

API-581 절차의 누출 시나리오에 의한 화재 및 폭발사고 결과분석

이현창*, 황순용**, 조지훈**, 함병호***, 김태옥

*한국안전이엔씨, **한국산업안전공단, ***노동부, 명지대학교 화학공학과

Consequence Analysis of Fire and Explosion Accidents by Release Scenario of API-581 BRD

Hern-Chang Lee*, Soon-Young Hwang**, Ji-Hoon Cho**, Byeong-Ho
Ham***, Tae-Ok Kim

*Korea Safety Engineering & Consulting, **Korea Occupation Safety & Healthy
Agency,

***The Ministry of Labor, Myongji University

1. 서 론

정량적 위험성 평가에서 사고영향을 평가하기 위해서는 무엇보다 화학물질의 누출량을 정확하게 산출하여야 하지만 현재까지 누출 시나리오 선정에 대한 명확하고, 객관적인 기준은 제시된 바 없다. 따라서 현재 K-CARM 프로그램에서와 같이 누출공의 크기를 최악의 누출 시나리오, 즉 파열로 가정하거나 사용자가 임의로 입력하고 있기 때문에 산출된 사고결과는 실제 사고피해와는 상당한 차이가 있을 수 있다. 또한 사고피해크기를 산출하는 이론식에 대한 검증이 완벽하지 않기 때문에 피해예측 결과에 대한 신뢰성 문제로 안전대책수립에 많은 어려움을 겪고 있다[1-3].

본 연구에서는 미국석유협회(API)에서 제시된 누출 시나리오[4-5]를 바탕으로 한국 실정에 적합하도록 개발된 위험기반검사(risk based-inspection, RBI) 프로그램인 KS-RBI Ver. 3.0을 사용하여 화학설비에 대해 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 그리고 일반적인 사고 결과분석(consequence analysis, CA)[6]에 사용되는 K-CARM 프로그램에 API-581 누출 시나리오를 적용하여 화재 및 폭발 사고결과를 비교·분석하였다.

2. 이론적 고찰

일반적인 사고결과 분석절차는 Fig. 1과 같이 누출유형 및 누출상태에 따라 누출속도 또는 누출량을 산출하고, 화재 및 폭발에 의한 피해범위와 독성영향을 산출한다[4-5].

본 연구에서는 가연성 가스가 누출되어 제트화재(jet fire) 및 증기운 폭발(VCE) 사고가 발생하는 경우 피해범위를 산출하였다.

2-1. 누출공의 크기 선택

API-581[4]에서는 누출공의 크기를 소형(small), 중형(medium), 대형(large), 그리고 파열(rupture)의 형태로 분류한다. 즉, Table 1에서와 같이 누출공의 크기를 대푯값으로 나타내고, 설비의 특성에 따라 선택적으로 사용한다.

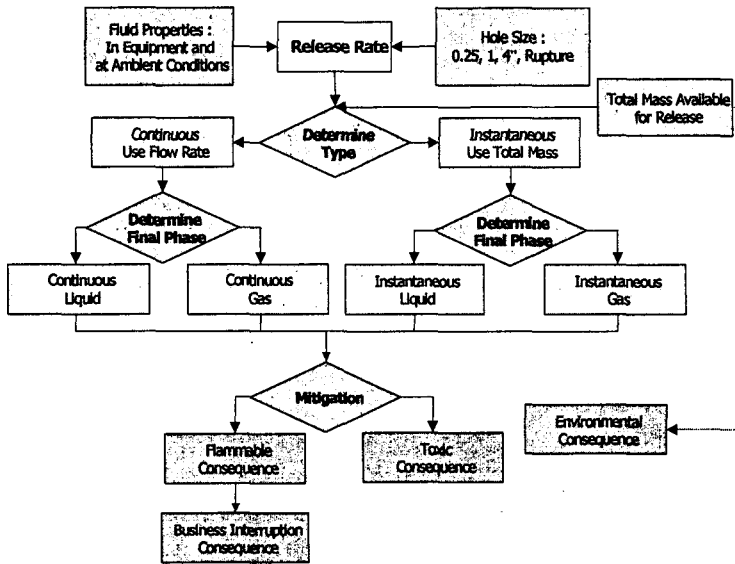


Fig. 1. Procedure for consequence analysis.

Table 1. Size of release hole used in RBI

누출공 크기	크기 범위	대표값
소형(Small)	0 - 1/4 inch	1/4 inch
중형(Medium)	1/4 - 2 inch	1 inch
대형(Large)	2 - 6 inch	4 inch
파열(Rupture)	> 6 inch	Entire diameter of item(max: 16 inch)

2-2. 누출시간 선택

모든 석유화학 공장들은 위험물질의 누출에 대해 검출, 차단 및 감소시킬 수 있도록 설계된 다양한 완화시스템을 가지고 있다. 검출 및 차단 시스템은 누출을 검출하고, 차단함으로써 누출 지속시간을 감소시키고, 완화시스템은 누출 후 물질의 점화나 확산 가능성을 최소화하여 피해범위를 감소시킨다.

Table 2 및 Table 3은 각각 검출 및 차단 시스템의 등급에 대한 기준과 검출 및 차단 시스템의 등급에 대한 누출 지속시간을 나타낸 것이다[4].

Table 2. Grades of detection and isolation systems

검출시스템	차단시스템	등급
시스템 계기로 검출	완전자동(시스템 상에서 자동 차단)	A
외부 시스템에 의한 검출	반자동(운전자 제어에 의한 차단)	B
육안검출 및 카메라에 의한 검출	수동	C

Table 3. Released times with grades of detection and isolation systems

검출시스템 등급	차단시스템 등급	누출 지속시간
A	A	1/4 inch : 20분 1 inch : 10분 4 inch : 5분
A	B	1/4 inch : 30분 1 inch : 20분 4 inch : 10분
A	C	1/4 inch : 40분 1 inch : 30분 4 inch : 20분
B	A or B	1/4 inch : 40분 1 inch : 30분 4 inch : 20분
B	C	1/4 inch : 60분 1 inch : 30분 4 inch : 20분
C	A, B, C	1/4 inch : 60분 1 inch : 40분 4 inch : 20분

3. 결과 및 고찰

D 석유화학공장의 H 공정에서 피해범위가 큰 설비 중의 하나인 V-156 Tank에 대해 정량적인 위험성 평가를 수행하였다. 이때, 누출공의 크기는 1/4, 1, 4, 16 inch를 사용하였고, 누출시간은 검출시스템과 차단시스템에 의해 산출된 누출 지속시간과 저장량을 누출속도로 나눈 시간을 비교하여 적은 시간으로 결정하였다.

누출 시나리오 및 공정조건에 대한 정보는 Table 4에 제시된 결과와 같다. 이때, iso-butane은 저장탱크에 액상과 기상(액상 30%)으로 저장되어 있으며, 누출 후 기상으로 상이 변화한다. 또한 누출이 발생되면 대기 중에 분산되는데, 공기보다 무겁기 때문에 지면에 체류할 가능성이 높다. 그리고 체류한 가스에 점화원이 작용할 경우에는 증기운 폭발이 발생될 수 있고, 누출과정에 점화 시에는 제트화재와 같은 사고가 발생될 수 있다. 따라서 두 가지 사고유형에 대해 K-CARM을 사용하여 사고결과를 분석하였다.

Table 4. Process conditions and release scenario for quantitative risk analysis

장 치 명	V-156 Tank			
저장물질	Iso-butane			
저장온도	46 °C			
저장압력	5.4 kg/cm ²			
직 경	340 cm			
높 이	1360 cm			
누 출 공	1/4 inch	1 inch	4 inch	16 inch
누출시간	3,600 sec	2,400 sec	180 sec	180 sec
풍 속	5 m/s			
대기안정도	다소 안정			

KS-RBI에 의해 산출한 장치 손상지역은 소(1/4 inch), 중(1 inch), 대(4 inch), 과열(16 inch)에 대해 각각 17, 253, 28926, 212941 ft²로, 반경이 약 1, 3, 30, 80 m를 나타내었다. 즉, 1/4 inch 누출의 경우에는 실제로 누출되어도 누출량이 희석되어 피해영향이 크지 않았으나, 4 inch 이상의 누출에서는 누출량이 많아져서 제트화재 및 증기운 폭발로 인한 피해지역이 급격히 증가되었다.

K-CARM에 의한 16인 inch 누출공 직경에서 제트화재의 경우 약 80 m(반경) 범위 안에 있을 경우에는 복사열의 영향을 받는 것으로 나타났으며, VCE의 경우에는 68 m(반경) 범위 안에 있을 경우에 과압의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 결과를 KS-RBI 프로그램의 결과와 비교하면, 16 inch 누출공 직경에서 제트화재에 의한 피해영향은 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 4 inch 누출공 직경에서 제트화재의 경우 약 22 m(반경) 범위 안에 있을 경우에 복사열의 영향을 받으며, VCE의 경우에는 과압에 의한 영향범위가 27 m(반경)이었다. 이 결과는 KS-RBI 프로그램에서는 약 30 m의 반경 내에 있을 경우에 영향을 받는 결과와 비교해볼 때 VCE에 의한 영향과 서로 잘 일치하고 있다. 또한 1 inch 누출공 직경에서 제트화재에서 복사열의 영향범위가 약 6 m(반경)이고, VCE에서는 과압의 영향범위가 26 m(반경)이었다. 이 결과는 KS-RBI 프로그램으로 산출한 제트화재의 피해범위와는 비슷하지만 VCE의 영향은 다소 차이가 있는데, 이것은 K-CARM의 경우 2400초 동안 누출된 iso-butane이 희석되지 않고, 모두 폭발한 것으로 가정하였기 때문으로 생각된다. 그리고 1/4 inch 직경에서의 결과는 1 inch 직경에서의 결과와 비슷한 경향을 나타내었으며, 누출공의 크기가 작은 경우에는 연속모델에 의해 누출이 이루어져서 제트화재에서는 다소 피해범위가 나타날 수 있으나, VCE의 경우에는 누출속도가 낮아 공기 중에서 희석된다고 가정하였을 때 피해범위는 상당히 줄어들 것으로 판단된다.

KS-RBI 프로그램에서 가중 피해영역은 4가지 누출 시나리오에 의한 피해영역과 고장율을 사용하여 가중 평균한 값으로, 아래의 식에 의해 산출한 가중 피해영역은 13 m(반경)이었다. 이때, 각 누출 시나리오에서 고장율은 7.4×10^{-6} , 1.9×10^{-5} , 1.9×10^{-6} , 3.7×10^{-6} 이었다.

$$\frac{7.4 \times 10^{-6} \times 1 + 1.9 \times 10^{-5} \times 3 + 1.9 \times 10^{-6} \times 30 + 3.7 \times 10^{-6} \times 80}{7.4 \times 10^{-6} + 1.9 \times 10^{-5} + 1.9 \times 10^{-6} + 3.7 \times 10^{-6}} = 13 \text{ m}$$

따라서 사업장에서는 13 m 반경에 대해 피해범위를 줄이기 위한 대책으로 방호벽과 같은 피해 완화조치를 취하여 더 이상 확산되는 것을 방지할 필요가 있다. 또한 가중 평균 피해범위와 16 inch 누출공 직경(최악)에서의 피해범위를 고려하여 비상조치계획을 수립하고, 피해범위 최소화를 위한 노력을 해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

위험기반검사 프로그램인 KS-RBI Ver. 3.0을 사용하여 화학설비에 대해 정량적 위험성 평가를 수행하고, K-CARM 프로그램에 API-581 누출 시나리오를 적용하여 화재 및 폭발 사고결과를 비교·분석하였다.

그 결과, K-CARM 프로그램에서는 제트화재와 증기운 폭발에 의한 피해범위가 예측되었으며, KS-RBI 프로그램은 화재와 폭발 사고를 확률적으로 계산하여 이를 종합한 피해면적으로 피해범위를 산출할 수 있었다. 또한 K-CARM 프로그램과 KS-RBI 프로그램의 피해범위는 4 inch 직경 이상에서는 거의 비슷하였으며, KS-RBI 프로그램을 사용하여 산출한 가중평균 피해범위(반경)는 13 m이었다.

따라서 사업장에서는 가중평균 피해범위와 16 inch 누출공 직경(최악)에서의 피해범위를 고려하여 비상조치계획을 수립함이 바람직할 것으로 평가되었다.

5. 참 고 문 헌

1. Lee, H. C., P. S. Shin, B. N. Choi, J. H. Jo, S. G. Jeong, O. H. Kim, D. I. Shin, and T. O. Kim, "Application of Risk Based-Inspection for the Safety Improvement of the Chemical Facilities", KIGAS, **10**(3), 13-19(2006).
2. 이현창, 김환주, 이영재, 장서일, 김태욱, "위험기반검사(RBI)에서 사고결과 분석", 한국산업안전학회 추계학술발표회 논문집, 345-350(2003).
3. 이현창, 유준, 김태욱, "가스 폭발사고에서 누출 시나리오 선정 및 사고결과 분석", 한국가스학회 춘계학술대회 초록집, G01-08, 209(2006).
4. API, "RBI Basic Resource Document : API-581 BRD", American Petroleum Institute (2000).
5. KOSHA, "Development of K-RBI Program (2nd year, Ver. 2.0)", Korea Occupational Safety and Health Agency(2004).
6. Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), Consequence Analysis(CA), Industrial Safety Training Institute of KOSHA, ISTI-2001-29-86(2001)