



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

에틸렌 확산화염 내 질소 첨가에 따른 매연
생성 특성 파악에 관한 연구

A Study on the Effect of N_2 Diluent on Soot Formation
Characteristics in Ethylene Diffusion Flames



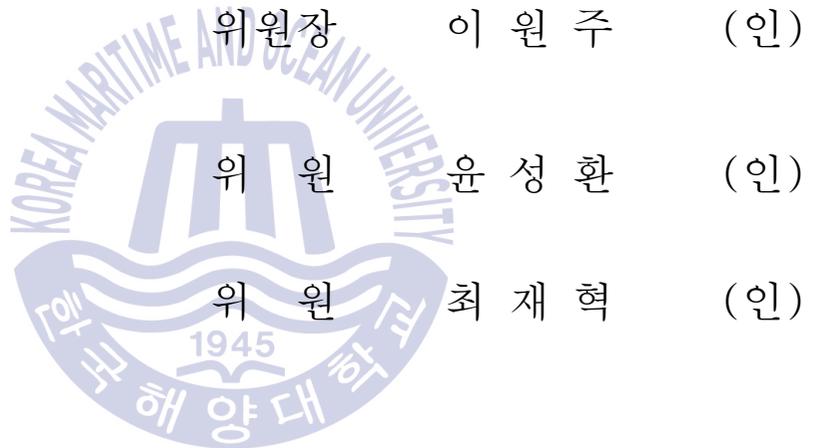
2019년 2월

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

김준수

본 논문을 김준수의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2018년 12월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Figures	iv
List of Tables	vi
요지	vii
Abstract	viii
1. 서 론	
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 매연생성특성 및 연구 현황	4
1.3 연구의 방법	7
2. 실험장치 및 연구법	
2.1 실험장치	8
2.1.1 유체공급장치	8
2.1.2 대향류버너	12
2.1.3 계측장치	15
2.2 연구법	18
2.2.1 실험 조건	18
2.2.2 실험 방법	18
2.2.3 수치해석 방법	19
3. 결과 및 고찰	
3.1 화염 형상	20
3.2 화염 온도 분포	22
3.3 매연생성 특성	26
3.3.1 광소멸법	26
3.3.2 수치해석에 따른 각 화학종 몰분율 변화	31

4. 결론	46
참고 문헌	49
감사의 글	53



List of Figures

Fig. 1	Flowchart on soot formation and oxidation	6
Fig. 2	Experimental Setup of Gas supply	9
Fig. 3	Calibrate graph of MFC	11
Fig. 4	Counter flow burner	13
Fig. 5	In-Diameter of Burner Nozzle	13
Fig. 6	Test Result of Stage movement	14
Fig. 7	Light Extinction Method	16
Fig. 8	Experimental Setup of LEM	17
Fig. 9	Flame image	21
Fig. 10	Flame temperature by R-Type thermocouple	24
Fig. 11	Flame temperature comparison by Simulating	25
Fig. 12	Signal comparison on Laser Extinction	28
Fig. 13	Soot volume fraction for N_2 dilution ratio	29
Fig. 14	Schematic of Soot Formation Flame in Counterflow	30
Fig. 15	Temperature and Mole fraction of Pure C_2H_4 flame	34
Fig. 16	Temperature and Mole fraction of N_2 10% Dilution flame	35
Fig. 17	Temperature and Mole fraction of N_2 20% Dilution flame	36
Fig. 18	Temperature and Mole fraction of N_2 30% Dilution flame	37
Fig. 19	Temperature and Mole fraction of N_2 40% Dilution flame	38
Fig. 20	C_2H_2 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle	39
Fig. 21	CH_3 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle	40

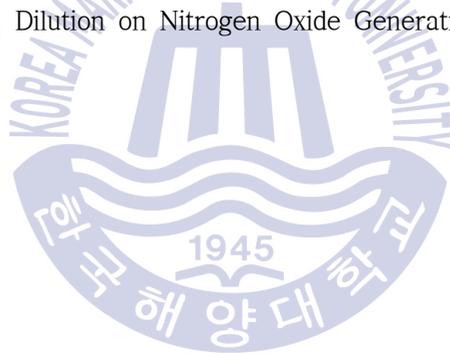
Fig. 22 C_3H_3 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle 41

Fig. 23 C_6H_6 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle 42

Fig. 24 OH concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle 43

Fig. 25 CO concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle 44

Fig. 26 Effect of N_2 Dilution on Nitrogen Oxide Generation 45



List of Tables

Table 1 MFC Specification	10
Table 2 Calibrate result of MFC	10
Table 3 Experimental condition	18



에틸렌 확산화염 내 질소 첨가에 따른 매연 생성 특성 파악에 관한 연구

김 준 수

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

요 지

탄화수소로 이루어진 연료의 연소과정에서 발생하는 배기가스는 대기 오염을 유발하고 인체에 유해한 영향을 미치는 매연입자를 포함하고 있다. 현대사회에서 매연입자로 기인한 환경문제는 중요한 이슈가 되고 있으며 전반적인 산업에서 환경 관련 규제가 강화되고 있는 추세이다. 이에 따라 연소 과정에서 발생된 매연을 제어하기 위하여 매연생성과정 에 대한 연구도 필수적이다. 매연의 생성과 산화특성에 미치는 주요 요 인 중 온도가 관련이 있다고 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 탄 화수소 물질 중 에틸렌 가스를 기반으로 한 대향류확산화염에서 불활성 기체인 질소를 10%간격으로 40%까지 첨가하고 화염 온도, 형태, 매연생 성 관련 화학종의 상태변화를 확인하기 위해 광계측을 통한 실험과 Chemkin 17.0프로그램으로 수치해석을 수행하였다.

연구 결과로 질소의 혼합비율이 증가함에 따라 화염온도는 감소하며 매연생성층이 좁아지는 것을 확인하였다. 또한 매연체적분율과 매연성 장에 관여하는 화학종들의 몰분율도 감소하는 것을 확인하였다. 본 연 구의 결과를 통해 환경 규제 대응을 위한 친환경 기술 개발에 적절한 응용과 다양한 산업현장 및 실험 연구에서 질소의 적절한 활용에 도움 이 될 것으로 기대한다.

KEY WORDS: 대향류확산화염, 질소, 혼합, 매연생성, 광소멸법, Chemkin

A Study on the Effect of N_2 Diluent on Soot Formation Characteristics in Ethylene Diffusion Flames

Kim, Jun-soo

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The exhaust gas generated in the combustion process of the hydrocarbon fuel contains soot particles that cause air pollution and have harmful effects on the human. Environmental problems caused by soot particles in modern society are becoming important issues, and environmental regulations are being strengthened in the overall industry. Therefore, it is necessary to study the soot formation process in order to control the soot formation in the combustion process. It is known that temperature is related to the main factors affecting the formation and oxidation characteristics of soot.

Therefore, in this study, up to 40% of 10% of the nitrogen gas was added to the fuel side in the counterflow diffusion flame based on the ethylene gas. Experiments were carried out through laser extinction method to determine flame temperature, shape, and soot volume fraction. Numerical analyzes were performed with the Chemkin 17.0 program to identify changes in the state of the species associated with soot formation.

As a result of the study, it was confirmed that as the dilution ratio of N_2 increases, the flame temperature decreases and the soot formation layer becomes narrower. Also, it was confirmed that the soot volume fraction and the mole fraction of chemical species involved in soot growth were also decreased.

The results of this study are expected to be useful for proper application of environmentally friendly technologies to cope with environmental regulations and for appropriate utilization of nitrogen in various industrial sites and experimental researches.

KEY WORDS: Counterflow diffusion flame, Nitrogen, Dilution, Soot formation, Laser Extinction Method, Chemkin Program



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

산업 혁명 이후 경제 발달에 따라 에너지 소비량이 급증하였으며 연소를 이용한 동력에너지도 기하급수적으로 증대되었다. 일상생활에서 접할 수 있는 대다수의 연소 과정에서는 탄화수소로 이루어진 연료가 사용되어진다. 이 연료의 연소과정에서 발생하는 배기가스는 대기오염을 유발하고 인체에 유해한 영향을 미치는 매연입자를 포함하고 있다. 현대사회에서 매연입자로 기인한 환경문제는 중요한 이슈가 되고 있으며 전반적인 산업에서 환경 관련 규제가 강화되고 있는 추세이다. 하지만 경제적인 측면에서 무조건적으로 에너지 소비를 감소시킬 수 없기 때문에 각 산업에서는 규제에 따라 다양한 방식으로 대응하고 있으나 완벽한 대체방안이 없으며 여전히 연소 과정은 대다수의 산업에서 필수불가결로 활용되고 있다.

최근 해운산업에서는 전기 추진선박, LNG 추진 선박 등 다양한 선박 추진 방식이 개발되고 있으나, 이 추진 방식에서도 여전히 연소과정은 필수적이다. 선박에서 추진기관 및 발전기관은 연소과정 중에 국부적인 고온영역이 발생하는 연소특성을 가지고 있으며 이와 같은 특성에 따라 배기가스 내 유해물질인 질소산화물, 황산화물, PM 등을 다량으로 발생시키는 문제점을 가지고 있다. 이 물질들은 이미 해양오염 방지협약(MARPOL 73/78) 및 각 국가 내부 정책에 따라 규제가 강화되고 있는 추세이며 공해를 항행하는 선박은 유해물질의 배출량을 필수로 감소시켜야 하는 상황이다.

이에 따라 연소 과정에서 발생된 매연을 제어하기 위하여 배기가스 재순환연소, 고복사연소, 산소부화연소(Oxygen-enriched combustion), 촉매연

소(Catalytic combustion) 등 다양한 기술 개발이 이루어지고 있으며, 이를 실제 연소 과정에서 최적화하기 위하여 기초연구들도 다방면으로 행해지고 있다.

이 중 매연생성과정 연구는 매연 억제 제어를 위한 가장 근본적인 영역으로 이를 밝힘으로써 명확하고 효과적으로 기술 개발에 접근을 할 수 있다. 매연생성과정은 PAH의 형성 및 성장에 관한 화학반응, 매연입자로 전환과정, 고온의 인근 기체와의 반응을 통한 성장 및 매연 입자간의 응집 등 다양한 분야를 아우르는 총체적인 연구 분야이다. 다양한 연구도구에 발달과 사회적 환경 규제 강화에 따라 현재까지도 다방면으로 연구가 이어져 오고 있음에도 불구하고 그 매연생성 과정은 여전히 명확하게 규명되고 있지 않다.

매연의 생성과 산화특성에 미치는 주요 요인으로는 압력, 당량비, 연료 특성, 온도가 있다고 알려져 있다. 이중 온도 변화요인과 관련하여 Wey(1984)는 프로판확산화염에서 화염온도 변화에 따라 soot 응집입자의 크기와 수밀도 변화가 있다고 보고하였으며, Glassman(1989)는 화염 특성 따라 화염온도가 Soot 생성에 미치는 영향을 연구하였으며, 확산화염에서 화염온도가 낮아질수록 soot를 감소시킨다고 보고하였다. 또한 최재혁(2012)은 에틸렌화염에서 톨루엔의 혼합에 따른 매연생성특성에 대해 연구하였으며, 톨루엔 혼합 비율에 따라 절대온도의 최댓값에는 변화가 없으나 착화지연현상으로 매연생성시간에 영향을 미치며 이에 따라 매연생성물질의 몰분율에 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 탄화수소 물질 중 에틸렌 가스를 기반으로 한 확산화염에서 불활성 기체인 질소를 첨가하고 화염 온도, 형태, 매연생성 관련 화학종의 상태변화를 확인함으로써 질소가 매연 특성 변화에 미치는 영향을 알아보려고 한다. 불활성 기체로 잘 알려진 질소는 이원화 상태에서 독성이 없고 인화성이 없으므로 산업 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 또한 연구 분야에서는 특히 3000℃ 이상으로 가열해도 약간의 해리만

일어나며 상온에서 반응성이 매우 미비하여 다양한 연소 실험에서 촉매역할로 사용되고 있다.

실생활에서 발생하는 연소는 난류성확산화염이 주를 이루며, 이는 매연 생성과정을 이해하기 위해 다양한 변수들이 존재함을 의미한다. 변수 조건을 단순화하여 매연생성과정 연구를 위해 본 연구에서는 대표적인 층류확산화염 중 대향류화염을 채택하였다. 대향류화염은 X축으로 넓게 분포된 화염 면적을 이루고 있고, 화염 아래로 안정적인 정체 면이 형성되어 있으며, 에어커튼을 통해 외부 요인의 영향을 최소화할 수 있다. 이를 통해 매연 계측에서 균일한 값을 얻을 수 있는 장점이 있다.

연소과정 중 발생하는 매연입자의 농도분포 측정은 특성상 실시간 측정이 이루어져야하며 비접촉식으로 측정이 이루어져야만 의미 있는 실험결과를 도출할 수 있다. 이에 본 연구에서는 비접촉식 광학법 중 널리 사용되는 광소멸법을 활용하였다.

질소를 10%간격으로 0%~40%까지 연료 측에 혼합하였으며 이에 따른 화염형상과 화염온도, 화염위치를 확인하였다. 또한 이 실험을 검증하고 비교분석하기 위하여 열화학반응 수치해석 프로그램인 CHEMKIN 17.0(USC-II Mech.)으로 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서 확산화염에서 질소혼합에 따른 매연상태 변화를 확인하는 연구를 실시하여 정량적인 데이터를 제공함으로써 매연 성장과 형성에 대한 기초연구로서의 역할뿐만 아니라 환경 규제 대응을 위한 친환경 기술 개발 등 다양한 산업현장 및 실험 연구에 질소의 적절한 활용에 도움이 될 것으로 기대한다.

1.2 매연생성특성 및 연구 현황

매연생성과정을 확인하기 위한 80년대부터 기초연구들이 행해지고 있으며 다양한 연구방법에 발달과 사회적 환경 규제 이슈에 따라 현재까지도 다방면으로 연구가 이어져 오고 있다. 연료의 연소방식은 예혼합 화염, 부분 예혼합 화염 및 확산화염으로 분류되는데, 이들 각 화염들은 화염안정성과 매연생성 측면에서 서로 다른 특징을 가지고 있다. 매연의 생성과 산화 과정에 대한 연구는 매연의 생성 및 산화 반응이 동시에 존재하는 예혼합화염에 비해 매연의 생성반응과 산화반응이 분리되어있는 확산화염이 주로 사용되고 있다. 특히 동축류 확산화염과 대향류화염은 비교적 단순한 구조로 이루어진 확산화염으로써 실험에서 많이 사용되고 있다.

일반적인 확산화염 관련 매연 연구 결과에서 탄화수소물질로 이루어진 연료가 열분해를 통해 벤젠 등의 초기 방향족 고리가 형성되고 이들이 성장하여 다중고리 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH)가 된다. 이 PAH의 지속적인 성장에 의해 약 1nm 정도의 작은 매연 입자로 성장하고 이것이 입자 응집, 표면 성장의 과정을 거쳐서 성장하고 최종적으로 O₂, OH에 의해 산화되게 된다고 보고되고 있다.[1] Fig.1은 매연이 생성에서 산화되는 일반적인 과정을 도식화하였다.

과거 연구에서는 화염 내부에서 높은 농도를 유지하는 C₂H₂가 HACA(Hydrogen Abstraction C₂H₂ Addition) 반응을 통해 매연의 전구체인 PAH 생성과 성장에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 벤젠고리 형성을 통한 PAH 성장에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있었다. 그리고 최근 연구를 통해 메틸(CH₃),프로파길(C₃H₃) 등과 같은 C1,C3 홀수탄소 화학종도 홀수탄소원자경로(odd-carbon atom pathways)를 통해 PAH 생성에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되었다.

기존 연구를 보면, 황준영 외 1인(1998)은 SFO(Soot Formation /Oxidation)화염, SF(Soot Formation)화염에서 매연 질량 성장에 기여하는

C_2H_2 와 PAH의 상대적 중요성 및 각 성장 경로의 특성을 규명하기 위해 대향류화염에 레이저 계측과 수치해석을 수행하였다. SF화염의 경우 SFO 화염 대비 매연 성장지역의 온도가 낮고 PAH의 농도가 10배이상 높게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 고온 지역의 매연성장에는 HACA반응 메커니즘이 매우 중요한 반면, 저온지역에서는 PAH와 매연 입자의 응집이 매연 성장에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

최재혁 외 2인(2012)은 대향류 화염에 디젤 대용 연료로 적합하다고 알려져 있는 톨루엔을 혼합함에 따른 매연 생성변화를 Chemkin으로 수치해석을 수행하였다. 순수 화염상태에서 가장 높은 온도를 나타냈으며, 톨루엔 혼합율이 높아질수록 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 그러나 메틸 농도는 3-5%의 저혼합율에서는 순수화염에 비해 높았으나 10-20%의 고혼합율에서는 순수화염보다 낮게 나타남을 확인하였다. 또한 화학반응을 확인하여 톨루엔 혼합화염의 경우 PAH 생성에 있어 메틸보다 H-라디칼에 의한 영향이 더 크게 작용하는 것을 알 수 있었다.

정용기의 3인(2004)은 메탄 기반의 동축류화염에서 연료 층과 산화제 층에 각각 질소를 첨가하고 평면빔을 통해 매연 분포를 2차원 형상으로 측정하고 수치해석을 통해 화염구조를 파악하였다. 화염내의 매연은 온도의 영향이 지배적이고 희석의 영향은 연료 층이 산화제 층에 비해 효과적으로 나타남을 알 수 있었다.

윤승석 외 2인(2003)은 메탄, 에탄, 에틸렌, 프로판, 프로펜 등 다양한 기체를 혼합하고 이때 매연 농도분포를 레이저계측을 통해 확인하였다. 또한 실험결과 이해를 돕기 위해 수치해석을 수행하였다. 순수연료에 비해 에탄, 프로판 등 혼합기체연료가 연소할 때 추가적으로 생성되는 C1화학종으로 인한 프로파길 생성이 프로판, 프로펜으로부터 탈수소화 반응에 의해 생성되는 프로파길 생성보다 더 빠르다는 것을 확인하였다.

다양한 연료 혼합 조건은 화염온도 및 화학종 물분을 변화에 영향을 미치고 이는 매연생성특성에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에

서는 순수 에틸렌 대향류화염을 대상으로 연료 측에 질소를 첨가함에 따른 화염온도와 화염형태 변화, 그리고 Soot부피분율, 각 화학종 몰분율 변화를 실험과 수치해석으로 확인함으로 질소혼합이 화염온도에 미치는 영향과 온도의 영향이 매연 생성에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

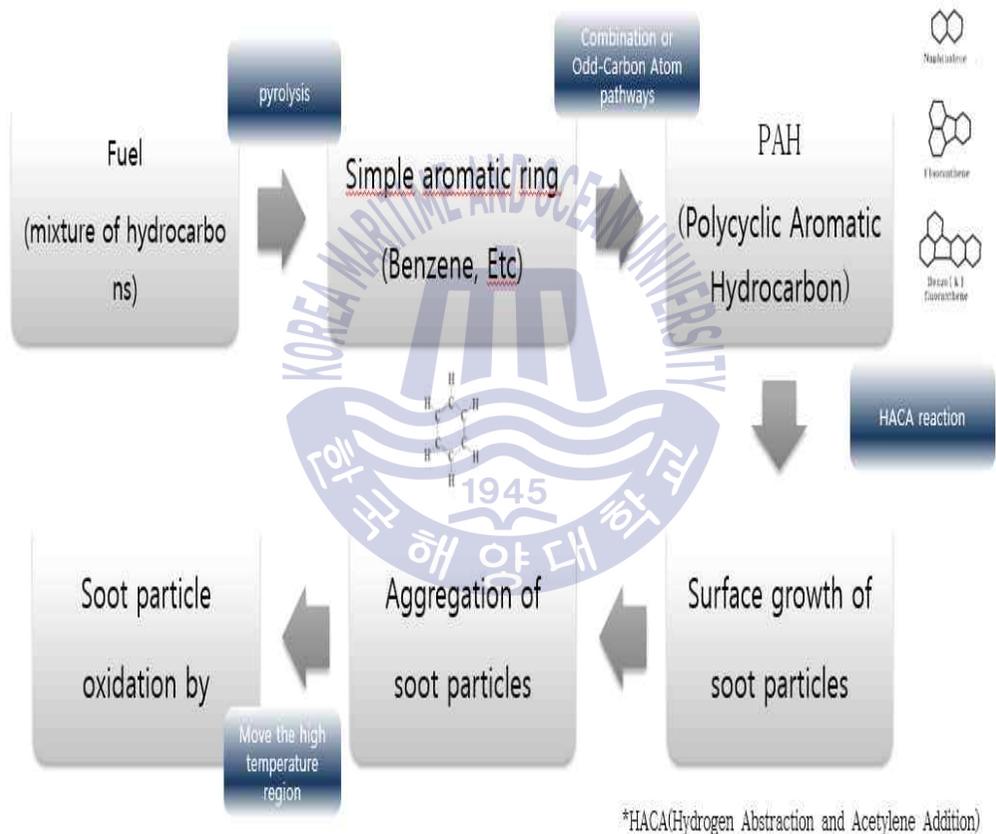


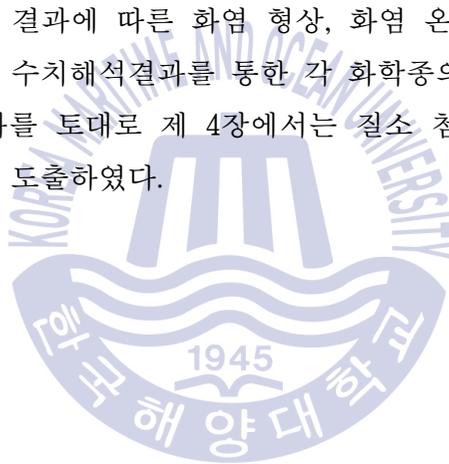
Fig. 1 Flowchart on soot formation and oxidation

1.3 연구 방법

본 연구에서는 실증연구를 위해 광소멸법을 통한 매연 계측과 수치해석을 위해 Chemkin 17.0 프로그램으로 수치해석을 수행하였다.

제2장에서는 실험에 사용된 장치에 대하여 기술하였다. 실험장치는 실험 조건에 따라 가스량 조절을 위한 유체공급장치, 대향류화염 형성을 위한 대향류버너, 계측장치 등 크게 3가지 요소로 구분하였으며 각 실험 장치의 제원을 조사하였다. 그리고 실험 장치를 통한 실험방법에 대하여 정리하였다.

제3장에서는 실험 결과에 따른 화염 형상, 화염 온도, 광소멸 계측값을 분석·고찰하였으며 수치해석결과를 통한 각 화학종의 몰변화를 분석하고 고찰하였다. 그 결과를 토대로 제 4장에서는 질소 첨가에 따른 매연생성 특성에 대한 결론을 도출하였다.



제 2 장 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 구성은 실험 조건에 따라 가스량 조절을 위한 유체공급장치, 대향류화염 형성을 위한 대향류버너, 계측장치 등 크게 3가지 요소로 구성되었다.

2.1.1 유체공급장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 유체공급장치의 구성은 Fig. 2에 나타냈다. 실험에 사용한 유체는 C_2H_4 , N_2 , O_2 총 3가지의 기체가 사용되었으며 각 공급 경로에 유량제어장치(Mass Flow Controller, MKS)를 설치하고 2대의 유량 제어기(Flow controller, MKS 600, ATOVAC GMC-1200)를 이용하여 실험 조건에 적합한 유량을 세팅하였다. 해당 실험에 사용된 MFC 명세는 Table 1과 같다. 정확한 유량을 제어하기 위하여 전자식 bubble 유량계를 사용하여 실제 유량흐름을 측정하여 유량 제어기 설정 값과 오차를 보정하였다. Table 2는 실험에 사용된 MFC의 보정 결과이며 r-스퀘어 값 0.999이상으로 유의미한 결과 값을 나타냈다. Fig. 3은 MFC 보정결과를 그래프로 표현한 것으로 설정 값과 실제 유량흐름이 일정한 비율을 유지함으로 1차방정식으로 나타냈다.

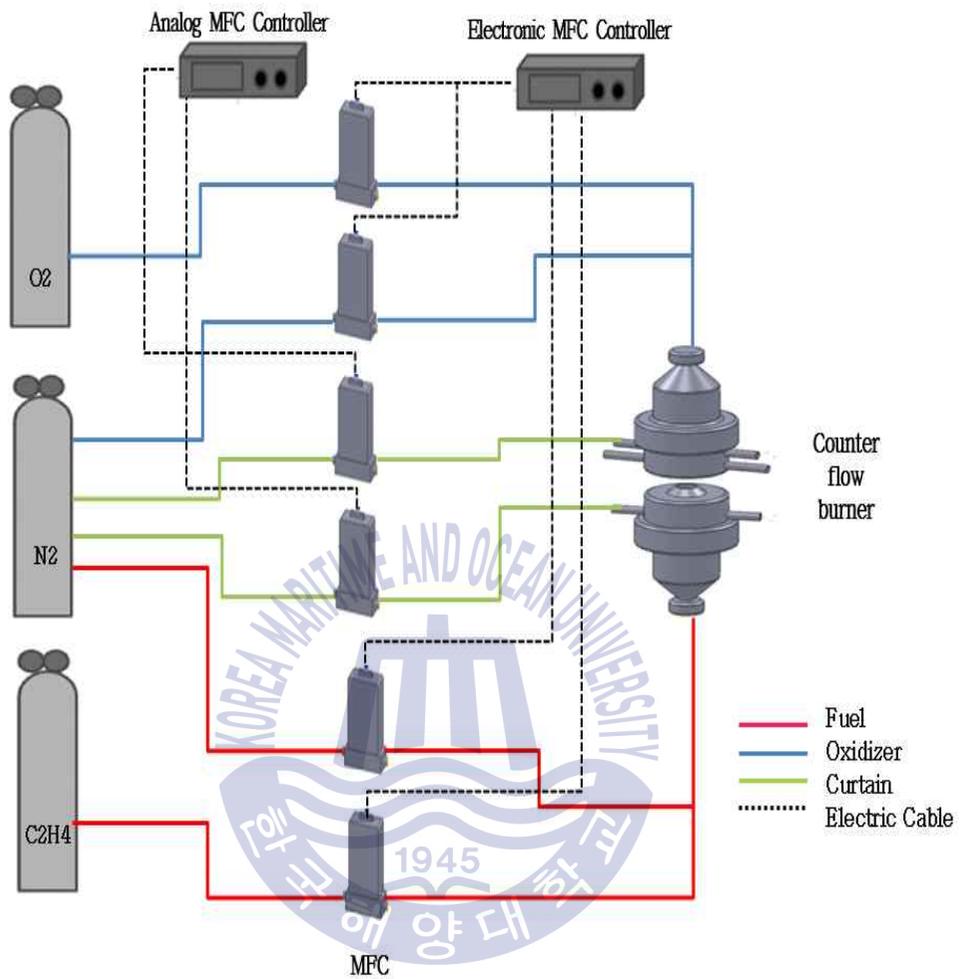


Fig. 2 Experimental Setup of Gas supply

Table 1 MFC Specification

TYPE	SCCM	Channel	Designated Gas	Used Gas	Remark
ATO VAC GMC-1200 (Electronic)	2000	ch.1	C_2H_4	C_2H_4	Fuel side
	500	ch.2	N_2	N_2	
	1000	ch.3	N_2	O_2	oxidizer side
	2000	ch.4	N_2	N_2	
MKS 600 (Analog)	5000	ch.2	N_2	N_2	Curtain Gas
	5000	ch.4	N_2	N_2	

Table 2 Calibrate result of MFC

section		Intercept		Slope		Statistics
		Value	Error	Value	Error	Adj. R-Square
FUEL	C_2H_4	0.01315	0.00329	0.00113	0.00000538	0.99996
	N_2	0.00236	0.00122	0.00114	0.00000392	0.99996
OXI	O_2	0.00769	0.00119	0.00111	0.00000265	0.99999
	N_2	-0.06538	0.00271	0.00119	0.00000426	0.99996
CUR-TAIN	N_2	-0.01591	0.04054	0.00611	0.00014187	0.99892
	N_2	0.03688	0.00875	0.00581	0.00003454	0.99993

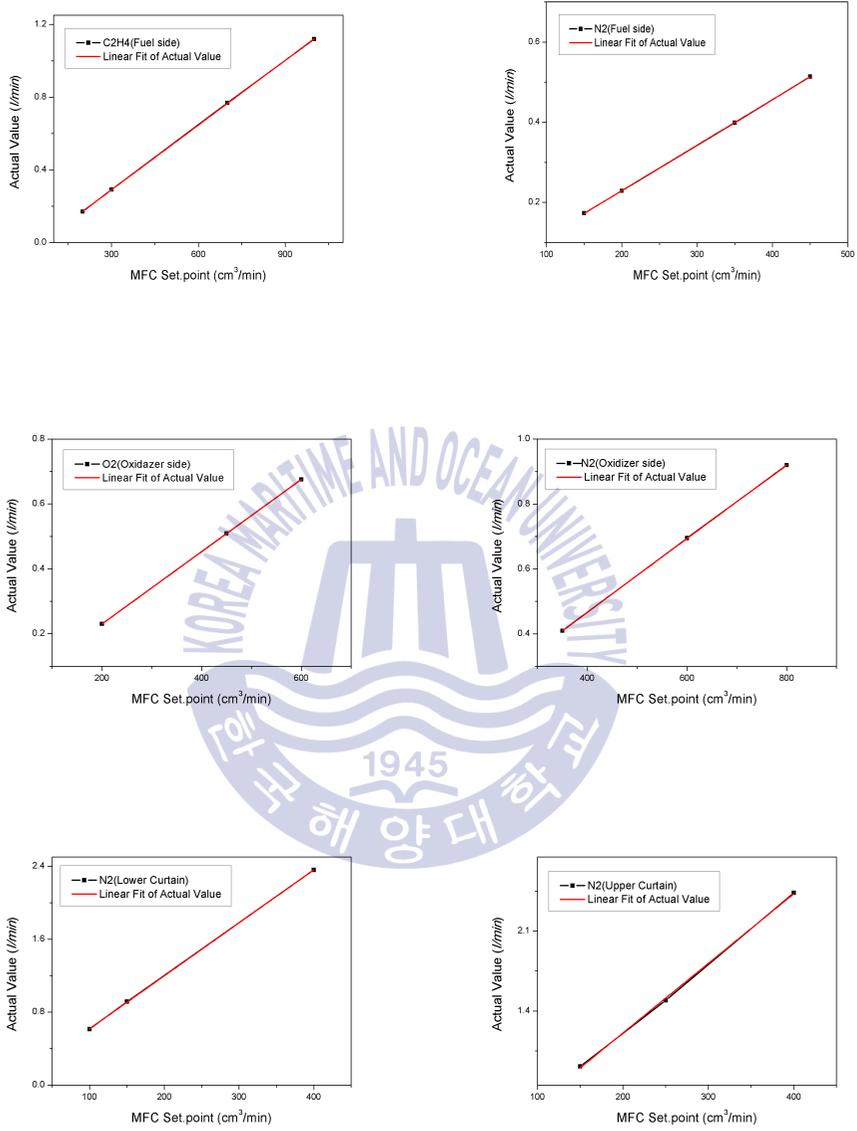


Fig. 3 Calibrate graph of MFC

2.1.2 대향류버너

레이저 조사범위 내에서 화염위치를 자유롭게 이동할 수 있도록 X-Y 축 스테이지 위에 대향류 버너를 장착하였다. Fig. 4는 실험에서 사용된 대향류 버너의 실물 사진 및 모식도를 보여주고 있다. 연료는 상·하부 버너 중심의 위치한 메인 노즐 내경 10mm을 통하여 공급되며 상부 측은 산화제, 하부 측은 연료를 연결하여 분사하도록 구성되어졌다. 상·하부 메인노즐의 간격은 10mm로 고정하였으며 20 cm/s의 속도로 균일하게 분사하도록 유량을 설정하였다.

메인 노즐 주위에는 외부 대기 가스의 영향을 최소화하기 위하여 상·하부 에어커튼 노즐을 통해 질소가스를 분사하였다. Fig. 5는 버너 노즐의 단면도이며 에어커튼 노즐은 외경 12mm로서 메인노즐 외경 사이 2mm 간극으로 40cm/s의 속도로 분사하였다.

스테이지 사용에 따른 실험 영향을 확인하기 위해 상·하 작동 테스트를 실시하였다. Fig. 6은 실시한 테스트의 결과를 나타냈다. 실험 적용 속도(18pps)와 동일하게 설정하고 Y축 A-B 간 이동 시간을 측정하여 그래프로 나타내었으며, 상승 중 0.45mm/min, 하강 0.461mm/min 속도로 등속 운동하는 것을 확인하였다. 이를 통해 실험에 미치는 영향이 미비하다고 판단하였다.

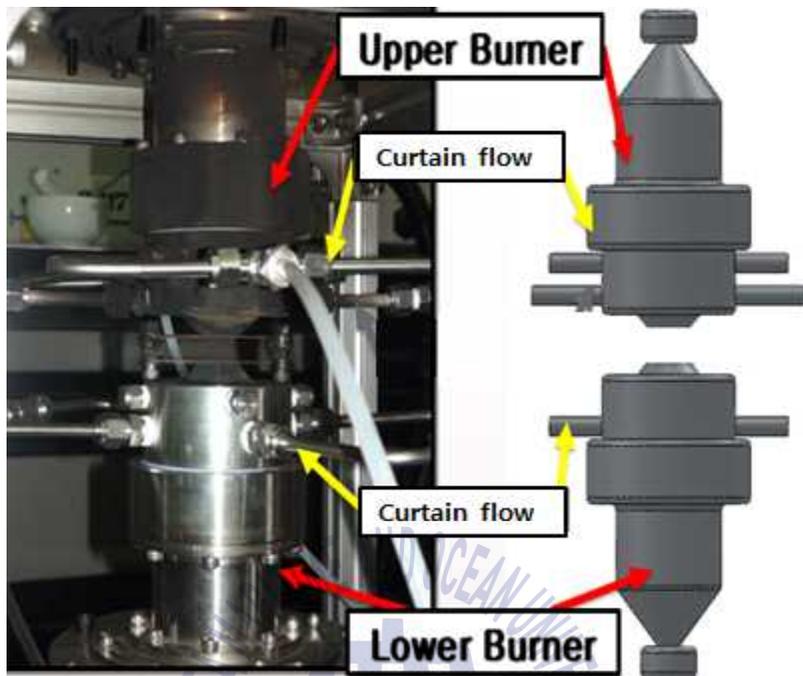


Fig. 4 Counter flow burner

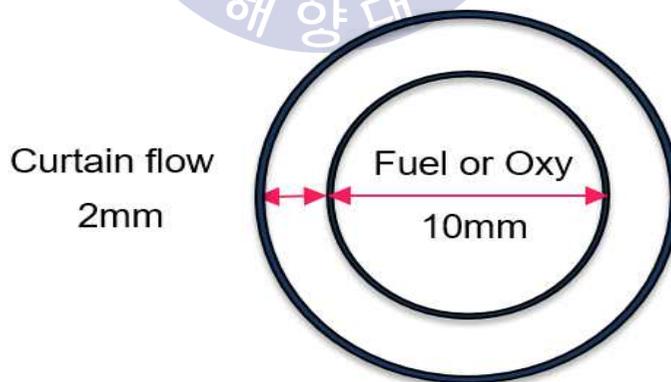


Fig. 5 In-Diameter of Burner Nozzle

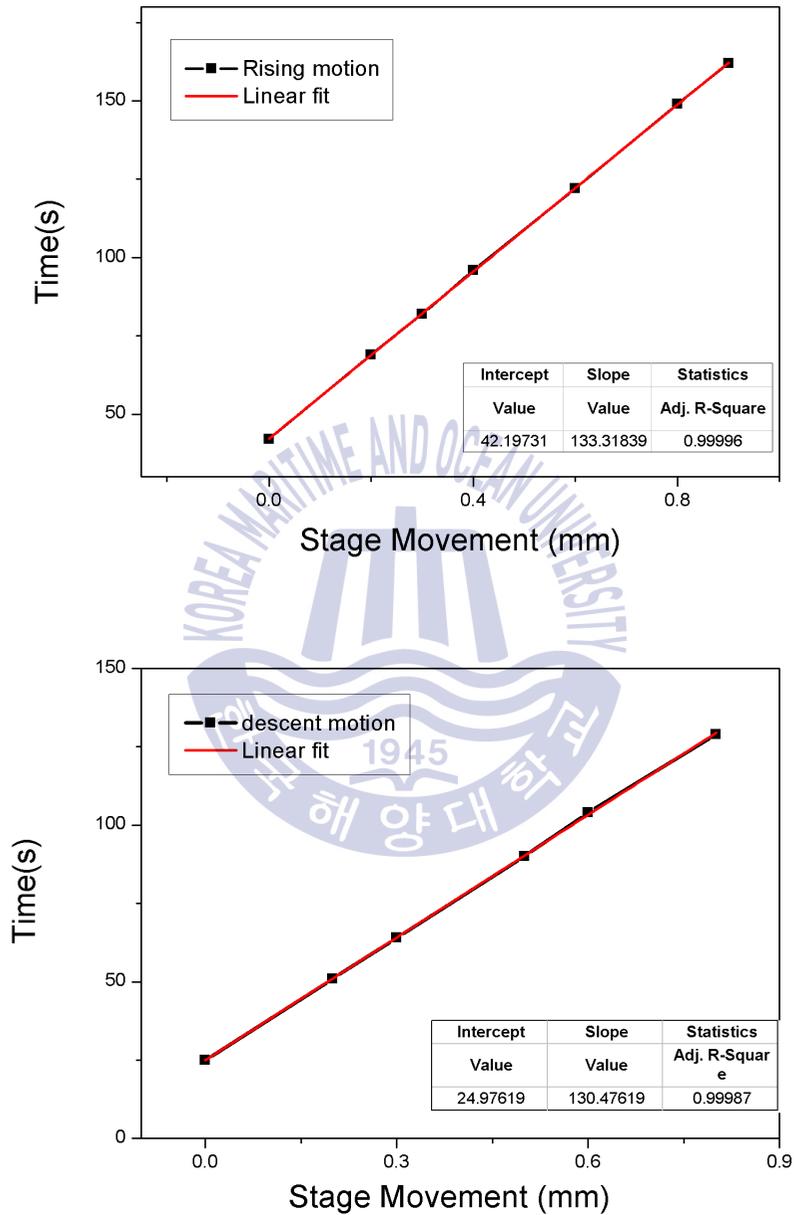


Fig 6 Test Result of Stage movement

2.1.3 계측장치

본 연구에서는 대향류화염에서 발생하는 매연체적농도를 측정하기 위하여 레이저를 이용한 광소멸법을 활용하였다. 레이저 광소멸법이란 조사된 레이저가 화염을 통과하면서 전후의 빛의 세기 변화를 측정하여 화염 내의 매연 체적분율을 구하는 방법이다. 화염 내의 매연에 의한 레이저 소멸현상의 개념은 Fig. 7과 같다.

본 실험에 사용된 레이저는 아르곤레이저(laser physics, reliant 1000m)의 514.5nm광을 출력 0.5W로 조절하여 사용하였다. 화염을 통과한 레이저광의 세기를 측정하기 위하여 광다이오드(THORLABS, DET100)를 사용하였고, 광 다이오드 손상 방지 목적으로 레이저 투과량을 감소시키는 ND(Neutral Density)필터 OD:2.0을 사용하였다. 이때 레이저광 신호이외의 신호를 제거하기 위해 Lock-in amplifier(Stanford Research, SR830)을 사용하였다. 광다이오드를 통해 측정된 값은 Amplifier(Time Constant 100 μ s, Sensitivity 100 μ A)를 거쳐 오실리스코프(HDO4024, Time Constant 100 μ s)로 전송 후 데이터화되어 수집하였다.

입사레이저광의 크기를 화염 측정 범위 수준으로 적절하게 조정하기 위해 볼록렌즈(F:500mm), Pinhole 등을 설치하였고 균등한 굴절율의 광을 조사하기 위하여 Half wave plate를 설치하였다. 본 실험의 입사레이저광의 크기는 반경 0.3mm 정도이다. Fig. 8은 광소멸계측장치의 구성을 나타냈다.

화염온도 계측을 위하여 R타입 열전대(Pt-Pt+13%Rd)를 사용하였다. 최대 1700 $^{\circ}$ C 까지 계측이 가능하며 화염범위를 세밀하게 계측하고 급격한 온도 변화에 민감하게 따라가기 위하여 0.3mm의 세선을 선택하였다. 직접 계측방식의 단점인 유동장 교란과 열영동 현상에 의한 복사열손실을 최소화하기 위하여 스테이지를 최소 단위인 1pps로 작동하였다. 계측 값은 Datalogger(Yokogawa MV2000)를 통해 실시간 수집하였다.

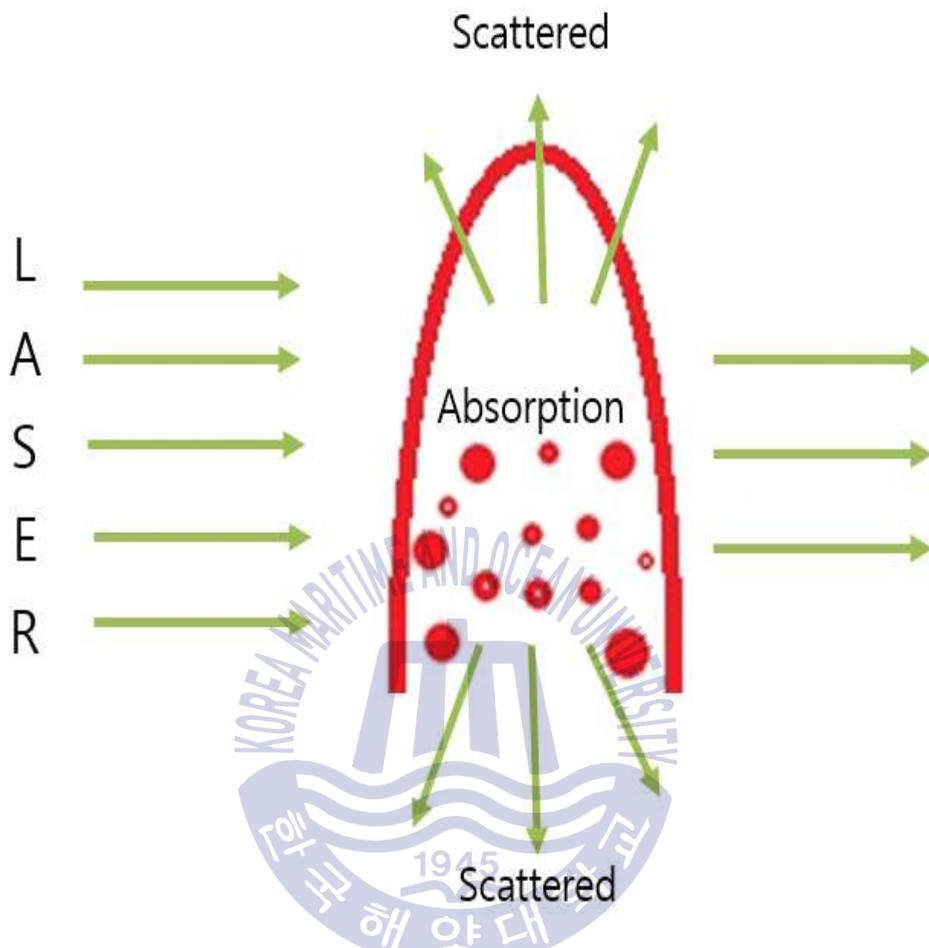


Fig. 7 Light extinction Method

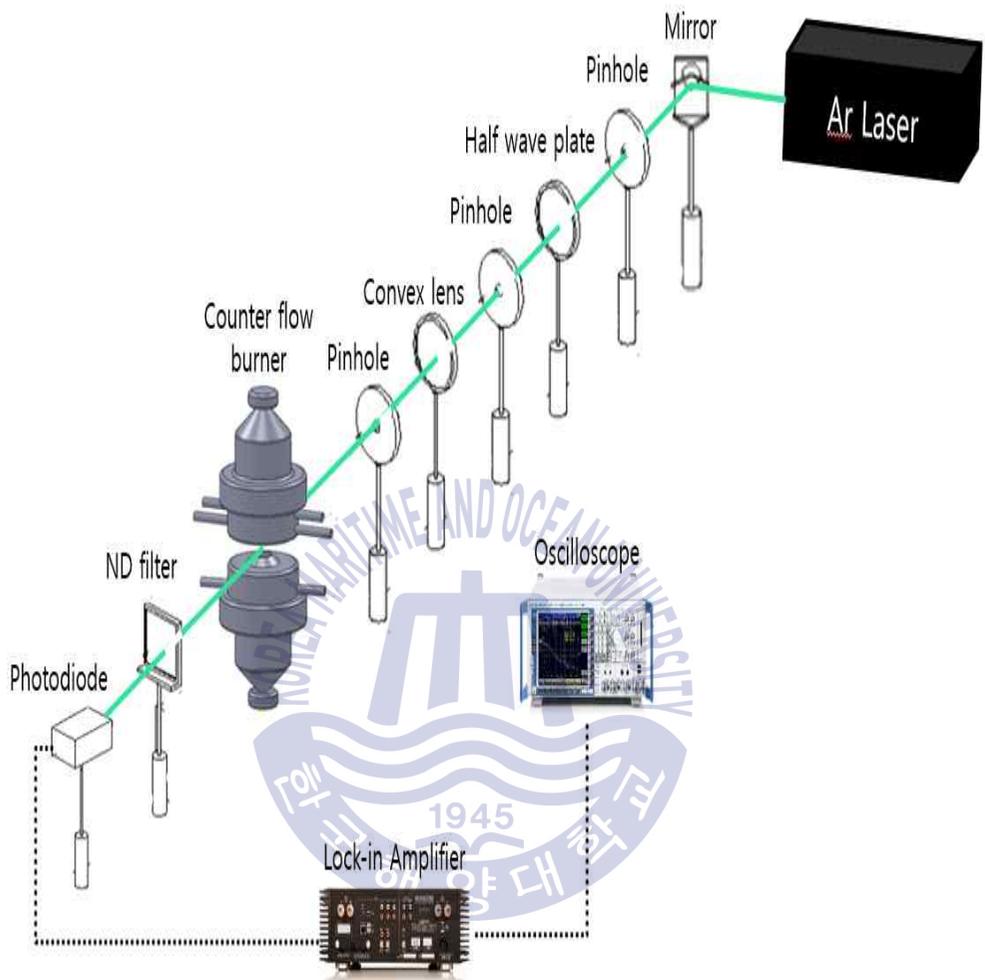


Fig. 8 Experimental Setup of LEM

2.2 연구범

2.2.1 실험 조건

에틸렌 확산화염 내 질소첨가에 따른 매연 생성 특성 파악을 알아보기 위해 Table 3과 같이 순수에틸렌 화염에 10% 간격으로 0%, 10%, 20%, 30%, 40% 질소 혼합하여 총 5가지 조건으로 실험을 수행하였다. 외부 압력은 대기압 상태이며 속도는 연료 및 산화제 20cm/s, 에어 커튼 40cm/s로 일정하게 분사하였다. 산화제 혼합비율은 O_2 24% : N_2 76% , 산화제 및 연료의 몰분율은 1로 일정하게 유지하여 대향류화염을 형성하였다.

Table 3 Experimental condition

Case	fuel mole fraction	oxidizer mole fraction	Pressure	Velocity
1	C_2H_4 100%	N_2 76% + O_2 24%	Atmospheric pressure	Main : 20cm/s Curtain: 40cm/s
2	C_2H_4 90% + N_2 10%			
3	C_2H_4 60% + N_2 20%			
4	C_2H_4 70% + N_2 30%			
5	C_2H_4 60% + N_2 40%			

2.2.2 실험 방법

본 연구의 광소멸 실험방법은 레이저 초점을 상부 메인노즐 끝단에 위치한 상태에서 스테이지를 Y축으로 0.461mm/min로 등속이동하며 하부 메인노즐 끝단에 닿을 때까지 레이저의 세기변화를 광다이오드로 측정하였다. 광다이오드를 통해 변환된 광원 to 전압은 amplifier를 통해 100 μ s 주기로 측정되고 오실리스코프를 활용하여 데이터를 수집하였다.

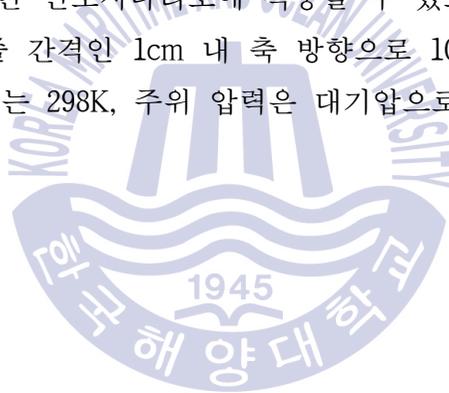
먼저 화염이 없는 상태의 레이저광의 세기를 계측하고 각 조건의 화염

을 형성한 후 화염을 통과한 레이저광의 세기를 계측하였다.

화염 온도 계측도 광소멸 계측과 동일하게 열전대 계측점을 상부 메인 노즐 끝단에 위치한 상태에서 스테이지를 Y축으로 0.026mm/min로 등속이동하며 하부 메인노즐 끝단에 닿을 때까지 계측하였다. 계측된 결과는 Data logger를 통해 실시간 수집하였다.

2.2.3 수치해석 방법

본 연구에서는 연소분야 연구에서 많이 사용되는 열화학반응 프로그램인 Chemkin 17.0을 USC-II Mech code를 활용하여 수치해석을 수행하였다. USC-II Mech은 784개의 반응과 111개의 종을 포함하고 있으며 다양한 C1~C4 탄화수소 관련 연소시나리오에 적용할 수 있도록 최적화 된 메커니즘이다. 실제 노즐 간격인 1cm 내 축 방향으로 10개의 균일한 격자를 두었으며 주위 온도는 298K, 주위 압력은 대기압으로 실험조건과 유사하게 설정하였다.



제 3 장 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 형태

연료 내 질소 첨가에 따른 에틸렌 확산화염의 형상 변화를 알아보기 위하여 질소를 0-40%까지 연료 측에 혼합하여 실험을 수행하였다. Fig. 9는 질소 혼합비율의 증가에 따른 에틸렌 대향류 확산화염의 형상 변화를 직접 촬영한 것으로, (a)부터 (e)까지 순서대로 연료 내 질소 농도가 각 10% 간격으로 0~40%으로 혼합된 대향류 화염을 나타낸다. (a)는 순수 에틸렌 100%인 조건에서 생성되는 화염으로 질소혼합 화염에 비해 상대적으로 매연 생성층인 홍염부가 더 밝고 Y축으로 넓게 분포되어 있으며, 양 끝단이 뾰족한 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 화염 위치가 타 화염보다 산화제 측에 가깝게 형성되는 것으로 나타났다. 이는 비에혼합화염의 일반적인 거동으로 미 연소된 연료가 공기와의 반응을 위한 반경 방향으로 이동하기 때문에 관찰된다.

$$Z_{st} = \frac{1}{1+v(Y_f/Y_o)} \quad (1)$$

식(1)은 이론혼합비를 구하는 식으로 이론 공연비의 위치, 즉 화염이 형성되는 위치를 나타내는 지표로도 쓰인다. 질소의 분자량과 C_2H_4 의 화학식량은 약 28로 거의 일정하므로 본 실험에서는 연료 몰분율이 1로 일정하여 혼합비에 따른 영향은 상대적으로 미비하다고 할 수 있다. 탄화수소로 이루어진 에틸렌과 비활성 기체인 질소 고유의 특성 차이에 기인하는지는 화염온도를 통해 명확하게 알 수 있다.



(a) C_2H_4 100%



(b) C_2H_4 90% + N_2 10%



(c) C_2H_4 80% + N_2 20%



(d) C_2H_4 70% + N_2 30%



(e) C_2H_4 60% + N_2 40%

Fig. 9 Flame image

3.2 화염의 온도 분포

에틸렌 확산화염 내 질소 첨가에 따른 화염의 온도 변화의 특징을 고찰하기 위해 R-Type 열전대를 이용하여 각 조건별 화염의 X축 중심에서 Y축 방향으로 온도를 측정하였다. 또한 수치해석을 통하여 실험 결과와 비교 검증하였다.

Fig. 10은 R-Type 열전대를 이용하여 측정한 결과 값을 나타낸다. 질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 화염의 온도는 1582.9K:1588.9K:1393.3K:1599.4K:1602.8K로 약 5K씩 감소하였다. Fig. 11은 수치해석으로 질소 혼합에 따른 화염온도분포를 나타낸다. 질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 화염 온도는 2270K:2250K:2240K:2220K:2200K로 약 15K간격으로 감소하였다. 실험에서 외부영향의 한계성으로 인해 수치해석과 결과의 차이는 있으나 화염의 질소 혼합비율이 높아질수록 일정한 비율로 화염온도가 감소하는 것을 확인하였다.

화염온도 최댓값으로 각 화염의 위치를 유추할 수 있다. 열전대 측정 결과에서 질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 화염의 위치는 연료 측 노즐을 기준으로 0.799cm:0.793cm:0.789cm:0.780cm:0.775cm로 점차 연료 측에 가깝게 형성되는 것으로 나타난다. 수치해석 결과는 질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 0.561cm:0.555cm:0.552cm:0.549cm:0.546cm로 열전대 측정결과와 유사하게 질소 혼합비율이 높아질수록 연료 측에 가깝게 형성되는 것으로 나타났다.

또한 연료 노즐 측에서 화염 위치는 질소 혼합비율과 무관하게 비슷한 위치를 나타내고 있으나 산화제 측에서 화염 위치는 질소 혼합비율이 감소할수록 점차 가깝게 분포되어있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 질소 혼합비율이 감소할수록 Y축 방향으로 화염이 더 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 화염형상, 열전대 측정, 수치해석에서 동일하게 확인하였다.

이 결과는 연료 혼합몰분율이 1로 일정할 때 활성기체인 에틸렌 비율이 높을수록 연소에 필요한 산소가 많이 필요하므로 희박현상에 따라 연료가 산화제 측으로 이동한다는 것을 의미한다. 또한 화염 온도 상승에 따라 활발해진 기체운동으로 분자가 더 넓은 범위로 확산되는 것으로 설명할 수 있다.



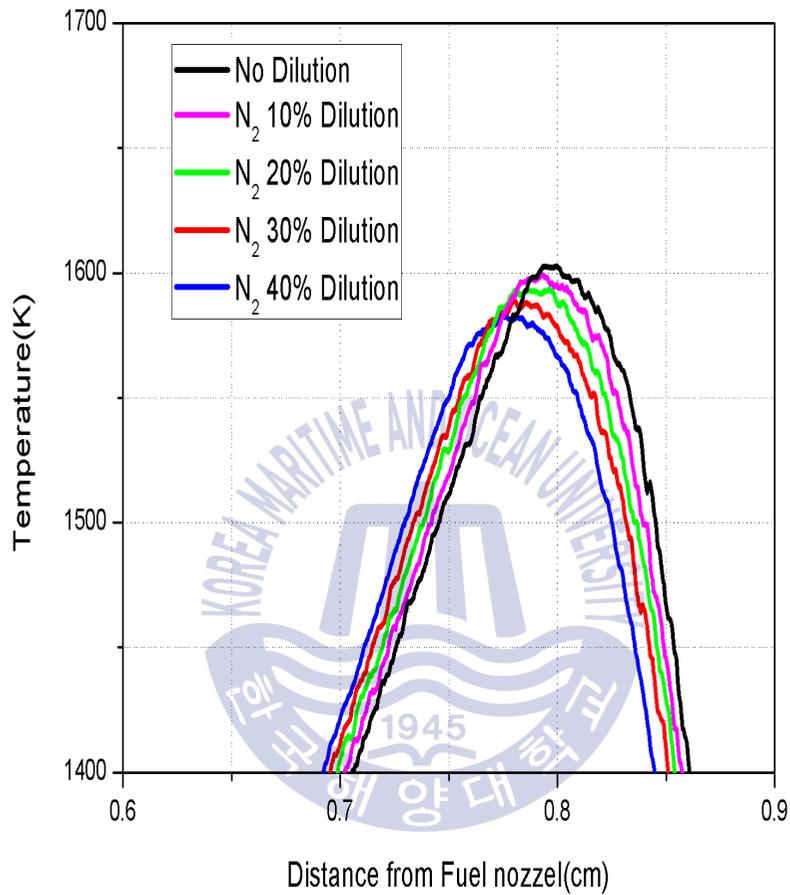


Fig. 10 Flame temperature by R-Type thermocouple

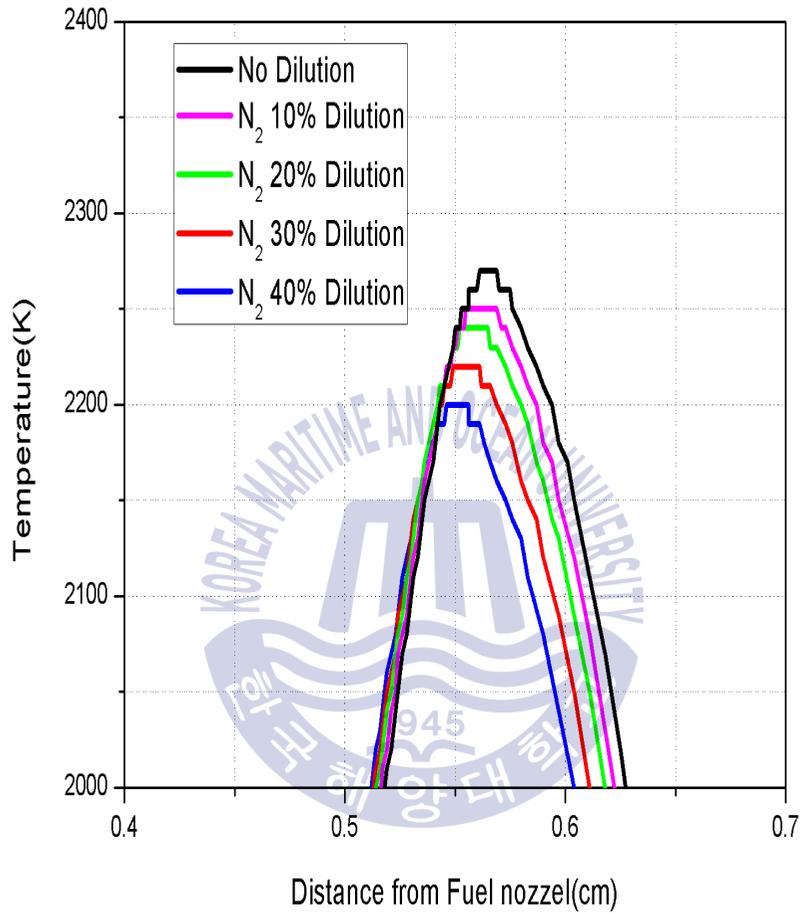


Fig. 11 Flame temperature comparison by Simulating

3.3 매연 생성 특성

3.3.1 광소멸법

본 연구에서는 대향류화염 내 매연 생성영역 내 매연입자에 의한 광소멸을 측정하여 매연체적분율을 확인하였다. 대향류화염은 정체면을 따라 x축으로 매연입자가 이동하므로 타 화염에 비해 상대적으로 y축 방향으로 계측 시 매연입자 생성 범위를 명확히 확인할 수 있다고 알려져 있다. Fig. 12은 광다이오드를 통해 계측된 전기신호를 나타낸다. 실험 결과, 각 조건에서 무화염상태의 광세기와 유사하게 유지하다가 화염과 가까워짐에 따라 질소 혼합비율 0% 기준으로 10%씩 증가 시 무화염상태 대비 54%:57%:60%:63%:64%로 광세기가 급격히 약해지는 형태를 보인다. 화염 부근에서 순수 에틸렌 화염보다 질소혼합 농도가 높은 화염일수록 광세기가 더 강하게 나타나며, 이는 질소가 soot 생성에 관여하지 않아서 매연생성이 감소한 것을 알 수 있다.

다음은 식(1) ~ (4)를 통해 광소멸 계수와 매연체적분율을 구하였다. 이를 통하여 Fig. 13에서는 각 화염 별 체적분율을 비교하여 나타냈다. 매연입자의 흐름은 화염과 입자정체면 사이에서 정체면으로 흘러가면서 밖으로 나간다. 매연 최적분율의 최댓값은 조건에 따라 약간의 차이가 있으나 연료 노즐에서 거리 0.53cm에서 최댓값을 나타내고 있으며 이를 정체면 구간으로 볼 수 있다. 질소 혼합비율이 10% 증가함에 따라 매연체적분율이 90%:93%:91%:95%로 감소하였고, 질소 40%혼합화염은 순수화염 대비 28% 매연체적분율이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 비활성 기체인 질소가 화학반응을 일으키지 못함에 따라 매연생성을 억제하는 효과를 의미한다.

또한 질소혼합을 증가에 따라 광세기가 감소하는 구간과 매연입자가 분포하는 구간이 좁게 나타난다. 연료 노즐로부터의 거리 0.4cm~07cm 구간에서 매연체적분율이 상승하며 화염온도에서 유추한 화염위치가

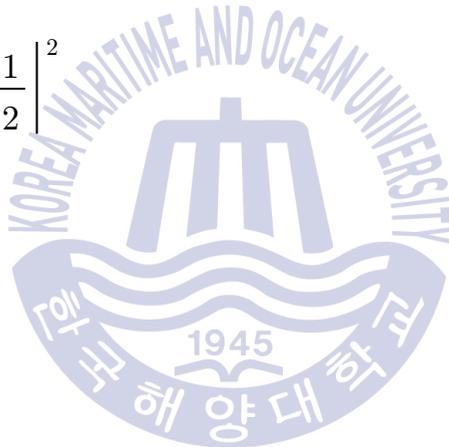
0.7cm~0.8cm 인근에서 형성되므로 fig.14와 같이 대향류 화염의 매연생성 특성이 나타남을 알 수 있다. 이 결과, 질소 혼합율의 증가가 매연입자의 체적분을 뿐 만 아니라 매연입자의 분포면적 감소에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

$$K_{ext} = -\Delta X^{-1} \log W_e / W_i = -\Delta X^{-1} \log I_e / I_i \quad (1)$$

$$E(m) = Im \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \quad (2)$$

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (3)$$

$$f_v = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(m)} \quad (4)$$



K_{ext} : extinction coefficient
 ΔX : width of the test section
 I_i : Initial laser signal
 I_e : laser signal after extinction
 λ : laser wavelength
 m : refractive index

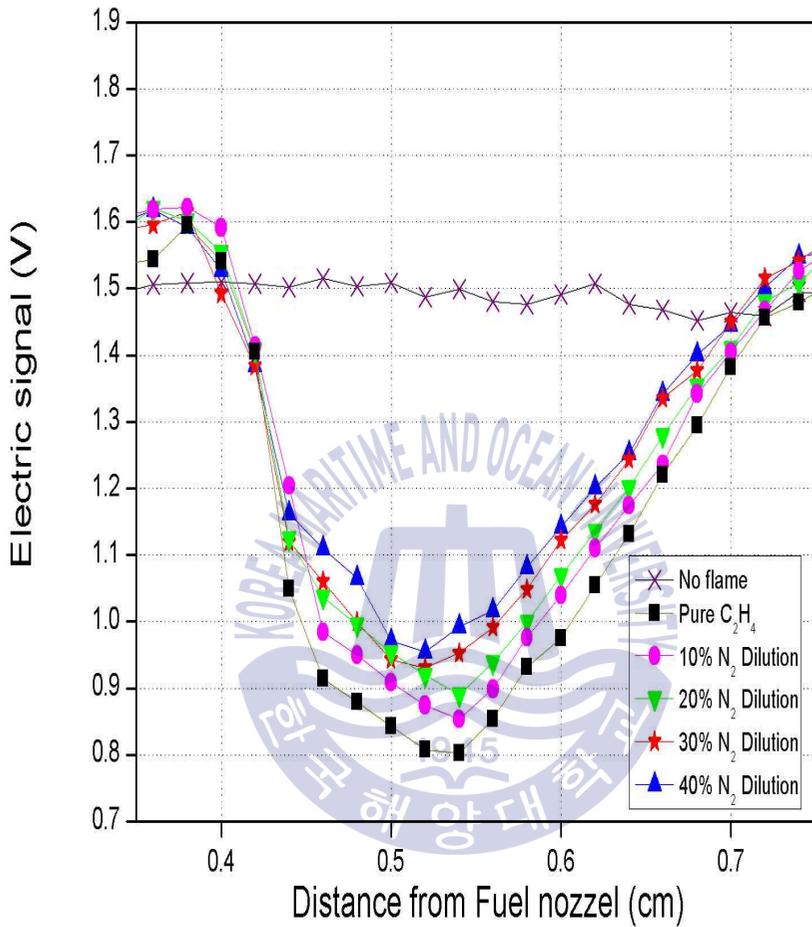


Fig. 12 Signal comparison on Laser Extinction

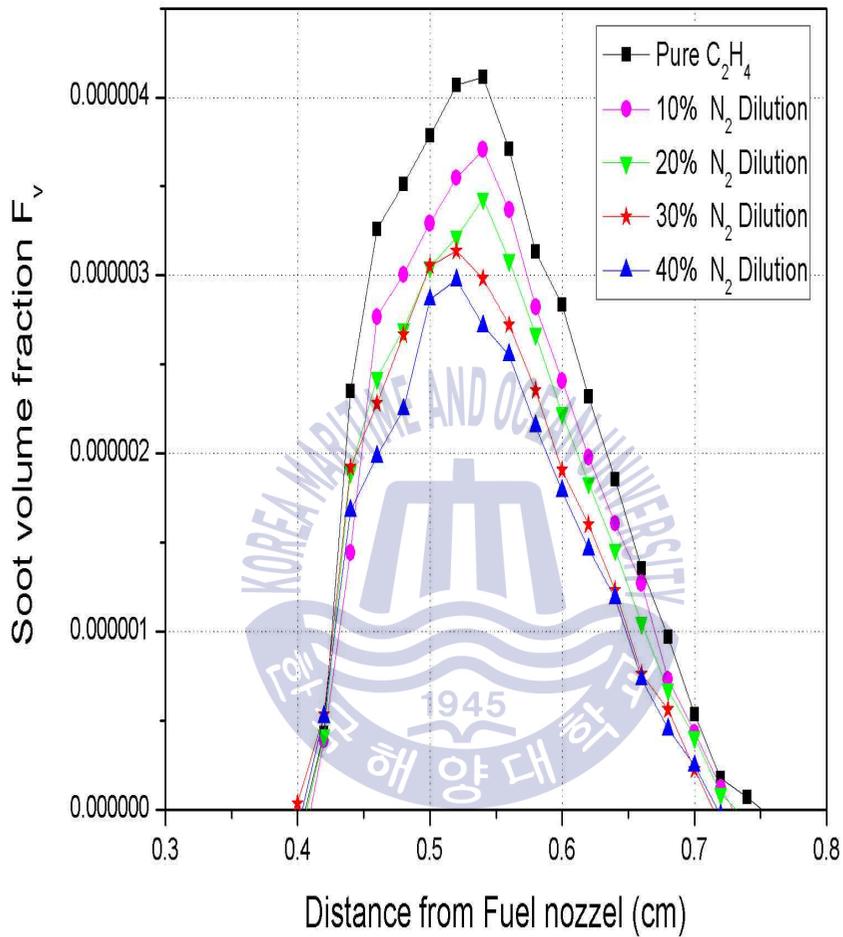


Fig. 13 Soot volume fraction for N_2 dilution ratio

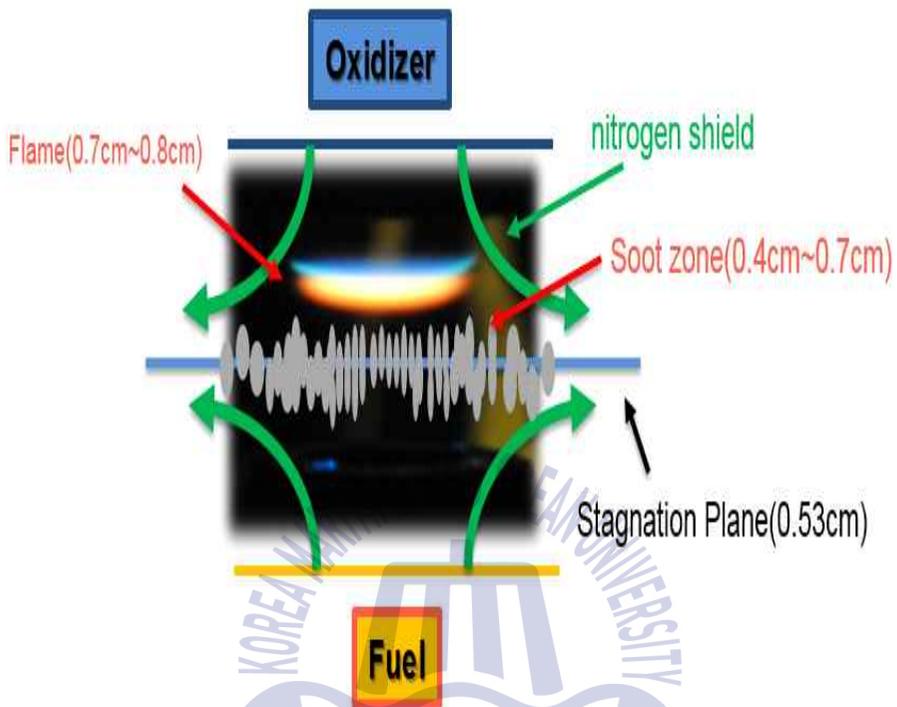


Fig. 14 Schematic of Soot Formation Flame in Counterflow

3.3.2 수치해석에 따른 각 화학종 물분을 변화

본 연구에서는 순수에틸렌대향류화염에서 질소혼합에 따른 매연생성 관련 화학종의 물분을 변화를 확인하기 위해 Chemkin 17.0 프로그램을 통해 각 화염조건에 따른 수치해석을 수행하였다. 대표적인 초기방향족 고리인 C_6H_6 와 매연 생성의 영향을 미친다고 알려진 C_2H_2 , CH_3 , C_3H_3 등의 화학종에 대한 농도 분포에 대하여 계산을 수행하였다. 또한 불완전연소 상태에서 발생하는 것으로 알려져 있는 CO 와 산화에 영향을 미친다고 알려져 있는 OH 에 대해 계산을 수행하였다. 마지막으로 첨가제로 사용된 질소가 화학반응을 알아보기 위하여 대표적인 질소산화물질인 NO , NO_2 에 대해 계산을 수행하였다.

Fig. 14-18은 순수에틸렌화염과 각 비율별 질소혼합화염의 주요 화학종의 물분율변화를 나타낸다. 연료로 사용된 에틸렌과 산화제인 산소가 0으로 수렴하는 지점에서 화염의 절대온도가 가장 높게 나타나며, 이를 통해 정상적으로 화염생성 및 시플레이션이 이루어졌음을 확인하였다.

Fig.19는 질소혼합에 따른 연료 측 버너에서의 거리에 대한 C_2H_2 의 농도를 나타낸다. 순수에틸렌화염의 경우 아세틸렌의 농도가 가장 높게 나타나며, 질소 혼합에 따라 일정한 간격으로 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 아세틸렌의 생성 경로는 $H + C_2H_2 (+M) = C_2H_3 (+M)$ 의 반응이 주를 이루고 있고, 질소 혼합에 따라 에틸렌의 농도가 감소하여 C_2H_3 의 농도도 감소하기 때문에 아세틸렌 농도가 감소한다고 할 수 있다.

Fig.20은 질소혼합에 메틸의 농도분포를 나타낸다. 질소 혼합이 증가할수록 메틸의 생성농도는 혼합율에 따라 순차적으로 낮아지는 것으로 나타나지만 질소 혼합을 40%화염과 순수에틸렌화염간의 농도 차이가 $8.80E-05$ 로 작아 질소 혼합에 따른 영향이 크지 않다고 할 수 있다. 또한 1500K 이상 고온의 화염영역에서만 분포하고 매연생성지역에서는 존재하

지 않으므로 에틸렌화염에서 메틸이 매연생성에 직접적으로 미치는 영향은 미비하다고 할 수 있다.

Fig.21은 질소혼합에 따른 연료 측 버너에서의 거리에 대한 C_3H_3 의 농도를 나타낸다. 순수에틸렌화염이 프로파질의 농도가 가장 높게 나타나며, 질소 혼합에 따라 일정한 간격으로 감소하는 것을 알 수 있다. 메틸과 동일하게 감소 차이가 $1.15E-04$ 로 작고 최댓값도 $3.76E-04$ 로 매연생성에 직접적으로 미치는 영향은 미비하다고 할 수 있다. 반응식에서 $2C_3H_3 \rightleftharpoons C_6H_5 + H$, $2C_3H_3 \rightleftharpoons C_6H_6$ 의 반응으로 초기 벤젠고리에 영향을 미치나 그 반응율은 매우 낮다. 이 결과를 통해 질소 혼합이 프로파질 감소에 영향을 미치나 그 영향도는 낮은 수준이며 매연 생성에 미치는 영향도 미비하다고 할 수 있다.

Fig.22은 순수에틸렌화염과 질소를 10%,20%,30% 및 40% 혼합한 혼합화염에 대하여 벤젠의 농도분포를 나타낸다. 질소의 혼합율이 증가함에 따라 벤젠의 농도는 감소하며, 그 감소 간격도 일정하게 비례한다. 이에 따라 질소비율이 증가할수록 초기 벤젠 고리 생성이 감소하고 이에 따라 PAH 생성도 감소해 매연생성이 감소할 것으로 예상된다. 벤젠 생성에 대한 화학 반응을 살펴 본 결과, 질소 혼합 비율과 무관하게 $C_6H_5 + H_2 = C_6H_6 + H$ 반응이 주를 이룬다. 초기 벤젠고리를 통한 PAH 및 매연 생성에 있어서는 타 화학종의 영향보다 H라디칼의 반응이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

아세틸렌과 벤젠은 동일한 화염 온도 위치에서 각 조건에 따른 화학종의 최대 농도가 같은 위치에서 있으나 메틸과 프로파질은 질소 혼합율의 증가에 따라 산화제 측에서 멀어지는 경향을 보인다. 이 결과를 통해 아세틸렌과 벤젠은 질소 혼합으로 탄화수소 연료비율에 영향을 받고, 프로파질과 메틸은 질소 혼합에 따른 탄화수소 연료비율 뿐만 아니라 화염온도 변화에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig.23은 질소혼합에 따른 연료 측 버너에서의 거리에 대한 OH 의 농도를 나타낸다. OH 는 완전연소 지점인 화염의 최대온도 시점부터 상승하는 것으로 나타나며, 이는 산화되지 못한 산소와 불안정한 H-라디칼 입자가 화학반응으로 결합하는 것을 알 수 있다. 질소 혼합율이 증가할수록 OH 의 농도는 감소하며 산화제 측에서 점차 멀어지는 경향을 보인다. 이는 활성기체인 에틸렌의 감소에 기인한다고 알 수 있다.

Fig.24는 순수에틸렌화염과 질소를 10%,20%,30% 및 40% 혼합한 혼합화염에 대하여 CO 의 농도분포를 나타낸다. 불완전 연소상태 구간인 산소희박상태 구간에서 산화제 측으로 점차 농도가 높아지다가 완전연소 상태 시점인 화염의 최대온도 시점부터 급격히 감소한다. 질소의 혼합율이 증가할수록 CO 의 농도도 일정하게 감소하며 이는 탄화수소 연료의 감소에 영향으로 알 수 있다.

Fig. 25는 에틸렌 화염에서 질소 첨가 시 이원화 형태의 질소가 타 화학종과의 화학반응으로 대표적인 유해물질인 질소산화물 생성에 영향을 미치는지를 나타낸다. 순수 에틸렌화염에서 NO 가 $5.29E-4$ 로 가장 높은 농도를 나타내고 질소 혼합에 따라 농도가 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 NO 의 몰분율그래프와 화염온도 그래프의 변곡점이 유사한 것으로 보아 질소 첨가에 따른 영향이 아닌 화염온도에 따른 영향으로 알 수 있다. NO_2 는 질소혼합과 무관하게 에틸렌화염에서 농도가 0에 수렴하여 영향이 미비함을 확인하였다. 이를 통해 본 실험 조건인 2200K-2270K 화염온도, 대기압 상태에서는 이원화 상태의 질소가 연소과정에 어떠한 직접적인 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

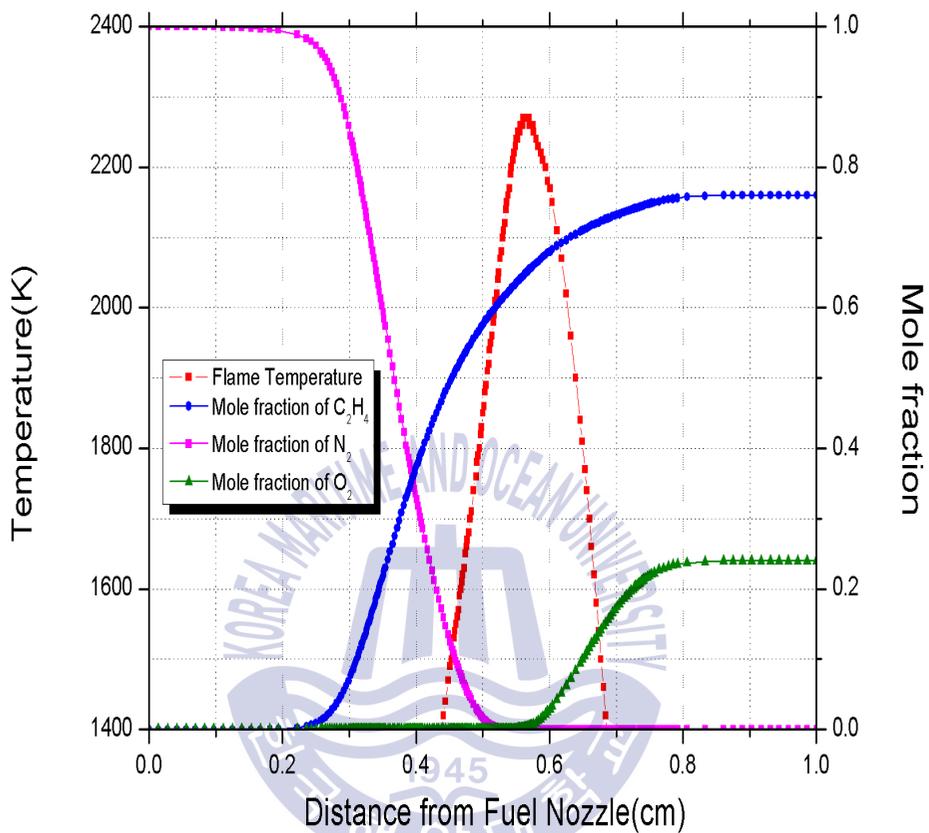


Fig. 15 Temperature and Mole fraction of Pure C_2H_4 flame

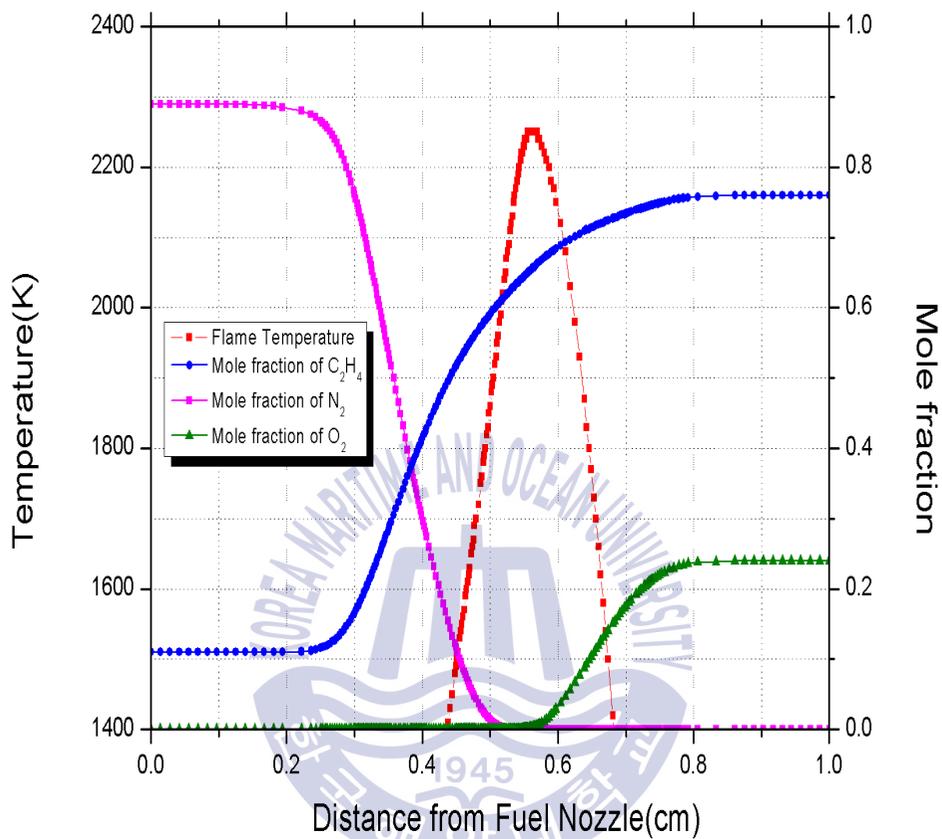


Fig. 16 Temperature and Mole fraction of N_2 10% Dilution flame

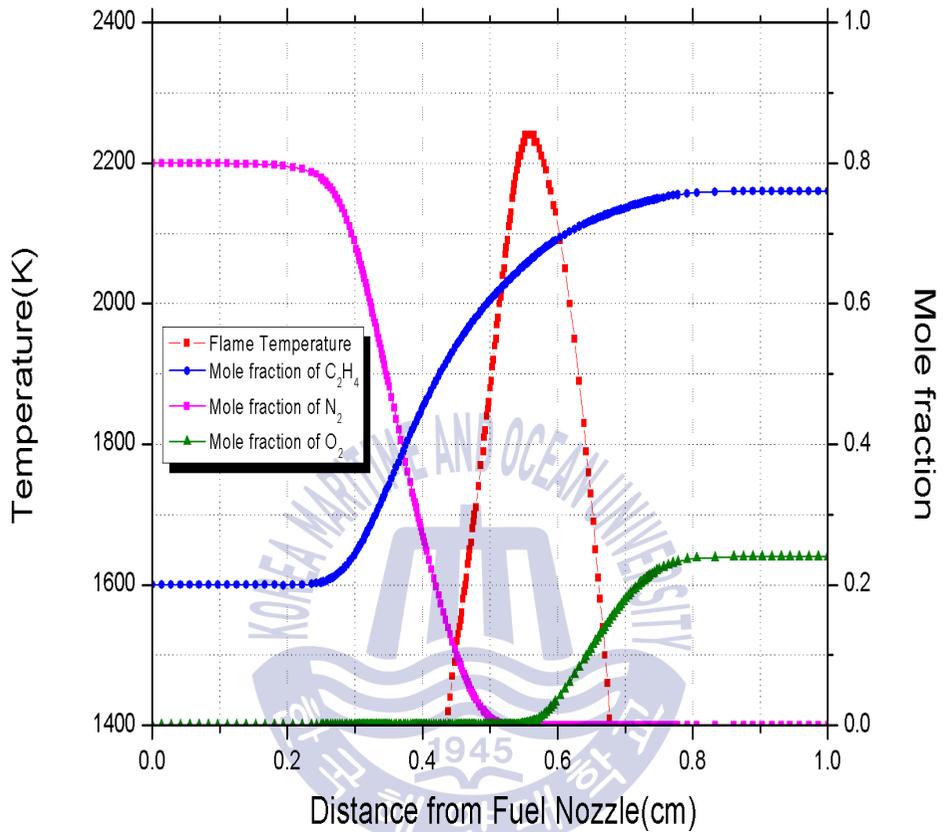


Fig. 17 Temperature and Mole fraction of N_2 20% Dilution flame

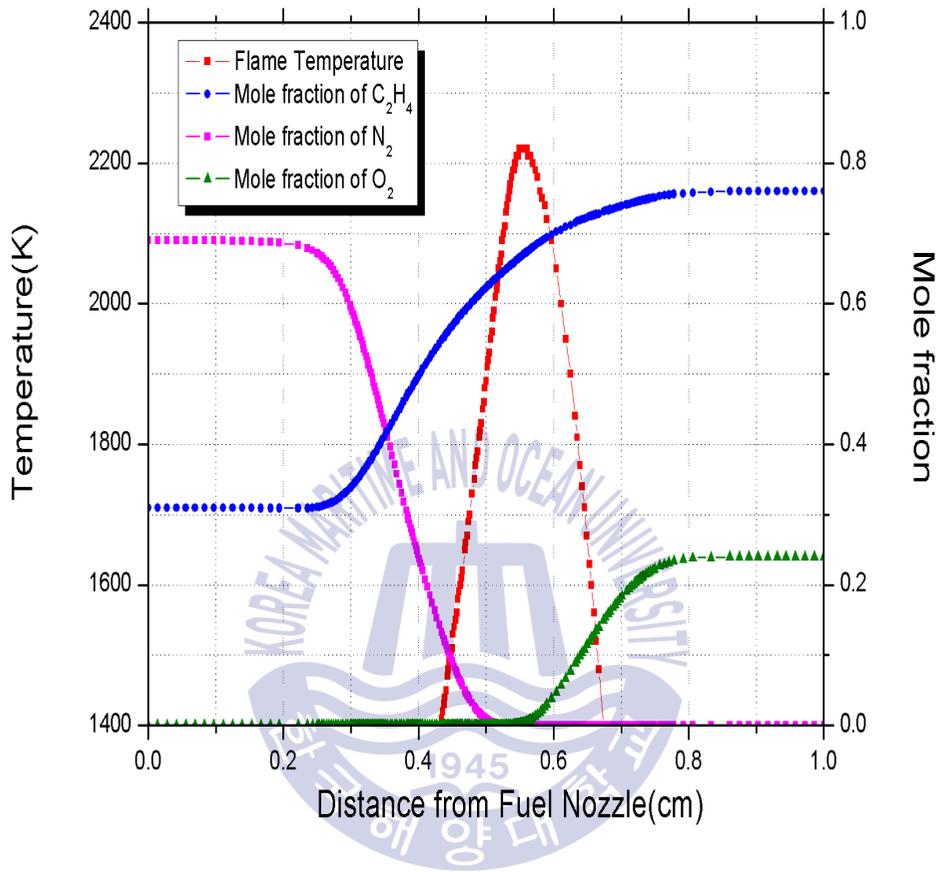


Fig. 18 Temperature and Mole fraction of N_2 30% Dilution flame

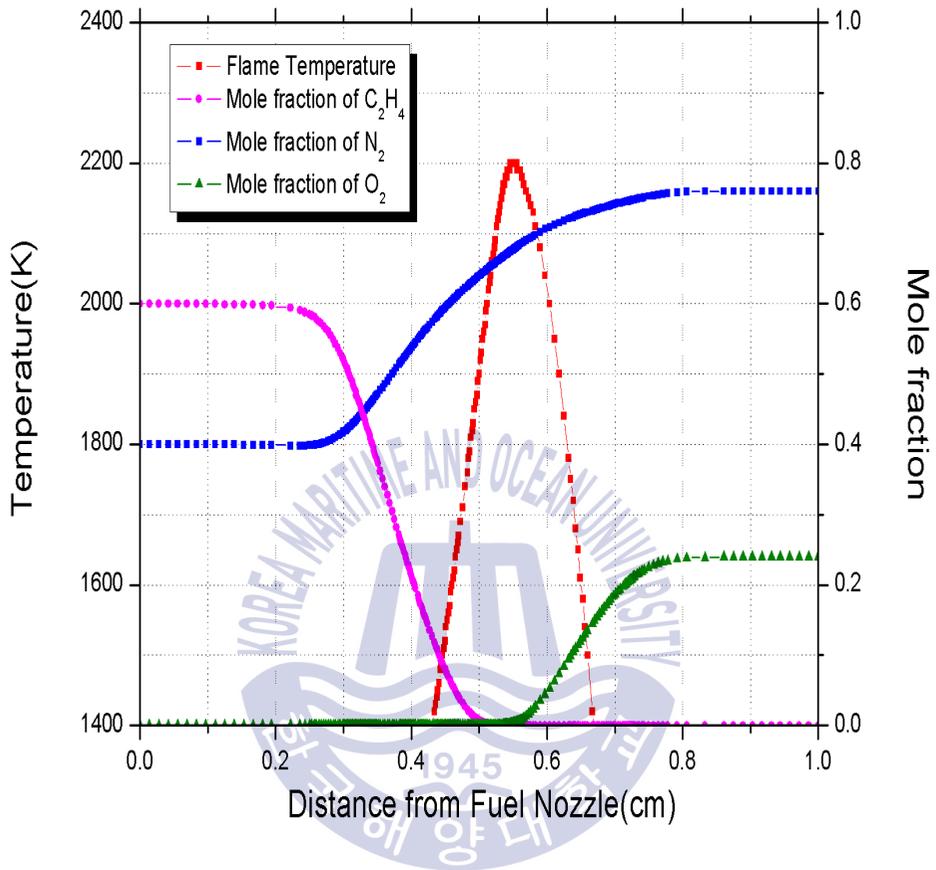


Fig. 19 Temperature and Mole fraction of N_2 40% Dilution flame

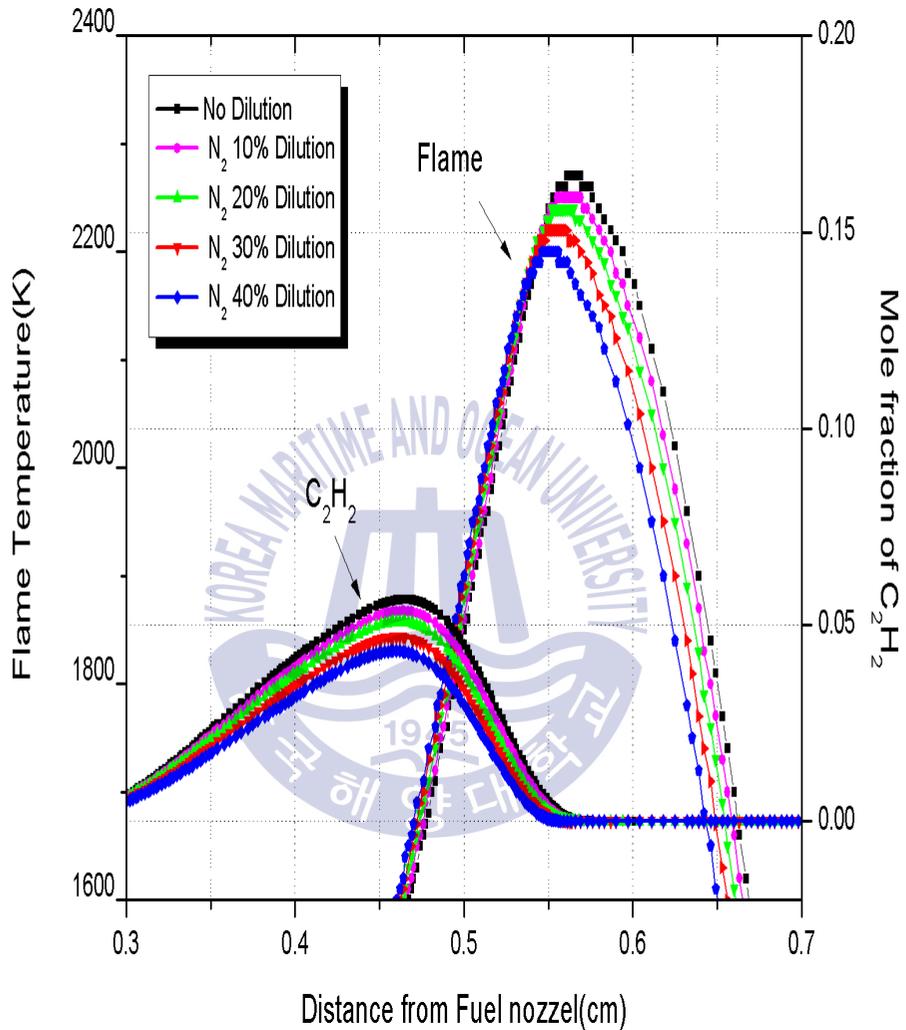


Fig. 20 C_2H_2 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

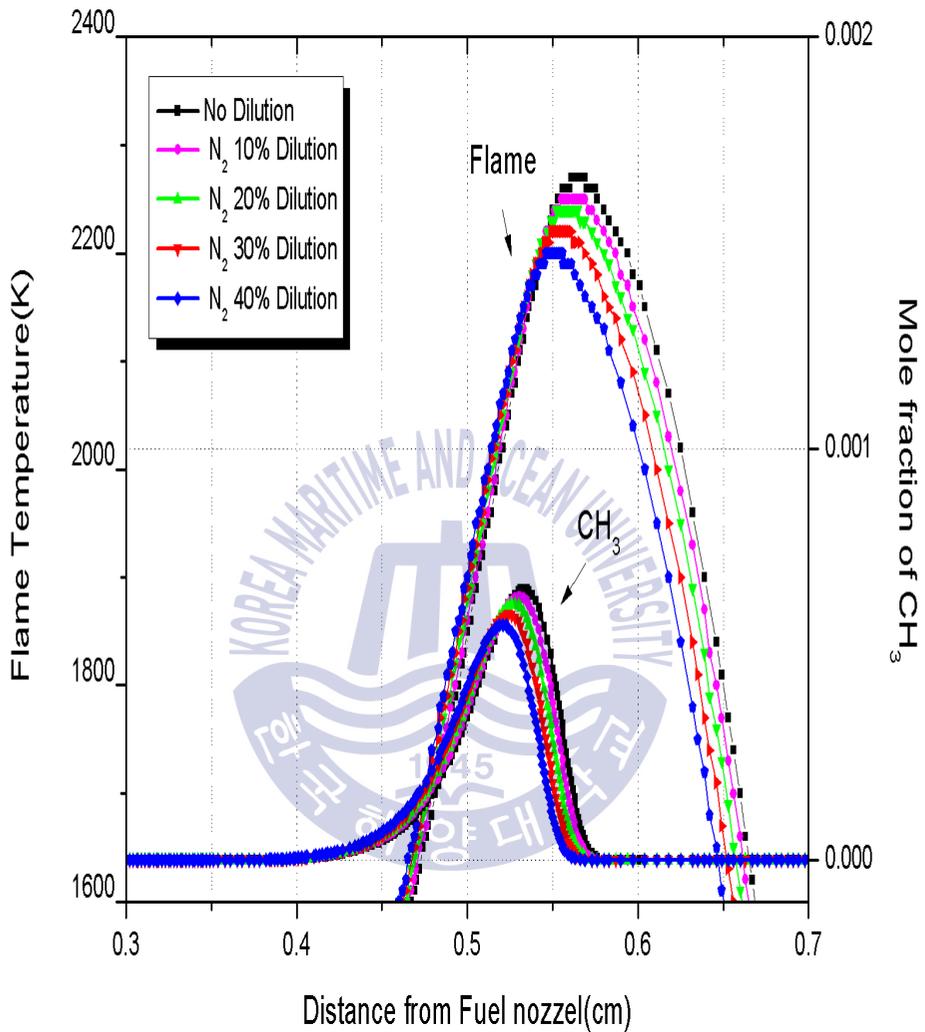


Fig. 21 CH_3 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

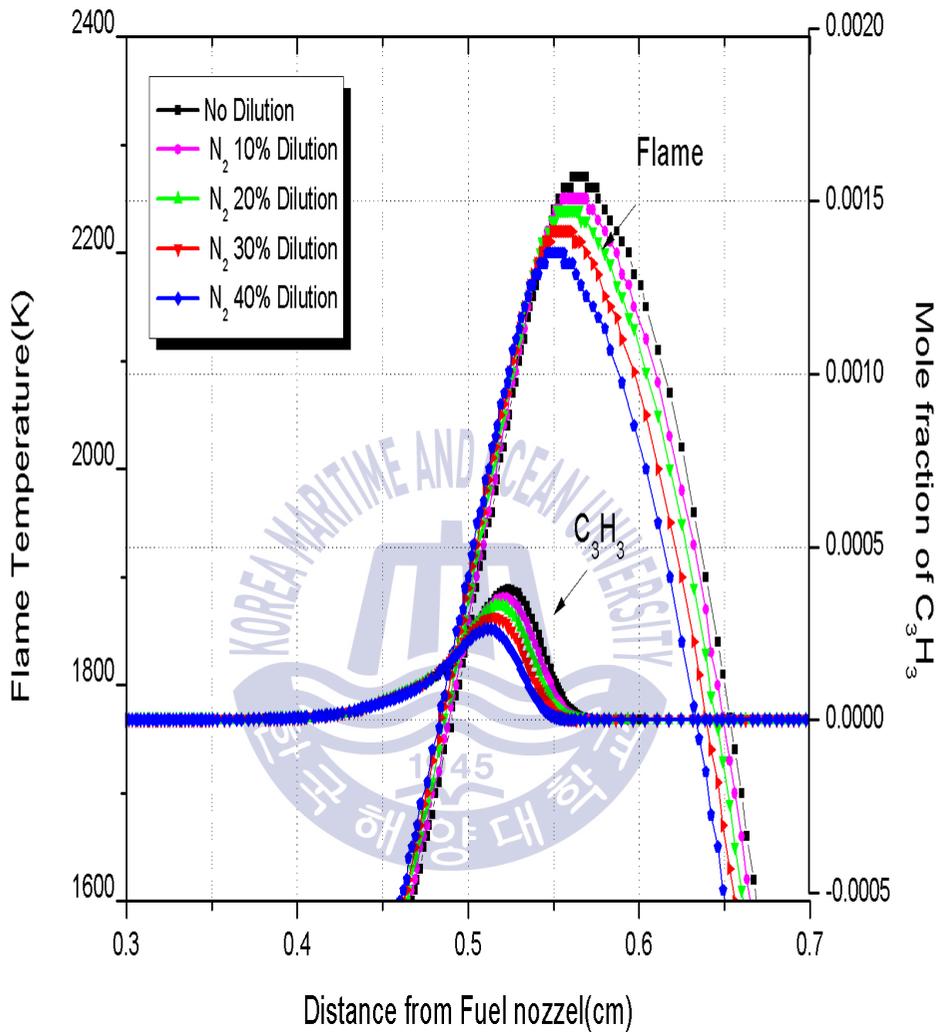


Fig. 22 C_3H_3 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

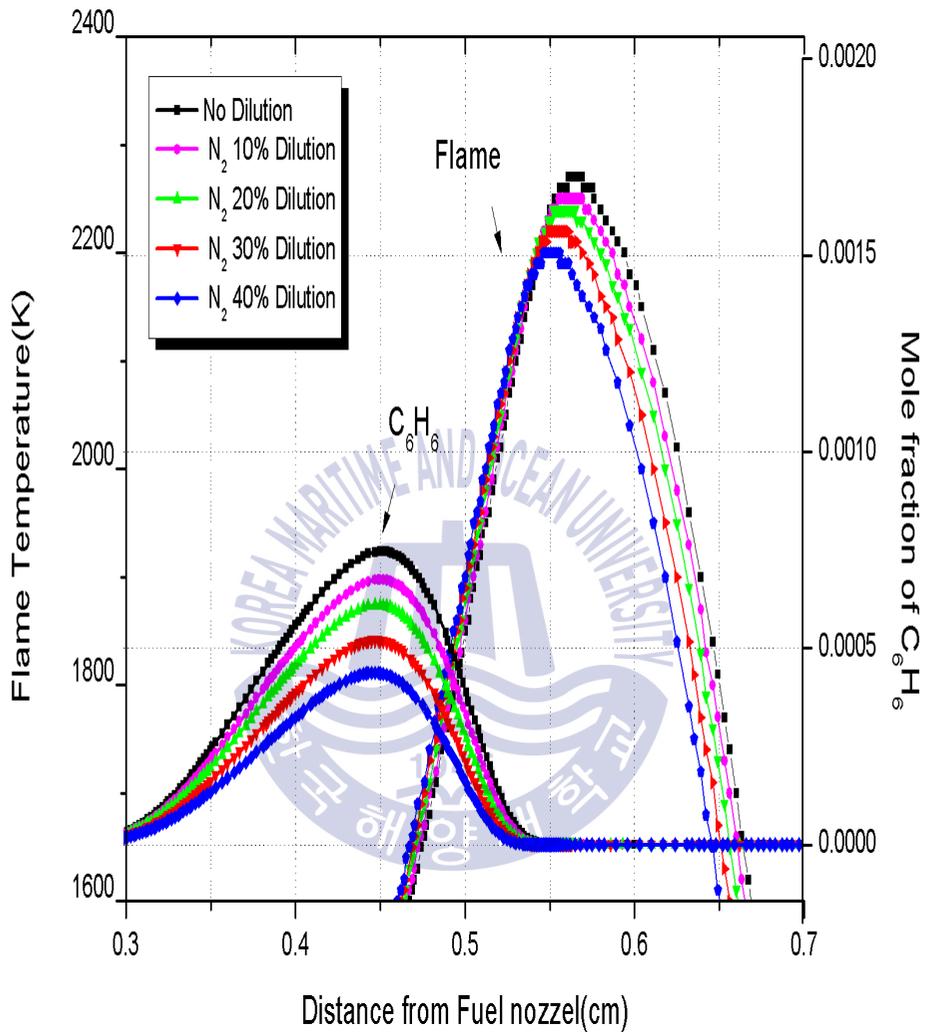


Fig. 23 C_6H_6 concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

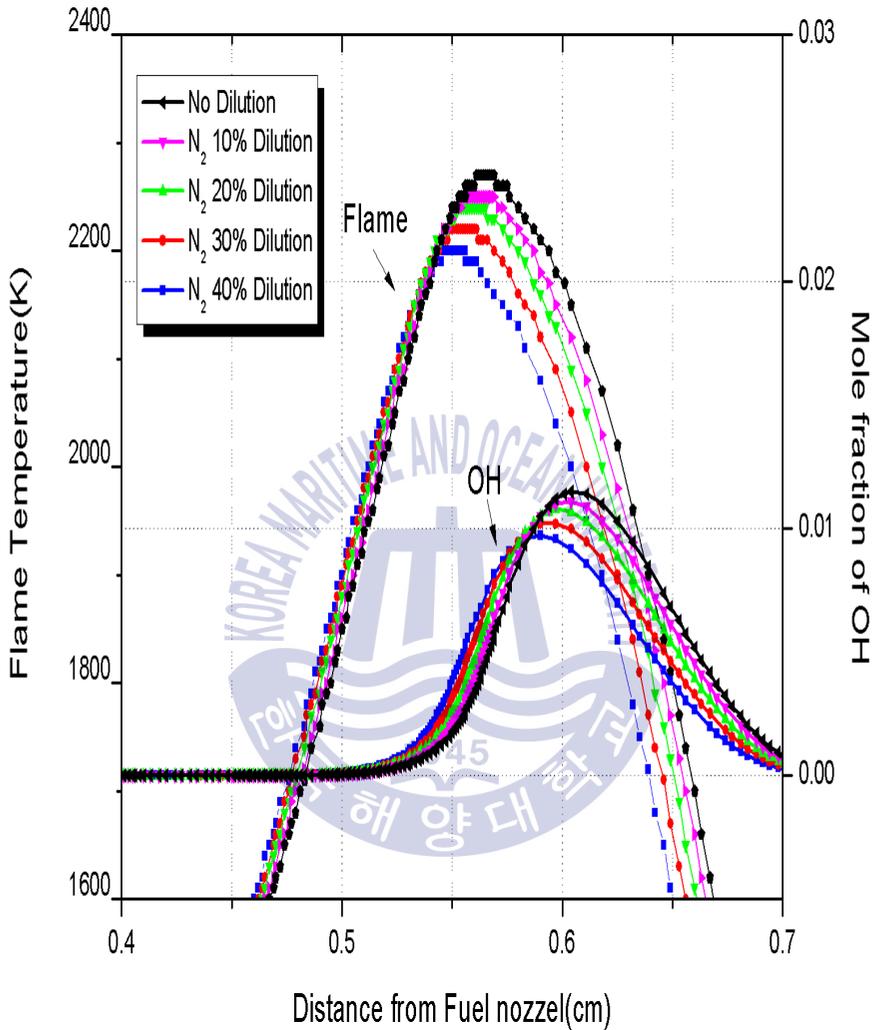


Fig. 24 *OH* concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

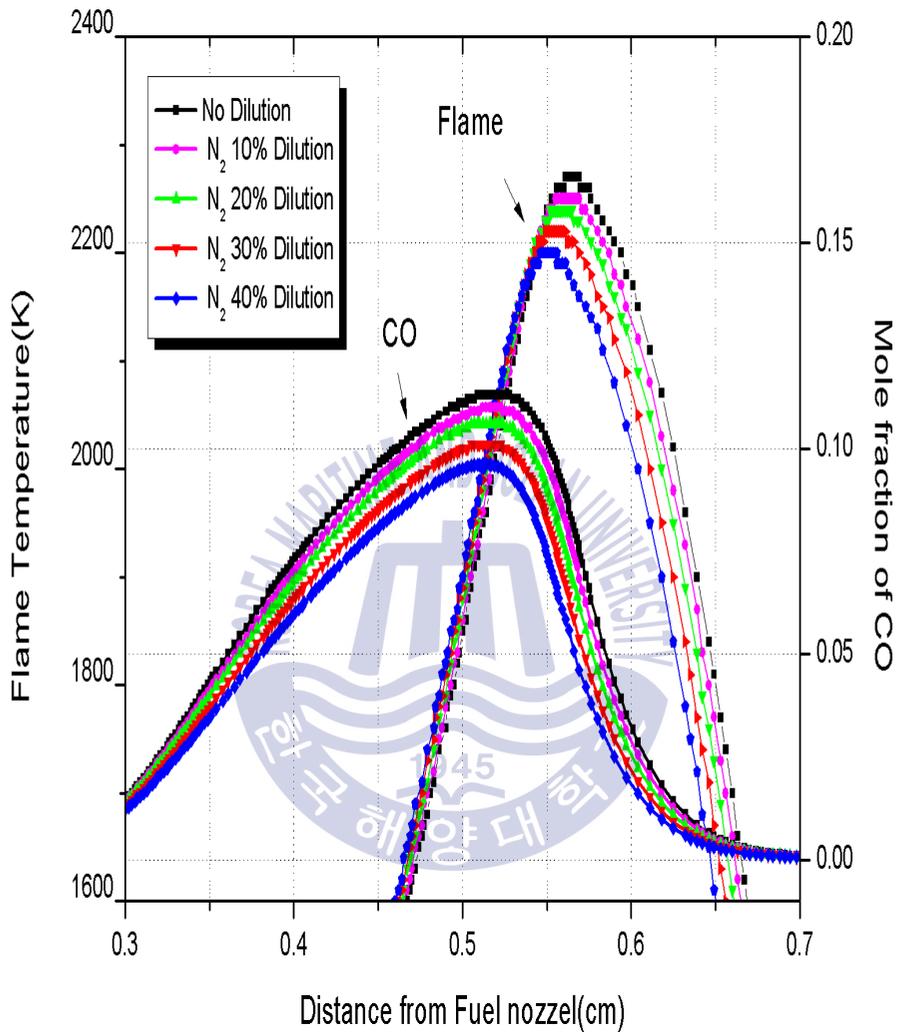


Fig. 25 CO concentrations for ethylene-based flame and N_2 dilution ratios of 0%,10%,20%,30% and 40% in the counterflow diffusion flames as a function of distance from the fuel nozzle.

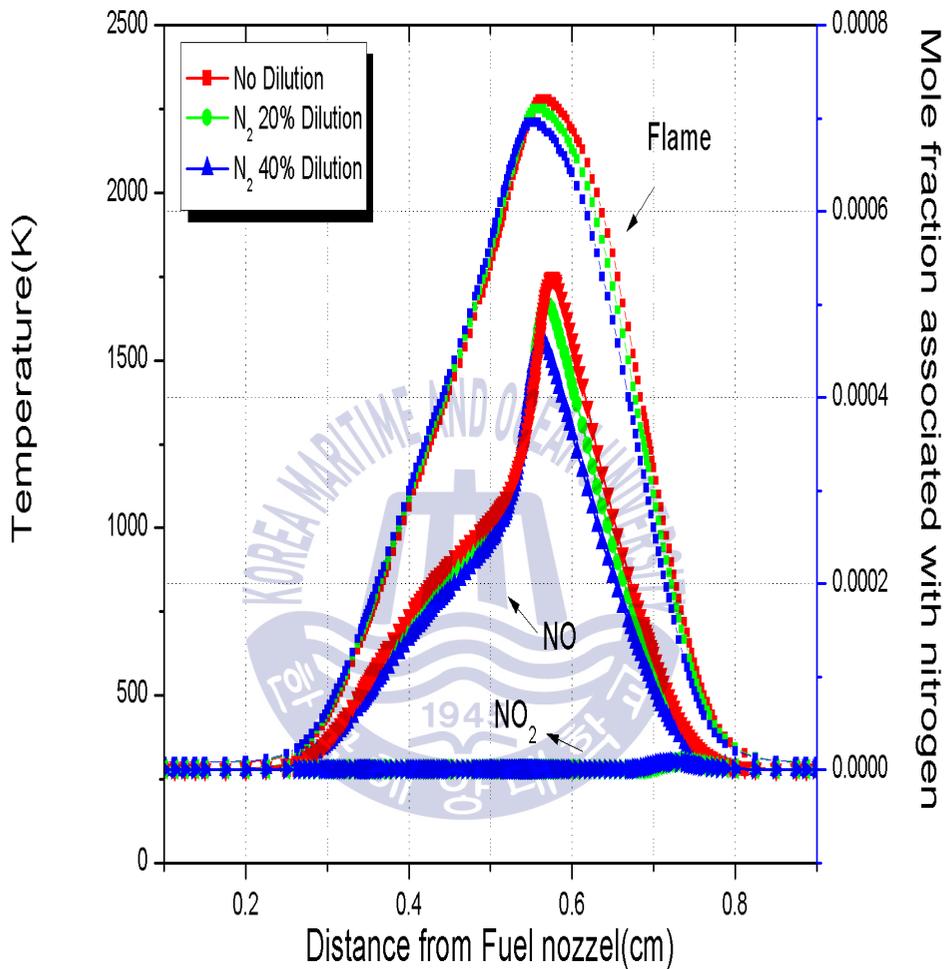


Fig. 26 Effect of N_2 Dilution on Nitrogen Oxide Generation

제 4 장 결론

본 연구에서는 에틸렌 대향류 화염에서 질소 혼합에 따른 매연생성특성 변화를 확인하기 위하여 광소멸법을 통한 실험과 Chemkin 17.0 프로그램을 통한 수치해석을 실시하였으며 그 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 실험에서 촬영한 화염형태 확인 결과, 순수 에틸렌 화염이 질소혼합 화염에 비해 상대적으로 매연층인 홍염부가 더 밝고 Y축으로 넓게 분포되어 있으며, 양 끝단이 뭉뚝한 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 화염 위치가 산화제 측에 가깝게 형성되는 것으로 나타났다. 이는 비예혼합화염의 거동으로 미 연소된 연료가 공기와의 반응을 위한 반경 방향으로 이동하는 것을 확인하였다.

(2) 열전대 계측을 통해 질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 화염의 온도는 약 5°C 간격으로 감소하였으며, 수치해석 계산에서 화염의 온도는 약 15K 간격으로 감소하였다. 이를 통해 질소 혼합비율이 높아질수록 순차적으로 화염온도가 감소하는 것을 비교 검증하였다.

질소혼합을 0% 기준으로 10%씩 증가함에 따라 화염의 위치는 연료 측 노즐을 기준으로 점차 연료 측에 가깝게 형성되는 것으로 나타난다. 또한 연료 노즐 측에서 화염 끝단은 질소 혼합비율과 무관하게 비슷한 위치를 나타내고 있으나 산화제 측에서 화염 위치는 질소 혼합비율이 감소할수록 점차 연료 측에 가깝게 분포되어있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 연료 혼합물분율이 1로 일정할 때 활성기체인 에틸렌 비율이 높을수록 연소에 필요한 산소가 많이 필요하므로 희박현상에 따라 연료가 산화제 측으로 이동한다는 것을 의미한다. 또한 화염 온도 상승에 따라 활발해진 기체운동으로 분자가 더 넓은 범위로 확산되는 것으로 설명할 수 있다.

(3) 광소멸법을 통한 레이저 계측 결과, 질소 혼합비율 0% 기준으로 10%씩 증가 시 무화염상태 대비 54%: 57%:60%:63%:64%로 광세기가 약해지는 형태를 보인다. 화염 부근에서 순수 에틸렌 화염보다 질소혼합 농도가 높은 화염일수록 광세기가 더 강하게 나타나며, 이는 질소가 soot 생성에 관여하지 않아서 매연생성이 감소한 것이라는 것을 알 수 있다.

최적분율을 계산한 결과, 질소혼합 비율이 증가할수록 매연 최적분율의 최댓값은 조건에 따라 약간의 차이가 있으나 연료 노즐에서 거리 0.53cm에서 최대값을 나타내고 있으며 이를 정체면 구간으로 볼 수 있다. 질소혼합비율이 증가함에 따라 매연체적분율은 감소하였고, 질소 40%혼합화염은 순수화염 대비 28% 매연체적분율이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 비활성 기체인 질소가 화학반응을 일으키지 못함에 따라 매연생성을 억제하는 효과를 의미한다. 또한 질소 혼합율의 증가가 매연입자의 체적분율뿐만 아니라 매연입자의 분포면적 감소에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

(4) 질소 혼합에 따른 매연생성에 관여하는 화학종의 물분율 변화를 수치해석을 통해 확인하였다. 대표적인 초기방향족 고리인 C_6H_6 와 매연 생성의 영향을 미친다고 알려진 C_2H_2 , CH_3 , C_3H_3 , 그리고 CO , OH 등은 질소혼합 비율이 높아짐에 따라 일정한 간격으로 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 아세틸렌과 벤젠은 동일한 화염 온도 위치에서 각 조건에 따른 화학종의 최대 농도가 같은 위치에서 있으나 메틸과 프로파길은 질소 혼합율의 증가에 따라 산화제 측에서 멀어지는 경향을 보인다. 이 결과를 통해 아세틸렌과 벤젠은 질소 혼합으로 탄화수소 연료비율에 주된 영향을 받으며, 프로파길과 메틸은 탄화수소 연료비율 뿐만 아니라 화염온도 변화에도 영향을 받는 것을 알 수 있다.

화학 반응식을 살펴본 결과, 질소 혼합 비율과 무관하게 벤젠고리 생성은 H라디칼의 반응이 가장 큰 영향을 미치며 타 화학종의 반응률은 매우 낮아 영향력이 미비함을 알 수 있다.

(5) 수치 해석을 통해 에틸렌 화염에서 연료 측에 질소 혼합 시 이원화 형태의 질소가 화학반응을 통해 타 화학종에 미치는 영향을 확인해보았다. 순수 에틸렌화염에서 가장 높은 농도를 나타내고 질소 혼합에 따라 농도가 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 NO의 몰분율 그래프와 화염온도 그래프의 변곡점이 유사한 것으로 보아 질소 첨가에 따른 영향이 아닌 화염온도에 따른 영향으로 알 수 있다. 이를 통해 본 실험 조건인 2200K -2270K 화염온도, 대기압 상태에서는 이원화 상태의 질소가 연소과정에 어떠한 직접적인 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 질소가 특정 조건의 대향류화염에서 혼합비율 증가에 따라 화염 온도 감소, 매연생성 감소, 매연생성에 관여하는 화학종의 감소에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 화염의 크기 및 매연입자의 분포구간도 감소시키는 것을 확인하였고 이원화 질소가 2200K-2270K 온도 구간에서 연소과정에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 이 연구 결과를 통해 화염 온도의 변화를 필요로 하는 요소에 질소는 유용한 촉매제로 활용 가능하며, 최근 환경규제에 따른 매연 억제기술 개발의 기초연구로써 기대된다.

추후 질소첨가가 매연생성 감소와 함께 다른 영역에서 어떤 영향을 미치는지 연구가 필요하며, 더 나아가 질소뿐만 아니라 다양한 활성기체와 비활성기체가 매연생성에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Rupley, 1996, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames" Sandia National Laboratories Report, pp 96-824.
- [2] Axelbaum, R, L., Law, C, K., 1990, "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames" 23rd Symposium on Combustion, pp 1517 ~1523.
- [3] Choi Jae-Hyuk, 2009, Experimental Study on Characteristics of Synergistic Effect of Fuel Mixing on Number Density and Size of Soot in ethylene-base Counterflow diffusion flames by laser techniques, Korean Society of Marine Engineering Vol.33, pp 378-386.
- [4] Glassman, I, 1989, "Soot formation in combustion processes," Symposium (international) on combustion, Vol. 22, No. 1, pp 295~311.
- [5] Glassman, I, 1998, "Soot Laminar Diffusion Flames: Effect of Dilution, Additives, Pressure, and Microgravity," 27th Symposium on Combustion, pp 1589~1596.
- [6] Gulder, O. L., 1992, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flame at Elevated Temperatures," Combustion and Flame, Vol 88, pp 74~82.
- [7] Gulder, O. L., and Sneling, D. R., 1993, "Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames," Combustion and Flame, 92, pp 115~124.
- [8] Gulder, O. L., 1995, "Effect of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane, and n-Butane Diffusion flames," Combustion and Flame, Vol 101. pp 302~310.

- [9] Hara, H. S. and Glassman, I., 1989, "Soot formation in diffusion flames of fuel/oxygen mixtures," Symposium(international) on combustion, Vol. 22, No. 1, pp 371~378.
- [10] Liu, Y., Tao, F., Foster, D.E. and Reitz, R.D., 2005, "Application of a phenomenological soot model to HSDI dissel multiple injection modeling" SAE Paper
- [11] McEnally, C. S. and L. D. Pfefferle, 2007, The effects of dimethyl ether and ethanol on benzene and soot formation in ethylene nonpremixed flames, Proc. Combust. Inst., Vol. 31, pp 603-610.
- [12] Mcenally, C.S., Koylu, umit O., Pfefferle L. D., and Rosner, D. E., 1997, "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples," Combustion and Flame, Vol 109, pp 701~720.
- [13] R. J. Santoro, H. G. Semerjian, and R. A. Dobbins, 1983, "Soot particle measurements in diffusion flame" Combustion and Flam. Vol 51, pp 203~218.
- [14] Sato, H., Tree, D. R., Hodges, J. T. and Foster, D. E., 1991, "A study on the effect of temperature on soot formation in a jet stirred combustor," Symposium(international) on combustion, Vol. 23, No. 1, pp 1469-1475.
- [15] Song, K. H., Nag, P., Litzinger, T. A. and Haworth, D. C., 2003, "Effects of oxygenated additives on aromatic species in fuel-rich, premixed ethane combustion: a modeling study," Combust and Flame, Vol. 135, No. 3, pp 341-349.

- [16] W. Pejpichestakul, A. Frassoldati, A. Parente & T. Faravelli, 2018, SOOT MODELING OF ETHYLENE COUNTERFLOW DIFFUSION FLAMES, JOINT MEETING THE GERMAN AND ITALIAN SECTIONS OF THE COMBUSTION INSTITUTE, pp 1785-1790.
- [17] Wey, C., Powell E. A. and Jagoda, J. I., 1984, "The Effect of Temperature on the Sooting Behavior of Laminar Diffusion Flames," Combustion Science and Technology, Vol. 41, pp 173-90.
- [18] Y. Wang, A. Raj and S.H. Chung, 2013, "A PAH growth mechanism and synergistic effect on PAH formation in counter flow diffusion flames", Combustion and Flame, Vol. 160, pp 1667-1676.
- [19] 엄재호, 이종호, 전충환, 장영준. 2002, 동축류 확산화염에서 질소첨가가 Soot발생에 미치는 영향. KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp 185-191.
- [20] 윤승석, 이상민, 정석호. 2003, 다양한 연료의 혼합에 따른 대향류 확산화염에서의 PAH 및 매연생성 특성, 한국연소학회, 한국연소학회지 8(3), 2003, 8-14 관한 실험연구. 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp 125-128.
- [21] 임상철, 안태국, 박선호, 남연우, 이원남. 2015, 레이저와 연속광원을 이용한 매연입자 광 소멸의 파장 의존성. KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp 73-76.
- [22] 조재호, 문선여, 황철홍, 오창보. 2012, CH₄ /Air 대향류 확산화염에서 불활성기체의 소화농도에 관한 실험연구. 한국화재소방학회, 학술대회 논문집, pp 125-128.
- [23] 한용택, 이기형, 이원남. 2004, 레이저 및 열전대를 이용한 동축류 확산화염에서의 매연입자 측정에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 B권, pp 863-870.

- [24] 정용기 외 3인. 2002, 층류확산화염에서 질소 첨가와 초기 예열온도가 NO 생성에 미치는 영향, 대한기계학회 기타 간행물, pp 1785-1790.
- [25] 이원남, 김성기. 1997, “연료혼합 및 공기첨가에 따른 매연생성 메커니즘의변화,“ 대한 기계학회 추계학술대회논문집, Vol. 2, No. 2, pp 30~35.
- [26] 최인철, 이재복, 황정호. 1999, 층류 확산 화염 내 매연 입자와 부피 분율 예측, 대한기계학회 추계학술대회논문집 B권, pp 602-607.
- [27] 최재혁, 박상균. 2013, 1g와 0g에서의 에틸렌 확산화염 내 매연 생성 특성에 관한 수치적 연구, 한국마린엔지니어링학회지 VOL 37, pp 807-815.
- [28] 최재혁, 윤석훈, 윤두호. 2012, 톨루엔 혼합에 따른 대향류 확산화염 내 매연 생성에 대한 수치적 연구, 해양환경안전학회지 제18권, pp 139-144.
- [29] 최재혁, 한원희. 2012, 대향류 에틸렌 확산화염내 PAH 및 매연의 생성에 미치는 n-헵탄 혼합의 영향에 관한 연구, 해양환경안전학회지 제18권, pp 55-60.
- [30] 이재서, 허강열. 2009, 층류 예혼합 화염에서의 SOOT 입자 크기 분포에 대한 연구, 한국연소학회 심포지엄 논문집, pp 257-263.
- [31] Reaction Design. 2000. A PROGRAM FOR COMPUTING OPPOSED-FLOW DIFFUSION FLAMES. CHEMKIN Collection Release 3.6.
- [32] 강석호, 1998. 21세기의 에너지와 산업사회 영남대학교출판부
- [33] 정석호 외 7인, 2001. 레이저응용연소계측. 문운당.

감사의 글

2년의 대학원 생활, 많은 사람들의 조언과 격려가 지금의 저를 맞게 하였습니다. 그 분들께 고마움을 담아 감사의 인사를 전하고자 합니다.

먼저 부족한 저를 위해 바쁜 일정 속에서도 언제나 인자한 미소로 맞아 주시고 소중한 가르침과 조언을 아끼지 않으시며, 본 논문이 나오기까지 물심양면으로 지도해주신 최재혁 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

고민이 있을 때 전심으로 적절한 조언으로 격려해주시고, 바쁜 시간 가운데 논문 심사와 지도를 해주신 이원주 교수님, 윤성환 교수님께 감사 인사 드립니다.

그리고 실험 준비에 함께 힘써준 이준혁, 권영섭 후배님, 수치해석 이해에 도움을 준 부경대 권순형 님께도 감사의 마음을 전합니다.

한 해 동안 함께 승선하면서 학업에 정진할 수 있도록 늘 많은 부분을 이해해주시고 업무적으로 배려해주신 한우리호 박용선 선장님과 교무부장 김태훈 교수님, 김홍중 기관장님, 신동욱 교수님, 김선태 교수님, 남홍식 교수님, 전재호 교수님, 박현민 교관님, 정수진 교관님께 감사의 인사를 드립니다.

연수원 업무에 부족한 점이 있음에도 이쁘게 지켜봐주시고 너그러운 마음으로 이해해주신 한반도호 변국남 선장님, 허재정 기관장님, 김종필 교수님, 류원 교수님, 박기태 교수님, 이성우 교관님, 김무겸 교관님, 김홍범 교관님, 권승철 교관님께도 감사의 인사를 드립니다.

바쁘다는 핑계로 자주 연락하지 못하지만 힘들고 지칠 때마다 마음의 버팀목이 되어주는 나의 벗 박지훈, 돼지, 성모, 이창, 재학이, 방, 윤근이, 상각이 그리고 재완이에게 미안함과 고마운 마음을 전합니다.

아들을 위해 항상 아낌없는 사랑을 베풀어주시고 지금 이 순간을 누구

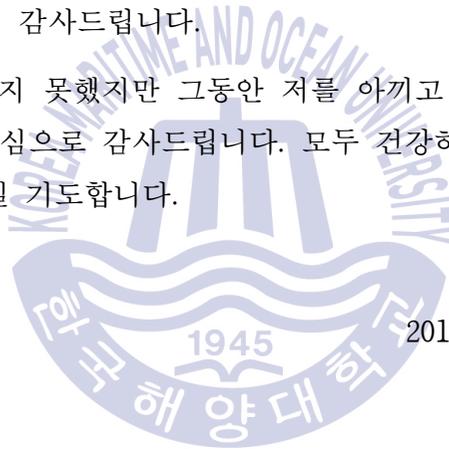
보다 기뻐하실 아버지, 어머니! 감사하고 사랑합니다. 저를 믿어주시고 묵묵히 응원해주시는 장인어른·장모님! 깊은 감사를 드립니다. 양가 어르신들의 은혜에 보답할 수 있도록 부디 오래오래 건강하시길 기원합니다.

가족이라는 이름으로 나를 항상 아끼고 이해해주는 누나 그리고 매형, 조카 은빈이, 은유에게도 감사의 마음을 드립니다.

그 누구보다 지난 1년간 헌신과 사랑으로 제 곁에서 함께 마음 고생해준 사랑하는 아내 윤희, 내 삶의 선물이 되어준 라엘리와 함께 기쁨을 나누고 싶습니다.

마지막으로 내게 가장 선한 것으로 베푸시길 기뻐하시는 내 영원한 등대, 하나님 아버지께 감사드립니다.

일일이 언급을 하지 못했지만 그동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한 번 진심으로 감사드립니다. 모두 건강하시고 가정과 직장에 행복만이 가득하시길 기도합니다.



2019년 1월 김준수 드림