

〈 논문 〉

연소로 내 2차공기의 주유동 수직방향 선회분사로 인한 선회류가 스윌수에 따른 가스 체류시간과 혼합 특성에 미치는 영향

박상욱* · 전병일* · 류태우** · 황정호†
(2005년 7월 5일 접수, 2005년 12월 5일 심사완료)

Effect of Swirling Flow by Normal Injection of Secondary Air on the Gas Residence Time and Mixing Characteristics in a Combustor

Sang-Uk Park, Byoung-Il Jeon, Tae-U Yu and Jung-Ho Hwang

Key Words: Swirl(스윌), Residence Time(평균체류시간), Recirculation Flow(재순환 유동), Mixing Characteristics(혼합효과)

Abstract

We investigated gas residence time and mixing characteristics due to various swirl numbers generated by normal injection of secondary air to a lab-scale cylindrical combustor. The residence time was estimated by measuring the temporal pressure difference which was caused by deposition of test particles on a filter media after the injection by a syringe. The mixing characteristics were evaluated by standard deviation value of test gas concentration at different measuring points. The test gas concentration was detected by a gas analyzer. The swirl number of 20~30 for $\theta=5^\circ$ caused long residence time enough to improve mixing characteristics. Numerical calculations were also carried out to understand physical meanings of the experimental results.

기호설명

- S : 스윌수
- Ga : 각 운동량
- Gt : 축 방향 운동량
- R : 반경
- U : 유속
- D : 직경
- θ : 원심방향으로부터의 노즐각도
- α : 혼합계수

1. 서론

최근 폐기물 소각처리는 폐기물의 부피와 질량을 최소화하고 폐열을 회수할 수 있어 점차 증가되는 추세이다. 하지만 소각과정에서 배출되는 불완전 연소가스와 2차 오염물질의 발생 등의 문제로 인해 소각로 연소실의 성능 향상에 대한 노력이 지속되어왔다. 그 중 하나인 다단 연소(staged combustion)⁽¹⁾는 연소실에 주입되는 총 공기량을 단계별로 주입하여 초기 연소 시 고온의 화염 영역에서 환원성 분위기를 만들어 NOx 발생을 억제한 후 필요한 추가의 공기를 2차로 주입함으로써 상대적으로 저온부위에서 완전연소가 되도록 하여 NOx 및 기타 유해물질을 저감하는 방식이다. 이처럼 유해물질 저감을 위해 공기를 단계별로 주입하게 되는데 이때, 2차 공기를 주입하여 스윌을 줌으로써 연소실 내 유

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부
E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

* 연세대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 한국생산기술연구원

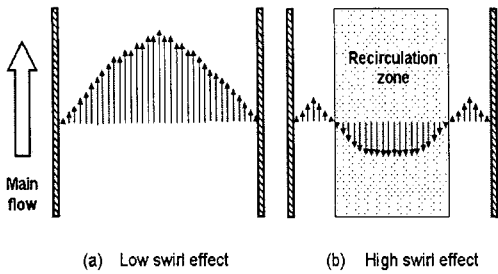


Fig. 1 Recirculation zone with swirl effect

동에 변화를 주어 연소가스의 혼합 및 체류시간에 영향을 주게 된다.⁽²⁻⁶⁾ 특히, 스윙유동에 의한 재순환 영역(recirculation zone)의 발생은 체류시간과 혼합 특성에 큰 영향을 준다. 재순환 영역에서 유동은 축 방향 위, 아래로 순환을 한다. Fig. 1은 2차 공기가 1차 공기에 수직으로 주입하여 발생된 스윙유동을 축 방향 단면으로 나타낸 그림이다. Fig. 1의 (a)는 스윙 유동이 약할 때 포물선 형태의 상승 유동이 발생하고, (b)는 스윙 유동이 강할 때 실린더 중심부에 재순환 영역이 발생되는걸 보여준다. 이러한 재순환 영역은 주 유동과는 무관한 사영역(dead zone)으로서 연소실내부 부피를 차지해 실질적인 체류시간의 감소에 영향을 미치고 있다.⁽⁷⁾ 그리고 혼합 특성의 경우에는 재순환 영역이 연소가스와 공기와의 혼합에 영향을 준다.⁽⁸⁾

이진욱⁽⁷⁾과 Huang⁽⁸⁾ 등의 연구는 swirl generator를 이용하여 스윙유동을 발생시키는 방식이지만 본 연구는 주유동과 직각방향으로 2차 공기를 주입하여 스윙을 발생시키는 방식이기 때문에 위의 연구결과와 동일한 효과가 있는지에 대해 확인이 필요하다. 그리고 만약 동일한 효과가 있다면 실제 연소실에 주입하는 1차 공기와 2차 공기의 적정비율을 산정함으로써 연료의 완전 연소를 위한 충분한 혼합효과와 체류시간을 얻을 수 있고 이를 실제 소각로 연소실 설계 시에 기초 데이터로 반영할 수 있을 것이다.⁽⁹⁾

체류시간의 측정에 관한 연구로, Lans 등⁽¹⁰⁾은 스윙유동에 따른 체류시간분포를 헬륨가스와 열선(hot-wire)를 이용해 측정 하였다. 측정 방법은, 연소실 입구 쪽에 주입하는 공기에 스윙을 주고 장치 내에 헬륨가스를 주입하여 내부 농도를 일정하게 맞춰준 뒤 헬륨가스를 차단함으로써 발생

되는 농도 변화를 이용하였다. 농도변화 측정은 핫 와이어를 이용하였으며, 체류시간분포 측정은 연소실 입구에서 헬륨가스가 차단된 시점부터 관측 지점에서 헬륨가스의 농도가 0이 되는 시점까지를 측정하는 방법을 사용했다.

혼합 특성을 관찰한 연구로, Huang 등⁽⁸⁾은 스윙유동에 따른 혼합 특성을 CO₂ 가스와 CO₂ 가스분석기를 이용하여 관찰하였다. 실험 방법은 스윙 발생기를 이용하여 스윙을 발생시키고 CO₂ 가스를 스윙 발생기 중심부에서 분사하여 실험 조건에 따른 위치별 CO₂ 가스 농도를 측정하였다.

본 연구는 연소실 성능을 향상시키고 독자적인 설계 기술을 확보하기 위한 일환으로 1차 공기에 2차 공기를 직각 방향으로 주입하여 실린더형 냉간 연소로에 스윙(swirl)을 발생시켜 유동에 따른 체류시간과 혼합 특성을 연구하였다.

실험 장치는 실린더 형 아크릴로서 연소실 형상을 꾸몄으며 본 장치 내부에 2차 공기의 유량 및 노즐의 각도를 변화시켜 체류시간과 혼합 특성 실험을 수행하였다. 체류시간 실험의 경우 입자 입경이 2 μ m인 더스트를 모의입자로 사용하여 체류시간을 측정하였는데, 실제 연소실 내 가스의 체류시간을 모사하기 위해 사용되는 입자는 유동을 따라 움직여야 하기 때문에 충분히 작은 입경을 가진 더스트를 사용하였다. 혼합 특성 실험의 경우 가스 분석기로 측정이 용이한 부탄가스를 모의가스로 사용하여 혼합 특성에 대해 실험하였다. 그리고 위의 실험들의 신뢰성을 높이고자 수치계산을 수행하였다. 또한, 수치계산과 실험 결과를 비교, 분석하여 체류시간과 혼합 특성 관찰 및 재순환영역의 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 2는 체류시간과 혼합 특성 실험 장치도이다. 그림에서 보는 바와 같이 크게 세 부분으로 나눌 수 있는데 먼저 첫 번째로 연소실을 형상화하여 아크릴로 제작한 냉간(cold flow)장치이다. 두 번째는 1차 공기와 2차 공기 그리고 더스트(dust)를 넣어주는 주입장치로 구분 지을 수 있으며, 마지막으로 냉간장치에서 주입된 입자가

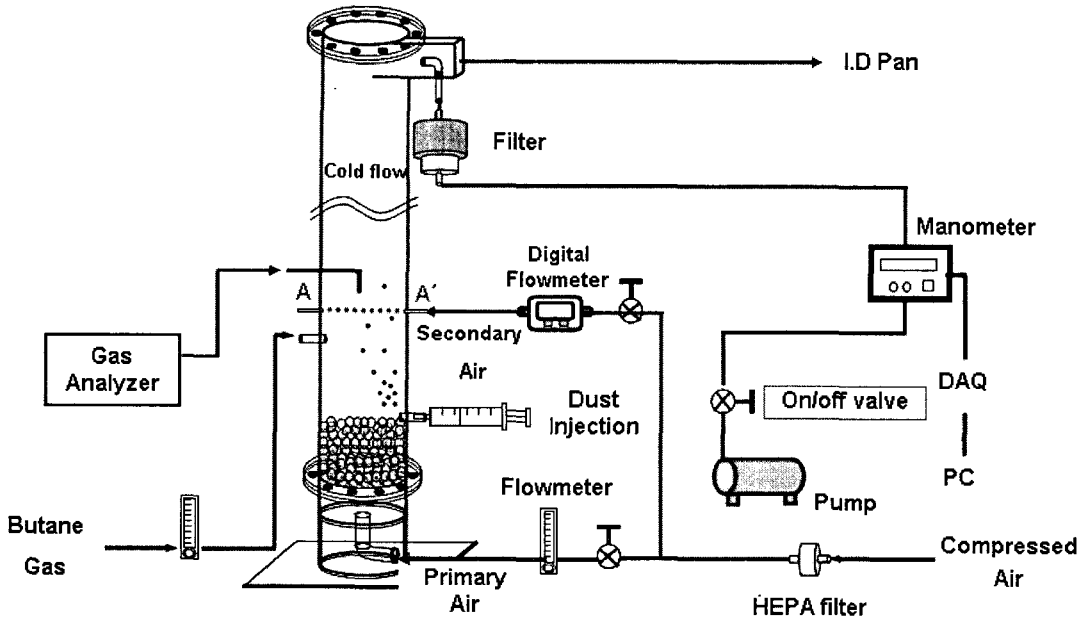


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

필터에 포집되면서 발생하는 차압을 측정하여 체류시간을 측정하는 장치와 주입한 부탄가스를 측정하는 장치로 구성되어 있다.

냉간장치는 입자의 선회현상을 확인하기 위해 투명 아크릴로 제작 하였으며 실린더 형으로 제작되었다. 장치 내경은 120mm이고 1차 공기는 맨 아래 바닥에서 주입되었으며 바닥에서 160mm 높이에 금속 그물망(wire mesh)으로 된 분산판을 두었다. 또한 비교적 균일한 유동을 위해 분산판 위에 비드(bead)를 40mm 가량 채워 넣었다. 더스트 주입부는 비드영역 바로 윗부분에 설치하였으며 2차 공기 노즐은 더스트 주입부로부터 380mm 윗부분에 설치되었다. 그리고 부탄가스 주입부는 2차 공기 노즐 아래 50mm에 설치되었다. 주입되는 1,2차 공기는 해파 필터에서 정화된 청정 압축공기를 이용하였고 비교적 유량이 많은 1차 공기는 퍼지형 유량계(purge flowmeter)를 사용하였으며 2차 공기는 디지털 유량계(TSI 4043)를 사용하여 보다 정확한 유량조절을 하였다.

체류시간 측정 실험에서 더스트는 가스의 체류시간을 측정하기 위해서 사용되었는데 그 입자가 관성력에 영향을 받지 않고 유선을 따라 움직일 수 있으려면 스토크 수(Stoke's Number)

가 1보다 작아야 한다. 이로 인해 본 실험에 사용된 더스트는 보령 화력발전소의 전기집진기(ESP)에서 포집된 fly ash를 사용하였다. 더스트의 입경은 TSI 사의 model 3321 APS(aerodynamic particle sizer)를 이용해 측정하였고, 평균입경이 $2\mu\text{m}$ 이다. 이때 실험조건에서 축 방향 속도가 가장 큰 경우는 0.29m/s 이고 더스트의 입경 및 밀도값을 통하여 스토크 수를 구하면 2.7×10^{-5} 이고 0에 매우 가까워서 입자의 거동이 공기의 유동과 일치하게 됨을 알 수 있다.

실제 더스트가 냉간장치 내 체류하는 영역은 더스트 주입부로부터 출구까지이다. 체류시간은 필터 내 입자 포집에 의한 발생된 차압을 이용하여 측정하였고 이를 위해 출구 쪽에 펌프와 차압계 그리고 더스트를 포집하기 위한 필터를 설치하였다. 필터는 공극사이즈(pore size)가 $1\mu\text{m}$ 인 Whatman 사의 유리섬유필터(glass micro fiber filter)를 사용 하였고 펌프는 ULVAC사의 진공펌프(G-20DA)를 사용하였으며 차압계는 OKANO 사의 디지털 차압계(micro manometer - POP202)를 사용하였다. 디지털 차압계로 측정된 값은 압력데이터 인식 프로그램 DA-100을 통해 컴퓨터로 출력되어 저장되었다.

혼합 특성 측정 실험에서 사용된 부탄가스는

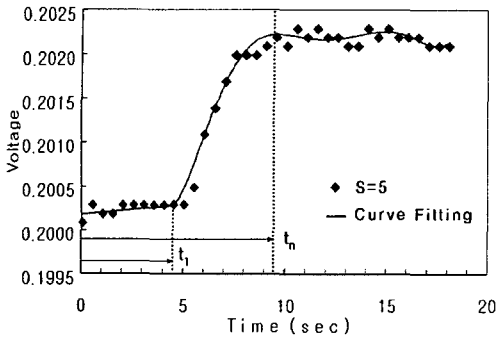


Fig. 4 Measurement of total time

특성 실험의 경우는 0에서 100까지 변화시키며 실험하였다. 이때, 스윙수가 커질수록 1차 공기 주입량이 감소하게 되고 2차 공기 주입량은 1차 공기 감소량만큼 증가하게 된다.

채류시간 측정 실험에서 채류시간은 내부에서 계속 머무는 더스트를 제외한 나머지 더스트가 2차 공기 노즐 위치에서 출구까지 이동할 때 걸리는 시간으로 정의하였다. 그리고 채류시간 측정은 더스트가 주입된 시간부터 필터에서 포집되어 차압 신호가 측정될 때까지 걸린 시간에서, 출구 쪽에서부터 필터에 포집된 후 데이터 전송까지 걸리는 시간(t_b)과 더스트 주입 후 2차 공기와 만나는 지점까지 걸린 시간(t_1)을 빼준 시간으로 하였다.

Fig. 4는 $\theta = 5^\circ$ 인 경우 더스트의 총 채류시간을 측정한 그래프이다. 여기서 시간을 측정하는 방법은 필터에 더스트가 포집될 때 발생하는 차압이 DAQ를 통해 전압(Voltage)으로 나타나게 되고 전압이 상승되는 순간(t_1)부터 더스트가 더 이상 포집되지 않을 때까지 즉, 전압이 더 이상 상승하지 않기 시작하는 시간(t_n)을 쟀 뒤, 식 (2)를 이용하여 채류시간을 구한다.

$$\text{Residence time} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} - t_n - t_b \quad (t_1 \leq t_i \leq t_n) \quad (2)$$

여기서 t_i 는 t_1 과 t_n 사이의 측정된 전압값들의 채류시간이고 n 은 측정된 전압값들의 총 개수이다.

혼합 특성 측정 실험에서 혼합 정도를 나타내기 위해서 혼합 계수 α 를 사용하였다. α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum (C - C_{avg})^2}{N - 1}} \quad (3)$$

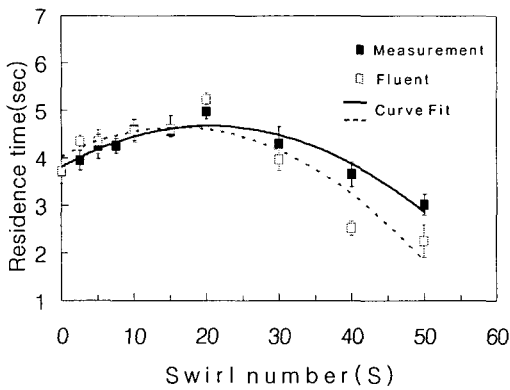
여기서 C 는 각 측정위치에서의 부탄가스 농도를 의미하고 C_{avg} 는 측정된 부탄가스의 평균 농도를 의미한다. 그리고 N 은 총 측정위치수이다. α 는 부탄가스 농도의 반경방향 표준편차를 나타내며 α 값이 0이면 완전 혼합인 상태를 나타낸다.⁽³⁾

실험 방법은 부탄가스 주입부를 통하여 부탄가스를 주입하게 되고 2차 공기 주입부 25mm 윗부분에서 부탄가스 농도를 가스분석기를 통해 측정하였다. 여기서 2차 공기 주입부 25mm 윗부분에서 부탄가스 농도를 측정할 이유는 본 혼합 특성 측정 실험의 목적이 스윙에 의한 혼합 효과를 보기 위한 것이고 2차 공기 주입부에서 부탄가스가 높이 올라갈수록 가스의 확산력으로 인하여 농도 분포가 균일해지기 때문에 스윙유동에 의한 혼합 효과가 지배적인 2차 공기 주입부 근처에서 부탄가스 농도를 측정하였다.

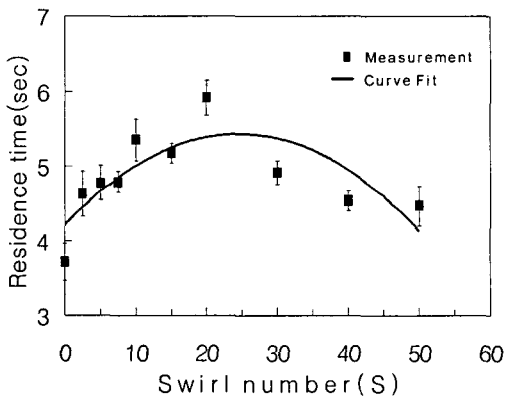
3. 수치계산 모델

실험적 연구와 더불어 본 연구에서 사용된 전산계산 방법은 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.1.22를 이용한 3차원 계산이다. 3차원 CFD 계산을 위한 격자(mesh)생성에서는 Gambit을 이용하였으며, 약 3만 1천개의 volume mesh가 사용되었다. 지배 방정식으로는 연속방정식과 Navier-Stokes Equation, 화학종 연속 방정식을 이용하였다. 그리고 2차 공기에 의한 스윙유동을 계산하기 위해서 난류 모델인 RNG k- ϵ 모델을 이용하였다.

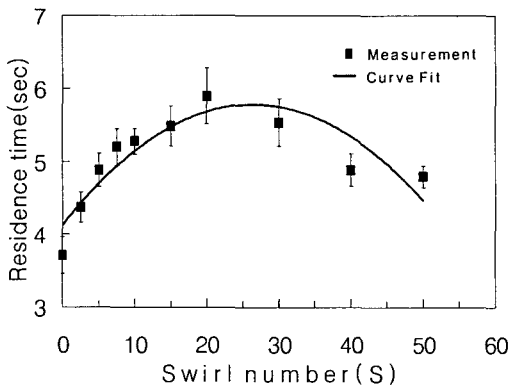
채류시간의 경우에는 연속방정식, Navier-Stokes Equation과 RNG k- ϵ 모델을 이용하여 유동장을 계산한 후 Lagrangian 방식의 입자의 운동방정식을 통해 더스트의 채류시간을 계산하였다. 그리고 입자의 운동방정식에서는 입자와 공기 사이의 항력과 중력, 확산력을 고려하였다.



(a) $\theta = 5^\circ$



(b) $\theta = 25^\circ$



(c) $\theta = 45^\circ$

Fig. 5 Residence time of dust

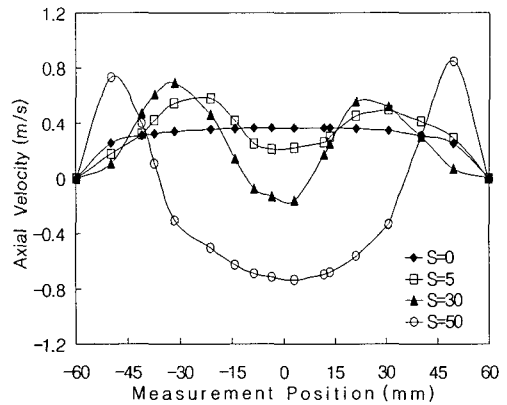


Fig. 6 Axial velocity distribution of various swirl number at the height of 605mm ($\theta = 5^\circ$)

혼합 특성의 경우에는 연속방정식, Navier-Stokes Equation 그리고 RNG k- ϵ 모델을 이용하여 유동장을 계산한 후 화학종 연속 방정식을 통해 부탄가스의 반경방향 분포를 구하였다. 그리고 화학종 연속방정식에서는 부탄가스의 확산질량 유동(Diffusive Mass Flux)을 고려하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 체류시간

Fig. 5은 디스트를 장치 내에 주입하였을 때, 노즐 각도와 스윙수에 변화에 따른 디스트의 체류시간을 나타낸 그래프이다. 스윙수가 0에서 20인 경우 스윙수가 증가할수록 점점 체류시간이 증가하고 스윙수 20에서 30사이일 때 가장 체류시간이 길며 스윙수 30이상인 경우 체류시간이 점점 감소하는 현상을 보인다. Fig. 6은 2차 공기 노즐 각도가 5도인 경우, 스윙수에 따른 축방향 속도의 반경방향 분포를 수치계산을 통해 구한 그래프이다. 스윙수가 0과 5인 경우 중심축에서 재순환영역이 발생하지 않고 스윙수가 30에서 재순환 영역이 중심축에서 반경 15mm 이내에서 발생하며 스윙수가 50인 경우 중심축에서 반경 30mm 이내에서 재순환 영역이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 스윙수의 증가는 중심축의 속도를 감소시키고 재순환영역의 크기를 증가시키는 것을 알 수 있다.

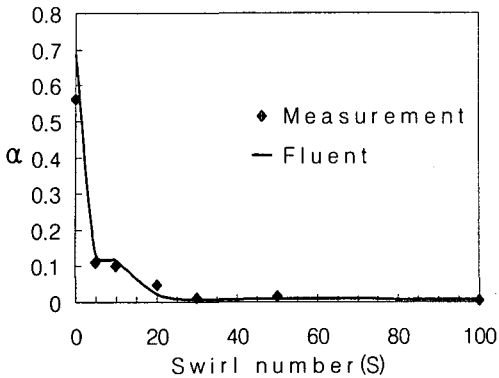
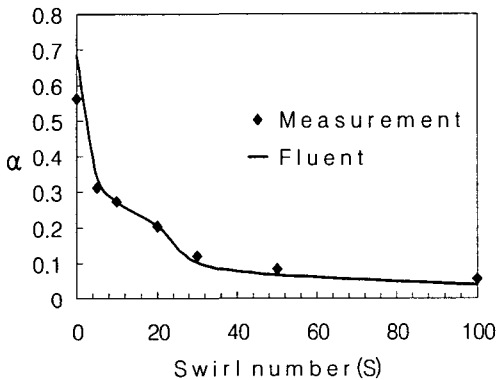
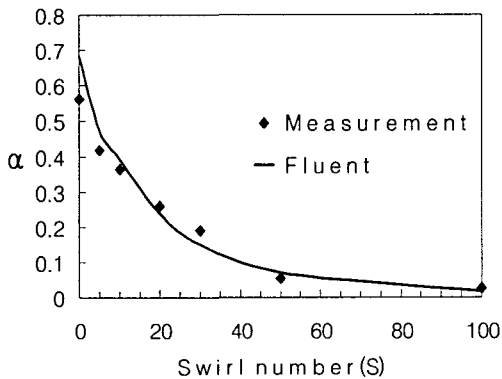
(a) $\theta = 5^\circ$ (b) $\theta = 25^\circ$ (c) $\theta = 45^\circ$

Fig. 7 Standard deviation of butane concentration at the height of 605mm

Fig. 5에서 전체적으로 스윌수가 0에서 30인 경우 스윌수가 커질수록 1차 공기량의 감소로 인하여 축 방향 속도가 감소하게 되고 스윌유동의 발생으로 인한 공기의 이동거리의 증가로 인하여 체류시간이 길어지게 된다. 스윌수가 30 이상인 경우는 장치 내 중심부에 재순환 영역이 발생 및 성장을 하게 된다. 이때 재순환영역은 장치 내에서 사 영역(Dead zone)으로 존재하여 공기가 이동할 수 있는 영역을 감소시키므로 스윌수가 30 이상인 경우 더스트의 체류시간이 감소하게 된다.

Fig. 5의 (a)에서 스윌수가 50인 경우 체류시간이 (b), (c)보다 짧은 것을 알 수 있다. 이는 Table 1~3을 보면 (a)가 (b), (c)보다 2차 공기가 더 주입되기 때문에 전체 유동에 미치는 2차 공기의 영향이 (a)의 경우 가장 크게 된다. 또한 (a)의 경우에는 2차 공기 주입방향이 장치 중심을 향하고 있고 (b), (c)의 경우에는 장치 내벽을 향하고 있어서 (a)가 (b), (c)보다 2차 공기가 1차 공기의 유동을 직접적으로 방해하게 된다. 따라서 2차 공기 주입부 위의 영역의 유동에 대해 1차공기가 미치는 영향이 줄어들게 되고 상대적으로 2차 공기가 미치는 영향이 커지게 된다. 이로 인해 스윌유동이 중심축에서 강하게 발생하여 재순환영역이 잘 발달하게 되므로 (a)인 경우 더스트의 체류시간이 (b), (c)보다 짧아지게 된 것이다.

Fig. 5의 (a)의 경우 수치계산을 수행한 결과, 실험 결과와 유사한 경향성을 보이고 이를 통해 실험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

4.2 혼합 특성

Fig. 7은 2차 공기 노즐 각도와 유량 변화에 따른 반경방향의 부탄 농도의 표준편차에 대해서 실험과 수치계산 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 6에서 전반적으로 스윌수가 커질수록 α 가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 스윌수가 커질수록 2차 공기 주입부 위에서 스윌유동과 재순환영역의 영향으로 혼합효과가 커지기 때문이다.

Fig. 7의 (a)인 경우 (b), (c)보다 같은 스윌수에서 표준편차가 적고 이를 통해 (a)가 혼합특성이 가장 좋은 것을 알 수 있다. 특히 스윌수 5인 경우 중심축에서 재순환 영역이 발생하지 않는 조건이지만 Fig. 7의 (a)에서 스윌수가 0일 때보다

급격히 α 값이 감소하고 있다. 이는 Table 1~3을 보면 (a)의 경우 (b), (c)보다 2차 공기가 더 주입되었고 이를 통해 전체 유동에 미치는 2차 공기의 영향이 (a)의 경우 가장 크게 된다. 그리고 (a)의 경우 2차 공기 주입방향이 장치 중심을 향하고 있고, (b), (c)의 경우 장치 내벽을 향하고 있어서 (a)가 (b), (c)보다 2차 공기가 1차 공기의 유동을 직접적으로 방해하게 된다. 그래서 2차 공기 노즐 위의 영역의 유동에 대해 1차 공기의 영향이 적고 상대적으로 2차 공기의 영향이 크게 된다. 이로 인해 (a)의 경우 2차 공기 주입부 영역 중심 위에서 스월 유동이 상대적으로 (b), (c)보다 강하게 발생하게 된다. 따라서 중심축을 따라 1차 공기와 함께 상승하는 부탄가스가 강한 스월 유동의 영향으로 반경방향으로 잘 퍼지게 되어서 α 값이 작아지게 된다.

Fig. 7에서 대체적으로 스월수가 50이상의 경우 스월수가 커질수록 α 값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 6의 (a)인 경우 스월수가 50이상인 경우 α 값이 일정하다. 이는 스월수가 증가하여도 장치 내에서 반경방향으로 재순환영역의 성장은 한계가 있기 때문에 α 값의 감소가 일어나지 않는 것으로 파악된다.

Fig. 7의 수치계산과 실험 결과가 유사한 경향성을 보이며 이를 통해 실험 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

스월수에 따른 입자의 체류 시간 및 혼합 특성을 파악하기 위해서 냉간 실험 및 수치계산을 수행하였다. 이를 통해 스월유동과 재순환 영역이 입자의 체류 시간과 혼합 특성에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서 알 수 있었다.

(1) 스월수가 0에서 20인 경우에는 체류시간이 증가하고 20에서 30사이에서 가장 길었으며 30 이상인 경우에는 감소하는 현상을 보였는데 스월수가 0에서 30인 경우에는 축 방향 속도 감소와 스월유동으로 인한 이동거리 증가로 체류시간이 증가하게 되고 스월수 30이후에는 재순환 영역의 발생 및 성장으로 인한 주 유동 측면에서 장치 내부의 부피감소로 체류시간이 감소하게 된다.

(2) 전체적으로 스월수가 증가할수록 α 값이

감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 스월수가 50 이상인 경우에는 α 값이 0.1이하로 매우 낮고 α 값의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이를 통해 재순환영역이 부탄가스의 혼합을 좋게하는 것을 알 수 있고 스월수가 50이상인 경우에는 재순환 영역의 반경 방향으로 성장이 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

(3) 체류시간 결과와 혼합특성 결과를 함께 고찰한 결과 2차 공기 노즐 각도 5이고 스월수 20에서 30인 경우 체류시간이 길면서 혼합 특성도 좋은 것을 알 수 있다.

(4) 수치계산 결과와 실제 실험 결과가 유사한 경향을 보이고 있다.

본 실험의 연구 결과가 이전 연구자들의 연구 결과와 유사한 효과가 있는 것을 확인할 수 있었고 실제 연소실에 주입하는 1차공기와 2차공기의 적정비율을 구할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 실제 소각로 연소실 설계에 기초 자료로 반영될 수 있게 되었다.

후 기

본 논문은 에너지관리공단 에너지기술 학술진흥사업(기술기획 700-10043호)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Turns, S. R., 1996, "An Introduction to Combustion," *McGRAW-HILL*, 1stEd, p. 499.
- (2) Choi, S. M. and Shin, D. H., 1994, "A Numerical Study on the Flow Performance of Municipal Solid Waste Incinerators," *KSME '98 Spring Conference (II)*, pp. 164~169.
- (3) Ryu, C. K. and Choi, S. M., 1996, "3-Dimensional Simulation of Air Mixing in the MSW Incinerators," *Combustion Science and Technology*, Vol. 119, pp. 155~170.
- (4) Shim, S. Y., Sohn, K. H. and Lee, C. S., 1994, "A Study on the Combustion Characteristics of Swirling Jet Combustor," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 18, No. 2, pp. 492~501.
- (5) Lee, K. B., 1996, "Study for a Secondary Air Affecting Fluid Flow in a Solid Waste

- Incinerator," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 20, No. 9, pp. 264~270.
- (6) Ohm, T. I. and Lee, K. B., 1997, "An Experimental and Computational Study for a Secondary Air Effect on the Fluid Flow in a Stoker Incinerator," *J. of KSEE*, Vol. 19, pp. 73~88.
- (7) Lee, J. W., Kim, S. C. and Yang, J. M., 2000, "Numerical Analyses for the Effect of Swirl on the Combustion Characteristics and Residence Time in the Pyrolysis Gas Combustor," *J. of Korean Solid Waste Engineering Society*, Vol. 17, pp. 480~488.
- (8) Huang, Rong F. and Tsai, Feng C., 2004, "Flow and Mixing Characteristics of Swirling Wakes in Blockage-effect Regime," *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, pp. 199~214.
- (9) Jeon, B. I., Park, S. U., Shin, D. H., Ryu, T. W. and Hwang, J., 2005, "Combustion Characteristics of RDF in a 30kg/hr Scale Pyrolysis Melting Incinerator," 30th *KOSCO Symposium*, pp. 47~56.
- (10) Van Der Lans, R. P., Glarborg, P., Dam-Johansen, K. and Larsen, P. S., 1997, "Residence Time Distributions in a Cold, Confined Swirl Flow," *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, pp. 2743~2756.
- (11) Jeong, Y. K., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2001, "The Effect of Swirl Number on the Flow Characteristics of Flat Flame Burner," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 7, pp. 997~1004.