

카본제조 부생가스 배출 안전성에 관한 연구

주종율* · 정필훈** · 김상길** · 이성은*

*호서대학교 소방방재학과 · **승실사이버대학교 산업안전공학과

A Study on the Safety of Carbon Manufacturing By-product Gas Emissions

Joo, Jong-Yul* · Jeong Phil-Hoon** · Kim, Sang-Gil** · Sung-Eun, Lee*

*Department of Fire and Disaster Prevention, Engineering

**Department of Industrial Safety Engineering, Korea Soongsil Cyber University

Abstract

In the event of an emergency such as facility shutdown during process operation, the by-product gas must be urgently discharged to the vent stack to prevent leakage, fire, and explosion. At this time, the explosion drop value of the released by-product gas is calculated using ISO 10156 formula, which is 27.7 vol%. Therefore, it does not correspond to flammable gas because it is less than 13% of the explosion drop value, which is the standard for flammable gas defined by the Occupational Safety and Health Act, and since the explosion drop value is high, it can be seen that the risk of fire explosion is low even if it is discharged urgently with the vent stock.

As a result of calculating the range of explosion hazard sites for hydrogen gas discharged to the Bent Stack according to KS C IEC 60079-10-1, 23 meters were calculated. Since hydrogen is lighter than air, electromechanical devices should not be installed within 23 meters of the upper portion of the Bent Stack, and if it is not possible, an explosion-proof electromechanical device suitable for type 1 of dangerous place should be installed. In addition, the height of the stack should be at least 5 meters so that the diffusion of by-product gas is facilitated in case of emergency discharge, and it should be installed so that there are no obstacles around it.

Keywords : Tail Gas Lower Explosion Limit, Explosive Hazardous Areas

1. 서론

산업재해보상보험법 적용사업체에서 발생한 산업재해 중 산업재해보상보험법에 의한 업무상 사고 및 질병으로 승인을 받은 사망 또는 4일이상 요양을 요하는 재해를 조사하여 고용노동부에서 발표한 2022년 산업재해현황분석 결과를 보면 전체 재해자는 130,348명(사망2,223명, 부상 106,038명, 업무상질병 요양자 21,785명)중 제조업 31,554명, 건설업 31,245명이었다. 화재폭발과열은 505명 중 제조업 231명, 건설업 103명 순으로 제조업이 전체 45.75%에 달하고 있어 제품 생산과정에서 화재폭발

사고를 예방을 하여야 전체사고가 감소하는 효과를 얻을 수 있을 것이다.[1]

선행연구로는 카본블랙의 제조공정에서 발생하는 사고를 예방하기 위해 2006년 오규형,이성은“카본블랙 제조 부생가스의 폭발 특성연구”에서는 폭발특성 실험 결과 폭발압력은 최대 $5.4kg/cm^2$ 이었고 평균 폭발압력 상승속도는 초당

$39.2kg/cm^2$ 였다. 이러한 결과들은 부생가스의 취급 및 이용에 따른 폭발이나 화재 사고시 공정과 시설 등에 치명적인 손상을 입힐 수 있으므로 가스폭발 방지 및 방호조치가 필요하다고 제시하였다.[2]

†Corresponding Author : Seong-Eun, Lee, Department of Fire and Disaster Prevention, HOSEO UNIVERSITY, 20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, E-mail: lse@hoseo.edu

Received February 19, 2024; Revision March 07, 2024; Accepted March 23, 2024

2023년 주중울,이성은“카본블랙 제조공정의 안전성 향상에 관한 연구”에서는 건조기에서 부생 가스가 점화과정에서 폭발한 사고 원인과 예방대책 및 공정트러블 등 비상운전 시에는 생성된 부생가스를 안전한 곳으로 대기 배출하여 폭발사고 예방을 제시하였다.[3]

2020년 유원중,김병직“폭발위험장소 설정시 인화성액체 누출물의 최적 산정방법 연구”에서는 국제표준인 IEC 60079-10-1을 인용한 한국산업표준 KS C 60079-10-1이 널리 사용되고 있었으나 제안된 액체 방출률 방정식은 기화량 계산 방법을 명확히 제시하지 못하고 있어 계산 과정이 복잡하거나 과도하거나 부족한 결과를 유도하고 있어서 이러한 점을 개선하기 위해 최적의 액체 방출률 계산 방법을 제안하고 계산 과정을 단순화하여 실용적이고 합리적인 방법을 제안하였다.[4] [5]

본 연구에서는 카본블랙의 제조 시 정상운전에서는 카본블랙 제조 과정에서 부생되는 테일 가스(Tail Gas)가 대기로 직접 배출되지 않도록 보일러, 건조 시설, 덕트 버너 가열로에서 소각한 후 대기오염 처리설비에서 적정하게 처리한 후 배출하도록 구성하여 운전 하지만 공정트러블 등 비상운전 시에는 생성된 테일 가스를 비상배출관(Emergency line)을 통하여 벤트스택(Vent Stack)으로 안전하게 배출하여야 한다. 벤트스택으로 배출되는 부생 가스에는 인화성가스 21%, 질소 및 수증기 등 불연성가스 81%로 함유되어 있기 때문에 혼합물질의 폭발하한계(LEL: Lower Explosion Limit)를 산정하였고, 부생가스 중 인화성 가스 함량이 가장 많은 수소에 대한 폭발위험장소범위를 산정하여 공정 운전시 폭발사고를 예방하기 위한 방법을 제시하고자 한다.

2. 부생가스 폭발하한계 산정

인화성 가스 또는 증기가 포함된 혼합가스에 불연성 가스 또는 불연성 가스와 산화제가 함유된 경우 혼합가스의 폭발성 여부를 판정하고 폭발하한계를 산정하고자 한다.

2.1 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) KS B ISO 10156의 계산식을 사용하여 구한 폭발하한계는 일반적으로 불활성 가스의 함유량이 높

을수록 실험을 통해 구하는 값 보다 작게 산정되기 때문에 보수적인 결과가 제시된다.[6] [7]

2.2 혼합가스의 폭발하한계 산정

2.2.1 르샤틀리에 공식 적용방법

혼합가스의 폭발하한계(LEL)를 구하기 위해 르샤틀리에 공식을 적용할 때 고려할 사항은 아래와 같다.

- (1) 인화성이 있는 혼합가스에는 적용할 수 있지만, 잠재적으로 폭발성인 혼합가스에는 적용할 수 없다.
- (2) 부분적인 할로겐화 탄화수소(Partially halogenated hydrocarbon) 또는 공기 이외의 산화제(Oxidizer)에 대해서는 적용 할 수 없다.
- (3) 인화성 가스, 질소 및 공기의 혼합가스에 적용되고 질소 외의 불활성 가스를 포함하는 경우에는 적용 할 수 없다.

※르샤틀리에 공식은 식(1)과 같다.[6]

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

LEL_{mix} : 혼합물질의 폭발하한계

A_i : 혼합물 중의 성분별 몰분율(mol%)

L_i : 성분별 폭발하한계

2.2.2 ISO 10156 계산식 적용방법

- (1) 질소와 공기 이외의 불연성 가스를 포함하는 혼합가스에 적용된다.
- (2) 혼합가스의 폭발하한계를 계산하는 방법은 아래와 같이 7단계로 진행된다.

1단계: 혼합가스의 물성치를 정리

- ① 인화성 가스: 폭발하한계, 몰분율, T_{ci}
(질소와 혼합될 때 공기중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스의 최대 함유량 mole%)
- ② 불연성 가스: 몰분율, 질소등가계수(K_i)

2단계: 인화성 가스의 당량 함유량(A_i') 계산은 식(2)를 사용하여 계산한다.

$$A_i' = A_i / [\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{i=1}^p K_i B_i] \tag{2}$$

A_i' : 혼합가스 중 i번째 인화성 가스의 당량 함유량 (mole%)

A_i : 혼합가스 중의 i번째 인화성 가스의 몰분율 (mole%)

B_i : 혼합가스 중의 i 번째 불활성 가스의 몰분율 (mole%)

K_i : 질소와 비교한 불활성 가스의 질소등가계수. 화학식 중에 원자가 3개이상인 물질의 경우에는 1.5를 적용 한다.

n : 혼합가스 중에 있는 인화성 가스의 총 개수

p : 혼합가스 중에 있는 불활성 가스의 총 개수

3단계: 혼합가스의 폭발성 여부를 판단은 식(3)을 사용하여 구한다. 값이 1보다 크면 인화성가스, 1보다 작으면 비인화성가스로 판단한다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{T_{ci}} \quad (3)$$

혼합가스의 인화성 가스(또는 증기)에 대해 2단계에서 구한 값과 주어진 T_{ci} 값을 사용하여 구한다.

T_{ci} : 질소와 혼합될 때 공기 중에서 인화성이 아닌 상태가 되는 인화성 가스 i 의 최대함유량(mol%)

4단계: 인화성 성분 만의 혼합물질의 폭발하한계(L'_M)를 식(4)를 사용하여 계산한다.

$$L'_M = L'_{mix} = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{L_i} \quad (4)$$

A_i : 혼합물 중의 성분별 몰분율(mole%)

L_i : 성분별 폭발하한계

5단계: 불활성 가스의 질소등가계수(K_i)의 평균값은 식(5)를 사용하여 계산한다.

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

K : 몰분율에 따른 무게 기준의 불활성가스의 질소등가계수(K_i) 평균값이고 혼합물질에서 공기 또는 산소는 불활성 가스로 고려되고 K 의 값은 1로 간주된다.

K_i : 질소와 비교한 불활성 가스 질소등가계수.

B_i : 혼합가스 중의 i 번째 불활성 가스 몰분율(mole%)

6단계: 폭발하한계(L'_i)은 보정계수를 반영한 식(6)를 사용하여 계산한다.

$$L'_i = C_L \times L_i \quad (6)$$

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

L'_M : 인화성 성분만 포함된 혼합물질의 폭발하한계 (vol%)

C_L : 폭발하한계의 수정계수

7단계: 수정된 폭발하한계를 사용하여 식(7)을 사용하여 성분별 폭발하한계를 구한다.

$$LEL_{mix} = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{L_i} \quad (7) [7] [8]$$

2.3 부생가스 폭발하한계 산정

2.3.1 부생가스 구성성분

Tail Gas의 구성성분은 <표 1>과 같이 인화성 가스와 질소, 공기 이외의 불연성 가스를 포함하는 혼합가스이다.

<Table 1> Tail Gas Components

Chemical name	Content (%)
Carbon dioxide	2.25
Acetylene	0.21
Hydrogen	10.04
Nitrogen	41.72
Methane	0.26
Carbon monoxide	10.52
Water	35.00

2.3.2 르샤틀리에 공식 적용방법

르샤틀리에(Le Chatelier) 식(1)을 사용하여 계산한다.

$$LEL_{mix} = 100 / 21.7137 = 4.605$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{L_i} = \frac{0.21}{21.03} \times 100 + \frac{10.04}{21.03} \times 100 +$$

$$\frac{10.52}{21.03} \times 100 + \frac{0.26}{21.03} \times 100$$

$$= 21.7137$$

2.3.3 ISO 10156 계산식 적용방법

(1) 1단계: 혼합가스의 물성치는 <표 2>를 사용하여 정리한다.

<Table 2> mixed gas properties

NO	Symbol	Unit	flammable gas			
			C ₂ H ₂	H ₂	CO	CH ₄
LFL	LEL	vol%	2.3	4	10.9	4.4
인화성	A_i	mole%	0.21	10.04	10.52	0.26
불활성	B_i	mole%	-	-	-	-

NO	Symbol	Unit	flammable gas			
			C ₂ H ₂	H ₂	CO	CH ₄
질소등가계수	K_i		-	-	-	-
인화성이 되지 않은 인화성 가스의 최대 함유량	T_{ci}	mole%	3	5.5	15.2	8.7

NO	Symbol	Unit	incombustible gas		
			CO ₂	N ₂	H ₂ O
LFL	LEL	vol%	-	-	-
인화성	A_i	mole%	-	-	-
불활성	B_i	mole%	2.25	41.72	35
질소등가계수	K_i	-	1.5	1	-
인화성이 되지 않은 인화성 가스의 최대 함유량	T_{ci}	mole%	-	-	-

(2) 2단계: 인화성 가스의 당량 함유량(A'_i) 계산은 식(2)를 사용하여 계산한다.

- ① $A'_{(C_2H_2)} = 0.21 / [(0.21 + 10.04 + 10.52 + 0.21) + (1.5 \times 2.25 + 1 \times 41.72 + 1 \times 35)] \times 100 = 0.21 mol\%$
- ② $A'_{(H_2)} = 10.04 / [(0.21 + 10.04 + 10.52 + 0.21) + (1.5 \times 2.25 + 1 \times 41.72 + 1 \times 35)] \times 100 = 9.93 mol\%$
- ③ $A'_{(CO)} = 10.52 / [(0.21 + 10.04 + 10.52 + 0.21) + (1.5 \times 2.25 + 1 \times 41.72 + 1 \times 35)] \times 100 = 10.4 mol\%$
- ④ $A'_{(CH_4)} = 0.21 / [(0.21 + 10.04 + 10.52 + 0.21) + (1.5 \times 2.25 + 1 \times 41.72)] \times 100 = 0.21 mol\%$

(3) 3단계: 혼합물질의 폭발성 여부를 판단은 식(3)을 사용하여 계산한다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{A'_i}{T_{ci}} = \left(\frac{0.21}{3} + \frac{9.93}{5.5} + \frac{10.4}{15.2} + \frac{0.21}{8.7} \right) = 2.58 > 1$$

값이 1보다 크므로 인화성 가스이다.

(4) 4단계: 인화성분만의 혼합물질의 폭발하한계(L'_M)를 식(4)를 사용하여 계산한다.

$$L'_M = \frac{100}{\left(\frac{1}{2.3} + \frac{47.74}{4} + \frac{50.11}{10.9} + \frac{1.24}{4.4} \right)} = 5.8 vol\%$$

(5) 5단계: 불활성 가스의 질소등가계수 평균값은 식(5)를 사용하여 계산한다.

$$K = \frac{(2.25 \times 1.5 + 41.72 + 35)}{2.25 + 41.72 + 35} = 1.026$$

(6) 6단계: 폭발하한계(L'_i)은 보정계수를 반영한 식(6)를 사용하여 계산한다.

$$L'_{C_2H_2} = \frac{100 - 5.8 - (1 - 1.026) \times \frac{78.97}{21.03} \times 5.8}{100 - 5.8} \times 2.3 = 2.31\%$$

$$L'_{H_2} = \frac{100 - 5.8 - (1 - 1.026) \times \frac{78.97}{21.03} \times 5.8}{100 - 5.8} \times 4 = 4.02\%$$

$$L'_{CO} = \frac{100 - 5.8 - (1 - 1.026) \times \frac{78.97}{21.03} \times 5.8}{100 - 5.8} \times 10.9 = 10.96\%$$

$$L'_{CH_4} = \frac{100 - 5.8 - (1 - 1.026) \times \frac{78.97}{21.03} \times 5.8}{100 - 5.8} \times 4.4 = 4.43\%$$

(7) 7단계: 인화성 가스의 성분별 수정된 폭발하 한계를 식(7)을 사용하여 재계산한다.

$$L'_M = \frac{100}{\frac{0.21}{2.31} + \frac{10.04}{4.02} + \frac{10.52}{10.96} + \frac{0.26}{4.43}} = 27.7 vol\%$$

혼합물질의 폭발하한계는 27.7vol%이다. 산업안전보건법 시행령 별표13 인화성 가스란 인화하한계 농도의 최저한도가 13%이하 표준압력(101.3kPa)에서 20°C에서 가스 상태인 물질이다. Tail Gas 폭발하한계는 27.7%이므로 산업안전보건법의 인화물질의 폭발하한값보다 훨씬 높음을 알 수 있다.

3. 수소가스 폭발범위 산정

Tail Gas 비상배출시 Vent Stack에서의 폭발위험장소를 산정하여 방폭형 전기기계기구의 사용 등을 검토하고자 한다. 대상 성분은 Tail Gas 내 가연성 성분 함유량이 가장 많은 수소에 대하여 검토하고자 한다.

3.1 수소의 물리·화학적 특성

3.1.1 인화성 물질 목록 및 특성

폭발위험장소를 선정하기 위하여 수소의 인화성 물질, 휘발성, 인화하한값, 방폭특성 값은 <표 3>과 같다.

<Table 3> List of flammable substances and properties

flammable substance				
Molecular formula	Molecular weight (kg/kmol)	specific gravity	adiabatic expansion Polytropic index	Auto ignition temperature
H ₂	2	0.069	1.400	500℃
Volatility		Lower flam. limit		
boiling point	vapor pressure (25℃)	(vol%)	(kg/m ³)	
-253℃	1240000mmHg	4	0.003	
Explosion proof characteristics				
Group Equipment		Classe de temperatures		
IIC		T1		

- (1) 방폭기기의 가스그룹은 <표 4>와 같으며 수소 최대안전틈새(MESG)이 0.5mm미만이므로 그룹 IIC에 해당한다. [9]

<Table 4> maximum experimental safe gap

maximum experimental safe gap(mm)	MESG≥ 0.9mm	0.5mm<MESG<0.9	MESG≤0.5mm
Gas	CH ₄ , C ₂ H ₆ , CS ₂ , C ₃ H ₈	C ₂ H ₄ , HCN	H ₂ , C ₂ H ₂
Equip. group	IIA	IIB	IIC

- (2) 방폭기기 온도등급은 <표 5>와 같으며 수소가스의 발화온도는 500℃이므로 T1에 해당한다. [9]

<Table 5> Temperature rating

Temperature class	Maximum Surface Temperature of Electrical Appliances(℃)	Range of auto-ignition temperature(℃)
T1	450Less than	More than 450
T2	300Less than	300More than ~ 450Less than
T3	200Less than	200More than ~ 300Less than
T4	135Less than	135More than ~ 200Less than
T5	100Less than	100More than ~ 135Less than
T6	85Less than	85More than ~ 100Less than

3.2 누출원(source of release) 목록

폭발위험장소를 선정하기 위하여 수소의 누출원(위치, 누출등급, 누출률, 누출특성), 인화성 물질(운전온도, 운전압력, 물질상태), 환기(형태, 희석등급, 이용도)는 <표 6>과 같다.

<Table 6> Temperature rating

source of leakage			
Location	grade of release	release rate (kg/s)	release characteristics (m ³ /s)
Stack	Primary	0.0913	29.2
flammable substances			
Operating temperature	Operating pressure		state
80℃	0.0001kg/cm ²		Gas
Ventilation			
Form	outdoor wind speed	Dilution rating	availability
natural ventilation (Outdoor)	2	Medium dilution	Good

3.2.1 누출등급(grade of release)

3등급(연속누출, 1차누출, 2차누출)으로 구분된다.

- (1) “연속 누출등급(Continuous grade of release)”이라 함은 연속, 빈번 또는 장기간 발생 할 것으로 예상되는 누출을 말한다.
 (2) “1차 누출등급(Primary grade of release)”이라 함은 정상작동 중에 주기적 또는 빈번하게 발생할 수 있을 것으로 예상되는 누출을 말한다.
 (3) “2차 누출등급(Secondary grade of release)”이라 함은 정상작동 중에는 누출되지 않고 만약 누출된다 하더라도 아주 드물거나 단시간 동안의 누출을 말한다.

따라서 Tail Gas는 스택으로 배출되기 때문에 1차 누출 등급에 해당된다. [5]

3.2.2 누출률(release rate)

식(8)을 사용하여 계산한다.

$$\begin{aligned}
 \text{누출률}(kg/s) &= \frac{\text{누출량}(m^3)}{\text{시간}(s)} \times \text{밀도}(kg/m^3) \quad (8) \\
 &= \frac{4020m^3}{3600s} \times 0.08kg/m^3 \\
 &= 0.0913kg/s
 \end{aligned}$$

수소가스 밀도는 식(9)를 사용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{밀도}(\rho_g) &= \frac{P_a M}{RT_a} \quad (9) \\ &= \frac{101325 \times 2}{8314 \times 298} = 0.08 \end{aligned}$$

※반응기 운전정지시 배출해야 할 가스량은 4020m³이다.

3.2.3 누출 특성(release characteristics)

식(10)을 사용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{누출특성}(m^3/s) &= \frac{W_g}{\rho_g(\kappa \times LFL)} \quad (10) \\ &= \frac{0.0913}{0.08(1 \times 3.8/100)} = 29.2m^3/s \end{aligned}$$

※κ: LFL안전계수(일반적으로 0.5~1.0값), 폭발 하한값을 알고 있을 경우 1을 적용한다.

3.2.4 환기형태

자연환기, 강제 전체환기, 국소배기로 구분되며 자연환기에 해당된다.[5]

3.2.5 옥외 풍속

옥외에서의 환기 개념은 엄격하게 적용할 수 없으며 그 위험은 누출원의 상태, 가스의 특성 및 대기의 공기 흐름에 관련된다. 개방공간에서 공기 이동은 대부분이 그 지역에서 발생할 수 있는 폭발성가스분위기를 분산시키기에 충분하다. 옥외 상황에 대한 풍속 지침은 <표 7>과 같다. 스택의 높이는 50미터 장애물이 없으므로 풍속은 2m/s가 된다.[5]

<Table 7> outdoor wind speed

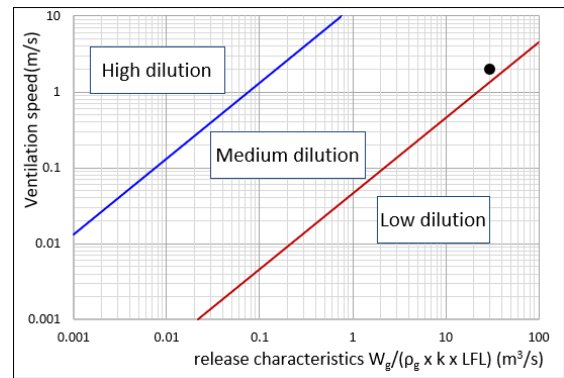
NO	lighter-than-air gas	a gas heavier than air
altitude ≤ 2m (Obstacle X)	0.5	0.3
2m < altitude ≤ 5m (Obstacle X)	1.0	0.6
5m < altitude (Obstacle X)	2.0	1.0
altitude ≤ 2m (Obstacle O)	0.5	0.15
2m < altitude ≤ 5m (장애물 O)	0.5	0.3
5m < altitude (Obstacle O)	1.0	1.0

3.2.6 희석등급

희석등급은 다음과 같이 3가지로 구분한다.

- (1) 고흩석(High dilution) 누출원 근처에서의 농도를 순간적으로 감소시키고 누출이 중단 된 후 사실상 지속되지 않는다.
- (2) 중희석(Medium dilution) 누출이 진행되는 동안에는 누출농도를 안정된 상태로 제어할 수 있고, 누출이 중단된 후에는 더 이상 폭발성 가스분위기가 지속되지 않는다.
- (3) 저희석(Low dilution) 누출이 진행되는 동안에 상당한 농도로 지속되고 누출이 정지된 후에도 인화성 분위기가 상당기간 동안 지속된다.[5]

누출특성값이 29.2m³/s이며 환기속도는 2m/s일 때 교차점은 [그림 1]과 같이 표시되며 희석등급은 중희석이 된다.



[Figure 1] Dilution rating chart

3.2.7 환기이용도

환기 이용도는 폭발성 가스의 존재 또는 형성에 영향을 미치므로, 환기 이용도는 위험장소의 중별을 결정할 때 고려한다. 환기 이용도의 3가지 등급은 다음과 같다.

- (1) 우수(Good) 환기가 실제적으로 지속되는 상태이다.
 - (2) 양호(Fair) 환기의 정상작동이 지속됨이 예측되는 상태, 빈번하지 않은 단기간 중단은 허용된다.
 - (3) 미흡(Poor) 환기가 양호 또는 우수 기준을 충족하지 않지만, 장기간 중단이 예상되지 않는 상태이다.
- 스택 높이 50미터이며 장애물이 없기 때문에 환기이용도는 우수가 된다.

누출등급과 환기유효성에 의한 폭발위험장소의 중별은 <표 8>과 같으며 누출등급은 1차, 환기유효성은 Good이므로 zone1이 된다. [5]

<Table 8> Leakage Classes and Explosion Hazardous Places

NO	medium dilution		
	Good	Fair	Poor
Continuous	zone 0	zone 0+ zone 1	zone 0+ zone 1
Primary	zone 1	zone 1+ zone 2	zone 1+ zone 2
Secondary	zone 2	zone 2	zone 2

4. 폭발위험장소

4.1 폭발위험장소의 범위 추정

인화성 가스가 발생할 수 있는 폭발위험장소의 범위는 누출률과 가스특성, 누출형상 및 주위의 기하학적 구조 등 다양한 요소들에 의해 결정되며, 다음 [그림 2] 중 하나에 속하는 누출특성에 따라 적절한 곡선을 선택한다.

(1) 고속의 제트

방해받지 않는 고속제트 누출을 말한다.

(2) 저속이 확산

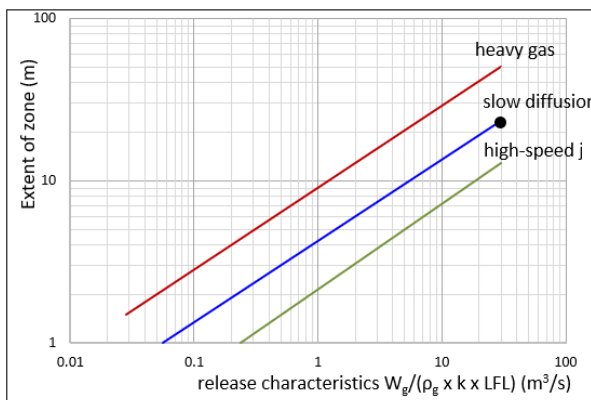
저속의 확산 누출 또는 누출형상이나 주위 표면의 충돌로 인한 속도 손실 제트 누출을 말한다.

(3) 무거운 가스

수평표면에 따라 확산되는 무거운 가스 또는 증기를 말한다.[8]

Tail Gas은 배출압력이 $0.0001kg/cm^2$ 이므로 저속의 확산에 해당된다.

Tail Gas 누출특성 가로축 값 $29.2m^3/s$ 에 해당하는 저속의 확산에 해당하는 점을 표기하면 세로축의 폭발위험장소 범위는 [그림 2]와 같이 23미터가 된다.



[Figure 2] Explosion hazard range estimation chart

5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 공정트러블 등 비상운전 시 부생가스는 누출, 화재, 폭발을 방지하기 위하여 Vent Stack으로 긴급하게 비상 방출하여야 한다. 방출되는 부생가스에는 인화성가스 21%, 질소 및 수증기 등 불연성가스 79%가 함유되어 있기 때문에 폭발하한값을 ISO 10156 식으로 사용하여 27.7vol%이다. 산업안전보건법에서 인화성 가스의 기준인 폭발하한값이 13%이하이기 때문에 인화성 가스에 해당하지 않으며 폭발하한값이 높기 때문에 벤트스택으로 긴급배출하여야 화재폭발위험이 극히 낮아진다.

2. Vent Stack으로 긴급배출되는 부생가스의 인화성가스 함유량 중 수소가스가 가장 많고 폭발하한값이 가장 낮은 수소가스의 폭발위험장소범위를 KS C IEC 60079-10-1으로 산정한 결과 23미터가 산정되었다. 수소는 공기보다 0.007배 가볍기 때문에 Vent Stack으로 배출시 상부로 급격히 확산하기 때문에 상부 23미터이내에는 전기기계기구를 설치하지 않아야 하며 불특이 설치할 경우에는 위험장소 1종에 적합한 방폭형전기기계기구를 설치하여야 한다. 또한 스택의 높이는 부생가스 긴급배출시 확산이 원활히 이뤄지도록 5미터 이상으로 하고 주위에 장애물이 없도록 설치하여야 한다. 향후 이 연구에서 얻은 부생가스의 폭발하한값이 실제 폭발실험에 얻은 폭발하한값과 일치 유무를 검증하는 실험이 필요하다.

6. References

- [1] 2022년 Analysis of Industrial Accident Status (2023), https://www.moel.go.kr/policy/policydata/view.do?bbs_seq=20231201612
- [2] K. H. Oh, S. E. Lee(2006), A Study on the Explosion Characteristics of by Product Gas of Carbon Black Manufacturing Process.
- [3] J. Y. Joo, S. E. Lee(2023), A Study on the Safety Improvement of Carbon Black Manufacturing Process.
- [4] W. J. Yu, B. J. Kim, J. W. Lee(2020), A Study on the Optimum Estimation of Flammable Liquid Release Rate for the Classification of Hazardous Area.
- [5] KS C IEC 60079-10-1 Explosive atmospheres-Part 10-1: Classification of areas-Explosive gas atmospheres.

- [6] [KOSHA Guide D-22-2012(2012) Technical Paper on the Estimation of Explosive Limits of Combustible Gas and Steam Mixtures.
- [7] KOSHA Guide P-179-2022(2022) Technical Guidelines for Determining the Explosivity of Mixed Gas and Calculating the Explosive Lower Limit.
- [8] 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.
- [9] KS C IEC 60079-20-1(2010) Explosive atmospheres - Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification - Test methods and data.

저자 소개



주 중 율

호서대학교 소방방재학과 박사과정
 현 숭실사이버대학교 산업안전공학과 겸임교수
 관심분야: 방재공학, 방폭공학, 화공안전, 전기 안전, 정전기 제거 장치 등



정 필 훈

부경대학교 안전공학과 박사
 현 숭실사이버대학교 산업안전공학과 전임교수
 관심분야: 안전공학, 산업안전, ISO45001, 전기안전, 화공안전, 소방안전, 반도체 제조공정, 정전기 제거 장치 등



김 상 길

한국교통대학교 안전공학과 박사
 현 숭실사이버대학교 산업안전공학과 겸임교수
 관심분야: 방폭공학, 화공안전, 정전기 사고 예방 등



이 성 은

호서대학교 소방방재학과 박사
 현 호서대학교 소방방재학과 교수
 관심분야: 위험물, 소화약제, 화재공학, 방폭공학, 안전 공학 등