



최대실험안전틈새(MESG)와 폭발압력의 상관관계에 대한 연구

†황경용 · 신운철 · 이택기*

한국산업안전보건공단, 한경대학교 전기전자 제어공학과*
(2016년 11월 16일 접수, 2016년 1월 19일 수정, 2016년 1월 20일 채택)

A Study on the Correlation of MESG and Explosion Pressure

†Kyungyong Hwang · Woonchul Shin · Taeck-Kie Lee*

Korea Occupational Safety and Health Agency, Korea

**Dept. of Electrical Electronics & Control Engineering, HANKYUNG University,
Anseong-si Gyeonggi-do, Korea*

(Received November 16, 2015; Revised January 19, 2016; Accepted January 20, 2016)

요약

폭발성 가스가 존재하는 위험장소에서 사용하는 전기기기는 폭발성 가스의 점화원이 되지 않도록 설계되어야 한다. 내압방폭 구조의 설계는 전기 스파크를 발생시키는 부품을 가진 용기가 내부에서 가스나 증기의 폭발시 최대 압력에 견디고 내부 화염이 외부 가스나 증기 폭발로 전파되지 않도록 설계되어야 한다.

이 논문은 화염 틈새를 통해 외부로 분사되는 연소 생성물의 분사가 외부 가스나 증기를 점화시킬 정도의 온도나 에너지를 가질 수 없도록 하는 MESG(Maximum Experimental Safe Gap)의 중요한 물리적인 메커니즘에 대해 설명하였다. IEC 60079-20-1:2010 기준에 의해 프로판과 아세틸렌의 MESG를 실험하여 MESG 값을 측정하고 가스 폭발시의 최대 폭발압력을 측정하였다. 결과로는 최소 MESG가 측정될 때 가스의 농도는 화학당량 농도보다 높고 폭발압력은 최소 MESG에서 가장 높게 나타났다.

Abstract - Electrical apparatuses for use in the presence of explosive gas atmospheres have to be special designed to prevent them from igniting the explosive gas. Flameproof design implies that electrical components producing electrical sparks are contained in enclosures and withstand the maximum pressure of internal gas or vapours. In addition, any gaps in the enclosure wall have to be designed in such a way that they will not transmit a gas explosion inside the enclosure to an explosive gas or vapours atmosphere outside it. In this study, we explained some of the most important physical mechanism of Maximum Experimental Safe Gap(MESG) that the jet of combustion products ejected through the flame gap to the external surroundings do not have an energy and temperature large enough to initiate an ignition of external gas or vapours. We measured the MESG and maximum explosion pressure of propane and acetylene by the test method and procedure of IEC 60079-20-1:2010. When the minimum MESG is measured, the concentration of propane, acetylene in the air is higher than the stoichiometric point and their explosion pressure is the highest value.

Key words : MESG, Maximum Experimental Safe Gap, explosion pressure, flameproof, propane, acetylene

†Corresponding author:hky@kosha.net

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업의 발달로 인하여 생활주변에 가연성 및 폭발성 물질의 취급이 급격히 늘어나는 추세이며, 규모도 대형화·복잡화 되어 대형 폭발사고의 위험이 증가하고 있다.

제조업체에서 사용하고 있는 가연성 및 폭발성 물질이 인화되어 화재·폭발을 일으킬 경우 그 피해는 생산설비, 기계설비 등이 파손되는 경제적 손실뿐만 아니라 많은 인명피해를 수반하게 되어 사회문제로 대두되고 있다.

따라서 경제발전과 사회 안정을 위해서는 화재·폭발 사고 예방이 절실히 요구되고 있다.

화재·폭발을 방지하기 위해서는 가연물, 산소(공기) 및 점화원이란 불리는 화재·폭발 3요소중 어느 한 가지를 제거하여 화재·폭발을 예방할 수 있다.

일반적으로 공정 특성상 가연물과 산소는 항상 사용해야 하므로 제어가 가능한 점화원을 관리하여 화재·폭발을 예방한다.

점화원을 관리하는 방법은 점화원의 방폭적 격리, 전기기기의 안전도 증가, 점화능력을 억제 하는 방법이 있으나 세계적으로 방폭 전기기기의 격리 방법의 하나인 내압방폭구조의 방폭기기를 가장 많이 사용한다¹⁾.

Fig. 1은 한국산업안전보건공단에서 2009년부터 2014년 까지의 방폭전기기기 인증현황을 나타내고 있다. 이를 살펴보면, 가스·증기 폭발위험 분위기에 사용되는 방폭기기가 전체 인증품의 약 93%를 차지하고 있어, 분진 폭발위험 분위기에 적용되는 방폭기기가(약 7%)에 비해 절대적인 다수를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그 중, 내압방폭구조의 방폭기기는 전체 중 약 37%로 모든 방폭인증 취득기기의 약 1/3을 차지하고 있으며 Fig. 2를 살펴보면 가스·증기 폭발위험 분위기의 방폭기기 중 내압방폭구조가 약 40%를 차지한다. 단일구조인 내압방폭구조에 내압방폭용기를 포함하는 복합방폭구조의 기기까지를 포함하면 전체 인증기기 중 약 50%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

위의 통계에서도 볼 수 있듯이 내압방폭구조는 방폭기기의 다수를 차지하고 있으며, 이는 산업현장에서의 수요가 많다는 증거이기도 하다. 가장 기본적이며 전통적인 방폭구조이지만 그만큼 많이 사용되고 있기 때문에 내압방폭기기에 대한 이론과 더불어 실질적인 연구의 필요성이 있다고 하겠다.

내압방폭 구조는 단순히 가스 또는 증기가 구조 내로 유입되는 것을 방지할 뿐만 아니라 구조 내에

서 폭발이 발생하더라도 외부로 화염이 전파되지 않도록 설계되었다. 전기기기 설계 시 구조 내에서 폭발이 발생하면 구조가 내부 폭발압력을 견딜 수 있도록 폭발압력을 감소시킬 수 있는 접합면을 고려하여야 하며, 접합면은 내부에서 발생한 화염이 외부 가연성 가스에 도달하기 전에 충분히 냉각시킬 수 있는 틈새크기(Safe Gap)와 길이(Width)도 고려하여야 한다.

즉, 가연성 가스와 증기에 의한 폭발 분위기에서 화염일주가 생기지 않도록 하는 틈새의 값을 안전틈새(Safe Gap)라 정의하고 독일에서는 스파르트바이테(Spaltweite)라 하였다. 이 틈새 중에서 실험으로 확인한 최대 틈새를 MESG라 하고 내압방폭구조 전기기기 설계시 반드시 알아야 하는 수치로 응용 공학적으로도 매우 중요한 수치이다. 또한 이 값의 한계치는 가연성 가스와 증기 분류의 기본 자료로 이용되는 등 안전공학상에도 널리 이용되고 있으며 연소

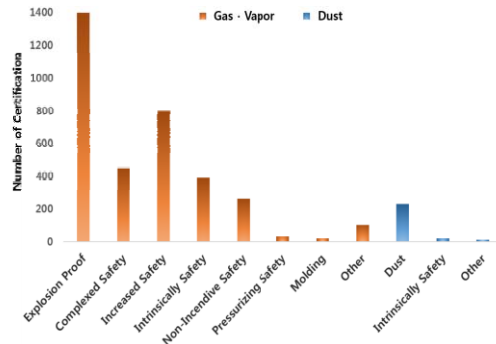


Fig. 1. Status of explosion proof, 2009-2014.

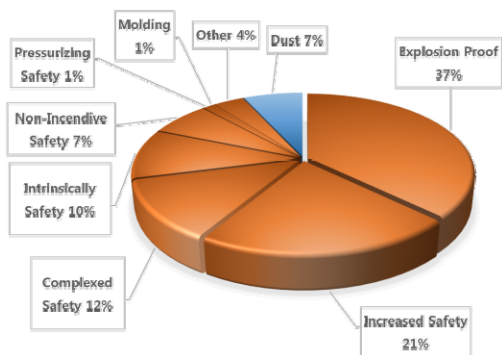


Fig. 2. Proportion of explosion proof, 2009-2014.

연구에도 특새를 이용한 화염의 소염은 매우 중요시되고 있다.

MESG에 대한 연구는 1906년 독일의 Beyling에 의해 시작되었다. 이 연구는 원통형 용기에 각종 특새를 만들고 CH₄-공기계 혼합가스를 준비하고 폭발 시험을 한 결과 어떤 특새에서는 내부 폭발이 일어나더라도 화염이 외부 폭발성 가스로 전파되지 않는다는 것을 실험적으로 밝혔다. 또한 독일 물리연구소(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)의 K.Nabert 영국 HSE(Health & Safety Executive)의 H.Philips 등이 많은 연구 논문을 발표하며 이론을 정립하였다^[2].

이와 관련하여, 국제규격인 IEC 60079-20-1 (Material characteristics for gas and vapour classification - Test methods and data)에는 각 가스별 MESG 값(인화성 가스와 공기의 혼합물/2성분계)을 최소 점화에너지와 MESG값 등에 의해 구해놓은 자료가 수록되어 있으나, 실제로 국내에서는 IEC의 표준 실험장치를 이용하여 MESG 값을 측정할 경우가 없어 본 연구에서는 MESG의 이론적 배경의 고찰과 함께 단일 가스(프로판, 아세틸렌)와 공기 혼합물의 농도별 안전특새를 측정하여 MESG 값을 구하는 과정을 제시하고, 동시에 실험을 통해 폭발압력을 측정하여 MESG와 폭발압력의 상관관계를 규명하고자 한다.

II. MESG의 이론적 고찰

혼합물의 최대안전특새의 실험의 기반이 되는 내압방폭전기기계·기구 설계·제작 시 영향을 미치는 여러 변수에 대하여 관련 문헌 및 선행된 연구논문 등을 참고하여 체계적으로 고찰하여 이론적 배경으로 삼고자, 안전특새에 영향을 미치는 변수에 대하여 알아보았다.

폭발성 가스를 점화시키는 에너지를 형성하는 변수로 공기-가스 비율, 가스 형태, 가스 움직임(난류 여부), 엔트레인먼트(entrainment)와 미연소 가스의 혼합^[8], 초기 압력과 온도 등을 분석 고찰하였고, 최대안전특새의 냉각은 열손실이 열생산보다 클 때 냉각이 일어난다고^[4], 특새 내에서 bulk 가스의 움직임이 없으면 전도에 의해서 가스 움직임이 빠르면 대류에 의해서 냉각이 된다^[5].

특새에서 발생하는 가스의 난류 현상도 열손실에 영향을 미치나 엔트레인먼트와 미연소 가스의 혼합물이 가장 큰 영향을 미치고, 큰 폭발압력의 연소가스가 특새를 통해 대기압으로 분출될 때 생기는 단열팽창에 의한 온도 강하에 영향을 미친다.

2.1. MESG 이론

2.2.1 MESG 이론적 배경

내압방폭구조는 고온 연소 생성물이 특새를 통해 외부 환경으로 분출되어도 외부 가스 환경에서 점화를 일으킬 정도로 충분한 에너지와 온도를 가지고 있지 않다는 것을 확신하는 구조이다. 폭발 분위기에서 점화되기 위하여 연소반응에 의한 열생성이 주위에 의한 열손실을 초과하여야 한다.

내압방폭구조의 연소생성물의 고온 분출물의 냉각은 특새에 의한 고온 연소물의 냉각과 분출시 탑승되어 나온 가스와 특새 외부가스와의 혼합에 의한 결과이다.

Frank-Kameneckii(1955)에 의한 열폭발설은 기본적인 점화 메커니즘을 설명하는데 이용된다. 이 학설은 팽창없이 가열되는 가상 용적(V_c)에서의 화학반응에 의한 열생성(\bar{Q}_R)과 전도에 의한 열손실(\bar{Q}_L)사이의 비율에 근거하고 있으며, 이 비율은 온도-시간 전개식(1966년 Beyer)에 의해 기술되고 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \bar{Q}_R - \bar{Q}_L \quad (2.1)$$

여기서, \bar{Q}_R : 화학반응에 의한 열발생, \bar{Q}_L : 전도에 의한 열손실

Lewis.B.(1987)의 열 발생율은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{d\bar{Q}_R}{dt} = V_c \cdot \Delta E \cdot [k \cdot \exp[-\frac{E_a}{RT}]] \quad (2.2)$$

여기서, ΔE : 몰반응 엔탈피, k : 반응 속도를 계량화한 반응률 상수, E : 반응 활동에너지, R : 일반 가스 상수

이 식은 반응률이 지수적으로 증가하는 곳에서 지수적인 온도 의존성에 근거를 두고 있으며, 이것이 Arrhenius 법칙이다.

Lewis.B(1987)의 열손실율 Q_L 은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{dQ_L}{dt} = \beta \cdot A(T - T_0) \quad (2.3)$$

(여기서 A : 부피의 표면적, β : 열전달계수이고 T : 점화 용기(부피)에서의 온도, T_0 : 가스 분위기의 온도)

온도와 함께 열손실(Q_L)과 열생산(Q_R)의 행동이 Fig. 3과 같다.

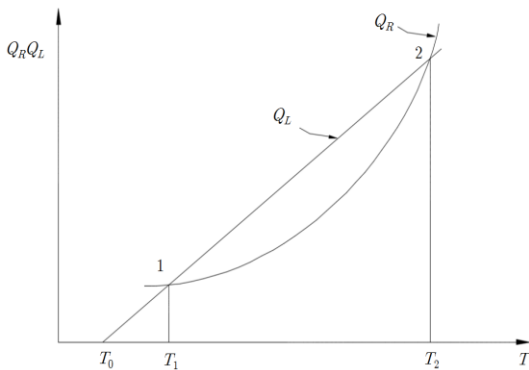


Fig. 3. Heat production(Q_R) and heat loss(Q_L) as a function of temperature.^[4]

온도가 $T < T_1$, $Q_R > Q_L$ 이면 반응시 온도가 상승한다.

Fig. 3의 포인트 1에서 $Q_R < Q_L$ 이고 혼합물이 T_1 에서 안정되면 어떤 점화도 시작되지 않으며, 점화가 되기 위하여는 온도가 T_2 를 초과하기 까지 열에너지가 외부 소스로부터 공급되어야 한다.

온도는 연소반응을 수행하면서 상승할 것이고 이것이 점화를 이끈다.

이것이 점화를 설명하는 기본 모델이다. 그러나 다른 중요한 측면을 고려하지 않았다. 예를 들면 이 모델에서의 열손실은 전도만 고려하였고 엔트레인먼트와 주위의 차가운 가스와의 혼합에 의한 냉각은 이 모델에서 고려되지 않았다. 온도는 점화 용기(부피) 전체에서 동일한 것으로 가정하였으나 실제 반응에서는 그렇지 않다.

점화 용기(부피)는 원형으로 간주되었고 열에 팽창이 되지 않는다 실제 반응에서는 점화용기(부피)의 형태는 이것과는 많이 다르고 가열될 때 확장된다. 가연성 가스는 가스를 점화하는데 필요한 점화 에너지와 온도에 따라 그룹화되었고 그 값은 문헌에 따라 약간 다르다.

폭발성 가스-공기를 점화시키는데 필요한 에너지는 다음 2, 3가지 변수에 달려있다.

- 공기-가스 비율
- 가스 형태
- 가스 움직임 난류
- 엔트레인먼트 와 미연소 가스와의 혼합
- 초기 압력과 온도

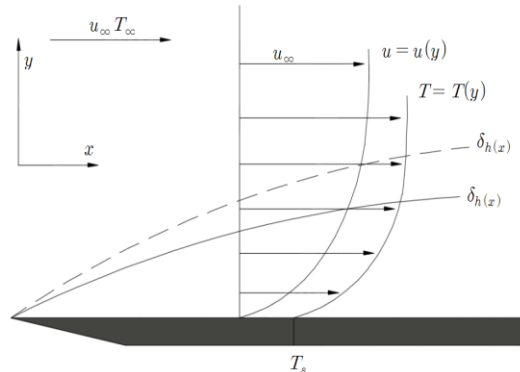


Fig. 4. The dashed line shows the hydrodynamic boundary layer, and the solid line shows the thermal boundary layer.^[5]

2.2.2 고온 연소 생성물의 분출물의 냉각

(1) 틸새 접합면 표면의 열전달

고온 연소 생성물이 더 낮은 온도를 가진 좁은 틸새를 통과할 때 온도 기울기가 정해지고 고온가스로부터 더 차가운 표면으로의 열전달이 일어 날 것이다. 가스가 더 빠르게 움직일수록 대류에 의한 열전달이 더 크게 발생하며, Bulk Gas에서 움직임이 없으면 열전달은 오직 전도에 의해서 일어난다.

고온가스의 흐르는 분출물로부터 표면으로의 열전달을 세밀하게 계산하는 것은 거의 불가능하다. 왜냐하면 분출물의 모든 위치에서 온도와 속도의 변화가 있기 때문이다.

고온 유체로부터 더 차가운 고체 표면으로의 열전달 구조는 Fig. 4와 같다.

유체가 단단한 평판을 가로 질러서 층류 자유흐름속도(u_∞)로 흐르는 곳에서 유체 온도는 평판 표면온도보다 더 높다.

열전달 과정은 경계층이라 불리는 지역의 표면에 근접해서 일어나고 그것의 구조가 대류 열전달 계수(h)를 결정한다.

표면 가까이에서의 유체속도는 정지되어 있고($u(0)=0$), 속도는 표면에서 멀어 질수록 증가하고 속도 기울기는 $u = u(y)$ 로 표시된다.

유체는 벽에서 멀리 떨어진 거리에서의 Bulk 속도는 $u = u_\infty$ 에 도달한다. 이것을 유체역학적인 경계층이라 한다.

유체온도가 표면에서 고체의 표면온도와 같다는 것을 가정한다($T(0) = T_s$).

표면에서 멀어질 때 온도는 벽에서 일정 거리에 있는 Bulk 온도로 증가하며, 기울기는 $T = T(y)$ 로

표시된다. 이것을 열경계층이라 한다.

(2) 특새에서의 난류 발생에 의한 표면으로의 열 전달

파이프의 거친 표면은 흐름에 요동이 생기게 하고 난류 흐름을 시작하게 한다. McCabe, Harriot 등은 2005년 발표한 연구자료에서 같은 레이놀드 수에 대하여 난류의 열전달 계수는 부드러운 것보다 거친 것이 약간 더 높고 열전달에서 거칠음의 효과는 실제 사용 시에는 무시할 수 있다고 발표하였다. 2007년 압력과 운동에 따른 벽에서의 열손실을 검사하는 연구논문에서는 속도는 벽에서의 열손실에 가장 큰 영향을 미치고 난류가 열손실에 두 번째로 영향을 미친다는 것을 발표하였다^[6].

(3) 실험장치의 외부 챔버에서 저온의 미연소 가스와의 혼합과 엔트레인먼트에 의한 냉각

고온 연소가스가 특새에서 분출 할 때 그것들이 특새외부에서 팽창하게 됨에 따라 단열 냉각된다.

문헌에서(레데커 1981) 냉각정도는 그다지 크지 않고 내압방폭구조에서 연소 생성물의 분출물을 냉각시키는데 큰 기여를 하지는 않는다고 발표하였다^[7].

엔트레인먼트와 용기 외부에서의 미연소가스와의 혼합이 더 우선적인 영향을 미친다.

주 챔버와 외부 주위와 연결하는 특새가 크면 특새를 통과하는 속도(u)는 낮아져서 가스가 외부 혼합물과 접촉할 때 혼합과 난류는 적어지며, 혼합과 엔트레인먼트의 냉각 비율이 낮아져서 외부 혼합물에 대한 재점화 확률이 높아지고, 특새가 작아질 때 가스의 속도(u)는 압력에 의해 밀어내어 지게 되기 때문에 증가된다. 연소 생성물의 분출물이 외부 혼합물과 접촉하는 곳에서의 난류는 커질 것이고 평면 난류 분사물의 Fig. 5에 나타내었다.

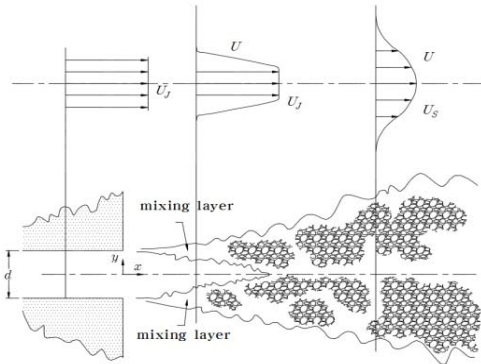


Fig. 5. Illustration of a plane turbulent jet.^[8]

엔트레인먼트와 차가운 미연소 가스에 의한 고온 연소 생성물의 냉각 비율은 높아질 것이다. 특새 가까이 분사물은 높은 속도로 움직여서 매우 빠르게 확장되어 고온 가스와 차가운 미연소 가스와의 접촉 시간이 너무 짧게 되어 외부 혼합물을 점화시키기에는 불충분하다. 분사물이 특새 출구에서 더 멀리 떨어진 곳에서 속도와 엔트레인먼트와 혼합 비율이 감소된다. 분사물은 특새 출구의 일정한 거리에서 외부 혼합물이 점화되기 좋은 조건에 도달한다. 열발생과 열손실의 균형은 외부 혼합물이 점화되는지 여부를 결정한다.

분사물이 원래의 높은 속도를 잃을 때 모양이 매우 변형이 되고 에너지와 온도도 잃게 된다. 그래서 운반된 혼합물은 점화에 필요한 온도로 도달하지 못하게 된다.

(4) 단열팽창

연소 과정에서 고온가스가 접합면으로의 열 전달 없이 접합면을 통과해서 배출된다고 가정하면 고온 가스가 팽창하게 되어 온도가 저하되게 된다. 단열 팽창에 관한 식은 다음과 같다

$$p \cdot V^x = \text{상수} \tag{2.4}$$

여기서, p = 가스 압력, V = 가스 부피, x = 단열 지수,

$x = C_p/C_v$ 정압(=Cp), 정적(=Cv)를 참고한 가스 평균 몰(mole)열 비율

이상가스 상태 방정식은 다음과 같다.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \tag{2.5}$$

p = 가스 압력, V = 가스 체적, n = 몰수, $R = 8.137 \text{ joule/mole} \cdot \text{K}$,

T = 가스 온도

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{\frac{x-1}{x}} \tag{2.6}$$

여기서 p_1, V_1, T_1 = 최고 폭발압력 상태, p_2, V_2, T_2 = 팽창과정 끝 부분에서의 가스 상태

접합면을 통과할 때 단열팽창에 의해 연소 잔존물의 가스 온도가 저하되어 외부 가스와 혼합되어 전체 가스를 냉각시키는 효과가 있다.

III. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험장치의 구성

3.1.1 가스 혼합을 위한 장치 구성

본 연구에서 사용하고자 하는 3가지 가스(아세틸렌, 프로판, 공기)를 각 조성에 따라 혼합하고 측정하기 위해서 사용된 기기 및 장치는 가스 공급 시스템(아세틸렌, 프로판 가스 공급), 공기 공급 시스템, MFC(Mass Flow Controller) 시스템 산소분석기 등으로 크게 구분할 수 있다.

각 기기 및 장치의 상세 내용은 아래와 같다.

(1) 가스 공급 시스템 (Fig. 6)

가스 공급 시스템에서는 Acetylene 및 Propane 각각의 용기에서 MFC로 공급되게 되며 상세 사양은 다음과 같다.

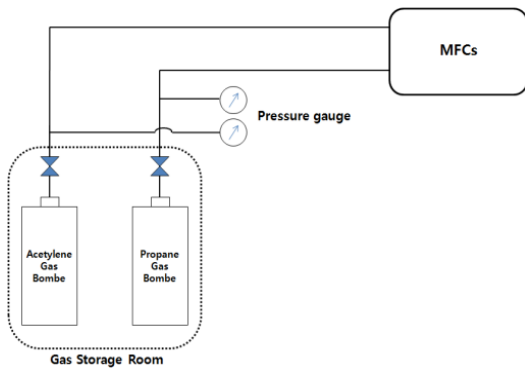


Fig. 6. gas supply system.

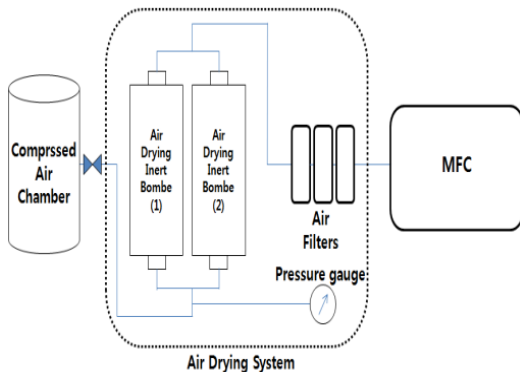


Fig. 7. air supply system.

- ① 아세틸렌(Acetylene) 가스 및 용기
 - 가스 순도: · 99.6 %
 - 정상상태(배관내) 가스압력: 1.5 bar
- ② 프로판(Propane) 가스 및 용기
 - 가스 순도 : 99.9 %
 - 정상상태(배관내) 가스압력 : 4 bar
- ③ 가스 공급 계통도

(2) 공기 공급 시스템(Fig. 7)

조연성 가스인 공기는 압축된 공기가 수분과 불순물 제거를 위해 dryer와 filter를 거쳐 MFC로 공급되며, 사양 및 계통도는 다음과 같다.

- ① 압축공기 : 중앙공급식 압축공기
- ② Air dryer
 - Capacity: 2.75 Nm³/ min
 - 건조방식 : silica gel 흡착방식
- ③ 공기 공급 계통도

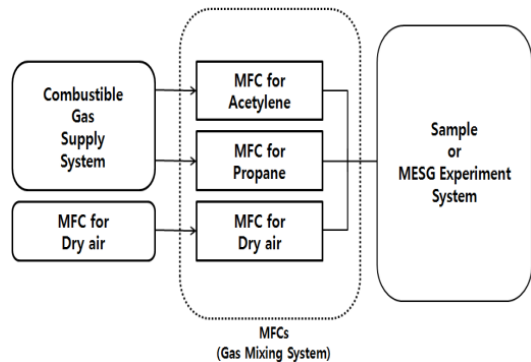


Fig. 8. MFC system.

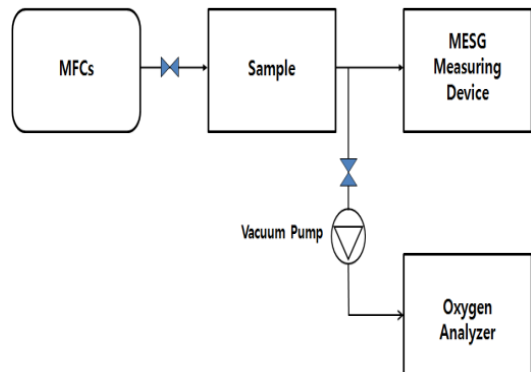


Fig. 9. Oxygen Analyzer System.

④ MFC(Mass Flow Controller) 계통도 (Fig. 8) 가스 공급 시스템과 공기 공급 시스템을 통해 공급된 가연성 가스와 공기는 각 가스의 분자량을 고려하여 전용으로 제작된 MFC module에서 실험에 필요한 조성농도에 따라 공급량을 조절하여 혼합되게 되고, MESG 측정장치와 폭발압력 측정을 위한 용기(Sample)로 공급된다.

(3) 산소분석기 (Oxygen Analyzer)(Fig. 9)

① 측정방식 : 배관에 연결된 측정부에 흘러가는 산소농도 및 측정대상 가스농도에 따른 자기장 내에서의 측정장치의 변화를 감지, 신호를 출력하는 방식

3.1.2. MESG 측정장치^[3]

본 연구에서 사용된 MESG 측정장치는 IEC 60079-20-1 (MATERIAL Characteristics for Gas and Vapour Classification-Test Methods and Data)에 따른 장치를 사용하였다.

장치의 내·외부 용기에 가스를 충전시킨 후 내부 용기에서 점화를 일으킨 후 점화된 화염이 외부용기의 가스로 전달되어 폭발이 일어나는지 여부를 통해 각 가스 조성농도에서의 MESG 값을 결정하였다.

본 시험장치는 투시창이 존재하여 폭발 또는 연소시 육안으로 관찰하도록 구성되어 있으나, 더욱 정확하고 객관적인 폭발 또는 연소 여부의 확인과 MESG 값의 측정을 위해 장치의 확인이 용이하도록 외부용기에 압력측정 센서를 설치하였다.

(1) MESG 측정용 설비

MESG 측정용 설비의 명세는 Table 1, 그 외형은 Fig. 10과 같다.

3.1.3. 폭발압력 측정 장치

각 가스농도별로 조성된 2성분계 가스의 폭발압력을 측정하기 위해서 다음과 같이 내압방폭구조로 설계된 직육면체 형상의 용기를 사용하였다. 가스 공급 시스템과 공기 공급 시스템을 통해 공급된 각 가스는 MFC를 통해 목적하는 농도별로 각 조성에 따라 혼합되고, 내압방폭구조의 폭발용기에 공급된다. 공급된 가스는 폭발용기의 후단에서 산소 분석기를 통해 가스의 농도를 측정하여 그 정확성을 판단하였다. 혼합가스는 용기 내부에 설치된 점화장치를 통해 점화가 이루어지고, 폭발압력은 압력측정장치를 통해 측정되었다.

Table 1. Specifications of MESG test apparatus

• Parallelism Deviation of the Gap Faces : < 0.01 mm	• Positioning Speed : 0.003 mm/s
• Maximum Load on the Drive Shaft : 13.000 N	• Adjustable Step Minimum : 0.001 mm
• Displacement Speed : 0.010 mm/s	• Repeatability(Unidirectional) : ±0.002 mm
• Power Supply : 230 VAC ± 10% / 50-60 Hz	



Fig. 10. MESG test apparatus.

(1) 점화장치(Fig. 11,12)

실험용기 내부에 주입된 혼합가스의 점화를 위해 다음과 같은 점화장치가 사용되었다. 점화장치는 자체적으로 설계·제작된 장치를 사용하였으며, 크게 상용전압(AC 220 V)의 전원을 공급받아 10 kV의 고전압을 방전할 수 있도록 해 주는 고전압 발생장치와 실험용기 내부에서 방전을 통해 실제 점화원으로 작용하는 점화플러그 등 2개 부분으로 나누어져 있다.

- ① 점화방식: Spark Ignition Type
- ② 구조
- ③ 방전 전압 : 10 kV
- ④ 점화장치 설치 및 구성

(2) 압력측정장치

Table 2는 압력측정장치의 명세를 Fig. 13은 그 외형을 나타낸 것이다.

- ① 측정방식 : Quartz Crystal Measuring Element 를 이용한 Diaphragm 방식

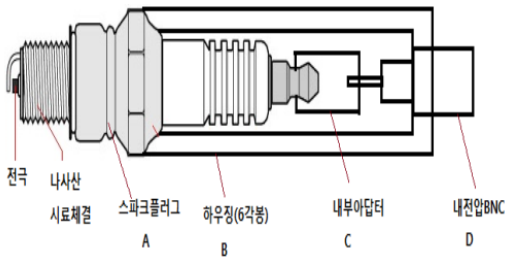


Fig. 11. ignition device.

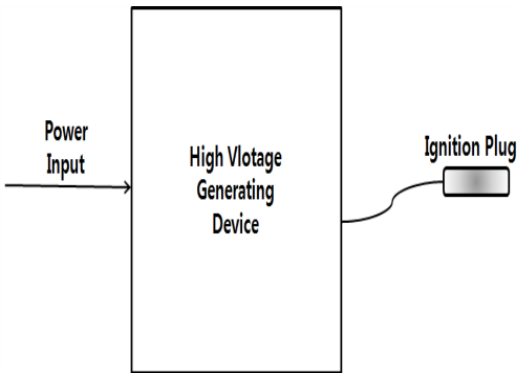


Fig. 12. ignition system.



Fig. 13. Pressure measurement sensor and diaphragm device.

Table 2. Specifications of pressure sensor

<ul style="list-style-type: none"> Manufacturer : KISTLER 	<ul style="list-style-type: none"> Model : 601A
<ul style="list-style-type: none"> Measuring Range : 0~250 bar 	<ul style="list-style-type: none"> Sensitivity : ≈ -16 pC/bar
<ul style="list-style-type: none"> Natural Frequency : ≈ 150 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Linearity : $\leq \pm 0.5$ %FSO
<ul style="list-style-type: none"> Acceleration Sensitivity : < 0.001 bar/g 	<ul style="list-style-type: none"> Operating Temperature : $-196 \sim 200$ °C
<ul style="list-style-type: none"> Temperature Coefficient : $< 10 \cdot 4$ °C 	<ul style="list-style-type: none"> Insulation Resistance : ≥ 1013 Ω
<ul style="list-style-type: none"> Shock Resistance : 10 000 g 	<ul style="list-style-type: none"> Capacitance : 5 pF
<ul style="list-style-type: none"> Weight : 1.7 g 	<ul style="list-style-type: none"> Connector: M4 \times 0.35

3.2. 시험방법 및 시험결과의 측정

3.2.1. 혼합가스 농도의 결정 및 조성

본 연구의 목표는 아세틸렌-공기, 프로판-공기 혼합가스의 각 농도별 MESG를 측정하고 이와 더불어 일정한 폭발용기에서의 폭발압력을 측정하여 그 상관관계를 파악하고, 산업현장에 사용하는 방폭기기 중 다수를 차지하고 있는 내압 방폭용기의 설계 및 기술기준에 적용하고자 하는 것이다.

본 연구에서 다루고자 하는 혼합가스(아세틸렌-공기, 프로판-공기)의 MESG 값은 각 가스의 MESG 값의 범위 내에서 변화될 것으로 가정하였다.

먼저, 각 가스의 화학양론농도 주변의 농도에서 농도(프로판 3.5 vol% ~ 9.5 vol%, 아세틸렌: 5.5 vol% ~ 14.5 vol%)의 변화에 따른 MESG 값을 측정해 보았다.

아세틸렌과 프로판 가스의 혼합비율은 각 가스의 농도에 따라 MESG에 미치는 영향을 알기 위하여 조성을 달리하였으며, 각 가스조성별로 양론농도(이

론적으로 가연성 가스의 연소시 완전연소가 이루어지는 농도)를 구하여 해당 농도에서 MESG 및 폭발압력 측정시험을 실시하였다.

3.2.2. MESG 측정

MESG는 IEC 기준에 따른 측정장치를 사용하였으며, 각 가스 조성의 2성분계 혼합가스를 장치의 내·외부 용기에 공급한 후 내부용기에 점화, 외부용기에 그 불꽃이 전파되어 폭발하지 않는 틈새를 MESG로 결정하였다. 측정용기는 관측창이 있어 육안으로 외부용기의 점화여부를 확인하도록 설계되었으나, 본 시험에서는 정확한 측정을 위해 외부용기에 압력측정장치를 설치하였다. 압력측정 결과 MESG 측정장치의 외부용기에 불꽃이 전파되지 않아 점화 또는 폭발이 이루어지지 않는 경우는 외부용기의 압력이 약 200 kPa 내외를 보였으며, 외부용기의 점화 또는 폭발이 이루어진 경우는 약 1,100~1,200 kPa의 압력이 측정되었다.

MESG의 결정은 각 가스조성별로 15회 연속해서 장치의 외부용기로 화염이 전파되지 않은 경우로 정하였고, 시험 중간에 점화가 1회라도 발생하는 경우에는 간극을 조정할 수 있는 최소단위인 0.01 mm 단위로 줄여가며 반복 시험하였으며, 2성분계인 아세틸렌 및 프로판 각 가연성 가스의 MESG는 각 가스의 양론농도에서 측정하였다.

실험당시 실험실의 온도조건은 20 ~ 25 °C를 유지하였으며, 시험가스 및 배관은 상온·상압을 유지하여 시험하였다.

3.2.3. 폭발압력 측정

각 가스농도별 시험압력용기의 폭발압력을 측정함으로써 MESG와의 상관관계를 알아보고자 하였다. 폭발압력은 모든 실험에서 동일한 용기에서 측정되었고, 5kHz Low Pass Filter가 적용된 압력센서를 사용하여 측정하였다. 점화원으로는 제작된 점화플러그를 사용하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. MESG 냉각효과

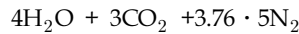
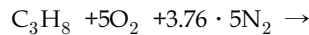
틈새 내부에서 발생한 화염 및 고온가스가 외부 가연성 가스에 도달하기 전에 저온으로 냉각되는 이론적 배경으로는 틈새 표면으로의 열전달, 틈새표면에서 생긴 난류에 의한 열전달, 외부에서의 저온가스와 내부에서 배출된 미연소가스의 혼합에 의한 냉각 효과, 단열팽창에 의한 효과를 고려할 수 있지만, MESG의 냉각효과에 가장 영향을 미치는 것은 틈새

표면으로의 열전달이라는 것을 고찰할 수 있었고, 나머지 영향은 냉각에 아주 미미한 효과를 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

4.2. 프로판 및 아세틸렌과 공기 혼합가스의 화학양론비와 MESG

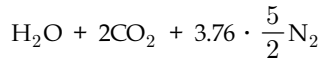
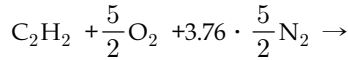
프로판 및 아세틸렌 각각의 가스와 공기의 혼합물을 이론적으로 공기와 가스의 상온, 상압에서의 완전연소 비율인 화학 양론비를 계산식에 의해 구하면 아래와 같다

프로판(C₃H₈)의 경우



$$\text{화학양론농도(Cst)} = \frac{1}{4.76(3+2)+1} = 4.03\%$$

아세틸렌(C₂H₂)의 경우



$$\text{화학양론농도(Cst)} = \frac{1}{4.76(2+0.5)+1} = 7.75\%$$

혼합가스의 시험결과(Table 3., Table 4.)를 보면

Table 3. MESG explosion pressure by propane concentration

가스농도 (vol%)	MESG (mm)	폭발압력 (kPa)
3.5	0.96	286.9
4.5	0.95	341.3
5.5	0.94	375.3
6.5	0.93	376.3
7.5	0.95	345.9
8.5	0.97	316.1
9.5	0.99	282.2

Table 4. MESG explosion pressure by acetylene concentration

가스농도 (vol%)	MESG (mm)	폭발압력 (kPa)
5.5	0.53	811.3
7.0	0.46	898.8
8.5	0.44	971.0
10.0	0.46	922.6
11.5	0.47	912.2
13.0	0.48	867.1
14.5	0.49	780.4

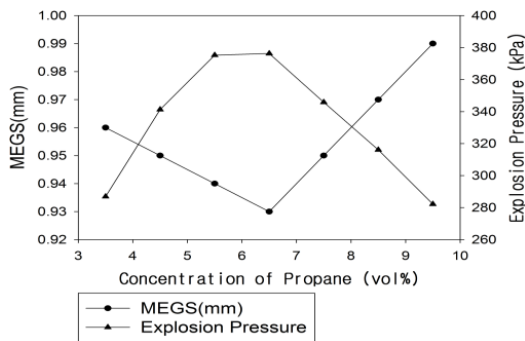


Fig. 14. MESG explosion pressure by propane concentration.

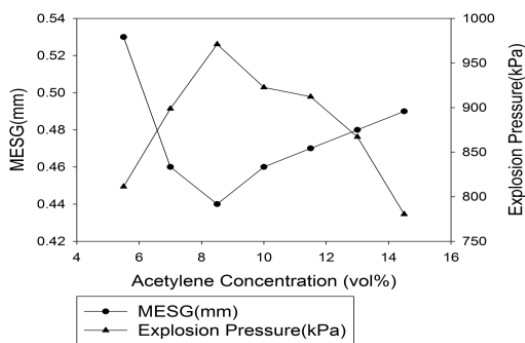


Fig. 15. MESG explosion pressure by acetylene concentration.

화학양론농도(프로판: 4.03 %, 아세틸렌: 7.75 %)보다 약간 높은 농도(프로판: 5.5 %, 아세틸렌: 8.5 %)에서

최소 MESG 값이 최소를 나타내고, 농도가 증가하거나 낮아질 경우에는 MESG 값은 증가한다. 이것은 불완전연소 상태가 화염전파에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

4.3. MESG 와 폭발압력

프로판 및 아세틸렌과 공기 혼합가스에서 MESG 와 폭발압력의 관계를 확인하기 위하여 프로판 및 아세틸렌과 공기 혼합가스에 대해 폭발실험을 한 결과, 프로판의 계산적인 화학양론 농도(4.02 vol%) 보다 높은 농도인 6.5 vol%에서 MESG 값은 최소값인 0.93 mm를 나타냈고, 폭발압력은 376.3 kPa로 최대값임을 알 수 있었다. 이와 마찬가지로, 아세틸렌의 경우도 계산적인 화학양론 농도인 7.74 vol%보다 높은 농도인 8.5 vol%에서 최소 MESG 값인 0.44 mm 와 최대 폭발압력인 971 kPa가 측정되었다.

Fig. 14 및 Fig. 15를 통해서 프로판과 아세틸렌의 MESG 값이 최소일 때 최대 폭발압력이 나타난다는 것을 알 수 있다. 앞서 살펴본 혼합가스의 농도와 MESG 값의 상관관계와 마찬가지로 화학양론농도 보다 약간 높은 농도에서 완전연소가 일어나게 되고, 이때 폭발압력이 최대값을 나타내는 것으로 추정된다.

V. 결론

첫째, 프로판 및 아세틸렌과 공기 혼합가스의 최소 MESG는 계산 화학양론 농도보다 약간 높은 농도에서 나타나고, 농도가 증가하거나 낮아질 경우에는 MESG가 증가하였다

둘째, 최대폭발압력은 MESG가 최소일 때 나타나고 MESG 값이 증가하거나 감소할 때 폭발압력은 낮아지는 경향이 있었다.

셋째, 인화성 가스와 공기의 혼합물은 화학양론 농도보다 약간 높은 농도에서 최소 MESG값과 최대 폭발압력을 나타낼 것으로 추론된다.

넷째, MESG 값 측정시 폭발압력을 먼저 측정하여 최대 폭발압력이 발생하는 안전틀새 값 부근에서 안전틀새를 조정하여 최소 MESG 값을 측정하면 실험시간과 비용을 대폭 감소시킬 수 있으며 다른 혼합가스에서도 동일한 경향을 보일 것으로 추정된다.

REFERENCES

[1] Hwang, K. Y., "A Study on the Effect to Ignition Limits of Explosive Gas of Electrode Material in the Test of Intrinsically Safety

- Electric Appatus”, Hanyang University, (1994)
- [2] Oh, K. H., “A Study on the Safe Gap for Explosion-proof”, Hoseo University, (1997)
 - [3] IEC 60079-20-1:2010 MATERIAL CHARACTERISTICS FOR GAS AND VAPOUR CLASSIFICATION
 - [4] Beyer, M., *Über den Zünddurchschlag explodierender Gasgemische an Gehäusen der Zündschutzart 'Druckfeste Kapselung'*, VDI Reiche, (1996)
 - [5] Kanury, A.M., *Introduction to combustion phenomena (for fire, incineration, pollution, and energy applications)*. New York, Gordon and Breach, (1975)
 - [6] Boust, B., J. Sottom, et al., "Unsteady heat transfer during the turbulent combustion of a lean premixed methane-air flame: Effect of pressure and gas dynamics." *Proceedings of the Combustion Institute* 31(1):pp1411-1418, (2007)
 - [7] Redker, T., *Classification of flammable gases and vapours by the flameproof safe gap and the incendivity of electrical sparks*, Physikalisch Technische Bundesanstalt, Heat Division, Braunschweig, (1981)
 - [8] Tennekes, H. A. L. J. L., *A first course in turbulence* London, England, The MIT press., (1944)