

바이오 가스 소각용 저공해 사이클론 소각기 개발을 위한 수치 해석적 연구

Numerical Study for the Design of Biogas-fired Low Emission Cyclone Incinerator

전 영 남* · 김 시 옥 · 백 원 석

조선대학교 공과대학 환경공학부

(2002년 4월 12일 접수, 2002년 7월 30일 채택)

Young Nam Chun*, Si Wouk Kim and Won Seok Baek

Dept. of Environmental Engineering, Chosun University

(Received 12 April 2002, accepted 30 July 2002)

Abstract

Concerns for energy conservation, environmental pollution, and the fact that organic wastes account for a major portion of our waste materials, have created the interest of biogas, which usually contains about 60 to 70 percent methane, 30 to 40 percent carbon dioxide, and other gases, including ammonia, hydrogen sulfide, mercaptans and other noxious gases. Cyclone combustors are used for burning a wide range of fuels such as low calorific value gas, waste water, sludge, coal, etc. The 3-dimensional swirling flow, combustion and emission in a tangential inlet cyclone incinerator under different inlet conditions are simulated using a standard $k-\epsilon$ turbulence model and ESCRS (Extended Simple Chemically-Reacting System) model. The commercial code Phoenics Ver. 3.4 was used for the present work. The main parameters considered in this work are inlet velocity and air to fuel ratio. The results showed that the change of operating conditions had an influence on the shape and size of recirculation zones, mixture fraction and axial velocity which are important factors for combustion efficiency and emission behavior. The application of this kind of computer program seems to be promising as a potential tool for the optimum design of a cyclone combustor with low emission.

Key words : biogas, swirl flow, cyclone incinerator, numerical simulation, $k-\epsilon$ turbulence model

1. 서 론

유기성 쓰레기의 메탄화 기술에 의해 발생하는 바이오 가스는 주성분이 메탄으로서 총 발생가스의

60~70% 정도 포함되어 있어 에너지원으로서의 효용가치가 있으며, 메탄은 대기 방출시 지구온난화 가스로서 이산화탄소보다 약 21배 정도 더 높은 온실효과를 야기한다. 사이클론 소각기는 화염이 매우 안정적이고, 전환효율이 높아 수년 전부터 연소과정에 이용되어왔을 뿐만 아니라, 높은 연소강도 때문에 폐수 슬러지, 회분함량이 많은 석탄, 저 발열량

* Corresponding author
Tel : 062-230-7156, E-mail : yunchun@chosun.ac.kr

가스, 황함량이 많은 오일과 같은 저질연료의 소각에 매우 효과적인 소각기로 입증되었다(Moghiman *et al.*, 1996; Syred and Beer, 1974). 최근 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic; CFD)의 발달로 실험이나 근사적인 해석방법에 의존해 오던 기존의 설계방식이 수치해석을 통한 최적의 형상을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 예측하는 방식으로 전환되고 있다(Griffiths and Boysan, 1996). 본 연구에서는 Phoenix Ver. 3.4 상용 코드를 이용하여 수치해석을 하였으며, 연소반응의 해석을 위해 확산화염 및 부분혼합화염 모두 적용 가능한 ESCRS (Extended Simple Chemically-Reacting System) 모델을 적용하였다. 바이오 가스 소각용으로 고안한 사이클론 소각기의 유동 및 연소특성을 파악하기 위해 3차원 형상에 대하여 해석하였으며, 공기비 및 유입속도의 변화를 주어 연소특성의 변화를 비교하였다.

본 연구는 매립장, 폐수처리장, 음식물 쓰레기 처리용 메탄 발효반응기 등으로부터 발생되는 바이오 가스를 소각하기 위해 사이클론 소각기의 유입조건 변화에 대한 변수별 연구를 수행하여 최적 설계 및 운전조건의 규명으로 저공해 소각기술을 향상시키고자 한다.

2. 연구 및 방법

2.1 기준 사이클론 소각기

본 연구에서는 바이오 가스 소각용으로 접선방향 유입식 반전형 사이클론 소각기를 문헌을 참고로 새로이 설계하였다(Syred and Beer, 1974). 유체의 유입은 접선방향으로 두 개의 입구에서 이루어지며, 입구를 대칭적으로 배치하고, 연소실 상단을 확장시켜 연소실내에서 유체가 균일한 선회를 이루도록 하였다. 입구에서 출구로 바로 빠져나가는 연료 및 공기를 막기 위해 출구에서 연소실 안쪽으로 vortex finder를 확장하였다. 입구는 이중관 구조를 이루며, 중심과 주위의 유속을 달리하였다. 연료와 공기는 예혼합되어 중심과 주위에서 서로 다른 공기비로 예열하여 주입하였으며, 연료의 조성은 CH₄, CO₂, H₂O로 음식물 쓰레기와 축산폐수를 이용한 메탄 발효반응기에서 발생된 바이오 가스 조성을 참고하였다. 본 연구에 사용된 사이클론 소각기를

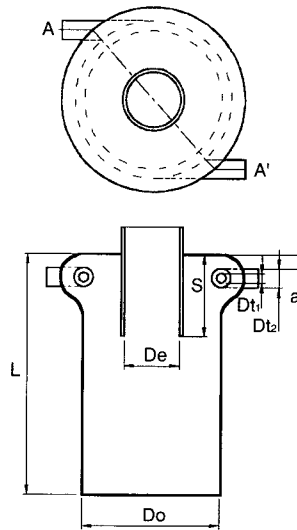


Fig. 1. Standard cyclone incinerator with two tangential inlet.

Table 1. Dimensions of the standard cyclone incinerator.

Dimensions					
D _o (m)	L/D _o	D _i /D _o	S/D _o	A _i /A _e	a/L
2	1.5	0.4	0.6	0.25	0.07

* A_i : Area of inlet * S : Length of vortex finder
* A_e : Area of exit

Table 2. Boundary conditions of the standard cyclone incinerator.

Inlet velocity (m/s)		Air ratio		
V _{central}	V _{annular}	λ _{central}	λ _{annular}	
25	20	0.8	1.4	
Preheating temperature (°C)		Parameters of biogas (%)		
T _{central}	T _{annular}	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
150	150	65	34	1

* V_{central} : Central inlet velocity (m/s)
* V_{annular} : Annular inlet velocity (m/s)
* λ_{central} : Central inlet air ratio
* λ_{annular} : Annular inlet air ratio
* T_{central} : Central inlet preheating temperature (°C)
* T_{annular} : Annular inlet preheating temperature (°C)

그림 1과 표 1에 나타내었으며, 이후부터는 기준 사이클론 소각기라 한다. 또한, 수치해석 과정에서 설

정된 기준 사이클론 소각로의 경계조건을 표 2에 나타내었다.

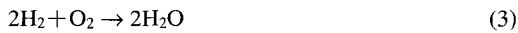
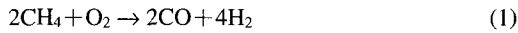
2.2 수치해석 모델

2.2.1 난류모델

난류모델은 난류운동에너지 (k) 및 난류에너지 소산율 (ϵ)에 의해 난류점성계수를 결정하며, 소각로의 수치모사를 위하여 Launder and Spalding (1988)에 의해 제안된 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.2.2 연소모델

연소모델은 확산화염, 부분 예혼합화염 모두 적용 가능한 유한반응모델 (finite-rate chemistry model)인 ESCRS 모델로서 연료 (CH_4)와 중간생성물 (CO , H_2)의 연소반응을 2단계 3가지 반응 (two-step three reaction)으로 적용하였다.



2.2.3 복사모델

소각시 발생하는 연소 생성물 중 CO_2 , H_2O 는 강한 흡수 (absorber) 및 방사체 (emitter)이지만 산란복사 (scatter radiation)는 거의 없다. 또한 N_2 , O_2 , H_2 는 흡수가 거의 없이 복사열전달이 이루어진다. 본 연구에서 사용한 Radiosity 복사모델은 Spalding (1988)에 의해 제안되었던 것으로 P-1 구조화 근사법 (P-1 spherical-harmonics approximation)에서 복사강도 (radiation intensity)가 RTEs (Radiative Transfer Equations)에 사용된 것과 같다.

2.2.4 국부 체류시간

국부 체류시간 (local residence time)은 주입된 유체가 그 점에 도달하여 얻어진 시간으로서 계산영역 내의 임의의 점에서 계산이 필요하다. 국부체류시간은 일반 지배방정식의 종속변수 ϕ 를 체류시간 t 로 하고, 생성항 S_ϕ 는 다음 식과 같이하여 계산한다.

$$S_\phi = \Delta t \frac{\sum_j \dot{m}_{inj}}{\sum_j \dot{m}_{inj}} \sum_j \dot{m}_{inj} = \rho Vol \quad (4)$$

여기서, Vol 은 셀의 체적, \dot{m}_{inj} 는 j 면을 통하여 셀

에 유입되는 질량 유량, Σ 는 모든 면에서 합을 의미한다.

2.3 지배방정식

정상상태, 비압축성, 뉴우톤 유체로 가정하고 중력항을 무시할 때 3차원 난류유동을 해석하기 위한 일반적인 지배방정식은 원통극좌표 (cylindrical polar coordinate)에서 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \bar{\phi}) \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_\phi r \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} \right) + S_\phi \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 일반 종속변수 $\bar{\phi}$ 는 θ -, r -, z -방향의 평균속도인 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} 와 단위 질량의 난류에너지 k 와 에너지 소산율 ϵ 을 나타낸다. Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항을 각각 나타낸다. $k-\epsilon$ 모델에서 난류 전단력항은 Boussinesq 가정에 의한 난류 또는 에디 점성계수 (μ_t)와 평균속도의 구배를 사용하였으며, 난류점성계수 μ_t 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov 관계식에 의하여 얻어진다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

여기서 C_μ 는 상수이며, μ_t 는 k 와 ϵ 값을 얻은 후에 다음 식을 이용하여 구한다. 난류점성계수 값이 정해지면 물질 또는 에너지 전달시의 확산계수는 난류에너지의 Prandtl 또는 Schmidt수를 이용하여 각각 구할 수 있다.

2.4 경계조건

입구 경계조건은 입구의 유동이 난류로 유입되는 경우 난류량으로 점성계수 (μ_t)를 얻기 위해 난류운동에너지 (k), 소산율 (ϵ) 및 특성길이 (L)로 주어진다.

$$k = \frac{3}{2} (u')^2 \quad (7)$$

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/4}}{l} \quad (8)$$

$$l = 0.07 L \quad (9)$$

$k-\epsilon$ 모델은 유체점성의 증가 및 난류성분의 감소로 난류 레이놀즈가 낮은 벽면 근처에서 Reynolds number가 zero가 되는 층류저층(viscous sublayer)이 존재하는 경우에는 적합하지 못하다. 벽면효과를 고려하여 본 연구에서는 벽함수(wall function method)를 이용하여 난류점성 계수에 대해 새로운 정의를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= \mu & y^+ < 11.5 \\ &= \frac{\mu y^+}{2.5 \ln(9y^+)} & y^+ \geq 11.5 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$y^+ = \rho k^{1/2} C_\mu^{1/4} \frac{y_l}{\mu}, \quad y_l \text{은 최초의 내부 grid point에서 벽까지의 거리이다.}$$

2.5 수치해석 방법

일반적인 2차 편미분지배방정식의 해를 얻기 위해서 제어체적에 기초한 유한차분법(control volume based finite difference method)을 이용하여 선형적인 이산화방정식(discretization equation)을 유도하였다. 차분화된 운동방정식의 셀 압력(cell pressure)의 decoupling을 없애기 위해 엇갈린 격자망(staggered grid arrangement)을 사용하였으며, 휘어진 벽면에 따른 오차를 줄이기 위해 BFC(Body-fitted Coordinate)좌표계를 적용하였다. 이러한 격자배치는 압력과 속도와의 관계를 물리적으로 타당하게 나타낼 수 있으며, 많은 보간식을 피할 수 있는 장점이 있다. 또한, 난류전단응력들을 속도사이의 위치에 배치 시킴으로써 운동량방정식은 물리적으로 타당한 의미를 가질 수 있다. 이산화방정식의 r, z -방향을 line-by-line TDMA(Tri Diagonal Matrix Algorithm)에 의해 해를 구하였으며, θ -방향은 시작점과 종점이 같아지므로 "Cyclic TDMA" 방식을 도입하였다. 운동방정식($\phi = \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$)에서 나타나는 압력-속도의 상호연계 방법은 빠른 수렴을 위하여 SIMPLER(Semi-Implicit Methods for Pressure-Linked Equation Revised) 알고리즘을 사용하였고, 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power Law Scheme에 의하여 실행하였다(Spalding, 1988; Patankar, 1980). 본 연구에서는 유한차분법을 사용한 상용 프로그램인 Phoenix를 사용하여 수치해석을 수행하

였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 바이오 가스 소각용으로 고안한 3차원 형상의 사이클론 소각기에 대하여 입구의 공기비와 유속을 변화시켜 유동현상 및 연소특성을 해석하였다. 그림 2는 수치해석에 사용한 몸통직경(D_0)이 2m인 기준 사이클론 소각기의 $32 \times 20 \times 166$ 격자계(surface grid generation)를 나타낸 것이다. 표 3은 본 논문에서 적용한 기준 사이클론 소각기의 변수들로서 Flame 1과 Flame 2는 각각 입구의 공기비 분포와 입구의 속도분포를 변화시켜 준 것이다.

계산수렴조건은 반복계산에서 이산화방정식의 상대적 잉여치(relative residual)가 모두 1×10^{-4} 이하로 줄어들 때, 수렴된 것으로 판단하였다.

3.1 기준 사이클론 소각기에 대한 고찰

그림 3(a)에 나타난 벡터장(vector field)과 점선

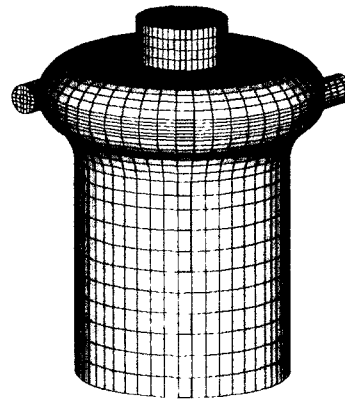


Fig. 2. 3-dimensional grid surface generation.

Table 3. Variables and their parameters.

Flame type	Air ratio		Inlet velocity (m/s)	
	$\lambda_{central}$	$\lambda_{annular}$	$V_{central}$	$V_{annular}$
Flame R	0.8	1.4	25	20
Flame 1	1.4	0.8	25	20
Flame 2	0.8	1.4	20	25

* Flame R : Standard cyclone incinerator

* Flame 1 : Cyclone incinerator with change of inlet air ratio

* Flame 2 : Cyclone incinerator with change of inlet velocity

방향 속도 (tangential velocity contours)를 보면, 접선 방향으로 유입된 혼합기는 원심력에 의해 하향선회류를 형성하여 연소실의 바닥면까지 벽면을 따라 나선형으로 진행한다 (Gupta *et al.*, 1984). 연소실 상단의 확장으로 인해 원심력이 증가되어 선회속도 증가 및 고른 선회류가 발달되었지만, 벽면의 마찰 손실에 의해 연소실 하단으로 진행할 수록 속도가 감소하였으며, 연소실 바닥에서 중심에 위치한 출구 쪽으로 방향이 전환되어 상향선회류를 형성하였다. 반경방향으로 $1.5 < r/R_e < 2.2$ 사이에서는 상향류와 하향류의 전단면에서 강한 난류를 동반한 고리형 재순환영역이 발생하여 고도의 난류물질 전달 및 혼합율이 증가되지만, $X/D_e = 2$ 부분에서는 입구에서 유입된 혼합기가 충분한 체류시간을 갖지 못하고 상향선회류에 유입되는 경향이 나타났다. 그림 3(b)는 온도분포 (temperature)를 나타낸 것으로서 접선 방향으로 혼합기가 유입되어 하향선회를 이루면서 연소가 진행됨을 알 수 있다. 이중관 구조의 입구상단에서는 중심에서 온도가 낮고 반경방향으로 갈수록 온도가 증가하는 전형적인 확산화염 경향이 나타났으며, 연소실 상단에서 $1,150^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온을 유지하였다. 그림 3(c)는 혼합기 중 연료의 질량분율인 혼합분율 (mixture fraction)을 나타낸 것으로

입구에서는 연료과농 상태로 큰 값을 나타내었지만, 혼합기가 하향선회류를 이루어 진행할수록 점차 감소하였으며, 재순환영역에서는 미연연료가 누적되어 다소 높은 값을 나타내었다. 그림 3(d)는 국부 체류시간을 나타낸 것으로 재순환영역에서 약 1초 정도로 나타났다. 미연연료 및 중간생성물이 고온의 재순환영역에서 재반응과 완전연소를 이루기 위해서는 충분한 체류시간을 필요로 한다.

그림 4는 반응물의 농도분포를 각각 나타낸 것이다. 바이오 가스의 주성분인 메탄은 입구에서 가장 높은 값을 보였으며, 연소가 진행되면서 연소기내에 미연된 상태로 존재한다. 메탄의 농도분포는 혼합분율의 분포와 유사하지만, vortex finder내에서는 $X/D_e = 2$ 부분에서 바이패스 된 산화제와 연소가 진행되어 다량 소모된 것을 볼 수 있다. 산화제인 산소는 연료의 산화에 소모되고 남은 잔류량으로 연소가 시작된 입구부근에서 급격히 감소하여 연소실 하단으로 진행할수록 농도가 증가하였다. 재순환영역에서는 하향선회류 중 산소의 유입으로 농도가 증가하였지만, 출구부근에서는 입구에서 바이패스 된 혼합기의 연소반응으로 농도가 감소하여 연소실을 빠져나가는 과잉 산소농도가 4.1% 정도를 나타내었다. 연소반응에 관여를 하지 않는 질소는 연소실내

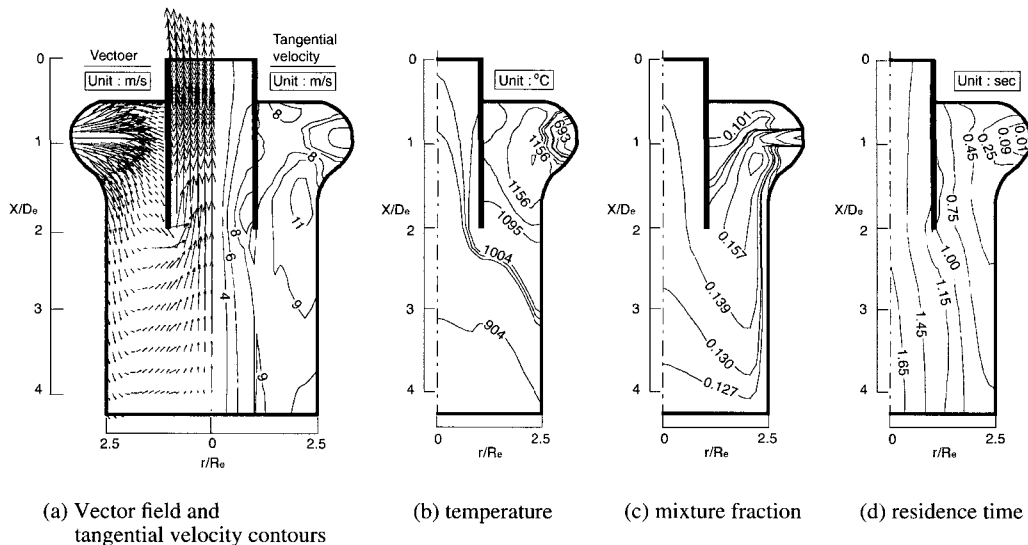


Fig. 3. Vector field, tangential velocity contours, temperature, mixture fraction and local residence time of the standard cyclone incinerator.

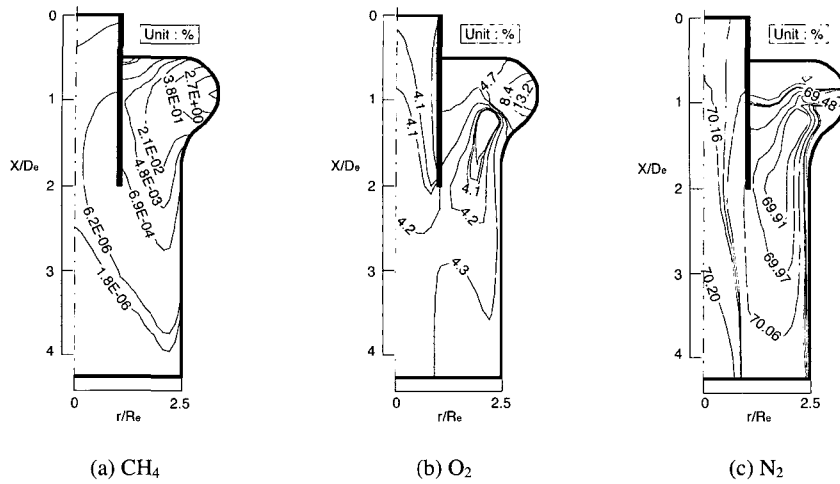


Fig. 4. Concentration contours of reaction materials in the standard cyclone incinerator.

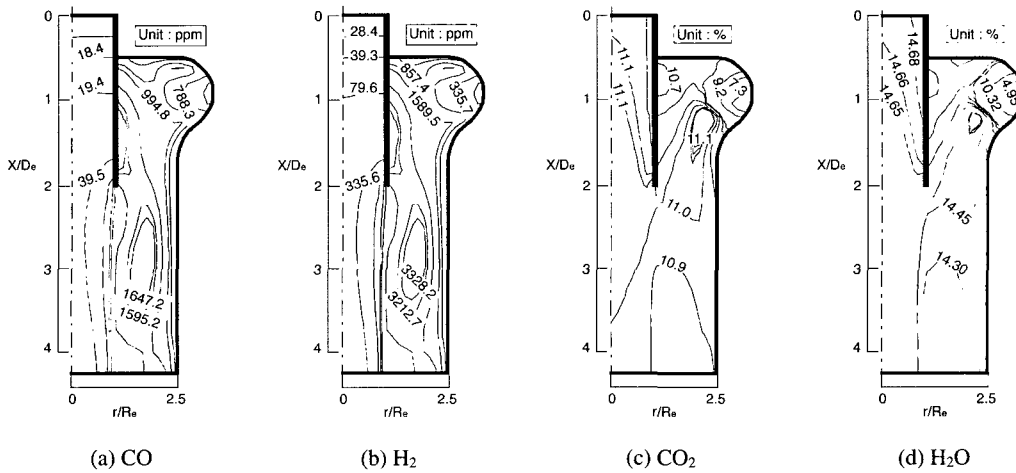


Fig. 5. Concentration contours of products in the standard cyclone incinerator.

에서 거의 일정한 분포를 나타내었다.

연소실내에서 발생하는 불완전 연소생성물의 양을 정량적으로 예측하는 것은 불완전연소생성물 (Products of Incomplete Combustion; PICs)의 발생량을 줄이는데 유용하다. 그림 5(a)와 (b)는 일산화탄소와 수소의 농도분포를 나타낸 것으로서 연소가 시작되는 입구부분과 재순환영역에서 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 가연성분이 이산화탄소나 수분으로 변하지 못하고, 열해리 작용으로 인해 증가된 것

이며, 특히 재순환영역에서는 강한 난류혼합과 열재순환으로 인해 반응성이 증가되고, 불완전연소생성물이 축적되기 때문이다. 그림 5(c)와 (d)는 완전연소생성물인 이산화탄소와 수분의 농도분포를 나타낸 것으로 연소실 상부와 출구부분에서 고농도로 나타났다. 이것은 연소반응의 시작으로 가연성분이 산소와 활발하게 반응함으로써 이산화탄소와 수분의 생성이 급격히 증가한 것이며, 출구에서는 입구에서 바이패스 된 혼합기의 연소반응으로 불완전연소생성

물의 완전연소가 이루어져 농도가 증가한 것이다.

3.2 변수별 연구에 대한 고찰

3.2.1 공기비 변화

입구의 중심과 주위로 공급되는 혼합기의 공기비를 서로 바꾸어 수치해석을 수행하여 그 결과를 기준 사이클론 소각기와 비교하였다. 그림 6(a)는 온도분포를 나타낸 것으로 입구부분에서는 온도가 1,334°C를 최고온도로 기준 사이클론 소각기 보다 약 150°C 정도 증가하였지만, 연소실 하단 및 재순환영역에서의 온도는 오히려 낮게 나타났다. 또한, 입구부분의 온도분포 및 최고온도가 나타난 위치가 변화하였다. 이것은 입구주위에서 연료과농의 혼합기가 공급되므로 중심에서 빠르게 주입되는 다량의 산화제와 주위의 가연성분이 혼합되어 화염면이 중심으로 이동하면서 연소반응이 일어난 것이며, 연소실내로 주입되는 연료의 열발생량이 증가하였기 때문이다. 그림 6(b)를 보면, 혼합분율의 분포는 거의 비슷한 것을 알 수 있으며, 입구부분의 화염이 시작되는 부분에서는 기준 사이클론 소각기 보다 높게 나타났고, 재순환영역과 연소실 하단에서는 더 낮게 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 입구 주위에서 상대적으로 더 많은 양의 연료가 주입되어 기준 사이클론 소각기 보다 연소반응이 더 빨리 시작되어 하

향산화류 중의 재순환영역으로 유입되는 연료성분의 양이 감소하였기 때문이다.

그림 7은 반응 생성물인 일산화탄소와 이산화탄소의 농도를 사이클론 소각기의 중심 ($r/R_c=0$)에서 축 방향으로 비교한 것이다. 출구에서 최종 배출되는 일산화탄소의 농도가 150 ppm 이상으로 기준 사이클론 소각기 보다 높게 나타났으며, 축 방향을 따라 연소실 중심에서 150~200 ppm을 유지하였다. 또한, 완전연소생성물인 이산화탄소의 농도분포는 기준 사이클론 소각기와 유사한 경향을 나타내고 있지만, 기준 사이클론 소각기 보다 전체적으로 2.5 ppm 정도 높게 나타났으며, 연소실 하단에서 출구 쪽으로 갈수록 증가하였다. 입구에서 공기비를 서로 바꿈으로써 연소실내로 연료과농의 혼합기가 공급되어 연료의 열발생량이 증가하여 연소실내의 온도가 증가하였다. 연소실내의 온도 증가로 인해 중앙에서 발생하는 선회류의 축 방향 모멘트 플럭스가 증가되어 벽면을 따라 발생한 하향산화류 중의 미연연료 및 중간생성물의 유입이 증가하였으며, 기준 사이클론 소각기 보다 상대적으로 고온을 형성하여 활발한 연소반응이 이루어져 이산화탄소의 발생량이 큰 값을 나타낸 것이다.

3.2.2 유속변화에 대한 고찰

입구의 중심과 주위로 공급되는 혼합기의 유입속

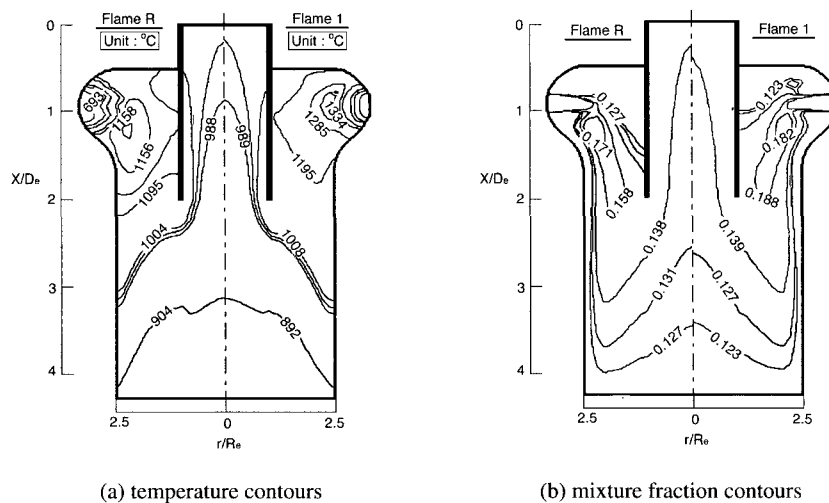


Fig. 6. Temperature and mixture fraction contours in the standard cyclone incinerator and cyclone incinerator with the change of the air/fuel ratio.

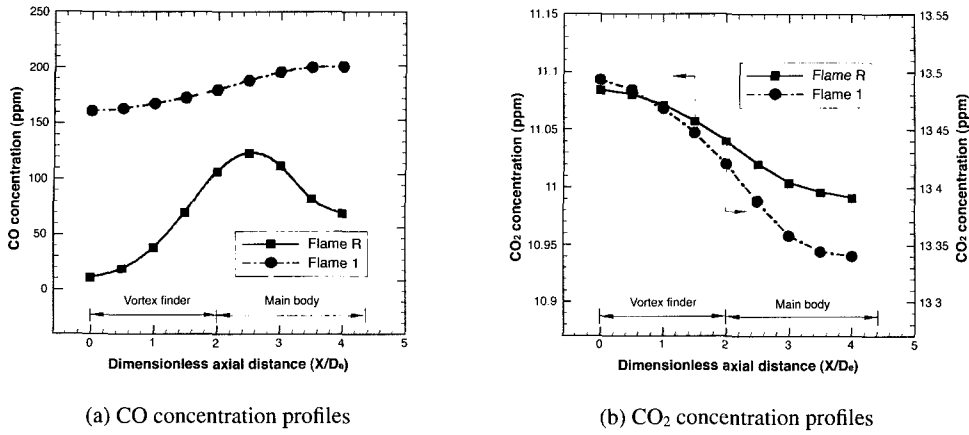


Fig. 7. Axial profiles of CO, CO₂ concentration in the standard cyclone incinerator and cyclone incinerator with the change of the air/fuel ratio.

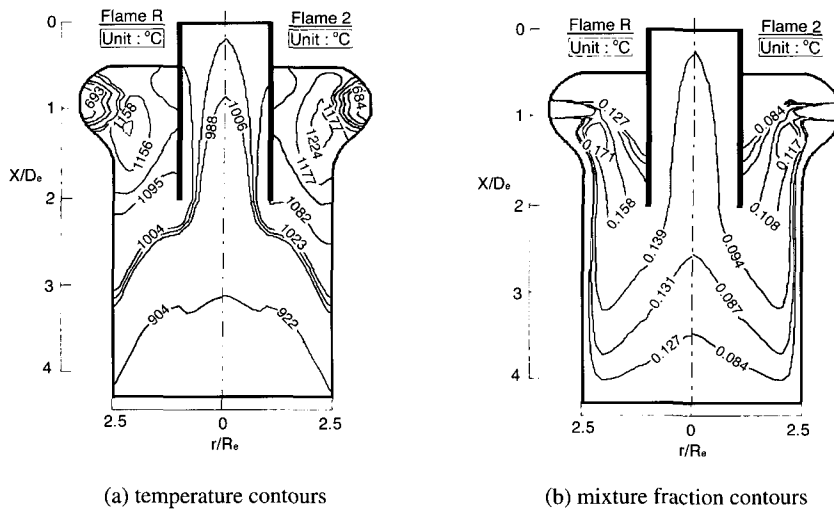


Fig. 8. Temperature and mixture fraction contours in the standard cyclone incinerator and cyclone incinerator with the change of the inlet velocity.

도를 서로 바꾸었을 때, 그 결과를 기준 사이클론 소각기와 비교하였다. 그림 8(a)는 온도분포를 비교한 것으로 기준 사이클론 소각기와 거의 유사한 분포를 보였으며, 연소실내의 온도가 전체적으로 약 20°C 정도 증가하였다. 입구부분의 화염중심에서는 연료가 과농하고, 공기의 유속이 빨라져 완전한 연소가 이루어지지 않아 낮은 온도를 나타내며, 반경 방향으로 갈수록 외부공기의 유입에 의해 연소속도

가 줄어들고 공기의 유입량이 많아져 활발한 연소가 일어나 온도가 상승하였다. 또한, 입구 주위로 과잉공기의 혼합기가 기준 사이클론 소각기 보다 빠르게 주입되어 연소실내에서 선회도가 증가되고, 중심으로 공급되는 연료과농의 혼합기와외의 난류혼합이 증가하여 화염의 안정화가 증대되었을 뿐만 아니라 산화제의 증가로 연소실내의 온도가 증가되었다. 그림 8(b)는 혼합기 중 연료의 혼합분율을 비교

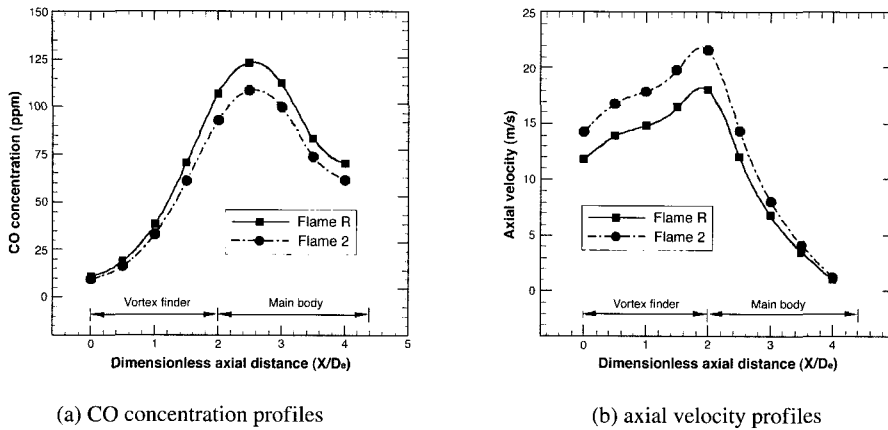


Fig. 9. Axial profiles of CO concentration and axial velocity in the standard cyclone incinerator and cyclone incinerator with the change of the inlet velocity.

한 것으로 연소실내 전체에서 기준 사이클론 소각기 보다 낮게 나타났다. 이것은 입구에서 과잉공기의 혼합기 유속이 증가되고, 연료과잉의 혼합기 유속이 감소되어 산화제 공급량의 증가 및 원심력의 증가로 인해 강한 선회류가 발달하여 혼합이 증대된 것이다.

그림 9는 불완전연소생성물인 일산화탄소의 농도와 축 방향 속도를 사이클론 소각기의 중심 ($r/R_c = 0$)에서 축 방향으로 비교한 것이다. 일산화탄소와 축 방향 속도의 분포는 기준 사이클론 소각기와 거의 유사한 경향을 보였다. 그림 9(a)에서 일산화탄소의 농도는 기준 사이클론 소각기 보다 더 낮게 나타났는데, 이것은 과잉공기의 혼합기 유속이 증가하여 산화제인 산소의 공급이 증가되어 연소성이 증가하고, 원심력의 증가로 인해 벽면을 따라 발생하는 하향선 회류의 강도가 증대되어 연소실내에 발생하는 재순환영역과 고리형 화염의 위치가 연소실 중심에서 벽면쪽으로 이동하였기 때문이다. 그림 9(b)를 보면, 축 방향거리 $X/D_c = 2$ 부분에서 축 방향 속도가 가장 높게 나타났으며, 기준 사이클론 소각기 보다 전체적으로 더 높게 나타났다. 이는 vortex finder로 유입된 혼합기의 연소반응과 연소실내의 온도 증가로 인해 연소가스의 밀도가 감소하여 연소실 중심 축을 따라 발생하는 선회류의 축 방향 모멘트가 증가하였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구는 바이오 가스의 소각을 위한 저공해 사이클론 소각기의 설계를 목적으로, 3차원 점선방향 유입식 사이클론 소각기를 표준형으로 선정하고, 유한반응모델인 ESCRS 모델을 이용하여 입구 유입 공기비 및 유속변화에 대해 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 이중관 구조의 점선방향 유입식 입구의 대칭적인 분포와 연소실 상단의 확장으로 인해 입구 부근에서는 확산화염 온도분포가 나타났으며, 연소실내에서는 고른 선회화염이 발달하였다.

둘째, 반경방향으로 $1.5 < r/R_c < 2.2$ 사이에서 국부 체류시간이 1초 정도인 재순환영역이 형성되었으며, 축 방향거리 $X/D_c = 2$ 부분에서 상향선회류를 따라 vortex finder로 유입된 혼합기 및 불완전연소생성물의 재반응으로 일산화탄소와 산소의 배출농도가 각각 11 ppm, 4.1% 정도였다.

셋째, 공기비를 변화시킨 경우, 열발생량의 증가로 인해 혼합기의 점화가 빨리 시작되고, 화염 형성 지역의 온도가 증가되었지만, 연소실 하단부의 온도는 오히려 감소되어 연소실내의 고른 온도 분포가 형성되지 않아 불완전생성물의 농도가 증가하였다.

넷째, 유입속도를 변화시킨 경우, 난류혼합이 증가되어 연소실내의 온도는 증가되고, 일산화탄소의 발

생량은 감소하였다. 또한, 재순환영역에서의 활발한 물리·화학적 재반응과 열팽창으로 인해 연소가스의 축 방향 속도가 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 조선대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Griffiths, W.D. and F. Boysan (1996) Computational fluid

dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers, *J. Aerosol Sci.*, 27(2), 281-304.

Gupta, A.K., D.G. Lilley, and N. Syred (1984) *Swirl flows*, Abacus press.

Moghiman, M., M.G. Thomas, P.J. Bowen, and A.J. Griffiths (1996) Numerical predictions of the carbon burnout performance of coal-fired non-slagging vertical cyclone combustors, *J. Inst. Energy*, 69, 31-38.

Patankar, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation.

Spalding, D.B. (1988) *PHOENICS training course notes*, CHAM TR/300.

Syred, N. and J.M. Beer (1974) Combustion in swirling flows : A Review, *Combustion and Flame*, 23, 143-201.