



등가누출직경을 적용한 음속 제트 누출의 폭발위험장소 범위 산정을 위한 수치 해석적 연구

Numerical Study on Extent of Hazardous Area for Sonic Jet Release Using Equivalent Leak Diameter

최승호^{*,**} · 최형권^{***}

Choi, Seung-Ho^{*,**}, and Choi, Hyoung Gwon^{***}

Abstract

In this study, three-dimensional $\kappa-\epsilon$ turbulence numerical simulations were conducted to analyze the extent of hazardous area for the sonic jet leakage of flammable gas. Incompressible fluid flows were simulated based on an inlet boundary condition estimated using the theory of “equivalent leak diameter” to prevent the direct simulation of sonic flows near the leakage hole. Numerical simulations of 20 methane leakage scenarios providing the lower explosive limit contour showed shapes of the hazardous area with a maximum height of approximately 12-14 times larger than the maximum width, owing to convection. The extents of hazardous area determined using computational fluid dynamics (CFD) were approximately 5%-10% lower than the results obtained with 1 m over based on IEC 60079-10-1. For scenarios in which quantitative data were not calculated using IEC 60079-10-1 due to low release rates, CFD provided quantitative data for the extent of hazardous area, showing nonlinear relationships with the pressure and diameter of leak holes.

Key words : Equivalent Leak Diameter, Sonic Jet Release, Extent of Hazardous Area, Computational Fluid Dynamics (CFD), IEC 60079-10-1

요 지

본 연구에서는 음속으로 제트 누출된 인화성 가스의 폭발위험장소 범위를 산정하기 위하여 3차원 $\kappa-\epsilon$ 난류 모델을 사용하여 수치해석하였다. 수치해석 방법론의 복잡성을 피하기 위하여 누출구멍 주위의 음속 유동은 등가누출직경이론을 적용하여, 비입축성 유동장의 입구 조건으로 적용하였다. 누출압력 및 누출구멍 크기가 다른 20가지 메탄 누출 시나리오에 대한 해석 결과 폭발하한계 Contour는 확산보다 큰 대류의 영향으로 최대폭 대비 최대높이가 약 12~14배 큰 폭발위험지역 형상으로 나타났다. CFD에 의한 폭발위험장소 범위는 IEC 60079-10-1에 의하여 1 m 이상으로 산정된 결과와 비교할 때 약 5~10% 작은 것으로 나타났다. IEC 60079-10-1에 의하여 정확한 범위가 계산되지 않는 누출률이 작은 시나리오에 대해서도 CFD 결과 정량적인 위험범위를 산정할 수 있었으며, 압력 및 누출구멍의 직경과 비선형비례관계를 갖는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 등가누출직경, 음속 제트 누출, 폭발위험장소 범위, 전산유체역학, IEC 60079-10-1

1. 서 론

인화성 가스를 사용하는 시설은 가스 누출 시 연소로

인한 사고 위험성이 높다. 이러한 사고는 연소의 3요소인 산소, 인화성 물질, 점화원의 조건이 충족되면 발생할 수 있다. 따라서 인화성 가스가 누출 시 이러한 조건이 충족되지

*정회원, 서울과학기술대학교 에너지시스템공학과 박사과정(E-mail: shchoi@kfpa.or.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Energy System Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

**한국화재보험협회 책임연구원

Senior Research Engineer, Korean Fire Protection Association

***교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수(Tel: +82-2-970-6312, Fax: +82-2-970-6312, E-mail: hgchoi@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Mechanical/Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

않도록 하는 것이 중요하다. 사고를 예방하기 위하여 기본적으로 인화성 가스가 누출되지 않도록 하는 것이 필요하나, 인화성 가스가 누출될 경우를 대비하여 폭발하한계(Lower Explosive Limit, LEL) 이하로 희석되기 전 전기적 점화원 등이 존재하지 않도록 폭발위험장소로 설정하여 관리하는 것이 일반적인 방법이다.

폭발위험장소 설정에 적용하는 대표적인 기준은 International Electrotechnical Commission (2015)에서 개정된 IEC 60079-10-1 (Explosive atmospheres - part 10: Classification of areas-Explosive gas atmospheres)으로 국내에서는 이를 부합화한 KS C IEC 60079-10-1을 적용하고 있다. 이외에도 NEC 500, 505, API Recommended practice 505, NFPA 497 등 산업코드 또는 지침이 적용될 수 있다. 그러나 Yim and Chung (2014)에 따르면 폭발위험장소는 가스의 특성, 누출구멍의 크기 및 형태 등으로 규정되는 사고시나리오, 환기조건, 누출공간의 구조 등 다양한 요소에 의하여 결정되나 많은 관련 코드 및 지침에서는 특수한 경우 또는 일반적인 경우에 대하여 폭발위험장소의 범위를 명기하고 있어서 코드 및 지침상 범위를 모든 상황에 적용하기는 어렵다.

2008년 제정된 IEC 60079-10-1은 폭발위험장소의 설정 시 가상체적(hypothetical volume) 개념을 적용하였으며, 이러한 가상체적의 반경을 폭발위험장소 범위로 예측하였다. 이러한 가상체적 개념은 환기유효계수, 누출등급에 따른 안전율 등에 따라 위험거리의 차이가 크게 발생할 수 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 2015년 개정 시 누출특성(Characteristic of release)이라는 개념이 도입되어 폭발위험장소 범위 산정 시 주관적 판단요소의 개입을 줄였다. 그러나 누출특성을 이용하여 폭발위험장소를 설정하기 위해서는 폭발위험장소 범위 추정 차트를 적용하여야 하는데 이 차트에 대한 수식이 제공되지 않아 정확한 폭발위험거리를 산정하는데 어려움이 발생하는 등 문제점이 도출되었다. 이로 인해 Choi (2018)는 폭발위험장소 범위가 커지게 되고 불필요한 방폭설비의 설치, 내화물량의 증가 등으로 비용 낭비가 발생할 수 있다고 분석하였다.

폭발위험장소 범위를 합리적으로 산정하기 위하여 이번 연구에서는 CFD를 통하여 인화성 가스가 음속으로 제트 누출되는 경우에 대하여 수치 해석하고, KS C IEC 60079-10-1:2015에 따라 산정한 폭발위험장소 범위와 비교·분석하였다.

2. 가스누출 조건

2.1 메탄가스의 특성

이번 연구에서는 인화성 가스 중 공기보다 가벼운 메탄가스가 누출되는 것으로 가정하였다. 연구에 적용된 인화성 메탄의 주요 물성값은 Table 1과 같다. 메탄가스와 같이 공기보다 가벼운 인화성 가스는 대기 중으로 누출되면 Fig. 1과 같이 부력과 밀도차에 의하여 상부로 급속히 확산되는

Table 1. Properties of Methane

Property	Methane (CH ₄)
Molecular Weight (kg/kmol)	16
Specific Heat Ratio	1.299
Specific Gravity	0.555
Explosion Range (%)	5~15

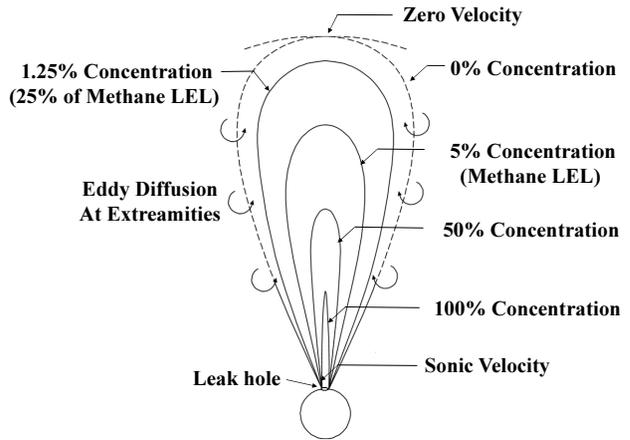


Fig. 1. Schematic of Sonic Jet Flow

경향이 있다.

고농도의 메탄가스는 주위로 확산함에 따라 공기와 혼합되며, 혼합가스의 밀도는 점차적으로 공기밀도에 접근한다.

인화성 가스의 폭발위험장소 범위는 인화성 가스의 농도가 희석되어 폭발하한계 이하로 내려가기 전의 영역으로 메탄가스의 경우 연소할 수 있는 농도는 5~15%로 연소하한계인 5%보다 높은 농도의 범위에서는 화재 및 폭발의 위험이 있다.

2.2 가스 누출률

본 연구에서 인화성 가스의 누출률은 KS C IEC 60079-10-1에 따라 분석하였다. 가스의 누출률은 누출 압력에 따라 달라질 수 있으며 초기에 음속 흐름을 형성하는지에 따라 적용되는 수식이 다르다. 일반적인 누출 조건에서 음속 여부를 판정하기 위해서 임계압력을 활용할 수 있으며, 임계압력은 아래 Eq. (1)에 의하여 산정한다.

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 p_c 는 임계압력, p_a 는 대기압력, γ 는 단열팽창 시 비열계수를 의미한다.

인화성 가스의 누출 시 압력이 임계압력보다 높으면 누출된 가스의 속도는 음속으로 판단된다. 메탄가스의 경우 사용 압력이 매우 낮은 경우 누출량이 소량이 되고 폭발위험장소

Table 2. Gas Release Rate (kg/s)

p (kPa(G))	S (mm ²)			
	1	2.5	5	10
150	4.30E-04	1.07E-03	2.15E-03	4.30E-03
250	6.00E-04	1.50E-03	3.00E-03	6.00E-03
500	1.03E-03	2.57E-03	5.14E-03	1.03E-02
800	1.54E-03	3.85E-03	7.70E-03	1.54E-02
1,000	1.88E-02	9.41E-03	4.71E-03	1.88E-03

범위는 무시할 수 있는 정도의 범위(Negligible Extent)로 판단될 수 있다. 따라서 이번 연구에서는 음속흐름이 발생할 수 있는 약 85 kPa(G)을 초과하는 압력 150, 250, 500, 800, 1,000 kPa(G)에 대하여 적용하였다. 그리고 본 연구에서 누출구멍은 IEC 60079-10-1에 따라 정상작동 중에 인화성 가스가 누출할 가능성이 높지 않은 2차 누출등급으로, 누출 개구부가 확대될 수 있는 조건을 고려하여 누출구멍의 면적 1.0, 2.5, 5.0 mm²를 적용하였다. 그리고 보다 큰 누출면적을 적용하는 API 581 등을 고려하여 누출면적 10.0 mm²를 추가로 분석하였다. 음속 가스의 누출률에 대한 근사식은 아래 Eq. (2)와 같다.

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

Eq. (2)에서 W_g 는 기체의 누출률, C_d 는 누출계수, S 는 누출구멍 면적, p 는 사용압력, M 은 가스의 물질량, Z 는 압축계수, T 는 내부의 온도, R 은 가스상수를 의미한다.

이상기체 및 누출 시 저항이 크지 않은 수직누출을 가정하여 5가지 압력(150, 250, 500, 800, 1,000 kPa(G)) 및 4가지 누출구멍의 면적(0.1, 2.5, 5.0, 10.0 mm²)으로 구성된 20가지 누출 시나리오를 Eq. (2)에 따라 분석한 결과는 Table 2와 같다.

3. 폭발위험장소 범위

3.1 수치해석에 의한 위험범위

3.1.1 등가누출직경 및 폭발위험장소 범위 산정

높은 압력상태의 가스가 대기압상태로 누출되면 누출구멍 부근에서 음속의 제트 누출이 발생된다. 음속의 제트 누출 시 초기영역에서는 충격파가 발생할 수 있으며, 이러한 음속의 난류모델은 많은 해석시간이 소요되는 등 분석이 어렵다. 본 연구에서는 음속 압축성 유동장을 해석해야 하는 수치해석 방법론의 복잡성을 피하고자, 압축성 유동장을 비압축성 유동장코드로 해석한 선행연구들(Gant and Ivings, 2005; Benintendi, 2010; Ferreira and Vianna, 2016; Choi and Choi, 2021)에서 사용한 등가누출직경 개념을 이용하였다. Gant and Ivings (2005)와 같이 누출구멍으로부터 누출된

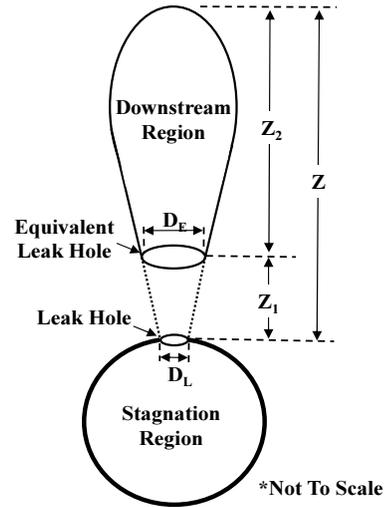


Fig. 2. Schematic Boundary Condition and Equivalent Leak Diameter

음속의 가스유량은 공기가 유입이 되지 않는 영역에서 Eq. (3)과 같이 동일하다고 가정하고, 이러한 영역 내 새로운 경계조건의 영역을 설정한다.

$$\rho_L A_L V_L = \rho_E A_E V_E \quad (3)$$

Eq. (3)에서 ρ 는 밀도, A 는 면적, V 는 속도, L 는 누출구멍, E 는 등가누출구멍 조건을 의미한다.

Ferreira and Vianna (2016)의 연구와 같이 등가누출구멍은 비압축성유동장의 입구 조건으로 가정되며, 경계조건은 속도가 Mach number 0.3 미만의 위치에 적용하는 것이 필요하다.

등가누출직경 및 해석영역의 개념은 Fig. 2와 같다. 등축성 고속누출을 가정하여 Mannan (2012)에 의해 증명된 Eq. (4)에 따라 경계조건을 추정하고 이 조건을 수치해석의 초기 조건으로 적용한다. 이러한 조건을 바탕으로 Birch et al. (1987)이 연구한 Eq. (5)와 Benintendi (2010)가 제안한 Eq. (6)에 따라 등가누출직경 및 누출구멍과 등가누출구멍사이의 거리를 추정하였다. 이러한 등가누출직경을 적용하여 Ferreira and Vianna (2016)는 음속의 난류 제트 누출의 해석 시간을 상당히 줄이며 가스누출 실험값 및 압축성 가스로 해석한 수치해석값과 부합되는 결과를 도출하였다.

$$P_L = P_S \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4)$$

$$D_E = D_L \sqrt{\frac{P_L}{P_a}} \quad (5)$$

$$V_{Z_1} = 6 \frac{D_E V_L}{Z_1} \quad (6)$$

Eqs. (4)와 (5)에서 s 는 사용압력 조건, Eq. (6)에서 z_1 는 등가누출구멍까지의 거리를 의미한다.

폭발위험장소 범위(Z)는 누출구멍으로부터 가상의 등가누출구멍까지의 거리(z_1)에 수치 해석한 폭발하한계에 도달하는 최대거리(z_2)를 더하여 산정하였다.

3.1.2 지배방정식

누출된 메탄가스의 유동해석은 정상상태의 이상기체를 가정하여 수행하였다. 수치해석은 유한체적법 기반의 ANSYS Fluent 16.2를 사용하였다. ANSYS Co. (2016)의 가이드에 따라 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식(Navier-Stokes Equation), 가스 확산계수는 $2.88 \times 10^{04} \text{ m}^2/\text{s}$ 가 적용된 물질전달 방정식(Species Transport Equation)을 적용하였다.

메탄가스의 유동은 완전한 3차원 난류유동으로 Realizable $\kappa - \epsilon$ 난류모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 속도-압력 지배방정식의 해법을 위하여 Coupled 알고리즘을 적용하였고, 2차 정확도 상류도식(Second order upwind scheme)을 사용하였다.

- 연속 방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

- 운동량 방정식(Momentum equation)

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) + \rho g_i \quad (8)$$

- 물질전달 방정식(Species transport equation)

$$u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = D_\phi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} \right) \quad (9)$$

- 난류 운동에너지 방정식(Turbulent kinetic energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

Eq. (10)에서 P_k 는 평균속도 구배에 의한 난류운동에너지 생성, P_b 는 부력에 의한 난류운동에너지 생성을 의미한다.

- 난류 운동에너지 소산율 방정식(Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + \rho C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (11)$$

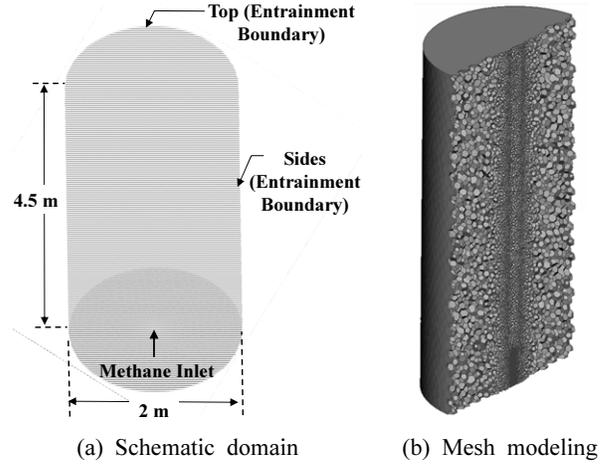


Fig. 3. Simulation Modeling

여기서, C_1 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (12)$$

3.1.3 해석영역 설정

해석공간은 누출률을 고려하여 지름 2 m, 길이 4.5 m인 원통형 공간으로 Fig. 3과 같이 설정하였다. Peric and Ferguson (2015)에 따르면 해석시간이 상대적으로 짧고 수렴성이 좋은 다면체(Polyhedral Type) 격자를 적용하여 수치해석을 진행하였다. 격자수는 격자의존도시험(Grid Dependency Test)를 수행하여 약 220만개의 격자와 결과가 근사한 약 182만개 다면체 비정렬 격자계를 적용하였다. 그리고 가스가 누출되는 해석공간은 온도 20 °C, 대기압 101,325 Pa인 상태를 가정하고, 해석공간 하부의 누출구멍을 제외한 해석공간의 경계면은 유동이 자유롭게 이루어지도록 설정하였다.

3.1.4 해석 결과

환기가 적절하게 이루어지지 않은 공간에서 가스가 누출된다면 가스가 축적되어 누출 공간 내 가스농도가 상승하게 된다. 이러한 가스는 지속적인 제트누출에 다시 흡수될 수 있으며, 폭발위험거리가 증가될 수 있다. 그러나 환기가 유효한 대공간 등에서는 가스가 축적되지 않으며, 누출된 가스가 연소하한농도에 도달하는 범위를 폭발위험장소 범위로 예측할 수 있다.

Fig. 4는 해석된 시나리오 중 500 kPa(G)와 1,000 kPa(G) 압력에서 10 mm² 누출구멍을 통해 누출된 메탄가스 농도 Contour를 나타낸다. 이러한 농도 Contour와 유사하게 모든 시나리오에서 음속의 제트 누출된 메탄가스는 상부로 급속히 유동하여 수직방향으로 긴 형태가 나타났다. 폭발농도에 도달하는 가스농도 Contour는 최대폭 대비 최대높이가 약

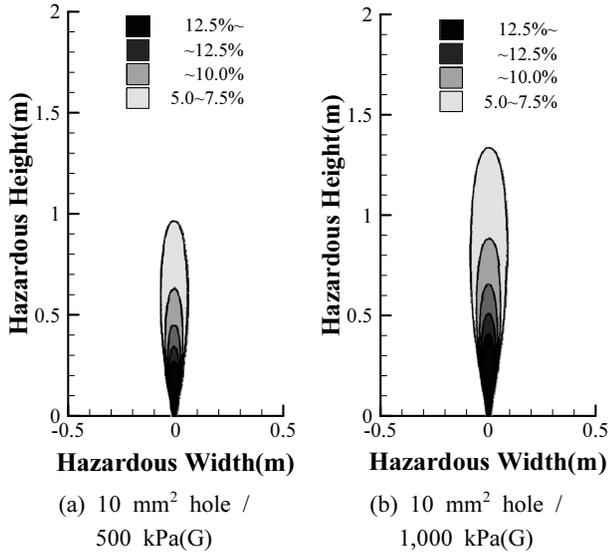


Fig. 4. Concentration Contours

Table 3. Hazardous Distances (m) by CFD

p (kPa(G))	S (mm ²)			
	1	2.5	5	10
150	0.18	0.28	0.38	0.56
250	0.24	0.37	0.50	0.72
500	0.30	0.50	0.72	1.02
800	0.40	0.64	0.91	1.28
1,000	0.45	0.72	1.02	1.43

12~14배 가량 큰 형상이 확인되었다. 이는 음속 누출된 가스가 초기속도와 부력으로 인하여 상부로 급속히 이루어지는 영향이 반경 방향으로의 확산보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

정상상태에 도달한 수치해석 결과에 등가누출구멍까지의 거리를 더한 폭발위험장소 범위는 Table 3과 같이 나타났다. 일부 시나리오에서 높은 압력의 영향으로 누출률이 더 큰 시나리오에 비해 위험범위가 길어지는 경우가 확인되었으나 전반적으로 폭발위험장소의 범위는 누출률이 증가함에 따라 커지는 경향이 나타났다.

Fig. 5는 누출구멍과 압력 조건에 따라 누출된 메탄가스가 폭발하한계인 5% 농도에 도달하는 범위를 나타낸 것이다. 압력이 동일한 경우 누출구멍의 직경이 커질수록 누출량이 많아져서 폭발하한계에 도달하는 범위가 커지게 되며, 누출구멍이 동일한 경우에도 압력에 따라 유사한 경향이 나타났다.

3.2 IEC 60079-10-1에 의한 위험범위

IEC 60079-10-1에 따른 폭발위험장소 범위를 산정하기 위하여 Eq. (13)에 따라 누출률을 주요 변수로 하는 누출

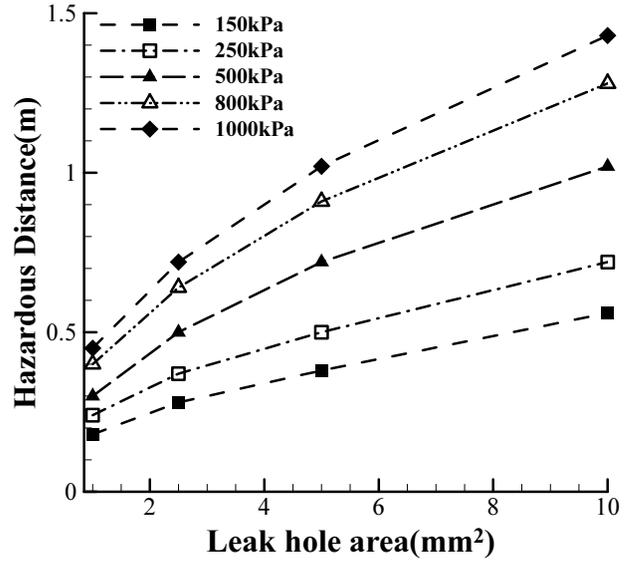


Fig. 5. Maximum Hazardous Distances (m)

Table 4. Characteristic of Release

p (kPa(G))	S (mm ²)			
	1	2.5	5	10
150	0.0129	0.0323	0.0646	0.1292
250	0.0181	0.0451	0.0903	0.1806
500	0.0309	0.0773	0.1545	0.3090
800	0.0463	0.1158	0.2316	0.4632
1,000	0.0566	0.1415	0.2830	0.5660

특성을 산출하였다.

$$\text{Characteristic of release} = \frac{W_g}{\rho_g \times \kappa \times L.E.L} \quad (13)$$

Eq. (13)에서 p_g 는 가스의 밀도, κ 는 안전계수를 의미한다. 장애물이 없는 공간 내에서 단일 가스 누출로 폭발하한계의 불확실성은 없는 상태로 가정하여 산정한 20가지 시나리오의 누출 특성은 Table 4와 같이 도출되었다. 계산된 누출특성을 반영하여 Fig. 6의 폭발위험장소 범위 추정 차트를 통해 폭발위험장소 범위를 산정하였다. 추정차트에서 인화성물질은 무거운 가스, 저속의 확산 누출, 방해받지 않는 고속 제트 누출로 구분되어 차트를 적용할 수 있으나 분석된 시나리오는 모두 음속의 제트 누출이 발생하는 경우로 Kim et al. (2018)과 같이 유동을 방해받지 않는 고속 제트 누출 차트를 적용하였고, 저속의 확산을 고려하지 않았다.

이렇게 산정된 IEC 60079-10-1에 의한 폭발위험장소 범위는 Table 5와 같다. 메탄의 경우 누출률이 약 0.00835 kg/s 미만일 때 누출 특성이 약 0.25 m³/s 미만으로 폭발위험장소

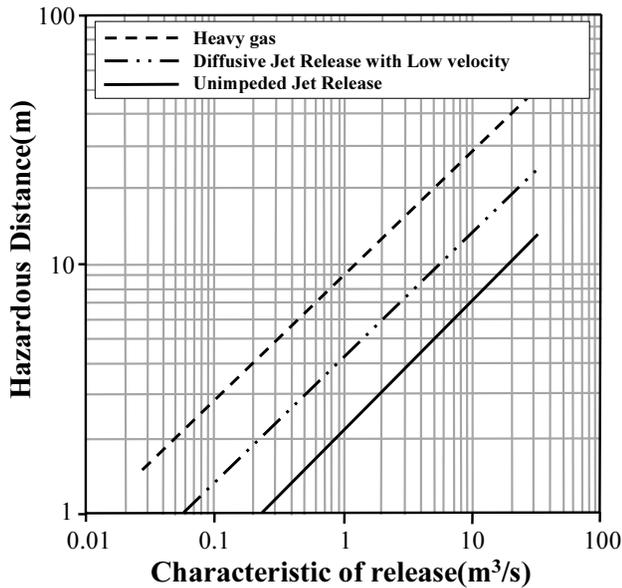


Fig. 6. Chart for Hazardous Area Distances

Table 5. Hazardous Distances (m) by IEC

p (kPa(G))	S (mm ²)			
	1	2.5	5	10
150	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
250	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
500	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1.12
800	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1.39
1,000	< 1.0	< 1.0	1.07	1.55

범위는 1 m 미만으로 추정되며, 정확한 값이 산출되지 않는다. 분석 대상 시나리오 중 폭발위험거리가 1 m 이상으로 산정되는 경우는 압력 500 kPa(G)에서 구멍크기 10 mm², 800 kPa(G)에서 10 mm², 1,000 kPa(G)에서 5, 10 mm²인 4가지 시나리오로 확인되었다.

3.3 폭발위험지역 범위 크기 비교

Jeong et al. (2013)에 따르면 IEC 60079-10-1에 의한 폭발 위험장소 범위는 실험값 또는 수치해석 결과보다 크게 나타났다. 이번 연구에서도 분석한 20가지 시나리오 중 IEC 60079-10-1에 따라 폭발위험장소 범위가 1 m 이상으로 산출된 4가지 시나리오를 수치해석 결과와 비교할 때 Table 6과 같이 수치해석에 의한 위험범위가 5~10% 가량 작게 나타나는 것으로 확인되었다.

IEC 60079-10-1에 따라 산정된 폭발위험장소 범위가 1 m 미만인 시나리오에 대하여 수치해석 결과 누출률에 따라 0.18 m에서 0.91 m까지 다양하게 나타났다. 일반적으로 폭발 위험장소 범위가 1 m 미만인 경우 보수적으로 1 m를 적용한

Table 6. Difference of Hazardous Distances (m)

S (mm ²)	p (kPa(G))	Hazardous distance (m)		Diff. (%)
		IEC 60079-10-1	CFD	
10	500	1.12	1.02	10
10	800	1.39	1.28	9
5	1,000	1.07	1.02	5
10	1,000	1.55	1.43	8

다. 그러나 가장 누출률이 작은 시나리오에 대하여 폭발위험장소 범위를 1 m로 적용할 경우 CFD 결과인 0.18 m보다 5배 이상 크게 폭발위험장소를 설정하게 되며, 이러한 경우 과도한 투자비용이 발생할 수 있다.

20가지 시나리오에 대한 수치해석 결과 메탄가스가 음속으로 제트 누출되는 경우 폭발위험장소 범위는 압력, 누출구멍의 직경과 비선형비례관계를 가지는 것이 확인되었으며 이에 대하여 후속연구에서 고찰하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 가스가 축적되지 않는 공간에서 압력 150, 250, 500, 800, 1,000 kPa(G)상태의 메탄가스가 1, 2.5, 5, 10 mm²의 누출구멍으로 누출되는 20가지 시나리오에 대하여 등가누출구멍의 개념을 적용한 CFD 해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 메탄가스가 음속으로 제트 누출되는 경우 폭발위험지역의 형상은 확산에 비해 대류의 영향이 우세하여 폭발 하한계 Contour는 최대폭 대비 최대높이가 약 12~14배 큰 수직방향으로 긴 형상이 나타났으며, 이러한 형상은 폭발위험장소 설정 시 반영될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) IEC 60079-10-1에 의하여 1 m 이상의 폭발위험장소 범위가 도출되는 4개의 시나리오와 비교할 때 수치해석 결과가 약 5~10% 정도 작게 나타났으며 이러한 결과를 고려하여 수치해석 결과를 통한 공학적인 폭발 위험장소 범위를 산정할 수 있다.
- 3) IEC 60079-10-1에 의하여 폭발위험장소 범위를 산정한 결과 1 m 미만으로 산출되어 명확한 범위를 알 수 없는 누출률이 작은 시나리오에 대하여 수치해석을 통하여 폭발위험장소 범위를 정량적으로 예측할 수 있었으며, 폭발위험장소 범위는 압력, 누출구멍의 크기와 비선형비례관계가 확인되었다.
- 4) 본 논문의 해석결과는 메탄가스가 음속으로 제트 누출되는 경우 폭발위험장소의 형상 및 범위를 정량적으로 결정하는데 활용될 수 있다. 또한, 등가누출직경을 적용한 수치해석 방법은 물성이 다른 인화성 가스, 누출조건이 다른 음속의 제트누출 등에 대한 폭발위험장소

범위를 효과적으로 평가하는데 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- ANSYS Co. (2016). *FLUENT Theory Guide*.
- Benintendi, R. (2010). Turbulent jet modelling for hazardous area classification. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 23, Issue. 3, pp. 373-378.
- Birch, A.D., Hughes, D.J., and Swaeld, F. (1987). Velocity decay of high pressure jets. *Combustion Science and Technology*, Vol. 52, Issue 1-3, pp. 161-171.
- Choi, J.Y. (2018). An analysis on the main amendment of hazardous area classification in korea and a study on its limitation. *Korean Journal of Hazardous Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 8-17.
- Choi, S.H., and Choi, H.G. (2021). A numerical study on installation location of a urban gas detector by using equivalent leak diameter. *Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 94-100.
- Ferreira Jr., E.S., and Vianna, S.S.V. (2016). Large eddy simulation combined with equivalent diameter for turbulent jet modeling and gas dispersion. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 525-540.
- Gant, E., and Ivings, M.J. (2005). *CFD Modelling of low pressure jets for area classification*. HSL 2005-11, Health & Safety Laboratory.
- International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 60079-10-1, Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres*.
- Jeong, J.H., Park, D.J., Ha, H.C., Lee, J.H., Hwang, S.M., Kang, M.J., et al. (2013). *A safety assessment on the establishing of the explosion-hazardous area of city gas-using facility*. KOSHA Occupational Safety and Health Research Institute.
- Kim, S., Lim, J.G., and Woo, I.S. (2018). A study on the examination of explosion hazardous area applying ventilation and dilution. *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 22, No. 4, pp. 27-31.
- Mannan, D. (2012). *Emission and dispersion, lees' loss prevention in the process industries* (4th ed.). Butterworth-Heinemann, pp. 752-1074.
- Peric, M., and Ferguson, S. (2015). *The Advantage of polyhedral. CD-adapco*.
- Yim, J.P., and Chung, C.B. (2014). A study on classification of explosion hazardous area for facilities using lighter-than-air gases. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 2, pp. 24-30.

Received	May 13, 2021
Revised	May 17, 2021
Accepted	June 3, 2021