

상대습도에 따른 가스 그룹 IIB, IIA, I의 폭발압력 분석

김 용 태*·정 기 효*

*울산대학교 산업경영공학과

Effect of Relative Humidity on Explosion Pressure for Gas Group IIB, IIA, and I

Yongtae Kim*·Kihyo Jung*

*School of Industrial Engineering, University of Ulsan

Abstract

Determination of explosion reference pressure is important in designing and testing flameproof enclosures (Ex d). Although relative humidity affects to explosion pressure, its effect is not well investigated for the gas group IIB, IIA, and I. This study tested explosion pressure for Ethylene (8 vol.%), Propane (4.6 vol.%), and Methane (9.8 vol.%), which are the representative gas of the gas group IIB, IIA, and I, at ambient temperature and atmospheric pressure (1 atm) under different relative humidity (0% ~ 80%). Ethylene- and Propane-air mixed gases generally tended to decrease as the relative humidity increased; however, explosion pressure was largely dropped at 20% of relative humidity compared to 0% and 10% of relative humidity. On the other hand, Methane-air mixture gas showed similar pressures at 0% and 10% of relative humidity; but no explosion occurred at more than 20%. The results of this study can be used in setting a testing protocol of explosion reference pressure for designing and testing a flameproof enclosure.

Keywords : Ethylene-Air, Propane-Air, Methane-Air, Relative humidity, Explosion pressure, Gas group IIB, IIA, I

1. 서론

석유화학공업의 발전과 함께 인화성액체 및 증기의 사용 증가로 산업현장의 화재폭발 위험성이 높아지고 있다 [1-4]. 2010년부터 2019년까지 화재·폭발로 인한 중대 재해는 370건이 발생하였으며, 이 중에서 접화원이 전기 설비인 재해는 37건(약 10%)이며 관련 재해자의 수는 103명에 이른다[5]. 이러한 인화성 물질(액체·가스·고체)로 인한 폭발 위험을 감소시키기 위해서는 인화성 물질을 인화성이 낮거나 없는 물질로 대체하거나, 인화성 물질의 양을 줄이고 누출을 통제하여 폭발성 분위기 형성을 방지해야 한다[6]. 그럼에도 불구하고 폭발성 분위기가 존재하는 경우는 KS C IEC 60079-10-1, -2에 따라 폭발위험지역구분을 하고, 폭발위험지역에는 KCs 안전

인증을 받은 전기기기를 사용함으로써 접화원이 되지 않게 해야 한다.

KCs 안전인증제도는 IEC 60079 시리즈에 기반하여 제정되었으며 2009년부터 국내에 시행되고 있다. KCs 안전인증을 위한 방폭구조는 내압, 압력, 안전증, 본질안전, 비점화 방폭구조 등으로 구현될 수 있다. 그러나 내압 방폭구조(Flameproof enclosures, Ex d)가 가장 오래되고 구현하기 쉬운 구조로서 국내외 인증의 40%를 차지하고 있다[7, 8]. 내압방폭구조는 용기내부에 가스·증기의 존재를 허용하고 내부에 폭발이 발생해도 용기가 폭발에 견디며, 내부폭발화염이 용기의 접합부를 통하여 주위의 폭발성분위기로 전파되지 않아야 한다.

폭발압력은 내압방폭구조의 강도 설계와 내압시험의 기준압력으로 사용된다. 내압시험은 [Table 1]과 같이 방

†Corresponding Author : Kihyo Jung, School of Industrial Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan, E-mail: kjung@ulsan.ac.kr

폭기기 그룹별로 지정된 가스 및 농도에서 내압용기의 내부를 점화시켜 측정된 일련의 압력 중에서 최고폭발압력을 기준압력으로 정하고, 그 압력의 4배까지 가압하여 내압용기의 강도를 확인하는 시험이다.

<Table 1> Concentration of gas-air mixtures for determination reference pressure

Equipment group	Representative gases	vol. %	Number of test
I	Methane(CH ₄)	9.8 ± 0.5	3
IIA	Propane(C ₃ H ₈)	4.6 ± 0.3	3
IIB	Ethylene(C ₂ H ₄)	8.0 ± 0.5	3
IIC	Acetylene(C ₂ H ₂)	14.0 ± 1.0	5
	Hydrogen(H ₂)	31.0 ± 1.0	5

인화성 혼합가스의 폭발압력은 혼합가스의 조성 및 농도, 초기 압력 및 온도, 점화위치, 용기의 형태 및 내용적, 장애물의 유무, 습도 등의 다양한 요인에 의해 영향을 받는 것으로 보고되고 있다[9-14]. Cashdollar et al. [15]은 형태(구형, 원통형)와 크기(20 L, 120 L, 25.5 m³)가 다양한 용기에서 최대폭발압력이 화학양론농도(Cst, stoichiometric ratio)보다 조금 높게 측정되는 것을 파악하였다(메탄(Cst = 9.5 %)의 경우 10 %, 프로판(Cst = 4.0 %)의 경우 4.5 ~ 5.0 %). Pekalski et al. [16]는 메탄-, 프로판-공기 혼합가스를 초기 온도(20, 120, 240 °C)와 압력(1, 5, 10 bara)을 변화시키는 폭발실험을 통해 온도가 낮고 압력이 높을수록 최대폭발압력이 높아짐을 확인하였다. Razus et al. [17]은 0.7 L, 20 L 구형용기를 활용한 폭발실험을 통해 체적이 크면 폭발압력이 높아짐을 파악하였다. Cao et al. [18]은 점화장치의 위치가 용기 중앙에 있을 때 폭발압력이 최대가 됨을 규명하였다.

상기 상술한 것과 같이 폭발압력에 대한 다수의 기존 연구에도 불구하고 폭발압력과 습도에 관한 연구는 상대적으로 드물다. Moradi et al. [19]은 탄광 32곳에서 채취한 석탄분진 샘플에 대해서 습기가 증가하면 최대폭발압력이 감소하고, 일정수준(임계값)을 초과하면 점화가 일어나지 않음을 실험적으로 규명하였다. Qi et al. [20]은 가솔린 증기의 폭발에서 가솔린의 농도(0.92 % ~ 2.40 %), 온도(283 K ~ 343 K), 산소농도(12.66 ~ 20.32 %), 상대습도(35 % ~ 98 %)의 변화에 따른 폭발 특성을 파악했다. Wang et al. [21]은 가솔린 증기의 폭발에서 상대습도(36 % ~ 98 %)의 증가가 폭발압력을 선형적으로 감소시키는 경향이 있음을 확인했다.

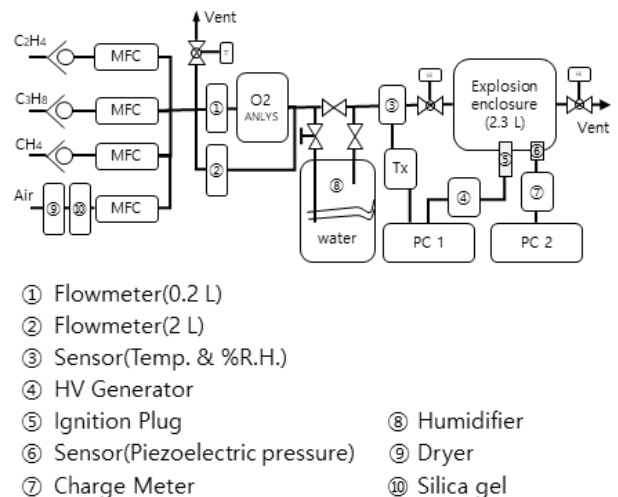
본 연구는 상온, 대기압에서 방폭기기 그룹 IIB (에틸렌 8 vol. %), IIA (프로판 4.6 vol. %), I(메탄 9.8 vol. %)에 대해 상대습도와 폭발압력 간의 관계를 실험적으로 규

명하였다. 내압방폭구조를 설계 및 시험하기 위해서는 기준압력을 결정하는 것이 필요하다. 기준압력을 결정하기 위해서는 실험조건 통제를 위한 상대습도와 폭발압력 간의 관계를 규명하는 것이 필요하다. 그러나 폭발압력에 대한 다양한 선행 연구가 수행되고 있으나, 상온 대기압에서 단일 인화성가스-공기 혼합물의 상대습도(0 ~ 80%)와 폭발압력에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 한편, 본 연구진은 선행연구를 통해 방폭기기 그룹 IIC(수소 31 vol.%, 아세틸렌 14 vol.%)에 대한 상대습도의 영향을 평가하였으나, 방폭기기 그룹 IIB, IIA, 그리고 I에 대한 폭발시험은 시행하지 못한 한계점이 있다. 본 연구의 상대습도에 따른 폭발실험 결과는 내압방폭구조의 기준(폭발)압력을 정확하고 일관성 있게 측정하는 실험 절차와 방법을 설계하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 실험은 본 연구진이 선행연구[22]를 통해 구축한 실험 장치를 활용하여 이루어졌다. 본 연구의 실험 장치는 [Figure 1]에 나타난 것과 같이 가스혼합장치, 가습장치, 폭발압력 측정장치로 구성되었다.



[Figure 1] Schematic diagram of the explosion apparatus

가스혼합장치는 인화성가스, 압축공기, 질량유량계(MFC, Mass Flow Controller), 산소농도분석기(O₂ analyzer)로 구성되었다. 조연성 가스인 압축공기는 건조기(Dryer), 필터, 제습제(Silica gel)를 거쳐 불순물과 수분이 제거된 건조한 상태로 공급된다. 폭발혼합가스의 지

정된 농도조성은 질량유량계와 산소농도분석기를 이용하였다. 질량유량계는 에틸렌, 프로판, 메탄, 압축공기의 분자량, 유량, 온도를 고려하여 지정된 농도를 조성한다. 산소농도분석기로 혼합가스의 농도를 실시간으로 측정하면서 질량유량계를 조절하여 최종 농도를 만든다. 인화성가스의 순도는 에틸렌 99.99 %, 프로판 99.95 %, 메탄 99.95 % 이다.

가습장치는 혼합가스의 습도를 조절하기 위해 밀폐수조를 이용하여 제작되었다. 습도조절이 불필요한 폭발 혼합가스는 수조를 바이패스 하도록 구성하였고, 가습은 니들밸브와 마이크로밸브를 이용하여 조절하였다.

폭발압력 측정장치는 폭발용기, 점화플러그, 고전압발생기, 압력센서, 전하증폭기(Low-pass filter with a 3 dB point of 5 kHz), 데이터취득 컴퓨터로 구성되었다. 폭발용기는 내용적이 2.3 L(내부챔버 20cm)인 원통형용기로 용기 중앙에 점화플러그, 용기 벽면 중앙에 압력센서가 설치되었다. 본 연구에 사용된 폭발용기는 최대안전틈새를 측정할 수 있는 장치이지만, 틈새를 4.90 mm로 설정하여 틈새의 영향을 받지 않고 외부챔버로 폭발이 전이 되도록 하였다. 에틸렌, 프로판, 메탄의 최대실험안전틈새는 각각 0.65 mm, 0.92 mm, 1.12 mm 이다[24].

2.2 실험 절차

본 연구의 실험은 5단계 절차로 수행되었다. 첫째, 가스 혼합장치를 활용하여 IEC 60079-1 (15.2.2.2절)에 정의된 혼합농도(에틸렌: 8.0 ± 0.5 %, 프로판: 4.6 ± 0.3 %, 메탄: 9.8 ± 0.5 %)를 조성하였다[23]. 혼합가스의 부피 비율(대기압에서 공기와 가스의 비율)은 에틸렌 8.0 ± 0.1 %, 프로판 4.6 ± 0.1 %, 메탄 9.8 ± 0.1%로 유지 되도록 하였다. 둘째, 건조한 상태로 조성된 혼합가스를 밀폐된 수조를 통과시켜 상대습도를 10 %부터 80 %까지 10 % 간격으로 가습하였다. 셋째, 농도와 상대습도가 조성된 혼합가스를 폭발 용기체적의 10배까지 폭발 용기에 흘려보내 충분히 퍼징(Purging) 되도록 하였다. 본 연구의 퍼징 수준은 압력방폭구조의 IEC 60079-2 (7.8절)에 제시된 기준의 5배 이상에 해당한다[25]. 넷째, 폭발용기의 입구밸브를 먼저 차단하고 출구밸브를 수조 후 닫아 혼합가스가 대기압이 되도록 하였다. 마지막으로, 혼합가스를 점화하여 폭발압력을 측정하였으며, 그 후에 폭발용기 내의 연소가스를 압축공기로 퍼징하였다. 본 연구는 혼합가스 종류(총 3종)별 폭발실험을 각 습도 조건(0 ~ 80 %, 총 9개 조건)에 대해 IEC 60069-1의 15.2.2.2절에 제시된 반복 회수(3회)보다 많은 5회 반복하였다.

2.3 통계 분석 방법

본 연구는 상대습도와 폭발압력 간의 연관성을 분석하기 위해 회귀 분석을 수행하였다. 독립변수는 혼합가스의 상대습도이며, 종속변수는 폭발압력으로 설정되었다. 또한, 본 연구는 분산분석을 통해 상대습도가 폭발압력에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였다. 분산분석의 사후 분석에는 Scheffe test를 사용하였다. 본 연구의 회귀 분석과 분산분석은 유의수준 0.05에서 SPSS(V24, IBM)를 활용하여 이루어졌다.

3. 실험 결과

3.1 에틸렌-공기 혼합가스

에틸렌-공기 혼합가스의 상대습도에 따른 폭발압력은 <Table 2>와 같다. 혼합가스의 상대습도는 실험조건으로 설정된 값과 유사하였다(설정 상대습도와 실제 상대습도의 최대 차이: ± 0.3 %). 한편, 에틸렌 혼합가스의 온도는 습도 조건이 달라져도 유사한 것으로 파악되었다(범위: 23.3 ~ 23.9 °C).

상대습도 조건별 에틸렌 혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <Table 3>과 같은 것으로 분석되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도에 따라 192.5 ~ 616.9 kPag의 범위를 보였다. 한편, 폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 4.9 ~ 49.3 kPag로 나타났다.

에틸렌-공기 혼합가스는 상대습도가 0 %에서 60 %까지 증가함에 따라 폭발압력이 [Figure 2]와 같이 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 폭발압력의 평균은 상대습도가 60 % 이상이면 일정한 것으로 파악되었다. 본 연구는 상대습도 0 %부터 60 %까지의 데이터에 대해 단일회귀분석을 실시하였으며, 회귀식은 $596.182 - 6.951 \times \text{상대습도}$ 로 도출되었다($p < 0.001$, $R^2 = 0.889$).

<Table 2> Explosion pressure of C₂H₄(8.0 vol. %)–air explosion mixtures at various relative humidity

Relative humidity (% R.H.)	Explosion pressure (kPag)
0.9	600.5
0.6	597.4
0.6	611.0
0.4	604.2
0.3	671.3
10.0	554.3
9.9	528.2

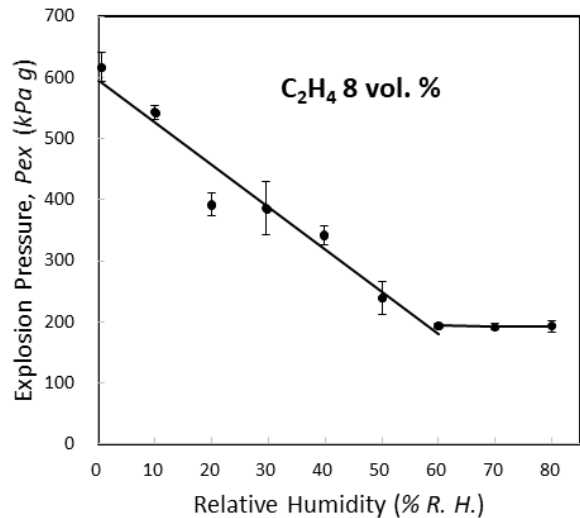
Relative humidity(% R.H.)	Explosion pressure(kPag)
10.1	549.1
10.1	527.9
10.2	558.4
20.0	380.8
20.0	363.6
20.2	405.6
19.9	422.7
19.8	388.7
29.8	430.0
29.8	304.9
29.5	390.7
29.6	362.2
29.6	441.3
40.6	349.1
40.1	332.5
40.0	315.9
39.2	367.7
39.2	343.8
50.0	295.3
50.5	234.2
50.4	235.2
49.5	203.8
49.8	226.7
59.9	195.8
59.8	199.9
59.9	193.7
59.9	192.5
60.1	185.1
70.0	181.2
69.9	192.5
69.8	197.2
69.9	193.7
69.9	195.8
80.7	177.8
80.1	191.6
79.9	193.2
79.8	189.2
79.5	210.9

폭발압력은 상대습도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($F = 172.69$, $p < 0.001$). 상대습도 0 %에서 폭발압력이 가장 높게 나타났고, 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 유의하게 낮아지는 것으로 분석되었다. 사후 분석 결과, 상대습도 조건은 <Table 4>에 표시된 것과 같이 4개로 집단화되는 것으로 나타났다.

<Table 3> Average and standard deviation of explosion pressures at various relative humidity for C_2H_4 (8.0 vol. %)-air explosion mixtures

Level of relative humidity*	Explosion pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard deviation		
0 ^a	616.9	30.8	172.69	<0.001
10 ^b	543.6	14.6		
20 ^c	392.3	22.7		
30 ^c	385.8	55.1		
40 ^c	341.8	19.3		
50 ^d	239.0	33.9		
60 ^d	193.4	5.4		
70 ^d	192.1	6.3		
80 ^d	192.5	11.9		

* Alphabet letters indicate significant differences at $\alpha = 0.05$



[Figure 2] Explosion pressure(p_{ex}) at various relative humidity for C_2H_4 (8 vol. %)-air explosion mixtures

3.2 프로판-공기 혼합가스

프로판-공기 혼합가스의 상대습도에 따른 폭발압력은 <Table 4>와 같다. 상대 습도는 실험조건으로 지정된 값과 유사하였다(최대: ± 0.3 %). 또한, 프로판 혼합가스의 온도는 습도 조건이 달라져도 유사한 것으로 분석되었다(범위: 23.2 ~ 24.0 °C).

프로판-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균값과 표준편차는 <Table 5>와 같다. 폭발압력의 평균은 상대습도에 따라 154.7 ~ 247.7 kPag의 범위를 보였다. 한편, 폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 8.6 ~ 16.1 kPag로 나타났다. 한편, 상대습도 50 % 이상에서는 폭발이 일어나지 않았다.

상대습도에 따라 폭발압력이 유의하게 영향을 받는 것으로 분석되었다($F = 55.61, p < 0.001$). 상대습도 0과 10 %에서 폭발압력이 유의하게 높았고, 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 낮아지는 경향이 있는 것으로 파악되었다. 사후 분석 결과, 상대습도 조건은 Table 5에 나타난 것과 같이 3개로 집단화되는 것으로 나타났다.

<Table 4> Explosion pressure of C_3H_8 (4.6 vol. %)-air explosion mixtures at various relative humidity

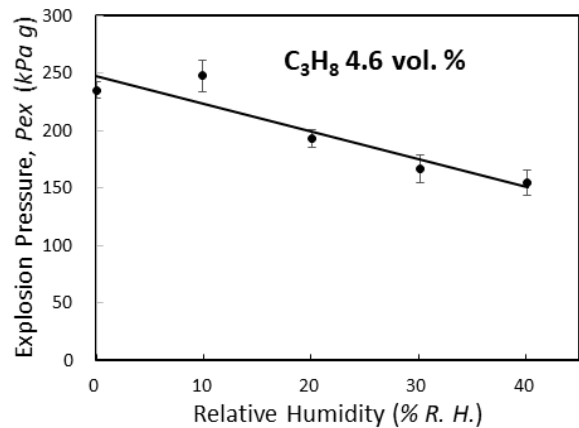
Relative humidity(% R.H.)	Explosion pressure(kPag)
0.0	239.9
0.0	234.7
0.0	234.5
0.0	245.8
0.0	222.6
10.0	234.1
10.2	253.6
9.9	240.3
9.6	273.2
9.7	237.1
20.0	192.4
20.0	205.5
20.4	188.9
20.1	198.9
20.0	182.9
29.8	181.1
30.2	178.5
30.3	152.4
30.2	152.4
30.0	171.0
40.2	165.5
40.1	140.9
40.0	169.7
40.3	148.8
40.0	148.8

<Table 5> Average and standard deviation of explosion pressures at various relative humidity for C_3H_8 (4.6 vol. %)-air explosion mixtures

Level of relative humidity*	Explosion pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard deviation		
0 ^a	235.5	8.6	55.61	0.000
10 ^a	247.7	16.1		
20 ^b	193.7	8.8		
30 ^c	167.1	13.9		
40 ^c	154.7	12.3		

* Alphabet letters indicate significant differences at $\alpha = 0.05$

프로판-공기 혼합가스는 상대습도가 증가함에 따라 폭발압력이 [Figure 3]과 같이 감소하는 경향이 있었다. 상대습도가 0 %와 10 %일 때는 폭발압력이 유사한 것으로 나타났으며, 10 %에서 20 %로 증가 시 폭발압력은 247.7 kPag에서 193.7 kPag로 54 kPag의 큰 감소를 보였다. 상대습도가 40 %까지는 폭발압력이 선형적으로 감소하다가 50 %부터는 폭발이 일어나지 않았다. 본 연구는 상대습도 0 %에서 40 %까지의 데이터에 대해 단일회귀 분석을 실행하였으며, 회귀식은 $248.152 - 2.416 \times$ 상대습도로 파악되었다($p = 0.019, R^2 = 0.807$).



[Figure 3] Explosion pressure at various relative humidity for C_3H_8 (4.6 vol. %)-air explosion mixtures

3.3 메탄-공기 혼합가스

메탄-공기 혼합가스의 상대습도에 따른 폭발압력은 <Table 6>과 같다. 상대 습도는 실험조건으로 지정된 값과 유사하게 나타났다(최대: - 0.1 %). 또한, 메탄-공기 혼합가스의 온도는 습도 조건이 달라져도 유사한 것으로 분석되었다(범위: 25.1 ~ 25.4 °C).

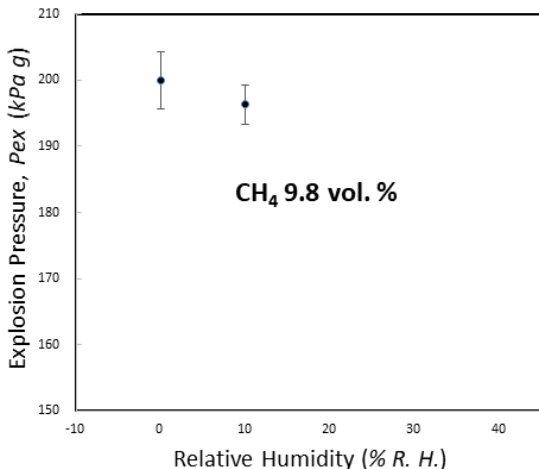
<Table 6> Explosion pressure of CH_4 (9.8 vol. %)-air explosion mixtures at various relative humidity

Relative humidity(% R.H.)	Explosion pressure(kPag)
0.0	198.6
0.0	208.5
0.0	196.5
0.0	197.3
0.0	199.1
10.0	196.6
10.0	199.1
10.0	199.4
9.9	195.3
10.0	191.2

메탄-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균값과 표준편차는 <Table 7>과 같다. 폭발압력의 평균은 상대습도에 따라 196.3 ~ 200.0 kPag의 범위를 보였다. 한편, 폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 (3.3 ~ 4.9) kPag로 나타났다. 상대습도 20 % 이상에서는 폭발이 일어나지 않았으며, 상대습도가 0 %와 10 % 일 때는 [Figure 4]에 나타낸 것과 같이 폭발압력이 유사한 것으로 나타났다. 한편, 상대습도에 따른 폭발압력의 영향을 분석한 결과, 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 파악되었다($F = 1.65$, $p = 0.174$).

<Table 7> Average and standard deviation of maximum explosion pressures at various relative humidity for CH₄(9.8 vol. %)-air explosion mixtures

Level of relative humidity	Explosion pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard deviation		
0	200.0	4.9	1.650	0.174
10	196.3	3.3		



[Figure 4] Explosion pressure at various relative humidity for CH₄(9.8 vol. %)-air explosion mixtures

4. 토의 및 결론

본 연구의 결과는 기존 연구와 유사하게 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 낮아지는 것으로 나타났다. Qi et al. [20]과 Wang et al. [21]은 가솔린 증기의 폭발압력과 상대습도의 영향을 연구하였으며, 상대습도가 증가함에 따라 폭발압력이 낮아지는 것으로 발표하였다. 이러한 경향성은 2가지 요인에 의한 것으로 해석될 수 있다. 첫째, 습도의 증가는 물 분자에서 방출된 라디칼을 풍부하게 하

여 용기 내 반응물의 라디칼 농도를 감소시킨다. 둘째, 수 증기는 열용량이 크기 때문에 일정한 부피의 용기에서 더 많은 열을 흡수할 수 있다. 따라서 동일한 온도 조건에서 상대습도의 증가는 O, H, OH와 같은 라디칼을 감소시키고 폭발반응성 및 폭발열을 흡수하기 때문에 혼합가스의 폭발압력이 감소한다고 해석될 수 있다.

프로판-공기 혼합가스와 메탄-공기 혼합가스는 상대습도가 50 % 이상과 20 % 이상에서 폭발이 발생하지 않았다. 이러한 결과는 상대습도가 증가할수록 폭발반응성이 저해된다는 기존 연구의 결과와 부합한다[22]. 그러나 폭발용기가 작으면 면적/체적 비율이 높아서 용기 벽면을 통한 열손실이 증가하여 폭발압력이 감소할 수 있다[26]. 본 연구의 폭발용기는 외부챔버(2.3 L) 내에 내부챔버(20 cm³)가 설치되어 있어 면적/체적 비율이 높았다. 그로 인해, 폭발압력이 상대적으로 낮아져 폭발에 필요한 점화가 상대적으로 낮은 습도에서 발생하지 않았을 수 있다. 따라서 본 연구에서 파악된 폭발이 발생하지 않는 상대습도는 폭발용기의 크기에 따라 달라질 수 있어 이를 검증하는 후속 연구가 필요하다.

본 연구는 가스 그룹 IIB, IIA, I의 대표가스인 에틸렌, 프로판, 메탄에 대해 상대습도에 따른 폭발압력을 시험하였다. 상온, 대기압(1 atm)에서 에틸렌(8 vol. %)-, 프로판(4.6 vol. %)-, 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력은 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 본 연구의 분산분석 결과에 따르면 에틸렌-, 프로판-공기 혼합가스는 상대습도가 10 %에서 20 %로 증가할 때 폭발압력 평균의 차이가 크게 나타났다. 또한, 메탄-공기 혼합가스는 0 %와 10 %에서 폭발압력 평균의 차이가 없는 것으로 나타났고 20 % 이상에서는 폭발이 일어나지 않았다. 이러한 폭발압력에 영향을 미치는 임계상대습도는 수소-, 아세틸렌-공기 혼합가스에 대한 기존 연구[22]에서 발견한 임계상대습도 10 % 및 20 %와 유사한 수준인 것으로 파악되었다.

내압방폭구조의 강도 설계 및 내압시험을 위한 폭발압력(기준압력) 결정은 상대습도가 통제된 상태에서 이루어지는 것이 추천된다. 본 연구의 결과에 따르면, 상대습도가 10 % 이상이 되면 폭발압력이 현저히 저하하거나 폭발이 발생하지 않을 수 있다. 따라서 내압방폭구조의 폭발압력시험 시 건조기(Dryer), 제습제(Silica gel), 습도센서를 설치하여 혼합가스의 상대습도를 10 % 이내로 통제하는 것이 필요하다.

본 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 2가지 측면의 후속연구가 필요하다. 첫째, 본 연구는 상대습도 변화에 따른 최대 폭발압력의 경향성을 실험을 통해 실증하였다. 그러나 폭발피해예측을 위해서는 상대습도에 따른 폭발압력상승시간에 대한 실험적 연구가 필요하다. 둘째, 본 연

구의 폭발시험은 크기가 작은 폭발용기를 사용하였다. 그러나 폭발용기의 크기가 작으면 면적/체적 비율이 높아져 폭발압력이 감소할 수 있다. 따라서 상대습도에 따른 폭발 압력의 특성을 보다 종합적으로 평가하기 위해서는 다양한 크기의 폭발용기에 대한 후속 실험이 필요하다.

5. References

- [1] J. Y. Choi, S. H. Byeon(2020), "A study on complementary method for hazardous area extent by IEC 60079-10-1 edition 2.0." *Journal of Korea Safety Management & Science*, 22(2):73-82.
- [2] P. Michorczyk, K. Zenczak, R. Niekurzak, J. Ogonowski(2012), "Dehydrogenation of propane with CO₂-a new green process for propene and synthesis gas production." *Polish Journal of Chemical Technology*, 14(4):77-82.
- [3] B. Su, Z. Luo, T. wang, J. Zhang, F. Cheng(2020), "Experimental and principal component analysis studies on minimum oxygen concentration of methane explosion." *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(21):12225-12235.
- [4] C. Jang, J. W. Kwon, M. H. Hwang(2017), "A study on explosion risk management for oil heater." *Journal of Korea Safety Management & Science*, 19(3): 1-10.
- [5] Y. J. Kwon, J. H. Byeon(2020), "A study on the management plan through performance maintenance analysis of explosion-proof facilities." *Journal of the Korea Society of Safety*, 35(2):8-16.
- [6] IEC 60079-14(2014), Explosive atmospheres- Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures d. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland.
- [7] IECEx Certificates, Search, Filters(2022), IEC Standard (IEC 60079-1). Retrieved July 20, 2022 from <https://www.iecex-cert.com/#/search>
- [8] OSHCI(2022), Statues of safety certificates on explosion-proof electric machines, tools and parts. Retrieved July 20, 2022 from <https://miis.kosha.or.kr/oshci/busi/ListExpSafetyCheck.do?searchType=D>
- [9] M. Mitu, V. Brinzea, A. Musuc, D. Razus, D. Oancea(2011), "Deflagration parameters of propane-air mixtures in a closed cylindrical vessel." *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin series B-Chemistry and Materials Science*, 73(3):17-26.
- [10] C. Movileanu, V. Gosa, D. Razus(2012), "Explosion of gaseous ethylene-air mixtures in closed cylindrical vessels with central ignition." *Journal of Hazardous Materials*, 235-236:108-115.
- [11] D. Razus, V. Brinzea, M. Mitu, D. Oancea(2009), "Explosion characteristics of LPG-air mixtures in closed vessels." *Journal of Hazardous Materials*, 165:1248-1252.
- [12] D. Razus, C. Movileanua, D. Oancea(2007), "The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures." *Journal of Hazardous Materials*, 139:1-8.
- [13] G. Ciccarelli, Q. Li, C. Metrow(2018), "The three-dimensional structure of a detonation wave propagating in a round tube with orifice plates." *Shock Waves*, 28(5):1019-1030.
- [14] L. Q. Wang, H. H. Ma, Z. W. Shen(2019), "On the explosion characteristics of hydrogen-air mixtures in a constant volume vessel with an orifice plate." *International Journal of Hydrogen Energy*, 44:6271-6277.
- [15] K. Cashdollar, I. Zlochower, G. Green, R. Thomas, M. Hertzberg(2000), "Flammability of methane, propane, and hydrogen gases." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3-5): 327-340.
- [16] A. Pekalski, H. Schildberg, P. Smallegange, S. Lemkowitz, J. Zevenbergen, M. Braithwaite, H. Pasma(2005), "Determination of the explosion behaviour of methane and propene in air or oxygen at standard and elevated conditions." *Process Safety and Environmental Protection*, 83(B5): 421-429.
- [17] D. Razus, V. Brinzea, M. Mitu, D. Oancea(2010), "Temperature and pressure influence on explosion pressures of closed vessel propane-air deflagrations." *Hazardous Materials*, 174:548-555.
- [18] Y. Cao, J. Guo, K. Hu, L. Xie, B. Li(2017), "Effect of ignition location on external explosion in hydrogen-air explosion venting." *International Journal of Hydrogen Energy*, 42:10547-10554.
- [19] H. Moradi, F. Sereshki, M. Ataei, M. Nazari(2020),

- “Evaluation of the effect of the moisture content of coal dust on the prediction of the coal explosion index.” Rudarsko-geolosko-naftni Zbornik, 35(1):17-26.
- [20] S. Qi, Y. Du, P. Zhang, G. Li, Y. Zhou, B. Wang(2017), “Effects of concentration, temperature, humidity, and nitrogen inert dilution on the gasoline vapor explosion.” Hazardous Materials, 323:593-601.
- [21] S. Wang, D. Wu, H. Guo, X. Li, X. Pu, Z. Yan, P. Zhang(2020). “Effects of concentration, temperature, ignition energy and relative humidity on the overpressure transients of fuel-air explosion in a medium-scale fuel tank.” Fuel, 259:116265.
- [22] Y. T. Kim, K. H. Jung(2022), “Relationship analysis between relative humidity and explosion pressure of hydrogen-air and acetylene-air mixtures in flameproof enclosure.” Journal of Korea Safety Management & Science, 24(4):101-107.
- [23] IEC 60079-1(2014), Explosive atmospheres-Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures d. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland.
- [24] ISO/IEC 80079-20-1(2017), Explosive atmospheres-Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification-Test methods and data.
- [25] IEC 60079-2(2014), Explosive atmospheres-Part 2: Equipment protection by pressurized enclosure p. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland.
- [26] G. Harris, P. Briscoe(1967), “The effect of vessel size and degree of turbulence on gas phase explosion pressures in closed vessels,” Combust and Flame, 11:17-25.

저자 소개



김 용 태

현재 울산대학교 대학원 산업경영공학부 박사 과정 중.
관심분야 : 산업안전보건, 방폭, 전기안전



정 기 효

포항공과대학교 산업경영공학과 박사 취득.
현재 울산대학교 산업경영공학부 교수 재직 중.
관심분야 : 인간공학, 산업안전보건, 데이터 분석