

연료 및 공기 노즐 위치와 공기 유량 변화에 따른 MILD 연소 특성에 관한 해석적 연구

A Numerical Study of the Combustion Characteristics in a MILD Combustor with the Change of the Fuel and Air Nozzle Position and Air Mass Flow Rate

김태권* · 심성훈** · 장혁상*** · 하지수[†]

Tae Kwon Kim* · Sung Hoon Shim** · Huyk Sang Chang*** · Ji Soo Ha[†]

계명대학교 에너지환경과학과 · *계명대학교 기계자동차공학과 · **한국기계연구원 · ***영남대학교 환경공학과

Energy · Environmental Science Department, Keimyung University

*Mechanical and Automotive Engineering Department, Keimyung University

**Korea Institute of Machinery & Materials

***Environmental Engineering Department, Youngnam University

(2011년 2월 5일 접수, 2011년 5월 27일 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 change of fuel and air nozzle position and air mass flow rate. For the case with the fuel nozzle located near center position of combustor, the reaction zone started at the fuel nozzle and had inclined shape toward combustor wall when the air mass flow rate was relatively smaller. On the other hand, the end of reaction zone moved toward center of combustor from combustor wall when the air flow rate was relatively larger. For the case with the air nozzle located near center position of combustor, the reaction zone started at the fuel nozzle and had inclined shape toward combustor wall when the air mass flow rate was relatively small, which was similar as the previous case with smaller air mass flow rate. On the other hand, the end of reaction zone moved toward combustor wall when the air flow rate was relatively larger. The maximum temperature increased as the air mass flow rate increasing for both cases, and the concentration of thermal NOx increased also from the previous reason of temperature characteristics. The concentration of NOx for the case with the air nozzle located near center position of combustor was considerably smaller than that for the case with the fuel nozzle located near center position of combustor. From the present study, the case with the air nozzle located near center position of combustor and theoretical air flow rate was the most effective condition for the NOx reduction and perfect combustion.

Key Words : MILD Combustion, Fuel Nozzle Position, Air Nozzle Position, Maximum Temperature, NOx

요약 : 연소과정 중에 발생하는 질소산화물을 저감하는 기술인 MILD 연소에 대하여 연료노즐과 공기노즐의 위치와 공기유량을 변화하면서 나타나는 연소특성을 수치해석을 통하여 연구하였다. 본 연구의 MILD 연소로는 연료노즐과 공기 노즐 사이에 연소배기가스의 배출구가 있는 연소로를 이용하였다. 공기노즐은 8개, 연료노즐은 4개를 사용하였다. 연료노즐이 연소로 중앙 부근에 위치한 연소로의 경우에 공기유량이 적을 때는 연소반응대가 연료노즐에서 시작하여 연료노즐 상부로 형성된다. 공기노즐이 연소로 중앙부분에 위치한 경우에 공기유량이 적을 때는 연소반응대가 공기노즐 부근에서 시작하여 연소로 벽면으로 치우치지만 공기유량이 증가하면 연소반응대가 연료노즐 측으로 옮겨가게 된다. 두 가지 경우 모두 공기유량이 증가하면 연소반응대에서 최대온도가 증가하고 따라서 배기가스에서의 NOx 농도가 증가한다. 두 가지 노즐 위치에서의 NOx 생성을 비교해 보면 공기노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우가 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우보다 NOx 농도가 현저히 적음을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로부터 NOx 저감과 연료의 미연가스 배출을 감안할 때 공기노즐이 연소로 중앙에 위치하고 이론공기량에 해당하는 공기량을 분출할 때 NOx 생성에 가장 효과적임을 알 수 있었다.

주제어 : MILD 연소, 연료노즐 위치, 공기노즐 위치, 연소반응대, 최대 온도, NOx

1. 서론

화석연료를 연소시켜서 에너지를 얻는 대표적인 설비 또는 기기가 화력발전소와 자동차이다. 화석연료를 연소할 때는 연소를 위해 공기를 산화제로 이용하고 있다. 이 때 공기 중의 질소와 산소가 고온의 화염대에서 반응을 하여 유해한 질소산화물이 발생한다. 이러한 질소산화물을 저감하기 위하여 화력발전소와 자동차는 촉매를 이용한 탈질설비나 장치를 설치하고 있다. 화력발전소의 탈질설비는 초기

설치비용이 상당히 크며 운전비용과 교체비용 등이 적지 않게 투입되어야 한다. 화석연료의 연소 시에 발생하는 질소산화물의 양을 탈질설비나 장치에 가기 전에 저감시킬 수 있다면 설치비용과 운전비용을 줄일 수 있다. 연소반응 시에 질소산화물을 줄이는 방법의 연구는 지연연소를 통한 연소반응 분산, 배기가스 재순환 등이 연구되고 있으며 최근에 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나인 배기가스 재순환법은 공기흡입구에 배기가스의 일부를 재순환시켜 연소할 때의 최고 온도를 낮춤으로써 NOx의 발생을 억제하는 방법

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

이다. 그러나 이 방법은 NOx를 저감하지만 이에 따라 연소 효율이 낮아지는 문제점이 있다. 이처럼 대부분의 연소기술들은 연소효율과 환경문제에 있어서 상반되는 관계를 가지고 있다.

배기가스 재순환에서 단점으로 나타난 에너지효율 저감을 보완하는 연구로서 최근의 연구들¹⁻⁶⁾인 MILD (Moderate and Intense Low oxygen Dilution) 연소가 에너지 효율 향상과 더불어 NOx를 저감하는 연소기술로 인식되고 있다. MILD 연소는 질소산화물의 발생을 억제하기 위하여 연소기 내에 강한 배기가스 재순환 영역을 만들어 낮은 화염온도에서 안정적으로 연소반응을 유지할 수 있는 연소기술이다. 여기서 배기가스 재순환이란 연소반응 전의 공기나 연료에 배기가스를 혼합하는 것을 말하며, 화염의 안정화를 위해 고온의 연소가스를 버너 내로 재순환시키는 것을 의미하지는 않는다. 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 향상하여 로의 소형화가 가능하다고 보고하고 있다.

본 연구는 MILD 연소로에서 연료 투입을 원뿔형 연소로 가운데에 위치하도록 하고 공기 투입을 외곽으로 위치한 경우의 연소 특성과 연료 공기 투입 위치를 서로 바꾼 경우의 연소 특성을 살펴봄으로써 각 경우의 최적 연소 조건과 두 경우 중에 어떠한 배치가 연소 특성이 좋은지를 비교하여 MILD 연소로의 연료 공기 투입 위치에 대한 최적 조건을 도출하여 효율적인 MILD 연소로 설계 시에 적용할 수 있는 기반을 마련하는데 목적이 있다.

2. 수치해석 방법

MILD 연소로 내의 연소 특성을 살펴보기 위해 본 연구

에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 MILD 연소로에 대하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 1에서 연소로 형상은 전체의 1/2만 표현하였다. 원뿔형 연소로는 거의 원통형과 유사한데 바닥의 직경이 0.96 m이고 상부의 직경이 0.72 m이며 높이는 2.4 m이다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 (a)의 경우는 연료 투입 노즐 위치가 원뿔형 연소로 가운데에 부근이며 공기 투입 노즐은 원뿔형 연소로 벽면 측에 있다. 연료 노즐의 직경은 5 mm이며 개수는 4개, 공기노즐 직경은 18 mm이며 개수는 16개이다. (b)의 경우는 연료와 공기 투입 노즐 위치가 (a)와 반대로 되어 있다. (a)의 연료 투입 노즐 전체 면적과 공기 투입 전체 면적이 같게 하기 위해 (b)의 연료노즐의 직경은 5 mm로 하고 개수는 4개로 하였다. 공기 노즐은 직경을 25 mm로하고 개수는 8개로 하였다. 노즐은 바닥에서 30 mm 상부로 돌출되게 설치하였다. (a)와 (b)의 경우 모두, 배기가스는 연료노즐과 공기노즐 사이에 골을 만들어 가장 밑바닥에서 외부로 배출되게 하였다. 수치해석에 사용된 계산 영역은 원형의 1/8 영역을 사용하였는데 이는 1/8 영역이 반복적으로 배치되어 있기 때문이다.

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 분자 점성계수에 난류유동에서 모델링한 난류점성계수의 합을 사용하였고 화학종방정식에서 연소반응속도는 에디 소산 모델⁸⁾을 이용하여 계산하였다. 본 연구에 사용한 연료는 메탄으로 메탄과 공기 중 산소와의 화학반응은 일 단계 화학반응을 이용하였다. 또한 연소 생성물 중에 CO₂와 H₂O 등의 존재로 말미암은 복사열전달은 DO 모델(Discrete Ordinate)과 회색가스 가중합 복사모델(WSGGM)⁹⁾을 이용하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 프로그램은 SIMPLE 알고리즘¹⁰⁾을 채택한 상용 열유체 전산해석 프로그램인 Fluent 프로그램을 이용하였고 유동장은 약 87만 개의 격자로 구성하였다. 열적 NOx 생성에 관한 계산은 NOx 반응속도가

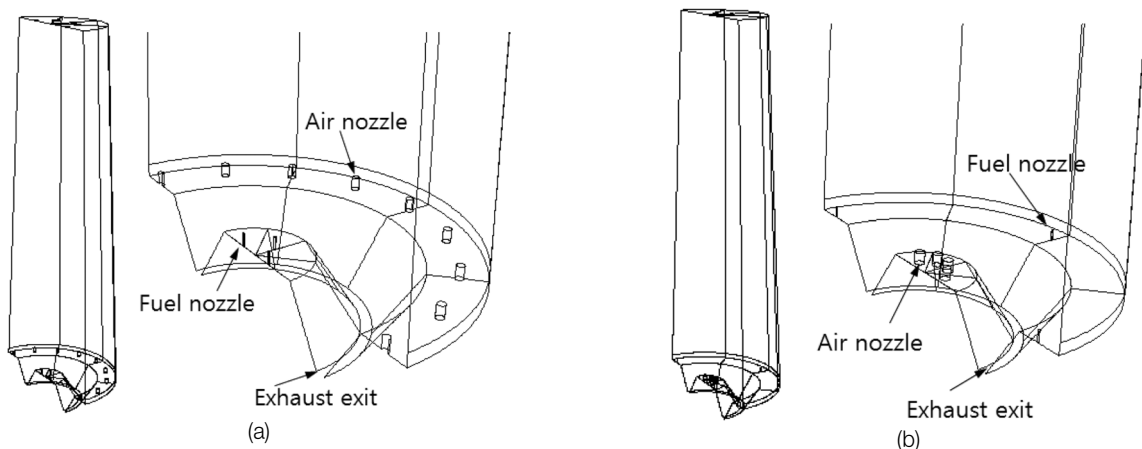


Fig. 1. Schematic configuration of MILD combustors (a) fuel nozzle location : near center and air nozzle location : near outside wall, (b) fuel nozzle location : near outside wall and air nozzle location : near center.

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 116 m/s이고 상온인 30℃ 상태로 분출된다. Fig. 1의 (a) 형상에 대한 원통의 외각에서 분출되는 공기는 20, 23, 26, 28, 30 m/s로 변화시켜서 계산하였는데 공기 또한 30℃로 분출되도록 하였다. 공기 분출속도 26 m/s는 연료분출 속도 116 m/s에 필요한 이론공기량에 해당된다. 따라서 20, 23 m/s는 이론공기량 보다 작은 공기량이고 28, 30 m/s는 이론공기량 보다 큰 공기분출량이다. Fig. 1의 (b) 형상의 연소로에 대하여는 연료분출 속도는 116 m/s 그대로 사용하였고 공기 분출속도는 (a)의 경우와 유사한 공기 유량이 되도록 20, 23, 27, 28.5, 30 m/s로 하였다. 이 경우에는 공기 속도 27 m/s가 연료유량에 대한 이론공기량에 해당한다. 이전의 MILD에 관한 실험 연구에서 MILD 연소 조건이 되었을 때 연소로 내가 약 800℃ 이상의 온도를 유지하고 있는 것을 관찰하였는데 본 연구에서는 원통 내부에서 MILD 연소 조건이 되었다고 가정하여 모든 벽면은 800℃ 보다 높은 1,000℃로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연료노즐이 연소로 중앙 부분에 위치한 연소로의 공기유량 변화에 따른 연소 특성

본 연구에서 연료노즐과 공기 노즐의 위치를 서로 바꿀 때 어떠한 특성 변화가 있는지를 살펴보고 두 가지의 경우 중에 어떠한 경우가 최적의 NOx 배출을 위한 형상인가를 알아보는 것을 우선적 목적으로 한다고 서론에서 언급하였다. 본 절에서는 먼저 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우인 Fig. 1(a)의 경우에 대하여 연소 특성을 살펴보기로 한다.

연료분출속도를 116 m/s로 일정하게 하고 공기분출속도를 변화시켜 연소로 내부 유동 형태를 비교한 것을 Fig. 2에 나타내었다. 공기분출속도는 20, 23, 26, 28, 30 m/s로 변화시켰다. 연료노즐의 면적과 공기노즐의 면적을 고려하여 연료분출속도가 116 m/s일 때 이론공기량(9.524 m³ air/m³ CH₄)의 공기분출속도는 26 m/s이다. Fig. 2를 살펴보면 이론 공기량보다 작은 공기분출속도인 20 m/s(Fig. 2(a))에서는 연료분출속도가 크기 때문에 분출된 연료는 연소로 상부까지 흘러가지만 공기는 연소로 상부까지 흐르지 못하고 연료의 침투 높이의 1/2까지만 흐르고 있는 것을 관찰할 수 있다. 공기분출 속도가 23 m/s인 경우(Fig. 2(b))에서도 유사한 경향을 보이고 있다. 공기분출 속도가 이론공기량에 해당하는 26 m/s인 경우에는 연료 침투 높이와 공기 침투 높이가 거의 비슷함을 관찰할 수 있다. 공기 분출속도를 26 m/s 보다 크게 한 경우(Fig. 2(d),(e))인 28 m/s와 30 m/s인 경우에는 연료의 침투 높이보다 상대적으로 공기의 침투 높이가 크게 되어 역전하는 것을 볼 수 있다. 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 것이라는 것을 예측할 수 있다.

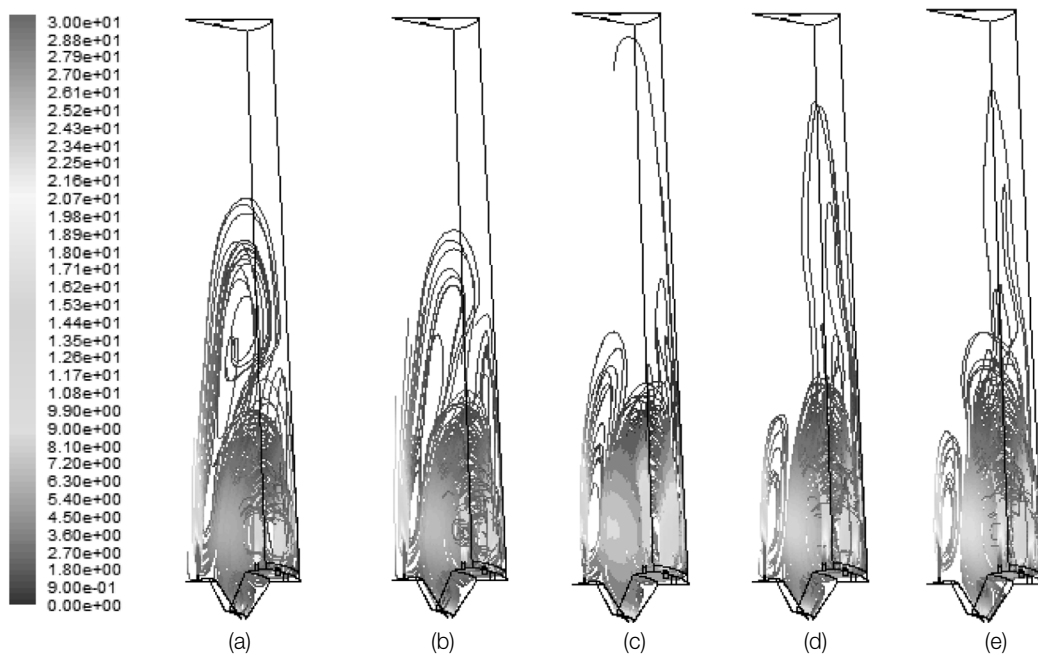


Fig. 2. Comparison of flow patterns with the change of air velocity for the case with the fuel nozzle location near center and air nozzle location near outside wall. $v_f = 116$ m/s. (a) $v_a = 20$ m/s, (b) $v_a = 23$ m/s, (c) $v_a = 26$ m/s, (d) $v_a = 28$ m/s, (e) $v_a = 30$ m/s.

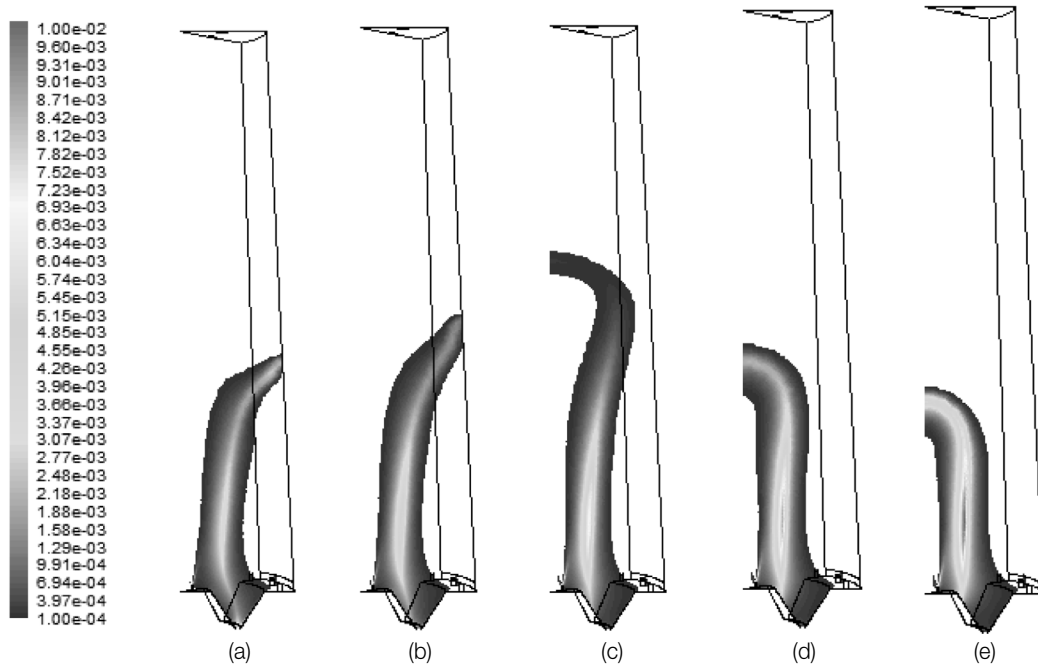


Fig. 3. Comparison of turbulent reaction rate contour with the change of air velocity for the case with the fuel nozzle location near center and air nozzle location near outside wall. $v_f = 116$ m/s. (a) $v_a = 20$ m/s, (b) $v_a = 23$ m/s, (c) $v_a = 26$ m/s, (d) $v_a = 28$ m/s, (e) $v_a = 30$ m/s.

앞에서 살펴본것과 같이 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 $0.0001 \sim 0.01$ $\text{kgmol/m}^3\text{s}$ 로 모두 같은 범위를 택하였다.

Fig. 3을 살펴보면 공기분출속도 변화에 따라 연소반응대, 즉 화염이 형성되는 형태가 크게 변하는 것을 관찰할 수 있다. 우선 $v_a = 20$ m/s의 경우(Fig. 3(a))를 살펴보면 연소반응대가 연료노즐 부근에서는 연료노즐 측에서 존재하다가 상부 영역에서는 공기 노즐 측으로 연소반응대가 휘어져서 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 2(a)에서 관찰하였듯이 이 경우에는 연료가 분출하여 다른 경우에 비하여 상부까지 흐르다가 벽면 측으로 연료가 흐르는 것을 관찰할 수 있는 것으로 이해 가능하다. 또한 최대 반응속도 값이 다른 공기분출 조건보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 공기분출 속도가 약간 증가한 Fig. 3(b)의 경우는 Fig. 3(a)와 연소반응대 형태는 비슷한 양상을 보여준다. 다만 연소반응속도의 최대값이 약간 크게 나타나고 있다. 공기속도가 26 m/s인 경우인 Fig. 3(c)에서는 연소반응대가 벽면에서 이탈하여 상부 끝 부분이 연료 노즐 측으로 옮겨가는 현상 영역임을 관찰할 수 있는데 이는 공기의 분출 운동량이 증가하여 연료가 더 상부로 까지 올라가는 것을 억제하여 연소반응대가 벽면으로 치우치는 것을 방지하기 때문으로 볼 수 있다. 연소반응속도의 최대값은 앞의 공기속도 경우에 비하여 증가한 것을 확인할 수 있다. 공기분출속도를 더 증

가한 경우인 Fig. 3(d)와 (e)에서는 연소반응대 끝 부분이 완전히 연료노즐 측으로 이동한 것을 관찰할 수 있는데 이는 분출한 공기 운동량이 상대적으로 증가하여 연료가 상부로 퍼져나가는 것을 억제하였기 때문이다. 공기의 분출량이 증가한 경우에는 최대 연소반응속도도 증가하여 나타난 것을 확인할 수 있다.

3.2. 공기노즐이 연소로 중앙 부분에 위치한 연소로의 공기유량 변화에 따른 연소 특성

앞 절에서 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우의 연소특성을 살펴보았다. 본 절에서는 공기노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우의 연소특성을 살펴보기로 한다. 공기분출 속도가 20 m/s인 경우에 유동 형태를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 공기의 분출을 연소로 가운데에서 분출하였는데 이 경우에 공기의 침투 높이는 거의 연소로 높이의 4/5 위치까지 침투하는데 공기노즐이 연소로 벽면에 위치한 경우에 (Fig. 2(a)) 연소로 높이의 1/3 위치까지 침투한 것과 비교해보면 더 높은 위치까지 침투하는 것을 확인할 수 있다. 연료가 연소로 상부에 침투하는 것은 공기 유동에 의해 억제되고 있는 것을 관찰할 수 있다. 공기분출속도가 23 m/s에서부터 30 m/s까지 변화할 때의 유동형태를 살펴보면 공기가 연소로 상부로 침투하는 영역에 대하여는 20 m/s와 유사한 것을 알 수 있다. 다만 공기 분출속도가 증가하면 공기 분출 측 제트 유동에 배기가스가 유입되는 것이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다.

공기분출속도의 변화에 따라 연소반응속도 분포의 변화 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 공기분출속도가 20 m/s일 때

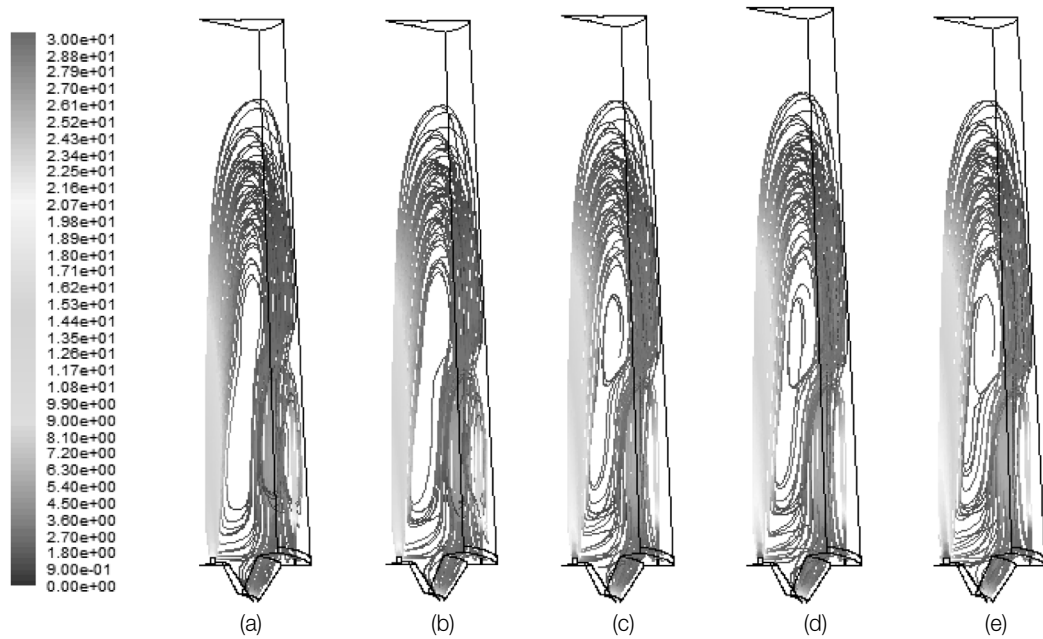


Fig. 4. Comparison of flow patterns with the change of air velocity for the case with the fuel nozzle location near outside wall and air nozzle location near center. $v_f = 116$ m/s. (a) $v_a = 20$ m/s, (b) $v_a = 23$ m/s, (c) $v_a = 27$ m/s, (d) $v_a = 28.5$ m/s, (e) $v_a = 30$ m/s.

(Fig. 5(a))는 연소반응대의 시작이 공기노즐 측에 있으며 상부로 올라가면서 연소로 벽면 측으로 기울어져 있다. 공기분출속도가 23 m/s일 때에도(Fig. 5(b)) 연소반응대의 시작은 공기노즐 측에 있지만 속도가 27 m/s일 때는 연소반응대의 시작이 연료노즐 측으로 옮겨간다. 이는 공기노즐에서 분출된 공기의 운동량이 커졌기 때문에 연료가 분출되어 상부로 퍼져가는 것을 막을 뿐만 아니라 연료 분출이 시작되는 곳까지 공기가 침투해 가서 그 곳에서부터 연소반

응이 시작되기 때문이다. 공기분출속도가 28.5, 30 m/s일 때에도(Fig. 5(d), (e)) 유사한 양상을 보여주고 있다. 3.1절의 경우와 유사하게 공기분출 속도가 증가하면 최대 연소반응 속도 크기도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 연료 및 공기노즐 위치 변화에 따른 MILD 연소 온도 및 NOx 생성 특성

3.1절과 3.2절에서 연료 및 공기 노즐 위치 변화에 따라

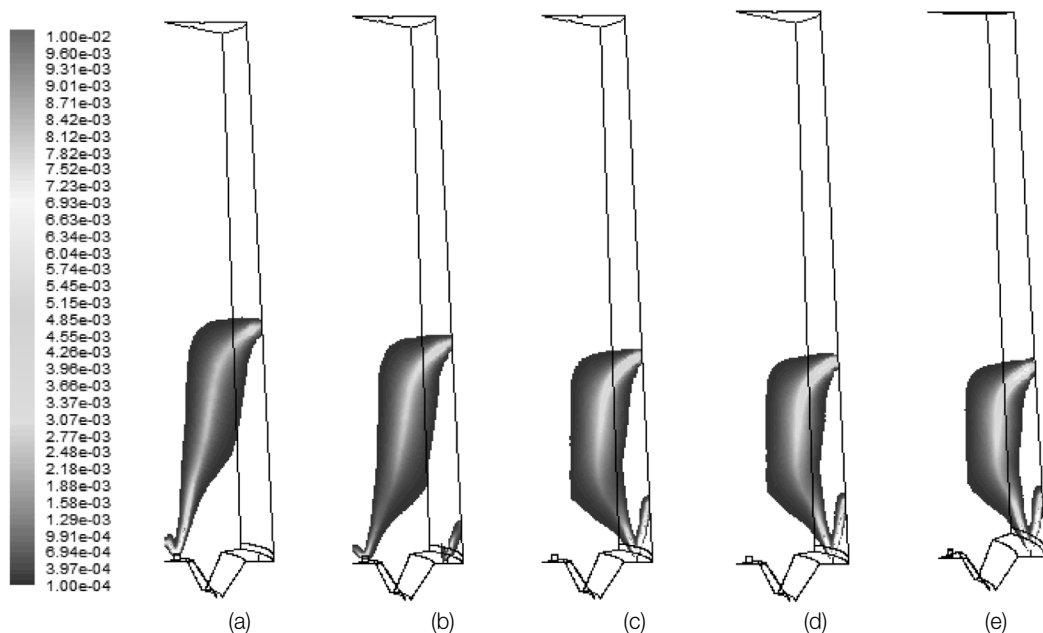


Fig. 5. Comparison of turbulent reaction rates contour with the change of air velocity for the case with the fuel nozzle location near outside wall and air nozzle location near center. $v_f = 116$ m/s. (a) $v_a = 20$ m/s, (b) $v_a = 23$ m/s, (c) $v_a = 27$ m/s, (d) $v_a = 28.5$ m/s, (e) $v_a = 30$ m/s.

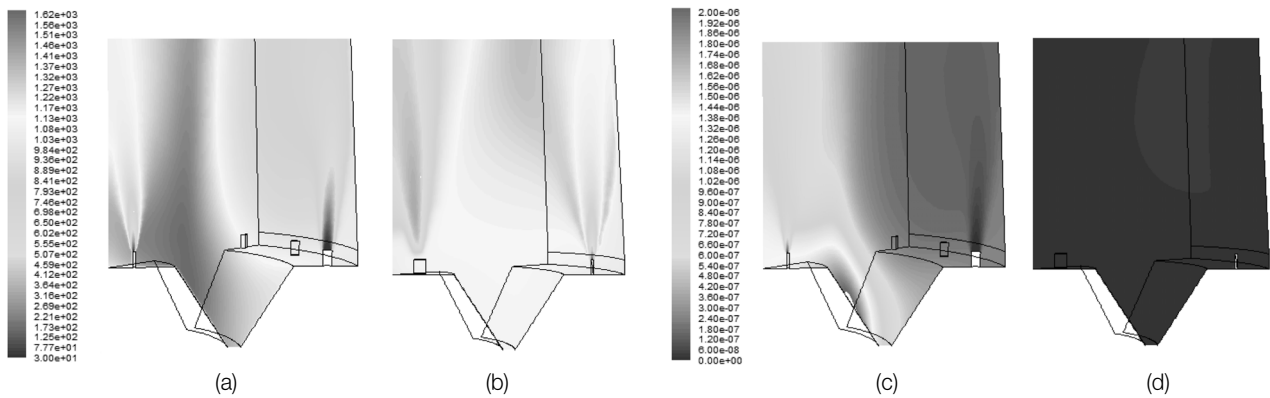


Fig. 6. Comparison of temperature and NOx concentration contours between the case with the fuel nozzle location near outside wall and air nozzle location near center(a, c) and the case with the fuel nozzle location near center and air nozzle location near outside wall (b, d). $v_f = 116$ m/s and $v_a = 28$ m/s. (a), (b) for temperature and (c), (d) for NOx concentration.

Table 1. Comparison of maximum temperature and NOx concentration at exit between the case with the fuel nozzle location near outside wall and air nozzle location near center (case 1) and the case with the fuel nozzle location near center and air nozzle location near outside wall (case 2)

Air Injection Velocity (m/s)		20	23	26	28	30
Max. Temperature(°C)	Case 1	1382	1430	1515	1613	1694
	Case 2	1286	1324	1364	1380	1383
NOx Concentration at Exhaust Exit	Case 1	1.99×10^{-8}	3.93×10^{-8}	1.54×10^{-7}	1.00×10^{-6}	4.07×10^{-6}
	Case 2	3.57×10^{-9}	5.84×10^{-9}	8.43×10^{-9}	1.85×10^{-8}	2.44×10^{-8}

유동형태와 연소반응대 형상에 대한 것을 살펴해보았다. 이 절에서는 두 경우에 대하여 온도 및 NOx 생성 특성을 살펴보기로 한다. Fig. 6에 연료분출속도 116 m/s, 공기분출 속도 28 m/s에 대하여 연료 및 공기노즐 위치 변화에 따른 온도 분포와 NOx 분포를 노즐 부근에 자세히 나타내었다. 온도는 30~1,620°C 범위이고 NOx 농도는 NO, NO₂, N₂O를 모두 합한 농도로서 질량분율로 $0 \sim 2 \times 10^{-8}$ 범위이다. 그림에서 관찰할 수 있듯이 연료노즐이 연소로 중앙 부근에 위치한 경우에는 연소반응대가 연료노즐 부근에 형성되어서 온도의 최대가 되는 곳도 연료노즐 부근에 위치하고 있으며 이는 배기가스가 배출되는 곳과 가까이 있다. 이것과 대조되게 공기노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우에는 연소반응이 활발한 곳이 노즐에서 떨어진 상부에 위치해 있어서 온도의 최대가 되는 곳도 노즐 또는 배기가스 출구에서 떨어져 있다. 또한 온도의 최대값도 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 것 보다 낮기 때문에 열적 NOx 생성도 상대적으로 낮아질 것으로 예상할 수 있다. 이러한 예상대로 Fig. 6(d)에서 관찰할 수 있듯이 NOx 생성 분포에서도 상대적으로 Fig. 6(c)에 비하여 상당히 낮은 분포를 보여주고 있다.

공기분출 속도 변화에 따른 최대온도와 최대 NOx 농도에 관한 비교를 Table 1에 나타내었다. Table 1을 살펴보면 공기분출속도가 증가하면 공기노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우나 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우 모두 최대온도도 같이 증가하고 있다. 두 경우를 비교해 보면 연료노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우가 공기노즐이 연소로 중앙에 위치한 경우보다 최대온도가 크게 나타났고 이에 따

라 배기가스 출구에서의 NOx 농도도 상대적으로 크게 나타나고 있다. 모든 경우에 MILD 연소 조건이기 때문에 NOx 농도는 일반적인 연소로에 비하여 매우 낮은 농도값을 보여주고 있다. 공기 분출 속도가 이론공기량보다 작은 경우에는 NOx 농도가 작게 나타나겠지만 불완전 연소로 인한 CO 생성, 미연 연료의 배출을 감안할 때 이론공기량에서 가장 최적의 조건임을 알 수 있다.

4. 결론

저의 원통형에 가까운 원뿔형 MILD 연소로에서 연료 및 공기 노즐 위치를 변경하는 것과 함께 공기 분출속도를 변화하여 연소로 내 유동형태, 연소반응속도, 온도 분포, NOx 생성 특성 등을 살펴보고자 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 연료노즐이 연소로 중앙 부분에 위치한 경우의 유동 및 연소반응 특성

연료분출속도를 일정하게 유지하고($v_f = 116$ m/s) 연소용 공기의 분출속도를 이론공기비 보다 작은 경우에서부터 큰 경우까지($v_a = 20, 23, 26, 28, 30$ m/s) 변화시켜 내부 유동 특성을 살펴 본 결과 공기 분출속도가 작은 경우에는 연료 분출 운동량이 커서 연료가 연소로 상부에 까지 침투해 갔지만 공기 분출속도가 크면 분출된 연료가 연소로 내에 흐르는 것이 억제되었다. 이러한 유동특성에 따라 연소반응

대는 공기분출속도가 작은 경우에는 상부에서 연소로 벽면에 치우치게 되는데 공기분출 속도가 증가하면 연소반응대의 상부가 연소로 벽면에서 연소로 중앙으로 옮겨갔다. 또한 연소반응속도의 최대값도 공기분출속도가 증가하면서 함께 증가하였다.

2) 공기노즐이 연소로 중앙부분에 위치한 경우의 유동 및 연소반응 특성

공기노즐이 연소로 중앙 부분에 위치한 경우에는 공기 유동이 연소로 상부까지 침투하였으며 분출된 연료가 상부로 침투하는 것을 억제하는 유동형상을 보여 주었다. 공기분출 속도가 작은 경우에는 연소반응대가 공기노즐 측에서 시작하여 상부에서는 벽면에 치우치는 형태를 보여주었지만 공기분출 속도가 큰 경우에는 연소반응대가 연료노즐 측으로 치우치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대 연소반응속도는 연료노즐 측에 있는 것이 아니라 연소반응대에서 연소로 상부 측에 존재하였다.

3) 연료 및 공기노즐 위치 변화에 따른 MILD 연소로 온도 및 NO_x 생성 특성

연료노즐이 연소로 중앙 부분에 위치한 경우에 비하여 공기노즐이 연소로 중앙 부분에 위치할 경우가 연소반응대에서 최대온도가 낮았으며 이에 따라 배기가스 배출구에서의 NO_x 농도도 낮게 나타났다. 연소반응시에 불완전 연소에 따른 CO생성과 미연 연료의 배출을 감안할 때 연료노즐이 연소로 중앙 부분에 위치하는 것 보다 공기 노즐이 연소로 중앙 부분에 위치하고 이론 공기량의 공기분출에서 NO_x 저감이 가장 최적이라는 것을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 지식경제부-한국에너지기술평가원에서 시행하는 신재생에너지기술개발을 수행하고 있는 한국기계연구원의 위탁연구 지원에 의한 것입니다.

KSEE

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. and 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. Ha, J. S., Kim, T. K. and Shim, S. H., "A numerical study of the air fuel ratio effect on the combustion characteristics in a MILD combustor," *Kor. Soc. Environ. Eng.*, **32**(6), 587~592(2010).
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," *Combust. Chem.*, p. 361(1984).