원자력발전소 비상운전시의 운전원 인지오류 예측 지원체계의 개발

김재환† · 정원대
한국원자력연구소
(2001. 1. 13. 접수 / 2001. 6. 28. 채택)

A Framework for the Support of Predictive Cognitive Error Analysis of Emergency Tasks in Nuclear Power Plants

Jae-Whan Kim† · Won-Dae Jung
Korea Atomic Energy Research Institute
(Received January 13, 2001 / Accepted June 28, 2001)

Abstract : This paper introduces an analysis framework and procedure for the support of the cognitive error analysis of emergency tasks in nuclear power plants. The framework provides a new perspective in the utilization of influencing factors into error prediction. The framework can be characterized by two features. First, influencing factors that affect the occurrence of human error are classified into three groups, i.e., task characteristic factors(TCF), situation factors (SF), and performance assisting factors(PAF). This classification aims to support error prediction from the viewpoint of assessing the adequacy of PAF under given TCF and SF. Second, the assessment of influencing factors is made by each cognitive function. Through this, influencing factors assessment and error prediction can be made in an integrative way according to each cognitive function. In addition, it helps analysts identify vulnerable cognitive functions and error factors, and obtain specific error reduction strategies. The proposed framework was applied to the error analysis of the bleed and feed operation of nuclear emergency tasks.
Key Words : cognitive error analysis, human error analysis

1. 서 론

원자력발전소의 안전성을 정량적으로 평가하기 위한 기법으로서 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 기법이 활용되고 있다. PSA 기법은 시스템의 안전성을 위협하는 일련의 사건들(기계 고장 및 인간 오류)의 조합으로 된 사고 시나리오를 개발하고, 각 시나리오의 발생 확률을 기계의 신뢰도 모델과 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis: HRA) 기법을 이용하여 정량적으로 평가하여 각 확률을 통합함으로써 전체 시스템의 안전성을 얻어내는 시스템 안전성 평가 도구이다. HRA는 PSA에서 인간에게 요구되는 직무의 수행 가능성을 인적오류확률(Human Error Probability: HEP)로 계산하는 역할을 담당하고 있다.

†To whom correspondence should be addressed.
jhkim4@kaeri.re.kr

HRA에 대한 PSA의 정량적 요구로 말미암아, THERP[1], ASEP[2], HCR[3], SLIM[4] 등 기존의 HRA 기법들이 인간의 의사결정 과정 중에 나타나는 인지오류의 분석에는 취약했으며, 외적 행위의 정량적 평가에 치중되어 있다는 비평이 제기되어 왔다. 최근 들어 인간의 인지적 기능의 중요성이 인식되기 시작하면서, 인적오류분석에 대한 연구도 인간의 외적 행위의 평가로부터 인지과정 중에 발생할 수 있는 인지오류 가능성의 분석에 관심이 기울어져 왔다. 원자력발전소의 비상사고시 운전원들은 발전소의 이상 상태를 감지하고, 사고를 중지 및 완화하기 위하여 가용한 정보와 경험을 바탕으로 문제 상황을 판단하고, 문제를 해결하기 위한 전략이나 적절한 절차를 선택하고 수행하는 일련의 과정을 통하여 사고를 종결하게 된다. 이와 같이 운전원은 물리적 수행 이전에 일련의 인지적 과정들을 거치게 되며, 각각의 인지적 활동은 올바른 전략의 선택과 수

행에 결정적인 역할을 하게 된다. 그러므로, 오류 분석에 있어서 이러한 인지 과정 중 오류 유발 가능성이 높은 인지단계(혹은 취약한 인지기능)와 취약한 상황 및 인적요소를 밝혀내는 것은 오류 감소나 수행도 향상 측면에서 중요한 작업이다.

기존 HRA의 이러한 한계점을 보완하기 위하여, 최근 인지공학 기술과 기발생한 사건분석 등을 토대로 하여 인간의 의사결정 과정중에 발생할 수 있는 오류 유발 상황과 가능한 오류 유형을 분석할 수 있는 방법들이 개발되고 있다. 이러한 방법들에는 HRMS[5], CREAM[6], INCORECT[7], MERMOS[8], ATHEANA[9] 등이 있다. 이들 중 예측적 오류분석 방법의 접근 방식은 다음과 같이 크게 4단계로 구성되어 있다: (1) 시나리오 및 직무 분석, (2) 상황요소 분석, (3) 인지기능 분석, (4) 오류유형 예측. 그러나, 현재의 오류 예측 과정에는 영향인자와 인지기능별 수행도 사이에 존재하는 이러한 방향성 있는 영향 관계를 적절히 반영할 수 있는 분석 체제가 마련되어 있지 않다. 이로 인하여, 오류예측 과정에서 개별적으로 평가한 영향인자 들을 어떠한 관점에서 어떠한 인자들을 인지기능별 오류유형 예측에 반영해야 하는지가 모호하게 되며, 오류유형 예측이나 영향요인의 분석이 적절하게 이루어지지 않게 된다. 인지오류 예측의 많은 부분이 분석자의 지식이나 경험에 의존하고 있지만, 수 개의 영향인자를 인지기능별 오류 예측에 고려할 때 분석자를 지원할 수 있는 적절한 분석 관점과 지원체계가 요구된다.

본 연구에서는 원전의 비상운전 직무에 대한 인지오류분석의 과정에서 분석자를 적절히 지원해 줄 수 있는 분석 체제를 제시한다. 본 논문에서 제안하는 인적 오류분석 방법은 인간의 의사결정 모형을 기반으로 하고 있으며, 인지기능별로 관련있는 영향인자들을 종합적으로 고려토록 함으로써 가능한 오류유형을 분석하도록 구성되어 있다. 제2장에서 본 연구에서 제안하는 오류 분석 체계를 제시하였고, 제 3장에서는 이에 따른 정보 분석 항목과 분석 절차를 제시하였다. 제4장에서는 제안한 분석 절차를 원전 비상운전 직무 중 '방출 및 주입' 운전 직무의 인지오류 분석에 적용하였으며, 제5장에서 본 연구에서 얻은 결론을 정리하였다.

2. 분석 체계

원전 운전원의 직무 수행은 특정 조건 혹은 상황하에서 이루어지게 되는데, 이러한 조건들에는 작업환경적 조건, 절차서나 MMI와 같은 기술적인 조건, 시나리오적 상황 조건 등 여러 가지가 있을 수 있다[10]. 동일한 직무를 수행한다 하더라도 서로 다른 조건하에서 수행될 수 있으며, 이러한 조건들은 운전원의 직무 수행도에 영향을 미친다[11]. 그러므로, 오류 분석자는 실제 상황을 올바로 반영한 오류 예측 결과를 얻기 위해서 주어진 직무와 함께 직무 수행도에 영향을 미칠 수 있는 이러한 조건들, 즉 영향인자들을 파악하여야 하며, 오류 분석 방법은 이에 적절한 체계와 분석 방법을 제공하여야 한다.

본 논문에서는 오류분석 과정에서 이러한 영향인자들을 주어진 직무의 특성과 상황적 여건하에서의 운전원의 인지기능 수행도 평가라는 관점에서 이루어지도록 하는 분석 체계를 제시하고자 한다. 즉, 운전원의 수행도 적절성 평가가 인지기능별 수행도 관점에서 이루어지며, 인지기능별 오류 메커니즘에 따라 직무 특성과 상황적 여건을 고려하여 인지기능별로 오류 가능성을 평가하게 된다. 이러한 분석 관점에 따라 오류 예측에 필요한 영향인자 정보 그룹을 다음과 같이 세가지 그룹으로 나누었다. 이 세가지 그룹은 주어진 직무의 특성과 관련된 직무특성요소(TCF: Task Characteristic Factors), 직무를 수행하게 되는 시나리오적인 혹은 현상적인 특성과 관련된 직무상황요소(SF: Situational Factors), 그리고 운전원의 직무 수행을 지원하는 수행지원요소(PAF: Performance Assisting Factors) 이다. 각 요소 그룹이 포함하고 있는 영향인자 들을 정리하면 다음과 같다.

- 직무특성요소(TCF) : 직무유형, 직무간 유사성, 수행 결과의 중대성 등.
- 직무상황요소(SF) : 주요 안전 계통/기기의 상태, 발전소 상태 변화 (주요 운전 변수의 수치 및 변화 상태), 사전 및 동시 수행 직무/목표, 허용 시간, 직무 수행 장소 및 작업 환경 등.
- 수행지원요소(PAF) : 정보 시스템, 절차서, 훈련 및 경험, 발전소 정책 등.

이러한 분류를 통하여, 인지기능별 오류발생 가능성을 직무 특성(TCF)과 처한 상황적 여건(SF)하에서 운전원 지원체계(PAF)가 적절한가 라는 관점에서 이루어지도록 한다. 본 분석 체계에서는 영향인자의 평가가 오류 예측 과정과 별도의 단계에서 이루어지는 것이 아니라 병행·통합적으로 이루어지도록 하고 있다. 본 분석 체계에 따른 각 요소의 평가는 직무특성요소(TCF)와 직무상황요소(SF)는 독

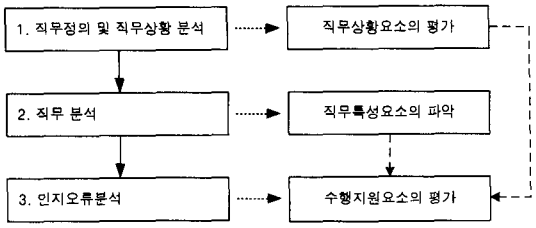

Fig. 1. Analysis procedure and relationship between influencing factor groups

립적으로 분석·평가 가능하며, 수행지원요소의 평가는 인지적 기능별로 직무의 특성과 상황 요소를 고려하여 그 적절성을 평가하도록 되어 있다. Fig. 1은 분석 과정과 요소간의 관계를 보여주고 있다.

본 연구에서는 문제인식, 정보수집, 상태파악, 계획/결정, 직무수행 등 5개의 인지기능을 기초로 하여 개발되었다. 직무수행 단계를 제외한 각 인지기능별 관련 영향인자는 다음과 같다.

- 문제인식 : 사전 혹은 동시 수행 직무, 짧은 허용 시간, 발전소 상태 변화, 훈련 및 경험, 정보 시스템, 절차서 등.
- 정보수집 : 발전소 상태 변화, 짧은 허용 시간, 정보 시스템, 훈련 및 경험, 절차서 등.
- 상태파악 : 직무간 유사성, 발전소 상태 변화, 절차서, 훈련 및 경험 등.
- 계획 및 결정 : 수행 결과의 심각성, 동시 직무/목표, 짧은 허용 시간, 발전소 상태 변화, 절차서, 훈련 및 경험, 발전소 정책 등.

3. 분석 절차

본 절에서는 Fig. 1의 분석 체계에 따른 분석 절차를 기술한다. 각 단계별 분석 내용과 방법, 그리고 분석 결과의 정리 등을 설명한다.

3.1. 직무 정의 및 직무상황 분석

이 단계는 직무상황요소(SF)의 분석과 관련된 단계로서, 이 단계에서는 운전원에게 요구되는 직무와 성공기준을 정의하고, 이를 위하여 직무가 요구되는 시점에서의 시나리오적인 전개 상황과 직무 수행시의 운전원의 수행도에 영향을 줄 수 있는 발전소의 전반적인 상황적 여건들을 분석하게 된다. 이 단계에서 분석하는 정보들은 다음과 같다.

- 직무의 요구 시점에서 수집하는 정보

이 정보는 운전원에게 요구되는 기능, 즉 직무를 파악하고 성공기준을 정의하기 위하여, 직무가 요구되는 시점에서의 시스템적 상태와 시스템 관점에서 요구되는 기능을 파악하기 위하여 HRA 분석자가 기본적으로 수집하여야 하는 내용이다. 이러한 것들에는 다음과 같은 내용들을 포함하여야 한다.

-초기사건을 포함한 시나리오의 전개
-주요 안전 계통/기기의 상태
-발전소 상태 변화 (주요 운전 변수의 수치 및 변화 상태)
-주요 사건의 시간 정보
-시스템 관점에서 요구되는 기능

- 허용 시간

시스템이 요구하는 직무의 완료시점을 고려하여 운전원 혹은 작업자에게 허용된 시간을 말한다. 이 여유시간은 수행시간 지연과 같은 오류유형과 밀접하게 관련되어 있으므로, 직무의 수행 시간과 대비한 여유시간의 정도에 따라 지연 오류유형의 발생 가능성을 고려하여야 한다. 또한, 여유시간에 대한 운전원의 인식 상태 여부에 따라 운전원의 행위 방식이 달라지므로, 여유시간에 대한 운전원의 인식 상태 여부도 중요한 수행도의 영향인자가 된다. 즉, 운전원이 짧은 여유시간에 대해 인식하고 있지 못할 때에는 지연 오류가 발생할 가능성이 높은 반면, 운전원이 이 사실을 인식하고 있을 때에는 성급한 행동을 유발시켜 잘못된 결과를 낳을 수 있다.

- 분석 대상 직무의 정의 및 선정

위에서 분석한 시스템 관점에서 요구되는 기능과 허용 시간을 고려해서 요구되는 직무와 성공기준을 정의한다. 그리고, 직무 달성에 필요한 직무 절차는 대부분의 원전 운전의 경우 절차서를 기본으로 하여 훈련·시행토록 하고 있으므로, 해당 절차서를 참고함으로써 얻는다.

- 사전 및 동시 수행 직무/활동

시스템 관점에서 운전원에게 요구되는 직무 외에, 운전원 혹은 작업자가 현재의 직무 이전 단계에서 수행중인 직무나 활동 혹은 상황적인 요구에 의해 현재의 직무와 동시에 수행될 수 있는 직무 등이 있다. 이러한 직무/활동의 파악은 관련 시나리오의 상황적 특성(주요 안전 계통/기기의 고장 등)을 고려하거나 해당 절차서에 제시된 주요 직무들을 분석함으로써 파악한다.

3.2. 직무 구조 및 특성 분석

분석 대상 직무가 정의되면 절차서를 토대로 하

여 직무 수행에 필요한 관련 직무절차를 수집하고 직무의 수행 구조 및 특성을 파악한다. 직무의 수행 구조 분석에서는 시스템이 요구하는 기능을 달성하기 위하여 필요한 단계들과 단계들간의 연관관계, 필요한 정보, 수행 절차 등을 파악한다. 필요하면 HTA(Hierarchical Task Analysis), GMTA(Goal-Means Task Analysis) 등의 직무분석 기법을 사용하여 표현할 수 있다.

직무구조를 바탕으로 직무 수행에 요구되는 인지기능의 분석을 수행한다. 인지기능의 분석은 본 단계에서 이루어져도 되며, 다음 단계인 '인지오류분석'에서 첨부된 인지기능별 질문서와 병행하여 수행해도 된다. 또한, 직무의 특성요소로서 수행 결과의 중대성, 부정적 효과, 유사 직무의 여부, 수행 순서 및 시기의 중요성 등을 파악하여야 한다.

3.3. 인지오류분석

이 단계에서는 앞의 두 단계에서 분석한 직무 상황과 대상 직무에 대한 지식과 이해를 바탕으로 하여, 인지과정 중 오류 발생 가능성을 분석한다. 인지기능별 오류 가능성과 취약 요소의 분석을 돕기 위해, Table 1과 같이 각 인지기능별로 질문서(Questionnaire)와 관련있는 영향인자들을 정리하였고, Table 2에서는 인지기능별 오류유형을 정리하였다. 각 인지기능에 해당하는 질문서를 통하여 인지기능별 오류유형 발생 가능성의 관점에서 영향인자 들을 고려한다.

인지기능별로 관련있는 인자들의 선정은 선행 연구자료[6,9,10,12]들을 참조하여 작성되었다. 인자들의 오류 가능성에의 고려시, 해당하는 직무특성요소(TCF) 및 직무상황요소(SF)의 경우 앞 단계들에서 분석한 결과를 반영하며, 수행지원요소(PAF)의 경우, 각 요소의 현재의 수준이 주어진 직무 특성과 상황적 여건하에서 요구되는 인지기능을 적절히 만족하도록 마련되어 있는가의 관점에서 평가하여야 하며, 분석자는 평가된 요소들을 종합적으로 고려하여 오류가능성(취약성)을 판단한다.

3.3.1. 문제인식 및 감지 단계

문제인식 및 감지 단계는 운전원이 요구되는 직무로 진입하게 되는 시점, 또는 요구 직무 수행으로의 동기를 얻게 되는 단계이다. 원전 운전의 경우 이러한 동기는 크게 두 가지 통로로부터 제공되는데, 하나는 주제어실의 경보나 신호 등으로부터 유

Table 1. Questionnaire by cognitive function for assessing vulnerable cognitive functions and influencing factors

질 문 서 (Questionnaire)		
1. 문제인식/감지(Activation & Detection) : 요구되는 직무가 운전원에게 잘 인식되는 상황인가? 혹은 누락 가능성이 있는가?		
직무특성요소	직무상황요소	수행지원요소
절차서 요구/ 정보 시스템 요구	사전 및 동시 수행 직무/활동 짧은 허용 시간 발전소 상태 변화	정보 시스템 절차서 훈련 및 경험
2. 정보수집(Observation) : 직무 수행에 필요한 정보들의 수집이 용이한가? 정보의 누락 가능성은? 정보의 혼동 가능성은?		
직무특성요소	직무상황요소	수행지원요소
필요 정보, 정보의 수, 위치, 혼동가능성 있는 정보의 포함 다수의 운전원을 통한 정보의 수집	짧은 허용 시간 발전소 상태 변화	정보 시스템 절차서 훈련 및 경험
3. 상태파악(Situation Assessment) : 주어진 정보들로부터 직무수행에 필요한 발전소의 상태 판단에 어려운 점은 없는가? 다른 상태와의 혼동 가능성은?		
직무특성요소	직무상황요소	수행지원요소
고 수준의 정보처리 요구 유사 직무 여부	짧은 허용 시간 발전소 상태 변화	절차서 훈련 및 경험
4. 계획/결정(Planning & Decision) : 직무수행을 위한 계획이나 의사결정시 어려운 점이 없는가? 계획을 위한 여건이 잘 마련되어 있으며 준비되어 있는가? 계획시 혼동 가능성은 없는가? 의사결정을 어렵게 하는 상황이 존재하는가?		
직무특성요소	직무상황요소	수행지원요소
수행 결과의 중대성, 부정적 효과, 불확실성 등.	동시 목표/직무 짧은 허용 시간 발전소 상태 변화	절차서 훈련 및 경험 발전소 정책 및 문화적 요소

Table 2. Cognitive error modes by each cognitive function

인지 기능	인지오류유형
문제인식 및 감지	인식 누락/지연
	잘못된 인식
정보수집	정보 누락
	잘못된 정보수집
상태파악	상태파악 못함
	불완전한 상태파악
	잘못된 상태파악
계획 및 결정	계획 못함
	불완전한 계획/결정
	잘못된 계획/결정
	의도적 규칙 위반

발되는 것이고, 다른 하나는 절차서로부터 이다. 그러므로, 문제인식 및 감지 기능에서는 먼저, 요구되는 직무가 절차서로부터 시작(initiation)되는 지, 정보계통에 의해서 시작되는 지를 파악하여야 하며, 해당 통로에 따라, 주어진 상황적 조건하에서 경보나 신호, 그리고 절차서, 훈련 등이 주어진 직무의 인식을 적절하게 할 수 있도록 마련되어 있는가의 관점에서 평가하여야 한다. 주어진 상황적 요소들은 이러한 인식을 어렵게 할 수 있는 여건인 지의 관점에서 평가한다.

주어진 직무가 절차서에 의해서 수행될 경우, 사전 및 동시 수행 직무의 여부에 따라 주어진 직무의 인식 지연 또는 누락의 형태로 영향을 받는다. 허용시간이 짧을 경우, 이러한 오류의 가능성은 더 커질 수 있다. 또한, 이러한 형태의 오류는 절차서, 훈련 등과 같은 수행지원요소의 수준에 따라 감소 또는 증가할 수 있다. 마찬가지로, 주어진 직무가 정보시스템에 의해 인식될 때, 절차서에 의해 인식되는 경우와 마찬가지로, 사전 및 동시 수행 직무의 존재 여부와 허용 시간은 중요하게 영향을 미치며, 발전소 상태 변화의 경우, 주어진 직무의 인식과 관련된 정보가 동적인 변화 추이를 보일 경우, 직무의 인식에 도움을 줄 수 있는 반면, 다른 정보들의 동적 변화에 의해서 관련 정보가 주는 인식력이 약화될 수도 있다. 정보 시스템에 의하여 직무가 인식되어지는 경우, 이러한 상황 요소들을 고려한 정보 시스템의 설계가 중요하며, 아울러 절차서, 훈련 등의 수준도 중요한 지원요소로 고려되어야 한다.

3.3.2. 정보수집 단계

정보수집 단계는 직무 수행 및 상황 판단에 필요한 정보 수집과 관련된 단계로서, 이 단계에서는 주어진 상황하에서 직무 수행 및 상황 판단에 필요한 정보가 적절하게 수집될 수 있는가, 또는, 필요한 정보가 적절하게 수집되도록 관련 요소들이 마련되어 있는가의 관점에서 평가된다. 즉, 주어진 상황적 조건하에서 해당 절차서 및 정보 시스템이 필요한 정보를 적절하게 제공하고 있으며 설계되어 있는지 등을 평가하여야 하며, 상황적 요소와 지원 인자의 결함으로 인한 정보수집의 어려움이나 정보의 혼동 가능성 등도 고려하여야 한다.

정보수집 단계에서 가능한 오류유형은 필요한 정보의 부분적 혹은 전적인 누락이나 잘못된 정보 수집으로 나타난다. 정보수집 단계에서의 오류 가능성에 영향을 줄 수 있는 직무특성요소로는 필요한 정보의 수나 물리적 위치, 혼동 가능성 있는 정보의 포함, MCR 내외부의 다수의 운전원들을 통한 정보의 수집 등을 포함하고 있으며, 허용 시간이 짧은 긴급한 상황이나 동적인 상황, 또는 동시 수행 직무 등이 존재할 때 오류 가능성은 커지게 된다. 또한 오류 가능성의 고려시 직무특성요소 및 상황요소에 대한 정보 시스템, 절차서, 훈련 등의 고려 여부 및 수준 등을 동시에 고려하여 오류 가능성을 평가하여야 한다.

3.3.3. 상태파악 단계

상태파악 단계는 주어진 정보를 바탕으로 발전소의 상황파악이나 사고진단, 시스템의 상태나 직무 수행/진입 상태 등을 판별하는 단계이다. 상태 파악에 필요한 정보의 적절성은 정보수집 단계에서 평가하게 되므로, 이 단계에서는 정보수집 이후의 상태파악 기능 수행시의 오류 가능성에 대해서 분석한다. 이 단계에서는 절차서 및 훈련 등의 지원요소가 주어진 상황적 여건 하에서 발전소 상태를 적절히 판단할 수 있도록 마련되어 있는가의 관점에서 평가된다. 상태파악에 영향을 미칠 수 있는 직무특성요소와 상황요소 들의 상태를 고려하여 상태파악 수행도를 평가하여야 하며, 발전소 상태 및 직무의 유사성 등으로 인한 잘못된 상태파악의 가능성도 고려하여야 한다.

상태파악 단계에서 발생 가능한 오류유형에는 최악의 경우 상태파악 불가능으로 나타날 수 있으며, 그 외에 부분적 상태파악, 또는 잘못된 상태파악의

형태로 나타난다. 이러한 오류의 발생 가능성에 영향을 주는 직무특성요소로서 주어진 직무나 상황의 정보처리 수준(규칙기반/지식기반)이 밀접히 관련되어 있으며, 직무의 정보처리 수준은 상황에 대한 운전원의 경험·훈련 및 절차서의 수준 등에 의해서 결정되어진다. 또한, 요구되는 직무와 유사한 다른 친숙한 직무가 존재할 때, 수행지원요소를 통한 특별한 주의가 없을 경우, 다른 직무로 판단할 가능성이 있다. 주어진 허용 시간이나 시스템의 동적 상태 변화 등으로 인한 긴급한 상황이 전개될 때, 이와 같은 오류의 가능성은 증가하게 된다.

3.3.4. 계획 및 결정 단계

계획 및 결정 단계는 주어진 상황에 적절하게 대처하기 위한 조치를 구상하고 적절한 조치를 선택하는 단계로서, 원자력발전소 비상사고 대응의 경우, 대부분의 조치 내용이 절차서에 제공되어 있으므로, 이 단계와 관련된 운전원의 활동은 주로 상황판단 후 적절한 절차서의 선택, 상황에 따른 절차서의 적절한 활용, 중요한 부분에서 요구되는 의사결정 등이다. 이 단계에서는 기본적으로 마련되어 있는 절차서의 내용 및 훈련 등이 주어진 발전소 상태에 대해 적절하게 대처할 수 있도록 준비되어 있는가의 관점에서 평가한다.

계획 및 결정 단계에서 가능한 오류유형에는 계획하지 못함, 불완전한 계획, 잘못된 계획, 의도적 규칙 위반 등이 있을 수 있다. 특별히 직무특성 및 상황요소 등의 존재 여부에 따라 의사결정의 성격이 결정되는데, 대표적인 예로서 직무의 수행으로 인해 부정적 효과나 큰 손상 혹은 불확실한 결과 등이 초래될 경우와 동시목표 혹은 직무가 존재하는 경우의 의사결정 등이 있으며, 이런 요소들이 존재할 경우, 이에 대비한 직무지원요소의 수준을 평가하여 오류 가능성을 평가하여야 한다.

4. 적 용

앞의 분석 과정을 원자력발전소의 비상사고 직무 중 하나인 '방출 및 주입' 운전 직무에 적용하였다. 각 단계별 수집 정보 및 분석 과정은 다음과 같다.

4.1. 직무 정의 및 직무상황 분석

앞의 분석 절차에서 정리한 것과 같이, 이 단계에서는 운전원에게 요구되는 직무를 정의하고, 직무 수행 시점에서의 직무상황요소에 대한 정보를 분석한다. 분석 절차에 따라, 분석 대상 시점에서 분석한 정보를 정리하면 다음과 같다.

● 직무의 요구 시점 관련 정보

-초기사건을 포함한 시나리오의 전개 : 해당 발전소의 안전성분석보고서[13]의 PSA 사건수목으로부터 얻은 완전급수상실사고시의 시나리오 전개 과정은 다음과 같다: 주급수 상실 * 원자로 정지 * 보조급수 상실. 주급수 상실로 인한 원자로 정지(low SG water level: 38.5% WR) 후 보조급수 요구(23.4% WR)가 있으나 보조급수도 상실되는 시점.

-주요 안전 계통/기기의 상태 : 보조급수계통 이용 불능.

-발전소 상태 변화(주요 운전 변수의 수치 및 변화 상태) : 원자로냉각재 온도 증가, 가압기 압력 및 수위 상승, 증기 발생기 압력 상승, 증기 발생기 수위 급감.

-주요 사건의 시간 정보 : 사고초기 시점. 원자로 정지 후 약 10분 전후 시점.

-시스템 관점에서 요구되는 기능 :

1) 이차측 급수 복구를 통한 노심잔열 제거

2) 방출 및 주입 운전을 이용한 노심잔열 제거

● 허용 시간 및 직무수행 시점 : 여유시간 약 10분, 첫 번째 PORV 개방시점에 맞추어서 SDS 개방.

● 분석 대상 직무의 정의 및 선정 : 완전급수상실 사고시의 방출 및 주입 운전 수행과 관련된 인지과정 중 오류 가능성 분석. 이 직무와 관련된 절차는 비상-05, 완전급수상실 및 회복-06, HR-3 일방관류 냉각에 걸쳐 있음.

● 사전 및 동시 수행 직무/활동 : 이차측 급수(주·보조급수) 복구 활동.

4.2. 직무 구조 및 특성 파악

본 단계에서는 요구되는 직무의 수행구조를 파악하고 직무와 관련된 특성을 파악한다. 아래 Table 3은 방출 및 주입 운전 직무와 관련된 직무절차 중 직무수행에 대한 판단과 관련된 절차를 보여주고 있다. 이 직무절차는 필요한 정보를 수집하여 RCS 열제거가 충분한 지를 판단하여 불충분할 시에 방출 및 주입 운전을 수행하도록 지시하고 있다. 한편, 방출 및 주입 운전 직무는 수행시 발전소의 경제성에 부정적 효과를 가져오기 때문에, 직무 수행에 대한 의사결정이 신중하게 요구되는 직무이다. 본 직

무가 포함하고 있는 인지기능에 대한 분석은 다음 단계인 '인지오류분석'에서 인지기능별 질문서와 함께 분석된다.

Table 3. The bleed and feed operation task

비상-05 (LOAF)	
예상반응 및 조치	불만족시 조치
~ 8. 다음을 모두 만족하여, 1대 이상의 S/G를 통한 RCS 열제거가 충분한 지 판단한다. O 다음 중 1개 만족: -S/G 수위: 2%(WR) 이상, - 또는 - -S/G로의 총 급수유량이 1.26E05 kg/hr (35 LPS) 이상이고, 수위복구중. O RCS Tc 증가량: 6℃ 이하. ~	~ 8. O 모든 S/G수위가 2%(WR) 미만이고 S/G로의 총 급수유량이 1.26E05 kg/hr(35 LPS) 미만이면, 일방관류 냉각을 위해 회복-06(HR-3) 절차를 수행 O RCS Tc 증가량이 6℃를 초과하면, 일방관류냉각을 위해 회복-06(HR-3) 절차를 수행
회복-03 (HR-3) 일방관류냉각	
~ 1. 조건 재확인 2. 이후 일방관류냉각 준비 및 수행 절차 ~	

4.3. 인지오류분석

본 단계에서는 앞에서 수집한 상황 정보와 직무에 대한 인식을 바탕으로, 주어진 질문서에 따라 정보를 취합함으로써 취약 요소를 파악하고 취약한 인지기능과 가능한 오류유형을 추정하였다. 방출 및 주입 운전 직무에 대하여 적용한 결과들을 표 4에 정리하였다.

문제 인식 및 감지 단계에서의 분석 결과를 보면, 본 직무의 필요성이 절차서에 의해 요구되며, 상황 요소로서 동시 직무인 급수계통 복구 활동이 이루어지게 된다. 이런 상황에서 수행지원요소로서 절차서, 훈련 등으로부터 충분한 지원이 마련되어 있지 않으면, '인식 누락 혹은 지연' 형태의 오류 가능성이 존재한다. 일단 직무인식이 된 이후, 정보수집 및 상황파악 단계에서는 상황 판단에 필요한 정보가 3개 정도이고, 긴급한 상황이라 할지라도 수행지원요소가 적절히 마련되어 있다면, 정보수집과 상태

Table 4. Results of cognitive error analysis for the bleed and feed operation task

인지기능	관련 절차단계	가능한 취약 요소	가능한 오류유형
문제인식	비상-05, Step 8	- 직무특성요소: 절차서 요구 - 직무상황요소: . 사전/동시 수행 직무: 급수계통 복구 활동 - 수행지원요소: . 정보 시스템 . 절차서: 본 직무에 대한 특별한 강조 없음 . 훈련 및 경험: 2년에 1회 훈련, 직무 목표/구조에 대한 인식 결여 가능	- 인식 누락/지연
정보수집	비상-05, Step 8	- 직무특성요소: 필요 정보: 3개 - 직무상황요소: . 허용 시간: 짧은 편임 . 발전소 상태 변화: 주요 변수들이 급박하게 변화하는 상태 - 수행지원요소: . 정보 시스템: 정상 기능 . 절차서: 적절히 제공하고 있음 . 훈련 및 경험: 2년에 1회 훈련, 정보수집에는 무난함	—
상태파악	비상-05, Step 8	- 직무특성요소: 고수준의 정보처리 요구치 않음 - 직무상황요소: . 허용 시간: 짧은 편임 . 발전소 상태 변화: 주요 변수들이 급박하게 변화하는 상태 - 수행지원요소: . 절차서: 적절히 제공하고 있음 . 훈련 및 경험: 2년에 1회 훈련, 상황판단에는 무난함	—
계획결정	비상-05, Step 8	- 직무특성요소: 수행 결과의 중대성 - 직무상황요소: . 동시 직무: 급수계통 복구 . 허용 시간: 짧은 편임 - 수행지원요소: . 절차서: 수행 결과의 중대성에 대한언급/고려 없음, 동시 직무와의 우선 순위 및 판단 기준 없음 . 훈련 및 경험: 2년에 1회 훈련, 수행 결과의 중대성에 대한 고려 교육 없음. . 발전소 정책: 안전 (> or <) 경제성	- 의사결정 지연 - 잘못된 의사결정

파악에는 어려움이 없을 것이다. 계획 및 결정 단계에서는 본 직무의 수행이 발전소의 경제성에 큰 손상을 미칠 수 있는 부정적 효과가 있으며, 이로 인하여 다른 동시 직무이며 대안인 급수계통의 복구 노력과의 사이에서 의사결정이 쉽게 이루어지지 않을 수 있다. 절차서 및 훈련 등의 수행지원요소에서 이에 대한 마련이 되어 있지 않으면, '의사결정 지연'이나 '잘못된 의사결정'이 발생할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소의 비상운전 직무 수행시 운전원의 인지과정중에 발생할 수 있는 인지오류의 예측적 분석을 지원하기 위한 분석 체계와 절차를 제시하였다. 본 논문에서 제안한 분석 체계의 특징은 영향인자 그룹을 직무특성요소, 직무상황요소, 수행지원요소 등 세 가지 그룹으로 분류한 후, 각 인지기능별로 요소 그룹을 종합적으로 고려하여 오류 가능성을 분석하도록 하는 것이다.

제안한 방법을 원전 비상운전 직무 중 '방출 및 주입' 운전 직무의 인지오류 가능성 분석에 적용한 예를 제시함으로써 인적오류분석에의 활용 가능성을 제시하였다. 적용을 통하여 제안한 분석 체계가 인지기능별 오류 가능성과 함께 취약한 상황 및 인적요소 들을 입체적이고 효과적으로 고려할 수 있었으며, 오류 감소 방안에 대한 중요한 Insight를 얻을 수 있음을 파악할 수 있었다.

참고문헌

1) Swain, A. and Guttman, H. E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, US NRC, 1983.
2) Swain, A., Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure, NUREG/CR-4772, 1987.
3) Hannaman, G. W., Spurgin, A. J., Lukic, Y. D., Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis, Draft Report NUS-4531, 1984.
4) Embrey, D., SLIM-MAUD: An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgment, NUREG/CR-3518, 1984.
5) Kirwan, B., "The Development of a Nuclear Chemical Plant Human Reliability Management Approach: HRMS and JHEDI," Reliability Engineering and System Safety, 56, pp. 107~133, 1997.
6) Hollnagel, E., Cognitive Reliability and Error Analysis Methodology, Elsevier, 1998.
7) Kontogiannis, T., A Framework for the Analysis of Cognitive Reliability in Complex Systems: A Recovery Centred Approach, Reliability Engineering and System Safety, 58, pp. 233~248, 1997.
8) Pierre Le Bot, Cara, F. and Bieder, C., MERMOS, A Second Generation HRA Method: What It Does and Doesn't Do, Proceedings of International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment, 1999.
9) U.S. NRC, Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), NUREG-1624, 1998.
10) 김재환, 정원대, 강대일, 하재주, 원자력발전소 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자 분류체계의 개발과 적용, KAERI/TR-1340/99, 1999.
11) Dougherty, Ed., "Context and Human Reliability Analysis," Reliability Engineering and System Safety, 41, pp. 25~47, 1993.
12) Reason, J. Human Error, Cambridge University Press, 1990.
13) 한국원자력연구소, 영광 5,6호기 확률론적 안전성 평가, 1999.