

원전 과도상황 인지를 위한 조기 경고

박재관*, 김택규*, 성승환*, 구서룡*

*한국원자력연구원

jkpark183@kaeri.re.kr, taekkyukim@kaeri.re.kr, shseong@kaeri.re.kr, srkoo@kaeri.re.kr

Early Warning for Transient Recognition at Nuclear Power Plants

Jaekwan Park*, TaekKyu Kim*, SeungHwan Seong*, SeoRyong Koo*

*Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

최근 고도화 되고 있는 인공지능 기술은 복잡한 데이터 속에서 내재된 인사이트를 발견하여 상태 변화를 진단하고 예측하는데 활용되고 있다. 이러한 첨단 기술을 활용하여, 원자력 발전소에서 공정상태가 비정상 또는 비상 상태로 악화되기 전에 운전원이 인지할 수 있다면 공정상태를 정상으로 회복하는데 도움을 줄 수 있다. 이 논문에서는 공정상태 판단을 위한 딥러닝 모델을 활용하는 지능형 조기 경고 개념을 제안한다. 공정상태의 변화 추세를 예측하는 목적으로 사용하는 지능형 조기 경고는 기존 경보 보다 단순화된 상태 천이 메커니즘을 사용하여 운전원의 부담이 증가하지 않도록 한다. 또한, 사고 시나리오 데이터로 딥러닝 모델로 학습하고 지능형 조기 경고 화면을 구현하여 운전원을 지원하기 위한 구현방향을 제시한다.

1. 서론

원자력 발전소에서는 운영 중에 문제가 발생하여 비정상 또는 비상 상태가 발생한 경우에 경보(Alarm)가 표시되고 해당 대응절차서에 따른 운전원의 조치가 이루어진다. 이것은 사전에 정의된 설정값(set-point)을 넘어선 비정상 또는 비상 상태를 맞이한 후에 운전원이 대응하는 방식이므로 선제적 상황인지 및 대응은 어렵다. 이에 따라, 비정상 또는 비상 발생으로 진행되는 과정을 의미하는 과도상황에서 이상상태를 조기에 감지하고, 운전원의 대응을 지원하기 위한 기반기술 개발이 요구된다. 과도상황 탐지 기술은 선제적 문제 인지를 위한 운전원의 업무 부담을 경감하고 운전원의 의사 결정을 지원함으로써 과도상황을 극복하고 효율적인 운전 운영을 통해 원전의 안전성을 향상시킬 수 있다. 최근, 고도화되고 있는 인공지능 기반 진단 및 예측 기술은 복잡한 데이터 속에서 내재된 인사이트를 찾아내어 데이터로부터 상황의 변화를 파악할 수 있다.

최근 원전 분야에서 딥러닝 기술을 활용하여 확률 기반으로 원전의 상태를 진단하는 연구들이 소개되고 있다[1-5]. 본 논문에서는 이러한 첨단 진단 및 예측 기술을 활용하여 원전 상태 변화를 조기에 인지하여

운전원의 대처에 도움을 줄 수 있는 조기 경고(Early Warning)를 제안한다. 또한, 운전원에게 조기 경고를 제공하기 위한 화면 인터페이스를 디자인하고 시범 사례로 구현된 결과를 소개한다.

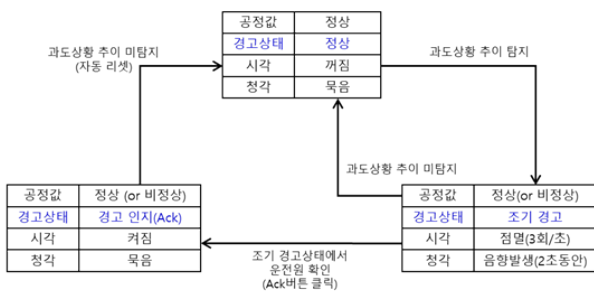
2. 지능형 조기 경고

원전에서의 경보[6]는 계측신호에 따른 규칙(Rule) 기반으로 사전에 정의된(Predefined) 로직에 의해 참 또는 거짓으로 판정되며 높은 신뢰도를 갖는다. 각 경보에 대해서 대응 절차서가 준비되고 엄격한 대응 조치가 수행된다. 인공지능 기반 진단은 기존의 규칙 기반의 경보와 달리 확률 기반으로 판정한다. 인공지능 기술이 최근 빠르게 발전하고 있으나, 기존 규칙 기반 판정의 신뢰도에는 아직까지 도달하지는 못하고 있다. 적용 사례에 따라, 매우 높은 정확도를 보이기도 하지만 특정한 경우에는 상대적으로 낮은 정확도를 보이기도 한다. 특히, 잘못된 경보는 운전원에게 큰 혼동을 줄 수 있기 때문에, 인공지능 진단 결과를 경보와 동등하게 제공하는 것은 아직 적합하지 않을 수 있다.

그렇다 하더라도, 최근 딥러닝과 같은 인공지능 기술은 사람이 눈으로 확인하지 못하는 데이터 속에 숨

겨진 특성을 파악할 수 있어서 사람의 역할을 보조하는 사례가 급속히 증가하고 있다. 자율주행 자동차에서의 운전지원이나 의료분야에서의 엑스레이 분석지원과 같이 이미 실생활에 잘 활용되고 있는 분야도 있다. 따라서, 원전 분야에서도 현재의 기술발전 수준에서 인공지능 기술을 적용적으로 활용하기 위한 단계적인 접근법이 필요하다. 즉, 인공지능 모델에 의한 데이터기반 지능형 진단 결과를 기존 정보 보다는 다소 낮은 엄격함과 주목도를 가진 개념으로 운전원에게 제공할 필요가 있다. 이러한 개념으로써 “지능형 조기 경고(Intelligent Early Warning)”를 정의할 수 있다. 지능형 조기 경고는 즉각적인 조치를 필수적으로 동반하지는 않지만, 원전의 상태가 정상에서 점차 벗어나고 있는 추세 변화를 운전원에게 알림으로써 정상상태로 다시 회복하는지 예의주시, 경고 발생을 사전에 대비, 경고 발생을 적극적으로 방지하는 등의 운전원의 대응 조치를 보조할 수 있다. 이러한 개념 도입을 통해, 비정상 정지를 운전원이 사전에 감지하여 원전을 안전하게 관리하는데 도움을 줄 수 있고, 더 나아가 비정상 정지를 줄이는데 기여할 수 있다.

아직 원전 분야에 적용 사례가 없고, 신뢰도의 지속적인 개선이 요구되는 지능형 조기경고에 기존의 경고 메커니즘을 그대로 사용하기는 어렵다. 상대적으로 덜 긴급한 과도상황을 위한 조기 경고는 록-인(Lock-in)과 같은 운전원의 수동 조작을 필수적으로 요구하지 않는 형태로써, 정보보다 더 간단한 상태 변화로 관리하는 것이 적합하다. 이 논문에서 제안하는 조기 경고 상태 제어 시퀀스는 그림 1 과 같다.



(그림 1) 조기 경고의 상태 천이도

정상상태에서 운전 중에 과도상황이 조기에 탐지될 경우, 경고상태는 “조기 경고”로 변하면서 시각 및 청각 알림이 개시된다. 이때의 원전 공정 변수들의 상태는 일부 비정상이거나 여전히 아직 정상 상태일 수 있다. 이것이 기존 정보와는 다른 점으로써, 기존 정보는 비정상 상태일 때 진입한다. 운전원이 확인 버튼(Ack)을 통해 이를 인지하게 되면 경고상태는 “경고 인지”로 변하게 되며 칼러 코딩은 켜짐 상태로 표시하고 음향은 목음 상태가 된다. 이후, 과도상

황이 변하여 진단 시스템에 의해 정상화 추이로 진단 되면 기존 정보와 달리, 운전원의 개입없이 경고상태는 “정상”으로 자동 복귀한다.

즉, 조기 경고 상태는 정상, 조기 경고, 운전원 인지(Ack)로 나뉠 수 있고, 운전원은 조기 경고를 묵음(Silence), 인지(Acknowledge), Reset(복귀), 시험(Test)으로 제어할 수 있다. 조기 경고의 시각 및 청각 코딩은 원전에 적용되는 기존 스타일 가이드와 일관성있게 설계되어야 한다. 기존 경고 메커니즘에서 사용되는 시각 코딩과 유사하게 조기 경고(Unack) 상태에서는 점멸(예: 3 회/초 점멸), 운전원 인지(Ack) 상태에서는 점등으로 표현할 수 있다. 청각 코딩은 조기 경고(Unack) 상태에서는 음향(예: 2 초 동안 음향), 운전원 인지(Ack) 상태에서는 묵음으로 표현할 수 있다. 단, 기존에 사용되고 있는 경보음과 다른 데시벨과 지속 시간 등을 사용하여 운전원이 구분할 수 있도록 해야 한다.

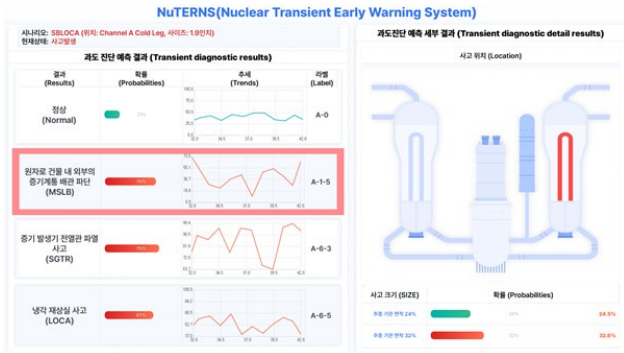
원전 경보시스템 설계 지침[7]에 따르면, 원전의 경보는 기본적으로 수동 복귀가 추천된다. 수동 복귀는 한번 발생한 이상변화를 운전원이 반드시 명시적으로 확인하여 해제하도록 강제하기 때문에 이벤트 발생을 놓치지 않을 수 있다. 이러한 과정을 경고 록-인(Lock-in)과 명시적 리셋(Reset)이라고 한다. 이에 반해, 자동 복귀는 운전원이 많은 경보들을 대응해야 하는 상황이거나 빠르게 복귀하는 것이 필요한 상황에서 사용 가능한 방법으로써 록-인만 강제하고 명시적 리셋은 적용하지 않는다. 현재의 기술 수준에서는 운전원 부담을 최소화하기 위해서 록-인도 강제하지 않는 형태의 자동 복귀를 적용하되, 조기경고의 신뢰도가 높아지고 원전 수용성이 높아지면 단계적으로 더 엄격한 방식의 적용을 고려할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 조기 경고를 활용한 사용자 화면

먼저, 선행 연구에서 구현된 대표적인 딥러닝 모델인 CNN[4]과 LSTM[5]을 활용하여 배관 파단과 관련된 중요 3 가지 사고 상황인, 원자로 건물 내외부의 증기계통 배관 파단(MSLB), 증기 발생기 전열관 파열 사고(SGTR), 냉각재 상실 사고(LOCA)에 대한 과도상황을 예측하도록 딥러닝 모델들을 학습하였다.

그림 2 는 이 논문에서 소개하는 조기 경고 사용자 화면이다. 전체 화면은 크게 세 부분으로 나뉜다. 먼저, 화면 좌측에 있는 정상 또는 사고 종류를 예측하는 “과도진단 예측 결과” 부분, 화면 우측 상단에는 정상 또는 과도상황 발생시 문제가 발생한 위치를 보여주는 “사고 위치” 부분, 화면 우측 하단에는 정상상태에서는 표시하지 않지만, 과도상황 발생시에

는 파단된 사이즈를 총 21 가지(SBLOCA 1 인치 ~ 6 인치, SGTR 전열관 1 개파단 ~ 5 개파단, SLB 주증기관 면적 10% ~ 100%) 중에서 지능형 진단 결과의 확률이 높은 두 가지를 보여주는 “파단 크기” 부분이 있다.



(그림 2) 지능형 조기 경고의 예

화면의 좌측에 표시되는 “사고의 종류”는 상황에 따라 수십 여가지 중에 확률이 높은 세 가지를 표시하는 것이기 때문에, 상황에 따라 상이한 값이 표시된다. 단, 정상 상태는 항상 가장 상단에 고정적으로 표시된다. 정상에 대한 추세 그래프는 초록색으로 표시하고, 과도상황 종류들은 붉은색으로 표시한다. 정상상태 및 과도상황 상태들의 확률의 합은 100%이고 과도상황 종류들 중에서 딥러닝 예측 결과 확률이 50%가 넘는 경우, 운전원 주의를 요하는 점멸과 음향과 같은 표시를 할 수 있도록 한다.

운전원 대응지원을 위해서는 가능한 경우 세부적인 추가정보(사고 위치/파단 사이즈 등)를 제공하는 것이 효과적이다. 이를 위해, 화면 우측 상단의 “사고 위치” 정보가 제공되는데, 사고가 발생했을 것으로 예측되는 위치를 빨간색으로 표시한다. 또한, 화면 우측 하단의 “사고 크기” 부분은 다양한 파단 크기 정보들 중에서 진단결과에 따른 가장 확률이 높은 2 개의 파단크기 정보를 표시할 수 있도록 제공한다.

4. 결론

데이터 기반 진단 및 예측이 가능한 인공지능 기술은 기존의 방법으로는 매우 어려운 원전 초기 상태 진단을 실현할 수 있다. 다만, 오진단에 대한 보상 방법, 기술적인 신뢰성 향상, 보수적인 원전 운영 그룹의 기술 수용성이 갖춰진 시점에 본격적으로 현장 적용이 가능할 것이다. 이 논문에서는 현재의 기술적 단계에서 인공지능 기술을 과도상황 진단에 적용하는 초기 방향을 제시하였다. 먼저, 기존의 경보보다 덜 엄격한 지능형 조기 경고를 정의하여 운전원의 업무 부담 증가는 최소화 하되 초기에 과도상황 발생을 인

지할 수 있도록 하였다. 또한, 원전 과도상황 조기 경고 사용자 화면을 구현하여 운전원이 필요로하는 과도상황 종류, 사고확률, 사고 위치, 사고 크기 등의 다양한 정보를 제공할 수 있음을 보였다. 이러한, 인공지능 기반의 초기 이상 진단 기술과 정보들이 사용자 지원을 위해 활용된다면 원전 안전성이 더 향상될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018M2B2B1065652 and No. 2019M2C9A1055903).

참고문헌

- [1] Yoo, K.H., Back, J.H., Na, M.G., Hur, S., Kim, H., "Smart support system for diagnosing severe accidents in nuclear power plants", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, pp. 562–569, 2018
- [2] Yang, J., Kim, J., "An accident diagnosis algorithm using long short-term memory", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50, pp. 582–588, 2018
- [3] Park J.K., Kim T.K., Seong S.H., "Providing support to operators for monitoring safety functions using reinforcement learning", Progress in Nuclear Energy, Vol. 118, 2020
- [4] Kim, T.K., Park, J.K., Lee, B.H., Seong, S.H., "Deep-learning-based alarm system for accident diagnosis and reactor state classification with probability value", Annals of Nuclear Energy, Vol. 133, pp. 723–731, 2019
- [5] Park J.K., Kim T.K., Seong S.H., "Aging detection of plant control system components using recurrent neural network", Progress in Nuclear Energy, Vol. 142, 2021
- [6] KEPIC, "EMD 2100 경보 작동 순서 및 경보기 설계", 서울, 대한전기협회, 2005
- [7] J.M. O'Hara, S. Fleger, "Human-System Interface Design Review Guidelines", USA, U.S.NRC, 2020