

API-581에 의한 위험기반 검사에서 가연성 물질의 사고결과 분석

이현창 · 유 준 · 김환주 · 장서일 · 김태옥[†]

명지대학교 공과대학 화학공학과
(2004. 7. 14. 접수 / 2004. 10. 30. 채택)

Consequence Analysis of Flammable Materials at Risk Based Inspection using API-581

Hern-Chang Lee · Jun Ryoo · Hwan-Joo Kim · Seo-Il Jang · Tae-Ok Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Myongji University
(Received July 14, 2004 / Accepted October 30, 2004)

Abstract : Consequence analysis of flammable materials that affect to a risk of facilities was studied at the risk based inspection using API-581. We found that consequence areas (damage area of equipment and fatality area) by release accident of flammable materials showed high value for the case of liquid phase and auto-ignition likely, and that consequence areas of flammable gases decreased as temperature increased and the pipe diameter and pressure decreased at continuous release.

Key Words : risk based inspection (RBI), consequence analysis, API-581, flammable material

1. 서 론

석유화학, 정유, 가스, 전력 등 에너지 산업분야의 기술이 급속하게 발전함에 따라 각종 설비들은 복잡·다양화되고 있으며, 더욱이 생산효율을 증가시키기 위해 압력설비와 같은 고온·고압의 조건하에서 운전되는 시설 및 설비의 사용이 급증하고 있다¹⁾. 이와 같은 설비들은 설치 후 시간이 지남에 따라 점차 노후화 되기 때문에 보수, 대체 또는 폐기하고 있으나 경제적 또는 환경적 요인으로 인하여 이들의 보수나 대체가 용이하지 않음을 고려할 때, 이로 인한 대형사고의 가능성은 그 어느 때보다도 높아지고 있다²⁾.

따라서 노후화 된 장치들은 유지·보존상태와 경제성 및 안전성에 따라 가장 효과적이고 적절한 시기에 검사하고 보수해야될 필요성이 있으며, 이를 해결하기 위해 최근 미국석유화학협회(API)에서 개발된 위험기반 검사(risk based inspection, RBI)는 위험에 기반하여 검사의 우선순위를 결정하고, 검사에

소요되는 자원을 관리하기 위한 검사방법이다^{3,4)}.

본 연구는 한국 실정에 적합한 새로운 위험기반 검사 프로그램을 개발하기 위한 일환으로 API-581⁵⁾에 의한 RBI에서 위험도 결정에 중요한 가연성 물질의 누출에 의한 사고결과를 분석하였다. 이를 위해 화학물질, 공정조건, 장치조건 등을 변화시키면서 사고결과 즉, 누출속도, 장치피해 및 상해영역을 산출하고, 해석하였다.

2. 이 론

2.1. 정량적 RBI

정량적 RBI는 장치에 대한 위험도를 산출하여 검사의 우선순위를 결정하는 방법으로, 누출 시나리오(s)별 위험도(risk)는 사고발생 가능성과 사고결과 크기의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다^{4,5)}.

$$(Risk)_s = (LOF)_s \times (COF)_s \quad (1)$$

여기서 사고 가능성(likelihood of failure, LOF)은 설비의 파손확률이나 파손횟수를 나타내고, 사고결

[†]To whom correspondence should be addressed.
kimto@mju.ac.kr

과 크기(consequence of failure, COF)는 피해면적 또는 피해 손실액으로 나타낸다.

API-581에 의한 RBI에서 가연성 물질의 누출에 의한 사고결과 크기는 Fig. 1과 같이 대표유체를 결정하고, 누출 시나리오를 작성하여 누출속도를 산출한 후 누출량과 확산을 고려하여 피해범위를 산정한다. 이때, 완화조치는 설비내의 검출시스템과 차단시스템의 형태에 따라 누출지속시간과 피해크기를 일률적으로 변화시킨다.

2.2. 대표유체

화학설비 내의 유체는 대부분 순수물질이 아니고 혼합물질이므로 대표물질을 선택하여 사용하는데, 가연성의 대표물질은 식 (2)에 의해 끓는점(normal boiling point, NBP), 분자량(molecular weight, MW), 또는 밀도에 의해 규정될 수 있다.

$$(Property)_{Mixture} = \sum x_i \times (Property)_i \quad (2)$$

여기서 x_i 는 몰분율이고, 대표물질에 적용되는 물질 및 이들 특성은 Table 1과 같다⁵⁾.

2.3. 누출공

위험기반 검사에서는 누출공(release hole)의 크기를 소형, 중형, 대형, 그리고 파열형으로 분류하여 적용하며, 구멍크기의 범위는 사업장 내·외의 잠재적인 피해영향에 따라 선택되는데, 주로 사업장 내의 경우에는 발생 가능성이 높은 소형 및 중형의 구멍크기가 사용되고, 사업장 외의 경우에는 중형 및 대형의 구멍크기가 사용된다. 따라서 배관에서는 4가지 표준 구멍크기, 즉 누출공의 직경이 배관직경보다 작거나 같으면 1/4, 1, 4 inch, 그리고 파열형을 사용한다.

2.4. 누출속도

위험기반 검사에서 가연성 물질에 의한 피해크기 예측은 모든 누출을 순간누출 또는 연속누출의 유형 중 하나로 모델화하고, 누출속도는 물질의 물리적 특성, 초기상태 및 공정조건에 따라 다르기 때문에 물질이 설비 내에 있을 때 물질상태에 근거하여 정확한 누출속도 방정식을 선택하고, 물질이 누출됨에 따라 물질의 누출형태(음속 또는 아음속)를 선택한다.

오리피스와 같은 구멍을 통해 누출되는 액체는 Bernoulli와 Toricelli의 방정식⁶⁾에 의해 식 (3)과 같이 산출된다.

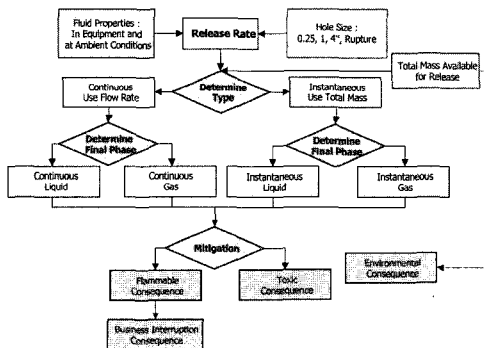


Fig. 1. Calculation procedure of consequences.

Table 1. Representative materials and its properties

Representative Material	Applicable Materials	MW	Density (lb/ft ³)	NBP (°F)	Amb. State	C _{pA}	C _{pB} (×10)	C _{pC} (×10 ³)	C _{pD} (×10 ⁶)	AIT (°F)
C ₁ -C ₂	methane, ethane, ethylene, LNG	23	5.69	193	gas	12.3	1.150	-2.87	-0.13	1.036
C ₃ -C ₅	propane, buthane, isobuthane, LPG, petane	51	3.61	6.3	gas	2.632	3.188	13.47	1.466	696
C ₆ -C ₈	gasoline, naphtha, light straight run, heptane	100	42.70	210	gas	-5.146	6.762	-36.51	7.658	433
C ₉ -C ₁₂	diesel, kerosene	149	47.73	364	liquid	-8.5	10.1	-55.6	11.8	406
C ₁₃ -C ₁₆	jet fuel, kerosene, atmospheric gas oil	205	48.38	502	liquid	-11.7	13.9	-77.2	16.7	396
C ₁₇ -C ₂₅	gas oil, typical crude	280	56.19	651	liquid	-22.4	19.4	-112	-25.3	396
C ₂₅₊	residuum, heavy crude	422	4.43	981	liquid	-22.4	19.4	-112	-25.3	396
H ₂	hydrogen only	2	61.99	-423	gas	27.1	0.0927	-1.38	0.765	752
H ₂ S	hydrogen sulfide only	34	60.37	-75	gas	31.9	0.0144	2.43	-1.18	500
HF	hydrogen fluoride	20	62.30	68	liquid	29.1	0.0066	-0.203	0.25	32000
Aromatics	benzene, toluene, zylene	104	42.73	293.3	liquid	-28.25	6.159	-40.2	9.94	914
Styrene	styrene	104	42.73	293.3	liquid	-28.25	6.159	-40.2	9.94	914

$$Q_L = C_d A \sqrt{2\rho \Delta P \frac{g_c}{144}} \quad (3)$$

여기서 Q_L 은 액체 누출속도(lb_m/s), C_d 는 누출계수(-), A 는 누출공의 단면적(in²), ρ 는 액체 밀도(lb_m/ft³), ΔP 는 압력차(psi), g_c 는 전환인자이다. 이때, C_d 는 난류에서 약 0.60~0.64이나 RBI에서는 0.61을 사용한다³⁾.

누출공을 통한 기체의 누출형태는 음속과 아음속 형태로 나타나며, 이를 결정하기 위하여 식 (4)에 의해 산출한 설비 내의 압력이 P_{trans} 보다 클 경우에는 식 (5)의 음속기체 누출속도식을 이용하고, 압력이 P_{trans} 보다 작거나 같을 경우에는 식 (6)의 아음속 기체 누출속도식을 이용한다⁶⁾.

$$P_{trans} = P \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4)$$

$$W_G(sonic) = C_d A P \sqrt{\left(\frac{kM}{RT} \right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (5)$$

$$W_G(subsonic) = C_d A P \sqrt{\left(\frac{M}{RT} \right) \frac{g_c}{144} \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (6)$$

여기서 P 는 운전압력(psig), P_a 는 대기압, k 는 C_p/C_v , M 은 분자량, R 은 기체상수, T 는 온도(R)이다.

2.5. 누출유형 및 최종상태

누출유형은 3분 이내 10,000 lb_m 이상이 누출되는 경우에 순간누출로, 그리고 누출공 직경이 1/4 inch 이하인 경우에 연속누출로 가정한다. 또한 누출 후 확산경향은 운전조건과 대기조건에서 상(phase)에 따라 변화하며, 상 변화가 없으면 최종상태는 초기상태와 동일하다. 그러나 상 변화가 있는 경우에 초기-최종 상태가 기체-액체는 기상모델로, 액체-기체는 NBP > 80°F인 경우에만 액상모델로 해석한다⁵⁾.

2.6. 피해영역 산출

가연성 물질의 누출에 의한 사고는 화재, 폭발 등의 형태로 나타나며, 사고피해 크기는 누출유형과 누출 후 자연발화 가능성에 따라 API⁵⁾에서 제시된 Table 2~Table 5에 의해 설비 손상영역(damage

area)과 상해영역(fatality area)의 면적을 산출할 수 있다. 이때, Table 2~Table 5에서 x 는 연속누출의 경우 누출속도이고, 순간누출의 경우는 누출량을 나타내며, 자연발화 가능성은 자연발화온도보다 최소 80°F 이상의 온도에서 일어날 경우 가능성이 있는 것으로 간주한다.

Table 2. Consequence equation for continuous release (auto-ignition not likely)

Materials	Final Phase Gas (Area: ft ²)		Final Phase Liquid (Area: ft ²)	
	Equipment Damage	Fatalities	Equipment Damage	Fatalities
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}	A=536x ^{0.90}	A=1544x ^{0.90}
C ₆ -C ₈	A=29x ^{0.98}	A=68x ^{0.96}	A=182x ^{0.89}	A=516x ^{0.89}
C ₉ -C ₁₂	A=1x ^{0.98}	A=29x ^{0.96}	A=130x ^{0.90}	A=373x ^{0.89}
C ₁₃ -C ₁₆			A=64x ^{0.90}	A=183x ^{0.89}
C ₁₇ -C ₂₅			A=20x ^{0.90}	A=57x ^{0.89}
C ₂₅₊			A=11x ^{0.91}	A=33x ^{0.89}
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=35x ^{0.8821}		

Table 3. Consequence equation for instantaneous release (auto-ignition not likely)

Materials	Final Phase Gas (Area: ft ²)		Final Phase Liquid (Area: ft ²)	
	Equipment Damage	Fatalities	Equipment Damage	Fatalities
C ₁ -C ₂	A=41x ^{0.67}	A=79x ^{0.67}		
C ₃ -C ₄	A=28x ^{0.72}	A=57.7x ^{0.75}		
C ₅	A=13.4x ^{0.73}	A=20.4x ^{0.76}	A=1.49x ^{0.85}	A=4.34x ^{0.85}
C ₆ -C ₈	A=14x ^{0.67}	A=26x ^{0.67}	A=4.35x ^{0.78}	A=12.7x ^{0.78}
C ₉ -C ₁₂	A=7.1x ^{0.66}	A=13x ^{0.66}	A=3.3x ^{0.76}	A=9.5x ^{0.76}
C ₁₃ -C ₁₆			A=0.46x ^{0.88}	A=1.3x ^{0.91}
C ₁₇ -C ₂₅			A=0.11x ^{0.91}	A=0.32x ^{0.91}
C ₂₅₊			A=0.03x ^{0.99}	A=0.081x ^{0.99}
H ₂	A=545x ^{0.657}	A=982x ^{0.652}		
H ₂ S	A=148x ^{0.63}	A=271x ^{0.63}		
HF				
Aromatics	A=2.26x ^{0.8227}	A=10.5x ^{0.7583}		
Styrene	A=2.26x ^{0.8227}	A=10.5x ^{0.7583}		

Table 4. Consequence equation for continuous release (auto-ignition likely)

Materials	Final Phase Gas (Area: ft ²)		Final Phase Liquid (Area: ft ²)	
	Equipment Damage	Fatalities	Equipment Damage	Fatalities
C ₁ -C ₂	A=280x ^{0.95}	A=745x ^{0.92}		
C ₃ -C ₄	A=313x ^{1.00}	A=837x ^{0.92}		
C ₅	A=304x ^{1.00}	A=811x ^{1.00}		
C ₆ -C ₈	A=313x ^{1.00}	A=828x ^{1.00}	A=525x ^{0.95}	A=1315x ^{0.92}
C ₉ -C ₁₂	A=391x ^{0.95}	A=981x ^{0.92}	A=560x ^{0.95}	A=1401x ^{0.92}
C ₁₃ -C ₁₆			A=1023x ^{0.92}	A=2850x ^{0.90}
C ₁₇ -C ₂₅			A=861x ^{0.92}	A=2420x ^{0.90}
C ₂₅₊			A=544x ^{0.90}	A=1604x ^{0.90}
H ₂	A=1146x ^{1.00}	A=3072x ^{1.00}		
H ₂ S	A=203x ^{0.89}	A=375x ^{0.94}		
HF				
Aromatics				
Styrene				

Table 5. Consequence equation for instantaneous release (auto-ignition likely)

Materials	Final Phase Gas (Area: ft ²)		Final Phase Liquid (Area: ft ²)	
	Equipment Damage	Fatalities	Equipment Damage	Fatalities
C ₁ -C ₂	A=1079x ^{0.62}	A=3100x ^{0.63}		
C ₃ -C ₄	A=523x ^{0.63}	A=1768x ^{0.63}		
C ₅	A=275x ^{0.61}	A=959x ^{0.63}		
C ₆ -C ₈	A=76x ^{0.61}	A=962x ^{0.63}		
C ₉ -C ₁₂	A=281x ^{0.61}	A=988x ^{0.63}	A=6.0x ^{0.53}	A=20x ^{0.54}
C ₁₃ -C ₁₆			A=9.2x ^{0.88}	A=26x ^{0.88}
C ₁₇ -C ₂₅			A=5.6x ^{0.91}	A=16x ^{0.91}
C ₂₅₊			A=1.4x ^{0.99}	A=4.1x ^{0.99}
H ₂	A=1430x ^{0.618}	A=4193x ^{0.621}		
H ₂ S	A=357x ^{0.61}	A=1253x ^{0.63}		
HF				
Aromatics				
Styrene				

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 API-581 절차에 따라 가연성 물질의 누출에 의한 사고피해 크기를 장치 손상영역과 상해영역으로 구분하여 산출하고, 매개변수의 영향을 해석하였으며, 이때 매개변수의 변화범위는 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Parameter ranges for calculation of consequence area

No.	Representative Material	Diameter (inch)	Temperature (°F)	Pressure (psig)
1	C ₁ -C ₂	1	100	7.35
2	C ₃ -C ₅	2	200	14.70
3	C ₆ -C ₈	4	300	29.40
4	C ₉ -C ₁₂	8	400	73.50
5	Acid(low)	16	500	147.00
6	Acid(high)		600	
7			700	
8			800	
9			900	
10			1,000	

Note : Shaded areas represent standard conditions.

C₁-C₂의 대표유체에 해당하는 CH₄의 경우 사고 결과에 미치는 온도와 압력의 영향은 Fig. 2와 같다. 이때, 누출속도와 피해크기는 운전 및 대기조건에 의해 가스모델을 적용하여 산출하였다. 그림에서 누출속도는 온도증가에 따라 서서히 감소하였으며, 압력증가에 따라 낮은 범위에서는 큰 폭으로 증가하였으나, 그 이후에는 거의 비례적으로 증가하였다. 또한 누출속도로부터 산출된 장치 손상영역과 상해영역은 누출속도에서와 비슷한 경향을 나타내었다.

Fig. 3은 29.4 psig에서 파이프 직경의 영향을 나타낸 것으로, 이때 파이프 직경이 작은 2, 4 inch 직경과 600°F 이상의 8 inch 직경에서는 연속누출이었고, 600°F 이하의 8 inch 직경과 16 inch 직경에서는 3분 이내에 10,000 lb_m가 누출하여 순간누출을 나타내었다. 연속누출에서 누출속도는 온도에 거의 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 파이프 직경의 증가에 따라 증가하였으나, 순간누출에서는 일정한 값을 나타내었다. 그리고 장치 손상영역과 상해영역은 온도증가에 따라 서서히 감소하고, 파이프 직경이 작은 2, 4 inch 직경에서는 증가의 폭이 작았으나, 직경이 8, 16 inch로 증가함에 따라 누출공의 면적 증가로 크게 증가하였다.

C₃-C₅ 범위에 해당하는 C₄H₁₀의 경우 사고결과에 미치는 온도와 압력의 영향은 Fig. 4에서와 같이 누출속도는 C₁-C₂에서와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 장치 손상영역과 상해영역은 자연발화 여부에 따라 크게 차이가 나고 있다. 즉, 700°F 이하에서는 누출 후 자연발화 가능성이 없기 때문에 손상영역이 적을 뿐만 아니라 온도와 압력의 영향도 매우

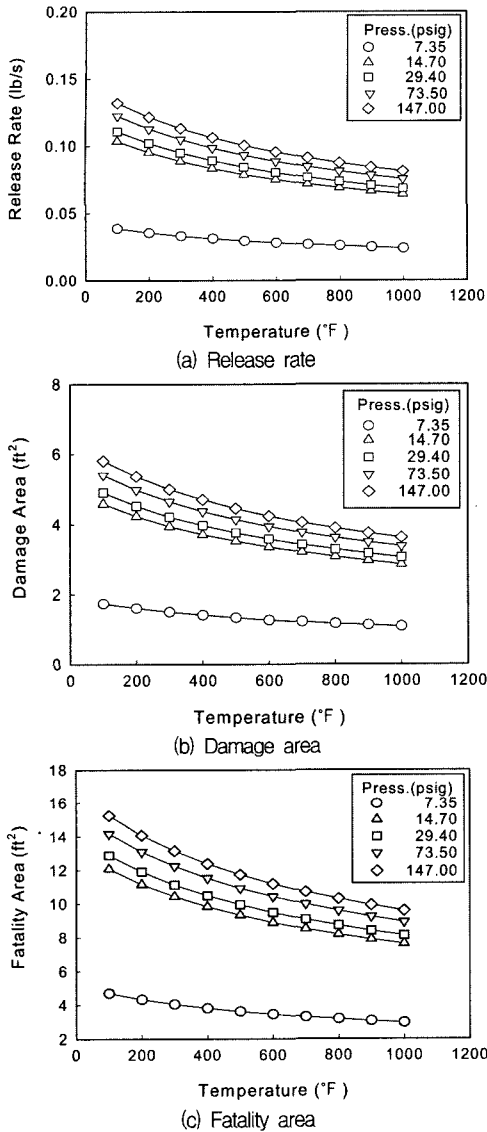


Fig. 2. Effect of temperature and pressure on release rate, damage area, and fatality area at 1 inch pipe for CH₄.

적었으나, 그 이후의 온도에서는 누출 후 자연발화 가능성으로 피해영역은 매우 큰 값을 나타내었을 뿐만 아니라 압력의 영향이 자연발화 가능성이 없는 경우보다 다소 증가하였다.

Fig. 5는 2기압에서 파이프 직경에 대한 영향을 나타낸 것으로, 이때 누출상은 기상이고, 누출형태는 파이프 직경이 작은 2, 4 inch와 500°F 이상의 8 inch 직경에서 연속누출을 나타내었으나, 500°F 이하의 8 inch 직경에서와 16 inch 직경에서는 순간

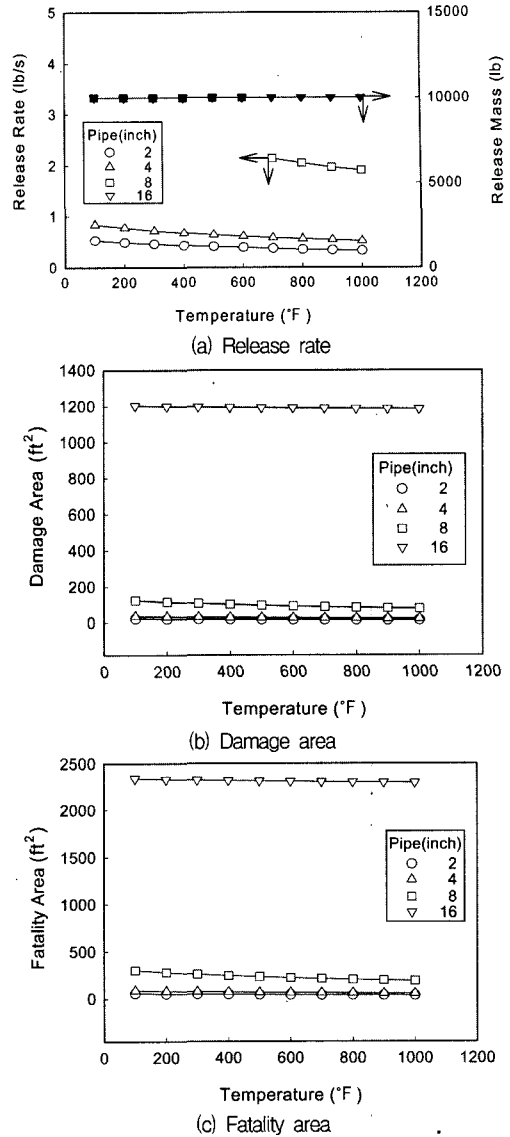
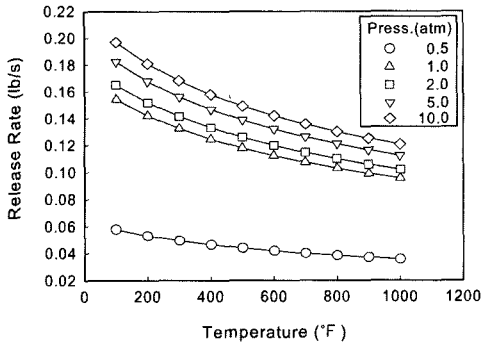
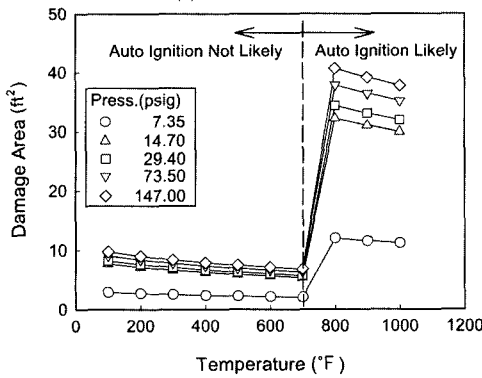


Fig. 3. Effect of temperature and pipe diameter on release rate, damage area, and fatality area at 29.4 psig for CH₄.

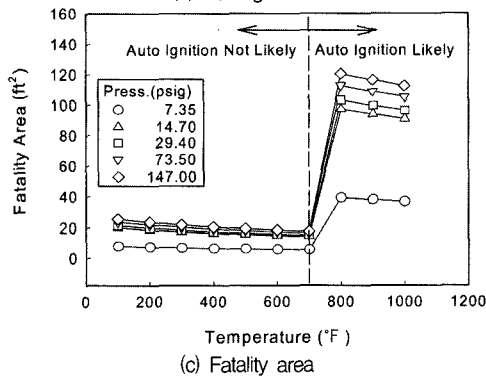
누출이었으며, 누출속도는 C₁-C₂ 결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 장치 피해영역과 상해영역도 700°F 이하에서는 자연발화 가능성이 없으므로 매우 낮은 값을 나타내었으나, 그 이후의 온도에서는 자연발화 가능성으로 인하여 매우 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 피해영역은 자연발화 가능성이 없는 경우보다 있는 경우에, 그리고 연속누출에서 보다 순간누출인 경우에 상당히 큰 값을 나타내었다.



(a) Release rate

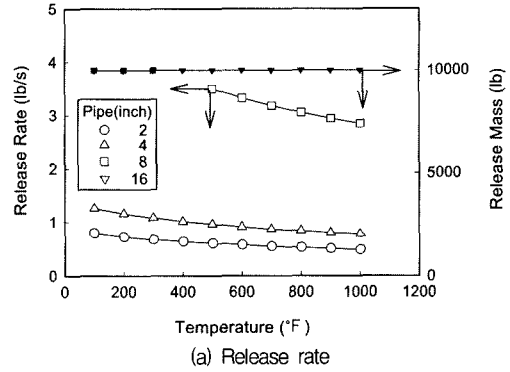


(b) Damage area

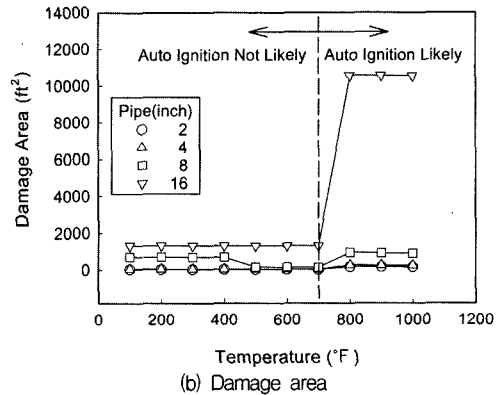


(c) Fatality area

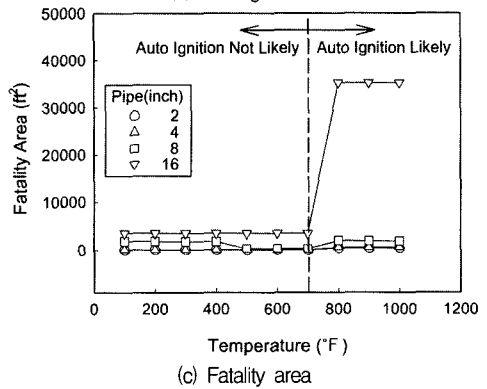
Fig. 4. Effect of temperature and pressure on release rate, damage area, and fatality area at 1 inch pipe for C₄H₁₀.



(a) Release rate



(b) Damage area



(c) Fatality area

Fig. 5. Effect of temperature and pipe diameter on release rate, damage area, and fatality area at 29.4 psig for C₄H₁₀.

C₆-C₈의 대표유체에 속하는 C₆H₁₄인 경우 1 inch 직경의 파이프에서 사고결과에 미치는 온도와 압력의 영향은 Fig. 6과 같으며, 그림에서 누출속도는 액상누출인 경우가 기상누출인 경우보다 상당히 큰 값을 가지며, 기상누출에서 보다 액상누출에서 압력의 영향이 크게 미침을 알 수 있다. 또한 장치 피해 영역과 상해영역은 자연발화 가능성이 없는 경우 기상누출에서 보다 액상누출에서 크고, 기상누출에

서는 자연발화 가능성이 있는 영역이 자연발화 가능성이 없는 영역보다 큰 값을 나타내었다.

또한 Fig. 7은 2기압에서 파이프 직경의 영향을 나타낸 것으로, 이때 누출형태는 2, 4 inch 직경에서 연속누출을, 그리고 8, 16 inch 직경에서는 순간누출을 나타내었고, 누출상태는 200°F 이하에서 액상을, 그리고 200°F 이상에서 기상을 각각 나타내었으며, 이때 자연발화 온도는 500°F이었다. 그림

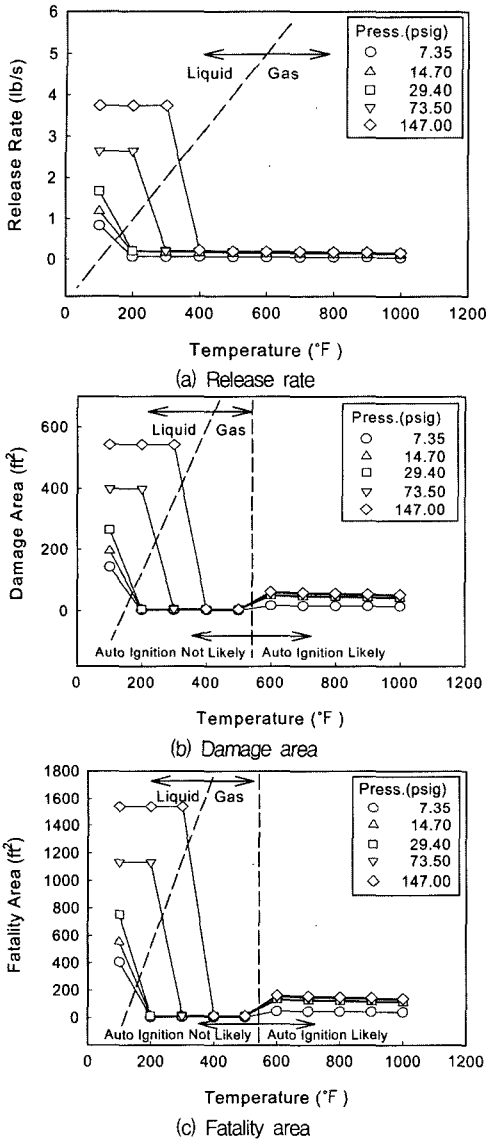


Fig. 6. Effect of temperature and pressure on release rate, damage area, and fatality area at 1 inch pipe for C_6H_{14} .

에서 누출속도는 순간누출 또는 연속누출에 따라 Fig. 5에서의 유사한 경향을 나타내었고, 장치 피해영역과 상해영역은 자연발화 가능성이 없는 경우(약 $500^{\circ}F$ 이하) 액체누출이 기체누출보다 피해영역이 크게 나타났으며, 약 $500^{\circ}F$ 이상의 영역에서는 자연발화 가능성으로 인하여 피해영역이 크게 증가하였다.

C_9-C_{12} 의 대표유체에 속하는 C_9H_{20} 인 경우 1 inch 직경의 파이프에서 사고결과에 미치는 온도와 압

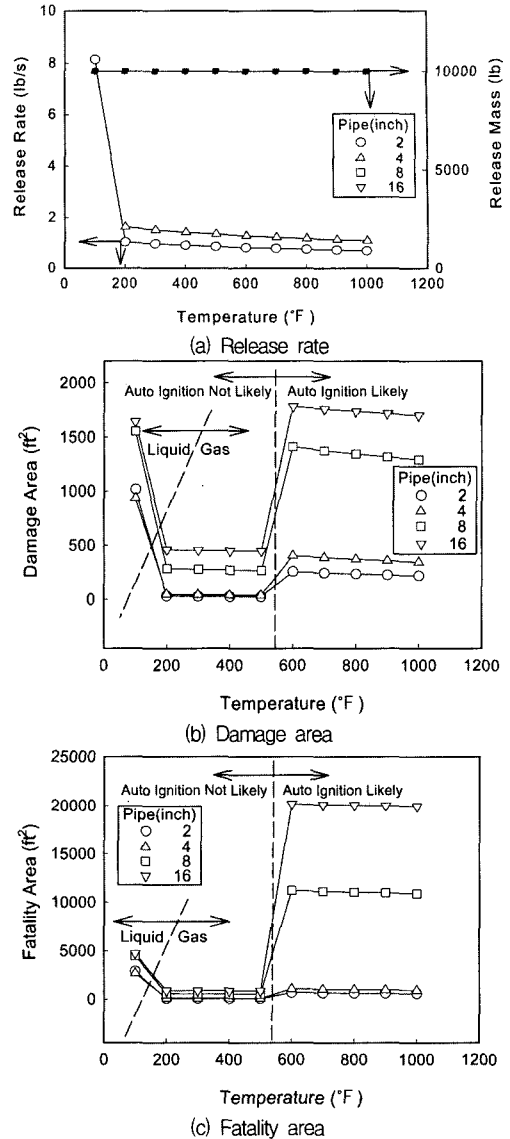
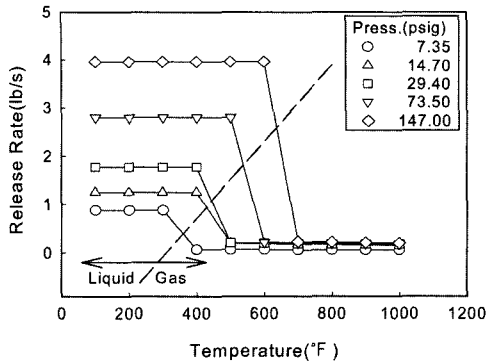
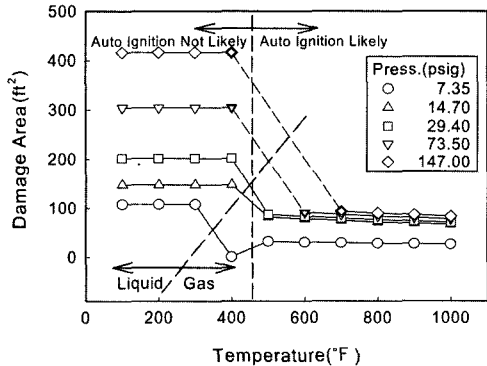


Fig. 7. Effect of temperature and pipe diameter on release rate, damage area, and fatality area at 29.4 psig for C_6H_{14} .

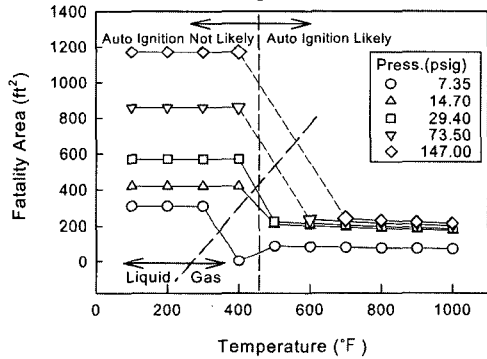
력의 영향은 Fig. 8과 같으며, 이때 온도가 낮은 범위에서는 액체누출을, 그리고 온도가 증가함에 따라 기체누출을 나타내었다. 앞의 결과에서의 같이 누출속도는 기체누출보다 액체누출에서 상당히 큰 값을 가지며, 압력의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 그리고 장치 피해영역과 상해영역은 약 $430^{\circ}F$ 이하에서 자연발화 가능성이 없었으며, 이 범위에서는 액체누출이었으나, 7.35 psig의 $400^{\circ}F$ 에서는 기체누출을 나타내어 피해영역이 감소하고,



(a) Release rate

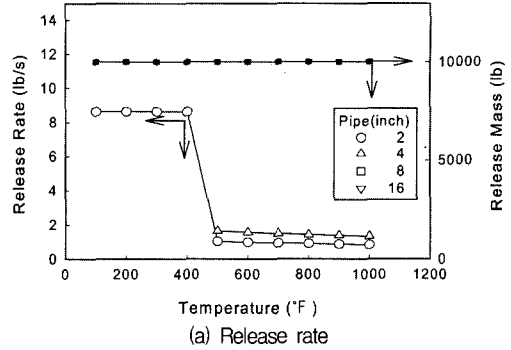


(b) Damage area

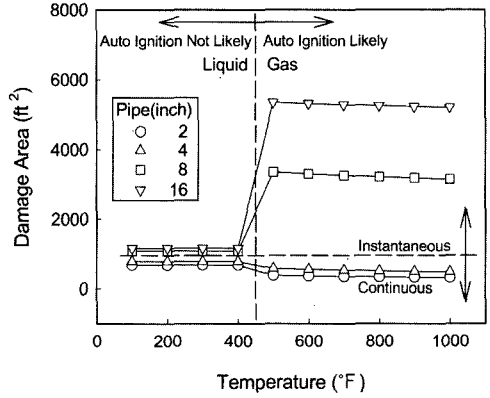


(c) Fatality area

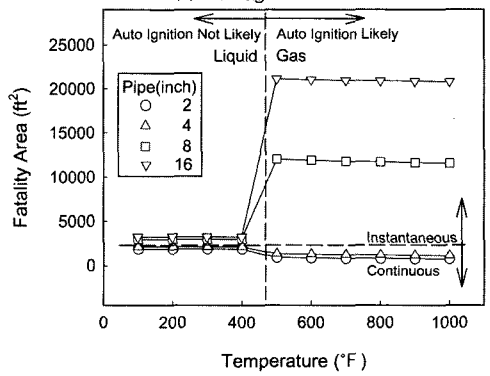
Fig. 8. Effect of temperature and pressure on release rate, damage area, and fatality area at 1 inch pipe for C_6H_6 .



(a) Release rate



(b) Damage area



(c) Fatality area

Fig. 9. Effect of temperature and pipe diameter on release rate, damage area, and fatality area at 29.4 psig for C_6H_6 .

자연발화 가능성 영역에서도 온도증가에 따라 감소하였다.

또한 2기압에서 파이프 직경의 영향을 나타낸 Fig. 9에서와 같이, 누출속도와 피해영역은 연속누출에서보다 순간누출에서, 그리고 기상누출보다 액상누출에서 상당히 크고, 순간누출에 대한 자연발화 가능성이 있는 경우가 없는 경우보다 피해영역이 큼을 알 수 있었다.

4. 결론

API-581에 의한 위험기반 검사에서 매개변수의 변화에 따른 가연성 물질의 사고결과를 분석하였다. 그 결과, 가연성 물질의 누출에 의한 사고결과와 크기, 즉 장치 손상영역과 상해영역은 기상누출보다 액상누출에서, 또한 연속누출에서보다 순간누출에서, 그리고 자연발화 가능성이 없는 경우보다 있는

경우에 상당히 큰 값을 나타내었다. 또한 연속의 기상누출에서 파해크기는 온도가 증가할수록, 그리고 압력과 파이프 직경이 감소할수록 감소하였다. 따라서 이 결과를 사용하여 설비의 위험 경감방안을 제시할 수 있다.

참고문헌

- 1) F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", Butter-worths, London, 1980.
- 2) T. A. Kletz, "What Went Wrong?", Gulf Publishing Co., Houston, TX, 1986.
- 3) API, "Based Resource Document of Risk Based Inspection : API 580", American Petroleum Institute, New York, 2001.
- 4) CRTD/ASME, "Risk-Based Inspection - Development of Guidelines", American Society of Mechanical Engineers, CRTD-20-1, New York, 1991.
- 5) API, "Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API 581", American Petroleum Institute, New York, 2000.
- 6) CCPS/AIChE, "Consequence Analysis of Chemical Release", American Institute of Chemical Engineers, New York, 1999.