



고압 독성가스시설에서 API-581 적용성 및 사고결과 분석방법에 관한 연구

장서일* · 김영란 · 박교식 · 신동일 · †김태옥

명지대학교 화학공학과, *제이케이코리아

(2014년 7월 14일 접수, 2014년 8월 26일 수정, 2014년 8월 27일 채택)

A Study on Applicability of API-581 and Methodology for Consequence Analysis in High-Pressure Toxic Gas Facilities

Seo-Il Jang* · Youngran Kim · Kyoshik Park · Dongil Shin · †Tae-Ok Kim

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

*JK Korea, Yongin 448-751, Korea

(Received July 14, 2013; Revised August 26, 2014; Accepted August 27, 2014)

요약

본 연구는 독성가스 사고의 주요 원인의 하나인 부식에 대해 고압 독성가스시설을 대상으로 필요한 안전 기술을 정립하기 위하여 미국석유화학회에서 개발한 API-581 절차를 채택하여 사고결과 분석방법에 대한 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 사고결과 분석방법을 제시하였다. 고압 독성가스시설에서 API-581의 8단계 사고결과 분석절차에 따라 단계별 적용성을 검토한 결과, 고압 독성가스시설에 적용할 사고결과 분석방법은 총 6단계로 단순화 할 수 있었다. 즉, Step 1(대표물질 결정), Step 5(누출유형 결정), Step 6(유체상 결정)과 Step 8(사고 피해영역 산출)은 적용하지 않고, Step 3(누출량 산출)은 inventory group 개념만 적용하며, Step 4(누출속도 산출)는 기체 누출속도만을 적용하고, Step 2(누출공 크기 선정)와 Step 7(완화시스템 등급 결정)은 전부 적용한다. 이때, Step 5와 Step 8은 일반적으로 적용이 가능한 CCPS 방법을 대안적인 방법으로 채택한다.

Abstract - To establish the necessary safety technology in high-pressure toxic gas facilities, especially for the corrosion, which is the main causes of toxic gas accident, this study adopts and investigates the API-581 procedures developed by the American Petroleum Institute (API). And the applicability of the 8-step analytical procedures of consequence analysis in API-581 is discussed, and a method for consequence analysis in high-pressure toxic gas facilities is suggested. Based on the discussion and results, the analytical procedure is simplified as the 6 steps in total for the effective application to high-pressure toxic gas facilities: Step 1 (determination of representative material), Step 5 (determination of release type), Step 6 (determination of phase of fluid), and Step 8 (estimation of damage range) are not applied; Step 3 (estimation of total amount of release) is applied only for the inventory group concept; Step 4 (estimation of release rate) only for the gas release rate; and all of Step 2 (selection of release hole size) and Step 7 (evaluation of post-release response) are applied. In the proposed method, the generally applicable method of CCPS is adopted as alternative method for Steps 5 and 8.

Key words : toxic gases, consequence analysis, API-581, CCPS (Center for Chemical Process Safety, AIChE)

†Corresponding author: kimto@mju.ac.kr

I. 서 론

최근 국내에서는 2012년 구미 불화수소 누출사고(사망 5명, 부상 18명)를 시작으로, 2013년에는 청주 산단내 휴대부품 제조업체와 삼성전자 화성 반도체 공장에서 불화수소 누출사고, 청주산단내 SK닉스, 안산반월산단, 삼성정밀화학 울산공장 등에서 발생한 염소가스 누출사고 등과 같은 독성가스 사고가 빈번하게 발생되고 있으며, 이들 사례에서와 같이 독성가스 사고는 인명 피해 등 피해규모가 클 뿐만 아니라 사회적으로 불안감을 조성하고 있다.

독성가스 사고에 관한 선행 연구결과에 의하면 독성가스 누출원인으로 첫째 공정흐름상 위험요소로서 플랜지, 밸브와 호스의 균열 등 손상, 둘째 탱크나 파이프 이음관의 내부부식을 들고 있다[1]. 또

한 위험물 저장탱크에서의 부식은 구조적으로 밀판이 부식에 가장 취약하고, 이 때문에 밀판의 부식이 위험물 저장탱크의 사용 중 신뢰성과 수명을 좌우하는 큰 인자로 작용한다고 보고하였다[2].

독성가스에 대한 정의는 고압가스안전관리법의 시행규칙 2조에 “아크릴로니트릴, 아크릴알데히드, 아황산가스, 암모니아, 일산화탄소, 이황화탄소, 불소, 염소, 브롬화메탄, 염화메탄, 염화프렌, 산화에틸렌, 시안화수소, 황화수소, 모노메틸아민, 디메틸아민, 트리메틸아민, 벤젠, 포스겐, 요오드화수소, 브롬화수소, 염화수소, 불화수소, 겨자가스, 알진, 모노실란, 디실란, 디보레인, 세렌화수소, 포스핀, 모노게르만 및 그 밖에 공기 중에 일정량 이상 존재하는 경우 인체에 유해한 독성을 가진 가스로서 허용농도(해당 가스를 성숙한 흰쥐 집단에게 대기 중에서 1시간

Table 1. Substance lists of high-pressure toxic gases

NO	Materials	CAS No.	Molecular formular	NO	Materials	CAS No.	Molecular formular
1	겨자가스	505-60-2	C ₄ H ₈ Cl ₂ S	21	아크릴로니트릴	107-13-1	C ₃ H ₃ N
2	디메틸아민	24-40-3	C ₂ H ₇ N	22	아크릴알데히드	107-02-8	C ₃ H ₄ O
3	디보레인	19287-45-7	B ₂ H ₆	23	아황산가스	7446-09-5	SO ₂
4	디실란	1590-87-0	Si ₂ H ₆	24	알진	7784-42-1	AsH ₃
5	모노게르만	7782-65-2	GeH ₄	25	암모니아	7664-41-7	NH ₃
6	모노메틸아민	74-89-5	CH ₅ N	26	염소	7782-50-5	Cl ₂
7	모노실란	7803-62-5	SiH ₄	27	염화메탄	74-87-3	CH ₃ Cl
8	벤젠	71-43-2	C ₆ H ₆	28	염화수소	7647-01-0	HCl
9	불소	7782-41-4	F ₂	29	염화프렌	126-99-8	C ₃ H ₅ Cl
10	불화수소	7664-39-3	HF	30	오불화비소	7784-36-3	AsF ₅
11	브롬화메탄	74-83-9	CH ₃ Br	31	오불화인	7647-19-0	PF ₅
12	브롬화수소	10035-10-6	HBr	32	요오드화수소	10034-85-2	HI
13	사불화규소	7783-61-1	SiF ₄	33	육불화텅스텐	7783-82-6	WF ₆
14	사불화유황	7783-60-0	SF ₄	34	이황화탄소	75-15-0	CS ₂
15	산화에틸렌	75-21-8	C ₂ H ₄ O	35	일산화질소	10102-43-9	NO
16	삼불화붕소	7637-07-02	BF ₃	36	일산화탄소	630-08-0	CO
17	삼불화인	7783-55-3	PF ₃	37	트리메틸아민	75-50-3	C ₃ H ₉ N
18	삼염화붕소	10294-34-5	BCl ₃	38	포스겐	75-44-5	COCl ₂
19	세렌화수소	7783-07-5	SeH ₂	39	포스핀	7803-51-2	PH ₃
20	시안화수소	74-90-8	HCN	40	황화수소	7783-06-4	H ₂ S

동안 계속하여 노출시킨 경우 14일 이내에 그 현취의 2분의 1 이상이 죽게 되는 가스의 농도를 말한다. 이하 같다)가 100만분의 5000 이하인 것을 말한다”라고 되어 있다[3]. 따라서 특정고압가스와 특수고압가스를 포함하여 Table 1과 같이 40종이 대상물질이다.

이와 같이 독성가스는 종류가 다양할 뿐만 아니라 특히, 독성가스 안전기술은 주요 선진국이 주도하는 다국적 회사에 집중 및 의존하고 있으며, 경쟁력 저하를 이유로 안전기술 미공개에 따른 국내 기업의 경쟁력 하락과 중소기업의 열악한 사업환경은 안전에 무방비로 노출되는 문제점이 대두되고 있다. 더욱이 화재 및 폭발 등에 의한 사고피해 예측기술은 비교적 잘 정립되어 있으나, 독성가스시설에서 부식에 의한 사고결과 분석에 관한 방법은 현재까지 제시된 바 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 독성가스 사고의 주요 원인의 하나인 부식에 대해 고압 독성가스시설을 대상으로 위험도(risk)를 산출하여 사고피해를 최소화 하는 안전기술을 정립하고자 하였다. 이를 위해 우선적으로 미국석유학회(American Petroleum Institute, API)에서 개발한 위험기반검사(Risk Based Inspection, RBI) 절차서인 API-581[4]를 채택하여 고압 독성가스시설에서 사고결과 분석방법에 대한 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 사고결과 분석방법을 제시하고자 하였다.

II. 고압 독성가스시설에서 API-581의 사고결과 분석방법의 적용성 검토

API-581에서 제시한 사고결과 분석방법은 위험도(risk)에 근거하여 설비들에 대한 검사의 상대적인 우선순위를 설정하는데 사용되며, 대표물질에 대한 제안된 공식을 사용하는 단순화된 방법을 채택하고 있다. 즉, Fig. 1의 API-581 사고결과 분석에 대한 절차를 나타낸 바와 같이 위험물질의 누출에 따른 사고결과 피해크기는 8 단계를 거쳐 산출된다.

따라서 본 연구에서는 각 단계에서 고압 독성가스시설에 대한 API-581의 적용성을 검토하였다.

2.1. Step 1: 대표물질 결정

API-581에서 취급하는 물질은 주로 탄화수소계 물질이며, 화학설비의 유체는 거의 순수 물질이 아니므로, 대표물질을 결정하여 평가한다. 또한 적용물질에 대한 대표물질을 모델화한 물질목록을 제공하고 있다(Table 2의 위험기반검사서에서 모델화된 물질 목록표 참조). 그러나 고압 독성가스시설에서는

Table 1에 나타낸 바와 같이 물질은 40종의 독성물질이며, 이를 API-581에서 모델화한 물질목록에 없는 것이 대부분이므로, 이들을 적용할 수 없다. 그러므로 고압 독성가스시설에서 취급하는 물질은 단일 독성가스 물질 그대로 적용하고, 공정 중에서 혼합물질로 존재하더라도 관심물질이 독성가스이므로, 이를 대표물질로 결정하는 것이 바람직하다.

Table 2에 Step 1과 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성에 대해 자세하게 나타내었다.

2.2. Step 2: 누출공 크기 선정

실질적으로 위험도 산출을 수행할 경우에는 하나의 누출공 크기를 선정해야 한다. 즉, 다수의 누출공에 대해 위험도를 산출하는 것은 비실용적이기 때문에 API-581은 누출공의 크기를 제한하고 있다.

API-581에서는 누출공의 크기를 크게 4가지(1/4인치, 1인치, 4인치, 그리고 파열)로 설정하고, 배관, 압력용기, 펌프, 압축기, 상압 저장탱크에 대해 누출공 크기 선정이 제시되어 있다. 이것은 물질별 특성이 반영된 것이 아니고, 시설대상이므로 고압 독성가스시설에서 누출공 크기 선정은 API-581을 준용하여도 무방할 것으로 판단된다.

Step 2와 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성은 Table 3에 자세하게 나타내었다.

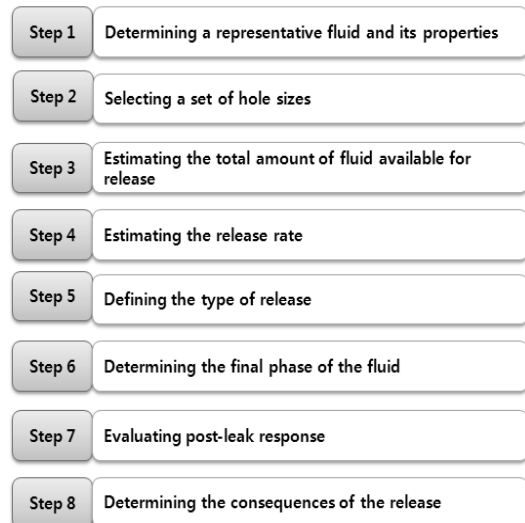


Fig. 1. Analytical procedures of consequence analysis in API-581.

Table 2. Applicability of Step 1 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구분	대표물질 결정																																						
API-581[5]	<ul style="list-style-type: none"> • 화학설비 유체는 거의 순수물질이 아니므로, 대표물질을 결정 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">대표물질</th> <th style="width: 50%;">적용물질</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C₁-C₂</td> <td>Methane, ethane, ethylene, LNG</td> </tr> <tr> <td>C₃-C₄</td> <td>Propane, butane, isobutane, LPG</td> </tr> <tr> <td>C₅</td> <td>Pentane</td> </tr> <tr> <td>C₆-C₈</td> <td>Gasoline, naphtha, light straight run, heptane</td> </tr> <tr> <td>C₉-C₁₂</td> <td>Disel, kerosene</td> </tr> <tr> <td>C₁₃-C₁₅</td> <td>Jet fuel, kerosene, atmospheric gas or</td> </tr> <tr> <td>C₁₇-C₂₅</td> <td>Gas oil, typical crude</td> </tr> <tr> <td>C₂₅₊</td> <td>Residuum, heavy crude</td> </tr> <tr> <td>H₂</td> <td>Hydrogen only</td> </tr> <tr> <td>H₂S</td> <td>Hydrogen sulfide only</td> </tr> <tr> <td>HF</td> <td>Hydrogen fluoride</td> </tr> <tr> <td>Water</td> <td>Water</td> </tr> <tr> <td>Steam</td> <td>Steam</td> </tr> <tr> <td>Acid(low)</td> <td>Low-pressure acid with caustic</td> </tr> <tr> <td>Acid(medium)</td> <td>Low-pressure acid with caustic</td> </tr> <tr> <td>Acid(high)</td> <td>Low-pressure acid with caustic</td> </tr> <tr> <td>Aromatics</td> <td>Benzene, toluene, zylene</td> </tr> <tr> <td>Styrene</td> <td>Styrene</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • 주로 탄화수소계 물질을 취급 • 혼합물의 대표물질은 다음 식을 이용하여 산출 $Property_{mix} = \sum x_i \cdot Property_i$ 여기서, x_i = 몰분율(mole fraction) $Property_i$ = NBP(normal boiling point), MW(molecular weight) 또는 밀도 	대표물질	적용물질	C ₁ -C ₂	Methane, ethane, ethylene, LNG	C ₃ -C ₄	Propane, butane, isobutane, LPG	C ₅	Pentane	C ₆ -C ₈	Gasoline, naphtha, light straight run, heptane	C ₉ -C ₁₂	Disel, kerosene	C ₁₃ -C ₁₅	Jet fuel, kerosene, atmospheric gas or	C ₁₇ -C ₂₅	Gas oil, typical crude	C ₂₅₊	Residuum, heavy crude	H ₂	Hydrogen only	H ₂ S	Hydrogen sulfide only	HF	Hydrogen fluoride	Water	Water	Steam	Steam	Acid(low)	Low-pressure acid with caustic	Acid(medium)	Low-pressure acid with caustic	Acid(high)	Low-pressure acid with caustic	Aromatics	Benzene, toluene, zylene	Styrene	Styrene
	대표물질	적용물질																																					
	C ₁ -C ₂	Methane, ethane, ethylene, LNG																																					
	C ₃ -C ₄	Propane, butane, isobutane, LPG																																					
	C ₅	Pentane																																					
	C ₆ -C ₈	Gasoline, naphtha, light straight run, heptane																																					
	C ₉ -C ₁₂	Disel, kerosene																																					
	C ₁₃ -C ₁₅	Jet fuel, kerosene, atmospheric gas or																																					
	C ₁₇ -C ₂₅	Gas oil, typical crude																																					
	C ₂₅₊	Residuum, heavy crude																																					
	H ₂	Hydrogen only																																					
	H ₂ S	Hydrogen sulfide only																																					
	HF	Hydrogen fluoride																																					
	Water	Water																																					
	Steam	Steam																																					
	Acid(low)	Low-pressure acid with caustic																																					
	Acid(medium)	Low-pressure acid with caustic																																					
	Acid(high)	Low-pressure acid with caustic																																					
	Aromatics	Benzene, toluene, zylene																																					
	Styrene	Styrene																																					
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> • 고압 독성가스시설에서 취급하는 물질은 탄화수소계 물질이 아님 • 고압 독성가스시설에서 취급하는 물질은 주로 단일 독성가스 물질임 • 공정 중에서 혼합물질로 존재하더라도 관심 물질이 독성가스이므로, 독성가스만 고려대상임 																																						

2.3. Step 3: 누출량 산출

API-581에서 총 누출량은 Table 4의 방법의 산출된 2가지 누출량 중에서 적은 양으로 산출한다. 이때, inventory group 개념은 고압 독성가스시설에 적용 가능한 것으로 판단되지만, 제시된 2가지 누출총량 설정은 특히, 모델화된 총 질량 등은 고압 독성가스와 맞지 않은 부분이기 때문에 그대로 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 따라서 Step 3에서는 inventory group 개념만 사용되는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Table 4는 Step 3과 관계된 API-581의 내용과 이

에 대한 고압 독성가스시설의 적용성에 대해 나타낸 것이다.

2.4. Step 4: 누출속도 산출

누출속도는 물질의 물리적 특성, 초기 상(initial phase) 및 공정조건에 따라 다르다. 따라서 API-581에서는 물질이 설비 내에 있을 때의 물질의 상(phase)에 근거하여 누출속도 산출식을 선택하고, 물질이 누출됨에 따라 물질의 누출형태(음속 또는 아음속)를 선택한다. 이것은 일반적으로 적용되는 누출속도 계산식이므로, 고압 독성가스시설에도 적용이 가능

Table 3. Applicability of Step 2 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	누출공 크기 선정
API-581[6]	<ul style="list-style-type: none"> • 누출공 크기는 크게 4가지로 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 소형(1/4"), 중형(1"), 대형(4"), 파열(설비의 전체 직경, 최대 16") • 사업장 내의 영향은 발생 가능성이 높은 소형 및 중형 구멍크기로, 사업장 외는 중형 및 대형 구멍크기로 위험도 산출 • 배관의 누출공 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 4가지 누출공 크기(1/4", 1", 4", 파열) 이용 • 압력용기 누출공 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 4가지 누출공 크기(1/4", 1", 4", 파열) 이용 - 설비 유형 <ul style="list-style-type: none"> a. 용기(vessel)류: KO 드럼, 압축기 및 반응기와 같은 표준 압력용기 b. 필터(filter)류: 필터, 여과기 c. 탑(column)류: 증류탑, 흡수장치, 스트리퍼(stripper) 등 d. 열교환기 동체: 재열기(reboiler), 응축기 및 열교환기의 동체 측 e. 열 교환기 튜브: 재열기(reboiler), 응축기 및 열교환기의 튜브 측 f. 핀/팬 냉각기(fin/fan cooler): 핀/팬형 열교환기 • 펌프의 누출공 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 3가지 누출공 크기(1/4", 1", 4") 이용 • 압축기의 누출공 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 2가지 누출공 크기(1", 4") 이용 - 설비 유형 <ul style="list-style-type: none"> a. 원심형 압축기 b. 왕복형 압축기 • 상압 저장탱크의 누출공 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 탱크 지상부 측면: 1/4", 1", 4" 누출공 크기 이용 - 탱크 벽 또는 바닥면: 파열 - 상압 저장탱크 바닥: 1/4", 1" 누출공 크기 이용
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> • 고압 독성가스시설에서 누출공 크기 설정은 물질별 특성이 반영된 것이 아니고, 시설대상이므로 API-581을 준용하여도 무방할 것으로 판단됨

Table 4. Applicability of Step 3 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	누출량 산출
API-581[6]	<ul style="list-style-type: none"> • 다음의 2가지 누출량 중에서 적은 양으로 설정 <ul style="list-style-type: none"> a. 장치의 누출량에 inventory group으로부터 3분 누출량을 합산하여 총 누출량을 산출. 이때, 누출장치는 동일한 누출속도를 갖는 것으로 가정하고, 파열의 경우에는 8인치 누출로 제한 b. 각 설비와 관련된 inventory group에서 모델화 된 유체의 총 질량
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> • API-581에서 적용된 inventory group 개념은 고압 독성가스시설에 적용이 가능한 것으로 판단됨 • 특히, 모델화된 유체의 총 질량 등은 고압 독성가스와 맞지 않는 부분이기 때문에 그대로 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단됨

하다. 다만, 본 연구의 대상이 고압 독성가스이므로, 액체와 관련된 식은 제외해도 무방할 것으로 판단된다.

Table 5에는 Step 4와 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성에 대해 자세하게 나타나 있다.

2.5. Step 5: 누출유형 결정

API-581의 사고결과인 피해크기 예측은 모든 누

출을 2가지 유형(순간누출, 연속누출) 중의 하나로 모델화 한다. 이때, 누출유형의 구분은 Table 6에 나타난 바와 같이 누출공이 1/4인치이거나, 3분 동안 누출된 총량이 10,000 lb_m 이하의 모든 저속 누출속도는 연속누출로 모델화하고, 이외의 경우는 순간누출로 모델화한다. 여기서 제시된 10,000 lb_m의 한계 값은 화재와 폭발에 대한 이전 자료들을 검토한 결과로, 10,000 lb_m 이상이 짧은 시간 내에 누출될 경우

Table 5. Applicability of Step 4 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	누출속도 산출
API-581[7]	<ul style="list-style-type: none"> 액체 누출속도 산출(생략) 음속 기체 누출속도(lb/s) 산출 $W_g(\text{sonic}) = C_d A P \sqrt{\left(\frac{kM}{RT}\right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ <p>여기서, C_d = 누출계수(기체의 경우 0.85~1) A = 누출공 면적(in²) P = 압력(psia) M = 분자량(-) R = 기체상수(10.73 ft³·psia/lbmole·R) T = 온도(R) k = C_p/C_v</p> <ul style="list-style-type: none"> 아음속 기체 누출속도(lb/s) 산출 $W_g(\text{subsonic}) = C_d A P \sqrt{\left(\frac{M}{RT}\right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2k}{k-1}\right) \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> API-581의 누출속도 계산은 일반적으로 적용되는 계산식이므로, 고압 독성가스시설에 적용이 가능함 액체의 누출속도는 제외해도 무방할 것으로 판단됨

Table 6. Applicability of Step 5 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	누출유형 결정
API-581[9]	<ul style="list-style-type: none"> 누출공이 1/4인치는 연속누출로 모델화 3분 동안 누출된 총량이 10,000 lb_m를 초과하면 순간누출로 모델화 3분 동안 누출된 총량이 10,000 lb_m 이하이면 연속누출로 모델화 모든 저속 누출속도는 연속누출로 모델화
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> API-581의 기준이 되는 10,000 lb_m는 화재와 폭발의 자료를 검토한 경험인 수치이므로, 이를 고압 독성 가스에 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단됨 따라서 누출유형에 대한 결정은 CCPS의 누출지속시간이 10분을 기준으로 결정하는 것이 바람직한 것으로 판단됨

에는 증기운 폭발이 더욱 쉽게 발생하고, 10,000 lb_m 이하가 짧은 시간 내에 누출될 경우에는 증기운 폭발보다는 플래쉬 화재(flash fire)를 생성하는 경향이 있다는 것이다.

따라서 API-581의 기준이 되는 10,000 lb_m는 고압 독성가스에 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단되므로, 대안적으로 누출유형에 대한 결정은 CCPS (Center for Chemical Process Safety)의 누출지속시간이 10분[8]을 기준으로 결정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Table 6은 Step 5와 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성에 대해서 나타낸 것이다.

2.6. Step 6: 유체상 결정

누출 후 유체의 확산 특성은 상(기체 또는 액체)에 따라 크게 다르다. 즉, 정상 운전조건에서 정상 대기조건으로 변할 경우 유체의 상에 변화가 없으면 유체의 최종상태는 초기상태와 같다. 그러나 유체가 누출 시 상태 변화가 있으면 사고피해 크기를 산출하기 위한 물질상태에 대한 평가가 어려워 질 수 있다.

따라서 API-581에서는 Table 7에 나타낸 바와 같이 유체상 결정지침을 사용하고 있다. 그러나 고압 독성가스시설에서 누출물질의 최종 상은 기상이 되므로, 액상은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

Step 6과 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성은 Table 7에 자세하게 나타내었다.

Table 7. Applicability of Step 6 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	유체상 결정		
API-581[10]	유체 상(phase) 결정지침		
	정상 운전조건에서 유체의 상	정상 대기조건에서 유체의 상	사고피해 크기 계산을 위한 최종상태 결정
	기상	기상	기상으로 모델화
	기상	액상	기상으로 모델화
	액상	기상	기상으로 모델화. 만약 대기조건에서 유체의 끓는점이 80°F보다 클 경우에는 액상으로 모델화
액상	액상	액상으로 모델화	
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> 고압 독성가스시설에서 누출물질의 최종 상(phase)은 기상임 액상은 고려하지 않음 		

Table 8. Applicability of Step 7 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	완화시스템 등급 결정		
API-581[10]	<ul style="list-style-type: none"> 독성 검출 및 차단 시스템은 2단계를 거쳐 평가 <ul style="list-style-type: none"> 적용 가능한 검출 및 차단 시스템의 분류 등급 결정 특정 피해크기 계산식을 참조하여 사고피해 크기에 미치는 검출 및 차단 시스템의 영향을 결정 		
	<검출 및 차단 시스템의 등급결정 기준>		
	검출시스템 유형		검출 등급
	시스템 운전조건의 변화에 따라 물질의 손실(즉, 압력 또는 흐름 손실)을 검출하기 위하여 특별히 고안된 시스템		A
	압력설비(pressure-containing envelope) 밖에 물질이 존재하는 지를 결정하기 위해 적절히 설치된 검출기		B
	육안검출, 카메라 또는 검출기		C
	차단시스템 유형		차단 등급
	어떠한 운전자의 개입 없이 공정기구나 검출기로부터 직접 차단되는 시스템		A
	누출영역에서 멀리 떨어져 있는 제어실 또는 기타 적절한 위치에 있는 운전자에 의해서 제어되는 차단시스템		B
	수동 운전밸브에 의한 차단(isolation)		C
* 검출 및 차단 시스템의 등급 결정기준은 연속누출의 피해크기를 평가할 경우에만 이용			
<검출 및 차단 시스템에 기반한 누출지속시간>			
검출시스템 등급	차단시스템 등급	누출 지속시간	
A	A	1인치 누출의 경우 20분 1인치 누출의 경우 10분 4인치 누출의 경우 5분	
A	B	1인치 누출의 경우 30분 1인치 누출의 경우 20분 4인치 누출의 경우 10분	
A	C	1인치 누출의 경우 40분 1인치 누출의 경우 30분 4인치 누출의 경우 20분	
B	A 또는 B	1인치 누출의 경우 40분 1인치 누출의 경우 30분 4인치 누출의 경우 20분	
B	C	1인치 누출의 경우 1시간 1인치 누출의 경우 30분 4인치 누출의 경우 20분	
C	A, B 또는 C	4인치 누출의 경우 20분 1인치 누출의 경우 30분 4인치 누출의 경우 20분	
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> 고압 독성가스시설은 특히 독성가스의 검출 및 차단 시스템이 중요함 API-581의 절차를 수용하는 것이 바람직한 것으로 판단됨 		

Table 9. Applicability of Step 8 of API-581 for consequence analysis in high-pressure toxic gases

구 분	사고 피해영역 산출																																										
API-581[12]	<ul style="list-style-type: none"> • 사고피해 결과는 다음의 4가지 누출유형에 따라 단순하게 산출할 수 있음 <ul style="list-style-type: none"> - 자연발화 가능성이 없고, 연속누출의 경우 - 자연발화 가능성이 없고, 순간누출의 경우 - 자연발화 가능성이 있고, 연속누출의 경우 - 자연발화 가능성이 있고, 순간누출의 경우 <p style="text-align: center;"><자연발화 가능성이 없고, 연속 기체누출의 경우(예)></p> <table border="1" data-bbox="441 508 1178 958"> <thead> <tr> <th>물질</th> <th>설비손상영역(ft²)</th> <th>중대사고영역(ft²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C₁-C₂</td> <td>A = 43x^{0.98}</td> <td>A = 110x^{0.96}</td> </tr> <tr> <td>C₃-C₄</td> <td>A = 49x^{0.98}</td> <td>A = 125x^{0.96}</td> </tr> <tr> <td>C₅</td> <td>A = 25.2x^{0.98}</td> <td>A = 62.1x^{1.00}</td> </tr> <tr> <td>C₆-C₈</td> <td>A = 29x^{0.98}</td> <td>A = 68x^{0.96}</td> </tr> <tr> <td>C₉-C₁₂</td> <td>A = 129x^{0.98}</td> <td>A = 29x^{0.96}</td> </tr> <tr> <td>C₁₃-C₁₆</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C₁₇-C₂₅</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>C₂₅₊</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>H₂</td> <td>A = 198x^{0.992}</td> <td>A = 614x^{0.993}</td> </tr> <tr> <td>H₂S</td> <td>A = 32x^{1.00}</td> <td>A = 52x^{1.00}</td> </tr> <tr> <td>HF</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aromatics</td> <td>A = 121.39x^{0.8911}</td> <td>A = 359x^{0.8821}</td> </tr> <tr> <td>Styrene</td> <td>A = 121.39x^{0.8911}</td> <td>A = 435x^{0.8821}</td> </tr> </tbody> </table> <p>* x = 총 누출률(lb/s), A = 영역(area, ft²) * 공정온도가 자연발화 온도에 80°F를 더한 온도보다 이하일 경우에는 자연발화 가능성은 없음</p>	물질	설비손상영역(ft ²)	중대사고영역(ft ²)	C ₁ -C ₂	A = 43x ^{0.98}	A = 110x ^{0.96}	C ₃ -C ₄	A = 49x ^{0.98}	A = 125x ^{0.96}	C ₅	A = 25.2x ^{0.98}	A = 62.1x ^{1.00}	C ₆ -C ₈	A = 29x ^{0.98}	A = 68x ^{0.96}	C ₉ -C ₁₂	A = 129x ^{0.98}	A = 29x ^{0.96}	C ₁₃ -C ₁₆			C ₁₇ -C ₂₅			C ₂₅₊			H ₂	A = 198x ^{0.992}	A = 614x ^{0.993}	H ₂ S	A = 32x ^{1.00}	A = 52x ^{1.00}	HF			Aromatics	A = 121.39x ^{0.8911}	A = 359x ^{0.8821}	Styrene	A = 121.39x ^{0.8911}	A = 435x ^{0.8821}
	물질	설비손상영역(ft ²)	중대사고영역(ft ²)																																								
	C ₁ -C ₂	A = 43x ^{0.98}	A = 110x ^{0.96}																																								
	C ₃ -C ₄	A = 49x ^{0.98}	A = 125x ^{0.96}																																								
	C ₅	A = 25.2x ^{0.98}	A = 62.1x ^{1.00}																																								
	C ₆ -C ₈	A = 29x ^{0.98}	A = 68x ^{0.96}																																								
	C ₉ -C ₁₂	A = 129x ^{0.98}	A = 29x ^{0.96}																																								
	C ₁₃ -C ₁₆																																										
	C ₁₇ -C ₂₅																																										
	C ₂₅₊																																										
H ₂	A = 198x ^{0.992}	A = 614x ^{0.993}																																									
H ₂ S	A = 32x ^{1.00}	A = 52x ^{1.00}																																									
HF																																											
Aromatics	A = 121.39x ^{0.8911}	A = 359x ^{0.8821}																																									
Styrene	A = 121.39x ^{0.8911}	A = 435x ^{0.8821}																																									
고압 독성가스 시설 적용성	<ul style="list-style-type: none"> • API-581의 4가지 누출유형에 따른 사고피해 결과는 고압 독성가스시설에 적용할 수 없음 • 따라서 독성가스의 분산에 따른 피해크기는 CCPS에서 제시한 분산모델을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단됨 																																										

2.7. Step 7: 완화시스템 등급 결정

누출에 대한 대응 영향을 평가하는 것은 API-581의 사고피해 크기에측에서 마지막 단계에 해당되며, 이 단계에서는 사고피해 크기를 제한하는데 있어서 효율성을 높이기 위해 여러 가지 완화(mitigation)시스템들이 적용된다. 이때, 대응 영향평가를 결정하는 2가지 주요 매개변수는 누출 지속시간과 위험물질의 확산 감소이다. 누출지속시간은 독성 피해와 환경 피해 평가에서 중요한 매개변수이지만, 인화성 물질은 빠르게 정상 농도에 도달하는 특성이 있으므로, 인화성 물질에서 누출 지속시간은 중요한 변수가 아니다. 이러한 누출 지속시간은 누출 검출시스템과 차단시스템의 유형으로부터 추정되고, 독성 피해 추정을 위해 직접적으로 투입되는 변수로 이용된다. 또한 수막(water curtain)과 같은 완화시스템은 최종 사고피해 크기를 감소시키기 위한 물질의 확산을 줄이는 역할을 한다.

모든 플랜트들은 위험물질의 누출결과를 검출,

차단 및 감소시키도록 설계된 다양한 완화시스템을 가지고 있다. 따라서 API-581에서는 여러 가지 유형의 완화시스템의 유효성을 평가하기 위해서 단순화된 기법을 개발해왔으며, 독성 검출 및 차단 시스템에 대한 검출 및 차단 시스템의 등급결정 기준을 Table 8에 나타내었다.

이와 같은 검출 및 차단 시스템은 고압 독성가스 시설에서 특히 중요하기 때문에 API-581에서 제시된 바를 그대로 수용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 따라서 Table 8에는 Step 7과 관계된 API-581의 내용과 이에 대한 고압 독성가스시설의 적용성에 대해서 자세하게 나타내었다.

2.8. Step 8: 사고 피해영역 산출

API-581에서는 Table 9에 나타난 바와 같이 4가지 누출유형에 따라 대표물질별로 사고피해 크기에 대한 산출식을 제시하고 있다. 그러나 고압 독성가스시설에서는 2.1절에 언급한 바와 같이 API-581의

API-581의 사고 결과분석 방법		고압 독성가스 시설 적용 사고 결과분석 방법	
Step 1	Determining a representative fluid and its properties - 탄화수소계 물질이 주 대상물질 - 위험기반검사에서 모델화된 물질 리스트가 있음	(제외)	Determining a representative fluid and its properties - 고압가스안전관리법 상의 고압 독성가스는 특수고압가스와 특정고압가스의 고압 독성가스가 주 대상물질임(열소 등 약 40여종)
Step 2	Selecting a set of hole sizes - 누출공 크기는 소형(1/4"), 중형(1/2"), 대형(4"), 그리고 파열로 설정 - 시공설(배관, 압력용기 등)로 누출공 크기 제시	Step 1	Selecting a set of hole sizes - API-581을 준용
Step 3	Estimating the total amount of fluid available for release - 2가지 누출량 설정 제시	Step 2	Estimating the total amount of fluid available for release - API-581을 준용
Step 4	Estimating the release rate - 액체 누출속도 계산식 - 기체 누출속도 계산식	Step 3	Estimating the release rate - API-581의 기체 누출속도 계산식 준용
Step 5	Defining the type of release - 3분 동안 총 누출량이 10,000 lb 기준으로 연속누출과 순간누출로 구분	Step 4	Defining the type of release - 대안적인 방법으로 CCPS의 누출시간(10분) 기준으로 연속누출과 순간누출로 구분
Step 6	Determining the final phase of the fluid - 유체 상(phase) 결정 지점에 따라 결정	(제외)	Determining the final phase of the fluid - 고압 독성가스 시설의 최종 상은 가스만을 고려
Step 7	Evaluating post-leak response - 검출 및 차단 시스템의 등급결정 기준으로 결정	Step 5	Evaluating post-leak response - API-581을 준용
Step 8	Determining the consequences of the release - 4가지 누출유형에 따라 탄화수소계 등의 피해크기 산출	Step 6	Determining the consequences of the release - 대안적인 방법으로 CCPS의 분산모델을 적용하여 피해크기 산출

Fig. 2. Suggested 6-step procedures of consequence analysis in the high-pressure toxic gases.

대표물질 개념을 적용할 수 없고, 또한 2.5절에서 언급한 바와 같이 누출유형 결정도 API-581의 절차를 적용하기에 무리가 있기 때문에 종합적으로 API-581의 절차를 적용할 수 없는 것으로 판단된다.

따라서 대안적으로 독성가스의 사고피해 영향인 독성에 대한 영향을 살펴보기 위한 독성가스 누출에 의한 사고피해 크기는 CCPS에서 제시한 분산모델 [11]을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

III. 고압 독성가스시설에 적용할 사고결과 분석방법 제시

2장의 적용성 검토결과를 바탕으로, 고압 독성가스시설에 적용할 사고결과 분석방법은 API-581과 비교하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 총 6단계로 단순화 할 수 있었다. 즉, 고압 독성가스시설에서는 API-581의 사고결과 분석단계인 Step 1(대표물질 결정), Step 5(누출유형 결정), Step 6(유체상 결정)과 Step 8(사고 피해영역 산출)은 적용하지 않고, Step 3(누출량 산출)은 inventory group 개념만 적용하며, Step 4(누출속도 산출)는 기체 누출속도만을 적용하고, Step 2(누출공 크기 선정)와 Step 7(완화시스템 등급 결정)은 그대로 적용한다. 이때, Step 5와 Step 8은 일반적으로 적용이 가능한 CCPS 방법을 대안적인 방법으로 채택한다.

따라서 고압 독성가스시설에서 사고결과 분석절

차로 대상물질인 독성가스에 대해 API-581을 준용한 누출공 크기 선정, 누출량 산출 및 누출속도 산출, 대안적인 방법으로 CCPS 방법에 의한 누출유형 결정, API-581을 준용한 완화시스템 등급 결정, 그리고 대안적인 방법으로 CCPS에 의한 사고 피해영역 산출의 6단계를 제안한다.

IV. 결론

고압 독성가스시설의 사고결과 분석방법을 제시하기 위하여 미국석유학회(API)에서 개발한 API-581의 8단계 사고결과 분석절차에 따라 단계별 적용성을 검토한 결과, 고압 독성가스시설에 적용할 사고결과 분석방법은 총 6단계로 단순화 할 수 있었다. 즉, 고압 독성가스시설에서는 API-581의 사고결과 분석단계인 Step 1(대표물질 결정), Step 5(누출유형 결정), Step 6(유체상 결정)과 Step 8(사고 피해영역 산출)은 적용하지 않고, Step 3(누출량 산출)은 inventory group 개념만 적용하며, Step 4(누출속도 산출)는 기체 누출속도만을 적용하고, Step 2(누출공 크기 선정)와 Step 7(완화시스템 등급 결정)은 전부 적용한다. 이때, Step 5와 Step 8은 일반적으로 적용이 가능한 CCPS 방법을 대안적인 방법으로 채택한다.

따라서 이와 같은 사고 결과분석 절차에 의해 독성가스시설의 사고피해 크기를 산출하고, 독성가스 사고의 주요 원인 중의 하나인 부식에 대한 사고발

생 가능성을 해석하므로써 독성가스시설의 위험을 최소화 하는데 필요한 안전기술을 정립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업의 ‘고압 독성가스 사고피해 기반 안전관리 기술개발’ 과제(과제번호: 20132010500050)의 성과입니다.

참고문헌

- [1] Ko, J. S., “Study on the Consequence Effect Analysis and Process Hazard Review at Gas Release from Hydrogen Fluoride Storage Tank”, *J. of the Korea Society of Disaster Information*, **9**(4), 449-461, (2013)
- [2] Choi, J. S. and Ro, K. J., “A Study on the Corrosion Tendency of Bottom Plates and Corrosion Prevention Measures in Hazmat Tanks”, *J. of the Korea Society of Disaster Information*, **4**(1), 39-152, (2008)
- [3] Ministry of Government Legislation, <http://www.moleg.go.kr/main.html>
- [4] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., MAY, (2000)
- [5] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7-3, (2000)
- [6] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7-4, (2000)
- [7] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7-6, (2000)
- [8] Center for Chemical Process Safety(CCPS), *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Release*, The American Institute of Chemical Engineering(AIChE), p.85, (1999)
- [9] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7, (2000)
- [10] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7-8, (2000)
- [11] Center for Chemical Process Safety(CCPS), *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Release*, The American Institute of Chemical Engineering(AIChE), p.76, (1999)
- [12] American Petroleum Institute(API), *Risk-Based Inspection Base Resource Document*, API PUBLICATION 581, 1st ed., p.7-9, (2000)