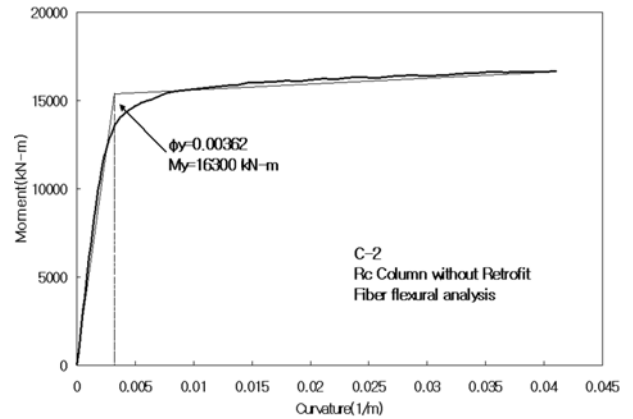


Fig. 11 Moment-curvature curve before retrofit

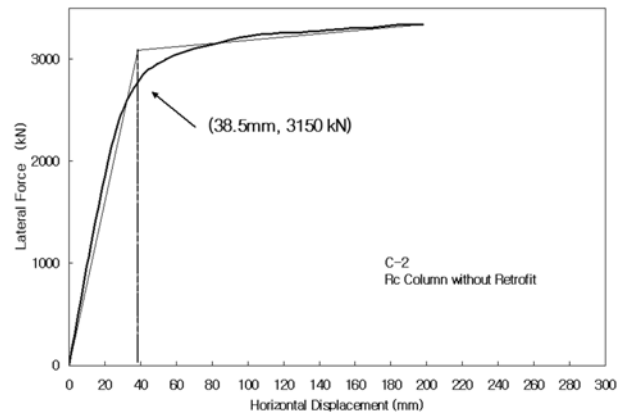


Fig. 12 Pushover curve before retrofit

Table 1 Design results of retrofitted column by DDM

Design parameters	Non-retrofit column (PGA = 0.5 g)	Retrofit column	
		PGA = 0.5 g	PGA = 0.8 g
Thickness of steel jacket (mm)	-	9.5	11.4
Init. yield disp. (mm)	-	63.5	63.5
Period (sec)	0.84	0.87	0.81
Yield disp. (mm)	38.5	42.5	43.3
Target disp. (mm)	190	300	300
Ductility factor	4.94	7.06	6.93
Yield curvature (1/m)	0.00362	0.00395	0.00406
Yield moment (kN-m)	16,300	28,500	31,000
Yield lateral force (kN)	3,150	3,650	3,780

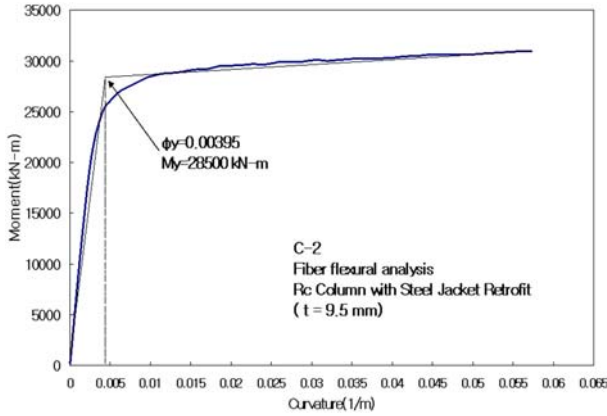


Fig. 13 Moment-curvature curve after retrofit (0.5 g)

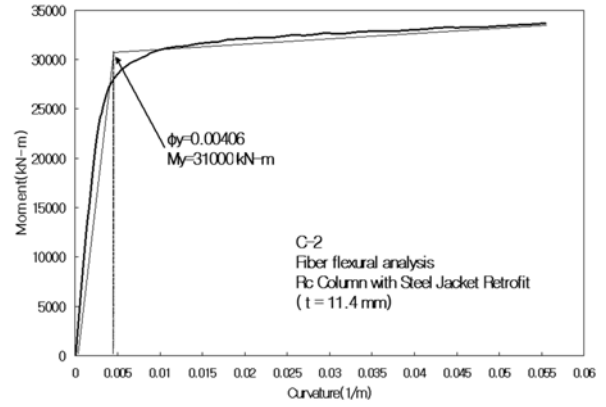


Fig. 16 Moment-curvature curve after retrofit (0.8g)

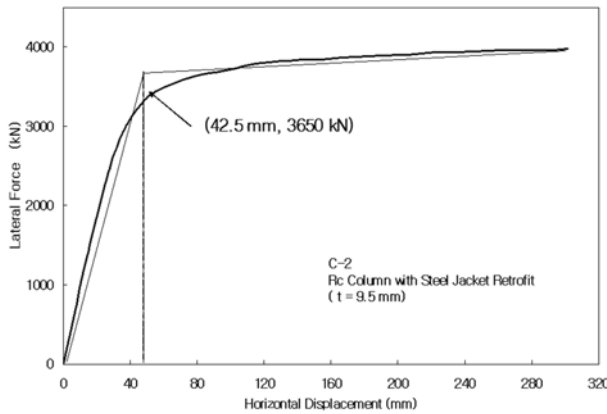


Fig. 14 Pushover curve after retrofit (0.5 g)

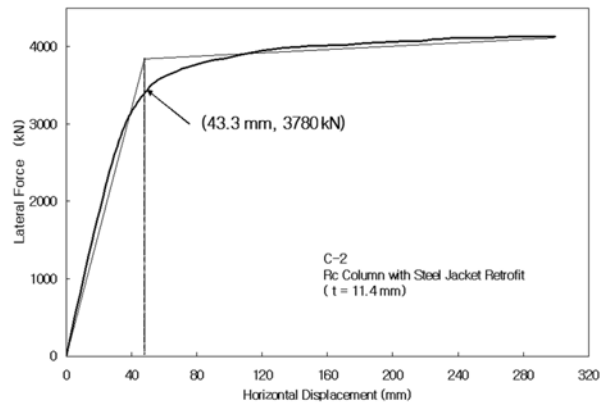


Fig. 17 Pushover curve after retrofit (0.8 g)

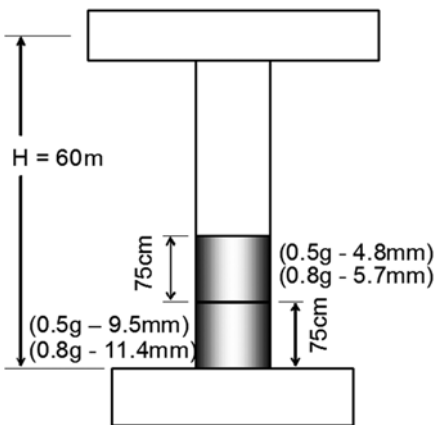


Fig. 15 Design results

한편 설계지진가속도 0.8 g에 대해 최상층부의 목표성능변위 300 mm에 대한 스틸재킷 보강에 의한 변위-기반 성능개선 설계를 수행한 결과 최종 보강 설계 기둥의 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계가 각각 Figs. 16 및 17과 같이 수렴되었다. 설계 재킷의 두께 및 길이는 Fig. 15와 같이 기초에서 높이 750 mm까지는 두께 11.4 mm, 그 위 높이 750 mm까지는 두께 5.7 mm로 결정되었다.

직접 변위-기반 설계법(DDM)에 의한 내진성능개선 설계 결과, 비보강 및 보강한 경우를 비교하여 Table 1에

나타내었다. 기존 철근콘크리트 기둥 부재에 대해 스틸재킷을 이용 성능 개선 설계를 할 경우, 이 연구에서 소개된 직접 변위-기반의 성능 개선 설계 방법은 주어진 설계지진가속도에 대해서 설계 목표성능에 적합한 성능개선 설계 결과를 제공해 주는 것으로 평가되었다. 더불어 스틸재킷에 의한 피복 보강은 철근콘크리트 기둥의 연성능력 확보에 효과적인 결과를 제공해 주었다.

한편 직접 변위-기반설계법에 의해 결정된 스틸재킷의 두께에 대하여 FEMA-356(2000)의 변위 계수법(DCM)에 의해 동일한 설계지진가속도에 대해 지진 성능 평가를 수행하여 Table 2와 같이 정리하였다.<sup>3)</sup> 스틸재킷을 보강한 경우에 대한 변위계수법에 의한 성능 평가 결과 설계지진가속도 0.5 g인 경우 성능 변위는 239 mm, 0.8 g인 경우 성능변위는 241 mm로 추정되었다. 변위계수법에 의한 성능 평가 결과는 직접 변위-기반설계법에 의한 설계

Table 2 Performance of retrofitted column by DCM

Design parameters	Retrofit column	
	PGA = 0.5 g	PGA = 0.8 g
Thickness of jacket (mm)	9.5	11.4
Yield displacement (mm)	42.5	43.3
Total displacement (mm)	239	241
Ductility factor	5.63	5.57

목표 성능값 보다 과소평가되었다.

변위계수법은 항복 전의 강성을 고려하여 유효강성과 유효주기에 의한 목표 변위를 추정하는 반면, 직접 변위-기반설계법은 항복 후의 강성비를 고려한 변위 연성도에 의한 유효강성을 고려하고 있어 목표 변위에 따른 성능 설계 평가에 있어서 높은 연성비의 거동에 대해서도 타당성 있게 평가가 가능한 것으로 평가된다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 기존 철근콘크리트 기둥에 대하여 스틸재킷을 이용하여 내진성능개선 설계를 위한 성능설계 방법을 제시한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

두 가지 변위기반설계법인 직접 변위-기반설계 개념 및 변위계수법을 각각 적용하여 철근콘크리트 기둥에 대한 스틸재킷 보강에 의한 성능 기반 내진 성능 개선 설계 방법을 제시하였다. 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 비선형 해석을 위하여 단면 층상화 및 부재 길이 방향의 세그먼트 분할에 의한 비선형 기둥부재의 해석 프로그램을 제시하였다. 개발된 성능설계법에 의한 철근콘크리트 기둥의 내진성능개선 설계 및 성능 평가 방법은 내진 성능 개선 목표의 설계 변위 성능에 따른 스틸재킷의 보강 설계를 결정하는데 합리적이고 간편한 방법으로, 적용 예에서 이 방법은 기존 철근콘크리트 기둥과 비교하여 스틸재킷 보강을 통해서도 변위 연성비 및 변위성능이 크게 개선된 성능설계 결과를 제공해 주었다.

## 감사의 글

이 논문은 2009학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었고 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Applied Technology Council, "Seismic Evaluation and Retrofit OF Concrete Building," *ATC-40 Report*, Redwood city, California, 1996.
2. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," *Report FEMA 273 (Guidelines) and Report 274 (Commentary)*, Washington, DC, 1997.
3. Federal Emergency Management Agency (FEMA-356), *Pre-standard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of*

- Buildings*, Washington, DC, USA, 2000.
4. Freeman, S. A., "Development and Use of Capacity Spectrum Method," *Paper No. 269, The 6th US National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Seattle, Washington, 1998.
5. Kowalsky, M. J., Priestley, M. J. N., and MacRae, G. A., "Displacement-based Seismic Design of RC Bridge Columns in Seismic Regions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995, pp. 1623~1643.
6. Xue, Q., "A Direct Displacement-based Seismic Design Procedure of Inelastic Structures," *Engineering Structures*, Vol. 23, Issue 11, 2001, pp. 1453~1460.
7. Lin, Y. Y., Tsai, M. H., Hwang, J. S., and Chang, K. C., "Direct Displacement-based Design for Building with Passive Energy Dissipation Systems," *Engineering Structures*, Vol. 25, Issue 1, 2003, pp. 25~37.
8. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "Direct Displacement-based Design: Use of Inelastic Design Spectra versus Elastic Design Spectra," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 1, 2001, pp. 47~64.
9. Chai, Y. H., "An Analysis of The Seismic Characteristics of Steel-Jacketed Circular Bridge Columns," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 1996, pp. 149~161.
10. Chai, Y. H., Priestley, M. J. N., and Seible, F., "Analytical Model for Steel-Jacketed RC Circular Bridge Columns," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 8, 1994, pp. 2358~2376.
11. 조창근, "FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발," 콘크리트학회 논문집, 19권, 4호, 2007, pp. 491~497.
12. 조창근, "FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단 거동예측," 대한건축학회 논문집, 20권, 8호, 2004, pp. 35~42.
13. 조창근, 하기주, 배수호, "FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발," 콘크리트학회 논문집, 19권, 4호, 2007, pp. 491~497.
14. 이승조, 박정민, 김화중, "중심압축을 받는 고강도콘크리트 충전각형강관 기둥의 내력특성," 대한건축학회 구조계 논문집, 18권, 7호, 2002, pp. 11~18.
15. 김성남, 강영중, 한택희, "내부 구속 중공 CFT 기둥의 내진성능 평가," 한국강구조학회 논문집, 19권, 1호, 2007, pp. 53~65.
16. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 1982.
17. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1827~1849.
18. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, New York, 1996, 686 pp.

**요약** 이 연구에서는 변위-기반성능설계 개념에 의해 기존 철근콘크리트 기둥에 대하여 스틸재킷 보강에 의한 내진 성능개선의 성능설계 방법을 제시하였다. 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 설계 변위 추정을 위해 스틸재킷 보강된 철근콘크리트 부재의 비선형 층상화 세그먼트 해석 모델을 제시하고, 성능기반설계에 의한 성능개선설계를 위하여 목표성능변위 및 설계지진가속도 조건에 대해 직접 변위-기반 설계 방법 및 변위계수법에 의한 내진성능개선 설계 방법을 제시하였다. 적용 예에서 이 방법은 기존 철근콘크리트 기둥과 비교하여 성능개선설계 결과 보강 전에 비해 변위 연성비 및 변위성능에서 크게 개선된 성능설계 결과를 제공해 주었다.

**핵심어** : 스틸재킷, 변위기반설계법, 내진 성능 개선, 철근콘크리트 기둥