

화학공정 위험영향 평가기술에서의 다중요소분석기법을 이용한 사고시나리오 산정에 관한 전략

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

김구희*[†] · 이동언 · 김용하 · 안성준 · 윤인섭

Ku Hwoi Kim*[†] · Dong Eon Lee · Yong Ha Kim · Sung Joon Ahn · En Sup Yoon

서울대학교 응용화학부

*서울대학교 화학공정신기술연구소

(2001. 08. 03. 접수/2001. 10. 12. 채택)

요 약

현재 전세계적으로 공장내(on-site)뿐만 아니라 공장외지역(off-site)에 대한 사고영향평가의 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. 그러나 공장외지역에 대한 위험영향 평가시 가장 먼저 결정되어야 할 가상시나리오에 대한 기준이 체계적으로 마련되어 있지 않아 사용자나 분석자에 따라 평가결과가 다양하게 나오며, 또한 공정에서 발생할 수 있는 사고의 이상원을 정확하게 파악하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 가상시나리오를 결정하는데 필요한 공정요소를 분석한 후, 분석결과에 따라 발생 가능하고, 먼저 고려되어야 할 시나리오를 산정할 수 있도록 전략을 제시하고자 한다. 분석된 공정요소들은 요소에 따른 가중치를 부여하여 위험등급을 결정한 후 등급에 따른 위험영향 평가를 수행하도록 한다. 분석의 결과는 가상시나리오의 신뢰성을 향상시킴으로써 위험영향평가가 과대평가되는 것을 방지하고, 공정의 설계나 비상계획의 수립시 효과적이고 적절한 대책마련을 유도할 수 있다.

ABSTRACT

This article proposes a strategy for producing accident scenarios in quantitative risk, which is performed in process design or operation steps. Present worldwide chemical processes need off-site risk assessment as well as on-site one. Most governments in the world require industrial companies to submit the proper emergency plans through off-site risk assessment. Korea is also preparing for executing Integrated Risk Management System along with PSM and SMS. However, there have been no systematic approaches and criteria for generating virtual accident scenarios, and it made impossible to get a unified or coherent assessment result. Without the result, causes of accidents cannot be corralled precisely. To get over these shortcomings, this study analyzed process elements and then proposed a strategy for selecting and generating the accident scenario that is most likely to happen and should be foremost considered. The analyzed process elements are ranked and risk grades determined. According to the grades, risk assessment is performed. The result of analysis enhances the reliability of the generated risk scenario, and prevents some risks from being overestimated. The result should be helpful in process design and emergency planning.

Keywords : Off-site risk assessment, Risk management program, Worst case scenario, ES(Equipment Screening) Method, Accident scenario selection

1. 서 론

화학공장에서의 사고를 예방하기 위한 동향으로는

설계시 조업의 위험성을 조기에 찾아내어 제거하며, 사고의 예방은 바로 생산성과 연결된다는 사실을 인식하여 사고로 인한 공정손실을 감소시키고자 하는 방향으로 나아가고 있다. 이러한 공정손실의 감소노력은 각종 안전기술의 발전과 함께 정성적, 정량적 안전성평

[†] E-mail: kimkh@pslab.smu.ac.kr

가기술이 대두되며, 현재는 이러한 기술들을 이용한 공장외 지역에 대한 위험영향평가기술이 활용되고 있다.

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 뿐 더러 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. 위험영향평가기술

2.1 RMP(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 안고 있다. 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 공장외지역에의 영향 평가에 대해 보고서를 작성하도록 하고 있다. 이러한 RMP의 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. 여기서 종말점이라 함은 독성물질의 경우 각각의 물질에 따른 농도값을 가지며, 가연성 물질의 경우 방사열(radiation heat)은 40초간 5 kW/m², 과압(overpressure)은 1 psi가 될 때까지를 말한다. 염소의 경우 0.0087 mg/l, 암모니아의 경우 0.14 mg/l의 종말점을 가진다. 최대량은 제어하에서 저장될 수 있는 최대량을 의미한다(각각 물질에 threshold가 정의되어 있음). 또한 WCS에서는 이러한 사고가 발생하게 되는 원인이나 발생할 수 있는 가능성 등은 고려하지 않는다. 모델링에 필요한 파라미터는 WCS나 ACS가 대부분

Table 1. Parameters for WCS and ACS

WORST CASE SCENARIO	ALTERNATIVE CASE SCENARIO
Endpoint	
각각의 독성물질에 대한 Endpoint가 정해져 있으며, 가연성물질에 대한 Endpoint는 증기운폭발의 경우에 1 psi로 하며, 화재로 인한 radiant heat level은 40초 동안 5 kW/m ² 으로 한다.	각각의 독성물질에 대한 Endpoint가 정해져 있으며, 가연성물질에 대한 Endpoint는 증기운폭발의 경우에 1 psi로 하며, 화재로 인한 radiant heat level은 40초 동안 5 kW/m ² 으로 한다.
Wind Speed/Stability	
안정도등급 : F Class 바람 속도 : 1.5 m/s	해당지역의 적절한 기상데이터 사용 가능. 잘 모를 경우 D등급과 3 m/s를 사용
Ambient Temperature/Humidity	
평균온도 : 25°C 평균습도 : 50%	평균온도와 습도 사용
Topography	
Urban 또는 Rural topography 사용	Urban 또는 Rural topography 사용
Height of Release	
Ground level	Release scenario에 따라 결정

비슷하며, 일반적인 파라미터들은 Table 1과 같다. 이를 위해서는 EPA에서는 간단한 도표형태로 구성된 EPA's Look-up Table이나 EPA's RMP Model등을 제시하여 공장외지역으로의 영향 평가를 수행하는데 도움을 주고 있다. 그러나 이를 통한 결과들은 실제 상용 소프트웨어를 이용하여 계산한 결과보다 좀 더 큰 수치를 보이는 경향이 있다.

2.2 위험영향평가시스템

공장외지역으로의 영향 평가를 산출하는 시스템으로는 현재 수많은 모델^{9,10)}들이 제시되어 사용되고 있다. 이처럼 뜻하지 않는 누출이나 확산의 거동을 평가하는 모델은 전세계적으로 약 20-25개 정도가 사용된다. 이러한 모델들의 특성은 크게 다음의 2가지 분류법에 의해 구분지을 수 있는데, 실시간 또는 Emergency Model이나 Planning Model 여부에 따라 구분하는 방법과 Public Model이나 Proprietary Model에 따라 구분하는 방법으로 나눌 수 있다.

실시간 Model은 소프트웨어와 하드웨어로 구성되어 기상데이터나 공정데이터 등을 실시간으로 받아 모사가 가능한 프로그램이며, Planning Model은 다양한 시나리오에 대해 수행할 수 있으며, 그 결과는 저장량의 축소, 크기가 다른 여러 탱크로의 분산 배치, 탱크, 배관 또는 다이크(dike)와 같은 장치의 사양 변경, 살수장치나 증기막(vapor barrier)과 같은 완화조치(mitigation measure)를 결정하는데 사용된다. Table 2는 각각의 모델에 대한 특징을 나타낸다.

2.3 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,^{11,12)} 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 5년 정도내에서 유사공정에 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)를 결정하여 상위 순위를 보이는 시나리오에 대한 영향평가를 수행한다면 좀 더 정확하고, 간단한 사고시나리오를 추론할 수 있는 것이다.

2.4 기존 방법론의 문제점

공장외지역에 대한 위험영향평가의 결과는 주변환경에 미칠 수 있는 독성물질의 농도나 방사열 또는 과압 등의 형태로 나타난다. 이러한 결과는 공정내의 사고가 발생했을 경우 적절한 비상계획을 마련할 수 있는 근거로서 활용될 수 있다. 따라서 실제사고에 근접한 모사를 수행하기 위해서는 어떠한 장치가 사고를 일으켰을 때 공장외지역에 가장 큰 피해를 줄 수 있는지를 파악하여야 한다. 기존의 위험영향을 평가하는 방법론들은 이러한 시나리오 산정에 있어 사용자의 주관에 전적으로 의존하고 있다. 즉 이는 사용자에게 따라 모사

Table 2. Risk assessment system

Public Model	Proprietary Model
AQPAC	AIRTOX
ALOHA	CANARY
DEGADIS	CHARM
DRIFT	CHEM-MIDAS
FEM3C	GASTAR
HGSYSTEM	HOTMAC/RAPTAD
PLM89A	PHAST
SCIPUFF	SADENZ/SACRUNCH/SAPLUME
SLAB	SAFEMODE
TSCREEN	SuperChem Expert
VDI Guideline	TRACE

의 결과가 다양하게 나올 수 있다는 단점이 있으며, 또한 공정의 상태를 파악하지 않고 물질의 저장량만을 가지고 모사를 수행하기 때문에 실제로 더 큰 위험성을 가진 경우가 간과되는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 사고의 결과가 공장외지역에 미치는 영향을 정확하게 모사하려면 물질의 특성이나, 기상데이터, 장치의 거동에 따른 영향들이 고려되어야 할 것이다.

3. 사고시나리오의 구축 전략

3.1 사고시나리오 추론 구조

해당 공정 내에서 발생할 수 있는 가상 사고 시나리오를 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 발생한 사고 시나리오를 정확하게 산출할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서는 시나리오 산정 기술의 신뢰성 향상을 위한 방법으로 각 공정에 대한 3가지의 knowledge base와 4가지의 추론 알고리즘으로 구성되어 기후조건과 공정요소를 분석하여 해당 공정 내에서 발생할 수 있는 사고의 형태를 사전에 추론함으로써 발생 가능한 사고 시나리오의 신뢰성을 향상 시킴으로써 사고시 비상계획 설정에 활용할 수 있다는 이점이 있다. 합성된 가상 사고 시나리오를 사용한 공장 외 지역에 대한 영향의 계산결과를 통해서 공정 내의 안전장치의 종류나 capacity를 결정할 수 있고 인근 주거지역에 대한 비상계획을 세우는데 좀 더 유연한 결과를 산출할 수 있다. 본 연구를 통한 가상 사고 시나리오 결정 추론구조는 다음의 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 본 연구에서 제안하고 있는 가상 사고 시나리오 합성시스템의 전체적 구조를 보여준다.

먼저 가상 사고 시나리오를 추론하기 위한 전체적

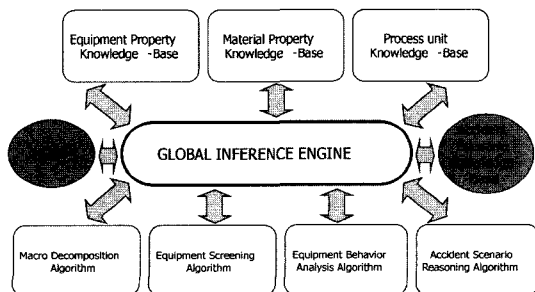


Fig. 1. Structure for proposed system.

구조를 살펴보면 먼저 크게 3가지의 개별 knowledge base을 가지는데, 장치의 특성과 기능을 나타내는 equipment property knowledge base, 해당 장치 내에 포함된 물질의 특성을 나타내는 material property knowledge base 그리고 기능별 단위공정의 특성과 주변지형의 특성을 나타내는 unit knowledge base로 구성되어 있고, macro decomposition algorithm, equipment screening algorithm, equipment behavior analysis algorithm 그리고 accident scenarios reasoning algorithm과 같은 개별적 알고리즘을 포함한 global inference engine으로 구성되어 있다. Macro decomposition algorithm은 전체 공정내에서 잠재 위험 영향이 큰 단위 공정을 추론하기 위한 알고리즘으로 단위공정의 기능과 물질의 특성을 고려하여 분석하며, equipment screening algorithm은 단위공정 내에서 위험성을 가지고 있는 개별장치를 추론하기 위한 알고리즘이며, equipment behavior analysis algorithm은 선정된 개별장치의 거동에 따른 이상원인의 분류와 이상의 크기를 평가하기 위한 알고리즘이며, accident scenarios reasoning algorithm은 장치의 이상거동과 물질의 특성을 이용하여 발생 가능한 사고의 형태를 추론하기 위한 알고리즘이다. 이러한 각각의 개별 알고리즘은 선택적으로 사용할 수 있으며, 공정에 따라 간단히 묘사하거나 추론할 수 있다.

3.2 사고시나리오의 산정

사고 시나리오를 추론하는 알고리즘은 지식베이스를 표현하는 규칙기반방식과 전문가의 지식을 기초로 하여 추론하는 방식 등으로 구성되어 있다. 전체적인 사고 시나리오의 추론과정은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 개별 지식베이스를 개별 추론 알고리즘에 의해서 합성하는 방식으로 구성되어 있다. 이러한 방법의 특징은 정성적인 위험성 평가 방법의 단점인 초기 사건에 대해서 한 전문가나 사용자의 전문지식이 없어도 쉽게

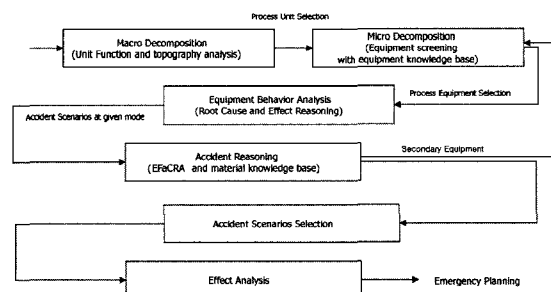


Fig. 2. Inference step of the proposed system.

해당 공정내에서 발생할 수 있는 사고의 종류나 그 원인 등을 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이러한 방법은 대규모의 정유/화학시설에서도 짧은 시간 내에 발생 가능한 사고의 종류와 그 원인 등을 추론할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

Macro decomposition은 전체공정을 파악하여 이상원이 발생할 수 있는 단위공정들을 분류하며, micro decomposition에서 ESA(Equipment Screening Algorithm)을 사용하여 추론된 단위공정내의 개별장치에 대한 위험성을 상대적으로 평가하는 단계이다. 여기서 선정된 장치는 equipment analysis 단계에서 장치거동에 따른 이상원인과 그 영향을 산출해낸다. 산출결과는 근본원인 분석을 통해서 그러한 사고를 발생시킬 수 있는 원인들과 그 영향을 규명하고, 그 영향은 물질특성과 함께 발생 가능한 사고의 형태를 추론하는 단계를 거친 후 해당 시나리오에 대한 영향 평가를 수행한다. 마지막 단계인 영향 평가는 상용 소프트웨어 패키지를 사용하여 계산할 수 있다.

3.2.1 Macro Decomposition Algorithm

본 연구에서는 공정에서 발생할 수 있는 가상 사고 시나리오 산정하기 위한 첫 번째 단계로서 전체 시스템을 분석하여 이상원이 잠재할 수 있는 단위공정을 파악하는 것이다. 즉, macro decomposition에서는 플랜트내의 여러 공정 중에서 사고 발생시 인근지역에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 공정을 확인하여 결정하는 단계이다. 이를 위해서는 먼저 시스템 분석을 통한 전체 공정의 분할작업을 수행한다. 먼저 공정을 주요 기능시스템으로 분할하는데 일반적으로 반응을 수반하는 화학공정은 대부분 원료공급, 반응, 분리, 생산(저장)의 일련의 과정을 지니며, 이를 위한 유틸리티로 구성되어 있다. 이러한 각 단계를 주요 기능시스템으로 정의하면 다음과 같다. 공급시스템, 반응시스템, 저장시스템, 분리시스템, 유틸리티 시스템으로 구분되며, 이러한 주요 기능 시스템은 서로의 상호작용이 심한 장치들은 하나의 시스템으로 묶거나 과거 조업경험으로 이상이나 자주 발생하던 공정은 별도로 관리한다, 일반적인 화학공장의 위험영향 평가를 위해서는 유틸리티 시스템보다 위험물질의 반응/저장이 일어나는 주요 시스템이 정의되고 고려되어야 한다. 이는 유틸리티 시스템은 고압상태로 운전되지만, 반응/저장이 일어나는 주요시스템에 비해 해당물질이 위험성을 가지지 않기 때문이다.

공정을 기능별로 분할한 후 해당공정의 기후적 특성 및 지리적 환경과 평균 풍향과 풍속 등을 고려하여, 사고 발생시 인근지역에 영향을 줄 수 있는 주요시스템

을 결정한다. 여기에는 인근지역의 주거비나 각 공정별 비상계획 등을 고려할 수 있다. 가장 먼저 고려되어야 할 것은 주요 기능시스템 인근에 주거지역이나 상업지역이 분포하고 있는가이다. 바람의 속도나 방향은 시간에 따라 여러 가지 변화를 가지므로 여기에서 사용하는 평균 풍향과 풍속은 그다지 큰 의미를 가지지 못한다. 그러나 사고 발생시 독성물질의 확산과 같은 경우는 바람의 방향이 인근지역에 가장 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 인근지역의 주거비와 함께 고려하도록 한다.

다음으로 사용중인 물질의 물성치를 고려한다. 이를 위해서는 material knowledge base에서 사용된 NFPA rating과 같은 공인된 자료를 활용한다. 이는 주요 공정 내의 물질이더라도 유난히 위험성이 큰 물질들(염소, 포스겐)이 간과되는 것을 방지하기 위해서이다. 위와 같은 방법을 통해 주요시스템이 결정되면 두 번째 단계에서 공정에 대한 좀 더 자세한 분석작업을 수행한다. Unit knowledge base의 구조와 형태는 앞 절에

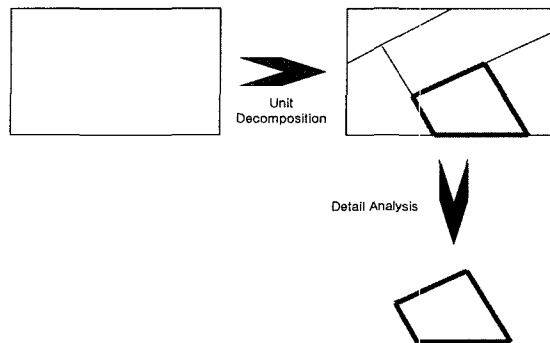


Fig. 3. Unit selection using macro decomposition.

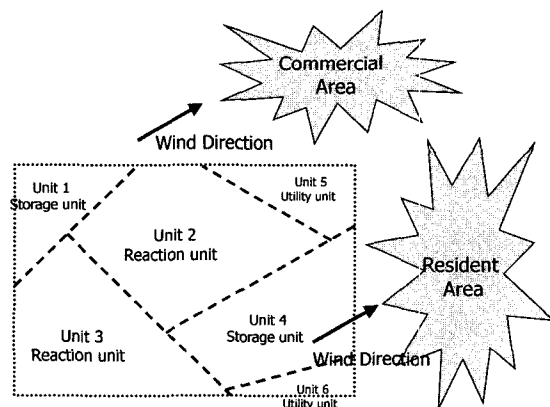


Fig. 4. Example for macro decomposition.

서 언급한 바와 같으며, 추론과정은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것과 같은 추론과정을 거쳐 대상공정은 선정한다.

3.2.2 Equipment Screening Algorithm

Micro decomposition 단계에서는 equipment screening algorithm을 사용하여 macro decomposition에서 결정된 공정에 대하여 세부요소를 분석한다. 즉 해당 공정내에 있는 장치들을 분석하여 이상이 발생하였을 때 인근지역이나 공정에 가장 큰 피해를 줄 수 있는 장치를 확인하는 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, 유량, 공정조건, 안전장치, 유사공정의 사고건수나, 장치연수, 보수이력 등이다.

Micro decomposition 단계에서 활용되는 knowledge base의 구조는 Fig. 5와 같다.

분석을 위해서 공정 내 장치에 영향을 줄 수 있는 공정요소의 분석이 선행되어야 한다. 공정 내 사고로 인한 위험영향 요소로는 크게 물질의 특성(flammability, toxicity 등), 운전조건(압력, 온도), 유량, 안전장치, 장치의 연수, 사고사례 등을 들 수 있다. 이러한 요소들을 고려하여 위험영향이 큰 장치를 선정하기 위해 본 연구에서는 ESA(equipment screening algorithm)를 제안하여 잠재위험을 가진 장치를 확인하고자 한다. ESA는 on-off 방식을 사용하여 공정요소별로 개별장치들의 적격여부를 판별하는 방법을 말한다. 먼저 잠재영향이 가장 큰 순서대로 공정요소들을 분류하면 ①

물질의 특성 ② 유량 ③ 운전조건 ④ 안전장치 ⑤ 장치의 연수 ⑥ failure rate ⑦ 사고사례 ⑧ 보수 이력 순으로 나열할 수 있는데, 각각의 요소들을 순차적 추론(sequential reasoning)방식으로 개별장치에 적용함으로써 잠재위험이 적은 장치들은 단계적으로 제거되어, 마지막에는 잠재위험이 가장 높은 장치만을 선별할 수 있다. 여기서 선정된 장치들은 equipment behavior analysis 단계에서 장치거동에 따른 발생 가능한 시나리오 선정에 활용된다. Fig. 5는 equipment screening algorithm 추론 과정을 나타낸다. 본 연구에서 제시하고 있는 추론 알고리즘은 크게 장치의 강도 분석 부분과 발생 가능성 분석으로 구분된다. 장치의 강도분석에는 물질의 특성, 유량, 운전조건이 분석 기준으로 사용되며, 발생가능성 분석에는 안전장치, 장치의 연수, failure rate, 사고사례 및 보수이력 등을 사용한다.

3.2.3 Equipment Behavior Analysis Algorithm (Equipment Failure and Cause Reasoning Algorithm, EFaCRA)

Equipment screening algorithm에 의해서 결정된 장치의 failure mode에 대해서 장치의 이상을 발생시킨 원인과 그 영향 그리고 그 영향으로부터 최종 사고의 형태를 추론하기 위한 알고리즘이다. 이를 위해서 각 장치별로 open, close, leak, rupture와 같은 모드를 선택하여 발생할 수 있는 원인과 영향을 전개한다. 장치 거동에 따른 이상 발생원은 Table 3에서 설명하고 있다. 분석과정은 누락의 가능성을 줄이고 분석의 완성도를 높이기 위해서 체계적인 방법으로 수행한다. 분석 결과는 철저하고 효율적인 평가를 위해서 일관된 형식에 따라 작성한다. 본 연구에서 사용된 원인/영향 추론은 지식베이스 방법으로 장치와 장치에 대한 기능 이상이 입력되면 장치의 모든 기능

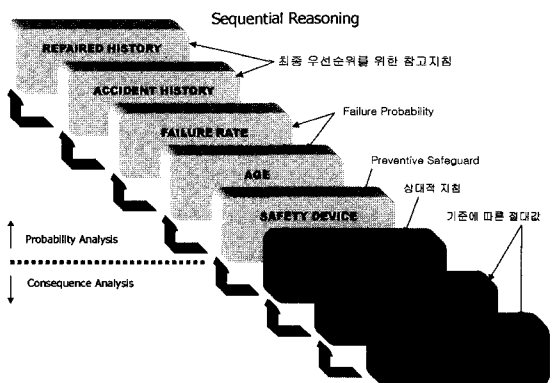


Fig. 5. Sequential reasoning of ESA(Equipment Screening Algorithm).

Table 3. Equipment failure mode

장치	발생 가능한 거동
밸브	<ul style="list-style-type: none"> • Open(항상 열려있는 경우) • Close(항상 닫혀있는 경우) • Rupture(파열로 인해 누출되는 경우) • Leak(작은 틈새로 새는 경우)
펌프	<ul style="list-style-type: none"> • Fail on • Transfer off • Seal leak/rupture • Pump casing leak/rupture
열교환기	<ul style="list-style-type: none"> • Leak/rupture(tube side to shell side) • Leak/rupture(shell side to external) • Plugged(tube and shell side) • Fouling

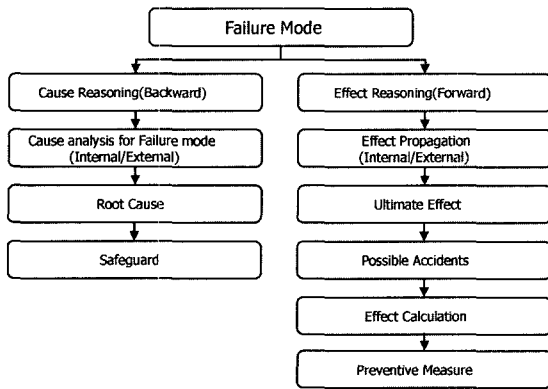


Fig. 6. Equipment failure and cause reasoning algorithm.

으로부터 주어진 기능의 이상을 발생시킬 수 있는 원인과 그 영향을 알아낸다. 이 방법은 전방/후방 추론 방법으로 기능의 이상을 중심으로 downstream에서의 기능이상으로부터 오는 영향과 upstream에서의 그 원인 등을 규명할 수 있도록 추론한다. 추론 과정은 Fig. 6과 같다.

먼저 후방 추론방법은 먼저 장치의 기능 이상으로부터 발생할 수 있는 영향을 추론한다. 여기에는 크게 장치 자체의 변화와 장치의 이상거동으로부터 오는 downstream으로의 영향으로 구분할 수 있으며, 장치의 내부적 변화는 기능이상으로부터 오는 내부의 온도나 압력의 변화나 이로 인한 최종적인 영향(장치의 파열 등)을 추론하며, 장치의 기능이상으로 인한 외부적 변화는 downstream이나 upstream의 변화를 추론하여 그 최종영향을 추론한다. 이상의 영향은 고려된 모든 이상상태에 대한 직접적인 결과와 그 영향으로 인해 다른 장치 및 전체 시스템이나 공정으로 전파될 것으로 예상되는 현상을 나타낸다. 일관된 평가를 위해서는 모든 장치의 이상의 영향이 공통된 원칙 위에서 분석되는 것이 중요하다.

전방 추론방법은 장치의 이상모드를 유발할 수 있는 원인들을 추론하는 방법으로 후방 추론방법과 마찬가지로 장치 자체의 이상원인과 upstream에서의 이상영향을 제공하는 원인을 추론하는 방법이다. 이러한 두 가지 방법들은 그 영향을 정량적으로 평가하여 그 원인을 완화시킬 수 있는 방법의 제시나 또는 안전장치의 설계에 응용할 수 있다.

Fig. 7에는 밸브에 대한 equipment failure and cause reasoning algorithm(EFaCRA)의 추론 예를 보이고 있다. 예를 들어 밸브의 기능이상인 fail로 인한 “close” 일 때 그 원인 및 영향을 추론하면, 각각의 경우에 대

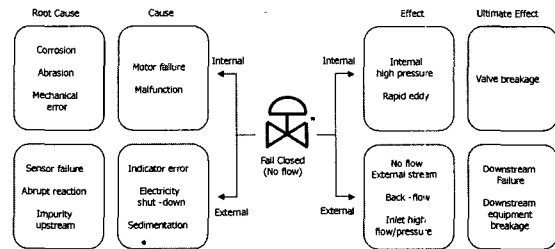


Fig. 7. equipment failure and cause for malfunction of valve.

해서 장치 자체나 내부적인 원인과 영향을 추론한 후에, 최종적인 “root cause”와 “ultimate effect”를 추론하여 accident scenario reasoning algorithm에 의해서 발생 가능한 사고의 형태를 추론한다.

3.2.4 Accident Scenario Reasoning Algorithm

Accident scenario reasoning algorithm은 equipment failure and cause reasoning algorithm의 결과와 물질에 대한 정보로부터 발생 가능한 사고의 형태를 추론하는 것이다. Accident scenario reasoning algorithm은 장치의 이상거동으로부터 추론된 결과와 material property knowledge base로부터 공정내 장치들이 지나는 물질에 대한 인화성지수, 반응성지수, 유해성 지수에 관한 정보를 얻고, 확인된 기능 이상과 변수일탈로부터 관련있는 위험요소를 알아낸다. Accident scenario reasoning algorithm에서는 발생 가능한 사고의 형태를 추론할 수 있다. 그 중에서 전형적인 3가지 사고의 형태를 예로 들면 다음과 같다.

- (1) Internal high pressure → valve leakage + toxic materials(Nh>2) ⇒ personnel Injury
- (2) No inlet flow + pump ⇒ pump damage & malfunction
- (3) External high pressure and temperature → downstream equipment breakage + flammable materials(Nf>2) ⇒ fire or explosion

Accident scenario reasoning algorithm은 공정장치의 이상거동과 물질 정보를 사용하여 다양한 형태의 사고를 추론할 수 있으며, 이에 대한 추론과정은 Fig. 8에 나타나 있다. 추론된 위험영향은 안전장치가 존재하는가에 따라 최종 영향의 결과를 표현할 수 있다. 확인된 기능 이상에 대한 안전장치의 종류에는 두 가지 유형이 존재하는데, 여기에는 preventive/mitigative safeguard가 있다. 예를 들면 leakage, rupture와 같은 기능이상에는 detector가, 고압, 고온에는 압력계와 온

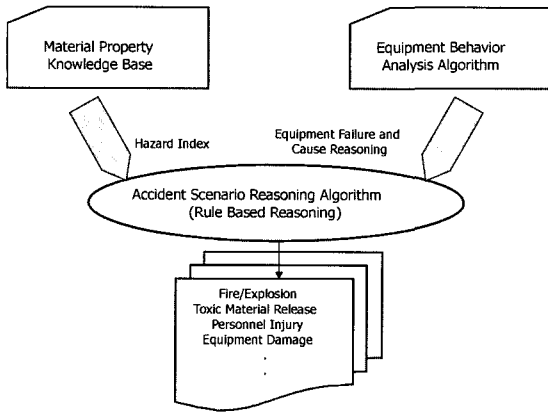


Fig. 8. Accident scenario reasoning algorithm.

도측정기가 mitigative safeguard로, 고압에 대해서는 pressure relief valve가 mitigative safeguard로 pressure indicator가 preventive safeguard로 제시된다.

4. 사례연구

4.1 8.3 C3/C4 이송 및 공급시설

C3/C4를 해양의 선박으로부터 공급받아 지하동굴형 저장시설(cavern)에 저장한 후 필요시 배관이나 트럭의 형태로 배송하는 시설이다. 지하 cavern은 수압의 의해 그 내부 압력이 조절되며, 저장 및 공급시설로는 pre-heater와 이송펌프, C3 dryer, C3 Stripper, odorant storage tank, inhibitor storage tank, valve류들로 구성되어 있다. 이 시설에 대한 PFD는 Fig. 9에 나타나 있다.

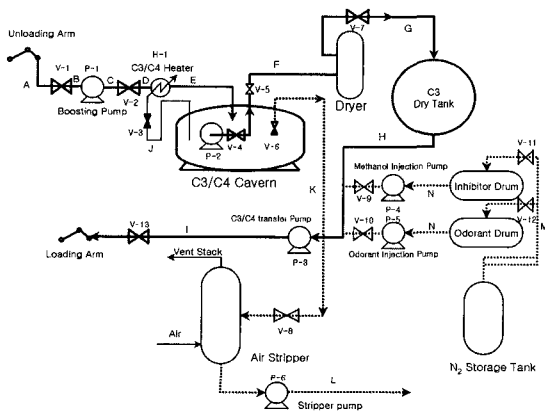


Fig. 9. PFD for C3/C4 storage process.

4.1.1 Macro Decomposition

단위공정으로 분류하여 공정의 기후 조건 및 주거지역을 고려하여 공정을 결정한다. 결정된 공정은 micro decomposition 단계에서 세부 장치별로 공정의 지역에 미칠 수 있는 잠재영향이 큰 장치를 결정한다. 대상시설은 남쪽의 주공정과 주변의 utility system 그리고 control system으로 구성되어 있다. 북쪽에는 사무실 및 교육센터와 주거시설이 위치하고 있다. 전체 공정을 주요 기능별로 분할하여 분석하면 세부 분석이 필요한 공정은 unloading area로부터 공급된 C3/C4를 heater를 거쳐 cavern에 저장된 후 필요한 C3/C4를 저장하고 공급하는 시설로 제한할 수 있다.

4.1.2 Micro Decomposition

Micro decomposition에 따른 단위공정내의 각 장치별 분석은 다음과 같다. 해당 공정 내에는 밸브 67개 (main stream 44개, heating stream 5개, utility stream 6개, seepage water treatment stream 12개), heater 3개, Dryer 5개, Stripper 2개, 저장탱크 3개, 펌프 26개가 있다.

각 밸브별 반응물질과 운전조건 등을 고려하여 ESA(Equipment Screening Algorithm)를 적용하기 위해 각 장치 및 stream에 대한 특성을 분석한다. 여기에는 크게 14개의 stream으로 구성되어 있으며, main stream이 8개이며, odorant stream 1개, inhibitor stream, heater에 연료를 공급하는 supply stream 1개 그리고 cavern내의 seepage water를 제거하고 그 안의 C3를 제거하는 stream 1개로 구성되어 있다. main stream은 주로 고압하에서 운전되며 주로 C3를 액화시킨 상태로 이동, 저장한다. 반응억제제로는 메탄올을 사용하며, 그 양은 매우 적다. 또한 cavern내에 가스상태로 존재하는 C3는 열교환기의 heater의 연료로 사용된다.

주공정에 대한 분석 결과 H-1 열교환기의 shell side에서의 이상과 V-5 밸브에서의 이상이 발생하였을 경우 가장 큰 위험영향을 보일 수 있는 것으로 나타났다.

열교환기 H-1의 상태는 C3를 액화상태로 저장하고 있으며 약 7.6 kg/cm²에서 -45°C에서 2°C로 온도를 상승시키며, C3의 flow rate는 시간당 약 2000톤이다.

밸브 V-1은 cavern에서 액화상태의 C3를 dryer를 통해 dry tank로 저장하는 라인상에 존재하는 밸브로 운전온도는 약 8.8°C, 운전압력은 약 16.7 kg/cm², flow rate는 시간당 약 1568톤 정도가 흘러간다.

다음 단계에서는 ESA(Equipment Screening Algorithm)를 통해서 결정된 장치(밸브, 열교환기의 shell side)에서 발생 가능한 이상모드와 그 원인/결과를 규

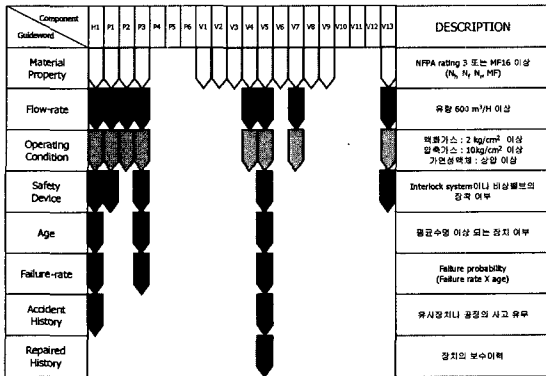


Fig. 10. Result of ESA(Equipment Screening Algorithm) for C3.C4 storage process.

명한다.

4.1.3 Equipment Behavior Analysis

이 단계에서는 ESA(Equipment Screening Algorithm)를 통해서 결정된 장치에 대해서 이상모드에 따른 원인과 결과를 추론하는 단계이다. 본 예제에서는 열교환기 H-1과 밸브 V-5에서의 이상이 가장 큰 위험 영향을 잠재하고 있기 때문에 이 두 가지 장치에 대하여 그에 따른 원인/영향 평가를 수행한다. 장치거동에 따른 이상원인/영향 분석 결과는 Table 4에 그 일부를 기술하였다.

4.1.4 Effect Analysis

추론 알고리즘에 의해서 산정된 시나리오를 가지고 위험영향 평가를 수행하며 위험영향 평가는 본 연구에서 개발된 수치모사 모듈을 가지고 수행한다. 위험영향 평가의 결과는 사고 발생시 인근지역에 대한 비상계획의 수립을 구체적이며 체계적으로 제시할 수 있는 근거를 제시한다.

5. 결 론

이상과 같이 국내외적으로 공장내 뿐만 아니라 공장의 지역에 대한 영향 평가 및 이를 통한 비상계획의 수립 필요성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이는 전세계적으로 환경문제와 연관되어 OECD 가맹국으로서 반드시 진행되어야 하는 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 공장의 지역으로의 영향 평가에 활용될 수 있을 것이다.

Table 4. Failure and cause analysis for equipment failure(Valve)

Equipment	Mode	Cause (Root Cause)	Effect	Ultimate Effect	Mat.	Relative Risk Ranking
Valve(V-5) on the feed line to the dryer	Fail closed	Motor failure	No flow of C3 to the dryer and dryer tank	Release of material	C3(L,G)	A (Fire/Explosion)
	Fail open	Malfunction	Low level in the dry and dry tank	Valve breakage	C3(L,G)	C (Equip. damage)
Valve(V-5) on the feed line to the dryer	•	Sensor failure	High hydraulic pressure	Pump breakage		C (Equip. damage)
		High hydraulic pressure	Internal high pressure	Release of material		C (Equip. damage)
		Electric shut-down	Rapid eddy	Downstream fail		A (Fire/Explosion)
		Sedimentation	Back-flow to the Cavern			
		Impurity stream	High pressure of outlet pump in the cavern			
		Motor Failure	Inlet pump fail due to high pressure			
		Malfunction	May cause pump rupture in the cavern			
Sensor failure	Excess flow of Flammable liquid to the dryer					
Low hydraulic pressure	High level in the dryer					
Electric shot-down	Overpressure in the dryer					
	May cause tank rupture due to over- pressure					

감사의 글

본 연구는 BK21사업, 국가지정연구실사업, 한국산업 안전공단과 서울대학교 공학연구소의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

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).
3. 김구희, 백종배, 고재욱, "화재 및 폭발피해의 강도산정에 관한 비교 연구", 한국화학공학회/학술발표회 논문 초록집, p.338 (1993).
4. EPA, "RMP Offsite Consequence Analysis Guidance", EPA(1996).
5. Murphy JF, Zimmermann KA, "Making RMP hazard Assessment Meaningful", Process Safety Progress, Vol. 17, No. 4, pp. 238-242(1998).
6. Woodward JL, "Improving the Effect of Atmospheric Stability Class for Dispersion Modeling", Process Safety Progress, Vol. 17, No. 4, pp. 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, Vol. 17, No. 4, pp. 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, Vol. 11, No. 4, pp. 261-277 (1998).
9. CCPS, "Vapor Cloud Source Dispersion Models", CCPS of the AIChE(1989).
10. CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs", CCPS of the AIChE(1994).
11. CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS of the AIChE (1989).
12. Arnaldos J, Casal J, Montiel H, Sanchez-Carricondo M, Vilchez JA, "Design of a Computer Tool for the Consequences of Accidental Natural Gas Releases in Distribution Pipes", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 11, No. 2, pp. 135-148(1998).