

지진에 의한 배전반 설치 앵커부의 하중특성에 대한 해석적 연구

Analytical Study on the Loading Characteristics of the Distribution Panel Installed Anchorage under the Seismic

이 상 문* · 정 우 영†
Sang-Moon, Lee* and Woo-Young, Jung†

(Received September 6, 2019 ; Revised October 29, 2019 ; Accepted October 29, 2019)

Key Words : Distribution Panel(배전반), Hydroelectric Power Plant(수력 발전소), Shaking Table Test(진동대 실험), Anchorage Behavior Characteristics(앵커거동특성), Anchorage Load(앵커 인발력)

ABSTRACT

The main purpose of this study is to assess the safety of the fixed earthquake anchorages for the distribution panel of facilities in an actual power plant. Experimental and analytical studies were conducted to investigate the load response that occurs on the anchorages in the event of an actual earthquake. Shaking table experiments of the panels were first conducted and the boundary conditions of different joint connections were considered depending on the fabrication characteristics of the subject structure for a 3D finite element analysis modeling proposal. Therefore, the contribution of this study was to investigate the transfer load characteristics of the anchorages of the switchboard field installation according to the seismic wave characteristics through a comparison with a vibration band experiment and the three-dimensional finite element analysis modeling presented through this study. Using the verified analysis model, an additional finite element analysis was performed to check the dynamic behavior of anchor bolts under various loading conditions such as weight changes and other earthquake waves.

1. 서 론

지진의 경우 다른 기상이변과 달리 예보가 어렵고 발생 시간이 짧기 때문에 그에 따른 대피나 준비를 할 수 있는 시간적 여유가 매우 부족하여 상대적으로 많은 인명과 재산적 피해가 발생한다. 특히 사회간접 자본의 중요 시설물 중의 하나인 발전소의 경우, 지진과 같은 자연재해에 노출이 된다면 운용 및 발전설비의 기능적 손실 및 오작동이 발생할 수 있으며 보

다 심각한 사회적 혼란과 피해를 초래할 수 있는 2차 피해로 이어질 수 있다⁽⁷⁾. 발전소 운용 시 전기설비는 일반적으로 패널(캐비닛)형태로서 앵커볼트로 대부분 배전반 바닥과 슬래브를 고정하고 있다. 최근 지진에 따른 이들 운용설비에 대한 지진피해가 Fig. 1과 같이 발생한 사례가 있으며 대부분 고정부 앵커의 손상으로 인한 시설물의 전도 및 슬라이딩 피해로 나타났는데, 이를 통하여 지진발생에 따른 주요 위험부위가 현장설치 앵커로 그 중요성을 인식할 수 있었다. 현재 국내의 경우 운용설비 내진성능 검증은 콘크리트

† Corresponding Author ; Member, Gangneung-Wonju National University
E-mail : woojung@gwnu.ac.kr
* Gangneung-Wonju National University

‡ Recommended by Editor Soo Il Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

설계기준을 통하여 슬래브에 국한되어 이루어지고 있으며, 정착 중요한 앵커 시스템에 대한 지진동 관련 성능기준 및 연구는 미비한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 배전반 내 고정부 앵커볼트에 대한 내진거동을 파악하고자 진동대 실험을 통한 구조물 응답을 분석하고, 수치모델을 이용한 해석적 연구를 통하여 실험 결과와 비교함으로써 검증된 수치해석모델링을 제안한다. 또한, 이를 이용하여 여러 가지 변수에 따른 고정부 앵커의 지진동에 따른 동적 거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험 및 수치해석 모델링

이 연구에서는 진동대 실험을 우선적으로 수행하고 이를 통하여 유한요소 해석을 위한 모델링의 신뢰성을 검증하였다. 검토 시 고려된 지진하중은 진동대 실험에 사용하였던 지진과 중 일부를 적용하여 진행하

였으며 고유진동수, 변위 그리고 앵커 전달하중 등을 비교하여 제안된 해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

2.1 실험적 방법

(1) 실험대상 제원

진동대 실험에 사용된 대상은 단문형 배전반으로 내부에 설치된 MCC(moter control center)와 계기용 변압변류기와 같은 운용설비는 제거 후 실험을 진행하였으며 제원은 Table 1 및 Fig. 2와 같이 나타내었다.

(2) 실험방법 및 순서

진동대 실험 시 ICC-ES AC156의⁽¹⁴⁾ RRS(required response spectrum), 원자력발전소 내진설계 기준 Reg. 1.60⁽¹⁶⁾ 및 울진지역의 등재해도 스펙트럼

Table 2 Seismic parameters of AC156 based on KBC

S_{DS}	z/h	A_{FLEX-H} (g)	A_{RIG-H} (g)	A_{FLEX-V} (g)	A_{RIG-V} (g)
0.55	1	0.88	0.67	0.36	0.14



Fig. 1 Type of damage to operating facilities

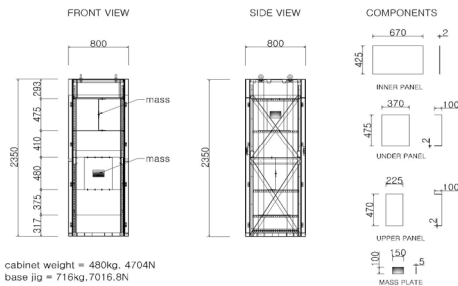


Fig. 2 Dimension of the specimen

Table 1 Tested specimen specifications

Specimen name	Dimensions (mm)			Weight (kg)	Boundary (fixed)
	Length	Width	Height		
Single door cabinet	800	800	2350	480	M16 Anchor

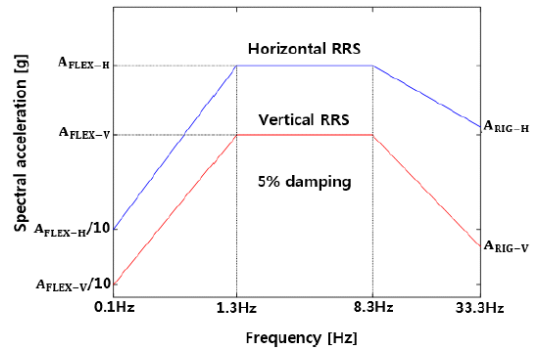


Fig. 3 Required response spectrum of AC156

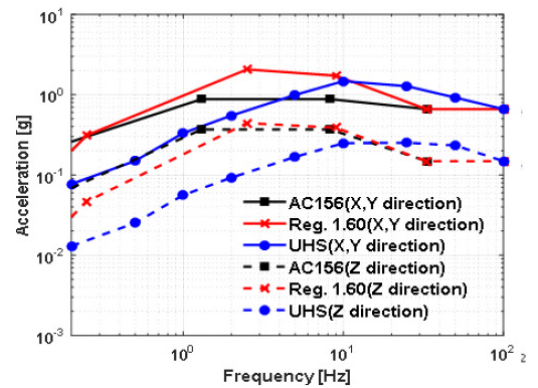


Fig. 4 Required response spectrum

(uniform hazard spectrum, UHS)의 가속도 배율을 조정한 3개의 입력지진파를 선별하여 시간이력실험을 수행하였다.

ICC-ES AC156은 국외에서 주로 사용되는 비구조요소 진동대 실험기준으로 ASCE 7과 IBC(international building code)를 바탕으로 하고 있으며 국내의 건축 구조기준에도 적용이 가능하며 산정된 주요 계수 결과들은 Table 2에 나타내었다. Fig. 3의 ICC-ES AC156규정된 RRS 감쇠비 5%를 적용하였으며, Reg. 1.60과 UHS의 영주기 가속도 값을 수평 및 수직방향으로 각각 0.67 g, 0.14 g로 정규화하여 Fig. 4에 나타내었다.

실험 시 Fig. 5와 같이 배전반 높이에 따른 내부 판재 중앙부, 최상단, 측면과 같은 주요 위치에 가속도계를 설치하여 거동을 측정하고 지그와 배전반 바닥판의 볼트 연결부 8개소에 8개의 로드셀을 설치하여 지진 시 앵커에 발생하는 인발력을 측정하였다. 추가적으로 배전반 측면 상·하단에 추가 구조물을 이용하여 총 2개의 LVDT를 설치하여 배전반의 변위응답으로 상대변위를 측정하여 지진동에 의한 배전반의 거동을 측정하였다.

초기 공진실험 시 Fig. 6(a)과 같은 쿵깡거림(banging),

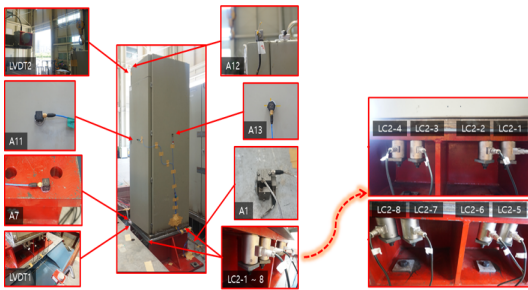
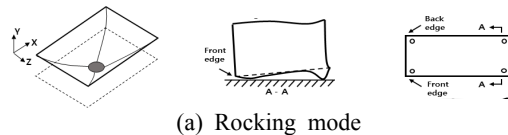


Fig. 5 Location of the each sensors



(a) Rocking mode



(b) Reinforcement

Fig. 6 Reinforcement to prevent rocking mode

덜컹거림(rattling) 등의 충격신호와 내부 판재들의 local mode로 인해 계측이 어려웠으며, 각 지진파들을 이용한 시간이력실험에서도 동일한 이유로 banging, rattling 현상이 발생하였다. 이는 앵커볼트에 인접한 바닥판의 국부변형(anchor localized deformation)에 의한 rocking mode로 추정되는 형상에 의해 정확한 측정이 이루어지지 않는 것으로 판단되어 Fig. 6(b)와 같이 실험체 하부 10 mm 광판 플레이트를 보강하여 재실험하였다. 배전반의 문은 볼트 체결하여 고정하였으며 내부 판재와 부재들은 용접 체결하여 고정하였다.

2.2 해석적 방법

(1) 모델링 제원 및 구성

이 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 비선형 거동특성을 알아보려고 비선형 강재 재료모델을 고려하였다⁽⁵⁾. FE 모델링의 구성은 Fig. 7과 같이 크게 본체, 지그, 앵커 볼트 3 그룹으로 분류하여 구성하였으며, 배전반 바닥부와 지그 상부면 사이의 접촉면은 실험과 동일한 조건으로 슬라이딩 효과를 갖도록 interaction 기능을 사용하여 경계면을 모델링하였다.

(2) 비선형 강재 재료모델 구현

해석 시 비선형 강재 재료모델을 구현하기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 Rayleigh damping system 알고리즘을 이용하여 재료 물성치에 적용하는 해석 방법을 사용하였다.

이 system의 감쇠계수 α_M 과 β_k 값을 산정하는 부

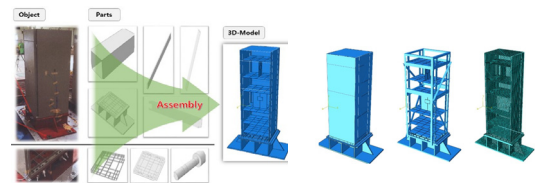


Fig. 7 Overall 3D-modeling geometry

Table 3 Material properties in 3D FEM

Material	Density (ton/mm)	Elastic		Damping (5%)	
		Young's modulus	Poisson's ratio	Alpha	Beta
Steel (SS400)	7.85e-09	2.1e+05	0.30	3.5775	6.99e-04

분에 있어서 eigen valuse analysis에서 나온 결과(고유진동수)와 미국 원자력 발전소에서 규정되는 USI A-46의⁽¹⁶⁾ general equipment에 대하여 제시한 감쇠 계수 5%가 factor로 이용되며, 최종적으로 위의 계수를 시간이력해석 시 재료 물성치에 적용하여 해석을 수행하였으며, 그 값은 Table 3에서 나타낸 것과 같다.

(3) 하중 조건

지진 하중은 실험 시 고려된 3가지 지진과 중 AC156을 이용하여 해석을 진행하였다. 지진 하중 및 방향은 실험에서 LVDT가 설치된 축(실험 시 Axis-X, 해석 시 Axis-Z)을 기준으로 고려하였으며 고유치해석의 경우 모든 지점을 고정(all-fixed), 시간 이력해석의 경우 하중이 적용되지 않는 2축(Axis-X,Y)을 고정하고 하중이 적용되는 Axis-Z에 대하여 release

한 후 해석을 수행하였다.

2.3 해석결과 비교 및 검증

(1) 고유진동수

공진탐색시험을 통하여 배전반의 고유진동을 측정 한 값과 해석을 통하여 알아낸 고유진동수를 서로 비교하였다. 실험의 경우, 고유진동탐색에 사용된 가속 도는 1 Hz ~ 50 Hz 까지 0.07 g의 수준에서 수행되었으며 Table 4에 나타낸 것과 같이 배전반 최상단에 설치된 가속도 센서 A12의 X축에서 측정된 15.3 Hz를 고유진동수로 결정하였다. 해석적 연구에서는 모드추출 방법인 Lanczos method를 이용하여 총 10차 모드에 대한 고유진동수를 파악하였으며, Table 5와 같이 94%의 질량이 참여된 5차 모드에서의 값을 고유 진동수로 결정하였다. Fig. 8은 언급한 5차 모드에 대한 모드 형상을 나타낸 것이다.

Table 4 Resonance search experiment results

Specimen	Sensor	Location	Resonant frequency (Hz)		
			X	Y	Z
Panel (single door)	A7	Bottom zig	N/A	N/A	16.0
	A8	Inside story 1	16.0	16.0	22.3
	A9	Inside story 2	16.0	13.8	23.3
	A10	Insidestory 3	15.8	17.8	16.0
	A11	Door center	16.0	16.3	16.0
	A12	Panel top	15.3	14.3	16.0
	A13	Side center	23.0	14.3	16.0

(2) 상대 변위

Fig. 9는 AC156에 대한 실험 시 측정된 배전반의 상대변위를 나타내었으며 Table 6은 보강 전·후의 상대변위 최대값과 최소값을 나타내었다. 보강 전 상대변위가 최대 4.02 mm까지 발생하였으나 보강 후 상대변위가 1.4 mm 이하로 약 70% 감소하였다. 이는 배

Table 5 Eigenvalue search analysis results

Mode No.	Eigen value	Natural frequency (cycle/sec)	Effective mass* (Axis-Z)
1	1931	6.9941	5.19859e-09
2	5088	11.353	5.20151e-08
3	5116	11.384	7.19501e-08
4	5732	12.051	1.95357e-07
5	10824	16.558	0.14054
6	11160	16.813	1.92275e-04
7	12498	17.792	2.29046e-05
8	12560	17.837	4.78865e-03
9	13981	18.818	3.98728e-03
10	22174	23.700	1.77555e-04

* The total effective mass at the Axis-Z is 0.14995

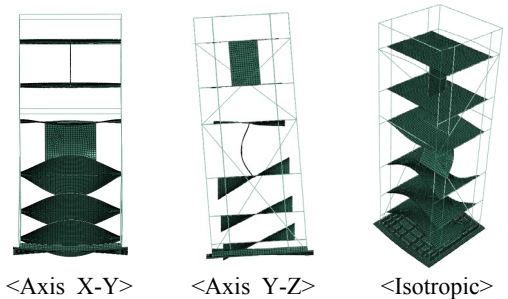


Fig. 8 View of the 5th mode shape

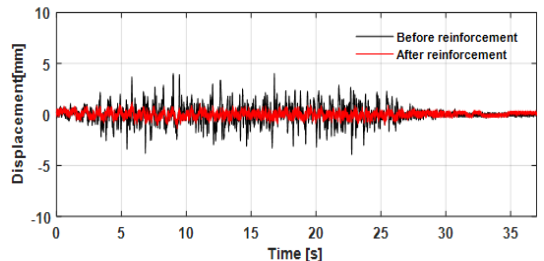


Fig. 9 Test results of relative displacement

전반이 앵커볼트로 고정될 경우 지진 시 배전반 내·외부에 충격이 가해져 **uplifting** 현상이 발생, 앵커볼트 주변으로 **cup-like** 변형 등이 생성되어 **rocking**이 발생되는데 이들 현상의 발생이 변위에 상당한 영향을 미치는 것임을 알 수 있었다. 보강된 조건에서 유한요소 해석을 이용하여 분석한 상대 변위는 0.402 mm이며, Fig. 10에 나타내었다.

(3) 앵커볼트 하중

Table 7은 AC 156 지진과의 시간이력실험에 대한 앵커하중의 실험과 해석결과들을 load cell 위치에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 11은 실험과 유한요소 해석 간 앵커 하중에 대한 비교 그래프이며 LC2-1을 제외한 앵커볼트에 전달되는 지진 응답은 대체적으로 비슷한 경향이 나타남을 알 수 있었다. 실험 Data LC2-1의 하중이 튀는 현상은 앞 절에서 언급한 지진동으로 인한 배전반 내 외부의 **rocking mode** 발생으로 인하여 유발되는 현상으로 판단된다.

Table 6 Relative displacement results

Relative displacement	Before reinforcement	After reinforcement
Maximum	4.02 mm	1.23 mm
Minimum	-3.93 mm	-1.39 mm

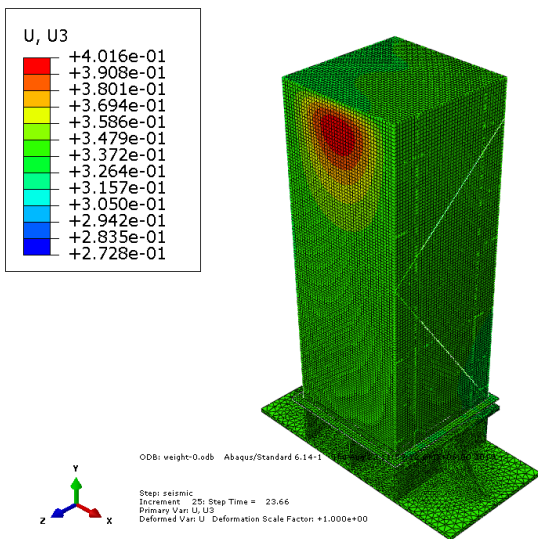


Fig. 10 Analysis results of relative displacement

3. 하중특성 분석

제안된 해석모델을 이용하여 실험체(중량 변화 등)와 지진하중(국내 발생 지진파)에 대한 각각의 변수로 구분하여 지진동에 따른 앵커볼트에 발생하는 거동특성을 조사하였다.

3.1 중량 변화에 따른 거동특성 분석

(1) 실험체 중량 조사

Table 8은 배전반을 구성하고 있는 요소들을 실측하여 조사한 값으로 실제 배전반 중량은 Table 1에 명시하였다.

대상구조물인 배전반의 경우 전반적으로 판재의 두께가 얇은 상태로 향후 배전반을 구성하는 프레임 판재의 두께가 두꺼운 것으로 교체된다는 가정 하에 전체 단위 중량을 10%, 20%, 30%, 40% 로 증가시켜 앵커볼트에 끼치는 영향을 분석하였으며, Fig. 8과 같이 내부에 모델링된 mass plate의 중량을 10%, 30%, 50%, 100% 증가시켜 전원공급기 같은 운용

Table 7 Comparison max. anchorage load results

Specimen	Description	Anchorage load (kN)	
		Experiment	Analysis
Panel (single door)	LC2-1	0.301	0.136
	LC2-2	0.198	0.148
	LC2-3	0.182	0.147
	LC2-4	0.207	0.142
	LC2-5	0.221	0.152
	LC2-6	0.170	0.191
	LC2-7	0.179	0.164
	LC2-8	0.171	0.177

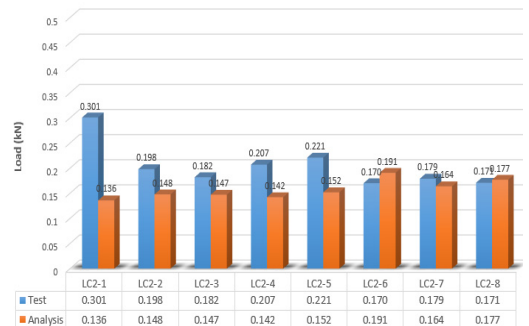


Fig. 11 Comparison between test and analysis

설비 부품의 부분 교체에 대한 중량 변화에 따른 영향성도 추가적으로 분석하였다.

(2) 프레임 및 내부 판넬 교체

프레임 내 판재두께의 변화에 따른 구조물 전체 중량의 증가가 하부 콘크리트에 설치된 고정부 앵커볼트에 미치는 영향을 분석하였다. 해석결과, Table 9와 Table 10에서 보이는 바와 같이 중량이 증가함에 따라 변위 및 앵커하중이 값이 증가하는 경향을 보였으며, 변위의 증가폭은 초기 조건대비 약 0.3 mm, 하중에 있어서는 약 5%~10% 증가하는 것으로 나타났

다. 지진동 발생 시 대상구조물 내 중량 변화와 배전반 내 고정부 앵커에 미치는 영향성은 다소 존재함을 알 수 있다.

(3) 내부 운용설비 교체

배전반 내부의 운용설비 부품 교체로 인한 부분적인 중량 변화가 지진동 발생 시 구조물의 거동 및 고정부 앵커볼트에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 조사하였다. 대상부품으로 고려된 mass plate의 재질은 배전반과 동일한 강재로 구성하였으며, 크기는 가로 세로 150 mm × 100 mm, 두께는 5 mm, 개수는 2 ea로 구성하였다.

Table 8 Distribution panel weight list

Parts	Length (mm)	Number (ea)	Self weight (ton)	Total weight (ton)
Body Pl	2300	4	7.850	0.178
	800	1		0.015
Side Pl (v)	2350	4		0.034
Side Pl (h)	800	4		0.012
Bottom Pl	900	1		0.065
	800	14		0.014
Bottom stiffener	256.4	4		0.0012
	156.6	4		0.0008
	167	2		0.0004
Inner Pl (v1)	440	1		0.002
Inner Pl (v2)	530	1		0.003
Inner Pl (h)	600	6		0.046
	1526	2		0.014
Bracing	1131	2		0.010
	2350	4		0.043
Column	800	4		0.015
	800	8		0.008
Main frame	800	4		0.018
Mass plate	100	2		0.001
Total				

Table 9 Abs. max. results of displacement

Step	Self weight (ton)	Total weight (ton)	Max. Disp. (mm)
0 %	7.850	0.480	0.402
10 %	8.635	0.528	0.408
20 %	9.420	0.576	0.415
30 %	10.205	0.624	0.422
40 %	10.990	0.672	0.429

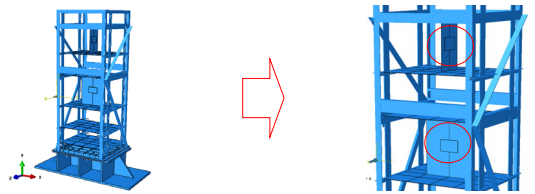


Fig. 12 Mass plate on the inner plate

Table 10 Comparison anchorage load each step

Whole change	Anchorage load (kN)				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
LC2-1	0.136	0.137	0.139	0.141	0.142
LC2-2	0.148	0.151	0.154	0.158	0.161
LC2-3	0.147	0.150	0.153	0.156	0.159
LC2-4	0.142	0.145	0.147	0.149	0.152
LC2-5	0.152	0.142	0.144	0.146	0.148
LC2-6	0.191	0.198	0.204	0.212	0.220
LC2-7	0.164	0.168	0.169	0.171	0.172
LC2-8	0.177	0.181	0.185	0.190	0.194

Table 11 Abs. max. results of displacement

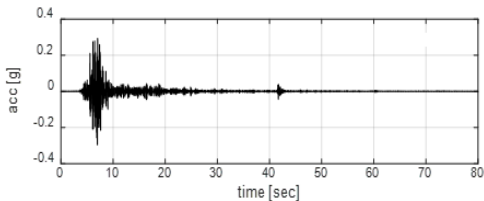
Step	Unit weight (kg)	Total weight (kg)	Max. Disp. (mm)
0 %	0.589	1.178	0.4016
10 %	0.648	1.296	0.4016
30 %	0.766	1.531	0.4017
50 %	0.884	1.767	0.4018
100 %	1.178	2.356	0.4019

하중변수는 Table 12와 같이 무게를 10%, 30%, 50%, 100% 증가시켜 해석에 적용하였으며, 중량을 제외한 하중, 경계조건 및 해석 수행 방법은 기존과 동일하게 유지하였다. 부분적 부품교체에 따른 중량 변화에 따른 배전반의 변위 및 앵커하중 결과의 경우 Table 11 및 Table 12와 같이 중량 변화 대비 지진동에 의한 영향이 미미하게 나타났다.

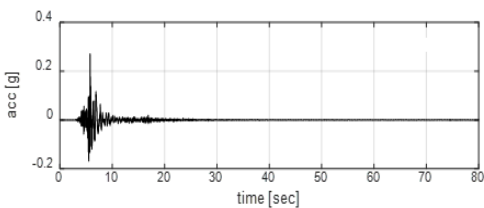
그 이유로는 본래 배전반을 구성하는 얇은 강재로 인하여 자체 중량이 작고 flexible한 강성이 형성되어 전반적으로 지진동이 배전반 및 앵커볼트의 거동에 많은 영향을 주지는 못한 것으로 분석되며, 따라서 배전반 내부에 설치되는 운용 장비의 교체로 인한 무게 변화는 지진 시 배전반에 직접적인 영향이 없으므로 판단된다.

Table 12 Comparison anchorage load each step

Partial change	Anchorage load (kN)				
	0 %	10 %	30 %	50 %	100 %
LC2-1	0.136	0.136	0.136	0.137	0.138
LC2-2	0.148	0.149	0.150	0.151	0.151
LC2-3	0.147	0.148	0.149	0.150	0.150
LC2-4	0.142	0.142	0.143	0.143	0.144
LC2-5	0.152	0.140	0.141	0.141	0.142
LC2-6	0.191	0.193	0.195	0.195	0.196
LC2-7	0.164	0.164	0.166	0.166	0.167
LC2-8	0.177	0.177	0.179	0.179	0.180



(a) Gyeongju seismic acceleration



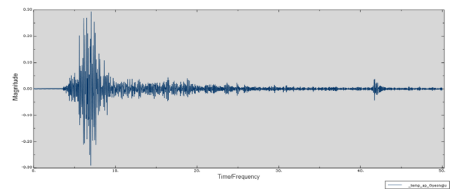
(b) Pohang seismic acceleration

Fig. 13 Actually seismic frequency

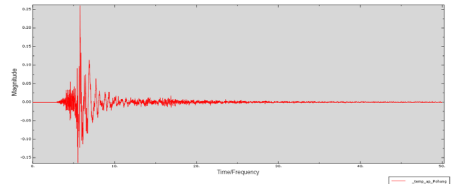
3.2 국내 지진발생에 따른 거동특성 분석

(1) 국내 지진발생 사례

최근 규모 5.0 이상의 강진이 발생한 경주 및 포항의 경우 비 구조요소에 피해는 전체 피해의 54%에 달하는 것으로 보고되었다. 이에 따른 제안된 수치 모델에 경주 및 포항 지진 data를 해석에 적용시켜 배전반의 지진동에 의한 거동특성을 분석하고 고정부 앵커에 전달되는 지진하중의 동적 특성을 검토하고자 하였다. Fig. 13은 배전반의 거동을 분석하기 위해 적용된 경주 및 포항지진의 실제 진폭을 나타내며, Fig. 14는 해석 시 amplitude로 적용되는 진폭을 나타낸 것이다.

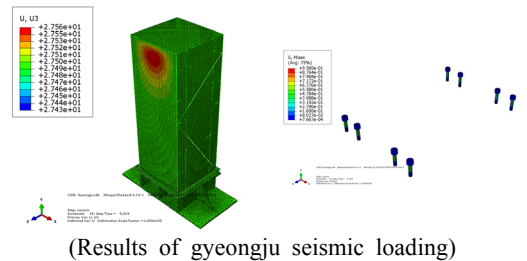


(a) Gyeongju seismic acceleration

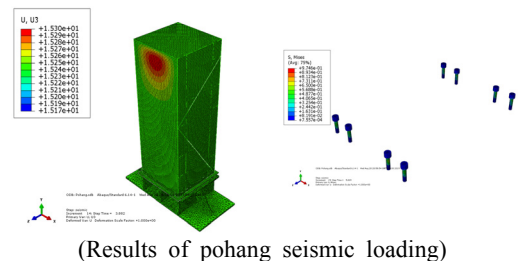


(b) Pohang seismic acceleration

Fig. 14 Converted amplitude for numerical analysis



(Results of Gyeongju seismic loading)



(Results of Pohang seismic loading)

(a) Displacement (b) Anchorage load

Fig. 15 Comparison results each seismic

Table 13 Comparison results each displacement

Classification	Maximum displacement (mm)	Remark
Gyeongju	27.56	Magnitude 5.8
Pohang	15.30	Magnitude 5.4

Table 14 Comparison results each anchorage load

Description	Anchorage load (kN)	
	Gyeongju	Pohang
LC2-1	0.1368	0.1387
LC2-2	0.1482	0.1497
LC2-3	0.1474	0.1483
LC2-4	0.1487	0.1486
LC2-5	0.1520	0.1520
LC2-6	0.1922	0.1960
LC2-7	0.1646	0.1642
LC2-8	0.1802	0.1867

(2) 결과 및 분석

Fig. 15는 국내 지진에 대한 배전반의 시간이력해석을 통한 변위 및 앵커하중의 결과를 나타내었다. Table 13과 Table 14에서 나타난 결과들을 비교함에 있어 경주에서 발생한 지진의 영향이 포항발생 지진의 것보다 약 12 mm 크게 변위가 발생하였지만 고정부 앵커에 전달되는 하중은 동일한 수준으로 나타났다. 그 이유로는 상대적으로 지진의 영향이 구조물에 미치는 시간이 긴 경주지진이 포항지진에 비하여 배전반의 변위에 좀 더 많은 영향을 준 것으로 판단되며, 두 지진의 진폭 최대치는 차이가 없어 앵커 볼트 전달하중의 결과는 비슷하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구는 발전소 내 배전반 시설물에 대하여 지진 발생 시 현장설치 고정 앵커부의 성능평가를 위한 기초연구로서 실제 지진발생 시 앵커부에 발생하는 하중응답을 조사하고자 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 수행된 진동대 실험 결과를 토대로 제안된 유한요소해석 모델링의 검증을 수행하고 실험체의 자중 변화에 따른 거동특성과 실제 국내에서 발생한 지진파에 의한 고정부 앵커볼트에 전달되는 하중응답을 해석적 연구를 통하여 검토하였다.

(1) 진동대 실험을 통하여 지진동으로 인한 배전반

하부 바닥판의 국부적인 rocking 현상을 10 mm 강판으로 보강하면 상대적으로 변위 및 고정부 앵커볼트의 하중이 보강 전 대비 70 % 이상 감소하는 것을 알 수 있었다.

(2) 배전반의 지진동에 대한 거동특성을 파악하고자 유한요소모델을 제안하였으며, 전반적으로 비슷한 거동 양상을 토대로 3차원 해석 모델링을 수행하였으며 이를 통하여 배전반 설비의 중량 변화에 따른 지진동 영향성을 조사하였다. 그 결과 배전반 중량의 경우 구조물 자체의 거동에 미치는 영향이 크지 않으며 이는 배전반 자체의 중량이 작고 flexible한 강성이 형성되어 지진동 발생 시 콘크리트 고정부 앵커볼트의 거동에도 많은 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

(3) 국내에서 발생한 지진파를 통한 배전반의 전반적인 거동을 해석적으로 분석한 결과, 배전반의 변위에 주로 영향을 미치는 부분은 지진의 진폭이 구조물에 전달되어 영향을 미치게 하는 시간에 따라 결정되는 것으로 보이며 고정부 앵커볼트의 경우 전달되는 지진하중은 지진동 진폭에 의하여 영향을 받는 것으로 나타났다.

(4) 배전반의 실제 설치 및 현장 적용에 있어서 내진 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 향후 필요할 것으로 사료되며, 이 연구를 통하여 지진 시 배전반과 비슷한 여타 비 구조요소의 해석적 연구 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(19IFIP-B128598-03)에 의해 수행되었습니다.

References

(1) Abdelnaby, A. E. and Elnashai, A. S., 2015, Numerical Modeling and Analysis of RC Frames Subjected to Multiple Earthquakes, Earthquakes and Structures, Vol. 9, No. 5, pp. 957~981.
 (2) Calvi, P. M., 2014, Relative Displacement Floor Spectra for Seismic Design of Nonstructural Elements. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 1037~1059.
 (3) Chowdhury, I. and Dasgupta, S. P., 2003, Computation of Rayleigh Damping Coefficients for

Large Systems, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 8, pp. 1~11.

(4) Ergun, M. and Ates, S., 2014, Comparing of the Effects of Scaled and Real Earthquake Records on Structural Response. *Earthquakes and Structures*, Vol. 6, No. 4, pp. 375~392.

(5) Hur, J., 2012, Seismic Performance Evaluation of Switchboard Cabinets Using Nonlinear Numerical Models, Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

(6) Kim, M. K. and Choi, I. K., 2011, A Shaking Table Test for an Re-evaluation of Seismic Fragility of Electrical Cabinet in NPP, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 24, No. 3, pp. 295~305.

(7) Oh, S. H., Park, H. Y. and Choi, K. K., 2018, Status and Characteristics of Earthquake Damage of Non-structural Constituent, *Journal of KSNVE*, Vol. 28, No. 3, pp. 12~19.

(8) Parks, J. E., Pantelides, C. P., Ibarra, L. and Sanders, D. H., 2018, Stretch Length Anchor Bolts under Combined Tension and Shear, *ACI Structural Journal*, Vol. 115, No. 5, pp. 1317~1328.

(9) Yun, D. W., Jeon, B. G., Jung, W. Y., Chang, S. J. and Shin, Y. J., 2019, Analysis of Anchorage Behavior Characteristics of the Electrical Cabinet Using Shaking Table Tests, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 43~50.

(10) Yang, J., Rustogi, S. K. and Gupta, A., 2003, Rocking Stiffness of Mounting Arrangements in Electrical Cabinets and Control Panels, *Nuclear engineering and Design*, Vol. 219, No. 2, pp. 127~141.

(11) American Society of Civil Engineering, 2000, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, ASCE 4-98, doi: 10.1061/9780784404331.

(12) Federal Emergency Management Agency, 2005, Earthquake Hazard Mitigation for Nonstructural Elements, FEMA 74-FM, http://mitigation.eeri.org/files/FEMA74_FieldManual.pdf.

(13) Federal Emergency Management Agency, 2012, Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide, FEMA E-74, <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/21405>.

(14) ICC Evaluation Service, 2015, Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-table Testing of Nonstructural Components, ICC-ES AC156-2010, <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac156/>.

(15) Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013, IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations, USA, IEEE Std 344, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6674964.

(16) Nuclear Regulatory Commission, 2014, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.60, <https://www.nrc.gov/docs/ML1321/ML13210A432.pdf>.



Sang-Moon Lee received his Master degree from Gangneung-Wonju National University with the topic related with evaluation of the applicability of reinforced concrete beams using FRP. He is currently a Ph.D. student at the Department of Civil Engineering of Gangneung-Wonju National University.



Woo-Young Jung received his Ph.D. degree from the State University of New York at Buffalo with the topic related with seismic retrofitting Strategies of Semi-rigid Steel Frame by using Polymer Matrix Composite Materials. He is currently a professor at the Department of Civil Engineering of Gangneung-Wonju National University.