

원전 주제어실의 HSI 및 절차서의 실험적 평가

장통일 · 김대호* · 이용혁*

G&P System · *한국원자력연구소 계측제어 · 인간공학연구부

1. 서 론

원전의 주기적안전성평가 업무에서 수행되는 인간공학적 평가는 HSI(Human System Interface)에 대한 인간공학적 적합성을 평가하는 부분과 인적요소를 고려한 절차서에 대한 명확성을 평가하는 부분으로 대별될 수 있다.

HSI 및 절차서 평가는 문서기반 평가와 실사평가로 분리하여 수행된다. 문서기반 평가로서의 절차서 평가는 수행단계 및 구성요소 등과 같은 세부요소에 대한 인간공학 적합성을 전문가 평가에 의하여 수행하고, HSI의 경우에는 운전에서 필수적으로 요구되는 계기들이 가용한지를 확인한다. 그리고, 실사평가는 여러 가지 기술기준을 바탕으로 실제 현장에서 사용되고 있는 계기에 대한 적합성을 전문가들에 의하여 평가한다. 각각 독립적으로 평가된 HSI 및 절차서는 실제 운전에서 동시 사용되기 때문에 절차서의 수행과 그에 따른 HSI의 사용상 문제점은 없는지 확인하는 과정은 필수적이다. 즉, 운전 수행시 발전소의 안전성을 유지할 수 있도록 절차의 구성이나 문서적 표현들이 운전원들에게 혼란이나 오류를 초래할만한 요소는 없는지 확인해야 하고, HSI의 경우에도 인간공학적 문제점에 의한 오류 발생 가능성이 없는지에 대한 확인이 요구된다.

절차서나 HSI에 대한 인적요소의 고려가 미약하였을 경우에는 운전원들에게 작업부하 및 혼동의 요소가 개입되어 결국 전체 시스템에 바람직하지 못한 결과를 초래하는 인적오류를 범하게 될 가능성이 있다.

원자력 분야에서는 작업부하나 오류가능성을 평가하기 위하여 다양한 신뢰성 평가기법을 주로 이용해 왔고, 최근에는 인지적인 측면을 고려할 수 있는 방법들이 개발되고 있다[1,2]. 또한, 절차서 평가에서는 아직도 유효하게 사용되고 있는 전통적인 점검표(checklist) 기반의 방법론 등도 있으며[4,5,6], 최근에는 인간과 기계와의 인터페이스 상에서 발생가능한 오류를 평가한 사례도 있다[2].

그러나, 인적요소에 대한 이러한 분석적인 방법들이 효과적이지만 기초자료의 수집이나 분석결과를 객관적으로 검증하기 위해서는 반드시 실험적인 과정이 요구된다[3]. 하지만, 실제 원전 운전원들의 오류는 매우 드문 희귀사건(rare events)이기 때문에 실험적인 평가가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 실험적 기법을 도입하고, 관측자가 운전원의 직무수행에 필요한 정보를 획득할 수 있도록 선행 연구에서 도입된 바 있는 관측척도를 이용하여, 주어진 직무를 수행하는 운전원이 경험하는 작업부하 및 오류가능성을 평가하였다. 또한, NASA-TLX 및 질문지를 사용하여 절차서 및 HSI에 대한 운전원들의 주관적 작업부하 및 오류경험 등을 평가하였다.

2. 평가척도

위에서 언급하였던 바와 같이 분석적 기법에 의한 분석결과는 근본적으로 실제 데이터가 필요하거나 현장에서 검증되어야 한다. 절차서의 수행오류나 HSI에 의한 오류의 발생은 매우 낮은 수준의 고신뢰이기 때문에 오류에 대한 실험관측이 어렵고, 포괄적인 실험계획수립이나 통계적 유의성 확보가 어렵다. 따라서 절차 수행과정에서 오류가능성과 관련된 것으로 추정되는 요소들에 대한 관측자 척도와 수행자들의 주관적 평가 등을 통하여 절차서의 오류가능성을 검출하는 방식을 활용하였다.

2.1 관측자 척도

현재 발전소에서 실제 운전을 하고 있는 운전원들이 참가하여 시뮬레이터 상에서, 선정된 절차서를 단계별로 수행하면서 평가자의 주관적 관측을 통하여 직접 평가하였다. 본 연구에서 사용된 관측자 척도는 정보획득수준, 직무경로, 집중도, 시행착오수준 등 절차서의 평가와 관련된 4가지이며, 각각에 대한 의미와 관측자의 평가내용은 다음과 같다[3].

- 정보획득 요구 (IGA : Information Gathering Action required) 수준 : 직무수행을 완료하기 위한 운전원의 모든 정보획득 관련 행위
 - 직무경로 부담 (TT : Task Trajectory) 수준 : 직무수행을 위한 운전원의 수행방식이 나타내는 경로 특성, 수행과정의 복잡성, 이동 및 조치에 대한 경로의 크기
 - 요구 집중도 (TCR : Task Concentration Requirements) 수준 : 운전원의 개인 혹은 팀이 절차서 상의 특정한 직무(단계) 수행에 요구되는 수행 집중도로서
 - 시행착오 (TM : Trial for MMI) 수준 : 절차서의 수행을 위한 기본 요구사항으로 관련 계기들을 제어반 상에서의 위치를 파악, 확인하는 데 필요한 시행착오 정도
- 본 실험에 사용된 관측자 척도 평가양식은 표 1과 같다. 평가 양식을 사용하여 절차서의 각 단계별로 실시되는 운전원의 인터페이스 상에서의 확인동작이나, 실험자와 나누는 대화 등을 관찰하여 관측자가 개별 척도에 대해 단계별로 평가하도록 하였다.

표 1 관측자 척도 평가를 위한 평가표 양식의 예시

절차서 단계 번호	절차서 단계 (절차서의 내용)	수행업무 내용	IGA (정보 획득) 업무수준	HSI 확인 시행착오수준	관측된 요구 집중도 수준	직무경로 부담 수준
비상-1 7.0	Phase A 및 Phaxe B를 리세트한다		상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하
⋮	⋮		상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하
⋮	⋮		상 중 하	상 중 하	상 중 하	상 중 하

2.2 주관적 척도

시나리오 수행상 운전원의 주관적 작업부하 평가를 위하여 NASA-TLX를 이용하였으며, HSI와 절차서에 대한 문제점 및 운전경험 등을 평가하기 위하여 HSI와 절차서에 대한 활용도 질문지를 개발하고 이를 이용하였다.

그림 1은 NASA-TLX 및 HSI와 절차서 평가를 위한 질문지를 나타낸 그림이다.

MMI에서의 비상안전장치 수험에 대한 작업부하 평가

SRO, RO, YO 성별 _____ 연령 _____ 시 일사정형임 _____

1) 평가기준 척도 유도 평가

다음 각 항목은 세어판(MMI)에서의 작업(타자)에 대한 작업부하 평가를 위한 기준틀입니다. 다음 항목들의 빈칸에 2점의 동위원자(즉, 양자)와 양자(즉, 음량)를 적절히 채워 주십시오. 채워지지 않은 빈칸은 1점의 동위원자(즉, 양자)를 나타냅니다.

평가기준 척도

평가기준 척도	1	2	3	4	5	6	7	8
---------	---	---	---	---	---	---	---	---

2) 평가기준에 대한 작업부하 평가

평가기준	평가기준	평가기준의 설명
주요한 업무	복합/중복	주요한, 직적인 활동에 얼마나 참여하는가 (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?
중요한 업무	신중/중요	신중/중요/중요한 업무에 얼마나 참여하는가 (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?
시간적 여유	신중/중요	결과를 얻기 위해 얼마나 많은 노력을 기울이는가 (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?
수행속도	신중/중요	수행속도, 정확도, 정확도에 관계 없거나 상충하는지 고려하는가? (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?
누락	신중/중요	평가기준을 위반/중요한 업무에 얼마나 참여하는가 (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?
정확성	신중/중요	정확성을 얻기 위해 얼마나 많은 노력을 기울이는가 (상과, 중과, 격화, 위험, 고위, 정시 등)?

MMI 및 절차서 평가를 위한 질문서

1. 선반

1) 선반의 위치는 어디에?

2) 선반의 높이, 폭, 길이, 무게는 얼마인가?

2. MMI

1) MMI의 목적은 무엇인가?

2) MMI의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

3) MMI의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

4) MMI의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

5) MMI의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

2. 절차서

1) 절차서의 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

2) 절차서의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

3) 절차서의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

4) 절차서의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

5) 절차서의 사용 목적은 무엇인가? (예: 안전, 효율, 정확도 등)

그림 1 NASA-TLX 및 질문지

2.3 오류가능성의 상관관계 도출

본 연구에서 활용된 4가지의 관측자 척도값은 작업부하(WL: Work Load) 및 인적오류(HE: Human Error)의 가능성을 판단하는 데 각각 서로 다른 기여도를 지닌다. 따라서, 아래와 같은 함수관계에 의해 각 항목간의 구체적인 기여도를 평가할 수 있다[3].

$$WL = f[IGA(x_1), TT(x_2), TCR(x_3), TM(x_4)] = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \quad (1)$$

$$HE = f[IGA(x_1), TT(x_2), TCR(x_3), TM(x_4)] = a'x_1 + b'x_2 + c'x_3 + d'x_4$$

작업부하와 오류가능성을 a, b, c, d 및 a', b', c', d'의 계수에 의해서 각 관측 척도들의 가중치가 결정되는 것이다. 따라서, 각각의 관측자 척도에 대한 가중치를 부여하고 그러한 가중치들의 합으로 종합하기 위하여 계층적 구조 분석(AHP: Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용하였다. AHP를 이용한 관측자 척도의 각 항목에 대한 가중치 계산 결과는 표 2와 같다. 작업부하의 경우, IGA와 TT는 0.35이고, TCR은 0.2, TM은 0.1로 평가되어 작업부하를 판단하는 데에 IGA와 TT가 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있고, 인적오류는 IGA가 0.1, TT 0.2, TCR, TM이 각각 0.3, 0.4로 평가되어 인적오류의 가능성을 판단하는 데는 TM이 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

표 2 작업부하 및 인적오류가능성에 대한 관측자 척도 각각의 가중치

	IGA	TT	TCR	TM
Workload (WL)	0.35	0.35	0.20	0.10
Human Error (HE)	0.10	0.20	0.30	0.40

3. HSI 및 절차서의 실험적 평가

3.1 평가방법

운전 절차서 및 HSI의 유효성 평가를 위하여 원전 운전원들의 참여하고, 시뮬레이터를 활용하여 실험평가를 수행하였다. 실험에 참가한 피실험자는 현재 국내 원전에서 직접 운전중인 운전조이며, 특별한 질환이나 시각적인 문제가 없었다. 평가자는 실험을 진행하는 실험진행자 1명과 관측자 척도에 대한 평가를 하는 3명의 전문가로 구성되었다. 실험 평가를 위하여 선정된 시나리오는 안전성 관련 우선순위에 따라 약 6개의 절차서가 관련된 총 3개의 시나리오를 선정하였다.

시나리오를 진행하면서 관측자는 주관적 판단에 의하여 절차서 각 단계별로 위에서 제시한 4가지의 척도에 대한 평점을 수행하고, 피실험자는 시나리오의 수행이 완료된 후 NASA-TLX 및 HSI와 절차서의 활용도를 묻는 질문지를 통하여, 시나리오 전체에 대한 작업부하를 평가하도록 하였으며, 발전소 현장 사정이나 개인적인 운전경험을 반영한 HSI 및 절차서의 오류가능성 및 문제점 등을 평가하도록 하였다.

3.2 평가결과 및 토의

각각의 척도에 대한 가중치가 구해지면, 관측자에 의해 평가된 상, 중, 하의 평점에 각각 3, 2, 1의 점수를 부여하고, 위에 제시하였던 식 (1)과 같이 가중치와 평점을 곱하여 합을 구하면 절차서의 각 단계별 작업부하 및 인적오류 가능성에 대한 평점을 구할 수 있다.

이러한 방법에 의하여 구해진 절차서의 각 단계별 평점 중 비교적 평점이 높다고 판단되는 2 이상의 절차단계를 각 시나리오 별로 구하였다.

표 3은 평가결과로서 E-0의 경우, step 13, 15 등의 절차단계는 다른 것들에 비해 확인조건이나 확인계기가 많아 운전종원의 작업부하나 오류가능성이 높게 평가된 것으로 판단된다. RCS 온도를 점검하는 단계의 경우에는, 절차 내에 조건문이 많고 또한 불만족시 조치사항에 기술되어 있는 조건이나 조치사항이 다른 절차단계들에 비해 많다. 따라서 이러한 부분들이 운전원의 운전행위에 있어서 작업부하나 오류가능성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그리고, 시나리오 진행상 발전소 상태가 절차서에서 요구하는대로 유지되지 못하는 경우에 운전원이 작업에 대한 부담이 큰 것으로 나타났으며, 운전원들의 의사결정이 직접적으로 개입되는 절차의 경우에는 작업부하나 오류가능성이 큰 것으로 나타났다.

시나리오 1의 ES-1.1 절차서의 분석결과에서는 운전종사자의 조작에 의하여 발전소 상태를 유지해야 하는 경우에 작업부하와 오류가능성이 큰 것으로 나타나 수시로 상태 변화를 감시해야 하는 업무에 부담을 느끼는 것으로 판단된다.

시나리오 3의 E-3 평점결과에서는, 부가자료의 비교를 통한 운전이 이루어지는 것으로 인하여 작업부하 및 오류가능성이 높은 것으로 평가되었으며, 확인계기가 많다는 것이 또한 원인으로 작용하였다. 또한 불만족시 조치사항의 수행 내용이나 확인계기가 많은 부분이 평점이 높게 평가된 원인으로 작용하였다. 특히, 시나리오 3의 경우에는 절차서 부분적으로 절차서상의 계기 순서와 다르게 번호순서대로 부르는 경우가 관측되어, 이에 대한 MMI의 확인 및 절차서의 확인이 요구된다.

표 3 작업부하 및 오류가능성 평점 결과

절차서	function	step	평가값		기타의견
			WL	EP	
E-0	주증기관 차단 확인(YG 1,2)	13.0	2.45	2.08	확인조건 및 계기가 많음
	SI배열 점검(YG 1,2)	18.0	2.7	2.52	확인 계기가 많음
	RCS 온도 점검(YG 1,2)	19.0	2.8	2.2	조건문이 많고, 불만족시 조치사항의 조건 및 조치내용이 많음
	PZR PORV와 살수밸브를 점검(YG 1,2)	20.0	2.9	2.6	가장 많은 시간 소요 1개의 PORV 가 안 열림
	RCS 건전성 점검(YG 1,2)	24.0	2.2	2.28	RO, SRO 의사결정 재확인 때 문
ES-1.1	충전유량 조절	7.0	2.4	2.2	운전종사자의 직접적인 조작에 의해 발전소 상태 유지
	○가압기 수위 유지	8.0			
	발전소 인수인계 유지	26.0	2	2	발전소 상태 유지단계
	○압력, 가압기 수위 ○RCS 온도, S/G 수위				
E-3	RCS 냉각시작 최대냉각	14.0	2.9	2.6	운전원이 부가자료를 직접 비교하여 운전이 이루어져야 하고 확인조건이 많음
	○ SI 종결조건 확인	22.0	2	2	절차서상의 밸브순서와 다르게 밸브번호 부름 22.2 HS-24,25,26,30으로 부름
	○ SI 펌프 정지	23.0			
	○ 충전유량 정상화	24.0			
	○ D/G 정지	32.0	1.7	1.8	밸브순서를 절차서 기술순서가 아닌 번호순서대로 부름
○ 2차측오염확산방지 CPP, CSP					

(1) NASA-TLX에 의한 결과

NASA-TLX를 활용한 운전원의 주관적 작업부하의 평가결과에서는, 그림 2에서 보는 바와 같이, 시나리오 2의 경우에 평점이 가장 높은 것으로 나타나 운전원이 작업부하가 높다고 느끼는 것으로 나타났다. 또한, NASA-TLX의 각 평점항목에 대한 평점결과를 보면, 그림 3에서 보는 바와 같이, 정신적 요구, 시간적 요구, 노력 등에 대한 항목이 다른 항목들에 비하여 높은 것으로 평가되어, 사고해결을 위한 시간적 압박감에 의한 정신적 작업부하가 큰 것으로 나타났다.

그리고, NASA-TLX 평점시에 각 항목에 대한 평점 이유를 묻는 질문에 대하여 운전원에 따라 차이는 있지만, 각종 계기 및 기기를 수시로 확인해야 하는 것에 의한 체력적인 부담을 크게 느끼는 경우도 있었으며, 숙련도 문제에 의하여 야기된 정신적 부담도 있는 것으로 나타났다.

(2) HSI 유효성

HSI 유효성 평가결과에서는 운전원이 비상상태를 가장 먼저 인지하는 수단은 경보창과 해당 계통의 HSI 계기인 것으로 나타났으며, 운전상에도 큰 불편함 없이 충분한 HSI 계기들이 제공되는 것으로 나타났다. 다만, HSI와 관련하여 질문하였던 내용 중에 일부 운전원들이 부담을 느끼는 것으로 확인되었다. 즉, 기기들과 관련하여 물리적으로 멀리 떨어져 있는 기기들의 확인이나 조작을 위한 잦은 이동에 의하여 체력적인 부담을 느낀다거나, 유사한 기기들로 인한 탐색시간 부담 등의 의견이 있었다. 그리고 절차서와 관련하여 일부 경보창이나 상태창의 이름이나 위치 등이 절차서에 기술되어 있는 내용이 실제 MCB 상에 기술되어 있는 내용과 차이가 있어 수행도에 영향을 미칠 수 있는 부분이 있는 것으로 확인되었는데, 이러한 부분은 절차서의 개선을 통한 해결이

요구되는 부분이다.

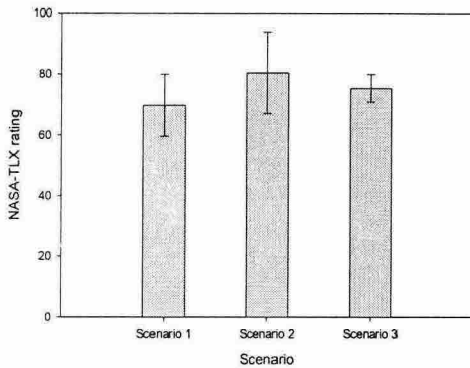


그림 2 각 시나리오 별 NASA-TLX 평점결과

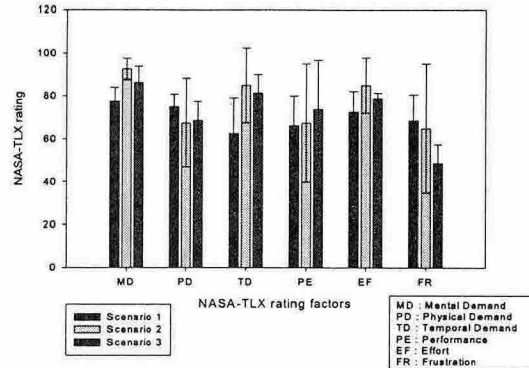


그림 3 각 평가항목 별 NASA-TLX 평점결과

4. 결 론

본 연구에서는 절차서 수행중에 발생할 수 있는 작업부하 및 인적오류의 가능성을 평가하기 위해 4가지 관측자 척도를 제시하고 원전의 운전절차서를 평가하였다. 관측자 척도에 의한 평가결과를 운전원들의 주관적 평가 결과와 비교하였을 때, 작업부하나 오류가능성이 높을 것으로 판단되는 단계에서 유사한 평가결과를 보여 본 연구에서 제시된 관측자 척도의 유효성을 확인할 수 있었다. 작업부하 및 인적오류의 가능성이 높다고 평가된 절차서의 각 단계들에 대하여, 인터페이스의 문제점이 아니라면 절차서 자체의 기술방식 및 내용을 등을 확인하는 과정은 필수적이다. 그러므로, 관측자 척도에서 절차서상으로 작업부하 및 인적오류의 가능성이 높다고 평가된 단계에서 해당 척도와 관련된 절차서의 세부 요소들을 개선해야 할 근거를 확인할 수 있었다. 또한, 점검표 등 분석적인 방법을 통해 얻은 평가 결과에 대한 실험적 확인으로 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] Yong H. Lee, Facilitating HRA through the Input from HSI Design, The 2nd OECD/NEA Workshop on Building the New HRA, 2002.
- [2] 이용희, 장통일, 임현교, 원자력발전소 주제어실 인터페이스 설계를 위한 인적오류 분석기법의 보완, 대한인간공학회지, Vol.22, No.1, pp.31-42, 2003.
- [3] 이용희, 장통일, 임현교, 관측자 척도를 이용한 원전 운전절차서의 적합성 평가, 한국안전학회 추계학술대회, 2003.
- [4] 한국원자력연구소, 원자력발전소의 주기적안전성평가를 위한 절차서 평가, KAERI/TR-2880/2004, 2004.
- [5] 한국원자력연구소, 원자력발전소의 주기적안전성평가를 위한 인간-기계 연계체제 평가, KAERI/TR-2881/2004, 2004.
- [6] 한국원자력연구소, 고리1호기 절차서의 인간공학적 평가, KAERI/CR-134/02, 2002.