

지반-구조물 상호작용을 고려한 축대칭 원전 구조물의 비선형 지진해석

윤정방, 최준성, 김재민
한국과학기술원

요약

강진에 의한 원전구조물의 동적해석시 지반의 비선형특성은 반드시 고려해야 할 사항이다. 지반의 비선형특성은 지반-구조계의 동적응답을 구하는 과정에서 가장 중요한 요소중의 하나이며 이를 고려한 비선형 지진해석은 일반적으로 매우 복잡하고 정해를 구하기가 매우 어려운 문제다. 본 연구에서는 비선형 해법으로 널리 사용되고 있는 등가선형화방법을 사용하여 계측결과가 있는 TEPCO 비선형 지진문제를 해석하였으며 이 방법의 정확도와 적용성을 분석하였다. 아울러 축대칭기법을 사용하여 비선형지진해석을 수행할때의 문제점에 관해서도 검토하였다.

1. 서론

원전구조물의 동적지진해석을 수행하는 목적은 지진하중에 대해 구조물의 안전성을 확보하기 위한 것이다. 일반적으로 원전구조물에 크게 영향을 주지 못하는 미소한 지진에 관해서는 선형해석 만으로도 충분한 해석이 가능하지만 이와같은 해석은 강진에 의한 원자력발전소의 안전성을 확보하기 위한 본래의 취지를 벗어나는 문제가 될 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 강진시 지반의 비선형성을 고려한 비선형해석이 반드시 필요하다. 일반적으로 지반의 비선형특성은 지반-구조계의 동적응답을 구하는 과정에서 가장 중요한 요소들 중 하나로 인식되고 있다. 주파수영역해법이 선형해석에 국한된 방법이지만 Constantopoulos(1973)는 Seed와 Idriss(1969)가 제시한 반복적인 선형해석을 통하여 일차원 파동전파문제에서 시간영역의 정확한 비선형 해와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 위와 같은 등가선형화기법에서 지반물성은 이전의 반복과정에서 계산된 변형률에 적합하도록 각 반복주기의 초기에 선택된다. 이때 사용되는 변형률은 일반적으로 등가 전단변형률로서 최대 전단변형률을 사용하여 구할 수 있다. 여기서 반복적인 방법이 비선형성을 지닌 지반물성의 어려움을 극복할 수 있는 효과적인 접근방법이며 보편화된 방법일지라도 비선형문제에 관한 근사해이므로 해의 정확도는 한계가 있을 수 있다. 몇몇 연구자들이 이러한 방법들을 사용하여 합리적인 해를 얻었지만 비선형계의 실제적인 거동을 그대로 나타낼 수는 없었다[Constantopoulos 1973]. 본 연구에서는 이들 방법의 적용성과 정확성을 검토하기 위하여 TEPCO 시험구조물의 지진계측자료를 사용하여 비선형해석을 수행하였으며 축대칭기법을 사용할 때 고려되어야 할 사항에 관해서도 언급하였다.

2. KIESSI를 사용한 등가선형화기법 절차

지반-구조물 상호작용해석을 위한 프로그램 KIESSI를 이용한 주파수영역에서의 비선형해석은 등가선형화기법을 적용하여 수행될 수 있다. 주파수영역에서의 선형해를 구할 수 있는 KIESSI는 다음과 같은 선형방정식을 매 주파수마다 계산하여 해석을 수행한다[윤정방 1995].

$$u(\omega) = H(\omega)f(\omega) \quad (1)$$

여기서 $u(\omega)$ 는 시스템에서의 응답이고 $H(\omega)$ 는 시스템의 전달함수이며 $f(\omega)$ 는 시스템에 가해지는

는 하중이다. KIESSI는 유한요소에 근거한 해석프로그램이므로 각 요소에서의 응답을 가지고 전단변형률을 산정해 낼 수 있다. 각 요소에서의 전단변형률을 산정하는 방법은 각 요소의 자유도와 적분점에서의 응답을 평균하여 얻을 수 있다. 물론 여기서의 전단변형률은 주파수에 종속적인 값이다. 이 값을 역 푸리에변환을 하여 시간영역에서의 전단변형률을 얻는다. 이렇게 얻어진 전단변형률의 시간이력을 사용하여 각 요소에서 등가의 전단변형률을 산정해내어야 하는데 이 과정이 주파수영역해석에서 비선형해석의 가장 중요한 절차이다.

등가의 전단변형률을 산정하는 이유는 다음과 같다. 일반적으로 선형해석에서의 전단응력과 전단변형률과의 관계는 그림 1과 같이 전단변형률-전단응력곡선이 일정한 한 개의 루프를 지니고 있다. 그래서 시간에 따른 전단변형률도 일정하다. 하지만 실제의 비선형문제는 이 전단변형률-전단응력곡선이 그림 2와 같이 일정하지 않고 시간에 따라서 반복적으로 변형을 일으키고 있어 시간에 따른 전단변형률도 일정하지 않게 된다. 결국 이는 시간에 따라서 전단탄성계수와 이력감쇠비가 변하고 있음을 의미하고 실제적으로 선형해석을 수행할 수 없음을 암시한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 각 요소에서 산정된 전단변형률의 시간이력으로 부터 선형해석을 위해 필요한 일정한 등가의 전단변형률을 산정해내는 작업이 필요하다. 등가의 전단변형률을 산정하는 방법에 관해서는 다음절에서 자세히 설명하였다. 이렇게 산정된 등가의 전단변형률로부터 그림 3의 관계도를 참조하여 전단탄성계수와 이력감쇠비를 구한 다음 다시한번 선형해석을 수행한다. 이와 같은 과정을 전단 탄성계수와 이력감쇠비가 일정해질때까지 계속 수행한다. KIESSI를 이용한 경우 보통 3회에서 5회의 반복계산을 하면 사용자가 원하는 비선형물성을 구할 수 있으며 이로부터 비선형 응답을 산정해 낼 수 있다.

3. 등가의 전단변형률을 산정하는 방법

지반의 비선형거동특성들은 전단변형률의 진폭에 따른 전단탄성계수와 이력감쇠비의 변화관계를 나타낸 그림 3과 같은 자료를 사용하여 주파수영역에서 반복적인 선형해석을 통해 구현할 수 있다. 이들 자료들은 일정한 진폭을 가진 조화진동에 의한 실험적 결과에 근거하고 있다. 그리고 진폭이 변화하는 일반적인 동적응답인 경우에는 물성치가 시간에따라 변화한다. 한편, 주파수영역에서 선형해석을 수행하기 위해서는 시간에 따른 일정한 물성치가 필요하므로 평균적인 변형수준을 나타내는 적절한 변형도 계수가 필요하다. 통상적으로 등가비선형해석시 다음단계에서 사용될 전단탄성계수와 이력감쇠비는 전단계에서 얻어진 다음과 같은 등가전단변형률(γ_{eq})을 이용하여 정한다.

$$\gamma_{eq} = RF \times \gamma_{max} \quad (2)$$

여기서 감소계수 RF는 경험적으로 2/3나 $1/\sqrt{2}$ 을 사용하고 있다. 위 방법은 각 유한요소의 전단변형률에 관한 최대전단변형률을 계산하여야 하므로 비경제적이다. 이보다 좀 더 경제적인 방법으로서 Kausel(1976)은 {RMS[전단변형률]/최대전단변형률}과 {RMS[입력가속도]/최대입력가속도}의 비가 대략 1이라는 점에 착안하여 다음과 같이 최대전단변형률을 구하는 방법을 제안하였다.

$$\gamma_{max} \approx \frac{\text{최대입력가속도}}{\text{RMS[입력가속도]}} \times \text{RMS}[\gamma(t)] \quad (3)$$

이와같은 기법은 최대전단변형률을 역푸리에 변환에 의한 시간이력으로부터 구하지 않고 주파수영역에서 직접 구할 수 있는 장점이 있다. $\text{RMS}[\gamma(t)]$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{RMS}[\gamma(t)] = \sqrt{\frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} |\gamma(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

여기서 $\gamma(\omega)$ 는 주파수 종속적인 전단변형률이다. 위의 관계식은 다음과 같은 Parseval의 등식을 사용하여 쉽게 유도할 수 있다.

$$\int_0^T \gamma^2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\gamma(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

4. 축대칭 모형화시 사용된 기법

축대칭구조물에 비대칭하중이 작용될 경우 축대칭요소에서 변형률이 원주방향을 따라 변화하기 때문에 변형률에 의존적인 강성도와 이력감쇠비는 요소내에서 일정한 값이 아니다. 따라서, 축대칭 구조물을 등가선형화기법을 사용하여 비선형해석을 수행할 때에는 원주방향(θ)으로의 변형률 분포에 관한 대표치의 산정이 필수적이다. 축대칭 유한요소에서 변위벡터, 변형률벡터 및 응력벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{u(r, \theta, z)\} = \sum_{n=0}^{N_f} [\Theta_n(\theta)] \{u_n(r, z)\} + \sum_{n=0}^{N_f} [\overline{\Theta}_n(\theta)] \{\overline{u}_n(r, z)\} \quad (6)$$

$$\{\epsilon(r, \theta, z)\} = \sum_{n=0}^{N_f} [T_n(\theta)] \{\epsilon_n(r, z)\} + \sum_{n=0}^{N_f} [\overline{T}_n(\theta)] \{\overline{\epsilon}_n(r, z)\} \quad (7)$$

$$\{\sigma(r, \theta, z)\} = \sum_{n=0}^{N_f} [T_n(\theta)] \{\sigma_n(r, z)\} + \sum_{n=0}^{N_f} [\overline{T}_n(\theta)] \{\overline{\sigma}_n(r, z)\} \quad (8)$$

여기서

$$[\Theta_n(\theta)] = \text{diag}(\cos n\theta, \sin n\theta, \cos n\theta) \quad (9)$$

$$[\overline{\Theta}_n(\theta)] = \text{diag}(\sin n\theta, -\cos n\theta, \sin n\theta) \quad (10)$$

$$[T_n(\theta)] = \text{diag}(\cos n\theta, \cos n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta) \quad (11)$$

$$[\overline{T}_n(\theta)] = \text{diag}(\sin n\theta, \sin n\theta, \sin n\theta, -\cos n\theta, \sin n\theta, -\cos n\theta) \quad (12)$$

로서 $[\Theta]$ 와 $[T]$ 는 $\theta=0^\circ$ 평면에 대칭인 성분을 나타내고 $[\overline{\Theta}]$ 와 $[\overline{T}]$ 는 평면에 역대칭인 성분을 표시하며 수직지진인 경우 푸리에 차수(n)는 영(0)이고 수평지진일 때에는 1의 값을 갖는다. 본 논문에서는 $n=1$ 인 수평지진의 경우만 다루었다. 또한, 변위벡터와 변형률벡터 및 응력벡터는 다음과 같은 성분으로 구분되어 나타내어진다.

$$\{u(r, \theta, z)\} = \langle u_r, u_\theta, u_z \rangle^T \quad (13)$$

$$\{\epsilon(r, \theta, z)\} = \langle \epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z, \gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}, \gamma_{r\theta} \rangle^T \quad (14)$$

$$\{\sigma(r, \theta, z)\} = \langle \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{\theta z}, \tau_{rz}, \tau_{r\theta} \rangle^T \quad (15)$$

본 논문에서는 위에서 보여진 식들과 다음과같은 옥타헤드럴(otahedral) 전단변형률(γ_{oct})을 사용하여 원주방향에서 변형률의 분포를 산정하였으며 이를 요소에서의 대표전단변형률로 사용하였다. 여기서 γ_{oct} 는 아래와같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{oct} = \frac{2}{3} \{ (\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + 6(\gamma_{r\theta} + \gamma_{\theta z} + \gamma_{rz}) \}^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

윗식은 식 (13)의 정의로볼 때 원주방향(θ)에 대해 의존적이므로 대표값을 나타내기엔 적절치 못함을 알 수 있다. 이를 위해서 본 논문에서는 다음과같이 원주방향(θ)에 대해 평균제곱근을 취하였다.

$$\{\gamma_{max}\}_{RMS} = \sqrt{\int_0^{2\pi} |\gamma_{oct}|^2 d\theta / 2\pi} \quad (15)$$

위의 식은 원주방향(θ)에 대해 독립적이고 평균적인 의미를 나타내므로 대표전단변형률로 사용하기에 적절하다.

5. 예제해석 및 결과

TEPSCO 시험모형의 지진거동계측위치 및 치수는 그림 4와 같으며 구조물의 유한요소모형과 재료상수는 그림 5에 나타나 있다. 자유장의 비선형물성은 TEPSCO 보고서(Katayama 1990)를 참조하였고 지반물성에 사용한 초기값은 $C_s=250m/sec$, $\nu=0.211$, $\rho=1.8t/m^3$, $h=0.02$ 를 사용하였다. 그림 3을 사용하여 반복적인 해를 통해 구해진 최종적인 비선형 지반물성은 TEPSCO 보고서와 매우 유사한 결과를 보였다. 해석에 사용한 통제운동은 그림 6과 그림 7에 나타나 있으며 지점 A1과 지점 S1에서 계측된 지진을 사용하였다. 본 논문에서는 비선형지진해석을 위해 남북방향성분과 동서방향성분의 통제운동을 사용하여 구조물의 상단에서 가속도에 관한 시간이력을 산정하였으며 그 결과를 그림 8과 그림 9에서 계측기록과 비교하였다. 계측기록과 비교해볼때 남북방향성분의 비선형해석결과가 동서방향성분의 비선형해석결과보다 더 좋은결과를 나타내고 있다. 또한, 해석에 사용한 통제운동의 종류에 따라 해석결과도 약간씩 차이를 보이고 있다. 이는 그림 10과 그림 11에서 보인 구조물의 상단과 지표면 지점 S1에서 각 통제운동에 따른 해석결과와 계측결과의 응답스펙트럼 비교로부터 잘 알 수 있다. 대체적으로 S1지점에서 계측된 통제운동을 사용한 결과가 계측결과에 더 근사하고 있다.

6. 결론

본 논문에서는 비선형해법으로 널리 사용되고 있는 등가선형화기법의 절차와 축대칭 구조물을 모형화할 때 대표전단변형률을 산정하는 방법에 관해 검토하였다. 그리고 계측결과가 있는 TEPSCO 비선형지진문제를 등가선형화기법을 사용하여 해석하였다. 실제 수렴된 비선형 지반물성의 크기는 TEPSCO 보고서에 수록된 결과와 매우 유사하지만 지진응답은 약간의 차이를 보였다. 남북방향에서는 KIESSI를 사용한 본 연구결과가 HASSI(Katayama 1990)를 사용한 TEPSCO 보고서의 결과보다 더 좋은 결과를 나타내었고 동서방향에서는 TEPSCO 보고서의 결과가 계측치에 더 근사된 결과를 나타냈다. 그러나 전반적인 감쇠응답스펙트럼의 경향을 비교해볼 때 비선형 해석결과가 계측결과와 대동소이하므로 KIESSI를 사용한 등가선형화방법의 타당성과 적용성이 검증되었다.

참고문헌

- [1]. 윤정방 (1995). "직접법에 의한 지반-구조물 시스템 내진해석 모델링방법 연구 (III)." 한국과학기술원.
- [2]. Constantopoulos, I. V., Roesset, J. M., Christian, J. T.(1973), "A Comparison of Linear and Exact Nonlinear Analyses of Soil Amplification." *5th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 225*, Session 5B, Rome, Italy
- [3] Katayama, Ikuo(1990). "Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities", pp. 55-95.
- [4]. Kausel, Eduardo, Roesset, Jose M., Christian, John T.(1976). "Nonlinear Behavior in Soil-Structure Interaction." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, No. GT11, pp.1159-1170.
- [5]. Seed, H. B., and Idriss, I. M.(1969). "Influence of Soil Conditions and Ground Motions during Earthquakes." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM1, Proc. Paper 6347, pp. 99-137.

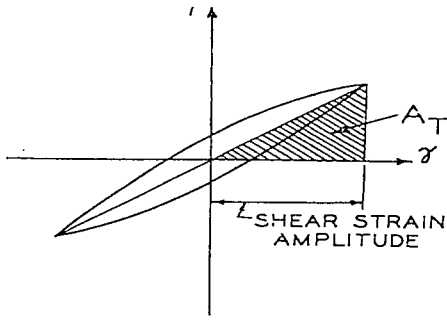


그림 1 선형인 경우의 응력-변형을 곡선에

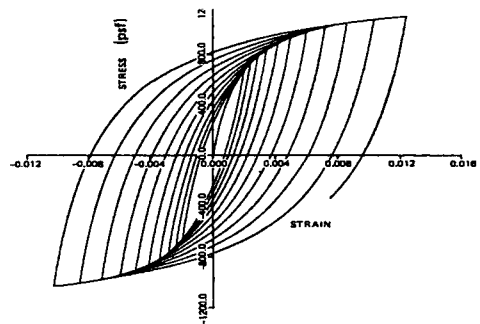


그림 2 비선형인 경우의 응력-변형을 곡선에

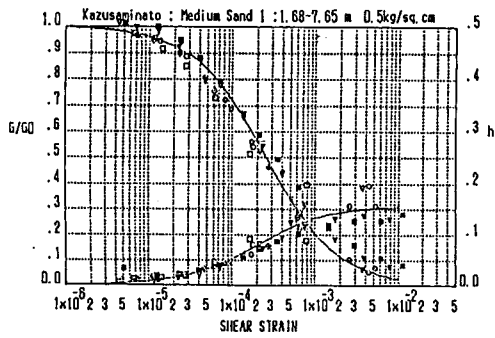


그림 3 변형률과 전단탄성계수 및 이력감쇠비의 관계

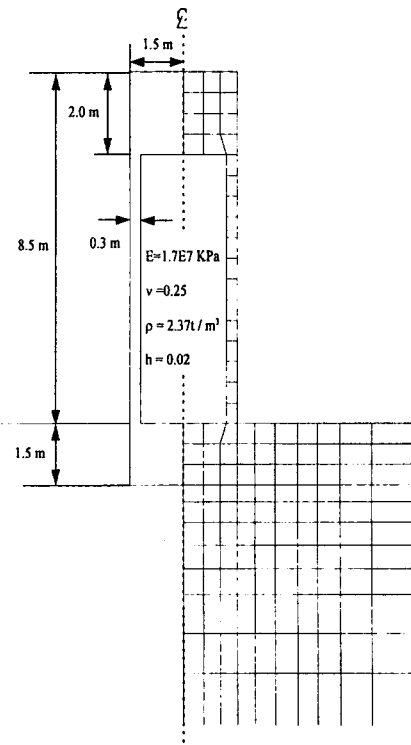


그림 5 TEPSCO 구조물의 유한요소모형과 재료상수

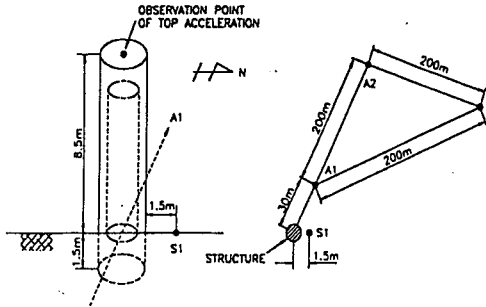


그림 4 TEPSCO 시험모형의 지진거동계측위치 및 치수

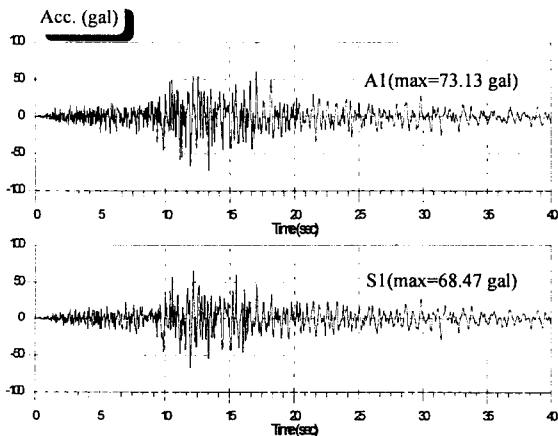


그림 6 예제해석에 사용된 통제운동(남북방향)

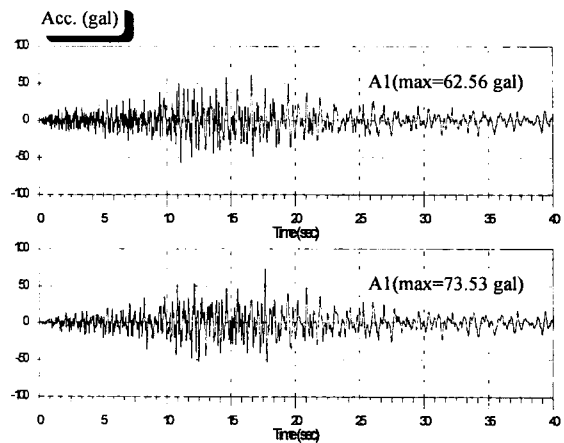


그림 7 예제해석에 사용된 통제운동(동서방향)

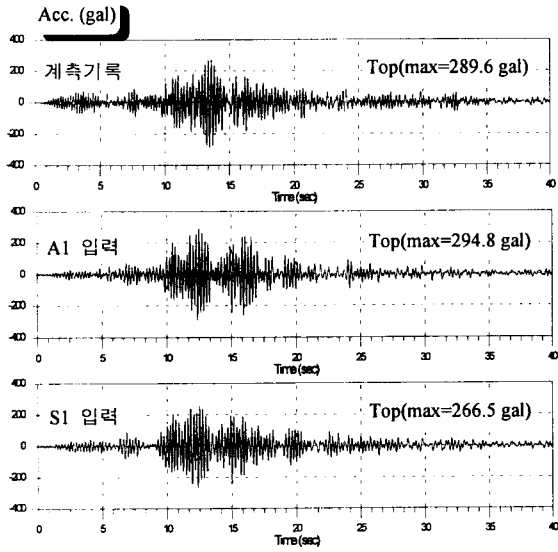


그림 8 구조물 상단의 계측결과와 비교 (남북방향)

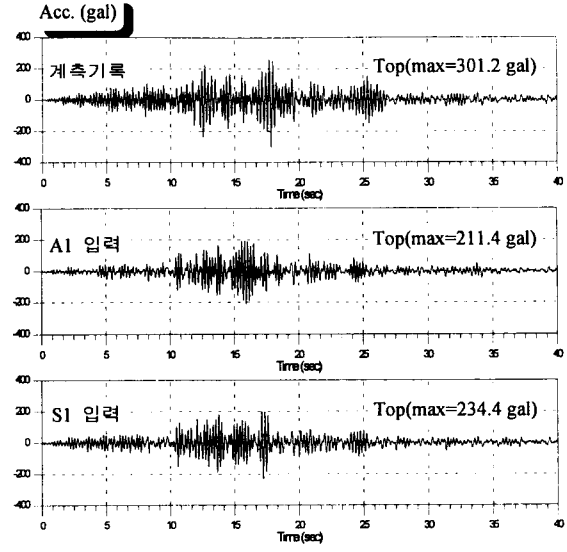


그림 9 구조물 상단의 계측결과와 비교 (동서방향)

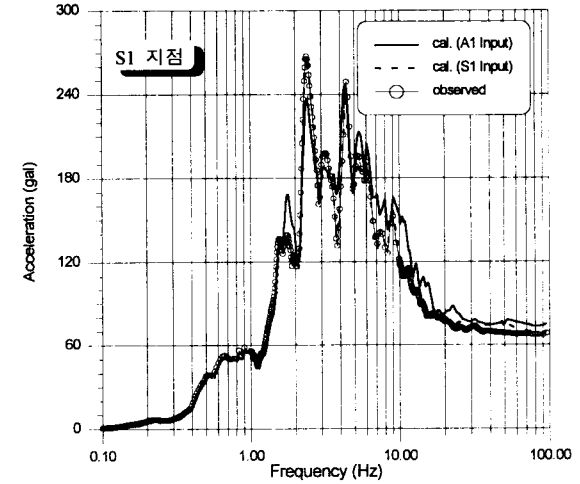
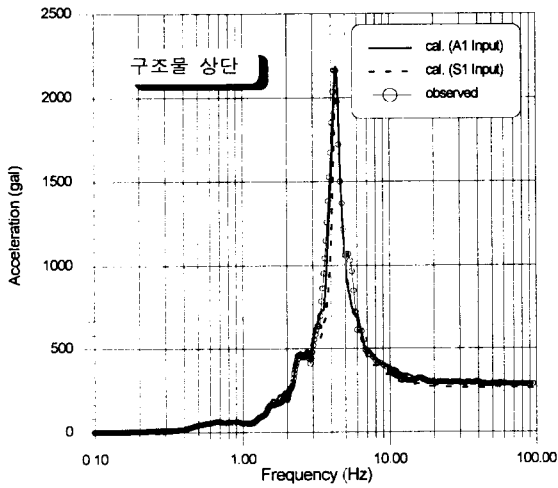


그림 10 구조물의 상단과 지표면 지점 S1의 수평가속도의 5% 감쇠응답스펙트럼(남북방향)

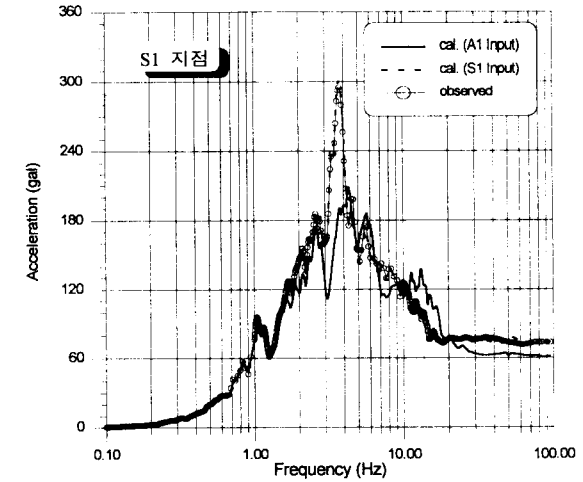
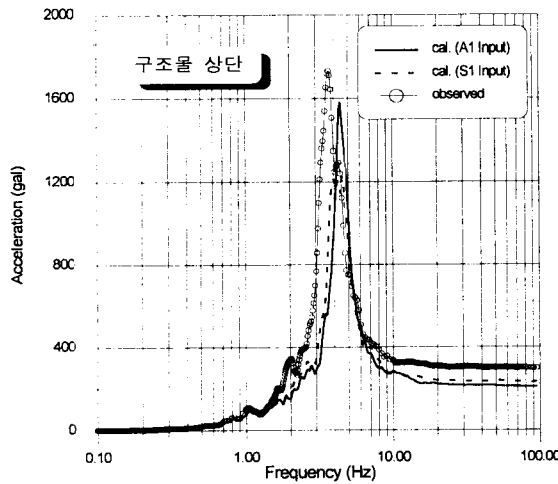


그림 11 구조물의 상단과 지표면 지점 S1의 수평가속도의 5% 감쇠응답스펙트럼(동서방향)