



# 디젤발전기의 내진용 방진베드 시스템의 내진성능평가

## Seismic Performance Evaluation of Isolated Common Bed System for Diesel Engine Generator

장 성 진\* · 전 범 규† · 박 동 옥\* · 백 은 림\*

Sung-Jin Chang\*, Bub-Gyu Jeon†, Dong-Uk Park\* and Eun-Rim Baek\*

(Received November 2, 2018 ; Revised November 26, 2018 ; Accepted November 26, 2018)

**Key Words** : Isolated Common Bed System(방진베드 시스템), Seismic Performance Evaluation(내진성능평가), Diesel Engine Generator(디젤발전기)

### ABSTRACT

The seismic performance of a vibration isolator bed system for emergency diesel engine generators was evaluated in this study. A shaking table test and numerical analysis were used for the evaluations. The ICC-ES AC156 test method was applied to the shaking table test, as recommended by ASCE 7. For inducing the input spectral acceleration, the generator was assumed at the highest location of a building. After the shaking table test, structural and functional rigidities were observed by visual inspection and functional testing. It was possible to evaluate the structural rigidity of the vibration isolator bed system for emergency diesel generators in greater detail through a numerical analysis.

### 1. 서 론

2016년 9월 경상북도 경주에 규모 5.8의 지진과 2017년 11월 경상북도 포항에 5.4의 지진을 포함하여 규모 5 이상의 지진이 빈번히 발생함에 따라 사회적으로 건물과 비구조요소의 안전문제에 관심이 크게 증가하고 있다.

내진설계 의무규정은 1988년에 도입되어 6층 이상 또는 연면적 100 000 m<sup>2</sup> 이상의 건축물에 대해 내진설계를 의무화한 이후로 그 대상을 점차적으로 확대하여 2017년 2월에 2층 이상 또는 500 m<sup>2</sup> 이상의 건축물도 내진설계를 하도록 의무화했다. 건축물의 내진설계가

강화됨에 따라 건물은 내진성능이 확보되었지만 건물에 설치되는 비구조요소의 손실로 인한 인명피해가 발생할 수 있으므로 지진이 빈번히 발생하는 미국, 일본 등의 선진국은 이에 대비하여 비구조요소에 대한 내진기준을 강화하고 있는 추세이다.

지진발생시 전원공급이 상실하면 소방시설의 전원을 확보하기 위하여 비상디젤발전기가 설치되게 된다. 그러나 비상디젤발전기가 내진성능이 확보되지 못한다면 지진발생시 소방시설이 마비되게 되어 지진으로 인한 이차피해를 방지할 수 없다. 따라서 비구조요소 중 비상디젤발전기는 비상시 주요 소방시설을 작동시키는 전원이므로 반드시 내진성능을 갖추어야 한다.

디젤발전기 기초부의 진동저감에 관한 연구와 본체

† Corresponding Author ; Member, Seismic Research and Test Center, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute (KOCED CMI)  
E-mail : bkjeon79@pusan.ac.kr

\* Seismic Research and Test Center, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute (KOCED CMI)

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2018 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

의 소음 및 진동에 관한 연구가 진행되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 국외에서는 원자력발전소에 설치되는 비상디젤발전기 시스템에 대한 내진성능 평가를 수행한 바 있다<sup>(3)</sup>. 국내에서는 기존의 지진하중보다 고주파성분의 영향이 큰 지진에 대한 내진성능평가가 진행된 바 있다<sup>(4)</sup>.

디젤발전기의 경우 모터에 의한 진동이 많이 발생하므로 스프링과 같은 방진시스템이 바닥에 설치되는 경우가 많다. 그러나 소방시설의 내진설계 기준<sup>(5)</sup>에 따르면 비상전원은 지진발생시 전도되지 않도록 설치하는 것을 규정하고 있다. 따라서 지진에 의한 과도한 응답 발생을 방지하기 위하여 내진스토퍼를 설치한 방진베드 시스템이 필요할 것으로 판단된다.

1000 kW 이상의 비상디젤발전기는 장비의 규격이 진동대 사양을 초과하므로 국내에서 시험이 불가능하다. IEEE Std 693<sup>(6)</sup>과 방송통신설비의 내진 시험방법<sup>(7)</sup> 등에서는 시험적인 방법으로 성능검증이 불가능한 경우 해석검증으로 내진성능을 평가할 수 있도록 권고하고 있다. 따라서 이러한 경우, 해석검증으로 내진성능을 평가하여야 할 것이다. 이 연구에서는 진동대 시험결과를 바탕으로 해석적인 접근으로 디젤발전기의 방진베드 시스템의 내진성능평가를 수행할 수 있음을 증명하고, 진동대 장비의 규모를 초과하는 동종의 시험대상 에 대하여 유한요소 해석을 통한 지진안전성 평가를 수행할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 시험 개요

### 2.1 시험방법

이 논문에서는 ASCE에서 추천하고, OSHPD에서 적용하여 사용하고 있는 비구조요소의 진동대 시험 방법인 ICC-ES AC156<sup>(8)</sup>에 따라 비상디젤발전기의 내진성능시험을 수행하였다.

시험을 통한 내진성능평가를 위하여 공진탐색시험과 지진모사시험을 수행하였다. 공진탐색시험은 각 축방향에 대하여 독립적으로 수행하였으며, 주파수 범위를 1 Hz부터 50 Hz까지 수행하여 입력신호와 출력신호의 TR(transfer function)으로 공진주파수를 결정하였다.

지진모사시험은 3축 동시 가진으로 요구응답스펙트럼을 만족하도록 시험을 수행하였다. 시간이력의 길이는 30초이며 강진지속시간은 20초이다. 각 축방향 시간이력간의 상관관계함수는 ASCE 4-98<sup>(9)</sup>에서

권고하는 0.3이하가 되도록 하였다.

디젤발전기의 이상여부를 판단하기 위하여 지진모사시험 후 기능검사와 육안검사를 수행하였다.

### 2.2 시험체

시험에 사용한 내진 기능을 갖춘 디젤엔진 발전기는 발전기, 엔진, 라디에이터, 커먼베드, 방진스프링, 충격흡수장치, 스토퍼로 구성되었다. 총 12개의 방진 스프링이 하부에 설치되었으며, 충격흡수장치는 6개소로 바닥판에 고정되었다. 스토퍼 8개소는 몸체의 측면에 설치되어 발전기가 원위치를 이탈하는 것을 방지하고 있다. 방진스프링, 충격흡수장치, 스토퍼는 바닥판과 M12 볼트로 체결되었다.

Fig. 1은 내진 기능을 갖춘 디젤엔진 발전기의 진동대 설치사진이며, Table 1은 디젤엔진 발전기의 규격이다.

### 2.3 지진하중

국내 건축구조기준<sup>(10)</sup>에 따라 단주기설계스펙트럼 가속도( $S_{Ds}$ )를 식 (1)과 같이 도출하였다. 지진구역계수( $S$ )는 지진구역 I로 가정하여 0.22 g를 적용하였으며, 단주기 지반증폭계수( $F_a$ )는 단단한 토사 지반( $S_D$ )으로 가정하여 1.5를 적용하였다.

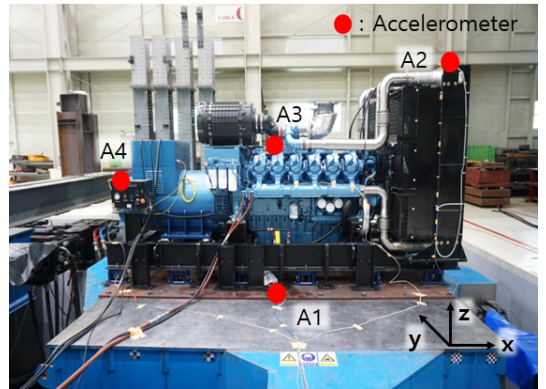


Fig. 1 Diesel engine generator

Table 1 Tested specimen specification

Specimen name	Dimensions(mm)			Weight(kg)
	Length	Width	Height	
Diesel engine generator	4470	1665	2146	8830

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 = 0.55 \tag{1}$$

ICC-ES AC 156에서 제시하고 있는 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 수평방향  $A_{FLX-H}$ ,  $A_{RIG-H}$ 를 계산하였으며,  $A_{FLX-H}$ 의 최대값은 1.6  $S_{DS}$ 를 초과할 수 없다. 여기서  $z/h$ 는 구조물과 비구조요소의 설치위치의 비이며 모든 층에 시공될 수 있으므로 1로 가정하였다.  $A_{FLX-V}$ 와  $A_{RIG-V}$ 는 각각  $S_{DS}$ 의 67%,  $S_{DS}$ 의 27%이다. RRS의 주요 파라미터는 Fig. 2 및 Table 2와 같다.

$$A_{FLX-H} = S_{DS} \left( 1 + 2 \frac{z}{h} \right) \tag{2}$$

$$A_{RIG-H} = 0.4 S_{DS} \left( 1 + 2 \frac{z}{h} \right) \tag{3}$$

### 3. 실험장비 및 계측계획

#### 3.1 실험시설 및 장비

지진모사시험은 지진방재연구센터의 6자유도 진동대를 이용하여 수행되었다. 지진방재연구센터의 6자유도 진동대는 국내 최고 수준의 진동대 장비로서 최대 적재하중은 30 ton이고, 크기는 4.0 m × 4.0 m이다. 최대 가속도는 수평 3.0 g, 수직 5.0 g이며 최대변위는 수평 ± 300 mm, 수직 ± 150 mm이다.

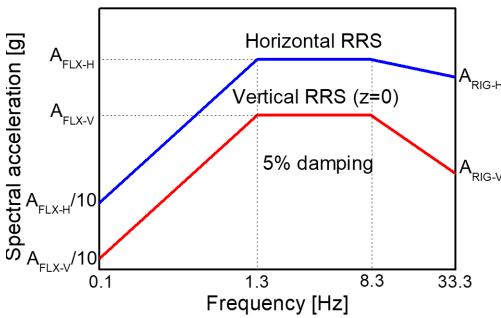


Fig. 2 Required response spectrum

Table 2 Shake table test parameter

$S_{DS}$ (g)	$z/h$	Horizontal		Vertical	
		$A_{FLX-H}$ (g)	$A_{RIG-H}$ (g)	$A_{FLX-V}$ (g)	$A_{RIG-V}$ (g)
0.55	1	0.88	0.66	0.36	0.14

### 3.2 계측 계획

시험에 사용된 모든 계측기기는 ISO 17025<sup>(11)</sup>에 준하는 품질관리가 이루어진 장비들이며, 입력가속도의 적절성을 확인하기 위하여 진동대 바닥에 3축 가속도계를 설치하였다. Fig. 1과 같이 시험대상설비인 디젤발전기의 웬, 엔진, 컨트롤패널 상부에 3축 가속도계를 각각 설치하였다. 시험 전과 후의 기능시험을 수행하여 디젤발전기의 기능의 연속성을 확인하였다. 발전기에서 출력되는 AC220V를 외부에 설치된 AC/DC transducer를 통하여 출력되고 이를 AC전압을 DC 전압으로 변환하여 전압전류기록계를 통하여 모니터링 하였다.

## 4. 시험결과 및 분석

#### 4.1 공진탐색시험

공진탐색시험으로 진동대에서 입력된 가속도(a)에 대한 센서가 설치된 각 위치에서 응답가속도(b)의 전달함수를 산정함으로써 디젤발전기의 공진주파수를 결정하였다. 전달함수( $T_{ab}$ )는 식 (4)와 같이 입력된 신호의 power spectral density( $P_{aa}$ )에 대한 입·출력신호의 cross power spectral density( $P_{ba}$ )에 의해 계산된다.

$$T_{ab}(f) = \frac{P_{ba}(f)}{P_{aa}(f)} \tag{4}$$

공진 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 신호는 symmetric hamming window가 적용되었다. 공진 검색 시험의 결과는 Table 3과 같다.

#### 4.2 지진모사시험

디젤발전기의 지진에 대한 성능을 확인하기 위하여 6 DOF 진동대에 디젤발전기가 설치된 상태에서 요구응답스펙트럼을 만족하는 지진을 모사하였다. ICC-

Table 3 Resonance frequency

Direction	Resonance frequency (Hz)		
	Test	Eigenvalue analysis	Difference(%)
X	3.75	3.50	6.67
Y	2.75	2.67	2.91
Z	5.00	4.63	7.40

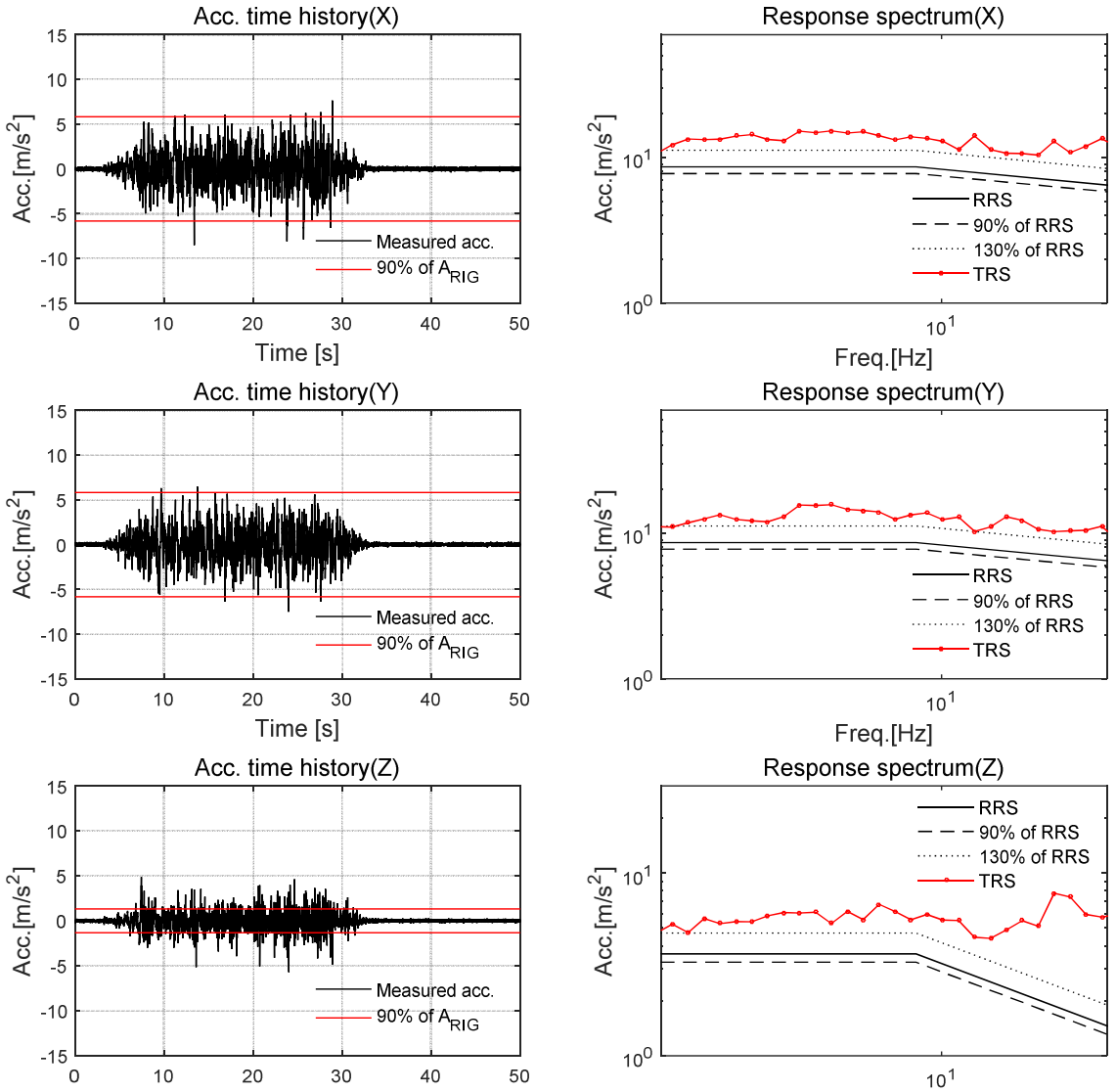


Fig. 3 Acceleration time history, TRS and RRS

ES AC 156에 따라 분석주파수 간격은 1/6 octave로 설정하였으며, 감쇠비는 요구응답스펙트럼과 동일한 5%로 하였다. 시험응답스펙트럼(TRS, test response spectra)과 요구응답스펙트럼(RRS, required response spectra)의 비교 결과는 Fig. 3과 같이 모든 관심영역 대역에서 TRS는 RRS를 포락하였다. 시간이력의 최대값이 ZPA(zero period acceleration)의 90%를 초과하고 있음을 확인하였다. 따라서 ICC-ES AC 156의 포락조건 및 시간이력 요구사항을 모두 만족하도록

시험 가진은 성공적으로 이루어졌다.

#### 4.3 기능검사 및 육안검사

시험 후 육안검사를 수행하여 디젤발전기의 파손 및 변형 발생여부를 점검하였으며 디젤발전기의 전원을 가동시켜 기능의 연속성을 확인하였다,

모든 시험 종료 후 수행된 육안검사서서 디젤발전기의 변형, 주요 부품의 이탈, 앵커부 또는 주요 부재의 파손 등은 발견되지 않았다. 그리고 Fig. 4의 시험 전

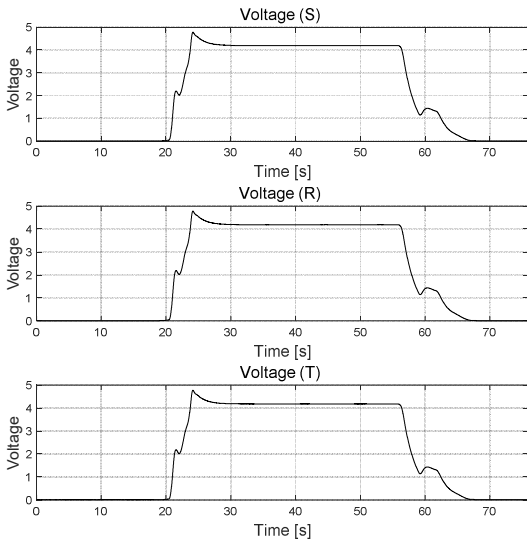


Fig. 4 Functional test before seismic test (on-off)

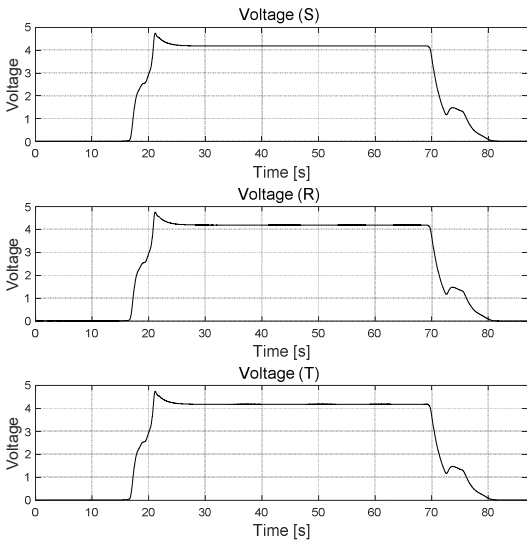


Fig. 5 Functional test after seismic test (on-off)

기능검사 결과와 Fig. 5의 시험 후 기능검사 결과로부터 지진모사시험 후 기능의 연속성이 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 지진에 대한 건전성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.

## 5. 유한요소 해석을 통한 내진성능 평가

### 5.1 모델링

하부의 디젤발전기 커먼베드를 빔요소로 모델링하여 방진스프링, 충격흡수장치, 스톱퍼를 모사하였으

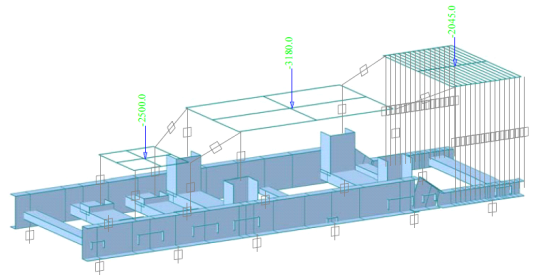


Fig. 6 Diesel engine generator model

며, 발전기와 엔진 등은 Fig. 6과 같이 질량으로 모델링하였다.

방진스프링은 수직 및 수평의 3축 방향에 대하여 탄성 거동하는 탄성링크요소(elastic link element)를 이용하여 이상화하였다. 충격흡수장치는 감쇠계수를 가지는 스프링지점(point spring support)으로 가정하였다. 스톱퍼(stopper)는 2방향(Y, Z)에 대해 강성을 가지는 스프링지점(point spring support)으로 가정하였다. 스톱퍼는 지진시 커먼베드의 횡변위 및 수직변위가 유격 크기 이상 발생하는 경우 추가의 변위 발생하지 않도록 구속하는 역할을 한다. 따라서 지진의 변위가 작을 경우 스톱퍼는 커먼베드의 자유거동을 모사하였으며, 변위가 유격 이상으로 발생하는 경우 구속효과를 모사하기 위해 무한 강성을 가지는 것으로 가정하였다.

디젤엔진발전기는 외부하중에 의해 변형이 발생하지 않는 강체보(rigid beam)로 가정하였다. 디젤엔진발전기의 자중은 강체보의 무게중심에 작용하는 집중하중으로 가정하였으며, 집중하중은 하중조합에서 중력하중 조건과 동적 해석 시 동적 질량(dynamic mass)으로 고려되었다.

### 5.2 해석 결과

해석모델의 고유진동수 및 모드형상을 파악하기 위하여 고유치해석을 수행하였다. 해석모델의 유효성을 평가하기 위하여 각 방향에 대한 고유진동수를 해석 대상기기를 대상으로 공진탐색시험 결과의 공진주파수와 비교하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 해석 결과는 실험결과와 비교하여 최대 7.40 % 수준의 오차율(error ratio, analysis/test)을 나타내어 해석모델이 타당한 것으로 판단된다.

주어진 요구응답스펙트럼에 대한 해석대상기기의

**Table 4** Numerical analysis result

Case no.	Analysis condition	Stress [MPa] (ratio to yield)
1	free bed model	202.0 (0.81)
2	constrained(y) bed mode	192.7 (0.77)
3	constrained(y,z) bed model	111.5 (0.45)

**Table 5** Required force of stopper

Case no.	Axial force [kN] (lateral stopper)	Shear force [kN] (vertical stopper)
1	-	-
2	0.36	27.05
3	51.62	24.44

구조적 건전성을 평가하기 위하여 응답스펙트럼해석을 수행하였다. 해석대상기에서 스토퍼는 커먼베드의 변위량에 따라 구속 여부가 달라지는 경계비선형 특성을 가지기 때문에 단일 응답스펙트럼해석에서는 스토퍼의 거동을 고려하기 어렵다. 따라서 스토퍼의 구속여부에 따라 Table 4와 같이 3가지 경우(스토퍼의 구속을 무시한 경우, Y방향을 구속한 경우, Y와 Z방향을 구속한 경우)에 대해 해석을 수행하였다. 스토퍼의 구속을 무시한 경우(case no. 1)에는 커먼베드의 응력을 주로 검토하고, 스토퍼의 구속을 고려한 경우(case no. 2~3)에는 스토퍼에 요구되는 축력 및 전단력을 산정하였다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 스토퍼의 구속을 무시한 경우 최대 응력이 202 MPa 발생하였으나 항복응력 250 MPa의 80% 수준으로 탄성상태를 유지하였다. 또한 주어진 지진하중 조건에서 커먼베드의 수평(Y) 및 수직(Z) 방향으로 변위를 제어하기 위해 Table 5에 나타난 바와 같이 축강도 51.62 kN, 전단강도 27.05 kN 이상이 요구된다.

## 6. 결 론

디젤엔진발전기의 내진용 방진 베드 시스템의 내진성능을 평가하였다. 내진성능 평가에 사용한 지진하중은 국내 건축구조기준을 바탕으로 연약지반을 제외한 최대지진력에 대응하는 등가정적하중을 계산하였으며, ICC-ES AC 156에 따라 평가대상설비가 임의의 구조물의 요구응답스펙트럼을 작성하였다. 지반

의 지진력은 구조물을 따라 상층부로 전달되며 증폭되므로 엄격한 평가를 위하여 평가대상설비는 구조물의 최상층에 설치되는 것으로 가정하였다.

ICC-ES AC 156의 시험방법에 따라 진동대를 이용한 내진성능 검증시험을 수행하였다. 모든 시험 종료 후 육안으로 식별되는 파손 및 탈락 등은 발생하지 않았으며 발전 기능은 정상 작동하였다.

평가대상설비에 대하여 지진응답해석을 수행하고 구조적 건전성을 평가하였다. 방진베드 시스템은 주어진 하중조건에 대하여 부재별 발생하는 최대응력이 사용 재료의 항복응력 이하로 발생하여 탄성상태를 유지하는 것으로 평가되었다.

유한요소 해석을 이용하여 디젤엔진발전기의 내진용 방진베드 시스템의 구조적인 지진안전성을 평가할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20171510101910, 설계초과 고주파 지진에 대한 원전구조물·기기 내진성능평가 기술개발).

## References

- (1) Lee, D. C., Brennan, M. J. and Mace, B. R., 2006, A Design Criterion for the Vibration Isolation of a Marine Diesel Generator Set, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 329~338.
- (2) Kim, C. S., Choi, H. O. and Jung, H. H., 2014, A Study of Analytical Integrity Estimations for the Structure and Rotor System of an Emergency Diesel Generator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 79~86.
- (3) Kawakami, S., Hara, F., Shibata, H., Ono, T., Horimizu, Y., Ichihashi, T., et al., 1993, Seismic Proving Test of Emergency Diesel Generator System, Proceedings of 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, pp. 37~48.
- (4) Jeong, Y.-S., Baek, E. R., Jeon, B.-G., Gim, M.-U. and Park, D.-U., 2018, Evaluation of Limit State Seismic Performance of Emergency Diesel Generator, Transactions

of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 188~196.

(5) National Fire Agency, 2017, Seismic Design Criteria for the Fire Facility, National Fire Agency Notice No. 2017-1.

(6) IEEE Std 693, 2005, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations.

(7) National Radio Research Agency, 2015, Seismic Test Methods for Broadcasting and Communications Equipment, National Radio Research Agency Notice No. 2015-14.

(8) ICC-ES AC156, 2010, Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components, British Standards.

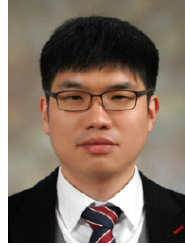
(9) ASCE 4-98, 2000, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures.

(10) Architectural Institute of Korea, 2016, Korean Building Code - Structural, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport Notice No. 2016-317.

(11) ISO 17025, 2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.



**Sung-Jin Chang** received Ph.D. degree in Civil Engineering from Pusan National University with the topic related with B-WIM (bridge weigh in motion) System using reaction force signals of support bearings. He is currently the research associate in seismic research and test center.



**Bub-Gyu Jeon** received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with seismic fragility evaluation of base isolated nuclear power plant piping system. He is currently the technical laboratory manager in Seismic Simulation Test Center. His research interests include seismic evaluation of nonstructural elements and seismic behavior of internal pressured piping system.