

동적 경보계통(ADIOS)의 성능평가

김정택, 정철환, 김장열, 이현철, 권기춘
한국원자력연구소
305-353, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소와 같이 복잡하고 안전성이 강조되는 경보처리 및 표시계통은 개발개념의 적합성(설계요건의 타당성), 적용된 알고리즘의 완결성(지식기반과 소프트웨어의 확인)과 인간공학적 유용성의 평가가 상당히 중요하다. 동적 경보계통(Alarm and Diagnosis-Integrated Operator Support System : ADIOS)은 다음과 같은 실험을 통해 경보처리 알고리즘의 완결성과 인간공학적 유용성을 확인하였다.

- 예비기능시험(Preliminary functional test)
- Petri net 을 이용한 알고리즘의 완결성 확인(Verification)
- 전규모 시뮬레이션 환경에서의 인간공학적 성능평가(Validation and Evaluation)

1. 서 론

경보는 공정 플랜트에서 이상상태를 감지하는 최초의 감지원이지만, 원자력발전소와 같은 복잡한 플랜트에서 기존의 하드와이어 경보계통은 하나의 센서에 하나의 경보표시기(경보창)가 할당되어 있어 경보폭주시 이상상태를 잘못 파악하는 경우가 종종 발생한다[1]. 이러한 경보폭주와 이상상태시 운전원의 인지부담을 경감시키기 위해 ADIOS가 개발되었다[2]. ADIOS와 같은 인간(운전원)을 대상으로 하는 MMIS(Man-Machine Interface System)은 적용된 알고리즘의 타당성과 인간공학적 유용성이 평가되어야 실제 발전소에 적용될 수 있다. 알고리즘의 타당성과 인간공학적 유용성의 평가에는 실제 주제어실과 같은 운전 환경에서 수행되어야 한다.

ADIOS는 TMI-II 사고 등 주요 이상상태에서 알고리즘의 타당성과 인간공학적 유용성을 확인하기 위해 여러 가지 성능을 평가하였다. 이러한 평가는 평가 방법, 평가 환경, 평가 시나리오 및 경보처리계통에서의 인간공학적 상호작용에 대한 평가기준이 언급된 EPRI-NP-3659 및 NUREG/CR-0700에 따라 수행되었다[3]. ADIOS는 예비기능시험, 알고리즘의 확인 및 인간공학적 성능 평가의 세가지 과정으로 평가되었다. 예비기능 시험에서는 실시간 환경에서 지식기반과 추론 구조를 수정하고, 경보처리 알고리즘의 적합성을 확인하였다. 알고리즘의 확인에서는 Petri-net을 통하여 ADIOS의 지식기반의 정확성(correctness), 일치성(consistency) 및 완결성(completeness)을 확인하였다. 마지막으로 인간공학적 성능 평가는 한국원자력연구소의 인간공학적 실험 설비인 KAERI-ITF(KAERI's Integrated Test Facility)에서 영광 3,4호기 운전원에 의해 수행되었다[4].

2. ADIOS의 경보처리

2.1 경보의 분류

ADIOS에서는 경보의 고유 특성에 따라 플랜트경보(plant alarm), 공정경보(process alarm)와 기기상태경보(status alarm) 등 세가지로 분류하여 경보를 처리하고 표시하였다. 플랜트 경보는 발전소 전체의 이상상태를 표시하며, 대부분 안전관련 경보로 우선순위 1 순위로 정의되고, hardwired 경보창과 schematic display 화면에 표시된다. 공정경보는 주공정경보와 부공정경보로 분류되며, 공정계통의 비정상상태를 인식시켜 준다. 공정계통의 이상상태는 같은 공정계통이나 다른 공정계통에 연속적으로 전파되는 경향이 있어 경보도 연속적으로 발생하게 된다. 주공정경보는 ADIOS의 1차 및 2차계통 overview schematic 화면에 표시되며, 대부분 우선순위 1이나 2순위로 정해졌다. 부공정경보는 overview schematic 화면 하단에 세부 subsystem schematic 화면에 표시되는 공정경보이다. 상태경보는 기기나 계통의 비정상상태나 현재 운전상태의 정보를 표시한다. 상태경보는 상태정보(status information), 관련 경보(related alarm)와 상태경보(status alarm) 등으로 분류되었다. 상태정보는 기기나 계통의 운전상태를 표시하나 비정상상태를 알려주므로 우선순위 없이 경보에서 분리하여 상태정보 목록에 따로 표시했다. 관련경보는 펌프나 밸브의 운전이 필수적인 조건 등 기기의 불건전상태(운전 가능 여부)를 경보한다. 상태경보는 기기의 비정상적인 상태나 기기의 오동작(malfunction)을 표시한다.

2.2 경보처리 및 우선순위

ADIOS에는 기기상태처리, 운전모드처리, 원인경보처리, 다중설정치처리 및 경보생성 등 경보처리의 대표적인 방법이 대부분 사용되고 있다. ADIOS의 경보는 발전소나 공중에 미치는 영향과 운전원이 경보에 대처해야 하는 긴급성에 따라 정적(default) 우선순위를 가진다. ADIOS는 정적 우선순위에 발전소나 기기의 상태 및 경보의 상관관계에 의해 처리되는 동적 우선순위를 적용하였다. 그림 1은 ADIOS의 경보처리 흐름을 보여주고 있다. 입력값과 설정치를 비교하거나, 기기상태 비교에 의해 받아들인 경보는 입력 변수 값과 상태 값을 이용하여 경보처리 모드와 경보처리 상태(state)를 정의하고, 원인경보와 결과경보 및 다중설정치 등 경보 상관관계를 비교하고, 현재 상태에서 비정상적인 기기의 운전 상태에 대한 정보를 받아 정적 우선순위를 변경시킨다. 우선순위가 변경된 경보는 각각의 지정된 화면에 경보를 표시한다.

3. 경보계통의 성능평가

3.1 예비 기능시험

3.1.1 예비 기능시험의 목적

ADIOS의 경보처리규칙은 경보의 특성에 따라 다르게 적용되었다. 적용된 경보처리규칙이 설계자가 의도한 대로 동작되는지를 시험해야 하고, 경보처리규칙을 조율해야 한다. ADIOS는 이러한 목적을 위해 "off-line test"와 "on-line test"를 수행하였다.

3.1.2 Off-line 시험

Off-line 시험에서는 경보객체의 입력 값이나 설정치를 변경함으로써 경보발아를 확인하였다. 경보 상관관계규칙은 경보객체의 속성인 direct precursor와 level precursor 항에 해당 경보의 이름이나 관련된 기기의 이름을 기입함으로써 적절하게 동작함을 확인하였다. 운전모드별 경보처리나 상태별 경보처리 규칙은 해당 mode 목록이나 상태목록에 기입하여 G2를 기동시킴으로써 적절하게 동작됨을 확인할 수 있었다. Off-line의 최종 시험은 G2 환경이 제공하는 off-line simulation 기능을 이용하여 수행하였다. 이 시험은 원자로 정지와 TMI-II 사고를 off-line으로 모의화하여 수행하였다. TMI-II 사고를 분석하여 예상되는 경보와 TMI-II 사고 모의화에 의해 발생 경보를 비교한 결과 경보처리 규칙은 정상적으로 동작됨을 확인하였다.

3.1.3 On-line 시험

On-line 시험은 계측제어기능 시험설비(TF : I&C functional Test Facility)를 이용하여 실시간으로 수행되었다. 이 시험설비는 고리 3,4 호기의 원전의 거동을 모의화한 시험설비이다. On-line 시험에는 TF가 제공하는 78개의 오동작 (malfunction)에 대하여 시험설비에서 모의화된 raw 변수값을 실시간으로 받아 경고 받아 및 소멸, 경고처리 규칙의 동작 및 경고 표시 방법의 적합성을 확인하였다. 그림 2는 계측제어기능 시험설비에서 실시간으로 TMI-II 사고를 모의화하여 경보를 처리한 1 차계통 overview 화면을 나타내고 있다.

3.2 경고처리 알고리즘의 완결성 확인

3.2.1 알고리즘 확인의 목적

경보처리 알고리즘의 완결성 확인은 경고처리 알고리즘의 논리적 부정확성(incorrectness), 불일치성(inconsistency) 및 불완결성(incompleteness)을 찾아내기 위한 것으로 한국과학기술원에서 개발한 COKEP(Checker Of Knowledge base using Extended Petri net)을 사용하여 확인하였다.

3.2.2 경고처리 알고리즘의 확인

COKEP은 확장된 페트리넷을 이용하여 자동으로 지식기반의 완결성을 확인 및 검증한다. ADIOS는 프레임 구조의 지식기반으로 구현되어 페트리넷을 이용하여 확인하기 위해서는 경고처리 지식기반을 규칙으로 변환했다. 먼저 G2 도구내에 구축되어 있는 지식기반을 ASCII 코드로 변환시킨다. 또한 경보지식기반에 입력된 지식들이 모두 같은 구조로 되어 있지 않기 때문에 자동으로 지식기반을 확인하고 검증하기 위해서 같은 구조를 갖도록 변환한다. 정형화된 지식기반에서 Level Precursor속성과 Causal 속성에 관한 지식을 확장 페트리넷의 입력으로 변환하기 위해 자동으로 If-Then 규칙으로 변환시킨다. If-Then으로 변환된 데이터를 COKEP에 입력하여 불건전성, 불일치성, 불완결성의 오류를 가질 가능성이 있는 규칙들을 확인한 다음 패턴 비교를 통해 오류를 가지는 규칙들을 점검하여 지식기반의 확인 및 검증을 수행했다.

3.2.3 경보지식기반 확인 및 검증 결과

경보처리 알고리즘을 COKEP을 통하여 확인하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- CTMT-OP-DECK-AREA-RAD-WARN의 설정치 = 50.0 인데 이 경보의 Level Precursor인 CTMT-OP-DECK-AREA-RAD-HI의 설정치 = 50.0으로 나타났다. 이와 같은 오류는 두 개의 경보가 동시에 발생할 경우 경보를 처리하는데 문제를 발생시킬 수 있다.

- 경보지식기반 속의 경보간의 인과관계는 19개가 자동으로 기록되었다.

- 경보지식을 If-Then으로 변환한 결과 109개의 If-Then 규칙들이 생성되었다. 이 규칙들을 확장 페트리넷에 입력하여 오류들을 확인한 결과 불건전성의 가능성을 가진 규칙이 75개정도 나타났다. 불일치성과 불완결성의 가능성을 가진 규칙은 하나도 없었다. 불건전성의 가능성을 가진 규칙 75개를 패턴 비교를 통해 확인한 결과 실제 불건전성 규칙은 하나도 없었다.

3.3 경고계통의 인간공학적 실험평가

3.3.1 인간공학적 실험평가의 목적

개발된 경고계통은 인간공학 실험설비인 KAERI-ITF에서 영광 원전 운전원을 통하여 효용성을 평가하였다. 그림 3은 영광 발전소 운전원에 의해 수행되고 있는 ADIOS의 인간공학적 성능평가 광경을 보여주고 있다. 실험은 ADIOS의 효용성을 인간공학적 측면에서 실험하여, ADIOS의 효용성 증대를 위한 개선점을 도출하는 것을 목적으로 한다. 따라서 ADIOS의 인간공학적 결함을

ITF와 비교하여 평가하고 개선점을 도출하는 것이 실험의 주안점이며, 이 실험은 APTEA 실험계획 중 예비실험(pilot experiment)의 성격에 해당한다. 실험에서는 인간공학적 실험설비의 경보계통과 ADIOS의 경보계통에 대한 인간공학적 효용성을 비교, 평가하였다.

3.3.2 인간공학적 실험설비(KAERI-Integrated Test Facility)

인간공학적 실험설비는 VDU 기반 경보시스템을 가진 가압경수로형 전규모 모의장치(Simulator)로 주실험실, 보조실험실, 실험감독실 및 인간공학 측정장비들로 구성되었다. 실험설비의 HSI 설비는 안전기능을 감시하는 flat-panel 표시, 변수추이를 관찰할 수 있는 계층적 mimic CRT, 대형 정보표시판 및 마우스, touchscreen 등을 가진 soft control 기기등으로 구성되었다. ITF의 경보시스템은 경보타일을 가진 VDT 기반의 경보목록으로 구성되어 있다.

3.3.3 인간공학적 효용성 실험

3.3.3.1 실험시나리오 및 실험 수행

영광 3,4 호기의 운전조(각 조별로는 RO 1인, TO 1인)가 실험에 참여하였다. 각 실험시나리오에 대한 실험조와 경보시스템 그리고 실험순서는 임의의 순서(random order)로 결정되었다. 실험에는 “Feedwater Pump Trip and RCP Sealing Line Leakage”, “SGTR” 및 “Loss of Feedwater and Main Steam Isolation Valve Fail”의 3개의 시나리오가 선택되었다. 각 실험시나리오에 대해서는 운전원의 Error가 time window에 의하여 정의되었다. 시뮬레이션의 진행중에는 2회의 freeze가 있으며 그 기간 중에는 다음의 발전소 매개 변수중 일부에 대한 운전원의 추이 파악 정도를 알아보기 위한 Situation Awareness 측정지를 피실험자에게 주고 응답을 받았다. 비디오 및 오디오 데이터, 긴장도 및 맥박등 생리적 데이터, 경보데이터 및 운전원 행위 데이터가 자동으로 기록되었다. 각각의 실험은 약 40 - 50분 정도 소요되었다. 실험은 피실험자간의 차이가 없다는 가정 하에서 쌍체비교(Paired Comparison)에 의한 통계 분석을 사용하였다.

3.3.3.2 종속변수 및 독립변수의 결정

실험에서 제어(control)할 수 있는 독립변수는 ADIOS와 ITF의 경보시스템 종류, 실험 시나리오와 운전조 등 이다. 운전조는 현실적인 제약으로 인하여 2개조를 활용하게 되며 이 두개조간의 운전경험이나 운전능력 등의 개인적인 차이는 미미하다고 가정한다. 실험의 목적에 비추어 ADIOS의 특징으로부터 종속변수를 추출하였다. 각 Measure에 대한 측정방법 및 측정에 사용되는 장비는 다음과 같다.

- 반응시간 : 실험전에 사용할 실험시나리오별로 time window를 작성하고 이를 기반으로 측정시점을 결정한다. 활용할 측정데이터는 ETS(Eye Tracking System), A/V system, System log 등이다. System Log를 통하여 측정시점을 확인하고 ETS와 A/V system에 의하여 운전원의 반응시간을 측정한다.

- Error Rate : 실험전에 사용할 실험시나리오별로 운전원의 오류(error)를 정의하고 이를 ETS, A/V system, System log 등의 데이터를 활용하여 오류의 발생여부를 확인한다.

- SA(Situation Awareness) : 우선 사용할 시나리오별로 SA의 측정시점 및 주요 발전소 매개변수를 결정한다. 실험중에 이 시점에서 시뮬레이터는 freeze상태가 된다. 이 측정시점에 운전원에게 주요 매개변수중 일부에 대한 추이를 묻는 설문을 작성하게 된다. 작성된 설문은 평점화하여 수치화한다.

- Mental workload : KAERI의 정신부하 측정시스템(telemetry기반)에 의하여 측정하고 분석한다.

- Questionnaire : 실험후 피실험자와의 자유로운 면담(interview)에 의하여 ADIOS/ITF의 MMI 사용편의성, Nuisance Alarm의 필요성, ADIOS의 초기정보감지기능 만족여부, ADIOS/ITF의 표시방법의 적합성, 주관적인 선호도, 개선요구사항 등에 대한 질의를 하고 응답을 수집한다.

3.3.3.3 실험데이터의 분석 및 결과

ITF는 실험데이터를 쉽고, 빠르게 분석하기 위한 DAEXESS(Data Analysis and Experiment Evaluation Supporting System) 도구를 가지고 있어 긴장도 및 맥박등 생리적 데이터 등 많은 실험데이터를 정성적으로 분석할 수 있다. 이 실험에서 각 시나리오에 따라 시간, 오류를 및 운전부담 등 각종 실험데이터를 통계적이고, 정성적으로 분석하였다.

- Situation Awareness : 데이터의 분석결과 ADIOS와 ITF간에는 Situation Awareness관점에서 별 차이가 없는 것으로 분석되었다.

- Mental Workload : 실험 중에 운전원(TO)이 받은 정신적 작업부하를 Telemetry를 통하여 측정하였다. 그러나 ITF하에서 행해진 2번째 실험시나리오에 대한 생체신호를 손실했기에 통계적인 분석은 불가하였다.

- Questionnaires : 실험 종료후 설문 및 질의응답이 수행되어 다음과 같은 결과를 얻었다.

- . ADIOS 에 뜨는 경고 중에 key alarm에 대해서 만 구체적인 정보를 얻는다. 우선 조치 중에 비정상적인 운전원 동작이나 불안정한 방향으로 발전소가 진행될 때에 대한 진단 기능이 수반된다면 좋을 것이다. 경고타일의 경우에는 운전 중에 한번 둘러봄에 의하여 전반적인 운전상황을 파악할 수 있는 장점이 있다.

- . 경보를 색상에 의하여 구분 표시하는 것은 도움이 된다.

- . 원자로 트립후 원인을 찾는 데 ITF보다는 ADIOS가 편리하다.

- . 경보의 수를 줄인 것은 차후에 경보를 확인할 때에 도움이 될 것이다.

- . ADIOS는 발전소 제어실에 바로 사용 가능하다. 정상운전중에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다. 그러나 현재의 ITF와의 연계사용이 불편하다. 이는 ITF 사용훈련이 부족했기 때문이라고 생각한다. ADIOS의 1 차, 2 차계통 process mimic overview 화면은 복잡해보이나 계통에 익숙한 운전원은 더 복잡한 process 계통도에 익숙하기 때문에 복잡해 보이지 않는다.

- . 발전소의 상태를 파악하는데 ADIOS가 유용하다고 생각한다.

- Error Rate : 실험시나리오에서 정의된 운전원의 직무에 대한 Time Window를 기반으로 오류를 검출하여 통계적으로 분석하였다. 분석결과 Error Rate측면에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

4. 결 론

ADIOS는 예비기능시험, Petri-net을 이용한 COKEP 도구에 의한 알고리즘의 완결성 확인 및 전규모 시뮬레이션 환경에서의 인간공학적 성능평가 실험을 통해 경보처리 알고리즘의 완결성과 인간공학적 유용성을 확인하였다. 이 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 원자로 정지와 TMI-II 사고를 모의화한 시험에서 경보 받아 및 소멸, 경보처리 규칙의 동작 및 경보 표시 방법의 적합성등 경보처리 규칙은 정상적으로 동작됨을 확인하였다.

둘째, 확장된 페트리넷을 이용하여 경보처리 알고리즘의 완결성을 확인한 결과 경보처리 알고리즘의 불건전성, 불일치성과 불완결성의 가능성이 없었음을 확인하였다.

셋째, 전규모 시뮬레이션 환경에서의 인간공학적 성능평가실험에서 다음의 결과를 얻었다.

- . ADIOS와 ITF간에는 Situation Awareness 관점에서 별 차이가 없었다.
- . ADIOS는 비정상상태 중에 key alarm을 인식하는데 유용하다.
- . 경보를 색상에 의하여 구분 표시하는 것은 도움이 된다고 생각한다.
- . 경보 수의 감소는 이상상태의 원인과 결과를 분석하는데 용이하다.
- . ADIOS는 정상운전중에 효과적으로 활용할 수 있어 주제어실에 바로 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] I.G.Hwang, J.T.Kim, et. al., An Object-Oriented Implementation to Improve Annunciation System, IAEA Specialists' Meeting, Chalk River, Ontario, Canada, Sep. 1996.
- [2] D.Y.Lee, J.T.Kim, et.al., An Implementation fo Alarm and Diagnosis-Integrated Operator Support System, CSEPC'96 Cognitive Systems Engineering in Process Control, Kyoto, Japan, Nov. 1996.
- [3] U.S. NRC, NUREG-0700, Guideline for Detailed Control Room Design Reviews, 1996.
- [4] B.S.Shim, et. al., The Development of Human Factors Experimental Evaluation Techniques, final report, KAERI/RR-1693/96, 1997

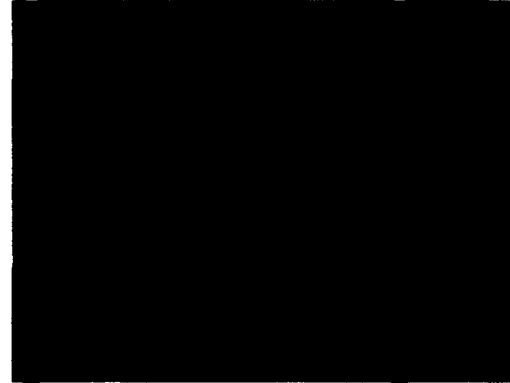
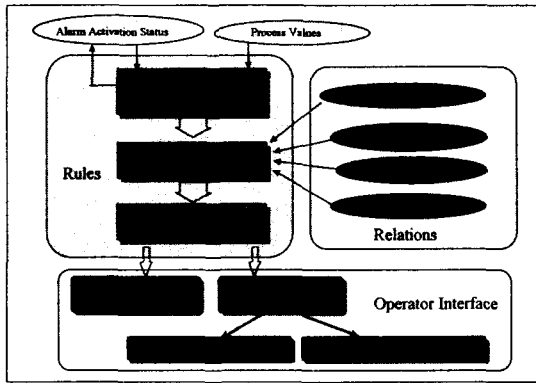


그림 1 ADIOS 경보처리 흐름도

그림 3 ADIOS 인간공학적 유용성 시험 광경

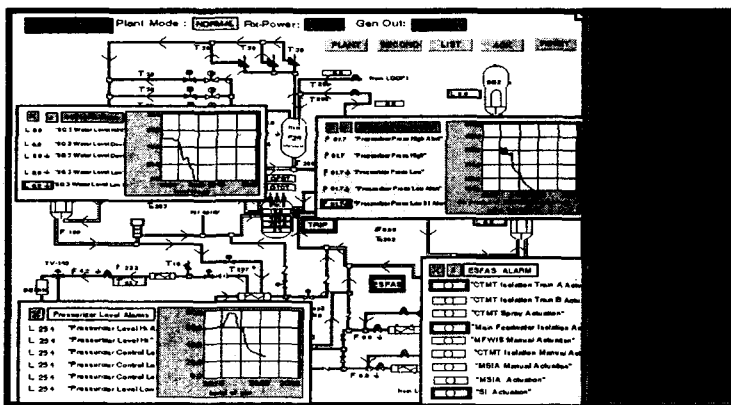


그림 2 TMI-II 사고를 모의화한 1 차계통 overview 화면