https://doi.org/10.21289/KSIC.2022.25.6.1155

내진안정성을 고려한 비상디젤발전기의 방진베드시스템에 관한 연구

A Study on the Seismic Isolated Bed System Considering the Seismic Stability of an Emergency Diesel Generator

하능교[1], 김재실[1*]

Neung-Gyo Ha[1], Chae-Sil Kim[1*]

〈Abstract〉

This study proposes a technology to ensure the seismic stability of a 1,000 kW diesel engine-type emergency generator by applying a seismic isolated bed system. The technology allows the static analysis by making the first natural frequency of the installed entire emergency generator larger than the earthquake cutoff frequency of 33 Hz. First a three dimensional model for the generator was made with simplification for mode analysis. A new bed system with springs, shock absorbers, stoppers was then devised. Next, The mode analysis for the finite element model equipped by the bed system was performed. the 1st natural frequency above 33 Hz, the seismic safety cutoff frequency, was calculated to be 152.92 Hz. Finally, based on the seismic stability theory, the von-Mises equivalent stresses derived by structural analysis under the Upset and Faulted conditions were 0.01603 Mpa, and 32.06 Mpa, respectively. so seismic stability was confirmed.

Keywords : Mode Analysis, Seismic Stability, Emergency Generator

1 국립창원대학교 기계공학부

1* 교신저자, 국립창원대학교 기계공학부, 교수
E-mail: kimcs@changwon.ac.kr

1 Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

1* Corresponding Author, Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National Univ. Professor

1. 서 론

비상발전기는 주요 시설이나 아파트 등에 설치되어 상시 전원이 사고나 고장에 의해 공급되지 못할 경우의 비상상황 발생 시 전원공급을 위한 발전장치이다.

최근 들어 포항 경주 지역 등 다수 지역의 지진 발생으로 더 이상 우리나라도 지진안정국가가 아니라는 경각심이 고취되어 신축 건물의 건설에는 내진설계가 포함되어야 하고 기존의 각종 건물들에도 필요 시 내진 보강공사가 실시되고 있다. 아울러 최근에 설치되는 비상디젤발전기도 내진안정성이 강력하게 요구되고 있다.

그러나 현재 공급되는 비상발전기는 내진 안정성이 확보되지 않은 상태로 설치되고 있어 외부의 강한 진동이나 충격이 가해질 경우 전도되거나 적절한 발전용량을 지속적으로 얻을 수 없는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 대용량에 속하는 1000kW급 비상발전기를 설치할 때 방진베드시스템을 적용시킴으로써 원자력 발전소 설비에 준하는 보수적인 내진안정성을 확보하는 방법을 제시하고자 한다.

먼저 방진베드시스템의 기초설계자료로 활용하기 위하여 현재 방진시스템이 적용되지 않은 비상발전기에 대한 모드해석을 실시한다. 그리고 내진검증이론에 따라 방진베드시스템이 포함된 비상발전기의 첫 번째 고유진동수가 지진 임계주파수인 33Hz 이상이 되도록 방진 스프링, 쇼크-업소버, 내진스토퍼 등을 포함하는 베드 구조물 모델을 제안하고 이 모델에 대하여 비상발전기의 내진 안정성을 판단하고자 한다.

2. 내진검증이론

내진검증은 원자력발전소 및 일반 산업현장의 기기나 구조물이 주어진 설치조건 및 운전 환경조건에서 지진이 발생해도 안전관련 기능에 영향을 미칠 수 있는 구조적인 손상이나 성능저하, 기능상실 등이 없이 목표한 기능을 정상적으로 수행할 수 있음을 해석, 시험, 시험과 해석의 조합, 경험 등 여러 가지 방법으로 입증하는 것을 말한다[1].

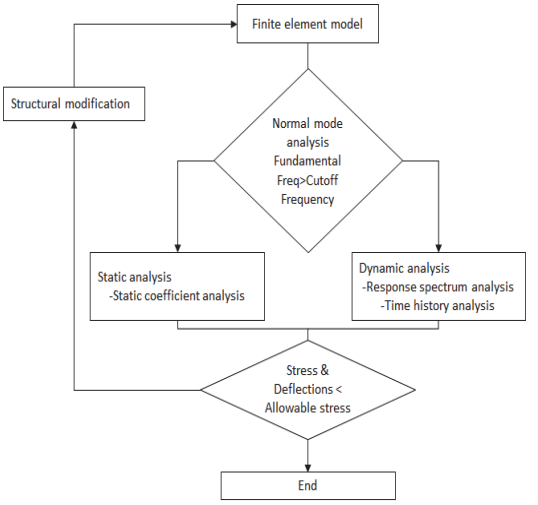

Fig. 1 Diagram of seismic analysis

본 연구에서는 비상발전기의 내진안정성을 아주 보수적으로 원자력 발전소의 비상디젤발전기에 준하는 해석을 통한 방법으로 안전정지지진 발생 시 기능을 유지할 수 있도록 검증하도록 할 것이다.

Fig. 1은 해석적인 방법으로 수행하는 내진검증 절차를 나타내고 있으며 그 특징은 검증대상 시스템의 첫 번째 고유진동수가 지진의 임계주파수인 33Hz 보다 크면 ZPA(Zero phase analysis)가 적용되는 위치의 가속도를 적용한 정적 구조해석을 수행하고 임계주파수보다 작으면 지진의 응답스펙트럼을 적용한 동적해석을 수행하여 안정성을 판단하여야 한다[2].

3. 기존 비상발전기의 모델링 및 해석

Fig. 2는 본 논문에서 연구되는 1,000 kW급

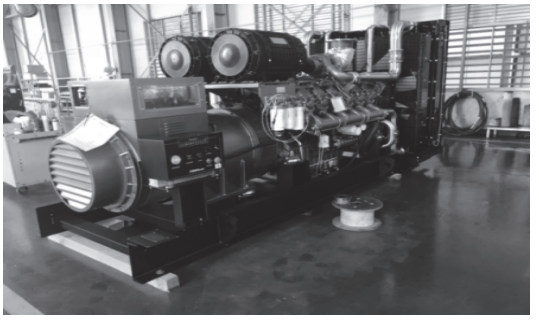

Fig. 2 1000kw emergency diesel generator

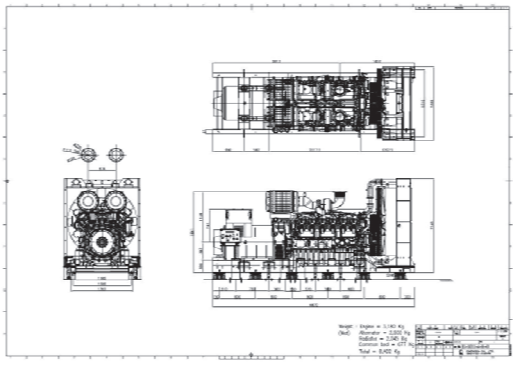

Fig. 3 1000kw emergency diesel generator drawing

비상 디젤 발전기를 나타내고 있다. 비상 디젤 발전기는 여러 가지 부품들로 구성된 매우 복잡한 구조를 갖고 있지만 크게 동체부, 엔진부, 라디에이터부, 베드 등의 주요 구성품으로 나눌 수 있다.

지진의 임계주파수와의 비교를 목적으로 하는 100 Hz 이하의 시스템의 고유진동수를 찾기 위한 모드해석을 위해서는 주요 구성품에 비해 오일 필터, 에어 필터 등과 같은 기타 부속품은 상대적으로 고유진동수가 높고, 또 이 부품들을 유한요소 해석에 적용시키기에는 엘리먼트 수가 기하급수적으로 증가하므로 해석모델을 단순화시킬 필요가 있다.

Fig. 3은 업체에서 제공한 비상디젤발전기의 도면을 나타내고 있다. 이 도면을 기초로 하여 해석을 위한 단순화가 진행된다. 비상발전기를 지지하

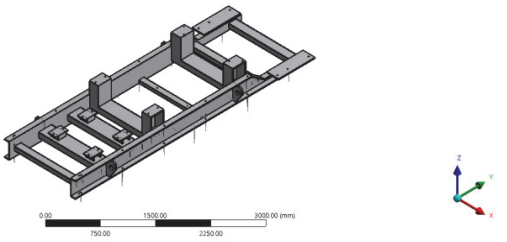

Fig. 4 Simplified modeling of emergency diesel generator bed

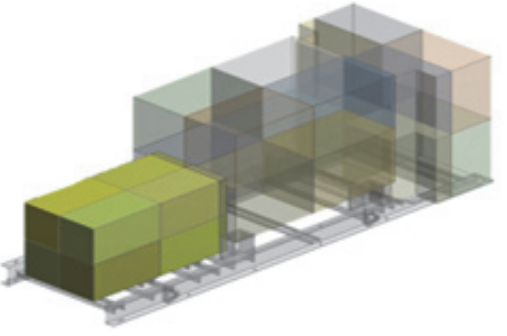

Fig. 5 Simplified modeling of power unit

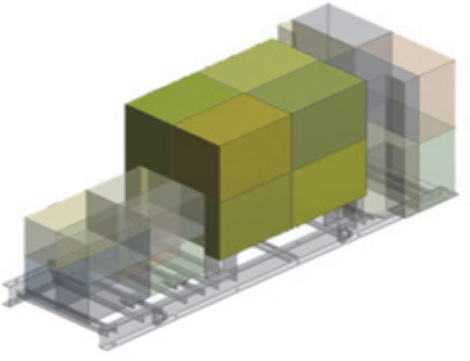

Fig. 6 Simplified modeling of engine parts

는 베드의 경우 Fig. 4와 같이 하나의 조립체로 단순화하여 모델링하였고 베드를 제외한 동체부, 엔진부, 냉각(라디에이터)부의 경우 무게중심의 위치와 관성모멘트 등의 주요 물성치가 고려될 수

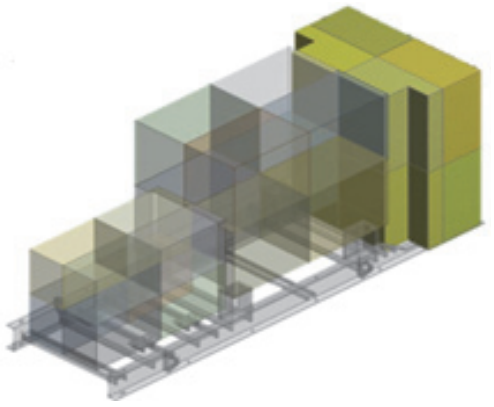

Fig. 7 Simplified modeling of radiator

Table 1. Properties of emergency diesel generator

재질	SS400
Yield Strength [MPa]	250
Modulus of Elasticity (E) [MPa]	210
Poisson's Ratio	0.3
베드 부 Density [kg/m^3]	7850

있도록 블록 형태로 그 형상을 적용하여 각각 Fig. 5, Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 모델링하였다

유한요소 해석을 위하여 비상발전기의 재질에 해당하는 SS400의 물성치를 Table 1과 같이 설정하였다. 또한 동체, 엔진 및 라디에이터 조립체의 실제 무게중심과 해석 모델의 무게중심을 각각 일치시키기 위해 각 조립체는 상부 좌측 앞부분이 1번, 뒷부분이 2번, 상부 우측 앞부분이 3번, 뒷부분이 4번, 하부 좌측 앞부분이 5번, 뒷부분이 6번, 하부 우측 앞부분이 7번, 뒷부분이 8번으로 하여 8파트로 나누어놓은 각 부분의 밀도를 Table 2와 같이 설정하였다.

모드해석을 위하여 사면체 솔리드 모델요소를 사용하였고 Minimum Edge Length를 3.0mm로 Mesh 설정하였다. 비상발전기 모델의 총 Node 수는 97,201개, Element 수는 28,297개가 생성되었다. Fig. 8은 메쉬작업이 이루어진 기존의 베드

Table 2. Adjusted density for each part of the emergency diesel generator

조립체	No. of part	Demsity [kg/m^3]
동체	1	9612.312
	2	9612.312
	3	8438.979
	4	8438.979
	5	7104.753
	6	7104.753
	7	6237.502
	8	6237.502
엔진	1	7919.101
	2	8842.857
	3	6882.957
	4	8079.993
	5	7532.804
	6	8842.857
	7	6547.203
	8	7685.847
라디에이터	1	11912.39
	2	11912.39
	3	5752.143
	4	5752.143
	5	9944.566
	6	9944.566
	7	4802.303
	8	4802.303

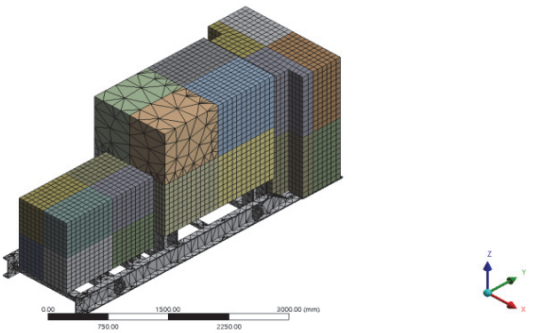

Fig. 8 Mesh of emergency diesel generator

가 적용된 비상발전기의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

방진베드시스템의 적용 전 초기 모델에 대한 구속조건은 베드부가 방진부품의 적용 없이 바닥면에 앵커볼트를 이용하여 베드와 지면을 연결하였음으로 유한요소모델에는 Fig. 9와 같이 앵커볼트 부분의 자유도 전체를 구속하였다.

Fig. 10은 기존의 비상발전기 유한요소모델에 대한 모드 해석의 첫 번째 모드에 대한 해석결과를 나타내고 있다. Table 3은 3번째 모드까지 계산된 고유진동수를 나타내고 있으며 첫 번째 모드는 19.878Hz를 나타내고 있다. 이는 앞서 제시한 내진검증이론인 Fig. 1의 지진 임계주파수인 33Hz보다 낮은 값이므로 내진안정성을 위해 베드의 내진설계가 필요한 것으로 판단된다.

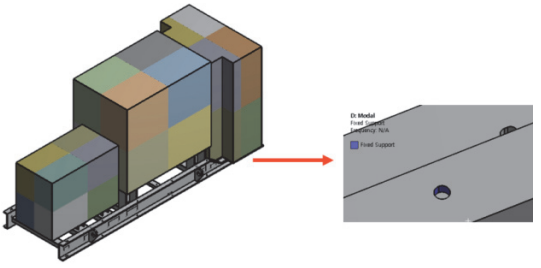

Fig. 9 Fixed supports on anchor bolts

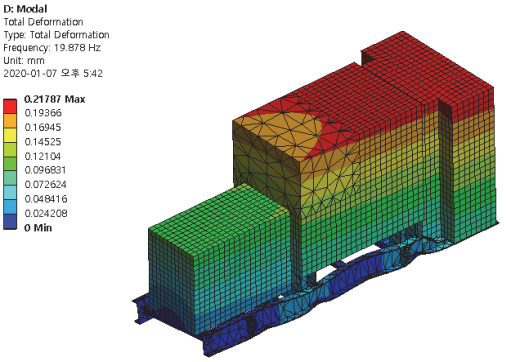

Fig. 10 1st mode for current emergency generator

Table 3. Natural frequency by mode

Mode	Frequency (Hz)
1st	19.878
2nd	26.381
3rd	38.177

4. 베드의 개선과 모델링 및 해석

비상용디젤발전기의 내진안정성을 확보하기 위하여 베드를 방진이 가능하도록 개선 설계를 수행하였다. 중력가속도 방향의 진동을 저감시키기 위해 방진스프링과 댐퍼로 구성된 Shock absorber를 기존의 앵커볼트 체결 부분인 12곳에 적용하고 수평 방향의 진동에 대처하기 위하여 내진스토퍼를 적용한다.

의뢰업체에서 제공한 방진 Shock absorber의 스프링 Stiffness를 588.6N/mm로 설정하였고 Damping값을 2.649N·s/mm로 설정하였다. 그리고 기존 앵커볼트가 적용되는 부분에 Fig. 11과 같이 구속조건을 적용하였다.

Stopper는 지진 시의 진동으로 인한 강한 흔들림이나 이동을 방지하기 위한 철물이다. 일반적으로 방진재의 변형이 어느 한도를 초과하였을 때는 스토퍼에서 작용하게 하고, 통상 운전 시에는 기기와의 사이에 적당한 틈새를 유지하여 설치한다.

Stopper는 무한강성을 가지게 됨으로 Stopper

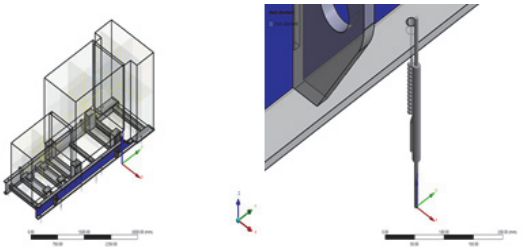

Fig. 11 Fixed supports on shock absorber (12 Point)

의 Stiffness를 1,000,000N/mm로 설정하여 Fig. 12의 도면을 바탕으로 하여 Fig. 13와 같이 수평

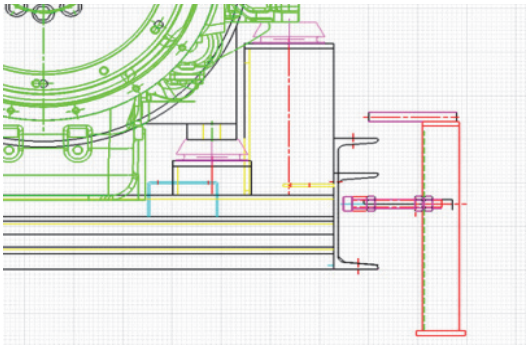

Fig. 12 Stopper drawing

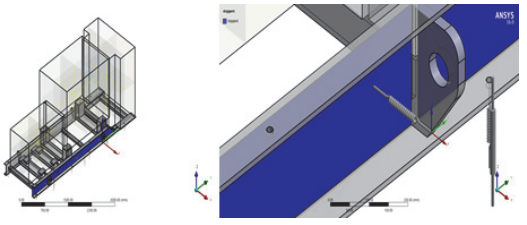

Fig. 13 Fixed supports on stopper

Table 4. Natural frequency of the improved model

Mode	Frequency (Hz)
1st	152.92
2nd	166.36
3rd	223.9

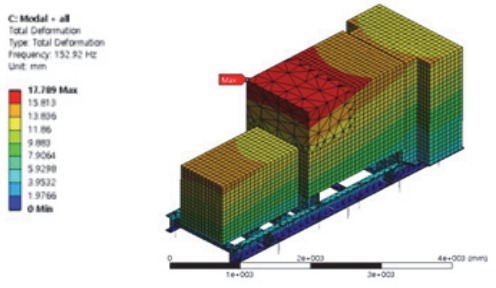

Fig. 14 1st mode for improved model

방향으로 구속조건을 적용하였다.

Fig. 14는 개선된 베드가 적용된 비상발전기 유한요소모델에 대한 모드 해석의 첫 번째 모드에 대한 해석결과를 나타내고 있다. Table 4는 3번째 모드까지 계산된 고유진동수를 나타내고 있으며 첫 번째 모드는 152.22Hz를 나타내고 있다.

이는 앞서 제시한 내진검증이론인 Fig. 1의 지진 임계주파수인 33Hz보다 높은 값이므로 Table 5의 운전조건에 따른 하중을 적용하여 정적 해석을

Table 5. Loading condition and allowable stress

Operating Condition	Loading Combination	Allowable Stress (MPa)	
		ASIC	value
Normal	Dead Weight	0.6×Sy	138
Upset	Dead Weight + OBE Seismic Loads	1.33×0.6×Sy	183.54
Faulted	Dead Weight + SSE Seismic Loads	0.95×Sy	218.5

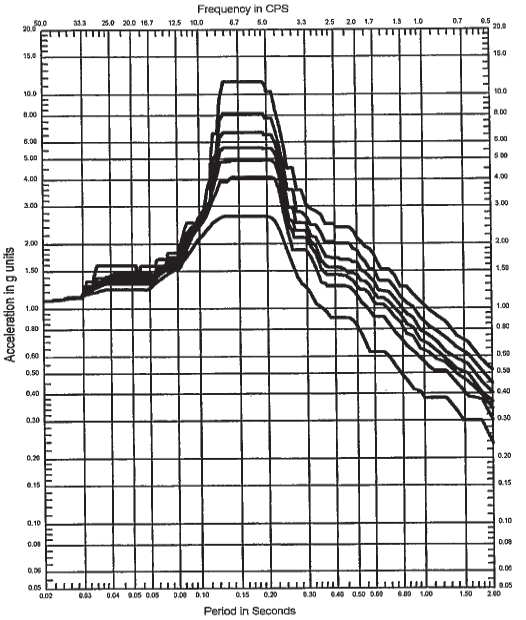

Fig. 15 Floor response spectrum (E-W)

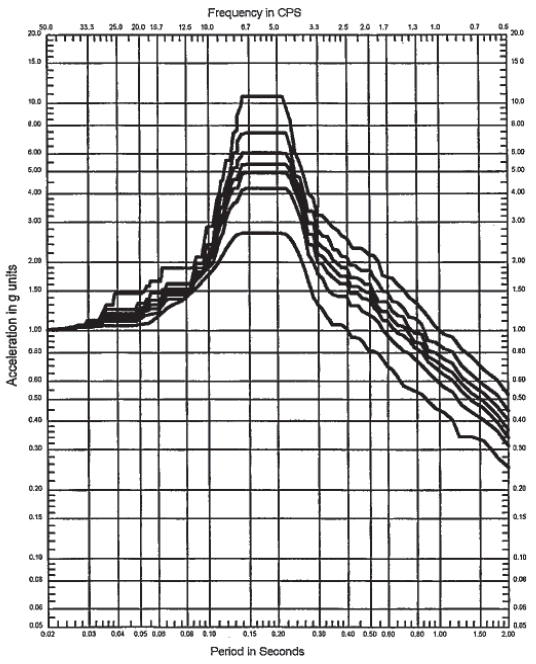

Fig. 16 Floor response spectrum (N-S)

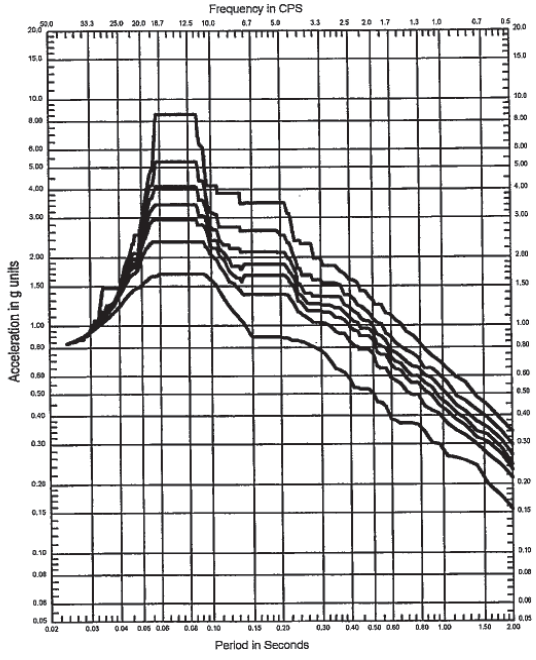

Fig. 17 Floor response spectrum (Vertical)

진행하였다. 운전기준지진 (OBE: operating base earthquake)은 과도한 위험을 초래하지 않고 설비들의 성능이 유지되도록 운전할 수 있는 지진을 말하며 안전정지지진 (SSE : safe shutdown earthquake)은 지역적, 국부적인 지질학적, 지진학적 특성과 국부적인 지반(subsurface material)의 특성을 고려할 경우, 일어날 가능성이 있는 것으로 평가된 최대 지진을 말한다.

그리고 각 운전조건별 허용되는 최대 응력은 ASIC 규격에 규정되어 있는 식에 의해 정의되고 비상발전기의 소재인 SS400의 항복강도(Sy) 230 MPa을 적용하여 계산되었다[4].

Fig. 15에서 Fig. 17은 각각 지진하중으로 입력될 응답스펙트럼(FRS)의 E-W, N-S, Vertical 방향별 데이터이며 그래프는 위로부터 각각 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 15%로 총 7가지의 감쇠비(Damping Ratio)로 이루어져 있다.

비상발전기에는 응답스펙트럼을 적용함에 있어 별다른 조건이 없기 때문에 여러 참고문헌에서와 같이 정적해석을 위해 ZPA가 적용되는 50Hz 위치의 가속도에 대하여 OBE 값은 SSE 2% 의 1/2을 적용하고 SSE 값은 3%을 적용하였다[5,6,7].

Fig. 18과 Fig. 19는 각각 Upset 조건과 Faulted 조건에 대한 해석을 수행하여 도출한

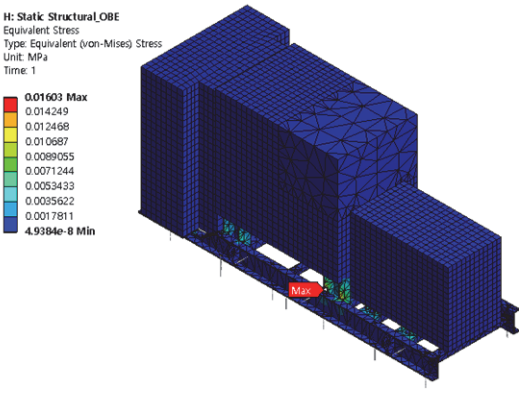

Fig. 18 Structural analysis result under upset condition

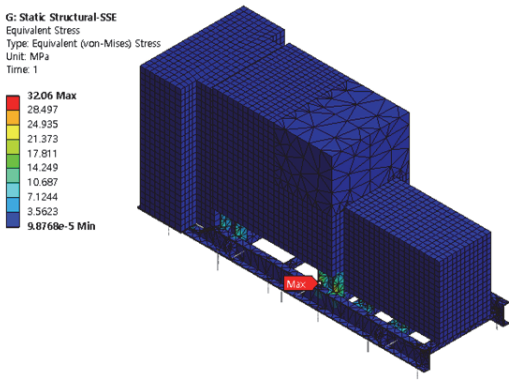

Fig. 19 Structural analysis result under faulted condition

vonMises 등가응력을 나타내고 있으며 Upset 조건에서의 최대값은 0.01603 Mpa, 이고 Faulted 조건에서의 최대값은 32.06 Mpa이다. 이들은 Table 5에 제시된 Upset 조건과 Faulted 조건에서의 각각 허용응력인 183.54 MPa과 218.5 MPa보다 훨씬 낮은 값으로 내진안정성이 확인되었다고 판단된다.

5 결 론

본 논문에서는 방진베드를 적용함으로써 1000 kW급 디젤 엔진형 비상 발전기의 내진 안정성을 확보하는 방법을 연구하였다. 먼저 현재 방진시스템이 적용되지 않은 비상발전기에 대한 모드해석을 실시한 결과 1st Mode의 고유진동수가 내진안전 임계 주파수인 33Hz보다 낮은 값인 19.878Hz가 도출되었다.

그러므로 의뢰 업체의 협의 후 베드부에 스프링, 쇼크업소버, 스토퍼, 등을 적용한 개선모델을 제안하였다. 이 모델에 대한 모드 해석에서 내진안전 임계 주파수인 33Hz 이상인 1st Mode의 고유진동수가 152.92Hz로 계산되었다.

내진안정성이론을 바탕으로 개선모델에 각각 Upset 조건과 Faulted 조건에 대한 구조해석을 수행하여 도출한 vonMises 등가응력이 Upset 조건에서의 최대값은 0.01603 Mpa이고 Faulted 조건에서의 최대값은 32.06 Mpa이다. 이들은 Upset 조건과 Faulted 조건에서의 각각 허용응력인 183.54 MPa과 218.5 MPa보다 훨씬 낮은 값이므로 내진안정성이 확인되었다.

후 기

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

참고문헌

[1] 교육과학기술부(원자력안전과), 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙. (2021).
[2] IEEE, Std. 323-1983 : Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station, (1983).
[3] Nuclear Power Engineering Committee of the IEEE Power Engineering Society, IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment of Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std. 323, (1987).
[4] ASIC, Specification for Structural Steel as contained in the Manual of Steel Construction-Allowable Stress Design 9th Edition, and “ASME Boiler & Pressure VesselCode Sec. II Part D (1989).
[5] 박종철, 고층 랙 자동창고용 스태커 크레인의 내진구조 안전성에 관한 연구, 산업대학원 석사학위 논문집, 창원대학교, (2016).
[6] 김재민, 실험계획법을 이용한 지진 및 풍하중

하의 관측안테나 구조물에 대한 안정성/정밀성을 고려한 최적설계, 석사학위 논문집, 창원대학교, (2016).

[7] 정훈형, 조방현, 김재실, 최헌오, 원자력 발전소 Main Control Board의 내진 건전성 평가에 관한 연구, 한국정밀공학회 2012년도 춘계학술대회논문집, p.1091-1092, (2012).

[8] IEEE Std. 344-1987, Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment of Nuclear Power Generating Stations, (1987).

[9] Singiresu S. Rao, Mechanical Vibrations 4th Edition, Pearson, (2004).

[10] 류정형, 원자력 발전소 폴라 크레인의 내진설계에 관한연구, 석사학위논문집, 한국해양대학교, (2001).

(접수: 2022.11.03. 수정: 2022.11.23. 게재확정: 2022.11.28.)