Research Paper

A Study on Thermal-flow Characteristics in a Reaction Chamber of Gas Scrubber Designed Based on Similitude Theory

Jonghyuk Yoon¹ · Dong Soo Kim² · Hyunkyung Kim² · Hyoungwoon Song^{1,*}

¹Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering

²M.A.T PLUS Co., Ltd.

(Received October 8, 2019; Revised November 6, 2019; Accepted November 7, 2019)

Objectives : A gas scrubber which is normally composed of a reaction chamber and a scrubbing part is being used to purify the waste gases from the processes. An efficient design of the reaction chamber is essential in a scrubber system due to the overall operation stability and high destruction & removal efficiency (DRE). The purpose of the study was to obtain the basic design data of deriving the improved design by analyzing a small-scale model of the commercial reaction chamber.

Methods : In the present study, the small-scale model of the simplified the reaction chamber was designed and fabricated based on similitude theory, and the thermal-flow characteristics were numerically analyzed inside the chamber using commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) code.

Results and Discussion : Based on two dimensionless numbers for the geometric similarity and three dimensionless numbers for the kinematic similarity, the small-scale model of the reaction chamber was designed and fabricated. From the numerical and experimental results, thermal-flow characteristics such as temperature gradient and thermal efficiency were evaluated. To validate the numerical method applied herein, the numerical results of the temperature at specific monitoring points were compared with the experimental data. The average error rates (2.5~9.8%) between them was shown and the numerical results of temperature distribution are in good agreement with the experimental data.

Conclusions : In this study, the small-scale model, which was designed and manufactured based on similarity theory was analyzed. From these results, the basic design data for drawing the improved design ideas were acquired. The results of this study can be used as basic data for analyzing thermal and flow characteristics in a variety of scrubber systems.

Key Words : *Semiconductor Industry, Gas Scrubber, Reaction Chamber, Similitude Theory, Computational Fluid Dynamics (CFD)*

* Corresponding author E-mail: hwsong@iae.re.kr Tel: 031-330-7406 Fax: 031-330-7111

연구논문

상사이론 기반 설계된 가스 스크러버 반응챔버 내 열유동특성에 관한 연구

윤종혁¹ · 김동수² · 김현경² · 송형운^{1,*}

¹고등기술연구원 플랜트공정개발센터

²엠에이티플러스(주)

목적: 반응챔버와 세정부로 구성되는 가스 스크러버는 반도체 제조공정으로부터 배출되는 폐가스를 정제하기 위해 사용되고 있다. 이때, 전반적인 운전안정성 및 높은 제거효율을 얻기 위해 스크러버에서 반응챔버의 효율적인 설계가 필수적이다. 이에 본 연구에서는, 상용 반응챔버에 대한 축소모델을 설계 및 제작하여, 상용 반응챔버의 개선설계안 도출방법을 제시하기 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

방법: 본 연구에서는 상용 반응챔버에 대한 기하학적 상사 및 운동학적 상사를 만족하는 반응챔버 축소모델을 설계·제작하고 상용 CFD 코드를 이용한 수치해석 연구를 수행하여 반응챔버 내부 열유동 특성을 분석하고자 한다.

결과 및 토의: 기하학적 상사를 만족하기 위한 2가지 무차원수, 운동학적 상사를 만족하기 위한 3가지 무차원수를 기반으로 상사성이 확립된 반응챔버 축소모델을 설계 및 제작하였다. 수치해석과 실험을 통해 반응챔버 내부 온도구배, 열효율과 같은 열유동특성이 분석되었고 해석결과를 검증하기 위해 특정 관측점에서의 온도를 실험과 비교 분석한 결과, 약 2.5~9.8% 평균 오차와 전반적인 온도분포의 유사성이 확인되었다.

결론: 본 연구에서는 상사이론을 기반으로 설계 및 제작된 반응챔버 축소모델을 분석하였고, 이를 통해 개선설계안 도출을 위한 설계기초자료를 확보하였다. 이와 같이 본 연구에서 수행한 스크러버 반응챔버에 대한 연구 결과는 다양한 종류의 스크러버를 설계하기 위한 자료로 활용될 것으로 기대한다.

주제어: 반도체 산업, 가스 스크러버, 반응챔버, 상사이론, 전산유체역학

1. 서론

반도체 가공, 세정, 냉각 등의 생산과정에서 지구온난화를 야기 또는 가속화시키는 각종 환경유해물질이 배출되며 이러한 환경유해물질을 저감하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 특히 반도체 생산공정으로부터 발생하는 환경유해물질의 경우 온난화 지수가 높고 열적으로 안정적인 난분해성 물질이기 때문에 이를 효과적으로 저감하기 위한 후처리 기술로 가스 스크러버 시스템이 대표적으로 사용되고 있다. 가스 스크러버 시스템에서 환경유해물질은 1차적으로 반응챔버를 거치면서 고온의 열화학적 반응을 통해 분해되고, 미분해물질 및 반응부산물은 2차적으로 액체의 직접적인 접촉 또는 고성능 흡착제를 통해 최종 처리된다. 이때 처리하고자하는 대상가스의 종류에 따라 열원종류 및 후단 세정방법을 선택적으로 조합하여 사용할 수 있으며 이와 관련하여 다양한 연구가 국내외서 다양하게 수행되고

있다.^{1,2)}

김성천 등³⁾은 수치해석을 통해 오리피스가 설치된 플라즈마 스크러버에 대해 플라즈마 방전 영역 내 처리가스의 체류시간을 증진시키기 위한 연구를 수행하였다. Lebel 등⁴⁾과 Huang 등⁵⁾은 사이클론 방식을 적용한 세정시스템에 대하여 액체 입자의 거동 및 열유동 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 이렇게 수행되었던 연구들은 스크러버의 세정시스템에 대한 연구가 주를 이루고 있어 반응챔버 내 열유동특성을 파악하는 데는 한계점이 존재한다. 또한, 스크러버를 분석하는 데 있어서 해석적인 방법을 주로 이용했다는 점에서 실제현상에서 발생하는 다양한 문제점 및 현상들을 고려하는 데는 한계점이 있다.

한편, 제품을 설계함에 있어서 경험적 또는 감각적인 방식으로 설계한다면 제작 완료 후 미처 예상하지 못한 문제점들이 발생할 가능성이 있으며 이로 인해 다시 원점으로 돌아와 제품을 재설계해야하는 일이 발생하기도 한다. 또

한 다양한 설계개선안을 원형모델 또는 실증모델에 직접 적용하고 실험하여 효용성을 판단하는 것은 운전비용문제, 실패비용문제, 공간제한, 가공제작문제 등이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해소하고자 한 시스템에 대해 얻어진 결과를 사용하여 다른 시스템의 현상을 설명할 수 있는 상사라는 개념이 사용되고 있다. 상사법칙은 기하학적으로 닮은 두 대상에 대하여 현상 또는 상태에 대한 물리량이 동일하면, 두 대상에 일어나는 현상 및 상태 역시 같은 결과를 보여주는 것으로 제품의 기초설계 및 보완설계에서 유용하게 사용되고 있으며 이와 관련하여 많은 연구들이 진행된 바 있다.^{6~14)}

이에 본 연구에서는, 상사법칙을 기반으로 상용 반응챔버에 대한 축소모델을 설계하였다. 그리고 반응챔버 축소모델에 대해 전산유체역학을 이용한 수치해석 연구를 수행하였다. 또한, 반응챔버 축소모델을 제작하고 실험을 수행하여 반응챔버 내 다양한 열유동특성을 해석결과와 비교 분석하였다. 이를 통해, 상용 반응챔버 개선설계안 도출을 위한 설계기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 반응챔버 축소모델 설계

반도체 폐가스 처리용 가스 스크러버에 사용되는 반응챔버 기준 모델은 M사에서 실제 현장에 적용하여 사용중인 모델로 폐가스 처리용량이 200 L/min이며 전열히터를 적용한 간접열전달 방식을 사용하고 있다.¹⁵⁾ 이러한 반응챔버의 축소모델을 설계/제작함에 있어서 다음과 같이 원형모델과 축소모델간의 기하학적 형상, 운동학적 특성을 무차원화 한 상사법칙에 기반하여 설계하게 된다.

2.1. 기하학적 상사

반응챔버 축소모델은 원형모델의 약 45% 수준으로 설계하였다. 반응챔버 형상설계변수의 경우, 반응챔버 내 열유동특성에 전열히터의 형상이 미치는 영향이 지배적이기 때문에 아래와 같이 기하학적 설계변수를 무차원화하여 선정하였다.

$$\Pi_1 = \frac{D_i}{D_o} \quad (1)$$

$$\Pi_2 = \frac{D_h}{L} \quad (2)$$

여기서 Π_1 는 직경비, D_i 는 환형유로 내경이자 히터의 외경, D_o 는 환형유로 외경, Π_2 는 직경 대 길이비, D_h 는 수력학적 직경으로 $D_o - D_i$ 으로 계산되며, L 은 히터 길이를 의미한다. 축소모델의 환형유로내경(D_{oi}), 환형유로외경(D_{oo}), 히터길이(L)를 각각 0.054 m, 0.074 m, 0.375 m로 설계하

면 원형모델과 축소모델의 직경비(Π_1)는 각각 0.727, 0.730이며, 직경 대 길이비(Π_2)는 0.054, 0.053로 기하학적 상사를 만족하게 된다.

2.2. 운동학적 상사

반응챔버 원형모델로 유입되는 폐가스는 약 700℃ 이상까지 폐가스의 온도가 변하며 이에 따라 물성과 열유동특성은 온도에 따라 변하게 된다. 또한 실제 반도체 제작공정 후에 배출되는 폐가스의 조성은 대부분 캐리어가스인 질소 기체이며 일부 N_2O , SiH_4 등의 가스가 수천~수만 ppm 정도를 포함하고 있다. 본 연구에서는 상용모델의 설계개선을 위한 기초자료 확보에 초점을 두고 있으므로, 축소모델에서는 공급 및 활용이 용이한 상온의 공기를 이용하여 폐가스를 모사하고자 하였다. 또한, 축소모델에서 원형모델과 동일한 열유동특성을 발생시키기 위한 유동조건 및 열전달 현상에 대한 상사성을 확인해야 한다. 따라서 아래와 같은 무차원 변수들을 이용하여 온도에 따라 변하는 모사 가스 열유동특성에 대한 운동학적 상사성을 확립하였다.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

$$Re_D = \frac{\rho U_c D_h}{\mu} \quad (4)$$

$$Nu_D = \frac{h_c D_h}{k} = C(Re_D)^m Pr^{1/3} \quad (5)$$

여기서 Pr 는 프란틀수로 운동점성도와 열확산도의 비율을 의미하며, ν 는 동점성계수, α 는 열확산도를 나타낸다. Re_D 는 레이놀즈수로 관성력과 점성력의 비를 의미하며, ρ 는 작동유체 밀도, U_c 는 단면 평균속도를 나타낸다. Nu_D 는 누셀트수로 대류열전달과 전도열전달 크기의 비를 의미하며, h_c 는 대류열전달계수를 의미하고, 하첨자 s 와 p 는 각각 축소모델과 원형모델을 의미한다. 누셀트수(Nu_D)의 대류열전달계수(h_c)는 온도, 속도, 형상 등에 의해 변해 정의하기 힘들기 때문에 많은 연구에서 실험식을 기반으로 한 상관관계식을 사용하고 있다.^{16,17)} 본 연구에서는 Manohar 등¹⁸⁾이 가열된 봉에 대한 강제대류시 사용된 상관관계식을 참고하여 사용하였다.

Fig. 1은 온도가 300 ~1000 K 변화할 때 원형모델과 축소모델 간의 상사성을 만족했는지 확인하기 위해 그림 원형모델과 축소모델간의 3가지 무차원변수비 Pr_s/Pr_p , $Re_{D,s}/Re_{D,p}$, $Nu_{D,s}/Nu_{D,p}$ 를 확인한 결과 0.96~1.01 범위의 값을 가지고 있으며 이를 통해 원형모델과 축소모델간의 열유동 상사를 이뤘다고 볼 수 있다.

Fig. 1. Comparison of dimensionless numbers between the small-scale and prototype models.

3. 수치해석

3.1. 해석영역 및 격자

실제 반응챔버에서 운전상태, 유지보수, 소재, 가공 등에 다양한 이유로 인해 원형모델의 형상은 복잡하지만, 축소 모델은 원형모델의 주요 열유동특성을 상사적으로 분석하는데 목적이 있기 때문에 단순화된 형상이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 2과 같이 상사법칙을 기반으로 단순화된 반응챔버 축소모델을 설계하였다. Fig. 2(a)는 반응챔버 형상을 나타낸 것으로 전체적인 크기는 앞서 설계한 대로 직경 약 0.188 m, 높이 약 0.541 m 수준이다. 공기는 반응챔버 상부에 유입관을 통해 반응챔버 내부로 유입된 후 ‘Y’ 형태의 환형유로를 지나는 구조를 지닌다. 환형 유로를 지난 공기는 하부영역에서 유동방향이 하향에서 상향으로 바뀌고 다공판을 지나 출구로 배기된다.

Fig. 2(b)는 반응챔버 수치해석에 사용된 해석격자를 나타낸 것으로 사면체격자와 육면체격자를 혼합된 2,340,575 개의 해석격자를 사용하였고 유동의 변화가 많이 발생하는 영역에 격자를 상대적으로 조밀하게 형성하였다.

3.2. 해석기법

열분해반응챔버 축소모델 내부에서 공기의 열유동 특성을 수치해석적으로 분석하기 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX 18.0 사용하였다.¹⁹⁾ 반응챔버 내부 작동유체인 공기에 대해서는 3차원 정상상태, 비압축성, 난류유동으로 가정하였다. 이때 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) 방정식이 적용된 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (7)$$

(a) Geometry

(b) mesh

Fig. 2. Computational domain of small-scale reaction chamber.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h_t}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_t) \\ &= - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} [U_i (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j})] + S_H \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, ρ 는 밀도, t 는 시간, U_j 는 각 방향 속도성분, p 는 압력, τ_{ij} 는 응력텐서, S_M 는 운동량 생성항, h_t 는 총 엔탈피, k 는 열전도도, T 는 온도, S_H 는 열 생성항을 나타낸다. 이때, 미지수인 압력, 각 방향 속도, 엔탈피는 Reynolds 평균되며 이러한 과정에서 레이놀즈응력항($\overline{\rho u_i u_j}$)과 난류플럭스항($\overline{\rho u_i h}$)이 생성된다.

3.3. 물성 및 경계조건

해석 경계조건의 경우 설계값을 기반으로 하여 아래와 같이 설정하였다.

- inlet : 89 L/min (=6.03 kg/hr) at 25°C
- outlet : 1 atm
- heater : 0.663 kW
- wall : no-slip & adiabatic condition

Table 1. Constants in equations of property variation with temperature.

Property	A	B	C	D	E	F
Density, ρ [kg/m ³]	345.6	2.688				
Viscosity, μ 10 ⁷ [N s/m ²]	1.25 × 10 ⁻⁷	4.10 × 10 ⁻⁴	7.02 × 10 ⁻¹	6.70 × 10 ⁻¹		
Thermal Conductivity, k 10 ³ [W/m K]	3.01 × 10 ⁻¹⁵	1.47 × 10 ⁻¹¹	-3.31 × 10 ⁻⁸	-1.08 × 10 ⁻⁵	9.25 × 10 ⁻²	2.60 × 10 ⁻¹

Fig. 3. Thermal and flow characteristics inside small-scale reaction chamber.

유입구로 25℃ 공기가 89 L/min의 유량으로 유입하도록 하였고 토출구는 대기압조건을 부여하였다. 히터부의 열유속 조건을 설정하는데 있어서, 실제실험에서 전열히터가 안정화 되었을 때 예상되는 전력사용량 값 1.0 kW에 실제 실험에서 발생하는 방열 약 35%를 고려하여 설정하였다.

반응챔버 운전시 내부의 온도는 큰 폭으로 변화하기 때문에 해석상에서 온도변화에 따른 공기의 물성 변화를 반영해야 한다. 이와 관련하여 온도변화에 따른 밀도, 점도, 열전도도는 각각 지수함수 및 다항함수 형태로 나타낼 수 있다.²⁰⁾ 이를 위해 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX 내부에 저장된 CFX Expression Language 를 이용하여 식(9)-(11)와 같이 구성된 함수를 해석상에 적용하였으며 이때 각 식의 계수는 **Table 1**과 같다.

$$\rho(T) = A(T - B)^{-1} \quad (9)$$

$$\mu(T) = AT^3 + BT^2 + CT + D \quad (10)$$

$$k(T) = AT^5 + BT^4 + CT^3 + DT^2 + ET + F \quad (11)$$

3.4. 해석결과

Fig. 3은 수치해석결과를 나타낸 것으로, **Fig. 3(a)**와 같이 바닥면에서부터 높이가 0.142 m, 0.242 m인 단면을 추출하

여 다공판을 통과하기 전후의 열유동특성을 파악하고자 하였다. **Fig. 3(b)**의 유선 및 속도분포 결과로부터 유입된 공기는 좁은 환형유로를 지나면서 상대적으로 빠른 속도로 하부영역에 도달하며, 유입구와 토출구의 구조적 배치로 인해 하부영역에서 $-y$ 방향으로 유동이 쏠리면서 단면에서의 유동이 편심된다. 한편, 실제 반응챔버 다공판 위에는 촉매층이 배치되어 있으며 촉매층으로 진입하기 전 유동이 균일해야 반도체 폐가스가 담체표면에 균일하게 접촉할 수 있으며 이는 촉매의 분해율에 직접적인 연관이 있다. 이때 다공판을 통과하기 전후 단면에서 유동균일도 (UI : Uniformity Index)는 아래와 같이 정의되며 각각 78.7%, 85.2%로 다공판을 통과하면서 유동균일도가 다소 개선되었다.

$$UI = 1 - \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n |v_i - \bar{v}| A_i}{\bar{v} \cdot A} \quad (12)$$

여기서, v_i 는 격자 i 에서 속도크기, $\bar{v}$ 는 평균속도크기, A_i 는 격자 i 면적, A 는 총단면적을 나타낸다. **Fig. 3(c)**의 온도분포 결과와 같이 25℃ 공기는 히터로부터 열전달에 의해 점차 온도가 상승하여 하부에 이르렀을 때 히터근처 영역에서 국부적으로 최대 700℃ 이상의 온도를 가지게 되고 전체적으로 혼합되어 온도는 전반적으로 약 400℃ 내외 수준의 온도분포를 보이게 된다. 또한, $-y$ 방향으로 유동이

Fig. 4. Experimental setup of small-scale reaction chamber.

집중됨에 따라 온도 또한 국부적으로 높게 나타나며 다공판을 통과하기 전후 단면에서 온도편차는 각각 26.8°C, 18.6°C로 다공판을 통과하면서 유동이 다소 균일해짐에 따라 온도분포 또한 개선되었다. 전반적으로 다공판을 통과하면서 유동과 온도가 균일해지지만 실제 반응챔버에서 오염가스 분해율, 촉매의 교체주기 등을 고려한다면 추가적인 열유동특성을 개선하기 위한 설계가 보완되어야 할 것으로 판단된다.

4. 반응챔버 축소모델 실험

4.1. 반응챔버 제작 및 실험방법

반응챔버 축소모델 형상 및 실험장치 구성은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)와 같이 원통형태 반응챔버 상부에 입구 2개, 측면에 출구 1개가 위치하고 있으며 반응챔버 중앙부에는 다수의 온도센서를 설치하였다. 반응챔버 중앙부에 위치한 히터의 직경은 약 60.5 mm, 길이는 약 375 mm, 전열면적은 0.074 m²으로, 최대용량은 약 1.2 kW이다. 발열체는 iron-chromium-aluminium (FeCrAl) 합금을, 절연체로는 세라믹류를, 히터 커버로 고온부식에 강한 STS316 계열의 스테인리스강을 사용하였다. 히터는 고온 조건에서 장시간 운전됨에 따라 열선 늘어짐에 의한 쇼트문제를 최소화하기 위해 절연체의 하중, 절연체 구멍크기, 발열체 자유도를 고려하여 설계하였다. 공기가 다공판을 지난 후 유동이 균일해 지도록 다공판 직경을 5 mm로 설계하여 제작하였다. 반응챔버 축소모델 실험장치를 Fig. 4(b)와 같이 구성하였으며 수치해석과 동일하게 상온·상압 상태의 공기가 반응챔버 상부의 유입구로부터 89 L/min 유량으로 유입되도록 하였으며 약 400분 동안 운전하였다. 한편 유량조절 및 측정은 면적식 유량계를 사용하였으며, 입출구온도와 반응챔버 내부 온도분포측정을 위하여 k-type 열전대를 사용하였다. 온도 데이터 측정 및 수집은 데이터 수집 디바이스

Fig. 5. Temperature variation with time at monitoring points in the chamber.

(G사 GL240 data logger)를 이용하여 실시간 모니터링 하였다.

4.2. 실험 결과

축소반응챔버 입구, 출구, 반응챔버 내부에 관측점 3곳의 공기온도변화를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 반응챔버 내부의 상온의 공기는 히터로부터 열전달을 받아 초기에 급격하게 온도가 상승하다가 운전시작 후 약 50분이 지난 후에 약 220°C 정도 도달하게 되면 히터열전달량, 열손실량 사이의 평형을 서서히 이뤄가며 온도상승폭이 완만해진다. 전체실험시간은 약 386분 정도 소요되었으며 측정된 최종온도는 입구, 반응챔버내부, 출구 각각 26.2°C, 391.9°C, 338.1°C이다. 이때 엔탈피, 공기열전달률 및 반응챔버열효율을 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$h = c_p T \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_o - h_i) \quad (14)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{E_e} \quad (15)$$

Fig. 6. Comparison of temperature distribution between experimental and numerical results.

여기서, c_p 는 정압비열, $\dot{Q}$ 는 히터로부터 열전달률, $\dot{m}$ 는 공기유량, η 는 반응챔버 열효율, E_e 는 전기사용량, 하첨자 i 와 o 는 입구와 출구를 나타낸다.

이때 식(14)으로부터 계산된 공기열전달률은 680 W, 전력량계를 통해 측정한 히터전기사용량은 약 1,000 W이다. 히터로부터 사용된 전기에너지가 모두 열에너지로 전환되었다고 가정하면 반응챔버 열효율은 약 68%, 방열 손실이 약 32% 정도라는 것이다. 일반적인 방열손실 2~30%와 비교할 때 다소 높은 수준이며 이는 반응챔버 내 열적특성 관측을 위해 설치하였던 다수의 열전대를 통해 열이 외부로 방출된 것으로 판단된다. 따라서 반응챔버 원형모델 제작시 단열을 강화하고 전열히터의 형태를 개선하여 열전달 효과를 증대시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 실험과 해석결과를 비교 분석하기 위해 일정한 높이에서 90° 각도별 4개의 관측점(TC#2a~d)을 설정하여 측정된 온도값을 실험과 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 실험으로부터 측정된 온도는 TC#1부터 TC#4까지 순서대로 378.8°C, 373.5°C, 372.6°C, 369.5°C이며, 해석으로부터 측정된 온도는 TC#1부터 TC#4까지 순서대로 416.0°C, 391.9°C, 381.7°C, 379.8°C이다. 실험값과 해석값의 차이는 각도별로 최소 2.5%에서 최대 9.8%까지 나지만 평균적으로 유사한 온도 수준을 보였다. 또한 각도별 온도 분포를 보면 TC#2b, d에 비해 TC#2a에서 상대적으로 온도가 높게 나타나는 경향이 실험과 해석 모두에서 유사하게 나타났으며, 이를 통해 본 연구에서 사용한 해석기법의 타당성을 확보하였다.

5. 결론

본 연구에서는 반응챔버의 개선설계안 도출하기 위한 방법으로 상사법칙을 이용하였다. 상사법칙 기반으로 설계된 축소모델에 대해 3차원 열유동해석을 수행하였고 반응챔버 축소모델에 대한 실험을 통해 반응챔버 축소모델에 대한 열유동특성을 분석하였다. 주요 연구내용을 정리하면

다음과 같다.

- 1) 반응챔버 형상에 대한 기하학적 상사를 만족하기 위해 전열히터에 대한 형상을 무차원 변수화하여 비교하였으며, 운동학적 상사를 만족하기 위해 3가지 무차원 변수를 선정하여 비교하여 원형모델과 축소모델간의 상사성을 확보하였다.
- 2) 상사 설계된 축소모델에 대하여 전산유체역학을 이용한 수치해석을 수행하여 반응챔버 내 열유동특성을 파악하였다.
- 3) 제작된 축소모델 반응챔버에 대한 실험을 수행하였고 해석과의 비교분석을 통해 해석기법의 타당성을 확보하였다.

이와 같이 본 연구에서 수행한 스크러버 반응챔버에 대한 연구결과는 다양한 종류의 반응챔버를 설계하기 위한 기초자료로 활용 될 것으로 기대한다. 특히, 반응챔버 통과 후 고온 폐가스의 폐열을 활용할 수 있는 시스템이 적용된 반응챔버를 설계하거나, 스크러버 후단 세정시스템의 용수 사용량 및 세정효율을 개선할 수 있는 시스템을 설계할 때 유용하게 활용될 것으로 보인다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 글로벌 환경기술개발사업 중 Non-CO₂ 온실가스 저감기술개발 사업단(2017002420001)에서 지원받았으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Environment, Development of advanced eco-friendly treatment system for reducing the NO_x, CO, and greenhouse gases emission in semiconductor processing, South Korea: CS Clean Systems, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/089/5510181.pdf>(2009).
2. H. W. Park, W. B. Cha, S. H. Uhm, Highly efficient thermal plasma scrubber technology for the treatment of perfluorocompounds (PFCs), Appl. Chem. Eng., 29(1), 10-17(2018).
3. S. C. Kim, Y. N. Chun, Numerical analysis of a gliding arc plasma scrubber for CO₂ conversion, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 30(4), 339-349(2014).
4. L. S. Lebel, M. H. Piro, R. MacCoy, A. Clouthier, Y.-S. Chin, Concept for a cyclonic spray scrubber as a fission product removal system for filtered containment venting, Nucl. Eng. Des., 297, 60-71(2016).
5. A.-N. Huang, N. Maeda, S. Sunada, T. Fukasawa, H. Yoshida, H.-P. Kuo, K. Fukui, Effect of cold air stream injection on cyclone performance at high temperature, Sep. Purif. Technol., 183, 293-303(2017).
6. S. B. Seo, Y. K. Shin, I. C. Bang, Numerical analysis on spatial universality of similarity technique inside molten salt reactor

- system, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 116, 569-582(2018).
7. M. Ebrahimi, E. Siegmann, D. Prieling, B. J. Glasser, J. G. Khinast, An investigation of the hydrodynamic similarity of single-spout fluidized beds using CFD-DEM simulations, *Adv. Powder. Technol.*, 28(10), 2465-2481(2017).
8. G. Xu, Y. Li, H. Deng, H. Li, X. Yu, The application of similarity theory for heat transfer investigation in rotational internal cooling channel, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 85, 98-109(2015).
9. J. Y. Kim, Study on design of pneumatic test model for subscale gas management system, *Korean Society of Computatuonal Fluids Engineering*, 22(2), 66-72(2017).
10. N. K. Lee, J. H. Lee, S. K. Um, Computational modeling of multi-vessel steam generator by similarity analysis, *The Korean Society of Mechanical Engineers Fall Conference*, KSME, pp. 206-210(2017).
11. S. H. Yu, K. S. Bang, D. H. Kim, K. S. Lee, Evaluation of thermal-hydraulic and scaling characteristics for storage vault, *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 13(2), 131-140(2015).
12. H. S. Kim, M. S. Shin, D. S. Jang, Y. C. Choi, J. G. Lee, A numerical study on combustion characteristics of orimulsion fuel in a small-scale combustor, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 26(4), 494-500(2004).
13. S. Park, H. Chang, T. Zhao, Numerical study on the arrangement of AIG for determining the NH₃ concentration distribution in the package type of small scale SCR system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(5), 368-377(2011).
14. S. C. Han, U. Y. Kim, H. Park, N. S. Park, Application of hydraulic similarity to jar - test for optimizing dosages of coagulants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 23(11), 1865-1874(2001).
15. H. J. Lee, S. H. Cho, H. K. Kim, D. S. Kim, Experimental study on characteristics of temperature profiles inside a gas scrubber, *The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*, KSME, pp. 445-446(2016).
16. D. M. Godino, S. F. Corzo, N. M. Nigro, D. E. Ramajo, CFD simulation of the pre-heater of a nuclear facility steam generator using a thermal coupled model, *Nucl. Eng. Des.*, 335, 265-278(2018).
17. J. A. Yakoob, E. F. Abbas, Experimental investigation of convection heat transfer for laminar flow in an inclined annulus, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 5(4), 160-168(2014).
18. K. Manohar, K. Ramroop, A comparison of correlations for heat transfer from inclined pipes, *Int. J. Engi.*, 4(4), 268-278(2010).
19. ANSYS Incorporation, *The manual of ANSYS CFX*, Version 18.0, USA(2017).
20. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, 5th ed., John Wiley & Sons Inc., pp. 943(2007).