국내 원자력발전소의 지진안전성 확보 현황

Securing Seismic Safety for Nuclear Power Plant in Korea

박 세 문
한국수력원자력(주)
원자력발전기술원 책임연구원

김 종 학
한국수력원자력(주)
원자력발전기술원 수석연구원

1. 서 론

최근 들어 인도네시아를 비롯한 동남아 일대의 빈번한 지진발생과 일본 니가타현 추에쯔-오키 지진의 발생('07. 7. 16)으로 가시와자키 가리와 원전이 정지되고 일부시설의 화재 발생과 소량의 방사능 물질이 환경으로 유출되는 사고가 발생하면서 국내에서도 원자력발전소(이하 원전)를 포함한 중요 산업시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심의 초점이 되고 있다.

우리나라는 환태평양 지진대에서 벗어나 대륙 쪽에 위치해 있어 강력한 지진 발생은 없으나 20세기 한반도에서 발생한 중규모 이상의 지진인 황해지진(1910년 M6.7), 지리산지진(1936년 M5.0), 충남홍성지진(1978년 M5.0), 속리산지진(1978년 M5.2), 울진앞바다지진(2004년 M5.2), 오대산지진(2007년 M4.8) 등의 기록은 국내도 지진재해가 가능할 수 있음을 시사하고 있다.

바로 얼마 전 중국올림픽을 불과 석 달 남짓 남겨둔 시점인 2008년 5월12일 중국 쓰촨성에서 규모 8.0의 지진(청두지진)이 발생해 엄청난 인명과 재산상의 피해를 입고 있다. 현재까지도 그 피해 규모가 정확히 파악되지 못하고 있는 실정이다. 국내 지진 · 지질학자들은 우리나라도 국내에서 발생한 예전의 지진 보다 큰 규모의 지진 발생이 가능하므로 이의 대비를 해야 한다고 경고하고 있다.

우리나라를 포함한 세계 각국에서는 중요한 산업시설물 및 공공시설물에 대해 내진설계 규정을 제정하고 시설물의 설계 및 시공 시 이를 적용하고 있다. 특히 원전은 사고 시 방사능 물질의 유출로 인해 인근 주민과 환경에 심각한 피해를 입힐 수 있으므로 다른 산업시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 내진해석 및 설계 요건을 적용하고 있다. 원전의 경우 내진안전성 확보를 위하여 발전소의 구

조물 및 각종 기기에 대하여 관련 규정을 기초로 내진설계를 수행한다. 또한 규제지침 1.12(US NRC)에 따른 지진 계측기기를 설치하여 발생 지진의 크기에 따라 경보발령, 원자로 안전정지 등 지진발생에 철저히 대비한 비상대응 절차를 마련하는 등 안전한 원전 운영을 위한 지진감시체계를 갖추고 있다. 지진감시설비는 지진 발생 시 발전소 내에서 지진동을 감지하여 기록하고 운전기준지진(OBE) 또는 안전정지지진(SSE)값 이상 시 원자로의 안전 확보를 위한 경보를 울리고 운전정지 결정 및 후속 정밀 평가, 재가동 여부 결정 등을 평가할 수 있는 지진자료를 제공하게 된다.

본 보고서에서는 우리나라 원전 내진설계 자료의 기본이 되는 국내 지진 발생현황과 원전의 내진설계 개념, 관련 기술기준 및 지진감시설비 운영을 포함한 원전의 지진 안전성 확보 현황을 소개하고자 한다.

2. 국내 지진발생 현황

2.1 지진의 발생원인

지진이란 지구 내부에 쌓여진 에너지가 순간적으로 방출되면서 그 에너지의 일부가 지진파의 형태로 전달되는 자연현상을 말한다. 즉, 지구적인 힘에 의하여 땅속의 거대한 암반이 갑자기 갈라지면서 그 충격으로 땅이 흔들리는 현상을 말하며, 지구 내부에서 급격한 지각변동이 생겨 그 충격으로 생긴 파동인 지진파(seismic wave)가 지표면까지 전해져 지반을 진동시키는 것이다. 일반적으로 지진은 넓은 지역에서 거의 동시에 느껴지는데 각 지역의 흔들림의 정도, 즉 진도(seismic intensity)는 갈라짐이 발생한 땅속 바로 위의 지표인 진앙(epicenter)에서 흔들림이 가장 세고 그곳으로부터 멀어지면서 약해져 어느 한계점을 지나면 느끼지 못하게 된다.

지진 현상을 가장 논리적으로 설명하는 판구조론은 지구가 두께 100km 정도인 10여개의 지각판으로 이루어져 있는데 이들 판 하부의 맨틀에서 발생하는 대류현상에 의해 매년 수 cm 정도로 대규모 수평이동을 하면서 축적된 탄성에너지가 판구조 중에서 가장 취약한 부위에 집중되다가 어느 한계를 넘는 순간 그 취약 부위가 어긋나면서 에너지가 방출되어 지진을 일으키는 것으로 설명한다.

지진은 땅속의 화약 폭발이나 지하핵실험 등으로 일어나는 유사지진인 인공지진과 사람의 영향과 무관한 자연지진으로 나뉜다. 자연지진은 발생원인이나 형태를 기준으로 구조지진, 화산지진, 함몰지진의 3가지로 분류한다. 대부분의 지진은 구조지진으로서 지구내부에서 대규모의 변형을 일으키는 힘의 원동력인 구조력(tectonic force)에 의하여 축적된 탄성에너지가 일시에 방출되는 현상에 기인하는 것이다. 화산지진은 화산지역에서 화산폭발이 원인이 되어 발생하는 지진이며, 함몰지진은 지각 내부의 연약한 지반이나 공동이 내려앉으면서 발생하는 지진이다.

구조지진은 판 경계부에서 발생하는 **판구조형 지진**과 판 내부에서 발생하는 **내륙형 지진**으로 구분할 수 있다. 대부분의 지진활동이 판 경계에서 일어나고 있는데, 일본은 4개의 판인 유라시아판, 북미판, 태평양판, 필리핀판이 만나는 곳에 위치해 있어 세계에서 대규모의 판구조형 지진이 가장 활발한 지역에 해당된다. 내륙형 지진은 판 경계에서 일어나는 판구조형 지진에 비하여 판 내부의 취약 부위인 단층에 의한 소규모 지진이 대부분으로서 유라시아판 내부에 위치한 우리나라는 이에 해당하는 경우이다. 내륙형 지진은 활성단층의 양쪽으로부터 압축력이 가해지면 활성단층 부분에 변형 에너지가 축적되다가 이 에너지가 한계를 넘을 때 활성단층 부분이 급격히 파괴되어 어긋나면서 지진이 발생하는 메카니즘에 의한 것이다.

2.2. 지진의 크기

지진 발생 위치로 진원(Hypocenter)과 진앙(Epicenter)을 사용하는데 진원이란 지진을 일으키는 지반의 파괴가 시작된 곳으로서 지진파가 발생한 지중의 지점을 의미하며 진앙은 진원의 바로 위 지표면의 지점을 의미한다.

지진의 크기는 주로 절대적 개념의 규모(Magnitude)와

상대적 개념의 진도(Intensity)로 나타낸다. 1935년 미국의 지진학자 리히터(C. Richter)는 지진의 강도를 1에서 9까지 숫자로 표시하였는데 이것을 리히터 규모(Richter scale)라고 한다. 지진발생 시 진동에너지의 총량에 대응되는 것으로서 지진 자체의 크기를 대표한다. 규모는 지진계에 기록된 지진파형의 진폭과 진앙까지의 거리 등을 변수로 산출하며 소수점 한자리까지 나타낸다. 지진파 에너지 E와 규모 M과의 관계는 다음과 같다(Gutenberg와 Richter : 1956).

$$\log E = 11.8 + 1.5M$$

여기서 M은 단위가 없으며 E는 erg단위를 갖는다. 이 식에 의하면 지진 규모가 1 증가할 때 에너지는 약 32배로 커지게 된다(표 1 참조).

진도는 어느 장소에 나타난 지진동의 세기를 사람의 느낌이나 구조물의 흔들림 정도를 계급화하여 정수단위로 나타내는 척도이다. 따라서 규모와 진도는 1대1 대응이 성립하지 않으며 하나의 지진에 대하여 규모는 지진감지 지역 어디에서나 동일수치이나 진도 계급은 달라질 수 있다. 지진 규모와 진도의 상관관계는 표 2에 나타냈다. 진도는 계급값을 쓰는 대신 가속도단위(cm/sec^2)로 나타내기도 하고 중력가속도 단위 g(1g=980gal: 1gal=1cm/sec^2)를 사용하기도 한다. 우리나라는 8계급의 일본 기상청 진도 계급인 JMA를 사용하다가 2002년부터 12단계 정수로 나타내는 미국의 수정 메르칼리 진도(MMI, Modified Mercalli scale: 1931, 1956)를 사용하고 있다. 이 밖에 동

〔표 1〕 규모와 지진에너지

규모 (M)	에너지 (erg)
8.0	6.3×10^{23}
7.0	2.0×10^{22}
6.0	6.3×10^{20}
5.0	2.0×10^{19}
4.0	6.3×10^{17}
3.0	2.0×10^{16}

〔표 2〕 규모–진도–지반가속도의 상관 관계

리히터 규모(M)		M(M)	JMA	지반가속도(g)	비고
1		I	0		
2	2.3			(0.001) 0.0014	
		II	1		
3	3.0			(0.003) 0.0032	
		III	2	0.0072	
4	3.7	IV		(0.01) 0.0144	
	4.3		3		
5	5.0	V		(0.025) 0.0323	◁ 오대산 지진 (0.7.18), M=4.8
	5.7	VI	4	0.00722	◁ 홍성 지진 (78.10.7), M=5.0
6		VII	5약	(0.06) (0.1)	◁ 국내 火電(0.1g)
	6.3	VIII	5강	(0.14) 0.1441	◀ 국내 原電(0.2g)
7	7.0		6약	(0.25) 0.3227	◁ 고베 지진 (95.1.17), M=7.2
		IX	6강	(0.45) 0.7224	
	7.7				
8		X		(0.3) 1.4414	◁ 당산 지진 (76. 7. 28), M=8
	8.3	XI	7		
9	9.0			3.2268	◁ 인도네시아 지진 (04.12.26), M=9.0
		XII			

(자료출처: 한국수력원자력(주) 홍보물)

유럽과 구소련을 중심으로 발달한 12계급의 MSK 진도(Medvedev, Spouheur, Karnik : 1963)와 서유럽의 RF 진도계급이 있다. 이렇게 진도계급은 세계적으로 통일되어 있지 않으며 나라마다 실정에 맞는 척도를 채택하고 있는 것이다.

참고로 규모는 소수점 한자리까지 아라비아 숫자로 표기하고 진도는 정수단위의 로마 숫자로 표기하는 것이 관례이며 잘못된 표현 중 흔한 것으로 '리히터지진계로 진도 5.6의 지진' 의 경우 '리히터스케일 혹은 리히터 규모 5.6의 지진' 또는 단순히 '규모 5.6의 지진' 이라 표현해야 옳은 표기법이다. '강도' 라는 표현은 결국 '진도' 에 해당하는 뜻으로 이해할 수 있으나 사용하지 않는 용어이다. '리히터지진계' 라는 기계 또한 존재하지 않는다.

진도는 지진의 규모와 진앙거리 그리고 진원깊이에 따라 크게 좌우될 뿐만 아니라 그 지역의 지반특성과 구조물의 형태 및 거주상황에 따라서도 달리 평가될 수 있다. 즉, 경우에 따라 규모가 큰 지진이라도 피해가 적을 수 있고, 작은 지진에서도 큰 피해를 입을 수 있다. 피해가 크고 규모가 큰 대표적인 지진으로서 몇 가지 예를 들면, 1906년 리히터 규모 8.3의 미국 서부 샌프란시스코에서 대지진이 발생한 경우는 진앙지와 그 주변도시의 수많은 건물이 파

괴되고 발생한 화재로 도시 전체가 완전히 폐허가 되었고, 1976년 규모 7.9의 중국 당산 지진은 당산의 주민 70만명 가운데 24만명이 사망하고 건물의 98%가 붕괴되는 대참사를 당했다. 이밖에 1985년 멕시코시에서 약 350km 떨어진 태평양연안에서 발생한 규모 8.1의 지진 (6,000명 사망, 건물 200개 이상 전파), 1988년 규모 6.8의 아르메니아지진, 1995년 규모 7.2의 고베지진등이 모두 큰 규모의 지진으로 인명과 재산상 큰 피해를 입은 경우이다. 작은 규모의 지진으로 큰 피해를 입은 경우는, 1996년 이란 아르데빌 지진으로 규모 5.5에 불과했지만 사망자가 3,000여명에 달하고 110개의 마을이 파괴되었다. 한밤중에 일어난 지진으로 주민 대부분이 집안에 있었고 건물이 흙블럭으로 쌓은 구조물이었기 때문에 일어난 참사이다. 반면, 같은 해 일본 아이치현에서 발생한 규모 5.6의 지진의 경우 피해는 미미했고 1989년 규모 7.1의 강진이 일어난 미국 캘리포니아의 경우도 역시 큰 피해가 발생하지 않았는데 이는 과거의 경험을 바탕으로 지진에 대한 준비를 하여 그 피해를 줄일 수 있었던 좋은 사례들이다.

2.3. 우리나라의 지진

우리나라의 지진은 1905년 최초의 지진계 설치 후 계기지진 기록이 가능해졌고 그 이전에는 주로 삼국사기, 고려사, 조선실록 등의 역사기록에 의존하여 그 피해 정도를 보고 진도를 추측할 뿐이다.

관측된 지진으로서 규모가 가장 큰 것은 1980년 1월 평북 삭주에서 발생한 리히터 규모 5.3 지진이며, 1978년 9월 규모 5.2의 속리산 지진, 1936년 7월 규모 5.0의 지리산 지진 등을 들 수 있다. 지진계가 없던 시절의 역사지진은 서기 2년 (고구려 유리왕 21년)부터 찾을 수 있다. 진앙지나 크기 등에 대한 직접적인 언급이 없이 "평양에서 땅이 흔들려 담장이 무너졌다"하는 식으로 피해만을 주로 기록하고 있다. 역사지진 기록의 몇 가지 예를 들면 백제 온조왕 45년 (AD 27년), "경기도 광주에서 땅이 흔들리고 사람이 사는 집들이 기울어 졌다(삼국사기), 고려 고종 10년 (1223년) 평양에서 땅이 크게 흔들리고 그 다음날에도 또한 같았다"(고려사), 조선 중종 14년(1519년) "강원 평창에서 지진이 일어나 땅이 요동하고 놀던 꿩들이 울어댔다"(조선실록) 등이 있다.

계기지진 기록 이후 가장 큰 지진 피해 기록으로는 1978년 홍성지진과 1996년 영월지진을 들 수 있다. 1978년 10월 7일 오후에 발생한 홍성지진은 홍성군청을 중심으로 반경 500m 이상에 집중되었으며 리히터 규모 5.0인 지진의 규모에 비해 상대적으로 피해가 컸다. 이는 사람이 밀집되어 사는 지역에서 발생했고 진원의 깊이가 얕았기 때문으로 판단된다. 그러나 무엇보다도 당시에 이 지역에서 지진에 대한 대책이 없었던 것이 가장 큰 원인이라 여겨진다. 영월지진은 1996년 12월 13일 오후에 발생하였는데 한낮에 발생하였기 때문에 발생당시의 주변 상황이 비교적 잘 알려져 있다. 피해 내용은 주로 진앙지 부근의 10여 개의 구조물에서 균열이 있었거나 도로변에 낙석이 있었던 정도였다. 그 밖에 1983년과 1993년에 일어난 일본 부근의 해저지진으로 인한 지진해일이 발생하여 동해안 일대에 인명과 재산피해를 가져온 사례가 있었는가 하면 2004년 5월 울진에서 80km 떨어진 해상에서 일어난 리히터 규모 5.2 지진의 경우 피해가 전혀 발생하지 않았다. 이렇게 지진은 진원지의 깊이와 진앙지의 거리 등에 따라 같은 규모의 지진이라도 그 피해 정도가 다양하게 나타난다.

역사기록을 보면 주로 인구밀도가 높은 경주, 서울, 평양일대에서 지진 기록을 많이 찾아볼 수 있는데 이는 인구밀도가 낮은 지역에 비해 그 피해를 심하게 입어 기록이 잘 되었기 때문으로 판단된다. 1905년 지진계측이 가능해진 후의 기록으로 보면 우리나라 진앙지 분포는 평안남도 남부와 황해도 북부일대에 집중되어 있음을 알 수 있다.

3. 관련 법규

현재 국내외 원전은 방사능과 관련된 시설의 중요성으로 인해 일반의 산업시설과는 비교될 수 없을 정도로 엄격

하고 보수적인 기준과 절차에 따라 내진설계가 이루어지고 있다. 그러나 원전건설의 초창기라 할 수 있는 1960년대까지만 해도 원전 선진국인 미국도 별도의 기준이 없이 일반 산업시설의 기준과 큰 차이가 없는 간단한 방법의 내진설계 절차를 적용하였으나 1971년에 발생한 원전 설계지진보다 큰 San Fernando 지진에 자극을 받아 1975년에야 비로소 지금과 같은 형태의 보다 엄격한 기준이 마련되었다. 우리나라는 원자력법 시행령 및 교육과학기술부 고시 등을 통하여 원전시설물의 내진설계를 요구하고 있으며 세부적인 내진해석 및 설계절차는 미국의 규제기준을 준용하고 있다.

원전은 건설 후 내진성능평가를 위해 지진계측설비를 설치하도록 규정하고 있는데 이의 관련 규정 또한 내진설계 관련 규정과 함께 발전 · 개정되어 왔다. 현행의 국내와 미국의 내진설계 및 지진계측관련 법규와 기준의 일부를 다음과 같이 소개하고자 한다.

<u>한국</u>

- 교육과학기술부 고시 2008-7호, 원자로시설의 위치에 관한 기술기준, 2008.4
- 교육과학기술부 고시 2000-8호, 원자로시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기술기준, 2000.6
- 교육과학기술부령 1호, 원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 제4조(지질 및 지진), 2008.3
- 교육과학기술부령 1호, 원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 제13조(외적 요인에 관한 설계기준), 2008.3
- KINS 안전심사지침서, 제3.7.4절 지진계측설비

<u>미국</u>

- US 10 CFR 100 App.A, Seismic and Geologic Siting Criteria for NPP, 1996
- US 10 CFR 50 App.A, General Design Criteria for NPP (GDC 2: Design Basis for Protection Against Natural Phenomena), 1996
- US 10 CFR 50 App.S, Earthquake Engineering Criteria for NPP, 1997
- US 10 CFR 100.23, Geologic and Seismic Siting Criteria, 1997
- US NRC Regulatory Guide (미국원자력규제위원회 규제지침)
  - 1.29, Seismic Design Classification
  - 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
  - 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants
  - 1.165, Identification and Characterization of Seismic Source and Determination of Shutdown Earthquake Ground Motions
  - 1.166, Pre-Earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Post-earthquake Actions
  - 1.167, Restart of a Nuclear Power Plant Shutdown by a Seismic Event
  - 1.208, A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, 2007
  - 1.12, Instrumentation for Earthquakes

  외
- US NRC Standard Review Plan (미국원자력규제위원회 표준심사지침)
- ANSI/ANS-2.2-2002. Earthquake Instrumentation Criteria for NPP
- ANSI/ANS-2.10-2003. Criteria for the Handling and Initial Evaluation of Records from NPP Seismic Instrumentation

4. 원자력발전소 내진 설계 및 지진감시시스템

우리나라 원전은 내진 설계 시 지진설계값을 운전기준지진(OBE) 또는 안전정지지진(SSE)값으로 구분하여 설

계 · 건설한다. 안전정지지진은 광역 및 국지 지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려할 때 우리나라 원전 부지에서 발생 가능한 최대지진을 근거로 한 값으로 안전정지지진 발생 시 원전은 가동이 정지된다. 반면 운전기준지진은 광역 및 국지지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려할 때 원전 수명기간 동안 발생 가능한 지진이며 발전소 시설물에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 지진을 의미한다. 따라서 원전의 안전에 중요한 시설물은 운전기준 지진이 발생할 경우라도 공중의 안전과 건강에 영향이 없이 정상적인 가동이 가능하도록 설계 된다. 지진감시설비는 지진 발생 시 발전소 내에서 지진동을 감지하여 기록하고 운전기준지진(OBE) 또는 안전정지지진(SSE)값 이상 시 원자로의 안전 확보를 위한 경보를 울리고 운전정지 결정 및 후속 정밀 평가, 재가동 여부 결정 등을 평가할 수 있는 지진자료를 제공하는 지진감시시스템을 구성한다.

4.1. 내진설계

원전의 내진설계는 일반 건물과 달리 부지조사 단계에서 분석한 부지 주변의 단층과 과거 발생 지진을 토대로 부지에 영향을 미칠 수 있는 최대지진값을 산정하여 내진설계 수준을 정하고 있다. 우리나라 원전은 부지에서 예상되는 최대지진인 규모 5.2보다 훨씬 큰 지진인 규모 6.5의 강진에도 견딜 수 있도록 보수적으로 내진설계되어 있다. 내진 설계 시 고려되는 지진력은 수평력, 수직력, 회전력 등이 있는데 이러한 힘들 중 가장 큰 영향을 미치는 것은 수평력이다. 일반적으로 내진설계는 수평력에 저항하는 구조로 만들기 위해 구조물의 벽체나 기둥들의 단면크기가 확대되고 사용 철근량이 증가하게 된다.

우리나라 원전의 내진설계값은 중력가속도 9.8m/s^{2}의 20% 크기인 0.2g인데 이는 규모 6.5 정도(진도 8에 해당)의 강진에 해당되는 값으로(표 2 참조) 이 크기의 지진이 원자로 건물 기초 바로 밑에서 일어나는 것으로 가정한 값이다. 이는 지진안전 지대에 속하는 우리나라에서는 보수적인 값이며 발생할 확률도 일만년에 한번 이하로 일어나기 힘든 지진이다. 내진설계값을 산출할 때 고려하는 한반도 지진원의 특성과 40년의 원전 설계수명 등의 조건은 설계지진값을 0.15~0.183g 정도로 산정하지만 보수적으로 0.2g를 채택하고 있다. 현재 건설하고 있는 차세대원전(APR1400)의 경우는 해외 수출을 목적으로 개발된 발전소로서 더 보수적인 0.3g로 설계하고 있다. 미국의 경우 지진대에 속하는 서부해안 지역의 원전을 제외한 대부분 원전이(80%이상) 0.2g 이하로 설계되어 있는 것을 감안하면 우리나라는 지진이 없는 나라임에도 불구하고 매우 엄격하게 원전을 건설하고 있다 할 수 있다.(표 3 참조).

원전 구조물 및 각종 기기의 내진성 확보를 목적으로 한 내진설계는 내진해석 결과로 얻은 지진력에 대해 구조

〔표 3〕 각국의 원전 내진설계 현황

국가명	최소값(g)	최대값(g)	비 고
한 국	0.2	0.3	가동중 원전은 모두 0.2g이나 향후 건설되는 APR1400의 경우 0.3g 적용
미 국	0.05	0.75	가동중인 100여기 원전 중 약 80% 이상이 0.2g 이하이나 활성단층인 산안드레아 단층의 직접적인 영향을 받는 서부의 디아블로캐년 (Diablo canyon) 원전은 0.75g임.
일 본	0.27	0.6	판의 경계부에 위치하여 강진이 빈발하며 국토의 거의 전체가 활성단층의 영향을 받고 있음.
프랑스	0.1	0.3	-
스페인	0.1	0.2	-
독 일	0.05	0.2	-
이태리	0.07	0.3	-
스웨덴	-	-	10기의 가동 원전 중 1기만 내진설계를 하였음.
중 국	0.15	0.3	-

물과 기기가 견디도록 1) 설계입력지진의 결정, 2) 지반-구조물 상호작용 해석, 3) 동적응답해석, 4) 구조물의 내진설계, 5) 안전관련 기기의 내진검증(Seismic Qualification)의 다섯 단계의 설계과정을 거친다. 이렇게 설계된 원전은 발전소 건물, 주요기기, 지표면 등에 각종 지진계측기를 설치하여 실제 지진 발생 시 이를 감지하여 기록하고 설계지진값 이상의 지진발생 시에는 발전소의 운전정지 및 내진 안전성 평가를 수행한다. 최근에는 추가된 의무사항에 따라 안전관련 시설물을 대상으로 지진에 대한 확률론적 내진안전성평가(Seismic Probabilistic Safety Assessment)를 수행하여 취약 부위 도출과 개선으로 발전소 전체의 내진 안전성을 확보하고 있다.

우리나라 원전은 미국의 규정을 준용하여 내진설계값을 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)과 운전기준지진(Operation Basis Earthquake, OBE)으로 구분하여 설계 · 건설하고 있다. 안전정지지진은 광역 및 국지 지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려할 때 우리나라 원전 부지에서 발생 가능한 최대지진이다. 원전의 안전에 중요한 시설물은 안전정지지진 시 그 기능을 유지할 수 있도록 설계 · 건설된다. 운전기준지진은 광역 및 국지 지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려할 때 원전 수명기간 동안 발생 가능하여 발전소 시설물에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 지진을 의미한다. 원전의 안전에 중요한 시설물은 운전기준 지진이 발생하더라도 공중의 안전과 건강에 영향이 없이 정상적인 가동이 가능하도록 설계 · 건설된다. 원전 구조물과 기기 등 시설물은 그 중요도에 따라 3등급으로 나뉘어 내진설계를 수행한다. 원자로의 안전에 중요한 시설물로서, 원자로를 포함한 원자로계통과 이를 보조하는 모든 보조설비계통 및 이들을 수용하고 있는 건물 등은 내진범주 I급(Seismic Category I)에 포함시켜 안전정지지진 설계값 수준의 지진발생 시에도 그 기능을 유지할 수 있고 운전기준지진 발생시에도 지속적인 정상운전이 가능하도록 설계된다. 한편 내진범주 II급 (Seismic Category II)에 속하는 시설물들은 원자로의 안전에는 직접적인 관련은 없으나 지진에 의해 파손이 발생할 경우 안전관련 기능을 저해할 수 있는 시설물들이 이에 해당된다. 안전정지지진 발생 시에도 건전성을 유지할 수 있어 내진범주 I급 시설물의 안전에 영향을 미치지 않도록 설계된다. 내진범주 I급이나 II급으로 분류되지 않은 일반시설물들은 내진범주 III급 (Seismic Category III)으로 분류하여 일반 산업기준에서 요구하는 내진설계가 이루어진다.

원전의 내진해석을 위하여, 부지에서의 지진운동을 정의하여 구조물 또는 지반-구조물 시스템에 입력한다. 지진운동의 정의 요소는 최대가속도(Maximum acceleration), 지속시간(Duration), 진동수 성분(Frequency Content) 등이 있으며 지진입력 운동의 형태는 최대지반가속도 (Peak Ground Acceleration, PGA), 설계지반 응답스펙트럼 (Design Ground Response Spectrum, DGRS), 가속도시간이력 (Acceleration Time History, ATH)이 있다.

최대지반가속도는 지진운동의 크기를 나타내는 가장 간단한 방법으로서 일반적으로 중력가속도에 대한 계수로 표시하며 강체 구조물의 해석에는 직접 이용할 수 있지만, 상세한 해석을 위해서는 다른 형태의 지진운동이 사용된다. 통상적으로 운전기준지진(OBE)의 지반가속도는 안전정지지진(SSE)의 1/2값을 사용하며 수직지반가속도는 수평지반가속도의 2/3값을 사용한다. 국내 원전에 적용되고 있는 최대지반가속도는 다음과 같다.

[표 4] 국내원전 내진설계 적용 최대지반가속도 값(OPR 1000, 한국형표준원전의 경우)

설계 지진	최대 지반가속도	
	수평방향	수직방향
안전정지지진 (SSE)	0.2g	0.13g
운전기준지진 (OBE)	0.1g	0.067g

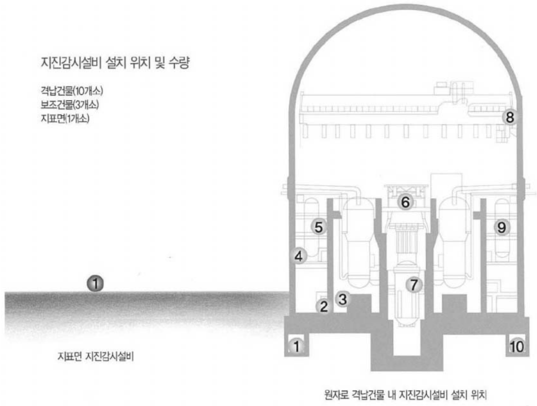
응답스펙트럼은 서로 다른 고유진동수와 감쇠특성을 갖는 일자유도계 시스템의 기초에 지진동이 작용할 때 일자유도계 시스템의 최대 응답을 그래프에 나타낸 것이다.

가속도 시간이력은 실제 지진파와 유사한 형태로서 규제 요건(SRP 3.7.1)을 만족하도록 인공적으로 작성한다. 두 수평방향과 수직방향의 3개 시간이력을 한조로 작성하며 시간이력해석 시 입력값으로 사용한다.

4.2 지진감시시스템

US NRC 1.12와 SRP 3.7.4 등 관련규정에서 제시하는 원전의 지진감시설비는 지진감시계통을 구성하는 시간이력 가속도계(Time History Accelerograph), 첨두가속도계(Peak Accelerograph), 응답스펙트럼 기록계(Response Spectrum Recorder), 지진스위치(Seismic Switch), 응답스펙트럼 스위치(Response Spectrum Switch) 등의 기기로 이루어져 있다. 지진계측기는 지진운동의 시간이력 확보 기능, 한개 이상의 지점에서 응답스펙트럼 확보, 일정 스펙트럼 가속도 초과 시 즉각적인 원격 통보 및 내부 전원기기에 의한 최대 가속도 기록 기능들을 충분히 발휘할 수 있어야 한다.

지진계측설비는 내진 설계 시 사용된 지진입력운동 및 계산된 시설물(구조물 및 기기)의 지진응답 운동을 확인할 수 있는 지점에 설치하며, 이를 위한 전형적인 설치 위치는 그림 1과 같다. 즉, 지진 입력운동 지점으로 "자유장(Free Field)"과 원자로 건물 기초 슬래브상이며 지진응답 지점으로는 원자로 건물, 원자로 기기, 원자로 배관과 기타 내진범주 1급 구조물, 기기, 배관 등이다. ANSI/ANS 2.2는 지진계측기의 종류, 개수 및 위치에 대해 원전 부지의 SSE 최대 가속도가 0.3g 미만인 경우와 0.3g 이상인 경우로 구분하여 명시하고 있다(표 5 참조). 이렇게 지진계측기의 설치위치 및 개수의 요건은 자유장 지진지반운동을 계측할 수 있는 위치, 지진발생 후에 내진설계 시 사용된 진동응답의 계산값과 비교할 수 있는 위치에 두어야 하나 계측기의 수량, 형식 및 위치는 안전정지지진과 기타 설계요인에 따라 좌우된다.



〈그림 1〉 지진계측기의 설치위치

〔표 5〕 지진계측기 설치 개수

지진계측설비	삼축시간이력 가속도계		삼축 응답스텍트럼 기록기		삼축점두 가속도계		지진스위치	
안전정지지진(SSE) / 설치 위치	0.3g 미만	0.3g 이상	0.3g 미만	0.3g 이상	0.3g 미만	0.3g 이상	0.3g 미만	0.3g 이상
Ⅰ. 자유장	1*#	1*#						
Ⅱ. 격납건물 내부								
- 기초	1*	1*	1*	1*			1*	1*
- 격납건물 상부	1	1						
- 원자로 기기 지지대			}1	}1				}1
- 원자로 배관 지지대								
- 원자로 기기					1	1		
- 원자로 배관					1	1		
Ⅲ. 격납건물 외부								
- 내진범주 Ⅰ급 구조물		1	1	1				
- 내진범주 Ⅰ급 기기 지지대			}1	1				
- 내진범주 Ⅰ급 배관 지지대				1				
- 내진범주 Ⅰ급 기기					}1	1		
- 내진범주 Ⅰ급 배관						1		

주 : * 제어실에서 판독
지반-구조물 상호작용이 무시할 만한 경우 생략 가능
} 두 위치중 하나를 위미함

격납건물 기초 또는 자유장에서 측정된 최대가속도나 응답스펙트럼이 운전기준지진 값을 초과하게 되면 발생지진은 운전기준지진(OBE)을 초과한 것으로 판정하는 데 이때는 재가동 허가 시까지 발전소를 정지하게 된다. 이후 재가동을 위한 발전소 성능 예측을 위해 안전관련 설비에 대한 현장 검사를 수행하고 첨두가속도계와 시간이력 가속도계로부터 측정된 응답을 설계 시 가정된 응답과 비교

하여 재가동 여부를 결정하게 된다.

따라서 지진계측기기는 원전의 가동 중에도 모든 기기에 접근하여 기록을 회수할 수 있도록 설치해야 하고 설치된 위치에서 성능시험이 가능해야 한다. 기기의 설치대는 강체로서 설치위치에서의 지진동을 증폭없이 전달하여야 하며 설치방향은 원전 설계시의 지진해석축과 일치하도록 한다. 기기의 작동을 위한 최소지반가속도는 0.02g를 초과하지 않도록 한다. 특히 지진스위치와 응답스펙트럼 스위치의 작동 시에는 경보시스템이 동시에 작동하도록 하며 기기의 설치 오차는 최대 ±5.0%, 0.01g에서는 ±1.5% 이내이다.

지진감시시스템을 구성하고 있는 지진계측기는 외부전원이 상실되어도 최소한 25분간 연속으로 작동시킬 수 있는 비상전원을 가져야 하며 각 기기의 특성은 다음과 같다.

시간이력 가속도계는 지진 발생동안 절대가속도를 시간의 함수로 계측 및 기록을 하는 기기로서 가속도 감지기, 기록계와 지진트리거로 구성되어 있다. 이 세가지 구성 요소들을 하나의 장치에 모아 놓은 자체보유식 계측기와 각 구성요소들을 별도로 분리해 놓은 분리형 계측기로 나눌 수 있다. 분리형 시간이력가속도계는 가속도 감지기에서 절대가속도를 감지하고 데이터를 원격으로 중앙 기록계로 전송하여 기록한다. 시간이력기록 결과로부터 첨두가속도를 결정하고 응답 스펙트럼을 계산한다. 가속도 감지기는 0.01g~1g의 동적범위, 0.5Hz-33Hz의 주파수 범위, 55%-70%의 감쇠비를 가지며 의사공진은 규정된 주파수 범위 안에 없어야 하며 교차축 민감도는 0.03g/g이다. 지진트리거는 작동범위가 0.005g에서 0.02g까지 조정 가능해야 하며 주파수 범위는 1Hz-10Hz이다.

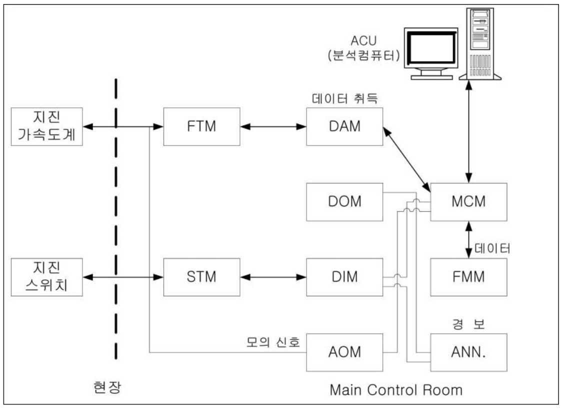
응답스펙트럼 기록계는 응답스펙트럼 가속도 측정을 기록하고 피동계측기 또는 능동계측기로 이루어진 응답 스펙트럼 기록계와 지진스위치로 구성되어 있다. 지진스위치는 규정된 가속도의 초과 여부를 원격으로 지시하기 위하여 즉시 신호를 제공한다. 가속도 감지기와 스위치폐쇄기(switch closer)로 구성, 지진발생 후 즉지 조치할 내용 또는 판단을 위한 근거를 제공한다. 동적범위는 50:1, 주파수 범위는 1Hz-30Hz 그리고 감쇠비는 규정된 주파수 범위 내에서는 없어야 하며 교차축 민감도는 0.03g/g이다.

첨두가속도계는 별도의 전원공급이 없이 3축 방향의 첨두가속도 값을 기록하는 기계식 시스템이다. 이러한 피동계측기는 지진발생 후에 전원을 필요로 하는 계측기들이 작동을 멈춘 경우에도 필요한 정보의 제공이 가능하다. 동적범위는 20:1이고 주파수 범위는 0.5Hz-20Hz, 감쇠비는 55%-70%이며 의사공진은 규정된 주파수 범위 내에서 없어야 한다.

지진스위치는 사전에 설정된 가속도 임계값(보통은 OBE) 초과 여부를 자동 및 즉시 원격지시해주는 삼축가속도 감시장치이다.

응답스펙트럼 스위치는 원자로 건물 기초 슬래브에 설치되어 보통 운전기준지진(OBE)을 초과하는 지진발생 시에 청각 및 시각 신호를 제공하는 기기이다. 지시값은 OBE의 백분율 값으로 나타낸다.

이상과 같은 지진계측기는 그림 2와 같이 제어실의 지시기와 연결하여 지진계측상태를 주제어실에서 실시간으



범례) MCM: Main Control Module, FMM: Flash Memory Module,
DIM: Digital Input Module, DOM: Digital Output Module,
AOM: Analog Output Module, DAM: Data Acquisition Module,
FTM: FBA TB Module, STM: Switch TB Module

〈그림 2〉 지진감시설비 전산시스템 구성도[2]
(고리1발 지진감시설비 사례)

로 원격 감시할 수 있도록 제어실 운전원 통보체계인 지진감시시스템으로 구성되고 주제어실(MCR)에 지진동 자료를 제공하게 된다. 발전소 구조물과 기기에 설치된 지진감시설비와는 별도로 발전소 주변 지역에서 발생한 지진감시를 목적으로 발전소 주변 지역 총 13개소에 지진관측설비를 설치하여 운영하고 있다. 관측결과는 기상청, 한국지질자원연구원, 원자력안전기술원 및 전력연구원 등과 네트워크를 구성하여 상호 공유하고 있다. 1999년 이후로 13개의 지진관측소로 구성된 원전부지 지진관측망의 지진통보시스템은 한전전력연구원에서 운영 중이며, 실시간으로 지진동의 크기 정보(PGA 값)를 한수원(주) 본사 및 원전 제어실로 제공하고 있다.

5. 결언

최근 발생한 쓰촨성 청두지진의 재앙을 접하면서 지진으로 인한 재해는 원폭의 몇 백배로 위협적임을 알 수 있다. 최근 부쩍 지진발생이 느는 것을 보며, 구전으로만 전해 내려오는 과거에 존재하고 번영했던 도시가 사라졌던 불가사의한 일들이 상당부분 지진에 의해서 발생했던 것은 아닐까 하는 다소 엉뚱한 생각을 해본다. 과거에도 내진설계에 대한 개념이 있었더라면 우리는 현재 보다 더 풍성한 역사의 흔적들을 접할 수 있었을지도 모른다.

지진은 분명 무서운 재해로 이어질 수 있으며 아직까지는 예측하기가 매우 어려운 자연현상이다. 그래서 지진에 대비하고 예방을 실천하는 자세가 매우 중요하다. 다행히 우리나라는 지진안전 지대에 속해 있어 이웃 일본이나 중국에서 겪는 큰 지진재해는 발생하지 않을 것으로 여겨지나 작은 피해라도 그 가능성에 대한 대비 자세는 항상 현명하다.

원자력발전소의 경우 우리나라에서 발생 가능한 지진보다 훨씬 더 큰 세기인 0.2g(차세대 원전은 0.3g)로 내진설계를 하여 건설하고 있는 것은 중요 구조물에 대한 지진안전성을 확보하고자 하는 의지의 실천이다. 매우 보수적인 내진설계 규정과 그 규정에 부응하며 건설되고 있는 한 원전의 지진안전성은 매우 신뢰할 만하다고 단언한다.

참고문헌

- 한국전력공사 전력연구원, 2000, 울진원자력 1,2호기 지진감시시스템 실용화, Technical Report
- 이종림, “원전의 지진감시시스템 · 지진파분석 시스템” 원자력산업, 1998, pp.52~59
- 한국전력기술주식회사, SSI 해석 교육 교재 1/2, 2007
- 한국수력원자력(주), 2004, 원전부지 지진안전성 정밀평가 기술 개발
- Daniel N. Lapedes, Geological Sciences, MaGraw-Hill Book Company