

원전 운전 지원을 위한 컴퓨터기반 기술 현황 분석

A Survey for the Computer-based Technology to support Operation in Nuclear Power Plants.

이종복, 장귀숙, 서상문
한국원자력연구소

Abstract

컴퓨터기반 운전지원시스템은 운전원의 발전소 상태감시와 진단기능을 수행을 지원하여 운전원의 안전성을 향상시키는 시스템으로 80년대 중반부터 개발되어왔고, 또한 최근의 컴퓨터 기술과 도구의 빠른 발전으로 컴퓨터기반 운전지원 시스템의 개발 및 원전 적용에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 컴퓨터기반 운전원 조언 시스템의 기술 현황을 분석하고, 현재 설계를 진행중인 일체형원자로(SMART, System-integrated Modular Advanced Reactor)에 컴퓨터기반 운전지원 시스템 적용을 위한 개발방안을 제안한다.

1. 서론

1980년대 중반이후 원자력 발전소의 안전성 및 운전의 효율성 측면에서 운전원의 의사결정을 지원해 줄 수 있는 운전지원시스템에 대한 관심이 고조되기 시작하였고, 운전오류 및 작업부하를 감소시켜 운전의 효율성을 높이는 컴퓨터기반 운전지원 시스템의 적용범위가 점차 확대되고 있으며, TMI(Three Mile Island) 사고로 원자력분야에서는 운전원의 실수는 발전소 안전을 위협할 수 있다는 점과 종합적인 인간기계연계의 제어실설계가 필요하다는 점을 인식하게 되었다[2,3,4].

또한 비상대응절차가 사건기반(event-based)에서 증상기반(symptom-based) 또는 기능기반(function-based) 대응절차로 바뀌었다는 점이다. 증상기반 절차에서는 발생할 수 있는 위험과 고장을 피하거나 감소시켜 발전소 운전상태를 안전화 시키는 방법으로서, 증상기반 절차는 구성과 분기(branch)가 복잡하여 운전원이 이를 정확히 수행하는 데 많은 어려움이 있었다. 그래서 필요한 대응절차 또는 경험적으로 얻어진 비상대응절차를 활용할 수 있도록 운전원을 지원하는 컴퓨터기반의 시스템 개발의 필요성이 제기되었다.

그리고 지식기반 시스템, 전문가 시스템, 신경 회로망, 수학적 모델, 그리고 통계학적인 방법 등과 같은 컴퓨터 기술과 도구의 빠른 발전으로 컴퓨터기반 운전지원 시스템의 개발

이 용이하게 되었다.

최근의 컴퓨터기반 운전지원 시스템은 운전원의 운전상황 판단, 진단 및 대응조치 결정을 지원하여 업무 부담을 저감시킴으로써 운전성능을 향상시킬 수 있는 온라인 컴퓨터기반 운전지원을 개발하는 추세이고, 80년대 중반부터 운전 절차와 진단과 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다[7].

본 논문에서는 운전지원 시스템 중에서 운전원 조언 시스템을 중심으로 특성 및 진단기술을 분석하고, 이를 기반으로 SMART 운전지원시스템의 개발 방안을 제안한다.

2. 운전원 조언 시스템(OAS : operator advisory system)

OAS는 발전소 상태를 평가하고 고장을 진단하여 미리 정의된 절차서 부분이나 제안된 성공경로의 도식적인 표현을 선택하는 인지적인 기능과 같은 대응전략을 운전원에게 지원한다. 현재 OAS는 운전원의 행위를 추적하여 기대되는 운전원의 행위와 비교하는 자동검사 기능, 현 상태에 따른 자동 경고, 그리고 현재 발전소 상태에 적합하지 않은 제어행위 블록을 연동(interlock)시키는 기능과 같은 지능적인 기능을 요구하고 있다. 일반적인 OAS의 공정제어행위(process control activity)는 아래와 일반적인 업무로 정의할 수 있다.

- 발전소 상태 감시
- 센서 데이터 검증과 해석
- 비정상 및 고장발견
- 비정상 및 고장진단
- 교정행위가 없는 시스템 행위의 예견
- 절차서 선택
- 동적인 절차서 지원-조언, 절차서 종합
- 동적인 절차서 확인
- 종합적인 사고회복을 포함한 절차서 실행

현재까지 개발된 OAS은 ① 발전소 고장을 진단하여 운전원에게 교정행위를 조언하기 위해 모듈기반으로 구축한 Operator Companion, ② 안전주입에 따르는 가압 경수로의 일차측 시스템 변수의 변화를 분석하여 운전원에게

운전안내를 지원하는 ACCINAL, ③정상/비정상 조건시 원자로의 실제적인 상태를 확인하는 과도해석 전문가 시스템 SEXTANT, ④발전소의 이차측 시스템의 비정상을 해결하도록 운전원을 지원하고자 개발된 지능적인 의사결정 시스템 IDA(Integrated Disturbance Analysis), ⑤ 발전소 장애동안 원인-결과 트리를 사용하여 사건의 순서를 기술하여, 운전원을 지원하는 컴퓨터기반 운전지원 시스템(COSSBWR: computerized operator support system for boiling water reactor), ⑥ 발전소 고장을 진단하고, 교정운전 안내를 지원하는 실시간 전문가 시스템인 DIAREX, ⑦ 발전소 비정상 기능에 대한 발견과 진단, 트립 후 안내 그리고 발전소 상태 예측을 수행하여 비정상 기능을 완화하는 INS, ⑧ 발전소 비상시 진단과 운전원 조언을 지원하는 DISKET, ⑨ 발전소 문제의 근본적인 원인을 베이스인 추론 원칙을 사용하여 운전원을 지원하는 COPILOT, ⑩ 목적트리와 성공트리의 형식화를 사용하여 급수 시스템의 비정상 기능을 교정하기 위해 운전원을 지원하는 프로토타입 전문가 시스템인 MOAS 등이 있다[5,6].

2.1 시스템 특성별 비교

표 1 시스템 특성별 비교

| 시스템 | 기능 | 대상 | 사용자 | 적용발전소 | 지식베이스 | 검증 |
|---------|--------------------------------------------------|-----|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------|
| DIAREX | - 진단(센서, H/W) - 운전 가이드 | 비정상 | 운전원 | 100MW BWR | - 고장진단모델 - 비상운전절차서 | 전문 위 시뮬레이션 |
| FAX | - 진단(센서, 공정) - 고장관리 - 교정행위 제안 - 대체행위 탐색 | 비정상 | 운전원 | | - GTST 모델 - 비상운전절차서 - 경향분석 | |
| MOAS II | - 진단(센서, H/W) - 교정수단 조언 | 비정상 | 운전원 | | - GTST 모델 - 비상운전절차서 | |
| REALM | - 상황분류/확인 | 비상 | 운전원 비상대응 기술 지원(현장비상자) | - IP-2 PWR - SONGS-2 PWR | - EALs | 현장 시험 |
| OAS | - 진단(폼포넌트) - 절차서 관리 | 비정상 | 운전원 | - Perry NPP 시뮬레이터 | - 비상운전절차서 | 시뮬레이션 |

대부분의 OAS 시스템의 주된 역할은 의사결정 지원기능으로서 OAS와 운전원간의 통신 그리고 인간-기계연계가 무엇보다도 강조되어 개발되었다. 그리고 지식기반 전문가 시스템을 기반으로 운전원 지원기능들을 구현하였고, 컴퓨터기반 운전지원 시스템의 많은 기능을 포함하는 OAS를 구현하기 위해서 정부조직 및 산하 연구조직 그리고 업체들의 참여가 필수적이었기에 OAS는 개발자의 환경에 맞게 기능을 나누어 개발하는 경우가 많았다. 또한 대부분의 OAS시스템들은 상용의 컴퓨터 지원도구를 사용하여 프로토타입 시스템으로 개발되

었고, 프로토타입 시험과 간단한 발전소 적용 시험을 수행하였다. 각 시스템의 특성은 표 1과 같다.

2.2 진단기술 비교

개발된 OAS 시스템 진단기술을 분석하여 진단모델에 따른 지식표현, 형식화 방법, 지식기반 탐색기법, 그리고 지식의 불확실성에 대하여 표 2와 같이 비교 분석하였다.

표 2 진단기술 비교

| 시스템 | 고장발견 | 확인/예측 | 진단후 추가지원 |
|---------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| DIAREX | - 고장진단 모델 - 고장트리분석 - 사고확산계출 | - 고장확인 규칙 - 고장진단 모델 - 사고확산계출 | 절차서 리이브러리로부터 최적화된 운전전략 선택 |
| FAX | 공정감시 공인트와 통계학적 프로세스 제어기준을 비교 | -GTST 모델의 프레임 기반 - 넓이-우선탐색 전략 - 불확실성에 베이스인 방법 - 데이터 경향분석의 추론 | - 미리 정의된 진단 메시지 출력으로 교정행위의 제안 - 대체행위 탐색 |
| MOAS II | - 공정감시 트리모델 | - 센서 검증기준의 정형화 - 센서 고장진단 트리모델 - 공정 장애 패턴 기반 - 하드웨어 고장진단 - GTST 모델 이용으로 발전소 운전모드 결정 | - 국부적인 교정행위 제안 |
| REALM | - 사건기반 추론 및 증상기반 추론 사용 | - 지식기반, 규칙기반 지식 - 표준 비상상태 분류 | - 시스템 조언 및 논리 설명 - 발전소 조건 변화, 대응 결과 기록 - 시간 및 청각적인 경보로 비상분류 제공 |
| OAS | - 데이터와 현재값 비교 (기본값, 문턱값 사용) | - 기기 지식을 계층적 분류구조로 구성 - 상용의 RDBMS 사용 - "Establish-refine" 탐색전략 사용 | - 절차서 관리 |

• 진단을 위한 지식

OAS는 지식기반 시스템으로서 지식의 획득과 그 지식의 적합한 표현방법이 무엇보다도 중요하다. 지식 획득이란 어떤 지식으로부터 문제를 해결할 수 있는 전문적인 지식을 얻어내는 과정을 의미한다. 지식획득의 과정은 문제의 특성을 파악하는 확인단계, 지식을 어떻게 표현할 것인지에 대한 개념을 정립하는 단계, 지식의 구조를 설계하는 형식화 단계, 그리고 실제로 시스템에서 사용할 수 있는 규칙을 구현하는 단계로 구성된다. OAS 시스템 개발에서 문제해결에 필요한 지식의 적합한 표현방법과 지식을 구조화하는 형식화 방법에 대한 고려가 매우 중요하다.

• 탐색기술

OAS들의 진단기술에서 각 시스템은 고장진단을 위한 모델을 구축하여 고장을 확인하고, 확인된 문제들을 해결하기 위해 탐색 전략을 활용한다. 탐색기법에는 넓이우선탐색(breadth-first search), 깊이우선탐색(depth-first search), 최적우선탐색(best-first search), Hill-climbing 탐색, Branch-and-bound 탐색 등 여러 가지가 있으

나 어느 탐색 전략을 사용할 것인가에 대한 평가는 매우 어렵다. 일반적으로 개발환경과 진단모델에 적합한 탐색 전략을 선정하는 것이 매우 중요하다.

• 불확실성

확인된 문제를 해결하는 데 있어서 현실적으로 많은 사실들이 불확실성을 내포하고 있다. 이런 경우에 OAS 시스템은 불확실한 정보로부터 여러 가지 문제를 해결할 수 있어야 하기 때문에 시스템의 불확실성을 다루는 문제를 고려하여야 한다. OAS에서 불확실성은 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 그 중 하나는 관찰된 사실이 내포하는 것으로 시스템의 지식으로부터 비롯되며, 다른 하나는 경험적인 지식이 내포하는 것으로서 전문가의 전문 지식으로부터 비롯된다. 이와 같은 불확실성은 초기에는 문제해결에 큰 영향을 미치지 않을 수 있으나 나중에는 이를 고려하지 않으면 문제를 해결이 어려워진다. 불확실성을 해결하기 위해 시도되는 방법은 확신도 기법(certainly factor), 베이시안(Bayesian approach) 등이 있다. 확신도 기법은 후 방향 연역추론 방식을 사용하며 전문가의 지식을 규칙형태로 표현한 규칙기반 시스템으로서 널리 사용되어 효용성이 입증되었으나 그 이론적 배경이 취약한 문제를 가지고 있고, 베이시안 접근은 불확실성을 처리하기 위해 조건부 확률이론을 이용하여 명확한 결과를 생산한다. 많은 OAS 시스템에서 확률론을 기초로한 베이시안 방법을 사용하여 실제의 문제 해결에 효과를 거두고 있다.

3. 운전지원시스템 개발 방안

SMART 컴퓨터기반 운전지원시스템을 개발하기 위해서는 전문가 시스템 기술 적용 현안, 확인 및 검증 방안에 대하여 국내 원자력 실정에 적합한 계획을 세우고, 운전원과 지원시스템의 상대적 관계 및 최적화 방안, 컴퓨터기반 운전지원시스템 구현을 위한 장소 및 방법, 컴퓨터기반 운전지원시스템의 사용 운전모드, 시스템 분류, 컴퓨터기반 운전지원시스템 안전성 평가한 후, SMART 컴퓨터기반 운전지원시스템의 요건과 기준을 명확히 설정하여 컴퓨터기반 운전지원시스템 개발에 필요한 응용과 적용 가능한 기술들을 종합적으로 평가 및 선정하여야 한다.

3.1 전문가시스템기술 적용

전문가 기술의 적용에 대한 국내 원자력 분야의 입장을 분석하여 SMART 컴퓨터기반 운전지원시스템에 적용가능한 분야를 선정하고, 부정확한 추론, 지식기반의 불완전함, 규칙의 잘못된 우선순위로 야기되는 사항들 그리고 빈약한 인간기계연계로 인해 발생할 수 있는 문제점들을 해결할 수 있는 방안을 모색하여

야 한다.

3.2 확인 및 검증 계획

컴퓨터기반 운전지원시스템은 소프트웨어 확인 및 검증을 통하여 신뢰도를 확인할 수 있다. 이 확인 및 검증은 국내 원자력 업계의 전문가 시스템의 사용에 대한 긍정적인 입장을 형성하는 데 필수적이다. 전문가 시스템의 확인 및 검증은 정확성, 정밀성, 속도, 적절성, 일관성 등의 기준으로 그 절차를 계획하여야 한다. 또한 지식의 구성과 문제해결을 위해 표현되어야 하는 지식의 정도, 추론 모델, 사실과 규칙들의 우선순위를 결정하는 시스템의 능력, 분명하지 않은 지식들을 제어하는 시스템의 능력, 그리고 추론의 정확함과 같은 전문가 시스템의 신뢰도에 관계된 문제점들을 고려해야 한다.

3.3 컴퓨터기반 운전지원시스템 기능의 범위 결정

컴퓨터기반 절차서와 운전원 조업 기능의 실제 적용범위를 결정하여야 한다. 특히 운전원과 시스템간의 원활하고 효율적인 통신기능과 컴퓨터기반 운전지원시스템 설명기능의 정도를 결정하여 운전원이 의사결정과정을 충분히 파악할 수 있는 구조를 정립하여야 한다.

3.4 운전원과 지원시스템의 상대적 관계 및 최적화 방안 정립

제어실에 적합한 운전원의 정보인지모델을 정립하고, 이를 기반으로 운전원의 역할과 컴퓨터기반 지원기능을 할당하여야 한다.

3.5 컴퓨터기반 운전지원시스템 구현을 위한 장소 및 방법 정의

기존 제어반과의 통합방안을 고려하여 기존의 인간기계연계에 일관성있는 정보를 컴퓨터기반 운전지원시스템이 생성할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

3.6 컴퓨터기반 운전지원시스템의 사용 운전 모드 결정

컴퓨터기반 운전지원시스템 구현으로 인한 운전원 운전전략에 미치는 영향을 분석하여 각 운전모드별로 기본 요구사항을 정의하고, 운전모드별로 컴퓨터기반 운전지원시스템 개념을 정립하여 절차서 행위의 우선순위를 결정해야 한다.

3.7 시스템분류(비안전, 안전관련, 안전)의 결정

컴퓨터기반 운전지원시스템은 시스템의 역할, 기능, 운전모드, 그리고 안전과의 관련성을 고려하여 분류하여야 한다.

3.8 컴퓨터기반 운전지원시스템 안전성 고려

컴퓨터기반 절차서의 고장에 대비한 하드웨어 기반의 백업용 절차서의 역할을 정의해야 하고, 운전원의 의사결정 결과와 컴퓨터기반 운전지원시스템의 결과가 서로 다른 경우를 대비한 방안을 마련하여야 한다.

3.9 인간기계연계 고려

컴퓨터기반 절차서의 적용범위를 결정한 후, 절차서 표시기기의 공간문제에 대한 방안을 세우고 추가되는 하드웨어, 터치 패널 등을 검토하여 결정하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 컴퓨터기반 운전원 조연 시스템의 특성과 지원기술을 분석하고 SMART 컴퓨터 기반 운전지원 시스템의 개발방안을 다음과 같이 제시하였다. SMART 컴퓨터 기반 운전지원시스템을 개발하기 위해서는 1) 전문가시스템 기술적용 현안, 확인 및 검증 방안에 대하여 국내 원자력 실정에 적합한 개발 계획을 세우고, 2) 운전원과 지원시스템의 상대적 관계 및 최적화 방안, 컴퓨터기반 운전지원시스템 구현을 위한 장소 및 방법, 컴퓨터기반 운전지원시스템의 사용 운전모드, 시스템 분류, 안전성 평가방법, 기능 그리고 인간-기계연계 고려사항들을 평가한 후 3) SMART 컴퓨터기반 운전지원시스템의 요건과 기준을 명확히 설정하고 4) 컴퓨터기반 운전지원시스템의 개발에 필요한 응용과 적용 가능한 기술들을 평가 및 선정하여야 한다.

참고문헌

- [1] IAEA-TECDOC-529, User Requirements for Decision Support Systems used for Nuclear Power Plant Accident Prevention and Mitigation, IAEA, Vienna, 1989
- [2] IAEA-TECDOC-444, Improving Nuclear Power Plant Safety through Operator Aids, IAEA, Vienna, 1987
- [3] IAEA-TECDOC-542, Use of Expert Systems in Nuclear Safety, IAEA, Vienna, 1990
- [4] EPRI NP-5088, Computerized Diagnostic Aids-Success Path Monitor, EPRI, 1987
- [5] John Teigen, Operator Advisory System and Procedure Synthesis - A Literature

Survey for Some Systems and Methods, OECD Halden Reactor Project, 1991

[6] S.Kaplan, Outline of COPILOT, an Expert System for Reactor Operational Assistance, Using a Bayesian Diagnostic Module, Reliability Engineering and System Safety, 1988

[7] 장귀숙외, SMART 개념설계의 컴퓨터기반 운전지원기술, KAERI/AR-494/98, 한국원자력연구소, 1998