

전산유체역학시뮬레이션을 이용한 도시가스 설비의 폭발위험성 예측

한상일¹ · 이동욱² · 황규석^{2†}

¹창원대학교 화공시스템공학과, ²부산대학교 화공생명공학부
(2018년 6월 25일 접수: 2018년 9월 11일 수정: 2018년 9월 18일 채택)

Prediction of Explosion Risk for Natural Gas Facilities using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Sangil Han¹ · Dongwook Lee² · Kyu-Suk Hwang^{2†}

¹Department of Chemical Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773, Korea
²School of Chemical & biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Received June 25, 2018; Revised September 11, 2018; Accepted September 18, 2018)

요약 : 산업현장과 열병합발전 등 다양한 장소에 사용되는 도시가스는 산업안전보건법 정의에 따라 인화성 가스에 해당되며 한국산업표준 KS C IEC에 의해 가스 폭발위험장소가 설정되어 안전하게 관리가 되어야 한다. 본 연구에서는 일반 화학공장에 적용되는 KS C IEC 표준을 저압 도시가스 사용설비 폭발위험성 예측에 합리적으로 적용하기 위해누출공 크기, 환기 등급, 환기 유효성 등의 주요 변수를 도입하였다.CFD 시뮬레이션 적용의 타당성을 평가하기 위해 전산유체역학 (CFD) 시뮬레이션, 가스누출실험, KS C IEC 표준 계산 통해 얻어진 폭발하한계가스 체적을 이용하여 네 가지 다른 조건에서 폭발 위험성을 평가하였다.

주제어 : 천연가스, 위험성 평가, 가상체적, 위험지역, 전산유체역학

Abstract : City natural gas is classified flammable hazardous gas and should be secured according to explosion risk assessment determined by Industrial Standard KS C IEC. In this study, leak size, ventilation grade and effectiveness were adopted to the KS C IEC for risk assessment in natural gas supply system. To evaluate the applicability of the computational fluid dynamics (CFD), the risk assessment was studied for four different conditions using hypothetical volume(V_z) valuesfrom gas leak experiments, KS C IEC calculation, and CFD simulation.

Keywords : Natural gas, risk assessment, hypothetical volume, hazardous area, CFD

[†]Corresponding author
(E-mail: kshwang@pusan.ac.kr)

1. 서론

도시 가스(City Gas)는 액화천연가스(Liquefied Natural Gas: LNG), 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas: LPG), 천연가스(Natural Gas : NG)의 세 가지로 구분되며 [1], LPG는 프로판과 부탄을 주성분으로 상온에서 압축하여 액화한 것이며, NG는 액화천연가스를 다시 기화하여 천연가스 상태로 배관을 통해 공급되는 메탄가스를 주성분으로 한다.

도시가스는 외부 누출 시 폭발의 위험성이 크므로 산업안전보건법의 안전보건기준에 관한 규칙 제 230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)에서 한국산업표준으로 정하는 기준에 따라 가스폭발 위험장소를 설정·관리하도록 하고 있다. 그 밖에 고압가스 안전관리법, 액화석유가스의 안전관리법 및 도시가스사업법은 KGS GC201 “가스시설 전기방폭 기준”을 통하여 가스 사용시설의 전기설비 방폭기준을 제시하고 있으나 폭발위험장소 구분을 위한 기술기준은 별도로 제시하고 있지 않다[2].

국외의 경우, 천연가스와 관련된 안전 기술기준 개발은 주로 영국에 위치하고 있는 EIGA(European Industrial Gases Association), IGEM(Institution of Gas Engineers & Managers)에서 많이 추진되고 있으며, 도시가스 사용설비 폭발위험장소 구분과 관련하여서는 HSE(Health and Safety Executive)의 HSL(Health and Safety Laboratory)에서 주도적으로 선행연구가 추진되고 있다[3].

폭발위험장소는 인화성 또는 가연성 물질이 누출에 의해 화재·폭발을 일으킬 수 있는 최소한의 농도로 항시 대기 중에 존재하거나 존재할 가능성이 높은 장소를 나타내며, 위험도 분석 결과 등급에 따라 폭발성 가스분위기가 생성될 우려가 있는 장소에서 전기설비를 안전하게 사용할 수 있도록 기기의 적절한 선정과 설치가 제시되어야 한다.

국내·외적으로 폭발위험장소 구분을 위한 기술 기준은 국내는 IEC와 부합하는 한국산업표준 KS C IEC 60079-10-1을 제시하고 있으며 국외의 경우 북미에서는 API 505, NFPA 505, NEC 505, 유럽에서는 EI part 15를 적용하고 있다 [4,5,6]. 한국산업표준은 국제 기준에 따라 폭발 위험장소를 0종 장소, 1종 장소, 2종 장소 및 비위험 장소로 구분하고 있으며, 위험장소에 해당되

는 경우 위험물 누출 시 주변의 전기 기계·기구가 점화원이 되지 않도록 그 지역의 위험등급에 적합하게 선정된 방폭용 전기 기계·기구를 사용하도록 하고 있다. 그러나 KS C IEC 표준은 가스 폭발하한계 구성범위를 예측하기 위한 가스 누출을 계산 누출공 크기, 환기등급을 위한 품질계수, 환기유효성 등에 대한 세부적인 기준 및 평가방법은 제시되어 있지 않고 가장 기본적인 개념만 설명하고 있으며, 현장 특성에 따른 추가적인 사항에 대해서는 전문가적인 접근이나 국가의 기술 기준을 통하여 계산하도록 권장하고 있다.

국내에서는 Yim[7]등이 “공기보다 가벼운 가스 사용시설의 폭발위험장소 설정방안에 대한 연구”에서 IEC 기준에 따라 공기보다 가벼운 가스에 대한 폭발위험장소 범위를 계산하였으며, Kwon [8]이 “도시가스 사용지역 보일러실의 폭발위험지역 설정에 관한 연구”를 통해 밀폐공간 보일러실 내부의 도시가스 사용시설에 대한 폭발위험지역 설정을 위한 실험 및 CFD 모델링을 실시하였다. 국외에서는 Ivings [9]등은 10 barg 미만의 도시가스 설비의 2차 누출원의 폭발위험장소 구분을 연구하였으며, Gant [10] 등은 저압가스 누출 시뮬레이션을 CFD를 통하여 분석하여, 저압가스 누출을 산정을 위한 경험적인 누출공 크기를 제시하였다.

본 연구에서는, 도시가스 공급 시설의 위험성을 평가하기 위해 전산유체역학 (CFD: computational fluid dynamics)을 도입하여, KS 표준 방법과 실험을 통해 기준에 연구된 위험성 평가 결과와 비교, 검증하였다. 또한 압연 공장 furnace 저압 도시가스 배관 시설의 폭발 위험성을 예측하기 위해 KS 표준에 구체적으로 제시되지 않은 누출공 크기, 환기 등급, 환기효율 품질계수, 환기 유효성 등의 주요 변수를 도입하여 폭발 위험성 [11]을 예측하고 그 결과에 따라 최종적으로 인화성가스 또는 증기 발생 가능 장소를 0종 장소, 1종 장소, 2종 장소, 비위험 장소로 구분하고 0종, 1종 및 2종 장소에 해당될 경우 그 위험장소의 범위를 결정하였다.

2. CFD 시뮬레이션 조건

마이크로소프트 윈도우 운영체제가 설치되어 있는 개인용 PC에서 FLACS10.3 [12]소프트웨어를 이용하여 저압 도시가스 누출 조건에 대한 가

상 체적을 계산하였다(Fig. 1). 설비 내부에서 누출된 도시가스는 체류되지 않고 자연배기 될 수 있도록 상부에 개구부가 존재하는 조건이며 실험에 사용된 누출압력 0.5 kgf/cm²는 CFD 시뮬레이션 적용이 불가하여 정압기 후단의 저압 도시가스 사용압력에서 가장 높은 1차 조정압력 0.9 kgf/cm²를 적용하였다(Table 1). CFD 결과를 실험과 KS 표준 예상 결과와 비교하기 위해 폭발하한계 (LEL) [13]측정 높이를 기준으로 약 1,000 배 크게 계산된 구의 체적을 가상체적 [14]으로 적용하였다.

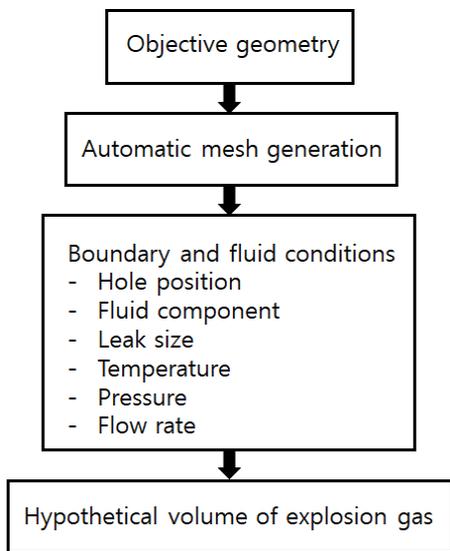


Fig. 1. Flow chart of CFD simulation.

Table 1. CFD simulation conditions.

| | A | B | C | D |
|--------------------|------------------------------|----------|----------|----------|
| Leak diameter (mm) | 0.232 | 0.56 | 1.2 | 1.8 |
| Flow rate (kg/s) | 1.33E-05 | 7.81E-05 | 3.59E-04 | 8.08E-04 |
| Grid (Mesh) | 384,750 | 319,950 | 252,050 | 227,800 |
| Temperature | 20 °C | | | |
| Pipe pressure | 0.9 kgf/cm ² | | | |
| Leak Gas/LEL | CH ₄ / 5 vol% LEL | | | |

CFD 시뮬레이션을 위한 가스누출 설비는 3m x 3m x3m 부피의 박스형태로 구성되며, 상부는 자연배기를 위해 폭 15 cm 정도 개방하였다

(Fig. 2). 벽은 모두 밀폐된 것으로 하여 외풍을 모두 배제하고 도시가스 밀도차에 의해서만 유도되도록 geometry를 구성하였다. 정방형 박스 내부 바닥 면에 도시가스 누출배관을 배치하였고, 누출공의 위치는 배관의 상부, 누출공은 진원으로 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다 (Fig. 3).

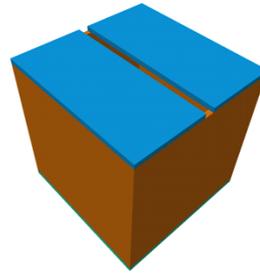


Fig. 2. External geometry.

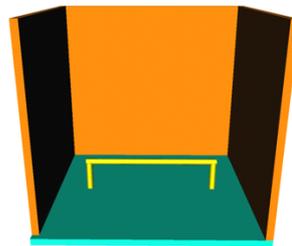


Fig. 3. Internal geometry.

3. FLACS CFD 시뮬레이션 결과

CFD 시뮬레이션 결과 누출 부위의 폭발 위험 지역은 누출시간 약 20초 이후 폭발 하한계 범위가 거의 증가하지 않는 누출 평형상태를 유지하였고, 누출된 도시가스가 건물 지붕 위의 개구부를 통해 희석되어 폭발위험장소의 범위가 증가하지 않는다는 것을 보여준다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 가스누출의 형태는 구의 형태가 아니라 누출 지점을 기준으로 타원의 형태로 지름이 좁고 높이가 긴 형태를 하고 있다 (Fig. 4).

가상체적은 안전율을 적용하기 위해 실제 CFD 프로그램으로 계산된 부피가 아닌 폭발하한계 (LEL) 측정범위의 높이를 반지름으로 하는 구의 체적을 적용하였다. 가장 높은 질량흐름속도를 가지는 누출공 크기 2.543 mm²의 CFD 시뮬레이션 결과 실제 cloud volume를 형성하는 폭발하

한계 범위 가상체적 V_z 프로그램 계산 결과는 $7.36 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 로 해석되었다 (Table 2). 이는 누출공 크기 2.543 mm^2 에서 구의 체적으로 계산한 가상체적 V_z 값보다 약 1,000배 낮은 값이다. CFD 시뮬레이션의 가스 누출 형태보다 크게 가정된 구의 체적을 기준으로 하여도 누출압력 0.9 kg/cm^2 , 누출공 크기 2.5 mm^2 의 가장 가혹한 조건에서 가상체적 값은 0.1 m^3 미만으로 계산되어 환기등급 강환기, 환기 유효성 양호를 적용하여 폭발위험성 평가결과 네 가지 조건 모두 비위험장소로 해석되었다. CFD 시뮬레이션 4가지 조건 모두 저압 도시가스 배관시설의 폭발위험성 예측 결과는 비위험장소로 해석되었다.

Table 2. Hazardous area classification by using CFD simulations.

| Items | | A | B | C | D |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Hole size (mm ²) | | 0.042 | 0.246 | 1.13 | 2.543 |
| Leak area (m ²) | | 4.20E-08 | 2.46E-07 | 1.13E-06 | 2.54E-06 |
| KS C IEC calculation | V_z (m ³) | 0.67 | 3.9 | 17.94 | 40.32 |
| | Zone | 2 | 2 | 2 | 1 |
| CFD | V_z (m ³) | 3.05E-03 | 9.20E-03 | 2.06E-02 | 7.36E-02 |
| | Zone | Non-hazardous area | Non-hazardous area | Non-hazardous area | Non-hazardous area |
| Experiment | V_z (m ³) | 2.68E-04 | 1.44E-03 | 2.44E-02 | 0.125 |
| | Zone | Non-hazardous area | Non-hazardous area | Non-hazardous area | 2 |

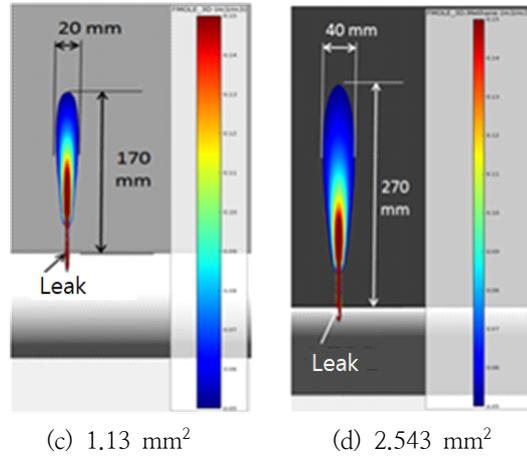
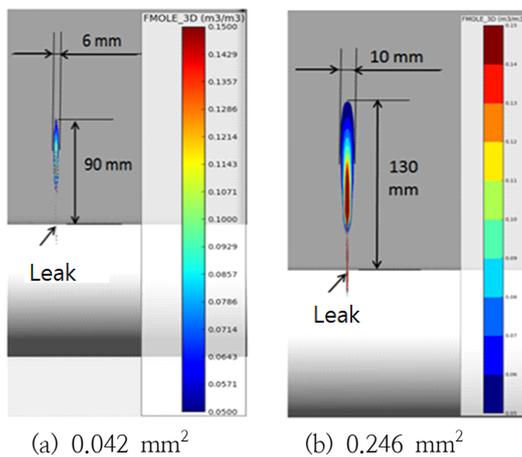


Fig. 4. Gas leak simulation with four different leak sizes.

4. 누출 실험결과 및 KS C IEC 표준 계산, CFD 시뮬레이션 결과 비교

압연공장 등 금속열처리 공장 가열설비의 도시가스 사용압력 중 정압기 후단 1차 압력 조정기에서 가장 높은 압력 0.9 kgf/cm^2 을 적용한 결과를 비교 하였으며, 누출을 1 g/s 미만으로 안전을 $k = 0.5$ 는 소량 누출로 CFD 시뮬레이션 해석이 불가하여 $k = 1$ 을 적용하였다. 안전을 k 값을 1로 적용하였으나, CFD 시뮬레이션 및 도시가스 누출실험 결과 계산된 폭발하한계(LEL) 구성 범위인 가상체적 V_z 는 실제 cloud volume 값보다 최고 1,000배 넓은 범위로 해석되는 폭발하한계 측정범위 높이 값을 반지름으로 한 구의 체적을 계산하여 KS C IEC 값과 비교하였다.

Fig. 5는 가스 누출 실험과 CFD 시뮬레이션에서 얻어진 LEL 100%의 가스 측정 거리를 비교하여 보여준다. 가스 누출 실험 데이터는 기존의 연구결과를 참조하였으며[15], 실험 조건과 동일하게 하기 위해 정압기 후단 1차 압력 조정기에서 가장 높은 압력 0.9 kgf/cm^2 을 적용한 결과를 비교 하였으며, 누출을 1 g/s 미만으로 안전을 $k=0.5$ 는 소량 누출로 CFD 시뮬레이션 해석이 불가하여 $k=1$ 을 적용하였다. 누출공의 크기가 커질수록 가스 누출량이 증가하여 LEL 측정 높이도 증가하였으며, 누출공의 크기가 0.042, 0.246, 1.13, 2.543으로 증가함에 따라 실험값과 비교하



였을 때, 오차는 125, 85.7, 5.9, 19.2% 로 줄어들었다.

누출 실험, KS C IEC 표준, CFD 시뮬레이션 방법을 사용하여 누출공 크기에 따른 가상체적을 비교하였다(Table 2).일반적으로 누출공 크기가 커질수록 가상체적은비선형적으로 증가하였다.CFD 시뮬레이션 결과 값과실험 결과 값은 유사했으며(Fig. 6),KS C IEC 표준 계산 방법은 실제보다과도한 가상체적 값을 예측하여 2중 위험 및 1중 위험 지역으로 구분되었다.따라서 CFD 시뮬레이션 방법이 KS C IEC 표준을 이용한 계산 방법보다 실험 데이터와 더 유사하여 위험성을 보다 정확히 예측할 수 있었다.

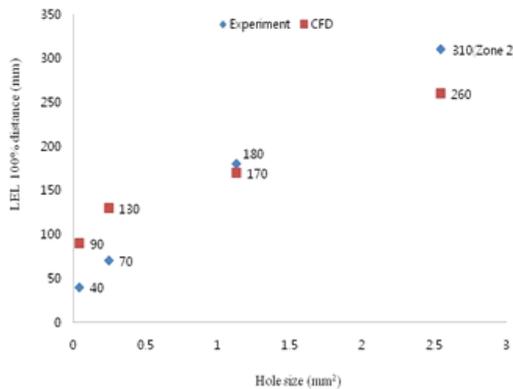


Fig. 5. Data comparison from CFD simulation and experiment for LEL 100% distance.

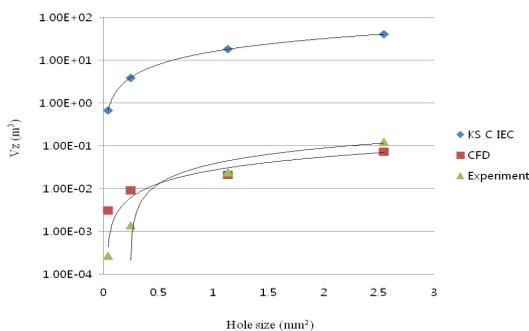


Fig. 6. Comparison of data from CFD, KS and Experiment of Vz volume.

5. 결론

압연공장과 같은 제강 또는 철강공장의 대형 건물에서 사용되는 0.1 MPa 미만 저압 도시가스 배관시설의 폭발위험성 평가를 위해 KS C IEC 표준 방법, 도시가스 누출 실험 및 CFD 시뮬레이션을 통해 얻어진 가상 체적을 구하고 위험성 등급을 비교하였다.

대형 건물 내부의 저압 도시가스 사용설비 폭발위험성 예측을 위해 일반적인 화학공장에 적용되는 KS C IEC 표준을 적용하기에는 많은 어려움이 있으므로 KS 표준에서 권장되는 CFD 프로그램을 이용하여 가상체적 Vz값을 예측하여 위험성 평가 기법을 발전시켜 최적화 하는 것은 매우 중요하다.따라서 본 연구에서 제시된 시뮬레이션 기법을 실생활에 보다 밀접한 저압 가스 사용설비의 폭발 위험성 예측에 적용한다면 합리적으로 활용될 수 있을 것이며, 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFD 시뮬레이션에서 사용압력 0.9 kgf/cm², 누출공 크기 2.5 mm²에 대해 계산된 폭발 하한계 가상체적은 6.9706X10⁻⁵m³로 해석되었으나, 이보다 약 1,000배 이상 넓게 계산되었던 구의 형태로 가상체적을 계산하여도 KS C IEC 표준 계산 값보다 540배 적은 체적을 나타내어, 환기등급 강환기, 환기 유효성 양호를 적용하여 비 위험 장소로 해석되었다.
2. 천연가스 누출을 계산에 가장 넓게 적용되는 누출공 크기0.25 mm² 에서 폭발위험범위 가상체적은 구의 체적을 적용한 CFD 시뮬레이션 값이 누출실험 값보다 11배 크게 나타났으며, KS C IEC 표준 값보다 424배 좁게 나타났다.
3. CFD 시뮬레이션을 적용하여 계산한 가상체적은 실험 값과 유사하게 나왔으며 KS C IEC계산식을 이용한 값은 1000 배 이상 크게 예측되었으므로, CFD 시뮬레이션 방법이 실제 결과를 더 정확히 반영하였다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. S. Kumar, H. Kwon, K. Choi, W. Lim, J. H. Cho, K. Tak, I. Moon, "LNG: An Eco-friendly Cryogenic Fuel for Sustainable Development", *Applied Energy*, Vol.88, No.12, pp.4264-4273, (2011).
2. Ha DM et al. *Code for explosion-proof electrical equipment of gas facilities*, Korea Gas Safety Corporation, (2018).
3. Ivings MJ, Klsey A. *Technical Input on Ventilation Effectiveness for Area Classification Guidance EI15*, Health and Safety Executive, (2014).
4. KS C IEC 60079-10-1, *Explosive atmospheres-Part-10-1:Classification of areas*, Korea Industrial Standard, (2012).
5. Energy Institute, *Area classification code for installations handling flammable fluids*, London: Energy Institute, (2005).
6. API RP 505, *Classification of locations for electrical installations at petroleum facilities classified as class 1, zone 0, zone 1 and zone 2*, American Petroleum Institute, (1997).
7. J. P. Yim, C. B.Chung, " A Study on Classification of Explosion Hazardous using Lighter than Air Gases", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.29, No.2, pp. 24-30, (2014).
8. Kwon, J. *A Study on the Establishing of the Explosion-hazardous Area of Boiler Room on the City Gas-using Facility*, M.S. Thesis, Seoul National University of Technology, (2014).
9. Ivings MJ, Clarke S, Gant SE. *Area Classification for secondary releases from low pressure natural gas systems*, Health and Safety Executive Research Report, RR630, (2008).
10. Gant SE, Ivings MJ. *CFD Modelling of Low Pressure Jets for Area Classification*, Health and Safety Executive Research Report, (2005).
11. R. Tommasini, E. Pons, "Classification of hazardous areas produced by maintenance interventions on N.G. distribution networks and in presence of open surface of flammable liquid," *Proc. Of 58th Industry Applications Society Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, pp. 1-10, (2011).
12. S. Dharmavaram, S. R. Hanna, O. R. Hansen, "Consequence Analysis—Using a CFD Model for Industrial Sites", *Process Safety Progress*, Vol.24, No.4, pp. 272-316, (2005).
13. M. Vidal, W. J. Rogers, J. C. Holste, M. S. Mannan, "A Review of Estimation Methods for Flash Points and Flammability Limits", *Process Safety Progress*, Vol.23, No.1, pp. 47-55, (2004).
14. J. Yim, C. Chung, "Validity Review on Classification of Explosion Hazardous Area using Hypothetic Volume", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.29, No.6, pp. 68-75, (2014).
15. S. Han, D. Lee, K. S. Hwang, "A Study on the Prediction of Explosion Risk for the Low Pressure Natural Gas Facilities with Different Explosion Conditions", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol.20, No.3, pp. 59-65, (2016).