<투고 원고- 2차 수정본>

A Study on the Performance of Causal Links between Error Causes: Application to Railroad Accident Cases

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to evaluate the effectiveness and efficiency of causal links between various error causes in human error analysis. **Background:** As finding root causes of human error in safety-critical systems is often a cognitively demanding and time-consuming task, it is particularly necessary to develop a method for improving both the quality and efficiency of the task. Although a few methods such as CREAM have suggested causal linking between error causes as a means to enhance the quality and efficiency of human error analysis, no published research to date has evaluated the performance of the causal links. **Method:** The performance of the CREAM links between error causes were evaluated with 80 railway accident investigation reports from the UK. From each report, errorneous actions of operators were derived, and for each error, candidate causes were found by following the predefined links. Two measures, coverage and selectivity, were used to evaluate the effectiveness and efficiency of the links, respectively. **Results:** On average, 96% of error causes actually included in the accident reports were found by following the causal links, and among the total of 121 possible error causes, the number of error causes to be examined further was reduced to one-tenth on average. As an additional result of this work, frequent error causes and frequently used links are provided. **Conclusion:** This result implies that the predefined causal links between error causes can significantly reduce the time and effort required to find the multiple levels of error causes and their causal relations without losing the quality of the results. **Application:** The CREAM links can be applied to human error analysis in any industry with minor modifications.

Keywords: Human error, Human error analysis, Causal factor, Performance shaping factor (PSF), CREAM

1. Introduction

원자력, 항공, 철도, 의료 분야와 같이 '안전'이 특히 중요시되는 산업에서 대형 사고의 주된 원인으로 여겨지는 인적오류(human error)의 원인을 제대로 분석하는 일은 인지적으로 복잡하고 시간과 인력이 많이 필요한 일이지만, 현업에서는 시간, 인력, 인간공학 분야 전문성 부족 등의 제약으로 인해 피상적 수준의 원인만 파악하는 경우가 많은 것이 현실이다. 따라서 인적오류 분석의 질과 효율성을 모두 개선할 수 있는 방법의 개발이 요구된다. 그 동안 많은 인적오류 분석방법(Human Factors Analysis and Classification System (Wiegmann and Shappell, 2003), Human Performance Enhancement System (INPO, 1990) 등)들이 개발되어 왔지만, 많으면 100개가 넘는 인적오류의 원인요소들을 리스트로 제공할 뿐, 그 중에서 적절한 원인요소를 찾고 해당 원인요소 간의 인과관계를 결정하는 일은 여전히 상당한 시간과 노력을 필요로 한다.

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method; Hollnagel, 1998), HEAR (Human Error Analysis and Reduction; Kim et al., 2010)와 같이 일부 인적오류 분석방법들은 인적오류 분석의 질 뿐만 아니라 효율성도 높일 수 있는 방안으로 오류의 원인요소 간 인과관계를 링크시켜 제공하고 있다. 이러한 링크는 인적오류의 원인분석을 피상적 수준에서 그치지 않고, 대부분의 경우 핵심 원인에 해당하는 조직적인 원인(organizational factors)까지 살펴보도록 함으로써 분석의 질을 높일 뿐 아니라, 수많은 원인요소 중에서 자세히 분석해야 할 요소의 범위를 줄여줌으로써 분석의 효율성도 높일 수 있다 (Kim et al, 2010).

이러한 원인요소 간 링크는 인적오류 분석에 매우 유용할 것으로 여겨지지만, 실제로 어느 정도 유용한지를 정량적으로 평가한 연구 결과는 찾아보기 힘들다. 이에 본 논문에서는 비교적 많이 알려져 있는 분석방법인 CREAM에 포함된 원인요소 간 링크의 효과와 효율성을 정량적으로 평가하였다.

2. Method

Figure 1은 CREAM에서 제공하는 인적오류의 원인분류체계 중 일부를 보여주고 있다. 분류에 따라 총 14개의 표가 제공되며, 각 표에 있는 항목들(총 123개)은 모두 인적오류 행위의 원인요소들이다. 여기서 "general antecedent (예. Figure 1의 "Fatigue")"와 "specific antecedent"는 좌측의 "general consequent (예. Figure 1의 "False observation")"의 원인이 될 수 있는 요소들을 나타내며, "general antecedent"에 있는 요소들은 다른 표에서 "general consequent"로 다시 나타나 그것의 원인(예. Figure 1의 "Irregular working hours")을 찾을 수 있다. CREAM에서는 이렇게 미리 설정되어 있는 원인요소 간 링크(consequent-antecedent links)를 따라가며 인적오류 행위의 다층적 원인들을 비교적 효율적으로 찾을 수 있도록 지원한다. 또한, 링크의 마지막은 조직적인 원인에 해당하는 경우가 많아 인적오류 분석이 피상적 수준에서 그치지 않도록 한다.

개발자인 Hollagel (1998)이 언급한 바와 같이, 특정 산업분야에 활용하려면 각 그룹의 요소들, 특히 조직(organization) 관련 원인요소들, 그리고 요소들 간 링크가 보완될 필요가 있다. 이에 CREAM의 원인분류체계를 특정 산업분야 사고 사례에 적용하기에 앞서 원인요소와 요소 간 링크를 일부 수정하여 (의미가 비슷해 분석자가 헷갈리기 쉬운 요소는 둘 중 한 개 삭제, 조직적인 요인 몇 개 추가, 세분화가 필요한 것 세분화 등) 총 121개의 원인요소가 평가에 사용되었다.

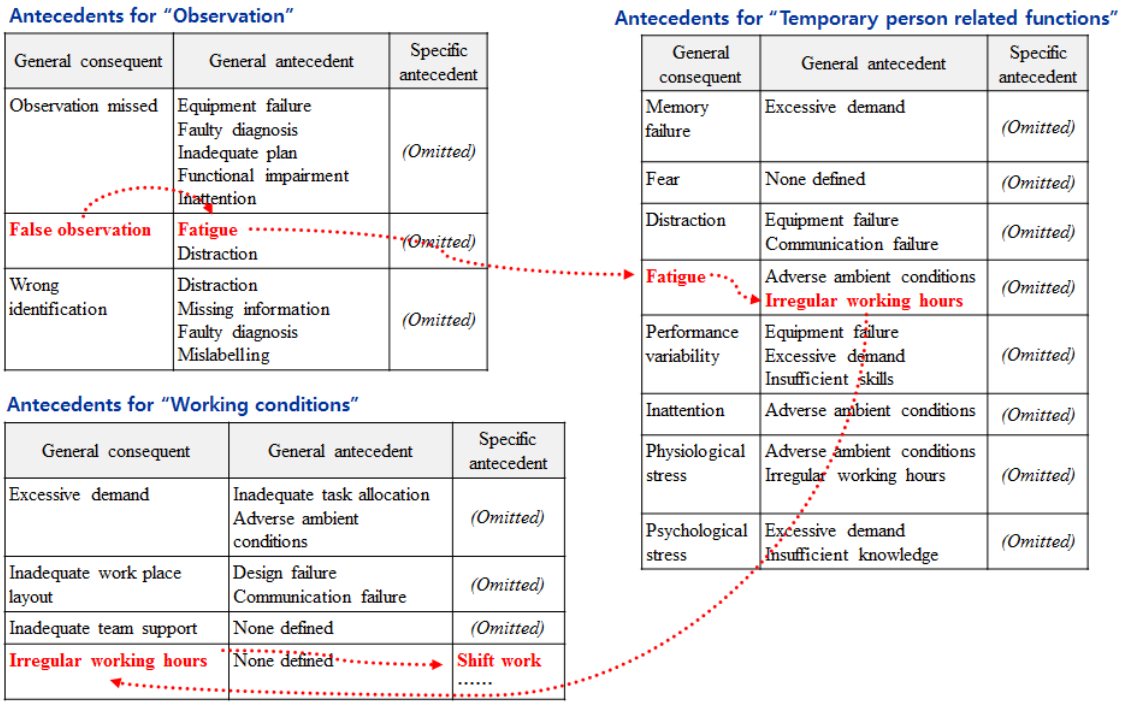

Figure 1. An example of CREAM links between error causes (Hollnagel, 1998)

CREAM의 원인요소 간 링크를 평가하기 위해 영국의 철도사고조사 전담기구인 RAIB (Rail Accident Investigation Branch)에서 2008년부터 2010년까지 3년간 발행한 철도사고조사 보고서 총 80개를 모두 분석하였다. 사고 사례로 RAIB의 보고서를 선택한 이유는 온라인에서 쉽게 얻을 수 있으면서도 타 보고서들에 비해 사고와 관련된 정보(관련 작업자들의 행위를 포함한 시간대별 사고발생 경위, 사고의 직접적/간접적 원인, 개선책 등)를 매우 상세하게 기록하고 있으며, 사고에 개입된 인적오류에 대해서는 인간공학 전문가를 활용해 깊이 있는 분석이 수행된 결과를 포함하고 있기 때문이다.

아무리 잘 기술된 보고서라도 인적오류의 원인과 관련된 정보를 완전하게 담고 있지는 못하겠지만, 현장(사고조사기관)의 조사자들을 대상으로 몇 년 동안 실제 조사 과정에서 CREAM을 사용해 분석하도록 하거나 연구자가 수년 간의 사고 사례와 관련된 모든 자료들을 다시 수집해 연구하는 것은 현실

적으로 매우 어려운 일이므로 본 논문에서는 불완전성을 가장 적게 가진 자료로서 RAIB 보고서를 활용하였다.

80개 보고서 중 3개는 특정 사건에 대한 조사보고서가 아닌 자주 발생하는 문제점(예. 건널목에서의 안전)에 관한 특별 보고서이므로 제외했고, 1개 보고서는 같은 종류이지만 서로 다른 2개의 사건을 포함하고 있어 총 78개의 사고사례가 평가에 사용되었다. 이 중 약 80% (62개)의 사고들은 열차 충돌, 탈선, 건널목 사고에 해당하는데, 이는 RAIB의 주된 조사 대상이 1명 이상 사망, 5명 이상 중상, 또는 철도 차량 및 인프라의 심각한 손상을 야기하는 중대 사고이기 때문이다. 총 78개의 사고 사례 중 10개는 현장 작업자(기관사, 신호원, 관제사, 선로작업자 등)의 오류 행위를 포함하지 않았고, 나머지 68개(87.2%)의 사고는 적어도 1개 이상의 인적오류 행위를 포함하여 총 97개의 인적오류 행위가 원인요소 간 링크를 평가하는데 사용되었다.

각 오류 행위에 대해 CREAM의 원인요소 간 링크를 따라가며 링크된 요소들을 후보 원인들로 삼았고, 후보 원인 중 해당 보고서에 실제로 포함되어 있는 요소들만 유효 원인(effective cause)으로 간주하였다. 또한, 보고서에 원인으로 기술되어 있지만 CREAM의 링크에 의해 찾아지지 않은 요소들도 조사하였다. RAIB 보고서에는 원인요소 간 인과관계가 따로 표시되어 있지는 않으나, 각 원인요소에 대한 상세 기술 내용을 통해 원인요소 간 인과관계를 충분히 파악할 수 있었다. RAIB 보고서로부터 유효 원인의 수와 원인 간 인과관계를 파악함에 있어서 분석자의 주관적 판단을 최대한 피하기 위해 보고서에 기술되지 않은 내용을 임의로 가정하지 않았으며, 특히 원인요소 간 인과관계의 판단이 애매한 경우에는 저자 간 논의를 거쳐 결정하였다.

CREAM 링크에 대한 평가 척도로는 두 가지 척도, 즉 포함도(coverage)와 선택도(selectivity)를 사용하였다. 여기서 "포함도(coverage)"는 원인요소 간 링크가 분석자로 하여금 인적오류의 원인을 얼마나 정확하게 찾을 수 있도록 하는지를 나타내며, 링크의 효과(effectiveness)를 평가하기 위한 척도이다. 아래 식 (1)과 같이 실제 보고서에 포함된 오류의 원인 중 링크에 의해 찾아진 원인의 비율(0~1)로 계산되며, 값이 1에 가까울수록 더 많은 원인들이 링크에 의해 찾아짐을 의미한다.

원인요소 간 링크가 많이 되어 있을수록 링크에 의해 찾아지는 후보 원인의 수가 증가하여 포함도 값이 평균적으로 높아질 것이다. 이 때문에 선택도(selectivity)가 또 다른 평가 척도로 사용되었다.

$$\text{포함도 (Coverage)} = \frac{\text{Number of causes covered by the causal links}}{\text{Number of causes included in the accident report}} \quad (1)$$

여기서 "선택도(selectivity)"는 원인요소 간 링크가 자세히 조사해야 할 원인요소의 범위를 얼마나 줄여주는지를 나타내며, 링크의 효율성(efficiency)을 평가하기 위한 척도이다. 아래 식 (2)와 같이 링크에 의해 찾아진 후보 원인의 수를 전체 원인요소의 수(121개)로 나눈 값(0~1)으로 계산되며, 값이 0에 가까울수록 링크의 효율성이 높다는 것을 의미한다.

$$\text{선택도 (Selectivity)} = \frac{\text{Number of candidate causes derived by the causal links}}{\text{121 (total number of error causes)}} \quad (2)$$

Table 1은 하나의 인적오류 행위에 대해 CREAM의 원인요소 간 링크의 유용성을 평가한 결과를 정리한 것이다.

Table 1. A worksheet for the evaluation of CREAM links between error causes

Report Title		Freight train collision at Leigh-on-Sea	
Date of Accident		April 26th, 2008	
Human Error		The train driver ***did not control the speed of the train*** so as to be able to stop short of the stationary train on the line ahead.	
Error Type		Delayed interpretation	
Error Causes	1st level	Fatigue	No/Inadequate procedure
	2nd level	Irregular working hours	Inadequate QC (procedure)
	3rd level	Shift work	N/A
Factors not covered by candidate causes		Inadequate team support	
# of candidate causes by the links (A)		12	
# of effective candidates (B)		5	
# of the actual causes in the report (C)		6	
Coverage (B/C)		0.833	
Selectivity (A/121)		0.099	

링크를 따라가며 찾아진 후보 원인의 수는 12개였고, 사고조사보고서에서 해당 인적오류의 원인으로 기술된 총 6개의 원인요소 중에 5개는 후보 원인 12개에 포함되어 있었으며, 나머지 1개('팀의 부적절한 지원')는 링크에 의해 찾아지지 않았다. 총 97개의 인적오류에 대해 이와 같은 분석을 실시하였다.

3. Results

3.1 Coverage and selectivity

총 97개의 인적오류에 대해 Table 1과 같이 분석을 실시한 결과, 각 오류에 대해 평균적으로 약 13개(12.98)의 후보 원인이 CREAM의 링크에 의해 찾아졌다. 이 중에서 사고조사보고서에 실제로 포함된 유효 원인은 평균 3.38개에 해당했다. 이는 분석 대상인 RAIB 보고서가 하나의 인적오류 행위 당 기술하고 있는 평균 원인요소의 수인 3.56개보다 조금 작은 값이다.

포함도(coverage) 값의 평균은 0.961로 CREAM 링크를 따라가며 인적오류의 원인을 분석했을 때 실제 사고조사보고서에 기술된 원인요소들을 대부분 찾을 수 있었다는 것을 의미한다. 총 97개의 인적오류 중에서 82개(84.5%)는 포함도 값이 1이었지만, 나머지 15개(15.5%)의 인적오류에서는 포함도 값이 1보다 작았다. 보고서에 기술된 원인요소 중 일부(예. '위험도 평가 부족', '작업자 간 연계(liaison) 불충분', '팀의 부적절한 지원' 등)는 CREAM의 링크에 의해 찾아지지 않았다.

선택도(selectivity) 값의 평균은 0.107로 CREAM 링크를 따라가며 인적오류의 원인을 분석했을 때 자세히 살펴봐야 할 원인요소의 수를 평균적으로 10분의 1 수준으로 줄여주었다는 것을 의미한다.

포함도와 선택도를 종합해서 보면, 이 결과는 CREAM의 원인요소 간 링크에 의한 인적오류 원인분석 방법이 분석 결과의 품질을 거의 잃지 않으면서도 매우 효율적인 방법이라는 것을 암시한다.

3.2 Frequent causes and links

총 121개의 원인요소 중 거의 절반에 해당하는 59개가 분석대상 인적오류(총 97개)의 원인으로 사용되었다. 가장 많이 나타난 원인요소는 "절차서의 부재 또는 부적절 (No/inadequate procedure)"로 97개 인적오류 중 50개의 오류(51.5%)에서 원인요소로 나타났다. 그 다음으로는 "유지보수 실패 (Maintenance failure)"와 "절차서 품질관리 부적절 (Inadequate quality control of procedure)"이 각각 33개 (34.0%)와 30개의 오류(30.9%)에서 원인요소로 나타났다. 분석 결과 가장 많이 나타난 상위 10개의 원인요소는 다음과 같다.

- 절차서의 부재 또는 부적절 (No/inadequate procedure): 51.5%
- 유지보수 실패 (Maintenance failure): 34.0%
- 절차서 품질관리 부적절 (Inadequate quality control of procedure): 30.9%
- 부적절한 교육훈련 (Inadequate training): 24.7%
- 불충분한 지식 (Insufficient knowledge): 21.6%
- 경영상의 문제 (Management problem): 15.5%
- 장비/인프라 실패 (Equipment/infrastructure failure): 14.4%
- 부적절한 관리/감독 (Inadequate supervision/ audit): 14.4%
- 설계 문제 (Design failure): 12.4%
- 불리한 환경 조건 (Adverse ambient conditions): 12.4%

여기서 절차서, 교육훈련, 관리감독, 설계 등의 조직적인 요인들이 인적오류의 주요한 원인들로 나타난 것은 철도 사고에 대한 인적 요인의 영향에 대한 기존 연구들의 결과와 유사하다(예. Edkins and Pollock, 1996; Baysari, et al., 2008).

각 원인요소의 빈도 뿐 아니라 원인요소 간 링크의 빈도 또한 조사하였다. 총 167개의 링크 중 70개(41.9%)의 링크가 적어도 한 번씩 사용되었고, 이 70개 링크의 평균 빈도는 4.63회였다. 가장 많이 사용된 원인요소 간 링크는 "절차서의 부재 또는 부적절 → 절차서 품질관리 부적절"로 97개 인적오류 중 30개의 오류(30.9%)에서 사용되었고, 그 다음으로는 "유지보수 실패 → 절차서의 부재 또는 부적절"이 24개의 오류(24.7%)에서 사용되었다. 또한, 이 두 개의 링크 간에는 연결고리가 존재하는데, "유지보수 실패 → 절차서의 부재 또는 부적절 → 절차서 품질관리 부적절"로 이어지는 3개 원인요소 간 링크는 15개의 오류(15.5%)에서 사용되었다. 분석 결과 가장 많이 사용된 상위 7개의 링크는 다음과 같다.

- 절차서의 부재 또는 부적절 (No/inadequate procedure) → 절차서 품질관리 부적절 (Inadequate QC of procedure): 30.9%
- 유지보수 실패 (Maintenance failure) → 절차서의 부재 또는 부적절 (No/inadequate procedure): 24.7%
- 불충분한 지식 (Insufficient knowledge) → 부적절한 교육훈련 (Inadequate training): 15.5%
- 부적절한 계획 (Inadequate plan) → 불충분한 지식 (Insufficient knowledge): 14.4%
- 유지보수 실패 (Maintenance failure) → 부적절한 관리/감독 (Inadequate supervision/ audit): 12.4%
- 설계 문제 (Design failure) → 설계 품질관리 부적절 (Inadequate quality control of design): 11.3%
- 장비/인프라 실패 (Equipment/infrastructure failure) → 유지보수 실패 (Maintenance failure): 11.3%

4. Conclusion

본 논문에서는 CREAM에서 제공하는 100개 이상의 원인요소 간 인과관계 링크의 효과와 효율성을 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 영국의 철도사고 조사보고서 80개에 포함된 총 97개의 인적오류 행위에 대해 CREAM을 사용한 원인 분석을 실시하였다. 분석 결과, CREAM의 링크를 따라가며 인적오류의 원인을 분석했을 때, 사고조사 보고서에 실제로 기술된 인적오류의 원인 중 평균 96%의 원인이 찾아졌고, 총 121개의 가능한 원인요소 중 자세히 살펴봐야 할 원인요소의 수는 평균 10분의 1 수준으로 줄어들었다. 이러한 결과는 CREAM의 원인요소 간 링크에 의한 인적오류 원인분석이 분석 결과의 품질을 거의 잃지 않으면서도 여러 계층의 원인과 그들의 인과관계를 파악하는데 드는 시간과 노력을 줄여주는 매우 효율적인 방법이라는 것을 나타낸다.

다만, 본 평가 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 RAIB 보고서 등 사고 데이터를 적용함에 있어 저자가 아닌 제3의 그리고 복수의 전문가가 참여할 필요가 있다.

CREAM은 특정 산업분야에서 사용하기 위해 개발된 방법이 아니기 때문에 어느 분야에서든 원인요소 및 요소 간 링크를 일부 수정하여 사용할 수 있다. 다만, 현업에서의 효과적인 활용을 위해서는 포함도(coverage) 값이 본 논문의 결과와 같이 0.96에 그치지 않고 가급적 1을 보장할 수 있어야 하므로 원인요소 및 요소 사이의 링크에 대한 지속적인 업데이트가 반드시 병행되어야 한다. 분석 결과들이 어느 정도 축적되면, 자주 나타나는 원인요소 간 링크를 통해 인적오류의 원인에 대한 패턴을 파악하는 것도 가능해질 것이다.

또한, 추가적인 분석 결과로서 철도 사고에 개입된 인적오류의 주요한 원인과 자주 사용된 원인요소 간 링크가 어떤 것들인지도 제시하였다. 이 결과는 철도 분야 뿐 아니라 타 산업에서도 인적오류를 줄이기 위해서는 특히 어떤 부분에 관심을 기울여야 하는지에 대한 정보로 사용될 수 있을 것이다.

References

Baysari, M.T., McIntosh, A.S. and Wilson, J.R., Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia, *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1750-1757, 2008.

Edkins, G.D. and Pollock, C.M., Pro-active safety management: application and evaluation within a rail context, *Safety Science*, 24(2), 83–93, 1996.

Hollnagel, E., *Cognitive Reliability and Error Analysis Method*, Oxford: Elsevier, 1998.

INPO. Human performance enhancement system. INPO 90-005. Atlanta: Institute of Nuclear Power Operation, 1990.

Kim, D.S., Baek, D.H. and Yoon, W.C., Development and evaluation of a computer-aided system for analyzing human error in railway operations, *Reliability Engineering and System Safety*, 95(2), 87–98, 2010.

Wiegmann, D.A. and Shappell, S.A., *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Company, 2003.