

비선형시간이력해석을 이용한 수배전반의 지진취약도 도출

문종윤, 권민호*, 김진섭, 임정희
경상대학교 토목공학과

Seismic Fragility Evaluation of Cabinet Panel by Nonlinear Time History Analysis

Jong-Yoon Moon, Min-ho Kwon*, Jin-Sup Kim, Jeong-Hee Lim
Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University

요약 지진은 예보가 거의 불가능하고 짧은 시간동안 일어나 지진이 발생할 때 적극적인 대처를 할 시간적인 여유가 거의 없어 다른 자연재해에 비해 인명피해와 재산피해가 많이 발생한다. 최근 전 세계적으로 지진이 빈번하게 발생하고 있다. 이와 같이 지진의 증가에 따라 구조물의 안전성 확보에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 상대적으로 비구조요소인 전기 시설 등에 대한 연구는 미비한 실정이다. 그리고 현재 국내의 전기설비는 지진에 대한 안전설계를 하지 않는 경우가 많아 지진이 발생했을 때 손상에 매우 취약하다. 따라서 본 연구에서는 ABAQUS를 통해 실제 수배전반과 유사하도록 모델링을 하였고 자연지진파를 이용하여 3D 동적비선형해석을 수행하였다. 송변전설비 내진설계 실무지침서의 지진구역 I 과 보통지반암 조건에 따르면 기능수행수준의 최대응답가속도는 0.157g이다. 하지만 본 연구에서 일반적인 수배전반에 대한 해석결과 0.1g에서 한계상태 도달비율은 30%로 안전하다고 볼 수 없다. 그리고 해석결과를 통해 지진취약도를 도출하고 분석하였다. 도출된 지진취약도는 수배전반의 한계상태를 판별하는 정량적 근거로 제시하고 이와 관련된 연구의 기초자료로 활용되는데 목적을 가지고 있다.

Abstract Earthquakes are almost impossible to predict and take place in a short time. In addition, there is little time to take aggressive action when an earthquake occurs. Therefore, there are more casualties and property damage than with other natural disasters. Recently, earthquakes have been occurring all over the world. As the number of earthquakes increase, studies on the safety of structures are being carried out. On the other hand, there are few studies on the electric facilities, which are relatively non-structural factors. Currently, electrical equipment in Korea is often not designed for earthquake safety and is quite vulnerable to damage when an earthquake occurs. Therefore, in this study, modeling was conducted through ABAQUS similar to an actual cabinet panel and 3D dynamic nonlinear analysis was performed using a natural seismic. According to seismic zone I and normal ground rock conditions of the power transmission and transmission facility seismic design practical guide, the maximum response acceleration of the performance level was 0.157g. In this study, however, it was not safe to reach the limit state of 30% of the analytical result at 0.1g for the general cabinet panel. From the results, the seismic fragility curve was derived and analyzed. The derived seismic fragility curve is presented as a quantitative basis for determining the limit state of the cabinet panel and can be utilized as basic data in related research.

Keywords : ABAQUS, Cabinet panel, Earthquake, Fragility curve, Nonlinear time history analysis

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(18IFIP-B128598-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Min-Ho Kwon(Gyeongsang National Univ.)

Tel: +82-55-772-1796 email: kwonm@gnu.ac.kr

Received December 13, 2017

Revised (1st January 3, 2018, 2nd January 29, 2018, 3rd February 1, 2018)

Accepted February 2, 2018

Published February 28, 2018

1. 서론

지진은 짧은 시간동안 일어나 지진이 발생할 때 적극적인 대처를 할 시간적 여유가 없어 다른 자연재해에 비해 인명피해나 재산피해가 크게 발생하게 된다. 그리고 지진의 발생횟수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있고 2016년 들어 경주에서만 각각 규모 5.8과 5.1의 지진이 발생하였으며 국내에서 발생한 지진의 최대 규모를 경신하였다. 또 최근에 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진은 경주지진보다 피해가 더 크게 발생하였다. 이와 같이 지진의 증가에 따라 구조물의 안전성 확보에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 그러나 상대적으로 비구조요소인 전기 시설 등에 대한 내진 성능평가는 미비한 실정이다. 특히 전 세계 전력계통은 전기저항으로 인해 발생하는 손실량을 최소화하기 위해 고전압화 되어가는 추세이고, 전기설비의 시장규모는 점점 커지고 있지만 구조물에 비해 현재 국내의 전기설비는 지진에 대한 안전설계가 미비한 경우가 많으므로 지진이 발생할 때 손상에 매우 취약하다. 또 전기설비의 손상은 2차 피해로 전기설비를 보유하고 있는 시설물 전체의 안전성에 큰 영향을 미치며 2차적인 인명피해가 발생할 수 있으므로 전기설비에 대한 안전성 문제가 중요하다. 또한 수배전반의 경우 지진에 의해서 피해가 발생할 경우 2차적인 인명사고로 이어질 가능성 크므로 지진에 대한 지진취약도 분석을 통한 성능평가에 대한 연구가 시급한 실정이다. 하지만 수배전반의 경우 발전시설물의 종류와 산업규모의 크기에 따라 다양한 형태를 갖기 때문에 그 형상을 표준화하기에는 어려움이 있다. 또한 수배전반 설계 시 지진구역과 지반조건에 따라 설계응답스펙트럼이 다르고, 변압기 본체, 축전지, 배전반등을 포함한 비애자형기기는 지표면 혹은 1층과 2층 혹은 3층 그리고 4층 이상에 따라 다른 증폭률을 고려하여야한다. 따라서 본 연구에서는 지진구역 I 과 보통지반암(S_B) 지표면에 위치하고 일반적으로 많이 사용되는 산업용 수배전반을 모델로 하여 실제 제작된 수배전반의 도면을 이용하여 유한요소모델링을 수행하였다[1]. 그 다음 자연지진파를 이용해 3D 동적비선형해석을 수행하여 손상 및 파괴를 확인하여 지진취약도를 도출하여 분석과 성능평가를 수행하였고, 이를 기반으로 관련된 연구에 대한 기초자료로 활용되는데 목적이 있다.

2. 유한요소 모델링

2.1 수배전반 구조요소별 제원

수배전반의 유한요소해석 모델링을 실제 구조물에 가깝도록 구성하여야 유한요소해석을 통하여 수배전반의 정확한 거동상태를 알 수 있다. 또한 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 구조요소를 이루고 있는 재료뿐만 아니라 재료의 물리적인 특성치를 탄성영역 및 비탄성영역까지 고려하여야한다. 그러므로 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 통하여 실제 수배전반과 유사하도록 유한요소모델링을 수행하였고, 정밀한 구조해석을 위하여 비선형 재료모델링을 수행하였다.

내부설비는 중량이 큰 진공차단기(VCB for MCSG)와 DCI-204A(W)만을 모델링하였고, 진공차단기의 중량은 486kgf이고, DCI-204A(W)의 중량은 38kgf로 실제 중량을 고려하였다. 수배전반의 재원을 Table 1에 나타내었고 수배전반의 상세도는 Fig. 1과 같다.

그리고 본 연구에서 사용된 수배전반은 SPCC강재로 제작되었고, SPCC는 Steel Plate Cold Commercial의 약자이고, 일본 JIS G3141 규격 냉간압연강판이다. SPCC는 표면이 여미한 강재로 여러 분야에서 사용되고 있다. 강재는 극한점 이후에 연화거동을 보인 후 파괴에 이르는 특성을 가지며, 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 응력-변형률 곡선을 가지는 SPCC강재를 적용하였다.

Table 1. Data of cabinet panel

Component	Thickness (mm)	Width (mm)	Height (mm)
Frame	2250	1400	2500
VCB for MCSG	1000	963	1365
DCI-204A(W)	200	290	320

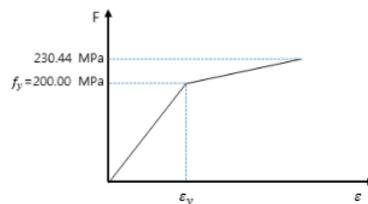


Fig. 1. Stress - Strain relation curve of SPCC

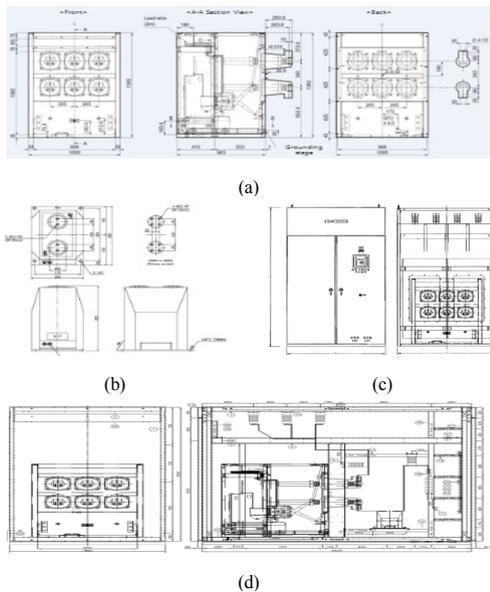


Fig. 2. Details of cabinet panel
 (a) Detail of VCB for MCSG (b) Detail of DCI-204A(W) (c) Front and back side of cabinet panel (d) Detail of cabinet panel

2.2 수배전반 유한요소 모델링

ABAQUS를 이용하여 수배전반의 구조요소별로 실제 상태와 동일한 제약조건을 주고 구조요소들 상호간에 용접이 되어있는 것을 가정하여 해석 수행시간을 고려하였다.

수배전반의 모델링은 주부재인 프레임은 4절점 쉘요소를 사용하였고 프레임 두께는 실제와 같은 두께를 적용하고 항복강도는 SPCC의 일반적인 항복강도 200MPa로 설정을 하였다. 내부설비인 진공차단기와 DCI-204A(W)는 각각 8절점 입체요소를 사용하였다. 또 내부설비 모델링에서는 질량 물성치는 동적 거동에 대한 타당성 확보를 위하여 전체중량을 증가중량으로 환산하여 설정하였다. 그리고 Constraint_Tie기능을 적용해 각각 프레임에 완전하게 부착되어있는 것으로 가정하였고 질량 물성치는 진공차단기와 DCI-204A(W) 각각 실제 중량을 부피로 나눈 질량을 적용하였다. 유한요소 특성과 구조요소별 재료특성 각각 Table 2와 Table 3에 나타냈고 Fig. 3과 같이 각각 구조요소별 모델링을 수행하였다.

Table 2. Finite element characteristics of structural members

Component	Element type	Number of elements	Number of nodes
Frame	4-Node shell	15,213	15,542
VCB for MCSG	8-Node solid	10,260	11,760
DCI		144	245

Table 3. Material properties of frame

Component	Frame	VCB for MCSG	DCI-204A(W)
Unit weight (t/m^3)	7.15	0.377	2.087
Young's Modulus (GPa)	192.9	200	200
Poisson's ratio	0.3	0.2	0.2
Yield stress(MPa)	200	X	X

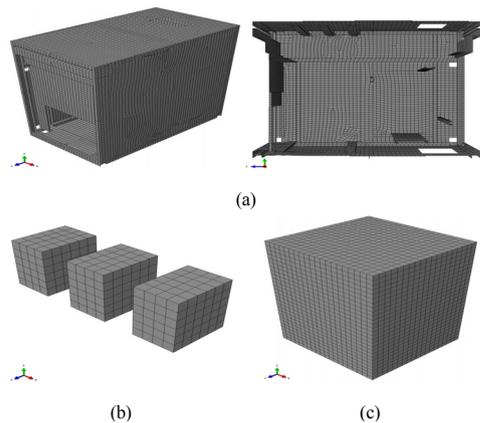


Fig. 3. Modeling details of cabinet panel
 (a) Frame modeling (b) DCI-204A(W) modeling (c) VCB for MCSG modeling

2.3 모드해석 결과

본 연구에서 시간이력해석을 수행하기 전 구조물의 동적특성과 고유진동수를 알기위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS에서 모드추출 방법인 Lanczos방법[2]을 사용해 총 20차 모드까지 해석을 수행하였다. 그 결

과 1차 모드와 비슷한 파괴양상을 보이고 크리티컬한 동적 특성을 가지는 17차 모드형상을 수배전반의 동적특성으로 보고 해당하는 고유진동수인 21.782Hz를 수배전반의 고유진동수로 결정하였다. 각 모드에 대한 고유치와 고유진동수는 Table 4와 같이 나타났고 모드형상은 Fig. 4와 같이 나타났다.

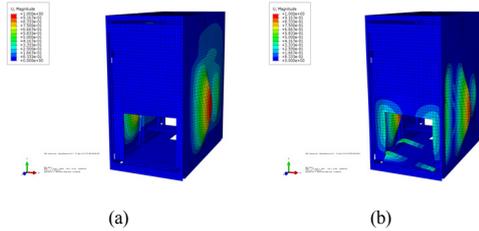


Fig. 4. The result of mode analysis by ABAQUS
(a) 1st mode (b) 17th mode

Table 4. Eigen value and natural frequency of each mode

Mode	Eigen value	Natural frequency (cycle/sec)
1	6184.0	12.516
2	6293.0	12.626
3	6559.0	12.890
4	6831.3	13.154
5	7029.1	13.344
6	7210.2	13.514
7	7859.6	14.110
8	8813.1	14.941
9	10377.0	16.213
10	11140.0	16.799
11	11428.0	17.014
12	12277.0	17.634
13	12690.0	17.929
14	14603.0	19.233
15	14732.0	19.318
16	16480.0	20.431
17	18731.0	21.782
18	21669.0	23.428
19	22499.0	23.872
20	24320.0	24.820

3. 지진파

3.1 지진파 구성

ASCE 43-05(ASCE, 2005)에서는 선형지진응답을 수

행할 때 주파수성분의 진폭을 조정해 추계학적으로 작성한 인공적인 시간이력을 사용할 수 있다. 하지만 지진응답 해석을 고려할 경우 실제로 기록된 지진파를 사용할 것을 권장하고 있다[3]. 그러므로 본 연구에서는 3D 동적 비선형해석을 위해 총 10개의 전 세계에 실제로 발생한 대표적인 지진들로 지진파를 구성하였다. Table 5에 동적해석에 사용한 지진파의 정보를 나타내었다. 여기서, 규모(Mag.)는 리히터 규모를 뜻하고 PGA(Peak Ground Acceleration)는 실 가속도 값을 중력 가속도 $9.81m/s^2$ 로 나눈 값이다.

Table 5. Information list of natural earthquake waves

no.	Events	Year	Station	Mag.	PGA (g)	Time (s)
1	Tabas Iran	Sep,16th 1978	Dayhook	7.35	0.3279	23.82
2	Imperial Valley	Oct, 15th 1979	Aeropuerto Mexicali	6.53	0.3267	11.14
3	Nahanni Canada	Dec, 23rd 1985	Site 2	6.76	0.489	19.95
4	N.palm Springs	July, 08th 1986	DeserHot Springs	6.06	0.3313	23.995
5	N.palm Springs	July, 08th 1986	NorthPalm Springs	6.06	0.5941	20.025
6	Loma Prieta	Oct, 18th 1989	Gilroy Array#1	6.93	0.2088	39.94
7	Kobe Japan	Jan, 16th 1995	Nishi Akashi	6.9	0.5093	40.95
8	San Fernando	Feb, 09th 1971	Carbon Cayonon Dam	6.61	0.0695	43.41
9	Imperial Valley	Oct, 15th 1971	Superstition MTN Camera	6.53	0.1092	28.275
10	Newzealand 02	Mar, 02nd 1987	Matahina Dam	6.6	0.2555	26.98

3.2 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)

선정된 지진파를 고속 푸리에 변환을 통해 푸리에스펙트럼을 Fig. 5와 같이 나타냈다. 10개의 지진파를 고속 푸리에 변환을 한 결과 대체적으로 0Hz에서 5Hz의 진동수가 우세한 지진으로 분석되었다.

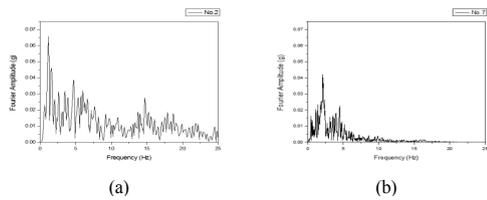


Fig. 5. Fourier transform spectra
(a) no. 2(Imperial valley), (b) no. 7(Kobe, Japan)

3.3 해석결과

수배전반의 지진취약도 평가를 위해 3D 동적 비선형 해석을 수행하였다. 배전반에 상재되는 하중은 자중 및 지진하중으로 구성하였고 지진하중은 상대적으로 약축인 수배전반의 정면 문과 평행한 X방향에 따라 바닥 지진하중을 적용하였다. 지진파는 0.06g부터 0.01g 씩 증가하여 0.1g까지 5개와 0.2g부터 0.2g 씩 증가하여 1.0g까지 5개 1.1g부터 0.1g씩 증가하여 1.5g까지 5개 모두 15개의 PGA를 선정하였고 150회의 동적해석을 수행하였다. 수배전반은 Mises 응력이 항복응력을 넘어섰거나, 소성변형이 생겼을 때 한계상태에 도달했다고 판단하였다.

동적해석을 수행한 결과 수배전반의 진공차단기를 받치고 있는 VCB 취부재 양끝단에서 응력이 집중되어 손상되거나 파괴가 일어났다. 그리고 비교적 낮은 PGA 0.06g에서 한계상태에 도달 비율은 30%로 나타났고, 1.4g에서 한계상태 도달비율은 100%로 나타났다.

4. 취약도곡선

지진취약도 곡선(Seismic fragility curve)은 지진이 발생하였을 때 지진의 크기에 대한 구조물의 손상이 발생할 확률을 의미한다. X축은 지진의 크기에 해당하는 PGA, Y축은 어떠한 수준의 손상이 발생할 확률이다. 본 연구에서는 취약도 곡선의 도출을 위해 Y축을 한계상태에 도달하는 비율로 설정하였고 중앙값(Median value)과 대수표준편차(Logarithmic standard deviation)를 구하였다. 한계 상태에 도달한 비율은 Table 6과 같이 나타났고, 결과를 통해 중앙값 μ 와 대수표준편차 σ 는 각각 -0.9866과 0.6133으로 구해졌다. μ , σ 및 한계상태에 도달한 비율을 바탕으로 Fig. 6과 같은 지진취약도 곡선을 도출하였다[4-6].

Table 6. Probability of failure

PGA	Probability of failure	PGA	Probability of failure
0.06g	0.3	0.8g	0.7
0.07g	0.3	1.0g	0.8
0.08g	0.3	1.1g	0.8
0.09g	0.3	1.2g	0.8
0.1g	0.3	1.3g	0.9
0.2g	0.3	1.4g	1.0
0.4g	0.3	1.5g	1.0
0.6g	0.6		

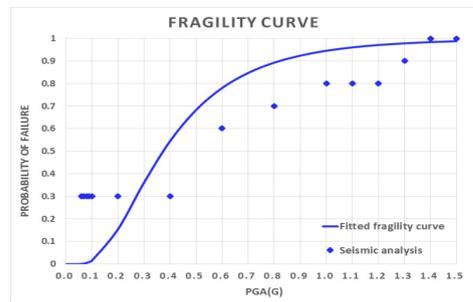


Fig. 6. Seismic fragility curve of cabinet panel

5. 결론

본 연구에서는 수배전반에 자연지진파를 적용해 유한 요소 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3D 동적 비선형해석을 수행하여 지진취약도 곡선을 도출하여 분석을 하였고, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 수배전반의 경우 모드해석은 일반적으로 1 ~20번 모드까지 수행되며 모드중 대부분은 구조물의 손상과는 다소 차이가 있고 진동 모드를 보였으며, 17번 모드가 수배전반 주요부재의 손상모드이므로 17번 모드를 동적특성으로 보고 이에 따른 진동수인 21.782Hz를 수배전반의 고유진동수로 결정을 하였다.
- (2) 실제로 제작된 수배전반의 도면과 동일하게 모델링을 수행하였다. 그 후 수배전반에 10개의 지진파를 PGA 0.06g부터 1.5g까지 15개를 적용하여 총 150번의 3D 동적 비선형해석을 수행한 결과 MCSG용 진공차단기의 하중을 직접적으로 부담하고 있는 VCB 취부재 양 끝단이 가장 취약한 것으로 나타났으며, 양 끝단에 현치 등의 보강이 필요한 실정이다.

(3) 송변전설비 내진설계 실무지침서의 지진구역 I 과 보통지반암 조건에 따르면 기능수행수준의 최대 응답가속도는 0.157g이다. 하지만 본 연구에서 일반적인 수배전반에 대한 해석결과의 0.1g에서 한 계상태 도달비율은 30%로 안전하다고 볼 수 없다. 따라서 현장에 적용된 수배전반에 대한 지진 취약도 분석이 필요한 실정이고, 이를 토대로 수 배전반 내진설계의 적용과 수준에 대해 재검토가 필요하다고 판단된다.

References

[1] "Practical Guide to Seismic Design of Transmission and Distribution Facilities", Korea Electric Power Corporation, 2003.

[2] Lanczos, C, "An iteration method for the solution of the eigenvalue problem of linear differential and integral operators", J. Res. Natl. Bur. Stand., vol. 45, no. 4, pp. 255-282, 1950. DOI: <https://doi.org/10.6028/jres.045.026>

[3] H. S. Seo, "Seismic Retrofitting Strategies in RC Column for Rapid Construction and Optimal Placement Retrofitting Structure", Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University Graduate School, Korea, 2017.

[4] Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., Naganuma, T. "Statistical Analysis of Fragility Curves", Journal of engineering mechanics, vol. 126, no. 12, pp. 1224-1231, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:12\(1224\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1224))

[5] Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T. Ueda, T, "Statistical analysis of fragility curves" Technical Report MCEER, 2003.

[6] Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang "Probability Concepts in Engineering", 2011.

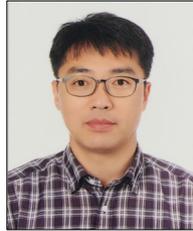
문 종 윤(Jong-Yoon Moon) [준회원]



- 2016년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 (석사과정)

<관심분야>
철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

권 민 호(Min-Ho Kwon) [정회원]



- 2000년 8월 : Univ. of Colorado Boulder (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 12월 : Univ. of Colorado, Denver (Research Fellow)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

김 진 섭(Jin-Sup Kim) [종신회원]



- 2008년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 경상대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
장구조, 구조해석, 복합재료 보강재, 내진성능평가

임 정 희(Jeong-Hee Lim) [정회원]



- 2013년 2월 : 경상대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 : 경상대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>
철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가