

Hualien 대형내진모델의 지진응답 예측해석

윤철호, 김문수, 이상국, 현창현
한국원자력안전기술원

윤정방, 김재민
한국과학기술원

요 약

본 연구는 국제공동연구로 수행중인 Hualien 대형내진모델시험사업중 모델구조물에 대한 지진응답 예측해석(blind prediction analysis)에 관한 것이다. 이 해석은 축대칭 무한요소를 이용하여 개발한 전산프로그램 KIESSI와 유연체적법에 의한 전산프로그램 SASSI를 이용하여 수행하였으며, 구조물 및 지반 특성은 뒷채움이 완료된 모델구조물에 대한 통일모델과 예측후 상관해석 결과를 사용하였다. 그 결과 지진응답 예측해석 결과는 계측된 지진응답과 비교적 잘 일치하였으나 더 좋은 해석결과를 얻기 위해서는 구조물 및 지반 특성을 좀 더 수정할 필요가 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

본 논문에서는 대만의 花蓮(Hualien)에서 국제공동연구로 수행중인 대형내진모델시험(large scale seismic test, LSST)사업[1,2]에서의 지진응답 예측해석결과를 기술하였다. Hualien LSST 사업은 Lotung LSST 사업[3]의 후속사업으로 미국, 대만, 일본, 프랑스, 한국 등 5개국 11개 기관이 참여하여 국제공동연구로 수행중이며, 1988년에 발의되어 본격적인 연구사업은 모델구조물이 완성된 후 약 6년간(1992년~1998년) 계속될 예정이다. 이 사업에의 참여기관은 앞의 주 회원기관 이외에도 이 기관들과 공동해석을 수행하는 많은 연구소와 학교, 회사 등으로 구성되어 있다. 이 사업에서는 강제진동시험과 실제 지진에 대한 지진시험을 수행하게 되며 강제진동시험은 지진시험 이전에 모델구조물의 진동특성 및 지반특성, 강제진동응답에 대한 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI)의 영향 등을 파악하기 위하여 수행한다.

이 내진모델시험 부지에서의 지진은 1993년말부터 1994년말까지 70여회 발생(리히터 규모 4-6)하였으며 모델구조물에 대한 지진응답 예측해석은 이 지진들중 계측이 가장 잘 이루어진 1994년 1월 20일 지진(리히터 규모 5.6)에 대하여 수행하였다. 이 해석은 축대칭 무한요소를 이용하여 개발한 전산프로그램 KIESSI[1]와 유연체적법에 의한 전산프로그램 SASSI[4]를 이용하여 수행하였으며, 구조물 및 지반 특성은 뒷채움이 완료된 모델구조물에 대한 통일모델과 예측후 상관해석 결과[5]를 사용하였다.

2. 자유장해석

자유장해석은 전산프로그램 SHAKE[6]와 동적강도행렬법[7]을 이용하여 개발한 전산프로그램 FREE를 이용하여 수행하였으며 SHAKE는 SASSI 해석을 위한 전단계 해석을 위하여, FREE는 KIESSI 해석을 위한 전단계 해석을 위하여 사용하였다. 이 해석에서 사용한 지반특성은 그림 1 및 2에 보인 바와 같은 모델구조물에서 멀리 떨어진 지역의 지반특성을 사용하였다. 이 그림에서 팔호 안의 값은 체계적인 해석결과 분석을 위하여 지반조사결과로부터 제시된 통일된 특성값(통일지반특성값)이며 네모상자 안의 값은 뒷채움후 강제진동 예측후 상관해석결과로부터 결정된 지반특성값(수정지반특성값)이다.

자유장해석 및 지진응답해석을 위한 통제점 지반운동(통제운동)은 시험부지에서 계측된 지진기록(1994년 1월 20일 지진) 모델구조물에서 적절히 떨어진 지역(그림 3의 A15점), 즉 자유장에서의 지반가속도를 사용하였으며 이 지반가속도는 그림 4에 보인 바와 같다. 이 통제운동은 최대 지반가속도가 남북방향은 약 0.032g, 동서방향은 약 0.044g로서, 지반의 비선형성을 유발시키기에 매우 작은 것으로 판단되었으므로 FREE에 의한 자유장해석에서는 선형으로 가정하였으며 SHAKE에 의한 해석은 지반 비선형성의 크기를 정량화해 보기 위하여 지반의 비선형성을 고려하여 수행하였다.

그림 5는 SHAKE와 FREE를 이용한 자유장해석결과와 downhole array에서의 측정결과를 응답스펙트럼으로 나타내어 비교한 것이다. 이 그림에 의하면 통일지반특성값과 수정지반특성값을 사용한 해석결과는 큰 차이를 보이지 않고 있으며 이 해석결과들은 남북방향 성분의 경우 계측결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 동서방향의 경우에는 계측점 D12와 D13에서 해석결과와 계측결과가 큰 차이를 보이고 있으며 이는 계측점 D11과 D13사이에서의 지반특성이 이방성을 크게 나타내고 있기 때문으로 판단된다. FREE에 의한 해석결과도 SHAKE에 의한 결과와 거의 유사하므로 그림 6에는 FREE에 의한 해석결과중 남북방향에 대한 것만을 보였다(이 경우는 통일지반특성과 수정지반특성이 동일함).

표 1에는 SHAKE에 의한 해석결과(수정지반) 얻어진 지반특성의 비선형 변화량을 나타내었다. 이 표로부터 지반 각층에서의 전단파속도는 2-9%, 전단계수는 5-17%, 이력감쇠비는 3-20% 정도 비선형성을 보이며 이 변화량은 지반 층이 깊어질수록 더 커짐을 알 수 있다.

3. 지진응답예측해석

시험모델 구조물은 실제 원자로 건물의 1/4 축척인 원통형 철근콘크리트 구조물로서 총중량이 1400ton, 높이가 약 16m, 직경이 약 11m이며 구조물의 1/3 정도가 묻혀 있다[1]. 그림 1은 모델구조물 단면 및 층상지반의 형상과 특성을 나타내고 있다. 여기서 통일지반특성중 포아송비는 자갈층의 경우 0.47, 그 이외의 경우는 지하수면 위 0.38, 지하수면 아래 0.48로 제시되어 있으며 수정지반특성에서는 SASSI 해석의 경우에만 모두 0.38로 수정하였다. 또한 초기 이력감쇠비는 구조물 및 지반 모두 0.02이다.

지진응답 예측해석에 사용한 SASSI 및 KIESSI의 해석모델은 각각 그림 7 및 8과 같다. SASSI

해석모델은 모델구조물의 축대칭 형상을 이용한 1/4 모델이며 KIESSI 해석모델은 축대칭요소를 이용한 2차원 모델이다. 이 해석모델들과 그림 4의 지진입력을 사용한 지진응답해석결과와 응답스펙트럼과 계측결과와 응답스펙트럼을 그림 9와 10에 비교하였으며 자유장에 대한 모델구조물 지붕의 전달함수를 그림 11에 비교하였다. 자유장해석결과 남북방향 성분은 계측결과와 잘 일치하였으나 동서방향 성분은 지반의 이방성에 의한 차이가 많으므로, 여기에서는 남북방향 지진성분에 대한 지진응답해석결과만을 계측결과와 비교하였다. 여기서 RFNL은 모델구조물의 지붕계측점, WHNL은 벽체의 중간지점, WLNL은 벽체의 지표지점, BASL은 기초슬래브 상부를 나타낸다. 이 그림들로부터 해석결과와 시스템 진동수는 SASSI 해석에서는 통일지반의 경우 7.5Hz, 수정지반의 경우 6.0Hz, KIESSI 해석에서는 통일지반의 경우 7.2Hz, 수정지반의 경우 6.2Hz임을 알 수 있으며 이 값들은 뒷채움후 강제진동해석결과와 일치하고 있다[1,5]. 그러나 계측결과로부터 구한 시스템 진동수는 5.3Hz로서 뒷채움후 강제진동시험에서는 시스템 진동수가 6.1-6.3Hz이었던 것[5]을 고려하면 지진계측결과와 강제진동시험결과는 서로 일치하지 않는다. 이 차이는 이 지진에 의한 구조물 근처 지반의 비선형성 및 지반 자체의 이방성에 의한 영향인 것으로 판단된다.

전체적으로 지진응답 예측해석결과는 SASSI와 KIESSI의 해석결과 모두 수정지반에 의한 해석결과가 통일지반에 의한 해석결과보다 계측결과와 비교적 잘 일치하고 있으며 특히 구조물의 낮은 지점(WLNL과 BASL)에서 잘 일치하고 있다. 구조물 상부(RFNL과 WHNL)에서는 두 프로그램에 의한 해석결과 모두 고진동수에서 계측결과보다 응답이 크게 나타나고 있으며 KIESSI에 의한 해석에서는 이러한 경향이 더욱 크게 나타나고 있다. 또한 KIESSI에 의한 해석에서는 최대응답이 계측결과와 유사한 반면 SASSI 해석에서는 전체적으로 계측결과보다 작게 나타나고 있다. 이는 구조물 자체에 대한 동적 특성에 대하여 좀 더 고찰해 볼 필요가 있음을 나타내고 있는 것이며, 앞으로 더 좋은 지진응답해석결과를 얻기 위해서는 해석에 사용한 전산프로그램별로 이러한 차이에 대한 원인 분석 및 구조물과 지반 특성의 수정과정이 필요하다.

그림 12에는 자유장해석결과로부터 얻어진 지반의 비선형성을 고려하여 SASSI에 의해 해석한 결과를 선형 지반특성을 이용한 결과와 비교하였다. 이 결과로부터 지진 자체에 의한 지반특성은 20%까지도 변하지만(표1) 구조물 응답의 변화는 무시할만함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Hualien 대형내진시험의 모델구조물에 대한 지진응답 예측해석을 수행하였으며 이로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 자유장해석결과는 남북방향 성분의 경우 계측결과와 잘 일치하였으나 동서방향 성분은 큰 차이를 나타내었다. 이는 지반의 이방성 때문인 것으로 판단되며 특히 이 이방성은 깊은 지반층에서 크게 나타난다.
- (2) 수정지반에 의한 지진응답해석결과가 통일지반에 의한 해석결과보다 계측결과와 비교적 잘 일치하고 있으며 특히 구조물의 낮은 지점에서 잘 일치한다. 또한 구조물 상부에서는 해석결과가 계측결과와 큰 차이를 나타내고 있으므로 앞으로 구조물 자체에 대한 동적 특성에 대하여도 좀 더 고찰해 볼 필요가 있다.

(3) 자유장해석결과로부터 얻어진 지진 자체에 의한 지반의 비선형특성은 20%까지도 변하지만 이에 따른 구조물 응답의 변화는 무시할만하다.

참고문헌

- [1] 윤철호 등. (1994). 원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술개발. KINS/GR-082, 과학기술처.
- [2] Tang, H.T. et al. (1991). "The Hualien Large-Scale Seismic Test for Soil-Structure Interaction Research." *Trans. of the 11-th SMIRT*, Vol. K1, 69-74.
- [3] Tang, H.T. et al. (1989). "EPRI/TPC Large-Scale Seismic Experiment at Lotung, Taiwan." *EPRI/NRC/TPC Workshop on Seismic Soil-Structure Interaction Analysis Techniques Using Data from Lotung, Taiwan*, EPRI NP-6154, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- [4] Lysmer, J. et al. (1988). *SASSI-User's Manual*. UC Berkeley & Bechtel Power Corp.
- [5] 윤철호 등. (1994). "Hualien 대형내진모델의 강제진동 예측후 상관해석", 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 한국전력공사 서울연수원, 10월 29일.
- [6] Schnabel, P.B. et al. (1972). *SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*. EERC/72-12, UC Berkeley, CA.
- [7] Wolf, J.P. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 원자력연구개발사업 지원에 의한 "원자력 안전규제 기술개발(구조/부지 안전성 평가기술개발 : 원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발)"과제로 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

표 1 SHAKE에 의한 자유장해석결과 지반특성의 비선형 변화량 (수정지반, 남북방향 성분)

깊이 (GL, m)	초기값(a)			해석결과(b)			
	Vs ¹⁾	G ²⁾	h ³⁾	Vs	G	h	γ ⁴⁾
0-2	125.0	0.269	0.02	118.1 (-5.5) ⁵⁾	0.241 (-10.6)	0.022 (10.0)	1.45x10 ⁻³
2-5	220.0	0.953	0.02	209.2 (-4.9)	0.862 (-9.5)	0.022 (10.0)	1.33x10 ⁻³
5-12	330.0	2.69	0.057	317.7 (-3.7)	2.49 (-7.5)	0.061 (7.0)	1.11x10 ⁻³
12-14.5	450.0	5.00	0.057	437.4 (-2.0)	4.72 (-5.5)	0.059 (3.5)	9.60x10 ⁻⁴
14.5-27	450.0	5.00	0.026	425.9 (-5.4)	4.48 (-10.4)	0.029 (11.5)	1.42x10 ⁻³
27-29.5	450.0	5.00	0.026	411.1 (-8.6)	4.17 (-16.5)	0.031 (19.2)	2.15x10 ⁻³
29.5-∞	450.0	5.00	0.026	410.2 (-8.8)	4.16 (-16.9)	0.031 (19.2)	2.25x10 ⁻³

주 : 1) 전단파속도(m), 2) 전단계수(x10⁴tonf/m²), 3) 이력감쇠, 4) 유효전단변형도(%), 5) 특성변화[(b-a)*100/a] (%)

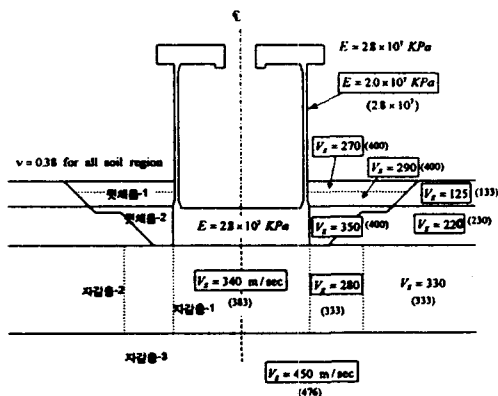


그림 1 해석에 사용한 지반특성(SASSI)

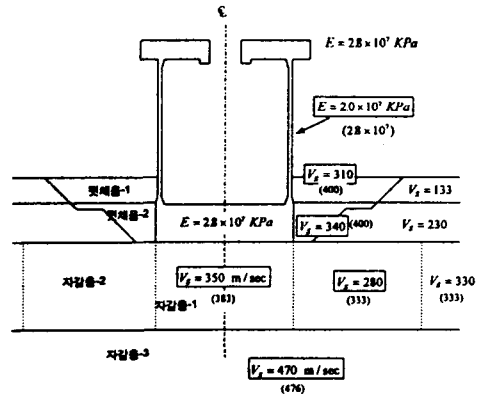


그림 2 해석에 사용한 지반특성(KIESSI)

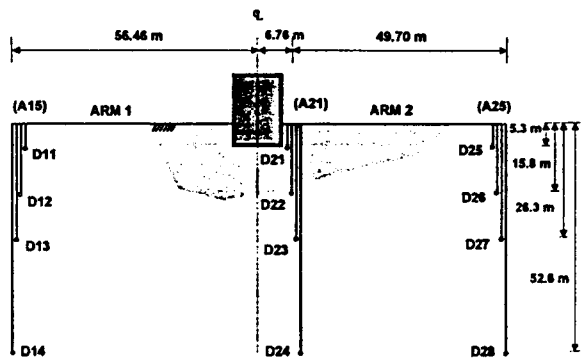


그림 3 지반운동 계측위치

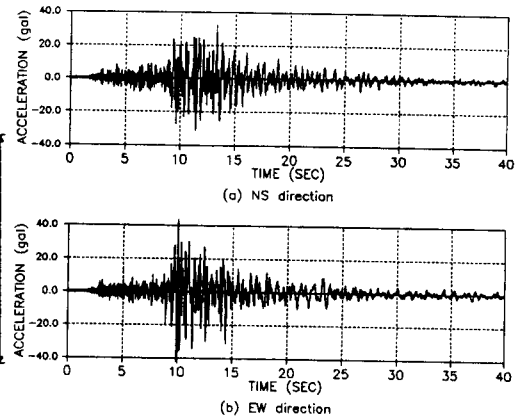
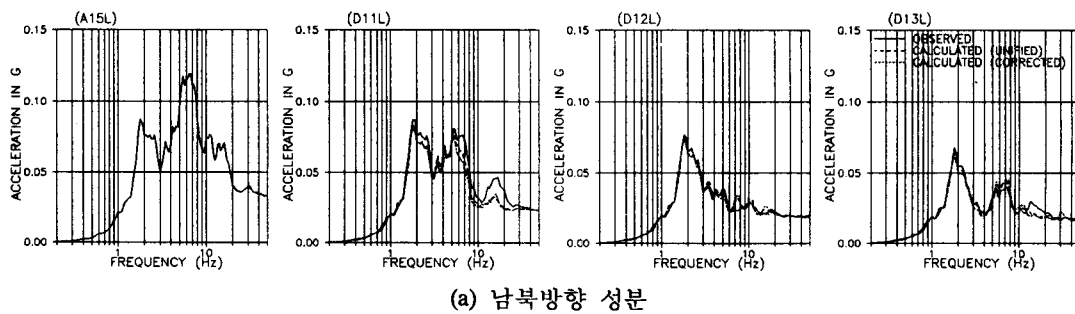
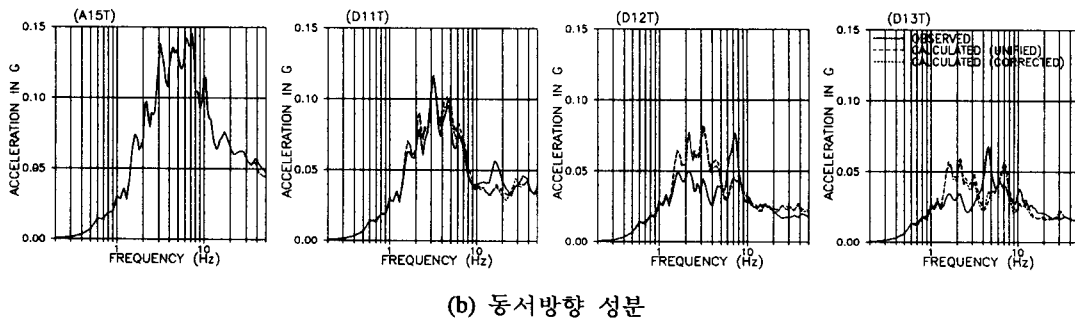


그림 4 통제운동의 가속도 시간이력



(a) 남북방향 성분



(b) 동서방향 성분

그림 5 자유장해석 결과 및 지반운동 계측결과의 응답스펙트럼(감쇠비 5%) (SHAKE)

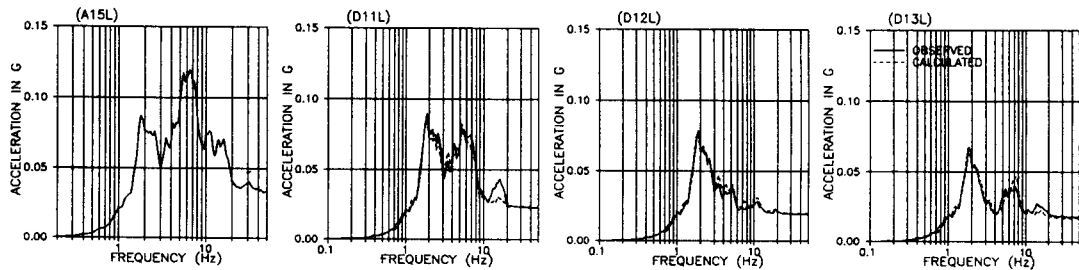


그림 6 자유장해석 결과 및 지반운동 계측결과의 응답스펙트럼(감쇠비 5%, 남북방향) (FREE)

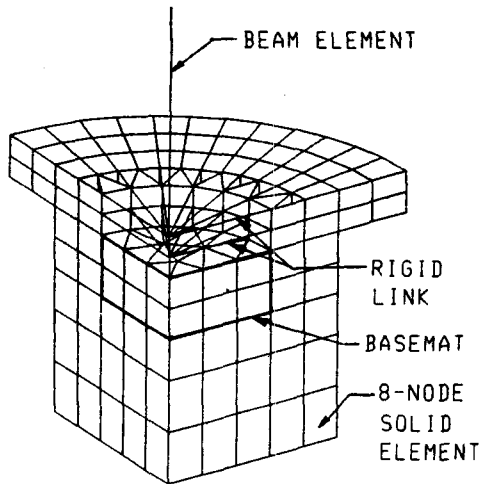


그림 7 SASSI 해석모델

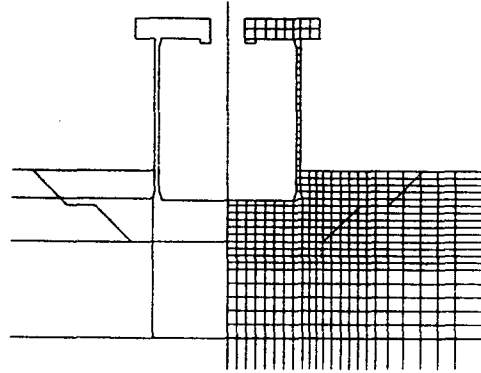


그림 8 KIESSI 해석모델

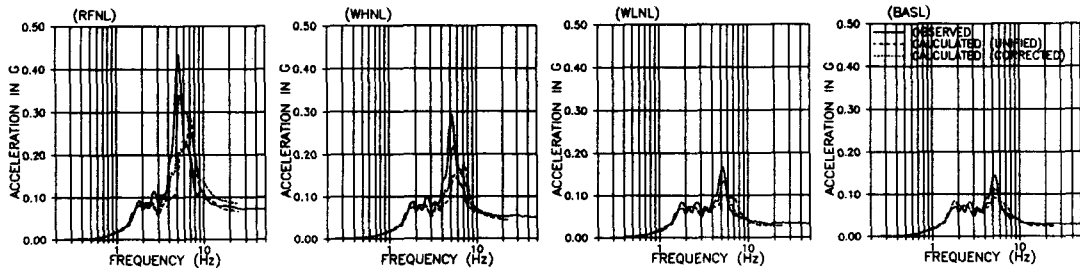


그림 9 지진응답해석 결과 및 응답계측 결과의 응답스펙트럼(감쇠비 5%) (SASSI)

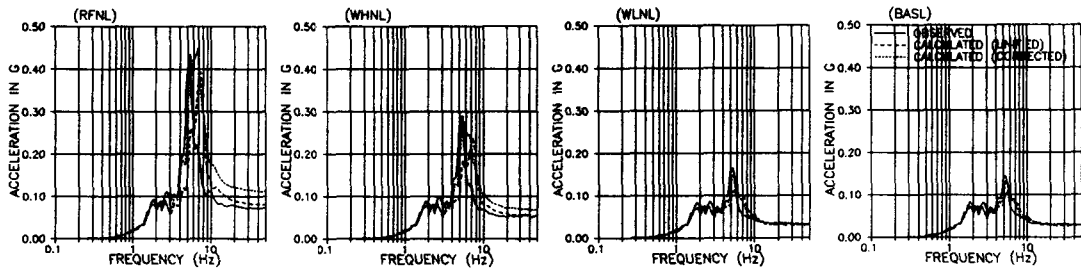


그림 10 지진응답해석 결과 및 응답계측 결과의 응답스펙트럼(감쇠비 5%, 남북방향) (KIESSI)

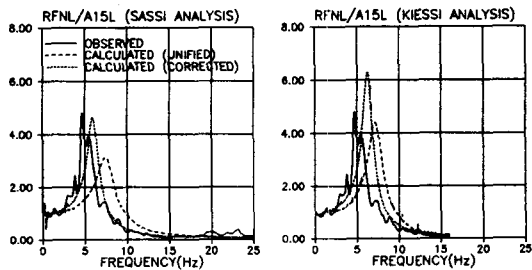


그림 11 자유장에 대한 모델구조물 지붕의 전달함수

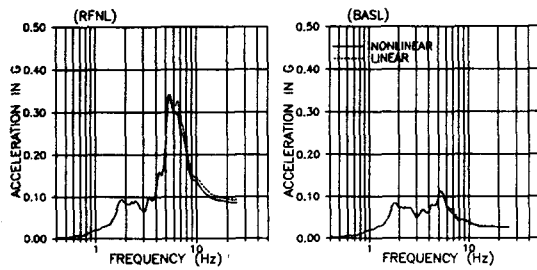


그림 12 선형 및 비선형해석 결과의 응답스펙트럼 (감쇠비 5%, 남북방향) (SASSI)