

나트륨 루프 운전 지원을 위한 전문가 시스템 개발

문성익^{†○} 이광형[†] 조충호[†] 남호윤[§] 황중선[§]
†한국과학기술원 전산학과
‡고려대학교 전산학과
§원자력연구소 액체금속로 냉각재연구실

Operator Decision Support System for Sodium Loop

Seong-Ick Moon^{†○} Hyung Leekwang[†] Choongho Cho[†]
Ho-Yoon Nam[§] Jong-Sun Hwang[§]
†CS Dept., KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)
‡CS Dept., Korea University
§Liquid Metal Reactor Plant Research Dept., KAERI

요 약

본 연구는 나트륨을 냉각제로 사용하는 원자력 발전소를 운영할때 사용하는 전문가시스템을 개발하는 것이다. 따라서 냉각제로 쓰이는 나트륨의 물리적 특성으로 인하여 일반 경수로의 경우보다 매우 세심한 주의가 요구된다. 특히 시설 설비의 측면에서 그 복잡도가 일반 경수로의 20배 이상으로 알려져 있다. 따라서 운전원들에게 실제적인 도움을 주기 위해서는 나트륨 루프의 특성을 고려한 전문가 시스템의 설계·구현이 필요하다.

본 논문은 이러한 나트륨 루프의 운영상의 문제를 완화하기 위해, 나트륨 루프의 운전을 지원하는 퍼지 전문가 시스템인 SLOAS(Sodium Loop Operator Advisor System)을 설계·구현한 결과를 보인다. 이 시스템을 통해 운전원은 실시간으로 전체 설비의 상태를 파악할 수 있으며, 또한 공정의 흐름만을 요약하여 관찰할 수도 있는 두 가지의 선택적 기능을 제공한다.

1. 서론

현재 일본과 프랑스 등지에서는 고속중수로에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이것은 천연 원자력 연료의 매장량이 수십년 내에 고갈될 것이라는 예측들에 따른 것이다.

그런데 냉각제로 물을 사용하는 일반 경수로와는 달리 고속중수로에서는 냉각제로 금속 나트륨을 사용한다. 이러한 액체 금속로에서는 상온에서 고체로 존재하는 나트륨을 섭씨 200도 이상으로 가열하여 순환계로 도입해야 하며, 어떤 이유론든 나트륨의 흐름에 문제가 발생하게 되면 나트륨이 응고하게 되어 곧 발전소 전체의 사고로 발전할 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 나트륨은 대기중에서 매우 불안정하며, 약간의 수분만 있어도 발화하여 화재를 일으키므로 고속중수로를 운전하는데에는 기존 원자력 발전소와는 달리 순환계의 운전에도 많은 연구가 필요하다.

실제로 미국의 TMI 원자력 사고, 구 소련의 체르노빌 사고 등 원자력 발전소의 사고는 자주 발생하였다. 특히 프랑스 Creys Malville의 고속중수로는 가동 첫해인 1987년 순환기계통에서 사고가 발생하여 3개월 동안 발전을 중단하였다. 이러한 사고후 원자력 발전소의 안전성 및 운전원들의 의사결정을 지원해 줄 수 있는, 컴퓨터를 이용한 시스템의 개발에 관심이 고조되기 시작하였다.

Creys Malville원전의 사고원인을 분석한 결과 수많은 정보 및 각종계기 신호들을 요구되는 시간내에 분석하여 운전원이 비상 대응조치를 취한다는 것은 불가능하다는 보고가 있었다[1]. 또 미국 등지에서는 경수로발전소의 경우도 운전의 복잡성에 의한 문제가 많이 제기되고 있는 실정이다. 그런데 액체 금속로의 경우는 중요한 설비의 수가 경수로 발전소의 6000여개에 비해 20,000여개로 3배 이상이고 전체적인 복잡성은 설비수에 대해 지수적 증가(약 20배 정도)를 보이는 것으로 보고되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 인공지능 기법을 이용한 전문가 시스템이 원자력 분야에 적용되고 있으나, 현재까지 도입된 시스템들 중 실질적으로 발전소의 안전성과 신뢰성 향상에 영향을 주는 것은 극소수에 불과하다. 그 이유는 개발된 시스템이 운전원에게 지나치게 복잡하고, 많은 입력을 요구하며, 꼭 필요한 정보들을 제공하지 못함에 따라서 오히려 운전원에게 부담을 주기 때문이다[2-6].

본 연구에서는 이러한 문제점들을 고려하여, 실용화를 목적으로 하고 실제 상황에서 운전원들에게 실제적 도움을 줄 수 있는 나트륨 루프 운전지원 실시간 전문가 시스템을 설계·구현한다.

2. 시스템 요구사항

현재 액체 금속로의 연구는 가장 핵심 시설중의 하나인 나트륨 순환계를 제작 시험하고 있는 단계이다. 그러나 이제 시작 단계에 있는 액체 금속로의 개발을 성공적으로 수행하기 위해서는 다음과 같은 문제들에 대한 고찰이 선행되어야 한다.

1. 운전에 필요한 정보의 증대

본격적인 액체금속로 시스템의 구축에 따르는 운영시스템의 대규모화와 고도화에 수반하여 운용기술자가 필요로 하는 양적 질적 지식량이 증대될 것이다.

2. 상태 및 고장진단

본격적 시스템은 물론 개발단계의 시스템에 대한 여러가지 상태 및 고장의 진단이 필요하다.

3. 운전 기술의 관리

계층 운영 전문가들의 퇴직, 이동으로 인한 전문지식의 이전이 힘들다. 또한 운전원 및 보수원들의 복잡한 시스템에 대한 문제 기피 의식이 상존하므로, 유사시 원인 규명 및 대책 마련이 곤란하다.

4. 운용자에게의 과중한 업무부담

개발 기간중 설비들이 증가함으로써 운용자들에게 요구되는 업무량이 점증적으로 증가하여 운용자의 처리능력의 한계를 넘어서게 된다.

이러한 문제점들과 함께 인간의 실수로 기인한 각종 문제점을 파악하여, 축적된 전문적, 경험적 지식에 바탕을 둔 판단에 카나즘의 시스템화가 요구된다. 그렇게 함으로써 운전원, 보수원의 경험부족에서 오는 오진을 막을 수 있고, 고장진단, 사고 복구 및 대책마련 그리고 전임개발자의 기술이전 등에 소요되는 시간과 노력을 최대한 줄일 수 있을 것이다.

현재 연구중인 액체 금속로의 경우 설비의 설치를 위한 방법 등은 설계과정을 거쳤기 때문에 어느정도 구체화 되어 있으나, 시스템의 정지조작 및 비상운전 상태에 대응하기 위해 사용되는 많은 운전절차는 체계화 되어 있지 않고 있다. 보통 원전의 발전시스템에 이상이 생기거나 일시적인 정지등의 이유로 시스템을 재가동시키거나 복구할때, 기존 원자력 발전소에서는 최적 복구 절차서와 기능 회복 절차서 등으로 구성된 비상/정상 운전 절차서가 사용 되고 있다. 이들 절차서는 중상 위주와 사건위주로 각 절차서가 구성되어 있고, 각 단계별로 운전원이 점검 또는 조치해야할 절차등이 기술되어 있다. 그러나 실제 경우에 운전원이 절차에 직접 언급되어 있지 않거나 절차들의 관계가 미묘한 여러 경우에 대응하여 복잡한 문제들을 짧은 시간 내에 적절하게 해결한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

국내에서 현재 연구중에 있는 액체금속로는 나트륨 순환계와 그것을 운영하는 전력 계통의 시스템만 갖추고 있지만, 이러한 각 요소 시스템들에 대한 운전 관리 전문가 시스템을 각 요소들이 개발됨에 따라 단계적으로 개발하여 앞으로 완성될 액체금속로의 전체 시스템에 대한 적절한 운용관리 시스템이 즉각적으로 운용될 수 있어야만 한다. 그래야만 프랑스의 Creys Malville 원전의 경우처럼 전체 시스템이 가동된 후에야 문제들이 대두되어 한꺼번에 해결해야 하는 어려움을 피할 수 있을 것이다.

특히 Creys Malville 원전의 경우는 사고 발생후 운전 보조 전문가 시스템이 3년에 걸쳐 개발 되었으나 운영상의 어려움 때문에 현재 가동이 중단된 상태로 부분적인 보수를 하고 있으며, 추가적인 운전 보조 시스템을 개발하고 있다. 따라서 우리는 위의 경험을 바탕으로 개발초기부터 개발에 참여하는 사람들의 경험적, 전문적 지식을 시스템화하여 개발이 완료되었을 때 완전한 가동이 가능하도록 하여야 할 것이다.

한편, 현재 작동되고 있는 나트륨 두프의 운전지원을 위해 MAXVIEW라는 이름의 시스템이 IBM-PC 상에 개발되어 있다. 이 시스템은 기존 설비의 각종 센서로부터 실시간으로 데이터를 주고받는 능력을 갖고 있으며, 기본적인 공정감시 기능과 상태 확인 기능을 가지고 있으나, 하드웨어의 용량부족으로 모든 상황을 한눈에 파악하기 힘들고, 또한 기본 설계의 패쇄성으로 인해 본격적인 운전지원을 위한 전문가 시스템을 개발하여 통합하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 이러한 경험을 바탕으로 본 연구에서는 액체 금속로 운전지원 전문가시스템 개발을 위한 다음과 같은 세부 목표를 설정했다.

1. 상태감시판넬의 구현

현재 가동중인 나트륨 순환계를 모델로 실험 공정을 관찰하고 각 실험부의 상황을 가시적으로 볼 수 있도록, 고해상도 모니터를 사용한 제어판넬에 전 시스템의 상태와 공정을 그래픽으로 표시한다.

2. 제어판넬의 설계

제어계통은 직접 디지털 제어방식을 사용하여 프로그램에 의하여 제어할 수 있게 설계한다. 이때, 현재 운전중인 나트륨 두프가 아직 완성되지 않은 시스템이므로 언제나 수정이 가능하도록 제어 판넬을 설계한다.

3. 요구사항의 정립

나트륨 실험장치의 운전지원을 위한 실시간 전문가 시스템 개발을 위한 기초 작업으로서 요구사항을 정립한다.

4. 장비코드의 표준화

플랜트의 확장 및 변경시 혼란을 방지하고 제어 계통명령을 단순화하며, 실험장치를 효과적으로 운영하기 위해 각종 장비들의 코드를 표준화한다.

3. 시스템 구성

본 연구에서 개발할 실시간 운전지원 전문가 시스템은 SLOAS(Sodium Loop Operator Advisor System)라는 명칭을 사용한다.

3.1 시스템 요구분석

1. 시스템의 상태정보 제공

시스템의 각 계통별로 상태정보를 제공함으로써 운전원의 발전소의 상태 판단의 부담과 노력을 최소화 시키고 사태 인지의 오류에 의한 실수를 줄일 수 있다.

운전 지원 컴퓨터 설비의 신호취득 센서로부터 취득된 정보, 즉 나트륨 밸브의 개폐 및 각 상태의 온도 유지상태등 필요한 정보등을 제어 판넬에 칼라로 표시할 수 있는 제어 판넬이 있어야 한다.

2. 경보발생시 위치 파악

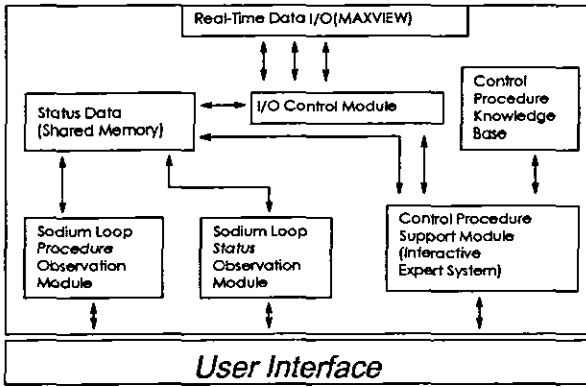


그림 1: SLOAS의 구성

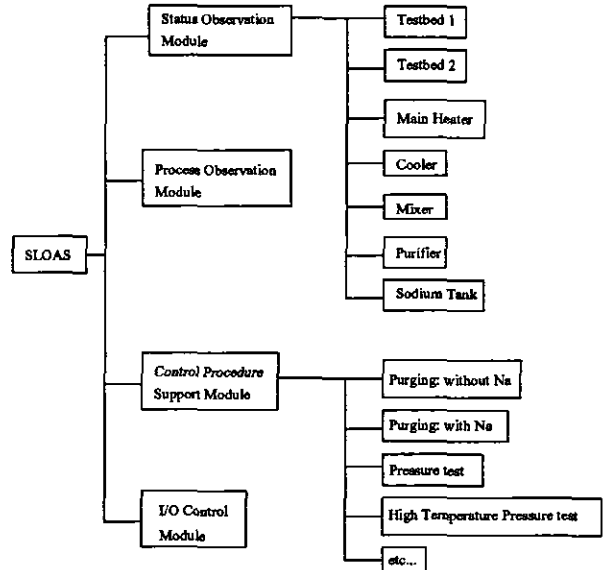


그림 2: SLOAS의 모듈구조

나트륨 누설과 같은 비상시 안전을 도모하기 위해서 경보발생 위치를 운전원의 제어 판넬에 표시하여 줌으로서 비상시 안전에 대비할수 있어야 한다.

3. 비상조치 지원절차 제공

나트륨 루프의 운전 에 필요한 운전 변수들을 알려주고, 운전원과의 온라인 대화를 통하여 이상의 원인이 된 장치나 기기를 알려주고, 비상조치 지원절차를 제공한다.

4. 각종 제어변수들의 분석

통신망을 이용한 디지털 제어 방법은 제어의 신뢰성과 신속성을 제공하지만 유사시의 사후 분석을 위해 모든 정보가 데이터 베이스화 될 수 있도록 코딩의 일관성을 유지하여야 한다.

5. 설비의 이력 기록

설비의 이력 및 상황을 기록하여 운전원에게 제공할 수 있어야 한다.

6. 안전성

나트륨 루프의 특성상 화재에 대단히 민감하므로 안전하게 운전할 수 있어야 한다.

7. 설비의 변경에 따른 시스템의 유연성 유지

각종 제어계통을 직접 디지털 제어방식을 사용하여 프로그램에 의하여 제어할 수 있게 설계한다. 또한 현재 시운전중인 액체금속로 시스템이 아직 완성되지 않은 시스템이므로 언제나 수정이 가능하도록 일반적인 개발환경 (C++, X11, Motif)을 이용하여 유연성을 최대로 하는 시스템을 구축하여야 한다.

3.2 전문가시스템의 구조

그림 1.은 SLOAS의 구조를 나타내고 있다. 각 모듈간에는 공유 메모리 (Internal Status Table)와 메시지 큐 등에 의해 정보전달을 한다. 그림 2.는 SLOAS 를 구성하는 모듈들의 구조를 보이고 있다. 시스템은 크게 4개의 모듈들로 이루어지고 각 모듈들은 여러개의 서브모듈들로 구성된다.

1. 상태감시 모듈 (Status Observation Module)

상세한 실험 상태를 표시한다. 전체 나트륨 루프의 온도개소, 압력개소, 유량개소, 수위개소등이 숫자와 색깔로 구분하여 디스플레이 된다.

2. 공정감시 모듈 (Process Observation Module)

공정진행 상황을 상세한 정보는 표시하지 않고 현재 실험이 진행되고 있는 상태를 표시하는 것으로서 현재 MAXVIEW에서 제공하는 제어 판넬과 같은 정보를 디스플레이 한다.

3. 운전절차 지원 모듈 (Control Procedure Support Module)

운전원의 각종 장치의 조작을 키보드 입력을 통해서 도와주는 실시간 제어모듈이다. 비상경보 및 고장을 진단하고 이의 대응절차 및 기능회복정보를 현장으로 송신하는 기능을 포함한다. 이 모듈은 아직은 구현되지 않았지만 전체 설계 구조에는 포함시켰다.

4. 입출력 제어 모듈 (I/O Control Module)

MAXVIEW로부터 실시간 데이터를 받아 시스템의 공유 메모리에 기록한다. 비상대응절차나 기능회복절차에 의한 제어값의 전송을 담당한다.

3.3 구현 및 작동환경

본 연구에서 설계된 SLOAS는 이식성 (Portability)과 기존 운전 시스템과의 인터페이스를 고려하여 SUN Sparc 4/75 워크스테이션 상에서 개발하고 있다. SLOAS를 위해 현재 사용중인 운영체제 환경은 SunOS 4.1.2와 X-Window 이며, 개발된 모듈들은 객체지향 언어인 C++와 X-Library, Motif 등을 이용하였고, 전문가 시스템의 지식베이스와 추론기관은 Prolog를 이용한다. 이는 이식성이 높은 개발 툴을 이용함으로써 확장과 수정이 용이하도록 하기 위함이다. 또한, 운전원이 쉽게 운전 상태를 감시할 수 있도록 운전 및 공정상태를 그래픽 처리 하였다.

추가적인 센서 설치 부담을 피하기 위해, 기존 운전 지원 컴퓨터 설비 (MAXVIEW)에서 제공하는 신호를 시리얼 포트를 통해 SLOAS로 중계한다. 여기서 제공되는 데이터는 시스템 버퍼와 커널버퍼에 저장되고 입출력 모듈에 의해 시스템의 주

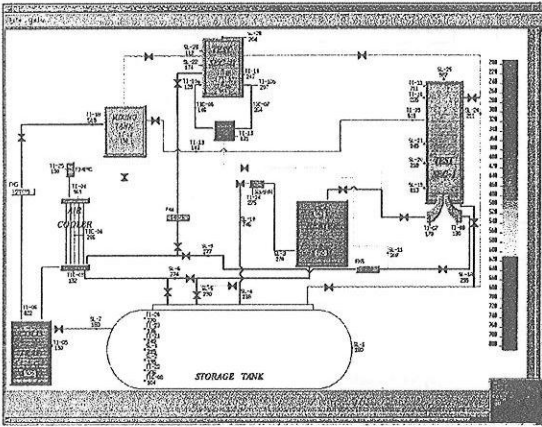


그림 3: 상태감시 모듈의 동작화면

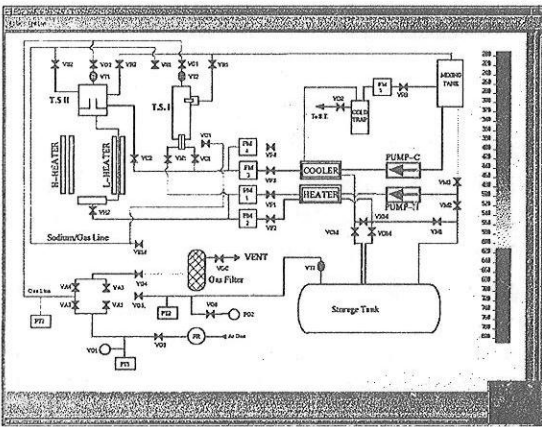


그림 4: 공정감시 모듈의 동작화면

기억장치에 있는 공유 메모리의 상태정보 데이터블럭에 기록된다. 이렇게 실시간으로 기록되는 데이터는 공정 감시 및 상태 감시모듈에 즉시 표현되도록 설계하였다.

그림 3.과 그림 4.는 구현된 두 모듈의 동작모습을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 액체금속로 운전지원을 위한 전문가시스템(SLOAS)를 설계·구현하였다. SLOAS는 크게 상태감시판넬, 공정감시판넬, 제어 판넬로 이루어져 있다. 상태감시판넬 및 공정감시판넬은 전 시스템의 상태와 공정을 그래픽으로 표시하고, 관련된 주변장치의 공정진행 상황 및 각 계통의 상태를 알기 쉽게 표현한다. 또한 각 장치들을 제어하기 위한 나트륨 루프 제어 판넬을 설계·구현하여 실시간 전문가 시스템 개발을 위한 기초 작업을 하였다. 그 결과 시스템을 구현하는데 있어서 중요시했던 데이터표현 방법의 적합성, 사용자 편리성, 시스템의 정확한 반응 및 유연성 등과 같은 사항들이 만족되었던다.

향후 과제로는 퍼지 규칙을 이용한 전문가 시스템을 개발하여 현재 개발된 시스템에 통합하고, 각종 제어변수들의 흐름을 분석하여 그로부터 상황을 분석할 수 있는 기능의 구현이 요구

된다.

참고 문헌

- [1] Cho Choongho, P. Baptiste, J. Favrel, R. Dorey, D. Dupont, "AID: System expert d'aide la coupure de tableau lectriques pour la Centrale Nuclaire de Creys-Malville(Decision Making Expert System to shut down Superphenix nuclear power plant electronic supplies for maintenance during outage)", *Convention Intelligence Artificiel 90*, Ed.HERMES:PARIS, pp. 729-744, 1990.
- [2] Lee KeonMyung, Shin HeeTae, Lee Kwang-Hyung, Cho choongho et al., "Object Oriented Expert Systems for rail vehicle scheduling in steelworks", *Proceedings of Korea-Japan Joint Conference on Expert Systems*, pp. 597-608, Feb. 2-5, 1992, Seoul, Korea.
- [3] N.Naito, A.Sakuma, K.Shigeno, and N.Mori, "A Real-Time Expert System for Nuclear Power Plant Failure Diagnosis and Operational Guide", *Nucl. Technol.*, pp. 79-284, 1987.
- [4] W.R.Nelson, "REACTOR: An Expert System for Diagnosis and Treatment of Nuclear Reactor Accidents", In *National Conf. Artificial Intelligence*, Pittsburgh, Pennsylvania, August 18-20, 1982.
- [5] Bill K.H.Sun and David G.Cain, "Computer Applications for Control Room Operator Support in Nuclear Power Plants", *Reliability Eng. and Systems Safety*, vol. 33, no. 3, 1991
- [6] M.Yokobayashi, K.Yoshida, A.Kohsaka, and M.Yamamoto, "Development of Reactor Accident Diagnostic System DISKET Using Knowledge Engineering Technique", *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 4, 1986.
- [7] 류찬호, 김용일, 허영환, "원자력 발전소 증기 발생기 전열관 와전류 검사 전문가 시스템의 사용자 인터페이스 개발", *한국정보과학회 가을 학회*, vol. 19, no. 2, pp. 1023-1026, 1992.
- [8] 조충호, 이광형, "컴퓨터 엔지니어의 입장에서 본 전문가 시스템의 구현 방법론", *한국 정보과학회 91 봄 학술발표 논문집*, vol. 18, no. 1, pp. 73-76, 1991.
- [9] 조충호, 이광형, "원전의 전기배전반 시스템의 유지보수 시스템", *전문가 시스템 연구회 91 추계 학술대회 논문집*, pp. 61-73, 1991.
- [10] 이건명, 신헌태, 이광형, 조충호 외 9인, "체철소 철도 차량 배차를 위한 객체지향 전문가 시스템", *한국 정보과학회 92 가을 학술발표 논문집*, vol. 19, no. 2, pp. 163-166, 1992.