

수치해석 기법을 이용한 아크 플라즈마 반응기의 VOCs 분해성능 평가연구

박미정, 조영민*
경희대학교 환경응용과학과

Numerical simulation of VOC decomposition in an arc plasma reactor

Mi-jeong Park, Young-min Jo*

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University

요약 수도권 대기관리권역 내에서 발생하는 휘발성 유기화합물(VOCs)를 규제하고 있다. VOCs는 산업 활동 및 일상생활에서 많이 쓰이고 있는 유기용제에서 발생되고 있다. 특히 주거지역과 인접하게 위치하고 있는 도장 공정에서는 다량의 유기용제를 사용하고 있으며, 그에 대한 영향이 크게 나타날 것으로 예상된다. 도장 공정에서 배출되는 VOCs를 제거하기 위하여 다양한 기술이 개발되고 있다. 최근 플라즈마를 이용하여 유해 VOCs를 고온에서 분해하는 공정이 제시되었는데, 본 연구에서는 반응기 설계에 앞서 전산유체역학기법을 사용하여 초고온 공정 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 질량과 운동량에 대한 보존 방정식과 에너지 보존 방정식을 이용하였다. 원심력 반응기의 내부 유체유동은 내측 벽면을 타고 강한 선회류를 형성하면서 하부로 하강하는 것을 알 수 있었다. 플라즈마에 의한 고온 가스는 반응기 하부까지 영향을 주지만, 방사형 방향(radial direction)의 열전달은 거의 없는 것으로 나타났다. 시험용 VOCs인 톨루엔에 대한 분해효율을 계산한 결과, 반응기 전체에 대하여 67%가 얻어졌으며, 이는 실제 플라즈마를 이용한 실험실 규모의 실험 결과치인 약 70% 와 비교적 유사하게 나타났다.

Abstract A range of techniques have been being developed to remove the volatile organic compounds from painting processes. High temperature decomposition of harmful VOCs using arc plasma has recently been proposed, and this work analyzed the extreme hot process by computer-aided fluid dynamics prior to the reactor design. Numerical simulations utilized the conservation equations of mass and momentum. The simulation showed that the fluid flowed down along the inner surface of the centrifugal reactor by forming intensive spiral trajectories. Although the high temperature gas generated by plasma influences the bottom of the reactor, no heat transfer in radial direction appeared. The decomposition efficiency of a typical VOCs, toluene, was found to be a maximum of 67% across the reactor, which was similar to the value (approximately 70%) for the lab-scale test.

Keywords : Arc plasma, Numerical simulation, Reactor design, VOCs

1. 서론

2005년 7월부터 수도권 대기환경개선에 관한 특별법(제30조)에 의하여 수도권 대기관리권역내에서는 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 함

유기준에 적합한 환경친화형 도료를 공급하고 판매해야 하며, 사용자는 환경성이 높은 제품을 선택 및 사용해야 한다. 하지만, 환경친화형 도료라 하더라도 일정량의 VOCs가 함유되어 있어 대기오염 등의 원인이 되고 있다. VOCs는 특히 산업 활동과 일상생활에서 많이 쓰고

본 연구는 산업통상자원부 민·군기술적용연구사업의 “고농도 VOCs 분해용 고온 아크플라즈마 개발” 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. (과제번호 : 15-SF-EN-05).

*Corresponding Author : Young-min Jo(Kyung Hee University)

Tel: +82-10-7121-2485 email: ymjo@khu.ac.kr

Received April 27, 2016

Revised May 23, 2016

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

있는 유기용제로부터 많이 발생하며, 그 중 페인트 도장 시설(64.1%), 세정시설(16.5%), 세탁시설(6.4%) 및 기타 유기용제사용(13.0%) 순으로 발생되고 있다[2]. 또한, 자동차 정비 보수도장과과정에서 배출되는 VOCs의 배출량은 도장시설 범주 내에 차지하는 비율은 약 2% 밖에 되지 않지만, 주거지역과 인접한 곳에 위치하고 있어 그로 인한 영향이 더욱 크게 나타난다[3]. 따라서 환경부에서는 2015년 1월 1일부터 대기환경기준에 대표적인 VOCs인 벤젠의 농도를 10 ppm 이하로 지정하고 있다.

도장시설에서 발생하는 VOCs를 처리하는 방법으로 활성탄 흡착 또는 흡착 후 연소 등이 있으나, 활성탄 교체 주기, 재생시설 및 재생주기 등을 예측이 어려움이 있다. 축열식 소각로(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO) 또는 재생 촉매 산화제(Regenerative Catalytic Oxidizer, RCO)의 효율은 높으나 설치면적이 넓어서 소형 도장설비에 적합하지 않다는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위한 방법으로 장치가 비교적 간단하고 연속적으로 사용이 가능한 아크 플라즈마를 소형 도장시설에 적용하여 고농도 VOCs를 처리하는 방안이 최근 시도되고 있다. 평판형 전극으로 구성된 유전체 배리어 방전(DBD) 반응기를 이용하여 톨루엔을 최대 46% 저감됨을 확인하였으며 향후 실내 공간, 산업 후처리 사용 등 목표공간의 적용 가능성을 확인하였다[4]. 또한 석유화학공장에서 배출되는 고농도의 BTX를 Sliding Arc Plasma(SAP) 공정을 적용하여 벤젠 약 90%, 톨루엔 약 89%, 자일렌 약 84% 처리됨으로써 아크 플라즈마를 이용한 VOCs 제거에 대한 안정적인 처리와 다양한 기술 개발에 효과가 있을 것으로 기대된다[5].

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 컴퓨터 소프트웨어를 통해 유체의 유동 해석하는 연구방법으로 비용절감과 시간절약을 할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 목적은 CFD 모델을 이용하여 고온 플라즈마 반응기 내의 유동현상 및 온도 분포 등을 계산하여 열전달량을 예측해보는 것이다. 실제 plasma torch에서 발생하는 수천도의 온도를 직접 측정하기에는 무리가 있으며, 이에 대한 열대류 현상을 명확히 관찰하는 것은 용이하지 않다. 따라서 수치해석을 통해 반응기 내부에서 흐르는 유체에 대한 온도분포를 예측해보고, 고농도 톨루엔의 분해효율을 산출해보고자 한다. 이와 동시에 시험용 반응기를 통한 실험으로부터 유체분위기 조건과 기

타 변수에 대하여 측정값과 계산 값을 비교함으로써 scale-up 설계에 대한 사전 검증의 가능성을 제시하였다.

2. 연구방법

전산유체역학 패키지를 이용한 수치해석은 유체흐름과 열 및 물질전달량을 계산함에 있어서 기본적으로 필요한 연속방정식(Continuity equation) 및 운동방정식(Momentum equation)과 반응기 내부 열전달을 해석하기 위한 에너지방정식(Energy equation)을 전산해석에서 고려하였다. 수치해석은 상용 CFD 패키지인 FLUENT 16.1을 사용하였다. 이러한 상용 전산유체역학 해석 패키지는 층류 및 난류 유동, 열전달 문제 및 화학반응문제, 다상유동 등 다양한 물리적, 화학적 현상 등을 예측할 수 있는 기능을 포함하고 있다[6].

2.1 지배방정식

상온의 순수공기와 VOCs를 함유한 오염공기의 혼합에 대하여 질량과 운동량에 대한 보존방정식(governing equation)을 사용하였다. 아울러 고온 열원이 있으므로 에너지 방정식을 추가적으로 적용하여 열전달량을 계산하였다. $k-\epsilon$ 모델의 3차원 난류흐름과 대상 VOCs인 톨루엔의 분해반응을 해석하기 위하여 유입유체의 유속과 압력, 열원에서 방출하는 온도, 유입가스의 농도 등을 변수로 선택하여 계산하였다. 실제로 계산에 적용한 연속방정식과 Navier-stokes 방정식은 다음과 같이 요약해 볼 수 있다 [7-8].

- Mass conservation equation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad [1]$$

- Momentum conservation equation :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \rho \overline{U_i U_j} \right) \right] \end{aligned} \quad [2]$$

- Energy conservation equation :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) \\ & = \frac{\partial P}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad [3]$$

- Species transport equation :

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

여기서, G_k 항은 평균속도구배에 의한 난류운동에너지 생성을 나타내며, G_b 항은 부력에 의한 난류운동에너지 생성량을 나타낸다. Y_M 항은 압축적인 난류에서 전반적인 소산율 팽창성분의 분배량을 나타낸다.

2.2 수치해석

본 연구의 고찰대상인 Arc plasma 반응기의 형상은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 2개의 유입구가 접선방향으로 장착되어 있는 원통형 사이클론 형태를 가지고 있다. 지정된 농도의 톨루엔 가스 흐름은 상부의 화염이 분출되는 토치 주변으로 유입되면서 고온 분위기 가스흐름을 형성하며 하부 배출구까지 배출될 때까지 분해반응이 일어난다. 토치에서 발생하는 플라즈마 화염의 온도는 3000℃이며, 유입되는 가스 내 톨루엔의 농도는 300 ppm으로 지정하였다. 상부 좌우에서 동시에 진입하는 가스는 3 m³/min의 유량으로 12.5 m/s의 유속을 유지함으로써 일반적인 원심력에 기반한 난류혼합에 유효한 조건을 구성하였다. 반응기 재질은 스테인리스 재질로서 외부와 단열 처리되는 것으로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 반응기의 경계조건을 Table 1에 요약하였다.

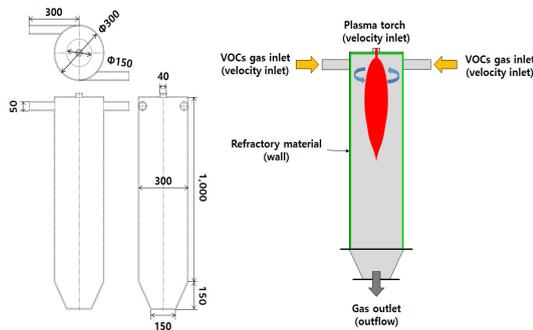


Fig. 1. Schematic configuration of test reactor.

Table 1. Parametric conditions for model calculation

Boundary	Types	Values
VOCs inlet	velocity inlet	3 m ³ /min, 300 K
torch inlet	velocity inlet	0.04 m ³ /min, 3000 K
outlet	outflow	zero diffusion flux for all variables
other sides	wall	standard wall function

수치해석을 위한 반응기 격자모델은 Workbench에 포함된 Geometry와 Mesh를 이용하여 10 mm의 크기로 정렬격자와 비정렬 격자를 혼합하여 약 123,000개의 Node와 약 690,000개 이상의 Element로 생성시켰다. 한편, 사용한 Eddy-dissipation 모델은 반응기 내에서의 화학반응 속도가 난류혼합에 의한 확산속도보다 훨씬 빠르다는 가정 하에 반응율을 계산하게 된다. 계산영역은 3차원으로 Continuity residual 값이 10⁻⁵ 이하로 감소하면, 결과 값이 수렴되어 계산이 끝나도록 설정하였다. 또한 계산의 정확성을 향상시키기 위해 모든 변수를 Second order upwind 조건으로 지정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응기 내부 유동현상 고찰

VOCs에 대한 연속분해반응을 유도하기 위하여 상대적으로 혼합효과가 뛰어난 접선유입 반응기 형태를 구성하였다. 이러한 반응기 내에서의 유체흐름 형태를 고찰하기 위하여 각각의 유입구로 유입되는 유체를 공기로 설정하여 단순화시킴으로써 계산의 속도를 높이고, 계산 결과에 대한 재현성과 이로 인한 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

반응기의 구조해석을 위한 첫 번째 단계로서 시험용 반응기 구조에 대한 유체 유입형태에 따른 내부 유동현상을 고찰하였다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 반응기 처리 목표유량인 3 m³/min에 준하여 처리대상 가스가 두 곳의 상부 접선방향 유입구에서 각각 12.5 m/s의 속도로 유입되도록 하였다. 고온 플라즈마 토치를 거쳐 반응기의 상부 유입구에서 공급되는 고온가스는 0.04 m³/min의 유량으로 수직으로 하강하며 반응기 내부로 공급되고 있다. Fig. 2 (a)에서 볼 수 있듯이 빠른 속도로 유입되는 접선 방향의 오염 가스는 반응기 내부 벽면을 타고 강한 선회류를 형성하면서 하부로 하강하는 것을 알 수 있다.

반응기 내부에서의 체류시간은 약 1.5 초 인 것으로 계산되었다.

Fig. 2 (b)는 토치에서 고온으로 가열된 공기가 반응기 내부로 유입되는 VOCs 함유가스와 얼마나 혼합이 잘 이루어질 수 있는가를 관찰한 계산결과이다. 유체 흐름의 모습에서 볼 수 있듯이 고온 가스는 오염가스의 내측면을 따라 하강선회기류를 형성한다. 즉, 강한 원심력에 의하여 상온의 오염 가스는 원통형 반응기의 안쪽 벽면을 따라 선회하면서 하강하여 하부 유출구를 통하여 빠져나간다. 반면에, 원통의 중앙 부위에서 유입되는 고온가스흐름은 상대적으로 바깥쪽에 위치한 오염가스흐름의 관성력에 의해 반응기로 유입되자마자 회전하기 시작하며, 이러한 선회력은 외측의 오염 가스량이 99% 이상으로 절대적으로 많기 때문에 매우 큰 driving force로 작용하는 것으로 보인다. 따라서 토치에 의해 가열될 적은 량의 가스는 접선방향으로 유입되는 오염가스와의 혼합 가능성이 매우 적을 것을 사료된다.

이러한 예측은 Fig. 2 (c)에서도 확인된다. 반응기 중앙부에는 유체혼합이 존재하지 않는 현상이 뚜렷이 나타나는 바, 가스의 특성상 중력에 의한 자유낙하 흐름형태가 발생하지 않는 것을 고찰할 수 있다. 그러나 제한된 공간이 주어지는 현장의 도장 공정 후단에 적용하기 위한 필연적인 구조로서 원심력 반응기를 설정하였다. 또한 시험가스로서 휘발성유기화합물 가운데 대표적인 톨루엔의 현장 농도인 300 ppm을 대상으로 분해효율을 계산해 보았다.

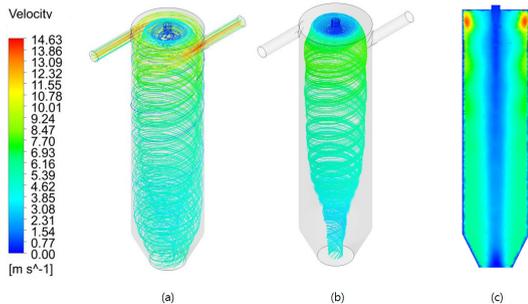


Fig. 2. Flow patterns in the reactor at room temperature; (a) tangential inlets and top torch; (b) streamlines of air flow-in from the top torch; (c) flow velocity profiles across the reactor.

원통형 원심력장치에서 흔히 발견되듯이 반응기 내측벽 접촉면에서는 유속이 거의 존재하지 않고, 벽면에 접근하면서 접선속도가 극대화됨으로써 하향류의 추진력을 지니게 된다. 본 반응기에서 상부 토치로부터 유입되는 공기량이 매우 적을지라도 접선 유입 가스는 일반 사이클론 반응기의 vortex finder를 거쳐 상부로 유출되는 현상은 전혀 발견되지 않았다. 따라서 유량의 불균형에 따른 유입가스의 역류나 사영역(dead zone)이 형성되는 것으로 보이지는 않는다.

3.2 반응기 내부 온도분포

수직으로 설치되는 반응기에서 열원이 상부에 존재함에 따라 병류형태의 유체흐름이 이루어진다. 즉, 차가운 오염가스와 3000 K의 초고온 가스흐름이 충돌하면서 강력한 열대류 현상이 발생할 것으로 추정된다. 다만 고온 가스의 부피가 상대적으로 미미하여 반응기 내에서 작은 열원(heat source) 형태로 머물 수밖에 없는 구조적 한계가 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 토치에서 기원한 열은 반응기의 하부까지 영향을 주는 것이 분명하지만 방사형 방향(radial direction)의 열전달은 거의 없는 것으로 밝혀진다. 거대 부피의 차가운 흐름이 적은 양의 고온 열원체를 머금은 Sink body 역할을 함으로써 온도부피 분포로 표기되지 못하는 것으로 보인다. 그러나 적은 양의 열매체에서도 고온 흐름과의 접촉면에 존재한 톨루엔 분자들은 순간적으로 분해될 수 있는 가능성이 충분할 것으로 사료된다.

따라서 총괄 열전달량 보다는 접촉면에서의 열전달 강도를 가정함으로써 일정량 이상의 톨루엔이 분해되어 소멸할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 2의 가스흐름에서 고찰할 수 있었듯이 반응기 내측벽면 부근에서 선회하면서 하강하는 오염 가스는 400 K 이하의 온도가 유지되는 것으로 나타났다. 실제로 하부 원추부를 포함한 총 높이 1.2 m의 수직형 반응기에서 오염 가스는 상부 0.25 m 이내에서의 고온 열체와 충돌하면서 열체를 급속히 냉각시킴과 동시에 강력한 열에너지 효과로 유해가스가 분해되는 것으로 추정된다(Fig. 3 참조). 그러나 반응기의 상부에서 0.1 m 이하에서는 1300 K까지 온도가 급강하하는 현상이 나타남으로써 고온 플라즈마 가스의 열에너지가 충분히 확산되어 톨루엔 분해에 소모되는 것으로 판단된다. 실제로 실험실 규모의 실험결과, 반응기에서 배출되는 가스의 온도는 323 ~ 353 K 정도로 측정되었다.

Fig. 4는 톨루엔의 열분해가 시작되는 것으로 알려지는 1,400 K의 온도를 지니고 있는 열원체의 형상을 추출하여 도시한 결과이다[9]. 이 온도범위를 유지하는 열유체 몸체(thermal flow body)는 길이 400 mm, 폭 100 mm의 원추형으로 구성되어 있다. 따라서 이 열체와의 직간접적인 접촉이나 내부를 통과하는 흐름이 구성될 때, 톨루엔 분자는 파괴되기 시작할 것이다.

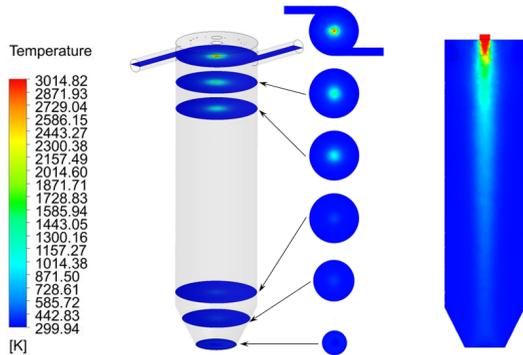


Fig. 3. Temperature profiles across the reactor.

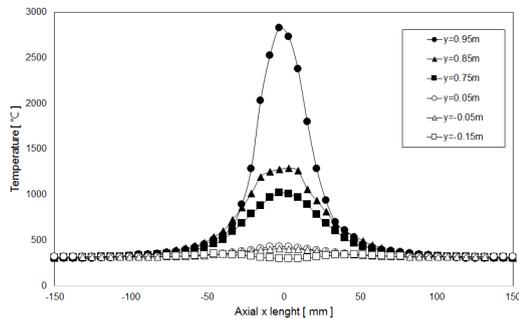


Fig. 4. Radial temperature profiles across the reactor.

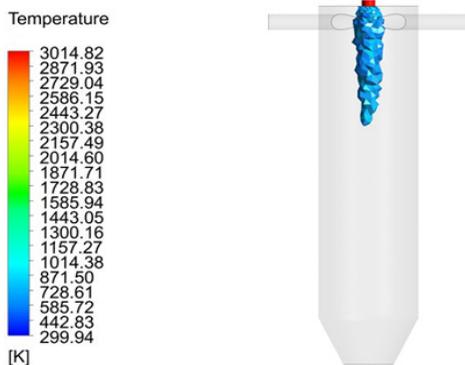


Fig. 5. Iso-surface body of the thermal flow at 1400 K.

3.3 고온에서의 톨루엔 열분해 반응효율 고찰

증기상 톨루엔은 산업현장에서 처리하기 매우 까다로운 물질이며, 배출원으로부터 포집하거나 열 또는 화학적으로 분해하기 어려운 유기물질이다. 실제로 톨루엔의 화학적 분해 kinetics는 수많은 연구에도 불구하고 정확히 알려져 있지 않고, 플라즈마에 의한 라디칼 분해 혹은 열분해는 여전히 연구대상으로 남겨져있다[10]. 환경적인 관점에서 난분해성 휘발성 유기화합물로 분류되는 증기상 톨루엔은 여러 가지 장치들을 거치면서 제거되는 효율에 초점을 맞춘 연구개발이 진행되고 있는 실정이다.

본 연구의 아크플라즈마 반응기에서 톨루엔은 함께 유입되는 충분한 양의 산소 분위기에서 산화분해되는 것으로 설정하였다. 고온의 열매체에서 산소분자들은 크게 활성화되어 반응성이 매우 높은 상태를 유지하며, 톨루엔 분자와 접촉하여 궁극적으로 이산화탄소와 물 분자를 형성하면서 분해된다고 가정하였다.

Fig. 6은 반응기 내부에서 발생하는 분해반응에 따라 변화되는 톨루엔의 질량기준 농도분포이며, Fig. 7은 톨루엔의 분해보로부터 발생하는 CO₂와 H₂O의 질량농도 분포도이다. 화학적 분해는 산화반응을 기초로 기상반응을 선정하였으며, 반응기 내부 압력은 1 기압을 유지시켰다. 톨루엔이 산소와 결합하면서 일으키는 반응은 발열 과정으로서 CO₂와 H₂O로 분해되면서 상당량의 열을 방출하였다. 따라서 반응을 고려한 수치계산에서 반응기 내부 온도분포를 계산정해 보았을 때, Fig. 8과 같은 결과를 구하였다.

톨루엔의 전환율은 앞서 예상한대로 온도분포도와 비례적인 관계를 보이면서 열체가 집중되어 있는 중앙부위에서 매우 낮은 농도값을 보여주었다. 그러나 반응기 하부로 유체흐름이 이동하면서 혼합 및 희석효과가 일어나 미반응되는 톨루엔에 의한 농도 재변화가 발생하였다. 즉, 이론적인 계산은 배출 농도가 평균 100 ppm에 이르는 것으로 나타났으나, 실험실 실험에서는 10 ppm 이하의 매우 낮은 수준을 유지하였다. 이는 실제 반응기 내에서의 열확산과 유체유동이 훨씬 활발하게 일어나고 있음을 입증해준다. 앞서 보았듯이 배출가스의 온도 또한 본 수치계산 보다 높은 값으로 측정되었던 바, 반응기 내부에서의 반응 전환율이 상당히 우수한 것으로 판단된다.

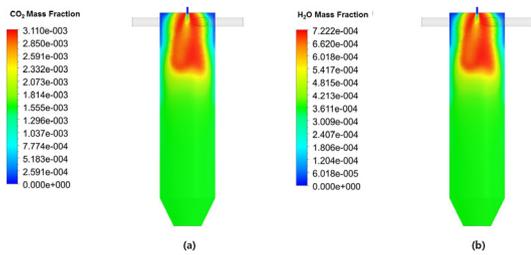


Fig. 6. Mass fraction of arc plasma reactor; (a) CO₂ mass fraction, (b) H₂O mass fraction.

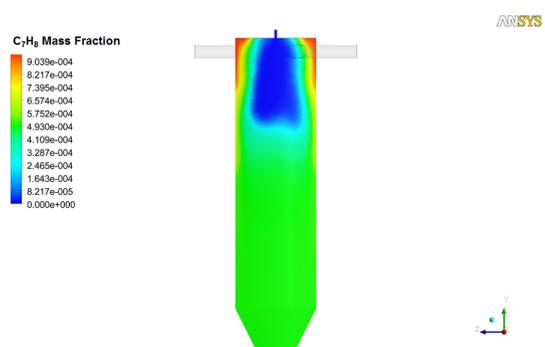


Fig. 7. Distribution of toluene mass fraction across the reactor.

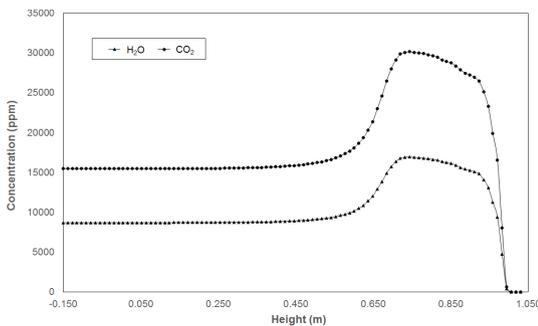


Fig. 8. Concentrations of reaction products with arc plasma reactor height.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학 기법을 이용하여 플라즈마 반응기 내에서의 열 분포와 유동 현상을 고찰하였다. 실제 도장 공정에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 목표 유량인 3 m³/min의 처리대상 가스가 집선 방향으로 빠

른 속도로 유입되면서 강한 선회류를 형성하였으며, 토치에서 고온으로 가열된 공기는 오염가스의 안 쪽에서 하상선회기류를 형성하는 것을 구체화하였다.

오염가스와 고온 토치가스흐름에 의해 형성되는 강력한 열대류 현상은 각각의 가스 유량차이로 인하여 약 320 - 350 K의 온도로 처리가스를 배출하는 것을 알 수 있었다. 그러나 방사형 방향의 열전달은 거의 없는 것으로 나타났다. 기체상 톨루엔은 1400 K부터 분해가 시작되므로 플라즈마에서 발생하는 적은 양의 열에너지로도 순간적으로 분해가 될 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 톨루엔은 열체가 집중되어 있는 부분에서 매우 낮은 농도 값을 보이는 바, 계산된 온도분포에 따라 톨루엔이 CO₂와 H₂O로 분해되는 경향이 있음을 확인하였다. 전산유체역학을 통하여 얻어진 이론적인 톨루엔의 분해 효율은 최대 67%까지 이었던 것으로 반해, 실제 실험으로부터 나타난 톨루엔의 분해효율은 90% 이상이었다. 따라서 실제 반응기 내부에서 발생하는 유체의 반응 전환율이 훨씬 우수한 것으로 사료된다.

Nomenclature

G_k : 평균속도구배에 의한 난류운동에너지 생성

G_b : 부력에 의한 난류운동에너지 생성

Y_M : 압축성인 난류에서 전반적인 소산율 팽창성분의 분배

References

- [1] The Special Act on Seoul Air Quality Improvement.
- [2] Ministry of Environment, "National Air Pollutants Emission", 2005.
- [3] Ministry of Environment, "Vehicle Maintenance Facility VOC paint Environmental Management Guidelines", 2004.
- [4] J. H. Park, Y. S. Jo, K. Y. Yoon, J. H. Byeon, J. H. Hwang, "Removal of Gaseous Toluene using a Plate-type Dielectric Barrier Discharge Reactor", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 26, No. 6, pp. 641-648, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2008.24.6.641>
- [5] W. T. Kwon, L. S. Kwon, W. S. Lee, "BTX Treatment of a Petrochemical Plant by Sliding Arc Plasma", Transactions of Korean institute of fire science and engineering Vol. 29, No. 6, pp. 65-70, 2015.

- [6] Zhongzhong Zhang, "Computational fluid dynamics modeling of a continuous tubular hydrothermal liquefaction reactor", Thesis, University of Illinois at urbana-Champaign, 2013.
- [7] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", The Finite Volume Method (Second Edition). Longman, New York, pp. 1 - 38, 2007.
- [8] C. S. König, M. R. Mokhtarzadeh-Dehghan, "Numerical Study of Buoyant Plumes from a Multi-flue Chimney Released into an Atmospheric Boundary Layer", Atmos. Environ, Vol. 36, pp. 3951 - 3962, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00310-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00310-2)
- [9] M. A. Oehlschlaeger, D. F. Davidson, R. K. Hanson, "Thermal decomposition of toluene: Overall rate and branching ratio," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, No. 1, pp. 211-219, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.002>
- [10] A. N. Trushkin, I. V. Kochetov, "Simulation of toluene decomposition in a pulse periodic discharge operating in a mixture of molecular nitrogen and oxygen", Plasma Physics Report, Vol. 38, No. 5, pp. 407-431, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063780X12040083>

박 미 정(Mi-jeong Park)

[정회원]



- 2015년 2월 : 경희대학교 대학원 환경응용과학과 (공학석사)
- 2015년 3월 : 경희대학교 대학원 환경응용과학과 (박사과정)

<관심분야>

환경수치해석, 대기오염제어, 대기확산

조 영 민(Young-min Jo)

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 1996년 11월 : University of New South Wales 대학원 (공학박사)
- 1986년 1월 ~ 1991년 5월 : 대우 전자(주) 연구개발부 주임연구원
- 1997년 3월 ~ 1998년 3월 : Singapore National University 화학공학과 환경연구소 선임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 경희대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

대기오염제어, 환경화학, 폐기물 소각 등