

## 철도 인간신뢰도분석 방법 선정을 위한 사례분석

### A Case Study for the Selection of a Railway Human Reliability Analysis Method

김재환<sup>†</sup> · 정원대\* · 장승철\*\* · 왕종배\*\*\*

Jae Whan Kim · Wondea Jung · Seung Cheol Jang · Jong Bae Wang

#### Abstract

The railway human reliability analysis(R-HRA) plays a role of identifying and assessing human failure events in the framework of the probabilistic risk assessment(PRA) of the railway systems. This study introduces a case study that was performed to select an appropriate R-HRA method. Three HRA methods were considered in the case study: (1) the K-HRA(THERP/ASEP-based) method, (2) the HEART method, (3) the RSSB-HRA method. Two case events were selected based on the review of the railway incidents/accidents, which include (1) a real-end collision event, which occurred on the railway between the Gomo and Kyungsan stations in 2003, (2) the signal passed at danger(SPAD) events, which are caused from a variety of factors. The three HRA methods were applied to both case events, and then the strengths and limitations of each method were derived and compared with each other from the viewpoint of the applicability of a HRA method to the railway industry.

**Keywords** : Human reliability analysis(인간신뢰도분석), Risk Assessment(위험도평가), Probabilistic Risk Assessment(확률론적 위험도평가)

#### 1. 서론

인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis; HRA)은 위험설비의 확률론적 위험도 평가에서 작업자의 인적오류 가능성을 파악하고 그 발생 가능성을 정량적으로 평가하는 역할을 수행한다. R-HRA(Railway-Human Reliability Analysis)는 철도 위험도 평가체계 내에서 그러한 역할을 담당하기 위한 방법을 지칭한다. 인적오류는 특정한 직무 및 환경적 조건 하에서 발생하므로 HRA는 그러한 상황적 조건을 적절히 반영하여 인적오류 발생 가능성을 평가해야 한다.

인적오류의 특성상 특정 조건에서 발생하는 인적오류의 빈도가 매우 낮아, 기사건의 통계적 처리를 통한 인적오류의 정량적 평가는 극히 제한되어 있다. 이러한 이유로 인하여, 위험도 평가에서는 일반적으로 인적오류 발생 영향인자를

기반으로 한 인적오류 평가 모델을 활용하고 있다.

본 연구는 기존 HRA 방법을 검토하여 철도 위험도 평가에 적절한 R-HRA 방법을 선정하기 위한 사례분석을 소개한다. 원자력 및 항공 산업에서는 1970년대부터 다양한 HRA 방법이 개발되어 안전성 평가에 활용해 오고 있는데, 대표적인 방법으로는 THERP[1], ASEP[2], HCR[3], SLIM[4], HEART[5] 방법 등이 있으며, 이들 중 직무유형에 따른 HEP 데이터의 직접적 제공 등의 이유로 실제 산업체에서 널리 활용되고 있는 방법은 THERP/ASEP 방법과 HEART 방법이다.

국내 원자력 분야에서는 THERP/ASEP 방법을 발전시켜 국내 원전 표준 HRA 방법인 K-HRA(Korean Human Reliability Analysis) 방법을 완성하여 활용 중에 있다[6]. 이 방법은 THERP/ASEP 방법을 기반으로 주요 영향인자의 반영 및 구체적인 분석자 지침의 제공 등을 통하여 분석의 신뢰성과 활용성을 개선시킨 방법이다. 또한, 최근(2004년) 영국의 Rail Safety and Standard Board(RSSB)에서는 기존 HEART 평가체계를 보완하여 철도 고유의 분류체계 및 데이터를 개선시킨 철도 고유 인간신뢰도분석 방법을 발표하였다[7].

본 연구에서는 기 개발된 HRA 방법 중 국내 표준방법인

† 책임지자, 정회원, 한국원자력연구소 종합안전평가부  
E-mail : jhkim4@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-8886 FAX : (042)868-8256

\* 정회원, 한국원자력연구소 종합안전평가부

\*\* 한국원자력연구소 종합안전평가부

\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 안전기술연구팀

K-HRA 방법[6]과 영국 산업체에서 널리 활용되고 있는 HEART 방법[5], 그리고 최근 개발된 RSSB-HRA 방법[7]을 R-HRA 후보 방법으로 선정하고, 철도산업에서 발생한 대표적인 사건에 대한 사례분석을 통하여 철도 직무에의 적용 가능성 관점에서의 각 방법의 장단점을 도출하고, 최종적으로 철도 인적오류 평가에 가장 적절한 R-HRA 방법을 선정하는 것을 목표로 한다.

## 2. 인간신뢰도분석 방법 검토

### 2.1 HEART 방법

HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) 방법은 영국의 Jeremy Williams에 의해 제안되었으며[5], 초기에는 주로 원자력산업에서 활용되었으나, 방법 자체의 일반성과 단순성으로 인하여 점차적으로 사용 범위가 확대되어 현재에는 영국 및 일부 타 국가의 여러 산업 분야에서 널리 활용되고 있는 방법이다.

HEART 방법의 평가체계는 일반 직무유형(Generic Task Type; GTT)과 영향인자(Performance Shaping Factors: PSFs)로 구성되어 있는 단순한 분석체계로 구성되어 있다. 9개의 일반 직무유형에 따른 기본오류확률을 제시하고 있으며, 오류발생 가능성을 증가시키는 38개의 영향인자를 제시하고 있다. 일반적인 평가 과정은 다음과 같다:

- 단계 1: 일반 직무유형(GTT)의 선정(기본 오류확률의 결정)
- 단계 2: 직무상황과 관련 있는 PSFs의 선정
- 단계 3: 선정된 PSF의 영향정도의 평가
- 단계 4: 최종 인적오류 확률(Human Error Probability; HEP)의 계산

최종 HEP는 선정된 일반 직무유형에 대한 기본 오류확률을 GEP(Generic Error Probability),  $i$ 번째 PSF( $i$ )에 대한 가중치를  $W(i)$ , 영향정도를  $R(i)$  라고 할 때, 다음 식에 의해 얻어진다.

$$\bullet \text{ 최종 HEP} = \text{GEP} * \prod [R(i)*(W(i)-1) + 1]$$

### 2.2 RSSB-HRA 방법

RSSB-HRA 방법은 영국 RSSB에서 철도 고유 HRA 방법 개발을 취지로 개발되었다[7]. RSSB 방법의 분석체계는 정성분석 모듈인 인적오류파악(Human Error Identification: HEI) 모듈과 정량평가 모듈인 인적오류 정량화(Human Error Quantification: HEQ) 모듈로 구성되어 있다. 두 모듈이 적절한 연결고리를 통하여 분석과정이 연계되도록 설계되어 있으

나, 근본적으로는 두 모듈을 독립적으로 사용할 수 있다.

RSSB-HRA의 HEI 분석 과정은 다음과 같다.

- 예비단계: 정보수집 단계
- 단계 1: 외적오류유형(External Error Mode; EEM)의 파악
- 단계 2: 인지영역(cognitive domains), 내적오류유형(Internal Error Mode: IEM), 오류 메카니즘(Psychological Error Mechanism: PEM)의 파악
- 단계 3: 영향인자(PSF)의 파악
- 단계 4: 오류감지 및 복구 수단의 파악

예비단계인 정보수집 단계에서는 오류분석에 필요한 직무 관련 정보들의 수집 단계이며, 직무분석 결과를 토대로 하여 단계 1로부터 오류분석을 수행한다. 외적오류유형으로는 ‘selection and quality’, ‘timing and sequence’, ‘communication’ 영역에서 총 24개 오류유형을 제시하고 있다. 인지영역은 Wickens[8]의 인간 정보처리 모형을 기반으로 Perception, Decision, Memory, Action, Violations 등 5개 인지영역을 구분하고 있다. 내적오류유형과 오류 메카니즘은 각각의 인지영역에 따라 발현 가능한 오류유형과 유발 메카니즘을 제시하고 있다.

HEQ 과정은 앞에서 소개한 HEART의 분석과정과 유사하나, HEART의 일반 직무유형(GTT)이 일반 오류유형(Generic Error Type: GET)으로 변경되었으며, 영향인자 체계가 부분 개정 되었고, 영향인자의 영향정도 평가에 대한 사용자 지침이 추가되었다. HEQ 과정은 다음과 같다.

- 단계 1: 일반 오류유형(GET)의 선정(기본 오류확률(GEP)의 결정)
- 단계 2: 직무상황과 관련 있는 PSFs의 선정
- 단계 3: 선정된 PSF의 영향정도의 평가
- 단계 4: 최종 HEP의 계산

일반 오류유형(GET)은 Wickens[8]의 인간 정보처리 모형에 따라 각 인지단계 별로 7개의 오류유형으로 구분하고 있다. 각 오류유형에 대하여 기본 오류확률(GEP)과 그에 대한 상한값 및 하한값을 제시하고 있다. 최종 HEP는, HEART의 체계와 동일하게, 기본 오류확률 GEP에 대하여 PSF 가중치 ( $W(i)$ ) 및 영향정도( $R(i)$ )를 고려한 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\bullet \text{ 최종 HEP} = \text{GEP} * \prod [R(i)*(W(i)-1) + 1]$$

### 2.3 K-HRA 방법

K-HRA 방법은 한국원자력연구소의 주도로 국내 원자력 분야 HRA 전문가들에 의해 공동으로 개발된 국내 표준 방법

이다[6]. K-HRA 방법은 원자력발전소의 PSA에서 널리 활용되고 있는 THERP 및 ASEP 방법을 기반으로 하고 있으며, 주요 영향인자와 분석 결과의 일관성을 유지하기 위해 세부 분석지침을 추가하였다. 이 방법은 크게 사고전 HRA 방법과 사고후 HRA 방법으로 분류되어 있다. 사고전 HRA 방법은 발전소 작업자의 보수, 시험, 교정 등 일상직무에 대한 인적오류 가능성을 평가하기 위한 방법이며, 사고후 HRA는 원자로 정지를 유발하는 비상사고 발생 후 운전원에게 요구되는 비상직무에 대한 인적신뢰도를 평가하기 위해 제안된 방법이다.

### 2.3.1 사고전 HRA

사고전 HRA에서는 미리 계획된 작업을 주어진 절차에 따라 수행하기 때문에 진단오류 가능성은 무시 가능하다고 판단하여 다음 식과 같이 수행오류 가능성만을 고려한다.

$$\bullet \text{HEP} = \text{NEP} * \alpha * R$$

여기서 NEP는 기본오류확률로서 일상직무에 대해서는 5.0E-3을 사용한다.  $\alpha$ 는 영향인자(PSF)에 의한 보정값이며, R은 작업 감독자에 의한 선형 작업자의 오류에 대한 복구실패확률을 나타낸다.

### 2.3.2 사고후 HRA

사고후 인적행위에서는 발생 사건에 대한 진단 및 상황 파악 등 운전원의 진단 활동이 중요한 위치를 차지하게 되므로, 사고후 HRA 방법에서는 진단오류 및 수행오류를 모두 고려한다.

진단오류는 다음 식에 의해 평가된다.

$$\bullet \text{Pr(진단오류)} = \text{Pr(기본 진단오류)} * \text{보정값}$$

Pr(기본 진단오류)은 기본 진단오류 확률을 나타내는 것으로, 이 값은 진단 여유시간에 의해 결정되며, 진단 여유시간에 따른 진단오류 확률은 THERP의 진단곡선을 이용하여 구한다. 기본 진단오류확률을 구한 후, 영향인자의 수준을 고려한 보정이 이루어진다.

수행오류 가능성의 평가는 다음 식에 의해 이루어진다.

$$\bullet \text{Pr(수행오류)} = \sum [\text{Pr(단위 작업오류)} * R]$$

수행오류확률인 Pr(수행오류)는 세부 단위행위에 대한 수행오류 확률인 Pr(단위 작업오류)와 그에 대한 복구실패 확률(R)을 고려한 값을 전체 단위행위에 대하여 합산함으로써 얻어진다.

## 3. 사례 분석

### 3.1 사례 선정

철도 HRA 선정을 위한 사례분석을 위하여 다음 두 가지 사례를 선정하였다. 첫 번째 사례는 ‘정지신호 무시/오인 사건(Signal Passed At Danger; SPAD)’이며, 두 번째 사례는 2003년도에 국내에서 발생한 ‘고모-경산 간 열차 추돌사고’이다. 이 두 사건을 사례로 선정한 이유는, 첫 번째 사례인 경우 SPAD가 철도사고의 주요한 발생 원인이 되고 있다는 점이고, 두 번째 사례인 경우는 고모-경산 사건이 인적요인 결합이 다중적으로 결부되어 사고로 이어진 대표적인 사건이라는 점이다.

#### 3.1.1 사례 1: 정지신호 무시/오인 사건(SPAD)

SPAD는 가장 빈번한 사고 발생 원인으로 알려져 있으며, 영국 철도사고 발생 원인의 약 20-30%를 차지하고 있는 것으로 분석되고 있다[9]. Anderson[9]에 의한 SPAD 발생 원인을 정리하면 다음과 같다.

1. 시계(visibility)의 저하로 인한 신호 확인 누락
2. 근접 선로의 다른 신호를 인식함.
3. 신호 확인은 이루어졌으나 오판 또는 무시함.
4. 특정 환경 조건 하(날씨 등)에서 브레이크 유효거리를 오판함.
5. 과속주행으로 인하여 정상 경고 및 브레이크 거리를 초과하여 정지함.
6. 신호 방식에 대한 망각

위의 SPAD 원인들 중에서 본 사례분석에서는 대표적으로 상위 3개의 원인에 대한 사례분석을 소개한다.

#### 3.1.2 사례 2: 고모-경산간 열차 추돌사고

이 사고는 2003년 경부선 고모-경산역 구간에서 발생한 사고로서, 김천역 출발 부산행 제303열차(무궁화)가 경부선 고모-경산역 사이를 운행하던 중 앞서 운행 중인 제2661화물열차 후부를 추돌하여 제303열차 발전차 앞바퀴 2개가 탈선되고, 발전차 차위의 객차가 파손되고 다수의 사상자가 발생한 사고이다[10]. 본 사고는 고모-경산 간 신호공사로 인해 자동 신호시스템(ABS)을 사용하지 못하고 선형열차가 전방역인 경산역에 도착한 것을 확인한 후에 후속열차를 운행시키는 통신식 방식 열차운행취급으로 변경된 상태에서 다단계의 인적오류 개입에 의해 발생되었다. 본 사건에 개입된 주요 인적오류 사건을 정리하면 크게 4단계로 나눌 수 있다.

- HE-1: 시공사에 의한 고모역 출발신호기 및 고모-경산 간

- 폐색신호기(7기) 사용중지에 따른 신호기 안전조치 미실시
- HE-2: 고모역에서 제2661 화물열차를 사용중지된 출발신호기 현시로 출발시킴 (기관사: 자동폐색식 운행으로 착각, 자동폐색신호기 2호주의 정지신호 현시에 따라 정차)
- HE-3: 고모역에서 선형 제2661 화물열차의 경산역 도착을 확인하지 않고 후속(제303 무공화호)열차의 통과 취급
- HE-4: 후속(제303 무공화호)열차의 선형열차(제2661 화물열차) 확인 및 제동 실패

본 사례분석에서는 위의 4가지 인적오류 사건 중 대표적인 사건인 ‘HE-3’ 을 분석 대상 사례로 선정하였다.

### 3.2 사례적용1: HRA 방법의 사례1에의 적용

#### 3.2.1 RSSB-HRA 방법의 적용

RSSB-HRA 방법의 SPAD 3가지 원인유형에 대한 오류유형의 분석결과에 의하면, 처음의 두 원인유형은 기관사의 신호인식 단계에서의 오류로 발생되며, 세 번째 유형은 판단 단

계의 오류에 기인하고 있다(표 1). 이것은 SPAD 사건이 주로 행위 단계의 오류보다는 신호인식과 판단 단계의 오류로 인해 발생한다는 것을 알 수 있다. 관련되는 오류 메커니즘과 그에 따른 영향인자들을 RSSB-HRA의 분류체계에 따라 표 1과 같이 도출하였다.

정성적 분석에 기초하여 각 오류유형에 대한 GET 및 GEP 결정, 정량적 평가를 위한 영향인자와 영향정도의 결정 등을 통하여 오류발생확률(HEP)을 구하였다(표 2). 평가 결과에 의하면 첫 번째 유형(‘기관사의 신호확인 실패’)의 가능성이 가장 높은 것으로 평가되었다. 이것은 이 사건이 기관사의 단순 오판과는 다른 특정한 상황(즉, 신호의 시계성 및 날씨 등의 환경적 특성)에 기인하고 있는 것이 정량화 과정에 반영되었기 때문이다.

#### 3.2.2 HEART 방법의 적용

HEART 방법은 위의 RSSB-HRA 방법과 달리 오류유형의 분석과 같은 정성적 분석은 포함하지 않는다. SPAD 사례에 대

Table 1. Qualitative analysis of the case 1 using RSSB-HRA

직무단계	외적유형	내적유형	매커니즘	영향인자
신호확인 및 정지	기관사의 신호확인 실패	Perception-No detection	Perceptual discrimination failure Distraction/Preoccupation Vigilance failure	신호위치, 가시성, 경보수준, 기관사실 환경
	기관사의 그릇된 신호확인	Perception-misidentification	Spatial confusion	신호위치, 가시성, 경보수준, 경험, 친숙도
	기관사의 신호 오판/무시	Decision-Misprojecton	Mind set	시간긴급성, 태도, 경보수준, 확신

Table 2. Quantitative assessment of the case 1 using RSSB-HRA

외적유형	GET	GEP	PSF(최대가중치, 영향정도)	PSF Value	HEP(GEP* Π PF <sub>i</sub> )
기관사의 신호 확인 실패	Detection	1.11E-04	감지 및 인식능력(10, 0.5) 비친숙성(17, 0.1)	PF <sub>1</sub> =(9*0.5)+1=5.5 PF <sub>2</sub> =(16*0.1)+1=2.6	1.59E-03
기관사의 그릇된 신호확인	Perception	2.05E-05	감지 및 인식능력(10, 0.5) 비 친숙성(17, 0.1)	PF <sub>1</sub> =(9*0.5)+1=5.5 PF <sub>2</sub> =(16*0.1)+1=2.6	2.93E-04
기관사의 신호 오판/무시	Decision	1.65E-06	시간 여유도(11, 0.1) 위험 인식성(4, 0.5)	PF <sub>1</sub> =(10*0.1)+1=1.1 PF <sub>2</sub> =(3*0.5)+1=2.5	4.54E-06

Table 3. Quantitative assessment of the case 1 using HEART

외적유형	GTT	GEP	PSF(최대가중치, 영향정도)	PSF Value	HEP(GEP* Π PF <sub>i</sub> )
기관사의 신호 확인 실패	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적 직무	0.02	감지 및 인식능력(10, 0.5) 비친숙성(17, 0.1)	PF <sub>1</sub> =(9*0.5)+1=5.5 PF <sub>2</sub> =(16*0.1)+1=2.6	0.286
기관사의 그릇된 신호확인	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적 습관적 직무	0.02	감지 및 인식능력(10, 0.5) 비친숙성(17, 0.1)	PF <sub>1</sub> =(9*0.5)+1=5.5 PF <sub>2</sub> =(16*0.1)+1=2.6	0.286
기관사의 신호 오판/무시	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적 습관적 직무	0.02	시간 여유도(11, 0.1) 위험 인식성(4, 0.5)	PF <sub>1</sub> =(10*0.1)+1=1.1 PF <sub>2</sub> =(3*0.5)+1=2.5	0.055

한 HEART 방법의 적용에 있어서 PSF 및 그 영향정도는 RSSB-HRA 분석결과와 동일한 것을 사용하였다. 그러나, 표 3의 평가결과에서 알 수 있듯이 모든 HEP 값들이 RSSB-HRA를 이용한 결과보다 상당히(2 order 이상) 높은 값들을 보여주고 있다. 이것은 HEART에서 제시하고 있는 GTT에 해당하는 NEP 값들이 철도의 SPAD 관련 직무상황을 적절히 표현하고 있지 못한 것으로 평가된다.

**3.2.3 K-HRA 방법의 적용**

본 사례적용에서는 K-HRA의 사고전 HRA 방법을 적용하였다. 표 4에서 보는 바와 같이, HEP 결과는 MMI 수준에 따라 서로 다른 값을 나타내고 있다. 그러나, K-HRA의 사고전 HRA는 원자력발전소의 일상직무 상황하에서 사용되는 영향인자를 제시하고 있어서 본 사례의 상황요인을 적절히 다루지 못하는 것으로 평가된다. 한편, 사고후 HRA를 적용할 경우, 매우 제한된 진단 여유시간으로 인하여 HEP 값은 1.0으로 평가된다.

**3.3 사례적용2: HRA 방법의 사례 2에의 적용**

**3.3.1 RSSB-HRA 방법의 적용**

표 5는 HE-3 사례에 대한 RSSB-HRA 방법의 정성분석 결과를 보여주고 있다. 본 사례는 통신식 방식으로의 운전취급에 따라 선형열차의 전방역 도착 확인 후 후속 열차를 취급시

켜야 하나 이에 대한 확인을 누락한 채 후행열차를 통과 취급시켰다. 이와 관련된 내적오류유형으로 가장 적절한 것은 위반(Violation) 유형에서 ‘상황적 위반(Situational violation)’과 결정(Decision) 유형에서 ‘투사오류(Misprojection)’로 볼 수 있다. 이와 관련된 대표적인 정성적 영향인자는 ‘시간 긴급성’, ‘작업부하’, ‘안이성’ 등으로 분석되었으며, 이러한 인자는 정량적 평가 단계에서 ‘시간 여유도’와 ‘위험 인식성’으로 고려된다. RSSB-HRA의 정량화 평가 체계에 따라 GET와 GEP, 영향인자의 수준 등을 고려한 최종 HEP 값은 2.28E-3으로 평가되었다(표 6).

**3.3.2 HEART 방법의 적용**

HEART에서 사용된 영향인자는 RSSB-HRA에서 사용한 영향인자와 동일한 인자를 사용하였으나, RSSB-HRA의 GET 대신 GTT 중 네 번째 유형인 ‘빠른 속도 또는 주의력이 부족한 상태로 수행되는 상당히 단순한 직무’를 선택함에 따라 GTT 상에 관련 영향인자가 이미 반영되어 있는 것으로 고려하여 NEP 값을 그대로 HEP 값으로 사용하였다. 최종 HEP는 표 7에서와 같이 0.09로 평가되었다.

**3.3.3 K-HRA 방법의 적용**

고모-경산 추돌사고의 HE-3과 같은 경우는 비록 비상상황은 아니지만 ‘시간 긴급성’이 존재하는 상황으로 K-HRA의

**Table 4.** Quantitative assessment of the case 1 using K-HRA

외적유형	GEP	복잡도	절차서	MMI	복구실패 확률	HEP
기관사의 신호 확인 실패	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	하(2.0)	고려없음(1.0)	5.0E-03
기관사의 그릇된 신호확인	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	하(2.0)	고려없음(1.0)	5.0E-03
기관사의 신호 오판/무시	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	중(1.0)	고려없음(1.0)	2.5E-03

**Table 5.** Qualitative analysis of the case 2 using RSSB-HRA

직무단계	외적유형	내적유형	메커니즘	영향인자
3.1 통신식 시행에 따라 선형열차의 전방역 도착 전화 확인(역무원)	정보취득 노력없음	Violation-Situational Decision-Misprojecion	Risk recognition failure	시간긴급성, 작업부하, 안이성
3.2 선형열차 전방역 도착 후, 후속 열차 운행(역무원)	이른 행위 / 조치	Violation-Situational Decision-Misprojecion	Risk recognition failure	시간긴급성, 작업부하, 안이성

**Table 6.** Quantitative assessment of the case 1 using RSSB-HRA

외적유형	GET	GEP	PSF(최대가중치, 영향정도)	PSF Value	HEP(GEP* II PF <sub>i</sub> )
정보취득 노력없음	Decision failure	3.68E-5	시간 여유도(11, 0.9) 위험 인식성(4, 0.7)	PSF1=(10*0.9)+1=10 PSF2=(3*0.7)+1=3.1	1.14E-3
이른 행위/조치	Decision failure	3.68E-5	시간 여유도(11, 0.9) 위험 인식성(4, 0.7)	PSF1=(10*0.9)+1=10 PSF2=(3*0.7)+1=3.1	1.14E-3
Total HEP					2.28E-3

Table 7. Quantitative assessment of the case 2 using HEART

GTT	GEP	PSF(최대가중치, 영향정도)	PSF Value	HEP(GEP*II PF <sub>i</sub> )
D. 빠른 속도 또는 주의력이 부족한 상태로 수행되는 꽤 단순한 직무	0.09	시간 여유도(11, 0.9) 위험 인식성(4, 0.7)	GTT에 PSF가 반영되어 있음	0.09

Table 8. Quantitative assessment of the case 2 using K-HRA

진단오류(=1.0)		수행오류(=0.05)		최종 HEP
기본 진단 오류	보정 인자	단위작업 오류	복구확률	
DEP(진단 여유시간 < 2분)=1.0	f(주관심작업(Y), MMI(중), 교육/훈련(중), 절차서 수준(중))=1.0	f(작업유형: step-by-step, 스트레스: extremely high)=0.05	1.0	1.0

Table 9. Comparison between HRA results by HRA methods

	RSSB-HRA	HEART	K-HRA
사례 1	4.54E-06 ~ 1.59E-03	2.18E-02 ~ 5.5E-01	1.25E-03 ~ 5.0E-03 (사고전 방법)
사례 2	2.28E-3	9.0E-2	1.0 (사고후 방법)

사고후 HRA 방법을 적용하였다. 사고후 HRA의 진단오류는 진단 여유시간으로 계산되는데, 현 사례의 경우 진단 여유시간은 대략 2분 정도로 추정되었다. 2분에 따른 THERP 진단곡선의 진단오류확률은 1.18E+00으로 1.0을 초과하는 값으로 평가된다. 그리고 수행오류의 경우 작업유형은 'Step-by-Step'이며, 스트레스 수준은 'Extremely High'로 고려되어, 이에 따른 수행오류확률은 5.0E-2로 계산된다. 결국, 표 8에서와 같이 본 사례사건에 대한 K-HRA의 적용결과는 1.0의 HEP 결과를 산출하게 된다.

#### 4. 토의 및 결론

표 9에서 정리한 바와 같이 두 사례에 대한 HRA 정량화 평가 결과는 방법 간에 다소 차이를 보인다. 전반적으로 RSSB HRA 방법의 경우 다른 방법들에 비해 낮은 값을 제시하고 있고, K-HRA의 경우 사고후 방법을 적용하였을 경우 상당히 높은 HEP 값을 나타내고 있다.

각 방법이 산출한 HEP 값에 대한 직접적인 유효성(validity) 평가는 현실적으로 비교 가능한 실제 데이터의 한계로 매우 어려운 부분이므로, 본 연구에서는 각 방법의 사례적용 시에 파악된 철도 직무에의 적용성 관점에서 각 방법의 장단점을 기술한다. 본 연구에서의 HRA 방법의 철도 직무에 대한 적용성 비교 관점은 HRA 방법이 철도 직무 및 환경을 얼마나 적절히 대표하고 있는가를 주 관심 영역으로 한다.

먼저, HRA 방법의 전반적인 한계점으로서, 두 번째 사례의 주요 오류유형인 위반(Violation)에 대한 정량화 체계는 모든 HRA 방법이 제공하고 있지 않다. RSSB 방법의 경우, 정성적

단계에서는 위반(Violation)의 세부 오류유형을 제시하고 있지만, 정량화 단계에서는 이에 대한 평가체계를 제시하고 있지 않다. 이 부분은 모든 HRA 방법의 한계에 해당하므로 방법 선정의 기준에서는 제외한다.

RSSB 방법의 분류체계는 크게 오류유형과 영향인자 체계로 나눌 수 있다. 오류유형의 경우, 인간의 정보처리 모형에 기반을 둔 일반 심리학적 분류체계에 철도 직무 환경에서의 오류유형을 추가 및 개정하여 사용하고 있어 철도 직무의 오류분석에는 구체적 직무와 무관하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 영향인자의 경우, HEART 방법에서 제시하고 있는 일반 영향인자 분류체계를 철도 환경에 맞도록 추가, 개정한 분류체계를 사용하고 있다. 다만, 주어진 직무 및 환경에 대한 영향인자 선정이 분석자에게 의존하고 있으므로 분석자 간의 일관성이 결여된 평가가 발생할 수 있다.

HEART 방법은 범용성으로 보이는 직무유형 및 영향인자 분류체계를 제시하고 있으나, 일반 직무유형(GTT)의 경우 철도 직무의 특성을 적절히 표현해 주는 직무유형이 결여되어 있다. 이로 인하여 주어진 직무 및 상황에 대한 해당 직무유형 선정 작업이 어렵게 느껴지며, 동시에 이것은 분석자 자신 및 분석자 간의 분석 일관성 결여를 유발할 수 있게 한다. 한편, 영향인자의 경우 원래 HEART 방법의 영향인자 체계가 있지만, RSSB-HRA의 개정된 영향인자 체계와 크게 다르지 않으므로 RSSB-HRA 영향인자 체계를 사용하여도 무방할 것으로 평가된다.

K-HRA 방법은 분석 과정이 체계화 및 절차화 되어 있어 적용 과정이 원활한 장점이 있다. 그러나 사고전 및 사고후로 구분된 방법상의 체계가 철도 직무에서는 적절치 않은 것으로

로 나타났다. 왜냐하면, 원자력발전소 직무의 경우에는 정상 상황과 비상상황이 뚜렷하게 구분되는 특성을 보이지만, 철도 직무의 경우에는 정상상황과 비상상황의 경계 구분이 뚜렷하지 않기 때문이다. 또한, 관련 영향인자 체계 및 적용규칙이 원자력 직무 환경에 맞추어져 있으며, 철도 직무 및 환경은 적절히 반영하고 있지 않은 것으로 평가된다. 정량화 값에 있어서도, 사고후 방법의 경우 짧은 진단 여유시간에 대해서 상당히 높은 HEP 값을 산출하고 있어 많은 직무가 짧은 여유 시간 내에 이루어지는 철도 직무의 경우에 불합리한 결과를 도출할 가능성이 있다.

위의 사례분석 및 평가를 통하여, 현존하는 HRA 방법들 중 RSSB-HRA 방법이 철도 위험도 평가를 위한 R-HRA 방법으로서 가장 적절한 것으로 사료된다. 현재 RSSB-HRA 방법이 현실적 활용상의 다소간의 어려움, 예를 들어, 분석에 소요되는 분석 요구량, 분석 결과의 일관성 유지 문제 등이 존재하는 것은 사실이다. 이러한 한계점들은 추후 연구개발 과정을 통해 적절히 보완해 나가야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Swain, A. D., Guttman, H. E. (1983), "Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications", NUREG/CR-1278, USNRC.
2. Swain, A. D. (1987), "Accident sequence evaluation program human reliability analysis procedure", NUREG/CR-4772, USNRC.
3. Hannaman, G. W., Sprgin, A. J., Lukic, Y. D. (1984), "Human cognitive reliability model for FRA analysis", Drafts report, NUS-4531, EPRI Project RP 2170-3.
4. Embrey, D. (1984), "SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgement", NUREG/CR-3518, USNRC.
5. 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.
6. 정원대, 강대일, 김재환 (2005), "원자력발전소 인간신뢰도분석(HRA) 표준 방법 개발: 전출력 PSA 내부사건 HRA", KAERI/TR-2961/2005, 한국원자력연구소.
7. Rail Safety and Standard Board (RSSB) (2004), "Rail-specific HRA technique for driving tasks", Final report.
8. Wickens, C., Hollands, J. (2000), "Engineering psychology and human performance", Prentice-Hall.
9. Andersen, T. (2004), "Human Reliability and Railway Safety", 16th ESReDA Seminar, Glasgow, UK.
10. 한국철도기술연구원 (2005), 철도사고 위험요인(PHA) 분석기술 개발, 연구보고서.