



독성가스시설의 인적오류 수행영향인자에 관한 연구

김영란 · 장서일 · 신동일 · 김태옥 · [†]박교식

명지대학교 화학공학과

(2014년 7월 14일 접수, 2014년 8월 26일 수정, 2014년 8월 27일 채택)

A Study on Performance Shaping Factors of Human Error in Toxic Gas Facilities

Youngran Kim · Seo-Il Jang · Dongil Shin · Tae-Ok Kim · [†]Kyoshik Park

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received July 14, 2013; Revised August 26, 2014; Accepted August 27, 2014)

요 약

독성가스시설에서 대형사고로 인한 손실을 감소시키기 위해서는 인적요소를 제어하고, 평가하는 것이 필요하다. 기존의 안전성 평가는 기계적 결함이나 시스템의 위협이 주로 강조되어 왔으며, 인적오류를 관리하는 평가방법이 부족하여 본 연구에서는 독성가스시설의 사고관리 상황에서 인적오류를 구성하는 수행영향인자 분류체계를 제안하고자 하였다. 이를 위해 주요 수행영향인자 분류체계의 유형을 수집하여 검토와 분석을 한 후 4가지(작업자 특성, 시스템, 직무특성 및 직무환경)로 나누고, 독성가스시설의 상황적 특성과 직무특성 및 작업환경을 고려하여 수행영향인자를 선택하였다. 이로 부터 인적오류의 평가에 사용하기 적절한 수행영향인자 체계를 구축하고, 구축한 수행영향인자 분류체계를 독성가스시설에서 발생하였던 사고 사례분석을 통해 적용성을 검토하였다.

Abstract - It is necessary to control and evaluate human factors to reduce economic loss by major accident in toxic gas facilities. Conventional works to evaluate hazards have been focused on mechanical and systematic failure, while only a little works have been studied on managing human errors. In this work, a classification system of performance shaping factor (PSF) was suggested to consist human error in managing accident in the toxic gas facilities. Four types of PSFs (human, system, task characteristics, and task environment) were collected, reviewed, and analyzed to be categorized selected according their characteristics of situational, task, and environmental parameters. The PSFs were further modified to set up PSF systems adequate to evaluate human error, and the proposed system to consist PSFs to evaluate human error was further studied through accident analysis in toxic gas facilities.

Key words : human error, performance shaping factor (PSF), toxic gas facilities

1. 서 론

독성가스시설은 점차 설비가 대형화되고 복잡해지고 있으나, 위험 관리 및 평가는 주로 사고 영향에

만 초점이 맞추어져 있고, 인적오류 관리를 위한 요인들은 중요하게 고려되어 있지 않다. 즉, 최근 독성가스산업은 급속한 발전으로 고도화 되고 있으나, 독성가스시설에서 발생하는 사고의 대부분은 인적오류가 주된 원인으로 분석되고 있다. 이와 같은 인적오류를 제어하기 위해서는 공정을 제어하는 설비, 장치, 시스템과 자료들을 분석하여 어느 부분에 결

[†]Corresponding author: hwayi21@empas.com

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

함이 있는지 판단하고, 결과로 나타난 결함요소가 사고로 나타날 가능성이 있는지에 대한 결함수목도 분석, 잠재위험 및 운전성 분석, 고장모드 및 영향분석, 원인 결과 분석 등의 자료를 바탕으로 분석이 필요하다. 그리고 분석결과를 바탕으로, 인적오류 유발요소를 제어하기 위한 수행영향인자(performance shaping factor, PSF)를 개발하고, 안전성 향상을 위해 수행영향인자를 수정하거나 추가하여 인적오류의 제어관리가 필요하다[1].

인적오류에 관한 연구는 끊임없이 연구되고 있는데, 대표적인 예로는 유럽의 EPSC(European Process Safety Centre)의 PRISM(Process Information and Safety Management)에서는 인적오류에 관한 연구가 진행되고 있고, 국내에서도 구미 불산사고 이후 인적오류 관한 연구가 더욱 활발하게 진행되고 있다 [2-4].

일반적으로 수행영향인자 분류체계는 그 특성상 적용분야와 사용목적에 적합한 형태로 개발되었으나, 기존의 수행영향인자 분류체계에는 여러 가지 문제점들이 있다. 즉, 수행영향인자 분류체계의 선정이 단계적인 과정보다는 개발자의 주관적인 판단으로 선정이 되고 있다는 점과 적용되는 수행영향인자들의 정의와 평가내용이 누락되어 있다는 점이다 [5]. 따라서 기존 수행영향인자 분류체계가 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해서는 선정과정이 체계적으로 되어야 한다.

본 연구에서는 수행영향인자 분류체계를 개발하는 방안을 제시하기 위하여 독성가스시설의 수행영향인자 체계를 구축하고, 구축한 수행영향인자 분류체계를 누출사고의 사례분석을 통해 적용성을 검토하였다.

II. 기존 수행영향인자 분류체계 검토

일반적인 수행영향인자의 의미는 육체적, 심리적, 생리적, 환경적 요인 등에 의해 영향을 받는 모든 요인들로 정의된다. 기존의 인적오류 분석에서 사용되고 있는 수행영향인자 분류체계는 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction), CREAM(Cognitive Reliability and Error Analysis Method), SPAR-H(Standardized Plant Analysis Risk-Human), CSNI Taxonomy 등이 있다[6-8].

현재까지 원자력 산업에서 사용되고 있는 THERP는 가장 대표적인 수행영향인자라고 할 수 있는데, THERP는 총 67개의 PSF를 크게 외적 수행영향인자(external PSF), 내적 수행영향인자(internal PSF) 및 스트레스 수행영향인자(stressor PSF)로 나누고 있

다. 이때, 외적 수행영향인자는 상황특성(situational characteristics), 직무 지시(job and task instruction) 및 직무와 장비 특성(task and equipment characteristics)로 분류하였고, 내적 수행영향인자는 유기적 인자(organismic factors)로 구분하고, 스트레스 수행영향인자는 심리적 스트레스(psychological stressor)와 생리적 스트레스(physiological stressor)로 분류하였다.

CREAM은 PSF가 아닌 CPCs(Common Performance Conditions)를 제시한 것으로, CPCs는 직무 상황을 평가하는 곳에 활용되고 있다. CREAM에서는 크게 10가지 CPCs로 나누고, 조직의 적절성, 작업조건, 인간시스템 인터페이스의 적절성 및 운영 지원, 시뮬레이션 목표의 수, 하루(주기리듬), 절차의 가용성 및 운영 지원, 목표의 수, 가용시간, 훈련과 경험의 적절성, 그리고 협업품질로 분류하였다.

SPAR-H는 8개 PSFs를 가용시간, 복잡성, 절차, 적성, 스트레스/스트레스들, 체험/훈련, 인체공학/인간시스템 인터페이스와 작업과정으로 구분하였고, CSNI taxonomy는 6개 PSFs로 주관적인 목표와 의도(subjective goals and intentions), 정신적 과부하 원인(mental load resources), 정서적 요인(affective factors), 직무특성(task characteristics), 물리적 환경(physical environment) 및 작업시간 특성(work time characteristics)으로 분류하였다.

이와 같은 기존의 수행영향인자 분류체계를 보면 분류체계의 선정이 단계적인 과정보다는 개발자의 주관적인 판단으로 선정되고 있다는 점과 적용되는 수행영향인자들의 정의와 평가내용이 누락되어 있다는 문제점이다. 따라서 기존 수행영향인자 분류체계가 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해서는 선정과정이 체계적으로 되어야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 인적오류분석 방법에서 사용되고 있는 수행영향인자의 여러 인자들 중에서 선정된 인자들이 어떤 특성과 추이를 가지고 있는지를 검토하였다. 초기의 인적오류분석 방법에 사용되는 THERP는 작업자 훈련, 경험 스트레스 수준 등과 같은 인자를 사용하고 있고, 이후 제시된 CREAM은 시스템의 중요성을 제시하고 있다. 그 외에 여러 수행영향인자들에서 사용되고 있는 인자들은 경험(experience), 절차서(procedure), 사람-장치간 인터페이스(MMI, Man-Machine-Interface), 스트레스(stress), 작업상태(working condition) 등을 자주 사용하고 있다.

기존의 수행영향인자 분류체계를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. The existing performance shaping factors

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> External performance shaping factors <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Situational characteristics (PSFs general to one or more jobs in a work situation)</i> <ul style="list-style-type: none"> - Architectural features - Quality of environment (temperature, humidity, air quality, and radiation, lighting, noise and vibration, degree of general cleanliness) - Work hours / work breaks - Availability / adequacy of special equipment, tools and supplies - Shift rotation - Staffing parameters : Organizational structure (authority, responsibility, and regulatory personnel) - Action by supervisors, co-workers, union representatives, and regulatory personnel - Rewards, recognitions, benefits ■ <i>Job and task instructions ; single most important tool for most tasks</i> <ul style="list-style-type: none"> - Procedures required (written or not written) - Cautions and warning - Written or oral communications - Work methods - Plant policies (shop practises) ■ <i>Task and equipment characteristics</i> <ul style="list-style-type: none"> - Perceptual requirements - Motor requirements (speed, strength, precision) - Control-display relationships - Anticipatory requirements - Interpretation - Decision-making - Complexity (information load) - Narrowness of task - Frequency and repetitiveness - Task criticality - Long-and short term memory - Calculation requirements - Feedback (knowledge of results) - Dynamics vs Step-by-step activities - Team structure and communication - Man-machine interface factors (design of prime/test/manufacturing equipment, job aids, tools, fixtures) <input type="checkbox"/> Internal Performance shaping factors <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Organismic factors (characteristics of people resulting from internal & external influences)</i> <ul style="list-style-type: none"> - Previous training / experience - State of current practice or skill - Personality and intelligence variables - Motivation and attitudes - Knowledge required (performance standards) - Stress (mental or bodily tension) - Emotional state - Sex differences - Physical condition - Attitudes based on influence of family and other outside persons or agencies - Group identification <input type="checkbox"/> Stressor performance shaping factors <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Psychological stressors (PSFs which directly affect mental stress)</i> <ul style="list-style-type: none"> - Suddenness of onset - Duration of stress - Task speed - High jeopardy risk

Table 1. (Continued)

<ul style="list-style-type: none"> - Threats (of failure, loss of job) - Monotonous, degrading or meaningless work - Long, uneventful vigilance periods - Conflicts of motives about for performance - Reinforcement absent or negative - Sensory deprivation - Distractions (noise, glare, movement, flicker, colour) - Inconsistent cueing ■ <i>Physiological stressors (PSFs which director affect physical stress)</i> <ul style="list-style-type: none"> - Duration of stress - Fatigue - Pain or discomfort - Hunger or thirst - Temperature extremes - Atmospheric pressure extremes - Oxygen insufficiency - Vibration - Movement constriction - Lack of physical exercise - Disruption of circadian rhythm
CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)
<ul style="list-style-type: none"> - Adequacy of organization - Working conditions - Adequacy of MMI and Operational support - Availability of procedures/plans - Number of simultaneous goals - Available time - Time of day - Adequacy of training and preparation - Crew collaboration quality
SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human)
<ul style="list-style-type: none"> - Available time - Stress / Stressors - Fitness for duty - Procedures - Ergonomics / HMI - Experience / Training - Work process - Complexity
CSNI Taxonomy
<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Subjective goals and intentions</i> <ul style="list-style-type: none"> - Exaggerations of some task - Aspects - Inappropriate extension of task contents - Task perceived as secondary - Conflicting goals - Inappropriate extension of task contents - Other ■ <i>Mental load, resources</i> <ul style="list-style-type: none"> - Inadequate ergonomic design of work place - Inadequate general task training and instruction

Table 1. (Continued)

<ul style="list-style-type: none"> - Overlapping tasks - Inadequate general education ■ <i>Affective factors</i> <ul style="list-style-type: none"> - Social factors - Time pressure - Insufficient load, boredom - Fear of failure - Other ■ <i>Task characteristics</i> <ul style="list-style-type: none"> - Familiar task on schedule - Familiar task on demands - Unfamiliar task on schedule - Unfamiliar task on demand ■ <i>Physical environment</i> <ul style="list-style-type: none"> - Noise - Light - Uncomfortable temperature - Humidity - Pressure - Smell - Radiation ■ <i>Work time characteristics</i> <ul style="list-style-type: none"> - Day shift - Night shift - In beginning shift - In middle shift - At end of shift, Not stated applicable

기존의 수행영향인자 분류체계들을 살펴보면 초기에는 운전원의 훈련과 경험 수준과 스트레스 인자와 같은 제한적인 인자들을 사용하고 있으나, 점차 그룹의 영향인자와 안전문화와 같은 인자들을 주요한 인자로 고려하였다. 그러나 안전문화 인자와 그룹의 영향인자 같은 경우는 세부적으로 인자를 정의하고, 그 의미를 정의하는 것이 필요하다.

III. 독성가스시설에서 수행영향인자 도출

기존의 수행영향인자를 바탕으로, 수행영향인자들은 작업자 특성(human), 시스템(system), 직무특성(task characteristics) 및 직무환경(task environment)으로 나누어서 총 수행영향인자를 구성할 수 있다. 이때, 작업자 특성이란 작업자 개인의 특성, 작업 능력 등과 같은 인자들을 말하는 것이고, 직무특성은 작업자에게 요구되는 직무와 관련된 인자들이다. 그리고 직무환경은 물리적인 작업환경 및 작업유형 등에 관련된 인자들을 말한다[1].

Table 2는 기본 수행영향인자 분류체계를 작업자 특성, 시스템, 직무특성 및 직무환경으로 구분하여 정리한 것이다.

첫 번째로, 독성가스시설에서 사고가 발생하는 경우에는 작업자의 인지적인 능력을 요구하기 때문에 작업자의 역할이 매우 중요하다[8]. 특히, 작업자는 관찰 및 진단 평가와 의사결정의 기능이 필요하기 때문에 작업자의 경험과 기술이 매우 중요한 요인이 된다. 즉, 직무교육 제공 등이 사고 발생 시 적절한 조치의 도움을 주기 때문에 분류체계에 직무지식(knowledge), 경험(experience), 기술(skills) 및 훈련(training)을 포함하였다. 또한 작업자의 정상적인 수행도에 영향을 미칠 수 있는 육체적 상태(physical condition)와 감정 상태(emotional state) 등도 선정하였다.

두 번째로, 시스템에는 시간의 관련된 인자인 가용시간(available time)을 선정하였고, 독성가스시설의 특성과 관련된 인자들인 피드백(feedback), 가스의 종류(type of gas) 등을 추가하였다. 그리고 기존의 수행영향인자의 조작-디스플레이 관계(control-display relationship)를 세분화 하여 조작부(controller), 조작 종류(control types)와 가시화(visibility)를 추가하였으며, HMI(Human-Machine-Interface) 자체가 인적오류에 영향을 줄 수 있어서 이를 추가하였다.

세 번째로, 직무특성의 경우 독성가스시설에서

Table 2. Total performance shaping factors

Level	PSFs	Classification system
Human	Previous training / experience State of current practice or skill Motivation and attitudes Knowledge Stress, stressors, mental load Emotional state Sex differences Physical condition Attitudes of family and agencies, social factors High jeopardy risk Decision-making Mental load	THERP, CREAM, SPAR-H THERP THERP THERP THERP, SPAR-H, CSNI Taxonomy THERP THERP THERP, CSNI Taxonomy THERP THERP THERP, CSNI Taxonomy
System	Control-display relationships Long-and short term memory Calculation requirements Feedback (knowledge of results) Man-machine interface factors, operation support Task speed, HMI(Human Machine Interface) Available time Work process Plant policies Dynamics vs step-by-step activities	THERP THERP THERP THERP THERP, CREAM, SPAR-H THERP CREAM, SPAR-H SPAR-H THERP THERP
Task characteristics	Procedure, pans Cautions and warning Work methods Task schedule Task demand	THERP, CREAM, SPAR-H THERP THERP CSNI Taxonomy CSNI Taxonomy
Environment	Motor requirements (speed, strength, precision) Complexity (information load) Narrowness of task Frequency Communication Group identification Team structure and communication Quality of environment Time of day Architectural features Work hours / work breaks Availability / adequacy of special Equipment, tools and supplies Action by supervisors, co-workers, crew collaboration quality	THERP THERP THERP THERP THERP, CSNI Taxonomy THERP, CREAM THERP, CSNI Taxonomy THERP, CSNI Taxonomy THERP THERP THERP THERP THERP CREAM THERP, CSNI Taxonomy

사고 상황을 대처하기 위해서는 절차서의 설명수준과 이용도, 갱신빈도 또한 직무특성의 중요요인이기 때문에 절차서를 선정하였고, 직무 자체가 단순하지 않은 동적인 상황이기 때문에 단계적인 수행능력이

중요하여 단계의 다른 세부화(level of detail) 등을 추가하였다. 또한 작업자와 작업자 간의 협력이나 의사소통, 리더의 능력이 중요한 영향을 주기에 리더십과 팀 협동력(team cooperation) 항목을 추가하였다.

Table 3. Classification of performance of shaping factors in toxic gas facilities

Human	System	Task characteristics	Task environment
<ul style="list-style-type: none"> - Knowledge - Experience - Skills - Training - Physical state: gender, age, skills - Fatigue, - Psychological state: emotion, mental load stress, responsibility, attitude 	<ul style="list-style-type: none"> - Feedback - Controller - Control types - Visibility - Value of parameters - Rate of parameters - Available time - Phase of plant operation - HMI - Type of gas 	<ul style="list-style-type: none"> - Procedure - Quality - Level of detail - Warning - Step by step activities - Calculational requirement - Leadership - Team cooperation - Narrowness 	<ul style="list-style-type: none"> - Place where operator action taken - Physical environment: noise, vibration, light, air quality, humidity, pressure - Work time - Communication - Safety culture

네 번째로, 직무환경의 경우 열악한 작업환경과 환경조건이 직무 수행능력에 영향을 끼치기 때문에 작업공간과 환경요인을 세분화 하고, 안전문화를 추가하였다.

따라서 독성가스시설에서 수행영향인자를 크게 4 가지로 구분한 최종 수행영향인자 분류체계를 Table 3과 같이 구축하였다.

이를 바탕으로 본 연구에서 독성가스시설에 대해 제시한 Table 3의 수행영향인자 분류체계를 주요 독성가스 사고사례를 통해 그 적용성을 검토하였다.

최근에 발생한 대표적인 독성가스 사고로는 2012년 9월 27일 경북 구미국가산업단지 4단지 내에서 발생한 불산 누출사고이다. 이 사고는 불산을 실은 20톤 탱크로리 두 대가 공장에 도착하여 한 대는 불산을 공장 내 보관탱크로 주입하고, 다른 한 대의 탱크 속 불산을 옮기던 중 근로자의 실수로 탱크로리의 밸브가 열리면서 약 8~12톤의 불화수소가 대기로 방출된 것으로 추정되었다. 당시 공장 직원들은 에어밸브가 잠긴 상태에서 배관 이음의 접속부분인 플랜지를 제거한 뒤 에어호스를 연결하고, 다시 원료밸브가 잠긴 상태에서 플랜지를 제거한 뒤 원료호스를 연결해야 하는 작업순서를 따르지 않고, 에어밸브와 원료밸브의 플랜지를 동시에 제거한 뒤 에어호스를 연결하다가 사고를 낸 것으로 확인되었다. 이 사고는 작업장에서 갖추어야 할 보호복과 보호장비 미착용 등의 작업자 부주의와 안전 불감증에 의해 발생한 사고이다[9].

위 사고의 원인인 인적오류는 Table 3의 독성가스시설 수행영향인자 분류체계에서 작업자의 지식, 경험 및 훈련과 관련되고, 시스템의 조작부와 직무특성의 절차서와도 관련됨을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 기존의 주요 인적오류에 대한 수행영향인자 분류체계를 분석하여 작업자 특성, 시스템, 직무특성 및 직무환경으로 분류하고, 각각의 수행영향인자를 구성하였다. 그리고 독성가스시설의 상황적 특성과 직무특성 및 작업환경을 고려하여 인적오류 평가에 적절한 수행영향인자를 선택하므로써 독성가스시설의 수행영향인자 체계를 구축하고, 구축한 수행영향인자 분류체계를 누출사고의 사례 분석을 통해 적용성을 검토하였다.

따라서 본 연구에서 도출한 수행영향인자 분류체계는 인적오류가 중요한 사고원인 중의 하나인 독성가스시설에 적용하여 사고로 인한 손실을 최소화 하는데 중요한 평가자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업의 '고압 독성가스 사고피해 기반 안전관리 기술개발' 과제(과제번호: 20132010500050)의 성과입니다.

참고문헌

[1] Jo, Y. D., Park, K. S., and Park, H. J., "A method of human error management in chemical process industries", *KIGAS*, 7(2), 42-47, (2003)

[2] <http://www.epsc.org>

[3] Lowe, K. and Kariuki, S. G., "Integrating Human Factors into Process Hazard analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 1764-1773, (2007)

- [4] Yu, K. S., Kim E. J., and Kim, Y. S., "Analysis of Performance Influencing Factor in Chemical Process Industry : A Practical Application", *KIGAS*, **11**(2), 60-64, (2007)
- [5] Kim, J. W. and Jeong, W. D., "Selection of Influencing Factors for Human Reliability Analysis of Accident Management Tasks in Nuclear Power Plants", *J. of the Ergonomics Society of Korea*, **20**(2), 1-28, (2001)
- [6] Swain, A. and Guttman, H. E., *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREG/CR-1278, US NRC, USA, (1983)
- [7] Hollnagel, E., *Cognitive Reliability and Error Analysis Methodology*, Elsevier, (1998)
- [8] Gertman, D. I., Blackman, H. S., Marble, H. L., Byres, J. C., and Smith, C. L., *The SPAR-H Human Reliability Analysis Method*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, (2005)
- [9] Park, J. K. and Seo, Y. W., *A Study on the Improvement of the Chemical Accident Response System*, Korea Environment Institute, 20-29, (2013)