

인지오류분석을 포함한 제 2세대 인간신뢰도분석 방법의 개발

An Advanced Human Reliability Analysis Methodology: Analysis of Cognitive Errors Focused On

김재환, 정원대
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

THERP, ASEP, HCR, SLIM 등 기존 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis) 방법들이 운전원의 의사결정 과정 중 오류분석에는 미흡하다는 평가가 제기되어 왔다. 본 연구에서는 기존 HRA의 이러한 한계점을 보완하기 위하여, 최근의 인지공학 기술과 인간오류 이론을 토대로 하여 운전원의 의사결정 과정 중에 발생할 수 있는 인지오류 가능성을 분석·평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 본 논문에서 제안하는 인간신뢰도분석 방법은 인간의 의사결정 모형과 인지기능별 영향(상황)요인을 기반으로 하여 개발되었으며, 가능한 오류유형의 분석을 위한 정성적 오류분석 절차와 이의 평가를 위한 정량적 오류평가 절차로 구성되어 있다. 원전의 비상운전 직무에 적용한 결과를 제시한다.

ABSTRACT

The conventional Human Reliability Analysis (HRA) methods such as THERP/ASEP, HCR and SLIM has been criticised for their deficiency in analysing cognitive errors which occurs during operator's decision making process. In order to supplement the limitation of the conventional methods, an advanced HRA method, what is called the 2nd generation HRA method, including both qualitative analysis and quantitative assessment of cognitive errors has been being developed based on the state-of-the-art theory of cognitive systems engineering and error psychology. The method was developed on the basis of human decision-making model and the relation between the cognitive function and the performance influencing factors. The application of the proposed method to two emergency operation tasks is presented.

1. 서 론

원전의 안전성을 정성적으로 분석하고 정량적으로 평가하기 위한 기법으로서 확률론적 안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 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 기계 신뢰도 모델과 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis) 기법을 이용하여 정량적으로 평가하여 각 확률을 통합함으로써 전체 시스템의 안전성을 계산하는 시스템 안전성 평가 도구이다. HRA는 PSA에서 인간에게 요구되는 직무의 수행 가능성을 분석·평가하는 역할을 담당하고 있으며, 최종적으로 인간오류확률(Human Error Probability: HEP)을 계산하여 PSA의 사건수목(Event Tree: ET)이나 고장수목(Fault Tree: FT)에 적절한 값을 제공한다.

HRA에 대한 PSA의 정량적 요구로 말미암아, THERP, ASEP, HCR, SLIM 등 현존하는 HRA 방법들이 운전원의 의사결정 과정 중에 발생할 수 있는 인지오류의 분석에는 취약했으며, 외적 행위의 정량적 평가에 치중되어 있다는 비평이 제기되어 왔다. 본 연구에서는 기존 HRA의 이러한 한계점을 보완하기 위하여, 최근의 인지공학 기술과 인간오류 이론을 토대로 하여 운전원의 의사결정 과정 중에 발생할 수 있는 오류 유형을 분석할 수 있는 방법을 개발하고자 한다.

본 연구에서 개발한 인간신뢰도분석 방법은 원전의 비상운전 직무를 분석 대상으로 하고 있으며, 상황요소의 분석과 이를 토대로 한 가능한 오류유형의 분석을 위한 정성적 오류분석 절차와 이의 평가를 위한 정량적 오류평가 절차로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안하는 인간신뢰도분석 절차는 인간의 의사결정 모형을 기반으로 하고 있으며, 각 인지기능별로 관련 있는 영향인자들을 적절하게 고려하여 분석할 수 있도록 구성되어 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 원전 운전원의 인지모형을 바탕으로 한 정성적 오류분석 절차를 소개하고, 제 3장에서는 정량적 평가 절차를 소개한다. 제 4장에서는 제안한 정성/정량 오류분석 절차를 두 비상직무에 적용한 결과를 정리하였으며, 제 5장에서 본 연구의 결론과 추후 연구 내용을 정리하였다.

2. 정성적 오류분석 절차

원자력발전소의 비상사고 시 운전원 대응조치는 크게 다음과 같이 두 가지 방식으로 이루어진다고 가정한다. 첫째는 사건 및 증상에 따라 마련된 비상운전절차서(EOP: Emergency Operating Procedures) 또는 회복운전절차서(FRP: Functional Recovery Procedures)를 바탕으로 이루어지는 대응방식이 있고, 두 번째는 정보계통에 의한 직무수행 필요성 인식이나 숙련된 운전원의 자발적 상황과악 노력에 의해 이루어지는 대응 방식이 있다. 본 논문의 인적오류분석 체계에서는 절차서를 바탕으로 이루어지는 대응 방식을 기본적 대응 방식으로 하고, 정보계통 및 자발적 상황과악에 의한 대응 방식은 보조적인 것으로 사용하였다. 그림 1은 운전원에 의한 절차서의 진행 시점과 시나리오의 진행 시점 사이의 관계로부터 발생할 수 있는 직무유형과 가능한 오류유형을 도식화한 것이다.

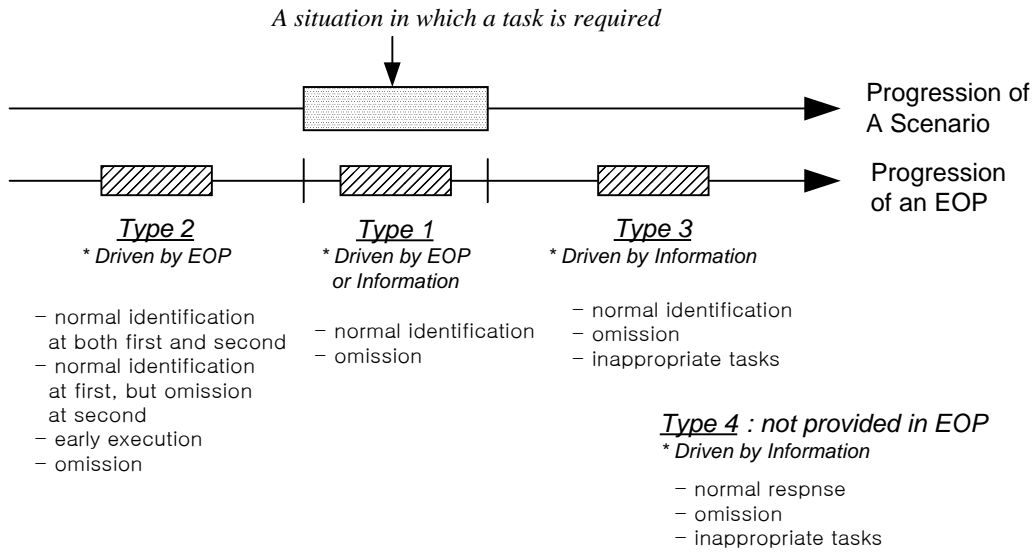


그림 1. 시나리오 전개 시점과 절차서 진행 시점과의 비교를 통한 직무 및 오류유형

본 오류분석 방법에서 취한 의사결정모형은 직무인식, 정보수집, 상황판단, 계획결정, 직무수행 등 5단계의 인지기능으로 구성된 모델을 사용하였다. 각 인지기능에 따른 수행 특성에 따라 인지기능별로 선정한 오류분석 항목은 다음과 같고, 해당 항목에 따른 오류분석 절차와 분석 경로를 그림 2의 플로차트에 도식화하였다.

직무인식 기능은 운전원이 현재의 사고 시나리오 상황하에서 필요하다고 판단되는 직무를 파악(identification)하는 단계이다. 앞에서 기술한 것과 같이 원전 운전원의 경우, 대부분의 직무 수행이 절차서를 바탕으로 이루어지므로 절차서를 통한 직무인식이 주(主)가 되며, 정보계통 및 운전원의 자발적 상황파악 노력을 통한 직무인식은 보조적인 것으로 분석된다. 직무인식 단계에서 가능한 오류유형은 주로 ‘직무 누락/지연’ 오류유형이 일반적이며, 익숙하지 않은 상황인 경우 잘못된 직무 선택도 가능하다. 직무인식 단계에서 고려한 오류분석 항목은 분석 직무의 상황적 조건의 필요 여부에 따라 크게 두 경로로 나누어지며, 세부 분석항목과 해당 분석 절차는 다음과 같다. 괄호 안의 내용은 구체적 오류유발 상황과 가능한 오류유형 분석을 위한 분석 절차를 나타낸다.

- 상황적 조건이 필요 없고, 절차서에 기술되어 있는 직무의 직무인식 오류 가능성 분석 (직무인식-01),
- 상황적 조건이 필요 없고, 절차서에 기술되어 있지 않은 직무의 직무인식 오류 가능성 분석 (직무인식-02),
- 상황적 조건이 필요하고 절차서에 기술되어 있는 직무의 직무인식 오류 가능성 분석 (직무인식-03),
- 상황적 조건이 필요하고 절차서에 기술되어 있지 않은 직무의 직무인식 오류 가능성 분석 (직무인식-04),
- 상황적 조건이 필요하나, 절차서 진행시점이 시나리오의 전개 상황보다 이르게 진행되는

경우(또는 시나리오의 전개가 느리게 진행되는 경우), 처음의 상황판단은 바르게 수행하나 직무의 재인식 시 누락 가능성이 존재할 수 있는 직무의 분석 (직무인식-05),

- 상황적 조건이 필요하고, 절차서 진행시점이 시나리오의 전개 상황보다 이르게 진행되거나 관련 변수의 상태가 불안정하게 변하는 경우의 ‘이른 수행’ 또는 ‘수행오류(Errors of Commission)’의 가능성 분석 (상황판단-04).

‘직무인식-01’과 ‘직무인식-02’의 경우 직무수행에 상황판단이 필요 없는 직무이므로, 직무인식 관점에서의 오류분석을 수행한 후 ‘정보수집’ 및 ‘상황판단’ 기능의 오류분석 과정을 거치지 않고 바로 ‘계획결정’ 기능의 분석으로 넘어갈 수 있다. 그러나, 직무수행 과정에서 복잡한 상황판단을 요구하는 직무이면, 정보수집 및 상황판단 기능의 오류분석도 고려해 보아야 한다. ‘직무인식-04’의 경우, 상황과악과 관련된 직무가 절차서에 기술되어 있지 않은 직무이므로, 상황인식 가능성이 존재할 경우, ‘계획결정’ 단계의 분석으로 간다. ‘직무인식-03’과 ‘직무인식-05’의 경우는 상황판단 과정에서 발생할 수 있는 오류 가능성을 분석하기 위해 ‘정보수집’과 ‘상황판단’ 기능에서의 오류분석 과정을 거쳐야 한다.

‘상황판단-04’의 경우, 오류 가능성이 주로 상황판단 단계와 연관되어 있으므로, 상황판단 기능에서의 오류분석 항목으로 포함시켰다. 한편, ‘상황판단-04’의 경우, 주로 부적절한 조치가 수행될 수 있는 ‘수행오류(Errors of Commission)’의 하나의 발생 메커니즘으로 고려될 수 있는 성격이므로, ‘수행오류(Errors of Commission)’ 가능성 분석에 대한 추후 연구에서 별도로 다룰 계획이다.

정보수집 단계에서의 오류분석은 상황 판단을 위해 필요한 정보를 수집하는 과정에서 발생할 수 있는 오류의 가능성을 분석한다. 이 과정에서 발생할 수 있는 오류의 유형은 정보의 부분 혹은 전체의 누락, 시간 지연, 잘못된 정보 수집 등이다. 정보수집 단계에서 고려한 분석 항목은 다음과 같다.

- 정보계통의 문제로서 설계상의 문제, 신뢰성의 문제, 정보 위치, 접근 용이성, 간접적인 방법(수(manual) 계산)으로 정보를 얻어야 하는 경우 (정보수집-01),
- 정보 자체의 문제로서 정보 자체가 유사한 다른 정보를 가지고 있어서 정보수집 시 혼동을 유발할 수 있게 하는 정보(예: 과냉각도, 과열된 증기발생기, Loop간 물리적 변수상태가 다른 경우 등)가 존재하는 경우 (정보수집-02),
- 다수의 정보가 필요한 직무인 경우 (정보수집-03),
- 다수의 운전원 및 현장 운전원을 통한 정보수집이 필요한 직무인 경우 (정보수집-04).

상황판단 기능에서는 정보수집을 통하여 얻은 정보를 종합(integration)하여 주어진 규칙 또는 지식을 바탕으로 발전소의 상태나 직무 수행을 위한 조건 등을 판단하는 과정이다. 이 과정 상에서 발생할 수 있는 오류유형은 상황 판단을 하지 못하거나 잘못된 상황 판단이다. 특히, 잘못된 상황 판단 중, 유사 직무가 존재할 때와 직무 인식 단계에서 기술한 ‘상황판단-04’에 대한

가능성을 분석하도록 했다. 앞에서 기술한 바와 같이, ‘상황판단-04’의 내용은 ‘수행오류(Errors of Commission)’ 분석 체제에서 재정립할 필요가 있으므로 본 절차에서는 잠정적으로 포함시키는 것으로 한다. 상황판단 기능에서 고려한 분석 항목은 다음과 같다.

- 절차서에 기술된 직무이더라도 판단(Judgement), 평가(Evaluation) 등과 같은 상위수준의 인지적 기능을 요구하는 ‘지식기반(Knowledge-based)’ 직무가 포함된 경우 (상황판단-01),
- 규칙기반 직무인 경우, 절차서의 기술 수준, 애매한 표현, 규칙/논리의 복잡성 등에 따른 분석 (상황판단-02),
- 분석 직무와 유사한 직무가 존재하는 직무인 경우 (상황판단-03),
- 상황적 조건이 필요하고, 절차서 진행시점이 시나리오의 전개 상황보다 이르게 진행되거나 관련 변수의 상태가 불안정하게 변하는 경우의 ‘이른 수행’ 또는 ‘수행오류(Errors of Commission)’의 가능성 분석 (상황판단-04).

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 상황판단 후 적절한 절차서의 선택, 상황에 따른 절차서의 적절한 활용, 중요한 부분에서 요구되는 의사결정 등이다. 이 단계에서 가능한 오류유형은 부정적 효과나 불확실한 효과 등으로 인한 누락/지연 오류와, 절차서의 부적절한 작성과 사용 및 의사결정 상황으로부터 올 수 있는 잘못된 계획/결정, 부적절한 직무의 선택 등의 오류유형이 발생할 수 있다. 이 단계에서 고려한 분석 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 절차서의 부재 및 부적절한 작성으로 인한 오류 가능성의 분석 (계획결정-01),
- 직무와 관련하여 발전소에 부정적 효과나 경제적 혹은 안전성 측면에서 큰 손상이 예상될 때와 효과가 불확실한 상황 (계획결정-02),
- 다수의 대응 방안이 존재할 때의 의사결정 상황 (계획결정-02).

위 항목 중, 절차서의 부적절한 작성으로 인한 오류는 직무수행 기능과 밀접히 연관되어 있으므로 직무수행 단계와 병행하여 분석하도록 했으며, 다수의 대응방안이 존재할 경우의 오류 가능성 분석은 부정적 효과나 불확실한 상황이 존재하는 경우에 한하여 오류 가능성을 고려하도록 했다.

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’, ‘선택 오류’, ‘수행 누락’, ‘수행순서 오류’, ‘유사직무 수행’ 등이다. 비제어 직무에 대해서는 오류유형을 중심으로 발생 가능한 상황을 고려하도록 정리했고, 제어직무에 대해서는 제어 직무의 수행 난이도와 운전원간의 협력을 중심으로 오류 가능성을 분석하도록 했다.

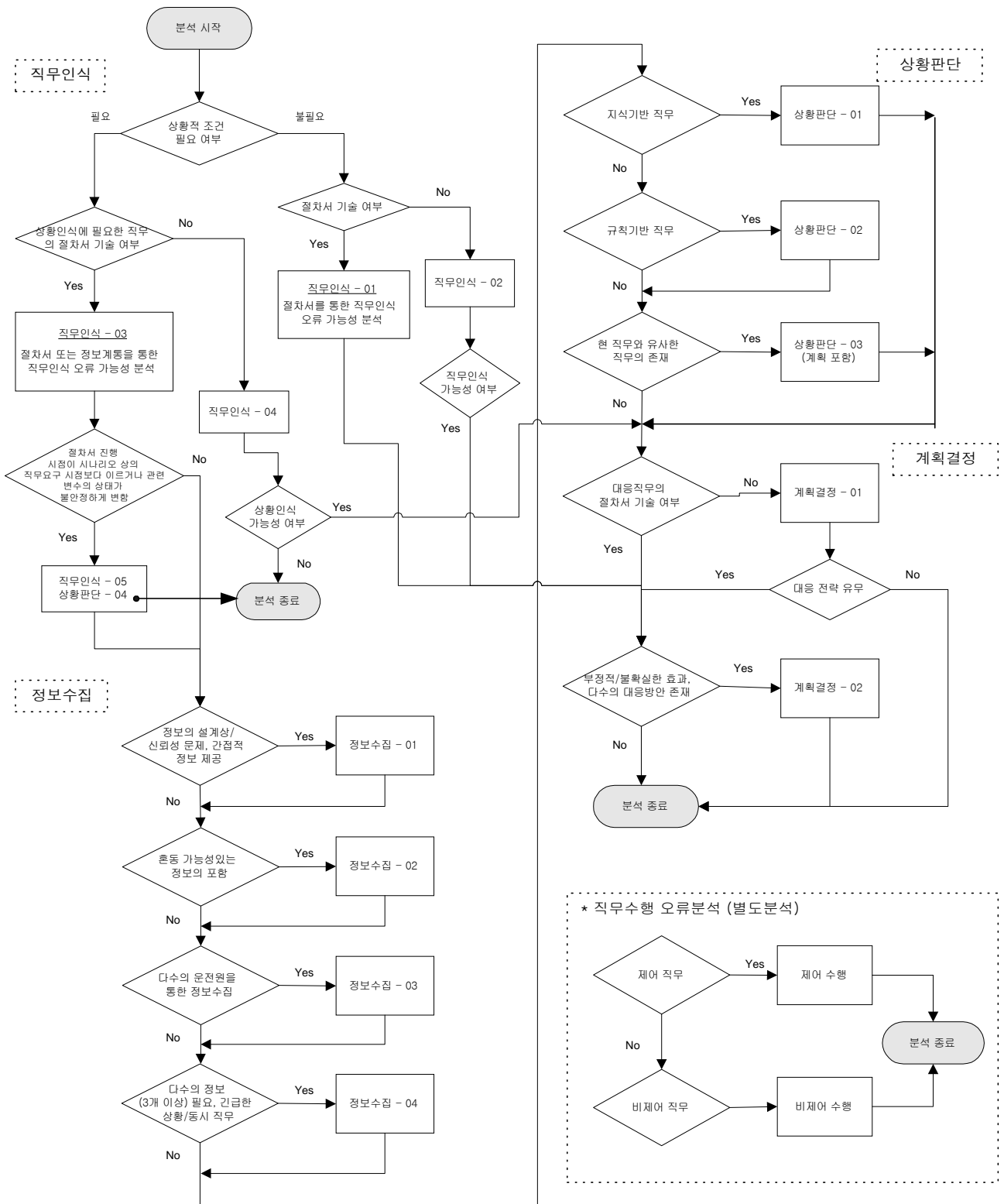


그림 2. 인지기능별 오류분석 항목 및 분석 절차

3. 정량적 평가 절차

정량적 평가 절차에서는 정성적 오류분석 절차에서 분석한 각 인지오류유형에 대하여 정량적 발생 가능성을 평가한다. 정량적 평가는 다음과 같이 크게 세 단계로 이루어지도록 구성되었다.

- 첫째, 파악된 인지기능 오류항목 또는 오류유형에 따라 제시된 기본 인간오류확률(BHEP: Basic Human Error Probability)을 결정한다.
- 둘째, 인지기능별로 선정된 영향(상황)인자의 수준을 반영하기 위하여 작성된 영향인자 결정수목(IFDT: Influencing Factor Decision Tree)의 가중치(Weights) 값을 이용하여 BHEP 값을 조정한다. 조정한 값을 AHEP(Adjusted Human Error Probability) 라고 정의한다.
- 셋째, 최종 HEP 값은 다음 식과 같이 얻어진다.

$$HEP = \sum_i AHEP_i = \sum_i BHEP_i * \omega_i(PIF_i), \quad (\text{식 1})$$

$\omega_i(PIF_i)$: 파악된 인지기능 오류항목 i 에 대한 영향인자 결정수목 (IFDT)으로부터 얻은 가중치,

$BHEP_i$: 파악된 인지기능 오류항목 i 에 대한 기본 인간오류확률(BHEP)

$AHEP_i$: 파악된 인지기능 오류항목 i 에 대한 조정 인간오류확률(AHEP).

표 1은 인지기능별 주요 오류분석 항목 및 오류유형에 대한 BHEP 값과 인지기능별로 고려한 영향인자 들을 정리한 것이다. BHEP 값들의 출처(Data source)는 THERP(Swain, 1983), HEART(Williams, 1988), INTENT(Gertman et al., 1992), CREAM(Hollnagel, 1998), CBDT(Parry, 1992) 등이며, 이들 자료에서 추출할 수 없는 데이터는 추정값을 사용하였다. 영향인자에 대한 결정은 영향인자 선정 과정을 통하여 이루어졌다(Kim and Jung, 2001). ‘정보수집-01’과 ‘계획결정-02’에 해당하는 결정수목(DT: Decision Tree)은 그림 3과 그림 4에 각각 제시하였다. 이 값들은 잠정적으로 제시된 값들이며, 실제 인적오류 자료, 실험, 적용, 전문가 회의 등을 통한 반복적인 수정이 필요한 값들이다.

한편, ‘직무인식-03’ 및 ‘직무인식-05’ 는 HEP 계산 시 THERP 진단곡선을 이용하도록 되어 있으며, 동시에 정보수집 기능과 상황판단 기능의 분석도 이루어진다. THERP 진단곡선이 주어진 허용시간 내에 잘못 이루어질 진단오류 가능성도 포함하고 있기 때문에, 본 분석 방법에서는 ‘직무인식-03’ 및 ‘직무인식-05’ 등이 정보수집 기능과 상황판단 기능에서 오류분석 항목(또는 오류유형)이 파악되면, 다음의 규칙에 의해 최종적인 하나의 값을 취한다. 직무인식, 정보수집, 상황판단의 과정을 진단오류라고 정의하면,

$$\text{진단오류확률} = \text{MAX}\{AHEP(\text{직무인식}), AHEP(\text{정보수집}) + AHEP(\text{상황판단})\}. \quad (\text{식 2})$$

즉, 정보수집 및 상황판단 과정이 THERP 진단오류에 포함되어 있으므로, 정보수집 및 상황판단

과정에서 얻은 정량오류평가 결과 직무인식 단계에서 구한 THERP 진단오류 값 중 큰 값을 취하는 것이다.

표 1. 인지기능 오류분석 항목별 기본 인간오류확률(BHEP)

인지기능	분석 절차	오류분석 항목 및 오류유형	BHEP	Adjusting PIFs
직무인식	직무인식-01	상황조건(무), 절차서(유)	THERP 진단곡선	동시직무량 및 직무 중요도, 정보시스템의 인식성, 훈련 정도, 절차서 수준
	직무인식-02	상황조건(무), 절차서(무)	HEP assigned	
	직무인식-03	상황조건(유), 절차서(유)	THERP 진단곡선	
	직무인식-04	상황조건(유), 절차서(무)	HEP assigned	
	직무인식-05	절차서의 이른 진행(재인식)	THERP 진단곡선	
정보수집	정보수집-01	정보 가용성/신뢰성/위치 등	DT 이용	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 - 상 - 중 - 하 애매한 표현/구체성 미비	HEP = 0.8 ~ 1.0 BHEP = 5.0E-2 BHEP = 1.0E-2 BHEP = 3.0E-3 BHEP = 3.0E-2	
	상황판단-03	유사직무 - 진단오류 - 절차서 주의 (유) - 절차서 주의 (무)	BHEP = 5.0E-3 BHEP = 5.0E-2	
계획결정	계획결정-01	대응직무의 절차서 결여	HEP assigned	N/A
	계획결정-02	부정적/불확실한 효과, 다수의 대응방안 존재	(DT 이용) 부정적/불확실 효과, 대체 대응 방안, 절차서, 발전소 정책 및 안전 문화, 훈련/교육 정도, 시간 긴급성	
직무수행	직무수행-01	제어 직무	제어실패오류 수행시점오류 수행순서오류	절차서, 훈련, 정보시스템, 팀 협력 수준, 동시직무량, 스트레스 수준
	직무수행-02	비제어 직무	대상선택오류 수행누락오류 유사직무수행 (+ 3.0E-3/단위행위)	

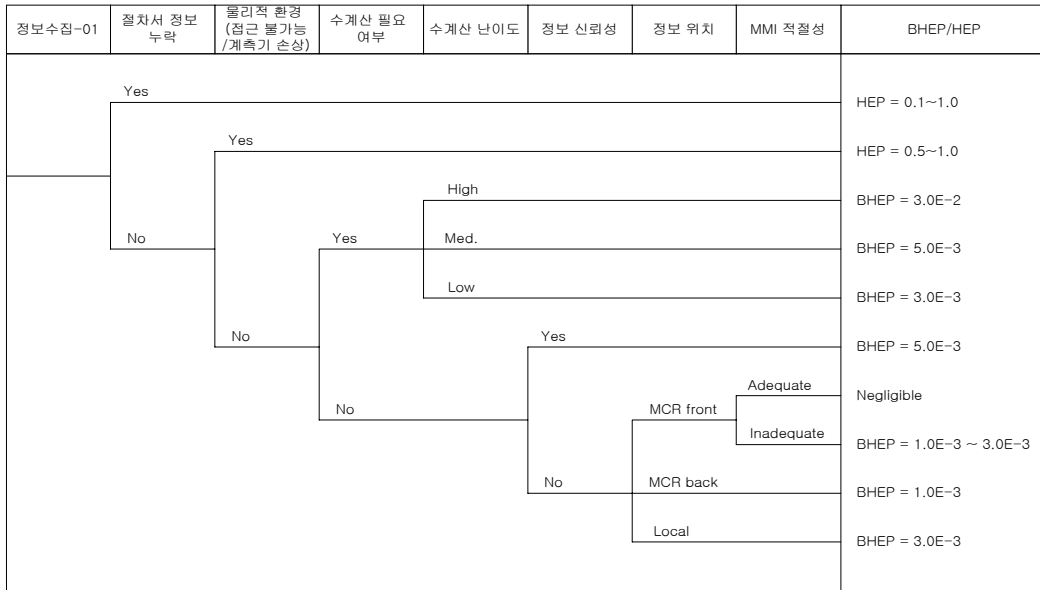
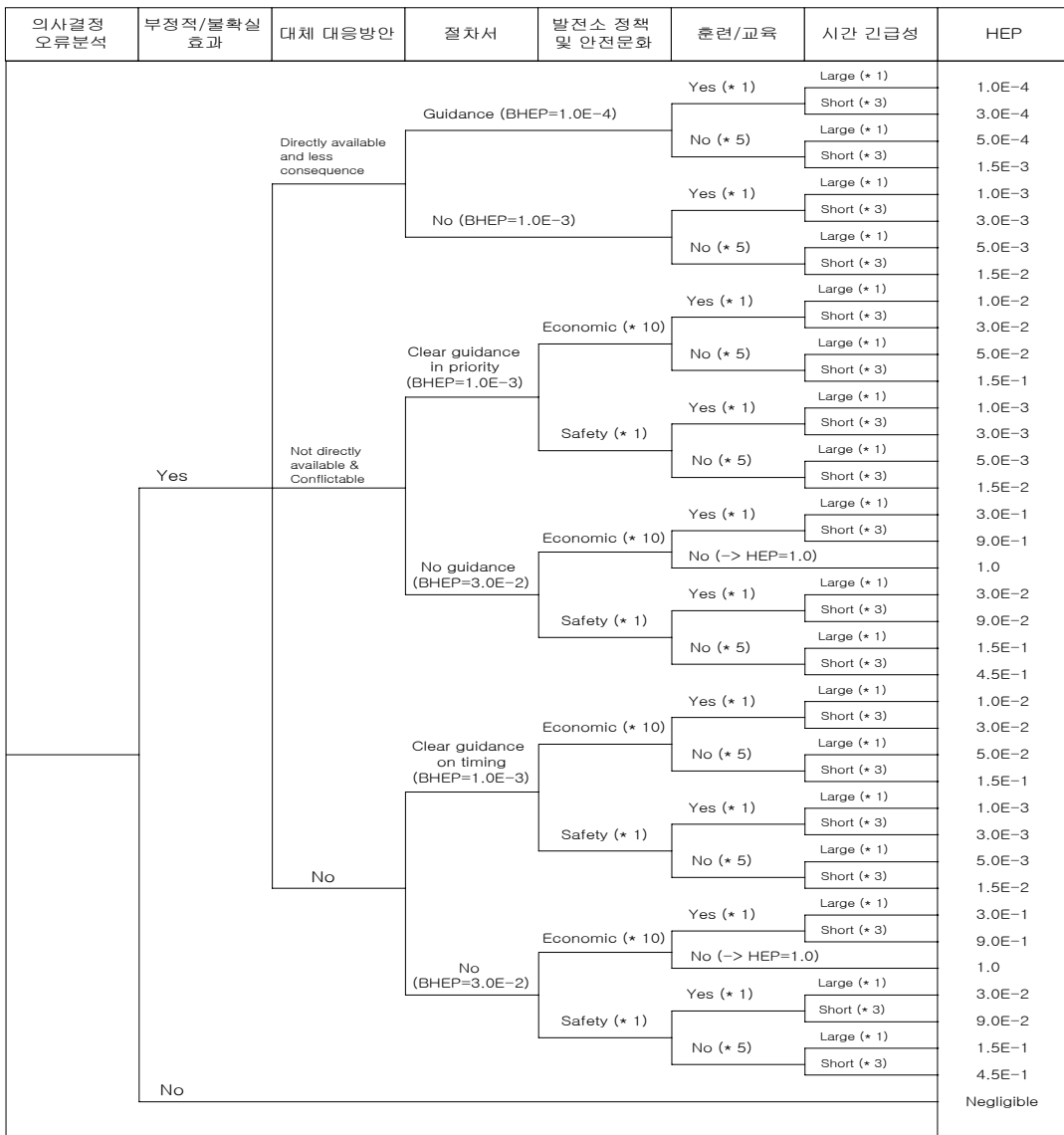


그림 3. '정보수집-01'의 BHEP/HEP 결정을 위한 결정수목



4. 적용

본 연구에서 개발한 정성적/정량적 인간신뢰도분석 절차를 두 비상직무에 적용한 결과를 정리하였다. 적용한 직무는 급수완전상실(LOAF: Loss of All Feedwater) 시나리오에서의 ‘방출 및 주입 운전’과 소형냉각재상실사고(SLOCA: Small Loss of Coolant Accident) 시나리오에서의 ‘냉각 및 감압 운전’ 직무이다.

4.1 ‘방출 및 주입 운전’의 오류분석 및 정량평가

표 2는 ‘방출 및 주입 운전’에 대한 분석 절차의 적용 결과를 정리한 것이다. ‘방출 및 주입 운전’은 주급수 상실사고로 원자료가 정지된 후 보조급수조차 작동하지 않는 급수완전상실 사고가 발생했을 경우, 비상운전절차서(EOP)인 비상-05, ‘LOAF’ 절차서를 이용하여 급수회복 노력과 함께 불충분한 노심냉각 상태를 판단하고, RCS 계통을 강제로 감압시킨 후 고압주입계통을 작동시켜 노심을 냉각시키기 위한 운전이다. 운전원은 LOAF 단계 8에서 불충분한 노심냉각 상태를 확인하고, ‘회복-06 (HR-03)’으로 전이하여 ‘방출 및 주입 운전’을 수행하게 된다.

‘방출 및 주입 운전’을 수행하기 위해서 물리적 상황 조건의 확인이 필요하므로, 직무인식 기능 단계의 오류분석에서는 ‘직무인식-03’ 절차를 이용하여 오류분석 및 정량평가를 수행하게 된다. 진단 허용시간은 16분으로 상당히 짧은 시간이며, 주급수 및 보조급수의 복구 노력이 사전 또는 동시 직무로서 수행되고 있는 상황으로 이로 인하여 운전원의 수행능력에 따라 다소간의 직무지연이 발생할 수 있다. 상황판단을 위한 정보수집 과정에서는 적절한 수준으로 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 상황판단 단계에서는 ‘중’ 정도 수준의 논리의 복잡성과 짧은 허용시간을 고려해서 규칙 사용시의 오류로 인한 ‘상황판단 오류’ 가능성을 평가하였다.

한편, ‘방출 및 주입 운전’은 수행 시 발전소의 경제성에 막대한 손실을 줄 수 있는 직무이므로, 계획결정 단계에서 의사결정의 어려움을 겪을 수 있다. 그러나, 직무수행에 주어진 가용시간이 상당히 짧으므로, 직무 수행이 지연될 경우, 발전소를 노심 손상에 이르게 할 수도 있다. 현재 참조 발전소의 관련 절차서에는 운전 조직 또는 의사결정 조직이 실제 상황에서 겪을 수 있는 이와 같은 의사결정의 문제를 적절히 반영하고 있지 못하다. 급수 복구와의 우선 순위, 방출 및 주입 운전 수행 중에 급수 복구가 이루어질 경우의 대응 전략 등에 대한 보충이 요구된다. 직무 수행 단계는 비제어 수행이고 수행 대상 외에 수행 시점이 중요한 직무이므로, ‘수행시점 오류’를 고려하였다.

위의 각 오류유형에 대한 정량 평가에 대한 결과를 THERP/ASEP 방법과 ASEP 방법을 실제 HRA 전문가의 입장에서 개선한 K-HRA(정원대 외, 2000) 방법과 비교하여 제시하였다. THERP/ASEP 방법의 경우, 의사결정 과정에서의 오류 가능성은 THERP 진단곡선을 이용하여 평가하게 되며, 특히 진단오류 가능성까지만을 포함하고 계획결정 오류는 포함되어 있지 않다. K-HRA의 경우는 계획결정 기능 중 ‘의사결정 부담감’이 존재하는 상황을 오류 가능성에 평가할 수 있도록 THERP 진단곡선의 한 조정 영향인자로서 고려하고 있다. 한편, 제안한 정량 평가 방법은 계획결정 기능의 오류를 별도로 평가할 수 있도록 개발되었으며, 의사결정시 해당 발전소의 정책

및 안전문화적 요소를 중요한 평가 인자로서 반영할 수 있도록 하였다. 표 2는 세 방법의 정량적 평가결과를 개략적으로 보여주고 있는데, 다른 방법과 비교해 볼 때 제안한 방법이 의사결정 과정 중의 오류 가능성을 적절한 수준으로 표현하고 있음을 볼 수 있다.

표 2. ‘방출 및 주입 운전’에 대한 분석 절차의 적용 결과

분석 대상 절차 및 오류분석 항목	정성적 오류분석	정량 평가 (제안한 방법)	정량 평가 (THERP/ASEP, K-HRA)
<u>직무인식-03:</u> 직무수행에 상황조건이 필요하고, 상황조건이 절차서에 기술되어 있는 직무	<ul style="list-style-type: none"> • 관련 절차서: LOAF step 8, 회복-06 (HR-03) • 진단허용시간: 16 분 • 사전/동시직무: 보조급수 복구 활동 • 운전원 수행도에 따라 직무지연 가능성 있음 • 직무의 중요도는 높음. 	-> 3.88E-02 (THERP 진단곡선)	<ul style="list-style-type: none"> • THERP 진단곡선 -> 3.88E-02 • K-HRA -> 3.88E-02 * 5 (의사결정 부담감 고려) -> 1.94E-01
<u>상황판단-02:</u> 규칙 기반 직무	<ul style="list-style-type: none"> • 규칙/논리의 복잡성: 중 • 시간 긴급성: 짧은 허용시간 (* 3) 	-> 1.0E-02 (BHEP) * 3 (시간 긴급성) = 3.0E-02	• N/A
<u>계획결정-02:</u> 부정적/불확실한 효과	<ul style="list-style-type: none"> • 부정적 효과: 경제적 손실 • 직무수행 실패: 노심 손상 • 시간 긴급성: 짧은 허용시간 (* 3) • 의사결정 지연 또는 잘못된 의사결정 가능 	정책 및 안전문화 특성에 따라, -> 경제성: 3.0E-02 * 10 * 3 = 9.0E-01 = ~1.0 -> 안전성: 3.0E-02 * 3 = 9.0E-02	• N/A
총 의사결정 오류 확률		1.29E-01 (안전성)	3.88E-02 (THERP) 1.94E-01 (K-HRA)
<u>비제어 수행:</u> 비제어 직무	• 수행시점 오류	-> 3.6 E-02 * 5 (스트레스 수준: Ext. High) * 0.1 (복구실패확률) = 1.8E-02	-> 0.25 (스트레스 수준: Ext. High) * 0.1 (복구실패확률) * 2 (Units of Action) = 5.0E-02
최종 인간오류확률		1.47E-01	8.88E-02 (THERP) 2.44E-01 (K-HRA)

4.2 ‘냉각 및 감압 운전’의 오류분석 및 정량평가

표 3은 ‘냉각 및 감압 운전’에 대한 분석 절차의 적용 결과를 정리한 것이다. ‘냉각 및 감압 운전’은 SLOCA시 원자로를 정지냉각 상태에 이르기까지 증기발생기에 물을 주입하고 발생한 증기를 제거하는 방법으로 이차측을 이용함으로써 일차측을 냉각한다. 또한 이 운전은 P-T (압력-온도) 곡선의 운전 제한치 내를 유지하면서 운전해야 하므로 일·이차측 간의 협력이 요구되는 직무이다.

‘냉각 및 감압 운전’과 관련된 절차서는 비상-02, LOCA 단계 16, 17, 18, 19, 20 으로서 ‘냉각 및 감압’ 운전 방법과 주의 사항 등을 기술하고 있다. 진단 허용시간은 54분이며, 직무 중요도는 높은 편이며, 동시 직무의 영향은 거의 없는 상황이다. 본 직무는 직무 수행에 있어서 상황 조건이 필요 없는 직무이며 절차서를 바탕으로 인식하고 수행하는 직무이므로, ‘직무인식-01’을 이용하여 오류 가능성을 평가한다. 본 직무의 경우는, 직무인식에 있어서 진단 허용시간이 충분하며 직무 중요도가 높고 동시 직무의 영향이 거의 없으므로, 직무인식 오류는 거의 없다고 볼 수 있다. 제안한 방법과 기존 방법(THERP/ASEP, K-HRA) 모두 THERP 진단곡선을 이용하여 평가한다.

정보수집, 상황판단, 계획결정 기능 분석 단계는 해당사항이 없으므로, 생략한다. 본 직무는 제어 직무로서, 가능한 오류유형으로는 ‘제어실패오류’이며, 직무의 난이도는 수행 순서, 제어 변수간 연관성을 고려하면서 운전원 간의 적절한 협력을 통하여 수행하여야 하는 직무이므로 다른 제어 직무에 비해 높은 편이다. 정량화에 있어서 복구 가능성은 제어 직무에 대해서는 감독자에 의한 복구 가능성만을 고려했고, 단위 직무에 대해서는 정보 Feedback 및 감독자 복구 가능성을 모두 고려했다. 기존 HRA 값보다 약간 높은 값을 보이고 있다.

표 3. ‘냉각 및 감압 운전’에 대한 분석 절차의 적용 결과

분석 대상 절차 및 오류분석 항목	정성적 오류분석	정량 평가 (제안한 방법)	정량 평가 (THERP/ASEP, K-HRA)
<u>직무인식-01</u> : 직무수행에 상황조건이 필요 없고, 절차서에 기술되어 있는 직무	<ul style="list-style-type: none"> • 관련 절차서: LOCA step 16, 17, 18, 19, 20 • 진단 허용시간: 54 분 • 동시직무: 없음 • 직무의 중요도: 높음. 	-> 2.56E-04 (THERP 진단곡선)	-> 2.56E-04 (THERP 진단곡선)
총 의사결정 오류 확률		2.56E-04	2.56E-04
<u>제어 수행</u> : 제어 직무	<ul style="list-style-type: none"> • 제어실패오류 • 직무 난이도: High <ul style="list-style-type: none"> - 수행순서 중요 - 제어 변수간 연관성 - 운전원 간 협력 필요 	-> 1.0 E-02 * 3 (스트레스 수준: Mod. High) * 0.2 (감독자 복구) + 6.0E-03 * 3 * 0.1 (정보 Feedback) * 0.2 (감독자 복구) = 6.36E-03	-> 0.05 (스트레스 수준: Mod. High) * 0.1 (정보 Feedback) * 0.2 (감독자 복구) * 2 (Units of Action) = 2.0E-3
최종 인간오류확률		5.06E-3	2.26E-3

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 인간신뢰도분석(HRA) 방법들의 한계점이었던 의사결정 과정 중 오류를 분석·평가할 수 있도록 개발된 제 2세대 인간신뢰도분석 방법을 소개하고, 두 비상직무에 적용함으로써 방법의 적용성을 제시하였다. 제안한 분석 방법은 원전 운전원의 의사결정 모형을 기반으로 하고 있으며, 인지기능별로 주요한 오류분석 항목과 영향요인을 바탕으로 오류분석 과정과 절차를 작성하였다. 의사결정 모형은 직무인식, 정보수집, 상황판단, 계획결정, 직무수행 등 5단계의 인지기능으로 구성되어 있다. 각 인지기능별로 오류유형 분석을 위한 정성 분석 절차와 각 오류유형의 발생 가능성 평가를 위한 정량 평가 절차를 제시하고 있다.

제안한 분석 방법의 비상직무에의 적용을 통하여 제안한 방법이 원전 비상운전 직무의 의사결정 과정 중 오류를 효과적으로 분석·평가할 수 있었으며, 원전 안전성 평가의 인간-기계 연계시스템(MMIS: Man-Machine Interface System)의 평가에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 연구로서 다양한 비상직무에의 적용을 통한 방법의 검증, 정량 데이터 및 평가 과정의 보완, 수행오류(Errors of Commission) 분석 체계의 정립 등이 계속될 것이다.

감사의 글 (Acknowledgement)

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌 (References)

- 정원대 외, "화학공장의 위험성 평가를 위한 인간신뢰도분석 방법 및 지원 시스템 개발", 화학공학회 2000년 춘계학술발표 논문집, 2000
- Embrey, D., 1984. SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgement. NUREG/CR-3518, USNRC.
- Gertman, D.I., et al, 1992. INTENT: A method for estimating human error probabilities for decision-based errors. Reliability Engineering and System Safety 35, 127-136.
- Hannaman, G.W., Spurgin, A.J., Lukic, Y.D., 1984. Human cognitive reliability model for PRA analysis (draft report). EPRI RP-2170-3.
- Hollnagel, E., 1998. Cognitive reliability and error analysis methodology. Elsevier, London.
- Kim, J.W. and Jung, W.D., Development of performance influencing factors for human error analysis in an emergency situation, Submitted for Applied Ergonomics, 2001.
- Parry, G.W., et al., An Approach to the Analysis of Operator Actions in Probabilistic Risk Assessment, EPRI TR-100259, June 1992.
- Reason, J., Human Error, Cambridge University Press, 1990.
- Swain, A. and Guttman, H.E., 1983. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278, US NRC, USA.
- Swain, A. Guttman, H.E., Accident sequence evaluation program human reliability analysis procedure, USNRC, NUREG/CR-4772, 1987.

- US NRC, 2000. Technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA). NUREG-1624 Rev. 1.
- Williams, J.C., 1988. 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.