



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](#)

공학석사 학위논문

동축류 메탄( $CH_4$ ), 에탄( $C_2H_6$ ), 프로판( $C_3H_8$ )

혼합 확산화염내의 수소( $H_2$ ) 첨가가

화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

Effect of Hydrogen( $H_2$ ) Addition on Flame Shape and  
Combustion Products in Mixed Co-flow Diffusion Flames of  
Methane( $CH_4$ ), Ethane( $C_2H_6$ ) and Propane( $C_3H_8$ )

지도교수 최 재 혁

2019年 8月

한국해양대학교 해사산업대학원

기관시스템공학과

박 호 용

본 논문을 박호용의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장      이 원 주      (인)

위 원      윤 성 환      (인)

위 원      최 재 혁      (인)

2019년 06월 17일

한국해양대학교 해사산업대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
Abstract .....	vi
<b>1. 서 론</b>	
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 및 내용 .....	2
<b>2. 이론적 배경</b>	
2.1 배기가스 규제 .....	5
2.2 배기가스 저감기술 .....	8
2.2.1 EGR .....	9
2.2.2 SCR .....	10
2.3 배기가스 생성원리 .....	11
2.3.1 질소산화물 .....	11
2.3.2 일산화탄소 .....	12
2.3.3 탄화수소 .....	13
<b>3. 실험장치 및 방법</b>	
3.1 실험장치 .....	14
3.1.1 동축류 버너(CO-FLOW BURNER) .....	14
3.1.2 주변장치 .....	16
3.2 실험 조건 및 방법 .....	18
3.3 수치해석 방법 .....	26

#### 4. 실험결과 및 고찰

4.1 연소생성물 특성 .....	27
4.1.1 질소산화물 .....	27
4.1.2 이산화탄소 .....	29
4.1.3 일산화탄소 .....	30
4.2 수치해석 결과 .....	31
4.3 화염 특성 .....	37

#### 5. 결론

참고 문헌 .....	43
-------------	----

# List of Tables

<b>Table 1</b> IMO of strategy .....	2
<b>Table 2</b> Exhaust gas reduction devices .....	8
<b>Table 3</b> Specifications of the Gas Analyzer (ECOM MK 6000) .....	16
<b>Table 4</b> Experiment data of Fuel and Oxidizer .....	18
<b>Table 5</b> Experiment data of Methane with hydrogen (Case 1) .....	19
<b>Table 6</b> Experiment data of Methane-Propane with hydrogen (Case 2) .....	21
<b>Table 7</b> Experiment data of Methane-Ethane-Propane with hydrogen (Case 3) ....	23

## List of Figures

Fig. 1 GHG Reduction Measures .....	3
Fig. 2 NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> emission reduction measures of IMO .....	6
Fig. 3 CO <sub>2</sub> emission reduction measures of IMO .....	7
Fig. 4 Exhaust Gas Recirculation .....	9
Fig. 5 Selective Catalytic Reduction .....	10
Fig. 6 Design of Co-flow burner .....	15
Fig. 7 Gas Analyzer .....	17
Fig. 8 Schematic diagram of case 1 .....	20
Fig. 9 Schematic diagram of case 2 .....	22
Fig. 10 Schematic diagram of case 3 .....	24
Fig. 11 Concentration of nitrogen oxide for hydrogen addition rates .....	28
Fig. 12 Concentration of carbon dioxide for hydrogen addition rates .....	29
Fig. 13 Concentration of carbon monoxide for hydrogen addition rates .....	30
Fig. 14 Calculated CO <sub>2</sub> distributions with increasing the hydrogen addition ·	33
Fig. 15 Calculated O <sub>2</sub> distributions with increasing the hydrogen addition ···	34
Fig. 16 Calculated CO distributions with increasing the hydrogen addition ···	35
Fig. 17 Calculated Flame Temp. with increasing the hydrogen addition .....	36
Fig. 18 Methane Flame Photographs by No. 1 ~ 9 .....	38
Fig. 19 Methane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9 .....	39
Fig. 20 Methane-Ethane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9 .....	40

# 동축류 메탄( $CH_4$ ), 에탄( $C_2H_6$ ), 프로판( $C_3H_8$ ) 혼합 확산화염내의 수소( $H_2$ ) 첨가가 화염 형상 및 연소 생성물에 미치는 영향

박 호 용

한국해양대학교 해사산업대학원  
기관시스템공학과

## 요 지

최근 강화된 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 황산화물( $SO_x$ ) 배출규제에 대응하여 LNG연료를 사용하는 선박엔진이 개발 및 상용화 되고 있지만 LNG 연료의 주성분인 메탄( $CH_4$ )은 탄소를 포함하고 있어 여전히 온실가스인 이산화탄소( $CO_2$ )를 발생시킨다. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 국제해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서(AnnexVI Reg. 20~21)에서 에너지 효율 설계 지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)를 적용하여 선종 및 선박의 크기별로 이산화탄소( $CO_2$ ) 배출 특성을 비교하고 단계별로 감축계수를 부여하여 2015년 기준으로 2020년까지 10%, 2025년까지 30%의 감축을 목표로 하고 있다. 또한 지난 2016년 파리에서 개최된 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention On Climate Change)이 발효되면서 개도국 포함 160개국 이상의 국가가 참여하여 온실가스 감축기여 의무를 부여하게 되었으며 국내에서는 저탄소 녹색성장을 위한 대안으로서 수소에너지와 그 이용 기술에 대한 관심이 높아지는 추세이다.



이와 같은 동향에 맞추어 무탄소 연료인 수소를 LNG의 주성분인 동축류 메탄, 메탄-프로판, 메탄-프로판-에탄 확산화염 내에 첨가하여 화염형상 및 연소생성물에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

본 연구에서는 상온상압 조건의 확산화염에 수소를 단계적으로 첨가하여 실제 생성되는 연소생성물의 변화 추이를 가스 분석기를 이용하여 실험적으로 관찰하였고 확산화염의 형상은 디지털카메라를 이용하여 단계적으로 관찰 하였다. 실험결과에서 확산화염에 수소를 첨함에 따라 질소산화물의 생성량이 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수소의 상대적으로 높은 단열화염온도와 빠른 연소속도가 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성을 촉진했기 때문이다. 반면 이산화탄소의 생성량은 감소하는 경향을 나타냈는데 수소를 첨가함에 따라 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판의 혼합 확산화염에 포함되어있는 전체 탄소비율이 줄어들어 이산화탄소의 생성량이 감소한 것이다. 이는 선박에서 LNG-수소의 혼합 연료사용으로 인해 온실가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 저감할 수 있는 하나의 방안으로 고려될 수 있다는 것을 의미한다. 확산화염에 수소를 첨가함에 따라 일산화탄소의 생성량이 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수소를 첨가함에 따라 전체적인 이론 공연비가 높아짐에 따라 불완전 연소 확률이 높아진 영향으로 보이며 이러한 경향은 메탄-에탄-프로판 혼합 확산화염에서 수소를 40% 첨가하였을 때 가장 두드러지게 보인다. 수소첨가량에 따른 화염형상을 비교분석한 결과, 모든 실험에서 수소 첨가량을 증가시키면 화염상부에 적노색부분이 줄어들고 화염의 하부의 파란색 부분이 선명해지는 것을 확인할 수 있었다.

KEY WORDS: 확산화염, 수소첨가, 질소산화물, 이산화탄소, 일산화탄소

# Effect of Hydrogen( $H_2$ ) Addition on Flame Shape and Combustion Products in Mixed Co-flow Diffusion Flames of Methane( $CH_4$ ), Ethane( $C_2H_6$ ) and Propane( $C_3H_8$ )

Park Ho-yong

*Department of Marine System Engineering  
Graduate School of Korea Maritime & Ocean University*

## Abstract

Recently, the marine engine using LNG fuel has been developed and commercialized in response to the regulation of sulfur oxides emission of the IMO(International Maritime Organization). However, the main component of LNG fuel is methane. It still generates carbon dioxide, a greenhouse gas. The IMO(International Maritime Organization) has adopted the EEDI(Energy Efficiency Design Index) in the Annex(Annex VI Regulations 20 to 21) of the International Maritime Pollution Prevention Convention(MARPOL 73/78). The EEDI(Energy Efficiency Design Index) is applied to compare  $CO_2$  emission characteristics according to the type of ship and ship size and to reduce  $CO_2$  emissions by 10% by 2020 and 30% by 2025 in 2015. In addition, as the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) was held in Paris in 2016, more than 160 countries, including developing countries, participated to contribute to the reduction of greenhouse gas emissions.

In Korea, interest in hydrogen energy and its utilization technology is increasing as an alternative for low carbon green growth. In accordance with these trends, the effect of hydrogen-free carbon fuel on the flame and combustion products is investigated by adding the co-flow methane, methane-propane, methane-ethane-propane diffusion flame, which is the main component of LNG.

In this study, the evolution of combustion products by adding hydrogen to the diffusion flame at room temperature and normal pressure was experimentally observed using a gas analyzer, and the shape of the diffusion flame was observed step by step using a digital camera. Experimental results show that the amount of nitrogen oxides tends to increase linearly with the addition of hydrogen to the diffusion flame. This is because the relatively high adiabatic flame temperature and fast burning rate of hydrogen facilitated the generation of thermal NO<sub>x</sub>.

On the other hand, the amount of carbon dioxide tended to decrease linearly with the addition of hydrogen, which decreased the total carbon content in the mixed diffusion flame of methane, methane-propane and methane-ethane-propane. This means that the use of mixed fuel of LNG-hydrogen in the ship can be considered as a way to reduce the greenhouse gas CO<sub>2</sub>. The amount of carbon monoxide formation tended to increase with the addition of hydrogen to the diffusion flame. This seems to be due to the increased incomplete combustion probability as the overall theoretical air / fuel ratio increases with the addition of hydrogen, and this tendency is most pronounced when 40% hydrogen is added in the methane-ethane-propane mixed diffusion flame.

As a result of comparing the flame shape according to the amount of hydrogen addition, it was found that when the amount of hydrogen is increased in all experimental casings, The length of the reddish-brown part of the flame is reduced, and the blue of the lower part of the flame. It was confirmed that the color portion became clear.

KEY WORDS: Diffusion flame, Hydrogen addition, Nitrogen oxide,  
Carbon dioxide, Carbon monoxide

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

19세기 선박 내연기관의 발명 이래로 물류산업의 혁신적인 발전을 이루었고 이것은 세계 산업생태계 구축의 초석이 될 수 있었지만 자원고갈과 환경오염이라는 심각한 문제를 초래하였다. 이러한 문제를 해결하고자 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 1970년 이후 선박에 의한 오염방지를 위하여 국제협약(MARPOL)을 채택하면서 선박의 내연기관으로부터의 이산화탄소( $CO_2$ ), 질소산화물( $NO_x$ ), 황산화물( $SO_x$ ), 블랙카본(Black carbon) 등 오염물질 배출 감소를 추진해왔고 미국, 유럽등도 자국해역 주변을 오염물질 배출통제해역(ECA)으로 설정하는 등 해운산업 환경규제는 점차 강화되고 있다. 또한 지난 2016년 파리에서 개최된 기후변화협약(UNFCCC)이 발효되면서 개도국 포함 160개국 이상의 국가가 참여하여 이산화탄소( $CO_2$ )와 같은 온실가스 감축기여 의무를 부여받게 되었다.

이에 발맞추어 선박업계에서도 오염물질 배출을 감소시킬 수 있는 다양한 관련 기술을 개발해 왔으며 에너지원으로도 석유에서 LNG와 같은 가스 연료를 사용하는 내연기관을 개발하여 각종 환경규제에 대응하고 있다. 하지만 LNG 연료의 주성분인 메탄( $CH_4$ )은 탄소를 여전히 포함하고 있어 이산화탄소( $CO_2$ )를 발생시키고 이렇게 선박에서 배출되는 이산화탄소량은 2007년 기준으로 10억 4,600만톤으로 세계 온실가스 배출량의 3.3%를 차지하고 있고 선박의 온실가스 규제 없이 방치할 경우 2050년에는 세계 온실가스 배출량의 12~18%를 차지할 것으로 예측된다. [1]

## 1.2 연구 목적 및 내용

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 온실가스 저감에 관한 포괄적 전략 개발 로드맵의 첫 단계로서, 2018년 4월 13일 해양환경위원회(Marine Environment Protection Committee)는 제72차 연례회의에서 초기 IMO 전략에 관한 MEPC.304(72)를 채택하였다. 초기 IMO 전략의 비전은 국제해상운송에서 발생하는 온실가스 배출을 저감하고, 사안의 급박성을 고려하여 금세기 내에 온실가스 배출을 가급적 이른 시기에 완전히 제거함을 목표로 하고 있으며 온실가스 저감에 관한 구체적인 단기, 중기, 장기조치들의 사항을 정리하면 Table 1과 같다.[2]

Table 1. IMO of strategy

구분	기간	조치	대상	현재 단계
단기	2018 ~ 2023	신규 EEDI	신규선박	-10% (2015) -20% (2020) -30% (2025)
		운영효율조치 (SEEMP)	기존 선박	SEEMP
		선단 개선 프로그램	기존 선박	-
		속도 제어	기존 선박	-
		메탄 및 기타 유기 화합물 배출규제	선박엔진/누출	-
중기	2023 ~ 2030	저탄소/무탄소 연료 사용 시범사업	연료/신규 및 기존선박	-
		운영효율조치강화	기존 선박	SEEMP
		시장기반조치(MBMs)	기존 선박/연료	-
장기	2030 ~	무탄소연료 개발 및 공급	연료/신규 및 기존선박	-

\*SOURCE : IFANS 주요국제문제분석(제49호)

선박 업계에서는 온실가스 배출 저감을 위한 노력은 다양한 경로를 통해 시도되고 있으며, 이는 Fig. 1과 같이 크게 기술적 조치(Technical measures), 운항 관련 조치(Operational measures), 경제학적 수단(Economic instruments)으로 대별될 수 있다. 기술적 조치(Technical measures)는 선박의 구조 개량 등을 통해 에너지효율을 높임으로써 결과적으로 화석연료 사용량을 줄이고 온실가스 배출을 저감하는 조치들이다. 운항 관련 조치(Operational measures)는 선박 항행 및 운용의 개선이나 혁신을 통해 결과적으로 에너지효율 향상을 도모한다. 경제학적 수단(Economic instruments)은 기술적, 운항 관련 조치들의 시행을 장려하기 위하여 인센티브를 부여하는 방식으로서, 해운업 부분에서도 탄소세 혹은 배출권 거래제 도입을 통해 온실 가스 배출의 외부효과를 줄이고 각 업체들이 환경비용을 내재화하게끔 하는 것이다.

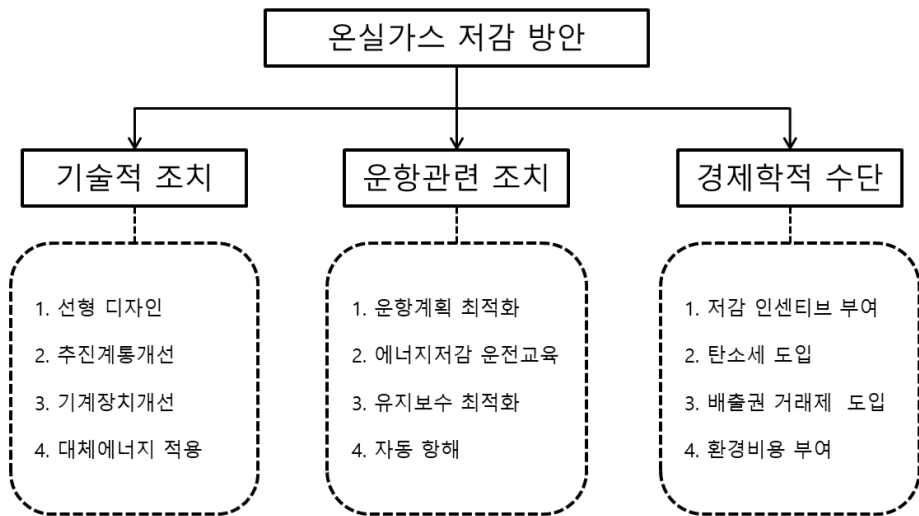


Fig. 1 GHG Reduction Measures

본 연구에서는 IMO 전략상 중/장기적인 조치 방안에 해당하고 온실가스 배출 저감을 위한 기술적 조치에 해당하는 무탄소 연료 개발의 일환으로 청정 연료로 각광 받고 있는 수소를 대상으로 연구를 진행하였다.

수소는 물질을 구성하는 모든 원소 중 가장 가볍고, 물과 탄화수소의 주성분의 형태로 주위에 존재한다. 단위 질량당 발열량이 크고, 연소 후 생성물이 수증기가 대부분인 청정연료이며, 가연한계가 넓고, 최소 점화 에너지가 낮아 순수 수소를 LNG 연료와 혼합하여 연소하면 연소속도가 빨라지고 연소 및 배기 특성이 향상된다. 또한 수소의 빠른 연소속도와 넓은 가연 범위 특성으로 인해 안정적인 희박연소가 가능하여 이산화탄소 배출량 저감을 기대할 수 있다.[3] [4] 따라서 이산화탄소의 증가로 인한 지구온난화 방지할 수 있는 석유 대체 에너지원으로 단기적으로는 EEDI 규제를 만족시킬 수 있는 내연기관의 에너지원으로 전망 되면 향후 장기적인 환경 및 배기 규제에 대응 가능한 석유에너지의 대체 에너지원으로 각광 받을 것이다.

본 연구에서는 가까운 미래에 석유에너지의 대체 에너지원으로써 수소연료를 사용하기 위한 기초적인 자료로 LNG연료의 주성분인 메탄, 에탄, 프로판 혼합 확산화염에 수소를 첨가하여 생성되는 연소 생성물과 화염 형상을 실험적으로 관찰하여 분석하였다.



## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 배가가스 규제

선박 배출가스에 대한 규제는 황산화물( $SO_x$ ), 질소산화물( $NO_x$ ), 이산화탄소( $CO_2$ )로 크게 나눌 수 있다. 황산화물에 대한 배출 규제는 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 국제해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 VI 규약(Regulation 14)에 따라 배출통제구역(ECAs, Emission Control Areas)은 ‘2015.1.1 이후 0.1% 이하, 그 외 모든 해역은 ’ 2020.1.1 이후 0.5%로 기존 대비 90% 수준으로 감축 시행 예정이다.

질소화합물( $NO_x$ )의 규제 대상선박은 출력이 130kW를 초과하는 선박용 디젤기관 및 ‘2000.1.1.이후 주요개조를 하는 출력이 130kW 초과 선박용 디젤기관이다. 2000년부터 2011년 이전에 건조된 선박은 Tier 1 허용 기준을 따라야 하고 2011년 이후에 건조된 선박은 강화된 Tier 2 허용 기준을 따라야 한다. 또한 2016년 이후 건조된 선박은 Tier 3이 적용되며 질소산화물( $NO_x$ ) 배출규제해역(ECAs)을 항해하는 동안 만족해야 하며, 배출규제해역을 제외한 구역에서는 Tier 2 기준까지 만족하면 된다.

이산화탄소( $CO_2$ ) 배출 규제는 에너지 효율 설계 지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)를 적용하여 선종 및 선박의 크기별로 이산화탄소( $CO_2$ ) 배출 특성을 비교하고 단계별로 감축계수를 부여하여 2015년 기준으로 2020년까지 10%, 2025년까지 30%의 감축을 목표로 하고 있다. 황산화물( $SO_x$ )과 질소산화물( $NO_x$ )에 대한 배기가스 규제와 이산화탄소( $CO_2$ )에 대한 상세내용은 각각 아래 Fig 2 및 Fig 3과 같다.

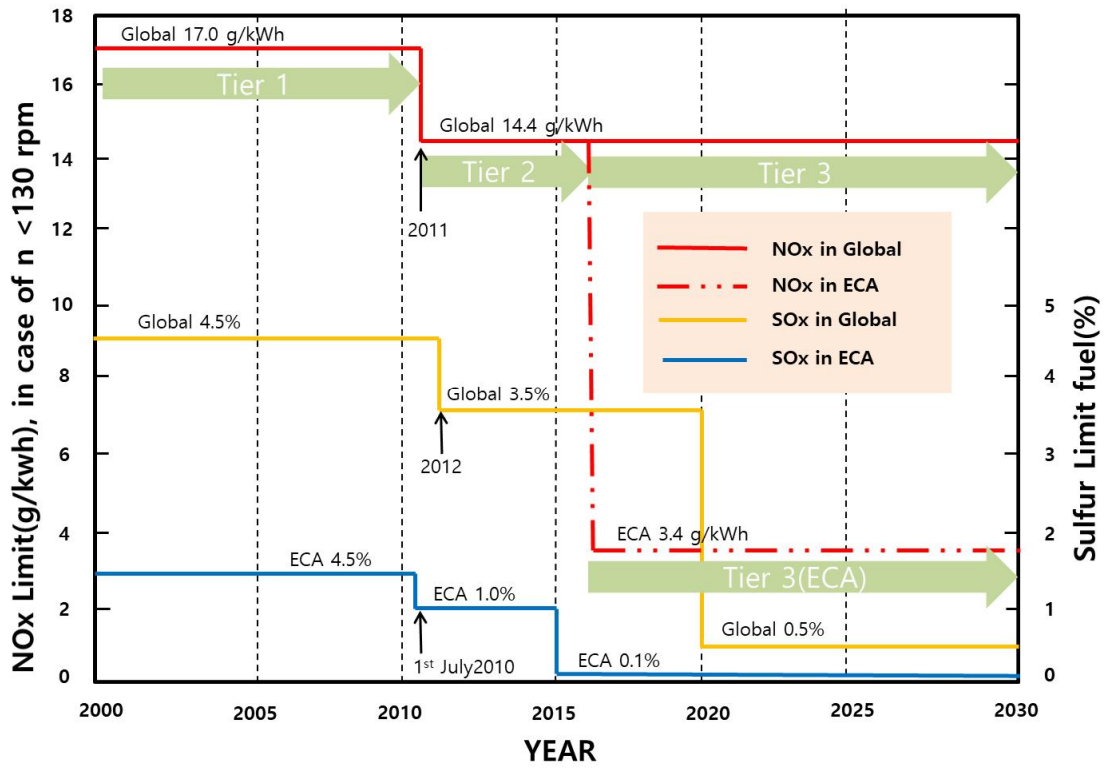


Fig. 2  $NO_X$ ,  $SO_X$  emission reduction measures of IMO

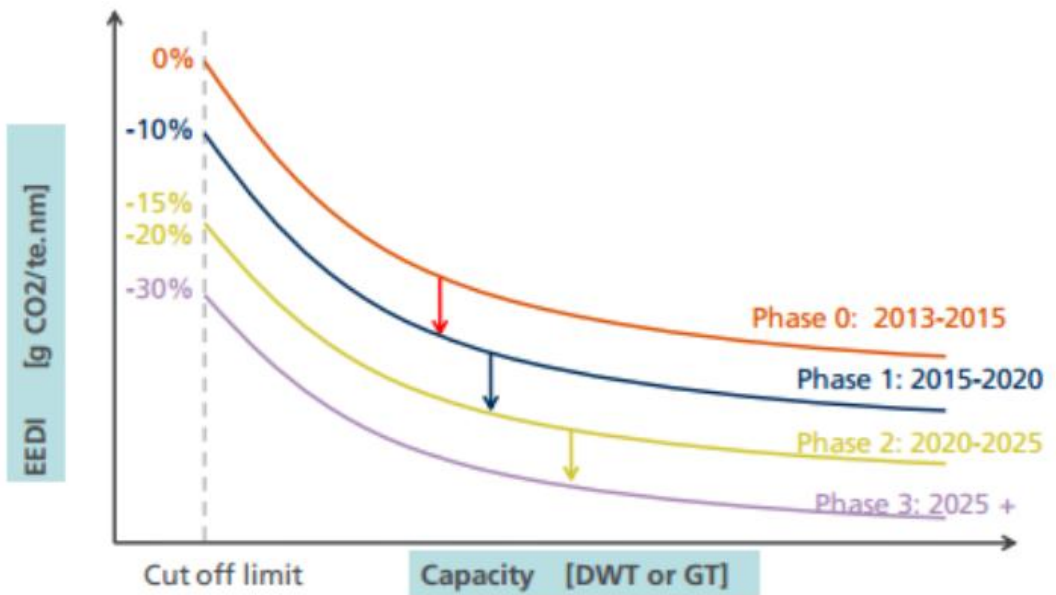


Fig. 3 CO<sub>2</sub> emission reduction measures of IMO

\*SOURCE : Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines,  
IMO Train the Trainer Course on Energy Efficient

## 2.2 배기가스 저감기술

선박에 적용되는 배기가스 저감기술은 운항계획과 디젤기관의 타입 및 사용연료 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 첫 번째로 운항계획에서 배출규제해역(ECA)을 항해하는 선박에 대해서는 질소산화물( $NO_x$ )의 배출 규제는 Tier 3을 만족하여야 하고 황산화물( $SO_x$ )은 0.1% 이하로 배출하는 배기가스 저감기술을 선택하여야 한다. 두 번째로 선박엔진의 특성을 고려하여야 한다. 예시로 Table 2와 같이 가스모드를 기준으로 Otto Cycle의 중속 X-DF엔진과 Diesel Cycle의 저속 ME-GI엔진을 선정하여 적합한 배기가스 저감기술을 접목하였다. 마지막으로 선박에 사용되는 연료가 가스연료인지 고유황유 혹은 저유황유 인지를 고려하여야 한다.

**Table 2** Exhaust gas reduction devices

구분	연료	저감기술	배출규제		
			SOx	NOx	운행지역
ME-GI	LNG	EGR	0.1% 이하	Tier 3	ECA
	MGO	EGR	0.1% 이하	Tier 3	
	LNG	-	0.1% 이하	Tier 2	non-ECA
	MGO/HFO	-	0.1% 이하 /3.5% 이하	Tier 2	
X-DF	LNG	-	0.1% 이하	Tier 3	ECA
	MGO	SCR	0.1% 이하	Tier 3	
	LNG	-	0.1% 이하	Tier 2	non-ECA
	MGO/HFO	-	0.1% 이하 /3.5% 이하	Tier 2	

## 2.2.1 배기가스 재순환장치(Exhaust Gas Recirculation, EGR)

배기가스 재순환장치(Exhaust Gas Recirculation)는 연료의 연소 과정에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 저감하기 위해 배기가스 일부를 냉각시킨 후 흡입공기와 함께 다시 연소실로 재공급시키는 장치이다. 배기가스의 높은 열용량과 낮은 산소함량이 연소실 최고 연소 온도를 낮추어 고온의 연소에 의한 질소산화물(NOx)의 생성을 억제한다. 하지만 기관의 출력을 감소시키고 연료 소비율을 높여 전체적인 효율 감소가 나타나는 단점이 있다.[6]

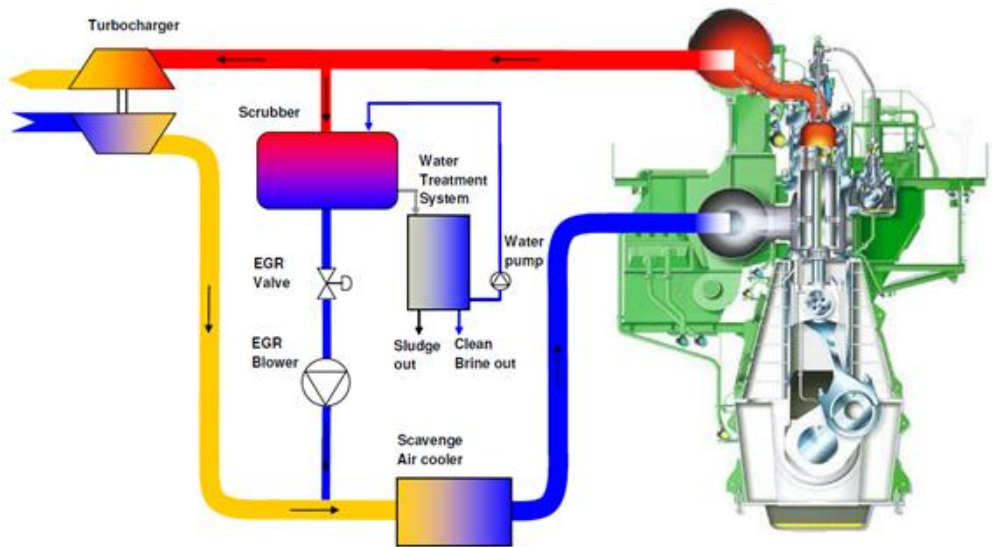


Fig. 4 Exhaust Gas Recirculation

\*SOURCE : <https://steemit.com/kr/@tolany/3-2>

## 2.2.2 선택적 촉매환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)

선택적 촉매환원법(Selective Catalytic Reduction)은 환원제의 종류에 따라 암모니아를 이용한 NH<sub>3</sub>-SCR 또는 요소수를 이용한 Urea-SCR로 구분되며 배출가스의 질소산화물을 촉매 반응기에서 반응시켜 질소 및 산소로 환원시키는 기술이다. 사용되는 촉매로는 크게 금속산화물 촉매와 Zeolite로 구분된다. SCR은 정화 효율이 높아 상업적 처리 기술로 발전했다. 그러나 장치의 부피가 매우 크고 귀금속 사용에 의해 비용이 비싸 현재 대형선박의 신조선에는 적용되고 있으나 소형 선박에 적용하기에는 어려운 실정이다.[6]

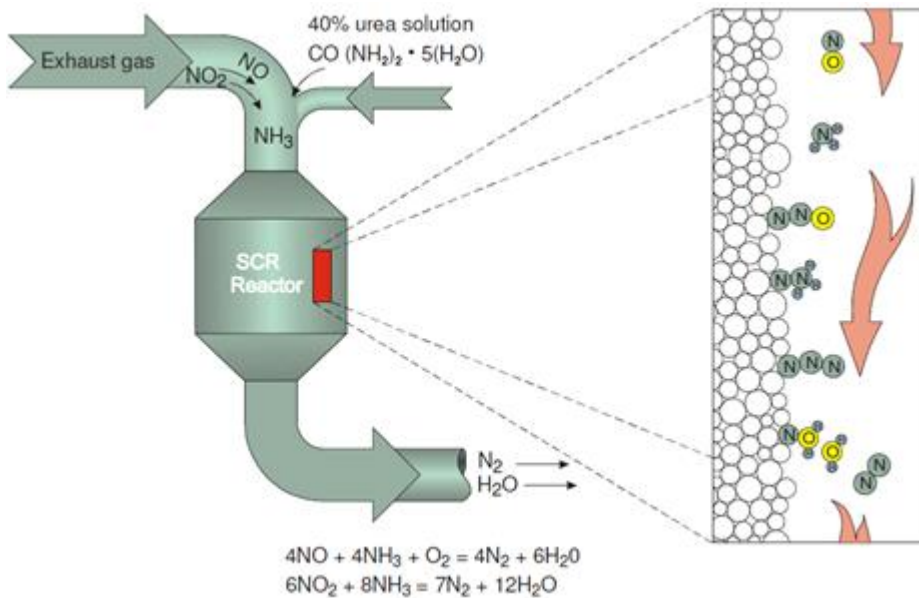


Fig. 5 Selective Catalytic Reduction

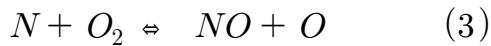
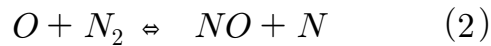
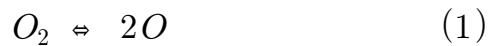
\*SOURCE : <https://steemit.com/kr/@tolany/3-2>

## 2.3 배기가스 생성원리

### 2.3.1 질소산화물

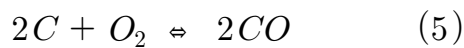
질소산화물( $NO_x$ )의 생성은 대부분 연소장치에서의 Thermal  $NO_x$ 가 대부분을 차지한다. 질소산화물( $NO_x$ )의 생성은 연소온도와 밀접한 관계가 있으며 고온 연소에서 연료 중 질소의 산화로 발생하여 대기 중으로 배출 된다.

일반적으로 연소가스 중 산소분자는 1700 °C 전후의 고온에서 식 (1)의 분해반응에 의해 산소원자를 생성하게 된다. 이 산소원자와 질소 분자가 반응하여 식(2)의 NO를 생성하고 동시에 질소원자로 분리한다. 이 질소원자는 산소분자와 반응하여 식(3)의 NO를 생성하고 산소원자를 발생시키는 연쇄반응을 일으킨다. 또한 대기 중으로 방출된 NO는 식(4)와 같이 산화되며 광화학 스모그(Photochemical smog) 현상을 일으킨다.[7]



### 2.3.2 일산화탄소

일산화탄소(CO)는 주로 연소 시 모든 탄소를 이산화탄소로 변화시키는 산소의 양이 부족할 때 불완전연소로 인하여 발생한다. 식(5)은 그 화학반응식이다.[7]



충분한 산소의 양이 보장되는 희박조건에서 연소시키면 일산화탄소를 저감할 수 있다. 디젤기관의 경우 항상 희박한 운전영역에서 작동하기 때문에 CO의 배출은 LNG 기관보다 더 적으며, 가솔린 기관과 비교해 보면 이론공연비 또는 희박한 영역에서 연소되기 때문에 이산화탄소(CO)가 가솔린 기관보다 적게 생성된다. [7]

일산화탄소(CO)는 무색, 무미, 무취의 성질을 띠고 있으며 피부나 점막에 대한 자극도 없어 감지하기 어렵다. 또한 물에 잘 녹지 않고 공기에 비해 비중이 0.967배이고, 헤모글로빈과의 결합력이 산소에 비하여 300배 이상 크기 때문에, 체내 산소운반작용을 저해하고 저산소증을 유발해 중독 또는 사망하게 된다. 그리고 인지작용과 사고능력 감퇴, 반사작용 저하, 졸음과 협심증 유발, 무의식 및 사망을 유발하며 임신여성에서는 태아성장 및 어린이의 조직 발달에도 영향을 미친다.[8]



### 2.3.3 탄화수소

탄화수소(HC)는 미연 또는 일부가 연소된 여러 탄화수소의 총칭이며  $C_8H_{18}$  또는  $CH_4$ 의 환산체적 ppm으로 측정된다.

탄화수소(HC)는 불완전 연소에 기인하여 농후한 영역에서 배출하고 또한 희박 연소 영역에서도 배출된다. 이것은 피스톤 링과 틈새체적(crevice)에 의한 배출이 이에 해당된다. 연소실 내의 압축과 연소에 따라 연소실 압력은 증가하고 이에 따라 실린더 안의 가스의 일부는 피스톤, 피스톤 링 그리고 실린더 벽 사이에 존재하는 틈새체적으로 유입된다. 유입된 대부분의 가스는 연소과정에서 연소되지 못하고 미연 혼합기로 남게 되는데, 이 틈새는 너무 좁아 열손실이 많으므로 화염이 들어가지 연소를 진행시킬 수 없기 때문이다. 이 가스는 팽창 및 배기과정에서 압력이 낮아지면서 틈새체적에서 나와 탄화수소(HC)로 배출된다.

또 다른 탄화수소(HC)는 연소실 벽 자체에서 발생된다. 화염이 연소실 벽에 접근함에 따라 화염이 꺼지는 소염층(quench layer)에는 탄화수소(HC)가 남는다. 연소실 벽 근방의 이 얇은 층( $\leq 0.1\text{mm}$ )에 있는 탄화수소(HC)는 기관의 운전조건에 따라 변화되며, 희박혼합기에서는 연소온도가 낮고 화염전파가 느리기 때문에 소염층의 두께가 두껍게 되어 많은 탄화수소(HC)가 배출되게 된다.

탄화수소(HC)의 세 번째 근원은 피스톤과 실린더 헤드 및 실린더 벽의 윤활유막에 흡수되는 탄화수소(HC)이다. 마지막으로 탄화수소(HC)의 배출근원이 되는 것은 기관 사이클 중 특별히 느린 연소에서 화염이 통째로 소실되는 현상(bulk quenching)에 기인하는 불완전연소이다. 이와 같은 상태는 공기연료비, 점화시기, EGR ratio 등 배출물 제어가 적합하게 조절되지 않은 과도적 기관 작동에서 발생한다.[9]

## 제 3 장 실험장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

#### 3.1.1 동축류 버너(CO-flow burner)

층류확산화염을 이용하여 연료 혼합 연소에 수소 첨가에 따른 배기생성물 및 화염 형상 특성을 알아보기 위하여 동축류 버너를 사용 하였다. 실험에 상용된 동축류 버너는 중심에 내경이 10mm 외경이 12mm 인 스테인리스 스틸(Stainless steel)의 재질의 내부 노즐과 내경이 100mm 이고 외경이 140mm인 외부 노즐로 구성되고 있다.

본 연구에서는 메탄, 에탄, 프로판의 혼합 연료를 내부노즐로 공급하였고 외부 노즐로는 산소 24%, 질소 74%를 혼합한 산화제(Oxidizer)를 공급 하였다. 이때 공급되는 산화제는 황동스크린과 직경 2mm의 유리구슬 및 세라믹 허니콤을 통과하게 설계하여 균질의 기체를 화염에 공급 하였다. 또한 생성되는 연소생성물의 분석을 위하여 가스 포집장치를 상부에 설치하여 내부에 가스분석기의 Probe tip을 연결하였다. 동축류 버너 하단에는 질량 유량 제어기 (Mass Flow Controller, MFC)를 통과한 후 역류방지밸브(Non-return check v/v)를 설치하여 실험의 안정성에 기 인하였으며 각 기체를 공급하는 파이프는 PVC재질의 Flexible type으로 구성·설치하여 실험의 용이성과 호환성을 높였다.

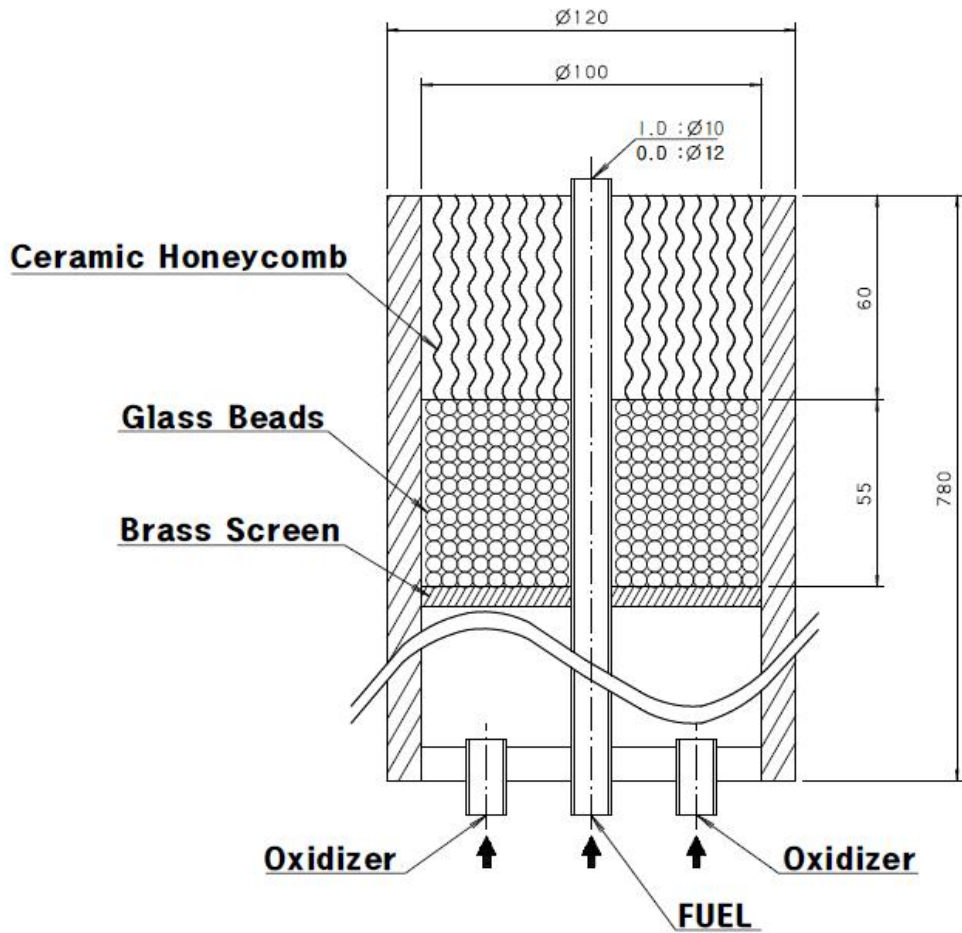


Fig. 6 Design of Co-flow burner

### 3.1.2 주변장치

본 실험의 주변장치는 실험에 요구되는 연료 및 산화제의 정밀한 유량을 공급하기 위하여 질량 유량계(Mass Flow Controller : MKS, 1179A0075C818V-K)를 선택하였으며 유량 제어기(Flow controller, MKS 600, ATOVAC GMC-1200)을 이용하여 각 실험에 필요한 유량을 공급하였다. 연소 생성물의 분석은 Fig. 7의 연도 가스 분석기(ECOM MK 6000)를 이용하여 계측하였으며, Table 3에 실험에 사용된 가스 분석기의 사양을 나타내었다. 또한 확산화염의 형상을 단계적으로 관찰하기 위하여 디지털카메라(FINEPIX S9500)를 이용 하였다.

**Table 3** Specifications of the Gas Analyzer (ECOM MK 6000)

Parameter	Measuring Range	Accuracy
$O_2$	0 - 25 Vol. %	$\pm 0.1$ Vol. %
$CO_2$	0 - 100 Vol. %	$\pm 0.2$ Vol. %
$CO$	0 - 20,000 PPM	$\pm 10$ PPM
$NO$	0 - 5,000 PPM	$\pm 5$ PPM
$NO_2$	0 - 2,000 PPM	$\pm 5$ PPM
$NO_x$	0 - 7,000 PPM	$\pm 5$ PPM
$SO_2$	0 - 5,000 PPM	$\pm 5$ PPM



Fig. 7 Gas Analyzer

\*SOURCE :<http://www.eurotron.co.kr/>

### 3.2 실험 조건 및 방법

모든 확산화염 실험은 주위온도  $288 \pm 3$  K, 대기압인 상온상압 (Temperature and pressure, NTP) 조건에서 진행하였다. 질소산화물 ( $NO_x$ ), 이산화탄소( $CO_2$ ), 일산화탄소( $CO$ ) 배출량 측정 범위를 선택하기 위해 필요한 확산화염의 연소한정한계는 고정된 연료(메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판)에 첨가되는 수소 혼합 유속( $V_{fuel}$ )조건에서 노즐 출구에서 산화제 동향류 분사속도( $V_{oxidizer}$ )를 조절하여 소염(blow out)이 발생하는 조건에서 결정되었다. 소염 시 산화제 및 연료의 유속과 유량 데이터는 Table 4와 같다.

**Table 4** Experiment data of Fuel and Oxidizer

구분	노즐 면적( $cm^2$ )	유량( $cm^3/min$ )	유속( $cm/min$ )
Fuel	0.785	400	509.6
Oxidizer	78.5	3333	42.5

확산화염실험은 총 3가지 Case로 나누어 진행하였고 각 Case는 연료의 구성 성분을 메탄(100%), 메탄(90%)-프로판(10%), 메탄(90%)-에탄(6%)-프로판(4%)로 나누어 첨가되는 수소의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 이때 산화제는 질소(76%), 산소(24%)비율로 고정하여 모든 실험에 동일하게 적용하였다. Case 1의 수소 첨가에 따른 상세 실험 데이터와 실험장비 구성은 각각 Table 5와 Fig. 8과 같다.

**Table 5** Experiment data of Methane with hydrogen (Case 1)

순서	수소(%)	연료( $cm^3/min$ )		산화제( $cm^3/min$ )	
		메탄	수소	산소(24%)	질소(76%)
1	0	400	0	800	2277
2	5	380	20		
3	10	360	40		
4	15	340	60		
5	20	320	80		
6	25	300	100		
7	30	280	120		
8	35	260	140		
9	40	240	160		

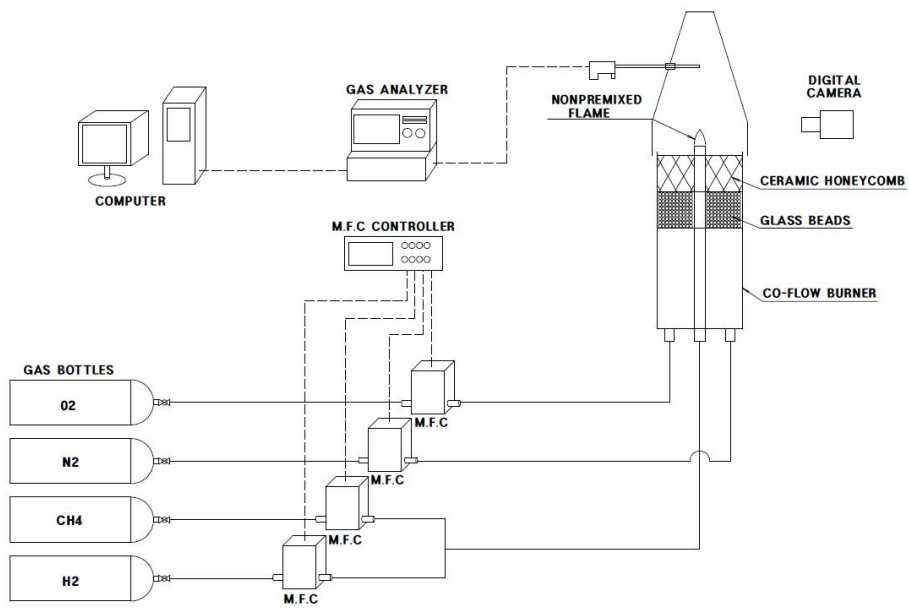


Fig. 8 Schematic diagram of case 1



Case 2의 실험은 메탄(90%)-프로판(10%)에 첨가되는 수소의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 상세 실험 데이터와 실험 장비 구성은 아래 Table 6과 Fig. 9와 같다.

**Table 6** Experiment data of Methane-Propane with hydrogen (Case 2)

순서	수소(%)	연료( $cm^3/min$ )			산화제( $cm^3/min$ )	
		메탄	프로판	수소	산소(24%)	질소(76%)
1	0	360	40	0	800	2277
2	5	342	38	20		
3	10	324	36	40		
4	15	306	34	60		
5	20	288	32	80		
6	25	270	30	100		
7	30	252	28	120		
8	35	234	26	140		
9	40	216	24	160		

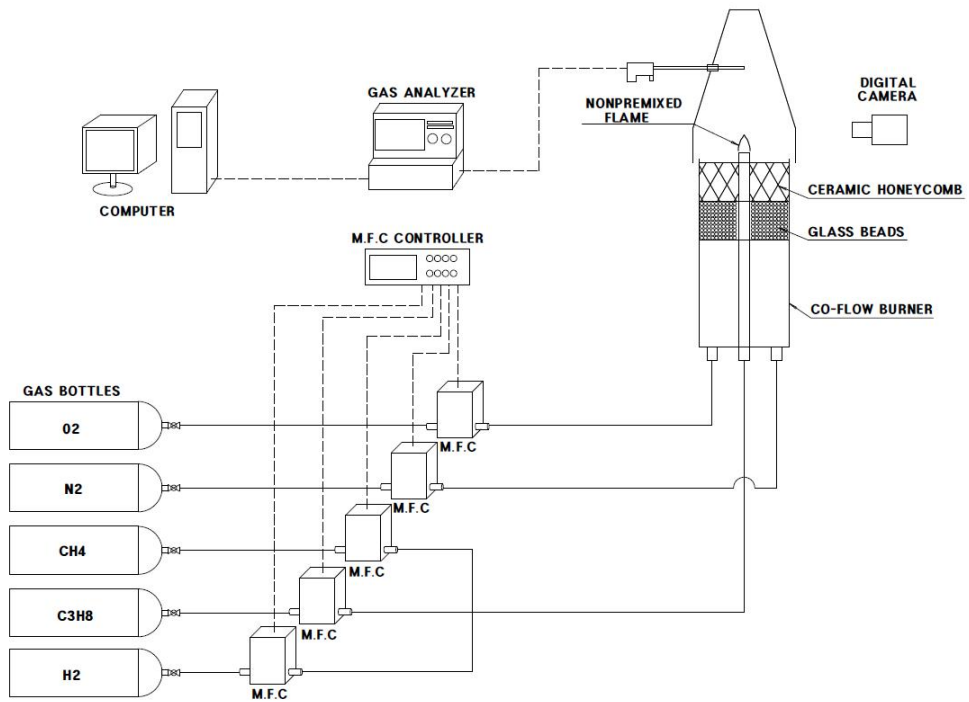


Fig. 9 Schematic diagram of case 2

Case 3의 실험은 메탄(90%)-에탄(6%)-프로판(4%)에 첨가되는 수소의 체적비율을 0%에서 40%까지 5%씩 증가하여 수행하였다. 상세 실험 데이터와 실험장비 구성은 아래 Table 7과 Fig. 10과 같다.

**Table 7** Experiment data of Methane-Ethane-Propane with hydrogen (Case 3)

순서	수소(%)	연료( $cm^3/min$ )				산화제( $cm^3/min$ )	
		메탄	에탄	프로판	수소	산소(24%)	질소(76%)
1	0	360	24	16	0	800	2277
2	5	342	22.8	15.2	20		
3	10	324	21.6	14.4	40		
4	15	306	20.4	13.6	60		
5	20	288	19.2	12.8	80		
6	25	270	18	12	100		
7	30	252	16.8	11.2	120		
8	35	234	15.6	10.4	140		
9	40	216	14.4	9.6	160		

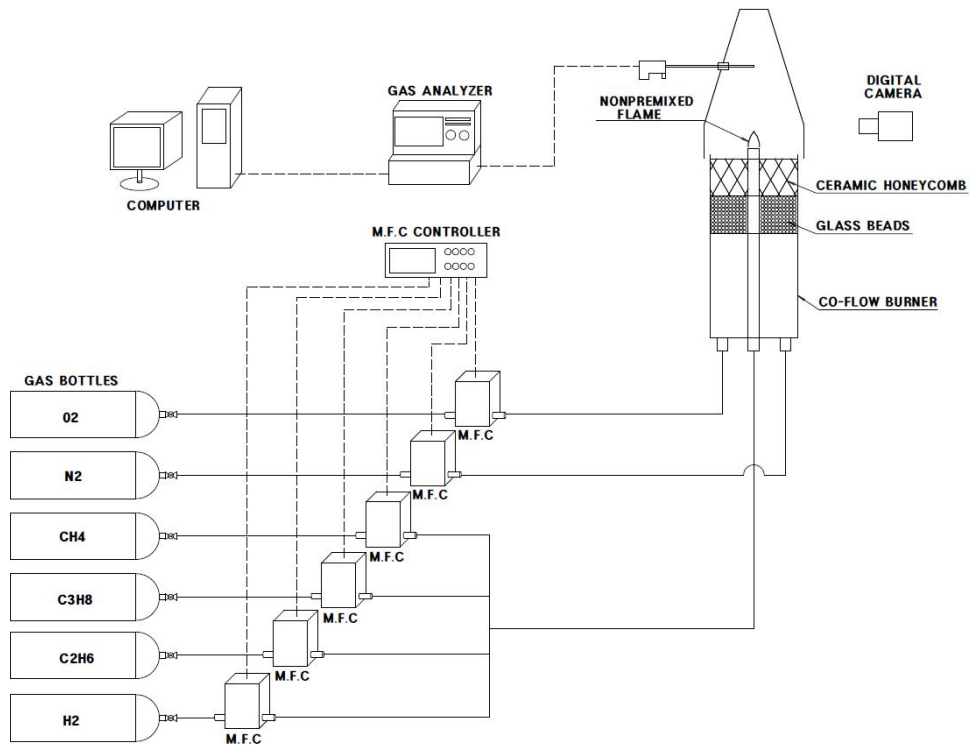


Fig. 10 Schematic diagram of case 3

연소생성물 측정은 각각의 실험 CASE마다 환경이 일정하게 유지되도록 공기를 충분한 시간 동안 연소실 내부에 분사하여 동일한 최초 실험 환경에서 수행되었다. 또한 화염과 연소생성물의 배출량이 충분히 안정화 되는 5분 이상의 시간이 지난 후 측정되었다.

### 3.3 수치해석 방법

단열환경에서 이론적으로 계산 · 발생하는 동축류 버너의 축 방향 기준으로 발생하는 화학종의 몰분을 확인을 위하여 USC Mech ver 2.0 을 기반으로 한 ANSYS Chemkin 17.0 프로그램을 활용하였다. 하지만 Chemkin 프로그램 반응모델에 동축류 확산화염을 수치해석 가능한 모델이 없기 때문에 대신 대향류 확산화염(Counterflow Diffusion Flame) 모델을 사용하였다. 실험 조건과 동일하게하기 위해서 대향류 확산화염의 연료(Fuel)에 수소를 5%씩 단계적 증가시켜 나갔으며 산화제(Oxidizer)부에는 질소와 산소를 79%, 24%로 혼합하여 분사시킴으로 설정하였다.

동축류 확산화염 대신 대향류 확산화염을 사용하였고, 프로그램 특성상 연소실 내의 압력, 온도 및 연료의 농도는 균일하다고 가정하므로 실제 실험 조건과 동일하다고 볼 수는 없지만, 그 경향을 파악하는 데는 크게 문제가 없으리라 판단되어 수치해석을 진행하였다.

## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 연소생성물 특성

메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판의 확산화염 내에서 수소를 첨가하였을 때 연소생성물 배출량을 실험적으로 측정하여 각각의 배출 특성 경향을 확인 하였다.

#### 4.1.1 질소산화물

연료의 속도는  $V_{fuel} = 509.6$  cm/min로 하고 산화제의 속도는  $V_{oxidizer} = 42.5$  cm/min로 고정하여 수소의 비율을 0%에서부터 40%까지 5%씩 증가하였을 때 질소산화물(NOx)의 배출 경향을 나타낸다.

전체적으로 모든 실험에서 수소의 첨가에 따라 질소산화물(NOx)의 생성이 Fig. 11과 같이 증가하는 경향을 보인다. 수소의 첨가가 연소실의 내부 온도를 상승시켜 Thermal NOx의 발생량을 증가한 것으로 보인다. 메탄 확산화염에서 수소 첨가량 30%에서부터 Thermal NOx의 생성량이 가파르게 증가하는 경향을 보였다.

그리고 메탄보다 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 혼합 확산화염 순서대로 Thermal NOx 배출량이 적게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 연료 혼합에 따른 불완전 연소율이 높아져 메탄-에탄-프로판에서 가장 적은 Thermal NOx가 생성된 것으로 보인다.

실제로 불완전 연소율을 보여주는 일산화탄소의 생성량 추이가 수소 첨가량 30%에서부터 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

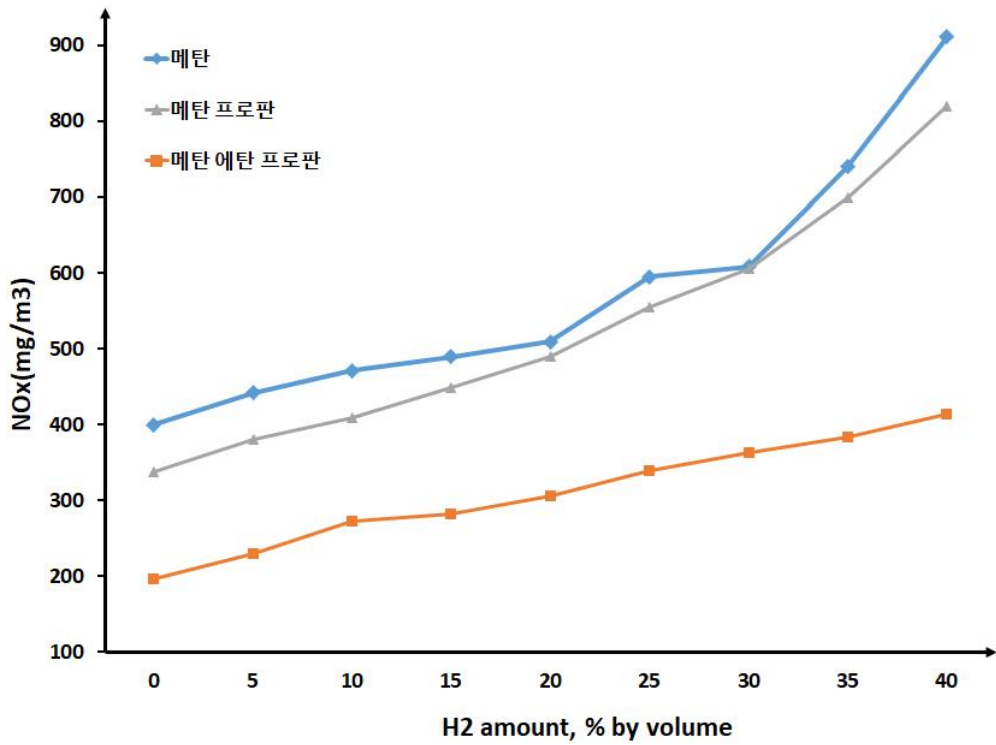


Fig. 11 Concentration of nitrogen oxide for hydrogen addition rates



### 4.1.2 이산화탄소

연료의 속도는  $V_{fuel} = 509.6$  cm/min로 하고 산화제의 속도는  $V_{oxidizer} = 42.5$  cm/min로 고정하여 수소의 비율을 0%에서부터 40%까지 5%씩 증가하였을 때 이산화탄소( $CO_2$ )의 배출 경향을 나타낸다.

전체적으로 모든 실험에서 수소의 첨가에 따라 이산화탄소( $CO_2$ )의 생성이 Fig. 12와 같이 감소하는 경향을 보인다. 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판, 메탄 순으로 이산화탄소( $CO_2$ ) 배출량이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 혼합연료의 탄소비율에 따라 탄소비율이 높은 메탄-프로판에서 가장 많은 이산화탄소를 배출하고 탄소비율이 적은 메탄에서 가장 작은 이산화탄소( $CO_2$ )가 발생된 것으로 보인다.

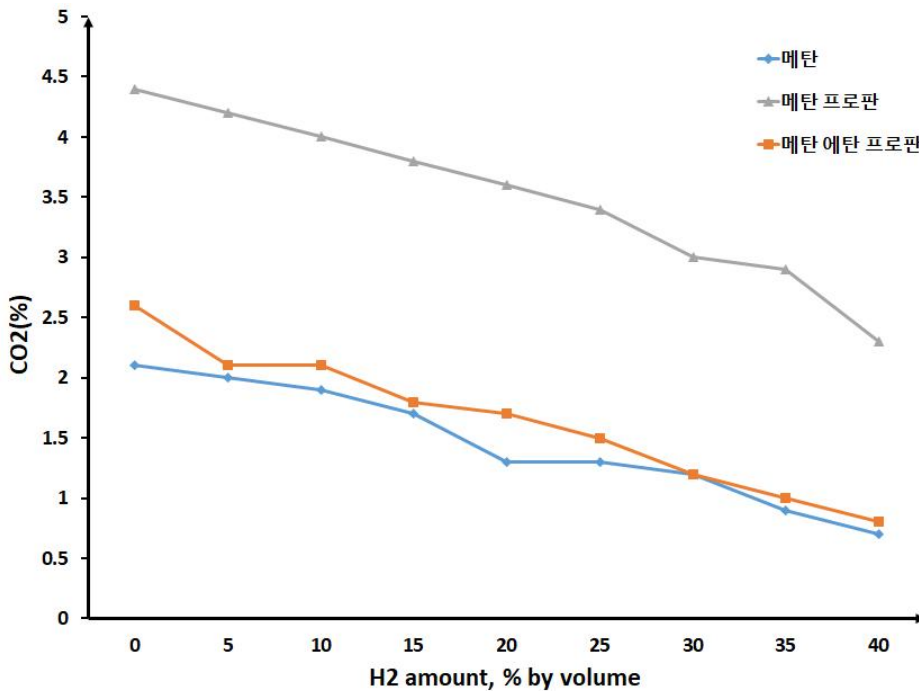


Fig. 12 Concentration of carbon dioxide for hydrogen addition rates

### 4.1.3 일산화탄소

연료의 속도는  $V_{fuel} = 509.6$  cm/min로 하고 산화제의 속도는  $V_{oxidizer} = 42.5$  cm/min로 고정하여 수소의 비율을 0%에서부터 40%까지 5%씩 증가하였을 때 일산화탄소(CO)의 배출 경향을 나타낸다.

Fig. 13와 수소 첨가량이 0%에서 10%까지는 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 모두 감소하는 경향을 보이다가 30%에서 급격하게 일산화탄소의 생성량이 증가하여 40%에서는 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄 순으로 처음과 비교하여 일산화탄소의 생성량 추이가 단일 연료보다 혼합연료에서 많이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

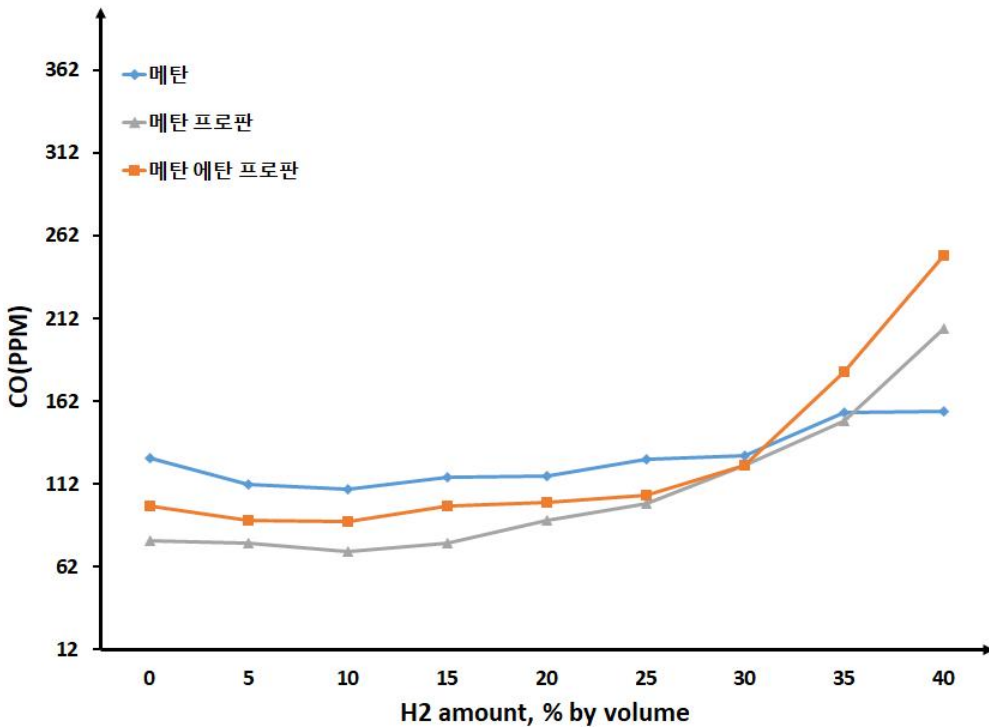


Fig. 13 Concentration of Carbon monoxide for hydrogen addition rates

## 4.2 수치해석 결과

USC Mech ver. 2.0을 기반으로 한 ANSYS Chemkin 17.0 을 이용하여 연료에 수소를 단계적으로 증가시킬 때 매연의 생성과 산화에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다.

수치해석 입력 조건은 가스의 압력 1.0 atm, 온도 298.0 K로 일정하게 하였고 화염의 높이는 실제 동축류 에틸렌 확산화염에서 발생된 화염의 높이와 비슷하게 10cm로 결정하였다. Table. 4 에서 볼 수 있듯이 동축류 확산화염을 실험했던 조건과 동일하게 대향류 확산화염의 연료(Fuel)에 수소를 5%씩 단계적 증가시켰으며 산화제(Oxidizer)에는 질소( $N_2$ )와 산소( $O_2$ )를 79%, 24%로 혼합하여 분사하였다.

Fig. 14~17 는 수소의 첨가량을 단계적으로 증가시켰을 때의 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. Fig. 14는 확산화염에 수소 첨가량이 증가함에 따라 계산된 이산화탄소( $CO_2$ )의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 수소 첨가량이 증가할수록 이산화탄소( $CO_2$ )의 몰분율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 추이는 실험과 같은 경향을 보이고 있고 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료가 이산화탄소( $CO_2$ ) 몰분율 생성이 증가되는 것을 확인 하였다.

Fig. 15는 확산화염에 수소첨가량이 증가함에 따라 계산된 산소( $O_2$ )의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 산소( $O_2$ )의 생성량은 이산화탄소( $CO_2$ )의 생성량과 반대로 수소의 첨가에 따라 증가하는 것을 Fig. 15에서 확인 할 수 있으며 탄소(C)의 비율이 상대적으로 많은 연료에서 적은 산소( $O_2$ ) 몰분율이 생성되는 것을 확인 하였고 이러한 경향은 이산화탄소( $CO_2$ ) 몰분율 생성추이와 정확히 반대되고 실험과 동일한 결과 값을 나타내는 것을 확인 하였다.

Fig.16은 확산화염에 수소첨가량이 증가함에 따라 계산된 일산화탄소

(CO)의 몰분율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 일산화탄소(CO)의 생성량은 5%씩 0-40% 까지 단계적 증가시켰을 때 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판, 메탄 순으로 Fig. 16과 같이 일산화탄소(CO)가 많이 생성되어 점진적으로 감소하는 추이를 나타내었다. 해석결과는 실험과 비교하여 0-10%까지의 실험 결과 추이와 동일하게 나타나는 것을 확인하였다. 10-40% 수소첨가 실험에서는 일산화탄소가 증가함에 반해 해석값은 감소하였는데 이상적인 실험 환경 및 화학반응식에서는 감소하지만 그렇지 못한 실제 실험에서는 혼합된 연료의 후류 상호작용에 의하여 환경 변위가 달라져 일산화탄소(CO)의 생성량이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig.17은 수소의 첨가에 따른 화염의 불꽃 온도를 해석한 결과 값이다. 그림에서 알 수 있듯이, 수소 0%-40% 까지 수소의 첨가량이 많아질수록 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 순으로 화염의 온도가 점진적으로 높아지는 것을 수치적으로 확인 할 수 있다. Fig. 11의 실제 실험에서도 같은 순서로 Thermal NOx의 생성량이 많은 것을 미루어 보아 화염온도가 높을수록 Thermal NOx의 생성량이 많아지는 상관관계를 실험 및 수치해석으로 검증 하였다.

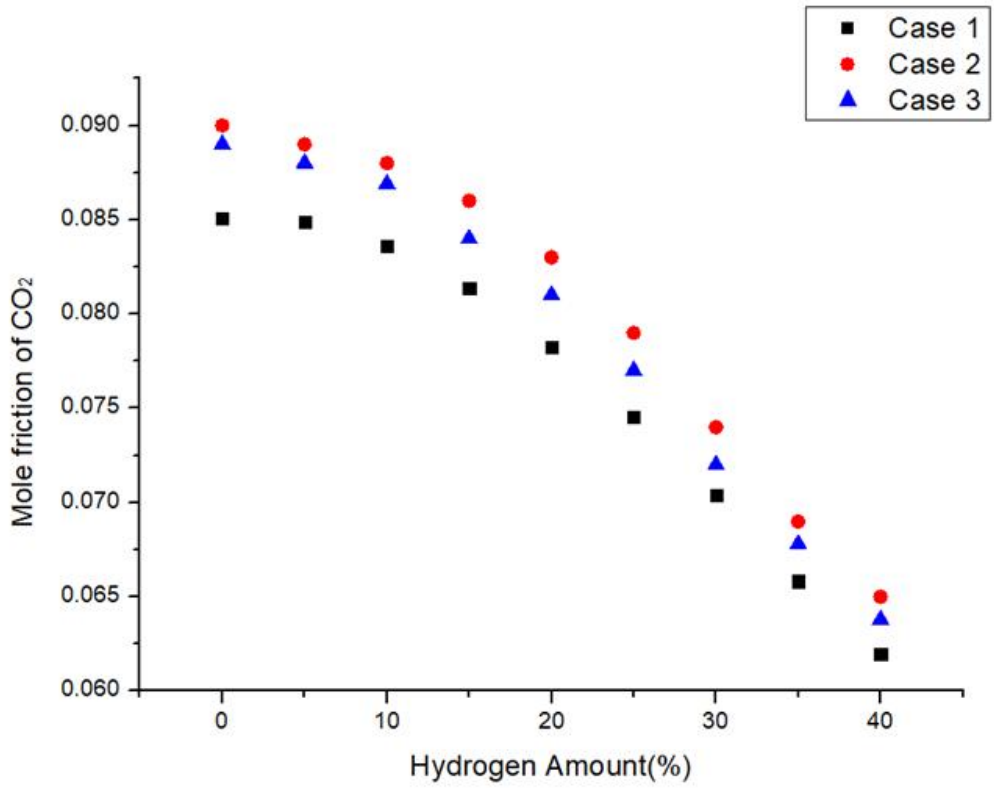


Fig. 14 Calculated CO<sub>2</sub> distributions with increasing the hydrogen addition

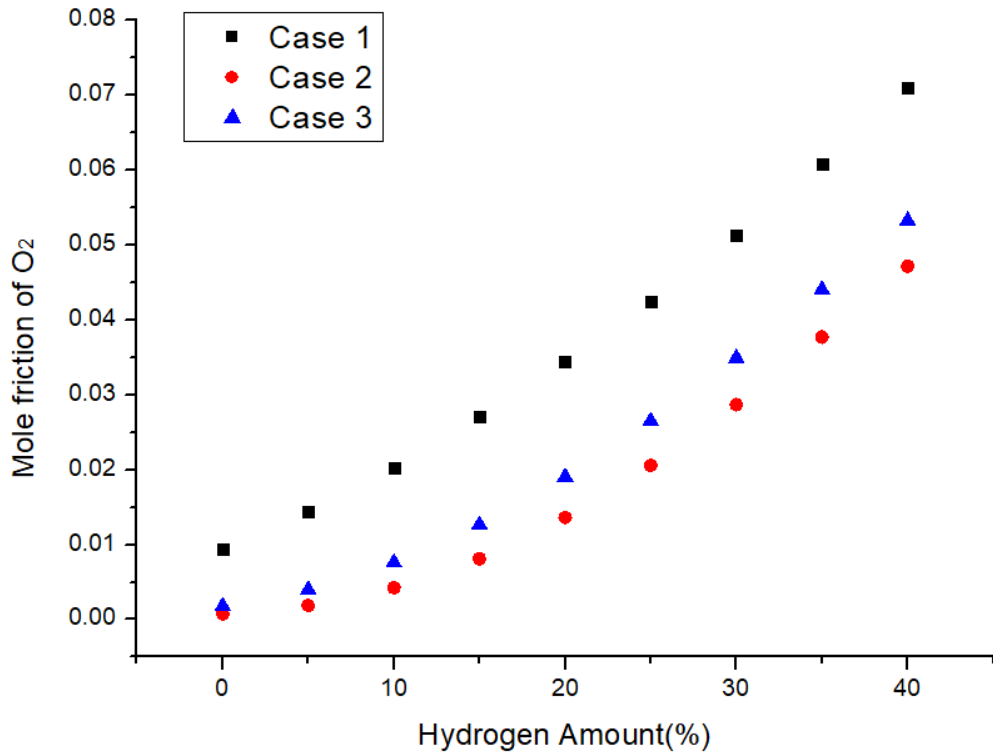


Fig. 15 Calculated O<sub>2</sub> distributions with increasing the hydrogen addition

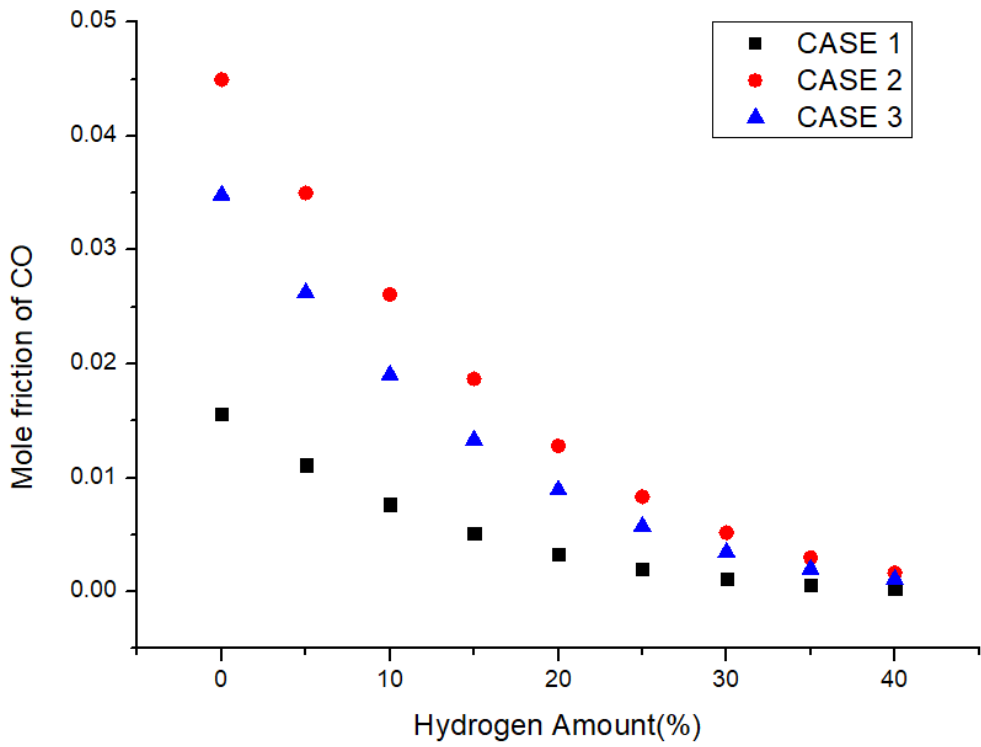


Fig. 16 Calculated CO distributions with increasing the hydrogen addition

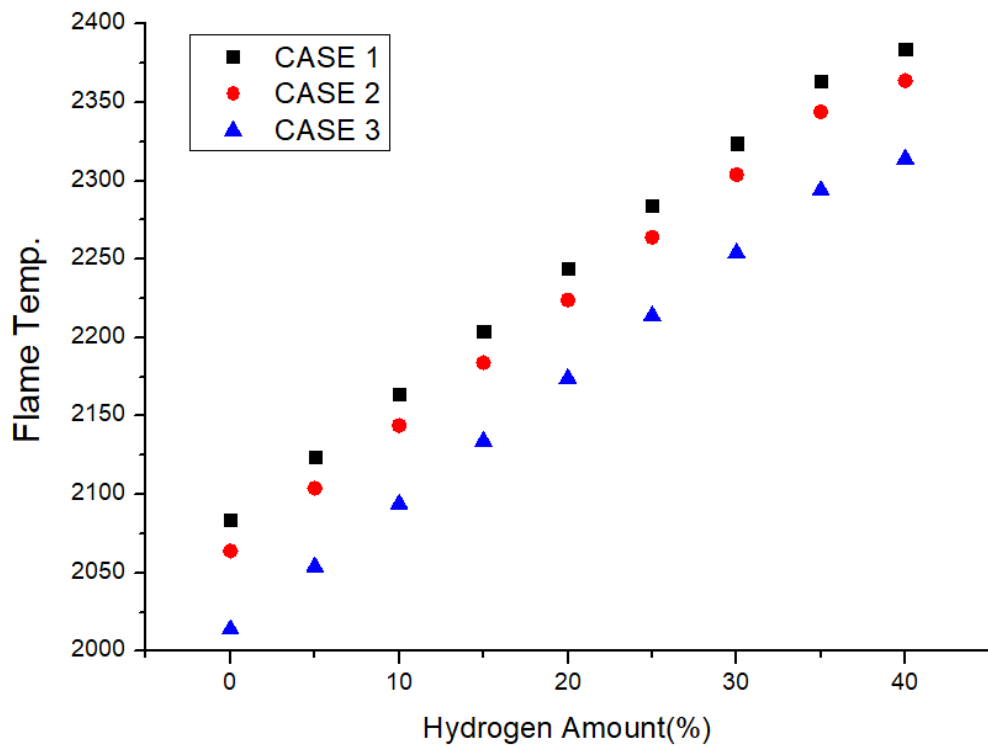


Fig. 17 Calculated Flame Temp. with increasing the hydrogen addition



### 4.3 화염 특성

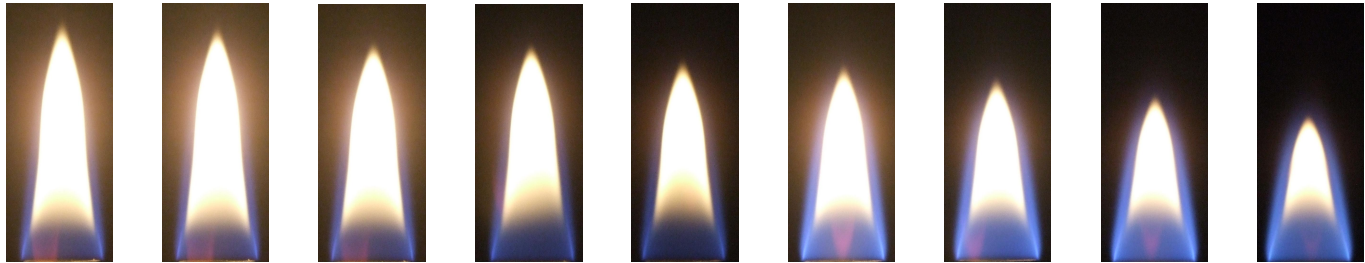
메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 확산화염 내부에 수소 첨가비율을 0% 에서 40%까지 5%씩 단계적으로 혼합시키면서 화염의 특성을 단계적으로 관찰하였다. 화염의 형상은 디지털카메라로 촬영하여 Fig. 18, 19, 20에 나타내었다.

Fig. 18, 19, 20를 살펴보면 No. 1에서 No. 9로 가면서 대체적으로 광도는 큰 차이를 보이지 않으나, 화염의 길이가 감소하고 화염의 상부 적노색부가 범위가 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

화염의 길이를 비교하여 볼 때 수소 함유량이 증가할수록 길이가 감소하는 것을 발견할 수 있다. 이는 아래 식(6)과 같이 화염의 길이 ( $L_f$ )에 대한 연료와 수소의 질량유량( $m_F$ )의 차이로 설명할 수 있다.[28]

$$L_f \approx \frac{3}{8\pi} \frac{1}{Y_{F,stoic}} \frac{\dot{m}_F}{\mu_{ref}} \frac{p_\infty}{p_{ref}} \frac{1}{I(p_\infty/p_f)} \quad (6)$$

질량유량은 밀도( $\rho$ )와 유량( $A \cdot V$ )에 비례하기 때문에 유량이 일정하면 밀도에 비례한다. 즉 연료의 수소 비율을 증가시키면 밀도의 감소를 가져오므로 질량유량이 감소한다. 위 (6)식에 따르면 화염의 길이가 작아지는 것은 수소 비율 증가로 인한 질량 유량 감소가 원인이라 할 수 있다.



구분	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H <sub>2</sub>	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 18 Methane Flame Photographs by No. 1 ~ 9



구분	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H <sub>2</sub>	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 19 Methane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9



구분	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9
Fuel	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%
H <sub>2</sub>	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%

Fig. 20 Methane-Ethane-Propane Flame Photographs by No. 1 ~ 9

## 제 5 장 결론

본 연구는 상온상압 조건의 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판 혼합 확산화염에 수소를 0%에서 40%까지 5%씩 단계적으로 증가시켜 생성되는 연소 생성물과 화염 형상을 실험적으로 관찰하여 분석하였다.

- (1) 실험결과 및 해석결과에서 확산화염에 수소 첨가량이 증가함에 따라 질소산화물의 생성량이 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수소의 상대적으로 높은 단열화염온도와 빠른 연소 속도가 Thermal NOx의 생성을 촉진시켰다. Thermal NOx의 생성량이 많은 순서는 화염온도가 높은 순서와 동일하게 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판으로 나타났다. 이는 수소를 혼합 연소하는 내연기관에 적용할 경우 희박한 AFR 또는 배기가스 재순환장치(EGR), 선택적 촉매 환원법(SCR)을 이용하여 Thermal NOx의 생성량을 감소하여야 한다는 것을 의미한다.
- (2) 이산화탄소의 생성량의 경우 확산화염에 수소를 첨가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이것은 수소를 첨가함에 따라 메탄, 메탄-프로판, 메탄-에탄-프로판의 혼합 확산화염에 포함되어있는 전체 탄소비율이 줄어들어 이산화탄소의 생성량이 감소한 것이다. 이는 선박에서 LNG-수소의 혼합 연료사용으로 인해 온실가스인 CO<sub>2</sub>를 저감할 수 있는 하나의 방안으로 고려될 수 있다는

것을 의미한다.

- (3) 확산화염에 수소를 첨가함에 따라 일산화탄소의 생성량이 증가하는 경향을 보였다. 흥미로운 점은 실험에서 일산화탄소의 생성량의 순서가 수소 40%에서 메탄-에탄-프로판, 메탄-프로판, 메탄으로 연료가 많이 혼합될수록 일산화탄소의 생성량이 많아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 수소를 첨가함에 따라 전체적인 이론 공연비가 높아짐에 따라 불완전 연소 확률이 높아진 영향과 혼합되는 연료의 수가 많을수록 확산화염에서의 서로 다른 연료의 후류 상호작용이 활발하게 일어났기 때문이다.
- (4) 수소첨가량에 따른 화염형상을 비교 분석한 결과, 모든 실험에서 수소 첨가량을 증가시키면 화염상부에 적노색부분이 줄어들고 화염의 하부의 파란색 부분이 선명해지는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 전체적인 화염의 길이를 비교하여 볼 때 수소 함유량이 증가할수록 길이가 감소하는 것을 발견할 수 있었다. 이는 연료의 수소 비율을 증가시키면 상대적으로 밀도가 작은 수소의 영향 때문에 전체 혼합연료의 밀도와 질량유량이 감소하기 때문이다.

## 참고문헌

- [1] 김대진 “해운산업 환경규제 강화에 따른 주요국 대응방안과 시사점” 산업은행조사월보, 제740호 Pp. 59-60, 2017.
- [2] 심상민 “국제해사기구(IMO)에서의 온실가스 저감방안 논의현황 및 한국에의 함의” IFANS 주요국제문제분석, 제49호 Pp. 12, 2018.
- [3] Kijong Kim, Yongseok Cho, Seangwock Lee, "An Experimental Study Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen enriched LPG fuel in a Constant Volume Chamber", KSAE12-B0074, 2012.
- [4] Seungmook Oh, Changup Kim, Kernyong Kang, "Combustion characteristics with hydrogen addition in a LPG fuelled spark ignition engine", Journal of KSAE, pp 338~343, 2005.
- [5] Dr. Zabi Bazari "IMO Train the Trainer Course on Energy Efficient Ship Operation", Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines., Module 2, Pp. 12, 2016.
- [6] Junhwee Kim, "A study on the combustion and Emission characteristics in a Hydrogen-Diesel dual fuel Engine". Master's Thesis, Mokpo National Maritime University, 2017
- [7] John B Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, pp572~577, 1988.
- [8] Y Adir, A Merdler, S B Haim, A Front, R Harduf, H Bitterman, “Effect of exposure to low concentration of carbon monoxide on exercise performance and myocardial perfision in young healthy men”, Occup Erruiron Med, 56, pp 535 ~ 538, 1999.
- [9] 이성렬, “내연기관”, 2002.
- [10] Boo Won-Chan, "A Study on Korean Countermeasures for Controls on Greenhouse Gas Emissions from Ships". Master's Thesis, Inha

University, 2015.

- [11] Park Han-Seon, "A Study on the State's Responsibility and Implementation on Emission Control of Greenhouse Gas related to Ships", Master's Thesis, Korea Maritime and Ocean University, 2014.
- [12] Vidas Korsakas, Mindaugas Melaika, Saugirdas Pukalskas, Paulius Stravinskas, "Hydrogen Addition Influence for the Efficient and Ecological Parameters of Heavy-Duty Natural Gas Si Engine", Lithuania, Vilnius Gediminas Technical University, 2017
- [13] Jae Woon Lee, "An Experimental Study on Lean Burn Characteristics Optimization of Hydrogen-LPG Engine for CO<sub>2</sub> Reduction in Practical Operating Region", Kookmin University, 2016.
- [14] Lee Bora, "A Study on the Application of Emission Trading System to reduce Greenhouse Gas from Ships", Korea Maritime and Ocean University, 2013.
- [15] Drew Plichta, Olivier Mathieu, Eric Petersen, Gilles Bourque, Henry Curran, Sinead Burke, Wayne Metcalfe, Felix Guthe, "Laminar Flame Speeds of Natural Gas Blends with Hydrogen at Elevated Pressures and Temperatures", Texas A&M University, 2013.
- [16] Antonio Mariani, Biagoi Morrone, Andrea Unich, "A Review of Hydrogen-Natural Gas Blend Fuels in Internal Combustion Engines", Universita degli Studi di Napoli, 2006.
- [17] Joo Jae Moon, "Studies on combustion characteristics of ammonia-substituted hydrogen-air flames", Sungkyunkwan University, 2011.
- [18] Midhat Talibi, Ramanarayanan Balachandran, Nicos Ladommatos, "Influence of combusting methane-hydrogen mixtures on



compression-ignition engine exhaust emissions and in-cylinder gas composition ", University College London, 2010.

- [19] Junghoon Ji, Changbo Oh, Euiju Lee, "Unsteady Flow Effects on Extinguishing Concentrations in Jet Diffusion Flames", Pukyong National University, 2009.
- [20] Won-Hui Han, Jung-sik Choi, Jae-Hyuk Choi, "The Trends of Hydrogen Energy Technology Development and Application to Ship", Journal of the Korean Society of Maritime Environments & Safety, 2010.
- [21] Youn Woo Nam, "A Study of Synergistic Effects on Soot Formation Using a Concentric Co-Flow Burner", Dan kook University, 2004.