

당량비 변화에 따른 MILD 연소로의 온도 분포 및 NO_x, CO 생성 특성

하지수¹ · 유상열² · 심성훈³ · 김태권[†]

(원고접수일 : 2010년 4월 12일, 원고수정일 : 2010년 5월 18일, 심사완료일 : 2010년 5월 26일)

The characteristics of temperature distribution, NO_x and CO formation in a MILD combustor with the variation of equivalence ratio

Ji-Soo Ha¹ · Sang-Yeol Yu² · Sung-Hoon Shim³ · Tae-Kwon Kim[†]

요약 : MILD(Moderate and Intense Low Oxygen Dilution)연소는 연소가스의 재순환을 이용하여 화염대의 고온 형성을 최대한 억제하여 질소산화물을 생성 과정에서 저감하는 동시에 연소로의 내부온도를 균일화하여 열 이용 효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. 본 연구에서는 MILD 연소로에서 연료 및 공기 유량으로 당량비를 조절하고, 그 변화에 따른 연소로에서 발생하는 배기가스 및 연소로 내부의 온도 계측을 통하여 MILD 연소기의 특성과 MILD 연소 시 최적 조건을 도출하고자 하였다. 본 연구를 통하여 당량비가 0.71~0.73일 때 MILD 연소가 구현되었으며 MILD 연소 조건에서 온도 균일도와 NO_x 및 CO 생성 특성을 평가하였다.

주제어 : MILD 연소, 당량비, 질소산화물, 일산화탄소, 배기가스재순환

Abstract : MILD (Moderate and Intense Low Oxygen Dilution) combustion is a technique which is able to reduce NO_x formation and to uniform temperature distribution in the furnace by recirculating the exhaust gas to the fresh air and fuel. This study focuses on finding optimal condition of MILD combustor by changing equivalence ratio with fuel and air flow. The present experiment employs six thermocouple sensors in the furnace, and two concentration probes of NO_x and CO at the exhaust exit pipe respectively. The MILD combustion phenomena have been observed at the condition of equivalent ratios of 0.71~0.73, and the temperature uniformity, NO_x and CO concentration are also examined at the MILD combustion condition.

Key words : MILD combustion, Equivalence ratio, NO_x, CO, Exhaust gas recirculation

1. 서 론

연소 및 환경설비 등에서 발생하는 공해물질들은 지구의 온난화, 광화학 스모그, 오존층 및 생태계 파괴 등 심각한 환경문제의 주범이 되고 있다. 주요 오염 물질 중 하나인 NO_x를 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 연소현상은 연료 및 공기의 초기 온도에 의하여 현저하게 영향을 받는다.

연소효율을 증대시키기 위한 축열식 연소방법의 경우 배기가스를 열교환 하여 연소용 공기 온도를 1500K 이상까지 올려서 사용되어 왔다. 그러나 배기가스의 NO_x의 생성은 온도에 크게 의존하기 때문에 공기 온도가 높아짐에 따라 다량의 NO_x가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 NO_x를 줄이는 연소기술 중 화염의 냉각방식은 불완전

[†] 교신저자(계명대학교 기계자동차공학부, E-mail:tkkim@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5551)

1 계명대학교 에너지환경과

2 계명대학교 기계공학과

3 한국기계연구원 신재생정시스템연구실

연소를 유발하여 CO가 증가되고, 희박예혼합연소는 화염 불안정 및 역화 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점 해결방법의 하나는 최근에 가장 많이 쓰이는 배기가스 재순환법이 있고 이는 공기 흡입구에 산소가 결핍되어 있는 배기가스의 일부를 연소실로 재순환시켜 연소할 때의 최고 온도를 낮춤으로써 NO_x의 발생을 억제하는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 연소효율이 낮고, 여전히 Fuel NO_x로 생기는 NO_x의 제어는 어렵다. 이처럼 대부분의 연소기술들은 연소효율과 환경문제에 있어서 상반되는 관계를 가지고 있다. 이와 관련하여 수많은 연구결과 중 FLOX(flameless oxidation, Germany) 또는 MILD(moderate and intense low oxygen dilution, Italy Australia) 연소가 에너지 효율 향상과 더불어 NO_x를 저감하는 연소기술로 인식되고 있다.[1-3]

이탈리아 및 호주 등에서 열적 질소산화물의 발생을 억제하기 위하여 연소기내에 강한 배기가스 재순환 영역을 만들어 낮은 화염온도에서 안정적으로 연소반응을 유지할 수 있는 MILD 연소기술의 연구결과[1]가 보고되고 있다. 이 MILD 연소의 장점은 고온의 예열공기를 사용하여도 NO_x의 발생 저감이 가능하며, 연소소음이 거의 없다. 여기서 배기가스 재순환이란 연소반응 전의 공기나 연료에 배기가스를 혼합하는 것을 말하며, 화염의 안정화를 위해 고온의 연소가스를 버너 내로 재순환시키는 것을 의미하지는 않는다.

Plessing[4]은 MILD 연소의 실험을 통하여 반응영역 내의 반응물의 반응온도를 자발화 온도 이상으로 상승시키는 것은 연소공기의 예열보다는 주로 강한 배기가스 내부 재순환에 의해서 이루어지며 이에 희석된 연소공기내의 낮은 O₂ 농도에도 연소현상이 발생하게 되는 것이 MILD 연소의 기본 특성임을 확인하였다. MILD 연소현상이 안정적으로 발생하기 위해서는 800℃ 이상의 연소실 온도[2]와 강한 배기가스 재순환 영역이 필요하다는 것을 실험적으로 확인하였다. 이론적으로 MILD 연소는 반응 영역 내에서 재순환영역으로 유입되는 배기가스에 의해 상승된 반응물의 온도와 연소반응 후의 온도 차이가 크지 않다. 또한 Wunning[1]의 실험결과를 보면 MILD 연소의 경우가 온도 변

동이 작은 것을 알 수 있다. MILD 연소는 자발화 온도 이상의 산화제 공급에 의해 안정되며 소음이 적은 화염이 형성되고, 로 내 전체로 반응영역을 확장시켜 균일한 온도분포로 열전달 효율을 향상시킴으로써 로의 소형화가 가능하다.

본 연구는 실험실 규모로 제작된 소형 연소로를 사용하였다. 연소로에 유입되는 연료 및 공기의 유량을 조절하여 MILD 연소 시 요구되는 당량비 및 배기가스 재순환 영역을 확인하였고, 이때 발생하는 배기가스를 측정해 MILD 연소로의 온도분포 및 NO_x, CO의 변화량을 관찰하였다.

2. 실험적 방법

2.1 MILD 연소로의 구성

MILD 연소로의 구성은 **Figure 1**과 같다. 외부에서 가스관을 통해 연료가 공급되며 컴프레셔로 공기를 공급한다. 연료 및 공기는 유량계를 사용하여 주입되는 양을 조절하였다. 연소로 내부는 원통구조로 외부직경 600mm, 내부직경 220mm, 높이 500mm이다. 위쪽에 예열버너를 설치하고 초기 예열 시에만 가동하도록 한다. 연소로내의 온도를 측정하기 위하여 연소로 내부 측면에 6개의 열전대를 설치하였고 고온에 잘 견딜 수 있도록 보호캡이 장착된 K-Type 열전대를 사용하였으며 DAQ board에서 정보가 수집되고, Labview 프로그램으로 측정된 온도를 저장하였다. 또한 가스분석기(Eurotron, Greenline MK2)를 통해 CO, NO_x 가스에 대한 농도를 측정하였다.

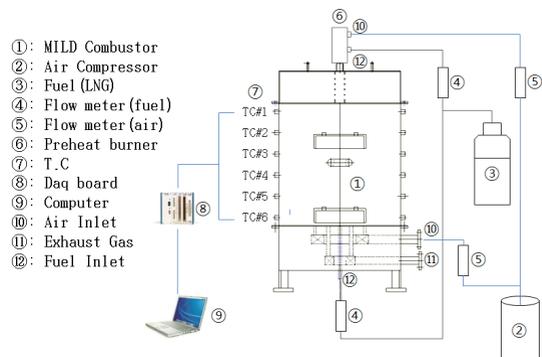


Figure 1: Schematic diagram of MILD combustor system

유량계를 통하여 일정량의 연료 및 공기를 공급하고, 당량비 및 노즐 출구 속도를 조절하였다. Figure 2와 같이 연료 노즐을 중심으로 배기관 4개, 공기 노즐 8개가 위치해 있다. 연료는 천연가스를 사용하였으며 천연가스의 조성은 Table 1에 나타내었다. 이렇게 함으로써 노즐에서 분사되는 연료와 공기는 연소로 상부로 올라가면서 연소하게 되며 이 연소과정에서 발생한 배기가스는 천장에 부딪히면서 방향을 전환하여 배기구 쪽으로 유동하면서 배기가스 재순환이 이루어진다. 공기노즐과 연료노즐은 바닥에서부터 500mm 높게 설치하였는데 이는 분출된 연료와 공기가 바닥에 있는 배출구로 바로 빠져 나가는 것을 방지하기 위해서이다.

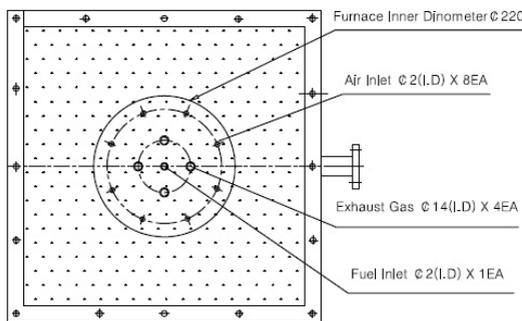


Figure 2: MILD Combuster burner

Table 1: Composition of LNG

CH ₄	89.4%
C ₂ H ₆	8.6%
C ₃ H ₈	1.39%
i C ₄ H ₁₀	0.25%
n C ₄ H ₁₀	0.32%
N ₂	0.004%
TOTAL	100%

2.2 실험 조건 및 방법

본 연구에서는 다음과 같이 3가지 경우의 실험을 수행하였다. 즉 공기 노즐의 체적유량을 180(ℓ /min)부터 220(ℓ /min)까지 20(ℓ /min)씩 늘

리면서 실험을 하였다. 각 조건에 의한 연소로 내부의 온도, NOx와 CO의 변화를 확인하였다. 이때 Table 2는 공기유량과 연료유량에 대한 당량비를 계산한 값이다.

본 연구의 실험과정은, 연소로 내부의 온도를 자발화 온도 이상으로 올리기 위해 연소로 상부에 설치된 예열버너를 사용하여 내부온도를 800℃이상으로 먼저 가열한 후 연소로 내의 온도가 850℃가 되면 예열버너를 끄고 하단부에 설치된 MILD 연소기를 통해 연료 및 공기를 공급하였다. 이때 공기 유량은 고정시키고, 연료 유량을 조절하여 노즐 출구속도 변화에 대한 연소로 내부의 온도를 DAQ board로 측정하고 가스분석기를 사용하여 배기가스를 측정하여 분석하였다.

Table 2: Equivalence ratio with of fuel and air flow rate

Fuel flow rate (ℓ /min)	Air flow rate (ℓ /min)		
	180	200	220
13	0.68	0.61	0.56
14	0.73	0.66	0.6
15	0.79	0.71	0.64
16	0.84	0.75	0.69
17	0.89	0.8	0.73
18	0.94	0.85	0.77
19	1	0.9	0.81

3. 결 과

3.1 연소로 내부의 온도 분포

Figure 3은 MILD 연소 시 연소로 내부의 모습으로써, 연소로 내부에 연료와 공기 노즐을 관찰할 수 있으며 일반적인 연소 시에 볼 수 있는 가시화염은 본 MILD 연소조건에서 관찰할 수 없음을 알 수 있다. Figure 4는 MILD 연소 전·후의 연소로 내부의 온도를 측정하여 나타낸 것이다. 예열버너를 사용한 예열모드에서는 연소로 내의 최고 온도와 최저 온도가 140℃ 이상 차이가 났다. 일반적으로 확산화염에 대한 메탄의 최고단열화염온도는 2200℃까지 올라간다. 그러나 예열버너를 끄고 MILD 연소가 활성화되면서 배기가스 재순환으로

인해 연소로 내의 최고 온도는 떨어지면서 최저 온도가 계속 올라가는 것을 알 수 있다. 일정 시간이 지난 후, 연소로 내의 최고 온도와 최저 온도가 60~80℃ 정도의 차이가 발생하였다. 이는 예열모드보다 60℃ 이상 줄어든 수치이다. 즉 MILD 연소가 시작되면서 강한 배기가스 재순환 영역이 형성되면서 연소로 상부와 하부의 온도차가 100℃ 이내로 줄어들어 예열모드보다 연소로 내부가 균일하게 가열되는 것을 확인할 수 있었다.

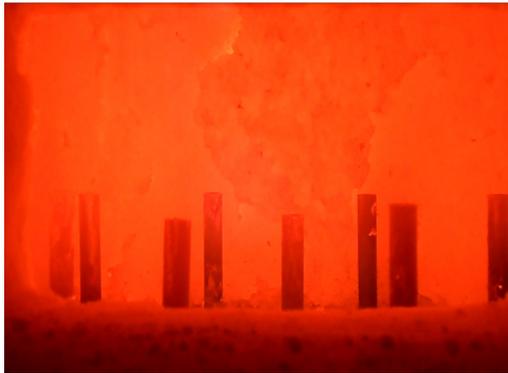


Figure 3: An example photograph of MILD combustion condition in the furnace

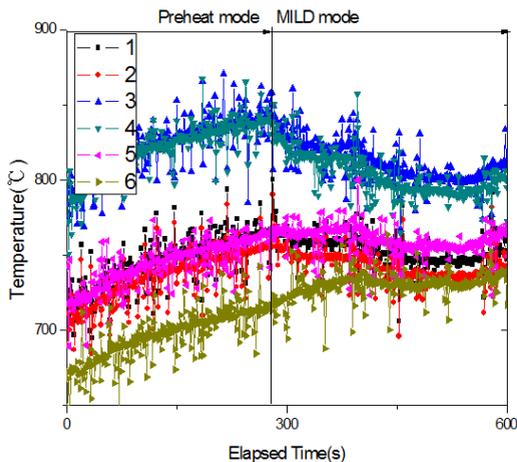


Figure 4: Time history of temperatures in the MILD combustor

3.2 배기가스 분석

MILD 연소기로 공기의 주입량을 고정시키고 연

료량의 변화에 따른 배기가스를 측정하였다. 배기가스의 재연소 반응 메커니즘은 Frazan et al.[5]의 연구에서 보고되었다. C.Y.Lee et al[6]의 연구에서는 연소로 내부에서 배기가스 재순환으로 재연소를 하기 위한 연료 공급량의 증가는 NOx의 N₂로의 환원을 주도하는 CH_i 라디칼들의 증가를 유도하여 보다 많은 NOx를 저감하나, 일정 당량비 이상에서는 그 효과가 포화 상태가 되고, 산소 농도가 낮아져 CO가 급격히 증가하는 것을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 당량비 0.56~1에서 각 조건별로 배기가스 성분 분석을 통하여 NOx를 저감하는 동시에 CO가 발생하지 않는 당량비 구간을 조사하여 다음의 결과를 얻었다. Figure 6는 Table 2의 조건에서 공기 유량을 고정시키고 연료 유량의 변화에 따른 NOx 발생량 변화를 보여주고 있다. 당량비가 0.56~0.69인 구간에서는 Fig 5처럼 예열버너에서 나타나는 확산화염 형태의 화염대가 노즐 주위로 형성되었다. 당량비가 낮아질수록 화염대가 커지면서 NOx의 농도가 급격히 증가하였다. 공기유량 180(ℓ/min)일 때 연료유량 14(ℓ/min), 공기유량 200(ℓ/min)일 때 연료유량 15(ℓ/min), 공기유량 220(ℓ/min)일 때 연료유량 17(ℓ/min)에서 가시화염이 사라지면서 NOx의 방출량이 10ppm 이하로 발생하였다. 이때의 당량비 구간은 0.71~0.77이고, 무화염 상태의 비교적 안정된 MILD 연소가 구현되었다.



Figure 5: A flame photograph of MILD combustion mode at $\Phi=0.64$

일반적으로 연소반응을 할 때 산소 농도가 낮을 경우 CO가 많이 발생하고, 산소 농도가 높을수록

CO의 발생이 적다. 이는 CO가 반응하도록 주도하는 활성화 라디칼인 OH의 영향으로써, 반응 환경의 산소 농도가 높을수록 풍부해지기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 실험조건에서 CO농도를 분석한 결과 다음을 얻었다.

Figure 7은 공기유량이 200(l/min), 220(l/min)일 때 CO 발생량 변화를 분석한 결과이다. 공기유량이 200(l/min)일 때 연료유량 17(l/min), 공기유량이 220(l/min)일 때 연료유량 18(l/min)에서 급격히 CO가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이때의 당량비는 각각 0.8, 0.77이다. 이는 당량비가 증가함에 따라 국부적인 연료 농후 영역이 확장되면서 반응영역 내의 산소가 부족하게 되고, 산화 반응을 하지 못한 결과로 CO가 증가하는 것으로 판단된다. 공기유량이 180(l/min)일 경우는 연료유량이 13(l/min)일 때부터 CO가 133ppm이 발생하고, 이후 급격히 증가하여 그래프에 나타내지 않았다.

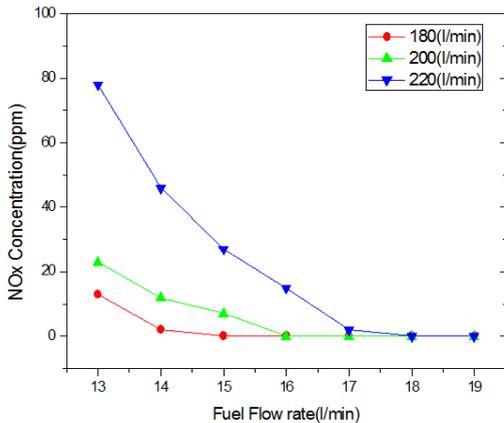


Figure 6: NOx concentration measurement with the variation of fuel and air flow rate

Figure 6과 Figure 7을 종합하여 보면 공기유량 200(l/min) 연료유량 15(l/min)일 때, 공기유량 220(l/min), 연료유량 17(l/min)일 때 NOx를 저감하는 동시에 CO가 발생하지 않는 최적의 MILD 연소가 구현되었다. 이때의 당량비는 각각 0.71, 0.73이고 연소로 내의 최고온도는 833℃, 828℃ 최저온도는 773℃, 755℃이었다.

당량비가 비슷함에도 불구하고 연소로 내의 최고온도와 최저온도의 차가 각각 62℃, 73℃로 11℃가 차이가 났다. 이는 공기유량이 220(l/min)일 때 공기유량이 200(l/min)보다 노즐에서의 출구속도가 빨라서 배기가스 재순환 영역이 고르게 형성되지 않은 것으로 보인다.

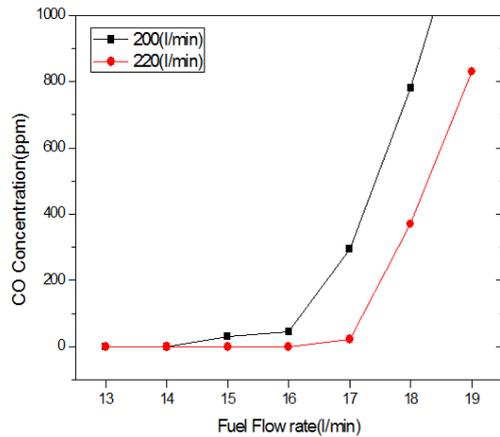


Figure 7: CO concentration measurement with the variation of fuel and air flow rate

4. 결 론

MILD 연소조건에서 당량비가 0.71 이상이 되면 가시적인 화염이 보이지 않는 완전한 무화염 상태가 구현이 되었다.

MILD 예열 모드에서는 최고온도와 최저온도의 차가 140℃ 이상으로 연소로 내의 온도차가 크지만 MILD 연소조건에서는 최고온도와 최저온도의 차가 60~80℃ 정도로 예열 모드일 때보다 온도차가 작게 되어 연소로 내부의 온도가 비교적 균일하게 된다. 즉 연소로 내부의 온도 균일화로 인한 열효율을 극대화할 수 있음을 보여준다.

NOx 생성은 공기유량 180(l/min)일 때 연료유량 14(l/min), 공기유량 200(l/min)일 때 연료유량 15(l/min), 공기유량 220(l/min)일 때 연료유량 17(l/min)인 조건에서 10ppm 이하로 떨어졌으며, 이때의 당량비는 모두 0.71 이상으로 무화염 상태가 되는 당량비조건과 일치하였다. 즉 고온의 화염대가 형성되지 않음으로 인해 MILD 연소의 NOx 저감효과를 설명할 수 있는

특징적인 현상이다.

CO의 생성은 당량비가 0.77이 되면서부터 급격히 증가하는 경향을 보였으며, NO_x와 CO 생성 특성으로 판단할 때 가장 최적의 MILD 연소조건은 공기유량 200(ℓ /min)일 때 연료유량 15(ℓ /min), 공기유량 220(ℓ /min)일 때, 연료유량 17(ℓ /min)이고 이때의 당량비는 0.71~0.73으로 나타났다.

본 연구를 통해 얻은 MILD 연소의 최적 당량비 구간에서 노즐의 출구속도 변화에 대한 연소로 내의 배기가스 재순환 영역을 향후 CFD를 이용하여 확인하고 노즐의 직경을 변경하여 노즐의 출구속도에 대한 MILD 연소특성도 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터와 지식경제부-한국에너지기술평가원에서 시행하는 신재생에너지기술개발의 주관기관인 한국기계연구원의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] J. A. Wuuning and J. G. Wunning, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation," Prog. Energy Combust. Sci., vol.23, pp. 81-97, 1997.
- [2] M. Katsuki, T. Hasegawa, "The science of technology of combustion in highly preheated air," 27 Symp (Int) Combustion, pp. 3135-3146, 1998.
- [3] A. Cavaliere, M. De Joannon, R. Ragucci, "Mild combustion of high temperature reactants", 2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion, 1999.
- [4] T. plessing, N. Peters, J.G. Wunning, "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exxxhaust gas recirculation," 27 Symp (Int) Combustion, pp. 3197-3204, 1998.

- [5] H. Frazan, G. J. Maringo, J. D. Riggs, A. S. Yagiela and R.J. Newell, "Reburning with powder river basin coal to achieve SO₂ and NO_x Compliance," Proc. of the Power - Gen Sixth International Conference, Dallas, pp. 175-187, 1993.
- [6] C. Y. Lee and S. W. Baek, "Effects of hybrid reburning/SNCR strategy on NO_x/CO reduction and thermal characteristics in oxygen-enriched LPG flame", Combust. Sci. and Tech., vol. 179, Issue. 8, pp. 1649-1666, 2007.

저 자 소 개



하지수(河芝洙)

1960년생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년~2006년 현대중공업 엔진연구실 근무. 2007~현재 계명대학교 에너지환경공학과 재직 중.



유상열(柳相列)

1981년생. 2008년 계명대학교 기계자동차공학부(학사). 2008년~현재 계명대학교 대학원 기계공학과 석사과정.



심성훈(沈成勳)

1957년생. 1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2002년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1988~현재 한국기계연구원 책임연구원 재직 중.



김태권(金兌權)

1957년생. 1979년 경북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1981년 경북대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1981년~1995년 한국기계연구원 내연기관 연구실장. 1995년~현재 계명대학교 기계자동차공학부 재직 중.