

기하형상 보강에 따른 배전반 내진 성능 향상에 대한 연구

신경준¹ · 경갑수^{2*} · 이수동³ · 최창훈⁴ · 이창환⁵

¹석사과정, 한국해양대학교, 토목공학과, ²교수, 한국해양대학교, 토목공학과, ³사원, (주)동명기술공단,
⁴공학박사, (주)에스씨코퍼레이션, 대표이사, ⁵이사, 안성산업(주)

A Study on the Enhancement of Seismic Performance of Distribution Boards through Geometric Reinforcement

Shin, Kyung Jun¹, Kyung, Kab Soo^{2*}, Lee, Su Dong³, Choi, Chang Hoon⁴, Lee, Chang Hwan⁵

¹Master Course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

³STAFF, Dong Myeong Engineering Consultants & Architecture Co., Ltd., Seoul, 05836, Korea

⁴CEO, SC Corporation Co., Ltd., Busan, 48965, Korea

⁵Executive Director, Ansung Electricity Co., Ltd., Ulsan, 44962, Korea

Abstract – The main purpose of this study is to assess the seismic safety of switchboards by analyzing their dynamic response under earthquake loading. To ensure the reliability of the evaluation, seismic time history analysis was conducted using a 3D finite element model, applying three different seismic waves as input excitations. The analysis focused on identifying the locations of maximum displacement in the unreinforced model to detect structural vulnerabilities and evaluate the overall stability of the frame. By tracking the dynamic behavior over time, this research provides a rigorous scientific basis for determining optimal reinforcement positions. These findings contribute to establishing practical design guidelines for enhancing the earthquake resilience of field-installed electrical enclosures.

Keywords – Distribution board, Seismic wave, Seismic performance, Geometric reinforcement, FE analysis

1. 서 론

최근 2016년 경주 및 2017년 포항 지진의 발생으로 한반도가 더 이상 지진 안전지대가 아님이 입증되었다. 이에 따라 사회기반시설의 내진 설계 중요성이 대두되었으나, 기존 연구는 주로 사회기반시설의 구조체에 집중되어 배전반과 같은 비구조요소의 내진 성능 및 보강 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

배전반은 지진 발생 시에도 안정적인 전력 공급 및 긴급 차단 기능을 수행해야 하는 국가 핵심 시설의 중추 설비이다. 병원이나 발전소 등 주요 시설 내 전력 공

급 중단은 막대한 경제적 손실과 인명 피해로 직결될 수 있기에, 최근 IEEE Std 693^[1] 및 국내 KDS 41 17 00^[2] 등 관련 기준이 강화되며 전기설비 내진 설계의 제도적 필요성이 강조되고 있다.

비구조요소의 내진 거동과 관련하여, Bae *et al.*^[3]은 진동대 실험을 통해 바닥 고정형 비구조요소 정착부 앵글의 이력거동을 분석하였으며, 특히 스티프너 보강 상세가 지진 시 발생하는 병진 및 Uplifting 현상을 억제하여 내진 성능을 확보하는 데 매우 효과적임을 실험적으로 증명하였다. 또한, 비구조요소의 내진 상세 및 설계 방안과 관련하여 Oh *et al.*^[4]은 외장재 부착용 경량 철골 서포트의 수직·수평재 접합 방식(용접 상세 등)이 구조물의 변형 수용 능력에 미치는 영향을 분석하여 국부 파괴를 방지하는 내진 접합 상세를 제안하였고, An *et al.*^[5]은 기존 이중바닥 시스템에 다경간 연속스트링거를 적용하여 모멘트 접합 효과를 유도함으로써, 시스템 전체의 수평 강성을 효과적으로 증대시키는 내진설

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 6, 2026; revised on June 10, 2026; approved on June 10, 2026.
Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-403-3762

E-mail. kyungks@kmou.ac.kr

계 방안을 수치해석적으로 검증한 바 있다.

특히 비구조요소 중 배전반과 관련한 연구로 Lee and Jung^[6]은 수력발전소 배전반을 대상으로 지진 시 바닥판의 국부적인 Rocking 현상이 앵커 주변의 Uplifting과 변형을 유발해 전도 피해의 원인이 됨을 규명하였으며, 하부 10 mm 강판 보강 시 전달 하중이 70 % 이상 감소함을 확인하였다. Choi *et al.*^[7]은 GR-63-CORE Zone 4 기준의 요구 응답 스펙트럼을 적용하여 설계 단계에서의 내진 건전성을 분석한 결과, 최대 응력이 주로 하부 베이스 프레임에 집중되나 재료의 허용 응력 이내에 있음을 수치적으로 입증하였다. 또한 Park and Yoo^[8]는 열반 설치 조건에 따른 동적 특성을 비교하여, 배전반이 다수로 연결될수록 시스템 전체의 강성이 증가하여 고유진동수가 상승하고, 단독 설치 대비 최대 응력 비율이 약 25–66 % 수준으로 감소한다는 점을 규명하였다. 설치 환경 측면에서 Choi *et al.*^[9]은 이중바닥 시스템 상의 배전반을 대상으로 진동대 실험을 수행하여 브레이싱 타입의 내진 보강 기술이 수평 안정성 확보와 전도 방지에 효과가 있음을 증명하였다.

이와 같이 기존 연구들은 주로 배전반의 단독 혹은 열반 설치 상태에서의 응력 분포 확인, 앵커부의 보강 또는 특정 환경에서의 보강재 성능 검증에 집중되어 왔다. 한편 배전반에 대한 기존의 보강 방식은 주로 외부 보강재 추가나 단순 재질 강화를 대상으로 하며, 배전반 자체의 구조적 형상 변화가 내진 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이는 구조제 형태의 배전반은 얇은 강판의 특성과 무게 중심 불균형으로 인해 지진하중 작용 시 국부 좌굴 및 진동 증폭 등의 구조적 결함이 발생할 가능성이 크기 때문이다.

따라서 이 연구는 앵커부를 재시공하거나 중량형 외부 프레임을 덧대는 기존 방식보다 경제적이며, 현장 설치 및 유지보수 측면의 시공성이 뛰어난 ‘기하학적 형상 보강 방안’을 도출한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다.

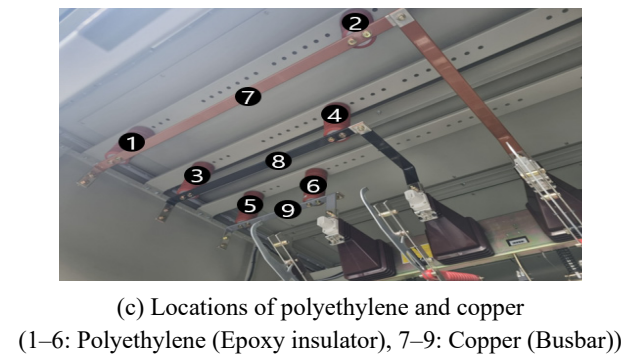
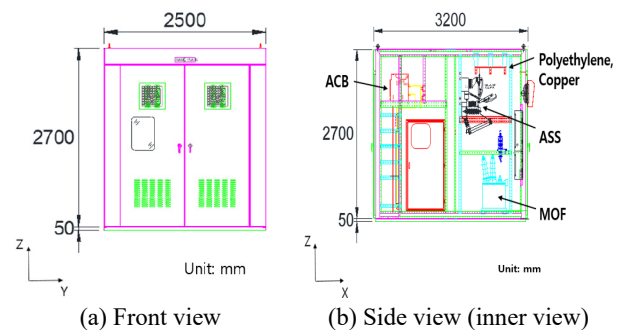
이를 위해 이 연구에서는 시간이력해석을 통한 배전반의 동적 거동 분석을 수행하여 구조적 취약성을 규명하고, 합리적인 보강 설계 방안을 제시함으로써 배전반 시스템의 내진 안전성을 강화하고자 한다.

Table 1. Geometry and self-weight of the distribution board model (excluding static loads)

Item	Dimensions (mm)			Weight (kN)
	Width	Depth	Height	
Distribution board	2500	3120	2700	19.78

Table 2. Material properties for structural analysis

Material	Weight density (N/mm ³)	Elastic	
		Young's modulus	Poisson's ratio
Steel (SS275)	7.698e-05	2.05e+05	0.3
Polyethylene	1.865e-05	1.25e+04	0.325
Copper	9.365e-06	1.15e+05	0.4



(c) Locations of polyethylene and copper

(1–6: Polyethylene (Epoxy insulator), 7–9: Copper (Busbar))

Fig. 1. Geometry of the distribution board model

2. 구조해석 모델링 및 해석 조건

2.1 구조해석 모델링

구조해석은 Midas Civil^[10] 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 대상 배전반 표본의 제원은 Table 1, 해석에 반영된 재질 물성치는 Table 2에 나타내었다. 배전반 외함 판넬의 두께는 국가철도공단의 철도용품 공단표준규격^[11]을 참고하여 측벽 및 천장부는 2.3 mm, 전면 및 후면 도어는 3.2 mm로 설정하였다.

이때 외함 판넬의 휨 거동을 모사하기 위해 외함 전

반에는 4절점 판 요소를 적용하였으며, 내부 프레임에는 솔리드 요소를 적용하여 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 배전반은 내부에 프레임이 다수 배치되어 있어 메쉬 크기를 일괄적으로 적용할 경우 일부에서 형상비가 과도하게 저하되어 수치적 오차가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 구조물의 기하학적 형상과 형상비를 고려하여 위치별로 메쉬 크기를 다르게 적용하였다. 전체 구조물에 대해 부위별로 파티션을 분할한 뒤 프레임 결합부 및 보강재 모서리 부는 2 mm~40 mm 크기의 메쉬를 설정하였고, 상대적으로 거동이 단순한 외함 평면 부위는 40 mm~200 mm 크기의 메쉬를 설정하였다.

이러한 조건 하에서 메쉬 밀도를 단계적으로 증가시키며 해석 결과의 수렴성을 확인한 결과, 메쉬 밀도 변화에 따른 주요 동적 응답 변위가 유사한 값으로 일정하게 수렴하여 수치적 안정성을 확보하였다.

2.2 경계 조건 및 하중 조건

경계 조건 설정 시에는 배전반이 설치되는 방식을 반영하여 배전반 전·후면 하부 ㄷ채널의 중앙부 위치에 앵커볼트가 설치되므로 해당 위치를 고정단으로 설정하였다. 이 연구의 목적은 구조물 전체의 동적 거동 특성을 파악하는 데 있으므로 앵커볼트의 체결 상태, 지반과의 마찰, 설치 깊이 및 재료 특성 등은 별도로 모델링하지 않고, 지반에 대한 완전 고정 조건을 이상화하여 경계 조건을 설정하였다.

또한 실제 설치 조건에서 하부 네 모서리 지점에는 구조물 자중에 의한 반력을 고려하여 X, Y축에 대해 회전 자유도를 구속하였다. 해당 지점에는 Midas Civil^[10] 프로그램의 Point Spring 기능을 활용하였으며, Z축(지면 수직 방향) 방향으로 지반의 압축 강성을 이상화하기 위해 충분히 큰 강성인 $1.0 \times 10^6 \text{ N/mm}$ 를 부여하여 지면의 접촉 상태를 탄성적으로 모사하였다. 이러한 설정은 배전반 하부와 지면 사이의 접촉 상태를 모사하기 위한 수치적 장치로, 자중에 의해 지면 아래로의 침하가 발생하지 않도록 강체(Rigid)에 가까운 반력을 형성하기 위한 것이다. 이는 모서리부에서 수평 방향(X, Y)에는 스프링 강성을 적용하지 않고 지반에 대해 압축력만 구속력을 갖게 함으로써, 실제 구조물 설치 시 하중이 수직 방향으로 지지되는 접촉 특성을 반영하였다. 여기서 X축은 배전반의 깊이 방향, Y축은 배전반의 폭

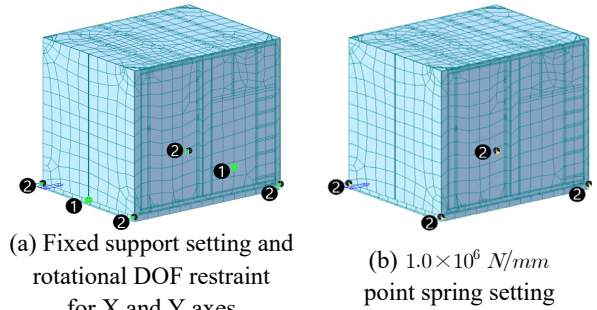


Fig. 2. Boundary condition settings

Table 3. Dead loads applied in analysis

Equipment	Weight (kg)	Applied load
Self weight	1978	19.78 kN
MOF	120	0.6 kN×2
ACB	70	0.7 kN×1
ASS	80	0.2 kN×4

방향, Z축은 수직 방향(중력 방향)으로 설정하였다.

경계조건 설정을 Fig. 2에 나타냈다. ①은 앵커볼트 위치이며, ②는 배전반 하부의 코너 위치이다.

구조해석에 사용된 고정하중으로는 배전반 외함의 자중과, Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 내부에 설치된 MOF (Metering Out Fit), ACB (Air Circuit breaker), ASS (Automatic Section Switch)의 실제 무게를 집중하중 형태로 적용하였고, 각 설비는 실제 배치 위치에 배전반과 접촉되는 위치의 개수로 하중을 분담하여 적용하였다. 설비의 중량 및 고정하중은 Table 3에 나타내었다.

2.3 지진하중 및 시간이력해석 설정

지진하중은 설계기준 부합성과 지반 조건에 따른 가속도 극대화를 고려하여 특성이 다른 3개의 지진하중을 적용하였다. 첫 번째는 배전반이 설치될 일반적인 건축물 환경에서의 성능 기준을 대변하는 지진파로, 국내 내진설계 기준(KDS 41 17 00)^[2]에 따라 생성된 S2 지반 조건, 내진 I등급 설계 지진파인 S2, SDC1 (이하 LC1으로 표기)이다.

여기서 SDC (Seismic Design Category, 내진설계범주)는 지반 조건과 시설물의 중요도를 고려하여 결정되는 내진설계 범위의 척도로, 배전반은 지진 발생 시 사회기반시설의 기능을 유지해야 하는 병원 및 발전소 등의 중요 건축물에 설치되는 내진 I등급 이상의 설비로 분류되므로 이를 반영하여 LC1을 이 연구의 지진하중

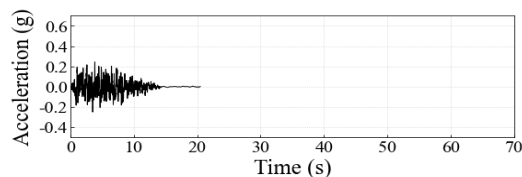
으로 선정하였다.

두 번째는 1994년 홋카이도 동해안 지진 기반의 T1-III-3(LG) (이하 LC2로 표기)이며, 세 번째는 1995년 효고현 남부 지진(고베 지진) 기록 기반의 T2-III-3(EW)(이하 LC3으로 표기)이다. 여기서 T1, T2는 각각 해구형 지진과 직하형 지진의 분류를 의미하고, III는 증폭 특성이 큰 매우 연약한 지반을 나타낸다. 연약지반의 경우 일반적으로 저주파 성분이 증폭되는 경향이 있으나, 이 연구에서는 고주파 특성을 갖는 배전반 구조물에 대하여 해당 지반 조건에서 발생할 수 있는 최대 지반 가속도(PGA) 증폭 구간을 하중 조건으로 적용하기 위해 이를 선택하였다. 또한, 명칭 끝의 3은 해당 지반 조건에서 가속도 및 증폭이 가장 큰 표준 스펙트럼 형상을 의미하며, LG와 EW는 지진의 계측 방향으로 각각 종방향 성분과 동서방향 성분을 의미한다.

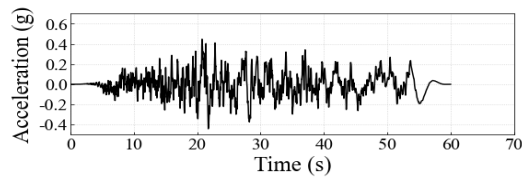
각 지진파는 Midas Civil^[10]에 내재된 지진파로, 프로그램 내에 지반가속도 형태로 입력되었으며, 지진파별 특성과 시간-가속도 이력은 각각 Table 4 및 Fig. 3에 나

Table 4. Characteristics of seismic wave

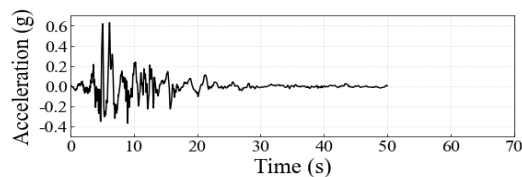
Seismic wave	PGA	Duration (sec)
LC1	0.2431g	20.475
LC2	0.447g	60
LC3	0.6314g	50



(a) LC1



(b) LC2



(c) LC3

Fig. 3. Acceleration time histories for each earthquake record

타내었다.

시간이력해석 시 Fig. 3에 나타낸 지진하중 적용 전, 해석 초기 0~5초 구간은 정적 하중만 작용하도록 설정하였으며, 6초 시점부터 가속도 형태로 지진하중이 작용하게 설정하였다. 이는 자중과 설비의 무게에 의한 초기 변형이 동적 충격으로 작용하는 것을 방지하고, 안정적인 초기 정적 평형 상태를 확보하기 위함이다.

또한, 입력 지진파 데이터의 시간 간격은 0.005초 또는 0.01초인데, 해석에서 입력 데이터의 시간 간격을 시간 증분으로 적용 시에 지진파의 급격한 진폭 변화나 고주파 성분을 정밀하게 포착하기에 한계가 있을 수 있다. 특히 배전반과 같이 고유주기가 짧은 비구조요소는 고주파 응답에 민감하므로, 충분한 시간분해능 확보와 수치적 해석 안정성을 위해 시간 증분을 입력 간격의 1/10로 설정하였다.

따라서 이 해석에서는 입력 간격이 0.005초일 경우 시간 증분을 0.0005초로, 입력 간격이 0.01초일 경우 0.001초로 설정하였고, 지진파별 해석 조건은 Table 5에 나타냈다.

해당 해석 시간 증분은 샘플링 주파수(Sampling Frequency) 기준으로 각각 2,000 Hz ($\frac{1}{0.0005}$) 및 1,000 Hz ($\frac{1}{0.001}$)에 해당하며, 수치 해석적 안정성 확보를 위한 최소 기준(구조물 최대 고유진동수 26.84 Hz의 10배인 약 270 Hz)을 충분히 상회하는 분해능이다(Table 8의 보강전 모델에 대한 고유치해석 결과 참고). 또한, 본 해석에 적용된 입력 지진파는 Midas Civil 내장 데이터베이스를 그대로 준용하였으며, 설정된 해석 시간 증분에 따른 가진 이력의 세분화 및 확장은 프로그램 내부 알고리즘에 의해 자동 선행 보간되어 반영되었다.

2.4 고유치 해석 및 감쇠비

배전반의 특성상 기하학적 형상이 복잡하며, 모델링 시 자유도가 방대해 지기에, 고유치 해석 시에는 K. J. Bathe의 'Finite Element Procedures'^[12]에 따라 대규모

Table 5. Analysis conditions for seismic wave

Seismic wave	Input interval (sec)	Time increment (sec)
LC1	0.005	0.0005
LC2	0.01	0.001
LC3	0.01	0.001

행렬 시스템에서 전체 고유치를 계산하는 대신, 지진 응답에 지배적인 저차 모드만을 추출하는 Lanczos method를 이용하여 수치적 수렴성 및 해석의 효율성을 확보하였다. 또한, 고유진동수는 각 보강 단계 및 지진 하중 적용 축별 동적 특성 변화를 반영하기 위해 각 케이스별로 산정하였다.

이 해석의 Damping Method로는 Element Mass & Stiffness Proportional Damping을 적용하였다. 이는 임계감쇠계수(C_c) 대비 실제 감쇠 정도인 감쇠비(ζ)를 설계 기준에 맞춰 일정하게 유지하면서, 보강에 따른 질량(M)과 강성(K)의 변화를 실제 감쇠 행렬(C)에 반영하기 위함이다. Rayleigh Damping 모델에서 사용되는 질량 비례 계수(α_m)와 강성 비례 계수(β_k)는 보강재 추가에 따른 시스템의 임계감쇠 특성 변화를 고려하여, 각 단계별 고유치 해석 결과를 바탕으로 재산정함으로써 해석의 정밀도를 높였다.

각 보강단계별 α_m , β_k 를 Table 6에 나타내었다.

연구에서의 목표 감쇠비(ζ)는 전 케이스에 대해 5 %를 적용하였다. 이는 변전소 설비의 국제 표준인 IEEE Std

Table 6. α_m , β_k of materials by reinf. stage

Reinf. stage	Seismic direction	Material	Damping (5%)	
			α_m	β_k
Before reinf.	y	SS275	2.5114	8.52E-05
		Polyethylene	6.2787	2.13E-04
		Copper	7.5344	2.56E-04
	x	SS275	3.3175	1.18E-04
		Polyethylene	8.2937	2.96E-04
		Copper	9.9524	3.55E-04
reinf. 1	y	SS275	2.7257	6.86E-05
		Polyethylene	6.8143	1.72E-04
		Copper	8.1772	2.06E-04
	x	SS275	2.0632	6.06E-05
		Polyethylene	5.1580	1.51E-04
		Copper	6.1896	1.82E-04
reinf. 2	y	SS275	2.7253	6.87E-05
		Polyethylene	6.8133	1.72E-04
		Copper	8.1760	2.06E-04
	x	SS275	2.0639	6.03E-05
		Polyethylene	5.1598	1.50E-04
		Copper	6.1918	1.81E-04
reinf. 3	y	SS275	2.6645	8.14E-05
		Polyethylene	6.6613	2.03E-04
		Copper	7.9935	2.44E-04
	x	SS275	2.0597	6.17E-05
		Polyethylene	5.1492	1.54E-04
		Copper	6.1791	1.85E-04

693^[1]의 지침에서 현대 지진학에서 활용되는 주요 지진 동 예측 모델 및 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) 데이터베이스가 기본적으로 5 % 감쇠 기준의 응답 스펙트럼을 채택하고 있다는 점을 반영한 것이다. 또한 동일 지침^[1]에서 진동대 실험 데이터가 확보되지 않은 경우 기본 감쇠값으로 5 % 감쇠비를 적용할 때 수치 해석상 솔루션의 수렴성이 보장되며, 0.13 Hz에서 33.3 Hz에 이르는 넓은 주파수 범위에서 약 ± 7 % 이내의 오차 제어가 가능하여 신뢰도 높은 해석 결과를 얻을 수 있다는 것을 반영한 것이다.

3. 지진파별 구조해석 결과

3.1 배전반 기하 형상 보강 상세

배전반 보강은 기본 모델(Step 0)에 y축 지진하중을 적용(Step 1)한 후 보강 1(Step 2)을 진행하고, x축으로 지진하중을 적용(Step 3)한 후 보강 2, 3(Step 4, 5)을 진행하였다. 상세한 보강 과정은 Table 7에 나타내었다.

각 보강 단계별 보강 위치는 기본 모델(Step 0)에서 방향별로 지진하중을 적용하며 순차적으로 확인된 구조적 취약부와 내부 프레임 및 부속 기기들과의 간섭을 피할 수 있는 위치를 고려하여 결정되었다. 즉, Y축 지진하중 작용 시 최대 Y축 변위를 제어하기 위해 도어와 측벽 모서리 및 ASS 거치 채널과 측벽을 보강 1의 대상으로 선정하였다. 이후 해당 방향의 거동을 안정화한 뒤 X축 지진하중을 적용했을 때, 새롭게 최대 상대변위가 나타나는 저압부 패널 중압과 천장부를 각각 보강 2 및 보강 3의 대상으로 순차 선정함으로써 보강 단계별 구조적 타당성을 확보하였다.

Table 7. Detailed reinforcement process

Step	Reinforcement description
0	Baseline model (before reinforcement)
1	Application of Y-axis seismic load (initial evaluation for Y-axis seismic loading)
2	Reinf. 1: Triangular gusset plates at corners (joining door-side wall+ASS mounting channel-Side wall)
3	Application of X-axis seismic load (additional evaluation for X-axis seismic loading)
4	Reinf. 2: Two additional beams on the low-voltage equipment mounting plate
5	Reinf. 3 : Two additional ceiling beams

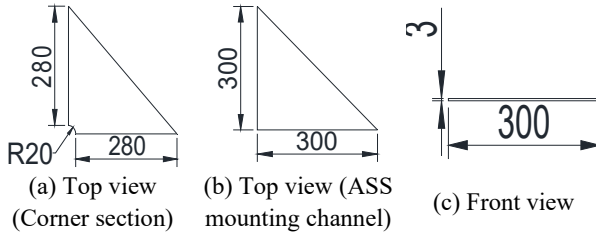


Fig. 4. Detailed geometry of triangular corner plate

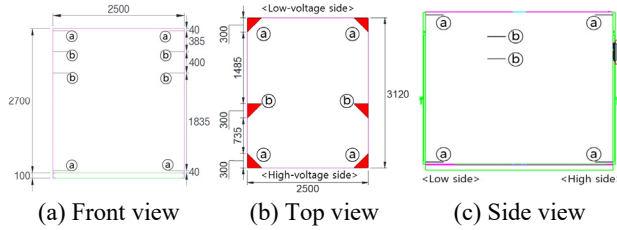


Fig. 5. Locations of triangular corner plate

보강 1의 Fig. 4에 나타난 삼각 plate는 300 mm×300 mm, 두께 3 mm의 직각 이등변 삼각형 형상으로, 모서리부의 삼각 plate는 도어측 프레임과의 간섭을 회피하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 직각부를 반경 R=20 mm의 곡면으로 절단한 형상(형상 ㉑)으로 구성하였다. 이러한 곡률 처리는 응력집중 완화 이론을 기반으로 한 것으로, 곡률 반경 R과 판 두께의 비율인 R/d가 0.1 이상일 경우 응력집중계수가 유의미하게 감소한다. 이 연구의 삼각 plate에서의 R/d는 20/3=6.67로 이 기준을 초과한다. 또한 Fig. 1(b)에 나타난 ASS부에는 Fig. 4(b)의 형상(형상 ㉒)을 사용하였다.

삼각 plate에 대한 상세 도면 수치를 Fig. 4, 배치 위치를 Fig. 5에 나타내었다.

또한 보강 2에서 사용된 2개의 beam에는 30 mm×30 mm 단면의 막대봉을 사용하였고, 저압부 기기 부착 패널의 상부 판넬과 하부 판넬이 만나는 부분의 앵글(Fig. 6에 middle angle로 표시)로부터 위, 아래로 307 mm 지점에 설치하였다. 상세 설치 위치는 Fig. 6와 같다.

3.2 고유치 해석

Table 8에 2.4절에서 설정한 방식으로 진행한 보강 전·후의 고유치해석 결과를 정리하였다. 또한, 보강 후의 배전반의 동적 강성 변화를 정량적으로 확인하기 위해 식 (1)을 이용하여 강성을 산정하였다.

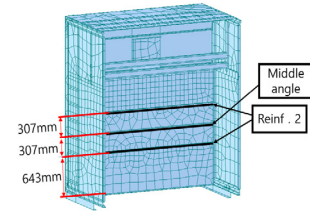


Fig. 6. Locations of the two beams in reinf. 2

Table 8. Eigenvalue analysis results and stiffness before and after reinforcement

Classification	Before reinf.			After reinf.		
Seismic direction	Y	X	Z	Y	X	Z
Governing Mode	10	4	61	4	2	50
Effective mass (kg)	420	250	670	480	200	620
Cumulative Mass (%)	83.66	91.10	88.50	82.94	82.16	83.79
Natural frequency (Hz)	11.88	8.92	26.84	12.42	12.23	29.34
Stiffness (kN/m)	2340	785	19055	2923	1180	21070

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

여기서, f : 고유진동수(Natural Frequency, Hz)

T : 고유진동주기(Natural Period, sec)

k : 구조물의 등가 강성(Stiffness, N/m)

m : 구조물의 등가 질량(Mass, kg)

이 연구에서는 총 900차의 고차 모드까지 고유치 해석을 수행하였다. Table 8에 제시된 모드는 각 축별 질량 참여율이 가장 높은 지배 모드를 의미한다. 900차 모드 기준 최종 누적 질량 참여율은 보강 전 Y축 83.66 %, X축 91.10 %, Z축 88.50 %였으며, 보강 후에는 각각 82.94 %, 82.16 %, 83.79 %를 나타내었다. 이는 배전반 외함을 구성하는 2.3–3.2 mm 두께의 얇은 강판넬들과 내부 프레임들의 수많은 국부 고주파 진동으로 유효 질량이 광범위하게 분산되는 박판 구조물에서 나타날 수 있는 동적 특성이다. 비록 일부 축의 누적 질량이 90 %에 미달하였으나, 방대한 고차 모드를 반영함으로써 배전반의 동적 거동을 충분히 묘사하였다.

특히, Table 8에 나타난 축별 지배 모드의 극단적인 격차(보강 전 기준 X축 4차, Y축 10차 대비 Z축 61차)는 수평 방향과 수직 방향 간의 강성 차이에 기인한다. 상대적으로 횡방향 강성이 낮은 X축과 Y축은 저차 모

드에서 구조물 전체의 광역 거동이 발현되는 반면, 지면에 수직인 Z축은 높은 수직 방향 강성으로 인해 얇은 판넬의 수많은 국부 모드가 선행된 후 고차 모드에서 전체 수직 거동이 나타나게 된다.

Table 8에 나타낸 보강 전후의 해석 결과를 살펴보면, Y축 방향의 경우 유효질량이 증가(420 kg→480 kg)함에 따라 고유진동수도 상승(11.88 Hz→12.42 Hz)하였다. 이에 따라 산정된 강성 또한 증가(2,340 kN/m→2,923 kN/m)하여, 보강 전 대비 구조적 강성이 약 24 % 이상 향상되었다. 이와 동시에 X축 방향에서는 유효 질량이 다소 감소(250 kg→200 kg)하였으나, 보강에 의해 고유진동수가 대폭 증가(8.92 Hz→12.23 Hz)함에 따라 강성 역시 약 50 % 이상 증가(785 kN/m→1,180 kN/m)하였다. Z축 방향에서도 유효질량이 감소(670 kg→620 kg)하였으나, 고유진동수가 상승(26.84 Hz→29.34 Hz)하여 강성이 약 10 % 이상 증가(19,055 kN/m→21,070 kN/m)하는 경향을 나타내었다.

결과적으로, 모든 축에서의 고유진동수 및 축별 환산 강성 증가는 배전반의 동적 거동 특성이 보강 전보다 지진 응답에 유리한 영역으로 전이되었음을 의미하며, 이는 제안된 보강안을 통해 외부 지진하중에 대한 구조적 저항 성능이 모든 축에서 확보되었음을 보여준다.

3.3 지진하중 별 변위 비교 및 응력 분석

3.3.1 내진 성능 검토

이 연구에서는 지진하중 작용 시 배전반의 구조적 안전성 확보 및 주요 기능의 유지 여부를 평가하기 위한 내진 성능을 검토하였다. 먼저 내부 구성요소 간의 기계적 간섭을 방지하고 기능 저하를 예방하기 위해, IEEE Std 693^[1]에서 제시하는 부상 상단과 플랜지 간의 상대변위 측정 지침을 준용하여 허용 상대변위 기준을 3 mm 이하로 설정하였다.

배전반과 같은 설비 구조물은 강재 프레임 및 배전반 외함 판넬이 항복 응력에 도달하여 물리적인 손상이 일어나기 전이더라도, 프레임의 미세한 뒤틀림과 상대변위(3 mm) 초과만으로 내부 탑재 기기의 가스 누설 및 절연 파괴 등 기능적 이상이 먼저 발생할 수 있다고 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 배전반의 내진 성능 확보를 위한 평가 지표를 배전반손상 여부를 판별하는

응력보다는, 내부 기기의 기능 유지를 결정짓는 변위의 역제로 설정하여 보강 효과를 평가하였다.

이 연구의 대상인 배전반은 내부에 장착된 ASS가 외함과 직접적으로 연결된 프레임과 단단히 결합되는 특성을 가진다. 지진 하중 발생 시 프레임에 발생하는 미세한 뒤틀림이나 변형은 내부 ASS 부상 플랜지로 직접 전가되는 구조적 연계성을 형성한다. 따라서 최종적으로 부상부의 기밀성 및 전기적 절연 성능을 확보하기 위해 외함의 국부적 변형이 전체 거동으로 증폭되는 전가 효과를 고려하여 배전반 외함 구조 전체에 대하여 허용 상대변위를 3 mm로 일괄 적용하였다.

또한, 지반 운동의 최대치와 구조물의 고유 동적 특성 사이의 상관관계를 정량화하기 위해 Newmark-Hall 응답 스펙트럼 이론^[13]을 적용하였다. 이 이론에서는 구조물의 응답 대역을 지배적인 파라미터에 따라 가속도, 속도, 변위 민감 영역으로 구분하는데, 영역별 특성은 Table 9과 같다.

이 연구에서는 이론적 산정의 정밀도를 제고하고자, Newmark-Hall^[13]의 연구에서 제시한 감쇠비 5 % 기준의 확률론적 범용 표준 증폭 계수($\alpha_A=2.71$, $\alpha_V=2.30$, $\alpha_D=2.01$)를 일괄 적용하는 대신, 각 입력 지진파의 고유한 주파수 에너지 분포를 반영한 실제 증폭도(α)를 직접 추출하여 분석에 활용하였다. 이는 지진파별 주파수 특성이 구조물 응답에 미치는 영향을 직접적으로 반영한 것이다.

이 연구에서는 지반 운동 파라미터인 PGA, PGV, PGD를 각각 지진의 충격력, 지반의 속도, 지반의 실제 이동 거리로 정의하였다. 또한 지반 운동 파라미터 산정시 PGA를 수치 적분하여 PGV를 도출하면서 발생하는 저주파 대역의 기선 표류(Baseline drift) 오차, 즉 미세한 적분 오차가 누적되어 속도 값이 한쪽으로 치우치

Table 9. Characteristics of each sensitive region

Sensitive region	Frequency (f_n)	Governing factor	Governing equation
Accel.	High (>8 Hz)	PGA, α_A	$S_a = \alpha_A \times PGA$ $S_d = \frac{S_a}{\omega_n^2}$
Vel.	Intermediate (2 Hz–8 Hz)	PGV, α_V	$S_v = \alpha_V \times PGV$ $S_d = \frac{S_v}{\omega_n}$
Disp.	Low (<2 Hz)	PGD	$S_d = \alpha_d \times PGD$

는 현상을 제어하고자 하였다. 이를 위해 데이터 처리 방식으로, 불필요한 저주파 노이즈를 걸러내는 수학적 기법인 버터워스 고역통과 필터(차단 주파수 0.5 Hz)를 가속도 이력에 적용하여 PGV를 도출하였다.

각 지진파가 구조물에 미치는 실제 증폭 계수(α)는 Chopra^[14]에 근거하여 대상 배전반의 고유진동수(Y축 11.88 Hz, X축 8.92 Hz, Z축 26.84 Hz)와 각 지진파의 주파수 특성을 고려한 가속도(S_a) 및 속도(S_v)를 지반의 흔들림인 PGA, PGV로 각각 나누어서, 가속도 및 속도 민감영역의 증폭계수(α_A , α_V)를 계산하였다.

최종적으로 도출된 지진파 파라미터(PGA, PGV)와 맞춤형 증폭계수(α)를 Newmark-Hall의 영역별 지배 방정식에 대입하여 이론적 응답 변위(S_d)를 산출하였으며, 도출된 지진파별 파라미터 및 증폭 계수는 Table 10에 나타내었다.

3.3.2 구조해석 결과

입력 지진파 특성에 따른 배전반의 내진 성능을 분석함에 있어, 수직 지진하중 적용 시에는 IEEE Std 693^[1]을 준용하여 수평 지진하중의 0.8배를 적용하였다.

이 연구의 보강은 3.1절에 나타난 바와 같이 방향별 구조적 취약성을 극복하기 위해 Table 7에 나타난 단계

Table 10. Amplification factors for each earthquake

		LC1	LC2	LC3
PGA		0.2431g	0.447g	0.6314g
PGV (mm/s)		0.135	0.549	0.897
S_a (mm/s ²)	Y-axis	3822.76	6388.97	6314.16
	Z-axis	3077.96	4580.79	6287.86
S_v (mm/s)	X-axis	74.66	116.45	116.07
α_A	Y-axis	1.60	1.46	0.99
	Z-axis	1.29	1.04	1.02
α_V	X-axis	0.55	0.21	0.13

Table 11. Analysis result

(Displacement : mm, Stress: MPa)

Seismic wave	Input direction	Axis direction	Displacement at the max displacement point (before reinforcement)			After reinforcement		Remark
			Before reinf.	After reinf.	Difference (%)	Max disp.	Max stress	
LC1	Y	X	1.565	1.234	-0.331 (-21.15%)	1.264	54.96	PGA 0.2431g
		Y	4.775	2.249	-2.526 (-52.90%)	2.404		
		Z	-3.221	-1.383	+1.838 (-57.06%)	-2.319		
	X	X	9.024	1.436	-7.588 (-84.09%)	1.722	49.37	Duration 20.475 sec
		Y	0.347	0.222	-0.125 (-36.02%)	0.295		
		Z	-4.244	-1.805	+2.439 (-57.47%)	-2.328		
	Z	X	0.778	0.317	-0.461 (-59.25%)	0.450	53.96	Fig. 3(a)
		Y	0.330	0.235	-0.095 (-28.79%)	0.346		
		Z	-3.124	-1.425	+1.699 (-54.39%)	-2.187		
LC2	Y	X	1.682	0.935	-0.747 (-44.41%)	0.951	59.11	PGA 0.447g
		Y	4.951	2.407	-2.544 (-51.38%)	2.601		
		Z	-3.321	-1.350	+1.970 (-59.34%)	-2.320		
	X	X	14.89	1.654	-13.24 (-88.89%)	2.012	60.6	Duration 60 sec
		Y	0.287	0.291	+0.004 (+1.390%)	0.291		
		Z	-4.304	-1.823	+2.481 (-57.64%)	-2.326		
	Z	X	0.824	0.384	-0.440 (-53.40%)	0.497	56.29	Fig. 3(b)
		Y	0.335	0.342	+0.007 (+2.090%)	0.342		
		Z	-3.160	-1.488	+1.672 (-52.91%)	-2.221		
LC3	Y	X	0.808	0.337	-0.471 (-58.29%)	0.399	56.94	PGA 0.6314g
		Y	1.629	1.242	-0.387 (-23.76%)	1.271		
		Z	-4.084	-1.529	+2.555 (-62.56%)	-2.327		
	X	X	15.35	0.804	-14.546 (-94.76%)	2.404	48.35	Duration 50 sec
		Y	0.289	0.291	+0.002 (+0.690%)	0.291		
		Z	-4.314	-1.818	+2.496 (-57.90%)	-2.327		
	Z	X	0.856	0.368	-0.488 (-57.00%)	0.432	59.55	Fig. 3(c)
		Y	0.357	0.361	+0.004 (+1.120%)	0.361		
		Z	-3.668	-1.536	+2.132 (-58.10%)	-2.224		

에 따라 순차적으로 진행되었다. 먼저, 초기 모델(step 0)에 Y축 지진하중을 적용(step 1)했을 때 발생하는 3 mm 이상의 Y축 변위를 감소시키기 위해 보강 1(step 2)을 우선 적용 한 결과 LC2 조건에서 초기 모델 대비 Y축 최대 변위가 약 56 % 감소하였으며, Y축 지진하중 적용 시 모든 축의 변위가 3 mm 이내로 발생하였다.

이후 X축 지진하중을 적용(step 3)한 결과, X축 변위 뿐만 아니라 Z축 변위 역시 3 mm를 초과하였다. 이에 먼저 X축 변위를 감소시키기 위해 보강 2(step 4)를 적용하였고, LC3 조건에서 X축 최대 변위를 약 95% 감소시켰다. 그러나 2차 보강 후에도 Z축 변위는 여전히 3 mm를 초과하였고, 이러한 잔류 Z축 변위는 최종적으로 보강 3(step 5)을 추가 적용함으로써 모든 지진파 조건에서 Z축 변위가 약 55 % 감소하며 모든 축의 변위가 허용 기준 이내로 발생하였다.

다만, 각 단계별로 보강을 진행함에 따라 제어하고자 하는 방향 외 타축의 변위가 미소하게 증감하는 현상이 발생하였다. 이에따라 개별 보강 단계의 단편적인 결과 보다는 전체 구조 시스템이 유기적으로 안정화된 최종 상태를 평가하는 것이 타당하다고 판단하였다. 따라서 Table 11에 보강 전과 최종 보강 후의 전반적인 변위 감소 효과 및 보강 후 최대 변위와 응력을 나타내었다.

1) 보강 전·후 변위 감소

Table 11의 결과를 분석한 결과, 대부분의 하중 조건 및 방향에서 유의미한 변위 감소 효과가 나타났다. 일부 하중 조건(LC2, LC3)의 특정 방향(Y축)에서 보강 후 0.002 mm~0.007 mm 수준의 변위 증가(0.69 %~2.09 %)가 발생했으나, 이는 전체 거동 대비 수치해석상의 미세한 동적 응답 변동 범위 내에 해당하므로 구조물의 전반적인 안정성에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

가장 큰 변위 감소율을 나타낸 경우는 지진파를 X축으로 적용하는 경우의 X축 변위로, 변위 감소율이 84.09 %~94.76 %인 것으로 나타났다. 이는 프레임 및 플레이트 보강을 통해 구조물 전체의 강성이 크게 증대되었음을 의미한다. 이는 삼각 코너 플레이트를 설치함으로써 반복적인 지진하중 하에서도 효과적인 하중 분산을 유도하고, 길이 방향 프레임의 변형 누적을 효과적으로 억제한 결과로 분석된다.

지진파를 각각 Y축 및 Z축으로 적용하는 경우, 각 축의 변위 역시 각각 23.76 %~52.90 %, 52.91 %~58.10 %의 감소율을 나타내었다. 특히 Z축 응답에서, 외함 천장 플레이트에 추가 빔을 보강 함으로써 얇은 판에서 발생하는 국부적인 처짐 및 떨림 현상을 직접적으로 개선하였다. 이를 통해 수평 지진 동과 결합되어 증폭될 수 있는 수직 성분 응답을 효과적으로 억제함으로써 구조적 동적 안정성을 확보하였다.

2) 허용 상대변위 및 항복 응력 기준 충족

최종 보강 후 모델에 대한 해석 결과, 모든 지진파 하중 케이스 및 입력 방향에서 각 축별 최대변위가 Y축에서 2.601 mm, X축에서 2.404 mm, Z축에서 -2.224 mm로 발생하여 3.3.1절에서 설정한 허용 상대변위 기준인 3.0 mm 이내를 만족하는 것으로 확인되었다. 또한, 배전반 전체에서 발생한 최대응력은 LC2를 X축 방향으로 적용 시에 60.6 MPa로 나타났으며, 이는 SS275 강재 항복강도(245 MPa)의 약 25 % 수준이다.

3) Newmark-Hall 이론^[13]에 근거한 변위 발생 양상

Table 11에 나타난 해석 결과를 분석한 결과, 보강 전 모델의 축별 최대 변위 발생 순서는 지반 가속도(PGA)의 크기 순서와 반드시 일치하지는 않는 거동을 나타내었다. 구체적으로 X축 및 Z축은 PGA 크기 순인 LC3 > LC2 > LC1 순으로 변위가 발생하였으나, Y축은 PGA 크기와 무관하게 LC2 > LC1 > LC3의 순서로 응답이 나타났다.

이러한 현상의 원인을 규명하기 위해 Table 8의 고유치 해석 결과를 바탕으로 각 축의 주파수 특성을 분석하였다. Table 9과 같이 Y축, Z축(11.88 Hz, 26.84 Hz)은 고진동수 대역이 가속도 민감 영역에 속하여 PGA 및 가속도 증폭 계수(α)의 조합에 의해 응답이 결정된다. 그러나, X축(8.92 Hz)은 이론적 전이 영역 내에서 속도 민감 영역의 에너지가 존재하는 대역으로 판단되어 속도 지배 방정식에 의해 분석을 수행하였다. 각 축의 각진동수($\omega_n = 2\pi f_n$)는 고유진동수에 따라 Y축 74.64 rad/s, X축 56.05 rad/s, Z축 168.64 rad/s로 산출되었으며, 이를 지배 방정식에 대입하여 도출한 이론적 응답 변위(S_d)를 Table 12에 나타내었다.

Table 12에 나타난 이론적 응답 변위(S_d)를 분석한

Table 12. Calculated spectral displacement by axis

Axis	Seismic wave	Calculation results (mm)
Y-axis (Accel. sensitive)	LC1	$\frac{0.2431 \times 1.6 \times 9810}{74.64^2} = 0.68$
	LC2	$\frac{0.447 \times 1.46 \times 9810}{74.64^2} = 1.15$
	LC3	$\frac{0.6314 \times 0.99 \times 9810}{74.64^2} = 1.1$
X-axis (Vel. sensitive)	LC1	$\frac{0.135 \times 0.55}{56.05} = 1.33$
	LC2	$\frac{0.549 \times 0.21}{56.05} = 2.05$
	LC3	$\frac{0.897 \times 0.13}{56.05} = 2.08$
Z-axis (Accel. sensitive)	LC1	$\frac{0.2431 \times 1.29 \times 9810}{168.64^2} = 0.11$
	LC2	$\frac{0.447 \times 1.04 \times 9810}{168.64^2} = 0.16$
	LC3	$\frac{0.6314 \times 1.02 \times 9810}{168.64^2} = 0.22$

결과, 가속도 민감 영역에 속하는 Y축과 Z축은 PGA와 가속도 증폭비(α_A)의 곱이 가장 큰 LC2 및 LC3에서 각각 최대 변위가 산출되었고, 속도 민감 영역의 지배를 받는 X축은 지반 속도(PGV) 및 속도 증폭비(α_V)의 상호작용에 의해 LC3에서 가장 높은 응답이 도출되었다.

이는 단순히 지반 가속도의 크기(PGA)뿐만 아니라 지진파의 특성과 구조물의 진동수에 의해 발생하는 증폭 현상이 실제 변위 형성을 일으키는 결정적인 요인임을 의미한다.

결과적으로 단자유도(SDOF) 가정에 따른 이론값(Table 12)과 수치해석 결과의 차이는 3차원 유한요소 모델 내의 저차 및 고차 모드의 복합적 동적 거동이 응답에 반영된 결과로 판단되나, 전체적인 경향성은 앞선 시간이력해석(Table 11)과 높은 정합성을 보이며, 이는 배전반 응답은 구조물의 동특성 및 지진파 특성에 종속됨을 의미한다.

4. 기존 연구와의 비교 검증

이 연구에서 수행한 구조해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 기존 연구의 데이터와 정량적 비교 분석을 수행하였다. 해석 대상인 배전반의 제원, 질량(M), 강성(K) 및 지진파의 특성이 연구마다 다르므로, 재료의 항복강도 대비 구조적 여유를 나타내는 안전율(Safety

Table 13. Comparison of seismic safety

Comparison Target	PGA	Yield Strength	Maximum Stress	Safety Factor
Previous study 1	0.20g	237.5	49.77	4.77
Previous study 2	0.50g	200.0	49.17	4.07
This study (LC1)	0.24g	245.0	54.96	4.46
This study (LC2)	0.45g	245.0	60.60	4.04
This study (LC3)	0.63g	245.0	59.55	4.11

Factor)과 응력비(Stress Ratio) 개념을 도입하여 해석의 적합성을 판단하였다.

Ha and Kim의 ‘비상 디젤발전기용 배전반의 내진 안전성에 관한 연구’^[15](이하 기존 연구 1로 표기)에 따르면, PGA 0.2g의 SSE (Safe Shutdown Earthquake) 하중 적용 시, 사용재료의 항복강도 237.5 MPa에 대하여 최대응력이 49.769 MPa로 산출되었다. 이는 안전율 약 4.77(응력비 20.95 %)에 해당하는 수치로, 적절한 내진 보강이 이루어진 배전반 구조물이 하중의 약 20 % 수준에서 안정적으로 거동함을 보여준다.

또한 Kook *et al.*의 ‘천연가스 생산기지 내 UPS 시스템의 해석모델 개발 연구’^[16](이하 기존 연구 2로 표기)에서는 IEEE Std 693 규격의 가장 가혹한 조건인 ‘High Required Response Spectrum (0.5g)’을 적용하였다. 해당 연구에서 항복강도 200 MPa 대비 최대응력은 49.17 MPa로 나타났으며, 이는 안전율 약 4.07(응력비 24.58 %)이다.

Table 13에 기존 및 이 연구 결과의 안전율을 나타내었다.

이 연구에서는 SS275 강재의 항복강도를 245 MPa를 사용하는 배전반에 3종의 지진파를 적용하였다. 보강 구조에 대한 해석 결과, LC1 (0.2431 g) 지진파 적용 시 최대응력 54.96 MPa로 안전율이 4.46(응력비 22.43 %), LC2 (PGA 0.447 g)에서는 최대응력 60.6 MPa로 안전율 4.04(응력비 24.73 %), LC3 (PGA 0.6314 g)에서도 최대응력 59.55 MPa, 안전율 4.11(응력비 24.31 %)로 산출되었다.

결과적으로, 이 연구의 안전율 산정 결과는 기존 선행 연구들과 유사한 범위(약 4.0–4.8) 내에서 유지되고 있음을 확인하였으며, 이는 이번 연구에 사용된 해석 모델의 타당성 및 결과의 신뢰성을 입증하는 근거로 사용될 수 있다.

다만, 이 연구와 선행 연구들은 배전반의 기하학적 제원, 내부 탑재 기기의 질량 분포 및 배치 형태가 상이하며, 적용된 지진파의 특성(PGA, 주파수 대역, 지속 시간 등) 및 경계 조건 등 세부 해석 조건에 명확한 차이가 존재한다. 따라서 이 연구에서 도출된 안전율과 기존 연구의 결과를 1:1로 직접 비교하여 절대적인 내진 성능의 우위를 논하는 것에는 한계가 있다. 4절에서의 비교 검증은 상이한 조건 하에서도 배전반의 박판 강재 구조물이 적절한 내진 설계 및 보강을 거쳤을 때 나타나는 전반적인 응력비와 안전율의 거시적 범위를 확인하고, 이 연구에서 진행한 유한요소해석 결과가 공학적으로 타당하고 신뢰할 수 있는 거동 범위 내에 있음을 교차 검증하기 위한 목적으로 수행되었다.

5. 결론

이 연구에서는 배전반의 내진 성능 향상을 위해 기하형상 보강 방안을 제안하였으며, 3가지 지진파 조건 하에서 수치 해석을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최종 보강 모델 분석 결과, 동일 조건하에서 배전반의 모든 방향(X, Y, Z축)에서 변위 저감 효과를 확인하였다. 특히 배전반의 길이 방향인 X축의 경우 지진파 특성에 따라 최대 94.76 %의 변위 감소가 발생하였으며, Y축과 Z축에서도 최대 52.90 %, 58.10 % 감소하였다. 이는 제안된 보강 구조가 특정 방향에 국한되지 않고, 구조물 전반의 동적 안정성 향상에 역할을 하는 것을 의미한다.
- (2) 고유치 해석 결과, 모든 축에서 고유진동수와 강성이 향상되어 하중 저항 성능이 강화되었다. Y축은 강성이 약 24 % 이상 향상(2,340 kN/m → 2,923 kN/m)되었으며, X축 및 Z축 또한 보강 후에 고유진동수 상승에 따라 강성이 각각 약 50 %, 10 % 이상 증가하였다. 결과적으로 이러한 동적 특성의 변화는 배전반이 보강 전보다 안정적으로 거동하며, 모든 축에서 구조적 저항 성능이 확보되었음을 의미한다.
- (3) 지진파 응답 분석 결과, 배전반의 최대 응답은

PGA의 크기뿐만 아니라 지진파의 주파수 특성과 구조물의 진동수에 의해 발생하는 증폭 현상에 의해 결정됨을 확인하였다. 가속도 민감 영역(Y, Z축)에서는 PGA와 가속도 증폭비(α_A)의 조합이 가장 큰 경우(LC2, LC3)에서 최대 변위가 발생하였고, 속도 민감 영역(X축)은 PGV와 속도 증폭비(α_V)의 상호작용에 의해 최대 응답이 결정됨을 도출하였다. 이러한 이론적 산정 결과는 수치 해석과 높은 정합성을 나타내었으며, 이는 배전반의 동적 응답이 구조물의 동특성 및 지진파의 특성에 따라 종속적으로 결정되는 것을 보여준다.

- (4) 검토된 모든 지진파 조건에서 보강 후 응답 변위는 기능 유지를 위한 허용 기준인 3 mm 이내로 제어되어 충분한 내진 성능을 확보한 것으로 분석되었다. 또한 모든 경우에서 발생한 최대 Von-Mises 응력은 강재 항복강도인 245 MPa의 약 25 % 수준인 60.6 MPa 이내로 산출되었으며, 이를 통해 극한의 지진하중 작용 시에도 배전반 구조물이 탄성 범위 내에서 거동하며 높은 안전율을 유지할 수 있음을 확인하였다. 결과적으로 이 연구에서 제안한 보강 구조는 지진파의 가속도 특성이나 지속 시간과 관계없이 배전반의 구조적 안정성을 보장할 수 있는 유효한 방안인 것으로 판단된다.

이 연구의 구조해석은 해석의 효율성을 위해 보강재 접합부를 완전 강결로, 앵커볼트 체결부는 지반에 대한 완전 고정단으로 이상화하여 수행되었다. 그러나 실제 현장 시공 시 보강재는 유지보수가 용이한 탈부착형 체결 방식으로 적용될 예정이며, 강진 발생 시에는 앵커의 뺄힘이나 바닥판 및 모재 경계면(3 mm 보강재와 2.3 mm 모재)에서의 국부적인 거동이 전체 구조물의 응답에 변수로 작용할 수 있다. 따라서 향후 실무 적용 및 정밀한 내진 성능 평가를 위해서는 이러한 체결부의 국부적 거동을 고려한 상세 해석이 요구되며, 나아가 1:1 스케일의 진동대 실험을 통한 보강 방안의 실물 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 안성산업(주)의 내진 배전반 개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 필요한 배전반 표본 및 제반 자료를 지원해 주신 안성산업(주)에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] IEEE. (2018) *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, IEEE Std 693-2018, IEEE Standards Association, USA.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Seismic Design Code for Buildings (KDS 41 17 00:2019)*, Korea (in Korean).
- [3] Bae, C.J., Lee, C.H., and Jun, S.C. (2023) Shake-Table Seismic Performance Evaluation of Stiffener-Reinforced Steel Angles Used for Floor-Mounting of Nonstructural Components, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, pp.59-60 (in Korean).
- [4] Oh, S.-H., Park, H.-Y., and Park, J.H. (2020) Connection Detail of Cladding Support System for Seismic Performance Improvement, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.285-295 (in Korean).
- [5] An, J.H., Kim, S.-Y., and Park, G.-S. (2024) Stiffness-Based Seismic Design of Access Floor System with Multi-Span Continuous Stringers, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.3, pp.175-185 (in Korean).
- [6] Lee, S., and Jung, W. (2019) Analytical Study on the Loading Characteristics of the Distribution Panel Installed Anchorage under the Seismic, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.29, No.6, pp.753-761 (in Korean).
- [7] Choi, Y.H., Kim, S.-T., Seol, S.-S., and Moon, S.-C. (2020) Seismic Integrity Analysis of an Electric Distributing Board using the Response Spectra Analysis Method, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, KSMPE, Vol.19, No.4, pp.45-51 (in Korean).
- [8] Park, S.W., and Yoo, Y.S. (2024) An Analytical Study on the Change of Natural Frequency and Response Spectrum Analysis Results According to the Inline Installation of Switchboards, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Mechanical Engineers*, KSME, pp.142-143 (in Korean).
- [9] Choi, E., Kim, J.H., Yoo, W.D., and Lee, S.Y. (2012) Seismic Retrofitting Technology of Access Floor System for Existing Switchboards, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 31-39 (in Korean).
- [10] MIDAS (2025) MIDAS CIVIL NX, <https://www.midasuser.com/ko/product/civil> (in Korean).
- [11] Korea Rail Network Authority (2021) Standard Specification for Distributing Board, KRSA-3105-R2 (in Korean).
- [12] Bathe, K.J. (1996) *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, USA.
- [13] Newmark, N.M., and Hall, W.J. (1982) *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, USA.
- [14] Chopra, A.K. (2000) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2nd Ed.), Prentice Hall, USA.
- [15] Ha, N.-G., and Kim, J.-S. (2023) A Study on the Seismic Stability of an Existing Switchboard for Emergency Diesel Generator, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, KSIC, Vol.26, No.6, pp.1341-1348 (in Korean).
- [16] Kook, S.-K., Hong, S.-K., Kim, J.-H., Choi, W.-M., and Park, Y.-H. (2016) Development of an Analysis Model for UPS System of LNG Receiving Terminal Facilities, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.29, No.6, pp.539-545 (in Korean).

요약: 이 연구의 목적은 지진하중 발생 시 배전반의 동적 응답을 분석하여 구조적 안전성을 검토하는 것이다. 성능 평가의 신뢰성을 확보하기 위해 3차원 유한요소 모델을 활용하여 총 3종의 지진파를 적용한 시간이력해석을 수행하였다. 분석 과정에서는 보강 전 모델에서 발생하는 최대 변위 발생 지점을 정밀하게 파악하여 구조적 취약 부위를 규명하고, 프레임 전체의 안정성을 평가하는 데 중점을 두었다. 시간 흐름에 따른 동적 거동 추적을 통해 이 연구는 합리적인 내진 보강 부위를 결정하기 위한 공학적 근거를 제시한다. 이러한 분석 결과는 현장에 설치되는 전기 외함 시스템의 내진 복원력을 향상시키기 위한 실무적인 설계 지침으로 활용될 수 있다.

핵심용어: 배전반, 지진파, 내진, 기하학적 요소 보강, 유한요소해석