

위험지역에서의 폭발방지를 위한 위험장소 구분에 관한 연구

나완석*

*한국폴리텍대학

e-mail:naws500@kopo.ac.kr

A Study on Hazardous Area Classification to Prevent Explosions

Wan-Suk Na*

*Dept. of Operation and Chemical Process, Korea Polytechnics

요 약

This study examines the causes of recurring industrial explosion accidents and underscores the role of hazardous area classification in preventing them. By comparing KS C IEC 60079-10-1 (2012 vs. 2015), the research highlights improved leakage-rate models, including the introduction of evaporative pool calculations, Cd and Z factors, and a 2% evaporation assumption. These refinements allow more precise hazard zone delineation in industries such as petrochemicals, printing, and coatings. The study concludes that adopting updated KS standards, expanding hands-on training, and fostering collaboration among government, industry, and academia are essential to strengthen industrial safety and establish a sustainable safety culture.

1. 서 론

화학물질은 산업 발전의 핵심 자원으로, 원료를 가공하여 고부가가치 제품을 생산하는 데 필수적인 역할을 해왔다. 그러나 이러한 화학물질은 본질적으로 유해성과 폭발성을 내포하고 있어, 현장에서의 관리 부실은 곧 중대재해로 이어지고 있다. 실제로 고용노동부 산업재해 통계에 따르면 최근 10년간 화재·폭발 사고로 인한 산업재해자는 매년 평균 200명 이상 발생하였으며, 이 중 사망사고도 꾸준히 보고되고 있다. 2022년 기준 국내 산업재해 중 화재·폭발 관련 사고는 전체 사고의 약 3.1%를 차지하였고, 치명률은 일반 재해 대비 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 특히 인화성 액체와 가스는 석유화학, 정유, 도료, 반도체 등 다양한 공정에서 널리 활용되지만, 위험성에 대한 인식 부족과 법규 미준수로 인해 대기업뿐 아니라 중소규모 사업장에서도 사고가 지속되고 있다. 이러한 사고의 주요 원인으로는 폭발위험장소를 명확히 설정하지 않거나, 방폭 전기·기계기구를 적절히 사용하지 않는 점이 지적된다.

폭발위험장소의 구분은 가연성 가스·증기가 존재하는 구역에서 전기·기계기구를 올바르게 설치하고 운용하기 위한 핵심 절차이다. 산업안전보건법은 인화성 액체·가스·고체를 제조·취급하는 구역의 경우 한국산업표준(KS) 기준에 따라 폭발위험장소를 설정

하도록 규정하고 있다. 따라서 해당 구역에서 사용되는 전기·기계기구는 가스·증기·분진 특성에 부합하는 방폭 성능을 갖추어야 하며, 이러한 성능이 정상적으로 유지되도록 관리하는 것이 의무화되어 있다. 다시 말해, 폭발위험장소 구분 결과에 따라 사업장의 안전 수준이 좌우된다.

우리나라의 폭발위험장소 구분은 2011년 산업안전보건법 개정 이후 KS C IEC 60079-10-1:2012 기준을 바탕으로 운영되어 왔다. 그러나 2015년 국제전기위원회(IEC)가 제2판을 발표하였고, 국가기술표준원은 이를 2017년 국내 KS 기준으로 최종 반영하였다. 이에 따라 인화성 물질을 취급하는 제조업 사업장은 KS C IEC 60079-10-1:2015 제2판을 의무적으로 준수해야 하며, 이를 통해 보다 정밀한 폭발위험장소 설정과 안전관리가 가능하게 되었다.

본 연구는 KS C IEC 60079-10-1:2012와 2015 제2판을 비교·분석하여 개정된 기준의 특징을 도출하고, 인화성 물질을 대상으로 한 사례 연구를 통해 폭발위험장소 범위를 산출하였다. 또한 환기·희석 조건의 영향, 누출계수(Cd)와 압축인자(Z)의 적용, 액체 누출 시 2% 증발률 가정, LEL 안전계수 적용 등을 검토하여 산업현장에 실질적으로 적용 가능한 안전 관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 폭발위험장소 범위를 산출을 위한 누출률 계산 방식

KS C IEC 60079-10-1:2015 제2판은 이전의 2012년판과 마찬가지로 액체 누출률과 아음속(subsonic) 또는 음속(choked) 조건에서의 가스 누출률을 산출할 수 있는 근사식을 제시하고 있다. 다만, 제2판에서는 기존에 포함되지 않았던 증발풀(evaporative pool)에 대한 방정식이 새롭게 도입되었다. 제시된 식은 기본적으로 2012년판의 계산식과 유사하지만, 액체 누출률에는 누출계수(Cd)가 반영되었고, 가스 및 증기 누출률 계산에는 Cd와 압축인자(Z)를 함께 고려하여 실제 산업 현장 조건에 보다 적합한 방식으로 개선되었다.

액체의 누출량은 [표 1]을 통해 추정하며, 2012년판과 비교했을 때 가장 큰 차이점은 액체 누출률의 2%를 가스 누출률로 환산하여 적용한다는 점이다. 그러나 이 2% 적용의 구체적인 근거는 명확히 제시되지 않았다.

가스 및 증기 누출률 계산은 아음속 방출과 음속 방출로 구분된다. 우선 임계압력(Pc)을 산정하여 내부 압력이 Pc보다 높을 경우, 방출되는 가스 속도는 음속으로 간주된다. 임계압력은 [표 2]의 식을 통해 계산할 수 있으며, 대부분의 가스에 대해서는 빠른 계산을 위해 약 1.89 Pa의 근사값을 사용할 수 있다. 일반적으로 산업 공정에서 사용되는 압력은 이 값보다 훨씬 크기 때문에, 음속 방출 조건이 자주 발생한다. 반면, Pc 미만에서는 아음속 방출이 적용되며 이는 보일러, 반응기, 기화기, 증기발생기 등 열 설비와 연결된 최종 공급 배관에서 흔히 나타난다.

[표 1] 액체의 방출 속도(kg/s)

$$W = C_d S \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (kg/s)$$

W : 액체의 누출률(시간당 질량, kg/s)
 C_d : 누출계수
 S : 유체가 누출되는 개구부(구멍)의 단면적(m²)
 ρ : 액체밀도(kg/m³)
 Δp : 개구부에서의 누설압력 차(Pa)

[표 2] 임계압력(Pa)

$$P_c = P_a \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (Pa)$$

P_c : critical pressure (Pa)
 P_a : atmospheric pressure (101,325 Pa)
 γ : polytropic index of adiabatic expansion or ratio of specific heats

가스 또는 증기 누출률은 [표 3]과 [표 4]를 통해 산정할 수 있

다. 만약 가스 밀도가 액화가스의 밀도에 근접할 경우에는 2상(two-phase) 유동으로 간주하여 별도 고려가 필요하다. 또한 증발 풀은 단순한 액체 누출 외에도, 개방된 용기나 표면에 저장·취급되는 인화성 액체에서 발생할 수 있다. 다만, 얇은 층에서의 유출처럼 열역학적 요소를 반영하기 어려운 경우에는 이 계산식의 적용이 제한된다.

2012년판에서는 개방 용기에서 발생하는 액체 표면 증발에 대한 식이 제시되지 않았으나, 2015년판에서는 [표 5]와 같은 새로운 근사식이 도입되어 산업 현장에서 활용할 수 있도록 하였다. 이 증발률 산정은 특정 가정을 기반으로 계산된다.

[표 3] 비임계(비초크) 유속에서의 가스 방출률(아음속 방출)

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \left(\frac{P_a}{P} \right)^{1/\gamma}} \quad (kg/s)$$

W_g : 가스의 질량 누출률(kg/s)
 C_d : 누출계수
 S : 유체가 누출되는 개구부(구멍)의 단면적(m²)
 P : 유체의 사용압력(Pa)
 P_a : 대기압(101,325 Pa)
 γ : 단열 팽창 폴리트로프 지수 또는 비열비(단위없음)
 M : 가스 또는 증기의 몰 질량(kg/kmol)
 Z : 압축인자(단위 없음)
 T : 유체, 기체 또는 액체의 절대온도(K)
 R : 이상 기체상수(8,314 J/kmol K)

[표 4] 임계(초크) 유속에서의 가스 방출률(음속 방출)

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (kg/s)$$

W_g : 가스의 질량 누출률(kg/s)
 C_d : 누출계수
 S : 유체가 누출되는 개구부(구멍)의 단면적(m²)
 P : 유체의 사용압력(Pa)
 P_a : 대기압(101,325 Pa)
 γ : 단열 팽창 폴리트로프 지수 또는 비열비(단위없음)
 M : 가스 또는 증기의 몰 질량(kg/kmol)
 Z : 압축인자(단위 없음)
 T : 유체, 기체 또는 액체의 절대온도(K)
 R : 이상 기체상수(8,314 J/kmol K)

[표 4] 액체의 증발률(kg/s)

$$W_e = \frac{6.55 u_w A_p P_v M^{0.667}}{R \times T} \quad (kg/s)$$

W_e : evaporation rate of liquid (kg/s)
 u_w : wind speed over the liquid pool surface (m/s)
 A_p : pool surface area (m²)
 P_v : vapour pressure of the liquid at temperature T (kPa)
 M : molar mass of gas or vapour (kg/kmol)
 R : universal gas constant (8314 J/kmol K)
 T : absolute temperature of the fluid, gas or liquid (K)

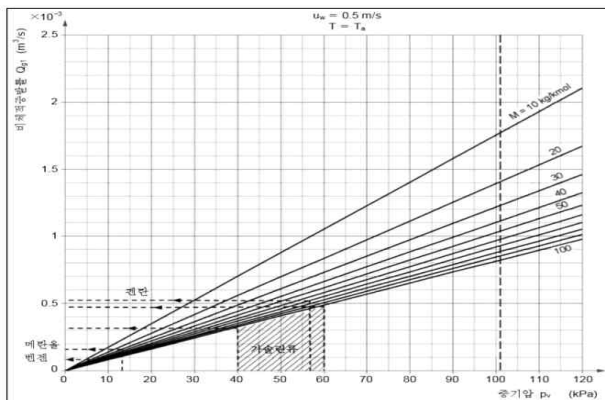
3. 폭발위험장소 범위를 산출을 위한 누출률 계산 모델링

[그림 1]은 액체의 체적 증발률(volumetric evaporation rate)을 나타낸 그래프로, 풀(pool) 표면적 1.0 m²를 기준으로 한 값이다. 따라서 실제 현장에서의 증발률은 해당 풀의 실제 표

면적에 수직축 값을 곱하여 산출할 수 있다.

KS C IEC 60079-10-1:2015 제2판에서는 증발 풀(evaporative pool)에 대한 새로운 계산식을 제시함으로써, 산업현장에서 폭발위험장소 범위를 보다 정확히 산출할 수 있도록 하였다. 이 방정식은 기존 기준에서 다루지 못했던 영역을 보완하여, 특히 액체 증발에 따른 위험도를 수치적으로 평가하는 데 유용하다. 이러한 계산식은 인쇄·도료·접착제 산업과 같이 인화성 액체를 노출된 상태에서 사용하는 공정에 직접적으로 활용될 수 있다. 예를 들어, 그라비아(gravure) 인쇄공정의 인쇄기 하부에 위치한 정사각형 풀(pool)에 접착제가 담겨 있는 경우, 해당 액체의 증발률을 본 모델로 산정함으로써 위험 구역의 범위를 보다 합리적으로 도출할 수 있다.

[그림 1] 액체의 체적 증발률



4. 결 론

본 연구는 KS C IEC 60079-10-1:2015 개정판과 2012년판을 비교·분석하여, 개정된 기준이 산업현장에서 폭발위험장소를 보다 정확하게 구분하는 데 기여함을 확인하였다. 특히 증발 풀 계산식의 도입과 누출률 산정식의 정밀화는 기존의 한계를 보완하여 현장 적용성을 크게 향상시켰다. 이러한 개선은 인쇄·도료·석유화학 공정 등 인화성 액체를 다량 취급하는 산업 현장에서 안전성을 확보하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

따라서 국내 사업장은 개정된 KS 기준을 충실히 적용하고, 동시에 국제 표준과 조화를 이루는 관리 체계를 구축해야 한다. 이를 효과적으로 실행하기 위해서는 방폭 전문 인력의 체계적 양성 및 실습 중심 교육의 확대가 필수적이다. 더 나아가 정부·기업·교육기관이 협력하여 제도의 실효성을 높이고, 산업 전반에 안전문화가 정착될 수 있도록 지속적인 지원이 필요하다.

참고문헌

- [1] 김남석. (2018). 개정된 KS기준에 따른 희석적용 및 폭발위험장소 구분에 관한 고찰 [박사학위논문, 인천대학교].

<http://www.riss.kr/link?id=T14919234>

- [2] 강민관, "방폭설비 폭발방지 억제대책을 위한 전문인력 양성 방안"에 관한 연구," 2023.
- [3] 황승만, "국내 방폭 자격증 수요예측에 대한 연구," 2023.
- [4] 나완석, 강민관, "XR 기반의 실감형 콘텐츠 운영에 관한 연구," 한국산학기술학회 2023년도 추계학술발표논문집, pp. 255-258, 2023.
- [5] 강민관, 나완석, 윤성중, "방폭설비 폭발방지 억제대책을 위한 전문인력 양성 방안"에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회논문집, 2023.