

국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (II) - 지반분류 개선방법

Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (II) - Development of Site Classification System

윤 종 구* 김 동 수** 방 은 석***
Yoon, Jong-Ku Kim, Dong-Soo Bang, Eun-Seok

국문요약

동반논문 (I)에서는 국내 지반특성에 적합하도록 국내 내진설계기준이 개선되어야 한다는 결론을 얻었다. 본 논문에서는 우수한 지반분류 방법을 찾기 위하여 상부 토층 30m의 평균 전단파속도(V_{S30}), 지반의 고유주기(T_G) 및 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법에 대하여 심도있게 검토하였다. 증폭계수(F_a , F_v)의 표준편차, 해석결과 의 평균 스펙트럼 가속도와 재산정된 응답스펙트럼을 비교한 결과 각각의 방법에서 큰 차이가 발생하지 않아 특정한 방법이 우수하다고 판단하기 힘들었다. 그러나, T_G 를 이용한 방법에서 RRS 값의 증폭구간이 좁은 구간에 집중되는 경향을 보여 지진시 유사한 거동특성을 나타내는 지반을 같은 지반그룹으로 분류할 수 있는 장점이 있었다. 또한, 증폭계수와 T_G 의 상관관계를 나타내는 추세선의 경우, V_{S30} 방법 보다 입력 가속도의 증가에 따른 지반의 비선형성 효과를 더욱 명확하게 나타낼 수 있었다. 마지막으로, V_{S30} 을 이용하여 지반을 분류할 경우 기반암이 30m 보다 얕은 곳에 존재하는 경우에도 무조건 심도 30m까지 기반암의 전단파속도를 가정하여 계산해야 하나, T_G 를 이용할 경우 이러한 불확실성을 제거할 수 있어 우수한 방법으로 판단된다. 본 논문에서는 지반의 고유주기를 이용한 방법을 기반암 깊이가 얕은 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법으로 제안하였다.

주요어 : 지반분류, 지반의 고유주기, 기반암 깊이, 응답스펙트럼, 지진응답해석, 증폭계수, RRS.

ABSTRACT

In the companion paper (I-Problem Statements of the Current Seismic Design Code), the current Korean seismic design code is required to be modified considering site characteristics in Korea for the reliable estimation of site amplification. In this paper, three site classification methods based on the mean shear wave velocity of the top 30m (V_{S30}), fundamental site periods (T_G) and bedrock depth were investigated and compared with each other to determine the best classification system. Not enough of a difference in the standard deviation of site coefficients (F_a and F_v) to determine the best system, and neither is the difference between the average spectral accelerations and the design response spectrum of each system. However, the amplification range of RRS values based on T_G were definitely concentrated on a narrow band than other classification system. It means that sites which have a similar behavior during earthquake will be classified as the same site category at the site classification system based on T_G . The regression curves between site coefficients and T_G described the effect of soil non linearity well as the rock shaking intensity increases than the current method based on V_{S30} . Furthermore, it is unambiguous to determine site category based on T_G when the site investigation is performed to shallower depth less than 30m, whereas the current V_{S30} is usually calculated fallaciously by extrapolating the V_s of bedrock to 30m. From the results of this study, new site classification system based on T_G was recommended for regions of shallow bedrock depth in Korea.

Key words : site classification, site period, bedrock depth, response spectrum, site response analysis, site coefficient, ratio of response spectrum, RRS

1. 서 론

동반논문(I, 국내 내진설계기준의 문제점 분석)에서는 현재 내진설계에 이용되고 있는 국내 기준이 국내의 일반적인 지반특성을 제대로 반영하지 못하고 있고, 지반분류 및 설계응답스펙트럼 작성 방법 등 설계지진력 산정하는 방법을 개선해야할 필요성을 확인하였다.⁽¹⁾

내진설계시 지반을 분류하는 목적은 지진시 비슷한 거동을 하는 지반을 같은 지반그룹을 분류하여 지반증폭현상 등 지진으로 유발되는 효과를 설계지진력 산정시 반영

하기 위함이다. 따라서, 내진설계를 위한 지반분류 방법을 개선하기 위해서는 지진시 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 먼저 고려해야 한다. 지진시 지반증폭현상을 수리역학적으로 단자유도계로 모델링 할 경우 지반증폭을 지배하는 요소는 전달함수(Transfer function)가 된다. 전달함수는 지반의 고유주기와 기반암 위에 있는 토층의 두께 및 전단파속도 함수로 표현되므로, 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 주는 요소는 지반의 고유주기와 토층의 두께(기반암 깊이) 및 전단파속도이다.

우리나라와 같이 기반암의 깊이가 얕아 대부분의 지반 조사가 기반암 깊이까지 수행되고 있고 토층의 전단파속도를 비교적 명확하게 측정할 수 있는 지역에서는, 기반암 깊이에 관계없이 심도 30m의 암반 물성까지 무조건 고려해야하는 V_{S30} 을 이용한 지반분류 방법 이외의 다른 방법

* 정희원, 한국유지관리(주) 지반설계사업부 이사(대표저자:hawaiiyoony@kmctech.co.kr)
** 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수
*** 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정
본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2006. 1. 6 / 심사종료일 : 2006. 3. 21)

을 생각해 볼 수 있다. 본 연구에서는 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 주는 지반의 고유주기와 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법에 대하여 검토하였고, 동반논문(I)의 결과인 V_{S30} 을 이용한 방법과 심도있게 비교·논의하였다. 또한, 최종적으로 가장 우수한 지반분류 방법을 찾기 위하여 여러 가지 판단기준에 근거하여 지반의 고유주기를 이용한 새로운 지반분류 체계를 제안하였다.

2. 전달함수

그림 1은 반무한 탄성 암반 위에 토사지반이 놓였을 경우에 대한 모식도이며, 그림에 나타난 지반에 지진파가 전달되었을 경우 암반층 상부와 지표면 상부의 층간 전달함수는 식 (1)과 같다.⁽²⁾

$$F(\omega) = \frac{1}{\cos k_s^* H + i a_z^* \sin k_s^* H} = \frac{1}{\cos(\omega H/v_{ss}^*) + i a_z^* \sin(\omega H/v_{ss}^*)} \quad (1)$$

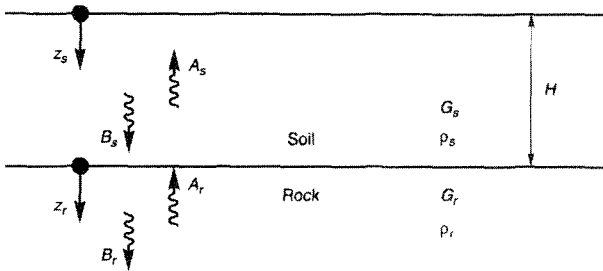


그림 1 반무한 탄성 암반 위에 있는 지반⁽²⁾

식 (1)과 같이 표현되는 전달함수를 살펴보면 토층 두께 또는 기반암 깊이(H)와 암반과 지반간의 복소저항비(Complex impedance ratio, α_z^*), 지반의 전단파속도(v_{ss}) 및 각속도(ω) 등의 함수이다. 특히, 각속도의 경우 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T_G$ 로 표현되므로 지반의 고유주기(T_G)에 대한 함수라고 할 수 있고, 지반의 고유주기는 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 지진시 지반의 응답특성에 영향을 미치는 요소는 기반암 깊이, 지반의 전단파속도 및 지반의 고유주기 등을 들 수 있다. 그림 1의 경우 상부 토층의 깊이가 일정한 경우에 대하여 나타냈으나, 지반의 층상구조는 일반적으로 다층구조로 되어 있어 각각의 층에 대한 전달함수를 개별적으로 계산한 후 최종적으로 전체적인 지반의 증폭현상을 평가할 수 있다.

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

여기서, D_i = 기반암 깊이까지 i 번째 토층의 두께 (m)

V_{Si} = i 번째 토층의 전단파속도 (m/sec)

본 연구에서는 위와 같이 지반증폭현상을 지배하는 요소가 전달함수임을 고려하여 지진시 지반분류 방법의 기준은 전달함수에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 중심으로 연구를 수행하였다.

3. 새로운 지반분류 방법 대안 검토

3.1 지반분류 방법 대안

동반논문(I)에서 서술한 바와 같이 V_{S30} 을 이용한 지반분류 방법은 기반암 깊이가 깊은 지역에서 효율적인 설계를 위하여 채택하고 있는 방법이다.⁽¹⁾ 국내와 같이 기반암 깊이가 얕아 대부분의 지반조사가 기반암 깊이까지 수행되고 있고 토층의 전단파속도를 비교적 명확하게 측정할 수 있는 지역에서는 기반암의 위치에 관계없이 무조건 심도 30m의 암반 강성을 고려해야 하는 V_{S30} 을 이용한 지반분류 이외에 다른 지반분류 방법을 생각해 볼 수 있다.

내진설계를 위한 지반분류 방법의 개선을 위해서는 지진시 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 먼저 고려해야 한다. 전술한 바와 같이 지진시 지반증폭현상을 지배하는 요소는 전달함수이고, 식 (1)에 나타난 바와 같이 전달함수는 지반의 고유주기(T_G), 기반암 깊이 그리고 토층의 전단파속도의 함수로 표현되므로 이 세 가지 요소가 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 준다. 또한, 식 (2)로 계산되는 지반의 고유주기는 기반암의 깊이와 전단파속도의 함수로 표현되고, 이들 두 개의 변수를 하나의 변수로 나타내고 있다. 따라서, 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법과 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법을 대안으로 생각해 볼 수 있다.

본 장에서는 위와 같은 논리를 바탕으로 현재 국내 기준에서 이용되고 있는 V_{S30} 을 이용한 지반분류 방법, 지반의 고유주기 그리고 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법에 대하여 심도있게 비교·검토하였다.

3.2 해석대상지반의 고유주기 특성과 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법

동반논문(I)에서 언급한 바와 같이 V_{S30} 을 기준으로 지반을 분류하였을 경우, S_E 지반은 입력 지진가속도의 증가에 따른 지반의 비선형 거동과 증폭계수의 경향 등에서 S_B , S_C 및 S_D 지반의 경향과는 정반대의 경향을 보이고 있어 모든 지반을 동일한 방법으로 경향성을 파악하는 것은 오류를 범할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 장에서는 S_E 지반을 제외한 S_B , S_C 및 S_D 지반의 고유주기 분포를 정규분포로 가정하여 그림 2와 같이 확률밀도함수로 나타내어 국내 지반의 고유주기의 특성을 파악하여 보았다.

그림 2에 나타난 V_{S30} 을 기준으로 분류할 경우 S_B , S_C 및 S_D 지반의 고유주기 분포를 살펴보면 평균값(mean)은 0.287초로 나타났고 표준편차의 경우 0.110초 였다. 따라

서, 평균값 $\pm 2\sigma$ (표준편차)의 범위는 0.077초에서 0.497 초에 해당한다. 본 장에서는 이러한 해석대상부지의 고유주기 분포 및 지반분류의 편이성을 고려하여 분류기준을 0.1초, 0.3초 그리고 0.5초로 경계값을 설정하여 표 1과 같이 지반을 T_A 지반, T_B 지반, T_C 지반 그리고 T_D 지반으로 분류하였다.

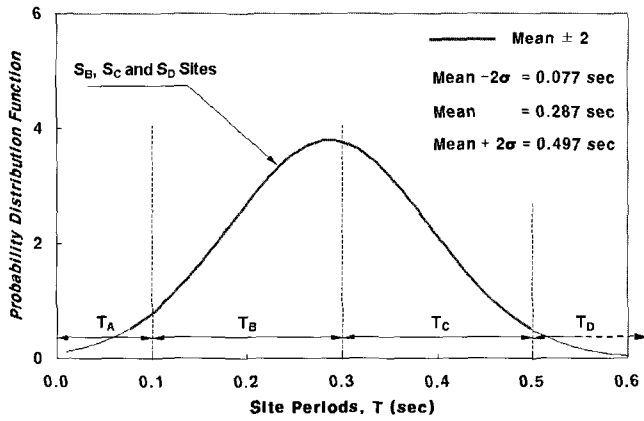


그림 2 S_E 지반을 제외한 해석대상부지의 고유주기 특성

표 1 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법

지반의 종류	지반분류 조건
T _A	T < 0.10 sec
T _B	0.10 sec ≤ T ≤ 0.30 sec
T _C	0.30 sec < T ≤ 0.50 sec
T _D	0.50 sec < T

동반논문(I)에 나타난 바와 같이 V_{S30} 기준으로 지반을 분류하였을 경우 S_B 지반은 16개, S_C 지반은 76개, S_D 지반은 60개 그리고 S_E 지반은 10개 이다. 그러나, 새로운 지반분류 체계인 표 1의 지반의 고유주기로 지반을 분류하였을 경우, T_A 지반은 18개, T_B 지반은 72개, T_C 지반은 58개 그리고 T_D 지반은 14개로 분류되었다. T_A 지반과 S_B 지반은 각각 18개와 16개로서 2개의 차이가 나타나지만 실제로 개별지반의 구성은 6개의 지반이 다르게 재

분류되어 S_B 지반에 대한 비율로 따져보면 37.5%의 지반 구성 요소의 변화가 발생하였다. T_B 지반과 S_C 지반의 경우 24개 지반이 재분류되어 31.6%의 변화가 발생하였고, T_C 지반과 S_D 지반의 경우 22개 지반이 재분류 되어 36.7%의 변화가 발생하였다. T_D 지반의 경우 S_E 지반 10개와 4개의 지반이 S_D 지반에서 T_D 지반으로 이동하여 40%의 변화가 발생하였다. 따라서, 지반분류 기준이 바뀌어 재분류된 개별지반의 구성요소를 근거로 판단하였을 경우 V_{S30}과 지반의 고유주기를 이용한 지반분류의 결과에서 많은 차이가 발생하여 증폭계수에서도 상당한 차이가 발생할 것으로 추측된다. 지반분류 기준을 변경함에 따라 개별지반이 재분류된 결과는 표 2에 요약하였다.

표 2 지반분류 기준의 변화에 따라 재분류된 지반 개수

V _{S30}		지반의 고유주기		기반암 깊이	
구분	개수	구분	개수	구분	개수
S _B	16	T _A	18	B _I	27
S _C	76	T _B	72	B _{II}	62
S _D	60	T _C	57	B _{III}	54
S _E	10	T _D	14	B _{IV}	19

표 3 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법

지반의 종류	지반분류 조건
B _I	H' < 10m
B _{II}	10m ≤ H ≤ 20m
B _{III}	20m < H ≤ 30m
B _{IV}	30m < H

* H = Bedrock depth, 기반암 깊이

3.3 기반암의 깊이를 이용한 지반분류 방법

기반암의 깊이는 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 미치는 요소중의 하나로 새로운 지반분류 방법의 대안으로 생각할 수 있다. 본 논문에서는 전단파속도를 기준으로 760m/sec 이상이거나, 시추주상도 상에 암반으로 분류되기 시작한 깊이, 그리고 풍화암에서 지반조사가 끝났을 경우 지반조사가 끝난 위치를 기반암으로 결정하였다. 본 장에서는

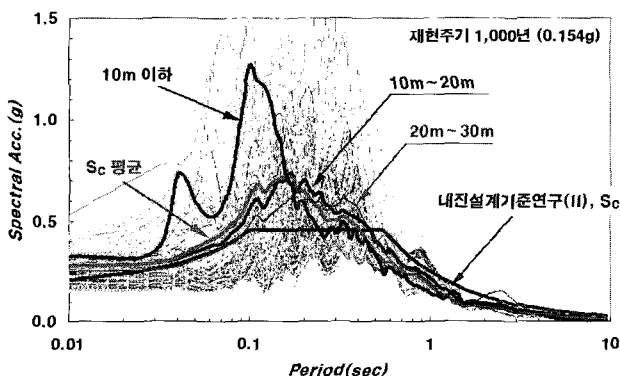


그림 3 S_C 기반암 깊이에 따른 스펙트럴 가속도 값의 비교

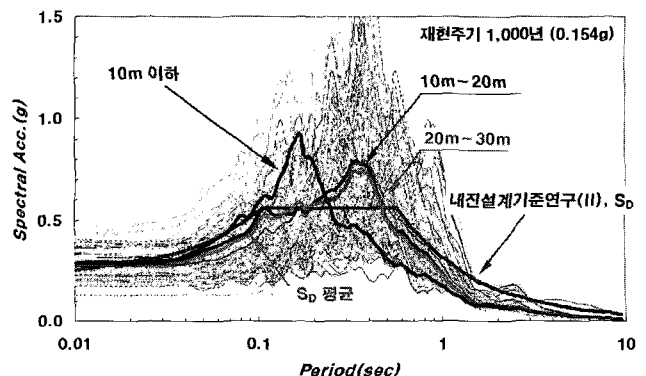


그림 4 S_D 기반암 깊이에 따른 스펙트럴 가속도 값의 비교

기반암의 깊이에 따른 영향 정도를 파악하기 위한 예비해석을 수행하였다. 이를 위하여, 그림 3과 그림 4와 같이 재현주기 1,000년 지진에 대하여 V_{S30} 기준으로 S_C 지반과 S_D 지반으로 분류된 지반을 기반암 깊이 10m 이하, 10m~20m 사이 그리고 20m~30m 사이에 위치해 있는 경우로 재분류하여 기반암 깊이에 따른 스펙트럼 가속도의 평균값을 비교하였다. S_B 지반과 S_E 지반의 경우 예비해석에서는 제외하였다.

검토 결과 기반암 깊이에 따라 스펙트럼 가속도의 경향은 상당히 다르게 나타났다. 특히, S_C 지반과 S_D 지반에서 기반암의 깊이가 10m 이내에 있을 경우 10m~20m 그리고 20m~30m 사이에 위치해 있는 경우와 전혀 다른 경향을 보이고 있다. 즉, V_{S30} 을 기준으로 같은 지반으로 분류되었으나 기반암의 깊이에 따라 전혀 다른 경향을 보인다. 이러한 현상은 기반암의 깊이가 스펙트럼 가속도에 큰 영향을 미치고 있고, 기반암이 심도 10m 이내에 존재할 경우 암반의 전단파속도가 과도하게 반영되어 V_{S30} 을 기준으로 지반분류시 왜곡의 개연성이 있어 개선이 필요하다고 판단된다.

예비해석의 결과를 바탕으로 기반암이 깊이가 10m 이하일 경우 전혀 다른 특성을 보이고 있어 별도로 분류하였고, 깊이 30m 이상일 경우 기반암 깊이가 깊은 지반으로 별도로 분류하였다. 깊이 10m~20m 사이와 20m~30m 사이에 존재하는 경우를 살펴보면, S_D 지반의 경우 상대적으로 작게 나타났으나 S_C 지반의 경우 기반암 깊이에 따라 단주기 영역의 특성과 장주기 영역의 특성이 나타나고 있다. 또한 S_C 지반과 S_D 지반이 전체 해석대상지반 162개중 136개를 차지하고 지반분류의 편이성을 고려하여 분류기준을 10m, 20m 및 30m로 설정하여 표 3과 같이 지반을 분류하였다.

표 3의 방법에 따라 기반암 깊이를 이용하여 분류하였을 경우, B_I 지반에 해당하는 지반이 27개, B_{II} 지반은 62개, B_{III} 지반은 54개 그리고 B_{IV} 지반은 19개로 분류되었고, 재분류된 결과와 다른 지반분류 방법과의 비교는 표 2에 나타나 있다. V_{S30} 으로 지반을 분류하였을 경우와 지반의 구성요소를 비교하면, B_I 지반의 경우 S_B 지반의 구성요소 보다 11개 지반이 추가 되었으나, 다른 지반종류에서 재분류된 지반의 수는 15개로 S_B 지반과는 전혀 다른 지반종류로 취급해야 한다. 따라서 재분류된 비율을 논의하는 것 자체가 무의미하다. B_{II} 지반의 경우에도 S_B , S_C 및 S_D 지반에서 재분류된 지반의 개수가 56개로 나타났고, B_{III} 지반의 경우 53개 지반으로 나타났다. 따라서, 기반암의 깊이를 이용하여 지반을 분류하였을 경우 지반의 고유주기 및 V_{S30} 을 기준으로 분류한 지반과는 전혀 다른 특성을 보일 것으로 예상할 수 있다.

3.4 우수한 지반분류 방법 판단 기준

우수한 지반분류 방법은 지반분류 기준과 증폭비가 일

정한 상관관계를 가져야 하고, 이를 개별 지반그룹으로 분류하였을 경우 동일 지반그룹에서는 증폭비가 통일된 경향성을 가지면서 증폭계수의 편차가 작아야 한다. 또한 해석결과와 스펙트럼 가속도의 평균값과 재산정된 응답스펙트럼과의 차이가 작은 방법이 우수한 지반분류 방법이다.

본 연구에서는 세 가지 지반분류 방법 중에서 가장 우수한 지반분류 방법을 선정하기 위하여 다음과 같은 다섯 가지 기준을 적용하여 검토하였다.

- (1) 증폭계수의 표준편차가 작은 방법
- (2) 해석결과와 스펙트럼 가속도 평균값과 재산정된 응답스펙트럼과의 차이가 작은 방법
- (3) 동일한 지반그룹내에서 RRS 값이 통일된 경향성을 보이는 방법
- (4) 지반분류 기준과 증폭계수의 상관관계가 명확한 방법
- (5) 지반조사 자료의 부족으로 인한 추측 가능성이 작은 방법

4. 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법

4.1 증폭계수의 재산정 및 표준편차 비교

어느 특정한 분류기준으로 지반을 분류하였을 경우 증폭계수(F_A , F_V)의 표준편차가 작다는 의미는 증폭정도가 비슷한 지반들이 같은 지반그룹으로 분류되었다는 의미가 된다. 따라서, 증폭계수의 표준편차가 작을수록 우수한 지반분류 방법이 되고 본 절에서는 세 가지 지반분류 방법으로 재산정한 증폭계수의 표준편차를 검토하였다.

표 4와 표 5에는 지반의 고유주기를 기준으로 분류된 T_A , T_B , T_C 그리고 T_D 지반의 증폭계수를 나타내었다. 표 6과 표 7에는 기반암 깊이를 기준으로 분류된 B_I , B_{II} , B_{III} 그리고 B_{IV} 지반의 재산정된 증폭계수를 나타내었다.

V_{S30} 을 기준으로 재산정된 증폭계수(동반논문(I)의 표 4와 표 5)와 지반의 고유주기를 기준으로 재산정된 증폭계수(표 4, 표 5)를 비교하면, T_A 지반과 S_B 지반의 경우 F_A 값에서 약 10% 정도의 차이가 나타나지만, T_B 지반과 S_C 지반의 증폭계수는 거의 비슷한 값으로 나타났다. 또한 T_C 지반과 S_D 지반에서도 증폭계수의 값이 비슷한 결과를 보이고 있으며, T_D 지반과 S_E 지반에서도 비슷하게 나타났다. 기반암 깊이를 기준으로 재산정된 증폭계수(표 6, 표 7)를 비교하여도, B_I 지반과 T_A 지반 및 S_B 지반에서 F_A 값에서 10% 정도의 차이가 나타난 것을 제외할 경우 다른 지반에서는 큰 차이가 발생하지 않고 있다.

이러한 결과는 표 2와 같이 지반분류 기준이 바뀔 때 따라 재분류된 개별지반의 구성요소 변화가 상당히 크게 나타나 증폭계수 값이 다르게 나타날 것이라는 예상과는 달리, 증폭계수의 표준편차가 차이가 상당히 작게 나타난 결과여서 주목된다. 따라서, 증폭계수와 표준편차에 한정할 경우 세 가지 지반분류 기준으로는 어느 특정한 방법이 우수하다고 결론 내리기 어렵다. 다만, 기반암 깊이를 이

표 4 단주기 증폭계수 F_a (지반분류 기준 - 지반의 고유주기)

Site Period T (sec)		0.110g		0.154g		0.220g	
		Average	σ	Average	σ	Average	σ
$T < 0.1$	T_A	1.19	0.273	1.20	0.297	1.22	0.319
$0.1 \leq T \leq 0.3$	T_B	1.73	0.401	1.73	0.411	1.80	0.446
$0.3 < T \leq 0.5$	T_C	2.05	0.431	2.02	0.418	1.96	0.448
$0.5 < T$	T_D	1.62	0.502	1.49	0.512	1.39	0.522

표 5 장주기 증폭계수 F_v (지반분류 기준 - 지반의 고유주기)

Site Period T (sec)		0.110g			0.154g			0.220g		
		Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v
$T < 0.1$	T_A	1.01	0.016	1.03	1.01	0.018	1.03	1.01	0.021	1.04
$0.1 \leq T \leq 0.3$	T_B	1.09	0.083	1.18	1.11	0.096	1.20	1.13	0.123	1.25
$0.3 < T \leq 0.5$	T_C	1.28	0.227	1.51	1.31	0.240	1.55	1.34	0.233	1.58
$0.5 < T$	T_D	2.02	0.427	2.45	1.99	0.418	2.41	1.94	0.437	2.37

표 6 단주기 증폭계수 F_a (지반분류 기준 - 기반암 깊이)

Bedrock depth (m)		0.110g		0.154g		0.220g	
		Average	σ	Average	σ	Average	σ
$H < 10$	B_I	1.31	0.343	1.33	0.363	1.35	0.375
$10 \leq H \leq 20$	B_{II}	1.83	0.464	1.83	0.457	1.84	0.473
$20 < H \leq 30$	B_{III}	1.97	0.399	1.95	0.391	1.92	0.422
$30 < H$	B_{IV}	1.67	0.523	1.58	0.552	1.49	0.630

표 7 장주기 증폭계수 F_v (지반분류 기준 - 기반암 깊이)

Bedrock depth (m)		0.110g			0.154g			0.220g		
		Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v
$H < 10$	B_I	1.03	0.044	1.07	1.03	0.051	1.08	1.04	0.064	1.10
$10 \leq H \leq 20$	B_{II}	1.16	0.237	1.40	1.18	0.247	1.42	1.19	0.232	1.42
$20 < H \leq 30$	B_{III}	1.26	0.234	1.49	1.28	0.240	1.52	1.33	0.258	1.52
$30 < H$	B_{IV}	1.75	0.538	2.29	1.72	0.508	2.23	1.69	0.485	2.18

용하였을 경우 각 지반종류의 표준편차가 크게 나타나 증폭계수의 산란정도는 큰 것으로 판단되고, 다른 방법에 비해 기반암의 깊이를 이용하였을 경우 증폭계수의 산란정도 측면에서 부적합한 면이 있으나, 그 차이는 각 증폭계수의 값에 비하여 큰 차이는 아니기 때문에 어느 특정 방법이 탁월한 우월성이 있다고 판단하기는 힘들다.

4.2 스펙트럼 가속도 평균값과 재산정된 응답스펙트럼과의 차이

해석에서 얻어진 스펙트럼 가속도 값의 평균값과 재산정된 증폭계수를 이용한 응답스펙트럼의 차이가 크게 발생하는 것은 재산정된 응답스펙트럼이 그 지반그룹의 특성을 대표하지 못한다는 의미이므로, 차이가 크게 나타나지 않는 방법일수록 우수한 지반분류 방법으로 판단할 수 있다.

본 절에서는 지반의 고유주기와 기반암 깊이를 이용하

여 재산정된 증폭계수(표 4~표 7)를 이용하여 작성된 응답스펙트럼과 지진응답해석 결과에서 얻어진 스펙트럼 가속도의 평균값을 비교하여 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 또한, 동반논문(I)의 그림 11과 비교하여 세 가지 방법중에서 우수한 지반분류 방법에 대하여 검토하였다.

그림 5(a)의 T_A 지반, 그림 6(a)의 B_I 지반 그리고 동반논문(I) 그림 11(a)의 S_B 지반의 결과를 살펴보면 해석결과의 평균 스펙트럼 가속도와 재산정된 응답스펙트럼의 차이에서 큰 차이가 발생하지 않고 있다. S_C , T_B 그리고 B_{II} 지반의 경우에는 B_{II} 지반이 약간 우수하게 나타났다. S_D , T_C 그리고 B_{III} 지반의 경우 어느 특정한 방법이 우수하다고 판단하기 힘들다. 마지막으로 S_E , T_D 그리고 B_{IV} 지반의 경우에는 S_E 지반이 약간 우수하게 나타났다. 이러한 결과는 표 8에 간략하게 정리하여 나타내었으나, 세 가지 방법에서 탁월하게 우수한 방법을 결정하기 힘들다.

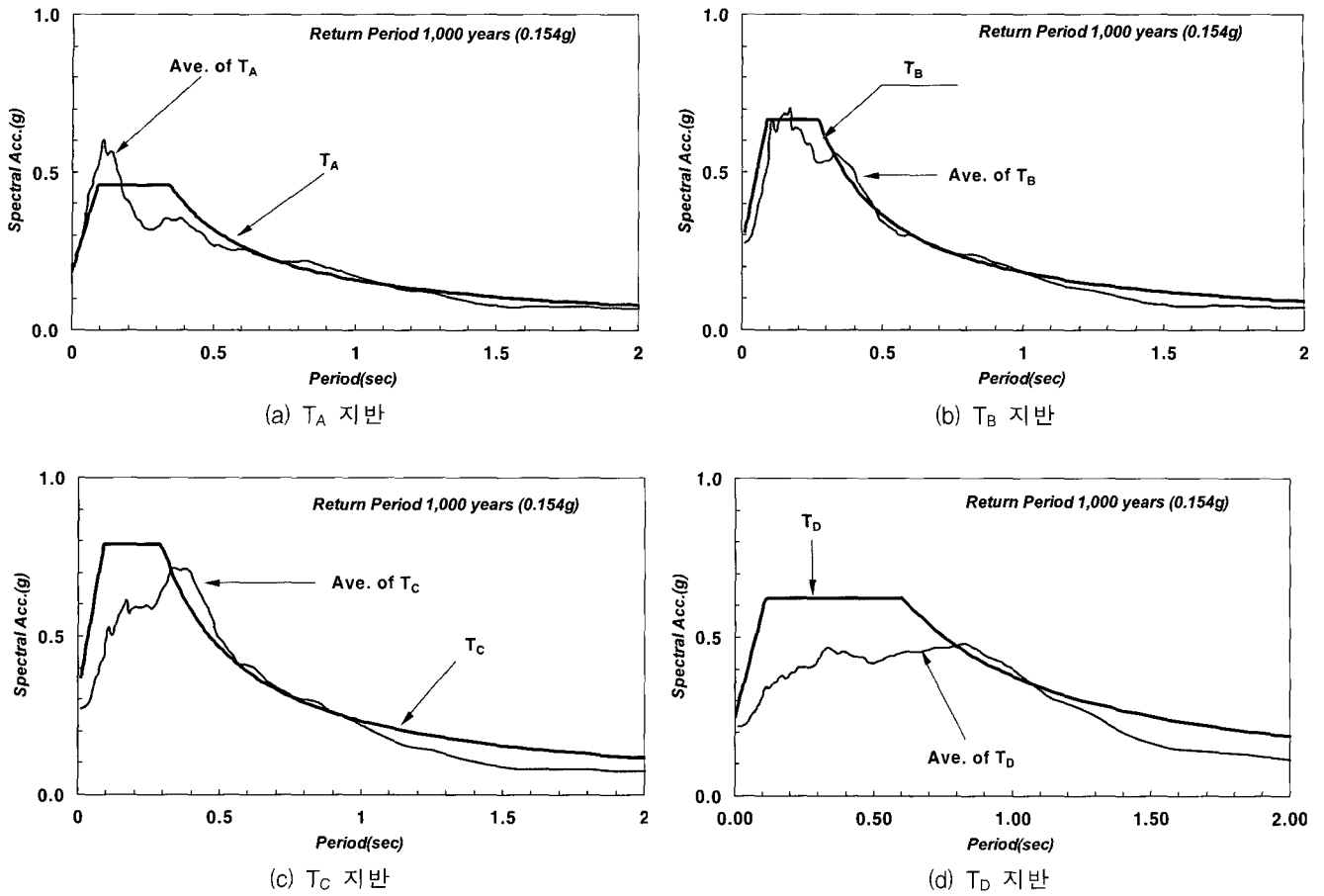


그림 5 스펙트럴 가속도의 평균값과 재산정된 응답스펙트럼과의 비교(지반분류 기준 - 지반의 고유주기, 재현주기 1,000년)

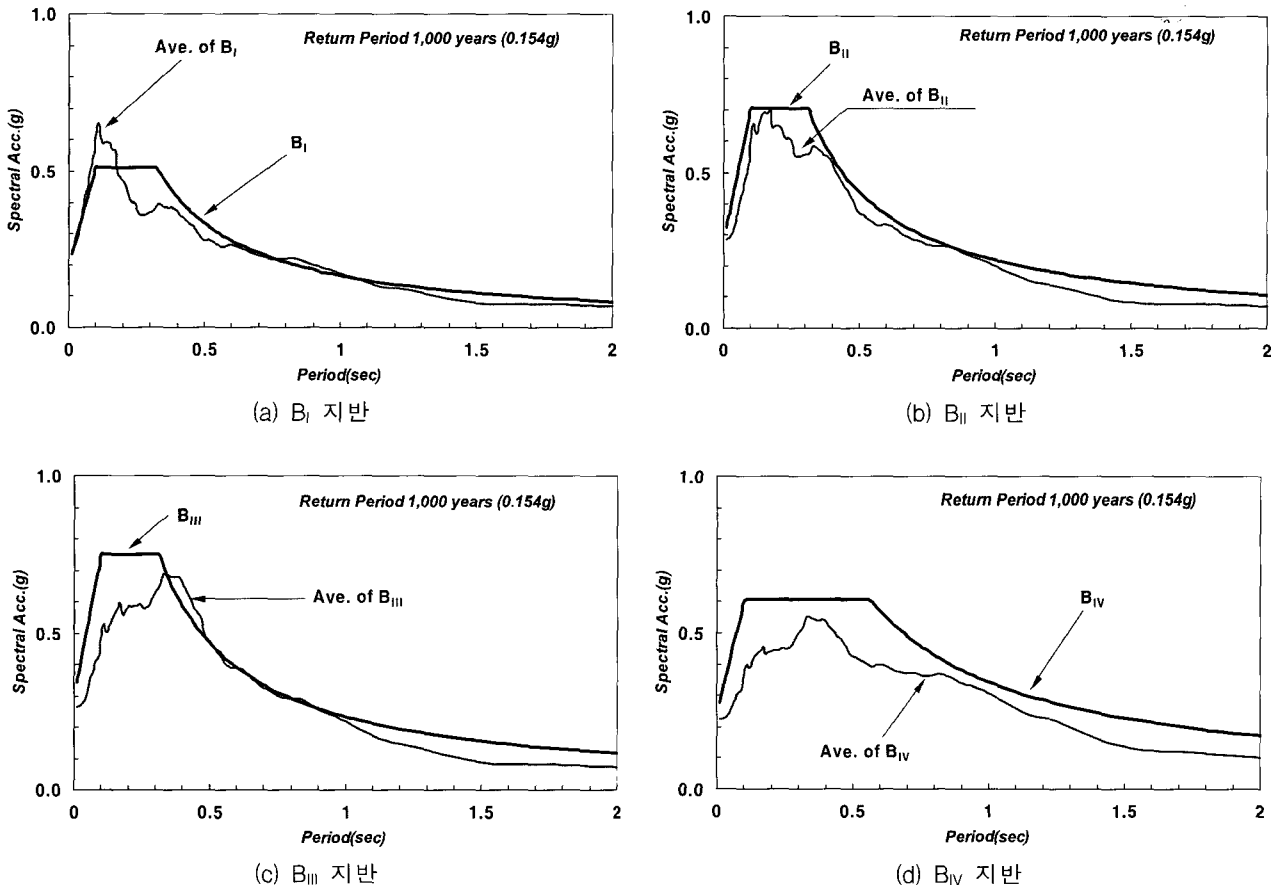


그림 6 스펙트럴 가속도의 평균값과 재산정된 응답스펙트럼과의 비교(지반분류 기준 - 기반암 깊이, 재현주기 1,000년)

4.3 동일한 지반그룹내에서 RRS 값의 통일된 경향성

4.1절의 증폭계수의 표준편차와 4.2절의 해석결과의 평균 스펙트럼 가속도와 재산정된 응답스펙트럼과에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 중간과정을 고려하지 않고 최종 결과의 수치 값만 비교했을 경우 차이가 나타나지 않았을 뿐이며, 실제로 중간과정의 세부적인 사항을 비교하여 보면 각각의 방법에서 상당한 차이가 발생한다. 그림 7, 그림 8 그리고 동반논문(I)의 그림 8은 이러한 현상을 명확히 설명해주고 있다.

그림 7에는 지반의 고유주기를 이용한 지반분류시 각 지반종류에 대하여 구조물 주기 0초 - 2.0초 사이의 RRS(Ratio of Response Spectrum) 값에 대한 결과를 나타내었다. 그림 7(a)의 T_A 지반과 동반논문(I) 그림 8(a)의 S_B 지반의 결과를 비교하여 보면, T_A 지반에서 S_B 지반 보다 RRS의 값이 증폭되는 영역이 더 넓게 나타나고 있다. 이러한 현상은 S_C 지반으로 분류되던 지반이 T_A 지반으로 분류되어 기존의 S_B 지반보다 더 넓은 영역에서 RRS의 값이 증폭되기 때문이다. 그러나, 두 지반의 결과 사이에는 주목할 만한 차이가 나지 않고 있다.

T_B 지반(그림 7(b))과 S_C 지반(동반논문(I) 그림 8(b))의 결과를 비교하여 보면, T_B 지반의 경우 주기 0.1초~0.5초 사이에서 집중적으로 증폭현상이 나타나고 있고, S_C 지반의 경우 0.1초~0.5초 사에서 주로 증폭이 발생하고 일부 0.5초 이상에서 증폭이 발생하는 경우도 있다. 특히, S_C 지반중에서 지반의 고유주기가 0.3초~0.5초에 해당하는 지반이 T_C 지반으로 분류되어 T_B 지반에서는 0.5초 이상에서 증폭되는 RRS 값을 찾기 힘들다.

T_C 지반과 S_D 지반의 경우, 새로운 지반분류 기준에 대한 효과가 뚜렷하게 나타나고 있다. 동반논문(I)에서 S_D 지반의 경우 대부분 지반에서 F_a의 값이 F_v의 값보다 크게 나타나지만, 기반암의 깊이가 깊고 고유주기가 장주기 영역의 일부 S_D 지반에서는 F_a의 값이 F_v의 값보다 작고 스펙트럴 가속도의 경우에도 장주기 영역에서 크게 증폭되는 현상에 대하여 언급한 바 있다. 즉, V_{S30}으로 분류하였을 경우 동일한 S_D 지반의 경우 0.1초~0.5초의 단주기 영역에서 RRS의 값이 증폭되는 지반과 0.5초 이상의 장주기 영역에서 집중적으로 증폭이 발생하는 지반이 공존하는 반면, 지반의 고유주기를 이용할 경우 T_C 지반에서는 0.5초 이상의 장주기 영역에서 크게 증폭되는 현상이 현저하게 감소하고 있다. 이는 기반암의 깊이가 깊어 주기 0.5초 이상으로 분류되는 지반이 T_D 지반으로 재분류 되었기 때문이다. 따라서, 지반의 고유주기를 이용할 경우 V_{S30}의 방법보다 효율적인 지반분류가 가능해져 지반분류의 목적인 지진시 유사한 거동을 나타내는 지반을 같은 지반그룹으로 분류되도록 개선된 결과를 확인할 수 있었다.

T_D 지반과 S_E 지반을 비교하여 보면, 기존의 S_E 지반의 개수가 10개인 반면 T_D 지반은 14개로 분류되어 T_D 지반에서 데이터 개수가 더 많음을 확인할 수 있고, 이는 일

부 장주기에 해당하는 S_D 지반이 T_D 지반으로 재분류되었기 때문이다. 따라서, 지반의 고유주기를 이용하여 분류할 경우 F_a 보다 F_v 값이 큰 경향을 보이는 지반은 대부분 T_D 지반으로 분류되어 V_{S30}을 이용한 방법보다 지반분류의 효율성이 향상된 것으로 분석된다.

위와 같은 현상은 기반암 깊이를 기준으로 지반을 분류하였을 경우에도 비슷하게 명확하게 나타나고 있다. 그림 8에는 기반암 깊이에 따른 각각의 지반종류에 대하여 구조물 주기 0초~2.0초 사이의 RRS 값에 대한 결과를 나타내었다

그림 8(a)의 B_I 지반, 그림 7(a)의 T_A 지반과 동반논문(I) 그림 8(a)의 S_B 지반의 결과 비교해 보면, S_B 지반과 T_A 지반의 경우 주기 0.1초~0.2초 부근에서 RRS의 값이 집중적으로 증폭현상이 발생하는 반면 B_I 지반에서는 RRS 값이 상당히 넓은 영역에서 증폭현상이 나타나고 있어 다른 기준의 경우보다 경향성 면에서 열등한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 B_{II} 및 B_{III} 지반에서도 나타나고 있어, 같은 지반으로 분류되었지만 개별 지반의 RRS는 상당히 다른 경향을 보이고 있어 우수한 지반분류 방법과는 거리가 멀다. 특히 S_E 및 T_D 지반의 경우 F_a 값 보다 F_v 값이 큰 형태의 경향을 뚜렷하게 보였는데, B_{IV} 지반의 경우 이러한 추세가 약화되어 단순히 기반암 깊이를 기준으로 지반을 분류할 경우 많은 오류를 범할 수 있는 것으로 판단된다.

4.1절과 4.2절에서는 기반암 깊이를 기준으로 지반을 분류하였을 경우 재산정된 증폭계수의 값은 V_{S30} 및 지반의 고유주기를 이용한 방법과 큰 차이가 없었고, 표준편차의 경우 상대적으로 크게 나타났지만 그 차이가 절대적으로 큰 값은 아니므로 수치적인 값을 판단기준으로 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법이 열등하다고 판단하기 힘들었다. 그러나, 각 개별지반의 RRS 경향성을 분석한 결과 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법이 가장 열등한 방법으로 나타났다. 이러한 사실은 지반의 분류기준이 바뀌어도 증폭계수와 증폭계수의 표준편차 및 스펙트럴 가속도와 응답스펙트럼의 차이는 크게 나타나지 않아 우수한 방법을 결정하기 힘들 수 있으나, 실제로 지반분류 기준에 따라서 각각의 개별지반 그룹이 나타내는 특성은 매우 달라짐을 보여주고 있다.

4.4 지반분류 기준과 증폭계수의 상관관계

지반분류 기준과 증폭계수와 상관관계를 나타내는 추세선이 일정한 경향을 가지면서 입력 지진가속도가 증가함에 따른 지반의 비선형성 등과 같은 중요한 특징을 효율적으로 표현할수록 우수한 지반분류 방법이다.

그림 9에는 지반의 고유주기와 증폭계수와의 상관관계 및 추세선의 경향성을 나타내었다. 그림 9(a)의 단주기 증폭계수 F_a와 지반의 고유주기와 관계를 살펴보면, 지반의 고유주기가 0.10초 보다 작을 경우 F_a 값은 0.08초 부

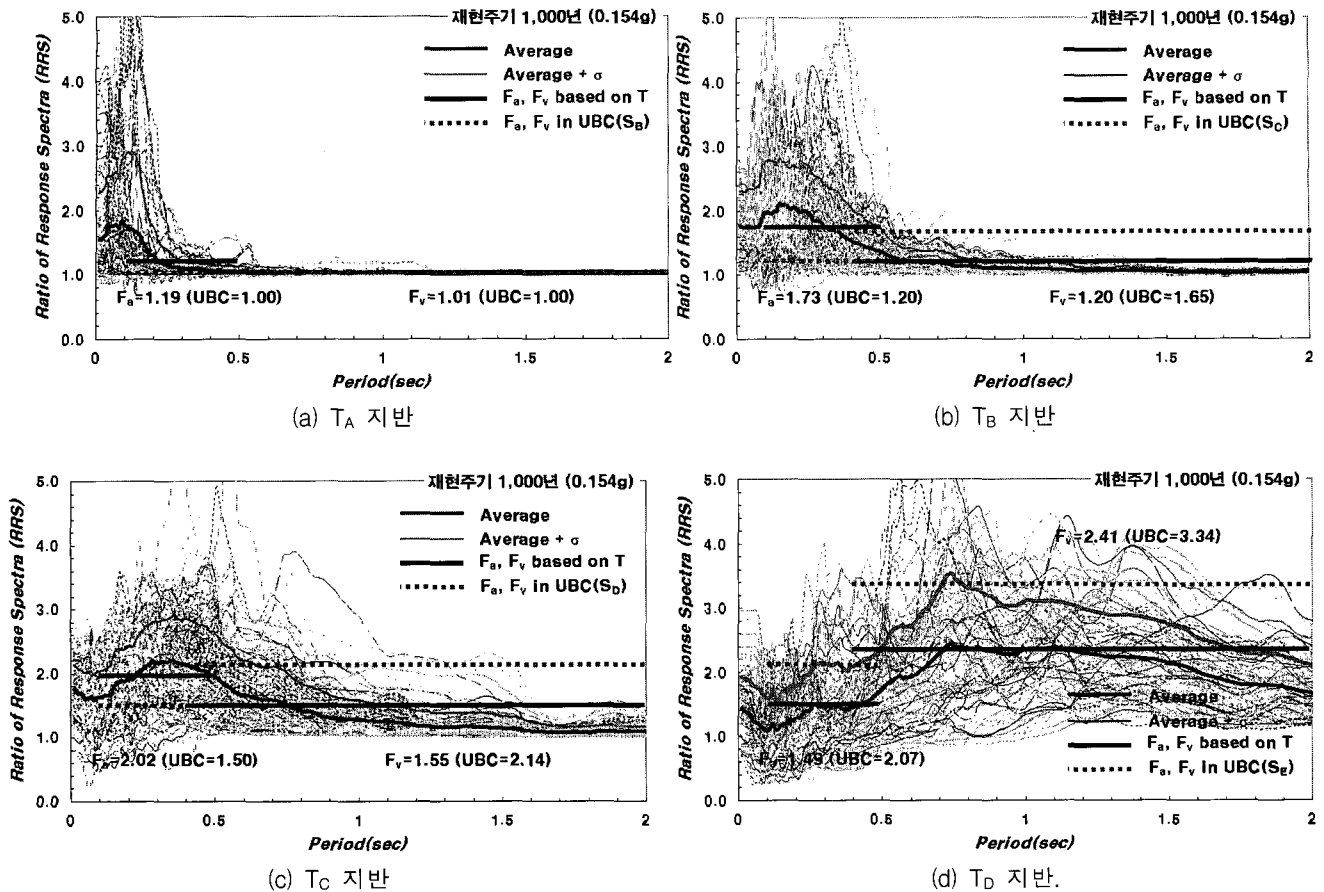


그림 7 재현주기 1,000년에 대한 지반 종류별 RRS 값의 경향성 검토(지반분류 기준 - 지반의 고유주기)

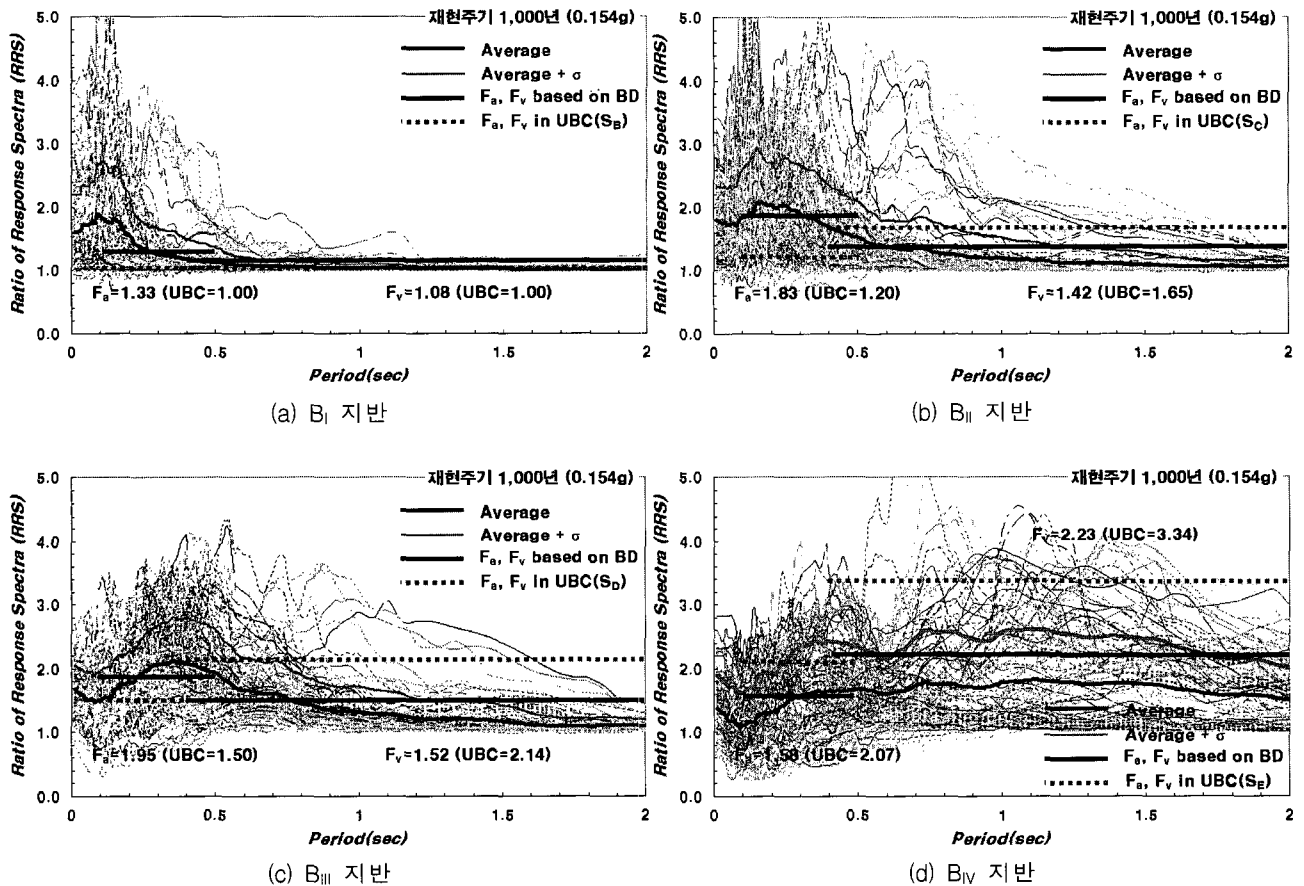
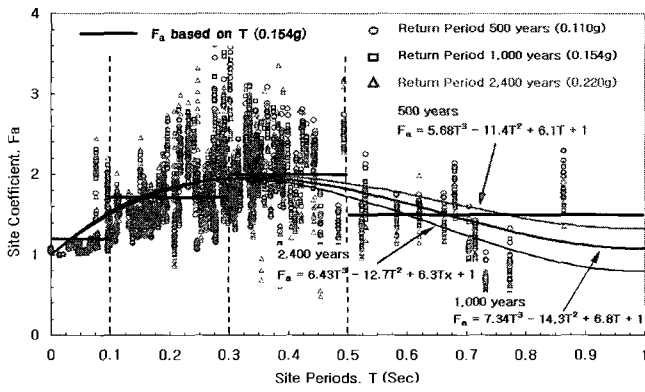
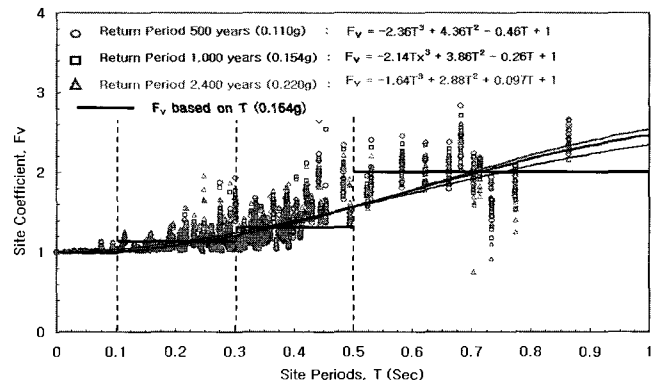


그림 8 재현주기 1,000년에 대한 기반암 깊이로 분류한 지반종류별 RRS 값의 경향성 검토(지반분류 기준 - 기반암 깊이)

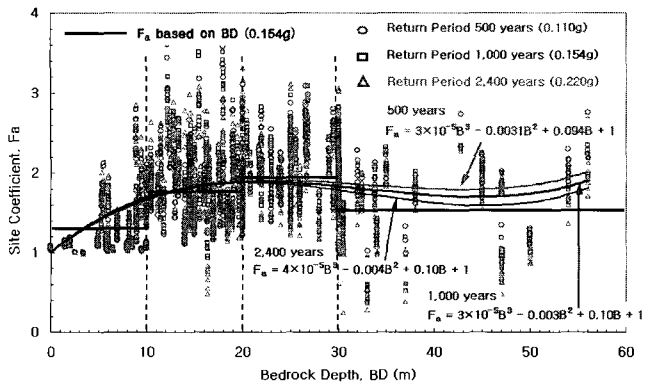


(a) 단주기 증폭계수 F_a 의 변화

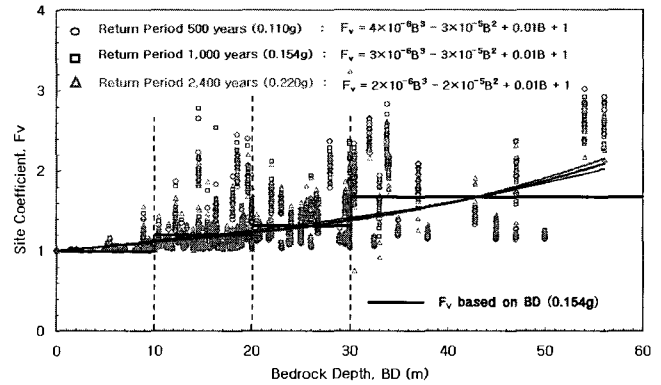


(b) 장주기 증폭계수 F_v 의 변화

그림 9 지반의 고유주기와 증폭계수와의 상관관계



(a) 단주기 증폭계수 F_a 의 변화



(b) 장주기 증폭계수 F_v 의 변화

그림 10 기반암 깊이와 증폭계수와의 상관관계

근에서 약간 큰 값을 가지는 경우가 나타나지만, 대부분 1.0 부근에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 지반의 고유주기가 0.1초~0.3초인 경우 F_a 값은 산란정도가 심하나 전반적으로 고유주기가 증가함에 따라 F_a 값도 증가하는 경향을 보이고 있고, 지반의 고유주기가 0.3초~0.5초 사이에서는 0.3초에 가까울수록 일정한 값을 보이는 경향이 있고 0.5초에 가까워질수록 소폭 감소하는 경향이 있다.

따라서, 표 1과 같이 지반의 고유주기를 0.1초, 0.3초 그리고 0.5초를 경계로 지반을 분류하였을 경우, 증폭계수 F_a 의 경우 T_A 지반의 영역에서는 1.0 근처에 수렴하는 경향을 보이고, T_B 지반의 영역에서는 증가하는 경향이, T_C 지반의 영역에서는 일정한 값을 가지나 조금씩 감소하는 경향이 나타나고 있다. 반면 T_D 지반의 영역에서는 전반적으로 감소하는 경향이 나타나고 있다. 따라서, 이러한 현상을 추세선으로 나타내기 위하여 추세선은 최소 2개의 변곡점(Inflexion point)이 필요한 것으로 판단하여 3차 다항식을 이용하여 추정하여 나타내어 보았다.

그림 9(a)에 나타난 추세선의 3차 다항식 자체는 큰 의미는 없으나, 추세선에서 나타나는 증폭계수의 경향 파악은 매우 중요하다. 재현주기에 따른 추세선의 변화를 살펴보면, T_A 및 T_B 지반에서는 세 가지 재현주기에 따라 추세선이 거의 일치하는 경향을 보이고 있고, T_C 지반의 경우 지반의 고유주기가 0.35초~0.4초 부근에서 입력 지진

가속도가 증가함에 따라 추세선이 점점 아래로 내려오고 있다. T_D 영역의 경우 지진가속도가 증가함에 따라 추세선은 확연히 구분되고 재현주기 2,400년에 해당하는 추세선이 가장 작게 나타난다.

이러한 현상은 지반의 고유주기가 0.35초 이하인 지반에서는 지진가속도가 증가함에 따라 증폭계수의 값이 일정하여 지반의 비선형 거동에 대한 영향이 크게 나타나지 않음을 의미하고, 0.35초 이상인 지반의 경우 지진가속도가 증가할수록 스펙트럴 가속도의 증폭정도가 크게 변하여 지반의 비선형 거동에 의한 영향이 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

그림 9(b)의 장주기 증폭계수 F_v 와 지반의 고유주기와 관계를 살펴보면, F_a 의 경향과는 전혀 다르게 나타났다. F_a 의 경우 지반의 고유주기가 커짐에 따라 증가하는 부분과 감소하는 부분이 존재하였으나, F_v 의 경우 지반의 고유주기가 커질수록 F_v 의 값이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. 재현주기에 따른 추세선의 경우 주기 0.6초 이하에서는 세 가지 재현주기의 추세선이 거의 구분되지 않는 반면, 0.6초 이상의 영역에서는 재현주기가 증가할수록 추세선이 약간씩 아래로 처지는 경향이 있으나 그 차이는 크지 않아 F_v 의 경우 단주기 증폭계수 F_a 보다 지반의 비선형 거동에 대한 영향이 상대적으로 작은 것으로 판단된다.

그림 10에는 기반암 깊이와 증폭계수와의 상관관계 및

추세선의 경향성을 나타내었다. 그림 10(a)를 살펴보면, 10m~20m 사이에 가장 많은 데이터 포인트가 존재하는 것을 볼 수 있고, 이는 국내 지반의 기반암 깊이가 10m~20m 사이에 가장 존재한다는 의미이기도 하다. 단주기 영역의 증폭계수 F_a 와 기반암의 깊이와의 관계를 살펴보면, B_I 지반의 경우 다른 깊이의 값보다 전반적으로 작은 값을 가지고 있고, B_{II} 및 B_{III} 지반의 값은 최대값과 최소값의 범위가 상당히 넓게 분포되어 있어 산란정도가 심하고 특별하게 감소하거나 증가하는 등의 뚜렷한 경향은 나타나지 않고 있다. 반면 깊이 B_{IV} 지반의 영역에서는 전반적으로 감소하는 경향이 나타나고 있다. 따라서, 추세선의 경우 그림 9의 지반의 고유주기를 이용하여 지반을 분류한 경우와 F_a 의 분포경향이 비슷하여 3차 다항식을 이용하여 추정하여 나타내어 보았다.

재현주기에 따른 추세선의 변화를 살펴보면, B_I 및 B_{II} 지반에서는 세 가지 재현주기에 따라 추세선이 거의 일치하는 경향을 보이고 있고, B_{III} 지반의 경우 기반암의 깊이가 25m 부근에서 지진가속도의 증가에 따라 추세선이 점점 아래로 내려오고 있다. B_{IV} 영역의 경우 지진가속도가 증가함에 따라 추세선은 확연히 구분되고 재현주기 2,400년에 해당하는 추세선이 가장 작게 나타난다.

이러한 현상은 기암암이 심도 25m 이하에 존재하는 지반에서는 지진가속도가 증가함에 따라 증폭계수의 값이 일정하여 지반의 비선형 거동이 크게 나타나지 않음을 의미하고, 25m 이상인 지반의 경우 지진가속도가 증가할수록 스펙트럴 가속도의 증폭정도가 크게 변하여 지반의 비선형 거동에 의한 영향을 많이 받는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 경향은 그림 9(a)의 지반의 고유주기를 이용했던 경우와 동일한 현상이기는 하나, F_a 의 산란정도를 정성적(Quantitative)으로 판단해보면 두 결과에서는 큰 차이가 존재한다. 우선 그림 9(a)의 지반의 고유주기를 이용한 결과를 먼저 살펴보면 주기 0.1초~0.3초의 영역에서는 F_a 값이 편차는 크지만 전반적으로 증가하는 경향이 있고 0.3초~0.5초에서는 소폭 감소하는 경향이 보이지만, 기암암의 깊이를 이용하였을 경우 깊이 10m~30m 전체구간에서 전반적으로 F_a 값의 증감 경향이 뚜렷하게 나타나지 않고 산란정도 또한 전 구간에서 크게 나타나고 있다. 이러한 결과는 기암암의 깊이를 보다 지반의 고유주기를 지반분류 기준으로 이용하였을 경우 더 우수한 지반분류 방법을 의미한다. 이에 대한 정량적(Qualitative)인 분석은 표 6과 표 7에 표준편차로 나타나 있고, 지반의 고유주기 기준으로 분류하였던 방법보다 전반적으로 표준편차가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 10(b)의 장주기 영역의 증폭계수 F_v 와 기반암 깊이와의 관계를 살펴보면, F_v 의 경우 기반암 깊이가 깊어수록 F_v 의 값이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있다. 재현주기에 따른 추세선의 경우 깊이 50m 이하에서는 세 가지 재현주기의 추세선이 거의 구분되지 않는 반면, 50m 이

상의 영역에서는 재현주기가 증가할 수록 추세선이 약간씩 아래로 치지는 경향이 있으나 그 차이는 크지 않다.

세 가지 기준에 대한 증폭계수와 상관계인 추세선의 경향을 살펴보면, V_{S30} 과 지반의 고유주기를 기준으로 분류하였을 경우 상당히 큰 차이점이 나타나고 있다. 특히, V_{S30} 을 이용한 경우 S_E 지반의 결과가 다른 지반의 결과와 상당한 차이가 나타나고 있다. 동반논문(I) 그림 9(a)와 같이 기반암의 가속도가 커질수록 추세선은 모든 영역에서 지반의 비선형을 나타낸다는 결론을 내릴 수 밖에 없는데, 사실은 동반논문(I) 그림 9(b)와 같이 S_E 지반을 제외하면 S_B , S_C 및 S_D 지반의 경우 입력 지진가속도의 증가에 따른 비선형은 나타나지 않고 있다. 따라서, V_{S30} 을 이용하여 지반 분류를 할 경우 모든 지반을 하나의 추세선으로 나타내면 증폭계수의 특징을 제대로 표현할 수 없을 만큼 큰 차이가 발생하여 우수한 상관관계를 가지고 있다고 판단하기 힘들다.

그러나, 지반의 고유주기를 이용하여 분류하였을 경우, 추세선은 모든 지반을 하나의 추세선으로 나타낼 수 있었으며 또한 기반암의 가속도가 커질수록 지반의 비선형 거동이 나타나는 부분과 나타나지 않는 부분을 정확하게 표현할 수 있어, V_{S30} 을 이용한 방법 보다 우수한 경향을 가진다고 판단할 수 있다. 또한, 기반암 깊이를 이용한 방법 보다 지반의 고유주기를 이용한 방법에서 이러한 추세선의 경향성이 더욱 확실하게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서, 지반분류 기준과 증폭계수와 상관계수를 기준으로 판단해보면 지반의 고유주기를 기준으로 지반을 분류한 방법이 가장 우수하다고 판단된다.

4.5 지반조사 자료의 부족으로 인한 추측 가능성이 작은 방법

마지막으로, 각각의 분류기준을 적용하는데 있어 지반조사 자료가 부족하여 지반조사 자료를 추측해야할 개연성이 있는지 판단하였다. 현재 국내에서 대부분의 지반조사는 항상 심도 30m까지 수행하지 않고 기반암의 위치를 확인하는 수준까지 수행된다. 따라서, V_{S30} 을 이용하여 지반을 분류할 경우 기반암이 30m 보다 얕은 곳에 존재하는 경우 현장 탄성파기법을 수행하여 심도 30m까지 전단파속도 추상도를 획득하지 못하였을 경우 기반암의 전단파속도는 대부분 일정하게 가정하여 계산해야 한다. 특히 국내 지반의 대부분을 차지하고 있는 S_C 지반과 S_D 지반의 경우 기반암 깊이가 매우 얇기 때문에 상대적으로 취약할 수 밖에 없다.

1997 UBC 기준에서 V_{S30} 을 이용하는 이유는 서술식으로 되어있는 기존 지반분류 기준의 모호함을 개선하고, 기반암의 깊은 지역에서 지진시 가장 큰 영향을 미치는 상부 30m 토층의 물성으로 설계에 이용하기 위함이었다. 그러나, 국내 지반의 경우 기반암의 깊이가 대부분 30m 이내에 존재하기 때문에 V_{S30} 을 이용하여 지반을 분류할 경우 토층과 암반의 물성이 같이 반영된다. 실제로 상부층

은 연약한 토층이지만 하부 암반층의 과도한 영향으로 단단한 토층으로 분류되는 경우도 빈번히 있다. 즉, 기반암의 깊이가 깊은 지역에서 설계의 효율성을 위하여 상부 30m의 평균 지반물성을 이용하려는 취지가 기반암의 깊이가 얇은 지역의 경우 불합리한 요소가 반영될 수 있는 개연성이 있다.

이러한 문제점은 지반의 고유주기 또는 기반암의 깊이를 이용할 경우 쉽게 해결할 수 있다. 지반조사가 기반암의 깊이까지 수행되면 식 (2)을 이용하여 지반의 고유주기는 비교적 명확하게 계산할 수 있다. 따라서, 지반의 고유주기와 기반암 깊이를 지반분류 기준으로 사용할 경우 V_{S30} 을 이용할 경우 보다 불확실성을 현격하게 제거할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 다섯번째 기준인 지반조사 자료의 추측 가능성에 대한 부분에서는 V_{S30} 을 제외한 나머지 두 방법이 우수하다고 결론을 내릴 수 있다.

5. 우수한 지반분류 방법 결정

본 논문과 동반논문(1)에서는 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법을 결정하기 위하여 V_{S30} , 지반의 고유주기 및 기반암 깊이를 이용한 지반분류 방법에 대하여 심도있게 비교·논의하였다. 본 절에서는 4장에서 논의한 결과와 3.2절에서 제시한 우수한 지반분류 방법을 선정하기 위한 다섯 가지 기준을 적용하여, 국내 지반특성을 가장 적절하게 반영할 수 있는 지반분류 방법을 결정한다.

5.1 증폭계수의 표준편차 검토

세 가지 방법으로 재산정된 증폭계수와 증폭계수의 표준편차를 살펴본 결과, 증폭계수의 값과 표준편차는 절대적으로 큰 차이가 나타나지 않아, 증폭계수의 표준편차를

기준으로 우수한 지반분류 방법을 결정하기는 힘든 것으로 판단된다.

5.2 스펙트럴 가속도와 설계응답스펙트럼의 비교

재산정된 증폭계수를 이용하여 응답스펙트럼을 작성하고 스펙트럴 가속도의 평균값을 비교하였다. 4장에서 언급한 바와 같이 세 가지 방법의 증폭계수 값의 차이가 크지 않아 설계응답스펙트럼 상에서 큰 차이가 발생하지 않았고 스펙트럴 가속도의 평균값도 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서, 세 가지 방법에서 일부 우수한 경우가 있었지만 전체적으로 큰 차이는 발생하지 않아, 응답스펙트럼과 스펙트럴 가속도의 비교만으로는 현격하게 우수한 방법을 선택하기 어렵다.

5.3 동일한 지반그룹내에서 RRS 값의 통일된 경향성 검토

각각의 지반분류 방법에 따라 특정한 지반그룹으로 분류되었을 경우 RRS 값이 동일한 지반그룹내에서 통일된 경향성을 나타내는지 검토하였다. 검토 결과 지반의 고유주기를 이용할 경우 지반분류 방법에서 같은 지반그룹내에서 서로 다른 특성이 보이는 현상이 V_{S30} 을 이용한 방법보다 현격하게 개선되었다.

특히, 4장에서 서술한 바와 같이 지반의 고유주기와 V_{S30} 을 이용하여 지반을 분류할 경우 지반 그룹별 구성요소는 상당히 많이 변화하였으나, 증폭계수의 값과 스펙트럴 가속도의 평균값에는 큰 차이가 발생하지 않는 결과가 발생하였다. 그러나, 이는 수치적으로 비슷한 값이 산정되었을 뿐이며 동일한 지반그룹내에서 RRS 값의 경향성을 분석한 결과 지반의 고유주기를 이용한 방법에서 지반분류의 목적에 부합하고 논리적으로 타당한 결과가 나타났다.

표 8 각 지반분류 방법에 대한 비교 평가

분류기준 및 지반종류	증폭계수의 표준편차		RS ¹⁾ 와 Ave. S _a ²⁾ 비교	RRS 값의 통일된 경향성		추세선의 경향성		지반조사 자료의 추측 가능성	전체 평가
	F _a	F _v		F _a	F _v	F _a	F _v		
V _{S30}	S _B	○ ³⁾	○	○		×	○	추측 가능성이 존재함	
	S _C	○	○						
	S _D	× ⁴⁾	×	×	×				
	S _E	×	○	○	○				
기반암 깊이	B _I	×		×	×	○	○	명확함	
	B _{II}	×	×	○	×				
	B _{III}								
	B _{IV}		×	×	×				
지반의 고유주기	T _A					○	○	명확함	○
	T _B		○	○	○				
	T _C		○	○	○				
	T _D	○		○	○				

¹⁾ RS=재산정된 응답스펙트럼, ²⁾ Ave. S_a = 해석결과의 평균 스펙트럼 가속도, ³⁾ ○ = 결과가 우수함,

⁴⁾ × = 결과가 우수하지 않음, ⁵⁾ 빈칸은 판단 유보

한편, 기반암의 깊이를 이용하였을 경우 가장 열등한 방법으로 나타났다. 따라서, 동일한 지반그룹내에서 RRS 값의 통일된 경향성을 기준으로 판단한 결과 지반의 고유주기를 이용한 방법이 국내 지반조건에 가장 우수한 방법으로 결론을 내릴 수 있다.

5.4 증폭계수와 지반분류 기준과의 상관관계 검토

지반의 고유주기를 이용하여 분류하였을 경우 모든 지반을 하나의 추세선으로 나타낼 수 있었고, 기반암의 가속도가 커질수록 지반의 비선형 거동이 나타나는 부분과 나타나지 않는 부분을 정확하게 표현할 수 있어, 지반의 고유주기를 이용한 방법이 가장 우수하다고 판단된다. 기반암 깊이를 이용한 방법보다 지반의 고유주기를 이용한 방법에서 이러한 추세선의 경향성이 더욱 확실하게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서, 지반분류 기준과 증폭계수와의 상관관계를 기준으로 판단해보면 지반의 고유주기를 기준으로 지반을 분류한 방법이 가장 우수하다고 판단된다.

5.5 지반조사 자료의 부족으로 인한 추측 가능성 검토

지반조사가 기반암의 깊이까지 수행되면 지반의 고유주기는 비교적 명확하게 계산된다. 지반의 고유주기와 기반암 깊이를 지반분류 기준으로 사용할 경우 V_{S30} 을 이용할 경우 보다 불확실성을 현격하게 제거할 수 있는 장점이 있어, V_{S30} 을 기준으로 지반을 분류하는 것보다 우수하다고 판단된다.

5.6 우수한 지반분류 방법의 선정

표 8에는 위에서 다섯 가지 기준으로 판단한 결과를 간략하게 요약하였다. 본 논문에서는 표 8과 위에서 서술한 내용을 바탕으로 지반의 고유주기를 이용한 방법을 국내 지반의 특성에 적합한 지반분류 방법으로 제안한다.

6. 결 론

본 논문에서는 지진시 지반증폭현상에 가장 큰 영향을 주는 지반의 고유주기와 기반암 깊이를 기준으로 지반을 분류하는 방법에 대하여 검토하였고, 동반논문(I, 국내 내진설계기준의 문제점 분석)에서 수행한 V_{S30} 을 기준으로 지반을 분류하는 방법과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세 가지 기준으로 지반을 분류한 후 재산정된 증폭계수의 표준편차와 설계응답스펙트럼을 제작성하여 비교

한 결과, 명확한 차이가 발생하지 않아 탁월하게 우수한 방법을 선택하기 어려웠다.

- (2) 지반의 고유주기를 이용하여 지반을 분류할 경우 동일한 지반 그룹내에서 RRS 값이 서로 다른 경향을 나타내는 현상을 개선할 수 있어, 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법이 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 증폭계수와 분류기준과의 상관관계를 나타내는 추세선에 대한 분석한 결과 지반의 고유주기를 이용한 방법이 가장 우수하였다.
- (4) 지반조사 자료가 부족하여 지반분류시 지반조사 자료를 추측해야할 개연성이 있는지 판단한 결과, V_{S30} 을 이용한 방법 보다는 지반의 고유주기를 이용한 방법이 우수하였다.
- (5) 위와 같은 사항을 종합하여 판단해본 결과, 지반의 고유주기를 이용한 방법이 가장 우수한 지반분류 방법으로 판단된다. 따라서, 향후 국내 내진설계 시방기준을 개선할 경우 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법을 추천한다.

참 고 문 헌

1. 윤종구, 김동수, 방은석 “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 한국지진공학회 논문집, 제10권 2호(통권 제48호), 2006, pp. 39-50.
2. Kramer, S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
3. MCEER-99-0010, *Site Factors and Site Categories in Seismic Codes*, Ricardo Dobry, Ricardo Ramos and Maurice S. Power. July 19, 1999.
4. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures*, FEMA 302/303, February, Part I. (Provisions) and Part. 2(Commentary), 1997.
5. Dobry, R. and Martin G. “Development of Site-Dependent Ratio of Elastic Response Spectra(RRS)”, *Proceeding of the Workshop on Earthquake Site Response and Seismic Code Provisions*, 1999.
6. Idriss, I. M., and Sun, J. I., *User's manual for SHAKE91 : A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits*, University of California, Davis, 1992, 13 pp.