

화학공정산업의 인적오류 제어 방법

† 조 영 도 · 박 교 식 · 박 희 준
한국가스안전공사 가스안전시험연구원
(2003년 4월 30일 접수, 2003년 6월 13일 채택)

A method of human error management in chemical process industries

Young-Do Jo · Kyo-Shik Park and Heui-Joon Park
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation
(Received 30 April 2003 ; Accepted 13 June 2003)

요 약

화학공정산업에서 화재, 폭발, 독성물질 누출의 대형사고로 인한 막대한 인적·물적 손실을 효과적으로 방지하기 위하여 기계적 오류와 연계하여 사람의 행동을 동적으로 제어하는 것이 필요하다. 석유화학공단을 비롯한 에너지산업시설에서의 대형사고는 기계적인 결함과 더불어 사람의 행동과 관련되어 있음에도 불구하고, 대부분의 연구는 시스템의 위험을 감소시키기 위하여 안전장치의 결함과 인간의 행동에 대하여 서로 연계를 지우지 않고 독립적으로 연구를 수행하여 왔다. 본 연구에서는 화학공정산업의 안전을 향상시키기 위한 방법을 제시하기 위하여 기계적 고장과 인적오류를 동시에 고려하여 인적오류를 제어하고, 중요한 수행영향인자에 대하여 고찰하였다.

Abstract - To prevent major accident from toxic gas release, explosion, or fire in chemical processes, it needs dynamic control of human error with mechanical failure. Although most of major accidents occur with a coupling of human error and mechanical failure, numbers of researches have studied human error and mechanical reliability independently, but no where cross each other, to reduce the risk in the process. This work focuses on the coincidence of human error and mechanical failure for management of human error, and on some important performance shaping factors to propose a method for improving safety effectively of the process industries.

Key words : Dynamic management, human error, risk management, performance shaping factor, mechanical failure, major accident

1. 서 론

화학공정산업에서 사고발생 경위는 결함수목분석, 사건수목분석, 그리고 원인결과분석 등의 기법을 이용하여 과거에 발생한 사고를 분석하고, 아직 경험하지 못한 대형사고를 예

측하기 위하여 복잡하게 연계된 기본사건들을 해석하는데 적용하여 왔다[1,2]. 지금까지 에너지 산업시설에서 위험관리를 위한 도식적인 표현은 비정상적인 사건, 즉 인적오류 기계적인 결함을 기본사건으로 하여 전개하는 것이 일반적이다[3]. 그러나 기업활동에 있어서 작업자의 활동과 기계적 요소 뿐 만

아니라 조직, 사회적 영향요소 등이 위험분석에 포함되어야 종합적인 안전관리를 할 수 있다. 따라서 현재 급격히 변화하고 있는 기술과 사회적 변화를 수용할 수 있는 새로운 위험관리 및 제어기법 개발이 필요하다. 급격하게 변화하는 기술에 비하여 위험관리기술은 낙후되어 있다[4]. 대부분의 석유화학산업 시설을 비롯한 화학공정산업에서 전통적인 위험평가 및 제어 시스템에서는 기계적인 결합에 중점을 두고 있으며, 인간의 행동제어에 관하여 거의 다루고 있지 않다. 비록 자동화 기술과 제어기술의 눈부신 발전에도 불구하고 수많은 화학공정산업에서 위험을 방지하기 위한 인간의 의사결정이 필요하다. 지금까지 발생한 대형사고의 원인을 분석하여 보면, 인간의 부적절한 행동에 의한 결과가 사고원인이 되는 것이 50%에서 80%에 이른다. 따라서 현재는 하나의 부적절한 행동으로 인하여 대형사고가 발생하는 것을 근본적으로 방지할 수 있도록 안전장치를 설계하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러므로 거의 모든 대형사고는 사람의 부적절한 행동과 안전장치 등의 기계적인 결합이 동시에 일어날 때 대형사고가 발생하게 된다[5]. 인간의 부적절한 행동은 시스템의 설계상태, 주변환경, 그리고 개인적인 요소에 영향을 받는다고 일반적으로 알려져 있다. 비록 공정 시스템은 인적오류를 줄이거나 제거하기 위한 방법으로 설계하여 인적오류를 어느 정도 제어할 수 있으나, 개인적 요소와 주변환경에 대한 사항은 인적오류를 줄이기 위한 제어가 매우 어려운 편이다. 다시 말하면, 적절한 인터페이스 설계와 교육을 통하여 인간의 실수를 완전히 제거하기 어렵다. 인적오류는 인간의 집중에 대한 한계, 경우에 따라서 시스템의 변경, 그리고 자주 일어나지 않는 사건에 대한 지식의 한계 때문에 종종 일어날 수 있다. 이러한 인적오류는 인적오류에 영향을 미치는 요소들의 좋고 나쁨에 따라 100배정도 차이가 날 수 있음이 보고되어 있다[6]. 그러나 현재까지 석유화학 산업을 비롯한 화학공정산업에서 공정운영 시스템은 공정상태 즉 한계온도, 한계압력, 한계유속, 등에 대한 정보를 플랜트 운전자에게 제공하여 위험을 제어하기 위한 의사결정을 할 수 있도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 플랜트 운전자의 오류에 의한 대형사고를 예방하기 위하여 시스템의

공정상태 정보뿐만 아니라 안전장치의 상태와 안전장치의 상태에 따라 인적오류를 제어하는 방법에 대하여 검토하고자 한다.

2. 중대사고의 발생빈도

화학공정산업에서 위험관리는 중대위험이 발생할 가능성 있는 사고 시나리오에 대하여 발생확률을 평가하고, 발생확률이 기준치를 상회할 경우 안전장치를 부가하는 등의 기계적인 제어 시스템에 중점을 두고 있지만 지금까지의 대형 사고발생 원인을 살펴보면 50퍼센트에서 80퍼센트가 사람의 잘못에 있다. 대부분의 대형사고 원인은 사람의 잘못 뿐만 아니라 기계적인 결합 등 여러 가지 복합적인 원인이 총체적으로 작용하여 발생하게 된다. 다시 말하면 사람의 잘못에 의하여 대형사고로 연계되는 과정을 차단하기 위한 안전장치가 고장난 경우에 있어서 인적오류가 발생하게 되면 바로 대형사고가 발생하게 된다. 따라서 석유화학시설 등 화학공정산업에서 일어날 수 있는 대형사고 시나리오를 선별하고, 선별된 대형사고 시나리오에 따라 안전장치 등의 기계적인 결합이 발생할 확률과 사람의 잘못을 일으킬 수 있는 확률을 분석하여 시설의 전체적인 대형사고 발생 가능성 저감시킬 수 있는 방법으로 위험을 제어할 필요가 있다. 화학공정산업에서 대형사고를 일으킬 수 있는 위험요소는 안전검토, 체크리스트 분석, 상대순위법, 예비 잠재위험 분석, 잠재위험 및 운전성 분석, 고장모드 및 영향 분석, 원인 결과분석 등 기존의 분석기법을 활용하여 찾아낼 수 있다. 이렇게 찾아낸 대형사고의 시나리오를 사건수목분석, 결합수목 분석 등을 통하여 사고가 발생할 수 있는 확률을 산정하고, 사고가 발생할 경우 피해정도가 어느 정도 되는지 분석하여 위험을 구할 수 있다.

사람의 잘못으로 인하여 대형사고가 발생한 것이 50퍼센트를 상회하고 있지만 현재까지 국내의 대부분 위험평가에 있어서 기계적인 결합분석에 치중하고 있으며 또한 위험제어 시스템도 기계적인 결합과 공정상태 변수에 치중되어 있다. 화학공정산업에서 안전장치를 주기적으로 점검하는 시점, 수리하는 시점, 고장난 상태에서 수리하기 위하여 기다리는 시점 등 안전장치가 고장나 있는 상태를

알고 있음에도 불구하고 기업의 이익을 추구하기 위하여 프로세스를 중지시키지 않고 계속 운전할 수 있다. 이러한 시점에 작업자의 인적오류가 대형사고로 연계된다면 이를 효율적으로 저감시키기 위한 경고, 행동지침을 제시 또는 작업변경 등을 통하여 인적오류를 감소시킬 수 있다. 따라서 중대사고의 가능성을 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

중대사고 발생빈도 =
(안전장치 등 기계적 고장빈도) x (인적오류 확률) (1)

기계적 고장확률은 인적오류에 비하여 많은 연구가 진행되어 왔지만, 아직 작업자가 인지하고 있는 고장상태와 인지하고 있지 않은 고장상태로 분류하여 심도 있게 검토되지 않았다. 예를 들어 살펴보면, 정기적으로 검사를 하고 있는 긴급방출밸브 등과 같이 시스템이 위험한 순간에 작동하여 대형사고를 예방하는 안전장치에 있어서 안전장치의 작동이 적절하지 못할 확률을 산출하여 보면 다음과 같은 다섯 가지의 요인으로 나누어 고려할 수 있다.

1. 정기적인 검사주기 사이에서 안전장치가 고장나서 기능을 수행하지 못할 확률은 다음과 같다.

기능발휘하지 못할 확률 =
(검사주기) x (안전장치의 고장빈도) / 2 (2)

일반적으로 상기의 고장을 시스템에서 발견하기 어려우며 이에 따라 인적오류를 동적으로 제어하기 어렵다.

2. 정기 검사하는 도중에 안전장치가 기능을 제대로 수행하기 어려우므로 이때의 확률을 나타내면 다음과 같다.

기능발휘하지 못할 확률 =
평균 점검에 소요되는 시간 / 점검주기 (3)

상기와 같은 상태는 운전자나 점검원이 인지하고 있으므로 이에 따라 동적인 인적오류 제어가 가능하다.

3. 고장을 검지하고 보수하는데 소요되는 시

간에 의하여 안전장치가 기능을 수행할 수 없는 확률을 나타내면 다음과 같다.

기능발휘하지 못할 확률 =
(안전장치의 고장빈도) x (보수에 소요되는 시간) (4)

4. 정기검사 때 검사에 대한 인적오류 또는 보수에 대한 인적오류에 의하여 안전장치가 기능을 수행할 수 없는 확률을 나타내면 다음과 같다.

기능발휘하지 못할 확률 =
(검사수리오류) x (검사수리 후 점검 오류) (5)

5. 정기보수에 의하여 안전장치가 기능을 수행할 수 없는 확률을 나타내면 다음과 같다.

기능발휘하지 못할 확률 =
(정기보수 빈도) x (정기보수에 소요되는 시간) (6)

상기 다섯 가지 안전장치의 수행을 적절히 발휘하지 못할 요인 중에서 인지 가능한 것은 2항 3항 그리고 5항이다. 상기 안전장치에 있어서 점검에 소요되는 시간과 안전장치의 고장빈도만 고려하여 최적의 점검주기를 구해보면 아래식과 같다.

점검주기 = $\sqrt{\frac{2 \times \text{점검에 소요되는 시간}}{\text{안전장치의 고장빈도}}}$ (7)

이때 안전장치의 기능을 발휘하지 못할 확률은 다음과 같다.

안전장치의 기능을 발휘하지 못할 확률 =
 $\sqrt{2 \times \text{점검에 소요되는 시간} \times \text{안전장치의 고장빈도}}$ (8)

이 중에서 인지 가능한 확률은 다음과 같다.

인지 가능한 안전장치의 고장확률 =
 $\sqrt{\frac{\text{점검에 소요되는 시간} \times \text{안전장치의 고장빈도}}{2}}$ (9)

식 (8)과 (9)로부터 구할 수 있듯이 일반적으로 안전장치가 기능을 발휘하지 못하는 총 기간 중에서 약 50% 이상 인지할 수 있다. 예를 들어 두 달마다 검사를 하고, 매년 정기

보수를 하는 안전장치에 있어서 고장빈도가 0.01/년, 보수에 소요되는 시간이 1일, 정기보수에 소요되는 시간이 2일, 점검오류가 없고, 6개월 후에 고장이 발생하였다고 가정하면, 안전장치의 기능을 발휘하지 못할 확률은 $0.0092(0.01 \times 1/2 \times 2/12 + 1/360 + 2/360)$ 이다. 그 중에서 인지하고 있는 기간동안 확률은 $0.0083(1/360 + 2/360)$ 이므로 안전장치가 기능을 발휘하지 못하는 총 기간 중에서 약 91%가 인지 가능한 기간이다. 안전장치가 기능을 발휘하지 못하는 것을 인지하고 있는 기간은 총 운전시간에 비하여 1%도 되지 않는 매우 짧은 기간이지만, 안전장치의 기능을 수행하지 못하는 대부분의 기간이 이 기간에 속하게 되므로 이때 인적오류를 저감시킬 수 있도록 집중 관리하는 것이 사고예방을 위하여 매우 효율적이다.

오차계수가 10이면 영향을 미치는 상황이 아주 나쁜 환경에서 인적오류확률은 0.01(0.001x10)이고, 아주 좋은 환경에서는 0.0001(0.001/10)로 환경에 따라 오류를 일으킬 수 있는 확률이 100배 차이가 발생 할 수 있다. 따라서 기계적인 고장이 발생하였을 경우 적절히 인적오류를 관리함으로써 별도의 추가 비용 없이 대형사고의 발생확률을 약 90배(100x0.91)정도까지 저감시킬 수 있다. 또한 그림 1에서 나타낸 작업조건을 변경하여 사고 발생확률을 더욱 감소시킬 수 있다.

3. 인적오류 제어

인적오류 제어방법은 그림 1에 도시된 바와 같이 화학공정산업의 대형사고로 인한 피해를 예방하기 위하여 공정을 제어하고 있는

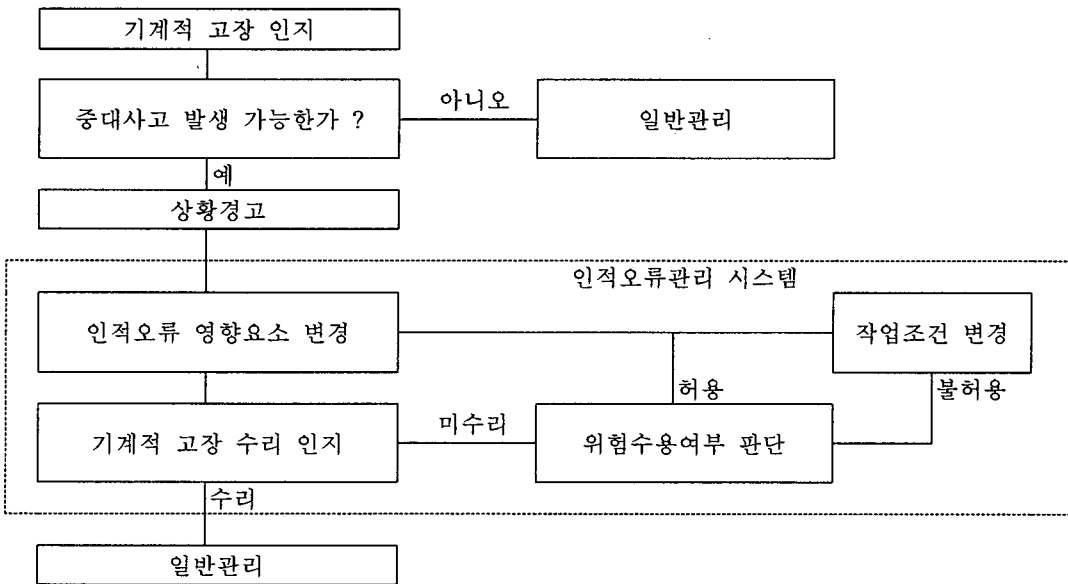


Fig. 1. A systematic diagram of human error management with a mechanical failure.

인적오류를 일으킬 수 있는 확률은 항공분야, 국방분야, 원자력분야 등에서 많은 연구가 진행되어 왔다[7]. 인적오류에 영향을 주는 요소의 좋고 나쁨에 따라 인적오류확률이 변하게 되는데 이를 오차계수로 나타낸다. 예를 들어 기본적인 인적오류 확률이 0.001이고

각종 측정장치 또는 점검자료로부터 입력되는 자료를 분석하여 시스템 중에 어느 요소가 결함이 있는지 인지하고, 인지된 결함요소가 사고발단의 원인이 되어 중대사고로 연계될 가능성이 있는지를 시스템에 대한 결함수목도 분석, 잠재위험 및 운전성 분석, 고장

모드 및 영향분석, 원인 결과분석 등의 자료

지 않고 사람에 의하여 발생할 수 있는 오류

Table 1. Classification of performance shaping factors(PSFs)

작무환경	직무특성	작업자특성	조직 및 사회요소
<p>공정환경 작업장 정리·정돈상태, 보호장구의 적절성, 물리적 환경(소음, 조도, 온도, 습도, 날씨 등), 총작업시간, 연장근무 여부 등</p> <p>시스템 에러감지시스템 여부, 에러복구시스템 여부, 유지보수체계, 일상 및 수시점검 활동</p> <p>설계 controls/displays의 선정, 배열, 위치, 일관적 설계여부, 라벨링 적절성 여부</p>	<p>절차서 절차서 유무, 설명수준, 이용도, 내용의 적절성</p> <p>직무성격 과도한 모니터링, 작업의 복잡도, 지식에 근거한 판단요구, 복잡한 논리절차·계산 등 요구, 시간긴급성, 작업위험성, 상황심각성</p>	<p>인지능력 학력, 해당 작업경력, 입사경력, 해당 직무에 대한 교육/훈련 수준</p> <p>육체적, 정신적 요소 주의 및 태도, 나이, 성별, 청각장애여부, 시각장애여부, 질병 중 또는 투약 중 상태여부, 육체적 장애(일시적 상태 포함)</p>	<p>팀워크 및 의사 소통 의사소통의 체계, 업무 및 책임권한 할당의 적절성</p> <p>안전문화 안전경영 관리정책의 시행여부, 안전관리 조직의 구성 및 운용 여부</p>

를 근거로 하여 판단하고, 중대사고로 연계될 가능성이 있는 결함은 상황을 경고하여 시스템 운전원이 현재 시스템의 위험한 상황을 인지 할 수 있도록 하고, 시스템의 결함요소와 연계된 인적오류 유발요소를 제어하여 주기 위하여 작업의 집중력 감소에 대한 분위기 변경 또는 운전원이 경험하여 보지 못한 비상사태 발생에 대한 처리절차를 상기시켜 주는 등의 수행영향인자를 관리하고, 결함요소가 수리되었을 경우 정상시의 관리 시스템으로 복귀하고, 만약 결함요소가 아직 수리가 되어 있지 않을 경우 단순히 인적오류에 영향을 미치는 수행영향인자를 변경시킴으로써 위험을 수용할 수 있을 정도로 감소시키기 어려운 경우에는 제 3자에 의한 작업과정의 점검을 추가한다든지 작업에 대한 스트레스 정도를 감소시키기 위하여 업무를 일부 분산한다든지 등의 작업조건 변경을 통하여 인적오류를 더욱 감소시키는 일련의 과정을 거쳐 기존의 화학공정산업의 위험을 상당히 감소시킬 수 있다. 따라서 기존의 화학공정산업에 안전성을 향상시키기 위하여 새로운 안전장치를 추가한다든지 하는 추가비용을 투자하

를 저감시키기 위한 인적오류제어로서 시스템의 총체적인 위험을 효율적으로 관리 할 수 있다. 수행영향인자들은 크게 4개의 그룹으로 나눌 수 있고 그에 따른 세부인자들을 분류하면 표 1과 같다.

- 직무환경 : 물리적인 작업환경 및 작업유형 등에 관련된 인자들
- 직무특성 : 절차서 및 작업자에게 요구되는 직무의 특성과 관련된 인자들
- 작업자특성 : 작업자 개인의 특성 및 작업 능력 등과 관련된 인자들
- 조직 및 사회적 요소 : 팀워크 및 의사소통, 안전문화 등과 관련된 인자들

주요 수행영향인자 선정은 직무와 공정조건에 따라서 변하게 된다. 예를 들어 화학플랜트의 비상직무상황에서의 직무상황의 특성을 기술하고 이것을 바탕으로 인적오류 및 인적성능에 영향을 주는 주요 수행영향인자를 선정할 수 있다. 비상직무상황에서 작업자에게 요구되는 직무의 특성을 간략히 기술하면 다음과 같다.

첫째, 비상직무상황에서 작업자의 직무는

관찰, 정보수집 등과 같이 단순한 행위 수준 뿐 아니라 인지적인 기능을 요구하는 직무들로 구성된다. 때문에 이러한 직무들에는 운전원의 훈련과 경험에 바탕을 둔 지식과 기술이 중요한 요소가 되며, 적절한 정보의 제공과 절차서 등이 직무수행의 성공에 중요한 기여를 할 것이다.

둘째, 비상직무시에 현장은 시간에 따라 시스템의 특성이 변하는 유동적인 상황이 발생할 수 있으며, 여러 사건들이 동시 다발하는 복잡한 상황이 전개될 수 있다. 그러므로 유동적인 상황에서 작업자에게 요구되는 시간의 특성 등이 인적성능에 중요한 영향을 미친다.

셋째, 비상직무시는 정상상태시와 같은 단순한 작업자 개인의 직무수행을 넘어서 팀내 외부간의 협력과 조직의 정책 및 빠른 의사결정이 요구된다. 때문에 의사결정의 체계, 조직의 정책, 안전문화 등이 중요한 영향을 미칠 것이다.

넷째, 비상직무시는 열악한 작업환경 등의 발생이 가능하며 이러한 환경 특성이 작업수행의 성공여부에 영향을 끼칠 수 있다.

이에 따라 수행영향인자의 주요 선정요건으로 요구되는 사항은 다음과 같다.

첫째, 비상직무 상황에 발생할 수 있는 인적오류에 영향을 미치는 모든 중요한 상황인자들을 누락시키지 않도록 선정한다.

둘째, 인자들간에 의미가 중복되지 않도록 선정한다.

셋째, 오류분석에 실제 반영가능하며 평가 가능한 인자들을 선정한다.

위와 같은 방법에 의하여 선정된 주요 수행영향인자를 그림 1에 나타낸 인적오류 제어 시스템에 활용하여 시스템의 안전성을 향상시킬 수 있다.

4. 결 론

화학공정산업의 안전관리는 사고를 방지하기 위한 근원적 차원의 접근이 필요하고, 점점 첨단화되어 가는 산업시설에 대하여 인적오류를 배제한 안전관리는 한계에 직면하고 또한 경쟁력을 갖춘 기업으로 성장하기 위하여 관리 가능한 모든 요소를 적절히 제어하여 시스템의 위험을 최소화하고 이윤을 최대한 창출할 수 있도록 하여야 한다. 대형사고는 인적오류와 안전장치의 기계적 결함이 동

시에 발생하여야 하며, 일반적으로 안전기기의 결함상태를 운전자나 작업자가 알고 있는 상태가 대다수 차지하고 있으므로 이때 인적오류에 영향을 미치는 요소를 적절히 관리함으로써 별도의 추가의 비용을 투자하지 않고 대형사고의 발생할 가능성을 획기적으로 저감시킬 수 있다.

감사의 글

이 연구결과는 과학기술부와 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정연구실(NRL) 프로그램의 지원결과로 수행되었으며 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Barlow, R.E. & Proschan, F., *Mathematical theory of reliability*, Wiley, New York, (1965)
- [2] Cepin, M & Mavko, B., *A dynamic fault tree*, Reliability Engineering and System Safety, **75**, 83-91, (2002)
- [3] Schilling, E.G., *Reliability engineering handbook*, Center for Quality and Applied Statistics, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York, (1999)
- [4] Svedung, I & Rasmussen, J., *Graphic representation of accident scenarios: mapping system structure and the causation of accidents*, Safety Science, **40**, 397, (2002)
- [5] Jo, Y.D. & Park, K.S., *Dynamic management of human error to reduce total risk*, Journal. of Loss Prevention in the Process Industries, in print, (2003)
- [6] Swain, A.D. & Guttman, H.E., *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications*, NUREG/CR-1278, Sandia National Laboratories for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, (1980)
- [7] Hollnagel, E., *Cognitive reliability and error analysis method*, Elsevier Science Ltd. (1998)