

내압방폭구조에서 수소-공기와 아세틸렌-공기 혼합가스의 폭발압력과 상대습도의 상관관계 분석

김 용 태* · 정 기 효*

*울산대학교 산업경영공학과

Relationship Analysis between Relative Humidity and Explosion Pressure of Hydrogen-Air and Acetylene-Air Mixtures in Flameproof Enclosure

Yong-Tae Kim* · Kihyo Jung*

*School of Industrial Engineering, University of Ulsan

Abstract

To test a flameproof enclosure for the safety certificate, a reference pressure of explosion needs to be determined. However, the explosion pressure may be changed according to relative humidity of explosive gases. Therefore, the guideline on relative humidity should be recommended for measuring the explosion pressure for accurate and reproducible testings. This study examined the relationship of explosion pressure with relative humidity of hydrogen (31 vol %)–air and acetylene (14 vol %)–air mixture gases. The explosion pressures were measured by increasing the relative humidity of the gases by 10 % from dry state to 80 % in a cylindrical explosion enclosure of 2.3 L. on ambient temperature and atmospheric pressure (1 atm). The maximum explosive pressures were remained almost constant until the relative humidity reached 10 % for the hydrogen–air mixture and 20 % for the acetylene–air mixture. However, the maximum explosive pressures linearly decreased as the relative humidity increased. Based on the results of the study, it would be recommended to use 10 % relative humidity for the hydrogen–air mixture and 20 % for the acetylene–air mixture as the critical value in testing a flameproof enclosure.

Keywords : Hydrogen–air, Acetylene–air, Relative humidity, Explosion pressure, Flameproof enclosure

1. 서 론

인화성 액체·가스·고체를 사용하는 폭발위험장소 [1]에서는 산업안전보건법 제84조에 따라 KCs 안전인증을 받은 방폭구조의 전기기기를 사용해야 한다[2]. 현행 KCs 방폭 안전인증은 기존의 3년 또는 5년의 유효기간을 갖는 성능검정합격증을 발급하던 제도에서 제조자의 공장 심사(기술능력 및 생산체제 심사)를 더하여 안전인증서를 발급하는 제도로 2009년에 도입되었다. 또한, 현행 안전인증은 확인심사(인증서의 주소에서 생산하는지 여부, 기술능력 및 생산체제의 유지 여부, 수거제품심사, 서면심사

내용과 같은 수준 이상의 재료 및 부품 사용 여부)를 통해 발급된 안전인증서의 유효성을 주기적으로 확인하고 있다. 현재까지 KCs 방폭 인증이 가능한 기관(이하, 인증기관)은 한국산업안전보건공단(KOSHA), 한국산업기술시험원(KTL), 한국가스안전공사(KGS) 3개이며, 인증 대상은 방폭구조를 갖는 전기기계·기구 및 부품(산업안전보건법 시행령 제74조)이다. 폭발위험지역에 사용할 목적으로 제조 또는 수입(형식별 10개 이하)하는 자는 출고(시장에 사용 가능한 상태로 놓이는 것) 또는 수입(통관)시 안전인증기관에 인증신청을 해야 한다(안전인증자율 안전확인신고의 절차에 관한 고시 제5조).

방폭구조는 내압방폭구조, 압력방폭구조, 충전방폭구조

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

등으로 다양하나, 내압방폭구조가 국내외 인증의 약 40%를 차지할 정도로 보편적이다. 내압방폭구조(flameproof enclosures; Ex d)는 용기 내부의 불꽃이나 폭발이 허용되거나 폭발 화염이 용기 외부로 전이되지 않아야 한다. 그로 인해, 내압방폭구조는 비교적 구현이 쉬워 국내외에서 가장 많이 사용되는 방폭구조이다[3, 4].

폭발압력은 내압방폭구조의 기계적 강도 설계 및 시험에 있어 매우 중요한 기준이 된다. 인증기관은 제품심사시 폭발압력을 기준압력으로 정하고, 그 값의 일정 배수(1.5배, 3배, 4배)에 대해 내압시험(overpressure test)을 수행한다. 내압시험에서 기준압력의 4배에 대해 방폭기준(용기의 영구적인 변형이 없음)을 충족하면 확인시험(routine test)의 의무가 없으나, 이를 충족하지 못하면 추가로 확인시험의 의무가 부가된다. 기준압력의 1.5배까지 방폭 기준을 충족할 경우는 모든 용기에 대해 확인시험을 해야 하며, 기준압력의 3배까지 기준을 충족할 경우는 배치(batch, 구분할 수 있는 생산단위)별 샘플링(8개/100개 이하, 32개/1,000개 이하, 80개/10,000 이하)하여 기준압력의 1.5배에 대한 확인시험을 해야 한다. 한편, 내압시험에는 공기 또는 불활성 gas와 같은 압축성 매체를 사용하면 용기가 파괴되면서 신체적 상해나 재산 피해를 야기할 수 있어 일반적으로 비압축성매체가 사용된다[5]. 그로 인해, 내압시험에는 비압축성 매체인 물을 사용한 수압시험을 주로 사용하게 된다. 그러나 수압시험은 시험 후 용기를 건조해야 하는 추가적인 공정이 필요하므로 제조자는 가능하면 4배의 내압시험을 통과해서 확인시험을 최소화할 수 있도록 방폭구조를 설계하는 경향이 있다.

폭발압력에는 가스 조성 및 농도, 초기압력, 주위온도, 점화위치, 용기의 형태 및 크기, 장애물 유무, 습도 등의 요인이 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다[6-16]. Cashdollar et al. [6]은 수소-공기 혼합가스의 최대폭발압력이 화학양론농도(Cst, stoichiometric ratio) 보다 조금 높은 값에서 발생함을 실험을 통해 확인하였다. Razus et al. [8]은 구형용기의 체적이 달라도 폭발압력에 큰 영향이 없음을 파악하였다. Xiong et al. [7], Ciccarelli et al. [12], Wang et al. [13]은 장애물의 비율이 증가함에 따라, Cammarota et al. [9]은 초기압력이 높을수록, Razus et al. [10]은 초기온도가 낮을수록, Cao et al. [11]은 용기 중앙에서 점화될 때 폭발압력이 최대가 됨을 규명하였다. 한편, Moradi et al. [14]은 석탄분진에서 인화성혼합물($\text{CH}_4 + \text{Air}$)에 습기가 많아지면 최대폭발압력이 점진적으로 감소하고, 습기가 분진의 허용한계를 초과하면(임계값) 점화가 일어나지 않음을 실험적으로 규명하였다. 마지막으로, Qi et al. [15]과 Wang et al. [16]은 가솔린증기 폭발에서 최대폭발압력과 습도와의 관계를 시험하였다.

폭발압력에 대한 다양한 선행 연구에도 불구하고 기기 그룹 IIC (수소(31 vol %) -공기와 아세틸렌(14 vol %) -공기 혼합가스)에 대해 내압방폭구조의 폭발압력 선정 시 고려해야 할 습도에 대한 실험적 연구는 미흡한 실정이다. IEC 60079-1(15.2절) [5]에는 폭발압력 결정을 위한 측정압력 값의 필터링 방법, 사용온도가 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 이하인 기기의 시험방법, 초기시험압력, 시험 횟수, 폭발성 혼합물의 농도, 점화 위치가 제시되어 있다. 그러나 혼합가스의 폭발압력은 습도에 의해 영향을 받음에도 불구하고, 습도 기준에 관한 명시적 언급이 없다. 따라서 가스 그룹에서 폭발 위험도가 가장 높은 등급인 IIC 그룹에 포함된 혼합가스에 대한 폭발압력과 습도 간의 관계를 실험적으로 규명하는 연구가 필요하다.

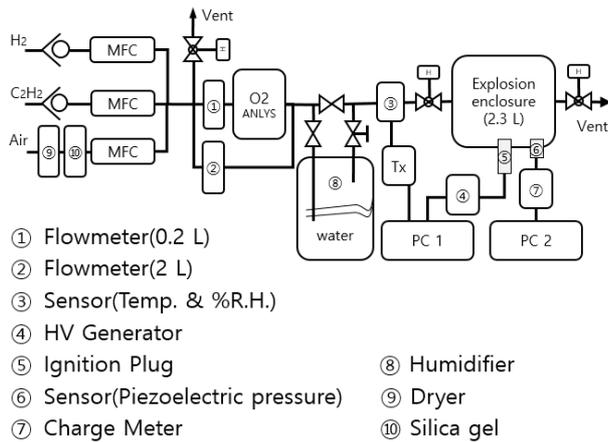
본 연구는 기존 연구에서 다루지 않았으며 IEC 60079-1에 명시되지 않은 상대습도 변화에 따른 기기 그룹 IIC의 대표가스인 아세틸렌-공기와 수소-공기 혼합가스의 폭발압력 영향 및 임계값을 파악하였다. 본 연구는 다양한 습도 조건에 대한 폭발 실험을 위해 혼합가스의 습도를 조절할 수 있는 가습장치가 갖춰진 폭발시험장치를 제작하였다. 또한, 지정된 비율의 가스-공기 혼합을 위해 질량유량계와 산소농도분석기를 갖추도록 제작되었다. 폭발압력은 용기 중앙에 설치된 점화 플러그를 점화시켜 폭발을 유발한 후 용기 벽면에 부착된 압력센서로 측정되었다. 본 연구의 결과는 내압방폭구조의 폭발압력을 보다 일관성 있고 정확하게 측정하기 위한 습도 기준을 설정하는 데 활용되어 안전인증을 위한 제품시험의 신뢰성을 향상하게 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구의 폭발실험장치는 [Figure 1]과 같이 인화성 gas와 공기를 혼합하여 농도를 조절하는 질량유량계(MFC, Mass Flow Controller, EL-Flow, Bronkhorst사), 혼합가스의 농도를 확인하는 산소농도분석기(O_2 Analyzer, Xendos 2223, Servomex사), 혼합가스의 습도를 조절하는 가습장치, 혼합가스의 온도 및 상대습도 측정기(Humidity & Temperature transmitter, EE31, E+E elektronik사), 폭발용기(Explosion enclosure), 고전압(10 kV) 발생장치(HV Generator), 점화 플러그(Ignition Plug), 압력센서(Piezoelectric pressure sensor), 압력전송기(Charge meter; low-pass filter with a 3 dB point of 5 kHz), 제어용 컴퓨터(PC 1), 압력측정용 컴퓨터(PC 2)로 구성되어 있다. 압축공기는 건조기

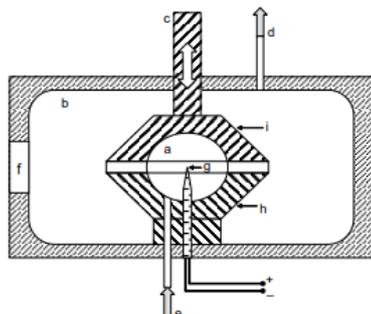
(Dryer)와 제습제(Silica gel)를 거쳐 건조된 상태로 공급되며, 순도는 수소 99.99 % 및 아세틸렌 99.95%이다.



[Figure 1] Schematic diagram of the experimental apparatus

지정된 농도의 혼합가스는 질량유량계와 산소농도분석기를 사용하여 제조되었다. 먼저, 수소, 아세틸렌, 압축공기의 온도, 분자량, 유량을 고려하여 폭발성 혼합가스를 조성하였다. 그리고 산소농도분석기를 이용하여 조성된 농도를 실시간으로 측정하면서 질량유량계를 조절하여 최종적으로 지정된 농도의 혼합가스를 구성하였다.

폭발용기는 체적 2.3 L, 직경 200 mm, 높이 75 mm의 원통형 용기이며, 단면은 [Figure 2]와 같다[18]. 본 연구에 사용된 폭발용기는 최대실험안전틈새([Figure 2]에서 h 표시된 부분과 i 표시된 부분 사이)를 측정할 수 있는 장치이나, 본 연구에서는 용기의 외부챔버([Figure 2]에서 b 표시된 부분)에 설치된 압력센서로 폭발압력을 측정한다. 수소와 아세틸렌의 최대실험안전틈새는 각각 0.29 mm와 0.37 mm이다[18]. 따라서 내부챔버([Figure 2]에서 a 표시된 부분)의 폭발이 틈새의 영향을 받지 않고 외부챔버로 전이되도록 틈새를 4.90 mm로 설정하였다.



[Figure 2] Cross-section of the explosion enclosure (a: Interior spherical chamber, b: Exterior cylindrical enclosure, c: Adjustable part, d: outlet of mixture, e: Inlet of mixture, f: Observation window, g: Ignition plug, h: lower gap plate, fixed, i: upper gap plate, adjustable)

본 연구는 혼합가스의 습도 조절을 위해 폭발시험장치에 가습장치([Figure 1]에서 ⑧번)를 설치하였다. 가습장치는 [Figure 3]에 나타난 것과 같이 니들밸브, 마이크로 니들밸브, 볼밸브, 물을 채운 병으로 구성되었다. 본 연구의 가습장치는 혼합가스가 지나가는 배관을 양 갈래로 구분하고 그중에 하나를 밀폐된 수조를 통과시켜 상대습도를 조절할 수 있게 하였으며, 습도 조절이 필요 없는 실험 조건을 위해 바이패스가 가능하게 하였다.



[Figure 3] Humidifier used in this study (① needle valve, ② micro needle valve, ③ ball valve, ④ bottle with water)

2.2 실험 절차

본 연구는 폭발용기 내부를 IEC 60079-1의 15.2.2.2 절에 명시된 수소(31 ± 1) % 및 아세틸렌(14 ± 1) % 농도의 혼합가스로 채운 후 점화시켜 폭발로 발생하는 압력을 측정하였다. 혼합가스의 부피 비율(대기압에서 공기와 가스의 비율)은 수소(31 ± 0.2) % 및 아세틸렌(14 ± 0.2)%로 측정되었다. 본 연구는 상대 습도에 따른 폭발압력을 분석하기 위해 혼합가스를 물이 담긴 가습장치를 통과시켜 상대습도를 건조한 상태(약 0%)에서 최대 80%까지 약 10% 단위로 가습시켰다. 그리고 실험은 각 습도 조건에 대해 5회 반복되었다.

폭발용기 내부를 원하는 상대습도로 조성하기 위해 혼합가스의 유량을 분당 2.5 L로 7분 이상 흘려보내 용기체적의 7배 이상 퍼지(purge) 시켰다. 이러한 방법은 IEC 60079-2 (7.8절)의 퍼지 기준 5배를 상회하는 수준이다[17]. 혼합가스가 대기압이 되도록 폭발용기의 입구 밸브를 먼저 닫고 수초 후 출구 밸브를 닫았다. 그리고 폭발용기 중앙의 점화 플러그를 점화시켜 폭발을 유발한 후, 용기 벽면에 설치된 압력센서로 폭발압력을 측정하였다. 폭발압력의 측정이 끝나면 폭발용기 안의 연소가스를 깨끗한 압축공기로 퍼지하고, 그 다음 조건의 폭발시험을 시행하였다.

3. 실험 결과

3.1 수소 혼합가스

수소 혼합가스의 상대습도에 따른 폭발압력은 <Table 1>과 같다. 상대습도는 실험조건으로 지정된 값과 유사하였으나, 미미한 변동(최대 차이: ± 0.4%)이 있었던 것으로 분석되었다. 한편, 수소 혼합가스의 온도는 습도 조건이 달라져도 혼합가스의 온도(범위: 23.0 °C ~ 23.5 °C)는 유사한 것으로 파악되었다.

상대습도 조건별 수소 혼합가스의 최대폭발압력 평균 값과 표준편차는 <Table 2>와 같은 것으로 분석되었다. 최대폭발압력의 평균은 상대습도에 따라 689.3~759.6 kPag의 범위를 보였다. 한편, 최대폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 (10.2 ~ 21.5) kPag로 나타났다.

본 연구는 상대습도와 최대폭발압력 간의 연관성을 분석하기 위해 SPSS(V24, IBM)를 활용하여 회귀 분석을 수행하였다. 수소 혼합가스는 상대습도가 증가함에 따라 최대폭발압력이 [Figure 4]와 같이 감소하는 것으로 나타났다($R^2 = 0.671$). 상대습도 10% 이하는 최대폭발압력이 비슷한 것으로 나타나 상대습도의 임계값은 10%로 분석되었다. 상대습도의 임계값인 10% 보다 증가하면 최대폭발압력이 759.6 kPag에서 697.1 kPag로 62.5 kPag 감소하는 것으로 나타났다.

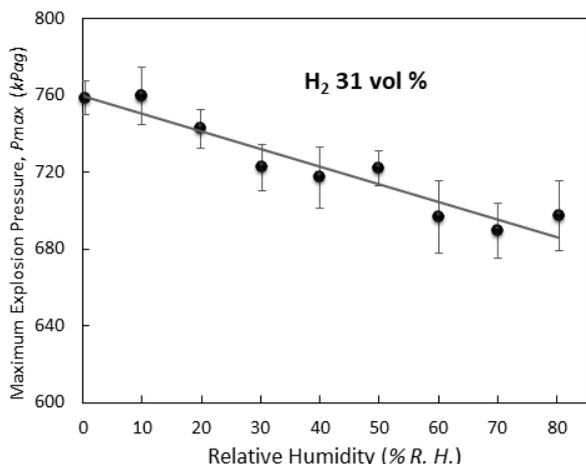
<Table 1> Results of H₂(31 vol %)-air explosion mixtures at various relative humidity

Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)
0.4	769.6
0.4	743.2
0.3	763.5
0.3	754.3
0.3	762.2
10.1	738.3
9.7	779.5
10.2	747.0
10.0	760.7
9.8	736.5
20.1	736.5
19.7	754.8
19.8	726.9
19.7	753.0
19.7	741.3
30.4	707.7

Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)
30.4	710.3
30.4	723.1
30.2	740.4
29.9	730.4
40.2	734.2
40.1	686.4
39.6	725.6
40.2	718.7
40.0	720.8
50.0	740.3
50.0	715.1
49.9	717.2
49.6	716.6
50.1	720.9
60.2	702.3
60.1	706.3
60.0	658.3
60.1	708.9
60.0	706.5
70.1	682.5
70.0	667.2
70.0	709.6
70.0	699.7
69.9	687.5
80.4	697.3
80.4	698.0
80.4	718.7
80.3	707.8
80.2	663.6

<Table 2> Average and standard deviation of maximum explosion pressures at various relative humidity for H₂(31 vol %)-air explosion mixtures

Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)	
	Average	Standard Deviation
0.3	758.6	10.2
10.0	759.6	17.2
19.8	742.5	11.6
30.3	722.4	13.7
40.0	717.1	18.2
49.9	722.0	10.4
60.1	696.5	21.5
70.0	689.3	16.3
80.3	697.1	20.6



[Figure 4] Maximum explosion pressure (p_{max}) with the various relative humidity on H₂(31 vol %) -air explosion mixtures

3.2 아세틸렌 혼합가스

아세틸렌 혼합가스의 상대습도에 따른 폭발압력은 <Table 3>과 같다. 상대 습도는 실험조건으로 지정된 값과 유사하였으나(최대: ± 0.4%), 상대습도가 가장 낮은 조건은 3%로 설정된 것으로 나타났다. 한편, 아세틸렌 혼합가스의 온도는 습도 조건이 달라져도 혼합가스의 온도(범위: 26.0 °C ~ 26.3 °C)가 유사한 것으로 분석되었다.

<Table 3> Experimental results of C₂H₂(14 vol %) -air explosion mixtures at various relative humidity

Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)
3.1	1189.6
2.9	1182.5
2.8	1122.8
2.8	1196.3
3.0	1081.5
10.0	1026.5
10.0	1188.2
9.9	1094.1
10.1	1177.4
10.2	1223.6
20.1	1059.0
20.2	1168.3
19.8	1166.2
19.8	1132.5
20.2	1162.1
30.3	1095.2
30.2	1070.7
30.1	1072.8
30.1	1048.2
30.0	1040.8

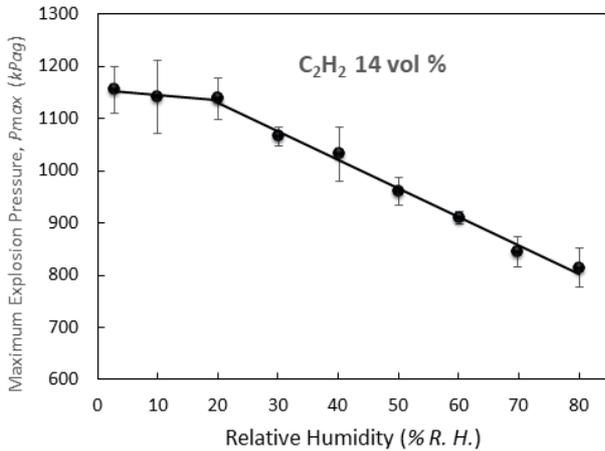
Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)
40.1	1022.8
40.1	960.1
40.3	1124.3
40.2	1039.9
40.3	1014.3
50.4	982.2
50.3	967.8
49.4	940.3
50.0	918.7
50.1	993.6
60.2	917.1
59.8	914.8
60.0	921.7
59.9	888.3
60.4	906.3
69.8	846.0
70.1	866.2
69.9	874.3
69.7	851.4
69.9	789.2
79.8	771.5
80.3	818.2
79.8	827.7
79.8	779.2
80.6	875.1

아세틸렌 혼합가스의 최대폭발압력의 평균값과 표준편차는 <Table 4>와 같다. 최대폭발압력의 평균은 상대습도에 따라 (814.3~1154.5) kPag의 범위를 보였다. 한편, 최대폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 (13.2 ~ 80.1) kPag로 나타났다.

<Table 4> Average and standard deviation of maximum explosion pressures at various relative humidity for C₂H₂(14 vol %) -air explosion mixtures

Relative Humidity (% R.H.)	Maximum Explosion Pressure (kPag)	
	Average	Standard Deviation
2.9	1154.5	50.2
10.0	1142.0	80.1
20.0	1137.6	46.3
30.1	1065.5	21.6
40.2	1032.3	59.5
50.0	960.5	30.7
60.1	909.6	13.2
69.9	845.4	33.4
80.1	814.3	41.7

아세틸렌 혼합가스는 상대습도가 증가함에 따라 최대 폭발압력이 [Figure 5]와 같이 감소하는 경향이 있었다 ($R^2 = 0.875$). 상대습도가 20% 이하일 때는 최대폭발압력이 유사한 것으로 나타났으며, 그로 인해 상대습도에 대한 임계값은 20%로 파악되었다. 상대습도가 임계값인 20%를 초과하면 최대폭발압력은 약 1137.6 kPag에서 814.3 kPag로 323.3 kPag 감소하는 것으로 나타났다.



[Figure 5] Maximum explosion pressure at various relative humidity for C_2H_2 (14 vol %)-air explosion mixtures

4. 실험결과논의

본 연구와 유사하게 Qi et al. [15]과 Wang et al. [16]은 가솔린 증기 폭발에서 상대습도가 증가함에 따라 최대 폭발압력이 감소하는 경향이 있음을 보고하였다. 이러한 경향성은 두 가지 요인에 의해 나타나는 현상으로 해석될 수 있다. 첫째, 습도가 증가하면 수증기로부터 발생된 라디칼이 증가하므로 폭발 반응물의 라디칼 농도를 감소시켜 폭발강도가 감소한다. 둘째, 수증기는 폭발과정에서 방출되는 열을 흡수하고 폭발강도를 줄여 결국 폭발압력을 감소시킨다. 따라서 수소와 아세틸렌은 일정한 온도에서 상대습도가 증가함에 따라 폭발압력이 낮아지며, 이러한 경향성은 동일한 온도에서 상대습도의 증가로 O, H, OH와 같은 라디칼이 감소되어 폭발반응성 및 폭발열을 감소시키기 때문으로 해석될 수 있다.

상대습도의 임계값(폭발압력에 영향을 미치지 시작하는 값)은 수소 폭발에서 10%, 아세틸렌 폭발에서 20%인 것으로 나타났다. 따라서 상대습도의 영향을 최소화하기 위해 내압방폭구조의 기준폭발압력 측정 시 혼합가스의 상대습도는 10% 이내로 유지하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 원통형 폭발용기(2.3 L)에 수소(31 vol %)-공기, 아세틸렌(14 vol %)-공기 혼합가스의 상대습도를 건조한 상태에서 80%까지 10%씩 증가시키면서 상온, 대기압(1 atm)에서 폭발압력을 측정하였다. 혼합가스의 최대폭발압력은 상대습도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 수소-공기 혼합가스는 상대습도의 임계값이 10%로 파악되었고, 아세틸렌-공기 혼합물은 상대습도의 임계값이 20%로 나타났다. 따라서, 안전인증을 위한 내압방폭구조의 폭발압력측정시험을 할 때는 임계값을 고려하여 수소의 경우 상대습도 10%, 아세틸렌은 상대습도 20% 이내로 유지하는 것이 권장된다. 이 조건을 충족하기 위해서는 공기압축기 후단에 건조기(Dryer)와 제습제(H_2SO_4 , KOH, $CaCl_2$ 또는 Silca gel)를 설치하여 압축공기의 습기를 제거하고 수소와 아세틸렌은 습기가 거의 없는 인증표준가스(CRM, certified reference materials) 또는 표준가스(RM, reference materials)를 사용하는 것이 필요하다.

본 연구는 방폭기기 그룹 IIC에 포함된 수소와 아세틸렌에 대한 상대습도와 폭발압력 간의 연관성을 실험을 통해 분석하고 임계값을 파악하였다. 본 연구의 실험 장치와 실험 방법론은 방폭기기 그룹 IIC뿐만 아니라 다양한 방폭기기 그룹(그룹 I, IIA, IIB)의 폭발실험에 적용될 수 있다. 따라서 본 연구진은 방폭기기 그룹별 대표적 가스(예: 메탄, 프로판, 에틸렌)에 대한 상대습도의 폭발압력 영향을 실험적으로 규명하는 향후 연구를 추진할 수 있을 것으로 기대된다.

6. References

- [1] D. Y. Kim, Y. W. Chon, I. M. Lee, Y. W. Hwang(2017), "A study on the improvement of classification of explosion hazardous area using hypothetic volume through release characteristic." The Journal of Korea Safety Management & Science, 19(2):31-39.
- [2] S. H. Lee, T. H. Kim(2017), "A guideline on development of LED convergence intrinsic safety luminaire for marine plants & ships and its standard." The Journal of Korea Safety Management & Science, 19(4):25-34.
- [3] IECEx Certificates, Search, Filters(2022), IEC standard (IEC 60079-1). Retrieved July 20, 2022 from <https://www.iecex-cert.com/#/search>

- [4] 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>
- [5] IEC 60079-1(2014), Explosive atmospheres-Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures d. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland
- [6] L. K. Cashdollar, A. I. Zlochower, M. G. Green, A. R. Thomas, M. Hertzberg(2000), "Flammability of methane, propane, and hydrogen gases." Loss Prevention in the Process Industries, 13(3-5): 327-340.
- [7] Y. Xiong, Y. Ma, H. Zhao, Y. Hu(2020), "Simulation study on the explosion characteristics of premixed hydrogen-air mixtures." Earth and Environmental Science, 546.
- [8] D. Razus, C. Movileanu, V. Brinzea, D. Oancea(2006), "Explosion pressures of hydrocarbon-air in closed vessels." Hazardous Materials, B135:58-65.
- [9] F. Cammarota, D. Benedetto, V. D. Sarli, E. Salzano, G. Russo(2009), "Combined effects of initial pressure and turbulence on explosions of hydrogen-enriched methane/air mixtures." Loss Prevention in the Process Industries, 22:607-613.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] G. Cicarelli, 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.
- [13] 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.
- [14] 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." MGPB, 35(1):37-47.
- [15] S. Q. Du, G. Li, B. Wang(2017), "Effects of concentration, temperature, humidity, and nitrogen inert dilution on the gasoline vapor explosion." Hazardous Materials, 323:593-601.
- [16] 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.
- [17] IEC 60079-2(2014), Explosive atmospheres-Part 2: Equipment protection by pressurized enclosure p. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland.
- [18] ISO/IEC 80079-20-1(2017), Explosive atmospheres-Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification-Test methods and data. International Electrotechnical Commission(IEC), Geneva, Switzerland.

저자 소개



김용태

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



정기효

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