

# 비구조요소의 내진 설계를 위한 기존 층응답스펙트럼의 평가

## A Study on Evaluation of Floor Response Spectrum for Seismic Design of Non-Structural Components

최경석<sup>1)</sup> · 이원호<sup>2)</sup> · 양원직<sup>2)</sup> · 김형준<sup>1)\*</sup>

Choi, Kyung Suk<sup>1)</sup> · Yi, Waon Ho<sup>2)</sup> · Yang, Won-Jik<sup>2)</sup> · Kim, Hyung Joon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울시립대학교 건축공학과, <sup>2)</sup>광운대학교 건축공학과

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, University of Seoul, <sup>2)</sup>Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University

### / A B S T R A C T /

The seismic damage of non-structural components, such as communication facilities, causes direct economic losses as well as indirect losses which result from social chaos occurring with downtime of communication and financial management network systems. The current Korean seismic code, KBC2009, prescribes the design criteria and requirements of non-structural components based on their elastic response. However, it is difficult for KBC to reflect the dynamic characteristics of structures where non-structural components exist. In this study, both linear and nonlinear time history analyses of structures with various analysis parameters were carried out and floor acceleration spectra obtained from analyses were compared with both ground acceleration spectra used for input records of the analyses and the design floor acceleration spectrum proposed by National Radio Research Agency. Also, this study investigates to find out the influence of structural dynamic characteristics on the floor acceleration spectra. The analysis results show that the acceleration amplification is observed due to the resonance phenomenon and such amplification increases with the increase of building heights and with the decrease of structure's energy dissipation capacities.

**Key words:** Non-structural components, Floor response spectrum, Ground acceleration spectrum, Time history analysis, Resonance

## 1. 서론

전기통신설비 등 비구조체의 지진피해는 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 통신망 두절, 금융전산망 손상과 같은 사회적 혼란을 야기시킬 수 있다는 점에서 내진성능 확보가 시급한 상황이다. 이에 따라, 국내에서는 전파연구소(Radio Research Agency, RRA)에서 고시한 전기통신설비의 내진 시험방법에 따라 통신장비, 전원설비, 부대설비, 옥외설비로 분류된 기기에 대한 진동대 시험을 통해 내진성능을 검증하도록 하였다[1]. 시험대상 설비에 인가하여야 하는 응답스펙트럼은 설치되는 설비의 높이에 따라 지반응답스펙트럼 또는 해당 층의 층응답스펙트럼을 사용하거나 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼을 사용하도록 규정하고 있다. 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼은 1~35Hz의 주파수범위에 대한 가속도 값을

정의하고 있으며, 2Hz~35/3Hz 구간의 주파수에서는 3.0g의 일정 가속도를 가지도록 제한하고 있다. 하지만 층응답스펙트럼은 구조물의 높이, 감쇠비, 주기 및 비선형 거동 등 동적특성에 따라 달라지기 때문에, 일률적인 층응답스펙트럼을 사용하는 것에 대한 타당성이 의문시된다.

국내의 건축구조관련규준[2-5]들을 살펴보면, 구조체를 제외한 건축, 기계 및 전기설비 등을 비구조 요소로 정의하여 이러한 요소들의 내진 설계 요구사항 및 설계방법을 제시하고 있다. 하지만 위 설계방법 역시 구조물의 탄성해석을 기반으로 하고 있으며, 특히 구조물과 비구조요소의 진동에 대한 상호작용을 고려하지 않고 있다.

이에 일부 연구자들은 비구조 요소의 설계를 위해 구조물의 동적거동을 고려한 층응답스펙트럼에 관한 연구를 진행하고 있다. Medina 등[6]과 Sankaranarayanan과 Medina[7]는 구조물의 높이 및 주기, 비구조요소의 설치 위치 등 다양한 변수를 가지는 모멘트 저항 골조의 비선형시간이력해석을 통해 층응답스펙트럼에 영향을 주는 주요 인자에 관한 연구를 수행하였으며, 해석 결과를 선형시스템과 비교하여 나타내었다. Saatcioglu 등[8]

\*Corresponding author: Kim, Hyung-Joon

E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

(Received 12 July 2013; Accepted 2 October 2013)

은 높이 및 횡력저항시스템이 다른 콘크리트 구조물의 비선형시간이력해석을 통해 지반응답스펙트럼과 비구조요소의 층응답스펙트럼을 비교하였으며, 이를 토대로 비구조요소의 설계층응답스펙트럼을 제안하였다.

본 연구에서는 우선 KBC2009를 바탕으로 국내를 대표할 수 있는 지반응답스펙트럼과 구조 시스템을 선정하였으며, 40개의 입력 지진파를 보정하여 선형·비선형시간이력해석을 수행하였다. 이후 해석결과를 토대로 선정된 층응답스펙트럼과 지반응답스펙트럼 및 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼을 비교하여, 구조물의 동특성이 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 모델의 수립

본 연구에서 수행한 시간이력해석 대상 건물은 총 20개의 구조물로서, i) 층수 : 3, 6층, ii) 구조형식 : 철골, 철근콘크리트 구조, iii) 반응수정계수 (R) : 1, 2, 4, 6, 8과 같이 분류된다.

해석대상건물은 높이 9m, 18m인 3층과 6층 규모의 구조물로서, 각 층의 높이는 3m이다. 기본적인 구조형식을 철골 및 철근콘크리트 구조로 구분하였으며, 각 구조 형식별 다양한 지진력 저항시스템의 소성능력을 반영하기 위하여 반응수정계수를 1(선형시스템), 2, 4, 6, 8로 분류하였다. 본 연구에서는 해석결과와 일반화를 위하여 특정 건축물 대신 Fig. 1과 같은 각 질량체를 수평방향 스프링으로 연결한 가상의 모델을 해석 대상 구조물로 설정하였다. 각 절점은 X축 수평방향 자유도만 존재하고, Y축 수평방향 및 Z축 회전방향의 자유도는 구속하였으며, 스프링요소는 X방향으로만 작동

하는 전단스프링으로 나타내었다. 본 연구의 목적은 앞서 분류한 구조물의 동적 특성에 의한 층응답스펙트럼의 영향을 알아보기 위한 것으로 해석 모델 수립시 특정 주기 및 동특성을 가지는 비구조요소의 모델은 포함하지 않았다.

Fig. 1에 분류된 구조물의 층강성과 중량을 나타내었으며, Table 1에 3층과 6층 구조물의 고유치 해석을 통해 산정한 주기 및 질량참여율을 정리하였다. 3층, 6층 구조물 모두 1차 모드의 질량 참여율이 80%이상이므로, 해석 대상 건물의 진동은 1차 모드가 지배하며, 1, 2차 모드의 질량 참여율의 합이 90%이상 되는 것을 확인할 수 있다.

전단스프링의 이력모델은 철골구조물인 경우 Bi-linear모델, 철근콘크리트구조물인 경우 Modified Takeda모델을 사용하였다. 이력모델의 항복 후 강성비  $\gamma$ 는 0.02를 적용하였으며, Modified Takeda 모델의 재하 (unloading) 및 재하(reloading) 강성을 정의하는 상수  $\alpha, \beta$ 는 각 0, 0.6을 적용하였다. 그리고 두 이력모델의 최대강도 이후의 강성 저하 현상은 반영하지 않았다. 이는 대상 구조물이 적절한 내진설계가 이루어져 지진에 의한

Table 1. Dynamic characteristics of supporting structures

| No. mode | Story : 3   |                                   | Story : 6   |                                   |
|----------|-------------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------|
|          | Periods (s) | Cumulative mass participation (%) | Periods (s) | Cumulative mass participation (%) |
| 1        | 0.2843      | 86                                | 0.5257      | 83                                |
| 2        | 0.1126      | 97                                | 0.1951      | 93                                |
| 3        | 0.0742      | 100                               | 0.1243      | 97                                |
| 4        |             |                                   | 0.0940      | 99                                |
| 5        |             |                                   | 0.0774      | 99                                |
| 6        |             |                                   | 0.0668      | 100                               |

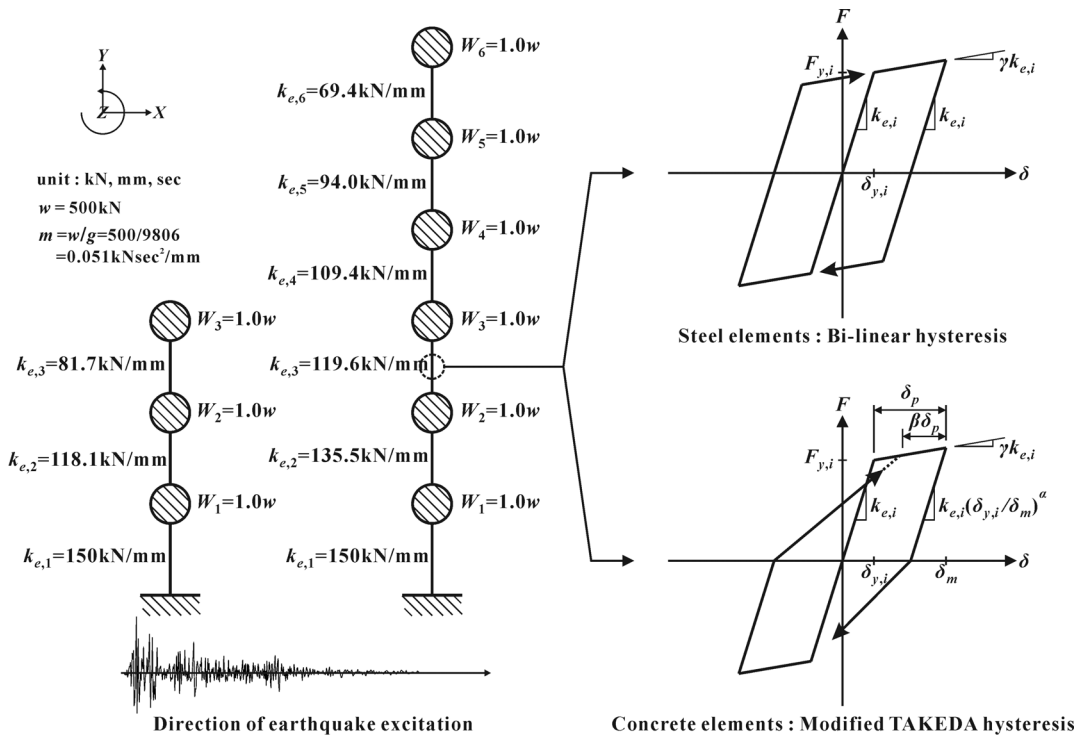


Fig. 1. Establishment of analytical model

**Table 2.** Information of recorded ground motions

| No. | Record             | Mag. | NEHRP class | Epicentral distance (km) | PGA (g) |
|-----|--------------------|------|-------------|--------------------------|---------|
| 1   | Northridge         | 6.7  | D           | 13.3                     | 0.52    |
| 2   | Northridge         | 6.7  | D           | 26.5                     | 0.48    |
| 3   | Duzce, Turkey      | 7.1  | D           | 41.3                     | 0.82    |
| 4   | Hector Mine        | 7.1  | C           | 26.5                     | 0.34    |
| 5   | Imperial Vally     | 6.5  | D           | 33.7                     | 0.35    |
| 6   | Imperial Vally     | 6.5  | D           | 29.4                     | 0.38    |
| 7   | Kobe, Japan        | 6.9  | C           | 8.7                      | 0.51    |
| 8   | Kobe, Japan        | 6.9  | D           | 46                       | 0.24    |
| 9   | Kocaeli, Turkey    | 7.5  | D           | 98.2                     | 0.36    |
| 10  | Kocaeli, Turkey    | 7.5  | C           | 53.7                     | 0.22    |
| 11  | Landers            | 7.3  | D           | 86                       | 0.24    |
| 12  | Landers            | 7.3  | D           | 82.1                     | 0.42    |
| 13  | Loma Prieta        | 6.9  | D           | 9.8                      | 0.53    |
| 14  | Loma Prieta        | 6.9  | D           | 31.4                     | 0.56    |
| 15  | Superstition Hills | 6.5  | D           | 35.8                     | 0.36    |
| 16  | Superstition Hills | 6.5  | D           | 11.2                     | 0.45    |
| 17  | Cape Mendocino     | 7.0  | D           | 22.7                     | 0.55    |
| 18  | Chi-Chi, Taiwan    | 7.6  | D           | 32                       | 0.44    |
| 19  | San Fernando       | 6.6  | D           | 39.5                     | 0.21    |
| 20  | Friuli, Italy      | 6.5  | C           | 20.2                     | 0.35    |

붕괴가 발생하지 않음을 의미하고, 구조물 붕괴시 비구조체의 지진응답 평가는 의미가 없기 때문이다.

반응수정계수( $R$ )에 따른 시스템의 분류를 반영하기 위한 각 전단스프링의 항복강도  $F_{y,i}$ 는 다음 식으로 산정하였다.

$$F_{y,i} = \frac{1}{R} \frac{\sum_{j=1}^{40} \max|V_{e,ij}|}{40} \quad (1)$$

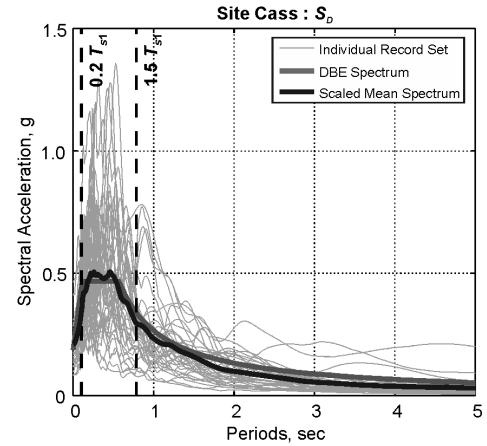
여기서  $V_{e,ij}$ 는 선형시스템의 시간이력해석동안 도출된 각 전단 스프링에 작용하는 층전단력으로, 40개 최대 층전단력의 평균값을 반응수정계수  $R$ 로 나눈 값을 각 비선형시스템의 항복 하중으로 정의하였다.

### 2.2 입력 지진파의 보정

해석에서 사용된 지진은 Table 2에 나타난 것과 같이 FEMA P695[9]에서 사용한 지진기록 중 20개의 원거리 지진이다[10]. 각 지진은 평면상에서 서로 직교하는 2개의 수평방향 지진파로 이루어져 있기 때문에 총 40개의 지진파를 해석에 적용하였다. 입력 지진파는 지반 및 지진의 강도 등 국내의 여건과 상이하기 때문에, KBC2009에서 제시하는 설계가속도스펙트럼(Design Based Earthquake Spectrum, DBE Spectrum)을 목표가속도스펙트럼으로 고려하여 보정하였다. 설계가속도스펙트럼 산정시 고려한 유효지반가속도  $S$ 는 경남지역의 0.20이고, 지반은  $S_B, S_C, S_D$ 로 분류하였다. 40개 지진은 지반 및 지진강도의 분류에 따라 동일한 보정계수를 적용

**Table 3.** Scale factor and average relative error for site class

| Site class | Story : 3 |         | Story : 6 |         |
|------------|-----------|---------|-----------|---------|
|            | $\alpha$  | ARE (%) | $\alpha$  | ARE (%) |
| $S_B$      | 0.410     | 8.0     | 0.360     | 9.5     |
| $S_C$      | 0.485     | 6.8     | 0.475     | 3.3     |
| $S_D$      | 0.565     | 7.6     | 0.565     | 7.0     |



**Fig. 2.** Scaled mean spectrum of ground motions and KBC2009 DBE spectrum for site class D.

하였으며, 보정방법은 다음 식과 같이 보정계수로 조정된 40개 지진의 평균 가속도스펙트럼과 목표가속도스펙트럼의 동일 주기별 가속도의 오차를 제곱한 값의 합(Error)이 최소가 되는 최소사승법을 이용하여 산정하였다 [11,12].

$$Error = \sum_{T_i=0.2T_{s,1}}^{1.5T_{s,1}} [\alpha S_{a,A}(T_{s,i}) - S_{a,T}(T_{s,i})]^2 \quad (2)$$

이때  $\alpha$ 는 보정계수이며  $S_{a,A}(T_{s,i})$ 와  $S_{a,T}(T_{s,i})$ 는 구조물의 주기  $T_{s,i}$ 일 때, 40개 지진의 평균가속도스펙트럼과 목표가속도스펙트럼을 의미한다. 그리고 보정계수 산정을 위해 고려한 주기 구간은  $0.2T_{s,1} \sim 1.5T_{s,1}$ 의 구간이며,  $T_{s,1}$ 은 구조물의 1차 모드 고유 주기이다. 따라서 구조물의 주기, 지반에 따라 총 6개의 평균가속도스펙트럼 보정을 수행하였다. Table 3에 보정계수 및 주기 구간내 보정된 평균가속도스펙트럼과 설계가속도스펙트럼의 오차를 평균적으로 나타낸 평균 상대 오차(Average Relative Error, ARE)를 나타내었으며, Fig. 2에 지반이  $S_D$ 인 3층과 6층 구조물의 설계가속도스펙트럼을 기준으로 보정된 40개 지진의 가속도스펙트럼 및 평균가속도스펙트럼을 나타내었다.

### 2.3 층응답스펙트럼의 산정

앞서 수립한 20개 대상구조물에 대한 해석모델에 지반( $S_B, S_C, S_D$ )에 따라 보정된 40개 지진파를 작용하여 총 2400개의 시간이력해석을 수행하였다. 해석에는 상용프로그램인 RUAUMOKO-2D를 이용하였다[13]. 구조물의 응답 모드별로 동일하게 5%의 감쇠비를 고려하였으며, 해석 간격은

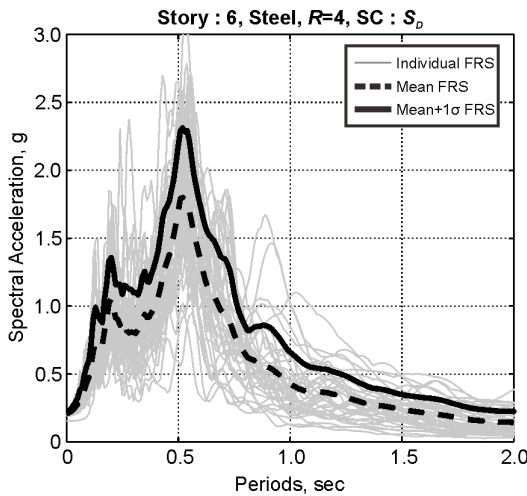


Fig. 3. Floor response spectrum at the top floor of 6-story steel structures : R=4, site class D

0.0025초로 설정하였다. 시간이력해석을 통해 산정된 층별 가속도이력으로부터 2% 감쇠비를 가지는 비구조요소의 탄성 층응답스펙트럼을 산정하였다. 이 때 비구조요소의 주기는 0~5초로 가정하였으며, 0.01초 주기 간격으로 스펙트라 가속도를 산정하였다.

Fig. 3에 S<sub>D</sub> 지반인 6층 철골 비선형시스템(R=4)의 지붕층 층응답스펙트럼을 나타내었다. 회색 선은 40개 지진에 대한 지붕층 바닥의 층응답스펙트럼을 의미하며, 검은 점선은 층응답스펙트럼의 평균값으로 이루어진 평균층응답스펙트럼, 검은 실선은 평균에 표준편차를 더한 평균 표준편차 층응답스펙트럼이다. 본 연구에서는 S<sub>D</sub> 지반의 평균 표준편차 층응답스펙트럼을 기준으로 해석 결과를 나타내었으며, S<sub>B</sub> 및 S<sub>C</sub> 지반의 해석 결과는 S<sub>D</sub> 지반의 해석결과와 유사한 경향을 나타내기 때문에 부록에 나타내었다.

### 3. 최대층가속도(PFA)의 분포

KBC2009에서 제시하는 비구조요소의 지진력  $F_p$ 는 다음 식과 같이 산정한다.

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS} W_p}{(R_p/I_p)} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \tag{3}$$

여기서,  $S_{DS}$ 는 단주기 설계스펙트럼가속도,  $a_p$ 는 증폭 계수,  $I_p$ 는 중요도 계수,  $R_p$ 는 비구조요소의 반응수정계수,  $z$ 는 비구조요소가 부착된 높이,  $h$ 는 구조물의 높이를 의미한다. 위 식에서 알 수 있듯이, KBC2009에서는 비구조요소의 설계시 주기에 따른 증폭계수 및 높이에 대한 영향을 고려하고 있다. 식 (3)의  $0.4S_{DS}$ 는 지반의 최대가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 의미하며,  $1+2z/h$ 는 구조물의 상대 높이에 따른 영향을 나타낸다. 만약 비구조요소의 접합형식에 따른 증폭계수  $a_p$ 의 영향을 무시한다면,  $z=0$ 인 경우 비구조요소에 작용하는 층가속도는 최대지반가속도와 동일하며,  $z=h$ 인 경우 층가속도는 최대지반가속도의 3배인 값과 같다. 따라서  $1+2z/h$ 는 비구조요소의 동적 특성과 관계없이 비구조요소가 설치되는 층에 따른 증폭의 영향만을 나타낸다. 이는 결국 최대지반가속도에 대한 최대층가속도(Peak Floor Acceleration, PFA)의 비인  $PFA/PGA$ 로 나타낼 수 있으며, 이는 비구조요소가 설치되는 층에 따른 층응답스펙트럼을 예측할 수 있는 근거가 된다.

Fig. 4에 3층과 6층 선형-비선형 시스템의 해석을 통해 산정된  $PFA/PGA$ 와 기준에서 제시한 층높이에 따른 영향을 비교하여 나타내었다. 이 때 세로축은 각 층의 높이를 구조물의 높이로 정규화한 상대 높이로 나타내었다.

선형시스템의  $PFA/PGA$ 는 KBC2009와 마찬가지로 상대 높이가 높아질수록 선형으로 증가하지만, 전 층에서 KBC2009에서 제시한 값보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 6층 구조물의 지붕층  $PFA$ 는  $PGA$ 에 비해 약 4.9배 증폭되었으며 3층 구조물은 약 4.2배 증폭되었다. 반면 비선형시스템의  $PFA/PGA$ 는 0.58~2.0 사이의 값을 가지며, 선형시스템과 달리 상대 높이가 높아지고 반응수정계수가 커질수록 작아지는 경향성을 보인다. 특히  $R \geq 2$ 이상인 비선형시스템의 상부층 최대가속도는 지반가속도보다 적은 응답을 보인다.

따라서 일반적인 구조물에 설치된 비구조요소에 작용하는 지진력을 식 (3)을 통해 산정한다면, 다소 과대평가될 수 있을 것으로 판단된다. 이에 ASCE7-05에서는 구조물의 동적 거동을 고려한 층응답을 반영하기 위해,

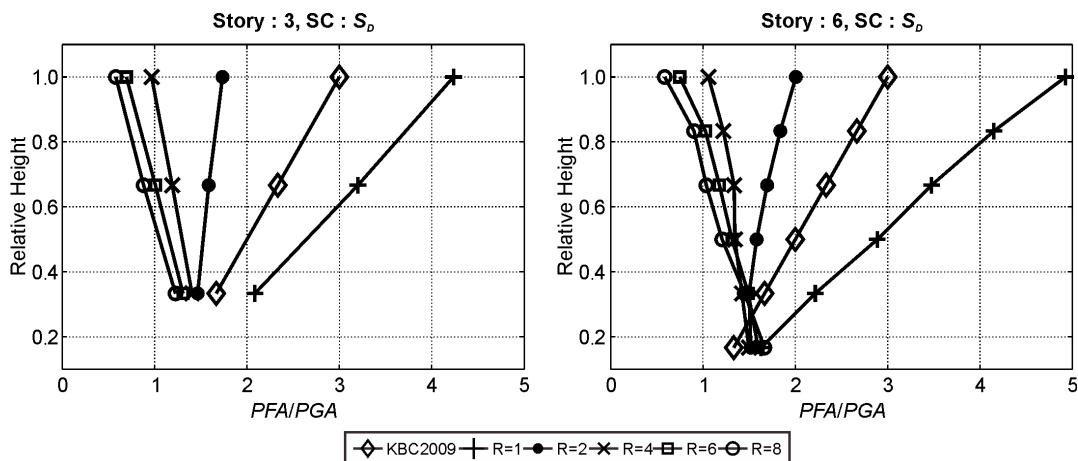


Fig. 4. Ratio of peak floor acceleration to peak ground acceleration of 3, 6-story steel structures: R=1, site class D

반응수정계수  $R=1$  일 때 모달 해석을 통해 산정된 증가속도를 적용할 수 있도록 제시하고 있다.

### 4. 층응답스펙트럼의 비교

#### 4.1 선형 시스템의 층응답스펙트럼

##### 4.1.1 구조물의 고유주기에 의한 영향

Fig. 5(a)에  $S_D$  지반, 3층과 6층 선형 철골 시스템( $R=1$ )의 지붕층 바닥 평균 표준편차 층응답스펙트럼과 지반응답스펙트럼(보정된 40개 지진의 평균가속도스펙트럼) 및 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 구조물의 높이와 상관없이 대부분의 주기 구간에서 층응답스펙트럼이 지반응답스펙트럼보다 큰 값을 가지며, 특히 구조물의 고유주기와 동일한 주기일 때 상대적으로 크게 증폭하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 모든 해석에서 공통적으로 나타났으며, 그 원인은 구조물의 고유주기와 동일한 주기로 진동하는 비구조요소가 공진하기 때문이다. 층응답스펙트럼의 증폭은 구조물의 고유주기가 1차 모드일 때 가장 크게 나타났으며, 고차 모드로 갈수록 증폭의 영향은 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히 3층과 6층 구조물 모두 1차 모드 부근에서 증폭된 층응답스펙트럼은 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼의 최대값  $3g$ 보다 약 3배 큰 가속

도 응답을 보였다.

본 연구에서는 이러한 층응답스펙트럼의 증폭 정도를 나타내기 위해 다음 식(4)와 같이 선형시스템의 층응답스펙트럼( $FRS_c$ )을 최대 증가속도( $PFA$ )로 정규화한 증폭 계수(Amplification Factor,  $AF$ )를 이용하였다.

$$AF = \frac{FRS_c}{PFA} \tag{4}$$

선형 시스템에서의 증폭계수는 탄성 구조물과 비구조요소의 주기에 따른 상호작용을 고려할 수 있다. Fig. 5(b)에 비구조요소 주기에 따른 증폭계수의 변화를 나타내었으며, 이 때 가로축의 주기는 구조물의 1차 모드 고유주기로 나눈 상대 주기( $T_{NSC}/T_{S1}$ )로 나타내었다. 상대주기에 따른 증폭 계수를 살펴보면, 비구조요소의 주기가 구조물의 1차 모드 주기와 동일할 때 최대값을 나타내며, 1차 모드 주기를 중심으로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 구조물의 1차 모드 주기뿐만 아니라 고차 모드 주기 부근에서도 역시 공진에 의한 층응답스펙트럼의 증폭 현상이 발생하였다. 3층 구조물의 경우 2차 모드 주기에서, 6층 구조물의 경우 2, 3차 모드 주기 부근에서 증폭계수가 증가하였다. 3층과 6층 구조물 모두 누적질량참여율이 약 97% 이상인 고차모드에서는 공진으로 인한 증폭 현상이 발생하지 않았다.

비구조요소가 구조물의 1차 모드 주기보다 긴 주기에서의 증폭계수를 살펴보면, 증폭계수가 1보다 작아지는 주기 구간이 존재한다. 3층 구조물의 경우 상대주기가 2.5, 6층 구조물은 상대 주기 1.7인 지점부터 증폭계수

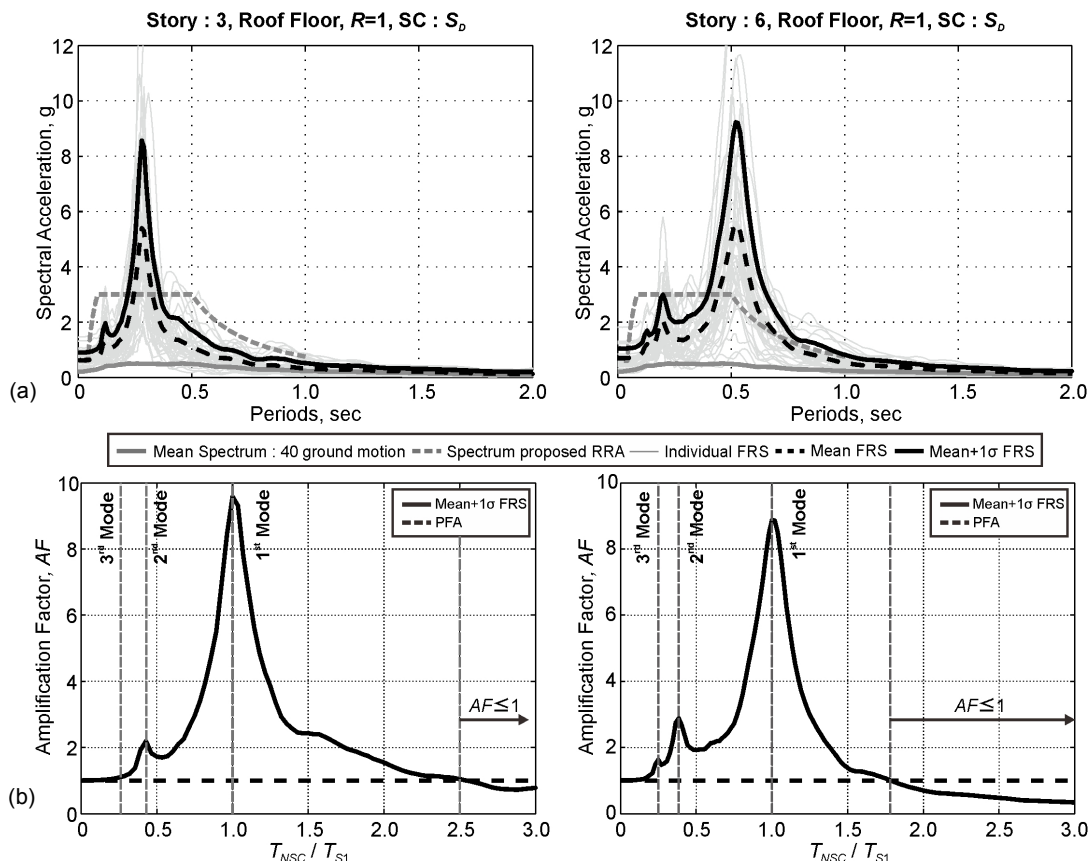


Fig. 5. (a) Comparison of floor response spectrum, spectrum proposed Radio Research Agency and ground acceleration response spectrum (b) Amplification Factor,  $AF$  : roof floor of 3, 6-story steel structures,  $R=1$ , site class D

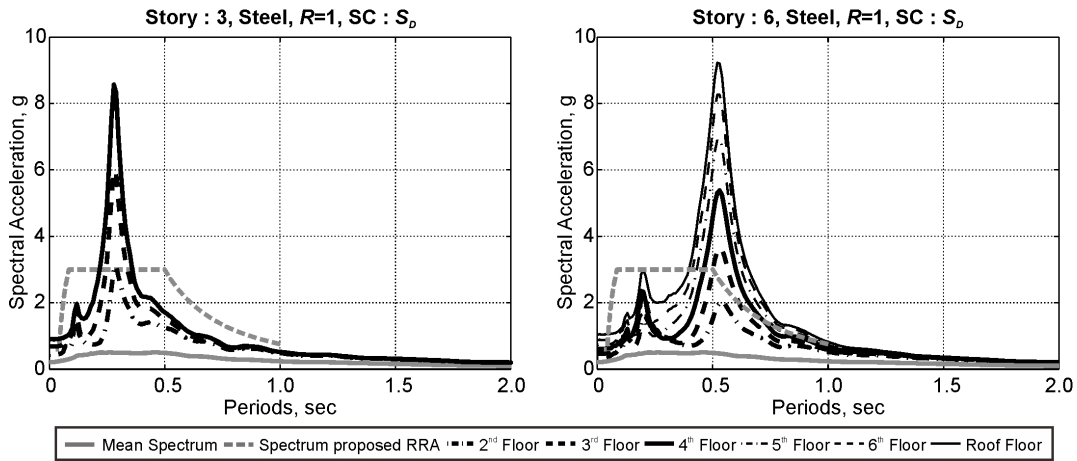


Fig. 6. Floor response spectrum at each floor of 3, 6-story steel structures :  $R=1$ , site class D

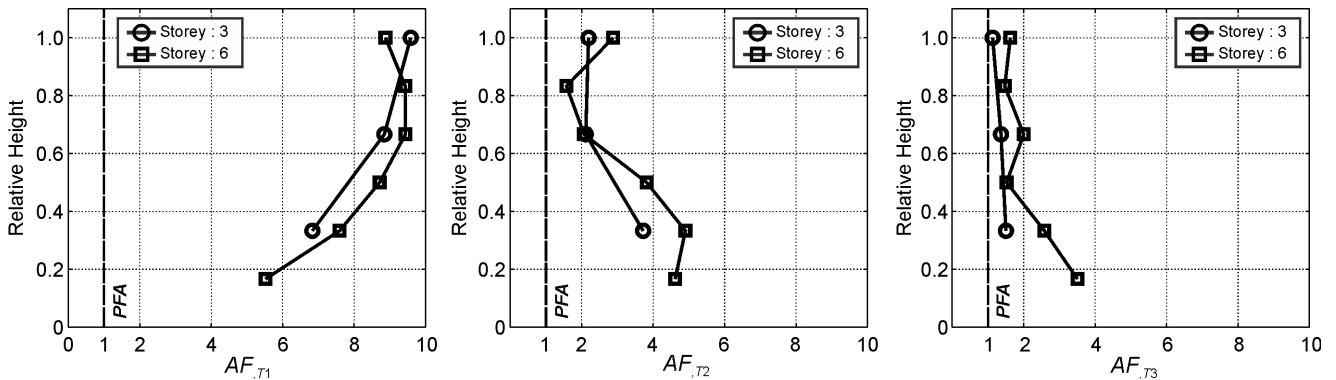


Fig. 7. Maximum value of  $AF$  at each floor of 3, 6-story steel structures at 1st, 2nd and 3rd fundamental period :  $R=1$ , site class D

가 1보다 작다. 이 구간에서의 비구조요소는 구조물의 최대층가속도보다 작은 가속도 응답을 보이지만, 지반과 구조물의 상대 운동과 유사하게 비구조요소의 변위가 층변위에 비해 상대적으로 클 것으로 예상된다.

한편 KBC2009의 식(3)은 비구조요소의 접합방식에 따른 증폭계수  $a_p$ 를 비구조요소가 강하게 접합된 경우 1.0, 유연하게 접합된 경우 2.5를 택하도록 제시하고 있다. 만약 접합방식에 따라 비구조요소의 주기가 변화한다고 가정한다면, KBC2009의 증폭계수  $a_p$ 와 본 연구의 증폭 계수  $AF$ 를 간접적으로 비교할 수 있으며, 특정주기에서 공진의 영향으로 두 값이 상당히 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 비구조요소의 설계시 구조물과 비구조요소 주기의 공진현상을 고려하여야 할 것이다.

#### 4.1.2 비구조요소가 설치되는 층 높이에 의한 영향

Fig. 6에  $S_D$  지반, 3층과 6층 선형시스템의 각 층의 평균 표준편차 응답스펙트럼과 지반응답스펙트럼 및 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 일반적으로 비구조요소의 설치 높이가 높아질수록 층응답스펙트럼이 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 일부 해석 결과 고차 모드 주기 부근에서 저층부의 층응답가속도가 상층부의 층응답가속도보다 큰 현상이 발생하였다. Fig. 6의 6층 선형시스템의 2차 모드 주기 부근에서의 층응답스펙트럼을 살펴보면, 4층 바닥의 층응답가속도가 5, 6층

의 층응답가속도를 초과하는 것을 볼 수 있다.

한편 1차 모드 주기보다 큰 구간에서는 전 층의 층응답스펙트럼이 지반 응답스펙트럼으로 수렴하는 경향성을 보인다. 전파연구소에 제시한 층응답스펙트럼과 비교하면, 두 구조물 모두 1차 모드 주기일 때 최하층을 제외한 모든 층에서 전파연구소의 층응답스펙트럼 이상의 스펙트라 가속도 값을 나타내는 반면, 1차 모드 이상의 고차 모드 주기 구간에서는 층응답스펙트럼이 전파연구소의 층응답스펙트럼보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에 구조물의 각 고유 모드 주기에서의 증폭 계수를 상대 높이에 따라 나타내었다. 여기서  $AF_{T_i}$ 는 구조물의  $i$ 번째 모드 고유 주기일 때의 층응답스펙트럼의 증폭 계수를 의미한다. 3층 구조물의  $AF_{T1}$ 는 상대 높이가 높아질수록 증가하는 반면,  $AF_{T2,3}$ 은 층이 높아질수록 감소하는 경향을 보인다. 6층 구조물의 경우,  $AF_{T1}$ 는 중간층까지 점차 증가하다 5, 6층에서 최대 값을 나타낸 후 저층에서는 다소 감소한다. 6층 구조물의  $AF_{T2,3}$ 를 살펴보면, 저층이 고층에 비해 상대적으로 큰 값을 가지며, 지그재그형의 분포를 나타낸다. 특히 6층 구조물의  $AF_{T2}$ 는 중간 증폭 계수의 변화가 두드러지게 나타났다. 이로 인해 구조물의 고차 모드 주기 부근에서 저층의 응답가속도가 고층의 응답가속도보다 큰 현상이 발생하였다. 구조물의 고유 주기에 따른 영향을 살펴보면 3층과 6층 구조물 모두 1차 모드 주기일 때 공진으로 인한 증폭의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있으며, 고차 모드로 갈수록 증폭 계수는 점차 작아진다.

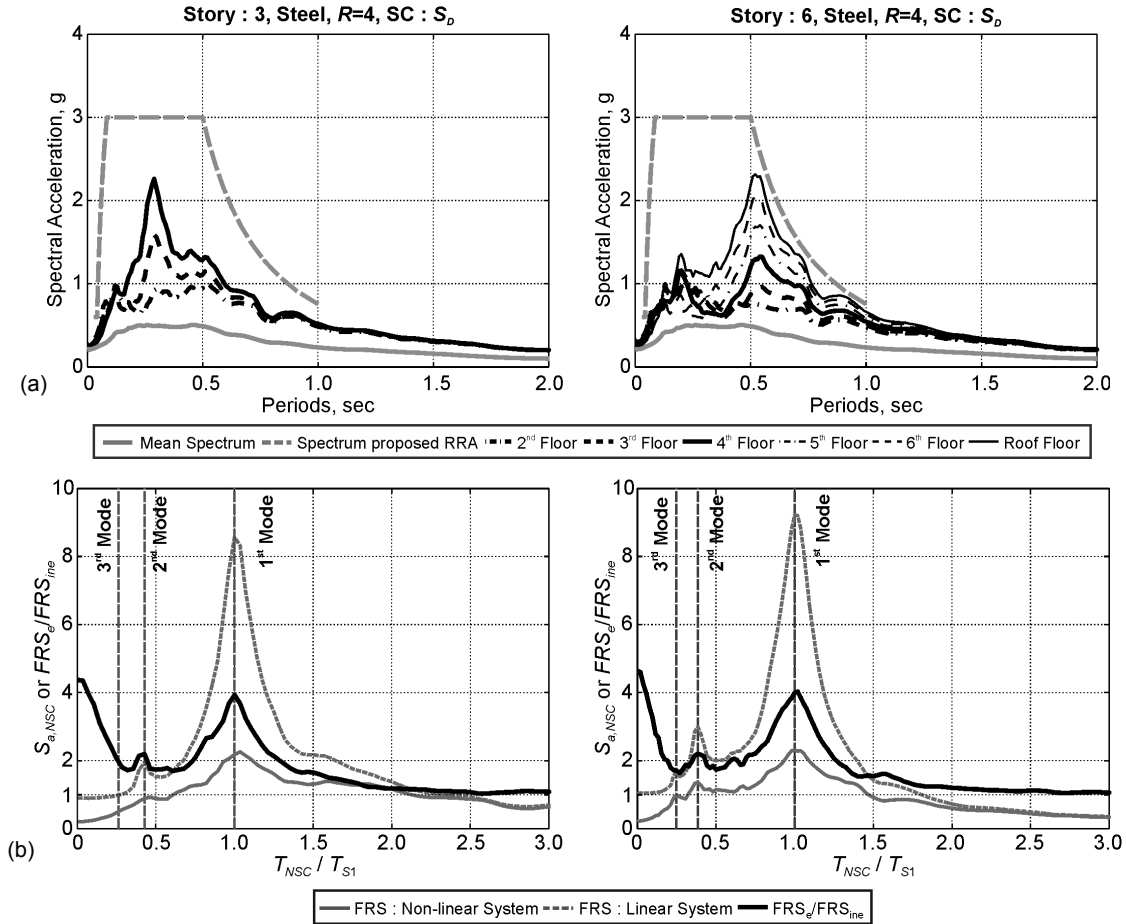


Fig. 8. (a) Comparison of floor response spectrum, spectrum proposed Radio Research Agency and ground acceleration response spectrum (b)  $S_{a,NSC}$  and  $FRS_e/FRS_{ine}$  of 3, 6-story steel structures :  $R=4$ , site class D

## 4.2 비선형 시스템의 층응답스펙트럼

### 4.2.1 구조물의 비선형 거동에 의한 영향

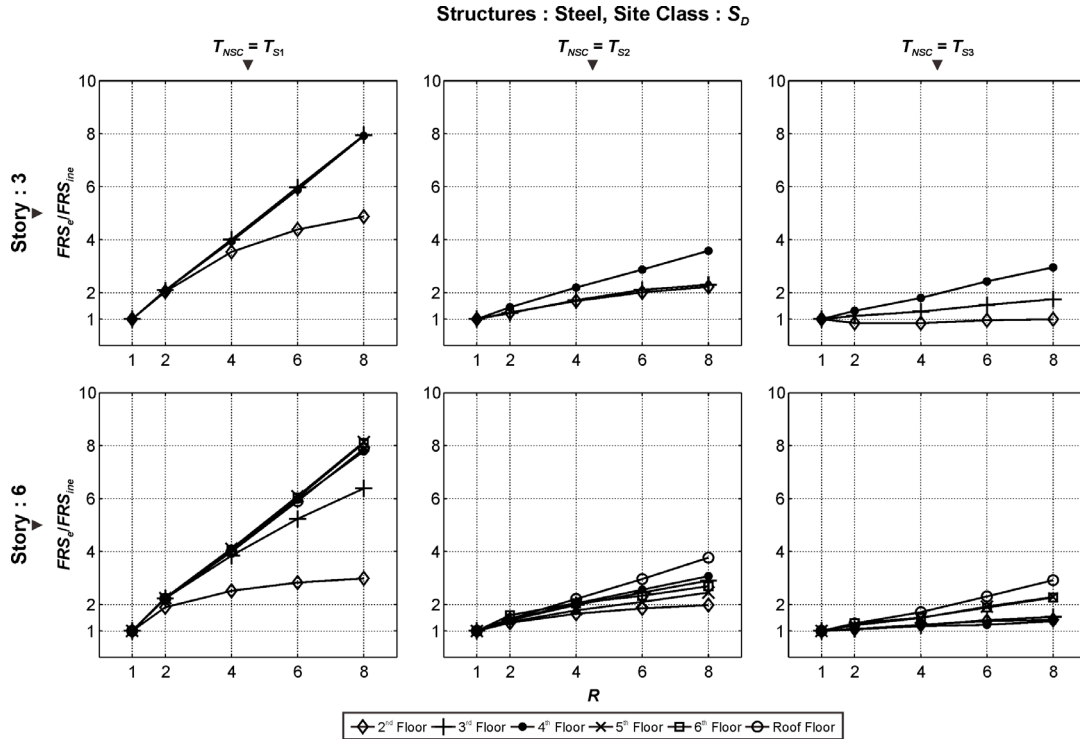
Fig. 8 (a)에  $S_D$ 지만, 3층과 6층 철골 비선형시스템( $R=4$ )의 평균 표준편차 층응답스펙트럼을 지반응답스펙트럼 및 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼과 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 비선형 시스템의 층응답스펙트럼은 선형시스템과 달리 전파연구소에서 제시한 층응답스펙트럼보다 적은 가속도응답을 보인다. 뿐만 아니라 구조물과의 공진으로 인한 증폭의 영향 또한 선형시스템에 비해 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 선형시스템과 비선형시스템의 층응답스펙트럼 비교를 위해 선형시스템의 층응답스펙트럼을 비선형시스템의 층응답스펙트럼으로 나눈  $FRS_e/FRS_{ine}$ 을 산정하였으며, 이를 Fig. 8(b)에 상대주기에 따른 각 시스템의 지층층 층응답스펙트럼과 비교하여 나타내었다[14].  $FRS_e/FRS_{ine}$ 값은 전 주간에 걸쳐 1이상의 값을 가지며, 특히 비구조요소의 주기가 0이거나 구조물의 1차 모드 주기와 동일할 때 상대적으로 큰 값을 가진다. 비선형시스템 역시 선형시스템과 동일하게 1차 모드 주기에 공진에 의한 증폭이 다소 발생하였지만 선형시스템에 비해 약 1/4배 줄어든 가속도 응답을 보인다. 구조물의 고차 모드 주기에 역시 비선형 거동으로 인해 층응답가속도는 감소하였으나, 1차모드 주기에 비교하였을 때 상

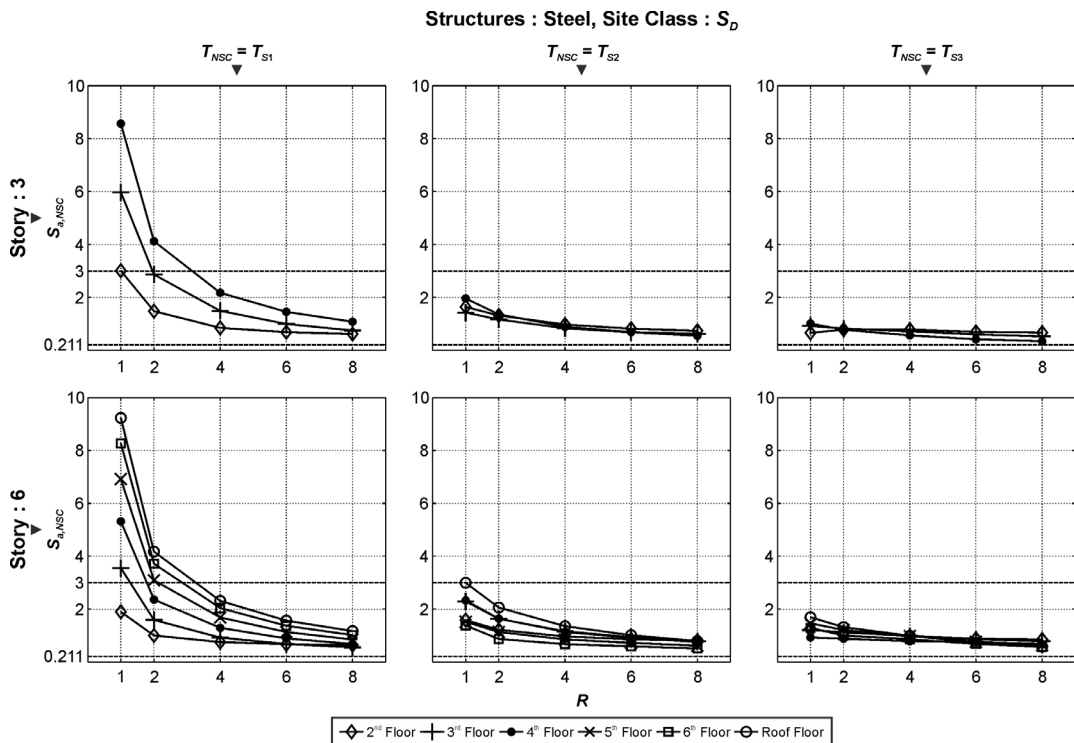
대적으로 적은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 장주기 구간에서는 선형 시스템과 비선형시스템의 층응답스펙트럼의 차이가 거의 발생하지 않았으며, 이로 인해 두 구조물 모두 상대 주기가 약 2.0이상의 구간부터  $FRS_e/FRS_{ine}$ 은 1을 유지하였다.

Fig. 9에 비구조요소가 구조물의 고유 모드 주기와 동일할 때, 각 층의  $FRS_e/FRS_{ine}$ 을 구조물의 반응수정계수( $R=1, 2, 4, 6, 8$ )에 따라 나타내었다.  $FRS_e/FRS_{ine}$ 은 일반적으로 구조물의 소성능력이 커질수록 큰 값을 가지며, 1차모드 주기에 최대값을 가진다. 이는 구조물의 비선형 거동으로 인한 추가적인 에너지 소산 능력과 강성변화로 인한 구조물 주기의 이동은 공진으로 인한 가속도의 증폭을 효율적으로 감소시킨다는 것을 의미한다. 그리고 대상구조물은 1차 모드가 진동을 지배하기 때문에 가장 큰  $FRS_e/FRS_{ine}$ 을 가지는 반면 고차 모드일 때 상대적으로 작은  $FRS_e/FRS_{ine}$ 을 가진다.

구조물의 각 고유 모드 주기에  $FRS_e/FRS_{ine}$ 을 살펴 보면, 3층과 6층 구조물 모두 상부층에서의  $FRS_e/FRS_{ine}$ 이  $R$ 과 선형 비례하는 것을 볼 수 있다. 특히 구조물의 1차 모드 주기에  $FRS_e/FRS_{ine}$ 과  $R$ 은 기울기가 1인 비례관계를 가지는 반면 중간층 이하 층에서는 다소 비선형적인 비례 관계를 보인다. 이러한  $FRS_e/FRS_{ine}$ 과  $R$ 의 비례 관계는 층이 낮아지고 고차 모드로 갈수록 그 기울기가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그리고 비구조요소가 구조물의 3차 모드 주기와 같을 때, 하부층에서의  $FRS_e/FRS_{ine}$



**Fig. 9.**  $FRS_e/FRS_{ine}$  of 3, 6-story steel structures at 1st, 2nd, 3rd fundamental period :  $R=4$ , site class D



**Fig. 10.**  $S_{a,NSC}$  of 3, 6-story steel structures at 1st, 2nd, 3rd fundamental period :  $R=4$ , site class D

는 거의 1의 값을 가지며 비선형 거동에 의한 응답가속도의 감소 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다. 이를 앞 절의 선형시스템의 증폭계수,  $AF$ 와 연

관시켜 살펴보면, 고차 모드일 때 하부층의 응답스펙트럼은 상부층에 비하여 상대적으로 큰 증폭계수를 가지는 반면, 구조물의 비선형 거동으로 인



한 감소의 영향은 상대적으로 작기 때문에 일부 구조물의 하부층에서는 고차 모드 주기일 때의 층응답가속도가 1차 모드 주기일 때의 층응답가속도보다 다소 큰 경우가 발생하였다. 하지만 고차 모드에서의 층응답가속도는 최대 지반가속도와 유사한 수준이기 때문에 이러한 영향을 크게 고려하지 않아도 되며, 이는 다음 Fig. 10을 통해 알 수 있다.

Fig. 10에 구조물의 각 모드 주기일 때 철골 비선형 시스템의 반응수정계수( $R = 1, 2, 4, 6, 8$ )에 따른 비구조요소의 층응답가속도( $S_{a,NSC}$ )을 나타내었다. 각 고유주기에서의  $S_{a,NSC}$ 을 살펴보면 일반적으로  $R$ 이 커질수록 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다.  $S_{a,NSC}$ 는  $R = 1 \sim 2$ 사이일 때 가장 큰 감소율을 보이며,  $R$ 이 커질수록 감소율은 점차 작아진다. 한편 층높이에 따른 영향을 살펴보면 1차모드 주기일 때 층이 낮을수록  $R$ 의 증가에 따른  $S_{a,NSC}$ 의 감소율이 적으며, 고차 모드로 갈수록 이러한 층높이에 대한 영향은 미비한 것을 알 수 있다. 그림에 나타냈듯이 3층과 6층 구조물 모두  $R \geq 4$ 일 때 전 층층에서 최대지반가속도 0.211g보다 크고 전과 연구소에서 제시한 최대 층응답가속도 3g보다 작은 응답을 보인다. 특히  $R \geq 6$ 인 비선형시스템의 경우 모드 주기 및 층높이에 따른  $S_{a,NSC}$ 의 변화가 상대적으로 적다.

### 4.2.2 구조형식에 의한 영향

본 연구에서는 철골 및 철근콘크리트 구조형식을 분류하기 위해 구조 부재의 이력곡선을 다르게 적용하였다. 실제 구조물의 소성능력은 지진력 저항시스템에 따라 상이하지만, 본 연구에서는 일반적인 영향을 알아보기 위해 구조형식별로 동일한 이력곡선을 적용하였다. Fig. 11에  $S_D$ 지반, 철골과 철근콘크리트 비선형시스템( $R=4$ )의 층응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 구조물과의 공진으로 인한 증폭의 영향이 큰 주기 구간에서는 철근콘크리트 시스템이 철골 시스템에 비하여 적은 층응답가속도를 보이는 반면, 이보다 긴 주기 구간에서는 철근콘크리트 시스템이 다소 크거나 유사한 층응답가속도를 가진다. 이러한 경향성은 모든 해석에서 동일하게 발생하였다.

본 연구에서는 3층과 6층 비선형 시스템을 구조 형식에 따라 분류하였지만, 기본적으로 동일한 주기, 고유감쇠비 및 항복 후 강성비 등을 적용하였기 때문에 구조 형식에 따른 가속도 응답은 결국 부재의 이력모델에 의해서 지배된다. Bi-linear모델로 나타낸 철골 비선형시스템과 Modified Takeda 모델로 나타낸 철근콘크리트 비선형시스템의 차이점은 제하 및 재하강성이며 있다. 일반적으로 Bi-linear모델은 제하 및 재하강성이 탄성강성과 동일

하며, Modified Takeda모델의 재하강성은 탄성강성과 동일하거나 작은 값을 가지고 재하강성은 탄성강성보다 항상 작은 값을 가진다. 시간이력해석 동안 두 비선형시스템의 강성은 선형시스템과 달리 변화하며 이는 구조물의 주기 변화를 유발하기 때문에, 지반운동으로 인한 구조물의 각 층가속도는 이러한 주기 변화에 따라 달라진다.

시간이력해석 결과 구조물의 각 시간별 1차 모드 주기를 살펴보면, 일반적으로 탄성 1차 모드 주기를 유지하는 시간이 철골 비선형시스템의 경우 80%이상인 반면, 철근콘크리트 비선형시스템은 20% 내외의 분포를 가지고 탄성 1차모드 주기를 기준으로 장주기 영역에 다양하게 분포한다. 이러한 차이점으로 인해 1차 모드 주기일 때 비구조요소의 증폭 현상은 철골이 철근콘크리트 비선형시스템보다 상대적으로 크며 이 주기보다 긴 특정 주기에서는 이와 반대로 역전 현상이 발생한다. Fig. 12에  $S_D$ 지반, 1차 모드 주기일 때, 지붕층에서의 철근콘크리트 시스템에 대한 철골 시스템의 층응답가속도비,  $FRS_{me,s}/FRS_{me,c}$ 를  $R$ 에 따라 나타내었다. 구조물의 층수와 관계없이  $FRS_{me,s}/FRS_{me,c}$ 는  $R$ 이 커질수록 증가하다  $R \geq 4$ 인 경우 약 1.5값을 유지한다.

Table 4에 두 비선형시스템의 40개 시간이력해석 후 계산된 누적 소산 에너지를 평균값으로 나타내었다. 에너지의 소산은 구조물의 추가적인 감쇠를 부여하기 때문에 층가속도 응답에 영향을 미친다. 두 비선형시스템의

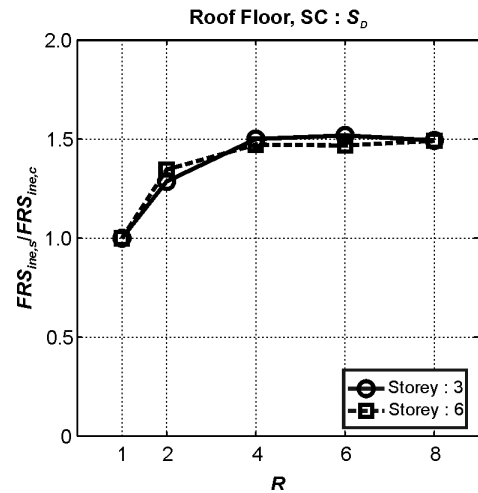


Fig. 12. Maximum value of  $FRS_{me,s}/FRS_{me,c}$  of steel and RC structures at 1st fundamental period :  $R=4$ , site class D

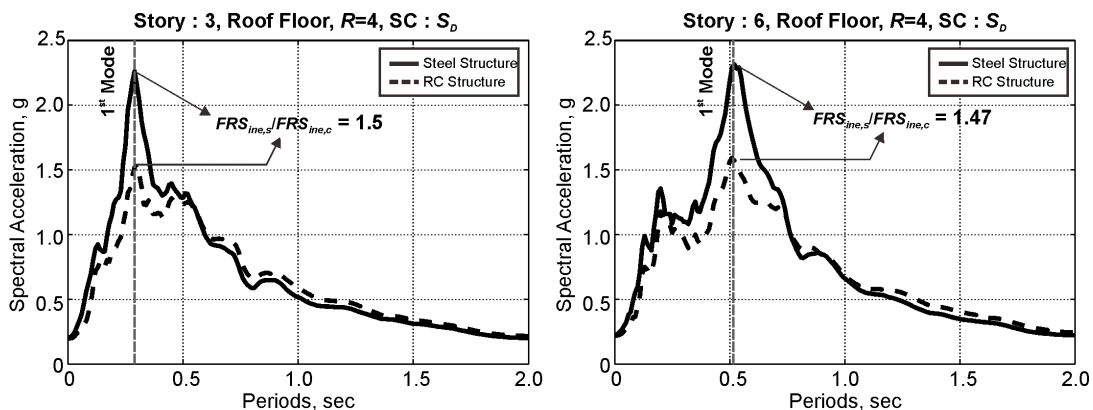


Fig. 11. Comparison of floor response spectrum at each floor of 3, 6-story steel and RC structures :  $R=4$ , site class D

**Table 4.** Average cumulative dissipation energy of 3, 6-story steel and RC structures :  $R=4$ , site class D

| R | Average cumulative dissipation energy (kNm) |         |         |         |
|---|---|---------|---------|---------|
|   | Steel                                       |         | RC      |         |
|   | 3-story                                     | 6-story | 3-story | 6-story |
| 2 | 8.11  | 28.99   | 13.62   | 37.47   |
| 4 | 13.96                                       | 36.92   | 18.79   | 41.36   |
| 6 | 15.51                                       | 37.08   | 17.97   | 37.71   |
| 8 | 15.63                                       | 35.60   | 16.94   | 34.83   |

평균 누적 소산 에너지는  $R=2$ 일 때 가장 큰 차이를 보이며  $R$ 이 증가할수록 차이가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히  $R=8$ 인 경우, 6층 철근 콘크리트 비선형 시스템이 철골 비선형 시스템과 더 적은 양의 에너지를 소산한다. 따라서 구조물의 1차 모드 주기일 때 철근콘크리트 비선형 시스템의 층응답스펙트럼이 철골 비선형시스템보다 작은 이유는  $R=2$ 인 경우 소산 에너지량의 차이로 인해 철근콘크리트 비선형시스템이 철골보다 적은 층응답가속도를 나타내는 반면  $R \geq 4$ 인 경우 이력 모델의 강성 변화로 인한 영향이 큰 것을 간접적으로 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 구조물의 동적특성이 비구조요소의 층응답스펙트럼에 미치는 영향을 분석하기 위해 상이한 소성능력을 가지는 3층과 6층 구조물에 KBC2009의 설계수준으로 보정된 40개 지진파를 적용하여 선형·비선형 시간이력해석을 수행하였다. 그리고 해석 결과를 이용하여 각 층의 층응답스펙트럼을 산정하였으며, 이를 지반응답스펙트럼 및 전파연구소에서 제시하는 층응답스펙트럼과 비교하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 선형시스템의 경우, 비구조요소의 층응답스펙트럼은 모든 주기 구간에서 지반응답스펙트럼의 가속도이상의 응답을 보이고, 구조물의 고유 주기일 때 공진으로 인한 증폭이 발생하였다. 이러한 증폭의 영향은 1차 모드 주기 부근에서 크게 나타났으며, 층이 높아질수록 증가하는 경향성을 보인다.
- 2) 비선형 시스템의 경우, 선형시스템과 동일하게 구조물과의 진공으로 인한 증폭 현상이 발생하였지만, 선형시스템에 비하여 현저히 적은 가속도 응답을 보인다. 비선형시스템의 소성능력을 나타내는 반응수정계수  $R$ 이 커질수록 층응답스펙트럼의 증폭은 감소하였으며,  $R=6$ 이상인 비선형시스템에서는 구조물의 고유 모드 및 층 높이에 의한 영향이 거의 발생하지 않았다.
- 3) 철골과 철근콘크리트 비선형시스템의 층응답스펙트럼을 살펴보면, 공진으로 인한 증폭의 영향이 큰 주기 구간에서는 철근콘크리트 구조가 철골 구조에 비하여 적은 층응답가속도를 보이는 반면, 이보다 긴 주기 구간에서는 철근콘크리트 시스템이 다소 크거나 유사한 층응답가속도를 가진다. 이는 두 비선형시스템에 적용한 이력모델 차이에 의한 것으로 해석 간 강성 변화 때문에 발생하는 것으로 나타났다.
- 4) 각 해석에서 도출된 선형·비선형 시스템의 층응답스펙트럼과 전파연구

소에서 제시한 층응답스펙트럼을 비교하면, 선형시스템과 상대적으로 낮은  $R$ 을 가지는 일부 비선형 시스템의 경우 1차 모드 주기 부근에서 전파연구소의 층응답스펙트럼보다 큰 응답을 보이는 반면,  $R=4$  이상인 비선형시스템의 층응답스펙트럼은 전파연구소의 층응답스펙트럼보다 작은 응답을 보인다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 소방방재청 지진 및 지진 해일 피해 저감 기술 개발 사업의 지원으로 수행한 ‘지진재해로 인한 사회·경제적 피해예측 모델 개발’ [NEMA-지진-2012-3]연구의 일환으로 수행되었음.

### / REFERENCES /

1. Seismic Test Method for Telecommunication Equipment: National Radio Research Agency, Korea; c2009.
2. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code: Architectural Institute of Korea; c2009.
3. Federal Emergency Management Agency, The 2003 NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures Parts 1 and 2: Provisions and Commentary (FEMA 450), Washington, D.C.; c2003.
4. International Code Council, International Building Code(IBC2012): Falls Church; c2012.
5. American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-10): Reston; c2010.
6. Medina RA, Sankaranarayanan R, Kingston KM, Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures, Engineering Structures, 2006;28:1927-1940.
7. Sankaranarayanan R, Medina RA, Acceleration response modification factors for nonstructural components attached to inelastic moment-resisting frame structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007;36(14):2189-2210.
8. Saatcioglu M, Shooshtari M, Naumoski N, Foo S, Floor response spectra for seismic design of operational and functional components of concrete buildings in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, 2010;37:1590-1599.
9. Federal Emergency Management Agency, Quantification of Building Seismic Performance Factors(FEMA P695): Washington, D. C.; 2009.
10. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER), [Internet], PEER Strong Motion Database; 2003 [updated December,2003], Available from: <http://peer.berkeley.edu/smcat>
11. Naeim, F, Alimoradi A, Pezeshk S, Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms, Earthquake Spectra, 2004;20(2):413-426.
12. Fahjan YM, Ozdemir Z, Scaling of Earthquake Accelerograms for Non-linear Dynamic Analyses to Match the Earthquake Design Spectra, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2005.

13. Carr AJ. RUAUMOKO MANUAL, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch: New Zealand: c2000.
14. Sewell RT, Cornell CA, Toro GR, McGuire RK. A study of factors influencing floor response spectra in nonlinear multi-degree-of-freedom structures, JABEEC Report No. 82: Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Palo Alto, CA; c1986.

/ APPENDIX /

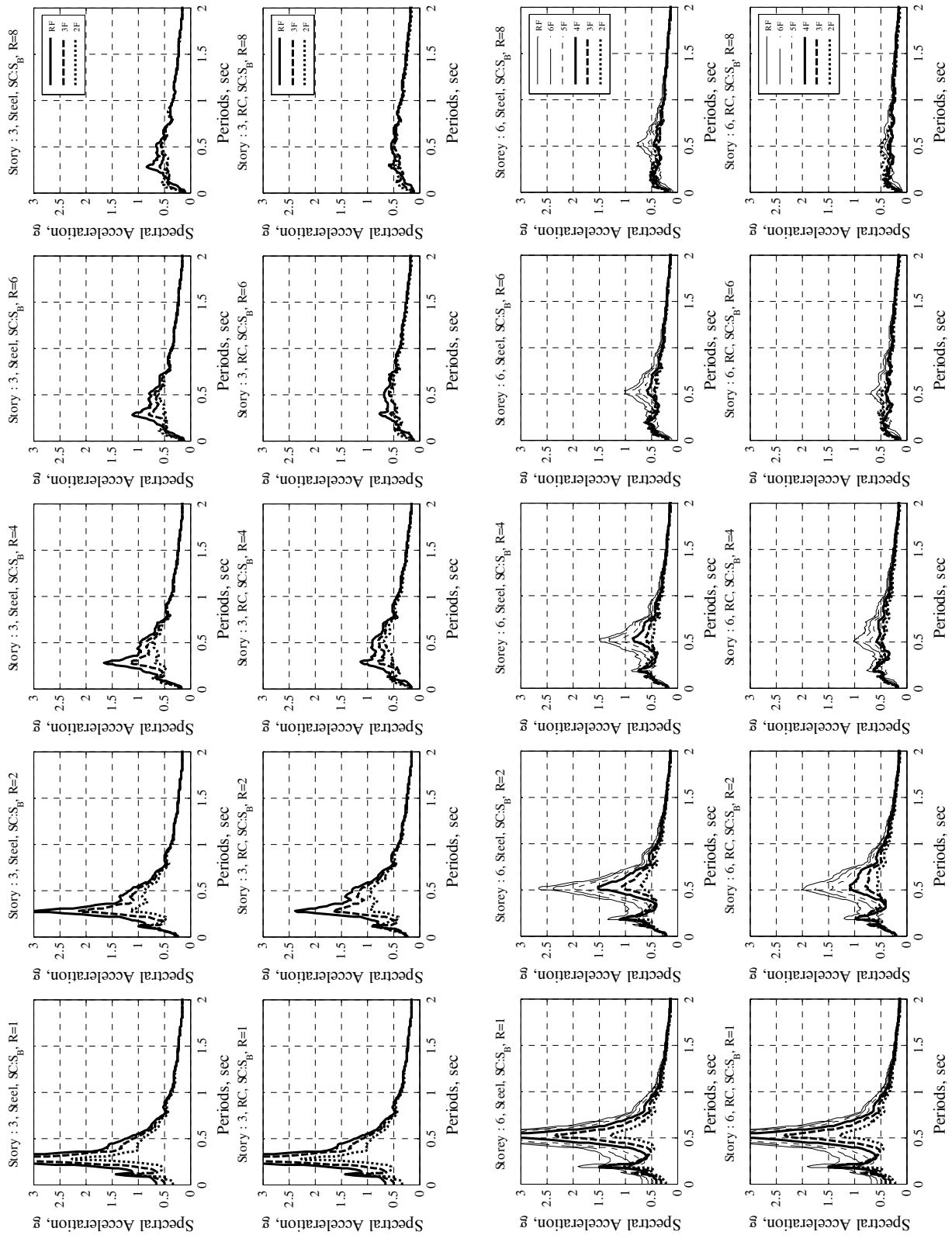


Fig. A1. Floor response spectrum at each floor of 3, 6-story steel and RC structures for site class B

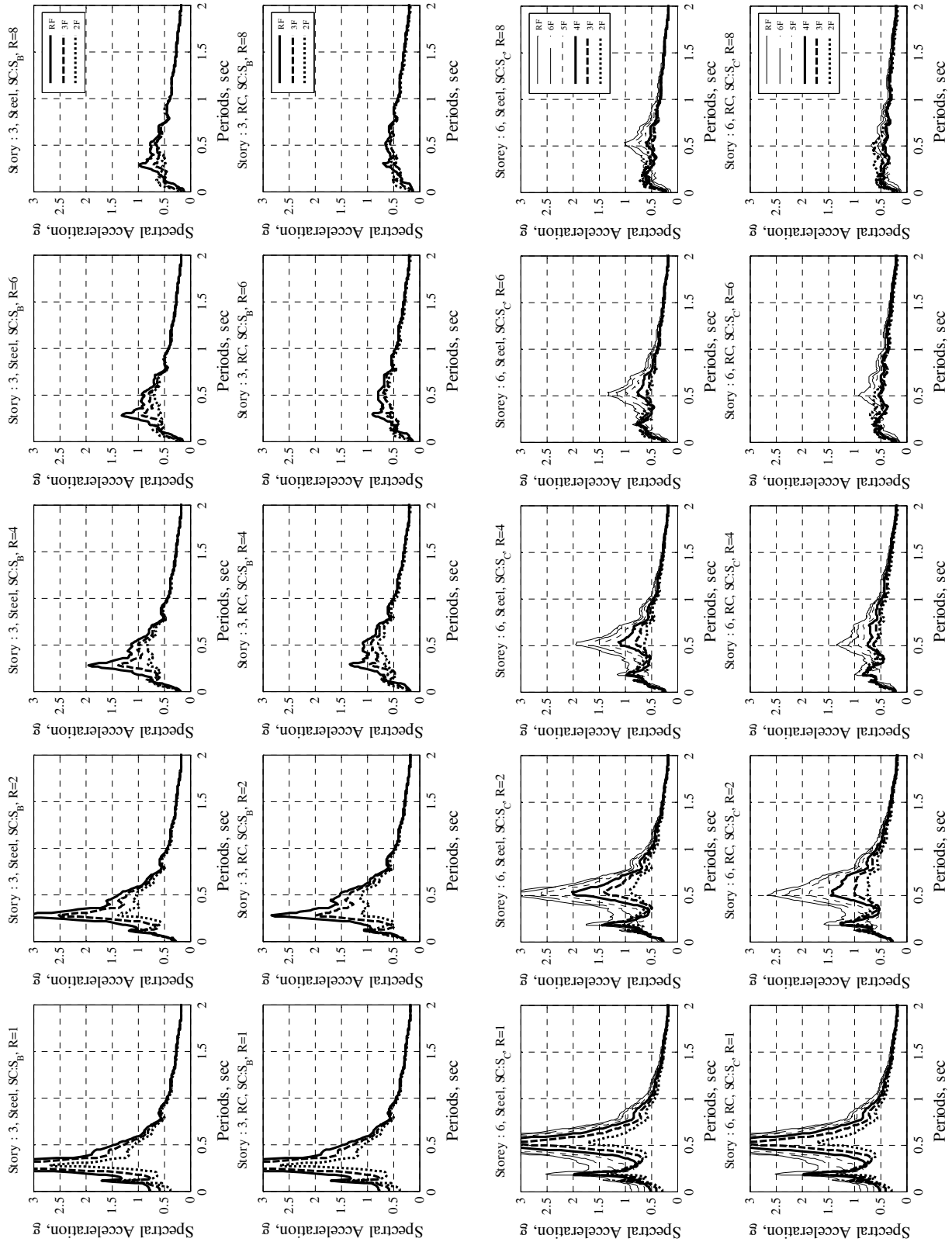


Fig. A2. Floor response spectrum at each floor of 3, 6-story steel and RC structures for site class C