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

[UCI]I804:21028-200000105236

공학박사 학위논문

# 습공기가 보일러 버너 화염에 미치는 영향에 대한 해석 및 실험적 연구

A Numerical and Experimental Study on the Effect of Humid Air on Boiler Burner Flame

지도교수 박 권 하

2018 년 8 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

이 영 춘

본 논문을 이영춘의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 조 권 회 (인)

위 원 : 윤 상 국 (인)

위 원 : 이 영 호 (인)

위 원 : 최 병 철 (인)

위 원 : 박 권 하 (인)

2018 년 6 월 29 일

한국해양대학교 대학원

Collection @ kmou

# 목 차

List of Tables ····· iii
List of Figures ····· iv
Abstract ····· vi

1. 서 론
1.1 연구 배경 ····· 1
1.2 연구 목적 및 내용 ····· 4

2. 수분 첨가 연소 개선 기술 동향
2.1 수분 첨가 연소 특성 연구 ····· 5
2.2 물 혼합 연료의 연소 특성 및 연구 ····· 6
2.3 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상 연구 ····· 14
2.4 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상 연구 ····· 15

3. 가스상 수분함량이 버너 화염에 미치는 영향에 대한 해석
3.1 수학적 모델 및 계산 조건 ····· 25
3.1.1 수학적 모델 ····· 25
3.1.2 화학 반응 ····· 27
3.1.3 계산 조건 ····· 32
3.2 계산 결과 및 고찰 ····· 36
3.2.1 유동해석 ····· 36
3.2.2 NO 생성 ····· 42
3.2.3 CO 생성 ····· 46



Collection @ kmou

3.2.4 $CO_2$ 생성 ····· 51
3.2.5 요약 ····· 53

**4. 하이브리드형 물 혼합 연료의 보일러 버너 성능에 대한 실험**
4.1 물 혼합 연료 ····· 54
4.1.1 물 혼합 연료 및 분류 ····· 54
4.1.2 물 혼합 연료의 제조 ····· 56
4.2 실험장치 및 실험조건 ····· 57
4.2.1 실험장치 ····· 57
4.2.2 실험조건 ····· 62
4.3 실험 결과 및 고찰 ····· 64
4.3.1 화염 거동 ····· 64
4.3.2 연소실 온도 특성 ····· 81
4.3.3 배기 특성 ····· 90
4.3.4 물 혼합 연료 보일러 버너 특성 ····· 99
4.3.5 요약 ····· 107

**5. 결론** ····· 108

**참고문헌** ····· 110



Collection @ kmou

# List of Tables

**Table 2.1** Summary of previous works ····· 18
**Table 3.1** Calculation conditions ····· 33
**Table 3.2** Composition of gas ····· 35
**Table 4.1** Specification of test burner ····· 59
**Table 4.2** Test conditions ····· 63

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

# List of Figures


**Fig. 2.1** Vaporizing behaviors of emulsified droplet ····· 8
**Fig. 2.2** Micro explosion in diesel engine ····· 13
**Fig. 3.1** Grids of calculation domain ····· 34
**Fig. 3.2** Vector of maximum velocity ····· 37
**Fig. 3.3** Maximum velocity at gas phase $H_2O$ fraction ····· 38
**Fig. 3.4** Contour of maximum temperature ····· 40
**Fig. 3.5** Maximum temperature at gas phase $H_2O$ fraction ····· 41
**Fig. 3.6** Contour of NO mass fraction ····· 43
**Fig. 3.7** Average NO mass fraction ····· 44
**Fig. 3.8** Maximum NO mass fraction ····· 45
**Fig. 3.9** Contour of CO mass fraction ····· 47
**Fig. 3.10** Average CO mass fraction ····· 48
**Fig. 3.11** CO and NO emissions in several cases ····· 50
**Fig. 3.12** $CO_2$ maximum mass fraction ····· 52
**Fig. 4.1** Experimental setup for the burner using emulsified fuel prepared with hybrid mixing unit ····· 58
**Fig. 4.2** Photo of experimental setup ····· 60
**Fig. 4.3** Hybrid mixing equipment ····· 61
**Fig. 4.4** Photomicrograph of the emulsified fuel ····· 65
**Fig. 4.5** Flame development of the diesel oil case at ignition start ····· 67
**Fig. 4.6** Flame behavior of fully developed flame in the diesel oil case ····· 69
**Fig. 4.7** Flame development of the 9.1% mixing case at ignition start ····· 71
**Fig. 4.8** Flame behavior of fully developed flame in the 9.1% mixing case ····· 74
**Fig. 4.9** Flame development of the 16.7% mixing case at ignition start ····· 76
**Fig. 4.10** Flame behavior of fully developed flame in the 16.7% mixing case ····· 79




Collection @ kmou

**Fig. 4.11** Temperature distribution in the flame center axis at 100% open case ···· 82
**Fig. 4.12** Temperature distribution in the flame center axis at 75% open case ····· 84
**Fig. 4.13** Temperature distribution in the flame center axis at 50% open case ····· 85
**Fig. 4.14** Temperature distribution in the flame radial axis at 100% open case ····· 87
**Fig. 4.15** Temperature distribution in the flame radial axis at 75% open case ····· 88
**Fig. 4.16** Temperature distribution in the flame radial axis at 50% open case ····· 89
**Fig. 4.17** $NO_X$ concentration variation with intake opening ····· 92
**Fig. 4.18** CO concentration variation with intake opening ····· 95
**Fig. 4.19** Smoke concentration variation with intake opening ····· 98
**Fig. 4.20** Comparison of flame temperatures ····· 100
**Fig. 4.21** Comparison of smoke percents ····· 101
**Fig. 4.22** Comparison of CO and $NO_X$ concentrations ····· 102
**Fig. 4.23** $NO_X$ comparisons between diesel and the emulsion of water mixing percent of 16.7% and fuel consumption reduction of 12% ····· 104
**Fig. 4.24** Comparisons of CO and smoke between diesel and emulsion 16.7% at 50% opening case ····· 106



Collection @ kmou

# A Numerical and Experimental Study on the Effect of Humid Air on Boiler Burner Flame

Young Chun Lee

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of
Korea Maritime and Ocean University

Supervisor : Kweonha Park

## Abstract

최근 광화학 스모그 현상으로 인한 미세먼지에 의해 가시거리가 짧아지고 호흡기와 눈을 자극하는 날이 증가하고 있다. 이는 질소산화물과 휘발성 유기화합물이 햇볕에 의한 화학반응에 의해 오존을 생성하고, 이 오존의 일부는 대기 중의 또 다른 오염물질과 2차 반응을 일으켜 미세먼지를 만들게 된다. 따라서 질소산화물의 저감이 미세먼지를 줄이는데 중요한 요소가 된다.

버너 연소에서 질소산화물과 분진 등의 공해물질을 줄이기 위한 연구는 발생 원인에 대한 이해를 바탕으로 그 특성을 파악하고 해결방안의 검증을 위해 수치적인 연구 및 실험적 연구가 수행되어야 한다. 물 혼합 에멀젼 기술은 연소의 불안정과 분사시스템 및 연소실의 부식에 있어 불리하지만 최근 정교한 분사기술을 통해 질소산화물과 스모크를 줄이기 위해 계속 연구되고 있다.

본 연구에서는 습공기가 보일러 버너 화염특성에 미치는 영향을 분석하기



Collection @ kmou

위해 수치해석 방법과 실험적 연구를 진행하였다.

Ansys CFX를 사용하여 흡기 중에 가스상 수분함량을 0%~20%까지 7개의 케이스(case)에 대해 연소온도, CO, $CO_2$, NO 발생량에 대해 분석하였다. 가스상 수분함량이 증가하면서 NO 최대질량분율은 196 ppm에서 9 ppm까지 큰 폭으로 감소하였으며 특히 가스상 수분 5%일 때 56.1%의 감소율을 보였다. 이는 열적(thermal) NO 생성에 영향을 미치는 1,800 K이상의 영역이 급격히 감소하였기 때문으로 파악된다. 가스상 수분 2.5%일 때 NO 질량분율은 38.1% 감소하였고, 이때 CO 질량분율은 2.5% 증가, $CO_2$ 질량분율은 1.5% 감소하였다.

실험적 연구는 물 혼합 에멀젼 연료의 연소 안정성을 향상시킨 하이브리드형 혼합장치를 적용한 보일러 버너에서 화염 거동 및 화염온도, 배기가스를 비교 분석 하였다. 화염거동은 에멀젼 화염은 휘도가 전체적으로 낮아지며 화염의 측면부와 후류부로 조각화염이 넓게 분포되는 구조를 갖는 것을 확인하였고, 화염온도는 흡기유량을 조절하여 동일한 배기상태를 유지하는 경우 에멀젼 화염이 11% 이상 높은 온도분포를 나타냈다. 질소산화물은 동일한 연소실 온도와 스모크 배출상태에서 45.5% 저감되었으며, 일산화탄소와 스모크는 동일한 흡기유량에서 각각 98.5%와 97.2% 저감되었다.

Recent photochemical smog phenomenon has reduced visibility distance and increased respiratory and eye problems. This causes the nitrogen oxides and volatile organic compounds to produce ozone by means of sun-induced chemical reactions, some of which create minute reactions with other airborne contaminants. Therefore, reduction of nitrogen oxides is a major factor in reducing particulate matters.

A study to reduce pollution, such as nitrogen oxides and dust, from burner combustion should be performed based on the understanding of the causes. Numerical and experimental studies should be performed to verify



Collection @ kmou

the solutions. Water mixture emulsions are disadvantageous due to the instability of combustion and corrosion of the dispensing system and combustion chambers. Yet they are being continuously studied to reduce nitrogen oxides and smoke fumes with advanced dispensing techniques.

In this study, numerical analysis methods and experimental studies have been performed to analyze the effects of humid air on the flame characteristics of boiler burners.

Ansys CFX was used to analyze the combustion temperature, CO, $CO_2$ and NO rates in seven cases, ranging from 0 % to 20 % of the gas phase $H_2O$ content during the intake. As the gas phase $H_2O$ content increased, Maximum value of NO mass fraction decreased significantly from 196 ppm to 9 ppm, with a 56.1 % reduction rate especially when the gas phase $H_2O$ was 5 %. This is due to the sharp decrease in the area above 1,800 K, which affects the generation of thermal NO. At 2.5 % gas phase $H_2O$, the NO mass fraction was decreased by 38.1 %, CO mass fraction was increased by 2.5 %, and $CO_2$ mass fraction was decreased by 1.5 %.

An experimental study has compared flame behavior, flame temperature and emissions in boiler burners equipped with hybrid mixer to enhance combustion stability of water mixture emulsion fuel. The flame behavior confirmed that the emulsion flame has a structure with a low luminance across the entire surface, and a large distribution of the fragments with the side wall and the rear wing of the flame. Nitrogen oxides were reduced by 45.5 % at the same combustion chamber temperature and smoke emission conditions, while carbon monoxide and smoke were reduced by 98.5 % and 97.2 % at the same intake air flow rate.

KEY WORDS: Gas phase $H_2O$ 가스상 수분; Burner flame 버너 화염;
Emulsion fuel 에멀젼 연료; Low $NO_X$ burner 저 $NO_X$ 버너



Collection @ kmou

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

화석연료의 연소를 통해 얻어지는 에너지는 우리 일상생활의 다양한 분야에 활용되고 있다. 가정에서의 난방과 취사를 위한 열에너지나 운송수단의 동력원, 산업용으로 사용되는 에너지원도 화석연료를 연소하여 사용하고 있다. 그러나 화석연료의 연소에 의해 생성되는 미연 탄화수소, 질소산화물, 일산화탄소, 황산화물, 매연 등의 공해물질은 우리의 건강과 환경을 위협하고 있으며 이러한 대기오염물질은 대부분 법적 기준에 의해 배출이 통제 된다. 최근 광화학 스모그 현상으로 인한 미세먼지에 의해 가시거리가 짧아지고 호흡기나 눈을 자극하는 날이 증가하고 있다. 이는 질소산화물과 휘발성 유기화합물이 햇볕에 의한 화학반응에 의해 오존을 생성하고, 이 오존의 일부는 대기 중의 또 다른 오염물질과 2차 반응을 일으켜 미세먼지를 만들게 되므로 질소산화물의 저감이 미세먼지를 줄이는데 중요한 요소가 된다[1].

이와 같이 환경오염에 대한 관심과 규제에 따라 가스터빈, 보일러 버너 등의 연소기에 대기오염을 줄이고 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 천연가스는 강화되는 환경 규제를 만족시킬 수 있는 고효율 에너지원이다. 천연가스를 사용하는 버너는 배기가스 발생량이 다른 화석연료를 사용하는 버너에 비해 적으며 출력당 가장 적은 이산화탄소를 배출하지만 상대적으로 낮은 화염온도와 이론혼합비 부근에서의 높은 온도 영역의 형성으로 인해 다량의 질소산화물이 발생할 수 있으며 이는 산성비, 광화학 스모그의 원인이 된다[2].

버너 화염이 연료과농 영역과 연료희박 영역으로 형성되고, 연료과농 영역에서 전체적인 화염온도를 저하시켜 열적(thermal) $NO_X$를 저감 하며, 연료희박 영역에서는 미연가스를 완전연소 시키는 것으로 알려져 있다[3]. 이와



Collection @ kmou

관련하여 Takash and Shingeru[4]은 2단 선회기를 통한 급속 혼합으로 연료과농 영역이 감소해도 기존 대비 $NO_X$가 저감된다는 것을 실험으로 확인하였다.

$NO_X$를 저감하는 방법으로는 희박 예혼합연소(Lean-premixed combustion)로써 연료와 과잉 공기를 예혼합하여 공급함으로서 화염온도를 저하시켜 열적 $NO_X$를 저감시키는 방법이 있으며, 과농-희박 연소(Rich-quick quench-lean burn combustion)방법은 화염온도를 낮추기 위해 이론 공기량보다 부족한 공기를 연소영역으로 공급하여 연료 과농상태로 연소를 유도하여 화염 후단에 공기를 과잉 공급하여 미연가스 및 CO를 완전 연소시켜 화염의 국소적 고온영역 발생을 억제함으로써 $NO_X$를 저감한다. 촉매연소(Catalytic combustion)방법은 촉매를 사용하여 연소가 일어나는 온도를 낮추게 하여 $NO_X$를 저감시키고, 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation)방법은 배기가스 성분 중 열용량이 큰 $CO_2$와 $H_2O$의 고온 영역으로 재순환하여 연소실 온도를 낮춰 $NO_X$를 줄이고 있다. 이 외에 물 또는 수증기 분사법을 이용하여 $NO_X$를 줄이는 방법이 알려져 있다.

Feese and Turns[5]는 기존의 EGR과 달리 연료로 배기가스를 재순환시키는 방법(Fuel Induced Recirculation)을 통해 적은 배기가스 순환율의 FIR로 높은 재순환율의 EGR과 같은 $NO_X$ 저감 효과를 얻을 수 있음을 보였다. 한편, Toqan 등[6]은 LNG화염에서 공기다단 연소를 통해 연소반응을 조절함으로써 NO의 발생을 억제하였고, Javier 등[7]은 연료의 단계적 공급에 따른 연소특성 분석을 통해 $NO_X$ 배출 저감을 위한 연소기의 운전조건을 제시하였다. Zaidi 등[8]은 과잉공기 연소법으로 질소산화물 30%, 일산화탄소 1% 감소, 배기가스 재순환으로 질소산화물 30%~50% 저감, 다단 공기 연소 또는 다단 연료 연소법으로 질소산화물을 40%~60% 줄일 수 있음을 밝혔다. Hayashi 등[9]은 메탄 연소기에 다단 연소를 실시하여 90%이상 질소산화물이 저감 되었고, Miller 등[10]은 메탄 연소기에 재연소를 실시하여 40%~50%의 질소산화물과 일산화탄소, 탄화수소가 저감되는 방법을 소개하였다. Lee 등[11]은 암모니아 환원제를 사용하여 질소산화물을 30%이상 줄일 수 있음을 밝혔으며, Paschereit



Collection @ kmou

[12]는 EV 버너의 $NO_X$ 저감과 화염 안정화를 위해 버너 내부로 분사되는 연료 유량을 조절해 $NO_X$ 배출량을 20%~30% 감소할 수 있음을 밝혔다. 대부분 이러한 기술은 질소산화물 저감을 위하여 활발한 연소를 억제하기 때문에 불완전 연소에 의한 분진의 증가를 가져온다. 이처럼 서로 상반된 배기특성을 가지고 있는 질소산화물과 분진의 배출을 동시에 저감하기 위해서 연료에 물을 혼합한 에멀젼 기술이 연구되고 있다[13].

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

## 1.2 연구 목적 및 내용

버너 연소에서 질소산화물과 분진 등의 공해물질을 줄이기 위한 연구는 발생 원인에 대한 이해를 바탕으로 그 특성을 파악하고 해결방안의 검증을 위해 수치적인 연구 및 실험적 연구가 수행되어야 한다. 물 혼합 에멀젼 기술은 많은 장점에도 불구하고 상용화에 부정적인 입장이 많다. 그 이유는 물 혼합에 의한 연소의 불안정과 분사시스템 및 연소실의 부식에 있어 불리하기 때문이며, 특히 과거의 정교하지 못한 분사기술 적용 사례들은 불신을 더욱 증가시켰다. 위와 같이 다양한 방법이 연구되고 있지만 습공기가 버너의 연소에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수분 첨가 연소 특성 연구, 물 혼합 연료의 연소 특성 및 연구 조사, 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상 연구 조사, 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상 연구 분야를 조사하여 기술 동향을 분석하였으며 이를 바탕으로 습공기가 버너 화염특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 흡기 중에 가스상 수분함량을 0% ~ 20%까지 7개의 케이스(case)에 대해 수치해석 방법으로 연소온도, CO, $CO_2$, NO 발생량에 대해 분석하였고, 물 혼합 연료의 연소 안정성을 향상시킨 하이브리드형 혼합장치를 적용한 보일러 버너에서 화염 거동 및 화염온도, 배기가스를 비교 분석하였다. 실험 조건은 물 혼합률을 디젤 소모량 기준으로 0%, 10%, 20%로 하였으며 이는 전체 소모량 기준으로 0%, 9.1%, 16.7%에 해당된다. 디젤 소모량을 동일하게 유지하면서 물의 혼합량을 조절하는 경우와 16.7%의 물 혼합률에 배기와 부하조건을 디젤만 사용했을 때와 유사하게 할 경우 2가지로 구분하여 실험하였다.



Collection @ kmou

# 제 2 장 수분 첨가 연소 개선 기술 동향

## 2.1 수분 첨가 연소 특성 연구

수분 첨가 연소 특성은 버너, 엔진분야 등에서 다양하게 연구되고 있다. 메탄 산소 스팀 연소가 온도에 미치는 스팀의 화학적 영향에 대해서 Chun Zou 등[14]은 스팀 몰분율이 72.5%일 때 기존 연소의 온도 프로파일과 일치하고, 스팀 몰분율이 0.75를 초과하면 CO 생성 속도가 증가한다고 발표하였다. Castineira 등[15]은 스팀첨가와 공기첨가의 플레어 연소(Flare combustion) 시뮬레이션을 실시하여 스팀을 과도하게 사용하면 반응성이 높은 휘발성 유기화합물을 더 많이 배출 할 수 있음을 밝혔고, Kuznetsov 등[16]은 수소, 산소, 스팀 혼합물의 층류 화염 속도를 연구하였다. Zhao 등[17]은 스팀 첨가시 메탄, 공기 확산 화염에서의 $NO_X$ 생성에 대한 거동과 영향을 연구하여 스팀 첨가로 NO 생성이 감소됨을 밝혔고, Linda 등[18]은 층류 확산 화염에서 스팀 첨가에 의한 $NO_X$ 저감에 대해 실험하여 스팀 첨가로 인해 NO가 60% 이상 감소되었음을 밝혔다.

수분 첨가 연소가 엔진에 미치는 영향에 대한 연구는 Gonca 등[19]은 스팀 분사 디젤엔진과 밀러사이클 디젤엔진을 비교하여 저속 및 중속의 엔진 속도에서 스팀분사 디젤엔진의 효율이 더 높고 모든 조건에서 배출 가스는 적다는 것을 밝혔고, Gonca 등[20]은 밀러 사이클 디젤엔진의 스팀 주입이 성능 및 배출가스에 미치는 영향을 연구하여 스팀분사 방법에서 NO 배출량은 48% 감소, CO 2.2% 감소됨을 밝혔다. 또한 Parlak 등[21]은 부분 부하 운전시 스팀 분사가 직분사 디젤 엔진에 미치는 영향을 연구하여 금속표면의 부식 부작용을 줄이는 온도를 찾고 최적의 스팀 분사 비율은 20% 함량이라 밝혔으며, Parlak 등[22]은 디젤엔진에 전자제어식 스팀 분사 시스템을 적용하여 $NO_X$를 최대 33% 줄이고, 연료소비량은 최대 5% 감소한다는 것을 밝혔다.



Collection @ kmou

## 2.2 물 혼합 연료의 연소 특성 및 연구

물 혼합 연료의 연소에 관한 연구는 단일 액적의 연소, 디젤기관, 공업로 등에 대하여 이미 시도 되었다. 그러한 연구 결과, 물 혼합 연료는 기존의 디젤기관의 분무 중심에서 발생한 미연소 부분의 문제점을 보완하여 미세 폭발(micro explosion)이나 순간터짐(splashing)에 의한 연소 중의 분무와 공기의 혼합을 촉진 시켜 예혼합 연소에 가까운 효과, 물 분사와 똑같은 수성 가스 반응이나 연소 가스 온도를 저감시키는 효과 등이 나타난다. 그러나 에멀젼 연료의 분무 연소에서는 에멀젼 연료의 미립화, 증발, 착화 등의 기본적인 물리적 특성이 확실하지 않기 때문에 연료의 유화와 유화에 의한 연소 효과 인과 관계는 불명확한 점이 많다. 대부분의 연구는 연소 실험이 쉬운 경질유에 계면 활성제를 이용하여 물을 유화시킨 연료를 대상으로 하고 있으며 유해 배기가스의 저감이나 연소 개선 등 유화에 의한 효과가 가장 요망되고 있으며, 유화 중질유에 관한 연구는 비교적 적고 유화 경질유에 나타나는 유화에 의한 연소 개선 등의 효과에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

종합적으로 물 혼합 연료의 연소 특성을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 미세 폭발에 의한 분무 유적의 미세화

유중 수적형의 에멀젼 연료는 미세한 물 입자 주위가 연료 피막에 의해 둘러싸인 구조로 되어 있다. 이 액적이 연소실 내의 고온 가스에 의해 가열되고 고온 가스와 연료 피막, 연료 피막과 내부 물 입자 사이에 급속한 열 이동이 일어나 그 속도가 충분히 큰 경우에 물 입자는 연료 액적의 내부에서 합체하여 비점 이상으로 되어 과열 상태로 된다. 이와 같이 형성된 과열 수증기는 매우 불안정하기 때문에 물과 연료 액적은 큰 폭발력을 가지게 되며 미세한 액적으로 분리되어 연소실 내의 공기와 잘 혼합되며 이 효과에 의해 연소가 촉진된다.



Collection @ kmou

Fig. 2.1은 유화 연료 액적을 가열면상에 증발시킨 경우의 구상 증발 영역에서 증발 형태의 차이점을 도식적으로 종합한 것이다. (A)는 물이 증기로 먼저 변하기 때문에 미세 폭발이 발생하지 않는 경우이다. 이 형태는 액적 내에서 물 입자의 합체가 진행되지 않는 상태에서 각각 기화하므로 액적을 파괴하지 않고 단지 표면에서 수증기가 빠져 나가는 현상이다. 이것은 기본 연료의 동점도가 높고 물의 혼합 비율이 낮은 경우에 일어나는 팽창 형태이고, 미세한 유화연료에서 일어나기 쉽다. (C)는 미세 폭발이 발생하는 경우의 모양이고, 기본 연료의 동점도가 낮고 물의 혼합 비율이 높고, 물 입자의 직경이 큰 경우에 생기며 액적의 가열에 의해서 내부의 물이 혼합 상태에서 분리하여 합체가 진행된다. 이 합체 속도가 충분히 빠르기 때문에 기화가 느려 과열 상태에 달하고, 그 결과 파열음을 동반하는 폭발로 증발을 완료한다. (B)는 중간적인 형태로, 약한 미세 폭발(파열, 분열)이 발생하는 경우이다. 이것은 전열면 온도가 낮고, 기본 연료의 동점도가 높은 경우에 나타난다. 물 혼합 연료 액적을 가열면상에 증발시킨 경우에 일어나는 미세 폭발은 기본 연료의 동점도, 물 혼합 비율, 물 입자 직경과 그 분포에 의해 크게 영향을 받으나, 어떤 경우에도 미세 폭발은 열면상의 액적이 구상으로 되고, 액적 내에 분산되어 있는 물 입자가 합체한 경우에 발생한다. 디젤유에서는 물의 혼합 비율이 0.1이상에서 미세 폭발을 일으키는데 반하여 A 중유에서는 0.25, B 중유에서는 0.7정도가 혼합되지 않으면 미세 폭발이 발생하지 않는다[13].



Collection @ kmou

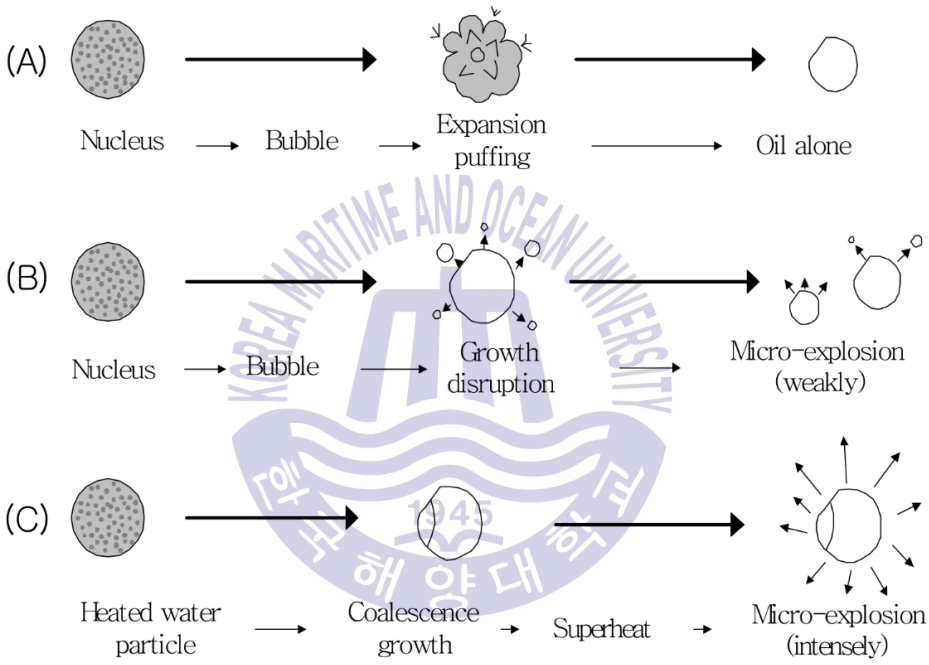



Fig. 2.1 Vaporizing behaviors of emulsified droplet



Collection @ kmou

(2) 미연소 탄화물의 완전연소(수성가스화 반응)

연료 입자가 연소과정에서 탄소 미립자와 물($H_2O$)과의 접촉으로 수성가스화 반응을 일으켜 미연소물의 완전연소를 이루어 미연소 카본의 발생을 줄여준다.

$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$

$C + H_2O = CO + H_2$

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$

(3) 과잉 공기의 감소에 따른 배기 손실 저감

수성가스화 반응에 의해 연소가 원활하고 탄소입자들이 감소해 완전 연소에 가깝게 연소하므로 산소를 지나치게 과냉 시킬 필요가 없기 때문에 공급 공기를 이론값에 가깝게 낮출 수 있다.

(4) 분무의 운동량 증가에 따른 공기 스월(swirl) 효과의 증대

물 혼합 에멀젼 연료에 포함된 물 액적은 질량을 증가시켜 큰 운동량을 보유할 수 있다. 이는 분무 액적의 회전 운동을 크게 하여 연소 시까지 오랫동안 유지시킨다. 분무와 연소의 균일화를 이루어 불균형 연소로 국부적 고온을 감소시켜 $NO_X$의 발생을 억제하고 입자상 물질(PM) 발생을 줄일 수 있다.

(5) 연소 온도 저하에 의한 열해리 경향 억제

국부적 단열 화염 온도가 높게 되면 이종의 연소 생성물이 단종의 생성물로 분리가 되는 열해리 현상이 발생하여 불완전연소 및 열 손실이 발생하게 된다. 첨가된 물로 인해 국부적 온도 상승을 저하시켜 열해리를 억제시킨다[23].

위와 같이 물 혼합 에멀젼 연료는 미세 폭발에 의한 연료의 완전 연소에 의해 입자상 물질(PM)은 저감되고, 화염온도는 상승하며 물 입자에 의한 냉각 손실 및 $NO_X$의 감소를 가져온다.



Collection @ kmou

물 혼합 연료의 주요 특성은 액적의 점도, 주위 조건, 물 혼합량, 유화제의 사용 여부 등에 따라 점화 후 액적의 상태 변화 과정과 미소 폭발 특성이 변화되는데, 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

미소 폭발은 연료 속에 포함된 물 액적이 열을 흡수하여 과열 상태가 되어 증기압이 물 액적 둘레를 싸고 있는 연료막의 표면 장력보다 커지면 순간적으로 매우 작은 액적으로 분리되어 넓게 퍼지면서 빠르게 연소가 진행되는 것을 말한다. 따라서 점도가 높은 연료일수록 미세 폭발 효과가 좋음을 보여준다.

미소 폭발과 물 혼합량과의 관계에 대해서 Kajitani 등[24]은 물 20%에서 가장 급격히 액적 크기가 증가되어 높은 미소 폭발 가능성을 제시하였고, Mizutani 등[25]은 유화제를 사용한 물 30%에서 연소 기간을 측정하여 미소 폭발을 증명하였으며, Park 등[26]은 유화제를 섞지 않은 30% 이하에서만 미소폭발이 발생한다고 발표하였다.

물 혼합 액적의 크기에 대해서 Kimoto 등[27]은 물 액적의 크기가 10 ㎛이상일 경우 부풀어 오르며 터지는 미소폭발을 관찰했으나, 1 ㎛의 작은 액적에서는 단지 부푼 후 분리만 되어 미소폭발이 없는 것을 관찰하였다. Vedruchenko 등[28]은 유화제를 사용한 물 10%와 20%에서는 물 액적의 크기가 10 ㎛일 경우만 폭발하며 30%이상에서는 10 ㎛이상인 액적들만 미소 폭발이 발생하는 것을 보여주었다.

계면 활성제가 미소 폭발에 미치는 영향은 Park 등[26]이 계면 활성제를 쓰지 않아야 미소 폭발이 발생한다고 하였으며, Yoshimoto 등[29]은 계면 활성제를 최대한 적게 섞어야 한다고 하였다. 계면 활성제는 액적의 표면 장력을 변화시켜 미소 폭발에 좋지 않은 역할을 미치는 것으로 보여 진다.

연료의 종류로 보면 Altenkrich 등[30]은 저질유일수록 폭발시간이 더 걸린다고 하였는데, 이는 액적이 흡수할 수 있는 열용량을 증대시켜 더욱 강하게 터질 것으로 예상되므로 저질유에서 더욱 큰 미세 폭발 효과를 볼 수 있을 것이다.



Collection @ kmou

유화연료의 연소에 따른 배기 배출물과 연소효율에 관해서 Kim 등[31]은 연소에 필요한 산소가 이산화탄소 15%, 질소산화물 16%, 이산화황 25%의 감소로 인해 약 3% 정도 줄어든다고 하였으며, Kadota. T 등[32]은 물의 유화는 열효율을 크게 개선하고 열적 질소산화물, 다환 방향족 탄화수소, 스모크와 탄소 잔유물 생성을 억제하는 역할을 한다고 하며, 특히 스모크의 감소는 미세 폭발에 의한 액적 연소의 활성화에 기인한 것이라고 발표하였다. 박 등[33]은 디젤보다 유화연료 사용 시에 황산화물의 농도가 57% 감소, 질소산화물의 농도가 67% 감소, 연소 효율이 6% 정도 향상 된다고 발표하였다. 에멀젼과 C-중유의 연소효율에 관하여 정 등[23]의 연구결과에 따르면 C-중유와 에멀젼 연료의 연소 효율은 각각 85.5%와 84.8%로 많은 차이를 보이지는 않았다.

유화연료의 연소압력에 미치는 영향은 고온 고압의 정적연소에서 C-중유 에멀젼 연료의 경우 Yoo 등[13]의 실험결과 연소실 압력의 평균 강하비율은 함수율 10%, 20% 30%에 대하여 각각 86.9%, 77.5%, 65.4%였으며 유화연료의 분사압력이 연소특성에 미치는 영향은 황 등[34]의 연구결과 함수율이 증가할수록 SMD(Sauter Mean Diameter)는 증가했지만 분사압이 300 kgf/㎠로 증가하면 SMD는 노즐 분사압 7.5 kgf/㎠ 순수연료 SMD보다 감소하였다.

일차원적 액적배열에서 점화특성에 관한 실험적 연구에서 정 등[35]은 물의 함수비율이 높을수록, 액적간의 간격의 거리가 넓을수록 점화지연현상이 현저하게 증가하고 미소폭발 특성에서 액적배열이 3개인 경우에는 물의 함수비율이 낮을수록 그리고 간격이 좁을수록 발생시기가 빨라지며 액적배열이 5개인 경우 4 mm 간격 이후에는 물의 함유비율이 낮을수록 빨라진다고 하였다. Mizutani 등[25]은 버너에서는 화염 초기, 중기에서 미소 폭발이 발생한다고 하였지만, Park 등[36]은 엔진에서의 미소 폭발은 분무 끝 부분에서 발생한다고 밝혔다.

버너에서는 미소 폭발이 발생할 주위 온도와 압력 조건이 분사 초기에 발생하나 엔진에서는 고압의 고속 분사로 분무 후류에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 2.2는 Park 등[36]의 실험 결과로 미소 폭발 현상을 잘 보여준다.



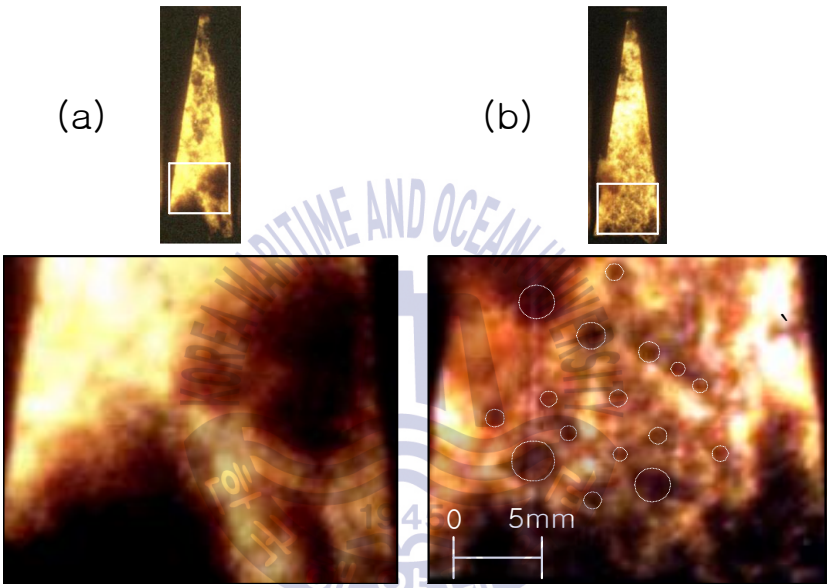
Collection @ kmou

요약하면 미소 폭발은 계면 활성제를 적게 사용하고, 물의 양은 20% ~ 30%, 물 액적의 크기는 10 ㎛, 고점도의 연료일 때 활발하게 발생한다. 미소폭발의 효과로 작게 미립화 된 액적들이 넓은 지역에서 빠르게 연소가 이루어지므로 연소 특성의 향상을 가져오며, 국부적인 온도 상승을 막아주고, 동시에 물 증발이 화염 온도를 저감시키기 때문에 효율, 질소산화물, 일산화탄소 및 스모크의 저감을 동시에 도모할 것으로 생각된다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou




(a) Diesel oil (b) Diesel oil + 20% Water

**Fig. 2.2** Micro explosion in diesel engine



Collection @ kmou

## 2.3 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상 연구

물 혼합 연료를 버너에 사용할 경우 질소산화물, 스모크 등 배기가스의 저감과 수증기의 배출 손실, 미소 폭발 효과 등에 대한 연구가 진행되었다.

Misubishi 등[37]은 중유에 물을 40% 혼합하여 질소산화물을 50% 저감했으며, Gollahalli 등[38]은 잔유(residual oil)에 20% 물을 혼합 사용하여 질소산화물은 유사한 수준이었지만, 많은 매연 감소 효과를 가져왔다.

석탄용 보일러의 경우도 Rawlins 등[39]의 연구결과 30% 물 혼합의 경우 질소산화물이 180 ppm ~ 750 ppm 감소하였으며, Liu 등[40]의 실험결과는 46% 물 분사로 질소산화물 20% 감소와 산소 감소, 이산화탄소 증가 등의 연소 활성화 특성을 나타냈다. Jahani 등[41]이 버너와 구성이 비슷한 항공기 엔진에서 유화제를 사용한 물 혼합을 실험하였다. 그러나 스모크가 초기에 많이 감소하였지만 큰 차이를 보이지는 못하였다.

효율의 경우 Gollahalli 등[38]이 잔유(residual oil)에 물 14%를 혼합함으로써 온도 40℃ ~ 103℃ 감소, 열 발생율의 저하를 보고하였고, Rawlins 등[39]은 석탄에 30%의 물을 혼합하여 스월 증가, 연소 효율이 상승(82% ~ 98%)된다고 발표하였다. Liu 등[40]은 석탄에 물 20%를 주입함으로서 200℃의 온도 감소로 연소 효율이 2% ~ 8% 감소하였다고 보고하였다. 항공기 엔진에서는 Jahani 등[41]의 실험에서는 5.8% 물 혼합에서 조금 효율이 올라가지만 이후에는 열 발생율이 떨어지는 것을 보여주었다. Misubishi 등[37]은 중유에 물 40% 사용시 질소산화물 개선 비용 50%를 절감하고, 효율은 3% 떨어지는 것을 발표하였으며, Hiroyasu 등[42]은 물 20%까지 연소효율이 상당히(5% ~ 10%) 좋아지다가 이후 급격히 감소하는 것을 보고하였고 함수량에 따라 소염(blow out) 지점이 다르므로 풍속 및 연료량의 가감을 적절히 조절할 필요가 있음을 밝혔다.

대체적으로 버너에서 물 혼합은 질소산화물과 배기가스를 줄이며 각 버너의 조건들을 적절히 조절하면 많은 양의 배기 유해물질을 줄이면서 효율도 유지하거나 약간 향상된 결과를 가져오는 것으로 보인다.



Collection @ kmou

## 2.4 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상 연구

엔진에 물을 사용하는 방법은 엔진에 물을 직접 분사하는 방법, 흡기다기관(intake manifold)에 분사하는 방법, 물 혼합 연료를 사용하여 질소산화물과 스모크를 줄이는 방법이 있다.

실린더 내에 물을 직접 분사하는 연구는 Kohketsu 등[43]이 물을 분사하여 질소산화물 50%, 입자상물질(PM) 25%의 저감 효과를 보았으며, Svahn 등[44]은 물 30%이하에서 질소산화물 40%~60%의 저감을 보였다. 흡기다기관에 물을 분사하는 연구는 Hambright 등[45]이 흡기다기관에 물을 분사하여 질소산화물은 매우 감소, 탄화수소, 유기성 용해물질(Soluble Organic Fraction)은 적은 양이 감소하였지만 입자상물질(PM)은 오히려 증가하는 결과를 가져왔다. 그러나, Ishida 등[46]은 질소산화물과 스모크를 동시에 절감했다고 발표하였다. 또 유 등[47]은 흡기다기관 내 물을 공급할 경우 토크 및 출력은 물의 공급량이 증가할수록 감소하였고, 제동연료소비율 및 소음은 증가, 배기 배출물은 일산화탄소가 약간 증가하였으나 질소산화물은 80%까지 큰 폭으로 감소하였다고 발표하였다.

물 혼합 연료를 사용하여 실험한 연구는 Afify 등[48]의 경우 질소산화물은 감소하지만 탄화수소는 증가하는 결과를 보였고, Yoshimoto 등[49]의 연구에서는 유화연료를 사용한 경우 질소산화물과 스모크는 크게 감소하였지만, 일산화탄소, 탄화수소는 소량 증가하고 30%에서 좋은 결과를 보여주었다. Yoshimoto 등[50]도 물 51%로 질소산화물을 40% 저감했으며 스모크에 대해서도 좋은 결과를 얻었다. O'Neel 등[51]은 질소산화물 10.4%, 입자상 물질 28.4%를 감소시켰지만, 탄화수소 32.2%, 일산화탄소는 65.3% 증가하는 결과를 보였다. Caffatarr 등[52]은 입자상 물질(PM)과 탄화수소를 가장 많이 줄일 수 있는 조건으로 5% 물과 3.5% 유화제를 사용하는 조건을 제시하였으며, Andrews 등[53]은 물 20%일 때 질소산화물 70% 감소,



Collection @ kmou

탄화수소와 일산화탄소는 증가하고, 물 10%일 때 입자상 물질 80%, 유기성 용해물질 75%, 카본이 80% 감소하는 것으로 보고하였다. Lawson 등[54]은 유화제를 사용하지 않고 혼합했을 때 물 15%에서 질소산화물 40%~60%, 일산화탄소 10%, 탄화수소 14% 감소를 보고하였다. Miyamoto 등[55]은 모델링으로 계산하여 물 양이 증가할수록 질소산화물과 스모크는 급속히 감소하는 것을 발표하였다. 서 등[56]은 에멀젼 17%에서 최고의 감소율을 보였는데 질소산화물 30%, 입자상 물질(PM) 40%의 감소율을 보였다.

이외에도 Yoshimoto 등[57]은 유화유와 EGR을 동시에 사용하여 53%의 물 사용에서 질소산화물을 58% 저감했으며, Johnson 등[58]은 알콜과 물을 연료에 동시에 혼합 사용하여 스모크와 입자상 물질(PM)을 상당히 감소 시켰지만 일산화탄소, 탄화수소, 유기성 용해물질(SOF)은 증가하는 결과를 보였고, Khan 등[59]은 에탄올, 메탄올, 물을 각각 연료에 혼합한 실험 결과 물의 경우만 입자상 물질(PM)을 줄일 수 있다고 보고하였다.

엔진에서 물 혼합 연료의 효율은 물을 직접 분사하는 Kohketsu 등[43]의 경우 연료 소모율은 20%이하에서 같거나 비슷하고, 이후에는 증가한다고 하였으며, Svahn 등[44]은 연료 소모율이 1%~1.5% 증가되는 것을 보고하였다. 흡입관에 분사하는 Hambright 등[45]은 흡기 매니폴드에 온도가 저하되어 체적 효율은 증가된다고 하였고, Ishida 등[46]은 물 분사 비율만큼 효율도 비례(물 1% = 효율 감소 1%)하여 감소한다고 하였다.

물 혼합 연료를 바로 사용하는 경우 Park 등[36]은 함수율 증가로 점화 지연이 증가하여 유화 연료의 효율이 향상되었고, Afify 등[48]은 2,000 rpm 부근에서 연료 소모율이 절감되고, Yoshimoto 등[49]은 유화유 40%까지는 연료소모율이 향상되나 이후로는 저감된다고 하였다. Yoshimoto 등[50]은 유화제 연료로 냉각 손실을 줄여 연료 소모율을 5%~9% 향상하였으며, O'Neel 등[51]도 물 혼합 연료로 연료 소모율을 저감하였다. Yoshimoto 등[57]은 EGR과 동시에 사용하였을 때도 연료소모율이 향상되고, Johnson 등[58]은 알콜이 포함된 물 혼합이 엔진 운전성과 효율 향상을 가져왔다. 하지만, Khan 등[59]은 물과 에탄올이 포함된 연료가 연료 소모율을 증가시키며, 메탄올인 경우에는



Collection @ kmou

5%의 연료 소모율 절감을 보였다. Ghojel, J 등[60]은 디젤과 에멀젼 오일을 동일한 출력으로 사용할 때, 디젤의 경우 가스상 오염물질에 의한 상당량의 세금이 발생 할 수 있는데 에멀젼 연료의 경우, 출력대비 가스상 오염물질의 배출 절감 효과로 대체 이익으로 상쇄 시킬 수 있다고 예측하였다.

엔진 기능의 성능향상에 관련하여 임 등[61]은 에멀젼 연료 함수율을 증가시켰을 때, 연료소비율은 저 부하 영역에서는 최대 19.8%가 증가하였다. 실린더 최고압력은 에멀젼 연료 함수율이 10%와 20%인 경우, 전 부하 영역에서 6.9%와 9.6% 증가되고, 압력 상승율은 46.5%와 53.4%가 증가되었다. 열 발생율은 에멀젼 연료 함수율이 10%와 20%인 경우 66.4%와 72.4%가 증가되었다고 보고하였으며, 위의 내용은 Table 2.1에 요약 정리되었다.

결과적으로 엔진에서 물 혼합 연료 사용으로 질소산화물은 모든 경우 줄어들었고 스모크, 일산화탄소, 탄화수소 등은 감소 또는 증가되는 경우들이 있었다. 이는 물 액적이 엔진에서 점화 지연을 가져와 적절한 시점에서 연소가 이루어지지 않기 때문이다. 하지만 분사 시점을 적절히 조절하면 배기가스의 감소와 약간의 연소 효율이 증가할 것으로 판단된다.



Collection @ kmou

Table 2.1 Summary of previous works

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 스팀이 연소에 미치는 영향 연구 | [14] | · 스팀 몰분율이 72.5%일 때 기존 연소의 온도 프로파일과 일치<br>· 스팀 몰분율이 0.75를 초과하면 CO 생성 속도 증가<br>· 스팀 몰분율이 0.725일 때 연소온도 영향 중요 |
| | [15] | · 스팀첨가, 공기첨가 플레어 연소 시뮬레이션<br>- 스팀/연료, air/연료비 연소 효율 예측 |
| | [16] | · 고온 고압조건에서 수소-산소-스팀 혼합물의 층류 연소 속도 연구<br>- 수소, 산소, 스팀 혼합물의 층류 화염 속도 연구 |
| | [17] | · 스팀 첨가시 메탄올 공기 확산 화염에서의 OH급진의 $NO_X$생성에 대한 거동과 영향<br>· 스팀분사를 사용한 가스터빈 열병합 발전 시스템 연구, $NO_X$ 배출량 예측 연구 |
| | [18] | · 고온 스팀 추가에 의한 층류 확산 화염의 $NO_X$ 저감에 관한 실험적 연구<br>- 스팀 분사로 NO 60% 감소 |
| | [19] | · 스팀분사 디젤엔진과 밀러 사이클 디젤 엔진 비교<br>- 밀러 사이클 적용 디젤엔진에 스팀 분사, $NO_X$ 저감 |
| | [20] | · 밀러 사이클 디젤엔진의 스팀 주입이 성능 및 배출 가스에 미치는 영향 연구<br>- 스팀분사 방법 NO 배출량은 48% 감소, CO 2.2% 감소 |
| | [21] | · 부분 부하 운전시 스팀 분사가 직분사 디젤 엔진에 미치는 영향 연구<br>- 최적의 스팀 분사 비율은 20% 함량 |
| | [22] | · 디젤 엔진의 $NO_X$배출량을 줄이기 위한 새로운 방법<br>- 전자적으로 제어되는 스팀 분사 시스템<br>· water steam injection 시스템<br>- $NO_X$ 최대 33% 저감, 연료소비량 최대 5% 감소 |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 물 혼합 연료 연소 특성 연구 (액적, 배기배출물, 미세 폭발 등) | [24] | · 액적 연구<br>· 물 20%일 때 급격히 액적 크기 증가(미소폭발가능성 높음)<br>· 40%이상에서는 비슷 |
| | [25] | · 버너 유화유 실험<br>· 물 30%일 때 연소 길이 짧아짐(20% ~ 30%감소)<br>· 미소폭발로 초기에 크게 팽창 후 빨리 없어짐 |
| | [26] | · 액적 연구<br>· 유화제, 함수율, 주위온도, 점도가 미소폭발에 미치는 영향<br>· 계면활성제를 섞지 않은 함수율 30%이하에서만 미소 폭발 발생 |
| | [27] | · 액적 연구<br>· 액적의 미소폭발과정<br>- 큰 액적(물 10 ㎛이상): 물 액적이 약간 부풀어 오른 후 터짐(미소폭발)<br>- 작은 액적(물 1 ㎛): 부풀어 오르고 깨진 후 연소 소멸 |
| | [28] | · 액적 연구<br>· 계면활성제 사용<br>- 주위 압력이 낮을 때 10, 20%는 작은 크기 폭발, 30%는 큰 액적만 폭발<br>- 주위 압력이 높을 때는 역순 |
| | [29] | · 액적 연구<br>- 계면활성제를 적게 사용, 물 액적이 약간 큰 경우 미소폭발 빨리 발생, 수명 짧음<br>- 물의 양이 증가 하면 늦게 나타나고, 액적 수명 길어짐 |
| | [30] | · 액적 연구<br>- 저질유 일수록 폭발 시간이 더 걸림. |
| | [31] | · $CO_2$(15%), NO(16%), $SO_2$(25%)의 감소<br>· 필요 산소 3% 감소 |
| | [32] | · Thermal NO, PACs, Soot와 탄소 잔유물 생성 억제<br>- 미세 폭발에 의한 droplet flame의 특징적인 형상에 의해 soot 감소 |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 물 혼합 연료 연소 특성 연구 (액적, 배기배출물, 미세 폭발 등) | [13] | · B-C유의 연소 효율 85.5%<br>· 에멀젼 연료의 연소 효율 84.8% |
| | [23] | · 연소실 압력의 평균 하강비율<br>- 함수율 10%, 20%, 30%에서 86.917%, 77.515%, 65.424% |
| | [33] | · SO의 농도 57%로 감소<br>· $NO_X$의 농도 67%로 감소<br>· 연소 효율 약 6% 정도 더 높음 |
| | [34] | · 분사압이 300 kgf/㎠로 증가 할수록 SMD는 노즐 분사압 7.5 kgf/㎠ 순수연료 SMD보다 감소 |
| | [35] | · 미소폭발 특성<br>- 액적배열이 3개인 경우에는 물의 함유비율이 낮을수록, 간격이 좁을수록 발생시기가 빨라짐<br>- 액적배열이 5개인 경우 4 mm 간격이후에는 물의 함유비율이 낮을수록 빨라짐 |
| | [36] | · 계면활성제 사용 디젤 엔진 실험<br>· 액적의 미소 폭발은 분무 끝부분에서 발생 |
| 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상연구 | [37] | · 중유 사용 버너에 물 혼합<br>- 물 40%까지 투입, $NO_X$ 50% 저감<br>- $NO_X$ 저감 비용 50% 절감, 효율 3% 감소 |
| | [38] | · 잔유(residual oil) 사용 버너에 물 혼합<br>- 물 20%에서 매연 많이 감소, $NO_X$ 비슷<br>- CO, $CO_2$ 증가, $O_2$ 감소, 연소 활성화<br>- 열발생율 저하 |
| | [39] | · 석탄 보일러에 물 혼합<br>- 물 30%에서 $NO_X$ 180 ppm ~ 750 ppm 감소<br>- 스월도 같이 증가시 연소효율 상승(82% ~ 98%) |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 물 혼합 연료 사용 버너 성능 향상연구 | [40] | · 석탄 보일러에 물 혼합<br>- 물 46%로 $NO_X$ 20% 감소, $CO_2$ 증가, $O_2$ 감소<br>- 물 20% 분사에서 200 K 감소, 연소 효율 저하(2% ~ 8%)<br>15% 추가 공기로 온도 20%를 올릴 수 있음. |
| | [41] | · 항공기 엔진 물 혼합 연료 실험<br>- PM은 초기에 많이 감소하지만 후에 큰 차이 없음<br>- 5.8% 물 혼합 시 효율 약간 상승, 이후로 떨어짐 |
| | [42] | · 물 혼합 버너<br>- 물 20%까지 연소효율 향상(5% ~ 10%)<br>- 물 양에 따라 blow out이 생기는 값 다름<br>- 흡입 풍속, 연료량의 가감 필요 |
| 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상연구 | [43] | · 엔진 연소실에 직접 물 분사<br>- $NO_X$ 50%, PM 25% 저감<br>- 연료소모율은 20%이하에서 같거나 증가, 이후 감소 |
| | [44] | · 연소실에 직접 물 분사<br>- 물 30% 이하에서 $NO_X$ 40% ~ 60% 감소<br>- 연료 소모율 1% ~ 1.5% 증가 |
| | [45] | · 흡입 매니폴드에 물 분사<br>- $NO_X$ 매우 감소, HC, SOF 감소, PM 증가<br>- 흡기 매니폴드 온도 저하, 체적 효율 증가. |
| | [46] | · 흡기 매니폴드에 물 분사<br>- $NO_X$, 스모크 둘다 감소<br>- 물 분사량 만큼 효율도 비례하여 감소 |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상연구 | [47] | · 토크 및 출력은 물 공급량이 증가할수록 감소<br>- 제동연료소비율 및 소음은 증가<br>- CO 약간 증가, $NO_X$는 80%까지 감소 |
| | [48] | · 물 혼합 연료 사용<br>- $NO_X$ 감소, HC 증가<br>- 2,000 rpm에서는 연료소모율 절감, 1,000 rpm에서는 증가 |
| | [49] | · 물 혼합 연료 사용<br>- 물 30%에서 $NO_X$, 스모크 크게 감소, CO, HC는 증가<br>- 40%까지는 bsfc의 이득, 이후 손실 |
| | [50] | · 혼합 연료 사용<br>- 물 51%에서 $NO_X$ 40% 감소, 스모크 감소<br>- 냉각 손실을 줄여 bsfc 5%~9% 향상 |
| | [51] | · 물 혼합 연료 사용<br>- $NO_X$ 10.4%, PM 28.4% 감소, HC 32.2%, CO 65.3% 증가<br>- 연료 소모율 절감 |
| | [52] | · 물 혼합 연료 사용<br>- PM과 HC 감소 조건: 5% 물, 3.5% 유화제 |
| | [53] | · 물 혼합 연료 사용<br>- 물 20%일 때 $NO_X$ 70% 감소, HC, CO는 증가<br>- 물 10%일 때 PM 80%, SOF 75%, 카본 80% 감소 |
| | [54] | · 기계적 물혼합 연료 사용<br>- 물 15%에서 $NO_X$ 40%~60%, CO 10%, HC 14% 감소 |
| | [55] | · 물 혼합 연료 엔진 시뮬레이션<br>- 물 양이 증가할수록 $NO_X$와 smoke는 급격히 감소 |
| | [56] | · 에멀젼 17%에서 최고 감소율, $NO_X$ 30% 감소, PM 40% 감소 |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 물 혼합 연료 사용 엔진 성능 향상연구 | [57] | · 유화유와 EGR 동시 사용<br>- 물 53%에서 $NO_X$ 58% 저감<br>- bsfc 향상 |
| | [58] | · 알콜이 포함된 물 혼합<br>- 스모크와 PM 상당히 감소, HC, CO, SOF 증가<br>- 효율 및 엔진 운전성 향상 |
| | [59] | · 에탄올, 메탄올, 물을 연료에 혼합<br>- 물 PM, CO저감, 에탄올은 $NO_X$와 HC를 가장 잘 저감시킴<br>- 물, 에탄올은 연료 소모율 증가, 메탄올은 연료 소모율을 감소시킴. |
| | [60] | · 디젤연료로 에멀젼 연료와 동일한 출력 사용<br>- 오염물질에 의해 발생하는 세금과 에멀젼 연료의 출력 대비 가스 배출절감효과에 의한 이익 상쇄 |
| | [61] | · 저부하 영역에서 함수율 증가시 연료소비율 최대 19.8% 증가<br>· 저부하 영역에서 함수율이 각각 10%, 20%일 때, 실린더 최고 압력 6.9%와 9.6% 증가, 압력 상승률은 46.5%와 53.4% 증가, 열 발생율은 66.4%와 72.4% 증가 |
| 기 타 | [11] | · 암모니아 환원제 버너에 사용<br>- 873 K에서 $NO_X$ 30% 감소 |
| | [62] | · 보일러의 저 $NO_X$ 연소법<br>· 공기 2단 연소법, 비평형 연소법, 배기가스 재순환법 등 |
| | [63] | · 저 $NO_X$ 기법 소개<br>· 저 과잉 공기 연소법: $NO_X$는 30%, CO 10% 감소<br>· 배기 가스 재 순환: $NO_X$는 30%~50% 감소<br>· 다단 공기 연소, 다단 연료 연소법: $NO_X$ 40%~60% 감소 |



Collection @ kmou

| 구 분 | 참고 문헌 | 주요 연구 내용 |
|---|---|---|
| 기타 | [64] | · 석탄 버너에 jet류 추가<br>- jet류 1개일 때 $NO_X$ 35%, 2개일 때 50%감소 |
| | [65] | · 메탄 터보 연소기<br>- 다단 연소시 국부적온도 상승방지<br>- $NO_X$ 최대 96% 절감 |
| | [66] | · 메탄 재연소 연소기<br>- $NO_X$ 40% ~ 50% 감소<br>- 재연소시 CO와 HC 절감 |

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

# 제 3 장 가스상 수분 함량이 버너 화염에 미치는 영향에 대한 해석

## 3.1 수학적 모델 및 계산 조건

### 3.1.1 수학적 모델

연소실 내부 유동해석을 위해 연속방정식, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

연속방정식은

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla \cdot (\rho U)=0 \tag{1}$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t}+\nabla \cdot (\rho U\otimes U)=-\nabla p+\nabla \cdot \tau+S_M \tag{2}$$

여기서 응력텐서(stress tensor) $\tau$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau=\mu(\nabla U+(\nabla U)^T-\frac{2}{3}\delta\nabla \cdot U) \tag{3}$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\nabla \cdot (\rho U h) \tag{4}$$
$$=\nabla \cdot (\lambda\nabla T)+\tau:\nabla U+S_E$$

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.



Collection @ kmou

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1\omega, \Omega F_2)} = \frac{a_1 k}{\max(a_1, (\frac{\partial u}{\partial y})F_2} \tag{5}$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2{}^2)$$

$$\arg_2 = \max(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega})$$

여기서 U는 속도벡터, $S_M$은 운동량 생성항, $\tau$는 응력 텐서, T는 온도, $\delta$는 단위행렬, $\rho$는 밀도, h는 비정상엔탈피, $\lambda$는 열전도도, $S_E$는 에너지 생성항, k는 단위 질량당 난류 운동 에너지, $\omega$는 각 속도를 나타낸다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

3.1.2 화학 반응

연료는 메탄($CH_4$)으로 가정하였으며, 메탄의 1단계 총체 화학 반응은 식 (6)과 같으며 화학반응률은 식(7)에 의해 계산된다.

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_k = AT^n \mathrm{Exp}\left(-\frac{E_a}{RT}\right)[A]^a[B]^b \quad (7)$$

여기서 계수값은 다음과 같다.

| $A$ | $n$ | $E_a/R$[K] | [A] | [B] | a | b |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $1.86\times10^{14}$ | 0 | 24,154 | $CH_4$ | $O_2$ | 1 | 1 |

연소 반응은 메탄 2단계 화학반응식을 사용하였으며 화학 반응률은 식 (7)에 의해 계산된다[67].

$$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 = CO + 2H_2O \quad (8)$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2 \quad (9)$$

여기서 계수값은 다음과 같다.

| $A$ | $n$ | $E_a/R$[K] | [A] | [B] | a | b |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $4.56\times10^{11}$ | 0 | 20,087 | $CH_4$ | $O_2$ | 0.2 | 1.3 |
| $3.13\times10^{12}$ | 0 | 24,417 | CO | $O_2$ | 1.5 | 0.25 |

질소를 함유하고 있지 않은 연료의 연소에서 질소산화물이 생성되는 과정은 네 가지 화학반응 메커니즘 또는 공기성분 중의 질소에 의한 과정에 의해서 설명된다. NO 생성의 네 가지 반응 메커니즘은 각각 열적 메커니즘(thermal or Zeldovich mechanism), 급속 메커니즘(prompt or Fenimore mechanism), $N_2O$



Collection @ kmou

중간생성물 메커니즘, 그리고 NNH 메커니즘이다. 열적 메커니즘은 광범위한 당량비에 걸쳐서 고온 연소 영역에서 일어나며, 이에 비해 급속 메커니즘은 농후한 당량비 연소 과정에서 일어나는 반응 메커니즘이다. $N_2O$ 중간생성물 메커니즘은 매우 희박하고 저온 연소 과정에서 NO의 생성에 주로 기여하는 반응이다. NNH 메커니즘은 NO 형성 반응에서 비교적 새롭게 명명된 메커니즘이다. 질소산화물은 $N_2O$, NO, $NO_2$, $N_2O_3$, $N_2O_4$, $N_2O_5$ 등을 총칭하며 90% 이상은 NO이다. 열적 메커니즘은 다음 두가지 연쇄 반응으로 이루어진다.

$$O + N_2 \underset{k_{r1}}{\overset{k_{f1}}{\longleftrightarrow}} NO + N \tag{10}$$

$$N + O_2 \underset{k_{r2}}{\overset{k_{f2}}{\longleftrightarrow}} NO + O \tag{11}$$

위의 식에 다음 반응을 추가하면 확장 Zeldovich 반응 메커니즘이 된다.

$$OH + N \underset{k_{r3}}{\overset{k_{f3}}{\longleftrightarrow}} NO + H \tag{12}$$

NO의 생성 속도는 $NO_X$ 생성량에 영향을 주고, $k_f$, $k_r$은 각각 정반응과 역반응계수를 나타내며 반응식에 대한 속도 상수 값은 다음과 같다.

$$k_{f,1} = 1.8\times10^{11}\exp[-38{,}370/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

$$k_{r,1} = 3.8\times10^{10}\exp[-425/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

$$k_{f,2} = 1.8\times10^{7}\ T\exp[-4{,}680/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

$$k_{r,2} = 3.8\times10^{6}\ T\exp[-20{,}820/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

$$k_{f,3} = 7.1\times10^{10}\exp[-450/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

$$k_{r,3} = 1.7\times10^{11}\exp[-24{,}560/T(K)] \quad [\text{㎥/kmol-s}]$$

열적(thermal) NO의 생성은 연소 온도가 높을 때, 연소 영역에서 산소 농도가



Collection @ kmou

높을 때, 고온영역에서 연소 가스의 체류시간이 길 때 많이 발생한다고 알려져 있다.

재연소 영역에서 O 및 H 원자와 OH 반응기가 평형 상태의 수치를 갖는다고 가정하고 이들 반응식을 살펴보면, NO 생성에 대한 이론적 식을 유도할 수 있다. 반응속도는 질소와 산소의 농도뿐만 아니라, 온도의 영향이 매우 큰 함수이다. NO와 N의 순수 생성 속도를 표현하면,

$$r_{NO} = k_{f1}[N_2][O] - k_{r1}[NO][N] + k_{f2}[N][O_2] - k_{r2}[NO][N] + k_{f3}[N][OH] - k_{r3}[NO][H] \quad (13)$$

$$r_N = k_{f1}[N_2][O] + k_{r1}[NO][N] - k_{f2}[N][O_2] + k_{r2}[NO][O] - k_{f3}[N][OH] + k_{r3}[NO][H] \quad (14)$$

여기에서 몰농도□□$[X_i]$의 단위는 mol/㎥이다. 반응식 (14)는 매우 큰 활성화 에너지를 가지고 있기 때문에 대부분 반응은 연료 연소의 반응이 완결된 후에 일어난다. 따라서 O, H, OH의 농도가 평형상태 수준이라는 가정을 확인 할 수 있다. 또한 질소 자유 원자는 NO보다 반응성이 매우 크기 때문에 질소원자는 생성되는 속도만큼 빠르게 소모된다. 이를 준정상상태(quasi steady state)라 하며 질소 원자의 농도는 반응 시간의 대부분 동안 거의 일정한 농도($[N]_{ss}$)를 유지한다. 질소원자의 순수 생성 속도($r_N$□를 zero로 놓는다면 반응식 (14)는 □□ $[N]_{ss}$에 대해 풀 수 있다.

$$[N]_{ss} = \frac{k_{f1}[N_2][O] + k_{r2}[NO][O] + k_{r3}[NO][H]}{k_{r1}[NO] + k_{f2}[O_2] + k_{f3}[OH]} \quad (15)$$

이 결과는 $N_2$, NO, $O_2$ 의 농도와 O, H, OH의 평형농도에 의존하는 $r_{NO}$□로 표현되어 반응식 (15)는 다음과 같이 치환 될 수 있다.

$$r_{NO} = k_{f1}[N_2][O] - k_{r2}[NO][O] - k_{r3}[NO][H] + (-k_{r1}[NO] + k_{f2}[O_2] + k_{f3}[OH]) \times ([N]_{ss}) \quad (16)$$

NO의 생성량은 NO 발생으로 인한 열 발생을 무시 할 수 있고 유동 결과에 영향이 없다는 가정 하에 후처리를 통하여 계산이 가능하다. 따라서 연소 해석



Collection @ kmou

후 결과로부터 NO 발생량을 예측하여 NO분포의 생성률은 식 (17)을 통해 계산된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2]\frac{\left(1-\frac{k_{f,1}k_{f,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]}\right)}{\left(1+\frac{k_{f,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2]+k_{f,3}[OH]}\right)} \quad (17)$$

열적(thermal) NO 생성 메커니즘은 일반적으로 1,800 K 이하의 온도에서는 중요하지 않다. 연료 산화 과정의 시간 스케일에 비하여 NO는 열적 메커니즘에 의해 천천히 생성된다. 따라서 열적 NO는 화염 후류 가스에서 생성된다고 생각된다.

급속(fenimore) 메커니즘은 탄화수소 연료의 연소화학과 밀접하게 연결되어 있으며 열적 메커니즘에 의해 NO가 생성되기 전에 일부 NO가 층류 예혼합화염의 화염대에서 빠르게 생성된다는 것을 발견했다. 급속 NO의 일반적인 메커니즘의 구성은 탄화수소 활성기가 분자 상태의 질소와 반응하여 아민이나 시안 복합물을 생성시키고, 아민과 시안 복합물은 NO를 생성 시키는 중간 복합물로 변한다. 급속 메커니즘을 시작하는 탄화수소 활성기가 생성되는 과정을 무시한다면 급속 메커니즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$CH + N_2 = HCN + N$ (18)

$C + N_2 = CN + N$ (19)

반응 (18)은 이 메커니즘의 주요한 경로이며, 이 반응에 의해 다음 단계의 반응속도는 제한된다. 당량비가 약 1.2보다 작을 때, NO로 생성되는 시안화수소(HCN)의 변환은 다음의 연쇄 과정을 따른다.

$HCN + O = NCO + H$ (20)

$NCO + H = NH + CO$ (21)

$NH + H = N + H_2$ (22)



Collection @ kmou

$$N + OH = NO + H \quad (23)$$

당량비가 1.2보다 클 경우 다른 반응이 생기고 화학반응은 더욱 복잡하게 된다. 당량비가 클 경우 위의 반응들이 더 이상 빠르게 일어나지 않고 NO는 HCN으로 재순환되어서 NO 생성이 억제된다. 또 급속 메커니즘과 결합된 Zeldovich 반응은 실제적으로 NO를 생성하기보다는 파괴한다.
즉 $N + NO \rightarrow N_2 + O$ 반응이 일어난다.

prompt NO 생성율은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-Ea/RT} \quad (24)$$

$$\left(k_{pr} = 1.21 \times 10^7 (\frac{RT}{p})^{a+1}\right)$$

여기서 $E_a$는 251,151J/mol이며 $a$는 산소 반응 차수를 나타낸다[68].



Collection @ kmou

### 3.1.3 계산 조건

가스상 수분(Gas phase $H_2O$)함량이 버너화염에 미치는 영향을 고찰하기 위해 가스상 수분이 함유된 연료와 공기를 버너 중심부에 공급하고 공기 중으로 방출되게 하였다. 계산격자의 생성은 NX와 ICEM을 사용하였으며 격자 수는 141,771로 **Fig. 3.1**과 같다.

**Table 3.1**은 계산조건을 나타내며 사용 연료는 메탄, 혼합기의 온도는 25℃, 과잉공기비는 1.3, 가스상 수분함량은 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 15%, 20%까지 7단계로 하였으며 Ansys CFX를 이용하여 해석하였다.

연소가스 조성은 **Table 3.2**와 같이 메탄의 이론혼합비 비율로 적용하였다.



Collection @ kmou

Table 3.1 Calculation conditions

| Items | Conditions |
|---|---|
| Inlet mixture temp | 25℃ |
| Fuel | $CH_4$ |
| Excess air ratio | 1.3 |
| Gas phase $H_2O$ fraction (%) | 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 |
| Outer boundary | Opening |



Collection @ kmou

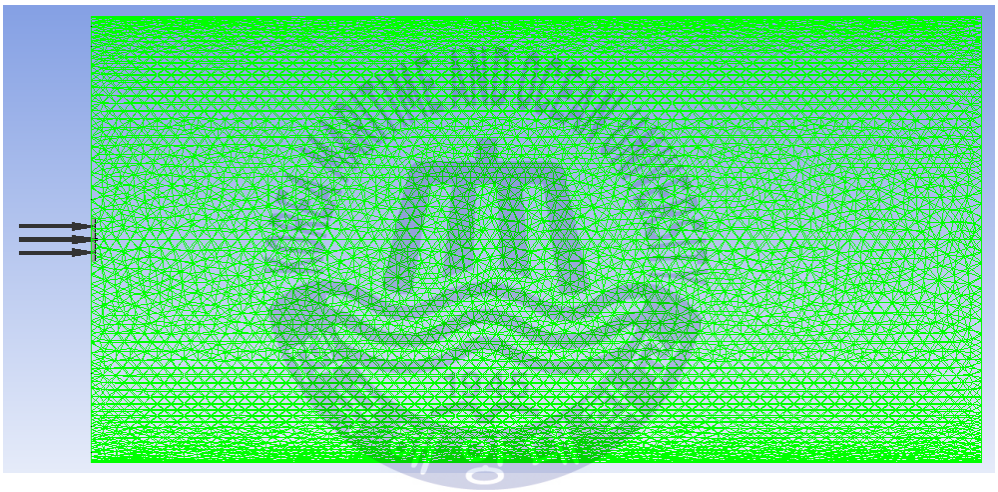


Fig. 3.1 Grids of calculation domain



Collection @ kmou

Table 3.2 Composition of gas

| Gas phase $H_2O$ fraction (%) | $CH_4$ | $H_2O$ | $O_2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.0748 | 0 | 0.1944 |
| 2.5 | 0.0748 | 0.0232 | 0.1895 |
| 5 | 0.0748 | 0.0463 | 0.1847 |
| 7.5 | 0.0748 | 0.0694 | 0.1798 |
| 10 | 0.0748 | 0.0925 | 0.1749 |
| 15 | 0.0748 | 0.1388 | 0.1652 |
| 20 | 0.0748 | 0.1850 | 0.1555 |



Collection @ kmou

## 3.2 계산 결과 및 고찰

### 3.2.1 유동해석

Fig. 3.2는 가스상 수분함량이 0% ~ 20%일 때의 유동속도를 나타낸다. 가스상 수분이 없을 경우 최대속도는 45.5 m/s이고, 가스상 수분 2.5%일 때 최대속도는 44.6 m/s로서 2% 감소하였고, 가스상 수분 5%일 때 최대속도는 43.7 m/s로서 4% 감소, 가스상 수분 7.5%일 때 42.8 m/s로서 5.9% 감소, 가스상 수분 10%일 때 41.8 m/s로서 8.1% 감소, 가스상 수분 15%일 때 40.2 m/s로서 11.6% 감소, 가스상 수분 20%일 때 최대속도는 38.6 m/s로서 가스상 수분함량 0% 대비 15.2% 감소하였다. 이와 같이 유동최대속도는 가스상 수분함량이 증가할수록 감소하였는데 이는 가스상 수분함량이 증가할수록 연소속도가 감소하기 때문으로 판단된다.



Collection @ kmou

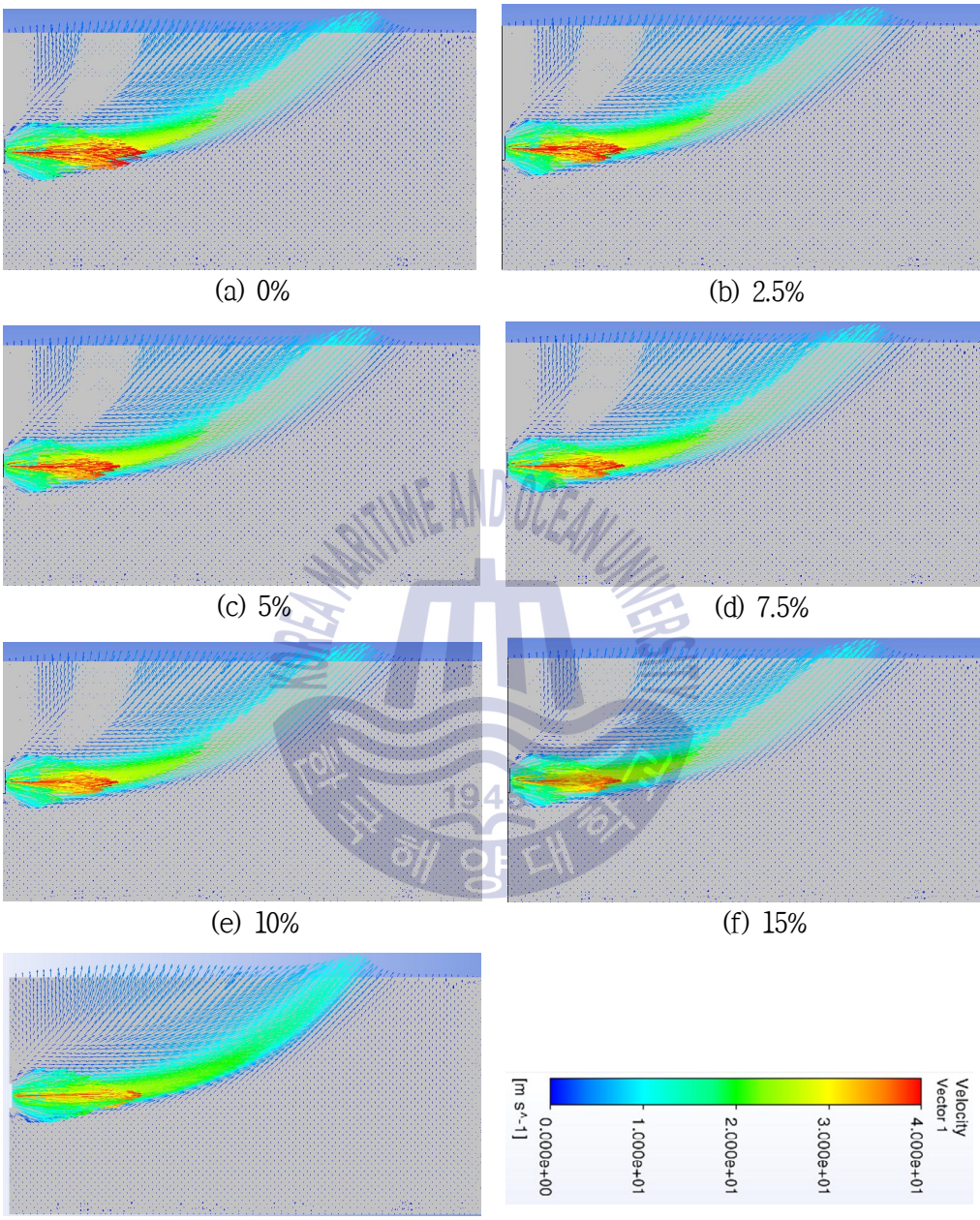



**Fig. 3.2** Vector of maximum velocity



Collection @ kmou

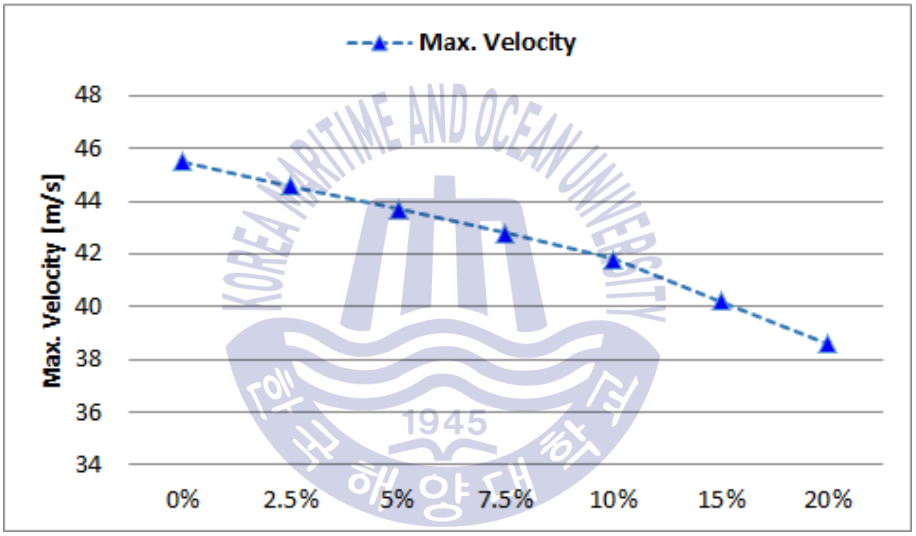



Fig. 3.3 Maximum velocity at gas phase $H_2O$ fraction



Collection @ kmou

Fig. 3.4는 가스상 수분함량에 따른 온도분포를 나타낸다. 가스상 수분 없이 공기만을 연소시켰을 경우 최대온도는 2,110 K에 도달했으며, 가스상 수분 2.5%일 때 2,061 K, 가스상 수분 5%일 때 2,016 K, 가스상 수분 7.5%일 때 1,975 K, 가스상 수분 10%일 때 1,934 K, 가스상 수분 15%일 때 1,862 K, 가스상 수분 20%일 때 최대온도는 1,795 K를 나타냈다. 특히 질소산화물의 생성은 열적 반응기구의 경우 1,800 K 이상에서 의미가 있는데[68] 가스상 수분함량이 증가할수록 1,800 K 이상 영역이 급격히 감소됨을 알 수 있다.



Collection @ kmou

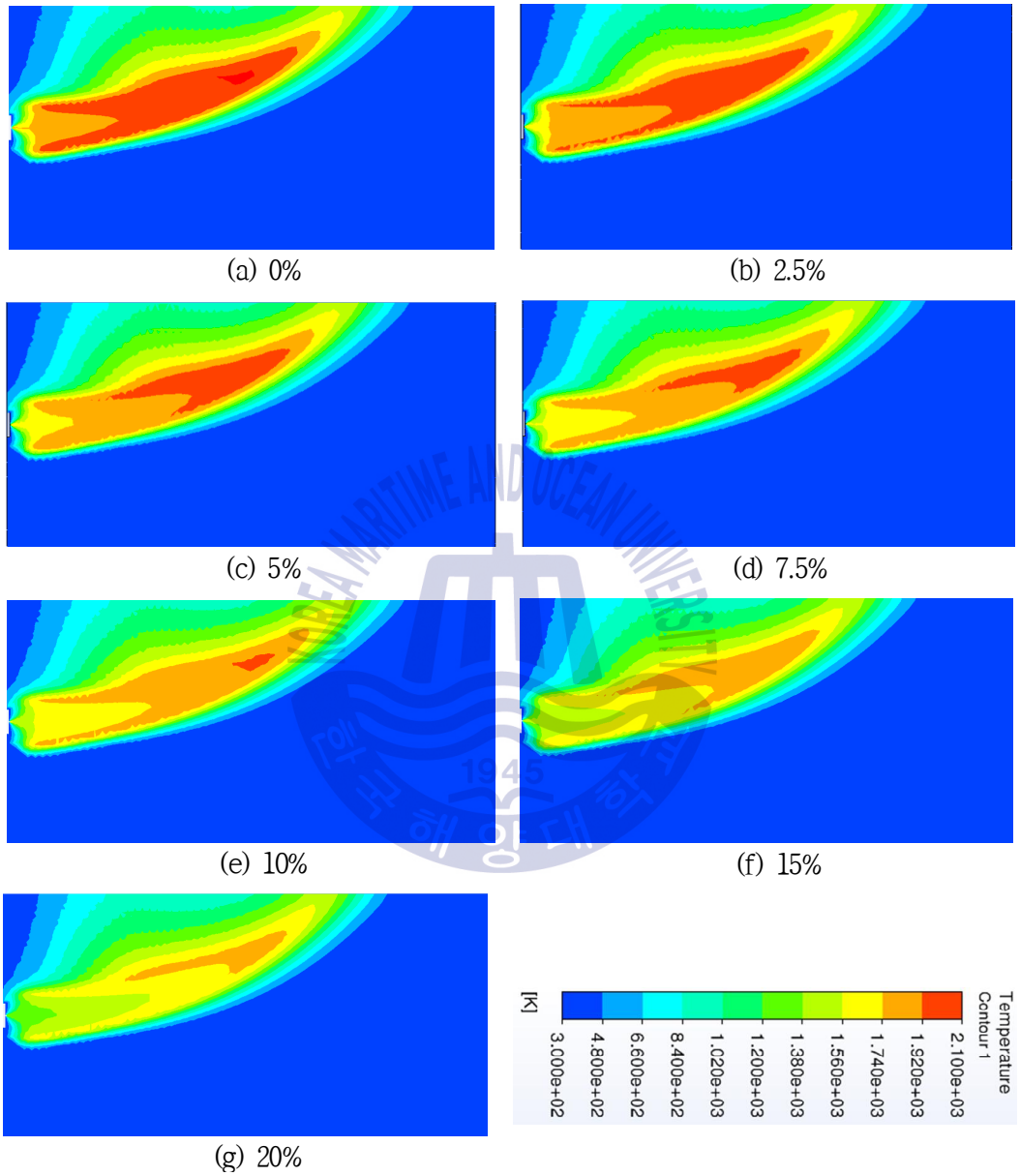



**Fig. 3.4** Contour of maximum temperature



Collection @ kmou

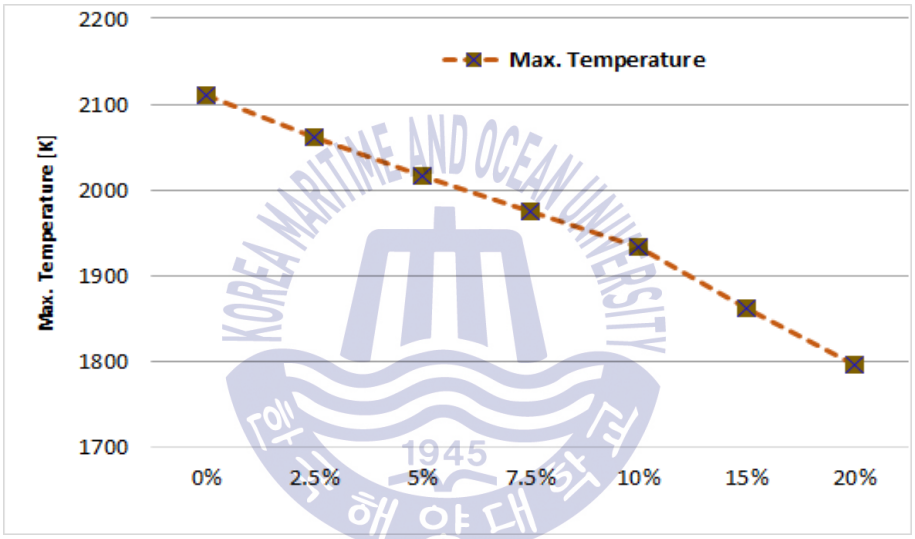



Fig. 3.5 Maximum temperature at gas phase $H_2O$ fraction



Collection @ kmou

3.2.2 NO 생성

**Fig. 3.6**은 가스상 수분함량에 따른 NO 질량분율(volume average of NO mass fraction)의 분포를 나타낸다. 가스상 수분함유 없이 공기만을 연소시켰을 때 평균 NO 질량분율은 2.91 ppm, 가스상 수분 2.5%를 함유했을 때 1.8 ppm으로 38%의 감소율을 보였고, 가스상 수분 5%일 때 1.12 ppm으로 61.5%의 감소율을 나타냈다. 가스상 수분 7.5%일 때 0.71 ppm, 가스상 수분 10%일 때 0.47 ppm, 가스상 수분 15%일 때 0.2 ppm, 가스상 수분 20%일 때 0.09 ppm으로 97%의 NO 질량분율 감소를 가져왔다. 이는 가스상 수분 함량이 증가하면 연소온도가 감소되어 질소산화물의 질량분율 분포가 감소됨을 보여준다.

NO 최대질량분율(maximum value of NO mass fraction)은 가스상 수분 함유 없이 공기만을 연소시켰을 때 196 ppm, 가스상 수분 2.5%일 때 130 ppm으로 33.7%의 감소율을 보였고, 가스상 수분 5%일 때는 86 ppm으로 56.1%의 감소율을 나타냈다. 가스상 수분 7.5%일 때 57 ppm, 10%일 때 39 ppm, 가스상 수분 15%일 때 18 ppm, 가스상 수분 20%일 때 9 ppm으로 공기만 연소했을 때보다 95% 이상의 감소율을 보였다. 이와 같이 NO 최대질량분율 또한 가스상 수분함량에 따라 연소온도가 낮아짐으로 이와 비례하여 감소함을 알 수 있다.



Collection @ kmou

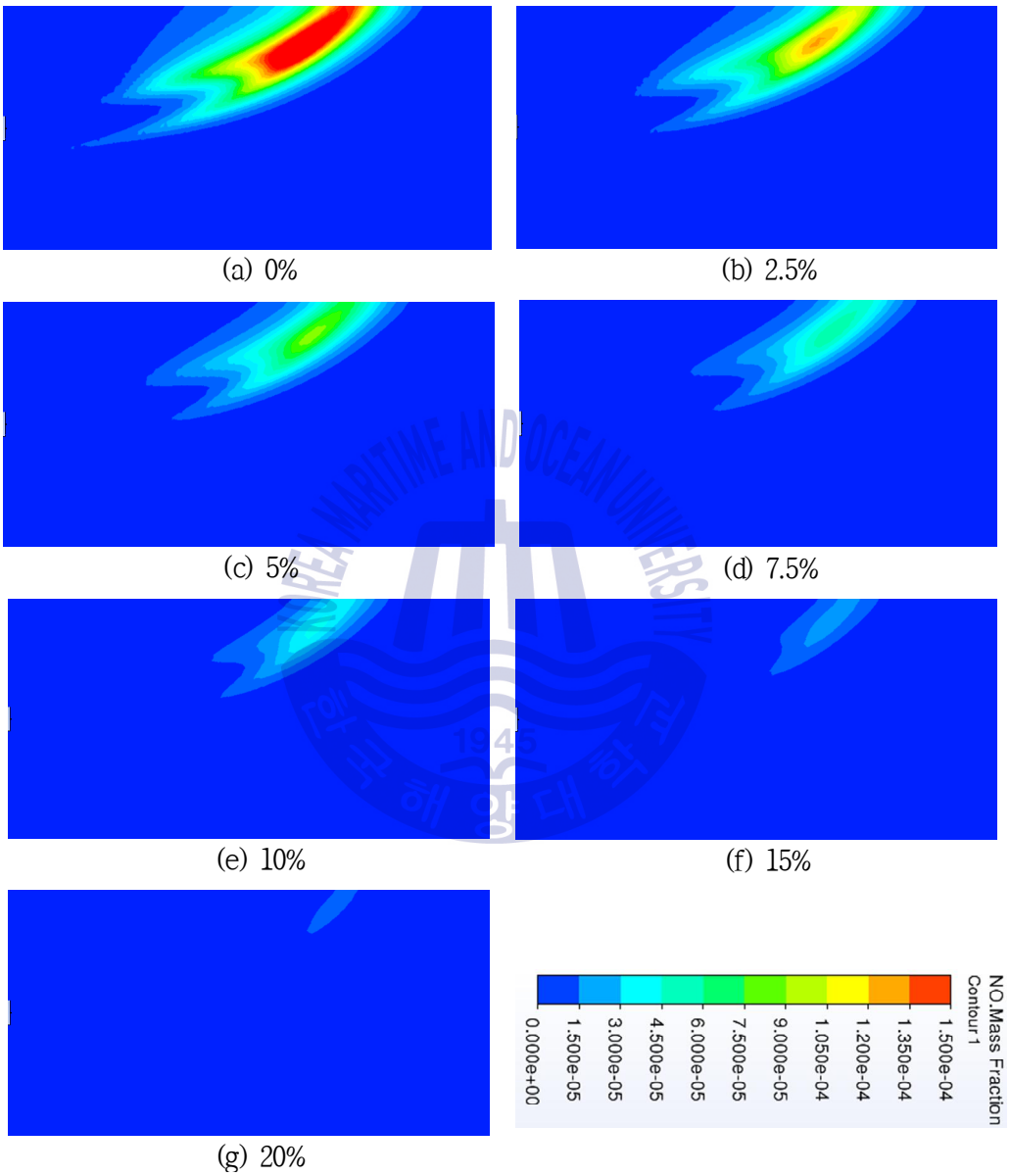



**Fig. 3.6** Contour of NO mass fraction



Collection @ kmou

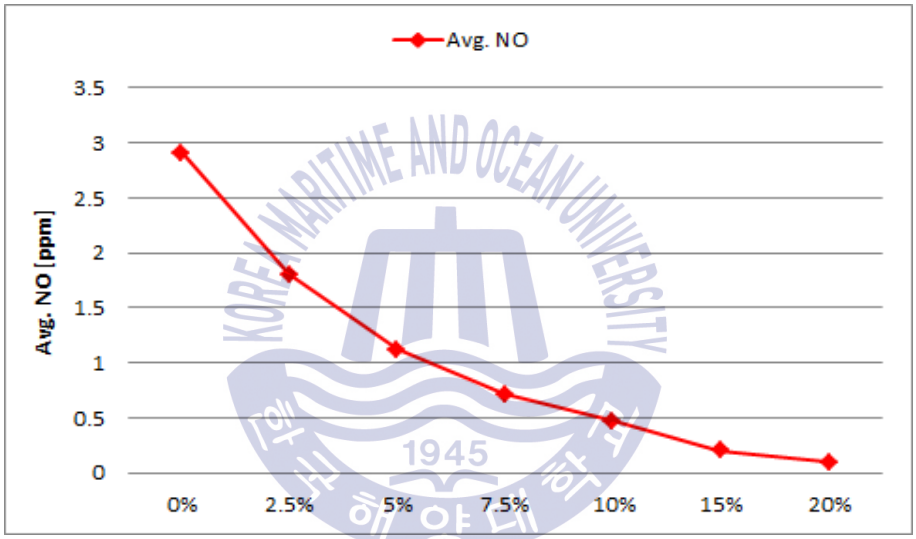



Fig. 3.7 Average NO mass fraction



Collection @ kmou

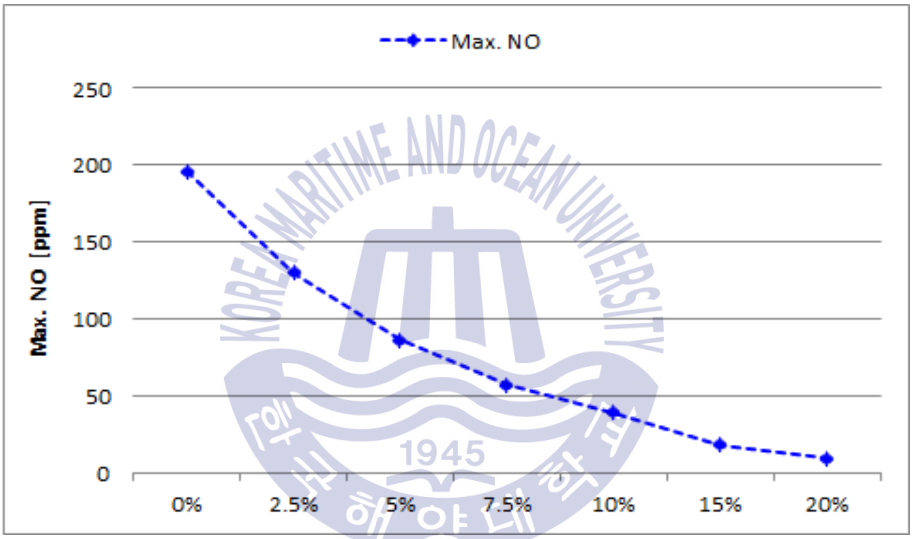



Fig. 3.8 Maximum NO mass fraction



Collection @ kmou

### 3.2.3 CO 생성

**Fig. 3.9**는 가스상 수분함량에 따른 CO 질량분율(volume average of CO mass fraction)을 나타낸다. 공기만을 연소시켰을 때 CO 질량분율은 280 ppm, 가스상 수분 2.5% 함량일 때 287 ppm으로 약 2.5% 증가, 가스상 수분 5%일 때 297 ppm으로 약 6.1% 증가하였다. 가스상 수분 7.5%일 때 307 ppm으로 9.6% 증가, 가스상 수분 10%일 때 315 ppm으로 12.5% 증가, 가스상 수분 15%일 때 329 ppm으로 17.5% 증가, 가스상 수분 20%일 때 337 ppm으로 20.4% 증가를 나타냈다. 또한 각 조건에서 CO 최대질량분율(maximum value of CO mass fraction)은 4.63%로 동일하였다. 이는 가스상 수분 첨가로 인해 연소속도가 감소하였고, 산소공급량이 줄어들어 CO 질량분율이 늘어난 결과로 판단된다.



Collection @ kmou

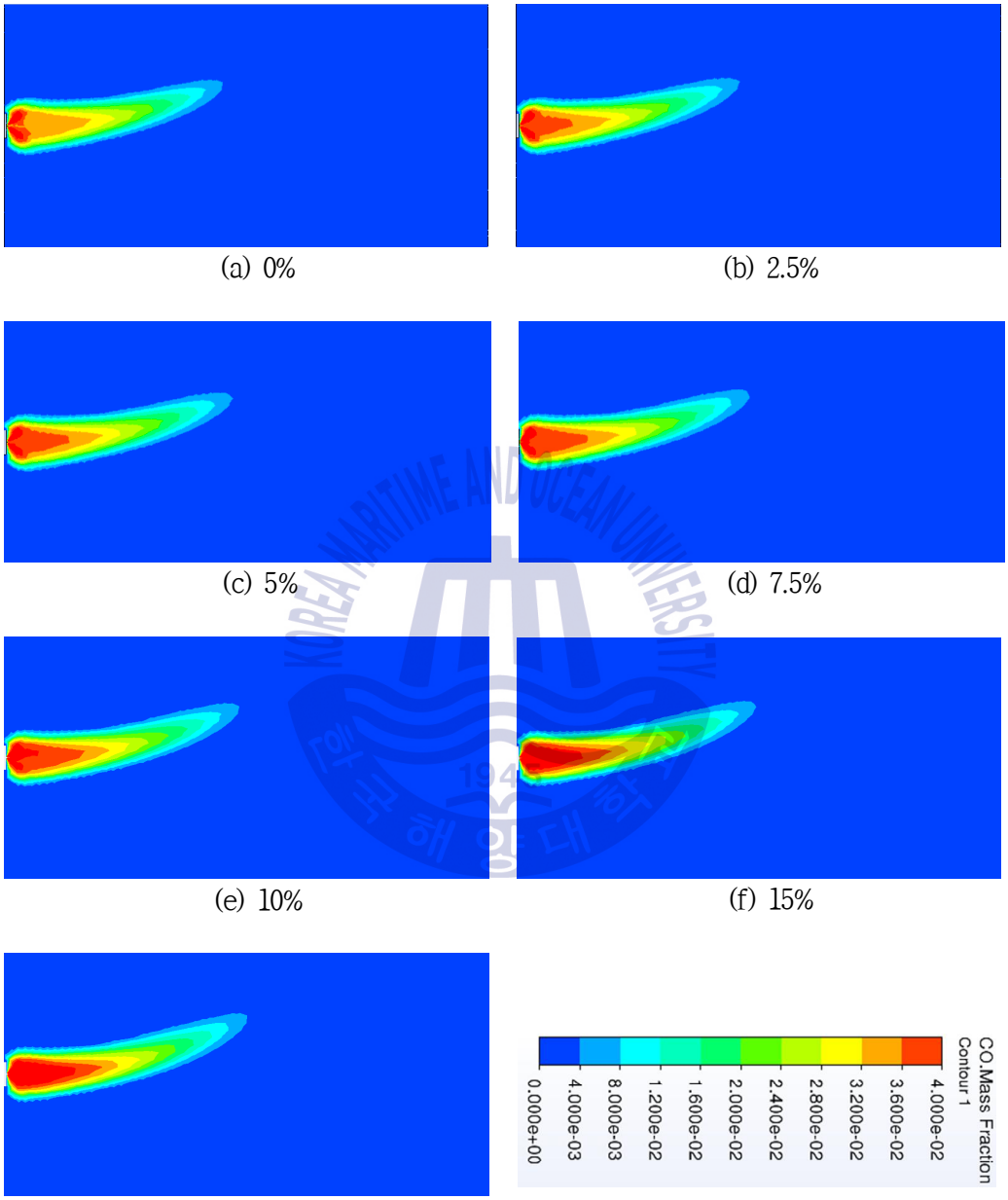



**Fig. 3.9** Contour of CO mass fraction



Collection @ kmou

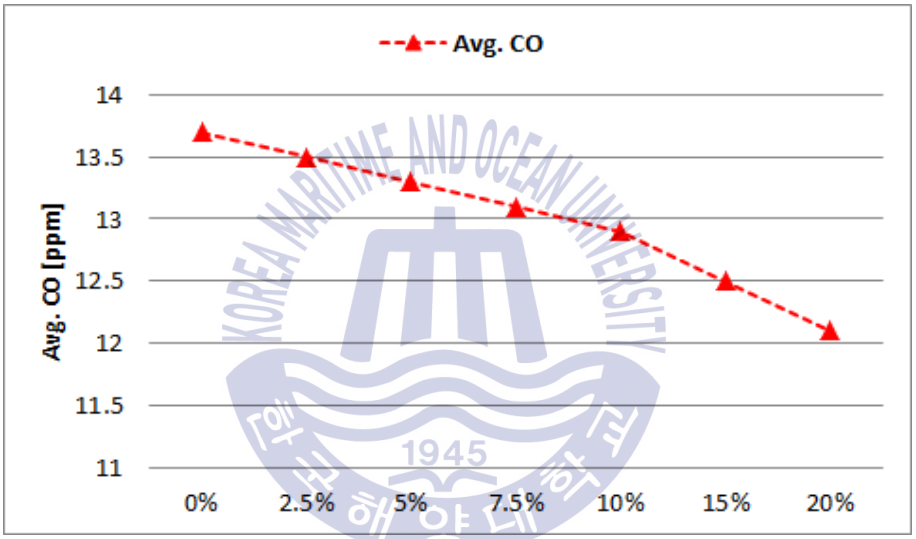



Fig. 3.10 Average CO mass fraction



Collection @ kmou

Fig. 3.11은 가스상 수분함량에 따른 CO와 NO의 질량분율 및 연소온도를 나타낸다. 가스상 수분 2.5% 함량일 때 연소온도의 감소율은 2.3%, NO 질량분율은 38.1% 감소하였으며 CO 질량분율은 2.5% 증가되었다. 가스상 수분 5% 함량일 때 연소온도의 감소율은 4.5%, NO 질량분율은 61.5% 감소하였으며 CO 질량분율은 6.1% 증가되었다. 가스상 수분 7.5% 함량일 때 연소온도의 감소율은 6.4%, NO 질량분율은 75.6% 감소하였으며 CO 질량분율은 9.6% 증가되었다. 가스상 수분 10% 함량일 때 연소온도의 감소율은 8.3%, NO 질량분율은 83.8% 감소하였으며 CO 질량분율은 12.5% 증가되었다. 가스상 수분 15% 함량일 때 연소온도의 감소율은 11.8%, NO 질량분율은 93.1% 감소하였으며 CO 질량분율은 17.5% 증가되었다. 가스상 수분 20% 함량일 때 연소온도의 감소율은 14.9%, NO 질량분율은 95.4% 감소하였으며 CO 질량분율은 20.4% 증가되었다. 특히 온도가 1,800 K에 가까울수록 질소산화물의 양은 급격히 감소함을 볼 수 있으며 이는 가스상 수분 함량이 질소산화물 저감에 매우 효과적임을 알 수 있다.



Collection @ kmou

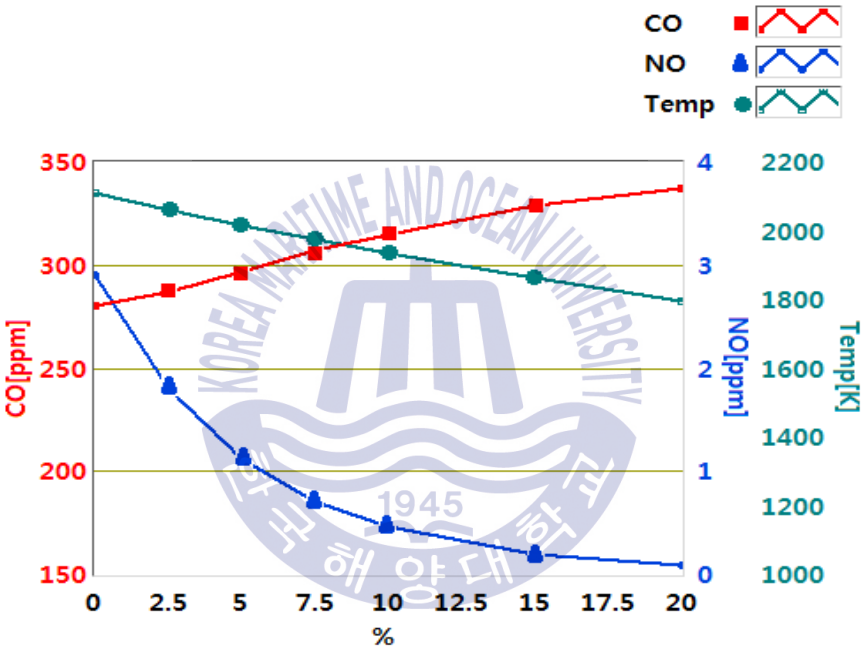



Fig. 3.11 CO and NO emissions in several cases



Collection @ kmou

3.2.4 $CO_2$ 생성

**Fig. 3.12**는 가스상 수분함량에 따른 $CO_2$ 최대질량분율(maximum value of $CO_2$ mass fraction)을 나타낸다. 공기만을 연소시켰을 때 13.7%, 가스상 수분 2.5% 함량일 때 13.5%로 공기만을 연소시켰을 때 보다 1.5% 감소하였다. 가스상 수분 5%일 때 13.3%로 2.9% 감소하였으며, 가스상 수분 7.5%일 때 13.1%로 4.4% 감소하였으며, 가스상 수분 10%일 때 12.9%로 공기만을 연소시켰을 때 보다 5.8% 감소하였으며, 가스상 수분 15%일 때 12.5%로 8.8% 감소, 가스상 수분 20%일 때 $CO_2$ 최대질량분율은 12.1%로 공기만을 연소시켰을 때 보다 11.7% 감소하였다. 이는 가스상 수분함량에 따라 일산화탄소의 질량분율이 증가하였고, 산소공급량은 줄어들어 이산화탄소의 생성은 줄어든 것으로 판단된다.



Collection @ kmou

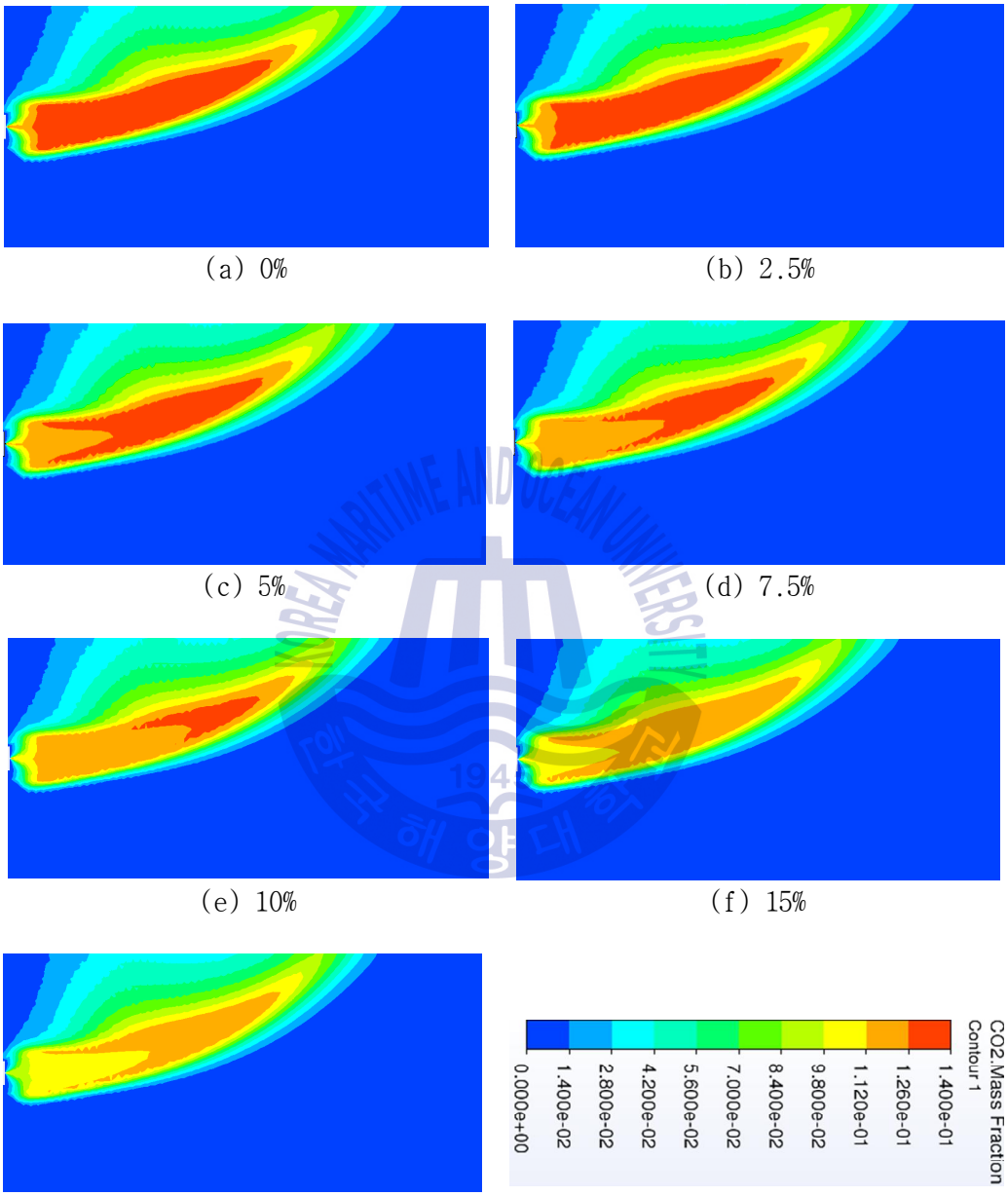



Fig. 3.12 $CO_2$ maximum mass fraction



Collection @ kmou

### 3.2.5 요약

흡기 중 가스상 수분함량이 버너화염에 미치는 영향에 대해 연소온도, CO, NO, $CO_2$ 생성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 가스상 수분 함량이 0% ~ 20%까지 증가할수록 유동 최대속도는 45.5 m/s에서 38.6 m/s까지 15.2% 감소하였고, 연소온도는 2,110 K에서 1,795 K까지 14.9% 낮아졌다.

2) 가스상 수분함량이 증가하면서 NO 최대질량분율은 196 ppm에서 9 ppm까지 큰 폭으로 감소하였으며 특히 가스상 수분 5%일 때 56.1%의 감소율을 보였다. 이는 열적(thermal) NO 생성에 영향을 미치는 1,800 K 이상의 영역이 급격히 감소하였기 때문으로 파악된다.

3) NO 질량분율이 가장 큰 폭으로 감소한 경우(case)는 가스상 수분 2.5% 함량일 때 38.1% 감소하였고, 이때 CO 질량분율은 2.5% 증가, $CO_2$ 질량분율은 1.5% 감소하였다.



Collection @ kmou

# 제 4 장 하이브리드형 물 혼합 연료의 보일러 버너 성능에 대한 실험

## 4.1 물 혼합 연료

### 4.1.1 물 혼합 연료 및 분류

물 혼합 연료는 디젤기관에서 배출되는 유해 배기가스 저감대책을 위한 청정연료 기술의 하나로써 연료에 물을 혼합하여 제조한다. 배기가스 저감을 목적으로 연구된 것은 비교적 최근의 일이며 자동차 회사 및 정유회사를 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

물 혼합 연료는 물과 경유를 혼합한 연료로 서로 잘 혼합되지 않는다. 이런 혼합되지 않는 두 종류의 액체를 혼합하기 위해 유화 방법이 사용된다. 서로 잘 혼합되지 않는 두 액체를 심하게 교반, 혼합하면 어느 한쪽이 미립자로 되어 다른 쪽의 액체 중에 분산된다. 이러한 과정을 유화(emulsification)라 하며 유화를 통하여 형성된 분산계를 에멀젼이라 한다. 그러나 유화제 즉, 계면활성제(surfactant)가 없이 두 액체를 혼합하여 그대로 방치하면 일정시간이 지난 뒤에는 본래 두 액체로 다시 분리된다. 두 액체의 교반에 의해 생성된 에멀젼을 그 상태로 유지시키려면 일반적으로 계면활성제를 첨가하는 것이 필요하며, 보다 장기간의 안정화를 위하여 계면활성제 외에 다른 안정화제들을 첨가한다. 계면활성제에는 기름에 사용되는 것(oil surfactant)과 물에 사용되는 것(water surfactant)이 있으며 계면활성제 외에 물을 첨가함으로써 저하될 수 있는 디젤 연료의 세탄가를 유지 혹은 향상시키기 위해서 세탄가 향상제(cetane improver)를 첨가한다. 특히 디젤연료의 유화에는 계면활성제가 꼭 필요하다. 물 첨가량은 기관의 사용 목적에 따라 다르지만 수％~50%에 이르며, 내연기관에는 일반적으로 유중수적형 에멀젼 연료가 사용되며 물



Collection @ kmou

첨가량은 약 12% ~ 20% 정도이다.

에멀젼 연료는 크게 두 가지로 나누어지는데 수중유적형 에멀젼 연료와 유중수적형 에멀젼 연료가 있으며 그 특징은 다음과 같다.

수중유적형 에멀젼 연료는 분산질로서 중질유의 유동성 개선에 효과가 높은 것으로 알려져 있으나, 연료 액적 주위에 물이 연속상으로 되어 있어서 기관에 적용 시 연소실 내부에서 무화 및 연소될 때 연료계에 부식의 우려가 있어 일반적으로 잘 사용되지 않고 있다.

유중수적형 에멀젼 연료는 수중유적형 에멀젼 연료와는 반대로 물 액적 주위에 연료가 연속상으로 되어 있는 형태로서 이 형식의 경우 일반적으로 연속상인 연료 안에 물 액적들이 20 ㎛ ~ 100 ㎛의 크기로 존재하게 되어 점도가 낮고 물 액적의 미세 폭발이 잘 발생하며, 연소실 내에서의 연소 시에도 물이 먼저 증발하기 때문에 연소실의 온도를 낮출 수 있으며 질소산화물의 생성 억제 효과가 커 디젤기관에 많이 적용하여 연구하고 있다.

에멀젼 연료의 2차 미립화 현상을 포함하여 그 연소과정은 원래 연료의 단일 액적의 연소와 비교해서 매우 복잡하고 난해하나 그 기본적인 성질을 파악하는 것이 매우 중요하다. 현재 응용의 주류를 이루고 있는 유중수적형 에멀젼 연료에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있으나, 연소측면에 있어서 수중유적형 에멀젼 연료와 비교해서 그 차이점 또는 유리한 부분이 아직 명확하게 규명되지는 않고 있다.



Collection @ kmou

### 4.1.2 물 혼합 연료의 제조

물 혼합 연료의 제조 기술은 물 입자의 크기, 점도, 안정성 등을 고려하여 기계적 방법, 화학적 방법, 초음파를 이용하는 방법 등이 있다. 기계적 방법은 임펠러(impeller)나 터빈(turbine) 등으로 유체를 교반 및 전단하는 것으로 비용은 적게 들지만 물의 미립화와 안정성에 문제를 가지고 있다. 화학적 방법은 계면활성제를 사용하여 유체의 표면장력을 감소시켜 연료 속에 물의 침투를 용이하게 하고 상을 안정화 시킨다. 초음파를 이용하는 방법은 연료와 물 사이에 초음파를 여러 단 교차시키면 공동현상(cavitation)이 발생하여 연료 속으로 물이 침투하는 원리를 이용한다.

일반적으로 사용되는 기술은 기계적 회전력을 이용하여 연료 속으로 물을 침투 시키고, 안정제인 계면 활성제로 유화연료를 보존시켜 사용하는 방법이며 실험에서도 이 방법을 사용하였다.



Collection @ kmou

## 4.2 실험장치 및 실험조건

### 4.2.1 실험장치

실험 장치는 물과 연료 공급장치, 물과 연료의 하이브리드 혼합장치, 버너와 연소실로 구성된다.

Fig. 4.1과 같이 물과 연료가 펌프에 의해 유입되고, 혼합기에서 물 혼합 연료가 생성된다. 이때 물 혼합량은 유량계에 의해 조절되며 혼합기에서 생성된 에멀젼 연료는 정적 혼합장치를 통과하여 연속적으로 순환하면서 미세하게 혼합되며 공급량만큼의 유화유가 연소실에 분사된다.

연소실의 구조는 직경 400 mm, 길이 1,260 mm의 원통이며, 연도는 직경 160 mm, 길이 1,500 mm의 크기이다. 연소실에 5개의 홀을 두어 연소 화염 구간에서의 질소산화물과 일산화탄소, 스모크를 측정하였고, 화염 온도는 화염 중심축과 반경방향으로 k-형 열전대로 측정하였다. 측정위치는 중심축의 경우 분사노즐 끝에서 200 mm, 350 mm, 500 mm, 650 mm, 800 mm 5점이며 반경방향으로는 중심축에서 0 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm이고 측정점 6은 연도 배가스 출구이다. 냉각수를 주입하여 연소실 온도를 일정하게 유지하였으며, 이때 입구와 출구의 온도를 계측하였다. 연소 화염의 가시화는 버너를 개방된 공간에서 연소시키고, 3 m 거리에서 고속 카메라와 줌 렌즈를 이용하여 영상을 1 ms 간격으로 촬영하였다. 실험에 사용한 버너는 정격출력 116 kW(10만 kcal/h)의 Olympia OM-N1 모델로 상세사양은 Table 4.1과 같다.



Collection @ kmou

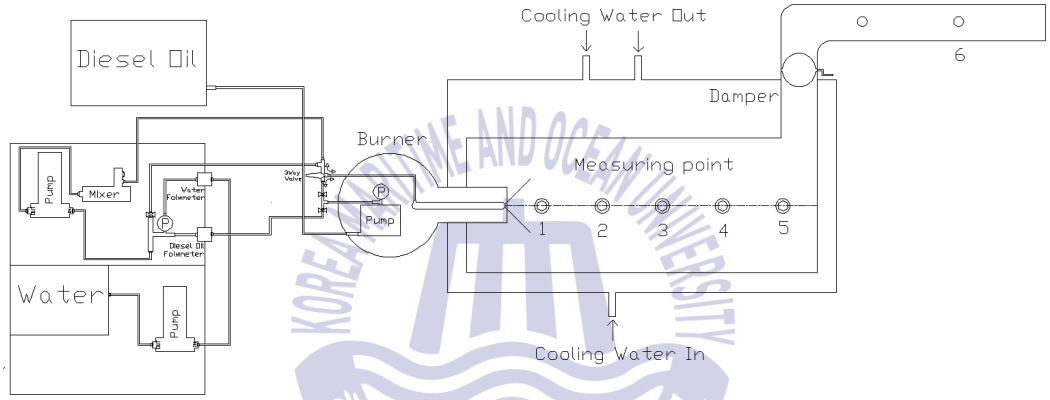



**Fig. 4.1** Experimental setup for the burner using emulsified fuel prepared with hybrid mixing unit



Collection @ kmou

Table 4.1 Specification of test burner

| Model | Oylimpia OM-N1 |
|---|---|
| Rated power | 116 kW |
| Fuel consumption | 6 ~ 12 L/h |
| Fuel feeding pressure | 0.7 ~ 1 MPa |
| Power control | ON / OFF |



Collection @ kmou

Fig. 4.2 Photo of experimental setup



Collection @ kmou

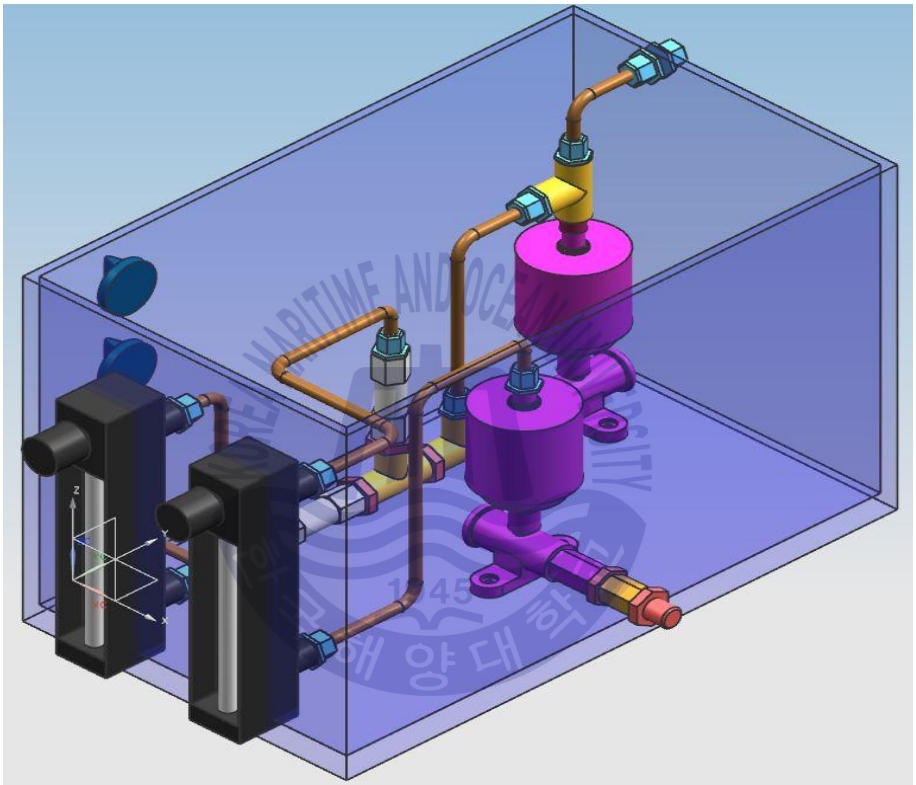


Fig. 4.3 Hybrid mixing equipment



Collection @ kmou

4.2.2 실험 조건

물 혼합률은 디젤오일 소모량 기준으로 0%, 10%, 20%로 하였으며 이는 전체 소모유량을 기준으로 하면 0%, 9.1%, 16.7%가 된다. 실험조건은 연료소모량을 동일하게 유지하면서 물 혼합률을 조절하는 경우와 16.7%의 물 혼합률에서 배기와 부하조건을 디젤만 사용했을 때와 유사하게 할 경우 2가지로 진행하였다.

Table 4.2와 같이 흡기조건은 물 혼합률 0%인 디젤오일만 사용한 경우에 배기가스 중의 스모크 농도가 0.1%~0.5%가 되도록 흡기구의 개도량을 조절하였으며 이를 기준(100%)으로 개도량을 75%, 50%가 되도록 하였고, 물 혼합률 16.7%에 대한 추가 실험의 경우는 스모크 농도가 디젤만 사용한 경우와 동일한 농도가 되도록 조절하였다.



Collection @ kmou

Table 4.2 Test conditions

| Water mixing percent (%) | Intake opening | Oil flux (cc/min) |
|---|---|---|
| 0 | 100% of Opt* | 250 cc/min |
| 9.1 | 75% of Opt* | |
| 16.7 | 50% of Opt* | |
| | Opening adjusted by the fuel gas concentration in the 20% emulsified fuel | 220 cc/min |

Opt* ; Opening optimized on the pure diesel oil



Collection @ kmou

## 4.3 실험 결과 및 고찰

### 4.3.1 화염 거동

Fig. 4.4는 버너 분사 노즐 출구에서 촬영된 에멀젼 연료의 현미경 사진이다. 액적들이 1 ㎛에서 10 ㎛ 정도로 분포되며, 물 액적의 크기가 1 ㎛ 이하에서는 미소 폭발이 아닌 액적의 분리만 가져오고 10 ㎛ 이상에서는 미소폭발은 잘 일어나지만 연소효율이 저하되는 결과를 가져오므로 본 실험 장치의 액적 크기는 1 ㎛ ~ 10 ㎛ 사이로 적절하다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
한국해양대학교
1945



Collection @ kmou

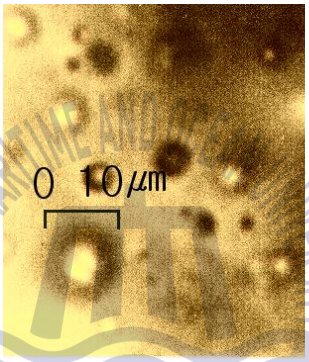



Fig. 4.4 Photomicrograph of the emulsified Fuel



Collection @ kmou

Fig. 4.5는 물 혼합률 0%인 디젤오일만 공급할 경우 점화가 시작될 때의 화염성장을 보여준다. 2~3회 점화 스파크 후에 착화되었으며 화염이 흡입 공기와 함께 후류로 밀려나가다가 10 ms 이후 버너에 접촉되고 이후에 연속 화염이 형성됨을 볼 수 있다.



Collection @ kmou

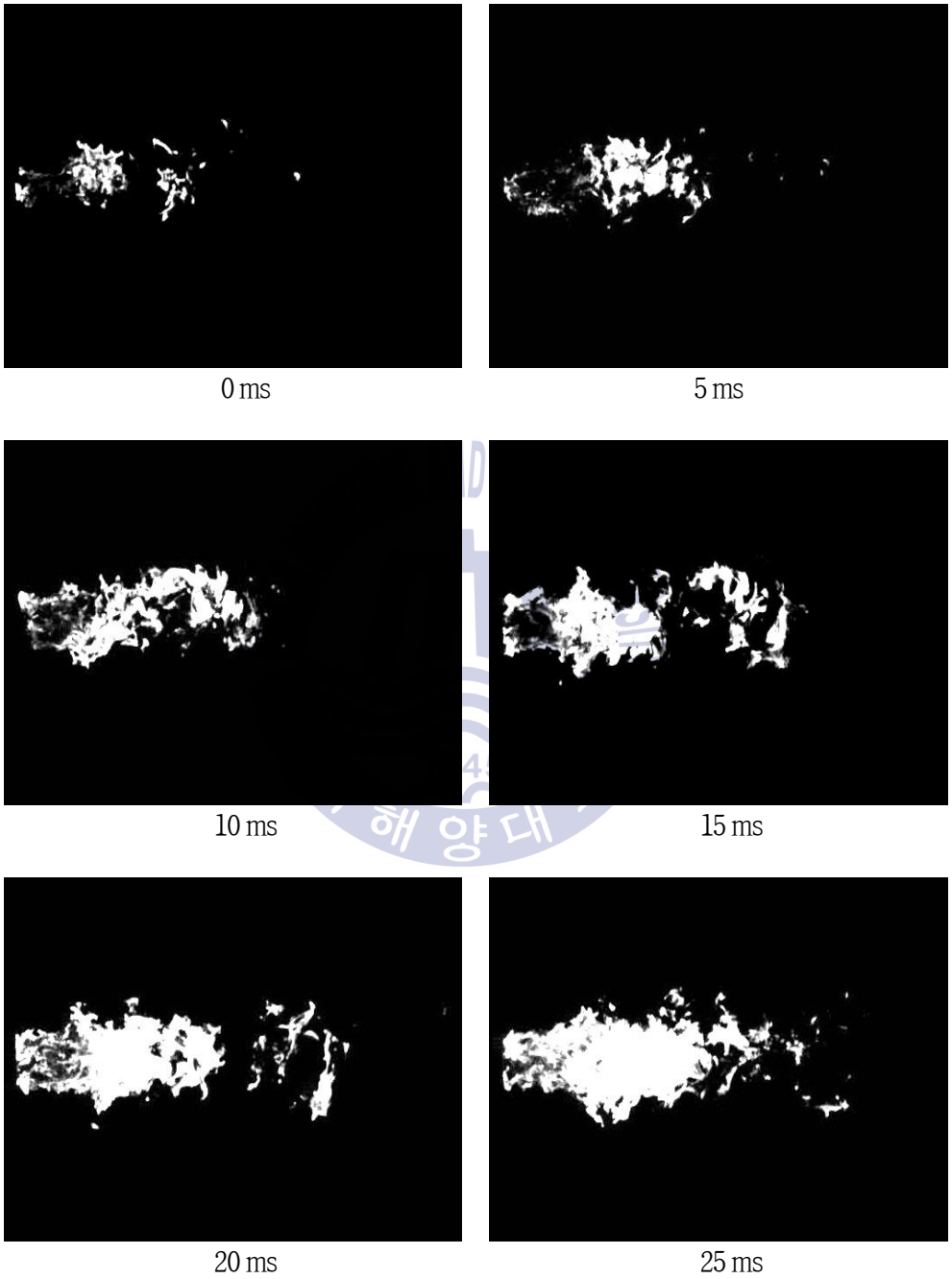



**Fig. 4.5** Flame development of the diesel oil case at ignition start



Collection @ kmou

성장된 화염은 Fig. 4.6과 같다. 화염의 폭은 전체적으로 좁지만 길이 방향으로는 길고 밝은 색의 고온부분이 중간에 집중됨을 알 수 있다. 흡입 공기의 스월 유동과 함께 후류로 가면서 좌우변동을 하지만 밝은 화염이 연속적으로 나타나고 있다. 이는 연소가 집중되어 고온 영역이 형성되어 질소산화물 생성의 원인이 될 것으로 판단된다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

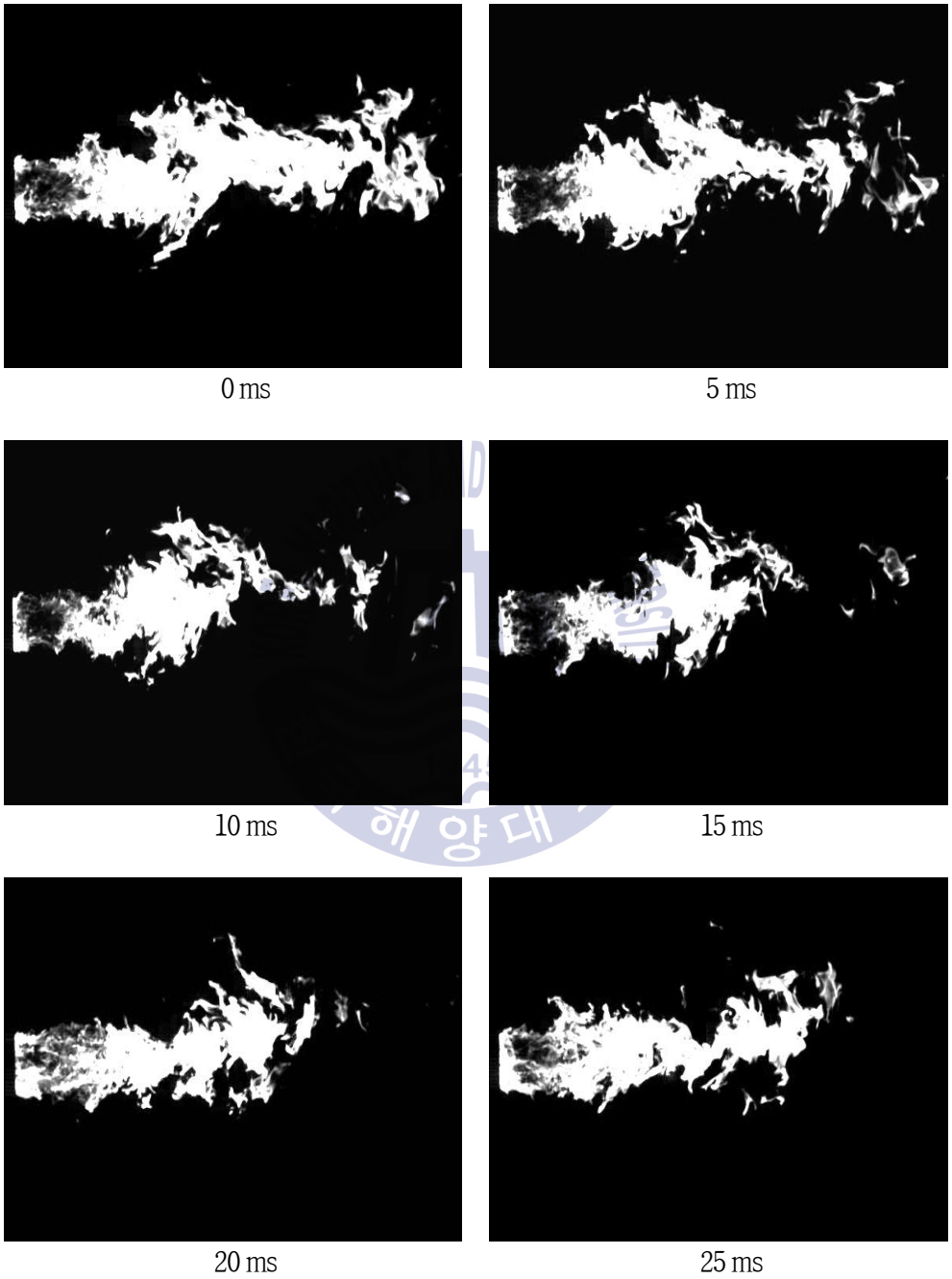



**Fig. 4.6** Flame behavior of fully developed flame in the diesel oil case



Collection @ kmou

Fig. 4.7은 물 혼합률 9.1%인 경우 점화가 시작될 때의 화염 성장을 보여준다. 화염은 점화 초기부터 매우 안정적인 상태로 버너에 부착되어 성장하지만 물 혼합률 0%인 디젤오일만 공급한 화염과 비교할 때 완전 성장까지 더 많은 시간이 소모되는 것을 알 수 있다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

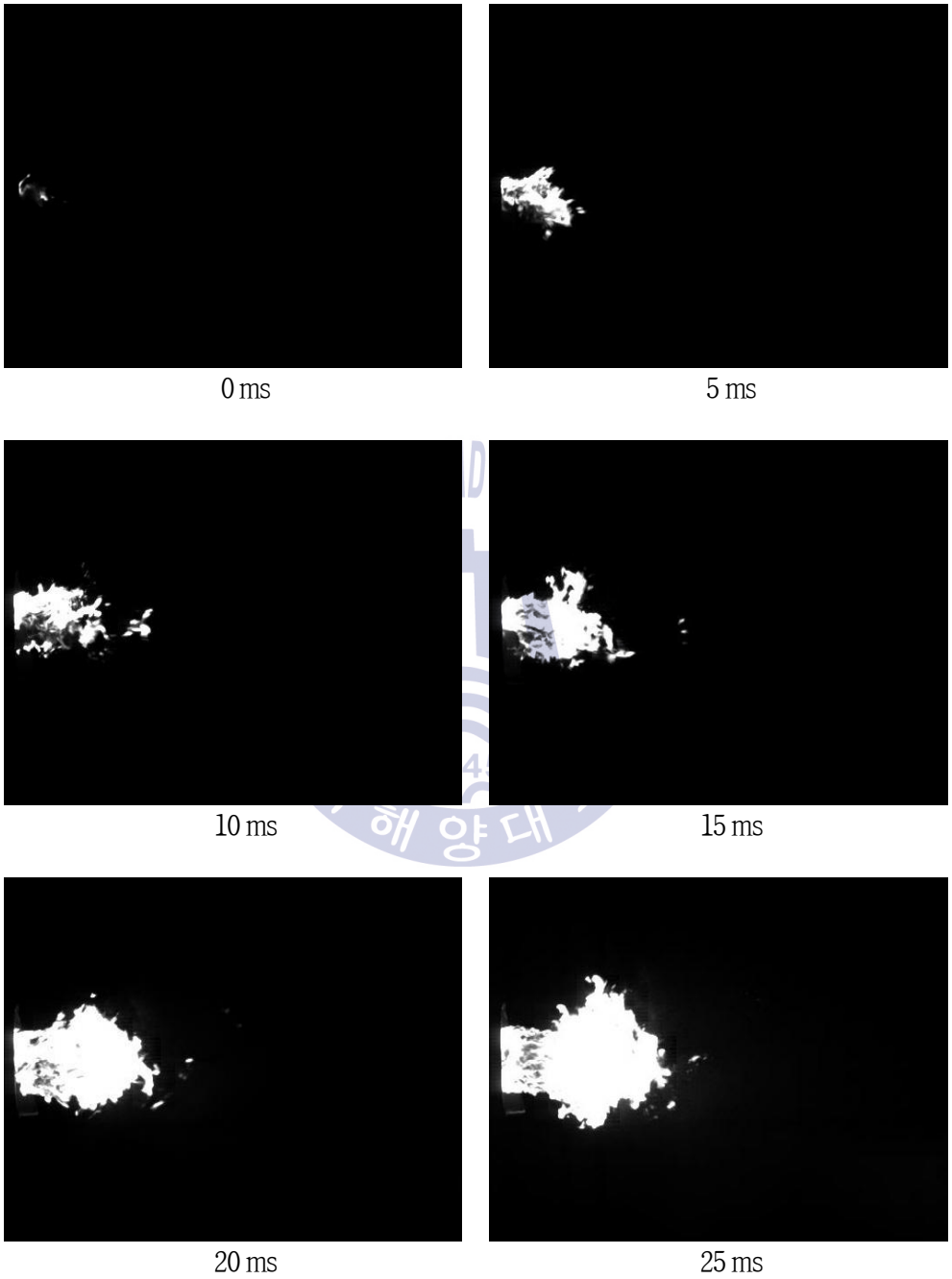
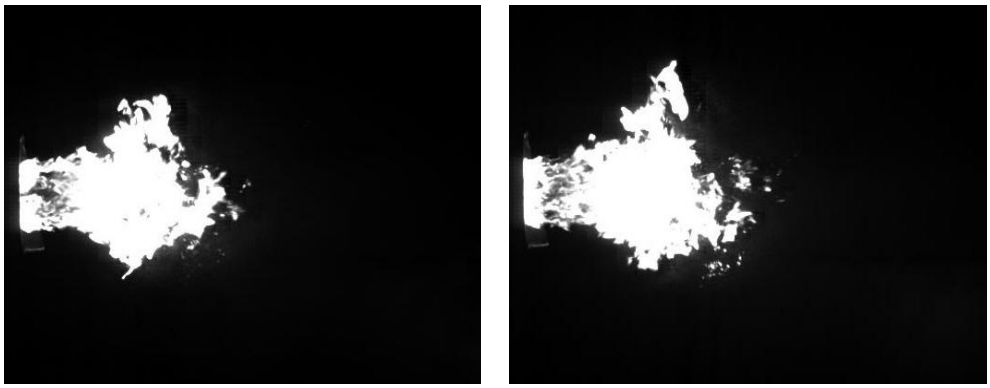


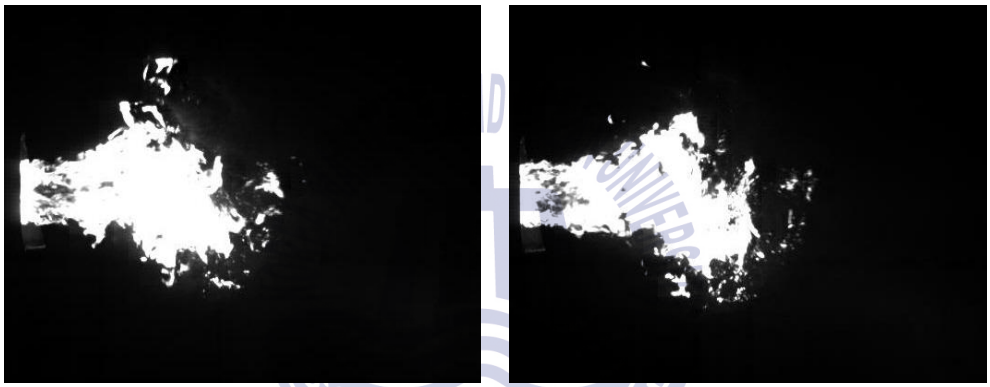

**Fig. 4.7** Flame development of the 9.1% mixing case at ignition start



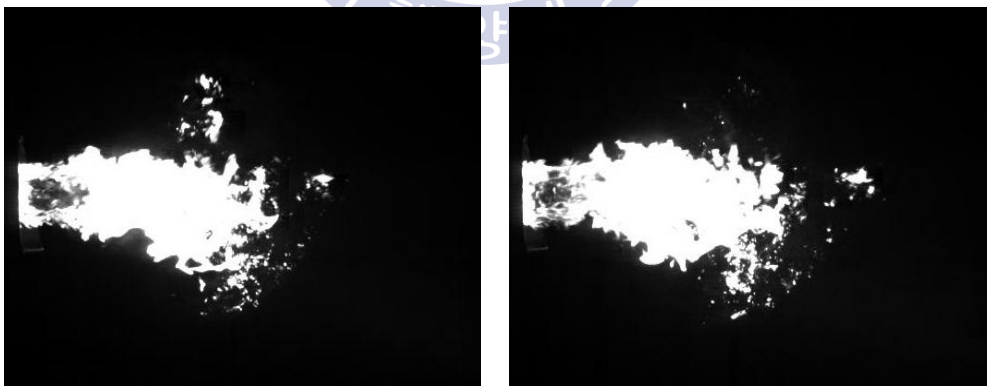
Collection @ kmou



30 ms 35 ms



40 ms 45 ms



50 ms 55 ms

**Fig. 4.7** Flame development of the 9.1% mixing case at ignition start – to be continued



Collection @ kmou

물 혼합률 9.1%인 경우 완전히 성장한 화염을 Fig. 4.8에 나타냈다. 디젤오일만 공급했을 때보다 상대적으로 폭이 크고 주 화염 길이가 짧으며 후류 화염이 길어진다. 주화염의 주변과 후류의 화염은 잔 불꽃으로 이루어지며 화염의 휘도 역시 물 혼합률 0%인 디젤오일만 공급했을 때에 비해 감소됨을 알 수 있다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

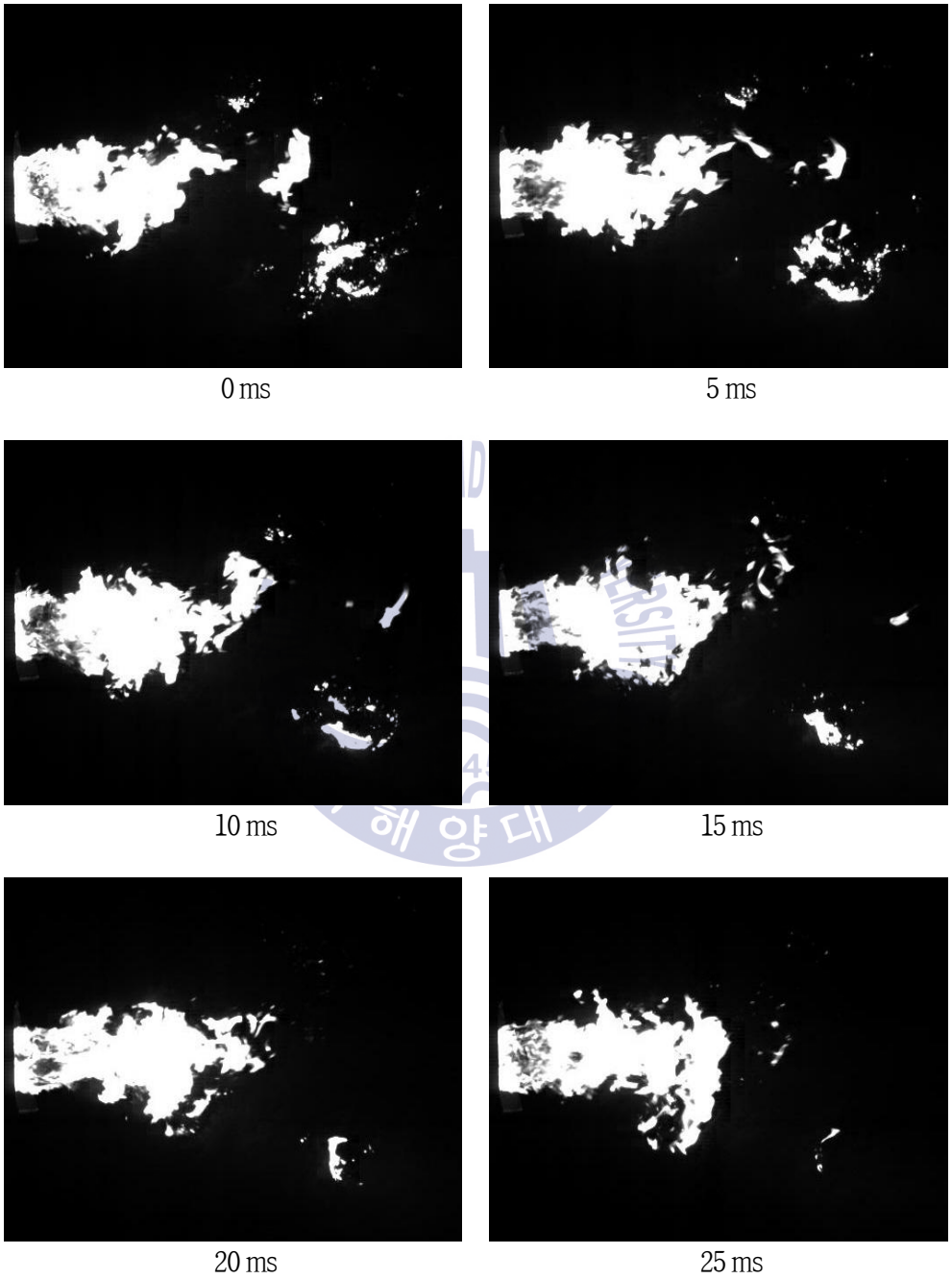



**Fig. 4.8** Flame behavior of fully developed flame in the 9.1% mixing case



Collection @ kmou

Fig. 4.9는 물 혼합률 16.7%인 경우 점화 시의 화염성장을 보여준다. 물 혼합률 9.1%의 경우와 유사하게 점화 초기부터 버너에 화염이 부착한다. 그러나 화염부상의 정도가 디젤오일만 사용한 경우와 유사하며 30 ms가 지나면서 화염이 급격하게 확대된다. 이는 동일한 디젤 유량에 물을 추가로 혼합하여 전체 연료 유량이 16.7% 증가하여 연료의 분사속도가 증가되었고, 물 혼합에 의하여 증가된 잠열의 영향으로 연소되지 못한 후류의 연료가 일시에 연소된 것으로 판단된다.



Collection @ kmou

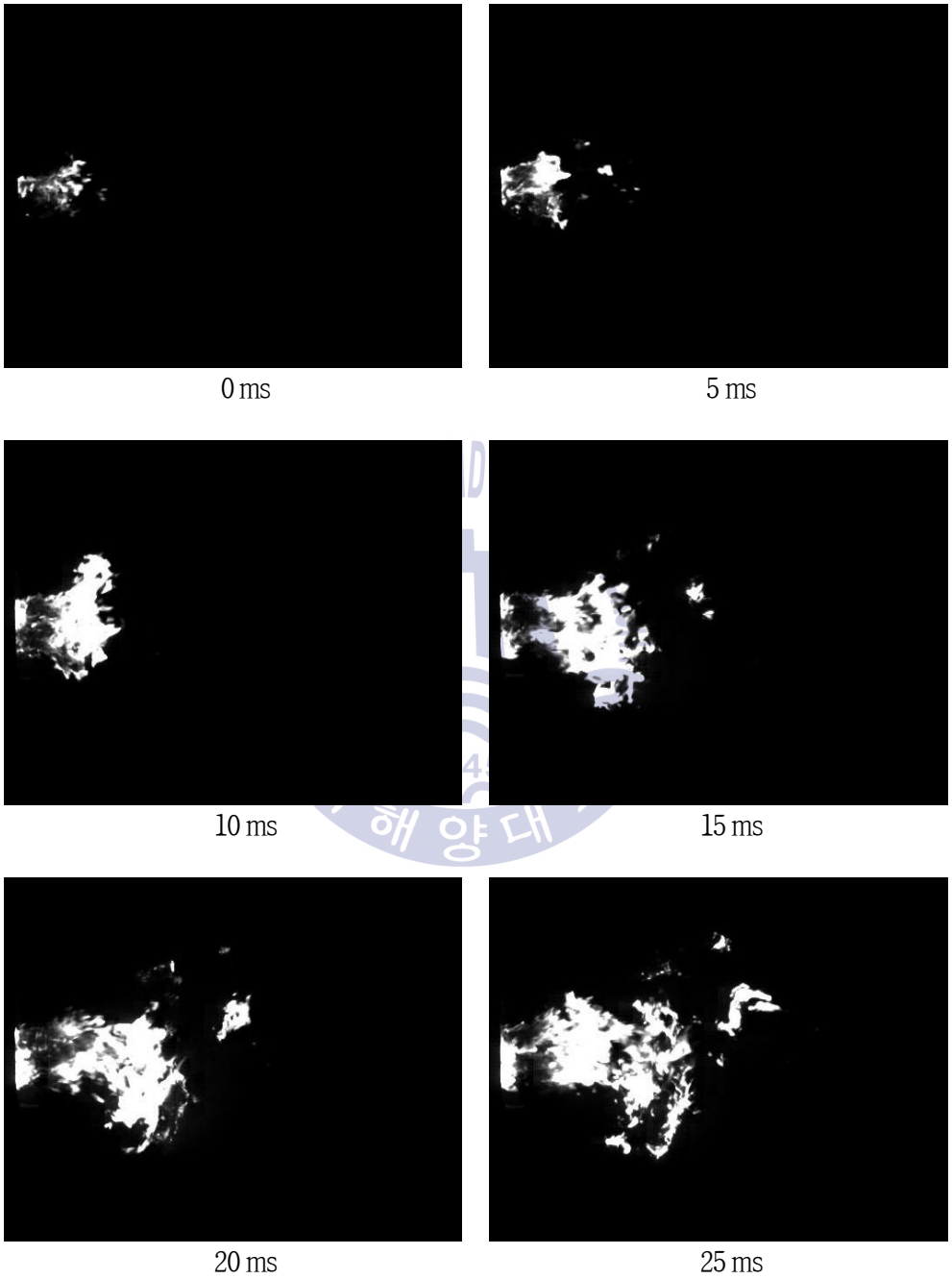



**Fig. 4.9** Flame development of the 16.7% mixing case at ignition start



Collection @ kmou

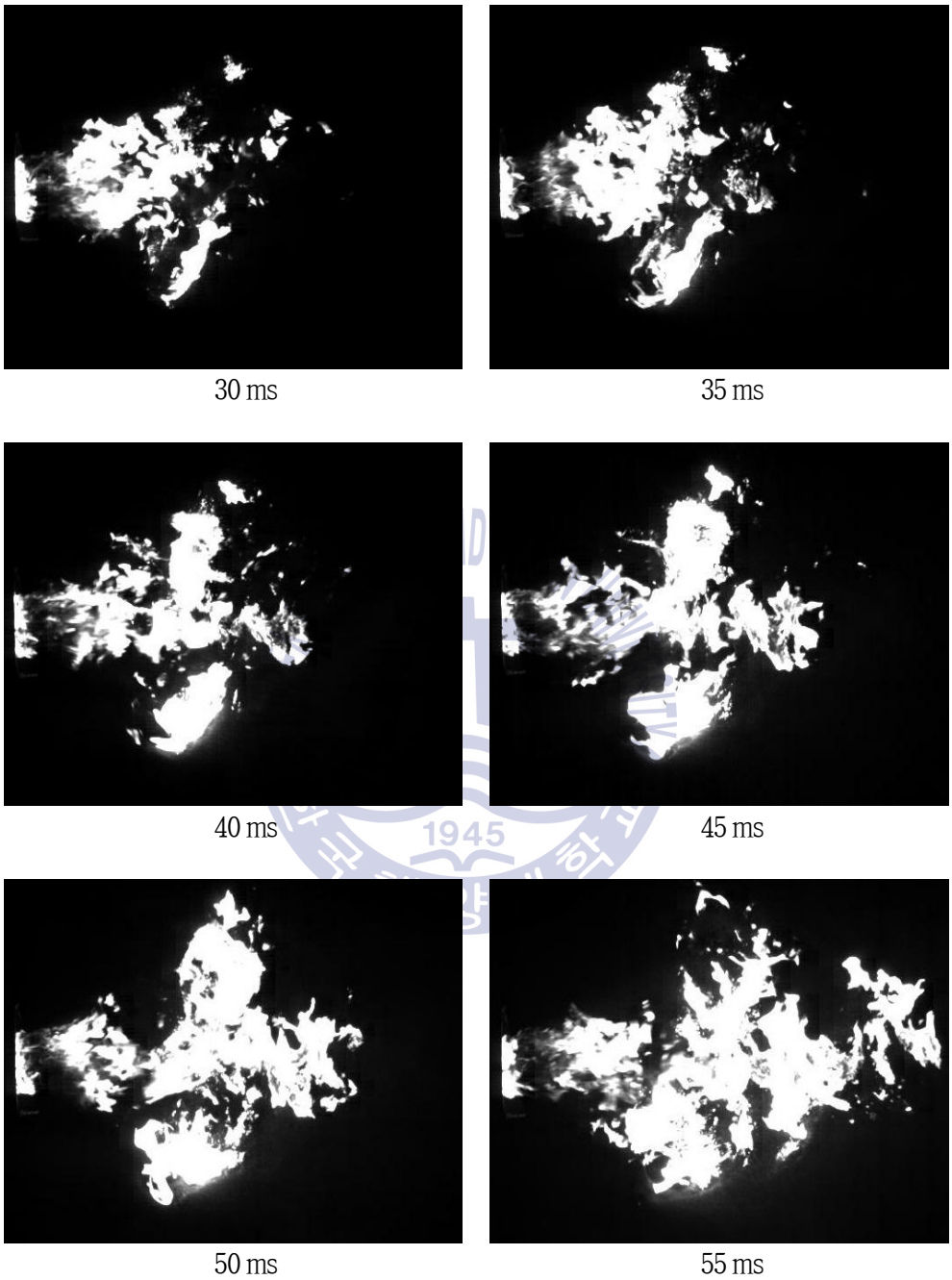



**Fig. 4.9** Flame development of the 16.7% mixing case at ignition start - to be continued



Collection @ kmou

Fig. 4.10은 물 혼합률 16.7%인 경우 화염이 완전히 성장했을 때 사진이다. 점화 직후 크게 확대되었던 화염보다 축소되어 안정 화염을 유지한다. 물 혼합률 9.1% 경우의 화염과 같이 물 혼합률 0%인 디젤오일만의 화염보다 폭 방향으로 크게 확산되며 작은 화염들이 화염 후류로 길게 분포된다. 디젤 화염과 비교할 때 전체 화염의 휘도가 크게 감소하였음을 알 수 있으며 이는 국부적인 고온 영역의 집중이 감소되었음을 의미한다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

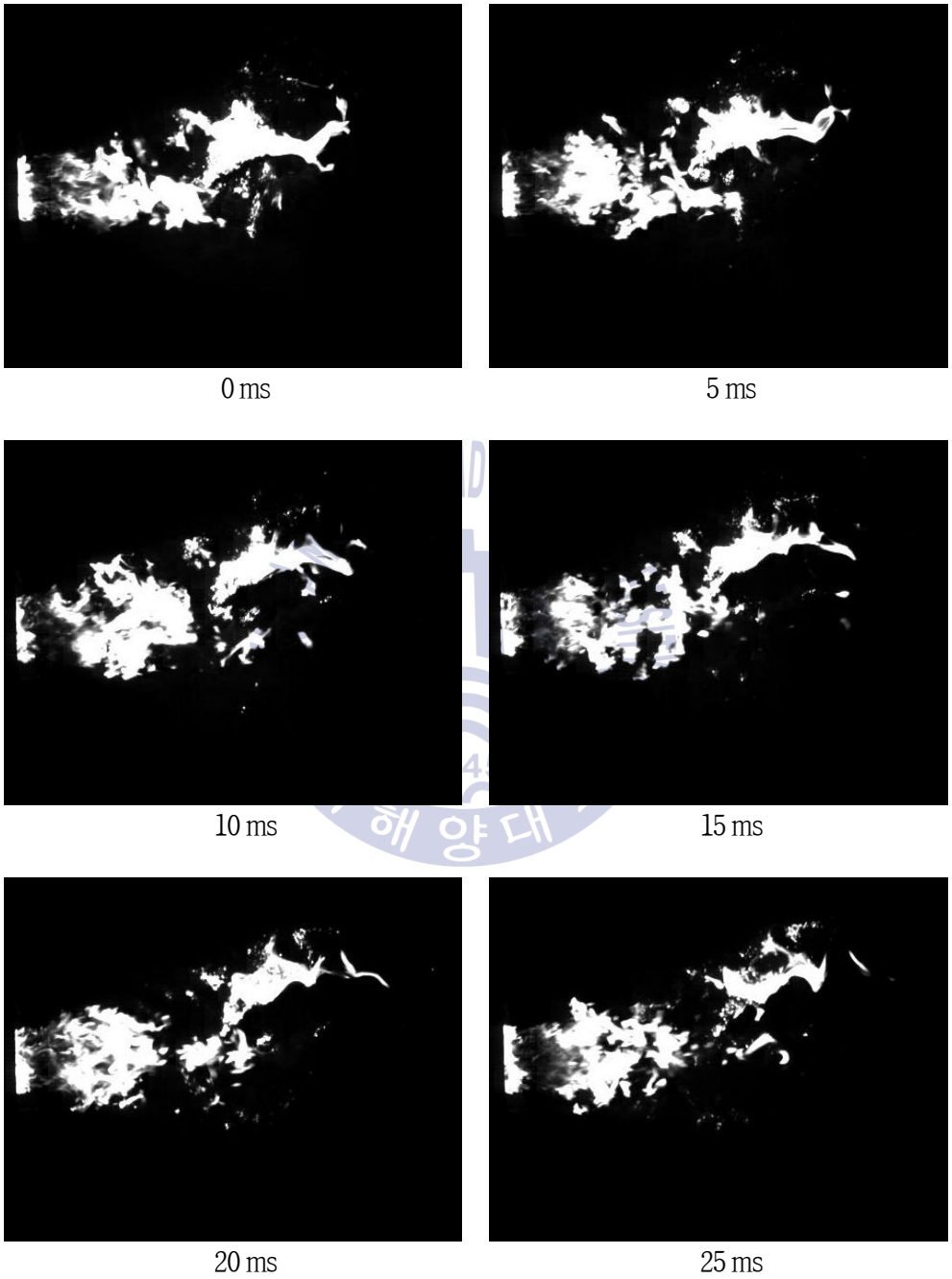



**Fig. 4.10** Flame behavior of fully developed flame in the 16.7% mixing case



Collection @ kmou

디젤오일과 물 혼합 연료의 화염 거동을 종합하면 점화가 시작된 직후 흡입 공기와 함께 화염이 후류로 날리면서 버너 노즐에 화염 부착과 부상을 반복하며 화염이 성장한다. 물 혼합률이 16.7%의 경우 9.1%보다는 부족하지만 0%인 디젤오일만의 점화보다는 안정된 화염의 성장을 가져온다. 이는 더 많은 양의 연료가 분사되면서 화염이 집중되기 때문으로 판단된다. 화염이 완전히 성장된 후의 거동은 물 혼합률이 증가하면 화염의 폭 방향과 축 방향으로 넓은 화염을 나타내지만 화염이 집중되어 큰 휘도를 나타내는 버너 근처의 주화염은 축소된다. 또한 화염의 전 영역에서 휘도가 감소하였으며 이는 액적의 미세 폭발과 물 혼합량 만큼의 분사속도 증가로 판단된다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

4.3.2 연소실 온도 특성

Fig. 4.11은 흡기구 100% 개방조건에서 화염 중심축 상의 온도 분포를 나타낸다. 물 혼합률 0%인 디젤오일인 경우 분사노즐 직후에 850℃를 나타낸 후 770℃까지 낮아지며 이후에 온도가 증가되는 현상을 나타낸다. 물 혼합률 9.1%의 경우도 0%와 유사한 변화를 보이지만 평균 1.5% 낮은 온도 특성을 보인다. 물 혼합률 16.7%의 경우도 9.1%와 유사한 온도 변화특성을 나타내지만 온도가 매우 저하되어 디젤오일 대비 평균 5.9% 낮은 온도를 나타낸다. 2번째 측정점에서 매우 낮은 온도를 나타내며 전체적으로 큰 온도변화를 나타내는 것은 많은 급기 유량에 의한 스월 유동의 영향이며, 물 혼합률의 증가와 함께 온도가 낮아지는 것은 혼합된 물의 증발과 미세 폭발 등에 의한 화염의 확산 때문으로 판단된다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

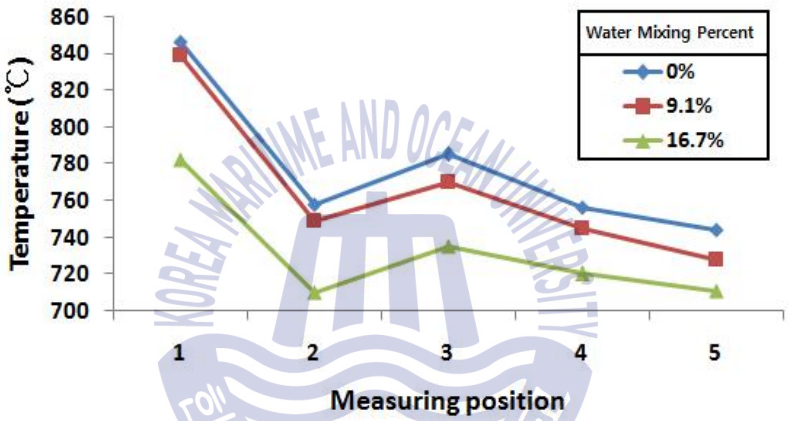



Fig. 4.11 Temperature distribution in the flame center axis at 100% open case



Collection @ kmou

Fig. 4.12와 Fig. 4.13은 흡기 개도율 75%, 50% 경우 화염 중심축에서의 온도 분포를 나타낸다. 흡기 개도율이 적어지면서 흡입 공기량이 감소되면 연소에 의한 열 발생량이 감소된다. 가열 유체의 유량이 크게 감소되기 때문에 온도가 증가한다. 흡기 개도율 50%인 경우 더욱 높은 온도분포를 나타내는데 0%의 경우 3번 위치부터 급격히 온도가 저하된다. 이는 연소공기의 부족으로 불완전 연소가 이루어지기 때문이다. 하지만 물 혼합 연료의 경우는 전체적으로 높은 온도를 유지하는데 이는 미세 폭발에 의한 화염의 확산으로 주위 공기를 충분히 이용하기 때문으로 판단된다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

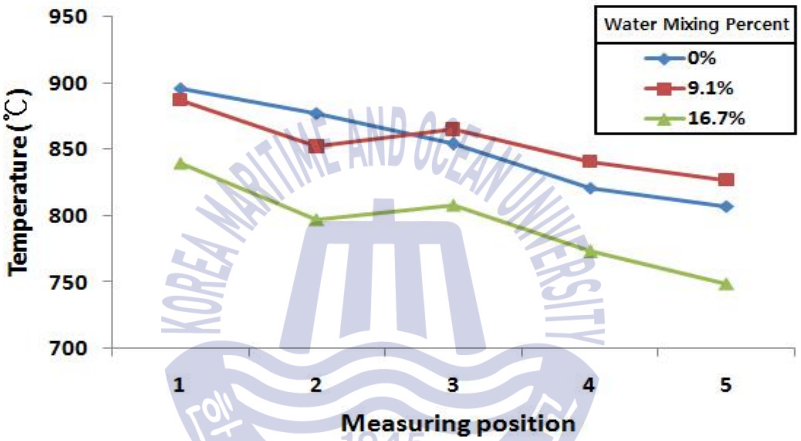



Fig. 4.12 Temperature distribution in the flame center axis at 75% open case



Collection @ kmou

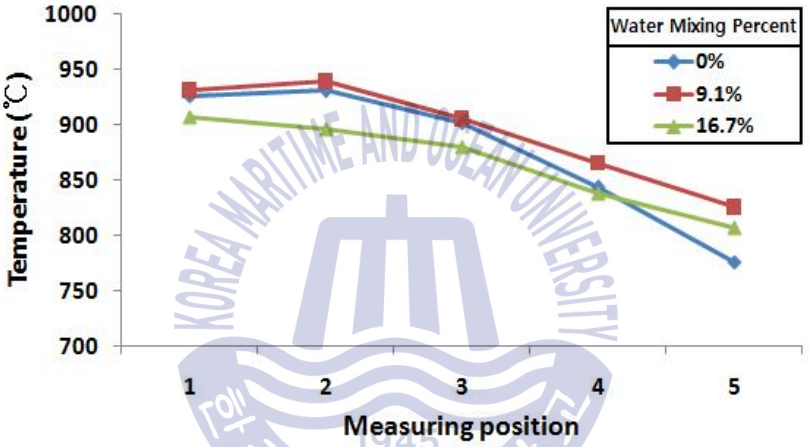



Fig. 4.13 Temperature distribution in the flame center axis at 50% open case



Collection @ kmou

Fig. 4.14 ~ Fig. 4.16은 흡기 개도율 100%, 75%, 50%에 대한 2번 측정점에서 반경방향의 화염온도 분포를 나타낸다. 화염의 중심에서 가장 높은 온도를 나타내며 가장자리로 가면서 온도는 낮아진다. 중심축에서의 온도 특성과 유사하게 물 혼합률에 따라 온도가 낮아짐을 알 수 있다.



Collection @ kmou

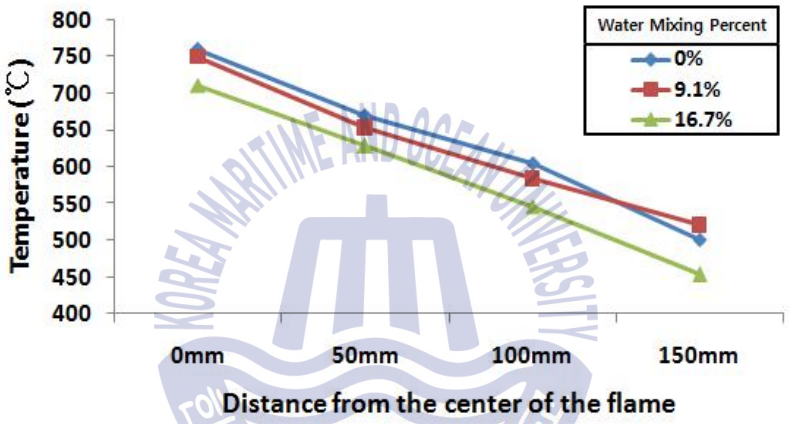



Fig. 4.14 Temperature distribution in the flame radial axis at 100% open case



Collection @ kmou

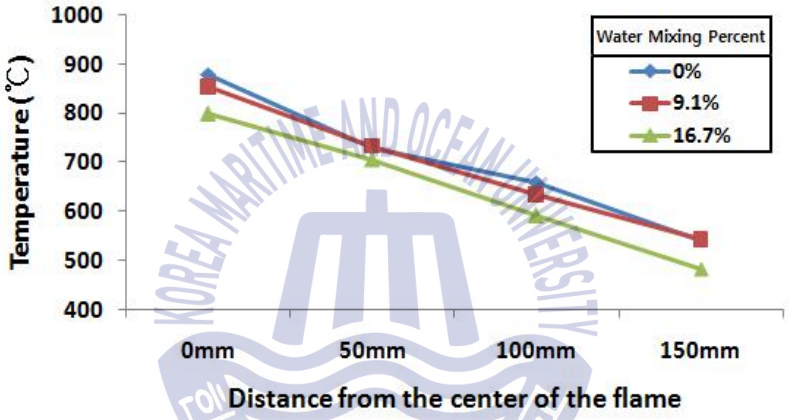



Fig. 4.15 Temperature distribution in the flame radial axis at 75% open case



Collection @ kmou

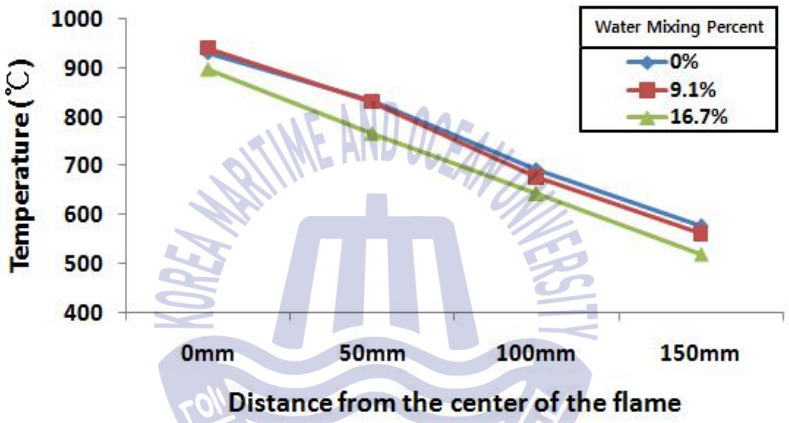



Fig. 4.16 Temperature distribution in the flame radial axis at 50% open case



Collection @ kmou

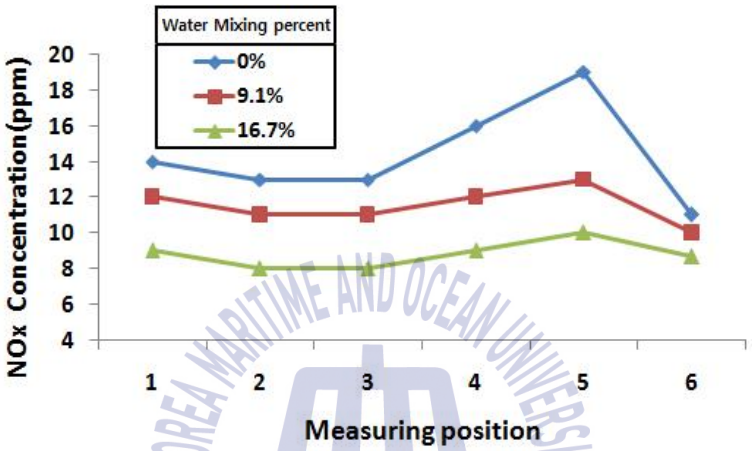
4.3.3 배기 특성

**Fig. 4.17**은 흡기 개도율이 변화할 때 물 혼합률에 따른 질소산화물 농도를 나타낸다. 100% 개도율에서 디젤오일만을 사용한 경우 14 ppm정도를 유지하다가 20 ppm까지 증가한 후 12 ppm정도로 낮아진다. 물 혼합 연료의 경우도 비슷한 경향을 나타내지만 물 혼합률의 증가와 함께 질소산화물 배출이 감소된다. 물 혼합률 16.7%에서는 위치에 따라 질소산화물이 47%까지 감소되었다. 흡기 개도율이 50%일 때 물 혼합률 0%인 디젤오일만을 사용한 경우 매우 낮은 7 ppm 정도의 값을 나타내는데 이는 부족한 공기로 인해 불완전 연소가 되어 매우 낮은 화염온도 때문으로 판단된다.

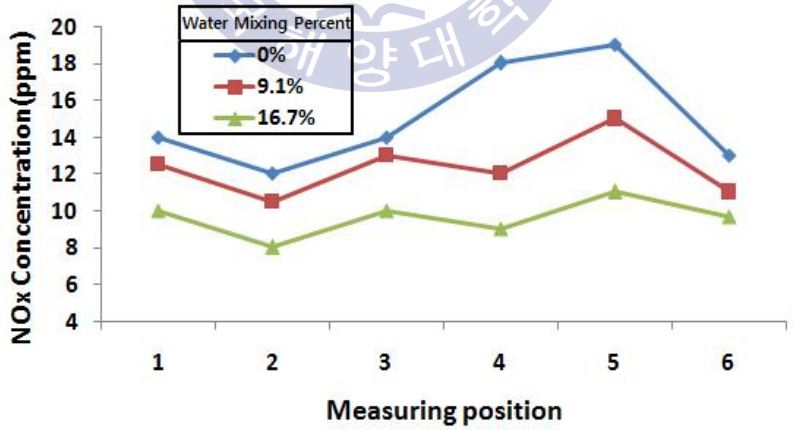
**Fig. 4.17**의 (d)는 보일러 연도로 최종 배출되는 배가스 중의 질소산화물 농도를 나타낸다. 물 혼합률 0%인 디젤오일만 사용한 경우 흡기 개도율 100% 일 때 11 ppm, 75% 일 때 13 ppm으로 증가, 50% 일 때 5 ppm으로 급격히 낮아지는데 이는 공급되는 공기의 부족에 따른 불완전 연소의 영향으로 판단되며, 물 혼합률 9.1%, 16.7% 경우는 화염온도의 증가와 공급 공기의 감소가 질소산화물 생성에 서로 반대되는 작용을 하여 전체적으로 유사한 결과를 나타낸다.



Collection @ kmou



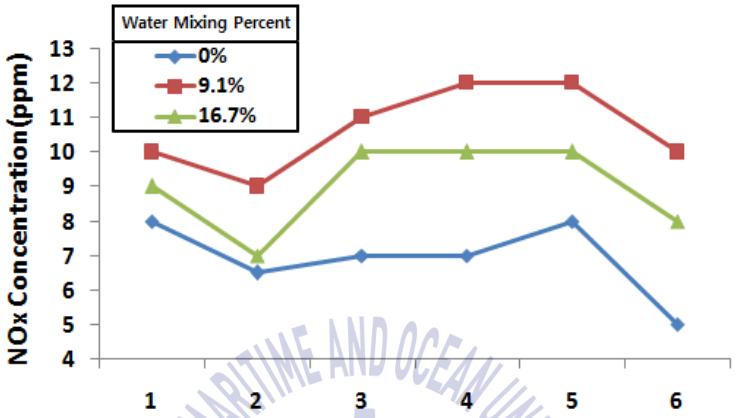

(a) Opening 100%



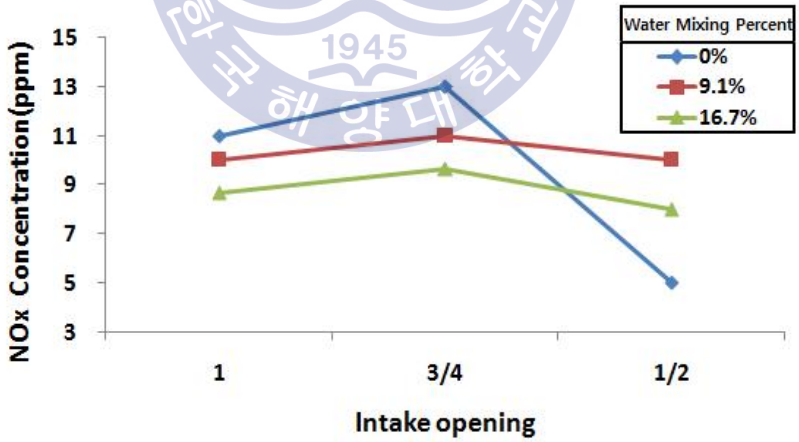

(b) Opening 75%



Collection @ kmou




(c) Opening 50%




(d) at position 6

Fig. 4.17 $NO_X$ concentration variation with intake opening

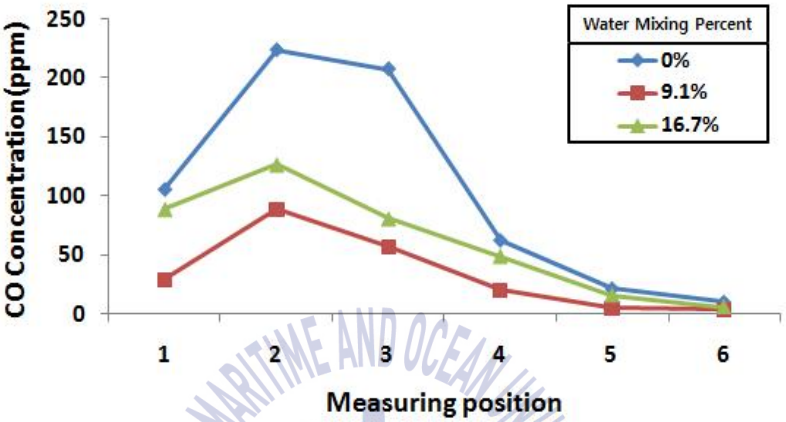


Collection @ kmou

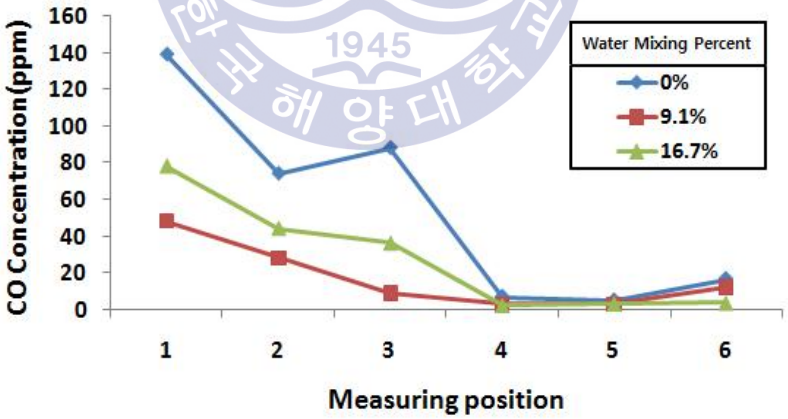
Fig. 4.18은 흡기 개도율과 물 혼합률이 변화할 때 일산화탄소 배출 농도의 변화를 나타낸다. 흡기 개도율이 100%이고 물 혼합률이 0% 일 때 일산화탄소 농도는 분사노즐에서 멀어지는 측정위치 2, 3에서 200 ppm 이상의 높은 값을 나타내며 이후에는 줄어들어 연도로 배출될 때는 매우 낮은 값을 나타낸다. 이는 공연비가 충분히 높은 경우 나타나는 연소현상으로 연소시작 반응과 함께 발생한 CO의 증가와 CO의 연소에 의한 이산화탄소의 생성으로 CO를 소모하는 반응의 결과이다. 물 혼합률이 9.1% 일 때 가장 낮은 값을 나타내며 16.7% 일 때 다시 증가되는 것을 알 수 있다. 흡기 개도율이 75%, 50%로 줄어들 경우 산소가 부족하여 연소 초기에는 CO의 농도가 줄어들다가 불완전 연소의 증가로 CO 농도가 다시 증가되는 현상을 나타낸다. 그러나 물 혼합률 16.7%의 경우는 흡기 개도율 50%까지 연속적으로 CO의 농도가 낮아짐을 보이는데 이는 에멀젼 연료의 미소폭발과 분사량 증가에 따른 연료 분포의 넓은 확산에 따라 흡입되는 공기를 충분히 이용한 결과이다. 배가스가 연도를 빠져나가는 측정위치 6의 경우 흡기 개도율이 100%, 75%까지는 모두 낮은 값을 나타내지만, 50% 개도율에서 물 혼합률 16.7% 일 때는 낮은 값을 유지하다가 물 혼합률 9.1% 일 때는 CO 배출농도가 크게 증가하고 물 혼합률 0% 일 때 더욱 증가되는 것을 알 수 있다.



Collection @ kmou



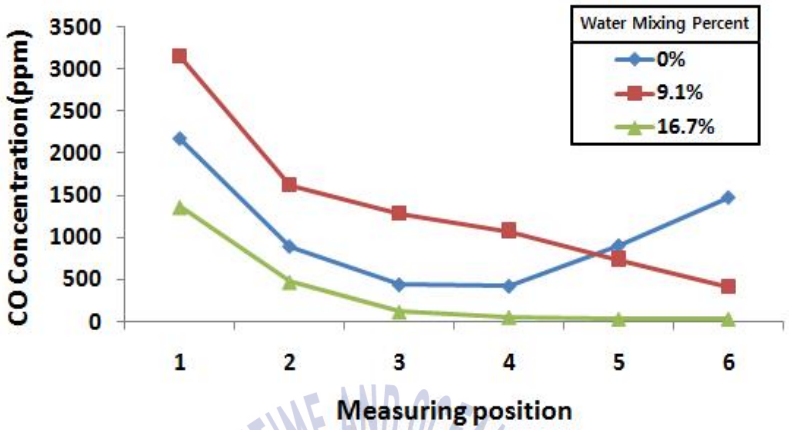

(a) Opening 100%



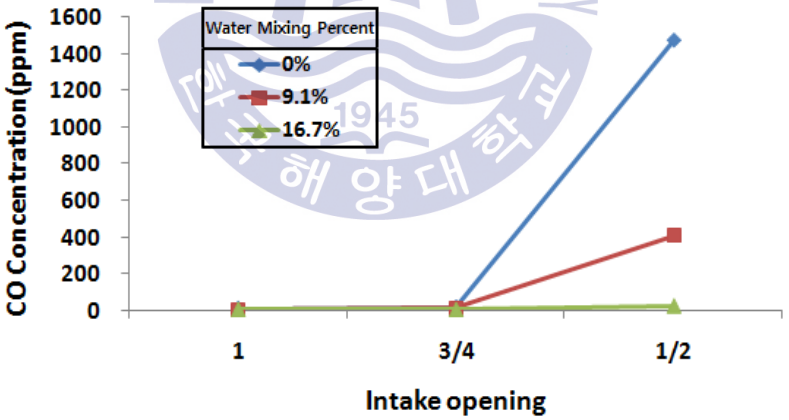

(b) Opening 75%



Collection @ kmou




(c) Opening 50%




(d) at position 6

Fig. 4.18 CO concentration variation with intake opening



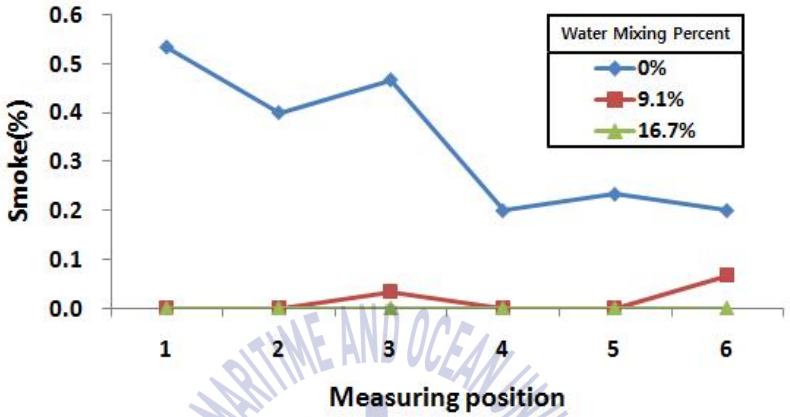
Collection @ kmou

Fig. 4.19는 흡기 개도율과 물 혼합률이 변화할 때의 스모크 농도 변화를 나타낸다. 흡기 개도율이 100%인 경우 모든 물 혼합률에서 0.5% 이하의 매우 낮은 값을 나타낸다. 흡기 개도율이 75% 일 때 물 혼합률 0%인 디젤오일의 경우 3% 내외에서 스모크 량이 증가되지만 물 혼합률 16.7%에서는 거의 0%를 유지한다. 흡기 개도율 50%의 경우 물 혼합률 0%에서 스모크 량은 60% 정도의 매우 높은 값을 나타내며, 물 혼합률 9.1%의 경우도 35% 내외의 높은 값을 나타낸다. 물 혼합률 16.7% 경우는 연속적으로 스모크 량이 줄어들어 배가스 출구에서는 매우 낮은 값을 보여준다. 배가스 출구를 기준으로 할 때 물 혼합률 16.7% 경우 물 혼합률 0%인 디젤오일과 비교하여 97%의 높은 저감률을 나타낸다.

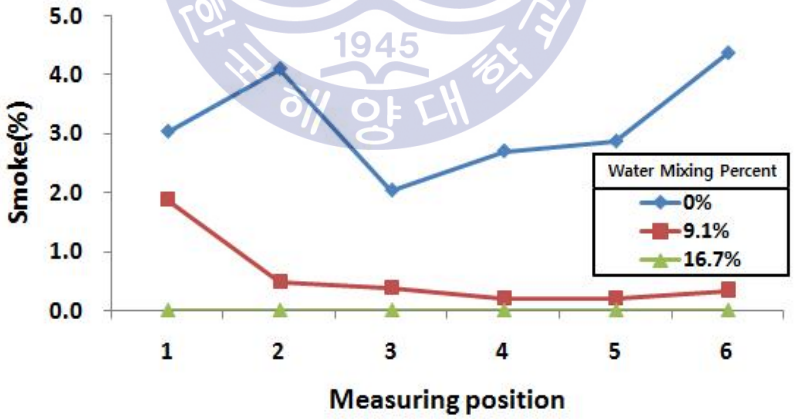
KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
한국해양대학교
1945



Collection @ kmou



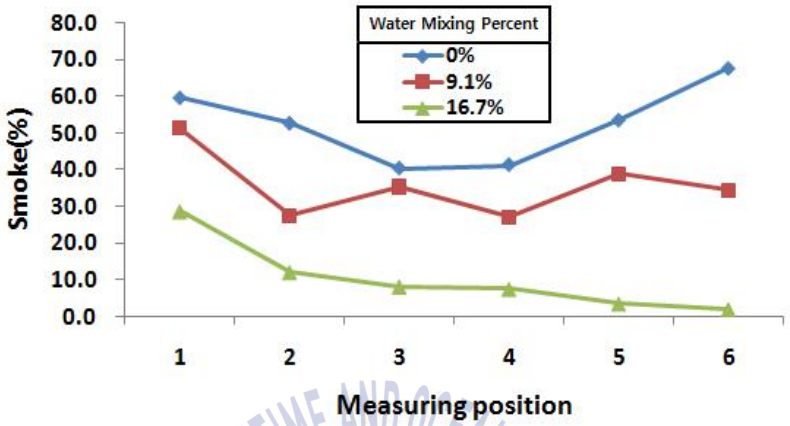

(a) Opening 100%



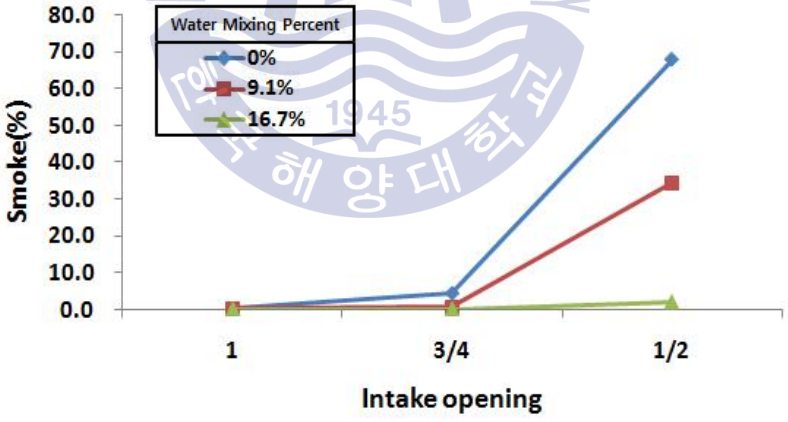

(b) Opening 75%



Collection @ kmou




(c) Opening 50%




(d) at position 6

Fig. 4.19 Smoke concentration variation with intake opening



Collection @ kmou

4.3.4 물 혼합 연료 보일러 버너 특성

물 혼합 연료가 보일러 버너 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2가지 경우로 실험을 하였다. 첫 번째는 연소실의 온도 및 배기 배출특성을 유사하게 유지하면서 연료 공급량과 흡기량을 조절함으로써 효율에 미치는 영향을 실험 분석 하였으며, 두 번째는 연료 공급량과 흡기량을 동일하게 유지하면서 배가스 농도를 계측하여 배기에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 4.20은 물 혼합률 0%와 16.7% 일 때 유량을 적절히 조절하여 연소실 내부의 온도분포를 비교한 것이다. 디젤 오일의 공급유량은 물 혼합률 0%인 경우 250 cc/min, 물 혼합률 16.7%의 경우 220 cc/min이며 물 공급유량은 44 cc/min이다. 연소실 중심축에서의 온도분포는 화염의 중간에는 물 혼합률 16.7%의 경우가 높지만 처음과 끝부분은 유사한 값을 나타낸다. 반경방향으로도 물 혼합 연료의 경우가 약간 높은 분포를 나타낸다. 이는 보일러의 부하, 즉 가열량이 물 혼합 연료의 경우가 약간 높다는 것을 나타낸다. 동일한 조건에서 측정한 스모크 량은 Fig. 4.21에서 보여주는 것처럼 배가스 출구에서 물 혼합률 0%와 물 혼합률 16.7%에서 공급유량을 12% 저감할 때 동일한 값을 갖는다. 이때의 일산화탄소와 질소산화물의 배출농도는 Fig. 4.22에 나타냈다. CO는 배가스 출구에서 물 혼합 연료가 약간 높게 나타났으며 $NO_X$는 물 혼합 연료의 경우 45% 저감되었다. 본 실험버너의 경우 위의 결과로부터 물 혼합 연료를 사용하면 연료 소모율을 12% 이상 저감시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.



Collection @ kmou

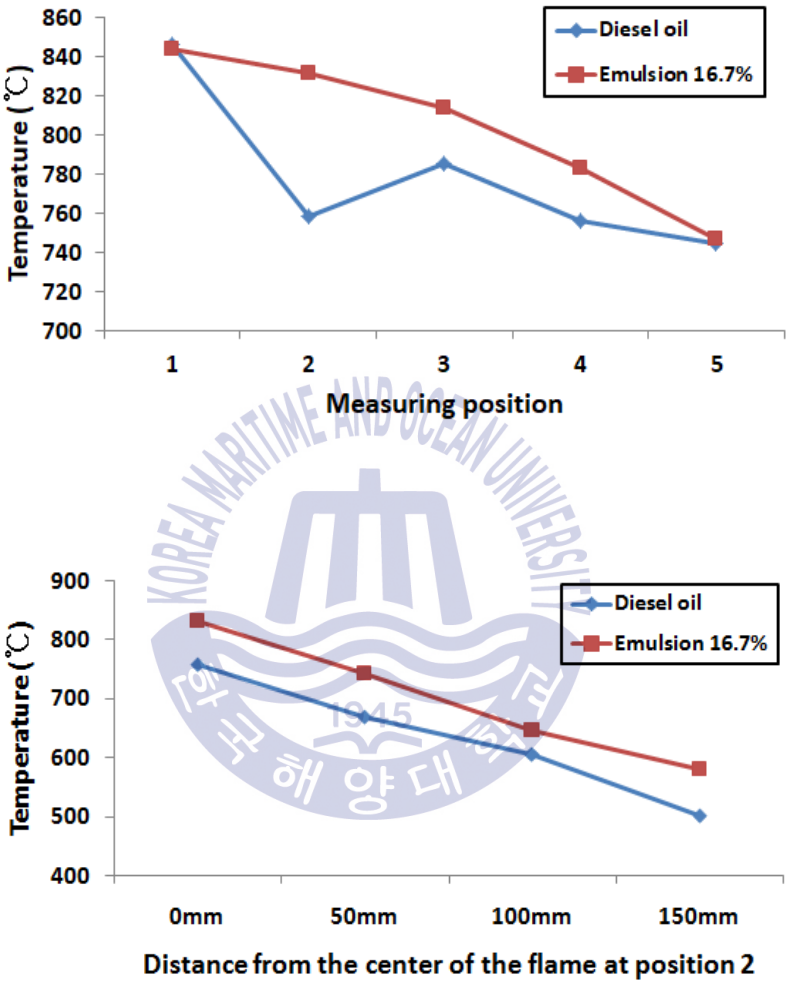



Fig. 4.20 Comparison of flame temperatures



Collection @ kmou

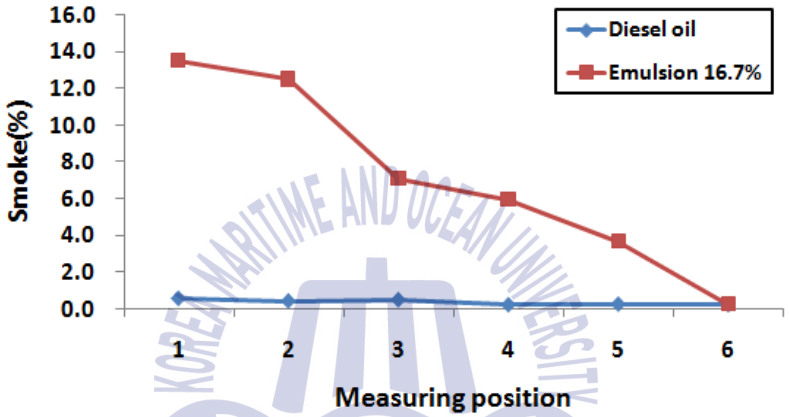



Fig. 4.21 Comparison of smoke percents



Collection @ kmou

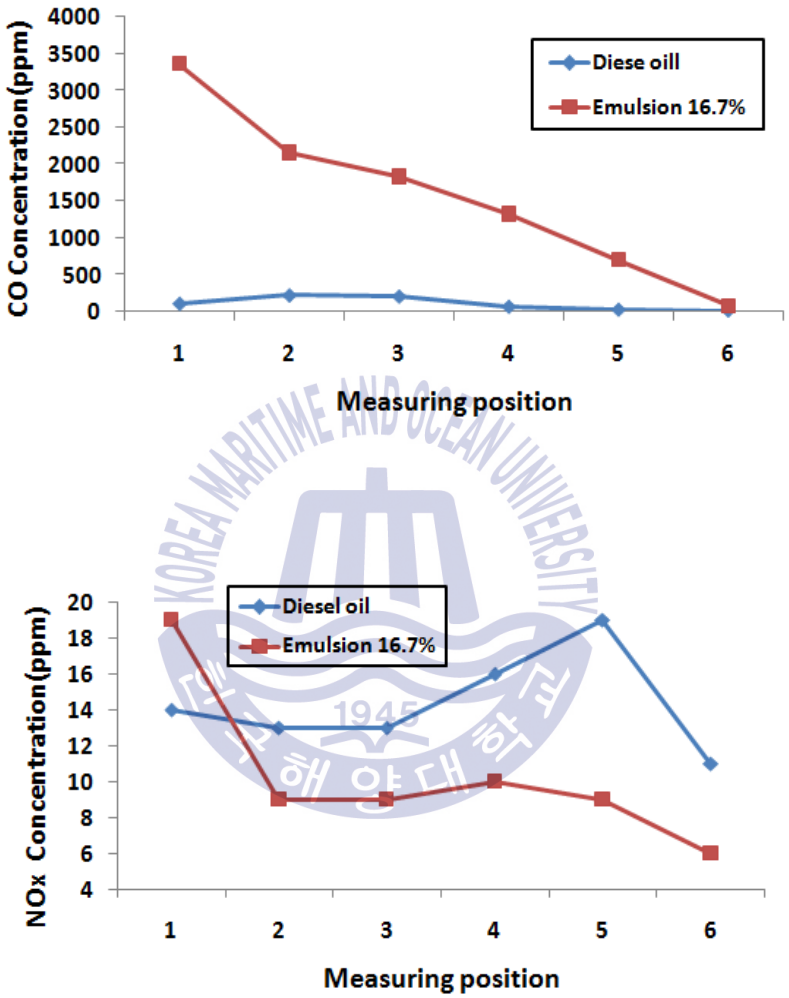



Fig. 4.22 Comparison of CO and $NO_X$ concentrations



Collection @ kmou

Fig. 4.23은 물 혼합률 0%인 디젤오일 경우와 물 혼합률이 16.7%이고 디젤오일 공급량을 12% 줄인 경우인 버너 부하와 스모크량을 유사하게 맞춘 경우의 질소산화물 배출농도를 비교한 그래프이다. 두 경우 모두 20 ppm 이하의 낮은 값을 나타내지만 물 혼합 연료의 경우 버너 근처에서만 약간 높은 값을 나타내고 이후부터 낮은 값을 유지한다. 배가스 배출위치에서는 45.5%의 질소산화물 저감을 나타낸다.

KOREA MARITIME AND OCEAN UNIVERSITY
1945
한국해양대학교



Collection @ kmou

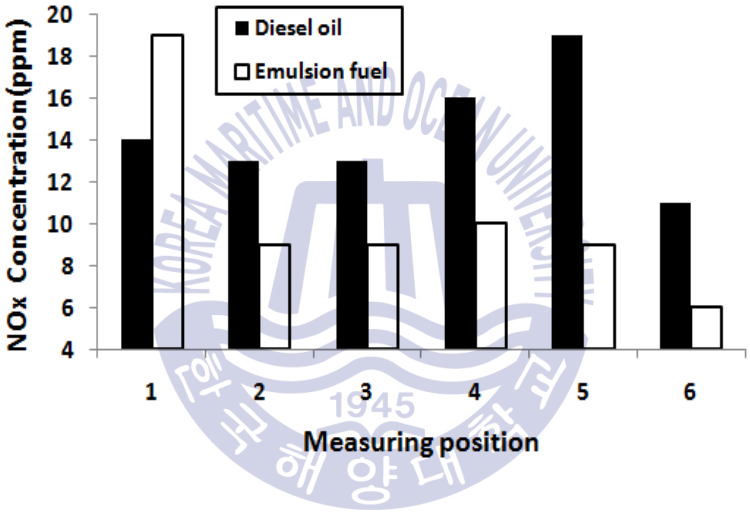



Fig. 4.23 $NO_X$ comparisons between diesel and the emulsion of water mixing percent of 16.7% and fuel consumption reduction of 12%



Collection @ kmou

Fig. 4.24는 흡기 개도율이 50% 일 때 물 혼합률 0%와 16.7% 각각의 경우에 일산화탄소와 스모크 농도를 나타낸 것이다. 일산화탄소와 스모크 농도의 변화는 매우 유사한 경향을 나타내는데, 물 혼합률 0%의 경우 버너 근처에서 매우 높은 값을 나타낸 후에 중간 부분에서 다소 줄어든 후에 화염 후류에서 다시 크게 증가 된다. 이는 일산화탄소와 스모크 모두 불완전 연소에 의한 생성물로 급기량의 부족이 원인이다. 그러나 물 혼합 연료의 경우 연속적으로 저감되어 배가스 배출시점에서 매우 낮은 값을 나타내는데 이는 액적 미세 폭발과 유동의 활성화로 흡입된 공기를 충분히 이용한 결과로 판단된다. 결과적으로 동일한 흡기량에서 일산화탄소는 98.5%, 스모크는 97.2% 저감되었다.



Collection @ kmou

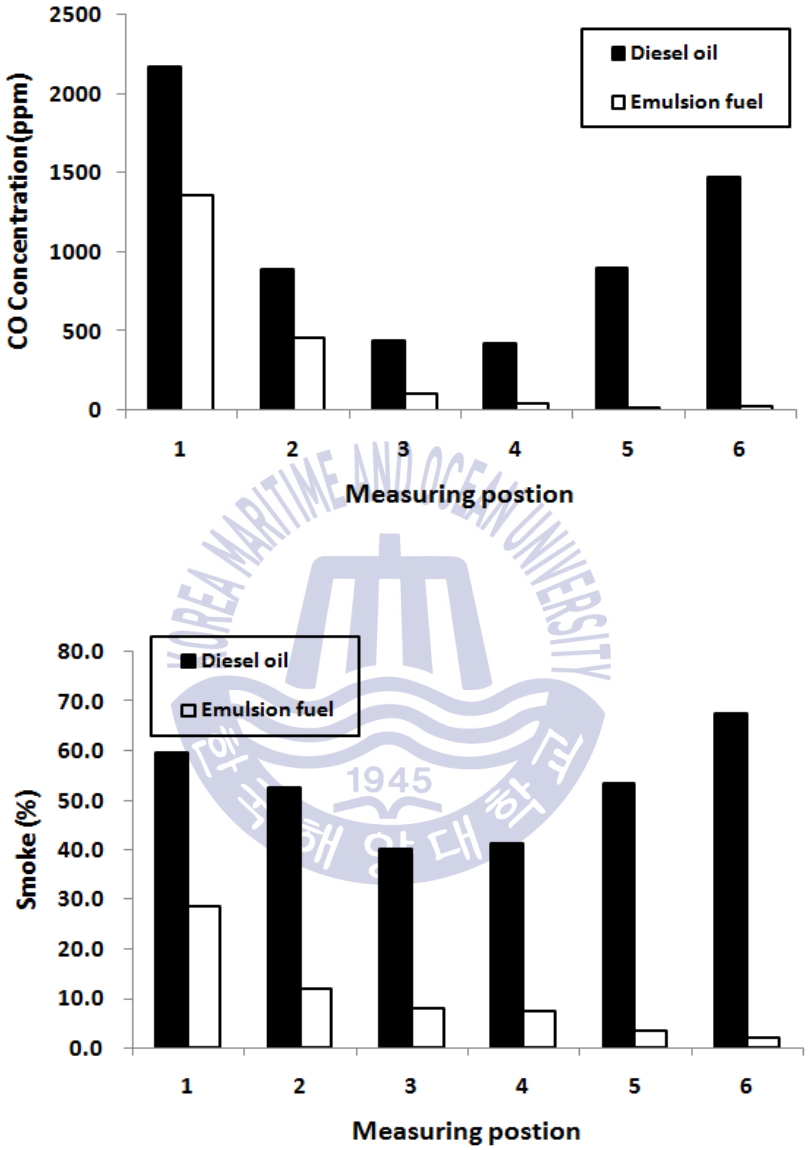



Fig. 4.24 Comparisons of CO and smoke between diesel and emulsion 16.7% in the 50% opening case



Collection @ kmou

4.3.5 요약

분사 노즐 직전에 간단하게 부착하여 연속적으로 순환시켜 미립화를 유지시키는 하이브리드형 물 혼합 연료장치를 부착한 보일러 버너 성능을 실험한 결과는 다음과 같다.

1) 화염 거동 : 디젤화염은 화염의 중심부에 높은 휘도를 나타내며 연소가 집중됨을 나타낸 반면, 물 혼합 에멀젼 화염은 화염의 휘도가 전체적으로 낮아지며 화염의 측면부와 후류부로 조각화염이 넓게 분포되는 구조를 갖는다.

2) 화염 온도 : 동일한 디젤유량과 흡기개도의 경우는 디젤화염이 높은 온도분포를 나타내지만, 흡기유량을 조절하여 동일한 배기상태를 유지하는 경우는 물 혼합 에멀젼 화염이 11% 이상 높은 온도분포를 나타낸다.

3) 효율 : 연소실 내부온도와 배기상태를 유사하게 유지한 경우 연료소모율이 12%이상 저감되었다.

4) 배기 : 질소산화물은 동일한 연소실 온도와 스모크 배출상태에서 45.5% 저감되었으며, 일산화탄소와 스모크는 동일한 흡기유량에서 각각 98.5%와 97.2% 저감되었다.



Collection @ kmou

# 제 5 장 결 론

습공기가 보일러 버너 화염특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 흡기 중에 가스상 수분함량의 변화를 주어 분석한 수치해석 결과와 물 혼합 에멀젼 연료의 연소 안정성을 향상시킨 하이브리드형 혼합장치를 적용한 실험 결과는 다음과 같다.

첫째, 가스상 수분함량 0%~20%까지 7개의 케이스(case)에 대해 연소온도, CO, $CO_2$, NO 발생량에 대해 분석하였다.

1) 가스상 수분함량이 0%~20%까지 증가할수록 유동 최대속도는 45.5 m/s에서 38.6 m/s 까지 15.2% 감소하였고, 연소온도는 2,110 K에서 1,795 K까지 14.9% 낮아졌다.

2) 가스상 수분함량이 증가하면서 NO 최대질량분율은 196 ppm에서 9 ppm까지 큰 폭으로 감소하였으며 특히 가스상 수분 5%일 때 56.1%의 감소율을 보였다. 이는 열적(thermal) NO 생성에 영향을 미치는 1,800 K이상의 영역이 급격히 감소하였기 때문으로 파악된다.

3) NO 질량분율이 가장 큰 폭으로 감소한 경우는 가스상 수분 2.5% 함량일 때 38.1% 감소하였고, 이때 CO 질량분율은 2.5% 증가, $CO_2$ 질량분율은 1.5% 감소하였다.



Collection @ kmou

둘째, 물 혼합 에멀젼 연료의 연소 안정성을 향상시킨 하이브리드형 혼합장치를 적용하여 보일러 버너에서 화염 거동 및 화염온도, 배기가스를 비교 분석하였다.

1) 화염 거동 : 디젤화염은 화염의 중심부에 높은 휘도를 나타내며 연소가 집중됨을 나타낸 반면, 물 혼합 에멀젼 화염은 화염의 휘도가 전체적으로 낮아지며 화염의 측면부와 후류부로 조각화염이 넓게 분포되는 구조를 갖는다.

2) 화염 온도 : 동일한 디젤 유량과 흡기개도의 경우는 디젤화염이 높은 온도분포를 나타내지만, 흡기유량을 조절하여 동일한 배기상태를 유지하는 경우는 물 혼합 에멀젼 화염이 11% 이상 높은 온도분포를 나타낸다.

3) 효율 : 연소실 내부온도와 배기상태를 유사하게 유지한 경우 연료소모율이 12% 이상 저감되었다.

4) 배기 : 질소산화물은 동일한 연소실 온도와 스모크 배출상태에서 45.5% 저감되었으며, 일산화탄소와 스모크는 동일한 흡기유량에서 각각 98.5%와 97.2% 저감되었다.

위의 결과를 종합하면 가스상 수분함량 7.5%일 때가 NO 감소효과가 크고, CO의 증가는 상대적으로 적은 최적의 케이스로 판단되며, 버너성능 실험결과는 연료소모율이 12%이상 저감되고 스모크와 $NO_X$, CO는 최소로 발생된 물 혼합률 16.7%일 때가 최적의 조건으로 판단된다.



Collection @ kmou

# 참고문헌


1. 배귀남, “미세먼지 오염의 과학적 이해와 합리적 판단”, 계간감사, vol. 131, pp. 20-27, 2016.
2. Turns, S. R., “An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Third Edition,” Mc-Graw Hill, pp. 4-11, 2012.
3. Coghe A., Solero G., and Scribano,G., “Recirculation phenomena in natural gas swirl combustor” ,Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 28, pp. 709-714, 2004.
4. Takashi, T., and Shingeru, S., “The Effect of Fuel-Air Mixing on $NO_X$ Formationin Non-Premixed Swirl Burners”, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 2733-2739, 1996.
5. Feese, J. J. and Truns, S. R., “Nitric Oxide Emission from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition,” Combustion and Flame, vol. 113, pp. 66-78, 1998.
6. Toqan, M. A., Beer, J. M., Jansohn. P., Sun. N., Testa. A., and Teare, J. D., “Low $NO_X$ Emission from Radially Stratified Natural Gas-Air Turbulent Diffusion Flames,” Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1391-1397, 1992.
7. Javier M. Ballester, Cesar Dopazo, Norberto Fueyo, Manuel Hernandez, and pedro J. Vidal, “Investigation of low $NO_X$ strategies for nautral gas combustion,” Fuel, Vol. 76, No.5, pp. 435-446, 1997.
8. A.Zaidi and S.Kumar, “Combustion control techniques to reduce $NO_X$ emissions from industrial boilers”, PULP & CANADA , vol. 96, no. 6, pp. 45-52, 1995.
9. Shigeru Hayashi, Hideshi Yamada, Kazuo Shimodaira, and Tohru Machida, “$NO_X$ emissions from Non-Premixed, direct fuel injection methane burners at High-Temperature and elevated pressure conditions”, Twenty-Seventh symposum (International) on Combustion/ The combustion institute, vol. 27, no. 2, pp. 1833-1839, 1998.




Collection @ kmou

10. C.Andrew Miller, A.Dahman Touati, Julian Becker, and Jost O.L.Wendt, "$NO_X$ abatement by Fuel-Lean reburning: Laboratory combustor and Pilot-Scale package boiler results", Twenty-Seventh symposum (International) on Combustion/ The combustion institute, vol. 27, no. 2, pp. 3189-3195, 1998.

11. Jung Bin Lee and Sang Done Kim, "$NO_X$ reduction by hydrazine in a Pilot-Scale reactor", Chemical engineering journal, vol. 69, no. 2, pp. 99-104, 1998.

12. Paschereit, C. O., Schuermans, B. and Buche, D., "Combustion Process Optimization Using Evolutionary Algorithm," ASME Turbo Expo, pp. 281-292, 2003.

13. Dong-Hoon Yoo, Osami Nishida, Hirotsugu Fujita, Jae-Keun Lim, "Combustion characteristics of emulsified C-heavy oil in constant volume combustion with high temperature and pressure", Journal of the korean society of marine engineering , vol. 34, no. 2 , pp. 243-249, 2010.

14. Chun Zou et al., "The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 75, pp. 12-18, 2014.

15. David Castineira, Thomas F. Edgar, "CFD for Simulation of Steam-Assisted and Air-Assisted Flare Combustion Systems", Energy Fuels, pp. 1044-1056, 2006.

16. M. Kuznetsov et al., "Laminar burning velocities of hydrogen-oxygen-steam mixtures at elevated temperatures and pressures", Proceedings of the Combustion Institute, Vol 33, pp. 895-903, 2011.

17. D Zhao et al., "Behavior and effect on $NO_X$ formation of OH radical in methane-air diffusion flame with steam addition", Combustion and Flame, Vol 130, pp. 352-360, 2002.

18. Linda G. Blevins et al., "An Experimental Study of $NO_X$ Reduction in Laminar Diffusion Flames by Addition of High Levels of Steam", ASME, Vol 3, 1995.

19. Guven Gonca et al., "Comparison of steam injected diesel engine and Miller cycled diesel engine by using two zone combustion model", Journal of the Energy Institute, Vol 88, pp. 43-52, 2015.



Collection @ kmou

20. Guven Gonca et al., “The effects of steam injection on the performance and emission parameters of a Miller cycle diesel engine”, Energy, Vol 78, pp. 266-275, 2014.

21. A. Parlak et al., “Effects of water steam injection on direct injection diesel engine operating with partial loads”, Journal of the Energy Institute, Vol 86, pp. 202-209, 2013

22. A. Parlak et al., “New method to reduce $NO_X$ emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system”, Journal of the Energy Institute, Vol 85, pp. 135-139, 2012.

23. 정진도, “Journal of energy engineering, 에너지공학” v. 12 no. 4 , pp. 267-273, 2003.

24. Shuichi Kajitani and Norihiro Sawa, “輕油油·水(W/O形)乳化燃料に關する硏究”, 日本機械學會論文集(B編) 56卷531号(1990－11), pp. 3542-3547, 1990.

25. Yukio Mizutani and Akio Taki, “水乳化燃料噴霧の 燃燒·排出特性と 燃燒機構”, 日本機械學會論文集(B編) 47卷424号(昭56.12), pp. 2386-2391, 1982.

26. M. C. Park, B. S. Kim and S. H. Oh, “An Experimental Study on Vaporization and Combustion Behavior for Single Droplets of Water-in-Oil Emulsified Fuels”, 한국연소학회지 Vol. 5, No. 1, pp. 81-89, 2000.

27. Kyoji Kimoto, Yukio Owashi and Yoshihiro Omae, “加熱面での乳化燃料油滴の蒸發擧動”, 日本機械學會論文集(B編) 52卷477号(昭61-5), pp. 2275-2284, 1987.

28. V. R. Vedruchenko, “The Dynamics of Droplet Transformations in the Flame of a Water-Fuel Oil Emulsion Used as the Fuel for Boiler Installations”, Thermal Engineering, Vol. 47 No. 2, pp. 156-160, 2000.

29. Yasufumi Yoshimoto, Minoru Tsukahara and Tadashi Murayama,, “乳化燃料のミクロ爆發に關する硏究”、日本機械學會論文集(B編) 55卷519号(1989－11), pp. 3538-3543, 1989.

30. R. A. Altenkrich, D. O. Evans, “水面に浮遊した燃料の液面燃燒”、日本機械學會論文集(B編) 56卷 526号(1990－6), pp. 1775-1779, 1990.



Collection @ kmou

31. Houng-Soo Kim, “Journal of the Korean Society of Marine Engineering”, v. 30 no. 1, pp. 88-92, 2006.

32. Kadota, T. Yamasaki, H., “Progress in energy and combustion science” , v. 28 no. 5, pp. 385-404, 2002.

33. 박현미, 어연우, 백승우, “Analytical science & technology”, v. 15 no. 5 , pp. 427-432, 2002.

34. 황상호, 배회화, 김덕줄, “Journal of ILASS-Korea, 한국액체미립화학회지”, v. 8 no. 2 , pp. 38-45, 2003

35. 정인철, “Construction equipment, 건설기계정보”, no. 150 , pp. 56-62, 2006.

36. J. W. Park, K. Y. Huh, K. H. Park, “Experimental Study on the Combustion Characteristics of Emulsified Diesel in a Rapid Compression and Expansion Machine”, Vol. 214, Part D 05699, pp. 579-585, 2000.

37. Misubishi Oil. Co. Ltd, “Low-$NO_X$ Burner Using Fuel Mixed with Emulsified Water”, 98-07-007-01, 1998.

38. S. R. Gollahalli, M. K. nasrullah and J. H. Bhashi, “Combustion and Emission Characteristics of Burning Sprays of a Residual Oil and Its Emulsion with Water”, COMBUSTION AND FLAME 55 pp. 93-103, 1984.

39. Douglas C. Rawlins, Geoffrey J. Germane, Paul O. Hedman and L. Douglas Smoot, “Laboratory-Scale Combustion of Coal-Water Mixtures”, COMBUSTION AND FLAME 63 pp. 59-72, 1986.

40. Da-Hua Liu, Ali M.Zghoul, Zongwen Li, Bon-Siau Tan, Karl L.Lockwood and Robert H.Essenhigh, “High Intensity Combustion of Coal with Water Injection”, COMBUSTION AND FLAME 63, pp. 49-57, 1986.

41. H. Jahani and S. R. Gollahalli, “Characteristics of Burnubg Jet a Fuel and Jet a Fuel-Water Emulsion Sprays”, COMBUSTION AND FLAME 63, pp. 145-154, 1980.

42. Hiroyuki Hiroyasu, Masataka Arai, Keiya Nishida, “乳化重質燃料の燃機構に關する研究”, 日本機械學會論文集(B編), pp. 1182-1189, 1983.

43. Susumu Kohketsu, Kazutoshi Mori, Kenji Sakai and Hiroshi Nakagawa, “Reduction or



Collection @ kmou

Exhaust Emission with New Water Injection System in a Diesel Engine", SAE PAPER 960033, pp. 51-58, 1996.

44. Peter Svahn, "$NO_X$ Reduction by Direct Water Injection in Wartsila Diesel Medium Speed Diesel Engines", Third Nordic Conference on SOx and $NO_X$ from Heat and Power Generation, 1996.

45. N. Hambright, R. W. Burrahm and V. O. Markworth, "Feasibility of Water Injection for Particulate Removal in Large Turbocharged Diesel Engine", NTIS A minerals research contract report, BuMines OFK 84-82, 1981.

46. Masahiro Ishida, Hironobu Ueki and Daisaku Sakaguchi, "Prediction of $NO_X$ Reduction Rate due to Port Water Injection in a DI Diesel Engine", SAE PAPER 972961, pp. 27-37, 1997.

47. 유경현, 윤용진, 오영택 "Transactions of the Korean society of mechanical engineers. B. B, 大韓機械學會論文集", v. 26 no. 12 , pp. 1756-1762, 2002

48. E. H. Afify, "Performace Combustion Characteristics and Exhaust Emission of a Direct Injection Diesel Engine using Water/Oil Emulsions as Fuel", ALO 19435, 3E-G, 1985.

49. Yasfumi Yoshimoto, Toshinori Kuramoto, Ziye Li and Minoru Tsukahara, "Influence of Water Content Ratio on Combustion Fluctuation of Diesel Engine Using Emulsified Fuel", BULLETIN of THE Marine Engineering Society in Japan vol. 26, No. 1, pp. 15-23. 1998.

50. Yasfumi Yoshimoto, Minoru Tsukahara and Toshinori Kuramoto, "Improvement of BSFC by Reducing Diesel Engine Cooling Losses with Emulsified Fuel", SAE PAPER 962022, 1996.

51. G. B. O'Neel, T. W. Ryan III R. W. Waytulonis, "Control of Diesel Exhaust Emissions in Underground Coal Mines-Steady-State and Transient Engine Tests with a Five Percent Water-In Fuel Micro emulsion", SAE PAPER 830555, pp. 77-83, 1983.

52. T. J. Caffatarr, T. W. Ryan III, G. B. O'Neel, R. W. Waytulonis, "Control of Diesel



Collection @ kmou

Exhaust Emissions in Underground Coal Mines-Single-Cylinder Engine Optimization for Water-In Fuel Micro emulsion", SAE PAPER 830553, pp. 55-66, 1983.

53. G. E. Andrews, K. D. Bartle, S. W. Pang, A. M. Nurein and P. T. Williams, "The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels", SAE PAPER 880348, pp. 1-9, 1988.

54. A. Lawson, A. J. Las, "Modified Fuels for Diesel Engines by Application of Unstabilizes Emulsions", SAE PAPER 790925, pp. 46-79, 1979.

55. Noboru Miyamoto, Hide Yuki Ogawa, Jianxin Wang and Kenji Yamazaki, "Simultaneous Reductions in Diesel $NO_X$ and Smoke Emissions with Aqueous Metal-Salt Solutions Directly Injected into the Combustion Chamber", SAE PAPER 961164. pp. 29-34, 1996.

56. 서희준, 오승묵, 허환일, "Transactions of Korea society of automotive engineers, 한국자동차공학회논문집", v. 10 no. 4, pp. 60-68, 2002.

57. Yasufumi Yoshimoto, Minoru Tsukahara, Ziye Li and Hinoshi Sano, "$NO_X$ Reduction with EGR in a Diesel Engine Using Emulsified Fuel", SAE PAPER 982490, 1998.

58. R. T. Johnson, J. O. Stoffer, "Performance of Stabilized Diesel Fuels Containing Alcohols and Water in Single and Multicylinder Direct Injection Engines", SAE PAPER 830557, pp. 91-104, 1983.

59. N. Khan and S. R. Gollahovli, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Burning Unstabilized Emulsions of Diesel Fuel with Water, Methanol, and Ethanol", SAE PAPER 811210, pp. 27-36, 1981.

60. Ghojel, J., Honnery, D., Al-Khaleefi, K., "Applied thermal engineering", v.26 no.17/18, pp. 2132-2141, 2006.

61. 임재근, 조상곤, 황상진, "Journal of the Korea society for power system engineering, 한국동력기계공학회지", v. 11 no. 1, pp. 51-55, 2007.

62. 김인환, 차성기, "보일러의 저 $NO_X$ 연소 시스템", 강림기연.

63. A. Zaidi and S. Kumar, "Combustion Control Techniques to Reduce $NO_X$ Emissions from Industrial Boilers", PULP & CANADA 96:6, 1995.



Collection @ kmou

64. A Keer, R Bautista, L Y Manzanares, E S Garbett and J Swithenbank, "$NO_X$ Reduction in a Pulverised-Coal Swirl Burner with High-Velocity Jets", Journal of the Institute of Energy, pp. 71-80, 1998.

65. Shigeru Hayashi, Hideshi Yamada, Kazuo Shimodaira and Tohru Machida, "$NO_X$ Emissions from Non-Premixed, Direct Fuel Injection Methane Burners at High-Temperature and Elevated Pressure Conditions", Twenty-Seventh Symposum(International)on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1833-1839, 1998.

66. C. Andrew Miller, A. Dahman Touati, Julian Becker and Jost O. L. Wendt, "$NO_X$ Abatement by Fuel-Lean Reburning: Laboratory Combustor and Pilot-Scale Package Boiler Results", Twenty-Seventh Symposum(International)on Combustion/The Combustion Institute, pp. 3189-3195, 1998.

67. W. Polike, W. Dobbeling, T. Sattelmayer, D. G. Nicol, "A $NO_X$ prediction Scheme for Lean-Premixed Gas turbine based on detailed Chemical Kinetics.", ASME, Vol. 118, pp. 775-776, 1996.

68. Stephen R. Turns, "An Introduction to Combustion Concepts and Applications", McGraw-Hill, pp. 179-186, 2012.



Collection @ kmou