

원자력발전소에서 작업자 인터페이스의 주기적 안전성 검증 방안

민유중 · 장동일 · 김수진 · 이용희

한국원자력연구소, 계측제어·인간공학연구부

1. 서 론

현대의 산업은 대규모 공정제어 시스템을 통한 작업자와 작업자 인터페이스의 상호 유기적인 관계를 통하여 운영되고 있다. 이러한 유기적인 관계가 고신뢰도 체계를 운영하고 있는 석유화학, 군사, 통신 등의 안전성 문제에 많은 영향을 미치고 있다. 실제 대부분의 안전 사고가 시스템 자체에 문제보다는 시스템을 운영하는 인간-기계 연계 체제(Human-Machine Interface; HMI)에서 비롯된 것이다. TMI, 체르노빌, JCO 등의 사고를 통하여 원자력발전소(이하, 원전)에서는 작업자 인터페이스의 품질 문제가 강조되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 우리나라도 원전에 대한 10년 주기의 주기적안전성평가(Periodic Safety Review: PSR)에서 인적요소 평가를 포함하고 있다.

대부분의 산업 시스템의 인적요소에 대한 안전성 평가는 상당히 광범위한 항목들에 대하여 외부 전문가관에 의하여 평가되어 지고 있다. 하지만 운전중인 시스템에 대하여 인적요소를 평가해야 할 경우, 외부 전문가관에게 시스템 운영에 대한 정보공개 및 확인과정을 무한대로 설정할 수 없고, 평가 대상 범위의 선정과 적합한 평가 방법론도 충분히 합의되어 있지 않은 것이 현실이다. 본 연구에서는 이러한 작업자 인터페이스의 인적요소 측면에서 안전성 검증의 실무과정에서 시행착오를 줄일 수 있는 방법론을 제시하고, 현재 운영중인 국내 원전의 주기적안전성평가에 적용하였다. 더 나아가 개발된 방법론을 통하여 타분야의 HMI 안전성평가에 적용 가능성을 보이고자 한다.

2. 평가 대상 및 범위

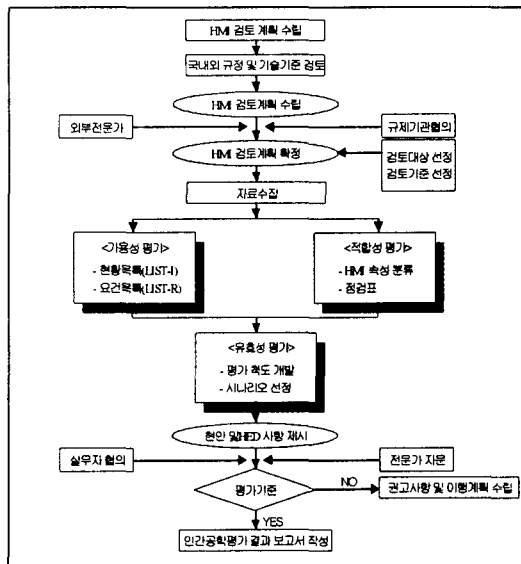
대규모 공정제어 시스템은 주제어실을 비롯한 다양한 감시제어 환경이 구축되어 있다. 모든 업무가 업무분장을 기반으로 주어진 HMI에서 진행되며, 해당 업무의 진행과정에서 운전 종사자와 HMI 기기가 서로 보완적으로 공조하고 있다. 따라서 작업자 인터페이스의 안전성 평가는 조직, 운영, 직무할당 및 관리, 교육 훈련, 안전 문화 등을 모두 포함해야 하지만, 직무분석을 통한 HMI 기기를 중심으로 한 안전성 평가가 우선적으로 수행되어야 한다. 평가대상 및 범위는 해당 시스템의 건설당시 인허가 심사 기준이나 규제기관의 기준에 의해 평가대상 및 범위가 결정된다. 원전의 경우 건설 당시의 인허가 심사 기준인 안전심사지침(KINS-G-001)에 명시된 바를 따라 주제어실 및

주제어반, 안전변수지시계통, 원격정지 제어반, 현장 제어반 등으로 구분하였다.

3. 평가방법

HMI의 안전성 평가 방법은 인간공학적 측면에서 가용성(availability), 적합성(suitability), 유효성(effectiveness) 등을 기본적인 평가척도로 사용한다. 가용성이란 운전원이 운전을 수행하는데 누락된 HMI 기기가 없음을 확인하는 것이며, 적합성은 HMI 기기 자체의 속성 및 배치, 배열, 환경에 대한 인간공학적 타당성을 의미한다. 특히, 개별적인 HMI 기기의 적합성에 대해서는 최근의 HMI 관련 기준들을 참고하여 세부 기술기준을 결정하였으며, 대상선별에서는 해당 HMI 기기의 안전성 관련도와 기기 유형에 대한 대표성을 고려하여 유형별로 분류하였다. 또한, 가용성과 적합성 평가로부터 도출된 현안(issues)들에 대하여 보다 심층적인 확인이 필요한 항목들에 대해서는 별도의 시뮬레이터 등을 활용한 유효성 확인 실험 평가를 수행하였다. 각 평가 척도에 대한 평가의 흐름은 운전경험검토, 문서기반 평가, 면담을 포함한 실사 평가, 전문가 평가, 실험 평가의 순으로 진행된다.

현재 운영되고 있는 대부분의 국내 원전은 HMI의 인적 요소에 대한 명시적인 요건이 없었으므로, 추가로 최근 제시된, NUREG-0711과 IEEE STD-845를 평가의 기준으로 사용하였다. [그림 1]은 평가 범위 및 평가 방법의 흐름을 나타낸 것이다.

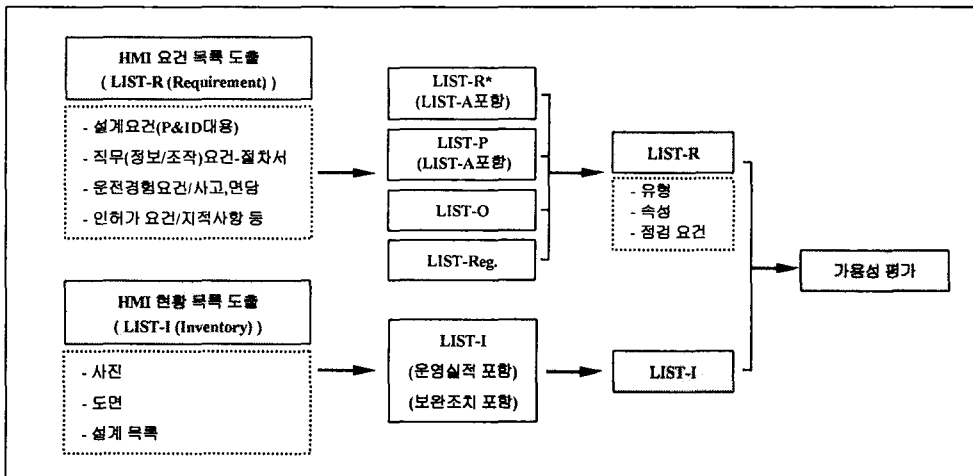


[그림 1] 평가 범위 및 평가 방법의 흐름도

3.1 가용성 평가

가용성 평가는 HMI가 안전성을 유지하기에 필요 충분하게 제공되고 있는가를 평가

하는 것이다. 평가 방법은 가용한 HMI 기기를 정리한 현황목록(LIST-I)과 필요한 HMI 기기를 정리한 요건목록(LIST-R)을 도출하고, 이를 상호 비교하여 가용성을 평가할 수 있다. 현황목록 LIST-I는 각 계통별로 주제어실 및 주제어반, 안전변수지시계통, 원격정지 제어반, 현장 제어반을 구분하여 관련 HMI 목록을 도출하며, 요건목록 LIST-R은 각 계통의 설계 문서를 통하여 도출한다. 이 목록 비교를 통하여 HMI 기기의 누락 혹은 불필요한 기기 여부를 문서상으로 파악하고, 가용 여부 및 위치 등을 현장에서 확인하는 방식이다. 그러나 이와 같은 방법은 건설당시의 설계문서가 기준이 되므로 추후 설계변경이나 유지 보수, 기기 교체와 같은 변화에 대응하지 못하고 있다. 따라서 요건목록 도출은 기본적으로 직무요건분석을 통한 절차서에서 도출한 HMI 요건(LIST-P)과 정보대응 요건(LIST-A), 법규상 명시된 요건(LIST-Reg.), 사례 및 운전경험분석 요건(LIST-O) 등을 포함한 최종적인 LIST-R의 도출이 필요하다. 가용성과 관련한 사례 및 운전경험분석 요건목록은 타호기 운전경험을 포함한 TMI 후속조치, 주제어반 검토 우선확인 사항, 정기검사 지적/권고사항, FSAR 개정 내용, CRDR 보고서, 설계변경, 정지이력, 고장 및 사고보고 등을 포함한 목록 도출이 필요하다. [그림 2]는 이러한 요건목록 LIST-R을 도출하기 위한 구성 요소들을 보인 것이다.



[그림 2] 요건 목록 도출을 위한 구성 요소

가용성 평가는 단순히 해당기기의 가용여부에 대한 확인으로 만족되지 않는다. 해당 기기의 유형은 물론 표시 및 조작 방식 등 세부적인 점검요건들이 추가로 검토되어야 할 것이다. 이들은 요건목록의 세부 항목을 통하여 확인한다. 기기의 세부 점검요건으로는 기기명칭, 상호작용 기능, 계측범위, 대안기기, 해당위치, 반응도 등 계측기능의 세부요소에 대한 요건이 포함된다. 이를 통하여 HMI 기기의 누락 또는 불필요 항목을 개별적으로 평가하고, 최종적으로는 현장 전문가의 검토 및 계측제어 분야 전문가의 평가를 거쳐, 예상 문제점 및 오류 등 가용성 문제의 세부 내용을 분석하여 인간공학적

현안(issues)으로 도출된다. 다음 <표 1>은 주제어반의 가용성 평가의 실무에 적용된 비교목록을 나타낸 것이다.

<표 1> 주제어반 가용성 평가 점검표(예시)

LIST-R					LIST-I				검토 의견	
Proc. No.	Step No.	Tag name	Tag number	Function	계측 범위	대안 기기	해당 위치	Tag name		Tag number
부수-3.3	17.3		AD-HV-46					CONDS POLISHER INLET VALVE	N-5J-AD-HS-46	밸브 번호 재확인
부수-3.1	29.3	복수 탈염기	AD-HV-46							
부수-3.2	23.3		AD-HV-46							
부수-3.3	17.3		AD-HV-47					CONDS POLISHER OUTLET VALVE	N-5J-AD-HS-47	
부수-3.1	29.3	복수 탈염기	AD-HV-47							
부수-3.2	23.3		AD-HV-47							
부수-3.3	17.2	CST로의 재순환 격리 밸브	AD-LV-48A					EXCH CONDENSATE DRAW-OFF VALVE	N-5J-AD-HS-48	

3.2 적합성 평가

적합성 평가는 HMI가 운전원이 사용하여 작업을 수행하기에 적절히 제공되고 있는가를 평가하는 것이다. 가용성 평가가 필요 기기에 대한 존재의 유무에 양적인 측면을 평가했다면, 적합성은 필요 기기에 대한 질적인 측면을 평가하는 부분이다. 즉, 안전성을 유지하는데 필요한 조치를 적절하게 제공하고 있으며, 작업 수행 중 안전성에 영향을 미칠 수 있는 결과를 충분히 방지할 수 있는가를 평가하는 것이다. 각 계통별로 주제어실 및 주제어반, 안전변수지시계통, 원격정지 제어반, 현장 제어반 등의 속성으로 구분하고 이 속성에 대한 세부 점검항목을 도출하였다. <표 2>는 평가 대상에 대한 적합성 평가의 점검 세부 항목을 나타낸 것이다.



<표 2> 적합성 평가 점검 세부 항목

주제어실 실사항목	범 위	주제어실 실사항목	범 위
1. 주제어실 및 부대시설 배치	<ul style="list-style-type: none"> - 주운전 지역 및 운전위치 - 제어반 및 부대시설 - 배치 자료 - 예비품, 소모품 및 비상장비 - 출입 통제 	6. 계기형식	제어기 <ul style="list-style-type: none"> - 제어기 일반 특성 - 제어기 보호 방식 - 제어기 동작 방향 및 구분 방식 - 푸쉬버튼(일반형 및 표지판형) - 회전형 제어기(J형, 열쇠조작형, 조절제어기, 선택제어기) - 기타 제어기(손바퀴형, 미끄럼형, 토글스위치, 로커스위치)
			지시기 <ul style="list-style-type: none"> - 지시기 일반 특성 - 지시계 - 표시등 - 기록계 - 계수기
2. 환경 조건	<ul style="list-style-type: none"> - 온도 및 습도 - 환기 - 조명 - 소음 - 사물함 - 분위기 및 안락감 	7. 경보 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 계통 설계 개념 - 음향 경보기 - 시각 경보기 - 경보 작동 제어기
3. 제어반 구조	<ul style="list-style-type: none"> - 운전중사자 콘솔 - 벤치보드 - 수직제어반 - 운전중사자 책상 및 의자 		

4. 제어반 및 계기 배치	<ul style="list-style-type: none"> - 계기 배치 일반 - 계기 배치 내용 구분 방식 - 계기 배열 방식 - 계기간 이격 및 군집 배열 방식 - 관련 제어기와 지시기의 배치 	8. 명 판	<ul style="list-style-type: none"> - 명판 위치 - 표시 내용 및 용어 - 표시 문자 - 임시 명판의 사용 및 통제 - 배치 내용 구분(경계구분 및 도식적 표시)
5. 컴퓨터 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 컴퓨터 계통 사용 및 관리 - CRT 화면 - 프린터 	9. 통신 계통	<ul style="list-style-type: none"> - 일반 전화계통 - 싸운드 파워드 전화계통 - 방송계통 - 비상 통신계통

본 연구에서는 원전의 안전성평가를 위하여 HMI에 대한 점검표 기반 전문가 패널 평가 방식을 제안한다. 인간공학적 평가의 기준으로는 NUREG-0700의 6절을 사용하도록 하였다. 국내 원전의 경우 점검항목이 1000여 항목에 이르므로 NUREG-0700은 실질적으로 사용 가능한 실무양식이 되지 못한다. 따라서 검토 대상 항목에 따른 세부 항목의 선정 및 적용 기준의 선별을 거친 실무양식의 개발이 필요했다. [그림 3]는 개발된 세부항목에 대한 적합성 점검표를 보인 것이다.

V.3.A10 MMI 적합성 검토의견 (주제어반-전문가 검토)

비고	MCB MMI 적합성 검토 검토장			회	실사 검토자	(서명) 2002년 11월 일
위치	계기명	정보창		인	K-2 검토자	(서명) 2002년 월 일
현재상태	속 성	기준 (0700)	요약내용	평가 의견	합천소 의견	
 127	표지 크기	6.3.3.1 6.3.3.3 6.3.3.5 6.5.1.3	문자 폭비율 6의10사이 문자 줄폭비율 2의3사이 숫자 높비 35 숫자높이 19의 최소사이 이나 3000x사이가 될 수 지워야 함			
	표지 색상	6.5.1.6	시각적 색상도 수기 11일 사지 및 정 색 의미의 부합되지 않을			
 131	음의 및 크기	6.3.3.4 6.5.1.4	음은이나 음이 하한 음이나 여어 사용			
	정보창 배열	6.3.3.3	기능이나 지시하여 위하여 그음됨			
창 위치	6.3.1.3 6.3.3.1		연관된 소용량제나 표시창 적 위하여 위치			
창 간격/크기	6.3.3.3 6.3.3.5					
창 크기	6.3.1.5 6.3.3.2 6.5.3.3					
(정보창의 설치 위치는 적용항목이 조직 운영의 정보창의 위치 검토 1. AN P12 SW LCD P1 정보창 위치부적합 2. LCD 등의 경우 '보유중' 표시 부적합 표시가 부정확하다 -> 필요할 경우 고안 3. AN printer와 정보창의 위치가 다르다 4. In-service status 정보창 group 개수로 2중일것은 검토된 바에 따라 확인 5. 표시크기가 작다 6. status light 상태판넬 반영 -> 표시지 부작가 -> 국방검소 통일화 방안						
첨부분	제어반 주변	기울 검토서	이격/중요수평기	사후미현조식제책(안)	의견표출결과	기타

[그림 3] 적합성 점검표(예시)

3.3 유효성 평가

HMI의 유효성은 HMI 기기 및 시설이 실제 의도된 작업을 적절히 지원하여 의도한 목적을 달성하는가를 의미한다. HMI의 유효성 검증은 앞 절의 가용성 평가와 적합성 평가를 통한 현안들에 대해 주어진 HMI 기기에 의하여 운전종사자들이 실제 작업을 수행하도록 함으로써, 기능상의 만족을 저해하는 문제점 존재여부를 확인하는 실험적인 과정이다. 실험평가에 대한 관측척도(observational measure)로 정보획득요구(Information Gathering Action required: IGA), 직무경로부담(Task Trajectory: TT),

요구 집중도(Task Concentration Requirement: TCR), 시행착오(Trial for HMI: TM)를 개발하여, 관측자로 참여한 전문가들이 패널합의 방식에 의하여 평가 결과를 도출한다. 개발된 관측 척도는 HMI와 관련된 작업부하와 오류 유발 가능성의 함수 관계를 추정하기 위하여 AHP 기법을 적용한다. 참여한 피실험자들의 주관적 평가 및 정성적인 검토의견과 그 결과의 비교를 통한 최종적인 평가의견을 제시하였다.

4. 적용 사례 및 결론

본 논문에서는 원전 작업자 인터페이스의 안전성 평가를 위한 인간공학적 검토 실무 방법론을 제시하였다. 개발된 방법론은 원자력법 및 시행규칙에 따라 현재 운전중인 원전의 주기적안전성평가에 적용하여, 작업자 인터페이스의 안전성 확인 실무 방법으로 활용하였다. 평가 과정에서 확인된 일부 추가 개선 가능한 사항에 대해서는 관련자의 참여에 의한 현안 해결 접근을 통하여 개선방안을 도출하고, 다 기준 의사결정과정을 통해 개선의 이행에서의 우선순위를 결정하였다.

현재 운영 중인 대부분의 원전은 인적 요소에 대한 명시적인 요건이 없었고, 안전성 평가에서 인적 요소 평가를 위한 구체적인 방법론 또한 불확실한 상황이므로 본 논문은 그 실무적인 출발점을 제공한 것이다. 제안된 방법론을 국내 원전에 적용함으로써 방대한 인적 요소들의 평가에 소요되는 실무상의 부담을 덜고 시행착오를 줄일 수 있는 효과적인 실무 방법론으로 판단된다. 국내 원전 적용 결과 객관적인 평가보다는 평가의 과정에 관련자를 참여시키고, 평가 결과를 현장 및 운영관리자의 의사결정에 반영할 수 있도록 구성된 방법론의 실무적 효용성(applicability)을 확인할 수 있었다. 개발된 방법론은 평가의 세부항목 및 기준을 해당 분야에 적합하도록 변경할 경우, 타산업의 안전성 평가 과정에서 작업자 인터페이스 검증에도 적용 가능할 것이다.

참고문헌

- 구진영, 이용희, 이정운, 박재창, 이철권, 이현철, "원자력발전소 주기적 안전성 평가를 위한 MMI 평가 방법론 개발", *한국원자력학회 2001 추계학술발표회*, 2001.
- 정연섭, 지문구, 김주택, "원자력발전소의 인간공학 주기적 안전성 평가 방법론 및 적용", *한국원자력학회 2003 춘계학술발표회*, 2003.
- IEEE, "IEEE Standard for the Verification and Validation of the man-machine system", *IEEE-std-845(1988)*, 1988.
- USNRC, Guidelines for Control Room Design Review, NUREG-0700, Sept. 1981.
- USNRC, Human Factors Engineering Program Review Model, Rev.1, NUREG-0711, 2002.