

원자력발전소의 인간 공학 주기적 안정성 평가 방법론 및 적용

정연섭 · 지문구 · 김주택
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

법령에 의하여 요구되는 주기적 안전성 평가를 위하여 인적 요소 평가 방법론을 개발하였다. 특히 평가 하위 업무간의 중복을 제거하여 업무의 효율을 향상시키고 반복적으로 수행되는 동일 발전소, 혹은 타발전소의 결과를 충분히 활용할 수 있도록 하였다. 이 방법론은 인간 기계 연계 체제의 현상태 평가, 운전 이력 중심 평가, 시뮬레이션 활용 평가라는 3가지로 특징지어진다. 이 평가 방법을 적용하여 고리 3·4호기에 대해서 부분 평가를 수행하였고 그 결과를 제시하였다.

서론

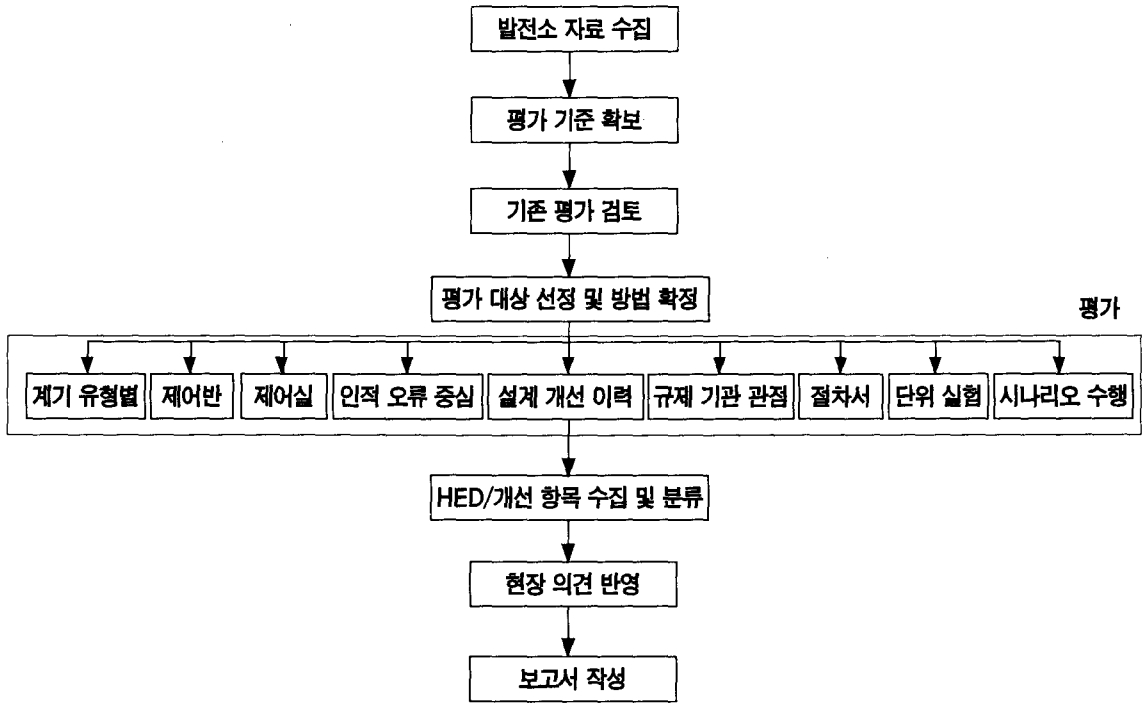
인간 공학 평가는 평가의 척도에 따라 그 업무가 방대하여질 우려가 있다. 물론 다양한 척도로 개선 사항을 도출한다면 그 자체가 나쁘다고 할 수가 없으나 수고한 노력에 비하여 그 개선 효과가 미흡하다면 좋은 접근 방법이라고 할 수가 없다. 일반적으로 인간 공학 평가는 주 제어실의 설계 단계에서 집중적으로 수행되고 다양한 방법론이 많으나 가동중인 원자력발전소에 대해서는 그 예가 많지 않다. 또 설계 단계의 방법론이 적절하지도 않다.

현재까지 고리 1·2호기 및 월성 1호기의 평가 방법론이 개발되었으나 업무간 중복이 많고 운전 이력에 대한 분석이 다소 빈약하였다.

전체적 흐름도

PSR 평가에서 두 가지 방법론을 생각할 수 있다. 첫째는, 계기 유형·제어반·제어실과 같은 현재 상태를 인간공학적 기준에 따라 평가하는 방식이고, 둘째는 운전/정비 이력으로부터 현재의 문제점을 밝혀내는 간접 방식이다. 기 발생한 사고는 현재 문제의 표출이기 때문

이다. 인간 공학 PSR은 이 두 가지 방식을 모두 채택하고 있다. 이 두 가지 방법은 다소 정적인 평가이다. 실제 발전중인 주 제어실을 임의로 조작할 수 없을 뿐만 아니라 대부분 문헌에 의거하여 평가하기 때문이다. 다행스럽게도 국내 원전들은 모의 제어 설비를 구축하여 이를 이용하면 발전소의 거동을 보면서 평가할 수 있다. 이 평가는 동적이며 앞의 두 가지 평가에서 도출된 HED를 강화 혹은 약화시켜 줄 수가 있다.



〈그림 1〉 인간 공학 평가의 흐름도

〈그림 1〉은 이런 평가 절차를 흐름도로 보여준다. 크게 현상태 평가, 운전/이력 평가, 시뮬레이터 평가로 분류되어 병렬 처리되고, 자료 수집 및 보고서 작성 등은 모든 평가에서 공통이기 때문에 직렬로 순서화되었다.

상세 단계

1. 자료 수집

자료 수집 단계는 현재 주제어실 및 현장 제어반의 상태를 파악하고 발전소 운전중에 발생한 사건 기록

을 수집하는 단계이다.

현재의 발전소에는 인쇄된 문서 뿐만 아니라 전자 파일로 보관되어 있는 경우가 많고 인트라넷을 통하여 직접 접근이 가능하므로 자료 수집이 많이 수월하여졌다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 앞으로 ERP가 도입되면 기록 자료 입수는 한층 더 수월하여질 전망이다.

〈표 1〉에 평가에 중요한 자료명을 나열하였다. 이 자료는 인간 공학 평가 수행에 필수적인 자료만을 나열한 것이며 실제 이를 자료를 읽고 재해석하려면 발전소 전체통의

설명서가 필요하다. 계통 설명서는 원자력교육원의 E-Learning 시스템에서 다운받을 수 있다.

2. 평가 기준 확보

상위 평가 기준에는 PSR 측면의 원자력 법령 및 지침이 있고 하위 평가 기준에는 인간 공학 평가 지침이 있다. 〈표 2〉에 적용중인 평가 기준을 나열하였다.

인간 공학 평가의 중요 지침이 되는 NUREG-0700은 3차례의 개정이 있었으며 개정에 따른 평가 항목 변천은 〈표 3〉과 같다.

〈표 1〉 인간 공학 평가를 위한 자료 목록 발췌

문서 및 자료	용도 및 입수 방법
K-HPES	<ul style="list-style-type: none"> • 기술공무부에서 관리 • 1996년 이후 자료는 인트라넷 KONIS에서 입수 • 인적 오류가 개입된 사건 사고들
사건 사고 보고서	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 정지 및 발전 정지 후 30일 이내 작성 후에 과기부·산자부 송부 • 과기부 고시 01-44호와 표준 기행-운영04에 의거 작성 • KONIS에서 입수 가능
운전 및 정비 경험 보고서	<ul style="list-style-type: none"> • 기기 고장 등으로 과도 상태 발생시 • 표준 기행-자료 03에 의거 작성 • KONIS에서 입수 가능
규제 기관 지적	<ul style="list-style-type: none"> • 고리 3·4호기 홈페이지에서 입수 가능
TMI 후속 조치 관련철	<ul style="list-style-type: none"> • TMI 사고 후속 조치로 MMI 측면에서는 CRDR를 포함하여 SPDS 설치 등 약 20여개의 항목들에 대한 자료
MCR 제어반 사진	<ul style="list-style-type: none"> • MCR 전경, 각 제어반, 각 계기 순으로 촬영
ERG 및 Background 문서	<ul style="list-style-type: none"> • EOP 절차서의 내용 타당성 검증을 위해 필요
절차서 목록 및 전자 파일	<ul style="list-style-type: none"> • 개정 이력은 절차서 파일 안에 포함됨 • 절차서 관리 시스템에서 모든 절차서 입수 가능 • 절차서와 별도로 지침서도 있음

〈표 2〉 평가 기준 문서 발췌

기준 문서	용도
과기부 원자력법 시행규칙 제19조의2	<ul style="list-style-type: none"> • 절차서, 인적 요소 평가의 항목 제시
IAEA Safety Series No.50-SG-012, Periodic Safety Review of Operational Nuclear Power Plants, IAEA, 1994	<ul style="list-style-type: none"> • 과기부 원자력법 시행규칙 제19조의2의 참조 지침
KINS-G-001, 경수로 안전심사지침(rev.01), 한국원자력안전기술원, 1997	<ul style="list-style-type: none"> • 이 지침에는 인간공학 분야 검토 지침이 18장에 나타남.
NUREG-0700, Guidelines for Control Room Design Reviews, USNRC, September 1981	<ul style="list-style-type: none"> • 1996, 2002년에 개정됨. • 1996년 개정부터 발전소의 계통이 사라지고 오로지 인간 공학적 측면만 다루고 있다.
NUREG-0711, Human Factors Engineering Program Review Model	<ul style="list-style-type: none"> • 이 문서는 인간 기계 연계 체계 설계시 따라야 할 인간 공학 프로그램을 제시하고 있다.

NUREG-0700의 개정판에서는 기존에 있던 평가 방법론이 삭제되고 디지털 계기에 대한 평가 인자들

이 새로 추가되었다. 그러한 개정은 평가 방법론, 계통의 운전까지 다루어 이 문서의 적용 범위를 제한하기

보다는 오로지 계기의 인적 기준에 치중하여 원자로 형태(중수로·경수로)에 상관없이 인간 공학적 기준을 동일하게 적용하려는 의도로 보인다.

그러나 개정판에서 사라진 방법론도 알고 보면 또 하나의 인적 평가 기준인 NUREG-0711에서 상세히 언급되어 있으므로 NUREG-0700 개정판을 사용한다고 하여도 인간 공학 평가 업무가 바뀌지는 않는다.

개정된 NUREG-0700을 사용하면 계기의 평가 인자가 더 상세화되고 디지털 계기의 기준까지 제공하므로 재래식 계기와 CRT가 공존하는 한수원 발전소 주 제어실의 평가에 더 적합하다. 뿐만 아니라 이전 버전에 존재한 재래식 계기의 인적 기준이 삭제되거나 변경되지도 않아 두 버전간에 상충되는 요건도 없다.

3. 기존 평가 검토

TMI 사건을 기점으로 인간 공학의 중요성이 인식되면서 부분적 혹은 전체적으로 주 제어실 인간 공학적 평가가 이루어졌다.

PSR에서 수행하는 평가도 결국 기존 평가의 연장선상에 놓이므로 기존의 평가 결과를 건설적으로 계승할 필요가 있다. 특히 TMI 직후에 행하여진 CRDR(Control Room Design Review)는 많은 노



력이 투입되어 행하여진 평가이기 때문에 그 가치는 높다.

뿐만 아니라 평가 방법론에서도 기존 평가를 검토할 볼 가치가 있다. 사실 인간 공학적인 평가 방법이 시대에 민감하지 않지만 평가 기준, 평가를 지원하는 기술들이 조금씩 진보되기 때문에 이전 방법을 이해할 필요는 있다.

인간 공학 평가를 끝내고 그 개선 항목이 주제어실에 반영되는 시점은 평가 보고서의 제출 후이므로 단순히 보고서만 검토하였다고 기존 평가의 검토는 끝나지 않는다. 후속 조치 보고서도 입수하여 지적된 개선 항목들이 이행되었는지 확인하여야 한다.

4. 평가 대상 선정 및 방법 확정

절차서를 예로 들어 평가 대상 선정의 중요성을 알아보자. 한 발전소의 절차서의 갯수는 약 1,000 여개에 육박하므로 모든 절차서를 일일이 검토할 수는 없다. 즉 대상을 좁힐 수 있는 기법이 필요하다. 예를 들어 안전 관련 절차서로 한정하든지 혹은 통계적인 방법으로 표본을 추출할 필요가 있다.


또 제어반을 보더라도 주제어실의 제어반, 원격 정지반, 현장제어반, SPDS 같은 컴퓨터 기반의 설비들이 있으므로 이것 또한 적절히 선택할 필요가 있다.

평가 대상의 선택은 경우에 따라

〈표 3〉 NUREG-0700의 개정과 적용

항목	Rev.0 (1981)	Rev.1 (1996)	Rev.2 (2002)	비교 및 적용성
발전소 타입에 따른 계통 운전 유형	언급	삭제	삭제	• 경수로·중수로에 상관없는 기준으로 탈바꿈. • Rev.2에서 삭제되어도 NUREG-0711의 평가에 의하면 해당 계통 운전 고려해야 함.
인간 공학 업무 평가 절차	확인 안됨	언급	삭제	• 인적 요소를 강조하고 그 평가 절차는 NUREG-0711에 위임
재래식 계기의 평가 항목	언급	큰 변화 없음	큰 변화 없음	
유지 보수를 고려한 인적 요인	없음	없음	추가	• 유지 보수성(보수중 인적 오류 등) 평가를 위하여 Rev.2 적용 필요.

〈표 4〉 유형 평가표 일부

계기 유형	NUREG0700 Rev2.	검토 내용
	PID(MA) 제어기의 기준은 없으나 연속 조작 다이얼, 수직 지시계, 버튼으로 분해하여 평가 가능. 기준 필요.	<ul style="list-style-type: none"> • 증/감 버튼의 간격이 좁은 경우가 있다. • 설정치(Setpoint)의 조정할 때 연속 조작 제어기의 출력 범위가 0-100으로 고정되어 실제 공정값(0-24kg/cm²)의 범위와 불일치하여 일일이 환산하여 주어야 한다. • 표준 원전에서는 이미 적용되고 있는 개념으로 제어기의 추후 변경 필요.

다르므로 해당 평가 기법에서 자세 히 설명된다.

5. 계기 유형별 평가

제어실의 계기들이 같은 유형이 반복되어 사용되므로 모든 계기를 평가하는 대신에 유형별로 평가를 하면 노력을 줄일 수 있다. 평가 초점은 눈금, 명판 조작의 편의성, 응답 속도, 사용 용도의 일관성 등이다. 이 평가 기준은 유형별로 정리되어 NUREG-0700에 잘 나타나 있다.

제어실에 사용되는 계기에는 위

치와 크기가 고정된 실계기와 모니터상으로만 접근되는 E-계기가 있다. 첨단 제어실은 E-계기로 조작된다.

가. 실계기 평가

- ① 주제어실의 모든 계기를 사진으로 촬영하여 Tag별로 정리한다.
- ② 주제어실의 계기 목록을 문헌(PUMAS나 SSILS)에도 찾아 정리하고 사진에서 얻은 목록과 비교한다.
- ③ Tag별 사진을 유형별로 분류한다.
- ④ 각 유형별 대표 사진에 대해서

인간공학 적합성(명판, 크기, 눈금, 지시 바늘, 증감 방향, 조작 편의성 등)을 평가한다.

④ C&LD를 참조하여 계기와 센서/구동부 관계 및 동적 특성도 검토한다.

⑤ 개선 사항을 제시한다.

나. E-계기 평가

E-계기도 실제기와 유사한 방법을 통하여 평가할 수 있다. 그러나 CRT상에는 여러 심벌들이 혼합되어 있기 때문에 실제기처럼 계기의 영역이 명확하지 않을 수가 있으므로 주의를 요한다.

6. 제어반 평가

이 평가 방법은 앞의 계기 유형 분석을 기반으로 다양한 계기가 설치된 제어반을 평가 대상으로 한다. 그러므로 계기를 직접 평가하기보다는 계기 사이의 관계, 즉 배열이 더 중요한 평가 인자가 된다.

가. 실제어반 평가

주제어실, 원격 정지실에 설치된 제어반 및 경보판을 전수 평가하고 현장제어반은 안전 관련으로 한정한다.

① 제어반에서 계기 배치 최신 도면을 출력한다.(Dreams에서) 이 도면은 계기의 형태를 단순화시킨 대신에 계기의 위치 및 연결 관계를 보여준다. 이 자료를 보충하는 방법으로 제어반의 사진도 권장할만 하다. 더 추천하고

픈 방법은 계기의 유형 사진을 계기 배치 도면에 복사하여 작성된 화면이다.

② 이 제어반으로 조직 및 감시되는 계통과 관련 P&ID를 참조한다.

③ 운전 모드에 따른 일련의 직무를 도상 수행하며 누락된 지시계 및 조절계가 없는지 확인한다.

④ 에너지/물질/제어 흐름을 고려하여 계기의 배열을 평가한다.

⑤ 계기의 군집 관계, 군집에 따른 색채 구분, 계기의 밀도 등도 평가한다.

⑥ 경보판 및 상태 등도 C&LD 등과 비교하여 평가한다.

⑦ 제어반의 인체 공학적인 구조를 평가한다.

나. E-제어반(CRT) 평가

E-제어반은 CRT로 보이는 제어반이며 여기에는 모든 화면이 나타나지 않고 지도를 통하여 접근한다. 운전원이 화면의 계층 구조에서 감시 제어 화면을 찾아가므로 평가의 내용에서 화면 향해를 고려하여야 한다.

7. 제어실 평가

이 평가 항목은 제어반이 놓인 주제어실 및 원격정지실의 제어반 배치 및 운전 환경에 대하여 평가한다.

① 각종 제어반의 평면 배치도를 구한다.

② 유형 및 제어반 정보를 통합하

여 PSR 수행 당시의 제어실을 문서화한다.

③ 운전원의 시야 거리 및 각도, 이동 동선, 의사 전달 편의성, 음향 시설, 통신 시설, 보안 시설 등에 대하여 평가한다.

④ 제어실의 온도·조명·습도 등의 환경에 대하여 평가한다.

8. 인적 오류 중심 평가

이 평가의 주된 목적은 만일 현재의 MMI에 인적 설계 결함이 있었다면 산업 운전중에도 이 결함으로 인하여 사건 사고로 표출되었다는 가정에 근거한다. 운영 허가 단계에는 이런 경험이 축적되지 못한 상태에서 MMI 설계를 평가했다면 PSR에서는 이런 경험 자료를 활용할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 모든 사건 사고가 모두 MMI나 절차서의 원인으로 귀착되지 않는다. 조직·교육·안전 문화 등 다양한 이유에서 사고가 발생되기 때문이다.

① 평가 대상의 선정은 K-HPES 보고서, 사건 사고 보고서, 운전/정비 보고서, 경미한 사건 보고서를 대상으로 한다.

② 자료 목록을 먼저 입수하고 상세 보고서는 분석 단계에서 참조한다.

③ K-HPES 보고서는 다양한 선택 항목 중 한 두 개를 선택하는 방식으로 기술되어 분석자가



P&ID 등 도면을 삽입할 수 없다. 그러므로 K-HPES의 보고서에서 Tag를 얻은 후에 원전 설비 관리 시스템(PUMAS)에서 Tag에 따른 기타 정보를 얻어낸다. 예를 들어 이 Tag가 포함된 P&ID명, Tag의 개선 이력 등이다. 이 파생 정보로부터 도면 관리 시스템(DREAMS)을 통하여 P&ID, C&LD, W7300 제어반인 경우 Process Control Block 등을 얻는다.

④ 계기 설계도, 배선도, 원자력 연수원의 계통 교재를 종합하여 사건을 재해석 한다.

⑤ 보고서의 사후 조치 내용을 보고 실제 설계나 절차서에 반영되었는지 확인한다. 조치가 교육 훈련이나 조직의 변경으로 반영되었다면 타팀으로 통보한다.

⑥ 인적 오류 유형을 계기별·운전 모드별 등 다양한 형식으로 표를 만들어 해석하도록 한다.

⑦ 좋은 관행 및 가능한 범위의 인적 신뢰도 자료까지 도출한다.

〈표 5〉는 고리 3·4호기의 인적 오류 보고서의 검토 사례이다. 아직 현장 의견은 반영되지 않은 상태이다.

〈표 6〉은 고리 3·4호기 인적 오류 보고서를 계기별로, 운전 상황별로 분류하여 빈번하게 발생하는 오류를 정리한 표이다. 타발전소의 자료까지 취합된다면 유용한 결과를

〈표 5〉 인적 오류 보고서 검토 사례

보고서 번호	제목	조치 계획	PSR 의견	현장 의견
K4-97-002	체적 제어 탱크 압력 감소	1. 정비 작업 관리 철저 2. 체적 제어 탱크 압력 감소시 운전원 조치 사항에 대한 기상 훈련 실시	• 체적 제어 탱크의 압력 감소를 조기 감지함. • 저압력 경보가 제공되는가? • PCV113는 자력식 밸브이므로 분해를 위하여 입력단·출력단·구동단 배관 막음에 대해 정비원 교육 필요.	
K3-97-005	원자로 냉각재 배출 탱크 수위 비정상 증가	1. 원자로 헤드 유출수 차단 밸브(BB-HV004) 차단 단계 절차서 삽입 2. 절차서 개정 사항 운전원 교육	• 고리 3·4호기 운영 절차서(종합-13 : 연료 재장전 수조 충수 및 배수)에서 단계 4.10에 차단 밸브 확인 절차 삽입 확인됨. • 절차서 개정 이력에 변경 페이지를 언급하고 있는데 절차서 페이지는 단계 내용의 증감에 따라 변동 가능성이 많으므로 단계 번호로 표시 바람.	

〈표 6〉 계기별·운전 상황별 인적 오류 유형 발현

계기	인적 오류 타입
Relay	• Relay의 기압 상태 확인 생략 • Relay 신호 제거에 따른 파급 효과 무시 • 기능에 따른 Relay의 군집 배열 필요
Valve	• 외부 압력에 의한 자력식 밸브 분해시 외부 압력 배관의 막음 미확인 (이로 인한 Tank의 압력 증감 발생)
Pipe	• 방시는 구역에서 작업시 부당 발생(ex 임시 배관 연결시 오류) • 장기간 미사용시 유체의 변질 미확인 • 플라스틱 배관의 꺾임 • 이형질(물과 수지) 이송시 막힘 발생
Card	• 점퍼 설정 착오 • 카드 제거시 영향 평가 미흡 • 접촉식 정전기로 인한 오동작
베어링	• 조립시 윤활유 입구 배열 잘못
수위 지시계	• RCS 배수시 압력 차이에 의한 수위 지시계 오차 발생
회로 결선	• 설계와 다르게 결선하는 오류
열교환기	• 구두 요청시 복수/급수/취기 계통 열교환기의 구별성 나쁨
Shift Operation	• 자주 사용되지 않는 계기 조작 후 교대시 통보 누락

얻을 수가 있다.

9. 설계 개선 이력 평가

등기가 무엇이든지 상관없이 받

전소는 항상 설계 개선이 이루어지고 있다. 특히 발전소 자발적으로 이루어지는 설계 개선은 운전원의 불편이나 선호도가 잘 반영되어 있기 때문에 운전원 관점을 파악할 수 있는 좋은 자료가 된다.

모든 설계 개선 자료는 원전 설비 개선 시스템에서 목록을 얻을 수 있으나 설계 변경의 상세 내용을 파악하기 위해서는 해당 호기로 상세 자료를 청구해야 된다.

설계 개선 자료를 분류하면 FSAR에 반영된 경우/아닌 경우, 규제 기관 지적에 따른 개선/자발적 개선, 과기처에 허가 여부/신고 여부, TMI 후속 조치 여부로 분류할 수 있다.

규제 기관 지적과 TMI 후속 조치는 규제 기관 관점 평가에서 따로 평가하고 나머지 설계 개선 항목 중에서 FSAR 반영분과 과기처의 허가 사항만 선택하여 평가한다.

10. 규제 기관 관점 평가

이 평가는 TMI 후속 조치와 과기부 행정 조치, 규제 기관의 정기 점검 및 특별 점검시 지적 및 권고 기준으로 인간 공학 평가를 수행한다.

가. TMI 후속 이행 평가

TMI 후속조치는 NUREG-0737에 따라 발전소가 적절히 조치하였는지 확인한다. <표 7>은 NUREG-0737에서 요구하는 가압 경수로형 MMI 항목을 발췌하였다. 해당

<표 7> TMI 후속 MMI 관련 항목 발췌

번호	요 구 사 항(NUREG-0737)	조 치 사 항	검 토 내 용
1	주제어실 설계 검토	CDRD 이행	CDRD 보고서로 확인
2	안전 변수(Safety Parameter) 표시반 설치	OACS 설치(SPDS)	OACS 매뉴얼로 확인
3	주제어실에 RCS 비응축 가스의 배기 설비의 지시 및 제어 가능, 그리고 절차서에 반영	Reactor 상부에 배기관 기설치.	조작 방법 확인 예정
5	노심 손상 완화 훈련		인간 공학 비평가 항목
12	불충분한 노심 냉각 파악을 위한 계측기 설치 (ICC, 수위 지시, 노심 과냉각도)		설치 여부 확인 필요
14	비상 대응 설비(ERF) 개선	ERF 설치	타분야에서 평가
15	격납 용기 외부 설비의 방사능 누출 방지 대책		비평가 항목
16	사고시의 발전소 내 공기중 방사능 Iodine 감시		계측기 확인 예정
17	사고시 주제어실 상주 기능성 검토	MCR 비상 공기 공급 및 여과 설비	비상 설비 교육 교재에서 확인함
18	터빈 트립에 의한 원자로 트립 가능성		CLD 확인 필요 예정

<표 8> 규제 기관의 권고 및 지적 평가 예

관리 번호	제 목	조치 부서	조치 내용	PSR 의견
86-174	기기 냉각수 밸브 자동 동작 절차서 미비	발전부		
86-176	핵연료 재장전 기중기 과부하 시험 절차서 부적합	기계부		
86-179	공기 정화 계통 여과기군 성능 시험 절차서 미비	기계부		

호기의 TMI 후속 조치 관련철이나 현재의 설비 혹은 계통 문서에서 확인한다.

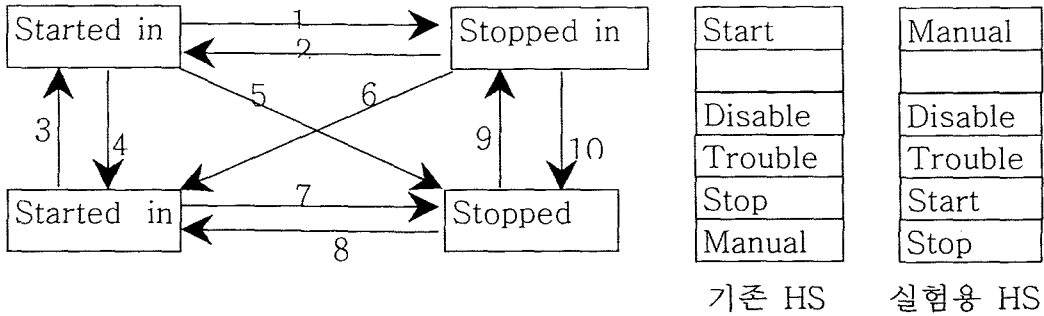
고리 1호기, 월성 1호기를 제외한 대부분의 발전소는 TMI 사고 이후에 준공되어 일반적으로 이 요건들이 잘 만족된다고 생각된다.

나. 규제 기관 지적/권고 사항 분석
지적/권고 사항은 고리 3·4호기의 경우 약 400건 정도이며 인간 공학 관련된 항목만 선택하여 평가한다. 선택 기준은 규제 기관의 인간 공학자 지적 항목은 필연적으로 포함하고 타분야 점검 중에서도 운전, 점검/보수, 시험의 우선 순위로 적당량 발췌한다. 특히 지시계·제

어기·절차서와 관련이 깊으면 가산점을 준다.

규제 기관의 지적이 권고보다 우선 순위가 높으며 또 반복적으로 지적되는 항목에 대해서는 최신의 지적에 더 높은 무게를 둔다.

발전소의 대부분의 직무가 절차화되어 있기 때문에 규제 기관의 지적은 결국에는 절차서로 귀결되는 경우가 많다. 그러나 인간 공학에서 절차서를 평가하는 관점은 절차서의 기술적인 정확성보다는 절차서의 표현 방법에 보다 초점이 놓이므로 발췌된 규제 기관 지적에 대해서도 적절한 균형을 유지하는 자세가 필요하다. 기술적인 정확성은 PSR



〈그림 2〉 Hand Switch와 상전이도

의 다른 팀에서도 검토하기 때문이다.

이런 기준으로 선택된 지적/권고를 더 자세히 평가하기 위해서 지적/권고의 후속 조치 항목을 인트라넷에서 얻어 규제 기관의 우려점과 발전소의 대응 내용을 검토한다. 대부분 잘 처리되어 있지만 혹시라도 미미한 점이나 개선 제안을 할 수 있다면 발전소의 의견을 듣는다.

〈표 9〉 HS의 설계에 따른 상태 전이도

조작	기존 HS	실험용 HS
1	공정 상태에 따른 자동 정지	공정 상태에 따른 자동 정지 신호
2	공정 상태에 따라 자동 가동	공정 상태에 따라 자동 가동 신호
3	Start 버튼 Click	Manual 토글
4	Start 버튼 Click	Manual 토글
5	Stop 버튼 Click	Stop 버튼
6	Start 버튼 Click	Start 버튼
7	Stop 버튼 Click	Stop
8	Start 버튼 Click	Start
9	Stop 버튼 Click	Manual 토글
10	Stop 버튼 Click	Manual 토글

11. 절차서 평가

1,000여개에 육박하는 절차서 평가를 위해 선택과 집중의 기법이 요구된다.

- ① 절차서의 분류 및 구비성 평가
- ② 안전 관련 및 표본 처리에 의한 절차서 선별
- ③ 절차서 분류별로 구성 및 형식 평가
- ④ 절차서의 내용 정확성 평가

규제 기관은 비상 운전 절차서 특별 점검(KINS/AR-516)을 통하여 각 발전소의 특별 점검을 수행한 적이 있기 때문에 지적된 항목의 이행 여부를 점검할 필요가 있다.

12. 단위 실험 평가

단위 실험 평가는 평가의 결과에 논란이 있을 수 있는 항목에 대하여 모의 실험을 수행하여 평가 결과의 정확성을 높이는 작업이다. 이 단위 실험은 컴퓨터 화면에서 모형을 만들고 동적 특성을 모의하여 평가한다. 아래 예는 단위 실험의 후보들이다

기존 Hand Switch는 Start/Stop 신호만으로 Auto/Manual의 변화가 가능하며 또 다른 특성은 Auto모드에서 일단 Hand Switch에 손을 대었다면 Manual 모드로

바뀐다는 점이다.

그러나 인간공학적인 관점에서 보자면 Start 버튼으로 Auto/Manual이 Toggle된다는 점이 직관적이지 못하다. 반면에 실험용 Hand Switch는 Auto/Manual의 선택이 Manual 스위치로 변화되기 때문에 더 직관적이지만 입력 신호가 더 많다.

13. 시나리오 수행 평가

시나리오 평가는 단위 평가보다 규모가 크고 발전소의 동적 특성을 최대한 반영한 평가이다. 단순히 MMI나 절차서로 평가가 한정되지

〈표10〉 울진 5호기 안전 제어기 및 표시기 일부분 발췌

NAMEPLATE ENGR.LINE1	NAMEPLATE ENGR.LINE2	NAMEPLATE ENGR.LINE3
ESF SWGR RM A	AHU SUP FAN 01A	VE-HS-081
ESF SWGR RM A	AHU HTR/SUP AIR	VE-TI-063/071
1E BATT RM A	EXH FAN 05A	VE-HS-105
ESSEN WTR CHLR	RM A EXH FAN 07	VE-HS-113
1E BATT RM A	EXH FAN 06A	VE-HS-107
ESSEN WTR CHLR	RM A EXH FAN 08	VE-HS-115
ESF SWGR RM B	RETURN FAN 03B	VE-HS-132

않고 운전원 조직, 운전원의 교육 및 훈련, 안전 문화 등에 크게 영향을 받는다. 비상 운전 절차서나 기동 정지 절차서 등을 수행하며 시간 제약을 고려하므로 종합적인 평가 기법이다.

이 평가는 운전조와 평가자로 구분되어 MMI나 절차서를 평가한다. 여러 가지 측정 방법이 있으나 NASA에서 개발된 작업 부하 측정 방법(TLX)이 많이 사용된다.

NASA-TLX는 정신적 부담, 육체적 부담, 시간적 부담, 개인 성과, 노력과 좌절의 5개 측면에서 피험자가 주관적으로 평가한다.

HED 및 개선 항목 수집 및 분류

1. HED의 분류

다양한 평가에 의하여 도출된 HED를 영향의 경중에 따라 분류한다. 비록 HED는 인간 공학적인 기준에 따라 도출되었지만 그 영향은 발전소의 안전을 해치기 때문에 안전 영향을 최우선으로 고려하였다.

제1 우선 인자는 이 HED가 안전 계통의 운전엔 필요한 지시계나 제어기인지 파악하고 제2 우선 인자는 영향의 심각성을 따진다. 제3 인자는 사용 빈도 수나 인적 기준의 편차 정도를 본다.

가. 안전 계통 지시계 및 제어기 여부
안전 계통은 RCS의 압력 경계와 방사능 물질의 누출을 막는 계통이

다. 〈표 10〉은 여러 가지 기준으로 안전 지시계 및 제어기를 분류하였다.

안전 분류는 개별 계기에 따라 〈표 11〉처럼 다르게 결정되지만 일차적인 근사 방식으로는 그 계기가 속한 계통이나 그 계기가 속한 제어반에 따라서 결정할 수 있다. 특히 운전원은 제어반 위치나 계통에 익숙하기 때문에 1차적인 근사도 나름대로 유용하다.

나. 인적 행위의 파급 효과

안전 계통 지시계나 제어기라고 하더라도 보통 한개만 설치되지 않고 여러 개가 설치되어 잘못된 행위에 대한 정정 기능이 있다. 또 어떤 조작은 실행 후에 되돌릴 수 있는 능력이 있기 때문에 한 실수가 바로 안전 사고로 직결되는 것은 아니다.

다. 사용 빈도 및 인적 편차

이 기준은 자주 사용하는 MMI를 개선하는 것이 효과도 높을 것이라는 상식에 기초한다.

2. 개선 사항 평가

각각의 HED에 대하여 여러 가지

의 개선 항목을 도출하고 각 개선 항목에 대하여 비용과 이득 평가를 수행한다.

현장 의견 반영

모든 HED나 개선 사항은 현장 의견을 반영하여 실용적으로 접근되어야 한다. 그러나 현장 의견을 수렴하는 과정은 생각만큼 쉽지 않다.

PSR 수행자는 각 호기의 문제점을 부각시켜 많은 개선 항목을 도출하려는 반면 현장에서는 될 수 있으면 문제점을 적게 지적당하고 개선 경비를 최소화하려 하기 때문이다.

보고서 작성

이 평가 결과를 토대로 인적 요소와 절차서에 대해 각각의 보고서를 제출한다. PSR 보고서는 안전성 보고서와 마찬가지로 문서 체계가 정립되어 있다. ☞

〈참조 문헌〉

- 원자력 발전소 주제어실 설계 검토, 한국전력 기술주식회사, 1990.6