

국내 원자력발전소 인간공학 설계를 위한 안전규제기술요건 방안

최성남, 정윤희, 김복렬

한국원자력안전기술원

요약

원전의 안전성을 보다 확보하기 위해서는 혁신적인 안전개념 도입과 체계적인 안전성 평가 및 성능검증의 강화가 수반되어야 한다. 본 논문에서는 신형 원전에 적용될 안전규제기술요건의 체계와 세부사항으로서 인간공학설계에 관련된 일반안전요건, 상세기술요건, 규제지침에 포함될 주요 내용의 기본사항을 제안하였고, 인간공학설계와 관련된 규제요건의 계층적 구조 방안을 정량화하고 가시화하기 위한 연구·개발될 내용과 방향을 제시하였다. 또한 제시된 요건에 관한 주요 기본사항들은 구체화하기 위한 다각적인 검증평가 과정과 추가 연구가 수행될 예정이다.

1. 서론

TMI-2 및 Chernobyl 원전의 사고는 원전 안전에 대한 국민의 우려를 고조시키고, 원자력 산업계의 안전에 대한 재고 필요성이 제기되었다. 원전의 안전에 대한 우려와 재고는 국내 전력원으로서 원전의 필요성과 병행하여 원전의 안전성을 보다 확보하기 위한 노력이 강화되어야 한다는 점으로 귀결된다.

최근 제어실 설계에 있어서 모든 산업계의 주요한 경향^[1]은 소형의 컴퓨터 워크스테이션을 설치하거나 대형 스크린 표시기를 활용하는 것이다. 또한 디지털 기술사용의 증가와 더불어 운전 제어기술은 전통적으로 운전원의 직무가 부분적으로 자동화되거나, 복잡한 계통 또는 기기를 단순화하는 보조장치의 도입으로 제어실이 많이 변화되었으며, 이같은 추이는 계속될 것으로 예상된다.

미국을 비롯한 외국의 규제기관들은 새로운 안전개념과 안전규제 방향의 제시와 시행을 위한 규제요건을 수립하여 왔으며, 신형 원전의 설계인증 검토에 적용하여 향상된 안전성 확보를 위한 노력을 기울이고 있다. 신규 규제요건은 기존 규제요건을 충족할 뿐 아니라 심층방어 개념의 강화, 중대사고 예방 및 완화, 계통 신뢰도 증진, 운전경험 반영 및 입증

기술 활용, 인적요인을 고려한 설계 등을 통하여 보다 향상된 안전성을 제시하도록 요구하고 있다.

한편 국내의 인간공학 설계에 관한 안전규제 기술요건의 개발은 국가선도기술개발사업(일명 G-7 Project)의 하나인 차세대원자로 개발사업의 일환으로 수행되고 있으며, 그 현황은 제 2 단계사업, 1차년도 개발연구를 진행 중에 있다. 이 연구는 향후 개발·상용화될 차세대원자로의 인·허가 심사시 적용될 안전규제 기술을 체계적이고 일관성 있게 개발하는데 주안점을 두고 있다. 본 논문에서는 지금까지 연구된 국내 인간공학설계에 관한 안전규제 기술요건의 체계구성과 일반안전요건, 상세기술요건 및 규제지침에 포함될 주요내용의 초안을 제시하고, 현재까지의 예비결과인 본 논문의 방안을 정량화하고 가시화하기 위한 연구·개발될 내용과 방향을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 안전규제 기술요건 체계

국내 안전규제기술요건의 체계^[2]는 [그림. 1]과 같이 안전목표, 안전원칙, 일반안전요건, 상세기술요건, 규제지침, 심사지침 등으로 구분되어 있다. 본 논문에서는 최상위 모범인

* 본 논문은 저자의 개인 의견으로서 한국원자력안전기술원의 공식적인 입장은 아님.

안전목표/안전원칙과 제3단계에서 개발될 심사지침은 다루지 않았으며, 인간공학요건에 관한 일반안전요건, 상세기술요건, 규제지침의 정의와 각 요건에 대한 해설 및 기술적 근거, 상세요건의 주요내용 등을 제시하였다. 안전규제기술요건에 대한 정의³⁾는 다음과 같다.

• **일반안전요건**

일반안전요건은 원자력법 시행령에 규정되어 있는 발전용 시설에 관한 기술기준과 함께 이에 상응한 적용범위와 상세수준 내용으로 법적 위상을 갖고 있어 인·허가 안전규제시 필수적으로 적용되어야 하는 기본요건을 의미한다. 이 요건은 미국의 '일반설계기준' (10CFR 50 APP. A GDC) 과 유사하다.

• **상세기술요건**

상세기술요건은 일반안전요건과 같이 안전원칙을 만족시키기 위하여 준수되어야 하는 기술적 상세요건이며 주요 구성계통 및 기기와 주요 기술분야에 대한 상세한 기술요건을 규정한다. 이 요건은 미국의 '안전심사지침'(SRP) 내용중 허용기준에 해당되는 부분과 유사하다.

• **안전규제지침**

안전규제지침은 필수적인 규제요건(일반안전요건, 상세기술요건)을 반영하기 위하여 선택적으로 제시하는 방법론과 기술내용을 포함한다. 이 지침은 미국의 '규제지침'(Reg. Guide)에 상응하는 지침이다. 이 지침의 목적은 "상세 기술요건"에서의 필수요건과 달리 사업자가 어느 정도 유연성을 갖고 지침내용을 따르도록 권유하고 있다.

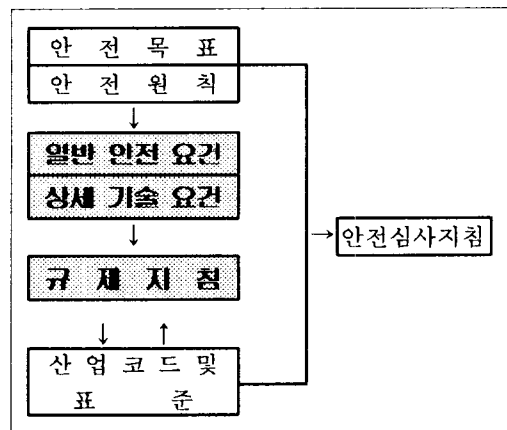


그림 1. 안전규제기술요건 체계도

2.2 인간공학 일반안전요건

• **해설 및 기술적 근거**

인간공학 고려가 요구되는 원자력 발전소 설계와 사항들은 인적오류를 방지하기 위하여 설계 초기단계에서부터 지속적으로 발전소 수명동안에 공인된 인간공학 설계원칙의 적용이 체계적이고 일관성 있게 이루어져야 한다. 인간공학 설계원칙은 발전소의 전체 계통과 운전원 및 보수요원의 모든 연계에서 일관성을 가져야 한다. 운전원의 직무 수행에 있어 개별적인 발전소 계통 및 기기 관련 변수들에 관한 정보가 필요하며, 운전원의 조치에 요구되는 소요시간을 비롯한 인적요소가 고려되어야 한다.

• **주요내용**

- 인적요소가 요구되는 설계범위 수립
- 공인된 인간공학 원칙 적용
- 인적요소에 관한 계획, 분석, 설계, 확인/검증의 이행과정단계 수행

2.3 인간공학 상세기술요건

인간공학에 관련된 상세기술요건⁴⁾은 [그림 2]와 같이 4개의 요건들로 구성되어 있으며, 각 요건에서는 기본요건과 상세요건을 다루고 있으며 주요 내용은 다음과 같다.

(1) **공통요건**

가. 인적 설계계획

• **해설 및 기술적 근거**

사업자는 인간공학 설계요건을 반영하고 확인할 수 있는 책임, 권한, 위치를 갖춘 인간공학 설계 팀을 가져야 한다. 이 계획은 인간-기계 연계에 관한 모든 관점들이 수용된 인간공학 원칙을 사용하고, 구조적인 하향식 체계적 분석을 근거로 하여 개발, 설계, 평가되는 것을 확인할 수 있도록 기술적 계획요소 내용으로 설명되어야 한다.

• **주요내용**

- 인간공학 계획의 목표 및 범위
- 인간공학 팀과 조직
- 인간공학 공정과 절차
- 인간공학 현안 추적체제

나. 인적요소 분석

• 해설 및 기술적 근거

사업자는 선행호기에서 제기된 유사한 인간공학 문제점들을 평가하고 개선내용을 반영하며, 기능요건의 분석 및 할당을 구현하여야 한다. 기능 할당 이후 계통수행 요건과 개발된 지침서/절차서를 활용하여 직무분석을 실시해야 하며, 운전요원의 구성 및 자격수준 평가를 통해서 운전원의 직무 및 설계내용의 적합성을 분석하여야 한다. 또한 잠재적 인적오류를 분석하기 위해 인간신뢰도분석(HIRA)과 같은 기법이 고려되어야 한다.

• 주요내용

- 운전경험 검토 범위 및 쟁점 추적체제
- 기능요건 분석 및 기능할당
- 직무분석 범위, 방법 및 결과
- 운전요원의 분석 및 결과
- 인간신뢰도 방법론 및 통합설계

다. 인적요소 설계

• 해설 및 기술적 근거

인적요소의 설계는 인간-기계 연계설계, 절차서 개발, 훈련계획 등을 포함하며, 각 요소는 인간공학 설계원칙과 평가지침에 따라 체계적으로 적절성이 입증되어야 한다. 인간-기계 연계설계는 기능 및 직무분석의 결과로부터 실제 설계를 구체화하고, 개발된 절차서 내용과 운전요원의 훈련계획을 수립하고 훈련하여야 한다.

• 주요내용

- 제어실 작업환경 및 제어반 배치
- 제어기 및 표시기 배치
- 정보 및 제어 연계설계
- 인간-기계 연계 설계의 현안사항
- 절차서 개발의 근거 및 범위
- 절차서 검토를 위한 지침서
- 훈련계획 및 범위

라. 인적설계 확인 및 검증

• 해설 및 기술적 근거

인적설계 확인 및 검증에 관한 평가는 설계된 계기의 가용성(availability)과 인간-기계 연계 직무 수행시의 적합성(suitability)을 평

가하는 것이다. 즉 설계내용이 인간공학 설계원칙에 부합되는지, 발전소 안전성과 관련된 목표를 성공적으로 수행하는데 있어서 적절한지 여부를 종합적으로 판단하는 것이다. 이를 위해 최종 계통검증은 동적이고 실제 운전환경과 동일한 조건에서 수행되어야 한다.

• 주요내용

- 확인 및 검증의 범위
- 확인 및 검증의 활동내용
- 인적요소 현안사항 추적 및 해결책 확인

(2) 주제어실

• 해설 및 기술적 근거

발전소가 어떠한 상황에서도 안전운전을 위한 제어실 설계능력을 갖추고 인적오류를 배제하기 위한 공인된 인간공학 원칙을 반영한 제어실 설계가 되어야 한다.

• 주요내용

- 제어실 작업공간 - 환경
- 제어반 배치 - 경보계통
- 시각 표시기 - 제어기
- 명판 및 위치 인식 보조물
- 제어기-표시기 통합

(3) 안전변수표시계통

• 해설 및 기술적 근거

발전소의 안전상태를 판단하기 위한 주요 안전기능이 요구되며, 인적오류를 배제하기 위한 공인된 인간공학 원칙을 반영하여 설계되어야 한다

• 주요내용

- 발전소 필수 변수의 간결한 지시
- 제어실 운전원의 보조역할
- 편리한 위치 및 연속지시
- 안전계통과의 격리
- 정보의 충분성

(4) 원격정지제어실

• 해설 및 기술적 근거

제어실 외부의 적절한 위치에서 원자료를 신속히 안전정지시킬 수 있는 제어실로서, 주제어실에 준한 인간공학 원칙을 적용한다.

- **주요내용**
 - 제어실 작업공간 - 환경
 - 제어반 배치 - 경보계통
 - 시각 표시기 - 제어기
 - 명판 및 위치 인식 보조물
 - 제어가-표시기 통합

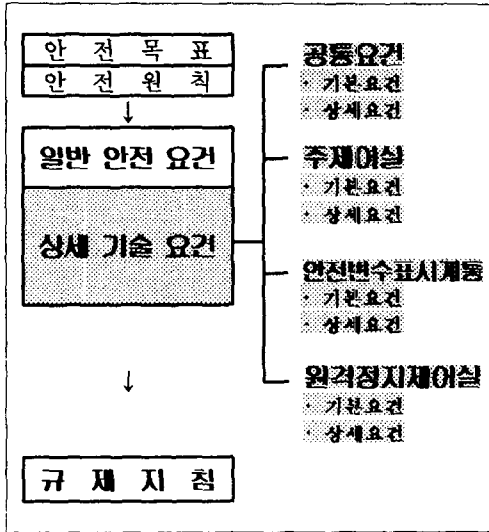


그림 2. 인간공학 상세기술요건 체계도

2.4 인간공학 규제지침

인간공학에 관련된 규제지침^[14]들은 [그림 3]과 같이 7개의 지침들로 구성되어 있으며, 각 지침에서 요구되는 주요 내용은 다음과 같다.

규제지침 1. 인간공학프로그램 관리

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 사업자가 인간공학 설계요건을 구현하기 위한 조직과 체제를 갖추었는가와 인간공학 설계 팀의 책임 및 권한의 확보 여부를 확인하는 것이다. 인간공학프로그램은 인간-기계 연계에 관한 모든 관점들이 수용된 인간공학 원칙을 사용하고 구조적인 하향식 체계적 분석을 근거로 하여 개발, 설계, 평가되는 것을 확인하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 인간공학프로그램 목적 및 범위
- 인간-기계 연계 설계팀 및 조직
- 인간공학 공정 및 절차
- 인간공학 현안 추적체계

- 기술적 프로그램

규제지침 2. 운전경험 검토

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 운전경험에 기초하여 인간공학 관련 안전성 쟁점사항들을 확인하는 것이다. 선행 운전경험에서 얻은 교훈과 쟁점사항들은 설계공정 초기에 발전소 설계를 개선하는 기본자료로 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 선행발전소 혹은 이전의 유사 발전소 인간공학 관련 현안사항
- 인간-기계 연계 관련 기술
- 운전원 면담 수행
 - 발전소 운전사항
 - 인간-기계 연계 설계사항

규제지침 3. 기능분석 및 할당

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 기능요건 분석과 기능할당에 있어서의 기술적 적합성을 평가하는 것이다. 기능요건 분석은 발전소 안전목표를 만족하기 위해서 수행되어야 할 기능들을 확인하는 것으로서, (1)목적, 수행 요건, 설계요건의 결정, (2)목적과 요구된 수행을 위한 기능의 정의, (3)기능과 발전소 공정 사이의 관계 정의, (4) 발전소 공정에 대한 제어기의 역할 (운전요원 또는 계통)을 이해하기 위한 구조를 마련하여야 한다. 한편, 기능할당은 (1)운전요원/수동제어기 (2)계통요소(자동 및 수동 제어장치 등) (3)운전요원과 계통요소간의 결합에 대해 제어기능들을 할당하고, 발전소 제어에 대한 요건을 분석하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 체계적으로 문서화된 기능할당 방법론
- 기존, 수정 혹은 신규 발전소공정들에 대한 인간과 계통들간의 제어기능 할당분석
- 신뢰도, 민감도, 정밀도, 시간, 및 안전요건
- 계통을 운전하는데 필요한 운전요원의 수와 숙련도

규제지침 4. 직무분석

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 운전요원, 인간신뢰도분석, 직무분

석의 내용을 포함한다. 이 지침은 (1)직무분석이 운전요원들에게 할당된 기능내용에 관한 직무요건들을 확인하는데 있어 발전소 요원에게 주어진 직무분석의 행동요건을 확인하고 (2)운전요원에 관한 요소는 직무요건들과 적용된 규제요건들을 활용하고, 운전요원의 인원과 자격요건들의 분석내용을 확증하며 (3)인간신뢰도분석은 발전소에 중요한 인적행위들을 확인하고, 인간공학과 인간신뢰도 분석/확률론적 위험성 분석이 현재 허용된 원칙과 관례에 부합된 방법대로 발전소 안전성과 신뢰도에서 야기되는 인적오류의 잠재요인을 분석하고 있음을 평가하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 인적수행요건이 인간한계 이내임을 보증
- 상세한 직무내용
- 운전, 보수, 점검 및 요구되는 운전원의 적정 인원과 자질
- 인간행동을 분석하기 위한 학제적 조직
- 인적오류 메카니즘에 역점을 둔 인간 행동에 대한 상세한 분석
- 인간오류 확률치를 평가하기 위한 민감도 및 불확실성 분석

규제지침 5. 인간-기계 연계 설계

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 인간-기계 연계 설계요건의 개발과 더불어 설계내용을 확정하고 운전원에게 이용될 경보기, 표시기, 제어기, 보조장치의 기능 및 직무요건들을 적절히 반영되었는가를 평가하는 것이다. 따라서, 인간-기계 연계 설계 지침은 인간공학 원칙/방법론을 적용하여 작성되며 설계자가 다양한 정보와 제어기들을 설계에 반영하는데 있어 인간공학적 설계의 적합성을 확인하고 최종 설계내용을 확정하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 작업공간의 환경, 배치
- 제어반 및 제어콘솔 설계
- 제어기 및 표시기 배치
- 정보 및 제어 인터페이스설계

규제지침 6. 절차서 및 훈련프로그램 개발

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 사업자의 절차서 개발계획과 내용이 발전소 계통운전과 발전소 사고제어를 하는데 인간공학이 적절히 고려되고 반영되었는 것을 확인하는데 있다. 이 지침의 훈련계획은 인간공학이 고려된 직무분석 요건에 근거를 갖는다. 작성된 지침은 사업자가 운전요원의 훈련개발을 위한 절차수행 내용과 방법이 인간공학적 관점에 충족하는지를 평가하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 절차서 종류, 범위와 내용
- 절차서 개발근거
 - 발전소 설계기준
 - 계통에 대한 기술요건 및 시방서
 - 직무 분석결과
- 훈련프로그램 개발
- 안전 기능 및 계통 전반에 대한 훈련
- 인간-기계 연계기기(예, 주제어실, 원격 정지제어실, 현장제어반)에 대한 훈련

규제지침 7. 인간-기계 연계설계의 확인/검증

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 확인 및 검증의 평가에 있어 설계내용이 인간공학 설계원칙과 일치하고 발전소 요원에게 발전소 안전성과 운전목표를 달성하기 위한 그들이 직무를 성공적으로 수행되는지를 종합적인 판정하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 인간-기계 연계 직무지원 확인
 - 발전소 요원의 직무 수행에 필요한 모든 경보기, 표시기, 및 제어기
- 인간공학적 설계 확인
 - 인간공학 원리, 지침 및 표준 적용
- 인간공학 현안의 해결책 확인
 - 인간공학 현안사항 추적 및 해결책
- 통합시스템 확인
 - 모든 성능요건 범위 내에서 운전원에 의한 효과적인 운전 가능성
- 발전소 인간-기계 연계 설계의 검증

규제지침 8. 안전관련 운전원의 조치기준

• 해설 및 기술적 근거

이 지침은 자동조치가 설계기준 사건을 완화시키는데 필요한지의 여부를 결정하는 운전원

조치에 따른 시간기준을 설정하는 데 있으며 안전 관련 계통운전 수행시 운전원 조치에 따른 규정된 시간의 제한성 문제와 안전 관련 조치사항들이 어떻게 자동화되어야 하는지를 수립하는 기준개발의 내용을 평가하는데 활용되어야 한다.

• 주요내용

- 운전원 조치에 따른 시간응답 설계요건 및 시간 측정방법의 개발
- 운전원 조치 여유도 확보
- 인간-기계간의 효과적인 기능할당 방법론

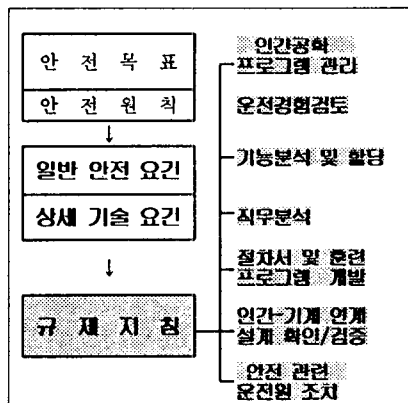


그림 3. 인간공학 규제지침 체계도

2.5 인적 규제요건의 연구과제

차세대 원전의 제어실은 지금까지 운전경험을 통해 제기되었던 많은 설계개선이 추진될 것으로 생각된다. 안전규제요건 가운데 특히 인적요소를 고려한 설계요건의 강화 필요성은 현재 가동중인 원전 사고가 대부분 인적오류에 기인되었다는 조사결과에서 찾을 수 있다. 규제요건의 인적요소 적용범위는 가동중인 원전에서 이행된 상세제어실설계검토의 주관점인 운전원과 제어실 계기간의 일치성 (compatibility)을 단순히 확인하는데 국한되지 않고, 현재의 설계 추이를 고려할 때 제어실 설비의 자동화를 비롯한 가공된 정보를 매체로 운전원과 발전소 계통이 이루는 상호작용에 관한 설계의 적합성이 주요한 안전성 검토 대상이 될 것이다.

인적요소에 대한 요건의 강화를 위해서는 현재의 요건과 달리 설계과정에서의 검토요건이 강화되고, 세부요건에서는 자동화 및 정보화 설계의 적합성을 평가하기 위한 사항이 명시되어야 할 것으로 생각된다. 이같은 요건의 구체화 과정에서 가능한 외국의 요건체계와 내용을 적절히 접목시키기 위한 추가적 연구가 필요하다. 이는 외국의 요건이 포괄적인 요건을 명시하는데 그치고 있으며, 구체적인 설계검토를 위한 상세성에 있어서는 부족하기 때문이다.

3. 결론

본 논문에서는 지금까지 연구된 국내 인간공학설계에 관한 안전규제기술요건의 체계구성과 일반안전요건, 상세기술요건 및 규제지침에 포함될 주요내용의 기본사항을 제시하였다. 인간공학 요건수립에 있어서 기본적인 구상은 전체적인 설계단계를 대별하고, 그에 따른 요건 분류를 시도하였다. 특히 설계공정에 대한 요건을 강화하기 위해 상세기술요건의 공통요건에서 이를 명시하고자 하였으며, 규제지침은 설계의 결과물인 계통(예, 안전변수 표시계통) 중심이 아닌 설계과정 및 그에 따른 설계결과를 대상으로 작성하였다.

추가적인 연구를 통해 현재까지의 예비결과인 본 논문에 제시된 요건의 주요 내용을 구체화할 것이며, 이를 위해 관련 인간공학 전문가의 의견수렴과 다각적인 검증평가 단계를 계획하고 있다.

• 참고문헌

1. J. M. O'hara, Advanced Human-System Interface Design Review Guideline, U.S. NRC, NUREG/CR-5908, 94.7
2. 최성남의, 차세대 원자로 기술개발(I) 최종 보고서, KRC-92N-J11, 94.12.
3. 김효정의, 차세대 원자로 안전규제기술 개발방향, KINS/GR-090, 94.12.
4. U.S. NRC, Human Factors Engineering Program Review Model, NUREG-0711, 94.7