

철도 위험도 평가를 위한 인간신뢰도분석 방법 검토

Review of Human Reliability Analysis Methods for Railway Risk Assessment

김재환* 정원대** 장승철*** 곽상록****

Kim, Jae Whan Jung, Wondea Jang, Seung Cheol Kwak, Sang Log

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 paper reviews three existing HRA methods including the K-HRA (THERP/ASEP-based) method, the HEART method, the RSSB-HRA method, and introduces a case study that was performed to select an appropriate method for a railway risk assessment. The case is the signal passed at danger (SPAD) events, which are caused from a variety of factors. From the case study, the strengths and limitations of each method were derived and compared with each other from the viewpoint of the applicability to the railway industry.

1. 서론

인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis; HRA)은 위험설비의 확률론적 위험도 평가에서 작업자의 인적오류 가능성을 파악하고 그 발생 가능성을 정량적으로 평가하는 기능을 담당한다. R-HRA (Railway - Human Reliability Analysis)는 철도 위험도 평가체계 내에서 그러한 역할을 담당하기 위한 방법을 지칭한다.

원자력 및 항공 산업에서는 1970년대부터 다양한 HRA 방법을 개발하여 안전성 평가에 활용해 오고 있다. 대표적인 방법으로는 THERP[1], ASEP[2], HCR[3], SLIM[4], HEART[5] 방법 등이 있으며, 이들 중 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 RSSB에서는 기존 HEART 평가체계를 보완하여 철도 고유의 분류체계 및 데이터를 개선시킨 철도 고유 인간신뢰도분석 방법을 발표하였다[7]. 이 방법은 정량평가 과정과 연계된 정성오류 분석 과정을 제시하고 있으며, 현재는 기관사 직무에 대한 평가체계만을 제시하고 있다.

* 책임저자, 정회원, 한국원자력연구소, 종합안전평가부

E-mail : jhkim4@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8886 FAX : (042)868-8256

** 한국원자력연구소, 종합안전평가부

*** 한국원자력연구소, 종합안전평가부

**** 한국철도기술연구원, 안전기술연구팀

본 연구에서는 기 개발된 HRA 방법 중 THERP/ASEP을 근간으로 개발된 K-HRA 방법과 영국 철도산업에서 널리 활용되고 있는 HEART 방법, 그리고 최근 개발된 RSSB-HRA 방법을 후보 방법으로 선정하고, 철도산업의 대표적 사건인 SPAD 사건에 대한 사례적용을 통하여 철도 직무에의 적용 가능성 관점에서의 각 방법의 장단점을 도출한다.

2. 인간신뢰도분석 방법 소개

2.1 HEART 방법

HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) 방법은 영국의 Jeremy Williams 에 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 기본오류확률(Nominal Error Probability)을 제시하고 있으며, 오류발생 가능성을 증가시키는 38 개의 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.

- 최종 HEP = 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 인적오류의 정성적 분석 모듈인 인적오류파악(Human Error Identification: HEI) 단계와 정량적 평가 모듈인 인적오류 정량화(Human Error Quantification: HEQ) 단계로 구성되어 있다. 두 모듈이 적절한 연결고리를 통하여 분석과정이 연계되도록 설계되어 있으나, 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. 앞에서 파악된 각각의 오류에 대하여 오류발생에 영향

을 주는 상세 영향인자(PSF)를 파악한다.

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.

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

2.2 K-HRA 방법

K-HRA 방법은 한국원자력연구소의 주도로 국내 원자력 분야 HRA 전문가들에 의해 공동으로 개발된 국내 표준 방법이다[6]. K-HRA 방법은 원자력발전소의 PSA에서 널리 활용되고 있는 THERP 및 ASEP 방법을 기반으로 하고 있으며, 주요 영향인자와 분석 결과의 일관성을 유지하기 위해 세부 분석 지침을 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. 두 방법으로 분류하여 제안한 이유는 원자력발전소의 사고전과 사고후의 직무 및 상황의 특성이 서로 상이하기 때문이다. 사고전 및 사고후 HRA 방법에 대해 간략히 정리한다.

2.2.1 사고전 HRA 방법

일반적으로 인적오류는 크게 진단오류와 수행오류로 나누어 평가한다. 그러나, 사고전 HRA에서는 미리 계획된 작업을 주어진 절차에 따라 수행하기 때문에 진단 오류 가능성은 무시 가능하다고 판단하여 진단오류 가능성은 고려하지 않는다. 그러므로 사고전 HRA는 수행오류 가능성만을 평가하며, 다음 식에 의해 평가된다.

- $HEP = NEP * \alpha * R$

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

2.2.2 사고후 HRA 방법

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

진단오류는 다음 식에 의해 평가된다.

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

$Pr(\text{기본 진단오류})$ 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 적용

3.1 사례: 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]. 참고문헌 [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(Broken driving sequence)

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

3.2 사례 적용 1: RSSB-HRA 방법의 적용

RSSB-HRA 방법의 SPAD 3가지 원인유형에 대한 오류유형의 분석결과에 의하면, 처음의 두 원인 유형은 기관사의 신호인식 단계에서의 오류로 발생되며, 세 번째 유형은 판단 단계의 오류에 기인하고 있다. 이것은 SPAD 사건이 주로 행위 단계의 오류보다는 신호인식과 판단 단계의 오류로 인해 발생한다는 것을 알 수 있다. 정성적 분석에 기초하여 각 오류유형에 대한 GET 및 GEP 결정, 정량적 평가를 위한 영향인자와 영향정도의 결정 등을 통하여 오류발생확률(HEP)을 구하였다(표 1). 평가 결과에 의하면 첫 번째(Driver fails to check signal) 유형의 발생 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.

표 1. RSSB-HRA 방법을 이용한 사례 1의 정량적 평가

EEM	GET	GEP	PSF (최대가중치)	영향정도	PSF Value	HEP (GEP* II PF)
Driver fails to check signal	Detection	1.11E-04	감지 및 인식 능력 (10) 비진속성 (17)	감지 및 인식 능력 (0.5) 비진속성 (0.1)	PF ₁ =(9*0.5)+1=5.5 PF ₂ =(16*0.1)+1=2.6	1.59E-03
Drive checked a wrong signal	Perception	2.05E-05	감지 및 인식 능력 (10) 비진속성 (17)	감지 및 인식 능력 (0.5) 비진속성 (0.1)	PF ₁ =(9*0.5)+1=5.5 PF ₂ =(16*0.1)+1=2.6	2.93E-04
Drive checked right signal but misunderstood it	Decision	1.65E-06	시간 여유도 (11) 위험 인식성 (4)	시간 여유도 (0.1) 위험 인식성 (0.5)	PF ₁ =(10*0.1)+1=1.1 PF ₂ =(3*0.5)+1=2.5	4.54E-06

3.3 사례 적용 2: HEART 방법의 적용

HEART 방법은 위의 RSSB-HRA 방법과 달리 오류유형의 분석과 같은 정성적 분석은 포함하지 않

는다. SPAD 사례에 대한 HEART 방법의 적용에 있어서 PSF 및 그 영향정도는 RSSB-HRA 분석결과와 동일한 것을 사용하였다. 그러나, 표 2의 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.

표 2. HEART 방법을 이용한 사례 1의 평가

EEM	GTT	GEP	PSF (최대가중치)	영향정도	PF Value	HEP (GEP* II PF)
Driver fails to check signal	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적이고 습관적인 직무	0.02	감지 및 인식 능력 (10) 비천속성 (17)	감지 및 인식 능력 (0.5) 비천속성 (0.1)	$PF_1=(9*0.5)+1=5.5$ $PF_2=(16*0.1)+1=2.6$	0.286
Drive checked a wrong signal	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적이고 습관적인 직무	0.02	감지 및 인식 능력 (10) 비천속성 (17)	감지 및 인식 능력 (0.5) 비천속성 (0.1)	$PF_1=(9*0.5)+1=5.5$ $PF_2=(16*0.1)+1=2.6$	0.286
Drive checked right signal but misunderstood it	상대적으로 낮은 수준의 기술을 요하는 일상적이고 습관적인 직무	0.02	시간 여유도 (11) 위험 인식성 (4)	시간 여유도 (0.1) 위험 인식성 (0.5)	$PF_1=(10*0.1)+1=1.1$ $PF_2=(3*0.5)+1=2.5$	0.055

(3) K-HRA 방법의 적용

본 사례적용에서는 K-HRA의 사고전 HRA 방법을 적용하였다. 표 3에서 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 1.0 으로 평가된다.

표 3. K-HRA 방법을 이용한 사례 1의 평가

EEM	GEP	직무복잡도	절차서	MMI	복구실패확률	HEP
Driver fails to check signal	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	하(2.0)	고려없음(1.0)	5.0E-03
Drive checked a wrong signal	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	하(2.0)	고려없음(1.0)	5.0E-03
Drive checked right signal but misunderstood it	5.0E-03	상(0.5)	중(1.0)	중(1.0)	고려없음(1.0)	2.5E-03

4. 토의 및 결론

위에서 소개한 사례 적용 결과에서 보는 바와 같이 각 방법을 이용한 정량화 평가 결과는 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 나타낸다.

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 있어 철도 직무의 평가에는 무난한 것으로 보인다. 다만, 주어진 직무 및 환경에 대한 영향인자 선정이 분석자에게 의존하고 있으므로 분석자간의 비밀관된 선정 및 평가가 발생할 수 있는 여지는 있다.

HEART 방법은 범용성으로 보이는 직무유형 및 영향인자 분류체계를 제시하고 있으나, 일반 직무 유형(GTT)의 경우 철도 직무의 특성을 적절히 표현해 주는 직무유형이 결여되어 있다. 이로 인하여 주어진 직무 및 상황에 대하여 해당하는 직무유형을 선정하는 작업이 어렵게 느껴지며, 동시에 이것은 분석자 자신 및 분석자 간의 분석 일관성에 있어서의 결여를 유발할 수 있는 여지가 있다.

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 나타났다. 왜냐하면, 원자력발전소 직무의 경우에는 정상상황과 비상상황이 뚜렷하게 구분되는 특성을 보이지만, 철도 직무의 경우에는 정상상황과 비상상황의 경계 구분이 뚜렷하게 구분되지 않는다. 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 여유시간 내에 이루어지는 철도 직무의 경우에 불합리한 결과를 도출할 가능성이 있다.

참 고 문 헌

1. Swain AD, Guttman HE. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. NUREG/CR-1278, USNRC, 1983.
2. Swain AD. Accident sequence evaluation program human reliability analysis procedure. USNRC, NUREG/CR-4772, 1987.
3. Hannaman GW, Sprgin AJ, Lukic YD. Human cognitive reliability model for PRA analysis. Drafts report, NUS-4531, EPRI Project RP 2170-3, 1984.
4. Embrey D. SLIM-MAUD: An approach to assessing human error probabilities using structured expert judgement. NUREG/CR-3518, USNRC, 1984.
5. Williams JC. 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, 1988.
6. 정원대, 강대일, 김재환. 원자력발전소 인간신뢰도분석(HRA) 표준 방법 개발: 전출력 PSA 내부사건 HRA. KAERI/TR-2961/2005, 2005.
7. Rail Safety and Standard Board (RSSB) Rail-specific HRA technique for driving tasks. Final report, Nov. 2004.
8. Wickens C, Hollands J. Engineering psychology and human performance. Prentice-Hall Inc., 2000.
9. Andersen T. Human Reliability and Railway Safety, 16th ESReDA Seminar, Glasgow, UK, 2004.