

생활폐기물 소각장 2차 연소로에서 요소용액을 이용한 선택적무촉매환원 공정에 대한 전산유체역학 모사 및 현장 검증

강태호* · 뉘엔 타인* · 임영일*[†] · 김성준** · 엄원현** · 유경선**

*한경대학교 화학공학과 화학기술연구소 FACS 연구실
456-749 경기도 안성시 석정동 67
**광운대학교 환경공학과
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1
(2008년 9월 5일 접수, 2009년 8월 14일 채택)

Computational Fluid Dynamics(CFD) Simulation and *in situ* Experimental Validation for the Urea-Based Selective Non-Catalytic Reduction(SNCR) Process in a Municipal Incinerator

Tae-Ho Kang*, Thanh D. B. Nguyen*, Young-Il Lim*[†], Seong-Joon Kim**, Won-Hyeon Eom** and Kyung-Seun Yoo**

*Lab. FACS, RCCT, Department of Chemical Engineering, Hankyong National University, Seokjeong 67, Anseong-si, Gyeonggi 456-749, Korea

**Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Nowon-gu, Wolgye-dong, Seoul 139-701, Korea

(Received 5 September 2008; accepted 14 August 2009)

요 약

생활폐기물 소각장에서 발생하는 질소산화물(NO_x)을 저감을 위한 요소용액 이용 선택적 무촉매 환원(SNCR: selective non-catalytic reduction) 상용화 공정에 대하여 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics) 모델을 개발하였고, 이 모델은 현장 실험결과로 검증되었다. 저 농도 일산화탄소와 12% 과잉공기 조건에서 요소와 질소산화물간의 7개 화학반응식과 액적의 증발과정을 포함하는 3차원 난류반응 흐름 CFD 모델은 소각로에 설치된 SNCR 공정의 유체역학 모사를 위하여 사용하였다. 본 SNCR 공정에서는 정면 노즐 1개와 측면 노즐 2개를 사용하여 2차 연소로 내에 요소용액을 공기와 함께 분사하였다. 3개의 노즐에 동일유량으로 $\text{NSR}=1.8$ 에서 요소용액과 공기를 분사할 경우, 출구온도는 현장 실험값과 모사값이 일치하며, 질소산화물 저감효율은 실험에서는 57%, CFD 모사에서는 59%를 보여주었다. 각 노즐 별 분사유량의 비율을 변화하면서 수행된 CFD 모사 결과에서는 3개의 노즐에 동일 유량을 분사하는 것보다 정면 1개 노즐에 측면노즐 유량의 2배를 분사하는 것이 약 8% 높은 질소산화물저감 효율을 보여주었다.

Abstract – A computational fluid dynamics(CFD) model is developed and validated with on-site experiments for a urea-based SNCR(selective non-catalytic reduction) process to reduce the nitrogen oxides(NO_x) in a municipal incinerator. The three-dimensional turbulent reacting flow CFD model having a seven global reaction mechanism under the condition of low CO concentration and 12% excess air and droplet evaporation is used for fluid dynamics simulation of the SNCR process installed in the incinerator. In this SNCR process, urea solution and atomizing air were injected into the secondary combustor, using one front nozzle and two side nozzles. The exit temperature(980 °C) of simulation has the same value as *in situ* experiment one. The NO_x reduction efficiencies of 57% and 59% are obtained from the experiment and CFD simulation, respectively at $\text{NSR}=1.8$ (normalized stoichiometric ratio) for the equal flow rate ratio from the three nozzles. It is observed in the CFD simulations with varying the flowrate ratio of the three nozzles that the injection of a two times larger front nozzle flowrate than the side nozzle flowrate produces 8% higher NO_x reduction efficiency than the injection of the equal ratio flowrate in each nozzle.

Key words: NO_x Reduction, SNCR(selective non-catalytic reduction), Urea Solution, Incinerator, CFD(computational fluid dynamics), Nozzle Flowrate Ratio

1. 서 론

소각에 의한 폐기물 처리는 폐기물의 감량화 및 폐열 이용 등의 장점과 국토 면적이 협소한 국내 여건상 매립지 확보의 어려움을

해결하기 위한 대안으로 주목 받고 있으며, 소각로를 이용한 폐기물 처리의 비율이 매년 증가추세에 있다. 그러나 폐기물의 불완전 연소로부터 발생하는 많은 대기 유해 물질들로 인하여 폐기물 소각 시설의 환경문제가 지속적으로 대두되어 왔다[1].

소각로의 연소실은 폐기물을 연소시키는 과정에서 소각이라는 기본적인 목적 이외에 폐기물 연소의 특성상 각종 공해 물질을 방출

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: limyi@hknu.ac.kr

하게 된다. 이 공해 물질을 효과적으로 억제하기 위해서는 폐기물의 연소에서 발생하는 불균일한 조성의 연소가스를 고온의 분위기에서 효과적인 혼합 및 충분한 체류시간을 갖도록 연소실을 설계 및 운전해야 한다. 특히 체류시간은 다이옥신류 등의 독성물질을 파괴하기 위한 시간을 확보한다는 측면에서 매우 중요한 것으로 알려져 있다[2]. 소각로에서 발생하는 오염물 중 질소산화물을 제거하기 위해 사용되는 선택적 무촉매 환원법(SNCR: selective non-catalytic reduction)은 850~1,175 °C 온도의 배출가스에 요소용액이나 암모니아를 분사해 질소산화물을 질소와 수증기로 환원시키는 탈질 기술이다[2,3]. SNCR 공정은 발전소, 소각로, 보일러 등과 같은 고정원으로 부터 질소산화물(NO_x)을 저감시키기 위한 경제적인 연소 후 기술로 알려져 있어 관련 산업체에서 많은 관심을 보여왔다[3-6]. 이 공정은 별도의 촉매를 사용하지 않고 배출가스에 분사하는 환원제로서 암모니아 용액이나 요소용액을 사용한다. 이 중에서 요소 용액은 암모니아에 비해 취급의 용이성과 안전성으로 인하여 폭넓게 사용되고 있다[7-11]. 실제 소각로에서 SNCR 공정은 (1) 배가스와 환원제간의 혼합, (2) 반응온도, (3) 체류시간이 적합한 균형을 이룰 때 최적의 효율을 나타낸다[3].

친환경적 소각로를 개발하기 위한 연구에 있어서, 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics)은 소각로 내부의 열유동 및 배가스 농도와 공정성능 예측을 위하여 이용되어 왔다[12]. CFD란 컴퓨터를 이용한 수치해석기법을 통하여 유체(액체 및 기체)의 속도 흐름이나 열전달 현상, 화학반응, 연소 현상, 확산 현상 등과 같은 물리·화학적 현상들을 해석하는 도구이다. 소각로에서 일어나는 각종 물리·화학적 현상을 CFD를 이용하여 해석하는 경우, 이를 실험적으로 측정하는 것에 비해 많은 시간과 인력 및 경비를 절감할 수 있다. 또한, 여러 가지 소각로의 형상과 운전 조건의 변화에 따른 결과를 컴퓨터에서 구현해 볼 수 있기 때문에 소각로 설계를 위한 충분한 자료를 확보할 수 있고, 기존 소각로의 경우에는 운전조건과 성능을 최적화시킬 수 있다.

본 연구에서는 지역 A의 도시생활폐기물 소각장의 2차 연소로에서 이용되는 SNCR 상용공정의 질소산화물 저감 효율을 예측하기 위해, CFD 상용프로그램 중의 하나인 Fluent(Fluent Inc., USA)를 이용하여 2차 연소로 내의 속도장, 온도장을 분석하고, 2차연소로 출구에서 질소산화물의 농도와 암모니아의 농도를 예측한다. 이를 위하여 개발된 요소와 질소산화물간의 7개 반응식과 액적의 증발과정을 포함하는 3차원 난류반응흐름 CFD 모델은 현장실험결과를 통하여 검증된다. 또한, 이 CFD 모델을 사용하여 요소용액과 공기 분사노즐의 유량변화에 따른 질소산화물 저감효율을 예측한다.

다음 장에서는 CFD 모사의 대상이 된 소각로 A의 구조와 2차연소로 유입 및 유출부에서 실험적으로 구한 경계조건에 대하여 기술한다. 3장에서는 사용하는 난류반응흐름 CFD 모델 및 모사에 관하여 설명하고, 4장에서는 모사결과와 현장실험결과를 비교한다. 마지막 장에서는 결론이 이어진다.

2. 소각로 구조 및 경계조건

생활폐기물 소각시설 A는 하루 50톤의 생활 폐기물을 처리할 수 있다. 이 소각장은 스토커 형식의 소각방식을 사용하고 있으며, 2차 연소로, 폐열 회수보일러, 가스 냉각탑, 연소가스 처리설비, 백필터 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 소각장의 연소로 모습이다. 스토커

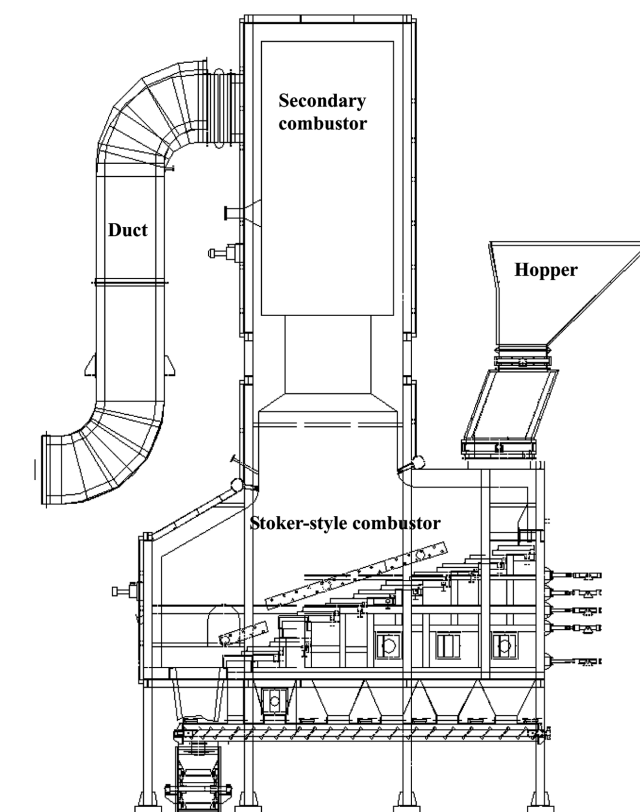


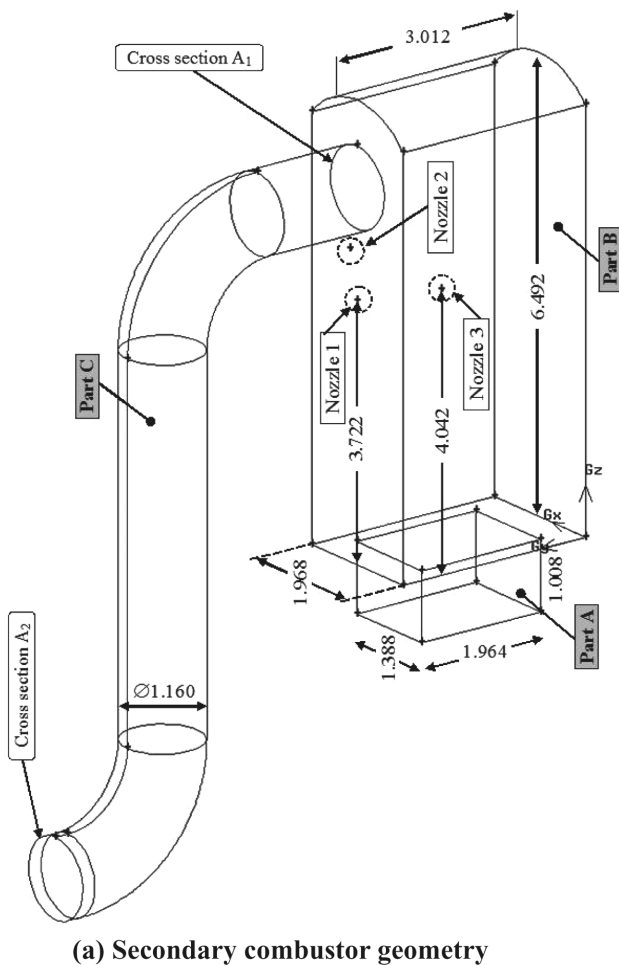
Fig. 1. Schematic diagram of a municipal waste incinerator.

형식의 1차 연소로에서 생성된 배가스는 2차 연소로(secondary combustor)를 거치면서 요소용액과 혼합되고, 2차 연소로 출구(duct)를 통해 폐열 보일러로 유입된다. 탈질 설비로는 액상 혹은 기상 첨가물이 사용되지 않는 희석 요소용액 SNCR 공정이 설치되어 있으며, 가스냉각탑 후단에서 소석회 분말을 이용하여 황산화물과 염화수소를 제거한다. 또한, 백필터 전단에 분말 활성탄을 주입하여 다이옥신을 제거한다. 먼지, 다이옥신, 사용된 분말활성탄, 소석회, 미처리된 산성 가스는 백필터에 의해 최종 처리되고 있다.

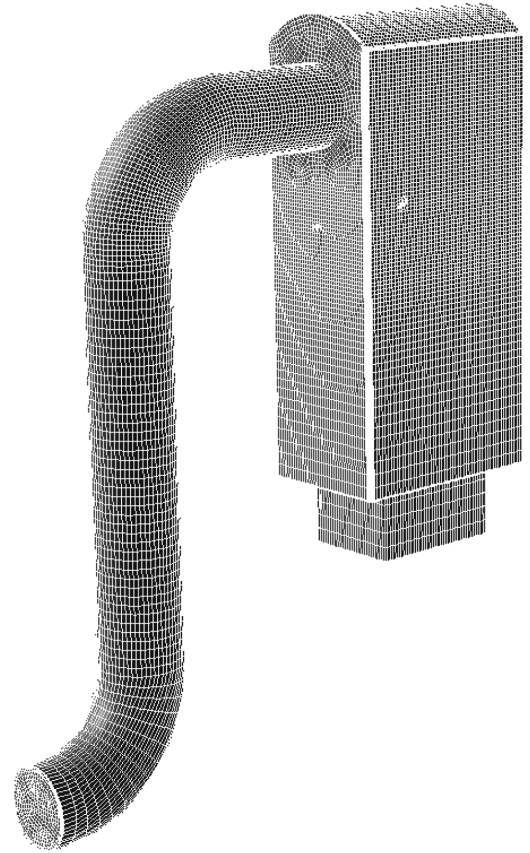
2-1. 2차 연소로 구조 및 격자구조

Fig. 2(a)에서 보여주듯이 연소가스 유입부(Part A), SNCR 공정부(Part B), 배가스 유출구인 덕트(Part C)를 포함하는 2차 연소로를 전산모사하기 위해 3차원 연소로의 구조를 도안하였다. 사각기둥 모양의 2차연소로는 총 7.5 m의 높이로서, 덕트가 위치한 면을 기준으로 정면에 1번 노즐이 높이 약 3.7 m에 위치하며, 측면의 2개의 노즐이 높이 약 4 m에 설치되어 있다. 3개 노즐은 모두 직경 5 mm의 원형팁이며, 벽면에서 연소로 안쪽으로 1 cm 돌출되어 있다. 덕트의 마지막 지점은 폐보일러와 연결되어 있으므로 덕트 이후의 온도는 급격히 감소하고, 따라서 더 이상 질소산화물 저감이 이루어지지 않는다. SNCR 노즐 근처에서 보다 정확한 모사를 위해 노즐 부근에서는 세밀한 격자를 구성하였으며, Fig. 2(b)는 2차 연소로에 대하여 약 55만개로 구성된 3차원 사각 및 육면체 격자(quadratic and hexahedral cell) 구조를 보여준다.

Table 1에서 3개의 격자수에 따른 속도, 온도, 그리고 질소산화물 농도를 보여준다. 격자수에 따라 속도와 온도는 변하지 않고 있으며, 실험결과와 거의 일치한다. 하지만, 덕트 출구에서의 질소산화



(a) Secondary combustor geometry



(b) Surface mesh structure

Fig. 2. Geometry and surface mesh structure of the secondary combustor.

Table 1. Effect of computational cell number on CFD simulation results

	Outlet velocity (m/s)	Outlet temperature (°C)	NO outlet (ppm)
Experiment	20	980	65
Mesh 1=387,960	19.7	980	53
Mesh 2=552,966	19.7	980	62
Mesh 3=723,200	19.7	980	60

물농도는 약간의 차이를 보여주고 있다. 이렇게 격자수와 격자구조에 따라 다른 농도값을 갖는 이유는 7개의 반응이 각 격자속에서 일어나며, 격자구조가 다름에 따라 다른 반응 결과값을 보여주기 때문이다. 본 연구에서는 질소산화물 농도값이 실험값에 가장 근접하는 격자수 및 격자구조(mesh 2 in Table 1)가 사용되었다.

2-2. 경계조건

1차 연소로에서 소각 시 발생된 배출가스는 질소산화물을 비롯한

여러 오염물질을 포함하고 있다. 본 연구에서는 질소산화물 저감율을 예측하는데 초점을 두고 있으므로, 1차 연소로에서의 연소반응은 고려하지 않고, 2차연소로의 유입부를 경계로 모사영역을 정하였다. Table 2에서는 2차연소로 유입부에서 질소산화물을 포함한 배출가스의 성분을 보여준다. 소각로의 일반적인 운전조건에 따라 연소 배가스 중에 질소가 약 82%, 산소가 약 12%, 그리고 이산화탄소가 약 6%를 차지한다. 배출가스 내 NO의 농도는 평균적으로 150 ppm이다. 2차 연소로 유입 배출가스의 온도는 1,050 °C이며, 이 온도에서 유속은 약 8 m/s이고, 유입가스 내 약 11% 포함하고 있는 물을 제외한 건조가스 유량은 기준상태(0 °C, 1 atm)에서 약 16,000 Nm³/hr이다. 이러한 운전조건은 고질 폐기물(고열량 생활폐기물)의 연소상태에 해당하며, 덕트 끝부분의 출구온도는 980 °C이고, 이 온도에서 유속은 약 20 m/s이다.

Table 3에서 보듯이 압축공기는 25 atm에서 50 Nm³/hr의 유량으로 분사되고, 노즐 끝에서 분사직전의 온도는 100 °C로 간주된다.

Table 2. Boundary conditions at reactor inlet

Species	Volume flowrate (Nm ³ /hr)	Mole flowrate (kmol/hr)	Mass flowrate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Pressure (atm)
NO	2.43	0.10859	0.00090	8	1050	1
CO ₂	1003.45	44.79672	0.54752			
O ₂	1945.92	86.87143	0.77219			
N ₂	13258.78	591.90964	4.60374			
Total	16216	723.68638	5.92435			

Table 3. Boundary conditions for atomizing air

Species	Volume flowrate (Nm ³ /hr)	Mole flowrate (kmol/hr)	Mass flowrate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Pressure (atm)
O ₂	10.5	0.46875	0.00417	83	100	25
N ₂	39.5	1.76339	0.01372			
Total	50	2.23214	0.01788			

Table 4. Boundary condition for urea solution at NSR=1.8

Species	Mole flowrate (kmol/hr)	Mass flowrate (kg/hr)	Mass flowrate (kg/s)	Velocity (m/s)	Temp. (°C)	Pressure (atm)
Urea Solution		146.60		83	100	2
Urea	0.0977	5.86				
Water	7.8184	140.73	0.02606			
HNCO	0.0977		0.00078			
NH ₃	0.0977		0.00031			

이때 유속은 약 83 m/s로 계산되었다. 압축공기와 함께 분사되는 요소용액은 4 wt% 희석용액이며, 물과 요소를 포함하여 유량은 NSR (normalized stoichiometric ratio)=1.8에 해당하는 약 150 kg/hr이다 (Table 4참조). NSR은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$NSR = \frac{2 \times n_{urea}}{n_{NO, inlel}} \quad (1)$$

여기에서 n_{urea} 는 요소의 몰수이고, $n_{NO, inlel}$ 은 유입되는 질소산화물의 몰수(150 ppm)이다. 요소 1몰은 NH₃ 1몰과 HNCO 1몰로 열분해되므로 2배의 당량비로 계산된다. 요소의 분해반응은 요소와 질소산화물의 환원반응에 비하여 매우 빠르다고 가정할 수 있으므로 [13], CFD 공정모사에서는 요소대신 NH₃와 HNCO가 반씩 유입되는 것으로 설정하였다. Table 4에서는 유입되는 요소용액에 대하여 NSR=1.8에서 물, NH₃, 그리고 HNCO의 질량유량을 확인할 수 있다.

2차 연소로의 벽온도 경계 조건은 소각로 입구 부근의 온도가 가장 높고, 높이가 상승하면서 연소로 외부로 열이 유출됨으로 벽온도가 감소한다. 전산모사에서는 이러한 벽온도 경계조건을 설정하기 위하여 연소가스 유입부(Fig. 2(a)의 Part A)에서는 다음과 같은 사용자정의함수를 이용하였다.

$$T_A = 900 - 30z_A, \quad 0 \leq z_A \leq 1 \quad (2)$$

식 (2)의 1차함수에 따라 유입부의 벽면 온도(T_A)는 높이(z_A)에 따라 900 °C에서 870 °C로 변한다. SNCR 공정부(Fig. 2(a)의 Part B)는 다음과 같은 1차선형함수로 정의되었다.

$$T_B = 870 - 11z_B, \quad 0 \leq z_B \leq 6.5 \quad (3)$$

식 (3)의 1차함수에 따라 SNCR 공정부의 벽면 온도(T_B)는 높이(z_B)에 따라 870 °C에서 800 °C로 변한다. 유입부에서는 높은 유속으로 인하여 벽면에서 외부로의 총괄열전달계수가 높고, 열손실량이 SNCR 공정부보다 더 크기 때문에, 유입부의 벽온도 하강률(30 °C/m)보다 SNCR 공정부의 하강률(11 °C/m)이 더 낮게 설정되었다. 연소가스 배출부(Fig. 2(a)의 Part C)는 곡선형태이며, 덕트 벽온도는 편의상 800 °C로 일정하게 설정되었다.

3. CFD 모델링

유체의 물리현상은 일반적으로 자연현상을 지배하는 법칙에 따라 질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식 및 에너지 보존 방정식 등으로 기술된다. 이러한 기본적인 물리법칙을 연속체로 가정한 유체에

Table 5. Modeling parameters used in this study

CFD modeling parameters	Description	Value
I (%)	Turbulence Intensity	2 nd Combustor Inlet
	Nozzle Inlet	10
C_r	Time scale constant	0.4083
C_ξ	Length fraction constant	2.1377
σ_k	Turbulent Prandtl numbers for k	1.0
σ_ϵ	Turbulent Prandtl numbers for ϵ	1.3
d_p	Uniform droplet diameter (μm)	45

적용할 경우, 유체의 유동은 속도, 압력, 밀도, 점도와 온도의 시간적 공간적 좌표에 따라 미분의 형태로 나타내어진다[14,15].

본 연구에서는 2차연소로에 설치되어 있는 SNCR 공정의 CFD 모델링을 위하여, 상기의 지배방정식, 난류흐름을 위한 k- ϵ 난류모델(난류운동에너지(k)와 이것의 소멸속도(ϵ)에 대한 2개 방정식으로 구성된 모델[22]), 난류흐름에서 화학반응을 고려하는 eddy-dissipation concept(EDC) 모델[16], 및 요소용액 액적의 증발과정을 묘사하는 액적모델 등을 사용하였다[12]. 자세한 모델에 관한 기술은 Nguyen *et al.*[12]에서 찾아볼 수 있다. 이 모델에서 사용되는 주요 모델인자값을 Table 5에서 보여준다. k- ϵ 난류모델에서 2차연소로 및 노즐 유입부의 경계값으로 이용되는 난류강도 (I)는 다음과 같은 식에 따라 정의된다.

$$I = \frac{\sqrt{(u')^2}}{\sqrt{u_{avg}^2}} \cong 100 \times 0.16(Re)^{-1/8} \quad (4)$$

여기에서 난류강도(I)는 평균속도(u_{avg})에 대한 속도변동(u')의 평균 제곱근의 비율로 정의되며, 완전 발달된 관 내부 흐름(fully-developed duct flow)에서의 난류강도는 Reynolds number에 따른 경험식으로 근사될 수 있다[12]. 2차 연소로 입구에서 난류강도는 8%, 노즐 입구에서 난류강도는 10%로 설정되었다. EDC 모델에서 사용하는 시상수(C_r)와 길이비율상수(C_ξ)는 미리 정해진 기본 값으로 설정되었다. k- ϵ 난류모델에서의 추가적인 모델인자 값은 Table 5에서 명시된다. 노즐에서 분사되는 액적의 입자직경은 45 mm로 일정하다고 가정하였고, 이러한 입자직경(d_p)은 물과 공기 분사시스템에 대한 Boll *et al.*의 경험식[17]에 따라 추정되었다.

$$d_p = \frac{4.22 \times 10^{-2} + 5.77 \times 10^{-3} (1000Q_L/Q_G)^{1.922}}{V_G^{1.602}} \quad (5)$$

여기에서, Q_L/Q_G 는 기상의 부피유량에 대한 액상 유량의 비를 의

미하며, $v_G(\text{m/s})$ 는 분사지점에서의 기체속도를 말한다. 이식으로 추정된 액적 입자크기는 약 59 mm 이지만, 노즐 팁이 고온(900~1,000 °C)에 노출되어 있는 것을 감안하여 액적크기는 45 mm로 설정되었다. 하지만, 액적크기가 SNCR 공정에 미치는 영향은 좀 더 연구되어야 할 것이다.

SNCR 공정에 대하여 난류흐름 및 열전달 현상을 200개 이상의 완전 화학 반응식(fully-detailed chemistry, [18])과 결합하여 모사한다는 것은 많은 계산 시간과 정보저장공간(memory)을 요구한다[3, 19-21]. 따라서 몇 개의 반응식으로 이루어진 간략화된 반응 속도식(reduced kinetic reactions)이 CFD 모사에서 폭넓게 사용되어 왔다[3, 19, 20]. Brouwer 등[19]은 6개 성분들이 참여하는 7개 반응 속도식을 개발하였고, 본 연구에서는 이 반응속도식을 근간으로 12% 과잉공기 및 저농도 일산화탄소 조건(5 ppm 이하)에서 운전되는 소각로에 적합한 반응속도식 인자를 사용하였다. 7개 반응에 대한 Arrhenius 속도식은 다음과 같이 정의된다.

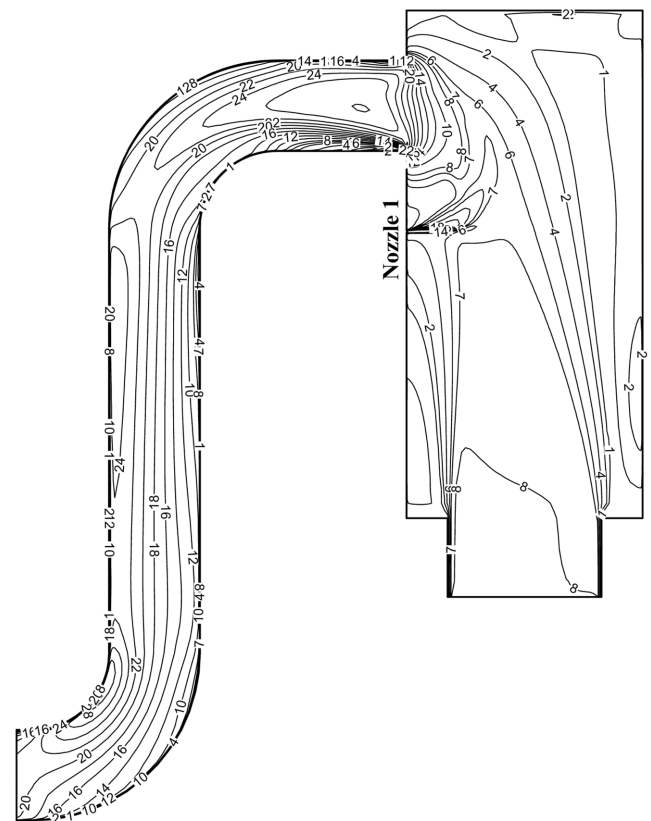
$$k_i = A_i \cdot T^b \cdot e^{-E_a/RT}, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (6)$$

여기에서 A_i 는 i 성분에 대한 충돌빈도상수이고, b 는 온도의존 지수이며, E_a 는 활성화 에너지이고, R 은 기체상수($R=8314.4 \text{ J/kmol/K}$)이다. 식 (6)의 반응속도식 인자값은 Table 6에서 제시된다. 이 표에서, M은 미지정 불활성 물질로서 반응에 참여하지 않고, OH 라디칼의 농도는 평형에 도달하였다고 가정하여 OH 농도의 영향은 무시된다. 따라서, 반응번호 1, 2, 그리고 4만이 2차 기초반응으로 정의되며, 다른 반응은 1차 기초반응이다[12, 19].

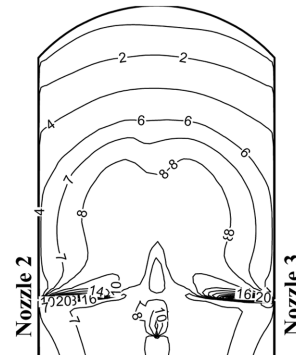
4. CFD 모사 결과 및 실험적 검증

7개 반응식과 액적의 증발과정을 포함하는 난류반응흐름 CFD 정상상태 모델은 상용화 CFD 프로그램 중의 하나인 Fluent(Fluent Inc., USA)에서 계산되었다. 사용된 계산기는 3.6 GHz dual core CPU, 3GB RAM이 장착된 개인용 컴퓨터이며, 평균 계산시간은 약 10 시간이었다. 현장실험 검증에 사용되는 데이터는 열량이 높은 고질폐기물이 소각될 당시의 1시간 동안 운전데이터이며, NO의 출구 농도는 1시간 동안 배출되는 농도의 평균값이다.

CFD 모사는 SNCR 공정부에 설치된 3개 노즐의 유량변화에 따라 3가지 경우에 대하여 수행되었다. Case 1은 Table 3과 4의 압축 공기 및 요소 용액량을 3개의 노즐에 일정하게 분배하여 분사하는 경우로서 실제 현장 조업조건을 의미한다. Case 2에서는 전체 분사 유량이 동일한 상태에서 정면노즐 1번과 측면노즐 2, 3번의 유량비율이 1:0.5:0.5로서 정면노즐에서 더 많은 유량이 분사된다. Case 3



(a) Side-view of the whole domain



(b) Front-view near nozzle 2 and 3

Fig. 3. Velocity contours.

은 노즐 유량비율이 1:1.5:1.5로서 측면노즐의 유량이 정면노즐 유량보다 더 많은 경우이다.

다음은 노즐유량에 대한 세가지 경우에 대하여 CFD 모사결과를

Table 6. Kinetics parameters of the reduced reaction mechanism

No.	Reaction	Pre-exponent (A) $\left[\frac{1}{\text{s} \cdot \text{K}^b} \text{ or } \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{K}^b \cdot \text{kmol}} \right]$	Temperature exponent (b)	Activation energy (E_a), [J/kmol]
1	$\text{NH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	2.13×10^1	5.3	2.43×10^8
2	$\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	8.83×10^3	7.65	5.86×10^8
3	$\text{HNCO} + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{NCO} + \text{M}$	1.39×10^{13}	0.85	3.45×10^8
4	$\text{NCO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{CO}$	2.26×10^{15}	0.0	-2.60×10^7
5	$\text{NCO} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{CO} + \text{H}$	3.68×10^9	0.0	0
6	$\text{N}_2\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}$	0.86×10^5	0.0	8.37×10^7
7	$\text{N}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O} + \text{M}$	8.50×10^7	0.0	3.39×10^8

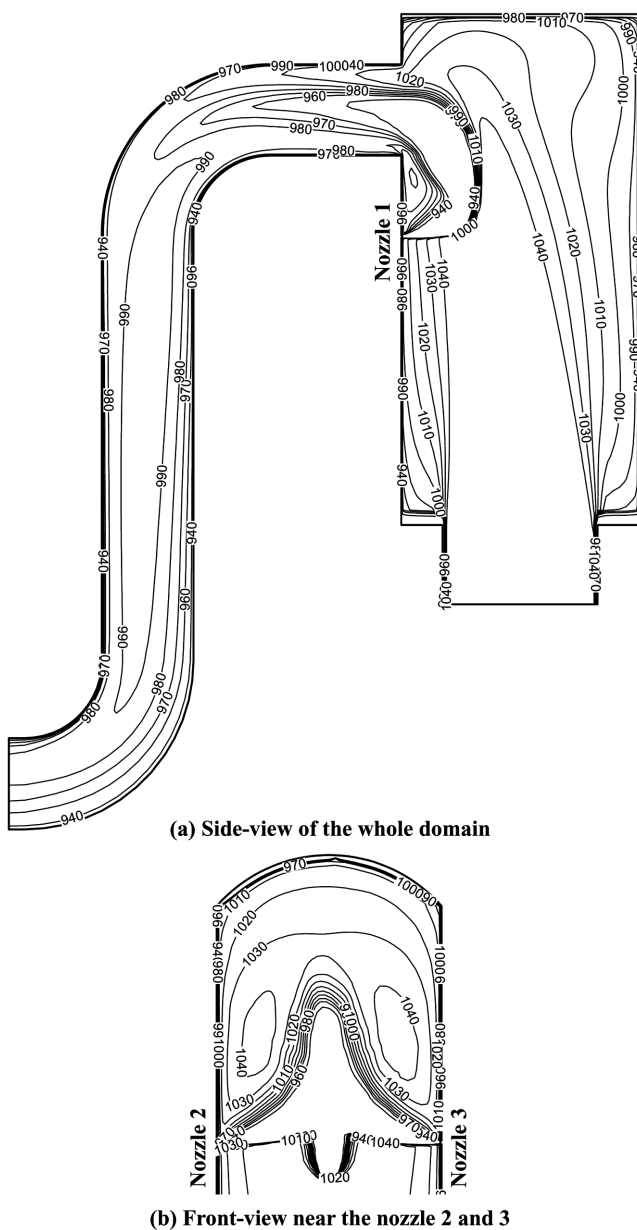


Fig. 4. Temperature contours.

해석하고, 특히 Case 1에 대하여 모사결과와 현장실험결과를 비교한다.

4-1. 속도장 및 온도장 분석

Fig. 3은 Case 1(노즐 유량 비율=1:1:1)에서 전체 모사영역의 측면 등속도선(velocity path-line contour)과 노즐 2, 3번 흐름을 볼 수 있는 노즐 주변에서의 정면 등속도선을 보여준다. 연소가스의 유입

속도는 약 8 m/s이고, 노즐팁에서의 최고속도는 약 83 m/s이며, 노즐 분사흐름은 연소가스의 주흐름에 교란을 주고 있다(Fig. 3(b) 참조). Fig. 4에서는 Case 1에서 2차 연소로 전체영역과 측면 노즐 2, 3번 근처에서의 등온도선을 보여준다. 1,050 °C로 유입되는 연소가스는 노즐부근에서 온도교란이 일어나고, 비교적 차가운 요소용액의 분사로 인하여 온도가 일시적으로 약 940 °C까지 하강하며, 덕트 끝부분에서 980 °C로 유출된다. Fig. 4(a)에서 덕트의 온도분포는 2차연소로와 가까운 쪽(오른쪽)이 먼 쪽(왼쪽)보다 낮은 온도가 형성되며, 이는 정면 1번 노즐에서 분사되는 저온 요소용액 및 압축공기의 영향으로 판단된다. 현장실험에서의 평균온도는 980 °C이고, 이는 모사결과에서도 일치한다(Table 7참조).

4-2. 노즐분사유량 비율에 따른 질소산화물 저감

Table 7은 Case 1(노즐 유량 비율=1:1:1), Case 2(노즐 유량 비율=1:0.5:0.5), 그리고 Case 3(노즐 유량 비율=1:1.5:1.5)에 대하여 출구온도, 질소산화물 출구농도, 그리고 암모니아 배출농도를 실험결과와 비교한다. 실제 운전조건에 해당하는 Case 1 모사결과는 NO 농도가 62 ppm(저감율=59%)이고, 현장실험결과는 65 ppm(저감율=57%)이다. 모사결과와 실험결과와의 차이는 2%로서 모사결과가 더 낮은 저감율을 보여준다. 암모니아 배출농도는 실험적으로 5 ppm 이하로 측정되고, 모사결과는 약 2 ppm으로서 서로 잘 일치한다. 결과적으로, 본 연구에서 제안된 SNCR 공정 모사를 위한 난류반응흐름 CFD 모델은 현장실험결과를 비교적 잘 예측하고 있다. 실험적으로 검증된 난류반응흐름 CFD 모델은 Case 1과 똑같은 연소가스 유입유량 및 온도조건에서 Case 2(노즐 유량 비율=1:0.5:0.5) 그리고 Case 3(노즐 유량 비율=1:1.5:1.5)의 경우에도 적용된다. Case 2와 3의 출구온도는 Case 1과 같지만, 질소산화물 출구농도(NO outlet)에서는 다른 값을 보여준다. 측면 노즐 2번과 3번에 정면노즐 유량의 0.5 배를 각각 분사하는 경우(Case 2)에서 가장 높은 NO 저감율이 예측된다. 기준 조건인 Case 1에 비하여 8% 높은 NO 저감율을 보여 주기 때문에(Table 7참조), 현재 SNCR 공정 운전조건은 좀 더 개선될 여지가 남아있다고 판단된다.

Fig. 5에서는 덕트 유출단면(Fig. 2(a)에서 cross-section A₂)에서 질소산화물 등농도선을 보여준다. Case 2에서 다른 두 경우보다 질소산화물 농도가 전체적으로 낮게 분포되어 있고, 단면의 하부가 상부에 비하여 더 높은 농도가 관찰된다. 3개 노즐에서의 분사유량의 비율을 다르게 한다는 것은 SNCR 공정 내 혼합조건 혹은 속도장의 변화를 유도하고 이에 따라 농도장의 교란을 의미하는 것이므로, 덕트 출구 농도장에 근거한 분산계수($N_{dispersion}$, dispersion number)를 정의하여 농도의 분산정도를 계량화한다.

$$N_{dispersion} = \frac{\mu_{NO}}{\sigma_{NO}} \quad (7)$$

Table 7. Comparison of simulation and the *in situ* experimental data

	Experiment	CFD Simulation		
		Case 1	Case 2	Case 3
Outlet temperature	980±5 °C	980 °C	980 °C	980 °C
NO outlet	65±5 ppm (57%)*	62 ppm (59%)	50 ppm (67%)	54 ppm (64%)
NH ₃ slip	Under 5 ppm	2.1 ppm	1.5 ppm	1.7 ppm

$$*NO \text{ Reduction efficiency (\%)} = \frac{[NO]_{inlet} - [NO]_{outlet}}{[NO]_{inlet}} \times 100$$

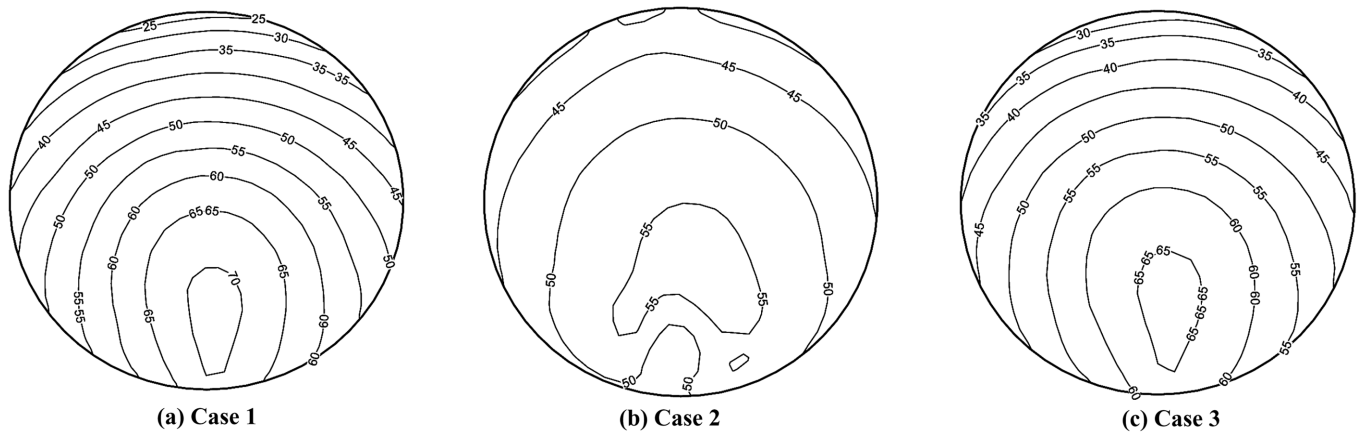


Fig. 5. NO concentration contours in the duct outlet cross-section.

Table 8. Comparison of NO concentration dispersion numbers for Case 1-3 at Cross section A₁ and A₂

	Cross section A ₁			Cross section A ₂		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
NO mean value (m_{NO} , ppm)	102.58	73.53	88.13	61.56	49.92	53.77
Standard deviation (s_{NO} , ppm)	39.35	39.89	32.27	10.27	9.64	10.06
Dispersion number (N_{NO})	2.61	1.84	2.36	6.00	5.18	5.34

여기에서 μ_{NO} 는 덕트 출구단면에서의 질소산화물 평균농도이며, σ_{NO} 는 덕트 출구단면에서의 농도 표준편차를 의미한다. 비슷한 평균농도에서 균일한 농도 분포일수록 표준편차가 작게 되며, 분산계수($N_{dispersion}$)는 커진다. 즉, 분산계수가 클수록 균일한 분포라고 할 수 있으며, 분산계수가 작을수록 농도의 교란이 심하다고 볼 수 있다. 또한, 농도의 분산도는 SNCR 공정의 노즐 분사유량 변화에 따라 바뀔 수 있다.

Fig. 5의 원형 단면(cross section A₂) 전체에서 구한 농도의 표준편차에 대한 평균농도의 비(분산계수)는 Case 1, 2, 그리고 3에 대하여 각각 각각 6.00, 5.18, 그리고 5.34이다(Table 8 참조). 질소산화물 저감율은 세 경우에 대하여 각각 59, 67 그리고 64%이므로 저감율이 높을수록 분산계수가 작은 경향성을 찾을 수 있다. 즉, 노즐 분사에 의해 큰 교란을 유도하여 농도의 표준편차가 클수록 더 높은 질소산화물 저감 효과가 나타난다. Table 8에서 보듯이, 이러한 현상은 덕트 입구 원형단면(cross section A₁)에서도 똑같이 나타난다.

Fig. 6에서는 노즐 유량 비율에 따른 정면노즐 1번 근처에서의 측면 NO 등농도선을 보여준다. 정면노즐에서 상대적으로 유량이 큰 Case 2의 등농도선은 다른 두 경우에 비하여 확대된 등농도선 영역을 확인할 수 있다. 이러한 Case 2의 확대된 등농도선은 덕트로 유출되는 배출가스의 흐름에 충분한 교란 혹은 혼합효과를 상승시키는 것으로 판단된다.

정면방향으로 덕트 유출구가 존재하므로, 2차 연소로 내 연소가스의 속도장은 정면노즐 주변으로 치우친 흐름을 형성된다(Fig. 3(a) 참조). 따라서, 주흐름에 교란을 많이 줄 수 있는 노즐은 정면의 1번 노즐이고, 정면노즐 1번의 유량을 증가시키는 것이 측면노즐의 유량을 증가시키는 것보다 유체 유속에 더 큰 교란을 유도할 수 있는 것으로 해석된다. 앞서 설명하였듯이, 이러한 더 큰 교란은 혼합효과를 상승시키고, 질소산화물 저감에 긍정적인 영향을 미친다.

Fig. 7에서는 Case 1 경우에 정면노즐 1번과 측면노즐 2, 3번 근처에서의 암모니아 등농도선을 보여준다. Fig. 7(a)에서 보여주듯이,

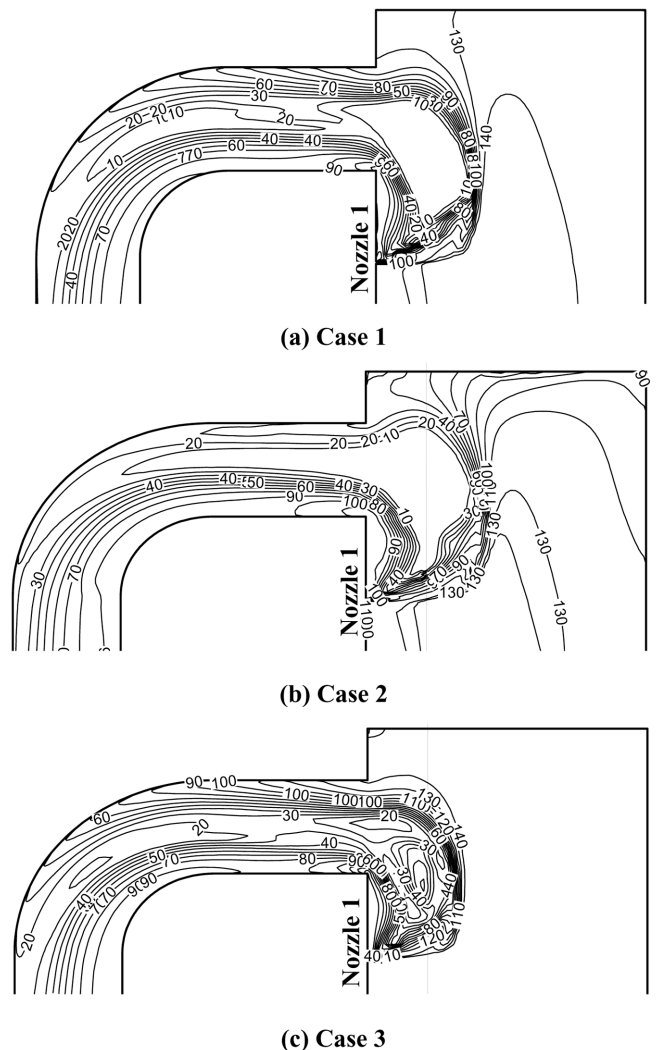
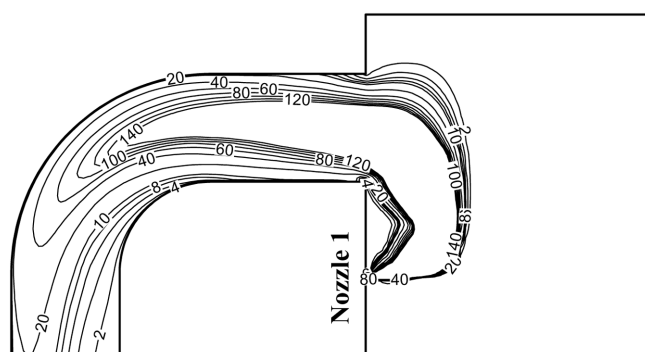
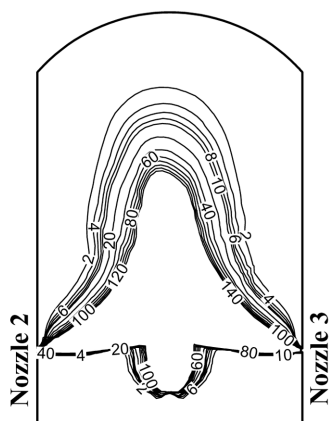


Fig. 6. NO concentration contours in side-view near nozzle 1.



(a) Side-view near nozzle 1



(b) Front-view near nozzle 2 and 3

Fig. 7. NH_3 concentration contours.

분사된 암모니아는 덕트를 지나가면서 NO와의 환원반응으로 인하여 지속적으로 농도가 감소한다. 노즐에서 분사되는 암모니아가 전체 연소가스에 대하여 135 ppm에 상당하는 유량임으로 배가스와 아직 혼합되지 못한 노즐의 앞부분에서는 국부적으로 140 ppm 정도의 암모니아 농도가 예측되고 있다(Fig. 7참조). 하지만, 반응이 진행되고, 연소가스와의 혼합이 증가하면서 암모니아 농도는 급격하게 감소하며, 최종적으로 덕트의 유출부에서는 2 ppm까지 감소한다.

서론에서 이미 설명하였듯이, 실제 소각로에서 SNCR 공정은 (1) 배가스와 환원제간의 혼합, (2) 반응온도, (3) 체류시간이 적합한 균형을 이룰 때 최적의 효율을 나타낸다[3]. 본 소각로에서는 고열량 생활폐기물의 소각시 덕트 유출부에서조차 980 °C의 높은 온도가 유지되고, 질소산화물 저감에 필요한 체류시간이 충분하므로, 배가스와 환원제(NH_3 와 HNCO) 간의 혼합만 잘 이루어지면 성공적으로 SNCR 공정이 운전될 것이다. 따라서, 본 연구에서 예측된 3개 노즐간 분사유량비율의 변화에 따라 농도를 이용한 분산계수(dispersion number)는 연소가스와 환원제간의 혼합 정도를 판단할 수 있는 계량화된 기준으로서 유용할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 운전 중에 있는 생활폐기물 소각로에 설치된 SNCR 공정에 대한 전산유체역학(CFD) 모사를 수행하였다. 요소용액을 이용하는 SNCR(selective non-catalytic reduction) 공정이 설치

된 2차연소로는 설계도면과 실제 측정된 값들을 바탕으로 3차원 구조의 CFD 모사영역으로 구축되었다. 요소와 질소산화물간의 환원 반응은 7개의 간략화된 반응식으로 표현하였으며, 12% 과잉공기와 저농도의 일산화탄소 조건에 알맞은 반응속도상수식이 제시되었다. 이러한 반응식과 액적의 증발과정을 포함하는 난류반응흐름 CFD 모델을 사용하여 속도장, 온도장, 그리고 각 성분들의 농도가 예측되었다.

난류반응흐름 CFD 모델에서 얻은 온도는 소각로 현장 실험값과 잘 일치한다. 현장실험결과에서는 고질 폐기물 소각 시에 발생하는 평균 150 ppm의 질소산화물이 SNCR 공정을 거치면서 65 ppm(저감율 57%)으로 저감된다. CFD 모사에서는 62 ppm(저감율 59%)으로서 약간 높은 저감률을 보이고, 실험값과 2% 저감률 차이를 보여준다.

공정성능의 향상 방안으로 정면 노즐 1개와 측면 노즐 2개에서 분사되는 유량의 비율을 변화하면서 공정성능(NO 저감률)을 예측하였다. 실제 운전에서는 3개의 노즐에 동일한 유량을 분사하는 것이지만, 전체 분사유량은 동일한 상태에서 정면노즐 유량이 2개의 측면노즐 유량보다 2배 더 많게 분사된다고 가정할 때, 같은 노즐 유량 비율로 운전할 때보다 덕트 출구에서 농도 편차가 심하고(또는 분산계수가 작고), 질소산화물 저감율이 8% 증가하는 것으로 예측된다. 따라서 SNCR 공정의 실제운전조건은 3개 노즐에서 분사되는 유량의 비율을 조정함으로써 공정성능을 개선할 수 있다고 판단된다.

감 사

This study is financially supported by Korea Ministry of Environment as "The Eco-technopia 21 Project". We thank to Byucksan Engineering Co., Ltd. (BEC) for the supply of the plant diagrams of the municipal incinerator. We appreciate to Nonsan Green Environment Co. for the helpful discussion and providing precious plant data.

참고문헌

- Kim, G. Y. and Rlee, G. H., "Parallel Numerical Analysis of Thermal Flow in Waste Incinerator," *J. Inst. Inf. Technol.*, **5**, 85-91(2003).
- Kim, S. B., Lee, J. W., Kim, H. J., Huh, I. S., "Flow Characteristics Analysis In Accordance with Geometrical Modification of Chamber of Waste Incinerator," *Korean Society Mechanical Engineers*, 536-540(1999).
- Cremer, M. A., Montgomery, C. J., Wang, D. H., Heap, M. P. and Chen, J.-Y., "Development and Implementation of Reduced Chemistry for Computational Fluid Dynamics Modeling of Selective Non-Catalytic Reduction," *Pro. Combustion Institute*, **28**, 2427-2434(2000).
- Wendt, J. O. L., Linak, W. P., Groff, P. W. and Srivastava, R. K., "Hybrid SNCR-SCR Technologies for NO_x Control: Modeling and Experiment," *AIChE J.*, **47**(11), 2603-2617(2001).
- Muzio, L. J., Quartucy, G. C. and Cichanowicz, J. E., "Overview and Status of Post-combustion NO_x Control: SNCR, SCR and Hybrid Technologies," *Int. J. Environ. Pollut.*, **17**(1/2), 4-30(2002).
- Tayyeb Javed, M., Irfana, N. and Gibbs, B. M., "Control of Com-

- bustion-generated Nitrogen Oxides by Selective Non-catalytic Reduction," *J. Environ. Manag.*, **83**(3), 251-289(2007).
7. Lee, J. B. and Kim, S. D., "Kinetics of NO_x Reduction by Urea Solution in a Pilot Scale Reactor," *J. Chem. Eng. Japan*, **29**, 620-626(1996).
 8. Lim, Y.-I., Yoo, K. S., Jeong, S. M., Kim, S. D., Lee, J. B. and Choi, B. S., "A Study on NO_x Removal from Flue Gas by Using Urea Solution," *Korean Chem. Eng. Res.*, **35**(1), 83-89(1997).
 9. Muzio, L. J. and Quartucy, G. C., "Implementing NO_x Control: Research to Application," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **23**, 233-266(1997).
 10. Alzueta, M. U., Bilbao, R., Millera, A., Oliva, M. and Ibanez, J. C., "Interactions Between Nitric Oxide and Urea under Flow Reactor Conditions," *Energy & Fuels*, **12**, 1001-1007(1998).
 11. Gentemann, A. M. G. and Caton, J. A., "Flow Reactor Experiments on the Selective Non-Catalytic Removal(SNCR) of Nitric Oxide using a Urea-Water Solution," Proceedings of the 21st German Flame Day Conference, Combustion and Furnaces, University of Cottbus, Germany, 9-10(2003).
 12. Nguyen, T., Kang, T. H., Lim, Y. I., Kim, S. J., Eom, W. H. and Yoo, K. S., "Computational Fluid Dynamics(CFD) Simulation for a Pilot-scale Selective Non-catalytic Reduction(SNCR) Process Using Urea Solution," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(5), 922-930(2008).
 13. Gentemann, A. M. G. and Caton, J. A., "Decomposition and Oxidation of a Urea-Water Solution as Used in Selective Non-Catalytic Removal (SNCR) Processes," proceedings of the 2nd Joint Meeting of the United States Sections: The Combustion Institute, Oakland, CA, 25-28 March 2001.
 14. Park, J. S., "A Numerical of the Flow Field for a Secondary Air Effect in a Stoker in a Municipal Solid Waste," Master Dissertation, Hanbat National Univ., 5-12(2003).
 15. Park, B. S., Lee, J. W., Kim, S. W. and Kang, S. K., "A Numerical Study on the Residence Time Distribution on a Combustion Chamber of a MSW Incinerator," Institute for Advanced Engineering, Daewoo Heavy Industry, Technical Report, 1-3(1999).
 16. Han, X., Wei, X., Schnell, U. and Hein, K. R. G., "Detailed Modeling of Hybrid Reburn/SNCR Processes for NO_x Reduction in Coal-fired Furnaces," *Combust. Flame*, **132**(3), 374-386(2003).
 17. Alonso, D. F., Goncalves, J. A. S., Azzopardi, B. J. and Coury, J. R., "Droplet Size Measurements in Venturi Scrubbers," *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 4901-4911(2001).
 18. Miller, J. A. and Bowman, C. T., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 287-338(1989).
 19. Brouwer, J., Heap, M. P., Pershing, D. W. and Smith, P. J., "A Model for Prediction of Selective Non-catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Ammonia, Urea, and Cyanuric Acid with Mixing Limitations in the Presence of CO," Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Italy, 2117-2124(1996).
 20. Montgomery, C. J., Swensen, D. A., Harding, T. V., Cremer, M. A. and Bockelie, M. J., "A Computational Problem Solving Environment for Creating and Testing Reduced Chemical Kinetic Mechanisms," *Adv. Eng. Software*, **33**(2), 59-70(2002).
 21. Skjoth-Rasmussen, M. S., Holm-Christensen, O., Ostberg, M., Christensen, T. S., Johannessen, T., Jensen, A. D., Glarborg, P. and Livbjerg, H., "Post Processing of Detailed Chemical Kinetic Mechanisms onto CFD Simulations," *Comput. Chem. Eng.*, **28**, 2351-2361(2004).
 22. Launder, B. E. and Spalding, D. B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press: London, England(1972).