원자력발전소의 지진안전 연구현황

김민규
한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부

- 연세대학교 토목공학과 학사, 석사, 박사
- 한국원자력연구원 선임연구원, 책임연구원, 부장
- IAEA EESS(External Event Safety Section) Committee member
- OECD/NEA WGEV(Working Group for External Event) Committee member
- ASCE DANS Committee member

1. 서론

원자력발전소의 안전에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 자연재해가 지진일 것이라는 것은 원자력계에서는 이미 예상한 사항이었다. 그러나 그동안 우리나라는 지진 발생 빈도가 적어서 원자력계에서도 큰 관심을 기울이지 않았고 국민들도 원자력발전소의 지진안전성에 관심을 두지 않았던 것이 사실이다. 그러나 우리나라에서 공학적으로 지진에 가장 안전한 시설은 원자력발전소이다. 일반 시설물에서는 전혀 생각하지 않는 많은 사항을 고려하여 건설되고 지속적인 안전성 평가가 이루어지기 때문이다. 그럼에도 불구하고 원자력 선진국인 미국과 일본 등과 비교해 원자력발전소의 지진안전 기술이 뒤처지는 부분도 많이 존재한다.

2011년 동일본 대지진으로 후쿠시마 원자력발전소에 사고가 발생하자 국내 원전의 지진안전성에 대한 관심이 급상승했으나 연구개발로 이어진 부분은 많지 않았다. 그러나 2016년 경주, 2017년 포항에서 연이어 지진이 발생하였고, 특히 지진 발생 지역이 우리나라에서 원자력발전소가 많은 경상도 지역이라는 점은 국민들의 우려로 이어지고 원자력발전소의 지진안전성에 대한 여러 연구과제가 도출되는 계기가 되었다.

우리나라에서는 모든 구조물을 통틀어서 1978년 가동이 시작된 고리 1호기에 처음으로 내진설계가 도입되었다. 1972년에 고리 1호기의 설계를 시작할 때 내진설계를 국내의 구조물 중에서 처음으로 도입한 것이다. 그 당시에는 원자력발전소를 제외한 다른 구조물에 대해서는 내진설계라는 말이 무엇인지도 모르던 시절이었다. 이후 1987년 건축물 설계기준에 내진설계의 개념이 적용되었지만 원자력발전소에서 수행하는 수준의 내진설계와는 많은 차이가

있었다. 그러나 고리 1호기의 내진설계도 우리 기술로 수행된 것은 아니어서 국내 기술로 내진설계가 이루어졌다고 할 수는 없다. 이후 건설된 모든 원전에 역시 내진설계를 수행했고, 설치되는 기기들은 내진검증 절차를 거쳐서 내진성능평가도 수행하였다. 그러나 우리나라에서 개발된 기술로 수행된 것은 거의 없고, 미국의 기술을 그대로 받아들여서 수행된 것이 대부분이었다. 원자력발전소를 28개나 건설한 현재까지도 내진설계, 내진검증, 내진성능평가와 관련하여 국내에서 개발된 기술은 그리 많지 않다. 이는 내진공학 분야에 대한 투자가 많이 이루어지지 않은 것이 가장 큰 이유라고 할 수 있다.

한국원자력연구원(이하 원자력연구원)에서는 원자력발전소의 구조물과 지진에 대한 안전성 관련 연구를 1997년부터 소규모로 진행하였으며 2016년 경주 지진 이후 좀 더 다양한 주제의 연구과제를 진행하고 있다. 본격적인 연구를 시작한 지가 그리 오래되지 않아 많은 성과가 도출되지는 않았지만 국내에서 부족했던 부분에 대한 기술개발이 이루어지고 있다. 본고에서는 원자력발전소의 지진안전성과 관련하여 한국원자력연구원에서 수행 중이거나 계획 중인 연구내용을 간단히 소개하고자 한다.

2. 원자력발전소의 지진안전성 연구현황

원자력연구원에서 수행하는 많은 지진 관련 연구의 목적은 지진에 의한 원자력시설의 안전성을 정확히 평가하기 위함이다. 이는 원자력발전소의 지진안전성을 확보하기 위한 첫 번째 순서가 되기 때문이다. 원자력연구원에서 수행하고 있는 원전의 지진안전성 연구들은 대부분 과학기술정보통신부(이하 과기부)와 산업통상자원부(이하 산업부) 등 정부의 지원으로 이루어진다. 기술의 수요가 국가에 있기 때문에 민간에서 수행하기에는 어려움이 있기 때문이다. 정부 지원으로 수행되는 연구개발과제는 다음과 같다.

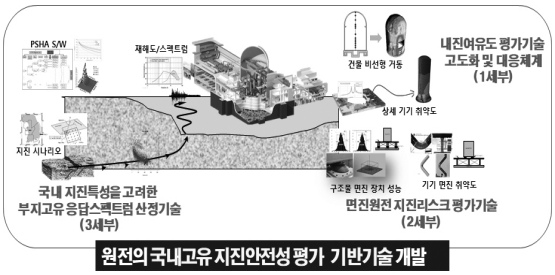
과기부의 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업의 대과제로 '원전의 국내고유 지진안전성 평가 기반기술 개발' 과제를 진행하고 있다. 이 과제는 과기부 원자력연구개발사업에서 최초로 총괄과제 형태로 수행하는 지진 관련 연구과제이다. 주된 내용은 세 가지 주제로 분류할 수 있는데, 첫 번째 주제는 내진 여유도 평가기술 고도화 및 대응체계 개발이고, 두 번째 주제는 면진원전 지진리스크 평가기술 개발, 세 번째 주제는 국내 지진특성을 고려한 부지고유 응답스펙트럼 산정기술 개발이다.

첫 번째 주제에서는 강지진동 발생 시 원전 구조물 및 기기의 손상확률 평가의 정확성을 향상하기 위하여 발전소 건물의 동적 비선형 거동을 고려한 평가기술을 개발하고 지진 발생 시 원전의 효과적인 대응 방안을 수립하는 것을 목표로 하고 있다.

두 번째 주제에서는 원자력발전소의 지진안전성을 획기적으로 향상하는 방법으로 면진장치를 적용하는 기술을 개발하며, 실제 면진장치가

적용되었을 때 원자력발전소의 지진안전성의 향상 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기술의 개발을 목표로 하고 있다.

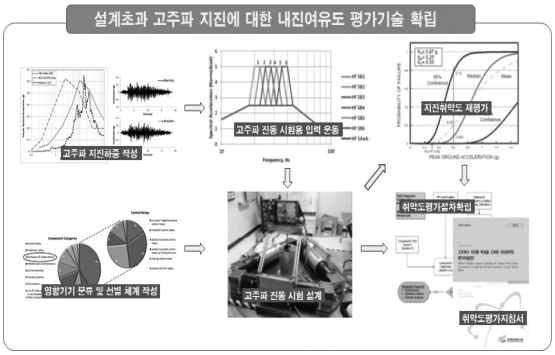
세 번째 주제에서는 원자력발전소의 지진안전성 평가 시 정확한 지진입력운동을 결정하기 위하여 국내고유 지진재해도 평가 프로그램을 개발하고 이를 위하여 경주 지진과 포항 지진의 결과를 포함한 지진동 감쇄식을 개발하며, 도출된 지진재해도 곡선을 이용하여 확률론적 방법으로 부지고유지반운동을 도출하는 방법의 개발을 목표로 하고 있다. 과제의 전체적인 모식도를 다음의 [그림 1]에 도시하였다.



[그림 1] 원전의 국내고유 지진안전성 평가 기반기술 개발 과제 개요

과기부 지원과제에서는 과제 진행의 일환으로 2016년 발생한 경주 지진 때 계측되었던 가장 큰 지진동인 명계리관측소에서의 지진기록을 이용하여, 원자력발전소의 대표적 구조형식인 전단벽 구조물에 대한 진동대 실험을 수행하여 원자력발전소 구조물의 안전성을 증명하는 결과를 발표하기도 하였다. 모든 실험과정과 결과는 공개되었으며, 실험결과에 대한 Blind Prediction 행사를 진행하였고, 많은 기관과 학교에서 참여하여 전단벽 구조물에 대한 지진응답해석결과를 비교함으로써 해석 방법에서 발전을 이룰 수 있도록 하였다. 최종보고서 역시 공개하였고, 참여 기관들이 각자의 방법으로 수행한 수치해석결과는 부록에 추가하였다. 또한 각 기관이 작성한 7편의 논문을 모아서 한국지진공학회지 2021년 5월호에 특별호로 출간하기도 하였다. [그림 2]는 공개실험으로 진행한 진동대 실험의 모습이다.

[그림 2] 전단벽구조물의 진동대 실험 진행 및 신문보도 내용

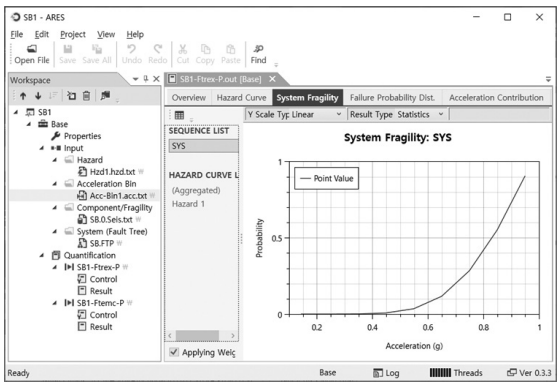


[그림 3] 설계초과 고주파 지진시 원전 구조물/
기기의 내진성능 평가 기술 개발 과제 현황

산업부 지원으로도 진행되는 연구과제 중 첫 번째는 '설계초과 고주파지진에 대한 원전구조물·기기 내진성능평가 기술개발'과제이다. 경주 지진 이후 국내에서 발생하는 지진동의 특성으로 밝혀진 것 중에서 가장 중요한 것은 국내에서 발생하는 지진동은 고주파수 특성이 탁월하다는 것이었다. 우리나라는 지반이 매우 단단한 암반층으로 구성되어 있으므로 전달되는 지진동은 매우 고주파수 특성을 지닐 것이라는 연구들이 있었는데 경주 지진과 포항 지진으로 인하여 그것이 증명된 것이다. 고주파수 지진동은 이미 미국에서도 한 차례 큰 이슈로 거론되어 EPRI에서 관련된 여러 권의 보고서를 작성한 바 있다. 우리나라의 경우 뒤늦게나마 경주 지진 등으로 인하여 국내에서 발생하는 지진동의 특성을 정확하게 알고 대처할 수 있는 기술을 개발하고 있다는 점에서 의미가 크다고 할 수 있다. 이 과제는 중소기업이 주관하며 원자력연구원과 여러 대학교가 같이 참여하여 산학연 협력 형태로 진행되고 있다. 원자력연구원에서는 고진동수 특성의 입력지진동을 산정하여 원자력발전소 주요 기기의 내진성능 평가 방법 및 지진취약도 평가 방법을 개발하여 고주파 지진에 의한 원자력발전소 주요 기기의 지진안전성 평가 방법론을 적용하고 검증하는 것을 목표로 하고 있다. 연구과제의 주요내용은 다음 [그림 3]에 정리하여 제시하였다.

또 하나의 산업부 과제는 원전의 확률론적 지진안전성 평가(PSSA, Probabilistic Seismic Safety Assessment, 지진 PSA) 프로그램의 개발을 주목적으로 하고 있으며, 현재 널리 사용하는 확률론적 지진안전성 평가 프로그램에 최신 기술을 적용하여 개발하는 것을 목표로 연구개발이 진행되고 있다. 확률론적 안전성 평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment) 기법을 개발하는 연구는 오랜 기간 동안 대규모로 진행되어 국내의 확률론적 안전성 평가 기술은 세계 최고 수준이다. 하지만 지진에 의한 확률론적 안전성 평가에 관한 연구는 실제로 수행된 바가 없어 본 과제가 국내에서 최초로 수행되는 지진 PSA 방법론을 연구하는 과제라고 할 수 있다. 현재는 주요 기술의 개발이 대부분 완료되고 전산 프로그램의 개발도 최종 마무리 단계에 있다. 기존 방법과 달리 구조물 기기의 지진상관성을 고려할 수 있도록 하였고, 지진 발생 시 인적 오류 확률을 고려한 평가를 할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 지진 PSA 프로그램들이 지진에 의한 초기 사건 빈도까지만을 평가할 수 있는 데 반해 본 프로그램에서는 내부 사건 리스크 평가 프로

그램과 연동하여 지진에 의한 노심손상 빈도까지 일괄로 구할 수 있도록 하였다. [그림 4]는 현재 개발 중인 프로그램의 구동 화면이다.



[그림 4] 확률론적 지진안전성 평가 프로그램 구동 화면

3. 향후 계획 및 발전 방향

2022년부터는 예비타당성 조사를 통과한 '가동원전 안전성 향상 핵심기술 개발 사업'이 시작되며, 기존의 연구가 기반기술의 개발에 치우쳤다면 앞으로 진행될 연구는 실제로 원전에 적용하여 종합적으로 원전의 지진안전성을 높이는 것을 목표로 하고 있다.

주된 내용으로는 (1) 빅데이터 기반의 입력지진 평가기술 개발을 위해 경주 및 포항 지진 등의 계측지진을 활용한 빅데이터를 구축하여 원전부지 특성을 반영한 입력지진 평가기술 개발, (2) 국내 지진재해도 평가를 위해 현재 진행되고 있는 한반도 활성단층조사결과를 반영하고 감쇄식과 재해도 평가에 AI 기술을 적용, (3) 손상에 따른 구조물/기기의 실시간 지진취약도 평가 기술 개발, (4) 설계초과 지진 발생에 대비한 내진보강기술 및 적용기술의 개발이다.

2022년부터 5년간의 종합적인 내진기술 개발 과제를 마치게 되면 국내의 내진기술도 원전 선진국들과 견주어 손색이 없거나 일부 기술에서는 우위를 점하여 기술을 선도할 수도 있을 것으로 보인다.

4. 맺음말

2016년의 경주 지진과 2017년의 포항 지진은 원자력발전소의 지진안전성에 대한 국민적 관심을 일으키는 계기가 되었을 뿐 아니라 원전의 지진안전성에 대한 본격적인 연구개발로 이어졌다. 앞으로 5년이 지나면 10년의 연구를 마치게 되어 구체적인 성과를 도출할 수 있게 된다. 그러나 10년의 연구로 원전의 지진안전성에 관한 연구가 종료되는 것은 아니다. 기술은 계속 발전하며, 발전소는 사용시간이 증가하면 일정 부분 변화를 겪게 된다. 원전 선진국들이 50년 가까이 원전의 지진안전성 관련 연구개발을 했으면서도 지속적으로 투자를 하는 것은 그러한 이유 때문이다. 이제 겨우 원전 선진국들과 어깨를 견줄 수 있는 수준으로 발전하는 상황이다. 따라서 원전 선진국 중에서도 앞선 기술력으로 원전 기술을 선도하는 수준에 이르도록 지속적인 연구개발과 투자가 이루어져야 할 것이다.

KAIF