

# 기초지반강성을 고려한 철골 건축구조물의 비선형 지진해석 Nonlinear Seismic Analysis of Steel Structure Buildings Considering the Stiffnesses of the Foundation-Soil System

오영희\*

Oh, Young-Hee

김용석\*\*

Kim, Yong-Seok

## ABSTRACT

Seismic responses of a building are affected due to the site soil conditions. In this study, linear time history seismic analysis and nonlinear pushover static seismic analysis were performed to estimate the base shear forces of the 3, 5 and 7-story steel structure buildings considering the rigid and soft soil conditions. According to the study results, the steel structure buildings designed for the gravity loads and wind load showed the elastic responses with the moderate earthquake of 0.11g, and the soft soil layer increased the displacement and the base shear force of a building. Therefore it is more reasonable to perform an elastic seismic analysis of a building structure with the moderate earthquakes considering the characteristics of the soft soil layer.

## 1. 서론

최근 동향을 살펴보면 성능에 기초한 내진설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 지진 발생시 구조물에 큰 변형을 일으키는 원인으로 작용하여 구조물은 비탄성 거동을 하게 된다는 사실을 Loma Prieta(1989), Northridge(1994), Gobe(1995) 지진사례를 통해서 알 수 있었다.

성능에 기초한 내진설계에서 건축구조물의 비선형 지진응답을 산정하고 내진성능을 평가하는데서 많이 적용하고 있는 해석방법이 비선형 정적해석법이다. 비선형 정적해석법으로 Pushover 해석을 이용한 방법이 있는데 Pushover 해석은 구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려하여 시스템의 안정한계상태를 파악할 수 있는 간단하면서도 실용적인 해석방법이다. Pushover 해석 시 사용되는 정적 횡하중의 분배방법으로는 UBC, ATC 3-06, FEMA-273 등 설계기준에서 제시된 방법들과 1차 모드특성을 고려한 ATC-40의 방법이 있는데 본 연구는 UBC-97에 의한 횡하중 분배방법을 이용하였다.<sup>(1)(2)</sup>

비탄성 정적해석에는 구조물의 힌지를 한점에 집중시키는 소성힌지법과 영역으로 확장하여 해

\* 학생회원 · 목포대학교 건축공학과, 석사수료

\*\* 정회원 · 목포대학교 건설공학부 건축공학전공, 교수

석하는 소성영역해석법, 구조물의 좌굴 등을 고려하는 고차해석법 등이 있는데 재료의 인성과 구조물의 부정정성을 해석에 반영하여 구조물의 비탄성 거동을 해석하는 소성힌지법이 일반적이다. 따라서, 본 연구는 비선형 정적해석법인 Pushover 해석법을 이용하여 작용하중의 지속적인 증가로 인해 형성되는 소성힌지와 구조물의 하중-변위 곡선을 비교 검토하였다. 기초지반조건은 암반과 UBC-97의 지반분류에 따른  $S_D$ 지반에 해당하는 연약지반을 고려하여 지반특성에 따른 구조물의 주기변화와 내진설계기준에서 제시한 반응수정계수의 적정성을 알아보았다.

## 2. 지진해석 모델

연구를 위한 건축물의 평면형식은 그림 1에 나타난 것처럼 가정하였으며, 건물층수는 주기를 고려하여 그림 2에 나타난 것같이 3, 5, 7층으로 구분하였고, 구조물의 모델링은 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 이용하여 3차원으로 수행하였다.

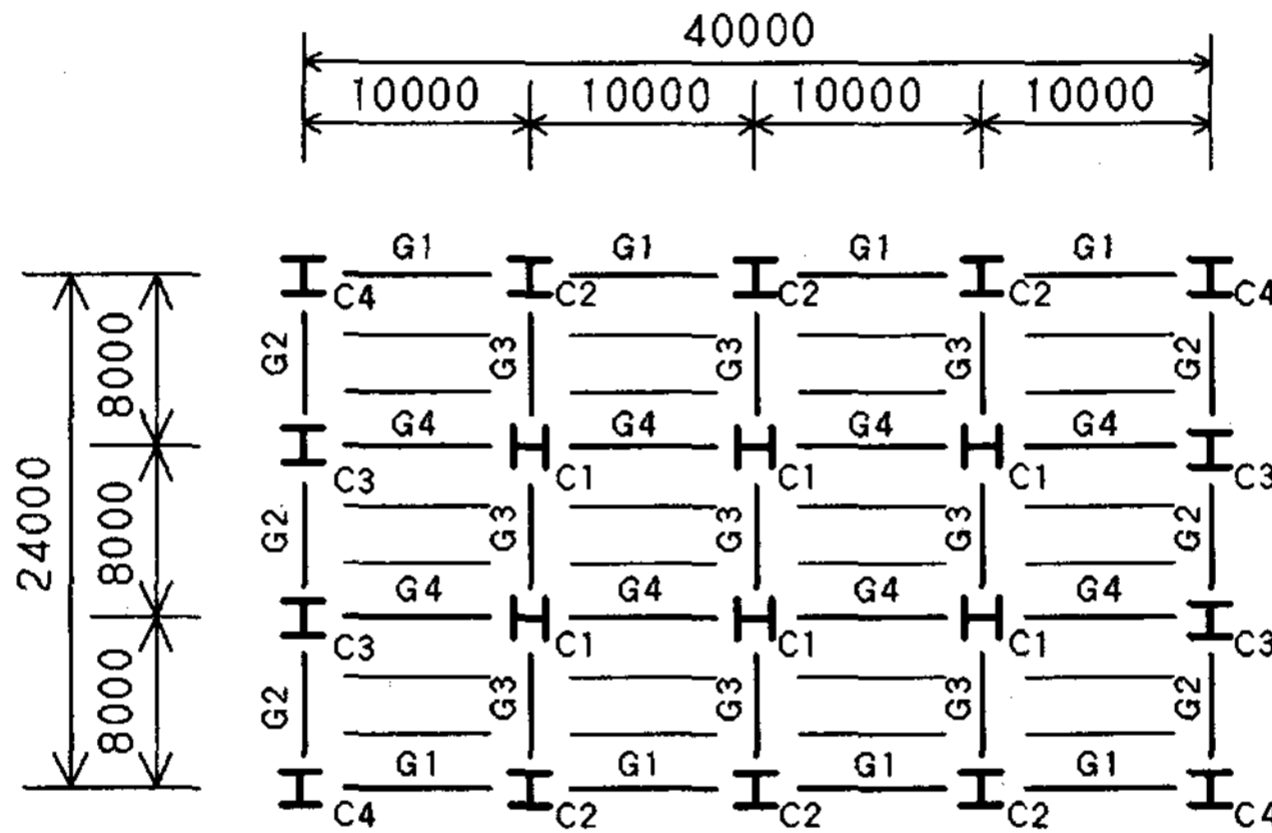


그림 1. 철골 구조물의 평면형식

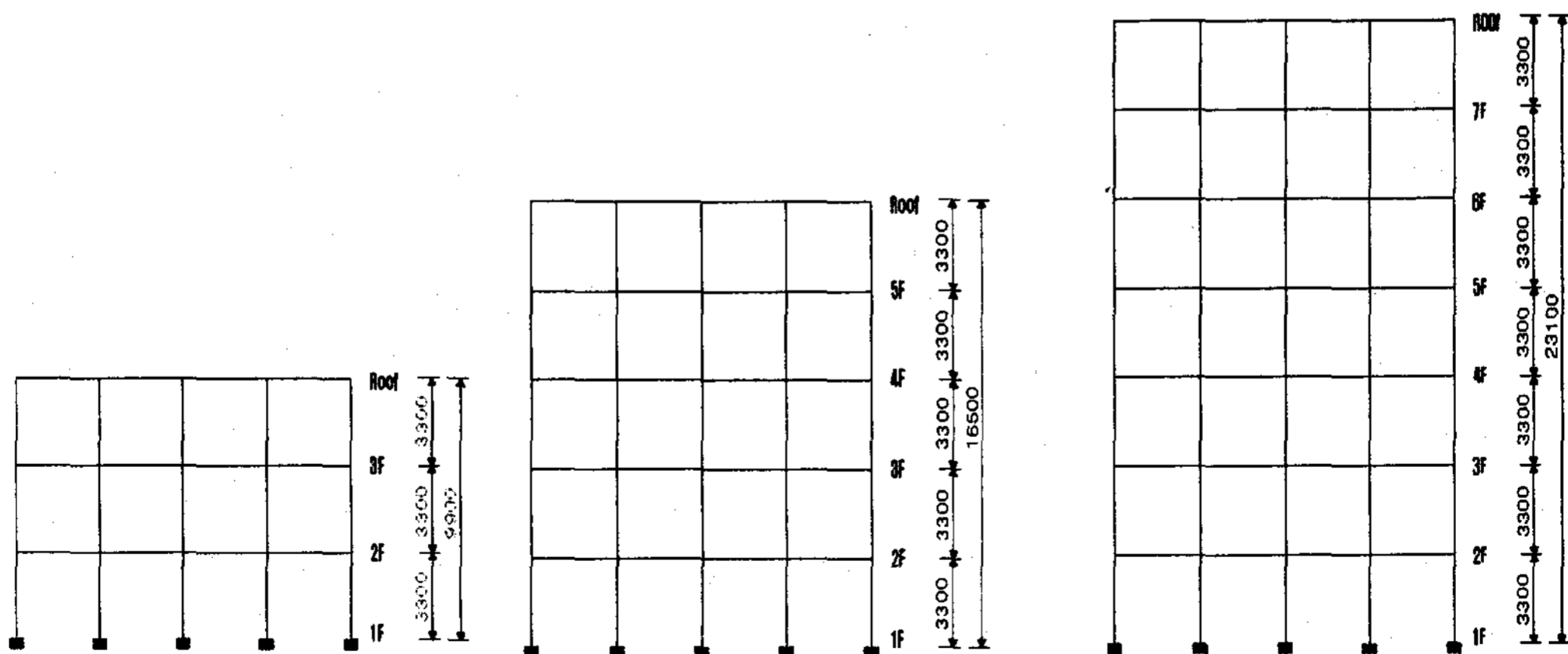


그림 2. 철골 구조물의 입면형식

적용하중은 고정하중의 경우 벽체를 고려하여 기준층은  $510\text{kgf}/\text{m}^2$ , 지붕층은  $380\text{kgf}/\text{m}^2$ 이고,

적재하중은 모든 층에 동일하게  $200\text{kgf}/\text{m}^2$ 을 고려하였으며, 풍하중은 국내기준인 KS2000을, 지진하중은 UBC-97 기준을 적용하였다. 횡하중은 X방향, Y방향으로 각 절점에 가하여 해석을 수행하였고, 철골부재설계는 AISC-ASD89를 적용하여 SAP2000으로 수행하였다. 지반은  $S_B$ 지반과  $S_D$ 지반으로 분류하여 해석하였는데,  $S_B$ 지반은 고정된 것으로 가정하고  $S_D$ 지반은 단위중량이  $1.8\text{t}/\text{m}^3$ , 감쇠비(D)와 포이손비( $\nu$ )가 0.05와 0.3으로 가정하였으며, 지반의 전단파속도( $C_s$ )는  $180\text{m}/\text{sec}$ 를 고려하였다. 기초뒤틀림깊이(E)는 지하 1층을 고려하여 4.0m로 가정하였으며, 기초반경(R)은 20m, 기초지반깊이(H)는 30m를 고려하였다. 지진해석은 1994년 Northridge E-W 지진자료를 최대지반가속도가 0.11g가 되도록 증폭시켜 시간이력지진해석을 수행하였다.

### 3. 구조물-지반 체계 고유주기

철골구조물의 기본주기는 ASCE7-02에서 제안한 아래의 식을 이용하였는데, 주기 산출을 위한 계수  $C_t$  는 0.068이고,  $h_n$  는 구조물의 높이를 나타낸다.

$$T = C_t (h_n)^{0.8} \quad (1)$$

구조물 부재는 중력하중과 풍하중을 고려하여 탄성설계를 수행하여 표 1에 나타난 철골부재들을 선정하고, 철골보의 모델링은 그림 3처럼 합성보의 콘크리트 슬래브 유효폭에 해당하는 콘크리트를 강재로 변환하여 구한 단면2차모멘트로 등가단면을 산정하였으며, 등가단면 부재도 표 1에 나타나 있다. 등가단면 부재를 고려하여 철골건물의 주기를 산정한 결과 표 2에 나타난 것처럼 등가단면을 고려한 주기가 철골보만 고려할 때 주기보다 기준식 (1)에 의한 주기에 유사하게 되는 것을 알 수 있었다.

표 1. 철골부재 단면

구분	층	부재	철골보 단면	합성보 등가단면
3층	모든층	G1	H 596×199×10/15	H 600×300×14/23
		G2	H 606×201×12/20	H 630×300×17/25
		G3	H 692×300×13/20	H 800×300×14/26
		G4	H 612×202×13/23	H 700×300×13/24
5층	2F-5F	G1	H 506×201×11/19	H 588×300×12/20
		G2	H 606×201×12/20	H 692×300×13/20
		G3	H 588×300×12/20	H 700×300×13/24
		G4	H 582×300×12/17	H 700×300×13/24
	Roof	G1	H 496×199×9/14	H 582×300×12/17
		G2	H 506×201×11/19	H 582×300×12/17
		G3	H 582×300×12/17	H 700×300×13/24
		G4	H 606×201×12/20	H 692×300×13/20
7층	2F-6F	G1	H 506×201×11/19	H 588×300×12/20
		G2	H 606×201×12/20	H 692×300×13/20
		G3	H 588×300×12/20	H 700×300×13/24
		G4	H 582×300×12/17	H 700×300×13/24
	7F-Roof	G1	H 500×200×10/16	H 582×300×12/17
		G2	H 506×201×11/19	H 588×300×12/20
		G3	H 582×300×12/17	H 700×300×13/24
		G4	H 606×201×12/20	H 692×300×13/20

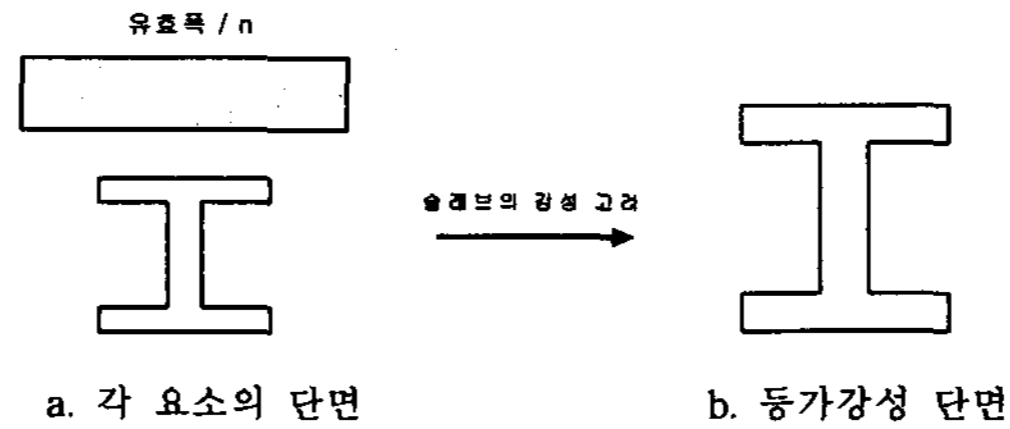


그림 3. 합성부재의 환산단면

표 2.  $S_B$ 지반의 경우 고유주기비교 (sec)

구 분		3층	5층	7층
ASCE7-02		0.43	0.64	0.84
철골조만 고려	X방향	0.72	1.1	1.54
	Y방향	0.62	0.97	1.39
등가단면 골조	X방향	0.65	0.79	1.22
	Y방향	0.57	0.74	1.16

연약지반에서의 구조물의 지진응답은 암반에서와 상당히 다른 거동을 보이므로 암반과 연약지반 위에 세워진 철골 구조물의 지진응답을 비교하였다. 부구조물 해석법에 의해 기초저면에 기초지반강성을 입력하는 방법은 SAP2000 요소 중 Damper요소를 사용하여 강성계수를 입력하였으며, 기초지반강성은 등가정적강성식으로  $S_D$ 지반 위 등가원형강성기초에 대한 강성을 구하여 기초 밑절점에 균등하게 분포시켰다.<sup>(3)(4)</sup>

기초지반강성을 고려한 건물의 고유주기는 표 3와 같다.  $S_D$ 지반의 주기가  $S_B$ 지반인 경우보다 3층인 경우에는 약 1.5배, 5층은 1.3배, 7층은 1.3배 길어짐을 알 수 있다. 이는 기초지반의 영향으로 구조물-지반 체계의 강성이 약해졌기 때문이다.

표 3. 지반특성에 따른 건물고유주기 (sec)

건물층수	방향	$S_B$ 지반	$S_D$ 지반
3층	X	0.65	0.97
	Y	0.57	0.86
5층	X	0.79	1.06
	Y	0.74	0.99
7층	X	1.22	1.55
	Y	1.16	1.47

#### 4. 지반특성에 따른 탄성 시간이력지진해석

국내 내진설계기준에 의한 설계밀면전단력은 2000년 대한건축학회 기준에 따라 지역계수(A) 0.11, 중요도계수(I) 1.0, 지반계수(S)는 암반(SB)지반의 경우 1.0, 연약(SD)지반의 경우 1.5를 고려하였다.

UBC-97 설계응답스펙트럼에 의한 설계밀면전단력은 0.11g 지진에 해당하는 건설교통부에서 제시한 지진계수  $C_a$ ,  $C_v$ 를 사용하여 설계응답스펙트럼을 작성한 후 각 건물의 고유주기에 해당하는 응답가속도를 구하고 총 질량의 75%인 등가질량을 곱하여 산정하였다.<sup>(5)</sup>

SAP2000에 의한 시간이력지진해석은 참고문헌(6)에서 고정지반과 SD지반에 대해 11개 지진을 사용해 구한 평균+표준편차 설계응답스펙트럼과 Northridge E-W지진에 의한 설계응답스펙트럼으로부터 할증계수 1.3과 1.6을 구하여 Northridge E-W 지진을 증폭시켜 수행하였다. 시간이력지진해석은 건물의 감쇠비를 0.05로 가정하고, Wilson  $\theta$ 법( $\theta$ 는 1.5)으로 직접적분하여 수행하였다.

표 4. 탄성 설계밀면전단력 비교 (tonf)

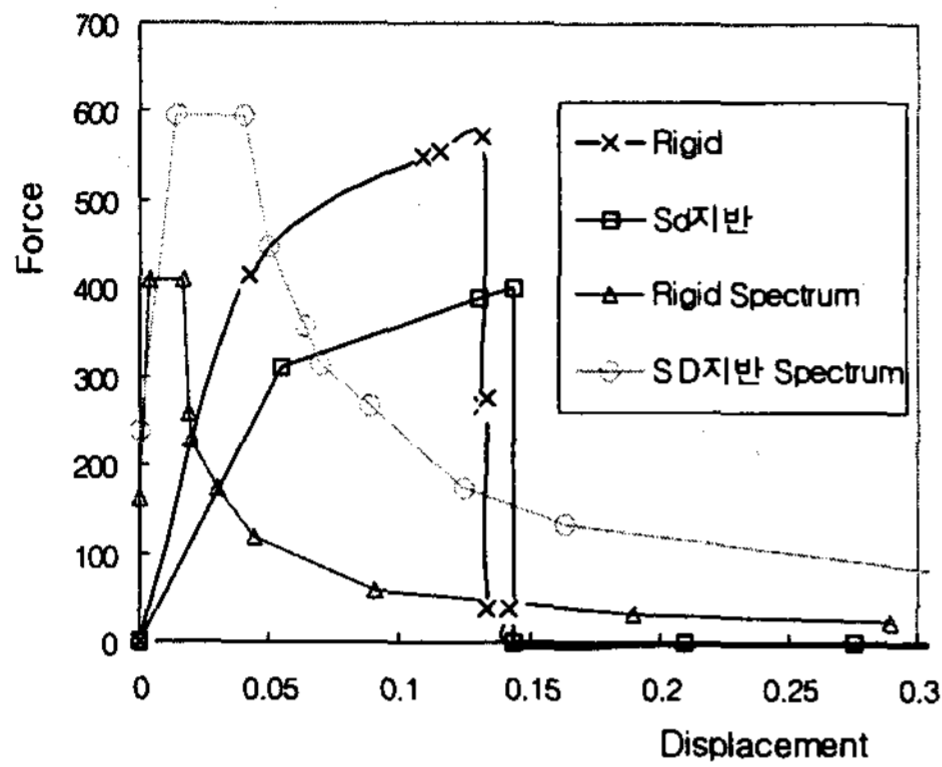
지반특성	건물층수	방향	고유주기(sec)	국내내진설계기준	UBC-97 설계응답스펙트럼	SAP2000에 의한 시간이력지진해석
S <sub>B</sub> 지반	3층	X	0.65	169	189	279
		Y	0.57	181	215	202
	5층	X	0.79	264	268	268
		Y	0.74	273	286	302
	7층	X	1.22	302	246	270
		Y	1.16	310	259	285
S <sub>D</sub> 지반	3층	X	0.97	208	268	283
		Y	0.86	221	299	234
	5층	X	1.06	342	423	357
		Y	0.99	354	447	435
	7층	X	1.55	402	405	266
		Y	1.47	413	427	265

탄성 시간이력지진해석 결과, S<sub>B</sub>지반에서 구조물의 밀면전단력이 건물의 층수나 X, Y방향에 관계없이 국내 내진설계기준이나 UBC-97 설계응답스펙트럼에 의한 밀면전단력과 약간의 차이는 있지만 상당히 유사하게 나타났다.

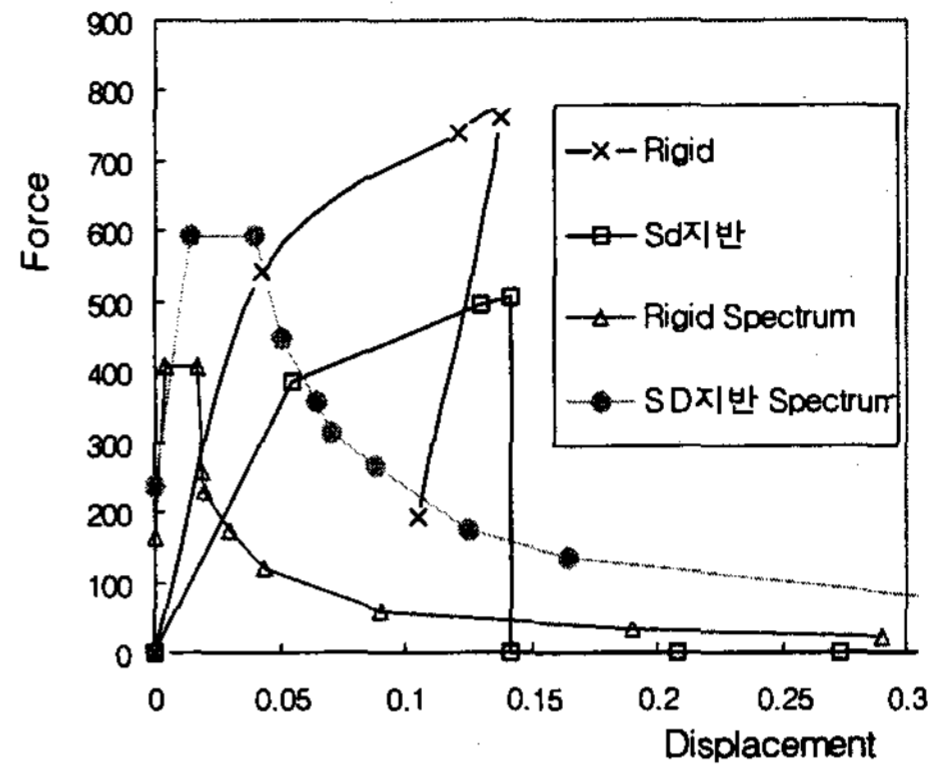
S<sub>D</sub>지반에서는 지반조건이 국내 내진설계기준에 의한 지반조건과 분류상 차이가 있어 직접 비교하는 것은 타당하지는 않지만, 국내 내진설계기준에 의한 밀면전단력과 UBC-97 설계응답스펙트럼에 의한 밀면전단력이 상당히 근사하게 나타났고, 시간이력지진해석에 의한 밀면전단력이 UBC-97에 의한 밀면전단력보다 층수가 높을수록 더 작게 나타났는데, 이것은 밀면전단력에 고차모드의 영향이 커지기 때문으로 판단되므로 고층건물의 경우 지반을 고려한 시간이력지진해석이 필요한 것으로 판단되었다.

## 5. Pushover 비선형 정적해석

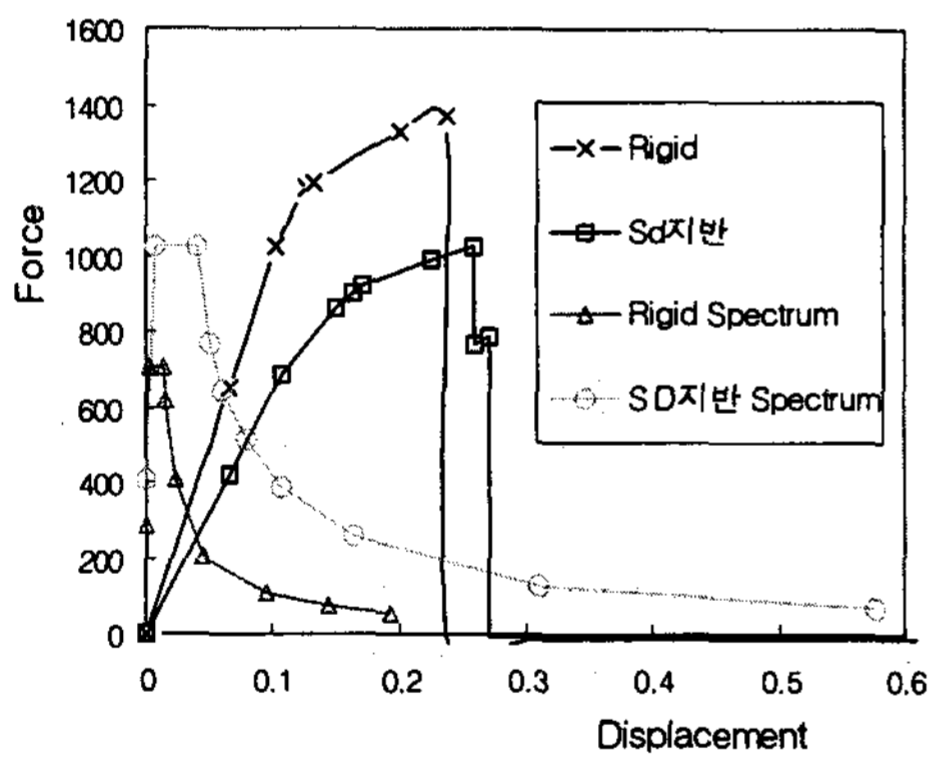
유한요소해석 프로그램 SAP2000으로 Pushover 비선형 정적해석을 수행하여 그림 4처럼 고정 (Rigid)지반일 때와 연약(S<sub>D</sub>)지반일 때의 성능응답스펙트럼을 비교하고, 탄성 요구응답스펙트럼과도 비교하였다. 또, 그림 5에는 각 건물의 지반조건에 따른 소성힌지 분포가 3차원으로 나타나 있다.



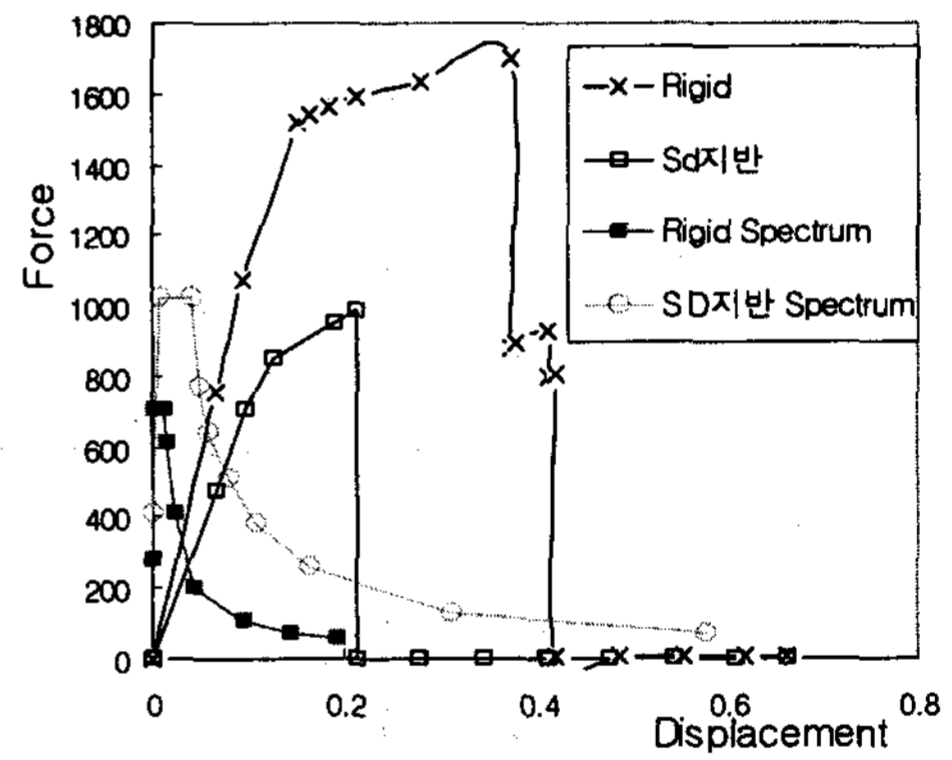
a. 3층 X방향



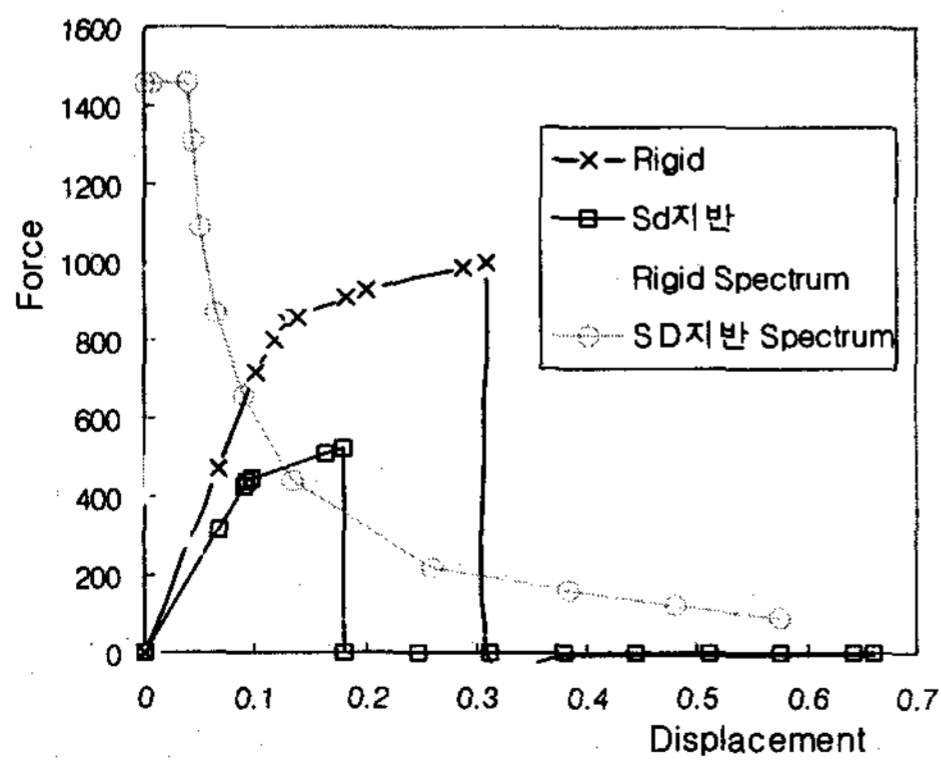
b. 3층 Y방향



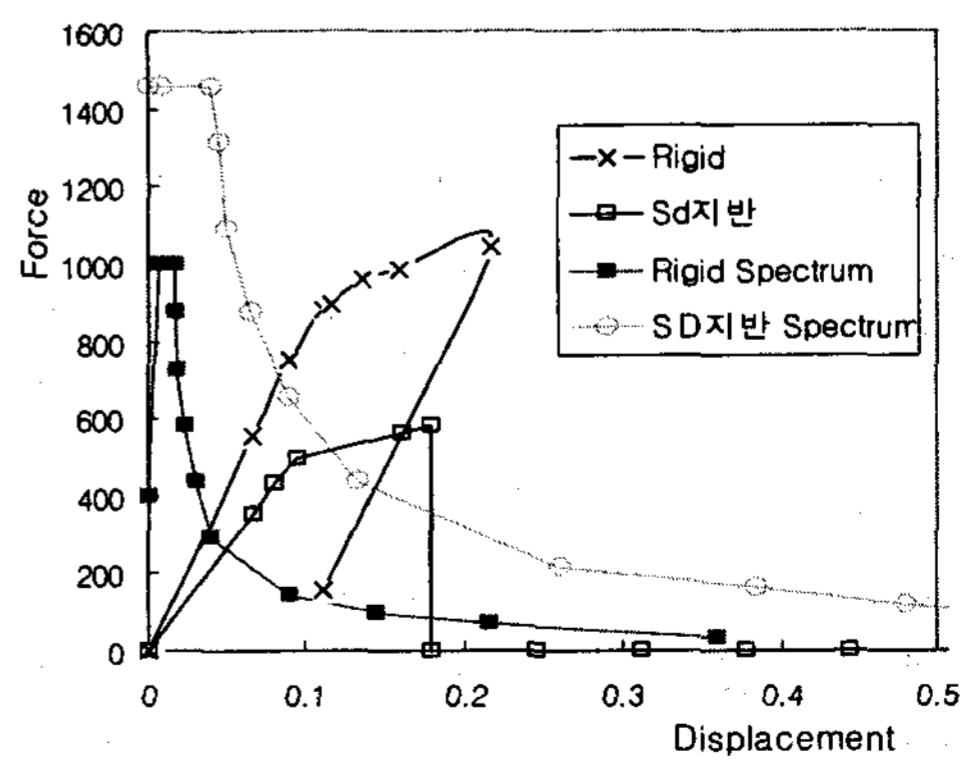
c. 5층 X방향



d. 5층 Y방향



e. 7층 X방향



f. 7층 Y방향

그림 4. 각 건물의 Pushover 해석결과

구 분	$S_B$ 지반	$S_D$ 지반
3층		
5층		
7층		

그림 5. 소성힌지분포

지반조건에 따른 각 건물의 성능점 전단력, 시간이력해석에 의한 밀면전단력, Pushover 비선형 해석에 의한 탄성한계전단력을 표 5에 나타냈는데,  $S_B$ 지반의 경우 시간이력해석 밀면전단력이 성능점 전단력과는 근사하고 Pushover 해석 탄성한계전단력보다는 고층일수록 상당히 작게 나타나 탄성한계 내에 있고,  $S_D$ 지반의 경우에도 성능점 전단력과 Pushover 해석 탄성한계전단력이 근사한데 시간이력해석 밀면전단력이 탄성한계 내에 있어 중약진의 경우 구조물의 지진해석을 탄성적으로 하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

또, 그림 4에 나타난 것처럼 기초지반이 연약할 경우 건물의 변위가 증가하고, 건물의 층수에 따라 차이는 있지만 구조물-지반 체계의 고유주기가 길어지면서 밀면전단력이 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 구조물의 지진해석 시 기초지반의 비선형성까지도 고려하고 지진해석을 수행하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.

표 5. 지반특성에 따른 전단력 비교 (tonf)

건물 층수	방향	S <sub>B</sub> 지반			S <sub>D</sub> 지반		
		성능점 전단력	시간이력 해석 전단력	Pushover 탄성한계 전단력	성능점 전단력	시간이력 해석 전단력	Pushover 탄성한계 전단력
3층	X	229	279	416	320	283	311
	Y	259	202	543	392	234	387
5층	X	285	268	1,024	501	357	683
	Y	310	302	1,074	534	435	703
7층	X	266	270	715	444	266	437
	Y	277	285	748	476	265	493

## 6. 결론

본 논문에서는 기초지반강성을 고려한 3, 5, 7층 철골조 건물에 대한 1994년 Northridge E-W 지진기록에 의한 탄성 시간이력지진해석과 Pushover 비탄성 정적해석을 수행하였는데, 지진해석 시 구조물의 철골보 만을 고려하면 구조물의 전체 강성이 과소평가되어 고유주기가 길어지기 때문에 지진해석 시 건물의 바닥 슬래브의 강성을 고려한 합성 철골보에 대한 등가단면을 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

한편, 건물에 대한 시간이력지진해석과 Pushover 비선형 정적해석 결과, 최대지반가속도가 0.11g처럼 중약진이어서 지진해석에 의한 설계밀면전단력이 구조물의 탄성한계밀면전단력 보다 작을 때에는 구조물을 최대 반응수정계수(R)를 사용하여 소성해석하는 것 보다는 탄성해석(R=1)을 하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

또, 기초지반이 연약지반일 경우에는 구조물-지반 체계의 고유주기가 길어져 구조물의 변위가 증가하고 설계밀면전단력이 커지기 때문에 기초지반의 비선형성도 고려해야 할 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code," California, 1997.
2. ATC, "ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings, Volume 1", Applied Technology Council, 1996.
3. 한국지진공학회, "구조물의 지진해석," 기술강습회 교재, 1999.
4. 김지원, 김용석, "연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답," 한국지진공학회 논문집, Vol.5, No.3, 2001.
5. Felipe Tarquis, "Structural Response and Design Spectra for the 1985 Mexico City Earthquake", Geotechnical Engineering Dissertation GD89-1, Civil Engineering Dept., University of Texas at Austin, 1988, pp.207.
6. 김용석, "비선형 연약지반을 고려한 약진에 의한 비탄성 응답스펙트럼", 한국지진공학회 논문집, 제7권 제4호, 2003.