

원자력발전소 원자로보호계통 캐비닛의 인간공학 평가

Human Factors Evaluation of the Reactor Protection System Cabinet

이현철*, 이동영*, 이정운*

Hyun-Chul Lee, Dong-Young Lee, and Jung-Woon Lee

Abstract - 원전계측제어시스템개발사업단(KNICS)에서 개발중인 원자로보호계통 캐비닛의 인간공학적 평가를 수행하였는데, 본 논문에서는 이에 대한 평가계획, 평가절차, 그리고 평가결과를 기술한다. 평가에는 기존의 시스템 경험이 있는 발전소 계측제어요원과 인간공학 전문가 그룹이 참여하였는데, 새로 개발하는 시스템에 대한 교육 및 훈련이 평가전에 시행되었다. 평가는 운전성을 평가하기 위한 수행도 평가실험과 참여자의 주관적인 의견을 수집하기 위한 설문지 작성으로 구성하였는데, 평가실험을 위한 7개의 실험시나리오를 작성하여 실험설비에 구현하였다. 설문지는 기존 시스템의 운용중 발생하였던 문제점 및 장단점을 평가하기 위한 설문지, KNICS 보호계통 캐비닛의 활용후 개선점을 도출하기 위한 설문지, 그리고 기능적인 측면에서 운용전문가의 의견을 요구하는 설문지 등의 3종류의 설문지로 구성하였다. 평가실험은 시나리오 운용순서에 따라 진행되었고, 모든 실험시나리오 실행과정은 비디오를 사용하여 기록하였다. 실험평가 데이터의 분석결과 KNICS 원자로보호계통은 유지보수 측면에서 기존의 시스템보다 우수한 것으로 평가되었으며, 화면설계 및 기기설계시 반영하여야 할 개선사항이 도출되었다.

Key Words : 인간공학 설계, 인간공학 평가, 시험 및 감시, 유지보수

1. 서론

원자로보호계통은 발전소 프로세스를 감시하다가 일정수준의 영역을 벗어난 프로세스 변수를 감지하여 원자로 트립이나 공학적인안전설비의 개시신호를 발생시키는 역할을 담당하고 있다. KNICS 과제에서는 기존의 아날로그 방식의 원자로보호계통을 디지털화된 국산화된 원자로보호계통을 개발하고 있다. 이 원자로보호계통은 4개의 채널캐비닛으로 구성되어 있으며 각 캐비닛에는 캐비닛운전원모듈(COM, Cabinet Operator Module)이라는 운전원 인터페이스가 장착된다. 특히 COM화면은 터치방식에 의한 화면작동이 가능한 보다 진보된 형태의 인터페이스를 채택하고 있다. KNICS 과제에서는 COM화면의 설계시 인간공학을 적용하기 위하여 스타일가이드를 개발하여 설계에 반영하였으며, 또한 인간공학 실험평가에 의한 설계의 타당성을 검증하고자 하였다. 본 논문에서는 인간공학 평가의 과정 및 그 결과에 대해 기술한다.

2. 인간공학 실험평가의 구성

원자로보호계통 캐비닛의 설계결과물을 인간공학적으로 평가하기 위하여, 발전소 계측제어요원의 시험 및 제어를 위한 사용자 인터페이스인 COM화면과 유지작업시 사용자의 작업이 수행되는 캐비닛 내부설계결과물 등을 평가대상으로 설정하였다. COM화면은 개발된 스타일가이드에 의해 설계되었는데, 화면설계의 타당성을 검증하기 위하여 운전원의 주요 직무를 대표하는 시나리오에 대한 작업수행도를 측정 평가하는 방식을 취하기로 했으며, 유지보수작업 관점에서 인간공학 평가는 설문지를 통한 평가 및 개선점 도출을 위한 의견수집에 역점을 두었다.

저자 소개

* 準 會 員 : 한국원자력연구소

2.1 수행도 분석을 위한 실험계획

원자로보호계통 캐비닛의 사용자인 계측제어요원은 주로 시험 및 감시직무의 수행을 위하여 COM화면을 사용한다. 설계된 COM화면에서는 수행할 직무의 내용에 따라 화면상에 표시된 버튼을 터치(touch)하여 직무수행환경을 설정하고 수행을 명령할 수 있다. COM화면에 대한 인간공학적 평가는 작업자인 계측제어요원이 COM화면을 사용하여 직무를 원활히 수행할 수 있는지를 확인하는 것이다. 본 연구에서는 COM을 활용하여 수행하여야 하는 사용자의 직무를 분석하여 대표적인 직무에 대한 운전시나리오를 작성하고, 각각의 시나리오에 대한 사용자의 작업수행도를 측정하고 평가하는 실험평가 계획을 수립하였다. 선정된 운전시나리오는 7종으로 다음과 같은 직무를 포함하고 있다.

- 자동주기시험 수행
- 수동개시자동시험 수행
- 건전성진단시험 수행 (진단 오류 발생)
- 건전성진단시험 수행 (설정치 관련 오류 발생)
- 건전성진단시험 수행 (Bypass 관련 오류 발생)
- 건전성진단시험 수행 (CP Output 관련 오류 발생)
- 설정치 감시 수행 (감시중 PLC 오류 발생)

2.2 유지보수작업을 위한 설문지

설문지는 3종류로 나눌수 있는데, ①RPS의 기능, ② 선행호기인 울진 5,6호기 DPPS의 유지보수, 그리고 ③ KNICS RPS의 유지보수 등과 관련된 설문지이다. KNICS RPS 기능관련 설문지는 "TYPE-1 설문지", 울진 5,6호기 DPPS(Digital Plant Protection System)의 유지보수 관련 설문지는 "TYPE-2 설문지", 그리고 KNICS RPS의 유지보수와 관련된 설문지는 "TYPE-3 설문지"로 구분하였다. 실험 전에는 울진 5,6호기 DPPS 유지보수와 관련된 설문지를 작성하도록 하였으며, 실험 후에 RPS의 기능과 유지보수에 관련된 설문지를 작성하도록 요구하였다.

(1) TYPE-1 설문지

TYPE-1 설문지는 다음과 같은 KNICS RPS의 기능과 관련된 설문 항목을 포함하고 있다.

- Setpoint 설정 방식 - 수동조작 vs. 자동설정
- Bypass 및 Setpoint 설정치 Key Switch의 사용 - 제공 vs. 제거
- KNICS RPS COM화면에서 고정된 화면분할방식의 사용 - 비분할 vs. 분할
- Bistable Rate Test의 자동화 - 수동 vs. 자동
- 시험시 자동 Bypass 기능의 필요여부 - 수동 Bypass vs. 자동 Bypass
- 오류메시지의 표시방식 - 오류제시 vs. 오류 및 조치사항 포함

(2) TYPE-2 설문지

설문지는 올진 5,6호기의 DPPS 유지보수와 관련된 설문을 포함하고 있으며, 설문의 항목은 다음과 같은 사항을 포함하는 29개의 항목으로 구성되어 있다.

- 기존 설비 유지보수의 빈도 및 난이도
- 유지보수시 작업자 지원
- 유지보수 작업시 위험요소
- 캐비닛과 Rack의 구성
- 모듈화 설계 및 패키지
- 레이블링(Labeling)
- 시험작업의 난이도 및 지원기능
- FPD 화면설계중 개선이 필요한 사항

(3) TYPE-3 설문지

설문지는 KNICS RPS의 유지보수와 관련된 설문을 포함하고 있다. KNICS RPS를 운용한 경험이 없으므로, 준비된 KNICS RPS Cabinet을 보고 유지보수 측면에서 예상되는 문제점이나 불편할 것으로 예상되는 사항을 자유롭게 기술하도록 요구하였다. 설문의 항목은 다음과 같은 사항을 포함하고 있는 27개의 항목으로 구성되어 있다.

- 예상되는 유지보수작업의 문제점
- 유지보수시 작업자 지원
- 유지보수 작업시 위험요소
- 캐비닛과 Rack의 구성
- 모듈화 설계 및 패키지
- 레이블링(Labeling)
- 시험작업의 난이도 및 지원기능
- KNICS RPS COM화면의 개선 요구사항

3. 실험의 수행

3.1 피실험자

KNICS RPS와 유사한 설계특징을 가지면서도 동등한 역할을 담당하는 현재 가동중인 원자로보호계통은 올진 5,6호기의 DPPS가 유일하다. 따라서 올진 5,6호기의 원자로보호계통인 DPPS의 운용경험이 있는 계측제어요원을 피실험자로 선정하였다. 다수의 피실험자가 실험평가에 참여하는 것이 바람직하나 원자력발전소의 당시상황이 많은 계측제어인력이 실험에 참여할 수 있는 상황이 아니어서, 2인의 피실험자만을 확보할 수 있었다. 피실험자는 실험 실시전에 RPS 계통 및 COM화면을 이용한 시험 및 감시 직무에 대한 교

육을 받았으며, 또한 충분한 시간동안 실습을 통한 훈련을 받도록 하였다. 일반적으로 RPS의 유지보수작업은 2인 1조로 실시하는 것이 현장에서의 관례이지만, 본 실험에서는 2인 이상의 인력이 필요한 작업(예를 들면, 하드웨어 교체)을 포함하지 않고 있으므로 1인씩 시나리오를 운용하도록 요구하였다. 또한 실험중 캡코더를 이용하여 실험 시나리오 수행과정을 모두 녹화하였다.

3.2 실험계획법

모든 피실험자가 7종의 실험시나리오를 모두 수행하도록 하였다. 시나리오 수행이전에 실험 시나리오를 수행하면서 수행한 결과를 기록할 응답지를 배포하였고 작성요령을 설명하였으며, 실험 시나리오는 이미 설정된 임의의 순서에 따라 수행하도록 요구하였고 피실험자간의 수행순서는 상이하게 구성하였다.

4. 실험데이터 분석

4.1 수행도 분석

피실험자는 시나리오 수행중 발견한 특기사항 및 요구하는 시험 등의 작업을 수행한 결과를 기록하도록 요구하였는데, 피실험자가 기록한 응답지의 내용과 실험자가 준비한 올바른 응답을 비교함으로써, 피실험자의 수행도를 알 수 있다. 실험자가 준비한 답안과 피실험자의 응답이 일치하는 지를 판단하여 시나리오 수행의 성공 혹은 실패로 구분할 수 있다. 다음의 표1은 실험 시나리오에 따른 피실험자의 수행결과(성공 혹은 실패)를 보여준다.

순번	시나리오 번호	시나리오 내용	시나리오 수행결과	
			피실험자 1	피실험자 2
1	S1	자동주기시험 수행	성공	성공
2	S2	수동개시자동시험 수행	N/A	N/A
3	S3-1	건전성진단시험 수행	성공	성공
4	S3-2	건전성진단시험 수행 (설정치 관련 오류 발생)	성공	성공
5	S3-3	건전성진단시험 수행 (Bypass 관련 오류 발생)	성공	성공
6	S3-4	건전성진단시험 수행 (CP OUTPUT ERROR 관련 오류 발생)	N/A	성공
7	S4	설정치 감시 수행	실패	성공

표 2 시나리오 수행결과

수동개시자동시험관련 시나리오인 S2는 실험중 시나리오 구현상의 문제점으로 인해 오류메시지가 표시되지 않는 상황이 발생하여 시나리오 수행을 하지 못하였으며, 피실험자 1의 경우에 S3-4 시나리오 실시중 시나리오의 수행보다는 설계에 대한 의견을 제시하는 데 시간이 너무 많이 소비되어 수행을 완료하지 못하였기에 성공실패의 분류에는 포함시키지 않았다. 모든 실험 시나리오에 대해 피실험자들은 주어진 임무를 완수하고, 올바른 상태진단이나 판단을 한 것으로 나타났다. 다만 피실험자 1의 경우 실험 시나리오 S-4를 수행하면서 설정치 감시에만 전념하여 PLC운전상태

를 감시하지 못하고 시간이 초과되어 실패로 처리하였다. 그러므로 설정치 감시와 같은 감시업무를 수행하는 도중에 건전성진단시험이나 자동주기시험에서 오류가 발생하는 경우, 사용자가 이를 쉽게 감지할 수 있도록 해 줄 필요가 있는 것으로 드러났다. 따라서 사용자의 감지를 도울 수 있도록 MENU버튼의 Blinking이나 청각적 표시장치(경보음 등) 등의 사용을 고려할 필요가 있다.

KNICS RPS COM화면 실험평가를 수행하면서 캠코더를 사용하여 피실험자(운용전문가)의 피실험자의 시나리오 수행을 녹화하였다. 녹화된 동영상 상을 사용하여 COM화면의 개선점을 찾아내고자 분석을 수행하였다. COM화면은 사용자의 터치(touch)에 의해 시스템의 기능을 작동시키거나 혹은 화면을 이동할 수 있는 데, 비디오 테이프를 검토한 결과 이 터치의 성능이 예상보다 낮은 것으로 드러났다. 터치실패는 사용자가 터치했음에도 불구하고 기능의 작동이나 화면이동이 의도한 대로 실현되지 못한 결과를 의미하는데, 대부분의 터치실패는 상위정보영역에서 발생하였다. 이는 상위정보영역이 정보취득을 위해서 제공되는 버튼의 개수가 많이 있고 또한 사용자가 정보취득이나 시험의 수행을 위해 반드시 터치해야 하는 부분이 있기 때문이다. 터치실패 비율은 22%로 분석되었으며, 따라서 터치의 민감도를 보다 향상시킬 필요가 있으며, 궁극적으로는 보다 향상된 기술을 사용하는 터치 하드웨어의 선정이 필요하다고 판단된다.

4.2 설문지 분석

설문지의 설문항목이 개수가 많고 또한 의견이 점수를 산출하는 방식이 아닌 의견수집에 초점이 두어져서 작성되었기 때문에 정량적인 분석보다는 정성적인 분석이 수행되었다. 본 논문에서는 설문지에 기술된 의견을 간략히 기술한다.

(1) TYPE-1 설문지 응답 분석

- Setpoint 설정방식 - 검토가 필요사항
- Keypress의 제공 - 인적오류를 고려할 필요가 있음
- 화면분할 - 긍정적 평가
- Bistable Rate Test의 자동화 - 긍정적 평가
- 시험시 자동 Bypass 기능- 긍정적 평가
- 오류메시지의 표시방식- 긍정적 평가

(2) TYPE-2 설문지 응답 분석

DPPS의 운용경험에 비추어 다음과 같은 운용정보 및 설계 개선사항에 대한 의견이 제시되었다.

- 유지보수작업의 빈도 - 퓨즈(Fuse)의 교체작업
- 유지보수작업의 난이도 - PLC 모듈의 교체작업
- 유지보수작업시 위험요소 - 내부공간의 협소
- 유지보수작업 지원사항 - 퓨즈 Labeling 및 목록
- 주의문 추가사항 - 발전정지와 관련된 기기
- 경보관련 개선사항 -상세한 경보내용 제공
- 유지보수작업중 현안사항 - 검사소요시간

(3) TYPE-3 설문지 응답 분석

KNICS 캐비닛의 설계에 대한 우려사항으로 다음과 같은 사항이 지적되었다

- 공기순환 문제 - 소형 PLC의 사용에 따른 부작용
- LED Label 판독 - 소형 PLC 사용에 따른 부작용
- 유지보수작업시 위험요소 - COM의 키보드

KNICS RPS의 장점으로서는 다음과 같은 사항이 지적되었다

- 유지보수를 위한 충분한 공간을 제공 - 위험요소의 감소효과가 기대됨
- COM화면에서의 시험직무 수행 - 신체적/정신적 작업부하의 감소가 기대됨

4.3 인간공학자 평가의견 분석

KNICS RPS COM화면 실험평가를 실시하면서 인간공학자의 평가를 수집하였다. 2인의 인간공학자는 KNICS RPS COM화면에 대한 교육을 받고 KNICS RPS Cabinet에 부착되어 있는 COM화면을 검토하고 그 결과를 정리한 평가의견서를 제출하였다. 인간공학자에게는 평가의견의 작성에 대한 제약이 없으므로 자유로이 작성할 것을 요구하였다. 제출한 이 평가의견서는 각각 화면명, 내용, 그리고 의견 등으로 구성되어 있었고 총 24개의 평가의견을 제시하고 있었다. 인간공학자는 Cabinet에 대한 유지보수 측면이 아닌 COM화면에 대한 평가를 실시하도록 하였으며, 질문사항이 있는 경우 수시로 화면구성이나 사용에 대한 설명을 제공하여 평가자의 화면이해 및 평가의견 작성이 원활히 수행되도록 하였다. 결과적으로 다음과 같은 사항에 대한 의견이 도출되었다.

- MENU와 PRINT 버튼 코딩
- INTEGRITY TEST ENABLE 및 AUTOMATIC TEST ENABLE 버튼 코딩
- ALL BYPASS와 CPC CWP 상태표시의 Grouping Label 추가
- 시험결과와 기록유지
- 트립변수 명칭 변경
- 오류메시지의 색상 코딩
- 경보RESET 기능의 추가
- 선택된 버튼의 배경색의 코딩 개선
- 수동개시자동시험관련 버튼의 코딩 개선
- 오류메시지의 표시순서를 일관성있게 배치

5. 결론

KNICS RPS COM화면의 실험평가를 실시하여 사용자의 의견 및 수행도를 분석하였다. 분석결과 KNICS RPS COM화면은 대체적으로 만족할 만한 수준의 설계로 평가할 수 있었으며 또한 유지보수 측면에서 DPPS Cabinet보다 KNICS RPS Cabinet이 유리한 것으로 평가되었다. 이는 KNICS RPS가 보다 진보된 기능을 제공하고 있으며, 사용자의 간섭(intervention)을 축소하여 사용자의 작업부하를 감소시켰고, Cabinet 내부공간을 충분히 확보하였기 때문으로 판단된다.

실험평가에 포함된 설문지를 분석한 결과 사용자 및 인간공학자의 의견은 Cabinet의 유지보수 측면에서의 개선점, KNICS RPS의 기능 개선점, 그리고 COM화면의 개선점 등이 도출되었다. 각 개선점들은 반드시 반영해야할 사항과 고려해야할 사항으로 분류하였으며, 계통설계자가 설계개선시 고려하도록 하였다.