

KOSHA GUIDE

P - 92 - 2023

## 누출원 모델링에 관한 기술지침

2023. 8.

한국산업안전보건공단

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

## 안전보건기술지침의 개요

○ 작성자 : 김 기 영

○ 개정자 : 이 정 석

한국산업안전보건공단 전문기술실 오상규

○ 제 · 개정 경과

- 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)

○ 관련규격 및 자료

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

○ 관련법규 · 규칙 · 고시 등

- 산업안전보건법 시행규칙 제50조(공정안전보고서의 세부내용 등)

○ 안전보건기술지침의 적용 및 문의

- 이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지([www.kosha.or.kr](http://www.kosha.or.kr))의 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
- 동 지침 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2023년 8월 24일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

목 차

1. 목적 ..... 1

2. 적용범위 ..... 1

3. 용어의 정의 ..... 1

4. 누출원인 및 상태 ..... 2

5. 누출원의 면적 ..... 2

6. 화학설비에서 누출되는 경우 ..... 3

7. 배관에서 누출되는 경우 ..... 6

## 누출원 모델링에 관한 기술지침

### 1. 목적

이 지침은 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 지침은 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 지침에서 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 지침에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 정하는 바에 따른다.

## 4. 누출원인 및 상태

### 4.1 누출 원인

위험물질의 누출을 야기시키는 원인은 다음과 같다.

- (1) 용기 등의 균열 또는 파손
- (2) 오조작에 의한 밸브의 열림
- (3) 비상배출(Emergency vent)

### 4.2 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)

## 5. 누출원의 면적

누출량을 산정하기 위한 누출원의 면적은 다음과 같이 산정하거나 가정한다.

- (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 mm 미만인 경우 : 배관의 단면적

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

(다) 배관의 호칭지름이 100 mm를 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

## 6. 화학설비에서 누출되는 경우

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

6.1.1 임계흐름압력비 ( $P_{CF}/P_1$ ) 산정

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

여기서,

$P_{CF}$  : 임계흐름압력( $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ ,  $\text{lb}_f/\text{cm}^2$ )

$P_1$  : 화학설비의 운전압력( $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ ,  $\text{lb}_f/\text{cm}^2$ )

$\gamma$  : 비열계수 ( $C_p/C_v$ )

## 6.1.2 누출량 산정

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

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

여기서,

 $P_a$  : 대기압력(kg/cm<sup>2</sup>, lbf/ft<sup>2</sup>) $Q$  : 누출량(kg/sec, lb/sec) $C_D$  : 누출계수(무차원) $g_c$  : 중력상수(9.8 kg · m/kg<sub>f</sub> · sec<sup>2</sup>, 32.2 lb · ft/lb<sub>f</sub> · sec<sup>2</sup>) $M_W$  : 분자량(kg/kg-mole, lb/lb-mole) $A$  : 누출원 면적(m<sup>2</sup>, ft<sup>2</sup>) $T_1$  : 화학설비의 운전온도(K, R) $R$  : 가스 상수(847 m · kg<sub>f</sub>/kg-mole · K, 1,545 ft · lb<sub>f</sub>/lb-mole · R)

&lt;표 1&gt; 누출계수

누출지점의 형태	흐름의 상태	누출계수( $C_D$ )
벤츄리미터/노즐	-	0.05~0.99
오리피스/구멍	음속미만	0.61~0.67
	음속이상, $P_a/P_1 \approx P_{CF}/P_1$	0.75
	음속이상, $P_1 \gg P_a$	0.84

※  $C_D$ 가 불확실한 경우에는  $C_D=1$ 로 가정(2) 누출속도가 음속 미만 ( $P_a/P_1 > P_{CF}/P_1$ )인 경우

$$Q = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2 g_c M_W}{R T_1} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_a}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_a}{P_1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \text{-----}(3)$$

6.2 액체 상태로 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 2&gt; 참조)

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

여기서,

$\rho_L$  : 누출되는 위험물질의 밀도(kg/m<sup>3</sup>, lb/ft<sup>3</sup>)

$g$  : 중력가속도(9.8 m/sec<sup>2</sup>, 32.2ft/sec<sup>2</sup>)

$h$  : 누출지점과 화학설비 내의 액체 높이 차(m, ft)

### 6.3 액체-증기 상태로 누출되는 경우

#### 6.3.1 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)

- 평형(Equilibrium) : 누출되는 지점이 화학설비 외부로부터 0.1 m 이상인 경우
- 비평형(Non-equilibrium) : 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.

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

여기서,

$f_v$  : 생성되는 증기 비율(Flash fraction)

$\bar{C}_{PL}$  : 액체의 평균 정압 비열(kcal/kg · K, Btu/lb · R)

$T_b$  : 대기압하에서의 액체의 비점(K, R)

$\Delta H_V$  : 평균 증발 잠열(kcal/kg, Btu/lb)



## 6.3.2 평형 포화액체가 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 3&gt; 참조)

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

여기서,

$\Delta H_V$  : 운전온도에서의 증발 잠열(kcal/kg, Btu/lb)

$\rho_G$  : 운전압력에서의 증기 밀도(kg/m<sup>3</sup>, lb/ft<sup>3</sup>)

$K$  : 상수(427 m · kg<sub>f</sub>/kcal, 778 ft · lb<sub>f</sub>/Btu)

$C_{P_L}$  : 운전온도에서의 액체의 비열(kcal/kg · K, Btu/lb · R)

## 6.3.3 비평형 포화액체가 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 4&gt; 참조)

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

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, ft)  
단, 0.1 m 미만

$L_e$  : 실험 상수(0.1 m, 0.33ft)

## 6.3.4 과냉각 액체가 누출되는 경우(계산 예는&lt;붙임 5&gt; 참조)

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

여기서,

$P_v$  : 운전온도에서 증기압(kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>)

$Q_S$  :  $L_P \geq 0.1\text{m}$  인 경우에는 식(6)에 의한 Q

$L_P < 0.1\text{m}$  인 경우에는 식(7)항에 의한 Q

## 7. 배관에서 누출되는 경우

## 7.1 가스 또는 증기 상태로 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 6&gt; 참조)

## 7.1.1 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) $\varepsilon$  : 배관의 거칠기 계수(m, ft) $D$  : 배관의 내경(m, ft)

&lt;표 2&gt; 거칠기 계수

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

(2) 배관의 거칠기 계수가 0인 경우

$$f = 0$$

## 7.1.2 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, ft) $D$  : 배관의 내경(m, ft)

## 7.1.3 임계흐름 압력비 산정

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

여기서,

$P_1$  : 배관내의 운전압력(kgf/cm<sup>2</sup>, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>)

$P_{CF}$  : 임계흐름압력(kgf/cm<sup>2</sup>, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>)

## 7.1.4 가스누출온도(Gas release temperature) 산정

다음 식을 이용하여 시행착오 방법으로 가스누출온도를 산정한다.

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

여기서,

T : 가스누출온도(K, R)

## 7.1.5 누출량 산정

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

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

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

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

## 7.2 액체상태로 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 7&gt; 참조)

## 7.2.1 마찰계수 산정

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

여기서,

Re : 레이놀드 수(Reynold's number)(무차원)

$\mu_L$  : 액체의 점도(kg/cm · sec, lb/ft · sec)

## 7.2.2 누출량 산정

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

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

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

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

## 7.3 액체-증기로 누출되는 경우(계산 예는 &lt;붙임 8&gt; 참조)

## 7.3.1 포화액체인 경우

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

여기서,

F : 유량감소계수(Flow reduction factor)(무차원)

&lt;표 3&gt; 유량감소계수

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

## 7.3.2 과냉각 액체인 경우

식(9)을 이용하여  $L_P$ 가 0.1 m 이상인 경우로 누출량을 산정한다.

## &lt;붙임 1&gt;

## 압력용기로부터 가스누출 계산 예

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

취급조건은 다음과 같다.

- 사고당시(안전밸브가 열릴 때)의 저장량 : 용량의 ½정도
- 취급온도 : 70 °F/ 21 °C
- 취급압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm<sup>2</sup> (포화상태)

염소의 물성은 다음과 같다.

- 비열계수( $\gamma$ ) : 1.325
- 분자량( $M_W$ ) : 70.9
- 상압(14.7 psia/1.033 kgf/cm<sup>2</sup>)에서 비점 : -29 °F (-34 °C)
- 취급조건 하에서의 액체밀도( $\rho_L$ ) : 87.7 lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup> (1,405 kg/m<sup>3</sup>)
- -29 °F/-34 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm<sup>2</sup>에서 액체밀도 : 97.6 lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup> (1,563 kg/m<sup>3</sup>)
- 취급조건 하에서의 가스밀도( $\rho_G$ ) : 1.35 lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup> (21.6 kg/m<sup>3</sup>)
- -29 °F/-34 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm<sup>2</sup>에서 가스밀도 : 0.225 lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup> (3.6 kg/m<sup>3</sup>)
- 취급조건 하에서의 증발잠열( $\Delta H_V$ ) : 109 Btu/lb<sub>m</sub> (60.6 kcal/kg)
- -29 °F/-34 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm<sup>2</sup>에서의 증발잠열 : 124 Btu/lb<sub>m</sub> (68.9 kcal/kg)
- 취급조건하에서의 엔탈피 : 234 Btu/lb<sub>m</sub> (130 kcal/kg)
- 50 °F/10 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm<sup>2</sup>에서의 엔탈피 : 234 Btu/lb<sub>m</sub> (130 kcal/kg)
- 평균액체비열( $\bar{C}_{P_L}$ , -29 °F/-34 °C~70 °F/21 °C) : 0.24 Btu/lb<sub>m</sub> °F (0.24 kcal/kg · °C)

## I. MKS 단위

1. 임계흐름 압력비
- $P_{CF}/P_1$
- 을 계산하여 음속이상 여부 결정

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

$$\gamma = 1.325$$

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

$$P_a = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.033 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_1 = 7.39 \text{ kgf/cm}^2 = 7.39 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{1.033 \times 10^4}{7.39 \times 10^4} = 0.14 < 0.5413 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

∴ 음속 이상임.

2. 누출량 산정

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

$$C_D = 0.84 (\text{표 1로부터})$$

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

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

$$P_1 = 7.39 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$\gamma = 1.325$$

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kgf} \cdot \text{sec}^2$$

$$M_W = 70.9 \text{ kg/kg-mole}$$

$$R = 847 \text{ m} \cdot \text{kgf/kg-mole} \cdot \text{K}$$

$$T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ K}$$

$$Q = (0.84)(1.134 \times 10^{-3})(7.39 \times 10^4) \sqrt{\frac{(1.325)(9.8)(70.9)}{(847)(294)} \left[ \frac{2}{1.325 + 1} \right]^{\frac{(1.325 + 1)}{(1.325 - 1)}}}$$

$$Q = 2.5 \text{ kg/sec}$$

## II. FPS 단위

1. 임계흐름 압력비
- $P_{CF}/P_1$
- 을 계산하여 음속이상 여부 결정

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

$$\gamma = 1.325$$

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

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2,117 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$P_1 = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{14.7}{105} = 0.14 < 0.5413 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

$\therefore$  음속 이상임.

2. 누출량 산정

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

$$C_D = 0.84 (\text{표 1로부터})$$

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$P_1 = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$\gamma = 1.325$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$M_W = 70.9 \text{ lb}_m/\text{lb-mole}$$

$$R = 1,545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb-mole} \cdot \text{R}$$

$$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$Q = (0.84)(0.012)(15,120) \sqrt{\frac{(1.325)(32.2)(70.9)}{(1,545)(530)} \left[ \frac{2}{1.325 + 1} \right]^{\frac{(1.325 + 1)}{(1.325 - 1)}}}$$

$$Q = 5.4 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## &lt;붙임 2&gt;

## 압력용기로부터 액체누출 계산 예

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

취급조건은 다음과 같다.

- 파열시의 저장량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 °F/21 °C
- 누출시의 압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm² (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

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

$$C_D = 0.61 (\text{표 1로부터})$$

$$\rho_L = 1,405 \text{ kg/m}^3$$

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

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

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kgf} \cdot \text{sec}^2$$

$$P_1 = 7.39 \text{ kgf/cm}^2 = 7.39 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_a = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.033 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$h = \frac{1}{2} \times 2.6 \text{ m} = 1.3 \text{ m}$$

$$Q = (0.61)(1,405)(1.134 \times 10^{-3}) \left[ \frac{2(9.8)(7.39 \times 10^4 - 1.033 \times 10^4)}{(1,405)} + 2(9.8)(1.3) \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$$Q = 29.4 \text{ kg/sec}$$



## II. FPS 단위

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

$$C_D = 0.61 (\text{표 1로부터})$$

$$\rho_L = 87.7 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$P_1 = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2 = 2,117 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$g = 32.2 \text{ ft}/\text{sec}^2$$

$$h = \frac{1}{2} \times 8\frac{1}{2}\text{ft} = 4.25 \text{ ft}$$

$$Q = (0.61)(87.7)(0.012) \left[ \frac{2(32.2)(15,120 - 2,117)}{(87.7)} + 2(32.2)(4.25) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = (0.642)[9,548 + 274]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 64 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## &lt;붙임 3&gt;

## 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 mm) 배관이 압력용기 외벽으로부터 6" (0.15 m)되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.

- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 °F/21 °C
- 취급압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm² (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

## 1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정

누출되는 지점이 압력용기 외면으로 0.15 m 이므로 평형 포화액체

## 2. 누출량 계산

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

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

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

$$\Delta H_V = 60.6 \text{ kcal/kg}$$

$$\rho_G = 21.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1,405 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 427 \text{ m} \cdot \text{kg/kcal}$$

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kg}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 21 \text{ °C} = 294 \text{ K}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C}$$

$$Q = \left[ \frac{(1.134 \times 10^{-3})(60.6)}{(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}} \right] \left[ \frac{(427)(9.8)}{(294)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

## II. FPS 단위

## 1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정

누출되는 지점이 압력용기 외면으로 0.15 m 이므로 평형 포화액체

## 2. 누출량 계산

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_V = 109 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\rho_G = 1.35 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$\rho_L = 87.7 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$K = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot \text{ }^\circ\text{F}$$

$$Q = \left[ \frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[ \frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 25 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## &lt;붙임 4&gt;

## 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 mm)배관이 압력용기 외벽으로부터 2" (0.05 m)되는 지점에서 파열된 경우 누출량은 ?

운전조건은 다음과 같다.

- 파열되었을 때의 취급량 : 용량의 ½ 정도
- 취급온도 : 70 °F/21 °C
- 취급압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm² (포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

## 1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정

누출되는 지점이 압력용기 외면으로부터 0.05 m 이므로 비평형 포화액체

## 2. 누출량 계산

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

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

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

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

$$\Delta H_V = 60.6 \text{ kcal/kg}$$

$$\rho_G = 21.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1,405 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 427 \text{ m} \cdot \text{kg/kcal}$$

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kg}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ K}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 7.39 \text{ kgf/cm}^2 = 7.39 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_a = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.033 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$C_D = 0.84 (\text{표 1로부터})$$

$$L_P = 0.05 \text{ m}$$

$$L_e = 0.1 \text{ m}$$

$$Q = \left[ \frac{(1.134 \times 10^{-3})(60.6)}{(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}} \right] \left[ \frac{(427)(9.8)}{(294)(0.24)N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 1.5 \left[ \frac{59.3}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$N = \frac{(60.6)^2(427)}{2(7.39 \times 10^4 - 1.033 \times 10^4)(1,405)(0.84)^2[(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}]^2(294)(0.24)} + \frac{0.05}{0.1}$$

$$N = 0.085 + 0.5 = 0.585$$

$$Q = 1.5 \left[ \frac{59.3}{0.585} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 15 \text{ kg/sec}$$

## II. FPS 단위

### 1. 평형 포화액체 또는 비평형 포화액체 여부 결정

누출되는 지점이 압력용기 외면으로부터 0.05 m 이므로 비평형 포화액체

### 2. 누출량 계산

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

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_V = 109 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\rho_G = 1.35 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$\rho_L = 87.7 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$K = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot \text{ }^\circ\text{F}$$

$$P_1 = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2,117 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$C_D = 0.84 (\text{표 1로부터})$$

$$L_P = 2 \text{ ''} = 0.167 \text{ ft}$$

$$L_e = 0.33 \text{ ft}$$

$$Q = \left[ \frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[ \frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 1.8 \left[ \frac{197}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$N = \frac{(109)^2 (778)}{2(15,120 - 2,117)(87.7)(0.84)^2 [(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}]^2 (530)(0.24)} + \frac{0.167}{0.33}$$

$$N = 0.085 + 0.50 = 0.585$$

$$Q = 1.8 \left[ \frac{197}{0.585} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$Q = 33 \text{ lb}_m/\text{sec}$
----------------------------------

&lt;붙임 5&gt;

## 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 °F/21 °C
- 취급압력 : 120 psia/8.45 kgf/cm<sup>2</sup>(포화증기압은 105 psia/7.39 kgf/cm<sup>2</sup>)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

$$Q = C_{D\rho_L A} \left[ \frac{2g_c(P_1 - P_v)}{\rho_L} + 2gh + \left( \frac{Q_s}{C_{D\rho_L A}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{식(9)})$$

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

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

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

$$\Delta H_V = 60.6 \text{ kcal/kg}$$

$$\rho_G = 21.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1,405 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 427 \text{ m} \cdot \text{kg/kcal}$$

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kgf} \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ K}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 8.45 \text{ kgf/cm}^2 = 8.45 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_v = 7.39 \text{ kgf/cm}^2 = 7.39 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$C_D = 0.84(\text{표 1로부터})$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$h = 3.7 \text{ m} \times \frac{1}{2} = 1.85 \text{ m}$$

$$Q = (0.84)(1,405)(1.134 \times 10^{-3}) \left[ \frac{2(9.8)(8.45 \times 10^4 - 7.39 \times 10^4)}{(1,405)} + 2(9.8)(1.85) + \left[ \frac{Q_s}{(0.84)(1,405)(1.134 \times 10^{-3})} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$$Q_s = \left[ \frac{(1.134 \times 10^{-3})(60.6)}{(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}} \right] \left[ \frac{(427)(9.8)}{(294)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

$$Q = (1.338) [147.9 + 36.3 + 0.56 \times 11.6^2]^{\frac{1}{2}}$$

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

## II. FPS 단위

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

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_V = 109 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\rho_G = 1.35 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$\rho_L = 87.7 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$K = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot \text{ }^\circ\text{F}$$

$$P_1 = 120 \text{ psia} = 17,280 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$



$$P_v = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$C_D = 0.84(\text{표 1로부터})$$

$$g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$$

$$h = 12 \text{ ft} \times \frac{1}{2} = 6 \text{ ft}$$

$$Q = (0.84)(87.7)(0.012) \left[ \frac{2(32.2)(17,280 - 15,120)}{(87.7)} + 2(32.2)(6) + \left[ \frac{Q_s}{(0.84)(87.7)(0.012)} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = (0.884) [1586.1 + 386.4 + 1.28Q_s^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = \left[ \frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[ \frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = 25 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

$$Q = (0.884) [1586.1 + 386.4 + 1.28(25)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 47 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## &lt;붙임 6&gt;

## 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 mm)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 °F/21 °C
- 취급압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm²(포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

## 1. 마찰계수 산정

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

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

$$\varepsilon = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m (표 2로부터)}$$

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

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

$$f = 5.13 \times 10^{-3}$$

## 2. 마하번호 산정

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

$$\gamma = 1.325$$

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

$$\frac{1.325 + 1}{2} \log_e \left[ \frac{2 + (1.325 - 1)Ma^2}{(1.325 + 1)Ma^2} \right] - \left[ \frac{1}{Ma^2} - 1 \right] + (1.325) \left[ \frac{4(5.13 \times 10^{-3})(12.2)}{(0.038)} \right] = 0$$

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

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

$$P_a = 1.033 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 1.033 \times 10^4 \text{ kg}_f/\text{m}^2$$

$$P_1 = 7.39 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 7.39 \times 10^4 \text{ kg}_f/\text{m}^2$$

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{1.033}{7.39} = 0.14 < 0.264 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

∴ 흐름이 음속 이상

### 5. 누출량 산정

$$Q = A Ma P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M_w}{RT_1}} \quad (\text{식(14)})$$

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

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

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{kg}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$M_w = 70.9 \text{ kg}/\text{kg-mole}$$

$$R = 847 \text{ m} \cdot \text{kg}_f/\text{kg-mole} \cdot \text{K}$$

$$T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ K}$$

$$Q = (1.134 \times 10^{-3})(0.283)(7.39 \times 10^4) \sqrt{\frac{(1.325)(9.8)(70.9)}{(847)(294)}}$$

$$Q = 1.4 \text{ kg/sec}$$

## II. FPS 단위

### 1. 마찰계수 산정

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$\varepsilon = 1.5 \times 10^{-4} \text{ ft (표 2로부터)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left[ \frac{1}{3.7} \left( \frac{1.5 \times 10^{-4}}{0.125} \right) \right]$$

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

$$f = 5.13 \times 10^{-3}$$

### 2. 마하번호 산정

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

$$\gamma = 1.325$$

$$L_P = 40 \text{ ft}$$

$$\frac{1.325 + 1}{2} \log_e \left[ \frac{2 + (1.325 - 1)Ma^2}{(1.325 + 1)Ma^2} \right] - \left[ \frac{1}{Ma^2} - 1 \right] + (1.325) \left[ \frac{4(5.13 \times 10^{-3})(40)}{(0.125)} \right] = 0$$

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

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

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2,117 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$P_1 = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$\frac{P_a}{P_1} = \frac{2,117}{15,120} = 0.14 < 0.264 = \frac{P_{CF}}{P_1}$$

∴ 흐름이 음속 이상

5. 누출량 산정

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$M_W = 70.9 \text{ lb}_m/\text{lb-mole}$$

$$R = 1,545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb-mole} \cdot \text{R}$$

$$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$Q = (0.012)(0.283)(15,120) \sqrt{\frac{(1.325)(32.2)(70.9)}{(1,545)(530)}}$$

$$Q = 3.1 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## &lt;붙임 7&gt;

## 배관으로부터 액체누출 계산 예

높이가 12 ft(3.7 m)이고 지름이 8½ ft(2.6 m)인 벤젠저장용 압력용기의 바닥에 설치된 일반 강관재질로 된 1½" (38 mm)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 °C
- 취급압력 : 30 psia/2.1 kgf/cm²

벤젠의 물성은 다음과 같다.

- 분자량 : 78
- 70 °F/21 °C, 30 psia/2.1 kgf/cm²에서의 액체비중( $\rho_L$ ) : 54.8 lb<sub>m</sub>/ft³(878 kg/m³)
- 70 °F/21 °C, 30 psia/2.1 kgf/cm²에서의 액체점도( $\mu_L$ ) : 4.3×10<sup>-4</sup> lb<sub>m</sub>/ft · sec  
(6.4×10<sup>-4</sup> kg/m · sec)
- 70 °F/21 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm²에서의 증기압 : 1.57 psia(0.11 kgf/cm²)
- 80 °F/27 °C, 14.7 psia/1.033 kgf/cm²에서의 기체비중( $\rho_v$ ) : 0.086 lb<sub>m</sub>/ft³  
(1.38 kg/m³)

## I. MKS 단위

1.  $Re\sqrt{f}$  산정 및 흐름종류 확인

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

$$D = 38 \text{ mm} = 0.38 \text{ m}$$

$$\rho_L = 878 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 6.4 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$$

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

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kgf} \cdot \text{sec}^2$$

$$P_1 = 2.1 \text{ kgf/cm}^2 = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_a = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.033 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$h = 3.7 \text{ m} \times \frac{1}{2} = 1.85 \text{ m}$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{(0.038)(878)}{(6.4 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{(0.038)}{2(12.2)} \left[ \frac{(9.8)(2.1 \times 10^4 - 1.033 \times 10^4)}{(878)} + (9.8)(1.85) \right]}$$

$$Re\sqrt{f} = 24,288 > 525$$

∴ 난류 흐름임

## 2. 누출량 산정

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

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

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

$$\varepsilon = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m (표 2로부터)}$$

$$Q = -4(1.134 \times 10^{-3})(878) \log_{10} \left[ \frac{1}{3.7} \left( \frac{4.6 \times 10^{-5}}{0.038} \right) + \frac{1.255}{24,288} \right] \sqrt{\frac{0.038}{2(12.2)} \left[ \frac{9.8(2.1 \times 10^4 - 1.033 \times 10^4)}{878} + (9.8)(1.85) \right]}$$

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

## II. FPS 단위

### 1. $Re\sqrt{f}$ 산정 및 흐름종류 확인

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$\rho_L = 54.8 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$\mu_L = 4.3 \times 10^{-4} \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{sec}$$

$$L_P = 40 \text{ ft}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$P_1 = 30 \text{ psia} = 4,320 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2,117 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$$

$$g = 32.2 \text{ ft}/\text{sec}^2$$

$$h = 12 \text{ ft} \times \frac{1}{2} = 6 \text{ ft}$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{(0.125)(54.8)}{(4.3 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{(0.125)}{2(40)} \left[ \frac{(32.2)(4,320 - 2,117)}{(54.8)} + (32.2)(6) \right]}$$

$$Re\sqrt{f} = 24,288 > 525$$

∴ 난류 흐름임

## 2. 누출량 산정

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

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\varepsilon = 1.5 \times 10^{-4} \text{ ft (표 2로부터)}$$

$$Q = -4(0.012)(54.8) \log_{10} \left[ \frac{1}{3.7} \left( \frac{1.5 \times 10^{-4}}{0.125} \right) + \frac{1.255}{24,288} \right] \sqrt{\frac{0.125}{2(40)} \left[ \frac{32.2(4,320 - 2,117)}{54.8} + (32.2)(6) \right]}$$

$$Q = 14 \text{ lb}_m/\text{sec}$$



## &lt;붙임 8&gt;

## 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 mm)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 °F/ 21 °C
- 취급압력 : 105 psia/7.39 kgf/cm²(포화상태)

염소의 물성은 <붙임 1>의 예와 같다.

## I. MKS 단위

## 1. 유량감소계수 산정

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

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

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

$$\text{<표 3>로부터 유추하면 } F = 0.59$$

## 2. 누출량 산정

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

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

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

$$\Delta H_V = 60.6 \text{ kcal/kg}$$

$$\rho_G = 21.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1,405 \text{ kg/m}^3$$

$$K = 427 \text{ m} \cdot \text{kgf/kcal}$$

$$g_c = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{m/kgf} \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 21 \text{ } ^\circ\text{C} = 294 \text{ K}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q = (0.59) \left[ \frac{(1.134 \times 10^{-3})(60.6)}{(21.6)^{-1} - (1,405)^{-1}} \right] \left[ \frac{(427)(9.8)}{(294)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

## II. FPS 단위

### 1. 유량감소계수 산정

$$L_P = 40 \text{ ft}$$

$$D = 1\frac{1}{2}'' = 0.125 \text{ ft}$$

$$\frac{L_P}{D} = \frac{40}{0.125} = 320$$

<표 3>로부터 유추하면  $F = 0.59$

### 2. 누출량 산정

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

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.125)^2}{4} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_V = 109 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\rho_G = 1.35 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$\rho_L = 87.7 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$K = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2$$

$$T_1 = 70 \text{ } ^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{P_L} = 0.24 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

$$Q = (0.59) \left[ \frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[ \frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = 15 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

## 안전보건기술지침 개정 이력

□ 개정일 : 2023. 8. 24.

○ 개정자 : 안전보건공단 전문기술실 오상규

○ 개정사유 : 산업안전보건법 관련 법령조항 삭제

○ 주요 개정내용

- (1. 목적) 산업안전보건법 제 49조의2, 같은 법 시행령 제 33조의 7, 같은 법 시행규칙 제130조의 2의 규정에 의하여” 법령 조항 삭제