

기초형식에 따른 회전기기의 가동중 진동특성 분석

Evaluation of Vibration Characteristics of Operating Rotational Machines Depending of Types of Foundation

김민규¹⁾ · 전영선²⁾

Kim, Min-Kyu · Choun, Young-Sun

국문 요약 >> 비상디젤발전기는 원전의 안전성에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 기기이다. 본 연구에서는 세 종류의 비상디젤발전기를 대상으로 가동중 진동을 계측하여 기초시스템에 따른 가동중 진동의 저감효과를 비교하였다. 대상 원전은 영광 5호기, 울진 2호기 및 울진 3호기 원전의 비상디젤발전기로 하였다. 영광 5호기와 울진 3호기의 비상디젤발전기는 동일한 종류의 비상디젤발전기로서 기초형식만 앵커볼트 고정과 스프링-댐퍼시스템을 이용한 면진으로 구분된다. 울진 2호기 비상디젤발전기는 기초부분에 seismic block을 설치하고 코일스프링을 이용하여 진동저감효과를 고려하였으므로 좋은 비교가 될 것이다. 이러한 진동계측의 목적은 기초형태에 따른 진동저감효과를 비교해 보기 위함이다. 결과적으로 스프링-댐퍼 시스템이 진동저감 시스템의 안정적 거동측면에서 좋은 효과를 보이고 있음을 알 수 있었다.

주요어 비상디젤발전기, 원자력발전소, 기초시스템, 앵커볼트, 스프링-댐퍼 시스템, 진동저감효과

ABSTRACT >> The Emergency Diesel Generator (EDG) is a very important equipment for the safety of a Nuclear Power Plant (NPP). In this study, the operating vibration of three kinds of EDG systems was measured. The target EDG systems are Yonggwang 5 unit and Ulchin 2 and 3 units. The Yonggwang 5 and Ulchin 3 unit EDG systems are the same type but the foundation systems are different. One is an anchor bolt type and the other is a spring and viscous-damper type. The purpose of these measurements is for a verification of the vibration isolation effect depending on the foundation system. As a result, it can be said that the spring and viscous damper system of the EDG performed better for the vibration isolation than that of anchor bolt type.

Key words Emergency Diesel Generator (EDG), Nuclear Power Plant (NPP), foundation system, anchor bolt, coil spring-viscous damper, vibration isolation effect

1. 서론

회전기계는 산업현장에서 널리 사용되는 기기로서 가동중에 발생하는 진동은 항시 대두되는 문제이다. 가동중 발생하는 소음과 진동은 주변 기기와 구조물에 기능적인 손상을 유발할 뿐 아니라 민원의 발생이유가 되기도 하고 비상디젤발전기와 같이 원자력 발전소 보조건물내부에 위치하기도 하는 기기의 경우는 업무에 지장을 초래하기도 한다. 이러한 여러 가지 이유로 회전기계의 가동중 발생하는 소음

과 진동을 저감시키기 위한 노력은 오래전부터 있어왔다. 가장 널리 사용되는 방법은 중량의 회전기기를 고정시키기 위하여 매입앵커의 사용시 기기와 기초블럭 사이에 방진 패드를 삽입함으로써 진동과 소음저감 효과를 얻고자 하는 방법이다. 이 방법은 기기를 안정적으로 고정시킬 수는 있지만 소음과 진동의 저감효과는 우수한 편은 아니다. 현재 가장 널리 쓰이는 방법으로는 코일 스프링과 같은 진동저감 장치를 기기와 기초블럭 사이에 설치하여 직접적인 진동저감효과를 얻고자 하는 방법이다. 본 연구에서는 기초시스템이 상이한 세 종류의 회전기계를 선택하여 기초의 특성에 따라서 달라지는 가동중 진동특성을 분석하였다. 회전기계로는 원자력 발전소의 기기중에서 원전의 안전과 관련하여 매우 중요한 역할을 하는 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)를 선택하였다. 원자력 발전소에서 사용되

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

²⁾ 정회원·한국원자력연구원 중합안전평가연구소 책임연구원, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

는 비상디젤발전기는 여러 종류가 있으나 대부분의 경우 엔진과 발전기를 포함한 전체 무게가 100톤을 넘어서는 대형 기기이다.

디젤발전기와 같은 회전기기는 기초의 형식에 따라서 주변에 전파되는 진동의 영향이 크게 달라지게 되므로 이러한 기계기초에 대한 연구는 1950년대부터 수행되었다(Macinate, 1984). 국내의 경우 장승필 등(1991)은 진동저감요소를 갖춘 회전기계기초의 동적해석이라는 연구를 통해서 일반적으로 회전기계의 기초요소로서 널리 사용하고 있는 스프링 시스템의 수치해석 기법에 대한 연구를 수행했다. 이 연구를 통해서 스프링기초를 사용하고 있는 경우 기기의 동적 거동에 큰 변화가 발생하는 것을 해석적으로 규명하였다. 또한 이종립 등(1997)의 연구에서는 기존의 연구가 수치해석만을 통한 연구인데 반하여 실제 회전기계의 축소모형을 이용한 실험을 동시에 수행하여 회전기계에 적용하고 있는 스프링 기초의 거동을 분석하였다. 이종립 등의 연구에서는 기계진동에 의한 동적거동 뿐 아니라 지진발생시의 거동을 분석하기 위하여 축소모형에 대한 진동대 실험을 동시에 수행하였다. 외국의 경우 많은 연구들이 수행되었지만 대표적인 연구로서 Liu와 Novak(1995)은 터빈발전기의 진동에 의한 기초의 동적거동에 대한 연구를 수행하여 기계진동에 의한 기초시스템의 동적거동을 분석하였다. 최근에 Kumar와 Reddy(2006)은 스프링으로 지지되어 있는 강체블록을 실제로 제작하여 스프링 강성에 따른 진동전파특성에 대한 실험연구를 수행하였다. 하중으로는 이상적인 조화하중을 사용하여 주파수에 따른 진동거동을 알 수 있도록 하였다. 이와 같이 국내외적으로 회전기계 기초의 동적거동에 대한 연구사례는 그리 많지 않은 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 기초형식이 상이한 세 가지 디젤발전기를 선택하여 가동중 진동을 계측함으로써 기초형식에 따른 진동특성을 살펴보고자 하였다. 본 연구에서 선택한 비상디젤발전기중 두 가지는 동일 회사의 동일 제품으로서

기초형식이 상이하게 적용되어 있으므로 기초형식에 따른 진동저감효과를 직접적으로 비교할 수 있을 것으로 판단되며, 나머지 한 기종의 경우는 전체 시스템을 좀 더 안정적으로 거동하도록 하기 위하여 중량(重量)의 콘크리트 블록을 사용하여 Seismic mass로서의 역할을 하도록 설계하였으므로 좋은 비교가 될 것으로 판단된다.

아무리 동일한 기종의 디젤발전기라고 하더라도 동일한 시스템으로 간주할 수 없고 또한 발전기가 설치되어 있는 환경이 동일하지 않으므로 직접적인 비교를 하여 정량적인 진동저감효과를 얻는 것은 불가능하다. 가장 이상적인 실험은 동일 기기를 이용하여 기초를 바꿔서 설치하여 진동특성을 비교하는 것이 좋겠지만 전술한 바와 같이 비상디젤발전기는 무게가 100ton을 넘는 기기이므로 현실적으로 쉽지 않은 것이 사실이다. 하지만 동일 기종의 비상디젤발전기를 대상으로 측정을 하였으므로 정성적인 비교는 가능할 것으로 판단된다. 실제 계측결과 코일 스프링 등을 이용하여 진동저감장치를 설치한 기기의 경우가 고정식 앵커를 사용한 경우에 비하여 최대 20배 가량의 진동저감효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다만 본 연구는 단순히 가동중 진동의 저감효과만을 분석하기 위함이라기 보다는 향후 원전의 비상디젤발전기에 대한 지진력 저감에 대한 연구를 위하여 기초의 동적거동 분석이라는 부차적인 목적을 가지고 있음을 밝혀두는 바이다.

2. 진동측정 개요

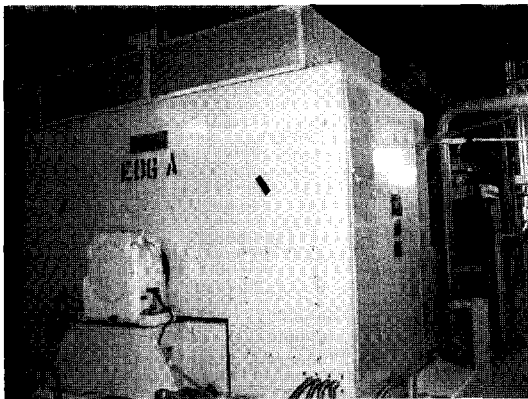
2.1 비상디젤발전기

본 연구에서 계측대상으로 하는 비상디젤발전기는 울진 2호기, 울진 3호기 및 영광 5호기 원자력발전소에 설치되어 있는 디젤발전기이다. 각 비상디젤발전기의 제원 및 사양은 다음의 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 영광 5호기와 울진 3호기의 디젤발전기는 동일회사의 동일모델

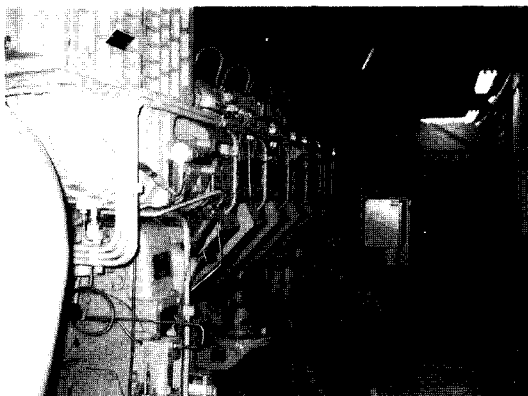
〈표 1〉 원전별 비상디젤발전기의 주요 제원

구분	영광 5호기	울진 3호기	울진 2호기
제작사	한중-SEMT Pielstik	한중-SEMT Pielstik	SACM
모델	16PC2-5V 400	16PC2-5V 400	UD45V 20S5D
정격출력(kW)	7000	7000	4500
정격속도(RPM)	514	514	1200
시험주기	1개월	1개월	2개월
시험출력	100%	100%	30%
시험시간	60분	60분	60분
기초형식	매입앵커를 사용한 고정	스프링 20set 점성댐퍼 6set	스프링 12set
특징	-	-	Seismic mass

인데 반해 기초형식이 상이하므로 기초에 따른 진동저감효과에 대한 직접비교가 가능할 것으로 판단된다. 이 비상디젤발전기는 SEMT Pielstick사에서 제작한 16PC2-5V400 모델이며 기초시스템은 영광 5호기의 경우 매입앵커를 이용해서 고정된 반면 울진 3호기는 스프링과 점성댐퍼를 사용하고 있다. 이 모델의 비상디젤발전기는 국내 뿐 아니라 외국의 많은 원자력발전소에서도 널리 사용되고 있는 모델로서 정격출력은 7000kW이며 정격속도는 514RPM이다. 영광 5호기의 경우는 기초와 완전 고정되어 있으며 별도의 비상디젤발전기를 위한 건물에 위치하고 있다. 반면 울진 3호기의 경우는 원자력발전소의 주 제어실(Main Control Room; MCR)이 위치하고 있는 건물내부에 비상디젤발전기가 위치하고 있고 따라서 비상디젤발전기의 진동을 줄이고자 20개의 코일스프링과 6개의 점성댐퍼를 진동저감을 위한 장치로 사용하고 있다. 울진 2호기는 SACM사의 디젤발전기이며 엔진이 2개에 발전기는 한대가 연결되어 있는 형식을 취하고 있다. 울진 2호기의 경우는 디젤발전기의 설치를 위한 설계단계에서부터 진동저감을 고려하여 안정성을 높이고자 Seismic Block을 사용하였다. 동일 모델인 영광 5호기와 울진 3호기의 디젤발전기와 울진 2호기 디젤발전기의 형상은 그림 1에



(a) 영광 5호기, 울진 3호기



(b) 울진 2호기

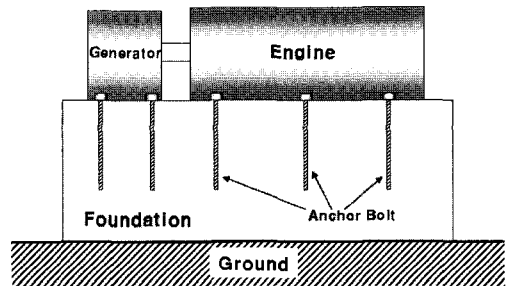
〈그림 1〉 원자력 발전소의 비상디젤발전기

제시하였다.

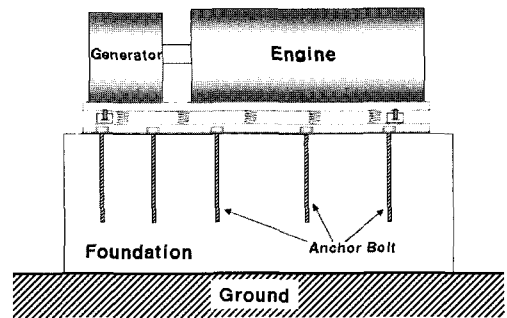
2.2 비상디젤발전기의 기초형식

2.2.1 영광 5호기와 울진 3호기 비상디젤발전기

영광 5호기 비상디젤발전기의 기초형태는 전형적인 앵커볼트 시스템으로서 매입앵커를 이용하여 기초와 발전기를 고정하는 형태이다. 영광 5호기는 비상디젤발전기실이 원자력발전소의 부속건물에 위치하지 않고 별도의 건물에 독립적으로 위치하고 있으므로 진동의 영향이 주변 구조물이나 기기에 미치는 영향이 적게 된다. 반면 울진 3호기 비상디젤발전기는 동일 모델이면서 원자력발전소의 부속건물 내부에 위치하고 있으므로 그 진동과 소음이 건물 전체에 영향을 미치게 된다. 따라서 설계변경을 통하여 엔진과 발전기를 기초와 격리시키는 방법을 사용하였다. 진동저감을 위해서는 GERB사의 코일 스프링과 점성댐퍼를 사용하였는데 코일스프링의 경우 8개가 하나의 set로 구성된 코일스프링 시스템을 20개 사용하였으며, 6개의 점성댐퍼를 사용하여 효과적으로 진동을 저감시킬 수 있도록 하였다. 앵커볼트를 사용한 영광 5호기와 스프링 댐퍼를 사용한 울진 3호기 비상디젤발전기의 기초형태에 대한 모식도를 그림 2에 각각 도시하였고, 울진 3호기에 사용한 스프링-댐퍼시스템의 물성을 표 2에 정리하였다.



(a) 앵커볼트 고정기초(영광5호기)



(b) 코일스프링-점성댐퍼 시스템(울진3호기)

〈그림 2〉 비상디젤발전기 기초시스템의 모식도(영광5호기, 울진 3호기)

〈표 2〉 울진 3호기 스프링-댐퍼시스템의 제원

코일스프링	TYPE	GERB GP 8.721			
	STIFFNESS	Horizontal	24.9 N/mm	Vertical	35.6 N/mm
SET	20 Set (1 Set consist of 8 spring unit)				
점성댐퍼	Damping Coefficient	Horizontal	2500 N/m/s	Vertical	2500 N/m/s
	Set	6 sets			

2.2.2 울진 2호기 비상디젤발전기

울진 2호기 비상디젤발전기는 설계단계부터 진동저감을 위하여 seismic mass를 도입하여 기초를 포함한 비상디젤발전기 시스템의 무게중심을 아래쪽으로 이동시켜 진동저감에 효과적이고 안정적인 시스템을 구축하였다. 울진 2호기 비상디젤발전기 시스템은 그림 3과 같이 페디스탈을 설치하여 그 위에 코일 스프링으로 전체 시스템을 지지하도록 설계하였다. 이 경우에는 점성댐퍼를 사용하지 않고 코일스프링만으로 진동저감효과를 나타낼 수 있도록 하였다. 울진 2호기 비상디젤발전기에 사용된 코일스프링의 제원은 표 3에 정리하였다.

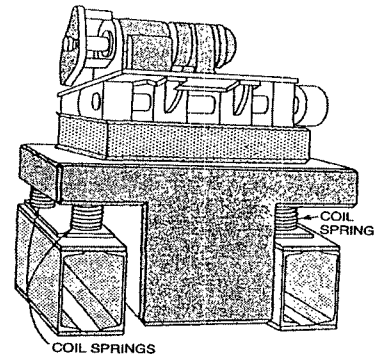
기초시스템에 seismic block을 설치하는 이유는 다음 그림 4에서 보는 바와 같이 seismic block을 설치함으로써 전체 시스템의 무게중심을 낮출 수 있게 되고 따라서 기초를 포함한 기기의 움직임을 회전운동과 병진운동으로 제한할 수 있지만 seismic block을 사용하지 않은 경우는 전체 시스템의 회전중심이 시스템의 외부에 위치하게 되므로 복잡한 거동을 하게 되는 것이다. 따라서 seismic block을 이용하여 시스템을 설계 할 경우 진동에 의해서 보다 더 안정적인 거동을 할 수 있게 된다.

2.3 계측 시스템

진동계측 시스템은 동일 비상디젤발전기를 사용하는 영광 5호기와 울진 3호기는 동일한 형태로 구성하였으며, 울진 2호기의 경우는 기초의 6지점과 페디스탈 윗부분 그리고 바닥면에서의 진동을 계측하였다. 회전기계의 진동하중이 대부분 연직방향의 랜덤하중의 형태가 되므로 주로 연직방향의 가속도 응답을 관측하여 비교하였으며, 스프링으로 면진된 경우는 주요부위에서의 변위를 동시에 계측함으로써 면진에 의한 전체 시스템의 거동을 파악 할 수 있도록 하였다.

2.3.1 영광 5호기 및 울진 3호기

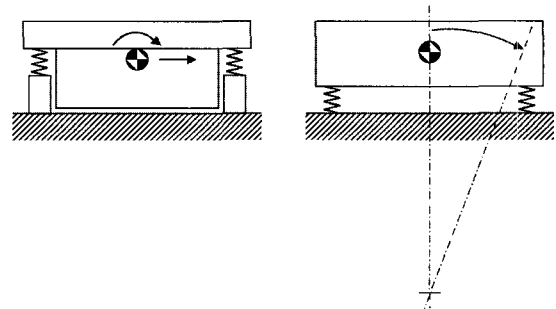
동일한 비상디젤발전기를 사용하고 있는 영광 5호기와 울진 3호기의 경우 가동중 비상디젤발전기의 진동측정을 위



〈그림 3〉 Seismic Mass Type Isolation System(Macinate, 1984)

〈표 3〉 울진 2호기 비상디젤발전기에 사용된 코일스프링의 제원

Item	Properties	
Resonant Frequency	Vertical	3-5Hz
	Horizontal	3.3-5.5Hz
Vertical Stiffness	608kgf/mm	
Permissible Displacement	0.5mm	

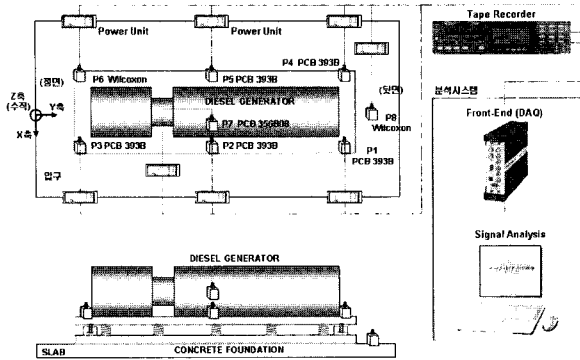


〈그림 4〉 스프링 기초에서 seismic block의 효과

하여 8개의 가속도계를 사용하였다. 그중에 6개는 발전기 기초에 설치하였고 한 개는 본체에 그리고 또 한 개는 기초와 격리된 바닥면에 설치하였다. 계측의 개요도는 다음의 그림 5에 도시한 바와 같고 계측을 위한 장비로는 signal conditioner와 power unit, tape recorder 그리고 신호분석기 등을 사용하였으며, 표 4에 정리하여 나타내었다. 진동저감효과를 분석하기 위하여 가동전 진동, 가동직후부터 최대출력까지 상승할 때까지, 정상운전상태 그리고 가동을 종료할 때, 이렇게 네 단계로 진동을 계측하였다. 본 논문에서는 가동전과 정상가동중의 측정된 결과만을 비교하였다.

2.3.2 울진 2호기

울진 2호기의 비상디젤발전기는 페디스탈 위에 스프링이 놓여져 있고 그 위에 비상디젤발전기가 설치되어 있는 형태이므로 위의 경우와 동일하게 8개의 가속도계를 이용하였지만 본체에서의 진동을 계측하지 않고 페디스탈 윗부분과 바닥면에서의 진동을 각각 측정하였다. 그러나 가동중에는 별



〈그림 5〉 디젤발전기 계측시스템 모식도(울진 3호기, 영광 5호기)

〈표 4〉 진동 측정 및 분석 장비 목록

장 비 명	제조사 & 형식
가속도계 (SEISMIC ACCELEROMETER)	PCB 393B, PCB 356B08 WILCOXON 731A
SIGNAL CONDITIONER & POWER UNIT	Dytran 4102, PCB 480E09 WILCOXON P31
변위계(LVDT)	Sensotec S5
신호기록기(TAPE RECORDER)	SONY 208AX
FFT 분석기(SIGNAL ANALYZER)	B&K Pulse
계측기 INTERFACE용 PC	-

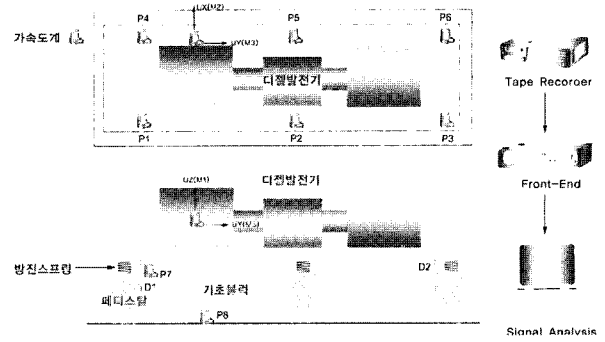
도의 가속도계를 이용하여 발전기 본체에서 발생하는 가속도를 관측하였다. 또한 페디스탈과 기초블럭과의 사이에서의 상대변위를 관측하였다. 관측의 모식도는 그림 6과 같다. 계측시스템은 울진 3호기의 경우와 동일한 시스템을 사용하였다. 다만 페디스탈과 기초블럭과의 상대변위를 계측하는 경우 첫 번째 페디스탈과 마지막 페디스탈의 상부에서 기초블럭과의 상대변위를 계측하여 전체 비상디젤발전기 시스템의 변위거동을 파악할 수 있도록 하였다. 변위계측점의 위치는 그림 6에 표시한 바와 같이 D1, D2로 하였다.

3. 진동측정 결과

3.1 가속도 응답

3.3.1 영광 5호기와 울진 3호기 비상디젤발전기

영광 5호기 비상디젤발전기의 가동전 및 가동중의 진동값을 시간영역과 주파수 영역에서의 최대값으로 각각 표 5와 표 6에 정리하였다. 시간영역에서의 최대값은 단지 최대값만을 비교한 것으로 진동에 의한 전체 에너지를 표현한다고 할 수 없으나, 주파수영역에서는 100Hz까지의 주파수 분석을 통하여 Overall 값으로 나타냈으므로 진동에 의한 에너지를 나타낼 수 있다고 볼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 가동전의 진동 값은 비상디젤발전기 본체를 제외하고는 기



〈그림 6〉 디젤발전기 계측시스템 모식도(울진 2)

〈표 5〉 영광 5호기 EDG 가동전 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	0.004	52.5	0.0009	39.3
P2	0.004	51.3	0.0007	37.4
P3	0.006	55.1	0.0011	41.4
P4	0.006	56.0	0.0013	42.6
P5	0.003	50.0	0.0005	35.1
P6	-	-	-	-
P7	0.183	85.2	0.0403	72.1
P8	0.003	48.0	0.0005	34.8

〈표 6〉 영광 5호기 EDG 가동중 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	0.187	85.4	0.0672	76.6
P2	0.140	82.9	0.0543	74.7
P3	0.117	81.4	0.0421	72.5
P4	0.269	88.6	0.0880	78.9
P5	0.147	83.4	0.0506	74.1
P6	0.133	82.5	0.0467	73.4
P7	1.056	100.5	0.3619	91.2
P8	0.071	77.1	0.0214	66.6

초부분과 바닥면(P8)이 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 반면 가동중에는 기초블럭에서의 진동 값이 0.117m/s²에서 0.269m/s²의 범위를 갖는데 반해서 바닥면에서는 0.071m/s²의 값을 나타내므로 앵커볼트로 고정시킨 경우에도 진동저감 효과가 있는 것을 알 수 있다. 앵커볼트를 이용하여 발전기를 고정시키는 경우에도 방진고무패드를 발전기와 기초 사이에 설치하기 때문에 이것에 의해서 어느 정도의 진동저감 효과가 나타난 것이다.

영광 5호기 비상디젤발전기의 가동중 기초에서의 진동측정결과를 그림 7에, 바닥면에서의 진동측정결과를 그림 8에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 앵커볼트를 이용하여



〈그림 7〉 영광 5호기 기초에서의 진동(P1, 가동중)



〈그림 8〉 영광 5호기 바닥에서의 진동(P8, 가동중)

고정한 경우에도 어느 정도의 진동저감효과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 주파수 영역에서의 결과를 비교해 보면 저주파수 영역에서는 진동저감이 크게 나타나는 것을 알 수 있으나 100Hz로 가까이 갈수록 기초의 진동레벨과 유사한 수준으로 증가하는 것을 알 수 있다. 앵커볼트로 고정된 경우 기초와 비상디젤발전기의 연결부에서 강성이 크기 때문에 고주파 영역에서는 진동저감효과가 적게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 비상디젤발전기 엔진의 회전수인 514RPM의 절반이 4.28Hz의 배수에서 공진주파수가 발생하는 것을 알 수 있다.

울진 3호기 비상디젤발전기의 가동전 및 가동중 진동 값을 시간영역과 주파수 영역에서의 최대값으로 각각 표 7과 표 8에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 가동전의 진동 값은 기초블록의 경우 0.017m/s²에서 0.031m/s²의 범위를 갖는 것을 알 수 있다. 영광 5호기의 경우와 비교하였을 때 배경진동의 수준이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 또한 영광 5호기의 경우는 기초블럭과 바닥면에서의 진동레벨이 유사한 수준이었지만 울진 3호기의 경우는 기초에서의 진동레벨이 2-3배 정도 큰 값으로 관측되는 것을 알 수 있다. 비상디젤발전기 본체가 스프링과 댐퍼를 이용한 제진장치를 설치하였으므로 주변의 소음과 진동에 의해서 발전기 본체에 진동이 발생하는 것으로 판단된다. 가동중에는 기초에서의 진동 값이 2.879m/s²에서 6.242m/s²의 범위를 가지므로 앵커 고정된 경우에 비하여 10배 이상의 큰 진동을 하는 것을 알 수 있다. 그러나 바닥면에서의 진동측정값은 0.048m/s²로서

〈표 7〉 울진 3호기 EDG 가동전 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	0.023	67.3	0.0051	54.2
P2	0.024	67.7	0.0042	52.6
P3	0.031	69.7	0.0075	57.6
P4	0.023	67.2	0.0057	55.2
P5	0.017	64.6	0.0050	54.1
P6	0.027	68.7	0.0055	54.9
P7	0.036	71.1	0.0033	50.4
P8	0.008	58.2	0.0033	50.5

〈표 8〉 울진 3호기 EDG 가동중 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	3.202	110.1	1.3599	102.7
P2	2.879	109.2	1.3480	102.6
P3	6.242	115.9	3.0339	109.6
P4	4.807	113.6	2.0520	106.2
P5	3.072	109.7	1.3192	102.4
P6	5.367	114.6	2.0278	106.1
P7	1.997	106.0	0.9339	99.4
P8	0.048	73.7	0.0218	66.8

앵커 고정된 경우의 절반정도에 그치는 것을 알 수 있다. 가동전 바닥면에서의 진동은 오히려 울진 3호기의 경우가 두 배 이상 크게 나타나고 있음에도 불구하고 가동중에 바닥면

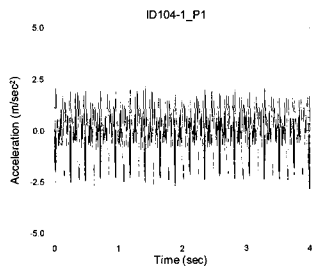
에서의 진동이 울진 3호기에서 절반정도로 감소하고 있는 것은 울진 3호기에 사용한 스프링과 댐퍼시스템이 진동저감용으로 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10에 울진 3호기에서 가동중에 기초와 바닥면에서 측정한 가속도 시간이력 결과를 도시하였다. 그림 9의 기초에서의 응답과 그림 10에서의 바닥면에서의 응답을 비교하면 시간영역에서 진동저감효과가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 FFT에 의한 주파수 영역에서의 응답을 비교해 보면 전 주파수 영역에서 고르게 진동저감효과가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 영광 5호기의 경

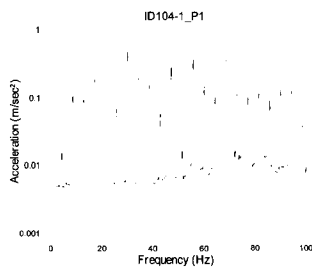
우와 동일하게 4.28Hz의 n배에 해당하는 주파수에서 탁월 주파수가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

3.3.2 울진 2호기 비상디젤발전기

울진 2호기 비상디젤발전기의 가동전과 가동중 진동 값을 시간영역과 주파수 영역에서의 최대값으로 각각 표 9와 표 10에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 가동전의 진동 값은 기초블록의 경우 0.015m/s²에서 0.126m/s²의 범위를 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 앞선 영광 5호기와 울진 3호기의 경우보다 큰 값으로서 울진 2호기에는 코일스프링만을 사용하였으므로 댐퍼에 의한 저감효과가 없기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단된다. 반면 페디스탈 위(P7)와 페디스탈 아래 바닥면(P8)에서의 진동 값은 가동전에도 기초 위에서의 진동 값의 20% 수준인 것으로 나타내서 울진 3호기와 같이 스프링에 의해서 면진되어 있으므로 기초블럭을 포함한 EDG시스템이 주변 진동에 더 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 페디스탈 윗부분의 진동이 아래부분 바닥면에 비해서 진동 값이 크게 관측되는 것은 페디스탈에 의해서도 진동저감의 효과가 있음을 알 수 있다. 가동중에는 기초에서의 진동 값이 2.579m/s²에서 6.827m/s²의 값으로 증가하지만 바닥면에서는 0.109m/s²를 나타내고 있으므로

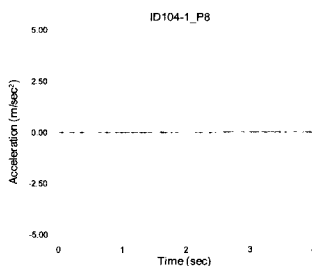


(a) 시간영역

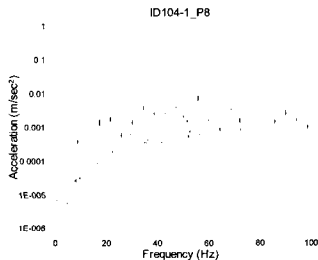


(b) 주파수 영역

〈그림 9〉 울진 3호기 기초에서의 진동(P1, 가동중)



(a) 시간영역



(b) 주파수 영역

〈그림 10〉 울진 3호기 바닥에서의 진동(P8, 가동중)

〈표 9〉 울진 2호기 EDG 가동전 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	0.061	75.7	0.048	73.6
P2	0.097	79.7	0.086	78.7
P3	0.067	76.5	0.049	73.8
P4	0.015	63.6	0.005	53.4
P5	0.105	80.4	0.085	78.6
P6	0.126	82.0	0.096	79.6
P7	0.020	65.9	0.005	54.4
P8	0.014	62.6	0.004	51.6

〈표 10〉 울진 2호기 EDG 가동중 진동

측정 위치	시간이력		주파수 분석(RMS)	
	Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]	O.A. [m/s ²]	O.A.[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
P1	4.181	112.4	1.843	105.3
P2	2.579	108.2	0.711	97.0
P3	5.330	114.5	2.326	107.3
P4	6.827	116.7	2.313	107.3
P5	2.637	108.4	0.655	96.3
P6	5.031	114.0	2.550	108.1
P7	0.177	85.0	0.061	75.7
P8	0.109	80.8	0.033	70.3

전반적으로는 약 95% 이상의 진동저감효과가 있는 것을 알 수 있다.

그림 11에 올진 2호기 기초(P1)와 페디스탈 윗부분(P7) 그리고 바닥면(P8)에서의 진동측정결과를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 올진 2호기의 경우는 엔진의 회전속도인 1200RPM의 절반이 10Hz에서 탁월주파수가 나타나는 것을 알 수 있으며 전 주파수 영역에서 진동저감효과가 탁월하게 나타나는 것을 알 수 있다. 시간영역에서의 결과를 보면 전 시간영역에서 특이점이 발생하지 않고 고르게 진동값이 나타나는 것을 알 수 있으며, 주파수 영역의 결과를 보면 공진영역에서의 진동값이 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

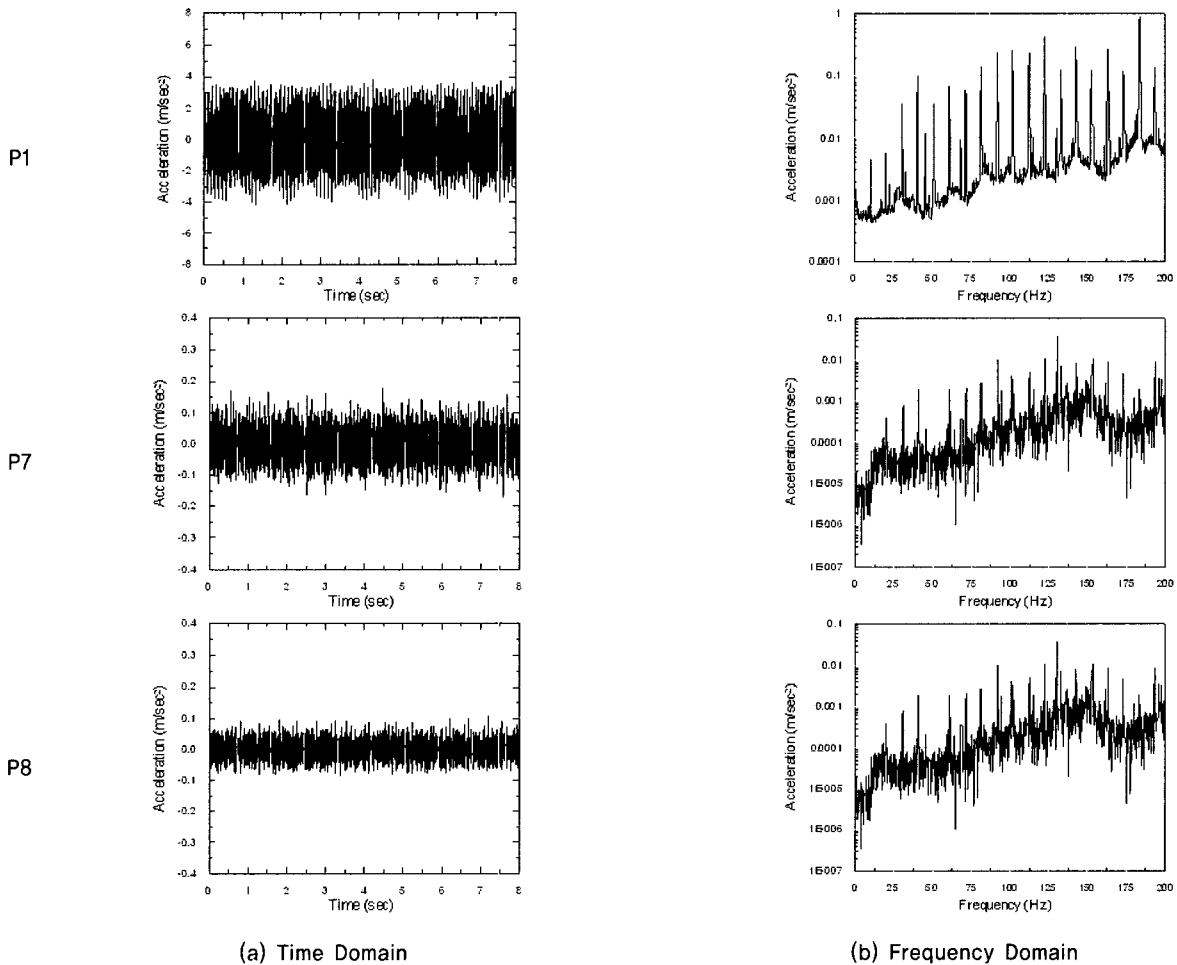
올진 2호기의 경우는 seismic mass를 이용하여 진동저감장치를 사용했기 때문에 수평방향 거동도 살펴보기 위하여 수평방향의 가속도 응답을 계측하였다. 비상디젤발전기의 정상가동중에 본체의 동일지점에서 연직방향과 수평 횡방향과 수평 종방향의 가속도 응답을 계측하여 시간영역에서의 최대값을 표 11에 정리하였다. 표 11에서 보는 바와 같이 연직방향의 가속도 응답이 가장 작고 수평 횡방향(X), 수평 종방향(Y)의 순서로 가속도 응답이 크게 나타나는 것

을 알 수 있다. 따라서 회전기계의 진동저감을 고려할 때 단지 연직방향 진동만을 고려해서는 효과적으로 진동저감 효과를 볼 수 없다는 것을 알 수 있다.

3.2 변위 응답

3.2.1 올진 3호기 비상디젤발전기

스프링과 점성댐퍼가 설치되어 있는 올진 3호기 비상디젤발전기의 가동중 거동을 분석하기 위하여 변위응답을 계측하였다. 표 12에 가동전과 가동중 최대변위를 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 수평 종방향 거동은 유사한 값으로 나타나는 반면 횡방향은 두 지점에서의 최대변위가 0.159mm와 0.070mm로서 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 비상디젤발전기에서 발전기와 엔진이 무게 차이로 인하여 무게중심이 발전기 쪽에 치우쳐 있기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단되며 스프링을 배치할 때 이러한 사항을 고려해서 배치해야 할 것으로 판단된다. 그러나 그 변위의 차이가 매우 작은 값이므로 전체 시스템의 거동에 문제가 되는 수준인 것으로 판단되지는 않는다. 연직방향 변위도 앞



(그림 11) 올진 2호기 EDG 가동중 진동측정 결과

〈표 11〉 횡방향 가속도 응답

측정방향	측정위치	시간이력	
		Peak [m/s ²]	Peak[dB] [Ref=1×10 ⁻⁵]
수직(Z)	M1	3.719	111.4
수평(X)	M2	7.651	117.7
수평(Y)	M3	9.734	119.8

〈표 12〉 울진 3호기 EDG 변위응답

가동전	측정방향		측정위치	최대변위[mm]
	수평방향	종방향		
가동중	수평방향	종방향	P3	0.004
		종방향	P6	0.004
	수평방향	횡방향	P3	0.159
		횡방향	P4	0.070
	연직방향	종방향	P3	0.048
		종방향	P6	0.050
			P3	0.249
			P6	0.164

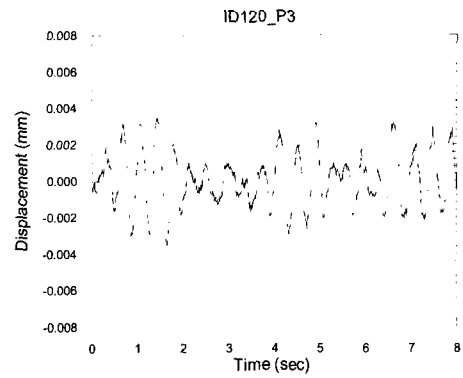
뒤 두 지점에서의 최대변위가 0.1mm 정도 차이가 나는 것은 수평 횡방향의 경우와 동일한 이유인 것으로 판단된다. 그러나 이 경우에도 동일하게 변위의 차이가 크지 않으므로 전체적으로 안정적으로 거동하고 있는 것으로 판단된다.

그림 12와 그림 13에 가동전 및 가동중의 변위응답을 도시하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 가동전의 변위는 두 지점에서 유사하게 나타나고 있으며 전체적으로 매우 작은 변위로 미소하게 움직이고 있는 것을 알 수 있다. 그림 13에서는 가동중 수평 횡방향 변위 시간이력을 도시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 지점에서의 변위 응답이 큰 차이를 보이고 있지만 그 값은 실제로 0.1mm가 안 되는 값으로서 미소한 것을 알 수 있다. 또한 두 지점에서의 변위 양상이 180°의 위상차이가 발생하는 것으로 판단되며 미소하게 Yawing 거동을 하는 것을 알 수 있다. 그러나 최대 변위 진폭이 0.3mm 이내의 거동을 보이고 있으므로 회전각은 미미한 것으로 판단된다.

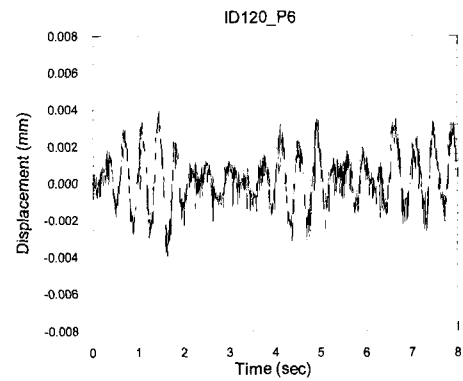
3.2.2 울진 2호기 비상디젤발전기

울진 2호기 비상디젤발전기에 대한 변위응답 시간이력을 관측하였다. 첫 번째와 마지막 페디스탈에서 페디스탈과 기초블럭과의 상대변위를 관측하였다. 최대변위응답을 표 13에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 연직방향과 수평 횡방향, 수평 종방향 모두 두 지점에서 관측되는 최대변위가 유사한 것으로 나타나고 있어서 전체 시스템이 안정적으로 거동하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 14에서는 비상디젤발전기가 정지 상태에서부터 정상 가동에 이를 때 까지 두 지점에서의 연직방향 변위응답시간이력을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 정지 상태에

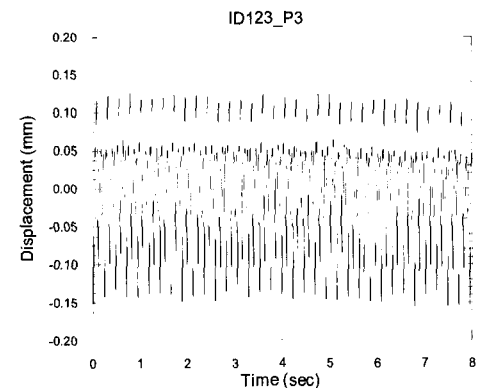


(a) P3

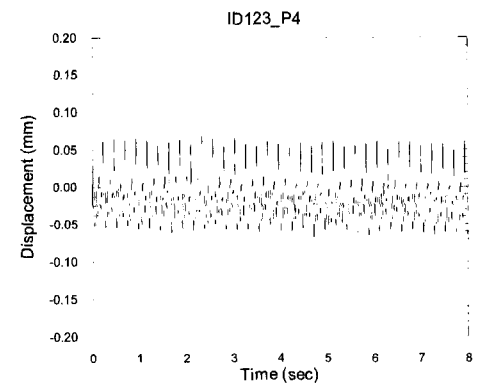


(b) P6

〈그림 12〉 울진 3호기 가동전 변위응답(연직방향)



(a) P3

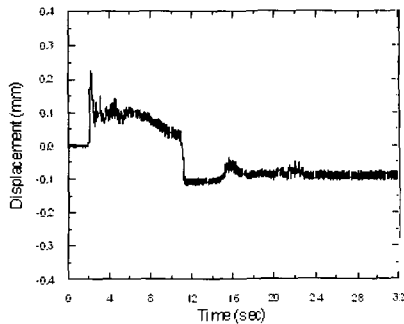


(b) P4

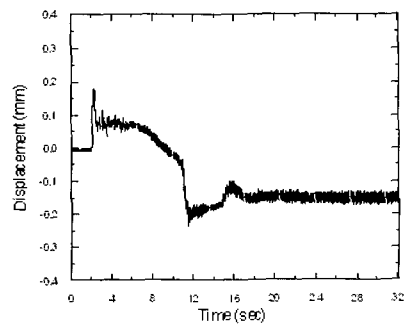
〈그림 13〉 울진 3호기 가동중 변위응답(수평 횡방향)

〈표 13〉 울진 2호기 EDG 변위응답

방향	위치	최대변위
UZ	D1	0.0161mm
	D2	0.0198mm
UX	D1	0.0095mm
	D2	0.0099mm
UY	D1	0.0065mm
	D2	0.0053mm



(a) D1



(b) D2

〈그림 14〉 울진 2발전소 EDG 가동중 변위응답(연직방향)

서 가동시 transient 하중의 발생에 의해서 최대 응답이 있은 후 정상운전 시에는 안정적인 변위거동을 보이는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 D1 지점에서는 0.1mm 정도의 변위를 중심으로 진동하는 것을 알 수 있으며, D2 지점에서는 0.15mm를 중심으로 진동하고 있는 것을 알 수 있다. 수렴하고 있는 최대변위값은 전체 시스템의 크기에 비하여 차이가 작은 것으로 판단되며, 진폭은 0.02mm 정도로 유사하게 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 변위의 위상이 180°의 차이를 보이는 것으로 보아 기초블럭을 포함한 전체 시스템이 rolling 거동을 하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 최대진폭이 울진 3호기의 경우와 비교하여 1/10 정도에 불과한 것으로 매우 안정적 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 울진 2호기의 경우는 엔진이 2개에 발전기가 한 대가 연결된 형태의 비상디젤발전기로서 전체 시스템의 무게 중심에 편심이 적으며, 또한 seismic mass의 영향으로 인하여 무게중심이 낮아짐에 따른 안정적 거동을 하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 결과 울진 3호기 비상디젤발전기의 배경진동이 영광 5호기의 경우에 비해서 상당히 크게 나타나지만 가동중 진동은 울진의 경우가 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있었다. 울진 3호기의 경우 비상디젤발전기의 가동에 의해서 진동이 1.5배 증가한 반면 영광의 경우는 24배가 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 울진 3호기 비상디젤발전기에 설치되어 있는 스프링-점성댐퍼 시스템의 진동저감효과가 확실히 나타나고 있음을 보여주고 있다. 앵커로 고정된 경우(영광 5호기 EDG)에는 50%, 스프링과 점성댐퍼를 사용한 경우(울진 3호기 EDG)에는 90%의 진동저감효과 있는 것을 확인 할 수 있었다.

울진 2호기 비상디젤발전기의 경우 방진마운트의 유연성으로 인하여 기초블럭에서의 진동레벨이 증가하였지만, 기초구조의 안정성으로 인하여 울진 3호기 디젤발전기의 기초블럭 진동레벨보다 낮게 측정되었음을 알 수 있고, 최대진동값을 비교하였을 때 발생 진동을 4%로 감소시키므로 방진시스템의 효율이 좋은 것으로 판단된다. 또한 변위시간이력의 분석을 통한 거동분석결과 울진 3호기와 같이 비상디젤발전기 시스템에 강재 기초를 설치하여 스프링-댐퍼 시스템을 설치한 경우보다 seismic mass를 설치한 울진 2호기의 비상디젤발전기 시스템이 가동중 진동에 대하여 안정적 거동을 하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Kumar, J. and Reddy, C.O., "Dynamic Response of Footing and Machine with Spring Mounting Base," *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24: 15-27.
2. Liu, W. and Novak, M., "Dynamic Behavior of Turbine-Generator-Foundation Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995, pp. 339-360.
3. Macinate, J.A., *Seismic Mountings for Vibration Isolation*, John Wiley & Sons, 1984.
4. 이종립, 장승필, 진동저감시스템을 갖춘 회전기계기초의 지진하중에 대한 동적거동, 대한토목학회논문집, 제17권 제II-2호, 1997, pp. 313-323.
5. 장승필, 임성순, 조대연, 이종립, 진동저감요소를 갖춘 회전기계기초의 동적해석, 한국강구조학회논문집, 제3권, 제3호, 1991, pp. 175-188.