

원자력발전소 운전원의 오류모드 예측 Prediction of Plant Operator Error Mode

Hyun-Chul Lee¹⁾, Erik Hollnagel²⁾, and Magnhild Kaarstad²⁾

ABSTRACT

The study of human erroneous actions has traditionally taken place along two different lines of approach. One has been concerned with finding and explaining the causes of erroneous actions, such as studies in the psychology of "error". The other has been concerned with the qualitative and quantitative prediction of possible erroneous actions, exemplified by the field of human reliability analysis (HRA). Another distinction is also that the former approach has been dominated by an academic point of view, hence emphasising theories, models, and experiments, while the latter has been of a more pragmatic nature, hence putting greater emphasis on data and methods.

We have been developing a method to make predictions about error modes. The input to the method is a detailed task description of a set of scenarios for an experiment. This description is then analysed to characterise the nature of the individual task steps, as well as the conditions under which they must be carried out. The task steps are expressed in terms of a predefined set of cognitive activity types. Following that each task step is examined in terms of a systematic classification of possible error modes and the likely error modes are identified. This effectively constitutes a qualitative analysis of the possibilities for erroneous action in a given task. In order to evaluate the accuracy of the predictions, the data from a large scale experiment were analysed. The experiment used the full-scale nuclear power plant simulator in the Halden Man-Machine Systems Laboratory (HAMMLAB) and used six crews of operators from a commercial nuclear power plant as subjects. The data consisted of systematic performance observations by experts using a pre-defined task description, as well as audio and video recordings. The purpose of the analysis was to determine how well the predictions matched the actually observed performance failures. The results indicated a very acceptable rate of accuracy.

The emphasis in this experiment has been to develop a practical method for qualitative performance prediction, i.e., a method that did not require too many resources or specialised human factors knowledge. If such methods are to become practical tools, it is important that they are valid, reliable, and robust.

1 MMIS Laboratory, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

2 MMSR Division, OECD Halden Reactor Project, Norway

1. 개요

인적오류(Human Error)에 대한 연구는 두가지 맥락에서 행해져 왔는데, 하나는 인적오류의 결과로부터 원인을 알아내고자 하는 것이고 또다른 하나는 주어진 상황에서 발생할 수 있는 인적오류를 예측하는 것이다. 전자는 결과데이터를 기반으로 시간적으로 앞서 발생한 현상에 대한 원인을 추정하는 것이며 따라서 지극히 분석적인 접근방법을 사용하게 된다. 이러한 접근방법은 결과에 대한 해석이 기반이 되며 인적오류의 발생원인을 규명하여 차후의 발생을 방지할 수 있도록 피드백을 생산하는 것이다. 그러나 후자는 현재의 상황으로부터 향후의 인적오류 발생을 예측하는 것으로 다소 경험적인 혹은 도구적인 접근방법을 사용한다. 이 접근방법은 주어진 MMIS(Man-Machine Interaction System)의 성능을 예측하게 해주어 MMIS의 설계와 병행해서 적용할 수 있다. 구체적으로는 원자력발전소의 설계시 수행하는 PSA(Probabilistic Safety Assessment)의 HRA(Human Reliability Analysis)에 입력을 주어 전반적인 MMIS의 안전성 및 신뢰도를 측정 가능하도록 해준다. 본 연구에서는 HRA에 입력자료로 활용할 수 있는 원자력발전소 운전원의 인적오류모드의 발생가능성을 예측하는 기법을 제시한다.

예측을 위한 기본자료는 예측의 대상이 되는 즉, 운전원의 수행도가 발현되는 상황의 상세한 기술이어야 한다. 본 연구에서는 운전원 직무분석(Task Analysis)를 이용하여 예측을 위한 기본자료를 얻으며, 이 기본자료를 바탕으로 운전원의 인지적인 활동 및 요구(demand)를 구분하고 또한 운전원이 처하게 되는 운전환경에 대한 평가를 고려하여 궁극적인 운전원의 인적오류모드를 예측하였다. 예측의 정확도를 검증하기 위하여 실제 운전운전원과

원전 시뮬레이터가 활용된 인간공학실험을 수행하였고 실험데이터를 분석하여 정확도를 평가하였다. 예측과정을 간략히 나타내면 다음의 그림 1과 같다.

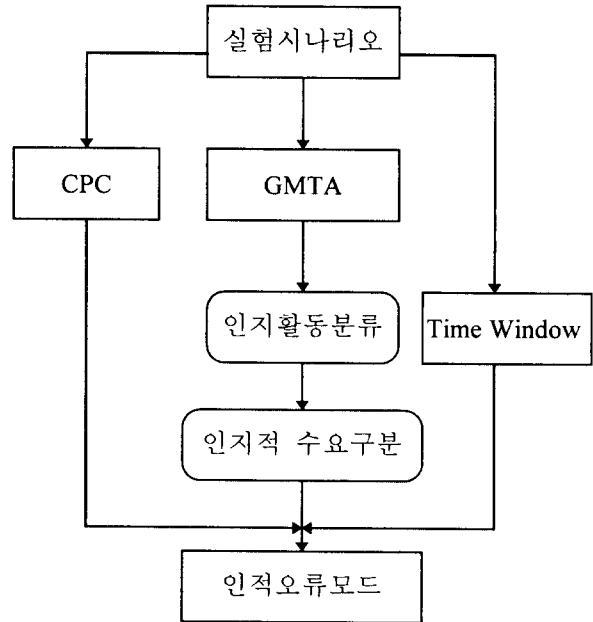


그림 1. 예측과정

2. 인적오류모드의 예측방법

2.1 운전원 직무분석

본 연구에서는 주어진 운전상황(operating context)에서 운전원이 범할 수 있는 인적오류모드(Human Error Mode)를 찾아내는 것이다. 이를 위한 기본적인 자료는 기대되는 운전원의 수행도(Expected Operator Performance)이다. 기대되는 운전원의 수행도는 주어진 상황에서 운전원이 발휘해야하는 이상적인 수행도(ideal performance)를 말하며 따라서 이는 주어진 상황 및 그 상황의 추이(trend)를 정확히 알고나서 결정되어 질수 있는 최적의 운전절차이다. 일반적으로 이

운전절차는 발전소 프로세스 전문가가 작성한다. 이 최적의 운전절차를 묘사하기 위하여 직무분석(Task Analysis)을 활용하였다. 본 연구에서는 발전소 프로세스 전문가의 도움을 얻어 직무분석을 수행함으로써 기본자료를 확보하였다.

직무분석은 운전원의 행위를 묘사하기 위하여 활용되는 기법으로 다양한 분석기법이 제시되어 있다. 본 연구에서는 운전원의 직무를 목적 및 수단으로 표시한 목적-수단 직무분석(Goal-Means Task Analysis)방법을 사용하였다. 목적-수단 직무분석은 계층적 직무분석(Hierarchical task analysis)과는 달리 운전원 행위를 시간에 따라 순서적으로 서술하지는 않는다. 주어진 상황에서 운전원이 달성해야하는 궁극적인 목적(Goal)으로부터 세부적인 목적을 도출하고 각 세부적인 목적에 대한 운전원의 직무수단(Means)을 명시함으로써 운전원의 역할을 묘사하는 방법이다[1]. 본 연구에서는 이 목적-수단 직무분석을 효율적으로 수행하기 위하여 OPAS(Operator Performance Assessment System)를 활용하였다. OPAS는 목적과 수단애 따른 계층적인 구조를 구조화한 단순한 기록이다. OPAS의 첫장은 주어진 운전상황 및 최종적인 목적 그리고 세부목적의 기술로 이루어 진다. OPAS에서는 세부목적을 stage로 구분한다. 각 세부목적별 운전원의 직무는 뒷장에 첨부된 운전원 직무기술에 기록된다. 편의상 운전원의 직무는 감지(detection) 및 운전(operation)으로 분류하여 기록된다.

부가적인 정보로서 시간창(Time Window)를 작성하였다. 시간창은 각 운전원의 직무가 언제까지 수행되어야 하는지에 대한 정보를 제공해준다. 주어진 상황이 시간적으로 촉박하게 운전원의 활동을 요구하거나 가용한 시간에 따라 운전원의 수행도가 영향을 받는

경우에 시간창은 중요한 정보원이 된다. 본 연구에서는 각 실험시나리오에 대한 시간창을 목적-수단 직무분석결과를 기준으로 작성하였다.

2.2 직무에 대한 인지적인 분석

직무분석을 통하여 얻은 각 운전원의 직무에 대한 인지적인 특성을 조사하였다. 이 조사의 목적은 인적오류를 인지적인 관점에서 살펴보기 위함이다. 즉, 인지과학에서 발견된 기법을 적용하기 위한 선행작업이며, 따라서 운전원의 인적오류모드를 예측하는데 그 기법이 활용됨을 의미한다. 이 기법은 2.3에서 다룬다. 인지적인 분석을 위하여 사용된 인지적인 활동분류는 Rouse(1981)의 결과와 유사하며 표 1과 같다.

2.3 인지적인 수요

인지적인 활동과 인지적 수요는 다음의 표 2와 같은 관계가 있다. 각 활동은 하나의 인지적인 수요와 대응된다. 이 관련표는 Hollnagel 등(1991, 1993)이 제시한 SMoC(Simple Model of Cognition)에 근거하고 있으며 하나의 인지적인 활동은 다수의 SMoC 함수와 관련되는 특징이 있다[2]. 다수의 관련된 인지적 수요중에서 실제로 가장 우월한 인지적 수요(dominant cognitive demand)를 결정하기 위해서는 운전경험자나 프로세스 전문가의 도움이 필수적이다.

2.4 CPC(Common Performance Condition)

인지적인 관점에서 운전원의 작업조건은 운전원의 수행도에 영향을 주며 따라서 인적오류의 예측에는 반드시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 운전원의 작업조건을 다음의 8개항목으로 구성된 CPC[표 3참조]에 의하여

평가하고 이를 운전원의 인적오류모드를 예측하는데 활용하였다[3].

2.5 예측

인적오류의 예측은 일단 운전원의 인지적인 활동 및 수요에 의하여 고려해야 하는 영역을 좁히고 CPC 및 발전소의 상황을 고려하여 가장 발생할 가능성이 높은 인적오류모드를 선정하는 방법으로 수행하였다. 선정을 위하여 활용된 인적오류모드는 표 4와 같으며 이는 인지적인 수요와 관련되어 결정되어 있다는 점에 유의하여야 한다. 본 연구에서는 각 운전원의 직무에 대하여 가장 발생가능성이 높은 운전원의 오류모드를 예측하였다.

3. 실험

예측의 정확도를 검증하기 위하여 인간공학실험이 수행되었다. 이 실험은 Finland Louvisa power plant에 종사하고 있는 운전원 12명이 6개의 운전조로 나뉘어 참여하였으며 총 16개의 실험시나리오가 사용되었다.

실험시나리오는 운전복잡성(Complexity)에 따라 8개의 고수준복잡도 시나리오와 8개의 저수준복잡도 시나리오로 구성하였다. 실험시나리오는 냉각재상실사고(LOCA)나 증기발생기세관파단사고(SGTR)와 같이 일상적인 운전원 훈련프로그램에서 자주 다루는 설계기준사고와 계기고장을 포함한 사고 등이 포함되어 있으며 각 시나리오의 복잡도는 프로세스 전문가에 의하여 평가되었다.

실험을 위하여 발전소 프로세스의 모사를 위한 VVER유형의 시뮬레이터와 각종 수검도측정장비를 갖추고 있는 HRP(Halden Reactor Project)의 HAMMLAB(Halden Man Machine Laboratory)를 활용하였다.

운전원의 운전활동은 VTR과 프로세스 전문가의 상황평가에 의하여 모두 감시되었으며 시뮬레이션 기록(Simulation log)에 의하여 운전원의 행위시간 및 운전상황을 기록저장하였다.

4. 실험데이터의 분석결과

실험데이터의 분석결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 실험분석의 결과 전반적인 인적오류모드 예측의 정확도는 68.6%였다.
- 운전복잡도에 따른 예측정확도는 고수준복잡도의 경우에는 75.11%, 저수준복잡도의 경우에는 60.5%였으며 복잡도에 대한 예측정확도는 통계적으로 유의하였다. 명시적으로 본 연구에서 사용한 예측기법이 고수준의 복잡한 운전조건에서 더 적응률이 높다는 것을 나타낸다.
- 운전원이 감시를 안하였거나 시간적으로 지연되어 수행한 활동에 대한 예측은 상대적으로 적응률이 높았으나 순차적인 운전활동을 여기거나 다른 활동을 수행하는 등에 대한 예측의 정확도는 매우 낮았다.

본 연구에서 인지적인 분석을 통한 운전원의 인적오류모드 예측기법을 제안하고 이를 실험을 통하여 정확도를 평가하여 예상한 수준보다 높은 예측정확도를 얻었다. 사용된 기법은 OPAS에서 정의되는 목적-수단 구조하에서의 직무분석을 토대로 하고 있는데, OPAS가 고수준의 운전활동만을 기술하고 있어서 실제 인지적인 활동의 선정시에 어려움을 겪었다. 따라서 OPAS의 직무기술을 세밀히 함으로써 더 높은 정확도를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 SMoC에서 활용된 일반적이고 단순한 4단계 인지모형을 발전시킴에 의해서도 높은 적응률을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Hollnagel, E., et al., A cognitive task analysis of the SGTR scenario, NKS/RAK-1.3, RISO, Denmark, 1996.
- [2] Hollnagel, E. and Cacciabue P.C., Cognitive Modelling in System Simulation, Proceedings of the Third Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, Cardiff, UK, 1991.
- [3] Hollnagel, E. and Marsden, P., Further Development of Phenotype/Genotype Classification Scheme for the Analysis of Human Erroneous Actions, HRA Ltd, 1996.

Cognitive Activity	General Description
Coordinate	Bring system states and/or control configuration into specific relation
Communicate	Pass on or receive person-to-person information
Compare	Examine the qualities of two or more entities
Diagnosis	Recognise or determine the nature or cause of a condition by reasoning
Evaluate	Appraisal or assessment of a situation
Execute	Performance of a previously specified action or plan
Identify	Establish the identity of a plant state
Maintain	Sustain a specific operational state
Monitor	Keep track of system states over time
Plan	Formulate set of actions necessary to achieve goal
Record	Set down or log system event
Regulate	Alter speed or direction of a control to attain a goal
Scan	Quick or speedy review of information sources
Verify	Confirm the correctness of a system condition or measurement

표 1 인지활동분류

Activity	SMoC Functions			
	Observation	Interpretation	Planning	Execution
Coordinate			•	•
Communicate				•
Compare		•		
Diagnosis		•	•	
Evaluate		•	•	
Execute				•
Identify		•		
Maintain			•	•
Monitor	•	•		
Plan			•	

Record		•		•
Regulate	•			•
Scan	•			
Verify	•	•		

표 2 인지적인 수요와 활동간의 관련표

CPC name/Descriptor
Adequacy of organisation: The quality of the support and resources provided by the organization for the tasks or work being performed. This includes communication systems, safety management system, support for external activities, etc Very efficient/Efficient/Inefficient/Deficient
Working conditions: The conditions under which the work takes place, such as ambient lighting, glare on screens, noise from alarms, interruptions from the task, etc. Advantageous/Compatible/Incompatible
Adequacy of MMI and operational support: The quality of the MMI and/or specific operational support provided for operators. The MMI includes control panels, workstations, and operational support provided by specially designed decision aids Supportive/Adequate/Tolerable/Inappropriate
Availability of procedures/plans: The availability of prepared guidance for the work to be carried out, including operating/emergency procedures, routines and familiar responses Appropriate/Acceptable/Inappropriate
Number of simultaneous goals: the number of tasks or goals operators must attend to. Since the number of goals is variable. This CPC applied to what is typical/characteristic for a situation Fewer than capacity/Matching current capacity/More than capacity
Available time: The time available to complete the work; or the general level of time pressure for the task and the situation type. How well the task is synchronised to the process dynamics Adequate/Temporarily inadequate/Continuously inadequate
Time of day: The time of day(or night) when the task is carried out; whether or not the person is adjusted to the current time. Day-time(adjusted)/Night-time(unadjusted)
Adequacy of training and experience: The level of readiness for the work as provided(by the organisation) through training and prior instruction. Includes familiarization to new technology, refreshing old skills, etc. As well as the level of operational experience Adequate,highly experienced operators/Adequate, but operators not very experienced/Inadequate

표 3 Common Performance Condition

Cognitive function	Potential Error Mode	
Observation errors	O1	Observation of wrong object
	O2	Wrong identification made
	O3	Observation not made (omission)
Interpretation errors	I1	Faulty diagnosis
	I2	Decision error
	I3	Delayed interpretation
Planning errors	P1	Priority error
	P2	Inadequate plan formulated
Execution errors	E1	Execution of wrong type performed
	E2	Action performed at wrong time
	E3	Action on wrong object
	E4	Action performed out of sequence
	E5	Action missed(omission)

표 4 인지적오류모드