한국지진공학회 논문집 | 제11권 제3호 (통권 제55호) | 2007년 6월, pp. 33~42

면진된 모형 비상디젤발전기의 지진응답 실험

Shaking Table Test of Isolated EDG Model

김민규[1] · 전영선[2]

Kim, Min-Kyu · Choun, Young-Sun

국문 요약 >> 본 연구에서는 원전내 주요 안전관련 기기중 비상디젤발전기를 대상으로 한 진동대 실험을 수행하였다. 원전의 비상디젤발전기는 원전 전체의 노심손상빈도에 미치는 영향이 매우 크며 또한 면진장치를 설치하여 지진력을 저감시킬 경우 큰 폭으로 노심손상빈도를 감소시킬 수 있으며, 가동중 발생하는 소음과 진동으로 인하여 주변 구조물과 기기에 영향을 미치기도 한다. 따라서 지진력 저감과 기계 진동의 저감효과를 동시에 고려하기 위한 면진장치를 적용하여 그 효과를 평가하여 보고자 하였다. 면진장치로는 코일스프링과 점성댐퍼가 결합된 형태의 면진장치를 선정하였다. 실험의 대상으로 하는 비상디젤발전기는 영광 5,6호기에 설치되어 있는 모델로서 축소모형을 제작하였으며, 제작된 모형에 적합한 코일스프링-점성댐퍼 시스템을 설계하여 제작하였다. 제작된 면진장치를 축소모형에 설치하여 설계지진을 이용한 진동대 시험을 수행하여 지진력 저감효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 설계지진의 경우 20% 그리고 Scenario 지진의 경우 70% 까지의 지진력 저감이 가능한 것을 확인하였으며, 면진장치의 기계적 특성이 설계값과 일치하지 않음으로 인하여 실제 지진력 저감효과가 크게 변할 수 있음을 확인할 수 있었다.

주요어 비상디젤발전기, 코일스프링과 점성댐퍼 시스템, 진동대 실험, 지진력 저감

ABSTRACT >> In this study, for research on an improvement of the seismic safety of an EDG system, a small scale EDG system was manufactured. For the isolation system, the Coil Spring-Viscous Damper systems were selected. For the shaking table test, 3 kinds of seismic motions were selected which had different frequency contents. In this study, the isolation effects were different and they depended on the input seismic motion. In the case of an NRC earthquake which had low frequency contents, the isolation effects of the horizontal direction were 20%. But for the seismic motions which had high frequency contents, the isolation effects were 50~70%. In the case of the vertical direction, poor isolation effects were observed. It was because the design properties and the real properties of the isolation system were a little different.

Key words Emergency Diesel Generator (EDG), Coil Spring & Viscous Damper system, Shaking Table Test, Seismic Safety

1. 서 론

본 연구에서는 원전내 주요 안전관련 기기중 비상디젤발전기를 대상으로 한 진동대 실험을 수행하였다. 기존의 연구결과에서 정리한 바와 같이 원전의 비상디젤발전기는 원전 전체의 노심손상빈도에 미치는 영향이 매우 크며 또한 면진장치를 설치하여 지진력을 저감시킬 경우 큰 폭으로 노심손상빈도를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다(전영선 등, 2002). 또한 비상디젤발전기는 가동중 발생하는 소음과 진동으로 인하여 주변 구조물과 기기에 영향을 미치기도 한다. 따라서 지진력 저감과 기계 진동의 저감효과를 동시에 고려하기 위한 면진장치를 적용하여 그 효과를 평가하여 보고자 하였다. 이와 같은 3차원 면진을 위하여 코일스프링과 점성댐퍼가 결합된 형태의 면진장치를 선정하였다. 실험의 대상으로 하는 비상디젤발전기는 영광 5,6호기에 설치되어 있는 모델로서 기초부를 포함한 전체 무게가 400ton에 이르는 중량의 구조물이다. 따라서 실규모의 실험은 불가능하므로 실험이 가능한 수준의 축소모형을 제작하였으며, 제작된 모형에 적합한 코일스프링-점성댐퍼 시스템을 설계하여 제작하였다. 제작된 면진장치의 동적 특성을 정확히 판단하기 위하여 수평 2방향과 연직방향에 대한 속도의존 감쇠특성 및 강성특성을 분석하였다(김민규 등, 2007). 그리고 제작된 면진장치를 축소모형에 설치하여 설계지진을 이용한 진동대 시험

[1] 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가연구센터 선임연구원, 공학박사 (대표저자: minkyu@kaeri.re.kr)

[2] 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가연구센터 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 2. 7 / 심사종료일 : 2007. 4. 9)

을 수행하여 지진력 저감효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 설계지진의 경우 20% 그리고 Scenario 지진의 경우 70% 까지의 지진력 저감이 가능한 것을 확인하였으며, 면진장치의 기계적 특성이 설계값과 일치하지 않음으로 인하여 실제 지진력 저감효과가 크게 변할 수 있음을 확인할 수 있었다.

1.1 연구목적

원자력 발전소 내부에 설치되어 있는 비상디젤발전기는 국내에서 발생가능한 지진에 대하여 충분히 내진력을 가지고 있도록 설계되어 있다. 단지 지진력 저감만을 위해서라면 비상디젤발전기에 면진장치를 설치할 필요가 없는 것이다. 그러나 지진은 그 크기를 예상하는 것이 현재로서는 거의 불가능하므로 예상을 넘어서는 규모의 지진이 발생시 비상디젤발전기의 손상은 원전전체의 안전에 치명적인 영향을 미치게 된다. 따라서 비상디젤발전기와 같이 원전의 안전에 막대한 영향을 미치는 주요기기들의 내진안전성은 충분히 확보되는 것이 필요하다. 전영선 등(2002)의 연구에서는 비상디젤발전기와 같은 안전관련 주요기기의 면진만으로 원전의 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF)를 획기적으로 감소시킬 수 있다는 것을 밝힌 바 있다. 또한 비상디젤발전기와 같은 회전기계의 경우 가동중 발생하는 소음과 진동은 주변의 기기와 사람에게 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 면진장치를 이용한 지진력 저감과 함께 발생하는 진동을 저감시키는 것도 반드시 고려해야 하는 문제이다. 다만 본 연구에서는 면진장치를 이용한 지진력 저감만을 고려한 분석을 수행하였으며, 진동저감의 문제는 분석대상에서 제외하였다.

따라서 본 연구에서는 비상디젤발전기의 면진을 통하여 예측한 수준을 넘어서는 강진의 발생시 기기를 안전하게 보호하고 또 CDF의 저감을 통한 원자력 발전소 전체의 안전성을 확보하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구동향

본 연구에서 대상으로 하는 비상디젤발전기의 면진에 관한 연구는 전 세계적으로도 그리 널리 이루어지진 않은 분야이다. 실제로 기기면진에 관한 연구가 시작된 것이 그리 오래된 일은 아니기 때문이다. 그러나 일반 구조물에 대한 연구가 시작된 것은 상당이 오래된 일이고 외국의 사례뿐만 아니라 국내의 경우도 면진장치가 설치된 구조물이 증가하고 있는 실정이다.

원전의 기기면진에 대한 연구는 국내의 경우 전영선 등(2002)에 의하여 기기면진을 통하여 CDF를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 밝힌 연구가 있고, 김민규 등(2004a, 2004b)은 원전기기를 대상으로 하여 소형 모형기기를 이용한 진동대 실험을 수행하여 적용가능성을 평가한 바 있다. 일본에서는 Takeda 등(1998)이 원전 설비의 면진에 대한 기초연구를 수행 한 바 있으며, Ebisawa 등(2000)이 원전의 기기면진에 대한 연구를 실험적인 방법과 해석적인 방법에 의하여 분석한 바 있다.

코일스프링과 점성댐퍼는 진동저감을 위한 장치로 널리 사용되는 장치로서 지진력 저감을 위한 장치로서는 일반적이지 않은 것이 사실이다. 국내의 경우 코일스프링과 점성댐퍼를 이용하여 면진장치로서 사용하는 연구는 현재까지 알려진 바가 없다. 세계적으로는 코일스프링과 점성댐퍼를 생산하는 여러 회사들을 중심으로 연구가 진행되고 있으며 독일의 GERB사의 경우 회전기계를 대상으로 진동저감과 면진효과를 동시에 만족시킬 수 있는 시스템의 개발에 대한 연구가 진행되었고 실제 적용된 사례도 있다(GERB, 2000). Makris와 Deoskar(1992, 1996)는 1994년 미국 노스리지에서 발생한 지진시 코일스프링과 점성댐퍼 시스템이 설치된 건물에서 계측된 지진기록을 이용하여 실제로 40% 이상의 지진력 저감효과를 발휘하였음을 밝힌 바 있다.

1.3 연구방법

본 연구에서 대상으로 하는 원전의 비상디젤발전기는 콘크리트 기초를 포함한 전체 무게가 400ton에 이르는 중량의 구조물이므로 실제 비상디젤발전기를 이용하여 실험을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 실험을 수행하고자 하는 진동대의 성능을 고려하여 실험이 가능한 수준으로 크기와 무게를 줄인 축소모형을 이용하여 모형에 적합한 코일스프링과 점성댐퍼 시스템을 설계 제작하여 적용시킨 후 진동대 실험을 수행하였다. 제작한 면진장치의 정확한 동적특성을 알아보기 위하여 속도변화에 따른 감쇠특성과 강성특성을 실험을 통하여 면진장치로서의 적용성을 분석하였다. 입력지진파로는 국내 원전의 설계지진으로 사용하고 있는 NRC의 설계스펙트럼을 이용하여 작성된 지진파와 국내 원전부지의 특성평가를 이용하여 작성된 Scenario 지진파 그리고 등신뢰도 스펙트럼을 이용하여 작성된 UHS 지진파를 사용하였다. 입력지진의 가진방향에 따른 거동변화를 살펴보기 위하여 비상디젤발전기 종방향으로 1방향 가진만을 수행한 경우와 3방향 가진을 수행한 경우에 대한 실험을 수행하여 결과를 비교하였다. 축소모형 비상디젤발전기 상단의 두 지점에서 3방향으로 가속도 응답을 계측하였으며, 면진

장치로 선택한 스프링과 댐퍼의 특성상 Rocking과 Rolling 현상이 크게 발생할 것으로 예상되므로 수평방향으로 종방향 횡방향에 대하여 각각 두지점에서 변위를 계측하였고 실험체의 네 모서리에서 연직방향의 변위를 계측하였다.

2. 실험개요

본 연구에서는 영광 5&6호기의 비상디젤발전기를 대상으로 하여 비상디젤발전기와 기초부를 포함한 전체 모형에 대한 축소모형을 제작하였다. 기초부분을 포함한 전체 비상디젤발전기는 총중량이 400ton에 이를 정도로 대형 구조물이므로 실구조물을 대상으로 한 실험은 불가능한 실정이다. 따라서 3차원 가진이 가능한 진동대의 실험가능 하중을 근거로 하여 실험체를 제작하였으며 제작된 실험체에 설치하여 면진 및 진동저감효과를 발휘할 수 있는 면진장치를 설계 제작하였다. 실험모형의 기초부분은 콘크리트를 이용하여 제작하였으며, 발전기와 엔진 부분은 강체블록을 이용하여 모사하였다. 대상으로 한 비상디젤발전기와 무게중심이 일치하도록 제작하였다. 면진장치는 코일스프링과 점성댐퍼가 결합된 형태의 장치를 선택하였으며, 지진력에 대한 저감효과 뿐 아니라 기계진동에 의한 진동저감효과도 동시에 고려할 수 있도록 설계하였다.

2.1 실험모형 제작

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 2대가 설치되어 있다. 본 모델은 정격출력이 7,000kW, 정격속도는 514RPM으로서 각 호기별로 약간씩 차이가 나지만 1개월 주기로 시험가동을 1시간씩 수행하여 비상시에 대비하고 있다. 비상디젤발전기의 제원, 형상 및 면진장치의 설계에 관한 사항은 김민규 등(2007)의 연구에서 이미 상세하게 기술하였으므로 본 논문에서는 생략한다.

2.2 면진장치의 특성

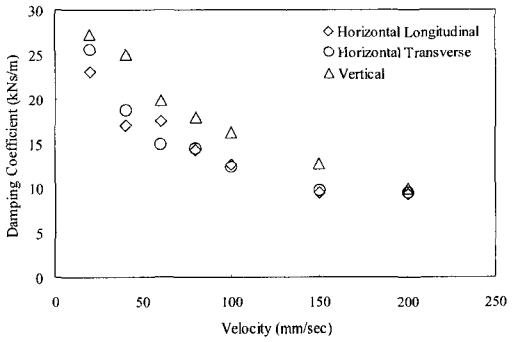
실험체의 면진장치로 사용하는 코일스프링-점성댐퍼 시스템은 코일스프링의 경우 거의 일정한 선형 탄성거동을 보이지만 점성댐퍼는 실린더 내부에 사용하는 점성물질의 특성에 의해서 가진속도에 따라 감쇠특성이 달라지는 속도 의존형 감쇠특성을 보이게 된다. 따라서 정확한 수치해석을 위해서는 속도변화를 고려한 특성시험을 실시하여 감쇠특성을 파악해야 한다. 김민규 등(2007)의 연구에서는 본 실험에 사용한 면진장치에 대하여 속도의존 거동특성을 파악하였다. 그 결과를 다음의 표 1,2와 그림 1,2에 정리하였다.

〈표 1〉 속도의존 감쇠계수

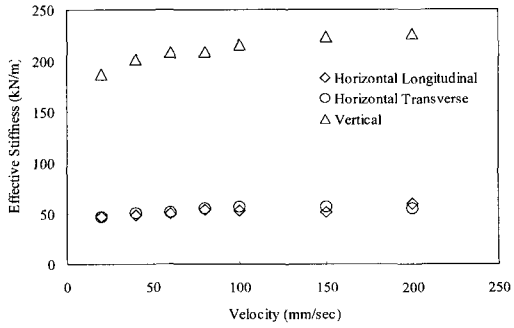
속도 (mm/sec)	수평종방향 (kNs/m)	수평횡방향 (kNs/m)	연직방향 (kNs/m)
20	23	26	27
40	17	19	25
60	18	15	20
80	14	14	18
100	13	12	16
150	9	10	13
200	9	9	10
설계값	3.5	3.5	4.0

〈표 2〉 속도의존 유효강성의 변화(단위:kN/m)

속도 (mm/sec)	수평종방향 (kN/m)	수평횡방향 (kN/m)	연직방향 (kN/m)
20	46.9	47.6	187.1
40	48.4	50.9	201.4
60	50.5	51.8	208.2
80	54.4	55.4	208.7
100	53.3	56.9	215.3
150	52.0	57.1	223.1
200	60.3	55.8	226.6
설계변수	40	40	144



〈그림 1〉 속도의존 감쇠계수의 변화



〈그림 2〉 속도의존 유효강성의 변화

표와 그림에서 보는 바와 같이 속도가 증가할수록 감쇠계수가 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 그 값이 점차 수렴해 가는 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 측정된 범위 내에서 설계값과는 상당히 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 유효강성의 경우도 가진속도에 따라서 다소 값이 변화하는 것을 알 수 있지만 이러한 경향을 속도의존성이라고 이야기 할 수 없는 현상이며 속도증가에 따라 점성댐퍼의 영향으로 인해 강성이 다소 높게 평가된 것으로 판단된다. 강성의 경우도 실제 설계변수에 비하여 수평방향의 경우 15-30% 정도 높게 평가되고 있고 연직방향의 경우는 30%에서 최대 50% 이상의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 감쇠계수의 변화는 구조물의 전체 시스템 응답을 감소시켜주는 역할을 하고 시스템의 고유진동수에 미치는 영향을 작지만 유효강성의 변화는 전체 시스템의 고유진동수의 변화를 초래하므로 실제 기대했던 응답과 상이한 응답을 발생시키게 한다. 코일스프링의 강성은 목표강성이 정해지면 사용재질과 코일의 직경 및 감긴 수 등을 이용해서 설계할 수 있고, 점성댐퍼의 감쇠특성도 외부 실린더와 내부 실린더의 크기 및 정섬유체의 성질을 이용하여 결정이 가능하다. 설계변수는 이러한 과정을 거쳐서 결정되는 것인데 반해서, 본 실험에서는 코일스프링과 점성댐퍼가 결합된 형태의 장치를 사용하므로 결합되 있는 상태에서 특성시험을 통하여 물성을 분석한 것이므로 이와 같은 차이가 발생한 것으로 판단된다.

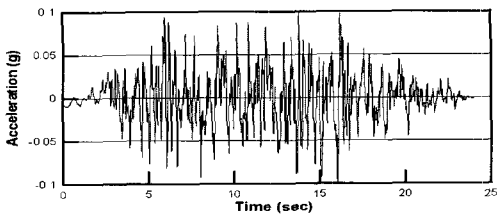
기존의 설계변수와 특성시험결과로 평가된 설계변수를 이용하여 전체 시스템의 고유진동수를 계산하여 표 3에 비교하였다. 표에서 보는 바와 같이 설계당시의 실험체의 무게와 실제 실험체의 무게도 다소 차이가 날 뿐만 아니라 스프링 시스템의 강성이 크게 달라졌기 때문에 연직방향과 수평방향의 고유진동수가 설계시의 값과 실제 예상치가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 미미한 것처럼 보이지만 실제 원전의 설계지진인 US NRC Reg. guide 1.60의 설계스펙트럼이 2.5Hz에서 탁월주파수를 보이며 저주파수에서 2.5Hz까지 응답이 증가하기 때문에 작은 차이가 응답에는 크게 영향을 미칠 수도 있을 것으로 판단된다.

〈표 3〉 설계값과 실제물성에 따른 실험모형의 고유진동수

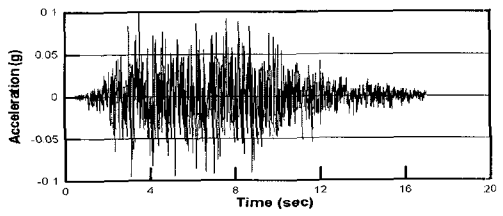
	설계		실제	
	수평	연직	수평	연직
상부중량(ton)	3.8	3.8	**4.0**	4.0
강성(kN/m)	40	144	**50**	200
각속도(rad/sec)	6.49	12.31	**7.07**	14.14
고유주기(초)	0.97	0.51	**0.89**	0.44
고유진동수(Hz)	1.03	1.96	**1.13**	2.25

2.3 입력지진파 선정

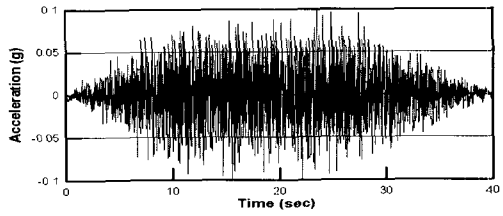
진동대 실험을 위한 입력지진으로는 원전의 설계지진으로 사용하고 있는 US NRC Reg. guide 1.60(1973)의 설계스펙트럼과 확률론적 지진재해도 분석에 의해 국내 원전부지에서 발생가능성이 있는 Scenario 지진(최인길 등, 2004b), 그리고 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum)에 의한 인공지진파(최인길 등, 2004a)를 사용하였다. 각 입력지진의 가속도 시간이력은 그림 3에 도시하였고 응답스펙트럼은 그림 4에 하나의 그림으로 표시하여 비교하였다. 건물내부에 위치하고 있는 기기의 경우 외부에 위치하는 것이 아니고 건물내부에 위치하고 있으므로 건물의 동특성을 반영한 층응답스펙트럼을 작성하여 실험을 하는 것이 타당하지만 일반 기기와 달리 비상디젤발전기는 그 크기와 무게로 인하여 건물의 1층에 위치하고 있으므로 층응답스펙트럼이



(a) NRC 지진

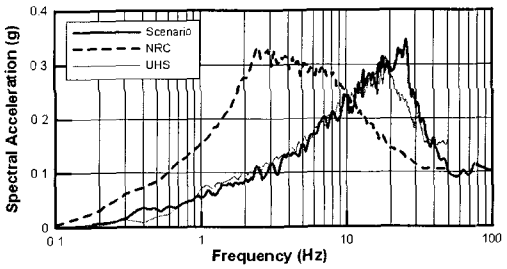


(b) Scenario 지진



(c) UHS 지진

〈그림 3〉 진동대 실험을 위한 입력지진의 가속도 시간이력



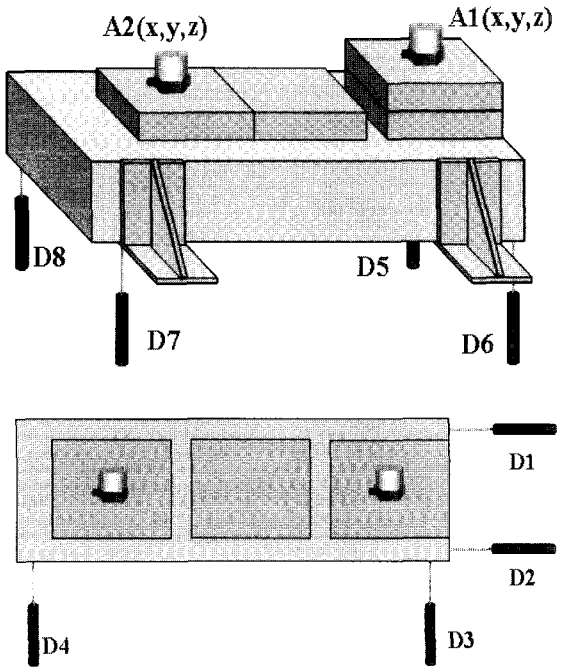
〈그림 4〉 입력지진의 가속도 응답스펙트럼(5% 감쇠비)

설계지진과 크게 달라지지 않는다. 따라서 원전의 설계지진과 기타 지진파를 이용한 실험을 수행하였다.

2.4 계측방법 및 실험순서

본 실험에서는 6개의 가속도계를 이용하여 모형구조물의 상단 2지점에서의 3방향 가속도를 계측하였으며, 연직방향 4지점과 수평방향 4지점에서의 변위를 계측하였다. 각 가속도계와 변위계의 위치는 그림 5에서 모식도로 나타내었다.

진동대 실험은 0.1g, 0.2g 그리고 0.3g의 3단계로 수행하였으며, 각 PGA 단계에서는 수평 1방향 가진의 경우와 3방향 가진의 경우에 대한 실험을 모두 수행하였다. 실험의 중간에 전체 시스템의 동특성을 파악하기 위한 랜덤진동 실험을 수행하였다. 전체 실험순서는 표 4에 정리하였다.



〈그림 5〉 계측기 배치 모식도

3. 실험결과 및 분석

3.1 가속도 응답 분석

지진파와 진동대 가진에 따른 실제 입력지진의 PGA와 가속도계가 설치된 2지점에서의 가속도응답은 다음의 표 5에 정리하였고 최대지반가속도 0.2g를 목표로 한 경우에 지진파에 따른 가속도 응답 시간이력과 응답스펙트럼을 그림 6-8에 도시하였다. 표에서 보는 바와 같이 모형의 두 지점 A1과 A2에서 계측한 가속도 응답은 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 모형자체가 거의 강체거동하기 때문에 이와 같은 결과가 나타나는 것이며 이것은 본 실험에서 계측의 신뢰성을 검증해 주고 있다고 볼 수 있다. 그림에서의 가속도 응답스펙트럼을 보면 1.2Hz 부근에서 탁월주파수가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 약간의 강성의 차이로 인해서 공진주파수 영역이 변화됨으로 응답이 크게 달라지고 있음을 확인할 수 있다.

진동대 입력과 구조물에서의 응답의 차이를 비교하여 지진력 저감효과를 확인해 보기 위하여 수평방향 및 연직방향에 대한 가속도 응답비를 정리하여 그림 9와 10에 그래프로 도시하여 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수평방향의 경우 NRC 스펙트럼을 이용한 지진파는 20% 정도의 지진력 저감효과를 보이는 반면 Scenario 지진과 UHS지진의 경우는 각각 70%와 50%의 지진력 저감효과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 1방향 가진인 경우와 3방향 가진인 경우에 지진응답비의 차이는 미미한 것으로 나타났으나 일부 NRC 지진의 경우 3방향 가진시 지진력 저감효과가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 진동대의 지진입력이 실제 지진파를 정확하게 구현하지 못해서 발생한 것으로 판단된다.

연직방향의 경우는 수평방향의 경우에 비하여 지진력 저감효과가 적은 것으로 나타나고 있다. 이것은 적용된 면진

〈표 4〉 면진 모형비상디젤발전기에 대한 진동대 실험 순서

	Earthquake Motion	PGA(g)	Remarks
1	Modal Test		Frequency Check
2	NRC, Scenario, UHS	0.1	1-D input (종방향)
3	NRC, Scenario, UHS	0.1	3-D input (2H & V)
4	Modal Test		Frequency Check
5	NRC, Scenario, UHS	0.2	1-D input (종방향)
6	NRC, Scenario, UHS	0.2	3-D input (2H & V)
7	Modal Test		Frequency Check
8	NRC, Scenario, UHS	0.3	1-D input (종방향)
9	NRC, Scenario, UHS	0.3	3-D input (2H & V)
10	Modal Test		Frequency Check

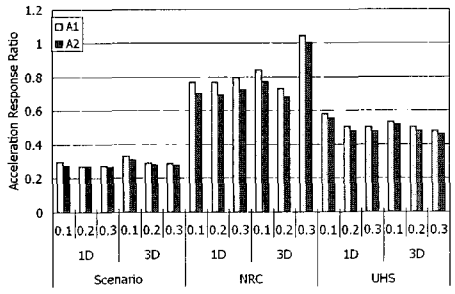
〈표 5〉 진동대 실험에 의한 최대가속도 응답(단위: g)

지진파	차원	Target PGA			Table PGA			A1			A2		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Scenario	1D	0.1	-	-	0.118	0.009	0.007	0.035	0.007	0.015	0.033	0.005	0.015
		0.2	-	-	0.242	0.020	0.006	0.066	0.005	0.035	0.066	0.004	0.029
		0.3	-	-	0.353	0.015	0.013	0.098	0.011	0.045	0.095	0.006	0.043
	3D	0.1	0.1	0.1	0.110	0.115	0.062	0.037	0.042	0.034	0.034	0.038	0.038
		0.2	0.2	0.2	0.238	0.248	0.127	0.070	0.076	0.072	0.067	0.070	0.076
		0.3	0.3	0.3	0.354	0.391	0.181	0.101	0.114	0.101	0.098	0.103	0.104
NRC	1D	0.1	-	-	0.127	0.010	0.004	0.098	0.007	0.054	0.089	0.006	0.045
		0.2	-	-	0.248	0.012	0.007	0.190	0.010	0.114	0.172	0.007	0.094
		0.23	-	-	0.276	0.010	0.005	0.221	0.012	0.121	0.200	0.009	0.111
	3D	0.1	0.1	0.1	0.118	0.115	0.106	0.100	0.114	0.143	0.092	0.106	0.125
		0.2	0.2	0.2	0.264	0.216	0.192	0.193	0.221	0.337	0.181	0.201	0.243
		0.3	0.3	0.3	0.293	0.255	0.216	0.306	0.314	0.416	0.294	0.237	0.300
UHS	1D	0.1	-	-	0.088	0.011	0.006	0.051	0.007	0.018	0.049	0.005	0.020
		0.2	-	-	0.192	0.012	0.009	0.098	0.010	0.039	0.093	0.006	0.033
		0.3	-	-	0.288	0.013	0.011	0.145	0.010	0.061	0.138	0.007	0.046
	3D	0.1	0.1	0.1	0.092	0.077	0.059	0.049	0.039	0.049	0.048	0.037	0.039
		0.2	0.2	0.2	0.189	0.164	0.118	0.095	0.079	0.093	0.092	0.071	0.078
		0.3	0.3	0.3	0.291	0.255	0.172	0.140	0.112	0.137	0.134	0.100	0.116

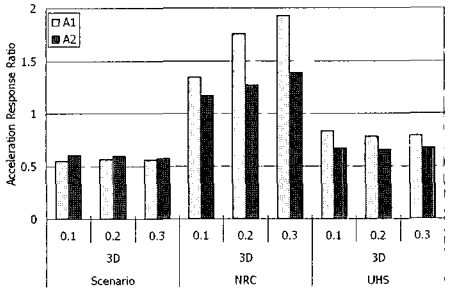
〈그림 6〉 NRC 지진시 모형 EDG에서의 수평가속도 응답(0.2g, 1D)

〈그림 7〉 Scenario 지진시 모형 EDG에서의 수평가속도 응답(0.2g, 1D)

〈그림 8〉 UHS 지진시 모형 EDG에서의 수평가속도 응답(0.2g, 1D)



〈그림 9〉 수평방향 지진응답비



〈그림 10〉 연직방향 지진응답비

장치의 연직방향 강성이 설계치에 비하여 증가하여 나타나는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 그림 4의 NRC 지진의 가속도 응답스펙트럼과 비교하여 보면 2.5Hz 부근까지 응답스펙트럼이 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데 실제 설계대로 제작되었을 경우 고유진동수가 1.96Hz임에도 제작된 면진장치의 경우 2.31Hz를 나타내고 있으므로 NRC 지진의 공진영역과 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 NRC 지진의 경우 입력지진에 비하여 응답가속도의 결과가 증폭되고 있는 것이다. 연직방향 가속도 응답의 경우 실험체의 전면부와 후면부에서의 응답이 차이가 발생하는 것은 EDG의 경우 엔진 부분에 비하여 발전기 부분이 더 무겁기 때문에 실험체도 무게중심을 고려하여 제작하였으므로 실험체의 전면부와 후면부에서의 응답이 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다.

수평 및 연직방향 모두 NRC지진시 지진력 저감효과가 적게 나타나거나 오히려 지진력이 증폭되는 효과가 발생한 것은 실험에 사용한 면진장치가 설계 목표치와 상이한 강성을 가지고 있기 때문에 발생한 것으로 목표치와 같은 면진장치가 설계되었을 경우 이와는 다른 결과가 나타났을 것으로 판단된다.

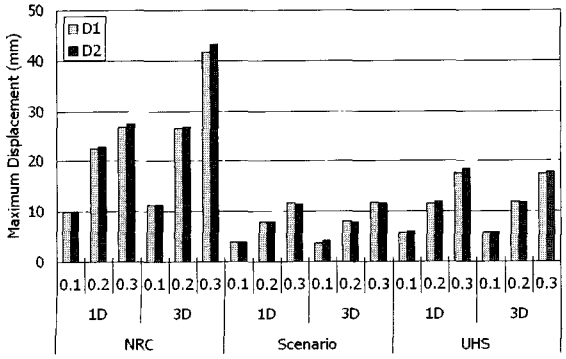
3.2 변위 응답 분석

지진응답실험 결과 설치한 8개의 변위계에서 계측된 변위응답을 비교하였다. 먼저 수평 종방향의 최대응답변위를 지진파와 가진 차원에 따라 그림 11에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 종방향 최대변위는 두개의 변위계에서 거의 동일한 계측값을 보이고 있으며 Scenario 지진과 UHS 지진의 경우는 1방향과 3방향 가진에 의한 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 반면 NRC 지진의 경우는 3방향 가진시 변위가 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 종방향으로는 최대 40mm 정도의 변위가 발생하는 것을 알 수 있다.

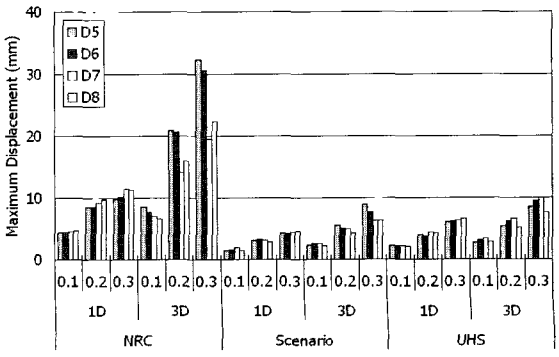
또한 수평방향 가진 및 연직방향 가진시의 연직방향 최대변위를 표 6과 그림 12에 정리하여 나타내었다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 고주파 성분의 지진파인 경우 수평방향 가진시 비교적 작은 Rocking 현상이 발생하지만 NRC 지진의 경우 3방향 가진시 최대 30mm 이상의 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 Scenario 지진이나 UHS 지진의 경우는 3방향 가진으로 인해서 연직방향 지진력이 추가되어도 연직방향 변위가 큰 폭으로 증가하지 않는다는 것이다. 반면 NRC 지진의 경우는 3방향 가진시 연직방향 변위가 크게 증가해서 최대 30mm 이상의 연직변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 진동대 실험을 통해서 계측된 수평방향 및 연직방향 변위의 시간이력을 그림 13~14에 정리하여 제시하였다. 그림 13에서 보는 바와 같이 종방향 두 지점에서의 변위는 거의 일치하는 거동을 하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 14에서 제시하고 있는 연직방향 변위시간이력은

〈표 6〉 연직방향 최대변위응답

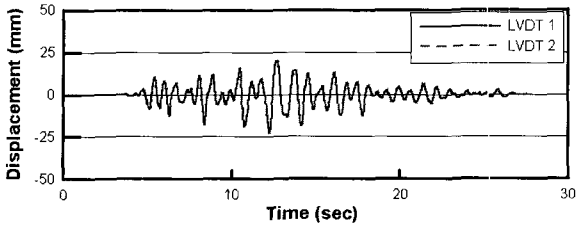
입력지진	방향	목표 PGA	최대변위 (mm)			
			D5	D6	D7	D8
NRC	1D	0.1	4.40	4.45	4.52	4.68
		0.2	8.54	8.51	9.10	9.68
		0.3	9.78	10.10	11.37	11.18
	3D	0.1	8.47	7.66	6.99	6.53
		0.2	20.95	20.60	14.06	15.85
		0.3	32.20	30.61	19.53	22.33
Scenario	1D	0.1	1.47	1.54	1.94	1.38
		0.2	3.12	3.21	3.15	2.90
		0.3	4.32	4.11	4.38	4.57
	3D	0.1	2.38	2.52	2.62	2.14
		0.2	5.52	4.98	4.88	4.32
		0.3	8.85	7.66	6.32	6.33
UHS	1D	0.1	2.15	2.20	2.17	2.12
		0.2	3.96	3.76	4.36	4.21
		0.3	6.12	6.13	6.26	6.64
	3D	0.1	2.74	3.04	3.39	2.80
		0.2	5.46	6.16	6.60	5.12
		0.3	8.50	9.40	10.00	7.57



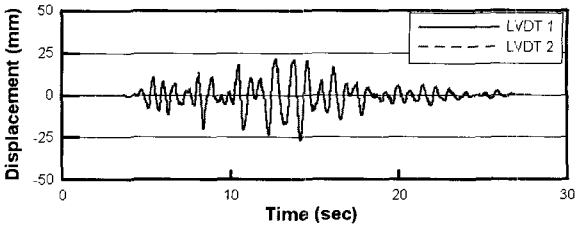
〈그림 11〉 지진파에 따른 수평방향 최대응답변위



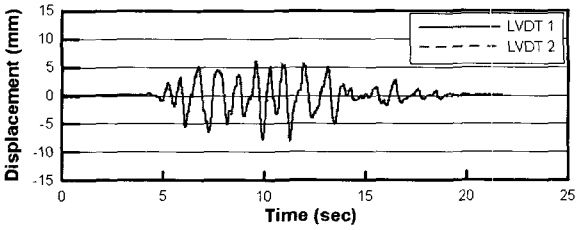
〈그림 12〉 연직방향 최대변위 응답



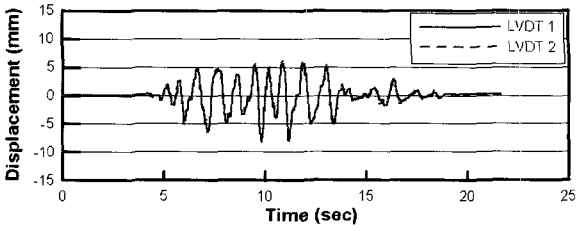
(a) NRC 1D



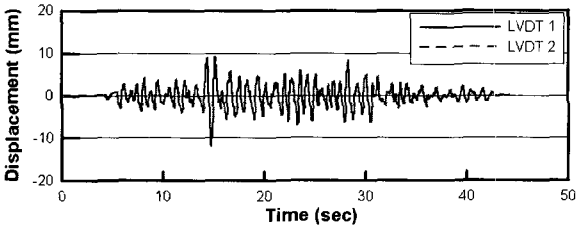
(b)NRC 3D



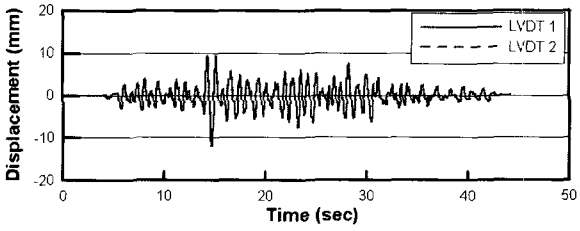
(c) Scenario 1D



(d) Scenario 3D

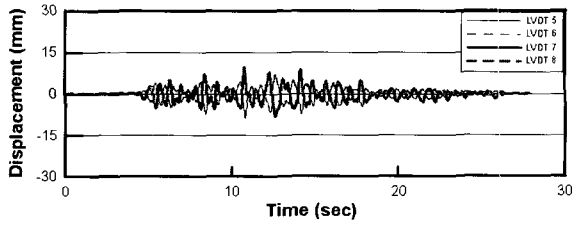


(e) UHS 1D

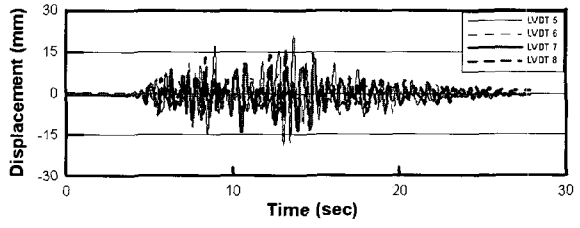


(f) UHS 3D

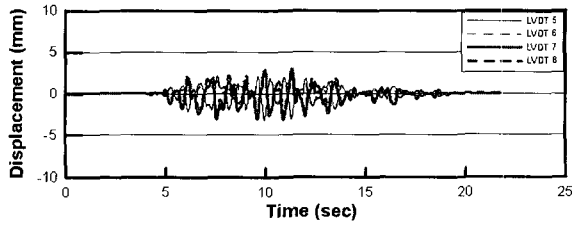
〈그림 13〉 진동대 실험에 의한 수평 종방향 변위 시간이력(PGA=0.2g)



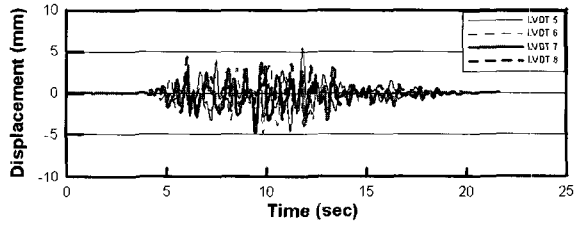
(a) NRC 1D



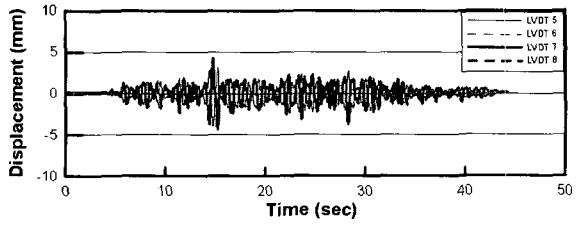
(b)NRC 3D



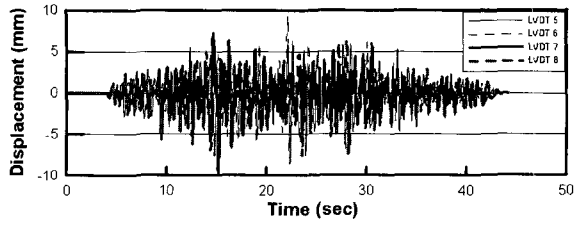
(c) Scenario 1D



(d) Scenario 3D



(e) UHS 1D



(f) UHS 3D

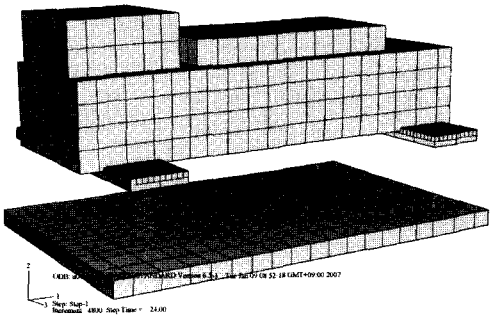
〈그림 14〉 진동대 실험에 의한 연직방향 변위 시간이력(PGA=0.2g)

계측지점 D5, D6과 D7, D8에서의 응답이 Rocking 현상에 의해서 180°의 위상차가 발생하고 있는 것을 알 수 있으며 3방향 가진의 경우는 Rocking 현상이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. D5, D6의 변위보다 D7, D8 지점에서 더 큰 변위가 발생하는 것은 무게중심이 D5, D6의 위치에 가까이 있기 때문에 뒷부분에서 더 큰 움직임이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 면진장치를 설치함으로서 변위가 크게 발생하는 것은 당연한 현상이지만 실제 비상디젤발전기에 면진장치를 설치했을 때 지진시 과도한 변위의 발생은 비상디젤발전기 자체의 안전성을 증가시킬 수 있지만 주변 배관의 손상을 일으켜서 더 위험한 결과를 초래할 수도 있다. 그러나 비상디젤발전기와 연결되고 있는 배관시스템은 충분한 연성을 가지고 있으므로 본 실험에서 발생하는 40mm 정도의 변위에서는 안전성에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

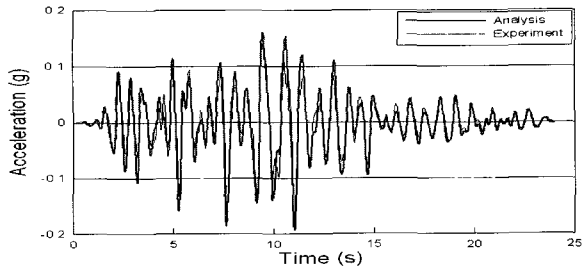
4. 수치해석 및 결과분석

본 실험결과를 해석적으로 분석하기 위하여 수치해석을 통한 응답을 비교하였다. 수치해석은 구조해석에 널리 사용하는 ABAQUS를 사용하였으며, 실험모델의 특성상 1dof 모형으로 수치해석을 수행하여도 그 응답을 예측하는데에 충분하지만 3차원 거동을 예측하기 위하여 그림 15와 같이 고체요소를 이용한 3차원 해석모형을 구성하였다. 각 재료의 물성은 콘크리트와 강재의 물성을 사용하였으며, 면진장치의 물성은 실험결과를 바탕으로 하여 표 3의 결과를 적용하였다.

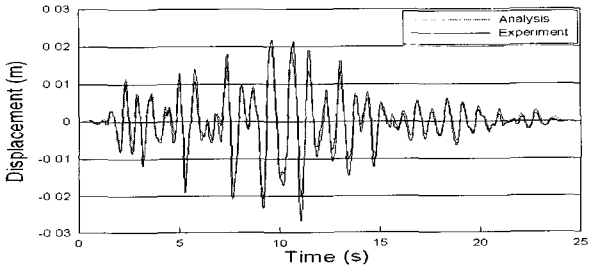
NRC 지진으로 1방향가진, 최대지반가속도 0.2g로 가진한 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 실제 진동대에서 입력된 지진기록을 사용하여 수치해석을 수행하여 실험에서의 결과와 수치해석에 의한 결과를 비교하였다. A1 지점에서의 종방향 가속도 응답 시간이력과 D1 지점에서의 종방향 변위응답 시간이력을 그림 16에서 비교하여 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 가속도와 변위응답 모두 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 스프링-댐퍼 시스템으로 면진된 비상디젤발전기의 응답을 얻기 위해서 면진장치의 속도의존 비선형 모델을 사용하지 않더라도 강성과 감쇠계수만의 조합으로 실험결과와 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있는 것이다. 이러한 결과는 수치해석방법의 타당성을 증명할 수 있는 것으로 판단되며, 본 연구에서 사용한 해석방법을 이용하여 실험이 불가능한 영역에 대한 수치해석을 통하여 파괴거동까지도 예측 할 수 있을 것으로 판단되며 면진모형에 대한 취약도 분석도 가능 할 것으로 판단된다.



〈그림 15〉 모형 비상디젤발전기의 수치해석 모형



(a) 가속도 응답(A1)



(b) 변위응답(D1)

〈그림 16〉 실험결과와 수치해석결과와의 비교

5. 결 론

본 연구에서는 원전의 안전관련 기기중 노심손상빈도에 큰 영향을 미치는 비상디젤발전기를 선택하여 면진장치를 설치하여 지진력을 저감시키므로서 예상할 수 없는 큰 지진이 발생했을 때 기기를 보호하고 원전의 노심손상빈도를 낮추기 위한 실험연구를 수행하였다. 비상디젤발전기의 거동을 대신할 수 있는 축소모형을 제작하였으며, 축소모형에 적합한 면진장치를 제작하여 설치하였다. 제작된 면진 모형 비상디젤발전기에 대하여 주파수 특성이 상이한 3종류의 입력지진을 이용하여 지진력 저감효과를 평가하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 특성실험을 통하여 면진장치의 유효강성을 산정해 본 결과 연직방향과 수평방향에 대하여 각각 144kN/m과 40kN/m으로 설계되어 있는 면진장치의 유효강성이 실제로는 약

200kN/m 와 50kN/m인 것으로 나타났다. 이와 같이 설계값보다 유효강성이 크게 나타남으로 인해서 면진 비상디젤발전기 시스템의 고유진동수가 증가하게 되는 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

- 실험체의 2지점에서 각각 3방향 가속도를 관측한 결과 NRC지진의 경우 20%, UHS 지진은 50% Scenario지진은 70% 이상의 지진력 저감효과가 있음을 확인 할 수 있었다. 연직방향의 경우는 지진력 저감효과가 적었지만 이것은 목표로 하는 설계변수와 다소 상이하게 제작된 면진장치의 특성에 기인한 것으로 판단된다.
- 지진응답실험시 설치한 8개의 변위계에서 계측된 변위응답을 비교하였다. Scenario 지진과 UHS 지진의 경우는 1방향과 3방향 가진에 의한 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었다. 반면 NRC 지진의 경우는 3방향 가진시 변위가 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 종방향으로는 최대 40mm 정도의 변위가 발생하는 것을 알 수 있다.
- 수평방향 가진 및 연직방향 가진시의 연직방향 최대 변위를 검토해 본 결과 고주파 성분의 지진파인 경우 수평방향 가진시 비교적 작은 Rocking 현상이 발생하지만 NRC 지진의 경우 3방향 가진시 최대 30mm 이상의 변위가 발생하는 것을 알 수 있었다. 특이한 것은 Scenario 지진이나 UHS 지진의 경우는 3방향 가진으로 인해서 연직방향 지진력이 추가되어도 연직방향 변위가 큰 폭으로 증가하지 않는다는 것이다. 반면 NRC 지진의 경우는 3방향 가진시 연직방향 변위가 크게 증가해서 최대 30mm 이상의 연직변위가 발생하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 실험은 과학기술부 원자력 중장기연구사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Ebisawa, K., Ando, K. and Shibata, K., "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," *Nuclear Engineering and Design*, 198(1-2), 2000, pp. 61-74.
2. GERB, Vibration Isolation Systems, 2000.
3. Makris, N. and Constantinou, M.C., "Spring-Viscous Damper Systems for Combined Seismic and Vibration Isolation," Earthquake engineering and Structural Dynamics, vol. 21, 1992, pp. 649-664.
4. Makris, N. and Deoskar, H., Prediction of Observed Response of Base-Isolated Structure, Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 5, 1996, pp. 485-493.
5. Takeda, M., Ohkawa, Y. and Akutsu, Y., "An Evaluation Method for Seismic isolation Effect in Siting of a Nuclear Facility," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 62, 1998, pp. 241-249.
6. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
7. 김민규, 전영선, Coil Spring & Viscos Damper System의 동적 거동특성분석, 한국지진공학회 논문집. Vol. 11, No. 2, 2007, pp. 19-26.
8. 김민규, 전영선, 최인길, 원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 I: 고무베어링, 한국 지진공학회 논문집, Vol. 8, No. 5, 2004, pp. 65-77.
9. 김민규, 전영선, 최인길, 원전기기의 면진을 위한 진동대 실험 II: FPS, 한국 지진공학회 논문집, Vol. 8, No. 5, 2004, pp. 79-89.
10. 전영선, 최인길, 원전기기의 지진력 저감이 노심손상빈도에 미치는 영향 평가, 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.
11. 최인길, 전영선, 서정문, Development of a Uniform Hazard Spectrum for a Soil Site by Considering the Site Soil Condition, 2004년 원자력학회 추계 학술발표회, 2004.
12. 최인길, 中島正人, 전영선, 연관희, 확률론적 지진재해도를 이용한 시나리오 지진의 결정기법에 관한 연구, 한국지진공학회 논문집, Vol. 8 No. 6, 2004, pp. 23-30.