<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.5.715 ISSN 1226-4873

245kV 가스절연개폐장치의 내진성능 실증을 위한 시험 및 해석§

김유경*†・권태훈*・정영진**・김홍태**・김영중***
* 현대중공업 미래기술연구소, ** 현대중공업 전기전자시스템 사업본부, *** 한국기계연구원

Study on Seismic Analysis and Test for Seismic Qualification of 245kV GIS

Yu-Gyeong Kim*†, Tae-Hoon Kwon*, Yeong-Jin Jeong**, Hong-Tae Kim** and Young-Joong Kim***
* Frontier Technology Institute, Hyundai Heavy Industries Co., ltd
** Electro Electric Systems, Hyundai Heavy Industries Co., ltd
*** Korea Institute of Machinery and Materials

(Received December 28, 2012 ; Revised February 13, 2013 ; Accepted February 14, 2013)

Key Words: Gas Insulated Switchgear(가스절연개폐장치), Modal Analysis(모드 해석), Response Spectrum Analysis(응답 스펙트럼 해석), Shaking Table Test(진동대 시험), Seismic Qualification(내진성능)

초록: 가스절연개폐장치(GIS)는 안정적인 전력공급을 위한 대규모 설비이다. 최근 전력설비의 내진성능 검증이 중요해짐에 따라 진동대를 이용한 실제적 내진 시험이 요구되고 있지만, 진동대 규모의 한계로 해석에 기반한 평가가 주로 진행되고 있다. 그러나 해석법은 실제 거동을 모사하기 어려워 결과의 신뢰도가 낮으므로 타당한 해석법 개발이 필요하다. 본 연구에서는, 시험과 해석을 병행하여 대형 전력기기인 245kV GIS의 내진성능을 검증하였고, 결과를 비교 분석하여 대형 구조물용 내진 해석 기법의 타당성을 평가하였다. 245kV GIS는 해석과 시험법에서 충분한 안전성을 보였고, 해석의 결과는 시험과 10% 이내의 차이를 보였다. 높은 신뢰성의 원인으로 질량, 강성, 입력 가속도를 분석하였다. 본 연구는 내진 시험을 수행 할 수 없는 대형 전력기기의 내진성능 실증에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: Gas insulated switchgear is large-sized electric equipment for providing a reliable supply of electric power. Recently, seismic tests of electric equipment using a shaking table have been mandated because seismic performance has become an increasingly important issue. However, basic analysis methods continue to be used because some electric equipment is too large for shaking table facilities. Thus, a reliable analysis method should be developed for large-scale electric equipment. This study aims to evaluate the seismic qualification of a 245kV GIS in accordance with IEEE-693 and to validate the analysis method by comparing it with test results. Both the test and the analysis showed that the 245kV GIS has proper seismic safety. Furthermore, the differences between the analysis and the test results are less than 10% for an accurately given mass, stiffness, and input acceleration. It is expected that this study can be used for the seismic qualification of large-scale electrical structures.

1. 서 론

가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS)는 안정적인 전력공급을 위한 전력계통 설비로, 송전시 변압기 선후에 위치하여 이상전류를 차단하고 전력을 분배한다. 변압기를 제외한 대부분의 전력기기를 금속탱크로 밀폐시킨 변전 시스템으로 가동 중 지진을 포함한 다양한 설계 하중에 대해 충분한 구조 건전성을 확보하여야 한다. 또한 구조적 성능 검증 시 신뢰성 있는 방법을 적용되어야 한다.

IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 등 관련 규격에서 제시한 내진성능 평가법은 유한요소법에 기반한 해석법과 실제 구조물을 가진하여 확인하는 진동대 시험법(shaking table test)이 대표적이다. 해석법은 결과를 경제적으로 도출할 수 있고, 평가대상 크기에 제한이 없다는 장점으로 현재까지 주 검증법으로 활용되었다. 그러나 실제 거동을 모사하는데 한계가 있어 결과의 신뢰성이

§ 이 논문은 대한기계학회 2012 년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임
† Corresponding Author, aspirany@hhi.co.kr
Ⓒ 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

낮다. 시험법은 육안으로 안전성 확인이 가능하여 결과의 신뢰도가 비교적 높지만 비용과 시간에 대한 부담이 크다. 또한 진동대 설비보다 큰 대규모 구조물의 평가가 어렵다는 단점이 있다.

이러한 관점에서 대규모 설비의 내진성능 평가는, 시험설비가 가지고 있는 규모의 한계 상 해석법에 기반해야 한다. 평가에 앞서, 해석법의 단점인 결과의 신뢰도 향상을 위해 시험법과 결과를 비교하여 해석법의 타당성 검증이 필요하다. 즉, 내진성능 평가의 효율성과 정확성을 동시에 확보하기 위해 해석과 시험을 병행한 평가가 수행되어야 한다.

현재까지 내진 시험 관련 연구는 비교적 크기가 작고 단순한 형상의 기기를 대상으로 수행한 것이 대부분으로,[1,2] GIS와 같은 복합 대형기기에 적용하기 어렵다. GIS에 대한 내진 해석 연구는 K.E. Buck[3]과 B. Withers[4] 등이 수행한 단순모델에 대한 내진성능 검증 연구가 있다. 그러나 시험과 해석의 연관성에 대한 연구가 미미하여, 해석 결과의 신뢰도가 낮다고 판단된다. 이는 현재까지 대형 구조물을 위한 시험설비가 충분하지 않아 유한요소해석 기반의 평가 연구가 진행되었기 때문으로 판단된다.

따라서 본 논문의 목적은 내진 시험 및 해석을 통해 대형 전력기기인 GIS의 내진성능을 검증하고 그 결과를 비교 분석하여 대형 구조물용 내진 해석 기법의 타당성을 평가하는 것이다. 이를 위해 내진성능 검증기준을 분석하였고, 시험법과 해석법을 병행하여 내진안전성 평가를 수행하였다. 평가 결과를 동특성 및 구조 건전성 측면에서 비교하여 대형 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 해석법의 타당성을 검토하였다.

2. 내진성능 검증기법

2.1 해석법

IEEE-693[5]에서 제시한 해석법은 정해석, 정적계수 해석, 응답 스펙트럼(response spectrum) 동해석, 시간이력 동해석법이 있다. 정해석법은 구조물의 진동수가 33 Hz 이상인 강체 거동의 구조물을 평가할 때 사용하며 가진 축에 기준하여 질량중심에 영주기 가속도(Zero Period Acceleration, ZPA) 값을 곱하여 안전성을 평가한다. 정적 계수 해석법은 몇 개의 주요 진동수를 가진 구조물에 적용할 수 있는 평가법으로, 가진 방향 별 질량분포를 산출한 후 응답 스펙트럼의 최대 가속도에 1.5 배하여 안전성을 평가한다. 응답 스펙트럼 동해석법은 다양한 진동수를 가진 대형 복합 구조물의 세부응답 산출이 요할 때 적용하며, 감쇠비(damping ratio)에 기준하여 응답 스펙트럼을 하중으로 부여한다. 시간이력 동해석은 대형 복합 구조물의 상세 거동 산출 시 활용하며, 실제 지진과 같은 시간이력 가속도를 하중으로 부여 후 계산한다. 서술한 네 가지의 해석법은 서술 순서대로 효율성 및 경제성이 우수하지만 결과의 정확도가 낮다.

유한요소법 기반의 내진 해석은 모드 해석과 응답 스펙트럼 해석 두 단계로 수행된다. 모드 해석은 구조물의 선형탄성 거동을 전제하며 구조물의 고유 진동수(natural frequency)와 모드 형상(mode shape)을 도출하여 진동특성을 파악한다. 응답 스펙트럼 해석은 응답 스펙트럼을 입력하중으로 부여하고 응력값을 도출하여, 구조물의 실질적 안전성을 평가한다. 응답 스펙트럼은 시간에 따른 불규칙 지진하중을 주파수기반의 지진가속도로 변환한 데이터로, 시간이력의 지진하중에 대한 해석보다 빠르게 해석할 수 있다. 그러나 해석결과인 응력값이 비교적 크게 도출되므로 보수적으로 평가할 수 있다. IEEE-693 에서는 구조물의 감쇠비에 따른 응답 스펙트럼을 제시하고 있다. 본 논문의 내진 해석에 사용된 요구 응답 스펙트럼(Required Response Spectrum, RRS) 및 코드에서 제시한 기본 RRS(damping ratio 2%)는 Fig. 1 에 도시하였다.

2.2 시험법

전력기기는 IEEE-693 기준에 의거하여 내진 시험을 수행해야 한다. 진동대 시험은 평가대상을 진동대 위에 설치 후 가진하여 내진성능을 평가하는 것이다. 성능요구수준에 따라 검증 수준(qualification level), 성능 수준(performance level)으로, 가진 가속도에 따라 고지진 수준(high seismic level, 0.5g), 중지진 수준(moderate seismic level, 0.25g), 저지진 수준(low seismic level)으로 분류된다.

진동대 시험은 ①고유 진동수 탐색, ②시간이력 시험(time history test), ③시간이력 운전시험(time history operational test), ④정현 비트 시험(sine beat test), ⑤고유 진동수 탐색의 절차를 거친다. 일반적으로 ①과 ⑤에서 측정한 진동수의 차이가 20%를 초과한 경우, 평가대상에 구조적 결함이 발생한 것으로 간주한다. 시험 시 입력하중으로 사용된 시험 응답 스펙트럼(Test Response Spectrum, TRS)은 RRS에 기준하여 -10% ~ +50% 이내에 존재해야 한다.

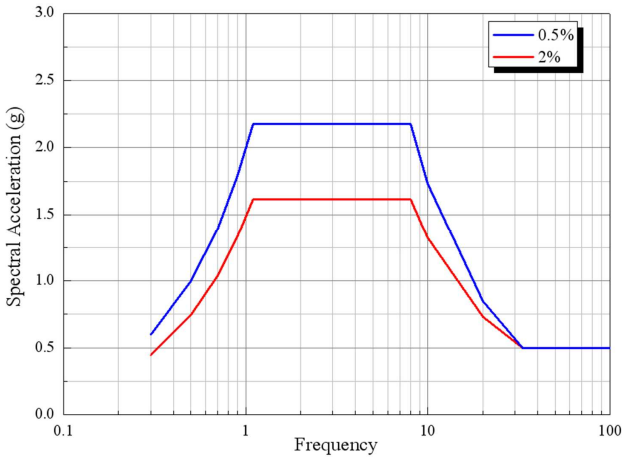

Fig. 1 Required response spectrum by damping ratio

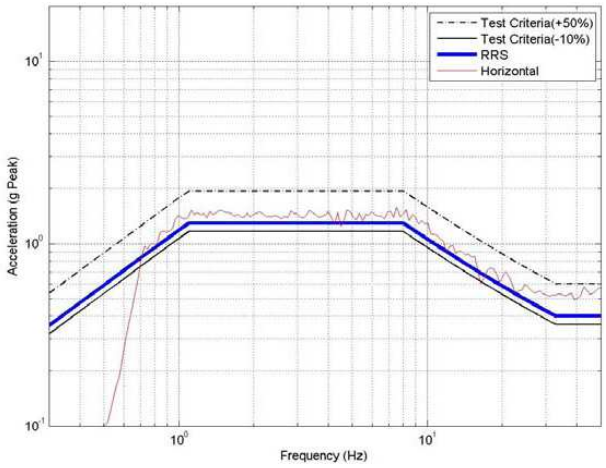

Fig. 2 TRS with RRS for time history test

Fig. 2 는 시험에 사용된 수평방향의 하중을 도시한 것으로 상기 범위를 만족하였다. 내진 시험에서 입력되는 TRS는 응력, 가속도, 변위계 등 센서를 부착하여 시험결과를 얻을 수 있으며 부착위치 선정기준은 IEEE-693 에 제시되어 있다. 본 논문에서는 GIS의 구조건전성 평가 및 해석과의 결과비교를 위해 응력과 진동수를 결과값으로 선정하였다.

3. 내진성능 검증조건

3.1 대표모델 설계

GIS는 유사한 형상의 상(phase)이 병렬로 연결되어 있는 대규모 전력설비로 그 규모가 수십 미터에 이른다. 내진 시험을 실시한 한국기계연구원의 시험설비는 가로 및 세로 길이가 각각 4m로, 설치할 수 있는 시험장치의 규모가 제한되었다. 따라서 전체 시스템 중 가장 대표적인 구조의 단일상을 시험대상으로 선정하였다. 선정된 상은 전체 시스템의 동특성 및 내부 구조물의 거동을 대표할 수 있어야 한다. 따라서 시험모델 주변 부품과의 연계효과를 모사할 수 있도록 추가 지지대를 설계하였다.

설계한 추가 지지대가 시험모델에서 생략된 주변 부스바 등과 연계효과의 모사여부를 확인하기 위해 추가 지지대가 없는 모델, 전체 GIS 모델에서 시험모델로 선정된 부분, 추가 지지대가 있는 모델에 대한 모드 해석을 수행하였다. 고유 진동수는 모델의 거동 특성을 확인할 수 있는 변수이므로, 각 모델에서 응답한 일차 및 이차 진동수를 비교 대상으로 선정하였다.

Table 1 은 각 모델의 고유진동수 비교 결과를 정리한 것이다. 전체 시스템에서 시험모델로 선정된 부위의 고유진동수를 기준으로 봤을 때, 추가 지지대가 있는 모델에서의 고유진동수가 지지대가 없는 모델에 비해 값이 유사함을 알 수 있다. 따라서 추가 지지대가 있는 모델이 전체 시스템의 응답을 좀 더 적절히 모사한다고 평가할 수 있다. 설계된 시험모델은 Fig. 3 에 도시하였고, 추가 지지대가 없는 시험모델의 측면도는 Fig. 4 와 같다.

3.2 내진 해석

유한요소모델은 쉘(Shell 143, 3D4N element)과 빔(Beam 188, 3D2N element), 질량(Mass 21, structural mass) 요소를 혼용하여 작성하였다. 유한요소모델 작성 시 형상의 세부 모사는 오히려 진동수의 노이즈를 유발할 수 있으므로 적절히 단순화하였다. 단순화된 부분의 질량을 고려하여 주요 기기의 밀도를 정의하였다. 재료물성치[6]는 지지대와 주물부, 파이프에 각각 다르게 정의되었다. 경계조건으로는 바닥과의 볼트 및 용접 연결부 위치를 고려하여 삼축방향으로 변위 및 회전을 고정하였다. 시험모델 내부의 볼트 연결부는 정확한 동특성 모사를 위한 주 요소이며, 역시 위치와 개수 등을 고려하여 조건부 고정을 적용하였다. 사용된 유한요소모델과 경계조건은 Fig. 3 과 같다.

지진하중은 IEEE-693 코드에 제시된 고지진 수준에서의 응답 스펙트럼 값을 사용하였다(Fig. 1 참조). 응답 스펙트럼 도출 시 사용된 감쇠비는 구조물의 고유한 특성이므로, 내진 시험에서 측정된 값인 0.5%를 사용하였다. 유한요소모델 작성 및 내진 해석은 상용 구조 해석 소프트웨어인 ANSYS Mechanical R13[7]을 활용하였다.

Table 1 Comparison of natural frequency among test and full models

Model	1st frequency [Hz]	2nd frequency [Hz] (direction)
Test model w/o additional support	5.78	5.87
Test model w/ additional support.	12.06	15.73
Corresponding part of site model	13.31	16.25

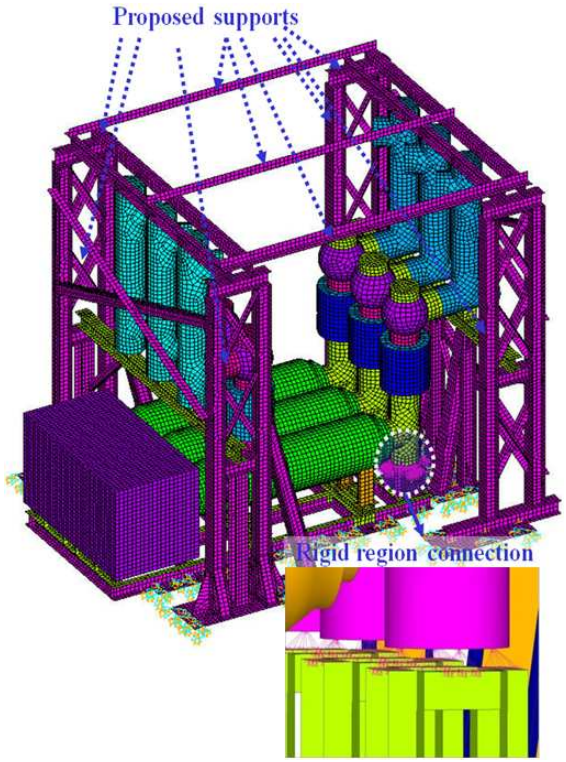

Fig. 3 Finite element model with B.C.

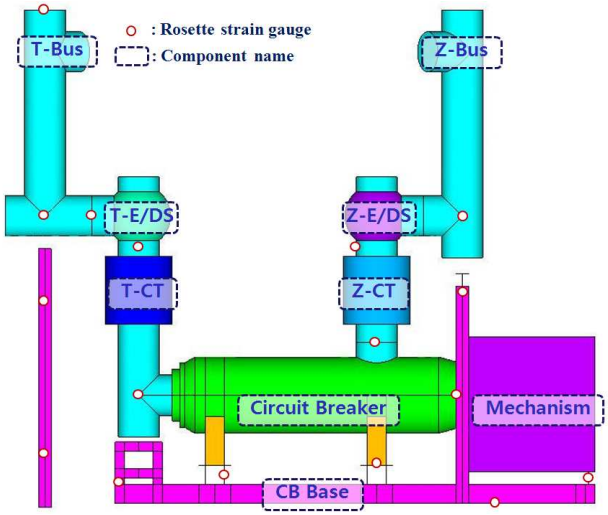

Fig. 4 Measuring locations of strain gauges

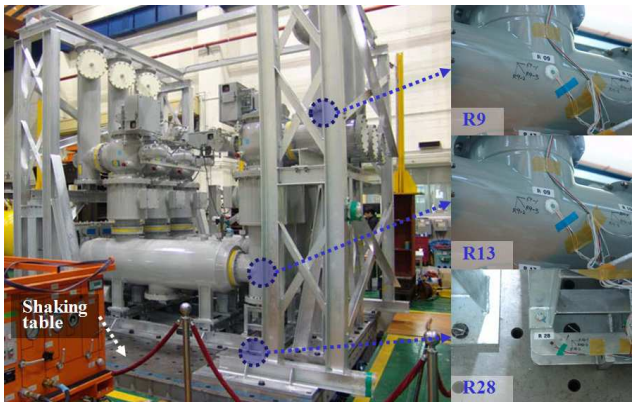

Fig. 5 Installed test model on the shaking table

3.3 내진 시험

2.2 절에 기술한 바와 같이, 내진 시험은 IEEE-693 에 기반하여 한국기계연구원에서 실시되었다. 지진하중의 등급은 내진 해석과 동일하게 고지진 수준의 TRS를 적용하였다. 해석과의 결과 비교를 위한 응력데이터는 삼축 스트레인게이지로 취득하였다. Fig. 4 는 주 기기 별 스트레인게이지의 대표 위치를 표시한 것이고, Fig. 5 는 실제 진동대에 설치된 시험모델 및 센서를 도시한 것이다.

4. 내진 해석 및 시험 결과

4.1 내진 해석

4.1.1 모드 해석

구조물의 동적 거동을 평가할 수 있는 두 요소는 진동수와 모드 형상이며, 이는 모드 해석으로 산출된다. 유효질량(effective mass)은 산출되는 각 모드에서 관여하는 부분의 질량이다. 일반적으로 모델의 실제 질량 대비 총 유효질량이 약 80% 수준으로 도출되어야 해석의 신뢰성이 확보된다고 할 수 있다. Table 2 는 본 해석에서 계산된 각 방향 별 유효질량비를 정리한 것이다. 수평방향(x, y)의 유효질량이 80% 정도 산출되어, 유효질량 기준 신뢰성이 확보되었다 판단하였다.

산출된 진동수 중 유효질량이 큰 모드를 지배진동수(predominant frequency)로 정의하였다. 지배진동수는 구조물의 동특성에 비교적 큰 영향을 줄 수 있는 값으로, 이 때의 모드 형상을 Fig. 6 에 도시하였다. 주요 모드 형상은 각 방향 별 가진 시 변형이 발생하기 쉬운 상위 지지대부분에서 발생하였다. 또한 시험모델의 최소 진동수(12.06 Hz)는 입력 응답스펙트럼(Fig. 1 참조)에서의 최대 증폭 진동수 범위(약 3 ~ 8 Hz) 외로 설계되어, 최대 가속도 회피 설계기준을 만족하였다.

Table 2 Effective masses ratio by exited direction

Exited direction	Total effective masses [ton]	Ratio of total mass [%]
x	11.62	83.27
y	11.14	79.87
z	9.06	64.92

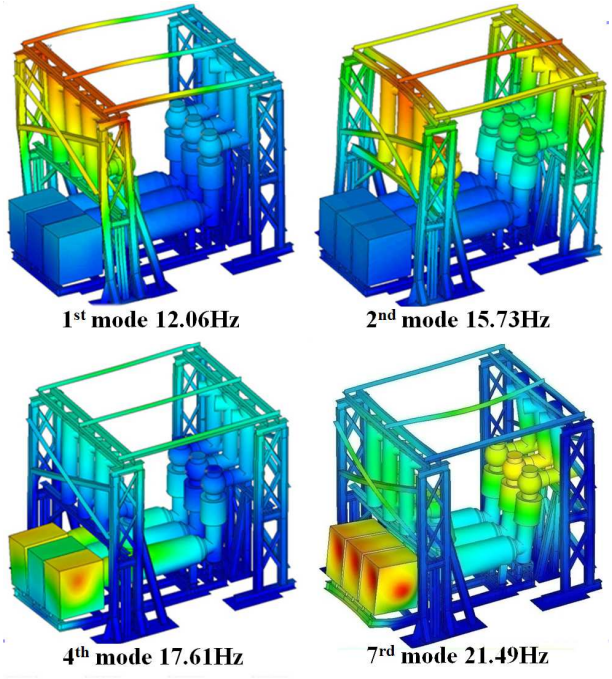

Fig. 6 Mode shapes of predominant frequencies

4.1.2 응답 스펙트럼 해석

지진하중에 대한 구조물의 안전성은 응답 스펙트럼 해석으로 산출된 응력으로 평가할 수 있다. 유한요소해석 시 모든 요소에서 산출되는 응력은 각 방향 별 응력을 SRSS(Square Root of Sum of Squared)로 조합한 것이다.

Fig. 7 은 모든 방향으로 가진 시 계산된 시험모델의 von-Mises 등가 응력 분포를 도시한 것이다. 최대 응력은 지면과의 볼트 연결부에서 84.6 MPa 로 도출되었다. 이는 소재의 허용응력 184.0 MPa (항복강도의 0.6 x 4/3)[8] 대비 0.46 의 응력비이다. 따라서 GIS 시험모델은 고지진 수준에서 구조적으로 안전하다.

4.2 진동대 시험

4.2.1 고유 진동수 탐색

고유 진동수는 구조물의 공진이 발생할 수 있는 진동수로, 시험모델의 주 기기별로 산출하였다.

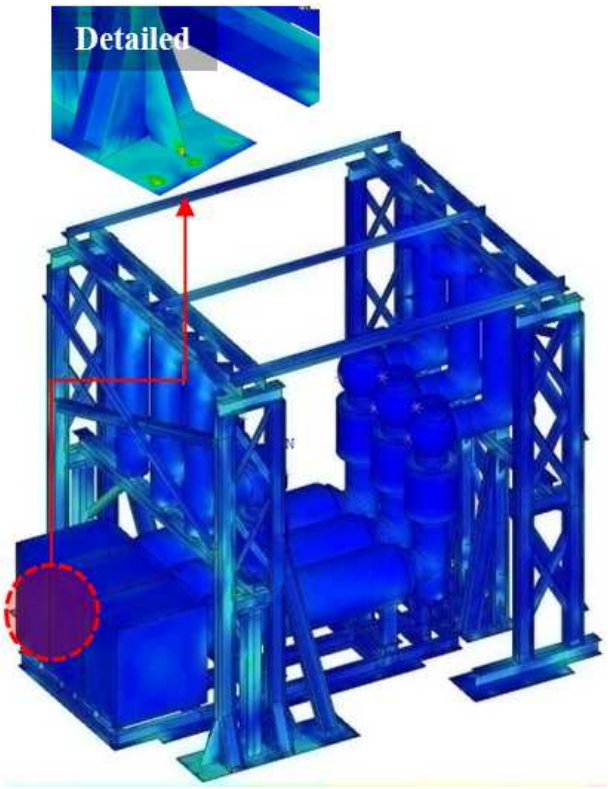

Fig. 7 von Mises stress of response spectrum analysis

시간이력시험 전과 후에 측정한 값이 20% 이상의 차이가 있을 경우 구조물의 손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 이는 구조물에 손상이 발생하면 형상 등을 변형시킬 수 있으며, 강성의 차이를 유발하였다고 생각할 수 있기 때문이다.

구조물의 진동수가 33 Hz 이상일 경우 정적 거동으로 간주할 수 있으므로, 그 이하의 값을 평가대상으로 정리하였다. Table 3 은 시험모델 내의 주요 구조물에서 측정한 고유 진동수를 시험 전후로 비교한 값으로, 최대 진동수 차이가 20% 이하임을 확인하였다.

4.2.2 시간이력시험

시간이력시험에서 발생한 응력은 스트레인게이지의 변형량을 기반으로 계산된 값이다. Table 4 는 스트레인게이지에서 측정된 응력을 기기별로 정리한 것이다. 본 시험에서는 세 방향의 스트레인게이지가 사용되었기 때문에 음의 응력값이 도출되었다.

내진 해석 결과에서 최대응력이 도출된 모서리나 연결부의 경우에는 면적이 좁아 스트레인게이지를 부착할 수 없었다. 따라서 시간이력시험에서 도출된 최대 응력은 해석에서의 응력에 비해 낮은 경향이 있다.

Table 3 Natural frequencies of each component during time history test

Location	Before Test [Hz]	After Test [Hz]	Difference* [%]	Direction
Circuit Breaker mechanism	12.28	11.68	5.14	Y
Circuit Breaker(CB)	19.29	17.42	10.73	Y
S-Current Transformer (CT)	12.4	11.72	5.80	Y
Z-bus	12.42	12.72	-2.36	Y
T-bus	12.09	12.53	-3.51	Y
Earth & Disconnection switch (E/DS)	26.13	22	18.77	X
T-CT bus	14.98	14.52	3.17	Y
Z-bus cover	12.57	12.04	4.40	Y
T-bus cover	14.08	14.89	-5.44	Y

*Difference = (Before test – After test)/After test

Table 4 Maximum stress of each component during time history test

Component	Stress [MPa]
CB	-1.35
CB base	-16.28
Support	-8.23
	-11.77
	-18.54
	-20.23
T-bus	-5.20
T-bus cover	4.31
T-CT	-6.21
T-E/DS	-4.83
Z-bus	-7.99
Z-bus cover	11.22
Z-CT	1.84
Z-E/DS	-2.44

Table 5 Comparison of predominant frequency

Mode No.	Analysis [Hz]	Test [Hz]	Location	Direction
1	12.06	12.58	T-bus cover	y
2	15.72	15.23	E/DS	x
4	17.61	19.12	Mechanism	y
7	21.49	21.94	Mechanism	y

5. 시험모델 타당성 검증

5.1 고유 진동수 비교

해석법의 동특성 모사를 검증하기 위해 모드 해석과 고유 진동수 탐색의 결과를 비교하였다. 비교 기준으로 지배 진동수로 선정된 모드에서 고유 진동수 및 응답방향을 선정하였다. Table 5 는 해석과 시험의 결과 비교를 정리한 것으로, 가진 모드에서의 차이가 10% 이하임을 확인하였다. 이에 따라 본 해석에서 사용된 유한요소모델은 실제 구조물의 동특성을 적절하게 모사하였음을 알 수 있다. 이는 내진 해석 시 고유 진동수에 영향을 주는 두 인자인 질량과 강성을 적절하게 모사했기 때문으로 판단된다.

일반적으로 시험과 해석을 수행 후 결과를 비교해보면 해석에서의 진동수가 시험에 비해 높게 도출된다. 실제 구조물의 거동에 큰 영향을 주는 강성 즉, 주요 연결부를 단순화하여 모사했기 때문에 강성이 실제보다 크게 정의되었기 때문이다. 본 연구에서는 3.2 절에서 기술한 바와 같이, 구조물 내부의 주 연결부 및 구조물이 설치되는 바닥 연결부의 수와 위치를 고려하여 모사했기 때문에 시험과 해석의 차이가 적었다고 판단된다. 또한 어느 정도의 형상 단순화는 해석 결과의 정확성에 크게 영향을 미치지 않으며, 결과의 노이즈를 발생시키지 않는다.

5.2 응력 비교

유한요소해석의 구조적 거동모사가 타당한지 알아보기 위해 응답 스펙트럼 해석과 시간이력 시험의 결과를 비교하였다. 비교 기준은 스트레인게이지 부착 위치에서 시험과 해석의 응력으로 선정하였다. Fig. 8 은 주요 기기에서 산출된 시험과 해석 결과 비교를 도시한 것이다. 차이가 10% 이내로 해석모델이 실제와 유사한 구조적 거동을 모사

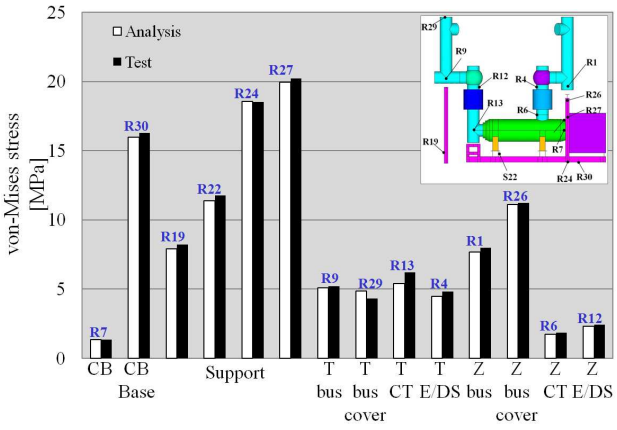

Fig. 8 Stress comparison between analysis and test

한다고 평가할 수 있다. 이는 시험과 해석에서 정의된 하중의 차이가 작고, 구조물의 파괴거동 범위가 선형탄성 내이기 때문으로 판단된다.

본 평가대상의 지배 진동수는 대부분 10 ~ 20 Hz에서 측정되었다. 이 범위에서 시험과 해석의 가진 가속도의 차이는 비교적 작다 (Fig. 2 참조). 또한 지배 진동수에서의 차이도 10% 전후이며, 이는 본 연구에서 산출된 시험과 해석의 차이와 유사하다.

본 연구에서 활용한 내진 해석기법은 선형탄성 기반의 거동을 전제하여 응력을 산출하는 것이다. 시험 시 구조물에서 소성변형이 발생하였다면 가정한 파괴거동과 차이가 있으므로 비교가 불가하다. 그러나 진동대 시험에서는 시간이력 시험 전후의 강성차이가 비교적 작았고, 구조물의 소성변형이 발생하지 않았으므로, 해석과 같은 선형탄성적 거동을 하였다고 할 수 있다.

시험과 해석의 결과는 동일한 경계조건 및 유사한 하중조건, 같은 선형탄성 기반의 구조 거동을 보였으므로 그 차이가 합당한 범위 내로 도출되었다고 판단된다. 향후 진동대 시험을 할 수 없는 대형 전력기기의 내진성능 검증 시 질량, 강성, 하중을 적절히 모사하여 유한요소모델을 작성한다면 실제와 유사한 구조건전성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 시험법과 해석법을 적용하여 245kV GIS의 내진성능을 검증하였다. 이를 위해 내진성능 평가기준인 IEEE-693 을 분석하여 적절한 시험법 및 해석법을 선정하였다. 또한 GIS전체 시스템을 시험법으로 평가할 수 없는 규모적 한계를 고려하여, 기본 구조의 시험모델을 시험대상으로 선정하였다. 시험모델과 전체 시스템의 동적/구조적 거동의 적합성을 부여하기 위해 추가 지지대를 설계하였다. 내진 해석과 진동대 시험으로 설계된 모델에 대한 내진 안전성 평가를 수행하였고, 구조 건전성 기준을 만족함을 확인하였다.

본 논문에서 적용한 유한요소해석법의 타당성 검증을 위해 시험과 해석의 결과를 비교하였다. 비교는 동특성 및 구조건전성 측면에서 수행하였다. 고유 진동수와 응력의 결과에서 90% 이상의 일치성을 확인하였다. 기존의 관련 연구에 비해 시험과 해석 결과의 차이가 작은 이유는 ①동특성 모사의 주 요소인 질량과 강성을 실제와 유사하게 모사, ②시험과 해석 모두 소성변형이 발생하지 않은 선형탄성적 구조거동을 보임, ③지배 진동수 범위에서 시험과 해석에 정의된 지진하중 차이가 미소함으로 판단된다.

본 결과를 활용하여 245kV 가스절연개폐장치 전체 시스템의 내진성능 검증연구가 수행될 예정이다. 본 논문은 진동대 시험을 수행할 수 없는 대형 전력기기의 내진성능 검증에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Lee, B. Y., Cho, C. R., Jeong, D. G, Kim, W. J. and Shon, J. Y., 2005, "Dynamic Analysis and Structural Safety Evaluation of Cabinet of a Reactor Safety System," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 12, pp. 131~140.

(2) Kim, H. T. and Lee, Y. S., 2011, "Seismic and Structure Analysis of a Temporary Rack Construction in a Nuclear Power Plant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1265~1271.

(3) Buck, K. E., Kleine-Tebbe, A. and Rees, V., 1993, "Verification of the Seismic Resistance of Gas-Insulated Switchgear(GIS)," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 114~120.

(4) Bolin, P., Dow, D. Fitzgerald, Gowhari, D., Hand, C., Nakauchi, S., Ninh, T.Osumi, M., P., Flood, J., Sadakuni, H., Shimizu, Y., Tran, T. and Withers, B., 2010, "Gas Insulated Switchgear Developed to Meet Increased Load Demand in Los Angeles Basin," *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1~7.

(5) 2005, "IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations," *IEEE Power Engineering Society*

(6) Davis, J. R., 1996, "ASM Specialty Handbook: Carbon and Alloy Steels," *ASM International*
(7) ANSYS, 2012, "User's Manual," Revision 13.0, *ANSYS Inc.*
(8) 1989, "Manual of Steel Construction Allowable Stress Design – Ninth Edition," *American Institute of Steel Construction*.