

내진설계기준의 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼 개선을 위한 연구 - (III) 검증

Site Classification and Design Response Spectra for Seismic Code Provisions - (III) Verification

조형익¹⁾ · Manandhar Satish¹⁾ · 김동수^{1)*}

Cho, Hyung Ik¹⁾ · Manandhar Satish¹⁾ · Kim, Dong Soo^{1)*}

¹⁾KAIST 건설 및 환경공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

/ A B S T R A C T /

In the companion papers (I, II), site-specific response analyses were performed at more than 300 domestic sites and a new site classification system and design response spectra (DRS) were proposed using the results of the site-specific response analyses. In this paper, the proposed site classification system and the design response spectra are compared with those in other seismic codes and verified by different methods. Firstly, the design response spectra are compared with the design response spectra in Eurocode 8, KBC 2016 and MOCT 1997 to estimate quantitative differences and general trends. Secondly, site-specific response analyses are carried out using V_s -profiles obtained using field seismic tests and the results are compared with the proposed DRS in order to reduce the uncertainty in using the SPT-N value in site-specific response analyses in the companion paper (I). In addition, site coefficients from real earthquake records measured in Korean peninsula are used to compare with the proposed site coefficients. Finally, dynamic centrifuge tests are also performed to simulate the representative Korean site conditions, such as shallow depth to bedrock and short-period amplification characteristics. The overall results showed that the proposed site classification system and design response spectra reasonably represented the site amplification characteristic of shallow bedrock condition in Korea.

Key words: Seismic code, Site classification, Design response spectra, V_s -profile, Real earthquake records, Dynamic centrifuge test

1. 서론

동반논문 (I)에서 300개 국내 지반에 대한 대규모 지반응답해석을 실시하여 국내 지반의 증폭특성과 내진설계기준이 불일치함을 규명하였으며, 동반논문(II)에서는 수행된 지반응답해석 결과를 바탕으로 국내 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼을 제안하였다. 본 논문에서는 제안한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼의 비교·검증에 아래와 같은 네 가지 기법을 적용하였다. 첫 번째로 제안한 $H1-1$, $H1-2$, $H2-1$, $H2-2$ 지반의 설계응답스펙트럼(Design Response Spectra, DRS)과 국내·외 내진설계기준에서 유사한 지반조건에 대해 제시된 DRS를 비교하여, 제안된 4개 지반 DRS의 정량적 수준과 경향을 평가하고 그 타당성을 논의

하고자 하였다. 두 번째로 실제 탄성파시험을 통해 획득한 전단파속도 주상도를 활용한 지반응답해석 결과와 제안한 DRS를 비교하였다. 동반논문(I)의 지반응답해석에 적용된 전단파속도 주상도는 표준관입시험 관입저항치(SPT-N치)를 통해 획득한 바 있다. 이러한 입력 자료에 대한 불확실성 해소를 위해 실제 탄성파시험으로 획득한 전단파속도 주상도를 활용하여 지반응답해석을 실시하고, 제안한 지반분류체계 및 DRS와 비교하고자 하였다. 세 번째로 국내에서 계측된 실지진기록을 활용한 검증을 실시하였다. 암반 노두 관측소, 토사지반 관측소에서 각각 계측된 지진파속도 신호로부터 국내 지반의 증폭특성을 평가할 수 있고, 이를 제안한 4가지 지반의 증폭계수로써 비교하고자 하였다. 마지막으로 동적원심모형실험을 활용한 실험적 검증을 통해 국내 지반의 증폭특성을 규명하고 제안한 기준과 비교하였다. 기반암 깊이가 얕고 단주기적 특성을 가진 국내 지반의 대표적 특성을 축소 모형으로 모사하여 동적원심모형실험을 실시하고, 그 증폭특성을 제안한 기준과 비교하였다. 이와 같은 검증을 통해 본 연구에서 제안한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼의 타당성을 논의하였다.

*Corresponding author: Kim, Dong Soo

E-mail: dskim@kaist.ac.kr

(Received February 26, 2016; Revised April 12, 2016; Accepted April 22, 2016)

2. 국내·외 기준과 비교

본 장에서는 제안된 4가지 지반의 설계응답스펙트럼(Design Response Spectra, DRS)과 국내·외 내진설계기준에서 유사한 지반조건에 대해 제시된 설계응답스펙트럼을 비교하고자 하였다. DRS 비교를 통해 본 연구에서 제안된 4가지 지반의 정량적 수준을 살펴보고 그 타당성을 논의하였다. *H1-1*, *H1-2*, *H2-1*, *H2-2*의 각 4개 지반과 국내·외 내진설계기준에서 유사한 지반조건에 대해 제안된 지반을 Table 1에 나타내었다. 동반논문(II)에서 논의한 Eurocode 8[1]과 2016 건축구조기준(안)(Korean Building Code, KBC)[2]에 더해 내진설계기준연구(II)(MOCT 1997)[3]에 제시된 현행 지반분류도 비교 대상으로 하였다. Fig. 1-4에 지반운동수준에 따라 *H1-1* 지반부터 *H2-2* 지반까지의 DRS를 Table 1에 제시된 국내·외 기준의 유사지반 DRS와 비교하였다.

Fig. 1에서 *H1-1* 지반은 Eurocode 8의 *E* 지반(기반암 깊이 20 m 이하)과 KBC 2016에서 기반암 깊이가 20 m 이하인 *S_C* 지반, 내진설계기준의 *S_C* 지반과 비교하였다. 동반논문(II)에서 논의한 지반운동수준에 따른 단주기, 장주기 증폭계수(F_v, F_d) 결정 시 *H1-1* 지반은 KBC 2016의 기반암 깊이가 20 m 이하인 *S_C* 지반과 지반운동수준에 따른 증폭계수가 같았으므로 작성된 DRS 역시 같은 수준인 것을 그림에서 확인할 수 있다. Eurocode 8과는 지반운동수준 0.2 g를 경계로 0.2 g 이하에서는 Type II와 0.2 g 이상에서는 Type I에 대해 제시된 DRS를 비교하였다. 0.2 g 이하에서 Type II의 *E* 지반 DRS와 비교 시 *H1-1* 지반의 DRS는 주기 0.3초 이하 단주기에서 증폭은 보다 낮고, 0.3초 이상 중 장주기 대역에서는 증폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 0.2 g 이상에서 Type I의 DRS와 비교 시에는 단주기 증폭은 유사하고 장주기 증폭은 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 내진설계기준연구(II)의 *S_C* 지반에 비해서는 전 지반운동수준에 걸쳐 단주기에서 증폭 정도가 증가하고, 장주기에서 스펙트럴 가속도가 감소한 것을 확인할 수 있다.

H1-2 지반은 Fig. 2에서 Eurocode 8의 *E* 지반과 KBC 2016에서 기반암 깊이가 20 m 이하인 *S_D* 지반, 내진설계기준연구(II)의 *S_D* 지반과 비교하였다. Eurocode 8과는 앞서 *H1-1* 지반의 DRS 비교 설명과 같이 *E* 지반의

Type I과 Type II의 DRS를 비교하였는데, 0.2 g 이하 지반운동수준에서는 단주기, 장주기 전 영역에서 걸쳐 *H1-2* 지반의 DRS가 *E* 지반의 DRS에 비해 상당히 큰 증폭을 도출하고 있다. 0.2 g 이상에서는 *H1-2* 지반의 장주기 영역 증폭이 *E* 지반보다 줄어들었으나 단주기에서는 상당히 큰 증폭을 도출하고 있다. KBC 2016의 기반암 깊이가 20 m 이하인 *S_D* 지반과의 비교할 경우 F_v 가 지배하는 장주기 영역에서는 동일한 수준의 증폭을 도출하고 있으나, F_d 가 지배하는 단주기 최대 증폭은 *H1-2* 지반의 DRS가 큰 증폭을 산정하고 있다. 내진설계기준연구(II)의 *S_D* 지반과의 비교에서는 역시 지반운동수준에서 *H1-2* 지반의 DRS가 단주기 영역에서 크고, 장주기 영역에서 작은 증폭을 도출하고 있다.

기반암 깊이가 20 m 이상이고 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)가 180 m/s 이상인 *H2-1* 지반은 Eurocode 8의 *C* 지반, KBC 2016에서 기반암 깊이가 20 m 이상인 *S_D* 지반, 내진설계기준연구(II)의 *S_D* 지반과 DRS를 비교하였다(Fig. 3). 비교대상인 세 지반분류는 모두 $V_{s,30}$ 을 분류기준으로 하며 전단파속도 180 ~ 360 m/s를 가지는 지반이다. Eurocode 8의 *C* 지반에 비해 *H2-1* 지반의 DRS는 0.2 g 이상에서 장주기 영역 DRS가 유사한 것을 제외하면 전 지반운동수준에서 상당한 단주기 영역 증폭을 보이고 있다. KBC 2016의 *S_D* 지반과는 장주기에서 유사한 증폭을 보이나, 역시 단주기에서 *H2-1* 지반의 증폭이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 내진설계기준연구(II)의 DRS와 비교 역시 단주기에서 상당히 큰 증폭을 도출하고 있으나, 0.22 g 이상에서 장주기 영역 스펙트럴 가속도는 감소한 것을 확인할 수 있다.

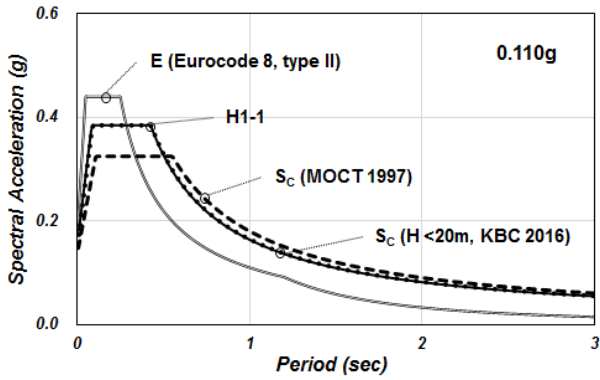
연약한 지반인 *H2-2* 지반의 DRS 비교는 Fig. 4에 나타내었다. *H2-2* 지반의 DRS는 Eurocode 8의 *D* 지반과 비교 시 0.11 g 수준에서 단주기 영역 증폭이 유사하다 지반운동수준이 증가할수록 감소하여 0.22 g 이상에서 Type I과 유사한 수준의 스펙트럴 가속도를 도출하고 있다. KBC 2016과 내진설계기준연구(II)에 제시된 *S_E* 지반은 그 정의가 같으나 서로 다른 증폭계수를 제시하고 있으므로 DRS 역시 스펙트럴 가속도 수준이 다른 것을 확인할 수 있다. 제안된 *H2-2* 지반의 DRS는 KBC 2016과 내진설계기준연구(II)의 *S_E* 지반의 DRS에 비해 전 지반운동수준에서 단주기, 장주기 영역 모두 스펙트럴 가속도가 감소한 것을 확인할 수 있다.

국내·외 기준의 유사 지반과의 DRS비교를 통해 지반운동수준에 따라

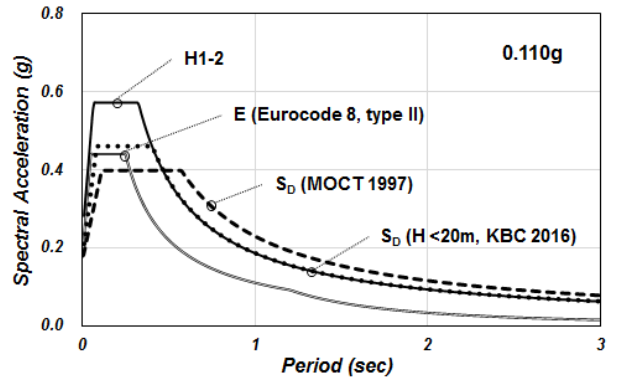
Table 1. Proposed site classes with equivalent site classes from other codes

Site class	Code	Equivalent site class	Parameters for classification
<i>H1-1</i> ($H \leq 20$ m, $V_{s,soil} \geq 260$ m/s)	Eurocode 8	<i>E</i>	$V_{s,soil} < 360$ m/s, 5 m < $H < 20$ m
	KBC 2016	<i>S_C</i>	360 m/s < $V_{s,soil} < 760$ m/s, 5 m < $H < 20$ m
	MOCT 1997	<i>S_C</i>	360 m/s < $V_{s,30} < 760$ m/s
<i>H1-2</i> ($H \leq 20$ m, $V_{s,soil} < 260$ m/s)	Eurocode 8	<i>E</i>	$V_{s,soil} < 360$ m/s, 5 m < $H < 20$ m
	KBC 2016	<i>S_D</i>	180 m/s < $V_{s,soil} < 360$ m/s, 5 m < $H < 20$ m
	MOCT 1997	<i>S_D</i>	180 m/s < $V_{s,30} < 360$ m/s
<i>H2-1</i> ($H > 20$ m, $V_{s,soil} \geq 180$ m/s)	Eurocode 8	<i>C</i>	180 m/s < $V_{s,30} < 360$ m/s
	KBC 2016	<i>S_D</i>	180 m/s < $V_{s,soil}$ or $V_{s,30}^* < 360$ m/s, $H > 20$ m
	MOCT 1997	<i>S_D</i>	180 m/s < $V_{s,30} < 360$ m/s
<i>H2-2</i> ($H > 20$ m, $V_{s,soil} < 180$ m/s)	Eurocode 8	<i>D</i>	$V_{s,30} < 180$ m/s
	KBC 2016	<i>S_E</i>	$V_{s,soil}$ or $V_{s,30} < 180$ m/s
	MOCT 1997	<i>S_E</i>	$V_{s,30} < 180$ m/s

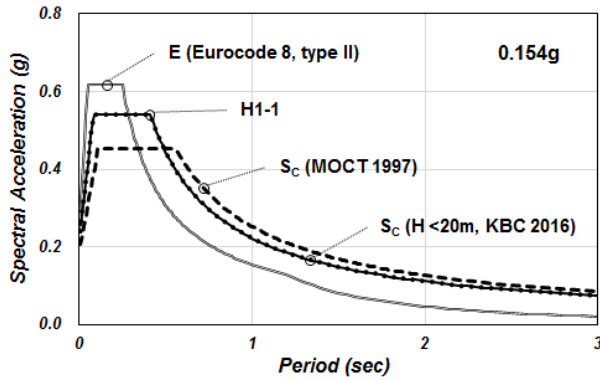
* $V_{s,soil}$ for 5 ~ 30 m of depth to bedrock, and $V_{s,30}$ for less than 5 m and greater than 30 m of depth to bedrock



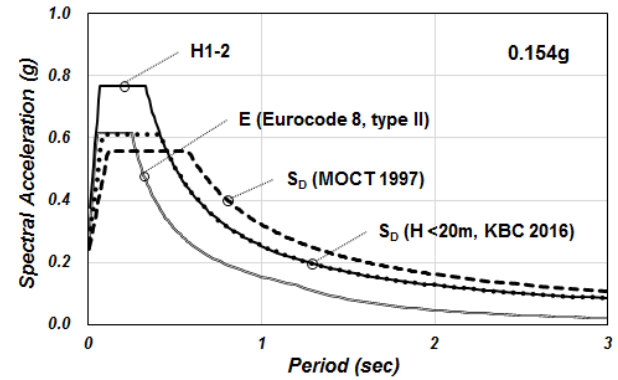
(a) 0.110 g



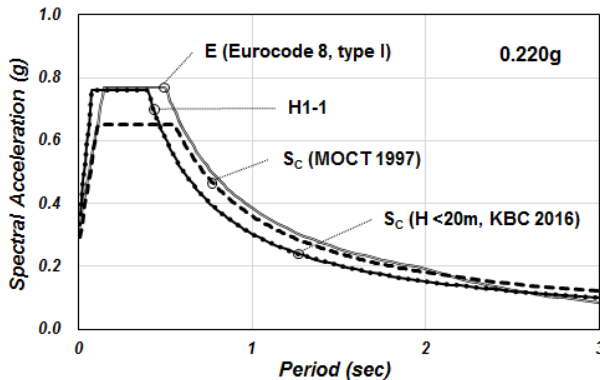
(a) 0.110 g



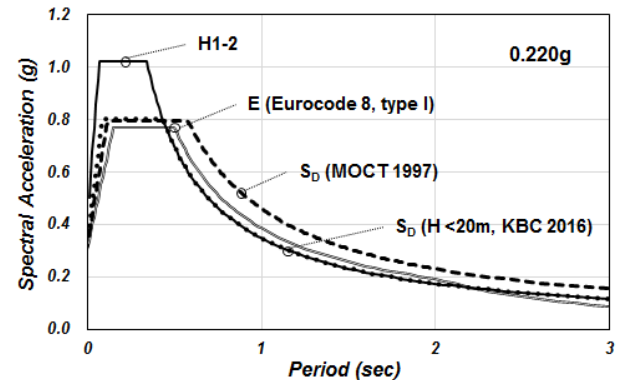
(b) 0.154 g



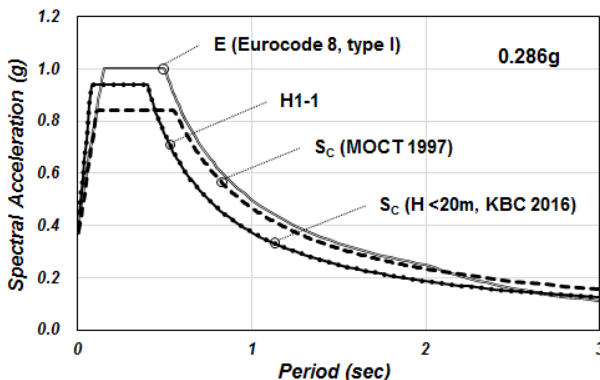
(b) 0.154 g



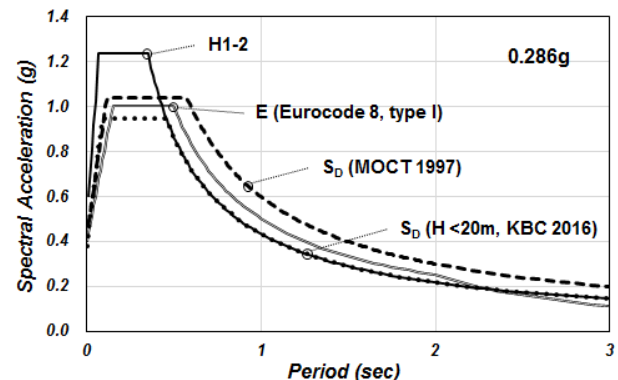
(c) 0.220 g



(c) 0.220 g



(d) 0.286 g



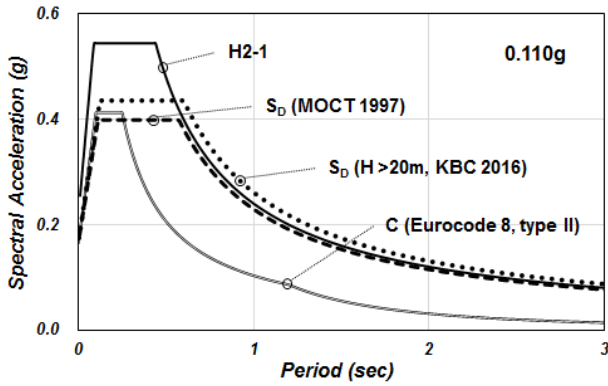
(d) 0.286 g

Fig. 1. Comparison with DRS of each seismic code (H1-1 site)

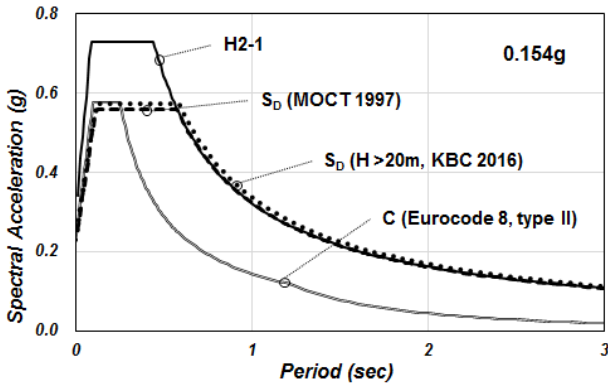
Fig. 2. Comparison with DRS of each seismic code (H1-2 site)

제안된 H1-1, H1-2, H2-1, H2-2 지반 설계응답스펙트럼의 정량적 수준을 살펴보았다. Eurocode 8, KBC 2016, 내진설계기준연구(II)에 제시된 유

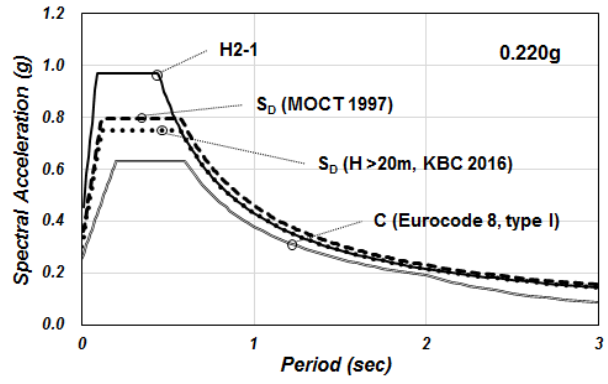
사 지반과의 비교 결과, 제안된 설계응답스펙트럼은 지반응답해석 결과를 반영하여 내진설계기준연구(II)보다 단주기 영역 증폭이 크게 고려되었으



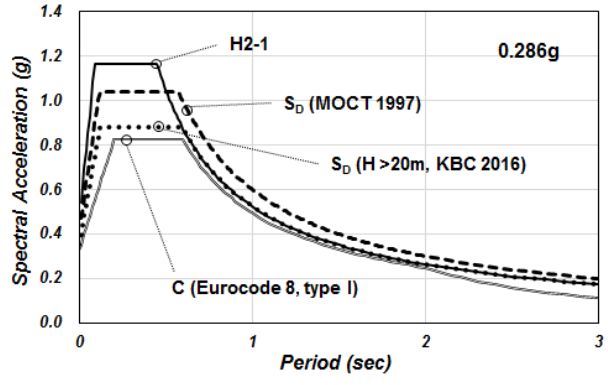
(a) 0.110 g



(b) 0.154 g

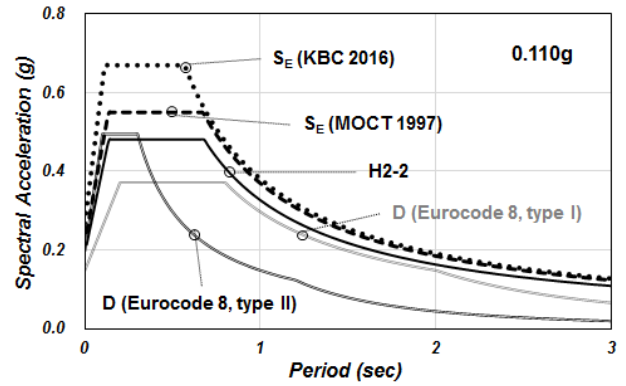


(c) 0.220 g

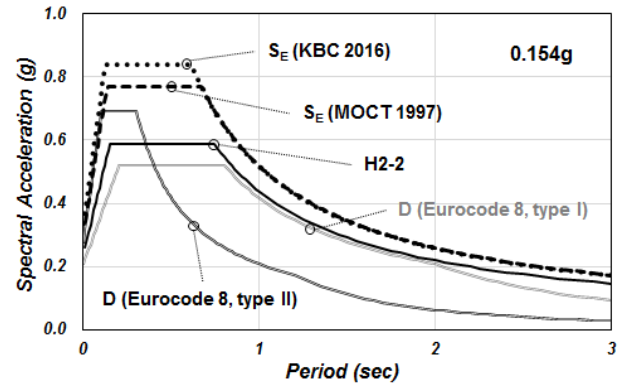


(d) 0.286 g

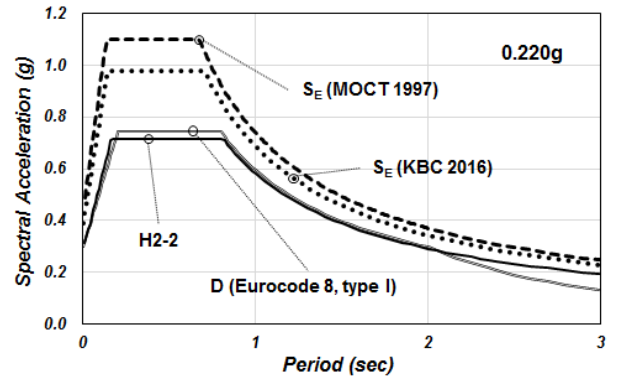
Fig. 3. Comparison with DRS of each seismic code (H2-1 site)



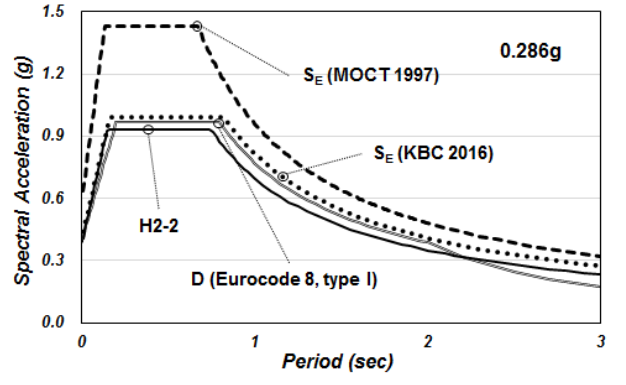
(a) 0.110 g



(b) 0.154 g



(c) 0.220 g



(d) 0.286 g

Fig. 4. Comparison with DRS of each seismic code (H2-2 site)

며 장주기 영역 증폭은 감소하였다. 이러한 경향은 Eurocode 8, KBC 2016에 제시된 유사 지반의 설계응답스펙트럼과 정량적 크기는 다르나 동일한

경향으로 판단할 수 있다.

3. 탄성파시험 결과를 활용한 지반응답해석과 비교

동반논문(I)에서 대규모 국내 지반의 지반응답해석 수행을 위해 확보한 국내 300개 지반의 전단파속도 주상도(V_s -profile)는 표준관입시험 관입 저항치(SPT-N치)와 전단파속도 간의 경험적 상관관계식을 통해 획득된 바 있다. 실제 탄성파시험(Field Seismic Test) 결과로 획득한 전단파속도 주상도의 개수 부족, 탄성파시험 결과로 획득한 전단파속도 주상도와 경험적 상관관계식을 통해 획득한 전단파속도 주상도를 혼용할 경우에 대한 자료의 신뢰성, 획득의 일관성 문제를 고려하여 전체 300개 지반에 대한 전단파속도 주상도를 SPT-N치로부터 획득한 바 있다. 동반논문(I)에서 밝힌 바와 같이 SPT-N치와 경험적 상관관계식을 활용한 전단파속도 주상도는 획득된 전단파속도 주상도 자체가 탄성파시험을 통해 획득되지 않았다는 점에서 신뢰성에 의문이 있을 수 있다. 이에 대한 검증의 일환으로 본 장에서는 동반논문(II)에서 제안된 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼과 실제 탄성파시험을 통해 획득한 전단파속도 주상도를 활용한 지반응답해석을 결과를 비교하고자 하였다.

김동수 등[4]은 실제 탄성파시험을 통해 획득한 125개 지반의 전단파속도 주상도를 활용하여 지반응답해석을 수행하고, 그 결과를 토대로 국내 지반 특성에 적합한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 김동수 등[4]의 연구에 활용된 125개 지반의 전단파속도 주상도를 활용하고자 하였다. 125개 지반 중 본 연구에서 제안한 지반분류체계

에서 기반암으로 분류되는 5개 지반을 제외한 120개 지반을 확보하였다. Fig. 5에 확보한 120개 지반의 지반종류 별 분포특성을 나타내었다. 내진설계기준연구(II)의 지반분류법으로 분류할 경우 120개 지반은 S_B, S_C, S_D, S_E 지반에 대해 각각 11, 57, 37, 15개씩 분류되며, 제안된 지반분류체계에서는 $H1-1, H1-2, H2-1, H2-2$ 지반에 대해 각각 53개, 15개, 42개, 10개씩 분류됨을 확인할 수 있다. 동반논문(I)의 지반응답해석에 활용된 300개 지반의 기반암의 전단파속도는 760 m/s를 적용한 바 있다. 그러나 추가 검증을 위해 확보한 120개 지반의 전단파속도 주상도는 실제 탄성파시험을 통

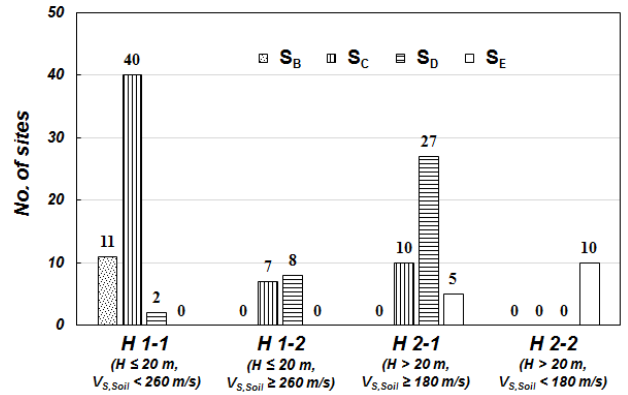


Fig. 5. Site distribution of 120 sites

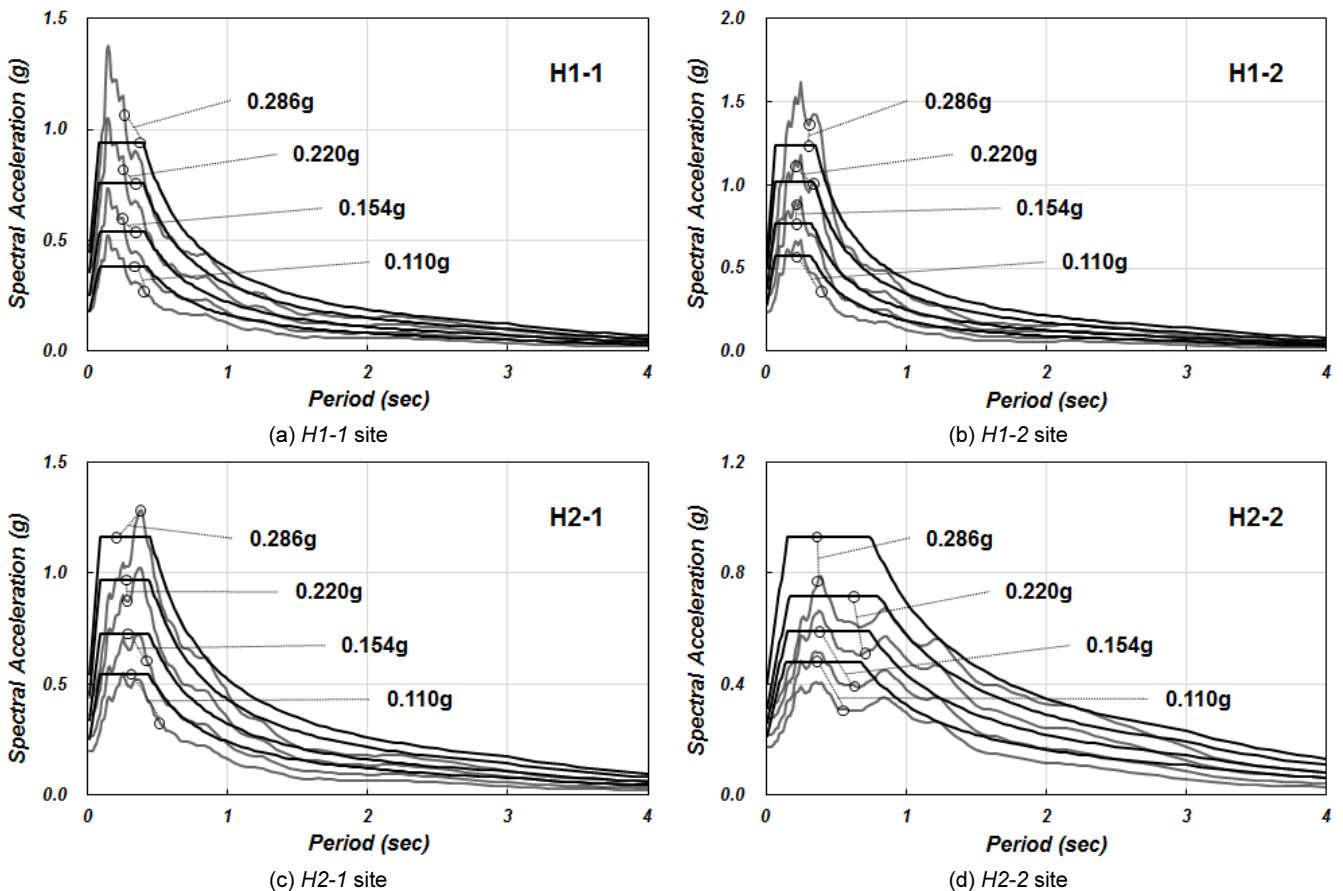


Fig. 6. Comparison of DRS and average response spectra

Table 2. Comparison of short-period site coefficients

Site class	Short-period site coefficient, F_a											
	0.110 g			0.154 g			0.220 g			0.286 g		
	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%
H1-1	1.40	1.48	106	1.40	1.50	107	1.38	1.54	112	1.31	1.56	119
H1-2	2.08	2.02	97	1.99	2.06	104	1.86	1.94	104	1.73	2.09	121
H2-1	1.98	1.96	99	1.89	1.89	100	1.76	1.81	103	1.63	1.72	106
H2-2	1.75	1.53	87	1.53	1.36	89	1.30	1.18	91	1.30	1.05	81

Table 3. Comparison of long-period site coefficients

Site class	Long-period site coefficient, F_v											
	0.110 g			0.154 g			0.220 g			0.286 g		
	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%	Original	Reevaluated	%
H1-1	1.49	1.06	71	1.45	1.06	73	1.38	1.08	78	1.31	1.09	83
H1-2	1.69	1.15	68	1.65	1.17	71	1.58	1.18	75	1.51	1.25	83
H2-1	2.18	1.45	67	2.10	1.47	70	1.96	1.51	77	1.83	1.54	84
H2-2	2.97	2.31	78	2.84	2.17	76	2.64	2.00	76	2.44	1.86	76

해 획득하였기 때문에 각기 다른 기반암 전단파속도를 가지며 최대 2,090 m/s의 기반암 전단파속도를 가지는 지반도 존재하였고, 이를 지반응답해석에 적용하였다.

동반논문(I)에서 논의된 지반응답해석과 동일한 절차를 적용하여 지반응답해석을 수행하였다. SHAKE 91 프로그램을 이용하여 확보한 120개 지반에 대해 8개의 입력지진파, 4개의 지반운동수준(0.110 g , 0.154 g , 0.220 g , 0.286 g)을 고려한 3,840회의 추가 지반응답해석을 실시하였다. Fig. 6에는 추가 실시한 지반응답해석의 결과를 본 연구에서 제안된 4가지 지반의 지반운동수준 별 DRS와 비교하였다. 앞 장의 ‘국내 외 기준과 비교’에서 논의한 바와 같이 제안된 DRS가 국내 지반의 증폭특성을 고려하여 상당히 큰 단주기 증폭을 반영하였음에도 불구하고, H1-1, H2-1 지반에서 실제 탄성파 시험 결과를 토대로 한 추가 지반응답해석 결과가 단주기 영역에서 제안된 DRS를 초과하는 스펙트럴 가속도를 도출하였다. 스펙트럴 가속도의 DRS 초과 정도를 정량적으로 나타내기 위해 Table 2, 3과 같이 추가 지반응답해석을 통해 도출된 F_a , F_v 와 본 연구를 통해 제안된 F_a , F_v 를 지반운동수준에 따라 비교하고 그 차이를 백분율로 나타내었다. F_a 를 비교한 Table 2에서 추가 지반응답해석을 통해 도출된 F_a 는 Fig. 6의 경향과 같이 H1-1, H1-2 지반에서 제안된 F_a 를 상회하는 것을 확인할 수 있다. H1-1 지반은 전 지반운동수준에서 106 ~ 119% 수준의 F_a 를 도출하고 있고, H1-2 지반은 최대 121% 수준으로 제안된 F_a 를 상회하는 것으로 분석되었다. H2-1 지반의 경우 0.22 g 이상 지반운동수준에서 제안된 F_a 를 초과하고 있으나 그 수준은 미미한 것으로 판단된다. F_v 의 경우 Table 3에 비교한 것과 같이 추가 지반응답해석을 통해 도출된 값이 제안된 값을 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다.

H1-1, H1-2 지반의 단주기 증폭을 제외하면 실제 탄성파 시험을 통해 획득한 전단파속도 주상도를 활용한 지반응답해석 결과가 본 연구에서 제안한 지반종류 별 DRS에 포함됨을 확인하였다. H1-1, H1-2 지반의 단주기 증폭의 경우, 추가 지반응답해석 시 적용한 기반암 전단파속도와 SPT-N

치를 활용한 기존 지반응답해석 시 적용한 기반암 전단파속도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 상기한 것과 같이 기존 지반응답해석에는 760 m/s의 기반암 전단파속도가 일률적으로 적용되었으나, 추가 지반응답해석에는 실제 탄성파시험에서 획득한 기반암 전단파속도가 적용되었다. 추가 지반응답해석에서 적용된 H1-1, H1-2 지반의 평균 기반암 전단파속도는 각각 1,092 m/s, 894 m/s로 기존 해석에 활용된 760 m/s를 최대 332 m/s 초과하였다. Manandhar et al.[5]은 국내 S_c , S_D 지반을 대표하는 지반을 설정하고 매개변수연구를 통해 기반암 강성이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 연구하였다. 해당 연구에서 기반암 강성이 760 m/s에서 2,500 m/s까지 증가할 때 국내 S_c , S_D 지반의 스펙트럴 가속도는 각각 80%, 60% 증가한다고 보고한 바 있다. 이는 기반암과 토사지반의 강성 차(impedance ratio) 증대에 따른 것으로, S_c , S_D 지반과 H1-1, H1-2 지반을 동일한 지반분류로 간주할 수 없으나, 해당 연구결과를 본 연구에 선형적으로 적용할 시 760 m/s에서 1,092 m/s로 기반암 강성이 증대되었을 때 15%의 스펙트럴 가속도가 증대될 것으로 기대할 수 있고, 이는 추가 지반응답해석 결과와 유사하다.

내진설계기준의 적용 및 지반응답해석 시 기반암(Reference Site)에 대한 정의를 살펴보면 NEHRP 2009[6]에서는 Campbell and Bozorgnia [7]에 의해 제시된 지반운동 모델링기법(Ground Motion Prediction Equations, GMPEs) 활용을 권장하였는데, 해당 모델링에서는 760 m/s의 기반암 전단파속도(Site Class BC Boundary)를 적용하여 관계식을 도출한 바 있다. 현재 실무에서는 $V_{s,30}$ 이 760 ~ 1500 m/s인 S_B 지반을 기반암으로 간주하여 설계에 활용하고 있으나 상기한 것과 같이 넓은 범위의 기반암 강성은 토사지반과 기반암 강성 차 증대를 야기하여 스펙트럴 가속도의 증대를 도출한다. 이를 정량화하기 위해서는 760 m/s를 기준으로 설계응답스펙트럼을 작성하고 그 이상의 기반암 강성이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 분석하여 기준에 포함할 필요가 있다.

4. 국내 실지진 기록을 활용한 검증

이세현 등[8]은 2004년부터 2008년까지 국내에서 계측된 실지진 기록을 활용하여 김동수 등[4]이 제안한 지반분류법과 지반 증폭계수를 검증한 바 있다. 이세현 등[8]이 수행한 실지진 기록을 활용한 검증은 두 가지 방법으로 나뉘는데 첫 번째 방법은 다음과 같다. 전국에 설치된 실시간 통합 지진관측망(Korea Integrated Seismic System, KISS)에 속한 각 연구기관(기상청, 한국지질자원연구원, 한국전력연구원, 한국원자력안전기술원) 지진 관측소에서 계측된 지진기록을 활용하는 것이다. 각 지진관측소를 암반노두 관측소, 토사지반 관측소로 분류하고[8,9], 관측소 설치위치의 위·경도 정보를 바탕으로 암반노두 관측소와 토사지반 관측소의 거리를 계산한다. 이후 30km 이내에 암반노두 관측소와 토사지반 관측소가 존재할 경우 두 관측소에서 동일한 지진에 대해 계측된 실지진 기록을 활용하여 국내 지반의 증폭특성을 평가한다. 두 번째는 한국전력연구원(KEPRI) 765 kV 변전소(신안성, 신가평, 신서산, 신태백)에 설치된 지진계측시스템을 활용하는 방법이다. Fig. 7과 같이 765 kV 변전소는 고도가 높은 산 중턱 일부를 절토 후 부지 정지를 위해 실시한 성토지반에 설치되어 있다. 여기에 지진계측시스템은 성토지반 상부 변전소 기초에 설치된 가속도 계측기와 인근 수

백 m 거리의 노출된 암반노두에 설치된 가속도 계측기로 구성되어 있다. 성토지반 상부 구조물 기초에서 계측된 가속도 기록과 암반노두에서 계측된 가속도 기록을 이용하여 성토 지반에 의한 지반 증폭특성을 평가할 수 있다. 언급한 두 방법은 암반노두에서 계측된 가속도 기록은 토사지반에 의한 증폭 효과가 배제되기 때문에 암반노두 및 토사지반에서 기록된 실지진 자료를 분석함으로써 지반의 증폭특성을 분석할 수 있다는 가정에서 출발한 것이다.

본 연구에서는 이세현 등[8]이 두 가지 검증법을 통해 도출한 결과에 더해 2008년부터 2013년까지 국내에서 발생한 규모 3.9 이상 지진에 대한 계측기록을 추가하여 검증에 활용하고자 하였다. Table 4에 이세현 등[8]의 연구에 활용된 지진의 목록과 본 연구에서 추가적으로 수집·분석한 지진의 목록을 함께 나타내었다. 표에는 지진발생일시와 지진원 위치, 지진규모와 각 지진에 대한 실시간 통합 지진관측망(KISS), 한국전력연구원 765 kV 변전소 지진계측시스템에서의 자료획득여부를 표기하였다. 또한 앞서 언급한 전국에 분포한 KISS 지진관측망 중 각 지진을 계측한 30 km 이내의 암반노두, 토사지반 관측소 쌍(pair)의 개수를 나타내었는데, 각 지진 관측소는 동·서 방향(EW), 남·북 방향(NS) 가속도 신호를 계측하기 때문에 30km 이내의 암반노두·토사지반 관측소 쌍의 2배수에 해당하는 지진기록을 확보하였다. 각 지진에 대해 계측된 시간영역 가속도 신호로부터 암반노두 및 토사지반에서의 응답스펙트럼을 도출하고, 동반논문(II)에 제시된 방법에 따라 F_w, F_v 를 산정하였다. F_v 산정에는 0.4 ~ 1.5초의 RRS (ratio of response spectra) 적분구간을 적용하였다.

이세현 등[8]은 위와 같은 분석이 이루어진 지진계측 자료들 중 암반노두 및 토사지반 관측소 사이의 거리가 최대 30 km로 비교적 멀고, 기상청 관측소 부지의 경우 암반노두, 토사지반 계측 구분이 모호함으로 상식에 어긋난 결과를 도출한 자료도 일부 존재함을 밝힌 바 있다. 더불어 분석에 활용된 국내 발생 지진의 규모가 크지 않아 RRS 및 증폭계수 산정 시 민감도가 증가하게 되어 증폭계수가 4 이상으로 커지는 자료들도 상당수 존재하였는데 이는 분석에서 제외하였다. 이에 KISS 지진가속도 자료 중 최종적으로 분석에 활용된 자료의 개수를 Table 4에 나타내었다. 765 kV 변전소 부지 지진계측자료는 전체 기록을 모두 활용하였다. Fig. 8에는 실지진 기록을 활용하여 도출된 F_w, F_v 를 내진설계기준연구(II)(MOCT 1997)에 제시된 증폭계수(지진구역 I, II)와 본 연구를 통해 제안된 지반운동수준 별 증

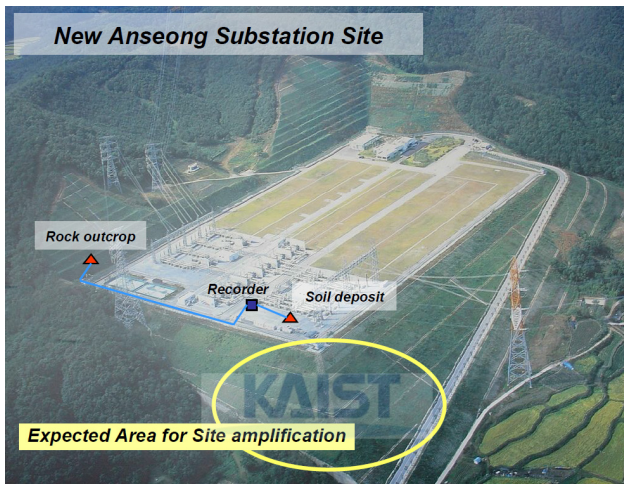


Fig. 7. Earthquake monitoring system at NAS substation site [10]

Table 4. Earthquakes used for verification

Date	EQ event	Location	Magnitude	Data source	Total pairs*	Refined pairs
2004/05/29	Uljin EQ	Sea	5.2	KISS	46	37
2005/03/20	Fukuoka EQ	Sea	7.0	KISS	48	41
2007/01/20	Odaesan EQ	Inland	4.8	KISS / KEPRI 765 kV stations	60	49
2008/05/31	JeJu EQ	Sea	4.2	KISS / KEPRI 765 kV stations	8	3
2008/10/29	Gongju EQ	Inland	3.4	KEPRI 765 kV stations	-	-
2009/05/02	Andong EQ	Inland	4.0	KISS / KEPRI 765 kV stations	108	68
2011/06/17	Baekryeongdo EQ	Sea	4.0	KISS / KEPRI 765 kV stations	54	41
2012/05/11	Muju EQ	Inland	3.9	KISS	146	91
2013/04/21	Heuksando EQ	Sea	4.9	KISS	164	105
2013/05/18	Baekryeongdo EQ	Sea	3.9	KISS / KEPRI 765 kV stations	122	83

* Pairs of stations within 30 km installed on rock outcrop and soil deposit in KISS

폭계수와 함께 도시하였다. 그림에서 가로축은 F_a , 세로축은 F_v 를 나타내고, KISS 지진자료를 활용하여 도출된 증폭계수는 2008년 전, 후를 구분하여 나타내었다.

KISS 지진관측망의 암반노두, 토사지반 관측소 간의 거리는 765 kV 변전소 부지 내의 관측소 간 거리에 비해 상대적으로 멀기 때문에 도출된 증폭계수의 신뢰성은 765 kV 변전소 부지 결과에 비해 낮은 것이 사실이다. 여기에 KISS 지진계측기록으로 도출된 증폭계수는 데이터의 수도 많아 산란 정도가 크므로 그림과 같이 회귀분석을 통해 그 추세를 가늠할 수 있도록 하였다. 추세선과 본 연구에서 제안된 증폭계수를 비교해보면, H1-1, H1-2 지반의 증폭계수는 추세선 상부에 추세선의 흐름과 유사하게 지반운동수준에 따라 도시되어 있다. 이는 제안된 증폭계수가 국내 지반의 증폭특성을 반영함에 더불어 다소간의 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 이에 반해 H2 지반에 대해 제안된 증폭계수는 추세선의 흐름과 1대1 선을 초과하여 장주기 증폭특성을 대변하고 있다. 토사지반에 설치된 지진관측소라 하더라도 국내 지반의 얇은 기반암 분포특성과 연약지반에 지진관측소가 설치되지 않는다는 점을 고려하면, 도출된 증폭계수는 기반암 깊이가 20 m 이내인 지반에 설치된 관측소 기록으로부터 획득된 것으로 추측할 수 있다.

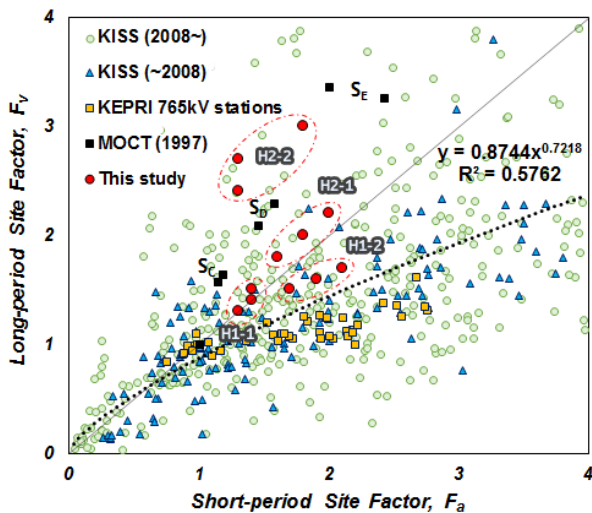


Fig. 8. Comparison of site coefficients from real earthquake records with coefficients in MOCT(1997) and proposed in this study

한국전력연구원 765 kV 변전소 부지 지진계측 기록을 활용한 증폭계수는 암반노두 계측과 토사지반 계측 사이의 거리가 수백 m 이내로 가깝기 때문에 보다 신뢰성 있는 결과가 도출되었다. 증폭계수의 산란정도가 크지 않고 단주기 증폭특성의 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안된 증폭계수와 비교 시에도 앞서 추세선 비교와 마찬가지로 유사한 증폭계수의 흐름과 안전율을 감안한 정량적 차이를 보이고 있다. 이에 반해 내진설계기준연구(II)에 제시된 증폭계수는 장주기 증폭특성을 대변하고 있는데 이는 국내 지반의 증폭특성에 적합하지 않음을 다시금 확인할 수 있다.

5. 동적원심모형실험을 활용한 검증

국내는 한국지질자원연구원에서 2002년 표준화된 실시간 통합 지진관측망(KISS)을 구축하면서부터 국내 발생 지진자료에 대한 공유가 가능해져 관련 연구가 활발히 이루어져 왔다[8]. 그러나 국내는 지진 중 약진 지역으로 2002년 이후 발생한 최대 지진은 Table 4에 나타낸 2004년 울진 앞바다 지진이며 규모는 5.2에 불과하였다. 더욱이 내륙에서 발생한 지진으로 범위를 좁히면 2007년 발생한 규모 4.8의 오대산 지진이 최대 규모의 지진이었다. 현재까지 국내에서 계측된 지진기록을 활용한 부지 증폭 연구는 지진 규모의 한계, 지진 관측소 하부 지반의 불확실성 등으로 그 한계가 있다. 이에 본 장에서는 축소모형으로 모사한 국내 대표 지반에 대한 동적원심모형실험(Dynamic Centrifuge Test)을 수행하여 국내 지반의 증폭특성을 실험적으로 규명하고, 그 결과를 제안한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼과 비교하고자 하였다.

동적원심모형실험은 KAIST에 구축된 KOCED 지오센트리피지실험센터[11]에서 수행하였다. 동적원심모형실험은 축소모형을 모형토조에 조성 후 모형토조를 원심모형시험기(Centrifuge)에 설치된 진동대(Shaking Table)에 탑재시켜, 고속 회전 중 진동대를 통한 지진 모사를 통해 실시된다(Fig. 9). 실험에 사용된 모형토조는 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 박스를 이용하였는데, ESB 박스는 진동대를 활용한 지진 모사 시 모형지반의 동적 거동과 유사한 거동을 보이도록 제작된 모형토조이다[12]. 진동대는 전기제어-유압방식(Electro Hydraulic Servo Type)의 진동대로 회전 반경 5.0 m, 최대 240 g-ton 용량의 원심모형시험기에 설치

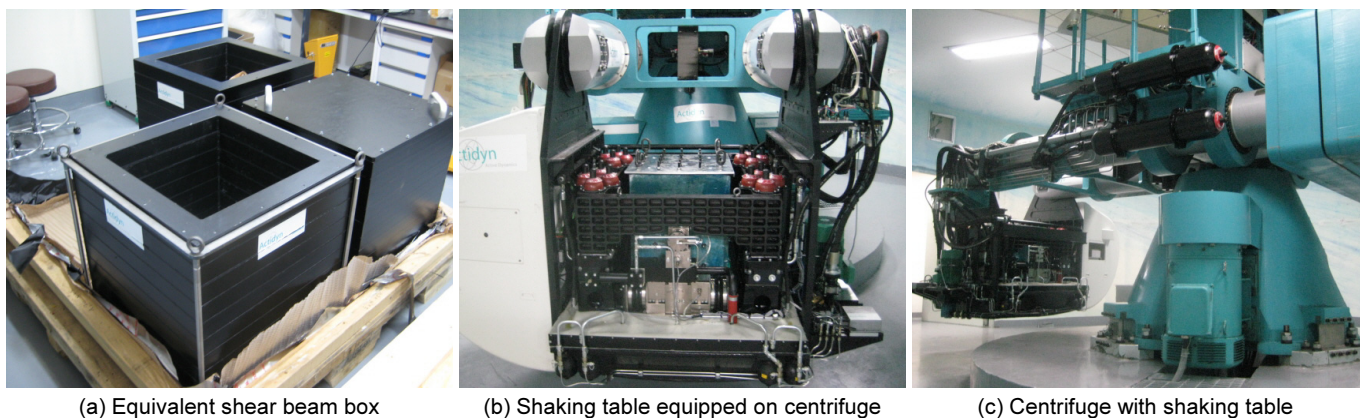


Fig. 9. Dynamic centrifuge testing facilities

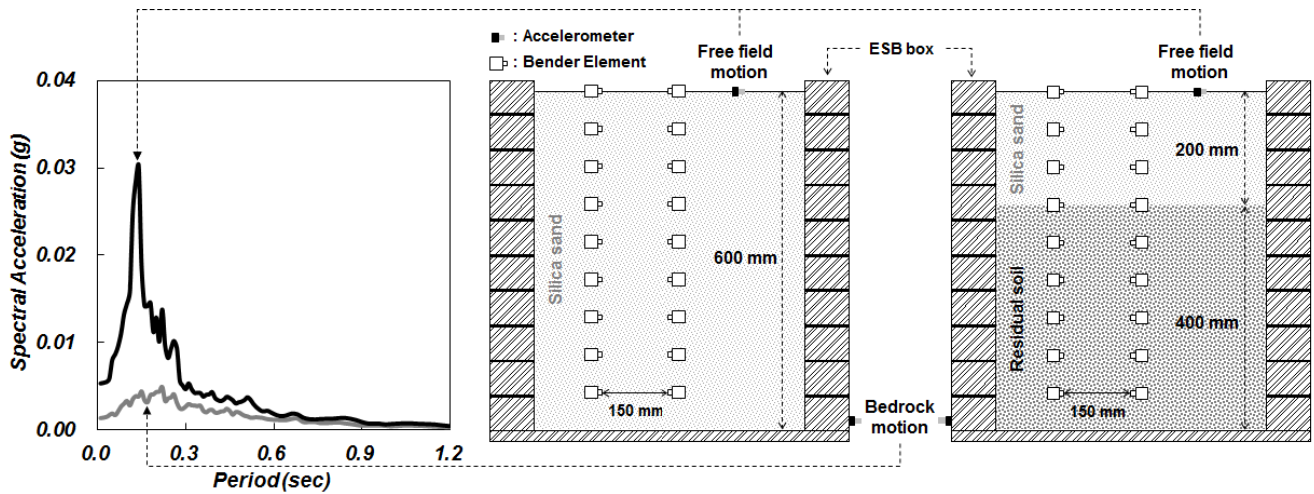


Fig. 10. Evaluation of seismic response of model ground in dynamic centrifuge test and testing plan

Table 5. General information of dynamic centrifuge tests

#	Entitled	Model thickness (cm)	Relative density (%)	Target G-level (g)	Simulated(prototype) site conditions					
					Height (m)	$V_{S,Soil}$ (m/s)	$V_{S,30}$ (m/s)	Site class		
								MOCT 1997	Proposed	
1-1	Uniform sand models	60	81	20	12	194	423	S_C	H1-2	
				40	24	234	284	S_D	H2-1	
1-2	44		20	12	157	352	S_D	H1-2		
			40	24	204	249	S_D	H2-1		
2-1	Layered soil models		-	-	20	12	149	335	S_D	H1-2
					40	24	183	224	S_D	H2-1
2-2	Layered soil models	20		12	190	415	S_C	H1-2		
		40		24	222	270	S_D	H2-1		

되어 원심모형시험 중 지진운동의 모사가 가능하다. 동적원심모형시험을 통한 부지증폭특성 규명은 Fig. 10과 같이 수행된다. 실험대상 지반의 축소 모형을 ESB 박스에 조성하고 실험 중 지진가속도 신호 계측을 위한 가속도 센서, 모형지반의 전단파속도 획득을 위한 벤티 엘리먼트 등을 설치한다. 이후 원심모형시험에서 진동대를 통해 모사하고자 하는 지진동을 모형토 조에 가진하게 되고, 모형토조 하부에 전달된 신호 및 지반에서 증폭되는 신호를 가속도 센서에서 획득하게 된다. 획득된 가속도 신호를 활용하여 실험 지반의 증폭특성을 평가할 수 있다.

실험으로 기반암 깊이가 얕고 단주기적 특성을 가진 국내 지반의 대표적 지반조건을 모사하고자 하였다. Fig. 10에 2개의 모형지반 단면을 나타내었는데 첫 번째 단면은 규사(Silica Sand) 단일층, 두 번째 단면은 층상구조(Layered Soil)를 모사하는 단면이다. 두 단면에서 모형지반의 높이는 60 cm로 상사비(Scaling Law)에 의해 20 g, 40 g 원심가속도 수준에서 12 m 와 24 m의 기반암 깊이를 가지는 지반을 각각 모사하게 된다(Table 5). 규사 단일층에 대한 실험은 모형지반의 상대밀도를 조절하여 2회 실시하였고, 층상구조에 대한 실험은 하부지반 조성에 사용된 풍화토(Residual Soil)의 강성을 변화시키며 2회 실시하였다. 규사의 상대밀도 조절과 풍화토 강성 조절로 인해 변화된 모형지반의 강성은 원심모형시험 중 벤티 엘리먼트 실험(Bender Element test)을 통한 전단파속도 측정으로 획득하였고

이를 Table 5에 $V_{S,Soil}$ 과 $V_{S,30}$ 으로 나타내었다. $V_{S,30}$ 결정을 위한 기반암 전단파속도는 ESB 박스의 재질인 알루미늄을 고려하여 2,000 m/s를 적용하였다. 측정된 $V_{S,Soil}$ 과 $V_{S,30}$ 을 토대로 모사된 모형지반을 내진설계기준연구(II)와 본 연구에서 제안된 지반분류법으로 분류하였고, 전체 실험 경우에 대해 S_C , S_D 지반, H1-2, H2-1 지반으로 분류되었다. 원심모형시험 중 진동대를 활용한 가진 실험은 먼저 원심가속도 수준 20 g에서 목표한 입력지진파(Input Motion)를 단계적으로 가진하고, 이후 40 g 수준으로 원심가속도를 증가시켜 동일한 입력지진파를 순서대로 가진하는 순으로 진행하였다. 규사 단일층 실험에 사용된 입력지진파는 Morgan hill, Kobe, San Francisco, Northridge 지진기록을 활용하였고, 층상구조 실험에는 artificial, El centro, Chichi, Northridge, Ofunato, Hachinohe 지진파를 활용하였다.

동적원심모형시험을 통해 획득한 모형지반의 하부 및 지표면 가속도 신호를 활용하여 Fig. 11과 같이 응답스펙트럼을 비교하였다. 비교에는 지반 운동수준 0.110 g에 대한 실험 결과가 활용되었다. 44%, 81%의 두 가지 상대밀도를 가진 규사 단일층 실험에서 모형지반은 Table 5와 같이 20 g 실험에서 H1-2 지반으로 모사되었고, 40 g 실험에서는 H2-1 실험으로 모사되었기에 결과를 구분하여 나타내었다. 층상구조 실험의 결과도 같은 방식으로 구분하여 나타내었다. 그림에서 동적원심모형시험 시 모형지반에 가진

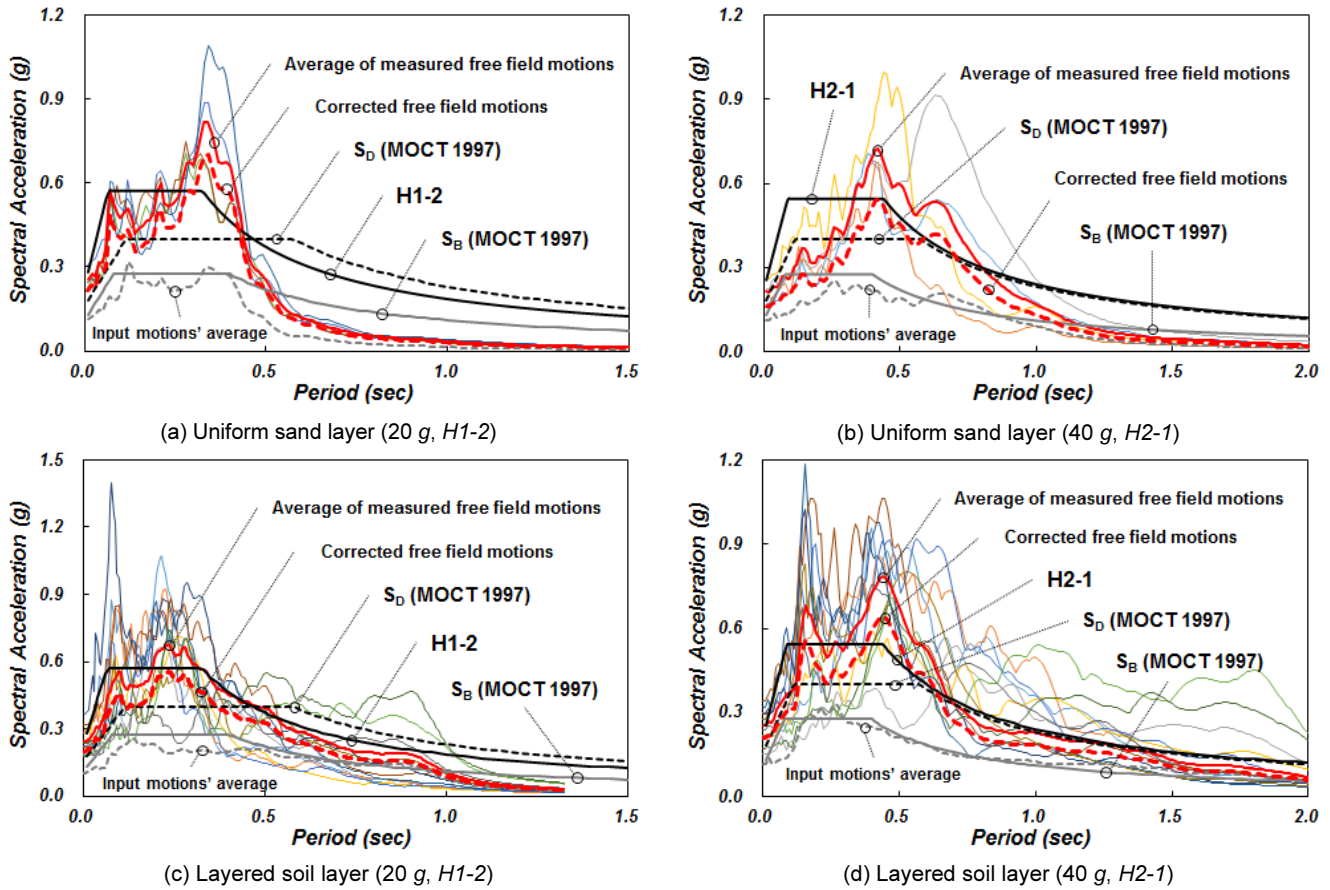


Fig. 11. Comparison of response spectra from centrifuge tests with DRS (0.110 g)

된 입력지진동의 평균을 내진설계기준연구(II)에 제시된 S_B 지반의 설계 응답스펙트럼과 비교하였다. 20 g에서 수행된 구사 단일층 실험에서 0.5초 이상 주기 영역을 제외하면 전체 실험에서 가진된 입력 지진동은 S_B 지반의 DRS와 유사한 것을 확인할 수 있다. 지반에 의한 입력지진동의 증폭특성 파악을 위해 모형지반 지표면에서 계측된 가속도 신호를 응답스펙트럼으로 표현하였고, 그 평균을 본 연구에서 제안한 H1-2, H2-1 지반의 DRS와 각각 비교하였다. 지반에 의해 증폭된 가속도 신호는 20 g 층상구조 실험을 제외하고는 제안한 H1-2, H2-1 지반의 DRS를 일부 주기영역에서 초과하고 있다. 실험결과는 내진설계기준연구(II)에 제시된 S_D 지반의 DRS를 단주기 영역에서 더욱 크게 초과하고 있으며, 장주기 영역에서는 반대로 S_D 지반의 DRS에 비해 현저히 줄어든 증폭을 확인할 수 있는데 이는 본 연구에서 수행한 지반응답해석 결과와도 일치하는 부분이다.

실험에서 모형지반 지표면에서 획득한 가속도 신호의 응답스펙트럼이 제안한 H1-2, H2-1 지반의 DRS를 일부 주기영역에서 초과하였는데 이는 ESB 박스 바닥과 모형지반의 큰 강성 차가 지표면 응답스펙트럼에 미친 영향으로 평가할 수 있다. 이에 대한 검증을 위해 실험 결과를 SHAKE 91 프로그램을 활용한 지반응답해석 결과와 비교하고자 하였다. 실험이 수행된 조건을 SHAKE 해석에서 동일하게 구성하여 해석을 수행하였다. 실험 시 사용된 시료의 물성을 공진주 실험(Resonant Column Test) 등의 실내실험으로 획득하고 이를 해석에 적용하였다. 입력 지진파로는 동적원심모형 실험 시 ESB 박스 바닥면에서 계측된 지진파를 동일하게 사용하고자 하였고, 모델링에서 기반암 층내 운동(In-layer, Within Motion)으로 적용시켰

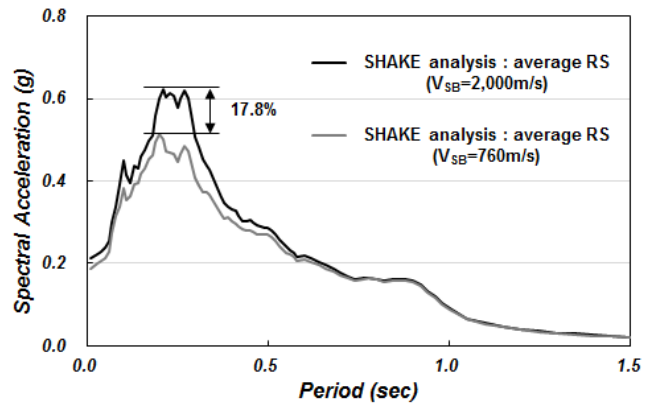


Fig. 12. Comparison of response spectrum using SHAKE 91 for different base conditions (ex. test no.2-2)

다. 기반암 전단파속도의 경우, 본 연구에서 기준 제안을 위해 수행한 300 개 지반의 지반응답해석 시 760 m/s를 적용하였으므로 760 m/s의 기반암 전단파속도와, 실험 시 ESB 박스의 바닥 강성을 대변하는 2,000 m/s의 기반암 전단파속도를 각각 적용하여 해석을 실시하였다. Fig. 12에 해석 결과를 지표면 응답스펙트럼으로 비교하였다. 그림에서 기반암 강성 760 m/s를 적용한 결과는 2,000 m/s를 적용한 경우에 비해 최대 스펙트럴 가속도를 기준으로 17.8% 감소된 결과를 도출하였다. 기반암 강성을 달리하여 도출된 두 응답스펙트럼의 최대 스펙트럴 가속도 차를 활용하여 동적원심모

형실험의 평균 응답스펙트럼을 전 주기영역에서 재조정하였다. Fig. 11에 점선으로 표시된 보정된 지표면 평균 응답스펙트럼은 실험에서 획득한 평균 지표면 응답스펙트럼을 상기 언급한 각 실험의 SHAKE 해석 결과에 의거하여 재조정된 것이다. 보정된 동적원심모형실험의 응답스펙트럼은 *H1-2*, *H2-1* 지반의 DRS 내에 대부분 포함되고 있는 것을 확인할 수 있다.

6. 토 의

동반논문(II)에서 지반운동수준에 따른 증폭계수 결정 시 *H1-2*, *H2-1* 지반의 단주기 증폭계수는 지반응답해석 결과에 중점을 두고 결정한 바 있다. 이에 반해 *H1-2*, *H2-1* 지반과 유사한 Eurocode 8[1]의 *C*, *E* 지반과 KBC 2016[2]의 기반암 깊이 20 m 이하의 *S_D* 지반(Table 1)의 증폭계수는 동반논문(II)에 나타난 것과 같이 지반응답해석 결과 및 *H1-2*, *H2-1* 지반의 단주기 증폭계수에 비해 0.4 ~ 0.5 가량 작은데, 이로 인한 DRS 크기의 차이는 Fig. 2와 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 국토교통부 행정예고를 통해 개정을 앞두고 있는 KBC 2016 지진하중 편 의 기초가 된 연구인 김동관[13]의 연구와 이를 바탕으로 진행된 건축구조기준 개정(안)에 대한 공청회[14]에서 새로이 추가된 기반암 깊이 20 m 이하의 *S_C*, *S_D* 지반에 대한 단주기 증폭계수는 지반운동수준에 관계없이 본 연구 결과와 유사한 1.8 수준이었다. 그러나 각계 전문가 의견수렴 등의 공청회 과정을 거치며 동반논문(II)에 나타난 수준으로 감소된 바 있다. 국내 지반에 대한 지반응답해석을 수행하여 증폭특성을 평가할 경우, 본 연구와 김동관[13]의 연구와 같이 단주기 증폭이 크게 산정된다. 그러나 이러한 연구 결과를 설계기준에 여과 없이 적용할 경우 최대 스펙트럴 가속도와 관계된 국내 건축물의 대부분을 차지하는 저층 구조물 설계 시 내진설계범주 증대 등으로 특수전단벽을 추가 적용해야하는 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제 해결을 위해 KBC 2016 개정(안)에서는 Eurocode 8에 제시된 지반종류 별 증폭계수(*S*)의 비를 적용하여 추가된 기반암 깊이 20 m 이하의 *S_C*, *S_D* 지반의 증폭계수를 결정하였다. Eurocode 8에서 기반암 깊이 20 m 이하 지반을 정의하고 있는 *E* 지반의 증폭계수와 *B*, *C* 지반(각각 *S_C*, *S_D* 지반에 대응)의 증폭계수의 비를 적용하여 새로이 추가된 기반암 깊이 20 m 이하의 *S_C*, *S_D* 지반의 증폭계수를 기존 *S_C*, *S_D* 지반의 증폭계수에서 증대시키는 방향으로 조정하였다. 본 연구에서 제안된 *H1-2*, *H2-1* 지반의 단주기 증폭계수도 Eurocode 8, KBC 2016 개정(안)과 같이 조정될 필요가 있을 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 동반논문(I, II)을 통해 제안된 국내 지반의 증폭특성에 적합한 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼을 다양한 방법으로 비교 검증하였다. 검증과정에서 논의된 내용을 아래와 같이 정리하였다.

1) 국내·외 기준과 비교

제안된 *H1-1*, *H1-2*, *H2-1*, *H2-2* 지반의 설계응답스펙트럼과 국내·외 내진설계기준에서 유사한 지반조건에 대해 제시된 설계응답스펙트럼을 비교하였다. Eurocode 8, KBC 2016, 내진설계기준연구(II)에 제시

된 유사 지반과의 비교 결과, 제안된 설계응답스펙트럼은 지반응답해석 결과를 반영하여 내진설계기준연구(II)보다 단주기 영역 증폭이 크게 고려되었으며 장주기 영역 증폭은 감소하였다. 이러한 경향은 Eurocode 8, KBC 2016에 제시된 유사 지반의 설계응답스펙트럼과 정량적 크기는 다르나 동일한 경향이다.

2) 탄성파시험 결과를 활용한 지반응답해석과 비교

실제 탄성파시험을 통해 획득한 국내 120개 지반의 전단파속도 주상도를 활용한 지반응답해석 결과와 제안된 4개 지반의 설계응답스펙트럼을 비교하였다. 그 결과, 실제 탄성파 시험에 기초하여 수행된 지반응답해석 결과가 제안된 지반종류 별 설계응답스펙트럼에 포함됨을 확인하였다. *H1-1*, *H1-2* 지반의 과도한 단주기 증폭은 해석에 적용된 기반암과 토사지반의 강성 차 증대에 따른 것으로, 기반암 강성이 응답스펙트럼에 미치는 영향을 평가하여 기준에 포함시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

3) 국내 실지진 기록을 활용한 검증

국내에 설치된 실시간 통합 지진관측망(KISS)과 한국전력연구원 765 kV 변전소 부지에서 계측된 지진기록으로부터 도출된 단주기, 장주기 증폭계수를 제안한 증폭계수와 비교하였다. 실지진 기록으로 도출된 증폭계수는 단주기 증폭의 특성을 나타내는데 이는 제안된 증폭계수와 유사하며 내진설계기준연구(II)에 제시된 증폭계수와는 반대되는 특성이다.

4) 동적원심모형실험을 활용한 검증

기반암 깊이가 얇고 단주기적 특성을 가진 국내 지반의 대표적 특성을 축소모형으로 모사하고 동적원심모형실험을 실시하였다. 상대밀도를 달리한 규사 단일층 실험, 지반의 강성을 달리한 층상구조 실험을 통해 *H1-2*, *H2-1* 지반을 모사하였고, 모형지반 지표면에서 계측된 가속도 신호를 토대로 변환된 응답스펙트럼은 제안한 설계응답스펙트럼 내에 포함됨을 확인하였다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었으며(MPSS-NH-2013-71), 이에 깊은 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1.1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. c2005.
2. Korean Building Code Revision (draft). Pre-Announcement of Administration. Announcement of Ministry of Land, Infrastructure and Transport. NO. 2016-4. c2016.
3. A Study on Site-Specific Seismic Design Response Spectrum. Ministry of Construction and Transportation. c1997.
4. Kim DS, Lee SH, Yoon JK, Development of Site Classification System and Modification of Site Coefficients in Korea Based on Mean Shear Wave Velocity of Soil and Depth to Bedrock, J Korean Soc Civ Engineers. 2008;28(10):63-74.

5. Manandhar S, Cho HI, Kim DS. Effect of Bedrock Stiffness and Thickness of Weathered Rock on Response Spectrum in Korea, KSCE J Civ Eng. 2016;1-15.
6. Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750). Washington, DC. Building Seismic Safety Council, c2009.
7. Campbell KW, Bozorgnia Y. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. Earthq Spectra. 2008;24(1):139-171.
8. Lee SH, Park DH, Ha JG, Kim DS. Verification of 2-Parameters Site Classification System and Site Coefficients (II) - Earthquake Records in Korea, J Korean Geotech Soc. 2012;28(3):35-43.
9. Yun KH, Suh JH. Classification of Seismic Stations based on the Simultaneous Inversion Result of the Ground-motion Model Parameters, Geophysics and Geophysical Exploration. 2007;10(3):183-190.
10. Lee SH. Development and Verification of Site Classification System for Design Ground Motions at Regions of Shallow Bedrock. Ph.D. Dissertation, KAIST. c2010.
11. Kim DS, Kim NR, Choo YW, Cho GC. A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea, KSCE J Civ Eng. 2013; 17(1):77-84.
12. Lee SH, Choo YW, Kim DS. Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Model Container for Dynamic Geotechnical Centrifuge Tests, Soil Dyn Earthq Eng. 2013;44:102-114.
13. Kim DK. Effects of Shallow Soil Deposits and Substructures on Earthquake Response Spectrum, Ph. D. Dissertation, Seoul National University. c2013.
14. Architectural Institute of Korea, Announcement of Public Hearing about Korean Building Code Revision, Available from: <http://www.aik.or.kr/html/board.jsp?ncode=a001&num=1078>