

## 인간신뢰도분석 표준 방법의 진단오류 분석 규칙 개발

### Development of an Analysis Rule of Diagnosis Error for Standard Method of Human Reliability Analysis

정원대, 강대일, 정광섭  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 논문에서는 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis : HRA)에 개입되는 분석자의 주관성을 최소화하기 위하여 개발 중인 HRA 표준 방법의 개발 현황을 소개하고, 진단오류 분석을 위해 표준화된 분석 방법과 규칙을 제안하였다. HRA 표준 방법 개발을 위해 ASME PRA Standard에 명시된 HRA 요건을 기준으로 국내 HRA의 수준을 평가하였으며, 이를 바탕으로 표준 방법 개발을 위한 요건을 제시하였다. 또한 현재까지 개발된 진단오류 분석의 표준 절차 및 방법을 설명하고, 이를 이용한 사례 분석을 통하여 제안된 방법의 기술적 적합성을 확인하였다.

#### Abstract

This paper presents the status of development of Korea standard method for human reliability analysis (HRA), and proposed a standard procedure and rules for the evaluation of diagnosis error probability. The quality of KSNP HRA was evaluated using the requirement of ASME PRA standard guideline, and the design requirement for the standard HRA method was defined. Analysis procedure and rules, developed so far, to analyze diagnosis error probability was suggested as a part of the standard method. And also a study of comprehensive application was performed to evaluate the suitability of the proposed rules.

#### 1. 서론

원자력 발전소 안전성을 평가하는 확률론적 안전성평가 (Probabilistic Safety Assessment : PSA)의 일부로서 발전소 안전성에 미치는 인적오류의 영향을 평가하기 위

하여 인간신뢰도분석 (Human Reliability Analysis : HRA)<sup>1)</sup>을 수행해 왔다. HRA란 작업자가 미리 정의된 직무를 수행함에 있어서 성공적으로 작업을 수행하지 못하는, 즉 기대하는 결과를 얻지 못하는 오류 가능성을 정량적으로 평가하는 작업으로서, THERP, ASEP HRA, HCR 방법 등이 널리 사용되어 왔다<sup>2)</sup>.

최근에 발표된 PSA 결과에 의하면 인적오류가 시스템 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 미국 Exelon사의 발표 자료에 의하면 인적오류확률이 전체 안전성에 약 60%까지 영향을 미치는 것으로 나타났으며<sup>3)</sup>, 국내 PSA 결과를 보더라도 안전성에 영향을 미치는 사건들을 중요도 순서로 나열했을 때 가장 중요한 10개 사건 중 4개가 인적오류 사건으로 분석되었다<sup>4)</sup>. 이와 같은 PSA 결과는 산업 현장에서 실제로 발생한 많은 재해가 인적오류로 유발되었다는 사실과 부합하고 있다.

이렇게 인적요인이 전체 안전성에 미치는 영향이 크에도 불구하고, 인적오류 평가의 불확실성이 계속 지적되어 왔다. 이의 근본 원인으로서는 1) 인적오류 데이터 부족, 2) 인적행위 메커니즘에 대한 이해 부족, 3) 통일된 분석 방법 및 절차 부족, 4) 분석자의 주관적 판단 처리의 일관성 부족 등을 들 수 있다<sup>5)</sup>. 오류 데이터가 절대적으로 부족한 HRA 특성 상 분석 시 여러 단계에서 분석자의 주관적 판단이 개입되는데, 표준화된 분석 절차와 통일된 평가 규칙의 미비로 인해 발생하는 분석 결과의 차이는 HRA 뿐만 아니라 PSA 전체 결과의 품질과 신뢰성을 저해하는 주요 원인으로 작용하여 왔다.

최근 들어 원전의 위험도 정보를 운전 및 규제에 관련된 주요 의사결정의 기준으로 활용하고자 하는 위험도정보활용(Risk-Informed Application)<sup>6)</sup> 노력이 활발해 지면서, 이의 기술적 토대가 되는 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)의 품질을 보다 높여야 되는 상황이 되었다. 이에 따라 PSA 품질의 주요 영향 인자 중 하나인 HRA의 불확실성을 줄이는 작업이 시급한 현안이 되었다. 이에 한국원자력연구소를 중심으로 HRA 방법과 절차를 표준화하는 연구가 시작되었다.

본 논문에서는 HRA에 개입되는 분석자의 주관성을 최소화하기 위하여 개발 중인 HRA 표준 방법의 개발 현황을 소개하고, 현재까지 개발된 진단오류 분석을 위한 표준화된 분석 방법과 절차를 제안하였다. 2절에서는 ASME와 NEI의 PRA 요건을 기준으로 국내 HRA 수준을 평가하고 이를 토대로 개발한 표준 방법 개발 요건을 소개하고, 3절에서는 진단오류 분석의 표준 방법과 절차를, 4절에서는 이에 대한 사례 분석 결과를 기술하였다.

## 2. 국내 HRA 수준 평가 및 표준 방법 개발 요건

### 2.1 ASME 및 NEI PRA Standard의 HRA 요건

발전소 운전 및 규제의 최적화를 위해 위험도 정보활용이 활발히 도입되면서 위험도정보의 기술적 기반이 되는 PSA의 품질이 중요한 선결 문제로 대두되었고, 이를 확보하기 위해 최근에 ASME PRA Standard(이하 ASME)<sup>7)</sup>와 NEI PRA Peer Review Guideline

(이하 NEI)<sup>8)</sup>이 미국에서 발간되었다. ASME가 규제 기관이 입장이 보다 반영된 것이라면, NEI는 사업자측의 입장이 강조된 요건이라 할 수 있다. 이들 지침서에는 PSA 표준화와 더불어 위험도정보활용 적용 분야에 따라 사용될 PSA에 등급을 부여하고, 등급 별로 데이터, 분석 방법, 그리고 문서화 수준 등에 대해 만족해야 할 요건을 정의하고 있다.

ASME와 NEI의 HRA 요건은 기본적으로 사고 전 오류, 사고 후 오류, 문서화 등으로 크게 구분되어 있으며, 두 요건 모두 기본적으로 인적오류 사건(Human Failure Events)의 정의, 선별 분석(Screening Analysis), 오류사건의 PSA 모델링, 정량 분석 및 의존성 분석, 문서화 등으로 세분화되어 있다.

ASME HRA 요건은 표 1에 정리한 바와 같이 모두 9개의 상위수준 요건과 34개의 세부 요건으로 구성되어 있다. 상위수준 요건 9개 중 4개가 사고 전 인간오류인 일상직무 인간오류에 대한 것이고, 4개가 비상직무 인간오류 관련, 나머지 1개가 문서화에 관한 요건이다. 반면 NEI HRA 요건은 모두 30개 항목으로 구성되어 있다. 공통사항인 일반지침이 3개, 사고 전 인간오류 관련이 4개, 사고 후 인간오류 관련이 18개, 의존성 평가 관련이 2개, 문서화 요건 3개로 이루어져 있다.

표 1. ASME 및 NEA HRA 요건의 구성

| 항목                                | ASME HRA 요건   | 요건수 | NEI HRA 요건   | 요건수 |
|-----------------------------------|---|-----|--|-----|
| 일반지침                              |   | 0   | - 일반지침 (HR01 - HR03)   | 3   |
| 사고전 인간오류<br>(pre-initiator HFES)  | - HLR A. 오류파악 (3)<br>- HLR B. 선별분석 (2)<br>- HLR C. 오류사건 정의 및 PSA 모델 (3)<br>- HLR D. 상세 정량화 및 의존성 분석 (7) | 15  | - 오류파악 (HR04 ~ HR05)<br>- 선별분석 (HR06)<br>- 정량화 (HR07)  | 4   |
| 사고후 인간오류<br>(post-initiator HFES) | - HLR E. 오류파악 (4)<br>- HLR F. 오류사건 정의 및 PSA 모델 (2)<br>- HLR G. 상세 정량화 및 의존성 분석 (9)<br>- HLR H. 회복행위 (3) | 18  | - 오류파악 (HR08 ~ HR09)<br>- 오류사건 정의 및 PSA 모델 (HR10, HR14, HR16, HR22 ~ HR25)<br>- 상세 정량화 (HR11 ~ HR13, HR15, HR17 ~ HR20)<br>- 회복행위 (HR21) | 18  |
| 의존성                               |   | 0   | - 의존성 평가 (HR26 ~ HR27)   | 2   |
| 문서화                               | - HLR I. 문서화 (1)  | 1   | - 문서화 (HR28 ~ HR30)  | 3   |
| 총 요건 수                            | - HLR(상위요건) 9개<br>- SR(세부요건) 34개  | 34  | - 전체 요건 (HR01 ~ HR30)  | 30  |

두 요건 모두 HRA 분야에서 알려진 필수적인 항목들을 포함하고 있으나, 사고 전 인간오류 부분은 요구하는 수준에 차이를 보이고 있다. ASME 요건에서는 이 부분에 대한

세부 요건이 15개인데 반하여 NEI에서는 4개만을 제시하고 있다. ASME가 NEI에 비해서 사고 전 인간오류 분석을 보다 강조한 것으로 해석할 수 있다. 이제까지 사고 전 인간오류는 PSA 전체 결과에 미치는 영향이 적다고 판단하여 단순하게 모델하고 분석하여 왔으나, 사고 전 인간오류의 영향이 상당히 크다는 경험적 근거를 토대로 이 부분의 요건을 강화하였다. HRA 분석자 입장에서는 기존에 수행하던 것보다 훨씬 강화된 이 부분의 요건을 만족하기 위해 추가적인 노력과 시간이 필요할 것으로 예상된다.

## 2.2 ASME HRA 요건을 기준으로 한 국내 HRA 수준 평가

HRA 표준 방법을 개발하기에 앞서서 우선 ASME 요건을 기준으로 국내 표준 원전의 HRA 수준을 평가하였다. ASME와 NEI의 HRA 세부 요건이 거의 유사한 내용을 포괄적으로 언급하고 있으나, ASME 요건이 보다 세분화되어 있고 또한 규제기관의 보수적 입장이 잘 반영되어 있다고 판단하여 국내 표준 방법을 개발하는 입장에서 이를 기준 요건으로 선정하였다.

표 2. ASME 요건을 기준으로 표준 원전 HRA 수준 평가 예

Table 4.4-5d HLR-HR-D : pre-initiator HFE의 평가는 인적수행도에 미치는 발전소 특성과 직무 특성의 영향을 고려하는 체계적인 절차에 따라 수행되어야 한다.

| Index No.<br>HR-D | ASME 요건 만족에<br>필요한 내용<br>(II / III 기준)                | 표준 원전 HRA에 대한<br>검토 의견  | 표준 원전<br>HRA<br>수준 평가 | Cat. II 목표 설정에<br>대한 검토의견                   |
|-------------------|---|---|-----------------------|---|
| HR-D1             | - 체계적인 절차 적용<br>(ASEP/THERP 포함)                       | - ASEP/THERP 적용   | II                    | - 만족  |
| HR-D2             | - 중요 계통 pre-initiator<br>HEP 상세 평가 (II)               | - 특정 행위에 대한 분석<br>결과를 공히 사용<br>- 분석 수준은 단순<br>screening 분석 보다는<br>상세한 분석 결과 사용          | II                    | - 중요 계통 선정기준<br>필요<br>- 상세 평가 수준 및<br>방법 필요 |
| HR-D3             | - 발전소 특정 관련 정보<br>분석 및 정리                             | - 일반적인 운전원 직무<br>조직 및 관리 수준 가정  | I                     | - 상세 평가 수준 및<br>방법 필요                       |
| HR-D4             | - pre-initiator recovery<br>factor를 선정하고<br>일관성 있게 적용 | - pre-initiator HEP<br>평가지 감독자에 의한<br>recovery<br>고려<br>- 일반적인 조직 관리 수준<br>가정(현장 확인 포함) | I                     | - 기술 근거 필요                                  |

표준 원전 HRA 수준 평가에는 국내 관련 기관의 HRA 전문가들이 공동으로 참여하여 평가 결과의 객관성을 높였다. 우선 각 요건의 정의에 대한 공통된 이해를 바탕으로, 요건별로 이를 만족하기 위해 필요한 기술적 내용, 표준 원전 HRA 수준 평가, 취약점 분석

및 개선 사항 도출 등으로 분석을 수행하였다. 표준 원전 HRA 수준 평가 및 개선점 정리의 예를 표 2에 정리하였다.

표 3에 정리한 바와 같이 ASME 요건을 기준으로 표준 원전의 HRA 수준을 보수적으로 평가한 결과, 전체의 45% 정도가 category II 이상이며, 55% 정도가 category I 이하에 속하는 것으로 평가되었다. 일상직무 인적오류 분석인 경우, category II가 5건, category I이나 그 이하가 10건으로 분석되었으며, 비상직무 인적오류 분석인 경우 category II 또는 III가 10건, category I이나 그 이하가 9건으로 분석되었다. 분석 결과로 볼 때 사고 전 인간오류 분석이 사고 후 인간오류 분석에 비하여 상대적으로 더 취약한 것으로 판명되었다.

표 3. ASME 요건을 기준으로 한 표준 원전 HRA 수준

| 항목                                | 요건 수 | ASME 요건에 대한 표준 원전 HRA 수준  |
|-----------------------------------|------|---|
| 사고전 인간오류<br>(pre-initiator HFES)  | 15   | - Category III : 0<br>- Category II : 5<br>- Category I : 8<br>- < Category I : 2   |
| 사고후 인간오류<br>(post-initiator HFES) | 19   | - Category III : 3<br>- Category II : 7<br>- Category I : 7<br>- < Category I : 2   |
| 종합                                | 34   | - Category III : 3<br>- Category II : 12<br>- Category I : 15<br>- < Category I : 4 |

### 2.3 HRA 표준 방법 개발을 위한 요건 설정

앞서 언급한 바와 같이 국내 HRA 수행 현황과 한계점을 분석하고 최근 발간된 ASME HRA 요건을 기준으로 표준 원전 HRA 수준 평가 결과를 바탕으로 HRA 표준 방법 개발을 위한 방향과 요건을 결정하였다. 기본적으로는 국내에서 현재 사용되는 HRA 방법 및 절차를 기반으로 현 기술 수준에서 적용 가능한 표준 방법을 개발하며, 위험도정보활용을 위해 최근에 발표된 ASME HRA 요건의 category II를 만족할 수 있는 수준의 표준화된 방법과 절차를 제공하는 것을 목표로 설정했다. 또한 표준 방법을 개발하는 과정에 국내 관련 기관이 공동으로 참여하고, 개발된 표준 방법을 통일적으로 사용함으로써 분석 기관이나 분석자에 따른 불확실성을 줄여야 한다. HRA 전문가 회의를 통해 ASME HRA 요건을 검토하고 평가해 본 결과, ASME 세부 요건을 표준 방법 개발에 그대로 적용해도 문제가 없는 것으로 평가되었다. 따라서 ASME HRA의 34개 세부 요건을 표준 방법 개발의 기본 요건으로 결정하였다. 전문가 회의를 통해 이들 기술적 요건

이외에 추가적으로 표준 방법의 개발 방향과 지침을 정리하였다. 표 3에 HRA 표준 방법 개발의 방향과 지침이 정리되어 있다.

표 4. HRA 표준 방법 개발 방향 및 요건

| 구분         | HRA 표준 방법 개발 방향 및 요건   |
|------------|--|
| 개발 방향 및 지침 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현 기술 수준을 반영한 방법이어야 함</li> <li>- 분석자의 주관성을 최대한 배제할 수 있는 명시적인 절차와 세부 규칙 제공</li> <li>- 국내 인적수행도 DB의 입력 정보를 제공해야 함</li> <li>- 설계, 운전 및 관리의 변경에 대한 민감도 분석이 가능해야 함</li> <li>- 적절한 수준의 인력과 시간으로 분석 가능해야 함</li> <li>- 분석 결과, 근거 및 과정 등 관련 정보가 체계적으로 DB화 되어야 함</li> <li>- 문서화 및 QA 기준을 만족시켜야 함)</li> </ul> |
| 기술적 세부 요건  | - ASME HRA 세부 요건(34항목)을 기본 요건으로 채택   |

### 3. HRA 표준 방법의 진단오류 분석 절차 및 규칙

HRA에서는 인간 행위의 특성에 따라 사고 전 인간오류와 사고 후 인간오류로 구분한다. 이것은 직무유형에 따라 관련되는 인간의 주된 인지과정이나 작업 특성에 차이가 있으며, 이로 인해 관련된 오류 발생 구조 역시 직무유형에 따라 서로 달라지기 때문이다. 일상직무는 일반적으로 사전에 직무가 계획되고 준비된 절차(서)에 따라 작업이 이루어지기 때문에, 돌발적인 문제에 직면했을 때 주로 개입되는 문제의 진단이나 의사결정(상태 파악 및 진단) 과정에서의 오류 가능성이 거의 없거나 무시할 정도이다. 반면 비상직무는 돌발적인 문제에 직면했을 때 개입되는 진단 및 의사결정이 상대적으로 중요한 직무 단계이기 때문에, 이 과정에서의 오류는 물론 수행단계에서의 오류도 모두 분석해야 한다.

진단오류 가능성을 평가하는 여러 방법이 있을 수 있으나, 진단 여유시간의 함수로 진단오류확률을 표현한 THERP<sup>9)</sup>이나 HCR<sup>10)</sup> 방법이 아직까지 가장 널리 인정을 받고 있다. 개발 중인 HRA 표준 방법에서도 진단오류확률은 THERP에서 제시한 진단-오류확률 계산 함수를 기본적으로 사용한다. 문제는 THERP에서 제시한 기본 진단오류확률을 여러 수행특성인자(Performance Shaping Factors ; PSFs)를 고려하여 보정을 하는데, 이제까지는 이 부분이 표준화되지 못하여 분석자마다 고려하는 인자와 평가 규칙이 달랐다. 따라서 표준 방법에서는 진단오류확률에 영향을 미치는 요인을 선정하고 이들의 조합에 따라 보정 값을 결정하는 규칙을 개발하였다.

진단오류 가능성에 영향을 주는 요인들을 결정하기 위하여, 표 5에 정리한 바와 같이

진단 과정별로 관련 영향인자를 파악하고 이를 대표하는 수행특성인자를 결정하였다. 선정된 수행특성인자 중 진단 여유시간은 기본 진단오류확률을 산출하는데 사용되고, 나머지 인자들은 기본 진단오류확률을 보정하는데 사용된다.

표 5. 진단오류에 영향을 미치는 수행특성인자 선정

| 항목# | 진단 과정 및 관련 영향인자   | 대표 PSFs        |
|-----|---|----------------|
| 1   | 진단 여유시간은 충분한가?  | 진단 여유시간        |
| 2   | 해당 직무(의 필요성)를 감지하기 쉬운가?   | 주 관심작업, MMI/경보 |
| 3   | 절차서에 언급되어 있는가?<br>- 시간적으로 적절하게 해당 절차가 제시되는가?<br>- 회복절차서에 있는 절차인가?<br>- 절차서 기술 수준 (이해의 용의성, 절차의 상세성)<br>- 문서화된 절차서와 행정관리의 수준 | 절차서            |
| 4   | 만약 절차서에 없는 작업일 경우<br>- 작업 경험 및 친숙도<br>- 운전원 경력 및 숙련도?   | 작업숙련도 및 경력     |
| 5   | 해당 절차(직무)에 대한 교육 및 훈련 수준(빈도 포함)?  | 교육 및 훈련        |
| 6   | Goal-conflict 영향?<br>- 의사결정 부담감<br>- 여러 대안 중 하나를 선택하는 어려움?  | 의사결정 부담감       |

HRA 표준 방법에서 제안하는 진단오류확률 계산 방법은 다음과 같이 표현된다.

- $Pr(\text{진단오류}) = Pr(\text{기본 진단오류}) * \text{보정 값}$ 
  - $Pr(\text{기본 진단오류}) = f(\text{진단 여유시간} = \text{허용시간} - \text{수행시간})$
  - $\text{보정 값} = f(\text{주관심작업, MMI/경보, 절차서, 교육/훈련, 의사결정부담감})$

진단오류확률을 평가하기 위해서는 진단여유시간에 의해 기본 진단오류확률을 구한 후, 앞에서 정의한 오류영향인자를 고려한 보정 값을 곱하여 최종 진단오류확률을 산출한다. 기본 진단오류확률은 앞서 언급한대로 THERP에서 제시한 진단-오류확률 계산 함수를 사용하여 얻는다. 비상직무 진단오류 보정 값을 얻는 단계에서 절차서가 없는 경우에 대한 보정 규칙은 고려하지 않았다. 이는 비상직무의 경우에는 비상운전절차서(EOP)에 필요한 모든 대응 조치들이 정의되어 있기 때문이다. 하지만 일상직무나 정지/저출력 HRA를 위해서는 절차서가 없는 경우의 평가 규칙도 추후 개발해야 할 것이다.

진단오류를 분석하는 절차는 다음과 같다.

#### 1) 기본 진단오류확률 계산

기본 진단오류확률은 진단 및 의사결정에 허용된 진단여유시간의 함수로 표현된다.

진단 및 의사결정에 허용된 여유시간은 다음과 같이 계산한다.

- 작업허용시간(Tm) 추정 : 작업을 위해 허용된 최대시간을 추정한다.
- 작업수행시간(Ta) 추정 : 진단 및 의사결정이 완료된 후 실제 물리적/육체적 작업을 수행하는데 필요한 시간을 추정한다.
- 진단여유시간(Td) 결정: 순수하게 진단 및 의사결정을 위해 허용된 여유시간. 즉  $Td = Tm - Ta$ 을 계산한다.

## 2) 최종 진단오류확률 계산

기본 진단오류확률을 앞서 선정된 수행영향인자를 고려한 보정 값을 곱하여 최종 진단오류확률을 계산한다.

문제는 앞서 언급한 것처럼 진단오류확률 보정 값을 결정하는 규칙을 개발하는 것이다. ‘주관심작업 유무’, ‘MMI 수준’, ‘교육/훈련 수준’, ‘절차서 수준’ 및 ‘의사결정부담’ 등 선정된 요인들을 평가하는 규칙을 개발하기 위해 HRA 전문가들이 모여 기술적 검토를 하였고, 이를 바탕으로 두 가지 안을 개발하였다. 보정 값 결정을 위한 두 가지 안 중에서 뒤에 설명할 사례 적용 분석을 통해 최종적으로 결정된 보정 값 결정 규칙은 그림 1과 같다. 보정 인자 중 ‘의사결정부담’ 인자는 극히 일부분의 오류사건에만 제한적으로 적용되기 때문에 그림 1에 포함시키지 않고 별도 처리하도록 하였다.

보정 값 결정은 크게 두 부분으로 구분할 수 있다. 일차적으로 해당 직무의 필요성이 운전원에게 직접적으로 전달될 수 있느냐에 따라 진단오류 가능성을 평가하고, 직무에 필요성이 분명하게 인지된 경우 이차적으로 절차서, 교육/훈련, 의사결정부담감 등을 고려하여 보정한다. 보정 값 결정에서 특히 많은 이견이 있었던 ‘절차서’와 ‘교육/훈련’ 인자에 대한 평가 방법을 결정하기 위해, 두 인자가 오류 가능성에 미치는 영향의 크기와 각 인자의 수준에 따른 보정 효과에 대한 전문가 설문조사를 수행하였다. 절차서와 교육/훈련이 오류 가능성에 미치는 영향은 직무의 특성과 상황에 따라 변하지만, 조사 결과를 바탕으로 HRA 수행 관점에서는 두 인자의 영향 정도가 동일하다고 결정하였다. 각 인자의 수준에 따른 보정 효과는 다음과 같은 두 가지 안이 최종적으로 제안되었다.

- 제1안
  - 주관심작업 : 예(1), 아니오(10)
  - MMI/경보 : 상(1/2), 중(1), 하(2)
  - 절차서 : 상(1/3), 중(1), 하(5)
  - 교육/훈련 : 상(1/3), 중(1), 하(5)
  - 의사결정부담 : 상(5), 중(3), 하(2), 아니오(1) (\*별도처리)



| 주관심작업<br>(Yes/No) | MMI 수준<br>(상, 중, 하) | 절차서 수준<br>(상, 중, 하, 없음) | 교육/훈련 수준<br>(상, 중, 하) | 보정값    |
|-------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|--------|
| Yes (1)           | 상(1/2)              | 상(1/3)                  | 상 (1/3)               | 0.054  |
|                   |                     |                         | 중 (1)                 | 0.165  |
|                   |                     |                         | 하 (5)                 | 0.825  |
|                   |                     | 중(1)                    | 상                     | 0.165  |
|                   |                     |                         | 중                     | 0.500  |
|                   |                     |                         | 하                     | 2.500  |
|                   | 중(1)                | 상                       | 상                     | 0.825  |
|                   |                     |                         | 중                     | 2.500  |
|                   |                     |                         | 하                     | 12.500 |
|                   |                     | 중                       | 상                     | 0.109  |
|                   |                     |                         | 중                     | 0.330  |
|                   |                     |                         | 하                     | 1.650  |
|                   | 하(2)                | 상                       | 상                     | 0.330  |
|                   |                     |                         | 중                     | 1.000  |
|                   |                     |                         | 하                     | 5.000  |
|                   |                     | 중                       | 상                     | 1.650  |
|                   |                     |                         | 중                     | 5.000  |
|                   |                     |                         | 하                     | 25.000 |
| 하(2)              | 상                   | 상                       | 0.218                 |        |
|                   |                     | 중                       | 0.660                 |        |
|                   |                     | 하                       | 3.300                 |        |
|                   | 중                   | 상                       | 0.660                 |        |
|                   |                     | 중                       | 2.000                 |        |
|                   |                     | 하                       | 10.000                |        |
| 하(2)              | 상                   | 3.300                   |                       |        |
|                   | 중                   | 10.000                  |                       |        |
|                   | 하                   | 50.000                  |                       |        |
| No (10)           | 상(1/2)              |                         | 5.000                 |        |
|                   | 중(1)                |                         | 10.000                |        |
|                   | 하(2)                |                         | 20.000                |        |

그림 1. 비상직무 진단오류확률 보정 값 산출 규칙 (제1안)

• 제2안

- 주관심작업 : 예(1), 아니오(10)
- MMI/경보 : 상(1/2), 중(1), 하(2)
- 절차서 : 상(1/2), 중(1), 하(3)
- 교육/훈련 : 상(1/2), 중(1), 하(3)
- 의사결정부담 : 상(5), 중(3), 하(2), 아니오(1) (\*별도처리)

4. 진단오류 보정 값 결정을 위한 사례 분석

보정 값 결정 규칙을 최종적으로 결정하기 위하여 앞 절에서 설명한 두 가지 안에 대한 사례 분석을 수행하였다. 평가의 객관성을 보다 높이기 위하여 사례 분석에는 HRA를 수행한 경험이 많은 한국원자력연구소와 한국전력기술(주)의 HRA 전문가들이 참여하였다. 사례 분석의 대상도 다양화해서 표준 원전 HRA와 고리 2호기 HRA의 오류사건을

분석 대상으로 선정하였다. 본 논문에서는 표준 원전 HRA 오류사건에 대한 사례 분석 결과를 중심으로 설명하겠다.

표 6. 진단오류 보정 값 결정을 위한 사례 분석 결과

| No | 사건명            | 사건설명                  | 진단 HEP (원안) | 진단 HEP (제1안) | 제1안/기본       | 진단 HEP (제2안) | 제2안/기본       |
|----|----------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1  | SDOPHEARLY     | 초기 F&B                | 9.60E-02    | 1.56E-01     | 1.62         | 1.41E-01     | 1.47         |
| 2  | MSOPHSR-L      | 이차측냉각운전(LOCA)         | 2.66E-04    | 2.11E-04     | 0.79         | 3.20E-04     | 1.20         |
| 3  | MSOPHSR-T      | 이차측냉각운전(Transient)    | 2.66E-04    | 2.11E-04     | 0.79         | 3.20E-04     | 1.20         |
| 4  | AFOPHALTWT     | 대체수원으로 전환             | 4.23E-04    | 3.15E-04     | 0.75         | 3.15E-04     | 0.75         |
| 5  | MXOPHDPLI      | LPSI위험급속냉각감압운전        | 1.00E-01    | 3.13E-01     | <b>3.13</b>  | 1.13E-01     | 1.13         |
| 6  | MXOPHEBOR      | 비상봉소주입운전              | 8.47E-04    | 2.38E-03     | <b>2.81</b>  | 2.16E-03     | <b>2.55</b>  |
| 7  | MFOPHSUFWP     | 기동급수펌프운전              | 5.00E-03    | 1.34E-03     | <b>0.27</b>  | 1.34E-03     | <b>0.27</b>  |
| 8  | SDOPHLATE      | 후기 F&B                | 1.69E-03    | 3.19E-03     | 1.88         | 1.91E-03     | 1.13         |
| 9  | HSOPHHLCLR     | 고온&저온관재순환             | 4.23E-04    | 4.80E-04     | 1.13         | 7.27E-04     | 1.72         |
| 10 | MXOPHDPLR      | LPSI재순환을위한 급속냉각감압운전   | 1.70E-03    | 1.95E-02     | <b>11.50</b> | 7.02E-03     | <b>4.14</b>  |
| 11 | MSOPHEVADV-2   | 현장에서ADV수동개방           | 2.66E-03    | 2.10E-02     | <b>7.88</b>  | 7.55E-03     | <b>2.84</b>  |
| 12 | SCOPHSDCOP     | 정지냉각운전                | 8.00E-05    | 3.90E-05     | <b>0.49</b>  | 5.90E-05     | 0.74         |
| 13 | SCOPHCSSOP     | CSS펌프통한정지냉각운전         | 7.90E-03    | 6.35E-03     | 0.80         | 3.81E-03     | <b>0.48</b>  |
| 14 | SCOPHSDCOPLT   | F&B후 후속정지냉각운전전환       | 8.47E-04    | 7.65E-04     | 0.90         | 7.65E-04     | 0.90         |
| 15 | AFOPHPSTART    | 정지냉각실폐후 AFWS재기동       | 4.23E-04    | 3.15E-04     | 0.75         | 3.15E-04     | 0.75         |
| 16 | RCOPHPCON      | RCS압력조절               | 4.23E-04    | 6.56E-04     | 1.55         | 6.56E-04     | 1.55         |
| 17 | MXOPHULK       | SGBDS이용SG overfill 방지 | 1.33E-02    | 2.67E-02     | <b>2.01</b>  | 2.67E-02     | <b>2.01</b>  |
| 19 | MSOPHEVISOLADV | 고장SG ADV차단            | 8.47E-04    | 4.24E-04     | 0.50         | 4.24E-04     | 0.50         |
| 20 | MFOPHSUFWPL    | 정지냉각실폐 후 SU펌프기동       | 4.24E-04    | 3.42E-04     | 0.81         | 3.42E-04     | 0.81         |
| 21 | AFOPHSG1ISOL   | SG1차단                 | 2.66E-03    | 2.67E-03     | 1.00         | 2.67E-03     | 1.00         |
| 22 | FSOPVSIAS      | SIAS 수동조작             | 8.48E-04    | 8.48E-04     | 1.00         | 8.48E-04     | 1.00         |
| 23 | FSOPVSIAS-M    | MLOCA시 SIAS 수동조작      | 1.61E-02    | 8.08E-03     | 0.50         | 8.08E-03     | 0.50         |
| 24 | FSOPVRAS       | RAS 수동조작              | 8.48E-04    | 4.24E-04     | 0.50         | 4.24E-04     | 0.50         |
| 25 | FSOPVRAS-LM    | MLOCA시 RAS 수동조작       | 3.22E-02    | 3.82E-02     | 1.19         | 3.82E-02     | 1.19         |
| 26 | FSOPVAFAS      | AFAS 수동조작             | 2.66E-03    | 1.34E-03     | 0.50         | 1.34E-03     | 0.50         |
| 27 | FSOPVCSAS      | CSAS 수동조작             | 2.54E-05    | 3.42E-04     | <b>13.45</b> | 3.42E-04     | <b>13.45</b> |
| 28 | FSOPVMSIS      | MSIS 수동조작             | 8.48E-04    | 4.24E-04     | 0.50         | 4.24E-04     | 0.50         |
| 29 | CVOPHCHGP4     | 충전펌프4 기동              | 4.80E-02    | 8.08E-03     | <b>0.17</b>  | 8.08E-03     | <b>0.17</b>  |
| 30 | EGOPHDG01E     | AAC DG 기동연결           | 8.47E-04    | 1.44E-03     | 1.70         | 1.44E-03     | 1.70         |

표준 원전 HRA 오류사건 가운데 사고 후 인적오류사건 55건에 대한 진단오류 분석을 재 수행하였다. 기본 진단오류확률은 이전과 동일하나, 새롭게 제안된 두 가지 보정 값 결정 규칙을 사용하여 최종 진단오류확률을 계산하였다. 표 6은 사례 분석 결과의 일부분을 정리한 것이다. 새롭게 제안된 안에 의해 계산된 결과가 원 계산 결과에 비해 100% 이상 차이가 나는 것을 붉은색으로 표시하였다. 전체적으로 몇 개의 오류사건을 제외하고

는 원래의 분석 결과와 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

표 7은 각 안을 이용한 사례 분석 결과 얻어진 진단오류확률의 분포를 정리한 것이다. 원안에 따르면 진단오류 확률이  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  범위에 있던 것이 제1안과 제2안에서 줄어든 대신,  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  범위에 해당되는 사건 수가 증가한 것으로 나타났다. 이 범위에는 보조 계통 기기의 실패 복구 오류사건이 많이 포함되어 있는데, 이 부분의 대한 평가가 새롭게 제안된 규칙을 사용하면서 오류가능성이 조금 낮게 평가되는 것으로 밝혀졌다. 하지만 전체 결과에 큰 영향을 미치는  $10^{-1}$  이상은 증가하였으며, 낙관적인 평가로 문제가 될 수 있는  $10^{-4}$ 이하의 오류사건 수는 감소하는 것으로 나타났다.

표 7. 진단오류확률 범위별 해당 오류사건 수

| 진단 HEP 범위                        | 오류사건 수 (원안) | 오류사건 수 (제1안) | 오류사건 수 (제2안) |
|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| $10^{-1} < \text{HEP}$           | 1           | 2            | 2            |
| $10^{-2} < \text{HEP} < 10^{-1}$ | 30          | 25           | 23           |
| $10^{-3} < \text{HEP} < 10^{-2}$ | 7           | 13           | 15           |
| $10^{-4} < \text{HEP} < 10^{-3}$ | 14          | 14           | 14           |
| $\text{HEP} < 10^{-4}$           | 3           | 1            | 1            |

표준 원전 HRA와 고리 2호기 HRA에 대한 사례 분석 결과, 제1안이 제2안 모두 사용 가능한 대안으로 밝혀졌다. 제1안이 제2안에 비해 진단오류 확률에 미치는 효과가 보다 큰 경향이 있으나, 사례 분석에 참여한 HRA 분석자들의 종합적 판단에 따르면 제1안이 제2안 보다 관련 인자의 영향을 적절하게 보정하는 것으로 나타났다. 다만 제1안을 사용할 시 PSA 최종 결과에 크게 영향을 미치는 MXOPHDPLI (HPSI 상실시 LPSI 운전을 위한 RCS급속냉각 및 감압운전 실패)의 진단오류확률이 3배정도 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 시뮬레이터 관찰에 의한 경험적 판단을 기준으로 하면 이 오류확률이 보다 사실적인 평가 결과로 판정된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 HRA에 개입되는 분석자의 주관성을 최소화하기 위하여 개발 중인 HRA 표준 방법의 개발 현황을 소개하고, 현재까지 개발된 진단오류 분석을 위한 표준화된 분석 방법과 절차를 제안하였다.

표준 방법에서 진단오류확률은 진단여유시간에 의해 기본 진단오류확률을 구한 후, 오류영향인자를 고려한 보정 값을 곱하여 최종 진단오류확률을 산출한다. 이제까지 문제가

된 부분인 보정 값을 결정하기 위해 국내 HRA 전문가들을 통하여 두 가지 보정 규칙을 도출하였고, 사례 분석을 통하여 두 안에 대한 적합성 평가를 수행하였다. 결과적으로 3절에서 제시한 제1안이 진단오류 확률의 보정에 더 적합한 것으로 결론이 났다. 제1안을 이용한 사례 분석 결과는 이제까지 수행된 HRA 결과와 크게 다르지 않으면서, 관련 인자의 영향을 보다 체계적이고 적절히 고려할 수 있는 규칙으로 판명되었다.

향후 수행오류에 대한 평가 절차와 규칙도 표준화되어 HRA 표준 방법이 완성될 예정이며, 관련 소프트웨어도 개발되어 국내 HRA의 신뢰성을 높이는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었습니다. HRA 표준 방법 개발에는 국내 관련 기관의 전문가들이 참여하고 있는데, 특별히 기술적인 자문과 사례 분석에 도움을 준 한국전력기술(주)의 김명로 과장과 박성규 대리에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, 1994.
2. Kirwan, B., A Guide to Practical Human Reliability Assessment. Taylor&Francis, 1994.
3. Exelon Nuclear, Proceedings of IAEA Workshop on Improvement of Safety and Economics of NPPs, 2002.
4. 한국전력(주), 영광 5,6호기 확률론적 안전성평가, 최종보고서, 2001.
5. Swain A.D., Human reliability analysis: need, status, trends and limitations, Journal of Reliability Engineering and System Safety, Vol.29, p301-314, 1992.
6. USNRC, An Approach for Using Probabilistic Assessment In Risk-Informed Decisions on Plants-Specific Changes to the Licensing Basis, Reg. Guide 1.174, 1998.
7. ASME, Standard for PRA for NPP Applications, Rev. 15, 2003.
8. NEI, PRA Peer Review Process Guidance, NEI-00-02, Rev.A3, 2000.
9. A.D.Swain and H.E.Guttman, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, 1983.
10. G.W.Hanaman, Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis, NUS-4531, 1984.