

원자력 발전소 인간공학 프로그램
(Human Factors Engineering Program in Nuclear Power Plant)

나정창, 이호형

한국전력기술주식회사

Abstract

Human Factors Engineering(HFE) program should be developed from the early stage of the design process for Nuclear Power Plant. The HFE program is conducted in accordance with the guidance in the Standard Review Plan(SRP) NUREG 0800, Chapter 18. The major purpose of this program is to reduce the incidence of human error during the operating life of the plants. A comprehensive human factors program is prepared by KOPEC to assure that key elements of human factors involvement are not inadvertently overlooked and the early, complete, and continuing inclusion of HFE in the design process. This paper is to introduce engineering steps of the HF activities to verify that the HF involvements on man-machine interface are adequate to support safe and efficient operation of nuclear power plant. If systems are developed without sufficient consideration on the HFE in the design, such systems may cost a high price due to the malfunction of the plant induced by the human errors.

1. 서론

원자력 발전소 설계는 계통설계자에 의해 그 기능이 정의되고 정의된 기능에 만족되는 계통이 설계된 후에 제어실 설계가 이루어지는 경향을 취해왔으나 미국의 TMI(Three Mile Island) 발전소 사고 이후에는 인적요소의 중요성을 인식하고 인적요소에 대한 충분한 고려를 해야 한다는 입장으로 선회하고 있다. 특히 원자력 규제기관에서는 신규로 건설되는 발전소의 인간-기계 연계 계통설계에 대한 인간공학의 체계적인 반영에 대한 명확한 근거와 적용방안에 대해 제시할 수 있는 인간공학 프로그램을 요구하고 있으며 원자력 발전소 설계 초기단계부터 인간공학의 체계적인 반영에 대한 인 허가 규제를 강화하려는 의지를 갖고 있다. 인간공학 적용의 주요 목적은 발전소 운전수명 기간동안에 인적오류를 줄이는데 있으며, 발전소 설계와 후속적으로 발생하는 설계변경이 인간공학 원리를 준수토록 함으로써 보다 안전하고 효율적인 발전소 운영을 도모하는데 적합한 인간-기계 연계(Man-Machine Interface)가 되도록 보증하는데 있다. 본 논문에서는 인간공학 프로그램에 대해 논하고 어떻게 원자력 발전소의 운전성 및 안전성 향상을 성취하는지를 밝히고자 한다.

2. 프로그램 적용 기준 및 절차

인간공학 프로그램은 발전소 설계 시작단계에서부터 발전소 운전 수명기간 까지 계속적으로 적용되므로 인허가 규제지침 (NUREG-0737, Supplement 1)에서 정의한 제어실 상세설계 검토는 요구되지 않으며 미국 연방법의 일반설계기준 19 요건을 준수하고 표준 검토지침(NUREG-0800, Standard Review Plan: SRP) 내용중에 "사업초기에 제어실 설계를 수행하는 신청자"라고 언급한 세부지침에 준한다.

2.1 일반설계기준 19

다음사항은 미국 연방법 (10CFR 50, 부록 A)의 일반설계기준 19에 기술되어 있는 내용이다.

- 1) 정상운전중에 원자력 발전소를 안전하게 운전하고, 냉각재 상실사고를 포함한 사고시 발전소를 안전 상태로 유지토록 하기위한 조치가 취해질 수 있도록 제어실이 설치되어야 한다.
- 2) 고온정지 동안에 발전소를 안전상태로 유지하기 위해 필요한 계측 및 제어설비를 포함하여 원자로의 즉각적인 고온정지 능력을 가진 기기 및 적절한 절차서 사용을 통해 후속단계인 원자로 상온정지 능력을 가진 기기가 제어실 외부의 적절한 위치에 설치되어야 한다.

2.2 표준검토지침 (SRP)

원자력발전소 설계 과정중의 인간공학 프로그램은 다음과 같이 3 단계 검토과정을 거친다.

- 1) 예비안전성분석보고서 작성단계에서는 계획, 예비설계 및 기준을 수용.

2) 최종안전성분석보고서 단계에서는 최종설계, 도면 및 절차서를 수용.

3) 최종 단계에서는 안전성 분석보고서에서 이행 약속한 사항에 대한 불일치 여부, 또는 과거에 지적되지 않은 결함사항을 도출하기 위해 제어설비의 설치검사나 운전원 및 관련자와의 면담이 포함된다. 상기 검토과정에서 원자력 발전소 설계에 적합한 인간공학 원리가 반영되었다는 것이 증명되고, 발전소 안전운전을 도모하는데 적합한 제어실의 운전원-기계연계 (Operator-Machine Interface)가 확인 되어야한다. 인간-기계 연계 요건을 만족시키기 위해 기존 기준과 실용적인 인간공학 지침을 사용하여 계통분석을 수행하고, 운전원에게 주어진 직무는 만족스럽게 수행되어짐을 보증하기 위해 평가되고, 정상 및 비상운전에 요구되는 모든 지시기 및 제어가 제어실에서 이용 가능함을 확인한다. 추후 설계결함 발생 및 변경을 최소화하기 위해 설계의 전 과정에 인간 공학 담당자가 참여하며 인허가 규제지침(NUREG-0700)에서 기술된 인간공학 개념이 수용됐음을 보증하기 위해 점검표가 이용된다.

3. 선행호기 설계결함사항 검토

한기(주)에서 작성한 3권의 보고서(1990년 6월) “원전 주제어실 설계검토 최종 보고서 (KOPEC/90-P-001, 002, 003)”상에 281건의 국내 원전(고리 1,2,3,4호기 및 영광 1,2호기) 인간공학 결함사항(Human Engineering Discrepancy:HED)이 기술되어 있다. 이 인간공학 결함사항들은 NUREG-0700에 의한 운전경험 검토, 주제어실 설비검토, 주제어실 실사, 계통기능검토 및 직무분석, 직무수행능력확인(이용성, 적합성), 주제어실 기능 검증 업무의 결과로써 발생된 것으로, 인간공학 결함사항 평가 및 해결방안등이 상기 보고서에 포함되어 있다. 또한 후속 원전(영광 3,4 호기 및 울진3,4호기) 주제어실 설계에 대한 확인 및 검증 업무가 한기(주) 주관 하에 수행되었으며, 71건의 인간공학 결함사항이 지적되었고 주제어반 기기, 제어실 실사, 계통분석, 계통검증, 설계 결함사항 평가 및 해결방안 등이 관련 보고서에 포함되어 있다. 설계 결함사항에 대한 검토의 중요성은 선행호기 경험을 활용함으로써 적절한 분석과 설계반영 등을 통해 주요 결함사항들이 후속 발전소에는 재발하지 않도록 하는 것에 있다. 이러한 인간공학 원리에 대한 세심한 배려 특히 발전소 개발 초기단계에서 되풀이되는 설계 문제를 해결함으로써 설계공정을 단축하고 관련비용을 줄일수있다.

4. 인간공학 프로그램

원자력 발전소 설계에 적용되는 단계별 인간공학적 수행분야와 그 각각에 대한 수행방법,절차,내용 등에대한 구체적인 사항은 다음과 같다.

4.1 인간공학적 활동계획 수립

이 계획은 미국 규제기관에서 작성된 NUREG-0700 지침과 NUREG-0800, 18장에 준하여 작성되며 설계과정에서 인간공학 개념이 조기에 완벽하고 지속적으로 반영되고 있음을 보증하는 것이다. 이 계획은 인 허가 요건을 충족시킴으로써 발전소 설계에 완벽한 인간공학 개념이 반영되도록 한다. 주요 인간공학 업무는 인간 공학 팀에 의해서 수행되나 직무분석, 기능분석 및 기타 업무 수행시에 관련 부서의 지원이 필요한 경우 다른 분야 (기계, 핵, 전기)및 계측제어 분야내의 다른 그룹이 참여한다. 아울러 주기기 공급자의 계측제어 기술자 및 모의 운전 기술자는 물론 국내의 운전 및 정비요원, 유경험 운전원 및 관련 기술자들로부터 전문적인 조언을 받는다. 인간공학 전문가들의 역할은 운전원들의 업무 수행에 영향을 줄 수 있는 의사결정을 할 때에 관리자 및 책임 있는 기술자들을 지원하고, 인간-기계 연계사항 및 인간 요소의 능력 및 한계를 고려한 정보를 적절한 형태로 제공하는 것이다. 발전소 설계 전과정에 인간공학의 원리, 지침 및 기준을 적용하는 목적은 운전원에 주어지는 직무부하를 줄이고, 인적실수 가능성을 감소시키며, 또한 발전소 운전 효율을 높이는 데 있다.

4.2 인간공학 설계지침서 작성

사업초기에 경험이 많은 인간공학 전문가가 NUREG-0800 에서 제시하는 사항을 기본으로 하여 인간공학 설계지침서를 개발하고, 이 지침서에는 주제어실, 원격정지반 및 비상대응 설비등에 대한 인간공학 지침이 기술된다. 인간공학 설계지침서는 최근의 미국 규제기관의 인간공학기준 (NUREG-0700), 산업체에서 작성된 산업기준(EPRI 및 INPO), 다른 발전소의 좋은 경험 및 사업주 요구사항 등을 근간으로 개발되고 추가적인 요건들은 그때마다 사안별로 검토된다. 이 지침은 표준화된 업무수행을 보증하기 위해 기기 공급자, 사업자 및 사업에 관련되는 모든 분야에 유효한 것이며 적용분야는 다음과 같다.

가. 제어실 작업공간

- 나. 작업환경
- 다. 경보 계통
- 라. 제어기
- 마. 시각 지시기
- 바. 청각 신호 계통
- 사. 명판 및 위치
- 아. 공정전산기
- 자. 제어반 배치
- 차. 제어기-지시기 조합

4.3 주제어반 크기 선정

주제어반 크기는 1992년에 발행한 한국표준협회 (KSI)의 한국인 체위 측정보고서에 준하여 25~50세 사이의 한국남자 5~95%에 해당하는 체위관련 자료를 기준으로 결정한다. NUREG-0700에서 정의하는 기능적 접근성(Functional Reach)과 가시성이 제어반크기를 결정하는데 중요한 고려 대상이 된다.

4.4 주제어실 배치의 기능적 결정

주제어실 기능적 배치는 인간공학 참고자료(EPRI NP-3659, NUREG-0700)와 참조발전소의 제어실 배치를 근간으로 하며, 주제어실과 관련되는 계통들이 어느 곳에 위치하는지를 주제어실에서 명확하게 확인할 수 있도록 설계된다. 배치는 운전원의 선행경험을 고려하고 원자로로부터 출발하는 열,유체계통의 공정흐름에 따라 설계되며, 이를 위해 운전 유경험자와 충분한 협의를 거친다. 주제어실 자체는 계통이 아니며 여러 계통이 모여져 구성된 것으로, 모든 정상운전 조건하에서 발전소를 안전하게 운전하고, 사고 상태 하에서 발전소를 안전하게 유지하기 위하여 필수적이고 충분한 계측 및 제어설비가 설치된다. 연속적 감시 및 제어를 요구하는 모든 계통 변수들이 주제어실에 포함되고 이 변수들은 핵계통, 공학적안전설비계통, 전기계통, 보조계통 및 사고후 감시계통으로부터 제공된다. 이외에 소내전산기표시, 안전변수 감시, 우회/불능 상태표시 (Bypassed/Inoperable Status Indication) 기능도 포함되어 있다.

주제어실은 제어실 운전요원 (운전원 2명, 보조운전원 2명, 발전과장 및 안전과장 (STA) 등)의 기

능적 필요성을 만족시키도록 설계되며, 인적실수 가능성의 최소화와 운전원의 편이성 및 효율성이 고려된다. 이러한 목적을 위해 종합적인 인간공학 개념이 설계에 반영되며 제어실 환경, 운전원 조작반과 체위, 주제어반 구성 및 배치, 전산기 표시장치, 제어실 명판, 경계선 (Demarcation) 및 모형도 (mimic), 제어실 작업흐름(Work Flow), 경보계통 설계, 기기 접근성등이 포함된다.

4.5 계통 기능분석 수행

기능분석은 주제어실과 관련되는 각 계통에 대해 비상운전을 포함한 운전절차 수행시의 운전원 직무내용, 목적 및 기능을 검토하기 위한 것으로 계통의 기능 설명, 계기 및 제어조건, 규제조건에 따른 계통요건, 사업자 요구 및 공급자 제의사항, 기기 운전(감시, 수동, 자동) 및 위치(현장, 주제어실)등을 포함한다. 이러한 사항들은 각 계통의 설계책임자(Responsible Engineer)에 의해 작성되는 “기능분석요약서(Functional Analysis Summary)”와 “계통기능설명서(System Functional Description)”에 나타나 있다. 상기문서는 주제어실 설계과정에서 작성되며 운전원 직무 분석관련 하여 NUREG-0700에서 명시한 기능요건을 만족시킨다. 기능분석과 직무분석의 목적 달성을 위해 계통기능 및 부기능은 한개 혹은 이상의 계통요소(사람, 기계, 구조)에 의해 수행되는 활동형태(정적역할)로 정의된다. 직무는 기능수행에 기여하는 단일계통 요소(사람 혹은 자동화설비)에 의해 수행되는 특정한 행위로 정의된다. 주제어실 운전원의 직무가 명확히 식별될 수 있도록 이러한 과정을 통해 기능이 검토된다.

4.6 계측 기기 형태 선정

제어실에서 사용되는 기기 형태는 다음과 같다.

- 경보 및 청각장치를 포함한 관련 하드웨어 ; 경보창, 인지, 시험, 복귀 및 경보음 멈춤 푸쉬버튼
- 안전변수 지시계통, 방사선감시 및 소내전산기용 CRT
- 기기, 계열 및 계통표시를 위한 상태등.
- 펌프, 밸브 및 기타 제어기능용 푸쉬버튼.
- 숫자 표시기를 지닌 아날로그 바그래프 지시계.
- 장시간의 추이를 표시하는데 사용되는 프로그램 가능한 타점식 기록계.
- 인간공학 팀에 의해 승인되거나 또는 요구된 로타리제어기를 비롯한 모든 제어 및 지시계
- 기타 CRT 및 키보드와 통신설비.

- 기기 공급자가 제공하는 Panel Insert.

주제어반 에 설치되는 제어기와 지시계의 일반적인 형태는 직무분석 이전인 설계초기에 선정된다. 관련 하드웨어는 인간공학 기준에 부합되도록 선정되며, 제어반상의 모든 기기 간의 조화가 이루어지도록 한다. 직무분석 결과에 따라 기기 및 제어기는 추가, 교체, 삭제 혹은 재배치되며 다른 지역으로 이동된다.

4.7 제어반기기 배치도 작성

인간공학 기술지침 (EPRI NP-3659, NUREG-0700, 및 인간공학 지침서)과 계통기능설명서를 기준으로 하여 제어반기기 배치도가 작성된다. 이 도면에는 주제어반 제어기와 지시계 배열, 그리고 이 기기 들간의 연관관계를 나타내도록 경계표시와 미믹선을 표시한다. 배치설계는 직무분석과 확인 및 검증수행시에 평가되고 그 결과로 발생된 인간공학 결함사항 에 준하여 기기 배치도를 수정한다.

4.8 모형제작

주제어반 모형은 실물크기로 제작된다. 이 모형은 제어반기기를 정적으로 표현하고 제어반 구성에 대한 평가업무와 다음사항이 수행되도록 한다.

가.운전원 직무분석과 확인 및 검증을 목적으로, 계통기능이 주제어반 설계에 통합되어진 인간공학의 도구로 사용.

나. 모의 운전, 면담, 질문, 관찰 등을 통한 제어반 배치와 제어실 구성을 평가

다. 운전원 직무와 기능 모의운전에 의한 작업공간 결함사항 확인

라. 절차서에 의하여 제어실내에 설치된 기기 들의 계측 제어요건 평가

마. 주제어반 설계를 위하여 설계 담당자 및 운전원과의 협의

바. 사업자에게 주제어실 설계 설명

직무분석과 확인 및 검증을 위하여 실물크기 목재 틀에 금속외장을 갖춘 모형 위에 제어기와 지시계 사진이 부착되며 이 사진은 제작자로부터 자료를 입수하여 제작된다. 기기 들의 구성은 계통도, 제어 계측도 및 논리도에 근거하고, 배치평가에 따라 재배치가 용이하도록 자석식으로 제작하였다. 배치는 제어반 기기 배치도에 따라 하며, 경계표시(Demarcation), 모형도(Mimic) 및 명패 등도 모형에 추가한다.

4.9 직무분석과 확인 및 검증계획 수립

직무분석과 확인 및 검증과정에 대해 명확하게 정의한 계획서가 개발되며 수행방법, 목표, 참여자, 문서 및 기타 필요한 사항이 언급된다. 점검표, 질의서와 같은 보조서류들도 이기간 중에 작성된다.

4.10 직무 분석(Task Analysis) 수행

주제어실 설계에 대한 인간공학 계획의 일부분으로서 직무분석이 수행된다. 이 분석의 목적은 사용자인 운전원에게 주제어반 (MCB)설계를 평가할 기회를 제공하여 운전성 향상 및 운전원 오류를 극소화 하는 것이다. 이들 분석에는 계통 설계 검토, 순차적 모의운전, 인간공학적 검토 등을 포함한다.

직무분석은 인간공학자와 운전원조 (통상적으로 6명)에 의해 수행되며 운전원에게 주제어반 설계에 적용할 기회와 주제어반 설계를 재검토할 기회를 제공하고 제어반 계측 기기의 이용성 및 적합성을 평가한다. 직무분석에 참여한 운전원에게는 제어실 설계 이론에 대한 오리엔테이션 그리고 직무분석의 수행 방법에 대한 설명회가 제공된다.

모의 운전은 해당 발전소(또는 참조발전소)의 절차서를 사용하여 수행하고, 이 과정에서 각 운전원에게는 제어반을 검토하고 질문 을하며 관련 문서들을 검토할 기회가 제공되며, 인간공학 전문가 및 계통 설계자들은 직무분석에 필요한 설명들을 지속적으로 제공한다. 직무분석에 관련된 모든 내용은 주제어실 직무분석 보고서 에 기술되어 있다. 이 보고서는 분석 방법론과 그 결과를 문서화하여 인허가 관점에서 추후 질문이 있는 경우에 이 문서를 참고자료로 이용한다.

설계과정초기에 적절한 시험을 거친 설계는 발전소의 개선과 운전 효율성에 있어서 추후 변경사항을 최소화 할 수 있고, 발전소 수명 연장과 예산 측면에 있어서도 더욱 중요한 의미가 있다. 이 보고서의 개요에서 언급한 것처럼 초기단계에서 주제어반 설계에 적절한 고려를 하므로서 이러한 노력을 성실히 수행하지 아니한 원자력발전소와 비교해 볼 때 개선에 대한 비용과 시간을 감소시켜주는 결과를 가져온다.

4.11 주 제어실 실사

제어실 실사를 통해 NUREG-0700, 제 6장에 기술된 인간공학 지침서와 제어실 설계를 체계적으로 비교한다. 제어실내의 특정설계에 대한 직접적인 관찰 및 계측이 필요하다. 제어실 실사의 목적은 특정계통이나 직무요건에 관계없이 만족할 만한 인간공학지침을 따르지 않는 계기, 기기, 배치 및 주위환

경의 특성 등을 확인하는 것이다. 이것은 기기 설계 관점에서의 결함사항을 식별하는 것이다. 제어실 실사에서 확인된 안전상 주요사항은 기록되고, 운전원과 발전소 성능에 미치는 영향 및 주제어실 내에서의 업무 수행상 필요성을 평가하는 관점에서 검토된다. 제어실 실사를 위해서는 점검표가 사용되는데 점검표는 완벽한 실사가 보증되도록 NUREG-0700의 참고자료를 사용하여 작성된다. 실사 기간에 작업공간설계, 경보기, 제어기, 지시기, 명판, 제어반 배치, 그리고 제어기-지시기 조합 등의 항목이 검토된다.

4.12 확인 및 검증

비록 직무 분석 작업이 계통 설계과정에서 적절하게 수행되었다 하더라도 계통설계에 대한 최종 평가와 그 이후에 발생한 설계 개선 사항에 대하여 인간공학적 요소들이 부주의로 인하여 누락되지 않았다는 것을 보증하기 위해 적절한 확인 및 검증 작업 수행이 필요하다.

확인 및 검증 과정에는 해당 발전소의 사업 팀에 의한 기기 평가, 직무분석 결과 반영에 대한 검토, 주제어실 조사, 그리고 운전원 모의운전이 포함된다. 이 팀은 주기와 보조기기 기술자, 인간공학 전문가, 그리고 경험 있는 운전원들로 구성된다. 확인과정의 목적은 사업 팀에게 설계를 평가하고 요구된 계측제어기에 대한 주제어반 내에서의 이용성을 결정하고, 운전성 측면에서 계측제어기의 적합성 여부를 결정하는 기회를 갖고자 하는 것이다. 이 분석에는 설계기술자에 의한 계통 기기 검토, 목록표를 사용한 주제어반에 대한 인간공학적 검토와 기기 평가 (배열도와 구성요소 목록표 등이 포함됨), 그리고 경험 있는 운전원에 의한 모의운전이 포함된다.

검증 과정의 목적은 주제어실 설계가 발전소 절차서를 이용하여 운전원들에 부여된 기능이 성취될 수 있는가를 확인하는 것이다. 이 분석은 어느 특정한 정상상황과 긴급한 상황의 시나리오를 선정하여 경험 있는 운전원들이 발전소 절차서를 사용하여 수행하고, 확인 과정에 참여하였던 운전원들이 검증과정 기간에도 참여한다. 확인 및 검증의 결과는 검증보고서를 작성하여 문서화한다. 이 문서는 확인 및 검증 팀의 구성, 작업에 사용된 도구, 직무검증과정, 이용성과 적합성의 검증 그리고 결과에 대한 평가에 관하여 상세한 내용을 포함한다.

4.13 기타 중요한 지역의 기능적 배치

책임기술자와 설계자들은 주제어실 뿐만 아니라 운전원과 관련 있는 중요한 지역 (컴퓨터실, 원격정지

실, 비상대응설비)에 대해서도 기능적으로 평면 배치도를 개발한다. 이들 지역들도 인간공학적 설계 개념이 적용되어야 하며 이를 위해 NUREG-0700, EPRI NP-3659, 그리고 인간공학 지침서 등이 사용된다.

4.14 설계 및 구매서류 검토

인간공학팀은 중요한 인간공학적 연계를 갖는 모든 계통 및 부계통의 설계와 구매서류를 지속적으로 검토하고 계통에 적용하는 모든 부분이 승인된 인간공학원칙에 따르도록 한다. 주제어실과 다른 제어실 사이에 기능적인 관계는 모든 발전소 운전 모드시 그 적합성을 보장토록 수립된다. 표준 검토계획서에서 중요하게 고려된 다음의 영역 즉 제어실 작업공간, 작업환경, 경보계통, 제어기, 시각 지시기, 청각신호, 계통, 명판, 공정관련컴퓨터, 제어반 배치도 그리고 제어-표시기조합 등에 대해서 충분히 검토한다. 아래와 같은 문서들이 검토되고 인간공학 설계원칙에 따라 필요시 변경된다.

- 가. 계통도 (P&ID)
- 나. 제어계측 도면 (C&ID)
- 다. 제어 논리도 (CLD)
- 라. 주제어반과 원격정지반의 배치도
- 마. 경보창 배치도
- 바. CRT화면 설계
- 사. 계통설계 기준
- 아. 계통기능 설명서
- 자. 기능분석 요약서
- 차. 구매 사양서

4.15 기타 설계관련 문서검토

4.15.1 공급자 설계의 인간공학적 검토

인간-기계 연계를 수반하는 공급자 도면 및 문서는 인간공학 팀에 의해 지속적으로 검토된다. 주제어반 하드웨어와 이터 공급자간에 일관성을 유지토록 보장하고, 계약서가 허용하는 범위 내에서 공급자에 의해 제공되는 모든 품목은 인간공학 설계지침서에 언급된 기준을 만족시킬 수 있도록 한다. 불일치

사항이 발생되었을 때 적절한 해결방안을 공급자에게 제시하여 시정 조치 토록한다.

4.15.2 컴퓨터계통 설계검토

공급자에 의해 공급되는 모든 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어(SPDS 포함)는 적절한 시기에 검토되며, CRT 하드웨어 및 배치는 효과적인 사용과 만족할 만한 인간공학 적용을 입증하기 위해 분석된다.

4.15.3 비상대응설비 설계검토

비상기술지원실과 비상운전지원실 설계에 대해 인간공학적 측면의 검토가 이루어지며, 그 목적은 설비들이 적절한 곳에 위치하고, 배치되며, 그리고 요구된 정보를 포함하고있음을 입증하는데 있다. 감시, 문서, 평면도, 그리고 주위환경과 같은 요인들이 검토시 고려된다.

4.15.4 통신계통 설계검토

인간공학 팀은 직통전화, 소내호출전화, 무선통신장치, 음성출력전화, 발전소 내 전화 및 일반전화와 같이 전반적인 발전소 통신계통 설계를 지원한다. 인간공학 팀의 지원목적은 이러한 계통이 발전소 모든 상황하에서 모든 운전 요구사항을 만족시키고, 모든 운전시나리오에 대해 발전소통신계통이 일부분으로 편리하게 사용될 수 있음을 입증하는 것이다.

4.16 경보계통 설계

주제어실 경보계통의 설계 및 이행에 인간공학이 고려된다. 인간공학 설계지침서는 색깔코딩, 형식, 문자, 경보순서, 청각경보기 특성과 경보계통의 기타사항을 기술하고 있다. 제작자 설계와 평가단계 동안에 공급자 설계도면 및 문서에 대해서 광범위하게 인간공학적 측면이 고려된다. 주제어실의 경보계통은 운전원 주의를 요하는 기기의 상태변화와 중요한 발전소 변수들이 비정상적인 상태에 대해 시각적이고 청각적인 신호에 의하여 운전원이 경계심을 갖도록 하기 위해 설계된다. 운전원이 아무런 행동을 취하지 않아도 되는 발전소 상태와 즉각적인 운전원 인지 (ESF 작동 같은 경우)가 불필요한 상태에서는 경보가 발생되지 않는다. 경보계통은 직접적인 공정제어나 보호기능은 없으나 비정상 상태가 발생했을 때 운전원이 정확한 조치를 취할 수 있도록 운전원에게 관련정보를 제공하는데 사용된다.

경보창 배열, 색감, 색깔코딩, 명판, 그리고 경보반 표시는 인간공학요건을 따른다. 어떤 경우에는 개별적인 경보지시의 손실없이 경보창 수를 줄이기 위해 다수의 경보가 다중 입력회로를 사용하여 한 개의 창에 지시되기도 한다. 이런 경우에 관련 입력은 공통표기 (예로서 “탱크 고수위”와 “탱크 고-고수위”)로 하나의 경보창에 나타낸다. 한가지 형태의 공통적인 문제를 갖는 다중입력은 또한 병합될 수 있다. 예를 들어 “고온도” 경보를 위한 여러 개의 온도감지기 또는 펌프 트립 (펌프모터 전류, 회전수, 토출유량)에 대한 다양한 경보가 하나의 창에 표시될 수 있다. 경보 회로는 실제로 비정상 상태가 아닌 데 경보가 발생하는 오동작을 최소화하도록 설계되며, 경보는 계통 및 기기 상태만을 표시하기 위해서는 사용되지 않는다.

발전소 경보계통은 발전소 운전의 모든 모드에서 적절하게 운전되고 작동되어야 한다. 경보창들 (개별 창들)은 운전원에게 중요 경보라는 것을 알려주고 제어실 운전을 향상시키는 우선 순위를 적용하기 위해 각 경보창에 색깔이 표시된다. 주제어반에 설치된 경보기 제어용 푸쉬버튼은 정상 및 최초 경보용으로 경보음 멈춤 (Silence), 인지 (Acknowledge), 복귀 (Reset) 그리고 시험 (Test) 푸쉬버튼을 포함한다. 경적은 운전원이 각 지역별로 음을 구별할 수 있도록 진폭과 주파수를 조절토록 되어있다.

4.17 주제어반 제작검토

주제어반은 현장 납품이전에 구매 사양서에 언급되어있는 요건을 만족하고있음을 입증 하기위해 검수를 받아야 한다. 치수, 색깔, 모양, 위치 그리고 구조물같은 항목들이 확인의 대상이 된다. 추가로 구성품 목록, 배치도면, 계기사양과 확인과정에 도움이 되는 기타 문서들과 제어반상의 계기 및 제어기들이 비교된다.

4.18 발전소 절차서 개발검토

NUREG-0899의 “비상운전 절차서 작성을 위한 안내지침”은 사업주가 발전소의 특정한 비상운전 절차서를 준비하고 적용하기 위해 필요한 항목을 규정하고있다. 비상운전 절차서의 목적은 다중 기기 고장과 광범위한 사고를 완화시킬 수 있도록 운전원에게 그 방법을 제시하는 것이다. 비록 NUREG-0899가 비상운전 절차서 개발에 주로 적용될지라도 이 지침은 발전소 운전을 위해 필요한 다음의 문서들, 즉 종합 운전 절차서, 계통운전 절차서, 기술지침서, 그리고 경보 절차서 개발에도 또한 적용할 수 있다. NUREG-0899 지침은 개발과 검증 및 확인과정을 명시하여 기술적으로 정확하고, 유용한 비상운전 절차서를 얻고자 비상운전 절차서 개정의 빈도와 범위를 줄이고자 하는데 목적이 있다. 이 문서는 비

상운전 절차서 개발(절차서 작성과 확인및 검증), 기술지침서 개발및 검증, 작성자 안내지침 및 비상운전 절차서 이용 및 유지하는데 그 지침으로 사용된다.

4.19 문서 작성

모든 설계작업 단계에서 제어실 설계에 인간공학이 관여되었음을 증명 하기 위해 적절한 문서가 작성된다. 문서는 추후 검토 또는 외부감사시에 쉽게 이해될 수 있고 그 목적과 내용이 입증가능토록 작성된다.

5.결론

TMI 사고에서 제어실 운전원에 의한 인적 오류가 사고의 주요 원인이었다는 것이 밝혀짐에 따라 인간공학의 중요성이 인식되었으며, 미국 연방법 (10 CFR 50,부록A)의 일반 설계기준 19 와 인허가 규제지침(NUREG-0700, 0800) 에서의 요건을 만족시킬 수 있도록 인간공학 측면에서 효율적이고 안전한 주제어실 운전이 더욱 요구되었다. 이러한 지속적이고 체계적인 인간공학 활동을 보장하기 위해 인간공학 프로그램 (HFE Program)이 개발되어 인간공학의 주요 요소가 부당하게 간과되지 않도록 문서화되고, 원자력 발전소 설계시작 단계에서 인간공학 적용범위와 수행방안을 명시하여 원자력 발전소 전 설계과정에 걸쳐 인간공학 원리가 적절히 반영되도록 하고있다. 본 논문은 한국적 실정을 고려하여 현재 운전중이거나 건설중인 원자력 발전소의 인간공학 프로그램에 대해 살펴보았으며 향후 원자력 인간공학 프로그램의 기본지침으로 활용할 수 있으리라 생각된다.

참고자료

1. EPRI, NP-3659, "Human Factors Guide for Nuclear Power Plant MCR Development," 1984.
2. EPRI, NP-3448,"A Procedure for Reviewing and Improving Power Plant Alarm Systems."1984.
3. NUREG-0700, "Guidelines for Control Room Design Review," 1981.
4. NUREG-0800, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants," 1981.

5. NUREG-0899, "Guideline for the Preparation of Emergency Operating Procedures," 1982.
6. NUREG-0737, Supplement 1, "Requirements for Emergency Response Capability," 1982.
7. KSI, "Korea Physical Standard Measurement Report," 1992.
8. KOPEC, "System Functional Description for UCN 3&4," Volumes I, II, III
9. KOPEC/90-P-001, 002, 003, "Control Room Design Review Final Report for Kori 1, Kori 2, and Kori 3&4," Jun. 1990
10. KOPEC/9-740-J-412, "Main Control Room Task Analysis Summary Report for YGN 3&4," Dec. 1991.
11. KOPEC/9-740-J455-004, "YGN 3&4 Final Verification and Validation Report for Human Factors Review of the Main Control Room, June 1994.
12. KOPEC/9-740-J410 "Human Factors Engineering Guideline for UCN 3&4.
13. KOPEC, "Function Analysis Summary for UCN 3&4" Volume I.
14. KOPEC/9-751-J211, "Procurement Specification Main Control Board and Associated Instruments for UCN 3&4"
15. KOPEC/9-750-J462, "UCN 3&4 Main Control Room Task Analysis Summary Report", October 1994.
16. KOPEC/9-750-J462-001, "UCN 3&4 Verificaiton and Validation Report"

그림 4.3-1

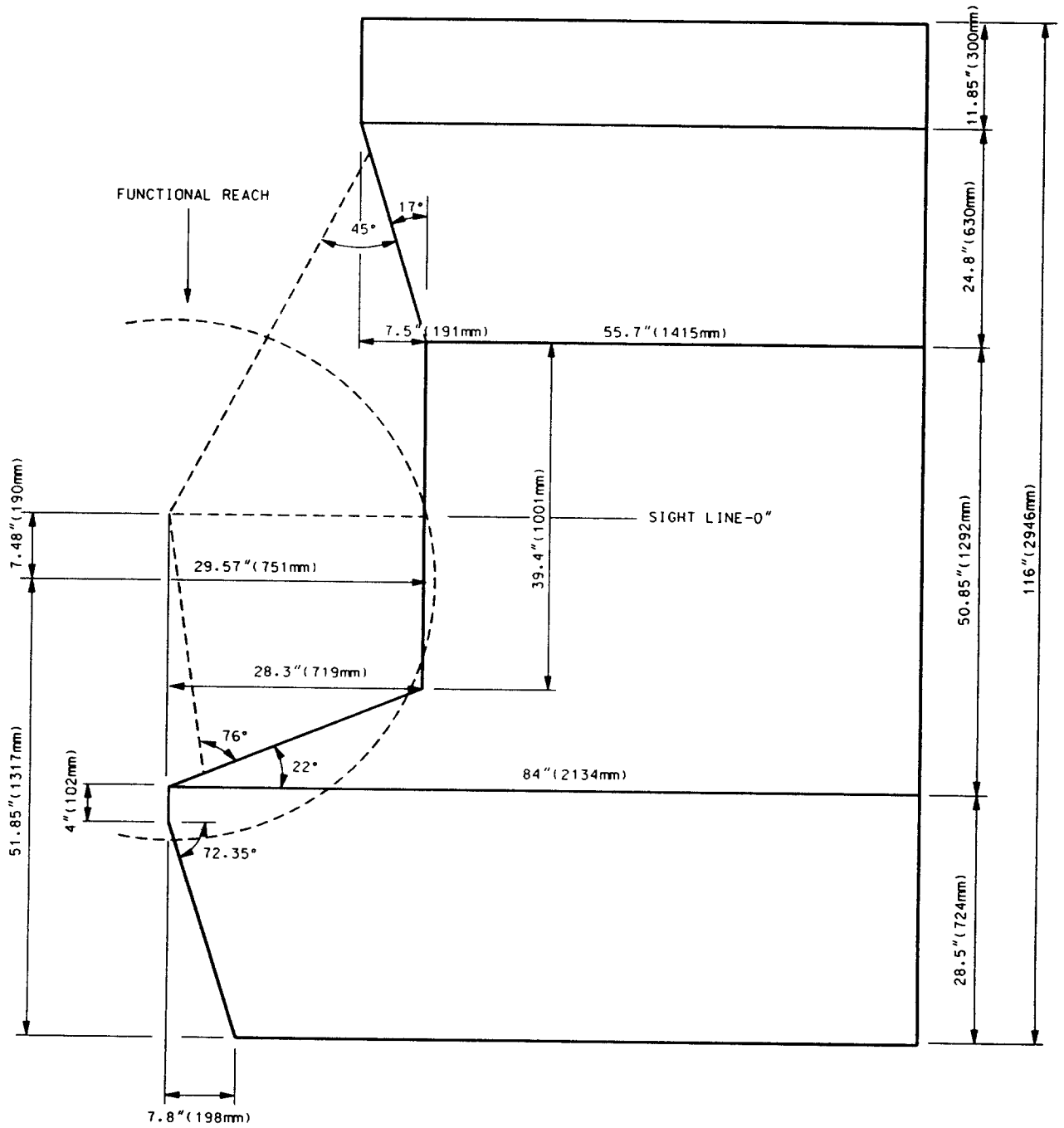


그림 4.3-2

