

# FTA를 이용한 화학공장의 위험성 평가에 관한 연구

김윤화·김기수·고재욱  
광운대학교 공과대학 화학공학과

## A Study on the Risk Assessment in Chemical Plants Using Fault Tree Analysis

Yun-Hwa Kim · Ky-Soo Kim · Jae-Wook Ko  
Dept. of Chemical Eng. Kwangwoon Univ.

### 1. 서론

1960년대 이후 우리나라는 경제 및 산업구조를 근대화 시키기위한 정부의 중화학공업 육성정책에 의해서 발전을 지속하였다. 특히 화학공업의 발달은 산업 발전에 획기적인 전기가 되어 신흥 공업국으로 발전하는데 중추적인 역할을 하였다. 그러나 각종 공정 설비의 규모가 증가하고 유해한 화학물질의 사용이 크게 증가함에 따라 화재·폭발 및 독성물질의 누출 사고 등으로 작업중인 근로자는 물론 인근지역 주민과 주변 환경에 까지 영향을 미칠 가능성 즉, 잠재적 사고의 위험성이 증가하였다.

우리나라 화학공장의 경우 설비중 약 58%가 10년(울산공단 69년말 조성, 여천공단 70년대말, 경인지역 60 ~ 90년대 등) 이상되어 설비 노후로 인한 사고 위험성은 계속 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 설비 노후로 인한 사고를 미연에 방지하기 위해서는 공정·설비에 대한 적절한 신뢰도 분석(reliability analysis)을 통한 공정 설비의 유지 및 보수가 중요하다고 할 수 있다. 또한, 사고 예방차원에서 공정의 잠재하는 위험성을 미리 인지하고 그에 따른 대책을 준비하는 것도 중요하다고 할 수 있다.

현재, 국내에서 수행중인 대부분의 위험성 평가는 정성적 위험성 평가 부분에 많은 비중을 두고 있다고 할 수 있다. 그러나 적절한 공정의 위험성을 분석하기 위해서는 사고 발생 가능성(likelihood : frequency or probability) 분석과 사고결과(consequence) 분석을 결합하여 수행해야 한다고 생각하며, 완화(mitigation) 방지책 또는 피난 대책(emergency plan)을 마련하여 만일의 사고 발생했을 경우 피해의 최소화 방향도 고려하여야 할 것이다. 또한 위험성 우선 순위화(risk prioritization)에 의한 위험성의 상대적 크기가 분류되면, 안전성 향상에 투자한 자본(cost) 대비 향상된 안전성에 따른 최적 위험성 감소(optimal risk reduction) 방향도 신중히 검토하여야 한다고 생각한다. 그러나 방재 대책이나 최적 위험성

감소 방법의 개발도 중요하지만, 대부분의 대형 재해(major accident)들이 작은 잠재위험(hazard)으로 부터 시작된다는 사실을 고려한다면 가장 중요한 것은 공정내 존재하는 잠재위험을 확인·분석(identify·analysis)하여 잠재위험을 제거하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

## 2. 이 론

공정내의 잠재위험을 확인하고 사고 발생 가능성(likelihood : frequency or probability)을 산정하기 위하여 많이 사용되는 방법이 이상 트리 분석(Fault Tree Analysis)이다. 1962년 H. A. Watson에 의해 개발된 FTA 방법론은 초기 원자력 산업과 항공산업에서만 선택적으로 사용되다가 1980년대에 접어들면서 화학공정 전반에 걸쳐 사용되기 시작하여 많은 부분 발전을 거듭하여 왔다. 하지만 국내에서는 공정 데이터 부족, 전문 인력 부족 등의 이유로 적절한 보급 및 사용이 이루어 지고 있지 못하고 있었다. 따라서 본 연구에서는 FTA 방법론을 이용한 화학공정의 신뢰도 분석의 연구·검토 및 보다 효율적으로 응용할 수 있는 방법에 대한 내용을 다루고자 한다.

## 3. 사례 검토

본 사례 검토에서는 화학공장의 안전성 평가 방법중 예비 위험성 분석(Preliminary Hazard Analysis)과 HAZOP(Hazard and Operability) 연구를 통하여 공정의 정성적 평가를 수행하여 공정내 존재하는 위험원을 확인·검증한 후 이상 트리 분석을 통하여 정성적·정량적 안전성 평가를 수행하여 공정의 사고 발생 경로와 사고 발생 확률 (또는 빈도)를 산정하여 위험성을 감소 시킬 수 있는 방향을 제시하고자 한다. 사례 검토 대상은 화학 공정 중에서 사고가 많이 발생하고 있는 저장 탱크 부분에 대하여 수행하였다.

### 시스템 묘사

그림 1에 나타난 것과 같이 이 공정은 무수 암모니아를 저장 탱크에 저장한 후 공정으로 암모니아를 공급하는 적재/적하 공정이다. 저장 상태는 저장 온도 20°C 에서 7.5 bar(gauge)로 유지되도록 설계 되어있으며 cylindrical vessel 형태로 되어있다. 안전 시스템으로는 탱크내 냉각기를 장착하고 있어서 온도 상승으로 인한 암모니아 비등에 따른 탱크 내의 폭발 분위기 형성을 제어하고 있으며 3개의 완화 밸브를 설치하여 과압에 의한 탱크의 파열을 방지하고 있었다. 저장량은 500 톤 정도를 저장하고 있었으며, 연간 약 30회 정도 탱크에 암모니아를 적재하고 있었다.

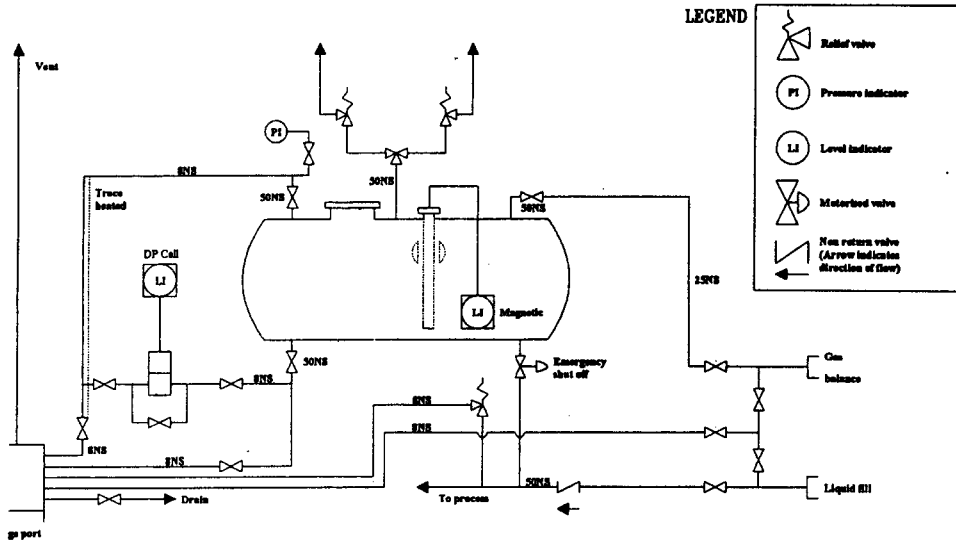


Figure 1. Line diagram of anhydrous ammonia storage system.

### 위험원 확인

암모니아가 인체에 미치는 영향은 대단히 크며 고농도의 암모니아를 흡입하였을 경우에는 사망할 수 있을 정도의 독성을 가지고 있다. 일반적으로 암모니아 400-700 ppm 정도의 농도에서 30분 정도 노출되면 심각한 피해를 입게 되며, 1700 ppm 정도의 농도에 30분 정도 노출되면 사망할 수도 있다.

PHA와 HAZOP 연구를 통하여 암모니아 저장 탱크의 위험원 분석 결과 발생 가능한 사고는 독극물 누출로 나타났으며, 독극물 누출을 야기할 수 있는 사고 원인으로는 파이프 라인 파손, 과압에 의한 탱크 파열, 외부 사고에 의한 탱크 파열, 적재/적하 작업시 발생할 수 있는 탱크와 탱크 로리 연결 부분에서의 암모니아 누출, 그리고 완화 밸브를 통한 암모니아의 증기상 누출로 파악되었다.

### 암모니아 저장탱크에 대한 위험성 평가

그림 1에 제시한 무수암모니아 저장탱크에 대한 신뢰도 분석을 수행하면 다음과 같다. 먼저 무수암모니아 저장탱크에 대한 FT를 작도하면 그림 2와 같다. 또한 그림 2로부터 중대 독성물질 누출을 발생하는 손실경로를 minimal cut set

(MCS)으로 표현하여 해석해 보면 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 또한 각각의 MCS가 중대 독성물질 누출을 야기할 수 있는 사고 발생 빈도를 계산하면 표 2와 같다.

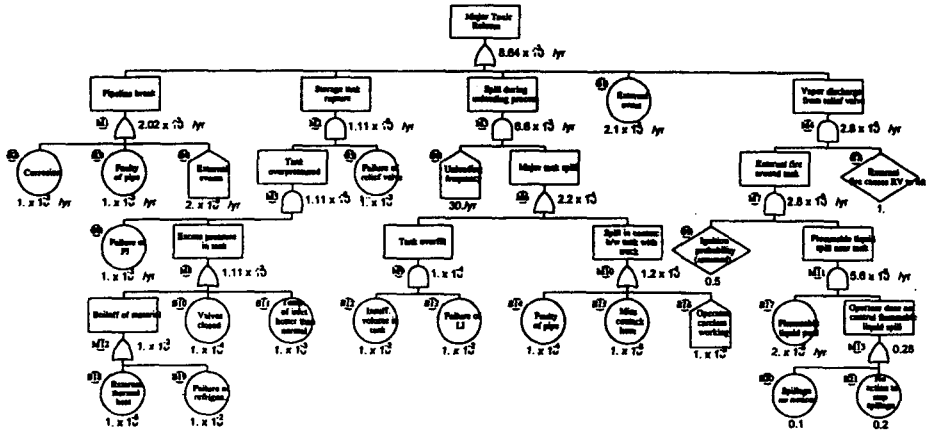


Figure 2. Fault tree for anhydrous ammonia storage tank.

Table 1. Minimal cut set for ammonia storage tank system

MCS No.	Basic event set	MCS No.	Basic event set
1	B1	8	B5 • B8 • B10
2	B2	9	B5 • B8 • B11
3	B3	10	B5 • B8 • B18
4	B5	11	B5 • B8 • B19
5	B6 • B14	12	B6 • B12 • B13
6	B6 • B15	13	B7 • B9 • B17 • B20
7	B6 • B16	14	B7 • B9 • B17 • B21

### 암모니아 탱크에 대한 안전성 고찰

표 2에서 알 수 있듯이 cut set 5번과 12번이 정상사상인 암모니아 누출을 일으킬 가능성이 가장 큰 것으로 나타났으며 이들 cut set의 구성을 살펴보면 다음과 같다.

$$- \text{MCS } 5 = B6 \bullet B14 = \text{unloading frequency} \times \text{faulty of pipe} \\ = 3 \times 10^3$$

$$- \text{MCS } 12 = B6 \bullet B12 \bullet B13 = \text{unloading frequency} \times \text{insufficient volume} \\ \text{in tank} \times \text{failure, or ignoring LI} \\ = 3 \times 10^3$$

Importance Analysis에 의해서 두 cut set이 정상 사상에 미치는 확률은 각각 35.46%로 나타났다. 즉, 정상사상인 암모니아 누출이 일어났을 경우 가장 큰 직접적인 원인은 이 두가지 경우가 발생했을때 이다.

Table 2. Frequency of the cut sets and top event

MCS	Frequency of cut set (yr <sup>-1</sup> )	Cut set importance	MCS	Frequency of cut set (yr <sup>-1</sup> )	Cut set importance
MCS 1	2.1 × 10 <sup>3</sup>	0.25	MCS 8	1 × 10 <sup>10</sup>	-
MCS 2	1.0 × 10 <sup>3</sup>	11.82	MCS 9	1 × 10 <sup>9</sup>	-
MCS 3	1.0 × 10 <sup>3</sup>	11.82	MCS 10	1 × 10 <sup>11</sup>	-
MCS 4	2.0 × 10 <sup>5</sup>	0.24	MCS 11	1 × 10 <sup>8</sup>	-
MCS 5	3.0 × 10 <sup>3</sup>	35.46	MCS 12	3 × 10 <sup>3</sup>	35.46
MCS 6	3.0 × 10 <sup>4</sup>	3.55	MCS 13	1 × 10 <sup>6</sup>	0.01
MCS 7	1.0 × 10 <sup>4</sup>	1.18	MCS 14	2 × 10 <sup>5</sup>	0.24
Top event frequency = Σ Ci = 8.46 × 10 <sup>3</sup> per year					

#### 4. 결 론

본 연구에서는 화학공정의 잠재적 화재·폭발·독성물질 유출과 같은 대형 재해의 사고 발생 경로와 시스템 결함에서 발생할 수 있는 사고의 형태에 따른 잠재적인 위험성을 파악하였으며, 궁극적으로 공정/시스템의 손실에 의한 사고 발생 확률을 산정하기 위하여 FTA 방법의 방법론을 연구·검토하였다. 또한 국내에서 가동중인 무수 암모니아 저장탱크에 적용하여 FTA 방법론의 타당성 및 응용성을 살펴보았다.

FTA를 화학공장에 적용하는데 있어서 가장 중요한 부분은 공정 전반에 대한

정확한 분석과 신뢰할 수 있는 데이터의 확보라고 할 수 있다. 또한 기본 사상들의 중복성(redundancy)에 의하여 사고 발생 확률이 underestimate나 overestimate 될 수 있다는 점이다. 이러한 점 때문에 FTA 방법론이 아직까지는 국내에서 많이 활용되고 있지 못한 점이라고 할 수 있으며, 국내 실정에 적합한 데이터의 수집 및 확보와 아울러 FTA 방법론에 연계하여 사용할 수 있는 정성적 위험성 평가 기법의 재정립이 필요하다고 사료된다. 또한 제한된 인력(man power)과 자본(capital)을 가지고 화학공장에 잠재된 위험원들을 효과적으로 제어할 수 있다고 생각되는 Cost Optimal Allocation 방법을 제안하여 보았다.

결론적으로 화학공장이 내재하고 있는 잠재위험에 의해 차후에 발생할 수 있는 재해를 미연에 방지하고 안전한 조업 조건을 유지하기 위해서는 정기적인 안전 진단과 그에 따른 대책을 마련하는 것이 시급하다고 생각하며, 궁극적으로 전공정에 대하여 자료 수집에 따른 데이터 베이스의 구축과 전문가 시스템의 개발도 매우 중요한 사안이라고 생각할 수 있다.

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구 (과제번호 :961-1109-056-2) 지원과 포항공과대학교 지능자동화연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의하여 수행하였으므로 이에 감사드립니다.

## 5. 참고문헌

1. Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", New York (1989).
2. David B. Brown, "System Analysis and Design for Safety", Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. (1976)
3. Ernest J. Henley, and Hiromitsu Kumamoto, "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. (1981).
4. ILO, "Major Hazard Control : A Practical Manual", International Labour Office, Genova (1988).
5. Mark Paradise, Ted Light, and Linda Ungr, "Using Feedback to Improve Your PSM". International Process Safety Management Conference and Workshop, San Francisco, California (1993).
6. 김 윤화, 엄 성인, 고 재욱: 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 1, p. 56~63 (1995).
7. 김 윤화, 백 종배, 고 재욱: 한국산업안전학회지, Vol. 9, No. 1 (1994).