



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

상대습도가 내압방폭구조의 폭발기준압력 결정에  
미치는 영향 연구

A Study on Effect of Relative Humidity in Determining  
Explosion Reference Pressure for Flameproof Enclosures

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원  
안 전 보 건 전 문 학 과  
김 용 태

상대습도가 내압방폭구조의 폭발기준압력 결정에  
미치는 영향 연구

지도교수 정 기 효

이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2023년 8월

울 산 대 학 교 일 반 대 학 원  
안 전 보 건 전 문 학 과  
김 용 태

김용태의 공학박사학위 논문을 인준함

심사위원 박창권 (인)

심사위원 이수동 (인)

심사위원 황규선 (인)

심사위원 최지원 (인)

심사위원 정기효 (인)

울산대학교대학원

2023년 8월

## 국문 요약

# 상대습도가 내압방폭구조의 폭발기준압력 결정에 미치는 영향 연구

울산대학교 일반대학원  
안전보건전문학과  
김 용 태

산업의 발전과 함께 다양한 인화성 물질(가스, 증기, 미스트, 분진, 섬유)을 다루는 공정이 증가하고 이에 따른 화재·폭발의 위험은 높아지고 있다. 근원적으로 화재·폭발의 위험을 줄이기 위해서는 인화성 물질을 인화성이 없거나 낮은 물질로 대체하고 사용하는 인화성 물질을 통제(인화성 물질의 양을 줄이고 누출을 억제 또는 최소화하고 누출된 물질을 수거 및 격리)하여 폭발성 분위기가 조성되는 장소를 적게 하고 남아 있는 폭발성 분위기의 존재 가능성에 따라 폭발위험장소를 구분하여 기계·기구를 설계, 선정, 설치, 유지보수 해야 한다. 또한 폭발 발생 시 폭발을 완화(폭발 전파 방지, 폭발압력을 경감, 억제, 노출된 인원을 최소화)시켜 피해를 최소화 해야 한다.

폭발위험장소에 전기기기를 설치·사용하는 경우에는 전기기기가 점화원이 되지 않도록 방폭구조를 적용해야 한다. 방폭구조에는 내압, 압력, 안전증, 본질안전, 몰드, 비점화 방폭구조 등 다양한 구조가 적용된다. 내압방폭구조(flameproof enclosure “d”)는 가장 오래되고 안전인증품의 약 40 %를 차지할 정도로 많이 사용되는 방폭구조로서 내압방폭용기의 내부에는 인화성 가스·증기가 존재할 수 있고 내부폭발이 발생해도 용기가 압력에 견디고 기기 주위의 폭발성 분위기로 폭발이 전파되지 않아야 하는 개념이다. 폭발압력은 내압방폭용기의 기계적 강도 설계 및 인증시험 시 내압시험의 기준압력으로 사용되는 중요한 값이다. 폭발압력에 영향을 미치는 요인에는 인화성가스의 농도, 초기온도, 초기압력, 점화원의 위치, 점화에너지, 장애물의 유무 및 형상, 용기의 크기 및 기하학적 형태, 습도 등이 있고 이와 관련된 다수의 선행연구가 있었지만 내압방폭용기의 폭발기준압력의 결정 시 습도의 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, IEC 60079-1: 2017 (15.2절)에는 폭발압력(기준압력) 결정시험을 위한 시료의 구성, 시험절차, 측정된 압력 값의 필터링 방법, 초기압력, 점화위치, 폭발혼합가스의 조성비, 시험횟수, 사용 주위온도가 -20

℃ 이하인 기기의 시험방법이 명시되어 있으나 습도가 폭발혼합가스의 폭발압력에 영향을 끼침에도 습도기준은 제시되어 있지 않다. 따라서 가스·증기의 물질 특성을 분류하는 국제기준 ISO/IEC 80079-20-1과 유럽기준 EN 13673-1과 같이 폭발압력시험 시 공기의 습도기준을 명확히 하기 위한 연구가 필요하다. 시험장치는 가스혼합장치, 가습장치, 폭발압력 측정장치로 구성되어 원통형 폭발용기 중앙에서 점화를 시키고 용기의 외벽에 설치된 압력센서로 폭발압력을 측정하였다. 방폭 기기그룹에 따라 IIC(수소, 아세틸렌), IIB(에틸렌), IIA(프로판), I(메탄) 각각의 인화성가스를 공기와 혼합하였다. 폭발혼합가스의 상대습도를 건조한 상태에서 상대습도 80 %까지 10 %단계로 조절하여 폭발시험을 수행하였다. 상온, 대기압(1 atm)에서 수소(31 vol. %)-, 아세틸렌(14 vol. %)-, 에틸렌(8 vol. %)-, 프로판(4.6 vol. %)-, 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력은 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 본 연구의 결과에서 수소-공기 혼합가스는 상대습도의 임계값이 10 %로 나타났고, 아세틸렌-공기 혼합가스는 상대습도의 임계값이 20 %로 파악되었다. 또한 분산분석의 결과에 따르면 에틸렌-, 프로판-공기 혼합가스는 상대습도가 10 %에서 20 %로 증가할 때 폭발압력 평균의 차이가 크게 나타났고 메탄-공기 혼합가스는 0 %와 10 %에서 폭발압력 평균의 차이가 없는 것으로 분석되었고 20 %이상에서는 폭발이 일어나지 않았다. 이와 같이 폭발특성에 있어 습도의 증가는 물 분자에서 생성된 라디칼을 증가시키고 폭발용기 내 반응물의 라디칼 농도를 감소시키고 더욱이 수증기의 열용량이 커서 일정한 용기의 체적에서 더 많은 열을 흡수하여 압력을 감소시킨 결과이다.

본 연구는 실험을 통한 실증적 연구로 폭발혼합물의 상대습도를 10 %이상 높아지면 폭발압력은 크게 낮아지거나 점화되지 않을 수 있음을 확인한 유의미한 결과를 도출하였다. 따라서 내압방폭용기의 폭발압력시험은 상대습도를 통제하고 모니터링하는 것이 권장된다. 이를 위해 인화성가스는 표준가스를 사용하고 압축공기는 드라이어와 황산( $H_2SO_4$ ), 수산화칼륨(KOH), 염화칼슘( $CaCl_2$ ), 실리카 겔(Silica gel;  $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) 등의 제습제, 습도계를 설치하여 10 %이하로 상대습도를 관리하는 것이 필요하다.

본 연구는 학술적측면과 실무적 측면에서 의의가 있다. 첫째, 학술적으로 내압방폭구조의 폭발시험에 사용되는 폭발혼합농도로 실증하고 그 임계값을 제시하여 이를 기초로 다양한 스케일의 용기 및 형태에 대해 기초자료로 활용 가능할 것이다. 둘째, 폭발압력에 영향을 미치는 상대습도의 임계값을 도출하고 실제 인증에 적용 가능한 측면에서 실무적 의의가 있다고 사료된다.

Key word : 내압방폭, 폭발압력, 기준압력, 상대습도

# 목 차

국문요약 .....	i
표 목차 .....	v
그림 목차 .....	viii
1. 서론	
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구내용 및 방법 .....	4
1.3 연구의의 .....	5
2. 이론적 고찰 및 선행연구	
2.1 폭발특성 .....	6
2.1.1 연소와 폭발 .....	6
2.1.2 폭발특성 .....	9
2.1.3 폭발시험가스 .....	13
2.2 폭발압력에 영향을 미치는 요인 .....	16
2.2.1 인화성가스의 농도 .....	17
2.2.2 인화성가스의 초기온도와 초기압력 .....	19
2.2.3 점화원의 위치와 점화에너지 .....	22
2.2.4 장애물 유무 및 형상 .....	23
2.2.5 용기의 크기 및 기하학적 형태 .....	26
2.2.6 습도의 영향 .....	29
2.2.7 시사점 .....	30
2.3 방폭기기 .....	31
2.3.1 폭발위험장소 .....	31
2.3.2 방폭구조 .....	32
2.3.3 방폭그룹 .....	35
2.3.4 기기보호등급 .....	37
2.3.5 방폭온도등급 .....	39
2.3.6 용기의 보호등급(IP Code) .....	40
2.4 폭발시험 .....	41
2.4.1 방폭기기의 폭발시험 .....	41
2.4.2 폭발압력측정 IEC 60079-1 .....	43
2.4.3 인화성가스 증기의 최대폭발압력의 결정 EN 13673-1 .....	44
3. 실험방법	
3.1 실험장치 .....	45

3.1.1 폭발가스 혼합장치 .....	45
3.1.2 가슴장치 .....	48
3.1.3 폭발압력 측정장치 .....	48
3.2 실험절차 .....	50
3.3 통계분석방법 .....	52
4. 실험결과 .....	53
4.1 수소-공기 폭발혼합물 .....	53
4.2 아세틸렌-공기 폭발혼합물 .....	55
4.3 에틸렌-공기 폭발혼합물 .....	58
4.4 프로판-공기 폭발혼합물 .....	61
4.5 메탄-공기 폭발혼합물 .....	64
4.6 소결 .....	65
5. 결론 및 향후 연구방향	
5.1 결론 .....	66
5.2 향후 연구방향 .....	67
참고문헌 .....	68
Abstract .....	76



# 표 목차

<표 1-1> 내압시험용 소형기기의 상대 압력 .....	3
<표 2-1> 라디칼 연쇄 반응.....	7
<표 2-2> 폭발거동에 영향을 미치는 주요한 변수 .....	9
<표 2-3> 수소(H <sub>2</sub> )의 특징 .....	13
<표 2-4> 아세틸렌(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )의 특징 .....	14
<표 2-5> 에틸렌(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )의 특징 .....	14
<표 2-6> 프로판(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )의 특징 .....	15
<표 2-7> 메탄(CH <sub>4</sub> )의 특징 .....	15
<표 2-8> 폭발시험가스의 폭발특성 데이터 .....	16
<표 2-9> 인화성가스의 최대폭발압력 .....	18
<표 2-10> 대기압, 상온에서 메탄-공기 혼합가스를 실험한 폭발압력 .....	28
<표 2-11> 폭발위험장소의 구분 .....	32
<표 2-12> 방폭원리에 따른 방폭구조의 분류 .....	32
<표 2-13> 고용노동부고시에 따른 방폭구조의 종류 .....	33
<표 2-14> IEC 표준에 따른 방폭구조의 종류 .....	33
<표 2-15> 방폭 그룹 .....	36
<표 2-16> 그룹 II의 세분류 .....	36
<표 2-17> 기기보호등급 .....	37

<표 2-18> 폭발위험장소와 기기보호등급 .....	38
<표 2-19> 기기보호등급과 방폭구조 .....	38
<표 2-20> 온도등급과 자연발화온도 .....	40
<표 2-21> 용기의 보호등급 .....	40
<표 2-22> 방폭기기의 폭발시험의 종류 .....	41
<표 2-23> 보호등급별 고정자 절연시스템 시험 .....	41
<표 2-24> 회전기기의 폭발시험 혼합물 .....	42
<표 2-25> 소형부품 발화시험용 폭발시험 혼합물 .....	42
<표 2-26> 감소된 주위 온도에 대한 시험계수 .....	43
<표 3-1> 시험에 사용된 인화성가스의 순도 .....	46
<표 3-2> Technical specifications of MFC .....	46
<표 3-3> 기준압력결정을 위한 가스-공기 혼합물의 농도 .....	51
<표 4-1> 상대습도변화에 따른 수소(31 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과 .....	53
<표 4-2> 상대습도별 수소-공기 혼합가스의 폭발 압력의 평균 및 표준편차 .....	54
<표 4-3> 상대습도변화에 따른 아세틸렌(14 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과 .....	56
<표 4-4> 상대습도별 아세틸렌-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차 .....	57
<표 4-5> 상대습도변화에 따른 에틸렌(8.0 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과 .....	59
<표 4-6> 상대습도별 에틸렌-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차 .....	60

<표 4-7> 상대습도변화에 따른 프로판(4.6 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과	·62
<표 4-8> 상대습도별 프로판-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차	· 63
<표 4-9> 상대습도변화에 따른 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과	··· 64
<표 4-10> 상대습도별 메탄-공기 혼합가스의 최대폭발압력의 평균 및 표준편차 .....	64

# 그림 목차

[그림 1-1] 최근 7년간 화재·폭발 재해자 .....	1
[그림 1-2] 논문의 구성 .....	5
[그림 2-1] 연소의 구분 .....	6
[그림 2-2] 중간 라디칼 진행 .....	7
[그림 2-3] 가스폭발의 삼각형, 분진폭발의 오각형 .....	8
[그림 2-4] Comparison of detonation and deflagration gas dynamics .....	10
[그림 2-5] Gas Explosion apparatus .....	10
[그림 2-6] 전형적인 폭발압력 파형 .....	11
[그림 2-7] 비정형 폭발압력 파형 .....	11
[그림 2-8] 압력충첩 .....	12
[그림 2-9] 대기압과 상온의 공기 중에서 인화한계 .....	17
[그림 2-10] 120 L 구형용기와 20 L 용기 .....	18
[그림 2-11] 에틸렌-공기 혼합가스의 최대폭발압력 .....	19
[그림 2-12] 초기압력별 메탄-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	21
[그림 2-13] 프로판-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	21
[그림 2-14] 원통형 용기에서 점화위치에 따른 폭발압력 .....	22
[그림 2-15] 점화에너지에 따른 폭발압력의 영향 .....	23
[그림 2-16] 장애물이 설치된 원통형 용기에서 점화원 및 압력측정 위치 .....	24

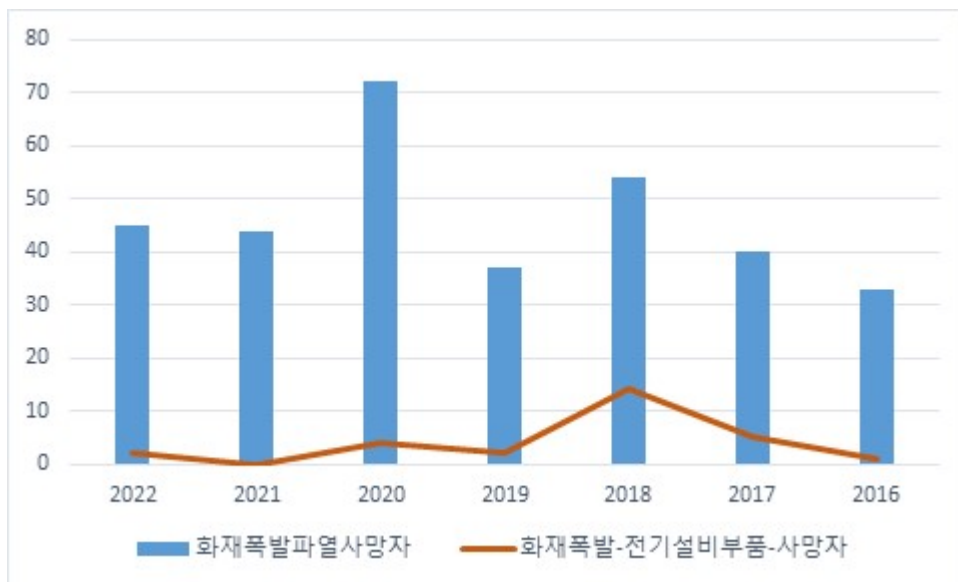
[그림 2-17] 최대폭발압력과 장애물의 영향 .....	24
[그림 2-18] 층류와 난류에서의 폭발압력 .....	25
[그림 2-19] 펜테인-공기 농도별 최대폭발압력 .....	27
[그림 2-20] 메탄-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	28
[그림 2-21] 에폭시프로판의 상대습도 40 %, 66 %, 88 %에서 농도변화에 따른 연소압력 .....	29
[그림 2-22] 온도 298 K에서 상대습도 변화에 따른 최대폭발압력 .....	30
[그림 2-23] 방폭기기 등급표시 .....	31
[그림 3-1] Schematic diagram of the explosion apparatus .....	45
[그림 3-2] 질량유량제어기 .....	46
[그림 3-3] 산소분석 전송기와 제어기 .....	47
[그림 3-4] 가습장치 .....	48
[그림 3-5] 폭발용기의 단면 .....	49
[그림 3-6] 점화플러그 .....	49
[그림 3-7] Piezoelectric pressure sensor .....	49
[그림 3-8] Charge meter .....	50
[그림 3-9] 압력신호 전송케이블 .....	50
[그림 3-10] 폭발압력 측정그래프 .....	52
[그림 4-1] 수소(31 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	55
[그림 4-2] 아세틸렌(14 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	58

[그림 4-3] 에틸렌(8.0 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	61
[그림 4-4] 프로판(4.6 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	63
[그림 4-5] 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력 .....	65

# 1. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

석유화학, 광업, 운송, 에너지 및 반도체 등 산업의 발전과 함께 다양한 인화성 물질(가스, 증기, 미스트, 분진, 섬유)을 처리하는 공정이 증가하고 이에 따른 화재·폭발의 위험은 높아지고 있으며 화재·폭발이 발생하면 인명 손실, 환경 피해, 시설 장비 및 재고 손실, 사업 중단 및 대중의 신뢰 상실 등 인적·물적 피해를 불러온다(장철 등, 2017; Grantham, 2012; Michorczyk et al., 2012; Choi et al., 2020; Su et al., 2020). [그림 1-1]은 2016년부터 2022년까지 7년간 화재·폭발에서 전기설비·부품으로 인한 재해자에 관한 통계자료이며 화재·폭발·과열로 인한 사망자 325명 중에서 전기설비·부품으로 인한 사망자는 28명으로 8.6 %를 차지하고 있다(한국산업안전보건공단, 2022).



[그림 1-1] 최근 7년간 화재·폭발 재해자

근원적으로 화재·폭발의 위험을 감소시키기 위해서는 인화성 물질을 인화성이 없거나 낮은 물질로 대체하고 취급하는 인화성 물질을 통제(인화성 물질의 양을 줄이고 누출을 억제 또는 최소화하고 누출된 물질을 수거 및 격리)하여 폭발성 분위기가 조성되는 장소를 적게 해야 한다. 또한 폭발 발생 시 폭발을 완화(폭발전과 방지, 폭발압력을 경감, 억제, 노출된 인원을 최소화)시켜 피해를 최소화해야 한다(KS C IEC 60079-14, 2014). 그러나 불가피하게 인화성물질을 사용할 경우에는 산업안전보건기준에 관한 규칙 제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)에 따라 인화성 액체의 증기나 인화성 가스 등을 제조·취급 또는 사용하는 장소를 KS C IEC 60079-10-1(폭발성 분위기-제10-1부: 장소 구분-폭발성 가스분위기)에 따라 가스폭발위험장소로, 인화성 고체를 제조·사용하는 장소는 KS C IEC 60079-10-2(폭발성

분위기-제10-2부: 장소 구분-폭발성 분진분위기)에 따라 분진폭발위험장소로 설정하여 관리하여야 한다. 또한 같은 규칙 제311조(폭발위험장소에서 사용하는 전기기계·기구의 선정 등)에서는 폭발위험장소에서 사용하는 전기기계·기구에는 적합한 방폭성능을 가진 방폭구조 전기기계·기구를 선정하여 사용하도록 하고 있다. 즉 산업안전보건법 제84조(안전인증)에 따라 KCs 안전인증을 받은 제품을 사용하여 전기기기가 점화원이 되지 않게 하여 화재·폭발을 예방하는 것이다.

현행 KCs 방폭 안전인증은 기존의 3년 또는 5년의 유효기간을 갖는 성능검정합격증을 발급하던 제도에서 제조자의 공장심사(기술능력 및 생산체계 심사)를 더하여 안전인증서를 발급하는 제도로 2009년에 도입되었고 확인심사(인증서의 주소에서 생산하는지 여부, 기술능력 및 생산체계의 유지 여부, 수거제품심사, 서면심사 내용과 같은 수준 이상의 재료 및 부품 사용 여부)를 통해 발급된 안전인증서의 유효성을 주기적으로 확인하고 있다(김용태 & 정기효, 2022). 현재 고용노동부로부터 KCs 방폭 안전인증업무를 위탁받은 기관(이하, 인증기관)은 한국산업안전보건공단(KOSHA), 한국가스안전공사(KGS), 한국산업기술시험원(KTL)이며(고용노동부 2022), 인증 대상은 방폭구조 전기기계·기구 및 부품이다(산업안전보건법 시행령 제74조). 폭발위험지역에 사용할 목적으로 제조 또는 수입(각 제품별 10개 이하)하는 자는 출고(시장에 사용 가능한 상태로 놓이는 것) 또는 수입(통관)시 안전인증기관에 인증신청을 해야 한다(안전인증·자율안전 확인신고의 절차에 관한 고시 제5조).

방폭구조에는 내압, 압력, 안전증, 본질안전, 몰드, 비점화 등 여러 가지가 있으며 내압방폭구조(Ex d)는 내압방폭용기(flameproof enclosures)에 의해 폭발을 방지하는 구조로 용기내부의 폭발에 용기가 견디고 외부로 화염이 전파되지 않게 하는 구조로서 용기내부에 폭발성 가스 분위기와 점화원이 될 수 있는 부품을 허용하여 내부구성품의 방폭 요구사항이 필요하지 않아 비교적 구현이 쉽고 오래된 방폭구조로서 국내인증(KCs)의 약 40%, 국제방폭인증(IECEX)의 41%를 차지할 정도로 보편적이다(산업안전보건인증원, 2022; 한국가스안전공사, 2022; 한국산업기술시험원, 2022; IECEX 2022).

폭발압력은 내압방폭용기의 기계적 강도 설계와 내압시험(overpressure test)의 기준압력(reference pressure)으로 사용되는 중요한 값이다. 일반적으로 내부구조와 형상이 단순한 내압용기의 폭발압력은 (0.6 ~ 1.1) MPa 이나 전동기 등과 같이 내부구조가 복잡하고 기하학적구조가 과도하게 비대칭적일 경우 폭발압력은 3.5 MPa 이상까지 올라가기도 한다(Horning et al., 2013). 따라서 방폭인증 시 폭발압력의 결정은 용기 체적이 작아 폭발이 일어나지 않는 경우를 제외하고 실제의 제품으로 폭발시험을 수행한다. 폭발압력(기준압력) 결정은 방폭기기 그룹별로 지정된 가스 및 농도에서 내압용기의 내부를 점화시켜 측정된 일련의 압력 중에서 최고폭발압력을 기준압력으로 정한다. 이 기준압력에 일정배수(1.5배, 3배, 4배)를 적용하여 내압시험을 수행하거나 용기의 체적이 작아 폭발압력을 측정할 수 없는 경우에는 압력측정 대신에 <표 1-1>과 같이 상대압력(relative pressure)으로 내압시험을 수행한다(IEC 60079-1, 2014).



<표 1-1> 내압시험용 소형기기의 상대압력

체적(cm³)	기기 그룹	압력(MPa)
≤10	I, IIA, IIB, IIC	1
>10	I	1
>10	IIA, IIB,	1.5
>10	IIC	2

내압시험의 목적은 용기가 내부 폭발압력에 견딜 수 있는지를 확인하는 것으로서 판정기준은 용기의 영구 변형이나 손상과 접합부의 영구적 확대가 없고 용기의 벽면을 통한 누설이 없어야 기준을 충족한 것이다. 만일 내압시험이 기준압력의 4배에서 판정기준을 만족하면 제조자는 일상내압시험(routine overpressure test)이 면제되고 기준압력의 1.5배에 대해서만 적정하면 제조하는 모든 내압용기를 일상내압시험해야 하고, 3배까지 만족하면 배치시험(batch test, 구분 가능한 생산단위)을 배치수량별 샘플링(100개 이하 8개, 1 000개 이하 32개, 10 000 이하 80개)하여 기준압력의 1.5배로 일상내압시험을 해야 한다(IEC 60079-1, 2014).

한편, 내압시험에는 일반적으로 물과 같은 비압축성 매체가 사용된다. 공기 또는 불활성 가스와 같은 압축성 매체를 사용할 경우 용기에 결함이 있어 용기가 파괴되면 인적·물적 피해가 발생하게 된다. 따라서 내압시험에는 비압축성 매체인 물을 주로 사용하는데 이는 시험 후 용기를 건조해야 하는 부가적인 공정이 필요하므로 제조자는 최적의 생산공정과 비용을 줄이기 위해 가능하면 일상내압시험이 면제가 되도록 내압용기를 설계하고자 한다.

폭발압력(기준압력) 결정시험의 절차 및 방법은 방호장치 안전인증 기준 고시<sup>1)</sup>, IEC 60079-1<sup>2)</sup>: 2014의 15.2.2절에 따른다. 이 고시와 절에는 시료의 준비방법, 시험 순서, 혼합가스의 조성비, 가장 가혹한 조건, 시험의 판정방법, 기준압력의 측정방법 등이 명시되어 있지만 폭발혼합가스의 습도기준이 제시되어 있지 않다. 다만, IEC 60079-0<sup>3)</sup>: 2017의 26.3절 비고에 “effects of variations in the humidity of the explosive test mixture are acceptable because they have been found to have negligible effect” 같이 구체적 범위 또는 조건 없이 폭발시험혼합물의 습도변화의 영향은 무시할 수 있는 것으로 밝혀져 허용한다고 말한다. 일반적으로 인화성 가스와 혼합되어 지정된 농도를 조성하는 조연성가스 공기는 대기 중의 공기를 압축하여 사용한다. 비 오는 날의 대기 중 습도는 비의 양, 온도, 지역 등에 따라 달라질

1) 고용노동부고시 제2021-22호 [별표 7의2] 내압방폭구조의 시험방법

2) Explosive atmospheres - Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures “d” 폭발성 분위기 - 제1부: 내압방폭용기 “d”에 의한 기기보호

3) Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements 폭발성 분위기 - 제0부: 기기 - 일반 요구사항

수 있지만 보통의 경우, 비가 오면 대기 중의 수증기 농도가 높아지기 때문에 상대 습도는 99 %까지 올라간다(기상청, 2023). 압축된 공기는 온도가 높아지고 단위체적당 절대습도의 양은 증가하여 수분은 더욱 많이 생긴다. 이 습기를 제거하기 위하여 건조기(dryer)와 냉각기(after cooler)가 설치되기도 하지만 실제로 비가 오거나 공조시스템의 관리 부실은 압축공기의 상대습도를 30 %까지도 상승시켜 폭발혼합가스의 습도를 증가시킨다. 이는 가솔린 또는 분진폭발과 같이 폭발압력을 낮출 가능성이 있다(Qi et al., 2017; Lee et al., 2001; Moradi et al., 2020; 오규형 등, 1997). 또한 가스·증기의 물질 특성을 분류하는 국제기준 IEC 80079-20-1: 2017(Explosive atmospheres - Part 20-1 Material characteristics for gas and vapour classification - Test methods and data)의 6.3.1절에서 폭발혼합물로 사용되는 공기의 상대습도는 10 %초과하지 않아야 한다고 명시하고 있으며 유럽기준 EN 13673-1: 2003(Determination of the maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours)의 3.3절에서 공기는 물과 오일이 없어야 한다고 규정하고 있는 것과 같이 방폭내압시험 시 공기의 습도기준을 명확히 할 필요성이 있다. 더불어 국내·외 방폭인증의 40 %이상을 차지하는 내압방폭구조의 주요시험인 폭발압력(기준압력)측정 시 폭발혼합가스의 습도에 대한 영향을 분석하고 이에 대한 안전인증기준을 마련하여 가장 가혹한 조건에서 인증시험이 수행되어 보다 안전한 인증제품이 제조되어 산업재해예방에 도움이 되고자 한다.

따라서 본 연구는 내압방폭구조의 용기설계 및 시험에 중요한 폭발압력을 보다 일관성 있고 정확하게 측정하기 위한 습도 기준을 설정하는데 활용하여 안전인증을 위한 제품시험의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

## 1.2 연구내용 및 방법

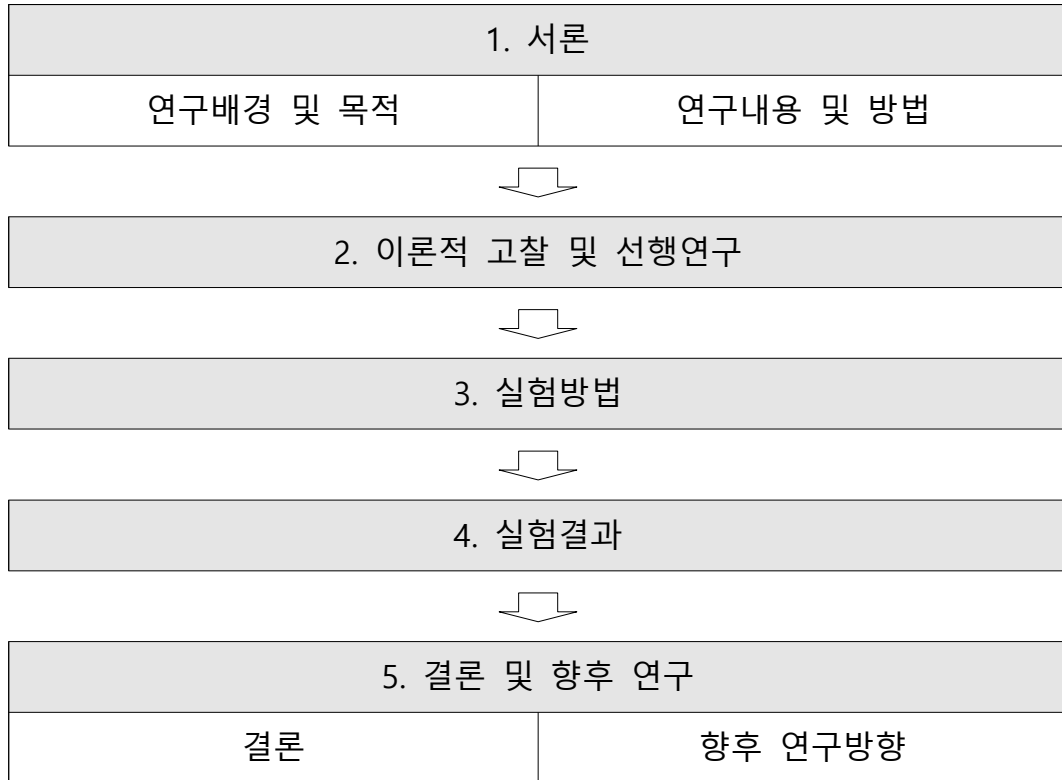
본 연구는 폭발기준압력과 상대습도의 상관관계를 파악하고 폭발압력에 결정적 영향을 미치는 상대습도 값을 도출하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구의 내용은 다음과 같다.

첫째, 폭발의 특성을 파악하고 폭발압력에 영향을 미치는 가스조성, 초기압력 및 온도, 점화위치와 점화에너지, 장애물의 유무, 용기의 크기 및 기하학적 형태 등에 대한 선행연구를 고찰하고 분석하였다.

둘째, 방폭기기와 관련된 폭발위험장소, 방폭구조, 방폭그룹, 기기보호등급 방폭은도등급, 방폭인증기준, 폭발시험에 대하여 이론적 고찰을 하였다.

셋째, 방폭 그룹별 IIC(수소, 아세틸렌), IIB(에틸렌), IIA(프로판), I(메탄) 각각의 인화성가스와 공기 혼합물을 건조한 상태에서 상대습도 80 %까지 변화시켜 폭발압력 값을 측정하고 압력에 결정적 영향을 주는 상대습도 값을 도출하였다.

본 연구는 다음 [그림 1-2]와 같이 크게 5장으로 구성되었다. 제1장은 서론으로 연구배경 및 목적, 연구내용 및 방법, 연구의의, 제2장은 이론적 배경 및 선행연구를 고찰하였다. 제3장은 상대습도가 내압방폭구조의 폭발기준압력 결정에 미치는 실험방법을 설명하였다. 제4장은 실험결과를 바탕으로 안전인증기준에 반영할 폭발기준압력시험 시 상대습도의 기준을 제시하였다. 마지막으로 제5장은 결론으로 연구 결과, 연구의 한계점과 향후 연구 방향을 나타내었다.



[그림 1-2] 논문의 구성

## 2. 이론적 고찰 및 선행연구

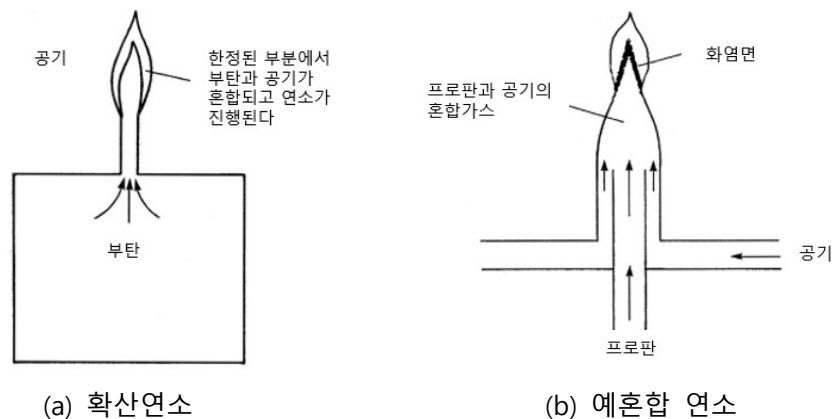
### 2.1 폭발특성

본 연구는 상대습도가 내압방폭구조의 폭발기준압력결정에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해 폭발의 이론적 배경 및 선행연구를 고찰하고 폭발시험기준을 검토하여 본 연구의 이론적 배경으로 삼고자 한다.

#### 2.1.1 연소와 폭발

##### 가. 연소

연소는 물질이 산소와 결합하여 에너지를 방출하는 화학반응으로 인화성가스의 연소는 일상생활 속에 있다. 프로판( $C_3H_8$ )은 전기가 공급되지 않는 곳에서 등기구, 가열기, 조리용으로 사용된다. 인화성가스의 연소에서 확산연소와 인화성가스-공기의 예혼합을 구분하는 것은 중요하다. [그림 2-1] (a)는 일반적인 부탄( $C_4H_{10}$ )가스등 불이고 연소는 제한적인 부탄출구의 좁은 바깥부분에서 일어난다. 이 부분에서 가스는 주위의 공기(산소)와 접촉하며 섞인다. 연소는 부탄(연료)과 산소의 반응부분으로의 확산률에 따라 비교적 천천히 진행된다. 같은 방식으로 양초와 오일램프의 연소에서 확산연소가 나타난다. 가스폭발에서 연소는 인화성가스와 공기가 점화전에 미리 인화비율로 혼합되고 점화가 되면 연소는 혼합물을 통하여 빠르게 진행된다. 이와 같은 연소를 “예혼합(pre-mixed)연소”라 하고 [그림 2-1] (b)의 프로판버너로 설명된다. 여기서 중요한 것은 프로판과 공기의 체적유량이며 인화범위 내에서 제어되어야 한다. 너무 많은 유량은 불꽃을 날려 꺼져 버리고 너무 적은 유량은 버너 안쪽으로 화염을 만들어 역화 되거나 꺼진다(Eckhoff, 2016).



[그림 2-1]연소의 구분(Eckhoff, 2016)

나. 기본 반응(Solheim, 2010)

모든 화학반응에는 반응을 유지하는 데 필수적인 반응성 중간체 라디칼이 포함된다. 라디칼은 최외각 껍질이 쌍을 이루지 못한 전자를 가진 원자, 분자 또는 이온이다. 비공유 전자는 항상 안정성을 추구하기 때문에 라디칼은 화학적으로 매우 반응성이 높다. 연소과정은 라디칼의 연쇄반응을 기반으로 하며 수소-산소 반응계를 사용하여 이러한 메커니즘을 설명한다. 이 반응계의 몇 가지 중요한 반응은 <표 2-1>과 같다.

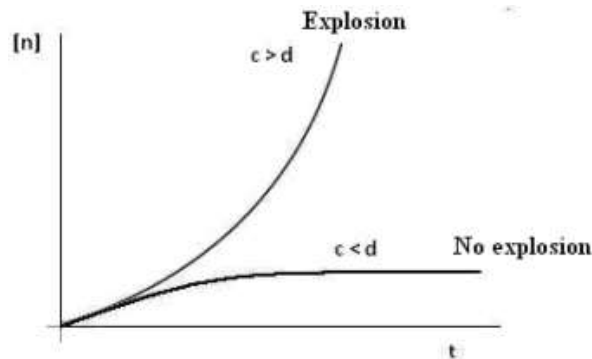
<표 2-1> 라디칼 연쇄 반응(Warnatz et al., 2006)

a	$H_2 + O_2 = 2OH\cdot^{(주)}$	연쇄시작(chain initiation)
b	$OH\cdot + H_2 = H_2O + H\cdot$	연쇄전이(chain propagation)
c	$H\cdot + O_2 = OH\cdot + O\cdot$	연쇄가지화(chain branching)
d	$H\cdot = \frac{1}{2}H_2$	연쇄종결(chain termination)

주)•비공유전자쌍

화학반응 메커니즘에는 네 가지 주요단계가 있다. 첫 번째 단계(반응 a)는 안정한 화학종이 반응성 화학종인 라디칼로 반응하는 연쇄시작 단계이다. 두 번째 단계(반응 b)는 반응성 중간라디칼이 다른 반응성 라디칼을 형성하는 안정한 종과 반응하는 연쇄전이 단계이다. 세 번째 단계는 안정한 종이 라디칼과 반응하여 2개의 반응성 종을 형성하는 연쇄가지화 단계(반응 c)이다. 마지막 단계는 반응성 종이 안정한 종으로 반응하는 연쇄종결 단계(반응 d)이며, 이는 벽 또는 기체상에서 발생할 수 있다.

반응구역에서 연속적으로 연쇄가지화 반응이 연쇄종결 반응보다 많을 때( $c > d$ ), 시간이 증가함에 따라 라디칼의 농도[n]가 기하급수적으로 증가하고 이것은 폭발을 일으킨다[그림 2-2 참조]. 연쇄 가지화 반응보다 연쇄 종결 반응이 더 많으면( $c < d$ ), 반응은 시간에 상관없이 고정반응으로 들어가 폭발이 일어나지 않는다.

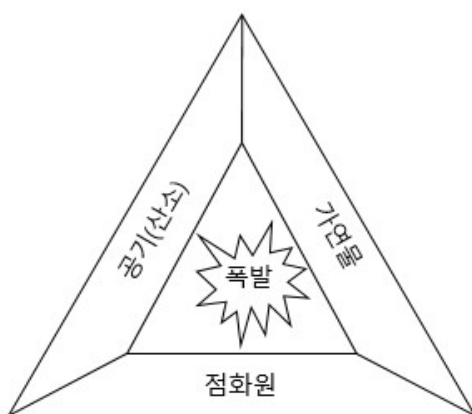


[그림 2-2] 중간 라디칼 진행(warnatz, 2006)

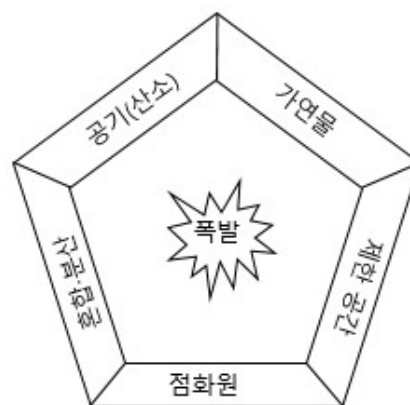
## 다. 폭발

폭발(explosion)이란 일반적으로 크고 예리한 소리와 함께 터지는 현상으로 초음속 충격파에서부터 비교적 약한 바람까지의 다양한 압력파면이 확장해 나가는 것으로 이해되고, 공학적으로는 급격한 압력의 발생 결과로 고압가스가 폭발을 수반하여 급속하게 팽창하는 현상으로 고압가스의 갑작스런 방출에 의한 충격파 형태의 에너지 소산이라 할 수 있다(현성호 등, 2009). 국제전기전자기술위원회 용어정의 IEC 60050-426-02-13, (2008)에서는 산화 또는 기타 발열 반응으로 인한 압력 및 온도의 급격한 증가라 했다. 한편, 폭발은 연소(combustion)의 한 형태로 공통적으로 물질의 화학반응에 의해 일어나지만 연소는 에너지를 천천히 방출하고 폭발은 에너지를 마이크로초(microseconds)단위로 빠르게 방출한다(Crowl et al, 2011). 연소 과정에서 발생한 열이 연료를 지속적으로 가열하여 불이 일어나며, 이러한 불이 인적·물적 피해를 동반하는 의도치 않은 불이 화재이다(한국산업안전보건공단, 2013).

폭발(화재)의 3요소는 가연물(fuel; flammable gas and vapor), 공기(산소), 점화원(ignition source)이며 폭발이 발생하기 위해서는 충분한 양의 가연물이 공기(산소)와 미리 혼합되어 폭발한계 내에 있고 유효한 점화원이 동시에 존재할 경우 폭발이 발생할 수 있으며 이 중에서 하나라도 제거되면 폭발이 일어나지 않는다. 이를 가스 폭발(화재)의 삼각형(Explosion triangle)이라 하며 [그림 2-3] a)과 같다. 또한 분진폭발의 오각형(Dust explosion pentagon)은 가연성분진, 공기(산소), 점화원, 분산(dispersion)·혼합(mixing), 제한공간(confinement)으로 구성되며 [그림 2-3] b)로 표현된다(Kauffman, 1982). 여기서, 분산은 분진입자가 공기 중에 분진운을 만드는 것이고 제한공간은 빌딩, 방, 용기 또는 공정기기(process equipments)와 같은 한정된 공간을 의미한다.



[그림 2-3] a) 가스폭발의 삼각형



b) 분진폭발의 오각형

인화성가스의 폭발특징은 최대폭발압력, 폭발압력 상승속도, 압력상승시간 등이 있다(오규형 등, 1992). 최대폭발압력은 용기의 폭발내압강도 설계에 중요한 파라미터이다. 밀폐공간에서 폭발의 최대폭발압력은 밀폐용기에서 운전되는 프로세스의

위험을 평가하고 폭발에 견딜 수 있는 용기설계를 위한 핵심 안전매개변수 중의 하나이다(Movileanu et al., 2014).

### 2.1.2 폭발특성

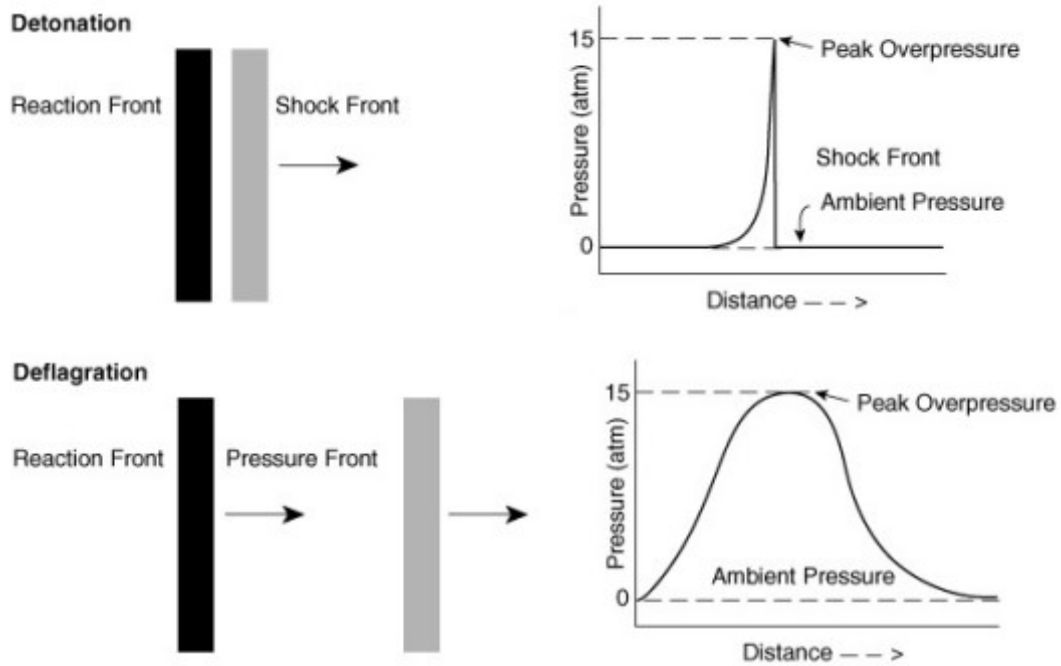
폭발 거동(behavior)은 여러 요인에 의해 다양한 형태로 나타난다. 폭발 거동에 영향을 주는 주요한 변수는 <표 2-2>와 같다. 폭발 거동을 특징짓기는 어렵고 이를 파악하기 위해 수많은 이론적, 반경험적 또는 경험적 연구가 있어왔음에도 불구하고 아직 완전히 설명되지 않았다(Grossel et al., 2011).

<표 2-2> 폭발거동에 영향을 미치는 주요한 변수(Grossel et al., 2011)

1. 주위온도
2. 주위압력
3. 폭발물질의 조성
4. 폭발물질의 물리적 특성
5. 점화원의 특성: 형태, 에너지, 지속시간
6. 주위의 기하학적 조건: 밀폐 또는 개방
7. 인화성물질의 양
8. 인화성물질의 난류
9. 점화지연시간
10. 인화성물질의 방출률

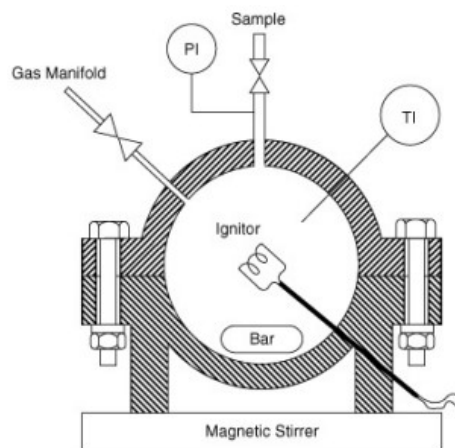
폭발로 생긴 에너지는 압력파, 복사열, 소리 등 여러가지 형태로 사라진다. 폭발 에너지는 폭발가스를 급속히 팽창시키고 주변 가스는 밀려 폭발지점에서 주위로 급격히 이동하는 압력파를 만든다. 대기 중의 압력파는 강한 바람을 동반하여 폭풍과도 불리고 압력파 전면부의 압력이 급변하면 충격파 또는 충격면이 나타난다. 이상기체의 음속은 온도만의 함수이며 20 °C에서 344 m/s이다. 일부 연소 반응에서 반응면은 강한 압력파에 의해 전파되며 반응면 앞면의 미반응 혼합가스를 자연발화온도이상으로 빠르게 압축시켜 반응면 앞면에 급격한 압력변화 또는 충격을 불러온다. 이것을 폭굉(defonation)이라 한다. 폭연(deflagration)의 경우, 반응에너지가 열전도 및 분자확산에 의해 음속이하로 미반응 혼합물로 전달된다. 개방계에서 발생하는 연소반응에 대한 폭굉과 폭연의 물리적 차이는 [그림 2-4]와 같이 나타난다. 폭굉은 반응면(reaction front)이 음속보다 빠르게 이동하며 충격면(shock front)은 반응면 바로 앞의 짧은 거리에서 나타나고 반응면은 충격면에 에너지를 공급하고 충격면을 음속이상으로 이동하게 한다. 폭연은 반응면이 음속보다 느린 속도로 전파

되고 압력면(pressure front)은 미반응 기체에서 음속으로 이동하고 반응면에서 멀어지고 뒤이어온 압력면이 축적되면 압력면의 크기는 계속 커질 것이다. 밀폐공간에서 폭연이 폭굉으로 바뀌는 것을 폭연의 폭굉으로의 전이(DDT, deflagration to detonation transition)라 한다(Grossel et al., 2011; 한국산업안전보건공단, D-49, 2012).



[그림 2-4] Comparison of detonation and deflagration gas dynamics(Grossel et al., 2011)

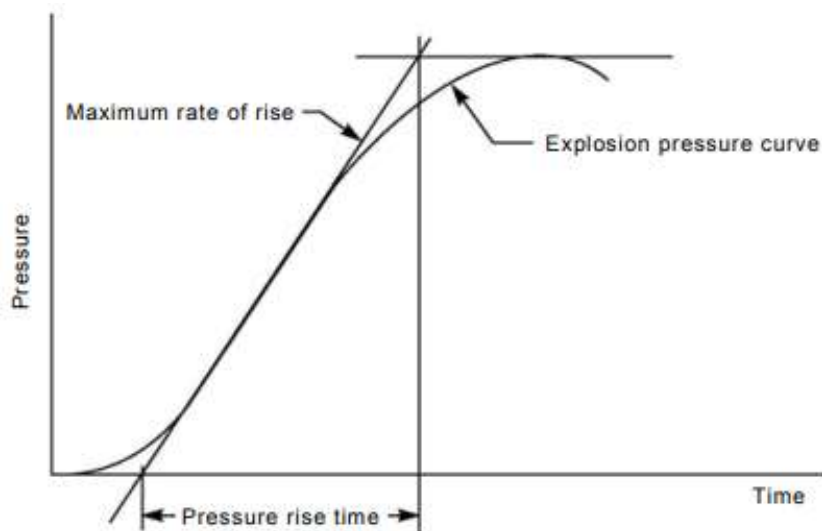
폭발특성(nature of explosion)은 폭발물질, 인화한계, 폭발압력의 상승속도, 최대폭발압력에 영향을 받는다. 이러한 폭발특성은 [그림 2- 5]와 같은 실험장치를 이용하여 결정한다. 밀폐용기에 폭발농도의 인화성가스를 채우고 용기의 중앙에서 점화시키고 용기벽에 설치된 압력센서로 폭발압력을 측정한다.



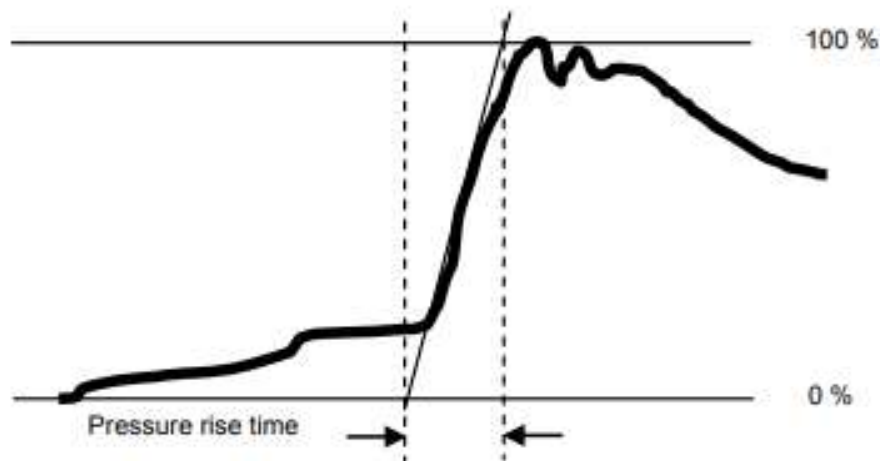
[그림 2-5] Gas Explosion apparatus(Grossel et al., 2011)



폭발압력은 폭발혼합가스를 점화시켜 측정된 압력의 최대값을 말하며 폭발압력의 파형은 일반적으로 [그림 2-6]과 같이 시간-압력 관계로 나타난다. 인화성가스의 폭발압력은 (6~11) barg 정도 측정된다. 이때 압력상승시간은 최대압력상승률  $((dp/dt)_{max})$  지점에서 경과시간이며 압력파형의 접선으로 구하고 보통 최대압력의 10 %에서 90 %까지의 시간이다. 폭발압력의 파형이 [그림 2-7]과 같이 불규칙적으로 나타나는 경우 압력상승시간은 파형 시작부의 완만한 부분을 제외한다. 폭발가스의 농도를 변화시켜가며 폭발한계를 구한다.



[그림 2-6] 전형적인 폭발압력 파형(IEC 60079-1, 2014)



[그림 2-7] 비정형 폭발압력 파형(IEC 60079-1, 2014)

이와 같이 얻어진 폭발특성은 폭발피해예측과 기기 및 공정설계에 활용된다. 인화한계는 폭발분위기의 형성을 제어하는 기준으로, 최대압력상승속도는 폭발강도를 의미하며 폭발발생 시 압력용기가 파열하여 주변에 큰 피해를 일으키기 전에 안전

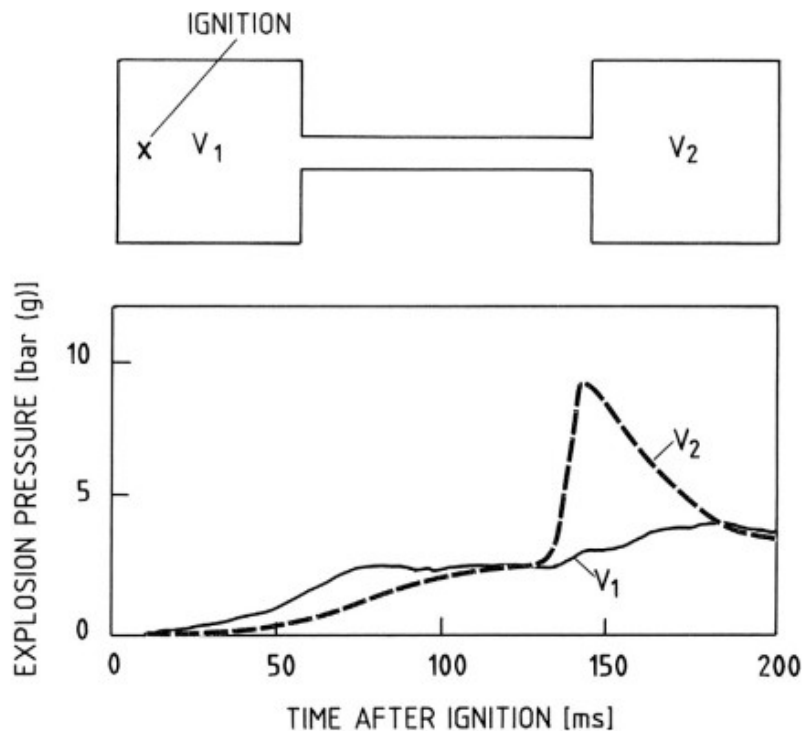
하게 과압을 해소시키는 방출구 크기를 설계하는데 사용되며 식(2-1)과 같이 최대폭발압력상승률에 폭발용기체적의 세제곱근을 곱한 값이다.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{1/3} = K(\text{상수}) \quad (2-1)$$

여기서,  $K$ : 폭연지수(bar·m/sec),  $(dp/dt)_{\max}$ : 최대압력상승률(bar/sec),  $V$ : 용기의 체적[m<sup>3</sup>]이다. 폭연지수( $K$ )는 가스인 경우에  $K_G$ , 분진인 경우에  $K_{St}$ 라 표기하며 가장 정확한 값은 실험에 의하여 결정된다. 인화성 혼합물의 가연성 위험을 평가하는 것은 방폭용기 설계 또는 폭연방출구 설계와 같은 밀폐된 용기에서 가스 폭발의 영향을 완화하는 데 매우 중요하다(Keller et al., 2014).

또한 [그림 2-8]과 같이 밀폐된 용기(12 L)를 50 cm의 덕트로 연결하고 10 vol. % 메탄-공기의 혼합가스를 채우고 상온 상압으로 한쪽에서 점화를 시키면 반대편 용기에서는 미연소 혼합가스의 압력이 중첩(pressure piling)되고 화염이 도달했을 때 가압된 혼합가스는 매우 높은 압력을 발생시킨다. 또한 난류 연소와 폭굉으로 전이되기도 한다(Eckhoff., 2016).

내압방폭용기의 기준압력 측정 시 동일한 시험조건에서 일련의 압력측정값이 1.5 배 이상 차이가 있거나 압력상승시간이 5 ms 미만인 경우 압력중첩이 있는 것으로 보고 아세틸렌 시험가스를 (24 ± 1) % 수소/메탄(85/15)의 혼합물로 추가 시험한다.



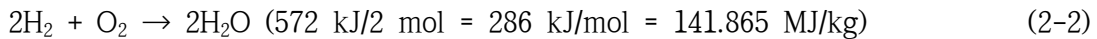
[그림 2-8] 압력중첩(Eckhoff., 2016)

### 2.1.3 폭발시험가스

내압방폭구조의 폭발시험으로 지정된 방폭기기 그룹별 대표가스(수소, 아세틸렌, 에틸렌, 프로판, 메탄)의 물리·화학적 특징에 대하여 살펴본다.

#### 가. 수소

수소는 주기율표에서 가장 첫 번째 화학원소로, 원소기호는 H, 원자번호는 1이다. 표준원자량은 1.008이고, 질량기준으로 우주의 75 %를 구성하고 있는 가장 흔한 원소이다. 자연상태에서는 대부분 화합물로 존재하고 반응성이 높지만 저온에서는 반응성이 낮다. 발화 시 폭발음과 무색의 불꽃을 내는 가연성 연료이며 식(2-2)와 같이 산소와 반응하여 물이 형성되며 연소열은 286 kJ/mol 이다. 공기보다 14배 가벼워 공기 중에 누출 시 급속히 확산되며 점화온도(약 500℃)가 높아 자연발화위험은 낮다. <표 2-3>에 수소의 물리·화학적 특징을 나타내었다.

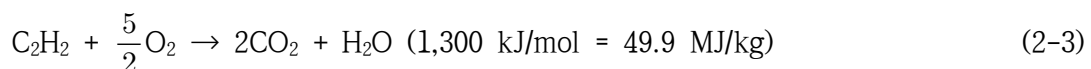


<표 2-3> 수소(H<sub>2</sub>)의 특징(Lide, 2004)

성상 (state at 0°C, 1bar)	기체	연소열	286 kJ/mol
색상	무색	녹는점	-259.16 °C
끓는점	-252.879 °C	몰열용량	28.836 J/(mol·K)
CAS No.	1333-74-0	밀도	0.08988 g/L (0 °C, 101.3 kPa)

#### 나. 아세틸렌

화학식은 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, 상온에서 무색무취의 기체상태, 물과 알코올, 아세톤에 녹으며 공기 중에서 그을음을 내며 탄다. 연소 시 많은 열이 발생하여 용접 등에 사용되며 고농도 흡입 시 마취효과가 있다. 식(2-3)과 같이 산소와 반응하여 물이 형성되며 연소열은 1,300 kJ/mol 이다. <표 2-4>는 아세틸렌의 물리·화학적 특징이다.

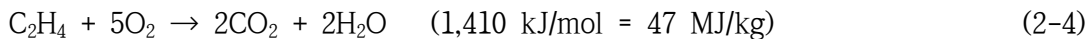


<표 2-4> 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)의 특징(Lide, 2004)

성상 (state at 0°C, 1bar)	기체	연소열	1,300 kJ/mol
색상	무색	녹는점	-81.5 °C
끓는점	-84 °C	몰질량	26.038 g·mol <sup>-1</sup>
CAS No.	74-86-2	밀도	1.1772 g/L (0 °C, 101.3 kPa)

#### 다. 에틸렌

상온에서 무색이나 냄새가 나며 인화성이다. 가스 절단 및 용접, 다른 화합물의 원료로 사용되고 산화되어 아세트알데하이드가 만들어진다. 식(24)과 같이 산소와 반응하여 이산화탄소와 물을 생성한다. <표 2-5>는 에틸렌의 특징으로 끓는점, 녹는점, 밀도 등이 기술되었다.

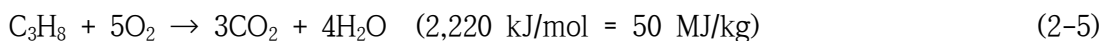


<표 2-5> 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)의 특징(Lide, 2004)

성상 (state at 0°C, 1bar)	기체	연소열	1,410 kJ/mol
색상	무색	녹는점	-19.2 °C
끓는점	-103.71 °C	몰질량	28.054 g·mol <sup>-1</sup>
CAS No.	74-85-1	밀도	1.178 kg/m <sup>3</sup> (0 °C, 101.3 kPa)

#### 라. 프로판

영어로 프로페인 또는 독일어로 프로판은 화학식 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>이고 상온에서 독특한 냄새가 있는 무색의 기체이다. 액화석유가스, 냉매, 윤활유 정제용 용제 등으로 사용된다. 연소반응은 식(2-5)과 같고 연소열은 2,220 kJ/mol 이고 물리·화학적 특징은 <표 2-6>과 같다.

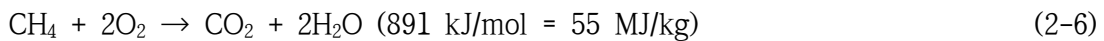


<표 2-6> 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)의 특징(Lide, 2004)

성상 (state at 0°C, 1bar)	기체	연소열	2,200 kJ/mol
색상	무색	녹는점	-187.7 °C
끓는점	-42.25 °C	몰질량	44.097 g·mol <sup>-1</sup>
CAS No.	74-98-6	밀도	2.0098 kg/m <sup>3</sup> (0 °C, 101.3 kPa)

#### 마. 메탄

영어로 메테인 또는 독일어로 메탄은 화학식 CH<sub>4</sub>로 가장 간단한 탄소 화합물로서 상온에서 무취이나 산업용으로 사용 시 누출여부를 확인하기 위해 냄새가 나는 화합물을 첨가한다. 기체로 천연가스나 석탄가스의 주성분이고 산화 반응식은 식(2-6)과 같고 연소열은 891 kJ/mol 이며 물리·화학적 특징은 <표 2-7>과 같다.



<표 2-7> 메탄(CH<sub>4</sub>)의 특징(Lide, 2004)

성상 (state at 0°C, 1bar)	기체	연소열	891 kJ/mol
색상	무색	녹는점	-182.5 °C
끓는점	-161.65 °C	몰질량	44.097 g·mol <sup>-1</sup>
CAS No.	74-82-8	밀도	16.043 kg/m <sup>3</sup> (0 °C, 101.3 kPa)

#### 바. 폭발시험가스의 폭발특성

인화성가스의 폭발특성은 실험장치, 환경조건, 데이터 취득방식 등에 따라 조금씩 차이가 있다. <표 2-8>은 1957년 영국의 표준에서 발췌된 데이터와 국제전기기술위원회(IEC)에서 발간한 2017년의 자료이다.

<표 2-8> 폭발시험가스의 폭발특성 데이터(BS 229, 1957, ISO/IEC 80079-20-1: 2017)

		Hydrogen	Acetylene	Ethylene	Propane	Methane
Relative density*(air=1)		0.07	0.90	0.97	1.56	-
Mixture for Max. pressure(vol. %, with air)		32.3/31.0*	14.5/14.0*	8.0	4.6	9.8
Max. pressure(bar)		7.2	10.1	8.7	8.4	7.0
Pressure rise time(ms)		7.5	22	25	46	70
Flammability limit(vol. %, with air)	BS	4.0-74.0	2.5-82	2.5-35	2-9.5	5-15
	IEC*	4.0-77.0	2.3-100	2.3-36.0	1.7-10.9	4.4-17
Autoignition. temp.*(°C)		560	305	440	445	600
Most incendive mixture*(vol. %)		27	8.5	6.5	4.2	8.2

\*ISO/IEC 80079-20-1의 데이터

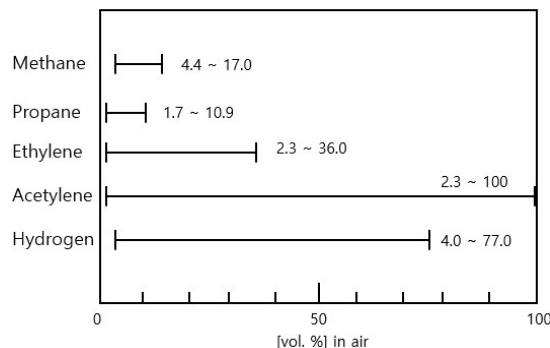
## 2.2 폭발압력에 영향을 미치는 요인

메탄(Cashdollar et al., 2000; Shen., 2016), 프로판(Mitu et al., 2011; Razus et al., 2010), 에틸렌((Movileanu et al., 2012;), 아세틸렌(Ivanov, 1965), 수소(Cao et al., 2017; Cammarota et al., 2009; Sun et al., 2019; Wang et al., 2019; Xiong et al., 2020; 오규형, 2004), 페테인(Harris, 1967), LPG(Razus et al., 2009), 분진(Lee et al., 2001; Moradi et al., 2020) 등 밀폐용기에서 다양한 인화성물질의 기본적인 특징을 파악하기 위한 수많은 연구가 진행되었다. 주로 최대폭발압력(Phillips et al., 1984; Razus et al., 2006; Cammarota et al., 2009), 압력상승률(Razus et al., 2007), 점화의 민감도와 습도((Darie et al., 2014; Darie et al., 2015), 연소속도(Razus et al., 2007), 최소점화에너지(Ivanov et al., 1965; Ono et al., 2007; Zhang et al., 2012), 인화한계(Phillips et al., 1984; Razus, et al., 2010)와 초기조건의 영향에 관심을 두었다. 이들은 가스폭발의 강도와 파괴력에 상당히 큰 영향을 준다.

폭발압력에 영향을 미치는 초기변수로 가스 농도(Movileanu et al., 2012; Sun et al., 2019), 초기압력(최재욱, 2005; Cashdollar et al., 2000; Mitu et al., 2011), 초기온도(Razus et al., 2010), 용기의 형태 및 크기(Harris, 1967; Mittal et al., 2017), 점화원 위치(Cao et al., 2017), 장애물의 유무(Ciccarelli et al., 2018; Wang et al., 2019), 첨가제(Oancea et al., 2002), 습도(Yang, 2013; Lemkowitz et al., 2014; Qi et al., 2017; Wang et al., 2020)가 있다. 이들의 주요한 선행연구를 고찰하여 폭발특성을 파악하고자 한다.

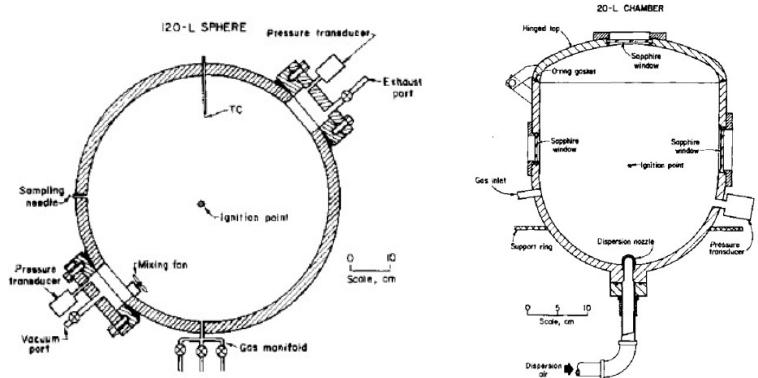
## 2.2.1 인화성가스의 농도

인화성가스는 공기(산소)와 적절한 비율로 혼합되어야 폭발한다. 이를 인화한계(Flammability Limits)라 하며 인화한계의 범위에서 농도가 낮은 부분이 인화하한(LFL; Lower Flammability Limits)이고 높은 부분이 인화상하(UFL; Upper Flammability Limits)이다. 인화하한은 화염의 전파를 지탱하는 공기 중의 인화성가스의 가장 낮은 농도인 반면 인화상한은 불충분한 양의 산소로 인해 가스혼합물이 점화될 수 없는 최대 인화성가스의 농도이다. 이는 LFL이 인화성가스에 의해 제한되는 반면 UFL은 산소 농도에 의해 제한됨을 의미한다. UFL 이상의 농도에 도달했음에도 불구하고 폭발혼합물의 농도는 희석으로 폭발가능영역으로 다시 감소될 수 있으므로 LFL을 초과한 폭발혼합물은 여전히 점화되어 폭발할 수 있기에 폭발혼합가스를 LFL 이하로 제어하는 것이 폭발을 방지하는데 중요하다(Bjerketvedt et al., 1997). 폭발한계(explosive limits)는 유럽표준과 법적규제 용어로 사용되고 인화한계와 같은 의미이다(ISO/IEC 80079-20-1, 2017). [그림 2-9]는 ISO/IEC 80079-20-1에서 제시한 상온, 상압에서의 메탄, 프로판, 에틸렌, 아세틸렌, 수소의 인화범위이다. 화학양론 조성은 연료와 산소가 완전히 반응하고 산소의 과잉연료가 존재하지 않는 조성으로 정의된다(Bjerketvedt et al., 1997). 상온상압에서 인화성 가스가 완전히 연소되는 인화성가스의 농도이다.



[그림 2-9] 대기압과 상온의 공기 중에서 인화한계

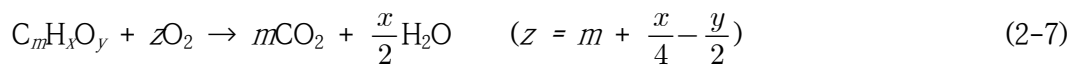
Cashdollar et al., (2000)은 메탄-, 프로판-, 수소-공기 혼합가스를 [그림 2-10]과 같은 20 L 챔버와 120 L 구형용기를 이용하여 상온, 상압에서 혼합가스농도를 변화시켜가며 인화성가스의 특성을 연구하여 <표 2-9>와 같이 인화성가스의 최대폭발압력을 비교하였다. 메탄의 최대폭발압력은 20 L 용기가 120 L 용기 보다 조금 낮았다. 25 m<sup>3</sup> 용기에서 구한 폭발압력을 화학양론비에서 얻어진 값으로 보정하면 120 L 용기의 값과 다른 용기의 값에 근접하였다. 최대폭발압력은 화학양론농도(메탄 9.5 %, 프로판 4 %, 수소 29.5 %) 보다 조금 높은 농도(메탄 10 %, 프로판 4.5~5.0 %, 수소는 특정하지 않음)에서 나타났으며 같은 형상의 구형용기에서 용기체적의 변화는 폭발압력에 영향이 미비하였다.



[그림 2-10] 120 L(좌) 구형용기와 20 L(우) 용기(Cashdollar et al., 2000)

한편 Harris, (1967)은 크기가 다른 구형용기(0.5 L 4 L, 1,699 L(60 ft<sup>3</sup>))에서 최대폭발압력에 대해 같은 결과를 얻었고 인화하한(LFL)과 인화상한(UFL) 부근(in lean and in very rich)에서 구형용기의 크기가 클수록 폭발압력값이 낮아짐을 확인했다.

Jones, (1938)는 탄화수소 증기의 경우 인화하한(LFL = 0.55C<sub>st</sub>)과 인화상한(UFL = 3.50C<sub>st</sub>)이 연료의 화학양론농도(stoichiometric concentration; C<sub>st</sub>) 함수임을 발견하였다. 대부분의 유기화합물에 대한 화학양론농도는 일반적인 연소반응식(2-7)를 이용하여 추정하며 공기와 인화성 혼합물은 식(2-8)을 따른다(Crowl & Louvar, 2011)



$$C_{st} = \frac{100}{1 + (\frac{z}{0.21})} \quad (2-8)$$

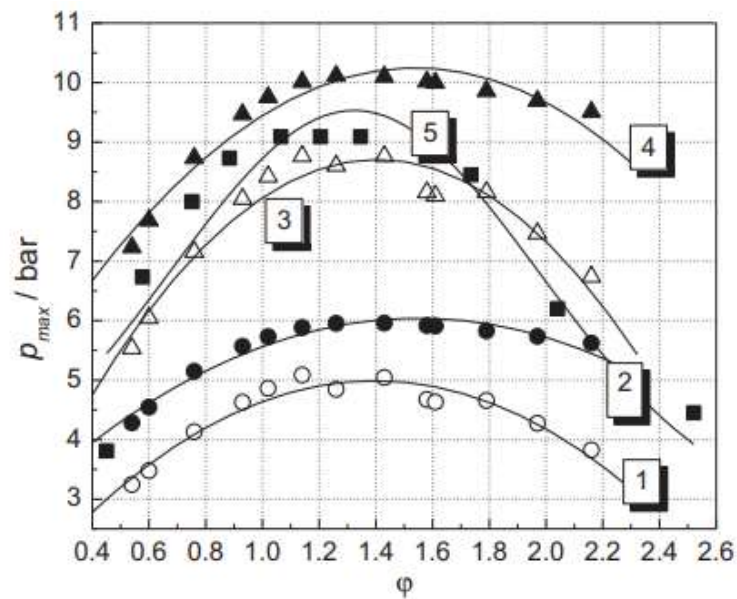
<표 2-9> 인화성가스의 최대폭발압력(Cashdollar et al., 2000)

최대폭발압력(Pmax) (bar g)	농도(vol.%)		
	Methane(CH <sub>4</sub> )	Propane(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Hydrogen(H <sub>2</sub> )
이론값(단열연소)	7.9	8.6	7.1
20 L chamber	7.3±0.1	-	-
120 L sphere	7.5±0.1	8.2±0.2	7.1±0.1
25 m <sup>3</sup> sphere <sup>a</sup>	6.6±0.1 <sup>a</sup>	7.8±0.5 <sup>a</sup>	-

<sup>a</sup>화학양론비에서 측정된 값( Nagy et al., 1971 & Sapko et al., 1976)



Movileanu et al., (2012, 2014)는 원통형 용기(L= 15 cm, D= 10 cm, V= 1.178 L, 중심부 점화)를 이용하여 에틸렌-공기 혼합가스의 폭발특성을 조사하였다. [그림 2-11]은 두 개의 초기 압력에서 측정된 폭발압력과 계산된 당량비( $\phi$ )의 폭발압력을 함께 나타냈다. 초기압력이 0.6 barg에서 원통형용기의 폭발압력값 [1], 단열폭발(adiabatic explosion)압력값 [3], 초기압력이 1 barg에서 원통형용기의 폭발압력값 [2], 단열폭발압력값 [4], 20 L 구형용기의 폭발압력 값 [5]를 곡선화하였다. 폭발한계 내에서 공기의 양이 많아지거나 인화성물질의 농도가 높아지면 폭발압력은 낮아졌고 폭발혼합가스의 최대폭발압력은 당량비 보다 높은 곳에서 나타났다.



[그림 2-11] 에틸렌-공기 혼합가스의 최대폭발압력( $P_{max}$ ); 초기압력([1]:  $p_0= 0.6$  barg, [3]:  $p_0 = 1$  barg)이 다른 원통형용기(1.178 L)와 단열폭발([2]:  $p_0= 0.6$  barg, [4]:  $p_0= 1$  barg), 구형용기([5]:  $p_0= 1$  barg, 20 L)(Movileanu et al., 2012)

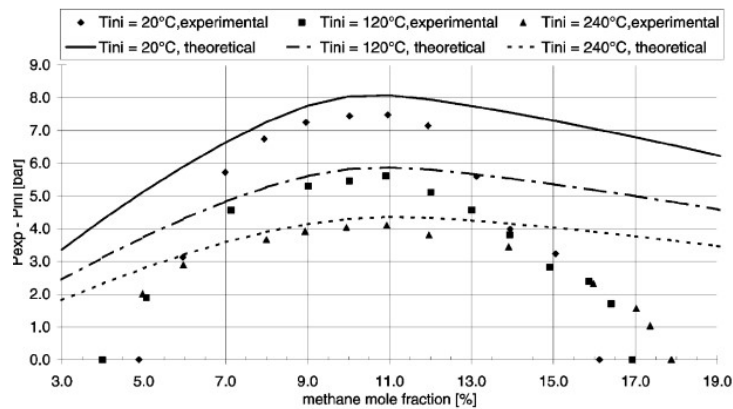
폭발에서 이론적으로 완전연소가 되는 농도비를 화학양론비( $C_{st}$ , stoichiometric ratio)라 하며 실제로 최대폭발압력( $P_{max}$ )은 화학양론비 보다 조금 높은 값에서 측정됨을 알 수 있다. 실험값과 화학양론비의 차이는 이상적이지 않은 불완전연소와 용기 벽에서의 열손실로 인하여 발생한다.

### 2.2.2 인화성가스의 초기온도와 초기압력

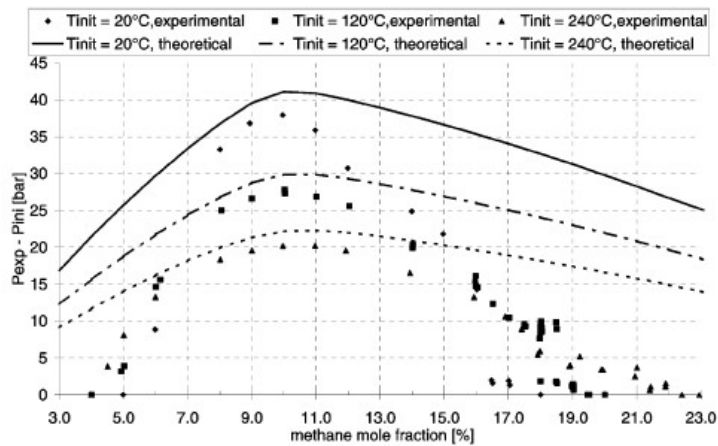
Pekalski et al.(2005)는 메탄-, 프로판-공기 혼합가스를 20 L 구형용기를 이용하여 인화한계의 모든 범위, 표준 및 높은 압력(1, 5, 10 barg과 온도(20, 120, 240 °C)에서 폭발시험을 수행하였고 다음과 같이 보고하였다. 폭발압력은 이상기체방정식에 따라 초기혼합가스의 몰수와 온도, 폭발 후의 몰수와 온도에 영향을 받는다.

$$P_{\text{exp}} = \left(\frac{n_{\text{exp}}}{n_i}\right)\left(\frac{T_{\text{exp}}}{T_i}\right)P_i \quad (2-9)$$

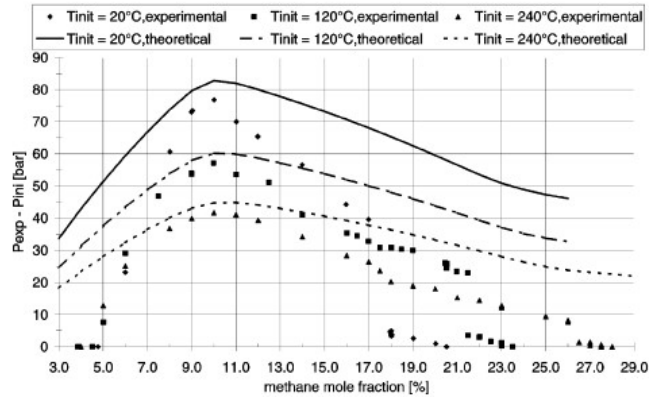
여기에서  $P$ 는 절대압력,  $T$ 는 켈빈온도,  $n$ 은 가스·증기의 몰수,  $\text{exp}$ 는 폭발 후,  $i$ 는 초기(폭발 전)이다. 식(2-9)은 다음의 가정 하에 초기온도, 초기압력에서 폭발압력을 대략적으로 추정하는데 사용할 수 있다. 첫째, 단열화염온도는 초기압력과 초기온도에 영향이 적은 함수이다. 둘째, 초기온도와 초기압력의 증가는 폭발 후 혼합물 조성에 큰 영향이 없다. 셋째, 온도와 압력의 난류와 같은 다른 요인은 폭발과정에 큰 영향을 미치지 않는다. [그림 2-12] (a)는 메탄-공기 혼합가스를 1 atm, 20 °C, 120 °C, 240 °C에서 인화한계의 모든 범위로 농도를 변화시켜가면서 이상적인(실선, 점선) 폭발압력과 실험한(원형점, 사각형 점, 삼각형점) 폭발압력을 나타낸 것이다. [그림 2-12] (b)는 초기압력 5 barg에서, [그림 2-12] (c)는 초기압력 10 barg에서 실험한 그래프이다. 인화성 혼합가스의 초기온도가 올라갈수록 폭발압력은 낮아졌고 초기압력이 높아지면 폭발압력도 증가하였으며 이상기체방정식과 같이 초기압력에 비례하였다(Pekalski et al., 2005).



(a) 초기압력 1 atm



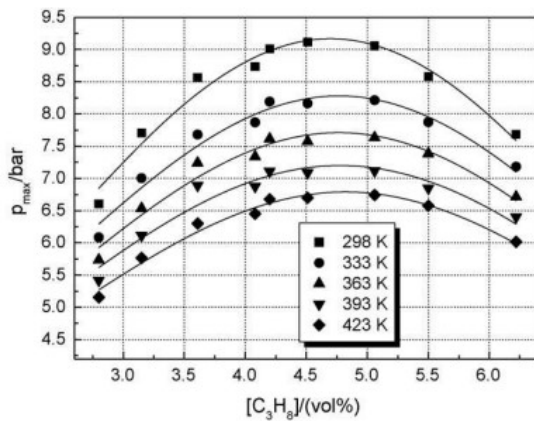
(b) 초기압력 5기압



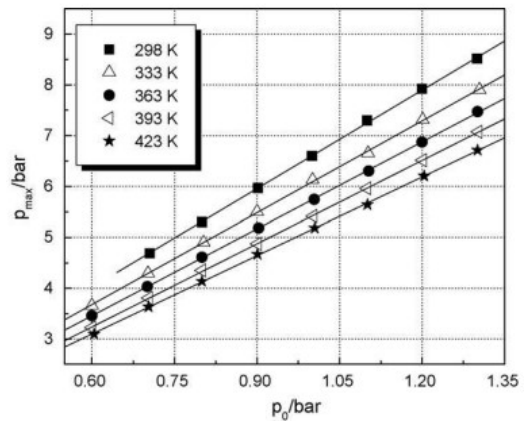
(c) 초기압력 10기압

[그림 2-12] 초기압력별 메탄-공기 혼합가스의 폭발압력(초기압력; 1 atm, 5 barg, 10 barg 20 °C, 120 °C, 240 °C) (Pekalski. et al., 2005)

Razus, et al., (2010)은 프로판-공기 혼합가스를 구형용기, 1 barg, 인화한계 범위에서 온도별(298 K, 333 K, 363 K, 393 K, 423 K) 폭발압력을 조사한 결과 [그림 2-13] (a)와 같은 데이터를 얻었다. 폭발압력은 초기온도의 증가에 반비례해서 낮아졌고 당량농도 부근에서 인화한계에서 보다 조금 큰 차이를 보였다. 또한 [그림 2-13] (b)와 같이 프로판-공기 혼합가스농도 3.15 %에서 온도별 초기압력의 변화에 따른 폭발압력을 보고하였다. 폭발혼합가스의 초기온도가 높아질수록 폭발압력은 낮아졌고 초기압력이 높을수록 폭발압력은 높아졌다. 온도가 높아지면 기체의 활성화도가 높아지며 기체의 밀도가 낮아지고 초기압력이 높아지면 단위체적당 압축가스의 양이 많아져 폭발압력이 높아진 것이다.



(a) 온도별 폭발압력



(b) 초기압력과 초기온도별 폭발압력

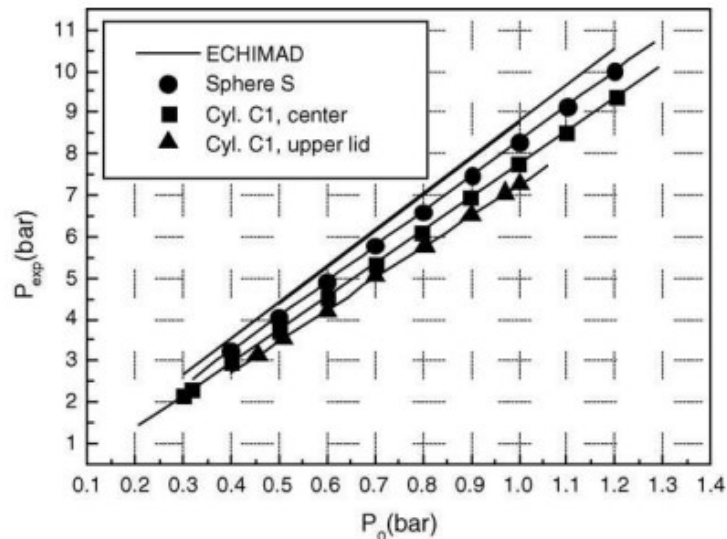
[그림 2-13] 프로판-공기 혼합가스의 폭발압력, 1 barg, 구형용기(Razus. et al., 2010)

폭발초기조건에서 온도가 높아지면 폭발압력이 낮아지고 초기압력이 높아지면 폭발압력이 커짐을 알 수 있다.

### 2.2.3 점화원의 위치와 점화에너지

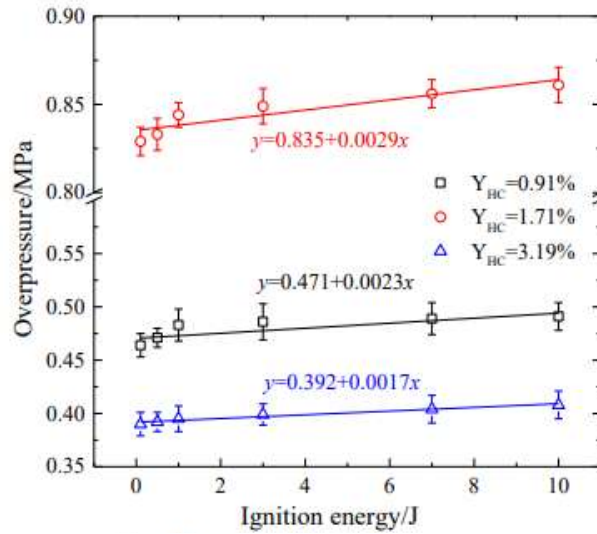
Dai et al. (2021)는 수소-공기 혼합물의 폭발 특성에 대한 다양한 점화 위치의 영향을 연구했다. 그 결과 중앙점화의 경우 에너지 손실이 적고 폭발 거동이 이상적인 정적폭발(constant volume explosion)과 유사하다는 것을 알 수 있었다.

지름이 같은 구형용기(S; D= 10 cm)와 원통형용기(C1; H= 15 cm, D= 10 cm)의 중앙과 상단 뚜껑에서 점화하여 측정된 폭발압력은 [그림 2-14]와 같이 구형용기 > 원통형용기의 중앙 > 원통형용기의 상단 뚜껑의 순으로 폭발압력이 높게 나타났다. 이는 점화가 용기의 기하학적 중심에서 발생되어도 구형용기에 비해 원통형용기에서 열손실이 더 높고 비대칭의 화염전파에서 최대 열손실이 발생하여 낮은 폭발압력이 생성됨이 확인되었다(Razus. et al., 2006). 면적/체적 비율이 높으면 열손실도 많아져 폭발압력이 낮아지는 것이다(Harris, 1967).



[그림 2-14] 원통형 용기에서 점화위치에 따른 폭발압력(Razus. et al., 2006)

Wang. et al.,(2020)은 907.5 L 연료탱크를 이용하여 가솔린-공기 혼합물의 폭발특성을 연구하였다. [그림 2-15]는 가솔린 농도를 세 가지(0.91 %, 1.71 %, 3.19 %)로 고정하고 점화에너지를 증가시키며 폭발압력을 측정된 그래프이다. 초기 점화에너지가 증가함에 따라 최대폭발압력은 높아지고 있다. 가솔린 농도 1.71 %에서 초기 점화에너지가 0.1 J 일 때 최대폭발압력은 0.833 MPa이고 초기점화에너지가 10 J 일 때 최대폭발압력은 0.861 MPa이며 최대폭발압력과 초기점화에너지는 선형적인 관계가 있음을 보여준다. 비슷한 현상은 석탄분진폭발에서도 나타났다(Lee et al., 2001).



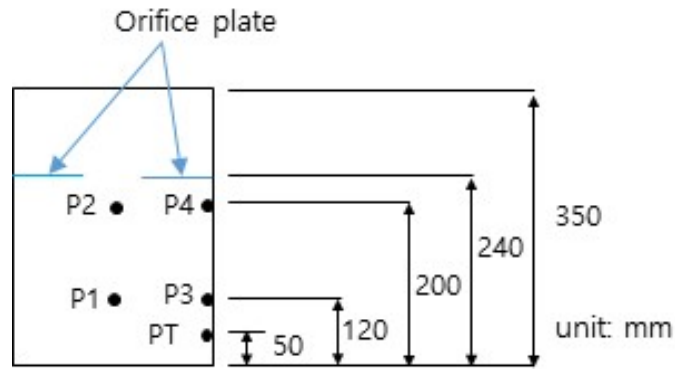
[그림 2-15] 점화에너지에 따른 폭발압력의 영향(Wang. et al., 2020)

화학 역학적 측면에서 가솔린폭발은 연쇄반응과정이므로 점화에너지를 증가시키면 공유결합의 파괴가 촉진되고 반응속도가 가속화되며 결국 과압 매개변수가 증가한다. 또한 화염전파의 관점에서 점화에너지는 점화플러그 근처의 가솔린-공기 혼합물의 화염속도에 영향을 끼쳐 과압 매개변수에 영향을 준다. 초기 점화 에너지가 증가함에 따라 가솔린-공기 혼합물의 화염면적과 화염전파속도가 증가하여 최대폭발압력 값이 더 커지게 된다(Wang. et al., 2020). 가솔린과 분진의 경우, 초기점화에너지가 클수록 폭발압력이 선형적으로 증가함이 나타났다.

폭발압력은 점화원이 용기의 중앙에 있을 때와 점화에너지가 클수록 높아짐을 알 수 있다.

## 2.2.4 장애물 유무 및 형상

Zhuang et al, (2023)은 [그림 2-16]과 같이 원통형 밀폐용기(체적 17.17 L, 지름 250 mm, 높이 350 mm)에 수소농도를 30 %로 유지하고 장애물(오리피스 플레이트) 없이 점화위치(P1: 용기 중심부, 바닥으로부터 120 mm 높이, P2: 용기 중심부, 바닥으로부터 200 mm 높이, P3: 용기 벽, 바닥으로부터 120 mm 높이, P4: 용기 벽, 바닥으로부터 200 mm 높이)를 다르게 하여 폭발압력을 측정(PT: 용기 벽, 바닥으로부터 50 mm 높이)한 결과, 최대폭발압력은 거의 일정하게 나타났지만 장애물을 설치(바닥으로부터 240 mm)하고 점화위치를 옮겨가며 폭발압력을 측정한 결과, 다양한 폭발압력이 나타났다. 이는 화염이 장애물의 영향으로 난류가 형성되어 폭발압력이 높아지기도 하고 장애물의 표면으로 열을 빼앗겨서 폭발압력이 낮아지기도 하며 정형화할 수 없는 다양한 양상이 나타남을 보고했다.

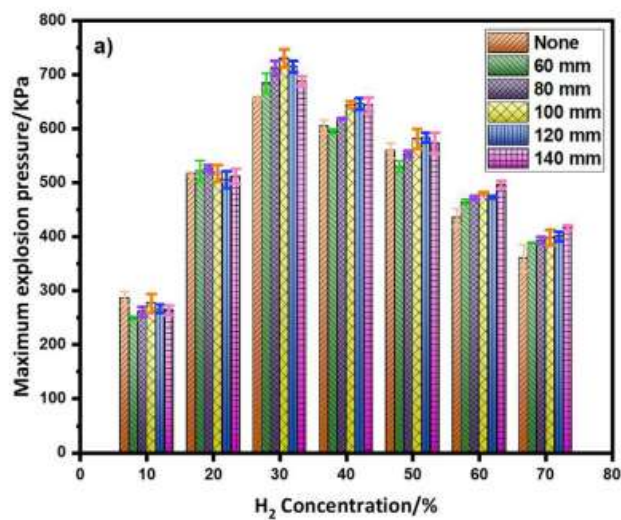


[그림 2-16] 장애물이 설치된 원통형 용기에서 점화원 및 압력측정 위치

또한 [그림 2-17] (a)처럼 다양한 크기의 오리피스 플레이트(홀 크기[mm]; 60, 80, 100, 120, 140)를 설치하고 수소-공기혼합가스의 농도를 변화시켜가며 폭발압력을 측정된 결과 [그림 2-17] (b)와 같이, 대체적으로 수소 농도가 20 vol. % 미만에서는 최대폭발압력이 낮아지고 수소 농도가 20 vol. % 초과하는 범위에서는 최대폭발압력이 높게 나타났고 이와 같은 현상은 화염이 오리피스 플레이트를 통과하면서 생성된 난류가 증가하였고 오리피스플레이트에 의한 화염의 열손실 때문이라 했다.



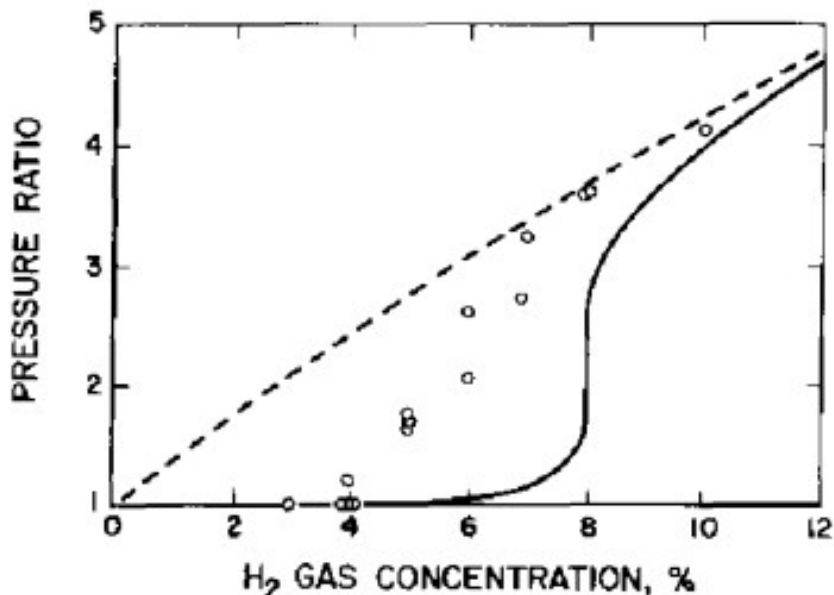
(a) 다양한 크기의 오리피스 플레이트



(b) 폭발압력 측정결과

[그림 2-17] 최대폭발압력과 장애물의 영향(Zhuang et al., 2023)

오규형 등, (1999)은 LPG-공기 인화성가스로 채워진 직사각형의 밀폐용기(270 L) 내에 목재 블록을 내용물로 넣어서 목재 블록의 부피와 표면적의 변화에 따른 폭발압력을 연구하였다. 밀폐용기 내에 내용물이 증가하여 용기의 체적이 감소할수록 폭발압력은 낮아졌고 동일한 부피의 내용물에서 표면적이 증가할수록 폭발압력은 낮아졌다. 이는 내용물의 표면을 통한 열 손실로 폭발압력이 감소한 것으로 판단했다. 그 결과 밀폐용기 내 폭발압력은 내장된 장애물의 부피 또는 배열은 폭발압력에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다. Kumaret al, (1983)은 100°C 및 대기압에서 직경 2.3 m의 구에서 수소-공기 혼합물의 연소에 대한 격자(gratings)의 영향을 조사한 결과 격자는 낮은 수소농도에서 연소범위와 최고압력을 증가시켰고, 그 효과는 높은 농도에서 적다는 것을 보여주었다. 일반적으로 격자는 방열판 역할을 하여 경우에 따라 최대 압력과 압력 상승률을 감소시킨다. Andrews et al., (1990)은 76 mm 직경의 밀폐용기에서 길이/직경(L/D) 비에 따른 압력상승률 증가에 대한 배플의 장애물 영향을 정량적으로 보고했다. 화염속도가 높으면 그리드 판 막힘에 따라 그리드 판과의 상호작용에 큰 난류가 생성되었다. 화염이 난류에 도달하면 화염가속이 발생하고 이 가속은 장애물의 함수인 것으로 나타났다. Cashdollar et al., (2000)은 120 L 챔버에서 수소와 공기의 인화하한 부근에서 정적인 층류(quiescent)상태와 요동치는 난류(turbulent)에서의 폭발압력을 보고하였다. [그림 2-18]에서 가로축은 수소의 농도, 세로축은 초기압력 대 폭발압력비, 점선은 이상값으로 수소 농도 (4 ~ 8) %에 걸쳐 난류(빈 원형)의 폭발압력이 층류(실선)보다 높음을 확인할 수 있다.



[그림 2-18] 층류와 난류에서의 폭발압력(Cashdollar et al., 2000)

Di et al., (2009)와 Yu et al., (2016)은 동일한 구멍(hole)면적의 원형, 정사각형, 정삼각형 장애물을 설치하고 폭발의 영향을 조사하여 각진 형상(삼각형 > 정사각형)이 둥근 형상(원형)보다 높은 폭발압력이 발생함을 관찰했다.

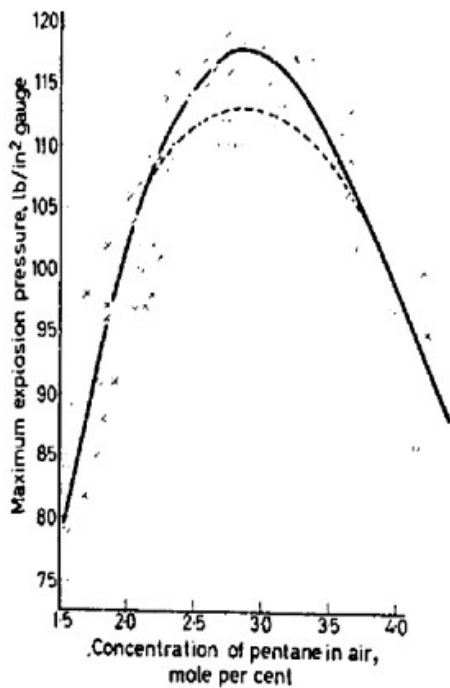
폭발압력과 장애물의 관계는 장애물의 위치, 크기, 압력측정위치 등에 따라 정형화 할 수 없는 양상이 나타났고 장애물에 의한 난류가 형성되면 압력이 증가하였고 인화하한 부근에서 난류에 의한 폭발압력이 층류보다 높게 나타났다.

현행 IEC 60079-1, (2014) Annex D에서 빈 내압방폭용기는 단순한 형상(정사각형, 직사각형, 원통형 단면으로 그룹 IIC의 경우 주요 치수가 다른 치수의 2:1 이하, 그 외 그룹(I, IIA, IIB)에서는 4:1 이하)을 요구하며 폭발시험에서 그룹 IIC는 단면적의 60 %, 그 외 그룹은 치수비가 2:1을 초과할 때 단면적의 80 %에 해당하는 장애물(baffle plate)을 설치하고 폭발기준압력을 정한다. 또한 빈 내압방폭용기에 내용물을 장착할 때 그룹 IIC의 경우 내용물은 각 단면적의 최소 40 %가 비어 있어야 하고 그 외의 그룹은 최소 20 %가 비어 있어 폭발화염이 내용물의 제한을 받지 않을 것을 요구한다. 이는 폭발 시 난류와 압력 증첩이 발생하여 폭발압력이 높아지지 않게 내용물을 장착하라는 의미인 것이다.

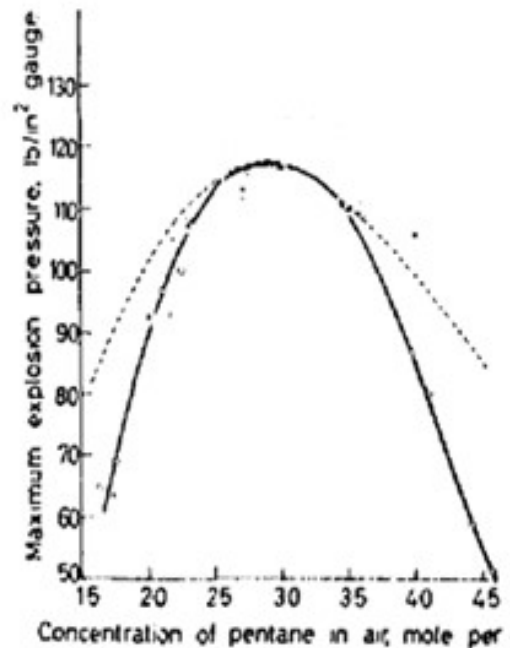
## 2.2.5 용기의 크기 및 기하학적 형태

Harris, (1967)은 체적이 다르지만 기하학적 모양이 확대된 구형용기(0.5 L 4 L, 1,699 L(60 ft<sup>3</sup>))에서 펜테인(pentane; C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>)-공기 혼합가스를 용기중앙에서 점화하여 폭발압력을 발표하였다. 0.5 L와 4 L는 최대폭발압력이 발생하는 농도에서 4 L의 폭발압력이 높게 나타났고 그 외 인화한계 내에서 동일한 폭발압력이 측정되었고 1,699 L(60 ft<sup>3</sup>)에서는 최대폭발압력이 발생하는 농도에서의 최대폭발압력이 동일하였지만 인화하한 부근과 인화상한 부근의 압력은 용기의 체적이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. [그림 2-19] (a)는 0.5 L(점선)와 4 L(실선) 용기, (b)는 4 L(점선)와 1,699 L(60 ft<sup>3</sup>; 실선)의 펜테인-공기 농도별 최대폭발압력 그래프이다. 저자는 4 L 까지 용기의 체적이 커지면서 폭발성이 높은 농도 부근에서의 최대폭발압력은 증가하고 4 L 보다 큰 체적에서는 인화상한하한 부근에서는 폭발상승속도가 낮아져 폭발압력도 낮아진다고 했다. 이는 긴 폭발반응시간으로 용기벽에서 열손실이 발생하여 폭발압력이 낮아진다고 하였다. 여기서 인화성 물질의 특성으로 최대폭발압력을 측정하고자 할 때 구형용기의 체적 4 L는 의미 있는 값이 되어 시험장치의 최소 체적으로 활용할 수 있을 것이다.





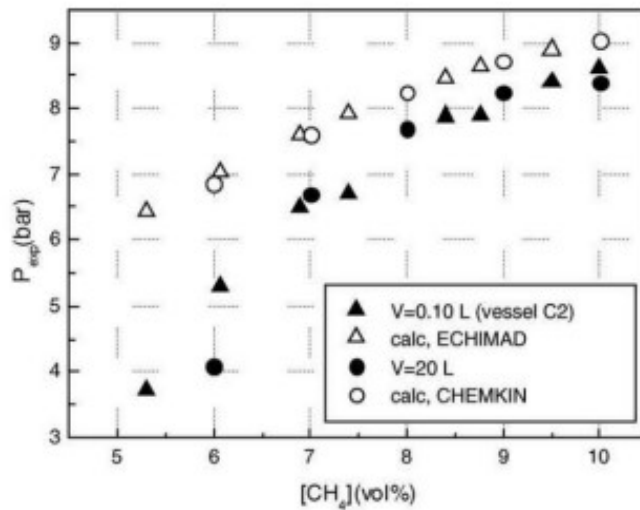
(a) 0.5 L(점선) 와 4 L(실선) 구형용기



(b) 4 L(점선) 와 60 ft³(실선)구형용기

[그림 2-19] 펜테인-공기 농도별 최대폭발압력(Harris, 1967)

Phillips. (1984)는 구형용기의 중앙에서 점화시킬 때 용기 내부의 장애물에 의한 화염의 급상승과 난류의 영향으로 최대폭발압력은 빈 용기 보다 높음을 확인하였다. 특히 반응성이 높은 아세틸렌, 수소 또는 낮은 점화온도의 디에틸에테르와 가솔린에서 이러한 현상이 나타난다. 다시 말해 열손실이 폭발압력을 낮춘다고 보고했다. Cashdollar et al.(2000)은 메탄-, 프로판-, 수소-공기 혼합가스를 상온, 상압에서 20 L 챔버와 120 L 구형용기, 25 m³ 구형용기의 폭발압력을 연구하여 같은 형상의 용기에서 용기의 크기는 폭발압력에 영향이 미비하다고 보고하였다. 이는 Harris.(1967)이 발표한 기하학적으로 확대된 4 L 이상의 폭발용기에서 최대폭발압력은 같다는 연구결과와 견해가 일치한다. Razu. et al, (2006)은 원통형용기(C2: 0.1 L, H= 9.8 cm, D= 4.9 cm)와 구형용기(20 L)를 이용하여 상온(298K), 상압(1barg)에서 메탄-공기 혼합가스의 폭발압력을 실험과 전용 프로그램으로 계산하였다. 실험결과 두 용기의 체적의 차이가 크어도 [그림 2-20]와 같이 동일한 패턴을 보였고 계산한 값은 매우 작은 차이가 나타났다. 계산한 값은 측정된 값보다 높았고 화학양론비 부근에서 차이가 좁아졌고 인화하한계 부근으로 갈수록 차이가 커졌다. 화염전파 중 고유한 열손실로 인해 실험폭발압력은 단열값(계산값)보다 낮았다.



[그림 2-20] 메탄-공기 혼합가스의 폭발압력, 1barg, 29  
8K(Razus. et al., 2006)

또한 대기압, 상온, 중심부 점화에서 메탄-공기 혼합가스를 실험한 여러 문헌을 분석한 <표 2-10>를 보고하여 20 L 구형용기의 최대폭발압력은  $(8.3 \pm 0.3)$ barg이었고 다른 크기의 구형용기에서 압력값은 다르게 나타났다. 특히 가장 큰 204 m<sup>3</sup> 구형용기의 폭발압력은 낮았고 이는 용기 벽으로의 복사과 대류 열손실로 압력이 낮아진 것으로 발표하였다(Razus et al., 2006; Ye et al., 2017).

<표 2-10> 대기압, 상온에서 메탄-공기 혼합가스를 실험한 폭발압력(Razus. et al., 2006)

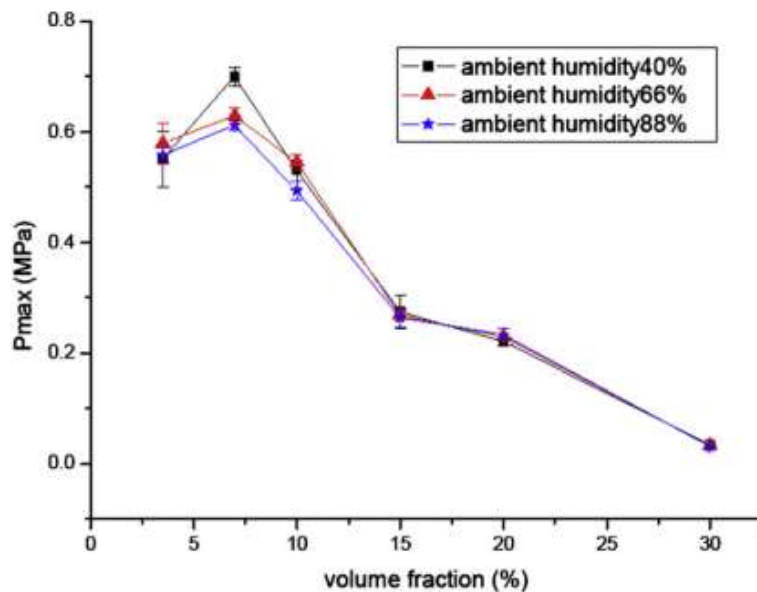
No.	P <sub>exp</sub> (barg)	CH <sub>4</sub> (vol. %)	Explosion vessel
1	8.3	10.5	20 L, according to EN 13673-1
2	8.1	9.5	20 L, conditions as in EN 13673-1
3	8.5	10.9	20 L, conditions as in EN 13673-1
4	8.3	10.0	20 L, sphere
5	8.2	10.2~10.5	20 L, sphere
6	8.1	9.5	5 L, sphere
7	8.7	9.5	5 L, sphere
8	7.7	9.5	204 m <sup>3</sup> , sphere
9	7.0	10.0	4.2 L, sphere
10	8.0	9.5	20 L, sphere

Jiao et al., (2018)은 구형의 113 L 와 22 L의 용기에 지름이 60 mm 이고 길이가 2000 mm 인 파이프를 3개까지 연결하고 용기의 중앙에서 점화한 후 용기와 파이프의 끝단에서 압력을 측정한 연구결과를 발표하였다. 실험결과 파이프를 연결하면 두 용기 모두에서 파이프의 표면(내벽)이 크게 증가하고 에너지 손실이 커져 구형용기의 폭발압력은 감소하였고 파이프 끝단에서의 압력은 모두 증가하였지만 압력증가의 정도는 113 L의 파이프 끝단에서의 압력이 더 크게 증가함을 알 수 있었고 이는 폭발혼합물의 양이 많기 때문에 파이프에 더 큰 예압을 발생시켜 압력이 증가하였다고 보고하였다.

앞서 Razus. et al., (2006)은 동일한 지름의 구형용기가 원통형용기보다 폭발압력이 높음을 확인하였으며 최대폭발압력이 발생하는 농도에서의 폭발압력은 일정체적(4 L)까지는 압력이 증가하였고 그 이상의 체적에서는 동일함을 알 수 있다.

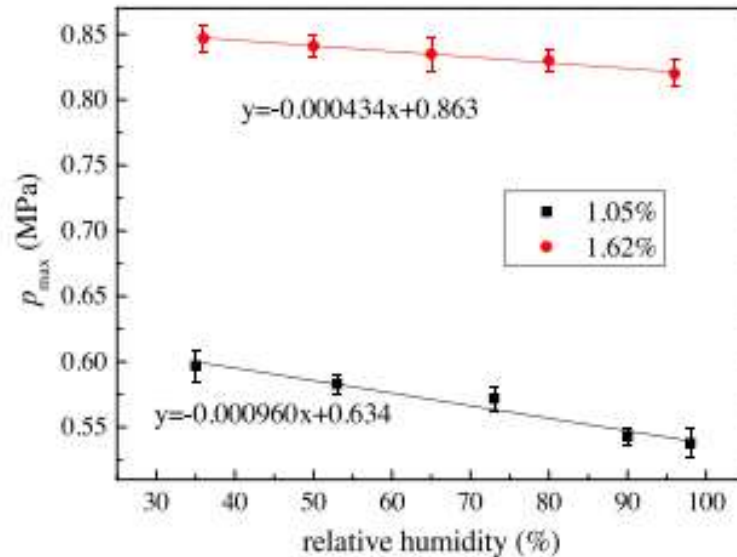
## 2.2.6. 습도의 영향

Zhang, (2012)는 에폭시프로판-공기 혼합가스에 상대습도를 40%, 66%, 88%로 변화시켜 농도별 최대폭발압력을 보고하였고 화학양론부근에서만 습도별 압력의 차이가 [그림 2-21]과 같이 나타났다. 수증기는 비활성 기체이기 때문에 대부분의 경우 혼합물은 수증기 농도가 증가함에 따라 덜 민감해진다. 이 연구에서 습도는 폭발혼합물의 발화과정에서 촉진과 억제 두 가지 기능을 모두 가지고 있어 농도 30 %에서 촉진기능을 하고 7~10%에서 촉진/억제기능이 균형상태로 나타났고 물에는 수소와 산소원자가 포함되어 두 원소 모두 연소를 촉진하는 이유일 수 있다고 저자는 생각했다.



[그림 2-21] 에폭시프로판의 상대습도 40%, 66%, 88%에서 농도변화에 따른 폭발압력(Zhang,2012)

Qi et al, (2017)은 가솔린-공기 혼합물 폭발과라미터를 상대습도(35 % ~ 98 %)의 영향에 대해 조사하기 위해 20 L 연료탱크에서 시험을 수행하였다. 습도의 증가는 [그림 2-22]와 같이 최대폭발압력을 선형적으로 감소시켰고 가솔린 농도 1.05 %에서 상대습도를 35 %에서 98 %까지 높였을 때 최대폭발압력은 0.059 MPa 감소하였다. 가솔린 농도 1.62 %에서 최대폭발압력은 0.027 MPa 감소하였다.



[그림 2-22] 온도 298 K에서 상대습도 변화에 따른 최대폭발압력, 3번 폭발 반복(Qi et al., 2017)

화학평형의 관점에서 수증기는 탄화수소 연소의 생성물중의 하나이다. 습도의 증가는 물분자에서 생성된 라디칼을 증가시키고 용기의 반응물의 라디칼 농도를 감소시킨다. 더욱이 수증기의 열용량이 커서 일정한 체적용기에서 더 많은 열을 흡수하고 압력을 감소시킨다(Qi et al., 2017). Wang et al, (2020)은 가솔린-공기 혼합물 폭발의 과압에 대한 습도의 영향을 조사하기 위해 907.5 L 연료탱크에서 시험을 수행하였다. 초기 습도의 증가는 최대폭발압력을 선형적으로 감소시키는 경향성이 나타났다. 가솔린 농도 1.71 %에서 상대습도가 40 %에서 98 %로 증가하였을 때 최대폭발압력은 0.858 MPa에서 0.819 MPa로 감소하였다. 폭발특성에 있어 습도의 영향은 첫째, 습도의 증가는 물에서 생성된 라디칼 농도의 증가를 의미하여 반응물로부터 생성된 라디칼 농도는 희석된다. 둘째, 수증기는 폭발과정에서 발생한 열을 흡수하고 폭발강도를 감소시키고 결과적으로 과압을 줄여주는 의미가 내포되어 있다.

## 2.2.7. 시사점

인화성가스의 폭발압력은 첫째, 화학양론농도보다 조금 높은 농도에서 최대폭발압력이 나타나고 둘째, 폭발혼합가스의 초기 온도가 낮을수록 초기압력이 높을수록 폭발압력은 높게 측정되었고 셋째, 점화에너지가 클수록 점화원의 위치가 용기 중

양에서 발화될 때 폭발압력은 높았다. 넷째, 장애물의 영향은 정형화하기 어려우나 인화한계 아래 부분에서 난류는 층류보다 폭발압력을 증가시켰다. 다섯째, 인화성 가스의 최대폭발압력이 발생하는 농도에서 용기의 체적 4 L까지는 최대폭발압력이 증가하였고 과도하게 큰(25 m<sup>3</sup>) 체적에서는 오히려 조금 낮아졌고 용기의 기하학적 형태는 원통형에 비해 구형에서 약간 높은 폭발압력이 나타났다. 여섯째, 가솔린과 분진에서 습도가 높아지면 폭발압력이 선형적으로 감소하였다.

최대폭발압력을 측정하는데 산업현장에서 사용되는 내압방폭용기는 연구에 쓰이는 구형의 시험장치와 같이 단순하지 않아 난류, 열손실, 압력중첩, 반사충격파, 폭굉이 발생할 수 있지만 이를 예측하기는 어렵다. 일반적으로 방폭인증 시 내압용기의 기준압력은 6 ~ 11 barg 정도가 측정된다. 그러나 복잡한 형상의 용기에서는 미연소폭발가스가 압축되어 최대 35 barg(Singh, 1984)가 폭발기준압력이 될 수도 있다. 기기의 모양, 조성농도, 점화위치, 압력측정위치와 같은 작은 변화에도 압력은 민감하다. 내압방폭전기기의 폭발압력을 결정하는 시험을 계획하는데 이러한 요소를 잘 고려해야 한다.

## 2.3 방폭기기

방폭기기에는 [그림 2-23]과 같이 방폭기기 표시가 되어 있다. 이 표시사항을 이해함으로써 방폭기기의 올바른 선택이 가능하다. ① Ex는 폭발분위기(Explosive atmospheres)의 약자로 방폭기기임을 나타내고 ② db는 방폭구조, ③ IIB는 가스그룹, ④ T3는 온도등급, ⑤는 기기보호등급을 의미하며 자세한 설명은 본 절에서 설명된다.

Ex db IIB T3 Gb  
① ② ③ ④ ⑤

[그림 2-23] 방폭기기 표시

### 2.3.1 폭발위험장소

인화성물질을 사용하게 되면 필연적으로 폭발위험분위기가 형성되고 누출원의 형태와 등급, 환기량, 희석의 정도 등을 고려하여 KS C IEC 60079-10-1, -2에 따라 가스·증기 및 분진의 폭발위험장소를 구분해야한다. <표 2-11>은 폭발위험장소의 구분을 나타낸 것이며 일반적으로 정량적인 발생 시간/빈도에 따라 장소를 구분하고자 하지만 이는 공식적인 표준이나 기준이 아닌 가이드이다.

<표 2-11> 폭발위험장소의 구분(KS C IEC 60079-1, 2015; KS C IEC 60079-10-2, 2015)

폭발위험장소의 구분	정의	폭발분위기 형성 시간/빈도 가이드*
0종 장소	폭발성 가스 분위기가 연속적, 장기간 또는 빈번하게 존재하는 장소	1000 시간/년 초과 또는 1시간/회 이상
1종 장소	폭발성 가스 분위기가 정상작동 중 주기적 또는 빈번하게 생성되는 장소	10 시간/년 초과 < 1000 시간/년 이하
2종 장소	폭발성 가스 분위기가 정상작동 중 조성되지 않거나 조성된다 하더라도 짧은 기간에만 존재할 수 있는 장소	1 시간/년 초과 10 시간/년 이내 그리고 1분/회 미만
20종 장소	공기 중 분진운 형태의 폭발성 분진 분위기가 연속적, 장기간 또는 빈번하게 존재하는 장소	1000 시간/년 초과 또는 1시간/회 이상
21종 장소	공기 중 분진운 형태의 폭발성 분진 분위기가 가끔씩 정상 운전 시에 발생할 우려가 있는 장소	10 시간/년 초과 < 1000 시간/년 이하
22종 장소	공기 중 가연성 분진운 형태로 폭발성 분진 분위기가 정상 운전 시에는 발생할 우려가 없으며, 발생한다고 해도 짧은 기간 동안만 지속될 수 있는 장소	1 시간/년 초과 10 시간/년 이내 그리고 1분/회 미만

\*형성 시간/빈도(Jespen, 2016)는 공식적으로 표준이나 기준으로 채택되지 않았음

### 2.3.2 방폭구조

폭발성 분위기에 사용되는 방폭기기의 구조는 원리에 따라 <표 2-12>와 같이 크게 스파크발생 차단, 전기기기회로의 점화에너지 제한, 점화원의 접촉 차단, 화염의 전파 방지로 분류할 수 있다.

<표 2-12> 방폭원리에 따른 방폭구조의 분류

원리	방폭구조
점화발생 차단	안전증, 비점화 nA
전기회로의 에너지 제한	본질안전
폭발분위기와 점화원의 접촉 차단	물드, 압력, 오일, 비점화 통기제한
화염의 전파 방지	내압, 충전

방폭구조의 종류는 <표 2-13>와 <표 2-14>과 같이 고용노동부고시와 IEC에서 분류하는 구조가 있다. 내압방폭구조에서 d, da, db, dc 가 있는 것은 해당규격의 버전이 바뀌면서 da, db, dc가 추가 된 것이다. 또한 d 는 1종 지역에서만 사용이 가능했지만 da는 0종지역, db는 1종지역, dc는 2종지역에 사용가능하게 기준이 세분화되었다.

<표 2-13> 고용노동부고시에 따른 방폭구조의 종류

구분	방폭구조	방폭기호
가스증기	내압	Ex d
	압력	Ex px, Ex py, Ex pz
	안전증	Ex e
	유입	Ex o
	본질안전	Ex ia, Ex ib
	비점화	Ex nA, Ex nR, Ex nC, Ex nL
	몰드	Ex ma, Ex mb
	충전	Ex q
분진	방진	Ex tD

<표 2-14> IEC 표준에 따른 방폭구조의 종류

Type of protection	Code
Flameproof enclosures	Ex d, Ex da, Ex db, Ex dc
Pressurized enclosure	Ex px, Ex py, Ex p, Ex pz, Ex pxb, Ex pyb, Ex pzc
Powder filling	Ex q
Liquid immersion	Ex o, Ex ob, Ex oc
Increased safety	Ex e, Ex eb, Ex ec
Intrinsic safety	Ex ia, Ex ib, Ex ic

pressurized room and artificially ventilated room	Ex pb, Ex pc, Ex vc
Non-sparking	Ex nA
Restricted-breathing enclosure	Ex nR
Sparking equipment	Ex nC
Energy limitation	Ex nL
Encapsulation	Ex ma, Ex mb, Ex m, Ex mc
Protection of equipment and transmission systems using optical radiation	Ex op is, Ex op sh, Ex op pr
Dust ignition protection by enclosure	Ex tD, Ex ta, Ex tb, Ex tc
Special protection	Ex sa, Ex sb, Ex sc

#### 가. 내압 방폭구조“d“(flameproof enclosure “d“)

내압방폭구조는 폭발성가스분위기를 발화시킬 수 있는 부품이 들어 있는 용기에서 내부 폭발로 발생하는 압력을 견디며, 용기 주변의 폭발성 가스 분위기로 폭발의 전파를 방지할 수 있는 용기를 이용한 구조로 주요시험으로 용기의 기계적 강도를 확인하는 내압시험, 내부접화에 의한 용기 주위의 인화성가스가 점화되는지 파악하는 인화시험이 있다(KS C IEC 60079-1, 2013). 접합부는 내압방폭구조에서 가장 중요한 부분으로 설치, 유지 보수 시 손상이 가지 않도록 잘 관리되어야 한다.

#### 나. 압력 방폭구조“p“(pressurization “p“)

압력방폭구조는 용기 내부의 보호가스 압력을 외부대기 압력보다 높게 유지함으로써 외부대기가 용기 내부로 유입되지 아니하도록 한 구조로 주요시험에는 용기의 최대양압시험, 누설시험, 퍼지시험이 있다(KS C IEC 60079-2, 2014). 보호가스로 깨끗하고 건조한 공기 또는 불활성 가스(질소, 아르곤 등)를 사용하며 용기내부를 최소 25 Pa이상 유지하고 px 구조는 용기의 내·외부온도를 제한하며, pz 구조는 외부온도만 제한한다. 복잡한 제어패널, 정상작동 중에 불꽃을 발생시키거나 고온인 부품에 적용한다. 전원을 공급하기 전에 제조자가 정한 시간이상으로 퍼징하여 내부를 폭발성분위기가 없도록 해야 한다. 1종 지역에 설치하는 px 구조는 양압에 실패하거나 유량이 부족하면 전원이 차단되고 알람이 동작되어야 한다.



## 다. 안전증 방폭구조“e“(increased safety “e“)

전기기기 또는 방폭부품에 적용되는 구조로, 과도한 온도 발생 가능성과 아크 및 스파크 발생에 대한 안전성을 증가하기 위해 추가 조치가 적용되는 보호형식으로 주요시험은 절연내력 및 특정 기기(회전기, 등기구, 정선박스, 저항가열기기 등)시험이 있다(KS C IEC 60079-7, 2015). 안전성을 증가시키기 위해 노출충전부(단자대 등)는 IP54, 절연충전부(전동기 권선 등)는 IP44를 기본적으로 요구한다. 분진 또는 습기의 침투와 축적은 충전부간의 절연거리, 공간거리를 좁혀 절연성능을 떨어뜨리고 고온, 불꽃을 발생하여 폭발을 일으킬 수 있다.

## 라. 본질안전 방폭구조“i“(intrinsic safety “i“)

기기 내부 및 폭발성 분위기에 노출된 상호연결 배선의 전기적 에너지를 스파크 또는 열적 효과로 인해 발화를 일으킬 수 있는 수준 이하로 제한하는 것에 기반한 구조로 불꽃점화시험, 온도시험, 절연내력시험이 있다(KS C IEC 60079-11, 2011). 정상조건과 2개의 고장조건에서도 폭발을 일으키지 않으며 0종 장소에도 사용가능하다. 배리어와 같이 비위험지역에 설치되나 방폭으로 평가받아야하는 본안관련기기와 인증을 받지 않을 수 있는 단순기기(simple apparatus)의 개념이 있다.

## 마. 몰드 방폭구조“m“(encapsulation “m“)

스파크나 열로 인해 폭발성 분위기를 발화시킬 수 있는 부품이 작동 또는 설치 조건에서 폭발성 분위기의 발화를 방지하기 위해 콤파운드나 기타 비금속 용기로 점착하여 완전히 둘러싸인 방폭구조이다(KS C IEC 60079-18, 2014). 콤파운드는 전기적, 열적, 기계적, 화학적으로 내성이 있어야 한다. 솔레노이드 코일, 릴레이, PCB에 많이 적용된다.

## 바. 비점화 방폭구조“n“(type of protection “n“)

전기기기의 정상작동 및 특정한 정기적 예상고장 발생 시 주위 폭발성 가스 분위기를 발화시킬 수 없도록 전기기기에 적용되는 구조로 장치 및 부품 내부에 접점이 있는 nC, 용기의 통기를 제한한 nR, 전기적 에너지를 제한하는 nL(ic와 같은 개념)이 있다. 2종 지역에서만 사용이 가능하다(KS C IEC 60079-15, 2017).

### 2.3.3 방폭 그룹

방폭 그룹은 특정 가스·증기 또는 분진에 따라 <표 2-15>와 같이 그룹(I, II, III) 또는 세부 그룹(IIA, IIB, IIC, IIIA, IIIB, IIIC)으로 분류된다.

<표 2-15> 방폭 그룹

그룹	정의
I	폭발성 메탄가스(fire damp)에 적합한 광산용 기기
II(IIA, IIB, IIC)	폭발성 메탄가스외의 가스폭발분위기에 사용기기
IIIA	폭발성 메탄가스외의 가연성 부유물에서 사용기기
IIIB	폭발성 메탄가스외의 비도전성 분진에서 사용기기
IIC	폭발성 메탄가스외의 도전성 분진에서 사용기기

그룹 II의 세분류는 <표 2-16>과 같이 최소시험안전틈새 또는 최소점화전류비에 따른다. 최소시험안전틈새는 ISO/IEC 80079-20-1의 장치를 이용하고 최소점화전류비는 IEC 60079-11의 불꽃점화시험기에서 측정된 메탄의 점화 전류와 해당가스의 점화전류 비율로 정한다.

<표 2-16> 그룹 II의 세분류

그룹	최소시험안전틈새 (MESG; mm)	최소점화전류비 (MIC)
IIA	MESG $\geq$ 0.90 mm	MIC > 0.8
IIB	0.50 mm < MESG < 0.90 mm	0.45 $\leq$ MIC $\leq$ 0.8
IIC	MESG $\leq$ 0.50 mm	MIC < 0.45

그룹을 대표하는 가스는 I 메탄, IIA 프로판, IIB 에틸렌, IIC 아세틸렌과 수소이고 천연 가스와 같은 산업용 메탄은 25 vol. % 이상의 수소를 포함하지 않는 경우 그룹 IIA로 분류하고 그룹 IIA의 다른 화합물과 메탄의 혼합물은 어떤 비율로든 그룹 IIA로 분류된다(ISO/IEC 80079-20-1, 2017). 최소시험안전틈새가 좁고 최소점화전류비가 낮다는 것은 위험성이 높다는 것을 의미한다.

폭발성 분진이 존재하는 장소에서 사용하는 기기는 그룹 III로 표현하며 분진특성에 따라 IIIA는 가연성 부유물, IIIB는 비도전성 분진, IIC는 도전성 분진으로 세분화된다. 여기서 가연성 분진은 공칭크기 500  $\mu$ m 이하인 미세한 고체입자를 말하고 도전성은 전기저항 1 k $\Omega$ ·m 이하인 가연성 분진을 말한다.

IIC 로 표시된 기기는 그룹 IIB 기기 또는 IIA 기기가 사용되는 장소에서 사용가능하며 IIB 기기는 IIA 기기가 사용되는 장소에서도 사용된다. 분진 그룹에서도 동일하게 적용된다.

### 2.3.4 기기보호등급

기기보호등급(EPL; Equipment protection level)은 점화원이 될 수 있는 가능성에 의해 기기에 부여된 보호등급으로, 폭발성 가스, 분진, 광산 내 메탄가스에 의한 폭발성 분위기로 <표 2-17>과 같이 구분한다.

<표 2-17> 기기보호등급(KS C IEC 60079-0, 2017)

구분	정의
Ma	폭발성 메탄가스에 취약한 광산에 설치되는 기기로 정상 작동, 예상된 오작동(expected malfunctions) 또는 드문 오작동(rare malfunctions) 중에, 심지어 가스의 누출(outbreak of gas)이 발생한 상황에서 충전된 상태로 있더라도 점화원이 될 가능성이 거의 없는 충분한 안정성을 갖고 있는 “매우 높은” 보호등급의 기기
Mb	폭발성 메탄가스에 취약한 광산에 설치되는 기기로 정상 작동 또는 예상된 오작동 중에 가스의 누출이 발생되고 기기의 전원을 차단하는 동안 점화원이 될 가능성이 거의 없는 충분한 안정성을 갖고 있는 “높은” 보호등급의 기기
Ga	폭발성 가스분위기에 설치되는 기기로 정상 작동, 예상된 오작동 또는 드문 오작동 중에 점화원이 될 수 없는 “매우 높은” 보호등급의 기기
Gb	폭발성 가스 분위기에 설치되는 기기로 정상 작동 또는 예상된 오작동 중에 점화원이 될 수 없는 “높은” 보호등급의 기기
Gc	폭발성 가스 분위기에 설치되는 기기로 정상 작동 중에 점화원이 될 수 없고 정기적인 고장(예: 램프의 고장) 발생 시 점화원으로서 비활성 상태의 유지를 보장하기 위하여 추가적인 보호장치가 있을 수 있는 “강화된(enhanced)” 보호등급의 기기
Da	폭발성 분진 분위기에 설치되는 기기로 정상 작동, 예상된 오작동 또는 드문 오작동 중에 점화원이 될 수 없는 “매우 높은” 보호등급의 기기
Db	폭발성 분진 분위기에 설치되는 기기로 정상 작동 또는 예상된 오작동 중에 점화원이 될 수 없는 “높은” 보호등급의 기기
Dc	폭발성 분진 분위기에 설치되는 기기로 정상 작동 중에 점화원이 될 수 없고 정기적인 고장(예: 램프의 고장) 발생 시 점화원으로서 비활성 상태의 유지를 보장하기 위하여 추가적인 보호장치가 있을 수 있는 “강화된(enhanced)” 보호등급의 기기

기기보호등급(EPL)과 폭발위험장소(Zone)의 관계는 <표 2-18>과 같고 Ex d nA와 같이 하나의 기기에 여러 방폭구조가 결합된 경우 사용 가능한 수준 Gc로 표현한 것으로 생각할 수 있다. 즉 가장 열악한 방폭구조가 기기보호등급을 결정하게 된다.

<표 2-18> 폭발위험장소와 기기보호등급(ISO/IEC 80079-20-1, 2017: IEC 60079-14, 2013)

폭발위험장소	기기보호등급
0	Ga
1	Ga 또는 Gb
2	Ga, Gb 또는 Gc
20	Da
21	Da 또는 Db
22	Da, Db 또는 Dc

기기보호등급별 방폭구조는 <표 2-19> 와 같다.

<표 2-19> 기기보호등급과 방폭구조(KS C IEC 60079-14, 2013)

기기보호등급	방폭구조	기호
Ga	내압(휴대용 인화성 가스 촉매센서에 한함)	da
	본질안전	ia
	광방사를 사용하는 기기와 송신시스템의 보호	op is, op sh
	특수 방폭구조	sa
Gb	내압	d, db
	안전증	e, eb
	본질안전	ib
	몰드	m, mb
	유입	o, ob
	압력	p, px, py, pxb, pyb
	충전	q
	광방사를 사용하는 기기와 송신시스템의 보호	op is, op sh
특수 방폭구조	sb	
Gc	내압	dc
	안전증	ec
	유입	oc
	본질안전	ic
	몰드	mc
	비점화	n, nA
	통기제한	nR
	에너지제한	nL

	스파크기기	nC
	압력	pz, pzc
	광방사를 사용하는 기기와 송신시스템의 보호	op is, op sh, op pr
	특수 방폭구조	sc
Da	몰드	ma
	보호용기	ta
	본질안전	ia, iaD
	특수방폭구조	sa
Db	몰드	mb
	보호용기	tb, tD
	압력	pD
	본질안전	ib, ibD
	특수방폭구조	sb
Dc	몰드	mc
	보호용기	tc, tD
	압력	pD
	본질안전	ic
	특수방폭구조	sc

### 2.3.5 방폭온도등급

방폭전기기기의 사용주위온도는 특별한 언급이 없으면  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이며 케이 블글랜드의 서비스온도는  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 방폭전기기기는 부여된 최고표면온도를 초과해서는 안 되며 설치·사용하는 장소의 가스·증기 또는 분진의 발화온도를 고려하여 선정한다. 폭발성분위기가 분진인 경우, 기기의 최고온도는 해당 분진운의 최저발화온도의 2/3의 값 또는 분진층의 최저발화온도에서  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 뺀 값 중에서 작은 값보다 최고표면온도가 낮은 기기를 선정한다. 기기주변의 외부 영향도 고려되어야 한다. <표 2-20>는 방폭기기의 온도등급과 자연발화온도 관계이며 온도등급 T6의 기기는 T5부터 T1까지 모두 사용가능하다.

<표 2-20> 온도등급과 자연발화온도(ISO/IEC 80079-20-1, 2017: IEC 60079-14, 2013)

온도등급	자연발화온도 범위(°C)	사용 가능한 기기 온도등급
T1	>450	T1 ~ T6
T2	300 < AIT ≤ 450	T2 ~ T6
T3	200 < AIT ≤ 300	T3 ~ T6
T4	135 < AIT ≤ 200	T4 ~ T6
T5	100 < AIT ≤ 135	T5 ~ T6
T6	85 < AIT ≤ 100	T6

### 2.3.6 용기의 보호등급(IP Code)

KS C IEC 60529(외함의 밀폐 보호등급 구분, IP코드)는 분진이나 물과 같은 외부의 물질이 전기기기 용기 내부로 침투에 효과적으로 밀폐시키는 정도에 대한 분류이다. 용기의 보호등급(IP; ingress protection)은 두 자리 수를 사용하며(두 자리 중에서 하나만 사용할 경우 보호하지 못하는 자리에 “X”를 적는다) 자릿수의 의미는 <표 2-21>와 같다.

<표 2-21> 용기의 보호등급(KS C IEC 60529, 2013, Jespen. 2016))

첫째자리	고형물에 대한 보호	둘째자리	물에 대한 보호
0	비보호	0	비보호
1	고형물 > 50 mm	1	수직으로 낙하하는 물
2	고형물 > 12 mm	2	낙하(기울기 15°)
3	고형물 > 2.5 mm	3	분무(sprayed water)
4	고형물 > 1 mm	4	튀김(splashed water)
5	분진보호(Dust-protect)	5	분사(low pressure water jets)
6	밀폐(Dust-tight)	6	강한분사(powerful water jets)
-	-	7	일시적 침수
-	-	8	연속적 침수

방폭기기에 적용되는 IP(외함의 밀폐 보호등급)는 KS C IEC 60529를 인용하여 적용하고 있으나 기기를 설치 또는 정상 작동 중에 개방이 필요한 모든 접합부는 기기의 열안정성(비금속성 재료가 사용된 기기는 내열 및 내한시험을 실시함)시험 후 열고 닫은 후 IP시험을 수행하는 점이 다르다.

## 2.4 폭발시험

### 2.4.1 방폭기기의 폭발시험

방폭기기의 폭발시험의 종류는 <표 2-24>과 같이 기준압력 결정시험, 인화시험, 회전기기의 고정자 절연시스템 시험, 스파크 점화시험, 소형부품발화시험이 있고 시험의 목적에 따라 압력측정과 점화여부확인으로 나뉜다.

<표 2-22> 방폭기기의 폭발시험의 종류

폭발시험의 종류		방폭구조	목적	적용 기준
폭발압력(기준압력)의 결정		내압	최대폭발압력 측정	60079-1의 15.2.2절
인화시험				60079-1의 15.3절
회전기기의 고정자 절연 시스템	임펄스 점화시험	안전증	점화여부 확인	60079-7의 6.2.3.1.2절
	정상상태 점화시험			60079-7의 6.2.3.1.3절
스파크 점화시험		본질안전		60079-11의 10.1절
소형부품의 발화시험		소형부품		60079-0의 26.5.3.2절

안전증 방폭구조의 정격전압이 1 kV를 초과하는 회전기기(전동기, 발전기)는 <표 2-25>과 같이 고정자 절연시스템과 전원케이블에 대하여 보호등급 “eb” 일 경우 임펄스 시험과 정상 상태시험을 “ec” 일 경우 정상상태시험을 해야 한다. 다만 보호등급 ec, 기기 그룹 IIA, 틀-권선형 고정자, 정격전압 6.6 kV 초과일 경우에만 정상상태 점화시험을 수행한다. 기기 그룹별 시험가스는 <표 2-26>과 같이 조성한다.

<표 2-23> 보호등급별 고정자 절연시스템 시험(IEC 60079-7, 2015)

보호등급	점화시험	정격전압
eb	임펄스, 정상상태	1 kV 초과
ec	정상상태	1 kV 초과, 다만, IIA 틀-권선형 고정자는 6.6 kV 초과 시 적용

<표 2-24> 회전기기의 폭발시험 혼합물(IEC 60079-1, 2017)

기기 그룹	시험가스-공기	농도( vol. %)
IIC	수소	21 ± 5
IIB	에틸렌	7.8 ± 1
IIA	프로판	5.25 ± 0.5

임펄스 전압시험에서 임펄스 전압은 상전압의 3배 이상, 전압상승시간은 0.2  $\mu$ s 에서 0.5  $\mu$ s 사이, 임펄스 인가시간은 임펄스 전압이 절반으로 떨어지는 시간(최소 20  $\mu$ s)으로 10번 시험한다. 전원의 한 상과 접지를 시험하며 나머지 상은 접지시키고 각 상을 시험한다. 폭발시험가스의 점화가 발생하지 않아야 한다.

정상상태 점화시험은 <표 2-26>의 시험가스를 조성하고 정격실효 선간전압(rated r.m.s. line voltage)의 최소 1.5배를 3분 이상, 최대전압 상승속도는 0.5 kV/s으로 절연시스템과 전원케이블에 인가한다. 전원의 한 상과 접지 사이를 시험하며 나머지 상은 접지시키고 이를 각 상에 대해 시험한다. 폭발시험가스가 점화되지 않아야 한다.

스파크 점화시험은 본질안전방폭구조의 기기에 적용하는 시험으로 기기가 정상 및 고장조건에서 발생 할 수 있는 단선(interruption), 합선(interconnection)이 발생할 수 있는 각 지점을 스파크점화시험기에 연결하고 점화여부를 확인한다. 시험에 사용되는 폭발혼합가스의 조성은 <표 2-26>과 그룹 I은 메탄 (8.3 ± 0.3) %로 한다. 이 시험은 인화성가스의 점화에너지에 따른 폭발특성을 이용한 시험이다.

소형부품발화시험은 기기의 온도등급을 초과하는 소형 부품(트랜지스터 또는 저항 등)이 점화를 일으키는 지 확인하는 시험으로 사용되는 가스는 <표 2-27>과 같다.

<표 2-25> 소형부품 발화시험용 폭발시험 혼합물(IEC 60079-1, 2017)

기기 그룹	인화성 가스	농도( vol. %)
I	메탄	6.2 ~ 6.8
II	디에틸에테르	22.5 ~ 23.5

디에틸에테르는 끓는 점이 34.6 °C로 휘발성이 강하여 기기의 사용 주위온도로 가열한 시험챔버에 소량을 증발시켜 공기와 혼합물을 만들어 시험한다.

이상과 같이 방폭기기에 적용되는 폭발시험은 내압방폭구조뿐만 아니라 안전증, 본질안전 방폭구조와 소형부품의 발화(점화)시험이 있다. 폭발압력을 결정하는 목적에 따라 적용하는 기준은 달라진다. 가스·증기의 특성시험 기준에는 EN 13673-1이 있다. 본 연구에서는 국제기준인 IEC 60079-1: 2014와 유럽기준인 EN 13673-1에 대하여 알아본다.



## 2.4.2 폭발압력측정 IEC 60079-1

폭발압력을 측정하는 목적은 방폭용기가 내부 폭발의 압력을 견딜 수 있는지 확인하는 내압시험을 위한 기준압력을 정하는 것과 용기 내부 폭발로 용기의 방폭성능을 무효화시키는 영구 변형이나 손상이 발생하지 않을 경우 만족스러운 것으로 간주한다. 또한 접합부는 영구적으로 확대되어서는 안 된다.

인화성가스·증기의 순도는 IEC 60079-0: 2017 26.3(폭발성 시험 혼합물에서의 시험)에 따라 95 % 이상이며 시험실 온도 및 대기압의 정상적인 변화와 폭발성 시험 혼합물의 습도 변화의 영향은 무시할 정도의 영향으로 밝혀졌지 때문에 허용되고 측정된 압력신호의 처리는  $5 \text{ kHz} \pm 0.5 \text{ kHz}$ 의 3 dB 포인트의 저대역필터(low-pass filter)를 사용한다. 시험횟수 및 폭발혼합가스의 부피비(대기압에서 공기와 비율)는 다음과 같다.

- 그룹 I :  $(9.8 \pm 0.5) \%$  메탄 3회
- 그룹 IIA :  $(4.6 \pm 0.3) \%$  프로판 3회
- 그룹 IIB :  $(8.0 \pm 0.5) \%$  에틸렌 3회
- 그룹 IIC :  $(14.0 \pm 1.0) \%$  아세틸렌 5회 및  $(31.0 \pm 1.0)$  수소 5회

기기의 사용 주위온도가  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  미만이면 다음에서 하나로 한다.

- 최소주위온도( $T_{a.min}$ ) 이하에서 시험
- 시험혼합가스를 식(2-2)만큼 가압(increased pressure)하여 시험

$$P = 100\{293 / (T_{a.min} + 273)\} \text{ kPa} \quad (2-2)$$

- 내부형상이 단순한 용기의 빈 체적이 10 L 이하 시 <표 2- 28>의 계수를 적용하여 기준압력을 높인다. 다만 용기의 빈 체적이 3 L 초과인 경우 내압시험은 기준압력의 1.5배는 허용되지 않고 4배로만 수행해야 한다.

<표 2-26> 감소된 주위 온도에 대한 시험계수(IEC 60079-1, 2017)

최소 주위온도( $^\circ\text{C}$ )	시험계수
$\geq -20$	1.0
$\geq -30$	1.37
$\geq -40$	1.45
$\geq -50$	1.53
$\geq -60$	1.62

점화원의 위치와 압력센서의 위치는 최대압력을 찾기 위한 시험소의 재량이다. 분리 가능한 개스킷은 용기에 장착하고 시험한다. 회전기기는 정지 및 구동상태에서 시험하며 회전속도는 정격의 90 % 이상으로 한다. 전동기는 2개 이상의 압력센서로 동시에 측정하며 전동기 각 끝(end shield)에 설치한다. 만일 단자함이 전동기 프레임과 밀봉되어 있지 않다면 압력센서를 단자함에도 부착하여 시험한다. 폭발압력시험에서 압력상승시간이 5 ms 이하이거나 일련의 폭발시험에서 폭발압력이 1.5 배의 차이가 나타나면 압력중첩(pressure piling)이 발생했다 하는데 그룹 IIB의 경우, 압력중첩이 발생하면 (24 ± 1) % 수소와 메탄혼합비 85대 15의 혼합가스를 이용하여 추가시험을 한다.

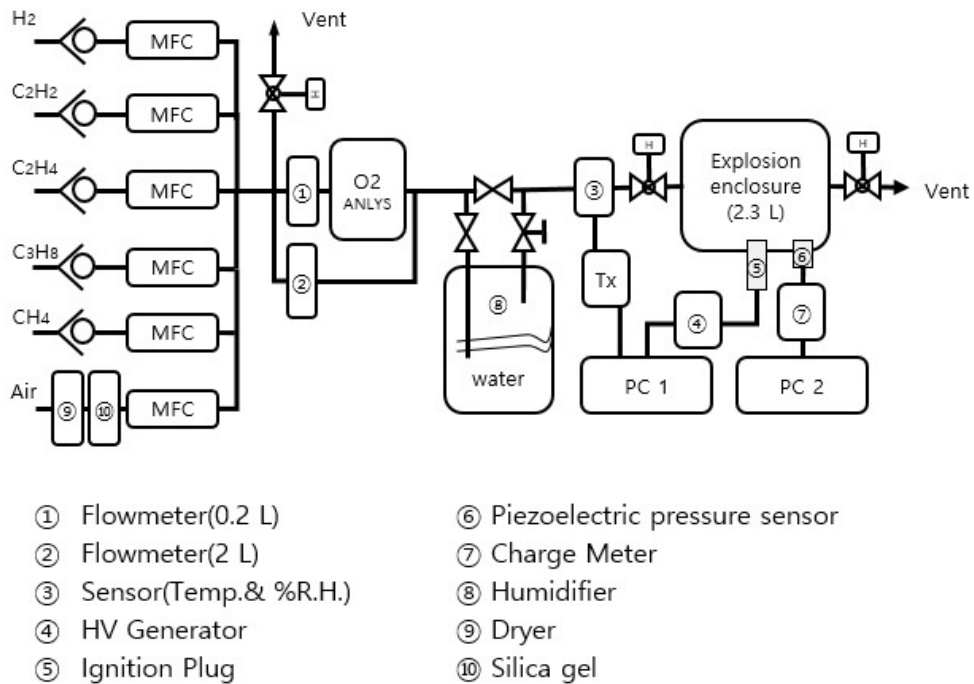
### 2.4.3 인화성 가스·증기의 최대폭발압력의 결정 EN 13673-1

이 표준은 인화성가스·증기의 특성을 측정하는 유럽기준으로 EN 13673-1 최대폭발압력의 결정(Determination of the maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise of gases and vapours - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure)에는 시험원리, 시험용기, 계측장치, 폭발혼합가스 순도, 점화시스템, 압력, 온도측정장치, 안전고려사항 등이 제시되어 있다. 시험은 대기압과 주위온도, 시험용기의 중앙에서 점화, 최대폭발압력이 측정될 때까지 인화성 가스의 농도를 변화시켜가며 시험한다. 시험용기는 5 L 이상의 구형 또는 원통형(높이와 직경이 같아야 함), 최소 20 barg의 강도를 가져야 하며 혼합가스의 농도 측정은 2 % mol 까지는 ± 10 %의 상대불확도를 2 % mol 이상에서는 ± 0.2 %의 절대 불확도를 요구하고 점화방식은 유도스파크 또는 전기아크(fusing wire)를 사용한다. 압력측정은 신뢰도를 확보하기 위해 압력센서의 끝부분은 용기내벽에 일치시키고 10 kHz 이상의 센싱과 20 bar 까지 측정가능하고 압력측정시스템의 정확도는 ± 0.05 bar 이상, 분해능은 최소 1 ms 이다. 3.3절에는 폭발시험혼합물의 공기는 물과 오일이 없는 것(the air free of water and oil)을 사용해야 한다고 명시되어 있다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 방폭 가스그룹별(I, IIA, IIB, IIC) 대표가스를 각 가스별 지정된 농도로 혼합하고 이를 건조한 상태부터 상대습도 80 %까지 가습하여 폭발압력을 측정하기 위해 [그림 3-1]과 같이 구성하였다. 실험장치는 기존의 내압용기의 폭발시험장치에 [그림 3-1]의 ⑧번(가습장치)을 제작하여 설치하였다.



[그림 3-1] Schematic diagram of the explosion apparatus

##### 3.1.1 폭발가스 혼합장치

폭발가스 혼합장치는 인화성가스(5종), 압축공기, 질량유량제어기, 산소분석계로 구성된다. 인화성가스는 가스실린더(봄베)에서 사용압력에 적정하게 감압(1.5 barg ~ 5 barg)되고 그 배관의 후단에는 소염기(flame arrestor)를 설치하여 만일의 역화를 차단하고 질량유량계로 공급된다. IEC 60079-0의 26.3절에서 요구하는 인화성가스의 순도는 상업용 가스 및 증기로서 95 %이상을 요구하며 본 연구에 사용된 인화성가스의 순도는 [표 3-1]과 같이 99 %이상이다.

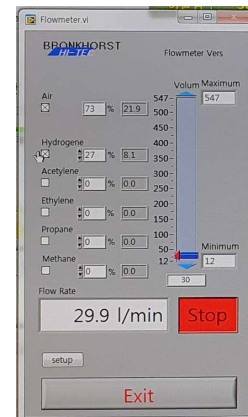
<표 3-1> 시험에 사용된 인화성가스의 순도

	Hydrogen (H <sub>2</sub> )	Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Methane (CH <sub>4</sub> )
공급압력[barg]	5	1.5	5	4	5
순도[%]	99.99	99.95	99.5	99.5	99.95

압축공기는 조연성가스로서 드라이어(Dryer), 냉각기(After cooler), 필터, 제습제(Silica gel)을 통과한 깨끗하고 수분이 제거된 건조한 상태로 공급된다. 질량유량제어기(MFC, Mass Flow Controller)는 각각의 인화성가스, 공기의 분자량, 유량, 온도를 실시간으로 모니터링하여 지정된 농도를 조성한다. [그림 3-2] (a)는 본 실험에 사용된 질량유량제어기와 [그림 3-2] (b)는 전용의 질량유량 프로그램이다. 질량유량제어기는 <표 3-2>와 같이 각 가스별 유량범위에서 가스의 열적 특성, 온도, 압력을 측정 및 보정하여 유량을 컨트롤한다.



(a)사용된 MFC



(b)MFC program

[그림 3-2] 질량유량제어기

<표 3-2> Technical specifications of MFC

	Max. Flow range [l/min]	Pressure rating(bara)	Repeatability	Accuracy
Air	400	5	< 0.2 % RD	± 0.5 % RD plus ± 0.1 % FS
Hydrogen(H <sub>2</sub> )	200	11		
Acetylene(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	130	2.5		
Ethylene(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	35	5		
Propane(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	35	4		
Methane(CH <sub>4</sub> )	35	5		

산소농도분석기(O<sub>2</sub> Analyzer, transmitter-Xendos 2223, controller-Xendos 2200, Servomex사)는 각각의 조성된 농도를 실시간으로 측정하면서 질량유량제어기를 조절하여 원하는 폭발혼합가스의 농도를 만들었다. 산소농도계의 정격유량(0.2 L)을 흘려보내기 위해 2개(2 L, 0.2 L)의 체적유량계와 벤트밸브를 설치하였다. 산소농도 분석기는 전원 재투입 시 2시간의 안정화 시간이 필요하므로 상시 전원을 공급한다. 또한 사용 전 공인시험가스를 이용하여 2점 교정을 실시하였다.



[그림 3-3] 산소분석 전송기(상)와 제어기(하)

### 3.1.2 가습장치

본 연구를 위해서 기존의 폭발시험설비에 추가로 가습장치를 제작하여 설치하였다. 보통의 가습기는 물을 가열하여 수증기를 발생시키거나 초음파(진동)를 사용하여 물방울을 잘게 부쇄 가습하는 방식이나 본 가습장치는 폭발혼합가스가 흐르는 배관의 압력을 이용하여 폭발혼합물의 일부 또는 전부를 밀폐수조의 물에 통과시켜 가습하는 방식이며 인화성 가스만이 아닌 폭발혼합가스의 상대습도를 조절하도록 제작되었다. 건조한 상태의 폭발혼합가스는 밀폐수조를 바이패스하고 최대 상대습도 80 %까지 가습이 가능하였다. [그림 3-4]은 본 연구에 사용된 가습장치이다. 습도 및 온도전송기(EE31, E+E elektronik사)의 측정범위는 상대습도 (0 ~ 100) %, 온도 (-40 ~ 180) °C 이다. [그림 3-4] ②는 마이크로 니들밸브로 가습되는 유량을 미세 조절에 사용된다.



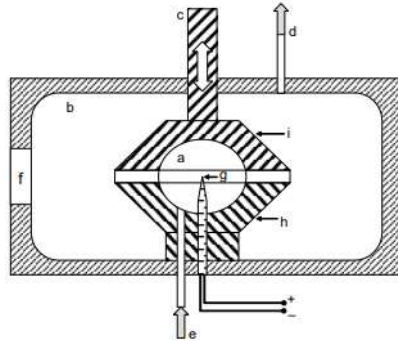
[그림 3-4] 가습장치 (① 니들밸브 ② 마이크로 니들밸브 ③ 볼밸브 ④ 밀폐수조)(김용태 & 정기호, 2022).

### 3.1.3 폭발압력 측정장치

폭발압력 측정장치는 폭발용기, 전기 스파크형 점화플러그, 10 kV 고전압발생기, 압력센서(Piezoelectric pressure sensor, Kistler), 압력전송기(Charge meter), PLC 제어용 컴퓨터, 동적 압력측정용 컴퓨터(PC 1 & 2; Data sampling rate 800 kS/s)로 이루어져 있다. 압력전송기는 하드웨어적으로 저대역필터가 내장되어 시험조건(3 dB point of 5 kHz)을 만족하고 있다.

폭발용기는 [그림 3-5]과 같은 단면으로 직경 200 mm, 높이 75 mm인 원통형용기이며 체적은 2.3 L(내부챔버 20 cm<sup>3</sup>)이고 용기 중앙에 점화플러그[그림 3-6], 용기 벽면 중앙에 압력센서가 설치되어 있다. 본 연구에 사용된 폭발용기는 내부챔버([그림 3-5]에서 a 표시된 부분)에서 폭발화염이 틈새([그림 3-5]에서 h 와 i 사이)를 통하여 외부챔버([그림 3-5]에서 b 표시된 부분)로 전파되는지 여부를 판단하는 장치이

나, 본 연구에서는 용기의 외부챔버의 측면 중앙에 설치한 압력센서로 폭발압력을 측정한다. 수소, 아세틸렌, 에틸렌, 프로판, 메탄의 최대실험안전틈새는 각각 0.29 mm, 0.37 mm, 0.65 mm, 0.92, 1.12 mm이다. 따라서 틈새의 영향 없이 내·외부챔버에서 폭발이 발생하도록 틈새를 4.9 mm로 설정하여 시험하였다.



[그림 3-5] 폭발용기의 단면(a: 내부 챔버, b: 외부원통형용기, c: 조정부, d: 혼합물 출구, e: 혼합물 입구, f: 관측창, g: 점화플러그, h: 틈새 밀면, 고정, i: 틈새 윗면, 가변)



[그림 3-6] 점화플러그

폭발압력측정용 센서는 [그림 3-7]과 같고 수정진동(quartz crystal)소자를 이용하여 측정하는 방식으로 감도(sensitivity ≃ -16 pC/bar), 선형성(Linearity ≤ ± 0.5 % FS), 사용온도가 (-196 ℃ ~ 200 ℃)로 동적폭발압력을 측정하는데 적합하다. 폭발 시 발생한 열은 센서 다이프램 내부 결정(crystal)의 하우징을 확장시켜 폭발압력을 낮게 할 수 있어서 열에 의한 압력센서의 온도영향을 방지하려면 센서 측정면이 온도 보상되어야 한다. 대부분의 압력센서는 폭발자체 온도 보상이 되지 않는 경우 약 1 mm의 실리콘 고무 또는 실리콘 그리스를 사용하고 센서 끝단(측정면)은 폭발용기 내부 벽과 높이가 같게 설치한다(EXTAG DS, 2013).



[그림 3-7] Piezoelectric pressure sensor

폭발압력측정용 증폭기(charge meter)는 [그림 3-8]와 같고 하드웨어적으로 저대역필터(low-pass filter  $\leq 20$  kHz) 기능이 있어 기준에서 요구하는 매끄러운(3 dB point of 5 kHz) 폭발압력측정이 가능하다.



[그림 3-8] Charge meter

또한 압력센서와 증폭기의 연결은 [그림 3-9]와 같이 케이블 외부가 실리콘튜브인 이중차단 고압동축케이블을 사용하여 노이즈 간섭을 최소화하였다.



[그림 3-9] 압력신호 전송케이블

### 3.2 실험절차

본 연구의 실험은 가스혼합장치를 사용하여 <표 3-3>과 같이 내압방폭구조의 폭발기준압력결정을 위한 기기 그룹별 인화성가스-공기 폭발혼합물의 농도를 IEC 60079-1 (15.2.2.2절)에 따라 조성하고 폭발용기의 내부를 점화시켜 폭발압력을 측정하였다. 폭발혼합물의 폭발실험 초기 온도는 상온이고 압력은 대기압에서 수행되었다.

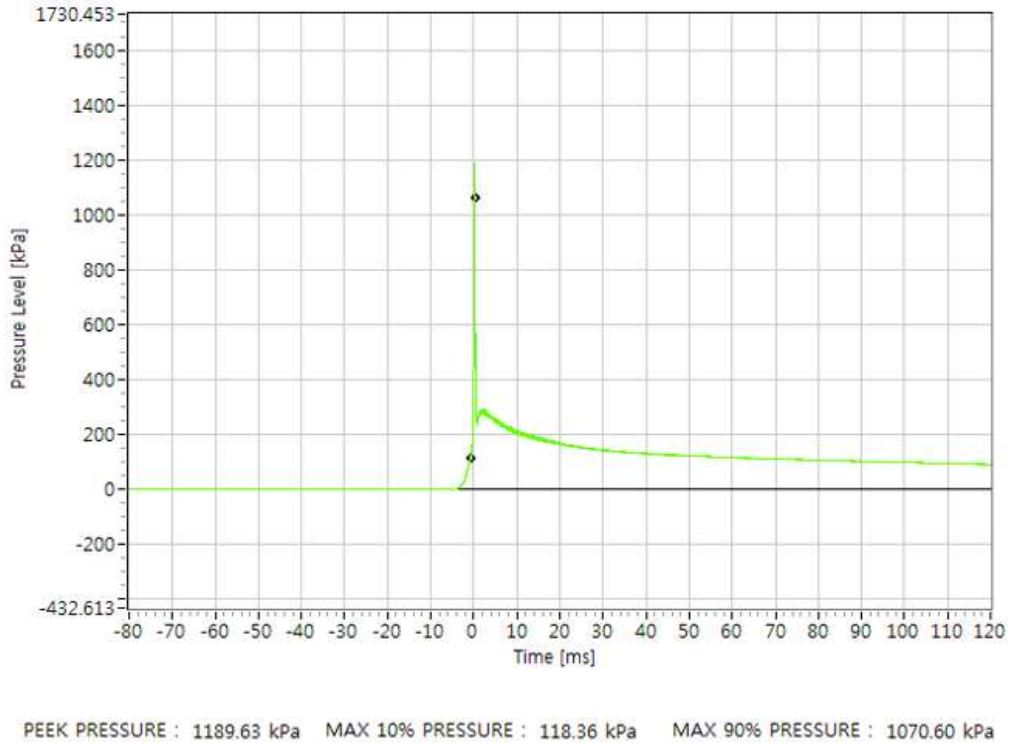


<표 3-3> 기준압력결정을 위한 가스-공기 혼합물의 농도(IEC 60079-1, 2017)

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

폭발혼합가스의 농도는 공기 중의 부피 비율(vol. %)로 수소(31 ± 0.2) %, 아세틸렌(14 ± 0.2) %, 에틸렌 (8.0 ± 0.1) %, 프로판 (4.6 ± 0.1) %, 메탄 (9.8 ± 0.1) %로 유지되었다. 건조한 상태의 폭발혼합가스를 가습장치에 통과시켜 상대습도를 10%씩 증가시켜 최대 80%까지 가습하였다.

폭발실험은 각 습도조건에서 5회 반복하였다. 농도와 습도가 조성된 폭발혼합가스를 폭발용기 체적의 10배 까지 폭발용기에 흘려보내어 용기 내부를 치환시켰다. 이러한 치환용량은 압력방폭구조 IEC 60079-2 (7.8절)의 퍼지 기준(5배)을 초과하여 수행되었다. 이때 질량체적유량계의 최소필요 유량, 산소분석계의 정격유량(0.2 L), 폭발용기의 적정유량을 위해 벤트밸브가 설치되었고 각각의 인화성 가스에 따라 적절히 조절되었다. 충분히 치환된 폭발용기는 입구밸브를 먼저 닫고 수초 후 출구밸브를 닫아 용기 내부의 폭발혼합가스압력이 대기압이 되도록 하였다. 폭발압력측정용 PC를 이용하여 압력은 모니터링 되고 폭발혼합가스를 점화시켜 폭발압력이 발생되면 압력은 트리거되어 폭발 전 80 ms 폭발 후 120 ms의 압력이 기록되며 [그림 3-10]은 본 연구에서 측정된 건조한 수소-공기 혼합물의 폭발압력파형이다. 점화플러그는 용기 중앙에서 점화되고 폭발압력은 용기 외부챔버의 측면 중앙에 설치된 센서로 측정되었다.



[그림 3-10] 폭발압력 측정그래프

폭발압력 측정 후 용기내부의 연소가스와 용기벽의 열을 약 5 barg의 압축공기로 퍼징하여 제거하였다.

### 3.3 통계분석방법

본 연구는 상대습도와 온도가 폭발압력에 미치는 영향을 분석하기 위해 다중회귀 분석을 적용하였다. 실험가스의 상대습도를 범주형 카테고리로 정의하고 온도를 수치형 카테고리로 정의하여 독립변수로 폭발압력을 종속변수로 설정하였다. 실험의 우연오차를 파악하기 위해 분산분석을 통해 모형적합도를 검증하였다. 분산분석의 사후분석은 Duncan 기법을 적용하였다. 본 연구의 회귀분석과 분산분석은 유의수준 0.05에서 SPSS(V24, IBM)를 사용하여 수행하였다.

## 4. 실험결과

대기압, 상온에서 인화성가스와 공기와의 농도를 수소 31 %, 아세틸렌 14 %, 에틸렌 8.0 %, 프로판 4.6 %, 메탄 9.8 %로 고정하고 건조한 상태의 폭발혼합가스를 가습장치에 통과시켜 상대습도를 10 % 씩 증가시켜 최대 80 %까지 가습하고 점화시켜 측정된 폭발압력은 다음과 같다.

### 4.1 수소-공기 폭발혼합물

수소-공기 폭발혼합물의 상대습도의 변화에 따른 폭발압력은 <표 4-1>와 같이 측정되었다. 상대습도는 건조한 상태부터 최대 80 %까지 10 %단계별로 증가시켰고 최대 차이  $\pm 0.4$  %가 있었던 것으로 나타났다. 폭발혼합가스의 온도는 상대습도가 변해도 미미한 변화(범위: 23.0 ~ 23.5  $^{\circ}\text{C}$ )가 있는 것으로 측정되었다.

<표 4-1> 상대습도변화에 따른 수소(31 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과

Relative Humidity(% R.H.)	Temperature( $^{\circ}\text{C}$ )	Explosion Pressure(kPag)
0.4	23.4	769.6
0.4	23.3	743.2
0.3	23.4	763.5
0.3	23.4	754.3
0.3	23.4	762.2
10.1	23.0	738.3
9.7	23.1	779.5
10.2	23.2	747.0
10.0	23.1	760.7
9.8	23.2	736.5
20.1	23.2	736.5
19.7	23.2	754.8
19.8	23.2	726.9
19.7	23.1	753.0
19.7	23.2	741.3
30.4	23.4	707.7
30.4	23.3	710.3
30.4	23.4	723.1
30.2	23.4	740.4
29.9	23.4	730.4
40.2	23.5	734.2
40.1	23.4	686.4
39.6	23.5	725.6
40.2	23.4	718.7

Relative Humidity(% R.H.)	Temperature(°C)	Explosion Pressure(kPag)
40.0	23.3	720.8
50.0	23.4	740.3
50.0	23.3	715.1
49.9	23.2	717.2
49.6	23.2	716.6
50.1	23.2	720.9
60.2	23.2	702.3
60.1	23.2	706.3
60.0	23.2	658.3
60.1	23.2	708.9
60.0	23.1	706.5
70.1	23.1	682.5
70.0	23.1	667.2
70.0	23.1	709.6
70.0	23.1	699.7
69.9	23.1	687.5
80.4	23.2	697.3
80.4	23.1	698.0
80.4	23.1	718.7
80.3	23.1	707.8
80.2	23.1	663.6

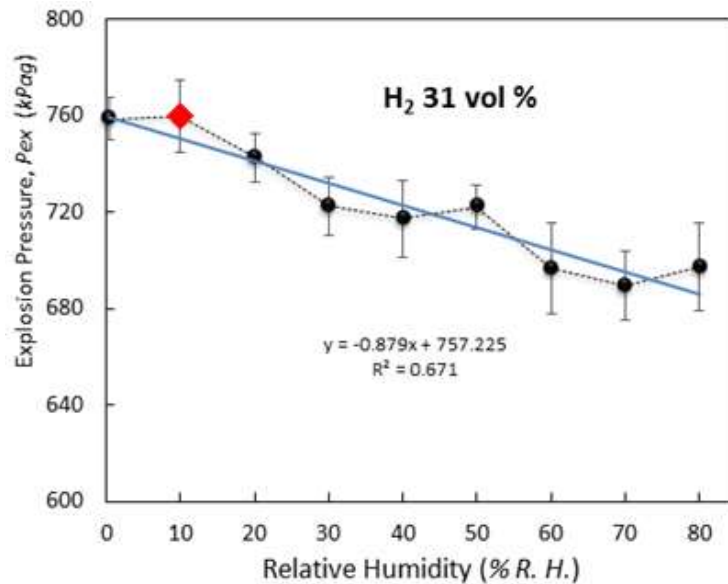
상대습도 변화량별 수소-공기 폭발혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <표 4-2>와 같이 분석되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도의 변화에 따라 (689.3 ~ 759.6) kPag의 범위가 나타났다. 폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 (10.2 ~ 21.5) kPag를 보였다.

<표 4-2> 상대습도별 수소-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차

Level of relative humidity*	Explosion Pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard deviation		
0 <sup>a</sup>	758.6	10.2	12.139	<0.001
10 <sup>a</sup>	759.6	17.2		
20 <sup>ab</sup>	742.5	11.6		
30 <sup>bc</sup>	722.4	13.7		
40 <sup>bc</sup>	717.1	18.2		
50 <sup>cd</sup>	722.0	10.4		
60 <sup>de</sup>	696.5	21.5		
70 <sup>de</sup>	689.3	16.3		
80 <sup>e</sup>	697.1	20.6		

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

폭발압력은 상대습도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 파악되었고( $F = 12.139$ ,  $p < 0.001$ ). 온도는 범주형 회귀분석결과 폭발압력에 유의미한 영향이 없었다( $p = 0.226$ ). 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 유의하게 낮아지는 것으로 분석되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도가 10 %에서 80 %로 증가하면 759.6 kPag에서 697.1 kPag로 62.5 kPag 감소하였다. <표 4-2>의 상대습도등급에 표시된 위첨자 알파벳(a, b, c, d, e)은 Duncan 사후분석 결과로 나타난 유사성을 나타내는 집단특성으로 상대습도는 5개로 집단화 되었다. 첫 번째 동일집단(a)은 상대습도 0 %, 10 %, 20 % 이고 상대습도 20 %는 집단특성이 ab로 0 % 및 10 %와 같고 30 % 및 40 %와도 같다. 하지만 상대습도 0 % 및 10 %는 상대습도 30 % 및 40 %와 다른 집단이다. 따라서 폭발압력에 영향이 나타나는 상대습도의 최댓값(임계값, [그림 4-1]의  $\blacklozenge$ )을 10 %로 결정할 수 있다.



[그림 4-1] 수소(31 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력

수소-공기 폭발혼합가스는 상대습도가 증가함에 따라 폭발압력이 [그림 4-1]과 같이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 상대습도 0 %에서 80 %까지의 데이터에 대해 단일회귀분석을 실시하였으며, 회귀식은  $757.225 - 0.879 \times \text{상대습도}$ 로 도출되었다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.671$ ).

#### 4.2 아세틸렌-공기 폭발혼합물

아세틸렌-공기 폭발혼합물의 상대습도의 변화에 따른 폭발압력은 <표 4-3>와 같이 측정되었다. 상대습도는 최소 3 %에서 최대 80 %까지 10 %단계별로 증가시켰고 최대 차이는  $\pm 0.6$  %가 있었던 것으로 나타났다. 아세틸렌-공기 폭발혼합가스의 온도는 상대습도가 변해도 미미한 변화(범위: 26.0 ~ 26.3 °C)가 있는 것으로 측정되었다.

<표 4-3> 상대습도변화에 따른 아세틸렌(14 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과

Relative Humidity (% R.H.)	Temperature (°C)	Explosion Pressure (kPag)
3.1	26.2	1189.6
2.9	26.3	1182.5
2.8	26.2	1122.8
2.8	26.2	1196.3
3.0	26.2	1081.5
10.0	26.1	1026.5
10.0	26.2	1188.2
9.9	26.1	1094.1
10.1	26.2	1177.4
10.2	26.1	1223.6
20.1	26.2	1059.0
20.2	26.3	1168.3
19.8	26.3	1166.2
19.8	26.2	1132.5
20.2	26.3	1162.1
30.3	26.3	1095.2
30.2	26.3	1070.7
30.1	26.3	1072.8
30.1	26.3	1048.2
30.0	26.2	1040.8
40.1	26.2	1022.8
40.1	26.2	960.1
40.3	26.1	1124.3
40.2	26.2	1039.9
40.3	26.2	1014.3
50.4	26.3	982.2
50.3	26.2	967.8
49.4	26.2	940.3
50.0	26.3	918.7
50.1	26.2	993.6
60.2	26.1	917.1
59.8	26.1	914.8
60.0	26.2	921.7
59.9	26.0	888.3
60.4	26.1	906.3
69.8	26.0	846.0
70.1	26.0	866.2
69.9	26.1	874.3

Relative Humidity (% R.H.)	Temperature (°C)	Explosion Pressure (kPag)
69.7	26.1	851.4
69.9	26.0	789.2
79.8	26.0	771.5
80.3	26.0	818.2
79.8	26.0	827.7
79.8	26.1	779.2
80.6	26.0	875.1

상대습도 변화량별 아세틸렌-공기 폭발혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <표 4-4>와 같이 분석되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도의 변화에 따라 (814.3 ~ 1154.5) kPag의 범위가 나타났다. 폭발압력의 표준편차는 상대습도의 변화에 따라 (13.2 ~ 80.1) kPag를 보였다.

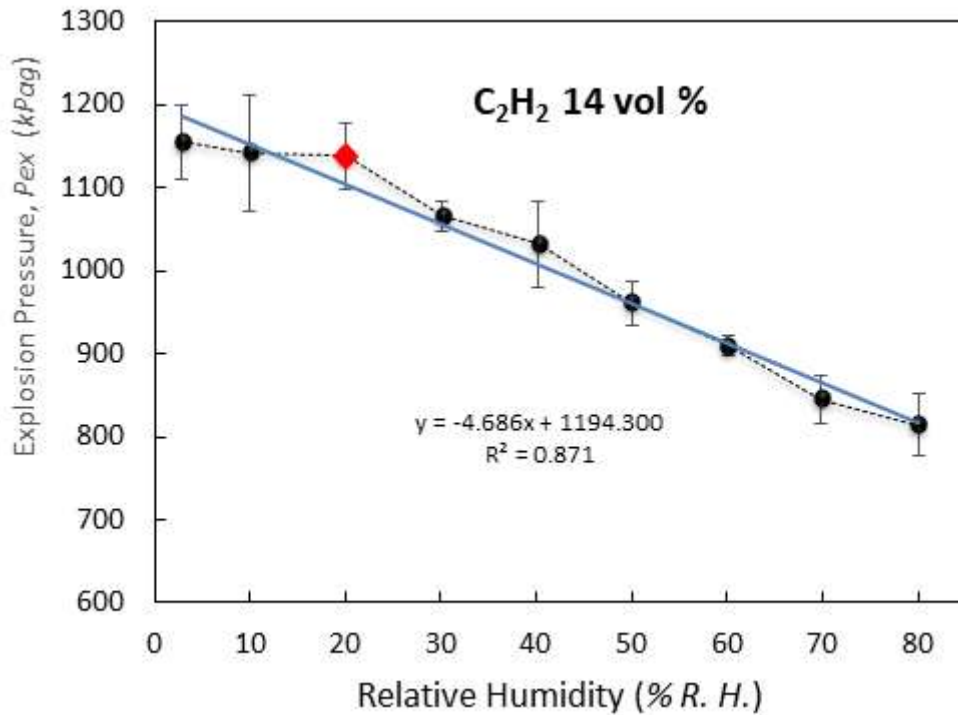
<표 4-4> 상대습도별 아세틸렌(14 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차

Level of relative humidity*	Explosion Pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard Deviation		
0 <sup>a</sup>	1154.5	50.2	40.124	<0.001
10 <sup>a</sup>	1142.0	80.1		
20 <sup>a</sup>	1137.6	46.3		
30 <sup>b</sup>	1065.5	21.6		
40 <sup>b</sup>	1032.3	59.5		
50 <sup>c</sup>	960.5	30.7		
60 <sup>c</sup>	909.6	13.2		
70 <sup>d</sup>	845.4	33.4		
80 <sup>d</sup>	814.3	41.7		

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

상대습도에 따른 폭발압력은 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 파악되었고 ( $F = 40.124$ ,  $p < 0.001$ ). 온도는 범주형 회귀분석결과 폭발압력에 유의미한 영향이 없었다( $p = 0.348$ ). 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 유의하게 낮아지는 것으로 분석되었다. <표 4-4>의 상대습도등급에 표시된 위첨자 알파벳(a, b, c, d)은 유사성을 나타내는 집단특성으로 Duncan 사후분석 결과 상대습도는 4개로 집단화 되었고 상대습도 0 %, 10 %, 20 %는 동일집단(a)으로 폭발압력이 가장 높게 나타났고, 상

대습도 30 %와 40 %는 다른 동일집단(b)로 분석되었다. 따라서 폭발압력에 영향을 크게 미치지 시작하는 상대습도(임계값, [그림 4-2]의  $\blacklozenge$ )를 20 %로 결정할 수 있다. 상대습도 0 %, 10 %, 20 %는 동일집단으로 폭발압력이 가장 높게 나타났고, 상대습도가 증가함에 따라 폭발압력이 [그림 4-2]과 같이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 상대습도가 임계값인 20 %에서 80 %로 증가하면 폭발압력의 평균은 약 1137.6 kPag에서 814.3 kPag로 323.3 kPag 감소하였다.



[그림 4-2] 아세틸렌(14 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력

상대습도 0 %에서 80 %까지의 데이터에 대해 단일회귀분석을 실시하였으며, 회귀식은  $1194.300 - 4.686 \times \text{상대습도}$ 로 분석되었다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.871$ ).

### 4.3 에틸렌-공기 폭발혼합물

에틸렌-공기 폭발혼합물의 상대습도에 따른 폭발압력은 <표 4-5>와 같이 나타났다. 폭발혼합가스의 상대습도는 최소 0.3 %에서 최대 80.7 %까지 10 %단계별로 증가시켰고 최대 차이  $\pm 0.8$  %로 설정된 값과 유사하였다. 에틸렌-공기 폭발혼합물의 온도는 상대습도 조건이 변해도 유사한 것으로 파악되었다(범위: 23.3 ~ 23.9  $^{\circ}\text{C}$ ).



<표 4-5> 상대습도변화에 따른 에틸렌(8.0 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과

Relative Humidity (% R.H.)	Temperature (°C)	Explosion Pressure (kPag)
0.9	23.8	600.5
0.6	23.9	597.4
0.6	23.8	611.0
0.4	23.7	604.2
0.3	23.7	671.3
10.0	23.8	554.3
9.9	23.8	528.2
10.1	23.8	549.1
10.1	23.7	527.9
10.2	23.8	558.4
20.0	23.4	380.8
20.0	23.4	363.6
20.2	23.3	405.6
19.9	23.4	422.7
19.8	23.4	388.7
29.8	23.4	430.0
29.8	23.4	304.9
29.5	23.5	390.7
29.6	23.4	362.2
29.6	23.4	441.3
40.6	23.5	349.1
40.1	23.4	332.5
40.0	23.5	315.9
39.2	23.5	367.7
39.2	23.4	343.8
50.0	23.6	295.3
50.5	23.5	234.2
50.4	23.5	235.2
49.5	23.5	203.8
49.8	23.5	226.7
59.9	23.5	195.8
59.8	23.6	199.9
59.9	23.6	193.7
59.9	23.6	192.5
60.1	23.6	185.1
70.0	23.6	181.2
69.9	23.6	192.5
69.8	23.5	197.2
69.9	23.5	193.7

Relative Humidity (% R.H.)	Temperature (°C)	Explosion Pressure (kPag)
69.9	23.5	195.8
80.7	23.6	177.8
80.1	23.6	191.6
79.9	23.6	193.2
79.8	23.6	189.2
79.5	23.5	210.9

상대습도 변화량별 에틸렌-공기 폭발혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <표 4-6>와 같이 분석되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도의 변화에 따라 (192.5 ~ 616.9) kPag의 범위가 나타났다. 폭발압력의 표준편차는 상대습도 조건에 따라 (5.4 ~ 55.1) kPag를 보였다.

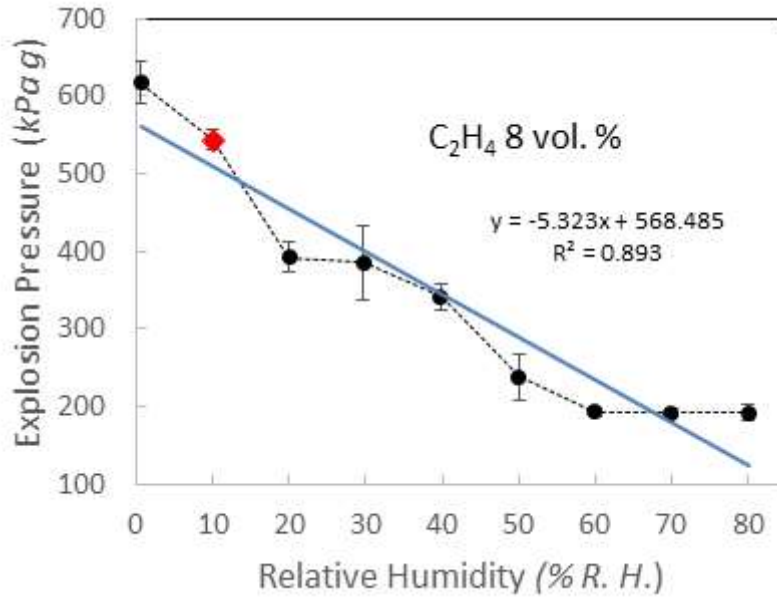
<표 4-6> 상대습도별 에틸렌(8 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차

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

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

상대습도의 변화에 따른 폭발압력은 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다( $F = 172.69$ ,  $p < 0.001$ ). 온도는 범주형 회귀분석결과 폭발압력에 유의미한 영향이 없었다( $p = 0.495$ ). Duncan 사후 분석 결과, 상대습도 조건은 <표 4-6>에 표시된 것과 같이 6개의 집단화(a, b, c, d, e, f)로 분석되었고 집단 간 폭발압력의 차이는 집단 a와 집단 b는 73.3 kPag, 집단 b와 집단 c는 151.3 kPag, 집단 c와 집단 d는 102.8 kPag로 나타났다. 여기서 폭발압력에 영향을 크게 미치는 상대습도는 집단

c이고 폭발압력에 크게 영향을 미치지 않는 상대습도(임계값, [그림 4-3의  $\blacklozenge$ ])를 10%로 결정할 수 있다. 가장 높은 폭발압력은 상대습도 0%에서 나타났고, 상대습도가 증가할수록 폭발압력이 유의미하게 낮아지는 것으로 분석되었다. 에틸렌-공기 혼합가스의 폭발압력은 상대습도가 0%에서 80%까지 증가함에 따라 [그림 4-3]과 같이 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 한편, 상대습도가 50% 이상이면 폭발압력의 평균은 유사한 것(집단 d)으로 나타났다.



[그림 4-3] 에틸렌(8.0 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력

상대습도 0%부터 80%까지의 데이터에 대해 단일회귀분석을 실시하였으며, 회귀식은  $568.485 - 5.323 \times \text{상대습도}$ 로 도출되었다( $p < 0.001$ ,  $R^2 = 0.893$ ).

#### 4.4 프로판-공기 폭발혼합가스

프로판-공기 폭발혼합물의 상대습도의 변화에 따른 폭발압력은 <표 4-7>와 같이 측정되었다. 상대습도는 실험조건의 지정값과 비슷하였다(최대:  $\pm 0.3\%$ ). 폭발혼합가스의 온도는 상대습도가 변해도 미미한 변화가 있는 것으로 측정되었다(범위:  $23.2 \sim 24.0\text{ }^\circ\text{C}$ ).

<표 4-7> 상대습도변화에 따른 프로판(4.6 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과

Relative Humidity(% R.H.)	Temperature(℃)	Explosion Pressure(kPag)
0.0	23.9	239.9
0.0	23.9	234.7
0.0	23.9	234.5
0.0	23.9	245.8
0.0	24.0	222.6
10.0	23.5	234.1
10.2	23.7	253.6
9.9	23.6	240.3
9.6	23.6	273.2
9.7	23.5	237.1
20.0	23.5	192.4
20.0	23.5	205.5
20.4	23.5	188.9
20.1	23.5	198.9
20.0	23.4	182.9
29.8	23.4	181.1
30.2	23.5	178.5
30.3	23.4	152.4
30.2	23.4	152.4
30.0	23.4	171.0
40.2	23.2	165.5
40.1	23.3	140.9
40.0	23.3	169.7
40.3	23.3	148.8
40.0	23.3	148.8

상대습도 변화에 따른 프로판-공기 폭발혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <표 4-8>와 같이 분석되었다. 폭발압력은 상대습도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 파악되었고( $F = 55.61$ ,  $p < 0.001$ ) 온도는 범주형 회귀분석결과 폭발압력에 유의미한 영향이 없었다( $p = 0.276$ ). 폭발압력의 평균은 상대습도의 변화에 따라 (154.7 ~ 247.7) kPag의 범위가 나타났고 폭발압력의 표준편차는 (8.6 ~ 16.1) kPag로 분석되었다. 또한 상대습도 50 %이상에서 폭발은 발생하지 않았다. 사후분석 결과, 상대습도 조건은 <표 4-8>에 표시된 것과 같이 3개로 집단화(a, b, c)되는 것으로 분석되었고 각 집단 간의 폭발압력의 차이는 집단 a와 집단 b는 54.0 kPag, 집단 b와 집단 c는 26.6 kPag로 나타났다. 또한 상대습도 0 %와 10 %는 동일집단(a)으로

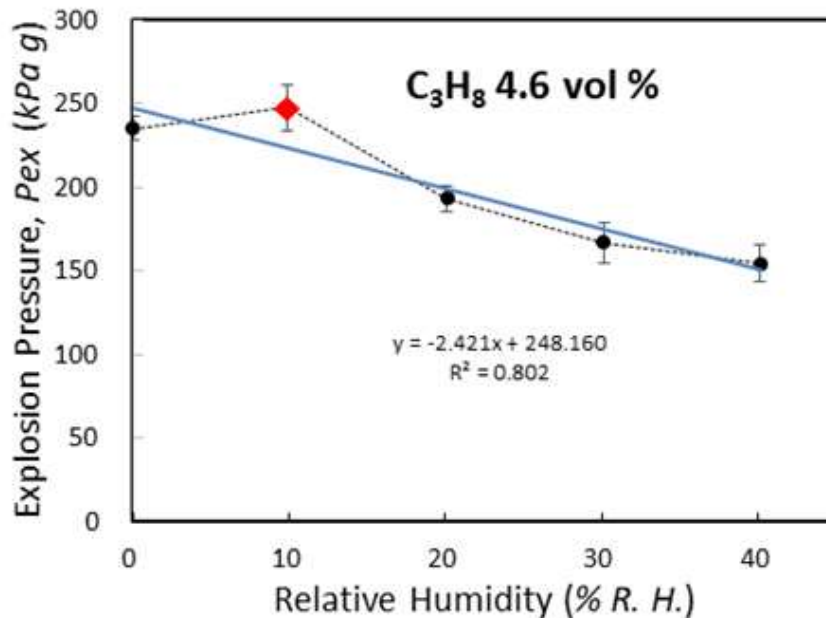
폭발압력에 영향을 크게 미치지 시작하는 상대습도(임계값, [그림 4-4]의  $\blacklozenge$ )를 10%로 결정할 수 있다.

<표 4-8> 상대습도별 프로판(4.6 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차

Level of relative humidity*	Explosion Pressure (kPag)		F	p
	Average	Standard deviation		
0 <sup>a</sup>	235.5	8.6	55.61	<0.001
10 <sup>a</sup>	247.7	16.1		
20 <sup>b</sup>	193.7	8.8		
30 <sup>c</sup>	167.1	13.9		
40 <sup>c</sup>	154.7	12.3		

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

프로판-공기 폭발혼합가스의 폭발압력은 상대습도가 높아짐에 따라 [그림 4-4]와 같이 낮아지는 경향을 보였다.



[그림 4-4] 프로판(4.6 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력

상대습도 0%에서 40%까지의 데이터에 대해 단일회귀분석을 실행하였으며, 회귀식은  $248.160 - 2.421 \times \text{상대습도}$ 로 파악되었다( $p = 0.001$ ,  $R^2 = 0.802$ ).

#### 4.5 메탄-공기 폭발혼합물

메탄-공기 폭발혼합물의 상대습도의 변화에 따른 폭발압력은 <표 4-9>와 같다. 상대습도는 실험조건의 지정 값과 비슷하였다(최대: -0.1 %). 또한, 메탄-공기 폭발혼합가스의 온도는 상대습도가 변해도 미미한 변화가 있는 것으로 파악되었다(범위: 25.1 ~ 25.4 °C).

<표 4-9> 상대습도변화에 따른 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 시험결과

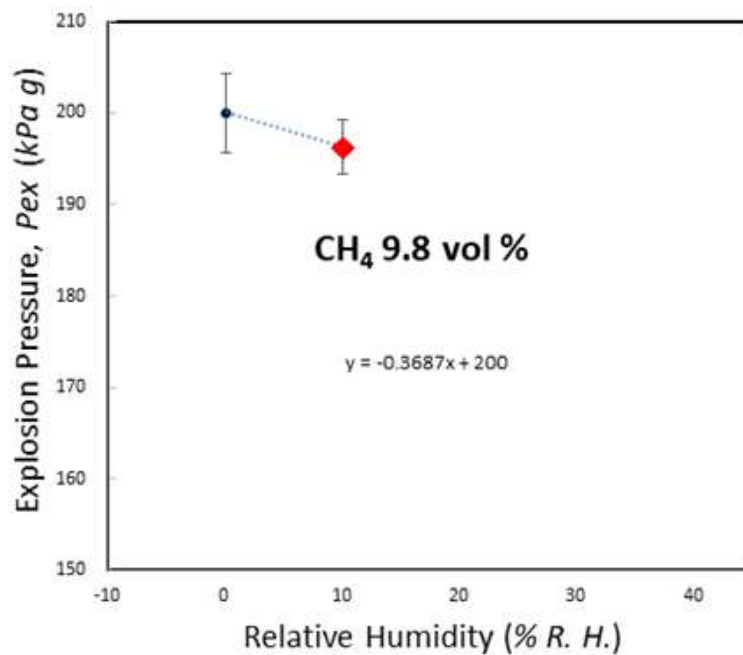
Relative humidity (% R.H.)	Temperature (°C)	Explosion pressure (kPag)
0.0	25.3	198.6
0.0	25.4	208.5
0.0	25.3	196.5
0.0	25.2	197.3
0.0	25.2	199.1
10.0	25.2	196.6
10.0	25.1	199.1
10.0	25.1	199.4
9.9	25.1	195.3
10.0	25.2	191.2

상대습도 변화에 따른 메탄-공기 폭발혼합가스의 폭발압력 평균값과 표준편차는 <표 4-10>과 같이 파악되었다. 폭발압력의 평균은 상대습도의 변화에 따라 (196.3 ~ 200.0) kPag의 범위가 나타났고 폭발압력의 표준편차는 (3.3 ~ 4.9) kPag로 분석되었다. 또한 상대습도 20 %이상에서 폭발은 발생하지 않았다.

<표 4-10> 상대습도별 메탄(9.8 vol %)-공기 혼합가스의 폭발압력의 평균 및 표준편차

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		

상대습도 20 % 이상에서는 폭발이 발생하지 않았고 상대습도 0 %와 10 %는 [그림 4-5] 과 같이 폭발압력이 유사하게 파악됐다. 또한 폭발압력은 상대습도에 따라 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 파악되었고( $F = 1.65, p = 0.174$ ) 온도는 범주형 회귀분석결과 폭발압력에 유의미한 영향이 없었다( $p = 0.399$ ). 즉 상대습도 0 %와 10 %는 상대습도의 변화가 유의미하지 않고 유연오차에 의한 동일집단으로 폭발압력에 영향을 미치지 시작하는 상대습도(임계값, [그림 4-5]의  $\blacklozenge$ )를 10 %로 결정할 수 있다.



[그림 4-5] 메탄(9.8 vol. %)-공기 혼합가스의 폭발압력

#### 4.6 소결

상온, 상압(1 atm)과 최대폭발압력을 일으키는 인화성가스의 농도([vol. %] 수소 31.0, 아세틸 14.0, 에틸렌 8.0, 프로판 4.6, 메탄 9.8)에서 온도는 범주형 회귀분석 결과 유의미한 영향이 없었고( $p > 0.05$ ) 폭발압력은 상대습도가 높아짐에 따라 폭발압력이 낮아지는 경향을 보였다. 회귀분석결과 에틸렌 > 아세틸렌 > 프로판 > 수소 순으로 상대습도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며 폭발압력은 인화성가스·증기의 고유 물리화학적 특성으로 EN 13673-1과 같이 실험에 의해 결정된다.

폭발압력은 1154.5 kPag ~ 196.3 kPag까지 다양하게 나타났으며 공기와의 혼합물에서 폭발압력이 상대습도에 크게 영향을 받기 시작하는 값(임계값)은 수소-, 에틸렌-, 프로판-, 메탄-공기 혼합가스에서 10 % 아세틸렌-공기 혼합가스에서 20 %로 분석되었다. 상대습도 50 %이상의 프로판-공기 혼합가스와 상대습도가 20 %이상의 메탄-공기에서는 폭발이 일어나지 않았다.

## 5. 결론 및 향후 연구방향

### 5.1 결론

본 연구 결과와 유사하게 가솔린-공기 혼합가스의 폭발가능성은 상대습도가 높아질수록 낮아졌다(Yang, 2013). 또한 가솔린-공기의 폭발압력도 일정한 초기온도(298 K), 농도(1.05 %, 1.62 %)에서 상대습도가 증가(35 % ~ 98 %)함에 따라 낮아졌다(Qi et al, 2017; Wang et al, 2020). 이러한 경향성은 다음으로 해석된다.

- 폭발혼합물의 습도가 높아지면 물 분자에서 증발된 라디칼을 증가시켜 폭발용기 내 폭발반응물의 라디칼 농도를 희석시킨다.
- 수증기는 폭발과정에서 나오는 열을 흡수하고 폭발반응성을 감소시키며 이는 결과적으로 폭발압력을 감소시킨다.

따라서 같은 온도에서 상대습도의 상승은 OH, H, O 와 같은 라디칼이 감소되고 폭발반응성과 폭발(연소)열을 흡수하여 폭발혼합가스의 폭발압력이 낮아진다고 설명될 수 있다.

본 연구는 가스 그룹 I, IIA, IIB, IIC의 대표가스인 메탄, 프로판, 에틸렌, 아세틸렌, 수소에 대해 상대습도의 변화에 따른 폭발압력을 측정하였다. 상온, 상압(1 atm)에서 수소(31.0 vol. %)-, 아세틸렌(14.0 vol. %)-, 에틸렌(8.0 vol. %)-, 프로판(4.6 vol. %)-, 메탄(9.8 vol. %)-공기 폭발혼합물의 폭발압력은 상대습도가 높아짐에 따라 폭발압력이 낮아지는 경향을 보였다. 특히, 수소-, 아세틸렌-공기 혼합가스의 임계상대습도(폭발압력이 상대습도의 영향을 크게 받는 값)는 각각 10%, 20%로 파악되었고, 분산분석 결과에 따르면 에틸렌-, 프로판-공기 혼합가스는 상대습도가 10 %에서 20 %로 증가할 때 폭발압력 평균의 차이가 크게 나타났고 메탄-공기 혼합가스는 0 %와 10 %에서 폭발압력 평균의 차이가 없는 것으로 분석되었고 20 %이상에서는 폭발이 일어나지 않았다(김용태 & 정기효, 2022, 2023).

내압방폭구조 용기의 강도 설계 및 내압시험을 위한 폭발기준압력 결정은 상대습도가 통제된 상태에서 이루어지는 것이 권장된다. 본 연구의 결과에 따르면, 상대습도가 10 %를 초과하면 폭발압력이 현저히 저하하거나 폭발이 발생하지 않을 수 있어서 내압방폭구조의 폭발압력시험 시 드라이어와 황산( $H_2SO_4$ ), 수산화칼륨(KOH), 염화칼슘( $CaCl_2$ ), 실리카 겔(Silca gel;  $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) 등의 제습제, 습도계를 이용하여 폭발혼합가스의 상대습도를 10 %이내로 통제하는 것이 필요하다(김용태 & 정기효, 2022, 2023).

본 연구는 다음과 같이 학술적 측면과 실무적 측면에서 의의가 있다. 첫째, 폭발압력에 영향을 미치는 다양한 요인에 대한 이론적 고찰 및 선행연구 등을 검토하여



산업안전 분야에 폭발위험을 예방 및 경감하는 방안을 모색할 수 있고 내압방폭구조의 인증 시 폭발압력시험에 사용되는 폭발혼합농도로 실증하고 그 임계값을 제시하여 이를 기초로 다양한 스케일의 용기 및 형태에 대해 기초자료로 활용 가능할 것이다. 둘째, 폭발압력에 영향을 미치는 상대습도의 임계값을 도출하고 인증기관은 인증시험에, 제조자는 방폭내압용기의 기계적 강도 설계에 적용 가능한 측면에서 실무적 의의가 있다고 사료된다. 또한 방호장치 안전인증 고시 개정의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 5.2 향후 연구방향

프로판-, 메탄-공기 혼합가스는 상대습도가 50 %이상과 20 %이상에서 폭발이 발생하지 않았다. 이러한 결과는 상대습도가 증가할수록 폭발반응성이 저해된다는 연구와 부합한다(김용태 & 정기효, 2022). 그러나 폭발용기가 작으면 면적/체적 비율이 높아서 용기 벽면을 통한 열손실이 증가하여 폭발압력이 감소할 수 있다(Harris, 1967). 본 연구의 폭발용기는 2.3 L의 외부챔버 내에 20 cm<sup>3</sup>의 내부챔버가 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 체적 및 기하학적 형상에 따라 달라질 수 있어 이를 검증하는 후속 연구가 필요하다(김용태 & 정기효, 2023).

본 연구의 결과를 일반화하려면 두 가지 후속연구가 진행되어야 한다. 첫째, 이번 연구는 인증시험에 사용하는 인화성가스의 농도에서 폭발압력과 상대습도의 인과관계를 실험을 통해 실증하였지만 폭발위험성 예측에 사용되는 폭발특성에는 폭발압력 뿐만 아니라 폭발압력상승시간 및 폭발압력상승률이 고려된다. 따라서 폭발압력상승시간과 폭발압력상승률에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 둘째, 본 연구에 사용된 폭발용기는 체적이 작고 기하학적 형상이 복잡하다. 따라서 폭발용기의 체적이 작고 기하학적 형상이 복잡하면 면적/체적 비율이 높아져 열손실이 증가하여 폭발압력이 감소하게 된다(김용태 & 정기효, 2023). 따라서 상대습도의 변화에 따른 폭발압력의 특성을 보다 종합적으로 평가하기 위해서는 4 L 이상 20 L 체적의 구형 폭발용기에 대한 후속 실험이 필요하다.

## 참고문헌

- 고용노동부. (2021). 안전인증·자율안전확인신고의 절차에 관한 고시. 제5조
- 고용노동부. (2022). 방호장치 안전인증 고시 [별표 7], [별표 7의2]
- 고용노동부. (2022). 산업안전보건업무 위탁기관 지정 현황 공고, [https://www.moel.go.kr/news/notice/noticeView.do?bbs\\_seq=20221202110](https://www.moel.go.kr/news/notice/noticeView.do?bbs_seq=20221202110)
- 기상청. (2023). 기상청 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>
- 김용태, 정기효. (2022). 내압방폭구조에서 수소-공기와 아세틸렌-공기 혼합가스의 폭발압력과 상대습도의 상관관계 분석. 대한안전경영과학회지, 24(4), 101-107.
- 산업안전보건인증원. (2022). 안전인증현황, [https://miis.kosha.or.kr/oshci/busi/listExpSafetyCheck.do?searchType=D&slndNm=&sCertificateNum=&ex\\_prod\\_name=01&MDepKind1=BP](https://miis.kosha.or.kr/oshci/busi/listExpSafetyCheck.do?searchType=D&slndNm=&sCertificateNum=&ex_prod_name=01&MDepKind1=BP)
- 산업표준심의회. (2011). 폭발성 분위기-제11부: 본질안전 "i"에 의한 기기 보호.(KS C IEC 60079-11).
- 산업표준심의회. (2013). 외함의 밀폐 보호등급 구분(IP코드).(KS C IEC 60529).
- 산업표준심의회. (2013). 폭발성 분위기-제14부: 전기설비 설계, 선정, 설치.(KS C IEC 60079-14).
- 산업표준심의회. (2014). 폭발성 분위기-제1부: 내압방폭용기 "d"에 의한 기기 보호. (KS C IEC 60079-1).
- 산업표준심의회. (2014). 폭발성 분위기-제18부: 몰드 방폭구조 "m"에 의한 기기 보호.(KS C IEC 60079-18).
- 산업표준심의회. (2014). 폭발성 분위기-제2부: 압력방폭용기 "p"에 의한 기기 보호. (KS C IEC 60079-2).
- 산업표준심의회. (2015). 폭발성 분위기-제7부: 안전증 방폭구조 "e"에 의한 기기 보호.(KS C IEC 60079-7).
- 산업표준심의회. (2015). 폭발성 분위기-제10-1부: 장소 구분-폭발성 가스 분위기.(KS C IEC 60079-10-1).
- 산업표준심의회. (2015). 폭발성 분위기-제10-2부: 장소 구분-폭발성 분진 분위기.(KS

- C IEC 60079-10-2).
- 산업표준심의회. (2017). 폭발성 분위기-제0부: 기기-일반요구사항.(KS C IEC 60079-0).
- 산업표준심의회. (2017). 폭발성 분위기-제15부: 비점화 방폭구조 "n"에 의한 기기 보호.(KS C IEC 60079-15).
- 임우섭, 목연수, 최재욱. (2004). Hydroxy Propyl Methyl Cellulose 분진의 습도와 온도에 대한 영향성 연구. 한국안전학회지, 19(3), 65-69.
- 오규형, 김종복, 이성은, 김홍, 이영철, 박승수. (1999). 밀폐 공간내 Block 에 의한 폭발특성 변화에 관한 연구. 한국가스학회지, 3(3), 23-28.
- 오규형, 김한석, & 이춘하. (1992). 가연성 가스의 폭발특성에 대한 연구. Journal of KIts VOL, 7(3).
- 오규형, 김홍, 유주현, 김태진. (1997). 가스 혼합물의 폭발압력과 연소열의 상관관계 연구. 한국가스학회지, 1(1), 49-55.
- 오규형, 이광원. (2004). 수소의 폭발 특성에 관한 연구. 한국수소 및 신에너지학회지, 15(3), 228-234.
- 장철, 권진욱, 황명환. (2017). 열매체 가열기 설비에서의 폭발위험관리에 관한 연구. 대한안전경영과학회지, 19(3), 1-9.
- 최재욱, 이인식, 박성태. (2005). 산소농도와 압력 변화에 따른 도시가스의 폭발특성. 한국가스학회지, 9(1), 38-43.
- 한국가스안전공사. (2022), 방폭안전인증 수수료 및 인증현황, <https://www.kgs.or.kr/kgs/afde/view.do>
- 한국산업기술시험원. (2022), KCs방폭인증현황, <https://customer.ktl.re.kr/web/contents/K503130000.do>
- 한국산업안전보건공단. (2022). 산업재해 통합분석, <http://172.16.3.109:8080/MicroStrategyPortal/servlet/mstrWeb>
- 한국산업안전보건공단. (2012). KOSHA GUIDE D-49-2012(가스폭발 예방을 위한 폭연방출구 설치에 관한 기술지침). 한국산업안전보건공단.
- 한국산업안전보건공단. (2013). KOSHA GUIDE D-46-2013(화학공장의 화재예방에 관한 기술지침). 한국산업안전보건공단.
- 현성호, 김명철, 김유선, 김인범, 이창우, 전성균. (2009). 방화방폭공학. 신광문화사.

- Andrews, G. E., Herath, P., & Phylaktou, H. N. (1990). The influence of flow blockage on the rate of pressure rise in large L/D cylindrical closed vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, 3(3), 291-302.
- Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., & van Wingerden, K. (1997). Gas explosion handbook. *Journal of Hazardous Materials*, 52(1), 1–150.
- Cammarota, F., Di Benedetto, A., Di Sarli, V., Salzano, E., & Russo, G. (2009). Combined effects of initial pressure and turbulence on explosions of hydrogen-enriched methane/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(5), 607-613.
- Cao, Y., Guo, J., Hu, K., Xie, L., & Li, B. (2017). Effect of ignition location on external explosion in hydrogen–air explosion venting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 10547-10554.
- Cashdollar, K. L., Zlochower, I. A., Green, G. M., Thomas, R. A., & Hertzberg, M. (2000). Flammability of methane, propane, and hydrogen gases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3-5), 327-340.
- Choi, J. Y., & Byeon, S. H. (2020). A Study on Complementary Method for Hazardous Area Extent by IEC 60079-10-2.0. *Journal of the Korea Safety Management & Science*, 22(2), 73-82.
- Ciccarelli, G., Li, Q., Metrow, C. (2018). The three-dimensional structure of a detonation wave propagating in a round tube with orifice plates. *Shock Waves*, 28, 1019-1030.
- Crowl, D. A., Louvar, J. F. (2011). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Pearson Education, 264.
- Dai, T., Zhang, B., & Liu, H. (2021). On the explosion characteristics for central and end-wall ignition in hydrogen-air mixtures: A comparative study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(60), 30861-30869.
- Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, (2002). *Chemical process safety: fundamentals with applications*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.
- Darie, M., Burian, S., Csaszar, T., Moldovan, L., Colda, C., & Andris, A. (2014). Air Humidity—A Significant Factor on Ignition Sensitivity of Gaseous Explosiv

- e Atmospheres. Proc. The Xth Environmental legislation, safety engineering and disaster management, Cluj-Napoca, Romania, 47.
- Darie, M., Burian, S., Ionescu, J., Csaszar, T., Moldovan, L., Colda, C., & Andriş, A. (2015). Investigation of air humidity influence over the ignition sensitivity of gaseous explosive atmospheres from the underground of firedamp mines. In The Sixth Balkan Mining Congress Balkanmine.
- Di Sarli, V., di Benedetto, A., & Russo, G. (2009). Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles. *Journal of Hazard Materials*, 169(1/2/3), 435–442
- Eckhoff, R. (2016). *Explosion hazards in the process industries*. Gulf Professional Publishing.
- Grossel, S. S. (2011). *Chemical process safety: fundamentals with applications*, Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ
- Grantham, C. (2012). Electrical machines and drives for potentially explosive atmospheres. *International Conference on Electrical Machines and Systems* (1) (pp. 128-134).
- Harris, G. F. P. (1967). The effect of vessel size and degree of turbulence on gas phase explosion pressures in closed vessels. *Combustion and Flame*, 11 (1), 17-25.
- Hornig, J., Markus, D., & Thedens, M. (2013). The use of porous structures in flameproof enclosures to reduce the maximum explosion pressure. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 607-612.
- IECEx Certificates, Search, Filters(2022), IEC Standard (IEC 60079-1). Retrieved July 20, 2022 from <https://www.iecex-cert.com/#/search>
- International Electrotechnical Commission(IEC). (2014). *Explosive atmospheres - Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures "d"*(IEC 60079-1).
- International Electrotechnical Commission(IEC). (2017). *Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements*(IEC 60079-0).
- International Electrotechnical Commission(IEC). (2017). *Explosive atmospheres - Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test*

- methods and data(ISO/IEC 80079-20-1).
- International Electrotechnical Commission(IEC). (2022). IECEx certified equipment scheme covering equipment for use in explosive atmospheres – Rules of Procedure(IECEx 02).
- International Electrotechnical Commission(IEC). (2013). ExTAG DS 2013/003, Recommendations to improve the effectiveness of the determination of explosion pressure, 2013
- Ivanov, B. A., & Kogarko, S. M. (1965). Ignition energy of pure acetylene and its mixtures with air at high initial pressures. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1(2), 73-75.
- Ivanov, B. A., Kogarko, S. M. (1965). Ignition energy of pure acetylene and its mixtures with air at high initial pressures. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1(2), 73-75.
- Jespen, T. (2016). *ATEX—Explosive Atmospheres*. Springer Series in Reliability Engineering.
- Jiao, F., Wang, Z. R., & Zhen, Y. Y. (2018). Experimental research on the Characteristics of Hydrogen-Air Explosion Pressure in Spherical Vessel-Pipe. *Procedia engineering*, 211, 306-314.
- Jones, G. W. (1938). Inflammation Limits and their Practical Application in Hazardous Industrial Operations. *Chemical Reviews*, 22(1), 1-26.
- Jones, G. W. (1938). Inflammation Limits and their Practical Application in Hazardous Industrial Operations. *Chemical Reviews*, 22(1), 1-26.
- Kauffman.(1982). *Fuel-Air Explosion*. University of Waterloo press.
- Keller, J. O., Gresho, M., Harris, A., & Tchouvelev, A. V. (2014). What is an explosion?. *International journal of hydrogen energy*, 39(35), 20426-20433.
- Kumar, R. K., Tamm, H., & Harrison, W. C. (1983). Combustion of hydrogen at high concentrations. Including the effect of obstacles. *Combustion science and technology*, 35(1-4), 175-186.
- Lee Dong Hun, Mok Yun Soo, Choi Jae Wook, and Lim Woo Sub. "The Effect of Humidity in Dust Explosion and the Autoignition Characteristics of MBS Copolymer." *The Korean Society of Safety*, 16.5 (2001): 64-67.

- Lemkowitz, S. M., & Pasman, H. J. (2014). A review of the fire and explosion hazards of particulates. *KONA Powder and Particle Journal*, 31, 53-81.
- Lide, D. R. (Ed.). (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (Vol. 85). CRC press.
- Michorczyk, P., Zeńczak, K., Niekurzak, R., Ogonowski, J. (2012). Dehydrogenation of propane with CO—a new green process for propene and synthesis gas production. *Polish Journal of Chemical Technology*, 14(4), 77-82.
- Mitu, M., Brinzea, V., Musuc, A., Razus, D., & Oancea, D. (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.
- Mittal, M. (2017). Explosion pressure measurement of methane-air mixtures in different sizes of confinement. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 46, 200-208.
- Moradi, H., Sereshki, F., Ataei, M., & Nazari, M. (2020). Evaluation of the effect of the moisture content of coal dust on the prediction of the coal dust explosion index. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 35(1).
- Movileanu, C., Gosa, V., & Razus, D. (2012). Explosion of gaseous ethylene-air mixtures in closed cylindrical vessels with central ignition. *Journal of hazardous materials*, 235, 108-115.
- Movileanu, C., Razus, D., Giurcan, V., & Gosa, V. (2014, August). Pressure evolution of ethylene-air explosions in enclosures. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 530, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Oancea, D., Răzuș, D., & Munteanu, V. (2002). Additive effects on the explosivity parameters of gaseous mixtures. *Analele University Bucuresti-Chim*, 11, 101-109.
- Ono, R., Nifuku, M., Fujiwara, S., Horiguchi, S., & Oda, T. (2007). Minimum ignition energy of hydrogen-air mixture: Effects of humidity and spark duration. *Journal of Electrostatics*, 65(2), 87-93.
- Phillips, H. (1984). Maximum explosion pressure in flameproof enclosures: the effects of the vessel and the ambient temperature. *Journal of hazardous materials*

- aterials, 8(3), 251-259.
- Pekalski, A. A., Schildberg, H. P., Smallegange, P. S. D., Lemkowitz, S. M., Zevenbergen, J. F., Braithwaite, M., & Pasman, H. J. (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(5), 421-429.
- Qi, S., Du, Y., Zhang, P., Li, G., Zhou, Y., & Wang, B. (2017). Effects of concentration, temperature, humidity, and nitrogen inert dilution on the gasoline vapor explosion. *Journal of hazardous materials*, 323, 593-601.
- Razus, D., Movileanu, C., Brinzea, V., & Oancea, D. (2006). Explosion pressures of hydrocarbon–air mixtures in closed vessels. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 58-65.
- Razus, D., Movileanu, C., & Oancea, D. (2007). The rate of pressure rise of gaseous propylene–air explosions in spherical and cylindrical enclosures. *Journal of Hazardous Materials*, 139(1), 1-8.
- Razus, D., Brinzea, V., Mitu, M., & Oancea, D. (2009). Explosion characteristics of LPG–air mixtures in closed vessels. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 1248-1252.
- Razus, D., Brinzea, V., Mitu, M., & Oancea, D. (2010). Temperature and pressure influence on explosion pressures of closed vessel propane–air deflagrations. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1-3), 548-555.
- Shen, X., Zhang, B., Zhang, X., & Wu, S. (2016). Explosion behaviors of mixtures of methane and air with saturated water vapor. *Fuel*, 177, 15-18.
- Singh, J. (1984). Gas explosions in compartmented vessels: pressure piling. *Chemical engineering research & design*, 62(6), 351-366.
- Solheim, F. (2010). An experimental investigation of the influence of mechanical damage, rust and dust on the ability of flame gaps to prevent gas explosion transmission (Master's thesis, The University of Bergen).
- Su, B., Luo, Z., Wang, T., Zhang, J., & Cheng, F. (2020). Experimental and principal component analysis studies on minimum oxygen concentration of methane explosion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(21), 12225



-12235.

- Sun, Z. Y. (2019). Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(1), 469-476.
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W. (2006). *Verbrennung* (Vol. 2). Berlin/Heidelberg: Springer.
- Wang, L. Q., Ma, H. H., & Shen, Z. W. (2019). On the explosion characteristics of hydrogen-air mixtures in a constant volume vessel with an orifice plate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 6271-6277.
- Wang, S., Wu, D., Guo, H., Li, X., Pu, X., Yan, Z., & Zhang, P. (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.
- Xiong, Y., Ma, Y., Zhao, H., Hu, Y. (2020). Simulation Study on the Explosion Characteristics of Premixed Hydrogen-air Mixtures. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 546, No. 4, p. 042062).
- Yang, D., Li, Z. P., & Hong, O. Y. (2013). Effects of humidity, temperature and slow oxidation reactions on the occurrence of gasoline-air explosions. *Journal of Fire Protection Engineering*, 23(3), 226-238.
- Ye, Q., Wang, G. G., Jia, Z., & Zheng, C. (2017). Experimental study on the influence of wall heat effect on gas explosion and its propagation. *Applied Thermal Engineering*, 118, 392-397.
- Yu, M. G., Zheng, K., & Chu, T. X. (2016). Gas explosion flame propagation over various hollow-square obstacles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30, 221-227
- Zhang, Q., Tan, R., Huang, Y., & Liang, H. (2012). Effects of humidity on minimum ignition energy of gaseous epoxypropane/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6), 982-988.

## Abstract

# A Study on Effect of Relative Humidity in Determining Explosion Reference Pressure for Flameproof Enclosures

Yongtae Kim

Department of Safety and Health, Graduate School

University of Ulsan

The development of industry has led to an increase in the use of flammable materials (gases, vapors, mists, dusts, and fibers), which has increased the risk of fire and explosion. To reduce the risk of fire and explosion, flammable materials should be replaced with non-flammable or less-flammable materials, and the use of flammable materials should be controlled (reducing the quantity of flammables, preventing or minimizing release, and collecting and containing releases). This will reduce the number of places where explosive atmospheres are formed, and the remaining explosive atmospheres should be classified according to the possibility of their existence. In addition, when an explosion occurs, the explosion should be mitigated (preventing the propagation of the explosion, reducing the explosion pressure, suppressing, and minimizing the number of people exposed) to minimize the damage.

When installing or using electrical equipment in an explosion-hazardous area, explosion type of protection must be applied to prevent electrical equipment from becoming a source of ignition. There are various explosion type of protection include flameproof enclosure, pressurized enclosure, increased safety, intrinsic safety, encapsulation, and type of protection "n". Flameproof enclosure ("d") is the oldest and most widely used explosion type of protection, accounting for about 40% of safety-certified products. The flameproof enclosure has a flammable gas/vapor inside, and even if an internal explosion occurs, the enclosure must withstand the pressure and the explosion must not transmit to the flammable atmosphere around the equipment. The explosion pressure is an important value used as the reference pressure for withstand test in the design of the enclosure's mechanical strength and certification type testing. Factors influencing the explosion pressure include concentration of flammable gas, initial temperature, initial pressure, location of ignition source, ignition energy, existence and shape of obstacles, size and geometry

of enclosure, humidity, etc. However, research on the effect of humidity when determining the explosion pressure of the flameproof enclosure is insufficient. In addition, IEC 60079-1:2017 (Cl. 15.2) specify the composition of test sample, test procedures, filtering methods for measured pressure values, initial pressure, ignition location, composition and concentration of explosion mixture gas, number of tests, and test methods for devices below  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . However, although the explosion pressure is affected by the humidity of the explosion mixture gas, there is no explicit humidity reference. Therefore, research is needed to clarify the humidity standards of air during the explosion pressure test, such as the international standard ISO/IEC 80079-20-1 and the European standard EN 13673-1, which classify the material properties of gases and vapor.

The test device consisted of a gas mixing part, a humidifying part, and an explosion pressure measuring part, and the explosion pressure was measured by a pressure sensor installed on the outer wall of the cylindrical explosion enclosure, ignited at the center of the enclosure. According to gas groups IIC, IIB, IIA, I of explosion-proof equipment, tests were performed by adjusting the relative humidity of air explosive mixed gas in 10% steps up to 80% relative humidity while standing upright. At room temperature and atmospheric pressure (1 atm), the explosion pressure of hydrogen (31 vol. %), acetylene (14 vol. %), ethylene (8 vol. %), propane (4.6 vol. %), and methane (9.8 vol. %)-air mixtures decreased with increasing relative humidity. In particular, the critical value of relative humidity was 10 % for hydrogen-air mixture and 20 % for acetylene-air mixture. In addition, according to the analysis of variance, the average explosion pressure of ethylene- and propane-air mixtures differed significantly when the relative humidity increased from 10 % to 20 %, and the average explosion pressure of methane-air mixture was not different from 0 % and 10 %. At 20% or more, no explosion occurred.

In terms of explosion characteristics, an increase in humidity increases the radicals generated from water molecules and decreases the radical concentration of the reactants in the vessel. Furthermore, the heat capacity of water vapor is large, so it can absorb more heat in a constant volume vessel and reduce the pressure. This means that the explosion pressure is reduced. Certification type tests must be conducted under the most severe conditions so that safe certified products can be manufactured and used.

As a result of this study, as an empirical study through experiments, yielded significant results confirming that the explosion pressure may be greatly reduced or ignition may not occur if the relative humidity of the explosive mixture is increased by more than 10%. Therefore, it is recommended to control and monitor the relative humidity in the explosion pressure test of the flameproof enclosure. To this end, it is necessary to use standard gas for flammable gas and install a dryer, dehumidifiers

such as  $H_2SO_4$ , KOH,  $CaCl_2$ , Silca gel, and a hygrometer for compressed air to control the relative humidity below 10 %.

This study is significant in both academic and practical terms. First, this study demonstrates and presents the critical value of the explosive mixture concentration used in the explosion test of the flameproof enclosure which can be used as a basic data for various scales of enclosure and shapes based on this. Second, it is thought that this study has practical significance in that it derives the critical value of relative humidity affecting explosion pressure and can be applied to actual certification.

Key word: flame proof, explosion pressure, reference pressure, relative humidity