

# 동축공기에 따른 Mild 연소의 열적 특성에 대한 수치연구

황창환\* · 백승욱\*\* · 김학영\*

## Numerical Investigation on the Thermal Characteristics of Mild Combustion According to Co-axial Air

Chang Hwan Hwang, Seung Wook Baek and Hak Young Kim

### ABSTRACT

Mild combustion is considered as a promising combustion technology for energy saving and low emission of combustion product gases. In this paper, the controllability of reaction region in mild combustion is examined by using co-axial air nozzle. For this purpose, numerical approach is carried out. Propane is considered for fuel and air is considered for oxidizer and the temperature of air is assumed 900K slightly higher than auto ignition temperature of propane. But unlike main air, the atmospheric condition of co-axial air is considered. Various cases are conducted to verify the characteristics of Co-Axial air burner configuration. The use of co-axial air can affect reaction region. These modification help the mixing between fuel and oxidizer. Then, reaction region is reduced compare to normal burner configuration. The enhancement of main air momentum also affects on temperature uniformity and reaction region. The eddy dissipation concept turbulence/chemistry interaction model is used with two step of global chemical reaction model.

**Key Words** : Mild combustion, Pre-heated air, Diluted combustion, Flameless combustion, Co-axial air

### 기 호 설 명

#### Alphabets

$D$  : nozzle diameter  
 $K_v$  : product gas recirculation rate  
 $MF$  : mass fraction  
 $\dot{m}$  : mass flow rate  
 $U$  : nozzle velocity

#### Subscripts

$^{\circ}$  : inlet condition  
 $I$  : gases  
 $up$  : upward

## 1. 서론

최근 급격한 지구온난화를 막기 위하여 온실가스 배출을 줄이려는 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 대표적 온실가스인 이산화탄소는 다양한 종의 탄화수소물로 이루어진 화석연료를 연소시켜 에너지를 얻기 때문에 다량으로 발생한다. 따라서 화석연료를 대체하기 위한 많은 연구가 진행되고 있지만, 여전히 대부분의 산업현장에서는 화석연료를 주 에너지원으로 사용하고 있다.

화석연료를 사용하는 이상 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해서는 연소시스템의 효율을 높여야 하며,

동시에 대기오염물질로서 규제되고 있는 질소산화물(NOx)과 일산화탄소(CO)의 배출도 최소한으로 억제해야 한다. 열효율을 높이기 위한 방법 중의 하나로 배기가스의 폐열을 활용하여 연소공기를 예열하는데, 이로 인하여 높아진 연소온도 때문에 thermal NOx의 발생이 증가하는 역효과가 나타나게 된다[1]. 따라서 기존의 시스템에서는 높은 열효율과 낮은 NOx 배출을 동시에 달성하기에는 한계가 있었다[1,2]. 그러나 지난 10년간 무화염 산화(Flameless oxidation)[2], HiTAC(High temperature air combustion)[3] 혹은 Mild 연소[4]의 연구를 통하여 두 목적을 동시에 달성하고자 하였다. 이 기술들은 공통적으로 배기가스의 연소로 내부 재순환을 이용하였다. Mild 연소는 열재순환(heat recirculation) 연소

\* 한국과학기술원 기계항공 시스템 공학부

† 연락저자, swbaek@kaist.ac.kr

의 한 종류로 분류되는데, 배기가스의 열을 이용하여 연소공기를 예열한 후 연소로에 공급하게 된다. 이렇게 예열공기를 통해 연소로에 열량이 공급되게 되면, 연료를 더 적게 사용하고도 원하는 온도장을 형성할 수 있다고 알려져 있다[2]. 또한 배기가스의 강한 내부재순환운동에 의해 유도되는 연소 영역의 확장 때문에 연소로 내부의 최고온도는 낮아지게 된다. 앞에서와 같은 효과들로 인하여 연소로내의 온도분포를 기존연소보다 균일하게 유지하고, 연소로내의 최고온도를 낮추어 thermal NOx의 발생을 줄일 수 있다고 알려져 있다[2,4].

Wünning과 Wünning[2]은 처음으로 무화염 산화에 대하여 연구하였고 배기가스 재순환율( $K_v$ )을 정의하였다. Dally 등[5]은 연료 혼합기가 Mild 연소에 끼치는 영향을 실험을 통해 연구하였으며, 불활성 기체로 희석된 연료를 공급하여 Mild 연소상태의 달성과 NOx 배출의 저감을 도울 수 있음을 밝혔다. Parente 등[6]은 수소가 첨가된 천연가스의 Mild 연소를 실험과 수치해석을 통해 연구하였다. 또한 상세한 화학반응과 EDC(eddy dissipation concept) 모델[7]을 이용한 수치해석 결과와 측정값이 잘 일치함을 보고하였다. Szegö 등[8]은 평행분사류를 이용한 Mild 연소의 특징을 실험을 통해 연구하였다. 그리고 Wünning과 Wünning[2]이 제시한 재순환율  $K_v$ 를 통해 연소안정성을 판단하지 않고, 새롭게 제시한 분사 운동량  $G$ 를 통해 연소안정성을 분류하고자 하였다.  $K_v$ 는 유동장의 속도, 밀도, 방향 등에 대한 정보가 없을 시에 값을 계산하기가 어려운 반면, 질량유동량과 공급속도의 곱으로 나타내어지는  $G$ 는 실험 조건을 통해 계산될 수 있다.

Mild 연소는 수관식 보일러, 철강공정의 재가열로, 풀림(annealing) 공정 등에 적용이 가능하고 이들 연소로는 성능을 유지하면서도 소형으로 설계, 제작되고 있는 추세이다. Mild 연소는 화염 연소의 얇은 층(thin layer) 연소와 다르게 공간(space) 연소라는 특징을 가지는데, 연소반응이 완료되지 않은 혼합기가 저온의 피열물, 연소로 벽에 닿을 시에 소염(quenching)이 발생할 가능성이 존재한다. 그렇게 된다면 다량의 CO가 발생할 수도 있는데, 이는 연소효율과 배기가스규제 측면에서 바람직하지 않은 현상이다. Mild 연소의 장점을 유지하면서 위와 같은 현상의 발생을 방지하기 위하여 더 작은 공간 즉, 더 작은 화학반응지역을 유도할 수 있다면 연소로의 소형화에 기여할 수 있을 것이다. 이것을 달성하기 위한 방법으로 연료노즐을 둘러싸는 동축공기 노즐을 이용한 연소제어가 본 연구에서 시도되었다. Mild 연소에서 주 연소공기는 연료의 자동점화온도보다 높게 공급이 되는 반면, 동축공기는 대기온도로 공급

된다. 동축공기는 연료노즐과 가까운 위치에서 공급되므로 연료와 산화제의 혼합이 촉진되어, 작은 화학반응영역을 유도할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 넓은 지역에서의 공간 연소를 발생시켜 얻어지는 Mild 연소의 장점을 반감시킬 수 있으므로, 반응지역을 조절하면서도 Mild 연소의 장점을 유지할 수 있는 동축공기 공급량에 대한 연구가 이루어져야 한다. 이를 위하여 각기 다른 양의 동축공기 공급에 의한 온도장의 변화, NO 배출의 변화를 수치해석을 통하여 살펴볼 것이다. 삼차원 수치해석을 위해 상용코드인 FLUENT 6.3.26을 사용하였다.

## 2. 연소시스템 및 연소기 작동조건

### 2.1. 연소로

이 논문에서 수치해석을 위해 지름 0.4 m, 높이 0.6 m의 순수 연소공간을 갖는 연소로가 모델링되었다. 연소공간은 0.1 m 두께의 단열재와 0.003 m 두께의 stainless steel에 둘러싸여있다. 연소로의 전 영역에 걸쳐서 배기가스 내부재순환을 유도하기 위하여 보통 연소로 하류에 위치하는 배기구를 없애고, 상류에 있는 연소기의 바깥부분에 링(ring) 모양의 배기구를 설치하여 이곳을 통해 배기가스를 배출하게 된다. 이와 같은 연소로의 형상특징을 Mild 연소를 실시하고자 하는 대부분의 연소로가 선택하고 있다[2,5,6,8,9]. Fig. 1에 연소로 내의 유동 진행방향과 계산 후 결과를 나타낼 위치를 표시하였다.

### 2.2. 연소기

연소기는 연소로의 바닥면에 장착되며 평평한 형상을 가지고 있다. Fig. 2에 연소기 선단부와 유동방향에 대한 개략도를 나타내었다. 연료와 산화제의 접촉면을 줄이기 위하여 다수의 연료노즐보다는 1개의 연료 노즐을 연소기의 중앙에 배치하였고, 연료는 300 K의 온도로 공급된다. 연료노즐을 6개의 주 공기노즐이 둘러싸고 있으며, 주 공기노즐을 통

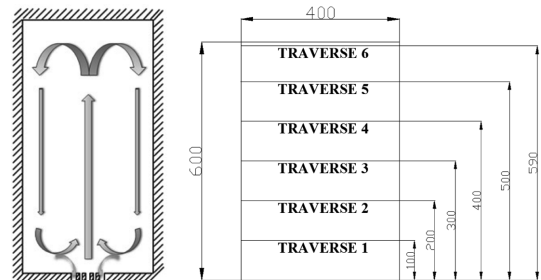


Fig. 1. Schematic of flow direction and data retrieval positions in furnace (unit : mm).

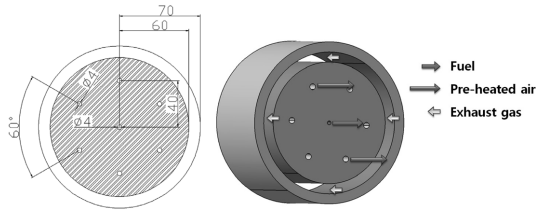


Fig. 2. Schematic of normal burner (unit : mm).

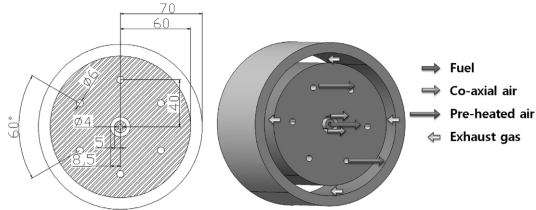


Fig. 3. Schematic of co-axial air burner (unit : mm).

해 공급되는 예열공기의 온도는 900 K으로 가정하였다. Fig. 3에 동축공기 노즐을 가지는 버너의 개략도와 치수를 나타내었다. 동축공기 노즐은 연료 노즐을 감싸고 있으며, 이를 통하여 공급되는 동축공기의 온도는 300 K으로 가정하였다.

### 2.3. 작동 조건

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>이 연료로 사용되었고 10 kW의 연소용량에 해당되는 유량을 계산에 이용하였다. 당량비는 0.97로 고정하였다. 동축공기는 연소로 중심축으로부터 반경방향으로 5 mm 떨어진 곳에 링 모양의 노즐을 통해 공급되게 된다. 동축공기와 연료가 매우 가까운 거리에서 분사되기 때문에 두 흐름의 속도 차이가 나게 되면, 연료가 유동장 내부로 퍼지지 못하고 어느 지점에 정체될 가능성이 있다. 이는 넓은 공간에서 연소반응이 유지되는 Mild 연소의 특성에 영향을 줄 수 있으므로, 동축공기와 연료의 분사속도는 거의 같은 값을 유지할 수 있도록 하였다. 서론에

서 밝혔듯이 Wüning과 Wüning[2]이 정의한 배기가스 재순환율  $K_v$ 는 유동장의 변수들에 대한 자세한 정보가 필요하므로, 수치해석이나 정밀한 관측이 이루어진 후에 계산될 수 있다. 따라서  $K_v$  대신에 분사 운동량  $G$ 를 이용하여 연소로 내부 재순환 유동의 강도를 조절하도록 하였다. 분사운동량  $G$ 의 첨자  $i$ 는 연료와 주 공기, 동축공기에 대하여 계산될 수 있음을 의미한다.

$$G_i = \dot{m}_i U \tag{1}$$

$$K_v = \frac{\dot{m}_{up}(z) - \dot{m}_0}{\dot{m}_0} \tag{2}$$

재순환율  $K_v$ 는 해석이 완료된 후에 각 횡단면에서 계산될 수 있다.  $\dot{m}_0$ 은 연소기 입구에서 연료와 공기의 질량흐름율의 합한 값이고,  $\dot{m}_{up}(z)$ 은 임의의 위치  $z$ 에서 연소로 상부방향으로의 총 질량흐름율을 나타낸다[9]. 전체 공기 공급량 중에 일부분이 동축공기 노즐을 통해 공급되기 때문에, 주 공기의 운동량은 줄어들게 된다. 운동량의 손실을 보상하기 위하여 동축공기가 없는 경우의 주 공기 운동량인 0.146 N이 되도록 주 공기 노즐의 직경을 조절하였다. 동축공기 공급량과 그에 따른 주 공기노즐 직경의 변화, 작동조건을 Table 1에 나타내었다. MFco-axial은 산화제 전체 질량흐름율 중에서 동축공기 공급량의 질량분율이다.

Case 1에서는 동축공기를 공급할 때에 변화되는 Mild 연소의 특징을 살펴보았다. 동축공기가 없는 상태와 전체 산화제의 50%를 동축공기로 공급하는 상태를 고려하였다. 그리고 주 공기 운동량이 같은 값을 가지도록 노즐 직경을 설정하였다. 이들을 비교하여 동축공기가 있고 없음에 따른 차이점을 살펴해보도록 하였다.

Table 1. Operation conditions and burner configurations

Case	Operation Conditions						Burner Configuration		
	co-axial air nozzle	MF <sub>co-axial</sub> (%)	$\dot{m}_{main\ air@900K}$ (g/s)	$G_{main\ air}$ (N)	$\dot{m}_{Co-Axial\ air@300K}$ (g/s)	$G_{Co-axial\ air}$ (N)	$D_{main\ air}$ (mm)	$D_{co-axial\ inner}$ (mm)	$D_{co-axial\ outer}$ (mm)
1-1	X	-	3.114	0.146	-	-	6	-	-
1-2	O	50	1.557	0.146	1.557	0.013	3	10	17.2
2-1	O	10	2.803	0.118	0.311	0.003	6	10	12
2-2	O	10	2.803	0.146	0.311	0.003	5.4	10	12
2-3	O	10	2.803	0.220	0.311	0.003	4.4	10	12
3-1	O	10	2.803	0.146	0.311	0.003	5.4	10	12
3-2	O	30	2.180	0.146	0.934	0.008	4.2	10	15
3-3	O	50	1.557	0.146	1.557	0.013	3	10	17.2

Case 2는 10%의 동축공기 공급량일 때 운동량 보정의 영향을 살펴보기 위한 세 가지의 계산조건을 설정하였다. 동축공기의 공급량을 늘릴 때 주 공기의 노즐 직경을 줄이지 않으면 속도는 감소하게 되고 결과적으로 운동량 또한 감소하게 된다. 주 공기운동량의 감소는 연소로 내부의 재순환유동에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대한 규명이 이루어져야 한다. 따라서 기본 버너에서 동축공기 노즐만 추가하여 주 공기 운동량이 보정되지 않은 case 2-1, 동축공기 노즐과 주 공기 운동량을 보정한 case 2-2, 마지막으로 기준 운동량 0.146 N 보다 50% 강화한 case 2-3을 통해 연소현상의 차이점을 볼 수 있도록 하였다.

Case 3은 동축공기 공급량 변화에 의한 차이점을 알아보기 위하여 전체 공기 공급량의 10%, 30%, 50%의 동축공기를 고려하였다. 동축공기노즐과 연소로 중심축과의 거리는 5 mm로 동일하게 유지하였고, 공급량이 늘어날수록 외경을 늘려서 공급 속도를 일정하게 유지하였다. 각 계산조건은 주 공기의 운동량을 보정하여 수치해석을 하였다. 추후 연소기 제작 시에 가공성을 고려하여 주 공기노즐의 직경은 3 mm로 제한하였으며, 이에 따라 50% 보다 더 많은 동축공기 공급량은 본 연구에서 다루지 않았다.

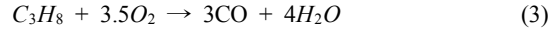
### 3. 수치해석 방법

수치해석을 위한 격자는 한 개의 유체 영역과 두 개의 고체 영역으로 이루어져 있다. 유동장 외부를 단열재와 stainless steel이 감싸고 있는 연소로를 모델링 하였으며, 열적 물성치를 온도에 대한 함수로 입력하였다. 난류유동을 모델하기 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식이 모델링되었고, standard k-ε 난류모델을 이용하였다. 복사열전달 방정식은 DO(discrete ordinates) 복사 열전달 모델을 이용하여 풀게 된다. 그리고 반응혼합기의 복사특성을 고려하기 위해 WSGGM(weighted-sum-of-gray-gases model)이 사용되었으며, 계수들은 Smith 등[10], Coppalle와 Vervisch[11]가 제시한 값이 이용되었다.

#### 3.1. 연소모델과 화학반응 모델

화학반응의 계산을 위하여 EDC 난류/화학반응 상호작용 모델이 사용되었다. ED(eddy dissipation) 모델과 같이 급격한 화학반응이 가정된 모델[12]은 Mild 연소의 수치해석에 적절치 않은 것으로 알려져 있다[6,13]. EDC 모델은 Arrhenius 형태의 화학반응을 고려할 수 있다. 총 세 단계를 가지는 화학반응 모델이 이용되었는데, 1단계로 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>이 O<sub>2</sub>와 반응하여 CO와 H<sub>2</sub>O를 생성하고, 2단계에서 CO가 O<sub>2</sub>와 반응하여 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 생성된다. 마지막으로 [CO]/

[CO<sub>2</sub>] 평형의 압력 의존도와 적절한 반응열의 계산을 위한 1단계의 CO 역반응이 정의 되었다[14].



#### 3.2. NO 모델링 접근 방법

NO 발생 모델링은 Zeldovich 기구에 의한 Thermal NOx 발생이 모델되었고 N, O, OH 화학종에 대하여 준정상 상태를 가정하면 다음과 같이 반응율이 표현된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[NO]^2}{k_{r,1}[N_2]k_{r,2}[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[NO]}{k_{r,2}[O_2]k_{r,3}[OH]}\right)} \quad (6)$$

연료 농후지역에서 공기 중의 질소와 탄화수소가 반응하여 생성되는 prompt NOx 발생은 다음과 같은 식을 통해 계산된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k_{pr}[O_2]^a [N_2][FUEL] e^{-E_p/RT} \quad (7)$$

위의 NO 발생모델에 대한 난류유동에서의 시간 평균 NO 발생을 고려해 주기 위하여 확률밀도함수 접근방법을 적용하였다[15]. 또한 중간 생성자인 N<sub>2</sub>O에 의한 NO 발생경로를 고려하였는데 이 반응경로는 일반적인 연소보다 상대적으로 낮은 온도에서 중요한 것으로 알려져 있다. 특히 무화염 연소 혹은 Mild 연소와 같이 낮은 온도의 연소의 NOx 생성에 대한 N<sub>2</sub>O의 연관성이 존재함을 여러 연구자에 의해 간접적, 이론적으로 규명되고 있다[16-18].

## 4. 결과 및 토론

#### 4.1. 동축공기 노즐 설치에 의한 영향

Fig. 4의 연료노즐 하류의 온도분포를 보면, case 1-1보다 case 1-2가 하류방향으로 더 진행하여 낮은 온도로 분포함을 확인할 수 있다. Case 1-2에서 연료와 동축공기 혼합기의 흐름은 연료노즐로부터 하류로 더욱 진행하여 분포하고, 이 흐름 내에서 연료와 산소 분자간의 혼합에 의하여 화학반응이 영향을 받을 수 있음을 유추할 수 있다. 이것은 Fig. 5와 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

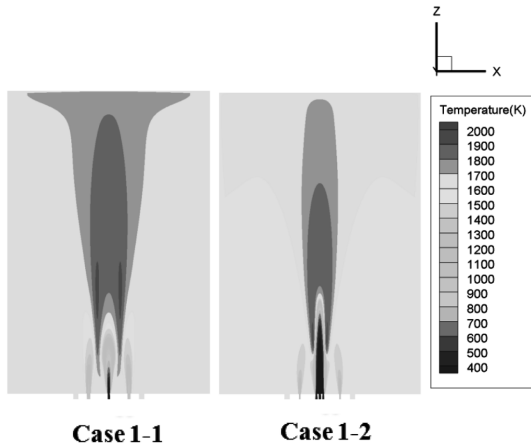


Fig. 4. Comparison of temperature contour for case 1.

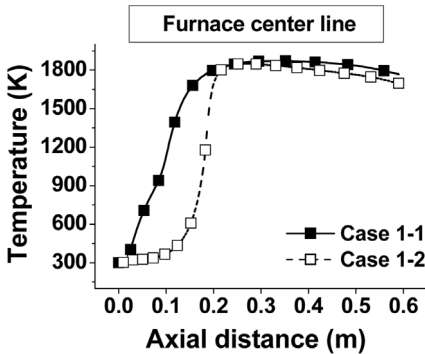


Fig. 5. Comparison of temperature profile at center line for case 1.

Fig. 5는 연소로 중심축에서 거리에 따른 온도변화를 나타내고 있다. 0~0.3 m의 온도상승구간에서 case 1-2가 더 가파른 온도구배를 보이고 있다. Fig. 6에 나타낸 화학식 (3)에 대한 반응율분포에서는 case 1-2의 연료와 동축공기 혼합기류 근처에 다른 지역보다 더 큰 값이 분포하고 있음을 확인할 수 있는데, 이 지역에서의 최고 반응율 값은  $0.5 \text{ kgmol/m}^3 \cdot \text{s}$ 으로 case 1-1의 최고 반응율  $0.32 \text{ kgmol/m}^3 \cdot \text{s}$ 보다 56% 큰 값이다. 이를 통하여 낮은 온도의 동축공기가 연료의 반응을 늦추지만, 더 작은 영역에서 빠른 반응속도 때문에 온도구배를 가파르게 형성함을 알 수 있다. 이것은 또한 연소반응지역을 더 작게 유도할 수 있음을 의미한다.

Fig. 7의 각 횡단면에서의 배기가스 재순환율을 보면 거의 비슷한 값과 분포를 보이고 있다. 다만 case 1-2의 재순환율이 약간 큰 값을 가지는데, Table 1에 명시한 동축공기의 운동량이 주 공기 운동량의 10%에 달하여 재순환율에 영향을 준 것으로 판단되며, 주 공기의 운동량을 동일한 수준으로 보정하

면 동축공기가 공급되었을 때에도 내부 재순환유동에 부정적인 영향이 없음을 알 수 있다. 또한 각 횡단면에서의 재순환율 값을 Kim 등[19]의 선회(swirl) 연소기를 이용한 일반연소 해석결과와 비교했을 때, 본 연구의 결과 값이 훨씬 크게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 Mild 연소와 일반연소를 구분하는 차이점으로써, 전체산화제의 50%를 동축공기 노즐을 통해 상온으로 공급하더라도 Mild 연소의 특징을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 가정된 900 K의 예열된 주 연소공기를 통해 약 1.9 kW의 열량이 연소로에 공급된다. Case 1-2는 주 연소공기 공급량의 50%를 상온의 공기로 공급하고 나머지 50%를 900 K의 온도로 공급하므로, 예열공기를 통한 공급열량도 절반으로 줄어든다. Fig. 8의 각 횡단면에서 반경방향의 온도를 비교해보면, 분포형태는 크게 다르지 않았으나 case 1-2가 전체적으로 60 K 정도 낮음을 알 수 있다. 이것은 예열공기를 통해 연소로에 공급되는 열량이 절반으로 줄어들었기 때문으로 생각된다.

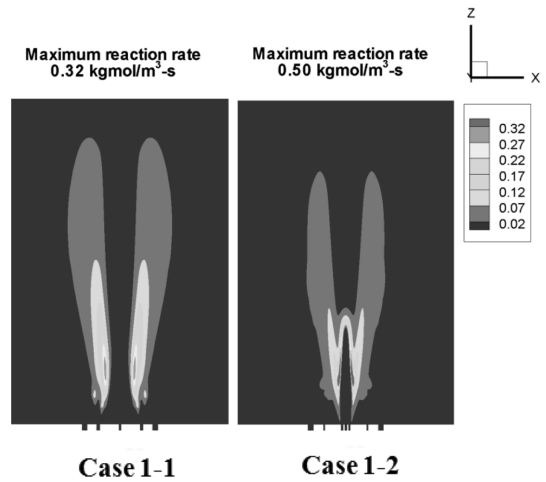


Fig. 6. Comparison of reaction rate contour for case 1.

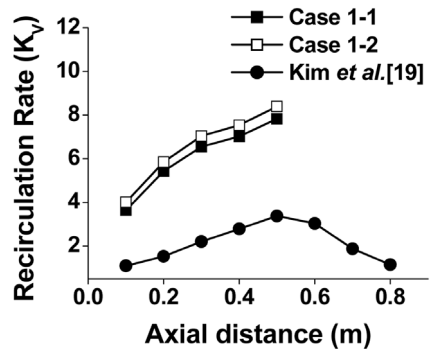


Fig. 7. Comparison of recirculation rate for case 1.

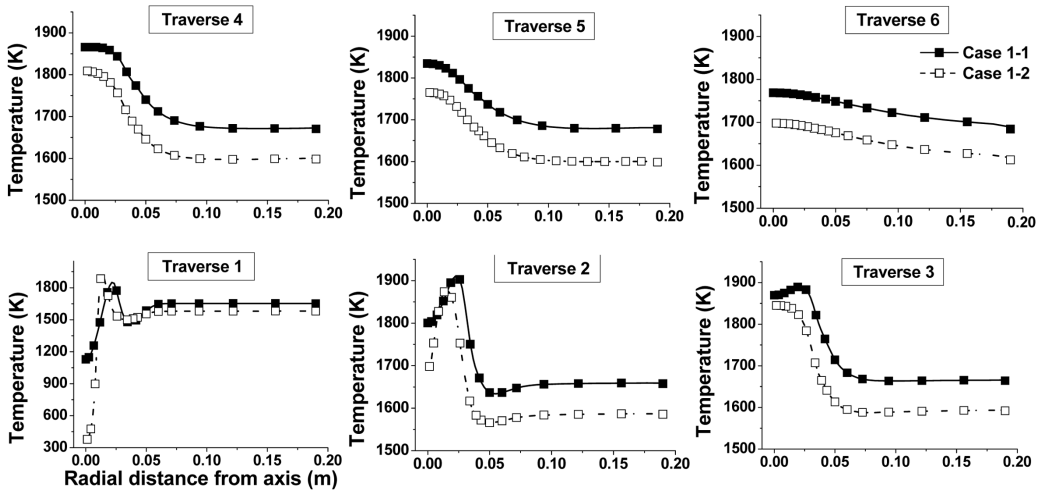


Fig. 8. Comparison of temperature at each traverses for case 1.

### 4.2. 주 공기 운동량의 영향

동축공기 공급량을 10% 고정시킨 상태에서 주 공기 운동량 보정이 연소에 끼치는 영향은 재순환율을 통해 확인할 수 있었다. 0.146 N으로 같은 값의 주 공기운동량을 가진 case 2-2와 case 1-1의 재순환율을 값은 거의 차이가 없었다. 주 공기운동량의 약 2% 정도의 운동량을 가지는 동축공기는 case 1에서와 다르게 재순환율에 끼치는 영향이 작았음을 의미한다. Fig. 9의 각 횡단면에서 재순환율을 이용하

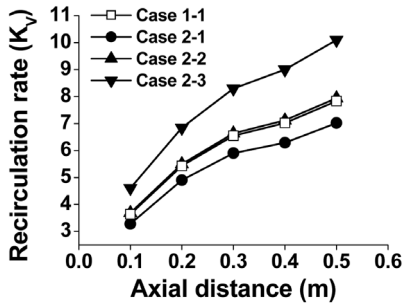


Fig. 9. Comparison of recirculation rate for case 2.

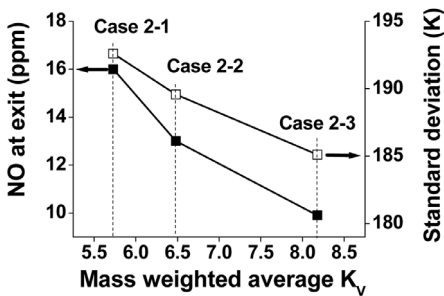


Fig. 10. NO and standard deviation at exit w.r.t mass weighted average  $K_v$ .

여 각 case의 질량가중평균 재순환율을 구한 후, 이에 대한 NO와 연소로 내부온도의 표준편차를 Fig. 10에 나타내었다. 주 공기의 운동량이 강화되어 배기가스 재순환율이 높아짐에 따라 내부 온도의 표준편차가 작아졌다. 이것은 연소로 내부 온도장의 균일도가 증가하였음을 의미하고, 이는 NO 배출의 감소로 이어졌다.

Fig. 11의 왼편은 화학식 (3)의 반응을 등분포선을 나타내고 오른편은 등온선을 나타내는데, 이 선들이 연소로 벽면과 가까울수록 표시한 값보다 낮은 값을 가진다. 내부재순환율의 증가에 따라 연료와 공기의 혼합기로 뜨거운 연소생성 가스의 유입이 증가하여 화학반응이 촉진, 더 작은 반응영역이 형성되었다. 또한 앞서 밝혔듯이 더 작은 표준편차를 보이는 균일화된 온도장을 가지므로 고온영역이 감소하였음을 알 수가 있다.

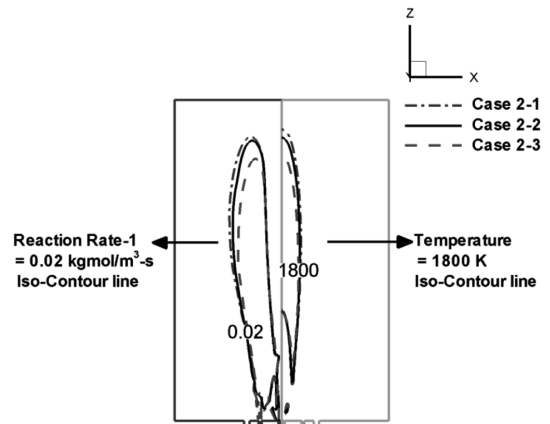


Fig. 11. Comparison of reaction rate and temperature iso-contour line for case 2.

### 4.3. 동축공기 공급량에 의한 영향

Case 3에서는 모든 하위 case의 운동량을 보정했기 때문에  $K_v$ 의 값과 경향에는 큰 차이가 없었다. 여기서 두드러지게 나타나는 현상은 동축공기 공급량이 증가할수록 반응하지 않은 연료와 공기의 혼합기가 하류로 더 진행한다는 것이다. 하지만 case 3의 모든 결과는 중심축에서 연소로 높이의 0.25 m 부근에서 최고 온도지점이 형성됨을 보이고 있다. 이 현상의 원인을 규명하기 위하여 Fig. 13에 연소로 중심축 방향의 온도와 반응율을 함께 나타내었다. 이 그래프에서 각 case간의 상대적인 반응 속도의 차이, 반응속도의 최고점의 위치가 온도 상승구간과 일치한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동축공기 공급량이 증가 할수록 연소로 중심축의 온도구배는 더욱 가파르게 된다는 사실을 알 수 있다. 온도장의 특성은 Fig. 14를 통해 파악할 수 있다. 연소로 하류 벽면부근의 높은 온도지역은 동축공기 공급량이 증가할수록 줄어들었다. 그리고 상온의 연료와 공기의 혼합기 부근에서 급격한 화학반응이 발생하는 지역을 제외하면, 연소로 하류의 벽면부근 뿐만이 아니라 전체적으로 온도가 감소했음을 확인할 수 있다. 이는 예열공기에 의한 열량공급이 감소하였기 때문이라 생각된다.

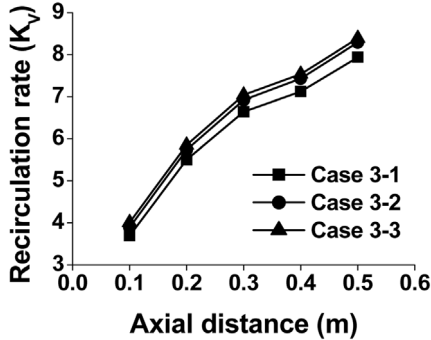


Fig. 12. Comparison of recirculation rate for case 3.

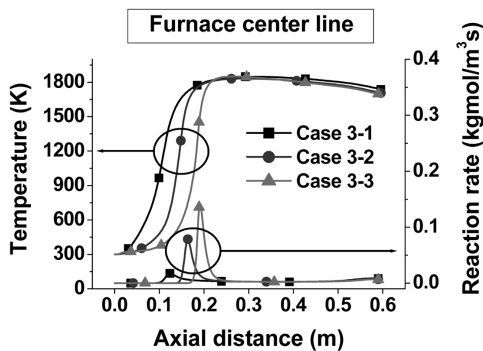


Fig. 13. Effect of co-axial air supply variation on temperature and reaction rate at center line for case 3.

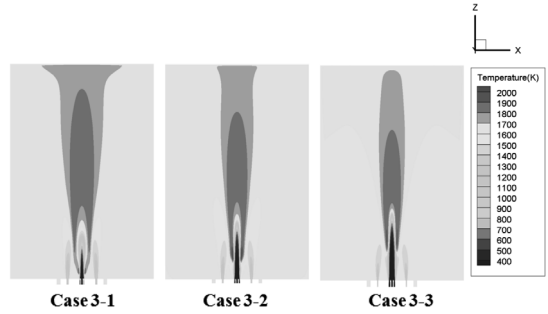


Fig. 14. Comparison of temperature contour for case 3.

## 5. 결론

Mild 연소환경에서 동축공기노즐을 통해 상온의 공기를 공급하였을 때 나타나게 되는 연소특성을 연구하였다. 연구는 수치해석을 통해 이루어졌으며, 변수를 통제하기 위해 동축공기 노즐의 위치와 공급속도를 고정시키고, 공급량과 노즐 직경을 변화시킨 계산 조건을 고려하였다. Case 1에서는 동축공기가 있을 때와 없을 때의 차이점을 살펴보고, case 2에서는 동축공기 노즐을 가지는 버너형상에서 주 공기 운동량의 변화에 의한 연소현상을 살펴보았다. 마지막으로 case 3을 통해 동축공기 공급량에 따른 연소현상의 변화를 살펴보았으며, 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 상온의 동축공기의 공급으로 인하여 연료와 공기의 혼합기가 점화온도에 도달하는 것이 지연되었기 때문에 연소로 중심축에서의 반응이 지연되었다.
- 2) 배기가스 재순환율  $K_v$ 는 주 공기 운동량이 증가함에 따라 증가하였다. 이로 인해 동일한 조건하에서 온도장이 더 균일해지고, NO의 생성이 줄어들음을 확인하였다. 또한 재순환율의 증가로 인해 화학반응 지역이 더 작아지는 것을 확인하였다. 이는 뜨거운 연소 생성가스의 상류로 유입이 증가하여 연료와 산화제 혼합기의 반응속도가 증가하였기 때문이다.
- 3) 버너형상과 운영조건의 변화를 고려한 연소해석을 통하여, 동축공기 노즐을 이용한 반응 지역의 조절이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 추후에는 본 연구에서 고려된 분사류(Jet flow)뿐만 아니라 선회류(Swirl flow)를 적용한 연구를 통하여 Mild 연소 조절성을 확보할 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## 참고문헌

- [1] J. Weinberg, "Advanced Combustion Methods", Academic Press, 1986
- [2] J. A. Wüning and J. G. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, No. 1, pp. 81-94, 1997.
- [3] Katsuki, Masashi, Hasegawa, Toshiaki, "The science and technology of combustion in highly pre-heated air", Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, Vol. 2, pp. 3135-3146, 1998.
- [4] A. Cavaliere, M. De Joannon, "Mild Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 4, 2004, pp. 329-366
- [5] B.B Dally, E. Riesmeier, and N. Peters, "Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion", Combustion and Flame, Vol. 137, 2004, pp. 418-431
- [6] A. Parente, C. Gallettia and L. Tognottia, "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, No. 24, 2008, pp. 7553-7564
- [7] I.R. Gran, B. F. Magnussen, "A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry", Combustion Science Technology, Vol. 119, 1996, pp. 191-217
- [8] G.G. Szegő, B.B. Dally, G.J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", Combustion and Flame, Vol. 156, No. 2, 2009, pp. 429-438
- [9] Jianchun Mi, Pengfei Li and Chuguang Zheng, "Numerical Simulation of Flameless Premixed Combustion with an Annular Nozzle in a Recuperative Furnace", Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 18, No. 1, 2010, pp. 10-17
- [10] T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model", Journal of Heat Transfer, Vol. 104, 1982, pp. 602-608
- [11] A. Coppalle and P. Vervisch, "The Total Emissivities of High-Temperature Flames", Combustion and Flame, Vol. 49, 1983, pp. 101-108
- [12] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1976, Vol. 1, pp. 719-729
- [13] P. J. Coelho, N. Peters, "Numerical simulation of a Mild combustion burner", Combustion and Flame, Vol. 124, No. 3, 2001, pp. 503-518
- [14] C.K. Westbrook and F.L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", Combustion Science and Technology, Vol. 27, No. 1, 1981, pp. 31-43
- [15] Fluent 6.3 Manual
- [16] D. Tabacco, C. Innarella, and C. Bruno, "Theoretical and Numerical Investigation on Flameless Combustion", Combustion Science and Technology, Vol. 174, No. 7, 2002, pp. 1-35
- [17] W. Yang and W. Blasiak, "Mathematical modelling of NO emissions from high-temperature air combustion with nitrous oxide mechanism", Fuel Processing Technology, Vol. 86, 2005, pp. 943-957
- [18] G. Löffler, R. Siebera, M. Haraseka, H. Hofbauer, R. Haussb, J. Landauf, "NOx formation in natural gas combustion-a new simplified reaction scheme for CFD calculations", Fuel, Vol. 85, 2006, pp. 513-523
- [19] 김학영, 백승욱, 손희, 김세원, "NOx저감을 위한 연료희박 재연소 기법의 실험 및 수치적 연구", 한국연소학회지, Vol. 14, No. 2, 2006, pp. 18-25