Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 18, No. 3 1999. 12

신형 원자력발전소 감시제어체계의 인간/체계 인터페이스 평가 방법에 관한 연구

A Study on an Evaluation Method for Human/System Interface of Advanced Supervisory Control Systems in Nuclear Power Plant

이동하*, 임현교**, 정병용***

Abstract

The design of nuclear control room is advancing toward totally computer based human system interfaces (HSI). Computer based interfaces offer the opportunity to provide improved support of operator performance, but if not properly deployed, can introduce new challenges. This paper reviews the Westinghouse AP-600 Human Factors Verification and Validation Plan selected for HSI evaluation model of Korea next generation nuclear control rooms. The AP-600 HSI evaluation model addressed 15 evaluation issues considering major activity class of operator and task complexity factors. This paper also describes the test procedures experimenters should follow to evaluate the addressed issues.

Key Words: Evaluation, Human/System Interface, AP-600, Verification, Validation

* 수원대 산업공학과(dhonghal@mail.suwon.ac.kr)
** 충북대 안전공학과
*** 한성대 산업시스템공학부

1. 서 론

원자력 발전소의 감시 및 제어 체계 (supervisory control system)가 종래에는 전선으로 연결된 표시기와 제어기로 구성되어 있었다. 십여 년 전부터 컴퓨터 기반 표시장치들이 개별적으로 도입되고 있지만 아직은 전선으로 연결된 제어반과 혼합형(hybrid)으로 운영되고 있다. 차세대용으로 설계되고 있는 신형제어실은 모든 발전자료와 제어변수들이 컴퓨터 기반 표시장치에서 통합 처리되는 기술이 도입되고 있다. 이러한 새로운 컴퓨터 기반 기술은 원자력발전소의 감시 및 제어 체계에 편리함과 동시에 원치 않는 부작용을 새로이 야기한다 (Stubler 등, 1991).

컴퓨터 기반 표시방식으로 처리하면 다양한 운전 과정자료를 통합하여 운전원에게 좀더 의미있는 정보를 제공할 수 있어 운전원의 주의를 중요한 영역에 집중시킬 수 있는 장점이 있다. 하나의 센서에서 오는 자료가 하나의 표시기에 표시되는 종래의 방식에서 상위 수준의 발전소 상태를 이해하기 위해서는 운전원 스스로가 많은 하위 수준의 발전소 자료를 비교하고 통합해야 했다. 이에 비해 컴퓨터 기반 표시장치에서는 다중 윈도우를 사용하여 관련 자료를 집중시킬 수도 있고 다른 형태의 의미 있는 정보로 변환할 수도 있고 각각의 자료를 통합하여 운전원이 목표로 하는 정보로 표시할 수도 있다.

반면 컴퓨터기반 감시제어체계는 운전원에게 새로운 인지적 부담을 줄 수도 있다. 운전원이 감시할 수 있는 대상이 컴퓨터 단말기에 집중되어 있어 navigation을 통해 원하는 정보에 접근해야 하는 부담이 있고 표시창을 관리해야 하는 부담이 추가된다. 제한된 표시장치에 나타난 정보에 몰두한 나머지 발전소 전체의 흐름을 놓칠 수 있다. 운전원이 인식하지 못한 상태로 수행된 잘못된 조작이 표시장치에 나타나지 않음으로써 중대한 오류을 범할 수도 있다.

컴퓨터기반 신형제어반은 운전원의 수행(진단, 해석, 목표 설정, 제어)을 돕기 위하여 다양한 지능형 (intelligent) 운전보조 체계를 도입할 수 있다. 지능형 운전보조 체계는 운전원의 수행도를 향상시키는 장점이 있다. 반면 드물게 발생되는 고장의 경우 지능형 체계의 추론이 지원하지 못할 수 있다. 이 경우 운전원이 지능형 체계가 제공하는 정보에 지나치게 의존하면 지능형 체계가 제공하는 정보 이외의 정보를 무시함으로써 올바른 체계상태를 해석할 수 없는 오류를 범할 수 있다.

컴퓨터 기반 신형제어실에서는 운전원에게 개별적인 단말기가 제공된다. 개별적 단말기의 운용은 운전원 각자의 임무와 취향에 맞게 표시창을 구성할 수 있는 장점이 되는가 하면 다른 운전원이 어떤 정보를 보고 어떤 정보를 제어하고 있는지를 알기 어렵게 하는 단점도 된다. 따라서 발전소 운전에 필요한 정보를 운전원 조직간에 공유하는데 방해가 될 수 있고 운전원의 협업 (coordination)이 저해될 수 있다.

이와 같이 새로 구축되는 컴퓨터 방식의 감시 제어 체계의 인간/체계 인터페이스 (Human/System Interface; HSI)는 종래의 제어

반과 비교하여 장점도 가지고 있지만 여러 가지 새로운 인간공학적, 인지공학적 문제점들을 부과하고 있다.

컴퓨터 기반 신형 제어실 설계과정에서 나타날 인간공학적, 인지공학적 문제점에 대비하여 미국 원자력 규제 위원회(NRC)에서는 1994년 신형 제어실 설계에 인간공학의 체계적 반영여부를 점검하기 위한 검토 모형(NUREG-0711)을 발표하였다 (USNRC, 1994). 이 중 HSI 설계에 관련된 사항은 다음과 같다 (USNRC, 1994).

(1) HSI 설계 과정 중 HSI 평가가 지속적으로 이루어져야 한다 (NUREG-0711 업무항목 7).

(2) 통합시스템의 설계가 이루어진 후 통합시스템의 HSI에 대한 인간공학 확인(verification) 및 검증 (validation)이 수행되어야 한다 (NUREG-0711 업무항목 10).

현재 국내에서는 차세대용 컴퓨터 기반 제어실의 HSI 설계가 진행 중이고 NUREG-0711의 업무항목 7에 대한 대비로서 HSI 평가 실험이 이루어지고 있다. HSI 평가 실험 과정에서는 미국 Westinghouse 사가 개발한 AP-600 HSI 평가 체계 (Westinghouse, 1992)를 사용하고 있다 (김중남, 1999). AP-600은 설계 인증 단계의 차세대 원자력 발전소 시스템으로서 아직 상용화된 시스템이 구현되지는 않았다. 본 연구에서는 AP-600의 HSI 평가 모형을 소개하고 이를 사용하여 HSI 평가 실험을 수행할 때 이행해야 할 절차와 실험자가 고려해야 할 사항들을 논의하고자 한다.

2. AP-600의 HSI 평가 모형

현재 차세대 신형 제어실의 HSI 평가모형으로 사용 중인 것은 AP-600의 인간공학 확인 및 검증 계획 (AP-600 Human Factors Verification and Validation Plan; Westinghouse, 1992)이다. 확인 과정은 HSI의 기능적 요구사항에 대하여 top-down 방식으로 이루어지며 체계설계 과정에 통합된다. 소프트웨어 설계의 각 단계에서 완성된 부분완성품에 대하여 그 단계에서의 규격화된 요구사항 (특히 인간공학적 기능 요건)이 만족되었는지를 보여야 한다. 반면 검증 과정은 통합된 HSI체계가 기능적, 성능적 및 인터페이스 요구사항에 맞게 설계되었는가, 설계요건을 구현했을 때 이것이 체계 임무(system mission)를 만족시키는가를 증명하여야 한다. 특히 HSI가 인간 성능 요구사항 (human performance requirement)을 만족시킬 수 있는지를 실험 평가하여야 한다. 이 실험에서는 전범위 또는 부분 시뮬레이션을 통해 실제운전 상황을 모사하여야 한다. 경제성을 고려하여 확인과정과 검증 과정은 통합수행 될 수 있다.

AP600의 MMI 체계 검증 및 타당도 평가의 목적은 다음과 같다 (Westinghouse, 1992).

(1) 시스템의 인간공학 측면에 대해 평가하고 평가결과는 HSI 설계과정에 피이드백한다.

(2) 발전소의 안전하고 효율적인 운전에 중요한 HSI요소를 찾아내고 이에 관련된 인

간 성능의 문제점을 파악한다.

(3) 다음 번 제품개발 주기의 개념 설계 단계에서 사용될 HSI 평가 기준을 개발한다.

컴퓨터 기반 신형 제어실에 설치되어 HSI 평가 대상이 되는 주요 설비는 다음과 같다 (Roth 등, 1993).

(1) 컴퓨터 기반 soft-controls 및 display

운전원에게 주어지는 제어체계 조작도구로서 touch panel, track ball, key board, mouse 등으로 구성된다. 제어행위에 대한 피드백은 console의 display에 표시된다.

(2) 발전소 상태표시 display의 기능적 물리적 조직

운전원의 발전소 상태에 대한 인지와 의사결정을 돕기 위해 발전소 전체의 기능적 물리적 구조를 mimic diagram으로 변환하여 필요한 정보를 표시한다.

(3) 기능적으로 조직된 alarm체계

수많은 alarm을 기능별로 분류하고 위험도 및 처리순서에 따라 우선 순위를 부여하며 운전원에게 인지적 부담이 되지 않도록 filtering하여 alarm 정보를 제공한다.

(4) 컴퓨터 기반 운전절차서

운전원과 발전소 계통간의 상호작용을 지원하고 안내하며 발전소 관련 사고 및 행위를 제어하는 절차서를 종래의 문서 매체에서 컴퓨터 매체로 전환하여 운전원에게 제공한다.

(5) control, display, alarm, procedure를 포함한 workstation

운전원 개개인에게 console 형태의 workstation이 주어진다. workstation에는 감시 대상과 alarm을 표시하는 display, 컴퓨터 기반 절차서, 및 soft control이 설치된다.

(6) 개관 표시장치

workstation을 통해 발전소의 특정부분에 주의를 집중하고 있는 운전원에게 발전소 전반적 상태에 대한 정보를 제공하기 위해 대형 개관표시장치가 설치된다. 발전소의 각기 다른 부분에 주의를 집중하고 있는 운전원조직에게 발전소 상태에 대한 정보를 공유하도록 하는 역할도 함께 수행한다.

(7) 발전소 의사전달체계.

컴퓨터 기반 제어체계의 도입에 따라 제어실 운전원간 및 현장 운전원 간의 의사전달 체계도 조정되어야 한다.

3. AP-600 HSI의 주요 평가 항목

확인 및 검증 계획 작성 절차는 평가항목 도출과 도출된 중요 평가 항목 각각에 대한 시험평가 계획을 수립하는 두 단계로 이루어져 있다. 평가항목을 도출하기 위해 AP-600의 HSI 평가모형에서는 제어실에서 수행되는 운전원의 주요 활동과 이를 지원하는 제어실 특성을 조사하였다 (그림 1).

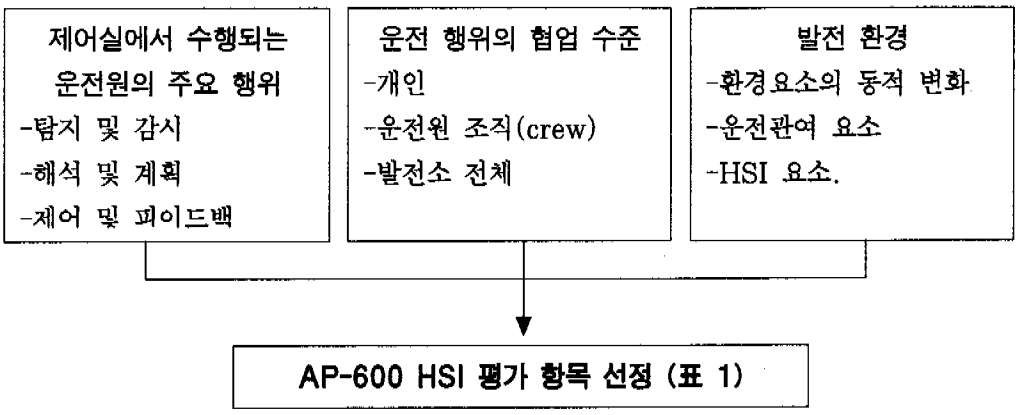


그림 1. AP-600 HSI 평가 항목 선정 과정

제어실에서 수행되는 주요 운전행위에 대해서는 일반적으로 알려진 Rasmussen (1986)의 운전 행위 모형을 기반으로 한 Westinghouse Simplified Operator Decision Making Model (WCAP-10170)을 사용하였다 (Wood, 1982). 이 모형에 의하면 제어실에서 이루어지는 주요 운전행위는 다음과 같다.

(1) 탐지 및 감시
(detection & monitoring)

비상 또는 비정상 상황에서 교란 원인을 탐지하도록 요구하는 경보가 들어오면 운전원은 비정상 요인을 밝혀내기 위한 운전변수 감시에 들어간다. 운전원의 감시행위에는 절차서나 운전감독원의 지시에 의한 감시 (능동적 감시), 광범위하게 훑어보는 수동적 감시, 및 다른 운전원의 활동과 목표에 대한 인지상태를 유지하기 위한 감시 등이 포함된다. 이러한 운전원의 감시행위를 지원하기 위해 HSI는 비정상 상태의 탐지를 용이하게 해주어야 할 뿐만 아니라 정상 및 운전 정지 상황에서도 발전소 전반적인 상태와 시스템 가용도 (availability)에 관한 인지 상태를 유지토록 지원해야 한다.

(2) 해석 및 계획
(Interpretation & Planning)

운전원의 의사결정 과정에서 가장 중요한 요소는 현재의 발전소 상태를 식별하고 이로부터 적절한 반응 계획을 세우는 일이다. 운전원이 수행하는 의사결정으로는 상황식별이 반응계획과 바로 연결될 수 있는 규칙 기반 (rule based)의 의사 결정이 있다. 또한 올바른 상황 이해와 운전목표 설정을 위해 여러 경로의 정보를 통합처리 해야 하는 지식 기반 (knowledge based)의 의사결정이 있다. 제어실의 HSI는 이 두 가지 과정 모두를 지원할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 운전원끼리의 협응 또는 운전원과 자동체계 (운전지원체계)와의 협응을 통해 이루어지는 의사결정과정도 지원할 수 있어야 한다.

(3) 제어(control)

운전원의 제어 행위는 주로 발전 과정에서의 기동, 조정, 정지행위로 이루어진다. 정해진 절차의 속도에 맞추어 제어하는 것은 단순하지만 운전원이 주도하지 않은 사건에 맞추어 제어하는 것은 어렵다. 다른 운전원과의 협응을 통해서 또는 자동체계와의 협응을 통해서 수행되는 제어는 더욱 어렵다. 제어실의 HSI는 운전원이 수행하는 모든 종류의 제어 행위를 지원할 수 있어야 한다.

(4) 피이드백

운전원의 제어행위는 운전원의 의도대로 이루어졌는지 확인되어야 한다. 운전원의 제어 결과는 발전변수, 운전목표 등에 반영되고 HSI를 통해 운전원이 이를 식별할 수 있어야 한다.

제어실에서 수행되는 운전활동은 개인차원에서만 수행되는 것이 아니고 개인, 운전원 조직(crew)과의 협동작업, 및 발전소전체와의 협동작업으로 수행되므로 HSI에 대한 평가 역시 이 세가지 수준을 모두 포함하여 이루어져야 한다. 개인수준에서의 평가는 HSI가 인간의 기본능력 (작업부하, 인지, 인체사이즈 문제)에 부과하는 요구에 대하여 이루어진다. 운전원 협동 수준에서의 문제에는 정보흐름, 협업의 조화 여부가 포함된다. 발전소 전체 수준으로 보아서는 제어실의 임무수행이 발전소 운전의 여타부분 (local 감시체계, 비상반응설비, 기술지원센터)의 임무와 얼마나 잘 조화되는지 평가되어야 한다. 협동작업과 발전소 전체 수준에서의 평가는 발전소 전체에 대한 상세 설계가 충분히 진행된 다음에 수행된다.

AP-600 HSI 평가 항목을 결정할 때 고려된 또 다른 요소는 운전원의 임무를 복잡하게 하는 발전 환경으로서 다음과 같다 (Westinghouse, 1992).

(1) 환경요소의 동적변화 정도(dynamism): 빈번히 상호작용하는 요소, 위험, 불확실성

(2) 운전 관여 요소: 다중요원 (multiple crew), 인간/자동체계 조합.

(3) HSI 요소: 정보통합 요구사항, 표시장치 access 요구사항

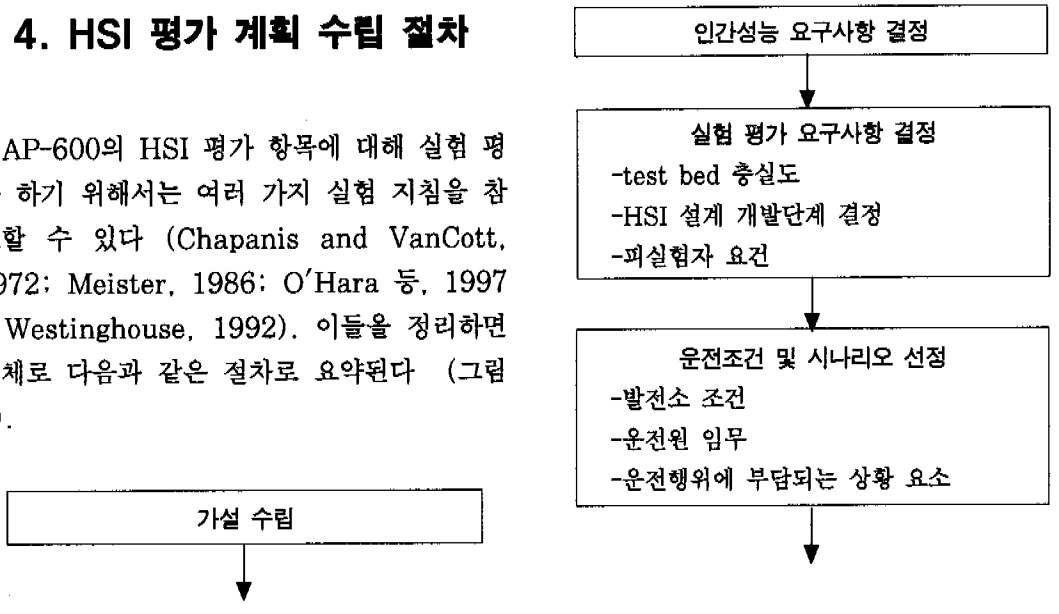
AP-600 평가 모형에서는 운전원의 주요 행위, 이들 행위가 이루어지는 협동 수준, 및 운전행위를 복잡하게 만드는 발전환경 요소의 대표적인 조합에 대해 HSI가 이를 지원하는지 여부를 검증하도록 평가 항목을 선정하였다. 선정된 AP-600 HSI 평가 항목을 정리하면 표 1과 같다 (표 1).

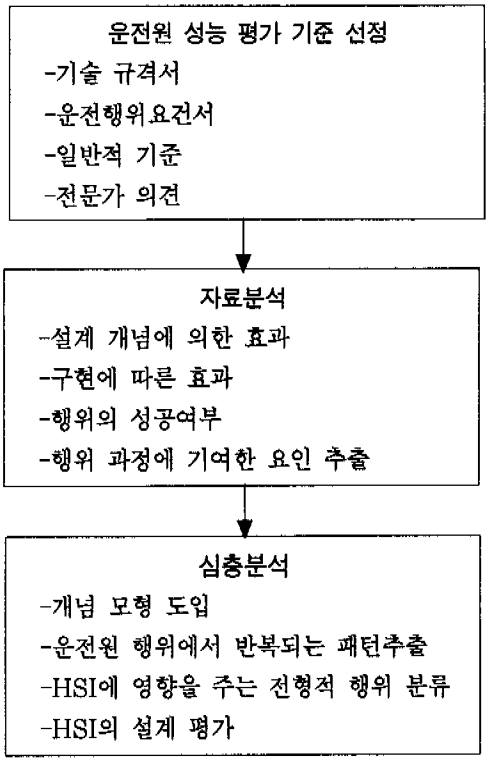
표 1. AP-600 HSI 평가항목 (Westinghouse, 1992)

운 전 행 위	평 가 항 목
탐지 및 감시	개관표시장치의 수동적 감시
	개관표시장치로부터 신호를 받아 workstation 표시장치에서 심층 정보 탐색
	운전원 조직간의 발전소 상태에 대한 인지상태 공유 여부
해석 및 계획	alarm에 의한 비정상상태 탐지 및 이해
	workstation 표시장치를 이용하여 비정상상태 해석 및 계획수립
	alarm, 표시장치, 절차서를 이용하여 단일 고장 사건 (single-fault event)에 대한 해석 및 계획수립
	alarm, 표시장치, 절차서를 이용하여 다중 고장 사건 (multiple-fault event)에 대한 해석 및 계획수립
	alarm, 표시장치, 절차서를 이용하여 다중 고장 사건 (multiple-fault event)에 대해 운전원조직의 해석 및 계획수립
	alarm, 표시장치, 절차서를 이용하여 중대 사고 (severe accident)에 대해 운전원조직의 해석 및 계획수립
제어 및 피이드백	단일 운전원 주도의 제어작업
	조건에 따른 운전원 주도의 제어작업
	다중 및 동시처리 절차서에 따른 제어작업
	사건 주도 제어작업
	운전원조직의 협업에 의한 제어작업

4. HSI 평가 계획 수립 절차

AP-600의 HSI 평가 항목에 대해 실험 평가 하기 위해서는 여러 가지 실험 지침을 참조할 수 있다 (Chapanis and VanCott, 1972; Meister, 1986; O'Hara 등, 1997 ; Westinghouse, 1992). 이들을 정리하면 대체로 다음과 같은 절차로 요약된다 (그림 2).





(그림 2. HSI 실험 평가 절차)

4.1. 가설 수립

HSI 평가 계획의 첫 단계에서는 검증할 수 있는 형태의 가설을 수립한다. 검증할 수 있는 형태의 가설은 설정된 평가항목에 대해 HSI가 운전원의 행위를 어떻게 지원할 수 있어야 하는가를 나타내어야 한다. 검증할 수 있는 형태의 가설은 설계 개념을 평가할 수 있는 단순한 문장이어야 한다. 또한 정량적, 정성적 자료들이 수집되어 설계 개념이 가설을 지원하는가의 여부를 결정하고 그 경우 얼마나 가설을 잘 지원하는가를 검증할 수 있어야 한다. 가설 수립 과정은 특정 설계개념에 관련된 인간행위를 분명하게 밝히며 HSI의 기능적 요구사항 및 인간성능 요구사항을 결정하는 기준 개발에도 유용하다. 개관표시장치에 대한 HSI 평가실험을 예로 들면 다음과 같은 가설을 수립할 수 있다.

가설 : 개관표시장치는 운전원의 수동적 감시를 지원한다.

4.2. 인간성능 요구사항 결정

인간성능 요구사항은 성공적인 운전을 위해 요구되는 운전원의 성능을 말한다. 인간 성능 요구사항에는 설정된 평가항목에 대해 HSI가 운전원의 행위를 지원한 결과 어떠한 성공적 행위가 나타나야 하는가를 서술한다. 개관표시장치에 대한 HSI 평가실험을 예로 들면 다음과 같은 인간 성능 요구사항을 정의 할 수 있다.

인간성능 요구사항: 운전원은 발전소 상태와 조건에 대해 신속하고 정확하게 전반적 평가를 할 수 있어야 한다.

각 인간 성능 요구사항에 대하여 인간 성능 척도가 개발되어야 한다. 인간 성능 척도는 실험에 의해 행위가 평가될 수 있도록 객관적이고 측정 가능해야 한다.

4.3. 실험 평가 요구사항 결정

실험 평가에 대한 요구사항에는 평가실험용 test-bed의 충실도(fidelity), HSI 개발 단계, 요구되는 피실험자 특성이 기술되어야 한다.

평가가설과 평가방법이 결정되면 이에 요구되는 시뮬레이터의 충실도도 결정된다. 또한

시뮬레이터의 충실도에 따라 HSI 설계에 대한 개발단계도 결정된다.

HSI 평가 실험 중에는 개념평가 및 인간 성능 평가 실험이 있다. 이들은 HSI 설계과정과 공조되어 수행되어야 한다. 개념 평가는 관련된 설계개념을 나타내 보이기 위해 개념 설계 단계에서 수행된다. 개념 평가 과정에서의 피실험자 역할은 운전원의 특성을 나타내는 것이다. 발전소 운전경험은 개념 평가과정에서도 바람직하지만 필수적이지는 않다. 따라서 개념 평가과정에서는 운전원 교육 강사, 엔지니어, 디자이너도 피실험자로 참여할 수 있다.

반면 인간 성능 평가과정에서는 시뮬레이터에서 훈련받은 발전소 운전원이 참여해야 한다. 인간 성능 평가 실험은 제품의 프로토타입이나 이를 나타내 보일 수 있는 장비 (시뮬레이터)를 사용하여 이루어진다. 인간 성능 평가는 workstation의 hardware가 완성되고 표시장치 계층 및 주요 표시장치 설계가 이루어진 후 실시되는 것이 원칙이지만 개발일정 단축을 위해 부분 완성단계에서도 제한적으로 이루어질 수 있다. 요구되는 피실험자 자질, 훈련 및 운전경험에 대해서는 각 개념평가 및 인간 성능 평가 과정마다 별도로 정의되어야 한다.

실험에 참여하는 피실험자의 수는 가용한 운전원 집단이 한정되어 있기 때문에 다른 분야의 과학실험에서 흔히 사용하는 power analysis (Cohen, 1969; Kramer and Thiemann, 1987)로 결정하기 어렵다. 따라서 주로 between-subjects design보다는 within-subjects design을 채택한다. 실험 횟수가 적어서 발생되는 실험의 신뢰도 저하 문제를 보완하기 위해서 인간성능 척도를 늘리고 이들로부터 측정되는 자료의 일관성 (또는 수렴성)을 분석하는 부수적인 분석을 추가할 수 있다 (O'Hara 등, 1997).

4.4. 운전조건 및 시나리오 선정

운전조건이란 발전소 상태, 변수구성, 사건 (event), 및 상황요소의 조합이며 실험 시나리오로서 구현된다. 모든 발생 가능한 운전조건에서의 평가가 사실상 불가능하므로 대표성을 갖는 운전조건에 대한 표본 추출은 실험결과의 타당도를 높이기 위해 중요하다. 체계의 안전을 위협하는 조건이 우선적으로 선정되어야 한다. 특히 체계 설계 시 고려되었던 운전조건 이외에 설계자가 고려하지 못했던 운전 조건까지 포함되어야 한다. 운전조건의 표본 추출은 다음의 세 가지 차원을 고려하여 이루어진다 (Westinghouse, 1992).

(1) 발전소 조건

정상상태, 고장사건 (계기고장, HSI 고장), 과도상태 (터빈트립, 외부전력상실), 사고 (주증기관 파열, 냉각재 상실), 설계범위를 넘어선 사건 (확률론적 위험도 평가 기법으로 추정)을 모두 포함해야 한다.

(2) 운전원 임무

WCAP-10170에 기반을 둔 운전원 행위 (탐지, 감시, 해석, 계획, 제어, 피이드백)가 모두 포함되어야 한다.

(3) 운전행위에 부담을 주는 상황요소

전형적으로 어려운 운전작업으로서 경보처리 중 또 다른 고장 증후 발견, 자동체계의 고장을 수동으로 제어하는 작업이 그 예이다. 이 밖에 실수 유발 상황 (Norman, 1988; Reason, 1988; Rasmussen, 1986; Woods 등, 1994), 심한 작업부하, 다중임무, 갑작스러운 작업부하의 변화, 피로 상황이 모두 포함되어야 한다.

4.5. 실험 및 자료 수집

실험이 이루어 진 후 여러 경로의 자료소스들로부터 체계 행위 (system performance), 운전원 성능 (operator performance), 및 운전원 인지요소(cognitive factor) 자료를 추출한다. 이로부터 수행된 운전행위 및 행위에 기여한 요소를 정리하여 기록한다.

인간 성능 척도는 다음 조건이 만족되도록 선정하는 것이 바람직하다 (ANSI/AIAA, 1992 ; Chapanis and VanCott, 1972; Meister, 1986; Muckler and Stevens, 1992).

(1) 개념타당도 (construct validity)

대부분의 운전행위는 상황 인식(situation awareness)이나 작업부하와 같이 가설적 개념으로 묘사된다. 개념을 측정하는 척도는 개념이 내포하는 행위의 영역 내에서 이루어지는 현상을 포착하여야 한다.

(2) 신뢰도 (reliability)

동일 조건하에서 동일한 측정결과가 나와야 한다.

(3) 해상도 (resolution)

의미있는 분석결과가 나오기에 충분한 세부사항이 측정되어야 한다.

(4) 민감도 (sensitivity)

측정범위가 관찰되는 현상을 충분히 포함할 수 있을 정도가 되어야 하며 측정빈도 역시 나타나는 현상을 평가하기에 충분히 많아야 한다.

(5) 객관성 (objectivity)

측정 대상은 누구나 쉽게 관찰할 수 있는 현상이어야 한다.

(6) 자연성 (unintrusiveness)

측정하는 과정에서 측정으로 말미암아 생리적, 심리적 부담을 주어서는 안된다 (Webb 등, 1973).

발전소 상태의 진행과정을 보여주는 체계행위자료는 발전소의 주요 안전기능 변수와 시나리오 상 중요한 변수들로 구성되며 운전 성공 및 실패를 판정하는 주요 근거가 된다.

운전 중 운전원이 어떤 행위를 했는가하는 운전원 행위자료는 체계행위자료를 보완하는 역할을 한다. 체계행위자료로 보아서는 합격판정을 받은 운전도 운전행위자료로는 비능률적인 운전으로 판정될 수 있다. 운전행위 자료는 체계행위자료에는 나타나지 않는 운전행위 상의 문제점을 밝힐 수 도 있다.

운전원의 행위는 발전소 운전에 필수적인 주요 (primary) 행위 (탐지, 감시, 해석, 계

획, 제어, 및 피이드백)와 모니터 조정, 메뉴 선택, 모니터간/화면간의 navigation, 절차서 탐색 등과 같은 부수적 (secondary) 행위가 있다.

운전행위는 실험 전 시나리오 구성이 끝난 후 시나리오에 의해 사전 확인 (top-down identification)되어야 하고 실험이 끝난 후 실제로 수행된 행위에 대해 사후확인 (bottom-up identification)되어야 한다. 사전 확인된 행위는 운전절차서나 직무분석을 통해 성공적인 운전에 필수적으로 요구되는 주요 행위를 말한다. 이렇게 확인된 주요행위들은 운전작업의 이상적 경로 (ideal path)를 제공하고 이를 근거로 하여 운전원이 빠뜨린 중요행위 (누락 오류)를 식별할 수 있다.

운전 중 실제로 이루어진 행위는 이상적 경로와는 다른데 체계와의 상호작용과 상황에 따른 다양한 부수적 행위가 가능하기 때문이다. 따라서 실제로 수행된 행위를 분석하면 실수로 저지른 행위 (error of commission)를 식별할 수 있다.

운전원 행위에 대한 척도로 널리 사용되는 것으로는 다음과 같다 (Meister, 1985).

(1) 시간 : 반응시간, 완료시간, 행위지속시간, 타 행위와의 공유시간, 부수적 임무에 사용한 시간 (HSI overhead)

(2) 행위정밀도 : 관찰의 정확성, 반응의 정확성, 오류특성

(3) 빈도 : 단위 반응의 발생빈도 또는 주기, 단위 행위 결과의 발생빈도 또는 주기, 관찰횟수, 자료수집횟수, 구두/서면 보고횟수, 및 정보요청 횟수

(4) 행위 성취도 : 행위성취정도, 성취율, 자원사용량

(5) 피실험자의 주관적 보고

(6) 관찰자 평정 : 운전원 개인 및 팀 행위 적합성, 임무분할 수행의 적합성, 발전 상황 유지보수 성취도, 운전결과

감시제어체계에서 한꺼번에 쏟아지는 많은 량의 정보와 복잡한 상황요소는 운전원의 정보처리, 주의력 배분, 및 작업기억(working memory)에 감당하기 어려운 부담을 주어 오류를 야기할 수 있다 (Norman, 1981, 1988; Reason 1988, 1990). 이러한 오류 분석에는 운전원의 인지적 상태 파악이 필수적이다. 운전원의 인지적 상태 파악을 측정하기 위해 다음 척도가 널리 사용되고 있다.

(1) 상황인식도(situation awareness)

SART (Situation Awareness Rating Technique) (Taylor, 1989), SAGAT (Situation Awareness Global Assessment Technique) (Endsley, 1988, 1995), SACRI (Situation Awareness Control Room Inventory) (Hogg 등, 1995)

(2) 인지부하 (cognitive workload)

SME (Subject Matter Expert) (Reid 등, 1981), 부수적 임무 부과 방법 (Secondary Task Method) (ANSI, 1993), 주관적평정법 (NASA-TLX) (Hart and Starveland, 1988), 생체신호반응 (이동하 등, 1996)

4.6. 운전원 성능 평가 기준 선정

행위자료수집의 궁극적 목표는 운전의 안전성과 효율성에 대한 체계의 타당성을 평가하는 것이다. 이를 위해서는 수집된 측정치를 체계의 타당한 성능으로 인정할 수 있는 기준(performance criteria)을 마련해야 한다. 다음의 네 가지 방법으로 기준을 정할 수 있다 (O'Hara 등, 1997).

(1) 해당 분야의 기술 규격서나 주요 운전 행위에 대한 요건서가 있을 경우 이를 참조한다.

(2) 해당 기술 규격서나 운전 행위 요건서가 없을 경우에는 유사한 체계나 행위에 대한 요건서를 참조하여 이를 기준으로 대체하여 사용한다.

(3) 유사한 환경에서 적용되었고 여러 분야에서 자주 채택되어 일반적으로 인정된 기준 (norm)을 사용한다.

(4) 전문가가 제시하는 기준을 사용한다.

4.7. 자료분석

자료분석 단계에서는 수집된 자료에 대한 통계적 분석을 실시하여 HSI 설계 개념에의한 효과, HSI 구현에 따른 효과, 행위의 성공여부 판정, 및 행위과정에 기여한 요인을 추출한다. 분석 방법으로 운전 중 이루어진 행위, 행위를 유도한 의사결정 및 주변상황 등을 일목요연하게 표시하는 차트를 사용하는 것이 도움이 된다. 반응의 정확성, 완전성 및 반응시간은 행위결과척도(outcome measure)로서 수집된다. 수행된 행위에 이르게 된 경로는 과정척도(process measure)로서 함께 수집된다. 행위결과척도만으로는 어떤 요소가 특정행위 결과를 유도했는가를 결정하는데 충분치 않다. 어떤 행위가 어떻게 해서 이루어졌는가 하는 과정척도자료가 특정 인터페이스가 사용자의 행위를 도울 수 있었는지를 알게 하는 중요한 정보가 될 수 있다. 행위 결과와 행위 과정을 알 수 있는 주요 자료 소스는 다음과 같다.

(1) 특정행위에 대한 직접 관찰

비디오 녹화 기록, 관찰자의 실험 현장 관찰, 운전원의 시선을 추적 기록한 eye tracker 기록, 또는 운전 행위 중 운전원이 직접 기록한 운전 소감 등.

(2) HSI와의 상호작용 기록

시뮬레이터 제어기에 대해 이루어진 제어행위 data log.

(3) 행위궤적

사전에 작성된 이상적인 운전경로 차트에 이상적 경로로부터의 이탈된 행위를 기록한다.

(4) 주요 발전변수의 동적변화 기록

시뮬레이터의 data log에 기록된다.

(5) 팀원간 구두 의사소통 기록

별도의 오디오 녹음 또는 비디오 녹화 기록.

(6) 실험 후 디브리핑 (debriefing) 인터

뷰에서 이루어진 구두보도(verbal report)

디브리핑 과정 녹음 기록 또는 디브리핑 과정에서 배포된 설문지에 기록한다.

(7) 관찰자의 평정 및 주석

사전 작성된 관찰자 평정지에 기록한다.

자료를 분석하는 과정에서는 설계 개념의 중요요소에 의한 효과와 설계 구현에 따르는 부수적인 인자들에 따른 우연한 효과들을 구분하는 것이 중요하다. 운전행위 과정에서 발생된 문제의 핵심 사항과 주변여건을 구분하는 것도 행위를 성공적으로 또는 실패로 이끈 요소를 찾는데 도움을 준다. 이 요소들은 다음 번 개념 설계에 피이드백을 줄 수 있다.

4.8. 심층분석

심층 분석 단계에서는 다중 소스로부터 수집된 자료의 상관관계가 조사되고 결합되어 특정 운전원 또는 팀의 행위를 기술한다. 실험자는 여러 경로의 증거를 상호 참조하여 특정행위와 인지적 활동에 대한 궤적을 설정한다. 이러한 상호 참조와 자료통합은 행위에 대한 자료의 타당도를 높여주며 실험의 표본수가 적어서 생기는 신뢰도 부족의 문제를 어느 정도 보완해 준다.

실제 행위에 대한 기술이 끝나면 행위의 상세 사항에 독립적이며 (context independent) 보다 개념 의존적(concept dependent)인 수준의 분석에 들어간다. 이때 개념모형(conceptual model)이 도입되며 이 모형에 의해 행위를 설명하게 된다. 각각의 실험결과에 독립적인 개념모형에 의해 행위를 설명할 수 있으면 특정개인과 특정사례를 초월하여 행위현상에 대한 일반화가 가능해진다.

개념모형에 의해 운전원의 행위를 일반화하여 표현한 다음 운전행위에 있어서의 여러 운전원에서 보이는 유사한 패턴을 확인한다. 예를 들어 표시장치에 대한 navigation 문제가 여러 사례에서 확인된다면 이들을 통합하여 navigation 행위의 어려움, 혼동, 오류를 포함한 전형적인 행위(prototypical performance)로서 navigation을 분류할 수 있다. 이러한 전형적인 행위의 분류는 특정 HSI가 분류된 인간행위를 지원하는 효과 (effectiveness)가 있는가, 어떤 요인이 분류된 인간행위를 어렵게 하는가, 분류된 인간행위를 향상시키기 위해서는 HSI의 어느 부분이 개선되어야 하는가에 관한 결론을 이끌어 낼 수 있다.

5. 결 론

AP-600은 미국 Westinghouse사에서 개발하여 미국 원자력 안전 규제위원회로부터 설계 인증만 받고 아직 구현되지 않은 원자력 발전소 체계이다. 발전소 체계가 실제로 구현되지 않았기 때문에 AP-600의 HSI 평가모형 역시 HSI 설계의 전과정에 실제로 적용된 경험이 없고 아직 개략적 수준의 프로그램으로 머물러 있는 미완성의 상태이다. 그럼에도 불구하고 국내 차세대 원전의 제어실 HSI 평가 실험 모형으로 선택되었기 때문에 이 모형의 완성성에 대해서는 더 많은 토의가 이루어져야 할 것이다. 이에 본 연구에서는

AP-600 HSI 평가 모형을 소개하고 이를 이용하여 평가 실험을 수행할 경우 진행해야 할 절차와 신뢰성 있는 실험을 위해 실험자가 고려해야 할 사항을 논의하였다.

AP-600 HSI 평가 모형에서 선정된 15개의 평가 항목 (표 1)들은 제어실 운전상황을 대표할 수 있는 항목으로 구성되어 있기 때문에 수많은 운전 상황을 모두 평가해야 하는 노력을 줄여 줄 수 있다. 이런 점에서 AP-600 HSI 평가모형은 실험 자원의 제약을 극복할 수 있는 효율적 방법이라 할 수 있으며 NUREG-0711의 업무항목 7 (설계과정에서의 HSI 평가)에서 요구하는 평가모형으로서도 무리없이 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 평가 항목이 제한되어 있으므로 NUREG-0711의 업무항목 10 (통합체계에 대한 HSI 확인 및 검증)에 규정된 '인간공학 현안 (issue) 해결 확인'과 같은 폭 넓은 평가 요구에는 다소 부족하다고 할 수 있다. 따라서 앞으로 이 부분을 보강하는 연구가 요망된다.

HSI 평가 실험 방법에 대해서는 광범위한 평가 대상을 목적으로 하여 여러 가지 실험 지침서들이 나와 있다 (Chapanis and VanCott, 1972; Meister, 1986; O'Hara 등, 1997; Westinghouse, 1992). 본 연구에서는 이러한 실험 지침서를 근거로 하여 국내 차세대 원전 평가 실험 팀이 참조할 수 있는 HSI 평가 계획을 선별 정리하였다. 효율적이고 신뢰성있는 HSI 평가 실험을 위해서는 본 연구에서 제시한 가설 수립, 인간성능 요구사항 결정, 실험 평가 요구사항 결정, 운전조건 및 시나리오 선정, 실험 및 자료 수집, 운전원 성능평가 기준 선정, 자료분석, 심층분석 등이 평가계획에 포함되어야 할 것이다. 본 연구에서는 또한 각 단계에서 실험자들이 따라야 할 방법론과 신뢰성있는 실험을 위해 유념해야 할 사항을 제시하였다.

AP-600 HSI 평가 모형은 수많은 HSI 평가항목 중 대표성있는 평가 대상을 선정하는 역할을 할 수 있으며 본 연구에서 제시한 HSI 평가 계획은 각 HSI 평가항목에 대해 평가 실험을 진행할 때 쉽게 참조할 수 있는 참조모형의 역할을 할 수 있을 것이다.

본 연구에서 다룬 AP-600의 HSI 평가모형 및 HSI 평가 계획은 원전제어실 평가에 적용되도록 구성되었지만 상기 방법을 적절히 수정하면 컴퓨터를 기반으로 하는 다른 계측제어계통 (예를 들면, 화공 공정 제어, 항공기 조종, 및 항공 관제 체계 등)의 설계 과정에서도 무리 없이 적용될 수 있을 것이다. 그러나 상기방법을 적용할 때에는 체계의 평가 실험이 갖는 다음과 같은 한계점을 염두에 두어야 할 것이다 (O'Hara 등, 1997).

(1) 체계타당성을 충족시키기에 충분한 모든 타당도 요소 (외적, 내적, 개념적, 통계적 타당도)를 만족시키는 실험설계는 불가능하지는 않지만 현실적으로 극히 어렵다.

(2) 평가결과 설계에 대한 타당성이 인정된다하더라도 실제 체계의 성능은 설계된 HSI, 훈련, 및 실제 사용하는 운전원 개인특성에 따라 타당성이 검증된 설계와는 다른 성능을 보일 수 있다.

(3) 완성된 체계가 운전되는 실제 상황 (운전조직의 분위기, 안전에 대한 인식, 관리/행정 절차)에 따라 체계 성능이 달라 질 수

있다. 이런 요소는 타당성 평가과정에서 고려하기 힘들다.

이러한 평가 실험의 한계가 있지만 평가과정이 지속적으로 수행되고 평가 결과 중 수렴성 (convergent)있는 결과가 지속적으로 피이드백 된다면 설계된 체계에 대한 신뢰도는 점진적으로 높아 질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김중남, "차세대 원전 MMI 설계의 인지 공학 적용." 인지공학연구회 '99 추계 workshop (pp. 15-33), 1999.

[2] 이동하, 심봉식, 오인석, 차경호, 이현철, 생체신호에 의한 원전 중앙제어실 운전원의 정신부하 측정시스템 개발, 한국원 자력 연구소 기술보고서, 1996.

[3] American National Standards Institute, ANSI/AIAA G-035-1992, "Guide to Human Performance Measurements." Washington, DC., 1993.

[4] Chapanis, A. and VanCott, H., "Human Engineering Tests and Evaluations," In H. VanCott and R. Kinkade(Eds), Human Engineering Guide to Equipment Design, US Government Printing Office, Washington, DC., 1972.

[5] Cohen, F., Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Academic Press, New York, 1969.

[6] Endsley, M. R., "Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement," Proceedings of the Human Factors-32nd Annual Meeting, Human Factor Society, California, 1988.

[7] Endsley, M. R., "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems," Human Factors, 37, 32-64, 1995.

[8] Hart, S. and Staveland, L., "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research," In P. Hancock and N. Meshkati (Eds), Human Mental Workload, North-Holland, New York, 1988.

[9] Hogg, D., Folleso, K. and Volden, F.S., "Development of a Situation Awareness Measure to Evaluate Advanced Alarm Systems in Nuclear Power Plant Control Rooms," Ergonomics, 38(11), 2394-2413, 1995.

[10] Kramer, H. and Thiemann, S., How Many Subjects?: Statistical Power Analysis in Research, Sage Publications, London, 1987.

[11] Meister, D., Behavioral Analysis and Measurement Methods, Wiley, New York, 1985.

[12] Meister, D., Human Factors in

Testing and Evaluation, Elsevier, Amsterdam, 1986.

[13] Muckler, F.A. and Stevens, S.A., "selecting Performance Measures: Objective versus Subjective Measurement," Human Factors, 43, 441-455, 1992.

[14] Norman, D., "Categorization of Action Slips," Psychological Review, 88, 1-15, 1981.

[15] Norman, D., The Psycology of Everyday Things, Basic Books, New York, 1988.

[16] O'Hara, J., Stubler, W., Higgins, J. and Brown, W., Integrated System Validation: Methodology and Review Criteria(NUREG/CR-6393), Brookhaven National Laboratory, 1997.

[17] Rasmussen, J., Information Processing and Human-Machine Interaction, North Holland, New York, 1986.

[18] Reason, J., "Modelling the Basic Error Tendencies of Human Operators." Reliability Engineering and System Safety, 22, 137-153, 1988.

[19] Reason, J., Human Error, Cambridge University Press, New York, 1990.

[20] Reid, G. B., Shingledecker, C. A. and Eggemeier, F. T., "Application of Conjoint Measurement to Workload Scale Development," Proceedings of the Human Factors Society-25th Annual Meeting, Santa Monica, 1981.

[21] Roth, E. M., Mumaw, R. J. and Stubler, W. F., "Human Factors Evaluation Issues for Advanced Control Rooms: a Research Agenda." Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (pp. 254-259), 1993.

[22] Stubler, W. F., Roth, E. M. and Mumaw, R. J., "Evaluation Issues for Computer-based Control Rooms." Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting (pp. 383-387), 1991.

[23] Taylor, R. M., "Situational Awareness Rating Technique (SART): The Development of a Tool for Aircrew Systems Design," Situational Awareness in Aerospace Operations (AGARD Proceedings No. 478), 1989.

[24] USNRC, NUREG-0711, Human Factors Engineering Review Model, Washington, DC, 1994.

[25] Webb, E., Campbell, D., Schwartz, R. and Sechrest, L., Unobtrusive Measures, Rand McNally and Co., Chicago, 1973.

[26] Westinghouse, Simplied Passive

Advanced Light Water Reactor Plant Program, AP600 Standard Safety Analysis Aport, DE-AC03-90SF184 95, 1992.

[27] Woods, D. D., Application of Safety Parameter Display Evaluation Project to Design of Westinghouse SPDS, WCAP-10170, submitted to USNRC, Westinghouse: Pittsburgh, PA, 1982.

[28] Woods, D. D., Johannesen, L., Cook, R. and Sarter, N., Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers, and Hindsight, (CSERIAC SOAR 94-01), Crew Systems Ergonomics Information Analysis Center, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, 1994.