

신형경수로 1400 소프트웨어기 및 안전제어반 인간공학적 설계적합성 평가

Human Factors Engineering Suitability Verification of APR1400 Soft Control and Safety Console

강성곤*, 김영갑, 신영철, 조성제

한국수력원자력 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

당초 표준설계는 불란서 N4 주제어실 및 미국 AP600 주제어실과 같이 비안전등급 범용(Universal) 소프트웨어기를 이용하여 안전등급 기기 및 비안전 등급 기기를 제어하여 비상운전을 수행하는 개념으로 설계하였다. 그러나 설계인가 심사과정에서 IEEE 603 6.2절에 정의된 안전기능을 수행하는 기기이므로 소프트웨어기의 설계등급을 소프트웨어기로 제어되는 기기가 수행하는 안전기능에 상응하는 안전등급(Hardware: Class 1E, Software: ITS)으로 상향하여 설계하도록 결정됨에 따라, 소프트웨어기 개념을 안전등급 제어기와 비안전등급 제어기를 분리하는 개념으로 변경하였으며, 안전제어반은 기본특성이 기존의 고정형 제어실과 유사하여 연구개발 단계에서 검증을 수행하지 않았으나, 안전제어반의 인간공학적 적합성 자료와 안전제어반상에 최소한으로 설치되는 고정형 운전수단의 결정을 위해 소프트웨어기 및 안전제어반의 인간공학적 설계 적합성에 대한 종합적인 평가가 필요하게 되었다. 이에 따라 본 연구를 수행한 결과 인간공학적으로 채널범용 소프트웨어기가 편의성이나 운전원 오류방지 측면에서 유리한 것으로 평가되었으며, 안전등급 소프트웨어기와 비안전등급 소프트웨어기를 통합한 범용 소프트웨어기가 인간공학적으로는 가장 유리할 것으로 평가되었다. 안전제어반 운전전략은 금번 인간공학실험을 통해 문제가 발생하지 않았으며 적절한 것으로 평가된다.

Abstract

At first, Standard design of APR1400 is designed to support the operation of the EOP using soft control of safety and non-safety like the control room of N4 and AP600. However, KINS required that the design of the soft control for the operation of the EOP is safety grade. According to the comment of the KINS, the concept of the soft control is changed into the concept of the separation of the safety and non-safety for the design of the soft control. KINS required that the result of the HFE suitability verification for changed design is submitted to obtain the approval of the design certification. It was assessed that channelized soft controller is advantageous at the side of operator's mistake prevention and convenience. but non-channelized soft control was assessed that it was the most advantageous considering human factor. safety console operation strategy is assessed that it is properly without problem during experiment period.

1. 서론

신형경수로 1400 소프트웨어 설계는 설계인가 심사과정에서 IEEE 603 6.2절에 정의된 안전 기능을 수행하는 기기이므로 소프트웨어의 설계등급을 소프트웨어로 제어되는 기기가 수행하는 안전기능에 상응하는 안전등급(Hardware: Class 1E, Software: ITS)으로 상향하여 설계하도록 결정되었으며 소프트웨어 및 안전제어반의 인간공학적 설계 적합성에 대한 종합적인 평가가 필요하게 되었다.

2. 안전등급 소프트웨어 제어운전개념 및 워크스테이션 구조

(1) 안전등급 기기의 제어운전

- (가) 안전등급 기기는 워크스테이션의 Information FPD에서 기기를 선택 한 후 안전급 소프트웨어를 통해 제어한다. (워크스테이션의 Information FPD에서 기기를 선택하면 안전급 소프트웨어에 기기제어를 위한 제어화면이 제공됨)
- (나) 워크스테이션의 Information FPD에서 안전등급 기기를 선택하면, 그와 대응하는 하단부의 안전급 소프트웨어에 제어화면이 나타나고, 해당 기기제어 허용을 위해 채널 확인스위치를 작동 한 후 제어를 수행한다.
- (다) 안전급 소프트웨어는 자체적으로 안전등급 기기를 선택하여 제어할 수 있다. 소프트웨어의 기기선택화면에서 기기를 선택하면 소프트웨어 화면은 선택된 기기 제어를 위한 제어스위치 화면으로 전환되며, 채널 확인스위치를 작동 한 후 제어를 수행한다.
- (라) 발전소보호시스템의 작동신호에 의해 안전기능이 확보된 기기는 채널확인스위치의 작동이 생략된다.

(2) 비안전등급 기기의 제어운전

- (가) 비안전등급 기기는 워크스테이션의 Information FPD 화면에서 직접 제어한다.
- (나) Information FPD에서 해당 비안전등급 기기를 선택하면 동일화면에 소프트웨어가 제어 창(Window) 형태로 나타나고 이 제어를 이용하여 제어를 수행한다.
- (나) 비안전등급 소프트웨어는 채널확인스위치의 작동이 요구되지 않는다.

(3) 워크스테이션 구조(그림 1 참조)

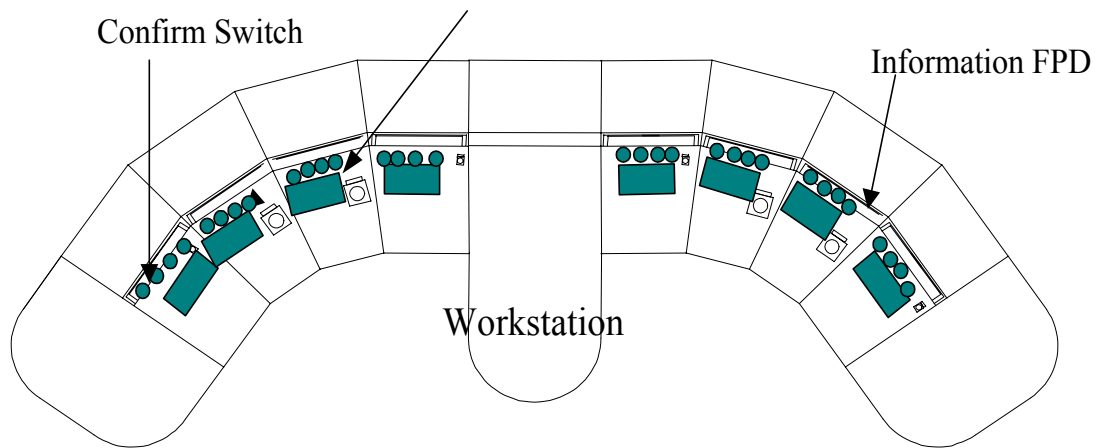


그림 1. 원자로 운전원/터빈 운전원 워크스테이션 구성도

3. 안전제어반 설계

1) 안전제어반 Minimum Inventory 선정의 적합성

신고리 3,4 호기 최소재고목록(MI)에 대한 결과는 신고리 3, 4 직무분석 후에 도출되며 건설단계에서 건설허가 이전에 수행할 예정이다. 금번 안전제어반에 대한 인간공학실험에서는 영광 3&4 호기를 기준으로 선정된 최소재고 스위치를 적용한 평가를 수행하였다.

2) 안전제어반의 운전전략

Tech. Spec.에 정한 바에 따라 주제어실 워크스테이션을 통한 운전이 불가능한 경우에 발전과장은 운전원들에게 워크스테이션에서 안전제어반으로 운전위치 전환을 지시한다. 안전제어반으로 운전전환시 각 운전원의 업무 수행 위치는 아래의 그림 2와 같다. 워크스테이션을 통한 운전시는 모든 운전원들이 대형정보표시판을 바라보며 워크스테이션(IPS)의 화면을 통해 발전소 상황감시 및 기기운전을 수행하며 안전제어반 운전시는 모든 운전원들이 안전제어반을 바라보며 각자의 위치에서 주요 변수 지시 및 경보계통(QIAS) 화면을 통해 발전소 상황 감시를 수행하고 고정형 최소 재고(Minimum Inventory) 스위치 및 안전등급 소프트웨어기를 이용하여 기기 운전을 수행한다. 운전원들의 역할은 기존 원전 운전조 구성원의 역할과 동일하다. 즉 발전과장은 종이절차서를 이용하여 운전원들에게 확인 및 조작을 지시하고 각 보직의 운전원들은 발전과장의 지시에 따라서 안전제어반상의 운전기기를 이용하여 비상운전 및 발전소 안전정지를 위한 비정상운전을 수행한다.

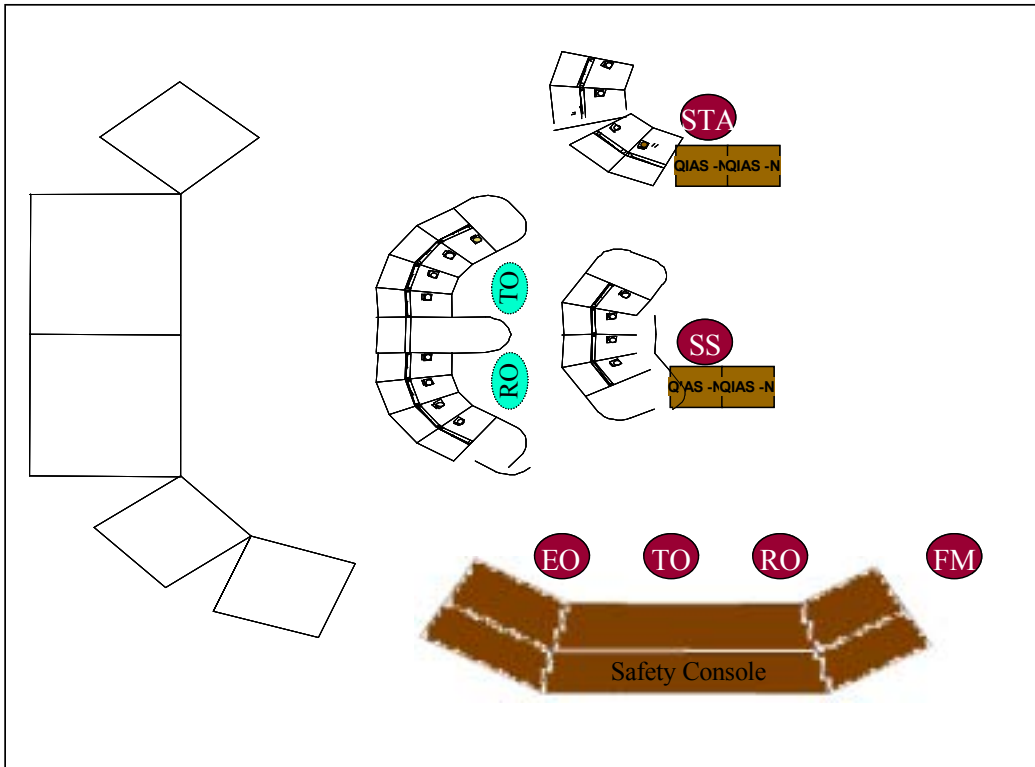


그림 2. 안전제어반 운전시 각 운전원 위치도
 SS : 발전과장, STA : 안전과장, FM : 발전대리, EO 전기계통운전원

4. 소프트웨어 및 안전제어반의 인간공학적 설계 적합성 분석

1) 동적모사장치(Dynamic Mockup) 구축과 분석 기준

전술한 목적을 달성하기 위해 본 분석에서는 우선 한국수력원자력(주) 신형원전개발센터가 보유한 신형경수로1400 동적모사장치(Dynamic Mock-up)의 보완 및 추가개발을 통해, 인간공학 실험 및 평가 환경을 구축하였다. 동적모사장치의 수정 및 보완에는 안전등급 기기 제어용 소프트웨어 설치, 안전제어반 설치, 기타 수정설계 등을 포함하고 있다. 안전등급 기기 제어용 소프트웨어는 운전원 워크스테이션 하단에 별도의 FPD를 통해 터치스크린을 이용하여 제어할 수 있도록 구현하였다.(그림 3 - 그림 8 참조) 안전제어반 설치에는 우선 Minimum Inventory Switch를 선정하여 고정형 제어스위치로 설치하였다. 또한 안전제어반에 요구되는 QIAS-N, QIAS-P 화면 및 안전등급 소프트웨어가 구현되었으며, 최종 시험 및 검증을 거쳐 인간공학 실험환경을 완성하였다.



그림 3. 채널범용 소프트웨어기



그림 4. 채널전용 소프트웨어기

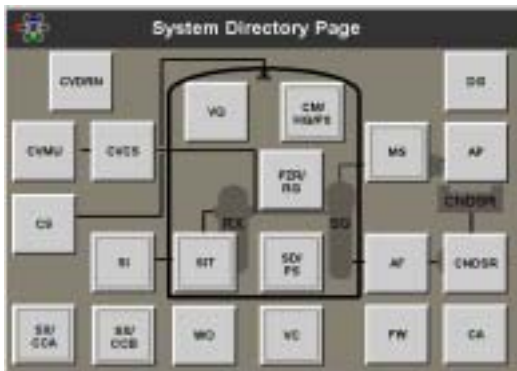


그림 5. System Directory Page 화면

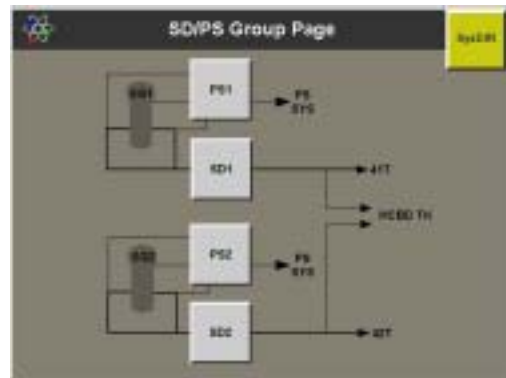


그림 6. System Group Page 화면

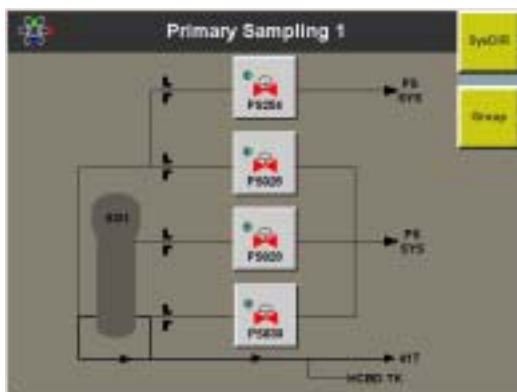


그림 7. System Mimic Page 화면



그림 8. 선택된 기기의 소프트웨어기화면

구축된 동적모사장치를 이용하여 한국표준형원전 주제어실에 근무하는 운전원 참여에 의한 인간공학 확인 및 검증이 수행되었다. 본 적합성 평가 실험에서는 다음의 척도를 사용하였다.

(1) 발전소 공정변수 평가

발전소 과도상태 발생 후 운전원의 대응능력을 간접적으로 측정하기 위해 시뮬레이터를 통해 발전소 상태변수 (plant parameter data)를 수집하였다.

(2) 상황인식 (Situation Awareness)

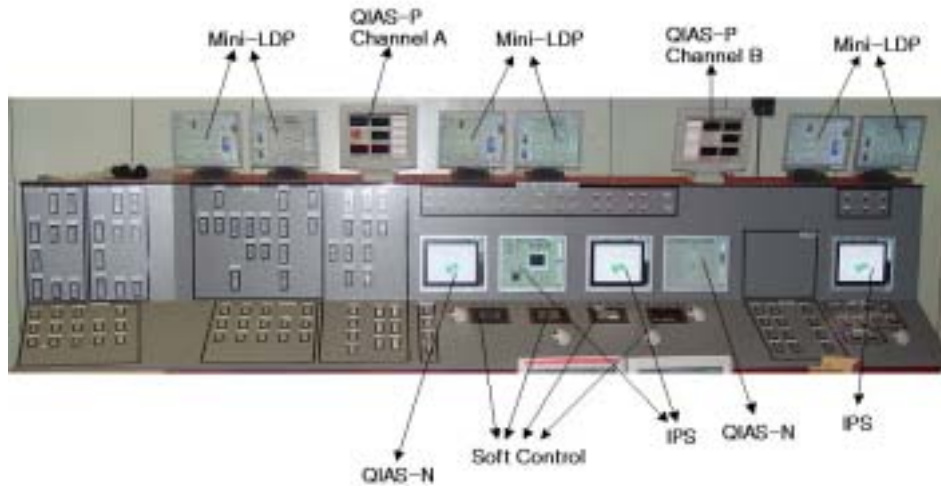


그림 9. 안전제어반

원자력 인간공학 분야에서 상황인식 측정평가에 활용할 수 있는 대표적 방법으로는 OECD Halden Reactor Project(HRP)에서 개발된 SACRI(Situation Awareness Control Room Inventory: SACRI)가 있다. SACRI는 항공분야의 측정평가시스템인 SAGAT의 측정방식에 인간공학 분석체계인 신호감지이론(signal detection theory)을 접목시킨 것으로 현재 원전분야 전용으로 개발된 방법이다. 그러나 이 방법은 HRP 시뮬레이터에 활용하기 위해 마련된 것으로, 현재 본 분석의 여건을 고려할 경우 적용에 어려움이 있다. 따라서 본 실험에는 보다 일반적인 상황인식 측정방법인 SART(Situational Awareness Rating Technique)를 부분적으로 수정한 KSAX방식을 이용하여 상황인식을 측정·평가하였다.

(3) 작업부하 (Workload)

본 실험에서는 주관적 평가 기법으로 널리 활용되고 있는 NASA TLX를 이용하여 운전원의 작업부하를 측정하였다. 미 항공우주국(NASA)에서 개발한 NASA TLX는 수행 직무에 요구되는 작업자의 작업부하를 정신적 요구, 신체적 요구, 시간적 요구, 수행도, 노력, 좌절 수준 등 6개 요인으로 분류하고 있다.

(4) 운전원간 상호작용 (Team Interaction)

행위기반 팀워크 평가척도 (Behaviorally Anchored Rating Scale: 이하 BARS)를 이용하여 운전조 협업 및 수행도 수준을 평가하였다. BARS는 OECD HRP에서 개발된 것으로 주요 평가항목으로는 팀의 임무 집중도 및 단체의사 결정 효율(task focus/decision making), 의견에 대한 조율(coordination as a crew), 의사소통의 효율(communication), 개방성(openness), 팀 융화(team spirit) 등 5개 부문으로 나누어져 있다.

(5) 운전원 설문조사 (Questionnaires) 및 심층면담 (Debriefing)

설정된 인간공학 평가현안을 종합적으로 평가하기 위해 실험에 참여한 운전원을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 본 실험에서의 설문조사는 각각의 시나리오가 종료된 후 실시하는 시나리오 종료 설문지와 운전조별 모든 실험이 끝난 후 실시되는 실험종료 설문지등 두 가지 유형으로 수행되었다

5. 소프트웨어기 인간공학 설계적합성

1) 소프트웨어기 사용 운전적합성

운전원의 상황인식은 KSAX를 통하여 평가되었으며 통계분석결과 신행경수로 1400 침단제어실에서 안전등급 소프트웨어기를 통해 운전할 때 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광 3&4호기 기존제어실에 비하여 유리한 것으로 평가되었다. 이 결과는 이전에 수행되었던 평가결과와 같다. 침단제어실에서 안전등급 소프트웨어기를 이용한 운전수행시 운전원이 느끼는 직무부하는 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광 3,4호기에서 느끼는 직무부하보다 적게 느끼는 것으로 평가되었다. 운전원간 의사소통에 대한 운전전문가들의 평가도 평균 수준 이상으로 평가되어 문제가 없는 것으로 판단된다.

소프트웨어기에 대한 인간공학 현안들 중 아래의 현안들에 대하여 설계결합사항이 도출되었으며 모두 설계반영을 통해 해결 가능한 현안들이다.

- 안전등급 soft control 다수기기 연속 조작성,
- 운전원 작업대 공간 적정성,
- 안전등급 soft control를 통한 조절 제어,
- 안전등급 soft control 반응시간의 적절성,
- 조작 후 Feedback 확인,
- 채널전용에서 의도하지 않은 채널의 기기 조작

이상에 대한 평가결과를 종합할 때 안전등급 소프트웨어기는 채널전용, 채널범용 두 가지 설계 모두 운전에 적합한 것으로 평가된다.

2) 안전등급 소프트웨어기 채널 전용(Channelized) 설계와 채널 범용(Multi-channel) 설계간 인간공학적 비교

인간공학적으로 채널범용 소프트웨어기가 편의성이나 운전원 오류방지 측면에서 유리한 것으로 평가되었으며 상세한 내용은 아래와 같다. 그러나 안전등급 소프트웨어기와 비안전등급 소프트웨어기를 통합한 범용 소프트웨어기가 인간공학적으로는 가장 유리할 것으로 평가되었다.

	채널범용	채널전용
사용성	Information FPD 화면과 안전등급 소프트웨어기 화면과의 관계는 일 대 일 (1:1) 대응 관계로 구성되어 있으며, Information FPD 화면에서 안전등급 기기를 선택하면 해당 FPD 아래에 있는 소프트웨어기 화면에서 관련 기기 제어를 위한 소프트웨어 화면이 나타난다. 이러한 제어 방식으로 운전원을 통해 시험한 결과 오류가 발생되지 않음.	Information FPD 화면과 안전등급 소프트웨어기 화면과의 관계는 다 대 다 대응 관계로 구성되어 있으며, 이러한 제어방식으로 유사한 기기가 두개 이상의 소프트웨어기 화면에 표시되는 경우 의도하지 않은 기기를 조작할 오류의 가능성이 있고, 4대의 소프트웨어기 중에서 방금 선택된 기기가 어느 채널의 소프트웨어기에 제공되었는지 확인해야 하는 부담이 있음.

응답시간	상대적으로 전용보다 느리지만 Fast Mode 사용시 소프트웨어기 운전에는 문제는 없음	소프트제어기를 위한 I&C 구성이 범용에 비해 상대적으로 단순하므로 응답시간이 빠름
조작단계	채널 Confirm을 위해 일부기기에 대한 조작 단계는 증가되지만, 인간공학 적합성 평가에서 큰 문제는 발견되지 않았음.	소프트제어기 조작 시 채널별로 구성되어 있어 채널 확인(Confirm Switch) 조작을 수행하지 않으므로 필요한 조작 단계 측면에서는 범용보다 유리함.
Workstation 공간	RO 혹은 TO Workstation(4개의 Information FPD)에서 소프트웨어기 설치 대수가 2대 내지 3대의 (수량을 2대 또는 3대로 확정 요망함) 소프트웨어기가 제공되어도 발전소 정상 및 비상운전을 위한 제어기능을 충분히 수행할 수 있기 때문에 Workstation Space에 유리함	RO 혹은 TO Workstation(4개의 Information FPD)마다에서 소프트웨어기 4대를 모두 설치해야 하므로 Workstation Space 확보에는 불리함. 전용 소프트웨어기 특성상 Confirm Switch 설치 공간은 불필요함.

6. 안전제어반 인간공학 설계적합성

1) Minimum Inventory 선정 적합성

안전제어반은 최소재고(MI) 스위치들과 기타 기기들을 통해 고온 및 상온 정지를 포함하여 발전소 필수 안전기능 유지가 가능하여야 한다. 신고리 3,4호기 최소재고(MI) 선정은 세 가지 방법을 통하여 이루어지며, 최소재고 스위치들은 EOP 수행에 필요한 안전급 기기 및 안전정지를 위해 요구되는 스위치, PRA/HRA 결과로 선정된 Critical Operator Actions(PSAR table 참조) 수행을 위해 요구되는 스위치 등을 포함한다. 또한, 비상운전절차를 수행하는데 필요한 기기 중 MI 스위치로 제공되지 않는 비안전기기 및 안전기기에 대해서는 안전제어반에 설치되어 있는 ESF-CCS 소프트웨어 안전제어기 또는 현장 운전으로 보완된다. 운전원의 상황인식은 KSAX를 통하여 평가되었으며 통계분석결과 안전제어반에서 운전할 때 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광3,4호기 기존제어실에 비하여 유리한 것으로 평가되었다.

2) 안전제어반 인간공학 적합성

안전제어반에서 운전할 때 운전원이 느끼는 직무부하는 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광 3,4호기에서 느끼는 직무부하보다 적게 느끼는 것으로 평가되었다. 안전제어반에 대한 인간공학 현안들 중 아래의 현안들에 대하여 설계결함사항이 도출되었으며 모두 설계반영을 통해 해결 가능한 현안들이다.

- MMI 기기의 배치 및 배열,
- 개별 운전정보 및 제어기 그룹핑,
- 관찰 및 조작상의 적절성,
- 최소재고(MI) 선정의 적절성

운전원간 의사소통에 대한 운전전문가들의 평가도 평균수준 이상으로 평가되어 문제가 없는 것으로 판단되었다. 이상에 대한 평가결과를 종합할 때 안전제어반 설계는 운전에 적합한 것으로 평가 된다

3) 안전제어반을 사용한 발전소 운전전략 적합성

안전제어반 운전시는 모든 운전원들이 안전제어반을 바라보며 각자의 위치에서 QIAS 화면을 통해 발전소 상황감시를 수행하고 고정형 최소 재고(Minimum Inventory) 스위치 및 안전등급 소프트웨어를 이용하여 기기 운전을 수행한다. 운전원들의 역할은 기존 원전 운전조 구성원의 역할과 동일하다. 즉 발전과장은 종이절차서를 이용하여 운전원들에게 확인 및 조작을 지시하고 각 보직의 운전원들은 발전과장의 지시에 따라서 안전제어반상의 운전기기를 이용하여 비상운전 및 발전소 안전정지를 위한 비정상운전을 수행한다. 안전제어반 운전전략은 금번 인간공학실험을 통해 문제가 발생하지 않았으며 적절한 것으로 평가된다.

7. 결론

운전원의 상황인식은 KSAX를 통하여 평가되었으며 통계분석결과 신형경수로 1400 침단체어실에서 안전등급 소프트웨어를 이용한 운전수행시 운전원이 느끼는 직무부하는 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광 3,4호기에서 느끼는 직무부하보다 적게 느끼는 것으로 평가되었다. 운전원간 의사소통에 대한 운전전문가들의 평가도 평균수준 이상으로 평가되어 문제가 없는 것으로 판단된다. 소프트웨어에 대한 인간공학 현안들 중 일부 현안들에 대하여 설계 결함사항이 도출되었으며 모두 설계 반영을 통해 해결 가능한 현안들이다. 이상에 대한 평가결과를 종합할 때 안전등급 소프트웨어는 채널전용, 채널범용 두 가지 설계 모두 운전에 적합한 것으로 평가된다. 안전제어반에서 운전할 때 운전원이 느끼는 직무부하는 평가에 참가한 운전원들이 평소에 운전을 수행하는 영광 3,4호기에서 느끼는 직무부하보다 적게 느끼는 것으로 평가되었다. 안전제어반에 대한 인간공학 현안들 일부 현안들에 대하여 설계결함사항이 도출되었으며 모두 설계반영을 통해 해결 가능한 현안들이다. 운전원간 의사소통에 대한 운전전문가들의 평가도 평균수준 이상으로 평가되어 문제가 없는 것으로 판단된다. 이상에 대한 평가결과를 종합할 때 안전제어반 설계는 운전에 적합한 것으로 평가된다.

<참고문헌>

1. 신형경수로 1400 표준설계 후속조치 이행 결과 보고서, 2003. 5