

# 원자력발전소 비상운전 직무의 인간오류분석 및 평가 방법 AGAPE-ET의 개발

김재환<sup>†</sup> · 정원대

한국원자력연구소 종합안전평가부  
(2003. 2. 17. 접수 / 2003. 5. 26. 채택)

## AGAPE-ET: A Predictive Human Error Analysis Methodology for Emergency Tasks in Nuclear Power Plants

Jae-Whan Kim<sup>†</sup> · Won-Dea Jung

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute  
(Received February 17, 2003 / Accepted May 26, 2003)

**Abstract** : It has been criticized that conventional human reliability analysis (HRA) methodologies for probabilistic safety assessment (PSA) have been focused on the quantification of human error probability (HEP) without detailed analysis of human cognitive processes such as situation assessment or decision-making which are critical to successful response to emergency situations. This paper introduces a new human reliability analysis (HRA) methodology, AGAPE-ET (A Guidance And Procedure for Human Error Analysis for Emergency Tasks), focused on the qualitative error analysis of emergency tasks from the viewpoint of the performance of human cognitive function. The AGAPE-ET method is based on the simplified cognitive model and a taxonomy of influencing factors. By each cognitive function, error causes or error-likely situations have been identified considering the characteristics of the performance of each cognitive function and influencing mechanism of PIFs on the cognitive function. Then, overall human error analysis process is designed considering the cognitive demand of the required task. The application to an emergency task shows that the proposed method is useful to identify task vulnerabilities associated with the performance of emergency tasks.

**Key Words** : human reliability analysis, human error analysis, probabilistic safety assessment

### 1. 서 론

원자력발전소와 같은 대형안전산업의 안전성평가 도구로서 확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 기법이 사용되고 있으며, 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis) 모델은 인간(운전원)에게 요구되는 기능을 성공적으로 수행할 가능성을 확률적으로 평가하는 부분을 담당하고 있다<sup>1)</sup>. HRA 에서 고려되는 인간행위는 크게 사고전 인간행위, 사고(원자로 정지) 유발 인간행위, 사고후 인간행위로 나눌 수 있다. 사고전 인간행위에는 작업자의 보수 및 시험 작업 중에 발생할 수 있는 인적오류사건 중 안전성에 영향을 주는 주요

시스템 및 기기의 비가용도에 관련이 있는 오류사건을 포함하고 있으며, 사고유발 인간행위에는 원자로 정지를 유발시키는 인적행위와 관련이 있으나 현재 PSA에서는 초기사건 빈도에 내재적으로(implicitly) 포함시키고 있을 뿐, 별도의 인간행위사건으로 고려하지는 않는다. 마지막으로, 사고후 인간행위는 LOCA, SGTR과 같은 특정 초기사건 발생으로 인한 원자로 정지 후에 전개되는 사건 진행과정에서 사건의 종료 및 완화를 위해 인간에게 요구되는 기능 또는 직무를 다루고 있다.

사고후 인간행위, 소위 동적상황에서의 인적수행도는 정상운전시의 인간행위보다 다양한 동적 상황 요인들이 결부되어 있어 복잡하며, 특히, 상황감지 및 판단, 의사결정 등 대부분의 비상대응 직무가 운전원의 인지적 기능을 요구하는 직무이며, 또한 이

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
jhkim4@kaeri.re.kr

러한 인지적 직무는 비상대응의 성공적인 수행에 결정적인 역할을 하고 있다. 그러나, PSA에서 사용되어 온 기존의 HRA 방법들<sup>2,5)</sup>은 인간행위에 대한 PSA의 정량적 평가 요구에 따라 정량적 오류확률의 추정을 위한 신뢰도 모델 위주로 개발되어 왔으며, 원전 운전원의 의사결정 과정 중에 발생할 수 있는 인지오류 가능성의 정성적 분석에는 많은 한계점을 가지고 있었다. 정성적 분석에 대한 이와 같은 제한된 분석은 사고후 인간행위의 정량적 평가 결과에도 적절한 수준의 값을 제공하지 못하게 될 뿐만 아니라, 원전 비상상황 시의 인적오류 감소를 위한 어떤 유용한 정보도 제공하지 못하게 된다.

이러한 기존 HRA의 한계점을 보완하기 위하여 시나리오적 요인, 기술적/환경적 요인, 조직/문화적 요인 등을 포함하는 전반적인 직무상황을 반영하는 것을 기본 체계로 하는 CREAM<sup>6)</sup>, MERMOS<sup>7)</sup> 등의 방법이 제안되었고, EOC(Error of Commission)를 포함한 다양한 유형의 인적사건을 고려할 수 있는 ATHEANA<sup>8)</sup> 방법이 제안되었다. 한편, 이러한 방법들은 실제 PSA HRA를 위한 원활한 활용을 위해서 구체적인 지침이 필요한 방법도 있고, 분석 과정이 복잡하고 많은 분석 자원이 요구되어 실제 PSA에의 활용에 제약이 예상되는 방법도 있다.

본 논문에서는 PSA에서 요구되는 인적행위사건에 대하여 기존의 정량적 오류평가에 치중되어 있던 HRA를 보완하기 위한 노력으로 정성적 분석에 기초를 둔 새로운 HRA 방법인 AGAPE-ET (A Guidance And Procedure for Human Error Analysis of Emergency Tasks)를 제안한다. AGAPE-ET 방법은 초기사건 후 요구되는 비상직무의 수행과 관련하여 직무 및 상황의 주요한 취약점(task vulnerabilities)과 운전원의 행위유형 또는 오류유형을 체계적인 분석 과정을 통해 도출할 수 있는 HRA 방법이다. AGAPE-ET 방법의 적용은 기본적으로 PSA 사고 시나리오 전개 과정에서 파악되는 인간행위에 대하여 이루어진다. AGAPE-ET는 비상사고 시나리오의 전개와 절차서를 기반으로 한 운전원의 행위와의 관계를 토대로 파악된 인간행위에 대한 오류 가능성을 분석 평가할 수 있는 방법이다. 이를 구현하기 위하여 운전원의 의사결정 모형을 정의하고 인적수행도에 영향을 미치는 영향인자를 선정하였다. 그리고, 운전원의 각 인지기능에 주요한 영향을 주는 상황 및 영향인자를 고려하여 인지과정에 따른 주요 오류유발 상황을 도출하고, 주어진 직무의 인지적 요구특성에

따라 분석과정을 효율적으로 절차화 하였다.

본 논문의 구성과 내용은 다음과 같다. 제2장에서는 AGAPE-ET가 기반으로 하고 있는 인지모형과 영향인자를 소개하고 이를 바탕으로 구성된 인지기능별 정성오류분석 항목에 대하여 소개한다. 제3장에서는 AGAPE-ET 분석 절차의 구조와 정량평가 체계에 대해 설명하고, 제4장에서는 AGAPE-ET 방법의 적용 예로서 급수완전상실 시 방출 및 주입 운전 상황에 대한 적용결과를 예시하고, 제5장에서 결론을 정리한다.

## 2. 분석 모델

### 2.1. 인지모형과 영향인자

원전 운전원과 같은 동적 시스템 하에서의 의사결정자의 문제해결 또는 의사결정 과정에 대한 연구가 다수의 연구자에 의해 수행되어 왔는데, 대표적인 연구로서는 Rasmussen<sup>9)</sup>과 Reason<sup>10)</sup>을 들 수 있다. Rasmussen은 SRK framework을 제안하였는데 직무의 숙련도에 따라 인지과정의 패턴이 변함을 보여주며, Reason은 오류분류체계로서 SRK 직무유형에 따라 발생 가능한 오류유형과 특성이 달라짐을 설명하고 있다. 최근에 제안된 여러 인지오류분석 방법들에서도 인지모형을 사용하고 있는데, HRMS<sup>11)</sup>는 Rasmussen의 8단계 인지과정에 기반한 오류유형과 심리학적 오류발생 체계를 제시하고 있으며, CREAM에서는 4개의 인지기능으로 구성된 단순화된 인지과정을 제시하고 있으며, ATHEANA 역시 4개의 인지단계를 포함하는 인지모형을 사용하고 있다. 기 사건의 원인분석 시스템으로서 사용되고 있는 K-HPES<sup>12)</sup>는 정보 입력 기능을 감지(detection) 기능과 관찰(observation) 기능으로 구분하여 사용하는 5단계 인지모형을 사용하고 있다.

AGAPE-ET는 최근 방법의 인지모형<sup>6,12)</sup>으로부터 원전의 비상상황을 고려하여 5단계 인지기능으로 구성된 단순화된 인지모형을 사용한다. AGAPE-ET에서 사용하고 있는 5단계 인지기능은 상황 및 직무인식(detection and activation), 정보수집(information gathering), 상황판단(situation assessment), 계획 및 의사결정(planning and decision-making), 직무수행(task execution) 단계이며, 실제적으로 이들 인지기능들은 순환적으로 또는 상호작용적으로 이루어진다. 상황 및 직무인식 (detection and activation) 단계에서는 운전원이 절차서 및 정보계통을 통해서 운

전원의 개입이 필요한 상황 또는 직무를 인식하는 단계이며, 정보수집 기능에서는 상황 판단을 위해 필요한 정보를 수집하는 과정이며, 상황판단 기능에서는 정보수집을 통하여 얻은 정보를 종합(integration)하여 주어진 규칙 또는 지식을 바탕으로 발전소의 상태나 직무 수행을 위한 조건 등을 판단하는 과정이며, 계획 및 결정 기능에서는 주어진 상황에 적절하게 대처하기 위한 일련의 수행 과정을 구상하거나 적절한 조치를 선택하는 과정이고, 직무수행 단계는 계획 또는 의도한 조치를 물리적으로 수행하는 단계를 나타낸다.

원전 운전원의 행위는 직무가 수행되는 특정한 상황(context) 혹은 조건(condition)의 영향을 받는다<sup>13)</sup>. 운전원의 수행도에 영향을 미치는 이러한 조건에는 절차서 및 정보시스템 등과 같은 기술적 요소, 시스템의 동적전개 또는 시간간극성과 같은 시나리오적 요소, 자격관리 또는 작업태도 등과 같은 조직/문화적 요소 등 다양한 요소들을 포함하고 있으며, HRA에서는 이러한 요소들을 수행영향인자(Performance Influencing Factor or Performance Shaping Factor) 혹은 영향인자(Influencing Factor)로 정의하고 사용한다.

AGAPE-ET 방법은 선행연구<sup>14)</sup>에서 영향인자 분류체계에 대한 광범위한 문헌 검토를 통해 원전 비상상황 시 운전원의 인지기능 수행에 영향을 주는 영향인자 체계를 구축하였다. 최종적으로 선정된 대표 영향인자는 '운전원의 훈련 및 경험', '절차서의 가용성 및 수준', '동시 목표 및 동시 직무', '직무유형 및 특성', '정보의 가용성 및 수준', '주요 변수의 상태 및 추이', '안전 계통의 상태', '가용한 시간 및 시간 간극성', '물리적 작업 환경', '팀 협력 및 의사소통', '발전소 정책 및 안전문화' 등 11개 인자이다. AGAPE-ET 방법은 구체적인 오류유발 원인 및 상황의 파악으로부터 가능한 오류유형을 분석하도록 개발되었으므로, 상황 및 영향인자는 비상직무의 수행과 관련된 구체적인 문제를 파악할 수 있는 유용한 도구가 된다.

## 2.2. 정성 분석 체계

본 절에서는 AGAPE-ET의 인적오류 정성분석체계에 대하여 설명한다. 본 연구에서는 앞에서 소개한 바와 같이 5단계의 인지기능으로 구성된 운전원 인지모형을 기반으로 하여, 각 인지기능별로 직무특성 및 상황요인으로 구성된 오류분석 항목을 도출

하였다. 이러한 오류분석 항목의 도출은 각 인지기능의 인지적 수행특성과 이에 영향을 미치는 영향인자의 기여정도를 고려하여 이루어졌다.

본 연구에서는 원전 비상운전 시 운전원의 대응 조치를 다음과 같이 가정하였다. 원전 비상운전 시 운전원은 크게 두 가지 방식으로 비상상황에 대응한다. 첫째는 사건 및 증상에 따라 마련된 비상운전 절차서(EOP: Emergency Operating Procedures) 또는 회복운전절차서(FRP: Functional Recovery Procedures)와 같이 비상사고 발생 시 운전원이 취하여야 할 조치를 마련해 놓은 절차서를 바탕으로 이루어지는 대응방식이 있고, 두 번째는 정보계통에 의한 상황인식과 운전원의 자발적 상황파악에 의한 대응방식이 있다. 실제로 원전 운전원은 두 가지 방식을 상호 보완적으로 활용하지만, 절차서를 바탕으로 한 대응을 기본적 대응방식으로 규정하고 정보계통 및 자발적 상황파악에 의한 대응 방식은 보조적이거나 특수한 상황에 국한한 것으로 가정하였다.

### 2.2.1. 상황 및 직무인식 관점에서의 오류분석

상황인식(detection)은 정보계통을 통해서 운전원의 개입이 필요한 상황을 인식하는 단계이며, 직무인식은 절차서에 기술된 직무를 시작하는 단계이다. 각 과정에 대한 운전원의 수행도가 서로 다르므로 각 경로에 대한 운전원의 오류 가능성을 별도로 분석한다.

앞에서 언급한 바와 같이, 원자력발전소는 절차서를 토대로한 사고대응이 규범화되어 있으므로, 절차서에 따른 직무인식 시 가능한 오류유형을 정보계통에 의한 인식보다 우선하여 분석한다. 절차서에 의한 직무인식에는 시스템 요구 시점보다 이른 시점에서의 인식, 적절한 시점에서의 인식, 지연된 인식 등 세 가지 유형으로 분류할 수 있다. 직무인식의 시점에 따라 각각 이른 수행과 지연/누락의 형태로 시스템에 영향을 미친다.

이 중 이른 직무인식은 다음 두 가지 형태의 오류 가능성으로 나타난다. 첫째는 잘못된 상황판단이나 결정으로 인한 이른 수행 오류 가능성이 존재하며, 둘째는 초기에는 올바른 상황 판단을 했으나 직무의 재인식 시 지연/누락 오류로 나타날 수 있다.

첫 번째 경우인 이른 수행 가능성은 잘못된 상황판단이나 의사결정으로부터 유발될 수 있으며, 이른 수행이 시스템 상에서 다른 문제를 야기 시키거나 운전 상황을 더 악화시킬 수 있는 직무인 경우에만

고려한다. 다음 상황에 대하여 오류 가능성을 고려한다. 아래 항목들은 다음 절인 상황판단 및 의사결정 단계에서 고려되는 주요 오류 항목을 포함하고 있다.

- 물리적 조건이 일시적으로 만족하고, 절차서 상에서 재확인 절차가 마련되어 있지 않은 경우
- 운전원이 훈련 시나리오에 익숙해져 있으며 관련 시나리오에 대하여 당연히 수행하는 직무이지만, 물리적 변수의 전개특성이 실제 시나리오와 훈련 시나리오간에 서로 상이한 경우, 일부 직무 수행조건 확인을 누락할 수 있음.
- 다수의 정보가 필요하고 직무 수행과 관련하여 운전원의 인식상 주요 정보와 보조 정보로 구분될 수 있는 경우, 보조 정보 중 중요하지 않은 정보로 무시되거나 시나리오상 당연한 상태로(실제는 벗어날 수 있음) 여길 가능성이 있는 정보가 존재할 때, 정보확인 누락으로 인한 이른 수행 가능성을 고려함.
- 혼동 가능성 있는 정보(과냉각도, 파열된 SG 등)를 포함하고 있을 때, 상대 정보가 직무 수행 조건 내에 있고, 절차서에 명확히 기술되어 있지 않은 경우, 잘못된 정보 수집으로 인한 이른 수행 가능성을 고려함.
- 절차서 상의 직무수행 조건이 있으나, 주어진 시나리오상 주요 직무로 인식되어 수행조건 확인을 누락하고 긴급히 수행하는 경우.

두 번째 경우인 올바른 상황판단 후 직무의 재인식 오류 가능성은 다음과 같이 재인식에 장애가 되는 상황 조건이 모두 만족하는 경우에 고려한다.

- 대기시간이 30분 이상인 경우
- 대기기간 동안 다른 주요 직무들이 수행되고, 절차서의 다른 페이지로 넘어갈 경우
- 절차서 상에서 직무를 중복적으로 기술하지 않아 재확인할 수 있는 통로가 없는 경우
- 경보계통의 지원이 없는 경우

단, 사고 시나리오 상의 직무 중요성 및 익숙함, 또는 다른 직무와의 연동성으로 본 직무의 누락 가능성이 매우 낮은 것으로 판단될 때는 직무의 재인식 오류 가능성은 무시할 수 있다.

다음으로는 절차서에 의한 직무인식의 부적절성 중 지연된 인식 가능성에 대해서 다룬다. 운전원에 의한 직무인식의 지연 가능성은 사전 혹은 동시 직무의 작업으로 인한 지연 가능성과 시나리오의 빠른 전개로 인한 지연 가능성 등 두 가지 경우를 고려한다. 일반적으로 시스템으로부터 주어진 허용시간으로부터 시나리오의 빠른 전개 시간과 사전작업으로 인한 예상 지연시간을 제함으로써 새로운 허용시간을 얻을 수 있으나, 현 분석 단계에서는 직무인식의 지연오류 가능성을 평가하기 위한 목적이므로 다음과 같은 경우에 한하여 지연오류 가능성을 고려한다.

- 허용시간이 제한적(예: 30분 이내)이고, 사전 및 동시 작업의 직무지연이 특정시간 이상(예: 10분 이상)으로 예상되는 경우  
예: - 사전 직무 단계에서의 시스템 작동 불만족시 조치 수행 작업  
- 주요 안전계통의 복구 작업 진행 중
- 허용시간이 제한적(예: 30분 이내)이고, 시나리오의 빠른 전개 가능성(예: 10분 이상)이 예상되는 경우
- 시스템 허용시간과 시나리오의 빠른 전개 가능성 및 사전작업으로 인한 예상 지연시간을 비교하여 특정시간(예: 20분) 이하인 경우

정보계통을 통한 상황인식에는 경보 및 신호와 발전소 상태 변수의 동적거동의 인식을 통해 이루어질 수 있다. 이 중 경보 및 신호를 통한 상황인식은 올바른 상황정보로서 활용될 수 있으며, 상태변수의 동적거동의 인식은 상황에 따라 올바른 상황정보로서 활용될 수도 있고 부적절한 조치를 유발할 수도 있다. 운전원 행위와 관련하여 주의를 끌 수 있는 상태변수의 동적거동에는 주요 물리적 변수의 상한치/하한치로의 접근, 갑작스런 변화를 포함한 빠른 변화율, 주요 시스템 및 기기의 작동 시점의 근접 등이 될 수 있다. 이러한 상태변수의 동적거동에 대한 운전원의 인식은 정확한 상황판단이 이루어지지 않을 경우 TMI-2와 같은 운전원의 부적절한 개입 조치(errors of commission) 또는 필요한 조치를 누락할 가능성이 있다. 본 논문에서는 경보 및 신호계통은 올바른 상황인식 정보로서 활용되는 것으로 하고, 상태변수의 동적거동은 상황과 요구되는 직무에 따라 올바른 조치 또는 부적절한

조치의 수행 가능성에 모두 관여되는 것으로 고려한다.

요구되는 직무에 대한 상황인식 오류 가능성은 직무의 특성과 제공되는 정보시스템의 종류, 시스템 허용시간 등을 고려하여 다음 항목으로 구성하였다.

- 사전 직무의 주요 계통과 관련한 직무 수행 중 (또는 기동 중) 실패인 경우
- 주요 계통의 운전 중 실패인 경우,
  - 경보계통이 지원되는 경우
  - 운전원의 주요 감시정보인 발전소 상태변수로부터 피드백 가능한 경우
- 정보계통이 지원되지 않으며, 다른 발전소 상태변수로부터의 피드백 가능성도 불확실한 경우

상태변수의 동적거동으로부터의 인식은 Fig. 1에서 표현한 바와 같이, 상태변수의 동적거동 인식 가능성을 포함하여 다른 정보를 통합하는 종합적인 상황판단의 필요 유무, 상황판단 규칙의 절차서 기술 유무 등에 따라, 운전원의 올바른 상황판단 가능성은 서로 달리 평가된다. 상태변수의 동적거동에 대한 인식은 주로 TMI-2 원전사고에서와 같이 운전원의 부적절한 개입조치(EOC; Errors of Commission)를 유발한다. 이와 같은 운전원의 부적절한 개입조치는 주로 상황판단 실패로부터 유발되므로, 본 분석에서도 상황판단 실패 가능성을 중심으로 분석한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 상태변수의 동적거동 인식이 다른 정보를 취합한 종합적인 상황판단이 필요한 경우, 상황판단 규칙의 절차서 기술 유무와 운전원의 절차서 또는 경험/훈련을 바탕으로 한 상황판단 유무와 능력 정도에 따라 올바른 상황판단 가능성이 결정된다. 본 연구에서는 운전원이 상태변수의 동적거동을 인식할 확률은 거의 1.0에 가까운 것으로 가정하며, 상황판단에 다른 정보가 필요치 않은 경우에 대해서는 정상적인 반응을 하는 것으로 가정한다. 또한, 절차서에 상황판단을 위한 관련 직무가 기술되어 있는 경우에는 절차서가 사고전개 과정 상의 적절한 위치에 작성되어 있고 시스템 상의 허용시간이 충분히 주어질 수 있는 경우라면, 절차서에 기술된 직무를 통한 상황판단이 이루어질 수 있으므로 이 경우는 앞에서 소개한 절차서에 의한 직무인식 과정에 의해 분석된다. 그러므로, 본 단계에서는 다음과 같이 상황판단을 위한 직접적인 규

칙이 절차서에 마련되어 있지 않은 경우와 시스템 상의 허용시간이 충분하지 않은 경우에 대해 부적절한 조치 가능성을 고려한다.

- 발전소의 물리적 동특성이 운전원의 부적절한 개입조치를 유발할 수 있는 상황
- 발전소의 동특성 상황에 대해 전반적인 상황 판단을 위한 직접적인 절차가 관련 절차서에 마련되어 있지 않은 경우
- 발전소의 동특성 상황에 대한 절차가 마련되어 있으나, 시스템 상의 허용시간이 제한된 경우

이러한 상황은 주요 계측기의 오작동과 사건발생 전의 운전상의 문제 등으로 인해 상황판단이 복잡해 질 수 있다.

### 2.2.2. 정보수집 관점에서의 오류분석

정보수집 단계는 상황판단을 위한 필요 정보를 수집하는 과정이다. 이 과정에서 발생할 수 있는 오류 가능성은 다양한 원인이 존재하지만, 전형적인 원전 주제어실의 팀 구조와 작업환경을 고려할 때 크게 5가지 요인의 복합적인 작용에 의해 발생할 수 있다. 정보수집 활동의 신뢰도에 영향을 주는 5가지 요인으로 구성된 오류분석 항목은 다음과 같다.

- 정보출처(source)인 절차서의 문제
- 정보계통의 문제로서 정보의 가용성과 신뢰성 문제
- 정보자체의 문제로서 혼동가능성있는 정보의 포함
- 직무 및 상황의 특성으로 다수의 정보가 필요한 경우
- 정보수집 채널로서 다수의 운전원을 통한 정보수집

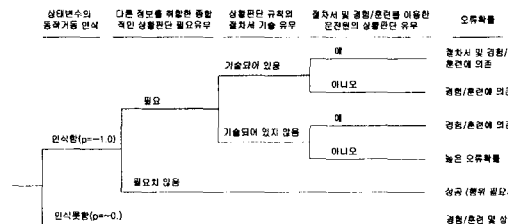


Fig. 1. A decision tree for judging the error possibility of incorrect situation assessment for the dynamic behaviours of plant parameters.

첫 번째 항목인 절차서는 상황판단을 위해 수집하여야 하는 정보를 제공하는 운전원 직무수행의 기본 지원요소로서 필요 정보의 적절한 절차서 기술은 올바른 정보수집 활동에 필수적이다. 필요 정보의 적절한 제공 여부는 절차서의 사용이전에 적절성 검토 과정에서 평가되고, 상세한 평가 내용은 절차서 설계 및 평가에 해당하는 업무이므로, 본 연구에서는 절차서의 전반적인 수준과 다른 특정한 분석항목에 대한 절차서의 기술 수준을 고려하도록 했다.

두 번째 항목은 정보의 가용성과 신뢰성 문제로서 이 항목에는 다음과 같은 내용을 포함한다:

- 신뢰성이 낮은 정보의 포함 여부: 고장 가능성이 큰 계기나 최근 오동작 및 빈번한 고장 경험이 있는 계측기의 포함; 정보 무시 혹은 오 정보 수집
- 열악한 물리적 환경 등으로 인한 접근 용이성
- 정보의 위치: MCR front panel/MCR back panel/Local CR/Local area 등
- 운전원 오정보 수집을 유발할 수 있는 MMI 설계 부적절
- 간접적인 방법을 통한 정보획득 (예: 수계산 필요 등)

세 번째 항목은 필요정보 자체가 유사한 다른 정보를 가지고 있어서 운전원으로 하여금 정보에 대한 혼동을 유발시킬 수 있는 경우이다. 이러한 정보로는 과냉각도와 같이 RCS 과냉각도, CET 과냉각도, 원자로헤드 과냉각도 등 다양한 유사정보를 가지고 있는 정보가 있고, RCS 루프 상의 물리적 정보 또는 증기발생기와 관련된 물리적 정보 등이 루프간 상태가 다른 경우에 이들의 정보수집이 필요할 경우가 있다. 실제 오류분석에서는 혼동 가능성이 상대정보를 선택했을 경우 이로 인한 부정적 영향이 예상되는 경우에만 오류 가능성을 고려한다. 오류유형으로는 혼동 가능성 있는 '잘못된 정보수집'으로 인한 '필요 직무의 누락', '이른 수행' 등이 가능하다.

네 번째 항목은 올바른 판단을 위해 다수의 정보가 필요한 경우로서, 일부 정보에 대한 확인 누락 가능성을 평가한다.

- 필요 정보와 유사한 목적을 위해 사용되나, 물리적 상태를 직접적으로 확인할 수 있는 정보

는 아니며 사용성(usability)이 직접적 정보보다 용이한(쉽게 확인할 수 있음) 정보가 있을 경우, 직접적 정보의 정보확인 누락 가능성을 고려함

- 운전원의 인식 상 주요 정보와 보조 정보로 나누어질 수 있을 때, 보조 정보 중 중요하지 않은 정보로 무시되거나 시나리오상 당연한 상태로(실제는 벗어날 수 있음) 여길 가능성이 있는 정보가 존재할 때, 정보확인 누락 가능성을 고려함

다섯번째 항목은 RO/TO/EO 등 다수의 운전원을 통한 정보수집이 필요한 경우와 현장 운전원과 같은 MCR 외부의 팀을 통한 정보수집이 필요한 경우를 포함하고 있으며, 지시 및 정보전달 시 의사소통 오류 가능성을 다루고 있다. 이것은 운전조의 지시 정보전달체제 및 훈련 방식에 크게 의존한다. 특히, MCR 외부 인력의 포함 시에는 절차서에 담당 운전원의 명시, 외부 인력을 포함한 훈련, 정보수집을 위한 이동거리 및 소요시간, 외부 인력의 직무량 등과 함께 평가되어야 한다.

위의 정보수집 과정에서 일어날 수 있는 각 오류 가능성의 정도는 상황요소인 동시 수행직무의 존재, 시간 긴급성, 발전소의 동적 상태, 안전시스템의 상태 등에 따라서 증감할 수 있다. 또한, 각각의 오류원 인요소에 대해 절차서나 훈련 시의 사전 대비 여부에 따라 달라질 수 있으므로 반드시 이에 대해 검토하여야 한다. 이 과정에서 발생할 수 있는 오류의 유형은 정보의 부분 혹은 전체의 누락, 시간 지연, 잘못된 정보수집 등이며, 각 분석 항목에 따라 가장 dominant 오류유형을 결정할 수 있다.

### 2.2.3. 상황판단 관점에서의 오류분석

상황판단 기능에서는 정보수집을 통하여 얻은 정보를 종합(integration)하여 주어진 규칙 또는 지식을 바탕으로 발전소의 상태나 직무 수행을 위한 조건 등을 판단하는 과정이다. 원전에서의 상황판단은 주로 초기사건의 진단과정 또는 사건완화 조치 중 시스템 상태과악 등에서 요구되는 인지기능으로서, 운전원의 효과적인 사고대응을 위해서 올바른 상황과악은 필수적인 인지기능이다. 본 분석에서는 필요한 정보의 수집 후 정보를 종합하여 판단하는 과정에서 발생할 수 있는 오류 가능성을 다룬다. 본 분석 절차에서 고려한 분석 항목은 다음과 같다.

- 절차서에 고려되어 있지않은 예상하지 못한 상황의 발생에 대한 상황과약의 경우
- 절차서에 기술된 직무 중, 운전원의 판단 (Judgement), 평가(Evaluation) 등과 같은 상위 수준의 인지적 기능을 요구하는 지식기반 (Knowledge-based)의 직무
- 절차서에 기술된 직무 중, 규칙기반(Rule-based)의 직무: 절차서의 기술 수준, 애매한 표현, 규칙/논리의 복잡성 등 분석
- 분석 상황/직무와 유사한 상황판단 규칙을 가지고 있는 상황/직무가 존재하는 경우

첫 번째 경우는 절차서를 통한 상황판단이 이루어질 수 없는 특수한 상황으로서, 정보시스템을 통한 상황과약이 이루어질 수 있느냐 하는 문제가 중요한 판건이 된다. 정보시스템을 통한 상황과약의 성공 가능성은 운전원의 상황인식 정도 및 필요한 정보수집을 통한 올바른 상황판단 능력에 달려있다. 또한, 운전원의 상황인식 정도는 경보나 계기 또는 주요변수의 물리적거동 특성의 인식성과 그 시점에서의 운전원의 작업부하에 의존하며, 운전원의 올바른 상황판단 능력은 상황의 난이도와 운전원의 경험·훈련을 포함한 능력에 달려있다. 본 항목은 상황 및 직무인식 단계에서 함께 고려된다.

두 번째 경우는 지식기반 직무로서, 운전원의 주관적 판단과 평가를 요구하는 상황 또는 직무로서의사결정 단계와도 직접적인 관련이 있으나, 주어진 상황의 판단을 우선하여 결정하는 것으로보고 상황판단 단계에 포함시켰다. 그러나, 상황판단 후 의사결정이 어려운 상황은 결정 및 계획 단계에서 고려된다. 이러한 직무의 오류 가능성은 요구되는 상황의 불확실성과 직접적인 연관이 있다. 즉, 현재 상황에 대한 불확실성이 클수록 판단 및 평가오류 가능성은 커진다. 대부분의 비상운전 직무는 규칙기반 직무로 구성되어 있으나, 다음과 같은 비상운전 직무의 일부 상황과 사고관리 시에 요구되는 일부 직무들이 이 경우에 해당된다.

- 사고진단 과정 중 증상이 애매하여 EOP의 단 일사건으로 진입할 것인지, 아니면 복합사건을 다루고 있는 FRP로 진입할 것인지의 판단 여부
- 사고관리 전략 수행으로 인한 발전소의 부정적인 효과에 대한 판단, 또는 전략의 수행으로

인한 부정적 효과와 수행하지 않음으로 인한 결과를 비교하여 전략 수행 여부의 결정

이러한 직무수행과 관련한 상세한 신뢰도 모델은 아직 없으며, 긴급한 상황(짧은 허용시간 또는 발전소의 동적 상태 등)이거나 동시수행 직무가 존재하는 등 작업부하가 클 경우, 판단 및 평가의 난이도는 증가할 수 있다.

세 번째 경우는 절차서를 기반으로 한 규칙기반 직무로서, 필요정보 및 판단규칙의 적절성은 절차서 평가 시 기본적으로 평가되므로, 다음과 같은 항목을 평가한다.

- 특정 상황에 대하여 절차서가 고려하지 못한 경우
- 규칙 상의 애매한 표현 (혼동 유발 가능성)
- 운전원의 경력/훈련 수준에 대한 절차서 기술 수준의 적절성 (구체성 수준)
- 규칙 또는 논리의 복잡성 (운전원 인식)

네 번째 경우는 유사한 상황판단 규칙을 가지고 있는 직무가 존재하는 경우로서, 현 직무와 유사한 판단 규칙을 가지고 있는 다른 (더 친숙한) 직무(특정 조건/항목이 상이한 직무)가 존재할 때, 특별한 주의가 없을 경우 유사하고 친숙한 다른 판단 규칙을 적용할 수 있다. 유사한 규칙의 경우로는 다음과 같은 것들이 존재할 수 있다 (유사한 조치가 있는 직무의 경우는 직무수행 단계에서 고려한다).

- 판단 규칙에 사용되는 상황 변수는 동일하나, 일부 변수의 설정치가 다른 경우
- 판단 규칙에 사용되는 상황 변수는 동일하나, 판단 규칙(Logic)이 상이한 경우
- 다수의 상황 변수 중 어느 하나 (또는 소수)가 다른 변수를 사용하거나, 어느 하나 (또는 소수)가 누락 또는 새로이 추가되는 경우

위의 유사 규칙이 유사한 상황 (시나리오)에서 적용되는 규칙일 경우에는 더 익숙한 직무를 (잘못) 사용할 가능성이 커진다.

#### 2.2.4. 계획 및 결정 관점에서의 오류분석

계획 및 결정 기능에서는 주어진 상황에 적절하게 대처하기 위한 일련의 수행 과정을 구상하거나

적절한 조치를 선택하는 과정으로서, 원자력발전소 비상사고 대응의 경우, 대부분의 조치가 절차서를 기반으로 이루어지고 있으므로, 이 단계와 관련된 운전원의 활동은 주로 상황 판단 후 적절한 절차서의 선택, 상황에 따른 절차서의 적절한 활용, 중요한 부분에서 요구되는 의사결정 등이다. 이 단계에서 가능한 오류유형은 부정적 효과나 불확실한 효과 등으로 인한 지연(누락) 오류와, 절차서의 부적절한 작성과 사용 및 의사결정 상황으로부터 올 수 있는 잘못된 계획/결정, 부적절한 직무의 선택 등이다. 원전의 비상사고 시 이 단계에서 고려할 수 있는 분석 항목을 정리하면 다음과 같다.

- 절차서의 부재 및 부적절한 작성으로 인한 오류 가능성
- 관련 직무의 수행이 발전소에 부정적 효과나 경제적 혹은 안전성 측면에서 큰 손상이 예상될 때와 효과가 불확실한 상황
- 다수의 대응 방안이 존재할 때 적절한 의사결정이 요구되는 상황

원자력발전소의 비상상황 시 상황인식 후 관련 상황에 대한 대응 전략이 절차서 상에 직접적으로 연결되어 있지 않은 경우는 다음과 같이 네가지 경우로 분류하였다.

- 주어진 상황에 필요한 직무가 익숙한 직무이고 절차서 없이 수행할 수 있는 단순 작업인 경우
- 단순 작업이 아니고, 관련 대응 직무가 다른 절차서(초기진단으로 선택된 절차서 외의 절차서)에 기술되어 있는 직무이며 사고 초기 직무(원자로정지 후 1시간 이내)인 경우; 운전원의 '훈련/교육' 수준에 따라 오류 가능성이 고려된다.
- 단순 작업이 아니고, 관련 대응 직무가 다른 절차서에 기술되어 있는 직무이며, 사고 초기 직무가 아닌 경우; TSC와 같은 다른 운전지원 조직의 구성 가능성을 고려한다.
- 다른 절차서에도 기술되어 있지 않고, 훈련/교육도 부적절/불충분한 경우

주어진 직무의 효과가 불확실한 상황 또는 경제적/안전성에 부정적 효과를 일으킬 수 있는 상황인

경우, 직무 수행의 누락/지연 또는 부적절한 결정의 오류가 발생할 수 있다.

- 현 직무 외의 다른 대체방안이 존재하지 않을 때, 다음의 경우 오류 가능성을 고려한다:
  - 절차서 상에 가용시간 또는 직무 수행시점에 대한 정보가 결여되어 있거나 시점이 불확실한 상황일 때
  - 절차서 상에 관련 정보가 제공되어 있는 경우 이더라도, 허용시간이 제한적일 때 (예: 30분 이내)
- 직접적으로 활용할 수 있고 현재 직무보다 부정적 효과가 적은 다른 대체방안이 존재할 경우, 다음의 경우 오류 가능성을 고려한다:
  - 절차서 상에 지침 및 관련 절차가 부족할 때
  - 절차서가 마련되어 있더라도 교육 및 훈련이 부족하거나 허용시간이 제한적일 때
- 다른 대응방안이 존재하나, 직접적으로 활용할 수 없고 현재의 직무와 **conflictible**한 방안인 경우, 다음의 경우 오류 가능성을 고려한다:
  - 절차서 상에 전략간 우선순위 및 수행에 대한 구체적 지침이 결여되어 있는 경우
  - 절차서 상에 지침 및 절차가 있으나, 허용시간이 제한적일 때

### 2.2.5. 직무수행 관점에서의 오류분석

직무수행 단계에서의 분석 절차는 크게 직무유형을 제어직무와 비제어 직무 등 두 유형으로 나누어 수행직무의 주요 특성(수행 순서, 수행 시점, 유사 직무의 존재 등)을 고려하여 분석하도록 하였다. 가능한 오류유형으로는 '수행시점 오류', '수행순서 오류', '대상선택 오류', '수행 누락', '유사직무 수행' 등이다. 비제어 직무에 대해서는 오류유형을 중심으로 발생 가능한 상황을 고려하도록 정리했고, 제어 직무에 대해서는 제어 직무의 수행 난이도와 운전원간의 협력을 중심으로 오류 가능성을 분석하도록 했다. 원전 비상상황 시에 주로 요구되는 제어직무로는 냉각 및 감압 조절, 반응도 조절, 급수유량 조절 등이다.

직무수행 단계에서 고려해야 하는 오류유형의 선정은 일반적으로 직무의 수행 특성과 다른 영향인자의 상태 및 수준에 의해 결정된다. 예를 들면, 직무의 성공여부에 정확한 수행시점이 요구될 경우 '수행시점 오류'가 주요한 오류유형이 될 것이다. 마



찬가지로, 직무의 수행순서가 중요할 경우, '수행순서 오류'가 주요한 관심대상이 되는 오류유형이 된다. 특별히, '대상선택 오류'의 경우, MMI의 설계특성이나 기타 Human Factors의 문제와 관련이 있으며, '유사직무 수행'의 경우, 현재의 직무수행 내용과 유사하나 대상 변수나 목표치가 일부 상이한 경우에 고려된다. 그리고, 그러한 오류유형의 발생 정도는 다음과 같은 영향인자의 수준에 의해 결정된다.

- 직무의 수행 복잡도
- 절차서 및 훈련 수준
- 제한된 가용시간 및 동시수행 직무의 유무
- 수행 대기시간의 정도
- 탐내외의 협업 수준 (협업 필요시)
- 제어 변수 및 기기의 수와 제어 변수간 연관관계 (제어직무의 경우)

### 3. 분석절차의 구조 및 정량화 체계

앞에서 정리한 인지기능별 오류분석 항목을 분석편의를 위하여 Table 1과 같이 분류 및 명명하였다.

한편, 직무의 특성에 따라 운전원에게 요구되는 인지기능이 서로 다르므로, 직무의 인지적 요구특성과 절차서 기술 유무에 따라 분석대상 인지기능, 즉

Table 1. The categorisation and naming of error analysis items

인지기능	분석 항목의 분류 및 명명
상황 및 직무인식	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 직무인식-01 : 이른 직무인식으로 인한 수행 가능성</li> <li>• 직무인식-02 : 이른 직무인식 후 직무의 재인식 오류</li> <li>• 직무인식-03 : 지연된 인식으로 인한 지연된 반응 가능성</li> <li>• 상황인식-01 : 요구되는 직무에 대한 상황인식 실패 가능성</li> <li>• 상황인식-02 : 상태변수의 동적거동으로 인한 부적절한 조치 가능성</li> </ul>
정보 수집	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정보수집-01 : 정보의 가용성과 신뢰성 문제</li> <li>• 정보수집-02 : 혼동가능성있는 정보의 포함</li> <li>• 정보수집-03 : 다수의 정보가 필요한 경우</li> <li>• 정보수집-04 : 다수의 운전원을 통한 정보수집</li> </ul>
상황 판단	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상황판단-01 : 지식기반 직무에 대한 상황판단</li> <li>• 상황판단-02 : 규칙기반 직무에 대한 상황판단</li> <li>• 상황판단-03 : 유사한 상황판단 규칙이 존재하는 직무</li> </ul>
결정 및 계획	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 계획결정-01 : 대응전략의 절차서 결여</li> <li>• 계획결정-02 : 의사결정이 난해한 상황</li> </ul>
직무 수행	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 직무수행-01 : 비제어직무에 대한 분석</li> <li>• 직무수행-02 : 제어직무에 대한 분석</li> </ul>

분석경로가 달리 결정된다. 예를 들어, 어떤 직무들은 직무수행 전에 상황판단과 의사결정을 요구하는 직무가 있는 가 하면, 어떤 직무들은 물리적 상태의 확인 없이 수행할 수 있는 직무가 있다. Table 1에서 직무인식-01, -02 및 -03의 경우, 물리적 상태조건이 필요없는 경우에는 직무인식-03의 경우만 분석되고, 분석 후 바로 계획결정-02 단계로 진행된다. 단, 직무수행 과정에서 복잡한 상황판단을 요구하는 직무이면, 정보수집 및 상황판단 기능의 분석도 수행할 필요가 있다. 상황인식-01 및 -02의 경우는 상황인식 및 판단이 필요하나 절차서 상에 직접적인 직무가 마련되어 있지 않은 경우에 한하여 분석하며, 분석 후 바로 계획결정 단계로 진행할 수 있다. 전체 오류분석 과정을 Fig. 2와 같이 도식화하였다. 분석자는 분석 경로를 따라 주어진 직무 및 상황에 대해 해당하는 분석항목이 존재하면 세부 분석항목을 따라 평가한다.

인적오류에 대한 정량적 평가는 원전 위험도 평가의 요구에 의해서 제기된다. 본 방법에서는 위에서 정리한 각각의 오류분석 항목에 대하여 정량적 평가체계를 제시한다. 각 오류분석 항목에 대한 오류확률은 다음과 같이 얻어진다.

$$AHEP_i = BHEP_i * \omega_i (PSF_i) \quad (1)$$

여기서,  $BHEP_i$ 는 오류항목  $i$ 에 대한 기본오류확률(Basic Human Error Probability)이며,  $AHEP$ 는 오류항목  $i$ 에 대해 영향인자의 수준( $\omega_i (PSF_i)$ )을 반영한 조정오류확률(Adjusted Human Error Probability)이다. 모든 가능한 오류항목에 대한 전체 인간오류확률(HEP)는 다음 식에 의해 얻어진다.

$$HEP = \sum_i AHEP_i = \sum_i BHEP_i * \omega_i (PSF_i) \quad (2)$$

각 인지기능별 오류항목  $i$ 에 대한 기본오류확률( $BHEP_i$ )은 기존 HRA 방법들에서 유사한 직무 및 상황에 대한 값을 추출함으로써 얻어졌다. BHEP 값들의 출처(Data source)는 THERP<sup>2)</sup>, HEART<sup>15)</sup> (Williams, 1988), INTENT<sup>16)</sup> (Gertman et al., 1992), CREAM<sup>6)</sup> (Hollnagel, 1998), CDBT(Parry, 1992) 등이며, 이들 자료로부터 추출할 수 없는 일부 데이터는 추정값을 사용하였다. Table 2는 인지기능별 분석항목에 따른 BHEP 값과 인지기능별로 고려한 영향

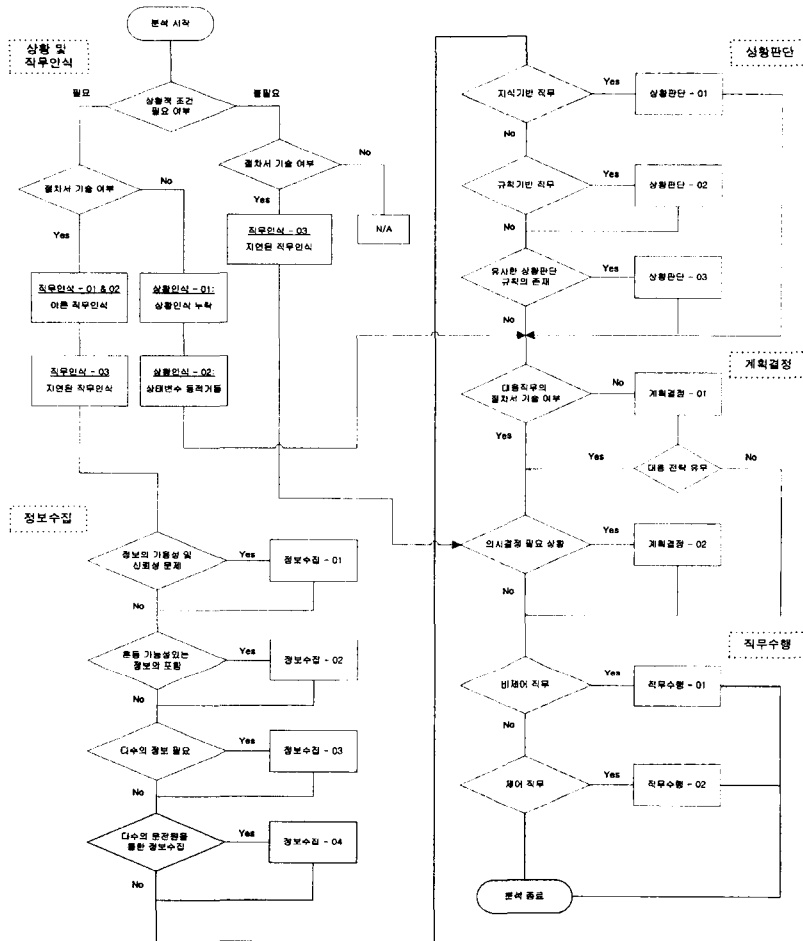


Fig. 2. The overall error analysis process of AGAPE-ET

인자를 정리한 것이다. Table 2에서 'HEP assigned'라고 표기된 데이터는 세부 항목에 대하여 오류확률을 할당한 경우로서, 상세한 오류확률 값을 참고문헌<sup>17)</sup>에 수록하였다. 또한, '정보수집-01'과 '계획결정-02'는 별도의 의사결정수목을 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 구성하였다. Table 2에서 보는 바와 같이, 직무수행 단계의 오류정량평가는 기존의 국내 PSA에서 사용된 K-HRA<sup>18)</sup>의 수행오류 평가 방법을 동일하게 사용한다. 각 인지단계에 해당하는 영향인자의 수준은 선정된 영향인자들로 구성된 영향인자 의사결정수목(IFDT: Influencing Factors Decision Tree)을 이용하여 평가된다<sup>17)</sup>.

한편, '직무인식-01 및 -02'와 '직무인식-03'의 경우, 그 자체에 정보수집 및 상황판단 항목을 포함하여 평가되므로, 이하의 정보수집 기능과 상황판단

기능에서 평가될 경우, 지나친 보수성을 배제하기 위해 두 값중 높은 값을 취한다. 즉, 직무인식, 정보수집 및 상황판단 과정을 '진단오류'라고 정의하면, 다음 규칙에 의해 최종적인 진단오류확률 값을 취한다.

$$\begin{aligned} \text{진단오류확률} &= \text{MAX} \{ \text{AHEP}(\text{직무인식}), \\ &\quad \text{AHEP}(\text{정보수집}) + \text{AHEP}(\text{상황판단}) \}. \quad (3) \end{aligned}$$

#### 4. 적용 및 결과

본 절에서는 AGAPE-ET 방법의 비상운전직무에 대한 적용 결과를 제시한다. 적용 예제 시나리오는 주급수 및 보조급수가 모두 상실되는 급수완전상실(LOAF: Loss of All Feedwater) 시나리오에서 일차측

Table 2. The values of BHEP and adjusting PSFs according to cognitive function

인지기능	분석 절차	오류분석 항목 및 오류유형	BHEP	Adjusting PSFs
상황 및 직무인식	직무인식-01	이른 직무인식으로 인한 이른 수행	HEP assigned*	동시직무량 및 직무 중요도, 정보계통의 인식성, 훈련 정도, 절차서 수준
	직무인식-02	이른 직무인식 후 직무의 재인식 오류	HEP assigned*	
	직무인식-03	지연된 인식으로 인한 지연된 반응	THERP <sup>2)</sup> diagnosis curve	
	상황인식-01	요구 직무에 대한 상황인식 실패	HEP assigned*	
	상황인식-02	상태변수의 동적거동으로 인한 부적절한 조치	Expert opinion (Refer to Fig. 1)	
정보수집	정보수집-01	정보 가용성/신뢰성/위치 등	DT (Fig. 3)	동시 직무, 시간 긴급성, 절차서, 훈련, 팀 협력 및 정보 전달 체계
	정보수집-02	혼동 가능성 정보	BHEP = 3.0E-3	
	정보수집-03	다수 정보 및 정보간 중요도	BHEP = 1.0E-2	
	정보수집-04	다수 운전원 및 현장 운전원	BHEP = 1.0E-2	
상황판단	상황판단-01	지식기반 직무	HEP = 0.1 ~ 1.0	동시직무량 및 상대적 중요도, 시간 긴급성, 훈련/교육 정도
	상황판단-02	규칙 결함(설계 오류) 규칙 논리의 복잡성 - AND or OR - NOT - NOT & (AND or OR) - AND & OR - NOT & AND & OR 애매한 표현/구체성 미비	HEP = 0.8 ~ 1.0	
			BHEP = 3.0E-4	
			BHEP = 2.0E-3	
상황판단-03	유사직무	BHEP = 5.0E-2		
계획결정	계획결정-01	대응직무의 절차서 결여	HEP assigned*	N/A
	계획결정-02	부정적/불확실한 효과 다수의 대응방안 존재	DT (Fig. 5): 부정적/불확실 효과, 대체 대응 방안, 절차서, 발전소 정책 및 안전 문화, 훈련/교육 정도, 시간 긴급성	
직무수행	직무수행-01	비제어 직무	K-HRA <sup>18)</sup> 수행오류 평가	절차서, 훈련, 정보시스템, 팀 협력 수준, 동시직무량, 스트레스 수준
	직무수행-02	제어 직무		

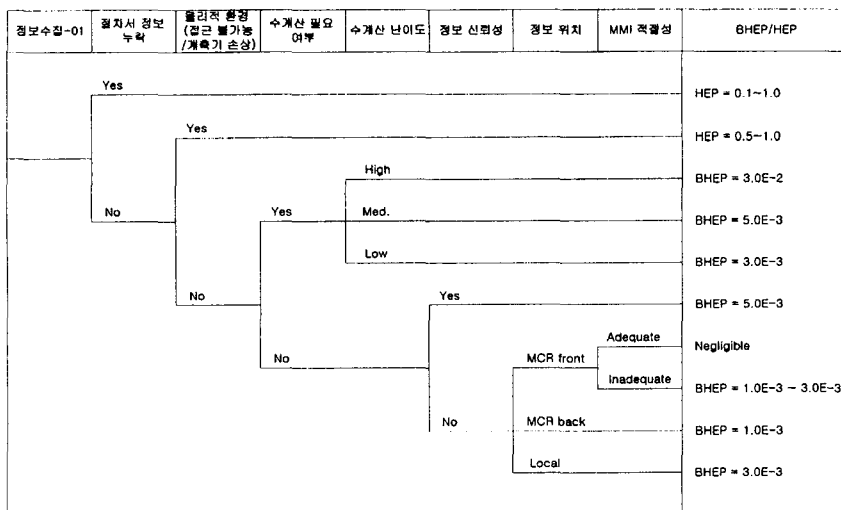


Fig. 3. The influencing factors decision tree for '정보수집-01'

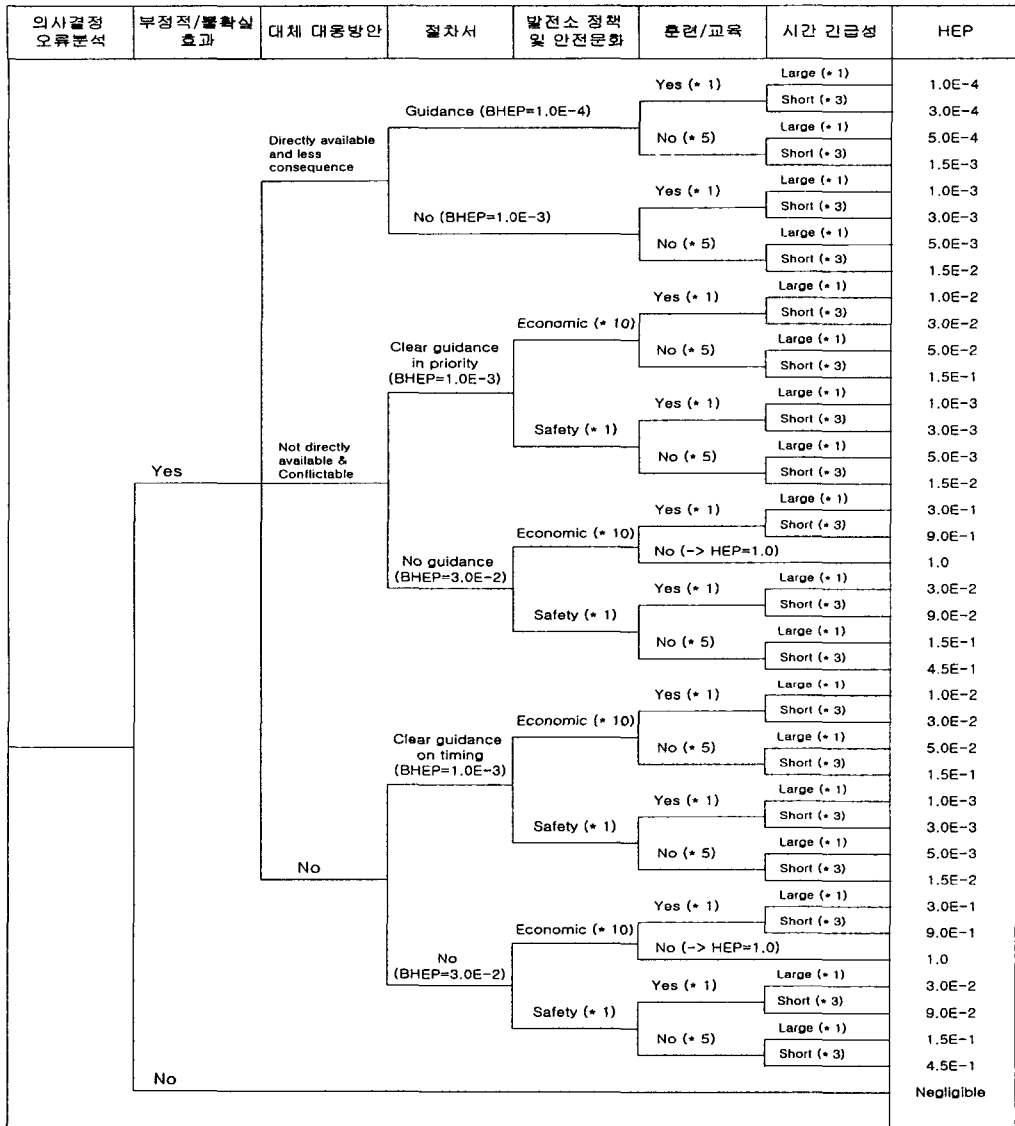


Fig. 4. The influencing factors decision tree for '계획결정-02'

방출 및 주입 운전이 요구되는 상황이며, 이 상황에서 주요한 직무 및 상황 특성의 파악과 발생 가능한 오류유형의 분석, 그리고 정량적 평가를 수행하였다.

방출 및 주입 운전은 주급수 상실사고로 원자로가 정지된 후 SG 수위에 의해 자동설정된 보조급수도 작동하지 않는 급수완전상실 사고가 발생했을 경우, 비상운전절차서(EOP)인 비상-05, 'LOAF' 절차서를 이용하여 급수회복 노력과 함께 불충분한 노심냉각 상태를 판단한 후, 안전감압계통(SDS: Safety Depressurisation System)을 이용하여 원자로냉각재

통(RCS: Reactor Coolant System) 계통을 강제로 감압시키고 고압안전주입계통(HPSI: High-Pressure Safety Injection)을 작동시킴으로써 원자로심을 냉각시키기 위한 운전이다. 방출 및 주입 운전의 수행이 요구되는 시점은 일반적으로 원자로 정지 후 약 15~25 분 정도로 알려져 있다<sup>19,20)</sup>. 본 논문에서는 기존 PSA<sup>21)</sup>에서 사용된 값인 20분을 사용한다. 이 직무와 관련된 절차서의 해당 부분을 Table 3에 제시하였다. 운전원은 EOP의 LOAF 절차단계 8에서 불충분한 노심냉각 상태를 확인하고 '회복-06 (HR-03)

절차서로 진이할 것을 판단/결정하며, ‘회복-06 (HR-03)’에서 PSV가 처음 개방되는 시점에서 ‘방출 및 주입 운전’을 개시하게 된다.

본 연구에서 개발한 절차를 위의 상황과 방출 및 주입 운전 직무에 적용한 결과를 Table 4에 정리하였다. 방출 및 주입 운전은 그 수행에 있어서 물리적 상황 조건의 확인이 필요하고 절차서에 기술되어 있는 직무이므로, 직무인식 기능과 관련된 분석을 수행한다. 방출 및 주입 운전은 일차측 냉각수의 격납건물로의 강제적 방출이므로 그 직무의 특성상 이른 직무인식으로 인한 이른 수행 가능성은 거의 없다고 판단된다. 또한 직무의 중요성으로 인하여 재인식 누락 가능성도 거의 없다. 그러나, 시스템 가용시간 20분 중 직무수행시간으로 약 4분을 빼면 진단 허용시간은 약 16분으로 상당히 짧은 시간이며, 이차측 열제거 기능 회복을 위해 주급수 및 보

조급수 복구 노력이 사전/동시 직무로서 수행되므로, ‘직무인식-03’ 단계에 따라 다소간의 직무인식 지연이 발생할 수 있다. 직무인식 지연이 가능하지만, 진단허용시간이 16분으로 충분히 제한된 시간이므로, THERP 진단곡선 이용시 그 값을 그대로 사용한다. 이때 진단오류확률은 3.88E-02로 계산된다. 정보수집 기능에서는 적절한 수준으로 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 상황판단 기능에서는 규칙 직무로서 ‘AND ^ OR ^ NOT’으로 구성된 논리의 복잡성과 짧은 허용시간을 고려해서 규칙 사용시의 오류로 인한 ‘상황판단 오류’ 가능성은 4.5E-02로 평가되었다.

계획결정 단계에서, 방출 및 주입 운전은 잘 알려져 있는 바와 같이 수행 시 발전소의 경제성에 막대한 손실을 줄 수 있는 부정적 효과가 존재하는 직무이고, 다른 대안적 직무로서 급수복구를 통한 이차

**Table 3.** Procedural steps for the feed and bleed operation  
- EOP-05 (Loss of all feedwater)

Step	Instructions	Contingency Actions
1	Ensure Standard Post Trip Actions performed	
2*	<u>Confirm</u> the diagnosis of a Loss of All Feedwater (LOAF) by verifying the Safety Function Status Check acceptance criteria are satisfied.	<u>Rediagnose</u> the event and go to ONE of the following: a. Appropriate ORP b. Functional Recovery Procedure
3	Trip ALL RCPs	
4*	IF a feedwater line break is suspected, THEN isolate the break and continue with the actions of this guideline.	
5	Evacuate the containment	
6*	Verify adequate RCS heat removal via the steam generators by checking ALL of the following: Steam generator has wide range level greater than or equal to 2% in at least one SG OR being restored by a total feedwater flow greater than 35 L/sec to one or both SGs AND RCS Tc temperature do NOT increase by more than 10 ±F (5.6°C)	IF both SG wide range level are less than 2% AND the total feedwater flow is NOT being restored greater than 35 L/sec to one or both SGs, THEN implement the FRP-06, HR-04  OR  IF RCS Tc temperature increase uncontrollably by 10 ±F (5.6 ±C) or greater, THEN implement the FRP-06, HR-04
7*	Attempt to restore main or auxiliary feedwater systems to operation by ensuring ALL of the following: <i>Proper actuation of AFAS</i> 7.1 Valve line up from the source of water to the SG(s) 7.2 Proper operation of pump(s) 7.3 Adequate water sources (CST, DWST, RWT) 7.4 Necessary vital auxiliaries such as power, instrument air, and/or instrumentation(s). 7.5	
* Step performed continuously		
- FRP-06, HR-04 (bleed and feed operation)		
Step	Instructions	Contingency Actions
1	<u>Confirm</u> that bleed and feed operation is required by ANY of the following: ...	

Table 4. Results of the application of AGAPE-ET to the feed and bleed task

분석 항목	정성분석 결과	정량평가 결과
직무인식-03: 지연된 직무인식	· 관련 절차서: 비상-05(LOAF) 단계 8, 회복-06 (HR-03) · 진단허용시간: 16 분 · 사전/동시작무: 보조급수 복 구 활동 · 운전원 수행도에 따라 직무 지연 가능성 있음	3.88E-02 (THERP 진단곡선)
상황판단-02: 규칙기반 직무	· 규칙/논리의 복잡성: 'AND ^ OR ^ NOT' · 시간 긴급성: 짧은 허용시간 (* 3)	1.5E-02 (BHEP) * 3 (시간 긴급성) = 4.5E-02
계획결정-02: 부정적/ 불확실한 효과	· 부정적 효과: 경제적 손실 · 절차서: 전략간 우선순위에 대한 구체적 지침 결여 · 시간 긴급성: 짧은 허용시간 (* 3) · 의사결정 지연 또는 잘못된 의사결정 가능	발전소 정책 및 안전문화 수준 고려 · 경제성: 3.0E-02 * 10 * 3 = 9.0E-01 · 안전성: 3.0E-02 * 3 = 9.0E-02
총 의사결정 오류 확률		1.35E-01 (안전성)
직무수행-01: 비제어 직무	· 수행시점 오류	0.25 (스트레스 수준: Ext. High) * 0.1 (복구실패확률) * 2 (Units of Action) = 5.0E-02
최종 인간오류확률		1.85E-01

측 냉각이 가능하므로 의사결정 시 난해한 상황에 직면할 수 있다. 또한, 직무수행에 주어진 가용시간이 상당히 짧으므로, 방출 및 주입 운전의 수행이 지연될 경우, 발전소는 노심 손상에 이를 수 있는 가능성이 있다. 현재 참조 발전소의 관련 절차서는 운전 조직 또는 의사결정 조직이 실제 상황에서 겪을 수 있는 이와 같은 난해한 의사결정의 상황은 다루고 있지 못하다. 급수 복구와의 우선 순위 문제, 의사결정에 대한 사전 대비, 방출 및 주입 운전 수행 중 급수 복구가 이루어질 경우의 대응 전략 등 본 상황에 대한 전략의 보충이 요구된다. 정량적 평가는 Fig. 4에 의해 발전소의 정책 및 안전문화 수준을 따라 경제성에 치중되어 있을 경우 9.0E-01로 평가되며, 안전성에 치중되어 있을 경우 9.0E-02로 평가된다. 직무 수행 단계는 비제어 수행이고, 직무의 성공에 수행 시점이 중요한 직무이므로 '수행시점 오류'를 고려하였다. 정량화 결과는 K-HRA 방법에 의해 5.0E-02로 평가된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 원전 비상상황 시의 시나리오적 특성과 운전원의 인지모형을 기반으로 개발된 인적

오류 분석 절차 AGAPE-ET 방법을 소개하고, 대표적인 원전 비상직무인 방출 및 주입 운전 직무에 적용함으로써 제안된 방법의 정성적 분석 및 정량적 평가의 적용성을 예시하였다. AGAPE-ET 방법은 원전 비상상황 시 운전원의 수행도에 영향을 줄 수 있는 주요 상황 및 영향요인을 선정하고, 이들 요인들과 운전원의 인지적 기능과의 영향관계를 고려하여 인지기능별로 주요한 오류유발상황을 도출하고, 이를 적절한 분석 지침서 형태로 절차화하였다. 분석자의 분석 부담을 덜기 위하여 직무의 인지적 요구 특성에 따라 분석 경로를 차별화하여, 단순한 인지 과정을 요하는 직무인 경우 그에 따른 단순한 분석 단계를 취할 수 있도록 하고, 복잡한 인지과정이 필요한 경우 해당하는 인지기능 분석 항목 내에서 해당하는 항목을 확인하여 해당되는 항목만을 분석할 수 있도록 분석과정을 효율적으로 설계하였다. AGAPE-ET의 정량적 평가 체계는 기존 HRA 방법으로부터 유사한 직무 및 상황특성에 대하여 얻은 기본오류확률(BHEP)과 인지기능별로 선정된 영향 인자의 수준을 반영하는 영향인자 결정수목(IFDT)으로 구성되어 있다.

AGAPE-ET 방법은 운전원의 인지과정을 바탕으로 한 오류분석 방법으로서, 직무의 수행과 관련된 취약점을 체계적으로 분석할 수 있는 특징이 있다. 이것은 특정 직무에 대하여 직무의 수행 난이도와 관련된 특성 또는 오류유발원인 및 상황을 파악할 수 있도록 하여, 절차서 작성 또는 훈련 시 특별한 주의를 요하는 주안점으로 활용할 수 있다. 또한, AGAPE-ET 방법은 기존 HRA 방법에 비하여 정성적 분석에 있어서 오류유발상황에 대한 구체적인 지침을 제공함으로써 실용적이고 일관성있는 분석이 가능하다.

### 참고문헌

- 1) Kirwan B, A guide to practical human reliability assessment, Taylor & Francis, 1994.
- 2) Swain AD, Guttman HE. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278, USNRC, 1983.
- 3) Swain AD, Accident sequence evaluation program human reliability analysis procedure, USNRC, NUREG/CR-4772, 1987.

- 4) Embrey D, SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgement. NUREG/CR-3518, USNRC, 1984.
- 5) Hannaman GW, Sprgin AJ, Lukic YD, Human cognitive reliability model for PRA analysis, Drafts report, NUS-4531, EPRI Project RP 2170-3, 1984.
- 6) Hollnagel E. Cognitive reliability and error analysis method. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- 7) Le Bot P, Cara F, Bieder C, MERMOS, a second generation HRA method: what it does and doesn't do. Proceedings of International Conference on PSA, Washington, DC, p.852-60, 1999.
- 8) USNRC. Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA). NUREG-1624. Rev. 1, 2000.
- 9) Rasmussen J. Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering. New York: North-Holland. 1986.
- 10) Reason J. Human error. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- 11) 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.
- 12) Yoon WC, Lee YH, Kim YS. A model-based and computer-aided approach to analysis of human errors in nuclear power plants. Journal of Reliability Engineering and System Safety 1996; 51: 43-52.
- 13) Dougherty Ed. Context and Human Reliability Analysis, Reliability Engineering and System Safety, 41, 25, 1993.
- 14) 김재환, 정원대, "원자력발전소 사고관리 직무의 인간신뢰도분석을 위한 수행영향인자의 선정," 대한인간공학회지, 제20권, 제2호, 2001.
- 15) Williams, J.C., A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance", Proceedings of the IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants, Monterey, California, pp. 436-450, 1988.
- 16) 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.
- 17) 김재환, 정원대, 원자력발전소 비상운전 직무의 인간오류분석 및 평가를 위한 AGAPE-ET의 개발과 적용, KAERI/TR-2077/2002, 2002.
- 18) 정원대 외, "화학공장의 위험성 평가를 위한 인간신뢰도분석 방법 및 지원 시스템 개발", 화학공학회 2000년 춘계학술발표 논문집, 2000.
- 19) Hirschberg, S. (ed.), Dependencies, human interactions and uncertainties in probabilistic safety assessments. Final report of the NKA Nordic Project RAS 470, 1990.
- 20) Svenson, O., A decision theoretic approach to an accident sequence: when feedwater and auxiliary feedwater fail in a nuclear power plant. Reliability Engineering and System Safety 59, pp. 243-252, 1998.
- 21) KEPRI, 영광 5,6호기 PSA Notebook, 2001.