석유화학공정의 가상사고 시나리오 유형 분석

강 미진, 윤 동현*, 이 영순**, 김 창은***
서울산업대학교 부설 안전과학연구소,
한국산업안전공단 중대사고예방실*,
서울산업대학교 안전공학과**, 명지대학교 산업공학과***

Typical Pseudo-accident Scenarios in the Petrochemical Process

Dong-hyun Yoon, Mee-jin Kang*,
Young-soon Lee**, Chang-eun Kim***
Korea Occupational Safety and Health Agency,
Safety science research institute attached to Seoul National University *,
Seoul National University of Technology**,
Myoungji University***

1. 서론

석유화학공정에서 비상대응대책을 마련하고 안전관리를 실시하기 위하여 잠재위험 도출 및 잠재위험에 대한 Risk를 산출해야 하는데, 이러한 risk를 정확히 산출하기 위해서는 정확한 가상사고 시나리오를 작성하는 것이 가장 중요하다. 이에, 석유화학공정을 구성하는 주요설비에 대하여 도출할 수 있는 일반적인 가상사고 시나리오의 유형을 제시하고자 한다.

2. 배경

가상사고의 Risk는 사고피해규모를 예측함은 물론 사고발생확률을 정량적으로 산출해야하므로, 가상사고 시나리오의 기본원인 및 사고의 전개 양상을 정확히 찾아내는 것이 중요하다.

가상사고 시나리오를 작성하는 것은 매우 많은 시간과 인력을 필요로 하기 때문에 이를 절감하기 위하여 가상사고 합성 및 선정 프로그램이 개발되어왔다.

이러한 생성 프로그램 중 최근 국내에서 개발된 프로그램으로 생성한 가상사고 시나리오에서는 Risk 우선순위를 개략적으로 부여하여 시나리오가 도출되므로 비교적 집중적이고 적절한 시나리오를 얻게 된다. 그러나, 전체 공정에 대해서 뿐 아니라 각 설비에 대해서도 많은 종류의 가상사고 시나리오가 도출된다.

그러나 국내 석유화학공정의 위험성평가를 실시하기 위하여 가상사고 시나리오를 작성해본 결과, 석유화학공정의 주요 설비에 대해서 고려될 만한 주요 잠재

위험의 원인이 유사하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 설비에 대해서 일반화될 수 있는 가상사고 시나리오 유형을 찾을 수 있을 것으로 기대되었다. 또한 석유화학공정은 대부분 유사한 설비로 구성되어 있기 때문에 이렇게 주요 설비에 대해서 가상사고 시나리오의 유형을 찾아낸다면, 각 사업장에서 적절한 가상사고 시나리오의 유형을 선택한 후 비교적 적은 노력과 시간으로 해당 공정, 해당 설비에 대한 비교적 정확한 가상사고 시나리오를 작성할 수 있다.

3. 연구 내용 및 결과

가. 연구방법

본 연구를 수행하기 위하여 국내 주요 석유화학공정 25개를 선정하였으며, 각 공정에 대하여 5개씩, 총 125개의 가상사고 시나리오를 작성하였다. 이 가상사고 시나리오는 각 공정의 숙련된 운전경험자 및 전문가의 지식과 경험을 토대로 유사공정에 대한 사고사례를 감안하여 작성하였다.

본 연구에서 가상사고 시나리오를 작성할 때 우선적으로 계기나 기기의 오작동 혹은 고장을 기본사건으로 채택하였으며, 정비불량이나 인적오류가 개입되는 부분은 가능한 한 배제하였다.

나. 연구내용

125개의 가상사고 시나리오를 각 설비별로 분류한 결과는 다음과 같다.
반응기에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 21
증류탑계에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 6
Compressor에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 11
Pump에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 14
Fired heater에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 9
저장탱크류에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 9
기타 설비에서 발생하는 가상사고 시나리오 : 55

다. 연구결과

알려진 바와 같이 석유화학공정은 다음과 같은 여러 단위공정의 집합이라고 할 수 있다. 즉, 반응공정, 분리공정, 이송공정, 저장공정 등과 같은 단위공정과 가열과 냉각을 위한 열교환기로 구성된다.

본 연구에서 선정한 석유화학공정도 위와 같은 여러 가지 단위공정으로 이루어져 있으며, 이러한 단위공정들에서 도출할 수 있는 가상사고 시나리오는 원래의 석유화학공정 종류에 상관없이 설비별로 유사하게 나타남을 알 수

있었고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 반응기에서 발생하는 주요 가상사고 시나리오 유형

㉠ 반응열 제거 실패 1

반응열을 제거하기 위한 Quench liquid (혹은 gas) 공급이 실패하여 반응기 내 온도/압력이 상승하여 반응기가 파손되면서 대기 중으로 위험물질이 누출되어 화재/폭발 및 중독사고를 유발한다.

㉡ 반응열 제거 실패 2

반응열을 회수하면서 제거하기 위한 steam generation system에 공급되는 BFW(Boiler feed water) 공급이 실패하여 반응열이 제거되지 못하여 반응기 내 온도/압력이 상승하여 반응기가 파손되면서 대기 중으로 위험물질이 누출되어 화재/폭발 및 중독사고를 유발한다.

㉢ 반응 중단

기체상태의 반응물이 반응하여 액체상태로 배출되는 공정에서 반응열이 제거되지 못하거나, 촉매 공급 중단으로 반응이 중단됨으로써 기체상태의 반응물이 제거되지 못하여 반응기 내 압력이 상승, 반응기가 파손되면서 대기 중으로 위험물질이 누출된다.

㉣ 과잉 반응

반응물 중 하나의 물질이 과량으로 공급되거나, 공급되지 못하여 이상반응을 유발하고, 이로 인하여 반응기 온도/압력이 상승함으로써 반응기가 파손되어 대기 중으로 위험물질이 누출된다.

(2) 증류탑계에서 발생하는 가상사고 시나리오 유형

㉠ Tower 상부에서의 응축 불량

Tower 상부의 vapor 응축기에서 냉각수 공급중단이나 냉각용 fan고장으로 응축이 이루어지지 않아 Tower의 상부 압력이 상승하여 설계압력을 초과하여 상단부 취약부위에서 vapor 상태의 위험물질이 대기 중으로 누출된다.

㉡ Reflux 중단

Tower 상부로 공급되는 reflux가 pump 고장이나 valve 오작동(닫힘)으로 공급이 중단되어 상부의 온도/압력이 상승하여 상단부 취약부위에서 vapor 상태의 위험물질이 대기 중으로 누출된다.

㉢ 고압설비와 저압설비가 연결된 경우

전단에 위치한 고압설비에서 저압설비로 공정물질이 이송되는 배관에 설치된 valve의 오작동(열림)으로 고압의 공정물질이 압력 저하 없이 그대로 유입되면서 저압설비의 내부 설치물(internal)이나 취약부위 파손으로 위험물질이 대기 중으로 누출된다. (이 경우는 설계년도가 오래된 공정의 경우 설계기준 부족으로 인하여 발생할 수 있는 시나리오이다.)

(3) Compressor에서 발생하는 가상사고 시나리오 유형

㉠ Compressor로 액체 유입

Compressor 전단에 위치한 drum에서 Level 제어 시스템의 실패로 인해 compressor로 액체가 유입되어 compressor가 기계적으로 파손되어 내부의 위험물질이 gas 상태로 대기로 누출되어 화재/폭발 및 중독을 유발한다.

㉡ Anti-surge line의 제어 실패

고온, 고압의 compressor 배출 gas가 anti-surge line의 제어 실패로 compressor 흡입측으로 다량 유입되면서 compressor 배출부의 온도/압력이 설계온도/설계압력을 초과하면서 파손되어 대기 중으로 위험물질이 누출된다.

㉢ 다단계 compressor에서 내부 냉각 실패

gas 압축에 따라 상승된 온도를 냉각하기 위한 내부 열교환기에 냉각수 공급이 중단되면서 compressor의 배출부 온도상승이 설계온도를 초과하여 flange와 같은 취약부위에서 위험물질이 대기로 누출된다.

(4) Pump에서 발생하는 가상사고 시나리오 유형

Pump 자체에서의 위험물질 누출을 고려하는 것은 주로 고속회전 pump나 고온의 위험물질을 다량 취급하는 pump를 대상으로 적용한다.

㉠ Pump suction trouble

Pump 상단부 tower나 drum의 level 제어실패로 pump suction으로 gas가 유입되거나 vortex를 형성하여 pump에 진동이 심하게 발생함으로써 pump가 기계적인 손상을 입게되어 내부의 위험물질이 대기 중으로 누출되어 화재 및 중독을 유발한다.

㉡ 대용량 pump의 일반적인 손상

Pump seal 파손과 같은 일반적인 pump의 손상이 발생할 경우, 이를 감지하기 못하거나 공정물질을 차단하지 못하여 다량의 위험물질이 누출되어 화재/폭발 및 중독을 유발한다.

(5) Fired heater에서 발생하는 가상사고 시나리오 유형

㉠ Tube 내 유량제어 실패

Tube로 공급되는 유량이 valve의 오작동(닫힘)이나 pump 고장 등에 의하여 갑자기 감소하였으나 연료가스의 공급이 연계되어 조절되지 못함으로써 tube의 과열을 초래하여 tube가 파손되고, 인화성 물질이 누출되어 heater내에서 화재가 발생한다.

㉡ Heater 내부 화재 확대

화염 접촉 등과 같은 여러 가지 이유로 hot spot이 발생하여 tube에 pinhole이나 crack 등으로 인한 일반적인 손상이 일어난 경우를 기본사건으로 시작할 수 있으며, 소규모 누출에 대한 감지 실패 및 연료차단 이나

공정물질 차단과 같은 조치사항 미비로 heater 내부의 화재가 확대되어 대규모 화재가 발생한다.

4. 결론

석유화학공정은 대부분 유사한 설비로 구성되어 있으며, 단지 운전조건과 취급하는 물질의 종류가 다를 뿐이다. 따라서 반응공정을 제외한 다른 단위공정, 즉, 기타의 설비에서는 가상사고의 주요 기본 원인이 매우 유사하게 나타난다. 이러한 특징을 이용하여 석유화학공정을 구성한 주요 설비에 대해서 가장 중요시 될 수 있는 보편적인 가상사고 시나리오의 유형을 제시할 수 있게 되었다.

이러한 가상사고 시나리오 유형을 이용하여 각 사업장에서 고유의 특성을 조금씩만 감안한다면 매우 손쉽게 정확한 가상사고 시나리오를 결정할 수 있다. 이렇게 얻어진 가상사고 시나리오를 토대로 정량적 위험성평가를 실시하여 사고발생확률 및 사고피해규모를 예측하면, 사고발생 시 취해야 할 조치사항에 대하여 보다 상세한 정보, 예를 들어 얼마나 빨리, 어떠한 조치를 취해야 하는 가, 혹은 주요 계기나 설비에 대한 유지보수 계획에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 정보를 토대로 비상대응대책을 마련하고 또한 안전교육 및 훈련의 기본으로서 안전관리에 많은 도움을 줄 것이다.

<참고문헌>

(1) "사고시나리오 선정프로그램 기술개발보고서", 한국산업안전공단, 2000.8.

(2) "가상사고시나리오 프로그램 기술개발보고서", 한국산업안전공단, 2001.8.

(3) Faisal I. Khan, S.A. Abbasi, "Multivariate hazard identification and ranking system", Process safety process, vol. 17, No. 3, Fall 1998.

(4) Faisal I. Khan, S.A. Abbasi, "HAZDIG - a new software package for assessing the risks of accidental release of toxic chemicals", pp.167~181, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 1999.

(5) "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", 2nd ed., pp. 35~71, pp. 93~196, AIChE.

(6) 각 공정별 공정도면, 운전정보, 유해물질 MSDS, 공정 설명서