

비상 디젤발전기용 배전반의 내진안전성에 관한 연구

A Study on the Seismic Stability of an Existing Switchboard for Emergency Diesel Generator

하능교¹, 김재실^{1*}

Neung_Gyo Ha¹, Chae-Sil Kim^{1*}

〈Abstract〉

This study proposes to ensure the seismic stability of an existing switchboard for emergency diesel generator by applying mode analysis, static analysis and dynamic analysis. First, a three dimensional model for the switchboard was made with simplification for mode analysis. Next, The mode analysis for the finite element model of the existing switchboard was performed. The 1st natural frequency below 33 Hz, the seismic safety cutoff frequency, was calculated to be 21.943 Hz. Finally, based on the seismic stability theory, the von-Mises equivalent stresses derived by structural analysis and response spectrum analysis under the normal and faulted conditions were 74.179 MPa and 49.769 MPa, respectively. These are less than specified allowable stresses. So seismic stability was confirmed.

Keywords : Switchboard, Seismic Stability, Finite Element Method, Modal Analysis, Response Spectrum Analysis

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. 서론

주요 시설이나 아파트 등에 설치되어 상시 전원이 사고나 고장에 의해 공급되지 못할 경우의 비상상황 발생 시 전원공급을 위한 비상발전기가 운용되고 있다. 그 주요 구성품 중의 하나인 배전반은 조작 레버, 기중 개폐기, 전압계, 전류계, 전력계, 적산 전력계, 와전류 계전기 등으로 구성되어 있으며 비상발전기의 운전이나 제어, 전동기의 운전 등을 위해 스위치, 계기, 릴레이 등을 일정하게 관리하는 장치로써 보통 비상발전기 본체와 별도로 설치되고 있다.

최근 들어 신축 건물의 건설에는 내진설계가 포함되어야 하고 기존의 각종 건물들에도 필요 시 내진 보강공사가 실시되고 있다. 아울러 최근에 설치되는 비상 디젤발전기도 내진 안정성이 강력하게 요구되고 있다. 이를 만족시키기 위하여 비상발전기 본체를 포함하여 별도 설치되는 구성품들의 내진 안정성이 확보되어야 한다. 그러나 현재 설치된 배전반의 경우는 설계단계에서 내진 안정성을 고려하지 않고 제작되어 운용되고 있다.

따라서 기존에 사용되고 있는 비상 디젤발전기 배전반의 내진 안전성을 내진 해석을 통해 확인하여 계속 사용 여부를 제시하고자 한다.

2. 내진검증이론

내진 검증은 원자력 발전소 및 일반 산업현장의 기기나 구조물이 주어진 설치조건 및 운전 환경조건에서 지진이 발생해도 안전 관련 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]

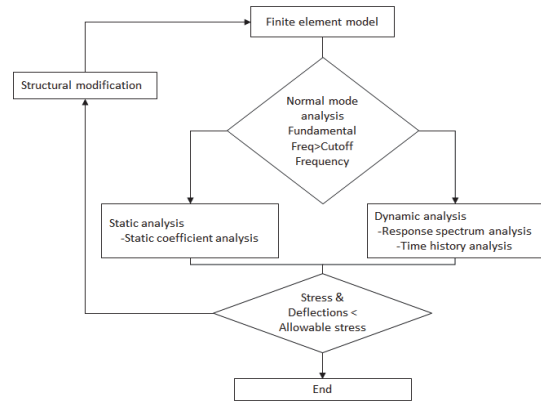


Fig. 1 Diagram of Seismic Analysis

본 연구에서는 배전반의 내진 안정성을 아주 보수적으로 원자력 발전소의 비상 디젤발전기에 준하는 해석을 통한 방법으로 안전정지지진 발생 시 기능을 유지할 수 있도록 검증하도록 할 것이다.

Fig. 1은 해석적인 방법으로 수행하는 내진 검증 절차를 나타내고 있으며 그 특징은 검증대상 시스템의 첫 번째 고유 진동수가 지진의 임계 주파수인 33Hz보다 크면 ZPA(Zero phase analysis)가 적용되는 위치의 가속도를 적용한 정적 구조 해석을 수행하고 임계 주파수보다 작으면 지진의 응답 스펙트럼을 적용한 동적해석을 수행하여 안정성을 판단하여야 한다.^[2,3,4]

기존에는 내진 안정성을 판단하기 위한 응답 스펙트럼으로 여러 참고문헌에서 사용된 응답 스펙트럼을 사용하였으나^[5,6,7,8] 이는 배전반의 내진 설계에는 과도하게 보수적이라 할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 과도한 안정성 때문에 발생하는 비용을 줄이며 충분히 내진 안정성을 확보할 수 있는 국내 원전(영광 5호기 및 6호기)의 비상 디젤발전기 건물 내진 설계 시 적용된 바 있는 US NRC Reg. Guide 1.60에서 제시된 표준 설계 응답 스펙트럼을 적용하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3에 US NRC Reg. Guide 1.60의 수평, 수직 방향에 대한 지반 가속도로 1g에 대

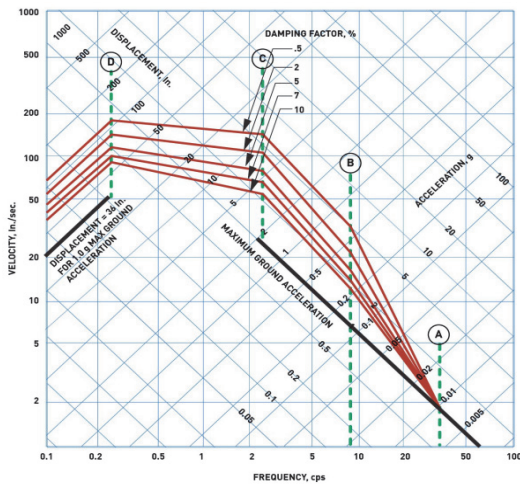


Fig. 2 Horizontal Design Response Spectrum Scaled to 1g Horizontal Ground Acceleration

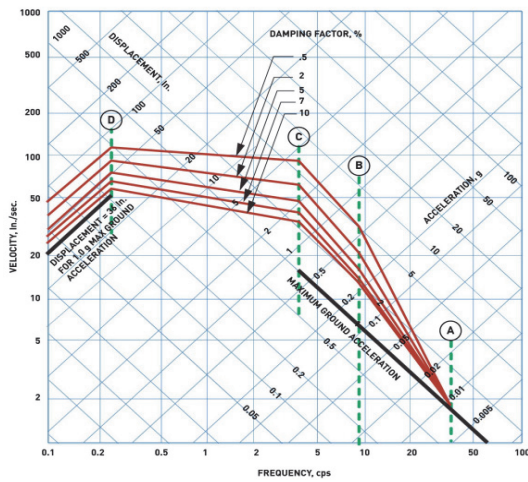


Fig. 3 Vertical Design Response Spectrum Scaled to 1g Horizontal Ground Acceleration

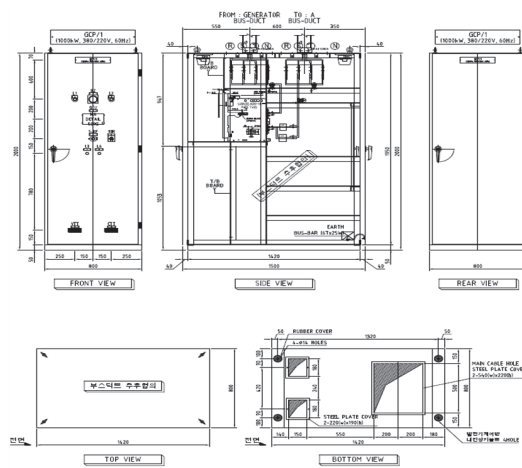


Fig. 4 Switchboard for Emergency Diesel Generator Drawing

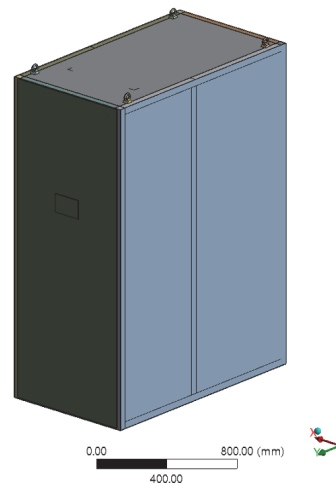


Fig. 5 Simplified Modeling of Switchboard for Emergency Diesel Generator

한 표준 응답 스펙트럼을 각각 나타내고 있다.^{9),10)}

3. 기존 배전반의 모델링 및 해석

배전반은 여러 가지 부품들로 구성되어 있지만 조작 레버, 기중 개폐기, 전압계, 전류계, 전력계,

적산 전력계, 와전류 계전기 같은 기타 부속품은 상대적으로 고유 진동수가 높고 이 부품들을 유한 요소해석에 적용하기에는 요소 수가 기하급수적으로 증가하므로 해석모델을 단순화할 필요가 있다.

Fig. 4는 업체에서 제공한 현장에서 사용되고 있는 비상 디젤발전기용 배전반의 도면을 나타내고 있다. 이 도면을 기초로 하여 해석을 위한 배전반

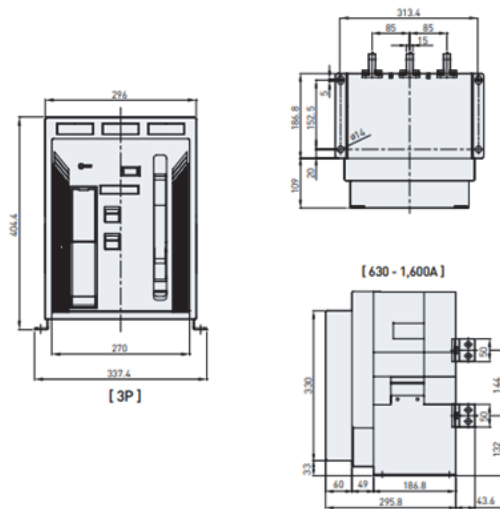


Fig. 6 UAN(S) A06~16 for Emergency Diesel Generator Drawing

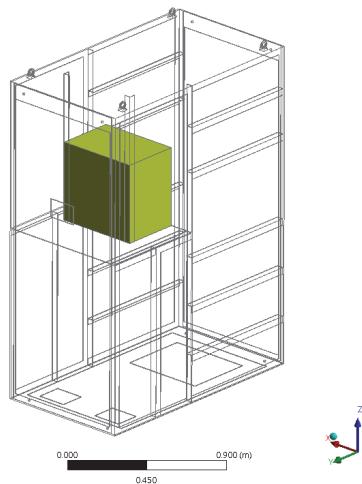


Fig. 7 Simplified Modeling of UAN(S) A06~16 for Emergency Diesel Generator

Table 1. Properties of Switchboard

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

의 모델링이 진행된다. 배전반의 경우 Fig. 5와 같이 하나의 조립체로 단순화하여 모델링하였다.

내부에 있는 UAN(S) A06~16의 경우 Fig. 6의 도면을 기초로 하여 Fig. 7와 같이 그 형상을 단순화하여 모델링 하였다.

유한요소 해석을 위하여 배전반의 재질에 해당하는 SS400의 물성치를 Table 1과 같이 설정하였다. 또한 내부에 있는 UAN(S) A06~16 경우 질량을 맞추기 위해 밀도를 Table 2와 같이 설정하였다.

모드 해석을 위하여 사면체 솔리드 모델 요소를 사용하였고 Minimum Edge Length를 2.3mm로 Mesh 설정하였다. 배전반 모델의 총 Node 수는 207,831개, Element 수는 51,015개가 생성되었다. Fig. 8은 Mesh 작업이 이루어진 배전반의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

배전반은 바닥면에 뚫린 앵커볼트를 이용하여 연결되었다고 가정하고 유한요소 모델에 Fig. 9와 같

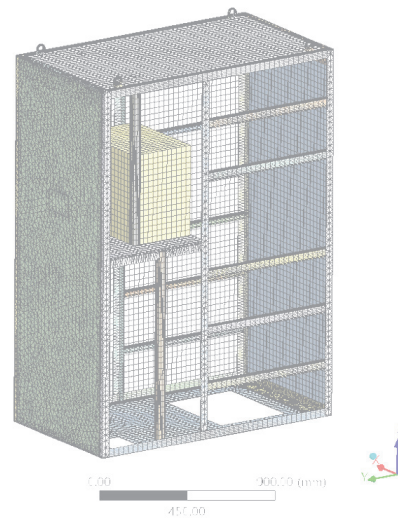


Fig. 8 Mesh of Switchboard

Table 2. Properties UAN(S) A06~16

Property	Value
Density [kg/m ³]	905

이 바닥면의 앵커볼트 구멍 안쪽 면을 구속하였다.

Fig. 10은 현재 운용 중인 배전반의 유한요소 모델에 대한 모드 해석의 첫 번째 모드에 대한 해석 결과를 나타내고 있다. Table 3은 3번째 모드 까지 계산된 고유 진동수를 나타내고 있으며 첫 번째 모드는 21.943Hz를 나타내고 있다. 이는 앞

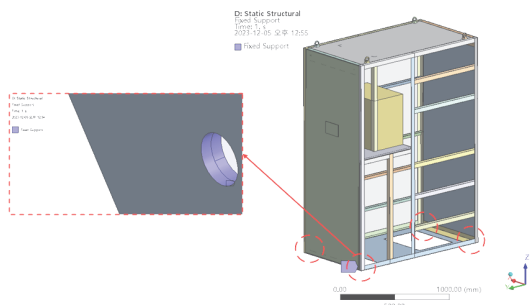


Fig. 9 Fixed Supports on Anchor Bolts

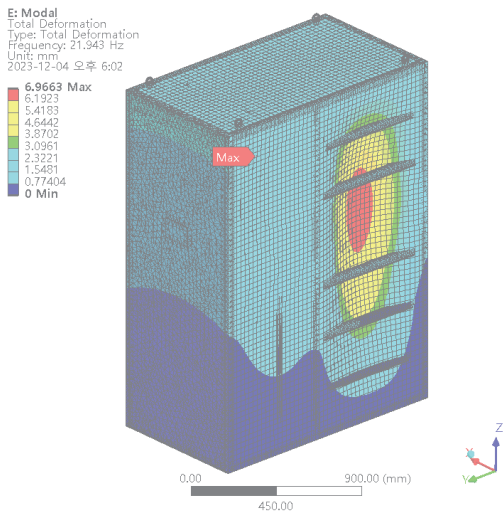


Fig. 10 1st Mode of Existing Switchboard

Table 3. Natural Frequency of Switchboard

Mode	Frequency [Hz]
1st	21.943
2nd	24.582
3rd	26.701

서 제시한 내진 검증 이론인 Fig. 1의 지진 임계 주파수인 33Hz보다 낮은 값이므로 내진 안전성을 판단하기 위해서 배전반의 동적해석을 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 운전조건별 허용되는 최대 응력은 ASIC 규격에 규정되어 있는 식에 의해 정의되고 배전반의 소재인 SS400의 항복강도(Sy) 250MPa을 적용하여 계산되었다.^[11]

지금까지의 내진 안정성 해석을 위한 응답 스펙트럼을 적용함에 있어 별다른 조건이 없기 때문에 여러 참고문헌과 같이 정적 해석을 위해 ZPA가 적용되는 50Hz 위치의 가속도를 적용하고 OBE 값은 SSE 2%의 1/2을 적용하고 SSE 값은 3% 적용하였다.^[5,6,7,8]

그러나 본 논문에서는 Fig. 11에 나타낸 영광 5호기 및 6호기 비상 디젤발전기 건물의 내진 설계를 위해 US NRC Reg. Guide 1.60의 표준 설계 응답 스펙트럼을 이용하여 산정한 층 응답 스펙트럼을 적용하였다. 이것은 수평 방향 최대 지반 가속도 0.2g에 대한 층 응답 스펙트럼으로써

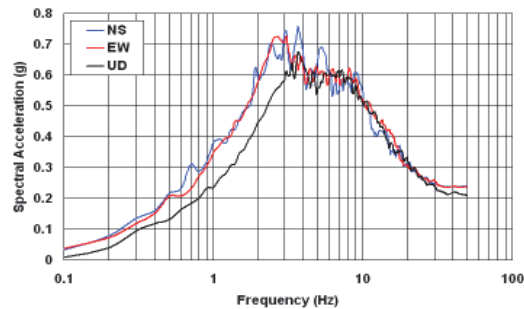


Fig. 11 Floor Response Spectrum

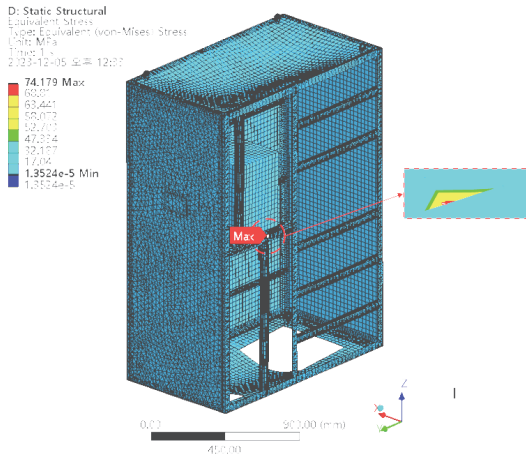


Fig. 12 Structural Analysis Result

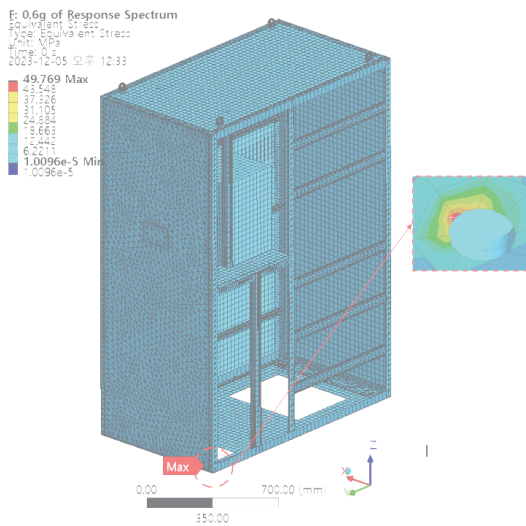


Fig. 13 Response Spectrum Analysis Result

Response Spectrum 해석을 수행하기 위해 지진 하중으로 입력될 층 응답 스펙트럼이 각각 E-W, N-S, Vertical 방향별 데이터가 제시되어 있다.^[10] 최대 지반 가속도 0.2g를 한국수력원자력에서 정의하고 있는 규모 환산식에 적용하면 리히터 규모 6.58로 확인된다.

Fig. 12에서 Fig. 13은 배전반에 대해서 각각 구조 해석과 Response Spectrum 해석을 수행하

Table 4. Loading condition and allowable stress

Operating Condition	Loading Combination	Allowable Stress (MPa)	
		ASIC	value
Normal	Dead Weight	$0.6 \times Sy$	150
Upset	Dead Weight + OBE Seismic Loads	$1.33 \times 0.6 \times Sy$	199.5
Faulted	Dead Weight + SSE Seismic Loads	$0.95 \times Sy$	237.5

여 도출한 vonMises 등가응력을 나타내고 있으며 최대 응력값으로부터 Dead Weight를 적용했을 경우는 74.179MPa, SSE Seismic Loads를 적용했을 경우는 49.769MPa를 도출하였다. 이 값들을 Table 4에 제시된 Normal과 Faulted 조건에 적용하면 각각의 허용응력인 150MPa, 237.5MPa보다 낮은 값이므로 내진 안정성이 확보하였다고 판단된다.

4. 결과 분석 및 고찰

본 논문에서는 비상 디젤발전기용 배전반의 내진 안정성을 확보하는 방법을 연구하였으며 기존의 내진 안정성을 과도하게 보수적으로 확보하는 응답 스펙트럼 대신 국내 원전(영광 5호기 및 6호기)의 비상 디젤발전기 건물 내진 설계 시 사용된 응답 스펙트럼을 사용하여 충분히 내진 안정성을 확보하는 방법을 연구하였다.

먼저 현재 운용 중인 배전반에 대한 모드 해석을 실시한 결과 1st Mode의 고유 진동수가 내진 안전 임계 주파수인 33Hz보다 낮은 값인 21.943Hz가 나타났다.

배전반의 1st Mode의 고유 진동수가 내진 안전 임계 주파수인 33Hz보다 낮은 값이므로 내진 검증 이론을 따라 동적해석을 수행하였다. 먼저 배전

반에 대해 Normal 조건을 적용하여 해석을 수행하여 도출한 최대 vonMises 등가응력은 74.179MPa로 나타났다.

그리고 US NRC Reg. Guide 1.60의 표준 설계 응답 스펙트럼으로부터 최대 지반 가속도 0.2g에 대해 산정되고 영광 5호기 및 6호기 비상 디젤발전기의 내진설계에 사용된 층 응답 스펙트럼을 이용하여 Response Spectrum 해석을 수행하여 도출된 SSE Seismic Loads는 49.769MPa으로 나타났다.

Normal 조건과 Faulted 조건 해석으로부터 각각 도출된 응력값을 ASIC 규격에 규정된 허용응력인 150MPa, 237.5MPa보다 낮은 값이므로 현재 사용 중인 비상 디젤발전기용 배전반의 내진 안전성은 확보되어있는 상태라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2023~2024년도 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] IEEE Std. 344-1987, Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment of Nuclear Power Generating Stations, (1987).
- [5] 박종철, 고층 랙 자동창고용 스택커 크레인의 내진구조 안전성에 관한 연구, 산업대학원 석사학위 논문집, 창원대학교, (2016).
- [6] 김재민, 실험계획법을 이용한 지진 및 풍하중하의 관측안테나 구조물에 대한 안정성/정밀성을 고려한 최적설계, 석사학위 논문집, 창원대학교, (2016).
- [7] 정훈형, 조방현, 김재실, 최현오, 원자력 발전소 Main Control Board의 내진 건전성 평가에 관한 연구, 한국정밀공학회 2012년도 춘계학술대회논문집, pp.1091-1092, (2012).
- [8] 하능교, 김재실, 내진안정성을 고려한 비상디젤발전기의 방진베드시스템에 관한 연구, pp.1155-1163, wp 25권 제 6호, 한국산업융합학회 (2022).
- [9] US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, (1973).
- [10] 김민규, 전영선, 서정문, 비상디젤발전기 면진설계지침(안)-스프링-댐퍼 시스템을 중심으로, 한국원자력연구소 (2007).
- [11] 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).

(접수: 2023.11.16. 수정: 2023.11.25. 게재확정: 2023.12.06.)