

SMART 인간기계연계설계 평가절차 개발

박근욱, 구인수, 이철권, 박희윤, 장문희

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 인간기계연계(MMI : Man Machine Interface)는 발달된 컴퓨터 기술과 디스플레이 기법을 기반으로 설계되고 있으며, 이는 안전성과 생산성을 향상시키려는 의도를 갖고 있다. 현재, 최신 기술을 적용한 제어실 설계는 인간기계연계 설계자, 발전소 운영회사, 규제기관 등 모두에게 관심의 대상이다. 최신 기술을 제어실 설계에 적용할 경우에는 객관성 있는 설계 평가를 통하여 설계 결과가 안전성 향상에 기여함은 물론 운전작업자에게 유용함을 가시적으로 입증할 필요가 있다. 본 논문에서는 SMART 인간기계연계설계 평가를 위해 개발된 절차의 구성과 평가작업 내용을 기술하였다.

1. 서론

TMI 원전 사고로 밝혀진 인간기계연계의 결함을 보완하고자 새롭게 설계되고 있는 신형 제어실은 다수개의 천연색 CRT, 대형 운전정보표시화면, 컴퓨터 기술응용에 의한 자동화 기능향상, 운전작업자의 의사결정 과정을 보조하는 지원시스템 등을 구비하는 특징을 갖는다. 수준의 차이가 있기는 하지만 미국의 NUPLEX 80+, 프랑스의 1400MWe N4 제어실, 독일의 PRINS 등은 신형제어실의 범주에 속한다. 한국원자력연구소에서 인간공학 실험평가 연구에 활용할 목적으로 개발한 ITF-HMS(Integrated Test Facility-Human Machine Simulator)는 비록 연구용 설비이지만, 완전히 VDU 기반으로 감시 및 제어 운전작업을 수행할 수 있도록 설계된 첨단 제어실 환경을 갖고 있다[1]. SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)의 중앙 제어실 또한 ITF와 같은 개념을 지양하여 설계되고 있다[2].

발달된 컴퓨터기술, 그래픽 처리기술, 통신기술, 운전작업 지원기술 등을 총체적으로 통합하여 보다 안전하고 효율적으로 운전작업을 수행할 수 있게 하는 최신의 제어실 설계가 원자력산업계의 관심을 집중시키고 있다. 무한경쟁 시대를 맞이하여 최신기술을 제어실 설계에 적용함으로써 안전성과 생산성을 더욱 향상시키려는 설계의도는 당연한 추세이다. 그러나, 최신 기술을 적용한 중앙 제어실 설계, 즉 인간기계연계 설계에 대한 확고한 이론이 아직까지 정립되어 있지 않은 상태이므로 어떤 인터페이스 또는 어떤 새로운 기능이 제어실과 운전작업자에게 바람직한가에 대한 논란이 계속되고 있다. 이러한 논란의 여지를 최소화 시키는 방법 중의 하나는 최신 기술을 적용한 인간기계연계 설계결과가 안전성 향상에 기여함은 물론 운전작업자에게 유용함을 가시적인 형태로 입증하는 것이다. 특히, 인간공학적 입장에서의 설계 타당성을 입증하는 것이 중요하다. USNRC의 NUREG-0711에서 요구하는 사항들 또한 이와 같은 맥락으로 해석될 수 있다[3]. 이를

위하여 SMART 설계에서는 인간기계연계가 인간공학적 설계 원칙과 요구를 근거로 설계되었으며, 운전작업자에게 주어진 직무(Task)가 효과적으로 수행될 수 있도록 설계되었음을 평가하는 절차를 개발하게 되었다. 개발된 평가절차는 NUREG-0711에서 요구하는 인간기계연계 설계의 인간공학적 확인 및 검증 업무를 지원하기 위한 사전작업의 성격을 갖는다. 즉, 절차에 따라 평가작업을 수행함으로써 설계중인 인간기계연계의 수정보완을 위한 입력 정보를 획득함과 동시에 차후에 공식적으로 수행될 인간공학적 확인 및 검증 기술을 확보하려는 의도를 갖는다.

2. 인간기계연계 평가절차

2.1 평가절차의 구성

평가 절차와 방법은 평가 대상 및 목적, 평가에 요구되는 가용자원의 유무 등에 따라 달라진다. 평가해야 할 대상과 평가의 필요성이 존재한다 해도 평가에 요구되는 가용자원이 충분하지 못할 경우도 있다. 설계자의 입장에서는 특별한 평가의 필요성이 없음에도 불구하고 어떤 규제적인 추가 요구사항에 따라 설계의 특정 구성요소나 기능을 평가하여 설계결과와 타당성을 입증해야 할 경우도 있다. 기존 발전소에서 적용되지 않는 새로운 유형의 인간기계연계 특징이 존재할 경우, 평가를 통한 타당성 입증 요구수준은 더욱 높아진다. SMART 인간기계연계 설계에는 기존 플랜트에 적용되지 않았던 새로운 유형의 설계 개념과 특징이 도입되고 있다. 따라서 SMART의 인간기계연계 평가는 비중이 높은 설계작업의 일환으로 간주된다. SMART의 과제환경을 고려하여 개발된 평가절차는 평가대상과 목표설정, 평가수준 설정, 평가조직 구성, 평가시행 계획서 준비, 일정 작성, 평가환경 조성, 가용성 평가, 적합성 평가, 동적모형 검증, 보고서 작성 등의 10 단계로 구성되어 있다.

평가대상 선정과 목표설정에서는 프로젝트 검토회의를 통하여 프로젝트 관리자가 평가되어야 할 인간기계연계 대상을 선정한다. 이 때 설계 진척도와 인간기계연계의 설계 수준, 평가의 필요성, 평가결과와 활용방안 등을 검토하게 된다. 평가대상이 선정되면 프로젝트 관리자는 평가목표를 설정한다. 이 때 설정되는 목표는 평가하려는 인간기계연계가 설계 초기에 의도했던 목표 또는 수정 설정된 목표와 어느 정도 부합되는 지를 판별하는데 초점을 둔다. 평가작업이 반복적으로 진행됨에 따라 평가목표가 변화될 수 있다. 평가 요구수준 설정에서는 선정된 평가대상이 어느 수준에 중점을 두고 평가되어야 하는 지를 결정하게 된다. 평가 요구수준은 새로운 인간기계연계 설계 특징의 채용 가능성 평가, 다른 발전소에 채용된 설계와의 우위성 비교평가, 안전규제와 운전작업 효율성 측면에서의 타당성 입증평가 등으로 구분된다. 평가 요구수준의 설정은 평가조직의 업무성격과 작업량에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 프로젝트 관리자는 평가할 대상, 목표, 설계진도, 평가에 요구되는 가용자원의 확보 상태, 예상 투입인력 등을 종합적으로 고려해야 하여 평가수준을 결정한다. 평가조직의 구성에서는 평가 시행절차를 개발하고 정의된 업무에 대한 수행 책임을 갖는 평가조직을 구성한다. 다음과 같은 능력과 경험을 갖춘 전문가를 주축으로 평가조직이 구성된다.

- 평가 시행계획서 작성과 평가 시나리오 개발이 가능한 전문가.
- 평가과정에서 수집된 자료의 분석과 설계대안을 제시할 수 있는 전문가.
- 원자력발전소 운전경험을 보유한 전문가.

평가 시행계획서 준비 단계에서는 평가조직이 수행하려는 업무의 일정, 절차, 업무내용을 정의

하는 계획서를 작성한다. 평가 시행계획서는 설정된 평가대상과 목표, 설정된 평가수준, 평가조직 구성원의 업무할당, 평가에 직접 활용되는 참고자료, 상세 평가수행 일정표, 평가환경 조성 계획, 평가시행 계획, 평가수행 결과 보고서 작성계획과 포함될 주요 내용 등을 중심으로 작성된다. 평가시행 작업일정 작성 단계에서는 평가조직 구성원의 기술 능력과 평가대상을 고려하여 상세 평가수행 계획서에 정의된 각 업무를 수행할 일정표를 작성한다. 일정표에는 진행하려는 평가업무의 시간적인 순서, 상호간의 선후관계, 일정별 산출물 등이 포함된다. 또한, 평가업무의 책임과 권한을 분명히 하기 위하여 평가업무 수행자가 일정표에 표시된다. 평가환경 조성 단계에서는 평가에 필요한 가용자원의 수집, 평가조직이 사용할 평가방법의 선정, 평가로부터 획득해야 할 시험 데이터의 정의, 검증 시나리오 개발, 평가과정에서 사용할 검사표 개발 등의 업무가 수행된다.

2.2 가용성 평가작업 절차

평가조직은 자원확보 상태확인, 평가대상의 기능과 직무범주 분류, 요구되는 MMI Inventory 목록 작성, 설계된 MMI Inventory 목록 작성, 가용성 검사표 작성, 검사 진행, 평가 결과표 작성, 가용성 향상 권고대안 제안, 보고서 작성 등의 9 단계로 구성된 업무를 수행한다. 자원확보 상태확인 단계에서는 가용성 평가를 위해 최소한 다음과 같은 자원을 확보하고 각 자원이 활용 가능한 상태인지를 확인하는 작업을 수행한다.

- 평가대상에 대한 설계요건(Design Requirement) 내용을 포함한 문서
- 평가대상이 되는 MMI Inventory 를 기술한 설계문서
- 기능/직무분석(FTA : Function Task Analysis) 내용을 포함한 문서
- 평가대상을 설계하는 과정에서 발견된 인간공학현안(Human Factor Issue)
- 안전규제지침 및 기타 문서(평가자가 필요하다고 판단되는 참고자료)
- 기능과 직무추출 결과
- MMI Inventory 설계 데이터베이스 자료

평가대상의 기능과 직무범주 분류 단계에서는 평가대상이 다음 중 어떤 범주의 기능과 직무를 포함하는지 판단한다. 만약에 다수의 범주에 속한다면 평가대상을 보다 세분화 시켜 범주를 결정하게 된다.

- 안전규제요건에 직접 관계되는 기능과 직무 포함(평가범주 1)
- 안전기능 유지를 위한 부수적 지원기능과 직무 포함(평가범주 2)
- 안전기능은 아니지만 발전소 운전에서 직결되는 기능과 직무 포함(평가범주 3)
- 운전작업자의 작업성능 향상 및 지원기능과 직무 포함(평가범주 4)

요구되는 MMI Inventory 목록 작성 단계에서는 가용성 평가범주별로 평가대상의 기능과 주어진 직무를 수행하는데 요구되는 MMI Inventory(감시, 지시 및 제어, 경보) 목록을 작성한다. 평가범주 1 과 2 에 속하는 경우, 해당 기능을 수행하기 위하여 안전규제요건과 지침에서 요구하는 MMI Inventory 중심으로 작성한다. 평가범주 3 과 4 의 경우에는 특정한 형태의 발전소 또는 인간기계연계 설계특징에 따라 감시, 지시 및 제어요건의 편차가 클 수 있다. 따라서 이 범주의 경우는 SMART 인간기계연계 설계요건 문서, 유사 기능을 갖는 참조 발전소의 설계 정보를 활용하여 요구되는(또는 권고되는) MMI Inventory 목록을 작성한다. 설계된 MMI Inventory 목록 작성 단계에서는 인간기계연계 설계문서 또는 설계 데이터베이스에 저장된 정보를 활용하여 각 평가범주의 해당 기능과 직무를 수행할 수 있도록 설계된 MMI Inventory 목록을 작성한다. 평가대상의 설계 충

실도가 높아 인간기계연계 구성요소의 형태, 제어 및 지시범위, 정밀도, 단위 등이 추출 가능하다면 목록에 포함시킨다. 가용성 검사표 작성 단계에서는 인간기계연계 기능, 운전작업자 직무, 요구되는 MMI Inventory 목록, 설계된 MMI Inventory 목록 등을 종합하여 평가환경에 적합한 가용성 검사표를 작성한다. 검사표는 검사결과와 발견한 문제점을 기입할 수 있는 항목이 포함된다. 검사표를 사용한 가용성 검사 진행 단계에서는 검사표와 설정된 가용성 평가 방법을 사용하여 검사가 진행된다. 검사는 설계된 MMI Inventory 와 요구되는 MMI Inventory 정보를 중심으로 MMI Inventory의 충족성, 누락여부, 불필요성 등의 식별에 초점을 둔다. 동적모형이 가용한 상태이면 설계된 MMI Inventory, 요구되는 MMI Inventory, 동적모형 MMI Inventory 에 대한 상호 비교검사 활동이 수행된다. 가용성 평가 결과표 작성 단계에서는 검사과정에서 발견된 모든 문제점을 취합하여 양식에 따라 가용성 평가 결과표가 작성된다. 가용성 향상 권고사항 작성 단계에서는 발견된 문제점을 설계조직이 해결할 수 있도록 평가조직이 설계 권고사항을 제시한다.

2.3 적합성 평가작업 절차

적합성 평가절차는 자원확보 상태확인, MMI Inventory 의 적합성 평가영역 결정, 새로운 설계특성 추출, 미해결 설계현안 목록작성, 적합성 검사표 작성, 검사 진행, 평가 결과표 작성, 적합성 향상 권고사항 작성, 보고서 작성 등의 9 단계로 구성된다. 자원확보 상태확인 단계에서는 최소한 다음과 같은 자원을 확보하고 해당 자원이 활용 가능한 상태인지를 확인한다.

- 평가대상을 구성하는 MMI Inventory 의 특성(Characteristic) 사양을 기술한 문서
- 평가대상을 설계하는 과정에서 발견된 인간공학현안(Human Factor Issue)
- 평가의 기준으로 사용될 인간공학지침(Guideline, Standard)
- MMI Inventory 설계 데이터베이스 자료
- 발전소 운전경험자
- 기타 (설계도면, Prototype MMI 등)

MMI Inventory 의 적합성 평가영역 결정 단계에서는 Human-System Interface Design Review Guideline(NUREG-0700, Rev. 1, Vol. 1, Part 2)에서 제시하고 있는 8개 영역(예 : Information Display, User-System Interaction, Process Control and Input Devices 등) 중 어느 영역에 대한 적합성 평가를 실시할 것인지 결정한다. 동일한 MMI Inventory 에 대하여 두개 이상의 영역이 선정될 수 있다. 새로운 설계특성 추출 단계에서는 다른 발전소 설계에서는 발견할 수 없는 새로운 설계특성 또는 특별한 이유 때문에 도입된 비표준적인 설계특성을 가지는 MMI Inventory 를 추출하여 별도의 표를 생산한다. 별도로 등록된 MMI Inventory 는 특별한 관심이 요구되며 엄격하게 평가되는 항목이다. 미해결 설계현안 목록 작성 단계에서는 적합성과 관련하여 미해결 상태인 인간공학 설계현안에 대한 목록을 작성하고 표 형태로 정리한다. 적합성 검사표 작성 단계에서는 적합성 평가의 근거로 사용할 인간공학 검토지침(예 : NUREG-0700)을 선정한다. 설계조직이 설계수행을 위하여 개발한 별도의 인간공학 설계지침이 존재하고, 해당 지침이 적합성 검토에 활용할만한 품질을 유지하고 있다면 이를 검사표 작성에 활용한다. 평가자는 적합성 평가를 위해 선정된 평가방법이 검사 진행 과정에서 적용되기 편리한 형태로 검사표를 작성한다. 검사표의 형식과 항목구성이 완료되면, 평가조직은 가용한 자원을 활용하여 운전경험자의 만족도 수준, 적합성 설계지침의 만족도 수준, 평가근거 항목을 제외한 모든 항목에 대한 내용작성을 완료한다.

검사표를 사용한 검사 진행 단계에서는 검사표와 평가방법을 사용하여 운전경험자의 만족도 수

준 검사와 적합성 설계지침의 만족도 수준 검사를 순차적으로 진행한다. 운전경험자의 만족도 수준 검사에서는 운전경험자가 자신의 지식과 운전경험에 비추어 볼 때 MMI Inventory의 각 설계특성이 만족할 만한 수준인가를 판별한다. 평가자는 운전경험자가 판별한 결과(만족, 불만족)와 판별에 사용된 근거내용을 요약하여 검사표에 기입한다. 다음 단계의 검사작업으로 평가자는 적합성 설계지침에 대한 만족도 수준을 검사한다. 즉, 설계된 MMI Inventory의 각 설계특성이 인간공학 설계지침이나 표준에서 제시하고 있는 수준에 적합한 가를 검사한다. 평가자는 검사결과(만족, 불만족)와 판정에 사용된 근거를 검사표에 기입한다. 이 단계의 검사에서 비표준적인 설계특성 또는 인간공학현안에 해당하는 검사항목의 경우, 만족도 평가를 위하여 적어도 두 종류 이상의 인간공학 설계지침이나 표준이 검사 판정의 근거로 사용된다. 적합성 평가 결과표 작성 단계에서는 운전경험자의 만족도 수준 검사와 적합성 설계지침의 만족도 수준 검사 과정에서 발견된 모든 문제점을 취합하여 적합성 평가 결과표를 작성한다. 적합성 향상 권고사항 작성 단계에서는 발견된 적합성 문제점을 설계조직이 해결할 수 있도록 설계 권고사항을 제시한다.

2.4 동적모형을 사용한 검증작업 절차

동적모형을 사용한 검증작업은 가용자원의 확보, 운전작업 범위 선정, 직무수행 이상경로 작성, 검증 시나리오 초안작성, 운전작업자 훈련실시, 운전작업자 숙련도 평가, 관측기록 장비와 보조도구 준비, 검증 시나리오의 검토, 검증 시나리오 수정보완, 검증 시행, 취득 데이터 분석, 발견 문제점 정리, 설계 권고대안 작성, 보고서 작성 등의 14 단계로 구성된다.

가용자원의 확보 단계에서는 참조발전소의 운전절차서, 동적모형의 설계자료, 기능분석 및 직무분석자료, 운전작업을 수행할 운전작업자 등의 자원을 확보한다. 운전작업자의 운전작업 범위 선정 단계에서는 운전작업자가 평가대상을 구성하는 인간기계연계를 사용하여 수행해야 할 대표적인 운전작업을 선정한다. 선정되는 운전작업 범위는 평가대상이 동적으로 표현할 수 있는 운전특성과 운전작업자가 평가대상을 구성하는 MMI Inventory를 사용하여 운전할 수 있는 범위로 국한된다. 직무수행 이상경로(Ideal Path) 작성 단계에서는 특정 운전작업을 수행하는데 요구되는 최소한의 감시, 진단, 제어 행위를 정의한다. 검증 시나리오 초안작성 단계에서는 평가환경 하에서 평가자와 운전작업자가 일련의 주어진 임무를 상호협력하면서 순차적으로 진행해가는 절차를 일차적으로 작성한다. 시나리오의 각 단계는 논리적인 시간순서를 가지며, 검증이 진행되는 과정에서의 자원의 역할(평가자, 운전작업자, 실험장비, 동적모형 등)이 명시된다.

운전작업자 훈련실시 단계에서는 동적모형 환경에 적합하도록 작성된 임시 운전절차서를 활용하여 동적모형 환경하에서 운전작업자에 대한 숙련도 훈련을 실시한다. 검증에 활용되는 운전작업자가 현재 발전소 운전을 담당하고 있다 할 지라도 훈련은 실시된다. 훈련과정에서 평가조직은 운전작업자에게 동적모형의 구성, 평가대상이 되는 MMI Inventory의 사용법, 수행해야 할 직무, 운전 목표 등을 교육시킨다. 운전작업자 숙련도 평가 단계에서는 운전작업자의 숙련도 평가를 위하여 평가계획서 준비, 평가일정 작성, 평가방법(시험, 실습 등) 및 평가요소(감시, 제어, 진단 능력 등) 설정, 숙련도 판정기준(특점점수, 운전작업 목표 달성도 등) 작성 등을 수행하고 훈련의 결과를 평가한다. 관측기록 장비와 보조도구 준비 단계에서는 검증과정에서 사용할 관측기록 장비를 준비하고, 각 장비의 동작상태를 점검한다. 또한 이 단계에서 관측목록(Observation Checklist)과 설문 조사서를 포함하여 각 장비의 사용과 관련된 소프트웨어 도구, 주변장치, 소모품 등이 준비된다.

검증 시나리오의 검토 단계에서는 작성된 시나리오 초안을 실험적용(Pilot Test)하고 시나리오의

구성에 대한 타당성을 검토한다. 이 과정에서 검증에 활용될 운전작업자는 참여하지 않는다. 대안으로 평가자가 시나리오 초안에 기술된 평가자의 역할(시나리오 진행, 장비운영, 관측 등)과 운전작업자의 역할을 병행하여 수행한다. 시나리오 검토는 작성된 시나리오의 미비점 발견에 초점을 두고 진행된다. 특히, 다음 사항의 타당성 검토에 역점이 주어진다.

- 시나리오의 각 단계가 순차적으로 진행될 수 있는가.
- 시나리오의 각 단계에서 평가자가 올바르게 검사표를 사용할 수 있는가.
- 관측기록 장비가 올바르게 작동하고 필요한 데이터를 취득하는가.
- 정의된 이상경로에 따라 운전작업이 수행될 수 있는가.
- 동적모형이 제공하는 운전특성이 운전작업에 충분한가.
- 운전작업자에게 질의할 질의항목은 평가목표 지향적이고 명확한가.

검증 시나리오 수정보완 단계에서는 시나리오 검토과정에서 발견된 문제점의 원인분석을 수행하고 원인 제거에 필요한 조치를 취하여 시나리오 초안을 수정 보완한다. 검증 시나리오의 시행 단계에서는 동적모형을 정상 가동하고 시나리오에 정의된 각 절차를 계획대로 진행한다. 운전작업자가 운전작업을 진행하는 동안에 평가자는 육안관측을 실시하고 검사표에 정의된 각 항목에 검사결과를 기입한다. 평가조직이 운전작업자에 대한 설문조사(또는 면담)를 계획하였다면 계획대로 수행한다. 검사 시나리오가 진행되는 과정에서 이상경로를 벗어난 운전작업자의 직무수행 행위는 검사표에 표시된다. 즉, 운전작업자의 그러한 직무수행 행위는 차후에 분석될 수 있도록 검사표 양식에 기록된다. 검증 시나리오 진행과정에서 시나리오에 정의되어 있지 않은 업무의 추가수행이나 간섭행위는 철저히 배제된다. 취득 데이터 분석 단계에서는 취득 데이터를 수립된 분석계획에 따라 분석한다. 관측목록을 사용하여 수집된 데이터, 관측기록 장비에 의해 수집된 데이터, 설문조사(또는 질의)에 의해 수집된 데이터 등 서로 다른 방법으로 수집된 데이터의 간의 상관관계는 분석을 수행하기 이전에 명확하게 정의된다. 발견 문제점 정리 단계에서는 검증과정에서 발견된 문제점을 종합하여 정리한다. 설계 권고대안 작성 단계에서는 검증과정에서 발견된 문제점을 설계조직이 해결할 수 있도록 설계 권고사항이 제시된다.

3. 평가절차의 활용방안

SMART 인간기계연계 설계 평가절차는 설계 진척도에 따라 가변적으로 활용된다. 설계 초기단계에서는 인간기계연계 설계의 잠재적인 문제점을 발견하고 개선방향을 도출할 목적으로 주로 사용될 것이다. 즉, 평가결과는 인간기계연계 설계를 위한 중요한 입력자료로 사용된다. 설계 중간단계 이후부터는 안전규제 기관이 요구하는 인간공학적 확인 및 검증 활동에 활용될 것이다. 즉, 설계 초반에 진행된 평가기술을 활용하여 NUREG-0711에서 요구하는 수준을 충족시키는 인간공학 적 평가활동을 수행하는데 활용된다.

참고문헌

- [1] KAERI-HMS Performance Test Report, HMS-SEC-KAERI-TR-DOC-19, 1997, March
- [2] KAERI/RR-1706/96, 중소형 일체형 원자로 개발-인간기계연계설계개발, 한국원자력연구소
- [3] USNRC NUREG-0711, Human Factors Engineering Program Review Model, July 1994.