

## 인간 신뢰도 분석을 위한 인적오류 분석 기법 검토

김재환, 정원대, 이용희, 하재주  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

본 논문은 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment)에서 수행하고 있는 현존 인간 신뢰도 분석(Human Reliability Analysis)의 현황과 기법의 한계점을 설명하고, 인적오류 분석(Human Error Analysis: HEA)의 필요성과 그 내용을 제시하였다. 그리고, 현재까지 개발된 인적오류 분석 기법 중 7가지 기법을 간략히 소개하고, 각 기법의 적용 범위, 오류 분석 구조, 분석 대상, 오류 분석 범위, 기반 모형 등에 대해서 상호 비교한 결과를 제시하였다.

### 1. 서론

확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)는 시스템의 안전성을 위협하는 일련의 사건들(인간 실수와 기계 고장)의 조합으로 된 여러 시나리오를 개발하고, 각 시나리오의 발생 확률을 기계의 신뢰도 모델과 인간신뢰도 분석(Human Reliability Analysis : HRA) 기법을 이용하여 확률적으로 계산하여 각 확률을 합함으로써 전체 시스템의 안전성을 평가하는 시스템 안전성 평가 도구의 하나이다. 그러므로, PSA에서 HRA의 주역할은 각 시나리오에서 인간에게 요구되는 직무의 수행 가능성을 확률로 계산하여, 인적오류 확률(Human Error Probability : HEP)을 PSA의 입력으로 제공하는 것이다. PSA의 HRA에 대한 이러한 정량적 결과에 대한 요구로 말미암아, THERP[1], HCR[2], HCR/ORE[3], SLIM[4], STAHR[5] 등 현재 사용되고 있거나 개발된 HRA 기법들의 대부분이 인간 신뢰도의 정성적인 면보다는 정량적인 평가에 집중되어 있었다. 또한, 몇몇 기법들은 인간 행위의 근본이 되는 원인과 내적인 의식 과정에 대한 고려를 생략한 채, 표면적으로 드러나는 외적 인간 행위의 평가에만 집중되어 있었다. 현존 HRA 기법들의 이러한 취약성으로 인하여 안전성 평가 작업이 종료된 이후에도 구체적인 인적오류 감소 방안을 제시하지 못하였다. 뿐만 아니라, 상세한 오류 분석이 생략된 평가는 오류의 발생 가능성을 실제보다 낮게 평가할 수 있고 오류로 인하여 시스템에 미치는 결과도 예상하지 못하게 된다.

본 논문은 이러한 HRA 기법들의 한계를 극복하기 위한 방법으로서 인적오류 분석(HEA)과 현재까지 연구개발되어 온 인적오류 분석 기법들을 소개하고, 각 기법들의 적용 범위, 오류 분석 구조, 분석 대상, 오류 분석 범위, 기반 모델 등에 대해서 각 기법들을 상호 비교, 검토하고자 한다.

### 2. 인적오류 분석

Kirwan[6]에 의하면 인적오류 분석은 어떤 형태의 인적오류가 발생하며 (External Error Mode), 인적 오류의 발생 원인이 무엇이며 (error causes, or Performance Shaping Factors), 어떤 과정에 의해서 발생하게 되는지 (Psychological Error Mechanisms)를 밝혀내는 것으로 정의하고 있다. External Error Mode로서 널리 알려져 있는 체계는 Swain[1]이 제시한 분류 체계가 대표적이다. 인적오류의 형태를 크게 Error of Omission, Error of Commission, Extraneous Act 등과 같이 분류했다. 이러한 외적인 오류 형태 분류만으로는 인적오류 감소를 위한 구체적인 방안을 제시하기가 어렵다. 구체적인 인적오류 감소 방안을 제시하기 위해서는 인적오류 외적인 형태 뿐만 아니라, 오류 행위의 과정, 즉 인적오류의 발생 원인과 과정을 밝혀내야 한다. 이러한 인적오류의 발생 원인과 상황에 대한 상세한 분석은 현재 수행되고 있는 인간신뢰도 분석에서 보다 신뢰성있는 인적오류 확률을 얻기 위해서도 필요하다.

인적오류 분석 기법으로서 본 논문에서 소개하고자 하는 기법은 GEMS, SHERPA, PHECA, Murphy Diagram, CADA, HRMS, COSFAH 등이다. 이들은 대부분 Rasmussen에 의해 고안된 Human Malfunction Taxonomy 나 SRK (Skill, Rule and Knowledge-Based Behavior) 모형[7]이 기초가 되거나 참고되었다. SRK 모형은 원래 오류 예측을 위한 모델은 아니지만, 인지적 오류 분석의 유용한 토대가 되고 있다[8]. 다음 3절에서 각 방법에 대하여 간단히 소개하고, 4절에서는 몇가지 기준에 따라 상호 비교하였다.

### 3. 인적오류 분석 기법

#### 3.1 GEMS (Generic Error Modelling System)

GEMS (Generic Error Modelling System) 모델[9]은 Reason에 의해서 제안되었으며, SB, RB, KB를 모두 포함하는 종합적인 오류 발생 과정을 설명하고 있다. Reason은 오류 형태(error type)를 인지단계에 따라 Slip, Lapse, Mistake로 구분하였다. Slip과 Lapse는 원래 의도된 계획의 적절성 여부와는 관계없이 수행단계에서의 실패, 기억력 상실 등으로 인하여 발생하는 오류를 말하며, Mistake는 의도 형성 과정에서의 실패, 즉, 목표 설정이나 목표 달성을 위한 방법 설정 단계에서의 판단 결함, 추론 실패로 인한 오류를 말한다. 이 두 단계 분류가 발생한 오류를 분류하는 데 모호한 점을 발견했다. 그래서, Reason은 SRK 단계와 결합하여 오류 형태를 SB Slips (and Lapses), RB Mistakes, KB Mistakes 3가지로 분류했다.

SB 단계에서 발견되는 오류들의 대부분은 크게 부주의(inattention)와 과주의(over-attention)로 인하여 발생한다. 부주의는 주의 감시(attentional check)가 필요한 순간에 이를 빠뜨리는 것을 말하고, 과주의는 Routine action 시 불필요한 순간의 주의 감시가 오류를 유발시키는 것을 말한다. Reason은 RB 단계에서의 오류를 크게 올바른 규칙의 잘못된 적용(the misapplication of good rules)과 잘못된 규칙의 적용(The application of bad rules) 두 항목으로 분류하여 설명하고 있다. 올바른 규칙의 잘못된 적용은 이 규칙이 일반적 상황에서는 올바른 규칙으로 적용될 수 있지만, 드물게 발생할 수 있는 예외적인 상황에서도 이 규칙을 동일하게 사용하는 경우를 말한다. 잘못된 규칙은 특정 상황이 전혀 다루어지지 않거나 잘못 표현되는 경우, 혹은 규칙의 행위부분이 부적절하거나(unsuitable) 비효율적이거나 (inefficient)인 행위를 낳는 경우를 말한다. KB 단계에서 발생하는 오류들은 '제한된 이성(bounded rationality)'과 '문제 영역 (problem space)에 대한 불완전, 부정확한 의식 모형(incomplete or inaccurate mental model)'에 기인한다.

### 3.2 SHERPA

SHERPA(Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach)[10]는 D. Embrey 에 의해 개발되었으며, 인적오류의 정성적 분석과 정량적 평가를 모두 포함하고 있는 일종의 인간신뢰도 분석 체계이다. 오류분석, 정량화 분석, 오류 발생 가능성을 최소화하기 위한 절차서, 훈련, 설계 부분에서의 권고안 제시 등을 모두 포함하고 있다. SHERPA 는 인적오류 예측을 돕기 위하여 직무를 정보처리 방식에 따라 분류한다. SHERPA 에서 채택하고 있는 정보처리 분류는 Rasmussen 의 정보처리 단계에 기초하여 다음과 같이 네가지 처리 방식으로 분류하고 있다: SB 처리 방식, RB 진단 처리 방식, RB 행위 처리 방식, KB 처리 방식. 이 기법은 목표 달성을 위한 직무들이 명백히 정의되어 있는 상황에 적용하도록 되어 있다. SHERPA 에서는 이러한 직무를 분석하기 위해 계층적 직무분석 기법 (HTA)을 이용한다. SHERPA 에서 사용하는 인적오류 분석(HEA) 기법은 Rasmussen 과 Pedersen 이 개발한 검색 방법[8]에 기초하고 있으며, 오류모드를 파악하기 위한 Flowchart 를 제공하고 있다. 또한, SHERPA 에서는 외적 오류모드 (EEM)와 심리적 오류 발생 구조 (PEM)에 대한 분류 체계를 제공하고 있다.

### 3.3 PHECA

PHECA (Potential Human Error Cause Analysis)[11]는 Whalley 에 의해 개발된 인적오류 분석 방법론이다. PHECA 의 기본 원리는 인적오류의 발생 원인이 수행중인 직무의 형태 (Task type), 반응의 형태 (Response type), 오류 형태 (Error type)에 의존하고 있다는 것이다. PHECA 는 일반적인 직무 형태(Generic task type) 7가지, 반응의 형태 7가지, HAZOP[12]에서 사용된 용어를 딴 오류 형태 10 가지로 각각 분류하고 있다. PHECA 는 이들 분류 체계로부터 오류 원인을 연결하는 연결 체계와 오류 원인으로부터 수행 특성인자(PSFs)를 밝혀내기 위한 연결 체계를 각각 제시하고 있다. PHECA 는 187 개의 PSFs 를 제시하고 있어서 오류와 그 오류와 관련된 PSFs 를 밝혀낼 수 있다는 점에서 독특하지만, 제시하고 있는 분석 체계에 대한 근거는 불확실하다는 평가를 받고 있다.

### 3.4 Murphy Diagram

Murphy Diagram[13]은 Pew 에 의해 개발되었으며, 각 의사결정 단계에서의 오류 모드와 그와 관련된 오류 원인을 표현하기 위한 표현 도구로 사용되었다. 의사결정 단계는 다음과 같이 8 단계로 나누고 있다: (1) ACTIVATION/DETECTION OF SIGNAL, (2) OBSERVATION AND DATA COLLECTION, (3) IDENTIFICATION OF SYSTEM STATE, (4) INTERPRETATION OF SITUATION, (5) DEFINITION OF OBJECTIVES, (6) EVALUATION OF ALTERNATIVE STRATEGIES, (7) PROCEDURE SELECTION, (8) PROCEDURE EXECUTION.

Murphy Diagram 에서는 각 의사결정 단계에서 발생할 수 있는 오류 모드와 오류의 간접 원인을 나타내는 Proximal Sources, 직접적인 원인이나 심리적 요인을 나타내는 Distal Sources 등을 표현한다.

### 3.5 CADA

CADA (Critical Action and Decision Approach)[14]는 Gall 에 의해 개발되었으며, Murphy Diagram 을 토대로 하여 오류 예측을 위한 분석 기법으로 발전시켰다. CADA 는 절차서를 기초로한 규칙기반 진단 직무 뿐만 아니라, 시스템에 대한 지식을 요하는 지식기반 진단 직무도 분석할 수 있도록 한다. CADA 는 대부분의 분석 정보를 실제 작업을 수행하는 운전원들로부터 얻기 때문에, 적용대상은 주로 현재 운전

중인 시스템에서 수행되는 직무이다. CADA 는 각 의사결정 단계에서 발생 가능한 오류 모드와 원인을 분석할 수 있도록 오류 가능성을 검사하는 몇가지 질문을 담은 질문서(questionnaire)를 제공하고 있다.

### 3.6 HRMS

HRMS (Human Reliability Management System)[15]는 Kirwan 에 의해 개발되었으며, 인적오류의 정성적 분석과 정량화 방법을 모두 다루고 있는 인간신뢰도 분석 체계이다. HRMS 는 Rasmussen 의 SRK 모델과 Reason 의 GEMS 모델을 기반으로 포괄적인 오류 분석이 가능하도록 하였다. 오류 분류 체계로서 EEM, PEM, PSFs 분류 체계를 가지고 있으며, 오류 분석시에는 EEM 과 PEM 을 밝혀내며, PSFs 는 오류 발생 가능성 평가시에 사용된다. EEM 의 분류 체계는 Rasmussen 의 SRK Step Ladder 모형의 기반하에서 각 인지 단계별로 발생 가능한 EEM 을 제공하고 있으며, PEM 으로는 마찬가지로 각 단계별로 발생 가능한 약 70 개 정도의 PEMs 을 제공하고 있다. 먼저 예상되는 EEM 을 밝혀낸 후, 그 EEM 을 유발시킬 수 있는 가능한 PEM 들을 찾아낸다. 이 과정에는 평가자의 판단이 개입된다.

### 3.7 COSFAH

COSFAH (Computerized Support For Analyzing Human-errors)[16]는 K-HPES(Human Performance Enhancement System)을 위해 국내에서 개발된 실무적인 인적오류 분석 방법론이다. 인적오류를 포함한 작업행위에 대하여 인지적 수행 단계를 역추적함으로써 인지적 오류의 원인을 분석하는 방식이다. 작업의 내용을 역추적하는 기반으로 간략화된 인지단계 모형을 사용하고 있으며, 단계별로 오류의 형태(type)와 원인(cause)을 연결하는 동적인 분류체계(dynamic classification scheme)를 가지고 있다. COSFAH 는 현장에서 수행된 직무중 오류가 포함된 직무의 내용을 재구성하고 실무자의 편의에 초점을 맞추어 전산화된 모형과 분류 체계를 사용하고 있는 회고적 분석 기법의 일종이다. 특히, K-HPES 에서 인지적 오류와 관련 원인을 분석하기 위한 핵심 절차로 활용되고 있다.

## 4. 인적오류 분석 기법 비교 분석

본 장에서는 위에서 소개한 인적오류 분석 기법들을 기법 적용 범위, 오류 분석 구조, 분석 대상, 오류 분석 범위, 기반 모델 등에 대해서 상호 비교, 검토한 결과를 소개하고 있다.

### 4.1 기법 적용 범위

여기서 다루고자 하는 기법 적용 범위는 각 기법들이 인간신뢰도 분석의 전 범위, 즉 정성적인 오류 분석과 정량적인 오류 가능성 평가 둘 모두를 다루는 기법인지, 아니면 오류 분석만을 다루고 있는 지, 혹은 분석을 지원하기 위한 표현 도구로서 활용되는 것인지에 대해서 정리해 본 것이다.

	정성적 분석	표현 도구	정량적 평가
GEMS	O	X	X
SHERPA	O	X	O (SLIM)
PHECA	O	X	X
Murphy Diagram	O	O	X
CADA	O	X	X
HRMS	O	X	O (PHOENIX)
COSFAH	O	O	X

#### 4.2 오류 분석 구조

여기서는 각 기법들이 얼마나 구조적인가, 즉, 오류 분석 절차가 분석자로 하여금 얼마나 조직적으로 분석할 수 있게 하는가를 본 것이다. 비조직적일수록 분석자의 주관적 판단이 많이 개입될 수 있으며, 이때에는 분석자마다 결과가 상이할 수 있다. 반면에, 조직적인 분석 절차를 가진 기법일수록 분석자의 판단이 많이 배제되고 분석자에 대한 의존도가 줄어들 것이다.

검토 결과에 의하면, 아주 체계적인 분석 구조를 가지고 있는 기법은 SHERPA, PHECA 이며, 나름대로의 기본적 체계만 갖추고 분석자의 판단을 요하는 기법은 Murphy Diagram, CADA, HRMS 이며, GEMS 는 분석자의 판단이 상당히 요구되는 기법이라고 볼 수 있다.

#### 4.3 분석 대상

각 기법들이 기발생 오류에 적합한 회고적 분석(Retrospective Analysis) 기법인지, 오류 가능성에 대한 예측적 분석(Predictive Analysis) 기법인지를 구분하여 비교하였다. 여기서 SRK 모델은 원래 Retrospective 분석에 적합한 것이었지만, 이 모델을 이용하여 예측 기법 개발을 시도한 것이 "Work Analysis Method[8]"이다.

Retrospective Analysis	GEMS, Murphy Diagram, COSFAH
Predictive Analysis	SHERPA, PHECA, CADA, HRMS

#### 4.4 오류 분석 범위

각 기법들이 분석할 수 있는 인간 행위의 범위를 비교한 것이다. Skill, Rule, Knowledge 행위 Level 를 기준으로 하여 각 기법들의 분석 범위를 조사하였다. 비록 상세 정도는 다르지만, 대부분의 기법들이 Skill, Rule, Knowledge 행위 전 범위를 다루고 있다고, SHERPA의 경우는 직무들이 명백히 정의되어 있는 상황에 적용되도록 되어 있기 때문에 Knowledge Level의 분석은 다루지 못하고 있다.

	GEMS	SHERPA	PHECA	Murphy	CADA	HRMS	COSFAH
분석 범위	S,R,K	S,R	S,R,K	S,R,K	S,R,K	S,R,K	S,R

#### 4.5 기반 모델

각 기법들이 기반으로 활용하고 있는 모델들을 비교한다. SRK 모델은 모든 기법들의 이론적인 기반이 되어 왔음을 볼 수 있으며, 대부분의 기법들이 모델기반 접근을 시도하고 있다.

	GEMS	SHERPA	PHECA	Murphy	CADA	HRMS	COSFAH
기반 모델	SRK, GEMS	SRK, GEMS	SRK	SRK, Step-ladder	SRK, Murphy	SRK, Step-ladder, GEMS	Simplified Stage model

### 5. 결론

지금까지 현존하는 여러 인적오류 분석 기법들을 소개하고, 기법들의 적용 범위, 오류 분석 구조, 분석 대상, 오류 분석 범위, 기반 모델 등에 대해서 비교하였다. 기법들마다 나름대로의 체계를 가지고 연구의 Focus를 인지적 오류(RB, KB 진단 오류)의 상세한 분석에 두고 있으며, 오류분석을 위한 인지적

직무분석(cognitive task analysis)의 중요성이 부각되고 있다. 대부분의 기법들이 오류분석과 오류분석을 위한 인지적 직무분석을 위하여 모형 기반 접근방식(model-based approach)을 시도하고 있다. 또한, 인적 오류 분석자에 대한 의존도를 줄이려는 노력을 보이는 기법들이 있지만, 오류 분석 업무의 특성상 전문가의 인적오류에 대한 지식을 완전 배제하기는 어려울 것으로 보인다.

#### [참고문헌]

1. A. Swain and H.E. Guttman, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US NRC, USA, 1983.
2. G.W.Hannaman, et al., "Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis, "NUS- 4531, Nuclear Utility Service Corp., 1984.
3. P. Moieni, A.J. Spurgin & A. Singh, Advances in Human Reliability Analysis Methodology. Part I: Frameworks, Models, and Data. RESS, Vol. 44, 1994. 27-55.
4. D. Embrey, SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement, NUREG/CR-3518, 1984.
5. L.D. Phillips, P. Humphreys, D. Embrey and D.L. Selby, "A Socio-technical Approach to Assessing Human Reliability", in R.M. Oliver and J.Q. Smith (Editors), Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis, John Wiley & Sons, 1990.
6. B. Kirwan, A Guide to Practical Human Reliability Assessment, Taylor & Francis, 1994.
7. J. Rasmussen, O.M. Pedersen, A. Carnino, M. Griffon, C. Mancini and P. Gagnolet, Classification System for Reporting Events involving Human Malfunction, Riso-M-2240, DK-4000, Riso National Lab., Denmark, 1981.
8. O.M. Pedersen, Human Risk Contributions in the Process Industry, Riso-M-2513, DK-4000, Riso National Lab., Denmark, 1985.
9. J. Reason, Human Error, Cambridge University Press, 1992.
10. D. Embrey, "SHERPA: A Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach", Int'l Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems, Knoxville, Tennessee, April 1986.
11. S.P. Whalley, "Minimizing the Cause of Human Error", Proceedings of the 10th Advances in Reliability Technology Symposium, Elsevier, 1988.
12. T. Kletz, "HAZOP and HAZAN - Notes on the Identification and Assessment of Hazards", Institute of Chemical Engineers, Rugby, 1974.
13. R.W. Pew, D.C. Miller and C.S. Fehrer, Evaluation of Proposed Control Room Improvements through Analysis of Critical Operator Decisions, NP 1982, EPRI, Palo Alto, CA, 1981.
14. W. Gall, "An Analysis of Nuclear Incidents Resulting from Cognitive Error", Paper presented at the 11th Advances in Reliability Technology Symposium, University of Liverpool, April 1990.
15. B. Kirwan, "The Development of A Nuclear Chemical Plant Human Reliability Management Approach: HRMS and JHEDI", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 56, pp. 107-133, 1997.
16. W.C. Yoon, Y.S. Kim and Y.H. Lee, A model-based and computer-aided approach to analysis of human errors in nuclear power plants, Rel. Eng. and System Safety, vol.51, pp.43-52, 1996.