



## 화학공장의 사고피해 최소화 대책수립을 위한 영향범위 평가

이현창<sup>\*</sup> · 한성환 · 조지훈<sup>\*\*</sup> · 신동일 · <sup>†</sup>김태옥  
 명지대학교 화학공학과, <sup>\*</sup>DNV 코리아, <sup>\*\*</sup>한국산업안전보건공단<sup>†</sup>  
 (2011년 2월 18일 접수, 2011년 4월 7일 수정, 2011년 4월 7일 채택)

### Estimation of Effect Zone for the Establishment of Damage-Minimizing Plan of Chemical Plants

Hem-Chang Lee<sup>\*</sup> · Seong-Hwan Han · Ji-Hoon Cho<sup>\*\*</sup> · Dongil Shin · <sup>†</sup>Tae-Ok Kim

*Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea*

*<sup>\*</sup>Det Norske Veritas Korea*

*<sup>\*\*</sup>Korea Occupation Safety Health and Agency*

*(Received February 18, 2011; Revised April 7, 2011; Accepted April 7, 2011)*

#### 요 약

화학공장에서 현실적인 사고피해 최소화 대책수립 방법을 제시하기 위하여 API-581 절차를 이용하여 누출 시나리오를 설정하고, 정량적 원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 사용하여 사고 영향범위를 산출하였다. 그리고 위험성 평가를 실시하였다. 그 결과, 화학공장의 사고피해를 최소화하기 위해서는 4가지 누출공의 크기(소, 중, 대 및 파열)와 검출 및 차단 시스템의 등급에 따른 누출시간을 사용하고, 고장빈도에 의한 가중평균과 최악의 누출의 경우를 동시에 고려한 피해면적을 산출하여 비상조치계획을 수립하는 것이 바람직하였다.

**Abstract** - As a way to propose a method for the establishment of practical damage-minimizing plan for chemical plants, the release scenario was established by using API-581 BRD and the effect zone was estimated by the KS-RBI program supporting the quantitative cause analysis. And the risk assessment was performed. As a result, we found that to minimize the damage of a chemical plant, it is effective to use four release hole diameters (small, medium, large and rupture) and release time estimated according to the classes of detection and isolation systems. In addition, it can be safely said that through applying the damage areas considering weighted average by failure frequency and worst-case simultaneously, industrial sites can come up with the effective emergency response plan.

**Key words** : damage-minimizing plan, effect zone, risk assessment, API-581, KS-RBI program, emergency response plan

#### I. 서 론

화학공업은 고도의 기술집약적인 장치산업으로, 생산기술의 발전과 더불어 시설이 대규모화, 고속

화, 그리고 복잡화되고 있을 뿐만 아니라 유해·위험성이 큰 화학물질의 취급량이 증가되고 있다[1,2]. 따라서 최근에는 설비의 자동화, 안전설계, 안전설비 설치, 비상조치계획 수립 등을 통하여 사고위험을 최소화 하려는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 설비의 노후화, 조작자 실수, 기계적인 고장 등으로 인하여 화재, 폭발, 독성물질의 누출 등과 같은

<sup>†</sup>주저자:kimto@mju.ac.kr

대형사고의 발생 가능성은 항상 존재하고 있다[3,4]. 특히, 이와 같은 사고가 발생할 경우에는 사고 영향이 공장내부의 시설이나 사람에게만 피해를 주지 않고, 인근지역의 주민이나 환경에까지 치명적인 영향을 미치기 때문에 일반사고와 다르게 중대산업사고(major industrial accident)로 구분하고 있다.

최근 들어 화학공장의 피해를 최소화하기 위하여 한국산업안전보건공단(KOSHA)에서는 화학공장의 피해 최소화 대책에 관한 기술지침[5]을 수립하여 보급하고 있으나 사업장에서는 누출 시나리오 선정 등 정량적 위험성 평가에 대한 정확한 이해가 부족하여 효과적인 사고피해 최소화 대책을 수립하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 화학공장에서의 현실적인 사고피해 최소화 대책수립의 방법을 제시하기 위하여 API-581 절차[6]를 이용하여 누출 시나리오를 선정하고, 정량적 원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 이용하여 사고 영향범위를 산출하여 위험성 평가를 실시하였다.

## II. 이론적 배경

API-581[6]에서 제시된 사고 결과분석 절차는 Fig. 1과 같이 누출유형과 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 사

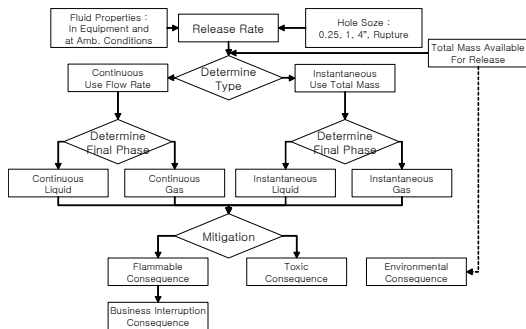


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

Table 1. Release hole sizes used in API-581[6]

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

고 피해범위와 독성물질의 확산에 의한 독성영향을 산출한다.

### 2.1. 누출공 크기

API-581[6]에서는 누출공 크기를 소형, 중형, 대형, 그리고 파열로 분류하며, Table 1과 같이 4가지의 누출공 직경을 사용한다.

배관의 경우에는 4가지 표준 누출공이 사용되며, 누출공의 직경이 배관 자체의 직경보다 작거나 같으면 1/4, 1, 4 inch와 파열이 사용된다. 예로, 1 inch 직경의 배관은 최대 가능직경이 1 inch 누출공과 동일하므로, 두 가지 누출공, 즉 1/4 inch와 파열(1 inch)의 크기를 가질 수 있고, 4 inch 배관은 1/4, 1 inch와 파열(4 inch)의 3가지 누출공을 가질 수 있다. 또한 다양한 크기와 유형을 갖는 압력용기는 배관에서와 같이 4 가지 누출공을 가지며, 특히 파열인 경우는 16 inch로 제한한다. 그러나 펌프의 경우 사용할 수 있는 누출공의 크기는 3가지(1/4, 1, 4 inch)이다. 특히, 흡인라인이 4 inch 미만인 경우에는 흡인라인의 직경을 기준으로 누출공의 크기를 결정한다.

### 2.2. 누출속도

화학설비에서 누출공에 의한 누출속도는 누출물질의 특성, 공정조건 등에 따라 변화하기 때문에 누출유형과 누출형태에 따라 적합한 모델을 사용하는 것이 바람직하다[7,8].

API-581[6]에서는 압력설비에 대하여 누출속도를 Perry & Green에 의해 제시된 방정식을 사용할 것을 제안하고 있으며, 오리피스와 같은 구멍을 통한 액체 누출은 식 (1)에 의해 초기누출속도를 산출한다[9].

$$Q = C_D A \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

여기서 Q는 누출속도(kg/s), A는 누출공의 단면적(m<sup>2</sup>), ρ는 밀도(kg/m<sup>3</sup>), P는 압력(Pa), C<sub>D</sub>는 누출계수(-)로, 일반적으로 0.62를 사용한다.

또한 용기누출에서 초기누출속도는 음속누출인 경우에는 식 (2)를, 그리고 아음속누출인 경우에는

**Table 2.** Class of detection and isolation systems

Class	Detection system	Isolation system
A	Instrumentation designed specifically to detect material losses by changes in operating conditions(i.e., loss of pressure or flow) in system	Isolation or shutdown systems activated directly from process instrumentation or detectors, with no operator intervention
B	Suitably located detectors to determine when the material is present outside the pressure-containing envelope	Isolation or shutdown systems activated by operators in the control room or other suitable locations remote from the leak
C	Visual detection, cameras, or detectors with marginal coverage	Isolation dependent on manually-operated valve

식 (3)을 사용한다[9].

$$Q = C_D A P_s \sqrt{\left(\frac{\gamma M w}{R T_s}\right) \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2)$$

$$Q = C_D A P_s \sqrt{\left(\frac{2 M w}{R T_s}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left[\left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right]} \quad (3)$$

여기서  $P_s$ 와  $P_a$ 는 공정 및 대기 압력(Pa),  $Mw$ 는 분자량(-),  $R$ 은 기체상수(kJ/kmol·K),  $T_s$ 는 공정온도(K), 그리고  $\gamma$ 는 열용량비(-)이다.

### 2.3. 누출시간

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

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

Table 3의 누출시간은 검출 및 차단 시스템의 등급에 의해 얻어지는 시간으로, 최종 누출시간을 의미하는 것은 아니다. 즉, 설비 내에 존재하는 인벤토리량(inventory amount)을 누출속도로 나누었을 때 계산되는 누출시간과 Table 3에서 제시된 누출시간을 비교하여 보다 작은 시간을 최종 누출시간으로 결정한다.

### 2.4. 피해면적

일반적으로 정량적 위험성 평가에서는 누출속도와 누출시간으로부터 누출량을 산출하고, 화재 및

**Table 3.** Leak durations based on detection and isolation systems

Class of detection system	Class of isolation system	Leak time (min)
A	A	1/4 inch : 20 1 inch : 10 4 inch : 5
A	B	1/4 inch : 30 1 inch : 20 4 inch : 10
A	C	1/4 inch : 40 1 inch : 30 4 inch : 20
B	A or B	1/4 inch : 40 1 inch : 30 4 inch : 20
B	C	1/4 inch : 60 1 inch : 30 4 inch : 20
C	A, B, C	1/4 inch : 60 1 inch : 40 4 inch : 20

폭발에 대하여 관심거리에서 과압(overpressure)이나 복사열을 산출한다. 그러나 API-581[6]에서는 경험적으로 산출된 공식을 사용하여 누출속도 또는 누출량을 이용하여 피해범위를 장치손상지역, 상해지역 및 독성영역으로 구분하여 산출한다. 이때, 장치 및 상해 피해범위는 화재 및 폭발이 발생되는 확률을 기준으로, 두 가지를 구분하지 않고 동시에 고려하며, 연속과 순간, 그리고 자연발화 가능성의 유무를 기준하여 산출한다.

Table 4는 API-581[6]에서 제시된 피해범위를 산출하는 식의 일부를 나타낸 것이다.

**Table 4.** Consequence equations for continuous or instantaneous release by API-581[6]

Material	Continuous release				Instantaneous release			
	Auto-ignition not likely <sup>a)</sup>		Auto-ignition likely <sup>b)</sup>		Auto-ignition not likely		Auto-ignition likely	
	Equipment damage area (ft <sup>2</sup> )	Fatality area (ft <sup>2</sup> )	Equipment damage area (ft <sup>2</sup> )	Fatality area (ft <sup>2</sup> )	Equipment damage area (ft <sup>2</sup> )	Fatality area (ft <sup>2</sup> )	Equipment damage area (ft <sup>2</sup> )	Fatality area (ft <sup>2</sup> )
C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>	A=43x <sup>0.98</sup>	A=110x <sup>0.96</sup>	A=280x <sup>0.95</sup>	A=745x <sup>0.92</sup>	A=41x <sup>0.67</sup>	A=79x <sup>0.67</sup>	A=1079x <sup>0.62</sup>	A=3100x <sup>0.63</sup>
C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	A=49x <sup>0.98</sup>	A=125x <sup>0.96</sup>	A=313x <sup>1.00</sup>	A=837x <sup>0.92</sup>	A=28x <sup>0.72</sup>	A=57.7x <sup>0.75</sup>	A=523x <sup>0.63</sup>	A=1768x <sup>0.63</sup>

x= total release rate(lb<sub>m</sub>/s) or total release mass(lb<sub>m</sub>), A = area(ft<sup>2</sup>)

a) not likely if process temperature is less than auto ignition temperature plus 80°F

b) must be processed at least 80°F above auto ignition temperature

**Table 5.** 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%

**Table 6.** Typical generic equipment failure frequencies

Equipment type	Leak frequency(per year for 4 hole sizes)			
	1/4 inch	1 inch	4 inch	Rupture
Reactor	1×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	2×10 <sup>-5</sup>
Pipe(6 inch)	4×10 <sup>-7</sup>	4×10 <sup>-7</sup>	-	8×10 <sup>-8</sup>
Pipe(8 inch)	3×10 <sup>-7</sup>	3×10 <sup>-7</sup>	8×10 <sup>-8</sup>	2×10 <sup>-8</sup>
Pipe(14 inch)	1×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-8</sup>	1×10 <sup>-8</sup>

피해면적을 산출한 다음에는 설비에서 사고피해를 완화하기 위한 시스템을 고려하여 피해범위를 감소시키는데, Table 5는 API-581[6]에서 제안된 완화시스템의 적용방식을 나타낸 것이다.

완화시스템을 통해 산출된 피해면적과 누출 시나리오에 따른 설비들의 고장률을 이용하여 식 (4)와 같이 가중평균(weighted average)에 의해 피해범위를 산출할 수 있으며, 가중평균은 설비들의 고장률을 반영하여 자주 발생하는 누출 시나리오에 가중치

를 부여함으로써 실제 사고가 가장 많이 발생하는 평균값을 의미한다. 이때, API-581[6]에서 제시한 대표적인 일반고장률은 Table 6에 나타내었다.

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

### III. 화학공장의 사고피해 예측결과 및 고찰

#### 3.1. 대상공정

기존에는 배관 또는 용기 하나의 설비에 대하여 정량적 위험성 평가를 수행하였으나, 제정된 KOSHA CODE[5]에서는 P&ID 상에서 고정설비를 기준으로 사고가 발생할 경우 유체흐름을 통제하는 부분을 하나의 구간으로 설정하고, 이에 대하여 정량적 위험성 평가를 수행한다. 즉, 고정설비에 연결된 배관을 동시에 고려하여 인벤토리(inventory) 량을 산출하여 최대 누출 가능한 량으로 산정하고, 배관과 고정설비를 동시에 위험성 평가를 수행한다.

본 연구에서 적용한 대상공정은 D 공장의 ○공정으로, 적용된 구간의 설비는 반응기를 중심으로 4개의 배관이 연결되어 있다. 이때, 검출시스템은 시스템의 계기로 검출되는 완전자동 방식(A 등급)이었고, 차단시스템은 시스템 상에서 자동으로 제어밸브가 닫히는 완전자동 방식(A 등급)이었다.

#### 3.2. 데이터 입력 및 시뮬레이션

대상공정에서 공정 담당자로부터 공정특성에 대해 설명을 받은 후 적용구간에 대해 P&ID 상에 유체특성에 따라 흐름을 나타내었다. 그리고 한국안전이엔씨(KSE&C)에서 개발된 KS-RBI 프로그램(Ver. 3.0)[10]을 사용하여 프로그램에 유체의 성분 및 조성, 설비의 직경 및 길이 등과 같은 정보를 입력한 후 검출 및 차단 시스템의 순위를 설정하였다. KS-RBI 프로그램은 위험기반검사를 수행하기 위해 개발된 프로그램이지만, KOSHA CODE[5]의 내용을 만족시키고, 위험성 평가를 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

#### 3.3. 위험성 평가

D 공장의 ○공정에서 사고 피해범위가 큰 설비 중의 하나인 M-DC201 반응기를 중심으로 사고 영향범

위, 즉 피해지역을 산출하고, 위험성 평가를 수행하였다. 이때, 누출공의 크기는 1/4, 1, 4 및 16 inch를 사용하였고, 누출시간은 검출시스템과 차단시스템에 의해 산출된 누출 지속시간과 저장량을 누출속도로 나눈 시간을 비교하여 작은 시간으로 결정하였다.

반응기의 누출 시나리오 및 공정조건에 대한 정보는 Table 7에 나타낸 바와 같다. 이때, M-DC201 반응기는 450 °C의 고온에서 운전되며, iso-butane/butane/butene 혼합물을 사용하고 있다.

공정조건을 바탕으로 KS-RBI 프로그램을 사용하여 M-DC201 반응기의 위험성 평가를 수행한 결과 보고서는 Fig. 2와 같으며, 각 누출 시나리오에 대한 누출속도와 누출시간은 0.071, 1.143, 18.293, 390.256 kg/s 및 1200, 600, 300, 180 초이었다. 또한 장치 및 상해 지역은 각각 5, 74, 1179, 52684 m<sup>2</sup> 및 14, 182, 2331, 254816 m<sup>2</sup>이었으며, 각각의 피해면적과 Table 6의 일반고장률을 사용하여 식 (4)에 의해 산출한 장치 및 상해의 가중평균 피해면적은 7973 m<sup>2</sup>와 26806 m<sup>2</sup>이었다.

이를 바탕으로 사고 피해 최소화 대책을 수립하는데 필요한 적절한 피해범위를 산출한 결과, 가중평균에 의한 장치 및 상해 범위는 50.4 m와 92.4 m이었으며, 최악의 누출 시나리오를 고려한 경우에는 피해범위가 각각 154.9 m와 284.8 m로 나타났다. 또한 반응기에서와 동일한 방법으로 배관에서 위험성 평가를 수행한 결과는 Table 8과 같이 가중평균에 의한 피해범위가 약 15 m 전·후이었으며, 최악의 경우에는 배관 직경이 증가할수록 상당히 증가하였다. 또한 상해지역은 장치손상지역에 비해 약 2배 정도의 피해범위를 갖는 것으로 나타났다.

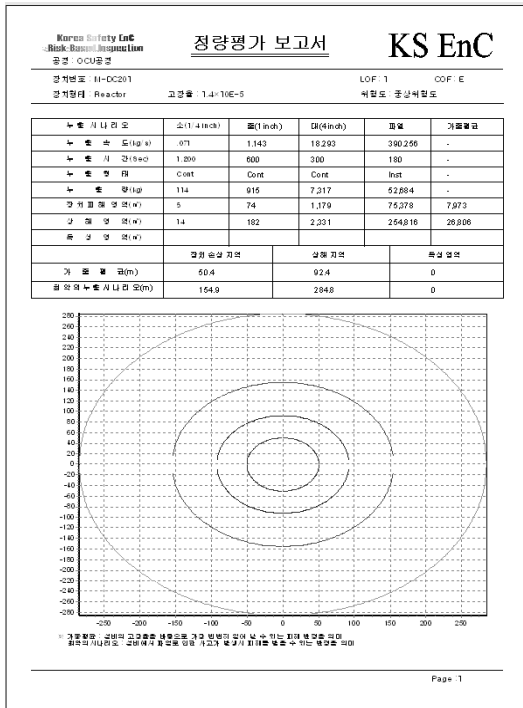
따라서 사업장에서는 고장빈도에 의한 가중평균과 최악의 누출 시나리오에 의한 피해범위를 바탕으로, 사업장의 환경과 재정을 고려하여 사고피해 최소화 대책을 수립하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

Table 7. Process conditions and release scenario for quantitative risk assessment

Equipment	M-DC201 reactor			
Storage material	Iso-butane(19.28%) / Butane(13.47%) / Butene(67.25%)			
Storage temperature	450 °C			
Storage pressure	2.1 bar(gauge)			
Diameter	140 cm			
Height	643 cm			
Release hole diameter	1/4 inch	1 inch	4 inch	16 inch
Release time	1,200 sec	600 sec	300 sec	180 sec

**Table 8.** Consequence areas of pipes for quantitative risk analysis

Equipment	Equipment damage range (m)		Fatality range (m)	
	Weighted average	Worst-case	Weighted average	Worst-case
6P2011-BA1(6 inch)	15.7	43.2	26.4	72.9
8P2014-BA7(8 inch)	12.4	46.1	20.7	78.0
14P2017-BA7(14 inch)	17.8	67.6	30.4	116.1
14P2018-BA1(14 inch)	17.8	67.6	30.4	116.1



**Fig. 2.** Report of consequence analysis by KS-RBI program.

#### IV. 결론

화학공장에서 현실적인 사고피해 최소화 대책수립 방법을 제시하기 위하여 API-581 절차를 바탕으로 개발된 정량적 원인분석이 가능한 한국형 위험기반검사(KS-RBI) 프로그램을 사용하여 화학설비의 사고 영향범위를 산출하고, 위험성 평가를 수행하였다. 그 결과, 4가지 누출공의 크기(소, 중, 대, 파열)를 사용하고, 검출 및 차단 시스템을 이용하여 누출 시간을 결정하는 누출 시나리오에 의해 산출한 피해

면적으로부터 고장빈도에 의한 가중평균의 경우와 최악의 경우(파열)에서 산출한 사고 영향범위를 고려하여 현실성 있는 사고피해 최소화 대책을 수립하는 것이 바람직하였다. 따라서 화학공장에서는 이와 같이 API-581 절차에 의한 현실성이 있는 위험성평가방법을 사용하여 화학설비의 사고 영향범위를 예측하고, 이를 바탕으로 사업장의 환경과 재정을 고려하여 사고피해를 최소화 할 수 있는 비상조치계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Lees, F. P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworths, London, (1980)
- [2] Kletz, T. A., *What Went Wrong?*, Gulf Publishing Co., Houston, TX, (1986)
- [3] Lees, F. P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 1, Butterworths, London, (1991)
- [4] Lees, F. P., *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 2, Butterworths, London, (1991)
- [5] 한국산업안전보건공단, *화학공장의 피해 최소화 대책에 관한 기술지침*, 8-28, (1993)
- [6] API, *Risk Based Inspection Base Resource Document : API-581*, American Petroleum Institute, 1st ed., (2000)
- [7] CCPS, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedure*, Center for Chemical Process Safety of AIChE, New York, (1985)
- [8] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety of AIChE, New York, (1989)
- [9] Crowl, D. A. and Louvar, J. F., *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*, Prentice Hall, New York, (1990)
- [10] KS EnC, *Development of KS-RBI Program*, Korea Safety Engineering and Consulting, KS-2006-01, (2006)