

지반-구조물 상호작용 해석의 단순화된 기준에 대한 평가

Evaluation of a Simplified Criterion for SSI Analysis

김재민¹⁾ 김원희²⁾ 현창현³⁾
Kim, Jae-Min Kim, Won-Hee Hyun, Chang-Hun

ABSTRACT

This paper is concerned with the simplified criterion given in ASCE 4-98, for determining whether soil-structure interaction (SSI) analysis is required for seismic response analysis of nuclear power plant structures. In this study, the criterion is evaluated for a couple of example structures including an existing nuclear power plant and the Hualien large-scale seismic test building. Forced vibration analysis and seismic response analysis are carried out using the simple stick model with soil springs and an elaborated SSI analytical model. From the numerical analyses, it is found that the criterion may not allow the fixed-base analysis for bedrock with shear wave velocity of greater than 1,100m/s which is a well-known criterion for a rock site. In addition, it is indicated that peak amplification as well as the peak broadening specified in NRC RG 1.122. shall be considered to include the effects of SSI.

1. 서론

원전 건설 부지가 한정되어 있고 설계기술이 발전함에 따라 암반이 아닌 지반에 원전이 건설될 가능성이 높아지고 있다. 최근에는 암반이 아닌 지반에 원전 건설을 가정한 신형경수로, 제4세대 원전 (GEN IV) 등의 설계가 수행된 바 있다. 이에 따라 원전구조물의 내진설계 분야에서 지반-구조물 상호작용 (SSI) 해석의 중요성이 증대하고 있다.

한편, 미국토목학회에서 제시한 원전시설물의 내진설계지침인 ASCE 4-98을 도입하여 국내 원전의 내진설계지침을 개정하는 방안이 검토되고 있다. 그러나 ASCE 4-98의 지침 중에는 현행 내진설계지침과 차이가 큰 부분이 있을 수 있으므로, 면밀한 검토 없이 도입할 경우 현행 설계수준의 내진안전성을 보장하지 못할 수 있다. 따라서 ASCE 4-98을 국내에 도입하기 전에 이 기준의 타당성과 현행 설계 실무와의 차이점에 대한 비교 및 분석이 필요하다.

이 연구에서는 ASCE 4-98 지침 중에서 SSI 해석여부에 관한 기준의 이론적인 배경과 합리성을 평가하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저 ASCE 4-98에서 제시하고 있는 SSI 해석관련 기준의 의미를 다양한 측면에서 분석하였다. 그리고 울진 3,4호기와 대만 Hualien 지진시험용 구조물에 대

1) 정회원 · 전남대학교 건설·환경공학부 부교수
2) 전남대학교 건설·환경공학과, 석사과정
3) 한국원자력안전기술원 책임연구원, 공학박사

해 SSI 해석을 수행하여, 지반의 전단파속도에 따른 고유진동수와 지진응답의 변동 추이를 분석하였다. 이와 같은 해석결과를 바탕으로 ASCE 4-98 기준의 합리성을 평가하였으며 이 기준을 국내 원전구조물에 적용하기 전에 보완해야 할 사항을 제시하였다.

2. ASCE 4-98의 SSI 해석 기준

ASCE 4-98에는 원전 구조물의 내진해석 시 SSI 고려여부에 대해 다음과 같은 기준을 제시하고 있다: 1) 암반 또는 암반류 지반이 아닌 경우에는 SSI의 영향을 고려하여야 한다. 2) 암반 또는 암반류 지반에서 식 (1)의 조건을 만족한다면 SSI 효과를 무시한 고정기초해석이 가능하다.⁽¹⁾

$$f_{soil} \geq 2f_{fixed-base} \quad \text{또는} \quad T_{fixed-base} \geq 2T_{soil} \quad (1)$$

식 (1)에서 f_{soil} 은 구조물이 강체일 때 지반의 영향을 고려한 시스템의 고유진동수이며, $f_{fixed-base}$ 는 고정기초에 대한 고유진동수로서 그림 1과 같다. 이 때 고유진동수 f_{soil} 을 계산하기 위하여 원형기초인 경우 그림 1과 같은 지반스프링상수를 사용한다. 그리고 $T_{fixed-base}$ 와 T_{soil} 은 각 고유진동수에 대응하는 고유주기이다. 암반 또는 암반류 지반은 전단파속도로 정의할 수 있으며 ASCE 4-98에는 전단파속도는 3,500ft/s (= 1,100m/s) 이상을 암반으로 보고 있다.

SSI 효과를 고려한 구조물의 고유주기 T_{SSI} 는 식 (2)와 같이 근사할 수 있다.⁽²⁾

$$T_{SSI} \cong \sqrt{\{T_{fixed-base}\}^2 + \{T_{soil}\}^2} \quad (2)$$

ASCE 4-98 기준인 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$1.0 \leq \frac{T_{SSI}}{T_{fixed-base}} \leq \sqrt{1.25} \approx 1.12 \quad \text{또는} \quad 0.90 \leq \frac{f_{SSI}}{f_{fixed-base}} \leq 1.0 \quad (3)$$

이 식으로 부터 ASCE 4-98에 제시된 고정기초해석 판단기준은 “지반-구조물 상호작용 효과에 의한 구조물 고유진동수의 변화가 고정기초 구조물에 비하여 10% 이내라면 SSI 효과를 무시한 고정기초해석을 수행하여 내진해석을 수행할 수 있다”라고 이해할 수 있다.

3. 예제구조물에 대한 지반-구조물 상호작용해석

3.1 예제구조물 및 인공지진파

첫 번째 예제구조물은 그림 2와 같이 대만 Hualien 지진시험구조물로서 대만의 동북부 Hualien(花蓮)에 설치된 원자력발전소 격납구조물의 1/4축소 모형이다. 이 구조물은 직경이 약 11m, 높이가 약 16m인 철근콘크리트 구조물로서 전체중량은 약 1500톤이다.

두 번째 예제구조물은 그림 3과 같은 울진 원자력발전소 3, 4호기 격납구조물이다. 이 원자력발전소는 한 기당 시설용량이 100만KW인 가압경수로형 원자로를 사용하고 있다. 해석대상 격납구조물은 지름이 48.77m이고, 높이는 69.5m이다.

이 연구에서는 지진응답해석을 수행하기 위하여 10개 인공지진파의 평균응답스펙트럼이 RG 1.60⁽³⁾의 설계응답스펙트럼을 만족하도록 그림 4와 같이 작성하였다⁽⁴⁾. 인공지진파의 포락함수로

서 사다리꼴 함수를 사용하였으며, 상승시간 1.5초, 강진지속시간은 10초, 총 지속시간은 18.5초이다. 이는 ASCE 4-98에서 제시한 기준에서 규모 6.5~7.0 이상에 대한 포락함수와 일치한다.

3.2 고정기초구조물에 대한 동적해석

고정기초해석은 SAP2000 V7.42을 이용하여 수행하였으며 두 예제구조물에 대한 해석결과는 다음과 같다.

- Hualien 지진시험구조물의 고유진동수는 표 1에 나타난 바와 같이 수평모드는 10.38 Hz이며 수직모드는 31.12 Hz 이다. 그림 6는 그림 4의 지진입력에 대한 구조물 상단 가속도응답의 평균 가속도응답스펙트럼을 나타낸 것이다.
- 울진 3,4호기 격납구조물의 고유진동수는 표 1에 나타난 바와 같이 수평모드는 4.56 Hz이며 수직모드는 13.09 Hz 이다. 그림 7은 그림 4의 지진입력에 대한 구조물 상단 가속도응답의 평균 가속도응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

3.3 지반의 전단파속도에 따른 기본고유진동수

이 연구에서는 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 SSI 해석용 SW인 SASSI를 사용하였다. 각 예제구조물에 대한 모델링 방법과 해석결과는 다음과 같다.

- Hualien 지진시험구조물 : SSI 해석을 위해 그림 8(a)와 같은 SASSI 해석모델을 작성하였다. 지반의 전단파속도에 따른 구조물의 고유진동수 변화를 분석하기 위하여 구조물 상단에서 수평 및 수직방향 단위하중 가진에 대한 강제진동해석을 수행하여, 그림 9와 같은 주파수응답함수를 구하였다. 이 주파수응답함수로부터 기본고유진동수를 그림 10과 같이 계산하였다. 해석 결과 일반적으로 암반으로 가정되는 $V_s=1,100\text{m/s}$ 에서의 침투진동수가 8.25 Hz로 고정기초구조물의 고유진동수 10.38 Hz와 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. ASCE 4-98 기준을 이 구조물에 적용할 경우 고정기초해석이 가능한 지반의 전단파속도는 약 1,576m/s로 산정되었다.
- 울진 3,4호기 격납구조물 : 이 구조물의 SSI 해석을 위해 그림 8(b)와 같은 해석모델을 작성하였다. 해석 방법은 Hualien 지진시험구조물과 동일하다. SSI 해석을 통하여 구한 주파수응답함수는 그림 11과 같으며 지반의 전단파속도에 따른 기본고유진동수의 변화는 그림 12와 같다. 이 구조물에서 $V_s=1,100\text{m/s}$ 일 때 고유진동수는 3.93Hz로서 고정기초구조물의 고유진동수인 4.56 Hz 보다 약 14% 작은 값을 보였다. ASCE 4-98 기준을 적용할 경우 고정기초해석이 가능한 지반의 전단파속도는 1,263m/s 인 것으로 계산되었다.

3.4 SSI 효과를 고려한 지진응답해석

ASCE 4-98 기준에 따라 고정기초해석이 가능한 기초 지반의 전단파속도 범위(Hualien 지진시험구조물 : 1,576m/s 이상, 울진 3,4 호기 : 1,263m/s 이상)에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 해석결과는 그림 13 및 그림 14에 정리하였다. 그리고 NRC RG 1.122⁽⁵⁾에 따라 구조물 고유진동수에서 응답스펙트럼의 최고값을 고유진동수의 15% 만큼 확대하여 설계응답스펙트럼을 작성한 결과와 이 연구에서 지반의 전단파속도 변동에 따른 응답스펙트럼의 포락값을 비교하여 그림 15와 그림 16에 정리하였다.

이와 같은 해석결과로부터 NRC RG 1.122에서 제시하는 최고주파수에서 주파수범위 확대만으로는 SSI 효과로 인한 최고값의 증폭현상을 고려할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 ASCE 4-98의

SSI 해석여부에 대한 기준은 재검토가 필요하며 적용범위에 대한 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 ASCE 4-98에 제시된 지반-구조물 상호작용해석 여부를 판단하는 기준에 대해 검토하였다. 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

1. ASCE 4-98의 고정기초해석 기준은 $f_{SSI} / f_{fixed-base} \geq 0.9$ 와 같은 의미를 가진다.
2. 예제 구조물에 대한 ASCE 4-98 기준을 적용한 결과, 일반적으로 암반으로 분류하는 전단파속도가 1,100m/s인 지반에 대해서도 고정기초해석에 의한 내진설계를 할 수 없다.
3. ASCE 4-98에 따른 고정기초해석이 가능한 지반을 추정한 결과, Hualien 지진구조물에서는 $V_s=1,576$ m/s, 울진 3,4호기 원전 격납구조물에서는 $V_s=1,263$ m/s에서 고정기초해석이 가능하다.
4. 예제 구조물에 대한 지진응답해석결과, ASCE 4-98의 SSI 해석여부에 대한 기준은 현행 실무와 비교하여 보수적이지 않을 수 있으므로 재검토가 필요하며, 적용범위에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

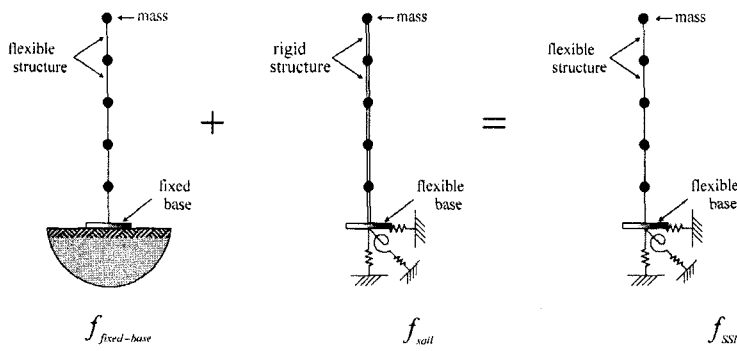
이 연구는 과학기술부 원자력중장기연구의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASCE Standard 4-98, "Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary", ASCE, 1999.
2. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice Hall, 1985.
3. Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants - Revision 1", U.S. NRC, 1973.
4. 김남식, 김재민, 이계희, 강형택, "지진격리교량의 지진해석을 위한 인공지진파의 작성", 한국지진공학회 2005년 학술대회 논문집, pp. 487-494.
5. Regulatory Guide 1.122, "Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment of Components", U.S. NRC, 1978.

표 1. 예제구조물의 고유진동수 (단위: Hz)

예제구조물	모드 구분	SAP2000		SASSI	
		$f_{fixed-base}$	$f_{SSI} (V_s=1,100 \text{ m/s})$	$f_{fixed-base}$	$f_{SSI} (V_s=1,100 \text{ m/s})$
Hualien	수평	10.38	8.80	10.38	8.25
지진시험구조물	수직	31.12	26.15	31.13	27.15
울진 3,4호기	수평	4.56	3.99	4.56	3.93
격납구조물	수직	13.09	12.40	13.10	11.93



반무한 지반에 놓인 원형 강체기초의 등가 스프링상수	
수평	$k_x = \frac{32(1-\nu)GR}{7-8\nu}$
수직	$k_z = \frac{4GR}{1-\nu}$
Rocking	$k_\phi = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$
비틀림	$k_t = 16GR^3/3$

그림 1. 지반-구조물 시스템의 고유진동수 정의

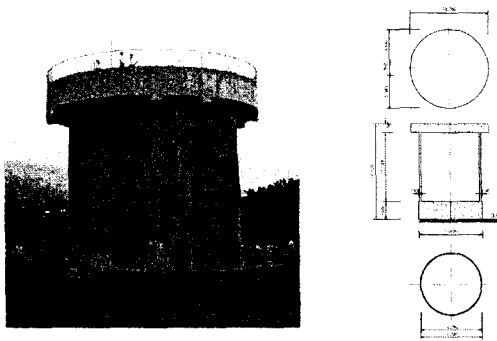


그림 2. Hualien 내진시험 구조물

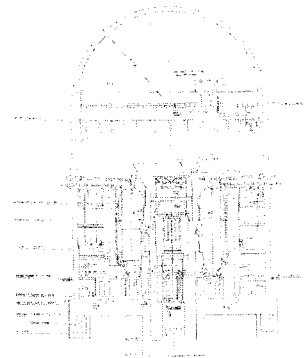


그림 3. 울진 3, 4호기 원전구조물

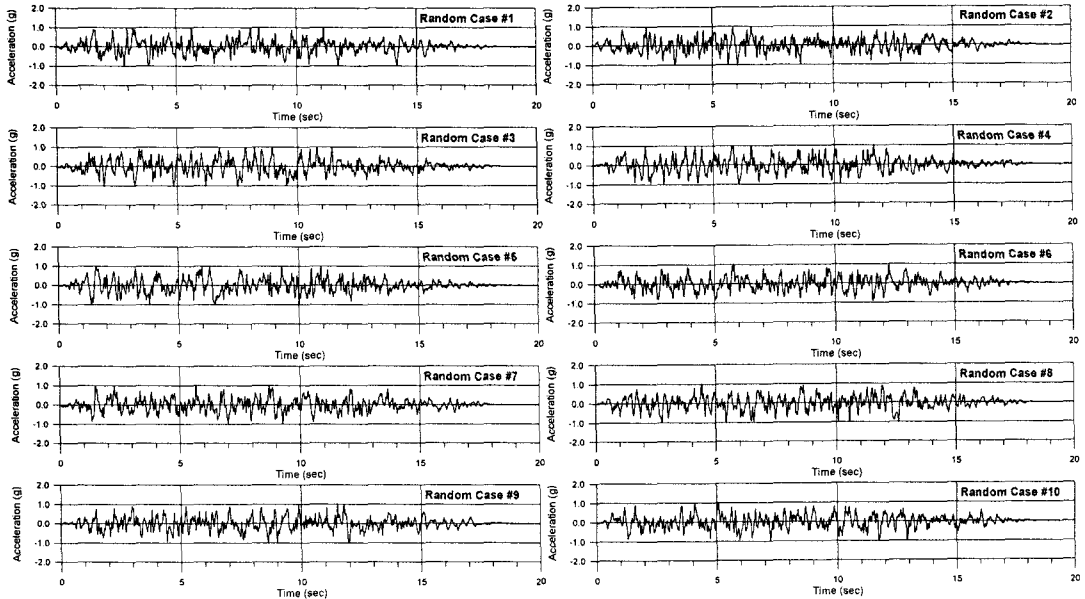
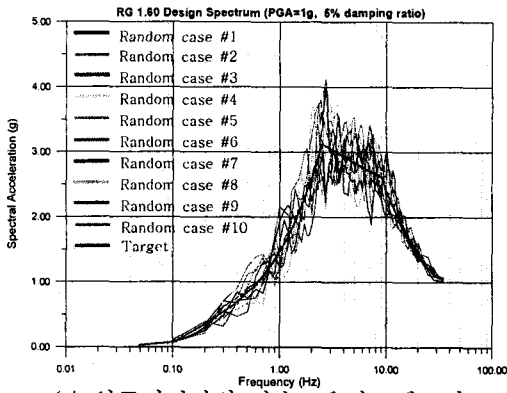
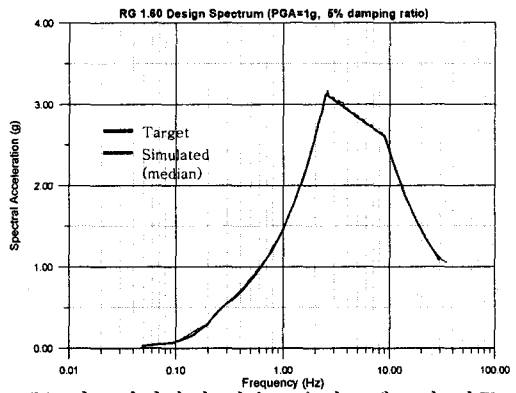


그림 4. 인공지진파의 시간이력곡선

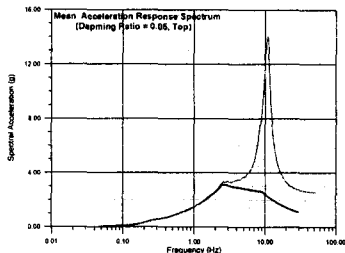


(a) 인공지진파의 가속도응답스펙트럼

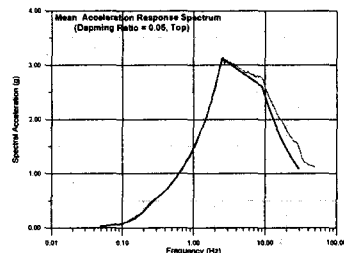


(b) 인공지진파의 가속도응답스펙트럼 평균

그림 5. 입력지진의 RG 1.60 설계응답스펙트럼(PGA=1g)과 인공지진파 응답스펙트럼의 비교

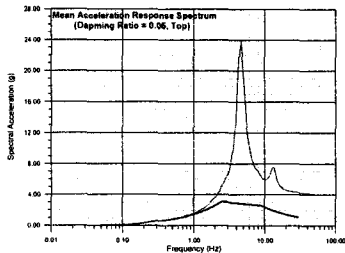


(a) 수평방향

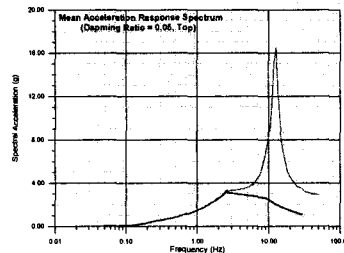


(b) 수직방향

그림 6. 고정기초 Hualien 지진시험구조물 상단 가속도응답의 가속도응답스펙트럼 (5% 감쇠비)

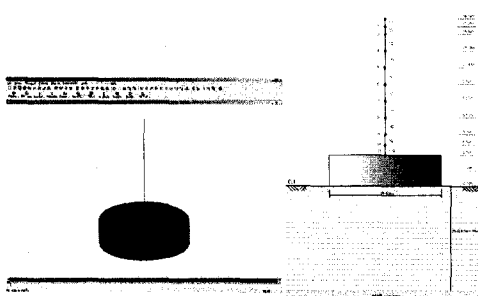


(a) 수평방향

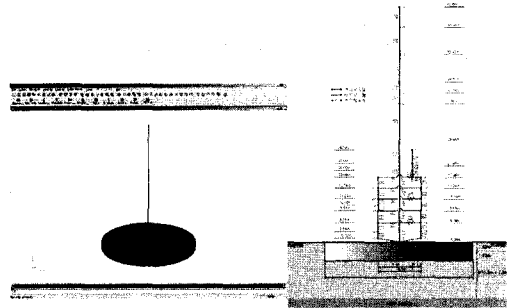


(b) 수직방향

그림 7. 고정기초 울진 3,4호기 격납구조물 상단 가속도응답의 가속도응답스펙트럼 (5% 감쇠비)

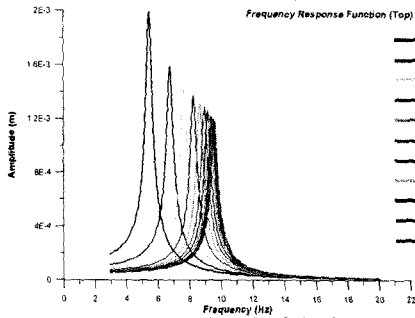


(a) Hualien 지진시험구조물

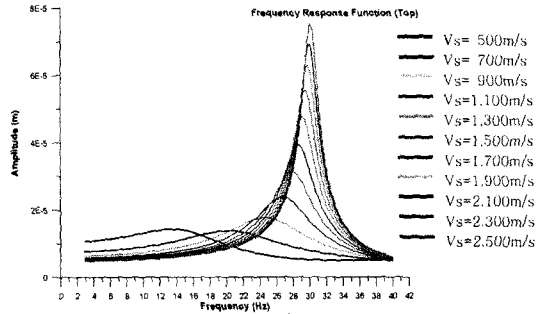


(b) 울진 3,4호기 격납구조물

그림 8. 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 SASSI 해석모델

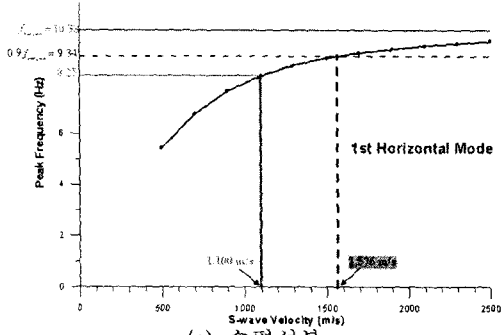


(a) 수평응답

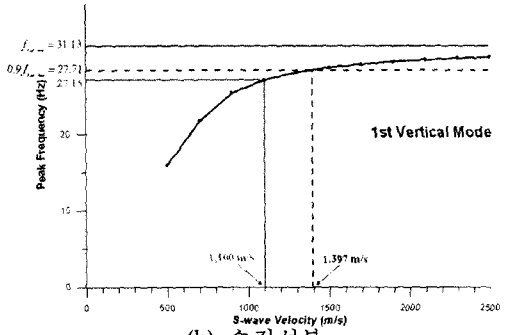


(b) 수직모드

그림 9. Hualien 지진시험구조물의 주파수응답함수 (SASSI)

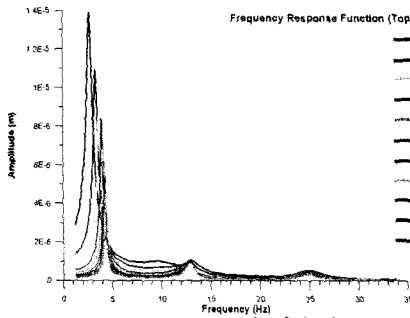


(a) 수평성분

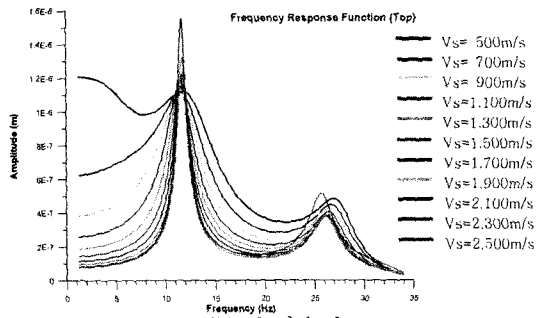


(b) 수직성분

그림 10. Hualien 지진시험구조물의 지반의 전단파속도에 따른 침두진동수 변화

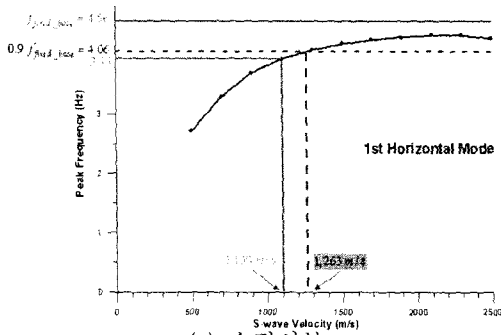


(a) 수평응답

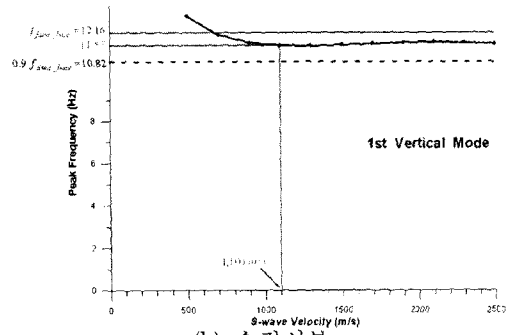


(b) 수직응답

그림 11. 울진 3,4호기 원전구조물의 주파수응답함수 (SASSI)



(a) 수평성분



(b) 수직성분

그림 12. 울진 3,4호기 격납구조물의 지반의 전단파속도에 따른 침두진동수 변화

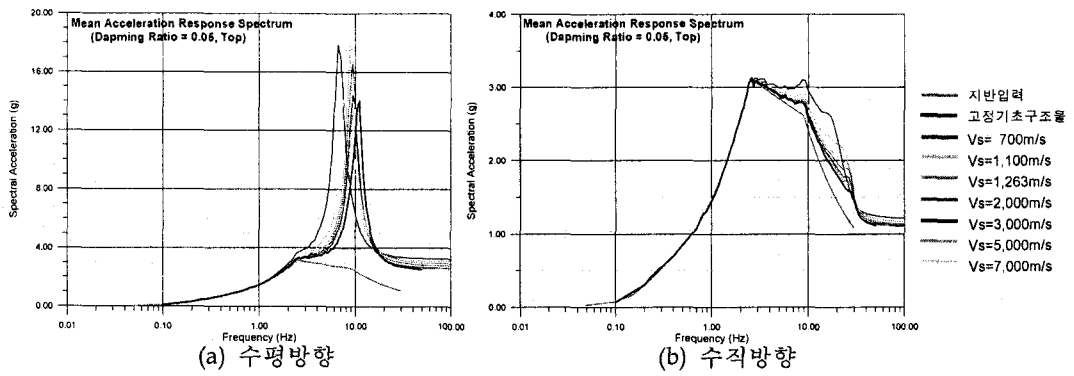


그림 13. Hualien 지진시험구조물 상단에서의 평균응답스펙트럼(고정기초해석 및 SSI해석, SASSI)

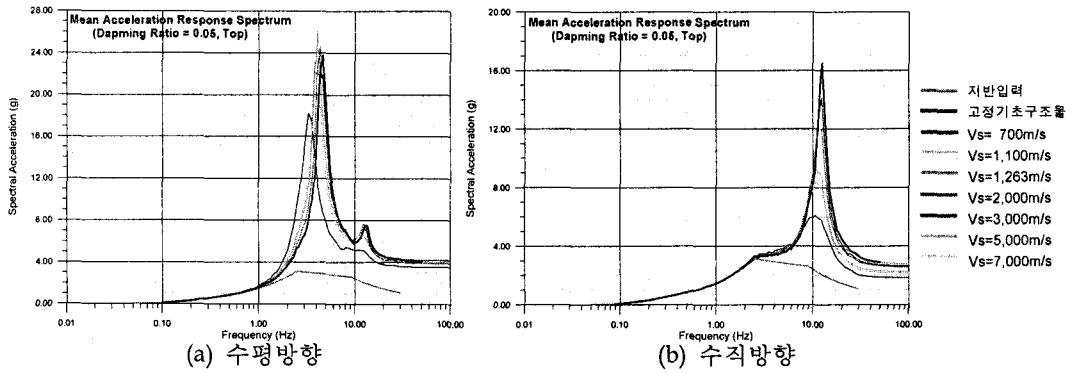


그림 14. 울진 3,4호기 구조물 상단응답의 평균응답스펙트럼 (고정기초해석 및 SSI해석, SASSI)

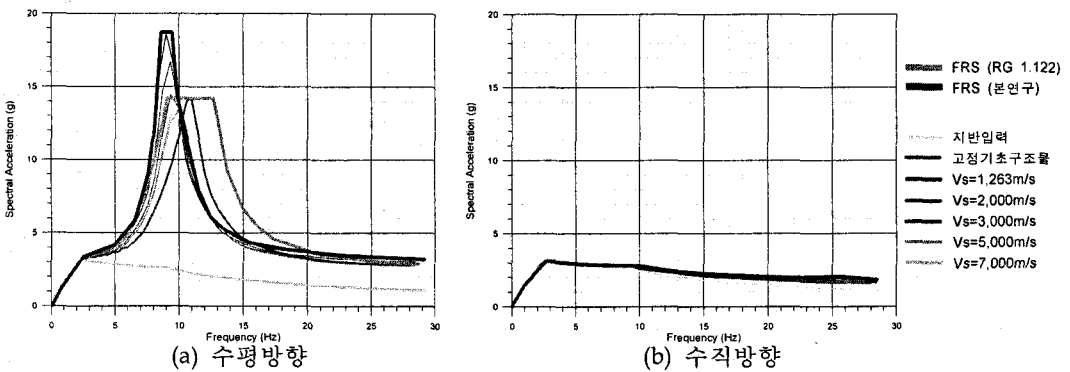


그림 15 Hualien 지진시험구조물 상단에서의 응답의 층응답스펙트럼

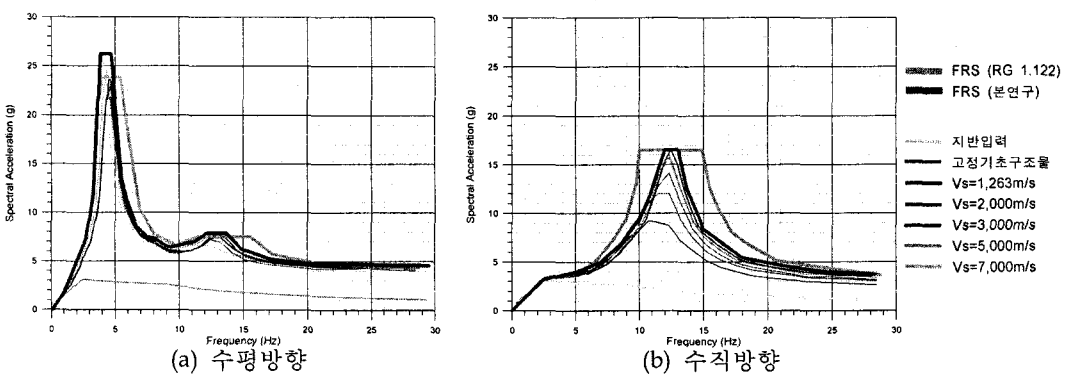


그림 16 울진 3,4호기 구조물 상단에서 응답의 층응답스펙트럼