원자력 발전소 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자의 선정*

Selection of Influencing Factors for Human Reliability Analysis of Accident Management Tasks in Nuclear Power Plants

김 재 환 · 정 원 대**

ABSTRACT

This paper deals with the selection of the important Influencing Factors (IFs) under accident management situations in nuclear power plants for use in the assessment of human errors. In order to achieve this goal, we collected two types of IF taxonomies, one is the full set IF list mainly developed for human error analysis, and the other is the IFs for human reliability analysis (HRA) in probabilistic safety assessment (PSA). Five sets of IF taxonomy among the full set IF list and ten sets of IF taxonomy among HRA methodologies were collected in the study. From the review and analysis of HRA IFs, we could obtain some insights for the selection of HRA IFs. By considering the situational characteristics of the accident management domain, candidate IFs are chosen. Finally, those IFs are structured hierarchically to be appropriate for the use in the assessment of human error under accident management situation. Three nuclear accidents such as TMI, Chernobyl and JCO were analysed to validate the proposed taxonomy.

Keywords: Influencing Factors, Performance Shaping Factors, Human Reliability Assessment, Accident Management, Nuclear Power Plants

* 본 논문은 과학기술부의 중장기 연구개발사업의 지원으로 수행되었음
** 한국원자력연구소 종합안전평가팀
주 소 : 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구소
전 화 : 042-868-8886
E-mail:jhkim4@kaeri.re.kr

530.805-대479ㄷ-20(2)

1. 서 론

원자력발전소의 안전성 평가를 위하여 확률론적 안전성분석(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 방법이 적용되고 있다. 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis)은 확률론적 안전성분석의 한 부분으로서 인간행위에 대한 평가 부분을 담당하고 있다. 인간신뢰도분석에서는 인간의 수행도에 미치는 이러한 직무 상황을 몇 개 혹은 다수의 상황인자 혹은 수행영향인자를 통해서 표현하고 있다. 이러한 상황인자는 방법들마다 각기 다른 용어들로 쓰여지는데, PSF (Performance Shaping Factors), PIF (Performance Influencing Factors), IF (Influencing Factors), PAF (Performance Affecting Factors), EPC (Error Producing Conditions), Context Factors, CPCs (Common Performance Conditions) 등의 다른 이름들로 사용되기도 한다. 인간신뢰도분석 내에서 이러한 수행영향인자는 각 방법에 따라 조금씩 달리 사용되는데, THERP(Swain & Guttmann, 1983), HEART(Williams, 1988), CREAM(Hollnagel, 1998) 등과 같이 기본 인간오류확률(Basic HEP)을 조정하는데 사용되는 경우가 있고, SLIM(Embrey, 1984), IDA(Phillips et al., 1990) 등과 같이 인간오류확률의 계산에 직접 사용되는 경우도 있다.

일반적으로, 수행영향인자 분류체계는 그 특성상 적용 영역과 사용 목적에 적합한 형태로 개발되어진다. 현존하는 인간신뢰도분석 방법들에서도 방법들 나름대로 서로 다른 분류체계를 제안하여 사용하고 있는데, 이러한 인간신뢰도분석을 위한 기존의 수행영향인자 분류체계에는 몇 가지 중요한 문제점을 가지고 있다. 첫째는 수행영향인자의 선정이 체계적인 과정을 통해서 이루어지기보다는 개발자나 분석자의 판단에 의존하여 임의적으로 이루어지고 있다는 것이다. 둘째는 THERP, ASEP, HCR, IDA 등과 같은 초기의 인간신뢰도분석 방법들에서는 제한된 인자들만을 고려하고 있다. 이로 인하여 인간오류가 실제와 달리 평가될 수 있을 뿐만 아니라, 중요한 인간오류 감소 방안을 누락할 수 있다. 세 번째 문제점은 수행영향인자에 대한 구체적인 정의 및 평가내용이 결여되어 있어서 각 인자들의 평가시 평가자들의 주관적인 기준으로 인자의 수준을 평가하게 되어 평가자들간에 평가 내용과 결과의 일관성을 잃을 수 있다.

본 연구에서는 원자력발전소의 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자 분류체계를 구축하였는데, 기존의 분류체계가 가지고 있었던 이러한 문제점을 해결하기 위해 체계적인 선정 과정을 통해 이루어졌다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존의 수행영향인자 분류체계들을 검토하였는데, 하나는 주로 오류분석 목적으로 분류해 놓은 상세 수행영향인자 분류체계이며, 다른 하나는 인간신뢰도분석 방법들에서 사용되고 있는 수행영향인자 분류체계이다. 상세 분류체계는 기발생한 오류의 원인을 분석하는데 사용되거나, 구체적인 설계 요소의 파악에 사용되는 분류체계로서 세부 인자들을 제시하고 있다. 반면 인간신뢰도분석에서 사용되고 있는 분류체계

는 한 직무의 인간오류확률을 계산하는데 필요한 수 개의 대표 인자들을 제시하고 있는 수준이다. 본 연구에서는 두 분류체계를 서로 구분하여 검토·비교함으로써 인간신뢰도분석에 필요한 세부 인자들을 구축하고자 한다. 상세 분류체계로서는 THERP(Swain & Guttmann, 1983), HEART(Williams, 1988), PHECA(Whalley, 1987), Gerdes'(Gerdes, 1997), Bellamy's(Bellamy, 1991) 등 총 5개의 분류체계를 검토하였다. THERP 및 HEART의 경우 인간신뢰도분석 방법으로 사용되고 있으나 일반적 인간신뢰도 분석에서 제시하고 있는 인자의 수준보다 상세하게 제시를 하고 있는 방법들이어서 상세 분류체계에 포함시켰다. 인간신뢰도분석 방법 중에서는 SLIM(Embrey, 1984; Chu et al., 1994), INTENT(Gertman et al., 1992), IDA(Phillips et al., 1990), HRMS(Kirwan, 1997), Julius'(Julius et al., 1995), Macwan's(Macwan & Mosleh, 1994), INCORECT(Kontogiannis, 1997), CREAM(Hollnagel, 1998), Taylor-Adams'(Taylor - Adams, 1995), Rogers'(Gibson et al, 1998) 등 총 10개의 분류체계들을 검토하였다.

본 연구에서는 검토한 모든 상세 수행영향인자들을 하나의 새로운 분류체계내에서 취합 수집하여 총 상세 수행영향인자 집합을 얻었으며, 이를 바탕으로 현재의 인간신뢰도분석 방법들에서 선정하여 사용하고 있는 수행영향인자들을 비교·분석하여 본 연구에서 필요로 하는 원전 사고관리 상황에서의 주요 수행영향인자의 선정 기준 등에 활용하였다. 본 논문에서 다루고 있는 내용은 다음과 같다. 제 2 절에서는 본 연구에서 수집한 수행영향인자 분류체계들에 대해서 간단히 소개하고, 제 3 절에서는 본 연구에서 수행한 원전 사고관리 상황하에서의 주요 수행영향인자의 선정 과정과 결과에 대해서 소개한다. 그리고, 제 4 절에서는 원자력 산업에서 발생한 사고 중 미국 TMI 원전 사고, 우크라이나 Chernobyl 원전 사고, 일본 도카이무라 JCO 핵연료 변환공장 사고 등을 분석하여 인적행위에 영향을 미쳤던 주요 영향인자들을 밝혀냄으로써 본 논문에서 제시하는 분류체계의 적절성을 검증하였다. 마지막으로, 제 5 절에서 본 연구를 통해 얻은 결론과 선정한 수행영향인자의 활용 등에 대해서 언급한다.

2. 주요 수행영향인자 분류체계의 검토

본 연구에서는 다양한 형태의 수행영향인자 분류체계중 본 연구의 목적에 따라 크게 두가지로 나누어서 검토하였는 데, 하나는 주로 오류분석 목적으로 개발된 상세 수행영향인자 분류체계이며, 다른 하나는 인간신뢰도분석에서 사용하고 있는 수행영향인자 분류체계이다. 본 연구에서 검토한 수행영향인자 분류체계를 아래에 두가지 그룹으로 나누어 간단히 정리하였다.

2.1 상세 수행영향인자 분류체계

THERP (Swain & Guttmann, 1983)

Swain은 수행영향인자를 단순하게 인간의 수행도에 영향을 미치는 모든 인자들이라고 정의하고 있으며, 총 67개의 PSFs를 크게 external PSFs, stressors PSFs, internal PSFs 등으로 구분하고, 이를 다시 여섯 개 그룹으로 분류하였는데 external PSFs 에는 Situational Characteristics, Job & Task Instructions, Task & Equipment Characteristics등으로 구성되어 있고, Stressors PSFs는 Psychological Stressors와 Physiological Stressors로 구분했으며, Internal PSFs는 Organismic Factors로 놓고 있다.

HEART (Williams, 1988)

HEART(Human Error Assessment and Reduction Technique) 방법은 수행영향인자로서 38개의 EPC(Error-Producing Conditions)를 제시하고 있는데, EPC는 인간오류확률을 얻기 위해 기준 확률(nominal probability)를 수정하는 인자로서 사용된다.

PHECA (Whalley, 1987)

PHECA는 1987년 S. Whalley에 의해 개발된 화학공정공장(Chemical Process Plants)에서의 인간 수행도에 영향을 미치는 PSF 분류체계이다. 이 분류체계는 직무의 인간오류를 유발시키는 설계요소의 파악에 활용된다. Whalley는 기존의 PSF 분류체계인 5개의 PSF List (Swain & Guttmann, Embrey, Singh, AMAS, Ergonomic literature)로부터 PSF의 분류체계 구조와 PSF 자료를 수집하여 반영하였으며, 조사 대상 화학공장 회사의 여러 사고 기록들(Company Accident Reports, Medical Department Records, Incident Reports, Plant Log Books, Supervisor Records, Computer Printout)과 폭넓은 영향인자를 포함할 수 있는 5가지 사례를 선정, 분석하여 PSF들을 분석해 내었다. Process, Personnel, Ergonomic 등 크게 세가지 그룹으로 분류하였다.

Gerdes' (Gerdes, 1997)

Gerdes는 PSF를 IF(Influence Factor)로 사용하고 있으며, 32개의 PSF에 관한 참고문헌을 토대로하여 취합, 정리하여 전체 108개의 IFs를 정리하였다. 크게 4개의 항목으로 나누었는데, HUMAN, TASK, MACHINE, ENVIRONMENT 등이다. 4개의 그룹들은 세부항목별로 다시 나누어진다.

Bellamy's (Bellamy, 1991)

Bellamy는 인간오류가 발생하는 상황(conditions), 혹은 인간오류 발생에 영향을 미치는 수행영향인자(performance shaping factors)를 다음과 같이 크게 8개의 그룹으로 정리하였다: Individual Factors, Man-Machine Interface Characteristics (Displays and Controls), Task Demands, Task Characteristics, Instructions and Procedures, Stresses, Environment, Socio-Technical Factors. THERP에서와 같이 Stresses에 영향을 주는 인자들을 별도의 그룹으로 정리하였다.

2.2 인간신뢰도분석 수행영향인자 분류체계

본 절에서는 기존의 주요 인간신뢰도분석(HRA) 방법들에서 인간오류의 정량화에 주로 사용되었던 수행영향인자들을 각 방법별로 표 1에 정리하였다. 각 방법들에 대하여 간단하게 기술한다.

SLIM (Embreys, 1984) & PLG-SLIM (Chu et al, 1994)

Embrey(1984)가 원래 제안했던 SLIM 방법에서는 전문가 그룹내에서 토론을 통하여 적절한 수행영향인자를 선정하도록 하고 있으며, 표 1에 제시된 수행영향인자들은 참고문헌(Embrey, 1984)에서 사용된 한 예를 보인 것이다. PLG SLIM에서는 이들 수행영향인자들을 이용하여 원자력발전소 정지/저출력시의 인간행위의 평가에 활용하였다. Embrey SLIM 및 PLG SLIM은 이들 수행영향인자를 이용해 SLI (Success Likelihood Index)를 얻는데 활용하고 있다.

INTENT (Gertman et al., 1992)

INTENT의 수행영향인자는 의도형성오류(errors of intention)의 정량적 평가를 목적으로 하며, 주어진 인간오류확률의 상한치와 하한치 값을 이용하여 특정 발전소에서의 인간오류확률을 얻는데 활용하고 있다.

IDA (Phillips et al., 1990)

IDA (혹은 STAHR) 방법에서는 선정한 수행영향인자들을 계층적 구조로 표현함으로써 상하위 인자간의 영향관계를 이용하여 직접적으로 인간오류확률을 계산하는데 활용한다.

HRMS (Kirwan, 1997)

HRMS는 인간오류확률 값과 당시의 작업상황을 알고 있는 실제 직무와 평가하고자 하는 직무의 수행영향인자의 상태를 비교하여 알고 있는 직무의 인간오류확률 값을 조정하는 데 사용한다.

Macwan's (Macwan & Mosleh, 1994)

Macwan이 제안한 수행영향인자, 즉 PIFs (Performance Influencing Factors)는 기본적으로 원전 운전원의 인지적 오류인 오진단(misdiagnosis) 혹은 의도형성 과정에 영향을 미치는 인자들을 정리하였다. PIF를 분석하는 발전소내에서의 인간행위의 기본모델로서 운전원과 발전소간의 상호작용이 비상운전절차서를 통해서 이루어지는 것을 가정하고 있다. 그래서 PIF의 선정도 운전원과 비상운전절차서, 발전소 등 세 개의 개체에 대해서 이루어졌다. 또 다른 특이한 사항으로 시간에 따라 변하는 시나리오-의존 인자와 시나리오의 전개에 따른 큰 변동이 없는 시나리오-독립 인자 등 크게 두 그룹으로 분류하였다. 표 1에서 보는 바와 같이, 운전원의 의도형성과 관련된 인자들이어서 대부분의 인자들이 상황과 밀접한 표현을 사용한 것을 알 수 있다.

Julius' (Julius et al., 1995)

Julius(1995)가 제안한 PIF 집합들은 Macwan(1995)이 제안한 PIF 집합들을 기초로하여 재정리하였으며, 사고 시나리오나 상황과 관계없는 context-independent PIFs

와 시나리오의 시간적인 전개나 상황에 따라 변하는 인자인 context-dependent PIFs로 크게 구분하여 정리하였으며, 각각의 그룹에 대하여 세분하여 세가지 하부그룹으로 나누어 정리하였다. Julius가 정리한 PIFs 들은 표 1에서 보는 것과 같다.

CREAM (Hollnagel, 1998)

Hollnagel은 상황인자(context factors)로서 표 1에서 보는 바와 같이 9개의 CPCs (Common Performance Conditions)을 제시하고 있는데, 기존의 PSF라고 불리었던 수행영향인자와의 차이점은 기존의 수행영향인자가 인간오류확률을 조정 혹은 계산하는데 사용되었다면, CPCs는 인간오류확률 계산 이전에 인간이 처한 직무 상황을 전반적으로 평가하는 데에 우선적으로 활용되는 것을 목적으로 하고 있다.

INCORECT (Kontogiannis, 1997)

Kontogiannis(1997)는 Hollnagel(1998)과 비슷한 수준으로 상황인자를 정의하고 있으며, 다만 CREAM(Hollnagel, 1998)에서와 같이 상황인자를 분석 초기에 한번 평가하여 분석에 반영하는 것이 아니라, 시간에 따라 변하는 인자들에 대해서는 상황이 변화함에 따라서 또는 사건이 진행됨에 따라서 여러번 평가하는 것을 제안하고 있으며, dynamic event tree (Acosta & Siu, 1993)와 같은 위험도 평가체계에 반영할 수 있다고 제안하고 있다. INCORECT에서는 표 1에서와 같이 10개의 Performance Conditions을 제안하고 있다. Kontogiannis는 기존의 수행영향인자에 포함되었던 stress, workload, task complexity 등은 다른 여러 수행영향인자들로부터 복합적으로 영향을 받아 나타나는 결과로 볼 수 있기 때문에 독립된 인자로서는 포함시키지 않았다.

Taylor-Adams' (Taylor-Adams, 1995)

Taylor-Adams가 개발한 이 분류체계는 CORE-DATA (Computerized Operator Reliability and Error Database)라고 하는 인간신뢰도분석 지원을 위한 인간오류 데이터베이스의 기본 모듈로 사용하기 위해 개발된 분류체계이다. CORE-DATA는 5개 요소에 대해 분류체계를 가지고 있는데, 각각은 external error mode, psychological error mechanism, performance shaping factors, task-equipment taxonomy, human action taxonomy 등이다. 이중 performance shaping factors는 PHECA (Whalley, 1987), THERP(Swain & Guttmann, 1983), HEART(Williams, 1988) 등에서의 분류체계를 참조하여 총 16개의 수행영향인자를 선정하였다.

Rogers' (Gibson et al, 1996)

위의 CORE-DATA는 후에 기존의 PSF 분류체계가 사고 시나리오에서 파악되는 여러 PSF들을 불충분하게 다루고 있다는 사실을 발견하고, 표 1에서와 같이 새로운 PSF 분류체계를 구성하였다. Rogers에 의해서 개발된 새로운 분류체계에서는 17개의 PSF를 선정하고 있다.

표 1. 인간신뢰도분석 방법들에서 사용하고 있는 수행영향인자 분류체계

Original SLIM	PLG-SLIM	HRMS	INTENT
1. Quality of design 2. Procedures 3. Role of operations 4. Teams 5. Stress 6. Morale /Motivator 7. Competence	1. Plant interface and indications of conditions 2. Significant preceding and concurrent actions 3. Task complexity 4. Procedural guidance 5. Training and experience 6. Adequacy of time to accomplish action 7. Stress 8. Other	1. Time 2. Quality of information/ interface 3. Training/Expertise/ Experience/ Competence 4. Procedures 5. Task organization 6. Task complexity	1. HMI 2. Stress 3. SRK 4. Experience 5. Safety culture 6. Training 7. Motivation 8. Workload 9. Supervision 10. Communication 11. Procedures
IDA	**CREAM**	**INCORECT**	**Taylor-Adams' PSFs for CORE-DATA**
1. Quality of information - Design - Meaningfulness of procedures 2. Organization - Role of operations - Teams 3. Personal - Stress - Morale/Motivation - Competence	1. Adequacy of organization 2. Working conditions 3. Adequacy of MMI and operational support 4. Availability of procedures/plans 5. Number of simultaneous goals 6. Available time 7. Time of day 8. Adequacy of training and preparation 9. Crew collaboration and quality	1. Time availability 2. Plan availability and accessibility 3. Information availability and accessibility 4. Simultaneous tasks 5. Decision-making criteria 6. Response dynamics and system coupling 7. Supervision 8. Capability degrading factors (CDFs) 9. Teamwork and social factors 10. Organizational factors	1. Alarms 2. Communication 3. Ergonomic design 4. HMI ambiguous 5. HMI feedback 6. Labels 7. Lack of supervision/checks 8. Procedures 9. Refresher training 10. Stress 11. Task complexity 12. Task criticality 13. Task novelty 14. Time pressure 15. Training 16. Workload
Rogers' Revised PSFs for CORE-DATA	**Macwan's commission error**		**Julius' commission error**
1. Adequacy of HMI 2. Training 3. Procedures 4. Adequacy of Supervision 5. Communication 6. Team organization 7. Stress 8. Task complexity 9. Task novelty/ unfamiliarity 10. Workload 11. Distractions 12. Adverse conditions 13. Fatigue 14. Motivation 15. Safety culture 16. Adequacy of design 17. Robustness of design	**Scenario-independent PIFs** 1. Crew training and experience 2. Crew confidence 3. Relative experience of RO and SRO 4. Recent experience with one or more faulty signals **Scenario-dependent PIFs** - Plant related 5. Values of critical parameters 6. Rate of change of critical parameters 7. Instrument failure - EOP related 8. Phase of EOP 9. Type of logic structure 10.Number of logical conditions - Operator related 11.Operator diagnosis 12.Memory of recent actions 13.Perceived importance 14.Perceived consequences 15.Operator expectations		**Context-independent PIFs** - Training related 1. Degree of familiarity with and frequency of training on, EOPs 2. General philosophy towards using the EOPs 3. Generic rules for handling procedural ambiguities 4. Method of resolving conflicting information from different instrumentations - Crew team characteristic 5. Team structure 6. Established protocol for communication 7. Adequacy of resources - Plant related 8. Human factors design of the plant **Context-dependent PIFs** - Plant related 9. Value of critical parameter 10. Trend of critical parameters 11. Availability of equipment 12. Availability of instrumentation - EOP related 13. EOP response phase (verification, diagnosis) - Operator related 14. Confidence in diagnosis 15. Expectation 16. Memory of previous actions and accident history

3. 원전 사고관리 상황하에서의 주요 수행영향인자의 도출

본 절에서는 원전 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 주요 수행영향인자의 선정 과정과 선정된 인자들에 대해서 설명한다. 다음과 같은 과정을 통하여 주요 영향인자를 도출하였다.

(1) 기존의 상세 수행영향인자 분류체계와 여러 문헌자료로부터 원전의 작업 상황과 관련한 수행영향인자를 선정, 취합하여 총 상세 수행영향인자 집합(set)을 생성해 내었다.

(2) 기존 인간신뢰도분석 방법들에서 선정, 사용하고 있는 수행영향인자들을 검토하여 수행영향인자들의 역할이 어떻게 변화되고 있으며, 어떤 인자들을 선정하고 있으며, 어떤 수준의 용어와 의미를 채택하여 사용하고 있는지 등을 분석하였고, 이러한 분석을 바탕으로 본 연구의 목적인 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자의 기준 마련에 활용하였다.

(3) 원전의 사고관리시의 주요 상황 특성을 분석하고, 이를 반영하여 위의 첫째 단계에서 얻은 총 수행영향인자 집합으로부터 이들 상황 특성과 관련있는 수행영향인자를 추출하였으며, 인간신뢰도분석(HRA)을 위한 수행영향인자의 기준을 마련하고, 이를 토대로 하여 대표 인자와 세부 평가인자를 체계적으로 구조화하였다.

3.1 총 상세 수행영향인자 분류체계 획득

원전의 작업상황과 관련한 상세 수행영향인자 분류체계를 얻기 위하여 본 연구에서는 2.1절에서 검토한 5개의 상세 수행영향인자 분류체계 외에, 팀 및 조직요소와 관련한 영향인자를 다루고 있는 참고문헌들도 포함시켰다(Hollnagel, 1998; Jacobs & Haber, 1994; Salas et al, 1992).

본 연구에서 수집·정리한 영향인자의 총 수는 약 230여개이며, 각각의 인자들을 본 연구에서 제안한 새로운 분류체계 내에서 재정리하였다. 그림 1과 같이 원전 운전원의 작업 수행능력에 영향을 미치는 인자를 크게 4개의 그룹으로 나누어 세부 수행영향인자를 분류했는데, 각 그룹의 이름과 그룹에서 다루고 있는 수행영향인자의 내용은 다음과 같다.

- HUMAN: 운전원 개인의 특성 및 작업능력 등과 관련된 인자
- SYSTEM: 발전소의 H/W 시스템과 물리적인 특성 등과 관련된 인자들
- TASK: 운전원에게 요구되는 직무의 특성과 관련된 인자들
- ENVIRONMENT: 팀 및 조직으로부터 오는 영향인자들과 물리적인 작업환경과 관련된 인자들.

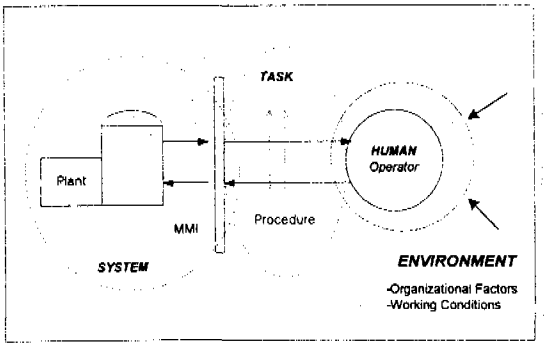

그림 1. 원자력발전소 운전원 작업상황 모델

표 2. 총 수행영향인자 집합

Level I	Level II	Level III & IV	References
HUMAN	Cognitive Characteristics	**Cognitive States**	
		- intelligence	Swain, Gerdes
		- knowledge	Swain, Bellamy, Gerdes
		- experience	Swain, Williams, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- training	Swain, Williams, Whalley, Bellamy, Gerdes
	Physical & Psychological Characteristics	**Physical States**	
		- gender	Gerdes
		- age	Williams, Gerdes
		- motor skills	Swain, Bellamy, Gerdes
		- physical disabilities	Gerdes
		- impediment: sight/hearing/speaking	*added
		- clarity in speaking/use of standard language	*added
		- fatigue/pain	Swain, Bellamy, Gerdes
		- discomfort	Swain, Bellamy
		- hunger, thirst	Swain, Gerdes
		Psychological States	
		- emotion	Swain, Williams, Gerdes
		- confusion	Gerdes
		- task burden	*added
		- fear of failure	Swain
		- high jeopardy risk	Swain
	Personal & Social Characteristics	**Personal**	
		- attitude	Swain, Bellamy
		- morale/motivation	Swain, Williams, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- risk taking	Whalley
		- self-esteem & self-confidence	Gerdes
		- sense of responsibility	Whalley, Gerdes
		- sensation seeking	Gerdes
		- leadership ability	Gerdes
		- sociability	Whalley, Gerdes
		- personality	Swain, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- anticipation	Gerdes
		Social	
		- status	
		- norms	Gerdes
		- attitudes based on influences of family and other outside persons or agencies	Gerdes Swain

Level I	Level II	Level III & IV	References
TASK	Procedures	- availability	Gerdes
		- format or type	Whalley, Bellamy, Gerdes
		- quality	Gerdes
		- level of detail	Bellamy, Gerdes
		- interpretation margin	Gerdes
		- number of steps	*added
		- clarity of instruction and terminology	Whalley, Bellamy
		- consistency in use of terminology	Williams
		- decision making criterion	*added
		- logic structure	*added
		- number of logical conditions (branches)	*added
		- adequacy of caution/warning	Swain
	Task Characteristics	**Task Type**	
		- type of man-machine interaction: EOP phase -> procedure following, monitoring, detection, verification, diagnosis, recovery	Gerdes
		- required level of cognition	Gerdes
		- dynamic vs. step-by-step activities	Swain
		Task Attribute/Requirement	
		- appropriateness of required tools	Swain, Gerdes
		- multiple sensory requirements	*added
		- perceptual requirements	Swain
		- task criticality	Swain, Bellamy
		- physical requirements	Bellamy, Gerdes
		- degree of manual operation	*added
		- motor requirements: muscular power/speed/dexterity/precision	Swain, Whalley
		- calculational requirement	Swain
		- anticipatory requirement	Swain
		- requirement on and type of feedback	Swain, Whalley
		- degree of reference to other materials beside procedures	*added
		- communication requirement	*added
		- team cooperation requirement	*added
		- necessity of decision making from higher organisation	Swain
		- number of required information	*added
		- number of necessary information to be memorized	Whalley, Bellamy
		- information load	Swain
		- task difficulty -> multiple attempts	*added
		- narrowness	Swain

Level I	Level II	Level III & IV	References
		- task novelty	Whalley
		- task consequences	Whalley
		- degree of local operation	*added
		- frequency and familiarity of task	Swain, Bellamy, Gerdes
		- degree of discrepancy with familiar tasks	*added
		- simultaneous goals/tasks (concurrent activities)	Gerdes
		- interruptions (from other personnel)	Gerdes
		- discrepancy between training and reality	*added
		- necessity of auxiliary tools	Swain
SYSTEM	MMI	**Indicator/Controllers**	
		- type of controls	Whalley
		- location	Whalley
		- identification	Whalley
		- visibility	Whalley
		- response feedback	Whalley
		- response time	Whalley
		- access	Whalley
		- reliability	Gerdes, Bellamy
		- discrimination/distinguishability of signals	Gerdes
		- attributes	Gerdes
		- type of sensing	Gerdes
		- control-display relationships	Swain
		- existence of failed instrument	*added
		- existence of failed/stuck indicator	*added
		- conflicting signals/cues	*added
		Panel/Display Layout	
		- display type	Whalley
		- scale continuity	Whalley
		- display location	Whalley
		- visibility	Whalley, Gerdes
		- legibility	Whalley
		- clarity	Whalley
		- response time	Whalley
		- accessibility/reachability	Whalley, Gerdes
		- control-display interactions	Whalley
		- coding/labeling	Gerdes
		- compatibility	Gerdes
		- arrangement	*added
		- complicatedness	*added

Level I	Level II	Level III & IV	References
		Support Systems	Gerdes
		- availability/adequacy	*added
		- usability of required function	*added
		- availability/adequacy of special equipment, tools and supplies	*added
	System States	- inherent system complexity	*added
		- organisation of components	Gerdes
		- number of coupled components	*added
		- reliability	Gerdes
		- redundancy	Gerdes
		- level of automation	Gerdes, Whalley
		- system configuration (ON/OFF state of components)	*added
		- stuck/failed components	*added
		- previous operation history and current operating status	*added
		- availability of vital sources	*added
	Phenomenological Characteristics	**Physical Characteristics**	
		- rate of change of critical parameters	Macwan
		- trend of critical parameters	Julius
		- value of critical parameters	Julius
		- required water level vs. current status of water level	*added
		- number of dynamic changing variables (plant dynamic behavior)	Thelwell, Gerdes
		Operational Characteristics	
		- suddenness of onset	Swain
		- total time to CD from the initiation of accident	*added
		- time available for operator performance	Williams, Gerdes
		- time pressure (time required vs. time available)	Whalley, Bellamy
		- phase of plant operation	Gerdes
		- EOP response phase (verification, diagnosis)	Julius
		- degree of alarm avalanche	*added
ENVIRON-MENT	Physical Working Conditions	**Physical Constraints**	
		- contamination from radioactive material	Swain, Gerdes
		- physical inconvenience from protective clothing	Whalley
		- temperature/humidity/pressure /illumination	Swain, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- noise	Swain, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- vibration	Swain, Whalley, Bellamy, Gerdes
		- G-forces	Swain, Gerdes
		- air pressure/quality/ventilation/	Swain, Gerdes, Whalley

Level I	Level II	Level III & IV	References
		oxygen insufficiency	
		- movement constriction	Swain, Bellamy
		- narrow work space or obstacles	Whalley
		- accessibility of components	Gerdes
		- architectural features	Swain, Gerdes
		- order & cleanliness	Swain, Gerdes
		Timing Aspects	
		- time of day	Gerdes
		- time on duty	Gerdes
		- time into scenario	Gerdes
		- circadian rhythm effects	Swain, Whalley
	Team & Organisation Factors	**Management & Policy**	
		- work organisation/coordination	Whalley, Jacobs & Haber
		- shift organisation	Swain, Whalley, Bellamy
		- supporting team	*added
		- level of supervision	Whalley
		- plant policy	Whalley, Gerdes
		- maintenance	Gerdes
		- human resource developing	Gerdes
		- investments and cuts	Gerdes
		- quality assurance	Gerdes
		- rewards and punishments	Swain, Bellamy, Gerdes
		- manning	Swain, Whalley, Gerdes
		- organizational structure	Swain
		Team Related Factors	
		- team structure and communication	Swain, Bellamy
		- clearness in role/responsibilities	Swain, Williams, Bellamy, Hollnagel, Jacobs & Haber
		- adequacy of distributed workload	*added
		- intra/inter-team cooperation/ communication	Gerdes, Whalley, Jacobs & Haber
		- team cohesiveness/collaboration	Hollnagel
		- ability/leadership /authority of team leader	*added
		- commitment to leadership	
		Team Communication Factors	*added
		- type/format/clarity/ protocol of instruction/information delivery	Whalley
		- standardization in instruction/information delivery	*added
		- media of instruction/information delivery (page phone, fax, paper, etc.)	*added
		Safety Culture	Jacobs & Haber
		- routine violations	Gerdes
		- safety/economy trade-off	Gerdes
		- openness in communication	Gerdes

위의 4개의 큰 그룹들내에서 세부 특성별로 여러 하부 그룹들로 나누어 분류하여, 총 수행영향인자 집합을 표 2에 제시하였다. 표 2에서 각 Level은 수행영향인자 집합을 특징별로 그룹핑하여 계층적으로 표현한 것이다. 위에서 여러 방법들에서 유사한 의미를 가지지만 사용하는 용어가 방법들마다 상이한 경우, 여러 용어중 대표적인 용어를 선택하거나 적절한 다른 용어를 사용하였다.

3.2 인간신뢰도분석 방법에서의 수행영향인자 분류체계의 특성 및 추이

본 절에서는 인간신뢰도분석 방법에서 사용되고 있는 수행영향인자에 어떤 인자들을 중요한 인자로 선정하여 사용하고 있으며, 선정하고 있는 용어의 의미의 수준이 어느 정도인지를 조사하였다.

첫째, 인간신뢰도분석 방법이 발전함에 따라 다양한 수행영향인자들이 고려되게 되었다. 초기의 인간신뢰도분석 방법인 THERP (Swain & Guttmann, 1983), ASEP (Swain, 1987), HCR(Hannaman et al, 1984) 등에서는 운전원의 훈련·경험 수준, MMI 수준, 스트레스 수준 등과 같은 매우 제한된 수행영향인자를 사용하고 있다. 전문가 판단에 의존하는 기법인 SLIM(Embrey, 1984), IDA(Phillips et al., 1990) 등에서는 운전원 한 개인의 특성뿐만 아니라 조직 및 팀 영향까지 고려할 수 있게 되었으며, INTENT(Gertman et al., 1992) 에서는 더 나아가 안전문화도 중요한 인자로 선정하였다. 최근 인간오류분석 기법으로 등장한 CREAM(Hollnagel, 1998), INCORECT (Kontogiannis, 1997) 등에서는 인자들에 대한 정의가 이전 방법들보다 구체적이게 되었으며, 조직 및 팀 영향, 시스템 특성과 인간의 인지적인 오류의 가능성에 영향을 미치는 동시작업의 유무(simultaneous goals and tasks)와 같은 인자까지 다루게 되었다. 또한 최근 NRC에서 개발한 ATHEANA(US NRC, 1998)에서는 시스템의 동적 특성을 주요한 영향인자로 고려하고 있다. 중요한 수행영향인자로서 고려되고 있는 인자들을 정리하면 다음과 같다. 초기에는 인간 개인의 특성과 절차서, MMI 등 극히 제한적인 인자들을 다루었고 그 정의도 모호하였지만, 점차적으로 전반적인 인자들을 다루게 되면서 팀 영향인자와 안전문화를 포함한 여러 조직인자들, 시스템의 동적 특성, 동시작업의 유무 등을 인간오류의 가능성에 영향을 미치는 주요 인자로서 고려하게 되었다.

둘째, 인간신뢰도분석 방법들에서 선정하고 있는 인자들을 대부분의 방법들이 중요하다고 고려하고 있는 인자들과 몇몇 방법들이 사용하고 있는 인자들, 그리고 소수의 방법들에서 사용하고 있는 인자들 별로 나누어서 정리해 보면 다음과 같다.

- 다수의 방법들이 사용하고 있는 인자들: Training, Experience, Procedure, MMI/Information, Time (Time의 경우, IDA, INTENT, Rogers'를 제외한 방법들이 모두 사용).
- 몇몇 방법들이 사용하고 있는 인자들: Stress(SLIM, INTENT, Taylor-Adams', Rogers'), Workload(INTENT, Taylor -

Adams', Rogers'), Motivation(SLIM, IDA, INTENT, Rogers'), Task complexity(PLG-SLIM, HRMS, Taylor-Adams', Rogers'), Simultaneous tasks /goals(PLG-SLIM, CREAM, Kontogiannis'), Working condition (CREAM, Kontogiannis', Rogers'), Supervision(INTENT, Kontogiannis', Taylor-Adams', Rogers'), Team factors(SLIM, CREAM, Kontogiannis, Rogers'), Communication(INTENT, Taylor-Adams', Rogers').

- 소수의 방법들이 사용하고 있는 인자들: Adequacy of resources (Julius'), Decision making criteria (Kontogiannis'), Response dynamics & system coupling (Kontogiannis'), Availability of equipment (Julius'), Trend and value of critical parameters (Macwan's, Julius'), Time of day (CREAM), Organization factors (Kontogiannis'), Task organization (HRMS), Safety culture (INTENT, Rogers')

셋째, 인자의 표현과 인자의 의미(정의)가 모호한 것들은 최근에 개발되고 있는 CREAM (Hollnagel, 1998), INCORECT (Kontogiannis, 1997) 등의 방법들에서 사용을 피하고 있는 것을 볼 수 있다. 예를 들어, 'stress', 'workload', 'task complexity' 등과 같은 인자들은 주어진 시간, 훈련 정도, 직무의 수준과 성격, 동시 수행 작업량 등 여러 인자들의 복합적 영향으로 나타나는 결과를 표현하고 있는 인자들로서, 최근 방법들에서는 사용하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, 'safety culture', 'organization factor' 등과 같은 인자도 그 의미가 모호하거나 포괄적인 인자들로서 구체적인 세부 인자와 관련된 표현을 사용하거나 이들 인자들에 대한 정의와 의미를 분명히 결정해주는 것이 평가를 용이하게 하고 평가의 일관성을 유지할 수 있도록 할 것이다.

3.3 원전 사고관리 상황하에서의 주요 수행영향인자의 도출

3.3.1. 원전 사고관리 상황의 주요 특성과 관련 영향인자의 도출

원전 사고관리 상황에서의 인간오류분석을 위해 사고관리시의 주요 상황의 특성을 분석하고, 이것을 바탕으로 사고관리 상황에서 인간의 수행도에 영향을 주는 주요 인자, 즉 수행영향인자의 요소를 결정하고 구체적 인자의 선정시 반영한다. 사고관리시에 예측되는 주요 상황적·직무적·조직적 특성을 관련 문헌자료(전력연구원, 1997; 한국원자력연구소, 1996; USNRC, 1988; USNRC, 1989)들을 토대로 다음 4가지로 분류하여 정리하였다. 표 3은 사고관리시의 주요 상황적 특성과 관련된 요소들을 요약·정리한 것이다.

첫째, 사고관리시에 요구되는 대부분의 운전원 직무는 인간의 단순한 행위 수준이 아닌 관찰, 정보수집, 진단, 평가, 계획, 의사결정 등 인지적인 기능을 요구하는 직무들로 구성되어 있다. 이러한 직무들에는 운전원의 훈련과 경험에 바탕을 둔 지식과 기술이 이러한

상황을 대처하는 중요한 요소가 되며, 절차서와 필요한 정보의 적절한 제공 등이 직무 수행의 성공에 중요한 기여를 할 것이다.

둘째, 사고관리시에 발전소는 시간에 따라 시스템의 특성이 변하는 동적인 상황(dynamic situation)이 전개되며, 여러 사건들이 동시에 발생할 수 있는 복잡한 상황(complex situation)이 전개될 수 있다. 이러한 발전소의 동적인 상황이 운전원의 수행도에 영향을 끼칠 수 있으며, 동시에 요구되는 직무, 주요 시스템의 상태, 시간의 특성 등이 운전원의 수행도에 중요한 영향을 미친다.

셋째, 사고관리시에 요구되는 운전원 직무들은 정상상태시와 같은 단순한 운전원 개인의 직무 수행을 넘어서서 팀내외부간의 협력, 그리고 상위 조직의 정책과 의사결정 등을 필요로 하는 상황이 발생하게 될 것이다. 이러한 상황하에서는 팀 및 조직 인자들중 의사결정의 체계, 발전소 정책, 안전 문화 등이 중요한 영향을 주게 될 것이다.

넷째, 사고관리시에는 기존의 운전 영역과 다르게 열악한 작업 환경이 발생할 수 있으며, 이러한 환경 특성이 작업 수행의 성공여부에 직접적인 영향을 준다.

이러한 사고관리시의 상황적 특성과 관련있는 후보 영향인자들을 앞에서 얻은 표 2의 총 수행영향인자 집합으로부터 추출하였다. 표 4는 이 과정에서 얻은 후보 영향인자 집합을 정리한 것이다. 선정된 인자를 각 그룹(HUMAN, TASK, SYSTEM, ENVIRONMENT)별로 살펴보면, HUMAN 그룹에서는 사고관리와 같은 비상상황에 대한 대응인 만큼 운전원 개인의 신체적사회적 특성보다는 운전원 개인의 훈련과 경험을 통해 축적된 인지적 능력과 비상상황으로부터 오는 운전원의 심리적 영향과 대응 자세 등과 관련된 인자들이 선정되었다. TASK 그룹에서는

표 3. 사고관리시의 주요 상황적 특성과 관련 요소

사고관리시의 주요 상황 특성	관련 요소
- 인지적인 직무들로 구성 (관찰, 진단, 의사결정, 계획 등)	- 지식 (훈련, 경험) - 절차서 - 인간기계연계시스템 (MMI) 등
- 시스템의 동적인 전개 - 동시 사건 발생 가능	- 동적 시스템 상태 - 동시 요구 직무 - 작업 허용 시간 등
- 운전원 개인의 직무 수행을 넘어서는 팀내외부의 협력 - 상위조직의 의사결정을 필요	- 팀 및 조직 인자 - 의사결정 체계 - 발전소 정책 등
- 현장 작업의 필요 - 열악한 작업 환경 발생 가능	- 작업 장소 및 물리적 환경

표 4. 사고관리시의 상황적 특성을 고려하여 선정한 후보 수행영향인자 집합

HUMAN	TASK	SYSTEM	ENVIRONMENT
- knowledge, experience, training, competence - stress, burden, fear of consequences - attitude, morale, motivation - risk taking, confidence	Procedures - Procedures **Task Type** - type of man-machine interaction - level of cognition - dynamic/step-by-step activities **Task Attribute/ Requirement** - task criticality - task novelty - task consequences - degree of local operation - calculational requirement - anticipatory requirement - communication requirement - necessity of decision-making from higher organization - necessity of auxiliary tools - number of necessary information - degree of reference to other procedures - degree of discrepancy with familiar tasks - simultaneous goals/tasks	- **MMI/Information** - **System states** - trend of critical parameters - value of critical parameters - number of dynamic changing variables - degree of alarm avalanche - suddenness of onset - time adequacy	**Working Conditions** - physical constraints (for local activities) - time of day (circadian rhythm) **Team Factors** - team structure - role/responsibility - adequacy of distributed workload - team cooperation & collaboration - communication **Organization Factors** - work organization - supervision - shift organization - plant policy - adequacy of instruction - maintenance - safety culture - organization structure and manning

하부 그룹으로 Procedure와 Task Characteristics 으로 나누어지는데, Procedure 그룹은 그 자체로서 중요한 인자

가 될 수 있으므로 그룹 이름을 그대로 선정하였고, Task Characteristics 그룹에서는 사고 전개 상황과 시스템의 동적 상황으로부터 오는 직무의 특성과 관련한 인자들을 선정하였다. SYSTEM 그룹에서는 MMI 그룹과 System States 그룹은 그 자체로서 인적 수행도에 영향을 줄 수 있으므로 그룹 인자 이름을 그대로 선정하였고, Phenomenological Characteristics 그룹에서는 발전소의 동특성과 관련된 인자들인 'trend of critical parameters', 'value of critical parameters', 'number of dynamic changing variables', 'degree of alarm avalanche', 'suddenness of onset' 등과 시간과 관련된 인자는 'time adequacy'로 대표하여 선정하였다. 마지막으로, ENVIRONMENT 그룹에서는 하부 그룹 중 Physical Working Conditions 에서 현장 작업이 요구되는 직무에 대하여 접근 가능성을 평가하게 될 'physical constraints'와 작업 시점 인자인 'time of day'를 선정하였고, Team & Organizational Factors 에서는 사고관리와 같은 비상상황의 특성을 고려하여 영향력이 있는 인자들을 위주로 선정하였으며, 정상상태의 운전원 수행도에 영향을 미칠 수 있는 'work organization', 'investments and cuts', 'rewards and punishments' 등의 인자들은 다른 선정된 인자들에 비해서 그 영향력이 약할 것으로 예상되어 후보 인자에서 제외시켰다.

3.3.2. 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자 분류체계의 구조화

위에서 얻은 사고관리시의 후보 수행영향인자 집합은 인간신뢰도분석 수행에 적절하도록 재구성되어야 한다. 본 연구에서는 인간신뢰도분석에 적절한 수행영향인자의 요건을 위 '3.2 인간신뢰도분석 방법에서의 수행영향인자 분류체계의 특성 및 추이'에서 얻은 Insight를 토대로 다음과 같이 6개 항목으로 정하였다.

첫째, 인간의 수행도 및 인간오류의 발생에 중요하게 영향을 미치는 것으로 판단되는 인자들을 가능한한 모든 중요한 상황을 평가할 수 있도록 선정한다.

둘째, 인자들간에 의미가 중복되지 않도록 선정한다.

셋째, 오류 발생에 일차적으로 관련이 있는 인자들을 선정하도록 한다.

넷째, 오류분석에 실제적으로 반영가능한 인자들을 선정한다.

다섯째, 실제적으로 평가가능한 인자들을 선정한다.

여섯째, 인자의 의미가 분명히 드러나도록 구체적인 표현을 사용한다.

이와 같은 요건에 따라 적절한 인자를 선정하고, 대표 인자와 세부 평가항목을 구성하거나 유사한 인자를 그룹핑하는 일련의 구조화 과정을 거쳐서 최종적인 분류체계를 구성하였다. 표 4의 HUMAN group에서는 〈knowledge, experience, training, competence〉 중 인간신뢰도에서 실제적으로 활용

가능하고 통용되는 인자인 'Training & Experience'를 선정하였고, 〈stress, burden〉 등은 다른 인자들의 복합적 영향으로 인한 것이므로 제외시켰고, 'fear of consequence'는 TASK group에서 'task consequence'로 사용하였다. 〈attitude, morale, motivation, risk taking, confidence〉 등의 인자들은 사고관리 상황하에서 다른 인자들에 비해 영향정도가 상대적으로 낮고 실제적으로 오류분석에 반영하기 어려운 인자들이기 때문에 본 분류체계에서는 제외시켰다.

TASK group에서는 'Procedure" 대표인자는 그대로 사용하여 'Availability & Quality of Procedure'로 표현하였고, 세부 평가인자는 총 영향인자 집합의 상세 인자 중 5개를 선정하였다. 'Task Type'과 'Task Attribute/Requirement'에서는 'Task Type/Attribute'로 통합하여 표현하였으며, 'Task Type'에서는 'type of man-machine interaction'과 'dynamic/step-by-step activity'를 선정하였고, 'Task Attribute/Requirement'에서는 'task criticality/consequence'와 'degree of discrepancy with familiar tasks'를 선정하였다. 'Task Attribute/Requirement'에서 다른 인자들은 주로 Requirement와 관련된 인자들로서 운전원의 수행도와는 다른 면에서 분석되어야 할 내용으로 본 분류체계 개발에서는 포함시키지 않았다. 그리고, 'simultaneous goals/tasks'는 그 자체로서 중요한 인자이므로 별도의 대표인자로서 다루었다.

SYSTEM group에서는 'MMI/ Information'은 'Availability & Quality of Information'으로 표현하였고, 세부 인자는 총 영향인자 집합으로부터 선정하여 구성하였다. 주요 변수의 상태나 추이, 경보 상태 등을 하나로 묶어 'status & trend of critical parameters'로 표현하였다. 표 4의 'System States'는 안전관련 계통에 대하여 국한하여 'status of safety system/component'으로 표현하였고, 세부 인자 중 4개의 인자를 세부 평가인자로 선정하였다. 시간 관련 인자는 별도의 대표인자로 다루어서 'time pressure'로 대표하였으며, 실제 시스템 상의 가용한 시간과 운전원의 수행시간의 상대적 비로써 표현된다.

ENVIRONMENT group의 'Physical Working Conditions'에서는 'time of day'는 실제 오류분석에 반영하기 어려우므로 본 분류체계 개발에서는 제외시켰고, 'physical constraints' 중에서는 직무가 요구되는 작업 위치('task location')와 현장 작업이 요구되는 직무인 경우 접근 가능성('accessibility')을 평가하도록 했다. 'Team Factors' 중에서는 'Team Cooperation & Communication'으로 표현하고 하부 인자로서는 팀 구성원의 역할 및 책임, 팀 구조와 협력 수준, 작업 부하의 적절성, 의사소통 체계 등을 포함하도록 구성하였다. 마지막으로, 'Organization' 인자들에서는 비상 상황의 특성과 관련하여 'supervision', 'plant policy', 'safety culture' 등이 관련될 수 있으나 'supervision'의 경우 팀 구조와 관련이 있으므로 'Organization' group에서는 생략하였고, 'Plant Policy & Safety Culture'로 표현하였다.

표 5. 구축된 원전 사고관리 상황하에서의 주요 수행영향인자 체계

	주요 수행영향인자	세부 평가 항목
HUMAN	1. Training & Experience	1. Adequacy of training (frequency, recent training, fidelity of simulation program) 2. Experiences/practices of real operating events 3. Learning of the past events/experiences 4. Career of operator
TASK	2. Availability & Quality of Procedures	1. Availability 2. Format or type 3. Clarity of instruction and terminology 4. Decision making criterion 5. Logic structure
	3. Simultaneous Goals/Tasks	1. Number of simultaneous goals/tasks 2. Priority bet. goals/tasks
	4. Control Type of Task	1. Type of man-machine interaction 2. Dynamic/step-by-step 3. Task criticality/consequences 4. Degree of discrepancy with familiar tasks
SYSTEM	5. Availability & Quality of Information	1. Information availability (instrumentation fail/stuck) 2. Clearness of meaning (Direct indication/Interpretation required/ Ambiguous/Unreliable information) 3. Distinguishability of information 4. Control display relationships
	6. Status & Trend of Critical Parameters	1. Value of critical parameters 2. Trend of critical parameters (Rate of change of critical parameters 3. Number of dynamic changing variables 4. Degree of alarm avalanche
	7. Status of Safety System/Component	1. Success/Fail state of safety system/component 2. Level of trust on the system/component 3. Number of failed/stuck components 4. Previous operation history and current status of safety system
	8. Time Pressure	1. Available time vs. Required time
ENVIRON-MENT	9. Working Environment Features	1. Task location 2. Accessibility
	10. Team Cooperation & Communication	1. Clearness in role/responsibility definition 2. Direction, type, method, protocol 3. Standardization in instruction/information delivery 4. Team cohesiveness/collaboration 5. Adequacy of distributed workload
	11. Plant Policy & Safety Culture	1. Plant specific prioritized (or preference for /objection to) goals/strategies 2. Safety/economy tradeoff 3. Routine violations

최종적으로 도출한 수행영향인자와 세부 평가항목를 갖춘 수행영향인자 체계를 표 5에 정리하였다. 총 11개의 주요 수행영향인자와 각각에 대한 세부 평가항목이 구성되었다. 이들 인자들은 인간신뢰도분석 방법의 개발과 관련하여 계속적인 검토·수정 과정이 이루어질 것이다.

4. 실제 원자력 사건/사고 사례분석을 통한 검증

본 절에서는 기 발생한 실제 원전 사건 및 사고 사례의 분석을 통하여 표 5의 수행영향인자 분류체계의 실용성을 평가해 보고자 한다. 본 분석에서 고려한 원전 사례는 1979년의 TMI-2 원전 사고, 1986년의 Chernobyl 원전 사고, 그리고 1999년도에 발생한 JCO 핵연료가공공장 사고이다. 각 사건/사고에 대한 개요와 인적오류가 관련되어 있는 주요 조치와 이에 연관되어 있는 영향인자를 분석하여 정리하였다.

4.1 TMI-2 원전 사고 (장순흥, 백원필, 1999; Reason, 1990; Meshkati, 1991; Wickens, 1992)

TMI-2 원전 사고는 1979년 미국 펜실베니아 주 TMI (Three Mile Island) 원자력 발전소 2기중 2호기에서 발생한 사고이다. 보수 작업자의 2차 계통 작업 도중 작업 실수로 인하여 증기발생기로 물을 공급하는 주급수 펌프(Main Feedwater Pump)가 정지되었고, 잇달아 터빈이 정지됨으로써 사고는 시작된다. 주급수 펌프의 정지로 원자로내의 온도와 압력이 상승하여 사고시작 후 3초경에 가압기 압력방출밸브(PORV: Power-Operated Relief Valve)가 자동 개방되었고, 약 8초후 가압기 고압신호에 의하여 제어봉이 삽입되어 원자로가 정상적으로 정지되었다. 그러나, 시스템 상의 두 가지 큰 문제와 잇따른 인간오류의 개입으로 사고가 더욱 악화되어 원자로심이 손상되는 상황까지 이르게 되었다. 첫 번째 시스템 상의 오류는 약 38초후 보조급수(또는 비상급수) 펌프가 작동압력에 따라 정상적으로 작동되었으나 두 개의 배관 밸브가 닫혀져 있음으로 인하여 약 8분 동안 증기발생기로의 급수가 이루어지지 않게 되었다. 두 번째 시스템 오류는 약 13초후 고압으로 자동 개방되었던 PORV가 원자로내 압력이 닫힘 상태 이하로 감소되었음에도 불구하고 닫히지 않고 개방된 상태로 약 2시간 이상 지속되어 원자로 냉각수의 방출통로가 되었다. 한편, 운전원은 PORV 계기의 설계 결함(밸브의 실제 상태를 표시하도록 설계되어 있는 것이 아니라, 밸브의 작동 신호를 나타내도록 설계되어 있었음) 등으로 말미암아 장시간 동안 상황 파악을 하지 못한 상태였고, 약 2분후 정상적으로 작동되었던 고압 안전주입계통(HPSI: High-Pressure Safety Injection)을 수동적으로 차단시키는 치명적인 오류를 유발하게 되었다.

TMI-2 사고는 인간오류나 시스템 오류 등 단순히 어느 하나의 문제나 표면적인 문제로 인하여 발생하였다기 보다는 그 이면에 여러 가지 조직적인 문제들과 잠재적인 오류 등이

표 6. TMI-2 사고의 주요 인적오류사건과 관련 영향인자

주요 인적오류 개입 사건	상황적 배경	관련 영향인자
1. 주급수 펌프 정지후, 비상급수 펌프가 작동되었으나 배관 밸브가 막혀 있음으로 인해 약 8분간 급수가 공급안됨.	- 이틀 전 현장 운전원의 보수 작업 중 닫힘상태로 방치해 둠. - 8분 후 증기발생기 저압력/저수위 상태 확인하고 밸브 개방함.	- Training (Education) - Procedure
2. 가압기 압력방출밸브(PORV)가 원자로내 고압으로 개방되었다가 압력이 설정치 이하로 떨어진 후 닫힘 신호가 났으나, 닫히지 않고 개방상태로 고착됨. 운전원이 PORV 개방상태를 2시간 이상 동안 파악하지 못함 (원자로냉각재 상실사고).	- PORV의 상태를 나타내는 계기가 밸브의 실제 상태를 나타내는 것이 아니라, 밸브에 가해진 신호 상태를 나타내도록 설계되었음. - 다른 시스템의 정보를 통해서 상황을 판단할 수도 있었으나, 주요 계기가 제어실 패널 뒤쪽에 위치해 있거나, 이전부터 유사한 값을 유지하고 있어서 운전원의 주의를 끌지 못했음. - 100개 이상의 경보가 정리되지 않은 채로 제시되고 있어서 상황판단에 혼란이 있었음.	- Availability of Information - Alarm avalanche - Distinguishability of information
3. 사고개시 후 약 2분 후 원자로내 압력신호에 따라 고압안전주입(HPSI) 계통이 자동적으로 작동되었으나, 약 4분 후 운전원은 가압기 수위가 고수위로 표시되어 있는 것을 확인하고 (PORV의 개방 고착된 상태를 인식하지 못한 상태), 원자로내 냉각수가 충분한 상태인 것으로 판단하고 가압기 만수위 방지를 위해 HPSI 계통을 수동으로 정지시킴. 이러한 조치가 발전소를 중대한 노심손상으로 이끈 주요 오류사건이 되었음.	- 운전원 교육/훈련시 가압기 만수위에 대한 주의가 강조되었음 (가압기가 만수위가 되면 압력 조절 기능이 상실되기 때문).	- Training inadequacy

복합적으로 결부되어 발생되었다. 이와 같이 TMI-2 사고에 여러 가지 요인들이 작용했지만, 본 논문에서는 비상사고시 인적행위에 영향을 준 인자를 중심으로 분석하였다. 표 6은 TMI-2 사고개시 후 개입되었던 주요 인적오류사건과 관련된 영향인자를 분석한 결과를 보여주고 있다.

4.2 Chernobyl 원전 사고 (장순흥, 백원필, 1999; Reason, 1990; Meshkati, 1991)

Chernobyl 원전 사고는 1986년 구소련의 우크라이나 공화국내 동일 지역에서 운전중이던 4기의 RBMK-1000 원자로중 4호기에서 발생했다. 이 사고는 정기 보수작업에 들어가기 전에 원자로 정지 후 비상 디젤 발전기가 작동할 때까지의 시간 동안에 터빈이 비상 전력을 제공할 수 있는 지를 시험하는 도중에 발생했다. RBMK-1000 원자로형은 설계 특성상 저출력 (정격 출력의 20 % 이하) 운전 중에는 기포 증가에 따른 중성자 반응도 계수가 증가하게 되어 핵반응이 급격히 일어날 수 있어 이 범위에서의 저출력 운전은 엄격히 금지되어 있다. 원래의 실험은 25 % 출력에서 시행하기로 계획되어 있었다. 그러나 운전원의 실수로 출력이 7 % 수준으로 떨어지게 되었고, 이 상태에서 (원자로 특성상 가장 불안정한 영역) 실험은 지속되었다. 한편, 비상 급수 계통인 ECCS (Emergency Core Cooling System)는 실험을 위해 전원을 단절시켜 놓은 상태이었고, 8기의 냉각재 펌프를 모두 기동시켰는데, 이로 인해 냉각재 유량이 증가하고 증기 압력이 감소되었다. 냉각재 유량의 증가로 인하여 반응도가 감소되고 이를 보완하기 위하여 대부분의 제어봉을 노심 밖으로 인출해 놓았다(결과적으로 6-8개 정도의 제어봉만을 남겨둔 상태이고, 제어봉을 다시 삽입하는 데는 약 20초가 소요된다: 규정 위반 사항임). 노심이 불안정한 상태에서 증기 압력을 유지하기 위해 급수 유량을 줄였고, 이로 인해 노심의 냉각 기능 저하에 따라 핵연료에서의 기포 생성이 증가하고 반응도가 급상승하여 핵연료가 파손되고, 핵연료와 물이 반응하여 증기 폭발이 발생하여 원자로가 파괴하기에 이르렀다.

Chernobyl 원전 사고는 실험 계획에서부터 실험 수행 과정까지 다양한 운전원 행위들과 원자로 시스템 특성이 결부되어 사고가 발생되었다. 또한 운전원 행위 이전에, 원자로 물리 및 안전에 대해 충분한 지식을 가지고 있지 않았던 시험을 주관하는 그룹과 Chernobyl 원전 운전원 그룹 사이에 충분한 정보 교환과 사전 준비가 부족한 상태에서 실험이 시작되었던 것도 사고 발생의 한 기여 요소가 될 수 있을 것이다. 이러한 상태에서 참여한 운전원 그룹은 정기 보수작업을 대비해 원자로를 정지해야하는 계획이 후속 되어 있었고 시간 상의 촉박함이 겹쳐서 시험을 빠른 시기에 완료하는 것이 우선시되어 저출력 안전성에 대한 위험성을 낮게 평가하고 여러 규정들을 위반하면서 시험을 수행하게 되었다. 본 사고와 관련한 인적행위에 영향을 끼친 영향인자들은 훈련/교육(지식)의 결여, 시간의 긴급성, 팀 협력의 부적절, 안전 의식(문화) 결여 등으로 분석된다.

4.3 JCO 핵연료 변환공장 사고 (하재주 외, 1999; Sasou et al., 2000; Tanabe and Yamaguchi, 2000; Kohda et al., 2000)

1999년 9월 30일 일본 도카이무라에 소재한 JCO 사(社)의 핵연료 변환공장에서 작업자의 부적절한 행위로 인한 일본 최초의 핵임계 사고(criticality accident)가 발생하였다. 사고 발생은 UF6 우라늄 분말을 질산으로 용해하고 침전 및 열처리하는 정제 공정

작업중에 발생하였는데, 우라늄 투입량을 2.4 kg 이하인 작업 공정에서, 이를 위반하고 작업을 가속화시키기 위해 18.8 % 농축도의 우라늄 16.6 kg 을 투입함으로써 사고가 발생하였다. 또한, 작업 공정 상 UF6 우라늄 분말을 질산으로 용해시키는 질산 용해조(dissolution tank)에 투입한 후, 우라늄 량을 2.4 kg 이하로 조절하는 중간 저장조(buffer column)를 거친 후 침전조(precipitation tank)로 투입되도록 되어 있는데, 작업자들은 이러한 규칙을 무시하고 바로 침전조에 18.8 % 농축도 16.6 kg의 우라늄을 투입함으로써 임계사고가 유발되었다. 작업자들이 절차서의 규정을 무시하는 이러한 부적절한 행위에 영향을 미친 근본 문제들을 여러 사고분석 자료들을 토대로 정리하면 다음과 같다.

(1) 작업자들이 예정된 작업 계획보다 서둘러 작업을 완료시키려 하였다.

(2) 근본적으로 작업자들은 핵임계 사고에 대한 지식이 없었다. 이것은 JCO의 조직적 결함 문제인데, 초기에는 임계 사고에 대한 안전 교육이 수행되었으나, 그후 임계사고에 대한 교육은 생략하고 절차서의 규정을 잘 따를 것을 강조했다. 또한, 중간 저장조(buffer column) 사용에 대한 절차서 내용을 수정하였지만 단순히 사용 절차에 대해서만 다루고 있었지 안전 문제에 대한 지침은 포함되어 있지 않았다. 그래서 작업자들이 핵임계 사고에 대해서 고려할 여지가 전혀 없었다고 볼 수 있다.

(3) 작업자들이 규정된 절차를 쉽게 무시하고 단순한 작업을 선택하게 되었는데, 이러한 행위에 대한 배경은 다음과 같다. JCO는 과거에도 몇 차례 절차서를 수정한 일이 있었는데, 대부분 작업이 이루어진 후 작업 방식을 재기술하는 수순이었다. 또한 부적절한 방법(illegal method)인 것을 알고 있으면서도 회사 내부적으로 승인하여 사용한 사례가 있었다. 이런 것으로 유추하여 볼 때, JCO 종사자의 전반적인 의식 속에는 더 나은 작업 방법이 발견되면 절차서가 개정될 부분으로 생각하는 습성이 있었을 것으로 추정된다.

(4) 작업 당시 작업 관리자(supervisor)에 의해 침전조 사용에 대한 확인이 있었지만, 작업 관리자는 현재의 작업이 고농축 우라늄을 사용하는 작업이라는 것을 인식하지 못하고 있었다. 이것은 고농축 우라늄 작업이 일상적인 작업이 아니었고, 또한 최근 고농축 우라늄 작업이 3년 전에 이루어졌다.

이러한 사고 원인분석 결과를 종합해 볼 때, JCO 사고는 단순한 작업자의 부적절한 행위로 발생된 사건이라기 보다는 '작업자에 대한 교육/훈련의 부적절', '절차서 부적절', '관리/감독의 부적절', '훈련/경험의 시점 및 빈도' 등을 포함하여 안전성보다는 생산성 향상으로 치우쳐있는 조직 전반의 '안전문화의 문제' 가 드러난 사고로 볼 수 있다.

4. 결론 및 논의

지금까지 원자력발전소 사고관리 상황하에서의 인간오류 평가를 위한 주요 수행영향인자의 선정과정과 선정된 주요 수행영향인자에

대해서 설명하고, 실제 원자력 산업에서 발생하였던 사고 사례의 분석을 통하여 분류체계의 적절성을 확인하였다. 수행영향인자 선정을 위하여 상세 수행영향인자 분류체계와 인간신뢰도분석 방법에서 사용하고 있는 수행영향인자 분류체계를 수집, 검토하였다. 상세 수행영향인자 분류체계로서는 Swain's THERP, Williams' HEART, Whalley's PHECA, Gerdes' Influencing Factors, Bellamy's PSF Taxonomy 등 총 5개의 분류체계에서 사용하고 있는 수행영향인자들을 수집하였고, 인간신뢰도분석 방법중에서는 SLIM, INTENT, IDA, HRMS, Julius' Errors of Commission, Macwan's Errors of Commission, INCORECT, CREAM, Taylor-Adams PSF Taxonomy for CORE-DATA, Rogers PSF Taxonomy for CORE-DATA 등 총 10개의 분류체계들을 수집하였다. 먼저, 전체 수행영향인자들을 하나의 새로운 분류체계 내에서 취합하였고, 또한 인간신뢰도분석 방법중에서 사용하고 있는 수행영향인자들의 특성과 추이 등을 분석하여, 인간신뢰도분석에 적절한 수행영향인자의 선정 기준을 설정하는데 활용하였다. 본 연구에서 설정한 선정 기준에 따라 최종적으로 11개의 수행영향인자를 도출하였고, 각 인자에 대한 세부 평가항목을 구성하였다. 또한, TMI 원전 사고, Chernobyl 원전 사고, JCO 핵연료 변환공장 사고 등 세 개의 원자력 산업 사고의 발생에 기여했던 인적행위를 분석하여 관련 영향인자를 파악함으로써 구축한 영향인자 분류체계의 적절성을 검증하였다.

본 연구에서 제시된 수행영향인자는 원전의 사고관리 상황에서의 인간오류분석을 목적으로 개발되었으므로 다른 분야에서의 적용성에 대해서는 사전 검토가 필요할 것이다. 제안된 수행영향인자 분류체계는 주어진 운전원 작업 상황의 사전 평가 및 인간오류의 발생 가능성 예측과 정량적인 평가 등에 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

장순흥, 백원필, 원자력 안전, 청문각, 1999.

전력연구원, 원전 사고관리계획 방향 정립 연구, T.R.96NJ11.97.77, 1997.

하재주, 외 다수, 일본 이바라키현 핵연료 가공회사(JCO) 임계핵사고 현황 및 분석(I), KAERI/TR-1402/99, 한국원자력연구소, 1999.

한국원자력연구소, 사고관리기법 및 코드개발, KAERI/RR-1742/96, 1996.

Acosta, C. & Siu, N., Dynamic Event Trees in Accident Sequence Analysis: Application to Steam Generator Tube Rupture, Reliability Engineering and System Safety, 41, 135-154, 1993.

Bellamy, L. J., The Quantification of Human Fallibility, Journal of Health and Safety, 6, 13-22, 1991.

Chu, T.L., et al., Evaluation of Potential Severe Accidents During Low Power and Shutdown Operations at Surry, Unit 1, NUREG/CR-6144, Vol. 2, Part 1B, USNRC, 1994.

Dougherty, Ed, Context and Human Reliability Analysis, Reliability Engineering and System Safety, 41, 25-47, 1993.

Embrey, D., SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement, NUREG/CR-3518, 1984.

Gerdes, G., Identification and Analysis of Cognitive Errors : Application to Control Room Operators, Ph.D. Thesis, 1997.

Gertman, D.I., et al, INTENT: A method for estimating human error probabilities for decision-based errors, Reliability Engineering and System Safety, 35, 127-136, 1992.

Gibson H., Basra, G. & Kirwan, B., Development of the CORE-DATA Database, The Final IAEA-RCM on Collection and Classification of Human Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessments, May 11-15, 1998.

Hannaman, G.W., Spurgin, A.J. and Lukic, Y.D., Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis, EPRI RP 2170-3, 1984.

Hollnagel, E., Cognitive Reliability and Error Analysis Methodology, Elsevier, 1998.

Huang, Y., Modeling Control Room Crews for Accidents Sequence Analysis, Ph.D. Dissertation, MIT, 1991.

Jacobs, R. & Haber, S., Organizational Processes and Nuclear Power Plant Safety, Reliability Engineering and System Safety, 45, 75-83, 1994.

Julius, J., Jorgenson, E., Parry, G.W. and Mosleh, A.M., A Procedure for the Analysis of Errors of Commission in a Probabilistic Safety Assessment of a Nuclear Power Plant at Full Power, Reliability Engineering and System Safety, 50, 189-201, 1995.

Kirwan, B., "The Development of A Nuclear Chemical Plant Human Reliability Management Approach: HRMS and JHEDI," Reliability Engineering and System Safety, 56, 107-134, 1997.

Kohda, T., Nojiri, Y. and Inoue K., Root Cause Analysis of JCO Accident Based on Decision-Making Model, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM -5), Osaka, Japan, Nov. 27 - Dec. 1, 2000.

Kontogiannis, T., "A framework for the analysis of cognitive reliability in complex systems: a recovery centred approach," Reliability Engineering and System Safety, 58, 233-248, 1997.

Macwan, J. and Mosleh, A., A Metho-

dology for Modeling Operator Errors of Commission in Probabilistic Risk Assessment, Reliability Engineering and System Safety, 45, 139-157, 1994.

Meshkati, N. Human Factors in Large-scale Technological System's Accidents: Three Mile Island, Bhopal, Chernobyl. Industrial Crisis Quarterly, 5, 133-154, 1991.

Phillips, L. D., Humphreys, P., Embrey, D. and Selby, D.L., 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.

Reason, J., The Chernobyl Errors, Bulletin of The British Psychological Society, 40, 201-206, 1987.

Reason, J., Human Error, Cambridge University Press, 1990.

Salas, E., Dickinson, T.L., Converse, S.A., and Tannenbaum, S.I., Toward an Understading of Team Performance and Training, in Teams, Their Training and Performance, R.W. Swezey and E. Salas (Eds.), Albex Publishing, Norwood, N.J., 1992.

Sasou, K. Goda H. and Hirotsu Y., An Analysis on Human Factor Issues in Criticality Accident at a Uranium Processing Plant, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-5), Osaka, Japan, Nov. 27 - Dec. 1, 2000.

Swain, A. and Guttmann, H.E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US NRC, USA 1983.

Swain, A., Accident Sequence Evaluation Program: Human Reliability Analysis Procedure, NUREG-CR-4772, US NRC, USA, 1987.

Tanabe, F. and Yamaguchi Y., Cognitive Systems Engineering Analysis of the JCO Criticality Accident, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-5), Osaka, Japan, Nov. 27 - Dec. 1, 2000.

Taylor-Adams, S.E., An Overview of the Development of the Computerized Operator Reliability and Error Dababase (CORE-DATA), The First IAEA-RCM on Collection and Classification of Human Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessments, April 3-7, 1995.

U.S. NRC, Integration Plan for Closure of Severe Accident Issues", SECY-88-147, May 1988.

U.S. NRC, Staff Plans for Accident Management Regulatory and Research

Program", SECY-89-012, Jan. 1989.

U.S. NRC, Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), NUREG-1624, 1998.

Whalley, S.P., Factors affecting Human Reliability in the Chemical Process Industry, Ph.D. thesis, Aston University 1987.

Wickens, C.D., Engineering Psychology and Human Performance, 2nd Ed., Harper Collins Publishers, 1992.

Williams, J.C., A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance, Proceeding of IEEE 4th Conference on Human Factors and Power Plants (pp. 436-450), Monterey, California, 1988.

Zamanali, J. et al. Evolutionary Enhancement of the SLIM-MAUD Method of Estimating Human Error Rates, Proceeding of ANS Topical Meeting, Boston, MA, 1992.

저자 소개

◈ 김재환

서울대학교 원자핵공학과 학사. 한국과학기술원 원자력공학과 석사.

현재: 한국원자력연구소 종합안전평가팀 선임연구원.

관심분야: 인적 및 조직안전연구.

◈ 정원대

고려대학교 산업공학과 학사.

한국과학기술원 산업공학과 석사 · 박사.

현재: 한국원자력연구소 종합안전평가팀 책임연구원.

관심분야: 인적 및 조직안전연구.

논문접수일 (Date Received): 2000/10/20
논문게재승인일(Date Accepted): 2001/7/18