

화학공정산업의 인적오류 제어 방법

□ 개요

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. 본고는 기계적 고장과 인적오류를 동시에 고려한 화학공정산업의 안전성 향상 방안을 제시하고자 한다.

□ 서론

화학공정산업에서 사고발생 경위는 결함수목분석, 사건수목분석, 그리고 원인결과분석 등의 기법을 이용하여 과거에 발생한 사고를 분석하고, 아직 경험하지 못한 대형사고를 예측하기 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 요소뿐만 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 석유화학산업시설을 비롯한 화학공정산업에서 전통적인 위험평가 및 제어 시스템에서는 기계적인 결함에 중점을 두고 있으며, 인간의 행동제어에 관하여 거

의 다루고 있지 않다. 비록 자동화기술과 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 결함이 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.

□ 중대사고의 발생빈도

화학공정산업에서 위험관리는 중대위험이 발생할 가능성 있는 사고 시나리오에 대하여 발생확률을 평가하고, 발생확률이 기준치를 상회할 경

우 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 결함 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 결함이 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 영향분석, 원인 결과분석 등 기존의 분석기법을 활용하여 찾아낼 수 있다. 이렇게 찾아낸 대형사고의 시나리오를 사건수목 분석, 결함수목분석 등을 통하여 사고가 발생 할 수 있는 확률을 산정하고, 사고가 발생할 경우 피해정도가 어느 정도 되는지 분석하여 위험을 구할 수 있다.

사람의 잘못으로 인하여 대형사고가 발생된 것이 50퍼센트를 상회하고 있지만 현재까지 국내의 대부분 위험평가에 있어서 기계적인 결함분석에 치중하고 있으며 또한 위험제어 시스템도 기계적인 결함과 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 =

$$(안전장치 등 기계적 고장빈도) \times (\text{인적오류 확률}) \quad (1)$$

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 =

$$(\text{검사주기}) \times (\text{안전장치의 고장빈도}) / 2 \quad (2)$$

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 =

$$\text{평균 점검에 소요되는 시간} / \text{점검주기} \quad (3)$$

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

3. 고장을 검지하고 보수하는데 소요되는 시간에 의하여 안전장치가 기능을 수행할 수 없는 확률을 나타내면 다음과 같다.

$$\text{기능발휘하지 못할 확률} = (\text{안전장치의 고장빈도}) \times (\text{보수에 소요되는 시간}) \quad (4)$$

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

$$\text{기능발휘하지 못할 확률} = (\text{검사수리오류}) \times (\text{검사수리 후 점검 오류}) \quad (5)$$

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

$$\text{기능발휘하지 못할 확률} = (\text{정기보수 빈도}) \times (\text{정기보수에 소요되는 시간}) \quad (6)$$

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 구하여보면 아래식과 같다.

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

이때 안전장치의 기능을 발휘하지 못할 확률은 다음과 같다.

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

이 중에서 인지 가능한 확률은 다음과 같다.

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

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 정기보수를 하는 안전장치에 있어서 고장 빈도가 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.

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 오차계수가 10이면 영향을 미치는 상황이 아주 나쁜 환경에서 인적오류확률은 $0.01(0.001 \times 10)$ 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(100×0.91)정도까지 저감시킬 수 있다. 또한 그림 1에서 나타낸 작업조건을 변경하여 사고 발생확률을 더욱 감소시킬 수 있다.

□ 인적오류 제어

인적오류 제어방법은 그림 1에 도시된 바와 같이 화학공정산업의 대형 사고로 인한 피해를 예방하기 위하여 공정을 제어하고 있는 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 결함 수목도 분석, 잠재위험 및 운전성 분석, 고장모드 및 영향분석, 원인 결과분석 등의 자료를 근거로 하여 판단하고,

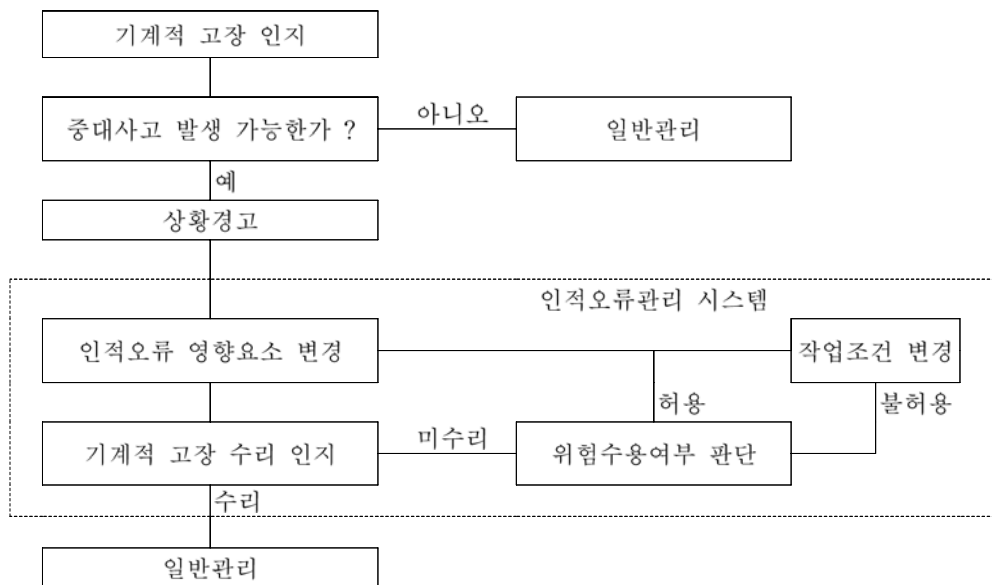


그림 1. A systematic diagram of human error management with a mechanical failure

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 상기시켜주는 등의 수행영향인자를 관리

하고, 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 투자하지 않고 사람에게 의하여 발생할 수 있는 오류를 저감시키기 위한 인적오류제어로 시스템의 총체적인 위험을 효율적으로 관리 할 수 있다.

□ 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 최대로 창출할 수 있도록 하여야 한다. 대형사고는 인적오류와 안전장치의 기계적 결함이 동시에 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.

참고문헌

- [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)