

API-581 절차에 의한 정량적 위험성 평가

이헌창*, 장서일, 조지훈**, 임대식**, 김동기***, 이주민****, 김태욱
명지대학교 화학공학과,

*한국안전이엔씨, **한국산업안전공단, ***한국가스안전공사, ****(주)그린에너지

Quantitative Risk Analysis Using API-581 BRD

H. C. Lee*, S. I. Jang, J. H. Cho**, D. S. Lim**, D. K. Kim***, J. M. Lee****,
T. O. Kim

Dept. of Chemical Engineering Myongji University,

*Korea Safety E&C, **KOSHA, ***Korea Gas Safety Co., ****Green Energy Co.

1. 서 론

화학공업은 고도의 기술집약적인 장치산업으로 생산기술의 발전과 더불어 시설이 대규모화, 고속화, 복잡화되고 있을 뿐만 아니라 여러 종류의 유해하고, 위험성이 큰 화학물질의 취급량이 증가하고 있다[1,2]. 따라서 최근에는 설비 자동화, 안전설계, 안전설비 설치, 비상조치계획 수립 등을 통하여 사고위험을 최소화 하려는 노력이 꾸준히 진행되고 있으나 설비의 낡음, 노후화, 조작자 실수, 기계적인 고장 등으로 인하여 화재, 폭발, 독성물질의 누출 등과 같은 대형사고의 발생 가능성은 항상 존재하고 있다[3-5]. 특히, 이와 같은 사고가 발생할 경우에는 사고영향이 공장내부의 시설이나 사람에게만 피해를 주지 않고, 인근지역의 주민이나 환경에까지 치명적인 영향을 미치기 때문에 일반사고와 다르게 중대산업사고(major industrial accident)로 구분하고 있다. 최근에는 이러한 중대산업사고를 예방하기 위하여 사용 설비에 대하여 정량적인 위험성 평가(quantitative risk analysis, QRA)를 수행하고 있으며, 이를 바탕으로 비상조치계획을 수립하고 있다. 그러나 QRA를 수행하기 위해서는 정확한 시나리오가 수립되어야 하는데, 사업장의 경우는 정량적 위험성 평가 프로그램의 복잡성, 경험 부족, 충분한 이해 부족 등의 원인으로 타당성 있는 QRA를 수행하지 못하고 있다. 특히, 누출 시나리오 작성에 가장 큰 영향을 주는 누출공의 크기와 누출시간에 대한 기술적 근거가 마련되어 있지 않아 정량적 평가 수행에 많은 어려움이 있다. 이를 위해 최근 한국산업안전공단(KOSHA)에서는 API-581 절차[6]에서 제시한 누출공의 크기와 누출시간 선정방법을 활용하여 화학공장의 피해최소화대책에 관한 기술지침[7]을 수립하여 보급하고 있다.

본 연구에서는 정량적 위험성 평가를 수행하는데 가장 중요한 변수인 누출공의 크기 및 누출시간의 선정방법을 API-581 절차에서 제시된 방법을 사용하여 사고 피해크기를 산출하는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 시나리오 작성

일반적인 사고결과 분석절차는 누출유형 및 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 피해범위와 독성물질 확산에 의한 독성영향을 산출한다.

2-1. 누출공 크기 선택

API-581[6]과 KOSHA CODE[7]에서는 누출공을 소형, 중형, 대형, 그리고 파열 형태로 분류하고, 일반적으로 각각의 설비별로 Table 1과 같이 4가지의 누출공을 이용한다. 배관의 경우 4가지 표준 누출공이 이용되며, 누출공의 직경이 배관 자체의 직경보다 작거나 같다면, 1/4 inch, 1 inch, 4 inch, 그리고 파열형태가 사용된다. 예로, 1 inch의 배관은 최대 가능 선택이 1 inch 누출공과 동일하므로, 단지 두 가지 누출공, 즉 1/4 inch와 파열(1 inch) 크기를

가질 수 있고, 4 inch 배관은 같은 이유로 인해 1/4 inch, 1 inch, 그리고 파열(4 inch) 크기의 3가지 누출공을 가질 수 있다. 또한 다양한 크기와 유형을 갖는 압력용기는 배관에서와 같이 4가지의 누출공을 가지며, 특히 파열인 경우 16 inch의 크기로 제한된다. 그러나 펌프의 경우 사용할 수 있는 누출공의 크기는 3가지로, 1/4 inch, 1 inch 및 4 inch이다. 특히, 흡인라인이 4 inch 미만인 경우 최종적으로 가능한 누출공은 흡인라인의 직경을 기준으로 한다.

Table 1. Hole sizes used in API-581 BRD

Hole Size	Range	Representative Value
Small	0-1/4 inch	1/4 inch
Medium	1/4-2 inch	1 inch
Large	2-6 inch	4 inch
Rupture	> 6 inch	Entire diameter of item, up to a maximum of 16 inch

2-2. 누출시간 선택

화학공장에서는 위험물질의 누출에 대해 피해를 최소화하기 위하여 검출시스템(detection system), 차단시스템(isolation system), 그리고 완화시스템(mitigation system) 등을 가지고 있다. 검출 및 차단 시스템은 누출을 검출하고, 차단함으로써 누출 지속시간을 감소시키며, 완화시스템은 누출 후 물질의 점화나 확산 가능성을 최소화하여 피해범위를 감소시키는 역할을 하게 된다.

Table 2는 설비의 검출 및 차단시스템의 등급(A, B, 또는 C)을 결정하는 기준이며, 또한 Table 3은 API-581[6]과 KOSHA CODE[7]에서 제시된 검출 및 차단시스템으로부터 결정된 누출 가능한 지속시간을 나타낸다.

Table 2. Oder and leak time of detection and isolation systems

Detection System	Classes	Detection System Rating	Isolation System Rating	Leak Time (inch):(min)
Suitably located detectors to determine when the material is present outside the pressure-containing envelope	B	A	A	1/4 : 30 1 : 20 4 : 10
Visual detection. cameras, or detectors with marginal coverage	C	A	B	1/4 : 40 1 : 30 4 : 20
Isolation System	Classes	A	C	1/4 : 40 1 : 30 4 : 20
Isolation or shutdown systems activated directly from process instrumentation or detectors, with no operator intervention	A	B	A or B	1/4 : 60 1 : 30 4 : 20
Isolation or shutdown systems activated by operators in the control room or other suitable locations remote from the leak	B	B	C	1/4 : 60 1 : 30 4 : 20
Isolation dependent on manually-operated valve	C	C	A, B, C	1/4 : 60 1 : 40 4 : 20

누출시간은 검출시스템과 차단시스템에 의해 얻어지는 시간으로, 최종 누출시간을 의미하는 것은 아니다. 즉, 설비 내에 존재하는 인벤토리 량(inventory amount)을 누출속도로 나누었을 때 계산되는 누출시간과 Table 2에서 제시된 누출지속시간을 비교하여 보다 적은 시간을 최종 누출시간으로 결정한다.

2-3. 피해면적 산출

일반적인 정량적 위험성 평가의 사고결과에서는 누출속도와 누출시간으로부터 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 대하여 과압과 복사열을 이용하여 관심거리를 산출하며, 독성물질의 누출에 대해서는 허용농도를 이용하여 확산범위를 산출한다. 그리고 피해면적을 통해 설비에서 사고피해를 완화하기 위한 시스템(mitigation system)을 고려하여 피해범위를 감소시킨다. Table 3은 API-581에서 제안된 완화시스템의 적용 방식을 나타낸 것이다.

Table 3. Adjustments to flammable consequence for mitigation system

Mitigation System	Consequence Adjustment
Inventory blowdown coupled with isolation system rated B or higher	Reduce release rate or mass by 25%
Fire water deluge system and monitors	Reduce consequence area by 20%
Fire water monitors only	Reduce consequence area by 5%
Foam spray system	Reduce consequence area by 15%

완화시스템을 통해 산출된 피해면적은 누출 시나리오에 따른 설비들의 고장률을 이용하여 식 (1)과 같이 가중평균(weighted average)을 산출할 수 있다. 이때, 가중평균은 설비들의 고장률을 반영하여 자주 발생하는 누출 시나리오에 가중치를 부여함으로써 실제 사고가 가장 많이 발생하는 평균값을 의미한다. 따라서 사업장에서는 가중평균 피해범위와 파열에 의한 최악의 누출 시나리오를 바탕으로 비상조치계획을 수립할 수 있다.

$$\text{Weighted average area} = \frac{\sum_{n=1}^{n=4} ((Area)_n \times (Frequency)_n)}{\sum_{n=1}^{n=4} (Frequency)_n} \quad (1)$$

3. 새로운 정량적 위험성 평가방법

일반적인 정량적 위험성 평가의 문제점은 누출공과 누출시간의 선택이 객관적인 방법에 의해 결정되지 못하고, 사용자의 주관에 의해 선정되기 때문에 정확한 값을 얻기가 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나 Fig. 1과 같이 API-5821 절차에서 제시한 누출 시나리오를 사용하는 경우에는 기존의 사고결과 분석(consequence analysis, CA)의 단점을 보완하여 보다 객관적이고, 현실성 있는 정량적 위험성 평가를 수행할 수 있다. 즉, 새로운 QRA 방법에서는 누출공의 크기를 API-581에서 제시한 4가지 형태로 지정하고, 옵션으로 사용자가 지정하는 누출공의 크기를 계산할 수 있는 방법이 도입되어야 한다. 즉, 4가지의 누출공은 과거의 사고 경험을 토대로 만들어 졌기 때문에 사고 예측에 도움이 될 것이다. 또한 누출 가능량은 기존의 경우 저장용기의 저장량을 기준으로 하였으나 새로운 방법에서는 용기를 기준으로 사고발생시 블록제어를 할 수 있는 범위를 선택하여 해당 범위 내의 물질의 량을 최대 누출가능 량으로 선택하는 것이 바람직하다. 또한 누출시간의 경우 현재 방법에서는 10분을 기준으로 사용되고 있으나 이 방법은 공정에 설치되어 있는 검출기와 밸브 등을 고려하지 않았기 때문에 피해크기가 실제보다 크게 나타나거나 보다 적게 나타나는 경우가 있다. 따

라서 검출시스템과 차단시스템을 고려하여 실제 가능한 누출시간을 예측하는 것이 현실을 보다 잘 반영한 결과라고 할 수 있다. 그리고 피해범위는 경험적으로 발생할 수 있는 평균 값과 최악의 누출 시나리오에 의해 얻을 수 있는 최악의 범위, 그리고 사용자가 입력한 누출공과 누출시간에 의한 피해범위를 같이 나타냄으로써 사용자가 산출결과로부터 현명하게 판단할 수 있도록 하여야 한다.

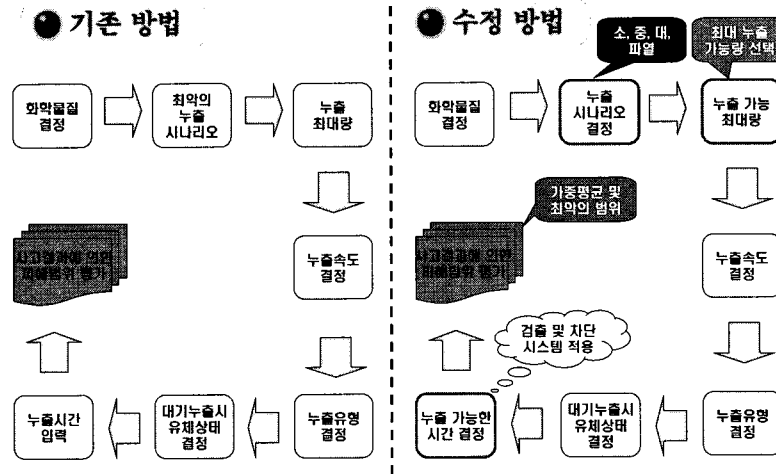


Fig. 1. New method for consequence analysis.

4. 결론

기존의 정량적 위험성 평가방법을 보다 현실적이고, 타당성 있게 수정하기 위해 API-581 절차에서 제시한 누출 시나리오를 사용하여 QRA를 수행하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 누출공의 크기는 4가지 기본크기를 사용하고, 누출 가능량은 블록을 설정하여 최대 저장량을 사용하는 것이 바람직하며, 또한 검출 및 차단 시스템을 고려하여 누출시간을 결정한다. 그리고 누출 후 완화시스템을 고려하여 피해범위를 산출하며, 이때 피해범위는 가중평균과 최악의 피해범위, 그리고 사용자 입력한 누출공에 대한 피해범위를 예측하는 것이 가장 바람직할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. KOSHA, "Safety Planning in Chemical Industry", Korea Occupation Safety and Health Agency(KOSHA), 8-28, (1993)
2. KOSHA, "Consequence Analysis(CA)", Industrial Safety Training Institute of KOSHA, STI-2001-29-86, (2001)
3. Kletz, T. A., "What Went Wrong?", Gulf Publishing Co., Houston, TX, (1986)
4. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Butter-worths Ltd., Vol. 1, London, (1991)
5. Lees, F. P., Loss Prevention in the Process Industries, Butter-worths Ltd., Vol. 2, London, (1991)
6. API, "Risk Based Inspection Base Resource Document : API-581", American Petroleum Institute(API), 1st ed., (2000)
7. KOSHA, "화학공장의 피해최소화대책에 관한 기술지침", Korea Occupation Safety and Health Agency, KOSHA CODE P-42-2006, (2006)