



## 저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

工學碩士學位論文

대용량 MILD 연소로에서 LNG와 합성가스  
혼합연료의 연소특성



安全工學科

李豪顯

工學碩士學位論文

대용량 MILD 연소로에서 LNG 또는  
LNG/합성가스 혼합연료의 연소특성

指導教授：吳 昌 備

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2014年 8月

釜慶大學校大學院

安全工學科

李 豪 顯

李豪顯의 工學碩士 學位論文을  
認准함

2014年 8月



主 審 工學博士 愼 晟 佑 (인)

委 員 工學博士 李 義 周 (인)

委 員 工學博士 吳 昌 備 (인)

## 요약문

대부분의 산업체 열 설비 및 동력장치는 화석연료의 화학에너지를 연소과정을 통해 열에너지로 변환하여 사용하는 구조로 되어 있으며, 이러한 화석연료의 연소과정에는 필연적으로 지구온난화 가스인  $\text{CO}_2$ , 대기오염물질인  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , 매연 (Soot) 등을 배출하게 된다. 하지만,  $\text{CO}_2$ 는 연소과정에서 필연적으로 생성되게 된다. 이를 줄이기 위해서 열효율을 높이는 방법이 가장 유용한 방법으로 알려져 있다. 오염물질인  $\text{NO}_x$  와 매연 등은 산성비를 통하여 대기와 수질 그리고 토양 등을 오염시키는 주 오염원이며, 자체가 갑상선 암과 다양한 호흡기 질환을 유발하는 물질로 알려져 있어 이에 관한 저감 대책이 최근 절실한 상황이다.

최근에는 선진국을 중심으로 개발되고 있는 무 화염 연소라고도 불리는 MILD 연소기술은 위에서 요구되는 고효율뿐만 아니라 저  $\text{NO}_x$ , 저 매연과 같은 저공해를 동시에 달성할 수 있는 최신 연소기법이다. 또한, 합성가스는 저급연료를 가스화하여 얻어질 수 있는 연료로서 연소에 이용된다면 대체연료의 활용에 좀 더 유리하게 된다. 따라서, LNG나 LNG+합성가스 연료를 이용한 MILD 연소기술을 개발하는 것은 산업체 열설비의 연료저감 및 다양화뿐만 아니라  $\text{CO}_2$ 와 같은 공해물질 저감을 동시에 이룰 수 있는 기술로서 필수적이라 할 수 있다. 이러한 기술들은 일본과 독일 등과 같은 선진국에서 많이 개발이 되어 있으나, 국내에서는 선진국에서 개발한 연소기의 기본 틀에서 벗어나지 못하는 실정이다. 그러므로 순수 국내 기술을 이용한 MILD 연소기술개발은 국내의 공업용 연소로 및 산업용 보일러 개발에 필요한 중요한 정보를 얻는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 LNG와 LNG+합성가스를 원료로 하는 대용량 MILD 연소기를 설계 및 제작을 실시하였고, 제작이 완료된 대용량 MILD 연소기의 성능 평가를 위하여 연료 노즐 배열, 질량 주기 최적화, 그리고 당량비 변화에 따른 MILD 연소 및

오염물질 배출특성에 대한 성능평가 실험을 실시하였다.

연료공급 노즐 배열 최적화 실험 조건으로는 두 가지가 있다. 첫 번째 조건은 MILD 연소기 중심부에서 1개의 내경이 6 mm인 노즐에서 연료를 공급할 수 있으며, 또 다른 조건은 내경이 20 mm인 공기공급 노즐의 주위에 환형 위치에 배치된 노즐내경이 각 3.6 mm인 6개의 노즐에서 공급할 수 있도록 되어있다. 두 가지의 연료공급 위치 조건을 변화시킴에 따라 연소성능의 변화를 관찰하였다. 그 결과 6개의 연료노즐을 사용하였을 때보다 1개의 노즐을 사용하였을 때 열재생 성능이 높게 나타났으며, 화염 또한 균일한 무화염 상태를 얻을 수 있었다.

절환시간 최적화 실험은 MILD 연소기 중심부에 있는 1개의 연료노즐과  $\Phi=0.7$ 의 조건을 고정한 상태에서 절환밸브의 절환시간을 9초, 12초, 15초, 18초로 3초씩 증가시키면서 MILD 성능평가를 비교하였으며, 절환시간 12초일 경우에  $\text{CO}_2$ 양이 가장 많이 저감되었다.

당량비 변화에 따른 MILD 연소특성 실험은 앞의 두 실험에서 검증된 MILD 연소성능에 최적화된 조건인 1개의 연료노즐과 절환시간을 12초로 고정한 상태에서 공급하는 공기의 양을 조절하여 총괄 당량비를 0.6, 0.7, 0.8, 0.9로 총 4개의 조건으로 변화시켰을 경우의 MILD 연소특성검토를 하였다. 이 경우 총괄 당량비 0.6조건에서 온도효율과 폐열회수율이 다른 총괄 당량비 보다 낮게 나타남을 확인하였다. 오염물질 배출특성으로 당량비가 과농해질수록  $\text{NO}_x$  배출량은 적게 배출되는 특성을 보였으며, 매연 배출량은 총괄 당량비 0.7 조건에서 가장 낮게 측정 되었다.

LNG연료에 합성가스 혼합비를 30%, 50%로 변화함에 따라서 MILD 성능 실험을 한 결과로는 LNG연료에 합성가스를 혼합함에 따라 온도효율을 증가하지만 열 재생 효율은 미소하게 감소하는 것을 알 수 있었으며, 합성가스를 30% 혼합한 조건에서  $\text{NO}_x$  배출량은 가장 낮은 배출량을 보였으며,  $\text{CO}_2$  저감량은 가장 높은 저감량을 보였다. 매연 배출량은 합성가스를 혼합할수록 많이 줄어드는 것을 알 수 있다.

# Combustion Characteristics for LNG or LNG/Syngas Mixed Fuel in Large-Scale MILD Combustor.

Ho Hyun Lee

Department of Safety Engineering, Graduate School,

Pukyong National University

## Abstract

Common thermal power facilities are used to adopt a combustion process in order to transform the chemical energy of fossil fuels into thermal energy. This combustion process could cause environmental problems, including CO<sub>2</sub>(greenhouse gas) and pollutant emission. However, CO<sub>2</sub> is inevitable generated in a combustion process. As is well known, how to increase the thermal efficiency is the best way to reduce CO<sub>2</sub> formation. NO<sub>x</sub> and Soot are the major source of pollution and cause various breathing problems and cancers. Therefore, the measures of pollutants reduction are necessary.

Moderate or intense low-oxygen dilution(MILD) combustion technology, also known as flameless oxidation(FLOX), is the latest combustion technology that results in high thermal efficiency and also it reduced pollutants emission, such as NO<sub>x</sub>, soot, and CO<sub>2</sub>. Syngas gain from the gasification of low-grade fuel, and also this fuel would help utilize alternative fuel. Developing MILD combustion technology by using LNG (Liquefied Natural Gas) or LNG+Syngas fuel is essential technology in order to reduce fuel consumption in the thermal facilities and to decrease pollutants emission. This technology was first exploited in

advanced countries such as Germany, Italy, and Japan. Therefore, MILD combustion technology that is developed entirely with domestic technology would be efficient for the development of industrial furnaces and boilers to get the important information.

In this study, high-capacity MILD combustor was designed and developed and LNG or LNG+Syngas were used as the fuel. The performance evaluation experiments, such as the arrangement of fuel nozzle, alternating period(t) optimization, and variety equivalence ratio( $\Phi$ ) effect, were investigated to confirm MILD combustor's performance regarding combustion efficiency and pollutants emission.

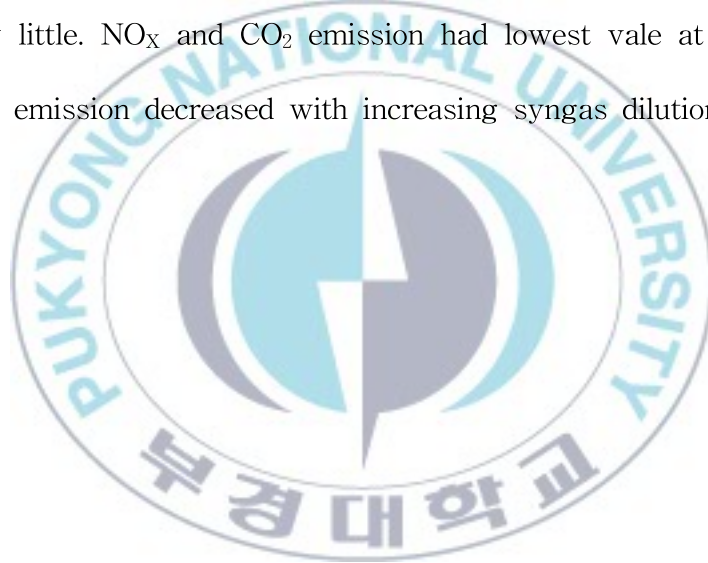
There are two conditions in order to optimize the arrangement of fuel nozzle. The first condition is that it has one fuel jet and it consists of central insulated fuel jet( $\varnothing 6\text{mm}$ ). The second condition is that it has six fuel jet and it consists of regular hexagonal position insulated fuel jet( $\varnothing 3.6\text{mm}$ ). Combustion performance was investigated with this two conditions. As a result, one central fuel jet(the first condition) shows greater thermal recycling performance than six regular hexagonal position fuel jet(the second condition), and also the flame condition showed uniform shape and flameless flame in the first condition.

The experiment of alternating period optimization was performed by using one central fuel jet. Equivalence ratio was fixed at 0.7( $\Phi=0.7$ ) and alternating period was gradually increase from 9 sec to 18 sec.( $t=9, 12, 15, 18$  sec). In case of  $t=12\text{sec}$ , the amount of  $\text{CO}_2$  is reduced much more than other conditions.

In the experiment of variety equivalence ratio conditions, fuel nozzle was fixed at one central nozzle and also alternating period was fixed at 12 sec. In this

experimental condition, the characteristics of MILD combustion was investigated with various equivalence ratio, such as  $\Phi=0.6$ , 0.7, 0.8, and 0.9. For  $\Phi=0.6$ , thermal efficiency and waste heat recovery rate were lowest value than other equivalence ratios.  $\text{NO}_x$  emission gradually decreased with increasing equivalence ratio, and Soot emission had lowest value at  $\Phi=0.7$ .

MILD performance experiments were performed with various syngas dilution rate(0%, 30%, 50%). In this results, thermal efficiency was increased with increasing syngas dilution rate in LNG fuel, and but waste heat recovery rate decreased very little.  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_2$  emission had lowest vale at syngas dilution rate 30%. Soot emission decreased with increasing syngas dilution rate.



# 목 차

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 요약문 .....                          | i      |
| 목차 .....                           | vi     |
| 기호설명 .....                         | viii   |
| 표 목록 .....                         | ix     |
| 그림목록 .....                         | x      |
| <br>제 1 장 서 론 .....                | <br>1  |
| 1.1 연구 배경 .....                    | 1      |
| 1.2 기존의 연구 .....                   | 4      |
| 1.2.1 MILD 연소 기초연구 .....           | 4      |
| 1.2.2 MILD 연소기 개발 연구 .....         | 7      |
| 1.3 연구목적 .....                     | 11     |
| <br>제 2 장 실험 장치 및 방법 .....         | <br>12 |
| 2.1 실험장치 설계 .....                  | 12     |
| 2.1.1 대용량 MILD 연소기 .....           | 14     |
| 2.1.2 열재생기 및 절환 시스템 .....          | 19     |
| 2.2 실험 방법 .....                    | 25     |
| 2.2.1 실험 장비 .....                  | 25     |
| 2.2.3 연소실 내부 온도 및 오염 물질 측정방법 ..... | 27     |
| <br>제 3 장 MILD 연소 특성 평가 방법 .....   | <br>31 |
| <br>제 4 장 대용량 MILD 연소 특성 .....     | <br>35 |
| 4.1 연료공급 노즐 배열 최적화 실험 .....        | 35     |
| 4.1.1 실험 조건 .....                  | 35     |
| 4.1.2 실험 결과 .....                  | 38     |
| 4.2 절환시간 최적화 실험 .....              | 46     |

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| 4.2.1 실험 조건 .....                    | 46     |
| 4.2.2 실험 결과 .....                    | 48     |
| 4.3 당량비 변화에 따른 MILD 연소특성 .....       | 55     |
| 4.3.1 실험 조건 .....                    | 55     |
| 4.3.2 실험 결과 .....                    | 57     |
| 4.4 합성가스 혼합에 따른 MILD 연소 특성 .....     | 62     |
| 4.4.1 실험 조건 .....                    | 62     |
| 4.4.2 실험 결과 .....                    | 64     |
| <br>제 5 장 100kW급 MILD 연소기 운용절차 ..... | <br>75 |
| 제 6 장 결론 .....                       | 77     |
| 참고문헌 .....                           | 80     |
| 부록 (대용량 MILD 연소기 도면) .....           | 84     |



## 기 호 설 명

|                      |                                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------|
| $\eta_T$             | : 온도 효율 [-].                                     |
| $\eta_{Regen}$       | : 폐열 회수율 [-].                                    |
| $\eta_{SYS}$         | : 공정 열효율 [-].                                    |
| $T_{c,in}$           | : 재생기로의 유입공기온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ].           |
| $T_{c,out}$          | : 재생기에서 연소실로 공급되는 배출공기온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]. |
| $T_{h,in}$           | : 연소실에서 재생기로 유입되는 배기가스온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]. |
| $T_{h,out}$          | : 재생기에서 외부로 배류되는 배기가스온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ].  |
| $(\dot{m})_{air}$    | : 공급되는 공기의 유량 [kg/s].                            |
| $(\dot{m})_{fuel}$   | : 공급되는 연료의 유량 [kg/s].                            |
| $(\dot{m})_{ex.gas}$ | : 배출되는 배기가스의 질량유량 [kg/s].                        |
| $N_{mix,dry}$        | : 수분을 제거한 혼합물의 농도 [ppm].                         |
| $N_{fuel}$           | : 연료노즐 수 [ea].                                   |
| $t_{switch}$         | : 절환밸브의 절환시간 [sec].                              |
| $(\dot{m})_{ex.gas}$ | : 배출되는 배기가스의 질량유량 [kg/s].                        |
| $\Phi$               | : 총괄 당량비 [-].                                    |

## 약 어

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| MILD  | : Moderate or Intense Low-oxygen Dilution. |
| CFD   | : Computational Fluid Dynamics.            |
| FLOX  | : Flameless Oxidation                      |
| HiTAC | : High-Temperature Air Combustion          |
| LNG   | : Liquified Natural Gas                    |
| SLPM  | : Sandard Liters Per Minut                 |

## 표 목록

**Table 2.1** Obtained detailed specifications through reference for conventional MILD combustor.

**Table 4.1** Experimental conditions of optimization experiments of configuration for inlet fuel nozzle.

**Table 4.2** Combustion efficiency for array of fuel supply nozzle.

**Table 4.3** Experimental conditions of optimization experiments of configuration for time of switching valve System.

**Table 4.4** Experimental conditions of optimization experiments of global equivalence ratio( $\Phi$ ).

**Table 4.5** Experimental conditions of optimization experiments of dilution rate of syngas.



## 그림 목록

- Fig. 1.1** (Left) Schematic diagram of HiTAC furnace operated with high frequency alternating flow regenerators. (Right) Installation of commercialization of HiTAC.
- Fig. 1.2** (Left) FLOX REGEMAT burner. (Right) Annealing and pickling line in Terni.
- Fig. 2.1** Concept of mixing and combustion in conventional combustor. [15]
- Fig. 2.2** Concept of mixing and combustion in MILD (high-temperature air) combustor. [15]
- Fig. 2.3** The manufacturing of Large-Scale MILD Combustor. (a) Front side view. (b) MILD Combustor in profile of 45° (c) Upper of MILD Combustor. (d) Bottom of MILD Combustor (union condition of heat regenerator).
- Fig. 2.4** Pilot burner in MILD Combustor (direction of tangent for installation in both sides).
- Fig. 2.5** Heat regenerator of MILD Combustor. (a) Fuel/Air stream line and installation for heat regenerator (b) Upper of heat regenerator (c) Bottom of heat regenerator.
- Fig. 2.6** (a) Fill a ceramic beads with inside of heat regenerator (b) Ceramic beads.
- Fig. 2.7** Schematic diagram of switching valve System for 2 pairs of the air / exhaust.
- Fig. 2.8** Switching valve System for 2 pairs of the air/ exhaust.
- Fig. 2.9** Schematic diagram of switching valve System for 3 pairs of the air / exhaust.
- Fig. 2.10** Switching valve System for 3 pairs of the air/ exhaust.
- Fig. 2.11** Schematic diagram of Large-Scale MILD Combustor and measuring / flow system.
- Fig. 2.12** Location of thermocouple for temperature measurement in MILD combustor.
- Fig. 2.13** Data acquisition process of temperature measurement for Data Logger in MILD combustor.
- Fig. 2.14** Soot mass measurement process (a) Pure filter mass, (b) Filter + soot mass, (c) Picture of soot to attached in filter.
- Fig. 2.15** Part of a FORTRAN program(MILD-QO) of evaluation of efficiency for MILD Combustor.
- Fig. 4.1** Schematic of heat regenerator and fuel nozzle position.
- Fig. 4.2** Conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 12초$ ,  $N_{fuel} = 6개$ ).
- Fig. 4.2** (a) measured temperature results from pilot Burner heating, (b) Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 12초$ ,  $N_{fuel} =$

67)).

**Fig. 4.4** Conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=18\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=6\text{개}$ ).

**Fig. 4.5** Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=18\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=6\text{개}$ ).

**Fig. 4.6** Conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.7** (a) measured temperature results from pilot Burner heating, (b) Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.8** Temperature in inside of MILD combustion for array of fuel supply nozzle by CFD[43] and measured experimental results ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ).

**Fig. 4.9** Temperature distribution of using CFD numerical results in inside of MILD combustor. ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ).

**Fig. 4.10** Flameless combustion conditions for variation of switching time in inside of MILD combustor ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.11** Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.12** MILD combustion efficiency and NOx emissions by variation of  $t_{switch}$  ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.13** CO2 reduction for variation of  $t_{switch}$  in MILD combustor ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.14** MILD combustion efficiency and NOx emissions by variation of  $\Phi$  ( $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.15** CO2 reduction and soot emissions in inside of MILD combustion by variation of  $\Phi$  ( $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.16** Inside of MILD combustor at LNG 70 % + Syngas 30 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ,  $t_{switch}=12\check{\text{초}}$ ).

**Fig. 4.17** Inside of MILD combustor at LNG 70 % + Syngas 30 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ,  $t_{switch}=15\check{\text{초}}$ ).

**Fig. 4.18** Inside of MILD combustor at LNG 50 % + Syngas 50 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ,  $t_{switch}=15\check{\text{초}}$ ).

**Fig. 4.19** Distribution of temperature in inside of MILD combustor. Tendency by variation in dilution rate of syngas ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1\text{개}$ ) and variation of  $\Phi$  in pure LNG conditions. ( $N_{fuel}=1\text{개}$ ).

**Fig. 4.20** Temperature in inside of MILD combustion for variation of  $\Phi$  by CFD [43] and measured experimental results.

**Fig. 4.21** MILD combustion efficiency and NO<sub>x</sub> emissions by dilution rate of syngas ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 15\text{초}$ ,  $N_{fuel} = 1\text{개}$ ).

**Fig. 4.22** Comparison of NO emission changed 1% O<sub>2</sub> in dilution rate of syngas predicted by CFD and measured experimental results [44].

**Fig. 4.23** Responses of inlet air, exhaust and maximum temperature in dilution rate of syngas [44].

**Fig. 4.24** CO<sub>2</sub> reduction and soot emissions in inside of MILD combustion by dilution rate of syngas ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 15\text{초}$ ,  $N_{fuel} = 1\text{개}$ ).



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

산업체 열설비 및 동력장치는 대부분이 화석연료의 화학에너지를 연소과정을 통한 열에너지로 변환하여 사용하는 구조로 되어 있으며, 화석연료의 연소는 필연적으로 지구온난화 가스인  $\text{CO}_2$ , 대기오염물질인  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , 매연(soot) 등을 배출하게 된다. 최근에 와서 대기 및 수질 환경의 중요성이 인식되면서 경제선진국을 주축으로 하는 기후변화협약에 의거 선진국 및 선진개도국의 경우는 2010년까지 온난화가스인 이산화탄소 배출량을 1990년도 수준 또는 그 이하로 감축하여야 한다. 선진개도국인 우리나라 경우도 전 산업공정의 약 85%이상이 화석연료를 사용하는 구조로 되어 있으므로  $\text{CO}_2$  배출량 저감 의무가 있는 것은 저명한 사실이다. 또한, 대기나 수질의 주요 오염원인  $\text{NO}_x$ 와 매연 등은 산성비를 통하여 대기와 수질 그리고 토양 등을 오염시키고 있으며, 이러한 오염원들은 갑상선 암과 다양한 호흡기 질환을 유발하는 물질로 알려져 있어, 이에 관한 저감 대책이 절실한 상황이다.

따라서, 경제성장을 지속하기 위해서는 기존의 화석연료 이외의 에너지를 활용하여야 하며, 그와 관련된 산업에서의 오염물질을 저감하기 위한 환경 친화적 공정 개선 또는 열소비의 대폭적인 효율 개선을 위한 기반기술 즉, 에너지사용절감 및 생산성향상을 동시에 획득할 수 있는 열 이용 기술이 요구되는 시기이며, 이러한 상황들을 개선하기 위해서 최근에 많이 연구가 되고 있는 분야가 MILD 연소 또는 고온공기 연소 방식을 이용하고 있다.

MILD 연소는 Moderate or Intense Low oxygen Dilution의 약자를 말하는 것으로서, 2004년에 이탈리아의 연소공학자인 Cavaliere와 Joannon[1]이 사용한 이후에

널리 알려진 용어가 되었다. 미소한 차이는 있지만 독일에서는 MILD 연소를 주로 무화염 연소(FLOX: Flameless Oxidation)[2]라고 부르며, 일본에서는 고온공기연소(HiTAC: High-Temperature Air Combustion)[3-5]라고 불려지고 있다.

일반적으로 MILD 연소는 공기의 공급온도가 연료의 점화온도 이상으로 공급되어 연료가 저절로 점화되도록 하며, 연소가 될 때에는 온도상승이 공기의 점화온도보다 높지 않은 연소상태를 말한다. 이러한 MILD 연소의 특징과 장점으로 MILD 연소시 배기가스의 열을 재순환하여 공기의 온도를 높여 공급하는 공기를 고온공기로 만들게 된다. 이러한 과정에서 만들어진 고온공기는 안정된 연소 상태를 보이며, 열손실을 줄이게 되어 열효율을 높인다. 그리고, 사용하는 연료를 절감할 수 있기 때문에 온실가스인  $\text{CO}_2$ 의 저감이 가능해진다. 또한, 고온공기로 인한 연소 특성 말고도, 연소생성물을 재순환으로 형성되는 연소 특성도 발생된다. 이 경우에, 유입공기의 산소농도가 낮아지게 된다. 이러한 이유로, MILD 연소는 화염대의 폭이 넓으면서, 전체적으로 화염온도가 낮고, 균일한 온도분포를 보인다. 균일한 화염온도분포로 인해 화염이 보이지 않는 무화염 연소 현상이 나타나며, 복사열전달 특성의 균일성과 연소 소음이 적어진다. 그리고, 전체적으로 화염온도가 낮기 때문에 질소산화물인  $\text{NO}_x$ 의 생성량이 적게 나타나는 특징을 가지게 된다.

통상의 연소 장치에서 MILD 연소 및 열효율을 높이려면 먼저 폐열 회수를 먼저 생각을 한다. 확산 또는 비 예열 혼합 연소에서 회수한 폐열을 연소용 공기로 되돌리면 일종의 열 재순환 연소가 된다. 근년에는 단시간 교대 방식의 축열기를 이용한 열 재생 연소로가 개발되었다. 축열기로 예열된 연소용 공기의 온도는 아주 높으므로 고온 예열공기 또는 고온공기 연소라고 불리고 있다[6-7]. 고온공기 연소는 일반적으로 연소용공기의 산소농도는 희석됨에 따라 연소의 안정성은 저하되지만 공기온도가 높아지면 안정성은 증가한다. 즉, 안정한 연소를 위해서는 산소농도가

회석되면 연소용 공기온도를 충분히 높이면 된다는 생각으로 만든 시스템이다. 이 시스템은 단시간에 축열과 방열이 교대로 일어나는 축열기를 가지고 있으며, 배기와 연소용 공기의 흐름 방향이 반대방향으로 되어있어 아주 높은 열효율을 나타낸다. 배기온도보다 수십에서 백 십도 K 정도가 낮으므로 연료의 자발적 착화 온도보다 높은 고온의 예열 공기를 쉽게 얻을 수 있다. 그리고, MILD 연소나 고온공기 연소 분야에서 가장 앞서 있는 나라중의 하나인 독일과 일본의 경우에는 기초기술 개발뿐만 아니라 상용화 기술개발까지 마친 상태이다. 그리고 국내에서도 일부 연구팀들에 의해서 기초기술 개발과 상용화를 염두에 둔 실용 MILD 혹은 고온공기 연소기를 개발한 연구가 진행하고 있지만, 상용화 단계에는 이르지 못하고 있으며 개발된 연소기들도 기본적인 형태는 독일이나 일본에서 개발한 연소기의 기본 틀에서 크게 벗어나고 있지는 못하는 실정이다. 이러한 MILD 혹은 고온공기 연소 기술은 선진국에서 산업 부문의 에너지절약 원천기술로서 상용화 연구개발과 관련된 요소 기술로 독창적이고 실용기술개발 잠재성이 있다는 이유로 기술보안이 철저한 상태이다. 또한, 현재까지 개발된 폐열 회수의 문제점은 시스템이 매우 복잡하다는 점과 축열재의 성능이 운전 중에 변할 수 있다는 큰 단점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 LNG 단독가스 또는 LNG에 합성가스를 혼소할 수 있는 대용량 MILD 연소기를 설계, 제작 및 연소특성을 검토한 연구를 통해서 MILD 혹은 고온공기 연소기술 분야에서 선진국의 기술을 모방, 개선하는 정도가 아닌 국내 기술로 열효율 증가로 인한 연료 저감으로 CO<sub>2</sub>를 저감시킬 수 있어 에너지절감 및 온실가스 저감 측면, 그리고 NO<sub>x</sub>와 같은 오염물질을 줄일 수 있어서 국내의 공업로 및 산업용 보일러 개발에 필요한 중요한 정보를 얻는데 매우 유용할 것으로 판단된다. 그리고, 이러한 연구가 국내 기술로 개발이 된다면, 산업 분야의 예산을 절충할 수 있으며, 이러한 예산을 안전 분야를 연구를 하는데 투자를 통해 선진국형 안전

문화를 이룩하는데 도움이 될 것으로 판단이 된다.

## 1.2 기존의 연구

### 1.2.1 MILD 연소 기초연구

MILD 연소에 관한 기초연구는 오히려 실제 MILD 연소기가 개발되고 난 이후에 더 활발히 연구되고 있다. 이것은 MILD 연소 기술이 개발되어 실제 연소기에 적용은 되었지만 아직까지도 공학적으로 고찰해야 할 연소현상이 많이 남아 있다는 이유와 개발된 MILD 연소기술을 최적화를 위해서는 더 많은 연구가 필요하기 때문이다. 주로 기초연구로는 복잡한 MILD 연소현상을 좀 더 쉽게 이해하기 위하여 비교적 간단한 기하학적 연소장에 대한 연구가 많다. 완전혼합반응기(Perfectly-Stirred Reactor: PSR), 대향류 연소장, 제트 연소장을 대상으로 전산해석 및 실험연구가 최근까지도 활발하게 진행되어 오고 있다.[8] 이러한 간단한 연소장에서는 다양한 연료에 대한 기초적인 MILD 연소특성을 고찰할 수 있으며, 화염구조와 오염물질( $\text{NO}_x$ ) 배출특성, 점화 및 화염 안정성과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 그리고, 실험에서 얻을 수 있는 정보는 제한적인 경우도 있기 때문에 전산해석을 이용하여 MILD 연소특성에 대한 연구들도 많이 진행되고 있다.

기초적인 연구 중 하나인, 1차원 대향류 비예혼합 화염에서 수소연료와 고온의 공기의 점화특성에 대한 수치계산연구를 수행하였다.[9-10] 이들은 압력, 공기의 공급 온도, 스트레인율의 변화에 따라 수소-공기 비예혼합화염의 S-곡선 거동과 3개의 점화한계(Ignition limit)를 지배하는 주요 화학반응, 점화점(Ignition turning point) 근처에서 화염최고온도와 H-라디칼(Radical) 최고 몰분율의 거동 등에 대해 보고하

였다. 그리고, 동일한 압력, 공기의 공급온도 조건에서 스트레인의 변화에 따른 H-라디칼의 최고 몰분율값을 이용한 S-곡선이 화염 최고온도를 이용한 곡선보다 두 번째 점화한계(Second ignition limit)를 뚜렷이 나타냄을 확인하였다. 열 발생(Heat release)을 고려하지 않았을 때는 점화점(Ignition point)과 소멸점(Extinction point)이 각각 1개로 총 2개의 전환점(Turning point)가 나타났지만, 열 발생을 고려한 경우 점화점과 소멸점이 각각 2개로 총 4개의 전환점이 생성되는 것을 확인하였다. 이전에는 2개의 점화점 중 점화를 발생시키는 1차 점화점(Primary ignition turning point)에서는 화학반응에 의한 열발생이 중요하지 않다고 보고하였다. 하지만 열 발생을 고려하였을 때 생성되는 2차 점화점(Secondary Ignition Turning Point)에서는 상대적으로 큰 라디칼 풀(Radical pool)이 형성되기 때문에 화학반응에 의한 열 발생이 상당히 중요함도 또한 확인하였다.

Liu 등은 메탄, 에틸렌, 메탄-수소혼합기의 대향류 유동장에서 점화에 대해 계산적, 실험적 연구를 수행하였다.[11] 첫 번째(1차) 점화점 구간의 생성은 주요한 화학반응의 경로와 반응물의 민감도에 따라 알 수 있으며, 그러므로 다른 화학반응기구에 따라 다르게 S-곡선이 나타남을 확인하였다. 메탄 연료의 점화에서 Double-turning의 경우, 1차 점화점은 열의 급증보다 라디칼의 급증에 의해 점화가 유발됨을 보였다. 하지만 열발생이 부족한 상태에서는 2차 점화점이 생성되지 않고 이는 2차 점화점에서 열적 피드백(Thermal feedback)의 중요성과 제일 강도 높은 연소 branch로의 최종 변화를 증명하였다. 점화점에 매우 근접한 지점에서 민감도 분석(Sensitivity Analysis)를 수행하였을 때, 1차 점화점 근처에서는 화학종  $\text{HO}_2$ 와  $\text{CH}_3$ 의 급증이 라디칼 연쇄반응(Radical Branching)을 지배함을 확인하였다.

Peters 등은 MILD 연소에 Flamelet Model이 적합한지 검토하였다.[12-13] 그리고, 근래에 들어 제트 유동장에서 전산해석을 이용하여 마일드 연소특성에 관한 연

구들이 많이 진행되고 있다. 주로 실험결과와 비교하여 정확한 해를 얻기 위하여 다양한 수치모델 및 화학반응기구의 적합성을 검토한 연구들도 꾸준히 진행되고 있다. Dally 등[14-15]은  $k-\epsilon$  난류 모델의 모델상수를 수정했을 때 제트 연소장의 MILD 연소특성을 예측함에 있어 매우 적합하다고 하였으며, 이때 조합되는 연소모델로는 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모델이 가장 적합하다고 보고된 바 있으며, JHC (Jet burner with Hot Co-flow) 유동장에서  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  연료를 이용한 실험연구 결과에 전산해석 결과를 비교 검토한 바 있다.[16-17] 그리고 Parente 등[18]과 Wang 등[19]은 제트 유동장에서  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  연료를 MILD 연소시킬 때 총괄반응기구(Global Reaction Mechanism)과 상세반응기구(Detailed Reaction Mechanism)의 예측성능을 실험과의 비교를 통해 검토하였다. 여기서는 WD4의 예측성능이 우수하다고 상세반응기구인 GRI-3.0을 기준으로 비교해 보았을 때 GRI-1.2 반응기구에서 축소된 DRM-19 반응기구도 주요 화학종, 라디칼의 분포와 NO 배출특성을 잘 예측한다고 보고하고 있다. 그리고, 최근에는 국내에서도 MILD 연소에 관한 관심이 높아지면서 고온공기를 이용한 실험적, 전산해석적 연구들이 활발히 진행되고 있다. 초반에는 고온공기를 이용한 대향류와 제트 유동장[20]에서 연소특성에 관한 실험적 연구들이 활발히 이루어 졌으며, 실제 산업용 연소로와 유사한 다양한 형태의 MILD 연소기의 특성에 관한 연구도 수행된 바 있다.

본 연구팀인 Kim 등은 최근 단순한 유동장인 대향류와 제트 유동장에서 고온공기류에 의한 연료의 점화 및 연소특성과 오염물질 생성특성에 관한 연구를 수행한 바 있다.[21-23] 이들 연구에서는 고온공기에 의한 점화특성을 정밀하게 검토하기 위하여 화염제어 연속계산법(Flame Controlling Continuation Method: FCCM)을 이용하여 공기류의 온도와 배기가스 성분 함량에 따라 S곡선을 통한 점화 및 소화점의 특성을 검토하였다. 또한, 제트 유동장에서 배기가스가 포함된 고온공기류에 의

한 MILD 연소특성을 전산해석연구를 수행한 바 있다[24]. 이 연구에서는 고온공기류의 온도와 배기가스에 의한 희석률에 따른 온도분포와 NO<sub>x</sub>, CO 등의 오염물질 배출특성을 배출지수(Emission Index)를 통해 고찰한 바 있다.

### 1.2.2 MILD 연소기 개발 연구

초기의 MILD 연소는 1974년 Hardesty와 Weingberg에 의해 제안된 초과 엔탈피 연소기술[25]을 기반으로 폐열회수를 통한 열효율을 높이는 연소방식이다. 초기의 MILD 연소 기술은 단순히 공기로 열을 재순환시키면 열효율은 높아지지만 NO<sub>x</sub>와 같은 오염물질 발생량은 증가하는 어려움이 있었다. 그리고, 1980-1990년대에서 들어오면서 고온공기를 배기가스와 혼합하여 산소농도를 저감시킨 상태에서도 화염 안정성이 높고 오염물질 배출이 적은 MILD 연소기술이 개발되었다. 2000년대에 들어오면서 실제로 일부 산업용 연소기에 기술이 적용되는 단계에 이르게 되었다. MILD 연소의 정의는 다음과 같다. CH<sub>4</sub>화염의 자발화 온도가 1000K 이라고 할 때, 반응물의 공급 온도는 1000K을 넘으며 화염의 온도와 공급온도의 차이가 자발화 온도인 1000K 보다 낮은 영역에서 MILD 연소가 발생하였다고 정의한다. 근래에는 실용화된 연소기에서 화염 최고온도가 1720K 또는 1450℃인 화염을 MILD 영역에 속해 있다고 보고된 바있다. [26-27]

MILD 연소기 개발 연구로는 축소 스케일의 MILD 연소기를 대상으로 실험 및 전산해석을 수행한 연구들이 많다[28]. 이와 같은 축소 스케일의 MILD 연소기 연구들은 연료 제트의 모멘텀 변화에 따른 연소시스템의 안정성을 고찰하거나, 오염물질 배출특성을 검토하였으며, 전산해석을 수행하여 CO와 NO<sub>x</sub>의 배출을 동시에 관찰하여 MILD 연소특성의 이해를 높이는데 기여하고 있으며, 그 이외에도 Pilot 스

케일 또는 실제 스케일의 마일드 연소기 개발과 관련된 많은 연구가 진행된 바 있다. 그리고, 실제 연소기 개발 연구에 관한 실험적, 계산적 연구 또한 많이 진행되는 연구로 연료제트의 모멘텀 및 화염 안정성, 오염물질 배출특성을 수행하여 실용 연소기 개발에 있어 MILD 연소특성의 이해를 높이는데 기여하고 있다.[29-30]

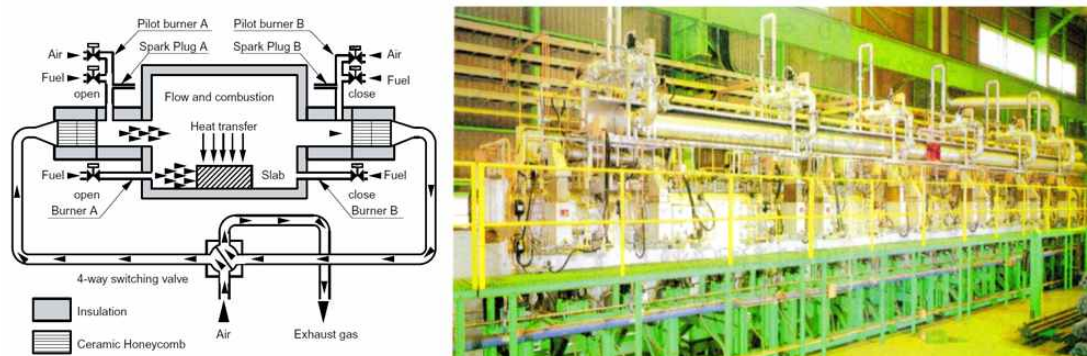
일본에서는 HiTAC 기술을 개발하는 프로그램을 진행하여 교번식 MILD 연소기를 개발하였다.[31] 교번식 MILD 연소기는 Fig. 1.1과 같이 양측에 축열 및 재생기능을 담당하는 재생기에서 교번식 방법으로 양쪽에 버너를 위치시켜 산화제가 배기가스에 의해 축열된 열을 흡수할 수 있게 한 방법이며, 이 연소기의 장점은 희박연소(Diluted Combustion)의 범주에 든다는 것이다. 희박연소는 연료와 공기가 서로 반응하기 전에 불활성 가스와 혼합되어 반응물 중의 산소농도가 공기중의 표준 산소농도인 21%vol 보다 매우 낮아지는 것을 의미한다. 연소용 공기의 온도가 연료의 자연착화온도보다 높을 때는 연소안정성의 문제가 없이 안정된 연소가 가능하므로 낮은 산소농도에서도 연소가 이루어지며, 산소농도가 낮아질수록 화염의 크기가 팽창하여 종래의 화염면에 연소대신에 공간연소 형태로 이행하며 산소 농도가 극도로 낮은 경우에는 화염이 없는 것처럼 보이는 무염 연소가 이루어진다.

그리고 독일에서 개발한 FLOX 버너는 Fig. 1.2에서 연료노즐 외주에 설치된 다수개의 공기노즐로부터 분사된 공기분류가 연소반응 전에 다량의 노내 가스를 흡입함으로서 연소 공기 중의 산소농도를 저하시켜 연소온도와 NO<sub>x</sub> 발생량을 저하시킨다. 또한, 유럽의 여러 국가에서도 복사 튜브형 연소실과 재생기를 장착한 마일드 연소기, 재생 HRS 버너 등 다양한 종류의 연소기들이 제작되고 성능실험이 수행되고 있다.

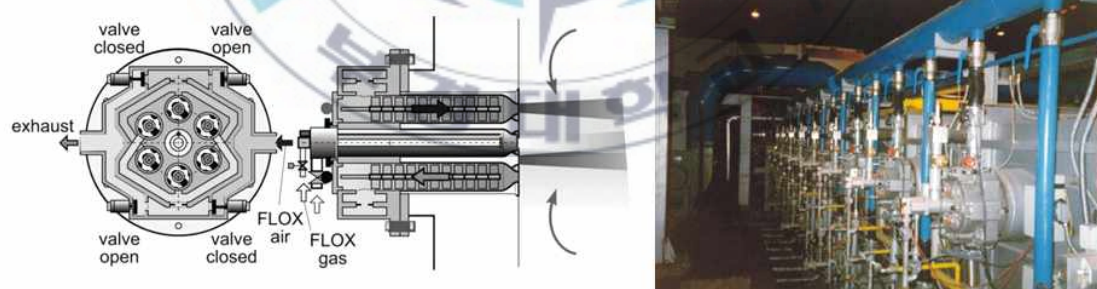
또한, 국내에서의 실제 산업용 MILD 연소로 개발은 계명대학교 연구팀[32]은 당량비 변화에 따라 고온공기를 이용한 연소로에서 발생하는 배기가스 및 연소로 내

부의 온도계측을 통하여 MILD 연소특성과 최적 MILD 연소조건에 대한 실험연구를 수행하였으며, 한국에너지기술연구소 연구팀은 고온공기(1000℃)를 연소기에 사용함에 있어서 화염이 보이는 거시적 연소특성을 검토한 바 있으며, 실험용 고온공기 연소시스템을 구성하여 고효율, 고온 폐열회수용 축열/재생기 최적 설계기술을 개발하였다.[33] 그리고 포항산업과학연구원팀은 2000년 초반에 재생기를 이용하여 교번식 축열과 동시에 산소부화 연소를 진행할 수 있는 연소시스템을 개발하였다.[34] 이 연소기는 MILD 연소기는 아니지만 기존에 교번식 MILD 연소기에 적용된 재생방식을 도입하여 축열함으로써 열효율을 높였다는 데에 의의를 둘 수 있다.





**Fig. 1.1** (Left) Schematic diagram of HiTAC furnace operated with high frequency alternating flow regenerators. (Right) Installation of commercialization of HiTAC.



**Fig. 1.2** (Left) FLOX REGEMAT burner. (Right) Annealing and pickling line in Terni.

### 1.3 연구 목적

위에서 살펴본 것처럼 근래에는 에너지의 효율적인 사용과 환경오염의 최소화를 동시에 얻을 수 있는 연소기법인 MILD 연소기술에 대한 중요성이 높아, 실험적, 계산적으로 많은 연구들이 진행되고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 부분적으로 연소기, 열재생기, 절환 시스템, Pilot 버너 부분적으로 구성 및 설계 후, 100kW급 MILD 연소기 전체적으로 제작을 완료한다.

(2) 제작된 100kW급 MILD 연소기를 연소 효율(재생기 온도 효율, 폐열 회수율)과 NO<sub>x</sub>, Soot, CO<sub>2</sub> 저감량과 같은 배기 가스 배출 특성으로 통해서 성능 평가를 실시한다.

(3) 다양한 연료에 대한 MILD 연소 성능 평가를 실시하였으며, 본 실험에서는 LNG와 LNG+합성가스를 이용하여 성능 평가를 실시하였다.

(4) 100KW급 MILD 연소기의 성능 평가 실험을 통해서 안정적으로 운용하기 위한 운용절차를 확립하였다.

## 제 2 장 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치 설계

MILD 연소에서는 연료의 점화온도 이상으로 반응물의 온도를 높여서 공급해 주어야 한다. Fig. 2.1[15]에서 보는 바와 같이 통상 연소기에서의 연소영역은 공급되는 연료(F)가 공기(A)가 바로 만나서 화염이 형성되는 F/A 영역과, 연료가 주변의 연소가스(B)와 혼합되는 BF 영역, 공기가 주변 연소가스와 혼합되는 BA영역, 그리고 BF와 BA가 만나서 이루어지는 BF/BA 상태로 연소되는 영역으로 구별된다. 반면, MILD 연소기의 연소영역은 Fig. 2.2[15]에서 보는 바와 같이 통상 연소기의 연소영역보다 훨씬 복잡하다. MILD 연소기에서는 공급되는 연료와 공기가 분사 즉시 만나서 화염이 형성되지 않도록 멀리 떨어뜨려 놓는 방식으로 공급노즐을 설계하게 된다. 이렇게 되면 연소영역은 통상 연소기와는 달리 F/A 영역은 거의 없게 되고 BF, BA 영역들과 BF와 BA가 만나는 BF/BA 영역, 그리고 BF가 공기와 만나는 BF/A 영역, BA가 연료와 만나는 BA/F 영역들이 주를 이루게 된다. 따라서 본 연구에서는 폐열을 재생하여 공기의 온도를 높여서 연소실 내부로 공급하고 연소실 내부에서 연소 생성물과 혼합시키고 연료와 만나 연소되는 MILD 연소기를 설계 및 제작하였다. 이 장에서는 MILD 연소기의 구성과 각 연소기 부분에서의 MILD 연소를 위한 설계 방법을 서술하였다. 그리고 MILD 연소 특성 및 오염물질 배출특성을 검토하기 위해 사용된 실험 측정 장치에 대한 제원과 기능을 살펴보고, 실험 방법에 대한 설명을 논의하도록 한다.

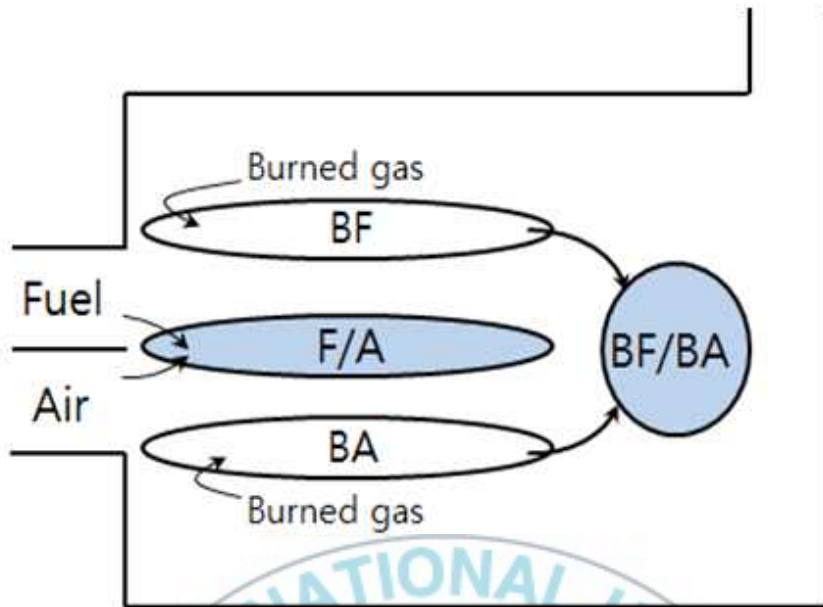


Fig. 2.1 Concept of mixing and combustion in conventional combustor.[15]

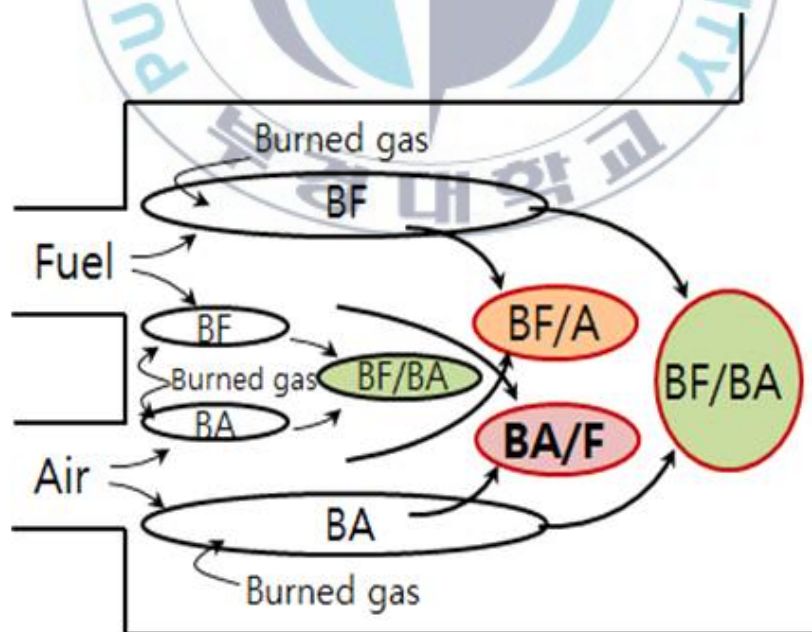


Fig. 2.2 Concept of mixing and combustion in MILD (high-temperature air) combustor. [15]

### 2.1.1 대용량 MILD 연소기

MILD 연소기를 설계할 때 고려해야할 가장 중요한 인자는 연소출력(용량), 전체 연소실 체적 및 형상, 연료 및 공기노즐 크기 및 위치, 열재생기 크기 및 형태, 절환밸브 시스템 구성, 유로계 구성, 파일럿 버너 구성 등을 들 수 있다. 그리고, MILD 연소기의 확장은 연소영역의 확장을 의미한다. 연소영역 확장은 본질적으로 넓은 연소공간을 필요로 하게 되므로 기존의 연소방식을 적용한 경우 현재의 연소실 공간은 최적으로 설계되어 있으므로, MILD 연소 방식을 적용할 경우에는 수치 해석 등을 이용한 로형의 최적화, 로폭 및 버너용량에 대한 재검토가 필요하다.

따라서 본 연구에 사용된 대용량 MILD 연소기 설계에는 Table 2.1에서 보면, 기존 문헌연구와 본 실험실의 선행연구에서 제작된 MILD 연소기의 체적과 연료, 공기유속과 관련된 정보를 참고 하였으며, 부분적으로 CFD 해석결과를 통해 얻은 정보 등을 이용하여, 대용량 MILD 연소기의 확장에 따르는 부차적인 문제점들을 해결할 수 있는 방향으로 설계를 진행하였다.

대용량 MILD 연소기의 배열을 잡을 때 유의사항은 체적당 발열량이다. 이것은 연소기의 크기를 결정하는 중요한 인자이기 때문이다. 본 실험에서 사용될 MILD 연소기는 기존의 연구들을 참고로 해서  $300\sim500\text{ kW/m}^3$  정도의 값을 가질 수 있도록 설계하였다. 체적당 발열량을 결정한 후, 연소실 크기는 실험실 높이를 감안해서 0.7 m로 연소실 길이를 결정하였고, 높이 결정 후 체적당 발열량을 통해 결정된 체적을 얻을 수 있도록 연소실 내경을 0.65 m로 결정하였다.

Fig. 2.3은 본 연구에서 사용한 MILD연소기 실제사진이며, 연소시 설계도면은 부록에서 참조하면 된다. MILD 연소기의 공기노즐 직경은 20 mm로 6개 중에서 3개는 공급구, 나머지 3개는 배기구로 번갈아 사용하게 되어있다. 연료노즐은 두 가지

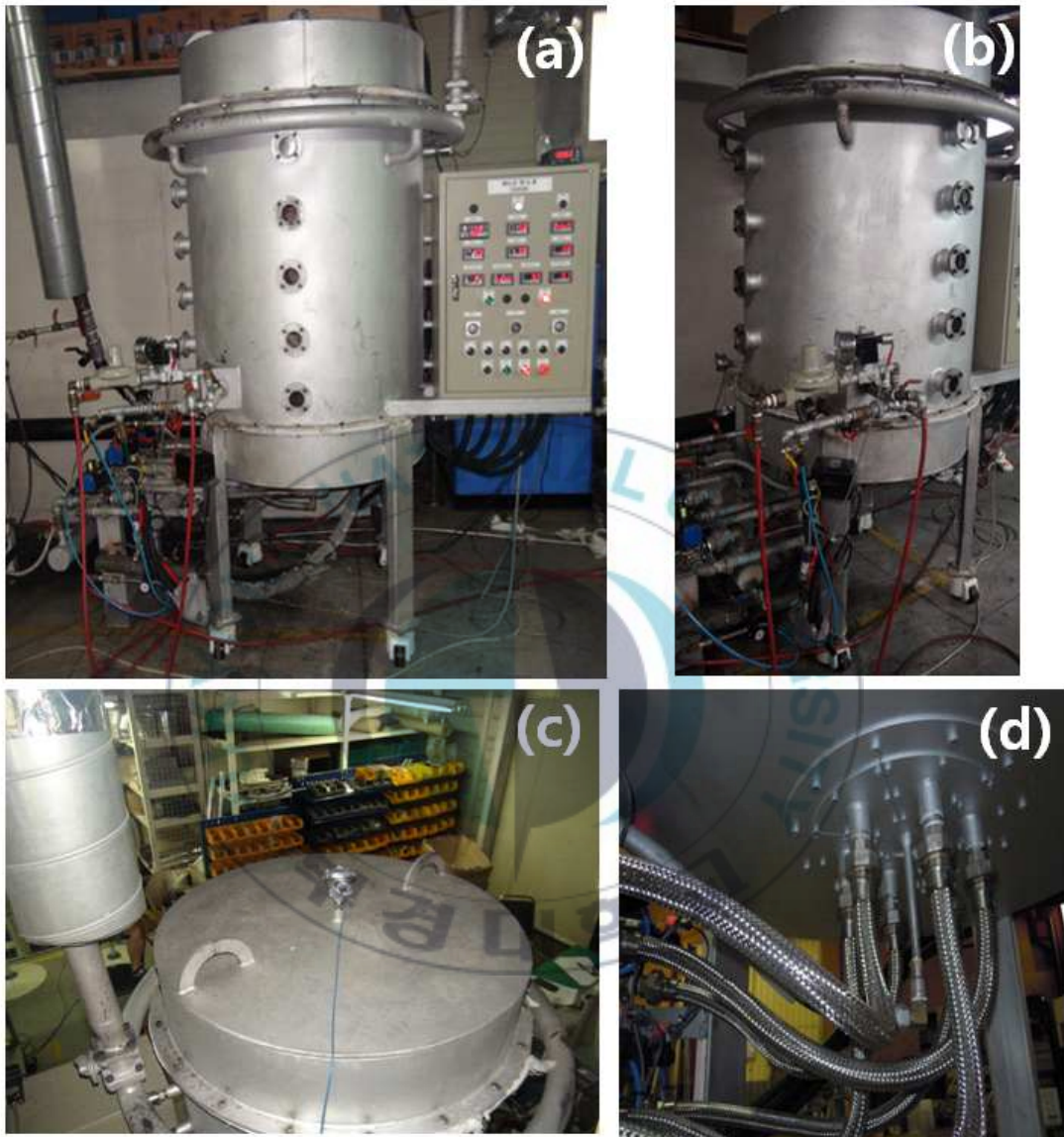
**Table 2.1** Obtained detailed specifications through reference for conventional MILD combustor.

| 참고문헌        |      | 연료유속<br>(m/s) | 연료의<br>대류시간<br>( $\mu s$ ) | 공기유속<br>(m/s) | 공기의<br>대류시간<br>( $\mu s$ ) | 체적당<br>발열량<br>(kW/m <sup>3</sup> ) | 발열량<br>(kW) |
|-------------|------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|-------------|
| 35          |      | 20            | 250                        | 73.7          | 74.6                       | 320                                | 10          |
| 36          |      | 9.34          | 503.2                      | 33            | 151.51                     | 180                                | 6           |
| 37          |      | 12.57         | 318.21                     | 28.9          | 162.58                     | 180                                | 6           |
| 38          |      | 100           | 100                        | 70            | 1,771                      | 23                                 | 580         |
| 39          |      | 7.9~70.7      | 114~4.2                    | -             | -                          | -                                  | -           |
| 40          |      | 20~100        | 25~5                       | 26~130        | 77~15.5                    | 5,600                              | 1~5         |
| 41          |      | 243           | 3                          | 95            | 52                         | 5,600                              | 150         |
| 본<br>30kW급  | 15kW | 26.2          | 68.7                       | 5.5(18.2)     | 3.6ms(1,099)               | 250.5                              | 15          |
|             | 30kW | 52.4          | 34.4                       | 11.6(36.4)    | 1.8ms(550)                 | 501                                | 30          |
| 본<br>100kW급 | 1개   | 82.8          | 72.5                       | 36.41(133.5)  | 549(150)                   | 301                                | 100         |
|             | 6개   | 38.4          | 93.8                       |               |                            |                                    |             |

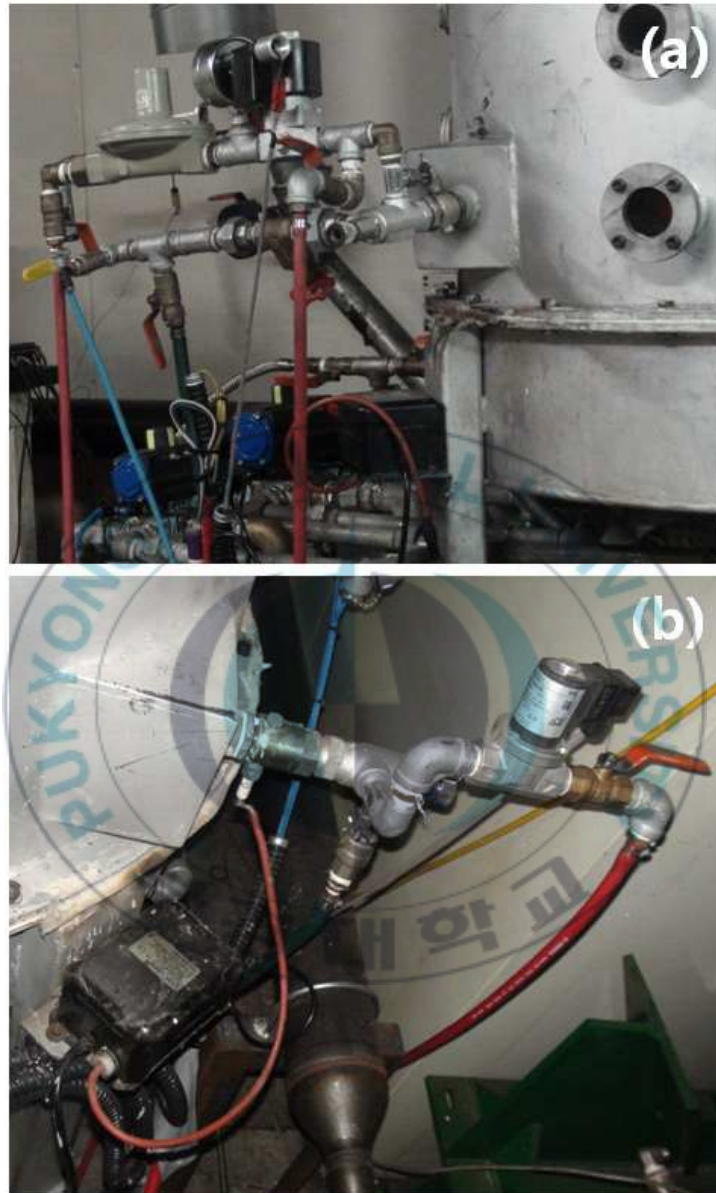
로 나누어진다. 하나는 연소기 중심부에 위치하며 직경은 6 mm이며, 또 하나의 연료 노즐은 재생기 주변을 원형으로 6개로 일정한 간격으로 직경은 3.6 mm로 배열을 결정하였다.

MILD 연소기에 대한 전체 배열을 마친 후에 연소기에 대한 설계를 하였다. 연소기의 구체적인 내용으로 화염 관찰용 가시화 창은 기존 연구에 사용한 MILD 연소기에서는 4개를 90°로 수직으로 배열하였지만 본 연구에서는 2개를 추가 설치하여 연소실 바닥면의 노즐출구 관찰이 가능하도록 하였다. 연소실 내부 직경은 단열제를 제외하면 650 mm가 되도록 하였으며, 길이는 1000 mm 가 되도록 하였다. 연소기 온도를 측정하기 위해서 열전대의 위치는 150 mm 간격으로 6개와 천장 벽면 중심부에 1개로 연소로 내부 온도를 측정하도록 설계하였으며, 연소로 벽면 온도를 측정하기 위해서 각각 아래 노즐위치로부터 100 mm 위에 1개, 상부 벽면으로부터 200mm 아래에 1개, 둘 사이에 1개를 수직벽면에 수직방향으로 3개를 설치하였으며, 내부 압력을 측정하기 위해서 압력 게이지 1개와 Indicator를 설치하였다.

밸브시스템은 각 1개씩 3 set를 순차적으로 공기공급구와 배기구가 변환 할 수 있도록 설계하였으며, 배기가스 라인에서 배기가스 응축수로 인해 막히는 것을 방지하기 위해 응축수 배출이 용이하도록 배출구를 위치 시켰다. 그리고 선행 연구의 경험으로 단위 열재생기의 체결부를 수정해서 볼트를 쉽게 체결할 수 있도록 하였으며, 기밀유지가 잘 되도록 볼트 체결부에 가스켓을 설치하고 하부 공기라인 피팅 부분에 기밀 유지가 잘 되도록 설계하였다. 연소기 외부의 환형 배기관 위치는 상향 조정하여 배기관 외경은 34 mm가 되도록 설계하였으며, 환형 배기관은 초기의 실험에서 배기가스를 열재생기를 거칠 필요가 없을 때 연소실로부터 직접 배출하기 위해서 만들어 졌으며, MILD 연소시에는 이 환형 배기관은 밀폐상태로 놓아 배기가스가 열재생기를 통해서만 배출되도록 제작하였다. 그리고, 연료 노즐은 연소실



**Fig. 2.3** The manufacturing of Large-Scale MILD Combustor. (a) Front side view. (b) MILD Combustor in profile of  $45^\circ$  (c) Upper of MILD Combustor. (d) Bottom of MILD Combustor (union condition of heat regenerator).



**Fig. 2.4** The photograph of Pilot burner in MILD Combustor (direction of tangent for installation in both sides).

중앙의 1개만 사용할 수도 있고, 환형의 6개를 사용할 수도 있도록 연소실 외부의 연료 공급라인에서 밸브의 간단한 조정으로 노즐선택이 가능하도록 설계하였다.

MILD 연소기는 초기에는 연소실 온도와 벽면온도 이상 올려야 할 필요가 있다. Fig. 2.4는 초기에 연소실 온도와 벽면 온도를 올리기 위한 대용량 MILD 연소기용 파일럿 버너 연결부위 사진이다. 파일럿 버너를 보면 연소기 하부 외측에 부착되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 2개가 접선방향으로 설치되어 있어서 연소실 내부에 스월형의 예혼합 화염을 형성시키고 연소실과 연소실 내부 벽면의 온도를 높이므로써 MILD 연소의 초기 조건을 담당하는 기능을 하게 설계를 하였다.

MILD 연소기의 중요한 부분인 열재생기 및 절환 시스템은 다음 장에서 설명을 자세히 하였다.

#### 2.1.2 열재생기 및 절환 시스템

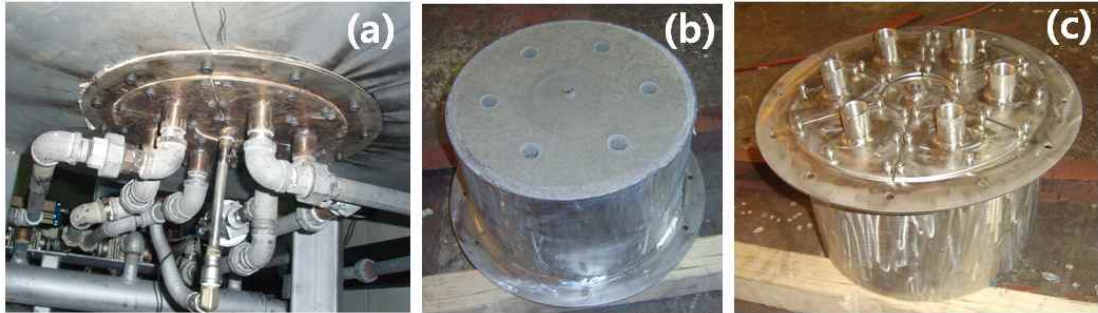
본 연구에서 MILD 연소기는 열재생기를 장착하여 동일한 유로를 공급되는 공기와 배기가스가 번갈아 사용하면서 배기가스의 열은 공급되는 공기를 가열하게 된다. 즉, 열재생기는 하나의 유닛으로 되어 있고, 고온의 배기가스로부터 열재생기의 내부의 비드로 열을 축적한 후 절환된 밸브에서 공급되는 상온의 순수 공기를 예열하기 위한 장치이다. Fig. 2.5 (a)는 열재생기와 연소기가 결합된 상태에 대한 사진이고, Fig. 2.5 (b), (c)는 연소기에서 분리된 열재생기의 각각 연소실 내부측과 외부측을 찍은 실물 사진이다. 중심에는 연료 노즐이 있으면 그 주위에는 원형으로 상온공기와 배기가스가 지나가는 노즐이 배치되어 있다. Fig. 2.6은 초기 실험에 사용되었던 축열체가 충전되어 있는 열재생기 내부 사진이다. 열재생기는 6개의 구획실로 나누어져 있으며 각 구획실마다 1개의 공기공급관 또는 배기관이 연결되는 구조

로 되어 있다. 각 구획실은 별도의 커버로 덮어져 체결되도록 제작되었다. 축열체로 사용된 세라믹 비드는 각각의 직경은 20 mm이며, 축열체 선정은 폐열회수율, 온도 효율, 압력손실 등 성능과 강도, 청소 및 교환 등을 고려하여 선정하였다. 이 축열체가 채워진 3개의 열재생기 구획실은 일정한 절환시간 동안 축열 또는 재생모드를 유지하다가 축열체에 충분한 열이 축적된 후 공기공급 라인과 배기가스 배출 라인을 절환시킴으로써 주입되는 공기가 축열체의 축적된 열을 흡수할 수 있도록 설계하였으며, 이러한 과정을 주기적으로 반복함으로써 공급되는 공기의 온도를 MILD 연소가 일어날 수 있는 충분한 온도에 도달하도록 가열시키고 연소실 내부에서 배기가스인 연소생성물과 충분히 혼합하여 연소에 참여하게 함으로써 MILD 연소가 가능하도록 설계하였다.

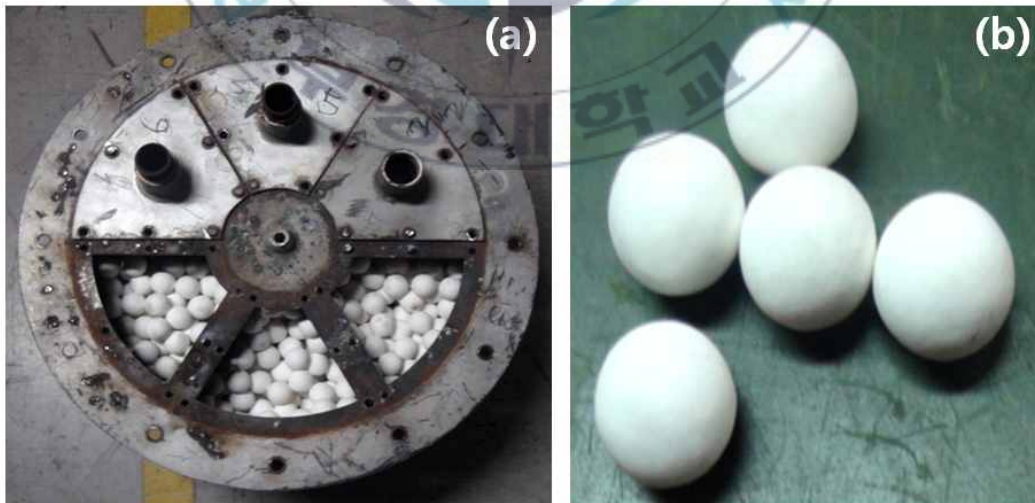
그리고 본 연구에서 사용되는 MILD 연소기는 열재생기를 장착하여 동일한 유로를 공급되는 공기와 배기가스가 번갈아 사용하면서 배기가스의 열을 공기를 가열하게 되며, 단위 열재생기의 6개의 구획실 중 3개는 배기가스, 3개는 공급공기 라인들과 연결되도록 구성되어 있다. 이 때 축열과 열재생을 최적화하기 위해서는 공급공기 라인과 배기라인의 적절한 스위칭이 필요하다. 이때 너무 짧은 시간 후에 절환시키면 충분한 열회수가 불가능하며 절환시간을 너무 크게 하게 되면 축열체가 이미 많은 열교환을 하여 온도가 낮아지게 되므로 회수할 열이 적어지게 된다. 선행 연구로 사용된 MILD 연소기에서는 Fig. 2.7와 같은 방식으로 공기유로 3개와 배기유로 3개를 각각 1쌍으로 2쌍의 유로를 동시에 절환하는 방식을 채택하였으며, Fig. 2.8은 실물 사진을 보여주고 있다. 그러나, 2쌍을 동시에 절환하는 경우, 절환순간에 배기가스가 공급되는 공기의 유로를 순간적으로 차단하기 때문에 화염안정성이 나빠지는 문제점이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Fig. 2.9와 같은 방법으로 3개의 4way 밸브를 이용하여 공기유로 1개와 배기

유로 1개를 1쌍으로 하여 총 3쌍의 공기/배기유로 조합을 만든 후 각 쌍을 2초 간격으로 순차적으로 절환하는 방식으로 시스템을 개선하였으며 Fig. 2.10은 실물 사진을 보여주고 있다. 이러한 문제점을 개선한 후 밸브의 절환순간에도 화염안정성이 나빠지는 문제점이 발생되지 않는 조건에서 화염 안정한 상태에서 본 연구를 수행하였다.

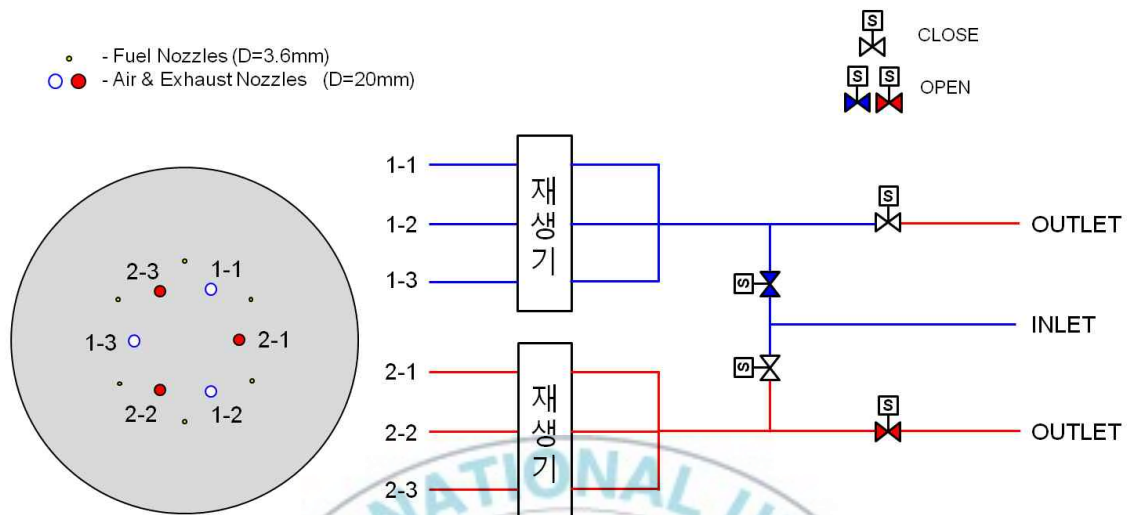




**Fig. 2.5** Heat regenerator of MILD Combustor. (a) Fuel/Air stream line and installation for heat regenerator (b) Upper of heat regenerator (c) Bottom of heat regenerator.



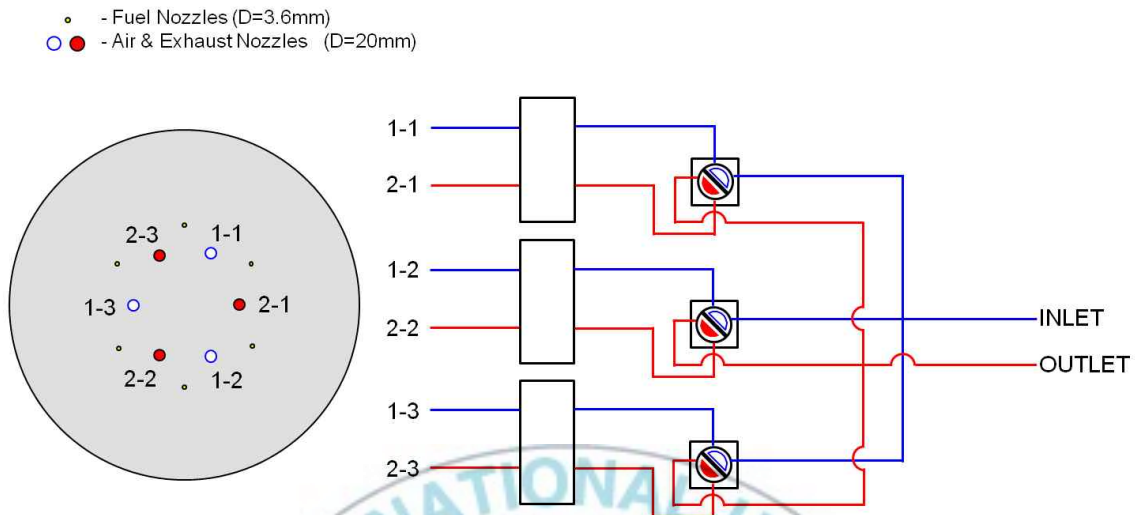
**Fig. 2.6** (a) Fill a ceramic beads with inside of heat regenerator (b) Ceramic beads.



**Fig. 2.7** Schematic diagram of switching valve System for 2 pairs of the air/ exhaust.



**Fig. 2.8** switching valve System for 2 pairs of the air/ exhaust.



**Fig. 2.9** Schematic diagram of switching valve System for 3 pairs of the air/ exhaust.



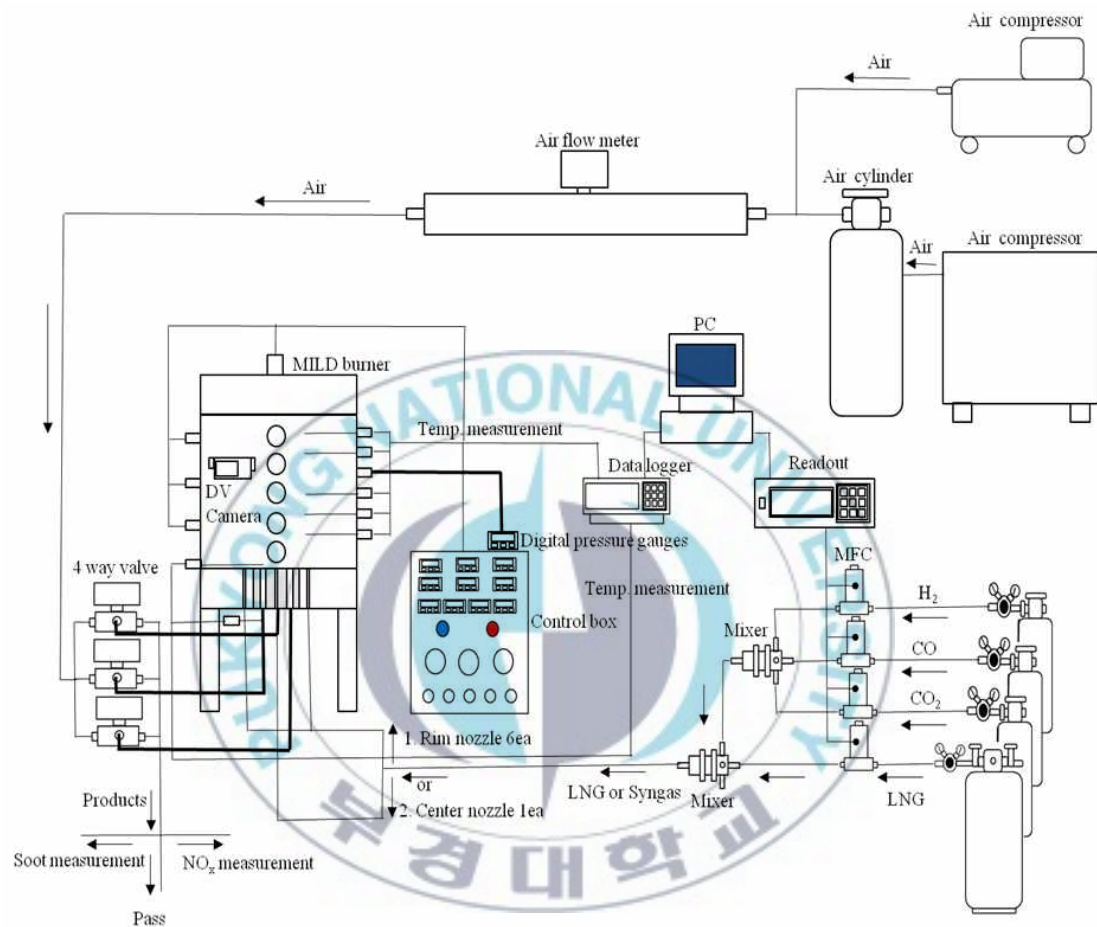
**Fig. 2.10** switching valve System for 3 pairs of the air/ exhaust.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 실험 장비

Fig. 2.11은 실험에 사용된 대용량 MILD 연소기의 성능평가 실험을 위한 연소기 및 실험장치 개요도를 나타내고 있다. 개요도에는 MILD 연소기, 연소기 제어반, 절환밸브 시스템 등을 묶은 MILD 연소시스템을 도시화 하였다. 연소기의 용량을 증가시키게 되면 다량의 공기가 필요하여 1대의 콤푸레서로는 공급이 어려웠으며, 공기 유량의 섭동이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 공기 공급 용량이 충분히 커서 유량의 섭동 없이 안정적으로 공기를 공급할 수 있도록 2대(모델명:NAWOOTECH-ES15, KEOSUNG-KSC-10)를 병렬로 연결하여 사용하였다. 또한 공기 콤푸레서에서 공급되는 공기를 충분히 축적한 후 안정적으로 공급할 수 있도록 공기 저장용 실린더를 설치하였다. 공급되는 공기는 유량계에서 정확하게 제어된 양으로 연소실로 공급되게 된다. 공기 유량을 기준습식 가스미터(모델명 : SHINAGAWA-W-NKDa-10A)를 이용하여 실험 전에 정확도를 보정하였다.

연료는 LNG 용기에 저장된 연료를 기화기를 거쳐 기화시켜 사용하도록 하였다. 합성가스의 경우에는 3가지 성분의 실린더를 이용하여 모사 합성가스( $H_2$  : CO :  $CO_2$  = 35% : 35% : 30%, 체적비 기준)를 제조하여 실험에 이용하였다. 공급되는 연료는 질량유량계(LNG용 : MFC Korea, TSC-150, 합성가스용 : Bronkhorst, F Series)로를 통해 정확한 양으로 제어되어 연소실로 공급되도록 하였다. 실험에 사용된 LNG 연료의 조성은  $CH_4$ 가 90% 이상을 차지하고 있으며,  $CH_4$ 와  $C_2H_6$ 이 96% 정도로서 대부분의 조성을 차지하고 있다.



**Fig. 2.11** Schematic diagram of Large-Scale MILD Combustor and measuring/flow system.

### 2.2.3 연소실 내부 온도 및 오염 물질 측정방법

연소실 내부와 내부벽면의 온도는 Fig. 2.12와 같은 위치에 있는 R-type 열전대를 통해 온도 데이터를 얻은 후 데이터로거(모델명 : Graphtec-GL-220)를 통해 Fig. 2.13과 같이 모니터링 하였다. 연소실 내부의 열전대 끝이 중심보다 약간 외측에 위치하는 이유는 중심까지 열전대를 길게 설치할 경우 고속의 연료와 공기에 의해서 열전대 지지대가 미소하게 흔들리는 현상이 생기게 되어 측정 위치가 미소하게 변하게 되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서 열전대 지지대를 약간 짧게 하여 열전대에 진동이 발생하지 않고 그 위치에 대한 온도를 정확하게 모니터링 하도록 하였다. 그리고, Fig. 2.12에서 보면 CH1~CH5까지 4개의 열전대 데이터는 연소실 내부의 온도를 측정하고, CH3은 압력 데이터를 취득하게 된다. CH9는 열재생기 중 연소실 내부표면에서 공기와 배기구 유입구가 번갈아서 측정되는 온도이며, CH10 열전대 데이터는 열재생기의 연소실 외부측 출구 또는 입구로 사용되는 유로에서의 온도를 나타낸다.

NO<sub>x</sub>와 산소의 농도측정은 배기가스 측정기(모델명 : ECOM-J2KN)으로 측정 하였으며, 전체적인 화염의 형상은 디지털 비디오 카메라(모델명 : SONY - HDR - CX550)를 이용하여 화염가시화 창을 통해 촬영하였다.

매연의 측정은 배기가스 라인에서 측정라인을 별도로 두어 매연측정 시에만 밸브를 개방하여 유량측정과 매연측정이 가능하도록 하였다. 매연측정용 유로의 초반부에는 배기가스 온도를 측정할 수 있는 K-type 열전대를 설치하여 배기가스 온도를 측정하였다. 매연은 산업용 매연채집 필터로 많이 사용되고 있는 Soot 필터(모델명 : ADVANTEC-GS-25) 공경 6  $\mu$ m을 이용하여 질량을 측정하는 Gravimetric 방법을 이용하였으며, 사용된 저울(모델명 : Vibra-LF-225DR)은 0.01 mg까지 측정이

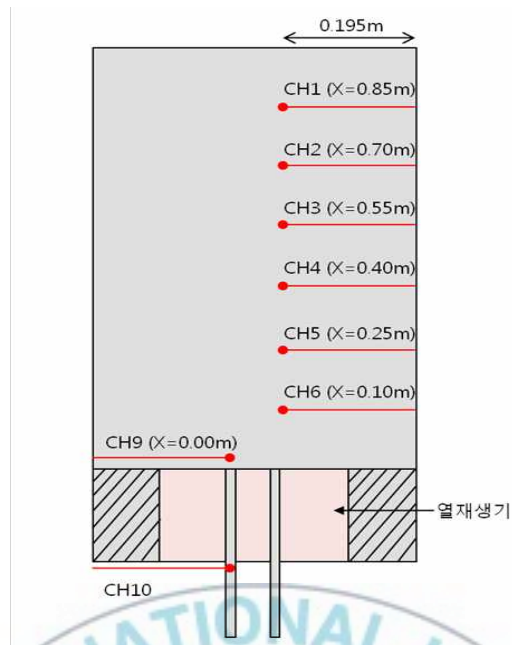


Fig. 2.12 Location of thermocouple for temperature measurement in MILD combustor.



Fig. 2.13 Data acquisition process of temperature measurement for Data Logger in MILD combustor.

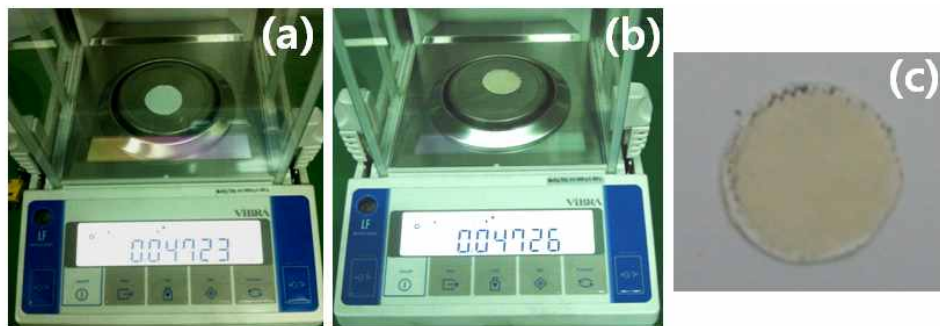


Fig. 2.14 Soot mass measurement process (a) Pure filter mass, (b) Filter + soot mass, (c) Picture of soot to attached in filter.

가능한 분해능을 가지고 있다. 매연측정 시에는 채집된 시간에 대한 매연 측정라인으로 통과된 배기가스에 해당되는 연료소모량을 계산하기 위해 배기가스 밀도는 측정된 온도에서의 완전연소가스에 대한 밀도를 CHEMKIN package를 이용하여 계산하였다. Fig. 2.14는 필터를 통해 채집된 매연의 질량을 전자저울을 통해 측정하는 사진이며 Fig 2.14. (c)는 2분동안 매연측정 유로에 설치하였던 필터로서 매연이 부착되어 있는 필터의 사진 예이다. 필터에 부착된 매연의 질량을 측정하기 전에 고온에서 장시간 수분을 충분히 증발시킨 후 측정하였다. 가장자리의 흰색이 원래 필터색이며 가운데 쪽의 옅은 황색을 띠는 것은 매연이 필터에 부착되었기 때문이다. 장시간 동안 매연을 측정하게 되면 매연이 필터를 막고 수분이 응축될 수 있기 때문에 측정시간은 마일드 연소조건에 따라 다르지만 대략 3~5분 정도가 되도록 하였다.

그 외 온도효율, 폐열회수율, CO<sub>2</sub> 배출량 저감은 앞 장에서 설명한 식을 이용하여 계산하였다, 계산과정에는 주어진 온도에 따른 비열 등의 열역학적 물성치 값들이 필요하기 때문에 성능평가 순간마다 이들 값들을 별도로 찾는 과정은 매우 번거로운 작업이 된다. 따라서 작업의 효율을 높이기 위해서 FORTRAN을 이용하여 Fig. 2.15과 같이 앞 장에 있는 식들의 값을 계산하는 프로그램(이름 : MILD-QO)을 직접 작성 및 사용하여 작업의 효율을 높였다.

```

=====
Copyright (C) 2010 - by Chang Bo Oh
MILD QO : MILD Combustion Quantative Objectives
** This program is modified 'MILDPROP' program
** MILDPROP : Property Calculator for the Mixed Gases

Source File = mild-qo.f
Data File   = spec.inp, product.inp
Output file = spec.out,   S_CP.out
              mean.out,   Final_golas.out

WRITTEN BY : *CHANG BO OH
             JI-WOONG PARK
             YU JEONG KIM

*Contact Information :
Chang Bo Oh
Assistant Professor, Ph.D.
Department of Safety Engineering
Pukyong National University
San 109, Yongdang-Dong, Nam-Gu
Busan, 608-739
KOREA
Tel : +82-51-629-6472
Fax : +82-51-629-6463
E-mail : cbo@pknu.ac.kr

=====
PROGRAM MILDQO
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z), INTEGER(I-N)
C
PARAMETER (LEN1WK=30000, LEN1RWK=30000, LEN1CWK=500, ICNT=1000,
1          LIN=11, LOUT=12, LIN1CCK=25, LIN1CCK=26,
2          eqmax=7, KMAX=10)
C
C DIMENSION ICKWRK(LIN1WK), RCKWRK(LIN1RWK), IMCKWRK(LIN1CWK),
1          FCKWRK(LIN1CCK), X(KMAX), Y(KMAX), YS(EQMAX,KMAX),
2          CP(ICNT), CV(ICNT), RHO(ICNT), COND(ICNT), VIS(ICNT),
3          HK(ICNT), PORT(ICNT), DI12(KMAX), DJK(KMAX,KMAX),
4          RHO1(ICNT,KMAX), CENS(KMAX), CVM(KMAX),
5          CPI(ICNT,KMAX), CVI(ICNT,KMAX),
6          CPM(KMAX), CVM(KMAX), COND1(ICNT,KMAX), DI121(ICNT,KMAX)
C
CHARACTER CKWRK(LIN1CCK)*16, KSYM(KMAX)*16, LLINE*80, SPEC*8,
1          VARIABLE*5, NVAR*10, CBUFF*6
C
REAL THIN, THOUT, TCIN, TCOU, EFF_DEN, EFF_NUM, EFF_T, EFF_T_P,
1          CAP, FLPM, FKGS, EDV, MW_RATIO, OXIDS, TOT_MFLOW,
2          SUMCPX, SUMCPAIR, EFF_EX_NUM, EFF_EX_DEN, EFF_EX,
3          AP_A, EFF_SYS, THIN_s, THOUT_s, TCIN_s, TCOU_s, TCIN_o,
4          EFF_DEN_o, EFF_NUM_o, eff_t_p_o, eff_t_o, Thout_o,
5          sumcpex_o, sumcpair_o, eff_ex_num_o, eff_ex_den_o, eff_ex_o,
6          eff_sys_o, eqv_n, Tcin_o_s, Thout_o_s,
7          sumcpn2, sumcpn2_o, eff_ex_den_n2, eff_ex_den_n2_o,
8          eff_ex_n2, eff_ex_n2_o, eff_sys_n2, eff_sys_n2_o
C
LOGICAL KERR, IERR
C
COMMON /PROP/ P, T, RU, DPHI, CPM, RHOM, CONDM, VISM
COMMON /ICONS/ Kk, LL
C
COMMON /SPEC/ JCH4, JC2H6, JC3H8, JC4H10, JH2, JCO, JC02,
1          JH2O, JO2, JN2
C
C =====
C KMAX : The maximum number of species considered in this code.
C When the species number is larger than KMAX, you have to
C modify the value of KMAX in PARAMETER.
C LEN1WK, LEN1RWK and LEN1CWK :
C Modify (increase) the values for the LEN1WK, LEN1RWK and
C LEN1CWK when you encountered error messages regarding the
C variables.
C ICNT : Modify the values for the big data
C =====
C Input and Output files
C =====
C OPEN (LIN,FILE='spec.inp') ! <- Input file
C OPEN (LOUT,FILE='spec.out') ! <- Initial Boundary Condition
C open (33,FILE='product.inp') ! <- Mixture Mean Property
C OPEN (13,FILE='mean.out') ! <- Cp for species i
C
C OPEN (27,FILE='S_CP.out') ! <- Cp for species i
C
C open (32, file='Final_golas.out')
C
C Initialization of CHEMKIN
C
C OPEN (LINKCK, FORM='UNFORMATTED', STATUS='UNKNOWN',
1          FILE='chem.bin')
C OPEN (LINKMC, FORM='UNFORMATTED', STATUS='UNKNOWN',
1          FILE='tran.bin')
C
C WRITE (LOUT, 15)
15 FORMAT (
1/ 'PROPERTY OF MIXED GASES : VERSION 1.0, 05/19/2011'
2/ 'X, Programmed by CHANG BO OH (PUKYONG NATIONAL UNIVESITY)'
3/ 'X, This codes is linked with CHEMKIN-II & TRANFIT Version 1.2,
4Aug., 1992')
C
C CALL CKLEN (LINKCK, LOU, LEN1CK, LEN1CK, LEN1CK)
C CALL MCLEN (LINKMC, LOU, LEN1MC, LEN1MC)
C
C CALL CKINIT (LEN1WK, LEN1RWK, LEN1CWK, LINKCK, LOU,
+          ICKWRK, RCKWRK, CKWRK)
C CALL CKINDX (ICKWRK, RCKWRK, MM, KK, II, NFIT)
C CALL MCINIT (LINKMC, LOU, LEN1MC, LEN1MC, IMCKWRK,
+          FCKWRK)
C
C =====
C Definition of species
C =====
C
C JCH4 = 1
C JC2H6 = 2
C JC3H8 = 3
C JC4H10 = 4
C JH2 = 5
C JCO = 6
C JC02 = 7
C JH2O = 8
C JO2 = 9
C JN2 = 10
C
C IDX = 0

```

Fig. 2.15 Part of a FORTRAN program(MILD-QO) of evaluation of efficiency for MILD combustor.

### 제 3 장 MILD 연소 특성 평가 방법

본 연구에서는 MILD 연소 특성을 고찰하기 위해서 연소효율과 오염물질 배출 특성을 검토하였다. 연소효율을 배기가스의 온도를 통해서 온도 효율( $\eta_T$ )과 폐열 회수율( $\eta_{Regen}$ )을 계산하였고, 배기가스에서 나오는 오염물질을 가스 분석기를 이용하여 분석을 실시하여 오염물질 배출량과 공정 열효율( $\eta_{SYS}$ )을 구할 수 가 있었다. 이러한 본 연구에서 사용된 MILD 연소기의 연소 특성을 알아보기 위한 온도 효율과 폐열 회수율 등 인자들을 계산하기 위해서 다음과 같이 정의된 식들이 필요하다.

온도효율의 정의는 재생기의 온도효율이며, 재생기의 온도효율은 재생기로 공급되는 배기가스가 축열체를 가열한 뒤, 고온의 축열체가 외부에서 재생기로 유입되는 공기를 얼마나 가열을 시키는지 의미한다. 즉, 축열체라는 매개체로 통해서 간접적으로 고온의 배기가스가 외부에서 저온으로 유입되는 공기의 가열정도이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\text{재생기 온도효율}(\eta_T) = \frac{\text{재생기 온도차}}{\text{재생기에서의 최대온도차}} = \left( \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} \right)_T \quad (3.1)$$

여기서,  $T_{c,in}$  : 재생기로의 유입공기온도

$T_{c,out}$  : 재생기에서 연소실로 공급되는 배출공기온도

$T_{h,in}$  : 연소실에서 재생기로 유입되는 배기가스온도

열재생기에서 배기가스의 열을 얼마나 흡수를 하는지 알기를 위해서 폐열 회수율을 이용하여 알아보았다. 폐열회수율( $\eta_{Regen}$ )은 열재생기를 통해서 연소기 내부의 고

온의 배기가스에서 공급되는 열이 어느 정도가 연소기 외부에서 공급되는 공기에 의해서 열을 회수하는 정도를 나타내는 값이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{Regen} = \frac{\text{재생기에서 연소기 내부로 회수된 열량}}{\text{재생기를 통해 배출되는 열량}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{air}(T_{c,out} - T_{c,in})}{(\dot{m}c_p)_{ex.gas}(T_{h,in} - T_{h,out})} \quad (3.2)$$

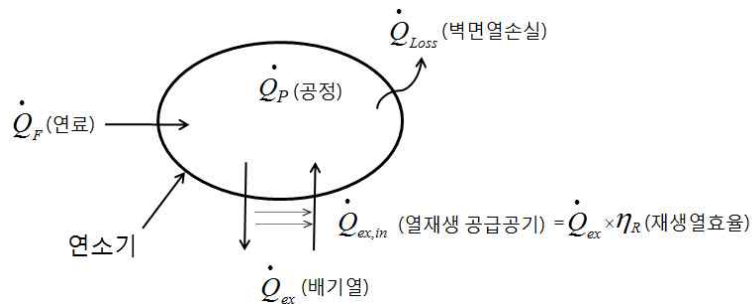
여기서,  $T_{h,out}$  : 재생기에서 외부로 배출되는 배기가스온도

$(\dot{m})_{air}$  : 공급되는 공기의 유량

$(\dot{m})_{ex.gas}$  : 배출되는 배기가스의 질량유량  $(=\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel})$

각 기체의 비열은 공기와 배기가스 각각에 대한 평균비열을 사용하였으며, 보다 정량적으로 산정하기 위해서는 각 온도에 대한 공기비열과 배기가스 비열 등을 정확하게 알아야 한다. 하지만, 전체 배기가스 조성에서 대부분의 성분은 질소이므로 각 가스의 대표성분인 질소의 비열을 이용할 수 있다.

CO<sub>2</sub> 배출 저감율은 통상적인 공업로, 가열로 등의 가열공정을 포함하는 연소기의 에너지 효율과 비교하여 MILD 연소시스템 효율 증가로부터 CO<sub>2</sub> 배출 저감율을 산출하였으며,  $\eta_R$ 은  $\eta_{Regen}$ 을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 MILD 연소 시스템은 적용 대상 가연물이 존재하지 않으므로 아래와 같은 식으로 시스템 효율을 결정하였다.



$$\dot{Q}_F + \eta_R \dot{Q}_{ex} = \dot{Q}_P + \dot{Q}_{ex} + \alpha \dot{Q}_F \quad (3.3)$$

위의 식 (3.3)에서 좌변은 연소기로 입력되는 열량을 의미하며, 우변은 연소기에서 배출되는 열량을 의미한다.

$$(1 - \alpha) \dot{Q}_F + (\eta_R - 1) \dot{Q}_{ex} = \dot{Q}_P \quad (3.4)$$

식 (3.4)의 양변에  $\dot{Q}_F$  으로 나누면, 식 (3.5)와 같은 공정 열효율( $\eta_{SYS}$ )을 얻을 수 있다.

$$\eta_{sys} = (1 - \alpha) + (\eta_R - 1) \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_F} = \frac{\dot{Q}_P}{\dot{Q}_F} \quad (3.5)$$

여기서,  $\alpha$  = 열손실율

$\eta$  = 열효율 (R: 재생기, SYS: 마일드연소기)

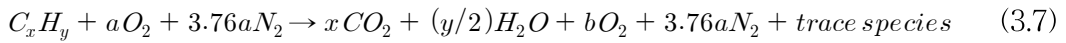
$\dot{Q}$  = 열량 ( E: 배기, F: 공급연료, P: 가연물)

그리고 공정 열효율이 높다는 것은 연료를 적게 사용하게 된다는 것이다. 연료를 적게 사용하면 CO<sub>2</sub> 배출량이 저감이 된다. 따라서, CO<sub>2</sub> 저감율은 본 연구에서의 MILD 연소기의 공정 열효율과 기존의 공업로의 열효율의 차이로 산출하였다.

NOx 배출량은 배기가스 분석기를 통해서 NOx와 O<sub>2</sub> 농도를 측정한 후, O<sub>2</sub> 농도가 1%일 경우로 환산한 NOx 농도를 계산하게 되며, NOx 농도는 일반적으로 알려져 있는 보정농도를 사용하였으며 식은 아래와 같다.

$$N_{mix,dry} = 4.76 \left[ \frac{x + (1 - \chi_{O_2,dry})y/4}{1 - 4.76\chi_{O_2,dry}} \right] - y/4 \quad (3.6)$$

이 식에서  $N_{mix,dry}$ 는 수분을 제거한 혼합물의 농도를 의미하며, 상수값  $x, y, \chi_{O_2,dry}$  값은 아래의 탄화수소계열의 총괄 화학 반응식에서 볼 수 있다.



여기서,  $x, y$  상수값은 각 C, H의 원자 개수를 나타내고 있으며,  $\chi_{O_2,dry}$ 는 건조 상태에서  $O_2$ 의 몰분율을 나타낸다. 식은 다음과 같다.

$$\chi_{i,dry} = \frac{N_i}{N_{mix,dry}} = \frac{N_i}{x + b + 3.76a} \quad (3.8)$$

매연 배출량(mg/kg)은 공급된 연료질량에 대한 배출되는 매연의 질량을 의미하며, 측정 방법은 Gravimetric 방법을 이용한다. 즉, 마일드 연소기 배기가스 중 검정된 일부 유량을 필터에 통과 시킨 후, 매연이 부착된 필터의 전 후 무게를 측정하여 매연 배출량을 결정하였다.

## 제 4 장 대용량 MILD 연소 특성

### 4.1 연료공급 노즐 배열에 따른 MILD 연소 특성

#### 4.1.1 실험 조건

대용량 MILD 연소기의 연소특성에 관한 연구하기 위해서는 연소기 기본 구성 및 설계를 완료하여야 하며, MILD 연소기를 상용화를 위한 선행연구와 관련 문헌들을 보면 연료 노즐의 위치, 모양, 크기, 연료노즐 수( $N_{fuel}$ )에 MILD 연소에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 따라서, MILD 연소기를 설계하는 과정에 있어서 연료 노즐의 크기와 위치는 매우 중요한 요소이며, 연소실로 공급하는 연료와 공기는 연소실 내에서 배기가스와 혼합을 증진시켜야 한다. 공기노즐의 경우에는 절환에 의해 배기구로도 사용되기 때문에 연소 후 배기가스의 재순환을 적절히 유지시켜야 하는 목적도 충분히 만족해야 하며, 본 연구에서는 기존의 MILD 연소에 관한 연구 결과를 기반으로 연료노즐의 위치를 Fig. 4.1와 같이 설계하였다. 연료노즐은 열재생기의 외경 바깥으로 각 공기 공급구 또는 배기가스 유출구 사이에 원형 단면을 갖는 6개가 위치하도록 하여 연소실 내부의 재순환 유동을 유발하도록 하고, 공기와의 직접접촉이 가급적 이루어지지 않도록 설계하였다. 하지만 본 연구실에서 선행 연구로 만들어진 연소기에 비해서 용량이 커진 만큼 연료노즐의 위치에 따라서 MILD 연소 특징이 달라지므로, 우선적으로 연료공급 노즐 배열의 최적화를 위한 실험을 실시하였다. Table 4.1은 연료공급 노즐 배열 최적화 실험에서의 공급 조건을 나타내고 있다. 본 실험에서의 조건을 Fig. 4.1에서 보면, 첫 번째 조건은 MILD 연소기 중심부에서 내경이 6 mm인 1개의 노즐에서 연료를 공급하며, 또 다른 조건

은 공기공급 노즐의 주위에 환형으로 위치에 배치된 노즐내경이 3.6 mm인 6개의 노즐에서 공급할 수 있다. 그 외의 조건은 공통적인 변수로 지정하였다. 연소기의 출력은 40 kW에서 연료는 LNG를 공급하였으며, 공기와 연료의 비는  $\phi = 0.7$ 로 공기를 공급하였다. 그리고 절환밸브의 절환시간( $t_{switch}$ )도 본 실험에서는 빠질 수 없는 변수이다. 우선 내경이 3.6 mm인  $N_{fuel}$ 를 6개로 사용할 경우 절환시간의 영향을 검토하기 위해서 공기공급 유로와 배기유로와의 절환시간( $t_{switch}$ )을 12초와 18초인 두 경우에만 본 실험의 변수를 설정한 뒤 연료공급 노즐 배열의 최적화 실험을 수행하였다. 절환시간에 따른 MILD 연소기의 최적화 실험은 그 변수가 많기 때문에 연료공급 노즐의 최적화 실험을 수행한 후에 절환시간의 변수를 좀 더 많이 선택한 후 실험을 실시하였다.



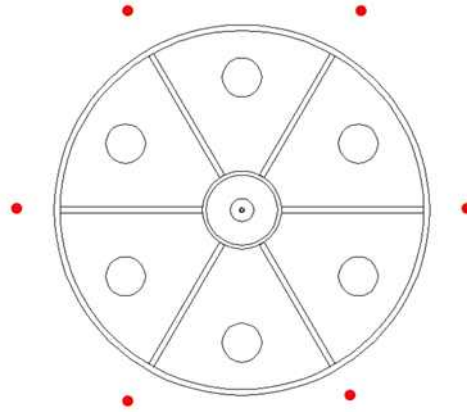


Fig. 4.1 Schematic of heat regenerator and fuel nozzle position.

Table 4.1 Experimental conditions of optimization experiments of configuration for inlet fuel nozzle.

|                                             | Condition 1 | Condition 2 |
|---------------------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Power [kW]</b>                           | 40          |             |
| <b>Fuel</b>                                 | LNG         |             |
| <b><math>\Phi</math></b>                    | 0.7         |             |
| <b><math>N_{\text{fuel}}</math> [개]</b>     | <b>6</b>    | <b>1</b>    |
| <b>Nozzle I.D. [mm]</b>                     | <b>3.6</b>  | <b>6</b>    |
| <b><math>t_{\text{switch}}</math> [sec]</b> | 12, 18      | 12          |

#### 4.1.2 실험 결과

Fig. 4.2는  $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12$ 초,  $N_{fuel}=6$ 개일 경우 MILD 연소모드에 들어갔을 경우 연소기 내부의 화염 사진이다. 이 조건에서는 MILD 연소의 대표적인 특징인 무화염 현상이 가시적으로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 4.3은 실험 초기에 Pilot 버너로 연소실을 가열을 한 후, 6개의 연료노즐을 사용하여  $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12$ 초 조건에서 연소실 온도가 급격히 올라가는 순간부터 MILD 연소를 시작하는 동안까지 50분 이내에서 실험한 결과를 보여주고 있다. Fig. 4.3 (b)는 온도 변화가 크지 않아 정상상태에 거의 도달했을 경우의 온도를 다시 그린 결과이다. 기존 연구로 J. Mi등[26]은 MILD 연소현상이 화염 최고온도가  $1450^{\circ}\text{C}$  ( $1720\text{K}$ ) 이하임을 실험을 통해서 확인된 바 있다. 따라서, Fig. 4.3 (b)에서 MILD 연소실 내부의 온도와 재생기 전후의 온도가 거의 정상상태에 도달하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 이때 수직 점선으로 표시된 순간의 온도를 이용하여 온도효율, 폐열회수율 등을 MILD-QO 프로그램을 이용하여 계산하였다. MILD-QO 프로그램을 이용하여 본 실험의 결과인 Table 4.2를 보면 온도효율( $\eta_T$ )은 78.8%, 폐열회수율( $\eta_{Regen}$ ) 79.5%이 되는 것을 확인하였다.

그리고, Fig. 4.4는  $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=6$ 개로 위의 실험 조건과 동일하나, 절환시간  $t_{switch}$ 를 18초로 변경하였을 때 MILD 연소기의 내부 화염 사진이며, Fig. 4.5는 Fig. 4.4과 같은 조건에서의 MILD 연소실 내부의 온도와 재생기 전후의 온도가 거의 정상상태로 도달하였을 때의 온도 데이터를 나타내고 있다.  $t_{switch}=18$ 초 조건에서의 화염은 Fig. 4.2의  $t_{switch}=12$ 초 조건에서의 화염과는 달리 2, 3번 가시화 창에서 화염을 보면 간헐적이고 순간적인 황염이 관찰되므로, 무화염이 균일하게 분포가 되

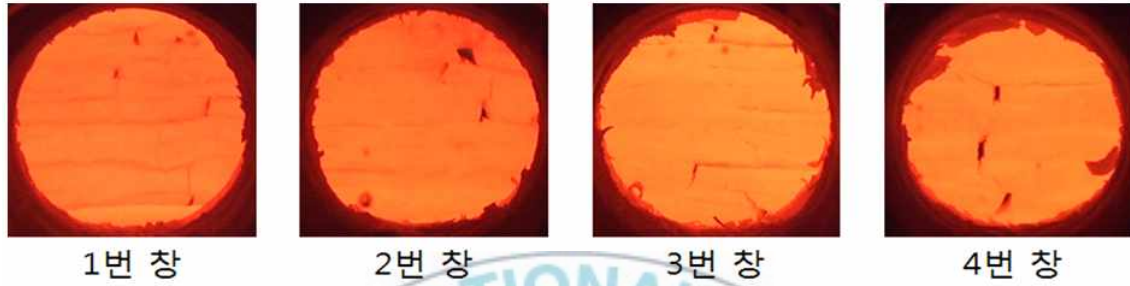


Fig. 4.2 The photograph of conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12초$ ,  $N_{fuel}=6개$ ).

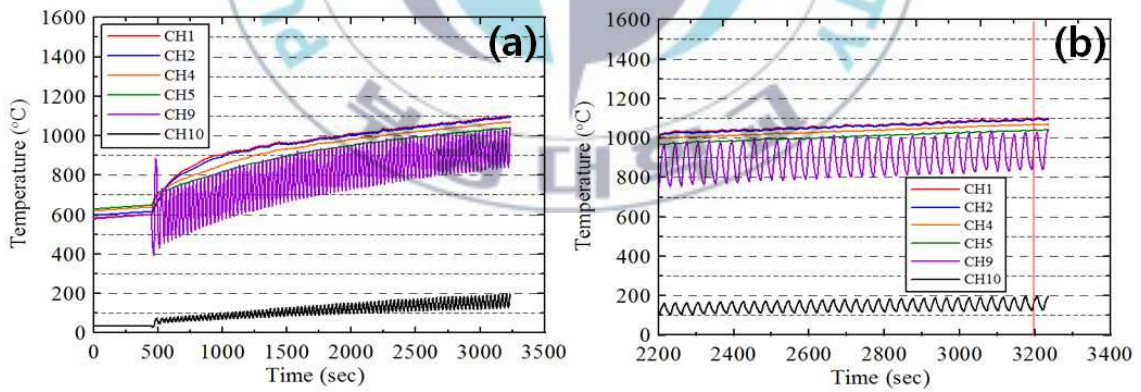


Fig 4.2 (a) measured temperature results from pilot Burner heating, (b) Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=12초$ ,  $N_{fuel}=6개$ ).

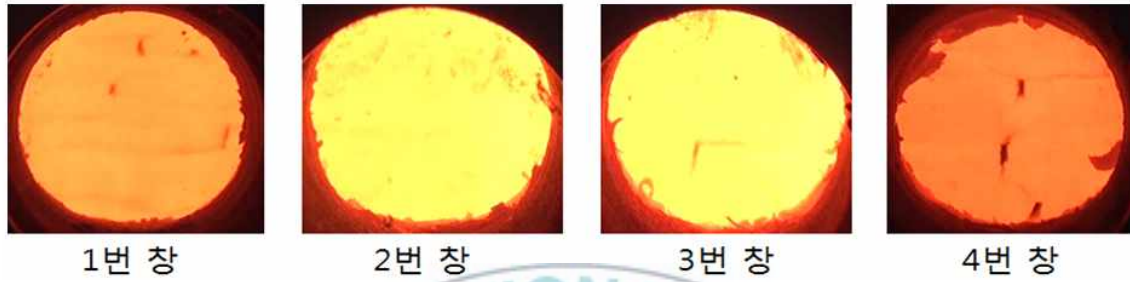


Fig. 4.4 The photograph of conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=18초$ ,  $N_{fuel}=6개$ ).

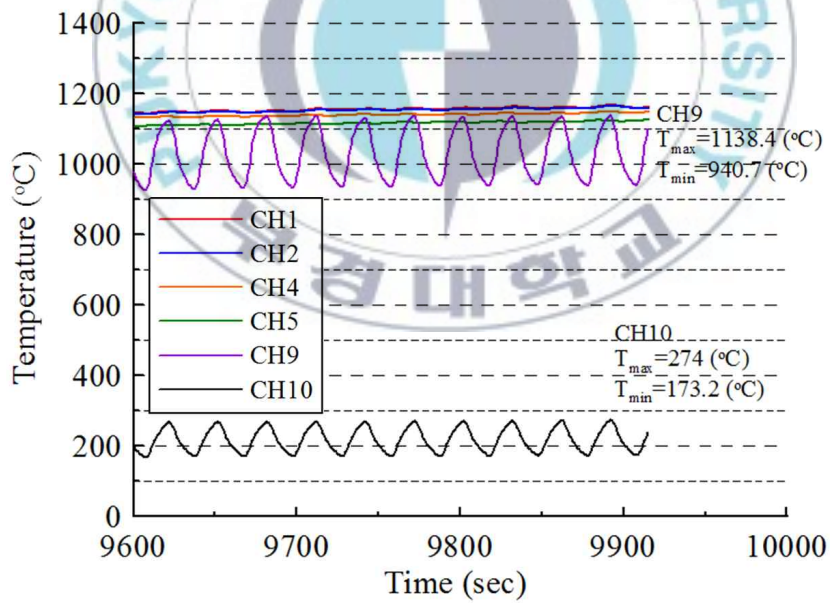


Fig. 4.5 Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch}=18초$ ,  $N_{fuel}=6개$ ).

지 않는 것으로 판단이 된다. Fig 4.5의 유입되는 공기온도나 연소실 온도 데이터를 통해서 보면 MILD 연소가 충분히 일어날 조건임에도 순간적인 화염이 관찰되는 것은 연소실 내부의 혼합 상태가 완전한 MILD가 될 정도로 이루어지지 못하였기 때문으로 판단되므로, 본 장에서는 절환시간 12초일 때 노즐 배열에 따른 MILD 연소 특성을 비교하였다.

다음으로는 동일한 용량에 대한 연소기 하단 중심부에 있는 1개의 연료노즐을 사용하여  $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 12$ 초인 경우에 대해 MILD 연소기의 연소특성을 확인하였다. 이 때 연소실 내부에서의 화염 상태는 Fig. 4.6에서 보는 바와 같이 매우 균일한 무화염 상태가 되는 것을 확인이 되었다. Fig. 4.7은 이 조건에 대한 온도측정 결과를 보여주고 있다. 연소실의 온도가 거의 2,200초 근처에서 정상상태에 도달하였을 때 연소실 내부온도는 1100~1150℃정도가 되고 있으므로 MILD 연소 영역에 도달했음을 알 수 있었다. 열제생기 전후의 온도는  $T_{c,in} = 195.2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{c,out} = 966.8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{h,in} = 1,085.1^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{h,out} = 298.5^{\circ}\text{C}$ 와 같이 얻어진다. 이 온도 데이터를 입력조건으로 MILD-QO 프로그램을 수행하면 온도효율은 Table 4.2에서 보는 바와 같이  $\eta_T$ 은 86.7%,  $\eta_{Regen}$ 은 90.9%가 나타남을 확인할 수 있다. 이 결과는 본 연구실에서 선행 연구로 행해진 수치해석 결과를 통해 알 수 있다. Fig. 4.8[43]은 대용량 MILD 연소실 내부온도를 실험 측정한 온도와 CFD 해석결과에 얻은 온도를 비교하였다. CFD 결과가 실제 실험의 온도보다 약간 낮게 예측하고 있으며, 실제 실험의 온도 범위의 10%정도가 차이 난다. 이것은 수치계산의 화학종과 반응에 따라 달라질 수 있으며, 최근 연구에 의하면 탄화수소 연료를 MILD 연소시킬 경우 온도가 대략 1,720 K 이하가 되면 무화염 상태로 관측되어 MILD 연소모드로 보인다고 알려져 있다.[42] 따라서 실제 실험과 CFD 해석결과 모두 1,720 K 이하이기 때문에 무화염 모드로 관찰될 것으로 생각된다. 따라서, CFD 해석결과는 신뢰성이 있다고 판단이

되므로, 실제 연소기의 내부의 유동을 해석하는데 사용하였다. Fig. 4.9[43]는 CFD를 이용한 MILD 연소실 내부온도 분포 결과를 도시화 하였다.  $N_{fuel}=1$ 개의 경우에는 연료의 유속이 세기 때문에 고온대가 천장 벽면 근처의 하류에서 형성되고 있는 반면,  $N_{fuel}=6$ 개의 경우에는 상대적으로 연료 유속이 낮기 때문에 연소실 중심부 근처에서 1,700 K 근처의 고온영역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 온도분포에 대한 CFD 결과를 보면,  $N_{fuel}=1$ 개보다는  $N_{fuel}=6$ 개의 경우가 고온영역이 넓기 때문에 무화염 모드를 형성시키기 더 어렵고 온도에 민감한 NOx의 배출 측면에서도 불리할 것으로 판단이 된다. 따라서, 실제 실험과 CFD 해석을 통해서 대용량 MILD 연소기에서는 공기 노즐 주위에 환형으로 있는 6개의 연료노즐을 사용하는 것보다, 중심부 1개의 연료노즐을 사용하는 경우가 MILD 연소상태를 얻는데 좀 더 효과적인 것을 확인하였다.



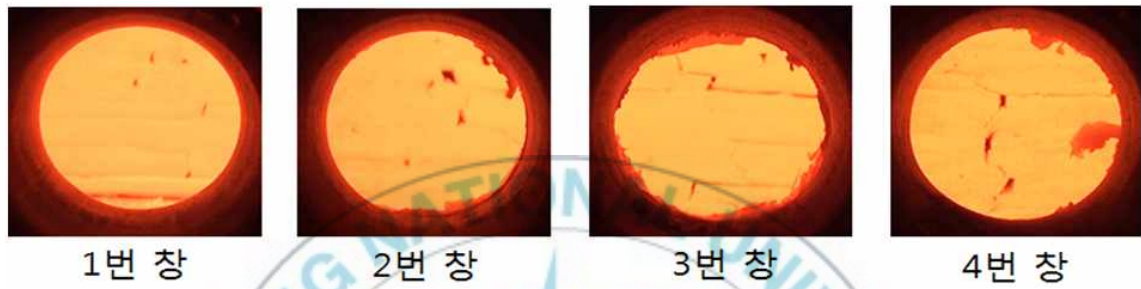


Fig. 4.6 The photograph of conditions of flameless combustion for inside of MILD combustion ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 12초$ ,  $N_{fuel} = 1개$ ).

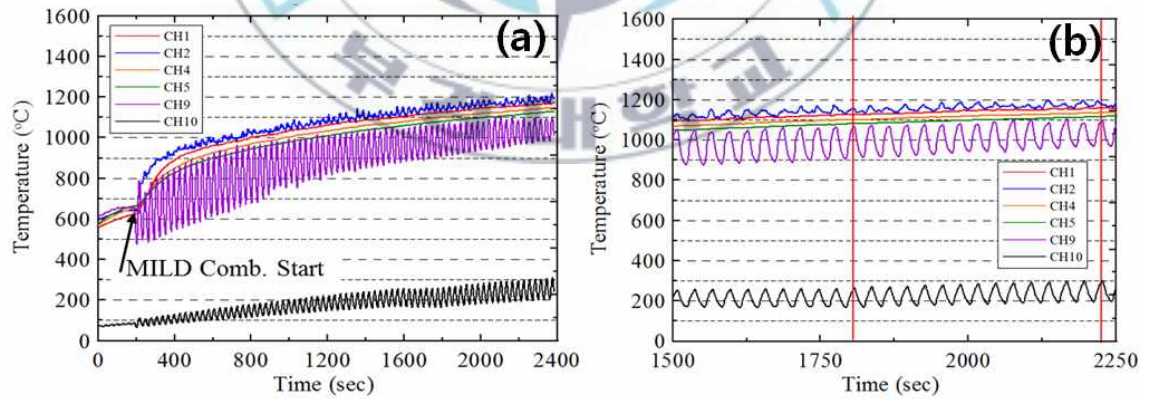
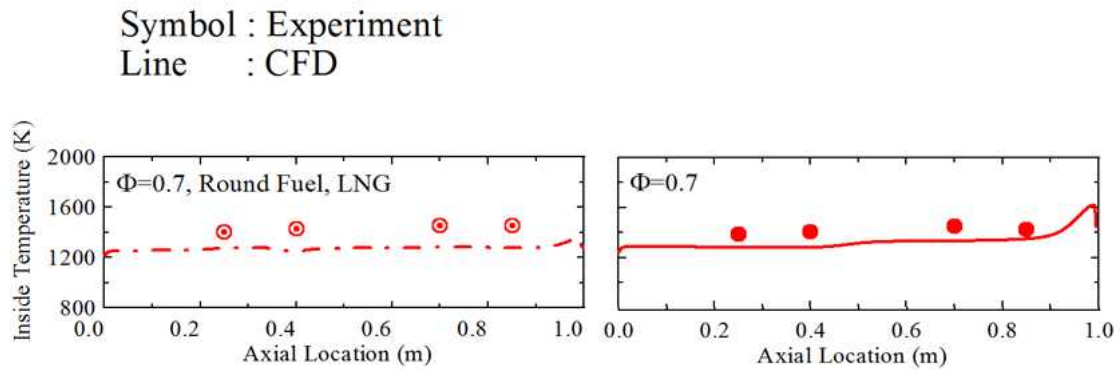


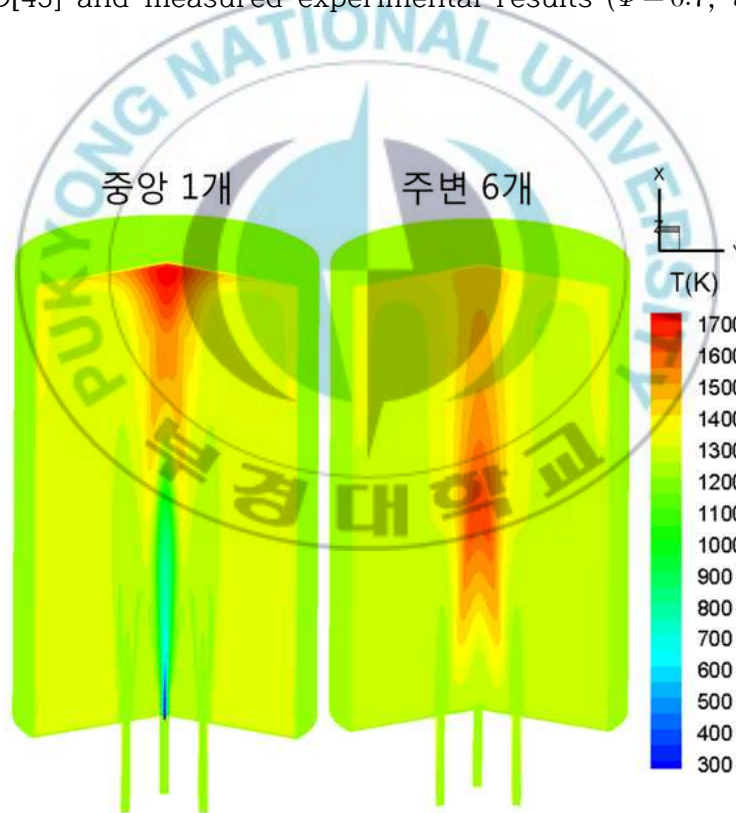
Fig. 4.7 (a) measured temperature results from pilot Burner heating, (b) Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 12초$ ,  $N_{fuel} = 1개$ ).

**Table 4.2** Combustion efficiency for array of fuel supply nozzle.

| $N_{fuel}$  | 조건           |            | 온도 효율<br>[%] | 폐열 회수율<br>[%] | 시스템 효율<br>[%] |
|-------------|--------------|------------|--------------|---------------|---------------|
|             | $t_{switch}$ | $\Phi$     |              |               |               |
| <b>6 ea</b> | <b>18 s</b>  | <b>0.7</b> | 79.5         | 75.2          | 78.7          |
| <b>6 ea</b> | <b>12 s</b>  | <b>0.7</b> | 78.8         | 79.5          | 78.7          |
| <b>1 ea</b> | <b>12 s</b>  | <b>0.7</b> | 86.7         | 90.9          | 83.4          |



**Fig. 4.8** Temperature in inside of MILD combustion for array of fuel supply nozzle by CFD[43] and measured experimental results ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch} = 12\text{초}$ ).



**Fig. 4.9** Temperature distribution of using CFD numerical results in inside of MILD combustor. ( $\Phi=0.7$ ,  $t_{switch} = 12\text{초}$ ). [43]

## 4.2 절환시간에 따른 MILD 연소 특성

### 4.2.1 실험 조건

앞 장의 연료공급 노즐 배열의 최적화 실험을 통해서 본 실험에서 사용된 대용량 MILD 연소기에서는 공기 노즐 주위에 환형으로 있는 6개의 연료노즐을 사용하는 것보다, 중심부 1개의 연료노즐을 사용하는 경우가 MILD 연소상태를 얻는데 좀 더 효과적인 것을 확인하였다. 따라서, 절환시간( $t_{switch}$ ) 최적화 실험에서는 연소기 중심에 있는 1개의 연료노즐에서 연료는 LNG를 공급하였고, 연료와 공기의 비는 총괄 당량비를 사용하여  $\phi=0.7$ 의 조건으로 공기를 공급하였다. 본 실험에서는  $t_{switch}$ 를 변수로 두었다. 최적의  $t_{switch}$ 을 확인하는 이유는 축열과 열재생을 최적하기 위해서는 공급공기 라인과 배기라인의 적절한 스위칭이 필요하다. 이 때, 너무 짧은 시간 후에 절환시키면 충분한 열회수가 불가능하며,  $t_{switch}$ 을 너무 크게하면 축열체가 이미 많은 열교환을 하여 온도가 낮아지게 되므로 회수하게 되는 열이 적어지게 된다. 본 실험에서의 절환밸브의  $t_{switch}$ 을 9초, 12초, 15초, 18초로 3초씩 증가시키면서 열재생기의 성능을 알 수 있는 온도효율, 폐열 회수율과 MILD 연소성능을 볼 수 있는 무화염 상태, NOx 배출특성 및 CO<sub>2</sub> 저감율을 확인 하므로써 최적의  $t_{switch}$ 을 판단하였다.

**Table 4.3** Experimental conditions of optimization experiments of configuration for time of switching valve System.

|                                             | <b>Condition 1</b> | <b>Condition 2</b> | <b>Condition 3</b> | <b>Condition 4</b> |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Power [kW]</b>                           | 40                 |                    |                    |                    |
| <b>Fuel</b>                                 | LNG                |                    |                    |                    |
| <b><math>\Phi</math></b>                    | 0.7                |                    |                    |                    |
| <b><math>N_{\text{fuel}}</math> [개]</b>     | 1                  |                    |                    |                    |
| <b>Nozzle I.D. [mm]</b>                     | 6                  |                    |                    |                    |
| <b><math>t_{\text{switch}}</math> [sec]</b> | <b>9</b>           | <b>12</b>          | <b>15</b>          | <b>18</b>          |

#### 4.2.2 실험 결과

절환시간( $t_{switch}$ ) 최적화 실험은 앞 장의 연료노즐의 배열에 따른 MILD 연소 특성에 관한 실험에서 절환시간에 대한 MILD 연소 특성을 약간 언급하였으나, 절환시간에 대한 변수가 12초 18초 조건에서 연료노즐은 6개를 사용하였기 때문에 본 장에서는 연소기 중심에 있는 연료 노즐 1개를 사용하여  $\Phi=0.7$ 에서의 절환주기에 따른 실험 결과를 말하고자 한다. Fig. 4.10은 절환 시간에 따른 MILD 연소 영역에 들어갔을 경우 연소기 내부의 화염 사진이다.  $t_{switch}=9$ 초일 경우에는 전체적으로는 MILD 연소의 특징으로 알려진 무화염 현상이 나타나고 있다. 하지만, 연소기 제일 아랫부분을 볼 수 있는 1번 창을 보면, 간헐적으로 청염이 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 2, 3번 창에는 청염이 아닌 적염이 간헐적으로 생겼다가 사라지는 것을 확인 할 수 있었다.  $t_{switch}=15$ 초, 18초일 때에도 1번 창에서는 절환주기 9초일 경우보다는 약하지만 청염이 나타나고 있으며, 2, 3창에는 9초일 경우랑 똑같이 간헐적으로 적염이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.  $t_{switch}=9$ 초, 15초, 18초일 경우에는 화염의 특징이 유사하게 나타나고 있지만,  $t_{switch}=12$ 초일 경우에는 위의 세 조건과는 다르게 연소기 전체적으로 균일하게 무화염 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구실의 선행연구를 통해서 MILD 연소는 공급하는 공기의 온도와 연소실 내부의 온도, 그리고 연소실 내부의 온도와 밀접한 연관이 있기 때문에, 이 현상을 설명하기 위해서는 연소기 내부의 온도를 확인할 필요가 있다. Fig. 4.11은 연소실 내부로 유입되는 공기, 외부로 나오는 배기가스 온도와 연소실 내부의 온도를 나타내고 있으며, Fig. 4.11 (b)에서  $t_{switch}=12$ 초일 때가  $t_{switch}=9$ 초, 15초, 18초일 경우보다 연소실 내부온도가 높게 나타나고 있다.

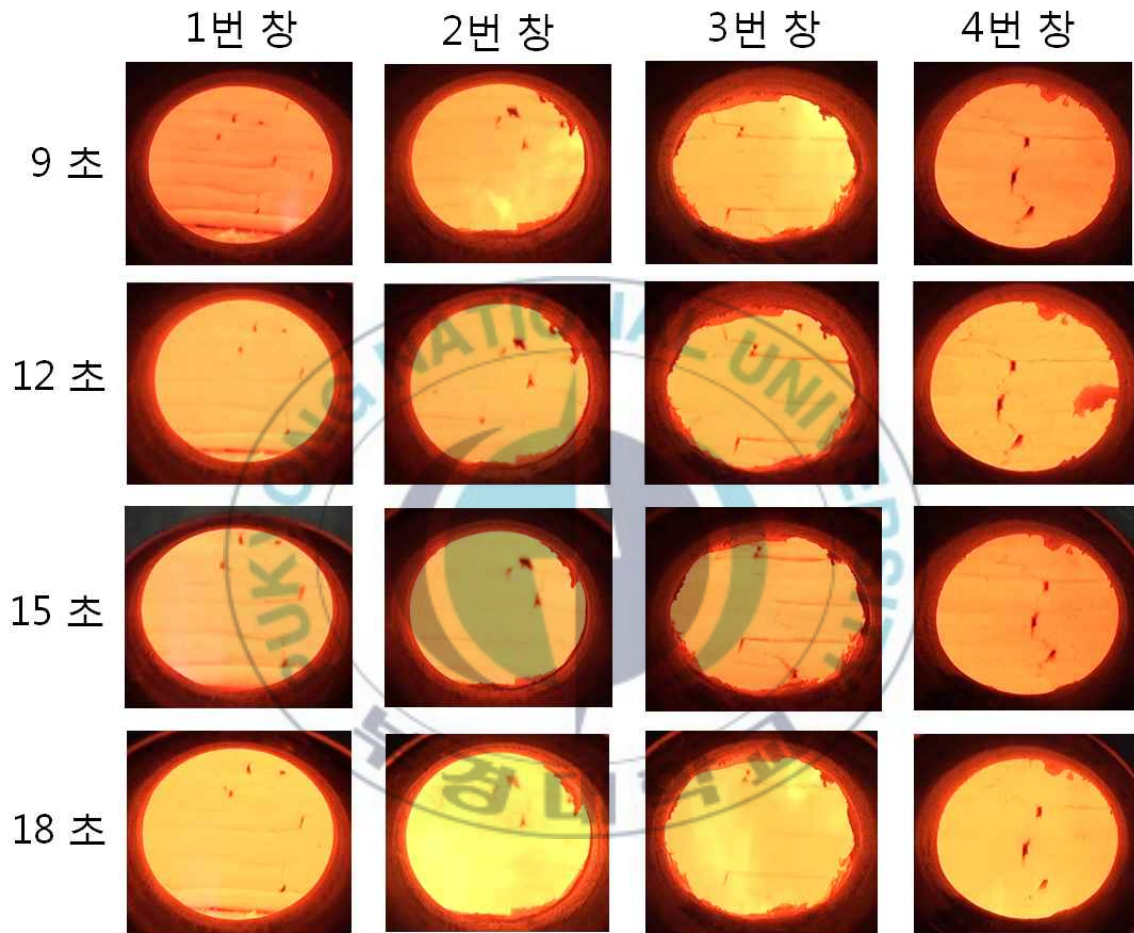
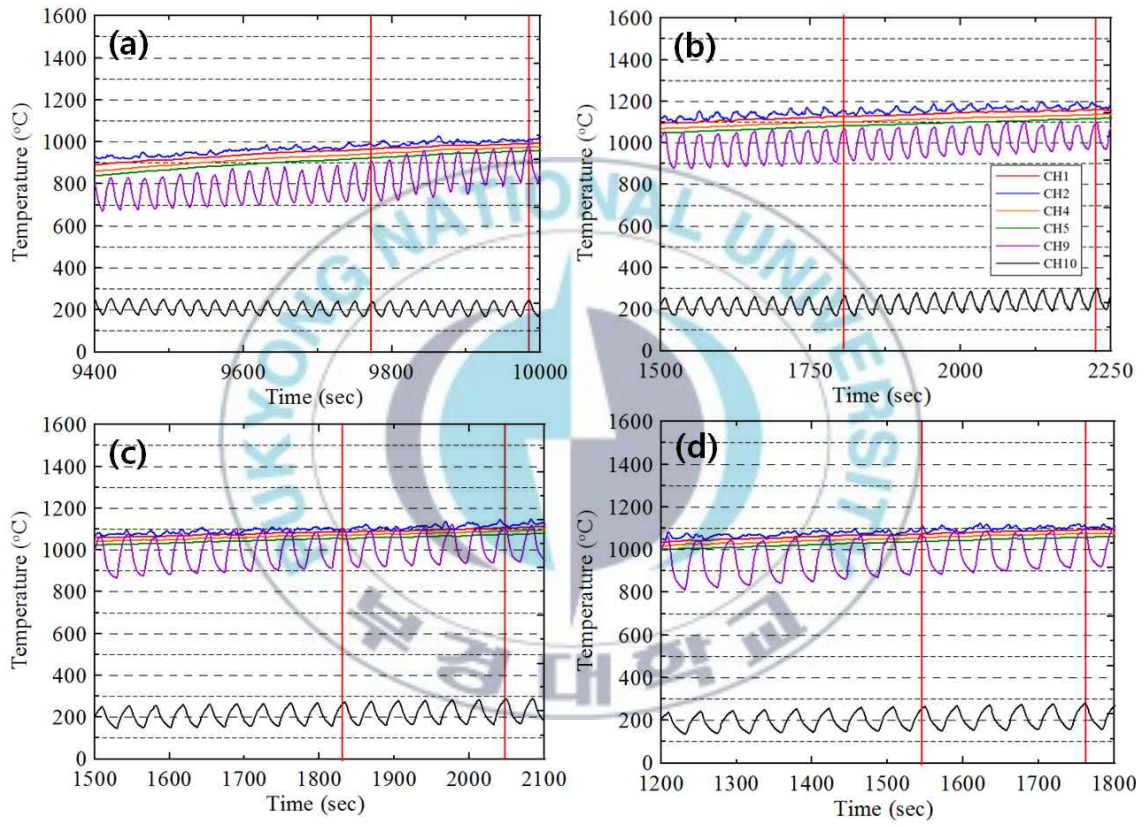


Fig. 4.10 The photograph of flameless combustion conditions for variation of switching time in inside of MILD combustor ( $\Phi=0.7, N_{fuel}=1$ 개).



**Fig. 4.11** Temperature change in quasi-steady state ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1$ 개).

(a)  $t_{switch} = 9초$ , (b)  $t_{switch} = 12초$ , (c)  $t_{switch} = 15초$ , (d)  $t_{switch} = 18초$ .

절환시간에 따른 4 조건 모두 온도영역이 1450℃이하로 마일드 영역에 들었음에도 불구하고  $t_{switch} = 12$ 초를 제외한 3 조건에서 화염이 생성이 되는 것은 연소실 내부에서 연소 생성물 그리고 주입하는 공기 등의 혼합 정도에 따라서 MILD 현상중 하나인 무화염의 발생과 밀접한 연관이 된다고 간주되어진다. 그리고  $t_{switch} = 9$ 초, 12초, 15초, 18초 4조건 중 최적의 상태를 보기를 위해서는 연소실의 내부 화염의 상태도 중요하지만 MILD 연소 특성인 연소 효율과 오염물질 배출량도 볼 필요가 있다.

Fig. 4.12는 절환시간 변화에 따른 MILD 연소기의 성능을 알 수 있는 온도효율( $\eta_T$ ), 폐열회수율( $\eta_{Regen}$ )과 오염물질 중 하나인 NOx 배출량과 그 순간의 MILD 연소기 내부 온도를 도시화하고 있다. Fig. 4.12의 결과에서  $\eta_T$ 와  $\eta_{Regen}$ 을 보면  $t_{switch} = 9$ 초일 때가 80% 미만으로 가장 낮게 나타나고 있으며,  $t_{switch} = 12$ 초일 경우가 가장 높았다. 그 이후 절환시간을 늘렸을 때에는  $\eta_T$ 와  $\eta_{Regen}$ 은 점점 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 연소실 내부온도의 경향을 따르고 있음을 알 수 있다.  $t_{switch} = 9$ 초일 때가 연소실 내부온도가 가장 낮게 나타난다. 이것을 미루어 보아 열재생기에서 축열이 충분히 되지 않아서 연소실 내부온도가 낮아지는 것을 알 수 있었고,  $\eta_T$ 와  $\eta_{Regen}$ 은 이러한 온도의 함수이기 때문에 이러한 경향을 따라간다. 그리고  $t_{switch} = 15$ 초, 18초부터는 연소실 내부 온도가 감소하는 경향을 가진다. 이 경향은 열재생기에 상온의 공기의 유입 시간이 증가됨에 따라 연소실로 공급되는 공기온도가 열재생기에 축열되어 있는 열을 흡수하는 시간이 증가된다. 열재생기에 열이 한정적으로 축열이 되어 있는데 열을 흡수하는 시간이 증가가 되면 연소실 내부로 유입되는 공기의 온도가 낮아지게 된다. 따라서, 이러한 영향으로  $\eta_T$ 와  $\eta_{Regen}$ 가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4.12의  $t_{switch}$ 의 변화에 따른 NOx 분포를 보면  $t_{switch} = 9$ 초일 경우 NOx의 배출량은 20.16 ppm이 가장 낮게 측정 되었고,  $t_{switch} = 12$ 초일 경우의 NOx 배출량은 23.99 ppm으로 가장 많이 측정되었다. 선행연구를 따르면 화염 최고 온도에 의해서 NO의 생성에 영향을 준다고 보고된 바 있다. 따라서,  $t_{switch} = 12$ 초 경우 NOx 배출량이 가장 높게 나타난다. 따라서, NOx 배출량은 화염 최고 온도의 거동 경향과 유사하므로 연소실 내부 최고 온도가 가장 높은  $t_{switch} = 12$ 초일 경우가 NOx 배출량이 가장 높은 것으로 판단된다. 그리고,  $t_{switch} = 15$ 초, 18초의 화염 최고 온도가 유사하게 나오고 있지만,  $t_{switch} = 15$ 초일 경우 화염 최고 온도와 공급되는 공기의 온도가 높게 측정되고 있지만, NOx 배출량이 낮게 나타나는 경향은 연소실 내부 혼합 상태에 따라서 달라지는 것으로 판단된다. 선행연구에서 공기와 배기가스의 혼합비에서 배기가스의 혼합량이 감소할수록 NO의 양이 높게 나타나는 것을 확인한 바 있기 때문에  $t_{switch} = 15$ 초일 경우가  $t_{switch} = 18$ 초일 경우보다 연소실에서의 배기가스와 유입되는 공기의 혼합상태가 좋기 때문에 NOx의 배출량이 낮게 나타나는 것으로 판단이 된다.

Fig. 4.13은 연소실 출력 40 kW에서  $\Phi = 0.7$ ,  $N_{fuel} = 1$ 개로 고정하고  $t_{switch}$ 의 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 저감율을 도시화 하였다.  $\eta_{Regen}$ 을 재생기 효율( $\eta_R$ )로 두고 식 (2.2)을 이용하여 시스템 효율( $\eta_{SYS}$ )을 계산한 뒤 기존의 공업로의 열효율 차이로 CO<sub>2</sub> 저감율을 계산하였다. 기존에 MILD 연소기술을 적용하지 않은 공업로의 열효율은 35%~40% 정도가 되며, 연소기에서의 벽면 열손실률은 15%로 가정하였다. 실제 연소기에서는 대부분 배기가스로 열이 손실되며 벽면 열손실률이 15%정도까지 이르는 경우는 드물지만 여기서는 보수적인 계산을 위해서 15%로 가정하였다. 동일한 절환시간에서 CO<sub>2</sub> 저감율이 2개의 값을 가지는 이유는 기존 공업로의 열효율을

35%로 계산할 경우와 40%로 계산을 하였기 때문에 CO<sub>2</sub> 저감율이 최대값, 최소값으로 나타난다. Fig. 4.13에서 절환시간의 변화에 따라서 CO<sub>2</sub> 저감율이 증가되다가  $t_{switch} = 12$ 초 이후부터는 감소하는 경향을 보인다.  $\eta_{SYS}$ 은  $\eta_{Regen}$ 을 이용하여 계산하였기 때문에 Fig. 4.12의  $\eta_{Regen}$  경향과 유사하게 나타난다. 국내에서의 CO<sub>2</sub> 저감율이 25~30%이며, 세계최고 수준의 CO<sub>2</sub> 저감율은 40% 이므로,  $t_{switch} = 9$ 초일 경우를 제외하면 모든 조건에서 35%이상으로 국내의 최고 수준보다 높으며,  $t_{switch} = 12$ 초일 경우에는 최대 43% 정도가 저감되어 세계 최고 수준의 CO<sub>2</sub> 저감율과 비슷함을 확인할 수 있었다. 따라서  $t_{switch} = 12$ 초일 경우가 본 실험에서 사용한 MILD 연소기의 온도효율( $\eta_T$ ), 폐열회수율( $\eta_{Regen}$ )과 CO<sub>2</sub> 저감율이 가장 높게 측정되었으며, NO<sub>x</sub> 배출량이 다른 조건에 비해서 높긴 하지만 현재 사용되어지고 있는 연소로의 최저 NO<sub>x</sub> 배출량이 60 ppm과 비교하면 적은 양을 배출하기 때문에  $t_{switch} = 12$ 초일 경우가 최적의 MILD 연소상태를 얻는데 좀 더 효과적인 것으로 판단된다.

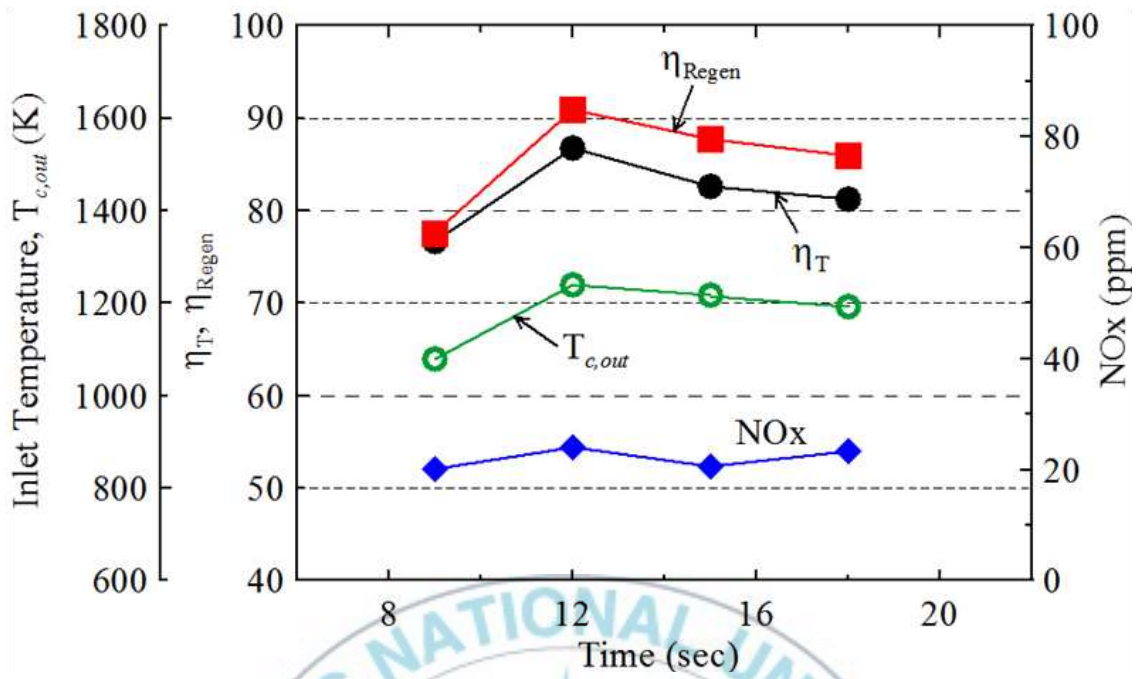


Fig. 4.12 MILD combustion efficiency and NOx emissions by variation of  $t_{switch}$  ( $\Phi = 0.7$ ,  $N_{fuel} = 17$ ).

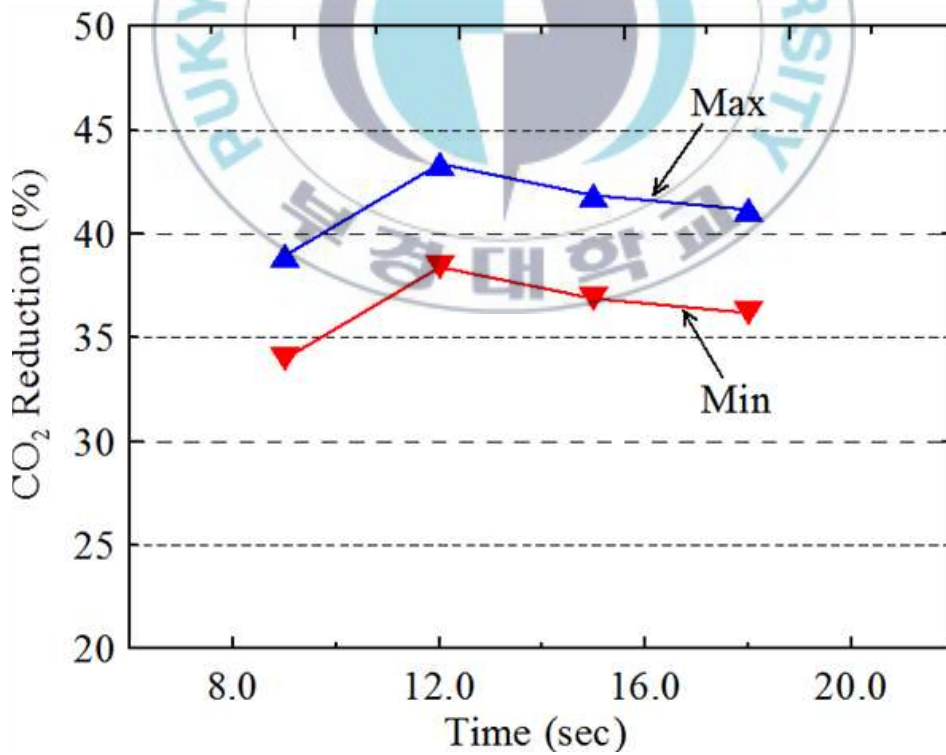


Fig. 4.13 CO<sub>2</sub> reduction for variation of  $t_{switch}$  in MILD combustor ( $\Phi = 0.7$ ,  $N_{fuel} = 17$ ).

### 4.3 당량비 변화에 따른 MILD 연소특성

#### 4.3.1 실험 조건

본 실험에서 사용된 연소기의 출력은 40 kW로 설정하였으며, 연료는 LNG를 공급하였다. 4.1 장에서 연료공급 노즐의 최적 배열에 관한 연구를 통해서 확인된 MILD 연소를 얻는데 적합한 노즐 배열인 연소기 중심에 있는  $N_{fuel}=1$ 개를 이용하여 연료를 공급하였으며, 4.2 장에서 MILD 연소기에 MILD 연소모드를 현상적으로 가장 잘 보여주었던  $t_{switch}=12$ 초로 절환시간을 고정하였다. 그리고, 본 실험에서는 **Table 4.4** 와 같이 변수로는 총괄 당량비( $\Phi$ ) 조건을 0.6, 0.7, 0.8과 0.9로 총 4개의 조건으로 MILD 현상을 해석할 수 있는 온도효율, 폐열 회수율을 통해 MILD 연소 특성을 비교 하였으며, NOx 배출특성 및 CO<sub>2</sub> 저감율, 매연 배출량 그리고 MILD 연소실 내부 온도를 측정하였다.

**Table 4.4** Experimental conditions of optimization experiments of global equivalence ratio( $\Phi$ ).

|                                             | Condition 1 | Condition 2 | Condition 3 | Condition 4 |
|---------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Power [kW]</b>                           | 40          |             |             |             |
| <b>Fuel</b>                                 | LNG         |             |             |             |
| <b><math>\Phi</math></b>                    | <b>0.6</b>  | <b>0.7</b>  | <b>0.8</b>  | <b>0.9</b>  |
| <b><math>N_{\text{fuel}}</math> [개]</b>     | 1           |             |             |             |
| <b>Nozzle I.D. [mm]</b>                     | 6           |             |             |             |
| <b><math>t_{\text{switch}}</math> [sec]</b> | 12          |             |             |             |

### 4.3.2 실험 결과

Fig. 4.14는  $N_{fuel} = 1$ 개,  $t_{switch} = 12$ 초 조건에서 당량비 변화에 따른 MILD 연소 효율, NOx 배출량 그리고 MILD 연소실 내부로 유입되는 공기의 온도를 도시화 하였다. 당량비 변화에 따른  $\eta_T$ 을 보면  $\Phi = 0.6$ 에서 가장 낮게 측정되었으며, 온도효율은 총괄 당량비( $\Phi$ )  $0.9 > 0.7 > 0.8 > 0.6$  순으로  $\Phi = 0.9$ 일 경우가 가장 높게 나타나는 것을 확인하였다. 온도효율이 높다는 것은 가열된 축열체가 유입되는 상온의 공기를 많이 가열을 하였다고 볼 수 있으며, 또한, 고온의 배기가스가 축열체를 많이 가열하였다고도 볼 수 있다. 당량비가 낮을수록 공기의 유량이 증가하며, 같은 체적 일 경우에는 증가된 유량으로 인해 공급되는 공기의 유속이 빨라져서 주입되는 공기를 충분히 가열하기 전에 재생기에서 연소기로 공기가 공급되기 때문으로 판단이 된다.

또한, Fig. 4.14에서  $\eta_{Regen}$ 을 보면  $\eta_T$ 와 유사한 경향으로  $\Phi = 0.6$ 일 경우에  $\eta_{Regen}$ 이 가장 낮게 나왔으며, 지그재그 모양의 경향을 나타낸다.  $\eta_T$ 와는 달리  $\eta_{Regen}$ 은  $0.7 > 0.9 > 0.8 > 0.6$  순으로  $\Phi = 0.7$ 가 최고 높은  $\eta_{Regen}$ 로 측정되었다.  $\eta_{Regen}$ 은 식 (3.2)을 이용하였으며,  $\eta_{Regen}$ 은 고온의 배기가스에서 공급된 열이 어느 정도가 공급되는 공기에 의해서 열을 회수하는 정도를 나타내는 값이며, 고온의 배기가스가 열 재생기에 축적시킨 열을 공급되는 공기가 열재생기에서 열을 많이 가져 올수록 높다. 따라서,  $\eta_{Regen}$ 은  $\Phi = 0.7$ 조건에 최고 높은 값을 가지기 때문에 축열체를 매개체로 유입되는 공기에 배기가스의 열을 많이 회수한다고 판단이 된다.

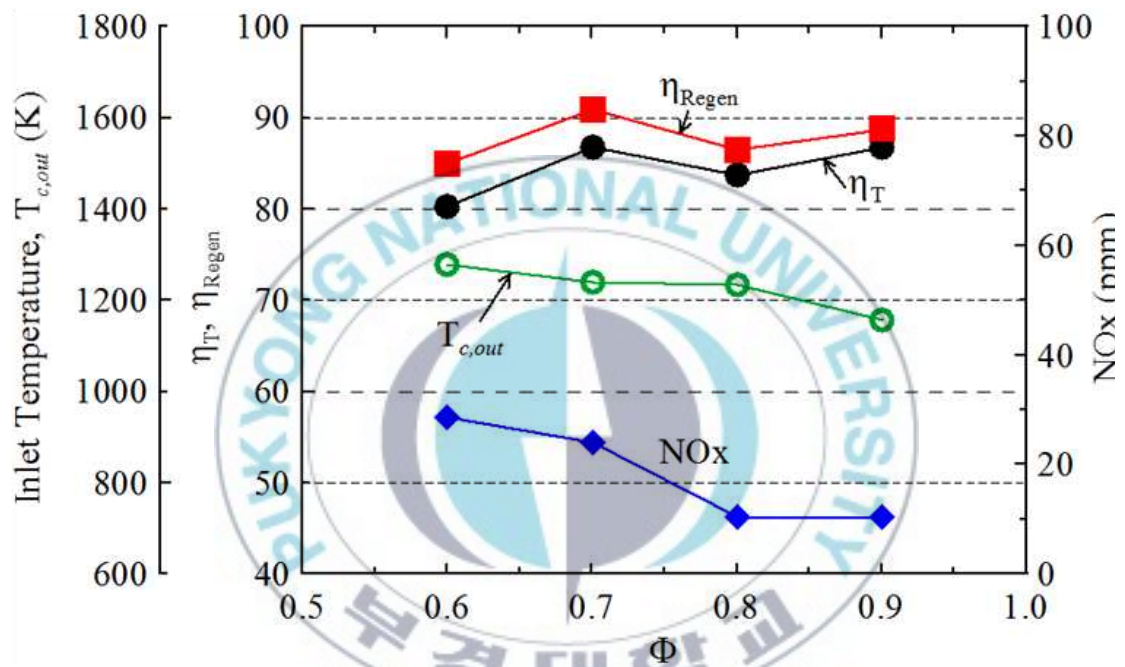


Fig. 4.14 MILD combustion efficiency and NOx emissions by variation of  $\Phi$  ( $t_{switch} = 12\text{초}$ ,  $N_{fuel} = 1\%$ ).

Fig. 4.14에서 당량비 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 배출량을 보면 당량비가 과농해질수록 NO<sub>x</sub>가 적게 배출되는 특성을 보이고 있으며, 당량비가 과농해질수록 NO<sub>x</sub> 배출량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 연소실 내부로 유입되는 공기의 온도 경향과 유사하게 나타나고 있다. 이러한 경향은 NO<sub>x</sub> 배출량은 온도와 밀접한 연관이 있기 때문에 연소실 내부로 유입되는 온도의 경향과 유사하게 나타난다. 당량비 0.6조건에서는 연소실 내부로 유입되는 공기의 온도와 NO<sub>x</sub> 배출량이 가장 높게 나타나는데 이러한 높은 온도 조건에서는 NO<sub>x</sub> 배출량이 높게 나타나는 것은 다른 연구에서 고찰한 바 있기 때문에 본 실험에서의 경향은 타당성이 있다. 그리고 당량비 0.9조건에서는 연소기로 유입되는 공기의 온도가 가장 낮게 나타나고 있으므로 NO<sub>x</sub> 배출량이 가장 낮게 측정이 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4.15의 당량비 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 저감율은 기존 공업로의 열효율을 35%로 계산할 경우와 40%로 계산을 하였기 때문에 2개의 값을 가지고 있으며,  $\eta_{SYS}$ 은  $\eta_{Regen}$ 을 이용하여 계산하였기 때문에 Fig. 4.14의  $\eta_{Regen}$  경향과 유사하게 지그재그 모양의 분포를 도시화 하고 있다. CO<sub>2</sub> 저감율은  $\eta_{Regen}$ 이 가장 낮은  $\Phi=0.6$ 일 경우에 가장 낮게 확인이 되고, 다른 조건을 제외한  $\Phi=0.6$ 일 경우의 최소값이 기준량인 35%보다 아주 미소하게 낮게 나타난다. 그리고, 매연 배출량은  $\Phi=0.7$  조건에서 105.5 mg/kg으로 가장 낮은 배출량을 보이는 것을 확인하였으며,  $\Phi=0.6$  조건에서는 218.1 mg/kg으로 가장 많이 배출량을 보이는 것을 확인하였다.  $\Phi=0.6$  조건일 경우에는 간헐적으로 적염이 관찰되었는데 이러한 영향으로 매연 배출량이 가장 높게 측정이 되고 있음을 알 수 있으며,  $\Phi=0.9$  조건에서 매연 배출량이 증가하는 경향을 보이는 것은 공기보다 연료 성분 조성이 높아 탄화 계열의 성분이 증가하였기 때문에 매연 배출량이 증가한다고 판단하고 있으며, 다른 문헌을 참고 해보면 연소 생성물과 연료, 공기의 혼합 정도에 따라서 매연 배출량에 영향을 준다고 보고된

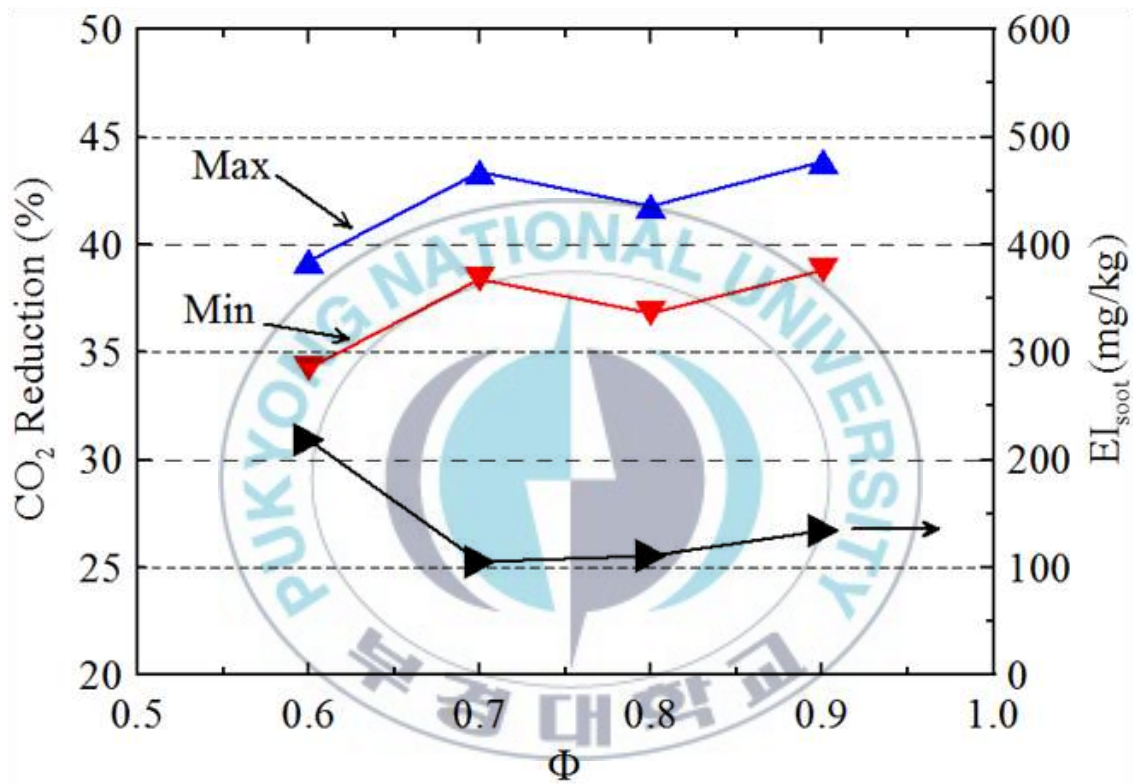


Fig. 4.15 CO<sub>2</sub> reduction and soot emissions in inside of MILD combustion by variation of  $\Phi$  ( $t_{switch} = 12\text{초}$ ,  $N_{fuel} = 1\text{개}$ ).

봐 있기 때문에 차후 연구에서는 CFD를 이용하여 연소실 내부의 연소 생성물과 연료, 공기의 혼합 상태 등을 연구가 필요하다.



## 4.4 합성가스 혼합에 따른 MILD 연소 특성

### 4.4.1 실험 조건

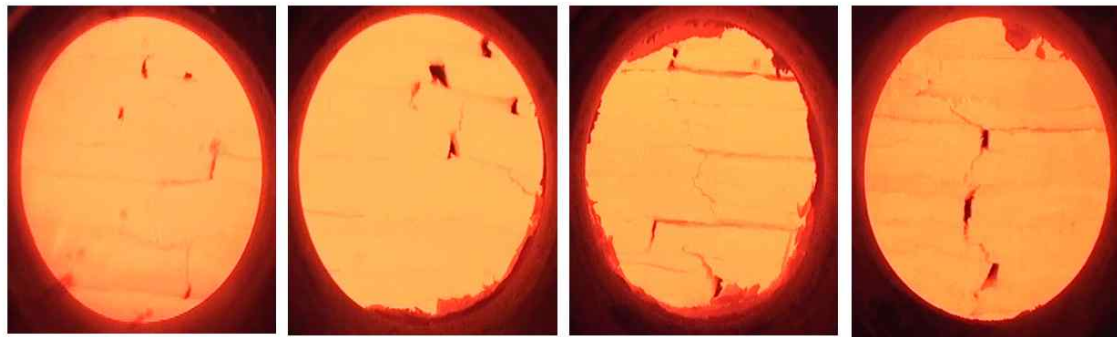
합성가스 혼합에 따른 MILD 연소 특성을 보기 위해서 **Table 4.5**에서 같이 연소기의 출력은 40 kW으로 연료를 LNG에 합성가스를 체적비 기준으로 30%, 50% 희석하여 공급하였다. LNG의 조성은 앞 실험에서 사용한 CH<sub>4</sub> 90%, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10%이고, 합성가스(Syngas)는 체적비 기준으로 H<sub>2</sub> 35%, CO 35%, CO<sub>2</sub> 30% 조성으로 하였다. 노즐 배열은 당량비 변화에 따른 MILD 연소 특성을 알아본 실험에서의 조건인  $N_{fuel} = 1$ 개로 고정하였으며,  $t_{switch}$ 은 연료의 특성이 변화했기 때문에 LNG를 이용한 실험에서 최적화된 절환시간  $t_{switch} = 12$ 초를 기준으로 3초를 더 증가해서  $t_{switch} = 12$ 초, 15초 두 조건에서 화염 특성을 보았다. 총괄 당량비( $\Phi$ ) 조건은  $\eta_{Regen}$ 이 제일 높고 매연 배출량이 제일 작은  $\Phi = 0.7$  조건으로 공기를 공급하였다.  $\Phi = 0.7$  조건을 정한 이유는 매연 배출량이 다른 조건 비해서 적게 배출되었기 때문이다. 매연은 탄화수소계 연료의 불안정한 연소 인해서 배출이 되는데  $\Phi = 0.7$  조건에서는 다른 조건에 비해서 안정한 연소를 한다고 판단이 되었으며,  $\eta_{Regen}$ 와  $\eta_{SYS}$ ,  $\eta_T$ 의 값으로 우수한 연소효율을 얻었기 때문에 합성가스 혼합에 따른 MILD 연소 특성 실험의 당량비 조건으로  $\Phi = 0.7$ 을 결정하였다. 이 경우 NO<sub>x</sub>의 배출량이 두 번째로 높게 나타나고 있지만, 세계 최고 수준의 NO<sub>x</sub> 배출량이 60 ppm을 감안하면 본 연소기의 LNG를 이용한  $\Phi = 0.7$ 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출량이 60 ppm 미만으로 측정된다. 따라서, 본 실험에서는 위와 같은 이유로  $\Phi = 0.7$  조건일 경우 본 조건에서 최적의 MILD 연소상태를 얻는데 좀 더 효과적인 것으로 판단된다.

**Table 4.5** Experimental conditions of optimization experiments of dilution rate of syngas.

|                           | Condition 1 | Condition 2 | Condition 3 | Condition 4 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Power [kW]                | 40          |             |             |             |
| Fuel [LNG:Syngas]         | 100 : 0     | 70 : 30     | 50 : 50     |             |
| $\Phi$                    | 0.7         |             |             |             |
| $N_{\text{fuel}}$ [개]     | 1           |             |             |             |
| Nozzle I.D. [mm]          | 6           |             |             |             |
| $t_{\text{switch}}$ [sec] | 12          |             |             |             |

#### 4.4.2 실험 결과

Fig. 4.16은 LNG에 합성가스를 30%를 혼합하여  $t_{switch} = 12$ 초일 경우의 MILD 연소실 내부의 화염 현상이다. 이 조건에서의 화염은 2, 3, 4번 창에서는 무화염 현상이 나오고 있으나, 사진으로 구분하기 힘들지만 실험 과정에서 1번 창 아랫부분에서 간헐적으로 청염을 확인을 하였다. 그리고 Fig. 4.17은 LNG에 합성가스를 30%를 혼합하여  $t_{switch} = 15$ 초일 경우의 MILD 연소실 내부의 화염 현상이다. 이 조건에서는  $t_{switch} = 12$ 초일 경우에는 1번 창 아랫부분에서 확인이 된 청염이 확인되었지만,  $t_{switch} = 15$ 초일 경우에는 청염이 나타나지 않으며 전체적으로 무화염이 균일하게 분포하는 것을 확인을 할 수가 있었다. 따라서, LNG에서는  $t_{switch} = 12$ 초일 경우가 최적의 절환시간이지만, 합성가스를 혼합에 따른 MILD 연소 특성을 알아보기 위한 본 실험에서는  $t_{switch} = 15$ 초가 최적의 절환시간으로 판단하였다. Fig. 4.18은 LNG에 합성가스를 50%를 혼합하여  $t_{switch} = 15$ 초일 경우의 MILD 연소실 내부의 화염 현상이다. 이 조건에서는 1번 창 하부측에 청염이 간헐적으로 확인되는 것을 확인되었다. 그리고, 합성가스 혼합에 따른 MILD 연소실 내부의 온도를 측정한 결과를 보여주고 있는 Fig. 4.19를 보면, 측정된 4개의 위치는 그림에서 CH1, CH2, CH4 및 CH5의 열전대 위치와 같다. 합성가스 혼합연료 조건에서 MILD 연소모드가 되면 연소실 내부의 온도는 1,400 K (1,100℃) 근처로 매우 균일해 지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 LNG를  $N_{fuel} = 1$ 개로 공급한 조건에서도 마찬가지로 1,400 K (1,100℃) 근처로 매우 균일해 지는 것을 확인할 수 있으며, 합성가스가 혼합될 경우에는 LNG 연료만 연소시킨 경우보다는 연소실 내부의 온도가 조금은 낮아졌음을 알 수 있다. 이 경우는 합성가스에 비활성 가스로 알려진 CO<sub>2</sub>를 혼합함에 따라



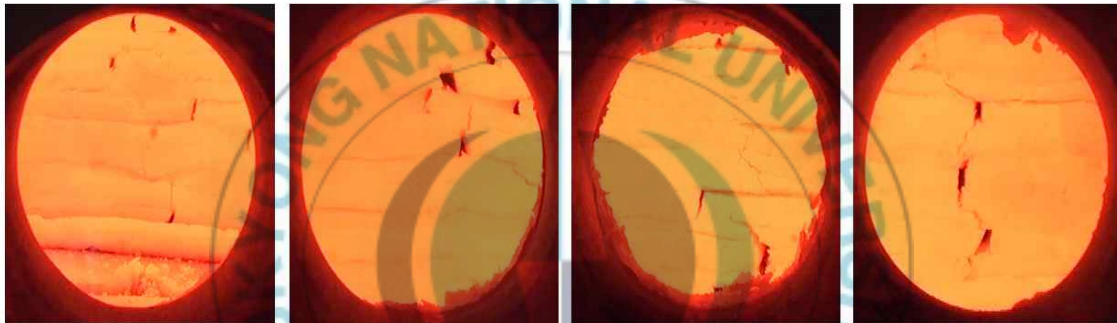
1번 창

2번 창

3번 창

4번 창

**Fig. 4.16** Inside of MILD combustor at LNG 70 % + Syngas 30 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1$ 개,  $t_{switch}=12$ 초).



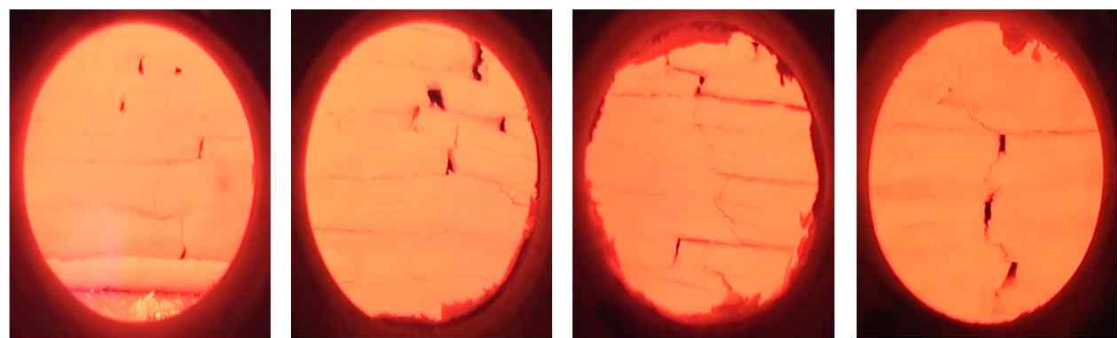
1번 창

2번 창

3번 창

4번 창

**Fig. 4.17** Inside of MILD combustor at LNG 70 % + Syngas 30 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1$ 개,  $t_{switch}=15$ 초).



1번 창

2번 창

3번 창

4번 창

**Fig. 4.18** Inside of MILD combustor at LNG 50 % + Syngas 50 % condition ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=1$ 개,  $t_{switch}=15$ 초).

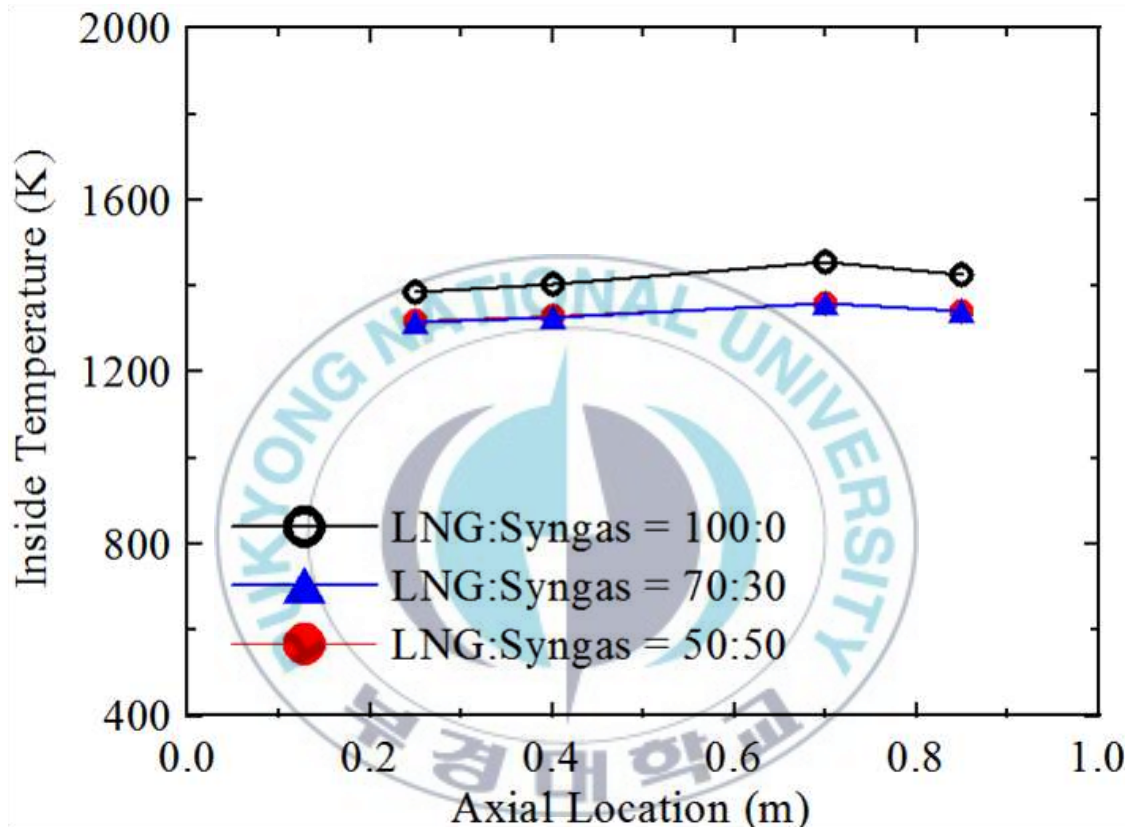


Fig. 4.19 Distribution of temperature in inside of MILD combustor. Tendency by variation in dilution rate of syngas ( $\Phi=0.7$ ,  $N_{fuel}=17\%$ ) and variation of  $\Phi$  in pure LNG conditions. ( $N_{fuel}=17\%$ ).

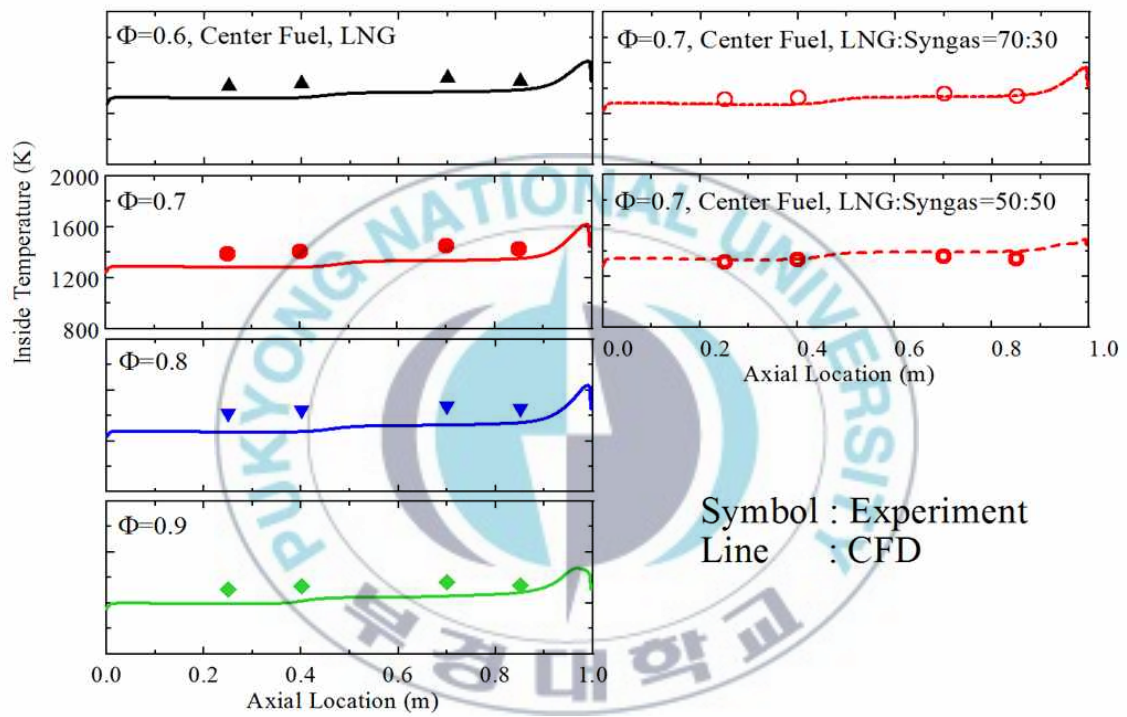
연료의 조성을 줄였기 때문에 연소실 내부 온도가 낮아졌다고 판단된다.

또한, 합성가스의 혼합비가 바뀌더라도 연소실 내부 온도의 변화는 거의 없는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.20은 앞 장에서 당량비 변화에 따른 MILD 연소특성에서 실제 실험과 CFD 계산으로 얻은 연소실 내부 온도 결과와 합성가스의 혼합비에 따른 연소실 내부 온도를 실제 실험과 CFD 계산을 비교하여 도시화 하였다. 연료를 LNG만 사용하였을 때보다 LNG와 합성가스를 혼합한 혼합연료에 대해서는 CFD 예측값이 매우 정확히 예측하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 본 연구실에서 수행한 CFD 계산을 본 실험 결과를 해석하는데 참고 내용으로 사용하였다.

Fig. 4.21은 합성가스 혼합비 변화에 따른 각종 효율, 오염물질인 NO<sub>x</sub>의 배출량과 연소기 내부로 유입되는 공기의 온도를 도시화 하였다.  $\eta_T$ 은 합성가스를 혼합할수록 감소되는 경향을 보이고 있으며,  $\eta_{Regen}$ 은 합성가스를 30% 혼합했을 때까지는 감소하지만, 그 이후로는 증가하는 경향을 보이고 있다.  $\eta_T$ 이 미소하게 감소하는 것 경향은 불활성 기체인 CO<sub>2</sub>의 첨가로 연료성분의 감소를 하였기 때문에 감소하는 것으로 판단이 되며, Fig. 4.18에서 보면 1번 창에는 간헐적으로 청염이 생기는데 온도 효율을 측정하기 위한 온도 인자에 화염이 간접적으로 영향을 주기 때문에  $\eta_T$ 이 미소하게 감소하는 것으로 예측이 된다. 그리고,  $\eta_{Regen}$ 이 감소하다가 증가하는 경향은 연소기 내부로 유입되는 공기의 온도의 경향과 유사하다. 이유는 합성가스를 30% 혼합했을 경우에는 청염이 발생하지 않지만, 합성가스를 50% 혼합을 할 경우 청염이 발생한다.  $\eta_{Regen}$ 도  $\eta_T$ 와 같이 청염의 영향으로 열 회수에 영향을 주었다고 판단이 된다.

Fig. 4.21에서 NO<sub>x</sub> 배출량이 합성가스의 혼합비가 증가함에 따라 실험 측정값은 합성가스를 30 % 혼합한 조건에서 약간 감소하였다가 50 % 혼합조건에서 다시 조



(a) Pure LNG,  $N_{fuel} = 1$  (b) LNG+Syngas,  $\Phi = 0.7$ ,  $N_{fuel} = 1$

**Fig. 4.20** Temperature in inside of MILD combustion for variation of  $\Phi$  by CFD [43] and measured experimental results.

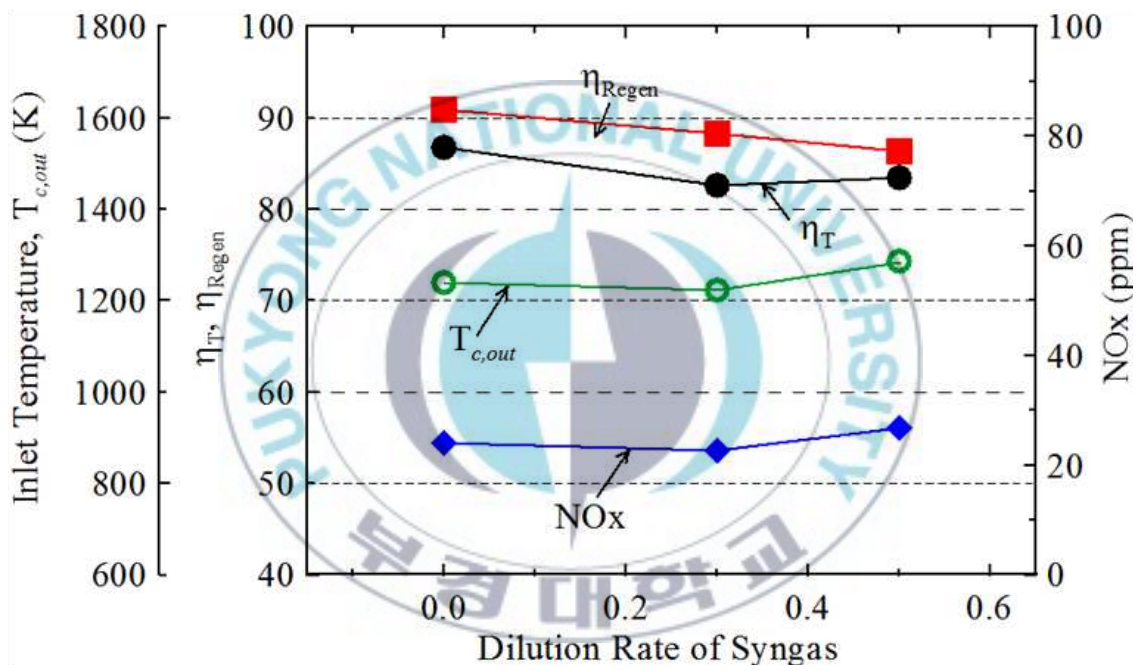
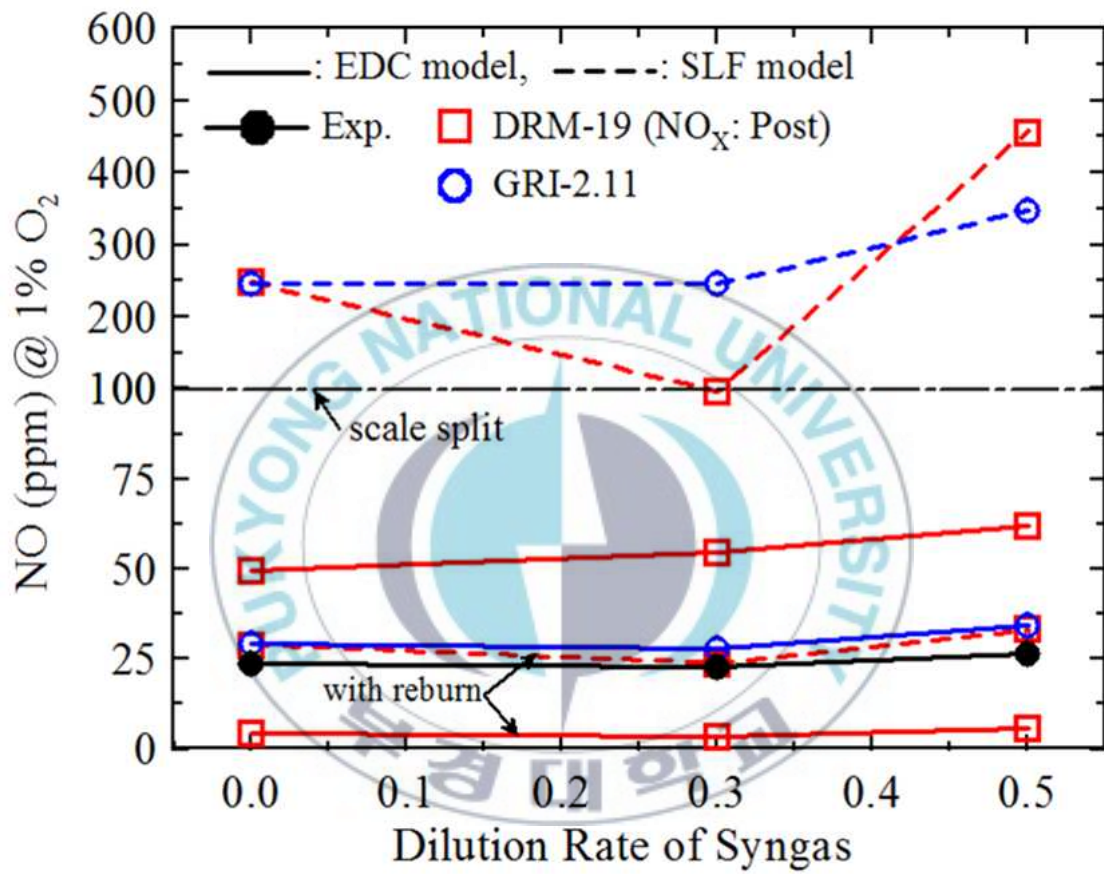


Fig. 4.21 MILD combustion efficiency and NOx emissions by dilution rate of syngas ( $\Phi = 0.7$ ,  $t_{switch} = 15\text{ 초}$ ,  $N_{fuel} = 1\%$ ).



**Fig. 4.22** Comparison of NO emission changed 1% O<sub>2</sub> in dilution rate of syngas predicted by CFD and measured experimental results [44].

금 증가하는 경향을 나타내지만 그 차이는 다소 미소함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 4.22에서 본 연구팀에서 CFD 수치계산으로 합성가스 혼합비에 따른 배기구에서 1% O<sub>2</sub>로 환산한 NO의 배출농도 결과 값과 같은 경향으로 나타남을 확인 하였다. Fig. 4.23에서 CFD 수치계산 결과에 따르면 연소실 내부의 온도는 합성가스의 혼합물이 증가하면서 거의 변화가 없는 반면, 재생기에서 연소기로 유입되는 공기의 온도는 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과는 공기의 유입되는 노즐 근처에서 화염이 일부 존재하는 조건일 수도 있으며, Fig. 4.18에서 확인한 바와 같이 실제 실험에서도 합성가스를 50 % 혼합한 조건에서 간헐적으로 청염이 관찰되고 있다. 따라서, 선행 연구를 통해서 NO<sub>x</sub> 발생은 화염의 발생 여부와 내부 온도 및 유입공의 공도가 증가하게 되면 증가되는 경향을 보이고 있기 때문에, 본 연구에서 합성가스를 50 % 혼합한 조건에서 NO<sub>x</sub> 배출량의 증가는 화염의 발생과 유입되는 공기의 온도의 증가를 하기 때문으로 판단이 된다.

CO<sub>2</sub> 저감율은 기존 공업로의 열효율을 35%로 계산할 경우와 40%로 계산을 하였기 때문에 2개의 값을 가지고 있으며,  $\eta_{SYS}$ 은  $\eta_{Regen}$ 을 이용하여 계산하였기 때문에

Fig. 4.24는 혼합가스 혼합비 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 저감율과 매연 배출량을 도시화 하였다. 먼저, CO<sub>2</sub> 저감율을 보면 앞에서의 실험 결과들을 보면 순수 LNG를 연료로 사용할 경우  $\eta_{Regen}$ 의 경향과 유사하게 나오고 있으나, 혼합연료를 사용할 경우에는 합성가스를 혼합할수록 CO<sub>2</sub> 저감율이 낮아지는 것을 확인 하였다. 이 결과는 CO<sub>2</sub> 저감율을 산정한 식 (3.5)를 보면  $\eta_{SYS}$ 을 계산하기 위해서  $\eta_{Regen}$  뿐만 아니라 연료와 배기가스의 유량에 의해서 그 값이 변할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 혼합가스 혼합비 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 저감율은  $\eta_{Regen}$ 의 경향과 다르게 나타난다고 판단이 된다. 또한, 매연 배출량은 합성가스를 혼합할수록 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 순수 LNG를 사용한 조건에서는 100 mg/kg을 조금 상회하던 값이 합성가스

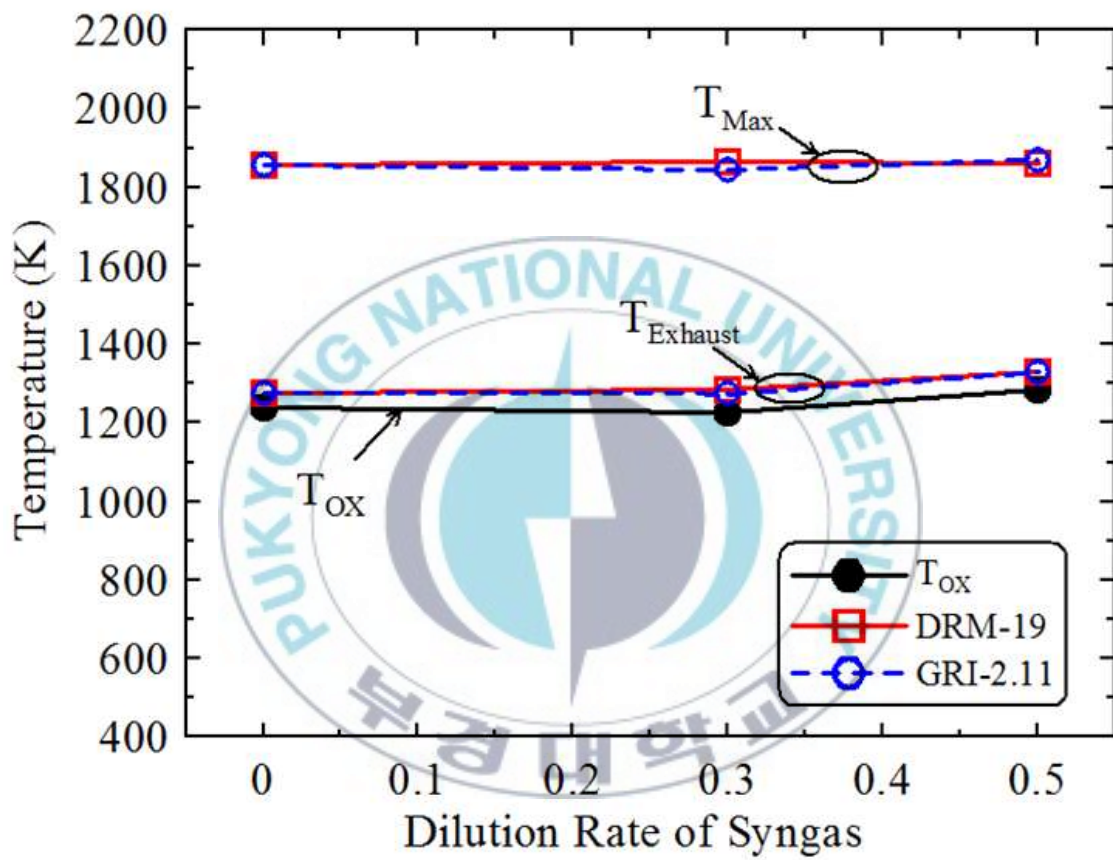
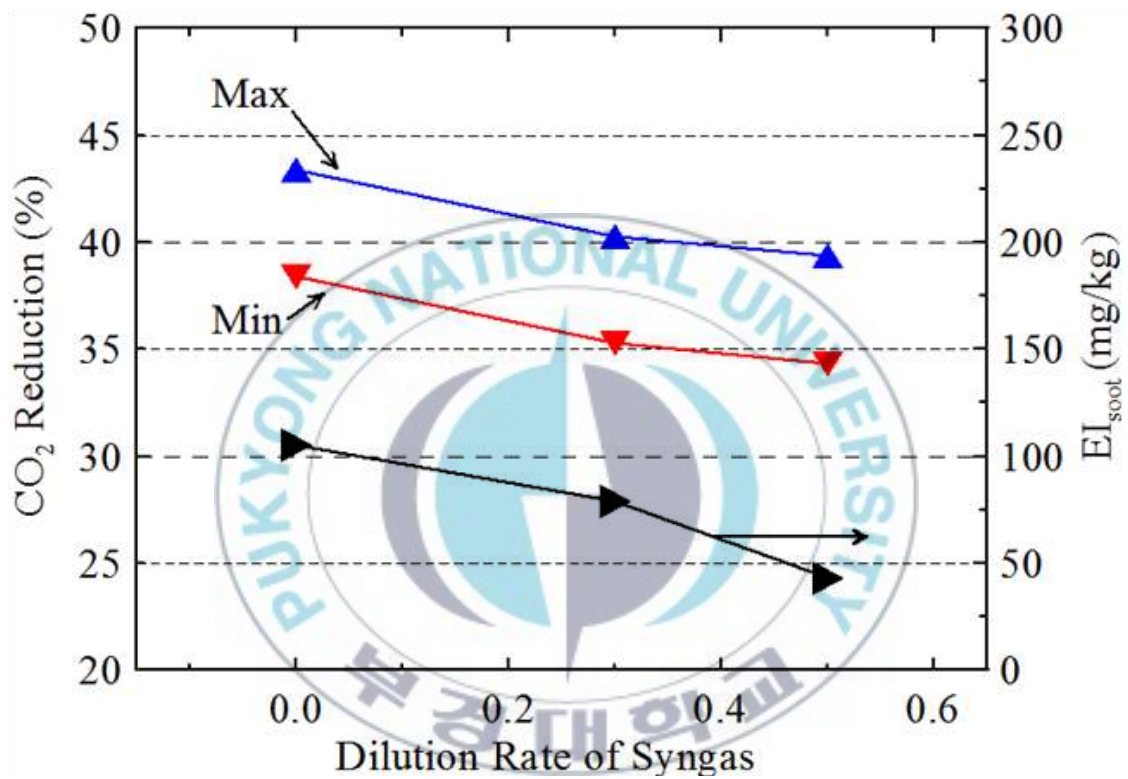


Fig. 4.23 Responses of inlet air, exhaust and maximum temperature in dilution rate of syngas [44].



**Fig. 4.24** CO<sub>2</sub> reduction and soot emissions in inside of MILD combustion by dilution rate of syngas ( $\phi=0.7$ ,  $t_{switch}=15\text{초}$ ,  $N_{fuel}=17\%$ ).

를 50% 혼합하게 되면 50 mg/kg 이하의 값으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 그리고, 합성가스를 혼합하게 되면 NO<sub>x</sub> 측면에서는 동일한 발열량 대비 비슷하거나 약간 증가하는 경향을 보이지만 매연의 경우에는 50% 이하로 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 합성가스의 혼합에 따라 매연 배출량이 감소하는 이유는 매연의 생성과 연관이 되는 탄화수소계 연료를 줄이면서 합성가스의 조성을 증가하게 되면 매연을 발생시키는 탄소 성분을 줄이기 때문에 매연 배출량이 감소한다고 판단이 된다.



## 제 5 장 100kW급 MILD 연소기 운용절차

본 연구에서 사용된 MILD 연소기를 안정적으로 운용하기 위해서는 운용절차의 확립이 필요하다. 정확한 방법에 의해 운용하지 않을 경우에는 적염이 발생하여 연소기 벽면의 내구성에 손상을 주거나 미소한 폭발음, 진동 등의 소음을 유발하는 어려움이 있다. 또한, MILD 연소모드로 진입하기 전에 연소실 내부와 연소실 내부 벽면 등을 충분한 예열시키지 않으면 안정적인 MILD 연소모드에 진입 할 수가 없다. 따라서 본 연구의 MILD 연소기에 대한 많은 실험을 통해 다음과 같은 MILD 연소기의 운용절차를 확립하였다.

- ① 각 파일럿 버너(2대)에 연소용 공기를 60 LPM으로 공급한다. 이 때 질량유량계의 정확도를 높이기 위해 10 LPM 에서 점진적으로 증가시킨다.
- ② 마일드 연소기 제어반의 점화 스위치 On하여 점화용 열원(스파크)을 발생시킨다.
- ③ 각 파일럿 버너용 연료(LPG)를 8-10 SLPM 정도로 공급한다. 이 때 연소실 내 압력에 따라 공급 유량이 달라지므로 주의를 요한다.
- ④ 파일럿 버너의 점화를 가시화 창과 연소실 내부의 열전대 온도센서를 통해 확인한다.
- ⑤ 파일럿 버너의 화염모양을 관찰하며 각 파일럿 버너에 대한 공기의 유량을 60-90 SLPM 사이가 되도록 질량유량계를 조절한다.
- ⑥ 연소기 중간에 있는 환형 배기관을 10%만 개방한다.
- ⑦ 연소실 내부의 열전대 중 TC-6(가장 하단에 위치한 열전대)의 온도가 300℃가 되면 공급 공기를 150 SLPM, 연료를 15 SLPM으로 조절한다.

- ⑧ 화염의 생성여부를 가시화창을 통해 확인한다. 이 때, 화염이 생성되면 열전대 TC-4와 TC-5의 온도상승을 통해서도 확인 할 수 있다.
- ⑨ 화염형성 후 공기유량과 연료유량을 점진적으로 목표출력(100kW)에 대한 유량까지 증가시킨다.
- ⑩ 연소실 내부의 화염이 안정화되면 중간 환형 배기관을 닫는다.
- ⑪ 연소실 내부의 전체 온도를 열전대를 통해 살펴보고 TC-6의 온도가 650℃를 넘으면 2개의 파일롯 버너 작동을 중지시킨다.
- ⑫ 연소실 내부의 전체 온도를 살펴보고 TC-6의 온도가 700℃를 넘으면 절환을 시작하고 시간이 경과되면서 마일드 연소모드에 도달하도록 실험을 진행한다.
- ⑬ 마일드 연소모드에 도달하는 동안 모든 열전대의 온도 데이터를 모니터링하고, 무화염이 적절히 이루어지는지 가시화창을 통해 관찰한다.
- ⑭ 마일드 연소기를 정지시킬 경우에는 공기는 계속 공급되는 상태에서 연료공급을 우선 차단한다. 이때 공기는 연소실 내부의 온도가 충분히 낮아질 때까지 계속 공급한다. 열전대를 통해 연소실 내부의 온도가 300℃ 이하로 떨어진 것을 확인한 후 공기공급을 차단한다. 공기공급이 차단되면 절환밸브 시스템도 동시에 작동이 정지된다.
- ⑮ 전원을 차단하고 마일드 연소기 작동을 완전히 마감한다.

## 제 6 장 결 론

본 연구는 실험 및 CFD 수치계산을 수행한 선행연구를 통해 얻은 결과를 이용하여 실용화 100KW급 MILD 연소기의 설계 및 제작을 하였으며, 제작된 MILD 연소기를 이용하여 순수 LNG 와 체적비 기준으로 H<sub>2</sub> 35%, CO 35%, CO<sub>2</sub> 30% 조성으로 이루어진 합성가스와 LNG를 혼합한 혼합연료에 대한 MILD 연소 및 오염물질의 특성을 검토하기 위하여 실험을 수행하였다.

우선 제작된 실용화 100KW급 MILD 연소기의 설계를 마치기 위하여 순수 LNG를 연료 조건으로 총괄 당량비 0.7 조건과  $t_{switch} = 12$ 초로 고정한 뒤, 연료공급 노즐 배열 최적화 실험을 수행하였다. 본 실험의 결과로는  $N_{fuel} = 6$ 개 일 경우에는 온도 효율이 78.8%, 폐열 회수율이 79.5%이며 연소실 내부에서는 적염이 간헐적으로 확인이 되는 반면,  $N_{fuel} = 1$ 개 일 경우에는 온도효율이 86.7%, 폐열회수율이 90.9%로 연소효율이 더 좋았으며 가시적으로 무화염 현상이 균일하게 연소실 내부로 분포가 되어있음을 확인하였다. 그리고, 또 다른 조건에서의 MILD 실험으로 연료로는 순수 LNG를 이용하여  $N_{fuel} = 1$ 개 에서 공급하면서, 공기는 총괄 당량비는 0.7 조건으로 절환시간( $t_{switch}$ )의 최적화 실험을 수행하였다. 이 경우에는  $t_{switch} = 12$ 초 조건에서는 연소실 내부에 무화염 현상이 고르게 분포 하고 있으나,  $t_{switch} = 12$ 초 조건을 제외한 모든 조건에서 간헐적으로 청염과 적염이 발생하였다. 그리고 연소효율과 CO<sub>2</sub> 저감율이  $t_{switch} = 12$ 초 조건일 경우에 가장 우수하게 나왔으며, NOx 배출량은  $t_{switch} = 12$ 초인 조건이 가장 높게 나왔으나, 세계 최구 최고 수준의 NOx 배출량이 O<sub>2</sub> 1%를 기준으로 60 ppm 보다 적게 배출이 되었기 때문에, 실용화 100KW급 MILD 연소기의 최적화된 조건으로는  $N_{fuel} = 1$ 개 조건과  $t_{switch} = 12$ 초 조건에서

MILD 현상을 잘 현상한다고 확인되었다.

위의 최적화 된  $N_{fuel}=1$ 개조건과  $t_{switch}=12$ 초 조건을 이용하여, 연료는 순수 LNG에서 당량비 변화에 따른 연소효율 및 CO<sub>2</sub> 저감율, NOx 배출량, 매연 배출량에 대하여 비교 검토하였다. 연소 효율과 CO<sub>2</sub> 저감율이 당량비 0.7 조건과 당량비 0.9 조건에서 가장 우수함을 확인하였다. 하지만, 당량비 증가함에 따라 매연 배출량이 증가하며 당량비 0.7 조건일 경우가 매연 배출량이 가장 낮으며, NOx 배출량은 당량비가 감소함에 따라서 증가되는 경향으로 가지고 있음을 확인 되었지만, O<sub>2</sub> 1%를 기준으로 60 ppm 보다 적게 배출되고 있기 때문에 당량비 변화에 따른 최적의 MILD 연소특성은 당량비 0.7 조건일 경우가 적합하다고 판단이 된다.

LNG 연료와 합성가스의 혼합에 대한 MILD 연소특성을 검토하기 위하여,  $N_{fuel}=1$ 개 조건과  $t_{switch}=15$ 초, 당량비 0.7조건에서 실험을 수행하였다. 합성가스 30% 혼합한 조건에서  $t_{switch}=12$ 초일 경우 간헐적으로 화염이 되었으며,  $t_{switch}=15$ 초에는 균일한 화염을 확인하였다. 그리고  $t_{switch}=15$ 초에서 합성가스 50% 혼합한 조건의 화염은 연소기 하부측에서 간헐적으로 청염이 확인이 되었다. 합성가스 혼합률이 증가에 따라서 연소실 내부의 온도는 유사하게 측정이 되고 있으나, 온도효율은 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고, 재생 효율은 미소하게 감소하다가 증가하고 있으며, CO<sub>2</sub> 저감율은 단순히 감소하고 있음을 확인하였다. 그리고, 오염물질 배출 특성은 NOx 배출량은 합성가스 30% 혼합한 조건이 가장 낮게 측정이 되며, 매연 배출 특성은 합성가스 50% 혼합한 조건에서 가장 낮게 측정되고 있음을 확인이 되었다.

본 연구 결과에서 얻은 결과가 본 MILD 연소기에서 얻을 수 있는 최적의 조건이라고 단정 지을 수 없지만, 조건 선정 과정은 MILD 연소기의 전체적인 성능을 알아보기 위한 조건을 선정 하였으며, 본 연구 결과는 차후 국내에 개발된 MILD

연소기의 개발을 위한 중요한 정보가 될 수 있을 것으로 예상이 된다.

마지막으로 실용화 100KW급 MILD 연소기를 안정적으로 운용하기 위해서 MILD 연소기에 대한 많은 실험을 수행한 선행연구를 통해서 운용절차를 확립을 하였다. 운용절차 방법은 3.2.2 절에 자세히 설명을 해두었다.



## 참 고 문 헌

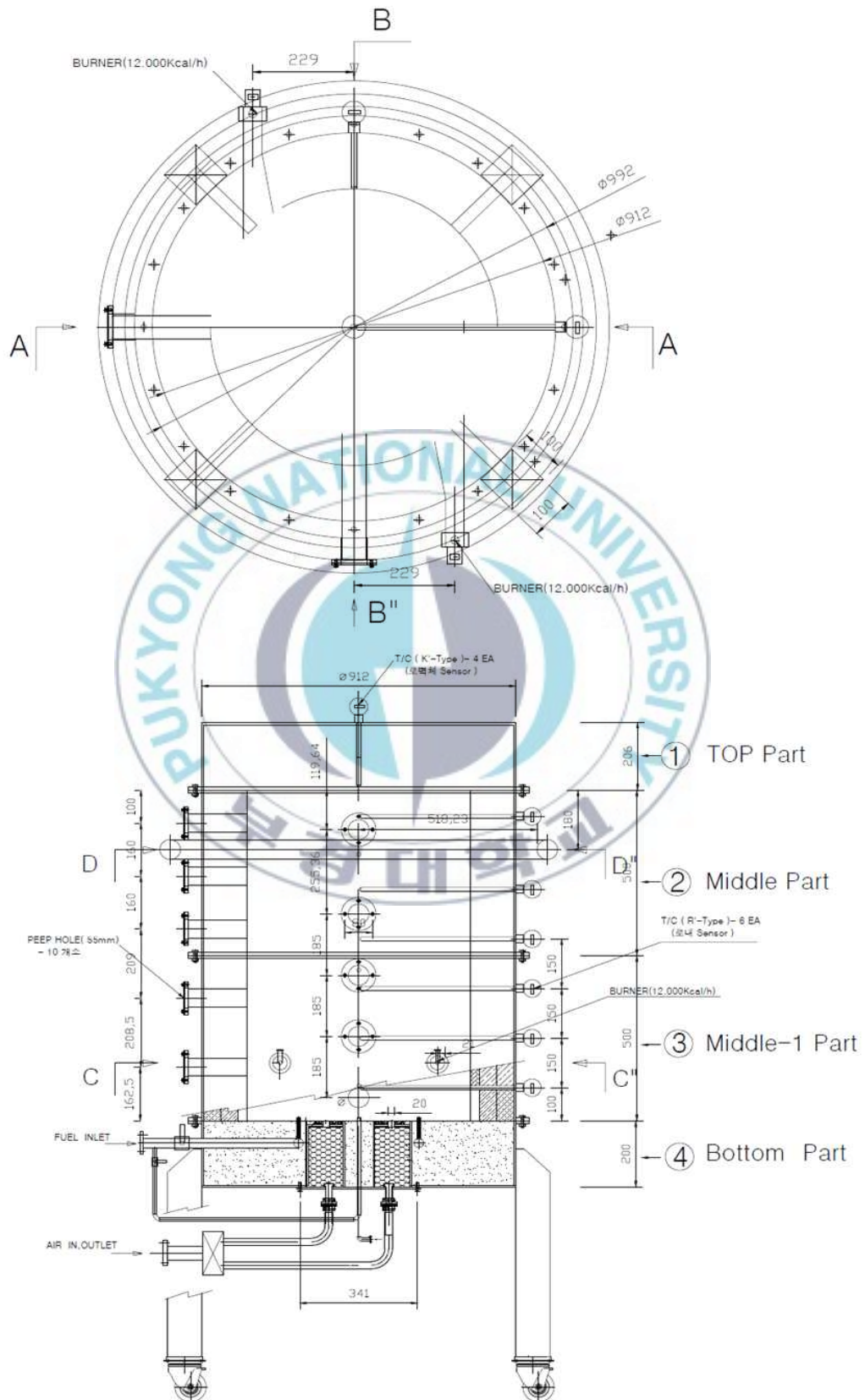
- [1] Cavaliere, A., and Joannon, M. "Mild Combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, pp. 329-366, 2004.
- [2] Wüning, J. A., and Wüning, J.G. "Flameless oxidation to reduce thermal NO<sub>x</sub>-formation", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, pp. 81-94, 1997.
- [3] Katsuki, M. and Hasegawa, T., "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 3135-3146, 1998.
- [4] Niioka, T., "Fundamentals and applications of high temperature air combustion", *Proceedings of the Fifth ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, San Diego*, 1999.
- [5] Guta, A. K., "Flame characteristic and challenges with high temperature air combustion", *Proceedings of Second International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnace, Jernkontoret-KTH, Stockholm, Sweden*, 2000.
- [6] Katsuki, M., and Ebisui, K., "Possibility of low nitric oxides emission from regenerative combustion systems using highly preheated air", *The First Asia-Pacific Conference on Combustion, Japan*, pp. 298-301, 1997.
- [7] Fujiori, T., Riechelmann and Sato, J., "Experimental study of NO<sub>x</sub> reduction by lifted turbulent jet flame in highly preheated flows", *The First Asia-Pacific Conference on Combustion, Japan*, pp. 294-297, 1997.
- [8] de Joannon, M., Saponaro, A., and Cavaliere, A., "Zero-dimensional analysis of methane diluted oxidation in rich conditions", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1639-1646, 2000.
- [9] Kreutz, T. G., Nishioka, M., and Law, C. K., "The Role of Kinetic Versus Thermal Feedback in Nonpremixed Ignition of Hydrogen Versus Heated Air.", *Combustion and Flame*, Vol. 99, pp. 758-766, 1994.
- [10] Kreutz, T. G., and Law, C. K., "Ignition in Nonpremixed Counterflowing Hydrogen versus Heated Air: Computational Study with Detailed Chemistry.", *Combustion and Flame*, Vol. 104, pp. 157-175, 1996.
- [11] Liu, W., Lu, T., and Law, C. K., "The Role of Double-turning in Counterflow Ignition of Methane, Ethylene and Methane/Hydrogen Mixtures.", *46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7-10 January 2008, Reno, Nevada*, AIAA 2008-994.

- [12] Peters, N. d“Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 10, pp. 319-339, 1984.
- [13] Peters, N. “Laminar flamelet concepts in turbulent combustion”, *Twenty-First Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA*, pp. 1231-1250, 1986.
- [14] Dally, B. B., Fletcher, D. F., and Masri, A. R., “Flow and Mixing Fields of Turbulent Bluff-body Jets and Flames”, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 2, pp. 193-219, 1998.
- [15] Christo, F. C. and Dally, B. B., “Modling Turbulent Reacting Jets Issuing into a Hot and Diluted Coflow”, *Combustion and Flame*, Vol. 142, pp. 117-129, 2005.
- [16] Dally, B. B., Fletcher, D. F., and Masri, A. R., “Flow and Mixing Fields of Turbulent Bluff-body Jets and Flames”, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 2, pp. 193-219, 1998.
- [17] Dally, B. B., Karpetis, A. N., and Barlow, R. S., “Structure of Turbulent Non-premixed Jet Flames in a Diluted Hot Coflow”, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, pp. 1147-1154, 2002.
- [18] Parente, A., Galletti, C., and Tognotti, L., “Effect of the Combustion Model and Kinetic Mechanism on the MILD Combustion in an Industrial Burner Fed with hydrogen Enriched Fuels”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 7553-7564, 2008.
- [19] Wang, L., Liu, Z., Chen, S., and Zheng, C., “Comparison of Different Global Combustion Mechanisms under Hot and Diluted Oxidation Conditions”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 184, pp. 259-276, 2012.
- [20] Cho, E. S., Kobayashi, H., and Chung, S. H., “A Numerical Analysis of the Characteristics with High Temperature Air Combustion in Counterflow Diffusion Flame”, *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 8, No. 4, pp. 9-14, 2003.
- [21] Kim, Y. J., Oh, C. B., and Fujita, O., “Prediction Performance of Chemical Mechanisms for Numerical Simulation of Methane Jet MILD Combustion”, *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 138729, Vol. 2013.
- [22] Kim, Y. J., Oh, C. B., and Fujita, O., “Global equivalence and Dilution Ratio Effects on the Flame Structure and Pollutants Emission of Methane MILD Jet Combustion”, *9th Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2013.
- [23] Kim, Y. J., and Oh, C. B., “Numerical Investigation of the Prediction Performance of the Chemical Kinetics for the MILD Combustion”, *24<sup>th</sup>*

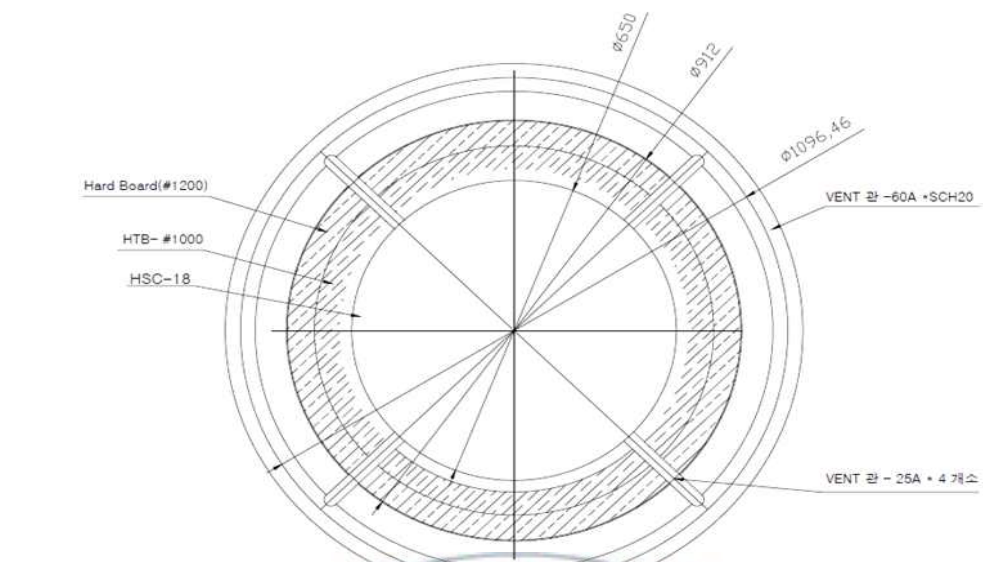
- International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS)*, 2013.
- [24] Song, K., M., Kim, Y. J., Oh, C., B., and Park, J., “Numerical Study of Ignition Characteristics of Combustion-product-diluted Air Non-premixed Flame”, *42th Symposium of the Korean Society of Combustion*, pp.167-173, 2011.
- [25] Hardestry, D. and Weinberg, F., “Burners Producing Large Excess Enthalpies”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 8, pp. 201-221, 1974.
- [26] Mi, J., Wang, F., Li, P., and Dally, B. B., “Modified Vitiation in Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution(MILD) Combustion Furnace”, *Energy Fuels*, Vol. 26, pp.265-277, 2012.
- [27] Szegő, G., Dally, B. B., and Nathan, G. J., “Operational Characteristics of a Parallel Jet MILD Combustion Burner System”, *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp.429-438, 2009.
- [28] Kumar, S., Paul, P. J., and Mukunda, H. S., “Studies on a New High-intensity Low-emission burner”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 1131-1137, 2002.
- [29] Li, P., Dally, B. B., Mi, J., and Wang, F., “MILD Oxy-combustion of Gaseous Fuels in a Laboratory-scale Furnace”, *Combustion and Flame*, Vol. 160, pp. 933-946, 2013.
- [30] Mi, J., Li, P., Dally, B. B., and Craig, R. A., “Importance of Initial Momentum Rate and Air-Fuel Premixing on Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) Combustion in a Recuperative Furnace”, *Energy Fuels*, Vol. 23, pp. 5349-5356, 2009.
- [31] Katsuki, M. and Hasegawa, T., “The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 3135-3146, 1998.
- [32] 하지수, 유상열, 심성훈, 김태권, 한국마린엔지니어링학회지, Vol.34, No.4, pp.485- 490, 2010.
- [33] 노동순, “에너지절약형 고온공기재생 연소기술 개발”, 한국에너지기술연구소, 온실가스 저감기술 개발 사업 보고서, 2000.
- [34] 이용국, “축열식 산소부화 연소시스템 개발”, 포항산업과학연구원, 온실가스 저감기술 개발사업, 2001.
- [35] Weber, R., Verlaan, A., L., Orsino, S., and Lallemand, N., “On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and drastic reductions in CO<sub>2</sub>, CO and NO<sub>x</sub> emissions”, *Journal of the Institute of Energy*, vol. 72, pp. 77-83, 1999.
- [36] Nakamachi, I., Yasukawa, K., Miyahata, T., and Nagata, T., “Apparatus or

- method for carrying out combustion in a furnace”, US Patent no. 4, pp. 945-841, August 7, 1990.
- [37] Ha, J., S., Park, J., Vu, T., M., Kwon, O., B., Yun, J., H., and Keel, S., I., “Effect of flame stretch in downstream Interaction between premixed syngas-air flames ”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 13181-13193, 2011.
- [38] Clavin, P., “Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 11, pp. 1-59, 1985.
- [39] Law, C., K., and Sung, C., J., “Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 26, pp. 459-505, 2000.
- [40] Kim, T., H., Park, J., Fujita, O., Kwon, O., B., and Park, J., H., “Downstream interaction between stretched premixed syngas-air flames”, *Fuel*, vol.104, pp.739-748, 2013.
- [41] Katsuki, M., and Hasegawa, T., “The science and technology of combustion in highly preheated air”, *Twenty-Seventh Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, Vol. 27, pp.3135-3146, 1998.
- [42] Medwell, P., R., and Dally, B., B., “Experimental Observation of Lifted Flames in a Heated and Diluted Coflow”, *Energy and Fuel*, vol.26, pp. 5519-5527, 2012.
- [43] 에너지기술개발사업 국제공동 연구, “단위 재생기를 적용한 고효율 합성가스 혼합 마일드 연소기 기술 개발”, *한국에너지 기술평가원*, 2013.
- [44] 김유정, “메탄 연료에 대한 MILD 연소 및 오염물질 배출 특성”, *부경대학교 학위 논문*, 2014

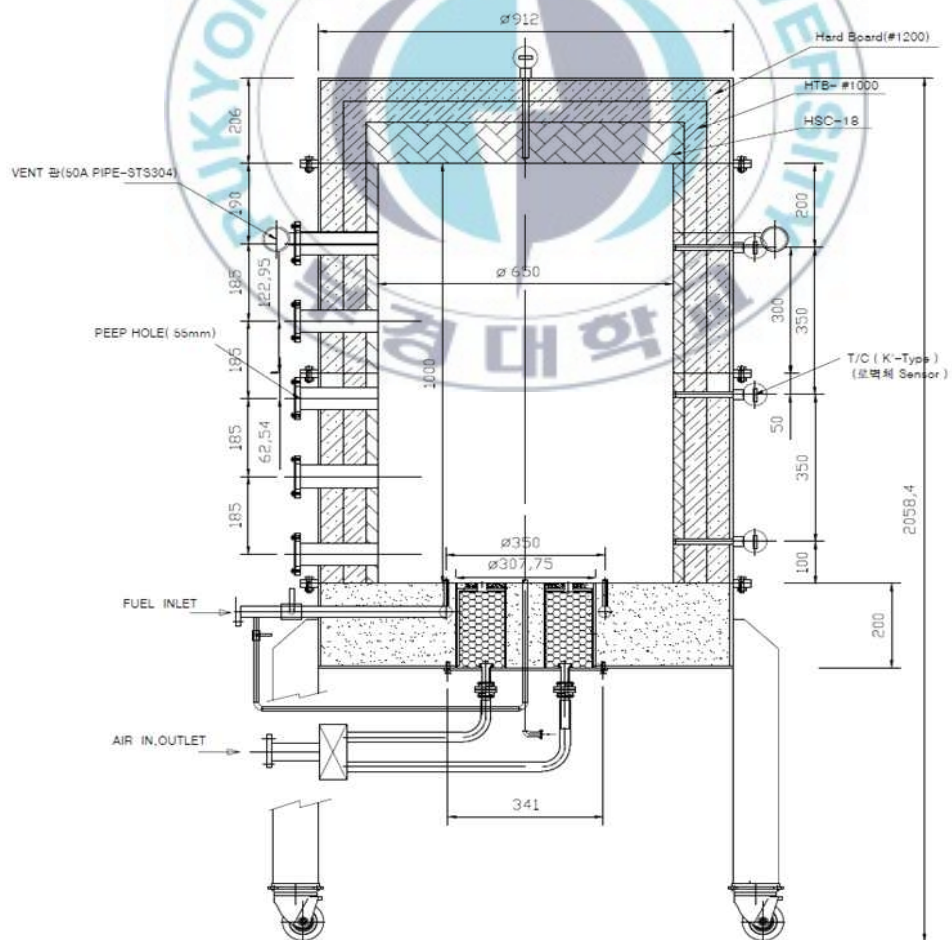
# 부 록



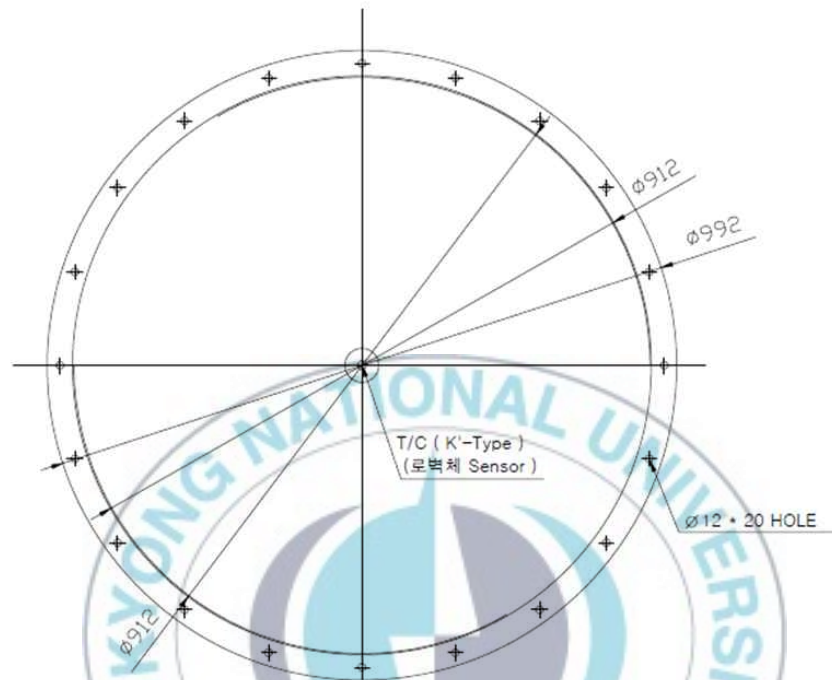




## SECTION D - D" ( VENT 관 )

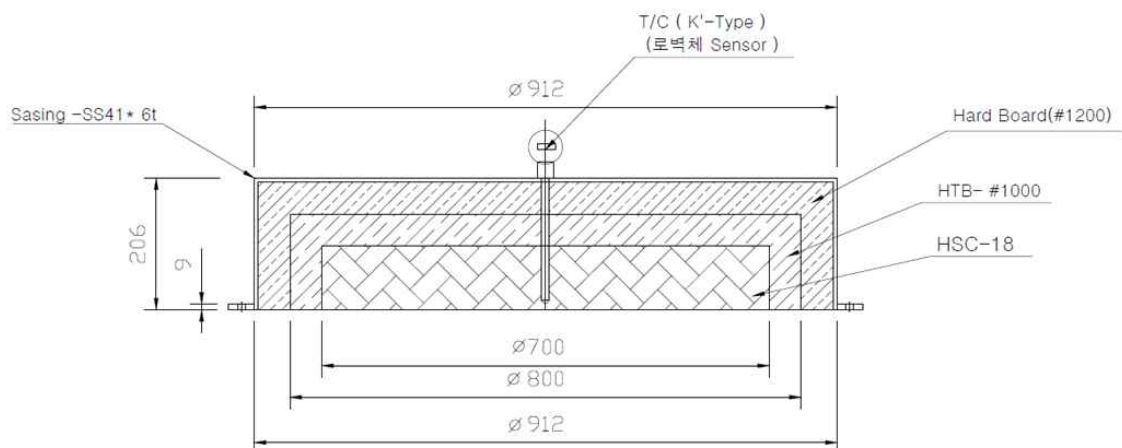


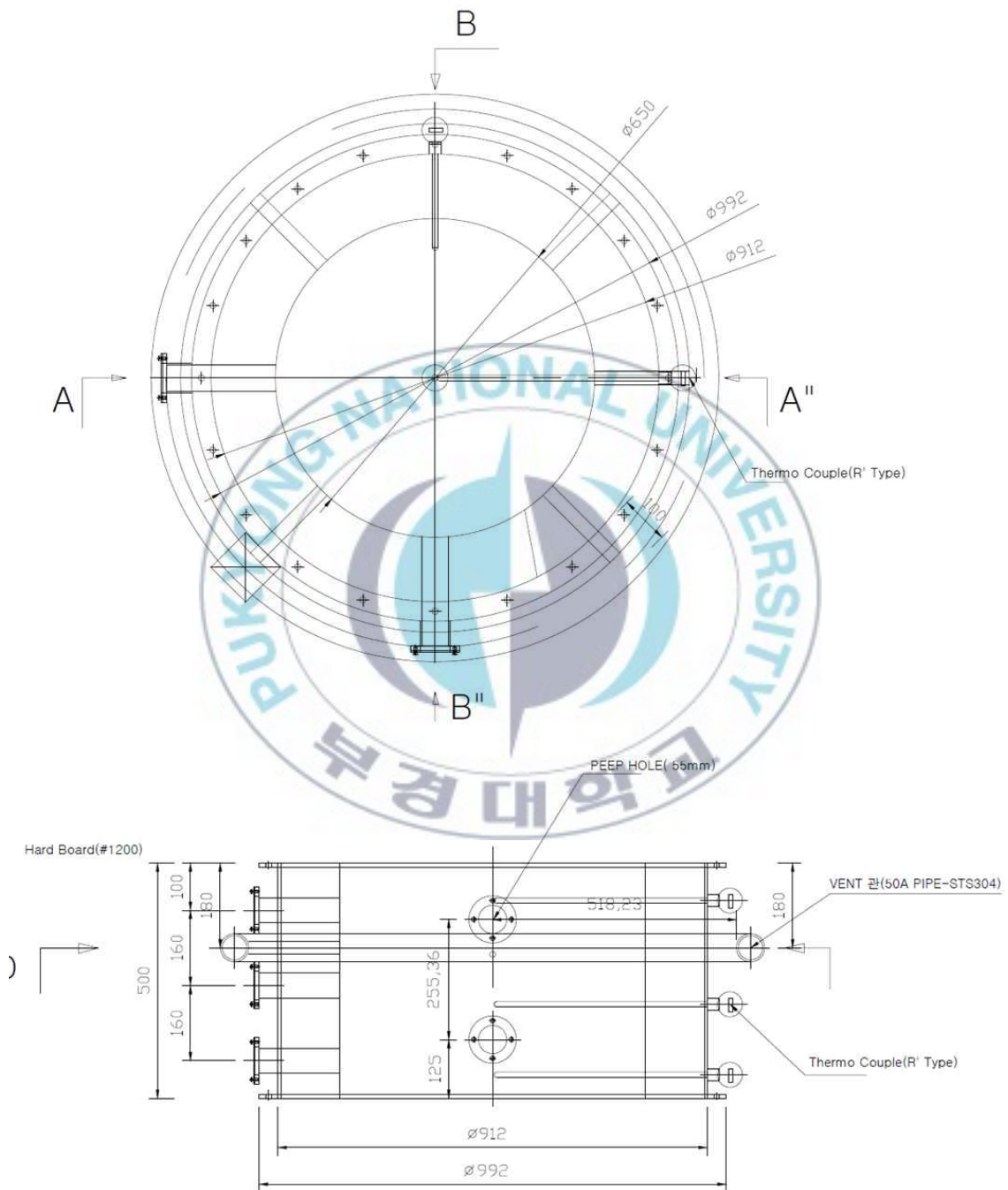
# ① TOP Part

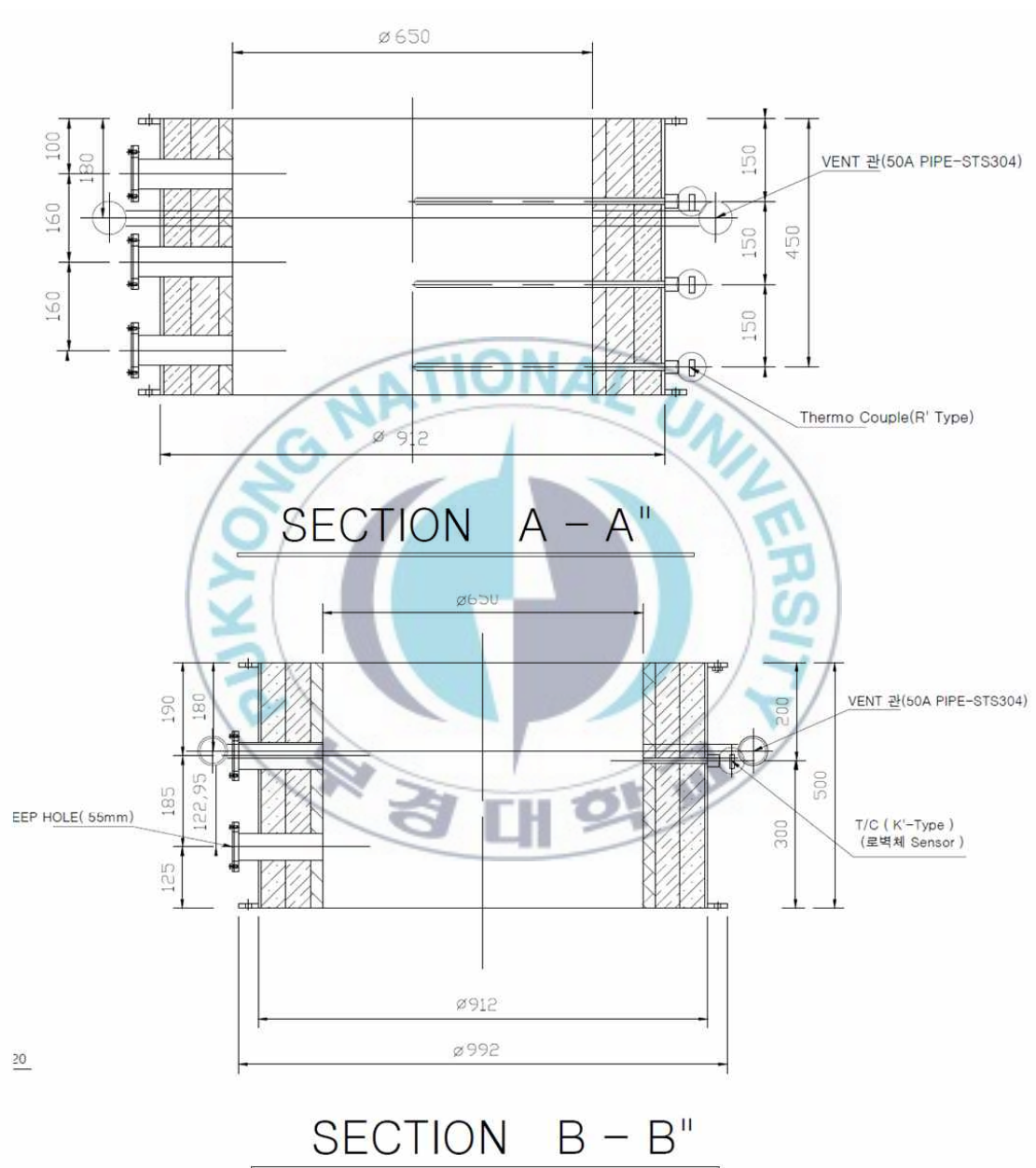


## NOTE

- CASE : SS41 \* T6
- REFRACTORIES : 1차 - High AL' Castable ( HSC -18)=100mm  
                           : 2차 - High Temp; Board (#1000) = 50mm  
                           : 3차 - Ceramic Board (#1200) = 50mm
- ANCHOR : SUS304 \* 8mm \* Y' Type
- 용접시 기밀을 유지하도록 할것

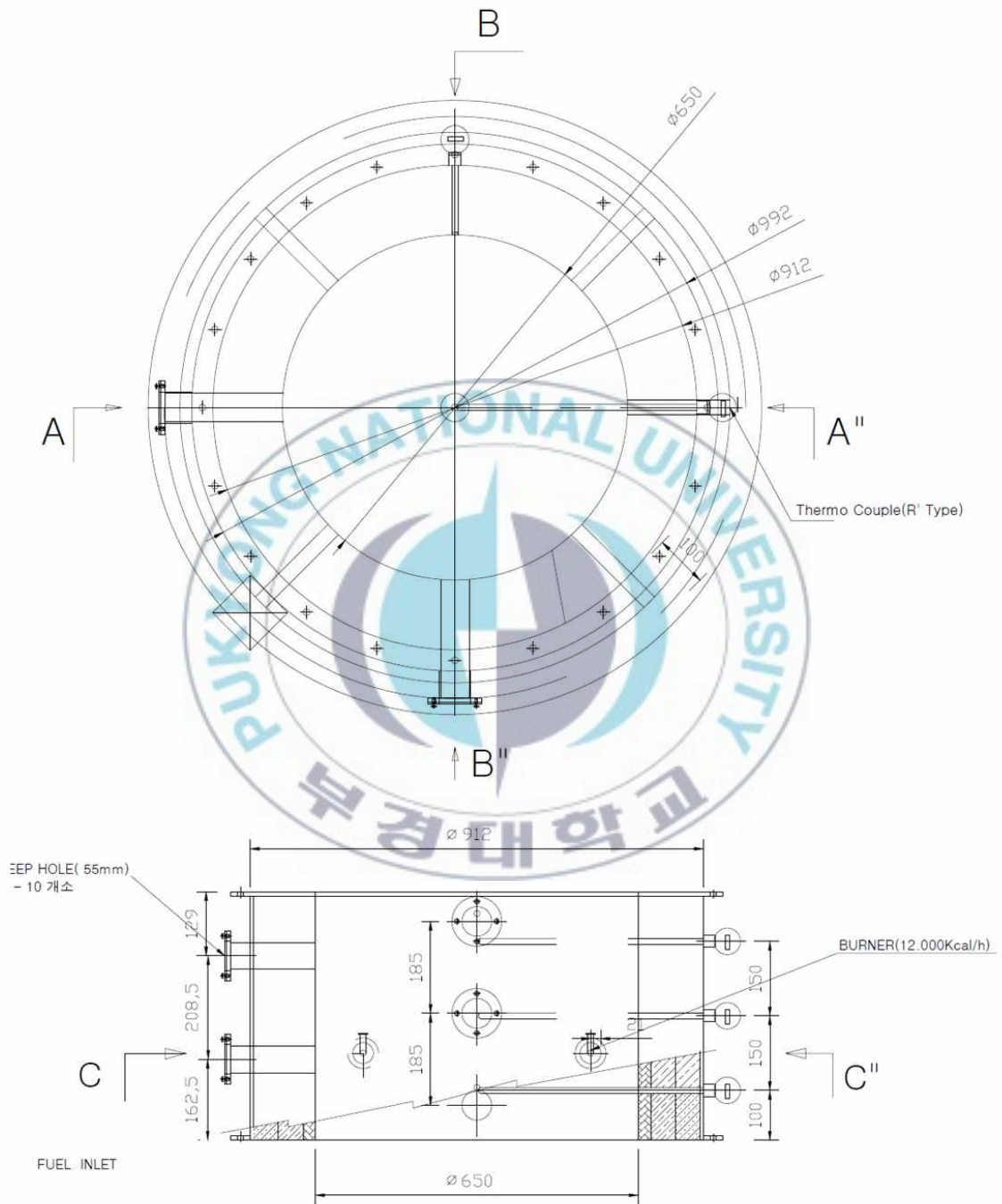


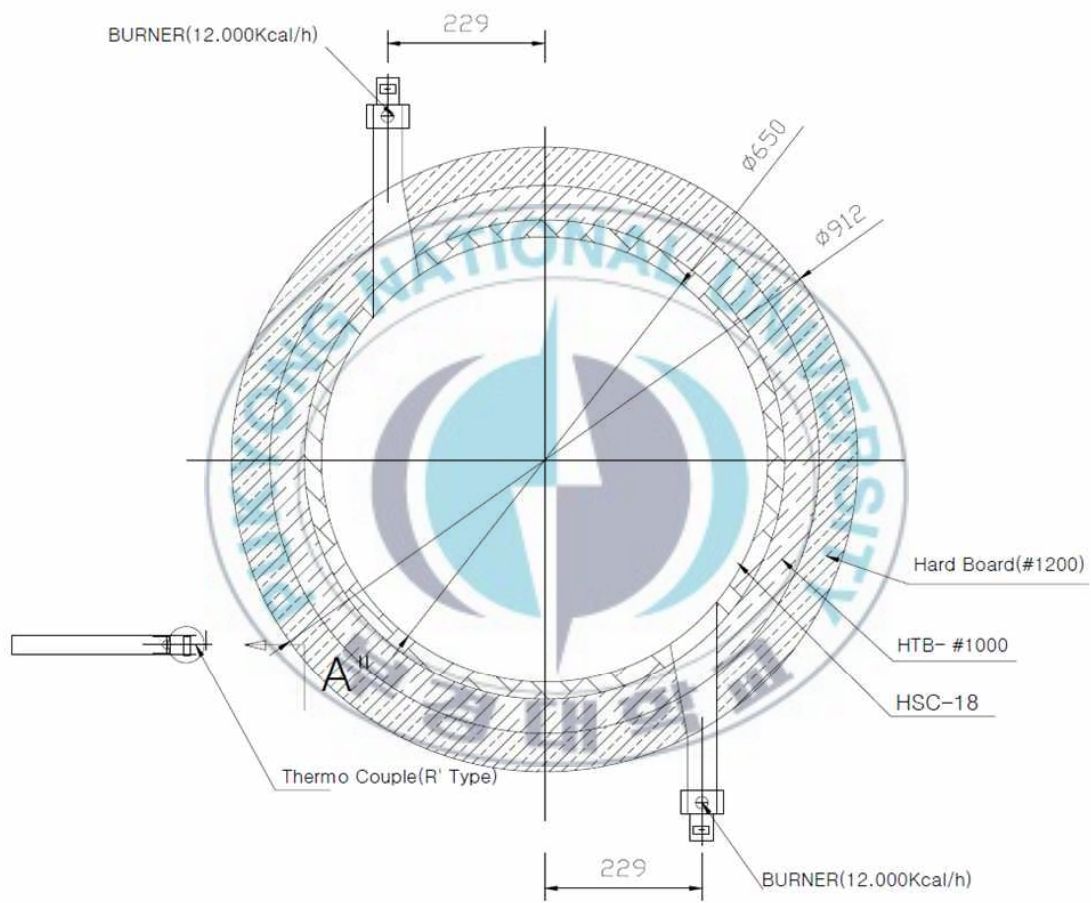


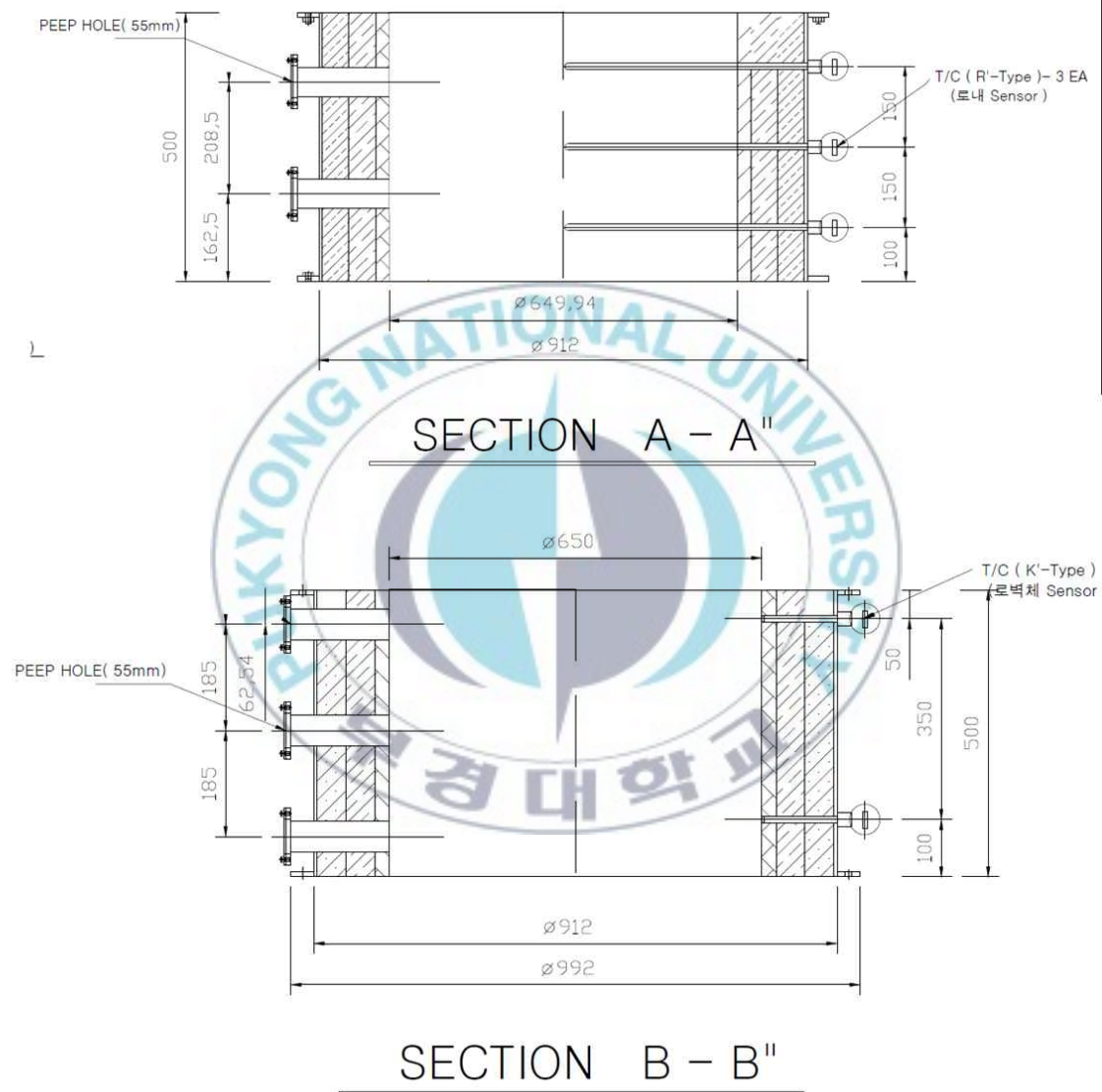


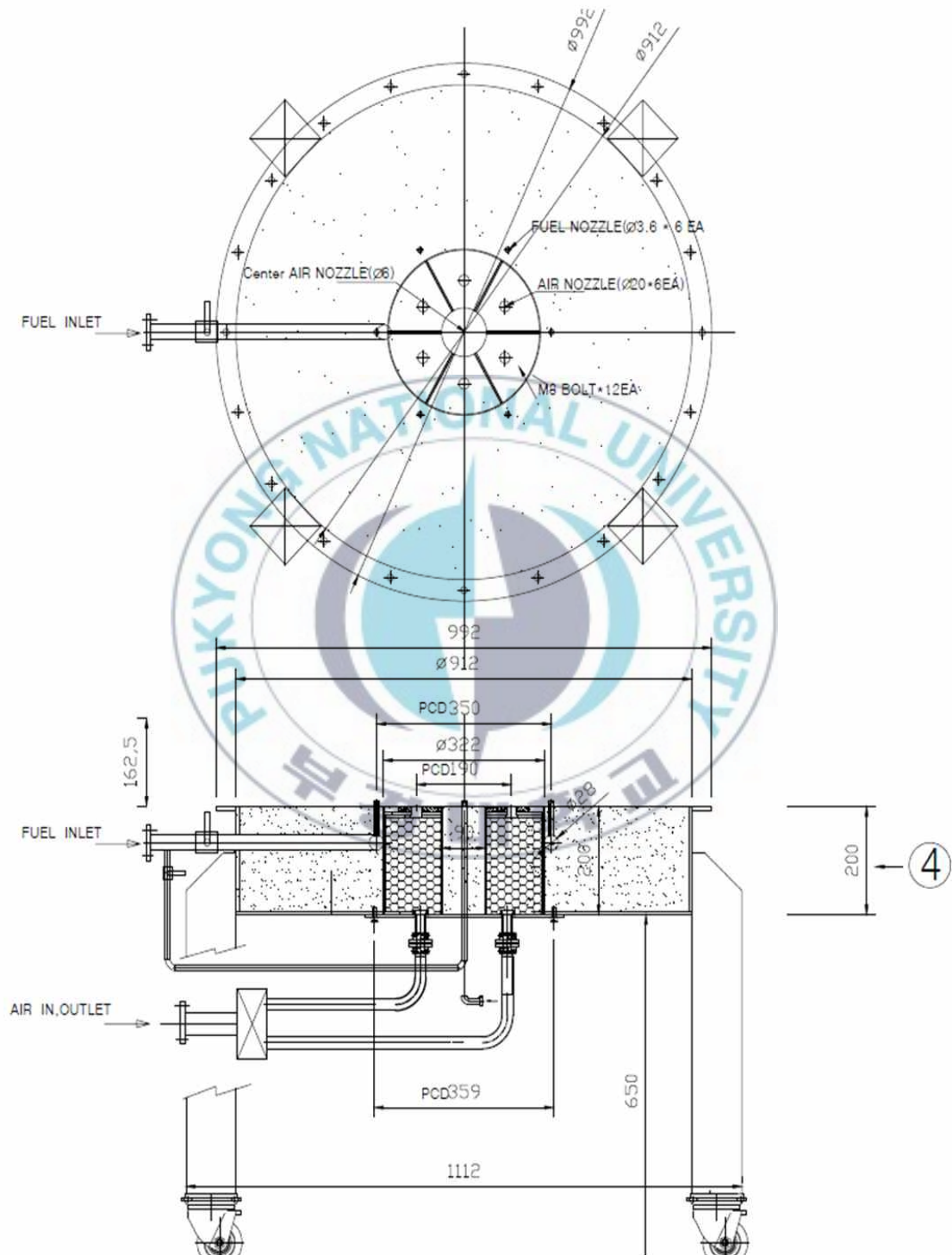


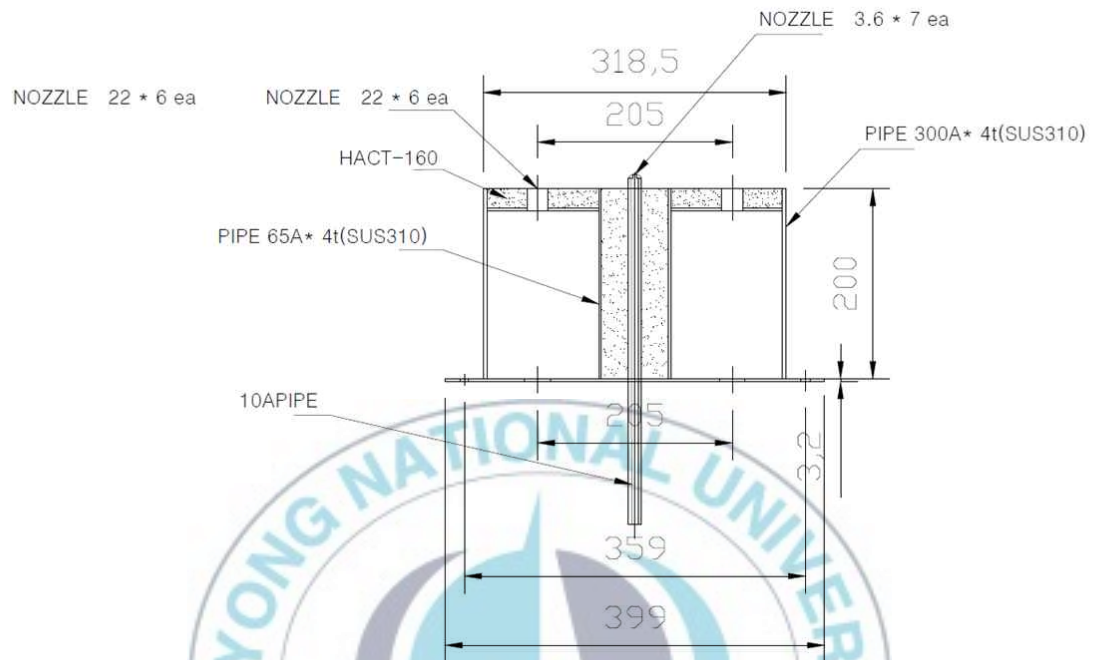
SECTION D - D'' ( VENT 관 )











## NOZZLE PART ( 1:2 )

