

KOSHA GUIDE

P - 179 - 2022

혼합가스의 폭발성 여부 판정 및
폭발하한계 산정에 관한 기술지침

2022. 12.

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

○ 개정자

- 알파안전(주) 조필래

○ 제 · 개정 경과

- 2022년 9월 화학안전분야 기준제정위원회 심의

○ 관련 규격 및 자료

- ISO 10156, Gases and gas mixtures - Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valves outlets, International Organization for Standardization, 2010
- EIGA, Document 169/19, Classification and labelling guide in accordance with EC Regulation 1272/2008 (CLP Regulation), European Industrial Gases Association (EIGA), 2019
- KOSHA GUIDE D-22 - 2012, 가연성 가스 및 증기 혼합물의 폭발한계 산정에 관한 기술지침

○ 기술지침의 적용 및 문의

이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자: 2022년 12월 31일

제 정 자: 한국산업안전보건공단 이사장

혼합가스의 폭발성 여부 판정 및 폭발하한계 산정에 관한 기술지침 (안)

1. 목적

이 지침은 인화성 가스 또는 증기가 포함된 혼합가스에 불활성 가스 또는 불활성 가스와 산화제가 함유된 경우 혼합가스의 폭발성 여부를 판정하고 혼합가스의 폭발하한계를 산정하는 방법을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 적용범위

이 지침은 다음과 같은 혼합가스에 적용한다.

- (1) 인화성 가스 또는 증기의 혼합가스
- (2) 인화성 가스 또는 증기에 질소 또는 다른 불활성 가스가 포함된 경우
- (3) 인화성 가스 또는 증기에 산화제, 불활성 가스가 포함된 경우

3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

- (가) “폭발하한계 (Lower explosive limit, LEL)”라 함은 가스 등이 공기 중에서 점화원에 의하여 착화되어 화염이 전파되는 가스 등의 최소농도를 말한다.
- (나) “질소등가계수 (Coefficients of equivalency relative to nitrogen)”란 질소를 1로 고려했을 때 질소 이외의 불활성 가스를 질소와 비교한 계수를 말한다.
- (다) “산소등가계수 (Coefficients of equivalency relative to oxygen)”란 산소를 1로 고려했을 때 산소 이외의 다른 산화성 가스를 산소와 비교한 계수를 말한다.

(2) 기타 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 주요 물질의 경우를 제외하고는 「산업안전보건법」, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에서 정의하는 바에 의한다.

4. 혼합가스의 폭발성 여부 판단

- (1) 혼합가스가 인화성 가스 또는 증기만으로 구성되어 있는 경우에는 폭발성 여부를 판정할 필요가 없다.
- (2) 혼합가스의 폭발성 여부는 식 (4-1)을 사용하여 결정한다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{A'_i}{T_{ci}} \leq 1 \text{ (비인화성 가스)}, \quad \sum_{i=1}^n \frac{A'_i}{T_{ci}} > 1 \text{ (인화성 가스)} \quad (4-1)$$

$$A'_i = A_i / \left[\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^p K_i B_i \right] \quad (4-2)$$

여기서,

A'_i : 혼합가스 중 i 번째 인화성 가스의 당량 함유량(mole%)이고, 식 (4-2)를 사용하여 계산된다.

T_{ci} : 질소와 혼합될 때 공기 중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스 i 의 최대 함유량 (mole%)이며 <부록 2>에 제시되어 있다. T_{ci} 값이 없을 경우에는 폭발하한계(LEL)를 사용할 수 있고, LEL을 모를 경우에는 보수적으로 인화성 가스는 1%, 인화성 액체는 0.5%, 자연발화성 가스 및 액체는 0.1%를 사용할 수 있다.

A_i : 혼합가스 중의 i 번째 인화성 가스의 몰분율(mole%)

B_i : 혼합가스 중의 i 번째 불활성 가스의 몰분율(mole%)

K_i : 질소와 비교한 불활성 가스의 질소등가계수. 화학식 중에 원자가 3개 이상인 물질의 경우에는 1.5를 적용하고 그 외의 경우에는 <부록 1>의 불활성 가스의 질소등가계수를 사용한다.

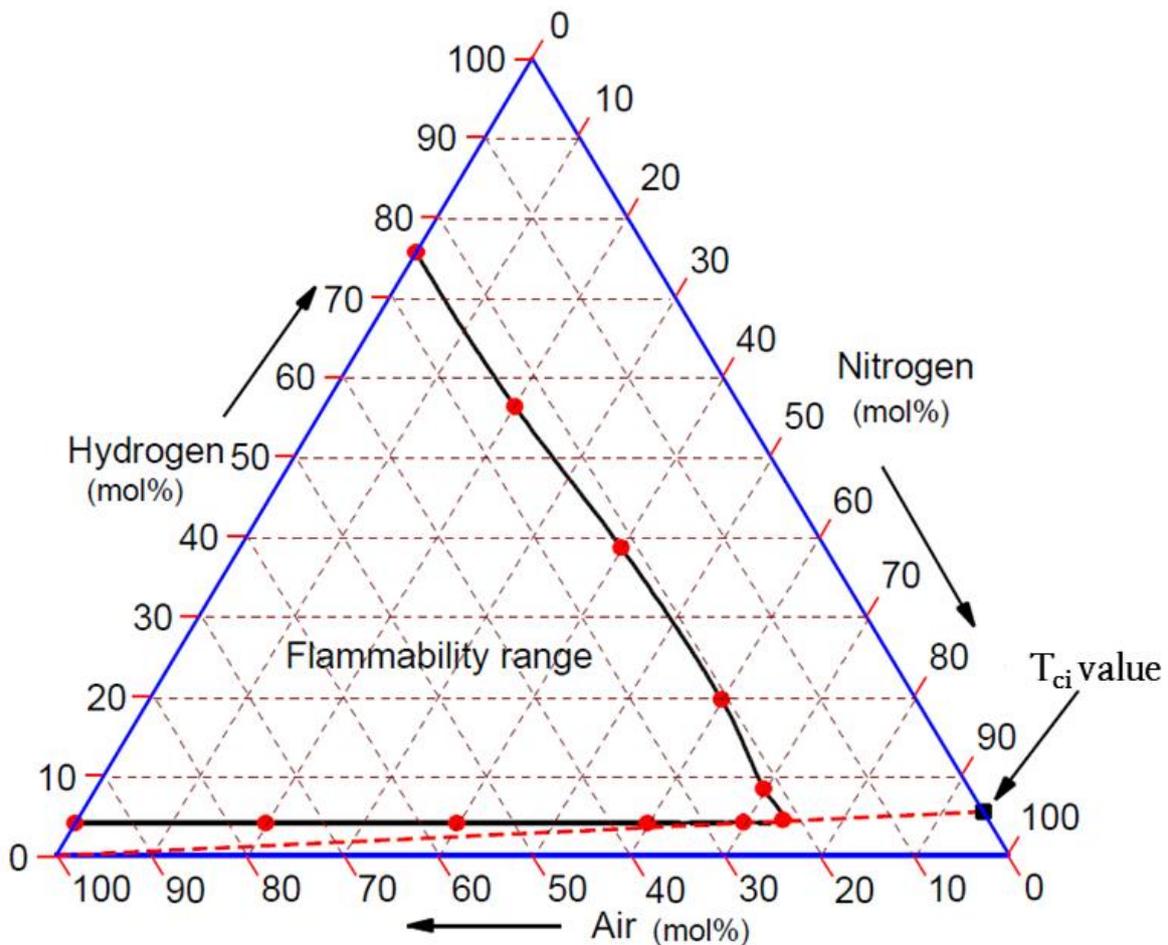
n : 혼합가스 중에 있는 인화성 가스의 총 개수

p : 혼합가스 중에 있는 불활성 가스의 총 개수

- (3) 어떤 물질의 T_{ci} 는 <그림 1>과 같은 가연성 가스-질소-공기의 3성분의 폭발삼각도(flammability diagrams of the 3-component system)를 통해 구해진다. <그림 1>은 수소에 대한 예이며, 흑색으로 표시된 부분은 혼합가스의 폭발범위(flammability range)를 나타낸다. 여기서 적색점선은 공기와 혼합될 때 폭발범위에 들지 않는 수소-질소 혼합가스를 나타낸다. 즉, 이 점선 아래의 혼합가스는

공기와 혼합될 때에 폭발범위를 형성하지 않는다.

- (4) ISO 10156에서는 이 적색 점선을 연장하여 질소농도 축과 만나는 지점을 T_{ci} 로 정의하고 있다.
- (5) <그림 1>에서 T_{ci} 를 나타내는 지점은 질소 94.5 mol%와 수소 5.5 mol%가 혼합된 상태이므로, 가연성 가스인 수소 5.5 mol%가 T_{ci} 의 값이 된다. 즉, 수소 5.5 mol% 및 질소 94.5 mol%인 혼합가스를 ISO 10156 시험방법에 따라 시험하면, 어떠한 불꽃도 관찰되지 않으므로 이 혼합가스는 폭발성 가스가 아닌 것으로 판정한다.



<그림 1> 수소의 T_{ci} 결정 (예)

5. 혼합가스의 폭발하한계 산정

5.1 일반사항

- (1) 실험을 통해 혼합가스의 폭발하한계를 파악하는 방법이 가장 적절하다.
- (2) 계산식을 통해 폭발하한계를 산정하는 방법은 르샤틀리에(Le Chatelier) 공식을 사용하는 방법과 ISO 10156의 계산식을 사용하는 방법이 있다.
- (3) ISO 10156의 계산식을 사용하여 구한 폭발하한계는 일반적으로 불활성 가스의 함유량이 높을수록 실험을 통해 구하는 값보다 작게 산정되기 때문에 보수적인 결과가 제시된다.

5.2 산화제가 포함되지 않은 혼합가스의 폭발하한계 산정

5.2.1 르샤틀리에 공식 적용방법

- (1) 혼합가스의 폭발하한계(LEL)를 구하기 위해 르샤틀리에 공식을 적용할 때 고려할 사항은 아래와 같다.
 - (가) 인화성이 있는 혼합가스에는 적용할 수 있지만, 잠재적으로 폭발성인 혼합가스에는 적용할 수 없다.
 - (나) 부분적인 할로겐화 탄화수소 (Partially halogenated hydrocarbon) 또는 공기 이외의 산화제(Oxidizer)에 대해서는 적용할 수 없다.
 - (다) 인화성 가스, 질소 및 공기의 혼합가스에 적용되고 질소 외의 불활성 가스를 포함하는 경우에는 적용할 수 없다.
- (2) 혼합가스의 폭발하한계를 구하는 르샤틀리에 식은 식 (5-1)과 같다.

$$LEL_{mix} = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{LEL_i} \quad (5-1)$$

여기서,

LEL_{mix} : 혼합물질의 폭발하한계

A_i : 혼합물 중의 성분별 몰분율(mole%)

LEL_i : 성분별 폭발하한계

5.2.2 ISO 10156 계산식 적용방법

- (1) 질소와 공기 이외의 불활성 가스를 포함하는 혼합가스에 적용된다.
- (2) 혼합가스의 폭발하한계를 계산하는 방법은 아래와 같이 7단계로 진행된다.
- (가) 1단계에서는 혼합가스의 물성치를 정리하는 단계이며, 정리해야 하는 물성치의 종류는 아래와 같다.
- ① 인화성 가스: 폭발하한계, 몰분율, T_c (질소와 혼합될 때 공기 중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스의 최대 함유량) (mole%)(<부록 2> 참조)
 - ② 불활성 가스: 몰분율, 질소등가계수(K_i)(<부록 1> 참조)
- (나) 2단계에서는 혼합물질의 폭발성 여부를 확인하기 위해 식 (4-2)를 사용하여 인화성 가스의 당량 함유량(A'_i)를 구한다.
- (다) 3단계에서는 식 (4-1)을 사용하여 혼합가스의 폭발성 여부를 판단한다. 혼합가스의 인화성 가스(또는 증기)에 대해 2단계에서 구한 값과 주어진 T_c 값을 사용하여 구한다.
- (라) 4단계에서는 식 (5-1)을 사용하여 인화성 성분만의 혼합물질의 폭발하한계(L'_M)를 계산한다. 즉, 식 (5-1)을 고쳐 쓰면 식 (5-2)와 같다.

$$L'_M = LEL_{mix} = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{LEL_i} \quad (5-2)$$

여기서,

LEL_{mix} : 혼합물질의 폭발하한계

A_i : 혼합물 중의 성분별 몰분율(mole%)

LEL_i : 성분별 폭발하한계

- (마) 5단계에서는 식 (5-3)을 통해 불활성 가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값을 구한다.

$$K = \frac{\sum K_i B_i}{\sum B_i} \quad (5-3)$$

여기서,

K : 몰분율에 따른 무게 기준의 불활성 가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값이

고 혼합물질에서 공기 또는 산소는 불활성 가스로 고려되고 K의 값은 1로 간주된다.

K_i : 질소와 비교한 불활성가스의 질소등가계수. 화학식 중에 원자가 3개 이상인 물질의 경우에는 1.5를 적용하고 그 외의 경우에는 <부록 1>의 불활성 가스의 질소등가계수를 사용한다.

B_i : 혼합물질에서중불활성 가스의 분율(%)

(바) 6단계에서는 식 (5-4) 또는 식 (5-5)를 사용하여 인화성 성분의 수정된 폭발하한계(LFL'_i)을 구한다.

$$LFL'_i = \frac{100 - L'_M - (1 - K) \times \sum_{i=1}^p B_i / \sum_{i=1}^n A_i \times L'_M}{100 - L'_M} \times LFL_i \quad (5-4)$$

$$LFL'_i = C_L \times LFL_i \quad (5-5)$$

$$C_L = \frac{100 - L'_M - (1 - K) \times \sum_{i=1}^p B_i / \sum_{i=1}^n A_i \times L'_M}{100 - L'_M} \quad (5-6)$$

여기서,

LEL'_i : 수정된 혼합물 중의 인화성 성분의 폭발하한계

C_L : 폭발하한계의 수정계수이고 식 (5-6)과 같다.

L'_M : 인화성 성분만 포함된 혼합물질의 폭발하한계(vol%)이고, 4단계에서 구한 값으로 식 (5-2)를 적용하여 구한다.

K : 불활성 가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값이고, 5단계에서 구한 값

A_i : 인화성 가스의 몰분율(mole%)

B_i : 혼합물질에서 불활성가스의 분율(%)

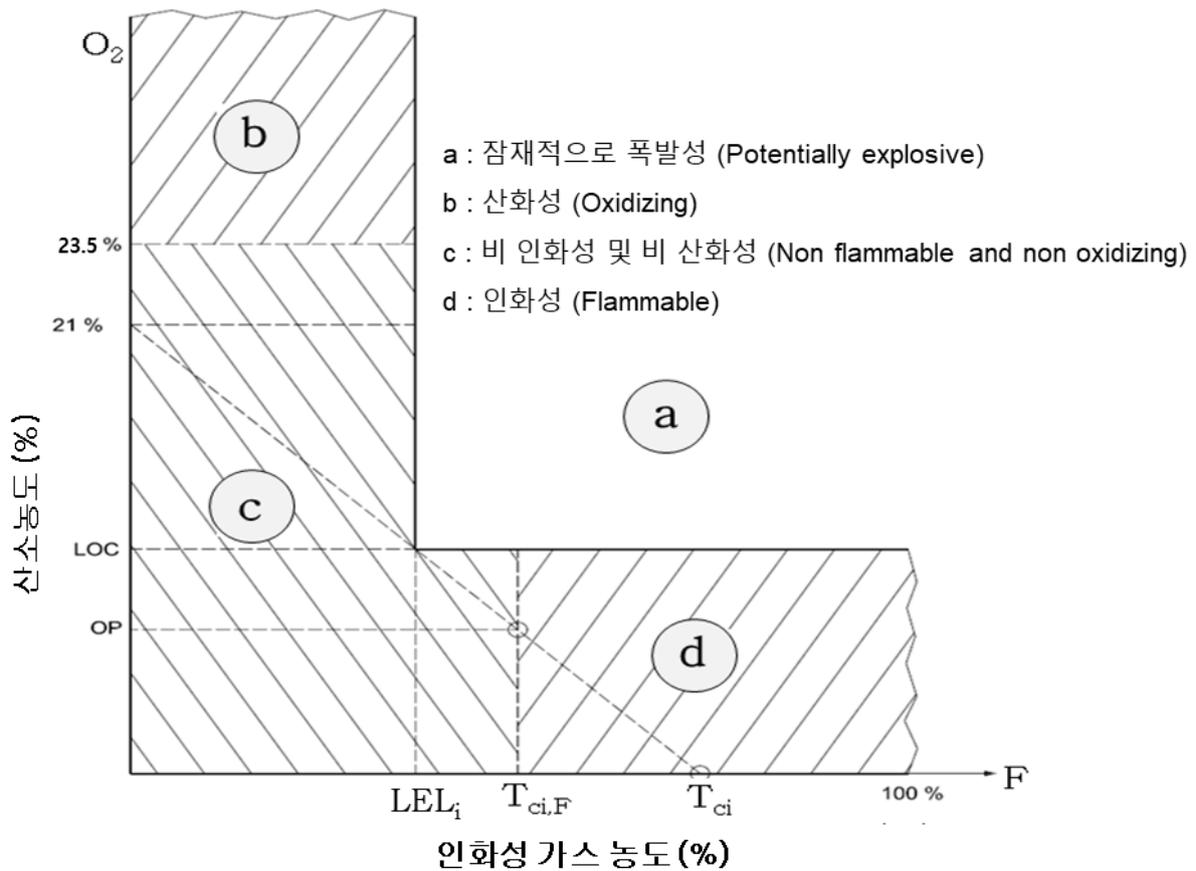
(사) 7단계에서는 최종적으로 6단계에서 구한 성분별 수정된 폭발하한계를 사용하여 식 (5-1)을 통해 성분별 폭발하한계를 구한다.

(3) 산화제가 포함되지 않고 불활성 가스만 포함된 혼합가스에 대해 ISO 10156 방법으로 폭발하한계를 산정한 예는 <부록 5>에 제시되어 있다.

5.3 산화제가 포함된 혼합가스의 폭발하한계 산정

5.3.1 일반사항

- (1) 혼합물질 중에 인화성 가스와 산소(또는 산화제)가 포함되어 있을 때에는 먼저 인화성 여부를 검토하고 또한 산소가 산화제로 작용될 수 있으므로 폭발성 여부를 검토한 후에 폭발하한계를 계산할 필요가 있다.
- (2) 혼합물질에 인화성 가스와 산화제가 함께 포함되어 있을 때 BS EN ISO 10156에서는 혼합물질을 다음과 같은 4개의 범주로 구분하고 있으며, <그림 2>에서 해당 영역이 각각 a, b, c, d로 표시된다.
 - (가) a영역(잠재적인 폭발성 물질)은 산소농도가 한계산소농도 (Limiting oxygen concentration, LOC)보다 크고, 인화성 가스의 농도가 LEL_i (공기 중의 폭발하한계) 이상인 물질을 나타낸다.
 - (나) b영역(산화성 물질)은 산소농도가 23.5 vol% 이상이고 인화성 가스의 농도가 LEL_i 미만인 물질을 나타낸다.
 - (다) c영역(비 인화성 및 비 산화성 물질)은 산소농도가 23.5 vol% 이하이고, 인화성 가스의 농도가 $T_{ci,F}$ 또는 LEL_i 미만인 물질을 나타낸다.
 - (라) d영역(인화성 물질)은 인화성 가스의 농도가 $T_{ci,F}$ 이상이고, LEL_i 이상인 물질을 나타낸다.
- (3) <그림 2>에 표시된 사항은 아래와 같다.
 - (가) LEL_i 은 공기 중의 폭발하한계이고, LOC는 한계산소농도이고 대기조건에서 인화성 물질, 공기 또는 불활성 가스의 혼합물질에서 폭발이 일어나지 않을 최대산소농도이다.
 - (나) T_{ci} 는 질소와 혼합될 때 공기 중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스 i 의 최대 함유량이다.
 - (다) $T_{ci,F}$ 는 혼합물 중에 함유된 산소농도를 고려하여 계산한 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스의 최대 함유량이다.
 - (라) OP (Oxidizing power)는 산화제 능력이며 계산을 통해 구해진다.



<그림 2> 인화성 가스 및 산화성 가스를 포함하는 혼합물의 분류

5.3.2 폭발하한계 산정과정

인화성 가스 및 산소가 함유된 혼합물질의 폭발하한계를 산정하는 과정은 다음과 같은 15단계를 통해 진행된다. 계산과정의 예는 <부록 6>에 있다.

(1) 1단계에서는 제공된 자료(성분별 함유량 등)와 <부록 1>, <부록 2>, <부록 3>, <부록 4>를 사용하여 다음의 자료를 정리한다.

- ① 인화성 가스 : 물분율, LEL, T_{ci} (부록 1), LOC (한계산소농도, <부록 4>)
- ② 불활성 가스 : 물분율, 질소등가계수(K_i , <부록 2>)
- ③ 산화제 : 산소농도, 산화성 가스의 물분율, 산소등가계수(C_i , <부록 3>)

(2) 2단계에서는 질소가 아닌 다른 불활성 가스에 대해 일반화계수 (Normalization factor) F를 계산한다. 일반화계수 F는 식 (5-7)을 사용하여 산정한다.

$$F = 1 / [1 + \sum (K_i - 1) B_i] \quad (5-7)$$

여기서,

B_i 혼합물질에서 불활성 가스의 분율(%)

K_i 불활성 가스의 질소등가계수. <부록 1> 사용

- (3) 3단계에서는 인화성 성분에 2단계에서 구한 일반화계수(F)를 곱하여 일반화된 인화성 성분의 합계(A_{nf})를 식 (5-8)을 사용하여 산정한다.

$$A_{nf} = \sum A_i \times F \quad (5-8)$$

여기서,

A_i 혼합물질에서 인화성 가스의 분율(%)

- (4) 4단계에서는 인화성 가스의 성분만으로 구성된 혼합물질의 폭발하한계(LEL'_M)를 식 (5-2)를 사용하여 산정한다.
- (5) 5단계에서는 인화성 가스의 혼합물이 공기 중에서 인화성을 갖지 않는 최대함유량($T_{c(mix)}$, mol%)를 식 (5-9)를 사용하여 산정한다.

$$T_{c(mix)} = \sum A_i / \sum \frac{A_i}{T_{ci}} \quad (5-9)$$

여기서,

A_i : 혼합물질에서 인화성 가스의 분율(%)

T_{ci} : 질소와 혼합될 때 공기 중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스 i 의 최대 함유량 (mole%)이며 <부록 2>에 제시되어 있다. T_{ci} 값이 없을 경우에는 폭발하한계(LEL)를 사용할 수 있고, LEL을 모를 경우에는 보수적으로 인화성 가스는 1%, 인화성 액체는 0.5%, 자연발화성 가스 및 액체는 0.1%를 사용할 수 있다.

- (6) 6단계에서는 산소농도에 2단계에서 구한 일반화계수(F)를 곱하여 식 (5-10)과 같이 산소당량농도(x_{O_2})를 산정한다.

$$x_{O_2} = C_{O_2} \times F \quad (5-10)$$

여기서,

C_{O_2} : 산소농도

- (7) 7단계에서는 혼합물 중에 함유된 산소농도를 고려하여 인화성이 아닌 상태가 되

는 인화성 가스의 최대 농도($T_{ci,F}$)를 식 (5-11)을 사용하여 산정한다.

$$T_{ci,F} = T_{ci} \times (1 - x_{O_2} / 21\%) \quad (5-11)$$

(8) 8단계에서는 혼합물질의 인화성 여부를 판단한다. 인화성 여부의 판단기준은 3단계에서 구한 A_{nf} (일반화된 인화성 성분의 합계)가 LEL_{mix} 보다 크고 A_{nf} 가 $T_{ci,F}$ 보다 크면, 인화성 가스로 판정된다. 즉, $A_{nf} > LEL_{mix}$ 이고, $A_{nf} > T_{ci,F}$ 이면, 인화성 가스이다.

(9) 9단계에서는 산화제 능력 (Oxidizing power, OP)을 계산한다. 산화제 능력은 식 (5-12)를 사용하여 산정한다. OP 값이 0.235(23.5%) 보다 클 경우에는 산화성 가스 (Oxidizing gas)로 간주한다.

$$OP = \frac{\sum x_i C_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^p K_i B_i} \quad (5-12)$$

여기서,

x_i : 혼합물 중 산화성 가스(oxidizing gas)의 몰분율(mol%)

C_i : 산화성 가스의 산소등가계수이고 <부록 3>에 있다.

K_i : 질소와 비교되는 불활성 가스의 질소등가계수

B_i : 혼합물 중 불활성 가스의 몰분율(mol%)

n : 산화성 가스(oxidizing gas)의 개수

p : 혼합물 중 불활성 가스의 개수

(10) 10단계에서는 혼합물질의 한계산소농도(LOC_{mix}) 또는 최소산소농도 (Minimum oxygen concentration, MOC)를 식 (5-13)을 사용하여 산정한다.

$$LOC_{mix} = \sum A_i / \sum A_i / LOC_i \quad (5-13)$$

여기서,

A_i : 인화성 성분의 농도 (mol%)

LOC_i : 인화성 성분의 한계산소농도. 만약 질소 이외의 다른 불활성 가스를 사용할 경우에는 일반화계수(F)를 사용하여 한계산소농도를 수정하고, <부록 4>를 참조한다.

(11) 11단계에서는 혼합물질의 폭발성 여부를 판단한다. 판단기준은 혼합물질의 한계

산소농도(LOC_{mix})가 산소당량농도(x_{O_2})보다 작으면 폭발성 물질로 판단된다.

- (12) 12단계에서는 불활성 가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값(K)을 구한다. 평균값은 식 (5-14)와 같이 계산되며, 산소의 당량계수는 1로 적용된다.

$$K = \frac{\sum K_i B_i}{\sum B_i} \quad (5-14)$$

여기서,

K_i : 질소와 비교되는 불활성 가스의 질소등가계수

B_i : 혼합물 중 불활성 가스의 몰분율(mol%)

- (13) 13단계에서는 LEL 계수(C_L)를 구한다. C_L 는 식 (5-6)을 사용하여 산정한다.
- (14) 14단계에서는 인화성 가스의 성분별 수정된 폭발하한계(LFL')를 산정한다. 성분별 수정된 폭발하한계는 성분별 폭발하한계에 13단계에서 구한 LEL 계수(C_L)를 곱하여 얻는다.
- (15) 15단계에서는 마지막으로 수정된 혼합물질의 폭발하한계(LFL_{mix})를 구한다. 14단계에서 구한 물질별 수정된 폭발하한계를 적용하여 식 (5-2)를 사용하여 산정한다.

<부록 1>

불활성가스의 질소등가계수(K_i)
(Coefficients of equivalency for inert gases relative to nitrogen)

No	EIGA SDS No	화학물질명	분자량	K_i
1	003A	Argon	40	0.55
2	003B	Argon (refrigerated)	40	0.55
3	006	Boron trichloride	117	1.5
4	007	Boron trifluoride	68	1.5
5	018A	Carbon dioxide	44	1.5
6	018B	Carbon dioxide (refrigerated)	44	1.5
7	018C	Carbon dioxide (solid)	44	1.5
8	020	Carbonyl fluoride	66	1.5
9	138	Germanium tetrafluoride	148.6	1.5
10	061A	Helium	4	0.9
11	061B	Helium (refrigerated)	4	0.9
12	062	2H-Heptafluoropropane (R227ea, HFC-227ea) (*)	170	1.5
13	064	Hexafluoroethane (R116, PFC-116)	138	1.5
14	066	Hexafluoropropene (R1216)	150	1.5
15	068	Hydrogen bromide	81	1.5
16	069	Hydrogen chloride	36.5	1.5
17	070	Hydrogen fluoride	20	1.5
18	071	Hydrogen iodide	128	1.5
19	077A	Krypton	84	0.5
20	077B	Krypton (refrigerated)	84	0.5
21	086A	Neon	20	0.7
22	086B	Neon (refrigerated)	20	0.7
23	089A	Nitrogen	28	1
24	089B	Nitrogen (refrigerated)	28	1
25	094	Octafluorobutene (R1318)	200	1.5
26	095	Octafluorocyclobutane (RC318, PFC-C-318)	200	1.5
27	096	Octafluoropropane (R218, PFC-218)	188	1.5
28	132	Octafluorotetrahydrofuran	216	1.5
29	137	Pentafluoroethane (R125)	120	3.5
30	099	Phosgene	99	1.5
31	102	Phosphorus trifluoride	88	1.5

No	EIGA SDS No	화학물질명	분자량	K_i
32	106	Selenium hexafluoride	193	1.5
33	108	Silicon tetrafluoride	104	1.5
34	113	Sulphur dioxide	64	1.5
35	110	Sulphur hexafluoride	146	4
36	111	Sulphur tetrafluoride	108	1.5
37	133	Tetrafluoroethane (R134a, HFC-134a) (*)	102	1.5
38	116	Tetrafluoromethane (R14, PFC-14)	88	2
39	119	Trifluoromethane (R23, HFC-23) (*)	70	1.5
40	123	Tungsten hexafluoride	298	1.5
41	127	Xenon	131	0.5
42	141	(1E)-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234ze, HFC-1234ze)	114	1.5

Note:
 (*) 부분적인 할로겐화 탄화수소(Partially halogenated hydrocarbon)
 EIGA SDS No : 유럽산업가스협회의 물질안전보건자료 번호

<부록 2>

인화성 가스 및 증기의 T_{ci} 및 LEL_i 값

번호	화학물질명	상태	CAS No.	UN No.	T_{ci} (%)	LEL_i (%)
1	Acetylene	가스	74-86-2	3374	3	2.3
2	Ammonia	가스	7664-41-7	1005	40.1	15.4
3	Arsine	가스	7784-42-1	2188	3.9	3.9
4	Bromomethane	가스	74-83-9	1062	13.9	8.6
5	1,2-Butadiene	가스	590-19-2	1010	2	1.4
6	1,3-Butadiene	가스	106-99-0	1010	2	1.4
7	<i>n</i> -Butane	가스	106-97-8	1011	3.6	1.4
8	1-Butene	가스	106-98-9	1012	3.3	1.5
9	cis-Butene	가스	590-18-1	1012	3.3	1.5
10	trans-Butenes	가스	624-64-6	1012	3.3	1.5
11	Carbon monoxide	가스	630-08-0	1016	15.2	10.9
12	Carbonyl sulfide	가스	463-58-1	2204	6.5	6.5
13	Chlorodifluoroethane (R142b)	가스	75-68-3	2517	26.4	6.3
14	Chloroethane	가스	75-00-3	1037	5.8	3.6
15	Chlorotrifluoroethylene (R1113)	가스	79-38-9	1082	7.4	4.6
16	Cyanogen	가스	460-19-5	1026	3.9	3.9
17	Cyclobutane	가스	287-23-0	2601	2.9	1.8
18	Cyclopropane	가스	75-19-4	1027	3.4	2.4
19	Deuterium	가스	7782-39-0	1957	6.7	6.7
20	Diborane	가스	19287-45-7	1911	0.9	0.9
21	Dichlorosilane	가스	4109-96-0	2189	2.5	2.5
22	Difluoroethane (R152a)	가스	75-37-6	1030	8.7	4
23	Difluoroethylene (R1132a)	가스	75-38-7	1959	6.6	4.7
24	Dimethyl ether	가스	115-10-6	1033	3.8	2.7
25	Dimethylamine	가스	124-40-3	1154	2.8	2.8
26	Dimethylpropane (neopentane)	가스	463-82-1	2044	2.1	1.3
27	Ethane	가스	74-84-0	1035	4.5	2.4
28	Ethyl methyl ether	가스	540-67-0	1039	2.8	2
29	Ethylacetylene	가스	107-00-6	2452	1.8	1.3
30	Ethylene	가스	74-85-1	1962	4.1	2.4
31	Ethylene oxide	가스	75-21-8	1040	4.8	2.6
32	Fluoroethane	가스	353-36-6	2453	6.1	3.8

번호	화학물질명	상태	CAS No.	UN No.	T_c (%)	LEL_i (%)
33	Fluoromethane	가스	593-53-3	2454	9	5.6
34	Germane	가스	7782-65-2	2192	1	1.0 (estimated)
35	Hydrogen	가스	1333-74-0	1049	5.5	4
36	Hydrogen selenide	가스	7783-07-5	2202	4	4
37	Hydrogen sulfide	가스	7783-06-4	1053	8.9	3.9
38	Isobutane	가스	75-28-5	1969	3.4	1.5
39	Isobutene	가스	115-11-7	1055	4	1.6
40	Methane	가스	74-82-8	1971	8.7	4.4
41	Methyl chloride	가스	74-87-3	1063	12.3	7.6
42	Methyl mercaptan	가스	74-93-1	1064	5.7	4.1
43	Methyl nitrite	가스	624-91-9	2455	5.3	5.3
44	Methyl silane	가스	992-94-9	3161	1.3	1.3
45	Methylacetylene (propyne)	가스	74-99-7	3161	2.5	1.8
46	Methylamine	가스	74-89-5	1061	6.9	4.9
47	Methylbutene (3-methylbut-1-ene)	가스	563-45-1	2561	2.4	1.5
48	Monoethylamine	가스	75-04-7	1036	5.7	3.5
49	Phosphine	가스	7803-51-2	2199	1.7	1.6
50	Propadiene	가스	463-49-0	2200	2.7	1.9
51	Propane	가스	74-98-6	1978	3.7	1.7
52	Propene	가스	115-07-1	1077	4.2	1.8
53	Silane	가스	7803-62-5	2203	1	1.0 (estimated)
54	Tetrafluoroethylene (R1114)	가스	116-14-3	1081	10.5	10.5
55	Trifluoroethane (R143a)	가스	420-46-2	2035	11.3	7
56	Trifluoroethylene (R1123)	가스	359-11-5	1954	13.1	10.5
57	Trimethylamine	가스	75-50-3	1083	3.2	2
58	Trimethylsilane	가스	993-07-7	3161	1.3	1.3
59	Vinyl bromide	가스	593-60-2	1085	9	5.6
60	Vinyl chloride	가스	75-01-4	1086	6.1	3.8
61	Vinyl fluoride	가스	75-02-5	1860	4.7	2.9
62	Vinyl methyl ether	가스	107-25-5	1087	3.6	2.2
63	Acetaldehyde	증기	75-07-0	1088	6.5	4
64	Acetone	증기	67-64-1	1090	4	2.5
65	Benzene	증기	71-43-2	1114	2.3	1.2
66	Carbon disulphide	증기	75-15-0	1131	1.3	0.6

번호	화학물질명	상태	CAS No.	UN No.	T_c (%)	LEL_i (%)
67	Cyclohexane	증기	110-82-7	1145	1.8	1
68	<i>n</i> -Decane	증기	124-18-5	2247	1.1	0.7
69	Diethyl ether	증기	60-29-7	1155	2.4	1.7
70	Dimethyl acetylene (2-butyne, crotonylene)	증기	503-17-3	1144	2	1.4
71	2,2-Dimethylbutane (neohexane)	증기	75-83-2	1208	1.9	1.2
72	<i>n</i> -Dodecane	증기	112-40-3	-	1	0.6
73	Ethanol	증기	64-17-5	1170	5.6	3.1
74	Ethyl acetate	증기	141-78-6	1173	4.6	2
75	Ethyl chloride (Chloroethane)	증기	75-00-3	1037	5.8	3.6
76	Ethyl formate	증기	109-94-4	1089	3.8	2.7
77	<i>n</i> -Heptane	증기	142-82-5	1206	1.3	0.8
78	<i>n</i> -Hexane	증기	110-54-3	1208	2.3	1
79	Hydrogen cyanide	증기	74-90-8	1051	5.4	5.4
80	Isooctane (2,2,4-trimethylpentane)	증기	540-84-1	1262	1.6	1
81	Isopentan (2-methylbutane)	증기	78-78-4	1265	2.1	1.3
82	Lead tetraethyl (tetraethyllead)	증기	78-00-2	1649	1.8	1.8
83	Methanol	증기	67-56-1	1230	12.5	6
84	Methyl acetate	증기	79-20-9	1231	5	3.1
85	Methyl ethyl ketone (butanone)	증기	78-93-3	1193	2.4	1.5
86	Methyl formate	증기	107-31-3	1243	8.1	5
87	Methylene chloride (Dichloromethane)	증기	75-09-2	1592	21	13
88	Monochlorosilane	증기	13465-78-6	2986	1	1.0 (estimated)
89	Nickel carbonyl (tetracarbonylnickel)	증기	13463-39-3	1259	0.9	0.9
90	<i>n</i> -Nonane	증기	111-84-2	1920	1.1	0.7
91	<i>n</i> -Octane	증기	111-65-9	1262	1.3	0.8
92	<i>n</i> -Pentane	증기	109-66-0	1265	1.8	1.1
93	Propyl formate	증기	110-74-7	1281	4.6	2.1
94	Propylene oxide	증기	75-56-9	1280	3.7	1.9
95	Toluene	증기	108-88-3	1294	2.3	1

<부록 3>

산화성 가스의 산소등가계수(C_i)

(Coefficient of oxygen equivalency for oxidizing gases)

번호	화학물질명	산소등가계수 C_i	비고
1	Bis-trifluoromethylperoxide	40	[1]
2	Bromine pentafluoride	40	[1]
3	Bromine trifluoride	40	[1]
4	Chlorine	0.7	
5	Chlorine pentafluoride	40	[1]
6	Chlorine trifluoride	40	[1]
7	Fluorine	40	[1]
8	Iodine pentafluoride	40	[1]
9	Nitric oxide	0.3	
10	Nitrogen dioxide	1	[2]
11	Nitrogen trifluoride	1.6	
12	Nitrogen trioxide	40	[1]
13	Nitrous oxide	0.6	
14	Oxygen	1	
15	Oxygen (refrigerated)	1	
16	Oxygen difluoride	40	[1]
17	Ozone	40	[1]
18	Tetrafluorohydrazine	40	[1]

[참고사항]

[1] 시험되지 않은 산화성 가스는 보수적인 값(40)을 적용하였다.

[2] 이 값은 산화질소(Nitricoxide) 및 삼불화질소(Nitrogen trifluoride)로 산정하였다.

<부록 4>

한계산소농도(Limiting oxygen concentration, LOC)

번호	EIGA SDS No	화학물질명	분자량	LOC (%)
1	001	Acetylene (dissolved)	26	2
2	002	Ammonia, anhydrous	17	12.2
3	005	Arsine	78	2
4	012	Butadiene 1,2-	54	2
5	013	1,3-Butadiene	54	2
6	014	Butane	58	9.6
7	017	but-1-ene	56	9.7
8	015	(Z)-but-2-ene	56	9.7
9	016	(E)-but-2-ene	56	9.7
10	019	Carbon monoxide	28	4.7
11	021	Carbonyl sulphide	60	4.6
12	028	Chloroethane	64.5	2
13	029	Chloromethane (R40)	50.5	2
14	033	Chlorotrifluoroethylene (R1113)	116.5	2
15	037	Cyclobutane	56	2
16	038	Cyclopropane	42	2
17	039	Deuterium	4	2
18	040	Diborane	27.7	2
19	043	Dichlorosilane	101	2
20	045	Difluoroethane (R152a, HFC-152a)	67	2
21	046	Difluoroethylene 1,1- (R1132a)	64	2
22	130	Difluoromethane (R32, HFC-32)	52	2
23	047	Di-methylamine	45	2
24	048	Dimethyl ether	46	8.5
25	049	Dimethylsilane	60	2
26	050	Disilane	62	2
27	051A	Ethane	30	8.8
28	051B	Ethane (refrigerated)	30	8.8
29	052	Ethyl acetylene	54	2
30	054	Ethylamine	45	2
31	053	Ethyl methyl ether	60	2
32	055A	Ethylene	28	7.6
33	055B	Ethylene (refrigerated)	28	7.6
34	056	Ethylene oxide	44	2

번호	EIGA SDS No	화학물질명	분자량	LOC (%)
35	058	Fluoroethane (R161, HFC-161)	48	2
36	059	Fluoromethane	34	2
37	060	Germane	76.6	2
38	131	Hexafluoro-1,3- Butadiene	162	2
39	067A	Hydrogen	2	4.3
40	067B	Hydrogen (refrigerated)	2	4.3
41	072	Hydrogen selenide	81	2
42	073	Hydrogen sulphide	34	9.1
43	074	Hydrogen telluride	130	2
44	075	Isobutane (R600a)	58	10.3
45	076	2-methylpropene	56	10.6
46	078A	Methane	16	11.0
47	078B	Methane (refrigerated)	16	11.0
48	079	Methyl 3- butene 1	70	2
49	081	Methyl acetylene	40	2
50	082	Mono-methylamine	31	2
51	083	Methanethiol	48	2
52	084	Methyl silane	46	2
53	080	Methyl vinyl ether	58	2
54	087	Neopentane	72	2
55	100	Phosphine	34	2
56	103	Propadiene 1,2-	40	2
57	104	Propane (R290)	44	9.8
58	105	Propylene (R1270)	42	9.3
59	107	Silane	32	2
60	114	Tetrafluoroethylene (R1114)	100	2
61	118	Trifluoroethane (R143a, HFC-143a)	84	2
62	122	Tri-methylamine	59	2
63	121	Trimethylsilane	74.2	2
64	124	Bromoethylene	107	2
65	125	Vinyl chloride	62.5	2
66	126	Vinyl fluoride	46	2
67	139	Trimethylborane	56	2

<부록 5>

산화성 가스가 포함되지 않은 혼합가스의 폭발하한계(LEL) 산정 예

1. 혼합가스의 구성성분

H₂(4%), CH₄(6%), Ar(27%), He(65%)

2. ISO 10156 기준을 정용한 혼합가스의 폭발하한계 산정과정

- (1) 1단계에서는 주어진 자료와 <부록 1> 및 <부록 2>의 자료를 찾아 아래의 표와 같이 정리한다.

<표 1> 혼합가스의 물성치 정리

구분	기호	단위	인화성 가스		불활성 가스		비고
			H ₂	CH ₄	Ar	He	
폭발하한계	LEL	vol%	4	4.4	-	-	
혼합물질의 물분율	인화성 가스	A _i	2	6		-	주어진 값
	불활성 가스	B _i	-	-	27	65	
질소등가계수	K _i		-	-	0.55	0.9	<부록 1>
공기 중에서 인화성이 되지 않는 인화성 가스의 최대 함유량	T _{ci}	mole%	5.5	8.7	-	-	<부록 2>

- (2) 2단계에서는 혼합물질의 인화성 여부를 확인하기 위해 먼저 식 (4-2)를 사용하여 인화성 가스의 당량 함유량(A'_i)를 구한다. 계산하면 수소와 메탄의 당량 함유량은 각각 다음과 같다.

$$A'_{(H_2)} = 2 / [(2+6) + (0.55 \times 27 + 0.9 \times 65)] = 2.46 \text{ (mol\%)}$$

$$A'_{(CH_4)} = 6 / [(2+6) + (0.55 \times 27 + 0.9 \times 65)] = 7.38 \text{ (mol\%)}$$

- (3) 3단계에서는 식 (4-1)을 사용하여 혼합물질의 폭발성 여부를 판단한다. 수소와 메탄에 대해서는 2단계에서 구한 값과 주어진 T_{ci} 값을 사용하여 구한다. 계산 결과는 다음과 같이 1보다 크므로 이 혼합물질은 인화성이다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{A'_i}{T_{ci}} = (2.46/5.5 + 7.38/8.7) = 1.5 > 1$$

- (4) 4단계에서는 식 (5-1) 또는 식 (5-2)를 사용하여 인화성 성분만의 혼합물질의 폭발하한계(L'_M)를 계산한다. 계산 결과는 다음과 같다.

$$L'_M = 100/(25/4 + 75/4.4) = 4.29 \text{ vol\%}$$

- (5) 5단계에서는 식 (5-3)을 통해 불활성가스의 질소등가계수(K_k)의 평균값을 구한다. 계산 결과는 다음과 같다.

$$K = (27 \times 0.55 + 65 \times 0.9)/(27 + 65) = 0.797$$

- (6) 6단계에서는 식 (5-4)를 사용하여 인화성 성분의 수정된 폭발하한계(LFL'_i)를 구한다. 계산결과는 다음과 같다.

$$LFL'_{(H_2)} = [100 - 4.29 - (1 - 0.797) \times (27 + 65)/(2 + 6)] / (100 - 4.29) \times 4 = 3.58$$

$$LFL'_{(CH_4)} = [100 - 4.29 - (1 - 0.797) \times (27 + 65)/(2 + 6)] / (100 - 4.29) \times 4.4 = 3.94$$

- (7) 7단계에서는 최종적으로 6단계에서 구한 인화성 가스의 성분별 수정된 폭발하한계를 사용하여 식 (5-1)을 통해 구한다. 계산 결과는 다음과 같다. 즉, 혼합물질의 폭발하한계는 48.04 (vol%)이다.

$$LEL_{mix} = 100 / (2/3.58 + 6/3.94) = 48.04 \text{ (vol\%)}$$

산화성 가스가 포함된 혼합가스의 폭발하한계(LEL) 산정 예

1. 혼합가스의 구성성분

H₂(5%), CH₄(1%), CO(3%), CO₂(10%), O₂(4%), N₂(77%)로 구성되어 있다.

2. ISO 10156 기준을 사용한 혼합가스의 폭발하한계 산정과정

(1) 1단계에서는 파악된 자료를 정리한다. 제공된 자료와 <부록 1>부터 <부록 4>까지의 자료를 참조하여 다음의 표와 같이 자료를 정리한다.

<표 2> 산화성 가스를 포함한 혼합가스의 물성치 정리

구분		기호	단위	인화성 가스			불활성 및 산화성 가스			비고
				H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	
혼합물질의 물분율	인화성 가스	A_i	mole%	5	1	3				주어진 값
	불활성 가스	B_i	mole%				10	4	77	주어진 값
공기 중에서 인화성이 되지 않는 인화성 가스의 최대 함유량		T_a	mole%	5.5	8.7	15.2				<부록 2>
폭발하한계		LEL	vol%	4	4.4	10.9				<부록 2>
한계산소농도		LOC		4.3	11	4.7				<부록 4>
질소등가계수		K_i		-	-	-	1.5		1	<부록 1>
산소등가계수		C_i		-	-	-	-	1	-	<부록 3>

(2) 2단계에서는 일반화계수(F)를 구한다. 불활성 가스인 CO₂와 N₂의 일반화계수(F)를 식 (5-7)을 사용하여 구하면 다음과 같다.

$$F = 1 / [1 + \sum (K_k - 1) B_k]$$

$$= 100 / [100 + (1.5 - 1) \times 10 + (1 - 1) \times 77] = 0.952$$

(3) 3단계에서는 식 (5-8)을 사용하여 일반화계수를 곱한 인화성 성분의 함량의 합을 구한다. 혼합물 중 인화성 성분(H₂, CH₄, CO)에 일반화계수(F)를 곱하여 더한 값을 구하면 다음과 같다.

$$A_{nf} = (5 + 1 + 3) \times 0.952 = 8.6 \text{ mol\%}$$

- (4) 4단계에서는 인화성 가스(H_2 , CH_4 , CO) 만으로 구성된 혼합물의 폭발하한계 (LFL'_M)를 식 (4-9)를 사용하여 구하면 다음과 같다.

$$LFL'_M = (5 + 1 + 3) / (5/4 + 1/4.4 + 3/10.9) = 5.14 \text{ vol\%}$$

- (5) 5단계에서는 혼합물의 최대 인화성 가스 농도($T_{ci(mix)}$)를 식 (5-9)를 사용하여 구한다. 주어진 데이터를 사용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{ci(mix)} &= \sum A_i / \sum \frac{A_i}{(T_{ci})_i} \\ &= (5 + 1 + 3) / (5/5.5 + 1/8.7 + 3/15.2) = 9 / (0.91 + 0.11 + 0.20) = 9 / 1.22 = 7.37 \end{aligned}$$

- (6) 6단계에서는 식 (5-10)을 사용하여 산소당량농도(x_{O_2})를 구한다. 질소 이외의 다른 불활성 가스가 사용될 경우의 산소당량농도는 산소농도에 일반화계수(F)를 곱하여 구하고, 결과는 다음과 같다.

$$x_{O_2} = O_2(\text{mol\%}) \times F = 4\% \times 0.952 = 3.8 \text{ mol\%}$$

- (7) 7단계에서는 식(5-11)을 사용하여 산소농도를 고려하여 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스의 최대 농도($T_{ci,F}$)를 산정하고, 그 결과는 다음과 같다.

$$T_{ci,F} = T_{ci} \times (1 - x_{O_2} / 21\%) = 7.37(1 - 3.8/21) = 6.04\%$$

- (8) 8단계에서는 혼합물의 인화성 여부를 판단한다. 3단계에서 구한 일반화된 인화성 성분의 합계인 $A_{nf} > LFL_{mix}$ 이고, $A_{nf} > T_{ci(flamox)}$ 이면, 인화성 가스로 판정된다.

따라서, $A_{nf} = 8.6 > LFL_{mix} = 5.14$ 이고, $A_{nf} = 8.6 > T_{ci(flamox)} = 6.04$ 이므로 혼합가스는 인화성 가스이다.

- (9) 9단계에서는 식 (5-12)를 사용하여 산화제 능력(OP, Oxidizing power)을 계산한다. 본 예에는 산소 외의 다른 산화제가 없으므로 해당사항이 없다.

- (10) 10단계에서는 혼합물의 한계산소농도(LOC_{mix})를 구한다. 식 (5-13)를 사용하여 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} LOC_{mix} &= \sum A_i / \sum A_i / LOC_i \\ &= (5 + 1 + 3) / (5/4.3 + 1/11 + 3/4.7) = 4.76 \end{aligned}$$

- (11) 11단계에서는 혼합물의 폭발성 여부를 판단한다. 판단기준은 혼합물의 한계산소농도(LOC_{mix})가 산소당량농도(x_{O_2})보다 작으면 폭발성 물질로 판단된다. 따라

서 $LOC_{mix} = 4.76 > x_{O_2} = 3.8$ 이므로 이 혼합물은 폭발성 물질이 아니다.

- (12) 12단계에서는 식 (5-14)를 사용하여 불활성가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값(K)을 구한다. 평균값은 다음과 같다.

$$K = \frac{\sum K_i B_i}{\sum B_i}$$

$$= (10 \times 1.5 + 4 \times 1 + 77 \times 1) / (10 + 4 + 77) = 1.055$$

- (13) 13단계에서는 식 (5-6)을 사용하여 LEL 계수(C_L)를 구한다. 산정 결과는 다음과 같다.

$$C_L = \frac{100 - L'_M - (1 - K) \times \sum_{i=1}^p B_i / \sum_{i=1}^n A_i \times L'_M}{100 - L'_M}$$

$$C_L = \frac{100 - 5.14 - (1 - 1.055) \times (10 + 4 + 77) / (3 + 5 + 1) \times 5.14}{100 - 5.14} = 1.0303$$

- (14) 14단계에서는 인화성 가스의 성분별 수정된 폭발하한계(LFL')를 구한다. 성분별 수정된 폭발하한계는 성분별 폭발하한계에 13단계에서 구한 LEL 계수(C_L)를 곱하여 얻으며, 다음과 같다.

$$LFL'_{H_2} = C_L \times LFL_{H_2} = 1.0303 \times 10.9 = 11.23 \text{ vol\%}$$

$$LFL'_{CH_4} = C_L \times LFL_{CH_4} = 1.0303 \times 4.4 = 4.53 \text{ vol\%}$$

$$LFL'_{CO} = C_L \times LFL_{CO} = 1.0303 \times 10.9 = 11.23 \text{ vol\%}$$

- (15) 마지막으로 15단계에서는 식 (5-2)를 사용하여 수정된 혼합물의 폭발하한농도(LEL_{mix})를 구한다. 산정 결과는 다음과 같다.

$$LEL_{mix} = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{LEL_i}$$

$$= 100 (3/11.23 + 1/4.53 + 5/4.12) = 58.78 \text{ vol\%}$$