

# 질점계 비선형 지진응답해석에 의한 구조물의 역량스펙트럼 제안

유진선<sup>1</sup> · 양원직<sup>2</sup> · 이원호<sup>1\*</sup> · 김형준<sup>3</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 건축공학과, <sup>2</sup>광운대학교 환경대학원, <sup>3</sup>서울시립대학교 건축공학과

## Propose of Capacity Spectrum Method by Nonlinear Earthquake Response Analysis

Jin-Sun You<sup>1</sup>, Won-Jik Yang<sup>2</sup>, Waon-Ho Yi<sup>1\*</sup> and Hyoung-Joon Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Kwangwoon Univ., Seoul, 139-701, Korea

<sup>2</sup>Graduate School of Environmental Studies, Kwangwoon Univ., Seoul, 139-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Architectural Engineering, Univ. of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

### Abstract

In this paper, a method on deducing the capacity spectrum based on nonlinear earthquake response analysis will be introduced. Damage assessment of general building draws the capacity spectrum through the Push-over analysis and the intersection point of capacity spectrum and demand spectrum is seen as performance point. Push-over analysis is the way to perform static analysis by using the equivalent static load changed from the effect of earthquake and predict the behavior of structures by earthquake. But, this method can not be taken into account in the effects of higher mode and the dynamic characteristic. Therefore, in order to calculate the capacity spectrum under dynamic properties of building. A capacity spectrum from going ahead with the nonlinear earthquake response analysis is suggested.

**Keywords** : nonlinear earthquake response, nonlinear response history analysis, capacity spectrum method

### 1. 서 론

일반적인 구조물의 손상도 평가는 비선형 등가정적해석(push-over analysis)을 통하여 구조물의 역량스펙트럼을 도출하고, 역량스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차점을 성능점으로 평가하고 있다. 등가정적해석은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법이다. 이 방법은 지진하중을 건물의 중량과 응답계수만으로 산정한다. 응답계수는 가속도계수와 중요도계수, 반응수정계수, 고유주기를 고려하여 산정된다. 또한 등가정적해석은 각층을 변위 제어로 가력하여 각층의 강성에 의한 복원력만으로 산출되기 때문에 지진파와 같은 동적하중에 대한 동적거동을 파악하는 것은 곤란하다. 또한 고차모드 및 층별 동특성의 영향을 고

려할 수 없다.

일부 연구자들은 층별 동특성의 영향을 고려한 비선형 응답을 보다 간편하게 산정하는 약산법으로 비연립 모드해석법을 사용하고 있다. 비연립 모드해석법은 비선형계의 응답을 모드별로 분리하여 가정하고 그에 따른 각 모드별 응답들을 조합하여 비선형 최대응답을 산정하는 방법이다. 비연립 모드해석법에는 비연립 모드중첩법(UMS), 비연립 응답스펙트럼법(URS), 비연립 Push-over법(UPA) 등이 있다. 그러나 이 방법으로 단면력을 산정할 경우, 비선형 시간이력법(NRH)과 비교하여 오차가 발생된다. 또한, 선형해석과는 달리 고려한 모드 수에 따라 오차가 불규칙하고 뚜렷한 경향성이 나타나지 않는다.

본 연구에서는 고차모드에 의한 동특성의 영향을 고려하기 위하여 비선형 시간이력법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-940-5195; E-mail: whyi@kw.ac.kr

Received November 15 2014; Revised December 1 2014

Accepted December 2 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시간이력해석은 각 부재에 대한 응답성상을 필요로 하지 않고 구조물 전체의 고차모드에 의한 동특성이 반영된 최대응답 가속도를 필요로 하므로 구조물 각층의 강성을 하나의 강성으로 표현하고 층질량을 설정하여 간단히 구조물의 응답성상을 파악할 수 있는 질점계 모델을 사용한다. 즉, 재현주기별로 스케일링된 지진과를 사용하여 질점계 비선형 지진응답해석을 통하여 최고층의 최대응답가속도를 산출하고 기존의 등가정적해석에 의한 역량스펙트럼의 결과와 비교·검토한다.

2. 해석 방법

이 장에서는 기존의 등가정적해석을 위한 제원을 설정하였고, 그에 대한 결과값을 산출하였다. 비선형 지진응답해석을 위한 질점계 해석모델 수립과정을 소개하였다. Akiyama가 제안한 에너지 평형법에 의한 강성분포식을 활용한 구조물의 층강성 산출과정과 항복점 산출과정을 소개하였다. 본 논문에 사용된 입력지진과와 입력지진과의 보정시 사용되는 계수값들의 제원을 소개하였다. 지진응답해석을 위해 사용한 Ruaumoko 프로그램과 프로그램의 설정방법과 결과값 산출방법에 대해 소개하였다.

2.1 등가정적해석을 위한 제원 및 결과값

지진응답해석 대상 건물은 콘크리트 구조물과 철골 구조물을 대상으로 하였다. 질점계 비선형 지진응답해석을 수행하기에 앞서 소방방재청의 지진대응시스템의 건축물 분류를 활용하여 등가정적해석을 위한 제원을 설정하였다. 콘크리트 구조물의 경우 C1, 철골 구조물의 경우 S1으로 구분하였다. 층수에 따라 콘크리트 구조물은 C1L1(2F), C1L2(4F), C1M(12F), C1H(20F), 철골 구조물은 S1L(3F), S1M(12F), S1H(20F)로 구분하였다.

콘크리트 구조물의 평면도는 Fig. 1과 같고, 철골 구조물의 평면도는 Fig. 2와 같다. 기둥이 받는 축력은 Fig. 1~2와 같이 한 기둥이 하중을 받는 면적 36m<sup>2</sup>, 81m<sup>2</sup>에 m<sup>2</sup>당

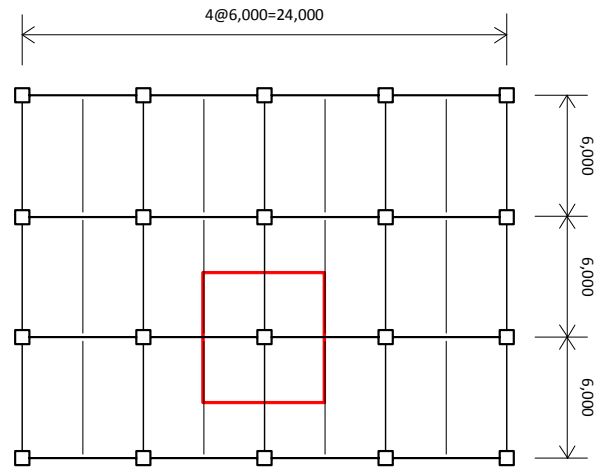


Fig. 1 Floor plan of analysis concrete building

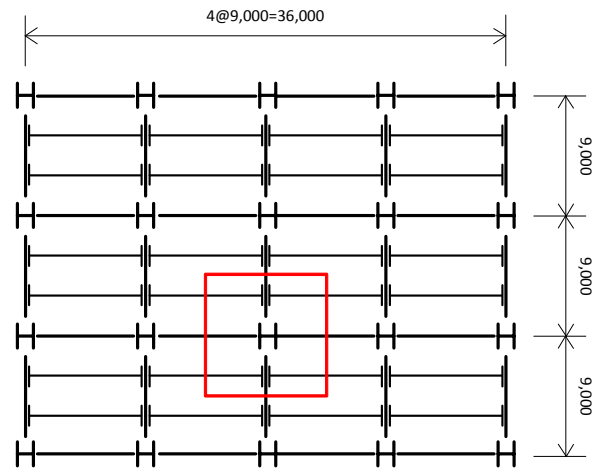


Fig. 2 Floor plan of analysis steel building

Table 2 Results of capacity spectrum (Push-over)

Category	Story	Dy	Ay	Du	Au
		(yield) mm	(yield) gal	(ultimate) mm	(ultimate) gal
C1L1	2	20.0	0.190	74.0	0.247
C1L2	4	39.6	0.149	152.0	0.189
C1M	12	102.4	0.074	249.3	0.097
C1H	20	135.2	0.066	328.1	0.082
S1L	3	24.0	0.054	76.0	0.105
S1M	12	127.0	0.060	188.0	0.068
S1H	20	240.0	0.071	330.0	0.084

Table 1 Floor height and Period of the analysis buildings

Category	Story	Height of story (cm)	Period (sec)
C1L1	2	335	0.607
C1L2	4	310	0.997
C1M	12	350	2.173
C1H	20	350	2.739
S1L	3	400	1.060
S1M	12	400	3.470
S1H	20	400	4.150

10kN으로 계산하여 1개 층당 각각 360kN, 810kN으로 계산하였다. 등가정적해석에 의한 결과값은 Table 2와 같다.

2.2 해석모델 수립

질점계 비선형 지진응답해석을 위한 해석모델 수립을 위해 해석결과를 일반화하여 Fig. 3과 같이 한 스펙에 대한 질량

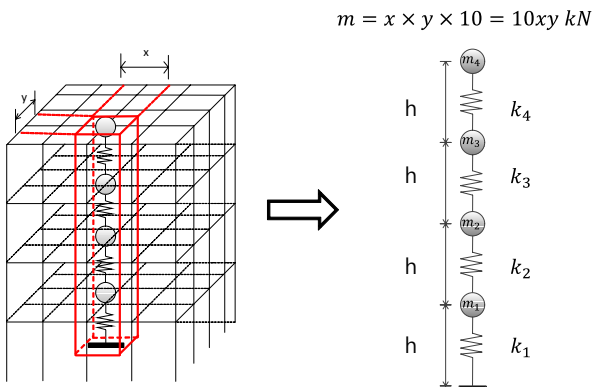


Fig. 3 Earthquake response analysis modeling

과 강성으로만 표현하였다. 또한 각 질점은 X축 수평방향으로만 자유도를 가지고, Y축 수평방향 및 Z축 회전방향의 자유도는 구속하였다. 스프링 요소는 X방향으로만 작동하는 전단스프링으로 나타내었다. 강도분포는 Akiyama가 제안한 에너지 평형법을 활용하여 강도분포식을 산정하였고, 층 전단력 계수( $\alpha$ )값을 반복 계산하여 층강성을 산출하였다. 이에 대한 자세한 설명은 하기절에서 설명한다.

2.2.1 에너지 평형법에 의한 층강성 분포

Akiyama의 “에너지 평형법에 의한 면진제진구조물의 설계법”에 의하면 하나의 지진이 구조물에 입력되어지는 총에너지가 구조물의 각부에 어떻게 분포하는가는 각 층의 강도분포, 강성분포에 영향을 받는 것임이 밝혀졌다. 5층 이하의

구조물은 전단거동 구조물로 고려하여 Akiyama의 에너지 평형법에서 제안한 전단계구조물의 강도분포식을 사용하였고, 6층 이상의 구조물은 휨거동 구조물로 고려하여 휨계구조물의 강도분포식을 사용하였다. 전단계구조물의 강도분포식  $\kappa_s$ 와 휨계구조물의 강도분포식  $\kappa_f$ 는 다음과 같다.

$$X = h_x \div h \tag{1}$$

$$\kappa_s = 1 + 0.5 \times X \text{ (if, } X \leq 0.2) \tag{2}$$

$$= 1 + 1.5927X - 11.852X^2 + 42.85X^3 - 59.48X^4 + 30.16X^5 \text{ (if, } X > 0.2)$$

$$\kappa_f = 1 + 1.5927X - 11.852X^2 + 42.85X^3 - 59.48X^4 + 30.2X^5 \tag{3}$$

여기서,  $\kappa_s$ : 전단계 강도분포비,  $\kappa_f$ : 휨계 강도분포비,  $h_x$ : 층고,  $h$ : 건물의 높이,  $X$ : 층 정규화

위와 같이 건물의 높이, 질량, 강도분포를 산정하였고, 층강성은 목표 주기가 나오도록 층 전단력 계수( $\alpha$ )를 조정하며 반복 계산하여 식 (4)와 같이 산출하였다.

$$k = \frac{\kappa \times m \times \alpha}{\delta} \tag{4}$$

여기서,  $k$ : 층강성,  $\kappa$ : 강도분포,  $m$ : 건물의 누적질량,  $\alpha$ : 층 전단력 계수,  $\delta$ : 변위

Table 3 Strength distribution and story-stiffness (C1)

Story	C1L1(2F)		C1L2(4F)		C1M(12F)		C1H(20F)	
	$\kappa_s$	$k$ (N/mm)	$\kappa_s$	$k$ (N/mm)	$\kappa_f$	$k$ (N/mm)	$\kappa_f$	$k$ (N/mm)
1F	1.00	11,600	1.00	14,700	1.00	23,700	1.00	40,400
2F	1.38	8,000	1.12	12,300	1.04	22,600	1.03	39,400
3F	-	-	1.38	10,200	1.08	21,400	1.05	38,200
4F	-	-	1.83	6,700	1.12	20,000	1.09	37,400
5F	-	-	-	-	1.20	18,900	1.10	35,600
6F	-	-	-	-	1.31	18,100	1.12	34,100
7F	-	-	-	-	1.46	17,300	1.16	32,900
8F	-	-	-	-	1.64	16,200	1.22	31,900
9F	-	-	-	-	1.88	14,900	1.28	31,100
10F	-	-	-	-	2.22	13,200	1.37	30,400
11F	-	-	-	-	2.78	11,000	1.46	29,500
12F	-	-	-	-	3.70	7,300	1.56	28,500
13F	-	-	-	-	-	-	1.69	27,200
14F	-	-	-	-	-	-	1.83	25,800
15F	-	-	-	-	-	-	2.00	24,300
16F	-	-	-	-	-	-	2.22	22,500
17F	-	-	-	-	-	-	2.52	20,400
18F	-	-	-	-	-	-	2.93	17,700
19F	-	-	-	-	-	-	3.48	14,100
20F	-	-	-	-	-	-	4.23	8,600

**Table 4** Strength distribution and story-stiffness (S1)

Story	S1L(3F)		S1M(12F)		S1H(20F)	
	$\kappa_s$	$k$ (N/mm)	$\kappa_f$	$k$ (N/mm)	$\kappa_f$	$k$ (N/mm)
1F	1.00	21,000	1.00	20,800	1.00	39,500
2F	1.18	16,500	1.04	19,800	1.03	38,500
3F	1.63	11,400	1.08	18,800	1.05	37,300
4F	-	-	1.12	17,500	1.08	36,100
5F	-	-	1.20	16,600	1.10	34,800
6F	-	-	1.31	15,900	1.12	33,300
7F	-	-	1.46	15,200	1.16	32,100
8F	-	-	1.64	14,200	1.22	31,200
9F	-	-	1.88	13,000	1.28	30,400
10F	-	-	2.22	11,600	1.37	29,700
11F	-	-	2.78	9,600	1.46	28,800
12F	-	-	3.70	6,400	1.56	27,800
13F	-	-	-	-	1.69	26,600
14F	-	-	-	-	1.83	25,200
15F	-	-	-	-	2.00	23,700
16F	-	-	-	-	2.22	22,000
17F	-	-	-	-	2.52	19,900
18F	-	-	-	-	2.93	17,300
19F	-	-	-	-	3.48	13,700
20F	-	-	-	-	4.23	8,400

콘크리트 구조물의 층균열전단력은 Akiyama의 에너지평형법에 의한 강도분포와 누적 질량, 층 전단력 계수를 곱하여 식 (4)와 같이 산정하였다. 층강성( $k$ )은 층균열전단력 ( $\kappa_s \times m \times \alpha$ )을 하기철의 균열변위( $\delta_{crac}$ )로 나누어 산정하였다. 층항복전단력은 층균열전단력의 3배로 산정하였다.

철골 구조물의 경우, 층항복전단력은 Akiyama의 에너지 평형법에 의한 강도분포와 누적 질량, 층 전단력 계수를 곱하여 산정하였다. 층강성( $k$ )은 층항복전단력( $\kappa_f \times m \times \alpha$ )을 하기철의 항복변위( $\delta_y$ )로 나누어 산정하였다. Table 3~4에 본 논문에서 설정한 콘크리트 구조물과 철골 구조물의 강도 분포와 층강성을 나타내었다.

2.2.2 항복점 산출

일반적인 콘크리트 구조물의 균열부재각은 1/1500이고, 항복부재각은 1/150이다. 본 논문에서는 각 층의 층고에 균열부재각을 곱하여 균열변위를 산정하였고, 층고에 항복 부재각을 곱하여 항복변위를 산정하였다. 또한 일반적인 철골 구조물의 항복부재각은 1/150이며, 각 층의 층고에 항복 부재각을 곱하여 각 층의 항복변위를 산정하였다. Table 5에 각 구조물별 균열부재각, 항복부재각, 균열변위, 항복변위, 층균열전단력과 층항복전단력을 나타내었다.

**Table 5** Angle of rotation of member, displacement and story shearing force of crack and yield

Category	Floor height (cm)	$\theta_{crac}$	$\theta_y$	$\delta_{crac}$ (cm)	$\delta_y$ (cm)	$F_{crac}$ (kN)	$F_y$ (kN)
C1L1	335	1/1500	1/150	0.22	2.23	26	78
C1L2	310	1/1500	1/150	0.21	2.07	30	91
C1M	350	1/1500	1/150	0.23	2.33	55	166
C1H	350	1/1500	1/150	0.23	2.33	94	283
S1L	400	-	1/150	-	2.67	-	559
S1M	400	-	1/150	-	2.67	-	554
S1H	400	-	1/150	-	2.67	-	1053

2.3 이력모델

이력모델은 일반적으로 비선형인 계의 입력·응답이나 점탄성체의 동적인 응력·변형 곡선이 그리는 폐곡선적인 히스테리시스를 나타내는 모델로 계의 감쇠성의 대소를 나타낸다.

비선형 이력모델은 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우 항복강도, 강성 및 강도의 저감정도가 어떠한 방식으로 변화하는가를 평가함으로 정의할 수 있다. 하중과 변형에 대한 이동 경로를 지정하기 위하여 일반적으로 하중의 재하(loading),

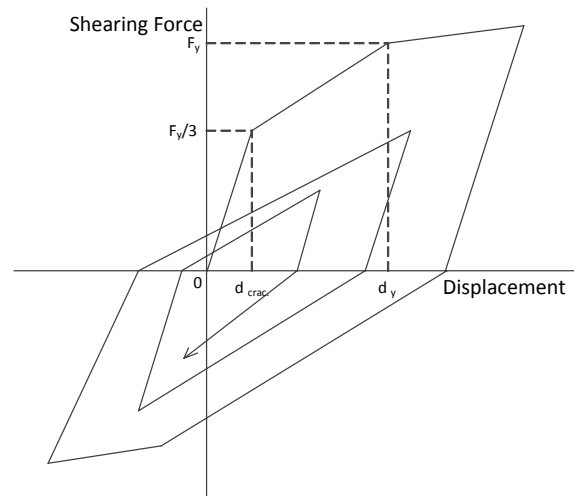


Fig. 4 Modified Takeda Type hysteresis model

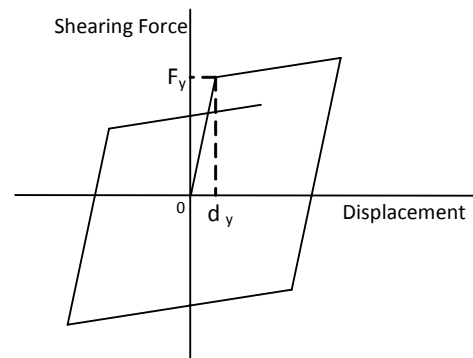


Fig. 5 Bi-linear model

제하(unloading), 재제하(reloading)의 상태를 고려한다.

본 연구에서는 이력모델 중에서 콘크리트 구조물의 경우, Fig. 4의 수정 다케다형 이력모델(modified takeda type)을 사용하였고, 철골 구조물의 경우, Fig. 5의 Bi-linear 모델을 사용하였다. 수정 다케다형 이력모델의 제하 및 재하 강성을 정의하는 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 0.06을 적용하였다.

### 2.4 입력지진파

해석에서 사용된 지진은 FEMA P695에서 사용한 지진기록 중 20개의 원거리 지진파를 사용했다. 각 지진파는 평면상에 서로 직교하는 2개의 수평방향 지진파로 이루어져  $x$ 방향과  $y$ 방향 20개씩, 총 40개의 지진파를 대상으로 하였다.

가속도 응답스펙트럼에 의하면 입력지진파의 고유주기가 0.2~0.9초까지 고루 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 입력지진파는 지반 및 지진의 강도 등 국내의 여건과 상이하기 때문에, KBC2009에서 제시하는 설계가속도 스펙트럼을 목표가속도스펙트럼으로 고려하여 보정하였다.

설계가속도 스펙트럼 산정시 고려한 유효지반가속도  $S$ 는 본 연구의 대상지역인 동대문구를 대상으로 재현주기 50년에서 5,000년까지 보정하여 설정하였으며, 지반종류는  $S_D$ 지반을 대상으로 하였다. 40개의 지진은 지반 및 지진강도의 분류에 따라 동일한 보정계수를 적용하였다. Table 6에 보정시 사용되는 계수값들의 제원을 나타내었다.

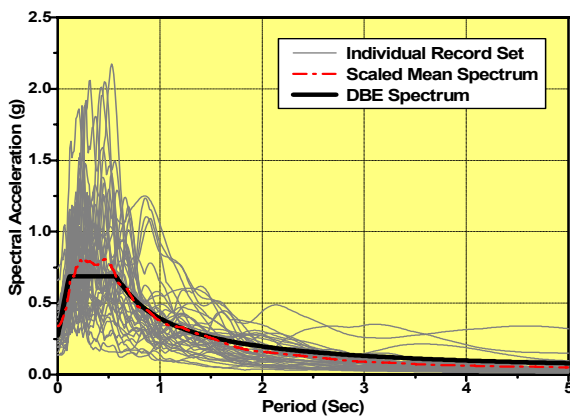


Fig. 6 Scaled Mean Spectrum (2475y)

여기서, EGA: 유효 지반가속도,  $F_a$ : 단주기 지반 증폭계수,  $F_v$ : 1초주기 지반 증폭계수,  $SD$ : 단주기의 설계스펙트럼 가속도,  $SD1$ : 1초주기의 설계스펙트럼 가속도

보정 수행결과와 대표적인 예로 재현주기 2475년에 대한 설계스펙트럼 및 평균스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. 재현주기 2475년의 설계스펙트럼을 나타낸 것은 실제 구조 설계시 재현주기 2475년을 많이 사용하기 때문이고, 재현주기 2475년의 평균 설계스펙트럼이 평균스펙트럼과 가장 일치하기 때문이다.

### 2.5 지진응답해석

지진응답해석은 지반이나 구조물을 모델화하여 해석기반에 지진동을 입력함으로써 기반에 대한 가속도나 변위의 응답 배율 등을 수치 계산에 의해 구하는 해석방법이다. 이것은 동하중에 의한 응력, 변위 거동과약이 가능하고, 입력치나 해석 모델, 고유주기, 지반조건 등에 따라 결과가 상이하다.

일반적으로 지진응답해석의 절차는 내진등급과 성능목표를 산정하고, 지반조사를 실시한다. 이후 입력지진파를 설정하고 그에 따른 결과인 설계응답스펙트럼, 최대가속도, 등가전단응력, 전단탄성계수곡선 등을 산출한다. 기존의 지진응답해석은 등가하중이 작용한다고 가정하는 등가정적해석(Push-over)을 사용한다.

본 논문에서는 FEMA P695의 40개의 지진파를 대입한 질점계 비선형 지진응답해석을 통하여 콘크리트 구조물과 철골 구조물에 대한 역량스펙트럼을 작성하였다. 지진응답해석은 2차원 해석모델인 Ruaumoko프로그램을 사용하여 진행하였다. 구조물의 감쇠비는 응답모드별로 동일하게 5%를 적용하였으며, 해석 간격은 0.0025초로 설정하였다. 해석 결과는 0.01초 간격으로 50초까지 산출하였다. 역량곡선상의 각각의 포인트는 40개 지진파에 대한 최상층 가속도의 절대값 중 최대값을 산출하였고, 그 가속도에서의 변위값의 절대값으로 작성하였다. 최상층의 가속도를 사용한 것은 기존의 역량스펙트럼이 건축 구조물 전체의 변위를 산출할 때, 최상층의 가속도를 대상으로 작성되어지므로 이와 비교하기 위함이다. 각 구조물의 해석은 8개의 재현주기와 40개의 지진파

Table 6 Date for creating design spectrum by return period

Category	50y	100y	200y	250y	475y	1000y	2475y	5000y
EGA	0.034	0.048	0.066	0.073	0.098	0.135	0.195	0.252
$F_a$	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.529	1.411	1.297
$F_v$	2.400	2.400	2.400	2.400	2.400	2.259	2.022	1.794
$SD$	0.138	0.192	0.264	0.292	0.391	0.517	0.686	0.816
$SD1$	0.083	0.115	0.158	0.175	0.234	0.306	0.393	0.451

를 적용하여 해석하여 1가지 종류의 구조물 당 320회의 해석을 진행하였다. 콘크리트 구조물은 1,280회, 철골 구조물은 960회의 해석을 진행하였다.

### 3. 해석 결과

질점계 비선형 지진응답해석을 수행하여 해석 대상 구조물의 역량스펙트럼을 산출하였다. Fig. 7~10에서는 콘크리트 구조물, Fig. 11~13에서는 철골 구조물의 역량스펙트럼 산출 결과와 40개 지진파의 평균값을 나타내었다.

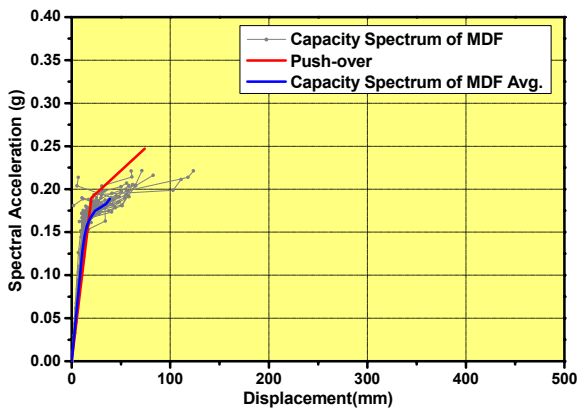


Fig. 7 Capacity Spectrum of C1L1(2F)

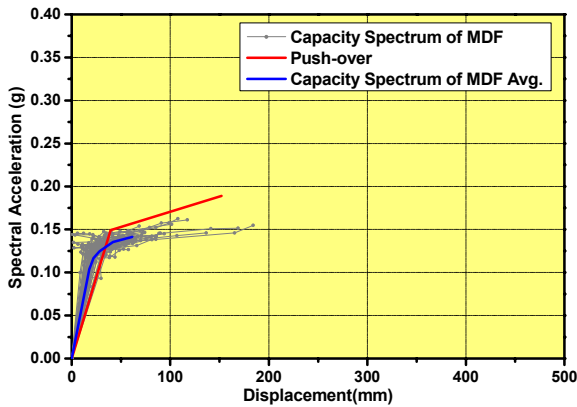


Fig. 8 Capacity Spectrum of C1L2(4F)

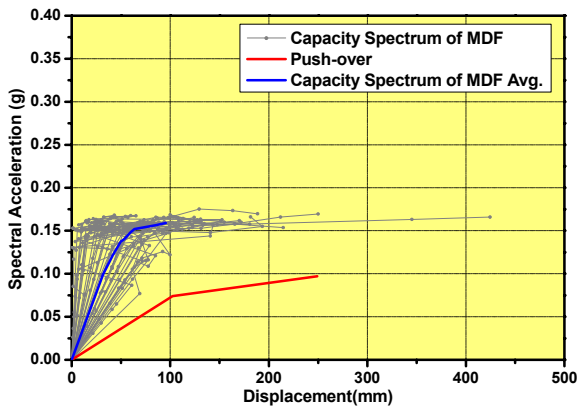


Fig. 9 Capacity Spectrum of C1M(12F)

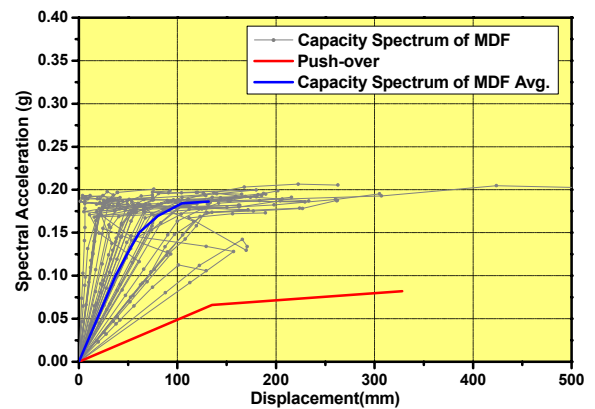


Fig. 10 Capacity Spectrum of C1H(20F)

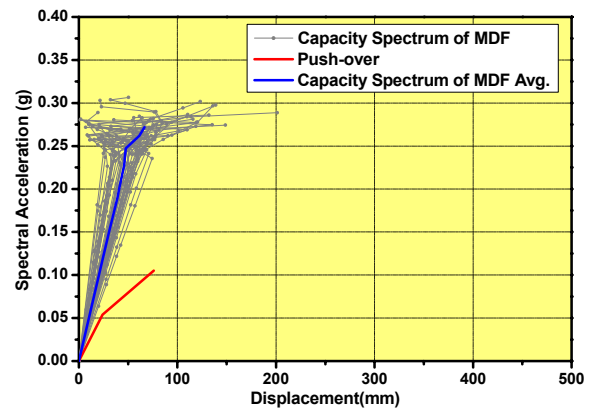


Fig. 11 Capacity Spectrum of S1L(3F)

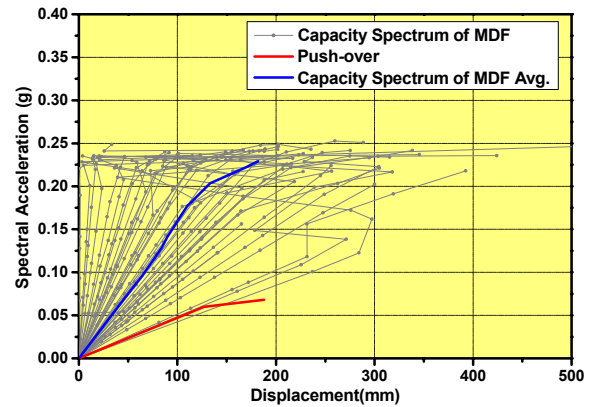


Fig. 12 Capacity Spectrum of S1M(12F)

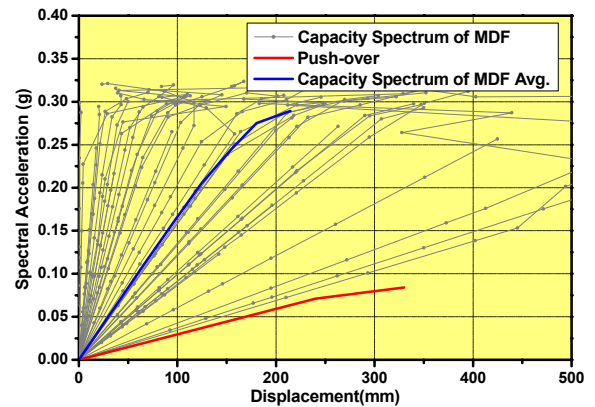


Fig. 13 Capacity Spectrum of S1H(20F)

### 3.1 콘크리트 구조물의 역량스펙트럼 산출결과

콘크리트 구조물의 역량스펙트럼과 등가정적해석에 의한 결과값을 나타냈다. 지진파별로 구조물의 역량스펙트럼이 많은 차이를 보였기 때문에 질점계 비선형 지진응답해석의 경향을 파악하기 위하여 역량스펙트럼의 재현주기별 평균값을 나타냈다. 콘크리트 구조물의 2층과 4층에서는 기존의 등가정적해석의 결과값과 유사한 양상을 나타냈다. 하지만 층수가 높아질수록 등가정적해석에 의한 결과값보다 강성이 크게 산출되었다. 이는 등가정적해석에서는 고차모드 및 층별 동특성의 영향을 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 질점계 비선형 지진응답해석을 통해 산출된 역량스펙트럼은 산포하는 경향을 나타냈다. 그러나 재현주기별 40개의 지진파의 평균값을 도출한 결과 등가정적해석보다는 강성이 크게 산출되었지만 일정한 경향을 나타내었다.

### 3.2 철골 구조물의 역량스펙트럼 산출결과

철골 구조물도 콘크리트 구조물과 마찬가지로 40개 지진파의 역량스펙트럼 평균값과 등가정적해석에 의한 결과값을 나타냈다. 철골 구조물은 콘크리트 구조물과 달리 저층(3F)에서도 강성의 차이가 나타났으며, 철골 구조물의 재현주기별 평균값도 콘크리트 구조물과 마찬가지로 다소 강성이 강하게 산출되었지만 일정한 경향을 나타냈다. 철골 구조물의 역량스펙트럼은 콘크리트 구조물보다 산포하는 경향이 심하게 나타났으나, 40개 지진파의 평균값은 콘크리트 구조물과 마찬가지로 일정한 경향이 나타났다.

질점계 비선형 지진응답해석을 진행한 결과 각 지진파의 역량스펙트럼은 일정한 경향을 나타내지 않았지만, 40개 지진파의 평균값은 일정한 경향을 나타내었다. 각 지진파의 역량스펙트럼이 일정한 경향을 나타내지 않은 것은 2.4절의 Fig. 6와 같이 각 지진파의 특성이 반영되어 구조물의 고유주기별로 차이가 나타난 것으로 사료된다.

콘크리트 구조물과 철골 구조물의 역량스펙트럼 산출 결과, 기존의 등가정적해석과 비교하여 강성이 다소 강하게 산출되었다. 이것은 고차모드 및 동특성이 반영되었기 때문에 강성이 크게 산출된 것으로 사료된다. 고차모드의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 14~15와 Table 7에 각 구조물별 모드 참여율을 나타냈다.

Fig. 14는 콘크리트 구조물, Fig. 15는 철골 구조물의 1차모드와 2차모드의 모드참여율을 나타내었다. 비교 결과 2층과 4층의 콘크리트 구조물의 경우 1차모드 참여율이 90%, 84%로 다른 구조물과 비교하여 기존의 등가정적해석

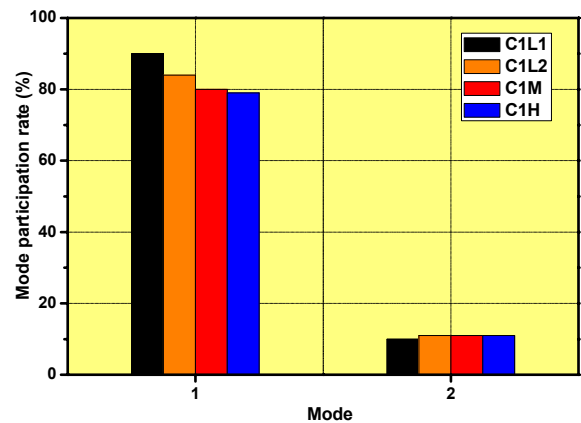


Fig. 14 Mode participation of type of concrete buildings

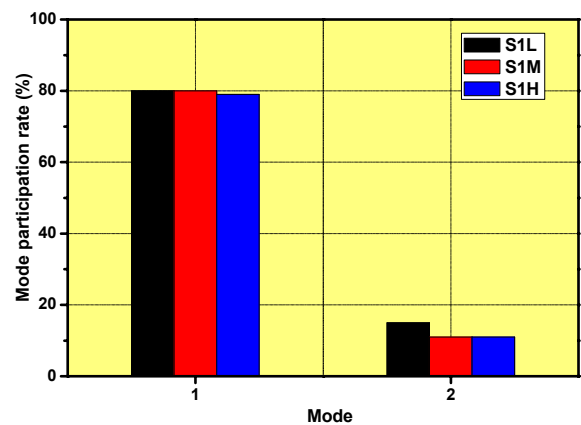


Fig. 15 Mode participation of type of steel buildings

Table 7 Mode participation of type of buildings

Mode	C1L1	C1L2	C1M	C1H	S1L	S1M	S1H
	%	%	%	%	%	%	%
1	90	84	80	79	80	80	79
2	100	95	91	90	95	91	90
3	-	98	95	94	100	95	94
4	-	100	97	96	-	97	96
5	-	-	98	97	-	98	97
6	-	-	99	98	-	99	98
7	-	-	99	98	-	99	98
8	-	-	99	99	-	99	99
9	-	-	100	99	-	100	99
10	-	-	100	99	-	100	99
11	-	-	100	99	-	100	99
12	-	-	100	99	-	100	99
13	-	-	-	100	-	-	100
14	-	-	-	100	-	-	100
15	-	-	-	100	-	-	100
16	-	-	-	100	-	-	100
17	-	-	-	100	-	-	100
18	-	-	-	100	-	-	100
19	-	-	-	100	-	-	100
20	-	-	-	100	-	-	100

과 유사한 양상과 강성을 나타냈다. 2층과 4층의 콘크리트 구조물을 제외한 나머지 구조물들은 1차모드의 참여율이 약 80%로 2층, 4층의 콘크리트 구조물과 비교하여 등가정적해석과 많은 차이를 나타냈다. 또한, C1M와 S1M(12F), C1H와 S1H(20F)와 같이 층수가 같은 경우, 구조물의 종류와 상관없이 고차모드의 모드참여율이 일치하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Akiyama가 제안한 에너지 평형법에 의한 층강성 분포식을 활용하여 일반적인 구조물의 층강성을 가정하였으며, FEMA P695에서 사용한 40개 지진파를 사용하여 비선형 지진응답해석에 의한 역량스펙트럼을 도출하였다. 또한 질점계 비선형 지진응답을 통해 도출된 역량스펙트럼과 기존의 등가정적해석에 의한 역량스펙트럼을 비교·분석하였다. 그에 따른 결과를 다음과 같이 정리한다.

- 1) 기존의 등가정적해석에 의한 역량스펙트럼과 비교 결과 등가정적해석(Push-over해석)은 구조물의 강성을 과소평가 하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 등가정적해석에 의한 역량스펙트럼과 본 연구에서 역량스펙트럼과의 차이가 고층으로 갈수록 심화되는 것으로 보아 기존의 역량스펙트럼에서는 고차모드에 의한 동적거동 특성이 반영되지 않았기 때문으로 사료된다. 이는 각 구조물의 규모별 1차모드의 참여율이 낮아지는 경향과 비례하는 것에서 알 수 있다.
- 3) 등가정적해석과 비선형 지진응답해석 결과에 의한 역량스펙트럼의 비교 결과, 기존의 등가정적해석에 의한 역량스펙트럼은 구조물의 성능을 과소평가하고 있는 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 소방방재청이 주관하는 지진지해로 인한 사회경제적 피해예측 모델 개발(No. NEMA-자연-2012-67) 및 2014년 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었습니다.

#### References

**Akiyama, H.** (2002) *Earthquake-Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance*, Goomibook.

**Athol, J.C.** (2000) Ruaumoko Manual. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

**Choi, K.J., Yi, W.H., Yang, W.J., Kim, H.J.** (2013) A Study on Evaluation of Floor Response Spectrum for Seismic Design of Non-Structural Components, *Earthquake Eng. Soc. Korea*, 17(6), pp.279~291.

**Chung, L.** (2009) *Development of the Seismic Fragility Function for Domestic Building Structure*, National Emergency Management Agency.

**Federal Emergency Management Agency** (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors(FEMA P695)*, Washington, D.C.

**Jang, G.C., Chang, K.H.** (2006) A Comparative Study on Formulation of Three-Dimensional Elastic-Plastic Finite Deformation Analysis for Prediction Large Deflection, *J. Korea Assoc. Spatial Struct.*, 6(4), pp.55~61.

**Lim, Y.K.** (2009) Reliability on Estimation of Nonlinear Seismic Response by Uncoupled Modal Analysis, University of Donga, Busan, Korea.

**Hwang, G.H.** (2012) Seismic Retrofit of old Irregular Shaped Building using Interaction Vibration Control, University of Donga, Gwangju, Korea.

#### 요 지

본 논문에서는 질점계 비선형 지진응답해석을 통한 역량스펙트럼 도출방법을 소개한다. 일반적인 건축물의 손상도 평가는 비선형 등가정적해석(Push-over Analysis)을 통하여 건축물의 역량스펙트럼을 도출하고, 역량스펙트럼과 요구스펙트럼의 교차점을 성능점으로 평가하고 있다. 등가정적해석은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산한 후 이를 이용하여 정적해석을 수행함으로써 구조물의 지진에 의한 거동을 예측하는 방법이다. 이 방법은 고차모드 및 층별 동특성의 영향을 고려할 수 없다. 따라서 건축물의 동특성이 반영된 역량스펙트럼을 산출하기 위하여 질점계 비선형 지진응답해석을 진행하여 건축물의 역량 스펙트럼을 제안하고자 한다.

**핵심용어** : 비선형 지진응답, 비선형 시간이력법, 역량스펙트럼