

화학공정 위험영향 평가기술에서의 다중요소분석기법을 이용한 사고시나리오 산정에 관한 전략

송지호, 김구희, 신동일*, 윤인섭

서울대학교 응용화학부

*서울대학교 화학공정신기술연구소

A Strategy for the Generation of Accident Scenarios Using Multi-Component Analysis in Quantitative Risk Assessment

Ji Ho Song, Ku Hwoi Kim, Dongil Shin*, En Sup Yoon

Division of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

1. 서 론

현재 전세계적으로 공장내(on-site)뿐만 아니라 공장외지역(Off-site)에 대한 사고영향 평가의 필요성이 대두되고 있으며, 공장외지역에 대한 영향평가 수행후 이에 대한 적절한 비상계획을 제출하도록 하고 있고, 국내에서도 종합적위험관리체계(IRMS ; Integrated Risk Management System)를 PSM이나 SMS와 더불어 시행 준비중에 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 공장에서의 위험성이 공장외 지역에 미치는 영향을 평가할 수 있는 기술개발을 위해 영향평가에 사용되는 사고시나리오를 설정하기 위한 전략을 제시하기로 한다. 이러한 사고시나리오는 공장외지역의 영향평가에 있어서 필수적이며, 시나리오의 선택에 따라 평가결과의 다양함이 존재하기도 한다. 정량적 안전성 평가 방법의 결과는 공정 내의 안전장치나 안전을 위한 시설의 크기, 주변 지역과의 최소 이격거리 등과 같은 비상계획의 결정 등에 도움을 주어, 필요 이상의 투자를 막는 비용 절감 효과 및 공정 내의 생산성 향상을 유도할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 추세에 따라 전세계적으로 정유 및 석유 화학 회사에서 정량적 안전성 평가 방법을 개발하여 안전 진단에 활용하고 있다. 한 예로 미국 DuPont사에서는 화학 공장의 실시간 안전성 평가 시스템을 개발하여 전세계의 자회사에 활용할 뿐더러 기능을 확대하여 범용으로 사용할 수 있도록 상업화하고 있다. 또한 이러한 정량적 안전성평가기술의 사용은 공정내에서의 인명 및 재산피해 뿐 아니라 공장외 지역에서의 인명 존중차원에서 반드시 수행되어야 하며, 이는 미국을 포함해 전세계적으로 공장외지역에 대한 영향평가의 연구가 진행되고 있는 이유이기도 하다.

2. 본론

2.1. RM(Risk Management) Program

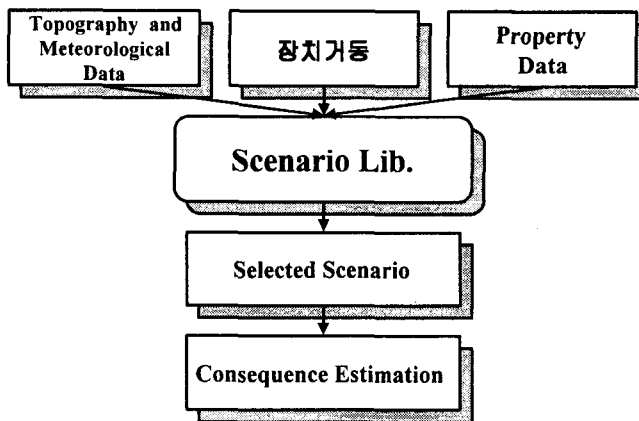
공정내 사고로 인한 공정의 지역에 대한 영향 평가 기술은 인근지역에 대한 적절한 비상계획의 수립을 목적으로 미국을 중심으로 하여 전세계적으로 사용되는 기술이다. 그러나 기존의 위험성 평가기술의 한계로 인해, 사용자의 주관에 따라 영향평가의 결과도 달라지는 문제점을 안고있다. 미국의 경우 EPA(Environmental Protection Association)에서는 유해화학물질의 관리차원에서 새로운 프로그램을 제정하여 시행할 계획을 세우고 있는데, 1996년 공표된 40CFR Part68의 Risk Management Program(RMP)을 통해 1999년 6월까지 특정물질의 사고로 인한 공장의지역에의 영향 평가에 대해 보고서를 작성하도록 하고 있다. 이러한 RM Program의 가장 큰 특징은 각각의 물질에 대해 최악의 사고시나리오(WCS : Worst Case Scenario)와 대체사고시나리오(ACS : Alternative Case Scenario)에 대한 영향 평가를 수행하도록 규정하고 있다는 점이다. 최악의 사고시나리오는 용기나 배관의 문제로 인해 규제물질의 최대량이 누출되는 것으로 정의되며 일반적으로 이러한 물질은 종말점(endpoint)이 될 때까지의 영향거리가 매우 큰 양상을 나타낸다. 또한 WCS에서는 이러한 사고가 발생하게 되는 원인이나 발생할 수 있는 가능성 등은 고려하지 않는다.

2.2. 사고시나리오의 구축 방법

공장의 지역으로의 위험영향평가 프로그램에서 가장 중요한 부분이 바로 공정내에서 발생할 수 있는 사고의 시나리오를 결정하는 것이다. 일반적으로 사고시나리오를 결정하는 방법은 크게 정성적 방법, 정량적 방법, 그리고 과거의 사고데이터를 이용하여 결정하는 방법 등으로 나눌 수 있다. 정성적인 방법에는 HAZOP analysis나 What-if analysis와 같은 방법들이 사용될 수 있으며, 정량적 방법에는 Event Tree Analysis(ETA)와 같은 방법으로 원인에 대한 결과를 추론할 수 있다. 또다른 방법으로 과거의 사고데이터를 이용하는 방법을 들 수 있다. 이 방법은 과거 5년정도내에서 유사 공정에 대한 사고사례를 분석하여 이를 가상 시나리오로서 활용하는 것이다. 그러나 각 방법은 나름대로 장, 단점을 가지고 있으며, 실제 사고로 인한 지역의 영향 평가에 활용하기에는 미흡한 점이 많다. 실제로 정성적 방법은 대상 공정내에서 발생할 수 있는 결과의 종류만을 나열할 수 있을 뿐이고, 결정된 시나리오의 순위(Ranking)를 매기는데 충분한 역할을 수행할 수 없다. 따라서 이는 수많은 사고시나리오에 대해 영향평가를 수행하게 되는 결과를 초래하여, 인력과 시간의 낭비를 초래할 수 있다는 단점이 있다. 정량적 방법인 Event Tree Analysis의 경우도 초기사건(Initiating Event)을 어떻게 결정하느냐에 따라 계산량과 결과가 달라지는 경향을 보인다. 미국의 RM Program의 경우 WCS는 공정의 상태나 운전조건 등을 전혀 고려하지 않고 단순히 최대 저장량만을 가지고 계산하기 때문에 그 결과가 실제보다 크게 과대평가(Over-estimation) 될 수 있는 가능성을 지니고 있다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 정성적 결과를 토대로 하여 그 결과를 정량적으로 보여줄 수 있는 방법들이 필요하다. 즉 위험도순위(Risk Ranking)을 결정하여 상위 순위를 보이는 시나리오에 대한 영향평가를 수행한다면 좀더 정확하고, 간단한 사고시나리오를 추론할 수 있는 것이다.

2.3. 사고시나리오의 구축 전략

본 연구에서는 시나리오 산정 기술의 신뢰성 향상을 위한 방법으로 공정분할과 공정요소분석 방법을 통한 해당 공정의 사고시나리오를 추론하고자 한다. WCS(Worst Case Scenario)를 결정하기 위한 기존의 방법들은 발생 가능한 시나리오에 대해 계산결과를 분석하는 단계를 거쳐야 하므로 인력 및 계산의 반복으로 인한 시간의 낭비를 초래하며, 공정상태를 분석하지 않기 때문에 발생 가능한 사고 시나리오를 정확하게 산출할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서는 기상조건과 공정요소를 분석하여 해당공정내에서 발생할 수 있는 사고의 형태를 사전에 추론함으로써 발생가능한 사고 시나리오의 신뢰성을 향상시킴으로써 사고시 비상계획 설정에 활용할 수 있다는 잇점이 있다. 제안된 시나리오를 사용한 공장외지역에 대한 영향의 계산결과를 통해서 공정내의 안전장치의 종류나 크기를 결정할 수 있고 인근 주거지역에 대한 비상계획을 세우는데 좀 더 유연한 결과를 산출할 수 있다. 본 연구를 통한 시나리오 결정 추론구조는 다음의 그림과 같다.



2.4. 사고시나리오의 선정

본 연구에서는 공정에서 발생할 수 있는 가상사고 시나리오를 결정할 수 있는 전략을 제시하고자 한다. 이를 위해서는 대상공정의 선정단계와 선정된 공정을 세부적으로 분석하는 2가지 단계를 거치면서, 보다 실제적인 가상 사고 시나리오를 구축할 수 있다.

• Step I (Macro Decomposition)

STEP I에서는 플랜트내의 여러 공정 중 사고발생시 인근지역에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 공정을 확인하여 결정하는 단계이다. 이를 위해서는 먼저 시스템 기법을 통한 전체 공정의 분할작업을 수행한다. 먼저 공정을 주요기능시스템으로 분할하는데 일반적으로 반응을 수반하는 화학공정은 대부분 원료공급, 반응, 분리, 생산(저장)의 일련의 과정을 지니며, 이를 위한 유틸리티로 구성되어 있다. 이러한 각 단계를 주요기능시스템으로 정의하면 공급시스템(feed system), 반응시스템(reaction system), 분리시스템(separation system), 생산시스템(product system), 유틸리티시스템(utility system)으로 구분되며, 다중요소분석을 통한 화학공장의 위험영향 평가를 위해서는 유틸리티 시스템

보다 위험물질의 이동/반응/저장이 일어나는 주요 시스템이 정의되고 고려되어야 한다. 그 다음으로 해당공정의 기후적 특성 및 지리적 환경을 고려한다. 인구밀집지로의 풍향과 평균풍속 등을 고려하여, 사고발생시 인근지역에 영향을 줄 수 있는 주요시스템을 결정한다. 여기에는 인근지역의 주거비나 각 공정별 비상계획 등을 고려할 수 있다. 위와 같은 방법을 통해 주요시스템이 결정되면 두번째 단계에서 공정에 대한 좀 더 자세한 분석작업을 수행한다.

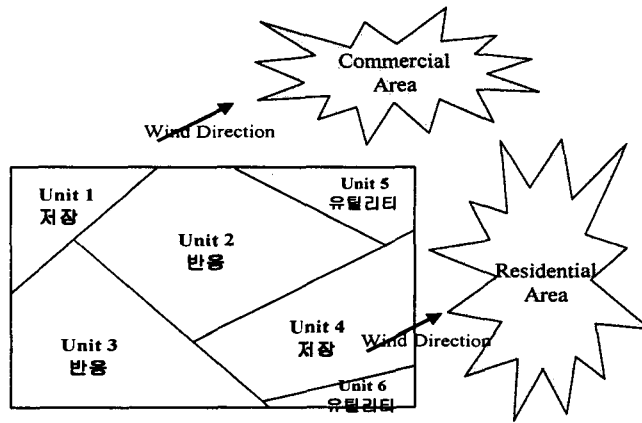


Fig. 1. 주요시스템 분할을 통한 대상공정 선정

● Step II (Micro Decomposition)

STEP II에서는 STEP I에서 결정된 공정에 대하여 세부요소를 분석하는 단계이다. 여기서는 대상공정의 밸브/펌프/열교환기 등을 중심으로 분석한다. 기타 저장탱크나 스트리퍼 또는 반응기 등을 밸브나 펌프의 작동 이상에서 발생한다는 관점에서 사고를 유발하기 때문에 실제로 용기 등에 영향을 미칠 수 있는 밸브나 펌프 위주로 그 거동을 분석하기로 한다. 여기에서 고려되어야 하는 공정요소로는 대상물질, 공정조건, 유량, 유사공정의 사고건수나, 장치년수, 안전장치 등이다.

이를 위해서는 공정내 장치에 영향을 줄 수 있는 공정요소의 분석이 선행되어야 한다. 공정내 사고로 인한 위험영향 요소로는 크게 물질의 특성(Flammability, Toxicity 등), 운전조건(압력, 온도), 유량, 안전장치, 장치의 년수, 사고사례 등을 들 수 있다. 이러한 요소들을 고려하여 위험영향이 큰 장치를 선정하기 위해 본 연구에서는 ESM(Equipment Screening Method)를 제안하여 잠재위험을 확인하고자 한다. ESM은 On-Off 방식을 사용하여 공정요소별로 개별장치들의 적격여부를 판별하는 방법을 말한다. 먼저 잠재영향이 가장 큰 순서대로 공정요소들을 분류하면 ① 물질의 특성 ② 운전조건 ③ 유량 ④ 안전장치 ⑤ 장치의 년수 ⑥ 사고사례 순으로 나열할 수 있는데, 각각의 요소들을 순차적 추론(Sequential Reasoning)방식으로 개별장치에 적용함으로써 잠재위험이 적은 장치들은 단계적으로 제거되어, 마지막에는 잠재위험이 가장 높은 장치만을 선별할 수가 있다. 예를 들어 첫 번째 단계인 물질의 특성에서는 Flammability

나 Toxicity가 NFPA Rating 3이상인지 여부를 확인한다. 두 번째로 운전조건에서 물질이 고압이나 고온으로 운전되는지를 확인하며, 세 번째로 각 개별장치별로 높은 유량을 가지는 장치를 선정 후, 안전장치의 여부를 확인한다. 즉, 장치에 이상이 발생할 경우, 그 영향을 완화시킬 수 있는 안전장치가 있는지를 확인한다. 마지막으로 순차적 추론 방식에 의해 선정된 개별 장치들에 대해서 장치의 년수나 사고사례를 토대로 하여 우선순위(Priority)를 매긴다. 여기서 선정된 장치들은 STEP III Equipment Analysis에서 장치거동에 따른 발생 가능한 시나리오 선정에 활용된다.

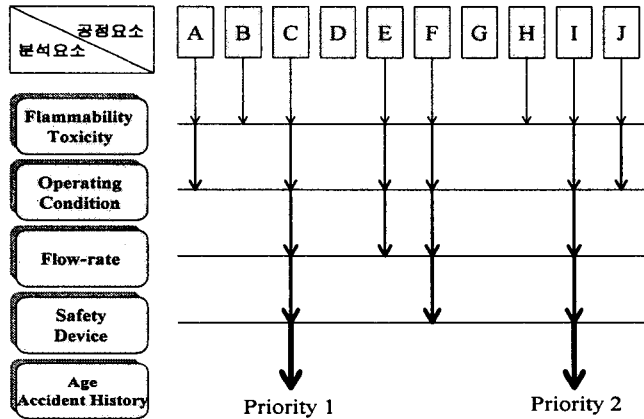


Fig. 2. ESM(Equipment Screening Method) 추론 구조

● Step III (Equipment Analysis)

STEP II에서 결정된 장치에 대한 거동에 따른 영향평가 모델을 이용하여 평가 및 계산한다. STEP II에서 결정된 장치들에 대해 높은 사고영향(High Severity)을 갖는 시나리오를 찾기 위해 장치의 거동에 관해 연구한다. 장치에 이상이 발생하였을 경우 그 이상이 미치는 영향에 대해 조사하고, 조사된 장치에 대해 위험순위(Risk Ranking)를 매김으로써 우선순위(Priority)가 높은 위험에 대해 사고발생 시나리오를 작성한다.

● Step IV (Scenario Selection)

여기에서는 장치의 이상거동에 따른 발생 가능한 영향을 추론한다. 즉 STEP III에서 결정된 장치에 대해서 이상모드에 따른 영향을 추론한다. 각각의 모드에 대해 발생 가능한 영향은 경우에 따라서 여러 가지가 존재할 수 있으며, 물질의 잠재 위험성과 이상의 크기에 따라 Risk Ranking을 부여한다.

3. 사례연구

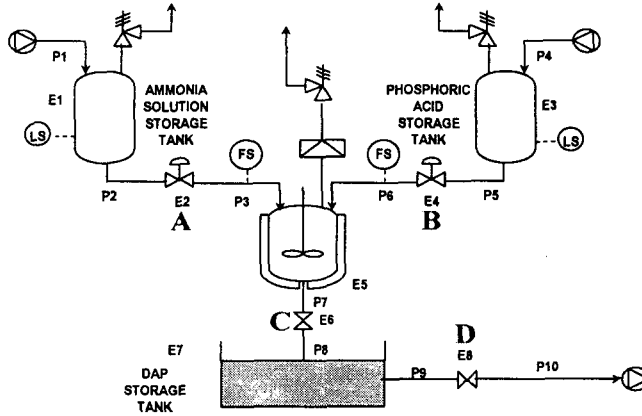


Fig. 3. DAP 제조 공정

- STEP I Macro Decomposition

단위공정으로 분류하여 공정의 기후 조건 및 주거지역을 고려하여 공정을 결정한다. 결정된 공정은 STEP II의 Micro Decomposition 단계에서 세부 장치별로 공정의 지역에 미칠 수 있는 잠재영향이 큰 장치를 선정한다.

- STEP II Micro Decomposition

Micro Decomposition에 따른 단위공정내의 각 장치별 분석은 다음과 같다. 해당공정내에는 밸브류 4개, 용기 2개, 반응기, 저장조 1개가 있으며, 용기 반응기, 저장조 등을 모두 밸브에 의해 조절되고 있다.

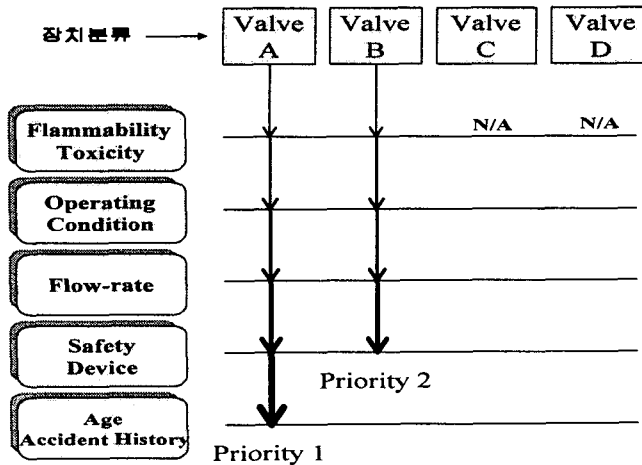


Fig. 4. DAP Process의 ES method 적용 예

각 밸브별 반응물질과 운전조건 등을 고려하여 ES(Equipment Screening) Method를 적용하면 다음 Fig. 4와 같이 밸브 A와 밸브 B에서의 이상으로 인한 사고가 가장 큰 위험영향을 보일 수 있는 것으로 나타났다.

- STEP III Equipment Analysis

STEP II에서 결정된 장치에 대해 거동에 따른 이상의 경우를 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

Table 6. DAP Process에서의 장치거동에 따른 영향

<i>Identification</i>	<i>Mode</i>	<i>Effect</i>	<i>Material</i>	<i>Ranking</i>
Valve A on the Ammonia line	Fail open	Excess flow of chlorine to the Reactor	Ammonia	D
		May cause a high level in the reactor or the DAP storage tank	Ammonia & DAP	C
		High pressure and high temperature in the reactor if the phosphoric acid feed rate is also high	Ammonia & DAP	C

<i>Identification</i>	<i>Mode</i>	<i>Effect</i>	<i>Material</i>	<i>Ranking</i>
Valve A on the Ammonia line	Rupture	Large release of ammonia to the surrounding area	Ammonia	A

- STEP IV Scenario Selection

STEP III에서의 결과를 바탕으로 결정된 시나리오는 다음과 같다. 사용중인 물질의 인화성이나 독성을 고려하고, Risk Ranking을 고려하면 Valve A의 파열로 인한 암모니아의 누출이 발생할 수 있다.

- STEP V Effect Analysis

STEP IV에서 산정된 시나리오를 가지고 위험영향 평가를 수행한다. 위험영향 평가는 기존의 상용프로그램이나 본 연구에서 개발될 프로그램을 사용하여 계산한다. 위험영향 평가의 결과는 사고 발생시 인근지역에 대한 비상계획의 수립을 구체적이며 체계적으로 제시할 수 있는 근거를 제시한다. 아래 그림에서와 같이 나타난 위험 영향범위는 그 정도에 따라 High Severity Area, Medium Severity Area, Low Severity Area로 구분하여 정도와 심각성에 따른 완화절차 및 비상계획을 수립하여야 한다.

4. 결 론

이상과 같이 국내외적으로 공장내 뿐만 아니라 공장외 지역에 대한 영향 평가 및 이를 통한 비상계획의 수립 필요성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이는 전세계적으로 환경문제와 연관되어 OECD 가맹국으로서 반드시 진행되어야하는 문제이기도 하다. 현재 국내에서도 이와 관련한 연구가 많이 진행되고 있으며, 본문에서 제시된 이러한 방법론들은 공정의 설계단계에서의 사고영향 평가의 신뢰성을 확보함으로써 좀더 정확하고 유연한 비상계획(Emergency Plan)을 제시할 수 있도록 도와주며, 사고 시나리오의 근거를 마련할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 공정설계단계에서 이를 고려하여 안전성의 확보 뿐 아니라 인적, 물적 절감의 효과도 얻을 수 있으며, 장치 및 물성 등에 근거한 시나리오 결정기법은 정량적 공정 안전성 평가시스템의 일부로 구축되어 공장외 지역으로의 영향 평가에 활용될 수 있을 것이다.

감 사

본 연구는 포항공과대학교 지능자동화연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, 2nd ed.", CCPS of the AIChE, 1992
2. Harris R. Greenberg, Joseph J. Cramer, "Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry", Van Nostrand Reinhold, 1991
4. EPA, "RMP Offsite Consequence Analysis Guidance", EPA, 1996
5. Murphy JF, Zimmermann KA, "Making RMP hazard Assessment Meaningful", Process Safety Progress, 17: (4) 238-242, 1998
6. Woodward JL, "Improving the Effect of Atmospheric Stability Class for Dispersion Modeling", Process Safety Progress, 17: (4) 1-8, 1998
7. Hoist S, Hjertager BH, Solberg T, Malo KA, "Properties of Simulated Gas Explosion of Interest to the Design Process", Process Safety Progress, 17: (4) 278-287, 1998
8. Khan FI, Abbasi SA, "Techniques and Methodologies for Risk Analysis in Chemical Process Industries", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11: (4) 261-277, 1998