

## 국내 도시지역의 지반응답특성 거동 평가

신대섭, 김후승\*  
서울시립대학교 토목공학과

### Evaluation of the Site Specific Ground Response in Korean Urban Site

Dea-Sub Shin, Hu-Seung Kim\*

Department of Civil Engineering, University of Seoul

**요약** 지진 발생시 지반조건에 의하여 지반운동에 영향을 받으며 내진설계시 지반특성을 고려한 부지응답특성 평가를 수행해야한다. 국내 내진설계기준의 설계지진력을 결정하는 부분은 미국내진설계기준(UBC-1997)을 차용하여 사용하고 있다. 국내 지반특성과 다른 미국의 지반특성에 적합하게 만들어진 기준을 그대로 사용하는 경우 과다 또는 과소 설계의 원인이 될 수 있다. 따라서 국내지반특성에 적합한 설계응답스펙트럼의 개선이 중요하다. 그래서 본 연구에서는 국내 도시지역의 158개 지반을 선정하여 미국 서부지역의 지반 특성과 비교하고 부지응답을 수행하였다. 158개의 지반을 내진설계기준에서 제시하는 분류방법을 이용하여 분류하였을 때  $S_B$ 에 해당하는 지반이 37개,  $S_C$ 은 107개, 지반  $S_D$ 은 14개로 분류되었다. 각 분류된 지반과 7개의 입력지진파를 토대로 해석을 수행하였으며, 내진설계기준과 비교 분석 결과, 국내 설계응답스펙트럼은 국내의 도시지역의 지반특성에 비하여 단주기 영역의 증폭을 과소평가하고 장주기 영역의 증폭을 과대평가하는 것으로 나타났다. 158개의 해석대상부지 중에서 77%정도를 차지하는 지반  $S_C$ ,  $S_D$ 의 결과에서 설계응답스펙트럼과 큰 차이가 발생한다는 것은 국내 내진설계기준에 제시되어있는 증폭계수를 국내 지반특성에 적합하도록 재산정 할 필요성이 있다는 것을 보여준다.

**Abstract** When an earthquake occurs, it is necessary to evaluate the site-specific ground response while considering ground characteristics in seismic design. The design seismic force of Korean seismic design criteria is borrowed from the Uniform Building Code(UBC-1997). However, the criteria are based on the ground characteristics of the United States, which are different from the ground characteristics in Korea, and using them could cause over-orunder-designing. Therefore, it is important to develop a proper design response spectrum for Korean ground characteristics. In this study, 158 ground sites in Korean urban areas were selected and compared to those in the western part of the United States, and their site-specific ground responses were analyzed. The classification standard in the seismic design criteria classifies the 158 sites into 37 sites, 107 sites, and 14 sites. Using 7 earthquake inputs, the criteria were compared for each group. The Korean design response spectrum underestimates the amplification of the short-period range and overestimates the amplification in the long-period range. There were large differences in the results of the and sites, which account for 77 percent of the 158 sites. Therefore, there is a need to modify the amplification factor in the Korean seismic criteria to properly reflect Korean ground characteristics.

**Keywords :** Design Response Spectrum, Ground Conditions, Ground Response, Site Specific, Ground Characteristics, UBC-1997

### 1. 서론

지진은 자연재해 중 가장 큰 인명과 재산피해를 입히는 자연재해이다. 국내에서는 지진발생시 지진에 대한

피해를 줄이기 위해 1980년대에 내진설계에 대한 개념을 도입하여 구조물 설계를 하였다. 이때 내진설계시 구조물에 작용하는 하중을 결정하는 것은 매우 중요하다. 국내 내진설계기준을 보면 하중 결정시 우선 지역별

\*Corresponding Author : Hu-Seung Kim(University of Seoul)

Tel: +82-43-217-6172 email: ssaint1004@naver.com

Received April 21, 2017

Revised (1st May 29, 2017, 2nd June 1, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

지진발생확률에 근거하여 작성된 지진 재해도에서 지역을 구분하고 지반 종류에 따른 설계응답스펙트럼을 작성하여 구조물 주기에 맞는 설계하중을 결정하도록 되어 있다.

하지만 국내 내진설계기준의 지반의 종류를 결정하는 부분은 미국내진설계기준(UBC-1997)[1]을 차용하여 사용하고 있다. 국내 지반특성과 다른 미국의 지반특성에 적합하게 만들어진 기준을 그대로 사용하는 경우 과도 또는 과소 설계의 원인이 될 수 있다.

지진시 구조물의 거동은 기반의 특성에 영향을 많이 받기 때문에 지진관련 지반의 특성에 대한 연구가 많이 필요하다.

지반의 특성으로 지진의 피해를 크게 입은 해외사례를 보면 Mexico City지진(1985)발생시 연약지반 위에 있는 Mexico City가 지진의 증폭으로 인한 큰 피해를 입었으며[2], Armenia지진(1988) 발생시 진원으로부터 거리가 가까운 지역보다 거리가 먼 연약지반 위에 세워진 도시에서 더 큰 지진 피해를 입었으며[3], Loma Prieta지진과 고베지진에서도 이와 같은 지반으로 인한 지진의 증폭으로 더 큰 피해가 발생하였다.

위와 같은 사례를 봤을 때 내진설계시 지진하중을 결정하는데 신뢰성 있는 지반의 증폭현상 평가가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 1차원 등가선형 부지응답해석을 통해 국내 도시지역의 부지특성을 평가하고 국내 내진 설계기준과 비교 분석을 수행하였다.

화암이 발달된 지역 및 퇴적도가 발달된 지역에서 자료를 획득하였다. 서울시 158개의 지반을 내진설계기준에서 제시하는 분류방법을 이용하여 분류하였을 때 지반  $S_B$ 에 해당하는 37개, 지반  $S_C$ 은 107개, 지반  $S_D$ 은 14개로 분류되었다. 각 지반 종류별 깊이에 따른 전단파속도 추상도는 Fig. 1에 나타내었다. Table 1에서는 해석지반의 지반종류별 기반암 깊이 및 상부 토층 30m의 평균 전단파 속도를 정리하였다.

Table 1을 살펴 보면 기반암의 위치는 지반  $S_B$ 의 경우 -3m에서 -14.5m, 지반  $S_C$ 의 경우 -10m에서 -30m, 지반  $S_D$ 의 경우 -7.5m에서 -30m에 위치하였다. 해석지반 대부분은 상부 토층에 매립토, 충적토, 자갈이 많은 토적도 층이 분포하고 있고, 하부층은 풍화토와 풍화암 및 기반암 층으로 구성되어 있었다. 이러한 층상 구조는 우리나라 도시지역의 지반 특성으로 보여 진다.

지진응답해석에서 가장 중요한 입력 물성치는 지반 깊이에 따른 전단파속도 및 기반암 위치이다. 지반의 전단파 속도는 수행된 지반조사 기법에 많은 영향을 받으므로 신뢰성 있는 지반조사 기법으로 얻어진 전단파속도를 이용하는 것이 중요하다. 그래서 본 연구에서는 국토교통부에서 운영하는 국토지반정보 포털시스템[4]에서 시추공 데이터를 받았다. 158개의 데이터는 SPT-N값을 이용하여 경험적 상관식으로 전단파속도를 추정한 지반이다. SPT-N값을 기준으로 지반의 전단파 속도를 추정할 때 Yamazaki & Umehara(1987)[5]이 제안한 식(1)을 이용하여 산정하였다.

$$V_s = 89.1N^{0.34} \tag{1}$$

여기서,  $V_s$ 는 지반의 전단파 속도(m/s),  $N$ 은 표준관입 시험의 (SPT)N값을 의미한다. SPT-N치를 전단파속도로 변환 시 발생하는 문제점에 대해서는 시설안전공단의

## 2. 국내와 미국 지반조건비교

### 2.1 국내 도시지역의 지반조사

해석대상지반의 지반조사 자료는 서울시 도시지역을 대상으로 국내 일반적인 지반특성을 가지는 풍화토와 풍

Table 1. Average value of bedrock depth,  $V_{s30}$ , site period according in the site class and Western United States

	$S_B$			$S_C$			$S_D$			
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	
Depth(m)	-3.0	-14.5	-8.8	-10	-30	-17.78	-7.5	-30	-16.87	
$V_{s30}$ (m/s)	743.04	933.93	821.72	400.6	759.18	637.83	176.14	327.29	239.89	
Site Period (sec)	This study	0.035	0.171	0.118	0.139	0.551	0.246	0.139	0.479	0.300
	Western United States				0.3	0.8	0.55	0.4	1.9	1.15

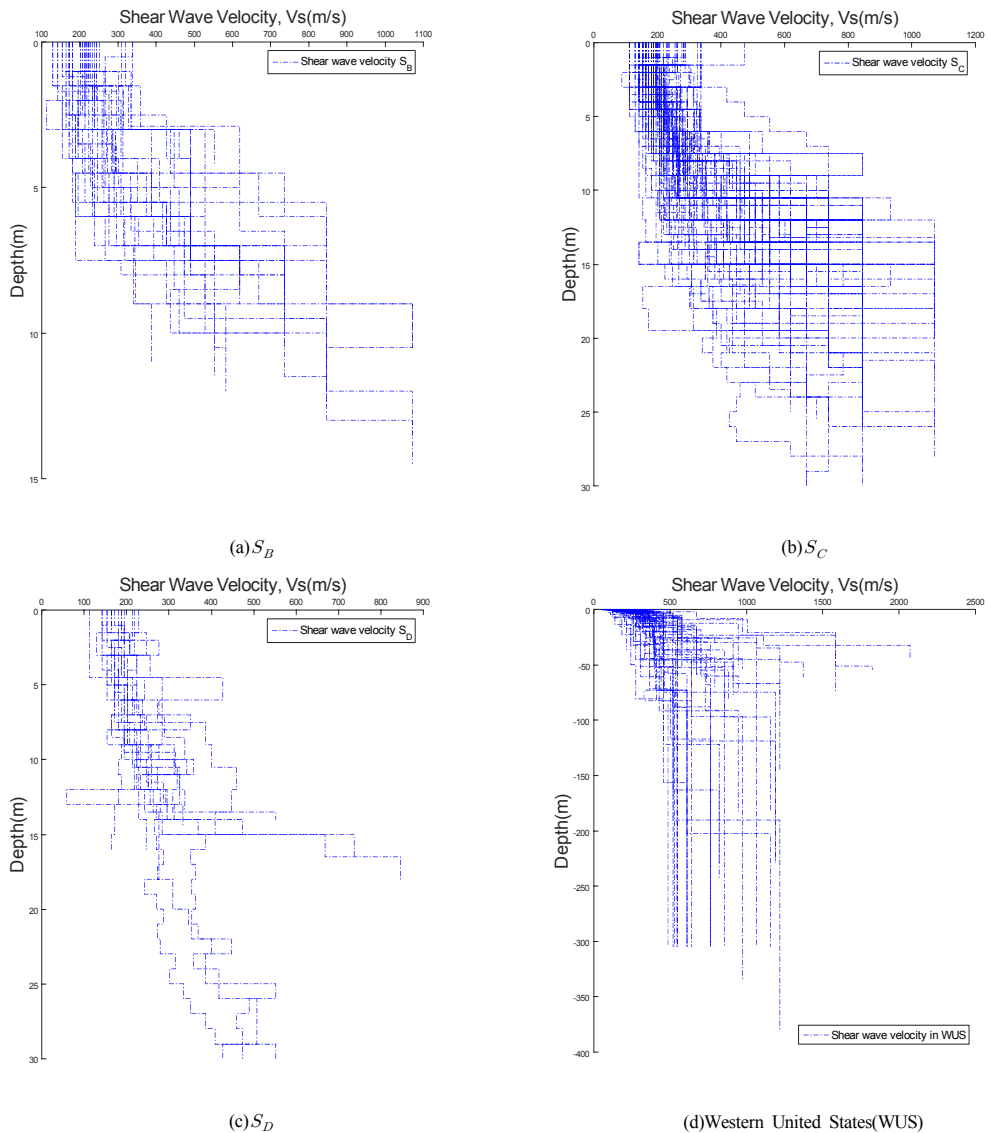


Fig. 1. Shear wave velocity profiles according to the site classification on this study area and Western United States

‘기존 시설물(기초 및 지반) 내진성능 평가요령’[6]을 적용하여 보완하였다. 표준관입시험시 기반암에 도달하여 N치가 50에 도달할 때 N값은 선형적인 비례관계를 토대로 N값을 환산하여 사용하였다. 전단파 속도가 1000m/s에 도달하였을 때 기반암으로 가정하여 해석을 수행하였다.

## 2.2 미국 서부해안지역 도시지역의 지반조사

미국 서부해안지역의 전단파 주상도는 Fig. 1(d)와 같

다. 미국 서부 해안지역의 전단파 속도는 NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation)에서 제공 받았다. Fig. 1(d)는 지반의 분류 없이 통합하여 나타낸 그림이다. 미국 서부해안지역의 전단파 주상도와 우리나라 도시지역의 전단파 주상도를 비교해 보면 우리나라의 도시지역의 경우 기반암의 깊이가 30m안에 있지만 미국 서부지역의 경우 최대 300m이상의 깊이에 기반암이 존재하여 우리나라의 일반적인 지반과는 다른 특징을 보인다.

우리나라의 도시지역 지반과 미국 지반 차이는 ROSRINE 프로젝트에서 조사된 미국 서부지역의 고유주기를 비교해 보면 더 정확히 알 수 있다. Table 1를 보면 대상지역의 고유주기와 ROSRINE 프로젝트에서 조사된 미국 서부지역의 고유주기를 보여준다. 우리나라 대상지역의 지반별 고유주기는 내진설계기준[7]에 제시되어있는 식(2)를 이용하여 계산하였다.

$$T = 4 \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}} \quad (2)$$

여기서, T는 지반의 고유주기(sec),  $d_i$ 는 I번째 토층의 두께(m),  $V_{Si}$ 는 i번째 토층의 전단파 속도(m/sec)이다.

ROSRINE 프로젝트에서 조사된 미국 서부지역의 지반  $S_C$ ,  $S_D$ 의 고유주기를 비교해 보면 우리나라 도시지역의 지반  $S_C$ 의 평균 고유주기는 0.246초이고 지반  $S_D$ 의 경우 0.3초이다. 그러나 미국 서부지역의 지반  $S_C$ 과 지반  $S_D$  평균 고유주기는 0.55초와 1.15초로 우리나라 도시지역의 지반 고유주기보다 크다. 이는 고유주기를 구하는 식(2)에 나타난 바와 같이 지반의 고유주기가 기반암의 깊이에 대한 함수로 나타내기 때문이다.

미국 서부해안지역은 기반암의 깊이가 300m이상에서 존재하기 때문에 지반조사시 기반암까지의 조사가 어렵다. 그래서 지진시 지반운동의 영향을 가장 많이 받는 상부 30m의 지반 물성치를 이용하여 내진설계에 적용하도록 하고 있다. 따라서 기반암이 30m 이내에 존재하는 우리나라의 경우 미국설계기준을 적용하게 되면 지반의 고유주기 영역이 다르고 구조물에 영향을 미치는 주파수 대역이 달라 설계 반영시 과대 또는 과소 설계가 될 수 있다. 따라서 미국 설계기준을 차용해서 사용하고 있는 국내 내진설계기준의 검토 및 개선이 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 국내도시지역의 부지응답해석

본 연구에서는 1차원 부지 응답 해석프로그램인 SHAKE91[8]을 이용하여 서울지역을 대상으로 7개의 입력지진파를 토대로 해석을 수행하였다. 해석은 각 지반별 지반 데이터로부터 지층의 구성과  $V_s$ 분포를 입력

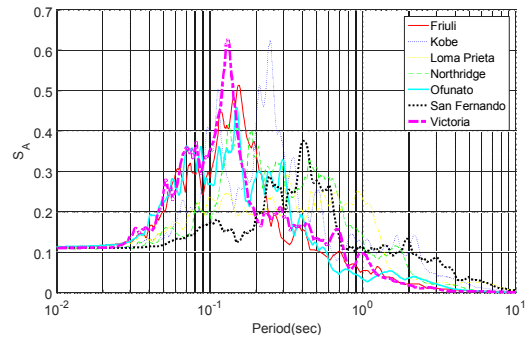


Fig. 2. Response spectra of 7 input motions

정보로 활용하여 500년 재현주기의 국내 지진 재해도를 근거로 0.11g로 스케일 조정하여 입력하였다. Fig. 2는 입력지진들의 암반노두 가속도 응답 스펙트럼으로 0.11g로 스케일 조정하여 도시한 것을 나타낸 것이다.

지진응답해석을 수행하기 위해서는 지반의 동적물성치인 변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선이 필수적으로 필요하다. 동적물성치인 전단탄성계수 감소곡선은 해외문헌자료[9]와 실내실험에서 구한 데이터베이스를 토대로 작성된 전단탄성계수[10]를 이용하였다.

해석대상부지에 대한 1차원 등가 선형 부지응답해석을 수행한 결과 부지별로 지층 구성 및  $V_s$ 분포와 같은 지반 특성에 따라 암반 노두에 대한 지표면 자유장 가속도의 비로 파악할 수 있는 증폭의 정도가 다르게 나타났다.

Fig. 3은  $S_B$ 에 해당하는 37개의 지반, 7개의 지진파에서 얻어진 평균 스펙트럼 가속도, 평균+표준편차와 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. Fig. 4은  $S_C$ 에 해당하는 107개의 지반, 7개의 지진파에서 얻어진 평균 스펙트럼 가속도, 평균+표준편차와 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 비교하였고 Fig. 5은  $S_D$ 에 해당하는 14개의 지반, 7개의 지진파에서 얻어진 평균 스펙트럼 가속도, 평균+표준편차와 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 비교하였다.

미국 내진설계기준을 보면 단주기 증폭계수( $F_u$ )와 장주기 증폭계수( $F_v$ )를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성한다. 여기서 단주기 증폭계수는 0.1초에서 0.5초주기 사이에 해당하는 지표면과 기반암의 스펙트럼 가속도비

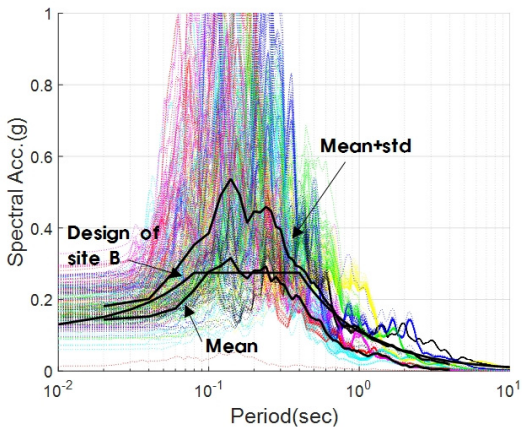


Fig. 3. Response spectra on ground surface and design of site class B

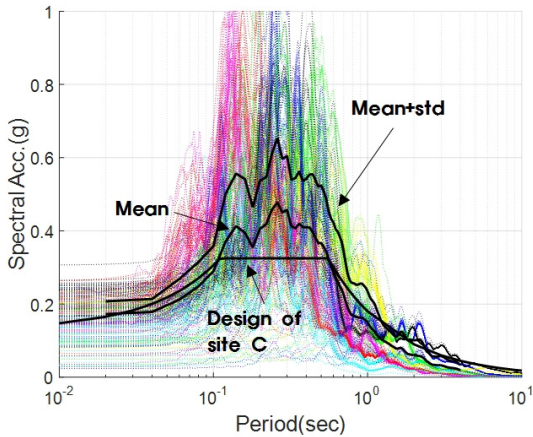


Fig. 4. Response spectra on ground surface and design of site class C

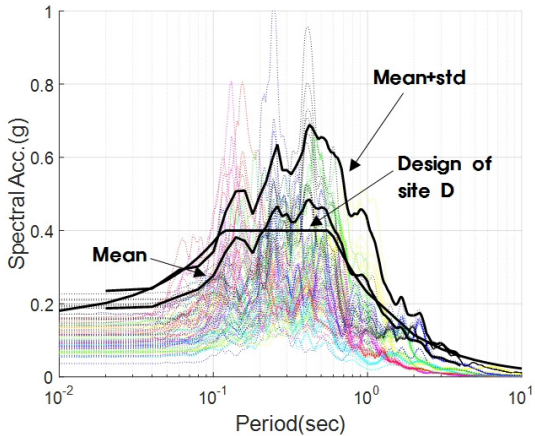


Fig. 5. Response spectra on ground surface and design of site class D

의 평균값이고 장주기 증폭계수는 0.4초에서 2초주기 사이에 해당하는 지표면과 기반암의 스펙트럼 가속도비의 평균값을 의미한다.

지반  $S_B$ 의 경우 단주기에 해당하는 0.1초에서 0.5초 주기 사이에 해당하는 평균 스펙트럼 가속도와 설계응답 스펙트럼과 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 지반  $S_B$ 의 경우 보통암에 해당하는 지반으로 미국 서부 해안지역의 보통암에 해당하는 지반조건과 다르지 않는 것으로 판단된다.

그와 다르게 지반  $S_C$ 와  $S_D$ 의 평균스펙트럼 가속도의 평균값과 설계응답스펙트럼을 비교해 보면 단주기 영역에서 설계응답스펙트럼 보다 크게 증폭이 되는 현상이 나타난다. 지반  $S_C$ 의 경우 약 0.2초 부근을 기준으로 설계 응답스펙트럼 보다 크게 증폭이 되며 지반  $S_D$ 도 약 0.4 초 부근을 기준으로 설계응답스펙트럼 보다 크게 증폭이 되는 현상이 보여진다.

장주기 영역에서는 지반  $S_B, S_C, S_D$ 에서 모두 설계 응답스펙트럼 보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 우리나라의 지반의 경우 기반암이 30m이내에 존재하며 미국의 지반특성과 차이가 있어 설계응답스펙트럼과 많은 차이가 발생한 것으로 보여진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 우리나라 도시지역의 158개 지반에 대한 부지응답해석을 수행하였다. 그리고 국내 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼과 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

우리나라 도시지역의 일반적인 특성을 가지는 지반과 미국 서부해안지역의 지반은 기반암의 깊이와 고유주기가 차이가 있음을 확인하였다. 미국 서부해안지역에 적합하도록 작성된 UBC-1997을 토대로 제정된 내진설계기준의 설계응답스펙트럼 작성 방법은 국내 지반조건에 적합하도록 개설할 필요가 있다고 판단된다.

국내 지반에 대한 지진응답해석 결과 UBC-1997기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼을 결정하기 위한 증폭계수는 국내의 도시지역의 지반특성에 비하여 단주기 영역의 증폭을 과소평가하고 장주기 영역의 증폭을 과대평가하는 것으로 나타났다.

158개의 해석대상부지 중에서 77%정도를 차지하는

지반  $S_c$ ,  $S_D$ 의 결과에서 설계응답스펙트럼과 큰 차이가 발생한다는 것은 국내 내진설계기준에 제시되어있는 증폭계수를 국내 지반특성에 적합하도록 재산정 할 필요성이 있다는 것을 보여준다.

### References

- [1] International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code" California, USA, 1997.
- [2] Dobry, R. Vucetic, M. "State-of-the-Art Report: Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits" *Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, vol. 106, no. GT, pp. 720-724, 1987.
- [3] Yegian, M.K. Ghahraman, V.G. Gazetas, G. "1988 Armenia Earthquake, I: Seismological, Geotechnical, and Structural Overview." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 120, no. 1, pp. 119, 1994.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:1\(119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:1(119))
- [4] Minister of Land, Infrastructure and Transport, Integrated DB Center of National Geotechnical Information: [www.geoinfo.or.kr](http://www.geoinfo.or.kr)
- [5] Zen, K. Yamazaki, H. Umehara, Y. "Experimental study on shear modulus and damping ratio of natural deposits for seismic response analysis", *Report of the Port and Harbour Research Institute*, pp. 26, 41-113, 1987.
- [6] Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, "Seismic Capacity Evaluation of the Structure : Foundation and Ground", 2004.
- [7] Ministry of Construction Transportation, "Study of seismic design standard (II)", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 1997.
- [8] Idriss, I. M. Sun, J. I. "User's Manual for SHAKE91," Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil Engineering, University of California, Davis, 1992.
- [9] Seed, H.B. Idriss, I.M. "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report no. EERC, pp. 70-10, 1970.
- [10] Kim, D. S. Choo, Y. W. "Dynamic Deformation Characteristics of Cohesionless Soils in Korea Using Resonant Column Tests", *Korean Geotechnical Society*, vol. 17 no. 5, pp. 115-128, 2001.

신 대 섭(Dea-Sub Shin)

[정회원]



- 2011년 8월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 석·박 통합과정

<관심분야>

내진 및 지진, 토목구조

김 후 승(Hu-Seung Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 2월 : 동명기술공단 구조부 근무
- 2011년 2월 ~ 2013년 1월 : 유니슨이앤씨 설계부 근무
- 2012년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

내진 및 면진, 토목구조