

초고층 구조물의 지진해석을 위한 지진기록의 조정방법

Scaling Method of Earthquake Records for the Seismic Analysis of Tall Buildings

김태호¹⁾ · 박지형²⁾ · 김옥종³⁾ · 이도범⁴⁾ · 고 현⁵⁾

Kim, Tae-Ho · Park, Ji-Hyeong · Kim, Ook-Jong · Lee, Do-Bum · Ko, Hyun

국문 요약 >> 최근 감쇠장치 등을 가진 초고층 건축물의 지진해석에 시간이력해석법이 자주 사용되고 있다. 지진기록은 구조물의 기본 진동주기를 T라 할 때 설계기준에서 요구하는 바와 같이 0.2T에서 1.5T 사이의 스펙트럼 값을 설계응답스펙트럼에 부합하게 조정되어 사용되고 있다. 설계기준에서 제시한 방법으로 조정할 경우 주기가 길어질수록 두 해석법 사이의 응답차이는 커지는 현상이 발생한다. 즉 설계기준에 의하여 조정된 지진기록을 사용하여 시간이력해석을 수행하면 밀면전단력 등은 비슷하지만 변위, 층간변위, 부재력 등은 적게 평가되는 현상이 발생하였다. 이들 결과에 밀면전단력 조정계수를 적용하면 응답이 더욱 작아지는 것을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 인공지진을 만드는 데 어려움이 있는 엔지니어들을 위하여 기존 설계기준에 부합하는 지진기록 조정방법을 제시하였다.

주요어 내진설계, 설계지진파, 초고층 건축물, 응답스펙트럼

ABSTRACT >> In recent years, time history analysis has been the method generally used for the seismic analysis of tall buildings with damping devices. When T is the natural period of the first vibration mode of the structure, the sum of the spectral acceleration of the earthquake ground motion is usually adjusted to that of the design response spectrum in the period ranging from 0.2T to 1.5T to meet the requirements of design code. However, when the ground motion is scaled according to the design code, the differences in the responses obtained by response spectrum analysis (RSA) and time history analysis (THA) of the structures increase as the natural period of the structure becomes longer. When time history analysis is performed by using ground accelerations that are scaled according to the design code, base shear is similar to that obtained from RSA, but other responses, such as displacements, drifts and member forces, are underestimated compared to RSA. If these results are adjusted by multiplying with the scale-up factor, the scaled responses become much smaller. Therefore, a scaling method of ground motions corresponding with the design code is proposed in this study, as a way of assisting structural engineers in generating artificial ground motions.

Key words earthquake resistant design, design ground acceleration, tall building, response spectrum

1. 서론

최근 초고층 구조물의 진동제어 등을 목적으로 시간이력 해석법이 많이 적용되고 있으며 이 해석법에 사용되는 설계 지진파는 지반조건에 맞는 지진기록으로서 설계대상 건물 주기의 0.2배에서 1.5배 사이의 평균값과 설계응답스펙트럼

의 평균값이 맞도록 조정되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이 이외에도 ASCE 7-05에서는 면진구조물이나 감쇠기를 가진 구조물에 대하여 1차진동주기가 변하지 않을 경우 건물 주기의 0.5배에서 1.25배 사이로 조정하고 있다.⁽³⁾

초고층 구조물에 대하여 적용을 요구하는 예는 참고문헌 ^{(7),(8)}에 제시되어 있으며 이들은 모두 기존 설계기준과 동일한 조정방법을 취하고 있다. 그러나 건물의 주기가 짧을 경우에는 평균값을 산정하는 대역이 좁기 때문에 응답스펙트럼 해석 결과와 시간이력해석 결과의 차이가 작다. 그러나 초고층 건물의 경우에는 일반적으로 주기가 길기 때문에 평균값 산정대역이 넓어져 응답스펙트럼 해석의 결과와 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 이런 문제로 일본이나 중국 등에서 엔지니어를 위하여 설계스펙트럼에 부합하는 설계지

¹⁾ 정회원·대림산업(주) 기술연구소 대리, 공학박사

(대표저자: tahz91@daelim.co.kr)

²⁾ 대림산업(주) 기술연구소 연구원

³⁾ 대림산업(주) 기술연구소 차장, 공학박사

⁴⁾ 대림산업(주) 기술연구소 부장, 공학박사

⁵⁾ 학생회원·성균관대학교 건축공학과, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 6. 2 / 수정일 1차 : 2008. 7. 23, 2차 : 8. 26, 3차 : 9. 2 / 게재확정일 : 2008. 9. 2)

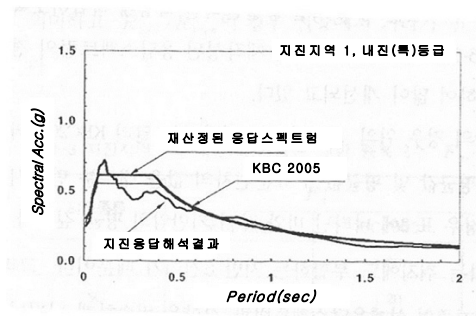
진파를 제공하는 등의 노력을 기울이고 있으나 국내에는 아직 설계스펙트럼에 맞는 설계지진파가 제공되지 않고 있어 엔지니어들이 스스로 인공지진을 작성하여야 하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 파악하여 인공지진을 작성하는 것에 어려움이 있는 일반 구조 엔지니어들이 쉽게 사용할 수 있는 개선된 지진기록의 조정방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 사용한 유한요소해석프로그램은 Midas Gen⁽⁶⁾이며 응답스펙트럼해석결과와 비교를 위하여 구조물의 비선형거동은 고려하지 않았다. 해석시 고려한 진동모드의 수는 각 방향에 대하여 질량참여율이 90%가 넘을 수 있도록 고려하였다.

2. 응답스펙트럼을 이용한 지진기록 조정방법

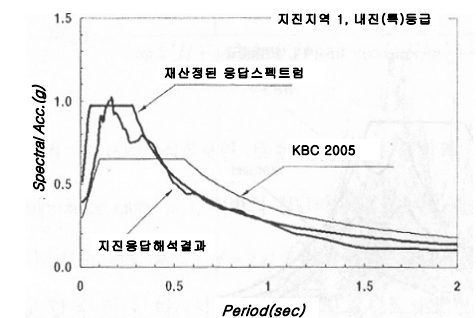
시간이력해석법은 지진해석법 중 가장 정확하며 비탄성 응답까지 구할 수 있지만 해석시간 및 응답분석이 어려우며 지진하중의 조정이 자유롭지 않은 단점이 있다. 반면 응답스펙트럼 해석법은 구조물의 모드 형상과 응답스펙트럼을 통하여 최대응답을 계산하는 방식으로 시간이력해석으로 구한 결과와 유사한 반면 해석시간 및 응답분석이 단순한 장점을 가지고 있다.⁽¹⁰⁾ 현재 UBC, IBC 및 우리나라의 「건축물 하중기준」 등에서 건축물 설계를 위한 지진해석의 경우에 대하여 응답스펙트럼 해석법을 사용하고 있다. 일반적으로 설계에 사용되는 지진응답스펙트럼은 단주기 대역에서 가로축에 평행한 직선과 장주기 대역으로 갈수록 스펙트럼 값이 감소하는 곡선을 이용하여 나타내며 그림 1과 같이 실제 지진기록들의 응답스펙트럼과 유사하다. 그러나 진동주기가 긴 구조물은 유연한 구조물이거나 초고층 구조물이기 때문에 큰 변위를 일으키며 P-δ효과의 영향을 받을 가능성이 있어 진동주기가 긴 경우에는 지진하중이 더 커질 수 있도록 정하는 경우가 많다. 그러나 시간이력해석의 경우는 지진하중의 특성에 따라 결과에 큰 차이가 발생하는 문제가 있다. 그리고 지진하중의 기준이 되는 수단이 설계기준에서 정하는 탄성응답스펙트럼이며 이에 따라 설계지진파도 선정되므로 앞서 언급한 문제를 개선하기 위한 지진기록의 조정방법이 필요하다. 그림 1은 162개의 국내 지반에 대한 지진응답해석 결과를 설계응답스펙트럼과 같이 나타낸 것이다.⁽⁹⁾ 그림에서 산정된 지진응답해석결과에 의한 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 장주기 대역에서 낮음을 확인할 수 있다.

이 장에서는 5층, 20층, 50층 모멘트 저항골조 예제 구조물에 대해 세 가지 지진기록 조정방법을 이용하여 각 예제 구조물의 응답을 확인하고 각각의 방법이 가질 수 있는 장

단점을 분석하였다. 각 지진기록 조정방법은 첫 번째 응답스펙트럼에서 가속도응답이 일정한 구간에서 나타나는 값의 평균치를 2.5로 나누어서 구하는 값인 유효최대가속도(EPA)를 이용한 방법이며, 두 번째는 일반건물에 대하여 적용되는 방법(건물 주기의 0.2배에서 1.5배 사이의 평균, 이하 Method A), 세 번째는 제진건물에 사용되는 방법(주기의 0.5배에서 1.25배 사이의 평균, 이하 Method B)이다. 각 예제구조물의 평면형상은 그림 2와 같으며 층고는 3.5m이고 재료는 철근콘크리트, 감쇠율은 5%를 적용하였다. 예제 구조물의 진동주기 및 지진기록 조정에 필요한 주기범위는 표 1에 제시하였다. 기준이 되는 설계응답스펙트럼은 KBC 2005의 설계응답스펙트럼을 사용하였으며, 지반조건은 S_B, 중요도계수 I_E는 1.5 및 반응수정계수 R=3이다. 이 예제에 사용한 지진은 USGS의 지반분류 조건 중 B 또는 C의 것을 이용하였으며 표 2와 같다.⁽⁵⁾ 각 조정방법에 대하여 최대 충전단력, 최대 층변위를 비교하였다.

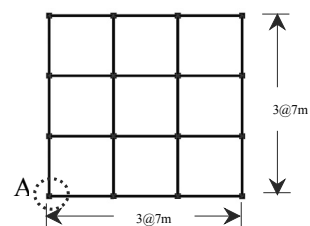


(a) 지반종류: S_B



(b) 지반종류: S_C

〈그림 1〉 지반종류에 따른 응답스펙트럼



〈그림 2〉 예제 구조물의 평면형상

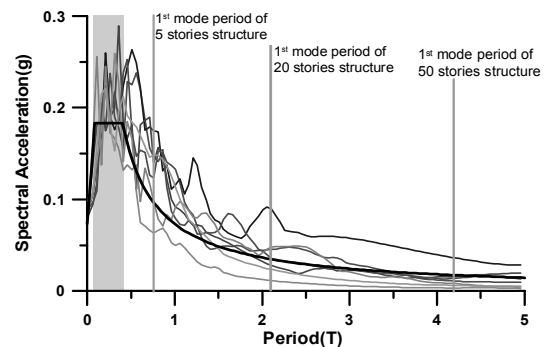
〈표 1〉 지진기록 조정에 사용된 예제구조물의 주기

예제 구조물	T ₁ (M.P.F)	T ₂ (M.P.F)	T ₃ (M.P.F)	T ₀ (초)	T _s (초)	0.2T ₁ (초)	0.5T ₁ (초)	1.25T ₁ (초)	1.5T ₁ (초)
5층	0.75초 (81.33%)	0.23초 (11.03%)	0.12초 (4.62%)	0.08	0.40	0.150	0.375	0.938	1.125
20층	2.12초 (77.38%)	0.68초 (10.39%)	0.57초 (3.84%)			0.424	1.060	2.650	3.180
50층	4.21초 (74.11%)	1.30초 (13.94%)	0.70초 (3.73%)			0.842	2.105	5.263	6.315

*) M.P.F: 질량참여율(Mass Participation Factor), T₀=0.2S_{D1}/S_{DS}, T_s=S_{D1}/S_{DS}

〈표 2〉 적용 지진기록

	Earthquake	지반분류 (USGS)
1	El Centro NS(1940)	C
2	El Centro EW(1940)	C
3	Taft N69E(1952)	B
4	Taft N21W(1952)	B
5	San Fernando N69E(1971)	B
6	San Fernando S21E(1971)	B
7	Northridge Santamonica N00E(1994)	B



〈그림 3〉 응답스펙트럼(EPA를 기준으로 조정)

2.1 유효최대가속도(EPA)를 이용한 조정방법

지진에너지가 가속도 응답스펙트럼에서 가속도응답이 일정한 구간에서 큰 것으로 보고 이 부분을 설계스펙트럼에 맞추어 조정하는 방법으로 기존에 많이 사용되어왔다. 그림 3은 0.08초에서 0.4초 사이의 평균값을 설계응답스펙트럼에 맞추어 조정한 지진기록들의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

EPA를 기준으로 조정할 경우에는 주기가 가장 짧은 5층 구조물의 경우에도 응답스펙트럼의 1차 모드 주기 값과 시간이력의 조정 값이 큰 차이를 보였다. 5층의 경우에는 지진 기록들이 다소 크게 평가되었고 50층의 경우에는 대부분 낮게 평가되었다. 이는 표 3과 그림 4를 통해서도 확인할 수 있으며 7개의 지진응답의 평균값이 비슷한 양상으로 변함을 알 수 있다. 그리고 초고층으로 갈수록 표준편차가 커져서 50층의 경우에는 일부 지진응답이 평균값의 두 배 내지는 1/2배정도로 크거나 낮게 평가되는 결과도 있었다. 따라서 단순히 EPA를 결정하는 구간에 맞추어 지진기록을 조정할 경우에는 응답스펙트럼 해석에 의한 결과와 비슷한 응답을 얻기가 어려울 것으로 보인다.

2.2 Method A에 의한 조정

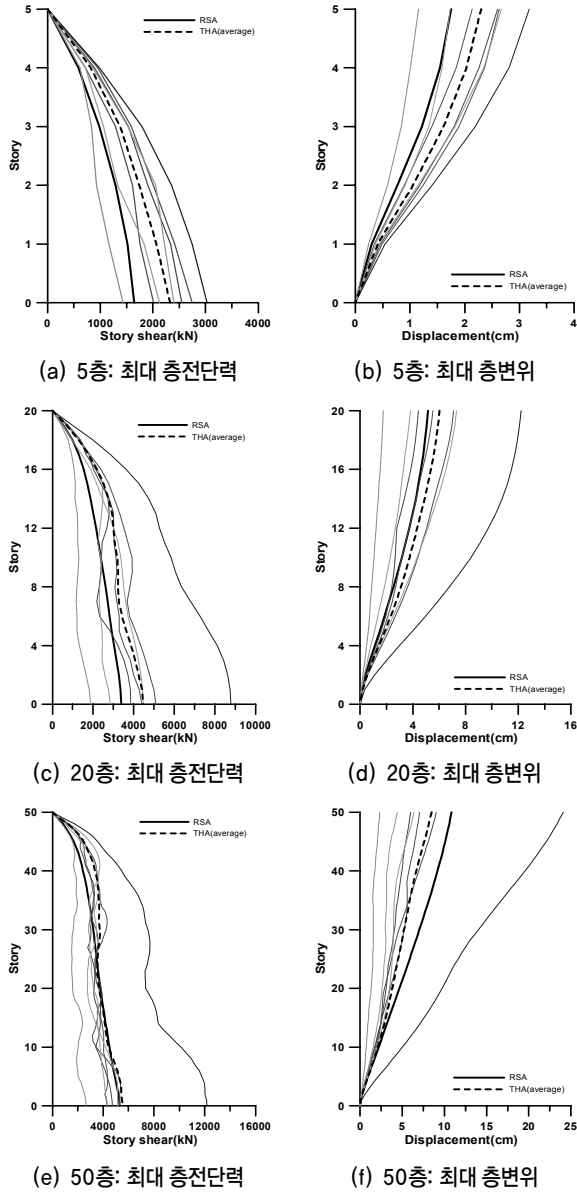
Method A에 의하여 위의 7가지 지진을 각 예제구조물에 맞추어 조정하면 그림 5와 같다. 세 예제에 대하여 각각 조

〈표 3〉 EPA를 기준으로 조정된 시간이력 응답비교

	5층 구조물		20층 구조물		50층 구조물	
	RSA	THA	RSA	THA	RSA	THA
밀면 전단력 (kN)	1643	2328 (σ=528)	3396	4481 (σ=2213)	5298	5522 (σ=3074)
	THA/RSA=1.42		THA/RSA=1.32		THA/RSA=1.04	
최대 변위 (cm)	1.76	2.30 (σ=0.68)	5.13	6.03 (σ=3.35)	10.86	8.46 (σ=7.20)
	THA/RSA=1.31		THA/RSA=1.17		THA/RSA=0.78	

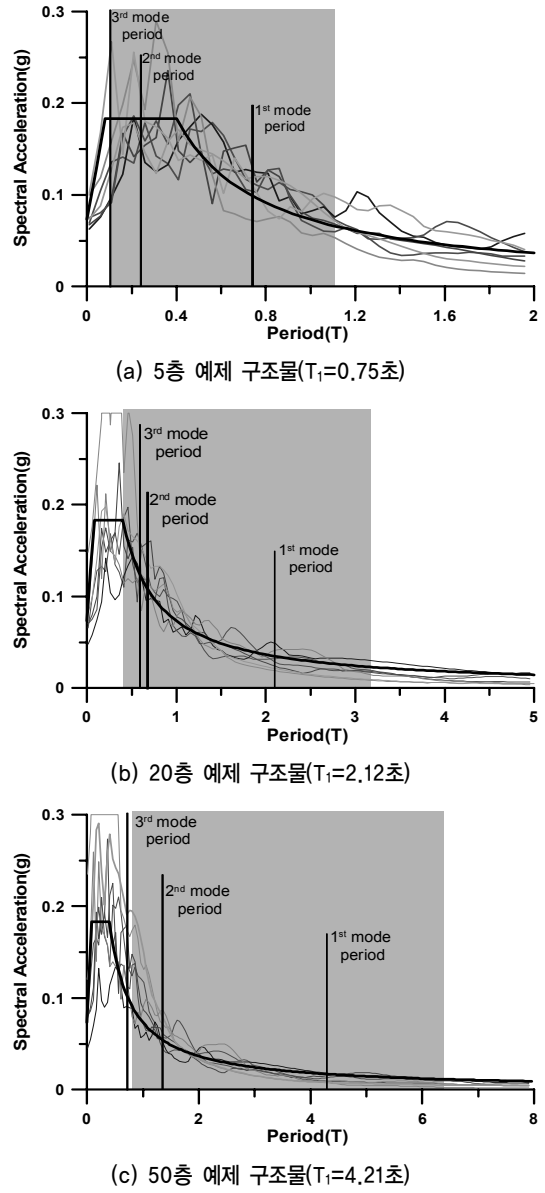
정된 지진기록들의 스펙트럼이 설계스펙트럼에 맞추어 조정되어 있음을 그림 5에서 확인할 수 있다. 다만 50층 예제를 위하여 조정된 경우에는 1차 모드의 주기에 해당되는 스펙트럼 값이 전반적으로 해당 주기의 설계스펙트럼 값에 비하여 낮고, 2, 3차 모드에 해당되는 짧은 주기 대역에서는 값이 크게 나타났다.

기준에 따라 조정된 지진기록을 적용하여 세 가지 예제구조물의 최대전단력 및 변위응답을 구한 것이 그림 6이다. 구조물의 1차모드 주기를 기준으로 일정한 범위의 평균을 맞춘 것을 기준으로 시간이력해석을 수행하기 때문에 EPA를 기준으로 응답을 구한 것에 비하여 정확하고 균일한 응답을 주는 것을 알 수 있다. 5층 예제의 경우에는 응답스펙트럼 값의 편차가 커서 해당주기에 따라 다소 민감한 영향을 받으나 평균을 구한 결과는 시간이력 해석의 경우가 밀면전단력 및 최대변위응답을 약간 크게 평가하고 있으며 층별 응



〈그림 4〉 시간이력응답비교(EPA를 기준으로 조정)

답 또한 잘 맞는 것을 알 수 있다. 20층 예제의 경우에도 층별 응답은 비슷하게 평가하고 있으나 1차 모드 주기가 2.12초로 평균값의 계산에 필요한 구간이 늘어남에 따라 시간이력의 1차 모드 평균스펙트럼이 설계응답스펙트럼에 비하여 다소 적게 평가되고, 2, 3차 모드에 해당되는 구간은 약간 큰 경향을 보였다. 이에 따라 밀면전단력은 큰 차이를 보이지 않지만 1차 모드가 지배하는 정도로 큰 변위응답의 경우에는 응답스펙트럼 해석결과와 90%정도로 평가되어 시간이력 해석법을 이용하여 구조물을 설계하고자 한다면 부재력을 다소 적게 평가할 수 있음을 고려하여야 한다. 50층 예제의 경우에는 이러한 양상이 크게 나타나는데 전단력 분포는 고차모드의 영향이 고려되어 응답스펙트럼 해석결과와 비슷하거나 고층부 부분에서는 오히려 크게 평가되는 반면에 변위응답은 66%정도밖에 평가되지 않았다. 그래서 초고층

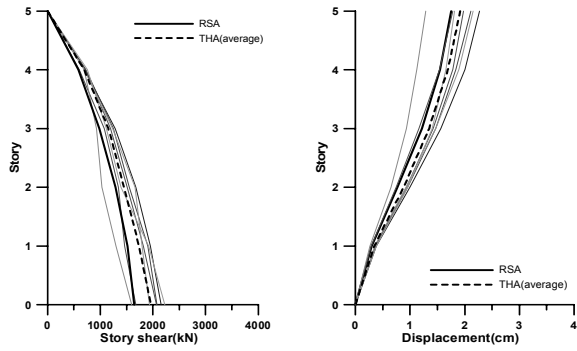


〈그림 5〉 응답스펙트럼(Method A에 맞추어 조정)

구조물과 같이 주기가 긴 구조물의 경우에는 현재 기준의 지진기록 조정방법이 문제를 가질 수 있음을 알 수 있다.

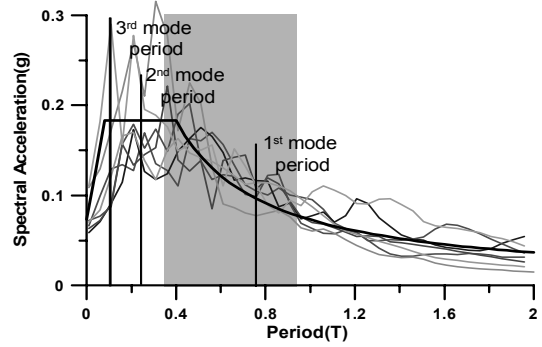
2.3 Method B에 의한 조정

면진구조물이나 감쇠기를 부착한 구조물의 주기 산정에 사용되는 이 방법은 $0.5T_1 \sim 1.25T_1$ 구간사이의 스펙트럼 평균값에 따라서 위의 7가지 지진을 각 예제구조물의 주기에 맞추어 조정하였으며 그림 7과 같다. 이와 같은 구간을 정한 것은 면진구조물이나 감쇠기를 부착한 구조물의 1차 주기의 질량참여율이 일반구조물에 비하여 크기 때문인 것으로 생각된다. 조정된 지진기록의 응답스펙트럼 분포를 살펴보면 50층 예제를 위하여 조정한 지진기록 중 일부가 단주기 대역에서 다른 지진기록들과 크게 다르게 조정되는 것을 알 수 있으며 이러한 경우에 2차(주기 1.3초), 3차 모드(주기

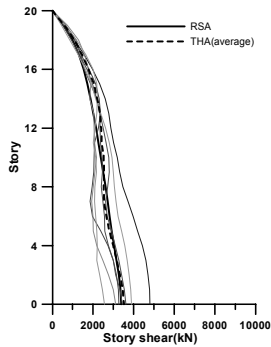


(a) 5층: 최대 층전단력

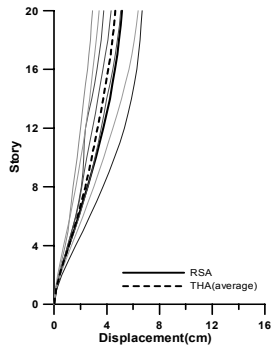
(b) 5층: 최대 층변위



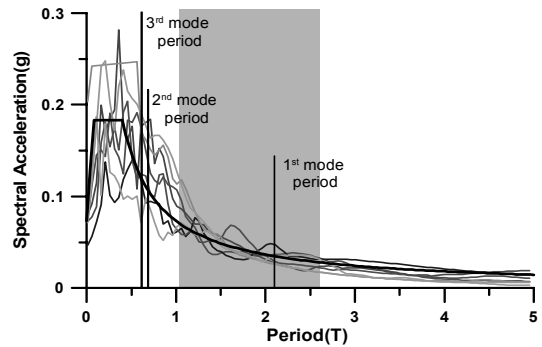
(a) 5층 예제 구조물($T_1=0.75$ 초)



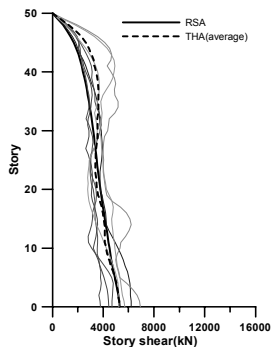
(c) 20층: 최대 층전단력



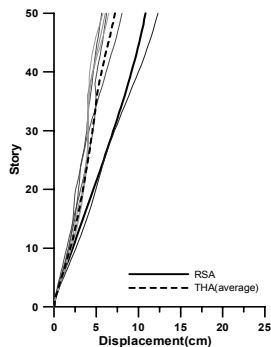
(d) 20층: 최대 층변위



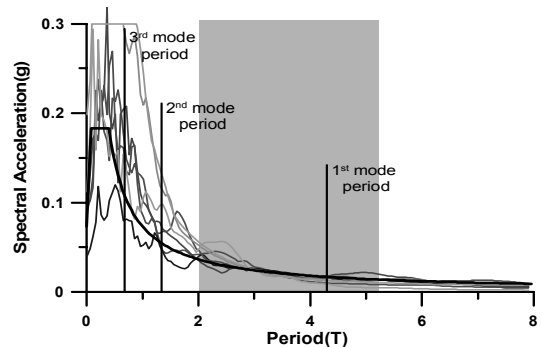
(b) 20층 예제 구조물($T_1=2.12$ 초)



(e) 50층: 최대 층전단력



(f) 50층: 최대 층변위



(c) 50층 예제 구조물($T_1=4.21$ 초)

〈그림 6〉 시간이력응답비교(Method A)

〈그림 7〉 응답스펙트럼(Method B에 맞추어 조정)

0.7초)의 응답이 반영될 가능성이 있음을 알 수 있다.

면진 및 제진 구조물에 적용하기 위한 지진기록 조정방법은 1차 모드에 대한 영향을 크게 봄으로써 그림 8의 최대 층전단력과 최대 층변위와 같은 구조물 전체의 응답을 2.2절의 경우보다 다소 근사한 결과를 나타낼 수 있음을 보인다. 그러나 이 경우도 50층 예제의 경우에 일부 지진기록의 고차진동모드가 크게 과대평가되는 문제를 안고 있는 것으로 나타났다.

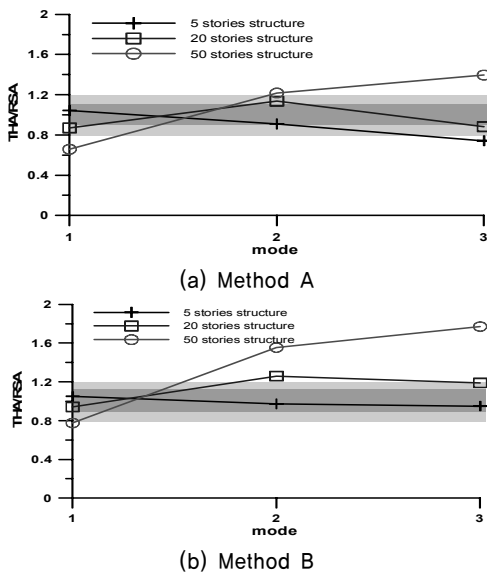
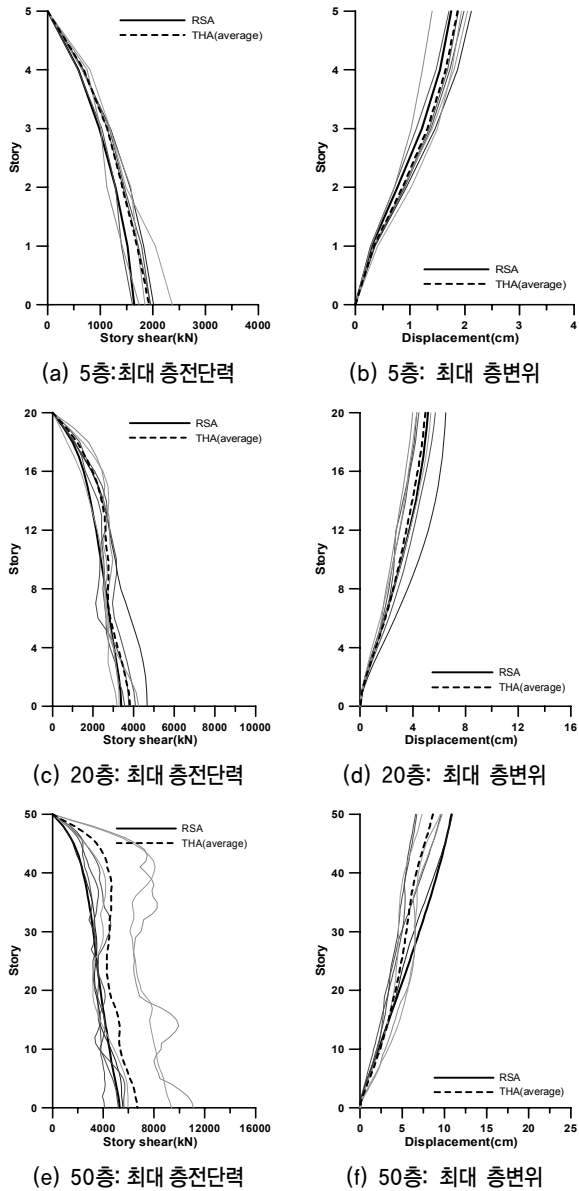
3. 개선된 지진기록 조정방법

3.1 모드별 응답스펙트럼 분석

이 장에서는 앞 장에서 살펴본 바와 같이 현재 코드에서 사용하고 있는 지진기록 조정방법들이 구조물의 주기가 길

어질수록 부재력을 평가하는데 오차를 가지는 것으로 나타났다. 이것은 앞서 제시한 조정 응답스펙트럼을 통하여 확인할 수 있었다. 그림 9에는 설계기준에 제시되어 있는 방법 Method A와 Method B에 의하여 조정된 응답스펙트럼 값과 설계스펙트럼 값의 비를 모드별로 나타낸 것이다. Method A에 의한 경우는 1차 모드 주기의 0.2배에서부터 평균을 산정하여 5층, 20층 예제의 경우는 근사한 응답을 나타내고 있다. 그러나 50층 예제의 경우는 산정범위가 0.84초에서부터 6.32초까지로 커지므로 1차 모드 응답은 낮게 평가되고 2, 3차 응답은 점점 크게 평가되는 현상이 나타났다. 특히 1차 모드 응답이 설계스펙트럼 값의 60~70%사이로 낮아 전체응답이 작게되는 원인이 되고 있다.

Method B의 경우는 면진 또는 제진구조물을 해석하는 경우에 사용되는 방법으로 1차 모드 응답이 중요하게 평가



〈그림 9〉 모드별 설계스펙트럼 값에 대한 조정응답스펙트럼 값의 비율

되어 평균산정범위가 좁다. 이에 따라 1차 모드 응답의 차이는 Method A에 비하여 줄어든 것으로 나타났으며 특히 5층 예제의 경우는 평균산정범위가 좁아 3차 모드에 해당되는 응답비까지 큰 차이가 없었다. 그러나 층수가 많아질수록 Method A와 동일한 현상이 나타나며 1차 모드의 응답 차이 보다는 2, 3차 모드의 응답 차이가 훨씬 커지는 문제를 발생시켰다. 이에 따라 주기가 긴 초고층 건축물의 지진에 대한 시간이력해석에 설계기준에 제시된 두 가지 방법 모두 적용하는데 문제가 있는 것으로 나타났으며 지진기록에 대하여 충분히 검토를 수행하지 않고 설계기준에 제시된 방법으로 조정할 경우에는 응답을 과소 또는 과대평가할 가능성이 있는 것으로 생각된다.

3.2 개선된 지진기록 조정방법

실제 가속도의 응답스펙트럼은 뒤의 꼬리부분이 동일한 기울기로 감소하는 것이 아니라 기준이 되는 주기값에 따라서 T^{-1} , T^{-2} , $T^{-2.585}$ 로 점점 가파르게 감소한다.⁽¹⁰⁾ 설계에서는 편의상 동일한 기울기(T^{-1})로 감소시키고 있다. 그래서 RSA와 THA의 차이가 발생하며 구조물의 주기에 따라서 변화하는 설계스펙트럼을 사용하는 것이 더 합당하다고 생각된다. 그러나 이것은 설계기준의 변경 등 여러 가지 어려움이 있고 현재 사용하는 방법은 초고층 구조물에 적합하지 못하다.

이에 따라 본 논문에서 고려하는 방법은 첫 번째로 코드에서 제공하는 방법을 그대로 이용하면서 1차 모드 스펙트럼 값과 설계스펙트럼 값을 비교하여 10%(Method A-1) 또는 20%(Method A-2) 이내의 오차를 가지는 지진기록을 사용하는 것이다. 이것은 앞 장에 나타난 현상과 같이 1차 모드 응답이 적고 2, 3차 모드응답이 커지는 정도를 오차범위 내로 줄이면 이에 따른 응답도 조정될 수 있을 것으로 생각되기 때문이다. 두 번째로는 현재 국내기준 등에서 제안하는 평균을 구하는 주기 범위인 $0.2T_1 \sim 1.5T_1$ 를 $0.2T_1 \sim 1.25T_1$ (Method A-3)으로 조정하는 것이다. $0.2T_1$ 의 경우에는 구조물의 3차 모드 주기가 해당하므로 그대로 고려하여야 하지만 $1.5T_1$ 의 경우에는 일반적으로 비구조체의 영향으로 구조물의 실제 주기가 해석상의 주기보다는 짧기 때문에 50%정도까지 고려할 필요는 없을 것으로 판단되며 면제된 구조물의 조정에는 1.25배의 범위까지만 평균산정을 하는 것도 하나의 근거이다.

개선된 조정방법이 타당한지를 알아보기 위하여 표 4에 나타난 지진기록들을 사용하였으며 이는 MIDAS Gen에서 제공하는 것들이다. 23~40번 지진들은 일본에서 관측된 지

〈표 4〉 지진기록 예

1	1994, Northridge, Arleta and Nordhoff Fire Station, 90	15	1971, San Fernando 8244 Orion Blvd., 180 Deg	29	T1-III-1(1983, NIHONKAI-Central, TR)
2	1979, Bonds Corner EI Centro, 220 Deg	16	1966, Parkfield Cholame, Shandon, 40 Deg	30	T1-III-1(1983, NIHONKAI-Central, LG)
3	1979, Bonds Corner EI Centro, 310 Deg	17	1966, Parkfield Cholame, Shandon, 130 Deg	31	T1-III-1(1995, HOKKAIDO-East Coast, LG)
4	1940, EI Centro Site, 270 Deg	18	1971, San Fernando Pocomo Dam, 196 Deg	32	T2-I-1(1995, HYOUGOKEN_South, NS)
5	1940, EI Centro Site, 180 Deg	19	1971, San Fernando Pocomo Dam, 286 Deg	33	T2-I-2(1995, HYOUGOKEN_South, EW)
6	1952, Hollywood Storage P.E., 270 Deg	20	1971, San Fernando, 69 Deg	34	T2-I-3(1995, HYOUGOKEN_South, NS)
7	1952, Hollywood Storage P.E., 0 Deg	21	1971, San Fernando, 159 Deg	35	T2-II-1(1995, HYOUGOKEN_South, NS)
8	1979, James RD. EI Centro, 220 Deg	22	1994, Northridge, Sylmar County Hosp., 90 Deg	36	T2-II-2(1995, HYOUGOKEN_South, EW)
9	1979, James RD. EI Centro, 310 Deg	23	T1-I-1(1978, MIYAGI-Coast, LG)	37	T2-II-3(1995, HYOUGOKEN_South, N30W)
10	1989, Loma Prieta, Oakland Outer Wharf, 270 Deg	24	T1-I-2(1978, MIYAGI-Coast, TR)	38	T2-III-1(1995, HYOUGOKEN_South, N12W)
11	1989, Loma Prieta, Oakland Outer Wharf, 0 Deg	25	T1-I-3(1993, HOKKAIDO-S/W_Coast, LG)	39	T2-III-2(1995, HYOUGOKEN_South, NS)
12	1994, Northridge, Santa Monica, City Hall Grounds, 0	26	T1-II-1(1968, HYUGANADA-Coast, LG)	40	T2-III-3(1995, HYOUGOKEN_South, EW)
13	1994, Northridge, Santa Monica, City Hall Grounds, 90	27	T1-II-2(1968, HYUGANADA-Coast, TR)	41	1952, Taft Lincoln School, 69 Deg
14	1971, San Fernando 8244 Orion Blvd., 90 Deg	28	T1-II-3(1994, HOKKAIDO-EastCoast, TR)	42	1952, Taft Lincoln School, 339 Deg

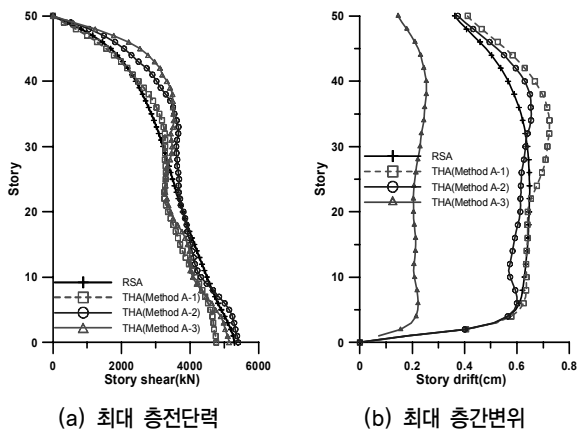
진을 설계스펙트럼에 맞추어 조정된 것이다. 앞 장에서 사용한 예제를 기준으로 하여 조정할 경우에 1차 모드 스펙트럼 값이 10%이내에 드는 지진은 5, 6, 23~26, 28번 지진으로 임의로 조정된 23~40번까지의 지진을 제외하면 사용가능한 지진기록은 단 2개 밖에 없었다. 20%이내에 드는 지진은 위의 지진 이외에도 7, 14, 16, 17, 29~31, 41, 42 등 사용가능한 것들이 많은 것으로 조사되었다.

조정된 스펙트럼 값의 오차가 0~10%이내인 경우(5, 6, 23~26, 28번 지진)와 10~20%이내인 경우(7, 14, 16, 17, 29, 41, 42)의 지진기록들의 평균응답을 비교하면 그림 10과 같다. 이 예제 구조물에 대하여 Method A-1의 조정방법을 선택한 경우에 밀면전단력 및 층간변위응답 모두 10%정도 낮게 평가되었다. 그러나 앞선 코드의 예와는 달리 층전단력 및 층간변위 응답 모두 일정한 패턴을 보임을 알 수 있다. 이것은 Method A-2에서도 비슷하게 나타남을 확인할 수 있다. 밀면전단력은 응답스펙트럼 해석결과에 비하여 약간 크게 나타나지만 변위응답은 Method A-1과 비슷하게 나왔다. 이것은 1차 모드 스펙트럼 값을 일정하게 맞추었기

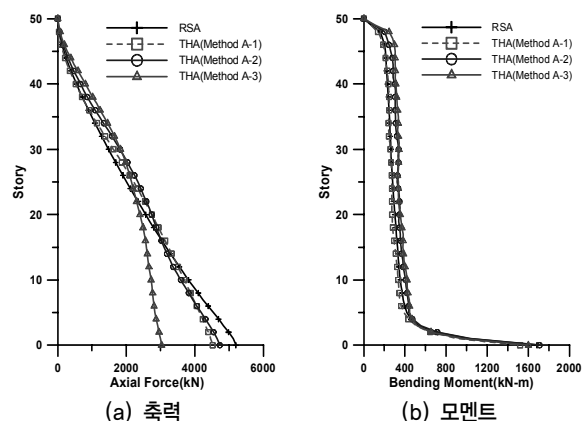
때문으로 판단된다. 코드의 평균값 계산을 위한 주기범위의 상한선을 $1.25T_1$ 로 조정된 경우(Method A-3)에 사용한 지진기록들은 2장에서 사용한 것과 동일하다. 이 경우의 응답은 기존 방법과 차이가 없었으며 이는 단순히 평균값을 계산하는 범위만 조정해서는 적절한 응답을 얻기 어려움을 의미한다. 그림 11에 나타난 기둥 A의 부재력을 비교한 결과도 그림 10의 결과와 유사함을 알 수 있으며 Method A-3을 제외한 Method A-1과 Method A-2는 응답스펙트럼 해석법에 의한 결과와 매우 근접한 응답을 나타내었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 볼 때 두 방법을 모두 적용하여도 결과의 차이는 크지 않을 것으로 생각되며 지진기록들의 선정 폭이 큰 Method A-2를 적용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

4. 예제 해석

제안방법의 적절성을 확인하기 위하여 2007년 준공된 그림 12의 건축물에 대하여 응답스펙트럼해석 및 시간이력해

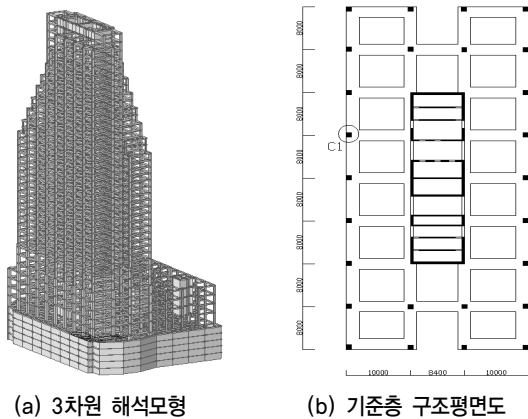


〈그림 10〉 개선된 조정방법에 의한 예제구조물의 응답비교



〈그림 11〉 기둥 A의 부재력 비교

석을 수행하였다. 해당 구조물은 건축물 하중기준(2000)에 의하여 설계되었으며 내진설계를 위하여 지반조건은 S1(1.0), 지역계수 0.11, 중요도 계수 $I_E = 1.2$ 및 반응수정계수는 4.0을 적용하였다. 시간이력해석을 위한 지진기록의 조정은 세 가지 방법으로 하였다. 한 가지는 2.2절의 조정방법(Method A)이며 다른 한 가지(Method B)는 2.3절의 조정방법이며 표 2의 지진기록들을 사용하였다. 마지막 조정방법(Method A-2)은 제안방법으로 3.2절에 제시된 지진기록 조정 후 1차 모드 응답이 20%이내의 차이를 가지는 지진기록을 선택하는 것으로 하였다. 예제 구조물의 두 방향에 대한 주요모드 주기 및 질량 참여율은 표 5에 나타내었으며 X방향의 주기가 6.77초로 Y방향의 5.23초에 비하여 길다. 이에 따라 지진기록 조정 필요 주기대역도 X방향은 8초 이상이 필요하였으며 Y방향은 6.8초정도가 필요하였다.



〈그림 12〉 예제구조물

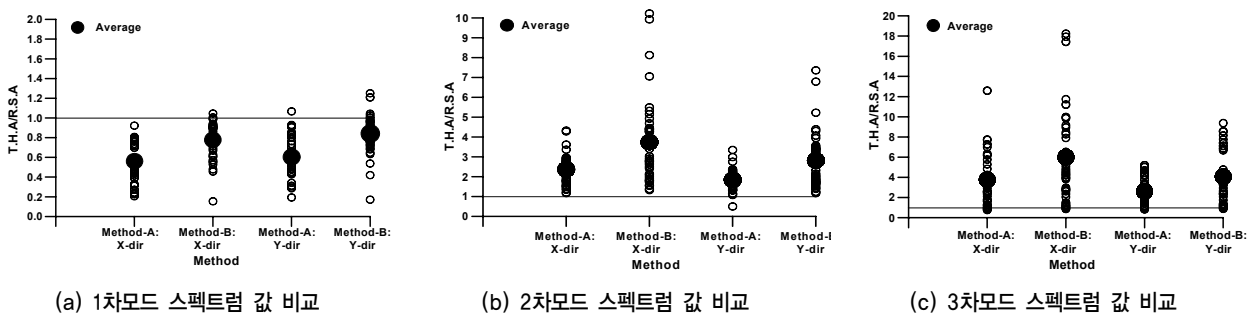
〈표 5〉 예제구조물의 주요모드 주기 및 질량참여율

Dir.	T ₁ (M.P.F)	T ₂ (M.P.F)	T ₃ (M.P.F)	0.2T ₁ (초)	0.5T ₁ (초)	1.25T ₁ (초)	1.5T ₁ (초)
X	6.77초 (64.2%)	1.50초 (18.6%)	0.61초 (8.5%)	1.35	3.39	8.38	10.05
Y	5.23초 (71.5%)	1.47초 (14.3%)	0.78초 (4.5%)	1.05	2.62	6.54	7.85

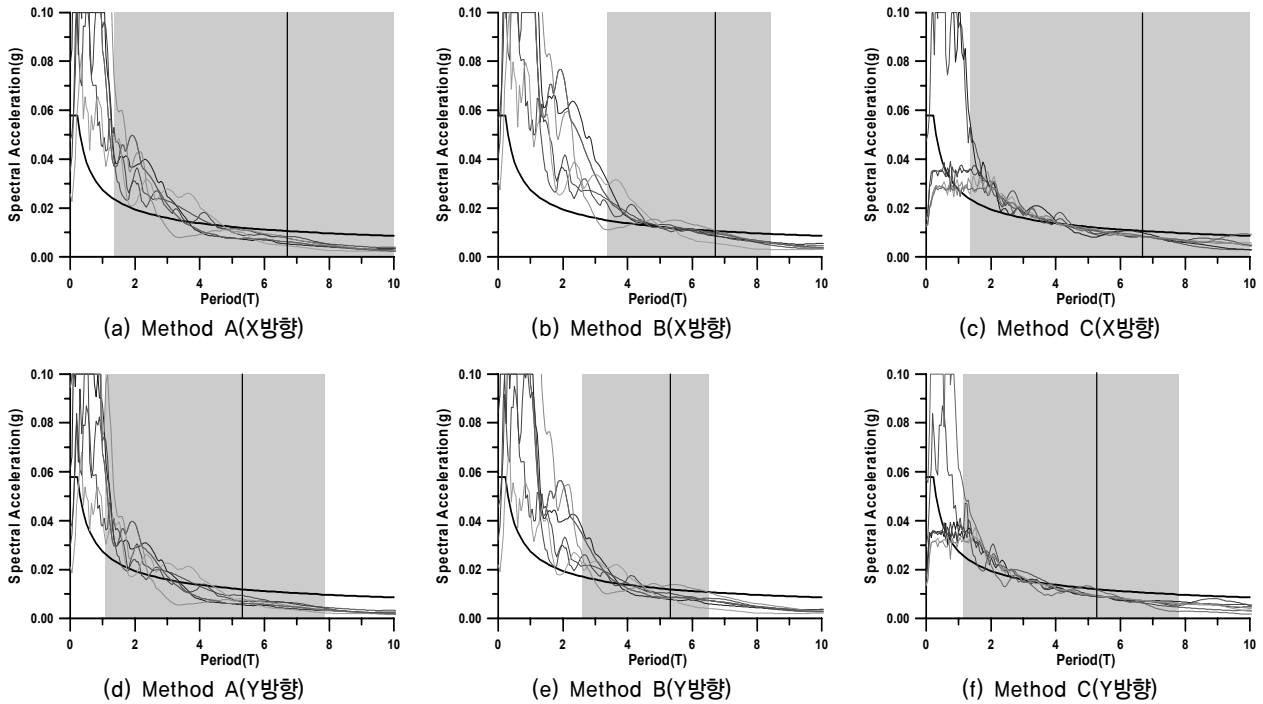
본 연구의 검토대상 지진기록 42개에 대하여 예제구조물의 주기에 맞추어 조정 후 3차 모드까지의 스펙트럼 값을 비교한 것이 그림 13이다. 평균값을 산정하는 범위에 따른 두 가지 산정방법 모두에서 정도의 차이는 있지만 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 즉 1차 모드 값은 설계스펙트럼에 비하여 낮고 2, 3차 모드의 응답은 설계스펙트럼 값보다 크게 나타나는 것이다. 산정범위가 긴 Method-A의 경우가 1차 모드의 스펙트럼 값이 설계스펙트럼 값보다 더 낮은 경향을 보였다. 2, 3차 모드의 경우는 평균산정범위가 짧은 Method-B가 1차 모드 응답을 맞추는 데 집중되어 2, 3차 모드의 응답이 상당히 과대평가되는 경향을 보인다. X 방향의 경우에 2차 모드 값은 최대 10배, 3차모드 값은 20배 큰 값도 나타났다. Method-A는 평균산정주기가 길어 1차 모드 응답은 낮은 반면 2, 3차 응답은 설계스펙트럼 값보다는 크지만 Method-B에 비하여 낮게 나타났다.

그림 14 (a), (b)는 표 2의 지진기록을 이용하여 산정된 것이며 그림 14 (c)는 표 4의 지진기록 중 X 방향에 대해서는 6, 16, 27~31번 지진의 스펙트럼을 그린 것이며 Y 방향에 대해서는 5, 23~26, 28, 41을 선택하여 그린 것이다. 이 그림은 앞서 검토하였던 그림 9의 경우보다 큰 편차를 보이는데 이것은 이 예제에서 사용된 설계기준이 KBC 2000으로 설계스펙트럼이 주기의 1/2승에 반비례한 반면 앞서 검토하였던 설계스펙트럼은 KBC 2005의 것으로 주기에 반비례함에 따라 나타나는 현상으로 판단된다.

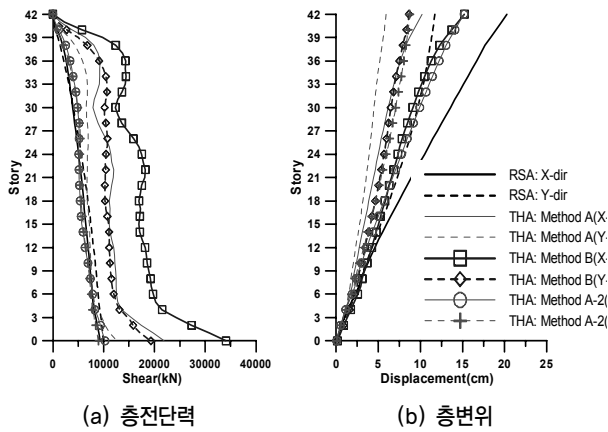
층전단력과 층변위 응답을 그림 15에 나타내었으며 층전단력을 살펴보면 Method A와 B의 응답이 응답스펙트럼 해석법의 응답에 비하여 훨씬 크게 평가되었으며 이것은 2, 3차 모드의 영향이 크게 조정되어 발생한 문제로 보인다. 반면 층변위의 경우에는 응답스펙트럼 해석법의 결과에 비하여 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 이것은 1차 모드의 응답이 낮게 평가되어 생긴 현상으로 먼진 구조물 등의 해석에 사용되는 Method B의 경우에도 근접한 결과를 보이지만 여전히 낮게 평가되었다. 제안 방법인 Method A-2는 층전



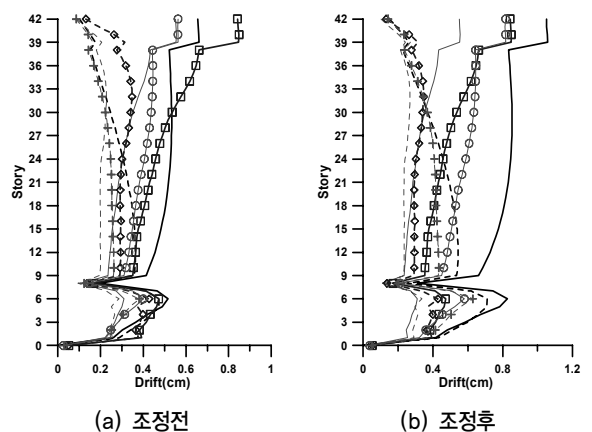
〈그림 13〉 조정 지진기록의 스펙트럼과 설계스펙트럼 값의 모드별 오차 비교



〈그림 14〉 두 방향에 대하여 각각 조정된 지진기록



〈그림 15〉 조정방법에 따른 응답비교



〈그림 16〉 밀면전단력 조정계수 적용 전후의 층간변위

단력의 경우는 거의 비슷한 결과를 나타내었으나 층변위의 경우에는 다소 낮게 평가되는 것으로 나타났다.

앞서 살펴본 층전단력과 층변위를 통하여 현재의 시간이력해석법을 위한 지진기록 조정방법이 부적절함을 이야기하는 것은 적절하지 않을 수 있다. 그래서 실제 설계에 적용할 경우에 변화를 살펴볼 필요가 있다. 내진 설계시에는 등가정적해석법에 의한 밀면전단력과 동적해석에 의한 밀면전단력을 나누어 조정계수를 얻는다. 이것을 동적해석법에 의한 응답에 곱하여 실제 설계에 적용하고 있다. 다음 표 6은 각 방법별 조정계수를 나타낸 것이다. 조정계수를 살펴보면 응답스펙트럼 해석법과 제안방법인 Method A-2는 1.5내외의 조정계수를 가지는 반면 기준에 의한 조정방법인 Method A, B는 밀면전단력이 등가정적해석에 의한 결과보다 커서 조정을 할 필요가 없는 경우도 나타났다.

〈표 6〉 조정방법에 따른 지진기록 모델별 예제구조물의 밀면전단력 조정계수

지진기록 조정방법		조정계수
RSA	X-dir	1.60
	Y-dir	1.50
Method A	X-dir	1.00
	Y-dir	1.18
Method B	X-dir	1.00
	Y-dir	1.00
Method A-2	X-dir	1.45
	Y-dir	1.65

표 6에 나타난 밀면전단력 조정계수를 반영하여 층간변위 응답을 구하여 보았으며 이를 그림 16에 나타내었다. 밀면전단력 조정계수 적용전의 층간변위응답은 대부분 응답스펙트럼 해석법에 의한 결과가 Method B의 조정방법을

적용할 경우에 30층 이상의 부분에서 층간변위가 더 크게 나타나는 경향을 제외하고는 시간이력해석법에 의한 결과들보다 크게 나타났다. 응답의 차이는 Method A의 경우 하부층에서 40%이상의 차이를 보이는 것으로 나타났으며 Method B는 하부(10~30층)에서는 작으나 상부(30층 이상)에서는 크게 나타났으며 두 방법에 의한 층간변위 형상은 응답스펙트럼에 의한 형상과 다소 다른 것으로 나타났다. 반면 Method A-2는 응답의 차이는 20%정도 낮으나 층간변위 형상은 비교적 유사한 것으로 평가되었다. 밀면전단력 조정계수를 적용한 후를 나타낸 그림 16 (b)는 지진기록 조정방법별 응답의 차이를 더 크게 나타낸다. 즉 Method A와 B는 2, 3차 모드의 밀면전단력의 응답이 과도하게 평가되어 층간변위를 거의 증폭시키지 못한 반면 응답스펙트럼 해석법과 제안방법인 Method A-2는 약 1.5배 정도 변위를 증폭 시킴으로서 응답의 차이를 줄였다. 응답의 차이는 Method A가 가장 큰 것으로 나타났으며 50% 이상 작은 것으로 나타났다.

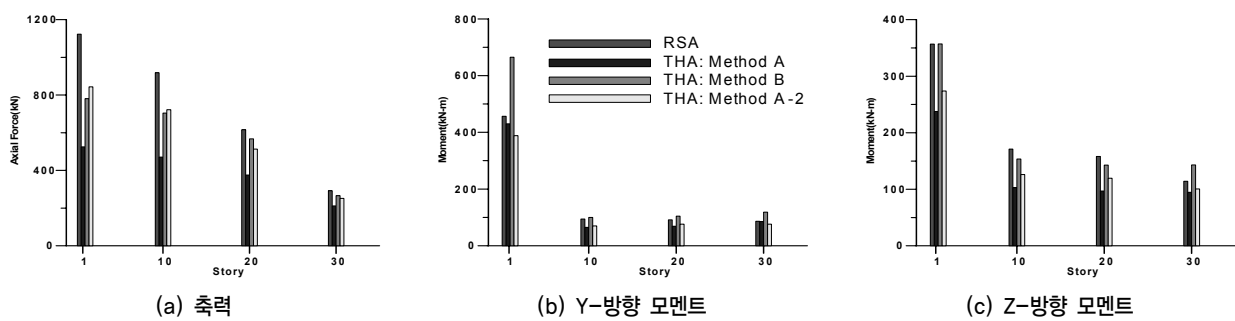
이러한 현상은 부재력의 측면에서도 그대로 나타나는데 그림 17과 그림 18을 보면 해당 기둥부재의 축력과 두 방향 모멘트응답이 조정 전에는 Method A를 제외하고는 크게 차이가 나지 않았으나 밀면전단력계수 조정 후에는 차이가 더 커져 Method A는 1층 기둥에서 축력이 1,000 kN이상 차이를 보였고 Method B의 기둥 축력도 두 배 이상 작게 나타나는 등 부재력을 낮게 평가함을 알 수 있다. Method B에 의하여 조정된 경우에 Y-방향 모멘트응답만이 응답스

펙트럼 해석결과에 근사하게 접근하였으며 이것은 조정전의 결과가 응답스펙트럼 해석결과에 비하여 크기 때문이다. 이에 따라 시간이력해석법에 의한 구조물의 설계를 수행하기 위해서는 기존의 지진기록 조정방법을 보완하여야 할 필요가 있는 것으로 판단되며 제안 방법과 같이 1차 모드 설계응답스펙트럼 값과 조정하고자 하는 지진기록의 1차모드 응답스펙트럼 값을 20% 이내로 조정하면 구조물의 해석편차를 줄일 수 있음을 확인하였다.

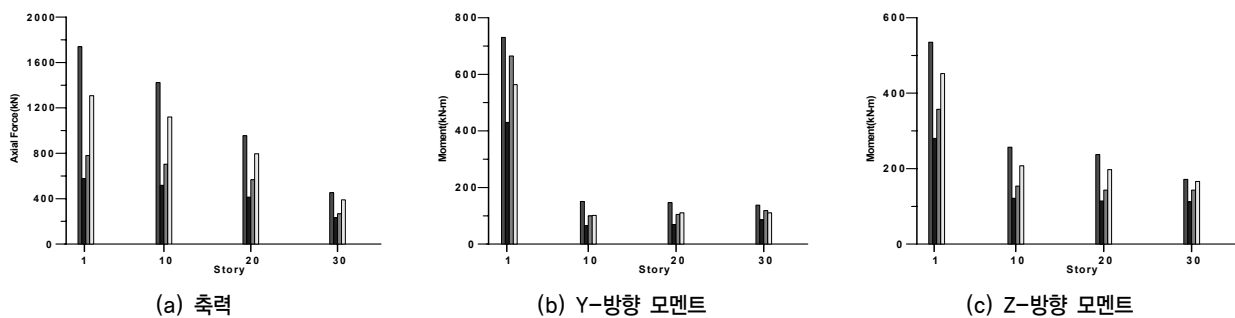
5. 결론

시간이력 해석법에서 사용되는 설계 지진파는 지반조건에 맞는 지진기록으로서 설계대상 건물 주기의 0.2배에서 1.5배 사이의 평균값과 설계응답스펙트럼의 평균값이 맞도록 조정되고 있다. 초고층 건물의 경우에는 주기가 길고 이에 따라 평균값 산정대역이 넓어 응답스펙트럼 해석의 결과와 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 본 연구를 통하여 초고층 건축물과 같이 주기가 긴 구조물의 시간이력해석을 위해서는 기존의 조정방법을 개선할 필요가 있는 것으로 파악되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설계스펙트럼의 경우에 스펙트럼 값은 변위지배구간의 주기에 반비례하는 반면 시간이력해석을 위한 설계 지진파 조정법의 경우에는 장주기 대역의 스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 더 낮은 경우가 많으며 이는 시



(그림 17) 밀면전단력 조정계수 적용 전 기둥 C1의 부재력



(그림 18) 밀면전단력 조정계수 적용 후 기둥 C1의 부재력

간이력응답이 전단력과 같이 하중성분은 크게 평가하는 반면 변위 등 응답성분은 낮게 평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

2. 기존 기준에 의하여 설계지진파를 조정할 경우에 밀면전단력은 큰 반면 응답이 작아 밀면전단력 조정계수를 적용하여 설계에 반영할 경우에는 구조물의 응답이 응답스펙트럼 해석결과에 비하여 과도하게 작게 평가될 수 있음을 확인하였다.
3. 대상 지역특성에 맞는 지진기록을 제공받을 수 없거나 적절한 인공지진을 사용할 수 없는 경우에는 기존의 조정방법을 통하여 조정한 후 설계용 스펙트럼 값과 1차 모드 스펙트럼 값을 비교하여 20%이내의 오차를 가지는 지진만 선택하여 사용하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

마지막으로 엔지니어들의 편의를 위하여 설계스펙트럼에 부합하는 지진기록 제공이 필요하며 제공이 쉽지 않다면 적절한 인공지진작성방법에 대한 충분한 교육이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. International Code Council, *International Building Code*, ICC, 2006.
2. International Code Council, *International Building Code*, ICC, 2000.
3. ASCE, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE, 2006.
4. 대한건축학회, 건축구조설계기준 및 해설 2006, 대한건축학회 2006.
5. Pacific Earthquake Engineering Research Center, *PEER Strong Motion Database*, PEER, 2000.
6. Midas IT Co., *Integrated Design System for Building and General Structures*, Midas IT Co., 2007
7. L.A. Tall Buildings Structural Design Council, *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the L.A. Region*, L.A. Tall Buildings Structural Design Council, 2005
8. 대한건축학회, 초고층 건축물 건설기술 지침(안), 대한건축학회 2007.
9. 대한건축학회, 건축물의 풍하중 및 지진하중, 대한건축학회 2007.
10. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prantice Hall, 2000.