

원자력 발전소용 차단기의 내진검증

May, 2007

전형식 박사
권병하 기술사

(주)유비콘 엔지니어링



Powerful Solutions for Vibration Problems!!

<1/45>

www.uvcon.com

Index

1. 개요
2. Seismic 해석 이란?
3. Seismic Qualification
 - 1) Seismic Similarity
 - 2) Dynamic Qualification
 - 3) Seismic Analysis
4. Conclusion
5. Appendix
 - : 기기 검증이란?



Powerful Solutions for Vibration Problems!!

<2/45>

www.uvcon.com

1. 개요

1. Scope

- 목적
: to provide a justification for seismic similarity and structural integrity of MCSG under the specified seismic conditions
- 적용 제품
: 4.16KV Metal-Clad Switchgears(MCSW) of Nuclear Power Plant

2.0 EQUIPMENT DESCRIPTION

- 2.1 Class 1E MCSG**
- MCSG assemblies
: vacuum circuit breakers, buses and accessories, mounted on metal frames, electrical connections and sheet-metal housings.
 - 2 종류의 Class 1E MCSG : Panel이 8개, 9개로 구성되어 있음
 - Size : (1) WDH : 686mm x 2200mm x 2400mm , 740mm x 2200mm x 2400mm
(2) WDH : 1067mm x 2600mm x 2400mm

Equipment No	Quantity	Title	# of Panel
XSW-2A	1	4.16KV SWGR	8 Panels
XSW-2B	1	4.16KV SWGR	9 Panels

1. 개요

2.2 Class 1E Components

- 4.16KV Switchgears에 사용된 부품 List
- 부품들은 mild environment conditions에서 사용되며 검증 프로그램 작동 중 기능적으로 문제가 없어야 한다.

Components	Model/Type	Components	Model/Type
Vacuum Circuit Breaker	HVF 1372-WA	Current Transformer	200WP
Over Current Relay	51Y443T2341	Surge Arrester	PDV-100
Ground Over Current Relay	GR-5/202D6141UL	Ampere Meter	WA-A2
Auxiliary Relay	HMTQ22R	Volt Meter	WA-V2
Breaker Control SW	YSNC3205	Watt Meter	WA-TW3
Indicating Light, Green	YSPL2-DL12G(N)	Run Hour Meter	077 - 156A
Indicating Light, Red	YSPL2-DL12R(N)	Ampere Transducer	RPA -A2-P1-03
Ammeter Selector SW	YSNC 4307	Volt Transducer	RPV -V1-P1-03
Volt Selector SW	YSNC 4210	Pull-Out Fuse Block	0116B4078
Select SW	YSNC Series	FUSE	AJT series
Shorting Terminal Block	YSCT series	MOC	3VE Series
Terminal Block	YSAT series	TOC	HTOC Series
CABLE	Q-SIS-P	Test Switch	129A518G01
SOCKET	YSSK08	Lockout Relay	HLR-06
Ground Sensor	302G0500UL	Fuse Block	20316R
Potential Transformer	VIY-60	On Timer	YSLT series

1. 개요

3.0 PLANT CONDITIONS

3.1 Environmental Service Conditions

- 4.16KV Switchgears와 부품들은 아래의 환경조건을 만족해야 한다.
- Radiation, Total Integrated Dose (TID)은 정상적인 폭로 조건에서는 40년이다. 사고 조건에서 TID는 최대 일년을 더하여 준다.

Conditions	Normal	Accident
Duration	40 Years	1 Year
Max. Temperature (°F/°C)	104 / 40	
Max. Relative Humidity (%)	100	
Max. Pressure (psig)	0.0	
Radiation, TID (Gy)	1.0×10 ² (Note)	

3.2 Design Basis Event (DBE) Conditions

- 4.16KV Metal-Clad Switchgears는 사양서에 명시된 대로 Design Basis Event (DBE) 조건에서도 정상 작동을 해야 한다.
- DBE(seismic events)의 특성은 검증 프로그램의 Floor Response Spectra Curves에 의해서 주어진다.
- 장비는 DBE 중이나 후에 정상작동을 하여야 한다.
- Operating Basis Earthquake(OBE)와 Safe Shutdown Earthquake(SSE)에서 각각 2% and 5% damping을 사용한다.

1. 개요

4.0 QUALIFICATION REQUIREMENTS

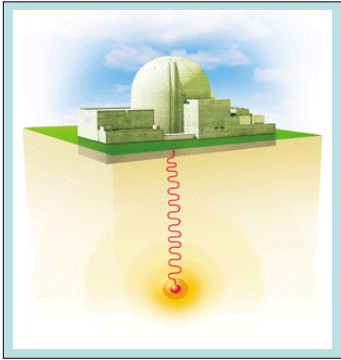
4.1 Definition of Seismic Conditions

- ☑ 4.16KV Metal-Clad Switchgears의 내진 검증은 해석과 시험을 통하여 수행한다.
- ☑ 해석과 시험은 해당 건물의 FRS(Floor Response Spectra)를 가지고 수행한다.
- ☑ 내진 해석은 Prototype과 전체 설비에 대하여 실시한다.
 - : 해석을 통하여 전체 설비의 동역학적 특성을 나타낸다.
 - : 해석은 정적 해석, 모달해석 그리고 스펙트럼 분석을 한다.
- ☑ 4.16KV Switchgears의 동적특성을 분석하기 위하여 prototype switchgear를 만들어서 해석 및 시험을 수행하고 Prototype은 3Panel 로 구성한다.
- ☑ Prototype을 시험 결과와 내진해석을 통한 결과는 서로 일치하여야 한다.
- ☑ 내진 검증을 하기 위하여 MSCG의 Prototype을 제작하고 엄격한 내진 수준을 결정하기 위하여 실제 MSCG의 해석 결과를 바탕으로 RRS를 수정한다.
- ☑ 내진 해석 및 시험을 위하여 50%의 여유를 고려하며 IEEE 323-1983, paragraph 6.3.1.5의 10% margin 에 따른다.

2. Seismic 해석이란?

1) Nuclear Power Plant & Earthquake

원자력발전소의 내진설계는 일반 건물과는 달리 부지조사단계에서 분석한 부지주변의 단층과 과거 발생 지진을 토대로 부지에 영향을 미칠 수 있는 **최대 지진값을 산정하여** 내진설계 수준을 정하고 있음.
우리나라 원전은 부지에서 예상되는 최대지진인 규모 5.0보다 훨씬 큰 규모 **6.5의** 강진에도 견딜 수 있도록 여유 있게 내진설계 되어 있음.



0.2g 이것이 포인트!

원자력발전소의 내진설계값을 말할 때 g라는 단위를 사용합니다. g는 gravity를 줄인 말로 우리말로로는 중력가속도라고 합니다. 우리나라 원자력발전소의 내진 설계값은 0.2g인데, 이것은 중력가속도 9.8%의 20%의 크기를 말합니다. 0.2g는 규모 6.5정도(진도 8에 해당)의 강진에 해당됩니다. 실제 원자력발전소 내진설계를 할 때는 내진설계값 0.2g의 지진이 원자로 건물 기초 바로 밑에서 일어나는 것으로 보고 설계 하고 있습니다.

지진의 규모와 진도의 관계

MM진도	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
지진가속도(a)	0.01					0.10	0.2					
리히터규모	1	2	3	4	5	6	7	8	9			

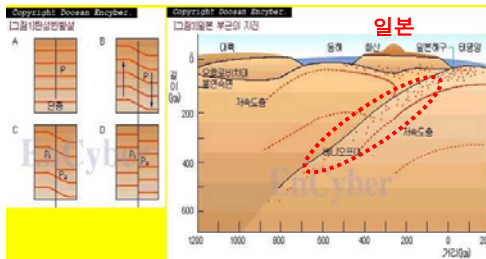
OBE Condition

SSE Condition

2. Seismic 해석이란?

2) 지반 구조

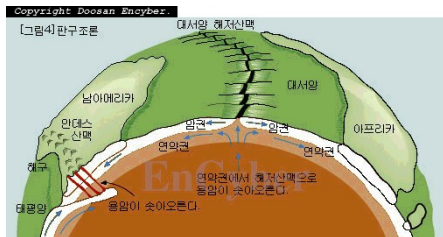
> 한국과 일본 주위의 지형



해저산맥에서 발생하는 지진은 모두 천발지진이며, 이보다 깊은 곳에서 발생하는 심발지진(深發地震)은 대부분 환태평양지진대의 해구(海溝)에서 발생한다. 이들 해구에서의 심발지진의 진앙은 천발지진의 진앙에 비하여 내륙 쪽에 위치한다. 일본 부근에서 일어난 지진은 진원의 수직분포를 보여준다. 진원이 해구로부터 내륙 쪽으로 점차 그 깊이가 깊어지며, 폭이 좁고 비스듬히 기울어지는 지역에서 발생함을 볼 수 있다.

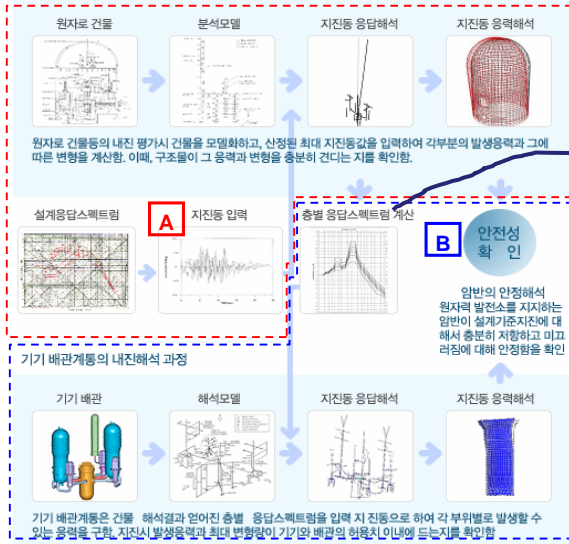
이 비스듬한 지진대를 베니오프대(Benioff zone)라고 하며, 심발지진이 발생하는 모든 해구에서 발견된다. 지진이 왜 특정한 지진대에서 많이 발생하며, 해저산맥에서는 천발지진이, 해구의 베니오프대에서는 심발지진이 발생하는가에 대해서는 1960년대에 이르러 판 구조론(板構造論)이 도입되기 전까지 지진학에서 미해결의 문제였다.

> 판 구조론



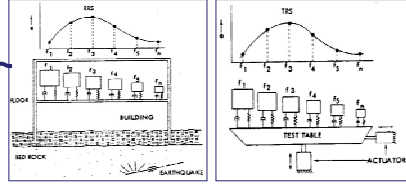
2. Seismic 해석이란?

3) 원자력 발전소 내진 해석 Process



A

- 한국에서는 지진이 발생하였을 때 지반 진동값을 SSE조건에서 0.2g 값을 사용한다.



B

- 총별 응답스펙트럼은 지진이 발생하여 지반 진동 0.2g가 원자로 건물에 왔을 때, 컴퓨터 해석으로 지진에 의한 각 건물의 층과 위치에서 지진진동의 응답해석을 하여 구한 값이다.
 - 한국형 원자로에서는 통상적으로 SSE조건 에서도 가속도 값이 5g를 넘지 않는다.
 - FRS Curve Sheet에서 보는 바와 같이, Damping Ratio가 1%인 경우에는 가속도 값이 6g가 넘지만 SSE 조건에서 통상적으로 3% Damping을 적용하므로 내진 해석을 할 때는 3.8g를 적용한다.

2. Seismic 해석이란?

4) Seismic Acceleration Decision

> 원자력발전소의 내진설계

- 1) 원자력법 제12조 및 원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙 제4조와 제13조,
- 2) 과학기술부고시 제2000-8호에 따라
 미국연방법 부록A(10 CFR Part 100 Appendix A)의
 “원자력발전소의 지진, 지질학적 부지선정기준”을 준용하고 있음.

> 이 기준에 따르면 각 원자력발전소 부지의 내진 설계값을

- 1) 부지를 중심으로 반경320Km이내의 광역지질
- 2) 과거지진 기록조사와 단층조사를 하여 부지에 미칠 수 있는 최대 가진값을 결정

> 원자력발전소에 설치될 기기들은 해당부지의 내진설계값으로 결정된 건물의 위치별 지진 특성값

(주파수특성에 따른 지진값)보다 큰 지진값에 대해 진동대 시험 또는 해석을 거쳐 기기의 내진성능을 확인

> 내진 설계값 0.2g라는 의미는 중력가속도 9.8m/sec²의 20%의 크기를 말하며 리히터 규모 6.5, 진도8의 강진에 해당.

> 원자력발전소 내진설계는 내진 설계값 0.2g의 지진이 원자로 건물기초 바로 밑에 일어나는 것으로 보고 설계

2. Seismic 해석이란?

5) Seismic Criteria

	최소값	최대값	
한국	0.1g	0.2g	
미국	0.05g	0.2g / 0.75g	-가동중인 100여기 원자력 발전소 중 80%이상이 0.2g 적용. - 활성단층인 San Andreas 단층의 직접적인 영향을 받는 서부의 Diablo Canyon 원전은 0.75g 적용.
일본	0.27g	0.6g	판 경계부에 위치하여 강진이 빈발하여 국토의 거의 전체가 활성화 단층의 영향을 받고 있음.
프랑스	0.1g	0.3g	-
스페인	0.1g	0.2g	-
독일	0.05g	0.2g	-
이태리	0.07g	0.3g	-
스웨덴	-	-	총 12기의 원자력 발전소 중 1기만 내진설계 됨

➢ 우리나라의 경우, 지진이 빈발하고 있는 판 경계부에서 비교적 멀리 떨어져 있어 판 경계부에 위치한 일본, 대만, 북미 서부지역과는 비교할 수 없을 정도로 지진의 발생 빈도가 작으며 전세계적으로 피해를 유발할 수 있는 규모 5.0 이상의 지진이 연간 1,000회 이상 발생하고 있는데 반해 우리나라는 10년에 1회 정도 발생하고 있음.

- 속리산 지진 : 규모 5.2, '78.9.16
- 홍성 지진 : 규모 5.0, '78.10.7
- 평북 삭주 지진 : 규모 5.3, '80.1.8
- 울진 해상 지진 ; 규모 5.2, '04.5.29

2. Seismic 해석이란?

6) 지진의 규모(Magnitude)와 진도(Intensity)

➢ Richter Magnitude

- 지진의 크기(지진이 발생할 때 방출할 때 에너지의 정도)를 나타내는 척도
- 각 관측소에서 지진계에 기록된 진폭을 진앙거리 및 진원 깊이를 고려하여 지수로 나타낸 것
- 관측위치와 관계없이 지진의 크기를 정량적으로 나타내기 위한 개념.

➢ 진도

- 규모와 다르게 어떤 지점에서 얼마만한 지진 진동이 발생했는지에 대한 정도를 정수의 형태로 표시.
- MMI (Modified Mercalli Intensity)는 1에서 12까지 12등급으로,
- JMA (Japan Meteorological Administration)는 0에서 7까지 8등급으로 분류.
- 진동의 정도는 사람 또는 동물의 느낌과 반응, 구조물에 가해지는 피해, 또는 지반에 생기는 변화를 그 정도에 따라 구분하며, 규모와 달리 진도는 지진발생지점으로부터 그 크기가 작아지는 것이 일반적임.

➢ 진도등급 JMA Scale 0~7단계 : 진도와 진동가속도 레벨

진도	지진의 명칭	진동가속도 피크치(cm/s ²)	진동가속도 레벨(dB)	비고
0	무감(No Feeling)	0.8이하	55이하	인체에 느끼지 못함
I	미진(Slight)	0.8~2.5	60±5	정지하고 있는 사람이나 주의 깊은 사람만이 약간 느낌
II	경진(Weak)	2.5~8	70±5	많은 사람들이 느끼는 정도의 약간 움직이는 것을 아는 정도의 지진
III	약진(Rather Strong)	8~25	80±5	가옥이 요동, 전등과 같은 현수물 흔들림, 창문, 미닫이 흔들림
IV	중진(Strong)	25~80	90±5	가옥의 진동이 심하고, 꽃병이 넘어지고, 그릇 속의 물이 넘쳐 나온다
V	강진(Very Strong)	80~250	100±5	벽에 금이 가고 묘석, 석등, 굴뚝, 돌담 등이 넘어짐
VI	열진(Disastrous)	250~400	105~110	가옥 파괴가 30% 이하, 산사태 발생, 지반 갈라짐, 앉아 있기 어렵다
VII	격진(Very Disastrous)	400 이상	110이상	가옥의 파괴가 30% 이상, 산사태 및 땅이 갈라지며, 단층 등이 생긴다

2. Seismic 해석이란?

6) 지진의 규모(Magnitude)와 진도(Intensity)

진도계급 MMI Scale 1~12단계

진도	일어나는 현상
I	민감한 기구에 의해 감지
II	구조물의 상층에 있는 소수의 사람들에 의해 느껴진다.
III	실내에서 느낄 수 있으며, 지진으로 인식을 못할 수도 있다.
IV	실내에서는 대부분 느낄 수 있으나 실외에서는 일부 느낄 수 있다. 창문, 그릇이나 문이 흔들리고 장치하고 있는 자동차가 흔들린다.
V	거의 모든 사람이 느끼며, 잠자는 사람을 깨운다. 약간의 그릇과 창문이 깨진다.
VI	모두가 느끼며 놀라서 실외로 나온다. 벽의 흠이나 석회 등이 떨어지며 골뚝이 피해를 입는다.
VII	보통 구조물은 일부 피해를 입는다. 운전 중인 사람이 느낄 수 있다.
VIII	무거운 가구가 넘어지며 골뚝, 벽 등이 무너진다. 자동차 운전이 지장을 받는다.
IX	잘 설계된 구조물이 기울어지고, 일반 구조물에 큰 피해를 주고 일부 붕괴된다. 땅에 금이 가고 지하 파이프다 부러진다.
X	대부분의 목조 구조물이 피해를 입고 석조 구조물이 무너진다. 땅은 심하게 금이 가고 휘어진다. 산사태가 일어난다.
XI	잘 설계된 일부 구조물이 남아 있고, 다리가 부서지고, 땅에 넓은 균열이 간다. 지하 파이프가 완전히 부서지고 산사태가 일어나며 철로가 심하게 휘어진다.
XII	전면적인 피해가 발생하며, 지표면의 흔들림이 육안으로 보인다. 시야와 수평선이 뒤틀리고 물체가 하늘로 던져진다.

2. Seismic 해석이란?

7) 내진 검증에 사용되는 용어의 정의

• **설계 기준 사고(Design Base Accident/Design Base Event)**

: 운전 기준 지진(OBE) 또는 안전 정지 지진(SSE), 냉각재 상실 사고(LOCA), 주증기관 파단(MSLB), 등과 같이 원전의 가상 사고 중 기기 설계에 적용될 설계 기준이 되는 사고.

• **고유 진동수(natural frequency)**

: 시스템 자체의 물리적 특성(질량, 강성) 때문에 물체가 자유 진동 조건에서 갖는 진동수

• **운전 기준 지진(OBE: Operating Basis Earthquake)**

: 지역적, 국부적인 지질학 및 지진학적 특성과 국부적인 지반의 특성을 고려하여, 발전소 수명 기간 중 발전소 현장에서 발생할 것이 예상되는 지진. 이는 공공의 건강과 안전에 대한 과도한 위험 없이 계속적인 운전을 하는데 필요한 원자력 발전소 설비들의 성능 보증에 대한 설계 기준이 되는 지반 진동을 발생시키는 지진이다.

• **안전 정지 지진(SSE: Safe Shutdown Earthquake)**

: 지역적, 국부적인 지질학 및 지진학적 특성과 국부적인 지반의 특성을 고려할 경우, 일어날 가능성이 있는 것으로 된 최대 지진.

• **요구 응답 스펙트럼(RRS: Required Response Spectrum)**

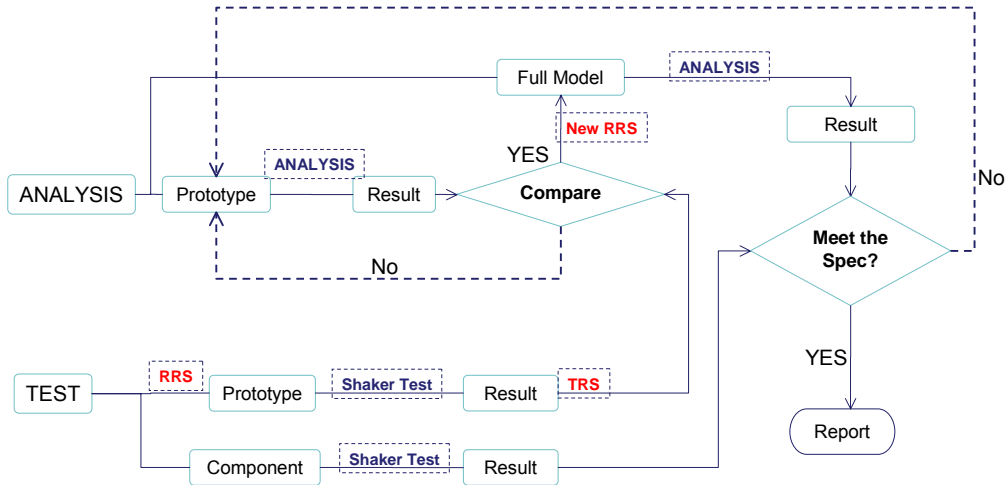
: 검증을 위한 사양서의 한 부분으로 제출하였거나, 차후 적용을 위해 인위적으로 만들어낸 응답 스펙트럼.

• **시험 응답 스펙트럼(TRS: Test Response Spectrum)**

: 셰이크 테이블(shake table) 운동의 실제 시간 이력(time history)에서 발생하는 응답 스펙트럼.

3. Seismic Qualification

Seismic Qualification Process



3. Seismic Qualification

1) Seismic Similarity

PROTOTYPE 과 XSW-2B MCSG의 구조적 상사성은 아래의 결과를 따른다:

- ☑ PROTOTYPE 과 XSW-2B MCSG 의 모달 해석은 ANSYS로 수행하였다. 두 모델의 경계조건은 응점부에서는 6자유도계로 하였고 볼트부에서는 3자유도계를 고려하였다. XSW-2B 의 기본 주파수는 17.81Hz 로 PROTOTYPE의 14.95Hz 보다 조금 높다. PROTOTYPE이 더 Flexible(나쁜 조건)한 조건임으로 XSW-2B MCSG를 대신 할 수 있다.
- ☑ PROTOTYPE 과 XSW-2B MCSG 의 응력해석은 SSE조건 일 때 ANSYS로 수행하였다. 정적해석은 세축의 직각방향으로 5g가 작용하는 것으로 수행하였다. 테이블에서 보는 바와 같이 XSW-2B MCSG 의 최대 응력은 13090로 PROTOTYPE의 20137보다 낮기 때문에 Prototype이 더 conservative하다.

	XSW-2B MCSG	Prototype
Principal Stress	Maximum	Maximum
σ_1	13090	20137
σ_2	3716.8	4562.6
σ_3	38.555	79.410

- ☑ 따라서 XSW-2B MCSG를 대신하는 PROTOTYPE의 내진 시험은 기술 사양서에 요구사항을 만족한다.

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

1) Qualification Method for Class1E Metal-Clad Switchgears

Item to be Qualified		Qualification Method	
		Environmental Qualification	Seismic Qualification
1	4.16KV Metal-Clad Switch Gears	Analysis and/or Testing	Analysis & Testing
2	Components	Analysis and/or Testing	Testing

2) Three Steps of dynamic qualification of the subject equipment

- 1) Seismic Similarity Analysis for the prototype and 4.16KV MCSG assemblies
- 2) Seismic analysis for actual 4.16KV MCSG assemblies
- 3) Seismic test for prototype MCSG assembly

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

3) Qualification Requirement

- ☑ Prototype 모델에 장착된 부품은 기능 작동여부가 시험 동안 계속 관측된다. 각각의 OBE, SSE 시험 동안에 계속 관측된다.
 - The subject equipment demonstrate **structural integrity** and **functional operability** throughout the seismic testing.
 - All electrical components do not change **state** throughout the seismic excitation.
 - The test specimen shows no sign of **significant physical damage** which affect their intended functional performance during the post-test inspection.
 - Loss of **circuit continuity** or loss of circuit isolation do not exceed two(2) milliseconds during the seismic excitations.
There was no evidence of any **contact chatter** larger than 2ms for the each contact and switch.
- ☑ The seismic responses levels for the pre-qualified components are less than their **pre-qualified levels**.
- ☑ Besides all pre-qualified components , the class 1E and non-class 1E components are installed in prototype MCSG and tested.
- ☑ There was no evidence of any **electrical discontinuity** which affect the main electrical function of MCSG.
- ☑ After completion of the qualification testing, the test specimen was visually inspected for **any damage**, and their conditions were recorded. Any **noticeable damage** and **structural defects** are not observed.

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

4) Acceptance Criteria

- The subject equipment shall demonstrate **structural integrity** and **functional operability** throughout the seismic testing and analysis.
- All electrical components shall not change **state throughout the seismic excitation**.
The test specimen shall show **no sign of significant physical damage** which would affect their intended functional performance during the post-test inspection.
- Loss of circuit continuity** or **loss of circuit isolation** exceeding two(2) milliseconds during the seismic excitation shall be investigated for its impact on the qualification of the test specimen

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

5) Seismic Simulator System

- The seismic qualification tests were performed using a tri-axial shake table at Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM) located in Daejeon, Korea.
- For the definition of directions, the coordinates used for the seismic test and the seismic analysis are different.
The relationship between the seismic test and the seismic analysis is shown in below:

<u>Seismic Test</u>	<u>Seismic Analysis</u>
X-dir. (side-to-side)	Z-dir.
Y-dir. (front-to-back)	X-dir.
Z-dir. (vertical)	Y-dir.

- Shaking table에서 3축방향으로 여러 주파수가 랜덤한 동작으로 움직인다. 랜덤 동작의 전체 시간은 40초이다.

- Specification of Shaker table
 - (1) Control Program : MTS Seismic Test Execution Software (STEX3)
 - (2) Manufacturer : MTS Systems Corporation, U.S.A.
 - (3) Principal Specifications
 - Max. Loading 30Ton
 - Table Size 4.0m × 4.0m
 - Control Axes Translational 3 axes, Rotational 3 axes
 - Max. Displacement H = ±100mm, V = ±67mm
 - Max. Velocity H = ±75cm/s, V = ±50cm/s
 - Max. Acceleration H = ±1.5g, V = ±1.0g
 - Max. Off-Center H = ±0.5m, V = +2.5m
 - Frequency Range DC - 100 Hz
 - Excitation Mechanism Electrohydraulic Servo, 3 Variable Control
 - Simultaneous Data Acquisition 64 Ch

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

6) Seismic Test Sequence

No.	Test	VCB Power	Remark
1	Pre-function 1	Close-Open-Close	부품 검사(외관)
2	Pre-function 2	Open-Close-Open	부품 기능 검사
3	Resonance Search 1	Close	Low Level (0.1g)
4	OBE 1	Close	
5	OBE 2	Open	
6	OBE 3	Close	
7	OBE 4	Open	
8	OBE 5	Close	
9	Resonance Search 2	Close	Low Level (0.1g)
10	SSE 1	Close-Open-Close	
11	SSE 2	Open-Close-Open	
12	Resonance Search 3	Close	Low Level (0.1g)
13	Post-function 1	Close-Open-Close	부품 검사(외관)
14	Post-function 2	Open-Close-Open	부품 기능 검사

가진 시험 시 모든 안전등급관련 부품을 장착해야 한다..

Resonance search 시험은 가진 시험 전후에 OBE, SSE 조건 모두에서 실시한다.

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

7) Seismic Qualification Test

- The prototype MCSG was seismically tested in accordance with the requirements of IEEE 344-1987, IEEE C37.81-1989 and IEEE C37.82-1987.
- The seismic testing was performed by using the KIMM tri-axial seismic simulator in accordance with the IEEE344-1987. The seismic test was performed on assembly basis to simulate the actual situation in service mounting condition.
- The specimen was mounted to dynamically rigid fixture, such that the combined specimen and fixture fundamental natural frequency will exceed 33 Hz and mounted as closely as practical. Its base is flush with the top of the table and oriented such that the horizontal axes of the excitation of the test table.
- The test response spectra (TRS) for each shake table motion was analyzed at 2% damping for the Operating Basis Earthquake (OBE) tests and at 5% damping for the Safe Shutdown Earthquake (SSE) test. Each TRS was compared with corresponding RRS as specified. The shaking table motions and the comparison plots of TRS and RRS were plotted at one-sixth octave intervals over the range of 1Hz to 50Hz.
- The 480VAC, 3-phase, 60Hz input power was supplied to the proto-type switchgear test specimen and the functional operability was monitored electrically or visually throughout seismic qualification test. The electrical monitoring system had the sufficient speed to determine that proper electrical properties are maintained before, during and after the seismic excitation.
- Functional operability of the critical components installed in the test specimen was monitored during the seismic test. The monitoring was accomplished for each OBE test and SSE test. There was no evidence of any contact chatter larger than 2ms for the each contacts and switches.
- After completion of the qualification testing, the test specimen was visually inspected for the structural integrity, and their conditions were recorded. Any noticeable damage and structural defects were not observed.

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

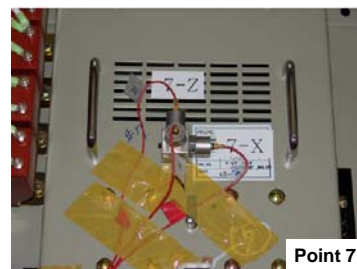
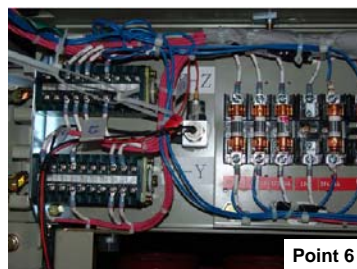
8) Prototype 및 센서 설치



3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

8) Prototype 및 센서 설치

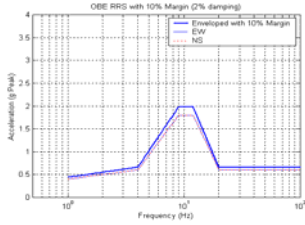


3. Seismic Qualification

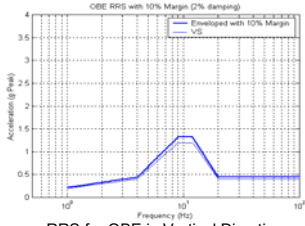
2) Dynamic Qualification

9) Input function

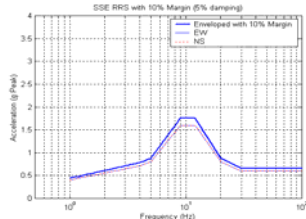
요구 응답 스펙트럼
(Required Response Spectrum)



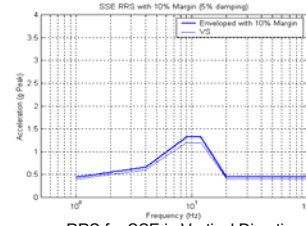
RRS for OBE in Horizontal Direction



RRS for OBE in Vertical Direction

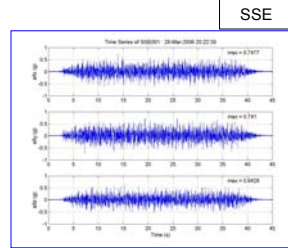
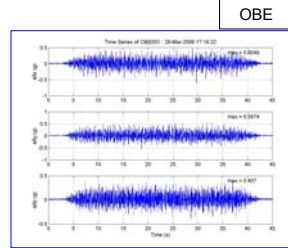


RRS for SSE in Horizontal Direction



RRS for SSE in Vertical Direction

Input Time Histories
(OBE & SSE)



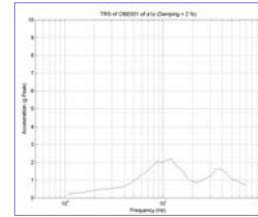
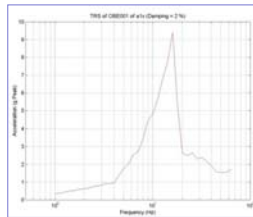
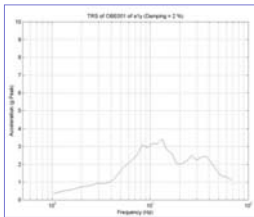
3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

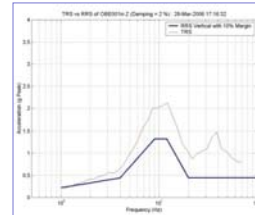
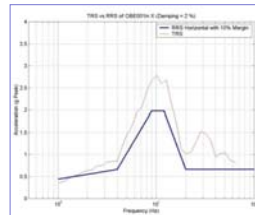
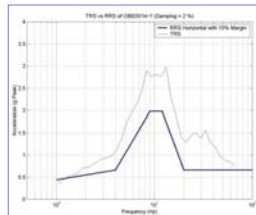
10) Test Result

: OBE Condition

TRS of Position #1



TRS와 RRS 비교



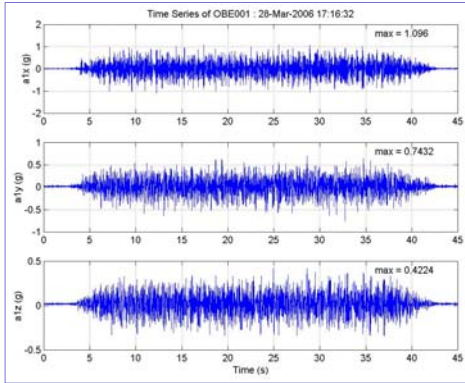
3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

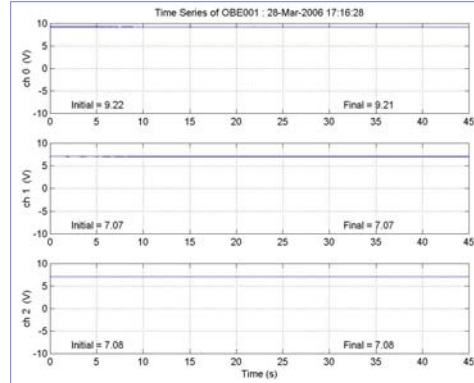
10) Test Result

: OBE Condition

Time Series



Time Series of functional Operability



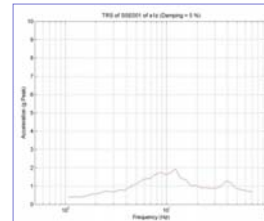
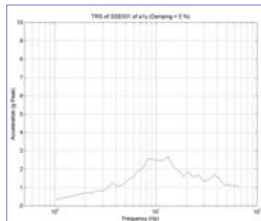
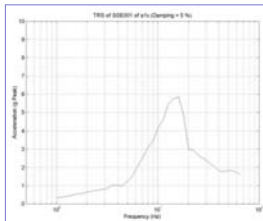
3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

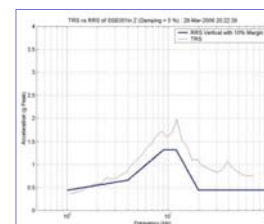
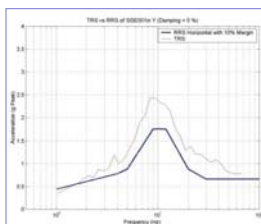
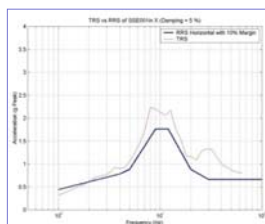
10) Test Result

: SSE Condition

TRS of Position #1



TRS와 RRS 비교



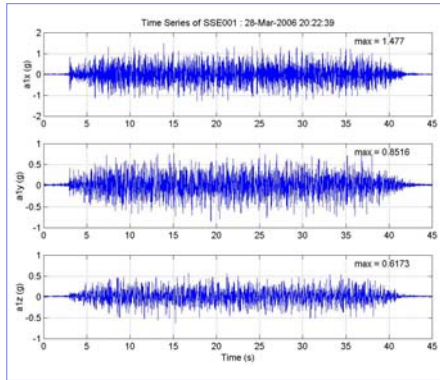
3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

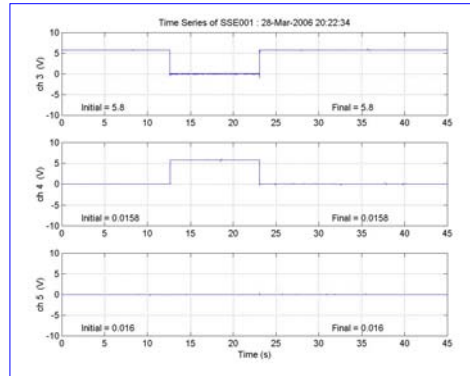
10) Test Result

: SSE Condition

Time Series



Time Series of functional Operability



3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

11) 부품 시험 결과

Components	Pre-Qualified Level(ZPA) OBE/SSE	Test Level (ZPA) OBE/SSE	Components	Pre-Qualified Level(ZPA) OBE/SSE	Test Level (ZPA) OBE/SSE
Vacuum Circuit Breaker	5g/5g	1.2g/1.5g	Potential Transformer	(Note 1)	1.2g/1.6g
Vacuum Circuit Breaker	4g/4g	1.5g/1.6g	Current Transformer	(Note 1)	1.2g/1.4g
Over Current Relay	6g/6g	1.2g/1.4g	Surge Arrester	(Note 1)	1.2g/1.4g
Over Voltage Relay	8g/8g	1.2g/1.4g	Ampere Meter	(Note 1)	1.2g/1.4g
Ground Over Current Relay	6g/6g	1.2g/1.4g	Volt Meter	(Note 1)	1.2g/1.4g
Auxiliary Relay	4g/4g	1.2g/1.4g	Watt Meter	(Note 1)	1.2g/1.4g
Breaker Control SW	4g/4g	1.2g/1.4g	Run Hour Meter	(Note 1)	1.2g/1.4g
Indicating Light, Green	4g/4g	1.2g/1.4g	Ampere Transducer	(Note 1)	1.2g/1.5g
Indicating Light, Red	4g/4g	1.2g/1.4g	Volt Transducer	(Note 1)	1.2g/1.5g
Ammeter Selector SW	4g/4g	1.2g/1.4g	Pull-Out Fuse Block	(Note 1)	1.2g/1.5g
Volt Selector SW	4g/4g	1.2g/1.4g	Fuse	(Note 1)	1.2g/1.5g
Select SW	4g/4g	1.2g/1.4g	MOC	(Note 1)	1.2g/1.5g
Shorting Terminal Block	4g/4g	1.2g/1.6g	TOC	(Note 1)	1.2g/1.4g
Terminal Block	4g/4g	1.2g/1.6g	Test Switch	(Note 1)	1.2g/1.4g
Cable	(Note 2)	(Note 2)	Lockout Relay	(Note 1)	1.2g/1.4g
Socket	4g/4g	1.2g/1.6g	Fuse Block	(Note 1)	1.2g/1.5g
Ground Sensor	(Note 1)	1.2g/1.4g	On Timer	(Note 3)	(Note 3)

Note-1. These items were qualified by testing at the MCSG assembly level.

For the mentioned components, there was no evidence of any electrical discontinuity which affect the essential electrical performance during the seismic test. Any noticeable damage and structural defects were not observed either.

Note-2. Seismic qualification was not concerned.

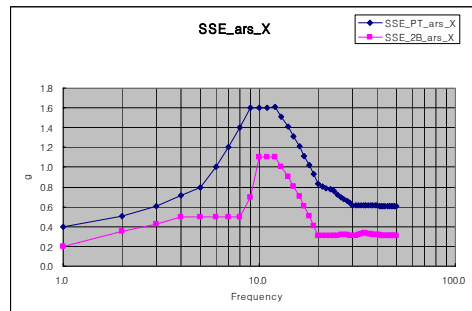
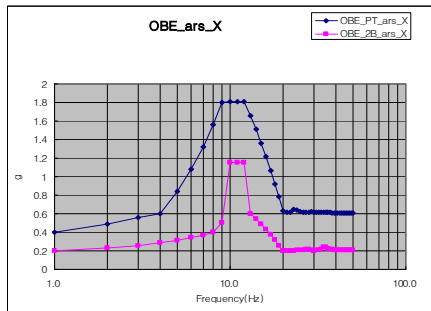
Note 3. The On-Timer was qualified with the TRS at location 7 after Seismic Test.

3. Seismic Qualification

2) Dynamic Qualification

12) Comparison of Seismic Response between the Prototype and the Actual SWGR

- The seismic responses of the prototype subjected to the RRS used for the seismic test should be equal to or higher than those of the actual SWGR panel subjected to the floor response spectra levels to justify that the testing of the prototype can cover the actual 9 unit SWGR panel.
- The seismic responses in g unit are calculated based on the modal participation factors, mode shapes, modal frequencies and the response spectral values for the Prototype model and the actual 9 unit SWGR panel. As shown in Figures, the seismic responses of the Prototype enveloped the seismic responses of the actual 9 unit SWGR panel with the comfortable margins in all cases. Hence, it can be stated that the seismic testing of the Prototype model can represent the actual 9 unit SWGR panel.



3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

1) General

- The dynamic qualification for the subject equipment were accomplished by a combination of analysis and testing.
- Seismic analysis on the actual switchgear assembly was performed to demonstrate the dynamic characteristics of overall MCSG configurations and to determine the severe seismic level applicable to the prototype MCSG.
- Seismic analyses for the actual MCSGs were performed prior to seismic test for the prototype MCSG.

2) Modeling

- The MCSG assemblies are modeled with a shell element, SHELL63.
- The effects of electrical components are considered as distributed masses.
- The mathematical model is input into the finite element computer program, which is capable of determining the static and dynamic response of structural linear elastic systems.
- The natural frequencies and the corresponding mode shapes are then calculated by using modal analysis method in the FEM program.
- The actual 4.16KV MCSG's and the prototype MCSG are welded to the embedded plate.
- The boundary condition should be constrained all degrees of freedom at the welds.
- The input data for the nodes, elements, boundary conditions, real constants and material properties

3) Modal Analysis

- The modal analysis was performed to evaluate the dynamic characteristics of the actual and the prototype MCSG assemblies.
- The ANSYS software is utilized to get the natural frequencies and mode shapes of the MCSGs.
- The Block Lanczos eigenvalue extraction method is used to solve large model with many constraint equations due to fast convergence rate.

4) Spectrum Analysis

- This seismic analysis of the actual MCSG, XSW-2B, was only performed by modal analysis and spectrum analysis.
- The spectrum analysis was performed for the seismic response of the actual MCSG assemblies before seismic test.
- A finite element method using the ANSYS software was used to perform seismic analysis.

3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

5) SUMMARY AND CONCLUSION

- ☑ The seismic similarity analysis was performed to verify whether the prototype MCSG model can be representative of the actual MCSG models and found to be acceptable for confirming the qualification of components mounted on the actual MCSG assemblies.
- ☑ The total masses of the FEM model for the MCSGs and the prototype are compared with actual MCSGs and the prototype model. The comparison of the total mass is summarized below and found to be acceptable.

Equipment	Actual Model(lbs)	FEM Model(lbs)	Error(%)
XSW-2A (8 Sections)	33,510(=15200 kg)	33,729	0.6
XSW-2B (9 Sections)	37,037(=16800 kg)	37,078	0.1
PROTOTYPE (3 Sections)	12,348(=5600 kg)	12,382	0.3

- ☑ The material of the MCSGs is SCP1 and is equivalent to A36, which the yield stress is 36000 psi. The maximum stresses and the allowable stresses are tabulated in the following table.
- ☑ The stress tabulation is only done for 9 section Model, XSW-2B.

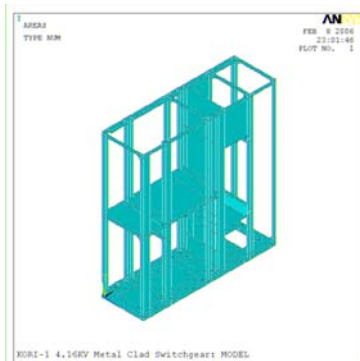
Plant Operating Condition	Loading Combination	Maximum Stress (psi)	Allowable Stress (psi)
Normal	Weight	1539.4	21600(=0.6Sy)
Upset	Weight+OBE	2883.0	28728(=0.6Syx1.33)
Faulted	Weight+SSE	2479.7	34200(=0.95Sy)

- ☑ The maximum stresses in three different levels are less than the allowable stresses and meet the

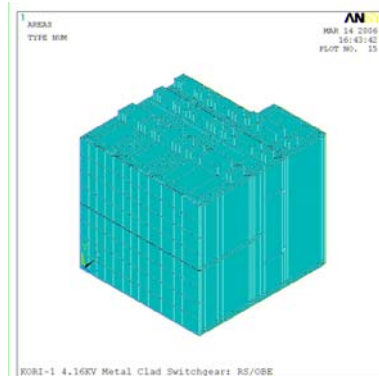
3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

6) Plot of Finite Element Model for PROTOTYPE



Model of VCB1200A Panel/Internals

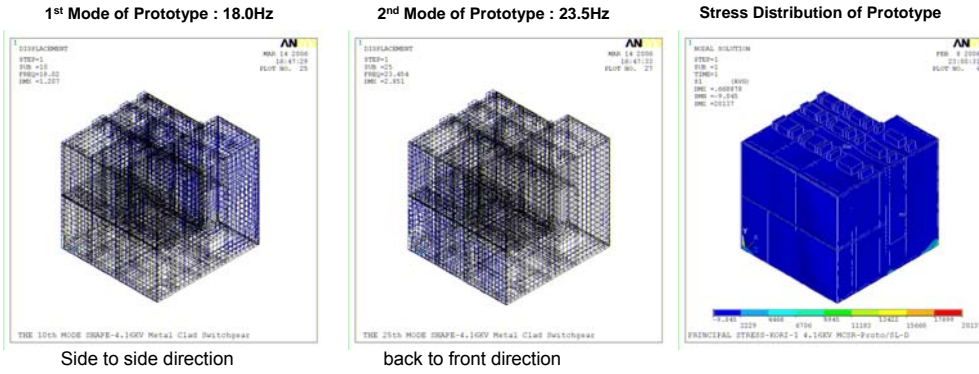


Model of Prototype

3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

7) Plot of ANALYSIS Results of PROTOTYPE

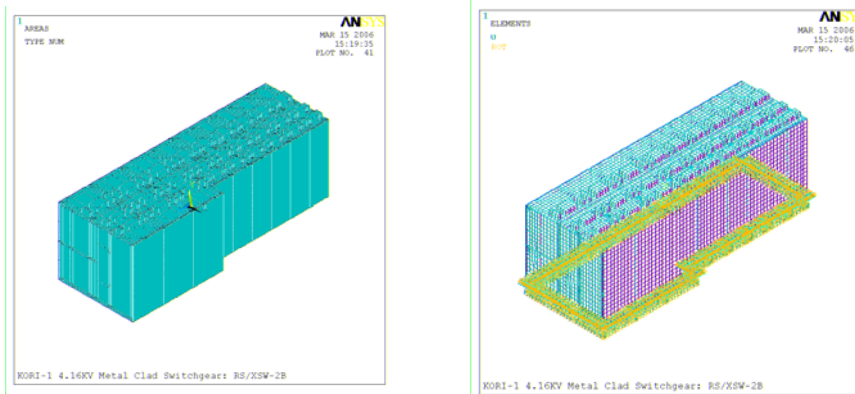


- 다른 모드는 Local mode 임.
- 실제로 방향과 일치하는 이 모드들이 1,2,3차 모드 임

3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

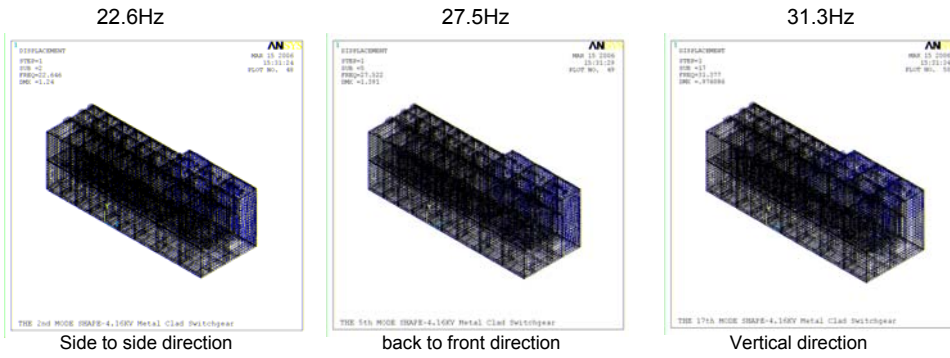
8) Plot of Finite Element Model for XSW-2B



3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

9) Plot of Mode Shape for XSW-2B

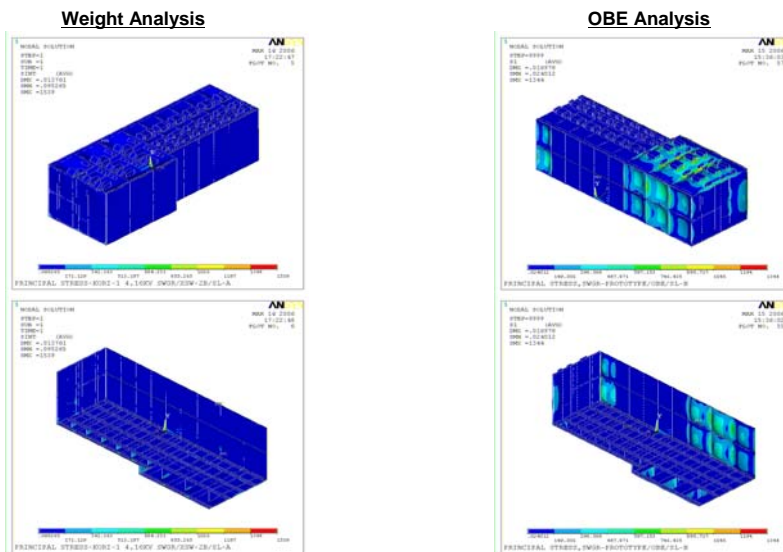


- 다른 모드는 Local mode 임.
- 실제로 방향과 일치하는 이 모드들이 1,2,3차 모드 임

3. Seismic Qualification

3) Seismic ANALYSIS

10) Stress Distribution for XSW-2B



4. Conclusion

- ☑ The total masses of the FEM model for the MCSGs and the prototype are compared with actual MCSGs and the prototype model. The comparison of the total mass is summarized below and found to be acceptable.

Equipment	Actual Model(lbs)	FEM Model(lbs)	Error(%)
XSW-2A(8 Sections)	33510(=15200 kg)	33729	0.6
XSW-2B(9 Sections)	37037(=16800 kg)	37078	0.1
PROTOTYPE(3 Sections)	12348(=5600 kg)	12382	0.3

- ☑ The natural frequencies of three different models based on the modal analyses are summarized below. Due to the rigidity increase in side-to-side direction the natural frequency of actual MCSGs is larger than that of the prototype. However, the dynamic characteristics of the actual MCSGs are much better than the prototype.

Equipment	Natural Frequencies, Hz		
	Side-to-Side	Front-to-Back	Vertical
XSW-2A(8 Sections)	22.6	27.5	31.4
XSW-2B(9 Sections)	22.6	27.5	31.4
PROTOTYPE(3 Sections)	18.02	23.45	23.25

4. Conclusion

- ☑ The following functional test for proto-type switchgear was performed before and after seismic test in accordance with the KEPIC EEE3000(IEEE C37.20.2) and found satisfactory.

1) Dielectric tests

Normal-frequency withstand tests was performed on proto-type switchgear in accordance with the general requirements. 19000V was loaded to demonstrate the ability of insulation system. Tests was made between each phase and ground with the other phases grounded.

2) Mechanical operation tests

Mechanical tests was performed to ensure the proper functioning of shutters, mechanical interlocks, etc. These tests ensured the interchangeability of removable elements designed to be interchangeable.

3) Electrical operation and control wiring tests

- Control Wiring continuity

The correctness of the control wiring of a switchgear assembly was verified by either or both of the following :
Actual electrical operation of the control devices.

Individual circuit continuity checks by electrical circuit testers

- Control wiring insulation tests

A 60 Hz test voltage was applied after all circuit grounds have been disconnected. Either 1500V for 1 min or 1800V for 1 s may be utilized. All wires was tested either individually or in groups. At the option of the manufacturer, switchgear mounted devices that have been individually tested may be disconnected during the test.

- Polarity verification

Tests was made to ensure that connections between instrument transformers and meters or relays, etc., are correctly connected with proper polarities. Instruments was tested to ensure that pointers move in the proper direction. This does not require tests using primary voltage and current.

- Sequence tests

Switchgear involving the sequential operation of devices was tested to ensure that the devices in the sequence function properly and in the order intended. This sequence test need not include remote equipment controlled by the switchgear assembly. However, this equipment may be simulated, where necessary.

Appendix

1. 기기 검증이란?

원자력 발전소는 구조물(structure), 계통(system), 기기(component)의 세가지 기본 요소로 이루어지며, 다량의 방사능 물질을 포함하고 있다. 원전의 안전관련 시설 및 설비는 자연 환경이나 재해로부터 보호되고, 환경 요인이나 가상적 사고 조건(postulated accident condition)에서도 구조적 건전성을 유지하며, 안전 관련 기능을 충분히 수행할 수 있도록 법률적으로 요구된다.

원전의 안전 관련 기기는 정상 또는 비정상 환경 조건(normal/abnormal environmental condition)과, 지진 발생과 같은 설계 기준 사고 (DBA/DBE:Design Basis Accident/Event) 조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며, 설계의 적합성이 입증되어야 한다. 이러한 입증 과정을 내진 검증(seismic qualification) 및 내환경 검증(environmental qualification) 이라 하고 두 과정을 합하여 기기 검증(equipment or component qualification)이라 한다.

1) 기기 분류

기계 기기와 전기 기기로 분류하며, 이들 기기는 안전 관련 기기와 비안전 관련 기기로 분류한다.

* 기계 기기 : 안전 관련 기계 기기는 능동 기기(Active equipment)와 수동 기기(Passive equipment)로

* 전기 기기 : 안전 관련 기능에 따라 전기 1급(Class 1E) 기기와 비전기 기기 1급(Non-Class 1E) 기기로 분류

2) 등급 분류

- 안정성등급(Safety Classification) : ANS 51.1
 - 원자력 안전 등급 (Nuclear Safety) : 안전성 관련 품목
 - 비원자력 안전 등급 (Non-Nuclear Safety) : 비안전성 관련 품목
- 내진 등급 (Seismic Category) : U.S NRC REG GUIDE 1.29
 - Category I : 안전성 관련 품목
 - Category II : 비안전성 관련 품목
- 전기 등급 (Electrical Class) : IEEE 603
 - Class 1E : 안전성 관련 품목
- 품질 등급 (Quality Class) : 미국 Bechtel의 등급분류 기준
 - Q Class : 안전성 관련 품목 (Safety-Related Item)
 - T Class : 안전성 영향 품목(Safety Impact Item)

Appendix

2. 내진 검증의 종류

내진 검증의 기술적 방법으로 해석(analysis), 시험(test), 시험과 해석의 조합, 경험(experience)에 의한 방법이 있다. 지진의 특성은 지면, 구조물 그리고 기기가 구조적 특성에 따라 상호 작용에 의한 거동을 하며, 공진(resonance)에 의해 증폭되는 현상을 나타낸다. 따라서 기기의 내진 검증은 기기가 위치하는 건물 바닥이나 벽의 층응답 곡선 (FRS: Floor Response Spectra)을 이용하여 기기의 거동을 분석하고 기기에 작용하는 지진 및 각종 부하에 대한 구조적 건전성, 내압력 건전성, 운전성에 대한 설계의 적합성을 보증하는 과정을 말한다.

1) 해석에 의한 방법

수학적 모델에 의해 거동을 해석하고 분석하는 방법으로 구조적 특성이 단순하여 수학적 모델은 가능하나 현실적으로 시험이 불가능한 경우에 사용되며 제어반이나 단순 구조 기기 등에 사용한다. 여기에는 기기의 동적 구조 및 동적 특성(구조의 복잡성, 강체 또는 유연 특성 등)에 따라 정적 해석(static analysis), 단순 동적 해석(simplified dynamic analysis), 상세 동적 해석(detailed dynamic analysis)등의 해석 방법이 있다. 수학적 모델 형식에는 연속 모델(continuous model)과 불연속 모델(discrete model)로 크게 나누며, SAP 이나 ANSYS 등과 같은 유한 요소법(FEM: Finite Element Method)에 의한 동적 해석이 많이 사용되고 있다.

2) 시험에 의한 방법

진동 테이블(shake table)을 이용하여 기기가 설치되는 면의 지진에 의한 거동과 유사한 인공 사인(sine)파를 만들어 시험하는 방법이다. 구조적 복잡성에 의해 수학적 모델이 어려우며, 능동적 기기의 운전성을 확인할 수 있는 경우에 편리한 방법이다. 시험될 기기의 동적 특성에 따라, 적용 될 주파수는 단일 또는 다중 주파수의 종류가 있고, 진동 테이블의 적용 축에 따라 단축(1축) 또는 다축(2축,3축) 시험 방식이 있다.

3) 시험 및 해석을 조합하여 수행하는 방법

냉동기와 같이 구조가 복잡하고 대형 기기인 경우와 같이 완전한 수학적 모델이 어렵고 시험에 제약을 받는 기기에 대한 검증 방법으로, 부분적인 해석과 시험으로 상호 보완적인 방법을 이용한다. 즉, 독자적인 해석이나 시험만으로 기기에 대한 완전한 검증이 어렵거나, 이미 시험이 시행된 기기와 유사 기기에 대해 해석을 통해 그 차이점과 특성을 분석하고 보완할 필요가 있는 경우에 이용된다.

4) 경험에 의한 방법

과거의 경험적인 자료, 즉 과거 기기 검증 시 얻어진 자료나 지진 등을 경험한 기기에 대하여 자료 등에 의해 동적 특성의 유사성을 확인하여 검증하는 방법이다.

3. 내진 검증 절차

1) 검증 대상 기기의 분류 및 구분

기능(Active, Passive, Class 1E)의 분류, 실제 적용 코드를 위한 품질 등급, 안전 관련 기능, 구매 사양서, 제작자 기기 번호 및 식별 번호, 모델 번호, 크기와 용량 등이다.

2) 설치될 위치의 확인 및 결정

이 과정에서는 설치 위치의 OBE, SSE에 대한 FRS, 지진 계수 또는 시간 이력 등에 의한 지진 입력 부하가 결정된다. 또한 설치 위치의 결정 후에는 설치 부위의 형태 및 방향을 결정하여야 한다. 예를 들면 제어반 (Panel)에 설치되는 계기의 경우, Panel은 해당 설치 바닥의 FRS가 적용되나, 계기의 경우는 Panel 특성에 따라 입력 부하가 증폭될 수 있으므로 Panel에서의 응답 곡선(response spectra)이 적용되며, 작은 부품의 경우 방향별 적용 분야가 큰 차이를 나타낼 수 있다.

3) 정상 운전 부하의 결정

예를 들면 하중, 압력, 열 팽창 부하, 노즐 부하, 운전 부하(전동기 Torque, 팬 Thrust) 등 이다. 내진 검증에서 고려되어야 할 부하는 정상 조건 부하(normal service load: 무게, 압력, 열등에 의한 부하), 운전 부하(operating load), 기기 진동과 같은 동적 부하, 지진 부하 (seismic load) 등이다.

4) 검증된 기기의 동일성(identity) 또는 유사성(similarity)의 확인

이 경우 모델명, 크기, 용량, 재질 등이 동일한지 확인하고 만일 동일하지 않을 경우 차이점을 구분하여 운전 특성 (속도, 응답 시간, Trip Level)이나 동적 특성 (공진 주파수, 강성도)을 확인해야 한다.

5) 기기 검증 보고서의 문서화

기기 검증 서류는 안전 관련 기기의 성능 요건 및 검토 요건이 적절한 방법과 적용에 따라 요구된 수준을 만족하고 완료 되었음을 보여주어야 한다.