

# 석유화학 공정의 가상사고 시나리오 유형분석

윤동현<sup>†</sup> · 강미진\* · 이영순\*\* · 김창은\*\*\*

한국산업안전공단 중대사고예방실 · 서울산업대학교부설 사고조사연구센터

\*\*서울산업대학교 안전공학과 · \*\*\*명지대학교 산업시스템공학부

(2003. 4. 18. 접수 / 2003. 8. 25. 채택)

## Typical Pseudo-accident Scenarios in the Petrochemical Process

Dong-hyun Yoon<sup>†</sup> · Mee-jin Kang\* · Young-soon Lee\*\* · Chang-eun Kim\*\*\*

Korea Occupational Safety and Health Agency

\*Research Institute for Accident Investigation Attached to Seoul National University

\*\*Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology · \*\*\*Department of Industrial & System Engineering, Myoungji University

(Received April 18, 2003 / Accepted August 25, 2003)

**Abstract :** This paper presents a set of typical pseudo-accident scenarios related to major equipments in petrochemical plants, which would be useful for performing such quantitative risk analysis techniques as fault tree analysis, event tree analysis, etc. These typical scenarios address what the main hazard of each equipment might be and how the accident might develop from an "initiating event". The proposed set of accident scenarios consists of total thirteen (13) scenarios specific for five (5) major equipments like reactor, distillation column, etc., and has been determined and screened out of one hundred and twenty-five (125) potential accident scenarios that were generated by performing semi-quantitative risk analysis practically for twenty-five (25) petrochemical processes, considering advices from the operation experts. It is assumed that with simple consideration or incorporation of plant-specific conditions only, the proposed accident scenarios could be easily reorganized or adapted for the relevant process with less time and labor by the safety engineers concerned in the petrochemical industries.

**Key Words :** pseudo-accident, scenario, pattern, generation, safety, quantitative risk analysis

### 1. 서 론

석유화학공정에서 비상대응대책을 마련하고 안전관리를 실시하기 위해서는 우선 잠재위험을 도출하고 해당 잠재위험에 대한 risk를 산출해야 한다. 사고의 risk는 사고피해의 심각성과 사고발생확률의 곱으로 표현되므로 가상사고의 risk를 산출하기 위해서는 사고피해규모(severity)와 사고발생확률(likelihood)을 정량적으로 산출해야 한다. 사고피해규모를 예측하기 위해 필요한 자료는 비교적 쉽고 명확하게 얻을 수 있으나, 사고발생확률을 구함에 있어서는 설비의 신뢰도 자료뿐 아니라 가상사고의 기본

원인 및 전개양상을 가능한 한 정확히 찾아내는 것이 매우 중요하다. 그런데, 이러한 가상사고 시나리오를 생성하는 것은 매우 많은 시간과 인력을 필요로 하기 때문에 이를 절감하기 위하여 가상사고 시나리오 합성 및 선정 프로그램이 개발되어왔다.

기존의 가상사고 시나리오 합성프로그램에는 해외에서 개발된 TORAP<sup>1)</sup>, HAZDIG<sup>2)</sup>, MAXCRED<sup>3)</sup> 등이 있으나, 이러한 프로그램은 대부분 1개 혹은 몇 개의 시나리오를 생성하고, 그 내용 또한 매우 단순하다고 할 수 있다. 반면에 최근 국내에서 개발된 프로그램<sup>4,5)</sup>으로 생성한 가상사고 시나리오에서는 risk 우선순위를 개략적으로 부여하여 시나리오가 도출되므로 비교적 집중적이고 적절한 시나리오를 얻을 수 있으나, 전체 공정 뿐 아니라 각각의 설비에 대해서도 많은 종류의 가상사고 시나리오를 생

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
dhyoon@kosha.net

성하여 그 결과가 너무 다양하다고 할 수 있다. 이러한 기존의 가상사고 시나리오 생성프로그램을 이용하여 필요한 가상사고시나리오를 도출하는 것은, 한편으로는 너무나 단순한 시나리오라는 점에서 또 한편으로는 너무 다양한 시나리오라는 점에서 많은 문제점을 갖고 있다 할 수 있겠다. 즉, 이렇게 도출된 다수의 다양한 가상사고 시나리오의 세트 중에서 실질적으로 정량적 위험성평가에 적용 가능한 시나리오를 선별하고 결정하기 위해서는 숙련된 기술자의 추가적인 판단과 노력이 필요로 하게 된다.

이에 본 연구에서는 석유화학공정을 구성하고 있는 주요 설비에 대한 포괄적인 가상사고시나리오들을 사전 도출하고 이를 선별, 분석하고 정형화함으로써, 대부분의 석유화학공정에서 즉시 적용할 수 있는 보편 타당한 가상사고시나리오 유형을 제시하였다.

## 2. 공정별 가상사고시나리오 생성

### 2.1. 시범공정 선정

먼저 국내 석유화학공정 중 대표적이라 할만한 공정에 대하여 각 공정별 가상사고시나리오를 생성하기 위하여 국내의 석유화학공정을 대표할 수 있는 25개 석유화학공정을 선정하였다. 즉, 석유화학 원료, 석유화학중간제품 및 최종 석유화학제품 등을 생산하는 대표적인 공정을 선정하였으며, 이렇게 선택한 25개 공정은 naphtha cracking process, cyclohexane 제조공정, 중질유제조공정, MTBE, CA 등 monomer 제조공정, 합성고무, HDPE 등 polymer 제조공정 등으로 모두 연속식 공정이다.

### 2.2. 가상사고시나리오 작성

선정된 각 공정에 대하여 5개씩 총 125개의 가상사고시나리오를 작성하였다. 각 가상사고시나리오를 작성하기 위하여 해당 공정에서 가장 위험한 물질을 취급하거나, 해당 공정에서 온도, 압력 등 운전조건의 조절이 민감한 설비 등을 주요 위험설비로 선정하였으며, 기존의 사고사례와 해당공정 운전자의 경험을 참조로 보완하였다. 선택된 위험설비에 대하여 관련도면과 공정의 흐름을 파악하고 해당설비의 운전방법을 분석하면서 정성적 위험성평가 방법(HAZOP study)에 따라 잠재위험을 도출한 후, 해당설비의 운전방법을 연구하고 주요 제어시스템과 안전/방호장치를 분석함으로써 해당설비에 대하여 몇 가지의 가상사고시나리오를 생성하였다. 이렇

게 생성된 가상사고시나리오는 정성적 위험성평가 방법에서 도출된 잠재위험의 초기사건을 세분화하고, 초기사건이 어떤 경로로 발전되는 가를 나타낸다. 결국, 그 경로의 다양성에 따라 동일 설비에 대해서도 다양한 가상사고시나리오가 도출되는 것이다. 이에 대하여 운전경험자와의 협의를 거쳐 가상사고시나리오를 수정, 보완하였는데, 운전경험자의 의견 및 사고사례를 참조하였다는 것은 가상사고시나리오의 작성 초기부터 사고발생가능성과 사고발생 시 피해규모를 반정성적으로 평가하여 결정하였다는 것을 의미한다.

해당 설비에 대하여 얻어진 다양한 잠재위험과 경로에 대한 수정과 보완을 거쳐 각각의 가상사고시나리오에 대하여 결합수분석을 수행하였으며, 이로써 보다 구체적인 잠재위험요인과 그 위험요인의 전개양상을 파악할 수 있었다. 이를 위하여 각 설비 및 계기, 안전/방호장치 등에 대한 적절한 신뢰도 자료를 찾아내어 적용하였으며, 시나리오에 포함된 인적오류를 분석하였다.

알려진 바와 같이 석유화학공정은 다음과 같은 여러 단위공정의 집합이라고 할 수 있다. 즉, 반응공정, 분리공정, 이송공정, 저장공정 등과 같은 단위공정과 가열 및 냉각공정으로 구성된다. 이러한 단위공정의 기능을 대표하는 설비는 반응기, 분리탑, 펌프, 배관, 탱크, 열교환기 등으로 석유화학공정을 구성하는 전형적인 주요 설비라 할 수 있다. 각 설비의 목적과 기능에 따라 제어방법 및 운전방법이 유사하기 때문에 서로 다른 공정이더라도 동일한 목적의 설비에 대해서 생성된 가상사고시나리오는 매우 유사한 양상으로 전개됨을 알 수 있었다. 즉, 석유화학공정이 다르더라도 동일한 설비에서의 잠재위험과 그 위험이 사고로 발전되는 전개과정이 비슷하다는 것을 알 수 있게 된 것이다.

## 3. 설비별 가상사고시나리오 유형

### 3.1. 설비별 가상사고시나리오 생성현황

총 125개의 생성된 가상사고 시나리오를 각 설비별로 분류한 결과는 다음과 같다.

이 가운데 주요 설비라고 할만한 반응기, 증류탑, compressor, pump, fired heater 등 5개 설비에 대하여 얻어진 가상사고시나리오는 총 61개임을 알 수 있다. 5개의 주요설비에 대하여 생성된 61개의 가상사고 시나리오를 분석한 결과, 13개의 가상사고

**Table 1.** The number of generated potential accident scenarios for each equipment

설비 종류	생성 갯수
반응기 류	21
증류탑 류	6
Compressor (압축기)	11
Pump (펌프)	14
Fired heater (가열로)	9
저장탱크 류	9
기타 설비	55
계	125

시나리오 유형을 얻어낼 수 있었다. 즉, 서로 다른 공정에서 얻어낸 61개의 가상사고시나리오가 유사한 잠재위험을 내포하며, 그 전개양상도 유사하게 도출된다는 것을 알 수 있었다.

### 3.2. 가상사고시나리오의 전개

앞서 언급한 바와 같이 생성된 가상사고시나리오에 대하여 세부적인 사건전개양상을 밝혀내기 위하여 결합수분석을 이용하였다. 해당설비에 대하여 초기에 작성된 가상사고시나리오는 사고의 결과와 개략적인 사고의 원인이 포함된다. 여기에 관련도면<sup>9)</sup>을 기초로 결합수분석을 실시하게 되면, 사고의 원인을 더 세부적으로 분석할 수 있을 뿐 아니라, 해당설비에 부착된 각종 안전/방호장치를 포함하는 사건의 구체적인 전개양상을 얻을 수 있다. 이러한 결합수를 작성할 때 다음과 같은 몇 가지 사항을 제한하였다.

첫째, 해당설비에는 비록 그 종류와 신뢰도의 차이는 있으나 각종 안전/방호장치가 대부분 기본적인 요구사항에 따라 설치되어 있다. 따라서 비슷한 형태의 대응 및 조치계획이 기계적으로 수립되어 있다고 가정할 수 있다. 둘째, 기본사건으로는 계기나 기기의 오작동 혹은 고장을 채택하였으며, 정비불량이나 인적오류가 개입되는 부분은 가능한 한 배제하였다. 왜냐하면 정비불량이나 인적오류의 발생확률이라는 것은 각 사업장의 안전의식 및 교육/훈련과 직접적으로 연관이 있기 때문에 이러한 기본원인이 잠재위험에 기여하는 바가 사업장에 따라 많은 차이를 나타낼 것이기 때문이었다. 그러나, 실제로 사고사례를 분석하면 정비불량이나 인적오류가 차지하는 비중이 비교적 높고, 모든 사업장에서 높은 안전의식과 충분한 교육/훈련을 실시하고 있다고 단언할 수 없으므로, 통상의 작업이 내포할 수 있는 일반적인 인적오류항목은 결합수분석에 포함

하여 수행하였다. 향후 인적오류항목에 대한 부분은 각 사업장에서 각 사업장에 적합한 별도의 인적오류분석을 수행하여야 할 것이다. 인적오류분석은 그 자체만으로도 하나의 위험성평가방법으로 커다란 자리를 차지하고 있을 만큼 매우 복잡하고 다양한 기법들이 개발되어 있으며, 정확한 인적오류를 분석하기 위해서는 인적오류분석전문가의 도움을 받아야 할 사항도 있다. 그러나, 국내에서 개발된 인적오류분석 프로그램(K-Hra)<sup>7)</sup>은 비교적 손쉽게 질문에 대한 답을 기입함으로써 인적오류확률을 계산할 수 있으므로 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 본 연구에서도 인적오류가 포함된 시나리오의 사고발생 확률을 분석하기 위해 국내에서 개발된 프로그램(KwTree)<sup>7)</sup>을 이용하였으며, 인적오류분석을 위한 각종 질문에 대해서는 보편적인 상황, 즉 각종 절차서를 보유하고 있으며 그 수준이 “중”에 해당하고, 운전원에 대한 교육·훈련 정도는 “상”에 해당하며, 모든 작업에 대한 운전원의 경력은 “숙련”으로 하는 상황을 가정하였다.

### 3.3. 설비별 가상사고시나리오 유형

각 설비에 대하여 정리된 13개의 주요 가상사고시나리오 유형을 정리하면 다음과 같다.

#### 3.3.1. 반응기에서의 가상사고시나리오 유형

##### 3.3.1.1. 반응열 제거실패 (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.

##### 3.3.1.2. 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.

##### 3.3.1.3. 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.

### 3.3.1.4. 과잉 반응

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

### 3.3.2. 증류탑에서의 가상사고시나리오 유형

#### 3.3.2.1. 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.

#### 3.3.2.2. Reflux 중단

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

#### 3.3.2.3. 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.)

### 3.3.3. Compressor에서의 유형

#### 3.3.3.1. Compressor로 액체 유입

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

#### 3.3.3.2. 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.

#### 3.3.3.3. 다단계 compressor에서 내부냉각 실패

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

### 3.3.4. Pump에서의 가상사고시나리오 유형

#### 3.3.4.1. 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.

#### 3.3.4.2. 대용량 pump의 일반적인 손상

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

### 3.3.5. Fired heater에서의 유형

#### 3.3.5.1. Tube 유량감소

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

#### 3.3.5.2. Heater 내부 화재 확대

화염 접촉 등과 같은 여러 가지 이유로 hot spot이 발생하여 tube에 pin-hole이나 crack 등으로 인한 일반적인 손상이 일어난 경우를 기본사건으로 시작할 수 있으며, 소규모 누출에 대한 감지 실패 및 연료차단이나 공정물질 차단과 같은 조치사항 미비로 heater 내부의 화재가 확대되어 대규모 화재가 발생한다.

## 4. 고찰

대부분의 사고시나리오에 대하여 사고의 전개양상은 대체로 다음 <Fig. 1>과 같은 형태로 나타난다. 다만, “대용량 pump의 일반적인 손상”이나 “Heater 내부 화재확대”와 같은 시나리오에서는 <Fig. 2>와 같은 형태로 사고가 전개된다.

5. 결론

대부분의 석유화학공정들은 유사한 목적과 기능을 갖고 있는 다수의 설비들로 구성되어 있으며, 설비측면에서 볼 때 각각의 공정들은 단지 취급하는 물질의 종류와 운전조건만이 상이하다고 할 수 있다. 따라서 반응공정을 제외한 다른 단위조작 공정들에 대하여 얻을 수 있는 잠재위험은 매우 비슷하다고 할 수 있다. 이에 석유화학공정을 구성하는 주요 설비에 대해서 가장 중요시 될 수 있는 보편적인 가상사고시나리오의 유형과 전개양상을 제시할 수 있게 되었다.

본 연구에서 제시된 가상사고시나리오 유형 및 전개양상을 활용하여 각 사업장에서 고유의 특성을 조금씩만 감안한다면 매우 손쉽고 정확하게 가상사고시나리오를 선정할 수 있을 뿐 아니라 이를 토대로 적은 인력과 시간으로 사고발생확률을 예측하는 정량적 위험성평가를 수행할 수 있게 되며, 이는 직접적으로 효율적인 보수유지계획 및 안전교육/훈련 계획을 수립하는데 기여할 수 있다.

각 사업장에서 고유의 설비 및 기기 등에 대한 신뢰도자료(failure rate)를 잘 구축하고 관리한다면 보다 정확한 사고발생확률을 계산할 수 있을 것이며 나아가 좀 더 효율적인 안전관리가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

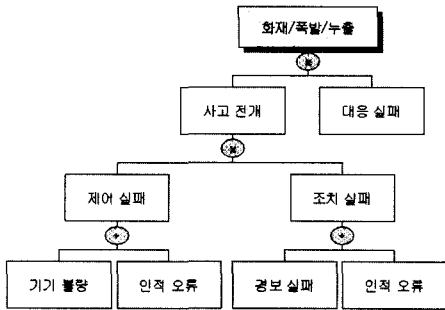


Fig. 1. Type A: General root-cause and effect

위에 나열한 주요 사고시나리오를 <Fig. 1>, <Fig. 2>와 비교하여 정리하면 <Table 2>와 같이 요약된다.

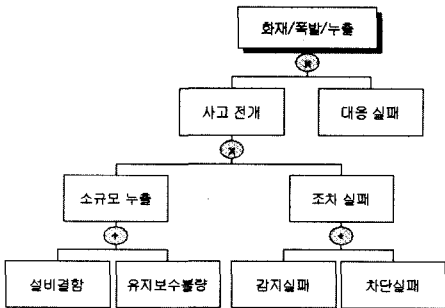


Fig. 2. Type B: Development from small leakage

Table 2. Typical pseudo-accident scenarios and development type

설비구분	시나리오 구분	제어실패의 주요인	전개양상
반응기	반응열 제거실패 1	Quench fluid 공급실패	A
	반응열 제거실패 2	반응열 회수설비 실패	A
	반응중단 / 과잉반응	반응물 및 촉매 공급실패 혹은 과잉공급	A
증류탑	상부 응축불량	응축설비 실패	A
	Reflux 중단	공급밸브 잠김 혹은 pump 실패	A
	고압/저압설비 연결	공급밸브 열림	A
Compressor	액체유입	전단 액위제어 실패	A
	Ant-surge	Anti-surge line 밸브 제어실패	A
	내부냉각 실패	열교환기 냉각수 공급실패	A
Pump	Suction trouble	전단 액위제어 실패	A
	대용량 pump 손상	설비결함 (차단실패)	B
Fired heater	Tube 유량감소	Tube 유량제어 실패	A
	내부화재 확대	설비결함 (차단실패)	B

참고문헌

- 1) Faisal I. Khan, S.A. Abbasi, "Multivariate hazard identification and ranking system", Process safety process, vol. 17, No. 3, Fall 1998.
- 2) 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.
- 3) "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", 2nd ed., pp. 35~71, pp. 93~196, AIChE.
- 4) "사고시나리오 선정프로그램 기술개발보고서", 한국산업안전공단, 2000.8.
- 5) "가상사고시나리오 프로그램 기술개발보고서", 한국산업안전공단, 2001.8.
- 6) "사고발생확률분석시스템 기술개발보고서", 한국산업안전공단, 2002.8.

- 7) “인간신뢰도분석 S/W 기술개발보고서”, 한국산업안전공단, 2000.7.
- 8) “기기 및 설비신뢰도 분석”, 한국산업안전공단, 2000.7.
- 9) 각 공정별 공정도면, 운전정보, 유해물질 MSDS, 공정 설명서