Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 25, No. 3 pp.85-96, August 2006

신형원전 주제어실 인적요소 검증을 위한 인적수행도 평가척도 개발*

하 준 수 · 성 풍 현

한국과학기술원 원자력 및 양자공학과

Development of Human Performance Measures for Human Factors Validation in Advanced Nuclear Power Plants

Jun Su Ha, Poong Hyun Seong

Department of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701

ABSTRACT

Main control room(MCR) man-machine interface(MMI) design of advanced nuclear power plants(NPPs) such as APR(advanced power reactor)-1400 can be validated through performance-based tests to determine whether it acceptably supports safe operation of the plant. In this work, plant performance, personnel task, situation awareness, workload, teamwork, and anthropometric/physiological factor are considered as factors for the human performance evaluation. For development of measures in each of the factors, techniques generally used in various industries and empirically proven to be useful are adopted as main measures and some helpful techniques are developed in order to complement the main measures. Also the development of the measures is addressed based on the theoretical background. Finally we discuss the way in which the measures can be effectively integrated and then HUPESS(HUman Performance Evaluation Support System) which is in development based on the integrated way is briefly introduced.

Keyword: Human performance, Advanced nuclear power plant, Plant performance, Personnel task, Situation awareness, Cognitive workload, Teamwork, Anthropometry/physiological factor, HUPESS

1. 서 론

원자력발전소의 신뢰성 및 안전성을 향상시키기 위한 연구개발은 발전설비의 자동화, 주요 안전계통의 안전여유도 확보 및 발전소 주공정 설비계통의 개선 등의 분야에서 주로 이루어져 왔다. 그러나 1979년 TMI 사고와 1986년 체르노빌 사고의 원인분석에서 주요원인 중에 하나가 부적절한 주제어실 설계, 운영절차, 운전원 훈련과 같은 인적요소에서 기인함이 밝혀짐에 따라 원자력발전소 운영의 주체가 되는 운전원에 대한 연구가 많은 관심을 받게 되었다. 또한 APR (Advanced Power Reactor)−1400과 같은 신형원전 설계에 CRT 기반의 디스플레이장치 및 진보된 경보 시스템과 같은 고급 정보처리 기술이 적용됨에 따라 주제어실 운전원의 업무는 보다 인지적인 성격을 띠게 되었다. 이에 따라 인간공학(Human Factor Engineering)이 신형원전 주제어실 설계에 있어 보다 중요하게 되었으며 이러한 신형원전 주제어실 설계의 적절성을 검증하기 위해 미국 U.S. NRC(미국

*본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발 사업의 "디지털 기반 주제어실의 인간공학 검증시스템 개발" 연구비 지원과제임.
교신저자: 성풍현
주 소: 305−701 대전광역시 유성구 구성동 373−1, 전화: 042−869−3820, E−mail: phseong@kaist.ac.kr

원자력규제위원회)의 지원 하에 HFEPRM(Human Factors Engineering Program Review Model)이 개발되었다(O'Hara et al., 2004). 통합 시스템 검증(Integrated System Validation)은 HFEPRM의 한 부분으로 설계된 인간기계연계(Man-Machine Interface) 시스템이 원전의 안전한 운전을 보증하는가를 검증하기 위해 인적수행도 기반의 시험을 통해서 수행된다(O'Hara et al., 1997). 미국 NRC에서 발간된 NUREG-0711과 NUREG-6393에서는 이러한 신형원전 주제어실 MMI 설계 검증을 위한 인적수행도 평가에 대한 일반적인 가이드 라인을 제공하고 있으나 실제 검증 업무에 적용하기 위해서는 실무현장에 적합한 기법들을 개발할 필요가 있다. 인적수행도를 평가하기 위한 평가기법들은 여러 분야에서 개발되어 왔으며 원자력 산업 분야에서는 여러 원자력 선진국들의 연구개발 컨소시엄인 OECD Halden Reactor Project에서 주로 연구되었다. 국내에서도 몇몇의 연구개발 프로젝트를 통해 인적수행도 평가관련 연구개발이 수행된 바 있다(심봉식 등, 1996; 조성제 등, 2003). 그러나 이들 연구에서 사용된 기법들이 실험실 차원의 연구이다 보니 신형원전 주제어실 인간공학적 설계 검증에 사용되기에 다소 미흡한 점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구결과들을 참고하여 국내 실무현장에 적용 가능한 인적수행도 평가척도들을 개발한다. 2절에서는 어떠한 요소들이 인적수행도 평가에서 고려되어야 하는지 기술하며 3절에서는 평가요소 별로 기존의 연구결과를 고찰하여 이론적 배경을 제시한다. 또한 본 연구에서의 인적수행도 평가척도 개발내용과 그 적절성을 기술한다. 4절에서는 효과적인 인적수행도 평가방안이 강구되며 개발된 평가 방법론에 근거하여 현재 개발중에 있는 전산화된 인적수행도 평가 지원 시스템에 대해 간략히 소개한다.

2. 인적수행도 평가요소

원전 주제어실의 운전원의 직무는 상황의 감시, 데이터나 정보의 감지, 상황이해 및 평가, 상태진단, 의사결정, 대응계획, 대응실행 등과 같은 일련의 인지적인 과정으로 이루어져 있다(U. S. NRC, 1999). 본 연구에서는 이러한 운전원의 일련의 직무수행에 따른 인적수행도를 평가하기 위해서 그림 1과 같이 원전성능(plant performance), 운전원 직무(personnel task), 상황인식(situation awareness), 작업부하(workload), 팀 협업도(teamwork), 인체측정/생리학적 요소(anthropometric/physiological factors) 등의 6개의 평가요소를 고려하였다. 상기 6개의 평가요소는 본 연구에서 개발된 방법론이 신형원전의 설계 검증 시 인허가를 지원할 수 있도록 규제 가이드 라인에 근거하여 선정되었다(O'Hara et al., 1997, 2004).

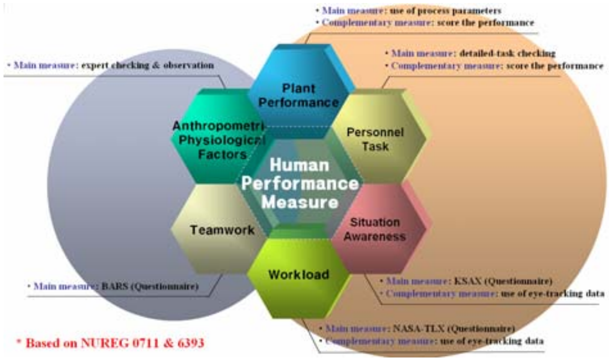

그림 1. 인적수행도 평가요소 및 평가척도

3. 인적수행도 평가척도

각각의 인적수행도 평가요소에 대한 평가척도들은 다음과 같은 고려사항 및 제약사항에 근거하여 개발하였다. 첫째로 주제어실 운전환경이 기존의 아날로그 기반에서 디지털 기반으로 바뀜에 따라 운전원의 직무수행은 다수의 워크스테이션 및 대형정보 표시반을 기반으로 수행된다. 또한 전산화 절차서 및 진보된 정보 시스템이 적용됨에 따라 기존원전의 주제어실보다 동적인 활동은 줄어들 것이며 운전원의 직무는 감시/감독 위주로 보다 인지적 성향을 띄리라 판단된다(최영상 등, 2001). 이렇듯 운전환경의 변화로 인해 운전원들이 수행해야 하는 직무의 성격과 특성이 바뀜에 따라 철저한 직무분석에 근거한 운전원 직무수행도 평가와 함께 변화된 환경에 따른 상황인식 및 작업부하 평가에 많은 관심을 기울일 필요가 있다. 둘째로 인적수행도 평가는 현실적이며 경제적이어야 한다. 본 연구가 궁극적으로 신형원전 주제어실의 설계 검증을 목적으로 하고 있으며 인허가시 기술적인 근거를 제공하고자 하는 것이므로 평가기법은 현실적이어야 한다. 또한 검증시험은 다수의 실험을 통해 수행되어야 하며 각각의 실험은 그 준비에서부터 실행까지 상당한 자원이 소모되므로 경제적인 방법론이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 평가척도를 크게 두 개의 범주로 나누어 주평가척도와 보조평가척도로 개발하였다. 원전성능, 운전원 직무, 상황인식, 작업부하 등의 평가를 위해서는 주평가척도와 보조평가척도 두 종류의 평가척도가 개발되었으며 팀 협업도와 인체측정/생리학적 요소 평가를 위해서는 주평가척도 만이 개발되었다. 주평가척도는 선행연구를 참조하여 그 유용성이 경험적으로 입증된 기법을 활용하였으며 보조평가척도는 주평가척

도의 한계점 등을 보완할 수 있도록 개발하였다. 또한 경제성을 달성하기 위해서 검증시험을 위한 실험평가 시 한번의 실험에서 상기 6가지 평가요소를 모두 평가 가능토록 평가요소 별로 다른 평가요소에 영향을 주지 않는 기법을 채택 또는 개발하였다. 예를 들어 상황인식 평가를 위해 실험 중간중간에 시뮬레이터를 일시 중지시키는 Freezing 기법(예: SAGAT, Endsley, 1988b)을 사용한다면 동시에 작업부하를 정확히 평가하기는 쉽지 않을 것으로 판단된다. 그렇다고 상황인식 평가를 위한 실험과 작업부하 평가를 위한 실험을 따로 실시한다면 필요 이상의 많은 비용이 소모될 것이다. 따라서 본 연구에서는 실험 시 운전원의 운전행위에는 일체의 간섭이 없는 상태에서 인적수행도를 평가할 수 있도록 평가척도를 개발하였다. 셋째로 인적수행도 평가기준은 명확해야 하며 명확한 기준을 제시하기 힘든 경우에는 최소한 현 기술수준에서 가장 합리적이어야 한다. 이를 위해 앞서 기술되었듯이 주평가척도는 선행연구를 참조하였으며 특히 원전 주제어실에서의 인적수행도 평가에 대한 선행연구가 수행된 기법들에 초점을 맞추어 선행연구결과를 참조기준으로 활용할 수 있도록 하였다. 따라서 주평가척도의 평가를 통해 평가요소 별로 성공/실패를 판단할 수 있다. 보조평가척도는 성공/실패의 판단보다는 운전원별 또는 운전조별 인적수행도의 상대적 비교 또는 특성파악을 위한 정량적 평가척도로써 활용되며 보다 다각적인 분석을 가능토록 하기 위한 보조적인 평가방안으로 개발하였다. 마지막으로 인적수행도를 평가하는 행위는 인적수행도에 영향을 주어서는 안 된다, 즉 비침투적이어야 한다. 예를 들어 인적수행도 평가를 위해 수시로 실험을 일시 중지시키는 행위 또는 운전원의 안구추적을 위해 거추장스러운 장비를 착용하는 행위 등은 인적수행도 자체를 왜곡시킬 수 있다. 본 연구에서는 상기 기술된 사항들을 고려하여 6가지 평가요소에 대해서 아래와 같은 평가척도들을 개발하였다.

3.1 원전성능

원전성능은 발전소 운전변수들을 관찰, 분석, 평가하여 측정될 수 있다. 명확한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 객관적인 평가가 가능하나 인적요소 측면에서의 설계결함이 존재하더라도 운전원의 능력 또는 다른 요인에 따라 원전은 운전허용범위 내에서 운전될 수도 있기 때문에 다른 평가요소들과 함께 고려되어야 한다(O'Hara et al., 1997). 원전성능 평가를 위한 주평가척도로서 약 5~7개의 중요 공정변수들이 운전전문가에 의해 선정되며 선정된 변수들은 그 값이 운전 상/하한 치 내에서 운전되는지의 여부를 확인함으로써 성공/실패를 평가하게 된다. 보조평가척도로는 각각의 선정된 공정변수에서 관측된 값과 설정 값과의 불일치도를 정량적으로 계산한다. 또한 각각의 선정된 공정변수에는 최종적인 목표 값이 있어 특정 이벤트 발생 후 목표 값에 이를 때까지의 소요시간을 평가한다.

3.1.1 주평가척도: 중요변수 값 확인

운전전문가는 우선 검증시험을 위한 실험 시나리오가 선정되면 해당 시나리오 평가에서 가장 중요하다고 판단되는 중요 공정변수를 5~7개정도 선정한다. 경우에 따라 필요하다면 더 많은 중요 공정변수를 선정할 수도 있다. 설계 문서, 기술 명세서, 안전성 분석 보고서 또는 운전 절차서 등을 검토한 후 안전한 원전 운전을 위한 중요 공정변수들의 상/하한 치가 운전전문가에 의해 평가된다. 실험평가 동안 공정변수 값들을 관찰하여 운전 상/하한 치를 초과하면 원전성능은 실패로 평가한다.

3.1.2 보조평가척도: 불일치도 및 목표 값 도달시간

선정된 중요 공정변수들은 분석적 계층화 기법(AHP: Analytic Hierarchical Process)을 이용하여 중요도에 따라 가중치가 평가된다(Saaty, 1980). 또한 각각의 선정된 공정변수에 대해 관측된 값과 설정 값(최적 운전범위)의 차이를 이용하여 불일치도를 계산한다(Andresen & Drøivoldsmo, 2000). 이러한 평가기법은 PPAS(Plant Performance Assessment System)에 도입되어 유용하게 사용된 바 있다(Moracho, 1998; Andresen & Drøivoldsmo, 2000). 이때 불일치도 계산을 위한 범위 값은 상기 "중요변수 값 확인"에서의 운전 상/하한 치 안에 포함되도록 최적 운전범위의 상/하한치가 운전전문가에 의해 평가된다. 마지막으로 앞서 평가된 중요변수에 대한 가중치들을 이용하여 가중 총합된다. 총합된 불일치도는 0에서 100까지의 값으로 표준화된다. 결과가 0에 가까울수록 원전성능이 더 좋은 것으로 평가된다. 또한 각각의 중요 공정변수에서 운전 목표 값 도달시간을 평가한다. 이러한 운전 목표 값은 "중요변수 값 확인"에서와 같이 기술 문서(설계 문서, 기술 명세서, 안전성 분석 보고서 또는 운전 절차서) 등을 검토한 후 운전전문가에 의해 선정한다.

3.2 운전원 직무

원전성능이 허용범위 내에 있다 하더라도 설계상의 결함은 운전원에게 불필요한 업무를 부과 할 수도 있다. 그러므로 운전원 직무를 평가함으로써 원전성능 평가에서 발견되지 못한 설계오류를 발견해 낼 수 있다(O'Hara et al., 1997). 원전 주제어실에서의 운전원의 직무는 주변환경으로부터의 상태 감지, 정보의 수집, 상황평가, 대응계획, 대응실행 등과 같은 일련의 인지활동으로 요약될 수 있다. 이러한 인지활동

이 올바르게 수행되는 지의 여부는 운전 과정을 관찰하여 알아낼 수 있다. 따라서 운전원 직무는 운전원이 적절한 데이터와 정보를 감지하는지의 여부와 이들이 적절한 대응을 수행하는지의 여부, 이들 순서의 적절성 등을 관찰함으로써 평가할 수 있다(Skraning, 1988).

3.2.1 주평가척도: 필수직무 완수확인 및 시나리오 종료시간

우선 운전전문가에 의해 운전원의 직무분석이 수행된다. 직무분석은 하향식분석법(top-down analysis)과 상향식 분석법(bottom-up analysis)을 이용하여 그림 2와 같이 계층적이고 도식적인 형태의 최적 시나리오가 운전전문가에 의해 분석된다(O'Hara et al., 1997; Skraning, 1988). 또한 운전전문가는 최하위 계층의 여러 세부 직무들 중에서 안전한 운전을 위해서 필수적으로 수행되어야 하는 직무들을 선정한다. 운전전문가는 실험평가 시나리오가 수행되는 동안 운전행위를 관찰하여 이러한 필수 직무들이 완료되었는지의 여부를 실시간으로 평가한다. 실시간으로 평가가 곤란한 상황이라면 실험 시나리오가 종료된 후 수집된 로깅 데이터나 시청각 녹화 데이터, 안구동작 계측 데이터를 이용하여 평가할 수도 있다. 그러나 실시간으로 평가하게 되면 각각의 세부 직무들이 수행되는 시간을 기록할 수 있으며 이는 다른 평가요소들과 연동되어 효과적으로 분석될 수 있기 때문에 가능하면 실시간 평가를 수행하여야 한다. 필수 직무가 완료되지 않았다면 운전원 직무는 실패로 평가한다. 운전전문가는 또한 최적 시나리오로부터 세부 직무들의 예상소요시간을 평가함으로써 전체 시나리오의 예상완료시간을 평가하고 실험평가 시 관측된 실제 수행시간과 비교평가 한다. 관측된 시간이 운전전문가에 의해 평가된 시간범위 이내에 있다면 운전원 직무는 성공으로 평가한다.

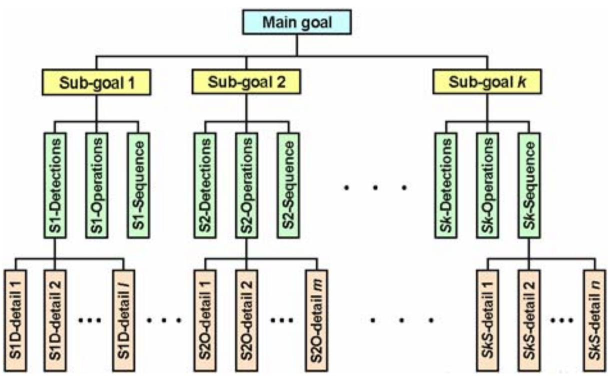

그림 2. 계층적으로 분석된 최적 시나리오

3.2.2 보조평가척도: 직무수행도의 점수화

운전원 직무 주평가척도는 직무수행도를 점수화한 보조평가척도로 보완된다. 우선 최적 시나리오에서 AHP를 이용하여 세부 직무들의 가중치를 계산한다. 다음으로 실험평가 동안 운전원의 대화나 행동 또는 운전원 워크 스테이션의 로깅 데이터를 관찰하여 평가자는 운전원이 세부 직무들을 적절히 수행하는지 확인한다. 마지막으로 세부 직무들의 가중치들과 직무확인 결과를 가지고 직무수행도가 점수화되어 계산된다. 점수가 높을수록 직무수행도가 우수한 것으로 평가된다. 이러한 운전원 직무수행도 점수화는 OPAS(Operator Performance Assessment System)에서 채택되어 원전 같은 동적인 운전환경에서 신뢰성 있고 합리적이며 민감도가 우수한 인적수행도 척도임이 확인되었다(Skraning, 1988).

3.3 상황인식

상황인식의 정의에 대한 논의는 여러 가지가 주장되었으나(Endsley, 1988a; Fracker, 1988) Endsley(1988b)는 여러 정의를 정리하여 다음과 같이 정의하였다: "SA는 일정한 시간과 공간의 범주 안에서 주변환경 요소들을 인지하고(1단계 상황인식), 그들의 의미를 이해하고(2단계 상황인식) 그리고 가까운 미래의 그들의 상태를 예측하는 것(3단계 상황인식)이다." 원전 주제어실에서 이루어지는 행위가 기본적으로 원전 상태의 감시, 정보의 입수, 해석, 상황의 판단, 진단, 의사결정 등 인지적 활동의 연속임을 감안하면 발전소의 상태를 감지하고 이해하고 미래를 예측하는 상황인식이 안전한 운전을 위해 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 현재까지 개발된 상황인식 평가기법들은 크게 성능 척도기법, 직접 질문/설문지 기법, 주관적 평가기법, 생리적 기법으로 구분할 수 있다(O'Hara et al., 1997; Endsley, 1995a). 성능 척도기법은 평가결과를 해석하는데 있어서 논리적으로 명확하지 못하고 평가를 위해서는 실험상황을 제어해야 하기 때문에 피실험자의 수행도에 침투적(intrusive)이므로 원전에서의 적용에는 한계점을 갖고 있다(O'Hara et al., 1997). 직접질문/설문서 기법은 평가시기에 따라 사후평가(post-test), 온라인 평가(on-line test), 정지기법(freeze technique)으로 구분된다. 이 기법은 질의응답을 통해 상황인식을 평가하는 것으로 사후평가기법은 많은 시간이 소요되고 응답을 과장되게 일반화하거나 합리화하는 경향이 있다. 또한 기억은 주관적 평가와 같이 부정확할 수 있다(Nisbett & Wilson, 1997). 온라인 평가기법은 시간경과에 따른 망각의 문제를 극복하고자 시뮬레이션 도중에 질의응답을 실시하는 기법으로 질의응답 자체가 부차적인 직무로 작용하여 피실험자의 수행도에 침투적인 단점이 있다(O'Hara et al.,

1997). 정지기법은 시뮬레이션을 무작위로 일시 정지시키고 질의응답하는 방식으로 사후평가와 온라인 평가의 결점을 보완한 방법이다. 대표적인 기법으로는 SAGAT이 있다(Endsley, 1988b). SAGAT은 항공분야에서의 활용을 목적으로 고안되었으며 사용이 용이하고 인지한 정보에 대한 객관적인 평가가 가능하며 피실험자의 평가 수용성이 우수하다는 장점이 있다(Endsley, 1996). 그러나 시뮬레이션을 일시 정지 시키는 행위가 피실험자의 수행도에 침투적이며 운전원이 질문을 미리 추측하여 특정 정보에 편중될 수 있다는 단점이 있다(Pew 2000; Sarter & Woods, 1991). 비록 몇몇 특정한 직무에 대한 수행도가 SAGAT에서의 질의시점, 질의시간, 질의빈도에 영향 받지 않음을 보이기니 하였으나(Endsley, 1990; 1995b) Endsley(2000)는 SAGAT을 이용한 상황인식 평가가 수행도에 영향을 미치지 않는다는 것을 증명하는 것은 결코 가능하지 않음을 인정하였다. 주로 항공분야에서 사용되어 오던 SAGAT을 원자력 분야에 적합하도록 적용한 기법으로는 SACRI(Situation Awareness Control Room Inventory)가 있다(Hogg et al., 1995). SACRI는 Halden Reactor Project(HRP)에서 사용되는 NORS 시뮬레이터에서 활용하기 위해서 개발되어 한국에서 운영중인 원전이나 차세대 원전에서 활용하기는 적합하지 않다(이동하와 이현철, 2000). 주관적 평가기법은 평가방법이 용이하고 비용이 저렴하며 비 침투적인 방식으로 평가할 수 있다는 장점이 있는 반면 운전원은 체계의 진정한 상태를 알지 못하며 시행(운전)동안에 인지된 정보나 상황을 기억해야 함으로 인해 부정확한 평가를 유발할 수 있다(Endsley, 1995a). 또한 평가결과가 시행(운전) 결과에 영향을 받을 수 있으며 SART(Situational Awareness Rating Technique, Taylor, 1990)나 SA-SWORD(Situation Awareness-Subjective Workload Dominance, Vidulich & Hughes, 1991)와 같은 기법에서는 작업부하와 혼동되어 평가될 수도 있다는 단점이 있다(O'Hara et al,, 1997). 생리적인 기법은 인지적인 활동으로 인한 생체/생리적인 신호를 계측하여 상황인식 평가에 활용하고자 하는 것으로 주로 정신적 작업부하나 피로도에 관한 연구에서 많이 사용되었으며 상황인식 분야에서는 극소수의 연구만이 수행되었다(Wilson, 2000). 원자력 분야에서는 안구동작을 계측하여 SA 평가에 활용한 VISA(Visual Indicator of Situation Awareness, Drøivoldsmo et al., 1998)가 있다. 일반적으로 생리적인 기법은 비 침투적인 방법으로 지속적으로 피실험자의 인지적인 상태를 파악할 수 있다는 장점이 있으나 얼마나 많은 양의 정보가 들어왔으며 이들이 올바로 수용되고 이해되었는가를 알 수 없다는 단점이 있다(Wilson, 2000; Endsley, 1995a). 본 연구에서는 이들 중에서 주관적 평가기법의 하나인 KSAX(Korea Situation Awareness Index, 조성제 등, 2003)를 주평가척도로 사용하고 생리적 기법 중 하나인 안구응시 데이터를 이용하여 보조평가척도로 운전원의 상황인식을 평가한다.

3.3.1 주평가척도: KSAX

KSAX는 SART를 국내여건에 맞게 변형시킨 '주관적 평가기법'으로 실험참여자인 운전원에 의해 주관적으로 평가된다. SART의 문제점은 작업부하와 혼동되어 평가될 수 있다는 것인데 KSAX에서는 SART의 평가체계에 Endsley의 상황인식 모델(1988a)을 적용하여 평가질문을 구성하는 방식을 채택하였으며 신형원전 주제어실 설계 적합성 평가에 성공적으로 사용된 바 있다(조성제 등, 2003). 이 기법은 실험종료 후 운전원 설문에 기반하여 평가되므로 상황인식 평가를 위해 운전행위에 제약을 가할 필요가 없으며(비 침투성) 이로인해 다른 인적수행도 평가요소에 영향을 주지 않는다. 그러므로 한번의 실험으로 6가지 모든 평가요소에 대한 평가가 가능하여 경제적인 평가를 가능케 한다. 또한 신형원전(APR-1400)에 대한 선행연구가 수행된 바 있어 검증평가 시 참조기준으로 활용할 수 있다는 장점이 있다. KSAX의 설문지에는 Endsley가 정의한 상태인지, 의미이해, 미래예측의 level 1, 2, 3 상황인식에 해당되는 질문이 포함되어 있고 운전원은 실험 주관자가 미리 선정한 점수 척도(7점, 10점, 100점, 임의선정)에 따라 평가하며 각각의 질문에 대한 평가사유를 기재하여 원인을 분석하는 데이터로 활용한다. 앞서 언급된 선행연구가 7점 척도로 평가되었으므로 7점 척도를 사용할 것이 권고된다. KSAX는 평가하고자 하는 신형원전의 상황인식 정도를 이미 인허가를 받은 기존원전의 상황인식 정도와 비교하여 평가하도록 만들어져 있다. 그러므로 신형원전의 상황인식 정도가 기존원전보다 더 높은 점수를 얻는다면 상황인식은 성공으로 평가된다(7점 척도의 경우 4점 이상).

3.3.2 보조평가척도: 안구동작 데이터에 기반한 연속평가척도

주평가척도인 KSAX는 실험평가 시나리오가 종료된 후 설문을 기반으로 주관적으로 평가되기 때문에 객관성 확보라는 점과 시나리오 동안의 연속적인 상태를 평가할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 안구추적(eye-tracking)에 기반한 연속평가척도를 개발하였다. 원전 주제어실에서의 정보의 인지 과정이 많은 부분 시각 채널을 통해 이루어진다는 사실에 주목하여 운전원의 안구응시 과정을 분석하여 상황인식에 대한 정보를 추출하고자 한다. 안구추적에 기반한 평가척도는 시각적으로 인지된 모든 정보는 자동적으로 인지적 처리 과정을 거친다(Underwood and Everatt, 1992; Hauland, 1996)는 가정과 안구응시는

시각적 인지와 매우 밀접한 관련을 갖는다는 가정(Moray and Rotenberg, 1989)에 근거한다. VISA를 적용한 실험연구에서는 문제해결에 중요한 관심영역에 대한 안구응시를 1단계 상황인식, 즉 상황감지의 척도로 그리고 특정시간 이상 정보응시에 소요된 시간을 2단계 상황인식, 즉 상황이해의 척도로 사용하여 SACRI 평가결과와의 연관성을 보이며 원전에서 효과적으로 활용될 수 있음을 보인 바 있다(Drøivoldsmo et al., 1998). 그러나 이 척도는 운전원이 적절하게 주변의 상황을 감지하고 있는지 그리고 상황을 올바르게 인식하고 있는지에 대한 정보를 제공하지는 못한다. 안구응시 데이터를 활용하여 운전원이 상황을 올바르게 인식하고 있는지를 알기 위해서는 운전원이 주변으로부터 제공되는 수많은 정보들 중에서 문제해결에 중요한 정보들을 시기 적절하게 응시하는지(응시순서, 체류시간, 응시빈도) 등의 응시패턴을 분석함으로써 알 수 있다. 이러한 운전원의 선택적 주의(selective attention)는 하향식(top-down) 및 상향식(bottom-up) 인지적 처리 과정을 거쳐 발생하는데 이는 주변으로부터 제공된 정보가 운전원의 상황모델(situation model)에 통합되어 운전원은 가장 효과적인 정보가 기대되는 영역에 주목하게 되는 발생기전을 갖게 됨을 의미한다(Stubler et al., 2000; O'Hara et al., 2002; Kim & Seong, 2003). 이러한 선택적 주의 과정은 운전원이 시스템으로부터의 정보를 선택적으로 입수하여 현 상황을 이해해 나가는 과정으로 볼 수 있으며 만약 선택적 주의가 잘못된 방향으로 진행된다면 운전원은 올바른 상황인식에 실패한 것으로 간주될 수 있다. 이에 본 연구에서는 운전원의 특정정보에 대한 안구응시, 응시체류시간, 응시패턴을 이용하여 연속적인 운전원의 상황인식을 평가한다. 그림 3에서와 같이 안구응시 지점과 응시체류시간 그리고 그 패턴을 궤적으로 표현하여 운전전문가는 평가실험이 종료된 후에 분석한다. 이 기법은 관찰된 데이터를 운전전문가가 분석하여 해석해야 한다는 단점이 있으나 운전전문가는 체계에 대해 가장 많은 지식을 가지고 있으며 객관적으로 관찰된 안구추적 데이터에 기반하여 평가하기 때문에 앞서 기술된 주관적 기법의 단점을 보완할 수 있으며 실험에 비 침투적으로 지속적인 상황인식을 평가할 수 있다는 장점이 있다. 본 저자는 실험연구를 통해 원전에서의 진단 업무 시 피실험자의 안구응시 패턴을 분석해 본 결과 동일한 조건에서 시스템 체계에 대한 지식이 풍부한 사람일수록 상황인식이 우수하며 상황인식의 정도에 따라 상이한 패턴을 보임을 확인한 바 있다(Ha & Seong, 2005).

3.4 작업부하

작업부하란 운전원의 한정된 처리 능력 중에서 특정 작업

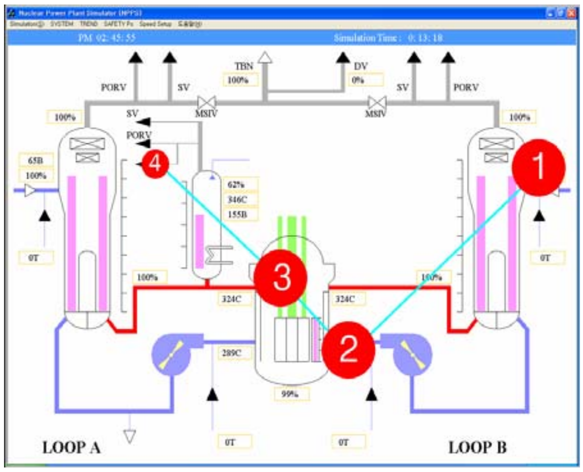

그림 3. 안구응시, 응시시간 및 응시패턴 분석

을 수행하는데 요구되는 자원의 양을 말한다(O'Donnell & Eggemeier, 1986). 정신적 작업부하가 클수록 더 많은 자원이 소요되며 만약 정신적 작업부하가 작업자의 한계를 넘어서면 인적 실수가 유발되어 인적수행도가 저하될 수 있다(Norman & Bobrow, 1975). 신형원전 주제어실의 운전환경이 개인용 워크스테이션과 대형정보 표시반에 의한 감독자 또는 감시자로써 직무를 보다 요구함에 따라 운전원의 직무는 물리적 활동보다는 정신적 활동을 더 많이 요구할 것이며 따라서 정신적 작업부하의 평가가 매우 중요한 고려사항으로 간주되고 있다(변승남과 최성남, 2002). 현재까지 개발된 작업부하 평가기법들은 일반적으로 분석적 평가기법, 성능기반 평가기법, 주관적 평가기법, 생리적 평가기법으로 구분할 수 있다(Williges & Wierwille, 1979; Ha & Seong, 2006). 분석적 평가기법은 주로 설계초기단계에 적용되는 기법으로 실험 없이 수학적 모델링, 직무분석, 시뮬레이션 모델링을 통해 평가되며 설계 후반기에 해당되는 설계 검증 시의 적용에는 적절치 않다(O'Hara et al., 1997). 성능기반 평가기법은 1차 과제법과 2차 과제법으로 분류할 수 있으며 1차 과제법은 의사결정(decision-making)에 따른 정신적 작업부하 평가에는 적절치 않으며 2차 과제법은 인적수행도 자체가 왜곡될 수 있다는 단점이 있으므로 신형원전 주제어실 설계 검증에의 적용은 한계가 있다(Wickens & Hollands, 2000). 주관적 평가기법은 설문조사와 면담을 통해 작업자가 느끼는 부하수준을 측정한다(Meshkati et al., 1990). 분석결과에 대한 신뢰성이 높고 적용이 쉬우며 직무에 독립적이기 때문에 새로운 시스템이나 새로운 직무 조건에 쉽게 적용이 가능하여 널리 사용되고 있다. 대표적인 주관적 평가기법으로는 Overall Workload(OW), Modified Cooper-Harper Scale(MCH), Subjective Workload Assessment Technique(SWAT), National Aeronautic and Space Administration Task load Index(NASA-TLX) 등이 있다 (Hill et al., 1992), Hill et al.(1992)은 SWAT, NASA-TLX, OW, MCH에 대한 신뢰성 평가를 통해 모델의 적합성을 검증하였고, 타당성(validity)에서는 NASA-TLX가 이용성에서는 NASA-TLX와 OW가 우수한 것으로 평가하였다. 생리적 평가기법은 정신적 작업부하에 따른 작업자의 자율 신경계(autonomic nervous system) 또는 중추 신경계(central nervous system)의 생리적 변화를 평가한다 (Wickens & Hollands, 2000). 대표적인 방법으로는 EEG (electroencephalogram) 또는 유발전위(evoked potential) 같은 뇌파분석 기법, 심장박동 분석, 안구동작 분석이 있다. EEG 분석은 많은 수의 전극을 피실험자의 두피에 부착하여야 함으로 신형원전 주제어실 검증과 같은 다수의 운전원의 동적인 환경에서의 평가에는 현재의 기술수준으로 부적합하고 유발전위 역시 측정을 위해서는 다수의 자극이 필요하기 때문에 본 연구에는 부적절하다. 심장박동률(heart rate)과 심장박동률 변동(heart rate variability)은 작업의 난이도 (비행조작 및 비행단계별 난이도)의 변화에 민감함이 증명되었다(Brookhuis & Waard, 1993; Brookings et al., 1996; Rau, 1996; Boer & Veltman, 1997). 그러나 심장박동 관련 척도는 피실험자의 신체적 또는 심리적 상태에 따라 변동을 갖기 쉽다는 단점이 있다(Kramer & Weber, 2000). 안구동작 분석은 주로 깜박임(blink), 응시(fixation), 동공반응 (papillary response) 등의 척도를 이용한다. 이 척도는 계측을 위해 고가의 장비가 요구되고 안구동작을 계측하기 위해서는 계측장비를 피실험자에 부착해야 하는 단점이 있었으나 최근 들어 운전원에 접촉하지 않고 계측할 수 있는 장비들이 개발되고 있으며 많은 후속연구들이 감시/감독 위주의 직무에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주고 있다 (Drøivoldsmo et al., 1998; Wickens & Hollands, 2000; Ha & Seong, 2006). 이에 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 주관적 평가척도인 NASA-TLX를 주평가척도로 사용하고 안구동작 계측에 기반한 연속평가척도를 보조평가척도로 사용한다.

3.4.1 주평가척도: NASA-TLX

주관적 평가척도는 참가자의 내적 경험의 척도가 될 수 있고, 이는 많은 산업 분야에서 인간의 정신적인 작업부하를 효과적으로 나타내는 것으로 널리 알려져 있다. 특히 NASA-TLX는 가장 널리 사용되고 있는 주관적 평가기법으로 실제 항공기 및 시뮬레이터를 이용한 항공기 운행 (Shively et al., 1987; Nataupsky & Abbott, 1987; Battiste & Bortolussi, 1988; Tsang & Johnson, 1989), 전투기에 의한 고공 전투(Hill et al., 1988; Bittner et al., 1989), 원격 제어차량 운전(Byers et al., 1988), 시뮬레이터를 이용한 원전 운전(Drøivoldsmo et al., 1998; Sebok, 2000; Braarud, 2000; Braarud & Brendryen, 2001; 변승남과 최성남, 2002; 조성제 등, 2003) 등의 다양한 다중직무(multitask) 환경에서 성공적으로 활용되어 왔다. 미국 NRC에서도 인지적 작업부하의 평가를 위해 NASA-TLX 사용을 권고하고 있다(Plott et al., 2004). 게다가 APR-1400에 대한 선행연구가 수행된 바 있기 때문에 해당연구를 참조기준으로 활용할 수 있다는 장점이 있다(변승남과 최성남, 2002; 조성제 등, 2003). NASA-TLX는 다음과 같은 6개의 주관적 평가항목으로 이루어져 있다: 정신적 요구(mental demand), 육체적 요구(physical demand), 시간적 요구(temporal demand), 수행도(performance), 노력(effort), 그리고 좌절수준(frustration level) (S. G. Hart, 1988). NASA-TLX에서 고려되는 상기항목들은 KSAX에서와 마찬가지로 평가하고자 하는 신형원전의 작업부하 정도를 이미 인허가를 받은 기존원전의 작업부하 정도와 비교하여 평가하도록 하였다. 운전원은 실험 주관자가 미리 선정한 점수 척도(7점, 10점, 100점, 임의선정)에 따라 평가하며 각각의 질문에 대한 평가사유를 기재하여 원인을 분석하는 데이터로 활용한다. 앞서 언급된 선행연구가 7점 척도로 평가되었으므로 7점 척도를 사용할 것이 권고된다. 신형원전의 작업부하 정도가 기존원전보다 더 높은 것으로 평가되면 작업부하는 실패로 평가한다.

3.4.2 보조평가척도: 안구동작 측정에 기반한 연속평가척도

상황인식 평가의 KSAX처럼 NASA-TLX도 실험평가 시나리오가 종료된 후에 설문을 기반으로 주관적으로 평가되기 때문에 객관성 확보라는 점과 시나리오 동안의 연속적인 상태를 평가할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 안구추적(eye-tracking)에 기반한 연속평가척도를 개발하였다. 본 연구에서는 안구 깜박임 빈도 및 지속시간과 같은 안구 깜박임(eye-blink) 관련 척도와 특정영역에 대한 안구응시의 횟수 및 지속시간 등과 같은 안구응시(eye-fixation) 관련 척도를 정신적 작업부하를 나타내는 보조평가척도로 사용한다. 안구의 깜빡임은 전체 또는 일부의 안구가 감겼음을 의미한다. 안구를 감고 있는 동안에는 시각적 정보의 입수가 불가능하므로 높은 수준의 시각적 주의가 필요할 때에는 깜박임 빈도 및 지속시간이 감소한다 (Bauer et al., 1987; Veltman & Gaillard, 1996). 다양한 실험연구를 통해 일반적으로 안구 깜박임과 지속시간은 인지적 작업부하가 증가함에 따라 감소함이 알려져 있다(Van Orden et al,. 2000; Veltman & Gaillard, 1998, Zeghal et al., 2002; Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006). 일부 높은 수준의 각성(arousal)이나 주의(attention)가 요구될 때 눈

깜박임 빈도가 증가한다는 연구가 있으나(Stern et al,. 1984; Tanaka & Yamaoka, 1993) 이는 본 연구와 같은 원전 주제어실의 운전원의 직무가 상태의 감시 및 감지, 상황이해 및 진단, 의사결정, 대응계획 및 실행 등과 같은 일련의 인지적인 과정임을 비추어 볼 때 집중 또는 주목을 해야 하는 시점을 나타내는 단서(clue)로 활용할 수 있다. 안구응시 관련 척도는 운전원의 인지적 작업부하를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있다는 사실이 알려져 있다(Goldberg & Kotval, 1998). 안구응시 측정은 관심영역에 대한 응시횟수와 응시 지속시간으로 구성된다. 안구응시의 횟수가 많을수록 보다 많은 정보처리가 필요함을 의미하고 지속시간이 길수록 대상에 대한 이해에 보다 많은 시간을 소비함을 의미한다. 다시 말하면 정신적인 작업부하가 높을수록 응시횟수와 지속시간이 증가한다. 이러한 안구응시 관련 척도들은 인지적 작업부하에 민감한 것으로 보고된 바 있다(Goldberg & Kotval, 1998; Lin et al., 2003). 특히 응시시간은 시각자원에서 요구되는 자원의 양을 나타내는 지표로 활용될 수 있다(Wickens & Hollands, 2000). Bellenkes et al.(1997)은 실험연구를 통해 가장 많은 정보를 제공하는 비행 계기에서의 응시시간이 가장 길었으며 숙련자보다 초보자의 응시시간이 더 길다는 것을 발견하였다. 본 저자의 실험연구에서도 원전에서 진단 업무 시 숙련자보다 초보자가 단일 기기를 더 오래 응시하는 패턴을 보임을 확인하였다(Ha & Seong, 2005). 또한 응시는 다중요소 디스플레이 환경 내에서 작업부하의 출처에 대한 진단적 지표가 될 수 있다(Wickens & Hollands, 2000). 작업에 중요한 기기에는 보다 빈번한 그리고 오랜 시간의 응시가 관찰되는데(Ha & Seong, 2005) 이는 상대적으로 다른 기기에 사용할 시간이 부족하게 되므로 다른 기기를 사용하는 과제에서의 수행을 저하시키는 요인이 된다. 그러므로 안구응시의 측정은 자원 할당의 전략적 측면을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 본 저자는 원전 시뮬레이터를 이용한 실험연구를 통해 진단 업무 시의 인지적 작업부하를 인지적 정보처리량, MCH, NASA-TLX, 안구동작 데이터를 이용하여 평가하였으며 이들의 상관관계를 분석하였다(Ha & Seong, 2006). 그 결과 안구동작 관련 척도들이 다른 척도들과 통계적으로 매우 유의함을 확인하였으며 주관적 척도를 보완할 수 있는 매우 효과적인 측정 수단임을 확인하였다.

3.5 팀 협업도

원전은 여러 운전원들로 구성된 운전조의 협업에 의해 운전된다. 운전조를 구성하는 각각의 운전원은 개별적으로 수행해야 할 직무가 있으며 또한 협업이 필요한 직무는 운전원들에게 적절히 할당되어 유기적으로 수행되어야 한다. 따라서 개별적인 직무 못지않게 팀 협업도의 평가도 매우 중요하다. 신형원전에서의 주제어실은 기존원전의 주제어실보다 운전원들이 더 가까이 위치하도록 설계되었으며 대형정보 표시반의 정보를 공유함으로 인해 팀 협업도는 향상될 것으로 기대된다(Roth et al., 1993; 1998). 이러한 팀 협업도의 평가를 위해서는 행위기반 팀워크 평가척도(Behaviorally Anchored Rating Scale: BARS)를 사용한다(Sebok, 2000; 조성제 등, 2003). BARS에서는 팀의 임무 집중도 및 단체 의사결정의 효율, 의견조율, 의사소통의 효율, 개방성, 팀 융화 등의 다섯 가지 세부항목을 평가한다. 평가자는 실험평가 시나리오를 수행하는 동안 운전행위들을 관찰하여 상기 평가항목들에 대해서 특이사항(anchors 또는 critical behaviors)을 관찰하여 기록한다. 시나리오가 종료되면 관찰된 특이사항에 근거하여 7점 척도로 평가한다. 평가자(운전전문가 또는 인간공학자)는 운전경험 및 평가경험에 비추어 안전한 운전을 위한 평균점 이상인지를 평가한다(평균점 이상이면 성공). 팀 협업도는 각 운전원들의 컨디션이나 감정상태 또는 개개인의 성향에 따라 좌우되기 쉬우므로 팀 협업도 평가를 통해 성공/실패를 판단하는데 초점을 맞추기 보다는 팀 협업에 지장을 주는 요소를 파악하는데 주안점을 두어야 한다.

3.6 인체측정/생리학적 요소

인체측정/생리학적 요소의 많은 부분은 설계초기단계에 인간공학 체크리스트를 통해 평가된다. 원전 주제어실 설계 검증은 설계에 대한 feed back단계로서 이 단계에서의 초점은 실제 운전환경에서만이 관찰 가능한 예상치 못한 인체측정/생리학적 설계오류가 존재하는지를 확인하는데 있다(O'Hara et al., 1997). 예를 들면, 운전원이 여러 제어장치나 디스플레이장치, 워크스테이션, 또는 콘솔 등을 통합된 환경 하에서 효과적으로 다룰 수 있는 지에 대한 실질적인 확인에 초점을 맞추어야 한다. 따라서, 설계초기단계에 확인된 인체측정/생리학적 사항들을 검토하고 실제 검증시험 동안에 예기치 못한 인체측정/생리학적 오류 또는 특이사항이 발생하는지 관찰하여 평가한다.

4. 토의사항: 효과적인 인적수행도 평가방안

본 연구에서는 신형원전 주제어실에서의 인간공학적 설계 검증을 위한 인적수행도 평가 방법론을 개발하였다. 6가지 인적수행도 평가요소에 대한 평가기법들은 설계 검증을 위

한 다각적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단되며 이에 더하여 여러 척도들이 서로 연계되어 종합적으로 분석될 때 보다 양질의 정보를 제공할 수 있으리라 판단된다. 이들이 종합적으로 분석되기 위해서는 우선 운전원 직무, 팀 협업도 특이사항, 인체측정/생리학적 요소의 실시간 평가 시(실험평가 시나리오를 수행하는 동안의 관찰평가) 관찰된 시간이 기록되어야 한다. 이는 전산화된 시스템을 구축함으로써 쉽게 구현할 수 있다. 전산화된 시스템은 원전을 모사한 동적 모사설비(dynamic mock-up)에 연계되어 원전 시스템의 상태관련 변수나 운전원의 시스템 제어행위 같은 로깅 정보를 취득할 수 있다. 이러한 로깅 데이터를 이용하여 시스템이 목적에 맞게 잘 운전되고 있는지 시스템의 상태변수(또는 파라메터)를 관찰함으로써 파악할 수 있다. 원전이 운전허용 범위 내에서 운전되더라도 인간공학적 설계오류는 운전원으로 하여금 불필요한 공정을 요구하거나 적절치 못한 방식의 운전을 요구할 수 있다. 따라서 시스템의 상태와 함께 운전원의 직무수행을 분석함으로써 이를 보완할 수 있으며 이러한 분석은 운전원의 행위에 대한 진단적인 정보를 제공할 수 있다. 즉 분석자는 특정시점의 운전원 행위를 시스템의 상태와 함께 분석함으로써 해당 행위의 원인에 대한 정보를 취득할 수 있다. 또한 일련의 운전원 직무수행 시 중요한 직무를 선별할 수 있다면 그 만큼 중요한 시점에 집중할 수 있다. 본 연구에서는 운전원의 직무가 목표(goal) 지향적인 절차서 기반임을 감안하여 운전 목표와 그에 따른 세부 직무로 체계적으로 분석하며 주목표, 하위 목표, 세부 직무의 중요도를 평가한다. 이 중요도 평가 값은 운전원 "직무수행도의 점수화" 뿐만 아니라 다양한 인적수행도 자료들을 분석할 때 중요시점을 구분해주는 정량적인 척도로 활용할 수 있다. 특히 이러한 정보는 운전원의 인지적인 상태를 평가하는 상황인식이나 작업부하 평가에 유용하게 활용할 수 있다. 원전 주제어실에서의 운전원의 직무가 일련의 인지적 처리 과정들과 비인지적인 행위들로 구성되기 때문에 직무수행 동안 운전원의 인지적 상태는 해당되는 세부 직무들의 인지적 특성에 따라 변동되기 쉽다. 따라서 세부 직무들의 인지적 특성을 고려하면서 생리적인 척도를 이용하여 상황인식이나 작업부하를 분석한다면 인지적 자원이 많이 소요되는 시점과 그렇지 않은 시점을 분리할 수 있어 시간 분해능과 민감도의 향상을 기대할 수 있다. 또한 중요 시점에 집중할 수 있어 효과적인 분석이 가능하다. 운전원의 세부 직무수행 이력은 주관적 설문평가에도 활용될 수 있는데 안구동작 데이터, 시청각 데이터와 함께 활용하여 주관적 평가 시 각각의 질문에 대한 평가사유와 비교 검토하여 보다 양질의 진단적인 정보를 제공할 수 있다. 실시간 관찰평가는 팀 협업도와 인체측정/생리학적 요소의 분석도 운전원들의 세부 직무수행의 연계선상에서 분석할 수 있도록 하여 보다 진단적인 정보의 제공을 가능케 한다. 운전원들의 일련의 직무수행 과정에서 팀 협업을 위해 할당되는 자원을 분석함으로써 개별 직무와 팀 협업을 위한 자원할당의 전략적인 측면을 평가할 수 있으며 인체측정/생리학적 요소의 설계결함이 어떠한 일련의 과정에서 발생하는지 파악하여 그 원인을 규명하는데 도움을 줄 수 있다. 시청각 녹화 데이터는 평가자가 실험평가 시 관찰하지 못한 시간/공간적 정보를 제공할 수 있기 때문에 역시 실시간 관찰평가 데이터와 연동되어 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다. 본 저자는 본 연구에서 개발된 평가 방법론과 기술된 효과적인 인적수행도 평가방안에 근거하여 다중의 척도들을 편리하고 효과적으로 평가하고 종합적으로 분석할 수 있는 전산화 지원도구를 개발 중에 있다. 이 시스템을 간략히 소개하면 신형원전 주제어실의 설계 적합성을 검증하기 위한 인적수행도 평가 지원 시스템(HUPESS: HUman Performance Evaluation Support System)으로 다음과 같은 특징을 갖는다:

- 신형원전 첨단 주제어실에서의 설계적합성 검증을 위한 현장에 적용되는(field-applied) 최초의 인적수행도 통합 평가 시스템
- 인적수행도 평가척도는 규제 가이드 라인에 준해서 개발(NUREG-0711, 6393)
- 주평가척도는 가장 널리 사용되어 그 유용성이 경험적으로 입증된 척도를 사용
- 현장에 적용 가능한 최신기술을 활용하여 보조평가척도 개발, 주평가척도의 한계점을 보완
- 측정에서 분석까지의 일괄처리(once-through) 시스템(통계분석 포함)
- 편리한 보고서 작성기능 지원(MS 워드)

HUPESS를 이용한 평가는 그림 4와 같이 신형원전 주제어실을 모사한 동적 모사설비와 연계되어 수행된다. HUPESS는 실험 시나리오가 수행되는 동안 동적 모사설비

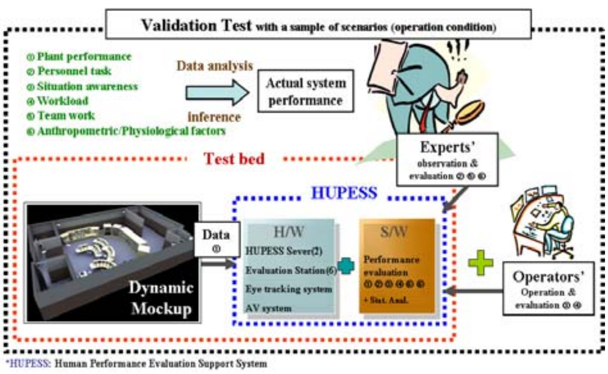

그림 4. HUPESS: 인적수행도 평가

로부터 원전 상태관련 변수와 로깅 정보를 취득/처리하고 안구추적 시스템(eye-tracking system)으로부터 안구동작 데이터를 취득/처리한다. 운전원은 실험 시나리오 수행 중에는 원전 시스템을 운전하고 시나리오가 종료된 후에는 상황인식과 작업부하의 주관적 평가를 위해 KSAX와 NASA-TLX 설문평가를 수행한다. 평가자(운전전문가와 인간공학이자)는 실험 시나리오 수행 중에는 운전행위를 관찰하여 운전원 직무, 팀 협업도 특이사항, 인체측정/생리학적 요소를 평가하고 시나리오가 종료된 후에는 관찰된 팀 협업도 특이사항을 참고하여 BARS 설문평가를 수행한다. 이렇게 측정된 인적수행도 데이터들은 시계열로 처리되어 종합적으로 분석된다. HUPESS는 다수의 전문가(운전전문가 및 인간공학 전문가)의 검토를 받아 신형원전 주제어실 인간공학적 설계 적합성 평가에 유용하게 활용될 수 있도록 설계되었으며 신형원전(APR-1400)인 신고리 3, 4호기의 주제어실 인간공학적 설계 검증 시 활용될 예정이다.

5. 결 론

신형원전 주제어실의 인간공학적 설계 검증은 인적수행도 기반의 실험평가를 통해서 수행된다. 본 연구에서는 이러한 인적수행도 평가를 위한 원전성능, 운전원 직무, 상황인식, 작업부하, 팀 협업도, 인체측정/생리학적 요소 등의 평가요소를 선정하고 평가요소 별로 평가척도를 개발하였다. 변화된 주제어실 환경, 현실적이고 경제적인 인적수행도 평가, 평가기준의 적절성, 평가행위의 인적수행도 비 침투성을 고려하여 평가척도들을 개발하였다. 선행연구를 참조하여 그 유용성이 경험적으로 입증된 기법들을 주평가척도로 활용하였으며 보조평가척도는 주평가척도의 한계점을 보완할 수 있도록 개발하였다. 효과적인 인적수행도 평가/분석을 위해 평가척도들이 연계된 종합적인 인적수행도 평가/분석 방안을 강구하였으며 이에 근거하여 전산화된 인적수행도 평가 지원 시스템(HUPESS)을 개발 중에 있다. HUPESS는 다수의 전문가 검토를 받아 신형원전 주제어실 인간공학적 설계 적합성 평가에 유용하게 활용될 수 있도록 설계되었으며 향후 신고리 3, 4호기의 설계 검증을 위한 효과적인 tool로서 활용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위해 아낌없는 조언과 격려를 해주신 운전전문가 이중근 박사님(G&P 시스템(주))과 인간공학 전문가 변승남 교수님(경희대학교), 박재희 교수님(한경대학교), 최성남 박사님(한국원자력안전기술원)께 깊은 감사의 말씀을 전합니다.

참고 문헌

변승남, 최성남, 차세대 원자력발전소 첨단제어설비에 의한 운전원의 정신적 작업부하 평가, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 28(2), pp. 178-186, 2002.

심봉식 등, 인간공학 실험평가기술 개발, 한국원자력연구소, *KAERI/RR-1693/96*, 1996.

이동하, 이현철, 상황인식에 대한 측정 및 차세대 원자로 운전원 성능평가에서의 활용방법에 관한 이론 연구, *IE Interfaces*, Vol. 13, No. 4, pp. 751-758, 2000.

조성제 등, 신형경수로 APR1400 소프트제어기 및 안전제어반의 설계 적합성 평가, KHNP, *TR. A02NS04.S2003.EN8*, 2003.

하준수, 성풍현, "EEG Analysis during complex diagnostic tasks in Nuclear Power Plants: Simulator - based Experimental Study", *한국 원자력 학회 추계 학술대회*, 부산, Vol. 2, 2005.

최영상 등, 차세대원자로 기술개발 (III), 전력연구원, *TR.99NJ13.-J2001.613*, 2001.

Andresen, G. and Drøivoldsmo, A., Human Performance Assessment: Methods and Measures, *HPR-353*, OECD Halden Reactor Project, 2000.

Battiste, V. and Bortolussi, M., "Transport Pilot Workload: A Comparison of Two Subjective Techniques", *Proceedings of the Human Factors Society 32th Annual Meeting*, 150-154, Santa Monica, CA. 1988.

Bauer, L. O., et al., Effects of Information-processing Demands on Physiological Response Patterns. *Human Factors*, Vol. 29, pp. 219-234, 1987.

Boer, L. C. and Veltman, J. A., "From Workload Assessment to System Improvement", *NATO Workshop on Technologies in Human Engineering Testing and Evaluation*, Brussels, 1997.

Braarud, P. Ø., Subjective Task Complexity in Control Room, *HWR-621*, OECD Halden Reactor Project, 2000.

Braarud, P. Ø. and Brendryen, H., Task Demand, Task Management, and Teamwork, *HWR-657*, OECD Halden Reactor Project, 2001.

Brookhuis, K. A. and Waard, D. D., The Use of Psychophysiology to Assess Driver Status, *Ergonomics*, 36, 1099-1110, 1993.

Brookings, J., Wilson, G. F. and Swain, C. R., Psycho physiological Responses to Changes in Workload during Simulated Air Traffic Control, *Biological Psychology*, 42, 361-377, 1996.

Byers, J. C., Bittner, A. V., Hill, S. G., Zaklad, A. L. and Christ, R. E., "Workload Assessment of a Remotely Piloted Vehicle(RPV) System", *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, 1145-1149, Santa Monica, CA. 1988.

Drøivoldsmo, A., et al., Continuous Measure of Situation Awareness and Workload, *HWR-539*, OECD Halden Reactor Project, 1998.

Endsley, M. R., "Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement", *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, 97-101, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, 1988a.

Endsley, M. R., "Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)", *Proceedings of the National Aero space and Electronics Conference*, 789-795, New York, IEEE, 1988b.

Endsley, M. R., A Methodology for the Objective Measurement of Situation Awareness, In *Situational Awareness in Aerospace Operations* (AGARD-CP-478; pp. 1/1-1/9), Neuilly-Sur-Seine, France: NATO-AGARD, 1990.

Endsley, M. R., Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems, *Human Factors*, 37(1), 65-85, 1995a.

Endsley, M. R., The Out-of-the-loop Performance Problem and Level of Control in Automation, *Human Factors*, 37(2), 381-394, 1995b.

Endsley, M. R., Situation Awareness Measurement in Test and Evaluation, In O'Brien, T. G. and Charlton, S. G. (Eds.), *Handbook of Human Factors Testing and Evaluation*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1996.

Endsley, M. R., Direct Measurement of Situation Awareness: Validity and Use of SAGAT, In M. R. Endsley and D. J. Garland (Eds), *Situation Awareness Analysis and Measurement*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.

Fitzgibbon, S. P., Popec, K. J., Mackenzie, L., Clark, C. R. and Willoughby, J. O., Cognitive Tasks Augment Gamma EEG Power, *Clinical Neurophysiology*, 115, 1804-1807, 2004.

Fracker, M. L., "A Theory of Situation Awareness: Implications for Measuring Situation Awareness", *Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting*, 102-106, Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, 1988.

Goldberg, J. H. and Kotval, X. P., Eye Movement-based Evaluation of the Computer Interface, In S. K. Kumar (Eds.), *Advances in Occupational Ergonomics and Safety.* IOS Press: Amsterdam, 1998.

Ha, C. H. and Seong, P. H., Investigation on Relationship between Information Flow Rate and Mental Workload of Accident Diagnosis Tasks in NPPs, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, (In press), 2006.

Ha, J. S. and Seong, P. H., "An Experimental Study: EEG Analysis with Eye Fixation Data during Complex Diagnostic Tasks in Nuclear Power Plants", *Proceedings of International Symposium On the Future I&C for NPPs (ISOFIC)* 2005.

Hart, S. G. and Staveland, L. E., Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock, & N. Meshkati, (Eds.), *Human Mental Workload*, Amsterdam: North-Holland, 1988.

Hill, S. G., Byers, J. C., Zaklad, A. L. and Christ, R. E., "Workload Assessment of a Mobile Air Defenses System", *Proceedings of the Human Factors Society Thirty-Second Annual Meeting*, 1068-1072, Santa Monica, CA, 1988.

Hill, S. G., Iavecchia, H. P., Byers, J. C., Bittier, A. C., Zaklad, A. L. and Christ, R. E., Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales, *Human Factors*, 34, 429-440, 1992.

Hogg, D. N., et al., Development of a Situation Awareness Measure to Evaluate Advanced Alarm Systems in Nuclear Power Plant Control Rooms, *Ergonomics*, Vol. 38, No. 11, pp. 2394-2413, 1995.

Kim, M. C. and Seong, P. H., A Computational Model for Knowledge-driven Monitoring of Nuclear Power Plant Operators based on Information Theory, *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 283-291, 2006.

Kramer, A. F. and Weber, T., Application of Psychophysiology to Human Factors, In Cacioppo, J. T., et al. (Eds), *Handbook of Psychophysiology*, Cambridge University Press, 794-814, 2000.

Lin, Y., Zhang, W. J. and Watson, L. G., Using Eye Movement Parameters for Evaluating Human-Machine Interface Frameworks under Normal Control Operation and Fault Detection Situations, *International Journal of Human Computer Studies*, 59, 837-873, 2003.

Moracho, M., Plant Performance Assessment System(PPAS) for Crew Performance Evaluations. Lessons Learned from an Alarm Study Conducted in HAMMLAB, *HWR-504*, OECD Halden Reactor Project, 1998.

Moray, N. and Rotenberg, I., Fault Management in Process Control: Eye Movements and Action, *Ergonomics*, 32(11), 1319-1342, 1989.

Nataupsky, M. and Abbott, T. S., "Comparison of Workload Measures on Computer-generated Primary Flight Displays", *Proceedings of the Human Factors Society 31st Annual Meeting*, 548-552, Santa Monica, CA, 1987.

Nisbett, R. E. and Wilson, T. D., Telling More Than We Can Know: Verbal Reports on Mental Process, *Psychological Review*, 84, 231-295, 1997.

Norman, D. A. and Bobrow, D. G., On Data-limited and Resource-limited process, *Cognitive Psychology*, 7, 44-64, 1975.

O'Hara, J. M., et al., Integrated System Validation: Methodology and Review Criteria, *NUREG/CR-6393*, 1997.

O'Hara, J. M., et al., Human Factors Engineering Program Review Model, *NUREG-0711*, Rev.2, 2004.

O'Hara, J. M., Higgins, J. C., Stubler, W. F. and Kramer, J., Computer-based Procedure Systems: Technical Basis and Human Factors Review Guidance, *NUREG/CR-6634*, U. S. NRC, 2002.

O'Donnell, R. D. and Eggemeier, F. T., Workload Assessment Methodology. In Boff, K. R., Kaufman, L. & Thomas, J.(Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance: Vol. II. Cognitive Processes and Performance*, John Wiley & Sons, 1986.

Pew, R. W., The State of Situation Awareness Measurement: Heading Toward the Next Century, In Endsley, M. R. and Garland, D. J.(Eds), *Situation Awareness Analysis and Measurement*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.

Plott, C., Engh, T. and Bames, V., Technical Basis for Regulatory Guidance for Assessing Exemption Requests from the Nuclear Power Plant Licensed Operator Staffing Requirements Specified in 10 CFR 50.54, *NUREG/CR-6838*, US NRC, 2004.

Rau, R., Psychophysiological Assessment of Human Reliability in a Simulated Complex System, *Biological Psychology*, 42, 287-300, 1996.

Roth, E. M., et al., "Human Factors Evaluation Issues for Advanced Control Rooms: A Research Agenda", *IEEE Conference Proceedings*, 254 -265, 1993.

Roth, E. M., et al., "Supporting Situation Awareness of Individuals and Teams using Group View Display", *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 42nd Annual Meeting*, 244-248, 1998.

Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.

Sarter, N. B. and Woods, D. D., Situation Awareness: A Critical but Illdefined Phenomenon, *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 45-57, 1991.

Sebok, A., Team Performance in Process Control: Influences of Interface Design and Staffing, *Ergonomics*, 43(8), 1210-1236, 2000.

Shively, R., Battiste, V., Matsumoto, J., Pepiton, D., Bortolussi, M. and Hart, S., "In Flight Evaluation of Pilot Workload Measures for Rotorcraft Research", *Proceedings of the Fourth Symposium on Aviation Psychology*, 637-643, Columbus, OH, 1987.

Skraning, G. jr., The Operator Performance Assessment System(OPAS), *HWR-538*, OECD Halden Reactor Project, 1998.

Stern, J. A., Blink Rate: A Possible Measure of Fatigue, *Human Factors*, 36, 285-297, 1994.

Stern, J. A., Walrath, L. C. and Golodstein, R., The Endogenous Eyeblink, *Psychophysiology*, 21, 22-23, 1984.

Stubler, W. F., O'Hara, J. M., Higgins, J. C. and Kramer, J., Human System Interface and Plant Modernization Process: Technical Basis and Human Factors Review Guidance, *NUREG/CR-6637*, U. S. NRC, 2000.

Tanaka, Y. and Yamaoka, K., Blink Activity and Task Difficulty, *Perceptual Motor Skills*, 77, 55-66, 1993.

Taylor, R. M., Situational Awareness Rating Technique(SART): The Development of a Tool for Aircrew Systems Design, In *Situational Awareness in Aerospace Operations*(AGARD-CP-478; pp. 3/1-3/17), Neuilly-Sur-Seine, France: NATO-AGARD, 1990.

Tsang, P. S. and Johnson, W. W., Cognitive Demand in Automation, *Aviation, Space, and Experimental Medicine*, 60, 130-135, 1989.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Basis and Implementation Guidelines for a Technique for Human Event Analysis(ATHEANA), *NUREG-1624*, Rev.1, 1999.

Underwood, G. and Everatt, J., The Role of Eye Movements in Reading: Some Limitations of the Eye-mind Assumption, In Chekaluk, E. and Lewellyn, K. R.(Eds,), *The Role of Eye Movements in Perceptual Process*, Elsevier Science Publishers B. V., Advances in Psychology. Amsterdam, 88, 111-169, 1992.

Veltman, J. A. and Gaillard, A. W. K., Physiological Indices of Workload in a Simulated Flight Task, *Biological Psychology*, 42, 323-342, 1996.

Vidulich, M. A. and Hughes, E. R., "Testing a Subjective Metric of Situation Awareness", *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, 1991.

Wickens, C. D. and Hollands, J. G., *Engineering Psychology and Human Performance*, 3rd Edition, New Jersey, Prentice Hall, 2000.

Williges, R. and Wierwille, W. W., Behavioral Measures of Aircrew Mental Workload, *Human Factors*, 21, 549-574.

Wilson, G. F., Strategies for Psychophysiological Assessment of Situation Awareness, In Endsley, M. R. and Garland, D. J.(Eds), *Situation Awareness Analysis and Measurement*, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 하 준 수 ❖ junsu12345@kaist.ac.kr
한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 석사
현 재: 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 박사과정
관심분야: 인적수행도, 확률론적 안전성 분석(PSA)

❖ 성 풍 현 ❖ phseong@kaist.ac.kr
MIT 원자력공학과 박사
현 재: 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 교수
관심분야: 원자력 계측제어, 인지공학, 신뢰도/안전성 분석

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2006년 03월 06일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2006년 07월 10일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2006년 07월 25일