

저압 도시가스 사용설비의 누출 조건에 따른 폭발 위험 분위기 형성 범위 예측에 관한 연구

한상일 · 이동욱* · †황규석*

창원대학교 화공시스템공학과, *부산대학교 화공생명공학부
(2016년 4월 14일 접수, 2016년 6월 27일 수정, 2016년 6월 28일 채택)

A study on the Prediction of Explosion Risk for the Low Pressure Natural Gas Facilities with Different Explosion Conditions

Sangil Han · Dongwook Lee* · †Kyu-Suk Hwang*

Department of Chemical Engineering, Changwon National University, Gyeongnam 641-773,
Korea

*School of Chemical & biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan
609-735, Korea

(Received April 14, 2016; Revised June 27, 2016; Accepted June 28, 2016)

요약

가스 사용 시설에서 폭발 위험성 평가 등급에 따라 적합한 방폭용 설비를 사용하는 것은 매우 중요하다. 가스 관련 법에서 가스 사용시설의 방폭 기준은 제시하고 있으나 폭발 위험장소 구분을 위한 기술기준은 별도로 제시되어 있지 않다. 본 연구에서 한국산업표준 KS를 이용하여 저압 도시가스 배관시설에 대해 합리적인 폭발위험성 예측 방법을 제시하고자 한다. 누출공 크기, 누출압력에 따른 가상체적, 환기 유효성 등의 중요변수를 적용하여 폭발위험성이 예측되었다. 자연 환기 조건을 만족하는 실험 설비가 제작되어 도시 가스 누출 실험 결과와 KS 표준에 의해 예측된 폭발 위험성 예측 결과가 비교되었다.

Abstract - It is imperative to use suitable explosion proof equipments to prevent explosion in different gas facilities. There is no technical standard for the classification of hazardous areas though standard of explosion proof is regulated. In this study, we have adopted Industrial Standard KS to develop the methodology for the prediction of the explosion risk in the natural gas facility with low pressure using the important factors including hole size, hypothetical volume, validation of ventilation effectiveness. The applicability of the developed methodology was evaluated by the comparison with the data obtained from experiments of natural gas explosion.

Key words : Natural gas, Explosion risk, hypothetical volume, hazardous areas

1. 서 론

도시 가스 (City Gas)는 일반적으로 액화천연가스 (Liquefied Natural Gas: LNG), 액화석유가스 (Liquefied Petroleum Gas: LPG), 천연가스 (Natural

Gas: NG)의 세 가지로 구분되며, LNG는 메탄이 주 성분이며 극저온 (-165.5 °C)에서 액화하여 부피를 줄여 이동하여 가스 형태로 공급된다. 본 연구에서는 가정과 산업체에서 일반적으로 사용되는 0.1 MPa 미만의 저압 천연가스 이용 시설의 위험성을 평가하고자 한다.

도시가스는 외부 누출 시 폭발의 위험성이 크므로 이를 제조·취급·사용하는 시설은 산업표준화법에 따른 한국산업표준 KS C IEC 60079-10-1에 따라 가스

†Corresponding author:kshwang@pusan.ac.kr
Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

폭발위험장소를 설정하여 안전하게 관리되어야 한다 [1]. 폭발위험장소는 인화성 또는 가연성 물질이 누출에 의해 화재·폭발을 일으킬 수 있는 최소한의 농도로 항상 대기 중에 존재하거나 존재할 가능성이 높은 장소를 의미한다. 폭발위험성 예측 및 평가 결과에 따라 폭발위험장소 범위가 결정되며, 그 지역에 설치되는 모든 전기설비는 위험장소 등급에 적합한 방폭용 전기 기계·기구를 선정하여 사용하도록 의무화되어 있다. 산업안전보건법에 따르면 2011년 7월 6일부터 KS C IEC 표준을 적용하여 산업시설에서 폭발위험장소 [2]를 설정하여 관리를 해야 한다. 하지만 관련 고시는 고온·고압의 운전조건을 가지는 정유공장, 석유화학공장 등에 적용되는 NFPA 497, API 505, NEC 505 등의 북미 기술기준을 기반으로 하므로 저압의 도시가스 배관시설에 적합하지 않다.

도시가스를 가열로 등의 연료로 사용하고 있는 사업장의 도시가스 내관 압력은 0.1MPa 미만 저압 도시가스에 해당한다. 도시가스사업법 및 KGS Code에 따라 도시가스 사용설비 시설의 설치 및 사용허가가 이루어지며 [3], 폭발위험장소 설정은 도시가스 사업자의 공급시설과 산업체의 정압기 설비까지만 적용되며 [4], 정압기 후단 도시가스 배관에 부착되는 솔레노이드밸브, 압력스위치, 리미트 스위치 등은 방폭형과 비방폭형 설비가 혼합되어 설치 및 사용되고 있어 사고 발생시 폭발 위험이 증가하는 문제점을 가진다.

도시가스 사용설비 폭발 위험성 평가를 위해, Ivings 등은 가연성 폭발 위험 물질의 저장과 사용에 관련된 위험장소 평가를 문서화한 Energy Institute (EI)의 EI Part15 [5]를 적용하여 환기 영향성을 분석하였다 [6]. Ivings, Gant 등은 10 barg 압력 미만의 도시가스 설비의 2차 누출원 폭발위험장소 구분에 대해 연구하였으며 [7], 국내에서 Yim 등은 IEC 기준에 따라 공기보다 가벼운 가스에 대한 폭발위험장소를 분석하였다 [8]. Kwon 등은 실험 및 CFD 모델링 분석을 통해, 밀폐된 보일러실 내부의 도시가스 사용시설에 대한 폭발위험지역을 평가하였다 [9].

대형 건물 내부의 저압 도시가스 사용설비에 대한 폭발위험성 예측을 위해 화학공장에 적용되는 KS 표준을 적용하기에는 많은 어려움이 있으므로, 본 연구에서는 KS 표준에 구체적으로 제시되지 않은 누출공 크기, 환기 등급, 환기 유효성 등의 주요 변수 [1]를 도입하여 폭발 위험성을 평가하였다. 또한 자연 환기가 가능한 도시가스 누출 설비가 제작되어, 도시가스 누출공 크기, 누출 압력에 따른 실제 가상 체적을 측정하여 위험성을 평가하였다.

II. KS C IEC 표준에 따른 누출을 계산

구멍을 통한 증기의 흐름속도는 Crowl/Louver의 화공안전공학에서 자유팽창 가스누출에 대한 베르누이 방정식을 따른다. 기체의 증기배출은 조절방출 (throttling)과 자유팽창 (free expansion) 방출로 구분되며, 본 연구에서는 누출공의 지름을 적용하는 자유팽창 방출 모델이 적용되었다.

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta Z + F = - \frac{W_s}{m} \quad (1)$$

- P : 압력 (force/area)
- ρ : 유체의 밀도 (mass/volume)
- u : 유체의 평균순간속도 (length/time)
- g_c : 중력계수 (length mass/force time²)
- a : 무차원 값으로서 속도분포 보정인자
= 0.5 (laminar flow)
= 1.0 (plug flow)
- g : 는 중력가속도 (length/time²)
- z : 는 기준점으로부터 높이 (length)
- F : 유효마찰 손실 (length force/mass)
- W_s : 축일,
- m : 질량

유체의 위치에너지와 축일을 무시하고 등엔트로피 팽창에 대해 이상기체 법칙을 적용하면 자유 팽창에 대한 질량 흐름속도는 아래와 같다.

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_0} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (2)$$

- P_0 : 가스용기 외부의 압력
- γ : 등엔트로피 팽창에서는 비열비
- C_0 : 방출계수
- A : 방출 가스의 단면적

초크압력 ($p_{choked} = P_0(2/(\gamma+1))^{\gamma/(\gamma-1)}$)은 파이프로 구멍을 통한 최대 유속에 의한 최대 방출 압력으로 P_{choked} 보다 외부압력이 낮을 경우 누출공에서 누출되는 기체의 속도는 음속과 같으며 이 때의 질량 흐름속도는 하류압력과는 무관하다. 초크흐름일 경우 기체의 누출율 (release rate)은 다음과 같이 얻어진다.

$$Q_m = C_0 A P_0 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

M : 인화성 기체나 증기의 몰 질량 (kg/kmol)
 T_0 : 용기의 배출전 기체나 증기의 온도 (K)
 R_g : 이상기체 상수

KSC IEC 60079-10-1에 따르면 가스 누출량에 대한 기본 계산식은 식(2)에서 얻어진 식과 동일하나 누출 형상은 고려되지 않았으며, 액체 또는 기체의 점도를 고려하지 않은 가장 보수적인 계산식을 적용한다. 방출 계수 C_0 가 가장 큰 값을 적용하여 오리피스 일반 방출계수 0.61 대신 1.0을 넣어 계산식을 단순화하였다.

가스 용기 외부 압력이 임계압력 p_c 보다 낮은 경우 가스 방출 속도는 초크흐름의 음속 상태가 된다.

$$p_c = p_0 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (4)$$

p_0 : 가스 용기 내부의 압력

1) 음속이상 가스속도를 갖는 초크흐름 가스의 누출 (dG/dt)

음속 이상 가스속도는 이론적으로 해당 가스의 최대 음속과 같다. 가스의 속도가 음속 이상인 경우 저장 용기로부터 가스 누출율은 식 (3)의 배출계수 C_0 를 1.0을 적용한 것과 동일하다. 방출부위에서의 가스속도 ($V_s=(\gamma RT/M)^{0.5}$)는 음속과 같다.

$$\frac{dG}{dt} = Sp \sqrt{\gamma \frac{M}{RT} \left[\frac{2}{\gamma+1}\right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}} \quad (5)$$

dG/dt : 가스의 누출율 (시간당 질량, kg/s)

p : 저장용기 내부의 압력 (Pa)

γ : 단열팽창시의 비열계수

S : 가스가 누출되는 개구부의 면적 (표면적, m^2)

M : 가스의 몰 질량 (kg/kmol)

T : 저장용기 내부의 절대온도 (K)

2) 음속 미만 가스속도를 갖는 가스의 누출

음속 미만 가스속도를 갖는 가스의 누출율은 식 (6)과 같으며, 방출부위 가스속도($V_0=dG/dt/(\rho_0 S)$)는 음속 이하이다.

$$\frac{dG}{dt} = Sp \sqrt{\frac{M}{RT} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right] \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma}} \quad (6)$$

III. 가상체적 V_z 계산

가상체적 V_z 는 누출된 가스 농도가 안전율 k 값에 따라 폭발하한계 (Lower Explosion Limit: LEL)의 25% (LEL 25 %, $k=0.25$), 50% (LEL 50 %, $k=0.5$), 100% (LEL 100 %, $k=1$) 보다 높은 지역을 나타낸다. 가스 농도가 LEL 값보다 높을 경우 폭발이 발생하며, 가상 체적을 기준으로 강환기, 중환기, 약환기의 환기 등급이 결정된다.

$$V_z = f \times V_k = \frac{f \times (dV/dt)_{min}}{C} \quad (7)$$

C : 단위시간당 신선한 공기의 환기 회수 (S^{-1})

f : 환기효율 보정 품질계수

$(dV/dt)_{min}$ 는 가스의 누출량을 폭발하한계 (LEL) 이하로 완화시키기 위한 신선한 공기의 최소 환기량을 나타내며 아래와 같다.

$$(dV/dt)_{min} = \frac{(dG/dt)_{max}}{k \times LEL_m} \times \frac{T}{293} \quad (8)$$

$(dV/dt)_{min}$: 신선한 공기의 최소 유량(m^3/s),

$(dG/dt)_{max}$: 누출원에서의 최대 누출율(kg/s)

k : LEL_m 에 적용되는 안전율
 (0.25, 연속 및 1차 누출 등급)
 (0.5, 2차 누출 등급)

가스 누출율 (dG/dt)는 압력 조건에 따라 식 (5) 또는 (6)으로부터 계산되고, 식 (7)을 이용하여 가상 체적 V_z 가 계산된다.

IV. 압연공장 Furnace 저압 도시가스 배관시설 폭발위험성 분석 실험

본 연구에서 대상 공장으로서 사용되는 압연공장의 가열로 (Furnace)는 도시가스를 연료로 하여 제강공장에서 공급받은 강괴, 슬라브, 블룸 등의 제강 금속을 재결정온도 이상으로 열을 가해 압연 작업을 수행한다. 일반적으로 압연공장 내부는 39,800,000 kcal/h 90톤 가열로 1대, 4,000,000 kcal/h 60톤 가열로 4대,

3,000,000 kcal/h 45톤 가열로 4대로 구성되어 있으며 각 가열로 버너의 연료는 모두 0.1MPa 미만의 저압 도시가스를 사용하여 열을 발생하여 압연 작업을 수행한다 (Fig. 1).

저압 도시가스 누출실험을 수행하기 위해 Fig. 2와 같은 설비가 제작되었다. 도시가스가 체류되지 않고 자연배기 될 수 있도록 상부에 개구부가 존재하며, 밸브와 압력계를 이용하여 누출압력이 조절된다. 압연

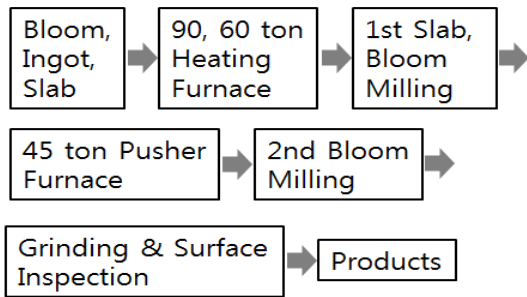


Fig. 1. Block diagram.

공장 등 금속 열처리 공장에서 일반적으로 사용하는 정압기 후단 사용자 배관의 가장 높은 1차 조절압력 및 2차 조절압력 중 0.5, 0.9 kgf/cm²의 두 가지 압력이 사용되었다.

네 가지 누출공 면적 (0.042, 0.246, 1.13, 2.54 mm²) 조건하에서 실험을 수행하기 위해 정밀 가공된 노즐 (Fig. 3)을 압력계 하단에 설치하였다. 도시 가스 공급 배관에는 국가 검 · 교정 인증을 받은 압력계 2개를 직렬로 부착하여 가스 누출 압력을 측정하였다 (Fig. 4).

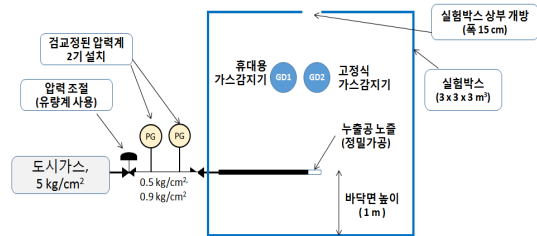


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.



Fig. 3. Orifice nozzles for the experiments.

저압 도시가스 사용설비의 누출 조건에 따른 폭발 위험 분위기 형성 범위 예측에 관한 연구

안전율을 높이기 위해 실제 가스 누출형태의 체적을 원기둥이 아니라 구의 형태로 가정하여, 누출공 상부 폭발하한계 측정거리를 반지름으로 하는 가상체적을 계산하였다. 폭발하한계 구성 농도 측정거리는 도시가스 누출 시 순간적 확산으로 감지기의 흡입속도에 따라 측정거리가 달라 이동식과 고정식 가스감지기의 LEL 측정거리를 평균하여 제시하였으며, 누출부위 LEL 넓이는 모두 20 mm를 넘지 않아 설치된 가스감지기로는 정밀한 분석이 불가하여 실험결과와는 상부의 누출방향 측정거리를 이용하였다 (Fig. 5). Table 1

Table 1. Data of LEL range and hypothetical volume V_z obtained from the experiments

Hole size (mm ²)	Lower explosion limit (LEL)	Distance (cm)		Hypothetical volume(m ³)	
		Internal pressure (kg/cm ²)		Internal pressure (kg/cm ²)	
		0.5	0.9	0.5	0.9
0.042	50%	3	6	0.000113	0.000905
	100%	2	4	0.000034	0.000268
0.246	50%	13	28	0.009203	0.091952
	100%	5	7	0.000524	0.001437
1.13	50%	29	30	0.10216	0.113097
	100%	16	18	0.017157	0.024429
2.543	50%	38	51	0.229847	0.555647
	100%	18	31	0.017157	0.124788

Table 2. Release conditions.

Leak gas		Natural gas			
Internal pressure (kgf/cm ²)		0.5		0.9	
Critical pressure (kgf/cm ²)		0.839			
Temperature (°C)		20			
Leak area		Interior piping flange			
Internal volume(m ³)		27 (3m x 3m x 3m)			
Ventilation effectiveness factor, f		3			
Molar mass (kg/kmol)		16.04			
Hole size	Dia. (mm)	0.23	0.56	1.20	1.80
	Area (mm ²)	0.04	0.25	1.13	2.54
Wind speed (m/s)		Minimum: 0.05			
		Maximum: 0.11			
Gas constant (J/kmol)		8.314			
Ratio of specific heats		1.32			



Fig. 4. Experimental apparatus with pressure sensors.



Fig. 5. Hypothetical volume V_z .

Table 3. Hypothetical combustible Volume V_z calculated by KS, condition I.

Wind speed	V (m/s)	0.05				0.11			
Diameter	d (mm)	0.232	0.56	1.2	1.8	0.232	0.56	1.2	1.8
Area	S (mm ²)	0.042	0.246	1.13	2.54	0.042	0.246	1.13	2.54
Hypothetical volume	V_z (m ³)	2.25	13.18	60.54	136.07	1.02	5.98	27.46	61.73
Hazardous area radius	r (m)	0.81	1.47	2.44	3.19	0.62	1.13	1.87	2.45
Zone classification		2	2	1	1	2	2	1	1

Table 4. Hypothetical combustible Volume V_z calculated by KS, condition II.

Wind speed	V (m/s)	0.05				0.11			
Diameter	d (mm)	0.232	0.56	1.2	1.8	0.232	0.56	1.2	1.8
Area	S (mm ²)	0.042	0.246	1.13	2.54	0.042	0.246	1.13	2.54
Hypothetical volume	V_z (m ³)	1.47	8.94	39.46	88.69	0.67	3.90	17.94	40.32
Hazardous area radius	r (m)	0.70	1.28	2.11	2.77	0.54	0.98	1.62	2.13
Zone classification		2	2	1	1	2	2	2	1

은 누출공 면적과 내부 압력에 따른 측정거리와 가상 체적을 보여준다.

V. KS 표준을 이용한 가상체적 V_z 계산

도시가스 누출 실험 장치와 동일한 조건에서 결과를 비교하기 위해 상부에 고정식 개구부가 있으며 강제환기 설비에 의한 자연대류가 없는 조건으로 가정하고 KS 표준의 가스 누출을 계산식을 이용하여 가상체적 V_z 가 계산되었다. 내부 풍속은 상부의 개구부와 실험장치의 틈새를 통하여 들어오는 바람에 의해 실제 측정된 하한 값과 상한 값을 적용하여 계산하였으며, 계산을 위한 가스 누출 조건은 Table 2와 같다.

1) 조건 1 (압력 0.5 kgf/cm², 안전계수 k=0.5, 내부 풍속 0.05 ~ 0.11 m/s)

조건1은 식(4)의 임계압력 0.839 kgf/cm² 이하 누출 압력으로 식(6)을 적용하여 계산한 결과 누출공 면적 0.042 mm²에서도 폭발하한계 가상체적 V_z 값이 2.25 m³로 모두 0.1 m³를 초과하여 강환기에 해당되는 조건이 없어 모두 폭발위험장소에 해당된다 (Table 3). 내부 체적 ($V_0=27$ m³)을 기준으로 가상 체적이 내부 체적 보다 작을 경우 중환기, 내부 체적 보다 클 경우 약환기로 구분된다. 중환기의 경우 누출 등급 (연속, 1차, 2차)에 따라 0중, 1중, 2중 위험장소로 각각 구분되며, 약환기의 경우 0중 또는 1중 위험장소로 구분된다.

Table 5. V_z data for different hole sizes obtained from KS C IEC and experiments.

Cases	A	B	C	D	
Hole size(mm ²)	0.04	0.25	1.13	2.54	
KS C IEC	V_z (m ³)	0.67	3.9	17.94	40.32
	zone	2	2	2	1
Experiment	V_z (m ³)	2.68×10^{-4}	1.44×10^{-3}	2.44×10^{-2}	0.13
	zone	N/A	N/A	N/A	2

(N/A: Non-hazardous Area)

2) 조건 2 (압력 0.9 kgf/cm², 안전계수 k=1.0, 내부 풍속 0.05 ~ 0.11 m/s)

조건2는 내부 압력이 임계압력 0.839 kgf/cm² 이상의 누출압력으로 누출속도가 음속 이상인 식(5)를 적용하여 계산하였다. 누출공 면적 1.13 mm² 이상에서 3개 조건의 가상체적이 실험장치의 체적을 크게 초과하는 1중 폭발 위험장소로 계산되었다 (Table 4).

VI. 누출 실험 및 KS C IEC 표준 계산 결과 비교

압연공장 등 금속열처리 공장 가열 설비에 사용되는 도시가스 공급 압력 중 정압기 후단 1차 압력 조정기에서 가장 높은 압력 0.9 kgf/cm²을 적용한 결과를 비교 하였으며, 누출율은 1g/s 미만으로 안전율은 k=

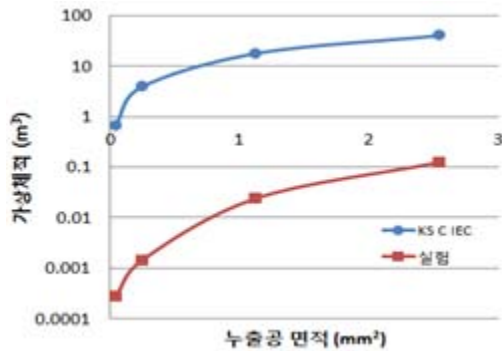


Fig. 6. Comparison of V_z Data for KS calculations and experiments.

1을 적용하였다. Table 5 에서처럼, 가상체적에서 차이가 발생하여 누출실험에서 비 위험 등급으로 판정된 지역이 KS 표준을 이용한 계산에서는 2중 또는 1중 위험지역으로 판정되었다. 누출공 면적이 증가할 경우 가상 체적도 커지며 누출공 면적이 2.54 mm² 일 때, 누출실험과 KS 표준으로 예측한 결과에서 동일하게 위험지역으로 판정되었다.

VII. 결 론

자연환기가 가능한 건물 내부 0.1 MPa 미만 저압 도시가스 배관의 누출실험 및 환기효율 품질계수 및 환기유효성 분석을 통한 KSC IEC 표준에 따른 압연공장 저압 Furnace 도시가스 배관시설의 폭발위험성 예측 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) KSC IEC 표준에서 제시하는 계산식에 의한 0.1 MPa 미만의 도시가스 누출 폭발위험성 예측 결과 4 종류의 누출공 크기에서 모두 폭발위험 범위 가상체적이 0.1 m³를 초과하여 폭발 위험등급 2중 장소로 해석되었다.
- 2) 상부 개구부가 있는 밀폐공간에서 저압 도시가스 누출 실험 결과에서 실제 측정된 폭발위험 범위 가상체적 값보다 넓게 적용되는 폭발하한계 (LEL) 측정 거리를 반지름으로 하는 구의 체적으로 계산하여도 누출공 면적 1.13 mm² 이하에서는 V_z 0.1 m³ 미만 강황기 등급의 비위험 장소로 해석되었다.
- 3) KS 표준을 이용한 예측 값과 실험에서 얻어진 데이터를 비교하였을 때, 누출공 면적이 커질수록 가상체적도 증가하는 비슷한 경향을 보였지만 KS 표준 예측 방법은 실제 폭발 위험 범위를 과대평가하는 결과를 보였다 (Fig. 6).

4) 실험 데이터와 계산으로 얻어진 값의 차이가 발생하여 위험 등급이 다르게 판별되므로, KSC IEC 표준으로부터 가상체적을 계산하여 폭발위험장소 설정 시 새로운 보정인자 도입 또는 환기효율 보정 품질계수 (f)를 개선하여 좀 더 합리적으로 접근할 수 있는 폭발분위기 위험성 예측방법이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 창원대학교 신임교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. KSC IEC 60079-10-1, "Explosive atmospheres-Part-10-1 : Classification of areas", Korea Industrial Standard, (2012)
2. Kang, S. M., Cheon, W. W., Choi, S. W., and Hwang, G. Y., "Electrical installations in hazardous area", Korea Occupational Safety and Health Agency, (2014)
3. KGS GC201, "Code for explosion-proof electrical equipment of gas facilities", KGS GC201, (2013)
4. KGS FS552, "Facility/Technical/Inspection Code for governors of general urban gas business", KGS Code, (2015)
5. EI part 15, "Area classification code for installations handling flammable fluids", 3rd edition, The Energy Institute, (2005)
6. Iving, M. J., and Klsey A., "Technical input on ventilation effectiveness for area classification guidance EI15" Health and Safety Executive Research Report, RR993, (2014)
7. Iving, M. J., Clarke, S., and Gant, S. E., "Area Classification for secondary releases from low pressure natural gas systems", Health and Safety Executive Research Report, RR630, (2008)
8. Yim, J. P., and Chung, C. B., "A study on Classification of explosion hazardous using lighter than air gases", Journal of the Korean Society of Safety, 29(2), 24-30, (2014)
9. 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, Seoul, Korea, (2014)