

# 변위기반 설계법에 의한 RC 기둥의 Steel Jacket 보강 내진성능개선 설계법

## Displacement Based Seismic Performance Improved Design of RC Column Retrofitted Steel Jacket

정 인 규\*

Jung, In-Kju

조 창 근\*\*

Cho, Chang-Geun

박 순 응\*\*\*

Park, Soon-Eung

### 요 약

본 연구는 기존 철근콘크리트 구조물에 대하여 대표적인 변위-기반 설계법인 Chopra&Goel이 제안한 직접변위-기반 설계법의 기본개념을 적용하여 최대 설계지반 가속도에 대한 보강 Steel Jacket의 두께를 결정하고, 결정된 보강 두께를 적용하여 보강 전 후 성능설계기법에 의한 비선형 해석 및 보강설계법에 의한 보다 개선된 알고리즘 및 프로그램을 제시하였다. Steel Jacket 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 설계 변위 추정을 위해 Steel Jacket 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 본 방법은 기존 철근콘크리트 기둥과 비교하여 성능개선설계 결과 보강 전에 비해 변위 연성비 및 변위성능에서 크게 개선된 성능설계 결과를 제공해 주었다.

### Abstract

This study is the research applying the representative Displacement-Based Design which is the basic concept of Direct Displacement Based Design proposed by Chopra and Goel to original Reinforced Concrete structure and determining the thickness of retrofit Steel Jacket about the Maximum design ground acceleration, and developing the more improved Algorithm as well as program by the Retrofit Design method and Nonlinear analysis by the Performance design method before and after reinforcement applying the determined retrofit thickness. To predict the target displacement of retrofitted columns, a nonlinear analysis model of reinforced concrete columns has been developed to be based on the nonlinear fiber cross-sectional and segmental analysis model, and the seismic displacement level of retrofitted columns is estimated by two procedures, the direct displacement-based design method and the displacement coefficient method. In examples of seismic retrofit design, the current seismic improved design method gives good results in improvements of displacement levels and displacement ductilities of retrofitted columns.

키워드 : Steel Jacket, 변위기반설계, 내진보강, 철근콘크리트 기둥

Keywords : Steel Jacket, Displacement-based design, Seismic retrofit, Reinforced concrete column

## 1. 서 론

2004년 인도네시아 슈마트라에서 규모 9.0의 강진이 발생하여 28만명의 사망자가 발생하였고, 2008년 중국 스촨성에서 규모 7.9의 지진으로 인하여 공식적으로 8만명의 사망자와 30만명의 부상자, 2만9천

명의 실종자 및 5백만명 이상의 이재민과 함께 153조원이 막대한 재산상의 손실을 가져왔다. 이와 같이 최근의 지진은 아시아 지역을 중심으로 빈번하게 발생하고 있고, 지진 활동성이 매우 낮다고 알려진 지역에서 발생하였기 때문에 우리나라 국민과 정부에 큰 충격을 안겨주었다.

지진의 피해를 최소화 하는 방법은 지진조기경보와 내진 설계기술을 들 수 있다. 그러나 지진에 대한 조기경보는 아직까지 그 예보 성공률이 30%로 전후로 평가되고 있으며 우리나라의 경우 아직 연구개발

\* 안동과학대 건설정보과 전임강사, 공학박사

\*\* 조선대학교 건축학부, 조교수, 공학박사(교신저자)

Mobile: 042-865-6511, Tel: 062-230-7023

E-mail : inkju0118@hanmail.net

\*\*\* 경북대학교 방재연구소, 공학박사, 토목구조기술사

이 전무한 상태이다. 따라서, 강진에 의한 피해는 새로운 내진 설계기술의 발전과 동시에 구조물의 구조 성능개선에 더욱 관심을 고조시키고 있다.

최근 활발하게 연구가 진행되고 있는 성능에 기초한 설계는 예상되는 지진하중에 대하여 구조물이 허용가능한 적절한 피해정도 및 성능치를 미리 설정하고 이를 달성할 수 있도록 구조물을 설계하는 방법이다. 이 방법은 변위를 구조물의 성능평가 대상으로 사용하므로 변위-기반설계법(DBDM)이라고 한다.

변위에 기초한 설계법에 주로 많이 연구되는 있는 방법은 직접변위기반설계법, 비탄성스펙트럼법, 역량스펙트럼법<sup>9)</sup>, 변위계수법<sup>8)</sup>등을 들 수 있다. 직접 변위기반설계법(Direct Displacement based Design Method, DDM)<sup>5)</sup>은 Kowalsky(1995)등이 제안한 방법으로 단자유도 시스템에 대한 손상을 변위의 한계로 나타내어 지진하중에 대해 목표로 하는 상태변위를 얻을 수 있도록 구조물을 설계하는 방법이다. 이후 Chopra&Goel(2001)<sup>5)</sup>은 비탄성 스펙트럼을 적용한 변위 기반설계법을 제안하였다.

비탄성 정적해석(Inelastic Static Analysis)을 이용한 대표적인 내진성능 평가방법으로는 역량스펙트럼방법(Capacity Spectrum Method)<sup>9)</sup>과 변위 계수법(Displacement Coefficient Method)을 들 수 있다. 역량스펙트럼은 Freeman(1978)이 제안한 방법으로 요구 및 역량스펙트럼을 이용하는 건축물의 성능평가를 위하여 개발되어 ATC-40(Applied Technology Council,1996)보고서와 FEMA-440(Federal Emergency Management Agency, 1997)보고서에서 채택하고 있는 방법이다. 변위계수법은 FEMA-273(1997), 356(2000), 440(2004)<sup>8)</sup>보고서에 채택하고 있는 방법으로 구조물의 탄성 변위응답에 보정계수를 곱하여 비탄성 응답변위를 산정하는 방법이다.

최근 건설되는 구조물에 대해서는 이러한 성능에 기초한 설계법이 반영되고 있으나, 성능에 기초한 설계법이 적용되기 이전 구조물에 대해서는 구조물이 가진 정확한 성능을 평가하기가 힘들다. 기존 구조물에 대한 내진 성능향상을 위해서는 예상되는 지진에 대해 구조물이 가진 성능을 평가하고, 성능의 개선이 필요하다.

본 연구는 기존 철근콘크리트 기둥부재의 내진성

능을 개선하고자 Steel Jacket 보강<sup>7)</sup>에 의한 철근콘크리트 기둥의 변위-기반 내진성능개선 설계 방법을 제시하는데 목적이 있다. Steel Jacket으로 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 설계 변위 추정을 위해 Steel Jacket 보강된 철근콘크리트 부재의 비선형 충상화다면 해석 모델을 제시하고, 목표성능변위 및 설계지진가속도 조건에 대해 직접-변위기반 설계 방법 및 변위계수법에 의한 내진성능개선 설계 방법을 제시하였다.

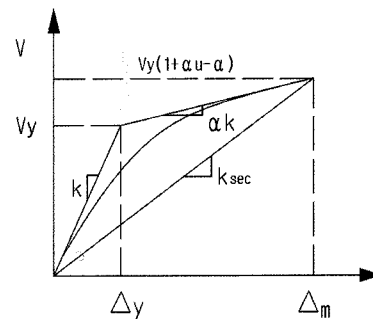
## 2 직접-변위기반 내진설계

직접-변위기반 설계법<sup>5)</sup>은 구조물의 비선형 거동 부재의 하중과 변위의 관계를 등가의 선형시스템으로 고려하여 지진의 성능치를 추정하는 방법이다.

본 장에서는 Steel Jacket으로 보강된 철근콘크리트 기둥부재의 내진성능개선을 위하여 직접-변위기반 설계법의 기본개념을 적용하여 목표 성능 향상을 위한 성능 설계법을 수정 제시하였다.

### 2.1. 등가강성 및 등가감쇠

비선형 단자유도 시스템의 거동을 평가하기 위하여 하중-변위 관계는 <그림 1>과 같이 등가 선형시스템 모델로 가정하여 유효등가 할선강성  $k_{sec}$ 를 산정하였다.



<그림 1> 등가선형시스템의 하중-변위 관계

여기서,  $k$ 는 탄성영역의 강성,  $\alpha k$ 는 항복영역의 강성,  $V_y$ 는 항복강도,  $\Delta_y$ 는 항복변위,  $\Delta_m$ 는 최대 변위로서 최대강도  $V_y(1+\alpha u-a)$ 에 대응한다. 이 경우 등가고유주기  $T_{eq}$ 는 선형 탄성일 경우 시스템의 고유주기  $T_n$  으로부터 식(1)과 같이 산정된다.

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

등가유효감쇠비  $\zeta_{eq}$ 는 구조물의 이력거동에 의해 소산되는 에너지를 고려하여 Chopra & Goel(2001)이 제시한 다음 식을 사용하였다

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

여기서,  $\mu$ 는  $\Delta_m/\Delta_y$ 로 변위 연성비로 정의되고,  $\alpha$ 는 항복후 강성비로 나타낸다. 따라서, 등가 선형 시스템의 총 유효 감쇠비는 이원 선형 시스템의 유효 감쇠비  $\zeta$ 와  $\zeta_{eq}$ 의 합으로 식(3)과 같이 정의된다.

$$\overline{\zeta}_{eq} = \zeta + \zeta_{eq} \quad (3)$$

### 2.2. Newmark-Hall 설계 스펙트럼

직접변위기반 설계법의 적용을 위하여 지진 설계 스펙트럼을 필요로 한다. 본 연구에서는 <그림 2>와 같이 Newmark 및 Hall(1982)이 제안한 삼원 탄성 설계스펙트럼(N-H스펙트럼)을 적용하였다. 또한 시스템의 등가고유주기를 추정하기 위해서는 설정된 목표변위에 대한 설계변위 스펙트럼의 작성이 필수적이며 산정된 감쇠비에 따라 식(4)와 같이 가속도, 속도, 변위 증폭계수  $\alpha_A, \alpha_V, \alpha_D$ 에 따라 <그림 3>과 같이 설계변위 스펙트럼에 의하여 시스템의 등가고유주기를 추정하였다.

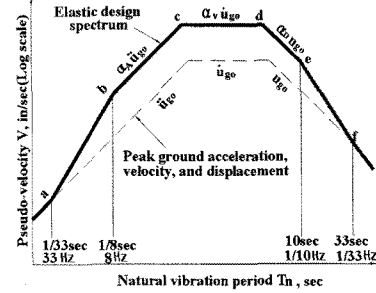
$$\begin{aligned} \alpha_A &= 4.38 - 1.04 \ln \zeta \\ \alpha_V &= 3.38 - 0.67 \ln \zeta \\ \alpha_D &= 2.73 - 0.45 \ln \zeta \end{aligned} \quad (4)$$

### 3. Steel Jacket 보강 RC 기둥 부재의 비선형 층상화 휨 해석모델

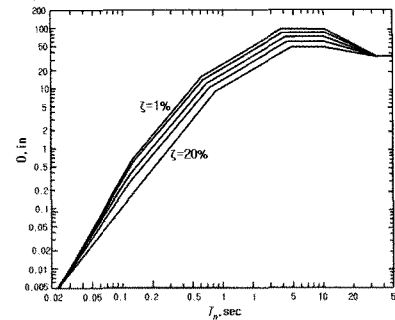
변위기반 성능내진설계를 위하여 합성부재의 비선형 휨 해석은 성능설계의 중요한 역할을 하게 된다. 이를 위해 본 연구에서는 Steel Jacket 보강된 합성단면을 재료특성에 따라 미소면적으로 나누어서 각각의 미소 단면의 응력과 변형률에 대한 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계 예측의 비선형 층상화 휨 해

석 모델을 개발하였다.

압축하중에 대한 구속 및 비구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Mander등(1988)<sup>10)</sup>의 콘크리트 재료모델의 구성관계를 기초로 하여 식(5)와 같이 정의된다.



<그림 2> N-H 삼원 설계스펙트럼



<그림 3> N-H 변위 설계스펙트럼

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

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

여기서  $f'_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대강도로 식(6)와 같이 정의되고,  $f'_c$ 는 비구속된 콘크리트의 최대강도,  $f'_l$ 은 유효 횡구속 응력으로 최대유효 횡구속력  $f_l$ 에 감소계수  $k_e$ 를 적용하여 산정한다. 또한,  $\epsilon$ 은 축방향 변형률,  $\epsilon_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대강도시의 변형률,  $\epsilon_c$ 는 비구속 콘크리트의 접선계수로  $5000 \sqrt{f'_{cc}}$ 로 정의하였고,  $\epsilon_{cc}$ 는 비구속된 콘크리트의 최대강도시의 변형률로  $\epsilon_{co}$ 의 함수로 정의된다.

재료의 비선형의 응력-변형률 관계를 정확히 고려하기 위해 <그림 4>와 같이 단면을 각 재료로 층상화 단면 분할하여 단면의 강재, 철근, 및 콘크리트 층에

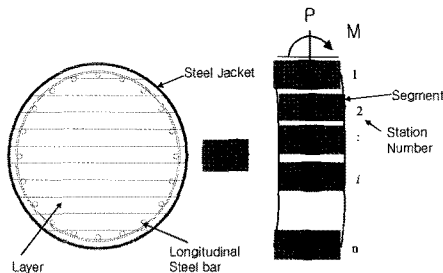
대한 응력과 변형률을 계산한 후 이를 합하여 전체 단면의 모멘트와 곡률의 관계를 산정하였다.

각 단면에 대한 층상화 해석 이후 부재길이에 따른 기둥 부재의 거동해석을 위해 <그림 4>와 같이 길이방향 각 스테이션에 대한 세그먼트로 분할하여 수치적분에 의해 비선형 하중-변위를 산정하였다. 길이방향의 각 세그먼트의 거동은 휨 곡률과 각 세그먼트 끝단에서의 모멘트 및 축력에 의한 힘으로 표현된다. 따라서 길이방향 임의  $i$  절점에서의 처짐은 식(7)과 같이 수치적분에 의해 산정되고, 경계조건에 대한 임의절점에 대한 변위는 식(8)과 같이 정의된다.

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

$$y_{cor,i} = y_{cal,i} - \frac{i-1}{NSEG} y_{cal,N} \quad (8)$$

본 연구에서는 하중 증분에 따른 초기  $M-P-\phi$ 의 관계로부터 Steel Jacket 보강 철근콘크리트 기둥 부재의 비선형 층상화 및 세그먼트 해석 모델을 제시하였으며, 부재의 비선형 해석 알고리즘은 <그림 5>와 같다.



<그림 4> Steel Jacket 보강 RC 기둥의 층상화 단면

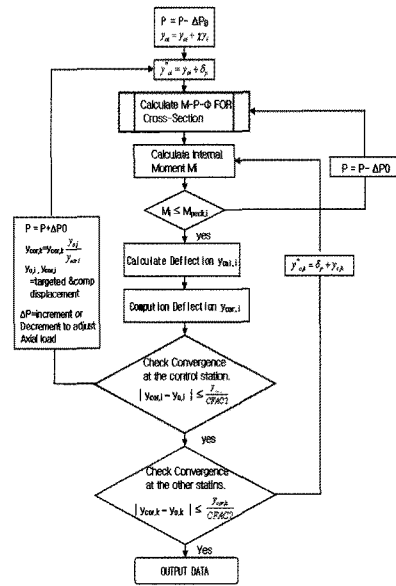
## 4. 보강 Steel Jacket 두께의 설계

### 4.1. 휨 연성에 필요한 Steel Jacket의 보강 두께의 설계

휨 연성능력 향상에 필요한 Steel Jacket의 두께는 단면의 형상, 휨 연성능력, 콘크리트의 압축강도 등을 고려하여 다음에 제시하는 설계방법에 따라 휨 연성보강에 필요한 Steel Jacket의 두께를 산출할 수 있다. 비선형 모멘트 곡률의 관계로부터 부재의 변위를 추정하기 위해 Steel Jacket 보강 부재의 소

성형지 길이( $L_p$ )는 식(9)와 같이 정의된다. (Priestly 등, 1996)<sup>11)</sup>

$$L_p = g + 0.044 f_y d_{bt} \quad (9)$$



<그림 5> 층상화&부재단면 비선형 알고리즘

여기서,  $g$ 는 Jacket 피복층과 부재 지점부의 간격을 나타내고,  $d_{bt}$ 는 종방향 주철근의 지름,  $f_y$ 는 종방향 주철근의 항복응력을 나타낸다. 식(9)로부터 소성곡률 ( $\phi_p$ )는 식(10)과 같이 정의되고, 등가 이선형상의 항복곡률( $\phi_y$ )은 합성단면의 층상화 해석에 의해 산정 된다. 따라서 최대요구 곡률( $\phi_m$ )은 식(11)과 같이 정의된다.

$$\phi_p = \theta_p / L_p \quad (10)$$

$$\phi_m = \phi_y + \phi_p \quad (11)$$

원형단면 기둥부재의 Steel Jacket 단면 직경을  $D$ 로 가정하면, 구축 Steel Jacket의 유효 체적비는 식(12)과 같이 정의되고, 요구되는 극한 압축변형률  $\epsilon_{cm}$ 은 식(13)과 같이 산정할 수 있다.

$$\rho_s = \frac{4t_j}{D} \quad (12)$$

$$\epsilon_{cm} = 0.004 + \frac{5.6 t_j f_{yj} \epsilon_{sm}}{D f'_{cc}} \quad (13)$$

여기서,  $t_j$ 는 Steel Jacket의 두께,  $f_{yj}$ 는 Jacket의

항복응력,  $\epsilon_{sm}$  은 Jacket의 최대변형률을 나타내고, 구속된 콘크리트의 최대압축강도  $f'_{cc}$ 는 식(6)에서 결정된 휨연성에 필요한 Steel-Jacket보강의 두께는  $t_j$ 는 위의 식으로 부터 식(14)와 같이 산정된다.

$$t_j = \frac{0.18 (\epsilon_{cm} - 0.004) D f'_{cc}}{f_{yj} \epsilon_{sm}} \quad (14)$$

#### 4.2. 전단 필요한 Steel Jacket의 보강 두께의 설계

기둥부재의 공칭전단강도가 초과되는 휨 강도에 의한 최대 전단강도보다 작은 경우에는 전단에 대한 보강이 필요하다. 기둥부재의 내진성능 개선에서는 필요한 재료특성이 알려져 있기 때문에 강도면에서 불확실성이 적다. 또한, Steel Jacket의 두께가 변화하여도 내진보강에 소요되는 비용은 크게 차이가 없으므로 어느 정도 여유를 확보하여 설계한다. 따라서 안전을 위해 기둥부재의 소성힌지 구역의 휨강도는 크게 평가하고 전단 강도는 작게 평가하여 전단보강에 필요한 Steel Jacket의 두께를 결정토록 하였다.

Steel Jacket 보강전 기둥의 설계 전단강도로부터 설계 강도에 전단 감소계수  $\phi_s$ 를 적용하여 기둥의 휨 강도에 의해 추정된 최대 전단강도  $V^0$ 보다 작은 경우 보강해야 할 전단강도는 식 (15)과 같이 고려하였다.

$$\phi_s V_{sj} \geq V^0 - \phi_s (V_c + V_s + V_p) \quad (15)$$

여기서, 전단강도감소 계수  $\phi_s = 0.80$ 을 적용하고,  $V_c$ 는 콘크리트에 의한 공칭전단강도,  $V_s$ 는 전단철근에 의한 공칭전단강도,  $V_p$ 는 압축력에 의한 공칭 전단강도를 나타낸다.

콘크리트의 전단강도는 식 (16)과 같이 정의되고, 강도 감소계수  $\kappa$ 는 변위 연성계수  $\mu_\Delta$ 값에 따라 결정된다.  $\mu_\Delta$ 의 값이  $0.6 \leq \mu_\Delta \leq 2$ 에서의 연성 감소계수  $\kappa$ 는 0.3MPa,  $\mu_\Delta \geq 8$ 일 경우 Priestley등, (1994)<sup>6)</sup>이 제시한 값을 적용하였다.

$$V_c = \kappa \sqrt{f'_c} A_e \quad (16)$$

원형단면 기둥의 전단철근의 공칭전단강도  $V_s$ 와

압축력에 의한 공칭 전단강도  $V_p$  식 (17) 및 식 (18)으로 정의된다. 여기서,  $D'$ 는 심부 콘크리트의 지름으로 외부 후프철근의 중심간 거리를 나타내고,  $\alpha$ 는 기둥의 중심축과 압축 스트럿이 이루는 각도이다.

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_h f_{yh} D'}{s} \cot \theta \quad (17)$$

$$V_p = P \tan \alpha \quad (18)$$

원형단면의 기둥부재를 Steel Jacket으로 보강한 경우 전단강도는 Jacket 층의 간격  $s = 1$ , 단면적을  $A_h = t_j$ 로 후프철근에 등가로 고려하여 강진 작용시 전단에 의한 부재의 파손을 방지하기 위해 Steel Jacket에 의한 피복의 항복응력  $f_{yj}$ 의 수준까지 설계에 적용하였다. 따라서, 원형단면 기둥부재에 Steel로 보강한 경우 Steel Jacket으로 저항할 수 있는 전단내력은 다음과 같이 정의된다.

$$V_{sj} = \frac{\pi}{2} t_j f_{yj} D \cot \theta \quad (19)$$

따라서, 위의 식들로부터 기둥부재의 전단저항에 필요한 Steel Jacket의 두께는 다음과 같이 산정된다.

$$t_j \geq \frac{V^0 / \phi_s - (V_c + V_s + V_p)}{0.5 \cdot \pi \cdot f_{yj} \cdot D \cdot \cot \theta} \quad (20)$$

#### 4.3 보강 Jacket 두께 결정을 위한 변위 기반 내진설계의 알고리즘<sup>4)</sup>

이상에서 소개된 변위기반 설계방법과 Steel Jacket보강 설계개념을 적용하여 철근 콘크리트 기둥에 대한 직접변위기반 내진성능 설계의 절차는 <그림 6>과 같이 제시하였고, 다음과 같이 요약된다. ① 시스템의 항복변위  $\Delta_y$  을 가정한다. ② 소성 회전각  $\theta_p$  를 가정한다. ③ 설계변위( $\Delta_m$ )와 연성도 ( $\mu$ )는 각각 다음 식과 같이 결정한다.

$$\Delta_m = \Delta_y + \Delta_p = \Delta_y + h \theta_p \quad (21)$$

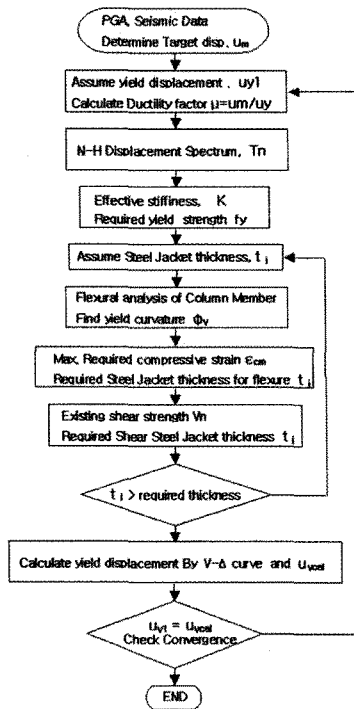
$$\mu = \Delta_m / \Delta_y \quad (22)$$

④ 설계연성도 및  $\zeta_{eq}$  와  $\mu$ 의 관계로부터 등가 감쇠비  $\zeta_{eq}$ 를 구한다. ⑤ 변위 스펙트럼으로부터  $\Delta_m$ 에 대한 유효주기를  $T_{eq}$ 를 산정한다. ⑥ 산정된 유효주기

로부터 시스템의 유효강성  $k_{sec} = (2\pi/T_{eq})^2 m$  를 결정한다. ⑥ 요구 항복강도를 다음 식과 같이 결정한다.

$$f_y = (k_{sec} \Delta_m) / (1 + \alpha\mu - \alpha) \quad (23)$$

⑦ 요구되는 항복강도에 대한 Steel Jacket 보강 두께  $t_j$  를 결정한다. Steel Jacket 의 두께는 휨 및 전단 강도에 대한 요구 조건을 만족하도록 결정한다. Steel Jacket보강된 철근 콘크리트 기둥부재에 대한 비선형 휨 해석을 수행하여 유효탄성강성을 결정하고, 항복변위  $\Delta_y$  를 산정한다. ⑧ 초기에 가정한 항복변위와 계산된 항복변위를 비교하여 수렴된 결과를 얻을 때까지 반복한다.

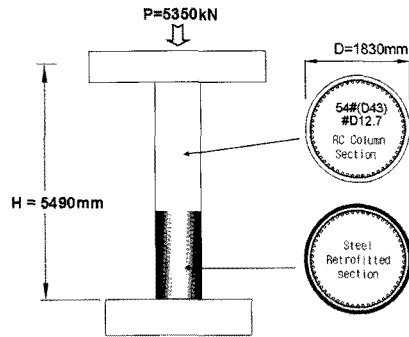


<그림 6> Steel Jacket보강 내진설계 알고리즘

### 5. 내진성능 설계의 적용 예

Steel Jacket보강 철근콘크리트 기둥에 대한 내진 성능 개선을 위한 성능설계 예를 적용 보강 전후의 내진성능 개선의 타당성을 검토하였다. 대상 구조물은 <그림 7>과 같다. 철근콘크리트 기둥부재의 높이 5490mm, 지름 1830mm, 주철근은 54#14(D43)으로 항복응력은 345MPa, 나선철근은 #4(D12.7)으로 항복응력은 303MPa이다. 콘크리트의 설계기준강도는

41MPa, 작용축력은 5350kN이다. Steel Jacket의 항복강도  $f_{yj} = 276 MPa$ , 최대 변형률  $\epsilon_{sm} = 0.15$  이다. 설계지진가속도(PGA) 값이 각각 0.4g 및 0.8g인 경우를 고려하여 기둥 최상층부에서의 목표변위를 260mm로 설정하여 Jacket 보강에 의한 직접 변위-기반 설계법에 의한 내진성능설계 예를 수행하였다.



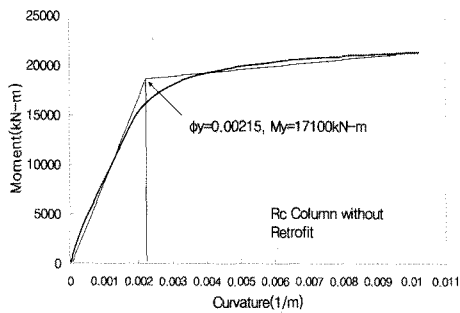
<그림 7> 대상 구조물

<그림 8> 및 <그림 9>는 보강전 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 17100kN-m 및 27.6mm로 추정되었다. 보강전 기둥의 설계지진가속도 0.4g에 대한 성능평가 결과 <표 1>에서 처럼 성능변위가 109mm로서 변위연성비가 3.95로 평가되었다.

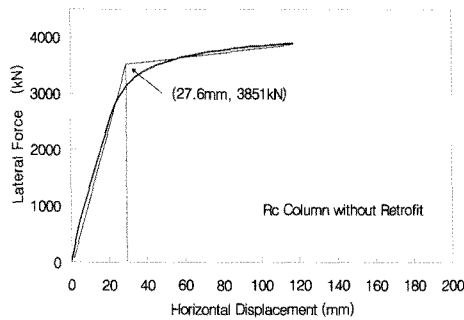
설계지진가속도 0.4g에 대해 최상층부의 목표성능 변위 260mm 에 대한 Steel Jacket 보강에 의한 변위-기반 성능개선 설계를 수행한 결과 최종보강설계 기둥의 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계가 각각 <그림 10> 및 <그림 11>와 같이 수렴되었다. 또한, 설계지진가속도 0.8g에 대해 최상층부의 목표성능변위 260mm 에 대한 Steel Jacket 보강에 의한 변위-기반 성능개선 설계를 수행한 결과 최종보강설계 기둥의 모멘트-곡률 및 하중-변위 관계가 각각 <그림 12> 및 <그림 13>과 같이 수렴되었다.

설계 Jacket의 보강 범위 및 두께는 <그림 14>와 같이 설계지진가속도 0.4g에 대해서 기초에서 높이 92cm까지는 두께 8.9mm, 그 위 높이 91cm까지는 두께 4.5mm로 결정되었고, 0.8g 에 대해서는 기초에서 높이 92cm까지는 두께 10.5mm, 그 위 높이 91cm까지는 두께 5.3mm로 결정되었다. (Priestley

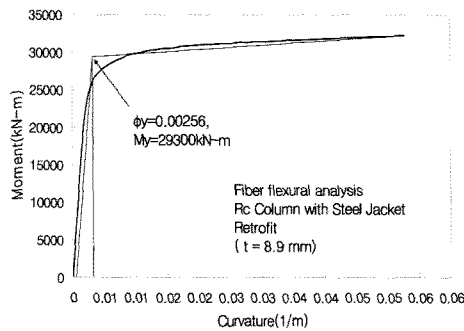
등, 1996).



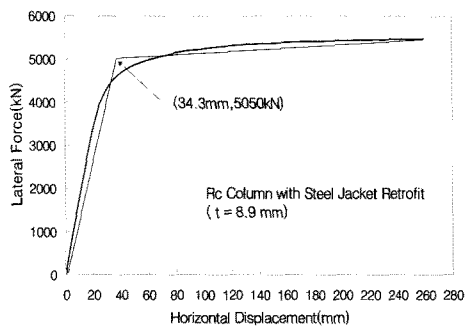
<그림 8> 보강전 모멘트-곡률



<그림 9> 보강전 비선형 정적해석

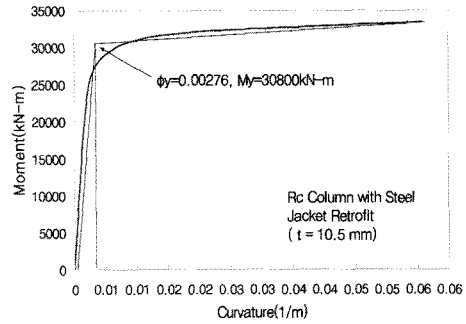


<그림 10> 보강후 모멘트-곡률(0.4g)

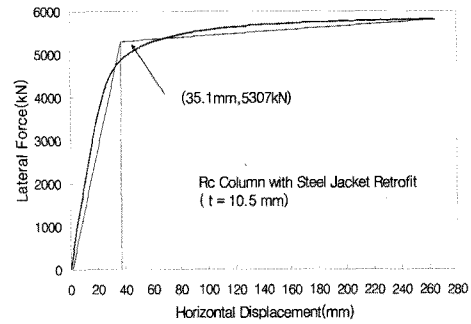


<그림 11> 보강후 비선형 정적해석 (0.4g)

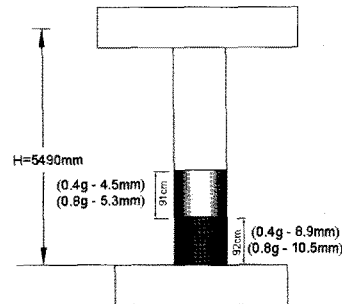
직접 변위-기반 설계법(DDM)에 의한 내진성능개



<그림 12> 보강후 모멘트-곡률 (0.8g)



<그림 13> 보강후 비선형 정적해석(0.8g)



<그림 14> Steel Jacket보강 결과

선 설계 결과, 보강전 · 후를 비교하여 <표 1>에 나타내었다. 기존 철근 콘크리트 기둥부재에 대해 Steel Jacket 을 이용 성능개선 설계를 할 경우, 본 연구에서 소개된 직접 변위-기반의 성능개선 설계 방법은 주어진 설계지진가속도에 대해서 설계 목표 성능에 적합한 성능개선 설계 결과를 제공해 주는 것으로 평가되었으며, Steel Jacket에 의한 피복 보강은 철근콘크리트 기둥의 연성능력 확보에 효과적인 결과를 제공해 주었다.

한편, 직접 변위-기반 설계법에 의해 결정된 Steel Jacket의 두께에 대하여 변위 계수법(DCM)<sup>2)</sup>에 의해 동일한 설계지진가속도에 대해 지진 성능평가를 수행하여 <표 2>와 같이 정리하였다.

〈표 1〉 DDM에 의한 RC 기둥의 보강설계 결과

Design Parameters	Non-retrofit Column (PGA=0.4g)	Retrofit Column	
		PGA=0.4g	PGA=0.8g
Thickness of Steel Jacket	-	8.9 mm	10.5 mm
Init. yield disp.	-	63.5mm	63.5mm
Period	1.24 sec	2.45 sec	1.81 sec
Yield Disp.	27.6 mm	34.3 mm	35.1 mm
Target Disp.	109.0 mm	260.0 mm	260.0 mm
Ductility factor	3.95	7.58	7.41
Yield Curvature(1/m)	0.00215	0.00256	0.00276
Yield Moment (kN-m)	17100	29300	30800
Yield Lateral Force	3851 kN	5050 kN	5370 kN

〈표 2〉 DCM에 의한 보강 성능평가 결과

Design parameters	Retrofit column	
	PGA = 0.4g	PGA = 0.8g
Thickness of Jacket	8.9 mm	10.5 mm
Yield Displacement	34.3mm	35.1 mm
Total Displacement	181 mm	172 mm
Ductility factor	5.28	4.91

Steel Jacket을 보강한 경우에 대한 변위계수법에 의한 성능평가 결과 설계지진가속도 0.4g인 경우 성능변위는 181mm, 0.8g인 경우 성능변위는 172mm로 추정되었다. 변위계수법에 의한 성능평가 결과는 직접 변위-기반 설계법에 의한 설계 목표성능값 보다 과소평가되었다. 이는 변위계수법은 항복 전의 강성을 고려하여 유효강성과 유효주기에 의한 목표 변위를 추정하는 반면, 직접 변위-기반 설계법은 항복 후의 강성비를 고려한 변위 연성도에 의한 유효 강성을 고려하고 있어 목표 변위에 따른 성능 설계 평가에 있어서 높은 연성비의 거동에 대해서도 타당성 있게 평가가 가능한 것으로 평가된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 기존 철근콘크리트 기둥에 대하여 Steel Jacket을 이용하여 내진성능개선 설계를 위한 성능설계 방법을 제시한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

대표적인 변위 기반설계법인 직접 변위-기반 설계 개념 및 변위계수법을 각각 적용하여 철근콘크리트 기둥에 대한 Steel Jacket 보강에 의한 성능기반 내

진성능개선 설계 방법을 제시하였다. Steel Jacket 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 비선형 해석을 위하여 단면 층상화 및 부재길이 방향의 세그먼트 분할에 의한 비선형 기둥부재의 해석 프로그램을 제시하였다. 개발된 성능설계법에 의한 철근콘크리트 기둥의 내진성능개선 설계 및 성능 평가 방법은 내진성능개선 목표의 설계 변위 성능에 따른 Steel Jacket의 보강 설계를 결정하는데 합리적이고 간편한 방법으로, 적용 예에서 본 방법은 기존 철근콘크리트 기둥과 비교하여 성능개선설계 결과 보강 전에 비해 변위 연성비 및 변위성능에서 크게 개선된 성능설계 결과를 제공해 주었다.

## 감사의 글

이 논문은 '2010년 교육과학기술부 교육역량강화 사업비 지원에 의한 연구과제'로 연구되었고, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 이승조, 박정민, 김화중, "중심압축을 받는 고강도콘크리트 층 전각형강관 기둥의 내력특성," 대한건축학회 구조제 논문집, 제 18권 7호, 2002, pp. 11-18.
2. 조창근, "FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발", 콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 2007, pp. 491-497.
3. 조창근, 하기주 외, "FRP 보강 철근콘크리트 기둥의 변위계수법에 의한 내진성능설계기법 개발," 콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 4, 2007, pp. 491-497
4. 정인규, 조창근, 박문호, "스틸재킷 보강 철근콘크리트 기둥의 변위기반 내진 성능 개선 설계 방법", 콘크리트학회 논문집, Vol.22, No. 1, 2010, 11~18.
5. Anil. K.Chopra, Goel Rakesh K, "Direct displacement based design : Use of inelastic vs. elastic design spectra", Earthquake Engineering, vol. 17, No.1, pp.47-64, 2001.
6. 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
7. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N., Seible, F., "Analytical Model for Steel-Jacketed RC Circular Bridge Columns", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.8. 1994.
8. Federal Emergency Management Agency (FEMA-356), "Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings", Washington, DC, USA, 2000.
9. 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.
10. 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.
11. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, New York, 1996.



- ▶ 접수일자 : 2009년 12월 1일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 10월 1일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 10월 8일