

2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수의 검증 (I) - 국외 내진설계기준 및 부지응답특성과의 비교

Verification of 2-Parameters Site Classification System and Site Coefficients (I) - Comparisons with Well-known Seismic Code and Site Response Characteristics

이 세 현¹ Lee, Sei-Hyun

선 창 국² Sun, Chang-Guk

하 정 곤³ Ha, Jeong-Gon

김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

In order to verify that the recently proposed two-parameters site classification system and the corresponding site coefficients are suitable for the local geological conditions in Korea, a comparison was conducted with current Korean seismic code, Eurocode-8, NYC DOT seismic code. The design spectrum of the current Korean seismic code is significantly amplified in the long-period range, whereas the other response spectra, including the proposed two-parameters approach, are significantly amplified in the short-period range, which is a typical geological condition in Korea. In addition, based on the results of site response analyses in the specific 10km×10km area of Gyeongju, spatial distributions of site coefficients from site-specific seismic response analyses were compared with the proposed site coefficients, as well as those specified in the current Korean seismic code. The site coefficients (F_a and F_v) from the current Korean seismic codes show significantly high spatial error distributions compared with those specified by the two-parameters site classification system. Therefore, the proposed system is suitable for regions of shallow bedrock including the Korean peninsula.

요 지

최근 제안된 2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수가 국내 지반조건 및 지반증폭특성에 적합함을 검증하기 위하여 내진설계기준연구II, Eurocode-8, 현재 개정중인 미국 동부지역 NYC DOT 내진설계기준과 비교를 수행하였다. 유사한 조건의 지반 조건에 대하여 각 기준의 설계응답스펙트럼을 비교한 결과, 2-매개변수 지반분류, Eurocode-8, NYC DOT 내진설계기준은 일반적인 국내 지반특성인 단주기 영역의 증폭을 크게 고려하고 있는 반면, 내진설계기준 연구II는 장주기 영역의 증폭을 크게 평하는 것으로 나타났다. 추가적으로 경주시 10km×10km 지역내 50개 부지에 대한 지반응답해석 결과를 확보하고, 이를 내진설계기준연구II 및 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭 계수와 2차원 공간적인 비교를 수행하였다. 단주기 및 장주기 증폭계수 모두에 대하여 내진설계기준연구II가 2-매개변수 지반분류 방법에 비하여 부지응답해석 결과와의 오차값이 월등히 큰 것으로 평가되어, 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수의 타당성을 확인하였다.

1 정희원, 한국원자력안전기술원 구조부지평가실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Structural System and Site Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지진연구센터 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

내진설계시 구조물에 작용하는 지진하중은 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도 및 국지적 지반 조건 등에 의해 결정되고, 지역 및 구조물의 중요도는 구체적인 설계가 이루어지기 전에 결정되는 요소이므로 결국 국지적 지반 조건이 지진하중 결정을 좌우하게 된다. 구조물 하부에 위치한 지반의 국지적 특성으로부터 지반분류를 수행하고, 이에 따라 가변성을 지닌 지반 증폭계수는 구조물에 작용하는 지진하중 산정을 위한 직접적인 요소이며, 1997년 건설교통부에서 제정한 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구II(건설교통부, 1997) 및 이 후 정부 여러 부처와 산하 기관에서 제정한 기준서에 명시되어 있다.

그러나 현재 국내 내진설계기준에 명시되어 있는 지반 분류 방법 및 지반 증폭계수는 기반암 깊이가 100~300m로 매우 깊고, 장주기 특성을 보이는 미국 서부 해안지역의 지반 조건에 적합하도록 작성된 UBC-1997(ICBO, 1997)과 같은 미국 내진설계기준을 준용한 것으로서, 일반적으로 비교적 얇은 기반암 깊이 및 단주기 특성을 보이는 국내 지반 조건을 제대로 반영하지 못하고 있다. 이에 따라, 국내 내진설계기준에서 제시한 표준설계응답스펙트럼은 부지 고유의 지반응답해석으로부터 획득한 응답스펙트럼과 비교하여 단주기 영역에서는 스펙트럴 가속도를 과소평가하고 있고, 장주기 영역에서는 과대평가하고 있다(선창국 등, 2005; 윤종구 등, 2006; Lee 등, 2011).

또한, 상부 30m 토층의 평균 전단파속도($V_{s,30}$)를 이용하는 지반분류 방법은 미국 서부 해안지역에서 기반암 깊이까지의 토층 물성을 모두 설계에 반영할 수 없기 때문에 경제성과 편의성을 고려하여 지진시 상대적으로 지배적인 영향을 미치는 얇은 심도의 지반 특성을 반영하고자 상부 100ft(약 30m) 토층의 물성을 설계에 이용한다는 취지로써 제안된 방법이다. 그러나 기반암이 주로 30m 이내에 존재하는 국내 내륙 지반 조건에 대해서 $V_{s,30}$ 을 이용하여 지반분류를 수행한다면, 30m 이내에 존재하는 암반의 물성을 함께 반영하게 된다. 즉, 기반암이 깊은 지역에서 설계의 효율성을 위하여 상

부 30m의 평균 지반물성을 이용하려는 취지가 기반암이 얇은 지역에서는 불합리한 요소로 작용할 여지가 있다.

위의 사항을 바탕으로 김동수 등(2008)은 기반암이 비교적 얇아 대부분의 지반조사가 기반암 깊이까지 수행되고, 토층의 전단파속도를 비교적 명확하게 평가할 수 있는 국내 지반 환경에 적합하도록, 기반암 깊이(Depth to Bedrock, H)와 토층 평균 전단파속도(Mean Shear Wave Velocity of Soil, $V_{s,soil}$)를 동시에 고려하는 2-매개변수 지반분류 방법 및 이에 따른 지반 증폭계수를 제안하였다.

일반적으로 설계기준 내 중요한 사항을 추가 또는 개정하게 되면, 수치적 또는 실험적 검증은 필수적으로 수반되어야 한다. 내진설계기준 내 지반 증폭계수는 지역적 지질 조건 및 지반의 동적 특성에 따라 매우 상이하므로, 해외의 경우 각 지역의 실제 지진 계측 자료와 부지응답해석 결과를 이용하여 지반 증폭계수의 정량적인 평가를 진행하여 왔다(Dobry 등, 1999). 우리나라의 경우, 1995년 발생한 고베 지진의 영향으로 국가적 내진 대책의 조속한 체계화를 필요로 하였지만, 당시, 지진에 대한 계측이 활성화 되지 않았기 때문에, 필수적 사전 검토 과정인 지반 조건에 따른 증폭 특성의 정량적 평가 없이 강진 지역 중 하나인 미국 내진설계기준을 준용하여 국가 내진설계기준 상위개념에 반영하게 되었고(Kim 등, 2002), 현재 국가 산하 기관 또는 공기업에서 제정한 모든 내진설계기준이 이를 따르고 있다.

본 연구에서는 최근 제안된 2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수(김동수 등, 2008)가 현행 국내 내진설계기준과 비교하여 국내 지반 조건 및 지반 증폭 특성에 적합함을 검증하기 위하여 국내 지반 조건과 유사한 국외 내진설계기준과의 비교를 수행하였다. 또한, 특정 지역에 대한 부지 고유의 지반응답해석 결과로부터 계산된 지반 증폭계수를 2-매개변수 지반분류 방법 및 현행 국내 내진설계기준과 2차원 공간에서 비교하였다. 마지막으로 2002년 이후 국내에서 계측된 규모 4.0 이상의 주요 지진 계측 기록 및 최근 신설된 765kV 변전소 부지에서 계측된 지진 기록을 분석함으로써 2-매개변수 지반분류 방법의 타당성을 입증하였다. 본 논문에서는 앞의 두 가지 검증 방법에 대해 상세하게 논

의하였고, 마지막 국내 실지진 계측 기록을 통한 검증 방법에 대해서는 동반 논문(II-국내 실지진 계측 기록을 통한 검증)에서 상세하게 논의하였다.

2. 현행 국내 지반분류 방법

현행 국내 내진설계기준 상위 개념인 내진설계기준 연구II(건설교통부, 1997)에서 정의하고 있는 지반분류 방법은 상부 30m 평균 전단파속도인 $V_{s,30}$ 과 표준관입 시험 저항값(SPT-N값) 및 비배수 전단강도를 부차적으로 이용하여 사질토 및 점성토에 모두 적용할 수 있도록 하고 있다. 분류 기준인 $V_{s,30}$ 은 부지의 전단파속도 주상도와 식 (1)을 이용하여 획득할 수 있고, 이를 바탕으로 표 1과 같이 5 종류($S_A \sim S_E$)의 지반과 지반 특성이 매우 불리할 경우 추가적인 부지특성평가가 요구되는 S_F 지반으로 분류하고 있다.

$$V_{s,30} = 30 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}} \right) \quad (1)$$

여기서, d_i 와 V_{si} 는 각각 지하 30m까지의 i 번째 토층의 두께(m)와 전단파속도(m/s)

또한, 정량화된 설계지반운동 특성 및 구조물에 작용하는 지진하중을 의미하는 설계응답스펙트럼은 단주기(C_a) 및 장주기 지진계수(C_v)를 토대로 작성하게 된다. 지진계수는 대상 지역의 지진학적 고찰을 토대로 도출된 지역계수(Z)와 단주기(F_a) 및 장주기(F_v) 지반 증폭계수의 곱으로 결정된다. 국내의 지진구역I($Z=0.11$)과 II($Z=0.07$)에 대한 각 지반 종류별 지반 증폭계수와 지진계수를 표 1에 함께 나타내었다. 그러나 표 1에 명시된 값들은 재현주기 500년(2등급 붕괴방지) 지진에 대

한 값이고, 다른 재현주기 지진 및 내진성능수준에 대해서는 각 재현주기에 해당하는 위험도계수(I)를 곱하여 지진계수를 산정한다.

3. 2-매개변수 지반분류 방법

김동수 등(2008)은 국내 전역에 걸쳐 분포한 125개 지반의 지층 분포도 및 전단파속도 주상도를 획득하여, 각각에 대해 기반암 깊이(H)와 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)를 결정하였다. 내진설계기준연구II에서 우리나라 재현주기별 지진가속도가 작용하는 위치를 보통암 지반(S_B 지반 : 전단파속도 760~1500m/s)으로 정의하고 있음에 따라, H는 전단파속도가 760m/s를 넘어서기 시작하는 깊이로 결정하였고, $V_{s,soil}$ 은 암반의 물성을 반영하지 않은 기반암 상부에 위치한 토층만의 전단파속도 평균값으로서, 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$V_{s,soil} = \left(\sum_{i=1}^n D_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{V_{si}} \right) \quad (2)$$

여기서, D_i 와 V_{si} 는 각각 기반암 상부 i 번째 토층의 두께(m)와 전단파속도(m/s)

또한 125개의 해석대상지반에 대해 1차원 등가선형해석 프로그램인 SHAKE91(Idriss와 Sun, 1992; Schnabel 등, 1972)을 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. 입력 지진파의 주파수 성분 및 가속도 수준을 다양하게 고려하기 위하여, 7개의 지진파에 대해 각각 3가지 재현주기에 따른 암반노두 가속도(0.110g, 0.154g, 0.220g)를 결합하여 총 2625개의 지반응답해석 결과를 획득하였고, 식 (3)-(4)을 이용하여 각 해석 결과에 대한 지반 증폭계수를 산정하였다.

표 1. 현행 국내 내진설계기준의 지반분류 방법

지반 종류	지반종류의 호칭	$V_{s,30}$ (m/s)	지진구역I($Z=0.11$)				지진구역II($Z=0.07$)			
			F_a	F_v	C_a	C_v	F_a	F_v	C_a	C_v
S_A	경암 지반	1500 초과	0.82	0.82	0.09	0.09	0.71	0.71	0.05	0.05
S_B	보통암 지반	760~1500	1.00	1.00	0.11	0.11	1.00	1.00	0.07	0.07
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360~760	1.18	1.63	0.13	0.18	1.14	1.57	0.08	0.11
S_D	단단한 토사 지반	180~360	1.45	2.09	0.16	0.23	1.57	2.29	0.11	0.16
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	2.00	3.36	0.22	0.37	2.42	3.29	0.17	0.23
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반									

표 2. 2-매개변수 지반분류 방법 및 대표 지반 증폭계수(김동수 등, 2008)

지반 종류	H(m)	V _{s,soil} (m/s)	0.110g(재현주기 500년)		0.154g(재현주기 1000년)		0.220g(재현주기 2400년)	
			F _a	F _v	F _a	F _v	F _a	F _v
H ₁ -1	10 미만	300 미만	1.34	1.03	1.37	1.04	1.41	1.05
H ₁ -2		300 이상	1.08	1.01	1.08	1.01	1.09	1.01
H ₂ -1	10~20	300 미만	1.94	1.16	1.97	1.20	2.02	1.25
H ₂ -2		300 이상	1.40	1.05	1.43	1.06	1.47	1.07
H ₃ -1	20 이상	200 미만	1.42	2.55	1.26	2.48	1.10	2.41
H ₃ -2		200~360	2.11	1.56	2.04	1.61	1.96	1.65
H ₃ -3		360 이상	1.67	1.14	1.69	1.17	1.69	1.21

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (4)$$

여기서, F_a와 F_v는 각각 지반의 단주기, 장주기 증폭계수이고, R_{rock}과 R_{soil}은 각각 진원(fault)에서 암반노두와 지표면까지의 거리(hypocentral distance)이다. RS_{soil}과 RS_{rock}은 각각 주기가 T인 구조물에 대한 지표면과 암반노두에서의 스펙트럴 가속도 값으로 가속도 응답 스펙트럼을 의미한다.

2-매개변수 지반분류 방법을 제안하기 위해, 우선적으로 기반암 깊이 10m와 20m를 경계로 H₁ 지반, H₂ 지반, 그리고 H₃ 지반으로 분류하였다. 이 후, 각 지반그룹에 속한 해석대상지반의 지반 증폭계수와 V_{s,soil}과의 경향성 및 분산정도를 분석함으로써 지반그룹을 세분화하고, 각 세부 지반그룹에 대한 대표 지반 증폭계수를 할당하였다. H₁ 지반과 H₂ 지반은 V_{s,soil}=300m/s를 경계로 각각 2개의 지반그룹으로 세분화하였고, H₃ 지반은 200m/s와 360m/s를 경계로 3개의 지반그룹으로 세분화한 결과, 총 7개의 지반그룹을 형성하였다. 김동수 등(2008)이 제안한 2-매개변수 지반분류 방법 및 각 기반암 가속도, 지반그룹에 대한 대표 F_a, F_v 값을 표 2에 정리하였다. 또한, 재현주기 2400년 지진 가속도에 대한 각 지반그룹의 지반 증폭계수와 내진설계기준연구II에서 제안하는 방법을 바탕으로 작성된 설계응답스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. 이는 얇은 기반암으로 인해 단주기 영역의 스펙트럴 가속도가 크게 증폭되는 국내 내륙지역의 일반적인 지반특성과 일부 해안 지역 연약지반에서의 장주기 영역 증폭이 발생하는 점을 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

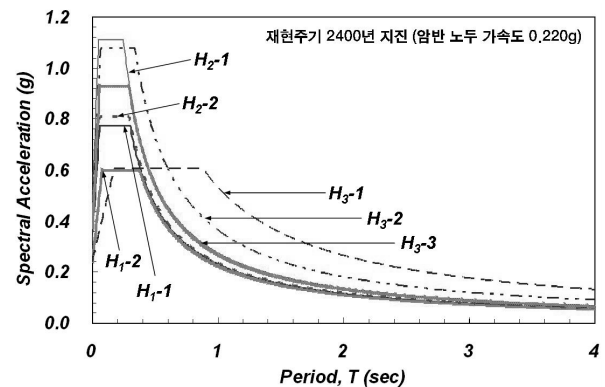


그림 1. 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 표준설계응답스펙트럼

4. 국내 지반 조건과 유사한 국외 내진설계기준과의 비교

국내 지반 조건에 대한 2-매개변수 지반분류 방법의 타당성을 검증하기 위해, 현재 유럽지역에서 널리 사용되고 있는 Eurocode-8(CEN, 2003)과 현재 개정중에 있는 미국 뉴욕시의 NYC DOT Seismic Guideline(Gajer 등, 2008)에서 제안하는 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼과의 비교를 수행하였다.

4.1 Eurocode-8(CEN, 2003)

Eurocode-8에서 제안하는 설계지진력 결정 과정에서 지반분류 방법은 우리나라 현행 내진설계기준 및 미국 UBC 기준과 동일한 V_{s,30}, SPT-N값, 비배수 강도를 이용하는 분류체계를 가지고 있으나, 암반 지반을 V_{s,30}이 800m/s 이상의 하나로 구분한 점과 부지 고유의 지반응답해석을 추천하는 지반 조건을 두 종류로 제시한 점에서 차이가 난다. 또한 주목할 만한 사항은 일반적인 국내 지반특성과 유사한 E 지반을 포함하여 미국 지반분

류 방법과의 차별화를 두고 있다. CEN(2003)에 나타나 있는 지층 주상도의 설명에 의하면, E 지반은 전단파속도(V_s) 800m/s 이상의 연암 상부에 C 지반($180\text{m/s} \leq V_s < 360\text{m/s}$) 또는 D 지반($V_s < 180\text{m/s}$) 정도의 V_s 를 갖는 층적층이 5~20m 정도 분포하는 지반으로, 2-매개변수 지반분류 방법으로는 H_1 또는 H_2 지반에 해당하는 것으로 판단된다.

설계응답스펙트럼의 경우, 현행 국내 및 미국 내진설계기준은 두 종류의 지반 증폭계수(F_a 와 F_v)를 이용하여 작성하는 반면, Eurocode-8은 규모 5.5를 기준으로 5.5 이상을 Type 1로, 5.5 미만을 Type 2로 분류하였고, 각각 다른 변수 값들을 적용하여 지진 규모 차이로 인한 지반의 비선형 특성을 반영하고 있다(CEN, 2003).

4.2 2008 NYC DOT Seismic Guideline(Gajer 등, 2008)

Nuttl(1981)에 따르면, 미국 동부 지역의 지진시 지반 운동 특성은 기반암 깊이가 매우 깊은 미서부 해안지역과 현격히 다르다고 보고되어 있다. 그러나 현행 1998 NYC Seismic Guideline은 미국 UBC 기준을 바탕으로 작성되어 지반분류 방법 및 지반 증폭계수가 뉴욕시의 지반 특성을 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라 Hwang 등(1997)은 일반적인 미동부 지역의 지반 조건을 확률론적인 방법으로부터 모사하여 지반응답해석을 수행하고, 이를 바탕으로 새로운 지반 증폭계수를 제안하였다. 최근 들어, R. Dobry 교수를 비롯한 여러 전문가들은 기반암 깊이가 비교적 얇은 미동부 지역의 지반조건을 고려하여, 아래와 같이 세 가지 매개변수를 동시에 이용한 지반분류 방법을 대안으로 제안하

였고, 자세한 지반분류 체계는 표 3에 나타내었다.

• 기반암 깊이(H)

- 100ft(약 30m) 미만 또는 이상에 대해 두 그룹으로 구분

• 토층 평균 전단파속도(V_s)

- 기반암 깊이가 100ft 이하일 때, 암반을 제외한 토층만의 평균 전단파속도

- 기반암 깊이가 100ft 이상일 때, 100ft까지의 토층 평균 전단파속도($V_{s,100}$)

• 상부 20ft(약 6m)에 대한 암반 전단파속도($V_{s,rock20}$)

- 기반암 깊이가 100ft 이하일 때에 대해서만 적용

표 3에 나타낸 바와 같이, H가 100ft 미만인 조건에서는 6개의 지반으로, H가 100ft 이상인 조건에서는 3개의 지반으로 분류되어 총 9개의 지반 종류로 구분하였다.

4.3 2-매개변수 지반분류 방법과의 비교

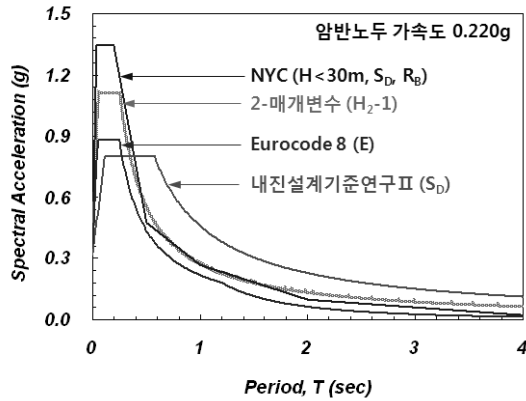
2-매개변수 지반분류 방법을 비롯하여 Eurocode-8, NYC DOT 및 현행 국내 내진설계기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼을 비교하였다. 비교를 위한 지반 종류는 각 지반분류 방법별로 아래와 같이 선택하였다.

• 2-매개변수 지반분류 방법

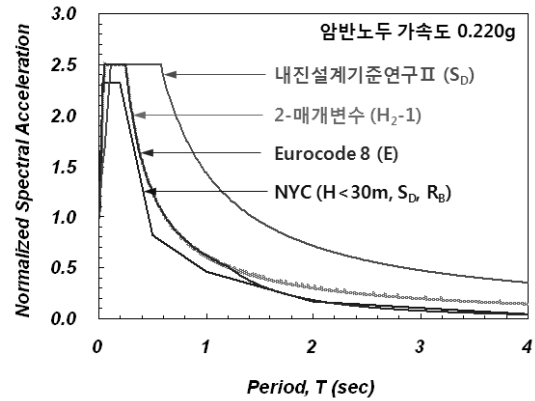
- H_2-1 지반 : 기반암 깊이가 10m~20m, 토층 평균 전단파속도 300m/s 이하

표 3. NYC DOT Seismic Guideline에서 제안하는 지반분류 체계

H	$V_{s,Rock20}$	$V_{s,Soil}$
H < 100ft	R_A ($V_{s,Rock20} \geq 1500\text{m/s}$)	S_C ($360\text{m/s} \leq V_{s,Soil} < 760\text{m/s}$)
		S_D ($180\text{m/s} \leq V_{s,Soil} < 360\text{m/s}$)
		S_E ($V_{s,Soil} < 180\text{m/s}$)
H ≥ 100ft	R_B ($760\text{m/s} \leq V_{s,Rock20} < 1500\text{m/s}$)	S_C
		S_D
		S_E
H ≥ 100ft	-	S_C
		S_D
		S_E



(a) 스펙트럴 가속도 비교



(b) 정규화 스펙트럴 가속도비 비교

그림 2. 각 내진설계기준의 설계응답스펙트럼 비교

- 내진설계기준연구II(국내 현행 내진설계 상위기준)
 - S_D 지반($180\text{m/s} \leq V_{s,30} < 360\text{m/s}$) : 국내 내륙지역의 일반적인 지반 조건
- Eurocode-8(CEN, 2003)
 - E 지반 : 국내 지반조건과 가장 유사
 - 국내의 지진규모를 고려하여 Type 2($M < 5.5$)의 설계응답스펙트럼 선택
- NYC DOT Seismic Guideline(Gajer 등, 2008)
 - 기반암 깊이(H) : 30m 이하
 - 토층 평균 전단파속도(V_s) : $S_D(180\sim 360\text{m/s})$
 - 상부 20ft 암반 평균 전단파속도($V_{s,Rock20}$) : $R_B(760\sim 1500\text{m/s})$

국내 내진성능수준으로 특등급 붕괴수준에 해당하는 0.220g의 암반 노두 가속도를 4개의 지반분류 방법에 동일하게 적용하여 산정된 설계응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도를 비교하였고, 그림 2(a)에 나타내었다. 뉴욕시의 경우, 미국 지질연구소(U.S. Geology Survey)에서 제공하는 미국 전역에 대한 2002년 지진재해도에 따르면 재현주기 2500년 지진의 최대 암반 노두 가속도가 약 0.217g로서, 0.220g와 유사하므로 Gajer 등(2008)에서 제시한 설계응답스펙트럼을 그대로 사용하였다.

내진설계기준연구II는 단주기 영역의 증폭 정도에 비하여 상대적으로 장주기 영역의 증폭을 크게 산정하는 데 반하여, 나머지 방법들은 각 지역의 단주기적 지반 특성을 반영하여 단주기 영역에서의 크게 증폭이 발생하고, 장주기 영역에서는 증폭이 거의 발생하지 않고 있

다. 단주기 영역에서의 증폭은 NYC DOT 내진설계기준이 가장 크고, 2-매개변수 지반분류 방법은 NYC 기준과 Eurocode-8의 중간에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 각 설계응답스펙트럼의 주기 0초에서의 스펙트럴 가속도값으로 정규화한 결과를 그림 2(b)에 나타내었고, 이것으로부터 차이는 더욱 명확하게 확인할 수 있다. 내진설계기준연구II를 제외한 나머지 내진설계기준의 설계응답스펙트럼은 그 형태가 단주기 및 장주기 영역에서 유사하고, 특히, 주기 1.2초 이하 영역에서는 2-매개변수 지반분류 방법과 Eurocode-8의 형태와 동일한 것을 확인할 수 있다. 반면, 내진설계기준연구II에서 제시하는 설계응답스펙트럼은 장주기 영역에서의 증폭을 과다하게 고려하는 것을 재차 확인할 수 있다.

김동수 등(2008)은 국내 전역에 걸쳐 획득한 125개 지반의 평균 고유주기를 0.08~0.52초 정도로 단주기 영역의 특성을 보인다고 보고하였다. 따라서 장주기 영역의 증폭을 과다하게 고려하는 현행 국내 내진설계기준과 비교하여, 2-매개변수 지반분류 방법의 설계응답스펙트럼은 지진시 국내 지반 운동 특성을 반영하기에 적합한 것으로 판단된다.

5. 부지응답특성 결과와의 2차원 공간적 비교

본 연구에서는 국내 내륙 지형 및 지질 특성을 대표하고, 역사 및 계기 지진 기록이 다수 존재하여 지진학적 가치가 높은 경주 지역의 부지응답해석 결과와의 2차원 공간적 비교를 통해 2-매개변수 지반분류 방법의 적합성을 확인하였다. 선창국 등(2005)에 의해 경주시 10km×10km 지역에서 획득한 다양한 지반조사 결과와

이를 바탕으로 수행된 지반응답해석 결과를 이용하였다.

5.1 대상 지역의 지반조사 및 지반분류 현황

선창국 등(2005)은 경주 지역의 지형 변화를 고려하여 하천 5개소, 구릉 8개소, 평지 15개소의 총 28개 부지에서 지반조사를 수행하였고, 대상 지역 내 22개 부지에 대하여 기수행된 지반조사 자료를 함께 확보하였다. 대상 지역에서 수집된 기존 지반조사 자료와 직접 수행한 지반조사 위치, 위치별로 수행된 현장 탄성과 시험 내용을 그림 3에 나타내었다.

획득한 전단파속도 주상도로부터 각 대상 부지에 대한 상부 30m 평균 전단파속도($V_{s,30}$), 기반암 깊이(H), 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)를 획득하였고, 이를 바탕으로 현행 국내 내진설계기준 및 2-매개변수 지반분류 방법에 의한 지반분류 현황을 표 4에 나타내었다. 대상 지역에서 수행된 지반조사 및 수집 자료에 의하면, 산지를 제외한 평지에서는 하천의 범람 및 퇴적 작용으로부터 모래와 자갈질 퇴적토가 풍화대 상부에 10~40m 두께로 다양하게 발달되어 있고, 이는 대상 지역의 지층 분포도로부터 확인할 수 있다. 이와 같이 국부적으로 다양한 지반조건을 포함하는 대상 지역에 대해, 현행 국내 내진설계기준의 $V_{s,30}$ 을 사용하면, 대부분 S_c 지반으로 분류가 수행되어 동일한 지반 증폭계수를 사용하게 되는 반면, 2-매개변수 지반분류 방법에 의하면, 기반암이 깊고, 약한 지반인 H_3-1 지반을 제외한 나머지 지반에

대해 골고루 지반분류가 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 국부적인 변화가 심하고, 기반암 및 토층 강성의 분포가 다양한 국내 지반특성을 고려할 때, 본 연구에서 제안하는 2-매개변수 지반분류 방법은 이를 합리적으로 반영하여 신뢰성 있는 설계 지진력을 산정할 것으로 판단된다.

5.2 지반 증폭계수의 2차원 공간적 비교

선창국 등(2005)은 지층 구성, 전단파속도 주상도, 공진주 시험을 통해 획득한 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선을 토대로 50개 대상 부지 각각에 대해 일차원 부지응답해석을 수행하였다. 해석 프로그램으로는 등가선형 해석기법의 SHAKE91(Idriss and Sun, 1992)과 비선형 해석기법의 NERA(Bardet and Tobita, 2001)를 모든 부지에 대해 병용하여 수행하였다. 발생 지진에 대한 다양한 주파수 특성을 반영하기 위하여 총 다섯 종류의 입력지진파를 사용하였고, 강진 지역의 계측 지진파인 El Centro, Hachinohe, Ofunato 지진, 인공 지진 및 경주 지역의 소규모 계측 지진파를 기반암 가속도 0.14g로 조절하여 해석을 수행하였다. 여기서, 기반암 가속도 0.14g는 내진설계기준연구II에서 제시하는 1등급 붕괴방지구준(재현주기 1000년 지진)에 대한 지진재해도의 경주 지역 기반암 가속도에 해당한다.

각 대상 부지에 대하여 2개의 해석 프로그램과 5개의 입력지진파를 통해 10개의 지반응답해석 결과를 획득하였고, 식 (3)~(4)를 이용하여 각 부지의 단주기 및 장주기 지반 증폭계수를 획득하였다. 이와 같이 획득한 부지 고유의 지반 증폭계수를 현행 내진설계기준 및 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수와 비교하기 위해, 식 (5)~(6)와 같이 오차값(E_a , E_v)을 각 대상 부지에 대해 결정하였다.

$$E_a = (F_{a,i} - F_{a,Analysis})^2 \quad (5)$$

$$E_v = (F_{v,i} - F_{v,Analysis})^2 \quad (6)$$

여기서, E_a , E_v 는 각각 단주기(F_a) 및 장주기 증폭계수(F_v)에 대한 오차값이고, $F_{a,i}$, $F_{v,i}$ 는 현행 내진설계기준 또는 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수($i = 1$: 현행 내진설계기준, $i = 2$: 2-매개변수 지반분류 방법), $F_{a,Analysis}$, $F_{v,Analysis}$ 는 선창국 등(2005)

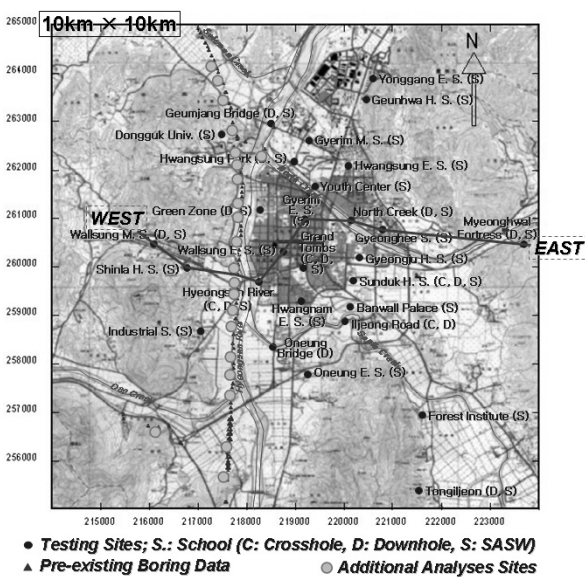
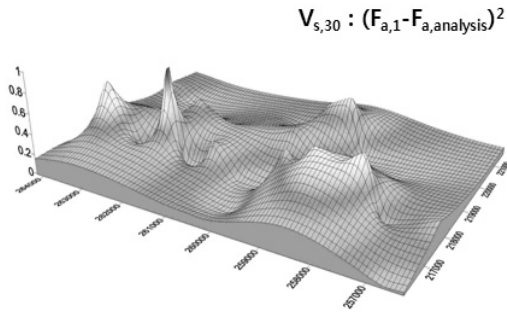


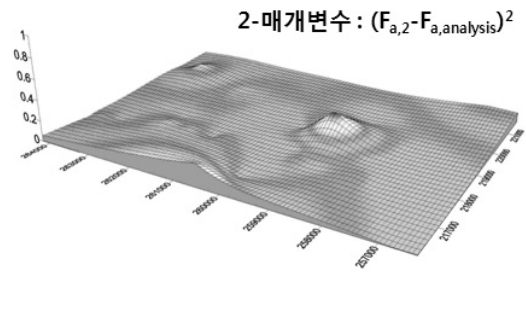
그림 3. 대상 지역내 지반조사 위치 및 수행 시험 내역(선창국 등, 2005)

표 4. 전체 대상 부지의 지반 특성 및 지반분류 현황

부지 번호	부지명	내진설계기준연구II		2-매개변수 지반분류 방법		
		$V_{s,30}$ (m/s)	지반분류	H (m)	$V_{s,soil}$ (m/s)	지반분류
1	황남초교	412	C	50.0	454	H3-3
2	황성공원	458	C	27.8	438	H3-3
3	형산강	665	C	8.2	289	H1-1
4	계림초교	420	C	25.0	385	H3-3
5	계림중교	616	C	14.0	408	H2-2
6	북천	352	D	45.0	419	H3-3
7	오릉초교	561	C	14.0	374	H2-2
8	선덕여고	432	C	11.2	237	H2-1
9	반월성	431	C	14.0	264	H2-1
10	동국대	535	C	16.0	372	H2-2
11	금장교	397	C	32.0	409	H3-3
12	근화여고	1194	B	1.5	286	H1-1
13	대릉원	385	C	38.0	415	H3-3
14	녹지대	311	D	35.0	340	H3-2
15	황성초교	510	C	12.0	337	H2-2
16	일정로	844	B	4.9	428	H1-2
17	산업연수원	439	C	36.0	470	H3-3
18	경희학교	497	C	20.0	420	H3-3
19	경주고교	569	C	16.0	436	H2-2
20	오릉교	374	C	30.0	374	H3-3
21	신라고교	1042	B	7.0	617	H1-2
22	월성초교	411	C	40.0	447	H3-3
23	청소년수련원	487	C	16.0	354	H2-2
24	산림연구원	327	D	25.0	294	H3-2
25	명활산성	357	D	25	357	H3-2
26	통일전	382	C	16	382	H2-2
27	월성중교	384	C	18.5	290	H2-1
28	용강초교	359	D	30.0	359	H3-2
29	hrhkb34	432	C	16.8	299	H2-1
30	hrkjt1	765	B	6.3	406	H1-2
31	hrkjb1	701	C	3.8	229	H1-1
32	hrkjb4	366	C	21.6	294	H3-2
33	hrkjb7	679	C	5.5	280	H1-1
34	hrkjb12	685	C	7.5	352	H1-2
35	hrkjb14	485	C	13.5	297	H2-1
36	hrkjb20	660	C	6.8	306	H1-2
37	hrkjb26	733	C	6.0	354	H1-2
38	hrkjb28	571	C	10.2	312	H2-2
39	hrkjb31	430	C	24.5	381	H3-3
40	hrkjb34	418	C	25.0	374	H3-3
41	hrkjb37	403	C	22.3	334	H3-2
42	hrkjb43	425	C	29.5	420	H3-3
43	hrkjb47	366	C	23.5	311	H3-2
44	ribh2	402	C	30.5	404	H3-3
45	hrhkb26	549	C	13.3	351	H2-2
46	hrhkb29	508	C	15.6	350	H2-2
47	hrkjb51	594	C	12.5	379	H2-2
48	hrkjb611	486	C	24.5	435	H3-3
49	hrkjb69	662	C	8.6	359	H1-2
50	hwcb2	732	C	5.0	312	H1-2

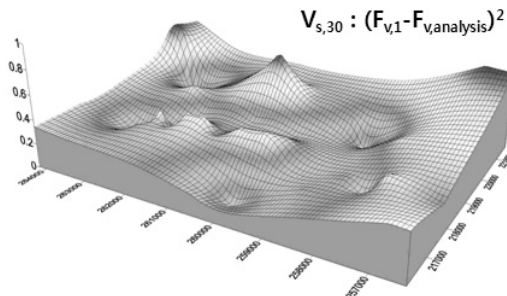


(a) 현행 국내 내진설계기준($V_{s,30}$)

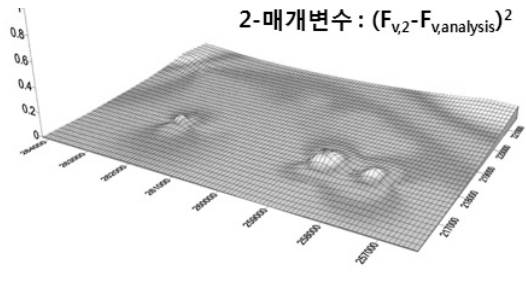


(b) 2-매개변수 지반분류 방법

그림 4. 단주기 증폭계수의 오차값에 대한 2차원 공간적 분포



(a) 현행 국내 내진설계기준($V_{s,30}$)



(b) 2-매개변수 지반분류 방법

그림 5. 장주기 증폭계수의 오차값에 대한 2차원 공간적 분포

에서 부지 고유의 응답해석으로부터 획득한 단주기 및 장주기 증폭계수를 의미한다.

이상 획득한 각 대상 부지의 오차값을 바탕으로 10km × 10km 대상 지역에 대한 2차원 공간적 분포를 예측하기 위해, 지구통계학적 크리깅(Geostatistical Kriging) 기법을 적용하였다. 크리깅 기법은 수학적 방법과 통계학적 방법이 결합된 형태이며, 기지 자료간의 상관관계, 기지 자료와 예측될 지점 값의 상관관계, 기지 자료의 경향성 등을 반영할 수 있어서 지질 및 지반공학적 예측과 같은 넓은 영역의 공간적 보간에 매우 효과적이다(천성호 등, 2005; 선창국과 정충기, 2006).

크리깅 기법을 이용하여 획득한 단주기 및 장주기 증폭계수의 오차값에 대한 2차원 공간적 분포를 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. 단주기 및 장주기 증폭계수 모두 $V_{s,30}$ 을 이용하는 현행 내진설계기준이 2-매개변수 지반분류 방법과 비교하여 부지응답해석 결과와의 오차값이 월등히 큰 것으로 평가되었다. 2-매개변수 지반분류 방법의 일부 경계에서의 오차값이 크게 평가되었지만, 전체적으로 부지 고유의 지반응답해석 결과를 잘 반영하고 있고, 더불어 제안된 지반 증폭계수는 합리적인 국내 지반증폭특성을 산정할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 기반암 깊이(H)와 토층 평균 전단파속도($V_{s,soil}$)를 동시에 고려하는 2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수의 국내 지반조건에 대한 적합성을 검증하기 위하여, 국내 지반조건과 유사한 국외 내진설계 기준과의 비교 및 경주 지역의 부지응답특성 결과와의 2차원 공간적 비교를 수행하였다.

- (1) 유럽지역에서 널리 사용되고 있는 Eurocode-8과 현재 개정중에 있는 미국 뉴욕시의 NYC DOT Seismic Guideline에서 제안하는 지반분류 방법 및 설계응답 스펙트럼과의 비교를 수행하였다. 지반분류 방법에서 Eurocode-8은 일반적인 국내 지반특성과 유사한 E 지반을 포함하여 미국 지반분류 방법과의 차별화를 두었고, NYC DOT 내진설계기준은 기반암 깊이, 토층 평균 전단파속도, 기반암 전단파속도의 3가지 분류 기준을 사용하여 2-매개변수 지반분류 방법의 타당성을 뒷받침하고 있다. 설계응답스펙트럼을 비교한 결과, 내진설계기준연구II(현행 국내 내진설계 기준)는 장주기 영역의 증폭을 크게 고려하고 있지

만, Eurocode-8 및 NYC DOT 내진설계기준은 각 지역의 단주기적 지반특성을 반영하여 장주기 영역에 비해 단주기 영역에서의 증폭을 크게 고려하였다. 이는 2-매개변수 방법에서 제안하는 설계응답스펙트럼과 매우 유사하였다.

(2) 경주시 10km×10km 지역내 총 50개 부지에 대한 지반 물성을 확보하고 지반분류를 수행하였다. 국부적으로 다양한 지반조건을 포함하는 대상 지역에 대해 $V_{s,30}$ 을 사용하는 현행 국내 내진설계기준은 대부분 S_c 지반으로 분류가 수행되어 동일한 지반 증폭계수를 사용하게 되는 반면, 2-매개변수 지반분류 방법은 여러 지반 종류에 대해 골고루 분류되었다. 일반적으로 기반암 및 토층 강성의 분포가 다양한 국내 지반특성을 고려할 때, 2-매개변수 지반분류 방법은 이를 합리적으로 반영하여 신뢰성 있는 설계 지진력을 산정할 것으로 판단된다. 또한 대상 부지에 대한 지반응답해석 결과를 확보하고, 내진설계 기준연구II 및 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수와 2차원 공간적인 비교를 수행하였다. 단주기 및 장주기 증폭계수 모두에 대하여 $V_{s,30}$ 을 이용하는 내진설계기준연구II가 2-매개변수 지반분류 방법에 비하여 부지응답해석 결과와의 오차값이 월등히 큰 것으로 평가되어, 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수의 국내 지반조건에 대한 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No.2011-0000314 : 원심모형실험을 이용한 지반구조물의 방재성능평가), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(II) - 내진설계성능기준과 경제성 평가”, 한국지진공학학회.
2. 김동수, 이세현, 윤종구 (2008), “기반암 깊이와 토층 평균 전단 파속도를 이용한 국내 지반분류 방법 및 지반 증폭계수 개선”, 대한토목학회 논문집, 제28권 제1C호, pp.63-74.

3. 선창국, 정충기, 김동수 (2005), “국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭계수 및 지반분류 체계 제안”, 한국지반공학학회 논문집, 제21권 제6호, pp.101-115.
4. 윤종구, 김동수, 방은석 (2006), “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 한국지진공학학회 논문집, 제10권 제2호, pp.39-50.
5. 천성호, 선창국, 정충기 (2005), “지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용”, 대한토목학회 논문집, 제25권 제2C호, pp.103-115.
6. Bardet, J. P. and Tobita, T. (2001), “NERA : A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits”, University of Southern California.
7. CEN (Comite Europeen de Normalisation) (2003), “Eurocode 8 : Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1.1 : General Rules, seismic actions and rules for buildings”, PrEN 1998-1.
8. Dobry, R., Ramos, R. and Power, M. S. (1999), “Site Factors and Site Categories in Seismic Codes”, Technical Report MCEER-99-0010.
9. Gajer, R., Dobry, R., Silva, W., Thomann, T., Kishore, K., Patel, J., Razzaq, A. and Jain, S. (2008), “2008 New York City DOT Seismic Design Guidelines for Bridges Considering Local Site Conditions”, 6th National Seismic Conference on Bridges and Highways.
10. Hwang, H. H. M, Lin, H. and Huo, J. (1997), “Site coefficients for design of buildings in eastern United States”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.16, pp.29-40.
11. ICBO (1997), “1997 Uniform Building Code, Volume 2-Structural Engineering Design Provisions”, International Conference of Building Officials, California.
12. Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1992), “User’s manual for SHAKE91 : a computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits”, University of California, Davis, California.
13. Kim, D. S., Chung, C. K., Sun, C. G. and Bang, E. S. (2002), “Site Assessment and Evaluation of Spatial Earthquake Ground Motion of Kyeongju”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.22, No.5, pp.371-387.
14. Lee, Sei-Hyun, Sun, Chang-Guk, Yoon, Jong-Ku, Kim, Dong-Soo (2011), “Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea”, Journal of Earthquake Engineering. (Accepted)
15. Nuttli, O. W. (1981), “Similarities and differences between western and eastern United States earthquakes and their consequences for earthquake engineering”, Earthquakes and Earthquake Engineering - Eastern United States, ed. J. Beavers. Ann Arbor, MI, Vol.1, pp.25-51.
16. Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972), “SHAKE : a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

(접수일자 2012. 1. 6, 심사완료일 2012. 3. 20)