

공연비 변화가 MILD 연소 특성에 미치는 영향에 관한 해석적 연구

A numerical study of the air fuel ratio effect on the combustion characteristics in a MILD combustor

하지수[†] · 김태권* · 심성훈**
 Ji Soo Ha[†] · Tae Kwon Kim* · Sung Hoon Shim**

계명대학교 에너지환경과학과, *계명대학교 기계자동차공학부, **한국기계연구원
Energy-Environmental Science Department Keimyung University

**Mechanical and Automotive Engineering Department, Keimyung University*

***Korea Institute of Machinery & Materials*

(2010년 4월 14일 접수, 2010년 6월 4일 채택)

ABSTRACT : A numerical analysis of reactive flow in a MILD(Moderate and Intense Low oxygen Dilution) combustor is accomplished to elucidate the characteristics of combustion phenomena in the furnace with the variation of air fuel ratio. For the smaller magnitude of air injection velocity(10 m/s), the air flow could not penetrate toward upper part of furnace. On the other hand, the air flow suppresses the fuel flow for the case of air injection velocity 30 m/s. The air velocity 18 m/s is corresponding to the stoichiometric air flow velocity, and for that case, the air flows to relatively more upper part of the furnace when compared with the case of air injection velocity 10 m/s. The reaction zone is produced with the previous flow pattern, so that the reaction zone of the air injection velocity 10 m/s is biased to the air nozzle side and for the case of air injection velocity 30 m/s, the reaction zone is inclined to the fuel nozzle side. For the cases with the air injection velocities 16, 18, 20 m/s, the reaction zone is nearly located at the center between air nozzle and fuel nozzle. The maximum temperatures and NO_x concentrations for the cases of air injection velocity 16, 18, 20 m/s are lower than the cases with air injection velocity 10, 30 m/s. From the present study, the stoichiometric air fuel ratio is considered as the most optimal operating condition for the NO_x reduction.

Key Words : MILD combustion, Air fuel ratio, Reaction zone, NO_x, Maximum temperature

요약 : 연소과정 중에 발생하는 질소산화물을 저감하는 기술인 MILD 연소에 대하여 공연비를 변화시키면서 나타나는 연소 특성을 수치해석을 통하여 연구하였다. 작은 크기의 공기분출속도(10 m/s)에서는 공기가 연소로 내 상부영역까지 침투하지 못한다. 반면에 공기분출속도가 30 m/s인 경우에는 공기유동이 연료유동을 억제하고 상부영역까지 흘러간다. 이론공기량에 해당하는 공기분출속도 18 m/s에서는 10 m/s 보다 상대적으로 상부영역까지 침투하였다. 이러한 유동 양상으로 공기분출속도가 작은 10 m/s에서는 연소반응대가 공기노즐 측에 치우쳐 나타나고 30 m/s에서는 연료노즐 측에 형성되었다. 공기분출속도 16, 18, 20 m/s에서는 공기노즐과 연료노즐 중간 영역에서 연소반응대가 형성되었다. 연소로 내 최대온도와 NO_x 생성은 공기분출속도가 10 m/s, 30 m/s인 경우 보다 이론공기량이거나 이에 가까운 16, 18, 20 m/s에서 낮게 나타났다. 본 연구로부터 MILD 연소로에서 이론공기량 조건이 NO_x를 저감하는 최적의 조건이라는 것을 밝혔다.

주제어 : MILD 연소, 공연비, 연소반응대, 질소산화물, 최대온도

1. 서론

배기가스의 NO_x 생성은 온도에 크게 의존하기 때문에 연소로 내 온도가 높아짐에 따라 다량의 NO_x가 발생되는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 NO_x를 줄이는 연소기술에는 지연연소를 통한 연소반응 분산, 배기가스 재순환 등이 연구되고 있으며 최근에 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나인 배기가스 재순환법은 공기흡입구에 배기가스의 일부를 재순환시

켜 연소할 때의 최고 온도를 낮춤으로써 NO_x의 발생을 억제하는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 연소효율이 낮고, 여전히 NO_x 발생을 줄이는데 어려움을 겪어 왔다. 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)연소가 에너지 효율 향상과 더불어

[†]Corresponding author : E-mail : jisooaha@kmu.ac.kr Tel : 053-580-5919 Fax : 053-580-5385

NOx를 저감하는 연소기술로 인식되고 있으며 열적 질소산 화물의 발생을 억제하기 위하여 연소기내에 강한 배기가스 재순환 영역을 만들어 낮은 화염온도에서 안정적으로 연소 반응을 유지할 수 있는 MILD 연소기술의 연구결과¹⁻⁶⁾가 보고되고 있다. 이 MILD 연소의 장점은 고온의 예열공기를 사용하여도 NOx의 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.

Plessing⁴⁾은 MILD 연소의 실험을 통하여 연소기 내의 반응물질의 반응온도에 영향을 주는 것은 연소공기의 예열보다는 배기가스 재순환에 의해 자발화 온도이상으로 상승되며, MILD 연소현상이 안정적으로 발생하기 위해서는 800°C 이상의 연소실 온도와 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 않으며, 자발화 온도 이상의 산화제 공급에 의한 안정되고 소음이 적은 화염이 형성되고, 로 내 전체로 반응영역을 확장시켜 균일한 온도분포로 열전달 효율을 향상시켜로의 소형화가 가능하다고 보고하고 있다.

본 연구는 이러한 MILD 연소로에서 실험실 규모로 제작된 연소로의 연소 실험에 앞서 연소유동에 대한 수치해석을 통해 MILD 연소 유동 특성을 살펴봄으로써 실험실 규모의 MILD 연소로의 연소 특성을 예측하여 최적의 연소 조건을 도출함과 아울러 MILD 연소로 내에서 연소유동 특징을 정립하여 현재의 원통형 연소로에서 향후에 보다 효율적인 연소로 설계 시에 적용할 수 있는 기반을 마련하는데 목적이 있다.

2. 수치해석 방법

MILD 연소로 내의 연소 특성을 살펴보기 위해 본 연구에서는 수치해석을 수행하였으며 Fig. 1에 본 연구에서 사용한 연소로 형상을 나타내었다. 원통형 외경은 320 mm이며 높이는 600 mm이다. 원통형 연소로의 바닥 중심에 직경 2 mm의 연료노즐이 있으며 원통 중심에서 반경 64 mm 위치에 직경 18 mm인 4개의 배출구가 있고 반경 128 mm에 직경 5.4 mm의 8개 공기노즐이 배치되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 1의 오른쪽에 나타난 원통의 1/8 영역, 즉 배출구

1/2 원과 공기노즐 1개가 포함되고 가운데 연료노즐 1/8이 포함된 영역을 계산영역으로 하여 수치해석을 수행하였다.

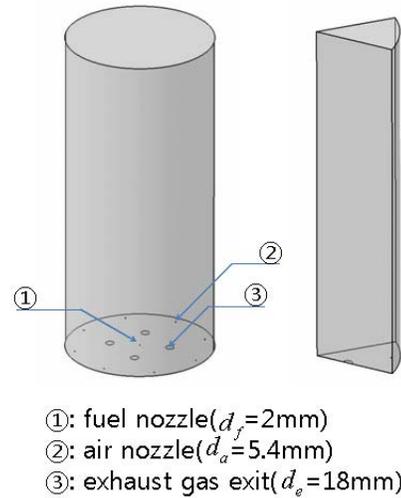


Fig. 1. Schematic configuration of MILD combustor(left) and computational domain used in the present study.

수치해석에 사용된 지배방정식은 3차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종방정식, 표준 k-ε 난류방정식을 이용하였는데⁷⁾ 이러한 지배방정식은 잘 알려져 있는 지배방정식이므로 자세한 지배방정식의 나열은 생략하기로 한다. 운동량방정식에서 이용된 점성계수는 분자점성계수에 난류유동에서 모델링한 난류점성계수의 합을 사용하였고 화학종방정식에서 연소반응속도는 에디 소산 모델⁸⁾을 이용하여 계산하였다. 본 연구에 사용한 연료는 메탄으로 메탄과 공기 중 산소와의 화학반응은 한 단계 화학반응을 이용하였다. 또한 연소 생성물 중에 CO₂와 H₂O등의 존재로 말미암은 복사열전달은 회색가스 가중합 복사모델 (WSGGM)⁹⁾을 이용하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘¹⁰⁾을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였다. 열적 NOx 생성에 관한 계산은 NOx 반응속도가 일반 연소반응 속도에 비하여 매우 느리기 때문에 유동장, 온도장, 농도장을 모두 계산하여 수렴된 상태에서 별도로 계산을 수행하였다. NOx 생성에 관한 반응속도계수는 Hanson과 Salimian¹¹⁾이 제안한 값을 사용하였다.

수치해석에 필요한 경계조건은 다음과 같다. 우선 연료분출속도는 110 m/s이고 상온인 25°C 상태로 분출된다. 원통의 외각에서 분출되는 공기는 10, 16, 18, 20, 30 m/s로 변화시켜서 계산하였는데 공기 또한 25°C로 분출되도록 하였다. 공기 분출속도 18 m/s는 연료분출 속도 110 m/s에 필요

한 이론공기량에 해당된다. 따라서 10, 16 m/s는 이론공기량 보다 작은 공기량이고 20, 30 m/s는 이론공기량 보다 큰 공기분출량이다. 원통 내부에서 MILD 연소 조건이 되었고 가정하여 모든 벽면은 1000℃로 설정하였다. 이 벽면 온도 가정은 실제와 차이가 날 수 있지만 차후 실제 실험 측정을 통하여 보정할 예정이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공연비 변화에 따른 유동특성

본 연구에서 사용한 연소로의 구조는 연소로 중앙에서 한 개의 연료 노즐을 사용하여 연료를 분출하고 연소로 벽면측에 여덟 개의 공기노즐을 설치하여 연소용 공기를 분출한다. 연소된 배기가스는 연료노즐과 공기노즐 사이에 4개의 원형배출구를 설치하여 배출하도록 되어 있다. 이러한 MILD 연소로에서 최적의 연소조건을 도출하기 위해 우선적으로 연료 분출량, 즉 연료분출속도를 일정하게 하고 공기분출속도를 변화시켜 공연비에 따른 연소로 내부 유동특성을 살펴봄으로써 연소로의 유동 구조를 파악해 보기로 한다.

연료분출속도를 일정하게 하고 공기분출속도를 변화시켜 연소로 내부 유동 형태를 비교한 것을 Fig. 2에 나타내었다. 연료분출속도는 110 m/s로 고정하고 공기분출속도는 10, 16, 18, 20, 30 m/s로 변화시켰다. 참고로 연료노즐의 면적과 공기노즐의 면적을 고려하여 연료분출속도가 110 m/s일 때 이론공기량(9.524 m³ air/m³ CH₄)의 공기분출속도는 18 m/s이다. Fig. 2를 살펴보면 이론 공기량보다 작은 공기분출속도인 10 m/s(Fig. 2(a))에서는 연료분출속도가 크기 때문에 분출된 연료는 연소로 상부까지 흘러가지만 공기는 연소로 상부까지 흐르지 못하고 연소로의 1/3 영역까지만 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 것은 공기분출량이 이론 공기량과 유사한 16, 18과 20 m/s(Fig. 2(b),(c),(d))일 때는 공기분출 속도가 10 m/s일 때 보다 공기가 상부로 약간 더 멀리 올라가지만 10 m/s일 때와 유사함을 알 수 있다. 공기분출 속도가 30 m/s(Fig. 2(e))일 때는 공기분출 운동량이 커서 연료가 상부로 올라가는 것을 억제하여 공기가 상대적으로 상부로 더 올라가고 연료는 반대로 하부로 치우치게 나타났다. 이러한 결과로 판단해 볼 때 공기분출속도 또는 공기분출 유량에 따라 연소로 내의 유동 형태가 많이 변하는 것을 확인할 수 있었고 이에 따라 연소로 내의 연소특성이 크게 달라질 것이라

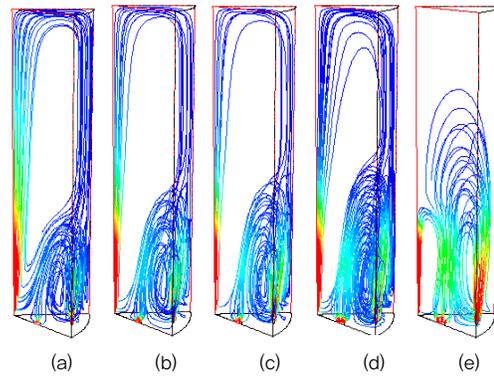


Fig. 2. Comparison of flow patterns with the variation of air velocity. $v_f=110$ m/s. (a) $v_a=10$ m/s, (b) $v_a=16$ m/s, (c) $v_a=18$ m/s, (d) $v_a=20$ m/s, (e) $v_a=30$ m/s.

는 것을 예측할 수 있다. 따라서 다음 절에서 공기분출속도 변화에 따른 MILD 연소로내의 연소특성을 살펴보기로 한다.

3.2. 공연비 변화에 따른 연소반응특성

앞 절에서 살펴보았듯이 공기분출속도에 따라 연소로 내의 유동 특성이 크게 변하기 때문에 연소특성도 이에 따라 많은 변화가 있음을 예측할 수 있다. Fig. 3에 공기분출속도 변화에 따른 연소반응속도 분포를 비교한 것을 나타내었다. Fig. 3에 나타난 연소반응속도는 난류화염의 연소반응속도이고 반응속도의 크기 범위는 0.001~0.005 kgmol/m³s로 모두 같은 범위를 택하였다.

Fig. 3을 살펴보면 공기분출속도 변화에 따라 연소반응대, 즉 화염이 형성되는 형태가 판이하게 변하는 것을 알 수 있다. 우선 $v_a=10$ m/s의 경우(Fig. 3(a))를 살펴보면 연소반응대가 공기 노즐 측에 치우쳐 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 Fig. 2(a)에서 관찰 하였듯이 연료분출속도 또는 연료 분출 운동량에 비하여 공기분출 속도 또는 운동량이 작기 때문으로 판단된다.

공기분출속도가 16, 18, 20 m/s일 경우(Fig. 3(b), (c), (d))의 경우는 공기분출 운동량이 다소 커서 연소반응대가 상부로 확대되고 또한 연소로의 넓은 영역으로 확산되는 것을 관찰할 수 있다. 특히 연료노즐과 공기노즐을 잇는 단면에서 연소반응대가 가장 넓게 확산되고 좌우로 가면서 축소되는 것을 알 수 있다. 공기분출속도가 30 m/s인 경우는(Fig. 3(e)) 연소반응대가 연료노즐 측으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2(e)에서 관찰하였듯이 공기분출 운동량이 증가함에 따라 분출된 연료가 연소로내로 넓게 퍼져나가는 것을 억제하고 공기가 연소로 내 넓은 영역으로 확산해 나가는 것으로 생각할 수 있다.

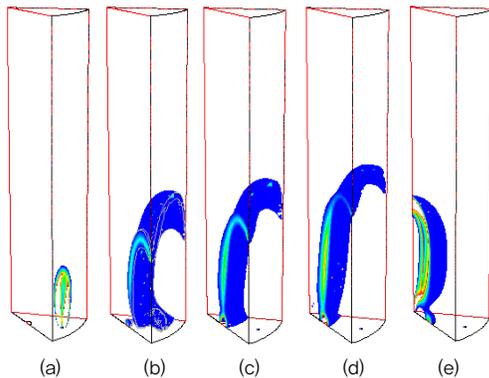


Fig. 3. Comparison of turbulent reaction rates contour with the variation of air velocity. $v_f=110$ m/s. (a) $v_a=10$ m/s, (b) $v_a=16$ m/s, (c) $v_a=18$ m/s, (d) $v_a=20$ m/s, (e) $v_a=30$ m/s.

Fig. 3에서 관찰 할 수 있는 또 하나의 사실은 공기속도 16, 18, 20 m/s에서 연소반응대 내에서 최대의 연소반응속도가 되는 크기가 다른 경우에 비하여 작다는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료분출속도 16, 18, 20 m/s에서 반응대가 넓게 퍼져서 보다 넓은 영역에서 반응이 일어나기 때문으로 생각된다. 이러한 결과로 연소로 내부의 온도 분포에도 영향을 미칠 것으로 보이며 따라서 열적 NOx 생성에도 관계가 있을 것으로 생각된다.

3.3. 공연비 변화에 따른 온도 분포 및 열적 NOx 생성 특성

공연비 변화에 따른 온도분포 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 온도분포 범위는 4가지 모두 1000℃에서 2500℃ 사이의 값으로 표현하였다.

Fig. 3의 연소반응 특성에서 예측하였듯이 공기분출속도가 작은 10 m/s에서는 공기노즐측에서 높은 온도 분포를 보이고 있다. 이론공연비 영역인 16, 18 그리고 20 m/s에서는 상대적으로 낮은 온도 분포를 보여주고 있다. 공기속도가 30 m/s에서는 연료노즐측에서 연소반응대가 형성되어 이 부근에서 다른 경우에 비해 넓은 영역에 걸쳐 높은 온도 영역이 있음을 보여주고 있다.

MILD 연소를 비롯하여 배기가스 재순환 연소, 이차 공기 주입에 따른 연소 지연 등은 궁극적으로 열적 NOx의 생성을 저감하기 위한 기술인데 열적 NOx 저감은 연소반응대에서 낮은 온도 분포를 유지하는 것이 가장 중요한 변수이다. 따라서 이미 Fig. 4에서 관찰하였지만 연소반응대에서 가장 최대의 온도를 비교함과 아울러 배출구에서의 평균 NOx 농도를 비교함으로써 공연비 변화에 따른 MILD 연소의 최적 연소 조건을 비교분석하기로 한다.

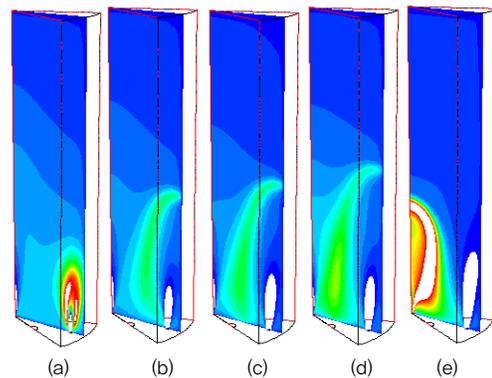


Fig. 4. Comparison of temperature distribution at the intersection plane containing fuel nozzle and air nozzle center with the variation of air velocity. $v_f=110$ m/s. (a) $v_a=10$ m/s, (b) $v_a=16$ m/s, (c) $v_a=18$ m/s, (d) $v_a=20$ m/s, (e) $v_a=30$ m/s.

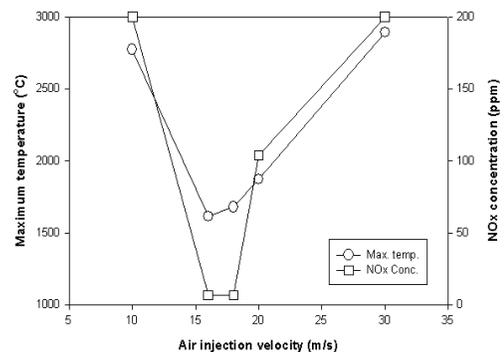


Fig. 5. Comparison of maximum temperature in the furnace and NOx concentration at the exhaust gas exit. $v_f=110$ m/s.

Fig. 5에 각 조건에서 연소로 내 최고온도 특성과 배출구에서의 NOx 농도를 비교하였다. 먼저 최대온도 특성을 살펴 보면 공기속도 16 m/s일 때가 1617℃로 가장 낮은 최대온도를 보이고 있으며 18과 20 m/s일 때는 16 m/s일 때보다 약간 크게 나타나지만 10 m/s와 30 m/s 일 때에 비하면 16 m/s와 유사한 최대온도 특성을 보여주고 있다.

열적 NOx 생성은 주로 연소반응대에서의 온도에 직접적으로 관계가 있다. 즉, 온도가 높으면 NOx 생성량도 증가하고 연소반응대 온도가 낮으면 NOx 생성량도 감소한다. 이러한 NOx 생성 특성을 감안하면 최대온도 특성에서 관찰 하였듯이 16 m/s일 때가 NOx 생성이 가장 낮게 나타날 것으로 예측할 수 있는데 실제 계산에서 이 경우에 배출구에서의 NOx 농도가 6.9 ppm으로 나타났다. 공기분출속도 18 m/s에서는 6.7 ppm, 20 m/s에서는 104.3 ppm으로 나타났다. 공기분출속도 10 m/s와 30 m/s에서는 그래프상에서는 200 ppm까지만 나타내었지만 각각 7746 ppm과 12872 ppm으

로 계산되어 실제 발생량과 차이가 많이 날 수 있지만 정성적으로 판단할 때 10 m/s와 30 m/s에서는 연소반응대 온도가 다른 경우에 비하여 높기 때문에 NO_x 발생량도 크게 나타날 것을 예측할 수 있다. Fig. 4의 온도분포 결과, Fig. 5의 최대온도 결과 그리고 NO_x 생성 특성으로 판단하면 이론 공기량 부근, 즉 당량비 1 부근에서 NO_x 생성량이 최소화되어 최적의 운전 조건으로 간주할 수 있다.

4. 결론

원통형 MILD 연소로에서 공연비 변화에 따른 연소로 내 연소반응속도, 온도 분포, NO_x 생성 특성 등을 살펴보았으며 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 연소로내 유동특성

연료분출속도를 일정하게 유지하고($v_f=110$ m/s) 연소용 공기의 분출속도를 이론공기비 보다 작은 경우에서부터 큰 경우까지($v_a=10, 16, 18, 20, 30$ m/s) 변화시켜 내부 유동 특성을 살펴 본 결과 공기 분출속도가 작은 경우에는 연료 분출 운동량이 커서 분출된 공기가 연소로 내 넓은 공간으로 흐르는 것을 억제하였다. 반면에 공기 분출속도가 크면 분출된 연료가 연소로 내에 흐르는 것이 억제되었다. 이러한 유동특성이 연소로 내에 연소반응 속도 특성을 비롯한 온도분포, NO_x 생성등에 직접적인 영향을 주고 있음을 예측할 수 있었다.

2) 연소반응 특성

공기분출속도가 작은 경우($v_a=10$ m/s)에는 공기분출측에, 공기분출속도가 큰 경우($v_a=30$ m/s)에는 연료분출측에 연소반응대가 형성되며 이론공연비 부근에서는($v_a=16, 18, 20$ m/s) 연소로 중앙 부근에 연소반응대가 형성되었고 연소반응속도 크기도 다른 경우에 비하여 작게 나타났다.

3) 온도분포 및 NO_x 생성 특성

공기분출속도가 작은 경우($v_a=10$ m/s)와 큰 경우($v_a=30$ m/s)에는 연소반응대에서 온도가 이론공연비 부근의 경우($v_a=16, 18, 20$ m/s)보다 크게 나타났다. 이로부터 열적 NO_x 생성이 이론 공연비 부근에서 작게 나타날 것이라는 것을 예측할 수 있었다. 배출구에서

의 NO_x 생성량을 비교해 보면 이론 공연비에서 가장 작은 값(6.7 ppm)으로 나타났으며 공기분출속도가 작거나($v_a=10$ m/s) 큰 경우($v_a=30$ m/s)에는 NO_x 생성량이 매우 크게 나타났다. 이로서 MILD 연소로 내에서 연소시 NO_x 생성량의 관점에서 보면 이론공연비에서 운전하는 것이 가장 최적의 운전 조건으로 판단되었다.

KSEE

사 사

본 연구는 계명대학교 비사연구기금, 지식경제부-한국산업기술평가원 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원과 지식경제부-한국에너지기술평가원에서 시행하는 신재생에너지기술개발을 수행하고 있는 한국기계연구원의 위탁연구 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Wuuning J. A., and Wunning, J. G., "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", *Prog. Energy Combust.Sci.*, **23**, 81-97(1997).
2. Katsuki, M., Hasegawa, T., "The science of technology of combustion in highly preheated air", *27 Symp (Int) Combustion*, pp. 3135-3146(1998).
3. Cavaliere, A., De Joannon, M., and Ragucci, R., "Mild combustion of high temperature reactants", *2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion*(1999).
4. plessing, T., Peters, N., and Wunning, J. G., "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exxxhaust gas recirculation", *27 Symp (Int) Combustion*, pp. 3197-3204(1998).
5. Frazan, H., Maringo, G. J., Riggs, J. D., Yagiela, A. S. and Newell, R. J., "Reburning with Powder River Basin Coal to Achieve SO₂ an NO_x Compliance", *Proc. of the Power - Gen Sixth International Conference, Dallas*, pp. 175-187(1993).
6. Lee, C. Y. and Baek, S. W., "Effects of Hybrid Reburning/SNCR Strategy on NO_x/CO Reduction and Thermal Characteristics in Oxygen-Enriched LPG Flame", *Combust. Sci. and Technol.*, **179**(8), 1649-1666(2007).
7. Launder, B. E., and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer methods in Applied Mechanics

-
- and Engineering", pp. 269-289(1974).
8. Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., "On mathematical model of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", In 16th Symp. on Combustion(1976).
9. Liu, F., Becker, H. A., and Bindar, Y., "A comparative modeling in gas-fired furnaces using the Simple Grey Gas and the Weighted-Sum-of-Grey-Gases Models", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **41**, 3357-3371(1998).
10. Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 126-131(1980).
11. Hanson, R. K., and Salimian, "Survey of rate constants in H/N/O systems", *Combustion Chemistry*, 361(1984).