

원자력발전소 운전작업에 영향을 미치는 작업수행도형성요인과 영향구조 파악

(Performance Shaping Factors and their effect on Nuclear Power Plant Operation)

박재희, 김철중

한국표준과학연구원 인간공학연구실

이용희, 서상문, 천세우, 이정운

한국원자력연구소 인간공학연구실

ABSTRACT

The operator's performance of nuclear power plants is affected by many performance shaping factors(PSF). The objective of this study is to find out the PSFs and their effect on the nuclear power plant operations. We extracted PSFs in five category, and identified the relationships between PSFs and performance using the four survey methods; literature survey, case study, video task analysis and questionnaire survey. Finally the knowledge on PSFs and their effect was represented as rule form for cognitive simulation.

I. 서론

원자력발전소 운전작업은 인지적으로 복잡하며, 정신적으로 스트레스를 많이 받는 작업 가운데 하나이다. 더우기 인간오류에 의한 사고 가능성성이 크고, 사고 발생시 그 피해가 크기 때문에 사전에 운전원의 작업특성을 이해하고 이를 개선해나가는 일은 매우 중요하다[Moray 88].

근래들어 인간의 인지과정을 모형화해 시뮬레이션(simulation)하는 많은 소프트웨어들이 개발되고 있다. 원자력 분야에 응용되는 시뮬레이션 소프트웨어들은 HOS, INTEROPS, CES, COSIMO 등이 있다[이용희 93]. 이것들은 주로 인공지능(AI; Artificial Intelligence) 기법을 주로 사용하고 있다. 한국원자력연구소도 원자력발전소 운전원 인지작업의 모형화와 시뮬레이션이 가능한 시스템을 개발하고 있다[이정운 94, 박영택 94]. 그 시스템에서는 어떠한 사고 시나리오를 입력으로 주었을 때, 운전원들이 어떻게 상황을 판단하고 대처해나가는지를 출력으로 보여주려 한다. 만일 운전원이 완벽하다면 어떠한 상황이라도 실수 없이 운전을 수행할 수 있을 것이다. 그러나 실제로 운전원들은 외부의 물리적 요인이나 운전원 자체의 내부적 요인에 의해 오류를 범하거나 작업수행도의 저하를 겪게 된다. 이렇게 운전원의 정상적 작업수행을 저하시키는 모든 요인들을 작업수행도형성요인(PSF; Performance Shaping Factor)이라 한다[Swain 83].

본 연구의 목적은 원자력발전소 운전원의 운전작업 수행을 저하시키는 모든 PSF를 찾아낸 후, 이것들이 작업수행에 어떠한 구조로, 어느 정도 영향을 미치는가를 조사, 정리하는데 있다[김철중 94]. 본 연구 결과는 한국원자력연구소에서 개발 중인 운전원인지도형 시뮬레이션 소프트웨어의 하부모듈(sub module)로 사용될 것이다.

원자력발전소 운전작업에 관계되는 PSF와 그 영향정도를 파악하기 위해서는 중앙조정실(MCR; Main Control Room)과 동일한 시뮬레이터를 이용한 실험이 효과적일 것이다. 그러나 이를 위해서는 장기간의 연구기간과 많은 비용이 소요되므로, 본 연구는 주로 문헌조사, 사례연구, 비데오 작업분석, 설문조사, 등의 방법을 이용하였다. 연구의 대상이 되는 운전작업으로는 냉각수 유출사고(LOCA; Loss of Coolant Accident)와 증기발생기튜브파열사고(SGTR; Steam Generator Tube Rupture) 시의 비상운전을 선정하여, 연구의 초점을 두었다.

II. PSF와 영향구조 조사방법

PSF 와 그 영향구조를 파악하기 위해 본 연구는 일반적 문헌조사, 사례조사, 운전작업 비데오분석, 그리고 설문조사 방법등을 병행해 사용하였다. 설문조사는 운전작업 전반에 관한 PSF를 추출하는데 효과적이었다. 일반적 문헌조사는 소음, 조명 등과 같이 어느 분야에나 비슷하게 적용될 PSF를 추출하는데, 사례조사와 운전 작업 비데오 분석은 작업이나 장비와 관련된 PSF를 추출하는데 효과적이었다. 네가지 방법에 대한 간단한 소개는 아래와 같다.

2.1. 일반적 문헌조사

인간공학분야의 많은 실험적 연구 결과들이 사실은 PSF(independent variables : X) 와 그것이 운전작업수행도(dependent variable: Y)에 미치는 영향($Y=f(X)$)을 알아내기 위한 것들이라 할 수 있다. 따라서 일반적 문헌조사는 가장 쉬운 방법이며, 이미 Boff 가 편집한 'Engineering data compendium; human perception and performance' 등과 같은 자료집에 잘 정리 되어 있기도 하다[Boff 88]. 그러나 실험조건이 다양한 이러한 연구결과들을 원자력분야에 그대로 적용할 수 있는지에 대해서는 면밀한 검토가 요구된다. 일반적 문헌조사를 통해 PSF와 그 영향구조를 파악한 일례로 다음과 같은 것이 있다.

익수한 소음을 들으며, 복잡한 작업을 할 때 소리의 강도가 100~140 dB 사이이면 그 작업 수행이 영향을 받게 되고, 140 dB 이상이면 작업자가 고통을 겪게 된다[Echeverria94].

위의 예는 문헌조사를 통해 도표로 정리되어 있는 내용을 문장으로 정리한 것인데, 여기에서 우선 PSF로 소음(noise)과 작업의 종류(task type)을 찾아낼 수 있다. 그리고 소음의 특성을 구체화하는 세부 변수로 소음의 강도(intensity of noise)와 소음의 친숙성(familiarity to noise)을 찾아낼 수 있다.

2.2. 운전작업 사례조사

일반적 문헌조사가 구체성을 띠지 않아 원자력 분야에 그대로 적용하기 힘든 반면, 원자력발전소 운전 시뮬레이터등을 이용한 연구 사례들은, PSF 추출과 영향정도 파악에 더 높은 확신을 가질 수 있다. 그러나 아직까지 원자력발전소 운전 시뮬레이터를 이용한 인간공학적 실험결과들은 많이 축적되어 있지 못하다. 실제 운전시뮬레이터들은 운전원의 교육과 훈련을 위해 주로 사용되고 있다. 운전작업 사례조사를 통해 PSF를 추출하고 그 영향구조를 밝혀낸 예로 다음과 같은 것이 있다. Roth 는 ISLOCA(Interface System Loss of Coolant Accident)사고 모의 실험을 통해 운전자들이 다음과 같은 오류를 범한다는 것을 밝혀내었다.

잔열제거(RHR; Residual Heat Removal)시스템에서 사고가 발생하면 그 증상이 바로 나타나고, 연이어 이는 원자로냉각시스템(RCS; Reactor Coolant System)에도 증상을 일으키게 된다. 그러면 대부분의 운전원들은 중요성이 높은 RCS에만 문제의 초점을 맞추어, RHR의 진짜 원인은 추적을 잘못하는 경향을 보였다[Roth 94].

이 사례 조사를 통하여 운전인지 작업에 관계되는 PSF로, 증상(symptom)들의 발생순서, 증상의 중요성, 비상운전절차서(EOP; Emergency Operation Procedure)의 체계, 운전자의 경험 등을 추출하였다.

2.3. 운전작업 비데오 분석

실제 비상운전 작업을 수행하는 과정을 촬영한 후, 이를 비데오 분석한다면 이를 통해서도 운전작업에 미치는 PSF를 찾아낼 수 있다. 이 방법은 특정작업의 단계별 PSF를 파악할 수는 있으나, 인지적 측면을 자세하게 파악하기는 어렵다는 단점을 가지고 있다. 한국원자력연구소 인간공학연구실에서 촬영한 LOCA, SGTR 두 사고에 대한 비데오 자료 분석에 의하면, 운전조(crew)의 팀장 스타일과 경험에 따라서도 작업수행도가 크게 달라진다는 것을 알 수 있었다.

2.4. 설문조사 및 운전원 면담

원자력발전소 운전원과 전문가 등과의 면담, 설문 조사 등을 통해서도 PSF를 추출할 수 있다. 이 방법은 앞의 세가지 방법을 통해 나온 결과들을 원자력 분야에 적용시키기 위한 보조적 방법으로 쓰일 수 있다. 원자력 발전소 운전원 4 명을 상대로 한 면담과 예비 설문조사 결과, 운전원들은 야근과 정보의 양, 조직 간의 갈등 등에 의해 스트레스를 받거나 작업수행도가 저하된다고 답변하였다. 특히 LOCA에 대해서는 비상운전절차 71단계 별로 받는 스트레스의 정도와 그 원인을 PSF 차원에서 조사하였다(그림 1).

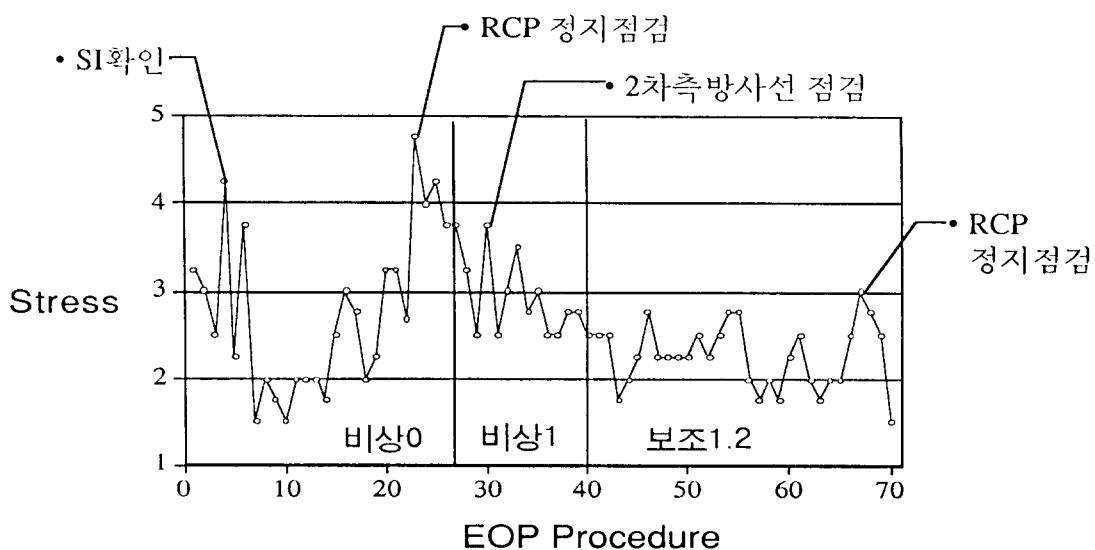


그림 1. 냉각수유출사고(LOCA) 비상운전절차 단계별 스트레스의 변화

III. PSF의 분류와 영향구조

위의 여러가지 방법들을 통해, 본 연구는 원자력발전소 운전작업에 영향을 미치는 PSF를 추출한 후 이를 물리적환경요인, 사회심리적 환경요인, 장비요인, 작업요인, 개인요인 등의 다섯 범주로 분류하였다. 그리고 각각의 PSF는 세부변수를 갖도록 하였다(표 1). 이렇게 정리된 PSF는 세부변수 차원에서 운전작업 수행도에 미치는 영향을 각각 분석, 정리하였다.

이때 운전작업은 편의상 시각작업, 청각작업, 기억능력, 인지작업, 집중능력, 조작작업, 그리고 이들을 포괄하는 일반적 작업 등 7 개 형태로 분류하여 작업수행도를 파악하였다. PSF가 작업수행도에 미치는 영향정도는 작업수행시간(performance time), 정확도(accuracy), 작업자만족도(operator satisfaction) 등을 기본으로 한 후, 통화인지율, 조작시간, 반응시간 등의 다양한 척도로 정리되도록 하였다(그림 2).

일례로서 물리적 환경요인의 하나인 소음이 운전작업 수행도에 미치는 영향은 다음 그림 2와 같이 정리되었다. 본 연구의 결과는 현재 개발 중인 운전작업 시뮬레이션 소프트웨어의 하부구조의 하나로 사용될 예정이기 때문에 영향구조는 IF.....THEN.....의 규칙(rule) 형태로도 표현해주었다.

표1. 원자력 발전소 운전작업에 영향을 미치는 PSF 분류안

PSF 분류	PS F	세 부 변 수
물리적 환경요인	소음	크기, 대역, 주파수, 지속시간, 소음의 형태, 소음원의 수, 발생장소, 내용, 소음과 신호간 거리
	조명	광도, 대비, 칼라대비, 파장, 휘광, 휘광입사각
	온열환경	온도, 습도, 피부온도, 손가락온도, 제어실온도, 풍속
사회심리적 환경요인	인센티브	인센티브종류, 인센티브수준
	조직문제	지도력, 대화채널, 협조관계
장비요인	표시장치	(디스플레이) 형태, 정확도, 해상도, 위치, 중요성, 배열, 수자, 사용칼라의 수, 주변광도 (신호) 강도, 크기, 작업거리, 지속시간, 순서, 불확정성, 시야내 위치, 빈도수
	조작장치	형태, 크기, 조절장치간 거리, 방향, 조절장치의 수, 양립성
	워크스테이션	시거리, 작업범위
작업요인	작업형태	감각기모드, 작업내용, 집중현태, 작업속도 조절, 시분할
	작업부하	(시간부하) 작업반복, 누적작업시간, 작업시간, 휴식시간 (난이도) 입력정보의 양, 입력패턴의 복잡도, 작업흔돈, 작업통미도 (불확실성) 자극집합의 크기, 반응집합의 크기, 불확실성, 전형성, 입력신호, 궤환정보, 결과정보, 시스템 상태 정보
	작업시간대	작업시간대, 교대근무형태
개인요인	고유요인	연령, 성별, 성격, 교육, 훈련, 숙련정도
	심리적요인	스트레스, 불안감, 지루함
	신체생리적요인	피로, 수면부족, 알콜, 의약품

본 연구과제는 현재 진행 중이므로, 앞으로도 계속적인 자료의 수집과 분석을 통해 결과를 보완해 나갈 계획이다. 그래서 최종적으로는 원자력 운전작업 시뮬레이션에 실제 사용될 수 있는 일관된 형태의 PSF 와 영향구조, 그리고 이의 표현을 결과로서 제시할 것이다. 이를 위해 본 연구는 앞으로 LOCA 와 SGTR 두 사고에 초점을 맞춘 분석과, 운전원들과의 면담을 통한 결과물의 검증에 집중할 것이다.

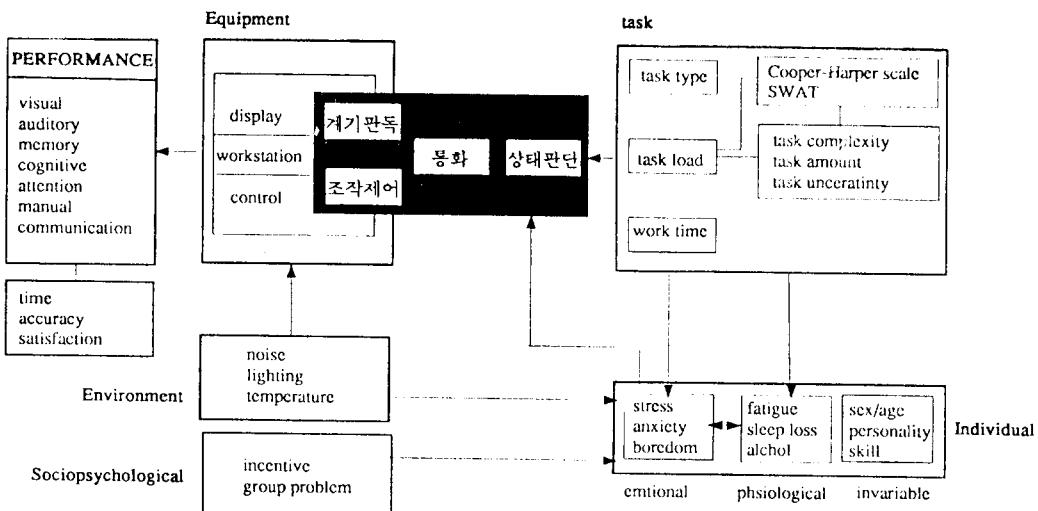


그림 2. PSF와 작업수행도 평가모형의 구조

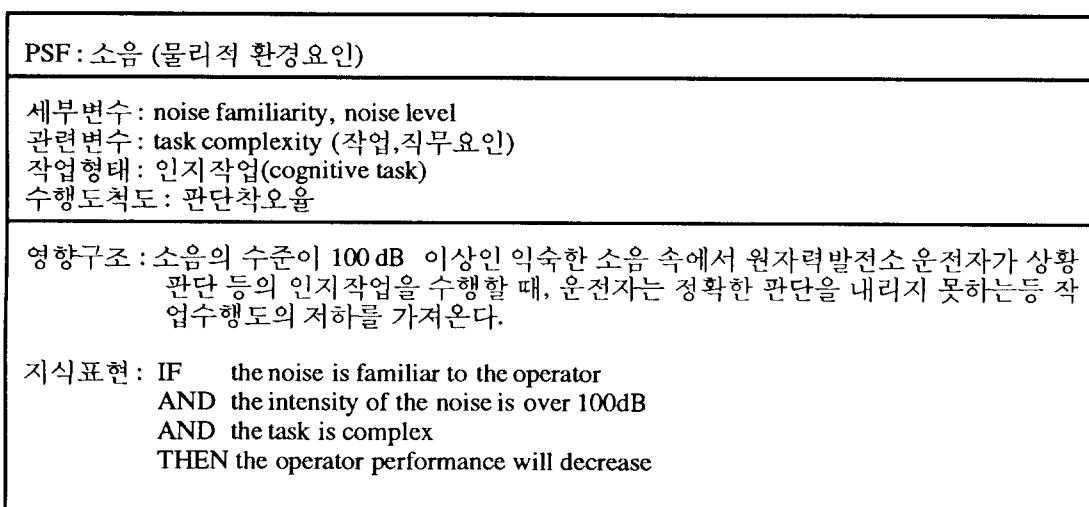


그림 3. PSF 가 작업수행도에 미치는 영향

참고문헌

- [1] Boff, K.R. and Lincoln, J.E.(1988), *Engineering data compendium: human perception and performance*, AAMRL.
- [2] Echeverria, D. et al. (1994), *The impact of environmental conditions on human performance*, NUREG/CR-5680.
- [3] Moray, N.P. and Huey, B.M. (1988), *Human factors research and nuclear safety*, National Academy Press.
- [4] Roth, E.M. et al. (1994), *An empirical investigation of operator performance in cognitively demanding simulated emergencies*, NUREG/CR-6208.
- [5] Swain and Guttman, H.E. (1983), *Databook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications*, NUREG/CR-1278.
- [6] 이용희 외 (1993), 원자력발전소 운전원 인지모형 개발을 위한 관련기술 및 사례 조사분석, KAERI/AR-362/93, 한국원자력연구소.
- [7] 이정운 외 (1994), 인간공학 기술개발: 인적행위 분석기법 개발, KAERI/RR-1339/93, 한국원자력연구소.
- [8] 박영택 외 (1994), 운전원 인지모형을 위한 지식표현기법에 대한 연구, 연구기관: 숭실대학교, 한국원자력연구소.
- [9] 김철중 외 (1994), 운전인지작업에 미치는 스트레스의 영향분석, 연구기관: 한국표준과학연구원, 한국원자력연구소.