

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.12.1079>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

고체 입자 소각로에서 분사기의 설계 인자에 따른 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

손진우* · 김수호* · 손채훈**

* 세종대학교 기계공학과

Numerical Study of Flow Characteristics in a Solid Particle Incinerator for Various Design Parameters of Injectors

Jin Woo Son*, Su Ho Kim* and Chae Hoon Sohn**

* Dept. of Mechanical Engineering, Sejong Univ.

(Received April 20, 2013 ; Revised October 6, 2013 ; Accepted October 7, 2013)

Key Words: Incinerator(소각로), Injector(분사기), Non-Reactive Flow(비반응 유동), Swirl Number(선회수), Recirculation Zone(재순환 영역)

초록: 폐기물을 효과적으로 소각 처리하기 위해, 고형화된 입자를 고속으로 연소시키는 소각로의 유동 특성을 수치해석적으로 조사하였다. 본 연구에서는, 기존 발전소에서 통용되는 선회 유동 유발을 통한 안정적 화염 형성 개념과 고에너지 밀도를 갖는 로켓 엔진 연소실의 설계 개념을 복합적으로 적용하였다. 첫단계로, 소각로로 분사되는 연료와 공기의 유동 특성 파악을 위해 1차 연소실에 주 분사기와 보조 분사기를 장착하여 비반응 유동장 수치해석을 수행하였다. 설계 변경 인자로 주 분사기의 편향각, 보조 분사기의 하향각, 두 분사기 간 간격을 선정하였다. 이러한 설계 인자의 변경에 따른 선회 유동 형성의 정도를 파악하기 위해 선회수(swirl number)를 평가 인자로 사용하였다. 각각의 설계 인자가 변함에 따라 선회수는 편향각이 증가할수록 선회수가 증가하였으며, 하향각에 따라서는 선회수가 크게 변하지 않았다. 설계 인자에 따라 형성되는 재순환 영역의 크기가 달라지며 이는 선회수의 크기에도 영향을 끼쳤다. 재순환 영역의 크기가 작으면 선회수가 큰 경향성을 보였다. 이러한 수치해석을 통해 활발한 선회 유동을 형성시킬 수 있는 설계 조건을 찾을 수 있었다.

Abstract: The flow characteristics in a solid particle incinerator are investigated numerically for high burning rate of wastes. The studied incinerator employs both a swirl flow used in the furnace of powerplants and a design concept applied to a rocket combustor. As the first step, the non-reactive flow field is analyzed in the incinerator with primary and secondary injectors through which solid fuel and air are injected. The deflection angle of a primary injector, inclination angle of a secondary injector, and gap between the two types of injectors are selected as design parameters. The swirl number is adopted for evaluating the degree of swirl flow and estimated over wide ranges of three parameters. The swirl number increases with deflection angle, but it is affected little by inclination angle. Recirculation zones are formed near the injectors, and their size affects the swirl number. The swirl number decreases with the zonal size of recirculation. From the numerical results, the design points can be found with strong swirl flow.

- 기호설명 -

C : 상수

\vec{F} : 외력

G : 난류 운동에너지 생성항

G_z : 축방향 운동량

G_θ : 각운동량

h : 1차 연소실 상부로부터의 거리

k : 난류 운동에너지

Pr_t : 난류 Prandtl 수

p : 압력

R : 연소실의 반지름

r : 반경방향 좌표

S_m : 생성항

S_w : 선회수(swirl number)

t : 시간

† Corresponding Author, chsohn@sejong.ac.kr

| | |
|--------------|----------------------------------|
| u | : 속도성분 |
| \vec{v} | : 속도벡터 |
| ω_k | : 각속도 |
| Y_M | : 전소산율(overall dissipation rate) |
| ϵ | : 난류소산율 |
| θ_d | : 편향각 |
| θ_i | : 하향각 |
| μ | : 점성계수 |
| μ_t | : 와점성계수 |
| ρ | : 밀도 |
| σ | : 프란틀 수 |
| τ | : 전단 응력 |
| $\bar{\tau}$ | : 응력 텐서 |

하첨자

| | |
|-----|---------------|
| i | : i 방향 단위벡터 |
| j | : j 방향 단위벡터 |

1. 서 론

폐기물을 처리하기 위한 여러 가지 방법 중의 하나로 연소 과정을 통한 소각(incineration)이 있다. 가정과 사무실, 공장에서 배출되는 고형 폐기물의 주성분은 탄화수소 계열로 볼 수 있으며, 질병으로 폐사한 가축을 소각하여 처분하는 경우에도 궁극적으로는 탄화수소 계열의 물질을 연소시키는 과정으로 간주할 수 있다.

이와 같은 소각대상의 고형물을 효과적으로 소각 처리하기 위해서는 수분을 제거한 후 고형화하고 이를 미립화하여 펠릿(pellet)이나 입자 형태로 만들어 연소시키는 절차가 필요하다. 또한, 이러한 소형 폐기물의 경우에는 소각 처리 수요 발생시 수요처까지 접근하여 처리하는 방식이 유리할 것이다. 이러한 새로운 개념의 소각 기술 적용을 위해서는 이동이 가능하도록 크기가 작으면서 동시에 고성능(시간당 높은 소각 처리량을 뜻함)을 갖춘 소각로가 필요하다. 그러나, 기존의 소각 능력이 큰 소각로는 대부분 고정된 정치형이며, 대형의 건축물로 제작되었다.^(1,2) 이러한 소각로는 앞서 언급한 폐기물(고체입자)을 효과적으로 처리하기에는 부적합하다.

아직까지 소형이며, 이동이 용이한 소각로는 국내에서 개발한 사례가 없으며, 제품화되기까지

해결해야 할 기술적 문제가 많다. 해결해야 할 기술 사항을 크게 분류하면, 폐기물의 전처리 기술, 고속 연소 기술, 후처리 기술(배출 및 환경적 사안과 관련됨), 이동식 장치로의 구성, 제어기술 등이 있다. 그 중에서 가장 핵심적인 기술은 작은 연소로에서 높은 연소율(burning rate)을 얻는 연소 기술이다.

요약하면, 체적이 작은 연소로에서 일정 시간 동안 많은 폐기물을 처리하기 위하여 고에너지 밀도를 갖는 소각로가 필요하다. 이러한 폐가축 소각로를 설계하는데 있어서 설계자가 고려해야 하는 기본 설계 조건을 3T로 나타낼 수 있으며, 이는 각각 시간(time), 온도(temperature), 난류(turbulence)를 의미한다. 즉, 연료의 체류시간을 길게하고, 연소 온도를 높게 하며, 강한 난류 유동의 유발을 통한 연료/산화제 혼합을 증진하는 것이 높은 연소율을 얻는 방법이다. 특히 소각로 내부의 선회 유동과 재순환 영역의 존재는 온도와 시간의 관점에서 상당히 중요한 요인이다.⁽³⁾ 재순환 영역의 형성은 유동의 주류와 재순환 되는 흐름이 교차하는 곳에서 강하고 빠른 유동이 형성되어 출구로 나가는 입자, 분진 등의 체류 시간을 오히려 줄인다는 해석도 제기되고 있다.^(4,5)

Fehr와 Vaclavinek⁽⁶⁾이 수행한 소각로내 비반응 유동 실험은 저공해 소각을 위한 기초 연구로서 소각로 형태에 적합한 가스 유동을 도출해 내는 연구였다. 또한 Bohn⁽⁷⁾은 선행 연구자와 유사하게 소각로에 대하여 비반응 유동 실험을 수행하였으며, 이 결과를 토대로 소각로의 축소 모델내의 유속과 혼합, 배분율 등을 규명하였다.

Hiett와 Powell은 피토크를 이용하여, 가스 터빈 내 유동장을 연구하였으며, Mathur, Maccallun 등은 3차원 구형 피토크를 이용하여 3차원 난류 유동장을 측정하였고, 강한 선회류는 연소실 중앙부에 재순환 영역을 발생시킴을 확인하였다.^(8,9) 또한, Aoki와 Nakayama⁽¹⁰⁾는 LDV 기법을 이용하여, 스윙 각도에 따른 난류 강도와 재순환 영역의 특성에 대해 연구하였다.

고체 입자화된 폐기물의 처리를 위한 고성능 소각 기술 개발을 위해, 가장 높은 고에너지 밀도를 갖는 연소기인 로켓엔진 연소기에 적용되는 연소 기술을 기존 기술에 접목시키려는 첫 시도로서 본 수치해석적 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 첫 번째 단계로서, 소각 연소로의 다양한 설계 인자 중 연료와 공기 분사 분사기의 다양한 설계 사양에 대해서 비반응 유동해석을 수행하여 성능 향상을 위한 연료(즉, 폐기물 입자)와 공기의 유동 특성을 조사하였다. 일차적으로 미세입자로의 분쇄가 가능한 입자를 소각대상으로 삼아 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

화학 반응이 없는 비반응 유동 특성을 알아보기 위해 난류 유동에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식이 이용되며, 다음의 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

위의 2개의 지배방정식과 함께 난류유동을 해석하기 위해 난류모델을 도입하였다. 본 연구에서는 범용적인 난류모델인 standard $k-\epsilon$ 모델을 개선한 realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. Realizable

$k-\epsilon$ 모델의 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)에 대한 수송방정식 (transport equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4)$$

위 식에서 와점성계수(eddy viscosity), μ_t 는 각 지점에서 $k-\epsilon$ 의 전달 방정식의 해로부터 구해진 속도 스케일과 길이 스케일로부터 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

식 (5)의 변수 C_μ 는 레이놀즈 등 많은 연구자에 의해 제안되고, 또한 실험적인 증거에 의해 입증되었다. standard $k-\epsilon$ model에서는 상수 0.09을 적용하며, realizable $k-\epsilon$ model에서는 식 (6)과 같은 공식을 적용한다.^(11,12)

$$C_\mu = \frac{k^2}{A_0 + A_s \frac{h U^*}{\epsilon}} \quad (6)$$

여기에서

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \overline{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}} \quad (7)$$

로 정의되며, 다음의 관계식을 이용한다.

$$\begin{aligned} \overline{\Omega_{ij}} &= \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $\overline{\Omega_{ij}}$ 는 각속도, ω_k 로 움직이는 기준좌표계에서 바라본 평균 회전율 텐서(mean rate-rotation tensor)이다. 식 (3)~(7)에서 사용된 생성항과 모델 상수 값은 참고문헌⁽¹²⁾에 상세히 기술되어 있다.

2.2 연소실 형상 및 해석방법

전체 소각로의 형상은 로켓 엔진 연소기의 형상을 따라 Fig. 1과 같이 상부와 하부로 나뉘어 각각

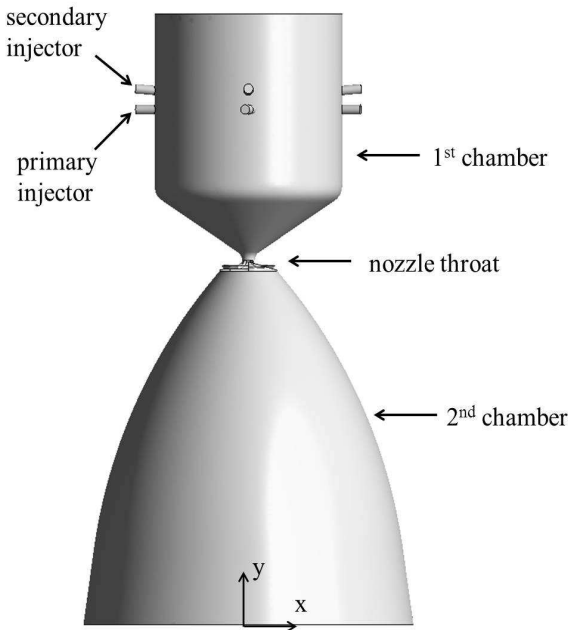


Fig. 1 Geometry and numerical grids of a solid particle incinerator with the first(top) and the second(bottom) chambers

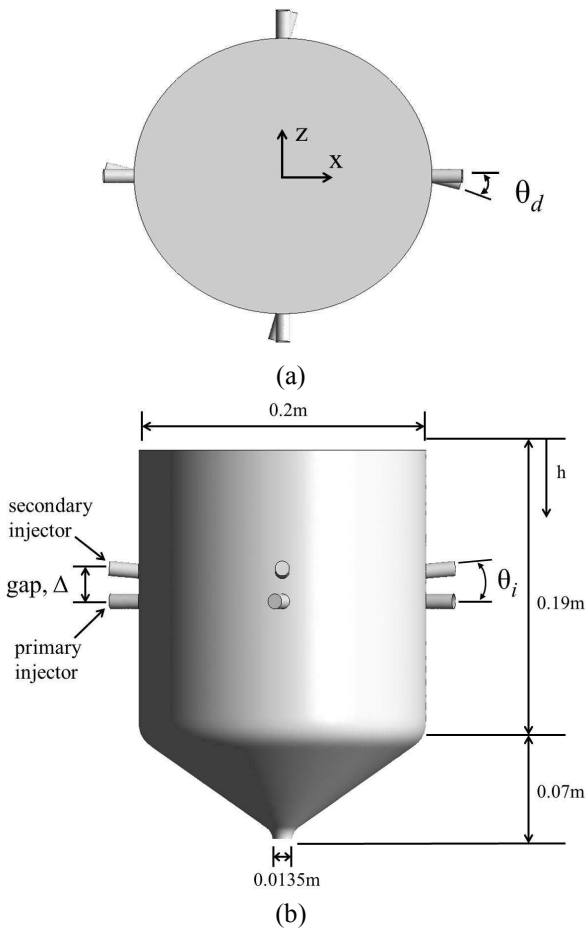


Fig. 2 Geometries of the 1st chamber with deflection angle, incline angle, and the injector gap between a primary injector, a secondary injector

1, 2차 연소실로 구성되어 있다. 1차 소각로에는 연료와 공기가 혼합되어 나오는 주 분사기와 화염 안정 및 연료의 혼합도를 높이기 위한 보조 분사기가 장착되어 있고, 2차 소각로에서 강한 선회를 만들기 위해 1, 2차 연소실 사이에 노즐 목(nozzle throat)을 두었다. 연료와 산화제로는 무연탄과 공기를 선택하였다. 실제 폐기물의 경우, 구성 물질의 다양성으로 인해 아직 물성치와 화학적 특성을 명확히 규정하기 곤란하며, 입자화하는 데에도 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여, 잘 알려진 고체연료인 무연탄을 모사 폐기물로 가정하여 연구를 진행하였다.

연소 측면에서 고려해 볼 때, 1차 연소실 내에서 대부분의 연료가 연소되도록 설계하고, 1차 연소실 내에서 완전 연소가 되지 못한 연료가 노즐목을 통과한 뒤 2차 연소실 내에서 강한 선회를 이루며, 완전히 연소되는 구조로 설계함이 바

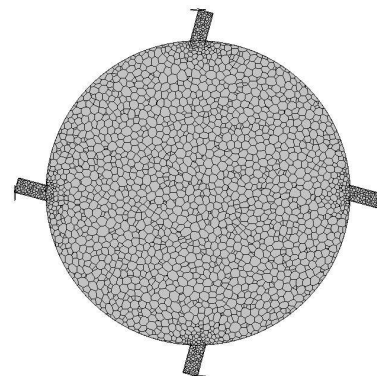


Fig. 3 Computational grids on the plane with primary injectors

람직하다. 이러한 새로운 소각로에서는 두 가지 중요한 개념이 적용된다. 한 가지는 기존의 산업용 보일러나 소각로에서 사용되는 선회 유동이며, 다른 한가지는 고압 연소이다. 전자는 예혼합기의 체류시간을 증대시키기 위함이며, 후자는 에너지 밀도를 높이기 위함이다.

전체 소각로 시스템을 구성하고, 궁극적으로 소각로의 최적화를 달성하기 위해 본 연구에서는 일차적으로 1차 연소실을 대상으로 수치 해석을 수행하여 유동 특성을 파악하고자 한다.

1차 소각로의 형상, 주요 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 1차 연소실에 장착된 2단으로 이루어진 분사기 중 아래쪽에 위치한 것이 주 분사기(primary injector)이며, 보조 분사기(secondary-injector)은 주 분사기의 위쪽에 위치한다. 주 분사기는 연소실 상부에서 0.1 m 떨어진 곳에 장착되어 있다. 대칭인 선회 유동을 얻기 위해 주 분사기와 보조 분사기를 1차 연소실 주위로 4개씩 90° 간격으로 장착하였다.

Figure 3에 본 연구에서 사용한 연소실의 격자계를 나타내었다. 격자계는 다면체 격자계로 구성되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 분사기 근처에서 형성되는 유동장을 정확히 계산하기 위해 분사기 주변에 격자를 밀집시켰다. 1차 소각로 내에서 유동 변화가 크게 일어나는 곳에서 격자 개수 변화에 따른 속도 변화와 격자 의존성을 확인한 뒤 격자 개수를 약 50만개로 결정하여 수치 해석을 수행하였다.

2.3 유동해석 및 정량화 방법

고성능 소각로 설계를 위한 설계 시 화염 안정

Table 1 Design parameters of the 1st chamber

| Design parameters | Ranges |
|---|-------------------------------|
| Deflection angle of a primary injector | 10 ~ 45° (step size: 5°) |
| Incline angle of a secondary-injector | 5 ~ 25° (step size: 5°) |
| Gap between a primary injector and a secondary-injector | 1 ~ 5 cm (step size: 2 cm) |

화와 소각 성능에 영향을 끼치는 중요한 유동 인자는 소각로 내에 형성되는 사이클론(cyclone) 유동의 강도이다. 강한 사이클론 유동을 형성시키기 위해서는 주 분사기와 보조 분사기의 적절한 설계가 필요하다. 이를 위해 주 분사기와 보조 분사기의 다양한 설계 인자들을 변경하여 비반응 유동해석을 수행하였다.

유동해석을 위한 설계 변경 인자로는, 주 분사기의 편향각(deflection angel), 보조 분사기의 하향각(incline angel), 그리고 주 분사기와 보조 분사기의 간격(gap)을 선택하였다.

주 분사기의 편향각, 하향각 그리고 분사기간격을 Fig. 3에 나타내었다. 편향각을 두는 이유는, 연소실 내에서 유동을 나선형 흐름으로 만들기 위함이며 접선 유동(tangential flow)을 형성하는 역할을 한다. 보조 분사기의 하향각은 분사된 공기와 연료의 유동에 난류 소산을 크게 만들어 공기와 연료의 혼합을 증대시키는 역할을 한다. 이와 더불어 주 분사기와 보조 분사기 사이의 간격도 유동과 혼합특성에 영향을 미친다. 이를 토대로 수치해석을 위해 설정한, 각 설계 인자들의 범위를 Table 1에 나타내었다.

1차 연소실 내의 유동 특성을 파악하기 위해, 연소실 내의 유동을 선회 정도로 정량화하여 주 분사기와 보조 분사기의 세 가지 설계 인자 변경에 따른 유동 특성을 알아보고자 한다. 선회수는 연료와 공기의 혼합뿐만 아니라 혼합기의 연소실 내 체류 시간(residence time)에도 영향을 주는 중요한 인자이므로, 유동 특성을 나타내면서 동시에 소각 성능을 좌우하는 대표 인자로 선택하였다. 선회 유동의 강도는 선회수(swirl number)를 이용하여 나타낼 수 있는데, 이는 식 (9)와 같이 축방향 운동량에 대한 원주 방향 각운동량의 비

로 정의된다.⁽¹³⁾

$$S_w = \frac{\text{angular momentum}}{\text{axial momentum} \times \text{length}} = \frac{G_\theta}{G_z R} \quad (9)$$

여기서, G_θ , G_z 는 각각 각운동량과 축방향 운동량을 나타내며 식 (10), 식 (11)과 같이 정의된다.

$$G_\theta = \int_0^R r u_\theta \rho u_z 2\pi r dr \quad (10)$$

$$G_z = \int_0^R u_z \rho u_z 2\pi r dr \quad (11)$$

위의 두 식을 식 (9)에 대입하여 1차 연소실내의 선회수를 구할 수 있다. 주 분사기와 보조 분사기에서 분사된 유동은 1차 연소실내에서 출구(노즐 목)로 향하게 되는데, 본 유동 해석에서는 유동 특성을 파악하기 위해 노즐 입구에서의 선회도를 선회수로 정량화하였다.

본 수치해석에서 한 개의 주 분사기에서 분사되는 무연탄의 유량은 0.56 g/s, 공기의 유량은 4.3 g/s(분사 속도는 약 37 m/s)이며, 한 개의 보조 분사기에서 분사되는 공기의 유량은 6.3 g/s(분사 속도는 약 54 m/s)이다. 전체적으로 당량비는 0.67이며, 공기 과잉율은 50 %이다.

분사되는 석탄과 공기의 온도는 각각 423 K, 623 K으로 설정하였다. 연소실 출구 조건은 대기압 조건을 부여하였다. 수치해석에 사용된 무연탄의 성분 분석 데이터와 물리적 성질을 table 2에 요약하였다. 서로 다른 온도와 화학종으로 인해 에너지 방정식과 화학종 방정식을 식 (1), (2)와 함께 고려하였으나 그에 대한 설명은 생략한다. 수치해석을 위한 solver로서 범용 열유동 해석 코드인 Fluent⁽¹²⁾를 사용하였다.

3. 결과 및 논의

설계 인자의 변경에 따른, 소각로 내에서 유동의 정성적 특성 변화를 파악하기 위해 기준(baseline) 설계점을 설정하였다. 기준 설계점에서의 각 설계 인자값으로서 주 분사기의 편향각을 10°, 보조 분사기의 하향각과 분사기 간격은 5°와 1 cm로 설정하고, Table 1에 나타낸 바와 같

Table 2 Results of ultimate and proximate analyses and physical properties of coal adopted in this study

| Coal (anthracite) | |
|------------------------------------|--------|
| Ultimate analysis (% Dry Ash Free) | |
| C content (wt% of dry fuel) | 89.3 |
| H content (wt% of dry fuel) | 5.0 |
| O content (wt% of dry fuel) | 3.4 |
| N content (wt% of dry fuel) | 1.5 |
| S content (wt% of dry fuel) | 0.8 |
| Proximate analysis | |
| Fixed carbon | 85.1 |
| Volatile | 6.9 |
| ash | 8 |
| Moisture | 0 |
| physical properties | |
| Lower heating value (kcal/kg) | 7600 |
| Density (kg/m ³) | 1550 |
| Thermal conductivity (W/m-K) | 0.33 |
| Mean particle diameter | 100 μm |

이 주 분사기와 보조 분사기의 편향각과 하향각 그리고 분사기 간 간격을 변경해 가며, 비반응 유동장을 얻기 위한 수치 해석을 수행하였다.

수치해석을 통해 설계 기준점에서 구한 속도 벡터를 Fig. 4에 나타내었다. Figure 4에는 각각 (a)보조 분사기 상층부, (b)보조 분사기, (c)분사기 중간 부분, (d)주 분사기, (e)주 분사기 하층부, 그리고 (f)1차 연소실 출구 부분에서의 속도 벡터를 나타내었다. 그림에서 h 는 연소실 상부(top)로부터의 수직거리를 나타낸다. Figure 4(d)에서 볼 수 있듯이, 주 분사기에서 분사된 공기가 1차 소각로 내에서 강한 선회(swirl)를 만들고, (b)에 나타내었듯이 보조 분사기에서 나온 2차 공기가 주 분사기의 공기와 충돌하면서 혼합이 증진됨과 더불어 소각로 내의 선회 유동을 형성하게 된다. 그리고 두 분사기의 하부(Fig. 4e)에서는 분사된 혼합기(premixture)가 선회를 하면서 분사기 입구 쪽으로 향하게 되고, 안정적인 선회 유동을 보이며 연소실 출구 쪽으로 향하게 된다. 또한, 1차 연소실 출구면(Fig. 4(f))에서는 면적이 좁아지고, 좁은 면적을 따라 유동이 가속되며 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

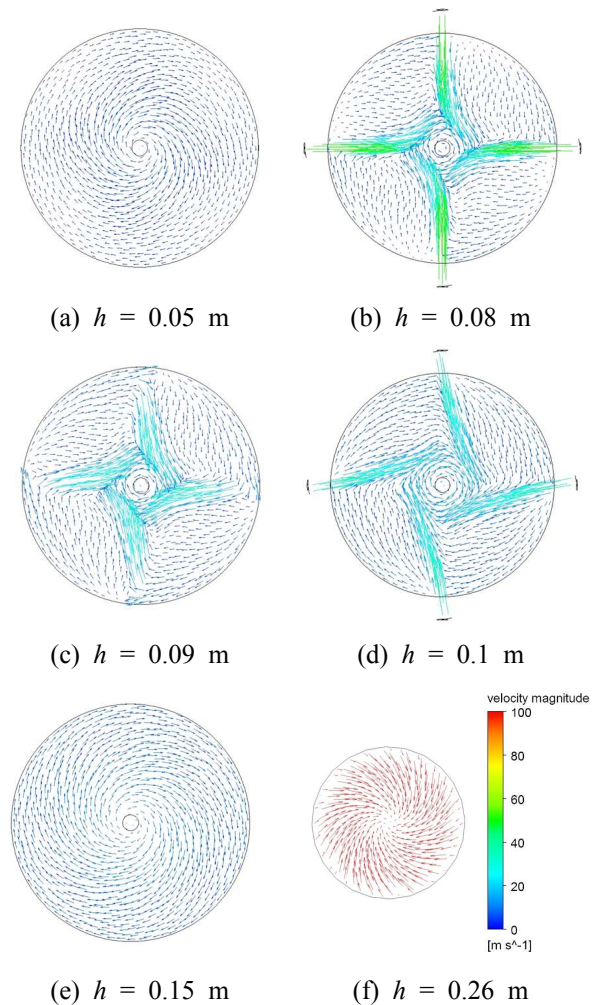


Fig. 4 Velocity vectors on various circular cross-sections for the baseline condition of the incinerator (top view; h denotes the vertical distance from the top of the chamber)

1차 연소실의 축 방향 단면의 속도 벡터를 Fig. 5에 나타 내었다. 주 분사기와 보조 분사기에서 분사된 공기가 충돌에 의해 분사기의 상부와 하부에서 유동의 재순환 영역(recirculation zone)이 생성되는 것을 볼 수 있다. 연소실 중앙부분에 도달한 혼합기는 출구부분으로 흐르면서 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 연소실이 실린더 형태와 분사기 입구부 형태로 구성되어 있어, 분사기 입구부에서 출구로 유동이 진행됨에 따라 유동 단면적이 감소하기 때문이다. 출구에서의 속도는 약 250 m/s로 계산되었다.

비반응 유동해석을 통해 얻은 결과로 미루어 볼 때 연소장이 형성될 경우에는 화학반응에 의

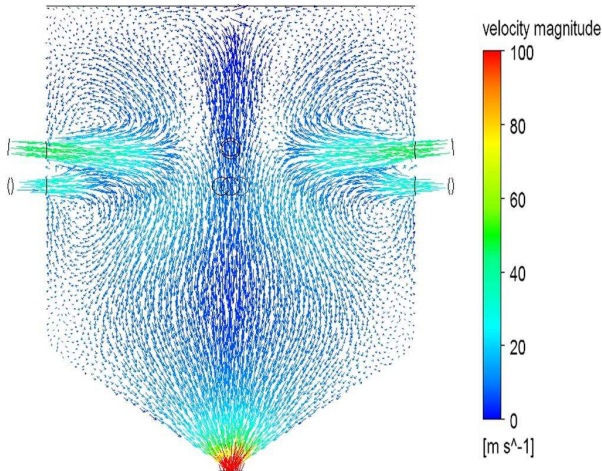


Fig. 5 Velocity vectors on the cross section for the baseline condition of the incinerator (side view)

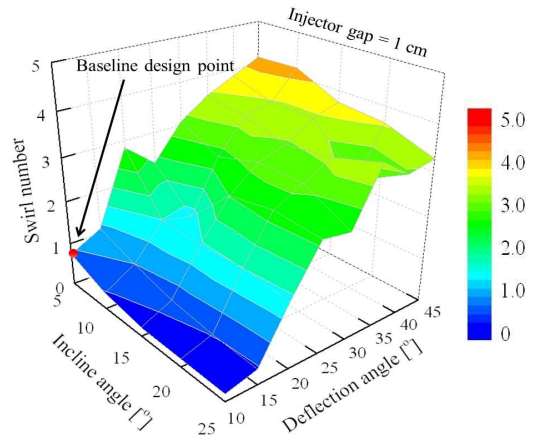
해 열이 방출되므로 기체의 온도와 압력이 증가하게 되어 출구에서의 속도는 더욱 가속될 것으로 예상된다. 노즐 목(본 연구에서는 연소실 출구 부분에 해당함)에서의 단면적 설정에 따라 유동의 초킹(choking)을 유도할 수 있으며 이 경우 2차 연소실(Fig. 1 참고)에서 초음속 유동장이 형성될 것이다.

설계 인자 변경에 따른 유동 특성 파악을 위해, 보조 분사기의 하향각과 주 분사기의 편향각, 분사기 간 수직 간격을 변경하며 유동해석을 수행하였다. 계산 결과를 바탕으로 선회수(swirl number)를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 선회수의 계산을 위해 주 분사기와 보조 분사기에서 분사된 혼합기가 출구로 나갈 때 안정된 선회 유동을 형성하는 지점($h = 0.13$ m)에서의 속도를 추출하였고, 앞에서 언급한 식 (9)~(11)을 이용하여 정량화하였다.

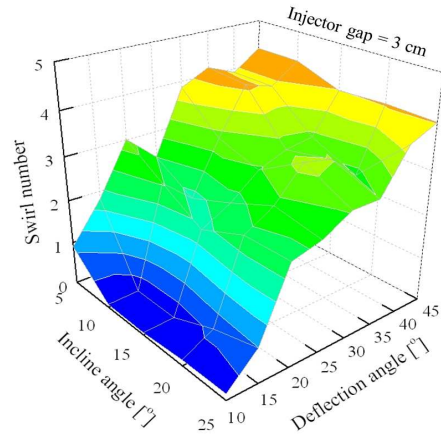
Figure 6의 (a)는 분사기 간격이 1 cm일 때 편향각과 하향각의 변화에 따른 선회수를 나타낸 것이며 (b)와 (c)는 각각 3 cm, 5 cm 간격일 때의 선회수를 나타낸 것이다.

비교 분석을 위한 기준 설계점을 Fig. 6의 (a)에 표시하였다. 기준 설계점에서의 선회수는 약 0.7로 계산되었으며, 주 분사기, 보조 분사기 그리고 분사기 간 간격을 변화시킴에 따라 선회수가 바뀔 수 있다.

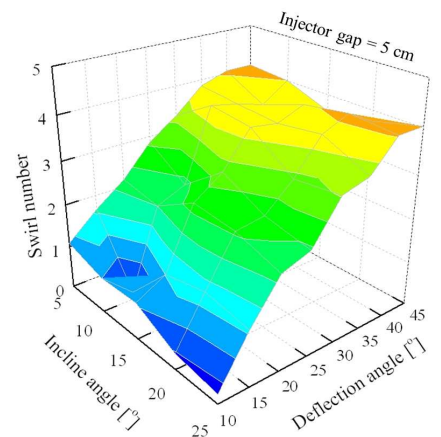
선회수와 각각의 설계 인자간의 상관관계에 따라 국부적으로 선회수가 증가하거나 감소하는 경향성을 보였으나, 전반적으로 주분사기의 편향각



(a) Injector gap : 1 cm



(b) Injector gap : 3 cm



(c) Injector gap : 5 cm

Fig. 6 Swirl numbers as functions of the deflection angle, the incline angle, and the injector gap

이 증가할수록 선회수가 증가하였다. 선회수의 크기는 작게는 약 0.1에서 크게는 약 4.5까지 변화하였다.

세 개의 분사기간격에서 보조분사기의 하향각이 증가하여도 편향각이 동일하면 선회수의 크기가 크게 달라지지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 보조분사기의 하향각보다 주분사기의 편향각이 선회수의 크기에 더 큰 영향을 주는 때문이라고 볼 수 있다. 또한 하향각이 커질수록 선회수의 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있는데, 하향각이 작을수록 주분사기의 선회유동에 영향을 주는 축방향 속도의 크기가 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

분사기간격이 길어질수록 하향각이 증가함에 따라 선회수의 감소폭이 작아지는 이유는 두 분사기가 충돌하는 거리가 길어져 보조분사기가 주분사기에 주는 영향이 줄어들기 때문이다.

Figure 6에 나타난 선회수로 정량화하여 파악한 유동 특성을 바탕으로, 기준 설계점과 각 분사기간격에서 최대/최소 선회수를 보이는 지점들을 추출하여 table 3에 나타내었다. 이로부터 각 분사기간격에 따라 주 분사기와 보조 분사기의 설계 인자, 즉 편향각과 하향각이 변화함에 따라 선회수의 차이가 매우 커짐을 알 수 있다. 그리고, 대체적으로 하향각이 작고 편향각이 클수록 우수한 선회 성능을 보임을 알 수 있었다.

기준 설계점을 제외하고 table 3에 나타난 6가지 소각로 설계점(a~f)에 대한 축방향 속도 벡터를 Fig. 7에 나타내었다. Figure 7의 (a), (c), (e)에 선회수가 낮은 설계점의 속도 벡터장을 나타내었고, Fig 7의 (b), (d), (f)에 선회수가 높은 설계점, 즉, 우수한 선회 유동 특성을 보이는 설계점의 속도 벡터장을 나타내었다. Figure 7의 (b), (d), 그리고 (f)에서의 유동 패턴을 보면, 연소실내 벡터의 방향이 단면의 수직방향, 즉 연소실의 접선방향의 벡터가 대부분인 것을 알 수 있다. 반면

에 선회수가 낮은 (a), (c), 그리고 (e)에서는 주분사기와 보조분사기의 상부와 하부에, 연소실 상부와 하부로 향하는 재순환 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 선회수가 낮은 설계점에서 접선방향의 유동을 형성하지 않고 축방향으로의 순환 영역이 크게 형성된 것은 편향각이 작아 주분사기에서 분사된 유동이 연소실 중앙으로 향하고, 높은 각도의 하향각을 가진 보조분사기의 유동과 충돌하여 연소실 상부와 하부로 크게 선회하는 유동을 형성하기 때문인 것으로 판단된다. 이로 인한 재순환 영역의 크기에 따라 축방향 속도와 접선 방향 속도가 변하게 되고 결국 선회수에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

본 수치해석 결과로부터 알 수 있듯이, 1차 연소실에 설치되어 있는 주 분사기와 보조 분사기의 분사형태와 주 분사기와 보조 분사기간의 간격을 조절함으로써 선회 유동 특성을 조절할 수 있다. 편향각과 하향각은 선회수와 각각 비례, 반비례 관계를 갖고 있으며, 각 분사기에서 분사된 유동의 충돌로 인해 형성되는 재순환 영역의 크기는 선회수에 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다.

Figure 8에 선회수에 따른 연료의 체류시간을 나타내었다. 선회수가 증가할수록 체류시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 분사기 간격이 길어질수록 선회수의 증가에 따른 체류시간의 증가폭이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 보조분사기에서 분사된 유동이 주분사기에서 분사된 유동에 영향을 주는 정도가 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 보조분사기에서 분사된 공기는 주분사기에서 분사된 공기와 연료의 혼합을 돕는데 큰 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 보조분사기와 주분사기의 간격이 짧을수록 선회수가 증가함에 따라 체류시간이 급격

Table 3 Swirl numbers calculated at various design points and for a high-performance incinerator

| | Baseline design | Gap between a primary injector and a secondary-injector | | | | | |
|--|-----------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1 [cm] | | 3 [cm] | | 5 [cm] | |
| Incline angle of a secondary-injector [°] | 5 | 25 | 5 | 20 | 5 | 25 | 20 |
| Deflection angle of a primary injector [°] | 10 | 10 | 45 | 10 | 45 | 10 | 40 |
| Swirl number | 0.7 | 0.17 | 4.16 | 0.14 | 4.35 | 0.22 | 4.10 |
| Annotation for Fig. 7 | | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |

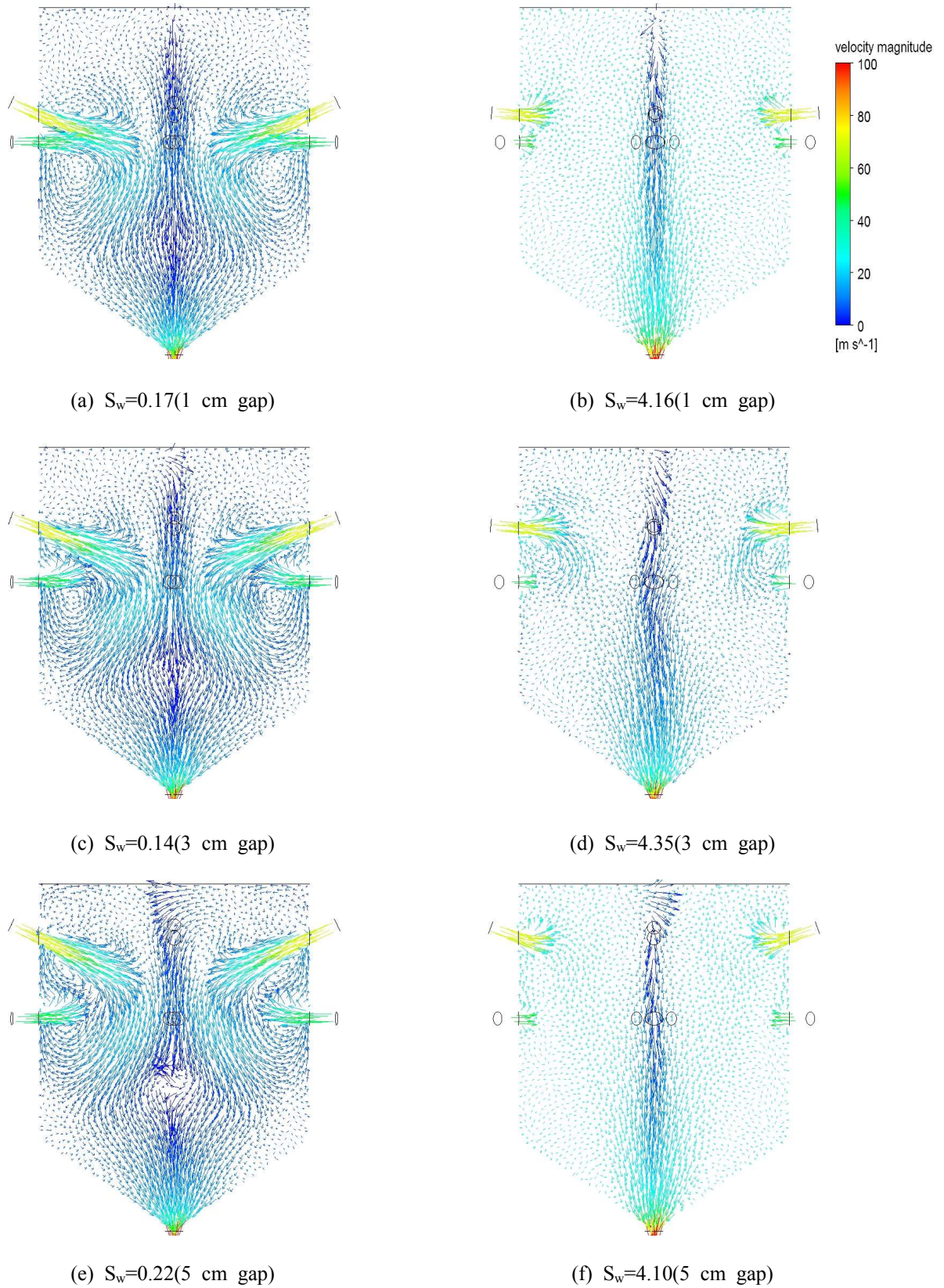


Fig. 7 Velocity vectors for the six design points of the incinerator(side view)

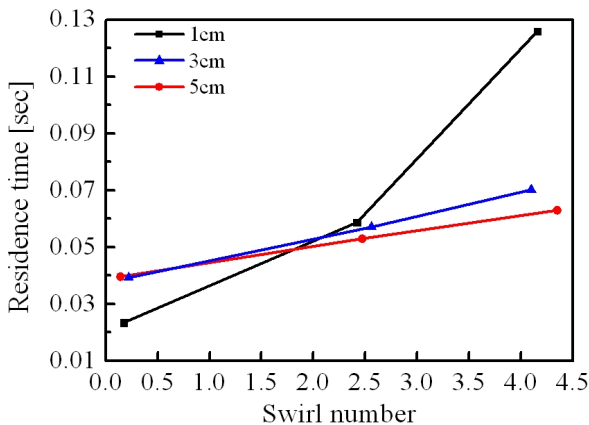


Fig. 8 Particle residence time at the various design point, swirl number

하게 증가하는 것이다.

수치해석을 통해 얻은 결과로부터 파악된 사실들은, 유동특성의 정량화 값인 선회수를 통해 연소실의 성능을 미리 예측할 수 있다는 것을 알려준다.

본 비반응장 유동해석 결과로부터 화염이 형성되는 패턴과 주 반응 지역을 예상할 수 있으며, 선회수와 체류시간 정보는 연소 성능 향상을 위한 설계 변경의 방향을 제시해 줄 수 있을 것이다. 즉, 연소실 내부에 접선 화염이 형성될 것이며 가급적 체류시간을 길게 할 수 있는 분사기 사양의 선택이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는, 소형이면서 고성능을 갖는 고체 입자 소각로의 구현을 위해 기존의 화력 발전소와 로켓 엔진 연소실에서 채택되는 설계 개념을 접목하기 위한 기초적인 수치해석을 수행하였다. 소각 성능 향상의 방향성을 찾기 위해 선회수를 도입하였고, 소각로의 연료/공기 분사 분사기에 적용되는 설계 인자 변경에 따른 선회 유동특성에 대해 연구하였다.

주 분사기와 보조 분사기가 장착된 1차 연소실에서 주 분사기의 편향각, 보조 분사기의 하향각, 두 분사기 사이의 간격을 변화시켜가며 비반응 유동해석을 수행하여 선회수를 구하였다. 주 분사기와 보조 분사기의 상부/하부에 형성되는 재순환 영역의 크기에 의해 선회수가 영향을 받으며, 재순환 영역이 크게 형성될수록 선회수는 작은 값을 가짐을 알 수 있었다.

각각의 설계 인자에 따라, 선회수는 단조적으로 증가하거나 감소하지 않았으며, 이로 인해 우수한 선회 유동 특성을 보이는 설계점들은 넓은 설계 인자의 범위에 걸쳐 분포하는 것으로 파악된다. 파악된 해석 결과로부터 우수한 소각 성능을 나타낼 수 있는 분사기 설계점들을 도출할 수 있을 것이다.

본 수치해석적 연구에서는 대상 소각물로 석탄 연료를 사용하였다. 따라서, 미세입자로 분쇄할 수 있으면서 상대적으로 발열량이 큰 폐기물에 대해 적용할 수 있는 유동 특성 결과를 도출하였다.

향후, 추가적인 연구를 통해 각 설계 인자와 선회유동간의 상관관계를 규명하고, 최적 설계점을 도출하고자 하며, 그와 더불어 연소장 해석을 통해 실제로 설계 인자의 변경에 따른 소각 성능을 파악하고 그 상관관계를 좀 더 명확히 분석하고자 한다. 모델 실험을 통한 해석 결과의 검증도 수반되어야 할 것이다. 한편, 본 연구에서 모사 연료로 채택한 무연탄과 실제 폐기물은 물리화학적 특성, 발열량 및 입자 크기가 상이하므로, 이를 고려한 실제 폐기물의 유동 및 연소 특성에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다. 일반적으로 실제 폐기물은 상대적으로 발열량이 낮고, 입자 크기가 크므로 이러한 요인으로 인해 상대적으로 낮은 성능을 보일 것으로 예상된다. 이를 고려한 후속 연구 결과와 본 연구 결과의 비교를 통해 실제 폐기물의 소각 성능을 예측하기 위한 상관관계를 도출하는 작업이 필요하며, 궁극적으로 폐기물 소각 성능 향상을 위한 요소 기술 개발로 이어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. 2013-023030).

참고문헌

- (1) Choi, K. C., Sung, N. C., Bae, B. H., Jang, S. H. and Suh, J. M., 2000, Waste Incinerator, ISBN-8974326019, Munwha Publishing Co.
- (2) Prabir, B., Cen, K. and Louis, J., 2002, "Boilers and Burners : Design & Theory,"

ISBN-8995318007, KEIC

- (3) Kilgroe, J. D., Lanier, W. S. and Alten, T. R. V., 1992, "Development of Good Combustion Practice for Municipal Waste Combustor," *National Waste Processing Conference*, Vol. 15, pp. 145~156.
- (4) Park, J. Y., Song, E. Y. and Jang, D. S., 1993, "A Numerical Study of the 2-D Cold Flow for a Quebec City Stoker Incinerator," *Journal of Energy Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 268~275.
- (5) Kim, S. J., Kim, S. K., Kim, Y. D. and Choi, S. M., 1994, "Combustion Chamber Design of Municipal Solid Waste Incinerator," *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society*, Vol. 11, No. 4, pp. 619~629.
- (6) Fehr, M. and Vaclavinek, J., 1992, "A Cold Model Analysis of Solid Waste Incineration," *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, No. 4, pp. 277~283.
- (7) Bohn, T. I., 1991, "Incinerator Wind Tunnel Model Test," Energy and Electronic Power Plant Technical Report, Essen National University.
- (8) Mathur, M. L., and Maccallum, N. R. L., 1976, "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers," *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 4, pp. 238~240.
- (9) Chaturvedi, M. C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansion," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 89, No. HY3, pp. 61~92.
- (10) Aoki, K. and Nakayama, 1987, "The Flow Characteristics in Swirl Type Combustor," *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*, pp. 45~54.
- (11) Reynolds, W. C., 1987, "Fundamentals of Turbulence for Turbulence Modeling and Simulation," Lecture Notes for Von Karman Institute Agard Report No. 755.
- (12) FLUENT User Guide, 2012, FLUENT Inc.
- (13) Sloan, D. G., Smith, P. J. and Smoot, L. D., 1986, "Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 12, pp. 163~250.