

면진된 모형디젤발전기의 지진응답실험 The Shaking Table Test of Isolated Model EDG System

김민규* 전영선**
Kim, Min Kyu Choun, Young Sun

ABSTRACT

This paper presents the results of experimental studies of the isolated Model EDG Systems. For the experimental work, the scaled model of EDG system and the isolation systems were developed. The target EDG model is 16PC2-5V400 which was manufactured by the SEMT Pielstick corporation. The Coil Spring and Viscous Damper Systems were selected for the isolation system. The Coil Spring and Viscous Damper systems can reduce not only seismic forces but also the operating vibration. For the input seismic motions, the scenario earthquake and the artificial earthquakes which were developed as NRC design spectrum and Uniform hazard Spectrum(UHS) were selected. As a result, at least 20% of seismic forces were decreased as the isolation system.

Key word : EDG System, Coil Spring and Viscous Damper System, Scenario Earthquake, NRC Spectrum, Uniform hazard Spectrum(UHS)

1. 서론

모든 원전에는 원전이 정지하는 비상시 내부전원으로 사용하기 위한 비상디젤발전기가 각 호기당 두개씩 설치되어 운영되고 있다. 비상디젤발전기는 대표적인 회전기기로서 가동중에 큰 소음과 진동이 발생하여 주변 건물과 기기들에 영향을 미치게 된다. 또한 원전의 안전에 크게 영향을 미치는 기기로서 지진시 안전하게 보호되어야 하는 기기이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 비상디젤발전기에 대하여 면진장치를 설치하여 지진력 저감을 도모하고 또한 비상디젤발전기에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 노력으로 Coil Spring과 Viscous Damper를 결합한 형태의 면진장치를 적용하여 면진효과를 평가하기 위한 진동대 실험을 수행하였다.

실험대상의 비상디젤발전기는 SEMT Pielstick사의 16PC2-5V 400모델로서 국내 원전에 가장 많이 설치되어 운영하고 있는 모델이다. 국내에 본 비상디젤발전기를 설치하고 있는 원전은 영광 5&6호기, 울진 3&4호기, 5&6호기 그리고 월성 3&4호기로서 전체 8기의 원전에 각 호기별로 2대의 비상디젤발전기가 설치되어 있다. 본 모델은 정격출력이 7000kW, 정격속도는 514RPM으로서 각 호기별로 약간씩 차이가 나지만 1개월 주기로 시험가동을 1시간씩 수행하여 비상시에 대비하

* 한국원자력연구소 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사, 정회원

** 한국원자력연구소 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사, 정회원

고 있다. 실험을 위하여 엔진부, 발전기부 그리고 기초부로 크게 구분하여 실험체를 제작하였으며, 그에 적합한 면진장치를 설계 제작하여 실험체에 적용하여 실험을 수행하였다. 모델 제작과 면진장치 제작은 김민규와 전영선(2006)의 'Coil Spring & Viscose Damper System의 동적거동특성분석' 연구에 상세히 기술하였다.

2. 실험 방법

2.1 입력지진과 결정

진동대 실험을 위한 입력지진으로는 세가지 지진파를 선정하였다. 국내 원전부지의 Scenario 지진(최인길 등, 2004a)과 울진원전 비상디젤발전기 건물의 FRS 그리고 등신뢰도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum, UHS)을 바탕으로 개발된 지진가속도 시간이력(최인길 등, 2004b)을 선정하여 실험에 사용하였다. 각 입력지진의 가속도 시간이력과 응답스펙트럼 형상을 그림 1에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진은 국내 지반특성을 반영하여 고주파수 성분이 탁월한 특성을 보이고 있으며, 울진원전의 FRS는 NRC Reg. Guide 1.60 (US NRC, 1973)의 설계지진과 거의 유사한 형상을 보이고 있다. UHS를 바탕으로 작성된 지진가속도 시간이력은 국내의 지진해도를 근거로 작성하였으므로 Scenario 지진과 유사하게 고주파수 성분이 탁월한 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 편의상 울진원전의 FRS는 'NRC'로 표기하며, UHS를 근거로 작성한 인공지진파는 'UHS'로 표기하였다.

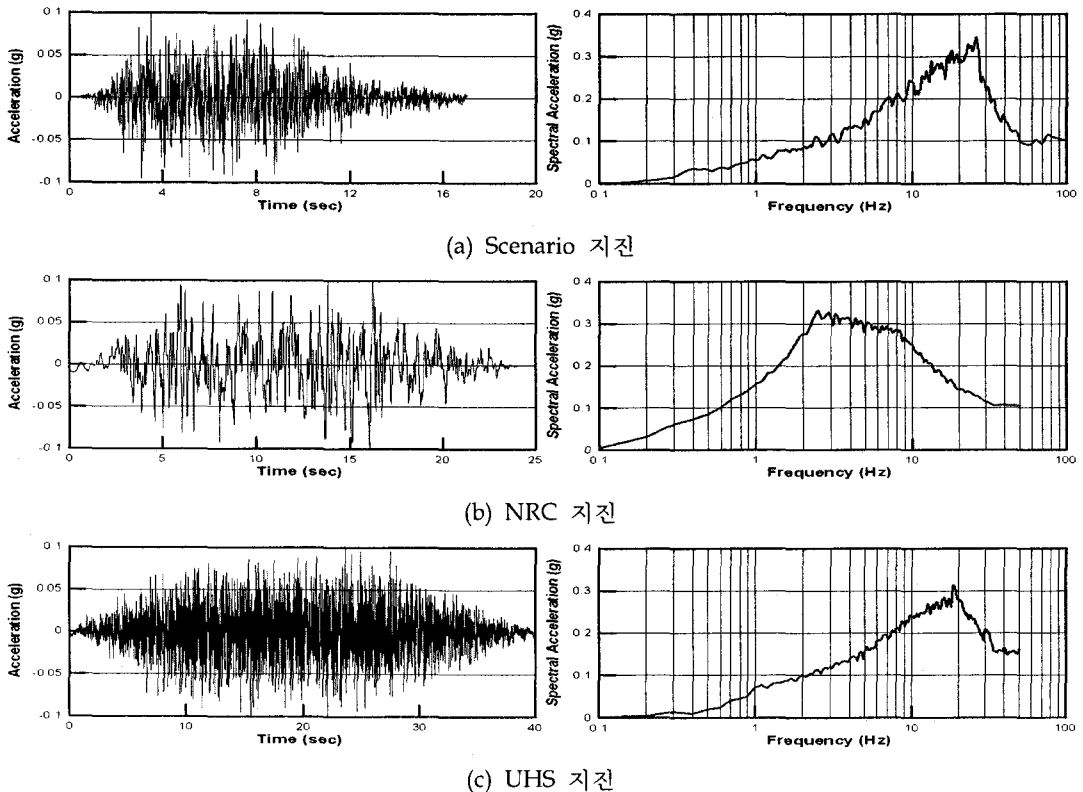


그림 1. 진동대 실험을 위한 입력지진 가속도 시간이력 및 가속도 응답스펙트럼

2.2 측정계획

본 진동대 실험에서는 적용된 면진장치의 연직강성이 일반적으로 사용하는 면진장치의 경우와 비교하여 작기 때문에 수평방향 가진시에서 Rocking 현상이 지배적으로 발생할 수 있으므로 4개의 변위계를 사용하여 연직변위를 계측하였고 2개씩의 변위계를 각각 수평 종방향과 수평 횡방향 변위 계측을 위해서 사용하였다. 따라서 총 8개의 변위계를 이용하여 Rocking 거동과 Rotation 거동을 분석할 수 있도록 하였다. 또한 지진력 저감효과의 판단을 위하여 실험체의 두지점에서 3방향의 가속도를 계측하였다. 실험체에서의 가속도계와 변위계의 위치는 다음의 그림 2에 도시하였다.

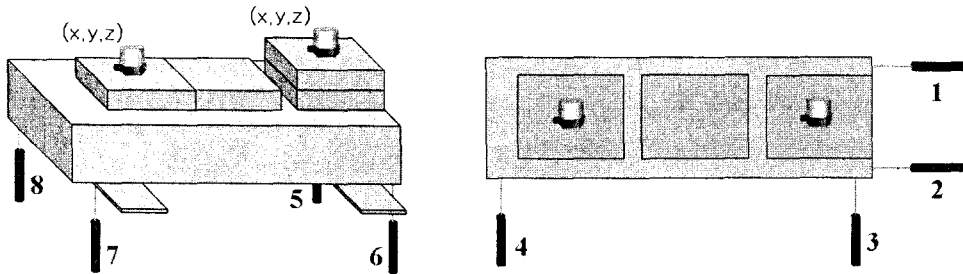


그림 2. 진동대 실험시의 가속도계와 변위계의 위치

2.3 실험순서

전술한 바와 같은 세가지 지진파를 이용하여 최대가속도를 0.1g, 0.2g, 그리고 0.3g로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 진동대 실험은 1방향으로 수평종방향만 가진한 경우와 3방향의 지진력을 모두 고려한 경우의 두가지로 수행하였다. 실험의 순서는 다음의 표 1에 정리하였다. NRC의 경우는 울진원전 EDG위치에서의 FRS의 최대가속도를 고려해서 0.23g 로 실험을 수행하였다.

표 1. 지진파를 이용한 모형 면진EDG의 진동대 실험 순서

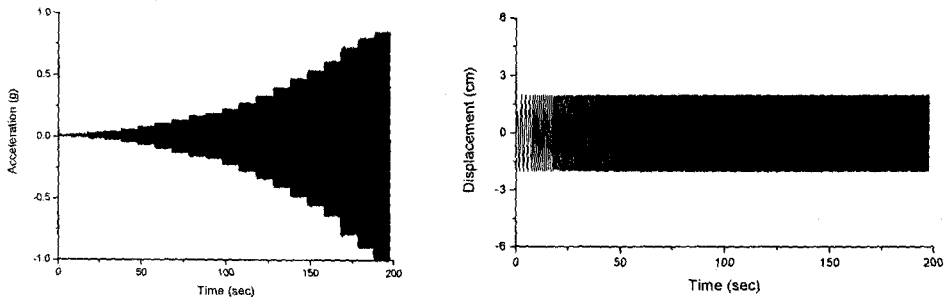
	Earthquake Motion	PGA(g)	Remarks
1	Modal Test		Frequency Check
2	Scenario Eq.	0.1	1-D input, 3-D input (2H &V)
3	NRC	0.1	1-D input, 3-D input (2H &V)
4	UHS	0.1	1-D input, 3-D input (2H &V)
5	Modal Test		Frequency Check
6	Scenario Eq.	0.2	1-D input, 3-D input (2H &V)
7	NRC	0.2	1-D input, 3-D input (2H &V)
8	UHS	0.2	1-D input, 3-D input (2H &V)
9	Modal Test		Frequency Check
10	Scenario Eq.	0.2	1-D input, 3-D input (2H &V)
11	NRC	0.23,0.23,0.21	1-D input, 3-D input (2H &V)
12	UHS	0.2	1-D input, 3-D input (2H &V)
13	Modal Test		Frequency Check

3. 정현파 가진에 의한 구조물의 응답특성 분석

지진파를 이용한 진동대 실험에 우선하여 실험체에 횡방향과 종방향으로 정현파 가진을 통한 실험체의 거동을 분석하였다. 가진주파수는 0.5Hz로부터 시작하였으며 0.5Hz 간격으로 주파수를 증가시키면서 실험을 수행하였다. 진동대의 최대변위는 2cm로 고정하였다.

3.1 수평방향 실험결과

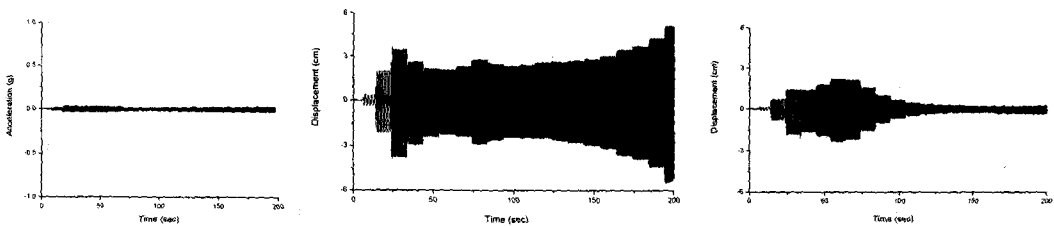
실험체의 수평방향으로 0.5Hz-10Hz까지 0.5Hz 간격으로 가진시험을 수행하였다. 실험결과 진동대의 입력가속도와 입력변위의 시간이력은 그림 3에 도시하였으며, 수평방향 응답의 절대가속도 응답 시간이력과 상대변위 시간이력 및 연직방향 상대변위 시간이력은 그림 4에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수평변위는 가속도 증가에 따라서 미소하나마 계속 증가하는 경향을 보였으며 시험체에서의 응답가속도는 저주파수 대에서 다소 증가하는 듯한 경향을 보이다가 고주파수로 가면서 일정값에 수렴하여 가속도응답만을 비교할 경우 탁월한 지진력 저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 수평가진에 의한 시험체의 Rocking 현상은 고주파수로 갈수록 감소되어 6Hz 이상에서는 연직변위값이 일정값으로 수렴하는 것을 알 수 있었다.



(a) 입력가속도 시간이력

(b) 입력변위 시간이력

그림 3 수평방향 정현파 가진시의 입력운동



(a) 절대응답가속도

(b) 응답의 상대변위

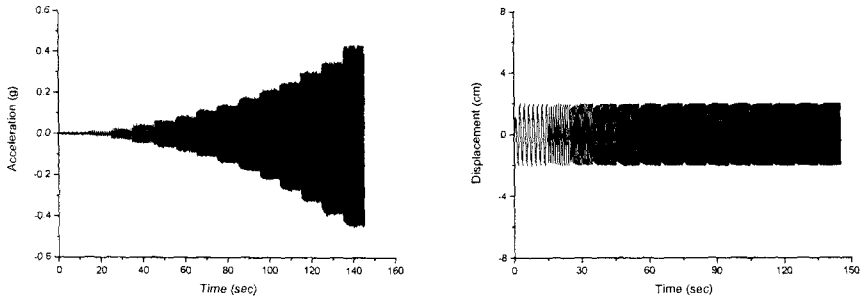
(c) 연직변위

그림 4 수평방향 정현파 가진시의 응답

3.2 연직방향 실험결과

연직방향의 경우는 동일하게 0.5Hz-7Hz까지 0.5Hz 간격으로 가진시험을 수행하였다. 진동대의 최대변위는 2cm로 고정하였다. 진동대의 입력가속도 시간이력과 변위시간이력은 그림 5에 도시하

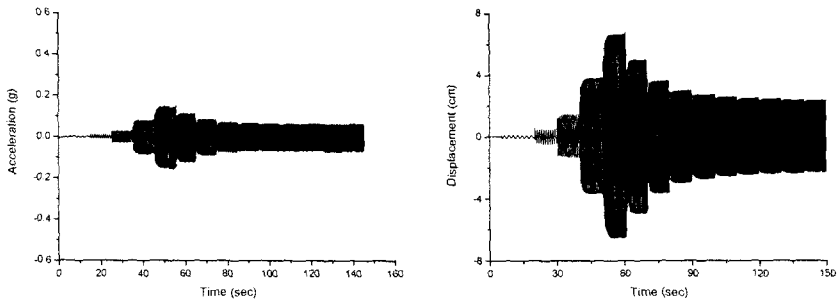
였고, 응답의 가속도 시간이력과 변위시간이력은 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 연직방향인 경우는 수평방향과는 달리 연직가속도가 증가함에 따라 저주파수에서는 오히려 지진력이 증폭되는 현상을 보이다가 주파수가 높아지면서 면진효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 변위는 4Hz 이상의 경우 수렴하여 진동저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) 입력 가속도

(b) 입력 변위

그림 5. 연직방향 정현파 가진시의 입력운동



(a) 응답가속도

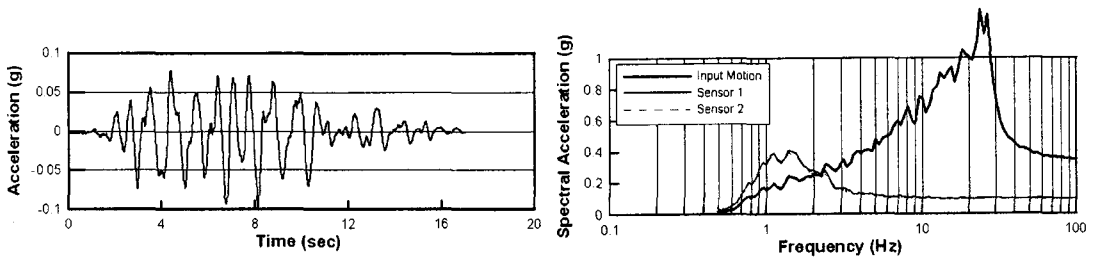
(b) 연직변위 시간이력

그림 6. 연직방향 정현파 가진시의 응답

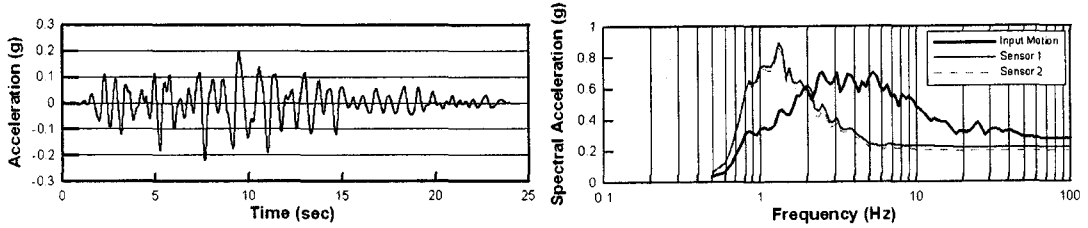
4. 지진파 가진에 의한 응답분석

4.1 가속도 응답 분석

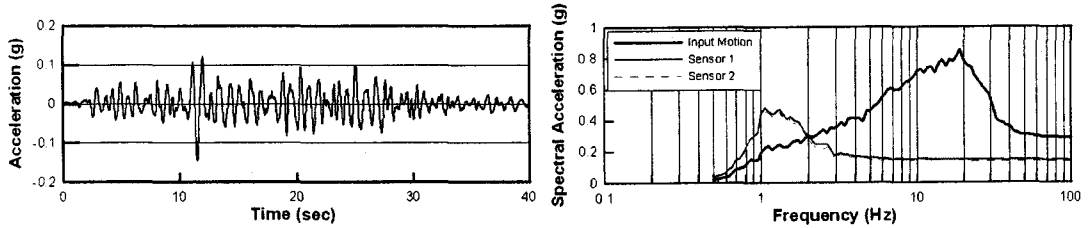
전술한 바와 같은 방법으로 진동대 실험을 수행하였다. 1방향 가진시 각 지진파에 따른 구조물에서의 응답가속도와 가속도 응답스펙트럼을 그림 7에 도시하였다. 세가지 지진파 모두 1-1.5Hz 범위에서 고유진동수가 나타나는 것을 알 수 있으며 면진효과를 발휘하는 것을 알 수 있다. 고유진동수 범위에 탁월주파수 대역이 위치하는 NRC 지진의 경우 면진효과가 다소 감소하지만 고진동수 성분이 탁월한 Scenario 지진파 UHS 지진의 경우는 면진효과가 탁월하게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) Scenario 지진 1-D (0.3g)



(b) NRC 지진 1-D (0.23g)



(c) UHS 지진 1-D (0.3g)

그림 7. 지진파에 따른 면진 EDG의 가속도 응답 및 응답스펙트럼

입력 지진파의 PGA와 면진 EDG실험체에서 관측된 가속도 응답과의 비를 구하여 그림 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Scenario 지진의 경우는 70% 이상의 지진력 저감효과가 있는 반면 NRC 지진의 경우는 20%정도의 지진력 저감효과가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 사용한 면진장치를 실제 EDG에 사용할 경우 최소한 20%정도의 지진력 저감효과는 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

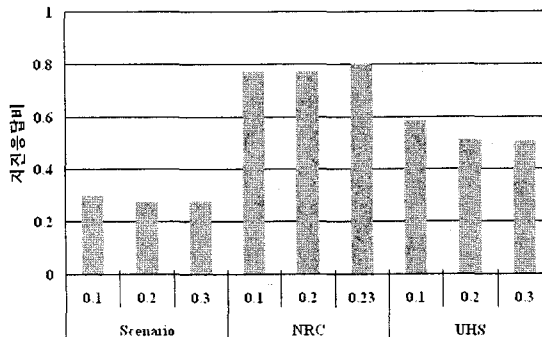
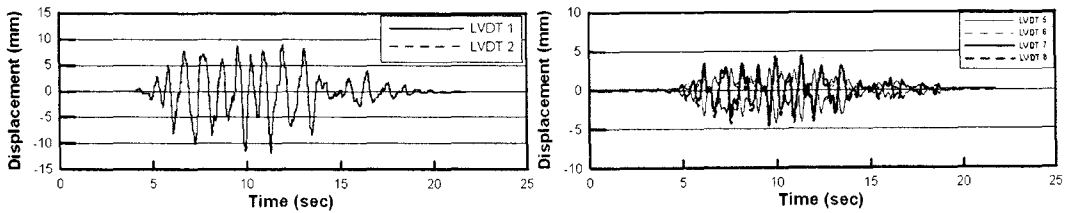


그림 8. 지진파에 따른 지진응답비

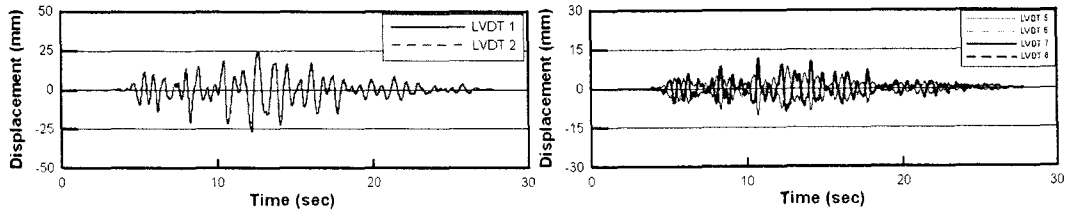
4.2 변위 응답 분석

전술한 바와 같이 8개의 변위계를 이용하여 각 지점에서의 변위 시간이력을 측정하였다. 1방향 가진시의 측정결과는 지진파에 따라 그림 9~그림 11에 도시하였다. 그리고 모든 경우에서의 최대 응답변위를 그림 12, 13에 정리하였다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 40mm 이상의 수평변위가 발생하는 것을 알 수 있으며 Scenario 지진과 UHS 지진과 같은 고주파 성분의 지진파인 경우 1-D 및 3-D 가진에 따른 응답변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 반면 NRC 지진파의 경우 3방향 가진시 변위응답이 큰폭으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 연직변위에 따른 Rocking 거동을 비교해 보면 고주파 성분의 지진파인 경우 수평방향 가진시 비교적 작은 Rocking 현상 발생하는 반면 NRC 지진의 경우 3방향 가진시 최대 30mm 이상의 연직변위 발생하여 Rocking 현상이 비교적 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.



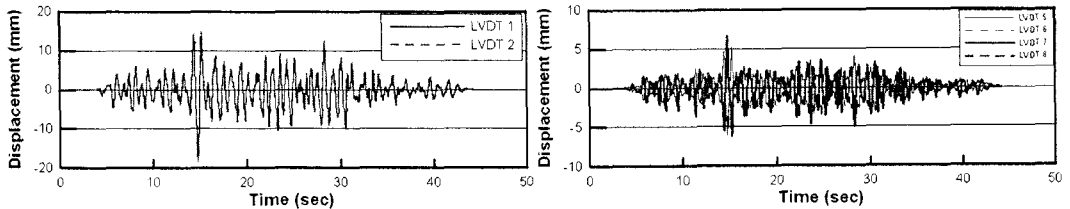
(a) 수평종방향 변위 시간이력 (b) 연직방향 변위 시간이력

그림 9. Scenario 지진 1-D 가진시의 지진응답 (0.3g)



(a) 수평종방향 변위 시간이력 (b) 연직방향 변위 시간이력

그림 10. NRC 지진 1-D 가진시의 지진응답 (0.23g)



(a) 수평종방향 변위 시간이력 (b) 연직방향 변위 시간이력

그림 11. NRC 지진 1-D 가진시의 지진응답 (0.23g)

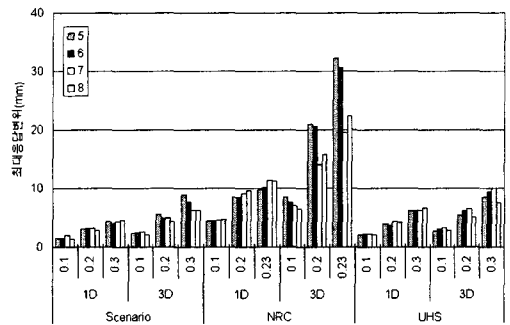
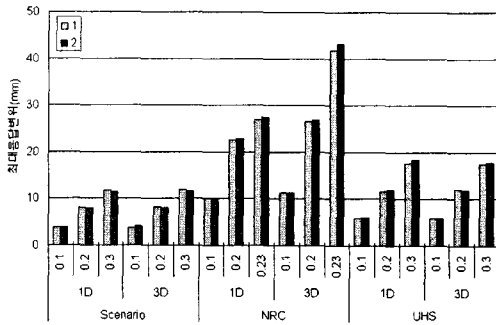


그림 12. 지진파에 따른 수평방향 최대응답변위

그림 13. 지진파와 입력가속도에 따른 연직변위

5. 결론

본 연구에서는 원전의 안전관련 기기중 전체 원전의 안전도에 큰 영향을 미치는 비상디젤발전기를 선택하여 축소모형을 제작하고 그에 적합한 면진장치를 선정하여 진동대 실험을 수행하였다. 면진장치로는 비상디젤발전기의 가동시 진동저감효과도 동시에 고려할 수 있도록 하기 위하여 Coil Spring & Viscous Damper 시스템을 선택하였다. 수평방향과 연직방향에 대한 정현파 가진 시험 결과 저주파수에서는 수평가진의 경우 Rocking 현상이 발생하였으나 6Hz 이상의 진동수에서는 안정적으로 면진효과를 보이는 것을 알 수 있었으며, 연직가진의 경우는 4Hz 이상에서 안정적인 면진거동을 보이는 것을 알 수 있었다. 지진파를 이용한 진동대 실험 결과 지진파의 탁월주파수 영역에 따라 상이한 면진효과를 나타내지만 최소 20% 이상의 지진력 저감효과를 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 Coil Spring & Viscous Damper 시스템이 회전기기 지진력 저감장치로 사용될 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기연구인 "구조물 진전성 평가기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 김민규, 전영선 (2006), Coil Spring & Viscose Damper System의 동적거동특성분석, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집.
2. 최인길, 中島正人, 전영선, 연관희 (2004a), 확률론적 지진재해도를 이용한 시나리오 지진의 결정기법에 관한 연구, 한국지진공학회논문집, Vol. 8 No. 6, pp23-30.
3. 최인길, 전영선, 서정문 (2004b) Development of a Uniform Hazard Spectrum for a Soil Site by Considering the Site Soil Condition, 2004년도 원자력학회 추계 학술발표회
4. US NRC Regulatory Guide 1.60, (1973). Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.