

원자력 분야의 인공지능 활용

한국원자력연구원 인공지능응용연구실 유용균

1. 원자력분야의 인공지능 필요성

기후변화대응을 위한 온실가스 감축 정책의 영향으로 미래 에너지 계통이 크게 변화할 것으로 예상된다. 전통적인 화석 연료 기반의 발전 방식에서 벗어나 태양광, 풍력, 수력 및 지열과 같은 재생에너지가 확대됨으로서 온실가스가 감소하며 친환경적인 에너지 시스템으로의 전환이 예상된다. 원자력은 재생에너지와 마찬가지로 탄소 배출이 거의 없으면서 안정적이고 지속적인 전력을 공급할 수 있는 청정에너지원으로 앞으로 미래 에너지 계통에서 더욱 중요한 역할을 담당하게 될 것이 기대된다.

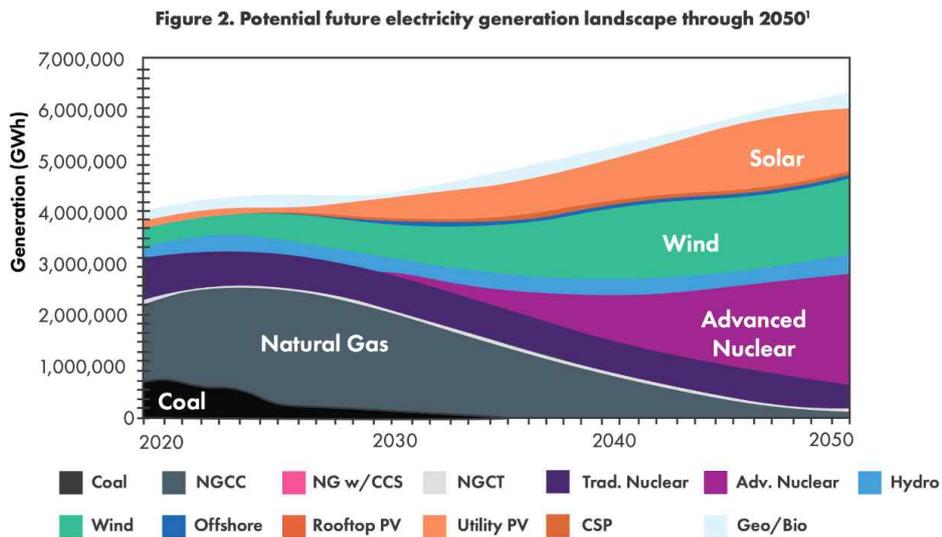


그림 1. 2050 세계 에너지 계통 변화¹⁾

1) 1. Vibrant Clean Energy LLC. "Role of Advanced Nuclear Technologies in Decarbonizing the U.S. Energy System." NEI Board of Directors presentation, Washington, D.C., May 2022.

에너지 계통의 변화는 원자력발전 분야에 여러 가지 도전적인 과제를 제시하고 있다. 예를 들어 재생에너지 비율의 증가에 따른 시시각각 변하는 전력수요에 맞춰 발전소의 출력을 빠르게 높이거나 낮춰 공급하는 부하추종 기술을 요구하고 있다. 또한 대규모 집중형 전원에서 분산전원 형태로 에너지 계통이 변화하면서 기존에 설치된 대형 원자력발전소 대신 소형모듈형원전(small modular reactor, SMR)에 대한 관심이 커지고 있다.

원자력발전은 연료비 등의 낮은 비용 때문에 주로 안전성 강화에 초점을 맞추어 기술 개발이 진행되었다. 그러나 미래의 에너지 경쟁에서 원자력이 타 에너지원과의 경쟁력을 유지하려면 안전성과 함께 경제성도 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 SMR 등의 차세대 원자로에서는 안전성뿐만 아니라 경제성 향상이 주요 목표가 되고 있다.

영국의 원자력산업 분야는 디지털 기술의 도입을 통해 신규 원전의 건설 및 전력 판매 비용을 30% 절감하겠다는 계획을 발표하였다²⁾. 한편 미국은 GEMINA 프로젝트를 진행하면서 인공지능, 선진 제어 시스템, 예측 기반 유지보수, 그리고 모델 기반의 결함 탐지 기술을 활용하여, 전력 생산의 주요 비용 요소인 운영 및 유지보수 비용(O&M)을 현재의 13\$/MWh에서 2\$/MWh 이하로 감소시키려는 목표를 가지고 있다³⁾. 이러한 움직임은 원자력산업이 에너지 시스템의 변화하는 요구사항에 부응하면서, 동시에 안정성과 경제성을 강화하기 위한 노력의 목적으로, 인공지능과 디지털트윈 같은 디지털 기술의 활용에 크게 주목하고 있다.

2) http://www.e-kna.org/web/home.php?go=Emenu_01&num=4255

3) <https://www.energy.gov/ne/articles/3-early-stage-rd-programs-transforming-nuclear-industry>

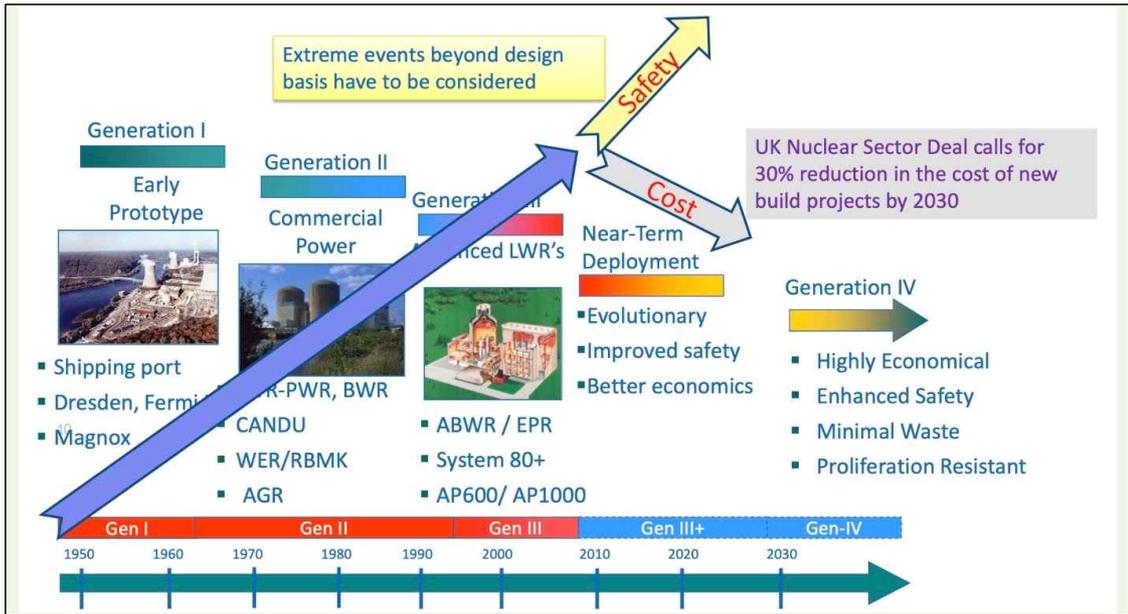


그림 2. 차세대 원자력발전소의 디지털 전환의 중요성⁴⁾

2. 문제해결 방법론 관점에서의 인공지능 활용

인공지능의 정의는 다양한 시대와 학자들에 따라 여러 가지로 제시되었으나, 1980년대 이후로는 사용자의 의도에 따라 특정 환경에서 최적으로 동작하는 시스템 구축을 중심으로 이해되고 있다. 현대 인공지능의 가장 핵심적인 기술은 바로 '기계학습'이다. 이는 프로그램 코드를 통해 직접 지시된 행동이 아닌, 데이터를 통해 기계가 스스로 학습하고 동작하는 알고리즘을 연구하는 분야를 지칭한다.

기계학습을 좀 더 간결하게 설명하자면, 데이터를 바탕으로 특정 함수를 형성하고 그 함수를 통해 미래의 데이터나 상황을 예측하는 방법론이다. 널리 알려진 응용 예로, 주어진 사진이나 음성 데이터를 분석하여 특정 사물을 구분하거나 음성을 해석하거나 텍스트 데이터를 활용한 감정 분석이나 사용자의 구매 기록을 통한 추천 시스템 구축 등이 대표적이다.

원자력발전소에는 많은 데이터와 안전을 위한 기능이 존재하므로 많은 분야에 인공지능 활용될 수 있다. 먼저 인공지능의 기술 영역인 영상 및 음성 인식 기술은 원자로의 안

4) 자료: Gen4 International Forum, AI in Support of the Nuclear Energy Sector (2022).

전한 운영에 적용될 수 있다. 하나로 원자로와 같은 연구로에는 노심의 상태를 지속적으로 모니터링하는 것이 중요하므로 원자로 노심을 감시하기 위한 CCTV와 같은 영상장비가 설치되어 있다. 그러나, 운전원이 24시간 내내 이 영상을 지속적으로 모니터링하는 것은 인력과 시간 면에서 매우 비효율적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 인공지능 기술을 통해 원자로의 영상에서 미세한 기포 발생과 같은 비정상 상황을 실시간으로 탐지하는 시스템이 개발되었다.

또 다른 흥미로운 활용 예로 핵반응이 일어날 때 발생하는 특징적인 푸른 빛, 체렌코프 방사(Cherenkov Radiation)를 활용하여 원자로의 출력을 예측하고 상태를 모니터링하는 시스템을 도입할 계획이다. 이를 통해 원자로의 안전성을 더욱 강화하고 효율적인 운영이 가능하게 될 것이다.

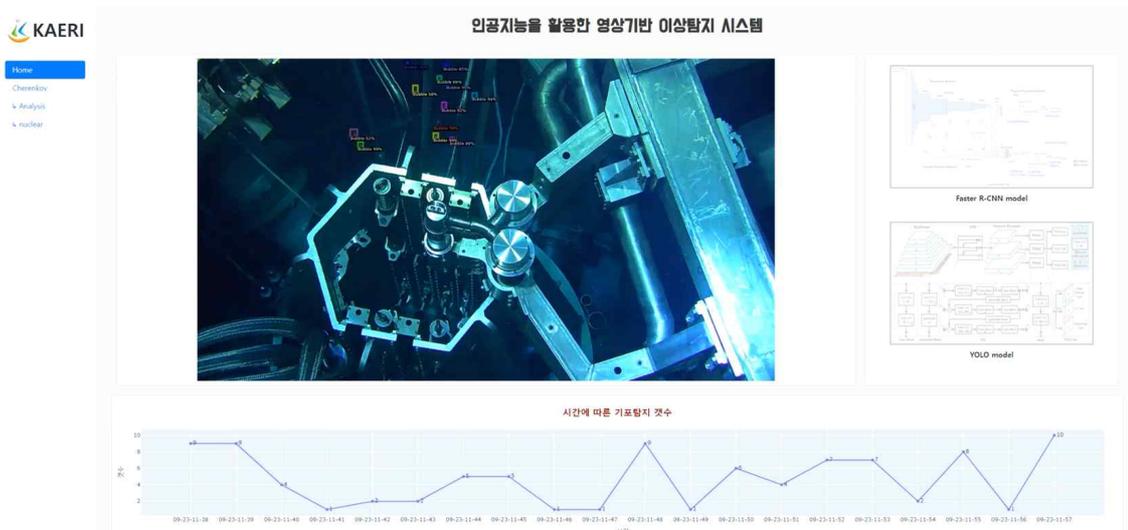


그림 3. 하나로 원자로 CCTV 상태감시 시스템

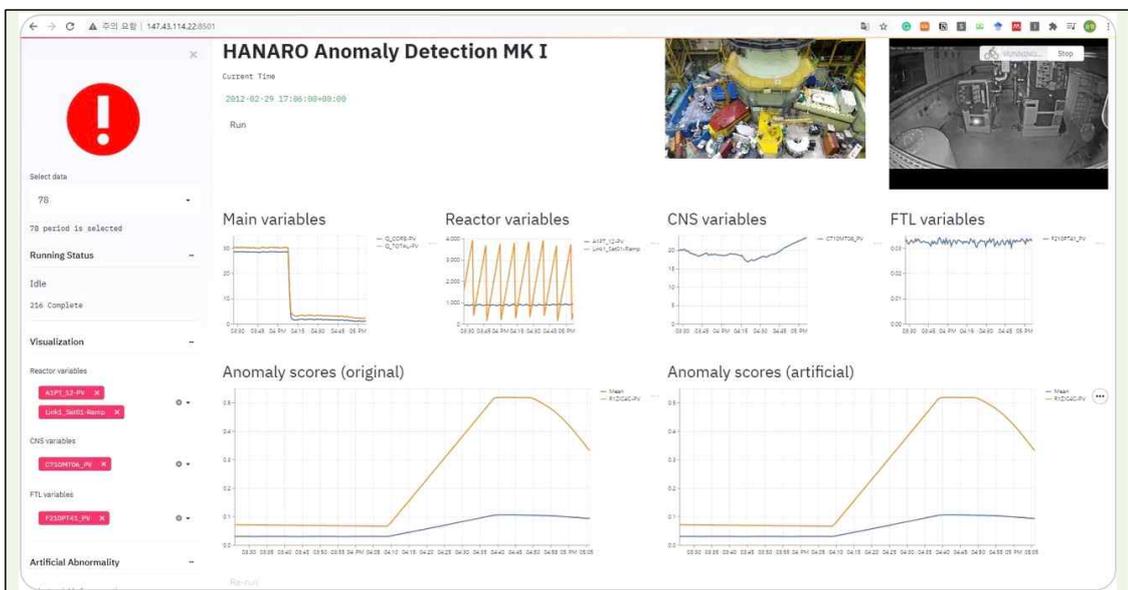
인공지능은 데이터를 활용한 새로운 수학적 방법론으로 볼 수 있으며, 이러한 관점에서 다양한 분야에 그 응용 가능성을 발견할 수 있다. 그 중에서도 복잡한 데이터 패턴을 찾아 활용하는 것이 대표적인 사례이다.

예컨대 원자로 운영 과정에서는 실시간으로 수백에서 수천 개의 계측 데이터가 생성된다. 이런 방대한 데이터 속에서 원자로의 상태를 규칙 기반 알고리즘이나 인간이 판별하는 것은 어려운 일이다. 그러나 인공지능을 이용하면, 다양한 계측 데이터와 그들 간의 상호작용을 분석하여 원자로의 비정상 상태를 탐지하거나 예측하는 것이 가능하다.

하나로원자로에서는 온도, 압력, 유량, 방사선량 등 수백개 이상의 계측신호가 실시간으로

로 측정되고 있다. 이러한 신호를 실시간으로 분석하여 원자로의 이상을 사전에 감지하는 이상탐지 시스템을 도입하였다. 원자로의 이상 상황 데이터는 극도로 부족하기 때문에, 정상 상태의 데이터로 인공지능 모델을 학습시켜 정상 패턴을 파악한다. 이후, 이 모델을 통해 새로운 신호의 정상성을 판단하는 비지도 학습 기반의 이상 탐지(anomaly detection) 방식을 적용하였다.

이러한 인공지능 기반 접근법은 원자로의 이상 상황을 사전에 예측하고, 그로 인한 원자로의 가동 중단없이 선제적 대응을 가능하게 한다. 실제로 하나로 원자로의 과거 운전 데이터에 적용해보았을 때 다수의 이상상황을 미리 감지할 수 있었다는 결과를 얻었다.⁵⁾

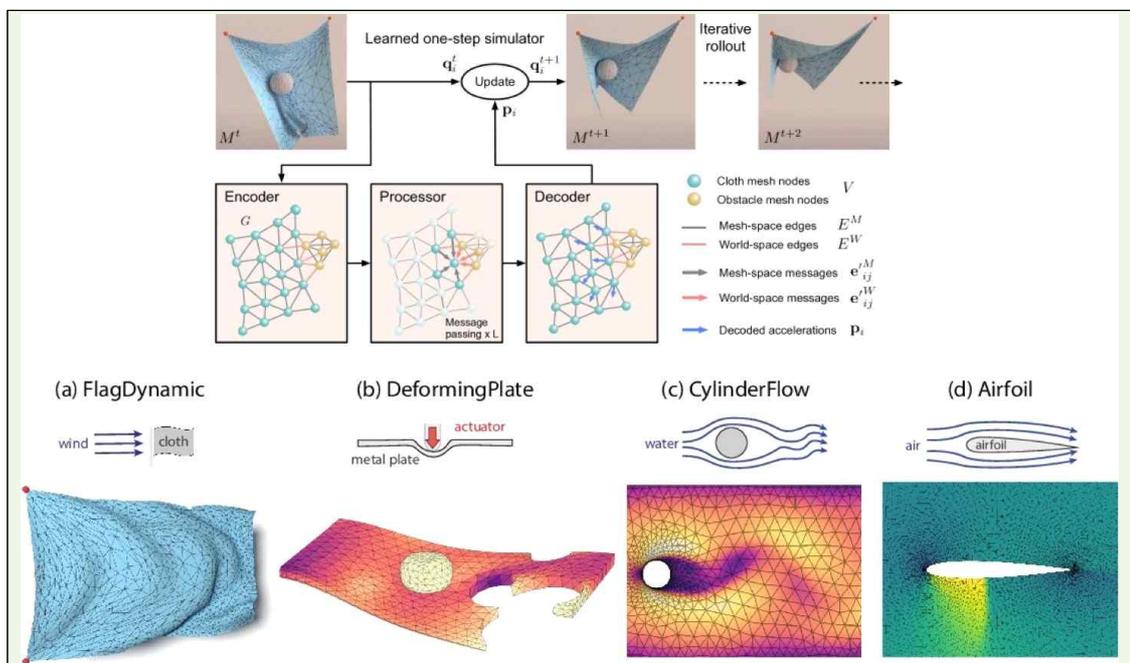


[그림 4] 하나로원자로에 도입된 인공지능 기반 이상탐지 시스템

인공지능 기술은 데이터를 이용하여 원자력분야에 필요한 다양한 수치해석 방법론을 개선하기 위해서 활용될 수 있다. 최근 PDE (Partial Differential Equation)을 효과적으로 풀기 위해서 인공지능 기술을 도입하거나 정해진 영역에서 과거 해석 데이터를 활용하여 이후 해석을 보다 빠르게 하는 근사 모델링 (Surrogate modelling)이 대표적인 응용 사례이다. 최근에는 PINN(Physics Informed Machine Learning)과 같이 인공신경망에 데이터 뿐만 아니라 알려진 물리법칙이나 휴리스틱한 규칙을 활용하는 방법론에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 한편 보다 유연한 공간에 적용되기 위하여 Point Cloud 기반 인공신

5) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573322004909>

경망을 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) 시뮬레이션에 적용하거나 GNN(Graph Neural Network)를 이용하여 Mesh 기반 해석에 인공지능을 도입하려는 시도가 주목을 받고 있다. 이러한 방법론 들은 원자로 설계과정에서 복잡한 다물리 현상을 빠르고 정확하게 시뮬레이션하는데 도움을 주며 이를 통하여 원자로의 성능을 최적화할 수 있다. 또한 원자로를 운영하는 과정에서 원자로 내부의 핵반응 분포, 기기 상태 등을 실시간으로 모니터링하거나 사고대응을 미래를 예측하기 위한 시뮬레이션 가속화에 활용되고 있다.



[그림 5] 딥마인드의 Mesh Based Simulation 연구⁶⁾

3. 시스템 관점에서의 인공지능 활용

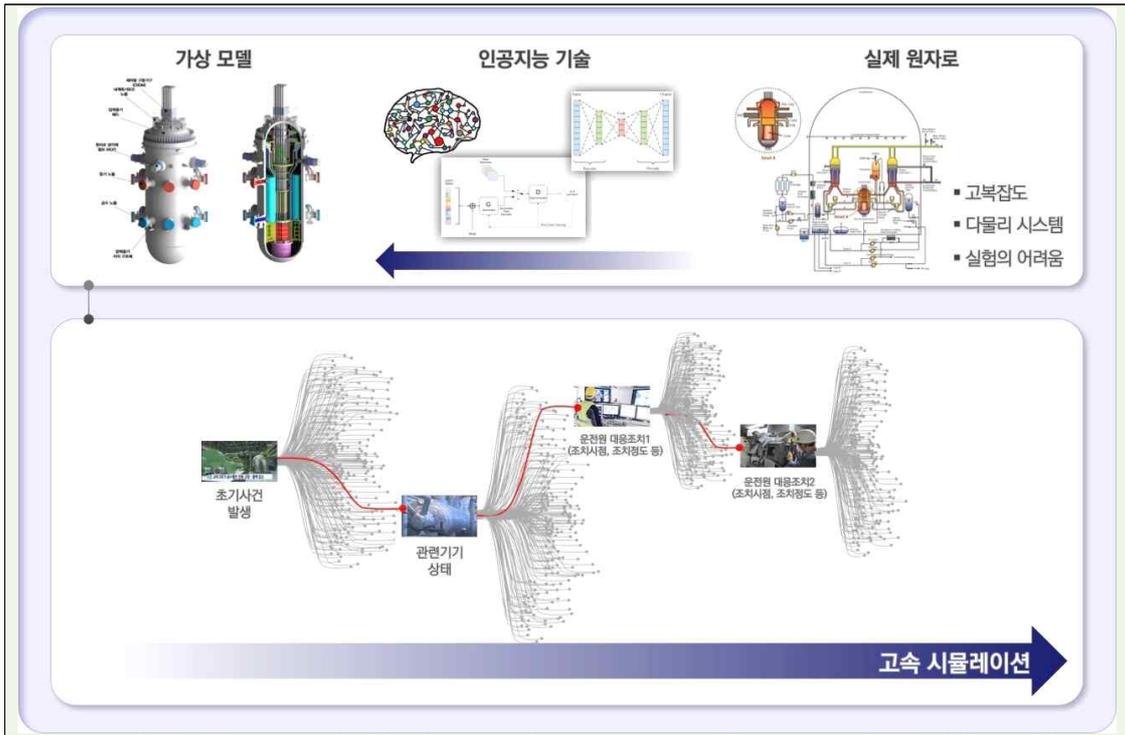
인공지능을 '합리적인 행동을 하는 시스템'으로 정의한다면, 그 목적은 주어진 환경 속에서 최적의 결정 및 행동을 도출하는 시스템을 개발하고 최적화하는 것으로 설명할 수 있다. 이러한 관점에서 원자력 분야에서 인공지능이 효과적으로 활용된 대표적인 사례는 원자로의 더 안전하고 효율적인 운용을 도와주는 인공지능 기반 운전원의 예를 들 수 있다.

6) Deepmind, Mesh based Simulation, ICLR (2021), <https://sites.google.com/view/meshgraphnets>

인공지능 운전원이라는 시스템을 개발하는 관점에서 인공지능의 요소 기술에 대해서 설명하고자 한다. 원자로의 효율적 운영을 도와주는 이러한 인공지능 시스템의 중심에는 '인식'과 '판단'이라는 두 핵심 기능이 있다. '인식'은 음성이나 이미지, 비디오와 같은 데이터에서 기계학습과 딥러닝 기술을 통해 패턴과 규칙을 탐색하는 과정을 포함한다. 이와 관련하여, 2장에서는 CCTV 모니터링, 이상행동 탐지, 그리고 시뮬레이션 가속화와 같은 '인식' 기능의 실제 활용 사례들을 소개하였다.

우리는 의사결정을 하기 전에 많은 경우의 수를 상상한다. 자동차 운전의 예를 들면 인공지능이 의사결정을 지원할 때도 단순한 패턴 인식을 넘어 미래의 상황을 예측하고 상상할 수 있는 능력이 필요하다. 예를 들어 자동차를 운전하는 상황에서 속도나 방향을 조절하기 위해 다양한 정보를 기반으로 여러 가능한 결과를 상상하며 핸들과 페달을 조작한다. 여기서 '디지털트윈'은 미래를 상상하기 위한 도구 역할을 한다.

원자로에서 사고 상황이 발생했을 때를 생각해보자. 이때 대응책을 결정하기 위해서는 지금의 상황뿐만 아니라 미래의 상황을 신속하게 예측하는 능력이 요구된다. 디지털트윈은 실시간으로 갱신되는 원자로의 상태정보를 바탕으로 미래 사고 상황을 빠르게 예측한다. 다양한 대응 시나리오와 디지털트윈을 통하여 예측된 결과를 바탕으로 최적의 대응 방안을 결정하여 원자로를 안전하게 제어할 수 있다.



[그림 7] AI기반 사고해석 시뮬레이터를 이용한 사고대응 시스템

아래는 하나로원자로에 인공지능 기술을 도입한 냉각수 온도조절 시스템을 보여주는 그림이다. 원자로의 냉각수 온도 조절은 출력, 유량, 온도와 같은 운전 상태뿐만 아니라 외부 환경의 온도와 습도 등의 정보를 고려하여 이루어진다. 이를 위해 원자로 시스템의 물리 모델, 즉 디지털트윈을 바탕으로 외부 환경을 반영한 온도 변화를 예측하고 인공지능은 최적의 냉각탑 팬의 속도를 운전원에게 제시하게 된다.

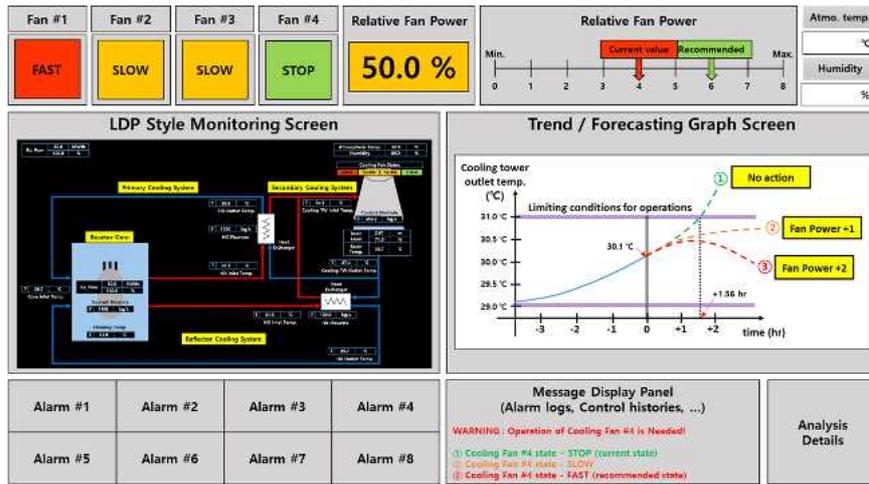
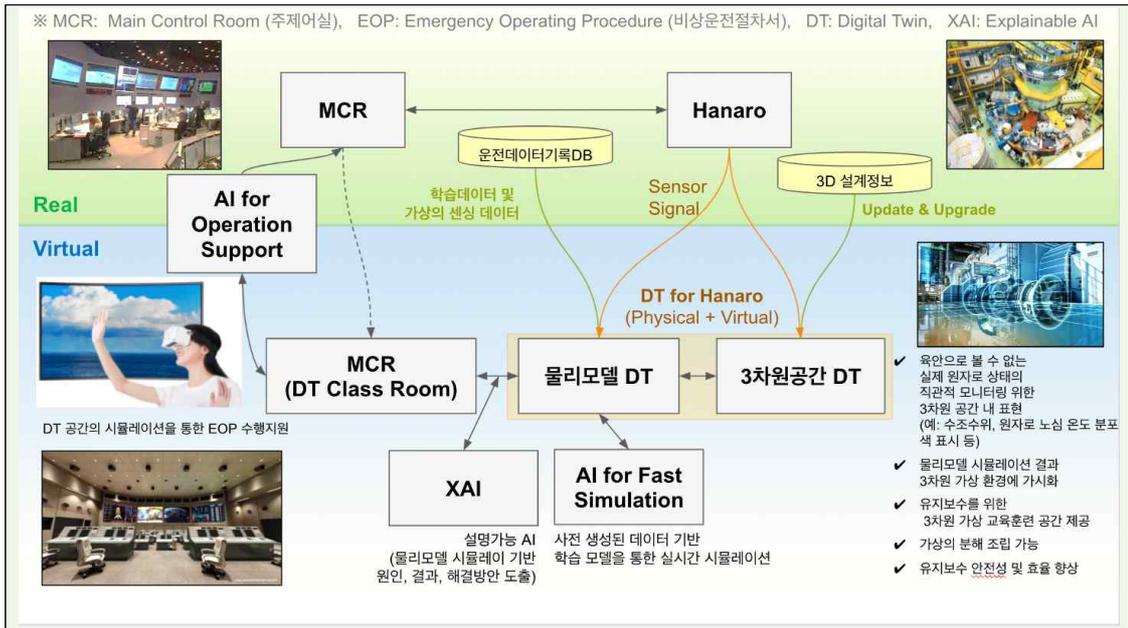


그림 6. 하나로원자로 냉각수 온도조절 시스템

디지털트윈은 인공지능을 통한 의사결정의 핵심적인 요소이고 한편으로 인공지능은 디지털트윈이 우리가 원하는 물리적 현상을 빠르게 시뮬레이션하는데 중요한 역할을 한다. 사전에 해석 및 실험을 통해 구축된 데이터와 딥러닝을 활용한 대리 모형(Surrogate Model)은 복잡한 다물리 현상을 신속하게 시뮬레이션하는 데 있어 큰 계산 자원을 절약하게 해준다. 원자력연구원은 이러한 디지털트윈 기술을 활용하여 하나로원자로의 안전성과 효율성을 높이는 동시에 운전원들의 훈련에도 큰 도움을 제공하는 것을 목표로 하고 있다.



[그림 8] 디지털 하나로 원자로 개념

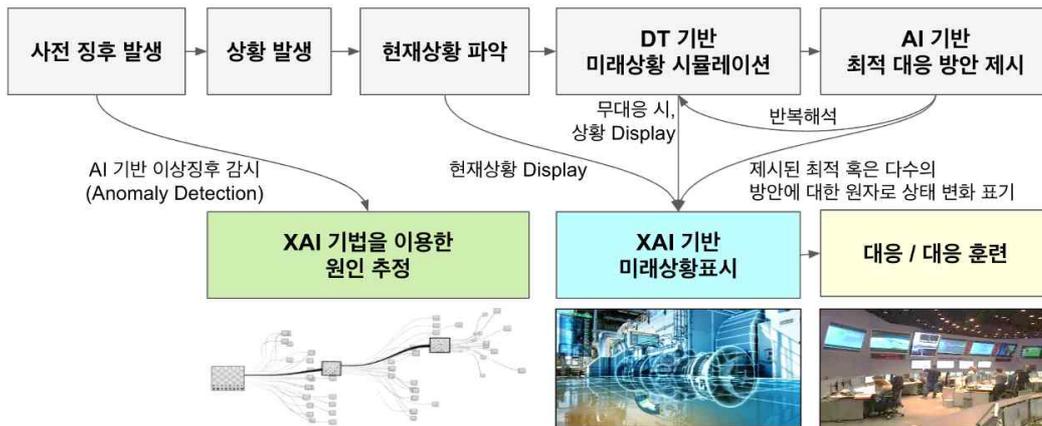


그림 9. 인공지능 기반 원자로 사고대응 시스템

4. 거대인공지능모델의 활용방안

인공지능(AI)은 지난 수십 년 동안 지속해서 진화해왔다. 이 진화는 기술적 발전, 컴퓨팅 능력의 증가, 데이터양의 확장 등 다양한 요인에 기반하였다. 이러한 변화의 흐름을 크게 수작업 지식(Handcrafted Knowledge), 통계적 학습(Statistical Learning), 그리고 콘텍스트 AI(Contextual AI) 세 가지 파도로 구분할 수 있다.

최근 우리가 직면한 세 번째 파도는 ChatGPT와 같은 기초 모형(Foundation Model)로 대표되는 Contextual AI이다. ChatGPT와 같이 특정한 작업(task)을 수행하기 위해서 개발된 것이 아니라 다양한 기능을 수행하는 거대인공지능 모델을 기초 모형이라고 부른다. 기초 모형은 재학습 과정이 없이도 약간의 튜닝과정이나 프롬프트 조정을 통하여 많은 데이터 없이도 다양한 분야에서 기존 인공지능 모델의 기능을 뛰어넘는 성능을 보인다. 또한 다양한 기초 모형은 API(Application Programming Interface)제공하여 코드 레벨에서 활용이 가능하므로 다양한 목적의 어플리케이션에 커스토마이징이 가능하다. 기초 모형의 성능이 기존 인공지능 모델을 뛰어넘고 API(Application Programming Interface)를 활용하여 쉽게 활용할 수 있게 되면서 인공지능 기술의 진입장벽이 낮아지고 이제 누구나 최신 인공지능 기술을 쉽게 활용할 수 있는 시대가 오고 있다.

원자력연구원은 언어 기초 모형을 활용하여 내부 규정을 이해하여 복잡한 질의의 답하는 챗봇을 개발하고 있다. 기존의 언어모형을 활용한 질의응답 시스템은 정보의 맥락을 이해하여 답변하는 성능이 부족하였다. ChatGPT와 같은 거대언어모델은 주어진 정보의 고차원적인 의미를 이해하여, 사용자의 질문을 더욱 근본적으로 파악하고 구체적인 답변을 제공하는 능력을 제공한다. 단, 현재 거대언어모델은 입력받을 수 있는 정보의 양이 제한되어 있으므로⁷⁾ 많은 양의 규정 정보를 모두 입력으로 사용할 수 없다. 따라서 입력 한계 크기에 맞게 질문에 관련된 규정 정보를 추출된 이후에 질문에 답변을 하게 된다.⁸⁾ 이러한 기능의 챗봇을 개발하기 위하여 불과 일 년 전까지만 하더라도 막대한 비용이 필요하였으나 기초 모형과 API(Application Programming Interface)를 활용하여 누구나 적은 노력으로 자신만의 챗봇을 개발하는 것이 가능하다.

보안에 민감한 정보를 활용하기 위하여 거대인공지능 모델의 기능을 대체할 수 있는 자체 언어모델⁹⁾의 개발하고 있으며, 원자력 문서를 위한 전용 언어모델을 통하여 원자력 분야의 문서 작성, 질의응답, 검색 등의 기능을 수행하는 인공지능 모델을 개발하고 있다.

7) GPT4의 경우 최대 32768 토큰

8) RAG(Retrieval Augmented Generation)

9) sLLM(small Large Language Model)

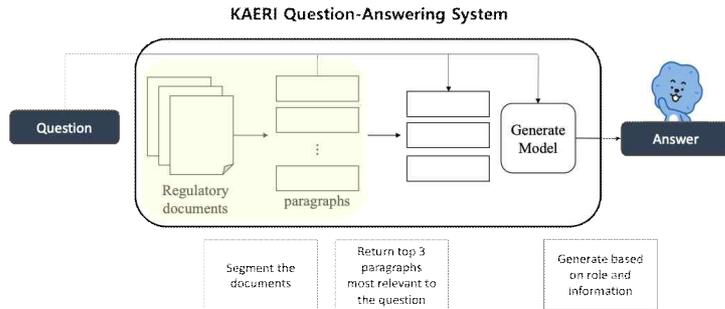
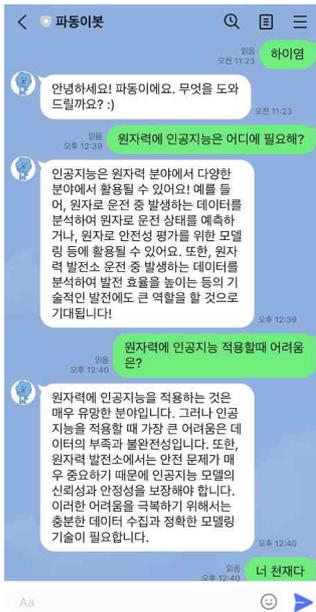


그림 10. 원자력연구원의 업무지원 챗봇 (파동이봇)

그림 11은 원자로의 자율 운전을 가능하게 하는 인공지능 시스템을 도식화한 것으로, 여기에는 앞서 소개한 거대인공지능, 디지털트윈, 고전적인 기계학습 기술이 포함되어 있다. 이 시스템은 먼저 고전적인 기계학습 방법론을 활용하여 다양한 데이터 패턴을 분석함으로써 원자로의 현재 상태를 정확히 파악한다. 이어서 디지털트윈을 통해 원자로의 미래 상태와 발생 가능한 시나리오들을 예측한다. 마지막 단계에서는 거대인공지능 모델이 운전원과 소통하며 원자로 운전 절차와 지침을 이해하고, 디지털트윈에서 얻은 예측 결과를 바탕으로 원자로를 안전하고 효율적으로 운영하기 위한 운전원의 의사결정을 지원한다. 거대인공지능 모델은 더 안전하고 경제적인 미래 원자력 기술 발전에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

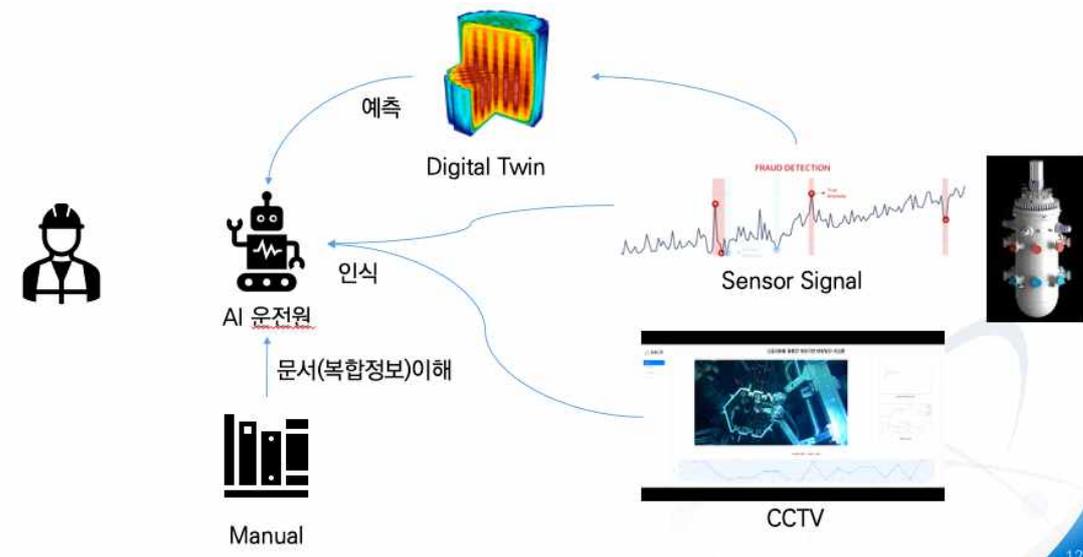


그림 11. 거대인공지능 모델을 활용한 원자로 자율운전 시스템

5. 원자력분야의 인공지능 한계

앞서 서술한 것과 같이 인공지능 기술은 원자력 분야에서 유지보수, 안전 모니터링, 시뮬레이션 등 다양한 영역에서 획기적인 발전을 가져올 것이 기대된다. 하지만 원자력발전소는 그 특성상 작은 오류도 큰 문제로 이어질 수 있는 곳이기 때문에, 인공지능 도입에 있어서는 매우 신중한 접근이 필요하다. 원자력발전소에서 인공지능을 인간을 100% 대체하는 의사결정 기계로 사용하기에는 아직 많은 한계가 존재한다.

현재 인공지능 기술의 가장 큰 한계 중 하나는 데이터에 대한 의존성이다. 인공지능 알고리즘은 대량의 데이터를 필요로 하며, 데이터의 질과 양이 결과의 정확성에 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어 데이터가 편향되거나 오류를 포함하고 있다면, 이는 AI가 잘못된 판단을 내릴 수 있는 원인이 된다. 원자력 분야에서는 특히 고도로 정확하고 세밀한 데이터가 필요하지만, 사고상황과 같은 비정상 상황에 대한 데이터를 충분히 확보하기 어렵다.

또 다른 문제는 인공지능의 '블랙 박스' 특성이다. 인공지능의 의사결정 과정은 때때로 추적하기 어려울 정도로 복잡하여, 인공지능이 어떤 근거로 결정을 내렸는지 인간이 이해하기 어려운 경우가 많다. 원자력과 같이 높은 수준의 안전이 요구되는 분야에서는 어떠한 상황에도 인공지능 시스템이 사용자가 의도한 대로 동작한다는 것이 증명되어야 하므로 단순한 인공지능의 정량적인 성능 평가를 넘어서야 한다.

인공지능은 또한 지속적인 학습과 개선을 필요로 하는 '동적 시스템'이다. 원자력 시설과 같은 복잡한 시스템에서, 인공지능이 새로운 상황이나 이전에 볼 수 없던 문제에 직면했을 때 적절히 대응하지 못할 수도 있다. 이러한 한계로 인해 중요한 상황에서 인공지능의 잘못된 판단을 통하여 원자로의 위험한 상황을 초래할 수 있다.

이러한 한계점들은 인공지능이 원자력 분야에서 실질적으로 적용되기 위하여 극복해야 할 과제들이다. 인공지능의 장점을 인정하는 것과 동시에, 이 기술의 취약점을 인식하고, 기술을 발전하여 보다 안전하고 효과적인 활용 방안을 모색하는 것이 중요하다. 예를 들어 인공지능기술의 신뢰성을 높이기 위하여 설명가능한 인공지능(explainable AI, XAI)의 기술발전이 필요하며, 데이터의 편향문제를 보완하기 위하여 인공지능의 판단의 신뢰성을 사전에 예측(Uncertainty Estimation)하는 기술이 필요하다. 예를 들어 인공지능이 원자

로의 이상을 발견하고 대응 방법을 제시할 때 판단의 근거를 명확하게 설명할 수 있어야 하고, 확신이 서지 않는 경우 운전원이 이를 인지할 수 있어야 한다. 또한 가상데이터 생성과 디지털트윈을 활용하여 데이터 부족 문제를 해결할 수 있는 연구가 필요하다. 마지막으로 인공지능의 결정에 대해 인간이 최종적으로 확인하고 승인하는 시스템을 구축함으로써, 인공지능의 판단을 과도하게 신뢰하지 않고 인간과 상호보안적으로 최적의 판단을 내릴 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 이렇게 개발된 인공지능 시스템이 실제로 원자로에 적용되기 전에 엄격한 테스트와 검증과정을 거쳐야 하며 이 과정을 위한 기술 표준이 제정될 필요가 있다.

위와 같이 원자력 인공지능의 한계를 극복하기 위한 연구개발과 엄격한 검증 시스템이 구축된다면, 비로서 안전에 직접적으로 연관된 원자력분야에도 인공지능 기술이 적용될 수 있을 것으로 기대된다.