Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 30, No. 1 pp.41-53, February 2011 DOI:10.5143/JESK.2011.30.1.41

복잡한 시스템에서의 인적오류 및 사고모형의 인지시스템공학적 연구의 동향

함 동 한

영국 미들섹스대학교

Research Trends of Cognitive Systems Engineering Approaches to Human Error and Accident Modelling in Complex Systems

Dong-Han Ham

School of Engineering and Information Sciences, Middlesex University, The Burroughs, London, NW4 4BT, UK

ABSTRACT

Objective: The purpose of this paper is to introduce new research trends of human error and accident modeling and to suggest future promising research directions in those areas. **Background:** Various methods and techniques have been developed to understand the nature of human errors, to classify them, to analyze their causes, to prevent their negative effects, and to use their concepts during design process. However, it has been reported that they are impractical and ineffective for modern complex systems, and new research approaches are needed to secure the safety of those systems. **Method:** Six different perspectives to study human error and system safety are explained, and then seven recent research trends are introduced in relation to the six perspectives. The implications of the new research trends and viable research directions based on them are discussed from a cognitive systems engineering point of view. **Results:** Traditional methods for analyzing human errors and identifying causes of accidents have critical limitations in complex systems, and recent research trends seem to provide some insights and clues for overcoming them. **Conclusion:** Recent research trends of human error and accident modeling emphasize different concepts and viewpoints, which include systems thinking, sociotechnical perspective, ecological modelling, system resilience, and safety culture. **Application:** The research topics explained in this paper will help researchers to establish future research programmes.

Keywords: Human Error, Accident Model, Cognitive Systems Engineering, Resilience Engineering, Systems Thinking, Functional Resonance Analysis Method

1. Introduction

널리 알려져 있는 바와 같이 대형시스템에서의 안전사고의 대부분이 인적오류(human error)와 밀접한 관련이 있다(Reason, 2000). 이러한 이유로 인적오류 및 사고모형(accident model)은 시스템의 안전성 확보를 위한 가장 핵심적인 연구분야로 인식되어 왔다(Qureshi, 2008). 또한

Corresponding Author: Dong-Han Ham. School of Engineering and Information Sciences, Middlesex University, The Burroughs, London, NW4 4BT, UK.
Mobile: +44-20-0793-1994-297, E-mail: d.ham@mdx.ac.uk
Copyright@2011 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

인적오류 및 사고모형에 대한 연구내용은 관련분야 연구(예: 인간 신뢰도 분석 및 시스템 안전 검증)의 기초지식으로 유용하게 활용되고 있다(Hollnagel, 1998).

현재까지 대부분의 인적오류 및 사고모형 연구의 궁극적인 목적은 안전사고에 대한 인적오류의 연관성을 파악하고 그 사고 및 오류의 특성, 경로 및 원인을 분석하는 것이었다(Reason, 1990; Spurgin, 2010). 이를 위해 다양한 관점에서 다양한 방법으로 연구가 진행되어 왔다. Rasmussen et al.(1994)은 이 연구들을 인적오류를 바라보는 다음의 6개의 관점에서 분류하고 있다.

- 비정상적 사고의 설명: 일반상식의 관점
- 인적오류 행위의 이해: 과학자적 관점
- 인적 수행도의 평가: 인간 신뢰도 분석가적 관점
- 인적 수행도의 향상: 인적오류 처방자의 관점
- 안전사고의 책임자 규명: 검사의 관점
- 시스템 설계안의 개선: 설계자의 관점

일반상식 관점(common sense view)에서의 인적오류 연구는 비정상적인 사고 발생의 원인을 일반적 맥락 하에서 탐색하는 것이다. 분석자에 친숙한 행위나 사건이 탐색과정에서 발생할 경우 원인규명이 끝나는데 통상 대부분의 경우 특정인이 그 원인으로 지정된다.

과학자적 관점(scientist's view)은 가장 많이 연구되어온 분야로 인적오류의 형태 및 분류체계, 인적오류의 발생과정과 영향분석 및 인적오류의 영향인자 분석이 주를 이루고 있다. 인지적 관점에서의 오류현상을 과학적으로 이해하기 위해 인지심리학적인 이론이 많이 이용되어 왔다. 특히 인적오류의 분류체계는 다른 인적오류 연구에 많은 영향을 주고 있다. 집중력 부족 및 기억기능의 오류로 인한 행위적 실수(slip and mistake)와 판단 착오(mistake)의 구분, 인지적 정보처리 단계(예: 정보수집, 상황판단, 의사결정, 계획수립, 행위수행)별 오류형태, Rasmussen의 3단계 인지적 제어 수준별 오류 및 특성 연구결과 등은 인적오류 연구의 가장 기초적이며 중요한 이론적 근거가 되고 있다(Reason, 1990; Hollnagel, 1998).

인간 신뢰도 분석자의 관점(reliability analyst's view)에서 인적오류는 정량화의 대상으로 인식된다. 인간 신뢰도를 예측하기 위해 예측 가능한 직무상황을 설정하고 해당 상황에서의 인적오류 발생 가능성이 예측된다. 이를 위해 인적오류 발생에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요소들을 체계적으로 고려하게 된다(Spurgin, 2010).

처방자의 관점(therapist's view)에서의 주된 관심은 파악된 오류에 기반해서 현재의 작업시스템의 운영과정에서의 가능한 개선점을 찾는데 있다. 따라서 분석자의 배경과 관심사항에 의존해서 다양한 오류의 근본적인 원인과 해결방안이 나올 수 있다. 예로 작업조직에 관심있는 분석자는 작업자들간의 역할관계에 초점을 둘 가능성이 높고 훈련센터 관계자는 오류의 원인을 작업자의 훈련내용과 연관짓는데 초점을 둘 가능성이 상대적으로 높다.

검사의 관점(attorney's view)에서는 안전사고의 궁극적 원인이 되는 사람이 존재함을 가정하고 있다. 사고의 원인을 탐색하고 추론해가는 과정이 해당 사고를 책임질 수 있는 특정인을 파악하는데 집중된다. 그러나 이러한 원인규명은 매우 어렵고 여러 문제점을 내포하고 있다.

시스템 설계자의 관점(designer's view)에서는 파악된 인적오류에 기반해서 현재의 작업시스템을 어떻게 잠재적으로 개선할 수 있는지가 핵심문제가 된다. 안전사고와 인적오류의 현상 및 이를 설명할 수 있는 원인의 연결고리에서 어떤 부분에 시스템개선의 주안점을 두는 가에 따라서 다양한 시스템개선안이 나올 수 있다. 이 관점에서 중요한 주제는 개선하려는 시스템의 범위를 어떻게 설정하는 가에 있다. 개선하려는 시스템이 단순히 운영 중인 기술적 시스템 영역인지 그 영역을 포함하는 보다 큰 작업시스템인지에 따라서 시스템개선의 주안점은 달라질 수 있다.

현재까지 이루어진 인적오류 및 사고모형에 관한 연구들이 인적오류 감소 및 안전사고의 합리적 해석에 많은 기여를 한 것은 사실이다(Qureshi, 2008). 하지만 복잡성과 불확실성이 지배하는 대형시스템에서 그 연구결과들은 여러 한계점을 드러내고 있다(Leveson, 1995; Hollnagel, 2004; Rasmussen, 1997). 대표적인 한계점으로 선형적 사고-원인 관계 설정으로 오류 및 사고해석의 단순화, 오류 및 사고해석에서의 다양한 맥락정보의 불충분한 고려, 규범적(normative) 인적행위 모형에 기반한 오류 분류체계의 비현실성, 오류분석을 위해 요구되는 전문지식의 깊이, 비구조적 직무상황에서의 오류 예측의 어려움 등을 들 수 있다.

이러한 한계점을 극복하고 시스템의 안전성을 극대화하기 위해 최근 십여년간 새로운 개념 및 방법들이 제안되거나 이전에 비해 더 강조되고 있다. 주로 인지시스템공학 분야에서 이 새로운 연구들을 주도하고 있다. 이에 본 논문에서는 인적오류 및 사고모형과 관련해 주목할만한 최근의 연구동향을 소개하고 이를 기반으로 향후 이 분야 연구를 전망하고자 한다. 이 논문에서 소개될 7개의 최근 연구동향과 앞에서 소개한 6개의 오류를 바라보는 관점과의 연관성이 Table 1에 정리되어 있다. 엄밀한 의미에서 각 연구동향은 모든 관점과 연관성이 있다. 따라서 Table 1은 각 연구동향이 어떤 한계점 극복에 더 밀접한 관련성이 있는가를 보여주는 것으로 해석하는 것이 바람직하다.

2장에서는 7개의 새로운 연구내용을 앞에서 설명한 인적오류 연구의 6가지 관점과 연관을 지어 설명한다. 3장에서는

Table 1. Limitations of traditional views on human error and new research trends

Different views on human error	Limitations	(related) New research trends
The common sense view	- Linear cause-effect relation - Focus on a human worker's faults	Systems thinking and Hierarchical accident model(2.1)
The scientist's view	- Difficulty characterizing work situations where an error happens - Less realistic error taxonomy - Linear cause-effect relation - Error taxonomy depending on a particular psychological theory	System resilience and Resilience engineering(2.2) ETTO principle(2.3) Common issues across domains(2.7)
The reliability analyst's view	- Assumption of normative task procedure that is different from actual procedure - Difficulty predicting situations and possible error types in less structured tasks	System resilience and Resilience engineering(2.2) Functional resonance analysis method(2.4)
The therapist's view	- Linear cause-effect relation - Focus on a human worker's faults - Identification of event chains and therapy influenced by the background of analysts	Systems thinking and Hierarchical accident model(2.1) Common issues across domains(2.7)
The attorney's view	- Linear cause-effect relation - Focus on a human worker's faults - Inadequate consideration of environmental and management factors	Systems thinking and Hierarchical accident model(2.1) Safety culture(2.5)
The designer's view	- Inadequate consideration of contextual information - Linear cause-effect relation - Ineffective design solutions based on event chains (Inadequate consideration of functional model of work system)	Systems thinking and Hierarchical accident model(2.1) Safety culture(2.5) Ecological information systems(2.6)

7개의 새로운 연구내용이 갖는 의미를 인지시스템공학의 관점에서 논의한다.

2. Recent Research Trends

2.1 Systems thinking and Hierarchical accident model

인적오류 및 사고모형 연구에서 시스템적 사고(systems thinking)의 적용이 새로운 흐름은 아니다. 다만 기존 연구들의 한계점을 극복하기 위해 시스템적 사고의 철저한 활용이 최근에 더 많이 강조되고 있다고 언급하는 것이 더 정확할 것이다. 이 분야를 선도하고 있는 연구자로는 미국 MIT 대학의 Leveson 교수로 그녀는 최근에 시스템 이론에 입각해서 새로운 사고모형인 STAMP(Systems-Theoretic Accident Model and Process)를 개발하였다(Leveson, 2004, 2010). 또한 STAMP를 여러 안전사고에 적용해서 이의 적용 가능성을 보여주었다(Leveson, 2010).

Leveson (2010, 2011)은 최근의 연구에서 시스템적 사고에 입각해서 기존의 시스템 안전 연구가 갖고 있는 약점을 지적하고 새로운 연구에서 가정조건으로 이용될 사항들을 잘 정리하였다. Leveson이 지적한 약점은 1절에서 언급한 내용과 일맥상통하는 부분이 많다. 특히 시스템 안전을 시스템 외부 및 내부 요소간의 비정형적 상호작용의 결과로 나타나게 될 창발현상(emergent property)으로 특징짓고 있다. 또한 안전사고는 일련의 사건의 연결고리가 아닌 시스템 관점에서의 통제 및 소통의 부적절 혹은 불충분의 결과로 이해할 필요가 있음이 지적되었다. 이러한 이유로 STAMP는 안전을 통제문제로 규정하고 안전관련 제약조건의 적절한 계층적 구조화 및 통제를 통해서 안전성이 향상될 수 있음을 강조한다(Leveson, 2011).

STAMP는 시스템 안전문제를 모형화하고 시스템 설계에 안전문제를 적극적으로 연결하기 위해 사회기술적 시스템(socio-technical systems)의 계층적 개념을 안전관련 제약조건 구조화에 활용하고 있다(Figure 1). 그런데 이러한 계층적 구조는 Rasmussen(1997)이 위험관리(risk management)를 위해 활용한 사회기술적 시스템 모형에 기반하고 있다. Rasmussen의 계층적 모형 또한 Vicente를 비롯한 여러 연구자에 의해 그 유용성이 입증되었다(Cassano-Piche et al., 2009; Vicente et al., 2002; Woo & Vicente, 2003). STAMP는 Rasmussen의 계층적 모형에서 각 수준간의 통제시스템을 보다 강조한 모형이라 할 수 있다. 각

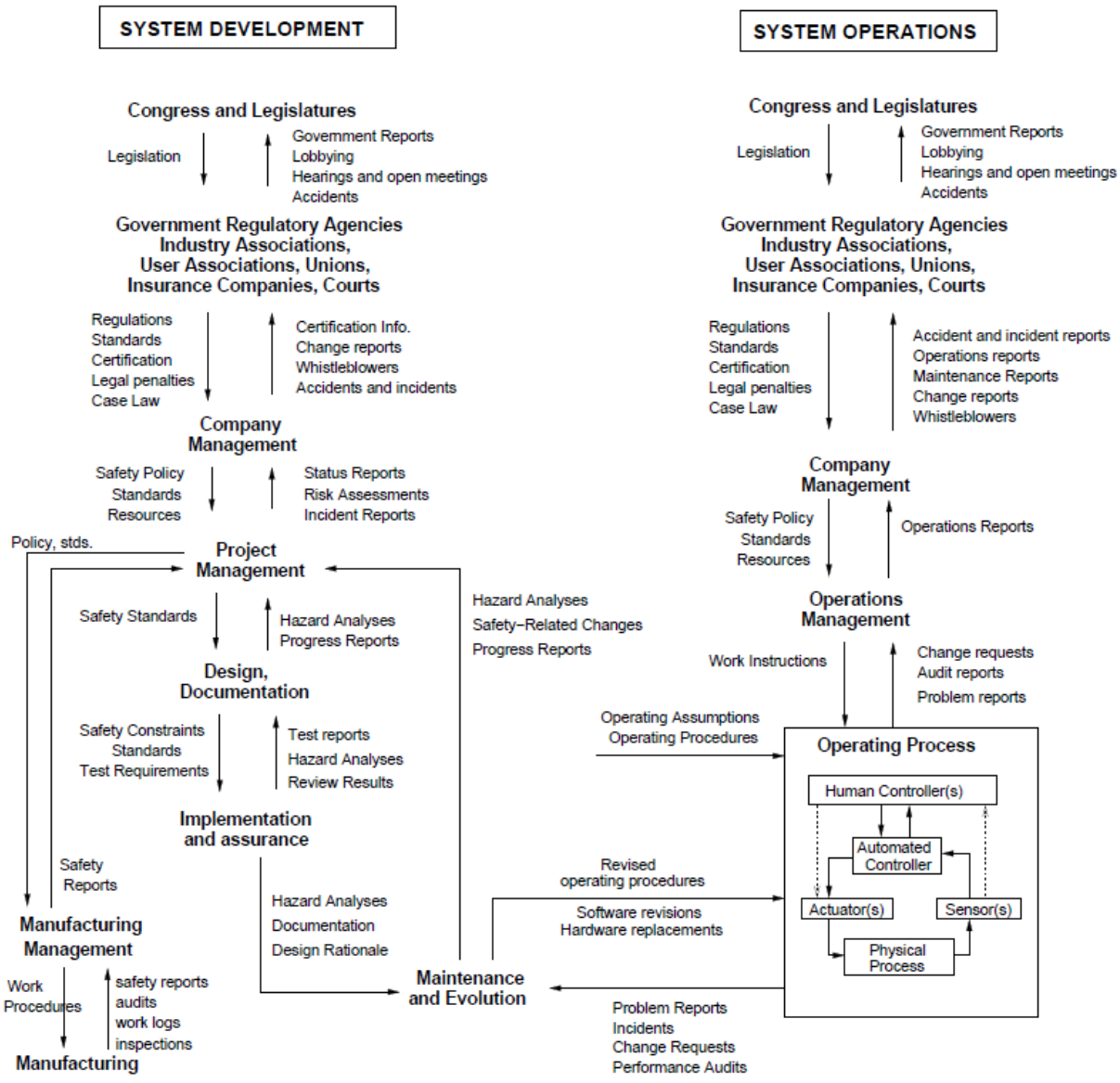

Figure 1. Hierarchical model of socio-technical safety control(reprinted from Leveson(2010) by her personal permission)

수준은 그 하위 수준에게 안전관련 제약조건을 강제적으로 부과하고 그 상위 수준에게 복잡시스템에서의 적응적 통제(adaptive control)의 행위를 보여준다는 것이 STAMP의 중요한 특징이다.

기존의 사고모형 대부분이 연결고리를 갖고 있는 일련의 사고들을 강조하는 반면에 STAMP는 시스템 설계 및 운용에서의 제약조건을 강조한다. 그래서 이러한 제약조건의 적절한 통제 및 흐름이 깨졌을 때 안전사고는 발생한다는 것이 STAMP의 또 다른 중요한 개념이다.

2010년에 발생한 대형사고 중에서 환경적으로나 경제적으로 가장 많은 관심의 대상이 된 것이 멕시코만의 기름유출 사고다. 본 논문을 작성하는 동안에 이 사건에 대한 사고분석 결과가 최근에 BBC를 통해 알려졌다(BBC, 2011). 사후 사건분석 보고서가 아직 대중에 공개되지는 않았지만 BBC기사에 의하면 이번의 멕시코만 사고는 STAMP의 관점에서 볼 때 시스템 설계 및 운용과정에서 계층적 수준간의 통제시스템이 부적절함에 기인했음을 알 수 있다. 비용을 절감하고 시간을 단축하기 위한 몇 가지 중요한 의사결정이 이루어졌는데 이 과정에서 직접적인 1차 책임이 있는 BP외에 Transocean이나 Halliburton을 비롯한 관련회사 및 규제기관 등의 분명한 책임도 있었다. 이를 비롯한 일련의 사실로부터 사고분석 위원회는 이번 사고는 시스템적이라는

결론을 내렸다("…the presidential commission said that the failures were 'systemic' and likely to recur.") (BBC, 2011).

2.2 System resilience and resilience engineering

시스템 안전관리와 관련해 최근에 새로운 패러다임으로 등장한 분야가 시스템 회복력(resilience) 및 회복성공학(resilience engineering)이다(Hollnagel et al., 2006; Weick and Sutcliffe, 2007). 회복성공학의 중요한 특징은 어떻게 시스템 및 인간이 실패없이 성공적으로 목적을 달성하는가와 어떻게 시스템 및 인간이 시스템의 안정적인 상태를 유지하기 위해 그 자신을 환경적 변화에 적응시키는가에 초점을 둔다는 것이다(Costella et al., 2009). 회복성공학에서 시스템의 성공은 실패 및 손실이 발생하기 전에 위험을 미리 예측하고 방지해서 시스템이 위험상태로 가지 않도록 지속적으로 시스템을 통제할 때 달성 가능한 개념이다(Jackson, 2010). 또한 회복성공학은 설사 실패 및 손실이 발생하더라도 재빠르고 신속하게 시스템이 원래의 안정적 상태로 회복될 수 있어야 함을 강조한다. 따라서 시스템의 회복력은 시스템의 실패 및 손실을 피하고 설사 사건이 발생한 경우 효율적으로 반응하는 능력으로 정의된다.

인적오류 및 시스템 안전사고에 대해 회복성공학이 접근하는 관점에서 중요한 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다(Costella et al., 2009; Hollnagel et al., 2006; Jackson, 2010). 첫째로 개인 및 조직의 직무수행에서의 변동성은 불가피하다는 것이다. 복잡한 시스템에서는 모든 상태를 미리 예측할 수 없기에 개인 및 조직이 내부 및 외부의 상황적 변화에 적응력 있게 순간적으로 대응을 해야 한다. 이 경우 높은 복잡도 및 시간적 제약으로 인해 적응전략이 완벽하지 않을 수 있다. 이러한 이유로 실제적인 시스템 운영상황에서 조직 및 개인의 동일한 행위가 성공할 가능성도 있고 실패할 가능성도 있다. 즉 수행도의 변동성은 불가피하다는 점을 인정해야 한다. 둘째로 많은 안전사고가 시스템의 기술적 요소의 고장이나 정상적 기능의 실패로 설명될 수도 있지만 많은 경우 그렇지 않다는 점이다. 많은 안전사고가 수행도의 변동성으로 인해 시스템 구성요소간의 상호작용이 전혀 예측하지 못하는 방향으로 이루어질 경우 발생한다는 것이다. 그래서 회복성공학에서는 시스템의 상태 변화에 대한 적응적 행위의 실패를 사고의 원인이 되는 사건으로 간주한다. 셋째로 효과적인 안전관리는 사고의 사후분석이나 사전의 확률론적 사고예측으로는 달성될 수 없고 대신에 보다 적극적이고 전향적인(Proactive) 방법에 의해 달성된다는 점이다. 전향적인 안전관리를 위해서는 시스템이 상당히 강건하고 유연하도록 운영이 되어야 하는데 이를 위해 시스템의 신뢰성 및 타당성 높은 모형이 필요하다. 이 모형을 기반으로 시스템의 상태 변화를 감지하고 필요한 조치를 취함으로써 이론적으로는 전향적인 안전관리가 가능하게 된다.

Hollnagel(2004)은 시스템이 높은 회복력을 갖기 위해서 네 가지의 품질적 속성 내지는 능력을 가져야 함을 지적한다. 첫째로 시스템의 안전을 위협하는 규칙적인 혹은 불규칙적인 위험에 대해 효과적으로 반응할 수 있어야 한다(ability to respond). 둘째로 시스템 자신 및 주변 환경에서 발생하는 상황에 대해 모니터링하고 단기적인 미래 예측을 할 수 있어야 한다(ability to monitor). 셋째로 장기적인 관점에서 시스템 자신 및 주변 환경의 정보를 종합해서 잠재적인 미래 상태를 예측할 수 있어야 한다(ability to anticipate). 넷째로 사고(accident), 준사고(incident), 근접사고(near-miss) 등에 대한 단순한 자료가 아닌 이 자료들에 기반한 경험을 축적하고 이 경험으로부터 학습할 수 있는 능력을 지녀야 한다(ability to learn). 이러한 네 가지 능력은 시스템의 회복력이 무엇인가를 보다 구체적으로 설명해주면서 특정 시스템의 회복력 정도를 판단해볼 수 있는 기준을 제공해준다.

회복성공학의 개념은 기존의 인적오류 및 사고모형이 갖는 한계점을 극복하기 위한 모형 및 방법론이 갖추어야 할 필요조건을 잘 제시해준다고 볼 수 있다. 특히 회복성공학에서 핵심되는 개념이 직무수행의 성공과 실패의 근원이 동일하다는 점이다. 이는 앞에서 설명했듯이 적응적 행위 수행도의 변동성에 기인한다. 이 변동성을 체계적으로 이해하고 이것에 기반해 인적오류 및 사고를 모형화 하려고 Hollnagel이 최근에 연구한 두 가지가 ETTO principle과 Functional Resonance Analysis Method(FRAM)이다. ETTO principle과 FRAM을 회복성공학의 범주 안에서 같이 설명해도 무방하나 두 가지가 향후 독자적으로 많이 발전할 가능성이 높아 여기서는 별도로 구분해 소개한다(회복성공학의 개념이 아직은 다분히 추상적이어서 보다 구체적인 프로세스 및 방법이 필요한데 ETTO principle 및 FRAM이 이런 노력의 일환이라고 해석해도 무방할 것이다).

2.3 ETTO principle

ETTO는 Efficiency-Thoroughness Trade-Off의 약자로 어떤 경우에는 성공적이었던 행위가 왜 어떤 경우에는 실패하게 되는가를 이해하고 서술하는데 유용한 모형이다(Hollnagel, 2009). 인적오류 및 사고모형의 전통적인 연구는 실패와 성공의 근원이 다르고 이를 위해 실패의 원인이 무엇인지를 분석했고 이를 통해 인적오류 형태도 분류하였고 인적오류 발생 메커니즘도 모형화하였다. 그런데 ETTO principle에서는 기존의 이러한 생각이 잘못되었고 위험 및

실패요인을 제거하는 방법으로는 시스템 안전이 확보될 수 없음을 주장한다. ETTO principle은 기존의 생각과는 다르게 실패와 성공의 근원은 동일하다는 전제를 하고 있다. 복잡하고 불확실한 상황에 대응하기 위해 개인 및 조직은 효율성(efficiency)과 완전성(thoroughness) 사이에서 절충점을 찾는 적응적 전략을 보이는데 이 행위의 결과가 어떤 경우에는 성공이 되지만 어떤 경우에는 실패가 된다는 것이다. 많은 경우 성공적이었던 하나의 적응전략이 어떤 경우에 전혀 예측하지 못한 방향으로 진행되어 올바르지 못한 결과를 초래한다는 것이다.

효율성은 직무목적을 달성하기 위해 사용되는 자원의 양을 최소화하는 것으로 정의되고 완전성은 직무목적의 성공적 달성을 위한 모든 필요조건을 충족하는 것으로 정의된다. Hollnagel(2009)은 효율성과 완전성이 동시에 극대화될 수는 없다고 한다. 그래서 절충점을 찾아 직무를 수행하는 전략적 행위를 보이는데 두 가지 경우에 실패하게 된다. 완전성이 너무 강조되어 직무수행이 너무 늦어지는 경우와 효율성이 너무 강조되어 직무수행이 부적절한 결과를 낳는 경우다.

수행의 변동성은 동적이고 불확실한 시스템 변화에 즉흥적으로 랜덤하게 대응하는 변동성으로 해석되어서는 안된다. ETTO principle은 효율성과 완전성의 균형을 잘 유지하기 위해 개인 및 조직이 전향적으로 사용하는 객관적이면서 정련된 전략의 집합체로 수행의 변동성을 특징 짓고 있다. Hollnagel(2009)은 그의 최근의 책에서 이러한 전략들을 잘 정리하고 있으며 기존의 안전사고의 예를 들어 사고원인을 ETTO 관점에서 설명하고 있다. 또한 수행의 변동성은 개인 수준에서 뿐만 아니라 조직적인 수준에서도 발생한다. 조직의 수준에서도 효율성과 완전성 사이의 절충점을 찾는 전략을 갖게 된다. Xia et al.(2010)은 병원의 중환자실의 침대 및 인력관리를 위해 병원조직이 어떠한 전략을 취하는가를 연구하였는데 그 이론적 토대로 ETTO principle을 사용하였고 그 유용성을 확인하였다.

ETTO principle은 인적오류의 근원에 대한 새로운 시각을 제공하고 개인 및 조직의 직무수행 전략을 성공적으로 만드는 요소를 이해하는 데 매우 유용한 서술적 모형이다. 그러나 ETTO principle은 단순하게 연속된 사건의 결과가 아니고 창발현상으로 나타나는 시스템 사고를 모형화하는 목적에는 실제적인 수단을 제공하지 않는다. 따라서 ETTO principle을 기반으로 시스템 안전사고가 어떻게 발생하는가를 이해하고 예측하는데 유용한 모형내지는 방법을 만들 필요가 있다. 이러한 연구노력의 하나가 뒤이어 설명할 FRAM이다.

2.4 Functional resonance analysis method(FRAM)

FRAM은 인적오류 및 사고가 발생하는 창발적 과정을 시스템 기능들의 비선형적인 상호작용을 모형화하여 이해하고 예측하는데 도움을 주는 방법이다(Hollnagel, 2004; Woltjer and Hollnagel, 2008). FRAM은 인적오류 및 사고를 바라보는 관점에서 회복성공학 및 ETTO principle과 동일한 전제를 하고 있다. 즉 수행도의 변동성은 필연적이며 성공과 실패는 동일 프로세스 및 전략적 행위로부터 나온다는 개념이 FRAM의 기본 철학이다. FRAM은 Rasmussen의 추상화 계층(Abstraction Hierarchy), Lind의 다단계 흐름모형(Multi-level Flow Model), Hollnagel의 목적-수단 직무분석(Goal-Means Task Analysis)과 같은 기능적 모형의 한 예라할 수 있다(Woltjer et al., 2009).

FRAM에서 기능적 공진(functional reasonance)은 바람직하지 못한 사건(event)을 암시하되 감지할 수 없는 여러 신호의 약한 변동성들이 의도하지 않은 상호작용을 해서 어떻게 감지 가능한 사건의 신호로 창발적 과정을 통해 발전해가는가를 설명해주는 개념이다. FRAM은 수행의 변동성을 서술하고 의도하지 않은 변동성을 억제하기 위해 일반적으로 다음의 네 단계를 거쳐서 이루어진다(Woltjer and Hollnagel, 2008).

1단계로 시스템의 필수적 기능을 파악하고 이 기능들을 6개의 요인으로 특성화한다. Figure 2는 FRAM에서 하나의 시스템 기능이 어떻게 도식화되는가를 보여주며 Table 2는 기능을 특성화하는 6개의 요인을 설명한다.

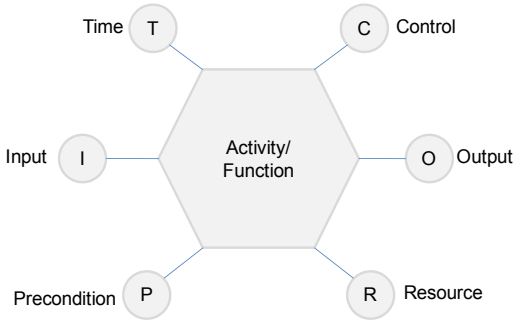

Figure 2. Hexagonal representation of a function ans its properties(Hollnagel, 2004)

2단계로 공통수행조건(common performance conditions (CPC))과 변동성의 현상적 형태(variability phenotypes)를 활용해서 상황의존적인 수행변동성을 특성화 한다. CPC는 Hollnagel의 CREAM(Cognitive Reliability and Error and Analysis Method) 연구에서의 핵심개념으로 인간 신뢰도 분석 연구에서의 수행도 영향인자(performance shaping

Table 2. Six Parameters of a Function of FRAM(Woltjer et al., 2009)

Parameter	Description	Essential variables
Input	What is transformed during function performance to produce the output	Essential variables that describe the input
Output	What is produced by a function, described as a changed state after successful function performance	Essential variables that change state when output is produced
Preconditions	Conditions(states) that must be fulfilled at the start of or during function performance	Essential variables that describe preconditions
Resources	What is needed and used to process input	Essential variables that change state as resources are used
Time	Time aspects, including time needed and time available to perform a function	Essential variables that describe time aspects
Control	What surpervises, steers, controls, plans, or adjusts function performance, such as deciding when a function should be performed	Essential variables that describe controls

factors)와 비슷한 개념으로 보면 된다(Hollnagel, 1998). FRAM에서는 다음의 11개의 CPC를 활용한다: 1) availability of personnel and equipment, 2) training, preparation, and competence, 3) communication quality, 4) human−machine interaction and operational support, 5) availability of procedures, 6) work conditions, 7) goals, number and conflicts, 8) available time, 9) circadian rhythm, and stress, 10) team collaboration, and 11) organizational quality. CPC는 각 기능의 인적, 기술적, 조직적인 측면을 종합적으로 표현해준다. 또한 11개의 가능한 변동성의 현상적 형태를 다음과 같이 정리하고 있다: 1) timing, 2) duration, 3) distance, 4) speed, 5) direction, 6) force/power/pressure, 7) object, 8) sequence, 9) quantity/volue, 10) position, and 11) accuracy. 변동성의 현상적 형태는 기능의 출력(output)에서 변동성의 형태를 서술하는데 활용되며 이 변동성은 이 기능과 연결된 다른 기능들에 영향을 미치게 된다.

3단계로 기능들의 가능한 의존성 및 유기론적 관계에 근거해서 기능적 공진을 정의한다. FRAM에서의 각 기능은 6개의 측면에서 특성화되기 때문에 각 기능들이 다양한 방법으로 연결되고 상호작용이 이루어진다. 예로 기능 A의 출력(output)이 기능 B에 입력(input)으로 사용되는 반면에 기능 C의 선행조건(precondition)으로 작용할 수 있다. 또한 이런 관련성은 공통수행조건과 변동성의 현상적 형태와 함께 고려되어 기능적 공진이 이해되고 예측된다.

4단계로 안전이 위협받을 수 있는 변동성에 대해 장벽(barriers)을 파악하고 수행도를 모니터링할 수 있는 척도나 요건을 개발한다. 장벽이란 바람직하지 않은 사건이 발생하는 것을 막거나 사건이 발생한 경우 그 결과에 대해 보호할 수 있는 수단을 의미한다. FRAM에서는 네 가지의 장벽 시스템을 활용한다: 1) physical barrier system, 2) functional barrier system, 3) symbolic barrier system, and 4) incorporeal barrier system.

FRAM은 현재까지 직무/기능 할당(Woltjer and Hollnagel, 2008), 사고분석(Herrera and Woltjer, 2009), 재무 위험도 예측(Sundström and Hollnagel, 2008) 등에 적용되어 그 유용성이 확인되었다.

2.5 Safety culture

안전문화(safety culture)는 1988년 체르노빌 원전 사고분석 보고서에서 처음 언급된 이후에 지난 20년 동안 시스템 안전에 중요한 영향을 미치는 요소로 인식되어 왔다(Choudhry et al., 2007). 안전문화와 관련해서 현재까지 활발하게 연구되어 오고 있는 주제를 나열하면 다음과 같다: 안전문화의 개념 정의, 안전문화 향상을 위한 리더십, 안전문화 및 안전문화 구성요소의 측정방안, 조직 내 위험 통제 시스템 개발, 안전경영 시스템 감사, 안전 훈련시스템 개발, 안전문화와 시스템 안전의 관련성, 안전문화와 규제기관과의 관련성(Cooper, 2001; Sorensen, 2002).

안전문화가 여러 산업영역에서 다양한 배경지식을 갖고 연구되어 그 정의가 다양하고 아직 통일된 정의는 없다(Cooper, 2000). 그러나 영국 보건안전위원회(UK Health and Safety Commission)의 정의가 가장 많이 인용되고 있다. 그들은 안전문화를 '조직의 보건 및 안전 프로그램의 실행, 스타일 및 성숙도를 결정하는 개인 및 조직의 가치관, 태도, 능력 및 행위 패턴 등의 결합체'로 정의하고 있다(HSC, 1993).

다양한 안전문화의 정의가 존재하지만 그 정의들을 종합해보면 안전문화는 다음의 중요한 개념을 갖는다: 1) 안전문화는 모든 그룹 및 조직구성원들이 공유하는 가치관에 대한 것으로 그룹 및 그 상위 수준에서의 개념이다, 2) 안전문

화는 조직의 공식적인 안전문제와 관련되며 경영시스템과 밀접한 관련이 있다, 3) 안전문화는 조직구조에서 모든 수준의 구성원들의 기여를 강조한다, 4) 안전문화는 조직구성원들의 행동에 영향을 준다, 5) 안전문화는 안전 직무수행에 따른 보상체계에 반영된다, 6) 안전문화는 사고, 준사고, 인적오류로부터 적극적으로 배우려는 의지에 반영된다, 7) 안전문화는 쉽게 변화지 않는 정적인 개념이다(Wiegmann et al., 2004).

안전문화와 비슷한 개념으로 안전풍토(safety climate)가 자주 언급된다. 그러나 안전풍토는 안전문화에 비해 일시적인 측면이 강하고 비교적 비가시적인 환경적 요소나 안전상태의 인지와 같은 심리적 요소를 더 강조한 개념으로 해석된다(Cooper, 2001).

안전문화가 사고모형 내지는 사고분석과 관련해 갖는 가장 중요한 의미는 많은 대형사고의 원인이 실제 작업현장에서 근무하는 작업자들의 개인적오류가 아닌 조직 수준에서의 오류로 판단하는 것이 더 올바른 경우가 있을 수 있다는 점이다(Reason, 1997). 오류를 능동적 오류(active errors)와 잠재적 오류(latent errors)로 구분할 때 능동적오류가 일반적으로 현장의 작업자와 밀접한 관련이 있다면 잠재적 오류는 작업자 외에 시스템 및 조직의 다른 구성요소와 밀접한 관련이 있다. 따라서 잠재적 오류는 안전문화와 연관해서 연구할 필요가 있다. 또한 안전문화가 작업자의 행위에 영향을 미친다는 것이 안전문화의 중요 개념중의 하나라고 앞에서 언급하였다. 그래서 최근에는 작업자의 인적오류가 얼마나 안전문화의 영향을 받은 것인가를 파악하려는 연구도 진행되고 있으나 아직 이와 관련해 과학적으로 검증된 사실은 없다.

Reason(1998)은 안전문화가 사회기술적으로 향상되고 설계될 수 있음을 강조했다. 이를 위한 선결조건은 안전문화를 구성하는 구성요소들과 그 요소들간의 상관관계를 이해하는 것이다. 이러한 문제 의식을 갖고 안전문화를 구조적으로 이해하기 위한 모형을 수립하고 검증하는 연구들이 많이 이루어져 왔다(Cooper, 2000; Guldenmund, 2000; Wiegmann et al., 2004). 연구방법론적으로는 구조방정식 모형을 수립하고 설문조사를 통해 검증하는 식의 연구가 많이 이루어졌다. 또한 원자력발전소, 화학공장, 의료시스템, 항공운항 시스템 등 다양한 분야에서 모형 연구가 이루어졌다. 이를 통해 모든 분야에 적용될 수 있는 구성요소 및 산업별로 특화된 혹은 높은 우선순위를 갖는 구성요소들이 파악되어 왔다.

안전문화의 측정과 관련해 최근의 중요한 연구동향 중의 하나가 안전문화 성숙도 모형(Safety Maturity Model)이다. 소프트웨어공학 분야에서 소프트웨어 개발조직의 개발 프로세스 생산성을 측정하고 향상시키기 위해 개발된 Capability Maturity Model Integrated(CMMI)를 참조해 안전문화 성숙도 모형이 여러 산업 분야별로 연구되고 있다 HSE, 2001; Jones and Earthy, 2001). 아직은 연구가 충분하게 이루어지지 않아서 실제 현장에서는 많이 활용되고 있지 않지만 추후에 성숙도 모형은 각 조직의 안전문화 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

2.6 Ecological information systems

인적오류 및 시스템 안전사고의 개념을 고려한 시스템 설계 프레임워크 중에서 근래 20여년 동안 가장 많은 관심을 받고 있는 것이 생태학적 정보시스템(Ecological Information Systems)일 것이다. 인지시스템공학의 기반을 마련한 Rasmussen 및 그가 근무했었던 덴마크의 RISØ 연구소의 연구결과가 생태학적 정보시스템의 근간을 이룬다(Rasmussen et al., 1994).

생태학적 정보시스템은 인적오류를 바라보는 관점에서 본 논문에서 소개한 다른 연구들과 공통적인 시각을 갖고 있다. 인적오류의 원인을 사건들의 연결고리를 활용해 분석하고 이를 제거하기 위해 정보시스템을 설계하는 것은 궁극적인 시스템 안전성 확보에 별로 효과적이지 못함을 지적하고 있다(Flach et al., 1995). 시스템에서의 인간의 행위는 목적을 달성하기 위해 환경 변화(특히 예측하지 못한 상황)에 적응적인 행위를 보이는데 이러한 이유로 시스템의 점진적 개선으로 인적오류의 원인을 제거하려는 방법은 비효과적임을 지적한다.

대신에 생태학적 정보시스템에서는 인간의 목적지향적이면서 적응적인 행위를 잘 지원해줄 수 있는 방향으로 정보시스템 설계가 이루어져야 함을 강조한다(Rasmussen, 1999). 이를 위해 정보시스템은 시스템의 모든(생태학적) 제약조건과(안전성 측면에서) 수용 가능한 행동반경을 명확하게 밝혀주는 것이 절대적으로 필요하다. 여기서의 제약조건은 행위형성조건(behaviour shaping constraints)과 동일한 개념이 된다. 즉 생태학적 정보시스템은 생태학적 제약조건과 수용 가능한 행동반경을 명시화해서 목적지향적이면서 적응적인 행위를 적절히 지원해 줌을 목적으로 하는 시스템 설계개념이라 할 수 있다. 그렇다면 복잡한 대형시스템에서 인지적 직무와 연결되는 의미있는 제약조건은 무엇이 있으며 어떠한 방법으로 그 제약조건을 모형화할 것인가의 문제가 대두된다.

Rasmussen 연구의 가장 큰 업적 중의 하나가 이러한 제약조건의 종류와 그 조건들의 모형화 방법을 개발했다는 데 있다(이러한 Rasmussen의 연구를 바탕으로 형성적 모델링(formative modelling)개념을 강조해 사회기술적 시스템 분석기법으로 Vicente가 개발한 것이 Cognitive Work

Analysis(CWA)이다(Vicente, 1999)). 생태학적 정보시스템에서는 5개의 제약조건을 분류하고 있다: 1) 작업영역 제약조건(work domain constraints), 2) 인지적 직무 제약조건(activity constraints), 3) 인지적 전략 제약조건(cognitive strategy constraints), 4) 사회조직적 제약조건(social-organizational constraints), 5) 인지적 자원 제약조건(cognitive resource constraints). 이 5개의 제약조건은 시스템 내에서의 직무행위가 이루어질 수 있는 일종의 자유영역을 예측해준다. 이러한 자유영역이 기능적으로 수용 가능하면서 안전한 행동반경이 된다. 이 영역내에서 기능적 목적을 달성하기 위한 직무의 선택은 여러 주관적 기준에 의해 자유롭게 선택된다(ETTO principle이 이 맥락에서 적용될 수 있다). 하지만 이 행동반경을 벗어남이 바로 시스템을 위험상태로 만들 수 있음을 의미한다. 따라서 이 5개의 제약조건은 직무의 구체적인 절차 내지는 궤적은 규명하지 않지만 시스템 내 모든 직무가 안전하게 이루어질 수 있는 자유공간을 형성해준다.

위의 5개의 제약조건 중에서 작업영역 제약조건과 인지적 자원 제약조건을 이용해서 정보디스플레이 설계개념으로 개발된 것이 생태학적 인터페이스(EID: Ecological Interface Design)이다(Vicente, 1996). EID는 작업영역 제약조건을 표현하기 위해 추상화 계층을 활용하고 이 표현결과는 바로 인터페이스의 컨텐츠가 된다. 이 부분은 시스템 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 의미를 지닌다. 작업자의 시스템에 대한 심성모형(mental model)에 맞추어 디스플레이가 설계되는 것이 아니고 작업영역 제약조건의 표현을 통해 디스플레이가 작업자로 하여금 작업 대상인 시스템의 올바른 모형을 갖도록 해주는 것이다. 이는 예상하지 못한 상황에서 적응적 행위를 성공적으로 이끄는데 중요한 역할을 한다. 한편 인지적 자원 제약조건을 반영하기 위해 EID는 정보처리 방식에 기반한 인지적 제어 수준의 3단계를 설명하는 SRK (Skill-, Rule-, Knowledge-Based Behaviour) 프레임워크를 이용한다. 따라서 EID는 인터페이스 컨텐츠가 SRK의 각 단계를 지원하기 위해 어떻게 표현되어야 하는가에 대한 설계원칙을 제공한다. EID의 효용성은 여러 연구를 통해 이미 입증이 되어 왔으며 현재도 개념적 기반 및 실행방법론적인 측면에서 지속적인 연구가 이루어지고 있다(Vicente, 2002).

2.7 Common issues across domains

인적오류 및 사고모형은 많은 산업분야에서 연구가 이루어져 왔다. 국내에서도 현재 활발한 연구가 이루어지고 있는 원자력발전소, 화학공장, 고속철도시스템, 제조산업, 항공운영시스템 외에도 의료시스템, 국방관리시스템, 국가보안시스템, 재난관리시스템, 금융산업 등에서 활발한 연구가 행해지고 있다. 그런데 상대적으로 인적오류 및 사고모형 연구가 더 활발했던 원자력분야 및 항공분야의 연구결과들을 다른 산업분야에 적용한다거나 예전에는 인적오류 및 사고모형 연구의 효용성이 적을 것이라고 믿었던 분야에서 이 분야의 연구가 관심을 받기 시작했다. 이와 관련해 본 논문에서는 세 개의 연구를 예로써 간략하게 소개한다.

Parush(2007)는 항공기의 인간-시스템 인터페이스(human-system interfaces) 설계에 적용된 개념과 원칙을 병원 수술실의 기기 및 정보디스플레이 설계에 적용하면 인적오류 및 사고의 위험성을 줄여서 안전성을 높일 수 있는가를 고찰했다. 그는 이 연구에서 인지적 정보처리 요건, 정보처리 과부하, 인지적 오류 가능성, 상황인식(situation awareness)의 측면에서 항공기 운영직무와 병원의 수술실에서의 직무가 비슷한 상황적 특성을 갖고 있음을 지적했다. 이러한 판단에서 그는 항공기에 적용된 설계개념과 원칙이 수술실에서의 인적오류 감지 및 방지를 위한 설계요건 도출, 의사결정 지원방향 설정, 상황인식 향상, 훈련요건 도출에 유용하게 활용될 수 있음을 주장했다.

Antunes and Mourão(2011)는 비즈니스 프로세스 관리(BPM: Business Process Management)시스템에 시스템 회복력 및 회복성공학의 개념을 적용하는 연구를 수행하였다. BPM 시스템이 회복력을 갖기 위해서는 여러 위태(hazard) 요소에서 잘 벗어나도록 지원해줘야 한다. 그들은 이 연구에서 시스템의 회복력을 위한 5개의 지원전략을 파악하였다(Failure handling, exception handling, model adaptation, restricted ad hoc changes, and unstructured interventions). 특히 회복력 수준이 높아지는 뒤의 3개의 지원전략에서 인간의 역할이 매우 중요함을 강조했다. 이러한 사실로부터 그들은 회복력 높은 BPM 시스템이 갖추어야 할 핵심기능들을 정리하였다. 이 연구는 점점 복잡해지고 불확성이 높아지는 비즈니스 환경에서 환경적 변화에 적응해야 하는 작업자를 지원하기 위해 BPM 시스템 개발에 기존의 인적오류 및 사고모형 연구가 매우 유용한 개념적 기반 및 방법론적 수단을 제공할 수 있음을 시사한다.

Sundström and Hollnagel(2008)은 FRAM을 재무시스템의 위험도 평가에 적용하는 연구를 수행했다. 2008년도에 발생한 국제적 금융위기는 기존의 많은 재무시스템 위험도 평가모델의 한계성을 그대로 드러냈다. 이 연구에서는 기존의 대표적인 위험도 평가모델을 검토하고 이들의 단점을 보완하기 위해 FRAM이 어떻게 활용될 수 있는가를 설명하였다. 또한 영국 금융위기의 시발점이었던 대표적인 주택담보대출 회사인 Nothern Rock 파산의 예를 들어서 FRAM이 재무시스템 위험도 평가에도 유용하게 활용될 수 있음을 보였다.

3. Discussion

앞에서 소개한 7개의 연구동향으로부터 향후 인적오류 및 사고모형 연구를 진행함에 있어 염두에 두어야 하는 중요 개념들을 제공한다. 인지시스템공학의 관점에서 이들을 고찰하고 향후 지향해야 하는 연구방향을 제시하고자 한다.

우선 시스템적 모형연구의 중요성이 높아지고 있음을 알 수 있다. Hollnagel(2004)은 사고모형 연구를 3개의 형태로 분류하였다. 첫 번째는 사고는 일련의 사건들의 연결고리로 설명될 수 있다고 가정하는 순차적 모형(sequential model)이다. Failure Modes and Effects Analysis(FMEA)나 Fault Tree Analysis(FTA)가 대표적인 순차적 모형의 예가 된다. 두 번째 모형형태는 사고는 분명하거나 잠재적인 여러 요인들이 결합되어 발생한다고 가정하는 인식론적 모형(epistemological)이다. 대표적인 예로 Reason(1990, 1997)의 Swiss Cheese Model을 들 수 있다. 세 번째 형태가 시스템 이론에 근거한 시스템적 모형(systemic model)으로 본 논문에서 소개한 STAMP 및 이의 기반이 되는 Rasmussen의 모형이 이 부류에 속한다. ETTO principle 및 FRAM도 이 부류와 맥을 같이 하는 연구라 할 수 있다.

왜 시스템 이론에 근거한 인적오류 및 사고모형 연구의 중요성이 높아지는가에 대해 생각해볼 필요가 있다. 높은 복잡도와 불확실성이 존재하는 시스템에서 발생하는 인적오류 및 안전사고는 시스템 이론의 관점에서 본다면 시스템 내외부 구성요소의 비선형적 결합에 의한 일종의 창발현상으로 간주하는 것이 바람직하다라는 인식이 널리 확산되고 있다(Hollnagel, 2004; Leveson, 2010). 시스템 안전의 궁극적 향상을 위한 인적오류 및 사고모형 연구는 그런 점에서 시스템 이론 및 시스템적 사고의 적극적 활용을 요구한다. 계층화 및 창발현상, 통제 및 제어이론, 전체주의(holism)에 근거한 시스템 현상, 기능 및 구조관점에서의 상호작용, 시스템학습 및 진화현상 등의 시스템 이 (Wilson, 1990)은 기존의 인적오류 및 사고모형 연구가 갖고 있었던 한계점을 극복하는데 큰 도움이 될 것이다. 본 논문에서 소개한 최근의 연구동향은 모두 이러한 연구노력의 일환으로 볼 수 있다.

시스템적 모형연구와 관련해 인지시스템공학은 네 가지의 핵심적인 개념을 제공한다(Hollnagel and Woods, 2005; Norros and Salo, 2009; Rasmussen et al., 1994; Roth et al., 2002). 이 개념들은 앞에서 설명한 연구동향의 기본적인 가정 내지는 전제조건이며 향후 이 분야의 연구방향을 설정하는데 중요한 이론적 기반이 되어야 할 것이다.

첫 번째 개념은 앞에서도 많이 언급했듯이 시스템의 복잡도와 불확실성에 한정된 인지적인 자원을 갖고 대응하기 위해 작업자는 목적지향적이면서도 변화에 적응적인 행위를 보인다는 점이다. 그래서 시스템내의 인간의(인지적) 행위는 절대로 규범적인 절차에 의해 설명이 되지 않는다. 절차적 지원을 제공할 수 없는 시스템상황에서뿐만 아니라 심지어 규정된 절차적 행위가 가능한 상황에서도 임의대로 주관적 기준에 의해 자유롭게 직무행위를 수행하려는 경향이 있다. 이러한 이유로 직무수행도의 변동성은 불가피하게 나타나고 이런 점을 오류해석에 잘 반영한 것이 회복성공학 및 ETTO principle이다. 규범적 인지모형에 기반한 오류 분류체계의 비현실성 및 비구조적 직무상황에서의 오류 예측의 어려움 같은 기존 연구의 한계점을 극복하기 위해서 향후 인적오류 특성 및 메커니즘 연구에서는 이러한 작업자의 특성이 반드시 고려되어야 할 것이다.

두 번째로 인지시스템공학에서는 구조적 분해에 의한 사건 중심의 인과관계 모형보다는 시스템의 기능적 추상화에 개념에 근거한 기능적 상관관계 모형의 필요성을 강조한다. 정적인 입출력의 인과관계를 보여주는 구조적 모형으로는 시스템 내에서의 작업자의 행위 및 오류를 이해하기 어렵다. 전체주의적 시각을 견지하면서 앞에서 설명한 목적지향적이면서 적응적인 작업자의 행위를 분석하기 위해서는 기능적 모형이 더 바람직하다. FRAM도 이러한 개념에서 개발된 기능적 모형의 하나로 해석될 수 있다. 창발현상으로 간주되는 오류 및 안전사고의 발생과정을 회고적으로 이해하거나 가능성을 갖고 예측하는 목적으로도 시스템의 기능적 모형화는 중요한 역할을 한다. 또한 작업자의 오류를 감소시켜줄 지원시스템을 개발하는 목적으로도 기능적 모형은 매우 유용하다. 생태학적 정보시스템은 기능적 모형 및 뒤에 설명할 제약조건 중심의 모형화의 중요성을 반영한 설계개념으로 볼 수 있다.

세 번째로 인지시스템공학에서는 시스템 내의 직무행위를 이해하고 안전성 향상을 위한 지원시스템 설계를 위해서 제약조건 중심의 모형화를 강조한다. 오류를 경감시키기 위한 지원시스템 설계와 관련해서 기존의 많은 연구들은 규범적인 인지적 직무 및 오류모형에 근거해서 알려져 있거나 예측되는 오류를 범하지 않게 여러 절차를 규정하는 것을 목적으로 이루어져 왔다. 그러나 앞에서 설명한 작업행위의 수행도 변동성을 불가피하게 인정해야 하는 상황에서는 이러한 설계 개념은 분명하게 한계를 갖고 있다. 그래서 인지시스템공학에서는 작업자에게 특정 절차를 강요하는 설계개념보다는 작업자가 자유롭게 적응적 행위를 할 수 있는 영역을 파악하고 이 영역을 명시화 해주는 설계 개념을 강조한다. 생태학적 정보시스템에서 설명했듯이 이러한 영역은 여러 제약조건이 의미있게 결합되었을 때 예측될 수 있다. 향후 인적오류를 고려한 정보시스템 설계는 이러한 설계개념의 연장선에서 연구되는 것이 바람직하다고 판단된다.

네 번째로 시스템에서의 인지적 기능 및 행위를 이해하기 위해서 결합인지시스템(JCS: Joint Cognitive Systems)의 개념이 고려되어야 한다는 점이다. 형식적으로 JCS는 최소 1인의 작업자(natural cognitive system)와 하나의 정보처리 가능한 기계(artificial cognitive system)로 구성된다. 여기에 또 다른 작업자가 고려되면 그 것은 새로운 JCS가 되고 여기에 또 다른 정보처리 가능한 기계가 추가적으로 고려되면 새로운 JCS가 되는 식으로 JCS의 개념은 계속 확장될 수 있다. JCS가 갖는 의미는 시스템에서의 인지적 연구를 위해 관심을 갖는 JCS의 범위(경계)와 그 이외 환경을 분명하게 할 필요가 있다는 것이다. 설정된 JCS의 범위에 따라 동일한 문제라도 인지적 관점에서 다른 분석결과를 낳을 수 있다. 또한 하위 수준의 JCS와 상위수준의 JCS는 서로 유기적인 관련성을 갖고 서로의 인지적 기능 및 행위에 영향을 주게 된다. Leveson의 STAMP 및 Rasmussen의 위기관리 모형에서의 각 계층간의 관련성을 이러한 JCS의 관점에서 해석하는 것이 더 올바를 것이다. 발생한 오류 및 안전사고를 해석하고 그 원인을 진단할 때 다양한 수준의 JCS가 고려되었을 때 보다 다양하고 객관적인 정보가 얻어질 것이고 이로부터 더 타당한 개선안도 도출될 수 있을 것이다. 또한 안전문화 설계 및 안전문화 성숙도 모형연구에서도 JCS의 개념이 적절하게 활용될 필요가 있을 것이다.

마지막으로 인적오류 및 사고모형 연구결과의 광범위한 응용을 언급하고자 한다. 시스템의 크기와 종류를 막론하고 인간의 행위가 이루어지는 시스템 및 인간이 만들어낸 모든 시스템에서 실패와 성공은 가장 큰 관심사항일 것이다. 시스템 실패(system failure)를 미리 방지하고 합리적으로 진단하고 높은 회복력을 가질 수 있도록 하는데는 다양한 방법이 존재하겠지만 인적오류 및 사고모형의 연구도 이에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 보인다. 그런데 현재까지 인적오류 및 사고모형 연구의 적용이 주로 대형공학시스템을 중심으로 이루어졌음은 부인할 수 없다. 앞에서 설명한 회복성공학을 비즈니스 프로세스에 적용한다던가 FRAM을 재무시스템 위험도 평가에 적용하는 연구는 이런 점에서 매우 의미가 있고 향후 인적오류 연구자들의 사회적 기여를 확대할 수 있는 하나의 방향을 제시한다고 볼 수 있다. 특히 저자의 개인적인 경험에 비추어 향후 국가재난시스템 및 보안시스템 분야에 인적오류 및 사고모형 연구자들이 기여할 부분이 매우 많다고 판단한다.

4. Conclusion

본 논문에서는 인적오류 및 사고모형에 관한 기존 연구의 한계점을 지적하고 이러한 한계점을 극복하고자 최근에 인지시스템공학계를 중심으로 새롭게 연구되거나 강조되고 있는 연구주제들을 소개하였다. 또한 소개된 주제들로부터 인적오류 및 사고모형 연구가 향후 지향해야 할 바를 정리하였다. 기존의 연구들이 분명한 한계점을 갖고 있으나 그 연구들로부터 나온 개념 및 방법 등의 장점이 평가절하 되어서는 안될 것이다. 또한 새롭게 연구되고 있는 개념이나 방법 등도 단점이 분명히 존재한다는 사실도 잊어서는 안될 것이다.

그러나 본 논문에서 소개한 새로운 연구주제들은 기존의 연구들과는 다른 인적오류와 사고에 대한 개념과 철학을 요구한다. 그러한 개념과 철학은 점점 복잡성과 불확실성이 높아지는 작업시스템 및 사회기술적 시스템에서의 안전성을 높이는데 필수적이라는데 많은 연구자들이 동의하고 있다. 본 논문에서 소개한 연구주제들은 아직 산업계에서 실제적으로 활용하기에는 다분히 추상적인 내용도 존재하고 방법론 측면에서 구체적으로 보완되어야 할 부분이 많이 있다. 특히 시스템 회복력 및 회복성공학, 사회기술적 시스템 개념에 기반한 사고모형, 안전 성숙도 모형, 생태학적 정보시스템 등은 보다 많은 사례 연구 및 구체적 기법 확보가 필요할 것으로 판단된다.

References

Antunes, P. and Mourão, H. Resilient business process management: framework and services, *Expert Systems with Applications*, 38(2), 1241-1254, 2011.

BBC, US oil spill: 'Bad management' led to BP disaster, http://www.bbc.co.uk/news/world-us-canada-12124830, 2011.

Cassano-Piche, A. L., Vicente, K. J. and Jamieson, G. A., A test of Rasmussen's risk management framework in the food safety domain: BSE in the UK, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(4), 283-304, 2009.

Choudhry, R. M., Fang, D. and Mohamed, S., The nature of safety culture: a survey of the state-of-the-art, *Safety Science*, 45, 993-1012, 2007.

Cooper, M. D., Towards a model of safety culture, *Safety Science*, 36, 111-136, 2000.

Cooper, D., *Improving Safety Culture: A Practical Guide*, John Wiley & Sons, 2001.

Costella, M. F., Saurin, T. A. and Guimaraes, L. B. de M., A method for assessing health and safety management systems from the resilience engineering perspective, *Safety Science*, 47-1056-1067, 2009.

Guldenmund, F. W., The nature of safety culture: a review of theory and research, *Safety Science*, 34, 215-257, 2000.

Flach, J, Hancock, P., Caird, I. and Vicente, K. J. (Ed), *Global Perspectives on the Ecology of Human-Machine Systems*, Lawrence-Erlbaum,

1995.

Herrea, I. A. and Woltjer, R., Comparing a Multi-Linear(STEP) and Systemic(FRAM) Method for Accident Analysis. In S. Martorell, C. G. Soares and J. Barnett(Ed), *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods, and Applications*, CRC Press, London, 19-26, 2009.

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

Hollnagel, E., *The ETTO Principle: Why Things That Go Right Sometimes Go Wrong*, Ashgate, 2009.

Hollnagel, E., *Barriers and Accident Prevention*, Ashgate, 2004.

Hollnagel, E. and Woods, D., *Joint Cognitive Systems: Foundations of Cognitive Systems Engineering*, CRC Press, 2005.

Hollnagel, E., Woods, D. and Leveson, N. (Ed), *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, Ashgate, 2006.

HSC, *ACSNI Study Group on Human Factors 3rd Report: Organizing for Safety*. UK Health and Safety Commission, London, 1993.

HSE, *Safety Culture MaturityModel*, UK Health and Safety Executive, Edinburgh, 2001.

Jackson, S., *Architecting Resilient Systems: Accident Avoidance and Survival and Recovery from Distruptions*, John Wiley & Sons, 2010.

Jones, B. S. and Earthy, J., *The Process-Based Approach to Assurance of Operability and Safety*, Process Contracting Limited, 2001.

Leveson, N. G., *Safeware: System Safety and Computers*, Addison-Wesley, 1995.

Leveson, N. G., A new accident model for engineering safer systems, *Safety Science*, 42, 237-270, 2004.

Leveson, N. G., *System Safety Engineering: Back to the Future*, Unpublished draft, http://sunnyday.mit.edu/book2.html, 2010.

Leveson, N. G., Applying systems thinking to analyze and learn from events, *Safety Science*, 49, 55-64, 2011.

Norros, L. and Salo, L., Design of joint systems: a theoretical challenge for cognitive systems engineering, *Cognition, Technology and Work*, 11(1), 43-56, 2009.

Parush, A., Safety in medical operating room and aviation: common issues, *HOT Topics*, 6(3), 2007.

Qureshi, Z. H. *A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Critical Sociotechnical Systems*, DSTO-TR-2094, Defence Science and Technology Organization, 2008.

Rasmussen, J., Pejtersen, A. M. and Goodstein, L. P., *Cognitive Systems Engineering*, John Wiley & Sons, 1994.

Rasmussen, J., Risk management in a dynamic society: a modeling problem, *Safety Science*, 27, 183-213, 1997.

Rasmussen, J., Ecological interface design for reliable human-machine systems, *International Journal of Aviation Psychology*, 9(3), 203-223, 1999.

Reason, J., *Human Error*, Cambridge University Press, 1990.

Reason, J. *Managing the Risks of Organizational Accidents*, Ashgate, 1997.

Reason, J. Achieving a safety culture: theory and practice, *Work and Stress*, 12, 293-306, 1998.

Reason, J., Human error: models and management. *British Medical Journal*, 320, 768-770, 2000.

Roth, E., Patterson, E. S. and Mumaw, R. J., Cognitive Engineering: Issues in User-Centred System Design. In J. J. Marciniak(Ed), *Encyclopedia of Software Engineering(2nd Edition)*, John Wiley & Sons, New York, 2002.

Sorensen, J. N., Safety culture: a survey of the state-of-the-art, *Reliability Engineering and System Safety*, 76, 189-204, 2002.

Spurgin, A. J., *Human Reliability Assessment: Theory and Practice*, CRC Press, 2010.

Sundström, G. A. and Hollnagel, E. "Modelling Risk in Financial Services Systems: A Functional Risk Modelling Perspective," *Proceedings of the Third Resilience Engineering Symposium*, Antibes Juan-Les-Pins, France, 2008.

Vicente, K. J., Improving dynamic decision making in complex systems through ecological interface design: a research overview, *System Dynamics Review*, 12(4), 251-279, 1996.

Vicente, K. J., *Cognitive Work Analysis: Towards Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work*, Lawrence-Erlbaum, 1999.

Vicente, K. J., Ecological interface design: progress and challenges, *Human Factors*, 44(1), 62-78, 2002.

Vicente, K. J. and Christoffersen, K., The Walkerton *E. coli* outbreak: a test of Rasmussen's framework for risk management in a dynamic society, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 7(2), 93-112, 2006.

Weick, K. E. and Sutcliffe, K. M., *Managing the Unexpected: Resilient Performance in an Age of Uncertainty*, Jossey-Bass, 2007.

Wiegmann, D. A., Zhang, H., von Thaden, T. L., Sharma, G. and Gibbons, A. M., Safety culture: an integrated review, *International Journal of Aviation Psychology*, 14(2), 117-134, 2004.

Wilson, B., Systems: *Concepts, Methodologies, and Applications*, Wiley, 1990.

Woltjer, R. and Hollnagel, E., "Functional Modeling for Risk Assessment of Automation in a Changing Air Traffic Management Environment," *Proceedings of the 4th International Conference Working on Safety*, Crete, Greece, 2008.

Woltjer, R., Prytz, E. and Smith, K., "Functional Modeling of Agile Command and Control," *Proceedings of the 14th International Command and Control Research and Technology Symposium*, Washington, USA, 2009.

Woo, D. M. and Vicente, K. J., Sociootechnical systems, risk management, and public health: comparing the North Battlefford and Walkerton outbreaks, *Reliability Engineering and System Safety*, 80, 253-269, 2003.

Xiao, T., Sanderson, P., Clayton, S. and Venkatesh, B., The ETTO principle and organizational strategies: a field study of ICU bed and staff management, Cognition, *Technology and Work*, 12(2), 143-152, 2010.

Author listings

Dong-Han Ham: d.ham@mdx.ac.uk

Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, KAIST

Position title: Senior Research Fellow, School of Engineering and Information Sciences, Middlesex University (UK)

Areas of interest: Cognitive Systems Engineering, Human-Computer Interaction, Architecting Resilient and Joint Cognitive Systems, Intelligence Analysis, Decision Support and Visual Analytics, Human-Centred Product and System Design

Date Received : 2011-01-31

Date Revised : 2011-02-08

Date Accepted : 2011-02-08