KOSHA GUIDE
C - C - 47 - 2026

누출원 모델링에 관한 기술지원규정

2026. 1.

한국산업안전보건공단

기술지원규정은 산업안전보건기준에 관한 규칙 등 산업안전보건법령의 요구사항을 이행하는데 참고하거나 사업장 안전·보건 수준향상에 필요한 기술적 권고 규정임

기술지원규정의 개요

○ 개정자 : 한국산업안전보건공단 전문기술실

○ 제・개정경과

- 2000년 11월 화학안전분야 기준제정위원회 심의
- 2000년 12월 총괄기준제정위원회 심의
- 2012년 7월 총괄 제정위원회 심의(개정, 법규개정조항 반영)
- 2023년 7월 화학안전분야 표준제정위원회 심의(개정, 법규개정조항 반영)
- 2025년 12월 화학안전분야 전문위원회 심의(개정)
- 2026년 1월 표준제정위원회 본위원회 심의(개정)

○ 관련규격 및 자료

- CCPS, “Guidelines for consequence analysis of chemical release”
- AIChE, “Consequence Assessment and Mitigation”

○ 관련 법규・규칙・고시 등

- 산업안전보건법 시행규칙 제50조(공정안전보고서의 세부내용 등)

○ 기술지원규정의 적용 및 문의

- 이 기술지원규정에 대한 의견 또는 문의는 산업안전포털 홈페이지(portal.kosha.or.kr)의 기술지원규정(KOSHA GUIDE) 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
- 동 규정 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2026년 1월 30일
제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

목 차

1. 목적 ····· 1
2. 적용범위 ····· 1
3. 용어의 정의 ····· 1
4. 법적 필수사항 ····· 2
4.1 공정안전보고서의 세부내용 등 ····· 2
5. 누출원인 및 상태 ····· 2
5.1 누출 원인 ····· 2
5.2 누출 상태 ····· 3
6. 누출원의 면적 ····· 3
7. 화학설비에서 누출되는 경우 ····· 4
7.1 가스 또는 증기 상태로 누출되는 경우 ····· 4
7.1.1 임계흐름압력비 산정 ····· 4
7.1.2 누출량 산정 ····· 4
7.2 액체 상태로 누출되는 경우 ····· 5
7.3 액체-증기 상태로 누출되는 경우 ····· 5
7.3.1 일반사항 ····· 5
7.3.2 평형 포화액체가 누출되는 경우 ····· 6
7.3.3 비평형 포화액체가 누출되는 경우 ····· 6
7.3.4 과냉각 액체가 누출되는 경우 ····· 7
8. 배관에서 누출되는 경우 ····· 7
8.1 가스 또는 증기상태로 누출되는 경우 ····· 7
8.1.1 마찰계수 산정 ····· 7
8.1.2 마하번호 산정 ····· 8

8.1.3 임계흐름 압력비 산정 ····· 8
8.1.4 가스누출온도(Gas release temperature) 산정 ····· 8
8.1.5 누출량 산정 ····· 8
8.2 액체상태로 누출되는 경우 ····· 9
8.2.1 마찰계수 산정 ····· 9
8.2.2 누출량 산정 ····· 9
8.3 액체-증기로 누출되는 경우 ····· 9
8.3.1 포화액체인 경우 ····· 9
8.3.2 과냉각 액체인 경우 ····· 10

<붙임 1> 압력용기로부터 가스누출 계산 예 ····· 11
<붙임 2> 압력용기로부터 액체누출 계산 예 ····· 13
<붙임 3> 압력용기로부터 평형 포화액체 누출 계산 예 ····· 14
<붙임 4> 압력용기로부터 비평형 포화액체 누출 계산 예 ····· 15
<붙임 5> 과냉각 액체 누출량 계산 예 ····· 17
<붙임 6> 배관으로부터 가스누출 계산 예 ····· 19
<붙임 7> 배관으로부터 액체누출 계산 예 ····· 21
<붙임 8> 배관으로부터 2상의 액체-증기누출 계산 예 ····· 23

누출원 모델링에 관한 기술지원규정

1. 목적

이 규정은 공정위험성 평가시 화재·폭발, 누출과 같은 사고시의 피해정도 및 피해범위 등을 정량적으로 산정하고 피해최소화 대책 등을 수립하는데 필요한 누출량 등을 산정하는데 필요한 사항을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 적용범위

이 규정은 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표1의 위험물질 중 인화성액체, 인화성고체, 인화성 가스 및 가연성 가스 및 급성독성물질을 취급하는 화학설비 및 그 부속설비에 대한 사고피해예측에 적용한다.

3. 용어의 정의

(1) 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

(가) “누출원 모델링 (Source term modeling)” 이라 함은 화재·폭발·누출 등에 의한 사고시의 피해예측에 필요한 입력자료, 즉 누출량(또는 누출속도), 누출되는 기간 및 누출되는 위험물질의 상태 등을 예측하는 방법을 말한다.

(나) “용기 등” 이라 함은 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표7의 화학설비 및 그 부속설비를 말한다.

(다) “배관” 이라 함은 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표7 제2호의 화학설비의 부속설비 중 “가” 항의 설비를 말한다.

(라) “포화액체 (Saturated liquid)” 라 함은 취급·저장온도에서 그 물질의 포화 증기압 하에서 취급·저장되는 액체를 말한다.

(마) “과냉각 액체 (Subcooled liquid)” 라 함은 취급·저장온도에서 그 물질의 포화

증기압 이상으로 취급・저장되는 액체를 말한다.

(2) 그 밖에 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 정하는 바에 따른다.

4. 법적 필수사항

다음은 산업안전보건법령에 관한 사항으로써 반드시 준수하여야 한다.

4.1 공정안전보고서의 세부내용 등

사업주는 산업안전보건법 시행규칙 제50조(공정안전보고서의 세부내용 등)에 따른 내용을 공정안전보고서에 포함하여 작성·제출 하여야 한다.

산업안전보건법 시행규칙 제50조(공정안전보고서의 세부 내용 등)

① 영 제44조에 따라 공정안전보고서에 포함해야 할 세부내용은 다음 각 호와 같다.
4. 비상조치계획
가. 비상조치를 위한 장비・인력 보유현황
나. 사고발생 시 각 부서・관련 기관과의 비상연락체계
다. 사고발생 시 비상조치를 위한 조직의 임무 및 수행 절차
라. 비상조치계획에 따른 교육계획
마. 주민홍보계획
바. 그 밖에 비상조치 관련 사항
② 공정안전보고서의 세부내용별 작성기준, 작성자 및 심사기준, 그 밖에 심사에 필요한 사항은 고용노동부장관이 정하여 고시한다.

5. 누출원인 및 상태

5.1 누출 원인

위험물질의 누출을 야기시키는 원인은 다음과 같다.

(1) 용기, 배관 등의 균열 또는 파손

(2) 오조작에 의한 밸브의 열림

(3) 비상배출(Emergency vent)

5.2 누출 상태

위험물질이 용기 등으로부터 누출될 때 누출되는 위험물질의 상태는 다음과 같다.

(1) 가스 또는 증기(Vapor)

(2) 액체

(3) 액체-증기(Two phase flashing liquid-vapor)

6. 누출원의 면적

누출량을 산정하기 위한 누출원의 면적은 다음과 같이 산정하거나 가정한다. 다만 최악 및 대안의 사고 시나리오와 관련한 누출원 면적은 KOSHA GUIDE C-C-58「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지원규정」에 따른 설비별 누출공 크기 선정 기준을 따를 수 있다.

(1) 이송 또는 압축설비를 제외한 화학설비의 균열 또는 파손에 의한 경우

그 화학설비에서 취급·저장하는 위험물질이 10분 동안에 모두 누출될 수 있는 구멍(Hole)의 면적

(2) 배관의 균열 및 파열에 의한 경우

(가) 배관의 호칭지름이 50 ㎜ 미만인 경우 : 배관의 단면적

(나) 배관의 호칭지름이 50 ㎜ 이상 100㎜ 이하인 경우 : 50 ㎜ 배관의 단면적

(다) 배관의 호칭지름이 100 ㎜를 초과하는 경우 : 배관 단면적의 20 %

(3) 이송 또는 압축설비의 균열 또는 파손에 의한 경우

흡인측 배관의 크기에 따라 전항에서 규정하는 면적

(4) 오조작에 의하여 밸브가 열린 경우

그 밸브의 구멍(Full bore)의 면적

(5) 비상 배출인 경우

비상 배출관의 내경에 의한 면적

7. 화학설비에서 누출되는 경우

7.1 가스 또는 증기 상태로 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 1>참조)

7.1.1 임계흐름압력비 (P_{CF}/P_1) 산정

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{----------(1)}$$

여기서,

P_{CF} : 임계흐름압력(Pa)

P_1 : 화학설비의 운전압력(Pa)

γ : 비열계수 (C_P/C_V)

7.1.2 누출량 산정

(1) 누출속도가 음속 이상 ($P_a/P_1 \leq P_{CF}/P_1$)인 경우

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{\gamma M_W}{R T_1}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \quad \text{----------(2)}$$

여기서,

P_a : 대기압력(Pa)

Q : 누출량(kg/sec)

C_D : 누출계수(무차원)

M_W : 분자량(kg/kg-mole)

A : 누출원 면적(㎡)

T_1 : 화학설비의 운전온도(K)

R : 가스 상수(8,314 J/kg-mole · K)

<표 1> 누출계수

누출지점의 형태	흐름의 상태	누출계수(C_D)
벤츄리메터/노즐	-	0.05～0.99
오리피스/구멍	음속미만	0.61～067
	음속이상, $P_a/P_1 \simeq P_{CF}/P_1$	0.75
	음속이상, $P_1 \gg P_a$	0.84

※ C_D가 불확실한 경우에는 C_D=1로 가정

(2) 누출속도가 음속 미만 ($P_a/P_1 > P_{CF}/P_1$)인 경우

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2M_W}{RT_1}\frac{\gamma}{\gamma-1}\left[\left(\frac{P_a}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_1}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}}\right]} \text{-----(3)}$$

7.2 액체 상태로 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 2> 참조)

$$Q = C_D\ \rho_L A\left[\frac{2(P_1-P_a)}{\rho_L}+2gh\right]^{\frac{1}{2}} \text{----------(4)}$$

여기서,

ρ_L : 누출되는 위험물질의 밀도(kg/㎥)

g : 중력가속도(9.8 m/sec^2)

h : 누출지점과 화학설비 내의 액체 높이 차(m)

7.3 액체-증기 상태로 누출되는 경우

7.3.1 일반사항

(1) 2상 유체의 누출은 액체가 누출되면서 압력의 차에 의하여 액체가 증기 상태로 플래쉬(Flash)되어 일어난다.

(2) 2상 유체의 누출은 다음과 같은 위험물질이 누출되는 경우로 분류한다.

(가) 포화 액체(Saturated liquid)

① 평형(Equilibrium) : 누출되는 지점이 화학설비 외부로부터 0.1 m 이상인 경우

② 비평형(Nonequilibrium) : 누출되는 지점이 화학설비 외부로부터 0.1 m 이내인 경우

(나) 과냉각 액체(Subcooled liquid)

(3) 2상 유체의 누출시에 생성되는 증기의 비율(Flash fraction)은 다음과 같이 계산한다.

$$f_v = 1 - e^{-\frac{\overline{C}_{PL}}{\overline{\Delta H_V}}(T_1 - T_b)} \text{----------(5)}$$

여기서,

f_V : 생성되는 증기 비율(Flash fraction)

$\overline{C}_{PL}$: 액체의 평균 정압 비열(J/kg · K)

T_b : 대기압하에서의 액체의 비점(K)

$\overline{\Delta H_V}$: 평균 증발 잠열(J/kg)

7.3.2 평형 포화액체가 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 3> 참조)

$$Q = \left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1 C_{P_L}}\right]^{\frac{1}{2}} \text{----------(6)}$$

여기서,

ΔH_V : 운전온도에서의 증발 잠열(J/kg)

ρ_G : 운전압력에서의 증기 밀도(kg/m³)

K : 상수(1000 m · Pa/kJ)

C_{P_L} : 운전온도에서의 액체의 비열(J/kg · K)

7.3.3 비평형 포화액체가 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 4> 참조)

$$Q = \left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1 C_{P_L} N}\right]^{\frac{1}{2}} \text{----------(7)}$$

여기서,

$$N = \frac{\Delta H_V^2 K}{2(P_1 - P_a)\rho_L C_D^2 (\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1})^2 T_1 C_{P_L}} + \frac{L_P}{L_e} \text{----------(8)}$$

L_P : 화학설비의 외면으로부터 누출되는 지점까지의 배관길이(m)
단, 0.1 m 미만

L_e : 실험 상수(0.1 m)

7.3.4 과냉각 액체가 누출되는 경우(계산 예는<붙임 5> 참조)

$$Q = C_D \rho_L A \left[\frac{2(P_1 - P_v)}{\rho_L} + 2gh + \left(\frac{Q_S}{C_D \rho_L A} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{----------(9)}$$

여기서,

P_v : 운전온도에서 증기압(Pa)

Q_S : LP≥0.1m 인 경우에는 식(6)에 의한 Q
LP<0.1m 인 경우에는 식(7)항에 의한 Q

8. 배관에서 누출되는 경우

8.1 가스 또는 증기 상태로 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 6> 참조)

8.1.1 마찰계수 산정

(1) 배관의 거칠기 계수(Roughness factor)가 0을 초과하는 경우

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) \right] \text{----------(10)}$$

여기서,

f : 마찰계수(무차원)

ε : 배관의 거칠기 계수(m)

D : 배관의 내경(m)

<표 2> 거칠기 계수

배관 재질	단 위	
	m	ft
주철관(Cast Iron)	2.6×10^{-4}	8.5×10^{-4}
아연도 강관	1.5×10^{-4}	4.9×10^{-4}
일반 강관	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
단철관(Wrought Iron)	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
압연 튜브(Drawn Tube)	1.5×10^{-6}	4.9×10^{-6}
유리관	0	0
프라스틱관	0	0

(2) 배관의 거칠기 계수가 0인 경우

$$f = 0$$

8.1.2 마하번호 산정

다음 식을 이용하여 시행착오 방법으로 마하번호를 산정한다.

$$\frac{\gamma+1}{2}\log_e\left[\frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{(\gamma+1)Ma^2}\right] - \left(\frac{1}{Ma^2}-1\right) + \gamma\left(\frac{4fL_P}{D}\right) = 0 \text{----(11)}$$

여기서,

Ma : 마하번호(무차원)

L_P : 화학설비의 외면으로부터 파손된 부위까지의 배관길이(m)

D : 배관의 내경(m)

8.1.3 임계흐름 압력비 산정

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = Ma\sqrt{\frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{\gamma+1}} \text{----------(12)}$$

여기서,

P_1 : 배관내의 운전압력(Pa)

P_{CF} : 임계흐름압력(Pa)

8.1.4 가스누출온도(Gas release temperature) 산정

다음 식을 이용하여 시행착오 방법으로 가스누출온도를 산정한다.

$$\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)\log_e\left(\frac{P_1T}{P_aT_1}\right)-\left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right)\left(\frac{P_1^2T^2-P_a^2T_1^2}{T-T_1}\right)\left(\frac{1}{P_1^2T}-\frac{1}{P_a^2T_1}\right)+\left(\frac{4fL_P}{D}\right)=0 \text{--(13)}$$

여기서,

T : 가스누출온도(K)

8.1.5 누출량 산정

(1) 가스의 유속이 음속 이상 ($P_a/P_1 \le P_{CF}/P_1$)인 경우

$$Q = AMaP_1\sqrt{\frac{\gamma M_W}{RT_1}} \text{----------(14)}$$

(2) 가스의 유속이 음속미만 $(P_1/P_a > P_{CF}/P_1)$인 경우

$$Q = A\sqrt{\left(\frac{2M_W}{R}\right)\left(\frac{\gamma}{(\gamma-1)}\right)\left[\frac{T-T_1}{\left(\frac{T_1}{P_1}\right)^2-\left(\frac{T}{P_a}\right)^2}\right]} \text{----------(15)}$$

8.2 액체상태로 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 7> 참조)

8.2.1 마찰계수 산정

$$Re\sqrt{f} = \frac{D\rho_L}{\mu_L}\sqrt{\frac{D}{2L_P}\left[\frac{(P_1-P_a)}{\rho_L}+gh\right]} \text{----------(16)}$$

여기서,

Re : 레이놀드 수(Reynold's number)(무차원)

μ_L : 액체의 점도(kg/㎝ · sec)

8.2.2 누출량 산정

(1) 층류(Laminar flow)인 경우 $(Re\sqrt{f} \leq 180)$

$$Q = \frac{A\rho_L(Re\sqrt{f})\sqrt{\frac{D}{2L_P}\left[\frac{(P_1-P_a)}{\rho_L}+gh\right]}}{16} \text{----------(17)}$$

(2) 난류(Turbulent flow)인 경우 $(Re\sqrt{f} \geq 525)$

$$Q = -4A\rho_L\log_{10}\left[\frac{1}{3.7}\left(\frac{\epsilon}{D}\right)+\frac{1.255}{Re\sqrt{f}}\right]\sqrt{\frac{D}{2L_P}\left[\frac{(P_1-P_a)}{\rho_L}+gh\right]} \text{--(18)}$$

8.3 액체-증기로 누출되는 경우(계산 예는 <붙임 8> 참조)

8.3.1 포화액체인 경우

$$Q = F\left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1}-\rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1C_{P_L}}\right]^{\frac{1}{2}} \text{----------(19)}$$

여기서,

F : 유량감소계수(Flow reduction factor)(무차원)

<표 3> 유량감소계수

L_P/D	유량감소계수(F)
0	1
50	0.85
100	0.75
200	0.65
400	0.55

8.3.2 과냉각 액체인 경우

식(9)을 이용하여 L_P가 0.1 m 이상인 경우로 누출량을 산정한다.

<붙임 1>

압력용기로부터 가스누출 계산 예

길이가 41 ft(12.5 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 액체염소 이송용 철도차량에 설치된 1½″(38 ㎜)의 안전밸브가 열리는 경우에 안전밸브로부터 누출되는 양은?

취급조건은 다음과 같다.
- 사고당시(안전밸브가 열릴 때)의 저장량 : 용량의 ½정도
- 취급온도 : 70 °F/ 21 ℃
- 취급압력 : 105 psia/724,711 Pa (포화상태)

염소의 물성은 다음과 같다.
- 비열계수(γ) : 1.325
- 분자량(M_W) : 70.9
- 상압(14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2)에서 비점 : -29 °F (-34 ℃)
- 취급조건 하에서의 액체밀도(ρ_L) : 87.7 lb_m/ft^3 (1,405 kg/m^3)
- -29 °F/-34 ℃, 14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2에서 액체밀도 : 97.6 lb_m/ft^3 (1,563 kg/m^3)
- 취급조건 하에서의 가스밀도(ρ_G) : 1.35 lb_m/ft^3 (21.6 kg/m^3)
- -29 °F/-34 ℃, 14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2에서 가스밀도 : 0.225 lb_m/ft^3 (3.6 kg/m^3)
- 취급조건 하에서의 증발잠열(ΔH_V) : 109 Btu/lb_m (60.6 ㎉/㎏)
- -29 °F/-34 ℃, 14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2에서의 증발잠열 : 124 Btu/lb_m (68.9 ㎉/㎏)
- 취급조건하에서의 엔탈피 : 234 Btu/lb_m (130 ㎉/㎏)
- 50 °F/10 ℃, 14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2에서의 엔탈피 : 234 Btu/lb_m (130 ㎉/㎏)
- 평균액체비열($\overline{C}_{P_L}$, -29 °F/-34 ℃~70 °F/21 ℃) : 0.24 Btu/lb_m °F (0.24 ㎉/㎏ · ℃)

1. 임계흐름 압력비 P_{CF}/P_1을 계산하여 음속이상 여부 결정

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = \left[\frac{2}{\gamma+1}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{(식(1))}$$

$$\gamma = 1.325$$

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = \left[\frac{2}{1.325+1}\right]^{\frac{1.325}{1.325-1}} = 0.5413$$

Pa = 101,325 Pa
P1 = 724,711 Pa

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{101{,}325}{724{,}711} = 0.14 < 0.5413 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

∴ 음속 이상임.

2. 누출량 산정

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{\gamma M_W}{R T_1}\left[\frac{2}{\gamma+1}\right]^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}}$$

C_D = 0.84(표 1로부터)

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.038^2}{4} = 1.134 \times 10^{-3}\,\text{㎡}$$

P_1 = 724,711 Pa

γ = 1.325

M_W = 70.9 kg/kg-mole

R = 8,314 J/kg-mole · K

T_1 = 21 ℃ = 294 K

$$Q = (0.84)(1.134 \times 10^{-3})(724{,}711)\sqrt{\frac{(1.325)(70.9)}{(8314)(294)}\left[\frac{2}{1.325+1}\right]^{\frac{(1.325+1)}{(1.325-1)}}}$$

Q = 2.5 kg/sec

<붙임 2>

압력용기로부터 액체누출 계산 예

길이가 41 ft(12.5 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 액체염소 이송용 철도차량의 바닥에 1½″(38 ㎜) 크기의 파열이 생긴 경우에 누출량은 ?

취급조건은 다음과 같다.
- 파열시의 저장량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/21 ℃
- 누출시의 압력 : 105 psia/724,711 Pa (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

$$Q = C_D \rho_L A \left[\frac{2(P_1 - P_a)}{\rho_L} + 2gh \right]^{\frac{1}{2}}$$

C_D = 0.61(표 1로부터)

ρ_L = 1,405 kg/㎥

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.038^2}{4} = 1.134 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

P_1 = 724,711 Pa

P_a = 101,325 Pa

g = 9.8 m/sec2

h = ½ × 2.6 m = 1.3 m

$$Q = (0.61)(1,405)(1.134 \times 10^{-3}) \left[\frac{2(724,711 - 101,325)}{(1,405)} + 2(9.8)(1.3) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = (0.972)[887 + 25]^{\frac{1}{2}}$$

Q = 29.4 kg/sec

<붙임 3>

압력용기로부터 평형 포화액체 누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 염소저장용 압력용기의 바닥에 설치된 1½″(38 ㎜) 배관이 압력용기 외벽으로부터 6″(0.15 m)되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/21 ℃
- 취급압력 : 105 psia/724,711 Pa (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정
   누출되는 지점이 압력용기 외면으로 0.15 m 이므로 평형 포화액체

2. 누출량 계산

$$Q = \left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1 C_{P_L}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.038)^2}{4} = 1.134\times10^{-3}\ \text{m}^2$$

ΔH_V = 60.6 ㎉/kg = 253.55 kJ/kg

ρ_G = 21.6 kg/㎥

ρ_L = 1,405 kg/㎥

K = 1,000 m · Pa/kJ

T_1 = 21 ℃ = 294 K

C_{P_L} = 1 kJ/kg · K

$$Q = \left[\frac{(1.134\times10^{-3})(253.55)}{(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}}\right]\left[\frac{(1,000)}{(294)(1)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\boxed{Q = 11.6\ \text{kg/sec}}$$

<붙임 4>

압력용기로부터 비평형 포화액체 누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 염소저장용 압력용기의 바닥에 설치된 1½″(38 ㎜)배관이 압력용기 외벽으로부터 2″(0.05 m)되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/21 ℃
- 취급압력 : 105 psia/7.39 ㎏f/㎠ (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정
   누출되는 지점이 압력용기 외면으로부터 0.05 m 이므로 비평형 포화액체

2. 누출량 계산

$$Q = \left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1}-\rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1 C_{P_L} N}\right]^{\frac{1}{2}} \text{(식(7))}$$

$$N = \frac{\Delta H_V^2 K}{2(P_1-P_a)\rho_L C_D^2(\rho_G^{-1}-\rho_L^{-1})^2 T_1 C_{P_L}} + \frac{L_P}{L_e} \quad \text{(식(8))}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.038)^2}{4} = 1.134\times10^{-3}\,\text{m}^2$$

ΔH_V = 60.6 ㎉/㎏ = 253.55 kJ/kg

ρ_G = 21.6 ㎏/㎥

ρ_L = 1,405 ㎏/㎥

K = 1,000 m · Pa/kJ

T_1 = 21 ℃ = 294 K

C_{P_L} = 1 kJ/㎏ · K

P_1 = 724,711 Pa

P_a = 101,325 Pa

C_D = 0.84(표 1로부터)

L_P = 0.05 m

L_e = 0.1 m

$$Q = \left[\frac{(1.134\times10^{-3})(253.55)}{(21.6)^{-1}-(1{,}405)^{-1}}\right]\left[\frac{(1{,}000)}{(294)(1)N}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 6.31\left[\frac{3.40}{N}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$N = \frac{(253.55)^2(1000)}{2(724{,}711-101{,}325)(1{,}405)(0.84)^2[(21.6)^{-1}-(1{,}405)^{-1}]^2(294)(1)} + \frac{0.05}{0.1}$$

$$N = 0.085 + 0.5 = 0.585$$

$$Q = 6.31\left[\frac{3.40}{0.585}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Q = 15.2 kg/sec

<붙임 5>

과냉각 액체 누출량 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 염소저장용 압력용기의 바닥에 설치된 1½″배관이 압력용기 외벽으로부터 6″(0.15 m)되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/21 ℃
- 취급압력 : 120 psia/8.45 kgf/㎠(포화증기압은 105 psia/724,711 Pa)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

Ⅰ. MKS 단위

$$Q = C_D \rho_L A \left[\frac{2(P_1 - P_v)}{\rho_L} + 2gh + \left(\frac{Q_S}{C_D \rho_L A} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = \left[\frac{A \Delta H_V}{\rho_G^{-1} - \rho_L^{-1}} \right] \left[\frac{K}{T_1 C_{P_L}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.038)^2}{4} = 1.134 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

ΔH_V = 60.6 ㎉/kg = 253.55 kJ/kg

ρ_G = 21.6 kg/㎥

ρ_L = 1,405 kg/㎥

K = 1,000 m · Pa/kJ

T_1 = 21 ℃ = 294 K

C_{P_L} = 1 kJ/kg · K

P_1 = 8.45 kgf/㎠ = 828,662 Pa

P_v = 724,711 Pa

C_D = 0.84(표 1로부터)

g = 9.8 m/sec^2

h = 3.7 m × ½ = 1.85 m

$$Q=(0.84)(1,405)(1.134\times10^{-3})\left[\frac{2(828,662-724,711)}{(1,405)}+2(9.8)(1.85)+\left[\frac{Q_S}{(0.84)(1,405)(1.134\times10^{-3})}\right]^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q=(1.338)\left[147.9+36.3+0.56Q_s^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = \left[\frac{(1.134\times10^{-3})(253.55)}{(21.6)^{-1}-(1,405)^{-1}}\right]\left[\frac{(1,000)}{(294)(1)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = 11.6 \text{ kg/sec}$$

$$Q=(1.338)\left[147.9+36.3+0.56\times11.6^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\boxed{Q = 21.6 \text{ kg/sec}}$$

<붙임 6>

배관으로부터 가스누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 염소저장용 압력용기에 설치된 일반 강관재질로 된 1½″(38 ㎜)크기와 가스 배관이 압력용기의 외면으로부터 40 ft(12.2 m) 되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/21 ℃
- 취급압력 : 105 psia/7.39 ㎏f/㎠(포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

Ⅰ. MKS 단위

1. 마찰계수 산정

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4\log_{10}\left[\frac{1}{3.7}\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)\right]$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

ε = 4.6 × 10^{-5} m (표 2로부터)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4\log_{10}\left[\frac{1}{3.7}\left(\frac{4.6\times10^{-5}}{0.038}\right)\right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 13.96$$

$$f = 5.13\times10^{-3}$$

2. 마하번호 산정

$$\frac{\gamma+1}{2}\log_e\left[\frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{(\gamma+1)Ma^2}\right] - \left(\frac{1}{Ma^2}-1\right) + \gamma\left(\frac{4fL_P}{D}\right) = 0 \quad \text{(식(11))}$$

$$\gamma = 1.325$$

$$L_P = 12.2 \text{ m}$$

$$\frac{1.325+1}{2}\log_e\left[\frac{2+(1.325-1)Ma^2}{(1.325+1)Ma^2}\right] - \left[\frac{1}{Ma^2}-1\right] + (1.325)\left[\frac{4(5.13\times10^{-3})(12.2)}{(0.038)}\right] = 0$$

$$1.163\ \log_e\left[\frac{2+0.325Ma^2}{2.325Ma^2}\right] - \left[\frac{1}{Ma^2}-1\right] + 8.7 = 0$$

반복하여 계산하면

$M_a = 0.283$

3. 임계흐름 압력비 산정

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = Ma\sqrt{\frac{2+(\gamma-1)Ma^2}{\gamma+1}} \quad \text{(식(12))}$$

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = (0.283)\sqrt{\frac{2+(1.325-1)(0.283)^2}{(1.325+1)}}$$

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = 0.264$$

4. 흐름의 음속 이상 여부 결정

P_a = 101,325 Pa

P_1 = 724,711 Pa

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{101,325}{724,711} = 0.14 < 0.264 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

∴ 흐름이 음속 이상

5. 누출량 산정

$$Q = AMaP_1\sqrt{\frac{\gamma M_W}{RT_1}} \quad \text{(식(14))}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.038)^2}{4} = 1.134\times10^{-3} \text{ ㎡}$$

M_W = 70.9 kg/kg-mole

R = 8,314 J/kg-mole · K

T_1 = 21 ℃ = 294 K

$$Q = (1.134\times10^{-3})(0.283)(724,711)\sqrt{\frac{(1.325)(70.9)}{(8,314)(294)}}$$

Q = 1.4 kg/sec

<붙임 7>

배관으로부터 액체누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 벤젠저장용 압력용기의 바닥에 설)치된 일반 강관재질로 된 1½″(38 ㎜)크기의 액체배관의 압력용기 외면으로부터 40 ft(12.2 m) 되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 °F/21 ℃
- 취급압력 : 30 psia/2.1 kg_f/cm^2

벤젠의 물성은 다음과 같다.
- 분자량 : 78
- 70 °F/21 ℃, 30 psia/2.1 kg_f/cm^2에서의 액체비중(ρ_L) : 54.8 lb_m/ft^3(878 kg/m^3)
- 70 °F/21 ℃, 30 psia/2.1 kg_f/cm^2에서의 액체점도(μ_L) : 4.3×10^{-4} $lb_m/ft\cdot sec$ (6.4×10^{-4} kg/m · sec)
- 70 °F/21 ℃, 14.7 psia/1.033 kgf/cm^2에서의 증기압 : 1.57 psia(0.11 kg_f/cm^2)
- 80 °F/27 ℃, 14.7 psia/1.033 kg_f/cm^2에서의 기체비중(ρ_v) : 0.086 lb_m/ft^3 (1.38 kg/m^3)

Ⅰ. MKS 단위

1. $Re\sqrt{f}$ 산정 및 흐름종류 확인

$$Re\sqrt{f} = \frac{D\rho_L}{\mu_L}\sqrt{\frac{D}{2L_P}\left[\frac{(P_1-P_a)}{\rho_L}+gh\right]}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

ρ_L = 878 kg/m^3

μ_L = 6.4×10-4 kg/m · sec

L_P = 12.2 m

P_1 = 2.1 kgf/cm^2 = 205,940 Pa

P_a = 101,325 Pa

g = 9.8 m/sec2

h = 3.7 m × ½ = 1.85 m

$$Re\sqrt{f} = \frac{(0.038)(878)}{(6.4\times10^{-4})}\sqrt{\frac{(0.038)}{2(12.2)}\left[\frac{(205,940-101,325)}{(878)}+(9.8)(1.85)\right]}$$

$$Re\sqrt{f} = 24,105 > 525$$

∴ 난류 흐름임

2. 누출량 산정

$$Q = -4A\rho_L\log_{10}\left[\frac{1}{3.7}\left(\frac{\epsilon}{D}\right)+\frac{1.255}{Re\sqrt{f}}\right]\sqrt{\frac{D}{2L_P}\left[\frac{(P_1-P_a)}{\rho_L}+gh\right]} \quad \text{식(18)}$$

$$D = 38\ \text{㎜} = 0.038\ \text{m}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.038)^2}{4} = 1.134\times10^{-3}\ \text{㎡}$$

$$\varepsilon = 4.6\times10^{-5}\ \text{m(표 2로부터)}$$

$$Q = -4(1.134\times10^{-3})(878)\log_{10}\left[\frac{1}{3.7}\left(\frac{4.6\times10^{-5}}{0.038}\right)+\frac{1.255}{24,105}\right]\sqrt{\frac{0.038}{2(12.2)}\left[\frac{(205,940-101,325)}{878}+(9.8)(1.85)\right]}$$

$$\boxed{Q = 6.3\ \text{kg/sec}}$$

<붙임 8>

배관으로부터 2상의 액체-증기누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 염소저장용 압력용기의 바닥에 설치된 일반 강관재질로 된 1½″(38 ㎜)크기의 액체배관의 압력용기의 외면으로부터 40 ft(12.2 m) 되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.
- 파열되었을 때 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 ℉/ 21 ℃
- 취급압력 : 105 psia/724,711 Pa (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

Ⅰ. MKS 단위

1. 유량감소계수 산정

L_P = 12.2 m

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$\frac{L_P}{D} = \frac{12.2}{0.038} = 320$$

<표 3>로부터 유추하면 $F = 0.59$

2. 누출량 산정

$$Q = F\left[\frac{A\Delta H_V}{\rho_G^{-1}-\rho_L^{-1}}\right]\left[\frac{K}{T_1 C_{P_L}}\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{식(19)}$$

D = 38 ㎜ = 0.038 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.038)^2}{4} = 1.134\times10^{-3}\ \text{㎡}$$

ΔH_V = 60.6 ㎉/kg = 253.55 kJ/kg

ρ_G = 21.6 kg/㎥

ρ_L = 1,405 kg/㎥

K = 1,000 m · Pa/kJ

T_1 = 21 ℃ = 294 K

$$C_{P_L} = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$Q = (0.59) \left[\frac{(1.134 \times 10^{-3})(253.55)}{(21.6)^{-1} - (1{,}405)^{-1}} \right] \left[\frac{(1{,}000)}{(294)(1)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\boxed{Q = 6.8 \text{ kg/sec}}$$

기술지원규정 개정 이력

□ 개정일 : 2026. 1. 30.

○ 개정자 : 한국산업안전보건공단 전문기술실

○ 개정사유 : 확인(체계정비)

○ 주요 개정내용

- 항목 4(법적 필수사항) 추가
- 국문 명칭(기술지침→기술지원규정) 개정
- 항목 6(누출원의 면적) 누출원 면적 계산 내용 추가
- SI 단위 적용