

철도사고 위험도평가를 위한 철도 인간신뢰도분석 방법의 개정과 전산 소프트웨어의 개발

Revision of the Railway Human Reliability Analysis Procedure and Development of an R-HRA Software

김재환[†] · 김승환* · 장승철*

Jaewhan Kim · Seung Hwan Kim · Seung Cheol Jang

Abstract This paper consists largely of two parts: the first part introduces the revised railway human reliability analysis (R-HRA) method which is to be used under the railway risk assessment framework, and the second part presents the features of a computer software which was developed for aiding the R-HRA process. The revised R-HRA method supplements the original R-HRA method by providing a specific task analysis guideline and a classification of performance shaping factors (PSFs) to support a consistent analysis between analysts. The R-HRA software aids the analysts in gathering information for HRA, qualitative error prediction including identification of external error modes and internal error modes, quantification of human error probability, and reporting the overall analysis results. The revised R-HRA method and software are expected to support the analysts in an effective and efficient way in analysing human error potential in railway event or accident scenarios.

Keywords : Human reliability analysis, Railway human reliability analysis, Probabilistic Risk Assessment

요 지 본 논문은 크게 두 가지 내용을 담고 있다. 하나는 기 개발된 철도 인간신뢰도분석 방법(R-HRA)의 개정에 관한 내용이며, 다른 하나는 개정된 R-HRA 방법에 기반한 R-HRA 지원 시스템의 개발이다. 개정된 R-HRA 방법은 분석자간 일관성을 유지하기 위한 직무분석 지침의 제공과 영향인자의 분류에 특징을 두고 있으며, R-HRA 지원 시스템은 인간신뢰도분석을 위한 정보의 수집, 내·외적 오류유형을 포함한 정성적 오류분석, 오류확률의 정량화, 전체 분석결과 문서화 작업 등을 지원하고 있다. 개정된 R-HRA 방법과 지원 소프트웨어는 철도 사고 시나리오에서 발생 가능한 인적오류 가능성을 효과적이고 효율적으로 분석할 수 있도록 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 인간신뢰도분석, 철도 인간신뢰도분석, 확률론적 위험도평가

1. 서론

인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis; HRA)은 위험설비의 확률론적 위험도 평가(Probabilistic Risk Analysis; PRA)에서 작업자의 인적오류 가능성을 파악하고 그 발생 가능성을 정량적으로 평가하는 역할을 담당한다. 철도 인간신뢰도분석 방법(Railway-Human Reliability Analysis; R-HRA)은 철도 위험도 평가체계 내에서 그러한 역할을 담당

하기 위한 HRA 방법을 지칭한다.

현재까지 알려진 대표적 인간신뢰도분석 방법들에 대한 철도 직무에의 적용을 통해 영국의 RSSB에서 개발한 방법을 R-HRA 기본 방법으로 선정하였다[1]. 그러나 RSSB HRA 방법은 분석결과에 있어서 분석자간 신뢰성 결여의 문제를 유발할 수 있는 것으로 지적되며, 일관성 결여 문제의 큰 기여 인자 중의 하나는 오류발생 가능성에 영향을 주는 영향인자의 선정과 평가 부분으로 알려져 있다[2, 3].

본 논문에서는 RSSB HRA 방법의 이러한 한계점을 부분적으로 개선하기 위하여 직무분석 지침의 제공과 영향인자의 분류를 기반으로 한 개정된 철도 인간신뢰도분석(R-HRA) 절차를 제안하였고, 제안된 R-HRA 절차에 따라 철

[†] 책임저자 : 정희원, 한국원자력연구원 종합안전평가부, 선임연구원
E-mail : jhkim4@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-8886 FAX : (042)868-8256

* 한국원자력연구원 종합안전평가부, 책임연구원

도 직무의 인간신뢰도분석 업무를 효과적으로 지원하기 위하여 R-HRA 전산 시스템을 개발하였다.

2. RSSB HRA 방법

철도 인간신뢰도분석 방법인 RSSB HRA 방법은 영국 RSSB에서 철도 고유 HRA 방법으로 개발되었다[2]. RSSB 방법의 분석체계는 인적오류의 정성적 분석 모듈인 인적오류파악(HEI) 단계와 정량적 평가 모듈인 인적오류 정량화(HEQ) 단계로 구성되어 있다.

RSSB HRA의 분석 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다.

- 정성분석 모듈(HEI)
 - 예비단계: 정보수집 및 직무분석 단계
 - 단계 1: 외적오류유형(EEM)의 선정
 - 단계 2: 인지영역의 선정
 - 단계 3: 내적오류유형(IEM)의 선정
- 정량평가 모듈(HEQ)
 - 단계 1: 기본오류유형(GET)의 선정
 - 단계 2: 영향인자(PSFs)의 선정
 - 단계 3: 선정된 PSF의 영향정도의 평가
 - 단계 4: 인적오류확률(HEP) 계산

예비단계에서는 오류분석에 필요한 직무 정보들의 수집 단계이며, 직무분석 결과를 토대로 하여 오류분석을 수행한다. EEM으로는 총 24개 오류유형을 제시하고 있고, 인지영역은 Wickens[4]의 인간 정보처리 모형을 기반으로 인식(Perception), 기억(Memory), 결정(Decision), 행위(Action), 위반(Violation) 등 5개 인지영역을 구분하고 있다. IEM은 각각의 인지영역에 따라 발현 가능한 오류유형을 제시하고 있다. HEQ 과정은 본 방법의 근간이 되는 HEART 방법[5]의 분석과정과 유사하나, HEART의 기본직무유형이 기본오류유형으로 변경되었으며, PSF 체계가 철도영역에 맞게 일부 개정되었다.

3. 개정 R-HRA 방법의 분석절차 및 분류체계

3.1 RSSB HRA 방법의 개정

기존의 RSSB HRA 방법의 분석 절차를 다음 항목들에서 개선 보완하였다.

첫째, 예비단계에서 ‘시나리오 및 상황 설명’ 단계를 추가하였다. 시나리오 및 상황 정보에 대한 분석은 인적오류의 유형분석 및 PSF 분석에 있어서 중요한 의미를 가지는 내용이나, 현 RSSB 방법에서는 이에 대한 명시적인 분석 지침이 없다.

둘째, 직무분석 단계에서 구체적인 ‘직무분석 지침’을 추

가하였다. ‘직무분석 지침’은 세부 직무단계 분석 시 분석자 간에 일관된 분석 수준을 유지하기 위하여 마련되었다.

셋째, 영향인자(PSF)의 상대적 중요도가 낮은 인자(중요도 값 ‘3’ 이하)를 PSF 분류체계에서 제외시킴으로써 전체 29개 인자에서 16개 인자로 축소시켰고, 다시 이들 16개 인자를 일반적으로 대부분의 직무에 영향을 줄 수 있는 일반 인자와 특수한 직무/상황에 적용될 수 있는 특별 인자로 분류하였다. 중요도 값 ‘3’ 이하의 PSF에 대한 배제는 RSSB HRA 방법의 근간이 되는 HEART[5]에서도 사용하고 있는 방법으로서 위험도 평가에 내재되어 있는 불확실성을 감안한 방안으로 볼 수 있다.

3.2 개정 R-HRA 방법의 세부 분석절차

본 절은 개정된 R-HRA 방법에 따른 분석 절차를 제시한다. Fig. 1은 개정된 R-HRA 분석 절차의 전반적인 흐름도를 보여주고 있다. R-HRA 절차는 크게 (1) 예비 분석 단계, (2) 인적오류 정성분석 단계, (3) 인적오류 정량 분석 단계로 구성되며, 각 단계별로 세부 분석 단계가 구성되어 있다.

3.2.1 예비분석 단계

예비분석 단계는 크게 ‘시나리오 및 상황 설명’ 단계와 ‘직무분석’ 단계로 구성된다.

- 단계 1: 시나리오 및 상황 설명

평가 대상 인적오류사건(HFE) 및 직무가 요구되는 시나리오 및 상황적 설명을 기술한다. 즉, 어떠한 사고 전개 및 운전 상황에서 해당 평가대상 직무가 요구되는가를 기술하는 것이다. 이 단계는 분석자로 하여금 시나리오 및 상황 정보를 파악 및 기술하게 함으로써 발생 가능한 오류유형과 상황요인들을 정량평가 단계 이전에 개략적으로 파악할 수 있도록 하기 위하여 기존 RSSB 방법에서 추가된 부분이다.

- 단계 2: 직무분석

기본적인 직무분석 방법은 계층적 직무분석 방법을 이용한다[7]. 분석자는 직무분석 시 서로 다른 내용 및 수준으로 기술할 수 있고, 이것은 분석자 간에 오류유형 파악에 있어서 서로 다른 결과를 낼 수 있으므로, 직무분석 결과에 대한 분석자 간의 일관성을 지원하기 위하여 다음과 같이 세부 직무분석 지침을 제시한다.

- 행위 주체 별로 기술: 대상 직무단계의 행위 주체를 구분하여 기술함
- 행위 대상(object) 별로 기술
- 필요한 정보의 경우 정보제공 대상(사람, 신호계통, 정보계기관 등) 별로 기술

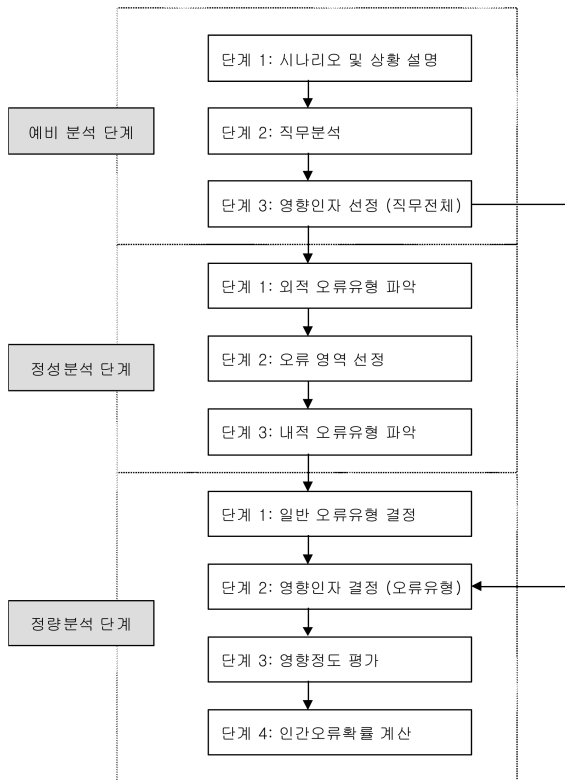


Fig. 1. Work flow of the revised R-HRA procedure

- 조치를 취하는 조치행위 대상(사람, 조종제어 기기 등) 별로 기술
- 행위 단위 별로 기술
- 정보 확인 및 수집 단계
- 상황파악 및 의사결정 단계
- 작업 수행 단계
- 단계 3: 영향인자 선정(직무전체)

본 단계에서 분석하는 직무와 상황에 관련되는 PSF 인자들을 가능한 한 모두 선정할 수 있다. Table 1은 기존의 29개 영향인자로부터 선정 작업을 거쳐 16개 인자로 축소하여 일반 영향인자와 특별 영향인자로 재분류한 분류체계를 보여준다. 이 단계에서 선정된 인자들은 ‘정량분석 단계’에서 세부 직무단계별로 선정된 오류유형에 대한 발생 확률을 평가 시 최종적으로 재선정되어 정량화 시에 반영된다.

3.2.2 정성분석 단계

- 단계 1: 외적 오류유형의 파악
- 직무분석에 따른 세부 직무단계에 대하여 가능한 외적 오류유형(EEM)을 최대 2개까지 선정한다. EEM 목록은 다음과 같이 세 그룹으로 분류되어 있으며, 세부 유형은 참고문헌 [6]에 자세히 수록되어 있다.
- 그룹 1: 선택 및 질적 오류: 8개 오류유형

Table 1. Taxonomy of performance shaping factors (PSFs)

| No. | 영향인자(PSF) | 최대 영향정도 |
|----------------|----------------|---------|
| 일반 영향인자 | | |
| 1 | 비친숙성 | 17 |
| 2 | 기관사 경험 | 8 |
| 3 | 인지/인식 능력 | 10 |
| 4 | 설계 및 배치 | 5 |
| 5 | 정보 수준 및 가용성 | 3 |
| 6 | 절차서의 명확성 | 5 |
| 7 | 시간 여유도 | 11 |
| 8 | 높은 작업부하 | 6 |
| 9 | 집중도 | 3 |
| 10 | 기관사실 근무환경 | 8 |
| 특별 영향인자 | | |
| 11 | 기능무효 가능 | 9 |
| 12 | 학습 필요 | 6 |
| 13 | 위험 인식성 | 4 |
| 14 | 낮은 피드백 수준 | 4 |
| 15 | 지연 또는 불완전한 피드백 | 4 |
| 16 | 목적간 충돌/불일치 가능성 | 3 |

- 그룹 2: 시점 및 순서 오류: 6개 오류유형
 - 그룹 3: 의사소통 오류: 10개 오류유형
 - 단계 2: 오류영역의 선정
- 단계 1에서 선정된 각 오류유형에 대하여 그 오류의 발생 가능성이 가장 높은 하나의 인지영역을 선정한다. 인지영역은 다음과 같이 4개의 영역으로 구성되어 있다.
- 인식(Perception) 영역
 - 기억(Memory) 영역
 - 결정(Decision) 영역
 - 행위(Action) 영역
- 단계 3: 내적 오류유형의 파악
- 단계 2에서 선정된 오류영역에 대하여 오류영역별 IEM 목록으로부터 발생 가능성이 가장 높은 하나의 IEM을 선정한다.
- 인식영역: 오청, 오인, 청각적 감지실패, 시각적 감지실패
 - 기억영역: 행위 망각, 정보 망각, 정보 오기억
 - 결정영역: 오판단/오투사, 서투른 결정/전략, 늦은 결정/전략, 결정/전략 구상 못함
 - 행위영역: 선택오류, 불확실한 정보, 그릇된 정보, 수행 누락

3.2.3 정량분석 단계

- 단계 1: 일반 오류유형의 결정

R-HRA 방법은 앞의 정성분석 단계에서 파악한 IEM과 일반 오류유형(Generic Error Type; GET) 및 기본오류확률(Generic Error Probability; GEP)을 연관시키는 연관표를 제시하고 있다(Table 2). 그러므로 앞의 정성분석 단계에서 파악한 IEM에 따라 해당되는 GET와 GEP를 Table 2로부터 결정할 수 있다.

Table 2. The mapping table between internal error modes, generic error types, and generic error probabilities

| IEMs | GET | GEP |
|--|-------|----------|
| <ul style="list-style-type: none"> • 청각적 감지실패 • 시각적 감지실패 | 감지 오류 | 1.11e-04 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 오청(오정보를 들은 경우) • 오인(오정보를 본 경우) • 불확실한 정보(정보를 그릇 듣거나 읽은 경우) • 그릇된 정보(정보를 그릇 듣거나 읽은 경우) | 인식 오류 | 2.05e-05 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 오청(올바로 들었으나 의미를 잘못 해석한 경우) • 오인(바로 보았으나 의미를 잘못 해석한 경우) • 그릇된 정보(그릇된 의미가 부여된 경우) | 해석 오류 | 1.57e-02 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 오판단/오투사 • 서투른 결정/전략 • 선택 오류(기관사가 그릇된 행위를 결정한 경우) • 수행 누락(행위를 취하지 않을 결정을 한 경우) | 결정 오류 | 3.68e-05 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 정보 망각 • 정보 오기억 • 불확실한 정보(잘못 기억된 정보에 기인한 오류) • 그릇된 정보(잘못 기억된 정보에 기인한 오류) | 기억 실패 | 4.71e-04 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 행위 망각 • 늦은 결정/전략 • 결정/전략구상 못함 • 수행 누락(기관사가 요구 조치를 망각한 경우) | 누락 오류 | 6.88e-05 |
| <ul style="list-style-type: none"> • 선택 오류(대상을 오선택하거나 위치를 부정확하게 취하는 경우) | 조치 오류 | 4.40e-02 |

• 단계 2: 영향인자 결정(오류유형)

본 단계에서는 각 오류유형의 발생에 영향을 주는 영향인자를 최종적으로 선정하는 단계이다. ‘예비 분석 단계 3’에서 선정된 모든 영향인자 들 중에서 특정한 오류유형의 발생에 영향을 주는 영향인자를 최종적으로 선별하여 결정한다.

• 단계 3: 영향정도의 평가

단계 2에서 결정된 각 영향인자의 영향정도 또는 실제 상태/수준을 평가한다. 영향정도는 분석자의 판단에 따라 0에서부터 1.0까지의 값을 반영할 수 있다. 참고문헌 [6]은 영향정도를 판단할 수 있는 지침을 제공하고 있다.

• 단계 4: 최종 인간오류확률 계산

분석 대상 오류유형에 대한 인간오류확률(HEP) 계산은 기본오류확률(GEP)에 대하여 PSF(i)의 최대 영향정도(W(i)) 및 영향정도(R(i)) 값을 고려하여 다음 식과 같이 얻어진다.

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

주어진 직무에 대한 최종 HEP는 모든 오류유형에 대한 HEP의 전체 합으로 얻어진다.

4. 전산 소프트웨어의 개발

4.1 설계 요건 정의

R-HRA 지원 전산 소프트웨어를 개발하기 위한 소프트웨어 설계 요건은 다음과 같다

- HEP 계산 자동화: R-HRA의 수행에 각종 정보를 DB화하고 세부 직무별 입력 값에 따라 오류확률을 자동 계산하여 평가한다.
- 정보 DB화: 분석에 사용된 모든 정보를 DB화하고 필요한 항목들을 실시간으로 제공한다.
- 분석 표준화: 분석 과정과 입력 선택의 전산 지원을 통하여 분석을 표준화한다.
- 문서화: 분석 입력과 분석 결과를 문서화하고 사용자의 요구에 맞춰 보고서로 출력하는 기능을 제공한다.

4.2 R-HRA 지원 전산 프로그램 개발

R-HRA 지원 전산 프로그램은 사건 정보를 총괄 관리하기 위한 R-HRA 이벤트 관리자와 인적오류 분석모듈로 구성되어 있다.

4.2.1 이벤트 관리자 모듈

인적 오류 분석의 기본이 되는 인적 오류 이벤트를 관리하는 기본 모듈이다. 사용자는 이벤트 관리자를 통하여 분석하고자 하는 인적 오류 이벤트를 선택한 후, 상세 분석창을 실행하여 해당 이벤트에 대한 상세 분석을 할 수 있다. Fig. 2는 R-HRA 프로그램의 이벤트 관리자 창을 보여주고 있다.

4.2.2 인적오류분석 모듈

인적 오류 분석 모듈은 인적 오류사건의 1) 일반정보 관리, 2) 오류분석 및 평가, 3) 분석결과 정리 모듈로 구현되

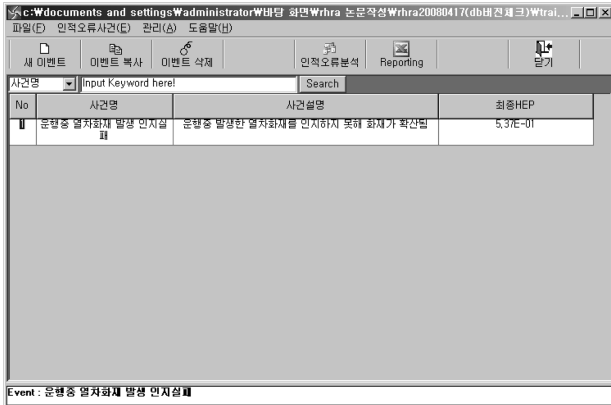


Fig. 2. The event manager of R-HRA

어 있다. 각 모듈의 기능은 크게 3가지 입력 Tab을 이용하여 사용자가 각 Tab을 선택함으로써 해당 분야의 자료를 입력할 수 있도록 구현되어 있다.

- 일반정보 관리

인적오류사건을 정의하는 기본적인 정보 및 사고 관련 시나리오, 관련 계통 및 기기, 절차서 등에 대한 정보를 입력 및 관리하기 위한 모듈로서, 분석자가 하나의 인적오류사건을 분석하기 위해 필요한 기본적인 정보들을 관리하기 위한 입력도구이다. Fig. 3은 R-HRA의 일반정보 관리 Tab을 보여주고 있다.

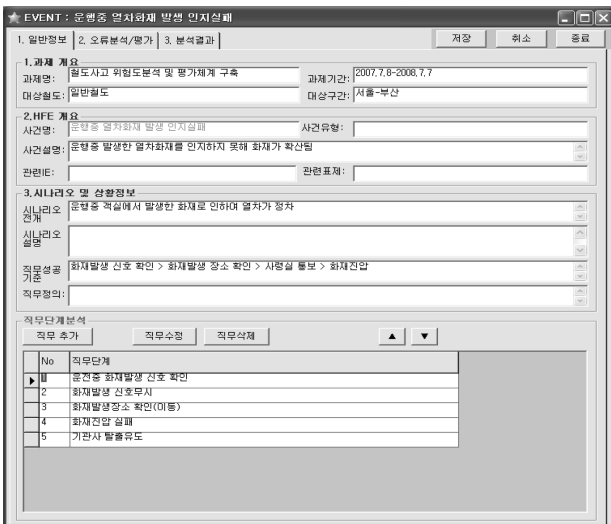


Fig. 3. The general information manager of R-HRA

- 오류분석/평가

분석하고자 하는 인적오류사건에 대한 실제적인 오류분석 및 정량평가를 수행하는 모듈이며, 직무단계별 외적오류유형을 정의하고, 정의한 외적오류유형에 대하여 정성평가와

정량분석을 수행할 수 있다. Fig. 4는 R-HRA의 오류분석 및 평가 Tab을 보여주고 있다.

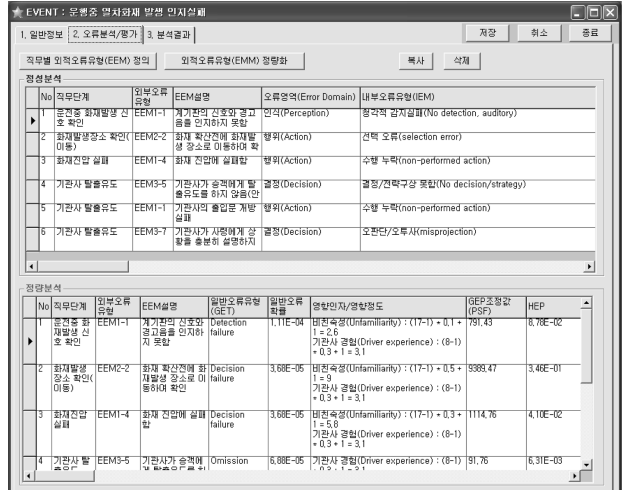


Fig. 4. The error analysis and quantification manager of R-HRA

- 분석결과

오류분석 및 평가단계에서 평가한 각 직무단계별 분석 자료를 기초로 하여 인적 오류 사건별 최종 인적 오류 확률을 계산하기 위한 모듈이며, 오류 분석/평가 단계에서 입력한 인적 오류 자료를 근거로 하여 최종 인적오류 확률을 계산하도록 구현하였다. 또한, 분석결과를 Microsoft Excel 파일로 변환할 수 있는 기능을 제공하고 있다. Fig. 5는 R-HRA의 분석결과 관리 창을 보여주고 있다.

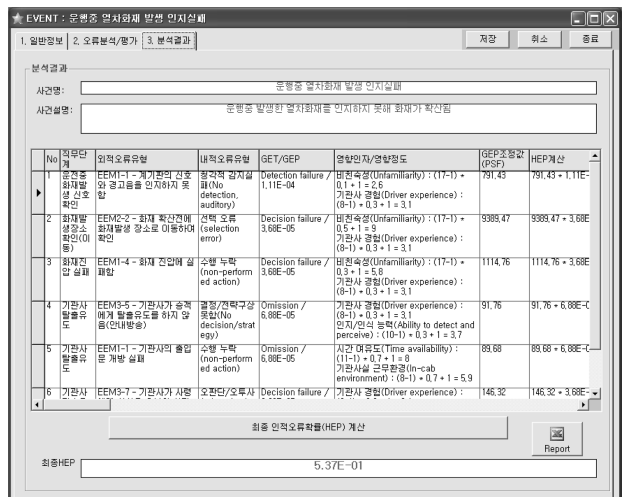


Fig. 5. The results reporting manager of R-HRA

5. 결론

본 논문에서는 철도 인간신뢰도분석 방법인 RSSB HRA 방법에 대하여 소개하고, RSSB HRA 방법의 한계점을 개

선시하기 위한 노력으로 분석 절차 및 모듈의 일부를 개정 및 추가하여 개정된 R-HRA 방법을 소개하였다. 또한, 개정된 절차를 바탕으로 R-HRA 지원 소프트웨어를 개발하여 인적오류 분석 과정을 효율적/효과적으로 지원할 수 있도록 하였다. R-HRA의 주요 개정 사항은 분석 절차가 개선된 부분으로는 ‘시나리오 및 상황 설명 단계의 추가’, ‘직무분석 지침의 추가’, ‘수행영향인자 선정 단계의 조정’ 등이며, 분석 모듈이 수정된 부분은 ‘영향인자 개수의 조정과 분류’이다. R-HRA 방법에 대한 개정과 지원 소프트웨어의 개발은 철도사고 위험도평가에서 활용되는 인적오류 분석 및 평가를 용이하게 할 수 있도록 지원할 뿐만 아니라, 분석 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

한편, 본 논문에서 소개된 R-HRA 방법은 고속열차, 일반열차, 도시철도 등 다양한 철도 시스템에서 적용될 수 있으나, 현재로서는 기관사 직무의 인적오류 분석에 국한되어 개발되어 있다. 기관사 직무외의 보수요원 및 신호취급원 직무에 대한 오류분석 및 평가 체계의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김재환, 정원대, 장승철, 왕종배(2006), “철도 인간신뢰도분석 방법 선정을 위한 사례분석,” 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp. 532-538.
2. Rail Safety and Standard Board (RSSB) (2004), “Rail-specific HRA technique for driving tasks,” Final report.
3. W. Huw Gibson (2006), “User trial of the rail-specific HRA technique,” Final report.
4. Wickens, C. and Hollands, J. (2000), “Engineering psychology and human performance,” Prentice-Hall Inc.
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. 한국철도기술연구원(2007), 철도사고 위험도분석 및 평가체계 구축, 연구보고서.
7. Kirwan, B. and Ainsworth, L. (1992). “A guide to task analysis,” Taylor & Francis Ltd.

접수일(2008년 3월 23일), 수정일(2008년 7월 22일), 게재확정일(2008년 7월 24일)