

영광 3 호기 원자력발전소 주제어반 설계의 인간공학적인 검토결과 예비보고

(A Preliminary Report of a Human Factors Review of Main Control Board Design of
Youngkwang #3 Nuclear Power Generation Plant)

이용희, 한국 원자력연구소

Abstract

국내에는 다수 원자력발전소가 가동중이며 국내기술진의 참여로 건설되고 있는 원전도 있는데, 그중 영광 3호기가 앞으로 건설될 원자력발전소의 원형으로 주목받고 있다. 원자력발전소에서 주제어반 (MCB: Main Control Board)은 운전원과 계통간의 상호작용이 이루어지는 핵심시설로써, 원자력발전소의 안전성과 효율성에 미치는 영향이 큰 것으로 평가되어 인간공학적인 측면이 강조되고 있다. 본문은 영광 3호기의 주제어반 시설검사에 참여한 결과를 주제어반 설계에 대한 인간공학적인 평가의 예비보고로써 제시하고자 한다.

(주의 : 본 발표 내용은 한국원자력연구소의 공식의견이 아니며, 저자의 개인적인 견해임.)

1. 서론

대규모 시스템의 설계에서 시스템공학 기술의 중요성이 부각되고 있다. 원자력발전소는 시스템 공학의 방법론이 필요한 대표적인 대규모시스템의 하나로 인식되고 있으며, 안전성과 효율성의 측면에서 기계측의 기술적인 성숙에 비하여 상대적으로 뒤떨어진 인간공학적인 측면의 중요성이 부각되고 있다.

국내에는 이미 8기의 원자력발전소가 가동중이며 건설 또는 추진되고 있는 원전도 있다. 그러나, 원전설계의 대부분이 도입되어 국내 산업공학계의 참여는 미진하였다. 현재 최초로 국내기술진의 참여로 건설되는 원전(영광3,4호기)는 앞으로 국내에 건설될 원자력발전소의 원형으로 주목받고 있을 뿐만 아니라, 국내기술의 확보가 강조되고 있다. 이러한 상황에서 부분적으로나마 설계의 인간공학 적용이 시도되고 있다. 영광3호기는 건설이 거의 완료되는 시점에 있어서 시설의 사용전 검사의 일환으로 인간공학적인 시설검사를 수행하였다. 본문은 인간공학적인 시설검사의 핵심이 되는 주제어실의 검토에 참여한 결과를 적용된 실무적인 방법론과 검토의 결과에 대하여 예비보고의 형태로 간략하게 제시하고자 한다.

2. 개요

가. 원자력발전소의 인간공학적인 검토

주제어반은 원자력발전소에서 운전원과 계통간의 상호작용이 이루어지는 핵심시설로써, 원자력발전소의 가동안전성과 효율성에 미치는 영향이 큰 것으로 평가된 바 있다. 따라서, 국내에서는 주제어반의 설계에 대한 인간공학적인 접근방식의 도입을 시도하고 있으며, 설계와 건설이 완료되는 시점에서 사용전 시설검사의 주요항목으로 인간공학적인 검토를 최초로 수행하였다.

나. 검토의 방법론

주제어반의 인간공학적인 검토는 현장실사, 운전원 인터뷰, 설문조사, 기술검토 등의 방식으로 수행되었는데, 전체 설계에 대한 상세한 검토라기보다는 경보기능, 주제어반의 배열, 표시 및 제어장치, 운전원 지원기능 등 규제기관에서 요청한 제한적인 검토자문 항목에 대하여 집중적인 검토를 수행하였다.

(1) 검토 항목

Task 1. 경보기능, 주제어반의 배열, 표시 및 제어장치의 인간공학적인 검토

Task 2. 안전정보 표시 및 운전원 지원기능의 적합성 평가

Task 3. 운전원 인터뷰를 통한 제어반의 인간공학적인 평가

(2) 수행 내용

- 시설실사 내용 : 영광 3 호기 제어반 및 제어실
현장검토(93년 00월 00일) : 사진조사, 지침서에 의한 개별항목 검토
- 서류검토(93년 00월) : 최종 안전성분석보고서(FSAR) 18장 기준
- 운전원 인터뷰(93년 00월 00일) : 별첨 인터뷰 양식 및 결과자료 참조
- 기술검토 회의 및 Boiler Room Meeting(94년 00월) :

(3) 운전원 인터뷰

- 일시 : 1993년 00월 00일
- 장소 : 영광3호기 건설현장 회의실
- 참여자 :
 - 규제기관 : 원자력안전기술원 계측제어 검사실
 - 시설의 인간공학적 적합성 검토단 :
 - 사업자 : 한전 운영부장 및 운전조
 - 설계용역사 : 한기 제어반 설계담당
- 관련자료 :
 - 기준자료 : FSAR 18장, HF 010 Rev.0.
 - 인간공학적 적합성 검토의 배경 설명자료 및 인터뷰 양식
- 절차 (1) 업무개요 및 배경 소개 : 전체 관련자 회의
(2) 운전원 인터뷰 진행 : 기초자료 작성 및 기준설명
(3) 운전원 현장 검토 : 검토 항목별 자기 확인 검토
(4) 인터뷰 참여자 토의 : 확인 및 정리
(5) 질의사항의 기술적인 상세 검토 :
- 인터뷰 방식
 - (1) 개인별 작업현황 파악자료 작성
 - (2) 검토항목별 건의 및 질의사항 논의 : 현장 검토 작성 포함
 - (3) 간접적인 검토항목 확인
- 작성자료항목
 - (1) 개인별 작업상황 관련
 - 개인별 인적사항
 - 개인별/운전 모드별 작업위치
 - 담당 계기의 범위 및 주관적인 부담
 - 업무에 대한 이해도 및 준비정보
 - (2) 상세검토항목 관련범위
 - 제어실 일반
 - 제어반
 - 경보
 - 의사소통
 - RSP
 - 기타
 - (3) 검토필요항목에 대한 간접 Check
 - 설계자 주도의 보완검토 필요항목
 - 운영자 주도의 검토 필요항목

3. 검토 결과

규제기관을 통하여 전달된 영광 3호기 주제어반 인간공학적 설계검토결과의 예비보고서에서 언급된 내용의 개요는 다음과 같다. 검토결과는 설계내용에 공통적으로 적용되는 일반사항과 기술적인 항목 및 이를 해결하기 위하여 주목되어야할 권고사항 등으로 구분하여 제시하였다.

가. 일반사항

- 운전 경험에 따른 개선 요구사항의 반영이 수행되었으나 그 과정 및 항목이 불확실함.
- 운전원의 추가적인 설비 개선 요구사항은 파악되지 않았음.
- NUREG-0700 6절을 기준으로할 때, 소소한 몇가지 문제점을 제외하고는 개별시설의 세부적인 문제점은 거의 보완되었음.(부록 B. 참조)
- 적용된 설계개념이 과거의 point-to-point방식(여러가지 계측제어기기에 대하여 개별적으로 각각의 MMI기기를 제공하는 방식)으로, 기본 설계의 낙후성 및 그에 따른 상당한 운전원 부담이 상존하는 것으로 예상됨.
- 사용된 MMI기기가 전기전자적인 측면에서는 품질이 우수한 것으로 보이나 인간공학적으로는 개별적인 기기자체의 품질수준이 매우 낙후되어 있음.
- 대부분의 기기와 시설에 대하여 여러가지 인간공학적인 보완조치를 적용하고 있으나, Back-fitting 방식의 설계를 보이고 있으므로 신규설비의 장점을 살리지 못하고 있음.
- 계통별 기능이 아니라 운전원 입장에서 전체 운전작업의 정의와 그에 따른 기능적인 세부 작업절차에 대한 검토가 필요함.

나. 인터뷰 결과

○ 개인별 인적사항 관련 (참고자료이며, 비공개 원칙이므로 요약하지 않음)

○ 개인별 작업상황 관련

- 개인별 업무의 분장과 관련하여 시설의 설계가 매우 양호하여 담당업무의 분장에 대한 기본적인 준비가 용이한 것으로 인식되고 있음.

(의견) 시설의 업무분장에 대한 설계특성이 명료하고 양호함.

- 현 시설에서 제공하는 분장의 내용과 담당기능에 대한 상세사항은 일부 건의사항이 있으며, 조작의 직접 훈련후에야 구체적으로 건의 가능함.

(의견) 추가적인 운전원 수용성에 대한 상세검토 작업 필요.

- 현 시설의 특성에 대한 명확한 인식이 부족하나, 이러한 인식의 부족이 시설의 활용에 미치는 영향에 대한 우려는 느끼지 않고 있음.

(의견) 개별 기기의 상세한 사용법의 훈련과 검토작업을 통하여, 설계특성에 대한 인식의 부족을 해결하고 특정한 시설활용의 부담에 대하여 예상하고 대비할 수 있도록 권고함.

- MCB상에서 나타나는 업무의 부담에 대한 인식이 아직 명확하지 않음으로써, 경보 및 일부기능에 대한 사용법 부담이 있음.

(의견) 상기항목과 동일함.

- 개인별로 담당 업무량의 주관적인 부담이 현격한 차이를 보이고 있음.

(의견) MCB의 설계초기로부터 운전원 직무분석에 의한 기능할당 검토와 개인별 업무량의 할당조정이 수행되지 않은 것으로 보임. 그러므로, 전체 MCB에 대한 기능할당분석과 주관적인 업무부담을 평준화하는 업무조정 및 보조 지원기능의 필요성 정의가 필요함.

- 시설의 설계가 개별적으로 분리되어 전체적인 시설의 사용방식과 절차에 대한 이해가 어려움. (예를들면, 경보대응이나 비상운전절차등 팀웍으로 이루어지는 절차를 위하여 어떠한 순서와 방식으로 각 시설이 활용되는지 정보가 부족함.)

(의견) 우선 각 operator module등 개별기기에 대한 사용법에 대한 명확한 자료를 작성하도록 하며, 운전절차별로 전체 MCB의 기기의 가용성(availability)과 적합성(suitability) 검토를 권고함.

○ 상세검토항목 관련

(1) 제어실 일반

제어실 일반에 대한 운전원의 수용도는 기존 호기를 기준으로할 경우, 매우 양호한 것으로 보임. 경보창의 가독성, 제어기 위치배열, 눈/입식작업의 피로, 작업역의 크기부담, 용어/기호의 일관성 등에 대한 우려가 제기되었음. 기타, operator module의 활용과 비상운

전등에서 1차측 작업자(RO)의 이동경로가 과도하거나 업무부담이 과도할 우려가 제기됨.

- 경보창의 가독성에 대한 우려가 있음

(의견) 가시성의 차원이 아닌 가독성의 차원에 대한 우려는 훈련등을 통하여 친숙성을 높여줌으로써 해결가능하나, 위치의 인체측정학적 검토(고개각도등), 경보창 자체의 배열과 크기의 조정 등 공학적 보완조치도 동시에 강구하기 바람.

- 제어기의 위치와 관련하여 무의식적인 작동위험등의 우려가 있음.

(의견) 패널상에서 제어기의 위치가 가장자리에 근접하여 무의식적인 작동위험이 있거나, 손의 파악특성을 기준으로 부적절한 위치(거리, 조작시 몸의 방향)에 있어 불편이 있는 것으로 보임. 이는 NUREG-0700의 기준에도 맞지 않는 사항이므로 보완이 필요함.

- 눈의 피로나 입식작업의 지속으로 인한 피로가능성이 있음.

(의견) 현재 설계의 기본적인 개념상으로 볼 때 재래식이므로, 입식식 작업의 부담은 피할 수 없는 것으로 보임. 그러나 정상작업위치에서 개인별 작업공간 배려를 통하여 보완이 가능하며, 시각적인 피로에 대하여도 작업자 편이성 제고의 차원에서 검토하여 후속기에서 개선되기를 기대함.

- 작업역의 크기부담이 우려되고 있음.

(의견) 작업역의 크기부담은 전체를 관장하는 역할과 1차측보다는 2차측에서 우려되고 있음. 이는 현 설계가 재래식의 point-to-point 개념으로 이루어지고 있으므로, 시설의 기본 설계개념상으로 변화되지 않으면 작업역의 부담을 해결되기 어려울 것으로 보임. 또한 U-shape을 통한 종합적인 파악의 편이제고가 point-to-point 개념의 과도한 수평배열로 인하여 효과를 얻지 못한 것으로 보임. 작업역의 부담을 완화하기 위하여 PMS와같은 종합정보체계나, 2차측 시설활용방식에 대한 지원(훈련, 사용법 등)을 개별적으로 고려.

- 분리되어 전체적인 시설의 사용방식과 절차에 대한 이해가 어려움. (예를 들면, 경보대응이나 비상운전절차 등 팀웍으로 이루어지는 절차완수를 위하여 어떠한 순서와 방식으로 각 시설이 활용되는지 정보가 부족함.)

(의견) 우선 각 operator module 등 개별기기에 대한 사용법에 대한 명확한 자료를 작성하도록 하며, 운전절차별로 전체 MCB의 기기에 대하여 그 가용성(availability)과 적합성(suitability) 검토를 권고함 (NUREG -0700 기준).

- 현 시설에서 사용된 용어의 통일이 필요함.

(의견) 원전에서 용어통일의 문제는 숙원성격을 가진 문제라는 반응을 보임. 운전원의 의견으로는 영광3호기뿐만 아니라 한전 전체적으로 용어정리 작업이 필요하나, 이 작업은 학계나 연구기관 등 제 3 자에 의하여 전반적으로 수행되는 것이 바람직하다는 의견을 들었음. 그러나, 우선 현 시설에서 각 기기와 절차서 및 P&ID 등에서 사용된 용어의 일관성이 특정한 문제를 야기할 수 있는 우려할 만한 수준의 문제인지에 대하여는 상세한 검토가 필요하나 운전원의 입장은 매우 절실한 문제로 지적됨.

(2) 제어반

제어반의 설계는 전반적으로는 큰 문제가 없으나 1차측의 설계를 중심으로 몇가지 우려사항을 보임. 제어기의 오류대응특성, 제어기의 조작방향에 대한 양립성(compatibility), 다중정보에 대한 대표값 선택의 부담, 설정치 및 한계 표시의 용이성, 과도한 정보획득절차, 조작결과 확인의 지연, 우선순위 표시를 위한 강화설계(enhancing feature)등에 대한 우려차원에서의 지적이 있음.

- 제어기의 오류대응특성에 대한 우려

(의견) 제어기의 설계특성이 과도한 정확성을 요구하고 있어서 약간의 실수에 대하여도 전혀 회복조치를 위한 수단을 제공하여 주지 못하는 경우가 있으며, 이는 1차측의 경우에 심각한 업무부담으로 보임. 이는 제어기 자체의 문제가 아니라, 계측제어시설의 기능적인 측면에서 제어논리의 설계가 오류에 대한 대응에 소홀함을 보이는 것이며, 구체적인

인 오류대응 및 회복을 위한 기능(error-forgiveness)을 확보하도록 상세분석이 필요함.

- 제어기의 조작방향에 대한 양립성(compatibility),

(의견) 계측제어기의 좌우상하등 조작방향이 일상적인 경험과 습관에 일치하지 않는 경우가 있다고 지적되었는데, 이는 해당 설계항목에 대한 상세조사 및 시정조치가 필요함.

- 다중지시계에 의한 정보에 대한 대표값 선택의 부담,

(의견) 현재의 시설이 가지고 있는 설계개념상으로 다중의 지시기에 의하여 주요 변수값 및 기기상태 정보를 제공받는 경우가 많은데, 필요한 값은 하나이므로 대표값을 선택하는 부담이 막대함. 이러한 측면은 TMI사고에서 얻은 교훈과 같이 단순한 업무의 부담이라는 우려의 차원을 넘어서 때로는 잘못된 선택으로 인한 심각한 인지적 오류를 야기할 수 있는 가능성을 내포하는 것으로, 지원설비등 적극적인 보완이 필요함.

- 설정치 및 한계 표시의 용이성,

(의견) MCB상의 기기들에 표시되어 있는 설정치, 한계치, 눈금, 단위 등의 표시가 충분한 가시성, 가독성을 확보하고 있지 않은 것으로 우려가 표시되었음. 해당 설계의 상세확인 및 보완조치가 필요함.

- 과도한 정보획득절차,

(의견) 단일한 정보를 얻는데 여러가지 단계의 절차를 수행해야하는 경우가 예상되는데, 이는 설계의 특성상으로 불가피한 경우를 제외하고는 운전원의 작업부담으로 작용하지 않도록 상세분석되어야함. 이러한 점은 단순한 MCB 기기선택의 문제가 아니라, 설계논리와 연관이 있으므로, 현재의 설계에 대한 보완은 제한적일 것으로 예상됨. 후속호기 설계에서는 개별적인 계측제어의 논리설계에서 사용절차에 대한 인간공학적 검토를 반드시 수행하도록 요구할 필요가 있음.

- 조작결과 확인의 지연,

(의견) 인간공학적인 측면에서 운전원의 모든 조작은 즉각적인 반응을 통하여 조작의 결과를 확인하도록함으로써, 조작의 정확성과 편의성을 확보할 수 있으나, 원전과 같은 다중의 제어루프를 가진 설계에서는 제어조작의 결과가 지연되는 점은 불가피한 경우가 많은 것으로 파악됨. 그러나, 제어결과에 대한 안전성등에 중요한 항목에 대하여는 가능한 빠르고 근접한 위치에서의 반응확인이 가능하도록 제공되어야함을 원칙으로하며, 지연이 불가피한 경우에는 현재 진행중인 내용의 어떠한 영향을 주고 있으며 어느정도 진행되고 있는지에 대한 표시를 통하여 보완할 수 있음.

- 우선순위 표시를 위한 강화설계(enhancing feature)의 적절성

(의견) 색상, 미믹, 형상코드 등 정보의 우선순위와 연관을 위한 강화설계의 내용이 기능적으로는 매우 도움이된다는 점에 동의하였으나, 사용자 입장에서는 일관성, 크기, 양립성등의 측면에서 약간의 보완이 필요한 것으로 지적됨.

(3) 경보

경보의 특성에 대하여는 상당한 개선이 이루어져 있음을 인식하고 있으며, 매우 호의적인 상황임. 그러나, SPDS/PMS기능, 경보CRT등 설계의 변화가 친숙하지 않으며, 그 활용방식에 대한 명확한 정의가 이루어지지 않은 점에 대하여 전반적인 우려를 가지고 있었으며, 개별적으로 소소한 추가개선 방향을 제기하였음.

- Dark Board 개념의 적용에 대하여는 흡족함.

(의견) 현재 운전원의 확인범위내에서는 경보의 논리적인 설계로 인하여 Dark Board 개념이 적용된 것을 매우 흡족하게 인식. 경보의 적용개념이 반영되었음.

- 경보창의 갯수는 많이 축소되었으나, 일부분에서는 선행호기와 유사하게 암기에 부담이 된다는 일부 지적이 있음.

(의견) 경보의 논리적인 설계로 인한 경보창의 축소개선이 인정되나 각 경보창의 암기부담에 대한 검토가 필요함.

- 경보창의 가시거리에 대한 의견은 3-7m로 상당한 편차를 보임.
(의견) 인간공학적 기준에 의한 경보창의 가시거리는 충분하지 않을 우려가 있음. 특히, 광대역의 U-shape MCB로 인하여 충분한 가시거리의 확보가 중요하나 물리적인 크기의 조정으로는 충분한 대응이 어려울 것으로 보임. 따라서, 다른 개선방안의 검토가 필요함.
- 경보의 구별기능이 충분하지 않음.
(의견) 비상운전 등 경보의 폭주시 충분한 식별을 위한 현재의 보완기능이 First-out-Annun, CFM-CRT, Alarm-CRT등으로 제공되고 있음에도 불구하고 그 기능의 활용이 불확실하여, 사용자의 인식이 충분하지 않으며, 다른 기존호기와 유사한 부담을 느끼고 있다고 판단됨.
- 정확한 경보와 잘못된 경보(고장난 경보등)를 구별하는 방식이 부족.
(의견) 경보의 가용성을 위협하는 가장 중요한 요인이므로 우려점의 운전에 대한 영향정도에 대한 사용자 수용성 검토가 필요함.
- 경보기능관련 설계의 종합적인 측면 보완 필요.
(의견) 경보창, First-out, CFM-CRT, Alarm-CRT, Alarm-log등 경보와 관련되어 있는 시설의 사용법과 그 설계 일관성(기호, 용어, 색상등)에 대한 우려가 있음. 따라서, 개별적인 검토보다는 제반기능에 대한 종합적인 검토가 필요함.
- SDPS기능의 충분성/적절성에 대한 의견.
(의견) 현재 SPDS기능을 위하여 제공되고 있는 CFM기능 및 PMS 기능이 ERF/SPDS요건을 만족하는 충분성을 갖추는데 문제가 없으나, 그 적합성에 대하여는 사용자 수용성 검토가 필요함.

(4) 의사소통

- 의사소통에 대하여는 제어실 내부 및 외부간의 의사소통과 정보전달에 대한 검토로, 제어실 내부의 배열에 관하여 약간의 문제점이 지적되었음.
- 의사소통 기기에 대하여 현 설비의 특성은 매우 지원이 잘되어 있음.
(의견) 기기의 기능적인 제공은 양호, 물리적 사용위치에 대하여 보완이 필요함.
 - 운전조건 교대에 필요한 소요시간과 정보는 충분하도록 설계되어있음.
(의견) 시설의 내용은 양호하나, 교대지원설계가 후속추가로 필요함.
 - 현 시설에서 지시확인을 위한 문제점은 없음.
(의견) 현재 운전원은 문제가 없이 양호한 것으로 인식되고 있으나, 실제적인 확인을 거치지 않은 것으로 보임. 절차서, log-print-out, 콘솔의 활용에 대한 실증검토가 필요함.
 - MCR 내부의 의사소통에 대한 시설배치의 적절성은 검토가 필요함.
(의견) 운전원 자체의 기술적인 검토가 충분하지 않은 관계로 시설배치에 대한 명확한 의견을 표시하지 않았으나, 운전원 콘솔에 대한 우려를 표명함. 콘솔의 사용방식이 입식인데 설계가 좌식기준이라든지, 사용시점과 기능에 대한 정의가 불확실, 시청각상의 방해 우려 등이 제기되었으므로 이에 대한 상세검토와 배치배열의 변경등 보완이 필요함.

(5) 원격정지판 (RSP:remote shutdown panel)

- RSP의 현 시설상태는 운전원이 충분하게 파악하고 있지 못하고 있으며, 그 중요성에 대한 인식이 강조되어야할 필요가 있음.
- 현 설계의 MCB와의 일관성에 대한 의견은 양호함.
(의견) MCB설계와 별다른 차이점이나 문제점을 발견하지 못함.
 - 기능의 보완에 필요한 계측제어변수가 있음.
(의견) RSP의 기능이 T-hot, RCS-press, S/G level, AFW flow, MSIV status, Stm Dump 등 보조적인 정보를 추가로 구비할 경우 충분한 기능 및 사용자 편의성을 확보할 수 있을 것으로 보임. 이에 대한 기술적인 검토가 필요함.

(6) 기타

현 시설의 의의에 대한 운전원의 의견을 수집한 결과, 긍정적인 개선이 이루어진 설계로 의견이 종합됨.

- 현 설계가 표준원전으로서의 요건을 충분히 갖추었는지에 대하여는 불확실하나 기존 호기에 비하여 상대적으로 점진적인 개선이 이루어지고 있음을 표시하였음.
- PMS로 대표되는 전산지원기능이 운전의 편이성을 제고하는데 매우 긍정적인 효과를 보이고 있음을 표시함. 이에 대한 수용도와 후속적인 개선의 기대감이 적극적으로 표현되었으나, 반대로 그 사용절차 등 활용방식에 대한 명확한 정의와 용어/기호의 일관성 등 인간공학적 검토가 기능의 긍정적인 활용을 위한 전제 조치로 필요한 것으로 표현됨.
- 제3자 검토를 위하여 심사기관이나 연구기관 주도로 MCR Mock-up을 제작하고 설계의 진행과정에서 객관적인 검토를 병행하는 방식이 제안됨.

○ 검토필요에 대한 간접 Check

한전 주도로 MCB 설계자에게 제기할 수 있는 질의사항의 후보에 대한 운전원의 의견을 간접적으로 수집한 결과, 다음 항목에 대하여 추가적인 검토가 필요한 것으로 종합됨.

- 경보의 고장 및 오류에 대한 운전원의 대응조치 방법론을 정의 필요.
- 무선사용에 대한 전자공학적 간섭의 우려 검토 필요.
- 지기기의 상태가 양호한지 여부에 대한 운전원의 판단방법에 대한 검토 및 명확한 방식의 제시.
- 경보의 설정치등 경보에 대한 상세정보를 얻는 방법의 명시.
- 특정시점에서 작동가능한 기기와 의미있는 표시기의 차별이 필요하지 않은지에 대한 검토. 각 운전상황별로 안전성의 위협이 있는 제어조작에 대한 확인 검토 방법론에 대한 추가기능 필요.

규제기관에서 MCB설계자 중심으로 상세검토가 수행을 요구해야할 검토항목을 간접적으로 수집하여, 다음과 같이 요약함.

- 패널의 기능할당에 대한 타당성과 선행호기 대비 우위성 정도 분석.
- 비상운전시의 소요 정보 및 제어기의 요건에 대한 현 시설의 검토 및 검증: (예:time-line analysis)
- 정상작업시의 업무부담에 대한 분석
- TMI-backfitting에 의한 보완된 시설과 현 시설의 차이점.
- SPDS등 보조지원기능의 활용방식에 대한 타당성/사용자 수용성 검토.
- 인간공학적 적합성검토의 chech list와 검토 결과 제시.

다. 기술적 검토 필요 사항

(1) 제어반 및 기기의 기능과 사용법에 대한 정의

다음항에 언급되는 제어반 및 기기의 기능과 사용법에 대한 명확한 정의가 필요하며, 이를 위하여 제어실의 기능적인 배치, 규격 등에 대한 상세한 검토가 필요함.

- PMS console : 규격 및 재료 사용
- Operator Console : 제어실내의 위치 및 규격
- Operator Modules : T/G, CFM 등
- 원격정지반 :

(2) 경보의 사용자 적합성

경보와 관련한 4가지 시설(경보창, 경보CRT, CFM-CRT, Line printer 등)의 개별적인 기능을 조합하여 사용하게 되는 실제 작업시의 사용자 적합성 평가가 필요함.

- 기능적인 일관성과 작업절차와의 연관
- 용어의 혼용
- 경보의 표현방식에 대한 일관성 : 1차/2차
- 경보의 표시방식 일관성

(3) 운전원 지원기능 및 개선된 기기의 사용법

각종 지원기능과 개선된 모듈에 대하여 각각의 기능과 운전작업과의 연계성에 대한 명확한 정의가 사용자 입장에서 이루어져야 함.

(4) 인간공학적 검토사항

다음 항목에 대하여는 개별적인 검토와 보완 필요성에 대한 협의가 요망됨.

- 용어 및 약어의 일관성
- 색상의 사용과 새상에 의한 코딩방식
- 지시기 및 제어기의 크기와 그에 따른 가시성, 가독성 등의 문제
- 제어기의 위치가 무의식적인 작동의 위험성을 내포한 것에 대한 우려
- 페이지 폰의 위치에 대한 적합성

(5) 기타

- 비상운전절차에 대한 운전원의 기능적인 준비가 불확실함.
- 부분 모듈에 대한 사용법이 고리 시뮬레이터 교육으로 부족 또는 부적절함.
- 색상사용이 과다하므로 실효성있는 곳에만 제한적으로 사용하는 것이 바람직.
- 가청경보의 음원설계에 대한 재검토가 요청됨.
- 경보창의 크기와 글자의 크기 조합이 과밀상태이므로 가독성 개선이 필요.
- 지시제어기 베젤이 크기, 색상면에서 과도하게 부각되어 시각적 부담을 야기.
- 채널표시방식의 실효성이 의문시되므로 베젤색상과 함께 검토하여 개선바람.

라. 기술적 권고사항

(1) 제어반 관련

- 운전원 콘솔의 위치 및 규격이 가시성, 의사소통, 기능 측면에서 부적합하며, 사용기구나 설계의 품질이 낙후되어 있으므로 시급히 개선 필요.
- PMS console의 기능적인 장점에 대한 수용도가 매우 높는데 비하여, 적합한 사용시점과 규격 등 사소한 부적합사항으로 인한 문제를 해결해야함.

(2) 지시기 및 제어기 관련

- 제어기가 판넬의 가장자리에 위치하여 잘못된 작동의 위험이 지적됨.
- 제어기의 조작상태 표시가 표시되지 않거나 불확실한 경우 개선 요망.
- 지시제어기의 위치가 손의 파악거리에 비하여 과도한 경우.

(예 : RCS패널의 왼편 RCS/CVCS쪽의 중앙)

- 전체적으로 제어기와 지시기의 눈금, 단위 등의 크기가 작아 가독성에 문제가 있으며, 베젤의 크기와 색상이 심리적으로 부담이 됨.
- 지시기 크기나 형태에 비해 판넬사의 위치가 너무 낮거나 높아 정상적인 자세로 읽을 수 없는 경우.
- 발광형 계기의 경우, 보호창의 재질이나 표면 처리, 돌출정도가 과도하여, 가독성에 위협을 줄 가능성이 있음.
- CPC등 중요한 단위 Operator Module은 기능적으로 검토되지 못하였으며, 운전원들이 사용법에 대한 부담을 느끼는 상태임.

(3) 경보관련

- 경보창, 경보CRT, CFM-CRT, Printer-logout 등 경보관련 기기의 사용법, 표시방식, 용어 등에 대한 일관성 문제가 지적됨.
- 경보창의 가시성은 양호하나, 가독성의 개선을 위하여 조명의 균일성, 글자의 개선 등이 필요함.
- 비상운전시 경보가 운전원에 미치는 부담에 대한 동적인 검토가 필요함.

(4) 사용자 수용성 검토 종합

- 종합적인 시설의 인간공학적 검토계획(가칭 HF V&V Plan) 수립이 필요.
- 시설의 설계완료시점에서 사용자는 물론, 규제기관과 연구기관 등 제3자의 참여하에 체계적인 사용자 수용성 검토(UAT: User Acceptance Test)를 수행.
- 설계과정에서 설정된 시설의 인간공학적 타당성에 대한 기준 검토.

마. 유관사별 일반 권고사항

(1) 전력사업자(한전)에 대한 권고사항

- 자원투입의 권고 :

국내 기술로 설계되었을 뿐만아니라 인간공학적인 측면이 고려된 최초의 표준원전이라는 입장에서, 공기등 상업적인 측면이외에 기술적인 측면을 고려하여 설계의 인간공학적인 완결을 위한 몇가지 우선순위가 다른 투자를 권고함.

- 영광 3&4호기 보완방식에 대한 권고 :

일단 영광 3&4 호기는 이미 설계가 완료된 상태이므로, 기존호기의 제어실 상세 설계검토(DCRDR)와 유사한 수준에서 가용성(availability)과 적합성(suitability) 검토 및 동적인 측면이 포함된 시나리오 중심의 종합검증을 시운전 단계 이전에 한기 또는 제 3자를 통하여 수행하여 최소한의 인간공학적인 검토와 보완을 수행하기 바람.

- 인간공학 전문인력 선정 및 육성에 대한 권고 :

설계자의 인간공학 설계결과 검토나 규제기관의 검토와 보완요구사항 처리 등에 대한 한전의 실무를 담당할 수 있는 전문인력을 선정하고, 본 영광 3&4호기를 계기로 전문성을 배양할 수 있도록 하여 후속기에 대비할 수 있도록 준비하기를 권고함.

- 인간공학 업무의 재편성에 대한 권고 :

추후 후속기의 설계과정에는 표준안전심사지침서(SRP) 18절 에서 언급한 바와 같이, 계측제어시스템의 기기설계와는 별도로 인간공학 설계활동이 전문성있는 인간공학자의 총괄하에 수행되도록 명시하여야 함.

(2) 설계용역사(한기)에 대한 권고사항

- 고유한 전문인력의 확보에 대한 권고 :

S&L사의 인간공학 전문가에 전적으로 의존하여 설정된 설계는 기술자립이나 국내 고유 설계의 개발은 물론 안전성 확보를 위한 기초적인 조치에도 미흡할 위험이 있으므로, 자체적인 전문인력의 양성이나 외부 전문가의 활용이 시급한 것으로 보임.

- 인간공학 업무의 일관성 확보 권고 :

원전 설계에서 인간공학활동은 과거의 제어실설계와는 다른 운전원 중심의 개념에서 종합적으로 접근하여, 개념설계에서의 상세 계획과 기준설정 및 최종적인 설계검증에 이르기까지 일관되게 수행되어야 함. 현재와 같은 담당자의 변동 및 근거서류의 불비 등의 상태는 인간공학분야의 인허가 및 규제에 매우 비효과적인 방식으로 보임.

- 인간공학 분야의 독자적인 기술체계 구축에 대한 권고 :

인간공학적인 설계는 유사한 사례나 국내의 실적이 없으므로, 계획수립, 기준설정, 검토 및 검증 등 설계과정에서 단계별로 규제 및 인허가 기관의 단계적인 승인과 외부 전문가에 의한 검토를 병행하는 방식으로 추진하는 것이 바람직함. 새로운 분야이므로, 당분간

이 분야에 대한 한기의 경험을 체계적으로 집결할 수 있는 전문성확보의 체제가 필요함.

- 직무분석의 중요성에 대한 권고 :

인간기계연계기능의 설계를 위하여 직무분석의 범위와 방향에 대한 중요성이 가장 심하게 지적됨. 초기 개념설계에서 필요한 직무분석은 개별계통측면에서 계측제어 기능의 수집 확인이 아니라, 인간공학적인 입장에서 전체 운전원의 작업기능의 구성에 대한 재검토 및 재구성이 필요함.(NUREG-0700 App. B 및 EPRI-NP-3659 2장 등 참조)

(3) 규제기관(원자력안전기술원)에 대한 권고사항

- 인간공학 기술의 사전 준비 권고 :

안전성과 관련하여 원전의 인간공학적인 측면의 평가분석은 외국에서도 진행중이거나 아직 완료된 사례가 없는 새로운 분야이므로, 규제 및 인허가를 위하여 그 계획설정, 기준, 절차, 검증 및 검토 방법론 등 신중한 준비가 필요함.

- 규제 및 인허가 조치의 시점에 대한 권고 :

인적요소에 대하여는 설계의 초기에 강제적으로 반영하지 않으면 설계가 진행되는 시점에서는 문제점을 발견하더라도 그에 대한 효과적인 보완조치가 곤란하므로, 가능한 세부 단계별로 공식적인 검토를 수행하도록 권고함.

- 전례의 부담에 대한 권고 :

기존 설계에 대한 사후 보완조치를 통한 개선된 설계를 신규설계에 적용가능한 것으로 수용하지 않기를 권고함. 특히, 실제로 2000년대에 운전되는 국내 표준원전의 기본적인 설계기반으로 영광 3&4호기 설계가 부적합함을 명확히 하지 않을 경우, 이를 전례로 하는 후속기에서의 설계 낙후성과 진부성의 부담을 피할 수 없을 것으로 보임.

- 표준원전 관련 권고 :

표준원전의 인간공학적인 문제들은 최소한 TMI 이전의 문제점을 종합적으로 해결하고 첨단설계를 반영할 수 있도록 새로운 설계개념으로 설정된 MMIS개념을 적용할 것을 사업자측에 요구하여야 하며, 이를 위한 별도의 인간공학분야 준비활동을 예비안전성분석(PSAR) 이전에 규제기관의 승인하에 수행하도록 요구하는 것이 시급함. 따라서, 영광 3&4호기의 설계는 적어도 제어실 또는 MMI측면에서는 국내 표준원전의 모체로써는 부적합함을 천명해야할 필요성이 있음.

4. 결론

규제기관을 통하여 전달된 영광 3호기 주제어반 인간공학적 설계검토의 결과는 대부분 인간공학 개념의 반영부족에서 기인하는 공통적인 일반사항으로부터 세부적인 기술적 항목으로 나타나 있다. 그러므로, 이를 해결하기 위하여 우선 주목되어야할 내용은 기술적인 문제라기 보다는 인간공학의 적용을 위하여 우선되어야할 전제사항을 확립하기 위하여 하계의 참여가 요망된다. 여기에 대하여는 각 유관사에 대한 일반적인 권고사항을 구분하여 제시하였다.

학계에서는 개선이 필요한 주요 설계요소에 대하여 상세한 사례 및 설계평가연구를 통하여 및 문제점의 실체와 보완방안 등을 제시해야할 의무가 있다. 이를 합의형태로 모을 수 있을 때에 국내 원전설계의 안전성과 및 건설기술의 확보를 위하여 후속원전의 설계에서 반영되어야할 기술의 구체적인 방향과 권고사항이 제시될 수 있을 것이다.

영광 3호기는 국내 원전기술자립의 토대가 되는 원형설계로, 인간공학의 반영이 공식적으로 수행되는 최초의 원전이므로, 인간공학계의 적극적인 관심과 지속적인 연구지원이 필요할 것으로 보인다.