



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 8월
석사학위 논문

지진 발생시 원전 안전성 검토 및
조치에 관한 연구

조선대학교 대학원
원자력공학과
박 창 석

지진 발생시 원전 안전성 검토 및 조치에 관한 연구

A Study on the safety review and action in case of
earthquake in Nuclear Power Plant

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원
원자력공학과
박 창 석

지진 발생시 원전 안전성 검토 및 조치에 관한 연구

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2019년 4월

조선대학교 대학원
원자력공학과
박 창 석

박창석의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위원 조선대학교 교수 김종현 (인)

위원 조선대학교 교수 김진원 (인)

2019년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vi
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목적	2
제 2 장 원전 내진규정 및 내진설계 절차	3
제 1 절 원전 내진설계 관련 법규 및 규정	3
제 2 절 원전 내진설계 기준	8
제 3 절 원전별 내진설계 적용현황	10
제 4 절 내진 등급 분류	13
제 5 절 원전 내진설계 절차	15
제 6 절 지진감시계통 안전심사지침	22
제 7 절 지진 감시 계통	27

제 3 장	지진발생시 원전 안전성 검토	37
제 1 절	지진 발생시 주요 영향 전력설비	37
1.	지진영향 국내외 원전 정지사례	38
제 2 절	전력설비 영향 분석	40
1.	계통 주파수 상승	40
2.	원자로 출력 변화 및 원자로 거동	42
3.	터빈-발전기 베어링 진동 증가	44
4.	대형 회전기기 회전수 증가 및 진동 상승	45
5.	주요 차단기, 변압기 및 송전선, 송전철탑 손상 ...	47
6.	각종 보호계전기 오동작	51
7.	주요 탱크 수위 흔들림	51
8.	지진 해일 발생	53
제 3 절	지진 발생시 조치	59
제 4 장	결론 및 제언	64
참고 문헌	65

표 목 차

<표 1> 원자로시설 부지조사에 관한 외국규정	4
<표 2> 미국 NRC 규제지침	5
<표 3> 원전 내진설계 적용 산업표준	6
<표 4> 경수로형 원전 안전심사지침서	7
<표 5> 국내원전 지진가속도 준위 및 고려된 지진	10
<표 6> 미국 일본 주요 원전 내진설계치	12
<표 7> 주요 기기 및 구조물 내진등급 분류	14
<표 8> 국내 원전 지진감시계통 설치호기	27
<표 9> 지진트리거 위치	28
<표 10> 지진스위치 위치 및 설정치	29
<표 11> 시간이력가속도계 위치	30
<표 12> 첨두가속도기록계 위치	31
<표 13> 지진감시 계측설비	35
<표 14> 지진으로 인한 원전 정지사례	38
<표 15> Droop Factor 설정치 및 출력자동감발량 비교	41
<표 16> 주파수 시뮬레이션 결과	42
<표 17> 한빛 1 호기 노심 온도계수	43

<표 18> 국내외 원전 터빈 지진영향사례 44
 <표 19> 국내외 원전 원자로냉각재펌프 지진영향사례 45
 <표 20> 국내 원전 복수펌프 지진영향사례 46
 <표 21> 국내 원전 격납건물 팬 냉각기 지진영향사례 47
 <표 22> 해외 원전 차단기, 변압기 및 송전선 지진영향사례 .. 47
 <표 23> 한빛원자력본부 송전선로 비정상시 출력운영계획 50
 <표 24> 일본 원전 보호계전기 지진영향사례 51
 <표 25> 국내외 원전 탱크 수위 지진영향사례 52
 <표 26> 우리나라 지진해일 기록 54
 <표 27> 지진해일에 의한 해수위 상승 54
 <표 28> 국내 원전별 부지고 대비 설계 해수위 55
 <표 29> 지진해일로 인한 피해사례 56
 <표 30> 고리 원전 해안방벽 증축내용 58
 <표 31> 지진관련 방사선 비상 및 발령조건 62

그림 목 차

<그림 1> 한빛원자력 부지반경 320 km	9
<그림 2> 원자력발전소 내진설계과정	21
<그림 3> 설계기준지진에 따른 지진감시계통 배치도	32
<그림 4> 지진감시계통 구성도	33
<그림 5> 하마오카 5 호기 터빈 블레이드 접촉으로 인한 손상	45
<그림 6> 가시와자키 가리와 3 호기 보조변압기 단락 및 화재 발생 부스덕트 모습	48
<그림 7> 하마오카 스위치야드 도체탈락 및 지지애자 파손 ...	48
<그림 8> 오나가와 1 호기 고전압 차단기 화재	49
<그림 9> 가시와자키 가리와 6 호기 사용후 연료저장조 물 유동 모습	52
<그림 10> 오나가와 1 호기 연료탱크 전도 및 유출	53
<그림 11> 오나가와 2 호기 쓰나미로 EDG 건물 침수	56
<그림 12> 후쿠시마 1 호기 수소폭발 전/후 모습	57
<그림 13> 후쿠시마 3,4 호기 수소폭발 모습	57

ABSTRACT

A Study on the safety review and action in case of earthquake in Nuclear Power Plant

Park, Chang Seok

Advisor : Prof. Kim, Jin Weon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

After the accident in Fukushima Daiichi nuclear power plants (NPPs) and the earthquakes in Gyeongju and Pohang, there has been an increase in public interest in the safety of NPPs under seismic conditions. Thus, it is important to review the influence of seismic event on the safety of NPPs. Therefore, the regulatory guidelines of seismic design, design procedure, and seismic monitoring system of NPPs were reviewed in this study.

In addition, the system, structure, and components (SSCs) of NPPs and operating parameters affected by the earthquake were identified, and the responses of the SSCs and parameters during the earthquake event were reviewed from the earthquake experiences of NPPs in Korea and Japan. Based on these, appropriate reviews and actions

were proposed to ensure the safety of NPPs in the events of an earthquake.

The key procedure of seismic design is consisted of decision of design earthquake, dynamic seismic response analysis, seismic design of structures and equipment, and seismic verification of equipment. In the dynamic seismic response analysis, the ground-structure interaction analysis should be added if the ground condition is not sound compared to the reference value.

For the safe operation of NPPs during the seismic event, it is important to understand the responses of structures and equipment of NPPs under seismic condition and to take appropriate action to mitigate the abnormal responses. Thus, this section reviews the expected responses and analyses the effects of the responses on the safe operation of the NPPs.

Based on the reviews of guidelines of seismic design and responses of NPPs under seismic events, it was concluded that the current design of Korean NPPs has no critical problems in terms of safe operation and safe shutdown during the earthquake event. To further enhance the safety of NPPs under seismic events, however, it is necessary to manage the lifetime of affected equipment and seismic verification of spare parts. Also, repeated training and emergency training on the response of NPPs in the event of earthquake are required.

제 1장 서론

제 1절 연구 배경

우리나라에서 1905년 처음으로 지진계측기에 의한 지진관측이 시작된 이래 규모 5.0 이상의 지진은 총 다섯 차례(‘78년 속리산 5.2, 홍성 5.0, ‘80년 신의주 5.3, ‘81년 포항 5.0, ‘82년 해주 5.1) 정도에 지나지 않았으나, 2011년 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 언론과 국민들의 원전의 안전성에 대한 의구심이 증대해 있는 상황에서, 2016년 9월 경주 지진(규모 5.1, 5.8)과 2017년 11월 포항 지진(규모 5.4)이 1년 간격으로 연달아 발생함으로써 원자력발전소의 지진 안전성에 대한 국민들의 불안감이 증폭되어 있어, 원전 주변에서 큰 지진이 발생할 경우 실제로 원전의 안전성에 문제가 발생할 소지가 있는지 살펴보는 것이 필요하다는 생각이 들었다.

현재 국내에서 가동 중이거나 건설 중인 원전 30기는 모두 지진 가속도 준위가 0.2g 내지 0.3g(APR 1400)로 내진 설계가 되어 있는데 이는 리히터 규모 6.5~7.0 정도의 큰 지진에 견딜 수 있게 되어 있다는 뜻이다.

이 수치는 원자력발전소 부지 내에서 이 정도의 큰 지진이 발생하더라도 견딜 수 있을 뿐만 아니라, 진앙지가 원전에서 멀리 떨어질수록 더 큰 지진에도 견딜 수 있음을 의미하는 것이다.

내진 설계는 0.2g ~ 0.3g로 되어 있지만 0.01g의 약진(규모 3.0~3.5 정도 ; 부지 내에서의 지진 강도) 발생 시에도 원자력발전소 주 제어실에는 지진경보가 발생되며, 0.1g(규모 5.0~6.0 정도)의 강진 발생 시에는 발전소를 수동으로 정지하고, 0.2g 이상(규모 6.5 정도)의 강력한 지진 발생 시에는 발전소가 자동으로 정지되도록 설계되어 있다.

우리나라에서 원자력발전소는 어느 산업시설보다 내진설계 및 운영체제

가 잘 되어 있다고 생각하지만, 실제로 발전소를 운영하는 종사자들이 지진에 대한 이해가 부족하거나 사전에 대비가 되어 있지 않으면 별다른 소용이 없으므로, 원전의 부지조사, 내진설계, 시공, 지진감시계통 운영, 지진발생시 발전 설비의 영향 및 안전성 검토 결과, 대처방안 등을 면밀하게 익히고 훈련하는 것이 중요하다.

제 2절 연구 목적

2016년 9월의 경주 지진은 그동안 우리나라에서 발생한 지진 가운데 가장 강력한 지진(규모 5.8)으로서 특히 월성원자력발전소 2,3,4호기를 수동 정지하게 됨으로써 언론 및 국민들의 불안감과 관심이 과도하게 증폭된 경향이 없지 않았다. (당시 월성 1호기는 계획예방정비를 위해 정지 상태였음)

우리나라의 경우 상기에서 기술한대로 규모 5.0 이상의 지진이 1905년 이후 총 8차례가 발생하였으나, 일본의 경우 연간 100회 정도로 우리와는 비교할 수 없을 정도로 크고 많은 지진이 발생하고 있다.

원자력발전소의 내진설계는 어떠한 법령과 규정에 따라 어떤 과정을 거쳐 실시되고, 지진발생시 감시계통은 지진을 어떻게 감지하며, 또한 지진에 의해 영향을 받을 수 있는 발전소 전력설비와 중요 변수들은 어떠한 것이 있는지, 또한 그 설비들이 어떻게 반응하는지 미리 파악하여 익혀둔다면 큰 지진 발생 시에도 적절히 대처할 수 있으리라 본다.

따라서, 본 논문에서는 지진 빈발국인 일본을 포함하여 국내외 원전의 지진 영향 사례와 분석 내용을 검토해서 대처 방안을 수립해 보고자 하였다.

제 2장 원전 내진규정 및 내진설계 절차

원전 건설 초창기인 1960년대까지만 하더라도 미국은 원전에 대한 별도 기준이 없어 기존 일반 내진설계의 일부를 수정하여 원전설계에 반영하고 있었는데, 1971년에 발생한 샌 페르난도(San Fernando) 지진의 가속도가 일부 원전의 내진설계값을 초과하자 새로운 내진설계 기준을 정하여 1973년부터 현재의 내진설계기준을 적용하게 되었고, 국내원전도 그 기준을 준용하고 있으며, 지진감시 계측기준도 그에 따르고 있다. [12]

제 1절 원전 내진설계 관련 법규 및 규정

1. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(위원회 규칙)[1]

제2장 제4조(지질 및 지진)

- ① 원자로시설은 지진 또는 지각의 변동이 일어날 가능성이 희박하다고 인정되는 곳에 설치하여야 한다.
- ② 원자로시설은 그 설치지점 및 주변의 지표면이 붕괴되거나 함몰될 가능성이 없고, 경사면과 지반이 안정된 곳에 설치하여야 한다.
- ③ 제 1항 및 제 2항의 규정에 의한 지질 및 지진학적 특성, 단층 현상, 지표 및 지반의 특성에 대한 조사·분석·평가에 관한 세부 기술기준은 원자력안전위원회가 정하여 고시한다.

제2장 제13조(외적 요인에 관한 설계기준)

- ① 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기는 지진·태풍·홍수·해일 등을 포함한 예상 가능한 자연현상의 영향과 항공기 충돌, 폭발 등을 포함한 예상 가능한 외부 인위적 사건의 영향에 의하여 그 안전기능이 손상되지 아니하도록 설계하여야 한다.

- ② 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기에 대한 설계기준에는 다음 각 호의 사항을 고려하여야 한다.
1. 해당 부지 및 인근 지역에서의 역사적 기록을 고려할 때 가장 심한 자연현상과 외부 인위적 사건

2. 원자로시설의 위치에 관한 기술기준 (원자력안전위원회 고시 제2017-15호)[1]

원자로시설 위치에 관한 부지조사에 준용할 외국 규정은 <표 1>에 정리되어 있다.

<표 1> 원자로시설 부지조사에 관한 외국규정 [12]

규제지침	제 목	비 고
10 CFR 100 APP. A	Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants	부지평가 기준
US NRC R.G. 1.60	Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants	'14.07 Rev.2
US NRC R.G. 1.132	Site Investigations for Foundations of Nuclear Power Plants	'03.10 Rev.2
US NRC R.G. 1.138	Laboratory Investigations of Soils for Engineering Analysis and Design of Nuclear Power Plants	'03.12 Rev.2

3. 미국 원자력규제위원회 규제지침 (Regulatory Guide)

내진설계 및 지진 발생시 조치에 필요한 미국 원자력규제위원회(US NRC) Regulatory Guide에는 다음 <표 2>의 사항들이 있다.[12][14][15][16]

<표 2> 미국 NRC 규제지침

규제지침	제 목	적용 분야	비 고
RG 1.12	Nuclear Power Plant Instrumentation for Earthquakes	지진 계측	'97.03 R.2
RG 1.29	Seismic Design Classification	내진등급분류	'07.03 R.4
RG 1.60	Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants	설계입력지진	'14.07 R.2
RG 1.61	Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants	내진해석시의 감쇠값	'07.03 R.1
RG 1.70	Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants	안전성분석 보고서의 형식 및 목차	'78.11 R.3
RG 1.92	Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis	내진해석시의 응답조합	'06.07 R.2
RG 1.100	Seismic Qualification of Electrical Active Mechanical Equipment and Functional Qualification of Active Mechanical Equipment for NPPs	내진검증	'09.09 R.3
RG 1.122	Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-Supported Equipment or Components	FRS(내진 부계통의 지진입력) 작성	'78.02 R.1
RG 1.165	Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion	설계입력지진 결정방법	'97.03 R.0
RG 1.166	Pre-earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Post-earthquake Actions	지진발생 후 조치사항	'97.03 R.0
RG 1.167	Restart of a Nuclear Power Plant Shut Down by a Seismic Event	지진에 의한 발전소 정지후 운전재개를 위한 점검 및 시험	'97.03 R.0

4. 산업 표준 (Industrial Standard)

원자력발전소 내진설계에 적용되는 산업표준으로는 다음 <표 3>의 내용들이 있다.

<표 3> 원전 내진설계 적용 산업표준 [12]

표 준 명	제 목	적 용 분 야
ANS-2.1	Guideline for Determining the Vibratory Ground Motion for the Design Earthquake for Nuclear Facilities	설계입력지진
ANSI/ANS-2.2	Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants	지진계측설비
ANSI/ANS-2.10	Guideline for Retrieval, Review, Processing and Evaluation of Records Obtained from Seismic Instrumentation	지진계측설비
ASME B&PV Code, Sec. III	Rules for Construction of Nuclear Power Plants	격납건물 포함 안전관련설비의 내진설계
ACI 349	Code Requirement for Safety Related Concrete Structures	콘크리트 구조물의 내진설계
ANSI/AISC N690	Specification for the Design Fabrication and Erection of Steel Safety Related Structures for Nuclear Facilities	철골 구조물의 내진설계
IEEE 344	IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations	내진검증

5. 경수로형 원전 안전심사지침서

원자력안전기술원에서 원자력발전소 시설의 인허가를 위한 안전성분석 보고서 심사시 적용하는 안전심사지침서에는 다음 <표 4>의 사항들이 있다.

<표 4> 경수로형 원전 안전심사지침서 [3]

관련 절	제 목	내 용
제 2.5.2절	지 진 동	지질공학적 부지특성 규명을 위한 지진동 요건
제 3.7.1절	내진설계입력	원자로시설의 내진설계를 위한 내진설계입력 요건
제 3.7.2절	내진계통해석	원자로시설의 내진설계를 위한 내진계통해석 방법 요건
제 3.7.3절	내진부계통해석	원자로시설의 내진설계를 위한 내진부계통 해석방법 요건
제 3.7.4절	지진계측설비	지진발생시 원자로시설의 가동정지 및 안전성 평가후 재가동 판단을 위한 지진계측설비 요건
제 3.10절	기계 및 전기 기기의 내진 및 동적검증	원자로시설의 내진안전성 확보를 위한 기계 및 전기기기의 내진 및 동적검증 요건

6. 전력산업 기술기준 [12]

원자력발전소 설계에 적용되는 근거는 이전 과학기술처 고시 제 96-32 호 “전력산업 기술기준의 발전용원자로 및 관계시설 기술기준 적용에 관한 지침(1996. 8. 31)”으로, 미국의 관련 기술기준 내용을 중심으로 작성되어 있으며, 내진설계 관련 기술기준은 ASCE Standard 4-86을 기준으로 작성되어 있다.

제 2절 원전 내진설계 기준

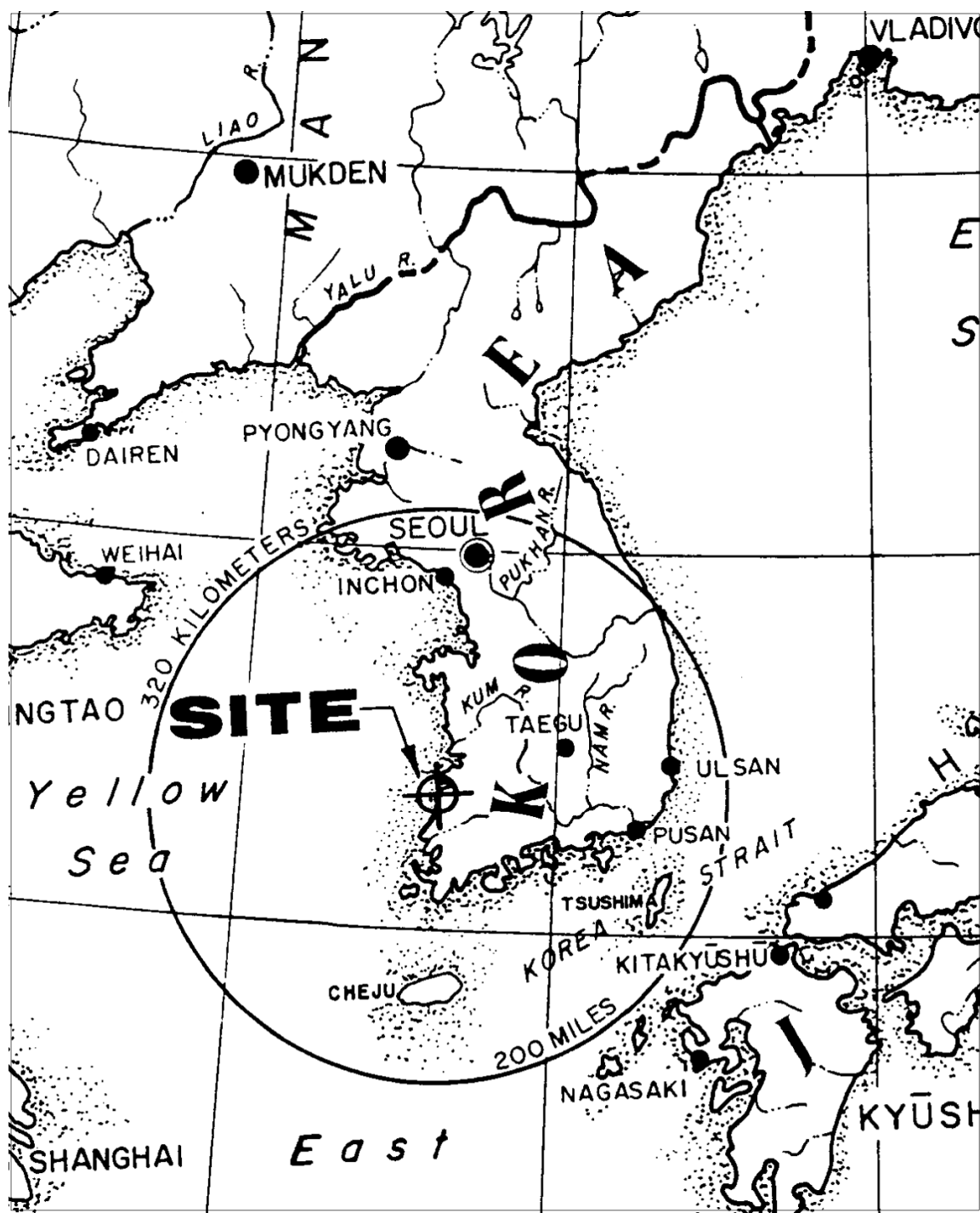
US NRC의 부지검토 절차에 따라 <그림 1>과 같이 부지반경 320 km (200 mile) 이내에서 1,000~10,000년에 1회 정도의 발생 빈도를 갖는 최대지진을 설계기준으로 채택한다.

부지 조사 중 길이 300 m 이상의 활성단층이 부지반경 8 km 이내에서 발견될 경우 별도의 세부조사를 통하여 발전소의 안전성을 검토하고, 이와는 별도로 발전설비 설계 시에는 지진이 발생된 비상시에도 발전소가 안전하게 정지될 수 있도록 설계하는데, 즉 안전정지지진(SSE, 0.2g)에서도 안전관련 계통이 정상적으로 작동하여 안전정지 기능이 상실되지 않도록 설계한다. [12]

이와 더불어 지진감시계통(Seismic Monitoring System)을 운영하게 되는데, 한빛원전 1호기를 기준으로 살펴보면 격납건물 16개, 보조건물 3개, 제어건물 2개, 자유장(Free Field) 1개 등 총 22개소의 감지장치로 구성되어 있다.

운전기준지진(OBE, 0.1g)의 1/10인 0.01g 초과 시에는 주제어실에 “SEISMIC MONITOR TRIGGERD” 또는 “SEISMIC EVENT” 경보가 발생되며, 운전기준지진(OBE, 0.1g) 초과 시에는 주제어실에 “SEISMIC MON SSE/OBE ALARM” 경보가 발생되며 발전소를 수동으로 정지하도록 되어 있다. 또한, 안전정지지진(SSE, 0.2g) 발생 시에도 발전소가 안전 기능 상실 없이 자동 정지되거나 정지하도록 설계되어 있다. [12]

한빛원자력의 경우 부지 반경 8 km 이내에는 단층이 전혀 발견되지 않았을 뿐만 아니라, 가장 가까운 ‘광주단층’이 부지에서 30~35 km 떨어진 지점에 있으나 활성단층이 아닌 것으로 판명되어 있다. [4]



<그림 1> 한빛원자력 부지반경 320 km

제 3절 원전별 내진설계 적용현황

국내 원자력발전소의 경우 부지 반경 320 km 내의 과거 계기지진은 물론 역사지진 기록까지 모두 조사하고, 설계에 영향을 주는 단층조사를 포함한 광역 지질조사를 수행하고, 반경 8 km 이내의 시추 및 현지답사를 통해 부지에 대한 지질조사 및 지표단층 조사를 실시하여 설계에 반영하였다.

아래의 <표 5> 및 지진가속도 산정시 고려된 가정들과 해외 원전들의 내진설계에 반영된 지진가속도를 살펴보면, 현재 국내 원전들의 내진설계는 충분한 여유도를 가지고 설계되어 있음을 알 수 있다. 이는 안전성을 최우선으로 고려하여 몇 십 만년에 한번 있을까 말까한 큰 지진을 대비하여 많은 비용을 들이고 있음을 알 수 있다. 안전정지지진(SSE)을 0.2g로 설계하는 경우 내진성 확보에 발전소 총 건설비의 약 10% 가까운 추가 공사비가 소요되는 것으로 알려져 있다. [12]

<표 5> 국내원전 지진가속도 준위 및 고려된 지진

부지별	고려된 지진	진도 또는 규모	가속도준위 (g)		
			계산	추천	설계적용
고리	지리산지진(1936.7.3)	JMA V MM VII-VIII	0.19	0.20	0.20
월성	경상도지진(1643.6.9)	JMA V MM VII-VIII	0.145	0.20	0.20
한빛	황해 지진(1910.1.8)	M 6.75	0.165	0.20	0.20
한울	지리산지진(1936.7.3)	JMA V MM VII-VIII	0.15	0.20	0.20
신고리	지리산지진(1936.7.3)	JMA V MM VII-VIII	0.19	0.20	0.30

- (1) 한빛원자력의 경우, 부지 반경 320 km를 벗어난 부지에서 약 405 km 부근에서 발생한 1910년 1월 8일 규모 6.75의 황해지진을 부지반경 90 km에서 발생한 것으로 가정하고 가장 보수적으로 계산한 결과 부지 내에서의 가속도 준위가 0.165g로 산출되었다. [4]
- (2) 고리원자력의 경우, 1936년 7월 3일 JMA 진도 V(MM 진도 VII~VIII)의 지리산 지진을 부지에서 106 km 지점에서 발생한 것으로 가정하여 계산한 결과 지반 가속도가 0.19g로 산출되었다. [4]
- (3) 한울원자력의 경우, 1936년 7월 3일 JMA 진도 V(MM 진도 VII~VIII)의 지리산 지진이 부지에서 260 km 떨어진 곳에서 발생했으나, 부지 직하에서 발생한 것으로 가정하여 계산한 결과 지반 가속도가 0.15g로 나왔다. [5]
- (4) 월성원자력의 경우, 양산단층을 활성단층으로 가정하고, 역사 지진인 규모 8.2의 동해지진을 부지에서 75 km 지점에서, 1943년 6월 9일 JMA 진도 V(MM VII~VIII)의 경상도 지진이 부지에서 22.5 km 지점에서 발생한 것으로 가정하여 지반 가속도가 0.145g로 산출되었다. [5]

그러나 역사지진 자료의 부족과 내진설계의 보수성 확보를 위해 4개 원전 부지 모두 잠재적인 최대 지진가속도를 0.2g로 상향 설정하여 내진설계 값으로 반영하였다.

- (5) 신고리 3,4호기의 경우 1936년 JMA 진도 V의 지리산 지진이 부지에서 매우 가까운 지점에서 발생한 지진으로 가정할 경우, 최대지반 가속도를 구하면 최대 147gal이 얻어지며, 부지에서의 최대 잠재 영주기 지반가속도는 0.2g로 평가되나, 신고리 3,4호기는 표준설계로 개발된 신형경수로(APR-1400)을 적용하므로 발전소 설계에는 안전정지지

진(SSE)을 0.3g로 상향하여 적용하였다. [5]

최근까지도 문제가 되고 있는 양산단층 및 입실단층이 최종 활성단층으로 판명된다고 하더라도, 고리원전보다 가까이 위치한 월성원전이 양산단층으로부터 22.5 km, 입실단층으로부터는 12 km 떨어져 있으므로 『원전 부지반경 8 km 이내에 활성단층이 없어야 한다』는 국내 및 미국원전의 부지선정 기준을 만족하고 있을 뿐만 아니라, 월성원전에 미치는 지진의 최대 가속도값이 0.14g(서울대 이기화 교수) 정도로 평가되고 현재의 내진 설계치가 0.2g로 되어 있어 안전에는 문제가 없는 것으로 판단된다. [2]

(6) 미국과 일본의 주요 원전 내진설계치

참고로 불의 고리에 위치해 있어 큰 지진이 자주 발생하는 미국 서부와 일본 원전의 내진설계치를 <표 6>에 정리해 놓았다. [12]

<표 6> 미국 일본 주요 원전 내진설계치

미 국		일 본	
발 전 소 명	설계치	발 전 소 명	설계치
Big Rock Point Nuclear	0.05g	Tokai	0.271g
Maine Yankee/ Crystal River	0.10g	Onagawa	0.375g
Indian Point/Turky Point	0.15g	Sendai/Genkai/ Fukushima	0.378g
Humbolt Bay/San Onofre	0.50g	Mihama/Ohi	0.405g
Diablo Canyon	0.75g	Shimane	0.643g

* 미국 서부의 활동성 단층지역에서는 0.5~0.75g

* 프랑스 : 0.06~0.2g

제 4절 내진 등급 분류

한빛 1,2호기 FSAR 3.2.1의 내진등급 분류에 따르면 다음과 같이 내진 등급 I, II 및 비내진 등급으로 분류되어 있으며, <표 7>에 주요기기 및 구조물을 분류해 놓았다. [4][12]

1. 내진 등급 I (Seismic Category I)

구조물, 계통 및 기기들(SSCs)이 안전정지지진(SSE, 0.2g), 운전기준 지진(OBE, 0.1g) 및 기타 지진 부하에도 기능 상실 없이 견디도록 설계된 설비로서, 다음 사항을 보증한다.

- 원자로냉각재 압력경계의 건전성
- 원자로를 정지하거나 안전정지 상태로 유지할 수 있는 능력
- 잠재적인 소외피폭을 야기할 수 있는 사고 발생 시에도 10 CFR 100 의 피폭 제한치 내로 방지하거나 완화시킬 수 있는 능력

2. 내진 등급 II (Seismic Category II)

구조물, 계통 및 기기들(SSCs)이 직접 안전에 관련되지는 않지만, 안전에 영향(safety-impact)을 줄 수도 있는 전력생산에 필수적인 설비이다.

3. 비내진 등급 (Non Seismic Category)

내진등급 I, II로 분류되지 않은 설비를 말한다.

<표 7> 주요 기기 및 구조물 내진등급 분류 [4][12]

구 분	주 요 기 기	구 조 물
내진등급 I	원자로, 증기발생기, 가압기, CRDM 안전주입탱크, RWST, VCT, BAT BIT, CST, MSIV, S/G PSV · PORV RCP, D/G Package, CHG Pp, AFWP CSP, CCW Pp & Hx, NSCW Pp RHR Pp & Hx, SFP CLG Pp & Hx Seismic Category I Fire Pump Fuel Handling Machine New Fuel Storage Racks Spent Fuel Storage Racks Essential Chiller, H ₂ Recombiner MCR Panels & Cabinets	격납건물 제어건물 연료건물 보조건물 디젤발전기건물 기기냉각수건물 CV Liner Plate NSCW Intake- Structures
내진등급 II	터빈, 복수기, MSR, 대기덤프밸브 COND Air Ejector, Vacuum Pump CWP, 공기 압축기, 터빈 윤활유 계통 TPOCW Pp, TPCCW Pp & Hx S/G Blowdown System SFP Clean-up Pp, CV Polar Crane Cask Crane, PRT, RCDT, EDT BRS HUT, LRS Evap & HUT, GRS Normal Fire Pump Demineralized Water System Condensate & Feedwater Systems	터빈건물 출입통제건물 방사성 폐기물건물 보조보일러건물 Radwaste Tunnel CW Intake- Structures
비 내 진 등 급	BABT, CVCS BMD & CBD, GFFD Hydro Test Pp, Refueling Machine, LRS HUT Pp, BTRS Chiller Unit 중앙냉동기, 보조보일러 Fresh Water Tank Domestic Water System	출입통제건물의 HVAC SFP Liner Plate Refueling Canal Liner

제 5절 원전 내진설계 절차

원전의 내진설계 과정은 크게 설계지진의 결정단계, 동적 지진응답 해석단계, 구조물 및 기기의 내진설계단계, 기기의 내진검증단계 등 네 단계로 구분할 수 있다. 이중 동적 지진응답 해석단계에서는 지반조건이 기준값 이상으로 견고하지 않을 경우에는 지반-구조물 상호작용 해석과정을 선행단계로 추가하게 된다.

이상의 다섯 단계와 각 단계에서의 내진설계 내용을 <그림 2> 원자력 발전소 내진설계과정과 더불어 간략히 설명하도록 하겠다. 또한 내진설계와는 별개로 지진발생시 원자로시설의 가동정지 및 안전성 평가 후 재가동 판단을 위하여 설치하는 지진계측설비에 관한 내용도 일부 설명하고자 한다. [2][3][12]

1. 설계지진의 결정

지진의 발생지인 진원에서 생긴 지진운동은 전파되면서 점차 약해진다. 설계지진의 결정단계는 이 지진파가 해당 부지 혹은 그 부지 근방의 일정 지점(구조물이 미설치된 자유장)에 도달하였을 때의 지진운동을 결정하는 과정이다.

원전설비의 내진설계에 적용하는 입력지진의 크기는 최대 지진가속도의 크기, 설계응답스펙트럼(DRS ; Design Response Spectrum, 대략적으로 지진동의 진동수 특성을 나타냄), 지진의 지속시간 등을 이용하여 결정한다.

이 설계지진은 현재 한 가지로 규정해 놓고 있는 것이 아니라 이 시설물들의 건설 및 운영허가 신청 시마다 해당 부지로부터 반경 320 km (200 miles) 이내의 지역에서 발생된 역사지진 및 계기지진 자료와 여러 가지 지진동 특성(지진 활동도, 부지와 인근지역의 지질 및 지체구조학적

특성, 지질구조 또는 지체구조구와 지진활동도와의 관계, 최대 잠재지진, 부지에서의 지진과 전달특성 등)들을 조사 분석하여 결정론적으로 결정한다. [2][3][12]

우리나라와 같이 기록된 강한 지진동들이 많지 않고 최대 가속도 값만 추정 가능할 때에는 최후 수단으로 표준응답스펙트럼(Reg. Guide 1.60에 주어진 응답스펙트럼)을 사용한다. 지진의 지속시간은 총 지속시간이 10~25초, 강진운동의 지속시간은 6~15초가 되도록 하고 있다. [3][12]

부지 정보로부터 추정된 지진 지속시간이 이 범위를 벗어날 때에는 부지 정보로부터 추정한 값을 사용한다. APR 1400 이전의 국내 원전 인허가시 승인된 최대 지진가속도 값은 모두 0.2g이며, APR 1400 이후에는 0.3g를 적용하고 있다.

2. 지반-구조물 상호작용 해석

앞서 결정한 지진운동은 구조물의 영향권 밖에 있는 자연 상태의 자유장(Free Field)에서 정의한 것이므로 구조물이 설치되면 대상 구조물까지 전달되는 과정에서 에너지의 분산, 지진파의 굴절 및 반사, 지반과 구조물과의 공진 현상 등에 따라 그 크기 및 형태가 바뀌게 된다. 이런 현상을 지반-구조물 상호작용이라고 하며 이러한 영향을 고려하여 대상 구조물 기초에서의 입력운동을 구하거나 지반과 구조물 시스템 전체를 해석 대상으로 하여 지진응답을 구하는 과정을 지반-구조물 상호작용 해석이라고 한다.

그러나 지반이 매우 단단한 암반으로 되어있는 경우 이 영향이 매우 작으므로 지반-구조물 상호작용 해석단계는 생략하며, 설계지진을 사용하여 다음 과정에서 설명하는 동적 지진응답 해석을 수행하게 된다. [2][3][12]

지반-구조물 상호작용 해석은 입력운동 뿐만 아니라 시스템을 구성하는 지반의 공학적 특성도 그 특성상 많은 불확실성을 내포하고 있으므로 정확한 해석결과를 예측하기는 쉽지 않다. 따라서 이 분야는 상당히 많은 연구가 이루어져 왔는데도 불구하고 현재까지 논란이 많은 실정이며 이와 관련된 현장 실증시험이 한국, 미국, 대만, 일본, 프랑스 등 5개국 11개 기관이 참여한 국제 공동 연구사업(1992~1998)으로 수행된 바 있다. 이러한 많은 노력의 결과로 안전심사지침서에는 상세한 지반-구조물 상호작용 해석 지침이 기술되어 있다. [2][3][12]

3. 동적 지진응답 해석

이 단계에서는 이전 단계에서 얻어진 대상 시설(구조물 또는 기기) 지부에서의 입력운동을 이용하여 대상 시설 각 위치에서 필요한 형태의 지진응답을 구하게 된다. 지진응답을 구하는 방법은 크게 동적 해석법과 정적 해석법으로 나눌 수 있으며, 대상 시설이 매우 단순한 경우를 제외하고는 동적 해석법에 의하여 지진응답을 구한다.

동적 지진응답 해석방법은 다시 여러 방법으로 나눌 수 있으나 보통은 응답스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법을 사용하게 된다. 응답스펙트럼 해석법은 주로 대상 시설의 설계를 위한 부재력을 구하기 위하여 사용하며 시간이력 해석법은 기기의 내진검증이나 부계통(Sub-System) 및 기기의 내진설계에 사용되는 층 응답 스펙트럼(FRS ; Floor Response Spectrum)을 구하기 위하여 사용한다.

동적 지진응답 해석은 대상물을 해석이 가능하도록 이상화시키는 수치해석 모델링 과정과 운동방정식의 해를 구하는 해석과정으로 나누어 볼 수 있다. 수치해석 모델링 과정에서는 동적 모델링에 필요한 이론적인 배경 뿐만 아니라 실제적인 많은 경험을 필요로 하며 해석 과정에서는 이론적인 배경의 숙지를 통한 다양한 연구결과의 적절한 적용을 필요로 한

다. [2][3][12]

안전심사지침서 및 미국 원자력규제위원회 규제지침 들에는 동적 지진 응답 해석에 사용할 감쇠값, 해석 모델링 절차, 모우드 응답의 조합방법, 감쇠의 해석절차, 층 응답 스펙트럼(FRS) 작성방법, 변수의 변동이 층 응답에 미치는 영향 고려방법, 지진운동의 세 방향 성분 고려방법, 여러 점에서 지지된 장비 및 기기의 지진해석방법, 설계전도 모멘트의 결정방법 등에 대한 구체적인 지침이 기술되어 있다. [2][3][12]

4. 구조물 및 기기의 내진설계

이 과정에서는 앞 단계의 동적 지진응답 해석으로부터 얻어진 지진응답(변위, 가속도, 부재력 등)을 다른 하중들에 의한 응답과 조합하여 구조물 또는 기기가 고려하는 하중에 대한 저항력을 가지도록 설계하는 과정이며, 이 과정에서는 다른 하중들과 지진하중을 어떻게 조합하며 설계저항력을 얼마로 할 것인가에 대한 결정이 이루어진다. 이러한 하중조합 및 각 하중조합에 대한 설계는 대상시설에 따라 안전심사지침서와 ASME Section III, ACI 349, ANSI/AISC N690 등의 방법을 따르게 된다. [3][12]

5. 기기의 내진 검증

이 과정은 수치 해석만으로는 확인하기 어려운 기기의 구조적 건전성(structural integrity) 또는 작동성(operability)을 평가하는 경우 가진시험대(shaking table) 등을 사용한 시험을 통해 이들을 확인하는 과정이다. 엄격하게는 해석에 의해 이들을 재평가하는 작업도 내진검증의 범주에 속한다고 할 수 있다.

이 과정에서는 시험과 해석 중에서 한 방법을 적절히 선택하여야 하며 지진 및 다른 동적하중의 정의시 고려사항, 시험 또는 해석에 의한 검증 방법 및 절차를 타당하게 적용하여야 한다. 또한 최종적으로 내진검증방법이 관련 기술기준에 부합되는지를 판단하고 지진발생시 내진안전성을 평가할 수 있도록, 내진검증보고서와 내진검증 요약 자료집을 작성하여 설계사양서 등과 함께 일정한 장소에 보관한다. 내진검증 절차 및 방법, 내진검증 문서철 등에 대해서는 안전심사지침서, Reg. Guide 1.100, IEEE 344 등에 상세한 지침이 제시되어 있다. [2][3][12]

6. 지진 계측 설비

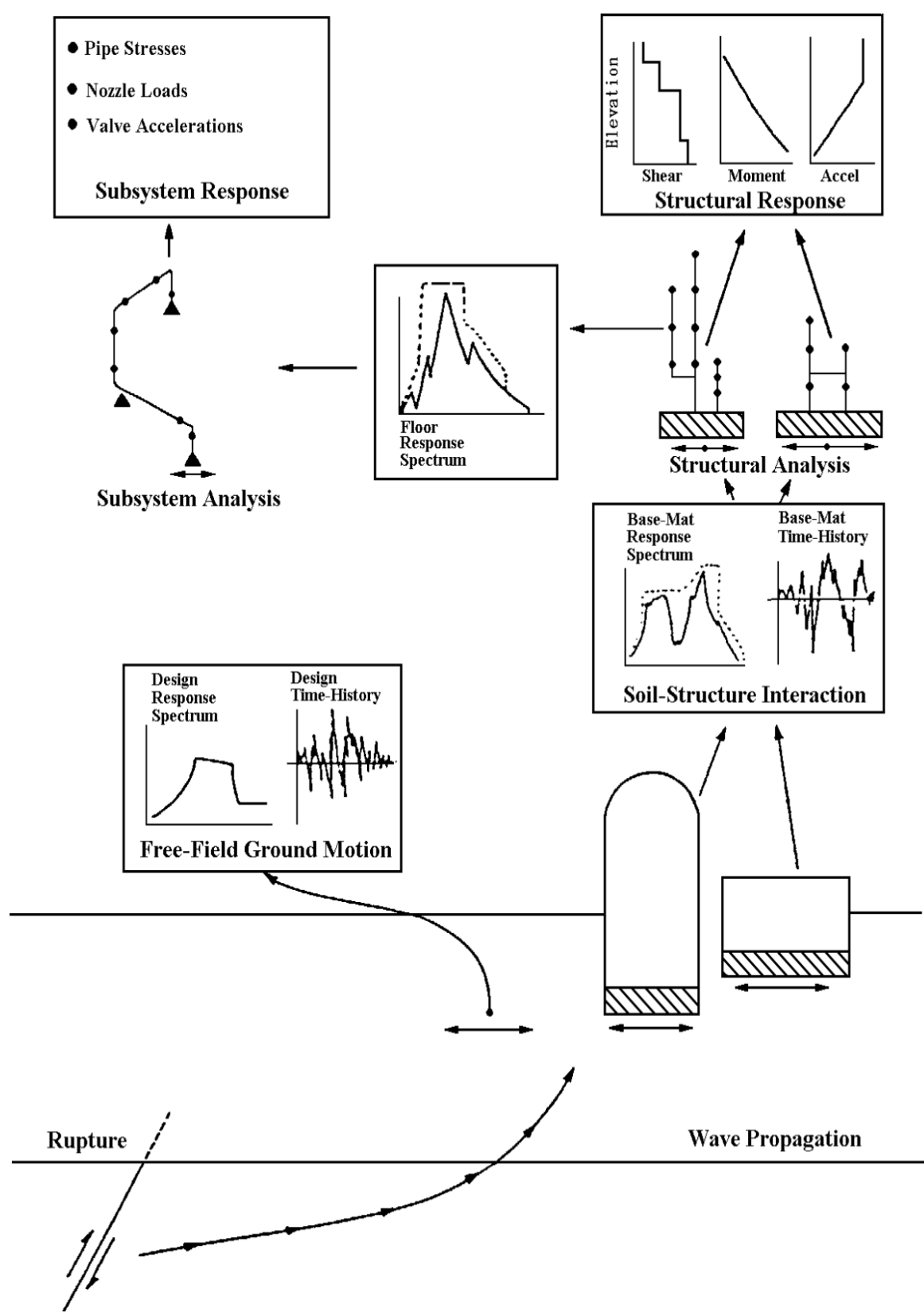
지진계측설비는 내진설계 단계와는 별개로 지진발생시 원자로시설의 응답을 측정 기록하여 원전 운영자에게 발전소 가동정지에 대한 판단기준을 제공하고 원전설비의 안전성 평가 수행을 위한 자료를 제공하는 설비이다. 이 설비로부터의 자료는 안전성 평가 후 재가동 판단을 위해 사용할 수 있다.

지진계측설비의 설치 위치는 지진발생시 원자로시설의 응답을 적절히 측정할 수 있어야 하며 측정응답을 설계응답과 비교 평가할 수 있는 위치에 설치한다. 또한 지진발생시 즉시 운영자에게 전달되어 원자로 가동정지 등 필요한 조치가 취해질 수 있도록 하며, 각 계측기기에 대한 주기적인 검·교정 및 성능시험을 실시하여 신뢰성 및 작동성을 확인할 수 있어야 한다. 이에 대한 상세 지침은 안전심사지침서, Reg. Guide 1.12, ANSI/ANS 2.2, 2.10 등에 제시되어 있다. [9][12][14]

이 지진계측설비에 의해 기록되는 지진기록 및 지진응답기록의 활용과 관련하여 미국 원자력규제위원회에서는 1997년에 Reg. Guide 1.166 및 1.167을 새로 제정, 시행하였다.

Reg. Guide 1.166에서는 기존에 응답스펙트럼만을 운전기준지진(OBE) 초과 판정기준으로 삼던 것을 응답 스펙트럼 뿐만 아니라 누적절대속도(CAV ; Cumulative Absolute Velocity)도 판정기준에 포함시켜, 고진동수 영역에 주로 영향을 주는 작은 규모의 지진에 의한 불필요한 원자로 정지를 방지할 수 있도록 하였다.

Reg. Guide 1.167은 지진 발생에 따른 원자로 정지 후에 운전 재개를 위한 지침을 구체적으로 제시하고 있는데, 여기에는 원자로 정지 후에 수행할 검사 및 시험, 검사기준, 검사자, 규제기관에 제출해야 하는 보고서 내용 및 장기 안전성 평가 등에 관한 지침들이 들어 있다. [9][12][15][16]



<그림 2> 원자력발전소 내진설계과정

제 6절 지진감시계통 안전심사지침

한국원자력안전기술원에서 개발하여 원전 시설의 인허가를 위한 안전성 분석보고서 심사시 적용하고 있는 “경수로형 원자력발전소 안전심사지침서”의 내용 중 지진계측설비에 대한 주요내용을 살펴보면 다음과 같다.

1. 계측기기의 종류

계측기기의 종류는 비상전원, 시간이력 가속도계, 최대 가속도계, 응답 스펙트럼기록기 및 지진스위치 등으로 나눌 수 있다. [3][12]

(1) 비상 전원

지진계측기는 외부전원이 상실되어도 계측기를 최소한 5분간 연속으로 작동시킬 수 있는 비상전원을 구비하고 있어야 한다.

(2) 시간이력 가속도계

○ 가속도 감지기

- 동적 범위(Dynamic Range) : 0.01g ~ 1.0g
- 주파수범위(Frequency Range) : 0.5Hz ~ 33Hz
- 감쇠 비(Damping Ratio) : 55% ~ 70%
- 의사 공진(Spurious Resonance) : 규정된 주파수내에서 없어야 함
- 교차축 민감도(Cross Axis Sensitivity) : 0.03g/g

○ 지진 트리거

- 작동 범위 : 0.005g에서 0.02g까지 조정이 가능해야 함
- 주파수범위 : 1.0Hz ~ 10Hz

(3) 응답스펙트럼 기록기

- 동적 범위 : 50 : 1
- 주파수범위 : 1.0Hz ~ 30Hz
- 감 쇠 비 : 2% ~ 5%
- 공 진 : 규정된 주파수 범위 안에서 없어야 함
- 교차축 민감도 : 0.03g/g

(4) 최대 가속도계

- 동적 범위 : 20 : 1
- 주파수범위 : 0.5Hz ~ 20Hz
- 감 쇠 비 : 55% ~ 70%
- 의사 공진 : 규정된 주파수 안에서 없어야 함

2. 계측기기의 설치위치

설치위치는 지진발생 후 발전소 안전성 평가의 일환인 지진해석 재평가 시 설계값과 측정값을 비교, 평가할 수 있는 곳이어야 한다. [3][12]

(1) 시간이력 가속도계

- 지표면 자유장(Free Field)
 - 원자로건물 기초슬라브(Containment Foundation)
 - 원자로건물 구조물(Containment Structure or Reactor Building)
 - 독립적인 내진등급 I 급 구조물의 기초슬라브
- ※ 만약 지반구조물 상호작용이 없다고 가정하면 지표면이나 원자로건물 기초슬라브 중 한 곳에만 설치한다.

(2) 최대 가속도계

- 원자로 기기(Reactor Equipment Item)
- 원자로 배관(Reactor Piping Item)
- 원자로건물 외부 중요 구조물의 기기 또는 배관(Equipment or Piping Item Outside of Containment Structure)

(3) 지진 스위치

- 원자로건물의 기초슬라브

(4) 응답스펙트럼 기록기

- 원자로건물의 기초슬라브
- 원자로 기기 및 배관의 지지물(Reactor Equipment Support or Piping Support)
- 격납건물 외부 중요 구조물내의 기기 또는 배관(Equipment Support or Piping Support Outside of Containment Structure)
- 응답스펙트럼 스위치는 원자로건물 기초슬라브에 설치

3. 주제어실 운전원 통보체제

지진이 발생하는 경우 즉시 주제어실 운전원에게 최대가속도값과 응답스펙트럼값이 통보되어야 하며, 운전원에게 통보되는 지진계측기의 설정값에 대한 근거를 검토하여야 한다. 주제어실 운전원에게 통보되는 지진 응답 자료는 다음의 사항을 만족해야 한다. [3][12]

- (1) 운전기준지진을 초과하는 지진발생 시에 원자로건물 기초슬라브에 설치된 지진 스위치가 청각 및 시각신호를 제공할 수 있어야 한다.

- (2) 원자로건물 기초슬라브나 지표면에 설치된 시간이력 가속도계는 지진발생 후에 설치 지점에서의 최대가속도를 주제어실 운전원에게 통보할 수 있어야 한다.
- (3) 원자로건물 기초슬라브나 지표면에 설치된 응답스펙트럼 기록기는 미리 설정된 진동수별 가속도를 초과하는 지진발생시 주제어실 운전원에게 통보할 수 있어야 한다.

4. 측정응답과 예상응답의 비교 평가

지진발생 후 지진계측기가 설치된 내진등급 I 급 구조물과 안전관련 기기에서 측정된 응답과 비교 평가하는 기준과 절차가 아래와 같은 사항을 만족해야 한다. [3][12]

- (1) 지진발생시 주제어실 운전원은 즉시 경보장치를 통해 지진응답의 정보를 제공받을 수 있어야 한다.
- (2) 만약 원자로건물의 기초 슬라브나 지표면에서 관측된 지진기록이 운전기준지진에 대한 최대가속도 또는 응답스펙트럼을 초과하게 되면 재가동 허가가 있을 때까지 발전소를 가동 정지해야 한다.
- (3) 발전소 재가동 판단에 도움을 주기 위해 안전관련 시설물에 대한 현장검사와 최대가속도계 및 시간이력 가속도에서 얻은 계측값을 설계값과 비교 평가해야 한다.
- (4) 측정응답과 예상응답의 비교절차는 다음과 같다.
 - ① 시간이력 가속도계의 지진계측자료를 처리한 후 적절한 감쇠값을

맞는 응답스펙트럼을 계산한다.

- ② ①항에서 구한 응답스펙트럼과 응답스펙트럼 기록기에서 구한 응답스펙트럼을 비교한다.
- ③ 지표면에서 계측된 시간이력 가속도 기록을 동적해석을 위한 입력으로 사용하여 원자로건물 각 부위에서의 응답스펙트럼을 계산한 후 응답스펙트럼 기록기의 계측자료와 비교 평가한다.
- ④ ③항에서 계산된 응답스펙트럼을 설계값과 비교 평가한 후 구조물 및 기기에 대한 지진효과, 재 모델링 작성 여부, 상세분석 여부 및 물리적 검사 여부를 결정한다.

제 7절 지진감시 계통(Seismic Monitoring System)

지진 감시계통은 지진이나 해일 또는 폭격 등에 의한 외부충격으로 인하여 원자력발전소내의 지진범주- I (Seismic Category I)의 구조물계통 및 각종 부품들의 진동이 설정치를 초과하는 경우, 지진의 정도에 따라 경보발생 및 저장된 데이터 분석을 통해 발전소 운전의 지속여부를 결정하게 된다. [6][9][12]

동일한 원자로형의 경우 지진감시설비는 <표 8>과 같이 한 호기에만 설치하고, 경보는 설치가 되지 않은 호기에도 동시에 발생될 수 있도록 되어 있다. 배치도 및 구성도는 <그림 3>과 <그림 4>에 있다.

<표 8> 국내 원전 지진감시계통 설치호기

고리본부				새울	한빛본부			한울본부			월성본부		
고리 1	고리 2	고리 3,4	산곡피 1,2	산곡피 3,4	한빛 1,2	한빛 3,4	한빛 5,6	한울 1,2	한울 3,4	한울 5,6	월성 1	월성 2,3,4	신월성 1,2
1	2	3	1	3	1	3	5	1	3	5	1	2	1

1. 지진감시계통 설치 근거

지진감시계통의 설치 근거로는 다음 사항들이 있다.

- (1) 원자력안전위원회 규칙 “원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙” 제 2장 제 4조 (지질 및 지진)
- (2) 원자력안전위원회 고시 제2017-15호 (원자로시설의 위치에 관한 기술기준)
 - 10 CFR 100 APP. A 준용

(3) 10 CFR 100 APP. A (Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants)

- 지진감시계통 설치
 - 운전기준지진(OBE) 초과 지진발생시 발전소 가동정지
 - 발전소 안전성 평가 후 재가동 여부 결정

(4) 미국 원자력규제위원회 규제지침(Regulatory Guide)

(5) 경수로형 원자력발전소 안전심사지침서

2. 구성 기기

가. 지진 트리거(Seismic Trigger)

지진트리거는 지진스위치와 같은 동작원리에 의하여 동작하며 감지기의 설정치가 가장 낮고 항상 지진에 의해서 동작 가능하도록 되어 있다.

지진트리거는 <표 9>와 같이 모두 2개로 2차원으로 감지 가능하며 각각 0.01g 이상에서 동작하게 되어 있다. 이 감응기 출력에 의해서 시간이력가속도계가 기록을 시작하는데 지진트리거 2대중 1대만 동작해도 0.1초 만에 침두가속도기록계(Triaxial Peak Accelerograph)에 전원을 공급해 주고 동작이 끝나더라도 10초 동안 지연 동작하게 되어 있다. [9][12]

<표 9> 지진트리거 위치

계측기 번호	현 장 위 치		비 고
SG-YS-011	Containment Base	87'8"	
SG-YS-012	Containment Operating Floor	125'0"	

나. 지진 스위치(Triaxial Seismic Switch)

지진스위치는 <표 10>과 같이 모두 8개이며 지진 가속치가 설정치를 초과했을 때 주제어실에 경보를 발생하게 된다. 8개중 4개는 안전정지지진 (SSE : Safe Shutdown Earthquake)용이고, 나머지 4개는 운전기준지진 (OBE : Operating Basis Earthquake)용이다.

지진스위치는 전 범위에 걸쳐서 그 설정치를 조절할 수 있으며 각 방향의 감지기는 원통으로 된 코일이 금속판에 연결되어 있고 코일 중앙에는 영구자석이 설치되어 있어서 각 감지기에 진동이 전달되면 고정된 영구자석 주위를 금속판에 붙어 있는 코일통이 상하로 움직여 그 크기가 자력에 의한 기전력으로 변환되어 이미 설정해 놓은 값보다 크게 되면 계전기를 동작시키게 되며 감지기 설정치보다 낮게 되더라도 지연시간(6~20초)만큼 경보를 연장하여 전달한다. [9][12]

<표 10> 지진스위치 위치 및 설정치

위 치			스위치 번호	설 정 치	
				수평(g)	수직(g)
OBE	Containment Base	87'8"	YS-007A	0.11	0.11
	Cont't Oper Floor	125'	YS-008A	0.20	0.15
	Cold Leg of Rx Pipe	115'9"	YS-009A	0.15	0.15
	RCP"B" Support(기초)	101'	YS-010A	0.15	0.15
SSE	Containment Base	87'8"	YS-007B	0.20	0.20
	Cont't Oper Floor	125'	YS-008B	0.30	0.25
	Cold Leg of Rx Pipe	116'	YS-009B	0.25	0.25
	RCP"A" Support(기초)	101'	YS-010B	0.25	0.25

다. 시간이력가속도계(Triaxial Time History Accelerograph)

시간이력가속도계는 <표 11>과 같이 모두 7개이며 지진범주- I (Seismic Category I)의 구조물, 계통 및 각종 부품 등 발전소 현장 주요 부위에 설치하여 유사 지진 반응에 대하여 3차원으로 주파수 진폭 및 위상에 대한 자료를 얻게 된다. 이것은 반응값이 설정치(0.11g) 이상 되는 경우 시간이력가속도계에서 감지된 가속치가 저장되게 되어 이 결과를 토대로 분석하게 된다. [9][12]

<표 11> 시간이력가속도계 위치 (7개)

계측기 번호	현 장 위 치		비 고
SG-YT-002	Containment Base	74'0"	
SG-YT-003	Containment Operating Floor	125'0"	
SG-YT-004	Auxiliary Building Base	69'0"	
SG-YT-005	AUX BLDG RHR Hx Support	102'0"	
SG-YT-006	Free Field	99'3"	1,2호기 중간 MCS 앞
SG-YT-018	Rx Equipment Support	101'0"	S/G"A" 기초
SG-YT-019	Control BLDG Structure	126'0"	MCR 뒷쪽 문 J-H48

라. 첨두가속도기록계(Triaxial Peak Recording Accelerograph)

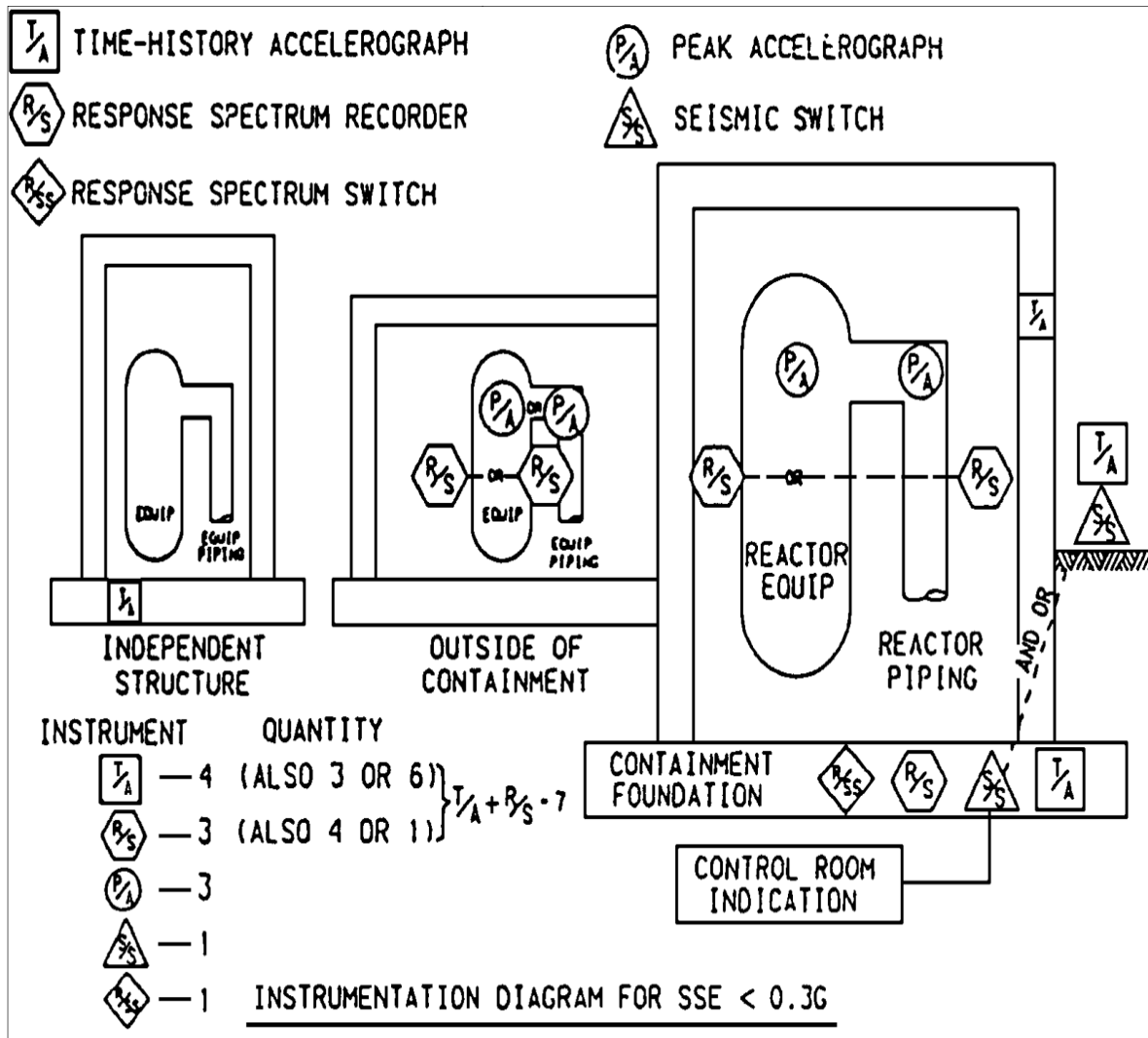
첨두가속도기록계는 <표 12>와 같이 전부 5개이며 첨두가속을 나타낸 위치를 기록하는 계기를 자체 내장하고 있으며 지진의 첨두치만을 기록한다. 이것은 전원을 필요로 하지 않으며 감도가 좋고 높은 지진 또는 진동

을 감지할 수 있도록 되어 있다.

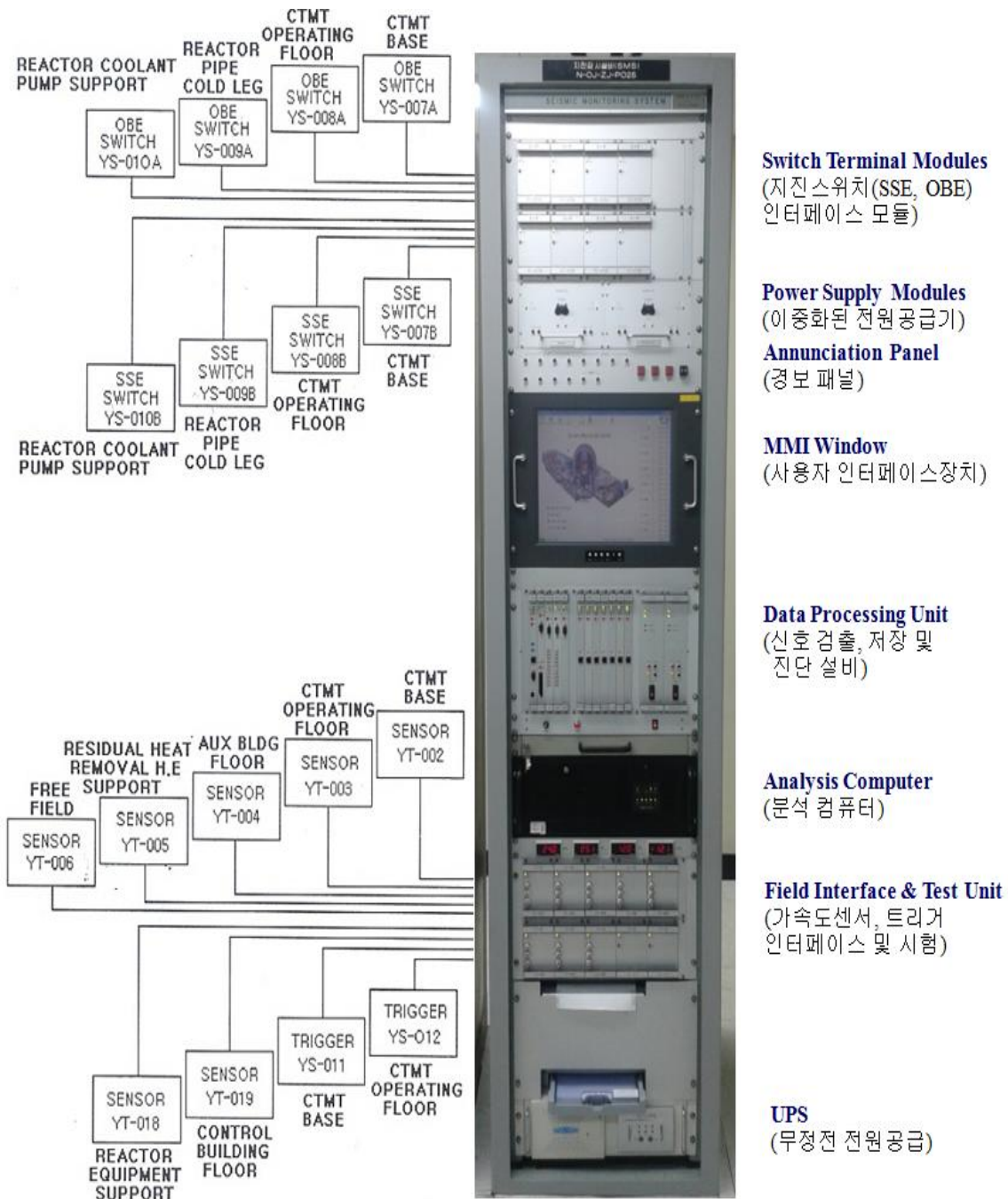
이것은 낮은 주파수도 감지 가능하며 가속치를 얻기 위해 감지기에 무거운 물질이 붙어 있고 그 연결부에 스프링으로 댐핑을 조절할 수 있어서 기계적으로 증폭시켜 금속판에 흔적을 남기게 된다. 이것은 각 방향으로 금속판이 설치되어 있는데 분석 시에는 현장에서 금속판만 떼어 현미경을 이용하여 금속판의 흔적 길이를 측정하며 이 측정치를 가지고 최대치를 판독하게 된다. [9][12]

<표 12> 침두가속도기록계 위치 (5개)

계측기 번호	현 장 위 치		비 고
SG-YR-013	Inside Containment near Top	148'0"	
SG-YR-014	AUX BLDG Equipment Piping (지진범주- I 에 속하는 배관)	105'0"	
SG-YR-015	Inside Containment on Rx Equipment	125'0"	
SG-YR-016	Control Room Floor	126'0"	MCR 뒷쪽 문 J-H48
SG-YR-017	Cold Leg of Rx Pipe	115'9"	



<그림 3> 설계기준지진에 따른 지진감시계통 배치도



<그림 4> 지진감시계통 구성도

3. 운영기술지침서 운전제한조건 및 조치 내용

한빛 1,2호기 운영기술지침서의 FSAR 16.3.3.3 지진 계측 설비의 운전 제한조건 및 조치사항을 다음과 같이 정리해 보았다. [4]

(1) 운전제한 조건

표 16.3.3-7에 제시된 지진감시계통이 운전 가능해야 한다.

(2) 적 용 : 항시

(3) 조 치

A. 1개 이상의 지진계측기가 14일 이상 운전 불가능한 경우, 원자력 안전위원회 고시 「원자력이용시설의 사고·고장 발생시 보고·공개 규정」에 따라 기기고장보고서를 60일 이내에 원자력안전기술원에 제출한다.

B. 기술지침서 16.3.0.3 및 16.3.0.4의 조항은 적용되지 않는다.

(4) 점검 요구사항

1) 지진 감시 계측기의 각각은 FSAR 표 16.4.3-4에 제시된 주기로 채널 점검, 채널 교정 및 아날로그 채널 동작시험을 수행함으로써 운전가능성이 입증되어야 한다.

2) 지진 발생동안 동작되는 위의 지진 감시 계측기의 각각은 24시간 이내에 운전 가능상태로 복구되어야 하고 채널 교정은 지진 발생 후 5일 이내에 수행되어야 한다. 동작된 계측기로부터 모든 자료가 수거되어야 하고 지진동(Vibratory Ground Motion)의 크기를 결정하기 위해서 분석되어야 한다.

4. 계측기 최소 운전가능수 및 채널 점검, 교정 주기

한빛 1,2호기 운영기술지침서의 지진감시 계측기 최소 운전 가능수 및 채널 점검, 교정 및 시험에 관련된 내용들이 <표 13>에 정리되어 있다.[4]

<표 13> 지진감시 계측설비 (FSAR 표 16.3.3-7/16.4.3-4)

계측기 및 센서 위치	측정범위 또는 설정치	계측기 최소운전 가능수	채널 점검	채널 교정	아나로그 채널 운전시험
1. Triaxial Time-History Accelerographs					
1) Strong Motion Accelerometers					
A. YT-002 CTMT Base	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
B. YT-003 CTMT OP Floor	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
C. YT-004 Aux Bldg Floor	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
D. YT-005 RHR Hx	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
E. YT-006 Free Field	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
F. YT-018 Reactor Equip	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
G. YT-019 Control Bldg Floor	± 1 g	1	1개월	18개월	6개월
2) Data Acquisition Modules					
A. YD-002 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
B. YD-003 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
C. YD-004 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
D. YD-005 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
E. YD-006 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
F. YD-018 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
G. YD-019 Control Rm Panel **	2.5 V	1	1개월	18개월	6개월
3) Seismic Triggers					
A. YS-011 CTMT Base *	H: 0.01g V: 0.01g	1	1개월	18개월	6개월
B. YS-012 CTMT OP Floor *	H: 0.01g V: 0.01g	1	1개월	18개월	6개월

* 주제어실 지시 및 경보

** 주제어실 지시

<표 13> 지진감시 계측설비 (FSAR 표 16.3.3-7/16.4.3-4)(계속)

계측기 및 센서 위치	측정범위 또는 설정치	계측기 최소운전 가능수	채널 점검	채널 교정	아나로그 채널 운전시험
2. Triaxial Peak Accelerographs					
A. YR-013 Top of CTMT	± 2 g	1	1개월	18개월	6개월
B. YR-014 Aux Bldg 1E Pipe	± 2 g	1	1개월	18개월	6개월
C. YR-015 CTMT React Equip	± 2 g	1	1개월	18개월	6개월
D. YR-016 Control Rm Floor	± 2 g	1	1개월	18개월	6개월
E. YR-017 Reactor Pipe	± 2 g	1	1개월	18개월	6개월
3. Triaxial Seismic Switches					
A. YS-007A CTMT Base *	H: 0.11g V: 0.11g	1	1개월	18개월	6개월
B. YS-008A CTMT OP Floor *	H: 0.20g V: 0.15g	1	1개월	18개월	6개월
C. YS-009A Reactor Pipe *	H: 0.15g V: 0.15g	1	1개월	18개월	6개월
D. YS-010A React Cool Pump*	H: 0.15g V: 0.15g	1	1개월	18개월	6개월
E. YS-007B CTMT Base *	H: 0.20g V: 0.20g	1	1개월	18개월	6개월
F. YS-008B CTMT OP Floor *	H: 0.30g V: 0.25g	1	1개월	18개월	6개월
G. YS-009B Reactor Pipe *	H: 0.25g V: 0.25g	1	1개월	18개월	6개월
H. YS-010B React Cool Pump*	H: 0.25g V: 0.25g	1	1개월	18개월	6개월
4. Analysis Computer	Frequency 1~33.5Hz	1	NA	NA	6개월
5. Data Acquisition System **	2.5V	1	6개월	18개월	6개월

* 주제어실 지시 및 경보

** 주제어실 지시

제 3장 지진발생시 원전 안전성 검토

지진발생시 원자력발전소의 안전성 여부는 원자력발전소 근무자 뿐 만 아니라 국민 모두가 관심을 가지고 있는 대단히 중요한 문제라 하지 않을 수 없다.

따라서 원자력발전소의 내진설계는 어떠한 법령과 규정에 따라 어떻게 수행되었으며, 또한 지진이 발생했을 때 필요한 지진감시설비는 어떻게 구성되어 있고, 기술지침서의 요구사항은 무엇이 있는지 이미 앞에서 알아보았다.

따라서 원전 근무자들에게 있어서 가장 중요한 것 중의 하나는 실제로 지진이 발생했을 때 발전소의 구조물 및 기기들이 어떻게 반응했으며, 그 원인은 무엇이고 어떻게 조치해야 하는지 알아보는 일이라 생각된다. 따라서, 그동안 국내외 원전의 지진 경험사항을 위주로 원인 및 안전성을 분석해보고, 그 분석에 따른 근무자들의 대응방안을 수립해 보고자 한다.

제 1절 지진 발생시 주요 영향 전력설비

지진 발생시 <표 14>의 국내외 원전의 정지 사례를 종합해 보면 주요 영향 전력설비의 반응을 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

- 계통 주파수 상승
- 원자로 출력 변화
- 터빈-발전기 베어링 진동 증가
- 대형 회전기기 회전수 증가 및 진동 상승
 - 원자로냉각재펌프(RCP), 충전펌프(CHG Pp), 복수펌프(COP),

가열기배수펌프(HDP), 순환수펌프(CWP), 격납건물 팬 냉각기 (Containment Fan Cooler) 등

- 주요 차단기, 변압기 및 송전선, 송전철탑 손상
- 각종 보호계전기 오동작
- 주요 탱크 수위 흔들림
 - 핵연료 재장전수 탱크(RWST), 복수저장탱크(CST), 사용후 연료 저장조(Spent Fuel Pool), 중수로 다우징 탱크(Dousing Tank), 연료유 탱크(Fuel Oil Tank) 등
- 지진해일로 인한 취수구 범람 또는 저수위 발생

1. 지진영향 국내외 원전 정지사례

큰 지진의 영향으로 인한 국내외 원전의 수동 및 자동 정지사례를 다음과 같이 <표 14>에 정리해 보았다. [13][18][19][20]

<표 14> 지진으로 인한 원전 정지사례

일 자	국가	발전소명	정지원인	노형/용량	기 타
'16.09.12	한국	월성 #2,3,4	수동정지	PHWR/700MWe	지진가속도 : 0.03981g
'11.08.23	미국	North Anna #1	Neutron Flux Lo	PWR/1100MWe	노심 감지기 충격 및 연료 움직임에 의한 중성자속 감소
'11.03.11	일본	Fukushima Daiichi #2,3,4	지진 자동정지 설정치 도달	BWR/784MWe	쓰나미에 의한 SBO 발생 #1,2,3,4 수소폭발 발생
		Fukushima Daini#1,2,3,4	지진 자동정지 설정치 도달	BWR/1100MWe	

<표 14> 지진으로 인한 원전 정지사례 (계속)

일 자	국가	발전소명	정지원인	노형/용량	기 타
'11.03.11	일본	Onagawa #1,2,3	지진 자동정지 설정치 도달	BWR/524MWe 825,825MWe	지진설계치: 0.25/0.375g 정지설정치 : 0.2 g
		Tokai Daini #2	지진 자동정지 설정치 도달	BWR/1100MWe	
'09.08.11	일본	Hamaoka#4,5	보조변압기 과 전류계전기 동작	BWR/1100MWe	
'07.07.16	일본	Kashiwazaki Kariwa#2,3,4 #7	Rx Trip	BWR/1100MWe ABWR/1356MWe	지진가속도 : 0.68 g 지진설계치:0.235/0.274g 정지설정치 : 0.12 g
'06.12.26	대만	Maanshan #1,2	#2 수동정지	PWR/951MWe	지진가속도 : 0.17 g 지진설계치 : 0.2/0.4g 터빈 및 RCP 고진동
'99.09.21	대만	Chinshan #2 Kuosheng#1,2	송전선 단선	BWR/600MWe BWR/948MWe	지진가속도: 0.037/0.043g 지진설계치: 0.3/0.4g
'93.11.27	일본	Onagawa #1	Neutron Flux Hi	BWR/524MWe	지진가속도 : 0.121 g 지진설계치: 0.25/0.375g 정지설정치 : 0.2 g
'87.	일본	Fukushima Daiichi#1,3,5	Neutron Flux Hi	BWR/460,784, 784MWe	
	일본	Tokai #1	변압기 서지 보호계전기 동작	GCR/166MWe	변압기내부 오일 유동으로 계전기 동작
'87.	일본	Fukushima	TBN Vib Hi	BWR	수은을 함유한 계전기 고장
'85.	일본	Ohi	계전기 고장	PWR/1175MWe	
'83.05.26	일본	Fukushima	TBN Vib Hi	BWR	
'78.	일본	Fukushima × 2	송전선 Insulator 파손	BWR	

제 2절 전력설비 영향 분석

1. 계통 주파수 상승

대지진 발생 시 도시나 공업단지 등의 파괴 및 송전망의 파손 등으로 인한 순간적인 대단위 부하 탈락에 의해 계통 주파수가 순간적으로 급상승하게 될 것이다.

이때 국내 원자력발전소의 경우 외부 부하 탈락에 의한 계통 주파수 급상승시에 대비해 <표 15>와 같이 터빈-발전기 측에 설정되어 있는 Governor Droop Factor(자동 감소 인자)가 작동되어 자동으로 출력이 감발되어 발전소 설비 및 계통 주파수 안정에 도움을 줄 수 있도록 되어 있다.

참고로 화력발전소의 경우는 Droop Factor가 원자력발전소보다 더욱 민감하게 반응하도록 되어 있다.

한빛 1,2호기의 경우 Droop Factor가 5%로 설정되어 계통 주파수가 60.5 Hz 이상으로 증가 시 다음의 식에 의한 비율로 출력이 자동 감소되도록 되어 있다.

- 한빛 1,2호기 Droop Factor 설정치 : 5 %

$$D.F(\%) = \frac{\Delta F/F}{\Delta P/P} = \frac{0.5/60}{\Delta P/997} \times 100 = 5$$

$$\Delta P = 166 \text{ MW}$$

$$\therefore 997 - 166 = 831 \text{ MW (기준출력 997MWe)}$$

☞ 주파수 60.5Hz부터 Droop Factor 동작 시작

<표 15> Droop Factor 설정치 및 출력자동감발량 비교

구 분	Governor Droop Factor	주파수 60.5Hz시 출력자동 감발량	기준출력
한빛 1,2호기	5 %	166 MW	997 MW
한빛 3,4,5,6호기	5 %	174.9 MW	1049.46MW
고리 1호기	119 %	4 MW	
고리 2호기	72 %	7.5 MW	
고리 3,4호기	100 %	8 MW	
신고리 1,2,3,4호기	5 %		
한울 1,2호기	4 %	207 MW	
한울 3,4,5,6호기	5 %		
월성 1호기	8 %	70.6 MW	678 MW
월성 2,3,4호기	8 %	74.2 MW	713 MW
신월성 1,2호기	5 %		

※ 출력 자동 감발량은 개략치임

○ 한빛 1,2 호기 유사 경험 사례

- 일 시 : 1991. 11. 19 04:44
- 내 용 : 서서울 전력소 ~ 청양 전력소 사이 송전선로에 낙뢰가 발생하여 계통 주파수가 61.42Hz 까지 급상승함으로써, Governor Droop 동작하여 발전기 출력 급감발 됨
- 출력변화(원자로/터빈-발전기) :
 - 1호기 ; 100% / 990MWe → 85%/ 800MWe
순간적으로 1090 ~ 740MWe 로 변화후 800MWe
 - 2호기 ; 100% / 972MWe → 87%/ 810MWe

○ 한빛 3,4호기 시뮬레이터 Simulation 결과

한빛 3,4호기 시뮬레이터를 이용하여 시험한 결과 <표 16>의 각각의 주파수 입력과 동시에 Governor Droop이 동작하여 약 5초 만에 아래의 출력까지 급감발 됨을 알 수 있었다.

<표 16> 주파수 시뮬레이션 결과

출력 \ 주파수(Hz)	60.0	60.5	61.0	61.5	62.0
원자로 출력 (%)	100	70.4	60.7	52.4	39.1
터빈-발전기출력(MW)	1063	727	635.4	551	422.4

2. 원자로 출력 변화 및 원자로 거동

원자로냉각재 펌프(RCP) 회전수 증가에 따른 냉각재 순환 유량이 증가하고, 복수펌프(COP) 및 가열기배수펌프(HDP) 회전수 증가에 따라 급수헤더 압력이 상승하면서 증기발생기 급수유량이 증가되어, 노심 냉각물이 증가되면서 감속재 온도계수(+MTC) 효과에 의한 약간의 원자로 출력 상승이 예상되나 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

특히 <표 17>에서와 같이 노심 초기(BOL)에는 거의 영향이 없겠지만, 노심 말기(EOL)에서는 다소 영향이 나타날 수도 있으나, 발전소 정지 설정치(한빛 1,2호기 경우 109%)까지는 상승되지 않을 것이다. [11]

상기 <표 16>의 한빛 3,4호기 시뮬레이터로 시뮬레이션 도중 살펴본 바에 의하면 계통 주파수 상승에 의한 Droop Factor 동작이 순간적으로 일어나 약 5초 정도 만에 원자로 및 터빈-발전기 출력을 급감발시켜 버리므로 원자로 출력 상승 가능성은 거의 없다 하겠다.

또한 큰 지진 발생 시 격심한 상하좌우 흔들림으로 인해 제어봉이 낙하되거나, 원자로내의 핵연료나 구성부품이 흔들려 일부 손상을 받을 가능

성도 가정해 볼 수 있으나, 원자로 및 원자로냉각재 계통과 연관되어 있는 모든 설비들이 내진범주 I 등급으로 설계되어 있을 뿐만 아니라, 지진 빈발 국가들인 일본이나 미국 및 유럽국가의 어떤 원자로에서도 이러한 원자로 거동은 보고된 바 없었다.

<표 17> 한빛 1호기 노심 온도계수(10주기) $ITC = MTC + FTC$

노심구분 \ 온도계수(pcm/°C)	감속재온도계수 (MTC)	연료온도계수 (FTC)	등온온도계수 (ITC)*
BOL, HZP	3.99	-3.17	0.82
BOL(150MWD/MTU) HFP, ARO, Xe 평형 C_B 2,400ppm, T_{avg} 310.2°C	-1.29	-2.51	-3.80
MOL(8,000MWD/MTU) HFP, ARO, Xe 평형 C_B 1,000ppm, T_{avg} 310.2°C	-38.33	-2.81	-41.14
EOL(17,600MWD/MTU) HFP, ARO, Xe 평형 C_B 300ppm, T_{avg} 310.2°C	-64.57	-2.93	-67.50

그리고 만에 하나 핵연료가 일부 손상을 받을 경우에는 GFFD(Gross Failed Fuel Detector)에서 자동으로 연료손상 징후를 알리는 경보가 발생하도록 되어 있으며, 관련 절차서에 따라 적절하게 운전할 수 있게 되어 있다.

지진 발생 시 제어봉이 낙하되는 경우는 아직 없었지만, 제어봉이 낙하된다 하더라도 제어봉 자체의 부(-)반응도로 인해 발전소가 자동 정지되도록 되어 있으므로 오히려 안전한 방향으로 진행되는 것이다.

3. 터빈-발전기 베어링 진동 증가

지진 발생 시 발전소에서 가장 민감하게 반응하는 기기 중의 하나가 바로 <표 18>과 같이 터빈-발전기 진동이다.

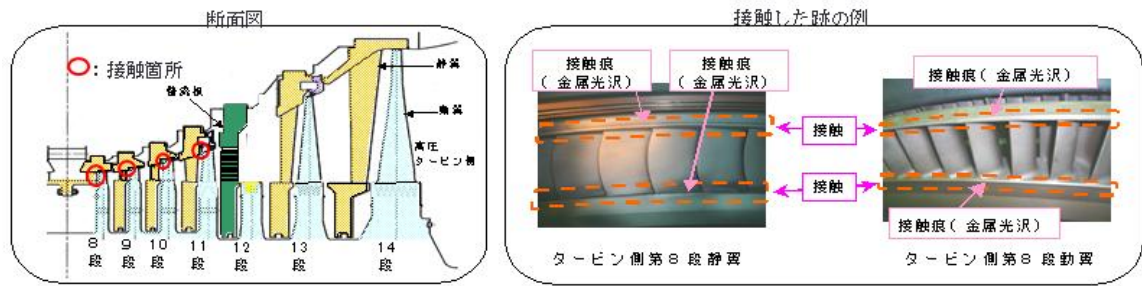
일본의 경우 터빈 진동 상승에 의한 원전 자동정지(Trip)가 2건 있었고, 국내에서도 지진 발생 시마다 터빈 진동 증가를 경험한 바 있으므로 큰 지진발생시 가장 큰 발전소 정지 사유가 될 수도 있으리라 생각된다.

그러나 국내 지진의 대부분이 규모 5.0 이하일 뿐만 아니라 지진의 영향 지속시간이 불과 몇 초에서 몇 십초 사이이므로, 터빈 진동이 순간적으로 경보치(한빛 1,2호기 경우 177 μ m)까지는 증가할 수도 있겠지만, 터빈 정지요구치(355 μ m)까지 상승하기는 어려우리라 판단된다.

하지만 큰 지진이 발생할 경우, 일본의 예를 보더라도 지진의 직접적인 영향보다는, 이런 간접적인 영향으로 발전소를 수동 정지해야 하는 경우가 충분히 생길 수 있다는 점에서 대비가 요구된다 하겠다. [13][18][19][20]

<표 18> 국내외 원전 터빈 지진영향사례

경험 호기	일 시	경 보 내 용	지진강도	비 고
일본 후쿠시마	'83.05.26	TBN Vib Hi Trip	규모 7.7	Vib Hi 자동 Trip
일본 후쿠시마	'87.	TBN Vib Hi Trip	?	Vib Hi 자동 Trip
한빛 1,2호기	'94.07.26	TBN BRG #10 Vib Hi	규모 4.9	약 60~70 μ m 증가
한빛 1,2호기	'96.12.13	-	규모 4.5	약 10~30 μ m 증가
한빛 1호기	'97.05.09	-	규모 3.2	약 10~27 μ m 증가
만산 1,2호기	'06.12.26	TBN Vib Hi	규모 7.0	만산 남서쪽 25km
일본 하마오카 4,5호기	'09.08.11	TBN Thrust Wear Hi	규모 6.5	
월성 2,3,4호기	'16.09.12	TBN Vib Hi	규모 5.1 규모 5.8	



<그림 5> 하마오카 5호기 터빈 블레이드 접촉으로 인한 손상

4. 대형 회전기기 회전수 증가 및 진동 상승

○ 원자로냉각재 펌프 (RCP)

<표 19>와 같이 지진발생시 원자로냉각재 펌프 진동 증가 경험이 있으므로 터빈 베어링 진동과 함께 유의해서 관찰해야 할 항목으로써, 펌프 진동과 함께 베어링 온도, 밀봉 주입수 온도 및 유량 등을 관련 절차서에 따라 점검 및 조치하도록 되어 있으며, 또한 회전수 증가에 따른 냉각재 순환 유량 증가로 원자로출력 상승 가능성도 일부 있으나 우려할 만한 사항은 못되는 것으로 판단된다. [12][13]

<표 19> 국내외 원전 원자로냉각재펌프 지진영향사례

경험 호기	일 시	경 보 내 용	지진강도	진 앙 지
한빛 2호기	'94.07.26	RCP B Vib Hi	규모 4.9	홍도 서북서 100km 해상
한빛 3호기	'97.05.09	CPC 오동작 (RCP Speed Sensing 받음)	규모 3.2	영광 남서쪽 37km 해상
월성 1호기	'97.06.26	PHT Pp Vib Hi	규모 4.3	경주 동남쪽 6km 내륙
만산 1,2호기	'06.12.26	RCP Vib Hi	규모 7.0	만산 남서쪽 25km
월성2,3,4호기	'16.09.12	PHT Pp Vib Hi	규모 5.1 규모 5.8	경주 남남서쪽 9/8km 내륙
고리1~4호기	'16.09.12	RCP Vib Hi		

○ 충전 펌프 (Charging Pump)

충전펌프 회전수 상승에 따라 충전유량이 증가하면서 가압기 압력 및 수위 증가가 예상되나, 가압기 살수밸브(open) 및 히터 자동동작(off), 그리고 충전유량 조절밸브 자동조절에 의해 곧바로 정상 압력 및 수위로 복귀될 것이다.

○ 복수 펌프 (COP), 가열기배수펌프 (HDP)

<표 20>과 같이 진동 상승과 더불어, 회전수 상승에 따라 펌프 출구 헤더 압력이 증가됨에 따라 주급수펌프 출구압력도 동반 상승되어 증기발생기 수위 및 압력 증가가 예상되나, 주급수조절밸브(MFCV)의 자동조절에 의해 곧 정상 수위 및 압력으로 복귀될 것이다. [13]

<표 20> 국내 원전 복수펌프 지진영향사례

경험 호기	일 시	경 보 내 용	지진강도	진 앙 지
월성 2,3,4호기	'16.09.12 (19:44)	복수펌프 Vib Hi	규모 5.1	경주 남남서쪽 9km 내륙
월성 2,3,4호기	'16.09.12 (20:32)	복수펌프 Vib Hi	규모 5.8	경주 남남서쪽 8km 내륙

○ 순환수 펌프 (CWP)

순환수 펌프의 경우 대유량, 저압력 펌프이므로 회전수 상승에 큰 영향은 없으나, 한빛 1,2호기의 경우 해수 빨에 의한 영향으로 기본적인 진동값이 높아져 있을 경우가 있으므로 현장 운전원이 수접촉(手接觸) 감각으로 판단하여 필요시 정비부서 담당자에게 점검 의뢰가 필요하다.

○ 격납건물 팬 냉각기 (Containment Fan Cooler)

<표 21>과 같이 한빛 3호기에서 진동 증가 경험이 있으나 별다른 문제는 없었으며, 회전수 상승 시에도 약간의 부하 증가 이외는 다른 문제가 없을 것으로 판단된다.

<표 21> 국내 원전 격납건물 팬 냉각기 지진영향사례

경험 호기	일 시	경 보 내 용	지진강도	진 앙 지
한빛 3호기	'97.05.09	RCFC Vib Hi	규모 3.2	영광 남서쪽 37km 해상

5. 주요 차단기, 변압기 및 송전선, 송전철탑 손상

대규모 원자력 및 화력발전 단지에서는 <표 22>와 같이 대지진 발생으로 인한 주요 변압기나 차단기의 손상 및 화재, 송전선이나 송전철탑 손괴시를 대비하여, 각 발전소 부지별로 송전선의 송전 용량과 부지 내 모든 발전기의 최대 송전량을 비교하여 대책을 수립해 놓아야 한다.

즉 <표 23>과 <그림 7>과 같이 송전선이나 송전철탑 손괴시 출력감발 또는 정지 우선순위, 그리고 출력 감발량과 감발률을 미리 지정해야 한다.

또한 발전소 부지 인근에서의 송전선 지락사고에 의한 발전소 영향 변수(주변압기 충격압력계전기 동작, 오실로그래프 동작 등)를 예상하여 비정상 및 비상 운전에 대비해야 한다. [18][19][20]

<표 22> 해외 원전 차단기, 변압기 및 송전선 지진영향사례

경험 호기	일 시	정지 및 고장 원인	노형	비 고
일본 후쿠시마 × 2개호기	'78.	송전선 Insulator 파손	BWR	
대만 진산 2호기 쿠오상 1,2호기	'99.09.21	송전선 단선	BWR	규모 7.3 발전소에서 180 km
일본 가시와자키 가리와 3호기	'07.07.16	지진 정지 설정치 도달 (보조변압기 화재)	BWR	규모 6.8 발전소에서 16 km
일본 하마오카 4,5호기	'09.08.11	보조변압기 과전류 보호계전기 오동작	BWR	규모 6.5
일본 오나가와 1호기	'11.03.11	비안전 고전압 차단기 (SWGR) 화재	BWR	규모 9.0 원전에서 130km



<그림 6> 가시와자키 가리와 3호기 보조변압기 단락 및 화재 발생 부스덕트 모습

【導體脫落、變形】



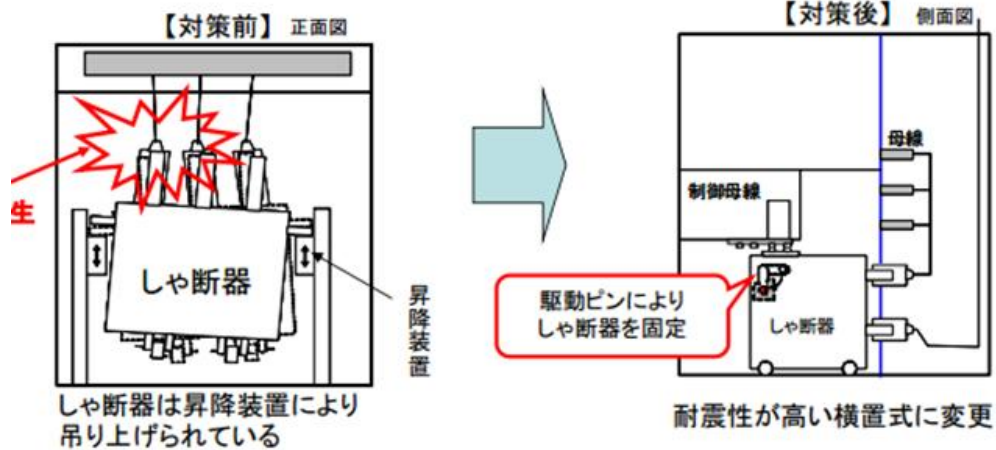
【支持碍子破損、本体脫落】



<그림 7> 하마오카 스위치야드 도체탈락 및 지지애자 파손

A)의 주요負荷

프(A), 循環水ポンプ)などの常用負荷



<그림 8> 오나가와 1호기 고전압 차단기 화재

예) 과거 영광 송전선(한빛 3,4호기 → 남원) 준공 전에 산불 등으로 인한 송전선로 이상 발생시 기존의 송전선(영신 및 영청 송전선) 용량 부족으로 인해, 한빛 1~4호기 출력감발을 및 수동정지 우선 순위를 지정하여 운영한 경험이 있으므로 좋은 예가 될 수 있을 것이다. [12]

<표 23> 한빛원자력본부 송전선로 비정상시 출력운영계획

적용기간 및 호기		'96. 4. 13~영광 T/L 준공시까지				비 고
		1호기	2호기	3호기	4호기	
영신 T/L 과도상태시 조 치	출력 (MWe)	950	950	1,000	1,000	100% 기준
	송전단 출력총합	3,900				
	감발 목표량	1,500				
	감발후 송전단 출력총합	2,400				
	각호기별 감발량	전력거래소 요청에 따름				
	감발율	30 MW/min				
	출력감발시 운전 형태	DEH, Oper-Auto		DCM, Oper-Auto		★ 수동 운전 금지
	출력 감발후 추가조치 사항	◆ 송전단출력총합 3,300/3,200/2,400 MW를 기준으로 한빛 3/2/1호기 정지 S/W OFF 조치가 필요함				송전단출력 최종확인 2,3호기 발전팀장이 직접 확인후 해당 S/Y 운전원에게 직접 통보
영청 T/L 과도상태시 조 치	출력 (MWe)	950	950	1,000	1,000	100% 기준
	송전단 출력총합	3,900				
	감발 목표량	600				
	감발후 송전단 출력총합	3,300				
	각호기별 감발량	전력거래소 요청에 따름				
	감발율	30 MW/min				
	출력감발시 운전 형태	DEH, Oper-Auto		DCM, Oper-Auto		★ 수동 운전 금지
	출력 감발후 추가조치사항	◆ 송전단출력총합 3,300/3,200/2,400 MW를 기준으로 한빛 3/2/1호기 정지 S/W OFF 조치가 필요함 ◇ 추가적인 출력감발(3,200/2,400MW 이하로 출력감발)시 한빛2/1호기 정지 S/W OFF 조치가 필요함				송전단출력 최종확인 2,3호기 발전팀장이 직접 확인후 해당 S/Y 운전원에게 직접 통보

6. 각종 보호계전기 오동작

상기의 송전선 사고 또는 직·간접적인 지진의 영향으로 인해 주변압기, 보조변압기 및 기동변압기의 충격압력계전기(부흐홀쯔 계전기)나 비올차동계전기 등이 지진의 동적인 충격에 의해 오동작되어 발전소 정지를 유발할 가능성도 있다. <표 24>와 같은 오동작에 대비하기 위하여 개별 기기 내진검증 및 예비품 수명관리 등을 실시하고 있다.

<표 24> 일본 원전 보호계전기 지진영향사례

경험 호기	일 시	정 지 원 인	노 형	비 고
오히	'85.	계전기 고장	PWR	수은 함유 계전기 고장
토카이 1호기	?	변압기 서지 보호 계전기 동작	GCR	변압기 내부 오일 유동으로 계전기 동작
하마오카 4,5호기	'09.08.11	보조변압기 과전류 보호계전기 오동작	BWR	지진으로 인한 오동작

7. 주요 탱크 수위 흔들림

발전소 주요 탱크들, 즉 <표 25> 및 <그림 9>, <그림 10>과 같은 핵연료 재장전수 탱크(RWST), 복수저장탱크(CST), 소화수 저장탱크(Fresh Water Tank), 사용후 연료 저장조(Spent Fuel Pool), Dousing Tank, 연료유 탱크(Fuel Oil Tank) 등의 수위가 지진동의 영향으로 실제로 수위가 흔들리거나 수위지시계의 오동작으로 수위 고 또는 저 경보가 발생할 수도 있다.

특히 수위가 흔들리면서 넘쳐서 방사성물질이나 연료유가 환경으로 누출될 경우를 방지하기 위하여 누설 방지댐을 설치하였다. [13][18][19][20]

<표 25> 국내의 원전 탱크 수위 지진영향사례

경험 호기	일 시	경 보 내 용	지진강도	진 앙 지
월성 1호기	'97.06.26	Dousing Tank Level Hi	규모 4.3	경주 동남쪽 6km 내륙
만산 1,2호기	'06.12.26	Large Wtr Tk Level Hi/Lo	규모 7.0	만산 남서쪽 25km
일본 가시와자키 가리와 1,2,3,6호기	'07.07.16	SFP Level Lo (6호기 SFP 저장수 범람)	규모 6.8	원전에서 16km
일본 하마오카 4,5호기	'09.08.11	CST Level Hi-Hi	규모 6.5	
일본 오나가와 1,2,3호기	'11.03.11	보조보일러 연료탱크 전도 및 누설	규모 9.0	원전에서 130km
월성2,3,4호기	'16.09.12 (19:44)	Dousing Tank Level Lo	규모 5.1	경주 남남서쪽 9km 내륙
월성2,3,4호기	'16.09.12 (20:32)	Dousing Tank Level Lo	규모 5.8	경주 남남서쪽 8km 내륙



<그림 9> 가시와자키 가리와 6호기 사용후 연료저장조 물 유동 모습



<그림 10> 오나가와 1호기 연료탱크 전도 및 유출

8. 지진해일 발생 가능성

우리나라에서 지진해일 발생 가능성이 가장 높은 곳으로는 동해안으로, 특히 중부 지방 이상에서는 과거 1983년 일본 서해안 중북부 근해에서 발생했던 규모 7.7의 아끼다현 지진 시 발생했던 지진해일의 영향으로 한울 원자력에서 북쪽으로 불과 15km 밖에 떨어지지 않은 임원항에서 약 4m의 수위 상승을 기록한 적이 있었고, 1993년 일본 홋카이도 오키리시마 부근 해상의 규모 7.8의 격진 발생으로 인해 동해안에 3m 이상의 파고가 강타, 4억여 원의 재산 피해를 가져오기도 했다. [5][13]

따라서 동해안에 위치하고 있는 전력시설에서는 대비가 요구된다 하겠다. 고리, 월성 및 한울 원전의 최종안전성 분석보고서(FSAR)에 따르면 지진해일에 의한 해수위 상승은 <표 26> 및 <표 27>과 같으며, 이러한 분석

에다 태풍 또는 폭풍 등에 의한 해수위 상승을 더한 값에 대하여 취수구 및 방수구의 방과제를 설계하여 대비하였으므로 지진해일이 발생한다 하더라도 큰 손상을 입을 확률은 희박하지만, 일본 서해안에서 규모 6.4 이상의 큰 지진 발생 시에는 경계를 강화해야 하리라 생각된다. [5][13]

<표 26> 우리나라 지진해일 기록 (한울 1,2호기 FSAR)

발생일시	해일명	규모	최고해수위	피해지역	피해규모
1741.08.29	캄포 지진해일	7.5 (추정)	강원도 연안 3~4m (추정)	강원도 전역	인명, 가옥, 선박 등 피해
1940.08.02	사코단 지진해일	7.7	목호 : 1.2m 나진 : 0.5m	삼척, 울진, 울릉도 등	어선피해 : 6척 가옥피해 : 56동
1964.06.16	니가타 지진해일	7.5	부산 : 0.32m 울산 : 0.39m	-	-
1983.05.26	아끼다 지진해일	7.7	울진 : 2.50m 목호 : 3.9m이하 임원 : 4.0m이하	울릉도, 삼척, 울진 등 동해지역	사망 : 3명 연안구조물, 선박, 공사자재 등 피해
1993.07.12	홋카이도 지진해일	7.8	울진 : 2.56m 목호 : 2.03m 포항 : 0.93m	울릉도, 삼척 등 동해지역	어선피해 : 33척

<표 27> 지진해일에 의한 해수위 상승

분류 호 기	FSAR의 지진해일	가상최대 지진해일*	100년 빈도 지진해일*
고리 1,2호기	0.4 m	0.62 m	0.33 m
고리 3,4호기	0.4 m	0.28 m	0.13 m
월성 1 호기	0.4 m	0.69 m	0.36 m
월성 2 호기	0.62 m		
한울 1,2호기	3.0 m	3.0 m**	0.21 m
한빛 1~4호기	-	-	-

* 발전소 구조물에 미치는 지진해일의 영향연구 (전력연구원, 1991)

** 울진 1,2호기 지진해일에 대한 영향검토 (KOPEC, 1986)

(1) 국내 원전별 부지고 대비 설계 해수위

국내 원전 단지별 부지고 및 설계 해수위는 <표 28>과 같은데, 고리 1,2호기는 부지고가 7.5m로 낮아 해수방벽을 10m로 증축하였다.

- 원전 해수위 산정 규제기준 : US NRC RG 1.59, ANSI/ANS 2.8, IAEA NS-G-3.5
- 설계 해수위 산정방법 (다음 조합방법 중 큰 값 적용)
 - 최고조위 + 폭풍해일 + 파랑 처오름(wave run-up)
 - 최고조위 + 지진해일 + 파랑 처오름(wave run-up)

<표 28> 국내 원전별 부지고 대비 설계 해수위

호기	고조위 (m)	폭풍해일 (m)	지진해일 (m)	처오름 (m)	설계 해수위 (m)	부지고 (m)	여유고 (m)	비고
고리1,2	0.927	2.507	0.33	3.75	7.184	7.5 ^{주(1)}	0.316	PSR (2007년)
고리3,4	0.927	2.507	0.33	3.75	7.184	9.5	2.316	
신고리1,2	0.927	2.507	0.33	4.43	7.864	9.5	1.636	FSAR
신고리3,4	0.927	2.507	0.295	4.40	7.834	9.5	1.666	PSAR
월성1~4	0.767	2.000	0.50	4.30	7.067	12	4.933	PSR (2009년)
신월성1,2	0.767	2.000	0.50	4.30	7.067	10	2.933	FSAR
한빛1~4	4.366	1.73	-	2.09	8.19	10	1.81	PSR (2005년)
한빛5,6	3.400	1.73	-	2.09	7.22	10	2.78	FSAR
한울1~6	0.330	0.89	3.00	2.4	5.73	10	4.27	FSAR

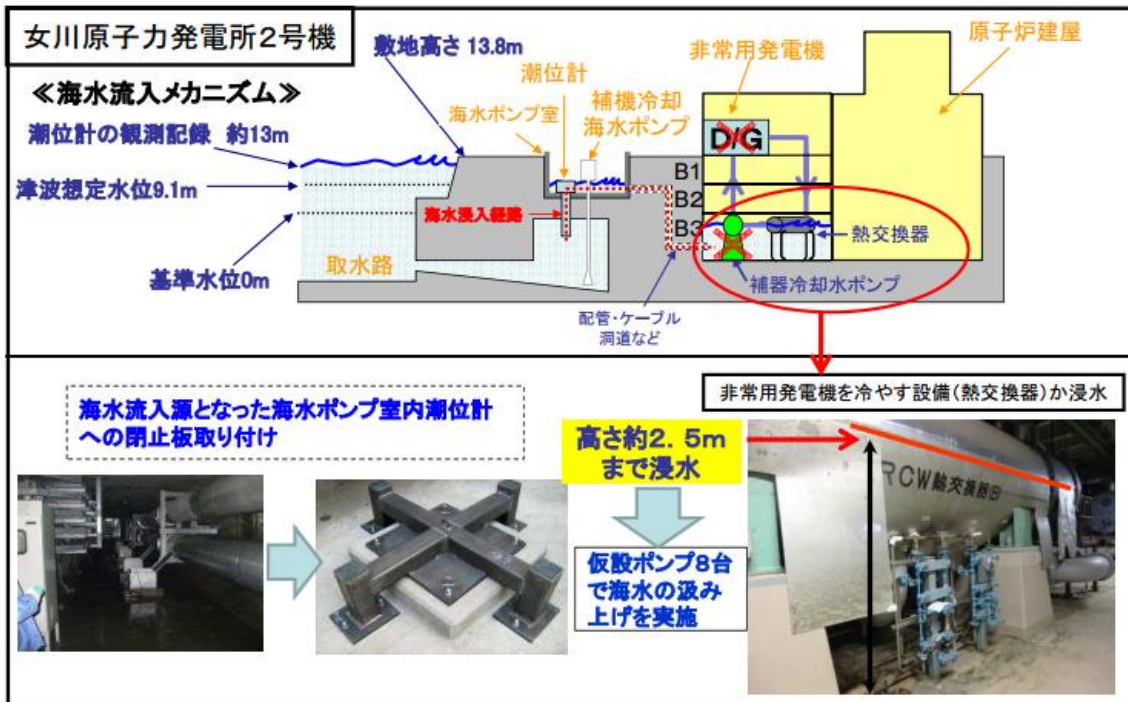
주(1) : 고리1,2호기는 고조위 및 폭풍해일(0.927+2.507 = 3.424) 고려시 부지고 5.8m로 안전하나, 처오름(3.75m)에 대비하여 해수 방벽을 축조하여 해일 피해에 대비함(7.5m)

반면에 서해 및 남해안은 지형 특성상 지진해일을 유발하는 대규모 지진의 발생 가능성이 없을 뿐만 아니라, 역사적으로도 지진해일의 발생이 전무하므로 지진해일의 발생 가능성은 아주 희박하다.

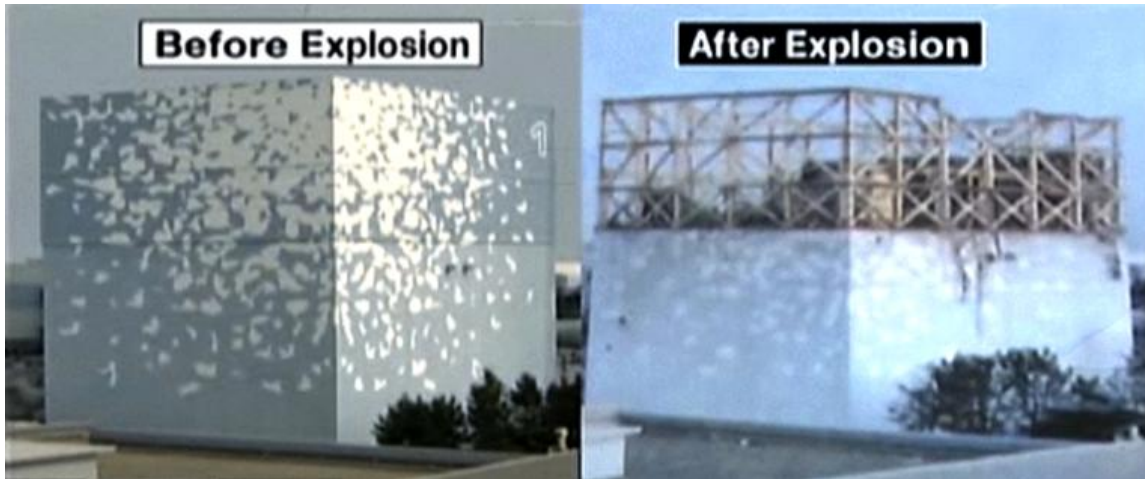
(2) 지진해일에 의한 피해 사례

<표 29> 지진해일로 인한 피해사례

경험 호기	일시	피해 내용	규모	진앙지
아키타(秋田) 화력발전소	'83.05.26	연료탱크 주변 기초지반의 침하 발생	7.7	아키타현 지진
일본 오나가와 1,2,3호기	'11.03.11	1호기 보조보일러 연료탱크 전도 및 누설 2호기 EDG 건물 침수	9.0	원전에서 80km 해상
일본 후쿠시마 다이이치 1,2,3,4호기		비상디젤발전기 침수로 인한 SBO 발생, 냉각수 상실, 수소폭발로 방사능물질 누출		원전에서 150km 해상



<그림 11> 오나가와 2호기 쓰나미로 EDG 건물 침수



<그림 12> 후쿠시마 1호기 수소폭발 전/후 모습



<그림 13> 후쿠시마 3,4호기 수소폭발 모습

(3) 지진해일 방재대책

고리 1,2호기의 경우 고조위 및 폭풍해일(0.927+2.507 = 3.424) 고려시 부지고 5.8m로 안전하나, 처오름(3.75m)에 대비하여 해수 방벽을 축조하여 해일 피해에 대비(7.5m)하였으나, 후쿠시마 후속대책으로 <표 30>과 같이 해안방벽을 높이 10m, 상단두께 1.85m, 길이 2.1km로 증축하였다.

<표 30> 고리 원전 해안방벽 증축내용

구분	연장	내용	비고
고리1,2호기	968m	상단 높이 7.5m → 10.0m 방벽 두께 0.5m → 1.85m	총 2,056m
고리3,4호기	1,088m	상단 높이 9.0m → 10.0m 방벽 두께 0.15m → 1.85m	

또한 국내 전 원전에 설계기준을 초과하는 대형해일 발생을 전제로 비상전력계통 및 주요 안전설비의 침수 방지와 침수가능성에 대비하여 구조물에 내진 설계된 방수문 설치(환기구 등 관통부의 침수방호조치 포함)를 진행 중이다.

후쿠시마 원전의 경우 과거 대형 지진 시 쓰나미 영향에 대한 규제기관의 수차례 경고에도 불구하고 대책이 늦어 재앙을 맞고 말았다. 반면에 오나가와 원전은 진앙에 훨씬 가까이 있어서 더 높은 쓰나미가 밀려 왔음에도 불구하고 큰 피해없이 안전정지 상태를 유지할 수 있었다.

미국 캘리포니아에 있는 San Onofre 원자력 발전소의 경우 지진해일 방재대책의 일환으로 Tsunami Wall이 평균 저극조위(MLLW)에서 + 30.0 ft의 규모로 해안선을 따라 설치되어 있다.

제 3절 지진 발생시 조치

원자력발전소에서 지진을 감지하였을 경우 주제어실의 경보 및 기기의 변수 변화 등을 신속히 파악하고 분석하여 적절하게 대처하는 것이 대단히 중요하다.

따라서 부지 내에서의 지진의 세기에 따른 조치사항을 아래의 여러가지 자료를 참고하여 다음과 같이 수립해 보았다.

- 각 원자력발전소의 지진에 대한 비정상 운전절차서
- 원자력발전처에서 작성한 “원자력발전소 지진발생시 초기대응 지침”
- ‘97년 5월 일본 사쓰마 지진시 센다이 원전의 대응 및 점검사항
- ‘07년 7월 니가타현 지진시 가시와자키 가리와 원전 영향
- ‘11년 3월 동일본 대지진시 후쿠시마 원전 쓰나미 영향
- 국내외 원전의 지진 영향 사례
- 제 3장 제 2절의 전력설비 영향 분석
- ‘97년 3월 개정 또는 새로 제정된 미국원자력규제위원회 Reg. Guide
 - Reg. Guide 1.12 Nuclear Power Plant Instrumentation for Earthquakes
 - Reg. Guide 1.166 Pre-earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Post-earthquake Actions
 - Reg. Guide 1.167 Restart of a Nuclear Power Plant Shut Down by a Seismic Event
- 미국 전력연구소 지침 (EPRI NP-6695, 1989)
Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake

1. 지진트리거 동작값 미만 지진발생시

지진트리거 동작값(0.01g) 미만의 지진 발생시에는 다음 사항을 비정상 운전절차서의 “지진 영향 사례” 서식에 기록한다.

- 지진강도 및 진앙지 (기상청에 문의 또는 지진통보문 접수)
- 지진의 지속 시간
- 구조물, 기기의 흔들림, 지명(地鳴) 등의 근무자 느낌
- 지진의 직·간접 영향으로 인한 경보 발생 유무
- 원자로 출력(Neutron Flux)
- 주요 회전기기 진동 변화사항 및 탱크류 수위 흔들림 정도
- 기타 특기사항

2. 지진트리거 동작 이상 운전기준지진 미만 지진발생시

지진트리거 동작값(0.01g) 이상이나 OBE(0.1g) 미만 지진 발생 시에는 즉시 발전소 비상연락망에 따라 발전소장, 실장 및 원자력안전위원회 지역 사무소 주재관에게 구두 보고를 실시하고, 다음 사항을 수행한다. [12][15]

- 지진감시계통 동작여부 및 경보사항 확인
- 상기 1과 같이 “지진 영향 사례” 서식에 기록
- 지진감시계통 제어반에서 OBE 이상 여부 평가
- 지진발생 즉시 “지진 발생시 주제어실 즉시 점검사항”에 따라 운전 영향여부 확인 및 기록
- 지진발생 후 8시간 이내에 “지진 발생시 현장 점검사항”에 따라 현장 기기 및 구조물 이상 유무 확인
 - 점검방법 : “지진발생시 현장 점검방법”에 따라 Plant Walkdown 실시
- 점검 결과 이상이 있는 계통 및 기기가 발견되었으나 발전소 운전중에 정비가 불가능하거나, 기술지침서에 따라 정지해야 할 경우 안전 정지 절차에 따라 발전소를 정지한 후 조치한다.

3. 운전기준지진 이상 지진발생시

OBE(0.1g) 이상 지진 발생 시에는 즉시 발전소 비상연락망에 따라 발전소장, 실장 및 원자력안전위원회 지역사무소 주재관에게 구두 보고를 실시하고, 다음 사항을 수행한다. [12][15]

- 원자로가 자동정지(ASTS 설정치 : 0.19g) 되었을 경우 비상운전절차서 수행 및 방사선 비상발령 여부 검토
- 원자로가 자동정지 되지 않았을 경우 다음 사항을 계속 수행
- 상기 1과 같이 “지진 영향 사례” 서식 기록
- 지진감시계통 제어반에서 OBE 이상 여부 평가
- 지진발생 즉시 “지진 발생 시 주제어실 즉시 점검사항”에 따라 운전 영향여부 확인 및 기록
- 지진발생 후 4시간 이내에 OBE 초과여부를 판단하기 위해 다음 사항을 평가해야 한다.
 - 응답 스펙트럼(Response Spectrum)
 - CAV(Cumulative Absolute Velocity)
 - 지진감시계통(Seismic Instrumentation) 운전 가능성
- 지진발생 후 8시간 이내에 “지진 발생시 현장 점검사항”에 따라 현장 기기 및 구조물 이상 유무 확인
 - 점검방법 : “지진발생시 현장 점검방법”에 따라 Plant Walkdown 실시
- 지진 기록값 종합 분석 및 평가결과 운전기준지진을 초과하였을 때에는, 발전소를 정지하기 전에 필수 안전정지 기기의 지진 영향여부를 확인하기 위해 다음 사항을 먼저 육안점검으로 확인한 후 수동으로 발전소를 정지한다.
 - 주제어실 제어반의 안전정지계통 이상여부 점검
 - 소외(off-site)전원 및 비상 소내(on-site)전원 가용성
 - 단, 정상 출력운전 중에 사용되고 있던 기기는 제외한다.
- 상기 점검결과에 따라 원상복귀(Reset)나 보수가 요구되면, 작업을 실

- 시하거나 대체 기기를 준비한다.
- 연료나 원자로 내부 손상(Damage)을 알기 위해 가능하면 발전소 정지 전에 “원자로냉각재의 총방사능 및 I-131 등가선량” 분석을 의뢰한다.
 - 지진의 간접영향으로 인해 발전소 중요변수가 자동 또는 수동 정지 설정치에 도달되어 자동정지(TRIP) 되거나, 수동정지 시켰을 경우 비상운전 절차서에 따라 발전소를 안전정지 시킨 후 상기 점검을 실시한다.
 - 방사선 비상계획서에 따라 비상을 발령하고, 방사선 비상연락망에 따라 비상조직을 소집, 가동한다. [8]

<표 31> 지진관련 방사선 비상 및 발령조건

구 분	발 령 조 건
백색비상 (17)	OBE이상 지진 발생(수평 0.1g 또는 수직 0.067g) 또는 부지내 타호기에서 지진 또는 지진해일로 백색비상 발령
청색비상 (14)	발전소가 고온정지 이상 + SSE이상 지진 발생(수평 0.2g 또는 수직 0.13g) 또는 부지내 타호기에서 지진 또는 지진해일로 청색비상 발령시
적색비상 (6)	대형화재 또는 노심용융사고로 방사성물질이 누출되거나 예상될 때 + SSE이상 지진 발생(수평 0.2g 또는 수직 0.13g) 또는 부지내 타호기에서 지진 또는 지진해일로 적색비상 발령시

4. 지진으로 인한 발전소 정지 후 점검사항

지진으로 인해 발전소가 자동 정지되었거나 수동으로 정지했을 경우, 지진피해 상황의 정밀평가를 위해 지진응답자료를 정밀 분석한다. [6][16]

- 상기 점검사항에 추가하여 “지진으로 인한 발전소 정지 전/후 점검사항”을 실시한다.
- 동작된 지진감시기는 24시간 이내에 운전가능한 상태로 복구하고, 지진 발생 후 5일 이내에 “지진감시계통 교정” 절차서에 따라 채널 교정을 실시한다.
- 지진이 종료되어 정상으로 회복된 뒤에 지진감시계통 제어반(ZJ-P025)을 원상복귀(Reset) 시킨다.
- OBE(0.1g) 이상의 지진이 감지되면, 기록된 지진 분석 자료를 원자력 안전위원회 지역사무소 및 한국원자력안전기술원에 아래 사항을 제출한다.
 - 대표지진계의 최대 가속도계값(x,y,z)
 - 운전기준지진(OBE) 초과여부 및 전체 계측기값
- 점검 결과 이상이 발견되지 않거나, 비정상적인 설비나 기기가 발견되어 정비 및 성능시험이 완료되면 발전소 원자력 안전위원회(PNSC)의 안전성 평가 및 원자력안전위원회 원자로 재가동 승인이 나면 정상 운전 절차서에 따라 발전소를 재가동한다.
 - 본사 및 원자력안전위원회 지역사무소에 발전소 재가동 통보

제 4장 결론 및 제언

상기에 기술한 바와 같이 원자력발전소의 내진규정, 내진설계 절차 및 지진을 감시하기 위한 지진감시계통에 대해서 충분히 알아보았다. 그리고 실제 지진이 발생할 경우 영향을 받는 주요 전력설비에 대해 국내외 사례와 함께 알아보고, 전력설비 영향에 대해 분석해 보았다.

지진 발생 시 계통주파수 및 원자로 출력 변화에 대해서는 이론적 분석 및 시뮬레이터를 이용한 실증시험과 국내외 사례 검토를 통해 관련 설비들이 안전하게 설계, 제작되고 시공되어 운영되고 있음을 확인하였다.

그리고 설계지진을 초과하거나 쓰나미 발생을 고려하여, 국내 전 원전에 대한 내진분석을 통해 지진 자동정지설비(ASTS) 설치와 안전정지 유지계통 내진성능개선 및 고리원전 해안에 쓰나미 방지방벽 증축을 완료하고, 방수문 설치를 진행하는 등 『후쿠시마 후속조치』 49건이 완료되면, 가능성은 희박하지만 후쿠시마와 같은 대형 지진과 쓰나미가 발생한다 하더라도 우리 원전은 충분히 안전하게 운영할 수 있으리라 확신할 수 있었다.

다만, 방사성물질 및 유류 유출에 대비한 현재의 방벽과 바닥 회수 시설에 대한 면밀한 재검토 및 보완이 필요하며, 계전기 오동작 및 부품 손상 사례에 대한 대비책으로 개별 부품에 대한 내진검증 및 대체 자재 관리방안 검토가 필요하다 하겠다. 또한 송전선(탑) 손괴에 대한 대비로 송전선로 비정상시 출력운영계획에 대형 지진 발생시 운영계획도 추가 반영해야 하겠고, 발전소 운영인력에 대한 교육훈련도 발전팀 직원 외에 정비 부서 직원에 대한 교육훈련도 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 원자력안전법, 원안위 고시 제2017-15호(원자로시설의 위치에 관한 기술기준)
2. 지진관측강화 및 원전안전대책(과학기술처, 1997.7)
3. 경수로형 원전 안전심사지침서(한국원자력안전기술원)
4. 한빛 1,2호기 최종 안전성 분석 보고서
 - FSAR 2.4.6 Probable Maximum Tsunami Flooding
 - FSAR 2.5 Geology, Seismology and Geotechnical Engineering
 - FSAR 3.7 Seismic Design
 - FSAR 16.3/4.3.3.3 Seismic Instrumentation
5. 한빛, 한울, 월성, 고리, 신고리 원전 최종안전성분석보고서(FSAR)
6. 한빛 1,2호기 운영절차서(기행, 정상, 비정상, 점검)
7. 고리 1,2,3,4호기 / 월성 1호기 / 한빛 3,4호기 비정상 운전절차서
8. 한빛 1,2,3,4호기 방사선 비상계획서
9. 지진감시계통 (한전 원자력발전처, 1996)
10. 내진설계를 위한 발전소 부지특성치 고찰 (한전 기술개발처, 1986)
11. 핵설계보고서(한전연료주식회사)
12. 지진발생시 원전 안전성 검토 및 조치(한전 영광 제1발전소, 1997.11)
13. 경주지진에 따른 월성2,3,4호기 원자로 정지 원인 및 대책보고서('16.12.)
14. NRC R.G. 1.12 NPP Instrumentation for Earthquakes
15. NRC R.G. 1.166 Pre-Earthquake Planning and Immediate NPP Operator Post-earthquake Actions
16. NRC R.G. 1.167 Restart of a NPP Shutdown by a Seismic Event
17. EPRI NP-6695 Guidelines for Nuclear Plant Response to an Earthquake
18. WANO MER TYO 99-013 대만 지진 관련 원자력발전소 영향('99.09.21)
19. INPO SEN 269 가시와자키 가리와 원전 지진발생 사례('07.07.16)
20. WANO SOER 2013-2 후쿠시마 다이이치 사고 후 교훈('13.03.)

감사의 글

2년전 임금피크제 적용을 받아 한울원자력에서 그동안 맡고 있던 보직을 다 내려놓고 정년퇴직까지 남은 기간 동안 무엇을 하며 지낼까 생각하며 다소 허허로운 마음으로 영광으로 오는 자동차 속에서 선배의 전화 한 통을 받았습니다.

인사말과 함께 지금부터 무엇을 할 계획인지 묻는데, 아직 딱히 정한 건 없지만 이런저런 생각 중이라고 했더니 대학원 공부를 권하는 것이었습니다. 솔직히 공부는 내 생각 속엔 없었지만 진지한 권유를 듣고 다시 생각해 보니 회사생활을 정리하면서 새롭게 나를 재충전하는 것도 괜찮겠다는 판단이 들어 입학 지원서를 내게 되었습니다.

거의 40년 만에 회사 직무교육이 아닌 학문에 대한 강의를 듣는다는 설레임과 함께 시작된 2년 과정 중에 다소 어렵고 생소한 내용도 있었지만 최고의 교수님들을 통한 강의가 너무 소중해서 단 한 번도 빠지지 않고 집중해서 들었을 뿐만 아니라, 과제를 부여받거나 평가 시험을 볼 때도 허투루 하지 않고 나름대로 최선을 다했다고 자부합니다.

강의 중에 일부는 이미 관련 업무를 맡아 실무를 해 본 내용도 있었지만 당시는 이론적으로 정립되지 않았던 사항들이 교수님의 강의를 통해 일목요연하게 정리될 때, 진작 이 대학원 과정을 수강했다라면 더 나은 관리자가 될 수 있었을 텐데 하면서 아쉬워했던 적도 있었습니다.

밤 늦은 시간에 먼 길 마다않고 달려와서 열정적인 강의와 함께 따뜻한 격려 및 조언을 해 주신 원자력공학과 정운관 교수님, 송종순 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님, 박병주 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 특히나 부족한 제 지도교수를 흔쾌히 맡아 학업과 논문 작성을 지도해 주시고 원자력학회 논문 발표장까지 오셔서 지켜봐 주신 김진원 교수님께 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 회사생활을 마무리할 즈음에 뒤늦게 시작한 공부를 적극적으로 지지하고 성원해준 사랑하는 아내와 세 딸들에게 고마움을 표하고, 과정 중에 많은 안내와 조언을 해 주신 김철준, 성기홍 선배님께도 감사 인사를 드립니다.

2019년 5월

박 창 석

저작물 이용 허락서					
학 과	원자력공학과	학 번	20177502	과 정	석 사
성 명	한글 : 박 창 석 한문 : 朴 昌 錫 영문 : Park Chang Seok				
주 소	광주시 북구 서하로 94번길 10, 109동 1804호(용봉동, 쌍용예가)				
연락처	E-mail : p1889714@naver.com				
논문제목	지진 발생시 원전 안전성 검토 및 조치에 관한 연구				
	A Study on the safety review and action in case of earthquake in Nuclear Power Plant				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB 구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center; margin-top: 20px;"> 동의여부 : 동의(○) 반대() </p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">2019년 5월</p> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">저작자 : 박 창 석 (인)</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px; font-size: 1.2em;">조선대학교 총장 귀하</p>					