

C-09

## 화학공정의 피해예측시스템 개발에 관한 연구

김구희\*, 안성준, 윤인섭

\*서울대학교 화학공정신기술연구소, 서울대학교 응용화학부

### Development of Consequence Analysis System in Chemical Processes

Ku Hwoi Kim\*, Sung Joon Ahn and En Sup Yoon

\*Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Korea,  
School of Chemical Engineering, Seoul National University, Korea

#### 1. 서론

산업의 발달에 따라 설비규모의 증대와 함께 위험물질의 사용량은 점차 증가하게 되었고, 이에 따라 필연적으로 잠재적인 위험은 증가할 수밖에 없게 되었다. 중대산업사고는 산업활동을 하는 과정에서 비정상상태의 결과로 위험물의 누출, 화재, 폭발 등이 발생하여 즉각적이거나 또는 장기적으로 근로자는 물론 주민의 피해를 유발하거나 인근지역의 환경에 중대한 영향을 주는 사고로 정의되고 있다.

국내의 경우에도 과거 수년간에 걸쳐 크나큰 인적·물적 피해를 가져온 대형참사가 빈번히 발생하였으며, 이는 특히 화학공업과 관련된 곳에서 주를 이루었다. 중대산업사고의 주요 발생형태는 화재, 폭발 및 독성물질의 누출로서, 이들 산업사고는 일반 산업재해와는 달리 사고 발생의 빈도(frequency)는 낮으나 사고의 결과(consequence)로서 중대한 영향을 끼치는 특징을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 유해화학물질이 누출시 그 영향을 평가할 수 있는 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 모델은 독성물질 및 가연성물질을 대상으로 하며, 누출의 형태(연속적, 순간적) 및 물질의 상태(액상/기상)에 따른 누출속도, 누출시간, 플래쉬 후 액체의 분율, 누출량 등을 계산하는 누출모델과 가스를 가벼운 가스(light gas)와 무거운 가스(dense gas)로 나누어 각각의 거동을 모사한 후 이를 다시 확산의 형태에 따라 연속누출, 순간누출로 나누어 모사하는 확산모델, 그리고 복사, 폭발과 압, 비산물로 인해 사람과 물건에 미칠 가능성이 있는 피해나 손상을 예측할 수 있는 화재, 폭발모델로 구성되어 있다. 또한 기존의 상용시스템을 기초로 하여 개발될 프로그램의 기능적인 설계사양을 제시하며, 누출모델, 확산모델, 화재/폭발모델, 기상처리모델, GIS 모델, 물성D/B모델, 영향평가모델, 사고시나리오분석모델 등을 구성하며 이들을 구조적으로 연계할 수 있도록 FDS(Functional Design Specification)을 구성하였다. 또한 마지막으로 수 기존의 상용 시스템과 결과를 비교함으로써 개발된 시스템의 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서 개발된 시스템을 사용하여 화학공정에서 발생 가능한 사고의 영향을 사전에 모

사함으로써 설계하려는 비상계획에 대한 틀을 제공할 수 있으며, 화학물질 사고 발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적 피해 및 환경 피해를 사전에 예측할 수 있는 근거를 제시하며, 국내 실제 데이터 등을 이용하여 개발된 프로그램을 통한 방재 대책 및 비상 대응 시스템을 구축하는 데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 2. IRMS

IRMS는 여러가지 하위시스템들로 구성된다. IRMS를 구현하기 위한 소프트웨어는 다양한 요소들의 결합을 통해서 이루어 질 수 있다. 위험관리를 위하여, 우선 HAZOP이나 Checklist와 같은 위험 식별 방법들을 이용하여 잠재적 위험 요소를 찾아낸다. 이 단계에서 위험한 장치를 식별하기위해, 장치의 용량, 다루어지고 있는 물질의 위험성, 다루어지는 온도, 압력, 인화성 등의 정보를 포함하여야 한다. 또한 이전의 사고에 대한 이력과, 그 사례들의 원인과 결과 또한 다시 재발 할 수 있는 확률에 대한 자료를 포함할 수 있다.

두 번째로, 실질적으로 사고가 발생할 수 있는 빈도에 대한 예상을 해야 한다. 이를 위해서 사용하는 기법은 ETA, FTA등이 알려져 있으며, 빈도를 예상하는 것과 함께 사고가 발생하는 경우의 영향을 예측해야 한다. 이를 위해서 한국산업안전공단에서 다루는 영향 모델을 사용하고자 한다. 이 모델은 본 연구를 통해 개발되어신 CARM(Consequence Analysis and Risk Management)이라는 프로그램에 포함되어 있다.

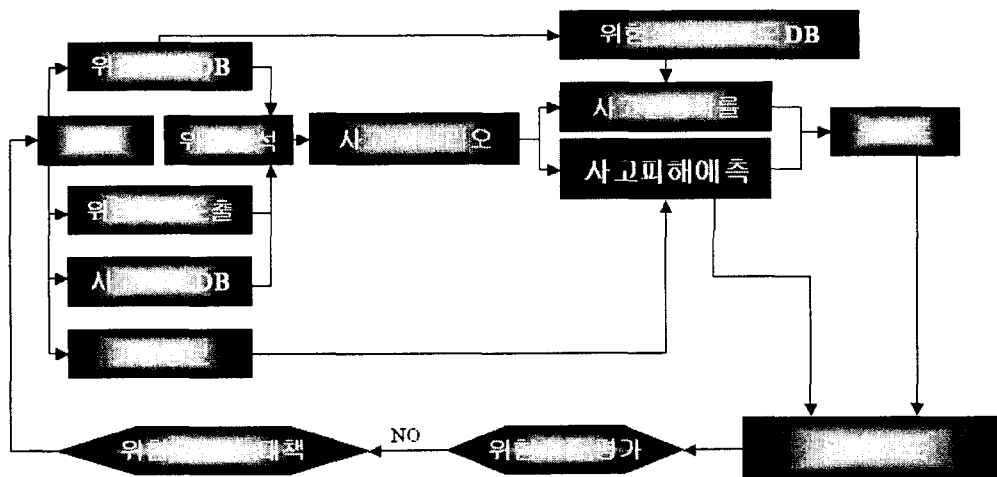


그림 1. 통합 위험관리 시스템 (IRMS)

세 번째 단계로, 앞에서 계산한 사고 확률 빈도와, 영향을 종합하여 ( $R = F \cdot C$ ), 위험도를 계산하고, 허용 가능한 위험 기준에 비교하여 허용 여부를 결정한다. 그리고, 계산된 위험도를 지리정보시스템 기술을 이용하여 위험도 지도를 그릴 수 있다. 이를 비상조치계획을 세우는 목적으로 활용할 수 있다.

### 3. CARM

CARM은 사고의 피해크기를 예측하기 위한 프로그램으로 여러 가지의 하위 모듈로 구성되어 있다. 물질 데이터 베이스, 누출량 계산, 확산 모델의 계산, 화재 모델의 계산, 폭발 모델의 계산, 풍향장 계산 등의 모듈로 구성되어 있다. 물질 데이터 베이스 모듈은 약 1300종의 물질에 대한 데이터를 포함하고 있으며, 물질의 데이터는 물질의 물리적 성질을 포함하여, 독성, 인화성등에 해당하는 데이터와 영향 평가를 위한 데이터를 포함하고 있다. 또한 데이터 베이스 모듈은 사용자가 다루는 특수한 물질에 대하여 물성을 따로 입력하여 새 물질을 추가할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 사용자가 원하는 경우 혼합물의 물성을 추정하여 계산할 수 있다.

누출량 계산 모듈에서는 사고가 발생한 경우 누출량과 누출구에서의 누출물질의 상태를 계산한다. 누출물질의 상태는 누출량 이외에, 압력, 온도, 기/액비 등을 포함한다. 누출의 상태는 12가지 경우로 나누어 분류되며, 이는 장치가 저장량을 가지고 있는지 여부, 누출이 전과로 인하여 발생한 경우와 유출로 인하여 발생한 경우, 또한 누출물의 상이 기체, 액체, 기/액 혼합인 경우로 나뉘어 모두 12가지 경우로 나뉘게 된다. 각각의 12가지 모델은 개별적으로 누출물의 상태를 계산하고 그 결과를 예상되는 사고에 해당하는 모듈에 그 정보를 전달한다. 예를 들어 누출된 물질에 액체가 포함되는 경우에는, 액면을 형성하게 되므로 액면 형성과 액면증발에 대한 계산을 수행하는 모델을 이용하여 풀의 지름을 계산하고 기상조건과 지면의 상태 등을 고려하여 액면에서의 증발량을 계산하며 이는 기상으로 누출된 물질의 양에 더해진다.

확산 모듈은 가벼운 기체에 해당하는 모델과 무거운 기체에 해당하는 모델로 이루어진다. 어느쪽의 모델을 사용하는가에 대한 기준은 Richardson number를 이용하여 결정된다. 가벼운 기체의 경우에는 확산과정에서 대기중으로 확산되어 공중으로 날아가 버리기 때문에 비교적 피해의 정도가 작기 때문에 상대적으로 모델의 연구가 적은 편이고 따라서 대략적인 모델이지만 가우시안 모델이 많이 사용된다. 하지만 무거운 기체의 확산의 경우에는 지표면 상으로 확산이 일어나서 큰 피해를 가져오기 때문에 많은 모델의 연구가 있으며, 본 연구에서는 SLAB모델을 개선하여 자체적인 모델을 개발하였다. 개발한 모델에서는 플럼을 계산하는 모델을 퍼프의 연속체로 계산하여 기존의 플럼 모델이 가지는 한계인 시간에 따른 변화를 나타내지 못하는 것과, 시간에 따라 누출량이 변하는 경우를 다룰 수 있도록 하였다. 이 모델들의 계산결과는 화면상에 농도의 분포로 표시된다.

화재모델은 화구, 제트화재, 액면화재의 세 가지 모델로 이루어진다. 각각의 모델은 복사열의 정도에 따르는 평면도와, 거리에 따라 복사열량의 변화를 보여주는 그래프를 계산할 수 있다. 각각의 모델들은 물질의 열량을 TNT 당량으로 환산하여 측정 기준 지점에서의 View-Factor를 고려하여 복사열의 플럭스를 계산한다. 최종적으로 열 플럭스의 계산은 앞에서 계산된 열원의 TNT 당량, View-Factor, 가림 효과 매개변수를 모두 곱하여 열 플럭스를 계산한다. 폭발모델은 폭발로 인하여 발생하는 과압의 크기를 계산한다. 결과는 화재 모델과 마찬가지로 평면상에서의 과압의 정도를 보여주는 평면도와, 거리에 따른 과

압의 크기 변화를 보여주는 그래프로 나타난다. 모델은 VCE(증기운 폭발), BLEVE(비등액체 팽창폭발)에 대한 모델들로 이루어진다.

풍향장 모듈은 풍향에 대한 것 뿐만 아니라 기상조건에 대한 고려를 포함한다. 풍향장 모듈은 사고 지점에서의 기상 조건을 계산하기 위하여 기상조건을 측정하는 풍향계들로부터 얻어지는 기상 정보를 종합하여 측정소의 위치와 다른 위치에서 일어나는 사고의 위치에서의 기상정보를 추정한다. 기상정보에는 대기온도, 상대습도, 대기안정도의 정보가 포함된다.

각각의 모델은 시나리오 데이터 베이스를 통하여 연결되며 그것들은 사고 시나리오와 누출정보, 기상조건을 포함한다. 그리고 그 결과는 위험도 분석 모듈로 전달되어 피해영향을 결정하는 변수로 사용되는 프로빗 값을 계산하며 만일 ETA나 FTA와 함께 사용되는 경우 CARM은 선택된 시나리오에 대한 위험도를 계산할 수 있다.



그림 2. 개발시스템의 초기화면

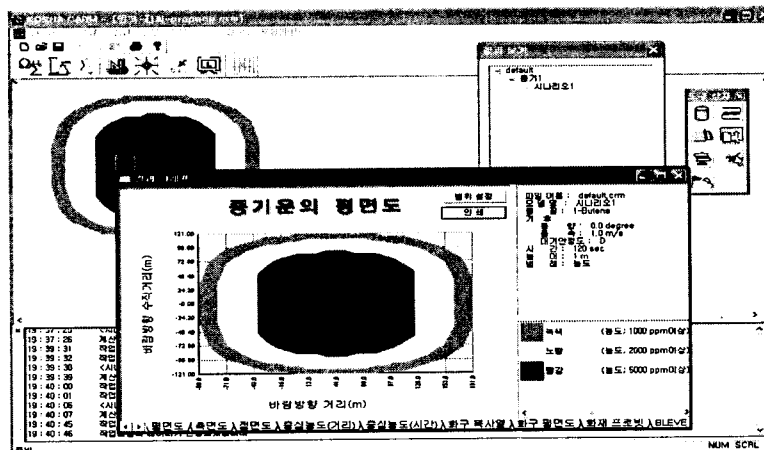


그림 3. 개발된 시스템에 의한 강도 산정 결과

#### 4. 결 론

CARM은 한국산업안전공단에서 개발하는 통합위기관리시스템(IRMS)의 한 요소로서 다른 요소들과 결합하여 사용할 때 보다 강력한 기능을 발휘한다. 전체시스템에서 위험성 분석 모듈로부터 발생 가능한 시나리오를 선별해 내고, CARM에서는 그 시나리오의 피해의 크기를 계산해내며, 사고 빈도 분석 시스템에서는 사고의 발생 확률을 얻어내서, 이를 종합하여 얻어지는 위험도를 GIS 시스템을 통하여 결과로 표현하면 주어진 상황에 대한 비상 대응 계획을 세울 수 있다. 한국산업안전공단에서는 위험설비, 설비 신뢰도, 주요사고 기록, 발생가능 사고 시나리오 등에 대한 데이터 베이스의 장기적인 계획을 가지고 있다. 통합위기관리시스템이 완성되면, 국내에 있는 화학산업단지에 위험관리를 위하여 사용될 것이며 여러 분야에서 괄목할 만한 이익을 가져올 것이다. 피해예측 모델은 계속 개선되고 있으며, 기술적으로 여러 부분에서 꾸준한 발전을 이룰 것이다.

#### 감사

이 연구는 한국산업안전공단의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. CCPS and AIChE. (1989). Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety,
2. ILO. (1999). Safework a Global Programme on Safety and Health at Work, p. 1
3. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, (1990). Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications, Prentice-Hall,
4. CCPS. (1996). Guideline for use of Vapor Cloud Dispersion Models,
5. CCPS. (1994). Guideline for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash fires, and BLEVEs,
6. D. M. Deaves. (1992). Dense gas dispersion modeling, Journal of loss prevention in the process industry, 4
7. D. L. Ermak. (1990). User's manual for SLAB: an atmospheric dispersion model for dense-than-air release, Lawrence Livermore National Lab.