

반응부의 유동해석을 통한 열플라즈마 가스처리기의 효율 개선

논 문
60-3-31

A Study in The Efficiency Improvement of Thermal Plasma Gas Processor Through Fluid Dynamics Analysis of Reaction Zone

서 문 준* · 정 진 도** · 구 경 완†
(Jun SeoMun · Jin-Do Chung · Kyung-Wan Koo)

Abstract - This study explores the numerical analysis method of fluid dynamics in the reaction section to improve the gas processing efficiency in the hazardous gas removal by atmospheric thermal plasma. This study also intends to contribute in technology advance to improve the processing efficiency and make the process more stable. Numerical analysis of temperature distribution in the reaction section dependent on the change in flow velocity of Ar and plasma temperature change, which are major control variables in the cracking process of HFC-23 using arc plasma, was done. The characteristic of incoming oxygen by temperature suggested that when temperature increased to 1600K, 1700K, 1800K respectively, the range of cracking temperature 1500K increased to 75.0%, 83.3%, 90.2% respectively. The temperature change of Ar by velocity change was widest in the area higher than 1500K when the velocity was 2.5m/s; however, since there was no big difference when the velocity was 2m/s, it is believed that 2 m/s would be most proper.

Key Words : Arc plasma, Temperature distribution, Flow pattern

1. 서 론

합불소가스는 지구온난화 물질로서 현재 반도체 등의 산업계에서 이들에 대한 처리가 이슈로 부각되고 있다. HFC-23는 비록 발생량이 이산화탄소보다는 적지만 지구온난화지수(Global Warming Potential : GWP)가 이산화탄소에 비해 최대 수만배 정도 높기 때문에 지구온난화에 큰 영향을 미치고 있어 전처리 및 후처리 등을 통해 그 배출량을 감소시켜야 한다. 국내의 경우 세계적인 경쟁력을 갖춘 반도체 산업은 세계 반도체 협의회에서 체결된 자발적 감축협약을 통해 HFC-23 배출량을 2010년까지 1997년을 기준으로 10% 감축하기로 되어 있다.

현재 HFC-23의 처리는 외국의 소각기법을 적용하고 있으나 탄화수소의 연료와 함께 불소화합물을 연소시키고 다시 급냉시키기 때문에 기인되는 낮은 열효율, 제거 대상의 가스보다 약4배 이상의 공기주입이 필요한 것, 합불소가스 분해를 위한 긴 체류시간 유지로 장치소형화 곤란 등의 문제점이 나타나고 있다. 따라서 HFC-23의 무해화를 위한 열분해 시스템의 장기적 안전성 확보, 에너지 절감, 처리효율의 고효율화 및 HF에 의한 이차오염을 방지하기 위한 신기

술개발이 필요하다. 한편 생산공정에서 배출되는 HFC-23은 CO₂와 비교한다면 저감이 상대적으로 용이하고 지구온난화 지수가 높아 탄소배출권 획득 측면에서 상당히 유리하다. 지금까지 알려진 기술은 배출되는 PFCs, HFCs, SF₆와 같은 불소화합물을 효과적으로 분해시키는 신뢰성이 있는 방법으로는 태우는 직화방법과 Plasma를 이용한 분해법으로 대별할 수 있는데, 그 이유로서는 합불소가스를 처리하는 시스템은 아주 간단한 구조에 내구성이 있고 유지보수가 간단한 형태의 시스템이 필요하기 때문이다.

HFC-23의 처리는 플라즈마에 의한 방식, 연소에 의한 방식, 촉매에 의한 방식 등이 있으며, HFC-23를 처리하기 위해 열플라즈마 공정의 적용이 활발히 시도되고 있다. 플라즈마에 의한 방식은 저온플라즈마를 이용하는 방식[1]과 열플라즈마를 이용하는 방식으로 구분할 수 있다. 저온플라즈마를 이용하는 방식의 경우 대용량으로 가스를 처리하기가 어렵고, 경우에 따라서는 감압된 상태에서 운전하여야 하므로 상압에서의 열플라즈마를 이용하는 방식이 더 효율적이다. 따라서, 본 연구에서는 상압 열 플라즈마에 의한 유해가스 제거기술의 처리효율 개선을 위해 J. Szekely, J. W. Mckelliget 그리고 M. Choudhary[2][3] 등 선행 연구자들의 실험 및 수치해석, B. Liu, T. Zhang와 D. T. Gavne[4]의 플라즈마 제트의 유동장에 대한 연구[5][6] 등을 고려하여 반응부의 유동을 수치해석적 방법[7]을 통해 연구하고, 처리효율과 안정적 공정의 개선을 위한 기술개발에 이바지하고자 한다.

* 준 회 원 : 호서대 공대 반도체디스플레이공학과 석사

** 비 회 원 : 호서대 공대 환경공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 호서대 국방과학기술학과 교수

E-mail : alarmkoo@hoseo.edu

접수일자 : 2011년 1월 18일

최종완료 : 2011년 2월 18일

2. 수치해석 방법

2.1 이론적 접근방법

플라즈마에 의하여 형성되는 유동장은 플라즈마 내 아크와 기체간의 상호작용과 주변의 혼합영향, 입자간의 운동에너지 등을 고려하여야 하지만 이들을 모두 고려하여 수치해석을 수행하기에는 어려움이 있어, 본 연구에서는 아크방전이 일어났다는 가정 하에 아크를 고온의 유체로 가정하여 온도분포 및 유속분포를 상용코드인 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 압력을 계산하기 위해서는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였으며, 정상상태 정상유동(Steady state steady flow : SSSF)를 가정하였다.[8][9]

2.2 지배방정식[10][11]

유동장의 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식을 사용하였다.

2.2.1 연속방정식

밀도가 다른 기체의 혼합물에 대한 연속방정식은 다음 식과 같다.

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

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

여기서 \vec{v}_m 은 질량평균 속도, ρ_m 은 혼합물의 밀도, α_k 는 k기체의 몰분율을 나타낸다.

2.2.2 운동량방정식

모든 기체의 운동량 방정식은 개별적 운동량 방정식의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] \\ + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (6)$$

여기서 n은 밀도가 다른 기체의 수, \vec{F} 은 질량력, μ_m 은 혼합기체의 점도, $\vec{v}_{dr,k}$ 은 기체 k의 속도이다.

2.2.3 에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k E_k + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (7)$$

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (8)$$

여기서 k_{eff} 는 유효 열전도도($\sum \alpha_k (k_k + k_i)$), k_i 는 난류열전도도, S_E 은 열생성항을 나타낸다. 압축성 기체에 대해서는 식(8)과 같이 나타내며, 비압축성기체에 대해서는 $E_k = h_k$ 로 나타낸다. 여기서 h_k 은 기체 k에 대한 엔탈피를 나타낸다.

3. 수치해석 조건

3.1 경계조건

국내 M사의 플라즈마장치를 모델로하여 수치해석을 수행하였으며, 이 장치는 반도체 공정에서 나오는 함불소가스를 처리하는 장비와 같은 구조를 가진다.

반응부 내의 유동장을 분석하기 위해서 반응부를 Section a, b, c의 단면으로 나누어 설정하였으며, 플라즈마 토치의 운전조건은 Table 1과 같다. 플라즈마에 투입되는 가스는 Ar가스로 적용 유량은 유입구 유속이 최대일 때를 기준으로 0.5m/s씩 감소시켜 적용하였다. 이러한 해석대상은 Fig. 1과 같이 모델링하였으며, 격자수는 총 13700여개 이다.

표 1 플라즈마 토치의 작동조건

Table 1 Operating condition of plasma torch

Electric capacity	9~14 [kW]
Oxygen inlet flow rate	0~100 [l/min]
PFC inlet flow rate	0~100 [l/min]

격자의 벽면은 no-slip 조건으로 속도를 0으로 가정하였고, 1,600~1,800K으로 Ar 유입구의 온도조건을 주었다. Table 2은 HFC-23의 물리적 성질[12]을 Table 3은 경계조건을 정리한 것이다.

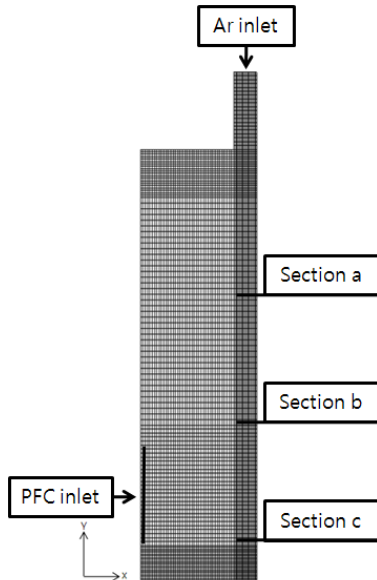


그림 1 계산격자와 경계조건
 Fig. 1 Calculation mesh and boundary condition

표 2 HFC-23의 물리적 성질
 Table 2 Physical properties of HFC-23

Density	3.1715 [kg/m ³]
Thermal conductivity	1.0183×10 ⁻⁴ [w/mK]
Viscosity	0.0144 [kg/ms]
Cp	1.5684×10 ⁻⁴ [j/kgK]

표 3 경계조건
 Table 3 Boundary conditions

Inlet (Ar)	Speed : 1.5 ~ 2 [m/s] Static Temperature : 1,600 ~ 1,800 [K]
Inlet (HFC-23)	Speed : 0.02 [m/s] Static Temperature : 298 [K]
Outlet (Mixture)	Average Static Pressure : 0 [Pa]

4. 결과 및 토론

아크 플라즈마를 이용한 HFC-23의 분해과정 중 주요 제어변수인 플라즈마의 온도 변화와 Ar의 유속변화에 따른 반응부 내부의 온도분포를 중점으로 수치해석을 수행하였다.

4.1 토치의 온도변화에 따른 반응부 내 온도분포

Fig. 2~4은 유입 Ar의 온도 변화에 따른 반응부 내 단면

a, b, c(Fig. 1)에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 모든 단면에서 유입 Ar의 온도가 높을수록 분해 가능 온도인 1500K 이상의 영역이 증가함을 알 수 있다.

아크 유출부로부터 가장 가까운 단면인 단면 a의 경우(Fig. 2), 1500K 이상의 영역이 반응부 내부 전체 길이 중 차지하는 비율은 유입 Ar의 온도가 1600K, 1700K, 1800K으로 증가함에 따라, 각각 약 75.0%, 83.3%, 90.2%로 증가한다. 이것은 온도 100K 당 약 7.6% 증가하는 결과이며 분해영역이 온도에 비례하여 증가하는 경향을 나타냄을 의미한다.

단면 b (Fig. 3)에서는 분해영역은 증가하나 유입 Ar 온도의 증가에 따른 분해영역의 폭이 증가하는 비율이 단면 A와 비교하여 약 50% 정도 감소해, Ar의 유입온도를 유지하는 최고온도 영역은 증가하고 반대로 1500K 이하의 영역에 형성되는 최저온도는 하강한다. 즉 최고온도에서 최저온도로 하강하는 영역이 좁아져 온도의 변화의 기울기가 매우 커진다.

단면 c의 경우는 단면 a와 유사한 온도변화의 패턴을 보이나, 열전달이 지속적으로 이루어져 분해영역은 확대되고 최저온도도 상승한다.

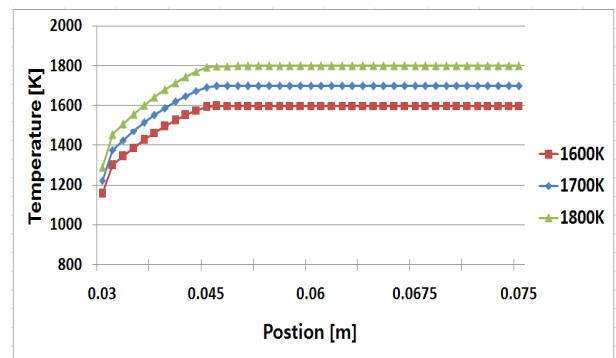


그림 2 온도변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section a)
 Fig. 2 Temperature distribution in reacting zone as temperature variation(Section A)

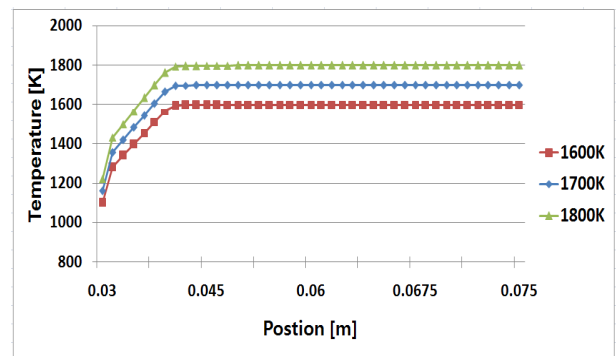


그림 3 온도변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section b)
 Fig. 3 Temperature distribution in reacting zone as temperature variation(Section B)

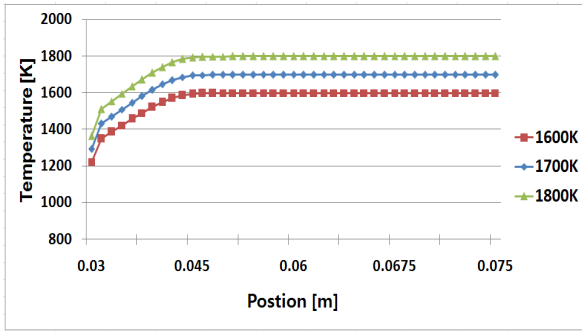


그림 4 온도변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section c)
 Fig. 4 Temperature distribution in reacting zone as temperature variation(Section c)

플라즈마 토치 온도변화에 따른 반응부 내 온도분포를 살펴보면 1800K일 때 분해온도의 영역이 가장 넓은 것으로 나타났다. 그러나 에너지사용량에 따른 효율을 감안하면 1700K일 때가 가장 이상적인 토치온도라고 사료된다.

4.2 유입가스(Ar)의 유속변화에 따른 온도분포

Fig. 5~7은 1700K일 때 유입 Ar의 유속변화에 따른 반응부 내 단면 a, b, c에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 모든 단면에서 유입 Ar의 유속이 빠를수록 분해 가능 온도인 1500K 이상의 영역이 증가함을 알 수 있다.

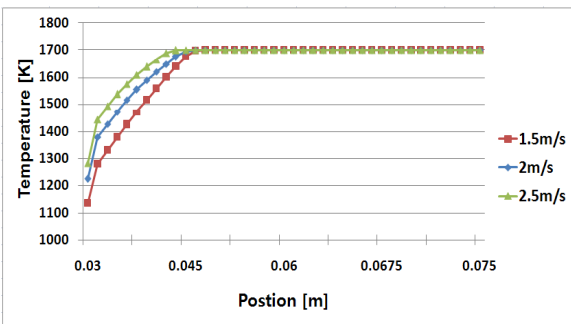


그림 5 유속변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section a)
 Fig. 5 Temperature distribution in reacting zone as velocity variation(Section a)

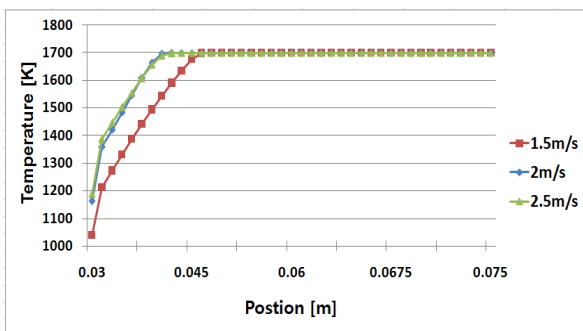


그림 6 유속변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section b)
 Fig. 6 Temperature distribution in reacting zone as velocity variation(Section b)

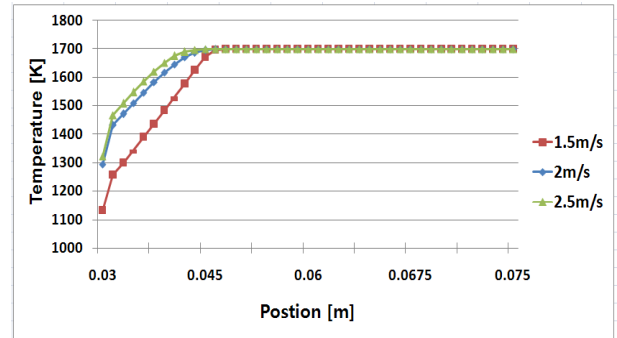


그림 7 유속변화에 따른 반응부 내 온도분포(Section c)
 Fig. 7 Temperature distribution in reacting zone as velocity variation(Section c)

아크 유출부로부터 가장 가까운 단면인 단면 a의 경우 (Fig. 5), 1500K 이상의 영역 유입 Ar의 유속이 증가함에 따라, 어느 정도 유속에 비례하여 증가하는 경향을 나타내나, 단면 b (Fig. 6)에서는 유속이 2m/s인 경우에만 증가하고 1.5m/s 및 2.5m/s인 경우는 큰 변화가 없는 결과를 나타낸다. 특징적인 것은 유속이 2m/s 및 2.5m/s인 경우, 상대적으로 최고온도 영역의 증가로 인해 온도 변화의 기울기가 커져 최저온도가 하강하는 결과를 나타낸다는 것이다.

단면 c의 경우는 단면 a와 유사한 온도변화의 패턴을 보이며, 열전달이 지속적으로 이루어져 분해영역은 확대되고 단면 b에서 하강하였던 최저온도도 다시 상승한다.

이상의 결과로부터 유입 Ar의 온도변화는 온도에 비례하여 분해영역이 확대되는 결과(Fig. 2~4)를 나타내나, 유속의 경우는 장비의 구조, 물리적 조건, 유동장의 형상 등에 따라 투입 에너지 대비 분해효율 높은 최적의 Ar 유입 속도가 존재할 가능성이 있음을 알 수 있다.

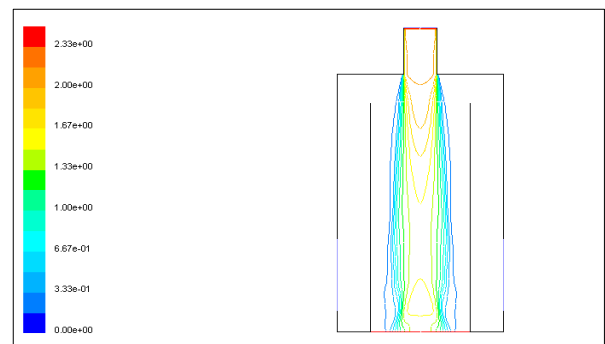


그림 8 반응부 내 속도분포
 Fig. 8 Velocity distribution in reacting zone

Fig. 8은 유입가스(Ar)이 2m/s일 때 반응부 내의 속도분포를 나타낸 것이다. 유동장 내의 유속은 0.33m/s에서 2.00m/s 정도로 넓게 분포하고 있으며, HFC-23과 접촉하는 아크표면의 유속은 아크 중심부의 유속과 비교하였을 때 최대 약 1.67m/s의 차이를 나타낸다. 이는 상대적으로 저속이나 밀도가 큰 기상의 HFC-23과 고온의 Ar이 상호 간의 운동량 및 에너지 교환을 통해 상대속도의 차가 감소하는 구

간입을 나타내는 것이며, 이 영역에서 분해에 필요한 온도인 1500K 이상을 유지하므로 이러한 영역의 크기의 대소가 분해효율에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 아크 플라즈마를 이용한 HFC-23의 분해과정 중 주요 제어변수인 플라즈마의 온도 변화와 Ar의 유속변화에 따른 반응부 내부의 온도분포를 중점으로 수치해석을 수행하였다. 유입산소의 온도별 특성을 보면 각각 1600K, 1700K, 1800K으로 온도가 증가함에 따라, 분해온도인 1500K의 영역이 약 75.0%, 83.3%, 90.2%로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 1800K일 때 분해온도의 영역이 가장 넓은 것으로 나타났다. 그러나 에너지사용량에 따른 효율을 감안하면 1700K일 때가 가장 이상적인 토치 온도라고 사료된다. 유속별 특성에서는 어느 정도 유속에 비례하여 증가하는 경향을 나타내나, 단면 b 에서는 유속이 2m/s인 경우에만 증가하고 1.5m/s 및 2.5m/s인 경우는 큰 변화가 없는 결과를 나타낸다. 이는 온도의 변화와 유속의 변화를 주었을 때 모두 온도영역이 변화가 일어나지만 온도 변화에서는 온도에 비례하여 분해영역이 확대되고, 유속변화에서는 장비의 구조, 물리적 조건에 따라 투입 에너지 대비 분해효율이 달라질 수 있다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 호서대학교 교내연구비(2009-0568)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김석준 : 저온 플라즈마를 이용한 유해가스 처리기술 개발, 한국기계연구원 보고서, pp. 14-17 (2001)

[2] J. Mckelliget and J. Szekely, 5th Arc furnace meeting, Budapest, Hungary, (1985)

[3] J. Szekely, J. Mckelliget and M. Choudhary : Heat-Transfer fluid flow and bath criculation in electric arc furnacse and DC plasma furnaces, Ironmaking and Steelmaking, vol. 10, no.4, pp 169-179, 1983

[4] B, Liu, T. Zhang and D. T. Gavane : Computation analysis of the influence of process parameters on the flow field of a plasma jet, Surface and Coating Technology, 132, pp. 202-216, 2000

[5] Energy and Environmental Research Corporation, Global Approach for Enhanced Mass Transfer Effects In-Duct Flue Gas Desulfurization Processes, Vol. 1, Literature Review, DOE Contact No. DE-AC22-88PC88873, DOE Report No. : DOE/PC/88873-T6-Vol.1.

[6] Stouffer, M. R., Yoon, H., Burke, F. P., "An Investigation of the Mechanisms of flue gas Desulfurization by in duct dry sorbent injection", Ind eng. Chem. res., vol. 28, no. 1, pp. 20-27, 1989

[7] 황기웅, 이홍식, 최경일, 김윤택, "플라즈마 내에서의 전자장 해석", 대한전기학회논문지, 제39권, 4호, pp. 52-56, 1990. 4.

[8] 정진도, "상압 열플라즈마 발생부 및 반응부의 유동 및 혼합과정 해석", 한국과학기술연구원 보고서, pp. 4-6, 2010

[9] Chung, J. D., Kim, J. W. and Park, Y. M., "A study on vortex generators to improve the mixing rate inthe dry sorbent injection process of the gas desulfurization system", Korea J. Chem. Eng., Vol. 27, No. 1, pp. 83-90 (2010)

[10] 정진도, 김장우, 서문준, 이중기, "아크 플라즈마 발생부 및 반응부의 유동 및 혼합과정 수치해석", 폐기물자원순환학회, vol. 27, no. 6, pp.484-490, 2010

[11] ANSYS, ANSYS FLUENT 6.3 User's Guide, 2005

[12] DuPont : Thermodynamic Properties of HFC-23 (trifluoromethane), T-23-ENG

저 자 소 개



서 문 준 (西門俊)

1983년 12월 25일생. 2009년 호서대학교 공대 환경공학과 졸업. 2011년 호서대학교 일반대학원 반도체디스플레이공학과 졸업(석사).

Tel : (041)548-3521

E-mail : midobann@naver.com



정 진 도 (鄭 鎮 度)

1960년 9월 23일생. 1983년 충남대학교 기계교육공학 졸업. 1985년 충남대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1990년 충남대학교 대학원 열유체공학 졸업(박사). 1996년 일본 가나자와대학원 환경공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 환경공학과 교수

Tel : (041)540-9566

E-mail : jdchung@hoseo.edu



구 경 완 (丘 庚 完)

1961년 2월 5일생. 1983년 충남대학교 전자공학교육학과 졸업. 1985년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1992년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수.

Tel : (041)540-9541

E-mail : alarmkoo@hoseo.edu