

# 철근콘크리트 연성 모멘트골조에 대한 반응수정계수와 비선형 변위량의 평가

## Estimation of Response Modification Factor and Nonlinear Displacement for Moment Resisting Reinforced Concrete Frames

김길환\*      전대한\*\*      이상호\*\*\*  
Kim, Kil Hwan      Jun, Dae Han      Lee, Sang Ho

### 국문요약

본 연구는 철근콘크리트 연성 모멘트골조의 선형·비선형 정적해석을 통한 반응수정계수와 비선형 변위량을 평가하여 합리적인 내진설계의 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 먼저 국내 내진설계 기준에 따라 각 모델을 설계한 후, 철근콘크리트 연성 모멘트골조의 반응수정계수와 비선형 변위량을 평가하였으며, 해석에 사용된 모델은 층수(10, 20, 30), 평면비(1:1, 1:2), 해석방법(2D, 3D)을 변수로 한 27개의 모델이다. 반응수정계수와 비선형 변위량의 평가는 각 모델별 선형·비선형 정적해석을 수행하여 그 결과를 비교·분석하여 산정하였다. 반응수정계수는 강도계수, 연성계수, 잉여도계수, 감쇠계수의 곱으로 산정하였고, 그 결과 해석방향의 저항골조의 수에 따라 2 스패인 경우 3.5, 3 스패인 경우 4.3, 4 스패인 이상인 경우에는 평면비나 층수와 상관없이 5.0에 근접한 결과를 나타내었다. 비선형 변위량은 층간변위각비(비선형 변위각/선형 변위각)에 의해 평가되었으며, 층간변위각비는 5.85에서 9.34로 나타났다.

주요어 : 반응수정계수, 강도계수, 연성계수, 비선형 변위량

### ABSTRACT

The purpose of this study is to provide a fundamental data of earthquake resistant design through the estimation of the response modification factor and nonlinear displacement for moment resisting reinforced concrete frames by linear and nonlinear static analysis. The analysis models are designed in accordance with AIK code and then, estimated the response modification factor and nonlinear displacement of the buildings. The parameters such as story numbers(10, 20, 30), plan ratios(1:1, 1:2) and analysis types(2D, 3D) of building structure are chosen for use in this study. After comparing the results of linear and nonlinear static analysis, the response modification factor is obtained as the product of four factors: ductility factor, strength factor, damping factor and redundancy factor. The response modification factor are close to 3.5 in case of 2 span, 4.3 in case of 3 span and 5.0 in case of 4 or more span models regardless number of stories and plan ratios. The nonlinear displacement is evaluated from the ratio of story drift angle(nonlinear drift/linear drift). The ratio of story drift angle increases as story numbers increase and the value varies from 5.85 to 9.34.

Key words : response modification factor, strength factor, ductility factor, nonlinear displacement

## 1. 서 론

우리 나라의 건축물에 대한 내진설계기준은 1988년에 건축물의 구조에 관한 규칙<sup>(1)</sup>을 개정하면서 시작되었다. 내진설계기준은 2000년까지 그 방법과 설계계수의 큰 변화 없이 사용하다가 2000년 6월에 최근의 연구결과 및 기상통계자료에 따라 내진설계 기준이 적용되는 지역 및 대상건축물의 범위를 확대·조정하고, 건축기술의 발전에 따라 신속하게 대처하기 위하여 건축물의 구조계산에 관한 구체적, 기술적인 사항을 개선하여 현행 제도의 운영상에 나타난 일부 미비점을 보완하여 개정되었다.<sup>(6)</sup>

현행 내진설계기준은 설계상의 절차뿐만 아니라, 기준내의 설계계수 등 대부분 ATC3-06<sup>(12)</sup>과 UBC 기준<sup>(11)</sup>을 기초로 제정되었고, 외국 기준에 제시되지 않는 몇몇 설계계수들은

명확히 정립되지 않고 경험적으로 사용되어 왔다. 이러한 설계계수 중 하나인 반응수정계수는 등가정적해석에서 지진하중 산정시 지진하중을 저감시키는 역할을 하는 중요한 계수로서 우리 나라의 내진설계기준에서는 구조방식과 지진저항 시스템에 따라 그 값을 다르게 규정하고 있다.

그러나 설계기준에서 제시하는 반응수정계수는 일반적인 구조시스템을 대상으로 과거 지진발생에 따른 피해와 거동 특성을 관찰한 내용을 바탕으로 결정된 수치로서 이론적 산출근거는 미약한 상황이며, 건물의 높이, 평면의 형태와는 상관없이 구조형식이 동일하면 같은 반응수정계수 값을 사용해야 하는 문제점이 제기되어 왔다.<sup>(2)</sup> 이러한 문제의 제기 에 따라 최근에 이루어진 반응수정계수에 대한 국내 연구로서 최문성 등<sup>(3)</sup>은 주상복합건물을 3차원 비선형 정적해석을 수행하여 반응수정계수를 유도하고, 유도된 반응수정계수를 ATC 기준과 우리나라 기준의 차이를 고려하여 보정을 하였다. 이영욱<sup>(4)</sup>은 약지진동 지역에서 4층의 철근콘크리트 연성 모멘트골조를 스패인과 경간(bay)을 변화시키며 설계한 후 2차원 push-over 해석을 수행하여 초과강도의 영향을 파악하

\* 정회원·부산대학교 대학원, 석사과정

\*\* 정회원·동서대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : jdh@dongseo.ac.kr)

\*\*\* 정회원·부산대학교 건축공학과, 부교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2002. 1. 3 / 심사종료일 : 2002. 4. 9)

는 연구를 수행하였다. 이한준 등<sup>(5)</sup>은 철골조 건물을 우리나라의 내진설계기준에 맞게 설계한 후 철골 연성 모멘트골조와 철골 집중가새골조를 2차원 비선형 해석 프로그램을 이용하여 반응수정계수를 산정하고, 구조물의 층수와 구조시스템에 따른 반응수정계수의 적정성을 평가하는 연구를 수행하였다.

이들 연구는 철근콘크리트구조와 같이 부정정차수가 높은 구조물에서 잉여도 계수에 대한 고려가 이루어지지 않았으며, 또한 구조물의 층 수, 경간 수에 따른 영향을 정량적으로 파악하지 못하고 있다.

한편, 우리나라 내진설계기준에서는 구조물의 허용 수평 변위를 층간변위로 제한하고 있다. 허용 층간변위( $\delta_x$ )는 강지진동이 작용할 때 구조물의 비선형 거동을 고려하여 설정된 것이며, 등가정적 설계용 지진하중에 의한 각층의 탄성변위에 반응수정계수를 곱해 산정하고 있으나, 실제 건물의 비선형 거동을 반영한 것이 아니고 그 이론적 근거도 불명확한 실정이다.

본 연구에서는 철근콘크리트 연성 모멘트골조를 대상으로 반응수정계수와 비선형 변위량의 산정에 대하여 고찰하고, 우리나라의 내진설계기준으로 설계된 철근콘크리트 연성 모멘트골조에 대하여 반응수정계수와 허용 층간변위( $\delta_x$ )의 타당성을 검증하는 것을 목적으로 한다.

해석변수로서 반응수정계수 산정시 제기된 문제점<sup>(2)</sup>에 따라 해석방법(2차원, 3차원 해석), 건물 층수(10, 20, 30 층), 평면비(1:1, 1:2), 해석방향의 저항골조 수(2, 3, 4, 8)를 선정하고, 선형·비선형 정적해석을 수행하여 반응수정계수 및 비선형 변위량을 산정하여 분석·검토한다.

## 2. 내진설계기준에서 반응수정계수와 층간변위

우리 나라 내진설계기준<sup>(6)</sup>에서 밀면전단력은 다음과 같이 산정된다.

$$V = \left( \frac{A I_E C}{R} \right) W \quad (1)$$

여기서, C는 동적계수( $C = S/1.2\sqrt{T} \leq 1.75$ ), A는 지역계수, S는 지반계수,  $I_E$ 는 중요도 계수, R은 반응수정계수, W는 건축물의 전 중량이다.

또한 지진하중에 의한 허용 층간변위는 그 층 높이의 0.015배를 초과할 수 없으며, 허용 층간변위량은 다음 산정식에 의하여 산정한다.

$$\delta_x = R \delta_{xe} \leq 0.015 h_x \quad (2)$$

여기서 R은 반응수정계수,  $h_x$ 는 층고,  $\delta_x$ 는 x층의 수평변위량,  $\delta_{xe}$ 는 설계용 정적 지진하중에 대한 탄성해석에 의한 x층의 수평변위량이다.

상기 식 (1)은 밀면전단력의 산정에 큰 영향을 미치는 반응수정계수의 적용 예를 보여주는 것이다. 또한 식 (2)는 반

응수정계수를 이용하여 지진시 비선형 층간변위량을 예측하는 방법을 나타내고 있다. 그러나 식 (2)는 비선형해석에 의한 검증 없이 도입된 것으로 적용시 그 타당성이 의문시된다.

## 3. 반응수정계수 산정식

반응수정계수가 ATC3-06<sup>(12)</sup>에서 처음 소개된 이후 많은 연구들이 수행되었다. 그 결과 ATC-19<sup>(2)</sup>에서 식 (3)과 같이 반응수정계수를 4개의 구성요소로 표현하는 산정식으로 제안하였다.

$$R = R_\mu \times R_S \times R_R \times R_\xi \quad (3)$$

여기서,  $R_\mu$ 는 연성계수(ductility factor),  $R_S$ 는 강도계수(strength factor),  $R_R$ 은 잉여도계수(redundancy factor),  $R_\xi$ 는 감쇠계수(damping factor)이다.

### 3.1 연성계수

구조물은 비선형 변형을 통하여 에너지를 흡수할 수 있기 때문에 구조물의 탄성영역에서 지지할 수 있는 수평하중보다 더 큰 하중도 지지할 수 있다. 이러한 영향을 반영하는 계수가 연성계수이다. 연성계수 산정시 고려된 연성비는 전체 시스템의 연성비이며, 산정식은 다음과 같다.<sup>(7),(8)</sup>

$$R_\mu = \frac{C_{eu}}{C_y} \quad (4)$$

여기서,  $C_y$ 는 구조물의 전체 중량에 대한 비탄성 한계 밀면전단력의 비를 나타내며,  $C_{eu}$ 는 구조물의 전체 중량에 대한 탄성 한계 밀면전단력의 비를 의미한다. 그림 1에서 구조물이 비선형 거동시 흡수하는 에너지와 탄성 거동시 흡수하는 에너지가 동일한 등가에너지법(equal energy method)을 사용하여 구한  $C_y$ 는 구조물의 탄성거동의 한계점인  $C_{eu}$ 로부터 정할 수 있다.

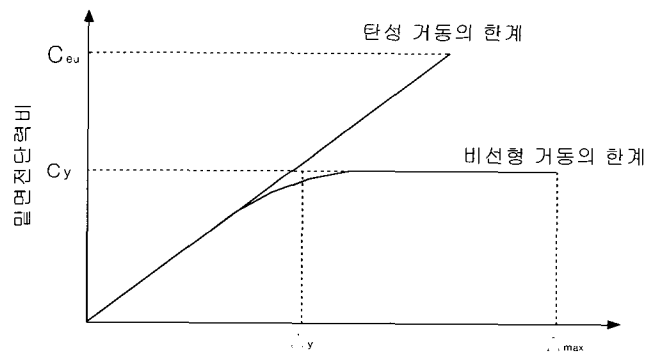


그림 1 연성계수

### 3.2 강도계수

일반적으로 건축물이 저항하는 최대 전단력은 설계용 밀면전단력보다 초과하게 되며, 이때의 초과강도를 고려해 주기

위한 계수가 강도계수이다. 강도계수는 비선형 정적해석(nonlinear static analysis 또는 pushover analysis)을 수행하여 건축물의 밀면전단력-지붕층의 변위 관계를 파악한 후 설계용 밀면전단력  $V_{Design}$ 과 최대 전단력  $V_{max}$ 의 비로서 구할 수 있다.<sup>(7),(8)</sup>

$$R_s = \frac{V_{max}}{V_{Design}} \quad (5)$$

그림 2에서 강도계수는 선형·비선형 정적해석을 각각 수행한 후 등가에너지법에 의해 항복점을 정의하고, bi-linear로 근사화 하여 최대 밀면전단력을 정하는 방법을 나타낸다.

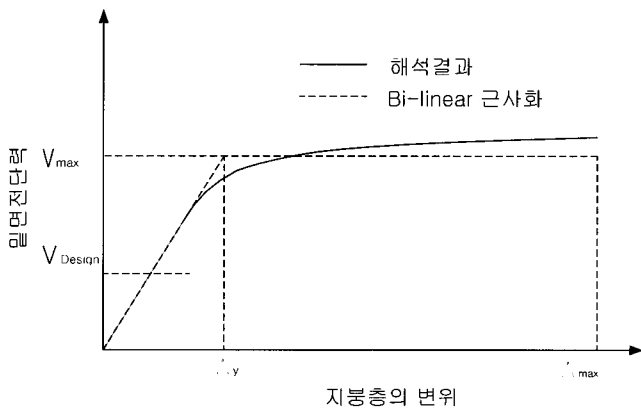


그림 2 강도계수

### 3.3 잉여도계수

잉여도계수는 건축물을 구성하는 일련의 수직방향 골조들이 분담하여 수평하중에 대한 저항도를 고려한 계수로서 내진골조에 대한 영향을 정량적으로 조사한 연구는 극히 미비한 실정이다. ATC-34<sup>(9)</sup>에서는 저항골조의 수에 따라 표 1과 같이 구분하여 잉여도계수를 부여하고 있다.

표 1 잉여도계수

횡 지진력에 대한 저항골조의 수	2	3	4
잉여도 계수	0.71	0.86	1.00

### 3.4 감쇠계수

감쇠는 일반적으로 구조물의 이력거동과 점성감쇠에 의해 에너지를 소산시키는 능력을 나타낸다. 탄성영역 내에서 건물의 감쇠특성은 일반적인 등가점성감쇠로 표현되어지며, 임계감쇠 5%를 사용하고 있다.

감쇠계수는 건물의 하중-변위 응답에 대한 부가적인 감쇠 장치의 효과를 고려하기 위한 계수이며, 표 2에서 Wu와 Hanson<sup>(10)</sup>이 제시한 값은 건물의 변위응답에 대해 중점을 둔 것이고, UBC-94<sup>(11)</sup> 규준은 Riddle과 Newmark의 연구결과를 바탕으로 면진 시스템(seismic isolation system)의 설계 지침에 대하여 규정된 값이다.

표 2 감쇠계수

점성감쇠(%)	2	5	7	10	12	15	20
UBC-94	0.80	1.00	-	1.20	-	-	1.50
Wu & Hanson	-	1.00	-	1.19	-	1.39	1.56

## 4. 해석 모델

해석 모델은 우리나라 내진설계규준에 따라 구조설계를 수행하고, 구조설계된 철근콘크리트 건물을 해석 변수별로 모델링한다. 선형·비선형 정적해석을 수행하여 밀면전단력-지붕층의 변위 관계를 구하고, 반응수정계수를 식 (3)을 적용하여 산정한다.

본 연구에서 건축물의 구조설계나 선형 정적해석은 MIDAS/GENw Version 4.2.1<sup>(13)</sup>을 사용하였고, 비선형 정적해석은 3차원 구조물의 비선형 정적·동적 해석을 수행할 수 있는 프로그램인 CANNY99<sup>(14)</sup>를 사용하였다.

### 4.1 해석 모델의 개요 및 설계

국내의 내진설계규준에서 사용하는 반응수정계수는 건물의 높이, 평면의 형태, 구조부재의 배치와는 무관하고 구조형식이 동일하면 같은 값을 사용한다는 문제점이 제기되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 연성 모멘트골조로 제한하였고, 건축물의 층 수, 평면비, 해석방법, 저항골조의 수에 따라 평가한다.

각 해석모델은 평면비에 따라 1:1/1:2, 층수에 따라 10층/20층/30층, 해석방법에 따라 2차원/3차원 모델을 각각 선정하였다. 해석 변수에 의한 각 모델들의 변수는 표 3과 같고, 선정된 모델 중 3차원 평면비 1:1, 1:2 모델의 평면은 그림 3과 같다.

그림 3에서 점선으로 표기된 부분은 2차원 모델의 골조이다. 표 3에서의 각 모델의 표기는 해석 모델 형태에 따라 2D, 3D, 층수에 따라 10F, 20F, 30F, 평면비 형태에 따라 1:1, 1:2, 해석 모델의 경간 수에 따라 22, 33, 42, 44, 84로 구분하여 나타낸다.

선정된 모델은 각 모델별로 국내의 내진설계 규준에 맞게 설계를 수행하였으며, 이때에 적용된 가정은 다음과 같다.

- 1) 용도 : 사무소
- 2) 구조형식 : 철근콘크리트 연성 모멘트골조
- 3) 적용규준 : 건축물의 하중기준 및 해설(대한건축학회)
- 4) 층고 : 3.5m
- 5) 경간 : 6m
- 6) 재료강도 :
  - 콘크리트 : 5층마다 동일한 단면과 콘크리트의 압축강도를 사용(표 4 참조)
  - 철근의 인장강도 : 4000kgf/cm<sup>2</sup>
- 7) 연직하중 : 해석의 편의에 따라 일반적인 사무소 건물의 하중을 적용(표 5 참조)
- 8) 지진하중 산정시의 가정(표 6 참조)

표 3 해석 모델의 개요

모델명	층수	높이	길이 (X방향 : m)	폭 (Y방향 : m)
3D10F11(22)	10	35	12	12
3D20F11(22)	20	70	12	12
3D30F11(22)	30	105	12	12
3D10F11(33)	10	35	18	18
3D20F11(33)	20	70	18	18
3D30F11(33)	30	105	18	18
3D10F12(42)	10	35	24	12
3D20F12(42)	20	70	24	12
3D30F12(42)	30	105	24	12
3D10F11(44)	10	35	24	24
3D20F11(44)	20	70	24	24
3D30F11(44)	30	105	24	24
3D10F12(84)	10	35	48	24
3D20F12(84)	20	70	48	24
3D30F12(84)	30	105	48	24
2D10F11(22)	10	35	12	-
2D20F11(22)	20	70	12	-
2D30F11(22)	30	105	12	-
2D10F11(33)	10	35	18	-
2D20F11(33)	20	70	18	-
2D30F11(33)	30	105	18	-
2D10F11(44)	10	35	24	-
2D20F11(44)	20	70	24	-
2D30F11(44)	30	105	24	-
2D10F12(84)	10	35	48	-
2D20F12(84)	20	70	48	-
2D30F12(84)	30	105	48	-

모델설명: 3D10F11(44)

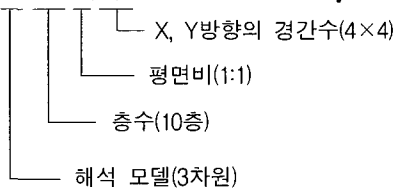


표 4 콘크리트의 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

층 수	10층	20층	30층
1-5층	240	300	400
6-10층	210	270	350
11-15층	-	240	300
16-20층	-	210	270
21-25층	-	-	240
26-30층	-	-	210

표 5 연직하중(kgf/m<sup>2</sup>)

용도	업무시설	지붕
고정하중	400	530
적재하중	250	200

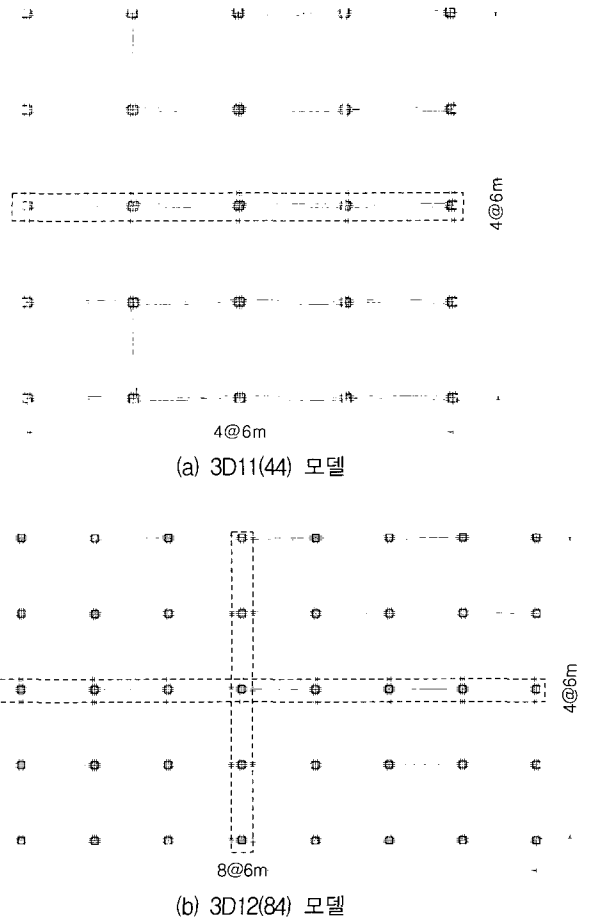


그림 3 해석 모델의 평면도

표 6 지진하중 산정시의 가정

지진하중 산정시 적용된 계수	
지역계수	0.1(지진구역 1)
중요도계수	1.0(도시계획지역, 중요도 2)
지반계수	1.2(지반2)
반응수정계수	5.0(철근콘크리트연성모멘트골조)

### 4.2 모델의 해석

구조설계된 건물의 골조를 모델화하고, 국내 내진설계규준에서 규정된 방법에 따라 등가 정적지진하중을 구조물에 입력하여 선형·비선형 정적해석을 수행하였다.

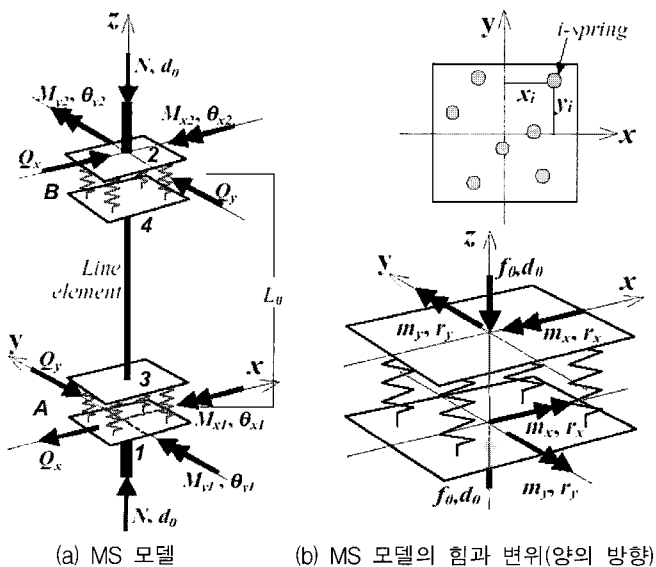
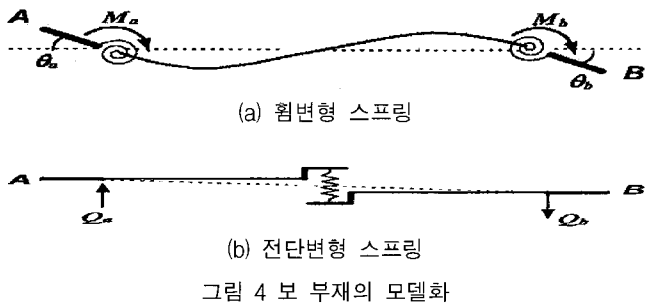
비선형 정적해석은 CANNY99를 이용하여 힘을 단계적으로 증가시키면서 강성이 변동하는 하중 단계 부근에서는 반복계산을 수행하는 증분 해석법(step-by-step)<sup>(14)</sup>을 사용하였다. 해석시 사용되는 보 부재의 단면 내력은 단면치수 및 배근도를 이용하여, 휨강도 및 전단강도를 국내 규준에 의해 산정하고, 비선형 정적해석을 수행하였다. 비선형 정적해석시 적용된 모델 및 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 기하학적인 비선형과 연직하중에 의한 P-Δ 효과는 고려하지 않음.
- 2) 부재의 단부 절점에서의 접합영역은 강역으로 고려.
- 3) 미소변형이론(Euler-Bernoulli)의 가정을 적용

- 4) 골조와 부재의 모델화
  - 바닥판 : 강막 바닥판의 가정
  - 보 : 일축 전단변형 스프링과 휨변형 스프링(그림 4 참조)<sup>(14)</sup>
  - 기둥 : MS(multi-spring) 모델(그림 5 참조)<sup>(14),(15)</sup>과 일축 전단변형 스프링
- 5) 철근콘크리트 기둥의 MS모델을 제외한 모든 부재의 골격곡선은 tri-linear로 가정
- 6) 수직하중은 고정하중만을 적용
- 7) 비선형 정적해석은 층간변위각이 0.015에 도달했을 때, 구조물이 붕괴된 것으로 가정하여 해석을 종료

보의 모델화에 사용된 일축 스프링<sup>(14)</sup>은 그림 4에 나타낸 바와 같이 하나의 직선으로 표시되는 모델로 비선형 휨변형은 부재의 단부에 집중되고, 두 개의 휨 스프링의 회전에 의해서 나타난다. 보의 전단변형은 보의 중간에서 탄성거동을 하도록 모델화 된다. 이러한 보 모델은 휨과 전단변형사이의 상호작용은 고려하지 않는다.

기둥 부재는 기둥의 축력과 2축 휨을 동시에 고려하기 위하여 그림 5와 같이 기둥의 양단부에 MS(multi spring) 모델<sup>(14),(15)</sup>을 사용하고, 전단변형을 고려하기 위해 중앙에 전단 변형 스프링을 사용하였다. MS 모델은 기둥 부재에서 축 하중의 변화와 2축 휨 사이의 상호작용을 고려한 모델이며 4개 이상의 일축 스프링으로 이루어진다. 철근콘크리트 기둥 부재의 경우 MS 모델은 철근과 콘크리트의 특성을 이용하



여 모델화할 수 있으며, 스프링의 갯수는 재료의 특성과 단면의 크기, 철근의 배열에 의해 결정되고, 각각의 스프링은 콘크리트와 철근의 응력-변형률 특성과 단면적을 가지는 스프링 요소로 거동한다.<sup>(14)</sup> 철근요소와 콘크리트 요소의 재료적 특성은 그림 6, 7과 같다. 철근 요소의 응력-변형도 곡선에서 변형도 경화는 고려하지 않았다. MS 모델과 일축 전단 스프링은 서로 독립적인 스프링에 의해 모델화되며, 각각의 스프링의 상호작용은 고려하지 않는다.

### 5. 해석결과 및 고찰

27개의 해석모델에 대해 구조설계를 한 후 우리나라의 내진설계규준에서 반응수정계수를 고려하지 않은 밀면전단력을 산정하여 선형, 비선형 정적해석을 각각 수행하였다.

각 모델에 대해 밀면전단력에 대한 지붕층의 변위 관계를 구하고, bi-linear로 근사화 시킨 다음 항복점을 정의하였다. 이때 고려된 한계상태의 변위  $\Delta_{max}$ 는 각 구조물의 구조형식에 따라 다를 수 있지만, 본 연구에서는 내진설계규준에서 정한 층간변위각이 0.015에 도달한 상태의 변위로 가정하여 해석모델의 임의 층의 층간변위각이 0.015에 도달했을 때 구조물 지붕층의 변위를 한계상태의 변위로 정의한다.

본 연구에서 적용된 항복점은 그림 8과 같이 같은 에너지 흡수능력을 가질 수 있도록 항복강도와 변위를 결정한다. 항복점을 결정한 후 항복점에 의한 최대 밀면전단력, 내진설계규준에 의한 설계용 밀면전단력과 선형정적 해석에 의한 탄성한계 밀면전단력을 이용하여 연성계수와 강도계수를 구한 다음 반응수정계수를 산정하였다.

각 층별 비선형 변위량( $\delta_x$ )은 각 모델의 선형 및 비선형 정적해석에 의한 층간변위각비를 사용하여 최대 변위량을

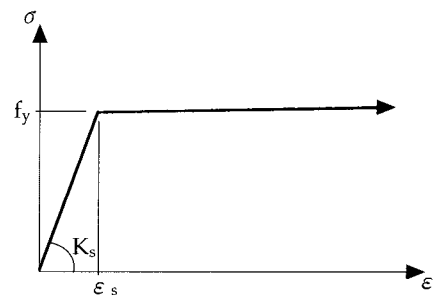


그림 6 철근의 응력-변형도 곡선

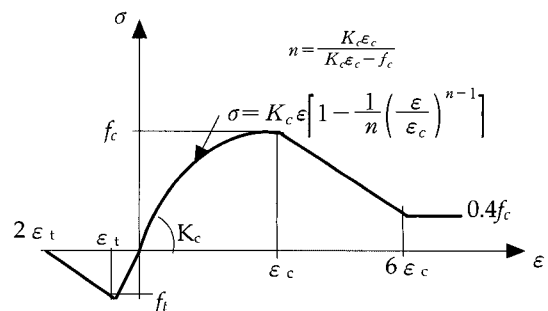


그림 7 콘크리트의 응력-변형도 곡선

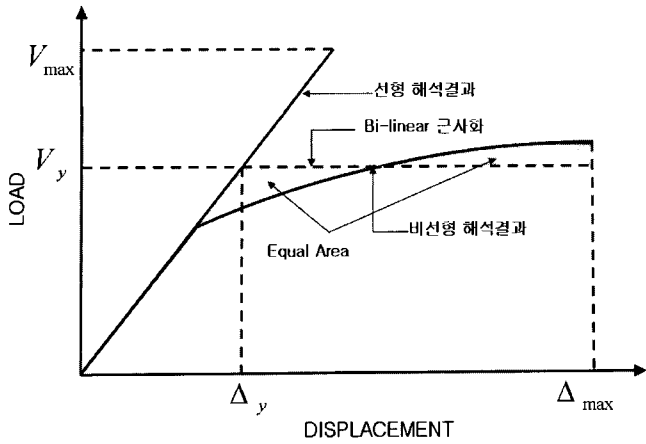


그림 8 항복점의 정의

검토한다. 이 때 선형 정적해석의 설계용 밀면전단력은 반응수정계수를 고려하여 산정하며, 비선형 해석의 경우 반응수정계수를 고려하지 않은 밀면전단력을 입력하여 산정한다.

### 5.1 반응수정계수의 평가

반응수정계수는 강도계수, 연성계수, 감쇠계수, 잉여도계수를 곱하여 산정하였다. 감쇠계수는 철근콘크리트 구조물의 경우 일반적으로 감쇠비가 5%이며, 이에 따른 감쇠계수는 1.0이다. 잉여도계수는 횡 지진력에 대한 저항골조의 수에 따라 각 모델별로 0.71~1.0을 적용하여 계산하였다.

#### 5.1.1 연성계수에 관한 고찰

연성계수  $R_\mu$ 는 그림 9와 같이 밀면전단력에 대한 지붕층의 수평변위 관계를 이용하여 구조물의 전체 중량에 대한 비탄성 한계 밀면전단력의 비  $C_y$ 와, 구조물의 전체 중량에 대한 탄성 한계 밀면전단력과의 비  $C_{eu}$ 를 구하여,  $C_{eu}/C_y$ 를 이용하여 구하였다.

그림 10은 각 모델별 연성계수 분포를 나타낸다. 각 모델별 연성계수는 층이 증가할수록 연성계수도 증가한다는 것을 알 수 있다. 평면비 1:2 모델인 경우 장변방향의 연성계수보다 단변방향의 연성계수가 더 큰 값을 나타내었는데 이는 해석방향의 저항골조 수가 작을수록 연성계수도 낮게 나타났다고 판단된다. 2차원 모델의 경우에는 3차원 모델의 해석결과와 비슷한 경향을 보였다.

#### 5.1.2 강도계수에 관한 고찰

강도계수  $R_s$ 는 그림 9와 같은 밀면전단력과 지붕층의 변위 관계에서 설계용 밀면전단력  $V_{Design}$ 과 최대 전단력  $V_{max}$ 을 구한 다음,  $V_{max}/V_{Design}$ 을 이용하여 구하였다.

그림 11은 각 모델별 강도계수의 분포를 나타내며, 강도계수는 3D12(84)모델인 경우 20층보다 30층에서 약간 증가하는 경향을 나타내었지만 전반적으로 층이 증가할수록 감소하였다.

평면비 1:2의 모델인 경우 장변방향의 강도계수가 단변방

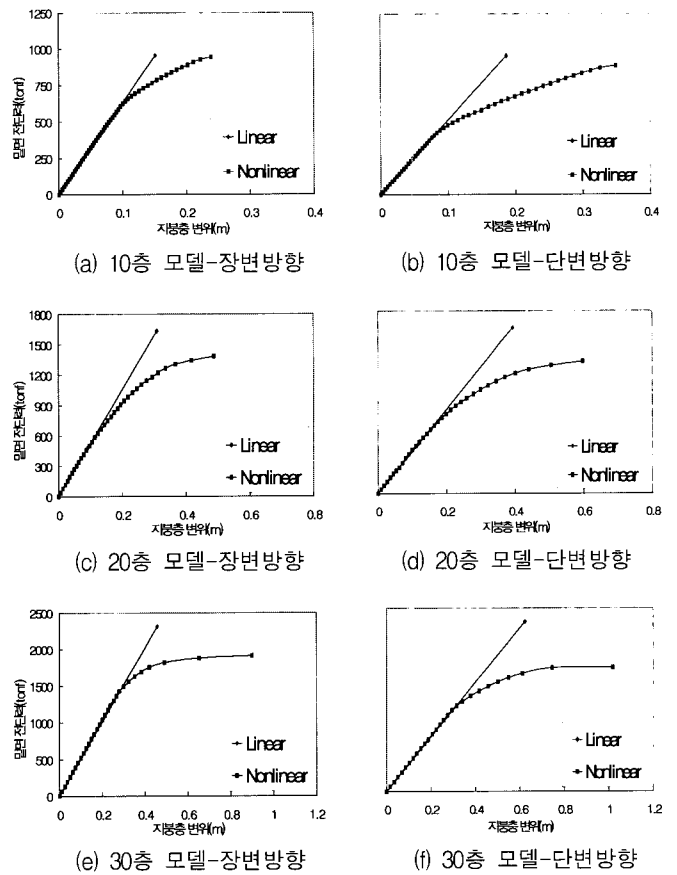


그림 9 3D12(84)모델의 밀면전단력-지붕층의 변위 관계

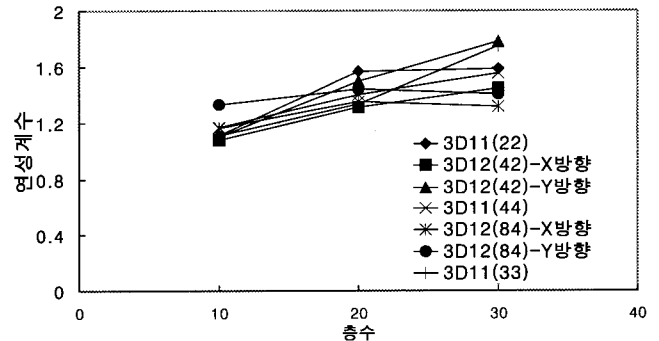


그림 10 각 모델별 연성계수의 분포

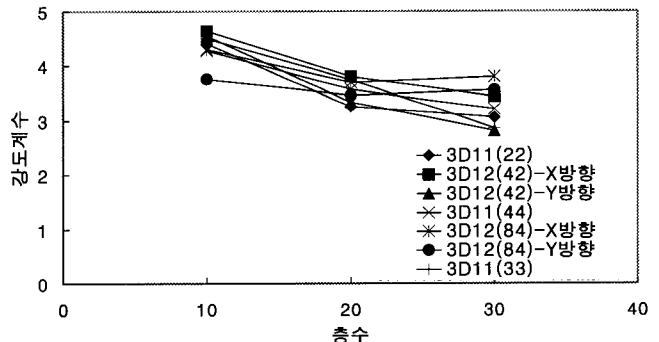


그림 11 각 모델별 강도계수의 분포

향의 강도계수보다도 크게 나타났으며 이는 해석방향의 저항골조 수에 의한 부정정 차수가 증가할수록 강도계수도 증가하는 결과를 나타냈다. 2차원 모델인 경우 3차원 모델의

해석결과와 비슷한 경향을 보였다.

### 5.1.3 반응수정계수에 대한 고찰

그림 12은 잉여도계수를 고려하지 않은 각 모델별 반응수정계수의 분포를 나타낸다. 각 해석모델의 반응수정계수는 5.0에 근접한 결과를 나타내었다. 표 1의 잉여도계수를 고려할 경우 반응수정계수는 그림 13과 같이 해석방향의 경간 수에 따라 2경간인 경우 3.5, 3경간인 경우 4.3, 4경간 이상인 경우 5.0에 근접한 결과를 나타내었다. 이것으로부터 반응수정계수는 해석방향의 저항골조의 수에 기인한 잉여도계수의 영향에 따라 각각 다른 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 반응수정계수는 잉여도계수의 영향을 고려할 필요성이 있다고 사료된다.

평면비와 층수에 의한 반응수정계수는 해석방향의 저항 골조 수, 즉 잉여도 계수의 영향에 따라 평면비 1:1, 1:2 모델이 각각 다르게 나타났지만 4경간 이상인 경우 층수나 평면비에 관계없이 거의 동일한 값인 5.0을 나타내었다. 2차원 해석 모델과 3차원 해석 모델의 반응수정계수의 산정결과는 그림 14

와 같이 저항 골조 수에 따라 차이가 나타나며 해석방법에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

### 5.2 비선형 변위량의 평가

여기서는 우리나라 현행 내진설계규준의 각층의 허용 층간변위량( $\delta_x$ ) 평가방법의 타당성을 검증하기 위해 선형해석에 의한 층간변위량( $\delta_{xe}$ )과 실제 비선형 거동에 의한 변위량의 관계를 검토한다. 선형·비선형 정적해석에 의한 층간변위각을 구하고, 선형해석과 비선형 해석에 의한 층간변위각비( $\delta_x/\delta_{xe}$ )를 산정하여 고찰하였다.

그림 15과 16은 3D12(42)모델의 층간변위각과 층간변위각비를 나타낸다. 각 모델의 층간변위각의 분포는 선형 해석인 경우 전형적인 골조구조 형식의 분포를 나타낸다. 비선형 해석인 경우에는 층수에 따라 다르게 나타났다. 비선형 해석의 경우 최대 층간변위각은 중간층에서 나타났다. 또한, 비선형 해석에 의한 층간 변위각은 층이 증가할수록 증가하였다.

현행 내진설계 규준에서 밀면전단력 산정과 층간 변위량 산정에서 반응수정계수는 동일하게 사용된다. 선형 정적해석과 비선형 정적해석에서 구한 층간변위각비는 반응수정계수( $R=\delta_x/\delta_{xe}$ )와 같은 것이며 각 모델별 층간변위각비를 구하여 비선형 변위량을 평가하고, 구조설계시 적용된 반응수정계수와 상관성을 검토하였다.

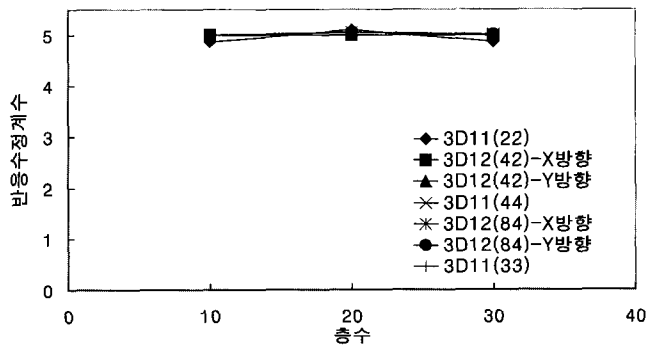


그림 12 각 모델별 반응수정계수의 분포(잉여도계수 무시)

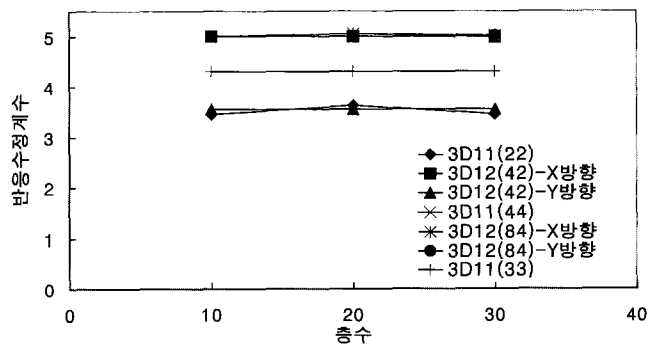


그림 13 각 모델별 반응수정계수의 분포(잉여도계수 고려)

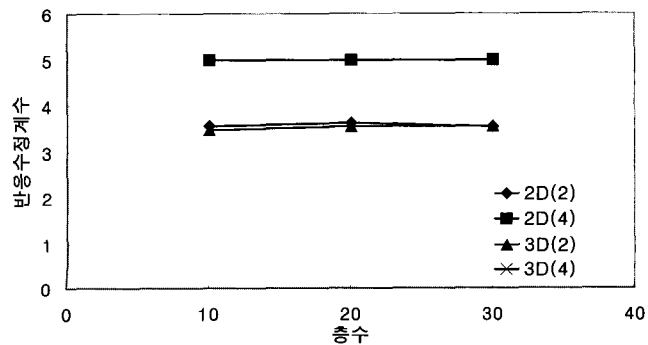
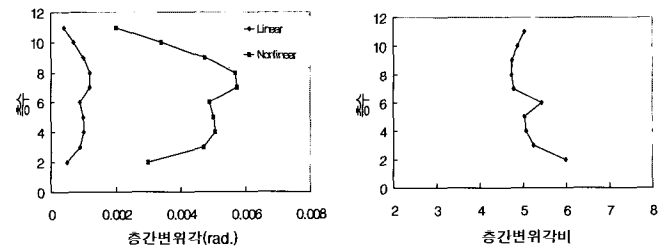
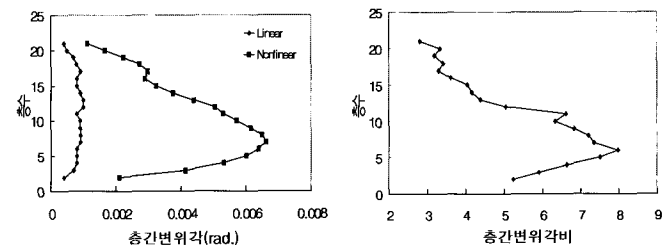


그림 14 2차원, 3차원 모델의 반응수정계수 분포



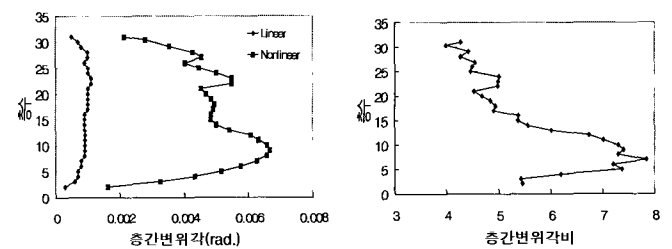
(a) 10층 모델의 층간변위

(b) 10층 모델의 층간변위 각비



(c) 20층 모델의 층간변위

(d) 20층 모델의 층간변위 각비



(e) 30층 모델의 층간변위

(f) 30층 모델의 층간변위 각비

그림 15 3D12(42) 모델의 장변방향의 층간변위각

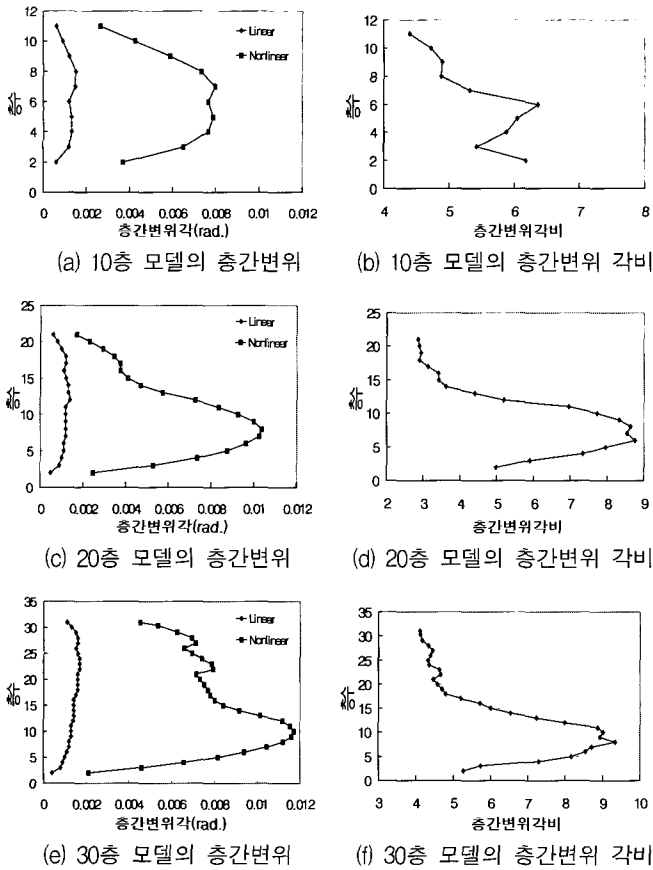


그림 16 3D12(42) 모델의 단변방향의 층간변위각

그림 15와 16에 의한 층간변위각비는 1층과 상층부에서는 구조설계시 적용된 반응수정계수와 비슷한 값이지만 중간층에서는 크게 나타났고, 층이 증가할수록 증가하였다. 평면비 1:2모델의 경우 장변방향의 층간변위각비보다 단변방향의 층간변위각비가 더 크게 나타났다. 이는 해석방향의 저항골조 수에 의한 잉여도 계수의 영향으로 판단된다.

그림 17에서 각 모델의 최대 층간변위각비의 분포는 층이 증가할수록 증가하였으며, 평면비 1:2모델인 경우 장변방향보다 단변방향의 층간변위각비가 더 크게 나타났다. 최대 층간변위각비는 5.85에서 9.34로 나타났는데 이는 현행 내진설계 기준에서 정하는 밀면전단력과 층간변위량을 산정할 때 적용되는 반응수정계수 R=5보다 큰 값을 나타낸다.

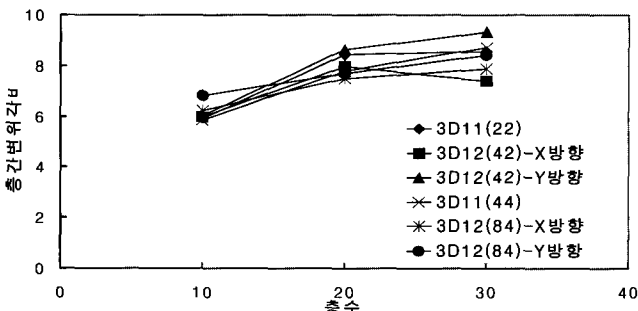


그림 17 각 모델별 최대 층간변위각비의 분포

## 6. 결 론

해석변수에 의해 선정된 철근콘크리트 연성 모멘트 골조의

27개의 모델에 대해 구조설계를 수행하고, 설계된 각 모델에 대해 선형·비선형 정적해석을 통하여 반응수정계수와 층간변위각을 산정하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연성계수는 각 모델에 따라 1.08~1.78로 층이 증가할수록 증가하며, 평면비 1:2 모델인 경우에는 장변방향보다 단변방향의 연성계수가 더 큰 것으로 나타났다.
- 2) 강도계수는 각 모델에 따라 2.81~4.64로 층이 증가할수록 감소하며, 평면비 1:2 모델인 경우에 단변방향보다 장변방향의 강도계수가 더 큰 것으로 나타났다.
- 3) 반응수정계수는 횡지진력에 대한 저항골조의 수에 따라 2경간일 경우에는 3.5, 3경간 일 경우에는 4.3, 4경간 이상 일 경우에는 층 수나 평면비에 관계없이 5.0에 가까운 값으로 나타났다. 따라서 반응수정계수 산정시 저항골조 수의 영향에 대한 잉여도 계수를 고려하여 산정하는 것이 타당하다.
- 4) 비선형 해석의 결과에서 층간 변위각의 분포 경향은 층수에 따라 다르게 나타났으며, 최대 층간변위각비는 5.85에서 9.34로 나타났다. 이는 현행 내진설계기준에서 정하는 허용 층간변위량을 산정할 때 적용되는 반응수정계수와는 일치하지 않는 결과로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 건설부, "내진설계 지침서 작성에 관한 연구", 1987.
2. ATC, "Structure response modification factors," *Applied Technology Council Report*, ATC-19, Redwood City, California, 1995.
3. 최문성, 김희철, "하부골조의 층수에 따른 주상복합 건물의 적정반응수정계수에 관한 연구", 한국지진공학회논문집, 제4권 제2호(통권14호), 2000, pp. 13-23.
4. 이영욱, "약지진동 지역의 저층 RC 골조의 초과 강도", 한국지진공학회논문집, 제3권, 제2호(통권10호), 1999, pp. 9-18.
5. 이한준, 주영규, 김상대, "철골조 건물의 반응 수정계수에 대한 해석적 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권, 제1호, 2001, pp. 151-154.
6. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, 2000.
7. Uang, C. M., "Establishing R(or  $R_w$ ) and  $C_d$  factors for building seismic provision," *Journal of Structure Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 1, 1991, pp. 19-28.
8. Uang, C. M., "Seismic force reduction and displacement amplification factors," *10th World Conference on Earthquake Engineering*, 1992.
9. ATC, "A critical review of current approaches to earthquake-resistant design," ATC-34, 1995.
10. Wu, J. and Hanson, R. D., "Study of inelastic spectra with high damping," *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 6, 1989, pp. 1412-1431.



11. ICBO, *Uniform Building Code*, International Conference on Building Officials, Whittier, California, 1994.
12. ATC, "Tentative provisions for the development of seismic regulation for buildings," ATC3-06, 1978.
13. 포스마이더스, *User's Manual-Analysis and Design*, 2000.
14. Li, K. N., *CANNY99 Three-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program Package-Technical and Users Manual*, Canny Consultants PTE. Ltd. Singapore, 1999.
15. Li, K. N. and Otani, S., "Multi-spring model for 3-dimensional analysis of RC members," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 1, No. 1, 1993, pp. 17-30.