

현대의 고도화, 자동화된 시스템이 파생한 휴먼에러에 관한 이론적 고찰을 통한 리스크 대응전략 설정

신인재[†]

고용노동부 산재예방지도과
(2013. 6. 25. 접수 / 2014. 2. 10. 채택)

A Study on Countermeasure Strategy on Risk of Human Errors driven by Advanced and Automated Systems Through Consideration of Related Theories

In Jae Shin[†]

Department of Occupational Accident Prevention, Ministry of Employment and Labor
(Received June 25, 2013 / Accepted February 10, 2014)

Abstract : This paper provides an integrated view on human and system interaction in advanced and automated systems, which adopting computerized multi-functional artifacts and complicated organizations, such as nuclear power plants, chemical plants, steel and semi-conduct manufacturing system. As current systems have advanced with various automated equipments but human operators from various organizations are involved in the systems, system safety still remains uncertain. Especially, a human operator plays an important role at the time of critical conditions that can lead to catastrophic accidents. The knowledge on human error helps a risk manager as well as a designer to create and control a more credible system. Several human error theories were reviewed and adopted for forming the integrated perspective: gulf of execution and evaluation; risk homeostasis; the ironies of automation; trust in automation; design affordance; distributed cognition; situation awareness; and plan delegation theory. The integrated perspective embraces human error theories within three levels of human-system interactions such as affordance level, psychological logic level and trust level. This paper argued that risk management process should deal with human errors by providing (1) reasoning improvement; (2) support to situation awareness of operators; and (3) continuous monitoring on harmonization of human system interaction. This approach may help people to understand risk of human-system interaction failure characteristics and their countermeasures.

Key Words : human error, trust in automation, distributed cognition, socio-technical system, risk management

1. 서론

전자통신 등 과학기술의 급속한 발전으로 인하여 자동 항법장치(GPS navigation) 등이 일상생활에도 범용적으로 쓰이게 되는 등 자동화 장치를 사용하지 않는 시스템은 없게 되었다. 산업현장의 기계설비 및 장치의 고기능화, 자동화 역시 급속히 이루어져 왔다. 이러한 최신의 정보통신기술은 작업의 편리성과 안전성을 향상시키는 데에도 기여하였다. 하지만 시스템의 기능적 안전성은 높아졌지만 인간에 의한 실수로 발생한 사소한 간섭이 시스템 전체에 영향을 주게 될 우려 역시 높아졌다. 이러한 현대 시스템은 ‘상호작용하는 복잡성과 단단히 얽혀있는 시스템’(interactive complexity and tightly coupled system)이라고 일컬어진다¹⁾.

산업재해에서 작업자의 불안정한 행동에 의한 재해가

다수를 차지하고 있다²⁾. 사고의 70~80%가 휴먼에러(Human error)에 의하여 발생하고 있다고 여러 연구에서 밝히고 있다³⁾. 사고를 예방하는데 있어서는 작업자의 실수를 작업과정에서 방지하기 보다는 해당 작업자체의 실수요인이 줄어들도록 기계, 장치 및 시스템 설계에 있어 유의하는 것이 보다 근본적인 리스크 대책이 될 것이다.

따라서 시스템을 설계하고 관리함에 있어 설계자(engineering designers)는 휴먼에러에 대한 심층적인 이해가 있어야 한다. 설계자는 과학적이고 기술적으로 논리적 기반으로 시스템을 설계하는 경향이 있다. 반면에 이를 실제로 사용하는 작업자는 인간으로서의 심리적, 사회적, 문화적으로 보편타당한 행동특성이나 인식체계에 따라 시스템을 이해하고 운용하려한다. 따라서 설계자는 작업자의 행동특성을 잘 이해하지 못하고 있다고 한다⁴⁾.

사고유형과 기인물에 초점을 두는 우리나라의 사고예방

[†] Corresponding Author : In Jae Shin, Tel : +82-2-580-5777, E-mail : shininjae@naver.com

Department of Occupational Accident Prevention, Ministry of Employment and Labor, 363 Samil-daero, Jung-gu, Seoul 100-760, Korea

대책 및 리스크 관리방법과는 달리 영국, 호주 등에서는 이러한 인간과 시스템의 부조화를 해결하기 위한 휴먼에러 방지 개념을 강조하고 있다. 1980년대 이후 인간의 정보처리 연구를 통한 휴먼에러 파악⁵⁾(Skill-Rule-Knowledge base information processing)과 행동실수의 분류⁶⁾(slip, mistake) 및 ‘포괄적 에러모델 체계’⁷⁾(Generic Error Modeling System) 등의 휴먼에러 분류 연구를 기반으로 시스템과 인간의 부조화 현상에 대한 연구결과를 활용하여 휴먼에러 방지를 위한 시스템 구축, 리스크 관리에 대한 연구가 이루어져 오고 있다.

시스템은 지속적으로 고도화 되고 있다. 더욱 복잡한 기능을 탑재한 다기능·고속·소형의 자동화 시스템이 보편화 되고 있다. 자동항법장치, 자동유도장치, 안내장치 등 다양한 형태로 개발되었다. 항공운송업, 자동차제조업, 화학공장, 제철공장은 물론 일반 제조공장에서도 자동화 시스템의 도입과 고도화⁸⁾가 이루어지고 있다. 이러한 고기능 자동시스템(이하 ‘고도화 시스템’이라 한다)의 전방위적이고 범용적인 도입이 안전에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 중요하게 될 것이다. 특히 인간과 시스템의 조화로운 상태를 만드는 것이 필요하다. 휴먼에러는 인간의 특성이기도 하여 이를 원천적으로 방지하는 것은 현실적으로 불가능 하지만 고도화 시스템이 인간의 인지 능력과 행동, 태도에 미치는 영향을 탐구하고 이에 대한 리스크 대응전략을 마련한다면 사고를 근본적으로 관리할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 고도화시스템을 화학공장, 항공·철도 시스템, 원자력설비, 반도체제조공정으로 한정시킨다. 이들 시스템은 자동화된 설비가 다양하게 구성되어있고, 전자통신망을 이용한 시스템관리가 이루어지고 있다. 특정 장소에서 발생한 한번의 에러가 시스템 전체에 영향을 줄 수 있고 사고발생시 피해가 크다. 고도화 시스템에서 사고를 예방하기 위해서 알아야 할 중요한 요소의 하나는 작업자의 인식과 행동 특성이다. 즉, 인간이 시스템의 안전성에 어떠한 영향을 주고 있는지를 알아야 그 시스템의 잠재적 리스크를 판단하고 대응할 수 있을 것이다. 휴먼에러에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나, 고도화 시스템에 미치는 영향에 대한 종합적 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 고도화 시스템과 관련된 휴먼에러 이론을 살펴보고 이러한 이론을 바탕으로 시스템을 설계하고 운용하려는 경우 활용할 수 있도록 ‘인간-시스템 종합조화개념’을 정리하여 소개하고 리스크 대응전략으로 제시하고자 한다.

2. 현대 시스템의 딜레마

2.1. 고도화 시스템의 특징

현대 고도화 시스템의 특징은 다음과 같다. 첫째, 장치의 다기능·복합성(multi-functionality)이다. 하나의 장치나

시스템에 여러 가지 기능을 담을 수 있게 되었다. 이는 장치의 소형·경량화가 이루어진 결과이다. 둘째, 디지털 표시(digital display)이다. IT기술의 발전으로 연산속도가 빠른 컴퓨터가 시스템내에 내장되었고 표시장치는 디지털화하여 표시되고 있다. 이는 아주 작은 표시장치에 다양하고 복잡한 기능을 넣을 수 있게 된 것이다. 셋째, 빠른 연산속도이다. 컴퓨터를 기반으로 시스템으로 인하여 생산관리 시스템의 운용속도가 빨라졌으며 여기에 대응하는 작업자의 적응성 문제가 제기된다⁹⁾. 국내 반도체의 경우 생산공정을 자동화한 라인은 기존의 라인보다 반도체 생산성이 몇 배 향상되었다. 넷째, 위험도의 상승이다. 유해물질, 중량물을 손쉽게 다룰 수 있는 기술의 발달로 시스템이 담당하는 유해도나 위험도는 점점 더 커지고 있다. 다섯째, 고도화 시스템은 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위한 안전장치, 제어장치를 채용, 장착하고 있다. 마지막으로 고도화 시스템의 작업조직은 그 운영에 있어 고도로 분화되고 있다. 예를 들어 제철공장의 경우 각 생산조직, 관리조직, 점검 및 보수조직이 각각 다른 회사에 소속되어있다. 다양한 조직이 함께 하나의 시스템을 운영하는 체계이다.

이러한 고도화 시스템의 특징으로 인하여 인간-시스템의 소통(interaction)에 부조화가 발생할 경우가 인간이 시스템을 인식하거나 운용하는데 어려움을 초래하고 있다. 일례를 들면, 기계식 연료분사장치인 기화기(carburetor)를 사용하던 예전 자동차는 운전자도 자동차 엔진기화장치를 수리할 수 있었으나, 현재 전자제어방식의 연료분사장치(EFI)는 운전자가 직접 그 내부의 회로를 보고 이해할 수 없다. 소형, 경량화는 조작의 편의성을 도모하고 있으나 조작위치가 밀집되어 오조작의 가능성이 커졌다. 또한 휴대성을 높이고 장소의 제약을 완화하는 장점이 있는 반면에 장소의 구분이 곤란하여 무질서하게 작동될 가능성과 비상시 적시 활용이 어려워질 수 있다. 디지털 표시는 사람으로 하여금 아날로그적 인지모형을 구축하는데 모호함을 유발한다. 어떤 경우 디지털로 표시된 디스플레이를 이해하기 어렵게 만들거나 당혹하게 한다. 예를 들어 항공기의 조종관리컴퓨터(FMC, Flight Management Computer)의 화면표시는 다양한 상태로 바뀔 수 있다. 2004년의 호주항공사고사례에서 부기장이 FMC 디스플레이의 화면모드가 자동으로 전환된 것을 모르고 도착지거리를 출발지점에 입력하였다⁹⁾. 2005년 그리스에 추락하여 115명이 사망한 키프로스 국적의 보잉 737사고는 조종사가 압력조정시스템이 수동으로 전환된 줄 모르고 비행하던 중 발생한 사고이다¹⁰⁾.

인간과 시스템의 상호작용(interaction)형태를 ‘즉각반응 단계’(affordance level), ‘심리적 로직 단계’(psychological logic level), ‘신뢰 단계’(trust level)로 구분하기도 한다¹¹⁾. Gibson에 의하면 affordance level에서는 인간은 사물(artefact)의 기능(functions)을 그 사물 본연의 특징을 통해 직관적으로 인지하게 된다. psychological logic level은 인간이 어떤 장치(또는 시스템)의 작동이나 운전원리에 대한 이해를 바탕으로 상호작용하는 단계를 말한다. trust level은 인간이 시스템의 신뢰성을 판단함에 있어 artefact가 주는 논리적 구성에 근거를 하고 있다.

i) ‘고도화’란 공정관리의 전반이 전자적으로 모니터링되고 라인이나 작업단위 요소가 시스템 전체와 상호연계되어 있는 것을 말한다.

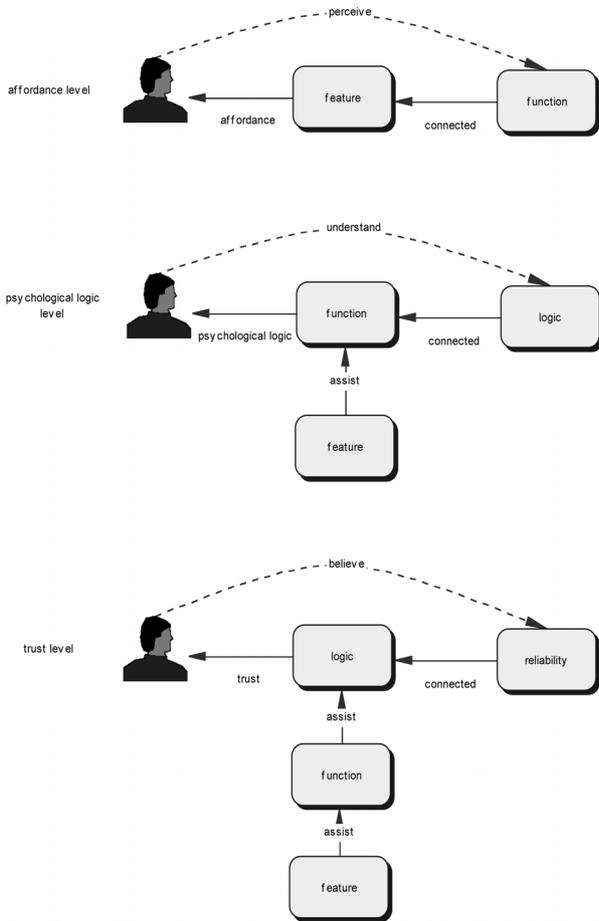


Fig. 1. Three patterns of human - system interaction processes in order for human to figure out design concepts with design elements of a system⁷⁾

2.2. 고도화 시스템에서의 인간-시스템 부조화 현상

이 연구에서는 현대 고도화 시스템에서 발생하는 인간-시스템의 부조화 현상에 대한 문헌을 고찰해 보았다. Engineering designers는 시스템을 안전하게 설계하려고 다양한 안전시스템을 도입하였다. 특히 자동화 시스템을 도입하였고 그 결과 시스템 자체의 안전성은 향상되었다. 하지만 자동화는 시스템내의 인간의 행동신념에 영향을 주게 된다. 자동화시스템을 사용하는 사람의 자동화시스템에 대한 신뢰도가 고착화되는 현상을 파악한 연구에서 Muir와 Moray는 작업자(operator)는 자동화에 대한 '과도한 신뢰'(over-trust) 또는 '불신뢰'(under-trust)의 이중적 신뢰를 갖게 되는 현상을 확인하였다¹²⁾. 자동화장치는 작업자의 이해력과 상황 판단 능력을 저하시키는 부작용이 유발하기도 한다. Bainbridge는 자동화장치에 대한 의존성이 높아짐에 따라 작업자(시스템 운영자)의 능력은 점진적으로 저하되는 현상이 나타난다고 하였다¹³⁾. 특히 이상상태 발생시 시스템이 제공하는 이상상태 표시에 대하여도 제대로 대응하지 못하기도 한다. Sarter, Woods와 Billings은 이러한 현상을 '자동화 놀람현상' (automation surprise)이라고 명명하였다¹⁴⁾. 일례로 응급차량 배치(Emergency

ambulance dispatch)에 관한 뉴질랜드의 한 연구에서 복잡하고 긴급한 지리적 상황에서 '최신 컴퓨터화된 지도기반 장치'(computerized map-based CAD system)가 장착된 ambulance 운전자가 기존의 텍스트 기반의 지도장치를 가진 차량의 운전자보다 오히려 응급처리 시간이 더 걸리는 등 잘 대처하지 못하는 사례를 보고하고 있다¹⁵⁾.

시스템의 안전장치가 증가함에 따라 작업자는 불안정한 상황에서도 시스템의 안전을 과신하는 태도를 보이는 경향이 있다. 그 결과 시스템 전체의 안전은 크게 변화가 없게 되는 결과를 초래한다. 예를 들어 안티브레이크(ABS) 시스템 등 안전성을 높이기 위한 다양한 안전장치가 개발되었으나 이를 사용하는 사람은 이를 과신하고 장치나 시스템을 과도하게 사용하게 되어서 전체 시스템의 관점에서 볼 때 안전성이 감소되었다고 말할 수 없으며, Wilde는 이를 '위험 항상성 현상'(risk homeostasis)라고 한다¹⁶⁾.

각종 기기의 소형화 디지털화는 하나의 화면(display)나 조작기기에 여러 가지 기능을 담을 수 있게 하였다. 이러한 기기가 제공하는 정보를 이해하고 실행하는데 작업자와 시스템간에 간극(gulf)이 발생한다고 한다¹⁷⁾. Hutchins, Hollan과 Norman는 '실행간극'(gulf of execution)은 실행시 발생하고, '평가간극'(gulf of evaluation)은 시스템의 실행결과를 확인, 평가하는 과정에서 발생한다고 하였다. 아울러 인간은 사물을 인지할 때 대상 사물의 특징(feature)에 따라 그 기능을 인식한다고 한다. 디지털 시스템의 조작장치, 화면은 그 형태만으로는 시스템이 가지고 있는 기능을 쉽게 인지하기가 어렵다^{18),19)}. 그 결과 artifact의 구성이 작업자의 다음계획에 대한 판단과 행동에 영향을 준다²⁰⁾. 이러한 현상이 발생하는 배경에는 현대의 복잡하고 고도화 시스템은 인간 작업자에게 순간적인 결정을 요구²¹⁾하고, 상황인식²²⁾이 더욱 중요해지고 있으나 문제를 해결하고 처리해야하는 정보는 사람과 시스템의 인공물(artifact)에 분산²³⁾되어 있어 작업자의 판단능력은 더 제한받고 있다고 한다. 이상과 같이 문헌에서 나타나는 이슈에 대하여 Table 1에 나타내었다.

고도화 시스템이 파생한 휴먼에러 영향에 대한 여러 현상에 대한 이론을 종합하면 다음과 같다.

1) 자동화는 작업의 편이성을 가져오는 대신 시스템 내의 작업자의 능력을 떨어뜨리는 요소로 작용한다. 특히 비정상적인 상황에 대한 대처능력을 현저히 떨어뜨리는 문제가 있다. 2) 소형, 디지털 기술을 이용한 표시장치는 조작의 다양성과 복잡성을 표현할 수 있지만, 그 기능과 작동원리를 이해하는 직관력을 감소시킨다. 특히 복잡한 내부구조의 이해력을 저해한다. 3) 다양한 안전설비의 도입과 설비의 고기능화는 시스템의 처리속도를 향상시킨 반면에 시스템내의 작업자는 시스템의 극히 일부분에만 참여하게 된다. 이는 작업자의 대응능력과 일치하지 못하므로 시스템의 이상상태시 적절하게 대처할 능력을 저하시킨다. 4) 인간의 시스템과의 반응은 사물(artifacts)에 대한 감각적 인지부터 기능을 인식하고 조작원리에 대한 이해 및 시스템에 대한 믿음체계까지의 4단계가 복합적으로 이루어지고 있다.

Table 1. Human system interaction issues in literatures

Author(year)	Human system interaction issues
De Keyser(1990)	temporal decision making
Hutchins, Hollan and Norman(1985)	gulf of execution and evaluation
Wilde(1982)	risk homeostasis
Bainbridge(1983)	the ironies of automation
Muir, Moray(1994)	trust in automation
Sarter, Woods, Billings (1997)	automation surprise
Gibson(1977),Norman(1998)	affordance
Hutchins(1995)	distributed cognition
Endsley(1995)	situation awareness
Busby, Hughes(2003)	plan delegation

2.3. 사고 사례 분석

이상의 휴먼 시스템 부조화로 인한 몇 가지 사고사례를 분석해 본다. 1999년 영국 런던 인근의 Ladbroke Groove에서 러시아워 시간에 열차가 정면충돌하여 258명의 사상자가 발생하는 사고가 발생한다. 영국 산업안전보건청(HSE)의 조사결과 사고원인은 사고열차의 기관사가 정지신호를 무시하고 운전하다가 충돌이 발생하였다. 해당 열차에는 적,황신호시 자동으로 경보하는 시스템이 장착되어 있었다. 기관사가 정지신호를 무시하고 운전한 사유는 평상시 러시아워 시간에는 신호가 금방 바뀌고 있어 빈번한 경보가 발령되어 통상적으로 경보시스템을 작동시키지 않고 운전해왔다는 것을 확인하였다²⁴⁾.

2003년 한국의 호남석유화학공장에서 폭발사고가 발생하였다. 현장내에서는 정비보수작업으로 인하여 스트레이너(strainer)를 해체해놓은 상태였으나, 조정실(control room)의 작업자는 모니터의 상태를 잘못 이해하고 화학물질 배출펌프가 열리도록 스위치를 작동시켜 폭발사고가 발생하게 되었음이 노동부의 재해조사결과 확인 되었다²⁵⁾. 2003년 미국 동북부와 캐나다 일부지역에 사상최대의 정전사고가 발생하였다. 미국 에너지부(MOE)의 조사결과 나뭇가지가 한 전력선로에 떨어지면서 합선이 발생하여 정전이 발생하였다. 대규모 정전사태로 변진 것은 전력조정실(control room)의 근로자가 모니터상의 전로 이상상태를 제대로 이해하지 못하여 정전이 발생한 선로를 제때에 찾지 못하였기 때문으로 밝혀졌다²⁶⁾. 2005년 미국 텍사스 정유공장에 화재폭발 사고가 발생하였다²⁷⁾. 해당 사고는 화학물질(Raffinate)이 Splitter에서 넘쳐흐를 때까지 조정실내의 운전자가 이를 알지 못하고 있었다.

2011년 일본 북동부에서 발생한 후쿠지마 원자력 발전소의 붕괴사고는 대형 지진으로 인한 쓰나미가 발전소를 덮쳐 발생하였다. 사고당시 비상시 용해로를 냉각시킬 장치가 있었으나 사용하지 못하였다. 펌프모터를 가동할 비상 전력설비가 없었다. 원자로와 분리된 독립적 발전장치를 두지 않고 자체 발전설비의 안전성에만 의존할 설계에 대한 비판이 있다²⁸⁾. 위 사고사례를 인간 시스템 상호작용의 실패유형에 따라 분류하면 Table 2와 같다. 실패유형 구분은 시스템과 소통하는 작업자의 지각(perception), 인

Table 2. Failure mode examples in human-system interaction

Accident cases	Failures in human properties			
	perception	recognising	reasoning	belief
Ladbroke train collision, U.K.(1999)	○			○
Honam chemical explosion, Korea(2003)		○		
East America electricity blackout, U.S.A.(2003)		○	○	
BP Texas chemical explosion, U.S.A.(2005)		○	○	
Fukushima nuclear power plant meltdown, Japan(2011)				○

식(recognising), 추론력(reasoning), 신뢰도(belief)에 있어 부정적 영향을 받았는지 여부에 따라 구분하였다.

전술한 휴먼에러이론에 의해 고찰해 볼 때 고도화 시스템이 갖는 리스크의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 안전시스템은 인간의 의도적, 비의도적 행동에 의해 실패할 가능성이 있다. 둘째, 시스템에 안전설비의 채택은 미시적, 국소적 안전성을 높아지지만, 시스템 전체, 거시적, 급격한 변화(catastrophic change)의 리스크는 상존한다. 셋째, 부수적 작업에 더욱 유의하여야 한다. 전술한 휴먼에러 이론에서도 일상적작업보다 점검, 보수, 비상조치 등에 있어 인간의 휴먼에러 가능성이 더 높아진다고 한다. 특히 고도화시스템의 조직에는 이러한 업무를 여러 조직이 나누어 담당하고 있다. 넷째, 따라서 휴먼에러의 대응은 인간을 시스템에서 소외시키는 방식으로 휴먼에러를 제거하는 것이 아닌 리스크를 관리하는 측면에서 접근하여야 한다.

3. 종합조화 개념 및 리스크 대응전략

3.1. 종합조화 개념

앞서 살펴본 휴먼에러 이론은 시스템이 인간의 인식, 태도 및 행동에 미치는 영향을 설명하고 있다는 점에서 의의가 있으나 각각의 이론은 시스템의 전반적인 영향에 대한 설명을 하지 않고 있어 종합적 대응책에 대한 전략 마련에는 한계가 있다. 기계설비 부품 하나하나의 모양, 기능에 안전성이 있다고 하여서 전체 시스템의 안전성을 담보하지는 못한다. 특히 원자력, 철도·항공, 화학공정과 같은 대형 시스템의 경우 더욱 그러하다. Figure 1에서는 시스템과 작업자가 가지는 각각의 요소(properties)와 이들이 상호 소통하는 관계를 표시하였다.

본 연구에서는 사람과 시스템의 interaction에서 발생하는 부조화 현상을 모두 포괄하면서 종합적으로 설명하기 위해서 ‘인간-시스템 종합조화(Total Harmony, Coordination for Human-System Interaction)’ 개념을 소개한다. 조화(harmony)란 서로가 잘 어울린다는 의미이다. 이는 상호작용이며 일방적으로 제공되는 것이 아니다. 따라서 종합조화는 시스템이 제공하는 표시, 기능, 운전상태를 작업자가 이해하고 반응하

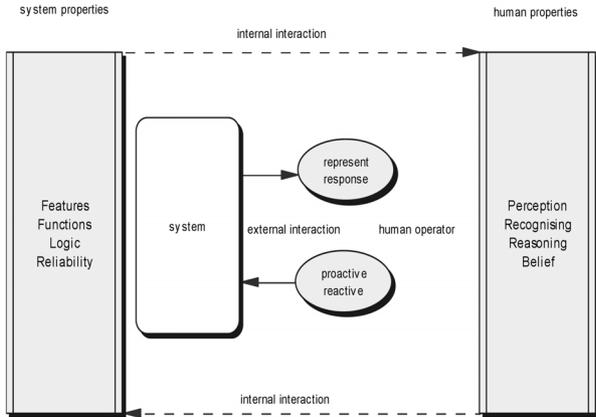


Fig. 2. Human - system interaction model

면서 바르게 해석할 수 있어야 한다. 또한 작업자가 대응이 필요한 때 제대로 대응할 수 있어야 함을 의미한다. 따라서 시스템의 설계, 관리는 이러한 인간과 시스템의 종합조화가 갖춰지도록 하여야 한다.

인간공학 이론에서 시스템은 인간의 인지모텔(mental model)에 부합하도록 설계되어야 한다고 한다²⁹⁾. 하지만 주로 표시장치 등의 설계와 같은 하위 레벨수준의 인지모텔의 일치에 주목하고 있다. 여기서는 시스템 전체에 대한 인간의 인식과 믿음까지 고려한 조화와 관리를 말한다. 중요한 점은 이러한 조화가 사전에 결정되지 않는다는 것이다. 시스템의 안전은 상호반응하며 진화한다. 처음에는 안전하게 설계하였더라도 시스템 내의 인간과 상호작용이 이루어지면서 시스템에는 새로운 불안정한 요인이 잠재되기 시작한다. 종합조화이론은 이러한 변화하는 시스템의 인식체계를 지속적으로 조화시키는 것을 말한다. 이는 리스크 관리가 휴먼에러에 대응하는 관리 틀이 되어야 한다는 점이다. 인간과 시스템과 관계에 있어 리스크는 지속적으로 변화하고 있다. 초기 리스크는 리스크 관리에 의해 안전성이 확보되지만 이는 상호반응 과정에 따라 곧 불안정한 상태로 바뀐다. 종합조화 시스템이란 시스템내의 작업자가 시스템을 이해하고 소통하며 시스템 내에서 능동적 역할과 참여가 가능하도록 시스템의 특성(feature), 기능(functions), 논리적 구성(logical reliability) 및 소통시스템(communication system)을 의 작업자의 지각적, 논리적, 심리적 상태에 부합하도록 설계, 운영되는 있는 시스템을 말 한다. 또한 동 시스템은 리스크관리를 통하여 지속적으로 관찰, 수정되어야한다. Figure 3은 인간-시스템 종합 조화시스템의 프로세스를 보여주고 있다.

3.2. 리스크 대응 전략

기존의 사람과 기계의 안전시스템 구현을 위한 안전공학 이론에서는 Fail-safety, Fool proof, Lock system 원리를 제시하고 있다. 첫 번째 Fail-safety는 기계설비의 일부분에 결함이 발생하였을 경우 전체 시스템의 실패나 작업자의 사고를 방지하기 위해 해당 결함이 전체시스템으로 확산되지 않도록 하는 것이다. 여기에는 구조적, 기능적으로

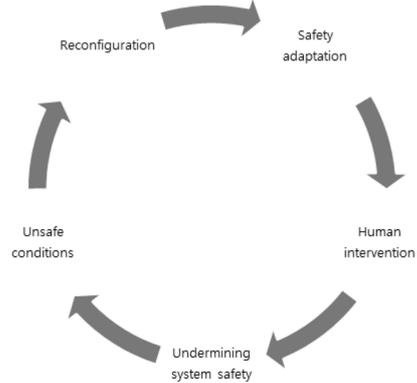


Fig. 3. Harmonization process of human-system interaction

구분한다. 두 번째 Fool proof 원리는 작업자가 기계·설비를 잘못 취급하여도 바로 사고와 직결되지 않도록 하는 장치를 말한다. 마지막 Lock system 은 작업자가 위험장소에 들어가거나 작동을 하지 못하도록 하는 시스템이다. 여기에는 인터록시스템, 트랜스록 시스템, 인트라록 시스템이 있다. 하지만 이론적 고찰과 사고사례 분석에서 살펴보았듯이 이러한 안전시스템 설계 개념만으로 현재와 같은 고도화 시스템에서의 인간-시스템 부조화로 인한 사고를 예방하는 데에는 한계가 있다. 고도화 시스템은 시스템의 설계가 고도로 복잡화, 소형화되어 서로 복잡하게 얽혀 있고 시스템의 작동은 신속히 이루어지고 있어 fail-safety나 fool proof, lock system 의 완전한 구현이 어려워졌다.

앞서 살펴본 바와 같이 시스템의 고기능화, 자동화를 반영하여 시스템 안전성의 개념을 도입할 경우 시스템이 갖추어야 할 기능에는 장치의 방호장치 뿐 아니라 인간의 심리, 인지, 사회학적 요소에 관한 사항도 고려하여야 한다. 따라서 고도화 시스템의 휴먼에러 예방을 위한 시스템 설계원칙으로 다음 3가지를 소개한다. (1)시스템은 작업자의 reasoning을 향상시키도록 하여야 한다³⁰⁾. (2)시스템은 시스템내 작업자가 시스템의 상황을 인식(situation awareness)하는데 지속적으로 도움을 주도록 설계, 운영되어야 한다³¹⁾. (3)시스템 안전의 목표는 시스템 자체의 방어는 물론 사람과의 조화이다³²⁾.

구체적 방법으로는 시스템은 다음과 같은 5가지의 power를 작업자에게 제공(requirements)하여야 한다. 첫째, Affordance power: 시스템의 각 구성요소는 작업자가 그 기능에 대한 혼란을 야기하지 않고 즉각적으로 인지할 수 있도록 형태, 모양, 크기, 색상, 배치 등 특성(feature)이 정하여 져야 한다¹⁵⁾. 둘째, Reasoning power: 시스템이 갖고 있는 정보는 작업자도 시스템 내부의 작동원리를 인식하고 현재 상태를 이해할 수 있는 형태로 제공하여야 한다¹⁷⁾. 셋째, Competency power: 이상상태 발생시 작업자가 대응능력(countermeasure)을 확보할 수 있도록 한다¹³⁾. 넷째, Communication power: 시스템의 표시장치(display)는 작업자와 부단한 소통이 이루어지도록 세심한 구성이 필요하다¹⁴⁾. 다섯째, Coordinating power: 시스템이 갖고 있는 여

러 요소와의 연관성에 대하여 명백히 이해할 수 있는 형태로 제공하여야 한다. 안전장치는 그 사용의 한계를 나타내어야 한다³⁰⁾. 각종 작업절차, 명세서나 지침이 다른 설비나 작업의 절차등과 충돌하지 않도록 구성되어야 한다.

이러한 휴먼에러 방지요소를 갖춘 시스템이 지속적으로 휴먼에러에 대응하도록 하기 위한 리스크매니지먼트 전략을 리스크매니지먼트 각 단계별로 살펴보면 다음과 같다.

Risk assessment 단계에는 휴먼에러가 발생할 수 있는 상황을 인간의 인지 및 신뢰 레벨의 모든 수준에서 평가하여야 한다. 이는 단위작업설비요소에 한 라인의 작업공정, 공장전체의 시스템관리 상태까지 같이 이루어져야 한다. Risk evaluation and decision 단계에서는 인간의 에러로 발생할 수 있는 급격한 변화요소를 평가하여야 한다. 특히 정상상태를 벗어나는 작업이나 환경의 발생에 대한 평가가 중요하다. Risk treatment 단계에서는 사용자(작업자)의 반응에 중점을 둔 조치방안을 고려하여야 한다. 작업자의 대응능력을 높이는 대책을 포함하여야 한다. Risk review and monitoring 단계에서는 사용자의 안전시스템에 대한 undermining 요소를 지속적으로 관찰하여야 한다. 예를 들어 절차의 변경이나 작업조직(특히, 점검·보수조직)의 변경시에는 그로 인한 위험요소를 면밀히 추적, 관찰할 필요가 있다.

4. 결론

이 연구에서는 자동화와 안전설비가 인간에 미치는 영향에 대한 문헌을 고찰해보았다. 시스템의 복잡화, 컴퓨터화는 인간과 시스템내에서 기계와의 소통이 원활히 이루어지지 않을 경우 우발적인 실수로 인하여 치명적 시스템의 손상과 인명피해를 야기할 수 있다. 따라서 이에 대한 대응책을 마련하는 것이 현대 고도화된 정보기술 사회에 있어 안전관리의 필수요소의 하나이다. 선진국에서는 이와 관련한 연구가 다양하게 진행되어 왔으나 국내에서는 고도화 시스템에 대한 휴먼에러 방지대책에 대한 사업장의 대응능력이 부족한 바³³⁾, 고도화 시스템이 인간에 미치는 영향을 살펴보고 이에 대한 리스크 대응 전략의 방향을 제시하였다는 점에서 본 연구의 의의가 있다.

시스템이 인간의 불확실성을 완벽하게 통제할 수 없기 때문에 인간의 실수에 의한 사고를 효과적으로 예방하기 위해서는 시스템이 인간과 소통하는 인간-시스템의 조화는 현대 고도화 시스템의 사고방지를 위해서 중요하다는 것을 본 연구에서 알 수 있었다. 특히 고도화시스템내에서의 업무의 분화현상이 가속화 되고 있고, 고용량설비 또는 고위험유해물질의 사용량이 증가하고 있고, IT를 기반으로 하는 자동화 시스템을 다수 채용하고 있는 우리나라에서는 이러한 개념의 적극적인 활용이 중요하다. 시스템을 설계하는 단계에서의 위험성 평가를 하거나 공정관리, 작업관리시 위험성평가 등 리스크관리를 함께 있어 본 연구 결과에서 제시하는 사항은 안전대책 수립을 전략으로 채용할 수 있을 것으로 사료된다. 아울러 이 연구에서

소개한 개념을 참조하여 보다 상세한 휴먼-시스템 실패방지대책에 대한 심도 있는 연구가 이루어지기를 기대한다.

References

- 1) C. Perrow, "Normal Accidents: Living with High-risk Technologies". Princeton, NJ: Princeton University Press, 1999.
- 2) T. Moriyam, H. Ohtani, "Risk Assessment Tools Incorporating Human Error Probabilities in the Japanese Small-sized Establishment", Safety science, 2009.
- 3) D.A. Wiegmann, S.A. Shappell, "A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System", Ashgate, 2003.
- 4) J.S. Busby, R.E. Hibberd, "Mutual Misconceptions between Designers and Operators of Hazardous Systems", Research in Engineering Design, 13, 132-138, 2002.
- 5) J. Rasmussen, "Skills, Rules, Knowledge: Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13, 257-267, 1983.
- 6) D.A. Norman, "Categorization of Action Slips". Psychological Review, 88, 1-15, 1981.
- 7) J. Reason, Human Error. Cambridge University Press, 1990.
- 8) A. Mital, A. Pennathur, "Advanced Technologies and Humans in Manufacturing Workplaces : An Interdependent Relationship", International journal of industrial ergonomics, vol. 33, no4, pp. 295-313, 2004.
- 9) Aviation Safety Investigation Report 200402747, "Final ATSB Report into the 24 July 2004 Boeing 737 Ground Proximity Caution near Canberra", Australian Transport Safety Bureau, 2005.
- 10) Accident Investigation Report, "Accident of the a/c 5B-DBY of Helios Airways, Flight HCY522 on August 14, 2005", The Accident Investigation and Aviation Safety Board, 2006.
- 11) I.J. Shin, "Development of a Theory-based Ontology of Design-Induced Error", PhD Thesis, University of Bath, 2009.
- 12) B.M. Muir, N. Moray, "Trust in Automation: Part1-Theoretical Issues on the Study of Trust and Human Intervention in Automated Systems", Ergonomics, 37, 1905-1923, 1994.
- 13) L. Bainbridge, "The Ironies of Automation". Automatica, 19, 775-780, 1983.
- 14) N.B. Sarter, D.D. Woods and C.E. Billings, "Automation Surprises", in G. Salvendy (Ed.) Handbook of Human Factors & Ergonomics, second edition, Wiley. pp. 1926-1943, 1997.
- 15) B.L. Wong, J. Hayes and T. Moore, "What Makes Emergency Ambulance Command and Control Complex?", Workshop on Complexity in Design and Engineering, 10-12th March 2005, 2005.
- 16) G.J.S. Wilde, "The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health", Risk Analysis, 2, 209-225, 1982.
- 17) E. Hutchins, J.D. Hollan and D.A. Norman, "Direct Manipulation Interfaces", Human - Computer Interaction, 1,

- 311-338, 1985.
- 18) J.J. Gibson, "The Theory of Affordances", In Shaw,R., Bransford, J.,(Eds.). "Perceiving, acting, andknowing: Toward an ecological psychology", (pp. 67-82). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1977.
 - 19) D.A. Norman, "The Design of Everyday Things", The MIT Press, 1998.
 - 20) J.S. Busby, E.J. Hughes, "How Plan Delegation Contributes to Systemic Failure", *Human Systems Management*22, 13-22, 2003.
 - 21) V. De Keyser, "Temporal Decision Making in Complex Environments", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 327, No. 1241, *Human Factors in Hazardous Situations* (Apr. 12, 1990), pp. 569-576, 1990.
 - 22) M.R. Endsley, "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems". *Human Factors*, 37(1), 32-64, 1995.
 - 23) J. Hollan, E. Hutchins and D. Kirsh, "Distributed Cognition: Toward a New Foundation for Human-computer Interaction Research". *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7, 174-196, 2000.
 - 24) HSE, "The Train Collision at Ladbroke Grove 5 October 1999. A Report of the HSE Investigation". Health and Safety Executive. London:HMSO, 2000.
 - 25) KOSHA, Accident Report, 2003.
 - 26) US -Canada Power System Outage Task Force, "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes Recommendations", Ministry of Energy, 2004.
 - 27) BP Fatal accident investigation report, "Isomerization Unit Explosion Final Report", Texas, USA., 2005.
 - 28) K. Ohmae, "World is Ignoring Most Important Lesson from Fukushima Nuclear Disaster", April 4 2012, *The Christian Science Monitor*, 2012.
 - 29) J.R. Wilson, & A. Rutherford, "Mental Models: Theory and Application in Human Factors", *Human Factors*, 31, 617 - 634, 1989.
 - 30) J.S. Busby, & R.E. Hibberd, "The Coordinating Role of Organizational Artefacts in Distributed Cognitions and How it Fails in Maritime Operations", *Le travail humain*, 69, pp.25-47, 2006.
 - 31) F. Durso, K. Rawson, & S. Giroto, "Comprehension and Situation awareness", In F. Durso, R. Nickerson, S. Dumais, S. Lewandowsky, & T. Perfect (Eds.), *Handbook of applied cognition*.(2nd ed., pp. 163 - 194). Hoboken, NJ: Wiley. 2007.
 - 32) D.D. Woods, R.I. Cook, "Perspectives on Human Error: Hindsight Bias and Local Rationality". In F. Durso (Ed.) *Handbook of Applied Cognitive Psychology*. New York: Wiley, 141-171, 1999.
 - 33) J.C. Park, "Techniques and Management Strategies for Preventing Human-error Related Chemical Accidents", Korea Occupational Safety and Health Research Institute, 2012.