creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2023년 8월
석사학위 논문

수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지 측정을 위한 기초연구

조선대학교 대학원
기계공학과
이 재 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지 측정을 위한 기초연구

A Fundamental Study of Spark Ignition Energy Measurements for Hydrogen-Oxygen Combustible Mixtures

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

이 재 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지 측정을 위한 기초연구

지도교수 박 설 현

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2023년 4월

조선대학교 대학원
기계공학과
이 재 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이재원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 오 동 욱 (인)

위 원 조선대학교 교 수 곽 재 복 (인)

위 원 조선대학교 교 수 박 설 현 (인)

2023년 5월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ····· Ⅰ

LIST OF FIGURES ····· Ⅱ

ABSTRACT ····· ⅳ

제 1장 서론 ····· 1

1.1 연구 배경 및 필요성 ····· 1

1.2 연구목적 및 내용 ····· 7

제 2장 실험 장치 및 방법 ····· 14

2.1 수소-산소 가연혼합물 점화 실험 장치 ····· 14

2.2 수소-산소 가연혼합물 점화 실험 방법 ····· 17

제 3장 실험 결과 및 고찰 ····· 25

3.1 수소-산소 가연혼합물 점화 시 스파크 방출특성 ····· 25

3.2 수소-산소 가연혼합물의 이성분 확산 계수 ····· 32

3.3 수소 체적백분율별 항복전압 측정 ····· 38

3.4 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 계산 및 측정 ·· 45

제 4장 결론 ····· 65

참고문헌 ····· 67

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1.1 Domestic Carbon Emissions ····· 3
Table 1.2 Comparison of flammability range and MIE of Hydrogen-Oxygen mixture and Hydrogen-air mixture ····· 7
Table 2.1 Quenching distance of various combustible mixtures ····· 19
Table 2.2 Electrode image analysis through MATLAB ····· 20
Table 3.2.1 Summary of Constant Value for Collision Integral Ω_D ····· 36
Table 3.2.2 Binary Diffusivity Coefficient of Hydrogen-Oxygen Mixture ····· 36
Table 3.3.1 Breakdown voltage by gap (0.7, 0.6, 0.4), capacitor capacity and hydrogen volume percentage ····· 38
Table 3.3.2 Breakdown voltage by gap (0.3, 0.2, 0.1), capacitor capacity and hydrogen volume percentage ····· 39
Table 3.3.3 Gas ionization constants, A, B value of Paschen's law ····· 43
Table 3.3.4 Breakdown voltage value of Paschen's law ····· 43
Table 3.4.1 Ignition energy of 90% hydrogen volume percentage ····· 46
Table 3.4.2 Ignition energy of 80% hydrogen volume percentage ····· 47
Table 3.4.3 Ignition energy of 60% hydrogen volume percentage ····· 48
Table 3.4.4 Ignition energy of 40% hydrogen volume percentage ····· 49
Table 3.4.5 Ignition energy of 20% hydrogen volume percentage ····· 50
Table 3.4.6 Ignition energy of 10% hydrogen volume percentage ····· 51
Table 3.4.7 Physical properties according to hydrogen volume percentage of hydrogen-oxygen combustible mixture for ignition energy calculation ··· 57
Table 3.4.8 Minimum Ignition Energy as a percentage of Hydrogen Volume in a Hydrogen-Oxygen Combustible mixture ····· 58
Table 3.4.9 Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Oxygen combustible mixture estimated through Probability ····· 63

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Earth's temperature change over the past 1000 years ····· 1
Figure 1.2 Changes in concentrations of carbon dioxide, methane and nitrogen dioxide over the past 1000 years ····· 2
Figure 1.3 Combustible range of fuel under STP condition ····· 4
Figure 1.4 Cases of domestic and overseas hydrogen explosion accidents ····· 5
Figure 1.5 Types of ignition sources ····· 8
Figure 1.6 Minimum Ignition Energy of Methane, Ethane, Propane, Pentane ····· 9
Figure 1.7 Kumamoto's MIE of Hydrogen-Oxygen combustible mixture ····· 10
Figure 1.8 Paschen's Curves of different gases ····· 11
Figure 1.9 Breakdown Voltage of Methane-Hydrogen mixture ····· 12
Figure 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus ····· 14
Figure 2.2 Overall View of the experimental device ····· 15
Figure 2.3 Schlieren Device for Ignition and Spark image Acquisition ····· 16
Figure 2.4 Schematic diagram of spark igniter ····· 16
Figure 2.5 Front and back of the static combustor to be used in the experiment ·· 17
Figure 2.6 Gas injection line to be used in the experiment ····· 18
Figure 2.7 Electrode image analysis through gap 0.2mm Matrox ····· 20
Figure 2.8 Oscilloscope Voltage, current waveform ····· 21
Figure 2.9 Oscilloscope Ignition energy spark Ignition Energy Eq(2.4) Comparison · 24
Figure 3.1.1 Schematic diagram of spark formation generated through electron avalanche and streamer propagation ····· 26
Figure 3.1.2 Spark emission Characteristics through voltage and current waveforms ····· 26
Figure 3.1.3 Measured voltage and current during spark formation period ····· 28
Figure 3.1.4 Image of spark kernel and flame developments ····· 31
Figure 3.2.1 Arc, Glow in the current waveform by hydrogen volume percent ····· 34
Figure 3.3.1 Breakdown voltage measured for each electrode ····· 42

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 3.3.2 Comparison of the breakdown voltage calculated by Paschen's law and the breakdown voltage measured through experiments ····· 44
Figure 3.4.1 Structure of premixed flame ····· 52
Figure 3.4.2 Combustion process of spherical premixed flame ····· 55
Figure 3.4.3 Quenching distance of Hydrogen-Oxygen combustible mixture ····· 56
Figure 3.4.4 Flame Temperature(Tb) by Hydrogen volume percentage and Equivalence ratio ····· 57
Figure 3.4.5 Ignition Energy measurement through hydrogen volume percentage probability ····· 62
Figure 3.4.6 Comparison of Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Oxygen combustible mixtures ····· 63

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Fundamental Study of Spark Ignition Energy Measurements for Hydrogen-Oxygen Combustible Mixtures

LEE, Jae-Won
Advisor : Prof. Park, Seul-Hyun, Ph.D.
Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Chosun University

The international community continues to make various efforts to solve the climate change problem and create a sustainable society. One of the various efforts, carbon neutrality, was presented. In response, the domestic government also suggested the first direction to expand the use of hydrogen to practice carbon neutrality. However, in the case of hydrogen, the flammable range (4% to 75%) is very wide and the ignition energy (0.017mJ) is also very low, so the risk of explosion is higher than other fuels. In particular, when hydrogen and oxygen are mixed, it has a wider combustible range (4% to 95.2%) and lower ignition energy (0.0012mJ) than conventional hydrogen fuel. However, studies on the measurement of the ignition energy of hydrogen-oxygen combustible mixtures are few and insignificant. Therefore, in this study, the ignition energy of the hydrogen-oxygen combustible mixture was measured. In order to measure the ignition energy of combustibles, an ignition source for igniting the combustibles is required, and the spark ignition energy of a hydrogen-oxygen combustible mixture is measured through a spark ignition device most widely used to measure ignition energy among various ignition sources. In order to measure the ignition energy through the spark ignition device, the breakdown voltage value must be measured first. In this study, the breakdown voltage according to the gap condition and the hydrogen volume percentage was measured. It was found that the breakdown voltage increased as the gap increased and the hydrogen volume percentage decreased. In addition, spark ignition energy was calculated through the measured breakdown voltage. The minimum ignition energy of the hydrogen-oxygen combustible mixture was measured in two ways. The first method is to measure the extinguishing distance for each hydrogen volume percentage of the hydrogen-oxygen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

combustible mixture through a relational expression between the extinguishing distance and the minimum ignition energy. The second method is a method of estimating the minimum ignition energy through a probability basis based on the ignition energy measured in this study. The minimum ignition energies of each measured hydrogen-oxygen combustible mixture were measured to be 2.23 μJ and 3.10 μJ. There was a difference between the minimum ignition energy of hydrogen-oxygen combustible mixtures measured through experiments and the minimum ignition energy of known hydrogen-oxygen combustible mixtures. This is determined to be due to the difference in the material, thickness, and hydrogen volume percentage of the electrode.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

산업 혁명 이후 우리가 소비하는 에너지는 주로 석유 및 석탄과 같은 화석연료의 연소를 통해 얻어지고, 화석연료의 연소는 지구온난화를 초래하는 이산화탄소 및 온실가스의 배출량을 증가시키고 이로 인한 기후변화가 심각해지고 있다. Figure 1.1은 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 3차, 4차 보고서[1]에 제시된 지난 1000년 동안 지구의 평균기온 변화를 나타낸 그래프이다. Figure 1.1에서 확인할 수 있는 바와 같이 1860년을 전후로 지구의 평균기온이 올라가기 시작해 1906년 ~ 2005년 사이 평균 0.74℃ 상승하였다. Figure 1.2는 같은 시기에 대기 중 이산화탄소, 메탄 및 이산화질소의 농도 변화를 나타낸 그래프이다[1]. Figure 1.1과 1.2의 그래프를 비교해 보면 지구의 평균기온이 상승하는 시기에 대기 중 이산화탄소, 메탄 및 이산화질소 농도 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

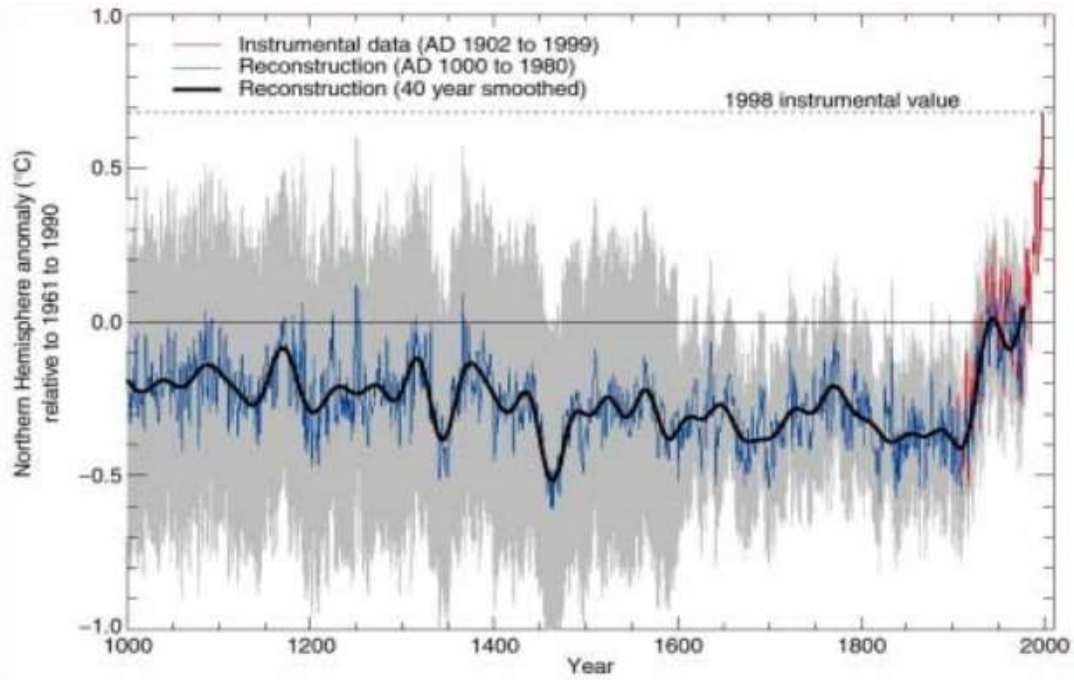


Figure 1.1 Earth's temperature change over the past 1000 years [1]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

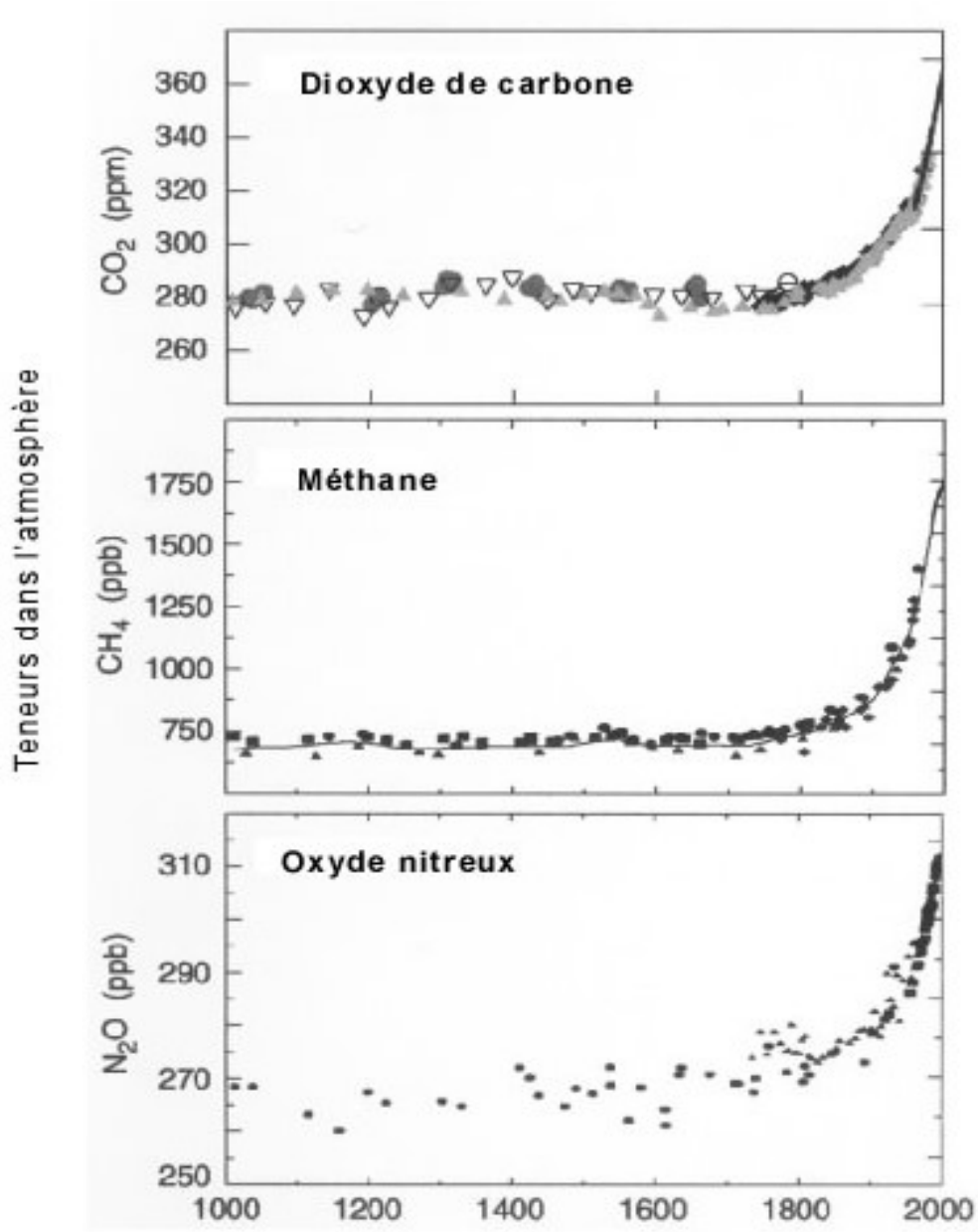


Figure 1.2 Changes in concentrations of carbon dioxide, methane and nitrogen dioxide over the past 1000 year [1]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

국제사회는 기후변화 문제를 해결하고 지속 가능한 사회를 만들기 위하여 다양한 관심과 노력을 하고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체 IPCC는 기후변화 문제에 대응하기 위해 탄소 배출량을 점차 감소시키고 최종적으로 2050년까지 탄소중립(net-zero)을 달성해야 한다고 제시하였다[2]. 이에 대응하기 위해 우리 정부도 국제사회 노력에 발맞춰 탄소중립을 위한 방향을 제시하였다. Table 1.1에 정리되어 있는 탄소중립 녹색성장 위원회의 자료에 의하면 국내 탄소 배출량은 2018년 기준으로 727.6백만 톤의 탄소가 배출되었고, 2030년까지 18년 배출량 대비 40% 감축한 291백만 톤을 달성하고 2050년까지 탄소중립(net-zero)을 목표하고 있다[3]. 또한, 2021년 탄소중립 기본법을 법제화하였고, 탄소중립으로 나아가기 위한 장기 저탄소 발전 전략(Long-Term Low greenhouse gas Emission Development Strategy, LT-LEDS)을 수립하였다[4].

Table 1.1 Summary of Domestic Carbon Emissions [3]

	Carbon Emissions (Unit: million tons CO_2eq)		
	('2018년)	('2030년)	('2050년)
Total Emissions	727.6	291	0
Transform	269.6	149.9	0
Industry	260.5	222.6	53.1
Transport	98.1	61	2.8
Construction	52.1	35	6.2
Livestock and Fisheries	24.7	18	15.4
Waste	17.1	9.1	4.4
Sink	-41.3	-26.7	-24.7
CCUS	-	-10.3	-57.9
Hydrogen	-	7.6	0

LT-LEDS의 2050 탄소중립 기본방향[5]에서는 화석연료를 대체할 다양한 재생에너지(수소에너지, 태양열 에너지, 태양광발전, 바이오매스, 풍력 에너지, 지열 에너지, 해양 에너지, 수력 에너지) 중 "깨끗하게 생산된 전기 • 수소의 활용 확대"를 첫 번째이자 핵심 요소로 제시하고 있다. 에너지 및 산업 분야에서 수소의 활용 확대가 탄소중립 관점에서 탄소 배출원이 없어 온실가스 감축에 유리할 것으로 평가되고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수소연료는 지속적인 에너지 공급이 가능하고 공해물질이 배출되지 않아 친환경 에너지라는 장점이 있지만, 가연 범위가 넓은 단점도 동시에 가지고 있다. Figure 1.3은 각종 연료의 가연 범위를 도시한 그래프이다. Figure 1.3에서 알 수 있는 바와 같이 수소는 메탄, 부탄, 벤젠 및 프로판과 같은 탄화 수소계 연료에 비해 매우 넓은 가연 범위 (체적백분율 4% ~ 75%)를 가지고 있다[6]. 넓은 가연 범위는 폭발 위험성을 증가시킬 수 있고, 수소연료의 낮은 점화 에너지로 인해 쉽게 폭발이 발생할 수 있다[7,8]. Figure 1.4는 수소연료의 폭발 위험성을 보여주는 사례로 국내/외 수소 저장 탱크에서 발생한 폭발 사고 이후 모습이다[9,10].

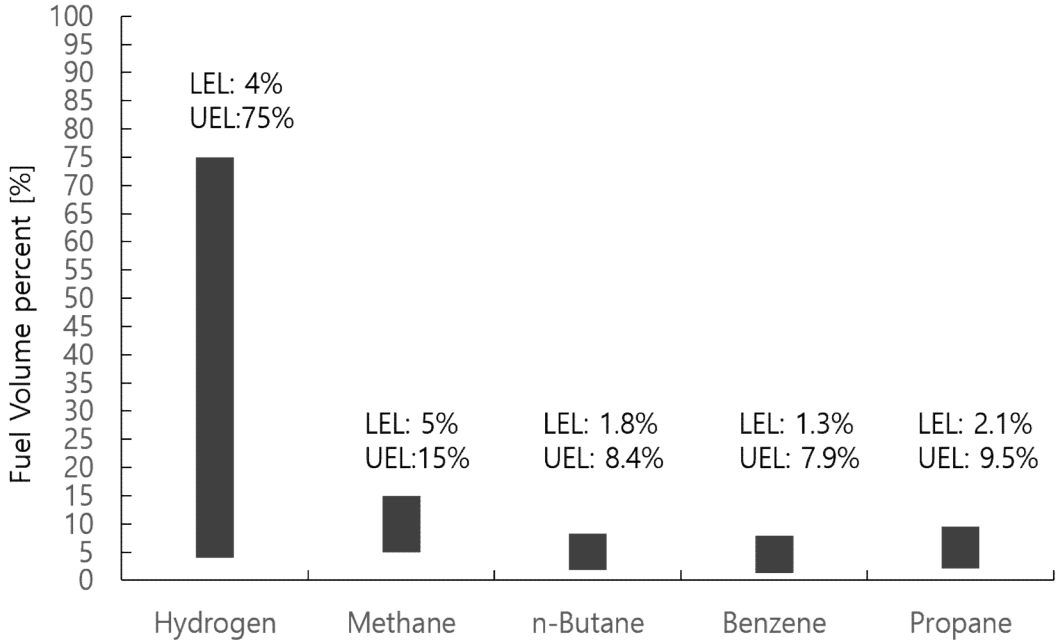


Figure 1.3 Combustible range of fuel under STP condition

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A) Gangneung Techno Park Hydrogen Storage Tank Explosion Accident [9]

B) Hydrogen filling station Explosion Accident in Norway [10]

Figure 1.4 Cases of domestic and overseas hydrogen explosion accidents

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 1.4(A)는 2019년 강원 테크노파크 강릉 벤처 공장의 수소 저장 탱크 폭발 사고 이후 모습이다. 사고원인으로는 수전해 시스템을 통해 수소 생산하는 과정 중 전해조에 정격 운전전류 밀도보다 낮은 전압과 전류의 전기가 공급되어 수소 순도가 떨어졌고, 혼합 농도 이상의 산소가 수소탱크 내부로 유입된 상태에서 정전기에 의해 폭발이 발생하였다. Figure 1.4(B)는 2019년 노르웨이 오슬로에서 발생한 수소 충전소 폭발 사고 이후 모습이다. 사고원인은 수소 저장 시스템의 잘못 조립된 플러그 틈새로 수소가 누출되어 산소와 혼합하여 점화로 이어진 것으로 추정된다. 두 사례를 보았을 때 수소 폭발로 인한 사고의 위험성은 매우 높고 피해 역시 큰 것을 알 수 있다. 수소연료의 사용이 증가함에 따라 수소연료를 다루는 시설이 늘어나는 추세이다. 따라서 수소연료의 생산, 저장, 수송, 이용 중에 발생할 수 있는 폭발 사고 위험성 문제를 해결하고 안전한 수소연료 사용하기 위한 연구가 절실히 필요한 시점이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 연구목적 및 내용

수소연료는 크게 두 가지 방법을 통해 생산되고 있다. 첫 번째 방법은 천연가스, 석탄, 석유등의 화석연료를 활용하여 촉매 반응으로 수증기 개질을 통해 수소를 생산하는 방식이며, 전 세계에서 생산되는 수소의 95% 이상이 수증기 개질을 통해 생산되고 있다[11]. 두 번째 방식은 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 전력을 통해 물을 전기 분해하여 수소를 생산하는 수전해 방식이 있다[12]. 수전해 방식은 전해질에 따라 AEC(Alkaline Electrolysis cell), PEM(Proton Exchange Membrane electrolysis cell), AEM(Anion Exchange Membrane electrolysis cell)의 방식으로 구분된다. 수전해 방식은 순수한 물을 이용하여 순도 높은 수소를 얻을 수 있고, 투자 대비 수소의 생산성이 높은 장점이 있다. 그러나 물을 전기 분해하여 수소와 산소로 분리 과정에서 생성된 산소가 따로 저장되지 않고 수소 저장시설 내부로 유입될 경우, 강릉의 사고와 같이 수소와 반응하여 폭발 사고로 이어질 수 있다.

Schroeder[13]에 의해 측정한 수소-산소 가연혼합물의 가연 범위 및 Kuchta[14]에 의해 측정한 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지와 Lewis와 Von-Elbe[8]의 수소-공기 혼합물의 가연 범위 및 최소 점화에너지를 Table 1.2에 정리하였다. Table 1.2에서 알 수 있는 바와 같이 수소-산소 가연혼합물은 가연 범위가 수소-공기 혼합물에 비해 넓고 최소 점화에너지는 훨씬 더 낮아 폭발의 위험성이 더 높은 것을 확인하였다. 하지만 수소-산소 가연혼합물은 농도 별 점화 에너지 특성 자료는 매우 제한적이다.

Table 1.2 Comparison of Flammability range and MIE of Hydrogen-Oxygen Mixture and Hydrogen-air mixture [8,13.14]

	LEL[%]	UEL[%]	MIE[mJ]
Hydrogen-oxygen	4	95.2	0.0012
Hydrogen-Air	4	75	0.017

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 1.5는 폭발로 이어질 수 있는 혼합 가연물의 점화원의 종류를 도시한 구성도이다. 점화원은 크게 강제 점화원 및 자연 점화원이 존재한다[15]. 강제 점화원에는 전기 및 기계적 점화원이 있고, 자연 점화원에는 열 및 기타 요소들이 존재한다. 다양한 점화원 가운데 가연혼합물의 점화에너지를 측정하기 위해 가장 많이 사용된 방식은 전기적 점화원인 스파크 점화장치 중 CDI(Captive Discharge Ignition) 방식이다.

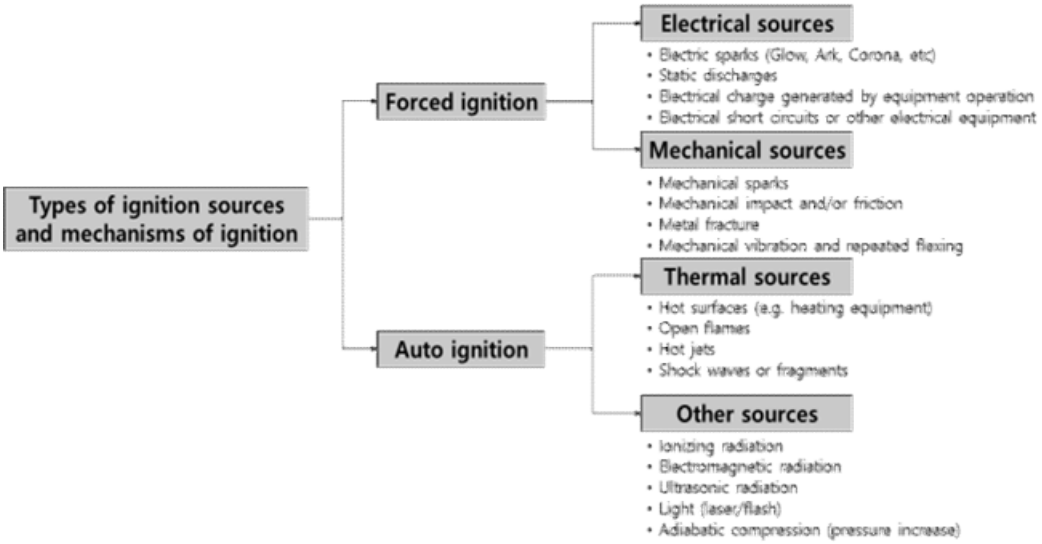


Figure 1.5 Types of ignition sources [15]

Uchman[16]와 Moorhouse[17]는 캐패시터를 활용한 스파크 점화장치를 통해 메탄, 에탄, 프로판 및 펜탄의 최소 점화에너지를 측정하였고, 점화에너지는 식 (1.1)를 통해 캐패시터 정전용량 C와 전압 V를 통해 계산하였다. 각 기체의 최소 점화에너지는 메탄 0.63mJ, 에탄 0.41mJ, 프로판 0.46mJ 펜탄 0.5mJ로 측정되었고 Figure 1.6에 도시하였다. 따라서 본 연구 역시 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 측정하기 위해 스파크 점화장치 중 CDI 방식을 사용하였다.

$$E_2 = \frac{1}{2} CV^2 \qquad (1.1)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

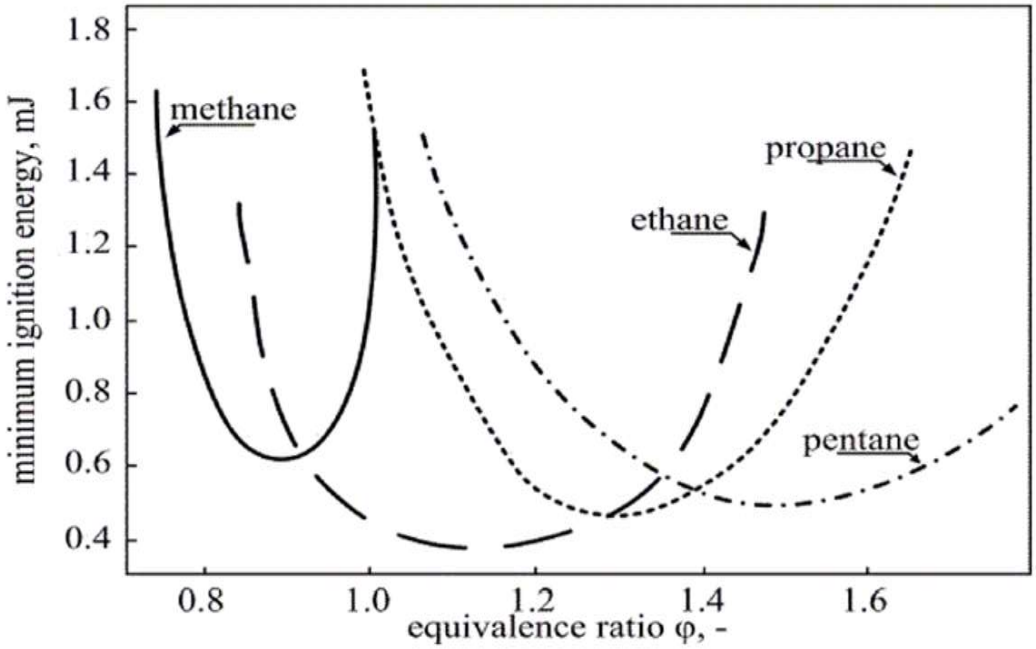


Figure 1.6 Minimum Ignition Energy of Methane, Ethane Propane Pentane [16,17]

Kumamoto[18]는 스파크 점화장치(CDI)를 통해 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 최소 점화에너지를 측정하였고, 최소 점화에너지값은 Figure 1.7에 도시하였다. Kumamoto[18]의 실험에서 측정한 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 4μJ로 측정되었다. 최소 점화에너지는 식 (1.1)에 캐패시터 정전용량과 전압에 의해 결정되기 때문에 Figure 1.7의 수소 체적백분율 20% ~ 60%의 최소 점화에너지는 실험 장치로 측정할 수 있는 최소 점화에너지 보다 낮아 측정이 불가하였다. 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 매우 낮아 실험을 통해 측정하기 어렵고, 연구사례 또한 많이 미비하여 수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지 측정을 위한 기초연구가 필요하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

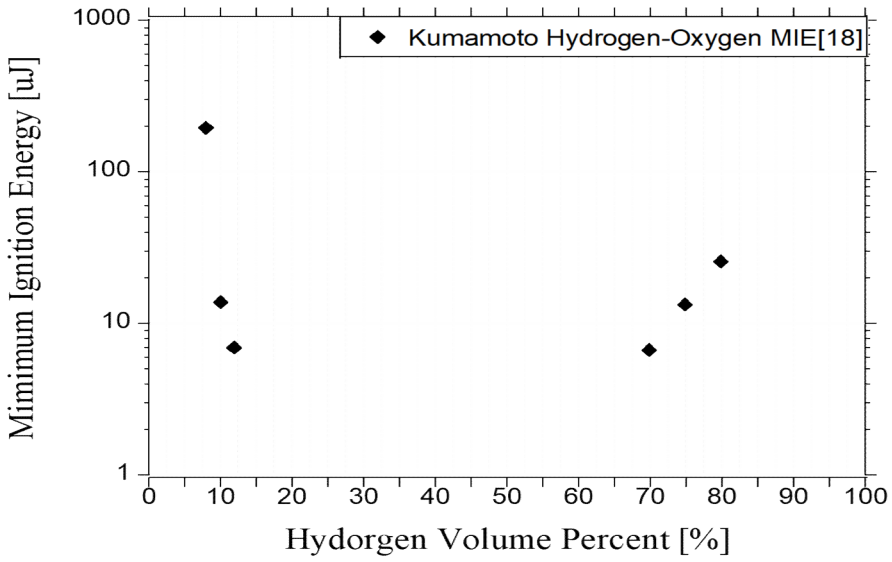


Figure 1.7 Kumamoto's MIE of Hydrogen-Oxygen combustible mixture [18]

캐패시터를 활용한 스파크 점화장치로 점화에너지를 측정하기 위해서는 식 (1.1)의 전압값이 매우 중요하다. 전극봉 사이에서 스파크를 생성하기 위해서는 전극봉에 항복전압 이상의 전압이 인가되어야 한다. 항복전압은 전기 전도성 즉 스파크를 발생시키기 위한 최소 전압이고, Paschen[19]에 의해 정의된 식 (1.2)를 통해 항복전압 V_b는 기체의 압력 P와 전극봉 간격 d의 함수로 설명된다. 아래의 식 (1.2)에서 A(kpa*cm)$^{-1}$는 특정 전기장에서 기체의 포화 이온화이고, B(kpa*cm)는 여기 및 이온화 에너지와 관련된 값이고, A, B는 기체의 조성에 따라 달라지는 상수이다. γ은 2차 전자방출 계수이다.

$$V_{b.\min} = \frac{BPd}{(\ln Pd + C)}$$

$$C = \ln\left[\frac{A}{\ln(1+\Upsilon^{-1})}\right] \qquad (1.2)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 1.8은 Yuxuan Chen[20]이 Paschen's law을 통해 측정한 각 단일 기체의 항복전압을 도시한 그래프이고, Figure 1.9는 kammermann[21]에 의해 측정된 메탄-수소 가연혼합물의 항복전압을 도시한 그래프이다. Figure 1.8 및 Figure 1.9에서 확인할 수 있는 바와 같이 Paschen's law을 통해 단일 기체, 고압 및 저압 조건, 마이크로의 전극봉 간극 조건에서 측정된 항복전압에 관한 연구는 많이 있지만, 대기압 조건에서 수소-산소 가연혼합물의 관점에서 측정된 항복전압에 관한 연구는 미비한 실정이다.

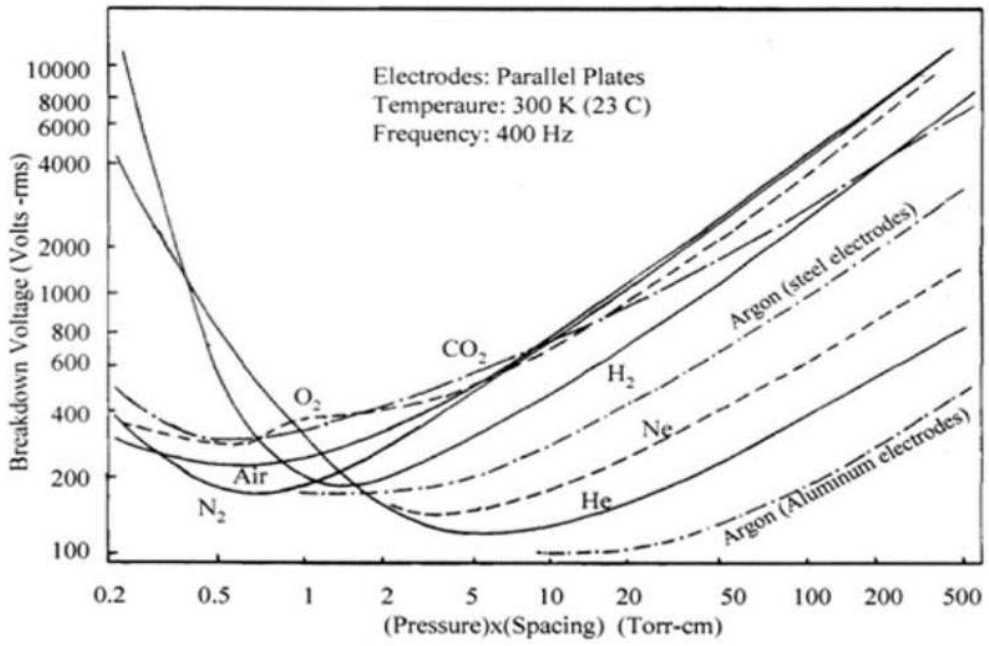
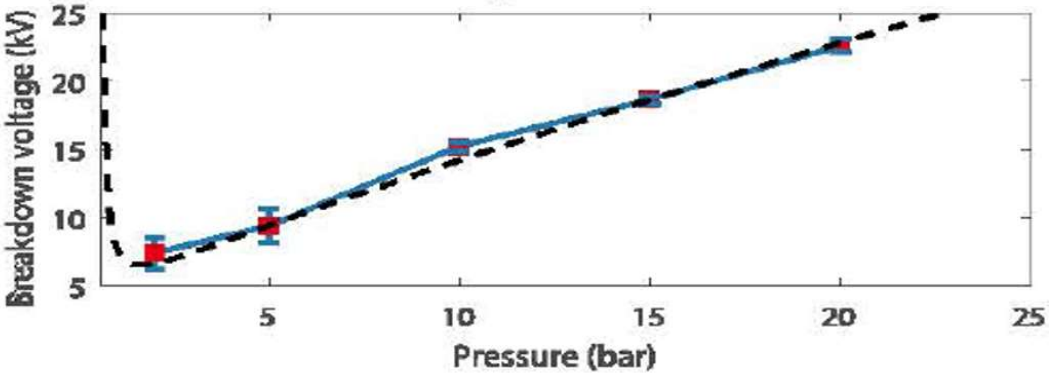
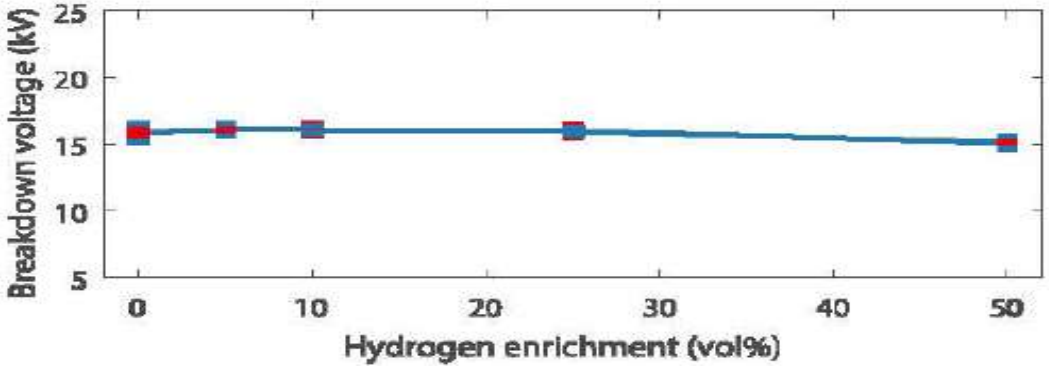


Figure 1.8 Paschen's Curves of different gases [20]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



A) Breakdown Voltage using Paschen's Curve as a function of pressure



B) Breakdown Voltage by Hydrogen volume percentage of Methane-Hydrogen mixture

Figure 1.9 Breakdown Voltage of Methane-Hydrogen Mixture [21]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 본 연구에서는 아래와 같이 크게 3가지의 연구 내용을 토대로 수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지를 측정하였다.

1) 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 스파크 방출특성 및 항복전압 측정

- 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 스파크 지속시간 및 이성분 확산계수와의 상관성 검토
- 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율, 전극봉의 간극, 캐패시터 정전용량 변화에 따른 항복전압 특성 파악

2) 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 점화에너지 측정

- 수소-산소 가연혼합물의 소염거리 측정
- 측정된 수소-산소 가연혼합물의 소염거리를 이용한 최소 점화에너지 계산
- 실측된 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 이용한 확률 기반 최소 점화에너지 추정

3) 본 연구에서 측정된 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지 비교 및 고찰

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 실험 장치 및 방법

2.2 수소-산소 가연혼합물 점화 실험 장치

수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지 측정을 위한 실험 장치는 약 350mL 용량의 정적 연소기, 점화장치, 및 점화 이미지를 가시화하기 위한 쉴리렌 장치로 구성하였다. Figure 2.1은 실험 장치의 모식도이고, Figure 2.2는 실제 실험 장치의 전체적인 모습이다. 점화 및 스파크 이미지를 관찰하기 위한 광학 창(두께 24mm, 직경 120mm, Quartz window)은 정적 연소기의 양 끝단에 장착하였다. 정적 연소기 중앙에서 스파크를 방출하기 위해 두께 2.4mm의 니켈 전극봉을 양 측면에 체결하였고 한쪽의 전극봉에는 간극이 조절될 수 있도록 마이크로미터를 적용하였다.

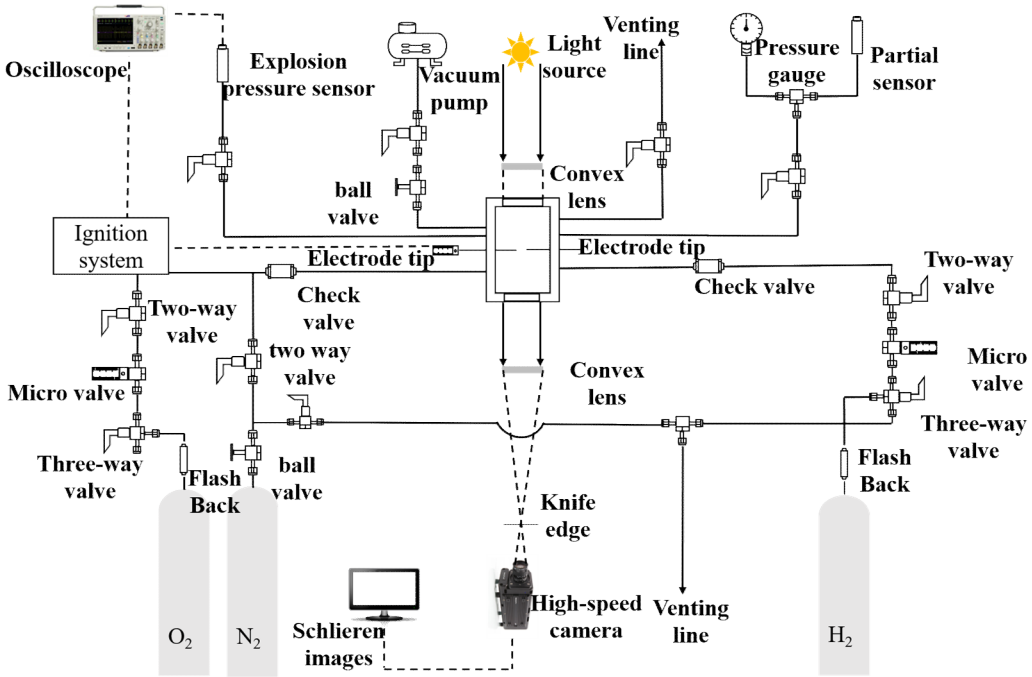


Figure 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus [22]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 2.2 Overall view of the experimental device

점화 및 스파크 이미지를 획득하기 위한 쉴리렌 장치의 구성은 아래의 Figure 2.3와 같이 초고속 카메라(IDT Motion Pro Y4-S4)와 Quartz 텅스텐 할로겐램프 및 직경 75mm, 초점거리 200mm인 Plano Convex Lens 2개를 사용하여 구성하였다. Figure 2.4는 스파크를 발생시키기 위한 CDI 점화장치의 개략도이다. 캐패시터를 활용한 스파크 점화장치(CDI)는 크게 고전압 파워서플라이(NEOS-H30, 0-15kV DC)와 가변 진공 캐패시터(CVBA-170BC/15-BDH-L, 5-180pF)로 구성하였다. 또한, 스파크 발생 시 측정되는 전압 및 전류의 노이즈 줄이기 위해 회로에 저항 R(99.3Ω)을 직렬로 체결하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

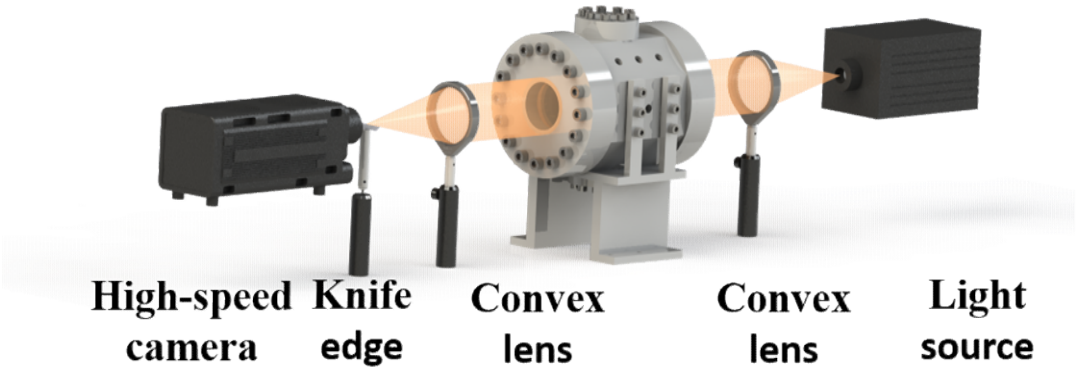


Figure 2.3 Schematic Diagram of Schlieren Device for Ignition and Spark image Acquisition

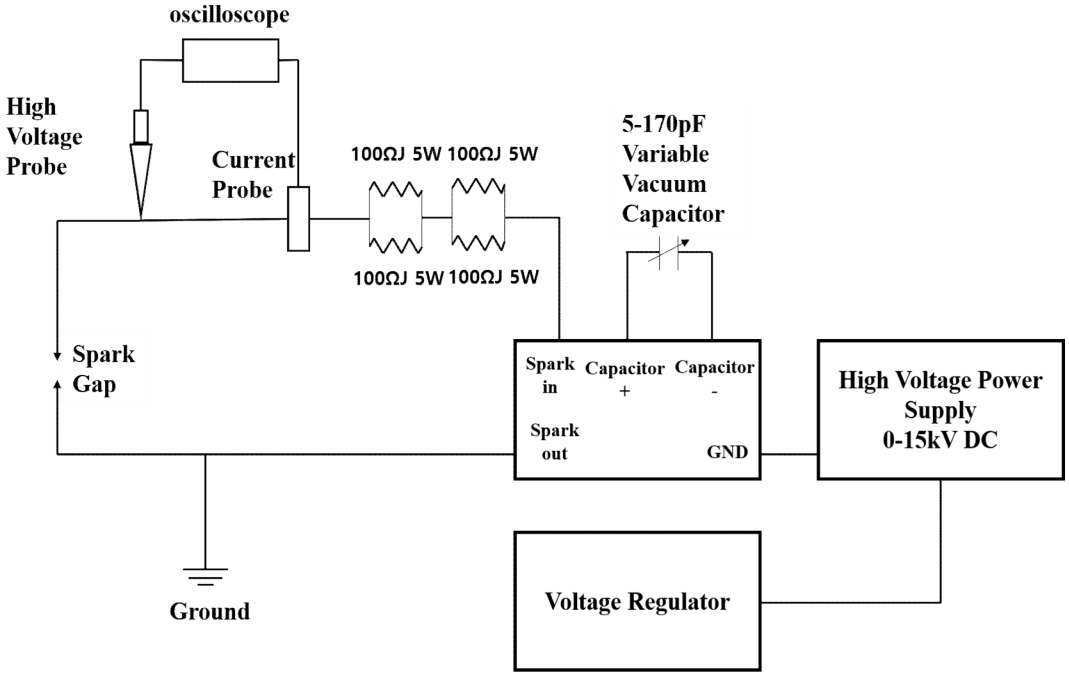


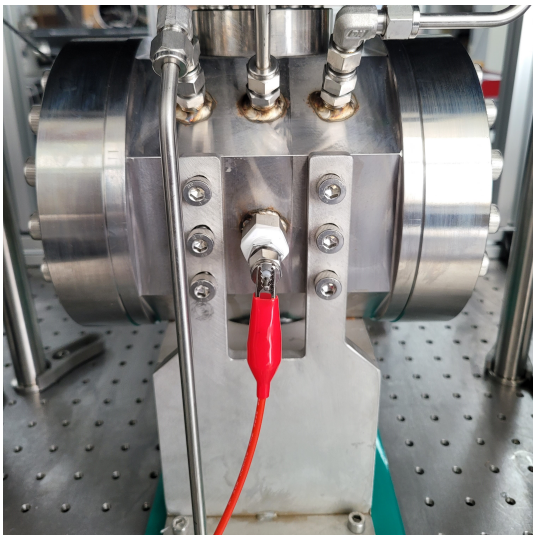
Figure 2.4 Schematic diagram of spark igniter

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

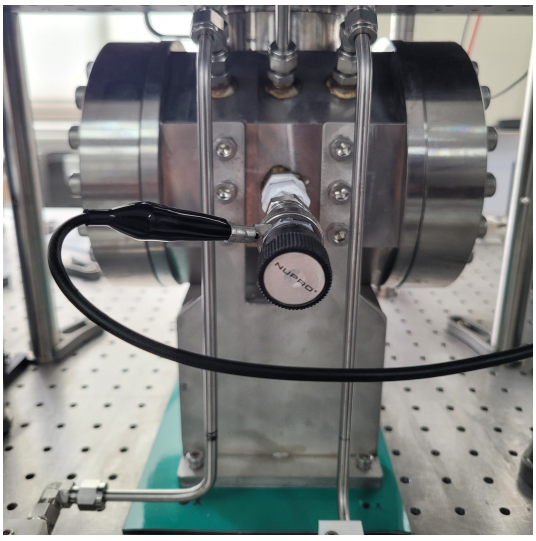
2.2 수소-산소 가연 혼합물 점화 실험 방법

본 연구의 실험 방법은 Figure 2.5의 정적 연소기 및 Figure 2.6의 기체 배관에 존재하는 공기에 의한 오차를 최소화하기 위한 진공펌프를 통해 1차례 진공 작업을 시행하였다. 이후 수소탱크에 연결된 수소 주입 라인에 존재하는 공기의 오차를 최소화하기 위해 불활성 기체(질소) 1bar, 수소 0.5bar를 주입 후 벤팅하였다. 이후 각 배관에 산소 분위기를 형성하기 위해 산소를 3차례 주입 및 벤팅을 반복하였다. 실험은 대기압에서 진행하였고 수소-산소 가연혼합물의 수소와 산소 가스의 체적백분율은 돌턴의 분압 법칙을 적용한 식 (2.1)을 통해 계산하였다. −1 ~ 20bar까지 측정할 수 있는 정밀 압력센서(PHP C0020BACT)와 소수점 둘째짜리까지 측정할 수 있는 Digital Indicator(SC-5000)를 사용하여 계산된 분압까지 수소 및 산소 가스를 주입하여 실험 조건을 설정하였다. 식(2.1)에서 P_{H2}, Po_2는 각각의 수소와 산소의 분압이다.

$$X_{mixture} = \frac{P_{H_2}}{P_{H2} + P_{O_2}} \tag{2.1}$$



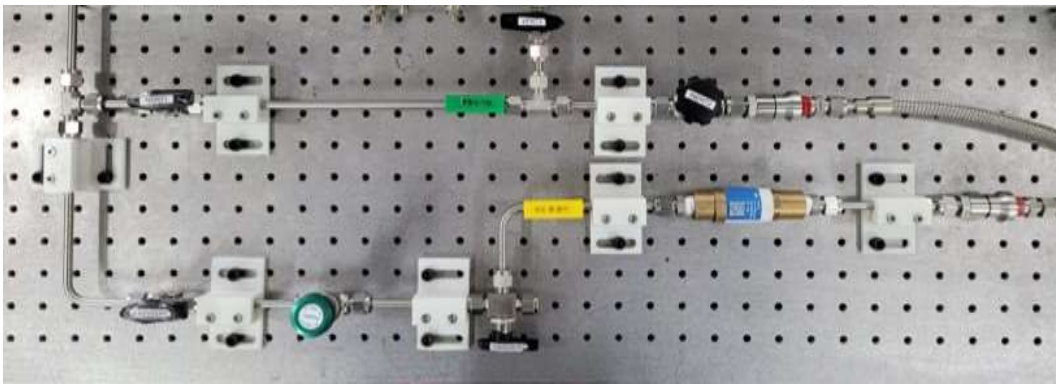
A) Anode of Coupled electrode of static burner



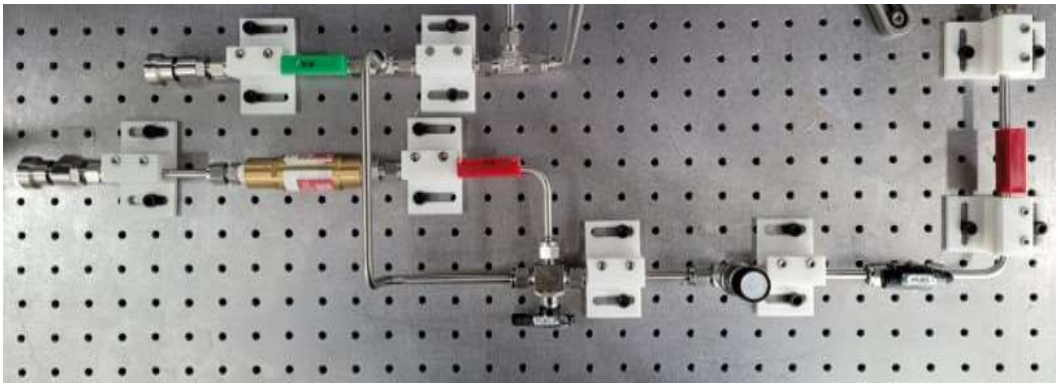
B) Cathode of Coupled electrode of static burner

Figure 2.5 Front and back of the static combustor to be used in the experiment

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



A) Oxygen and Nitrogen injection line



B) Hydrogen injection line

Figure 2.6 Gas injection line to be used in the experiment

수소와 산소 주입 후 수소-산소 가연혼합물의 성층화를 방지하기 위해 10분의 대기시간을 두었고, 10분의 대기시간 동안 전극봉의 간극 설정 및 캐패시터 정전용량을 설정하였다. 본 연구에서는 전극봉의 간극 변화에 따른 수소-산소 가연혼합물의 항복전압 및 소염 거리를 측정하여 점화에너지를 계산하였다. Potter[23]의 선행연구에 따르면 소염 거리는 폭발성 가스 혼합물에서 발생하는 층류화염이 두 평행한 표면 사이의 공간 즉 전극봉의 거리에 따른 화염 소멸을 의미한다. Potter[23]의 선행연구에 설명된 다양한 혼합물의 소염 거리는 Table 2.1에 정리하였다. Table 2.1에서 수소-산소 가연혼합물의 소염 거리는 0.1 ~ 0.3mm 사이의 값을 갖는 것으로 보고된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2.1 Quenching distance of various combustible mixtures [23]

Flame system	Quenching distance d(mm)
Hydrogen-air	0.64, 0.50, 0.53, 0.06
Hydrogen-oxygen	0.19, 0.23, 0,34
Methane-air	2.5, 2,4 2,16
Methane-Oxygen	0,3

따라서 본 연구의 간극 설정은 Table 2.1에 정리되어있는 수소-산소 가연혼합물의 소염 거리를 확인하기 위해 약 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.7mm 조건에서 실험을 진행하였고, 설정한 간극 조건별 항복전압을 측정하였다. 쉴리렌 장치를 통해 획득한 전극봉 이미지로 MATLAB의 Image Processing Tools 및 Matrox inspector의 Line Profile Tool을 비교하여 전극봉의 간극을 분석하였다. Figure 2.7은 마이크로미터 기준으로 0.008inch일 때 전극봉 간극의 쉴리렌 이미지를 Matrox inspector의 line profile tool을 통해 분석한 결과이다. 이미지 분석 결과 전극봉 간격의 Pixel은 X_1, X_2의 좌표가 각각 337, 339로 차이값은 2로 확인되었다. 이를 비교하기 위해 각각의 전극봉 간격 조건에서 MATLAB의 Image Processing Tool을 활용하여 이미지 분석한 결과는 Table 2.2에 정리하였고, 비교 결과 각각의 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 얻은 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

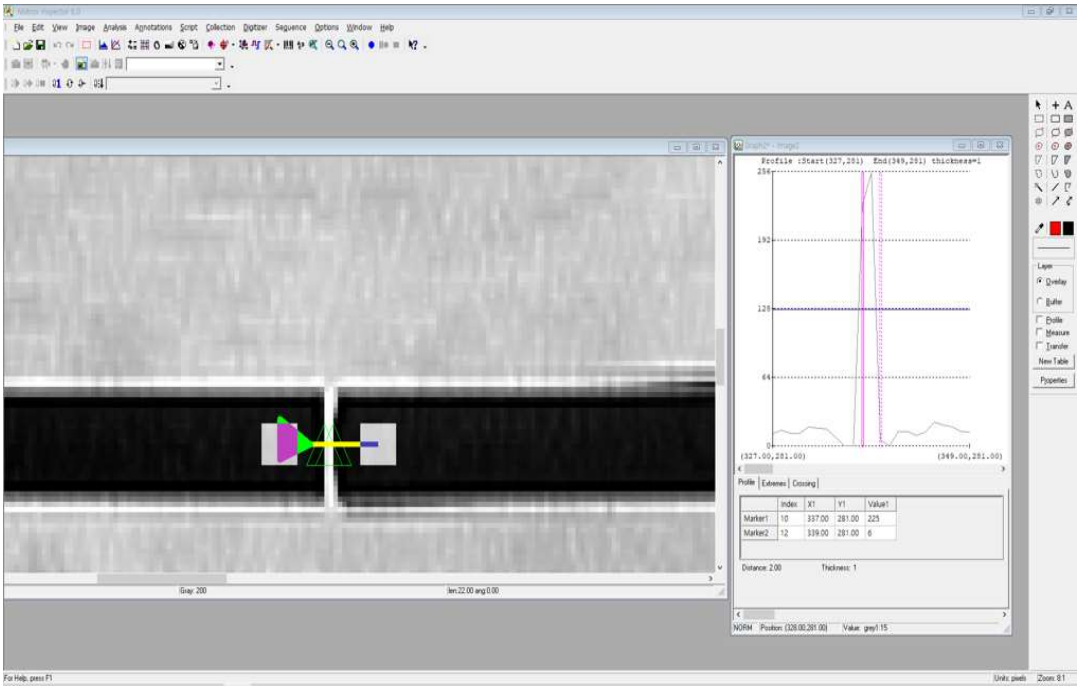


Figure 2.7 Electrode image analysis through gap 0.2mm Matrox

Table 2.2 Electrode image analysis through MATLAB

electrode thickness Y_1	electrode thickness Y_2	electrode Pixel Y_2-Y_1	Gap distance X_1	Gap distance X_2	electrode Pixel X_2-X_1	Gap distance (mm)
269.5	293.5	24	337.5	338.5	1	0.1
269.5	293.5	24	337.5	339.5	2	0.2
269.5	293.5	24	337.5	340.5	3	0.3
269.5	293.5	24	337.5	341.5	4	0.4
269.5	293.5	24	337.5	343.5	6	0.6
269.5	293.5	24	337.5	344.5	7	0.7

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전극봉의 간극을 설정한 후 캐패시터의 정전용량에 따른 항복전압 및 점화에너지에 미치는 영향을 확인하기 위해 본 연구에서는 캐패시터 정전용량(50pF, 100pF, 150pF)의 조건에서 실험을 진행하였다. 캐패시터 정전용량 설정 후 스파크가 발생할 때까지 전극봉에 전압을 승압해가며 인가하였다. 항복전압에 도달하여 스파크 발생 시 전압은 High Voltage Probe (P5102, max peak 20kV, 1V : 1000V), 전류는 Current Probe (CT-D1.0, max peak 1000A, 1A/1V)를 통해 오실로스코프(Tektronix DP4104)에 연결하여 측정하였다. Figure 2.8은 오실로스코프에 의해 측정된 전압 및 전류 파형이고, 파형 1은 전압값, 파형 2는 전류값이다.

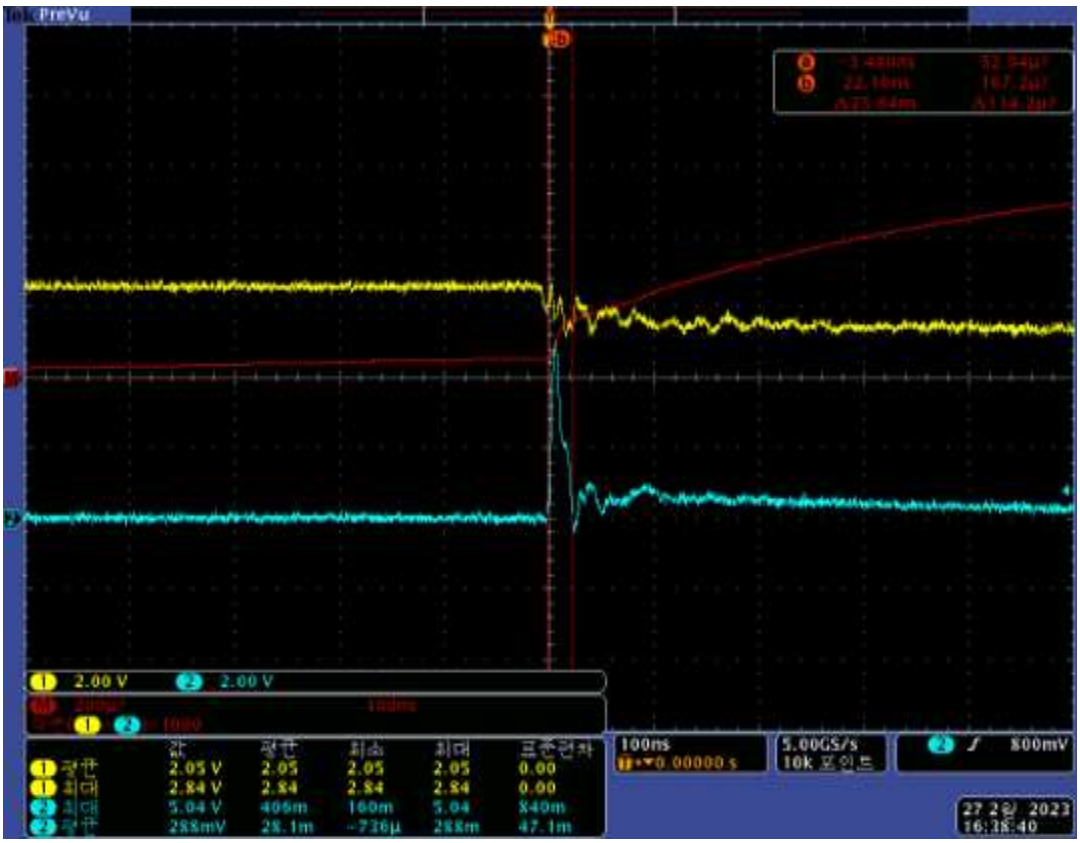


Figure 2.8 Oscilloscope Voltage current waveform

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화에너지는 오실로스코프 Math 기능을 활용하여 Figure 2.8의 오실로스코프에 측정된 전압 및 전류 파형을 시간에 따라 적분하여 점화에너지를 측정하였다. 오실로스코프의 Math 기능 설정은 식 (2.2)와 같다.

$$E_1 = \int VI(t)dt \tag{2.2}$$

본 연구에서 식 (2.2)를 통해 측정된 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 선행연구자별 스파크 점화에너지 계산식으로 비교하였다. 서론에서 설명한 식 (1.1)은 Lewis와 Von-Elbe[8]의 CDI 점화장치를 활용하여 점화에너지를 계산하는 식이다. 식 (1.1)의 점화에너지는 캐패시터 정전용량과 항복전압을 통해 구해진다. 항복전압은 Figure 2.8에 측정된 전압 파형에서 전압강하가 발생하기 전 전압값을 의미한다. 식 (1.1)를 통해 계산된 점화에너지는 캐패시터에 충전된 에너지가 모두 방전되었을 때 즉 전압 파형을 기준으로 0V로 떨어졌을 때의 점화에너지값을 의미한다.

그러나 스파크 점화장치 특성상 캐패시터에 충전된 에너지가 모두 방전되지 않고 캐패시터에 일부 저장된 상태로 존재하면 충전된 에너지에서 방전하고 남은 일부 에너지의 차이를 고려하여 계산해야 한다[24.25]. 이러한 에너지의 차이는 전압값의 차이를 통해 구할 수 있다.

$$E_3 = \frac{1}{2}C(V_b^2 - V_r^2) \tag{2.3}$$

여기서 V_r은 방전 후 캐패시터에 남아있는 전압값을 의미한다. 또한, Ono[25]의 선행연구에서 점화에너지 계산방식은 캐패시터의 방전된 에너지 값과 방전 후 남아있는 에너지와 더불어 회로에 연결된 저항이 소비하는 에너지 값을 고려하여 식 (2.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_4 = E_2 - E_r - E_R \tag{2.4}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (2.4)에서 E_2, E_r, E_R은 각각 식 (1.1)의 에너지, E_r는 캐패시터의 잔여 에너지, 회로에 연결된 저항이 소비하는 에너지값을 의미한다. E_r 및 E_R은 식 (2.5) 및 식 (2.6)을 통해 계산할 수 있다[25]. 식 (2.5)의 Q는 전하량, I는 회로에 흐르는 전류를 의미한다. 또한, 식 (2.6)의 R은 회로에 연결된 저항값을 의미한다.

$$E_r = \frac{Q^2}{2C}$$
$$Q = CV_b - \int I(t)dt \quad (2.5)$$

$$E_R = \int RI^2(t)dt \quad (2.6)$$

본 연구의 점화 회로에는 노이즈를 줄이기 위한 99.3Ω의 저항이 직렬 연결되어 있고, Figure 2.8의 전압 파형을 통해 전압값이 0V로 방전되지 않고 일부 남아있는 것을 확인하였다. 따라서 항복전압과 방전 후 남은 전압의 차이 및 저항에 의한 에너지손실을 고려하여 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지값을 식 (2.4)로 계산하였고, 식 (2.2)를 통해 측정된 점화에너지와 비교하였다. Figure 2.9는 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율(80%)에서 식 (2.2)와 식 (2.4)를 통해 측정한 점화에너지를 비교한 그래프이다. 비교 결과 식 (2.4)를 통해 계산된 점화에너지와 오실로스코프를 통해 측정된 점화에너지는 다소 오차가 존재하였지만 앞서 설명한 점화에너지 계산식 중 가장 유사한 것으로 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 오실로스코프로 측정된 점화에너지값을 사용하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

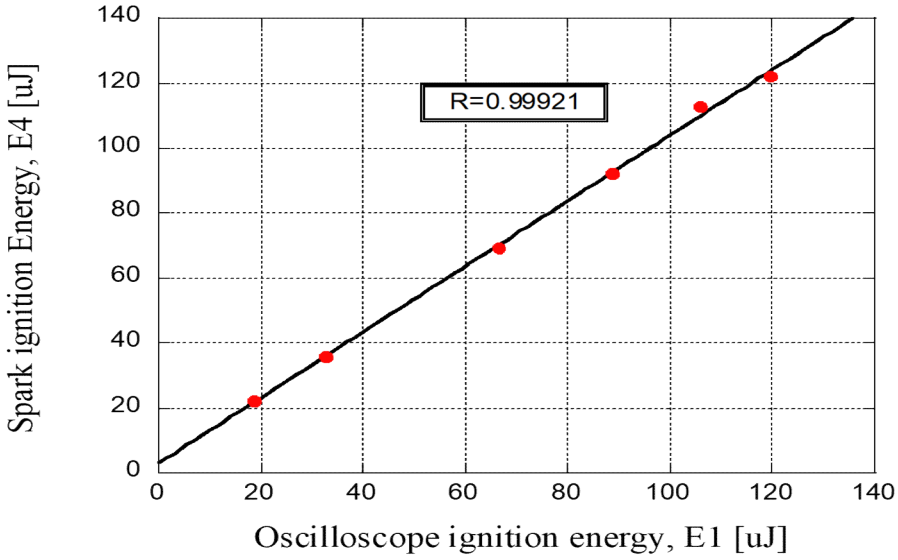


Figure 2.9 Oscilloscope Ignition Energy Spark Ignition Energy Eq(2.4) Comparison

전압, 전류 및 점화에너지 측정과 동시에 스파크 발생 후 전극봉 사이에서 점화핵(Ignition Kernel)이 생성되어 구형 전파가 시작된다. 점화 이미지는 앞서 언급한 쉴리렌 장치와 초고속 카메라의 설정값(FPS: 15,800 frame 및 Exposure: 2 μs)을 통해 획득하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3장 실험 결과 및 고찰

3.1 수소-산소 가연혼합물의 점화 시 스파크 방출특성

본 연구에서는 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 측정하기 전 점화를 시키기 위한 점화원인 스파크의 방출특성을 확인하였다. 두 전극봉의 전압 차이로 인해 발생하는 전기장은 전기장 내부의 전자를 가속화 한다. 가속화된 전자는 충돌하게 되고 이때 발생 되는 충돌에너지가 이온화 포텐셜을 초과하면 분자는 이온화된다. 위의 과정을 통해 형성된 전자는 시드 전자라고 불리며 전자사태를 통해 분기 성장함과 동시에 밝은 빛을 방출하는 전도성 채널 즉 스파크를 형성하게 된다[22].

Figure 3.1.1은 전자사태에서 전도성 채널로 전환되는 형상을 도시하였다. 스파크는 열 및 질량 확산을 통해 주변으로 에너지를 전달하고 점화 반응을 유도한다. 스파크는 사전 항복단계, 항복단계, 아크 단계, 글로우 단계의 상 변이과정을 통해 형성되고 소멸하게 된다. Figure 3.1.2는 Carlos Javier[26] 및 Yang[27]의 선행연구에서 설명한 스파크 방출특성의 상 변이과정을 전압 및 전류의 파형을 통해 나타낸 그래프이다. 전자사태의 결과로 양극에서 고도로 이온화되고, 스트리머 성장은 양극에서 음극으로 향하게 된다. 스트리머가 음극에 도달하면 전도성 채널이 형성되고 사전 항복단계가 시작된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

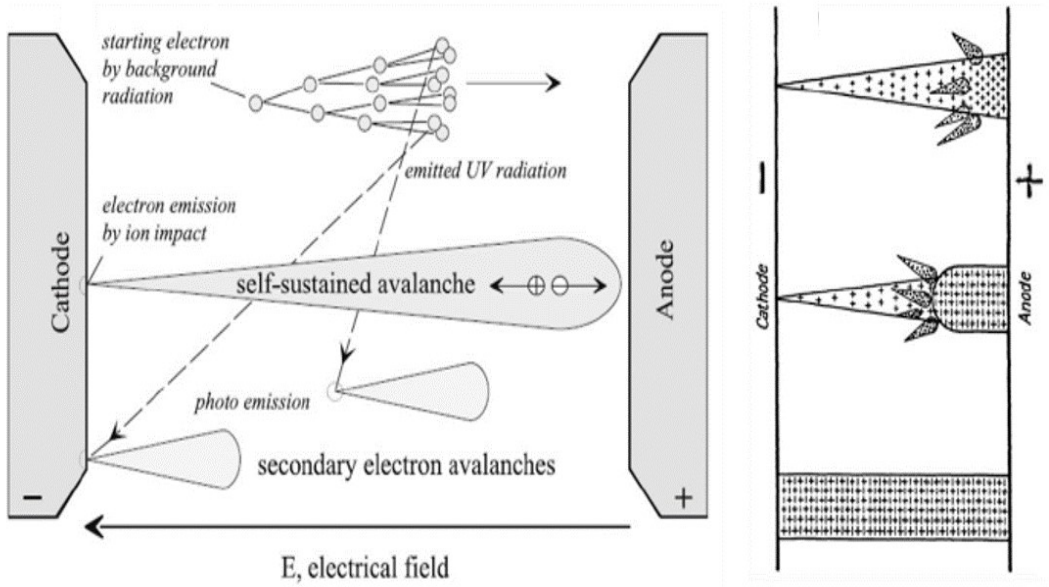


Figure 3.1.1 Schematic Diagram of spark formation generated through electron avalanche and streamer propagation [26]

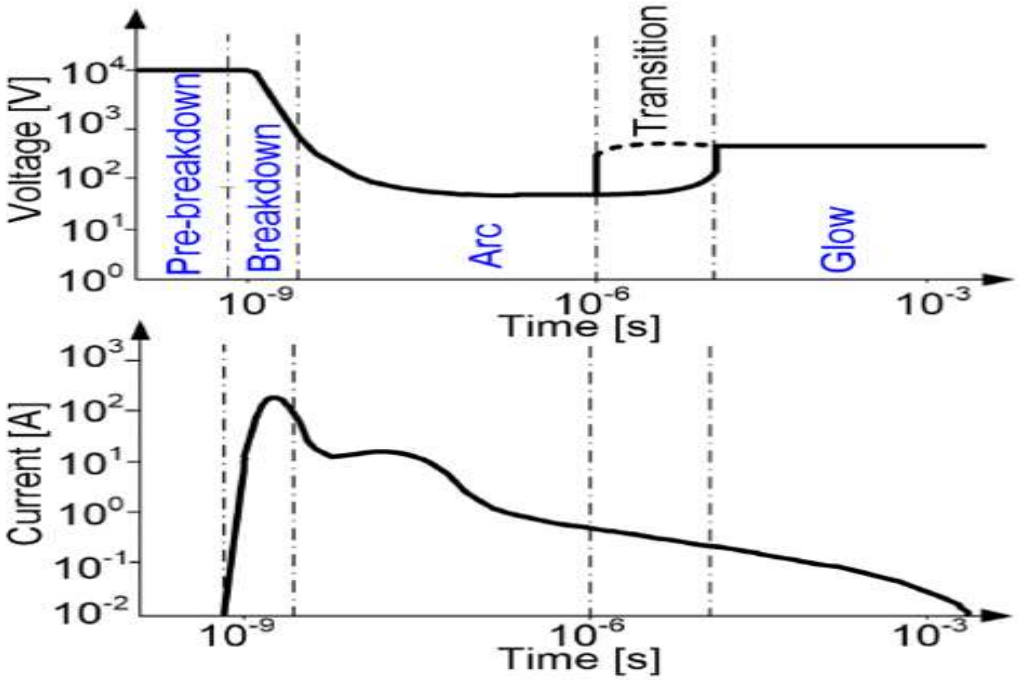


Figure 3.1.2 Spark emission Characteristics through voltage and current waveforms [26,27]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

사전 항복단계는 두 전극봉 사이에서 이온화가 시작되고, 전자사태와 스트리머 성장을 통해 플라즈마 채널이 성장하는 단계이다[26].

사전 항복단계 후 발생하는 항복단계는 전극봉 사이에서 완전히 이온화가 된 이후 전압 차에 의해 캐패시터에 저장된 에너지가 고온 고압의 전도성 채널을 통해 방전된다. Figure 3.1.2의 그래프에서 보이는 것과 같이 전압은 수 kV ~ 수백 V로 떨어지는 전압강하가 발생한다. 앞서 설명한 바와 같이 전압강하가 발생하기 직전의 전압은 항복전압이고, 항복전압은 혼합가스의 특성과 전극봉의 간격에 따라 달라진다. 전압강하와 동시에 전류는 상승하게 된다. 항복단계 과정은 수십ns의 시간으로 매우 빠르게 일어난다[26,28].

이후, 최대치까지 상승했던 전류가 점차 줄어들기 시작하면서 아크 단계로 넘어간다. 아크 단계는 열전도 및 질량 확산을 통해 전도성 채널이 팽창하며 음극의 표면에서 밝은 빛을 방출함과 동시에 전압 차이로 인해 발생 되는 에너지를 전달하는 단계이고, 아크 단계 동안 이온 포화도는 0.1%로 감소하게 된다. Figure 3.1.2에 도시된 그래프의 전류 파형은 최대값에서 점차 감소하였고, 전압의 파형은 전압강하 이후 낮은 전압으로 유지되다가 이후 전압이 상승하는 구간에서 글로우 단계로 넘어가게 된다. 또한, 아크 단계의 경우 수 μs로 지속된다[22.26].

스파크의 상 변이과정 중 마지막 단계인 글로우 단계는 전자가 이온 충격에 의한 전자를 방출하여 전도성 채널을 유지하는 단계이다. 전도성 채널을 유지하기 위해서는 아크 단계의 전압보다 높은 전압이 필요하므로 다소 상승하게 된다. 전류는 아크 단계보다 점차 낮아지면서 0으로 수렴하고 동시에 이온 포화도는 0.01%까지 감소하여 에너지 전달이 종료된다[26,29].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

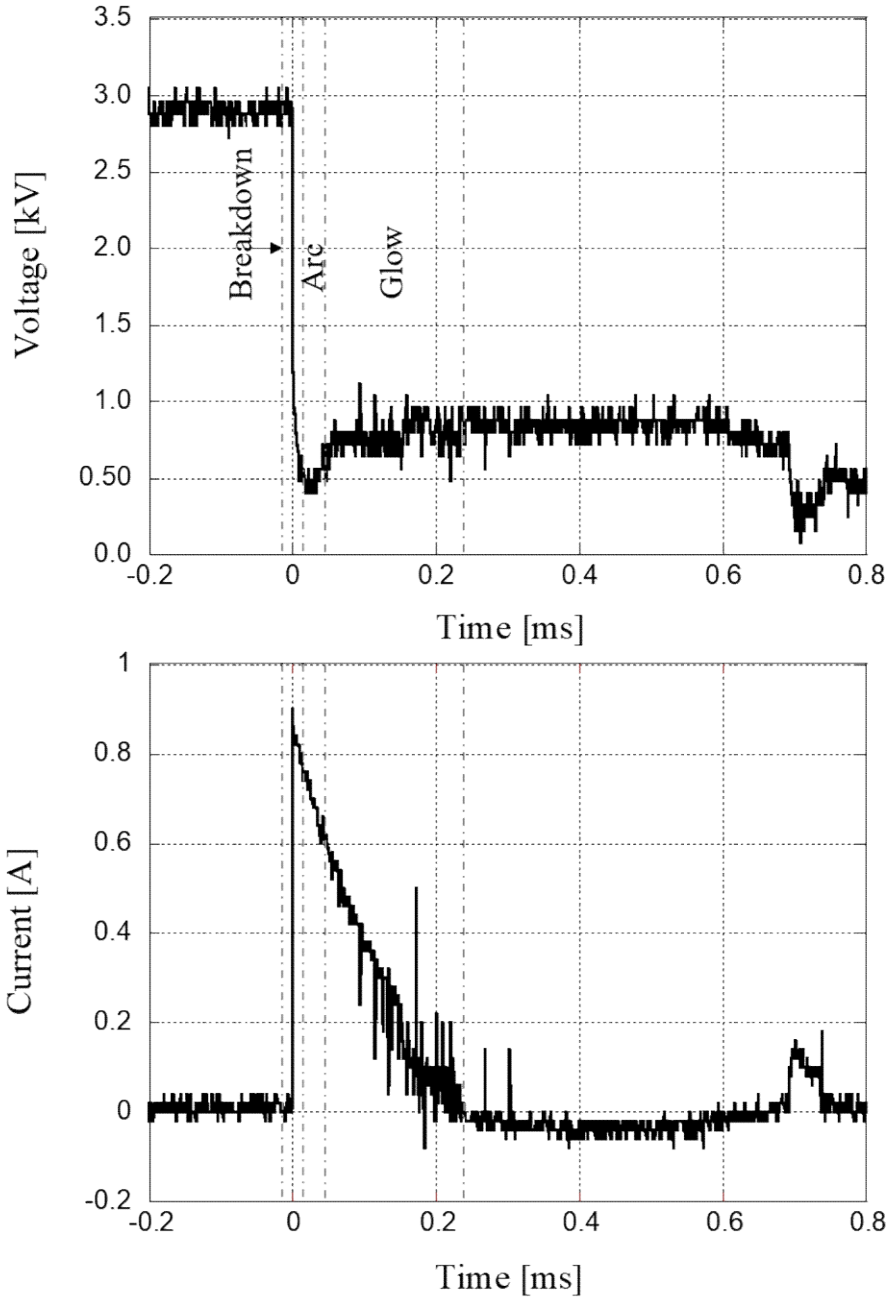


Figure 3.1.3 Measured voltage and current during spark formation period [22]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

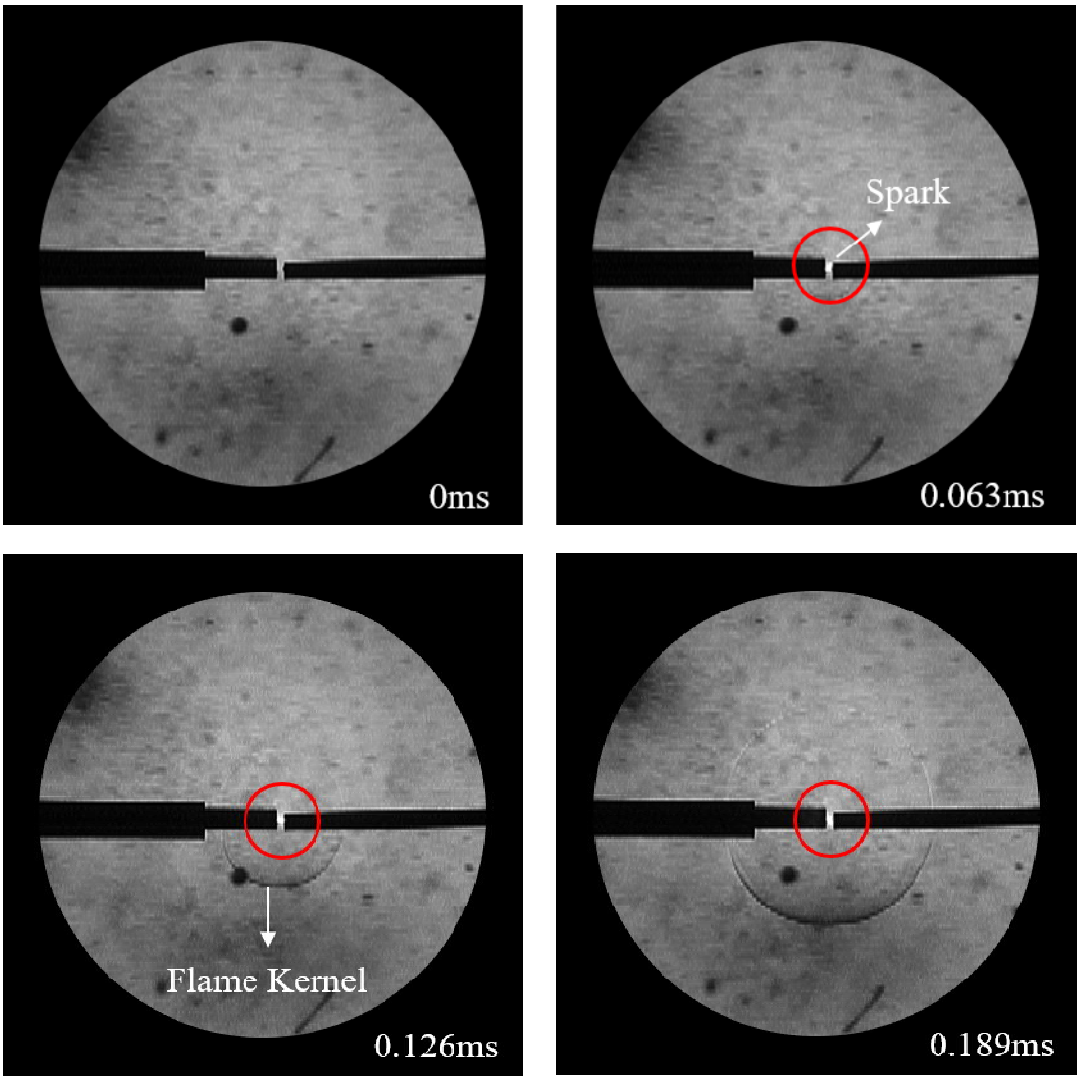
본 연구에서는 앞서 설명한 스파크 방출특성을 수소-산소 가연혼합물의 스파크 점화 시 측정되는 전압과 전류의 그래프를 통해 확인하였다. Figure 3.1.3은 Kim[22]의 수소-산소 가연혼합물 스파크 점화 시 측정된 전압 및 전류 그래프이다. Figure 3.1.3에서 전압 및 전류 파형의 항복단계는 전압강하가 이루어지는 지점을 기준으로 약 0.007ms 동안 지속되었다. 앞서 언급한 Figure 3.1.2의 스파크 방출특성 중 항복단계의 특성과 비교한 결과 본 연구의 항복단계 특성과 유사한 것을 확인하였고, Figure 3.1.2의 항복단계 지속시간보다는 짧게 지속되었다. 이후 아크 단계로 전환된다.

아크 단계는 항복단계 종료 지점을 기준으로 약 0.043ms 동안 이루어졌고, 이 구간 역시 Figure 3.1.2의 아크 단계 지속시간보다 매우 짧게 지속된 것을 확인하였다. Figure 3.1.2의 아크 단계에서 전압 파형은 점차 하강하다가 다시 증가하는 형태를 보이고, 전류 파형은 계속 감소하였다. 본 연구에서 측정한 Figure 3.1.3의 전압, 전류 파형 역시 비슷한 경향을 보였다. 아크 단계 이후 마지막 단계인 글로우 단계로 전환된다.

글로우 단계는 전류 파형을 기준으로 아크 단계 종료 시점부터 0이 되는 지점을 끝으로 약 0.2ms 동안 지속되었다. 본 연구에서 측정된 전압 파형 역시 아크 단계보다 높은 전압값이 확인되었다. 전류 파형은 아크 단계에 비해 점차 감소하면서 0으로 수렴하는 결과를 보였다. Figure 3.1.2의 파형과 Figure 3.1.3의 파형 형태는 비교적 유사했으며 각 구간의 지속시간에는 차이가 있었다. 그 이유는 전극봉의 재질, 두께, 가연혼합물의 차이 및 캐패시터의 정전용량 차이가 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다.

또한, 아크 단계와 글로우 단계 경우 스파크가 발생 되고 소멸하는 단계 즉 스파크의 지속시간에 해당하고, Figure 3.1.3의 전류 파형에서 아크 단계 및 글로우 단계의 지속시간은 약 0.25ms이다. 이를 쉴리렌 장치를 통해 획득한 스파크의 지속시간과 비교하였다. Figure 3.1.4는 Figure 3.3.3의 전류 파형 측정 시 초고속 카메라로 촬영된 점화 이미지이다. 쉴리렌 이미지는 0.063ms 간격으로 0.443ms까지 측정하였으며, 쉴리렌 이미지 중 스파크 형상은 붉은색 원으로 표시하였다. 스파크 발생 후 점화 핵은 0.126 ~ 0.443ms까지 형성되었고, 스파크 지속시간은 0.063 ~ 0.316ms까지 약 0.253ms 동안 지속되었다. 전류 파형의 스파크 지속시간과 쉴리렌 이미지로 관측된 스파크의 지속시간을 비교했을 때 일치하는 것을 확인하였다[22].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

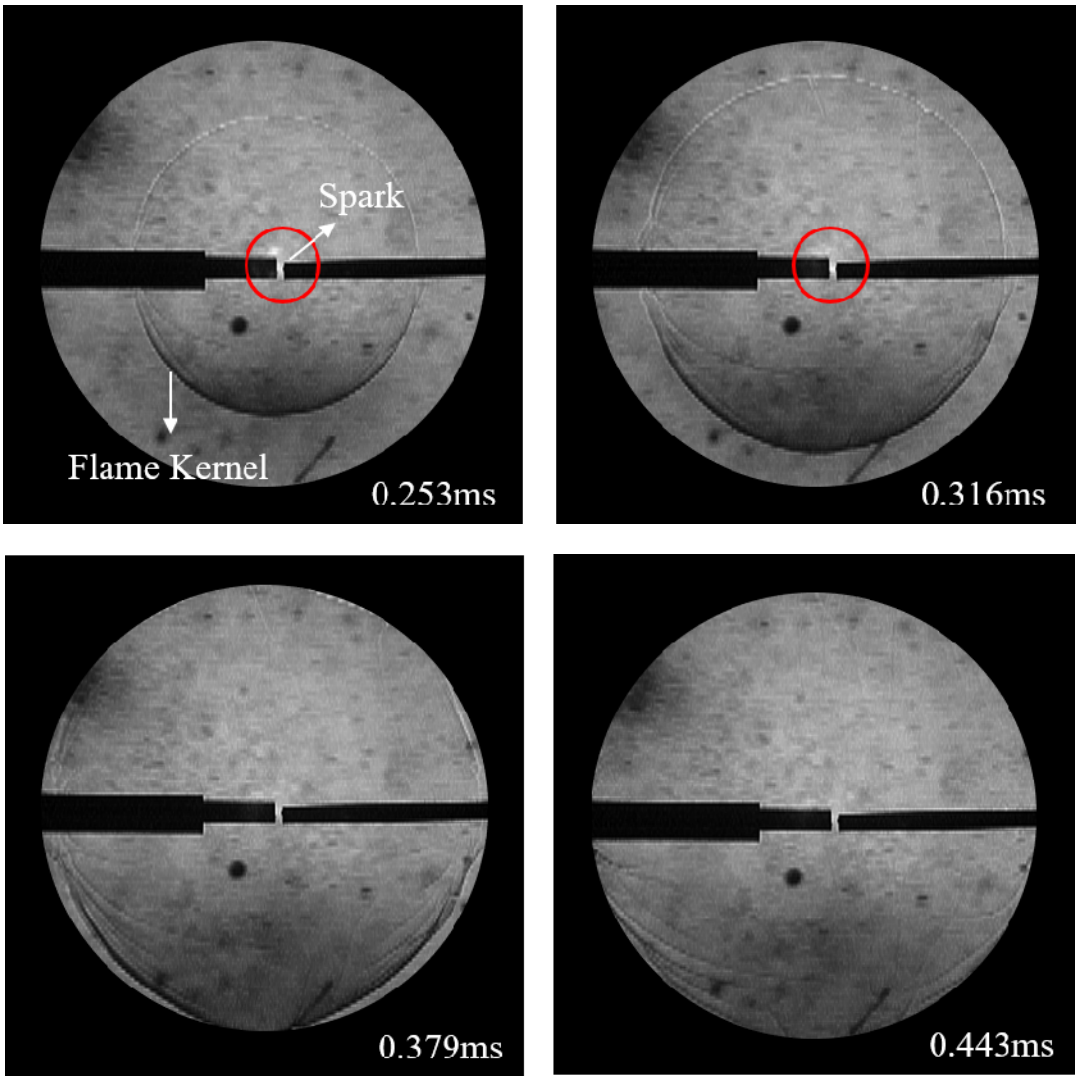
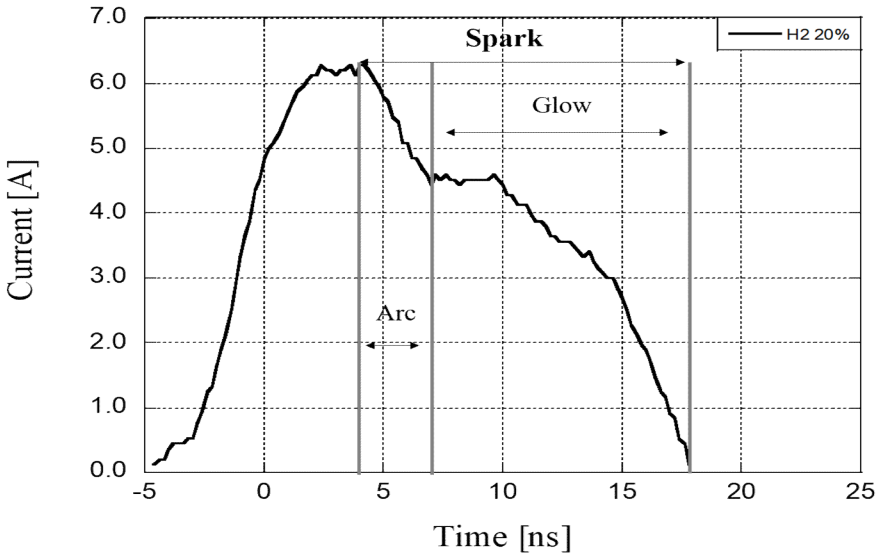


Figure 3.1.4 Image of spark kernel and flame developments [22]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

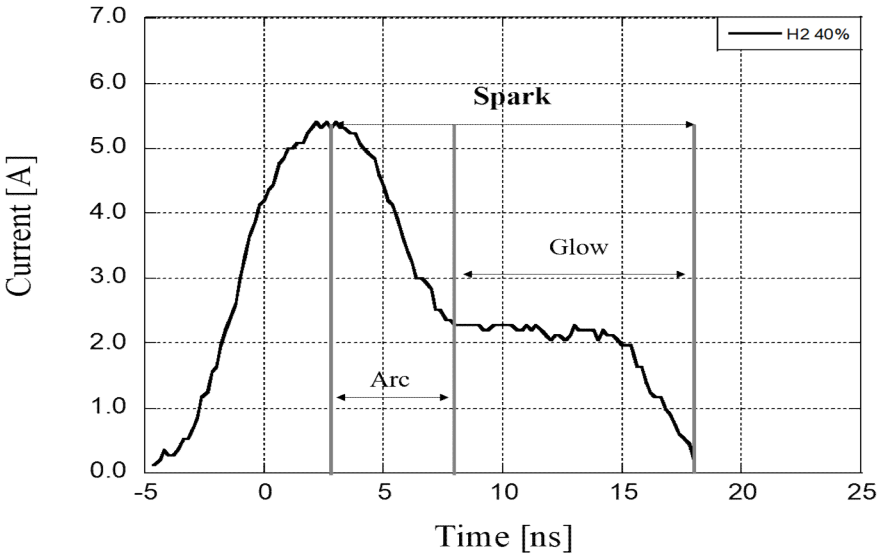
3.2 수소-산소 가연혼합물의 이성분 확산 계수

스파크 방출특성의 각 단계 특징 중 아크 및 글로우 단계 즉 스파크의 지속시간을 수소 체적백분율에 따라 확인하였다. Figure 3.2.1은 간극(0.3mm) 및 캐패시터 정전용량(100pF) 조건에서 수소 체적백분율 20%, 40%, 60%, 80%일 때 스파크 발생 시 측정한 전류 파형이다. 각각의 전류 파형에 아크, 글로우 단계를 표기하였고, 수소 체적백분율이 증가할수록 아크 및 글로우 단계 즉 스파크 지속시간이 13.6, 15, 16, 16.8ns 순으로 증가하였다. 따라서 본 연구에서는 수소 체적백분율에 따른 스파크 지속시간의 차이를 스파크 채널 내 이온종의 확산, 즉 이성분 확산 계수(binary diffusivity)와의 상관성을 통해 확인하였다.

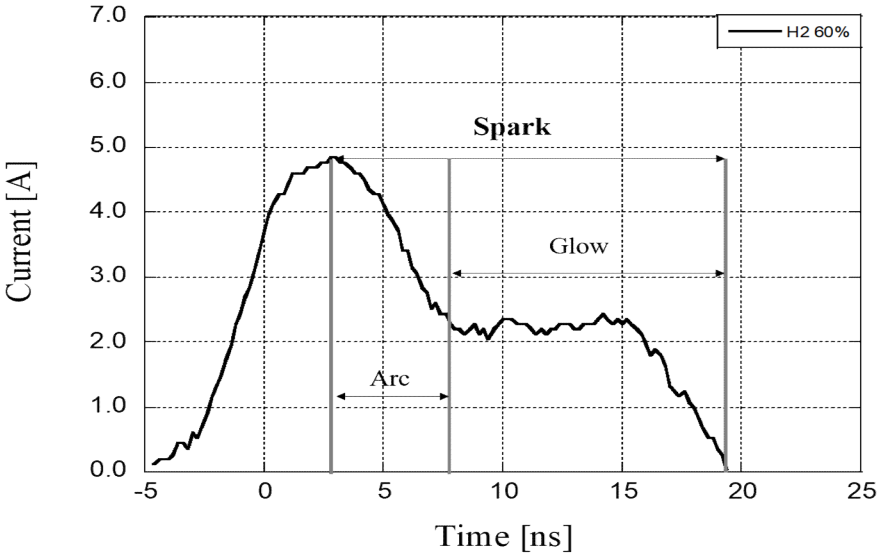


A) Measured current at Hydrogen volume percent 20%

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

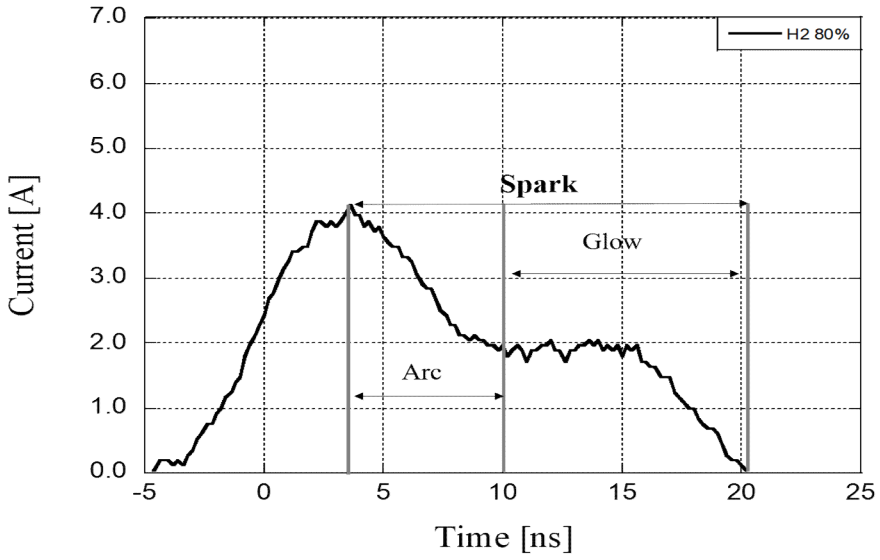


B) Measured current at Hydrogen volume percent 40%



C) Measured current at Hydrogen volume percent 60%

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



D) Measured current at Hydrogen volume percent 80%

Figure 3.2.1 Arc, Glow in the current waveform by hydrogen volume percent

이성분 확산 계수는 확산에 대한 Fick's law에 등장하는 혼합물의 성질 중 하나이다[30,31]. Fick's law는 하나의 화학종이 다른 화학종으로 확산되는 속도를 말하며, 질량을 기준으로 표현된 Fick's law는 아래의 식 (3.2.1)과 같다[30,31].

$$\dot{m}''_A = Y_A(\dot{m}''_A - \dot{m}''_B) - \rho D_{AB}\frac{dY_A}{dx} \qquad (3.2.1)$$

$\dot{m}''_A$는 A 화학종의 질량 플럭스, $\dot{m}''_B$는 B 화학종의 질량 플럭스, Y_A는 A 화학종의 질량 분율, ρ는 밀도, D_{AB}는 이성분 확산 계수이다. 식 (3.2.1)의 첫 번째 항은 평균 유동에 의한 것이고 두 번째 항은 확산에 의한 것이다. 따라서 확산에 의한 두 번째 항을 기준으로 화학종 A의 확산에 의한 플럭스 $\dot{m}''_{A.diff}$는 식 (3.2.2)와 같이 표현할 수 있다[30,31].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\dot{m}''_{A.diff} = -\rho D_{AB}\frac{dY_A}{dx} \quad (3.2.2)$$

식 (3.2.2)에서 화학종 A의 확산 플럭스는 질량 분율의 구배에 비례하고, 비례상수는 -ρD_{AB}로 표현된다. 식 (3.2.2)에서 화학종 A는 농도가 높은 곳에서 농도가 낮은 곳으로 이동한다. 이는 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 것과 비슷한 현상이다. 비례상수 앞에 음의 부호는 농도의 구배가 음의 부호를 가질 때 플럭스가 양이 되도록 하기 위한 것이다[30,31]. 따라서 본 연구에서는 수소-산소 가연혼합물에 관하여 Fick's 확산 법칙에 비례상수인 이성분 확산 계수를 구하였다.

이성분 확산 계수[31]는 근본적으로 온도에 비례하고 압력에 반비례하며, 혼합물의 조성에는 무관하지만, 압력과 온도가 일정한 조건에서 이성분 확산 계수는 혼합물 조성에 따라 차이가 발생할 것이라고 예상할 수 있다. 이성분 확산 계수(D_{AB})는 식 (3.2.3)에서 본 연구의 가연혼합물인 수소와 산소를 기준으로 A는 H_2, B는 O_2로 D_{H2O2}로 표현할 수 있다. 이성분 확산 계수는 아래의 Svehla[32] 및 Reid[33] 등에 의해 제안된 식 (3.2.3)을 통해 계산하였다.

$$D_{H2O2} = \frac{0.0266\,T^{\frac{3}{2}}}{PMW_{H2O2}^{\frac{1}{2}}\sigma_{H2O2}^{2}\Omega_D} \quad (3.2.3)$$

식 (3.2.3)에서 T(K)는 절대온도, P(pa)는 압력이며, 압력은 대기압 조건이고 온도는 실험 시 측정한 온도를 대입하였다. MW_{H2O2}는 수소 산소 혼합 분자량이며, 수소 분자량 2.016g/mol 및 산소 분자량 32g/mol을 각 기체의 체적백분율을 곱하여 식 (3.2.4)로 계산하였다. σ_{H2O2}(Å)는 수소, 산소의 강구 충돌 지름이며, 수소의 σ_{H2}는 2.827Å, 산소의 σ_{O2}는 3.467Å이고 식 (3.2.5)에 대입하여 계산하였다[30].

$$MW_{H2O2} = X_{H2}MW_{H2} + X_{O2}MW_{O2} \quad (3.2.4)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\sigma_{H2O2} = (\sigma_{H2} + \sigma_{O2})/2 \tag{3.2.5}$$

Ω_D는 충돌 적분의 무차원 양이며, Ω_D는 식 (3.2.6)의 상숫값 및 무차원 온도 T^*를 대입하여 계산하였으며, 계산에 사용된 각각의 상숫값은 Table 3.2.1에 정리하였다. 무차원 온도 T^*는 식 (3.2.7)를 통해 계산하였고, K_B는 볼츠만상수, T는 온도, ε_{H2}, ε_{O2}는 Lennard_jones[33] 표기된 에너지값이다. 식 (3.2.3)을 통해 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율에 따라 계산된 이성분 확산 계수는 Table 3.2.2에 정리하였다.

$$\Omega_D = \frac{A}{(T^*)^B} + \frac{C}{\exp(DT^*)} + \frac{E}{\exp(FT^*)} + \frac{G}{\exp(HT^*)} \tag{3.2.6}$$

$$T^* = \frac{K_B T}{\varepsilon_{H_2O_2}} = \frac{K_B T}{(\varepsilon_{H_2}\varepsilon_{O_2})^{\frac{1}{2}}} \tag{3.2.7}$$

Table 3.2.1 Summary of Constant Value for Collision Integral Ω_D [22,30]

A	B	C	D	E	F	G	H
1.06036	0.15610	0.19300	0.47635	1.03587	1.52996	1.76474	3.89411

Table 3.2.2 Binary Diffusivity Coefficient of Hydrogen-Oxygen Mixture

	Hydrogen-Oxygen Mixture			
Hydrogen Volume Percent [%]	20%	40%	60%	80%
D_{H2O2} [10^{-5} m^2/s]	2.9738	3.3907	4.0527	5.3612

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.2.2에서 확인 할 수 있는 바와 같이 이성분 확산 계수는 수소 체적백분율이 증가함에 따라 늘어나는 경향을 확인하였다. 결과적으로 수소 체적백분율이 증가함에 따라 Table 3.2.2에 정리된 이성분 확산 계수가 늘어나는 것을 확인하였고, Figure 3.2.1에 전류 파형의 아크 및 글로우 단계 또한 늘어나는 것을 확인하였다. 이에 따라 스파크 지속시간은 스파크 채널 내 화학종의 확산 즉 이성분 확산 계수에 의해 차이가 나는 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.3 수소 체적백분율별 항복전압 측정

본 연구에서는 수소 체적백분율, 캐패시터 정전용량 및 전극봉의 간극 조건에 따른 수소-산소 가연혼합물의 항복전압 변화 여부를 확인하였다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구의 항복전압은 전극봉의 간극 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.6mm, 0.7mm, 캐패시터 정전용량 50pF, 100pF, 150pF, 수소 체적백분율 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 90%, 100%에서 각각 측정하여 Table 3.3.1 및 3.3.2에 정리하였다.

Table 3.3.1 Breakdown voltage by gap (0.7, 0.6, 0.4), capacitor capacity and hydrogen volume percentage

Gap distance [mm]	0.7			0.6			0.4		
Capacitor capacity [pF]	50	100	150	50	100	150	50	100	150
H_2 Vol [%]	Breakdown Voltage [kV]								
0	3.72	3.72	3.76	3.48	3.56	3.52	3.16	3.28	3.28
10	3.60	3.56	3.56	3.32	3.40	3.4	3.04	3.04	3.04
20	3.44	3.44	3.44	3.24	3.28	3.28	2.96	2.96	2.96
40	3.28	3.28	3.28	3.12	3.12	3.12	2.80	2.80	2.80
60	3.16	3.12	3.12	2.96	2.88	2.96	2.64	2.64	2.64
80	2.96	2.96	2.96	2.80	2.80	2.84	2.48	2.48	2.48
90	2.8	2.72	2.72	2.72	2.56	2.56	2.16	2.28	2.20
100	2.6	2.6	2.6	2.44	2.44	2.52	2.04	2.12	2.04

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.3.2 Breakdown voltage by gap (0.3, 0.2, 0.1), capacitor capacity and hydrogen volume percentage

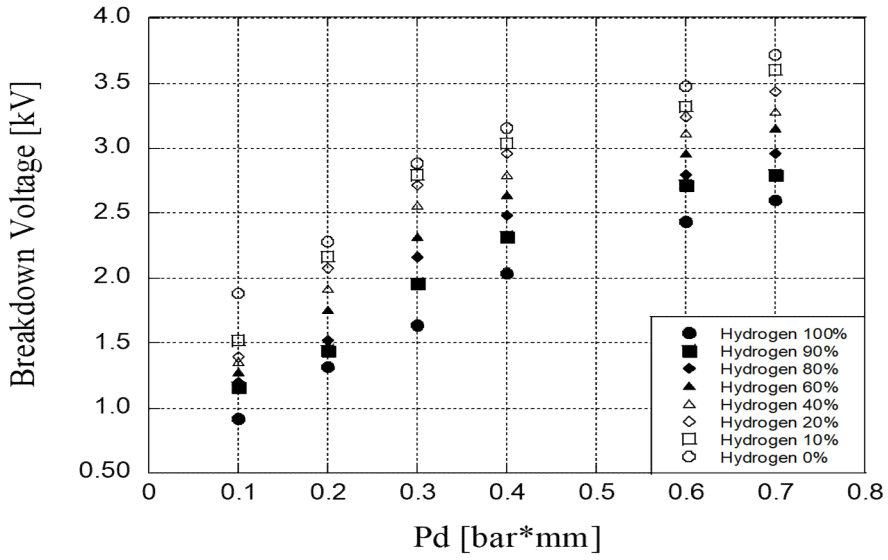
Gap distance [mm]	0.3			0.2			0.1		
Capacitor capacity [pF]	50	100	150	50	100	150	50	100	150
H_2 Vol [%]	Breakdown Voltage [kV]								
0	2.88	2.88	2.80	2.28	2.32	2.24	1.88	1.76	1.76
10	2.80	2.72	2.72	2.16	2.12	2.08	1.52	1.60	1.52
20	2.72	2.64	2.64	2.08	2.00	2.00	1.40	1.40	1.40
40	2.56	2.48	2.56	1.92	1.92	1.96	1.36	1.36	1.32
60	2.32	2.32	2.32	1.76	1.84	1.84	1.28	1.28	1.28
80	2.16	2.16	2.08	1.52	1.68	1.68	1.20	1.20	1.20
90	1.96	1.88	1.88	1.44	1.48	1.48	1.16	1.08	1.08
100	1.64	1.64	1.72	1.32	1.28	1.32	0.92	0.92	0.92

Table 3.3.1, 3.3.2에 정리한 항복전압을 캐패시터 정전용량에 따라 비교한 결과 캐패시터 정전용량이 달라져도 항복전압은 변화 없이 일정한 것을 확인하였고, 다소 차이가 나타나는 부분은 노이즈에 의한 것으로 판단된다.

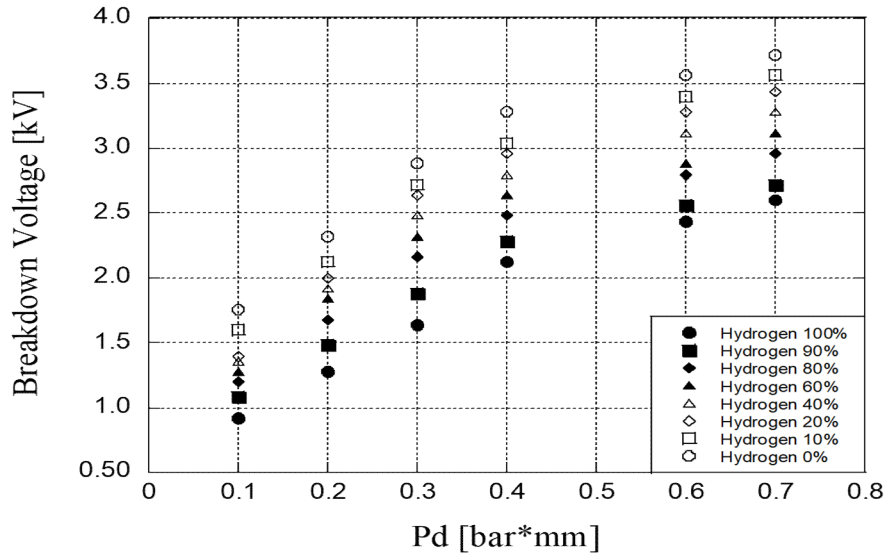
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 3.3.1은 본 연구에서 측정한 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율 및 전극봉 간극 조건에 따른 항복전압을 나타낸 그래프이며, 각각의 그래프는 캐패시터 정전용량에 따라 A는 50pF, B는 100pF, C는 150pF에서 측정한 항복전압 그래프이다. 그래프의 각 전극봉 간극 조건에서 수소 체적백분율보다 산소 체적백분율이 증가할수록 항복전압이 증가하는 경향을 확인하였다. 이와 같은 결과는 수소와 산소의 이온화 포텐셜은 수소 15.4eV, 산소 12.0eV로 기체분자를 이온화하는데 필요한 에너지는 수소가 더 높으나, 수소의 항복전압이 산소에 비해 낮게 측정된 이유는 평균자유이동경로(Mean Free Path)에 의해 산소 대비 자유이동경로가 긴 수소분자는 전자의 가속화가 용이하고, 더 낮은 전압으로도 충돌에너지가 이온화 포텐셜에 도달하기 쉽기 때문이다[22]. 또한, 앞서 서론에서 설명한 Paschen's law 식 (1.2)에 의하면 압력이 일정한 조건에서 전극봉의 간극이 늘어날수록 항복전압은 증가하게 된다. 따라서 Figure 3.3.2에서 확인 할 수 있는 바와 같이 대기압조건에서 전극봉의 간극이 늘어날수록 항복전압이 증가하는 경향을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

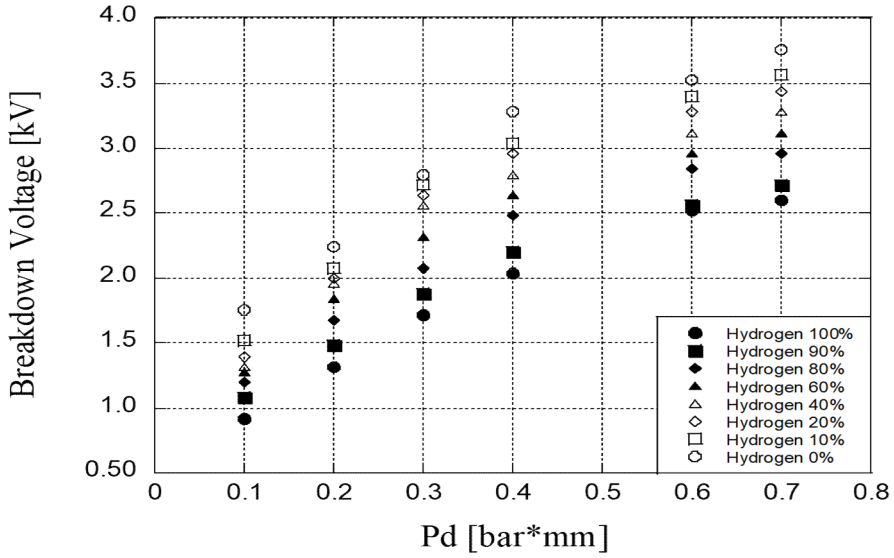


A) Breakdown voltage measured for each electrode gap at 50pF of capacitor capacity



B) Breakdown voltage measured for each electrode gap at 100pF of capacitor capacity

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



C) Breakdown voltage measured for each electrode gap at 150pF of capacitor capacity

Figure 3.3.1 Breakdown voltage measured for each electrode

실험을 통해 얻은 항복전압을 식 (1.2)의 Paschen's law에 의해 계산된 항복전압과 비교하였다. 식 (1.2)의 상수값인 A, B는 전기장 범위에 따라 달라지는 상수값이며 기체의 고전압 Paschen의 특성에 관한 Heylen[34]의 선행연구에 나온 수소와 산소의 A, B값을 Table 3.3.3에 정리하였다.

$$\frac{\alpha}{p} = Aexp(-\frac{B}{E/P}) \tag{3.3.1}$$

$$\gamma = \frac{1}{(e^{\alpha d}-1)} \tag{3.3.2}$$

식 (1.2)의 2차 전자 방출계수 γ은 식 (3.3.1), (3.3.2)를 통해 계산할 수 있지만, Fridman[35]의 선행연구에 의하면 통상 0.01 ~ 0.1 사이의 값을 사용한다고 보고된다. 따라서 본 연구에서는 2차 전자방출 계수(γ=0.01)를 사용하여 수소-산소 가연

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

혼합물의 항복전압을 계산하였다. 식 (3.3.1)에서 α는 Townsend 이온화 계수이고, p는 압력, E/p(V/torr*cm)는 압력당 전기 응력을 의미하고, 여기서 E는 전기 강도를 의미한다. Table 3.3.3의 상숫값 A, B와 2차 전자 방출계수(0.01)를 식 (1.2)에 대입하여 계산한 항복전압을 Table 3.3.4에 정리하였다.

Table 3.3.3 Gas ionization constants, A, B value of Paschen's law [34]

Gas	A [cm^{-1}*$Torr^{-1}$]	B [V/cm*Torr]	E/P range [V/cm *Torr]
H2	5.1	138.8	22-1000
	25.5	172.4	15-22
O2	2.67	125	25-60
	6.4	187	37-133
	10	250	133-350

Table 3.3.4 Breakdown voltage value of Paschen's law

Gap distance [mm]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7
H_2 Vol [%]	Paschen' law Breakdown Voltage [kV]					
0	0.673	1.077	1.223	1.505	2.036	2.290
10	0.654	1.044	1.198	1.473	1.992	2.240
20	0.636	1.010	1.173	1.442	1.948	2.191
40	0.600	0.943	1.123	1.379	1.861	2.092
60	0.564	0.876	1.072	1.316	1.774	1.993
80	0.528	0.809	1.022	1.252	1.686	1.894
90	0.510	0.775	0.997	1.221	1.643	1.844
100	0.492	0.742	0.972	1.189	1.599	1.795

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

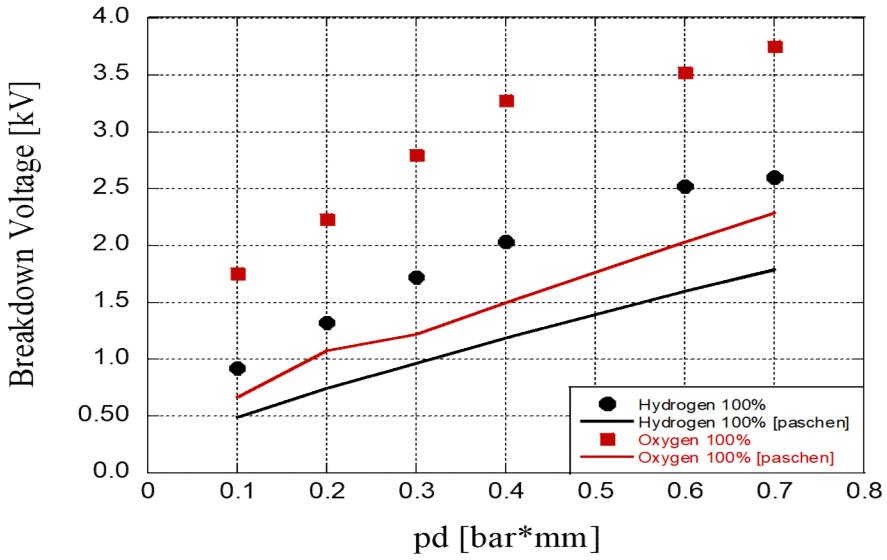


Figure 3.3.2 Comparison of the breakdown voltage calculated by Paschen's law and the breakdown voltage measured through experiments

Figure 3.3.2는 수소 체적백분율 100% 및 산소 체적백분율 100% 조건에서의 Table 3.3.4에 정리된 항복전압과 Figure 3.3.1(A)의 항복전압을 비교한 그래프이다. 비교 결과 식 (1.2)를 통해 계산한 항복전압보다 실험을 통해 측정한 항복전압이 더 높은 것을 확인하였다. 이와 같은 차이는 식 (1.2)는 기체의 최소 항복전압 값을 계산하기 때문에 실험을 통해 측정한 항복전압과는 상이하며, 전극봉의 재질 및 두께 또한 영향을 끼쳤을 것이라 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.4 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 계산 및 측정

본 연구의 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 측정 및 계산 방법은 크게 세 가지 방식으로 구분하였다. 첫 번째는 캐패시터 정전용량과 항복전압을 통해 가연혼합물의 점화에너지를 측정하는 방식이다. 두 번째는 수소 체적백분율별 소염 거리를 측정하여 최소 점화에너지를 계산하는 방식이다. 세 번째는 확률을 통한 최소 점화에너지 추정하는 방식이다. 본 연구에서는 각각의 점화에너지 측정 및 계산방식의 특징을 확인하고 비교하였다.

수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 측정은 수소 체적백분율(10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 90%)별 오실로스코프 math 기능을 활용하여 측정하였고, 측정된 점화에너지를 앞서 설명한 스파크 점화에너지 계산식 식 (1.1), 식 (2.1) ~ 식 (2.4)의 점화에너지 E_1, E_2, E_3, E_4 값을 각각 계산하여 비교하였다. 실험을 통해 측정 및 계산된 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지값은 Table 3.4.1 ~ Table 3.4.6에 정리하였다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구의 스파크 점화장치 특성에 맞는 점화에너지 계산식은 식 (2.4)이고, Table 3.4.1 ~ Table 3.4.6에서 확인할 수 있는 바와 같이 오실로스코프를 통해 측정한 점화에너지와 가장 유사한 것을 확인하였다.

수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지를 계산하기 위해 전극봉 간극 조건에 따라 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 소염 거리를 측정하였고, 측정된 소염 거리를 통해 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지를 계산하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.1 Ignition energy of 90% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.16	0.28	15.49	33.6	31.7	19.9	N
2	0.2		1.44	0.56	28.88	51.8	44	32.8	N
3	0.3		1.96	0.60	51.89	96	87	61.1	N
4	0.4		2.36	0.92	79.04	139	138	87.4	N
5	0.4		2.16	0.96	65.69	117	93.6	69.4	N
6	0.6		2.72	1.44	119.2	185	133	121	N
7	0.7		2.80	1.76	104.3	196	119	108	N
8	0.1	100	1.08	0.36	15.83	58.3	51.8	21.6	N
9	0.2		1.48	0.44	29.59	110	99.8	42	N
10	0.3		1.88	0.52	52.91	177	163	69.7	N
11	0.4		2.28	0.92	78.63	260	218	96.7	N
12	0.6		2.56	1.04	101.4	328	274	124	N
13	0.7		2.72	1.68	103	370	229	120	N
14	0.1	150	1.08	0.36	15.74	87.5	77.8	23.4	N
15	0.2		1.48	0.58	29.14	164	139	43.8	N
16	0.3		1.88	0.36	50.23	265	255	73	N
17	0.4		2.20	0.52	76.63	363	343	103	N
18	0.6		2.56	1.52	94.63	492	318	120	N
19	0.7		2.72	1.52	120.1	555	382	158	N

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.2 Ignition energy of 80% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.20	0.32	18.55	36	33.4	22.2	N
2	0.2		1.52	0.56	32.55	57.8	49.9	36	N
3	0.3		2.32	1.12	69.84	135	103	81.4	Y
4	0.3		2.16	0.96	66.56	117	93.6	69.4	Y
5	0.4		2.32	1.28	79.19	135	93.6	84.7	Y
6	0.4		2.48	1.44	88.55	154	102	92.1	Y
7	0.6		2.80	1.52	105.9	196	138	113	Y
8	0.7		2.96	1.84	119.5	219	134	122	Y
9	0.1	100	1.20	0.24	18.14	72	69.1	27	N
10	0.2		1.68	0.64	37.73	141	121	52.4	N
11	0.3		2.24	0.96	80.33	251	205	102	Y
12	0.3		2.16	1.20	64.1	233	161	83.2	Y
13	0.4		2.48	1.12	94.3	308	245	122	Y
14	0.6		2.8	1.76	113.8	392	237	133	Y
15	0.7		2.96	1.92	128	438	254	150	Y
16	0.1	150	1.20	0.32	18.46	108	100	28.9	N
17	0.2		1.68	0.64	36.36	212	181	55.5	N
18	0.3		2.08	1.04	64.8	324	243	88.3	Y
19	0.4		2.48	1.20	94.53	461	353	129	Y
20	0.6		2.84	1.64	114.2	605	403	141	Y
21	0.7		2.96	1.84	125.3	657	403	152	Y

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.3 Ignition energy of 60% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.28	0.40	22.48	41	37	25	N
2	0.2		1.76	0.72	36.2	77.4	64.5	44.7	Y
3	0.3		2.32	0.64	75.03	135	124	81.2	Y
4	0.4		2.48	1.28	93.79	154	113	99.4	Y
5	0.4		2.64	1.28	102.2	174	133	106	Y
6	0.6		3.20	1.76	149.9	256	179	154	Y
7	0.6		2.96	1.52	148.3	219	161	143	Y
8	0.7		3.16	1.96	143.4	250	154	144	Y
9	0.1	100	1.28	0.24	20.91	81.9	79	30.6	N
10	0.2		1.68	0.80	32.3	141	109	40.1	Y
11	0.2		1.68	0.56	41.33	141	125	53.7	Y
12	0.2		1.84	0.72	38.01	169	143	46.7	Y
13	0.3		2.32	1.28	82.77	269	187	102	Y
14	0.4		2.48	1.36	101.1	308	215	125	Y
15	0.4		2.64	1.20	101.4	348	276	124	Y
16	0.6		2.80	1.52	124.3	392	276	161	Y
17	0.6		2.88	1.60	134.7	415	287	165	Y
18	0.7		3.12	1.92	148.6	487	302	171	Y
19	0.1	150	1.28	0.40	22.77	123	111	34	N
20	0.2		1.84	0.72	50.46	254	215	69.9	Y
21	0.3		2.32	0.96	80.03	404	335	112	Y
22	0.4		2.64	1.20	107.3	523	415	140	Y
23	0.6		2.96	1.68	129.3	657	445	162	Y
24	0.7		3.12	1.92	151.2	730	454	184	Y

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.4 Ignition energy of 40% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.36	0.24	23.42	46.32	44.8	28.4	N
2	0.1		1.36	0.40	22.71	46.2	42.2	27.5	N
3	0.2		2.00	0.80	65.14	100	84	64.3	Y
4	0.2		1.92	0.48	51.57	92.2	86.4	57.9	Y
5	0.3		2.60	0.92	109.9	169	148	106	Y
6	0.3		2.56	1.20	102.5	164	128	105	Y
7	0.4		2.80	1.28	124.8	196	155	126	Y
8	0.6		3.12	1.60	155.1	243	179	160	Y
9	0.7		3.28	2.00	168.3	269	169	166	Y
10	0.1	100	1.36	0.16	23.43	92.5	91.2	34.8	N
11	0.2		1.92	0.56	47.09	184	169	69.6	Y
12	0.3		2.48	1.36	93.97	308	215	112	Y
13	0.4		2.80	1.52	112.6	392	276	140	Y
14	0.6		3.12	1.68	160.3	487	346	197	Y
15	0.7		3.28	2.00	166	538	338	192	Y
16	0.1	150	1.32	0.28	21.81	131	125	34.5	N
17	0.2		2.16	0.48	55.36	350	333	90.4	Y
18	0.2		1.96	0.68	55.95	288	253	82.7	Y
19	0.3		2.80	0.48	90.41	588	571	155	Y
20	0.3		2.56	0.96	98.84	492	422	142	Y
21	0.4		2.80	1.52	129.3	588	415	172	Y
22	0.6		3.12	1.92	142.9	730	575	175	Y
23	0.7		3.28	1.44	170.8	807	651	234	Y
24	0.125	50	1.68	0.40	40.59	70.6	66.6	44.2	Y
25	0.125		1.60	0.24	35.48	64	62.6	39.8	N
26	0.125		1.44	0.40	32.04	51.8	47.8	32.9	N
27	0.125		1.44	0.48	32.45	51.8	46.1	32.9	Y
28	0.125		1.52	0.48	38.45	57.8	46.1	36.8	N

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.5 Ignition energy of 20% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.40	0.28	26.15	49	47	30.2	N
2	0.2		1.80	0.52	59.36	81	74.2	50.5	Y
3	0.2		1.80	0.60	56.58	81	72	52.5	Y
4	0.2		2.08	0.56	58.81	108	100	66.8	N
5	0.3		2.72	1.12	120	185	154	119	Y
6	0.4		2.96	1.44	151.6	219	167	142	Y
7	0.6		3.20	1.52	170.4	256	198	168	Y
8	0.6		3.24	1.48	182.6	262	208	169	Y
9	0.7		3.44	1.52	197.3	296	238	197	Y
10	0.1	100	1.40	0.36	24.44	98	91.5	35.8	N
11	0.2		1.84	0.48	51.15	169	158	68.2	Y
12	0.2		1.84	0.48	53.13	169	158	68.7	N
13	0.2		2.16	0.56	68.33	233	218	92.8	Y
14	0.2		2.00	0.56	60.34	200	184	80.5	N
15	0.3		2.64	0.72	87.19	348	323	132	Y
16	0.3		2.64	1.12	125	348	286	148	Y
17	0.4		2.60	1.60	152.6	438	310	186	Y
18	0.6		3.28	1.52	181.7	538	422	227	Y
19	0.7		3.44	1.60	207.3	592	464	253	Y
20	0.1	150	1.40	0.28	23.29	147	141	38.8	N
21	0.2		2.00	0.48	58.59	300	283	86.3	Y
22	0.3		2.40	0.96	96	432	363	129	Y
23	0.3		2.64	0.96	122.3	523	496	161	Y
24	0.4		2.96	0.96	157.7	657	588	200	Y
25	0.6		3.28	1.52	186.3	807	634	249	Y
26	0.7		3.44	1.84	203	888	634	272	Y
27	0.175	50	2.16	0.64	56.6	117	106	713	N
28	0.175		2.24	0.48	54.21	125.5	120	74.5	N
29	0.175		2.08	0.56	52.87	108	100	646	Y

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.6 Ignition energy of 10% hydrogen volume percentage

Test Number	d [mm]	C [pF]	V_b [kV]	V_r [kV]	E_1 [μJ]	E_2 [μJ]	E_3 [μJ]	E_4 [μJ]	Ignition Y/N
1	0.1	50	1.52	0.32	28.65	57.8	55.2	35.1	N
2	0.2		1.92	0.64	51.63	92.2	81.9	57.2	N
3	0.2		2.16	0.48	70.67	117	111	72.5	N
4	0.3		2.40	0.96	100.3	144	121	91.3	N
5	0.3		2.80	0.80	126.9	196	180	127	N
6	0.4		2.84	0.68	140	202	190	131	N
7	0.4		3.04	0.72	147.8	231	218	149	N
8	0.6		3.32	1.40	201.4	276	227	174	Y
9	0.7		3.48	1.64	216.6	303	236	193	Y
10	0.7		3.60	1.52	218.8	324	266	208	Y
11	0.1	100	1.60	0.32	27.59	128	123	46.2	N
12	0.2		2.00	0.56	55.58	200	184	78.1	N
13	0.2		2.12	0.68	73.06	225	202	92	N
14	0.3		2.32	0.32	85	269	264	110	N
15	0.3		2.72	0.40	120.1	370	362	154	N
16	0.4		2.88	1.44	149.4	415	311	176	N
17	0.4		3.04	0.64	145.8	462	442	193	N
18	0.6		3.40	1.56	223.2	578	456	248	Y
19	0.7		3.56	1.56	232.4	634	512	273	Y
20	0.1	150	1.44	0.24	25.23	156	151	41.2	N
21	0.1		1.52	0.48	32.03	173	156	48.4	N
22	0.2		1.92	0.56	51.32	276	253	78.2	N
23	0.2		2.08	0.64	70.47	324	294	96.1	N
24	0.3		2.32	0.48	86.47	404	386	148	N
25	0.3		2.72	0.88	118.5	555	497	166	N
26	0.4		2.88	0.96	132	622	553	180	N
27	0.4		3.04	0.88	146.8	693	635	205	N
28	0.6		3.40	1.40	206.3	867	720	268	Y
29	0.7		3.56	1.64	227	951	749	293	Y

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

최소 점화에너지에 영향을 주는 요소들은 초기온도, 초기압력, 연료의 형태, 혼합가스의 조성비, 전압 및 소염 거리 등이 있다[36]. 최소 점화에너지에 영향을 주는 인자들 가운데 소염 거리와의 관계를 확인하기 위해 최소 점화에너지와 온도의 관계에 대한 이론을 설명하고, 이를 근거로 최종적으로 최소 점화에너지와 소염 거리의 관계를 도출하였다.

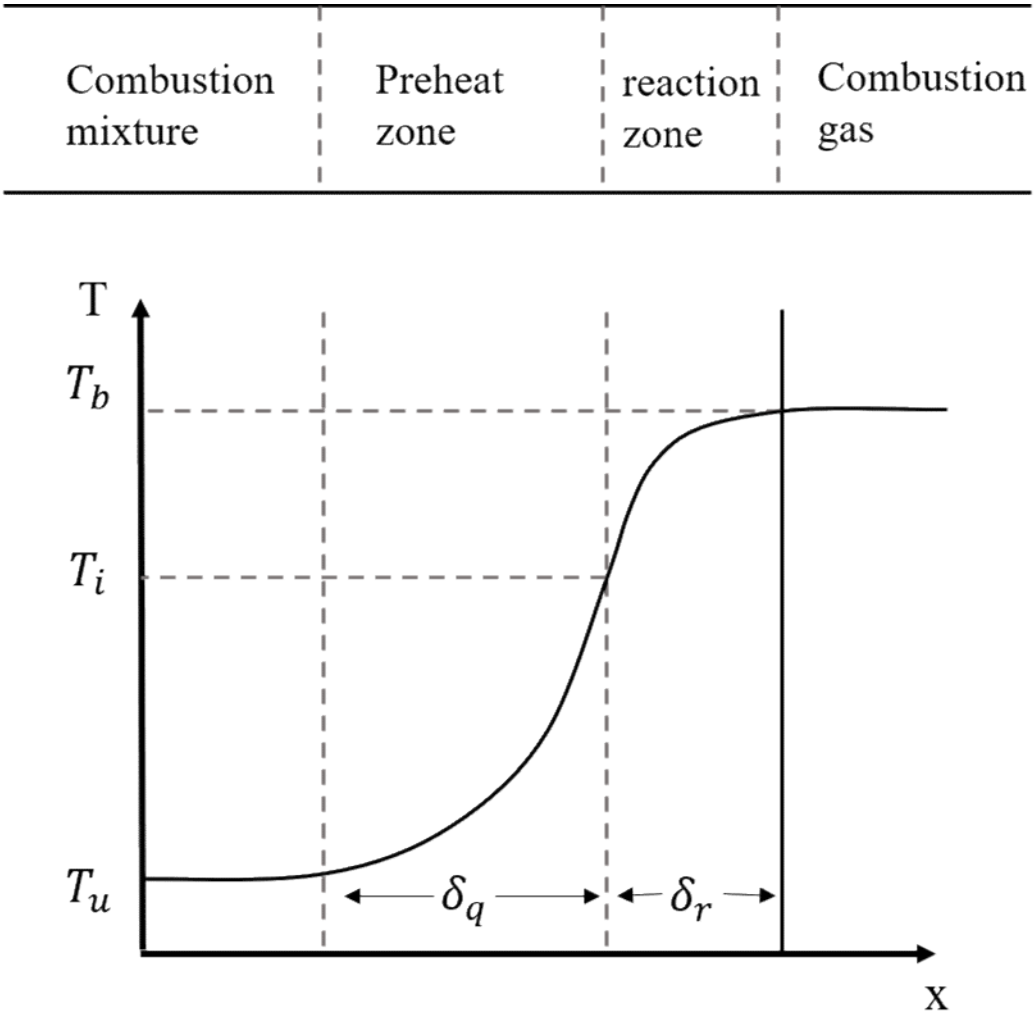


Figure 3.4.1 Structure of premixed flame [37]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 3.4.1은 예혼합화염의 연소과정을 도시한 그래프이다[37]. 최소 점화에너지는 Figure 3.4.1의 초기 상태에서 화염온도까지 혼합가스 부피에 요구된 에너지가 열과 같다는 가정하에 식 (3.4.1)과 같이 나타낼 수 있다[36].

$$E_{MIE} = \dot{m} C_p \triangle T$$
$$E_{MIE} = \rho_b V_a C_p \frac{(T_b - T_u)}{dt} = (A\delta_r)\rho_b C_p (T_b - T_u) \quad (3.4.1)$$

여기서 $\dot{m}$은 미연소 가스의 질량유량이고, C_p는 정압비열, A는 화염의 단면적을 의미한다. δ_r은 예열 영역의 화염의 두께를 의미하고 Figure 3.4.1의 그래프에서 정의하였다. T_b는 단열 화염온도, T_u는 초기온도를 의미하고 온도의 구배는 상수로 간주한다. V_a는 시간에 따른 화염의 체적이고, ρ_b는 미연 상태의 혼합 기체 몰 밀도이다. 식 (3.4.1)의 화염 두께를 계산하기 위해 화염전파속도와 화염 두께 사이의 관계를 에너지 보존방정식을 통해 식 (3.4.2)로 표현할 수 있다[38]. 식 (3.4.2)에서 k는 열전도율을 의미한다.

$$Ak\frac{dT}{dx} = V_a \rho_b C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.4.2)$$

식 (3.4.1)을 Figure 3.4.1의 예열 영역과 반응 영역의 화염두께로 다시 정리하면 식 (3.4.3)과 같이 표현할 수 있다.. 식 (3.4.3)의 왼쪽 항은 열전도에 의하여 화염 면에서부터 전달된 열량이고, 오른쪽 항은 예열 영역에서의 미연 혼합기의 엔탈피 증가이다. 또한, Figure 3.4.1의 반응 영역은 T_i에서 단열 화염온도 T_b까지 변화하는 영역으로 반응에 의한 열이 발생하게 되고, 이때 $T_i < T_b$이나 그 차이가 크지 않으므로 $T_i = T_b$로 가정하였다[37].

$$k\frac{T_i - T_u}{\delta_r} = \frac{V_a}{A}\rho_b C_p \frac{T_i - T_u}{\Delta t} \quad (3.4.3)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서 V_a/A는 화염이 전파된 거리를 의미하고, $V_a/(A\triangle t)$는 화염전파속도 S_u를 의미한다. 따라서 화염전파속도와 Figure 3.4.1에 정의된 화염 두께 사이의 관계는 식 (3.4.4)와 같다[38].

$$S_u = \frac{k}{C_p \rho_b \delta_r} \tag{3.4.4}$$

소염 거리와 최소 점화에너지의 관계에 관한 선행연구[24,39,40]에 의하면 소염 거리는 화염의 두께 δ_r에 비례한다고 보고된다. 따라서 식 (3.4.4)를 화염 두께에 관해서 다시 정리하면 식 (3.4.5)와 같이 표현할 수 있다.

$$d \approx \delta_r \approx \frac{k}{C_p \rho_b S_u} \approx \frac{k T_u}{C_p \overline{M}} \frac{1}{P} \frac{1}{S_u} \tag{3.4.5}$$

식 (3.4.5)에서 $\overline{M}$은 혼합 기체의 평균 분자량, P는 연소실 내부의 초기압력을 의미한다. 이때 화염전파 속도는 정적 연소기 초기 조건에 민감하다고 알려져 있다[39]. 따라서 식 (3.4.5)를 식 (3.4.1)에 대입하여 구형 화염의 화염전파속도와 최소 점화에너지의 관계인 식 (3.4.6)을 도출하였다[8,36,37,38].

$$E_{MIE} = \pi A \frac{k}{S_u}(T_b - T_u) = \pi d^2 \frac{k}{S_u}(T_b - T_u) \tag{3.4.6}$$

여기서 단면적 A는 $A \geq d^2$로 소염 거리에 대한 동일 길이 제곱의 면적보다 커야 하므로 단면적 A를 소염 거리(d)의 제곱과 같다고 가정하였다[36]. 선행연구에서는 화염 두께 δ_r를 소염 거리 d와 같다고 본다[39]. 따라서 식 (3.4.6)의 화염전파속도를 소염 거리로 표현하기 위해 식 (3.4.4)를 대입하여 소염 거리와 구형 화염의 최소 점화에너지의 관계식인 식 (3.4.7)을 도출하였다[8,36,37,38]. Figure 3.4.2는 Figure 3.4.1의 예혼합화염의 연소과정을 구형의 최소 화염 모습으로 표현하여 열과 온도 분포로 나타낸 이미지이다[8,38].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$E_{MIE} = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_b C_p (T_b - T_u) \quad (3.4.7)$$

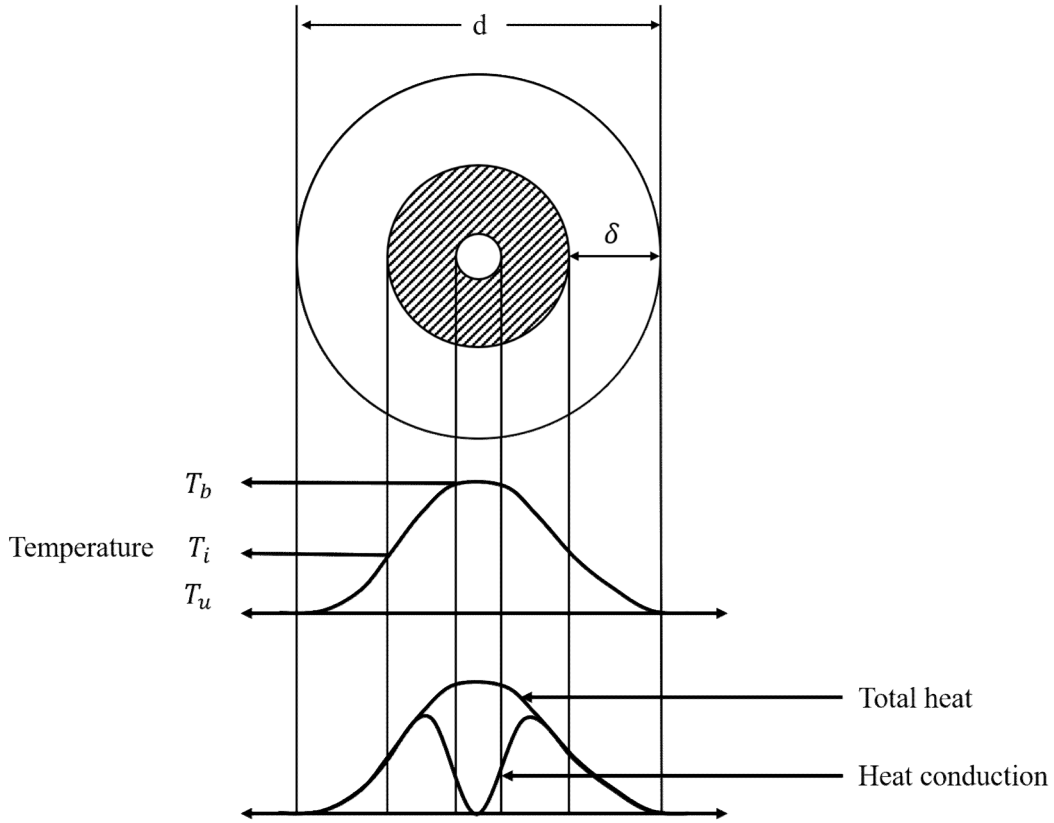


Figure 3.4.2 Combustion process of spherical premixed flame [8]

본 연구에서 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 식 (3.4.7)을 통해 계산하였다. 측정된 소염 거리 수소 체적백분율 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 90%일 때 0.3mm, 0.175mm, 0.125mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.7mm≤로 측정되었고, Figure 3.4.3에 도시하였다. 초기온도(T_u)는 298K로 가정하였고, 단일 화염온도(T_b) 및 정압비열(C_p)은 Chemkin 소프트웨어를 활용하여 구하였다. Figure 3.4.4는 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율 및 당량비별 단열 화염온도의 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 단열 화염온도는 당량비 1에 가까워질수록 높아지는 경향을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\rho_{b(H_2)} = \frac{PM_{H_2}}{RT}\ ,\ \rho_{b(O_2)} = \frac{PM_{O_2}}{RT} \tag{3.4.8}$$

$$\rho_{b(H_2O_2)} = \rho_{b(H_2)} * X_{H_2} + \rho_{b(O_2)} * X_{O_2} \tag{3.4.9}$$

ρ_{bH2O2}는 식 (3.4.8), (3.4.9)를 통해 구하였다. 식 (3.4.8)에서 P는 압력(atm), M은 수소와 산소의 몰 질량(g/mol), T는 초기온도(K), R은 농도와 관련된 이상기체(0.0821L*atm/K*mol)를 의미한다. 식 (3.4.8)를 통해 계산된 수소와 산소의 밀도를 각 기체의 체적백분율에 곱하여 가연혼합물의 체적백분율에 따른 밀도를 계산하였다. 본 연구의 수소 체적백분율 조건에 따라 각각의 물성값은 Table 3.4.7에 정리하였다.

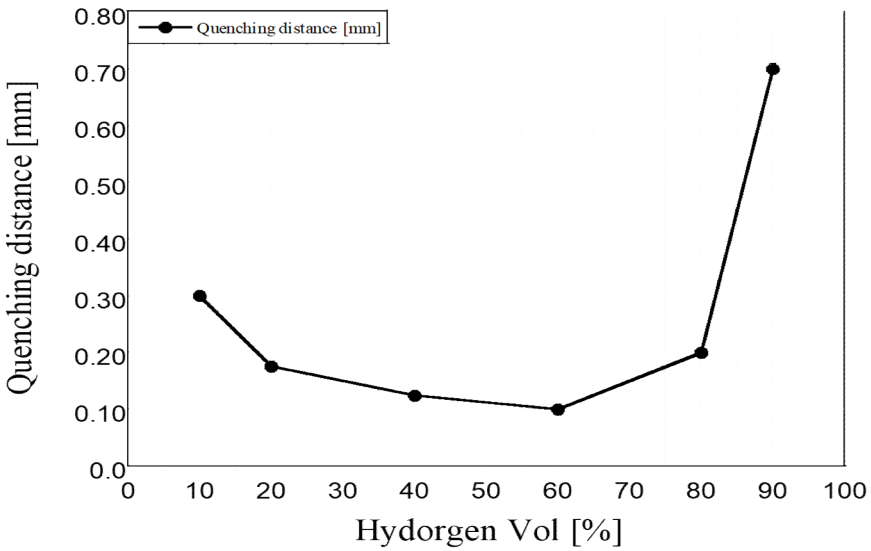


Figure 3.4.3 Quenching distance of Hydrogen-Oxygen combustible mixture

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

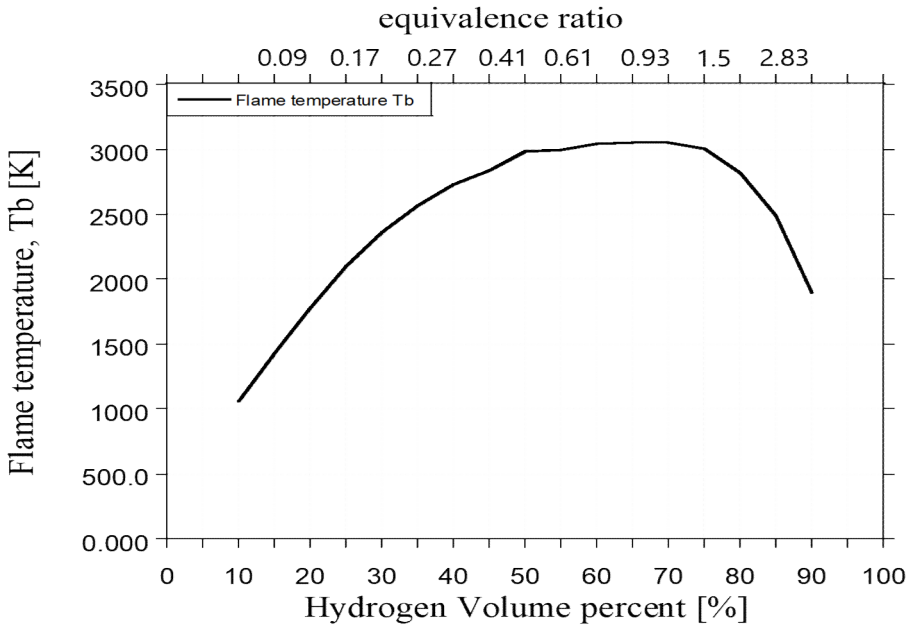


Figure 3.4.4 Flame Temperature(T_b) by Hydrogen volume percentage and Equivalent ratio

Table 3.4.7 Physical properties according to hydrogen volume percentage of hydrogen-oxygen combustible mixture for ignition energy calculation

O_2 Vol[%]	H_2 Vol[%]	Quenching distance [mm]	ρ_b [kg/m^3]	C_p [J/kg*k]	T_b [K]	T_u [K]
10	90	0.7<	0.0250	6764.755	1899.952	298
20	80	0.2	0.3275	4654.806	2826.4	298
40	60	0.1	0.5726	2717.018	3037.536	298
60	40	0.125	0.8177	1899.543	2693.33	298
80	20	0.175	1.0628	1388.833	1784.787	298
90	10	0.3	1.1854	1176.007	1067.196	298

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.8 Minimum Ignition Energy as a percentage of Hydrogen Volume in a Hydrogen-Oxygen Combustible mixture

O_2 Vol [%]	H_2 Vol [%]	Minimum Ignition Energy Eq(3.4.6)[μJ]
10	90	398.89
20	80	16.15
40	60	2.23
60	40	3.81
80	20	6.16
90	10	15.16

Table 3.4.7의 정리된 물성값을 식 (3.4.7)에 대입하여 계산된 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지를 Table 3.4.8에 정리하였다. 본 연구에서 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 수소 체적백분율 60%일 때 2.23μJ로 확인되었다.

소염 거리와 최소 점화에너지 관계식으로 계산된 최소 점화에너지를 비교하기 위해 점화 여부를 기준으로 확률을 통해 최소 점화에너지를 추정하였다. 본 연구에서 측정된 수소-산소 가연혼합물의 점화 데이터에 대한 누적 확률분포를 얻기 위해 로지스틱 회귀 방법을 사용하였다[24]. 따라서 확률 기반으로 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 식 (3.4.10)과 식 (3.4.11)을 통해 추정하였다[24]. 식 (3.4.10)에서 y는 점화 여부로 점화가 되었을 때 1, 점화가 되지 않았을때 0이며, x는 점화에너지를 의미한다. 식 (3.4.11)에서 P(x)는 확률, x_i는 i번째 실험에 대한 스파크 에너지, β_0은 확률 함수의 위치를 결정하는 값, β_1은 함수의 가파른 정도 즉 기울기를 의미한다. β_0, β_1의 값은 식 (3.4.11)의 최대우도법(Likelihood function)을 사용하여 추정한다.

$$P(x) = \mathrm{Pr}obability(y = 1; x) \tag{3.4.10}$$

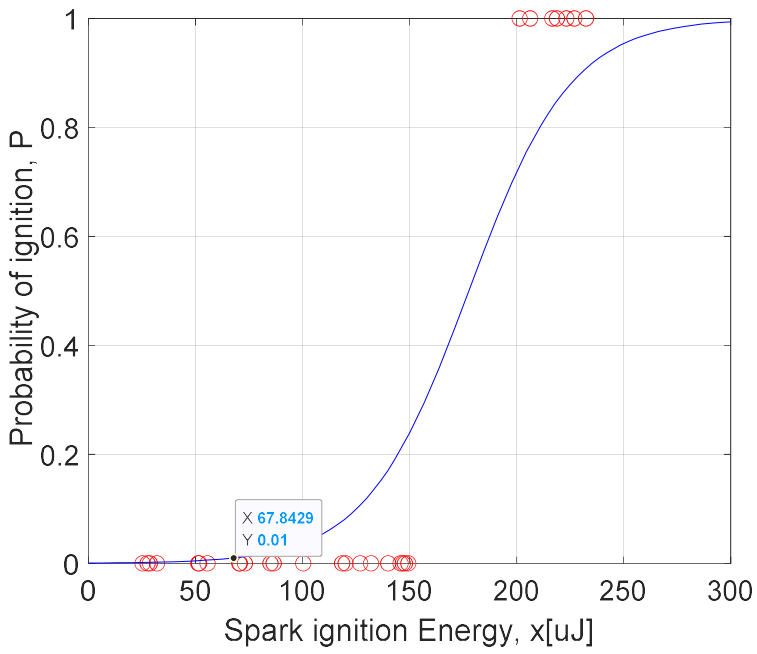
$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_0 - \beta_1 x_i)} \tag{3.4.11}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

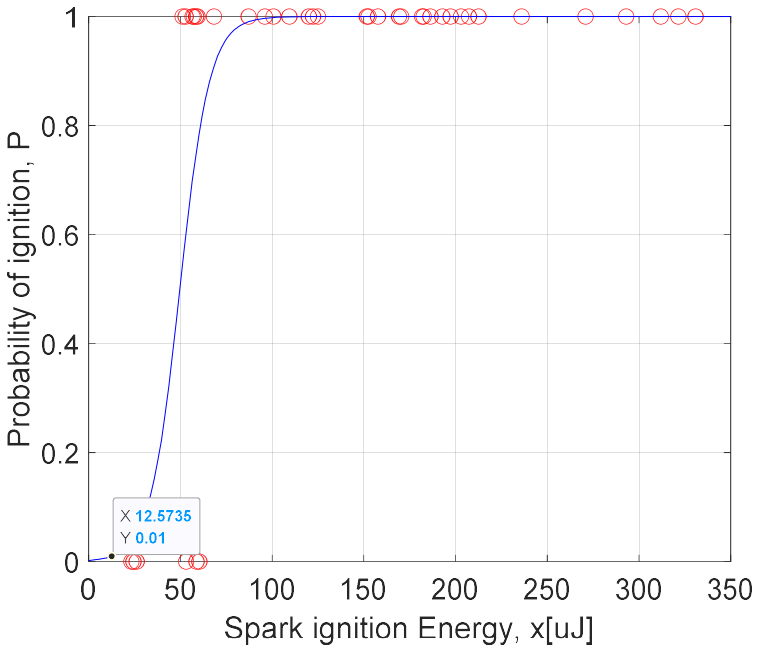
$$L = \prod_{i=1}^{n} P(x_i)^{y_i}(1 - P(x_i))^{1-y_i} \quad (3.4.12)$$

MATLAB을 활용하여 식 (3.4.12)의 β_0, β_1을 추정하고, 동시에 식 (3.4.11)를 통해 수소 체적백분율 10%, 20% 40%, 60%, 80%일 때 확률에 따른 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 그래프를 Figure 3.4.5에 도시하였다. 확률에 따른 점화에너지 그래프에서 최소 점화에너지는 점화 확률 1%일 때 점화에너지값을 최소 점화에너지로 간주한다[41]. 따라서 Figure 3.4.5에 표시한 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율별 1%의 점화 확률일 때 최소 점화에너지값을 Table 3.4.9에 정리하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

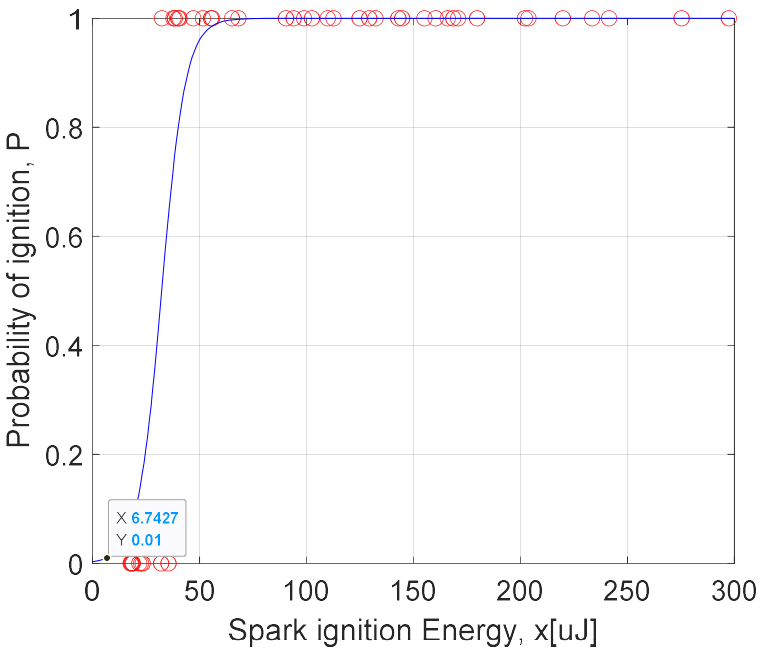


A) Hydrogen volume percentage is 10%

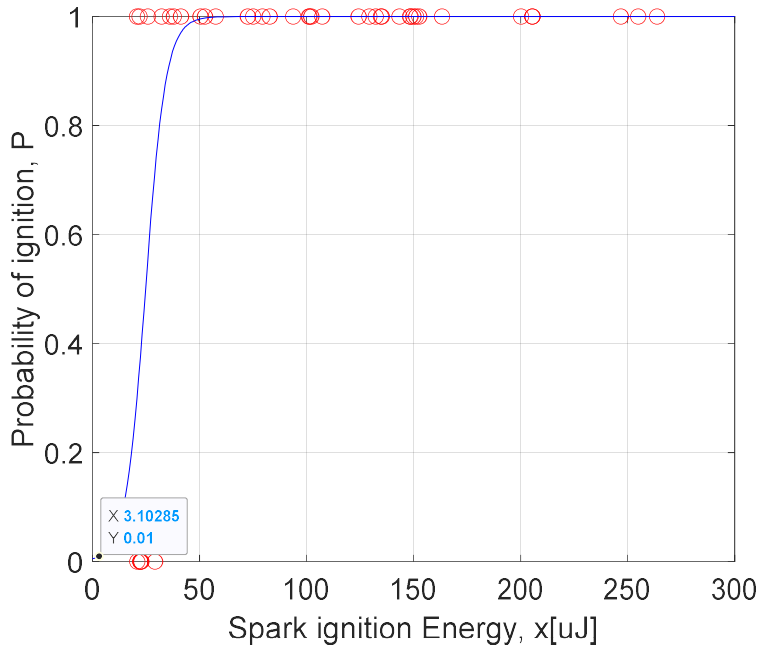


B) Hydrogen volume percentage is 20%

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

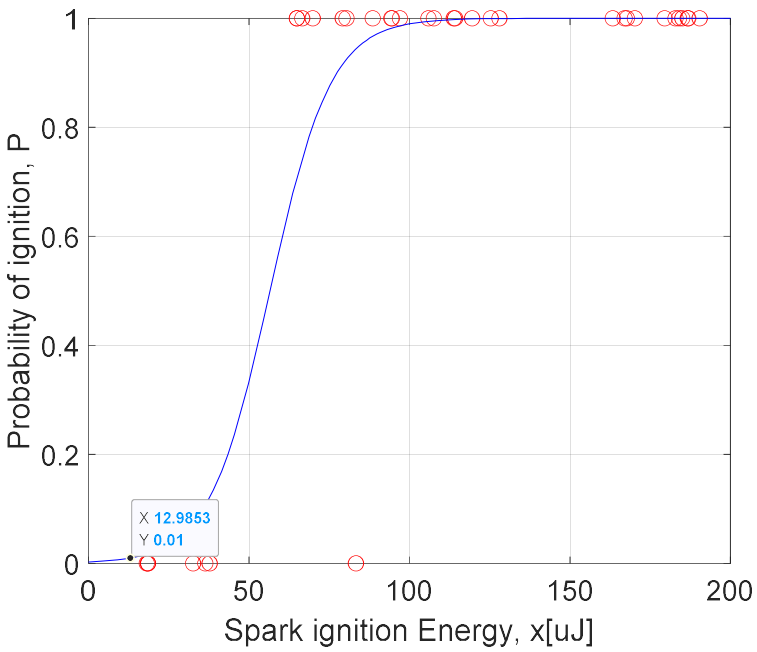


C) Hydrogen volume percentage is 40%



D) Hydrogen volume percentage is 60%

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



E) Hydrogen volume percentage is 80%

Figure 3.4.5 Ignition Energy measurement through Hydrogen volume percentage probability

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3.4.9 Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Oxygen combustible mixture estimated through Probability

O_2 Vol[%]	H_2 Vol[%]	1% probability Minimum Ignition Energy [μJ]
20	80	12.99
40	60	3.10
60	40	6.74
80	20	12.57
90	10	67.84

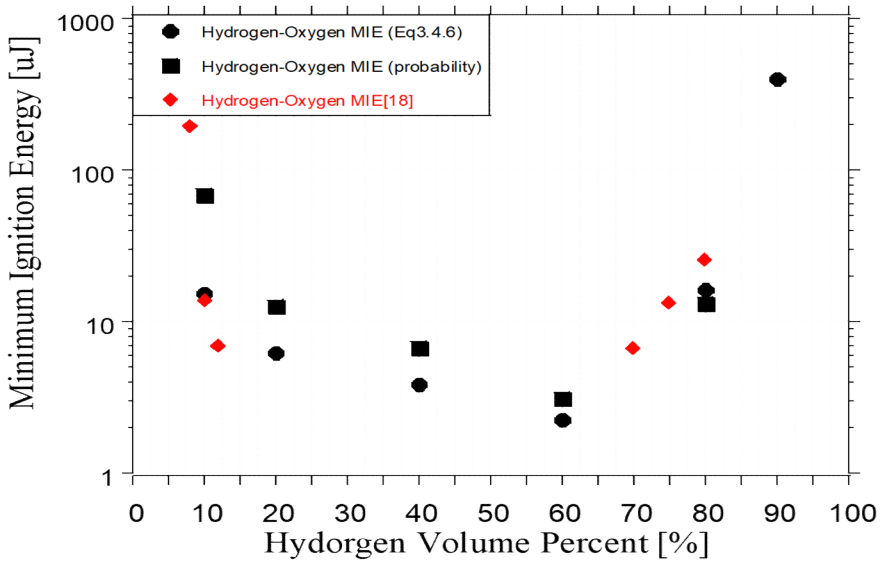


Figure 3.4.6 Comparison of Minimum Ignition Energy of Hydrogen-Oxygen combustible mixtures

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 3.4.6은 Table 3.4.8의 소염 거리를 통해 계산된 최소 점화에너지, Table 3.4.9의 확률을 통한 최소 점화에너지 및 서론에 설명한 Kumamoto[18]의 선행연구 결과와 비교한 그래프이다. 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지를 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 계산한 최소 점화에너지는 수소 체적백분율 60% 조건일 때 2.23μJ로 계산되었고, 확률을 통해 추정된 최소 점화에너지는 3.11μJ로 확인되었다. 관련 선행연구에 보고된 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지 1.2μJ과 본 연구에서 측정한 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지가 상이한 것은 이유는 전극봉의 두께 및 재질의 차이 또는 수소 체적백분율의 차이인 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 결론

본 연구에서는 간극조건, 캐패시터 정전용량, 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율에 따른 항복전압, 소염 거리, 이성분 확산 계수, 점화에너지 및 최소 점화에너지 측정에 관한 연구를 수행하였다. 수소-산소 가연혼합물의 항복전압 및 점화에너지를 측정하기 위해 스파크 점화장치를 통해 실험을 진행하였으며, 점화 시 획득한 전압 및 전류 파형과 쉴리렌 장치를 통해 얻은 스파크 이미지를 비교하여 이성분 확산 계수와 상관성을 확인하였다. 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 계산하기 위해 전극봉 간극 및 수소 체적백분율별 항복전압을 계산하여 Paschen's law의 항복전압 계산식과 비교하였다. 이후 측정된 항복전압을 통해 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지를 실험 조건에 맞는 계산식을 활용하여 계산하였고, 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 두 가지 방식을 통해 도출하였다. 첫 번째 방식은 측정된 소염 거리를 통해 최소 점화에너지를 계산하였고, 두 번째 방식은 점화 여부를 기준으로 확률을 통한 최소 점화에너지를 추정하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 가연혼합물을 점화시키기 위한 점화원인 스파크는 플라즈마 채널 내 이온의 열 및 질량 확산을 통해 에너지를 전달한다. 수소-산소 가연혼합물의 수소 체적백분율에 따른 아크 및 글로우 단계 즉 스파크 지속시간은 수소 체적백분율이 증가할수록 늘어났고, 이를 스파크 채널 내 이온종의 확산 즉 이성분 확산계수와의 상관성을 검토하였다. 수소-산소 가연혼합물의 이성분 확산계수를 계산한 결과 수소 체적백분율이 증가할수록 늘어나는 것을 확인하였다. 따라서 이성분 확산 계수는 화학종의 질량 확산에 영향을 끼쳐 스파크 지속시간의 차이가 나타난 것으로 판단된다.

(2) 실험을 통해 얻은 수소-산소 가연혼합물의 항복전압은 수소 체적백분율이 증가할수록 감소하는 경향을 확인하였고, 간극이 늘어날수록 항복전압 역시 증가하는 것을 확인하였다. 캐패시터 정전용량의 차이에 따른 항복전압은 변화 없이 일정한 것으로 확인되었다. 실험으로 측정한 항복전압 값을 비교하기 위해 Paschen's law을 통해 항복전압을 계산하였으며, 비교 결과 실험으로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

측정한 항복전압 값이 더 큰 것으로 확인되었다. 이는 전극봉의 재질 및 두께 또는 식 (1.2)는 기체의 최소 항복전압 값을 계산하는 식이기 때문에 각각의 항복전압에 차이가 난다고 판단된다.

(3) 스파크 점화장치(CDI)로 가연물의 점화에너지를 계산하는 방식은 스파크 점화장치 특성에 따라 다양한 점화에너지 계산식이 존재하였고, 각각의 점화에너지 계산식의 특징을 확인하여 실험 조건에 맞는 계산식을 확인하였다. 본 연구에서는 수소-산소 가연혼합물의 점화에너지 측정은 점화 시 오실로스코프의 math 기능을 활용하여 획득한 전압 및 전류 파형을 시간에 따라 적분하여 측정하였다. 오실로스코프로 측정된 점화에너지 와 본 연구의 스파크 점화장치 특성에 맞는 점화에너지 계산식으로 계산된 점화에너지를 비교하였고, 비교 결과 약간의 차이는 존재하였지만 비교적 일치하는 것을 확인하였다.

(4) 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지는 소염 거리와 최소 점화에너지와의 관계식을 통해 계산하여 확인하였다. 수소-산소 가연혼합물의 소염 거리는 수소 체적백분율 90%, 80%, 60%, 40%, 20%, 10%일 때 0.7mm≤, 0.2mm, 0.1mm, 0.125mm, 0.175mm, 0.3mm로 측정되었다. 측정된 소염 거리를 통해 계산된 수소-산소의 최소 점화에너지는 수소 체적백분율 60%일 때 2.23μJ로 확인되었다. 이를 비교하기 위해 확률을 기반으로 최소 점화에너지를 추정하였고, 확률 기반으로 측정된 최소 점화에너지는 3.11μJ로 확인되었다. 실험을 통해 계산된 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지와 보고되고 있는 수소-산소 가연혼합물의 최소 점화에너지를 비교한 결과 다소 차이가 존재하였고, 이는 전극봉의 재질 및 두께에 따른 차이 또는 수소 체적백분율의 차이로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고문헌】

[1] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021.03/tar-wg1-2001-ts pdf

[2] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Robert, J. Skea,P. R. Shukla, S. Connors, T. Waterfield, et al., "Global Warmingof 1.5 °C", An IPCC Special Report, IPCC Secretaria, Vol. 1,No. 5, pp. 175-311 (2018).

[3] https://www.2050cnc.go.kr/flexer/view/BOARD_ATTACH?storageNo=108

[4] The Government of the Republic of Korea, "Enforcement Decree of the Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Response to the Climate Crisis", (2019).

[5] The Government of the Republic of Korea, "2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea towards a Sustainable and Green Society", (2020).

[6] J. G. Quintiere, "Principles of fire behavior", CRC Press, (2016).

[7] Y. D. Jo, S. S. Tak, K. S. Chol, J. R. Lee and K. S. Park, "Analysis of Hydrogen Accident in korea", Trans, of the korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 1, pp. 82-87 (2004).

[8] B. Lewis and G. Von Elbe, "Combustion Flames and Explosions of GASES", Elsevier Ltd, Amsterdam, NL (2012).

[9] https://www.hani.co.kr/arti/area/gangwon/900499.html

[10] https://www.h2news.kr/news/article.html?no=7651

[11] O. S. Joo, "Hydrogen Production Technology", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 49, No. 6, pp. 688-696, (2011).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[12] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production", Chinese Journal of Catalysis, Vol. 39, No. 3, pp. 390-394. (2018).

[13] V. Schroeder and K. Holtappels, "Explosion Characteristics of Hydrogen - Air Andhydrogen - Oxygen Mixtures at Elevated Pressures", International Conferenceon Hydrogen Safety, Pisa, Italy, Paper No. 120001 (2005).

[14] J. M. Kuchta, "Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries-a manual" Bulletin, Bureau of Mines, Washington, DC (USA), No. PB-87-113940/XAB; BM-B-680, (1986).

[15] S. T. Mcnally, "Lecture. sources of hydrogen ignition and prevention measures", HyResponse, (2016).

[16] W. Uchman, and S. Werle, "The ignition phenomenon of gases--part I: the experimental analysis—a review", Journal of Power Technologies, Vol. 98, No. 2, (2018).

[17] J. Moorhouse, A. Williams, and T. E. Maddison, "An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons", Combustion and flame, Vol. 23 No. 2, pp. 203-213, (1974).

[18] A. Kumamoto, H. Iseki, R. Ono and T. Oda, "Measurement of Minimum Ignition Energy in Hydrogen-oxygen-nitrogen Premixed Gas by Spark Discharge", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 301, No. 1, pp. 12-39 (2011).

[19] F. Paschen, "Ueber die zum funkenübergang in luft: wasserstoff und kohlensäure bei verschiedenen drucken erforderliche potentialdifferenz", JA Barth, pp. 66-96 (1889).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[20] Y. Chen, “Electrical breakdown of Gases in subatmospheric pressure”, (2016).

[21] T. Kammermann, W. Kreutner, M. Trottmann, L. Merotto, P. Soltic and D. Bleiner, “Spark-induced Breakdown Spectroscopy of Methane/Air and Hydrogen-enriched Methane/Air Mixtures at Engine Relevant Conditions”, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Vol. 148, pp. 152-164 (2018).

[22] D. J. Kim, J. W. Lee and S. H. Park, “Preliminary Study on Spark Emission Characteristics for Measuring the Minimum Ignition Energy of a Hydrogen-Oxygen Combustible Mixture”, fire Science and Engineering, Vol. 36, No. 6, PP. 8-15, (2022).

[23] A. E. Potter JR, “Flame quenching. In: Progress in Combustion Science and Technology”, Pergamon, pp. 145-181, (1960).

[24] S. P. M. Bane, “Spark Ignition: Experimental and Numerical Investigation with Application to Aviation Safety”, Doctoral’s Thesis, California Institute of Technology (2010).

[25] R. Ono, M. Nifuku, S. Fujiwara, S. Horiguchi and T. Oda, “Minimum Ignition Energy of Hydrogen – Air Mixture: Effects of Humidity and Spark Duration”, Journal of Electrostatics, Vol. 65, No. 2, pp. 87-93 (2007).

[26] C. J. B. Parejo, “Experimental Characterization of Electrical Discharges and Formation of the Ignition Kernel”, Doctoral’s Thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechique-Poitiers (2019).

[27] Z. Yang, X. Yu, H. Zhu, D. S. Ting, and M. Zheng, “Effect of spark discharge energy scheduling on ignition under quiescent and flow conditions”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 234, No. 12, pp. 2878-2891, (2020).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[28] R. Maly and M. Vogel, “Initiation and Propagation of Flame Fronts in Lean CH4-air Mixtures by the Three Modes of the Ignition Spark”, Symposium (International) on Combustion, Elsevier, Vol. 17, No. 1, pp. 821-831 (1979).

[29] N. Jeanvoine, “Plasma-material interaction and electrode degradation in high voltage ignition discharges” (2009).

[30] S. R. Turns, “Introduction to Combustion”, McGraw-Hill Companies, New York, USA (1996).

[31] Yunus, A. “Cengel Heat and mass transfer: fundamentals and applications”, McGraw-Hill Education, 2019.

[32] R. A. Svehla, “Estimated Viscosities and Thermal Conductivities of Gases at High Temperatures”, NASA Technical Report R-132 (1962).

[33] R. C. Reid, J. M. Prausnitz and B. E. Poling, “The Properties of Gases and Liquids”, McGraw-Hill, New York (1987).

[34] A. E. D. Heylen, “Sparking formulae for very high-voltage Paschen characteristics of gases”, IEEE electrical insulation magazine, Vol. 22, No. 3, pp. 25-35, (2006).

[35] A. Fridman, A. Chirokov, and A. Gutsol, “Non-thermal atmospheric pressure discharges”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 38, No. 2, (2005).

[36] D. M. Ha, and S. K. Lee, “ A Study on Pressure Dependence of Minimum Ignition Energy”, Journal of the korean institute of gas, Vol. 1, No. 1, pp. 7-13, (1997).

[37] H. Y. Kim, "Combustion theory", ACAdemy NETwork, (2000).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[38] R. Nordrik, “Investigation of Spark Ignition and Autoignition in Methane and Air Using Computational Fluid Dynamics and Chemical Reaction Kinetics”, A numerical Study of Ignition Processes in Internal Combustion Engines, (1993).

[39] H. J. Kim, S. W. Hong, and H. D. Kim, “Quenching Distance Measurement for the Control of Hydrogen Explosion”, CD-Rom Proc., 18th ICDERS, (2001).

[40] S. Y. Yang, H. J. Hong, S. H. Jung, S. D. Kim and S. W. Hong, “Quenching Distance Measurement for Developing Quenching Meshes for Control of Hydrogen Combustion”, korean Nuclear Society, (2000).

[41] M. Ngo, “Determination of the minimum ignition energy (MIE) of premixed propane/air“, Master’s Thesis. The University of Bergen, (2009).