

국내 지반특성에 적합한 설계응답스펙트럼 개선을 위한 증폭계수 제산정에 대한 연구

Modification of Design Response Spectra Considering Geotechnical Site Characteristics in Korea

윤종구*

김동수**

방은석***

Yoon, Jong-Ku

Kim, Dong-Soo

Bang, Eun-Seok

ABSTRACT

Despite the site classification method was improved in the previous study, the response spectrum would be required to be modified by adjusting the integration interval to calculate the site coefficients because the response spectra did not match well the average spectral accelerations obtained by site response analyses in the range of long periods. In this paper, new response spectra for each site categories were determined by adjusting the integration interval of long-period site coefficient F_v from 0.4~2.0 to 0.4~1.5 second. It matched well the average spectral accelerations and new response spectrum, and it was also improved compared to the current site classification system.

1. 서 론

국내 지반에 대한 지진응답해석 결과와 설계응답스펙트럼을 비교한 결과 단주기와 장주기 영역에서 큰 차이가 발생하여 국내 지반의 특성에 적합하도록 내진설계기준의 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼을 개선해야 할 필요성을 제기되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 현재 내진설계기준의 지반분류 방법인 상부 토층 30m의 평균 전단파속도(V_{S30}), 지반의 고유주기 그리고 기반암 깊이를 이용하여 지반을 분류하는 방법에 대하여 검토한 결과, 지반의 고유주기를 이용할 경우 동일한 지반그룹에서 개별 지반들이 서로 다른 특성을 나타내는 현상을 개선할 수 있었고, 증폭계수와 지반분류 기준의 상관관계를 나타내는 추세선의 경향성 면에서도 입력 지진가속도의 증가에 따른 지반의 비선형 거동을 효과적으로 나타내어 국내 지반조건에 적합한 지반분류 방법으로 나타났다.⁽²⁾

* 한국유지관리(주) 지반설계사업부, 이사

** 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수

*** 한국과학기술원 건설및환경공학과, 박사과정

그러나, 지반분류 방법을 개선하여도 해석결과의 스펙트럴 가속도의 평균값과 재산정된 설계응답스펙트럼과 차이가 나타나는 부분이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 설계응답스펙트럼을 작성하기 위해 필요한 증폭계수를 계산하는 방법을 변경해야 한다. 이는 국내 내진설계기준이 미국의 서부해안지역의 지반조건에 적합하도록 작성된 기준이고, 설계응답스펙트럼을 작성하기 위한 증폭계수를 산정하는 방법도 미국의 지반조건에 적합하도록 되어 있기 때문이다.

본 논문에서는 국내 지반조건에 적합하도록 지반증폭현상을 평가할 수 있는 증폭계수의 계산방법을 검토하여, 국내 지반에 적합하도록 적분구간을 변경하는 방법에 대하여 논의하였다. 또한, 변경된 증폭계수의 적분구간을 이용하여 설계응답스펙트럼을 재작성하였다. 재작성된 설계응답스펙트럼의 경우 증폭계수의 적분구간을 변경하기 전보다 국내 지반특성을 합리적으로 반영하는 것으로 나타났다.

2. 증폭계수 산정방법

국내 내진설계기준의 설계지진력 산정방법의 근간이 된 NEHRP 1994에서는 단주기 영역 증폭을 통제하는 증폭계수 F_a 와 장주기 영역 증폭을 통제하는 증폭계수 F_v 를 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성하고 있고, F_a 와 F_v 는 각각 식(1)과 식(2)를 이용하여 계산되었다.^{(3),(4)}

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

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rockl}(T)} dT \quad (2)$$

여기서, R_{rock} 와 R_{soil} 의 값은 각각 진원(fault)에서 암반노두와 지표면까지의 거리(hypocentral distance)를 의미하고, 본 연구에서는 R_{soil}/R_{rock} 은 진원에서 거리가 먼 경우 1.0으로 가정하여 계산하였다. RS_{soil} 은 구조물의 주기 T에서 지표면의 스펙트럴 가속도 값이고, RS_{rock} 은 암반노두의 스펙트럴 가속도 값이다. 즉, RS_{soil}/RS_{rock} 은 주어진 주기 T에서 기반암과 지표면의 스펙트럴가속도 비로서 RRS (Ratio of Response Spectra)로 나타낸다. 따라서, F_a 는 주기 0.1초에서 0.5초 사이에서 지표면과 암반노두의 스펙트럴가속도비(RRS)의 평균값을 의미하고, F_v 는 주기 0.4초에서 2.0초 사이의 RRS의 평균값을 의미한다.

NEHRP 1994에서는 식(2)의 F_v 를 구할 경우 RRS의 평균값을 이용하지 않고, 평균값 + 표준편차(σ)의 값을 이용하여 산정하였다. 이는 장주기 영역에서 RRS 값의 산란정도가 매우 심하고 일반적으로 장주기 영역에 해당하는 구조물의 경우 중요한 구조물들이 많기 때문에 장주기 영역의 스펙트럴 가속도의 증폭을 보수적인 관점을 견지하였기 때문이다. Dobry 등(1999)은 위와 같은 사항을 설계기준에 반영하기 위하여 평균값 보다 평균값 + 표준편차(σ)을 이용하는 것이 더 적절한 것으로 판단하여 F_v 를 계산하였고, 이를 현재 이용되고 있는 미국 내진설계기준에 적용하고 있다.⁽⁴⁾

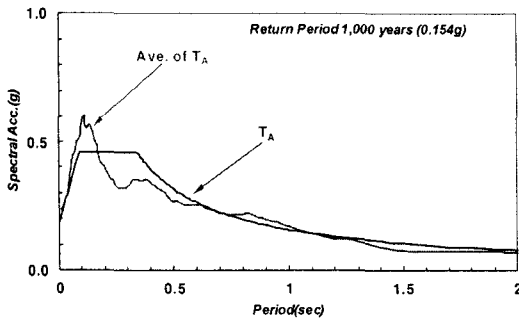
3. 증폭계수 적분구간의 변경에 대한 검토

3.1 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법

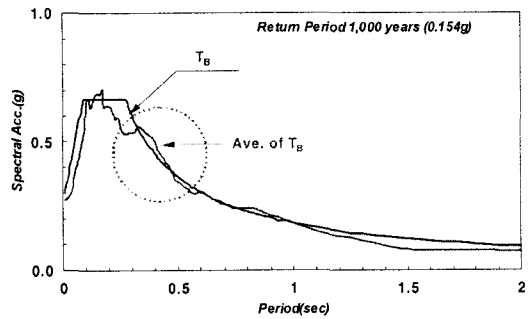
지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법은 표 1에 나타난 바와 같이 지반의 고유주기를 0.1초, 0.3초와 0.5초를 경계로 T_A 지반, T_B 지반, T_C 지반 그리고 T_D 지반으로 분류한다. 그림 1에는 재현주기 1,000년 지진에 대하여 T_A , T_B , T_C 및 T_D 지반에서 재산정된 설계응답스펙트럼과 스펙트럴 가속도의 평균값을 비교하여 나타내었으며, 그림 2에는 동일 지반그룹내에서 RRS (Ratio of Response Spectrum) 값의 경향성에 대하여 나타내었다.⁽²⁾

표 1 지반의 고유주기를 이용한 지반분류 방법

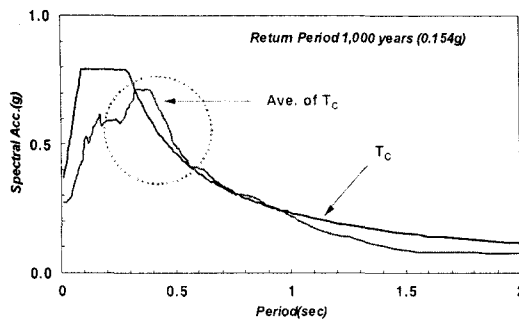
지반의 종류	지반분류 조건
T_A	$T < 0.10 \text{ sec}$
T_B	$0.10 \text{ sec} \leq T \leq 0.30 \text{ sec}$
T_C	$0.30 \text{ sec} < T \leq 0.50 \text{ sec}$
T_D	$0.50 \text{ sec} < T$



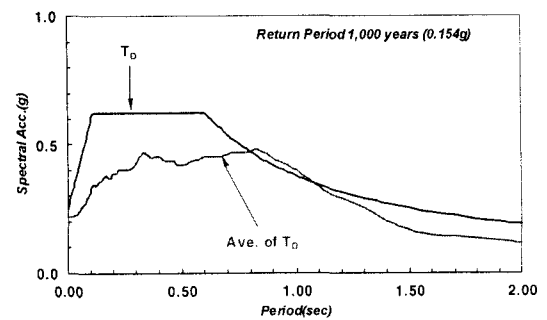
(a) S_B 지반



(b) S_C 지반

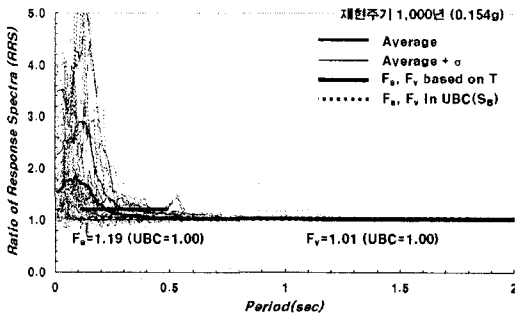


(c) S_D 지반

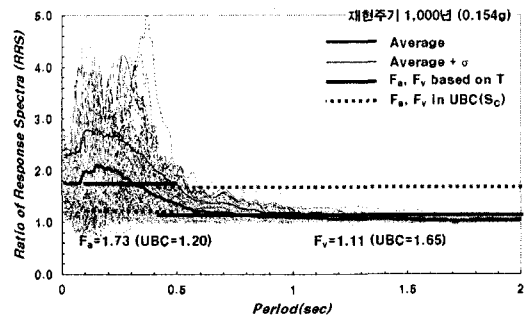


(d) S_E 지반

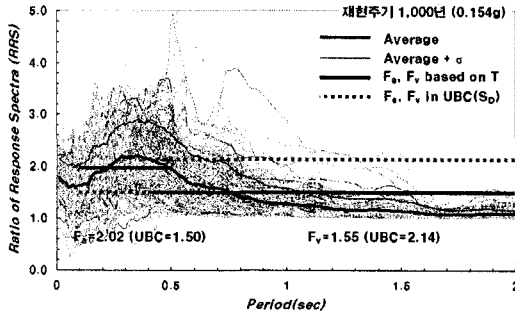
그림 1 설계응답스펙트럼과 스펙트럴 가속도의 비교



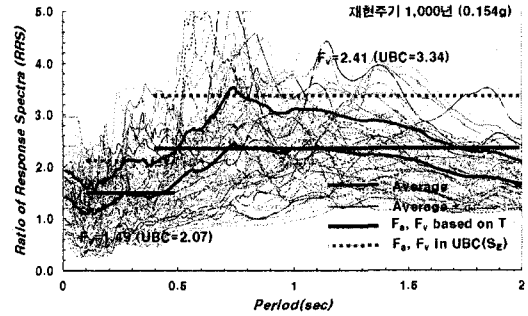
(a) S_B 지반



(b) S_C 지반



(c) S_D 지반



(d) S_E 지반

그림 2 재현주기 1,000년에 대한 동일 지반그룹 내에서 RRS 값의 경향성 검토

3.2 증폭계수의 적분구간 변경의 필요성

2장에서 설명한 증폭계수를 산정하는 방법은 Borchardt (1994)가 제안한 방법이다. Borchardt는 1989년에 발생한 Loma Prieta 실지진기록과 등가선형 및 비선형 해석방법을 이용하여 증폭계수를 산정하는 방법에 대한 중요한 연구결과를 발표하였다. Borchardt는 RRS의 평균값을 구하기 위하여 표 2에 나타난 바와 같이 적분구간을 short-period band (0.1~0.5초), intermediate-period band (0.5~1.5초), long-period band (1.5~5.0초), mid-period band (0.4~2.0초) 그리고 entire-period band (0.1~5.0초) 등 5개의 적분구간에 대하여 계산하였다. 즉, 아래 식(3)에서 적분구간 a와 b를 달리하여 증폭계수를 계산하였다.

$$F_{a/v}(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{b-a} \int_a^b \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (3)$$

각각의 적분구간을 이용하여 얻은 결과를 그림 3과 같이 상부 30m 평균 전단파속도(Mean shear wave velocity, V_{S30})에 대하여 나타내었고, 회귀분석 및 통계분석을 통한 추세선(Regression curve)을 도출하였다. 그림 3을 살펴보면 위 식을 이용하여 계산한 RRS의 평균값과 V_{S30} 의 관계를 대수축(log-scale)으로 나타내었을 경우 일정한 오차 범위($\pm 2\sigma$) 내에서 선형적인 상관관계가 있는 것으로 나타난다. 따라서, RRS의 평균값으로 구하는 증폭계수와 지반분류 기준인 V_{S30} 의 상관관계는 그림 4와 같이 V_{S30} 의 역수의 거듭제곱의 형태로 나타난다.

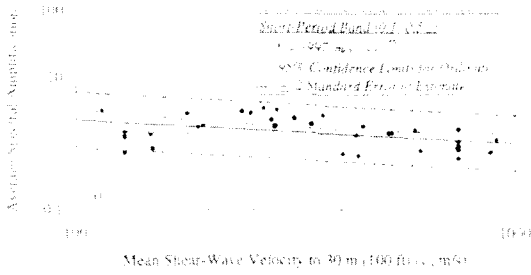
그림 4를 살펴보면 적분구간에 따라 증폭계수는 중요한 두 가지 특징을 보인다. 첫째는 V_{S30} 이

증가함에 따라 증폭계수는 모두 1.0에 수렴하는 형태로 나타났으며, 둘째는 적분구간 0.1초~0.5초와 나머지 적분구간 사이에 뚜렷한 추세의 차이가 나타났고, 나머지 적분구간의 경우 거의 비슷한 값을 가지고 있어 주기 0.4초~2.0초의 적분구간으로 대표하여 하나의 적분구간으로 통일하였다. 따라서, 위와 같은 연구결과를 바탕으로 증폭계수 계산방법을 식(1)과 식(2)와 같이 제안하였고, 증폭계수를 단주기와 장주기 영역으로 두 개의 그룹으로 분류하여 NEHRP 1994 이후 기준에 반영되고 있다.

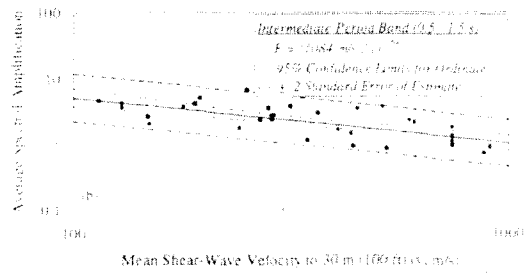
현재 국내 내진설계기준의 설계응답스펙트럼은 위와 같은 과정을 통하여 계산된 미국의 지반조건에 적합한 증폭계수를 바탕으로 지진계수(C_u , C_v)를 산정하여 작성하고 있다.⁽⁶⁾ 따라서, 국내 지반조건에 적합하도록 지반증폭현상을 평가할 수 있는 증폭계수의 계산방법을 검토해야 할 필요가 있고, 식(3)에서 국내 지반에 적합한 적분구간인 a와 b를 찾아내어 증폭계수도 국내 지반에 적합하도록 적분구간을 변경하여 문제를 해결하는 것이 합리적이다.

표 2 Loma Prieta 지진기록을 이용한 증폭계수 산정(Borcherdt, 1994)

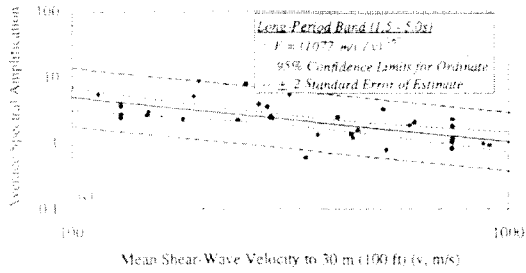
Station	Geology	Site Class	H/D ₁ (km)	S _{vel}		K/E Norm Factors						Vertical				Horizontal			
				u ₁ (s)	u ₂ (s)	Vert	Horizontal		period bands (sec)				period bands (sec)						
				0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0	0.1-0.5	0.5-2.0		
South San Francisco	KJss	B	85	910	2985	1.00	1.00	1.00	1.03	1.00	0.69	1.44	0.96	1.12	0.92	0.92	1.09	0.96	
Yerba Buena	KJsh	B	97	880	2886	1.00	1.00	1.00	0.78	0.98	0.80	0.81	0.90	0.72	0.73	0.98	0.73	0.74	
Rincon Hill	KJsh	B	96	745	2444	1.00	1.00	1.00	1.13	1.00	1.15	1.11	1.11	1.06	1.11	1.07	1.07	0.98	
Bay Area Regional	KJsh	B	98	745	2444	1.00	1.00	1.00	0.72	0.99	1.07	0.81	1.07	0.59	1.00	1.16	0.67	0.66	
Diamond Heights	KJsh	B	94	745	2444	1.00	1.00	1.00	1.38	1.44	1.20	1.38	1.39	1.60	1.25	1.04	1.53	1.39	
Piedmont J. High	KJss	B	94	745	2444	1.00	1.00	1.00	0.92	0.61	0.48	0.85	0.56	0.91	0.96	0.83	0.91	0.97	
MEAN - K/E Norm, SC B				795	2608				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
STANDARD DEVIATION				78	256				0.25	0.27	0.43	0.23	0.27	0.36	0.18	0.42	0.31	0.23	
Cliff House	KJsh	B	101	745	2444	1.00	1.00	1.00	1.05	1.91	1.61	1.21	2.06	0.80	1.83	1.79	0.98	1.62	
Bonita Point	KJss	B	105	745	2444	1.00	1.00	1.00	0.79	1.28	1.72	0.91	1.28	0.87	1.35	2.30	1.00	1.43	
MEAN				745	2444				0.92	1.60	1.66	1.06	1.67	0.83	1.59	2.05	0.99	1.83	
STANDARD DEVIATION				78	256				0.25	0.27	0.43	0.23	0.27	0.36	0.18	0.42	0.31	0.23	
CSPH Stadium Grounds	TMss	H	73	825	1722	1.00	1.00	1.00	1.42	1.10	0.52	1.34	1.06	1.44	0.86	0.78	1.34	0.76	
Woodside Fire Station	TMss	H	57	440	1443	1.00	1.00	1.00	0.82	0.79	0.87	0.82	0.77	0.96	0.95	1.19	0.72	0.86	
APPELL 7 (Duggan Temple)	TMss	H	65	435	1427	1.00	1.00	1.00	1.78	1.00	0.92	1.63	0.97	1.33	1.47	1.37	1.36	1.41	
MEAN - TMss, botm (south)				467	1531				1.34	0.97	0.77	1.26	0.94	1.14	1.09	1.12	1.14	1.01	
STANDARD DEVIATION				51	166				0.48	0.16	0.22	0.41	0.15	0.43	0.33	0.30	0.36	0.35	
Berkeley - Lawrence Lab.	TMss	H	100	610	2001	1.00	1.00	1.00	0.90	2.90	1.80	1.20	2.60	0.77	2.15	2.00	1.01	1.98	
APPELL 10 (Skidmore Blvd)	TMss	H	65	405	1328	1.53	1.25	1.42	0.70	1.48	1.61	0.86	1.51	0.70	1.69	2.49	0.99	1.68	
MEAN - TMss				808	1665				0.80	2.19	1.70	1.03	2.06	0.73	1.92	2.28	1.00	1.83	
Prasada	sp	H	99	594	1948	1.00	1.00	1.00	2.06	2.01	2.46	2.07	2.10	1.58	2.32	1.87	1.69	2.11	
Golden Gate Bridge	Qalosp	H	101	515	1689	1.00	1.00	1.00	1.56	1.82	2.88	1.66	2.03	1.44	3.74	3.27	1.83	3.36	
MEAN (sp)				555	1819				1.81	1.92	2.67	1.82	2.06	1.51	3.03	2.87	1.76	2.73	
STANDARD DEVIATION				503	1651				1.32	1.59	1.58	1.37	1.58	1.13	1.88	1.86	1.28	1.74	
MEAN - TMss (sp)				80	263				0.52	0.73	0.87	0.45	0.68	0.40	0.98	0.84	0.40	0.88	
STANDARD DEVIATION				88	288				0.70	0.77	0.92	0.57	0.73	0.49	1.05	0.84	0.47	0.87	
APPELL 9 (Criswell Res.)	Q1s	H	64	450	1476	1.00	1.00	1.00	2.00	2.60	2.30	2.10	2.50	1.84	3.50	1.57	2.06	2.71	
SLAC	Q1s	H	54	344	1128	1.53	1.25	1.42	2.85	0.82	0.39	2.45	0.83	1.98	1.17	0.59	1.94	1.60	
MEAN - Q1s				397	1302				2.42	1.71	1.30	2.28	1.66	1.91	2.33	1.08	2.00	1.86	
STANDARD DEVIATION				75	246				0.60	1.26	1.42	0.25	1.18	0.10	1.64	0.69	0.69	1.23	
MEAN - Q1s - TMss, sp, SC B				480	1574				1.57	1.61	1.52	1.57	1.60	1.40	1.98	1.69	1.44	1.76	
STANDARD DEVIATION				88	288				0.70	0.77	0.92	0.57	0.73	0.49	1.05	0.84	0.47	0.87	
MEAN - Q1s - TMss, sp, SC B				622	2041				1.29	1.40	1.35	1.31	1.40	1.14	1.59	1.49	1.23	1.47	
STANDARD DEVIATION				183	601				0.59	0.66	0.59	0.49	0.62	0.45	0.70	0.58	0.42	0.54	



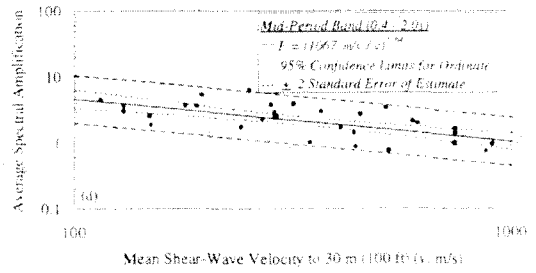
(a) 적분구간 0.1초~0.5초, F_a



(b) 적분구간 0.5초~1.5초, F_v



(c) 적분구간 1.5초~5.0초, F_v



(d) 적분구간 0.4초~2.0초, F_v

그림 3 다양한 적분구간을 이용한 증폭계수와 V_{S30} 과의 상관관계 (Borcherdt, 1994)

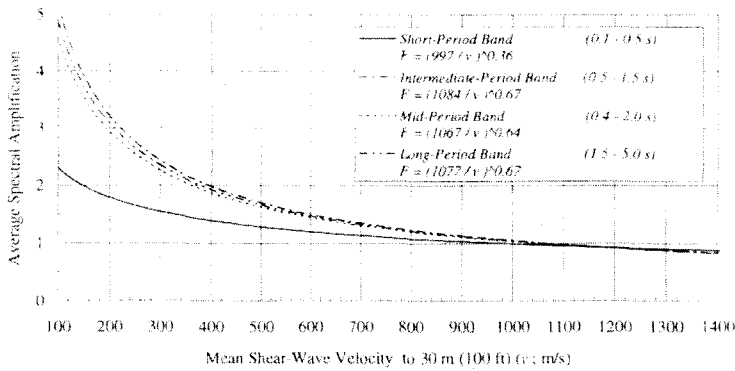


그림 4 평균 스펙트럴 가속도의 증폭정도와 V_{S30} 과의 상관관계 (Borcherdt, 1994)

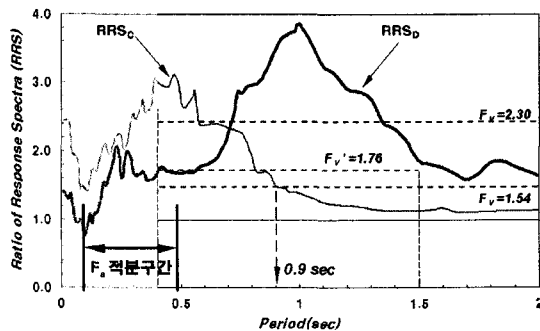


그림 5 증폭계수의 적분구간 및 F_v 결정 방법론

그림 5의 RRS_C 와 RRS_D 는 T_C 지반과 T_D 지반에서 하나씩 선택하여 단주기 영역에서 크게 증폭되는 지반과 장주기 영역에서 크게 증폭되는 지반의 예를 나타낸 것이다. 그림 5를 살펴보면 적분구간의 변경을 검토해야 하는 합리적인 이유를 찾을 수 있다. 먼저 RRS_C 에 대하여 살펴보면 적분구간 0.4초~2.0초의 평균값은 1.54이고, 주기 0.9초 근처에서 RRS_C 의 값이 평균값과 비슷해지고 그 이상의 장주기에서는 RRS_C 의 값은 점점 작아져 평균값 보다 상당히 작은 특정한 값에 수렴하게 된다. 따라서 RRS_C 의 경우 적분구간을 0.9초 보다 충분히 길게 설정하면 F_v 의 값은 지속적으로 감소할 수밖에 없다. 따라서, 장주기 영역에서 지표면의 스펙트럼 가속도의 증폭정도를 나타내는 F_v 값의 정의에 부적합한 값으로 계산된다. 적분구간이 부적합할 경우 실제 증폭 정도를 왜곡하여 F_v 값을 과소평가하게 되고, 이런 현상으로 인하여 그림 1에서 T_B 지반과 T_C 지반에서 점선으로 표시된 원 부분과 같이 스펙트럼 가속도의 평균값 보다 계산정된 응답스펙트럼의 값이 작게 평가된다.

그러나, RRS_D 의 경우 주기 0.4초 이상에서 어느 특정한 값에 수렴되지 않고 전체적으로 큰 값을 가지고 있어 적분구간을 변경할 필요가 없다. 그림 2를 살펴보면 T_A , T_B 그리고 T_C 지반의 경우 그림 5의 RRS_C 와 같은 경향을 보이고 있고 적분구간을 재설정 할 필요가 있으나, T_D 지반의 경우 RRS_D 와 같은 경향을 보이고 있어 기존의 적분구간을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

현재 이용되고 있는 내진설계기준의 경우 단주기 및 장주기 영역에서 스펙트럼 가속도의 증폭 경향이 다른데 반하여, 증폭계수를 적용하기 위한 적분구간은 동일하게 적용하고 있다. 따라서, 위에서 설명한 바와 같은 오류가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 개선하기 위하여 다소 복잡해지는 단점이 있으나, 지반의 특성이 다른 경우 증폭계수의 적분구간을 적용하는 기준도 달리하여 가급적 실제 증폭 현상과 일치하는 설계응답스펙트럼의 작성에 중점을 두었다.

3.3 단주기 증폭계수 F_a 의 적분구간에 대한 검토

그림 5에 나타난 바와 같이 증폭계수의 적분구간을 변경하려는 이유는, 현재 이용하고 있는 F_v 의 적분구간과 같이 적분구간 내에서 특정한 값으로 수렴하는 경우 수렴하는 현상에 의해 증폭계수의 평균값이 과소평가되는 현상을 개선하기 위함이다. 그러나, 그림 2의 해석결과에서 RRS 의 경향성을 나타낸 그림을 살펴보면 F_a 의 적분구간 0.1초~0.5초의 경우 적분구간 내에서 특정한 값에 수렴하는 현상이 나타나지 않는다. 따라서, F_a 의 경우 적분구간을 변경해야 할 특별한 사유가 없는 것으로 판단된다.

3.4 장주기 증폭계수 F_v 의 적분구간에 대한 검토

전술한 바와 같이 NEHRP 1994 기준 이후 제시된 증폭계수의 적분구간은 F_a 의 경우 0.1초~0.5초, F_v 의 경우 0.4초~2.0초를 이용하고 있다. 표 1에 지반의 고유주기를 기준으로 지반분류를 위한 경계는 0.1초, 0.3초와 0.5초로 설정하여 T_A , T_B , T_C 그리고 T_D 지반으로 분류하였다. 따라서, T_D 지반을 제외할 경우 대부분의 지반은 주기 0.1초~0.5초 사이에서 스펙트럼 가속도의 증폭이 크게 타나날 것으로 추측할 수 있고, 실제로 그림 2에 나타나 있는 지반의 RRS 의 값을 살펴보면 주로 주기 0.5초를 전후로 RRS 의 값에서 중요한 변화가 나타난다.

T_A 지반(그림 2-(a))에서는 주기 0.5초 이하에서 RRS 의 값은 매우 크게 증폭되지만 주기 0.5초 이상에서는 꾸준히 감소하여 1.0에 수렴한다. 따라서, T_A 지반의 경우 주기 0.5초 이상에서는 RRS 의 값과 기존의 적분구간을 적용하여 계산된 F_v 값이 거의 같은 값을 가지므로 F_v 의 적분구간을

변경해야 할 타당한 이유를 찾기 힘들다. 실제로, F_v 의 값이 1.01이고 RRS의 평균값을 검토해보면 주기 0.8초 이상부터는 RRS의 평균값이 1.00~1.01 사이의 아주 좁은 구간에 수렴하고 있어 적분구간을 변경하여 재계산한다고 해도 F_v 값의 변화는 거의 발생하지 않는다.

T_B 지반(그림 2-(b))의 경우 주기 0.5초 이하에서는 RRS의 값은 매우 크게 증폭되지만 주기 0.5초 이상에서는 점점 감소하여 주기가 커질수록 1.0에 수렴하는 경향을 보인다. 그림 2-(b)에 나타난 바와 같이 T_B 지반의 F_v 평균값은 1.20으로 나타났고 RRS의 평균값을 검토해보면 주기 0.66초 이상의 영역에서부터 1.20보다 작아지기 시작하여, 1.5초~2.0초 사이에서는 1.04~1.02 사이의 값으로 감소추세를 형성하면서 1.0 근처로 수렴하고 있다. 따라서, F_v 의 정의(Definition)가 주기 0.4초~2.0초(0.5Hz~2.5Hz)에서 RRS의 평균값(엄밀히 말하면 평균값 + 표준편차)임을 고려하면, 주기 1.5초 이상에서 RRS 값은 평균값보다 상당히 작은 특정한 값에 수렴하는 반면 적분구간은 지속적으로 늘어나기 때문에 RRS 평균값은 감소할 수밖에 없다. F_v 의 의미가 장주기 영역에서 지표면의 스펙트럼 가속도가 암반노두 값보다 증폭되는 정도를 평가하는 것이므로 RRS의 값이 1.02~1.04 사이의 값을 가진다는 것은 증폭이 거의 발생하지 않음을 의미한다. 따라서, 증폭의 의미가 없는 영역을 굳이 적분구간으로 편입하여 F_v 가 과소평가되는 현상을 유발시키는 것은 개선될 필요가 있다.

T_B 지반에서 발생하는 현상은 T_C 지반(그림 2-(c))에서도 동일하게 발생되고 있고, 특히 T_C 지반에서 적분구간의 재설정이 필요하다. 그림 2-(c)에서 T_C 지반의 F_v 평균값은 1.55으로 나타났고 RRS의 평균값을 검토해보면 주기 0.72초 이상의 영역에서부터 1.55보다 작아지기 시작하여, 1.5초 이상에서 1.10 보다 작은 값을 가지며 주기가 증가할수록 RRS는 꾸준히 감소하여 1.0에 수렴한다. T_C 지반의 경우 주기 T_B 지반보다 1.5초 이상에서의 RRS 값이 전체평균을 감소시키는 역할을 더욱 가속화 시키고 있다. 따라서, T_C 지반의 경우 그림 5의 예제와 같이 RRS_C 와 같은 현상이 심하게 발생하여 적분구간의 재설정이 필요하다.

T_D 지반(그림 2-(d))의 경우 그림 5의 RRS_D 와 같은 현상이 나타나는 지반으로, RRS의 값이 1.5초 이상에서도 매우 큰 값을 가지고 있고 특정한 값에 감소하는 경향으로 수렴하지 않기 때문에 현재 적분구간이 타당한 것으로 판단되어 그대로 이용하는 방법이 합리적이다. 이는 이미 UBC 기준 작성을 위하여 충분히 검증된 방법이므로 본 연구에서는 T_D 지반의 경우 증폭계수의 산정을 위한 적분구간 변경에서 제외하였다.

따라서, T_A 지반의 경우 적분구간을 변경할 이유가 없으나 변경을 하여도 크게 달라지지 않을 것으로 판단되고, T_B 지반과 T_C 지반의 경우 적분구간을 변경하여 증폭계수를 재산정할 필요가 있다. 그러나, T_D 지반의 경우 적분구간을 변경하지 않고 현재의 방법을 그대로 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

4. 적분구간을 변경한 설계응답스펙트럼의 제작성

4.1 증폭계수 F_v 의 적분구간 결정

지금까지는 적분구간을 재산정해야 하는 근거에 대하여 논의하였다. 그러면, 과연 어떠한 기준으로 적분구간을 재설정하느냐가 새로운 관심사항이다. 그림 5의 예제에 나타난 바와 같이 적분구간을 달리 적용하면 F_v 의 값에 상당한 영향을 미친다. 그림 5의 예를 들자면 F_v 의 적분구간을 0.4초에서 1.5초로 하였을 경우 F_v 값은 1.76이 되어 기존의 적분구간인 0.4초에서 2.0초의 1.54에 비하여 매우 크게 증가한다. 또한, 경우에 따라서는 F_v 를 현상에 비하여 과소평가 할 수 있고 과대평가 할 수 있다. 따라서, 재산정된 F_v 값이 정의에 충실하고 현상을 가장 적절하게 설명할 수 있

도록 적분구간을 설정해야 한다.

본 논문에서는 이를 위하여 F_v 의 정의와 문헌의 내용을 재검토해 보았다. 진술한 바와 같이 F_v 는 RRS, 즉 지표면의 스펙트럴 가속도가 암반노두의 스펙트럴 가속도에 비하여 증폭되는 정도를 주기 0.4초~2.0초에서 평균값+표준편차의 값으로 나타내는 평균을 내포하고 있는 상수이다. 또한, 3.2절에서 서술한 바와 같이 적분구간을 0.4초~2.0초로 설정한 것은 1989년 Loma Prieta 지진기록을 이용하여 통계처리 했을 경우 여러 적분구간의 결과가 비슷하게 나타났고 대략 0.4초~2.0초이 결과와 비슷했기 때문에 적분구간을 0.4초~2.0초로 설정하였다. 이는 미국 서부해안지역의 지반조건은 T_D 지반과 비슷한 경향을 가졌기 때문에 F_v 의 적분구간 0.4초~2.0초는 합리적인 것으로 판단된다. 그러나, 국내 지반의 대부분은 T_B 및 T_C 지반에 해당하고, 이를 지반조건이 전혀 다른 국내 지반에 같은 적분구간을 적용하였을 경우 F_v 의 값은 과소평가될 위험이 있다. 따라서, RRS의 값이 1.0 근처의 값을 가지고 감소추세를 형성하며 수렴하는 구간의 경우 적분구간에서 제외하여 F_v 의 과소평가를 해소하는 것이 합리적인 것으로 판단했다.

수치적인 값으로 검토를 해보면 RRS의 평균값이 1.0을 기준으로 10% 이내의 증폭, 즉 1.1보다 작은 경우를 기준으로 설정하였다. 여기서 10%로 정한 이유는, RRS의 평균값이 지표면의 스펙트럴 가속도가 암반노두의 스펙트럴 가속도보다 10% 정도 증폭되었다는 의미이고, 10%는 상대적으로 충분히 작은 값으로 판단했기 때문이다. 그림 2-(b)의 T_B 지반의 경우 RRS의 평균값이 1.1보다 작아지는 주기는 0.94초 이상에 해당하고, 그림 2-(c)의 T_C 지반은 1.55초 이상에서 RRS의 값이 1.1 이하로 감소하고 주기가 증가할수록 1.0 근처에 점점 감소추세로 수렴하고 있다. 본 연구에서는 이러한 논리를 바탕으로 F_v 의 적분구간을 0.4초~1.5초로 설정을 하였다. 적분구간을 0.4초~1.5초로 정한 이유는 T_B 지반보다는 T_C 지반의 경우 증폭계수의 적분구간을 변경해야 할 이유가 더욱 명확하였기 때문이다.

4.2 설계응답스펙트럼의 제작성

본 절에서는 F_v 의 적분구간을 변경하여 재산정된 증폭계수를 이용하여 설계응답스펙트럼을 제작성하였다. 설계응답스펙트럼을 작성하기 위해서는 증폭계수 F_a 와 F_v 가 필요하고, 증폭계수 F_a 의 경우 3.3절에서 설명한 바와 같이 적분구간을 변경할 필요가 없기 때문에 기존의 연구결과를 그대로 사용하였다. 표 3에는 지반의 고유주기를 이용하여 지반을 분류하였을 경우 재산정된 증폭계수 F_a 값을 나타내었고, 표 4에는 적분구간을 변경하기 전의 F_v 값을 나타내었다.

T_A , T_B 그리고 T_C 지반에 대하여 증폭계수 F_v 의 적분구간을 주기 0.4초~1.5초로 설정하여 재계산한 결과는 표 5에 나타내었다. 여기서, 기존의 T_A , T_B 그리고 T_C 지반의 표기 방법과 구분하기 위하여 $T_{A,NF}$, $T_{B,NF}$ 그리고 $T_{C,NF}$ 로 표기하였고, T_A 지반의 경우 진술한 바와 같이 적분구간을 변경하기 전후의 값에 큰 차이가 없을 것으로 판단했으나, 증폭계수 산정 과정의 통일성을 위하여 T_A 지반도 적분구간을 변경하였다. 그러나, T_D 지반의 경우 적분구간 0.4초~2.0초에 해당하는 값으로 적분구간 변경전의 값이다.

재현주기 1,000년의 결과를 중심으로 서술해보면, 적분구간을 변경하기 전의 값인 표 4의 F_v 값과 변경후의 값인 표 5의 F_v 값에서 예상했던 바와 같이 T_A 지반의 경우 1% 정도의 변화가 발생하여 적분구간 변경으로 인한 변화는 미미하였다. T_B 지반의 경우 적분구간 변경전 F_v 는 1.20이었던가 변경후 1.27로 약 5.8% 정도 증가하였고, T_C 지반의 경우 1.55에서 1.72로 10.9% 정도 증가하였다. 재현주기 500년 및 2,400년에서도 동일한 현상이 발견된다. 여기에서도, 당초 예상했던 바와 같이 T_C 지반에서 적분구간에 대한 영향이 크게 나타났다.

그림 6에는 기존의 F_a 값인 표 3의 값과 새로 산정된 F_v 값인 표 5를 이용하여 T_B 지반 및 T_C

지반의 설계응답스펙트럼을 재산정($T_{B,NF}$, $T_{C,NF}$)하여 나타내었다. 그림 6-(a)와 그림 1-(b)의 T_B 지반의 결과를 비교해보면 본 절에서 재산정한 F_v 를 이용한 설계응답스펙트럼이 기존의 적분구간을 적용하여 구한 값보다 주기 0.4초 부근에서 개선된 것을 볼 수 있다. T_C 지반의 경우 적분구간 변경전의 그림 1-(c)와 적분구간 변경후의 그림 6-(b)를 비교해 보면 개선효과가 더욱 뚜렷하여 적분구간을 재산정하여 계산한 값이 해석결과의 현상을 더욱 합리적으로 설명하고 있는 것으로 판단된다.

표 3 단주기 증폭계수 F_a

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 4 적분구간 변경전의 장주기 증폭계수 F_v

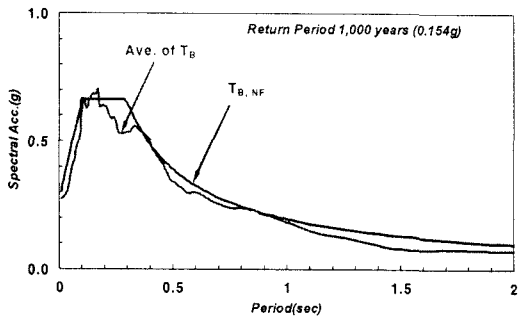
Site Period T (sec)		0.110g			0.154g			0.220g		
		Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v	Ave.	σ	F_v
$T < 0.1$	T_A	1.01	0.016	1.03	1.01	0.018	1.03	1.01	0.021	1.04
$0.1 \leq T \leq 0.3$	T_B	1.09	0.083	1.18	1.11	0.096	1.20	1.13	0.123	1.25
$0.3 < T \leq 0.5$	T_C	1.28	0.227	1.51	1.31	0.240	1.55	1.34	0.233	1.58
$0.5 < T$	T_D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

표 5 적분구간을 0.4초~1.5초로 변경하여 재산정된 증폭계수 F_v

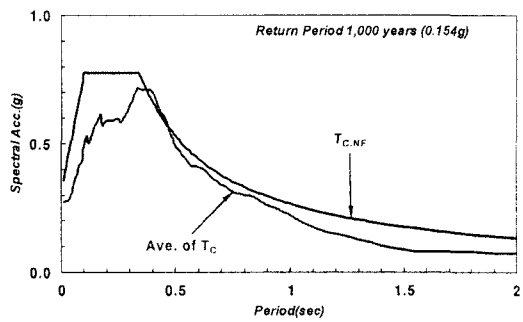
지반의 고유주기 T (sec)		0.110g			0.154g			0.220g		
		평균	σ	F_v	평균	σ	F_v	평균	σ	F_v
$T < 0.1$	$T_{A,NF}^*$	1.02	0.022	1.04	1.02	0.024	1.04	1.02	0.028	1.05
$0.1 \leq T \leq 0.3$	$T_{B,NF}$	1.12	0.111	1.23	1.14	0.128	1.27	1.17	0.164	1.34
$0.3 < T \leq 0.5$	$T_{C,NF}$	1.37	0.297	1.67	1.41	0.311	1.72	1.45	0.300	1.75
$0.5 < T$	T_D^{**}	2.02	0.427	2.45	1.99	0.418	2.41	1.94	0.437	2.37

* NF = New Site Factor의 약자

** T_D 지반의 경우 증폭계수 적분구간은 0.4초~2.0초로 적분구간의 변경이 없음.

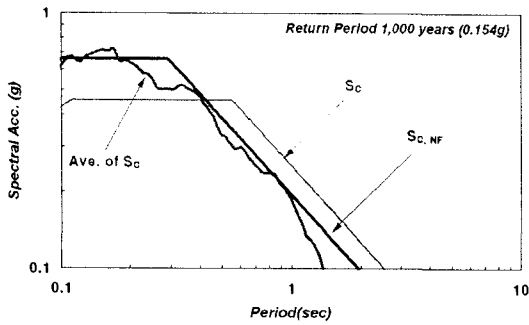


(a) T_B 지반

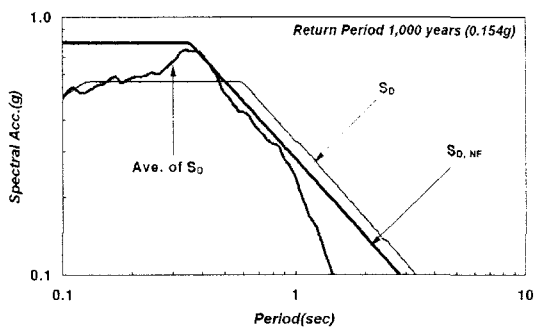


(b) T_C 지반

그림 6 증폭계수 적분구간 변경후 설계응답스펙트럼과 스펙트럴 가속도의 평균값 비교



(a) T_B 지반



(b) T_C 지반

그림 7 로그단위로 나타낸 재현주기 1,000년에 대한 F_v 의 적분구간을 변경하여 재작성한 설계응답스펙트럼

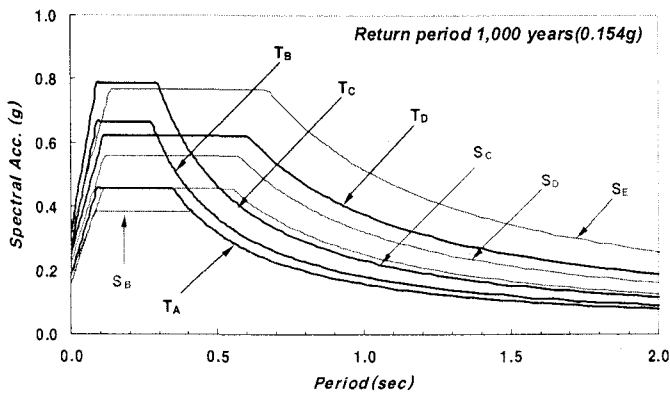


그림 8 V_{S30} 과 지반의 고유주기를 기준으로 지반분류시 각 지반종류별 설계응답스펙트럼의 비교 (재현주기 1,000년)

적분구간 변경전과 변경후의 차이를 명확하게 알아보기 위하여 그림 6의 스펙트럴 가속도 축인 y-축과 주기 축인 x-축을 로그단위를 이용하여 그림 7에 다시 나타내어 보았다. 그림 7을 살펴보면 적분구간을 변경하여 재계산한 F_v 를 이용하여 재작성된 설계응답스펙트럼($T_{B,NF}$ 및 $T_{C,NF}$)이

기존의 S_C 및 S_D 지반의 설계응답스펙트럼보다 개선되었음을 확인할 수 있고, 또한 적분구간을 변경하기 전의 T_B 지반과 T_C 지반의 설계응답스펙트럼 보다도 개선되었음을 알 수 있다. 그림 7에는 계산정된 F_v 값을 각각의 RRS와 함께 나타내었고, T_A 지반과 T_D 지반의 경우 생략하였다. 따라서, 3장에서 문제를 제기했던 적분구간의 적용성에 대한 검토 결과 새로운 적분구간을 적용하였을 경우 기존의 적분구간을 이용하였을 경우보다 설계응답스펙트럼 작성면에 있어서 개선의 효과가 있다고 결론을 내릴 수 있다.

그림 8에는 적분구간을 변경하여 계산정된 증폭계수를 이용하여 각 지반종류별 설계응답스펙트럼과 현재 내진설계기준에서 제시하고 있는 V_{S30} 과 지반의 고유주기를 기준으로 지반을 분류하였을 경우 각 지반종류에 대한 설계응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 선행 연구결과에서 지반의 고유주기를 이용하여 지반분류 하는 방법이 가장 우수한 방법으로 결정되으나, 지반분류 기준을 변경하여 개선하여도 설계응답스펙트럼을 작성하는데 있어 불합리한 점이 발견되었다. 따라서, 본 논문에서는 국내 지반조건에 적합하도록 지반증폭현상을 평가할 수 있는 증폭계수의 계산방법을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단주기 영역의 증폭계수 F_a 의 적분구간은 변경할 사유가 없어 현재의 방법을 그대로 사용하기로 결정하였다. 이는 RRS 값이 F_a 적분구간에서는 감소추세를 형성하며 수렴하는 경향이 나타나지 않았기 때문이다.
- (2) 장주기 영역의 증폭계수 F_v 의 적분구간은 현재 주기 0.4초~2.0초에서 주기 0.4초~1.5초로 변경하여 재계산을 하였다. 적분구간을 변경하여 F_v 를 계산정한 결과 T_B 지반과 T_C 지반에서 계산정된 F_v 값을 바탕으로 작성된 설계응답스펙트럼과 스펙트럴 가속도의 평균값에서 차이가 나타났던 부분이 해결되었고, 국내 지반특성에 더 적합한 설계응답스펙트럼을 작성할 수 있었다. 따라서, 증폭계수의 적분구간 변경은 합리적인 방법으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 한국지진공학회논문집, 2005 (제출중)
2. 윤종구, 김동수, 방은석, “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (II) - 지반분류 개선방법”, 한국지진공학회논문집, 2005 (제출중)
3. NEHRP, 1997, Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures, FEMA 302/303, February, Part I. (Provisions) and Part. 2(Commentary).
4. 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.
5. Borcherdt, R.D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification): Earthquake Spectra, v. 10, p. 617-654.
6. 윤종구, 김동수, “국내 지반특성에 적합한 설계지반운동 결정 방법에 대한 연구”, 한국지진공학회논문집, 제8권 제3호, pp. 23-32, 2004년 6월호