

## 지반 종류별 응답스펙트럼 평가에 대한 비교 연구

### A Comparative Study on Evaluation of Response spectrum accounting for Soil Types

김 선 우\*                      한 상 환\*\*  
Kim, Sun-Woo                Han, Sang-Whan

#### ABSTRACT

The response spectrum has been widely used to differentiate the significant characteristics of earthquake ground motion and to evaluate the response of structures under ground shaking. Current design response spectrum is based on Seed, Ugas, and Lysmer's study. (1976) In this study, earthquake ground motion data sets adopted by Seed, Miranda, and Riddell is analyzed regards to soil types. And how earthquake data sets effected the design response spectrum is evaluated using acceleration-displacement response spectrum.

#### 1. 서    론

응답스펙트럼은 지진과 그에 의한 영향력이 구조물과 지반 운동에 미치는 효과를 알아내기 위한 수단으로 그 중요성은 오랫동안 엔지니어와 지진학자들에 의해 인식되어 왔다. Housner(1941)와 Biot(1942)에 의해 처음으로 응답스펙트럼의 개념이 소개된 이후 스펙트럼은 가속도 기록이 가지는 중요한 특성과 지반운동에 의한 구조물의 반응을 평가하기 위한 목적으로 사용되어왔다. 그러나 1971년 미국 서부에서 발생한 San Fernando 지진 이전에는 지진기록이 수적으로 매우 제한되어 있었으며, 또한 대부분이 충적토(Alluvium)에서 기록된 것이었다. 따라서 그 이전에 개발된 설계 응답스펙트럼들은 대부분 충적토에서 발생한 지진기록에 기초를 둔 것으로 토질 조건의 영향이 고려되지 않은 것이었다. 그 후 1976년 Seed, Ugas, Lysmer (이하 Seed)와 Mohraz는 각각 그들의 연구에서 지반조건이 스펙트럼에 미치는 영향을 발표하였다. Seed (1976년)는 23건의 지진으로부터 104개의 수평성분 지진기록을 선별하여 연구에 이용하였다. 이 지진기록들은 4개의 지반종류, 즉 (1) Rock, (2) Stiff Soil Site, (3) Deep Cohesionless, (4) Soft to Medium Clay and Sand로 구분하였다. 이 연구로 그는 지반이 연약할수록 스펙트럼의 가속도가 커지며, 이와 같은 지반조건의 영향은 단주기 영역보다 0.5초 이상의 주기영역에서 더욱 명확하게 나타난다는 연구 결과를 발표하였다. Mohraz (1976년)는 162개의 지진기록을 4개의 지반종류, 즉 (1) Rock, (2) 30-200ft. Alluvium on Rock, (3) Less than 30ft. Alluvium on Rock, (4) Alluvium으로 구분하고, 이를 기초로 각 지반종류에 따른 설계 응답스펙트럼을 발표하였다. 지진학자들에 의해 연구된 이러한 연구 결과 중 Applied Technology Council(ATC)은 Seed의 Mean 스펙트럼에 바탕을 둔 설계스펙트럼을 제안하였다. 이 설계스펙트럼에서는 3가지의 지반종류, 즉 (1) Rock and Stiff Soil (S1), (2) Deep Cohesionless or Stiff Clay Soils (S2), (3) Soft to Medium Clays and Sands (S3)에 기반을 두고 있다. ATC의 설계스펙트럼은 SEAOC (Structural Engineers Association of

\*\* 정희원 · 한양대학교 건축공학과 석사과정

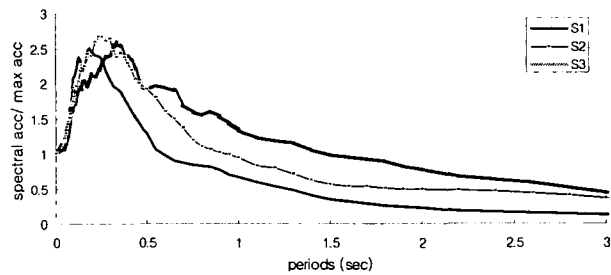
\*\* 정희원 · 한양대학교 건축공학과 조교수

California)의 Recommended Lateral Force Requirement (1988년, 1990년), ICBO (International Conference of Building Officials)의 Uniform Building Code (1988년, 1991년, 1994년)에 채택됨으로서 가장 대표적인 설계 스펙트럼으로 이해되고 있다. 이에 본 연구에서는 Seed(1976년), Miranda(1995년), Riddell(1993년)의 지진 가속도 기록을 이용하여 각각의 응답스펙트럼이 가지는 특징과 Miranda(1995년), Riddell(1993년)의 응답스펙트럼이 Seed(1976년)의 응답스펙트럼과 가지는 차이점에 대해 비교하고 현재 통용되어지고 있는 설계스펙트럼의 평가에 목적을 두고 있다.

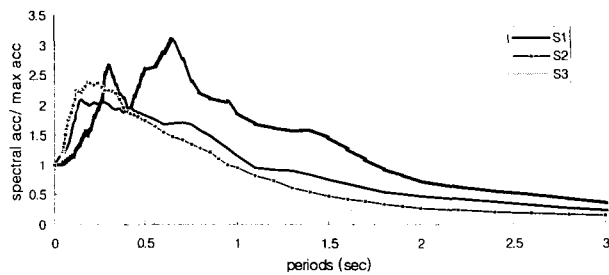
## 2. 지반분류에 따른 응답스펙트럼

지진운동에 대한 응답스펙트럼의 측정은 약 45년 동안 습관처럼 인식되어 왔고, 이렇게 기록된 가속도 응답스펙트럼은 Seed에 의해 제시된 설계스펙트럼을 모델로 내진설계 시 기본으로 여겨져 오고 있다. 본 연구의 시작은 서로 다른 지진 자료를 가지고 있는 Seed(1976년), Miranda(1995년), Riddell(1993년)의 지진가속도에 지반별 응답스펙트럼의 작성이다. 다음은 각각의 내진설계 기준에서 제안하고 있는 지반종류에 대한 분류로 본 연구에서는 이들 기준 중 UBC (1994년)에서 제안하고 있는 내용을 기본으로 하였다.

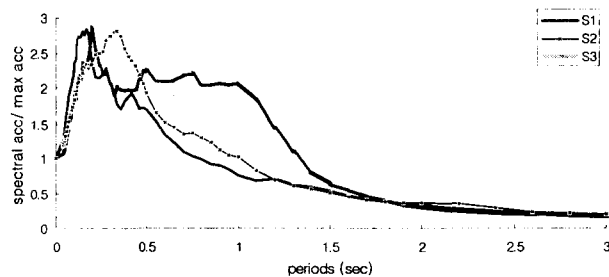
[그림 1, 2, 3]은 각각 Seed(1976년), Miranda(1995년), Riddell(1993년)이 지진이 발생했을 때에 계측된 지반의 가속도에 대하여 지반을 강성별로 분류하고 이에 대한 각각에 대한 가속도 응답스펙트럼을 평균한 후 이 가속도 스펙트럼을 Normalizing하여 그린 것이다. 일반적으로 지반의 진동과 이에 대한 가속도 응답스펙트럼은 지반의 토질학적 특성, 지진의 규모, 지진을 일으키는 지진파의 구성 및 지반과 진앙과의 거리와 지진파 경로의 지질학적 특성 등에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그러나 위의 4가지를 모두 고려하는 것은 현실적으로 관련 자료 부족으로 불가능하다. UBC (1994)에서는 지반상태에 따른 종별 분류에 대해 지반1, 4를 전단파 속도에 의해 판단할 수 있다고 했으나, 지반 2, 3에 대해서는 아무런 언급이 있지 않다. 위에서 사용한 지진 자료는 각 연구자별로 전단파 속도와 대응하여 "Rock", "Soft Rock", "Alluvium" 등으로 나누어 놓은 것을 볼 때 각 지반을 순서대로 지반 1,



[그림 1] Average acceleration spectra for different site conditions by Seed



[그림 2] Average acceleration spectra for different site conditions by Miranda



[그림 3] Average acceleration spectra for different site conditions by Riddell

않다. 위에서 사용한 지진 자료는 각 연구자별로 전단파 속도와 대응하여 "Rock", "Soft Rock", "Alluvium" 등으로 나누어 놓은 것을 볼 때 각 지반을 순서대로 지반 1,

2, 3에 대응하는 것은 무리가 없다고 보았다. 따라서 이에 근거하여 지반의 가속도 응답에 대한 영향을 분석하였다. 연구자 각자에 대한 지반종류 분류 기준과 선정된 지진자료 개수는 각각 [표 1]에 제시되어 있다.

[표 1] 연구자에 따른 지반종류 분류 기준

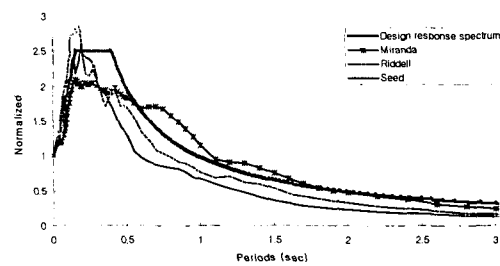
구분	Seed	Miranda	Riddell
S <sub>1</sub>	Rock (26개)	Rock (30개)	Rock (16개)
S <sub>2</sub>	Stiff site (23개)	30-200ft. Alluvium site (46개)	Dense gravel Dense sand (39개)
S <sub>3</sub>	Deep cohesionless soil site (22개)	Soft soil site (8개)	Gravel and Soft lime Medium Density sand (16개)

※ ( )안의 숫자는 본 응답스펙트럼에 사용된 지진 자료 개수

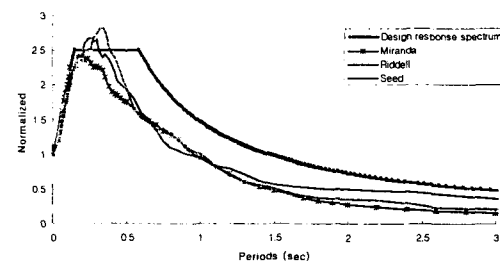
Seed (1976년)의 연구 결과에 따르면 일반적으로 강성이 클수록 응답스펙트럼의 값은 낮아지며, 또한 지반이 견고할수록, 강성이 클수록 짧은 진동주기를 가지는 지진파의 성분이 상대적으로 크게된다고 하였다. 그러나 위의 그래프에서 알 수 있듯이 Seed의 응답스펙트럼과 달리 Miranda와 Riddell의 응답스펙트럼은 0.5초 이하의 단주기에서 이 이론을 만족시키지 못함을 알 수 있다. 특히 Miranda의 응답스펙트럼에서는 0.5초 이하의 단주기에서 지반 S<sub>3</sub>가 지반 S<sub>1</sub>이나 S<sub>2</sub>보다 응답스펙트럼 값이 낮게 나타났다.

다음은 위에서 제시한 연구자 각자에 대한 가속도 응답스펙트럼을 연구자들이 제시한대로 각 지반별, 즉 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>에 따라 적용시킨 후 그 결과를 UBC (1994년)에서 제안하고 있는 설계응답스펙트럼과 비교한 그래프이다. 비교 대상으로 선정된 설계응답스펙트럼은 가장 널리 사용되고 있다. 이 그래프에 나타난 결과를 보면 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>에서 UBC (1994년) 설계응답스펙트럼 값이 Riddell의 응답스펙트럼 보다 과소 평가 되고 있음을 알 수 있다.

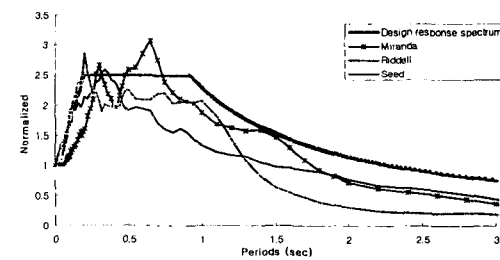
또한 지반종류가 같을지라도 연구자에 따라 그 응답스펙트럼의 형태가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 S<sub>3</sub>에서는 주기에 따라 각 연구자들의 응답스펙트럼의 형태가 완전히 달라짐을 알 수 있다. 이러한 응답스펙트럼의 결과를 Seed의 응답스펙트럼이 가지는 최대가속도에 대한 값으로 환산한 결과 다음과 같이 각 주기별로 응답스펙트럼 값의 오차가 발생하였다.



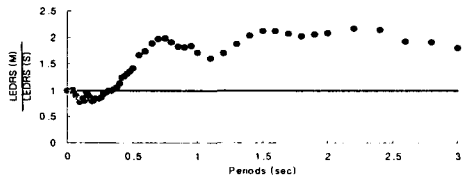
[그림 4] Average acceleration spectra (S<sub>1</sub>)



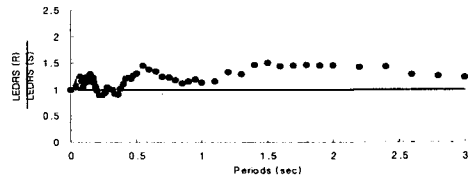
[그림 5] Average acceleration spectra (S<sub>2</sub>)



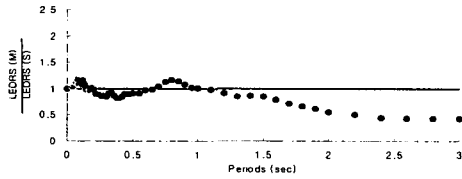
[그림 6] Average acceleration spectra (S<sub>3</sub>)



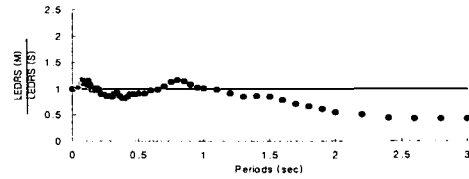
[그림 7] Seed에 대한 Miranda의 주기별 가속도 비 ( $S_1$ )



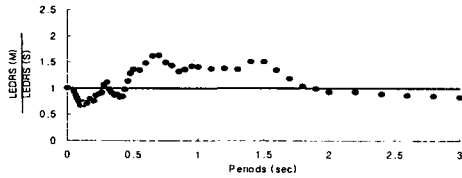
[그림 8] Seed에 대한 Riddell의 주기별 가속도 비 ( $S_1$ )



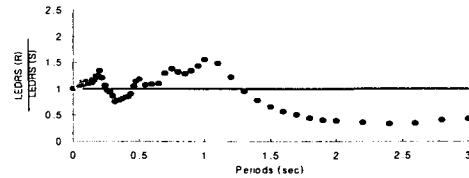
[그림 9] Seed에 대한 Miranda의 주기별 가속도 비 ( $S_2$ )



[그림 10] Seed에 대한 Riddell의 주기별 가속도 비 ( $S_2$ )



[그림 11] Seed에 대한 Miranda의 주기별 가속도 비 ( $S_3$ )

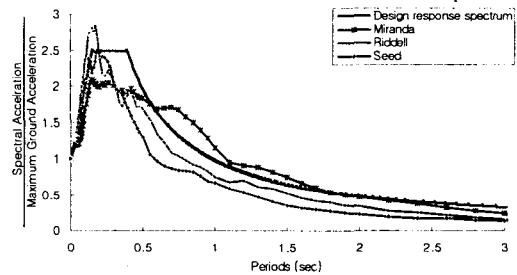


[그림 12] Seed에 대한 Riddell의 주기별 가속도 비 ( $S_3$ )

각 연구자의 가속도 응답스펙트럼에 대해 이러한 오차가 발생하는 이유는 같은 지반종류라 할지라도 토질 조건에 대한 정의가 완전히 동일하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 또한 이러한 오차 발생으로 인해서 응답스펙트럼의 형태가 달라지는 것으로 보인다. 따라서 어떠한 지진자료를 선택하느냐에 따라 동일 지반이라 할지라도 지반상태 및 종별 가속도 응답스펙트럼이 달라진다고 볼 수 있다.

### 3. PGA (Peak Ground Acceleration) 분포와 응답스펙트럼

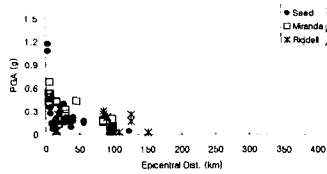
[그림 13]은 Seed(1976년), Miranda(1995년), Riddell(1993년)이 정리한 지진자료에 대해서 지반  $S_1$ 에 대한 응답스펙트럼을 작성한 후 이를 표준화한 값을 기준 (UBC 1994)에서 제시한 설계응답스펙트럼과 비교한 것이다. 이 그림을 보면 고유주기 0.2초 이하에서 기준의 설계응답스펙트럼이 Riddell의 자료를 이용하여 작성한 응답스펙트럼에 비해 과소 평가되고 있다. 또한 고유주기 0.5초 이상에서는 기준에서의 설계응답스펙트럼이 Miranda의 자료를 이용하여 작성한 응답스펙트럼보다 과소평가 되고 있음을 알 수 있다.



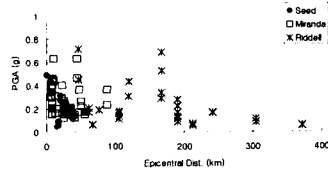
[그림 13] 설계응답스펙트럼과 연구자별 응답스펙트럼 비교 ( $S_1$ )

본 연구에서는 이러한 결과가 나타나는 원인에 대해 알아보고자 각 연구자가 선정한 지진자료에 대해 진앙거리에 대한 PGA 분포도를 작성해 보았다. 아래 그래프에 나타난 PGA 분포도를 살펴보면 Seed의 지진자료는 진앙거리 50km 이내에서 PGA가 분포되어 있음을 알 수 있다. 반면에 Miranda와 Riddell이 제안한 자료에서는 PGA가 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다. 특히 Riddell이 제안한 자료의 PGA는 진앙거리

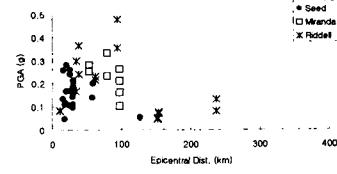
400km 이내까지 골고루 분포되어 있다.



[그림 14] S<sub>1</sub>에 대한 PGA 분포 비교



[그림 15] S<sub>2</sub>에 대한 PGA 분포 비교

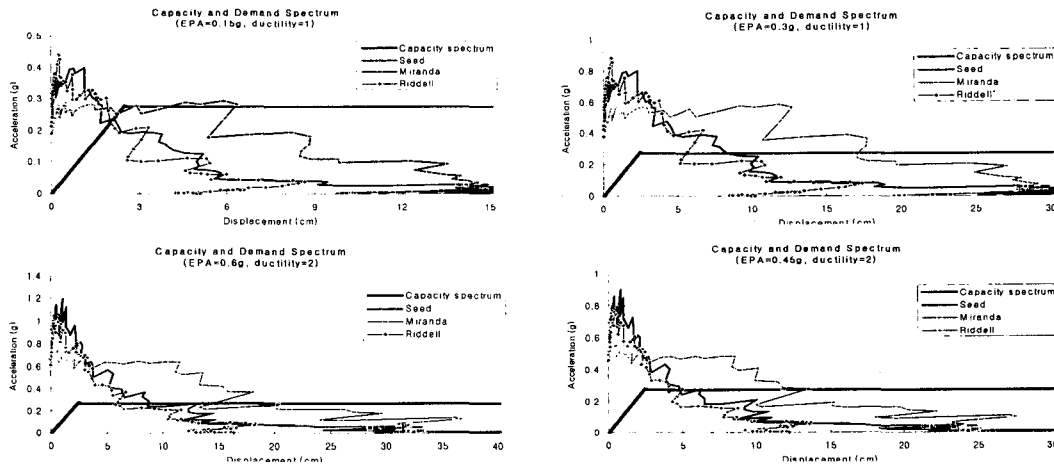


[그림 16] S<sub>3</sub>에 대한 PGA 분포 비교

이러한 결과로 [그림 7~12]와 같은 결과가 나타남을 가정할 수 있다. 특히 [그림 7]의 고유주기 0.5초 이후에 발생한 Miranda와 Seed의 가속도 비에 대한 오차는 [그림 14]에 나타난 것처럼 Miranda의 지진자료가 Seed의 자료에 비해서 PGA가 큰 경우를 사용했기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과를 볼 때 지진자료를 선정하고 그에 대한 가속도 응답스펙트럼을 제시함에 있어 진앙거리에 따른 PGA 분포와 PGA 값이 응답스펙트럼에 영향을 미침을 알 수 있다.

#### 4. 변위 연성비(Ductility)를 이용한 가속도-변위 응답스펙트럼 비교

본 연구에서는 변위 연성비를 이용한 가속도-변위 응답스펙트럼을 사용하여 성능점을 통해 각 연구자에 의해서 분류된 지진자료의 특징을 비교해 보았다. 지반 S<sub>1</sub>에 해당하는 10개의 지진자료에 대하여 중간값을 가속도-변위 응답스펙트럼(ADRS)형식으로 변환하여 요구스펙트럼으로 사용하였다. 선정된 10개의 지진자료는 0.2g이하의 지진자료를 무작위 선정한 후 이들을 EPA=0.15g, EPA=0.3g, EPA=0.45g, EPA=0.6g 비율로 축척 하였다. 이렇게 각각의 EPA 값으로 축척된 지진자료를 변위 연성비 1~5에 대해 가속도-변위 응답스펙트럼을 이용하여 성능점을 비교한 결과는 다음과 같았다.



[그림 17] 서로 다른 지진자료에 대한 변위 연성비에 따른 성능점 비교

변위 연성비를 이용한 가속도-변위 응답스펙트럼 평가에서 각 연구자별로 선정된 지진자료에 따라 구조물의 성능점이 달라짐을 알 수 있었다. [표 2]는 위 [그림 17] 가속도-변위 응답스펙트럼(ADRS)에서 나타난 성능점을 비교한 결과이다. 이 결과표에서 보듯이 동일 지반내에서 동일한 크기로 축척된 지진이라 할지라도 어떠한 지진자료를 선택하느냐에 따라 성능점이 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 가속도 응답스펙트럼 평가에 있어서 동일한 조건이라 할지라도 응답스펙트럼이 선택되는 지진자료에 영향을 받음을 알 수 있다.

[표 2] 변위 연성비에 따른 성능점 비교

구분		Seed		Miranda		Riddell	
EPA (g)	ductility	PGA (g)	Displacement (cm)	PGA (g)	Displacement (cm)	PGA (g)	Displacement (cm)
0.15	1	0.24	2.131	0.25	2.245	0.23	2.027
	2	0.14	1.283	0.16	1.426	0.11	0.982
	3	0.09	0.941	0.14	1.246	0.09	0.771
	4	0.07	0.762	0.13	1.412	0.07	0.648
	5	0.07	0.510	0.12	1.070	0.07	0.613
0.3	1	0.28	8.3	0.27	17.085	0.28	5.68
	2	0.29	2.565	0.28	5.6	0.22	1.964
	3	0.195	1.746	0.28	2.492	0.172	1.542
	4	0.144	1.29	0.255	2.284	0.145	1.3
	5	0.132	1.182	0.24	2.14	0.137	1.225
0.45	1	0.27	15.146	0.284	40.673	0.29	16.29
	2	0.281	6.322	0.279	13.621	0.26	4.13
	3	0.293	2.619	0.273	8.214	0.258	2.313
	4	0.246	1.851	0.267	4.244	0.217	1.943
	5	0.198	1.773	0.28	2.943	0.205	1.838

## 5. 결론

본 연구에서는 위에서 비교한 여러 가지 결과를 이용하여 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1. 동일한 지반내에서 가속도 응답스펙트럼을 비교한 결과 0.5초 이하의 단주기에서 Seed의 응답스펙트럼과 달리 설계응답스펙트럼 값이 Miranda와 Riddell의 응답스펙트럼보다 과소 평가되어 있음을 알 수 있었다. 이는 동일한 지반종류라 할지라도 토질 조건에 대한 정의가 완전히 동일하지 않기 때문인 것으로 사료된다.
2. 지반종류가 동일할지라도 응답스펙트럼을 작성함에 있어 선택된 지진자료의 진앙거리에 따른 PGA의 분포와 PGA값이 응답스펙트럼에 영향을 미침을 알 수 있었다.
3. 동일 지반내에서 동일한 크기로 축적된 지진이라 할지라도 지진자료에 따라 성능점이 달라짐을 알 수 있었다.

그러므로 가속도 응답스펙트럼 평가에 있어서 동일한 지반조건이라 할지라도 지진자료의 선택에 따라 응답스펙트럼의 형태가 달라질 수 있을 것으로 사료된다. 또한 UBC (1994년)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼이 실제 발생한 지진 자료에 대해 일부 과소평가 되어 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터의 지원으로 수행된 과제로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. H. B. Seed, C. Ugas, and J. Lysmer "Site-dependent spectra for earthquake resistant design", Bulletin of the Seismological of America. vol 66. No. 1, pp.221-243, 1976
2. Rafael Riddell "Inelastic design spectra accounting for soil conditions", EESD vol.24. pp1491-1510, 1995
3. E. Miranda, "Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra", J. strct. eng. ASCE 119. 1319-1338, 1993
4. Uniform Building Code, International Conference of Building Officials (1994년)
5. 김상대, 김명환 "내진구조설계를 위한 스펙트럼의 이해" 도서출판 새론, 2000. 2
6. 오영훈, 한상환, 이리형 "EFFECT OF HYSTERETIC MODELS ON THE INELASTIC RESPONSE SPECTRUM", 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, February, 2000