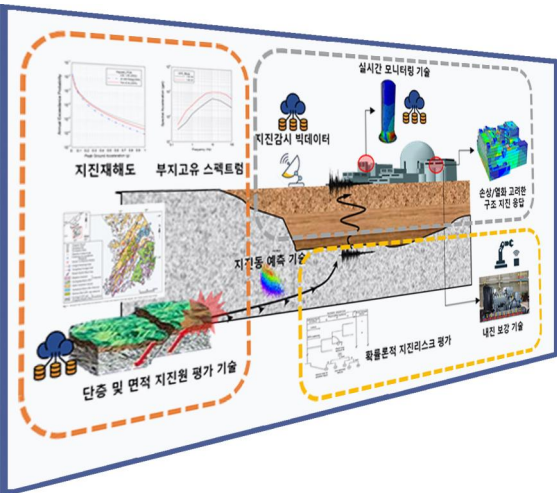


설계초과 강진 대비 원전구조물/기기 안전성 향상 기술 개발

Development of Seismic Safety Enhancement Technology for the SSCs in NPP against Beyond Design Earthquake

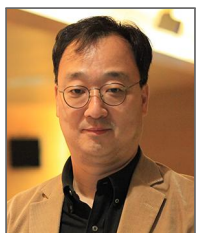


1. 서론

원자력발전소의 안전성을 위협하는 큰 요소는 지진과 같은 자연재해를 들 수 있다. 지진은 원자력발전소에 직접적인 손상을 일으킬 수 있는 가장 큰 에너지를 가지고 있는 자연재해이다. 지진의 무서움은 2011년 동일본 대지진에 의한 후쿠시마원자력발전소 사고를 통해서 많은 사람이 알게 되었다. 우리나라의 경우는 2011년 후쿠시마 원전사고를 계기로 전 원전에 대한 상세조사가 이루어졌고 50개의 보강대책이 발표되어 모두 조치완료된 상태이다. 그러나 지진에 대한 본격적인 대규모 연구개발이 시작된 것은 2016년 경주지진 발생 이후라고 할 수 있다. 원자력연구원에서는 2017년부터 2021년까지 5년간 과기부의 지원으로 ‘원전의 국내고유 지진안전성 평가 기반기술 개발’이라는 과제를 수행한 바 있다. 이 과제는 원자력 분야에서 지진에 대한 안전성 평가를 위한 최초의 연구과제라고 할 수 있으며 5년의 연구를 통하여 지진취약도 평가기술 개선, 원전 면진장치 적용을 위한 면진적용 원전의 리스크 평가기술 그리고 지진재해도 평가 소프트웨어 개발 등 많은 연구성과를 도출하였다. 그러나 5년의 연구를 통하여 원전의 지진안전성 관련 연구를 모두 수행한다는 것은 불가능한 일이며, 2022년부터 지진안전성 평가 및 지진에 대한 원전 안전성을 향상시킬 수 있는 기술의 개발을 위한 5개년 연구과제를 시작하였다. 현재(2023년 6월) 전체 5년의 연구기간중 1년반 정도가 지난 시점이며, 인공지능 기술 등 최첨단 기술을 적용하여 가동원전에 대한 원전 안전성을 실질적으로 향상시킬 수 있는 기술의 개발을 위하여 원자력연구원 주관으로 9개의 대학교, 3개의 중소기업이 참여하여 기술개발에 매진하고 있다. 본 기고에서는 현재 연구개발이 진행 중인 AI활용 지진재해도 기반 실시간 지진안전성 평가 및 향상 기술 개발 과제에 대하여 소개하고자 한다.

2. 과거의 연구성과(2017-2021)

가동 원전의 안전에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 대표적인 자연재해로는 지진을 들 수 있다. 국내의 규모 3.0 이상의 지진발생 건수를 살펴볼 경우, 현대식 관측 장비의 도입을 고려하더라도, 지속적인 증가 추세를 보이는 것으로 보이며, 지진 재해가 내재하는 불확실성(지진규모, 발생위치, 지역 및 부지 변동성 등)은



김민규

한국원자력연구원 구조·지진안전연구부 수석연구원

지진안전성 평가에 있어서의 현실적인 어려움이라 할 수 있다. 2016년 경주지진과 연이은 2017년 포항지진의 발생으로 원전의 지진안전성 확보가 시급한 현안으로 대두되었으며, 관련한 다부처 국내 활성단층 조사 연구가 진행 중이었으며 1단계(2017년~2021년)로 동남권지역에 대한 활성단층조사를 마친 상황이다.

원전에서의 지진안전성 평가는 확률론적 지진안전성 평가(seismic probabilistic safety assessment)라는 방법을 통하여 이루어지게 되는데, 이는 확률론적 기법을 활용하여 지진에 대한 원전의 사고 빈도를 정량적으로 평가하는 절차라고 정의할 수 있을 것이다. 세부적으로는 지진재해도 평가, 지진취약도 평가, 지진리스크 평가로 구분하여 볼 수가 있고, 원전 부지에서의 지진동 크기에 대한 확률적인 발생빈도, 원전구조물 및 기기에 대한 파괴확률, 지진으로 인한 노심손상빈도를 정량적으로 계산하는 과정을 거치게 된다.

확률론적 지진재해도 평가에 있어서는 잠재적인 지진원, 지진발생률, 거리에 따른 감쇄식 등을 고려하게 되는데, 특히 국내 지진동 특성을 고려한 감쇄식의 개발은 강진을 포함한 방대한 양의 지진 데이터를 필요로 하게 된다. 원자력 연구원에서는 경주지진과 포항지진의 발생으로 국내에서 계측된 규모 5.0 이상의 지진에 대한 관측기록을 분석하여 국내 지진 관측자료 기반 감쇄식을 제시할 수가 있었다. 또한, 해외의 지진재해도 평가 상용프로그램 활용의 문제점을 해결하고자 국산화 개발을 수행하였으며, 확률론적 지진재해도 평가 고유알고리즘 개발, 국내 지진 감쇄식을 포함, 그래픽 환경 사용자 편의성을 확보한 확률론적 지진 재해도 평가 프로그램 KOHAZ(그림 1)를 개발하였다.

지진취약도 평가에 있어서는 기존의 집중질량모델에 기반한 취약도 평가 절차의 단점을 극복하고 3차원 원전구조

물 모델을 활용한 해석기반의 취약도 평가체계를 제시하고자 하였다. 국내 지진동 특성의 입력지진파 선정, 3차원 원전구조물 모델링, 확률변수 및 분포의 선정, 확률변수 샘플링, 설계초과 지진에 대한 비선형 시간이력 해석, 한계상태의 정의와 같은 일련의 평가체계를 구축함으로써 원전구조물과 선별된 주요기기에 대한 취약도 곡선을 도출할 수 있었다. 더 나아가 극한상태 이력거동 모사의 한계점을 개선할 수 있도록 전단벽체 실험과의 연동을 통한 원전 하이브리드 평가기법의 개발은 선도적인 기술요소로 들 수 있다.

지진리스크 평가에 있어서 대표적인 성과로는 지진정량화 소프트웨어 Probabilistic Risk Assessment of Systems for Seismic Events (PRASSE)의 개발을 들 수 있다. 기존의 텍스트 기반의 소프트웨어를 개선하여 그래픽 입출력 환경 편의성, 지진 사건 초기빈도 계산 모듈, 및 component 모듈을 추가함으로써 원전 시스템 불확실성 평가에 있어서의 정확성 높이는 중요한 성과를 달성할 수 있었다. 또한, PRASSE의 개선으로 지진사건빈도와 내부사건정량화를 통합한 Advanced Risk assessment program considering Earthquake Scenario (ARES)의 개발을 완료하였으며, 이는 원전구조물 비선형, 지진상관성, 인적오류에 대한 정량화 모듈을 포함한 대표적인 연구개발 성과라 할 수 있다.

3. 설계초과 강진 대비 구조물/기기 안전성 향상 기술 개발

2020년 과학기술정보통신부와 산업통상자원부는 국가기저에너지원으로 원자력을 운영해야 하는 상황에서 안전하고 안정적인 원전 운영을 저해할 수 있는 3가지 핵심이슈를 도출하였고, “가동원전 안전성 향상 핵심기술개발 사

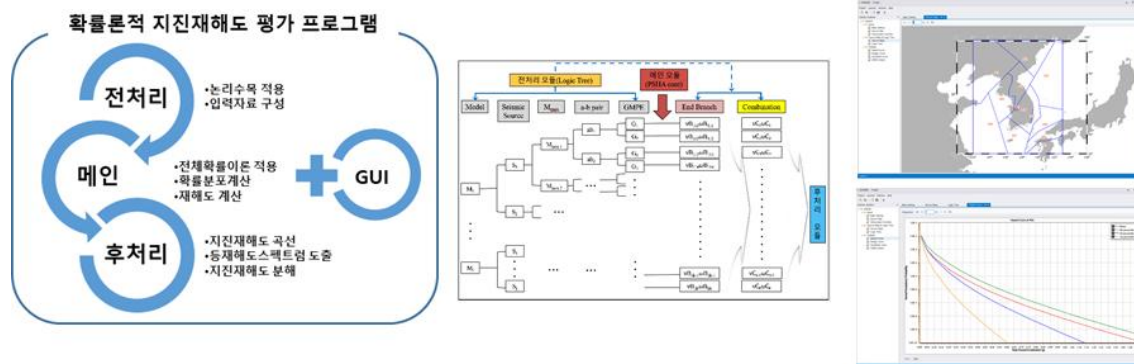


그림 1 국내 확률론적 지진 재해도 평가 프, KOHAZ

업”에 대한 예비타당성평가를 실시하였다. 예비타당성평가를 통하여 20개의 주요 연구과제를 도출하였고, 그 중의 하나로써 “설계초과 강진 대비 구조물/기기 안전성 향상 기술 개발” 과제가 선정되어 한국원자력연구원의 주관으로 2022년부터 수행하고 있다.

기존의 연구과제가 안전성 평가기술을 개발하는 것에 집중하였다면, 본 연구과제에서는 원자력발전소의 실질적인 안전성 향상을 목표로 하고 있다는 점에서 차이가 있다고 할 수 있다. 물론 원자력발전소의 안전성 향상기술 개발을 위해서는 정확한 안전성 평가 우선되어야 하므로 과제의 많은 부분에서 정확하게 안전성 평가를 할 수 있는 기술의 개발이 이루어지고 산업체를 중심으로 한 연구그룹에서는 안전성 향상기술의 개발을 하게 된다.

연구과제의 내용에 따라서 크게 구분을 하면 지진재해도 평가기술, 실시간 모니터링 기반 지진대응기술 그리고 가동원전 지진리스크 평가기술의 3가지 분야로 크게 구분할 수 있다. 전체 연구과제 내용을 하나의 그림으로 나타내면 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

그림 2에서 보는 바와 같이 지진재해도 평가기술은 2016년 경주지진이후 전 국토를 대상으로 시행되고 있는 활성단층 조사 결과를 반영한 지진재해도 평가를 위하여 단층 지진원과 면적 지진원을 평가하는 기술을 개발하여 궁극적으로 부지에서 발생가능한 부지고유 입력지진동을 결정하기 위한 기술이다. 두 번째로 실시간 모니터링 기술은 지진시 발생하는 진동을 실시간으로 관측 및 처리하여 원전의 영향을 분석할 수 있는 기술의 개발을 목표로 하고 있으며,

지진응답을 빠른 시간에 예측할 수 있도록 하기 위하여 기계학습을 통한 예측방법을 개발하며, 원자력발전소에 설치되어 있는 기존의 가속도계를 활용하여 가속도계가 설치되어 있지 않은 위치에서의 응답을 예측하는 기술을 개발하고 있다. 또한 가동원전 리스크 평가기술에서는 기존에 우리 연구원에서 개발한 원전의 확률론적 지진리스크 평가기술을 더욱 발전시켜서 정밀한 평가를 가능하게 할 뿐만 아니라 내진보강 등을 통하여 실질적인 내진성능을 향상시킬 수 있는 기술의 개발을 목표로 하여 연구를 진행하고 있다. 각각의 연구항목에 아래에 좀 더 상세하게 설명하였다.

○ 지진재해도 평가기술 개발

국내 원전 부지 고유의 지반증폭효과를 고려한 입력지진 평가기술을 개발하고, 국내 지진 데이터 수집을 위한 센서 시스템 개발 및 지진 빅데이터 구축을 통한 국내 지진 특성을 규명할 계획이다.

자연재해인 지진 활동이 내재한 불확실성과 지진재해도 평가에서 고려되는 다양한 인적 불확실성을 저감하기 위해서 인공지능 기술을 접목한 지진재해도 및 부지 고유 지진하중 평가기술을 개발하고 있다.

확률론적 지진재해도 분석은 임의의 부지에서 지진에 의해 발생하는 지진동이 일정 크기를 초과할 수 있는 확률을 구하는 것이 목적이다. 일반적으로 확률론적 지진재해도 분석은 전체확률이론(total probability theorem)과 무작위추출이론(Monte Carlo approach)을 적용하는 두 방법이 존재한다.

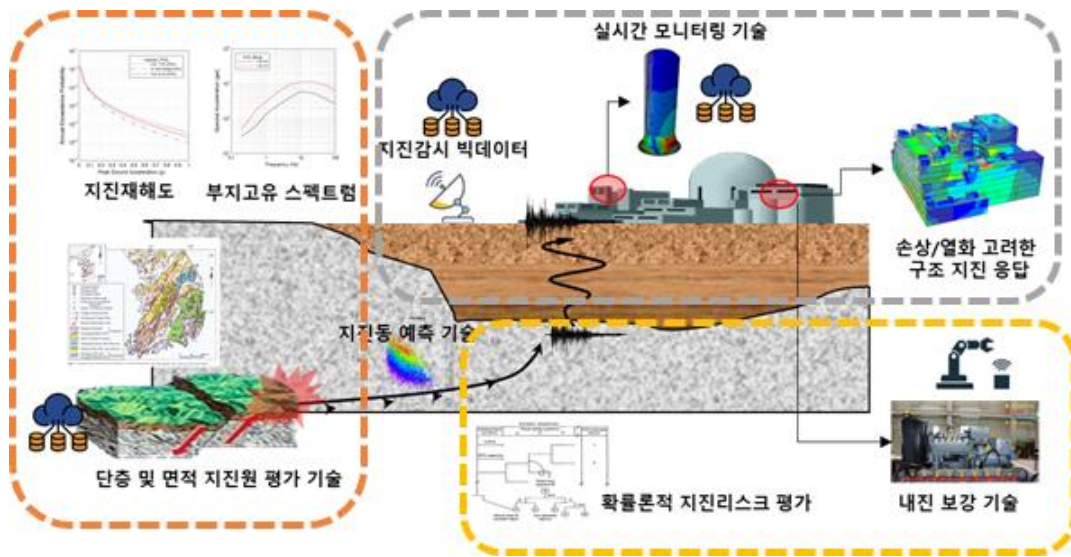


그림 2 설계초과 강진 대비 구조물/기기 안전성 향상 기술 개발 과제 모식도

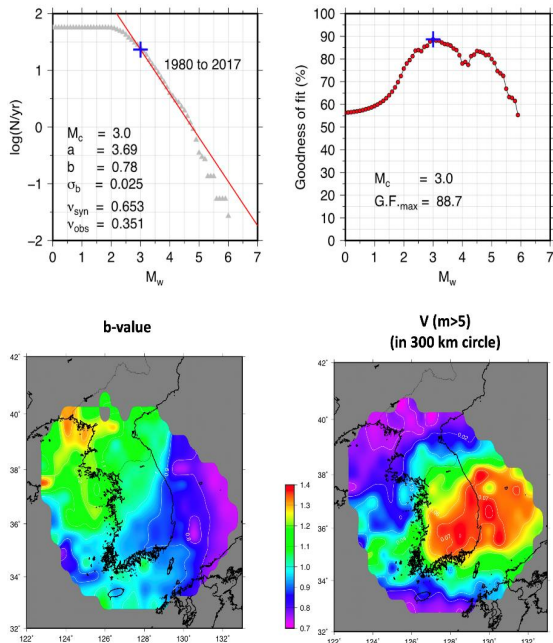


그림 3 국내 지반 특성 분석

지진재해도 분석에 필수적인 지진목록은 역사지진을 포함하더라도 대규모 지진의 긴 재현주기 특성을 온전하게 반영하지 못하는 근본적인 한계가 있기 때문에 Monte Carlo 방법을 이용하면 인공 지진목록 합성을 통해 불완전한 지진목록의 불확실성을 저감할 수 있다. 특히, Monte Carlo 방법은 국내와 같이 지진활동이 활발하지 않은 지역에 효과적으로 적용할 수 있다(그림 3, 4).

이와는 별도로 2016년 경주지진과 2017년 포항지진을 포함한 국내에서 발생한 모든 지진기록을 수집하여 빅데이터를 구성하고 빅데이터 기반으로 입력지진동 평가를 하는 기술을 개발하고 있다. 기존의 지진동 데이터 수집뿐만 아니라 적극적으로 스마트 센서를 개발하여 지진감시 센서에서 직접적으로 데이터를 처리하여 데이터 분석시간을 저감시킬 수 있는 기술 또한 개발하고 있다. 개발 중인 스마트센서와 현재 테스트를 진행 중인 모습을 그림 5에 제시하였다.

○ 실시간 지진대응 기술 개발

가동 원전에 설치되어 있는 실시간 지진 감시 계통을 활용하여 지진취약도 평가 및 지진 대응 기술을 수립하여 지진에 대한 대응 절차를 효과적으로 개선하고, 원전 구조물 및 기기의 지진 응답에 대한 빅데이터 구축과 AI 모델 개발을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 신규원전에 대해서는 동특성의 신뢰성을 향상시키며, 모드형상 식별이 가능하도록 최적의 센서 배치안을 도출하는 연구도 진행 중에 있다. AI 모델을 활용한 지진취약도 평가기술을 개발함으로써 강진시 손상기기를 빠르게 예측하고, 해당 기기를 선별 점검하여 조기 대응시간을 효과적으로 감소할 수 있을 것으로 판단된다(그림 6).

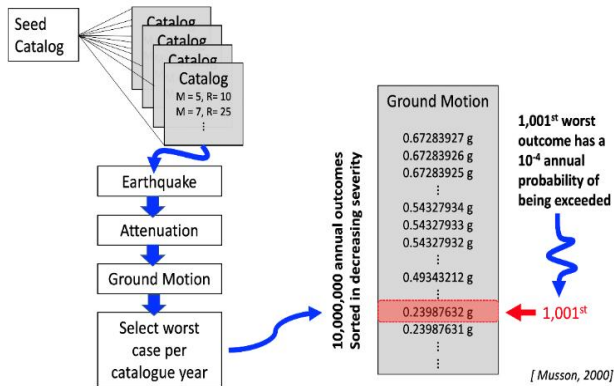


그림 4 MCS 적용 PSHA 기본 개념

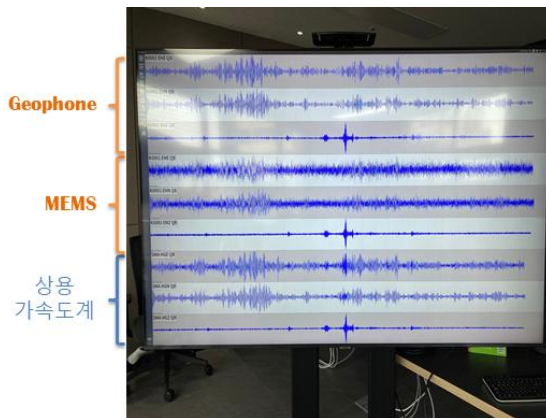


그림 5 스마트 지진감시 센서 제작 및 테스트 진행

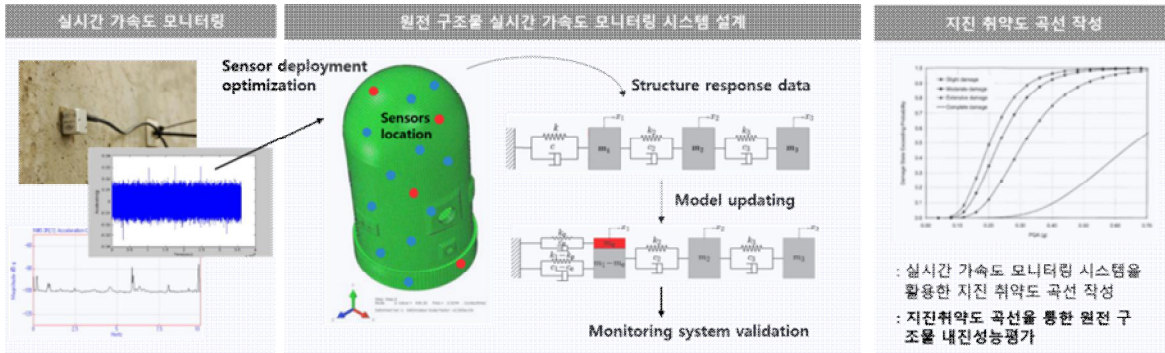


그림 6 실시간 모니터링 기반 지진취약도 평가 기술

○ 확률론적 지진안전성 평가기술 개발

확률론적 지진안전성 평가기술 개발 분야에서는 원전의 안전개선항목을 반영한 지진취약도 평가기술의 개발과 원전구조물의 열화를 고려한 지진취약도 평가방법의 개발을 목표로 하여 연구를 진행하고 있다.

2011년 후쿠시마 사고 이후 국내원자력발전소는 후쿠시마 후속조치 50건을 발굴하여 개선사업을 진행하였고 대부분의 조치가 이루어진 상태이다. 그러나 확률론적 지진안전성 평가에서는 많은 내용이 반영되어 있지 않으므로 실제 평가시에는 개선조치에 의한 안전성 향상효과가 반영되어 있지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 후쿠시마 후속조치를 통하여 개선된 사례를 조사하고 실제 현장 답사를 통하여 개선효과가 안전성 평가결과에 어떻게 반영될지에 대한 연구를 진행하고 있다.

또한 최근 원자력발전소에서는 격납건물 Steel Liner Plate 배면에서 다수의 공극이 발생하여 전체 원전에 대한 조사를 수행한 바 있다. 특히 한빛 34호기에서 다수의 공극이 발생하여 전수조사결과 수량을 파악하고 모두 보수보강을 거쳐 운영허가를 받은 바 있다. 그러나 격납건물 내부의 공극은 현실적으로 탐지가 어렵기 때문에 찾아내지 못한 공극이 또 있을 것으로 판단하고 있다. 이에 격납건물 공극을 비롯한 원전구조물의 열화에 의한 손상이 원전의 안전성에 미치는 영향에 대한 검토를 진행하고 있다. 공극의 크기가 크지 않기 때문에 실질적으로 공극에 의한 구조적인 영향은 크지 않을 것이 분명하지만 열화에 의한 영향을 정량적으로 분석하는 것은 원전의 안전성 확인 측면에서 반드시 필요한 사항이기 때문이다.

이 외에도 내진보강을 통하여 주요 구조물 및 기기의 내진성능이 향상되었을 때 원전의 지진리스크 향상효과를 정량적으로 도출할 수 있는 연구가 진행되고 있다. 이러한 연

구를 통하여 원자력발전소의 지진리스크를 열화를 고려하여 평가할 수 있고, 이를 바탕으로 최적의 보강방법과 보강기술을 제시하여 지진안전성을 향상시키며 향상된 효과를 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 맺음말

국내 원자력발전소는 우리나라에서 발생가능한 지진에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있다고 판단이 된다. 그러나 일부 내용에 대하여 그 안전성이 확인되지 않은 부분이 있고, 국민이 안심하는 수준이 높아진 만큼 더욱 더 안전성을 향상시킬 수 있는 연구개발이 필요한 상황이다. 이에 원자력연구원이 주도하여 2022년부터 5개년에 걸쳐 설계초과 지진에 대한 원자력발전소의 안전성 평가 및 향상기술을 개발하고 있다. 본 연구의 결과를 통하여 국내 가동 원전의 지진에 대한 안전성이 실질적으로 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 원자력발전소에 적용되는 지진관련 기술이 다른 일반 구조물의 지진안전성 평가 및 향상에도 적용되어 많은 사회인프라 시설의 지진안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 