

## NO<sub>x</sub> 저감을 위한 SNCR 시스템의 전산해석연구

나혜령, 박병수, 주지선, 서정대\*, 김현진\*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터, 대우조선공업(주) 선박해양기술연구소\*

### Numerical Study of SNCR System for the NO<sub>x</sub> removal in a Municipal Solid Waste Incinerator

H.R. Na, B.S. Park, J.S. Ju, J.D. Seo\*, H.J. Kim\*

Institute for Advanced Engineering, Plant Engineering Center

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.\*

#### 1. 서론

산업 현장에서 연소 과정에서 발생하는 NO<sub>x</sub>를 제거하기 위한 방법으로 현재 연구 및 상업화 대상에서 가장 널리 사용되고 있는 것이 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 SNCR((Selective non-catalytic reduction)이다. 그러나, SCR의 경우 높은 장치비와 유지비가 소요되어, 최근에는 로 내에 요소용액을 직접 분사하여 NO<sub>x</sub>를 질소와 수증기로 환원시켜 제거하는 방법인 SNCR에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 이 방법은 SCR에 비해 NO<sub>x</sub> 저감율이 비교적 낮지만 설치비와 유지비가 적고, 설치기간이 매우 짧으며, 기존 설비의 변경이 크게 요구되지 않으므로 노후된 연소설비에서 발생하는 NO<sub>x</sub> 저감에 보다 효과적으로 알려져 있다. 본 연구에서는 소각로에서 발생하는 배기가스내 질소산화물을 제거하기 위해 SNCR 시스템의 질소산화물 제거반응을 전산해석방법론을 적용하여 모델링하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 미국 Reaction Engineering International(REI)에서 검증하고 제안한 SNCR 화학반응 메커니즘을 모델링에 도입하였으며, 대우조선공업(주)에서 설계한 50톤/일급 상용 도시쓰레기 소각로에 적용하였다. 일차적으로 SNCR 시스템의 해석에 필요한 액적반응모델 및 SNCR 반응에 포함된 화학반응 모델과 연계된 소각로 2차 연소실에 대한 기상반응모델을 개발하여 모델간의 상호 작용을 검토함으로써 반응모델의 적용 타당성을 검증하고자 하였다. 또한, 검증된 SNCR 화학반응 모델을 폐기물 연소모델과 연계하여 배기가스내 질소산화물의 제거율을 최대로 할 수 있도록 질소산화물과 환원제의 혼합 효과를 증대시킬 수 있는 SNCR 시스템의 설계 방향을 제시하고자 하는 것이 본 연구의 궁극적인 목적이다.

#### 2. 수학적 모델 및 해법

질량, 운동량, 에너지, 화학종의 농도를 나타내는 기상지배방정식을 일반형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_\phi$$

운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for

Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하였으며 유동이 결부된 종속변수의 보간을 위해서는 power-law scheme을 사용하였다. 그리고, 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 또한, 로내로 분사되는 요소수용액의 반응을 해석하기 위해서 액적모델을 설정하여, 초기에 유입된 요소액적의 온도가 상승한 후 증발(vaporization) 및 비등(boiling)을 통해 기화되어 액상에서 가스상으로 전달된 후 반응된다고 가정하였다.

SNCR 시스템내 질소산화물 제거반응은 미국의 REI에서 검증을 거쳐 제안한 축소된 형태의 반응 매카니즘을 도입하여 모델링하였으며, 반응에 사용된 Kinetic 모델의 대표적인 형태 및 매개변수들을 아래의 <표 1>에 요약하였다. 그리고, SNCR 시스템의 전산해석에 사용된 열역학적 물성치는 ASPEN 코드의 데이터베이스를 활용하였다.

<표 1> SNCR 화학반응 Kinetic 모델

Reaction No.	A	b	Ea	Reaction Mechanism
(1)	4.24E+08	5.30	83600	<p>The diagram shows the reaction mechanism for Urea [CO(NH2)2]. Urea decomposes into HNCO and NH3. HNCO further decomposes into NCO and N2O. NCO reacts with N2O to form N2 and NO. NH3 also reacts to form N2 and NO.</p>
(2)	3.50E+05	7.65	125300	
(3)	2.40E+14	0.00	68000	
(4)	1.00E+13	0.00	-390	
(5)	1.00E+13	0.00	0	
(6)	2.00E+12	0.00	10000	
(7)	6.90E+23	-2.50	64760	

$$Rate\ Constant(k) = A(T + [CO])^b \exp\left(-\frac{E_a}{T + [CO]}\right)$$

위의 <표 1>에 나타난 화학반응을 해석하기 위하여, 본 연구에서는 상용 코드인 FLUENT를 가지고 난류혼합에 의한 반응(turbulent mixing controlled reaction)과 화학적 기구론에 의한 반응(chemical kinetics controlled reaction)중 반응속도가 느린 반응에 의하여 전체 반응률이 결정된다는 율속법칙을 이용한 제한속도 반응모델(finite rate reaction model)을 이용하여 해석을 수행하였다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

본 SNCR 시스템의 전산해석에서는 50%의 요소 수용액이 소각로 2차 연소실 벽면에 설치된 각각 2개의 노즐을 통해서 입경이 100μm인 균일한 액적 형태로 atomizing 공기와 함께 분사된다고 가정하였으며, NSR(Normalized Stoichiometric Ratio)이 2인 조건을 사용하였다. 특히, 본 연구에서는 배기가스 자체의 유동에 따른 혼합 특성 등을 배제하고 환원제 분사노즐 자체의 분사 특성이 배기가스와의 혼합에 미치는 영향을 조사하기 위하여 소각로 2차 연소실로 유입되는 배기가스가 수직방향으로 일정한 속도 분포를 갖는 plug 흐름으로 가정된 입구 경계조건을 사용하였으며, 또한 고유 환원반응의 특성 및 요구되는 체류시간의 해석을 위하여 2차 연소실로 유입되는 가스는 온도가 1000℃이고 NO 농도가 200ppm인 공기로 가정하였다.

[그림 1]은 2차 연소실에서의 가스상 속도분포를 나타낸 결과이다. 주입각도가 15° 로 환원제가 분사되는 경우로, 균일한 유동장을 형성하여 반응을 촉진시키는 역할을 하는 노즐의 속도는 수직단면에서의 속도 분포도에서 볼 때 주유동장의 변화에 미치는 역할은 크지 않은 것으로 보여진다. 즉, [그림 1]의 노즐 위치에서의 수직단면 속도 벡터 및 분포도를 살펴보면, 노즐에서 분사되는 질량유량에 의한 축방향 속도변화는 스프레이 분사노즐 근처에서만

국부적으로 나타나고, 곧 주 유동의 패턴에 희석되고 있음을 볼 수 있으며, 이 결과로부터 환원제 분사노즐 자체의 분사 특성이 배기가스와의 혼합에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단할 수 있다.

[그림 2]는 50톤/일 소각로 2차 연소실을 대상으로 얻어진 전산해석 결과 중 주요 반응물들의 농도분포를 보여주고 있다. 결과로부터 알 수 있듯이 요소 수용액은 소각로내로 분사되자마자  $\text{NH}_3$ 와  $\text{HNCO}$ 로 곧바로 분해된 후, 이들 환원제는  $\text{NO}$ 와의 반응을 거쳐 빠르게 소멸됨을 볼 수 있다. 특히,  $\text{HNCO}$ 의 경우는  $\text{NO}$ 와의 반응속도가  $\text{NH}_3$ 와 비교하여 상대적으로 느리기 때문에 비교적 넓은 농도분포를 보이나,  $\text{NO}$ 와의 반응은 빠르게 진행되고 있음을 보여준다. 또한, [그림 3]의  $\text{NO}$  농도 분포와 비교해 보면, 분사노즐 위치에서 요소로부터 분해된  $\text{NH}_3$ 와  $\text{HNCO}$ 가 빠른 속도로 소멸되는 영역에서 축방향으로  $\text{NO}$ 의 농도가 빠르게 감소하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 분무각도에 의한 균일한 유동장 형성으로 인해 환원제와 질소산화물과의 반응이 빠르게 진행되므로 질소산화물의 제거효율이 증가함을 알 수 있다. 또한, 위의 결과로부터 요소에 의한  $\text{NO}$ 의 환원반응은 반응로에서 약 1초 이상의 체류시간을 요구한다는 것을 알 수 있으며, NSR이 2인 현재의 해석조건에서는 약 59%의  $\text{NO}$  제거율을 보이는 결과를 예측할 수 있었다.

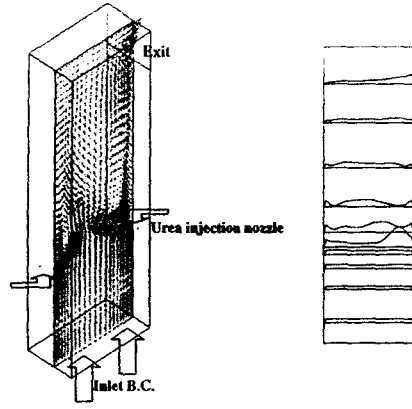
#### 4. 결론

본 연구는 SNCR 시스템의 전산해석에 필요한 반응모델, 즉, 환원제의 역할을 하는 요소 수용액의 액적반응모델과 소각로 2차 연소실에서의 질소산화물과 환원제의 기상반응모델을 개발하여 일차적으로 모델의 적용 타당성을 검증하였으며, 반응물질간의 혼합효과를 높여 질소산화물의 제거율을 증대시킬 수 있는 운전조건에 관한 전산해석 연구를 진행하였다.

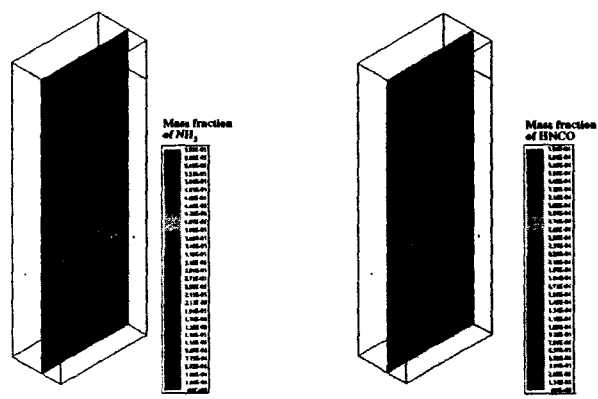
전산해석 결과로부터 반응모델의 적합성을 확인하였으며, 질소산화물을 효과적으로 제거하기 위해서는 연소실 내에 균일한 유동장을 형성시켜 환원제와 질소산화물이 빠르고 균일하게 혼합될 수 있는 반응유동장을 형성시키는 것이 중요함을 확인하였다. 추후, SNCR 화학반응 모델을 폐기물 연소반응 모델과 완전히 연계하여 해석할 수 있는 전산모델을 개발하고, SNCR 운전조건 최적화를 위한 분사노즐 위치등의 세분화된 연구를 진행할 예정이다.

#### 참고문헌

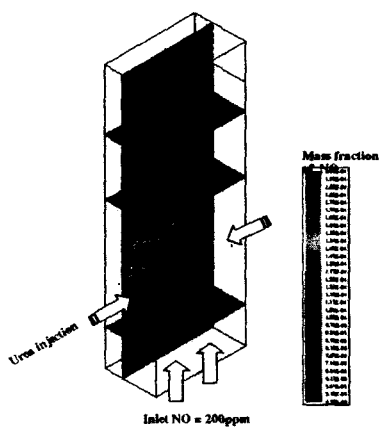
1. R. Pachaly, J.E. Hofmann and W.H.Sun, "The NO<sub>x</sub>OUT Process for the Control of the NO<sub>x</sub> Emissions from Waste Incinerators", The Air and Waste Management Association Annual Meeting, 1991.
2. R. Hardman, J. Cox, M. Cremer, E. Eddings, L. Muzio, T. Martz and J. Stallings, "Evaluation of SNCR Performance on Large-Scale Coal-Fired Boilers", The Institute of Clean Air Companies(ICAC) Forum on Cutting NO<sub>x</sub> Emissions, 1998.
3. M. Cremer, M. Heap, M. Zoccola and V. Ciarlante, "CFD Modeling of SNCR Performance in Convectiv's Indian River Units 3 and 4", DOE Conference on SCR and SNCR for NO<sub>x</sub> Control, 1999.
4. 임영일, 유경선, 정상문, 김상돈, 이정빈, 최병선, "요소용액을 이용한 배연가스내의 질소산화물 제거연구", 화학공학 Vol.35, No.1, pp.83-89, 1997.



[그림 1] SNCR 시스템내 수직단면 속도분포 결과



[그림 2] SNCR 시스템내 수직단면에서의 환원제의 농도분포



[그림 3] SNCR 시스템내 질소산화물(NO)의 농도분포