

대전 4공단 소각로 후연소로 모델 연구

Numerical Study of the Post Combustion Chamber of Grate Type Incinerator
in Daejeon 4th Industrial Complex* 김혜숙¹⁾, 신미수¹⁾, 장동순¹⁾, 박병수²⁾, 엄태인³⁾

Hey-Suk Kim, Mi-Soo Shin, Dong-Soon Jang, Byung-Soo Park and Tae-In Um

Abstract

A 3-D axisymmetric computer program is developed to predict the NO behavior in SNCR system for the stoker incinerator with the waste treatment capacity, 200ton/day. To this end a turbulent reacting flow field calculation is made using proper assumption and empiricism. The stoker bed is assumed to be a homogeneous waste-volatilized gaseous state. The initial composition or reactants are assumed based on the data of the ultimate analysis. Turbulent is resolved by k-ε model and turbulent reaction is handled by eddy-breakup model harmonized with empirical chemistry data for gaseous combustion, NO and urea reaction. The liquid droplet is traced by Lagrangian method incorporated by aerodynamic drag, Coriolis and centrifugal forces. Radiation is treated by sensible heat loss model. Calculation results are in good agreement with experimental data at the outlet of post combustion chamber in Daejeon 4th industrial complex. The flue gas shows the temperature range of 900~1000°C, velocity of 5m/s and NO concentration of 140ppm at the exit while the measured temperature, flue gas velocity and NO concentration are 967°C, 3~4m/s and 100~200ppm respectively. Using the developed computer program a parametric study has been made with the variation of heat content of waste, castable length and SNCR variables for the determination of proper injector location. In general, the calculated results are consistent and physically acceptable.

1. 서론

SNCR(Selective NonCatalytic Reaction)은 고온에서 촉매 없이 환원제를 사용하여 질소산화물을 수증기와 질소로 환원시켜 제거하는 방법으로 소각로, 화석연료 보일러 및 연소로 등에서 사용한다. 대부분의 소각로에서는 질소산화물을 저감하기 위해 SCR

(Selective Catalytic Reactor)를 설치 운영하고 있으나 운영비 등으로 현재 SNCR를 추가 설치하여 단독 또는 SCR과 병행 운전 중에 있다.

SNCR 공정은 870~1050°C인 고온의 연소가스에 환원제를 분사하여 40~60% 까지 NO를 저감할 수 있으며 환원제의 체류

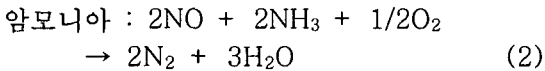
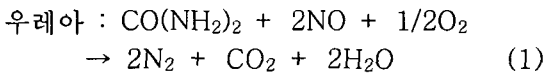
1) 충남대학교 환경공학과 305-764 대전시 유성구 궁동 220 Tel 042-821-6677

2) 씨디 어댑코 코리아(주) 150-742 서울 영등포구 여의도동 27-2

3) 한밭대학교 환경공학과 305-719 대전시 유성구 덕명동 산 16-1

시간은 로내 연소가스와 혼합하여 반응하기 위해 최소한 0.5초의 체류시간이 필요하다. 쓰레기 소각로의 경우 환원제가 전체 소각로 단면에 효율적으로 분산될 수 있는 로내 형상과 최소 반응시간 이상의 충분한 체류시간을 가지고 있어 SNCR 적용이 유리하다.

환원제에 따른 주요 SNCR 반응은 다음과 같다.



SNCR 공정성능에 영향을 주는 3가지 주요인자는 연소가스온도, 체류시간, 그리고 환원제 분포이다. NO 저감반응은 온도와 체류시간에 민감하다. 즉 높은 온도에서는 환원제의 열적분해에 의해 NO 저감이 감소하며 낮은 온도와 체류시간에서는 미반응 환원제 배출이 문제가 된다.

쓰레기 소각로를 비롯해 모든 소각시설은 폐기물 관리법에 의해 연소가스는 2초 이상 체류하여야 하며 연소실 출구온도는 850°C 이상 유지하도록 규제하고 있으므로 대부분의 소각로 주연소로 온도는 1050 ~ 1150°C, 후연소로 출구온도는 약 850~900°C이며 체류시간은 2~4초 정도이다. 이와 같이 후연소로 구간에서 온도와 체류시간의 유리한 결합은 SNCR 적용시 높은 NO 제거효율과 더불어 높은 환원제 반응효율을 제공해 준다. 그러나 실용보일러와 달리 소각로는 투입되는 쓰레기 발열량과 질소함량을 예측할 수 없으며 수분함량은 계절과 기후조건에 따라 변하므로 로내 연소조건이 급격히 변동하게 된다. 저장조 하단에 쌓여 있는 쓰레기 또한 신규 쓰레기와 다르게 연소하며 산업, 가정, 건축 등으로부터 발생한 쓰레기 근원 역시 연료의 질과 연소방법에 지대한 영향을 준다. 이런 모든 인자들은

후연소구간의 온도를 약 100°C 정도 변동하게 하며 NO농도도 이에 따라 변동한다. 결국 소각로의 SNCR 공정은 로내 온도분포에 근거하여 조정하며 변동하는 연소조건에 따라 환원제의 분사위치를 선택적으로 결정할 수 있도록 후연소로 구간에 수직방향으로 보통 3~4단의 인젝터를 설치하고 각단의 인젝터 갯수는 원하는 NO 제거효율에 따라 결정한다.

로내 온도조건이나 체류시간 등이 충분히 주어진다 하여도 환원제와 발생한 질소산화물의 균일한 혼합이 전제되지 않는다면 환원제 slip 양은 상황에 따라 달라지므로 SNCR 설계는 다년간의 현장 경험에 기초한 노하우와 함께 로내 유동장 해석이 불가피하게 결합되어야 한다. 현재 SNCR 공정을 적용하는 대부분의 소각로는 외국 기술을 도입하고 있으나 설계에 필요한 일반적인 소프트웨어를 제공받지 못하고 극히 제한적인 자료만을 제공받으므로 운전조건의 변화나 부하량 변동에 따른 SNCR 시스템의 효율적인 대응이 어려운 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 대전 4공단 소각로 1호를 대상으로 후연소로 모델을 개발하여 일일 처리량 및 발열량 증가에 따른 로내 온도분포와 난류혼합조건을 고려한 적정 체류시간을 갖는 최적의 환원제 분사위치를 예측하였다.

2. 수치해석 모델 및 방법

후연소로에서 우레아 수용액 주입에 따른 NO 제거를 모사하기 위해 본 연구에서는 Eulerian 방법을 이용한 연료와 공기에 대한 기상지배방정식과 우레아 용액에 대해 Lagrangian 방법을 이용하여 액적의 궤적을 추적하는 액상지배방정식을 고려하였다. 소각로내 유동과 온도분포를 기술하기 위해 비압축성 정상상태 3차원 축대칭 원통형 좌표계에 대한 일반지배방정식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r \phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_o \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_o \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S_o + S_{o,p} \quad (3)$$

식 (3)은 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분방법을 사용하여 이산화하였으며 특히 운동량 방정식에 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다. 난류에서의 특성시간 및 크기로 나타나는 난류에 대해 k-ε 모델을, 난류반응해석은 eddy breakup 모델을 사용하였다. NO의 경우 문헌에 나타난 경험식에 의해 thermal NO 생성을 모델링하였고 870~1050°C 영역에서는 식 (1)의 NO 저감반응을 고려하였으며 이 온도영역 밖에서는 반응이 일어나지 않는다고 가정하였다.

3. 계산 결과 및 토론

본 연구는 대전 4공단 스토커소각로의 후연소로 구간 형상인 가로 4.3m × 세로 3.7m 인 장방형을 이와 대등한 면적을 가진 원통형으로 가정하였으며 이는 IFRF나 기타 우수한 국제연구논문에서도 흔히 사용된 방법으로 결과에 대한 신뢰성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. Fig.1은 4공단 스토커 소각로 도식도로 화격자의 복잡다단한 베드모델 대신에 2차 공기주입을 포함한 주연소실의 연소물질이 후연소로로 완전 균일하게 휘발화된 가스상으로 일정하게 유입된다고 가정하였다. 그러므로 후연소로의 입구 전방 2m 지점을 균일하게 휘발 혼합된 기체상의 폐기물 연료가 주입되는 것을 가정하였다.

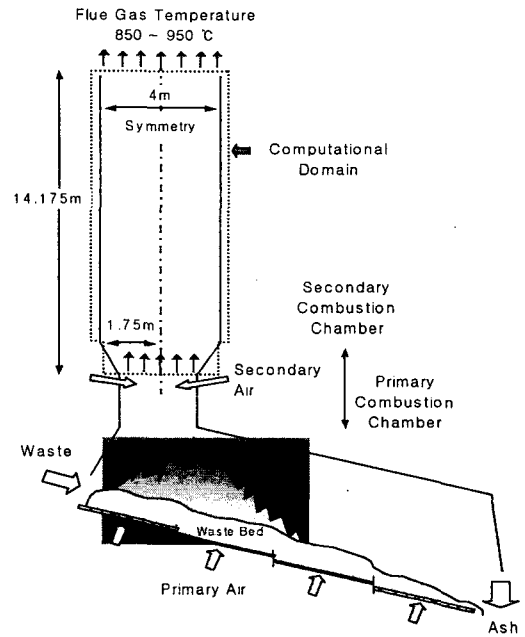


Fig. 1 Schematic diagram of a grate-type waste incinerator

Table 1. 대전시 쓰레기 소각로 1호기의 일반사항

항 목	내 용	
소각로	소각형식	스토커식 (계단식 병렬 왕복운동)
	소각용량	200 톤/일 × 1기
	폐열보일러	31.2 톤/시간 × 1기
	평균 소각량	188 톤/일
	쓰레기 발열량	1,700 kcal/kg
	평균 배가스량	41,500 Nm ³ /hr

본 연구에서는 Table 1 에서 나타난 대전시 소각로 1호기의 제원 및 운전조건를 기준으로 하여 스토커 소각로 보일러에서 일어나는 온도장, 속도장 그리고 NO의 발생 농도장 등을 일차적으로 계산하였으며 개발한 후연소로 모델을 검증하기 위해 1호기 소각로 측정자료와 비교·검토 하였다.

Fig.2 는 벽면 내화재 높이 8m, 1700kcal/kg의 발열량을 기준으로 한 로내 온도분포와

NO 발생농도, H₂O와 O₂, 환원제의 농도장을 예측한 결과로 출구에서의 NO 평균농도는 140ppm 정도이며 출구 온도는 약 967℃ 그리고 보일러 내부에서의 배기가스의 속도는 5~6 m/s 정도로 나타났다.

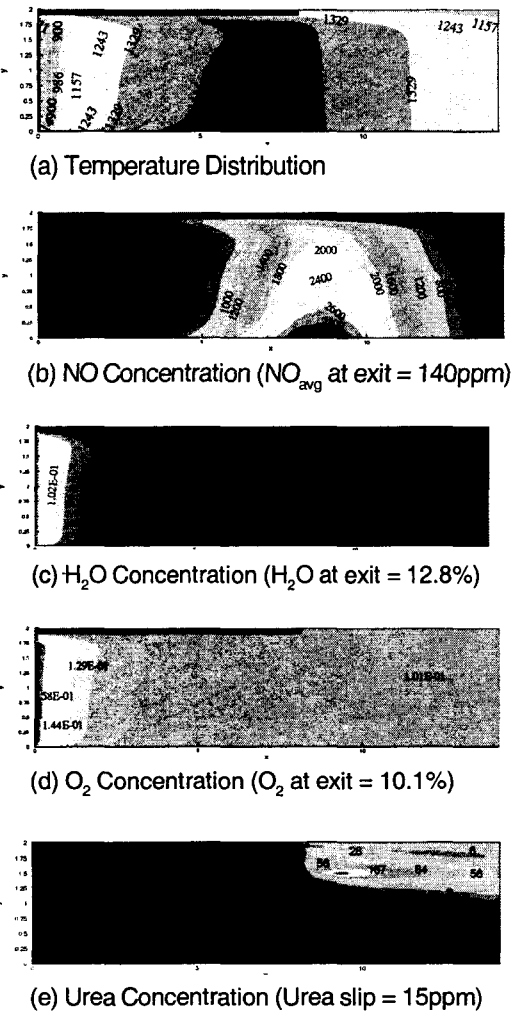


Fig. 2 Temperature distribution and NO, H₂O, O₂ and Urea concentrations in secondary combustion chamber

위 결과는 소각로 1호기 운전시 측정된 900~1000℃의 출구 온도범위와 NO농도 120ppm, 그리고 H₂O, O₂ 농도와 유사하며

벽면 내화재가 끝나는 후류영역의 온도가 환원제 주입에 적합한 것으로 판단되었다. 높이 8.24m 에서 환원제인 10% 우레아 용액 (NSR, Normalized Stoichiometric Ratio=1.0 for 200ppm as NO)을 분사한 경우 30% 정도 NO가 저감되었다. 우레아는 주입위치 상부에서 출구를 향하여 흘러가는 양상을 나타내었으며 우레아 slip은 약 15ppm으로 계산되었다. Fig. 2 (e)에서 우레아 액적이 소각로 중심부까지 효율적으로 확산될 경우 NO 저감효율은 증가될 것이며 환원제 주입속도나 액적 크기 증가에 의한 중심부로의 침투가 매우 중요함을 알 수 있다.

소각로에 투입되는 쓰레기 조성은 기후나 지역적 특성에 의해 변하며 현재 대전 4공단에서 처리하는 쓰레기 발열량은 해마다 증가하고 있는 추세이다. 기존 소각로 1호기의 경우 낮은 발열량으로 인해 출구 온도 850℃를 맞추기 위해 내화재 높이를 8m로 하였으나 현재 발열량 증가추세로 인한 온도효과를 고려하여 내화재 높이를 5m로 낮추고 이에 따른 내부 온도변화와 환원제 주입가능 위치를 살펴보았다.

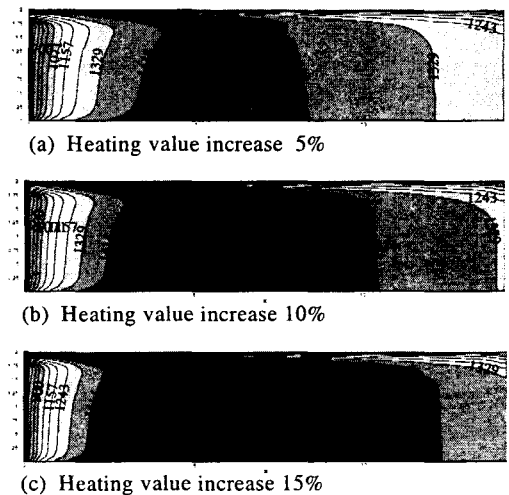


Fig. 3 Temperature distribution as the increase of heating value

Fig. 3은 기준발열량 1700kcal/kg에 비해 발열량이 5, 10, 15%로 각각 증가한 경우의 온도장으로 발열량이 증가함에 따라 1414K 이상 되는 등온선이 급격하게 팽창하고 있으며 이때의 출구 NO 농도 또한 실질적으로 증가하였다. Fig. 3 (c)는 발열량이 2000 kcal/kg에 근접한 경우로 출구영역인 12m 정도에서 우레아 반응이 가능한 온도 영역에 도달하나 배기가스 유속이 5m/s 이고 순수 화학반응에 요구되는 최대시간이 0.5초임을 고려한다면 출구 2m 전방에서 우레아의 주입은 반응에 충분한 체류시간을 제공하지 못하게 된다. 결국 발열량이 2000kcal/kg 이상에서는 SNCR 반응이 실질적으로 가능하지 않음을 시사하여 준다. Fig. 3 (a)의 경우 주입된 환원제가 defected jet 형상으로 휘어져서 출구 쪽으로 나가며 무화와 휘발화 그리고 혼합이 일어나는 일련의 과정을 고려한다면 적당한 환원제 주입위치는 6.5~7.5m 사이로 판단되며, 발열량이 10% 증가한 Fig.3 (b)는 10~11m 가 적합한 것으로 판단된다. 이와 같이 발열량에 따른 환원제 주입위치는 NO 저감 농도에 영향을 주며 위에서 선정환원제 주입위치는 일련의 수치해석결과, NO의 최대감소를 일으키는 위치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

4. 결론

대전 4공단 소각로 1호기를 기준으로 후연소로 수치해석결과 온도장, NO 농도장 그리고 연소가스유속은 1호기에서 관찰된 결과와 일치하였다. 구체적으로 언급하면 출구에서의 NO농도는 140ppm, 온도는 967°C(1240K), 산소농도 10.1% 로 계산되었으며 보일러내부에서의 배기가스의 평균 속도는 5 m/s 정도로 경험적으로 계산된 3~4m/sec보다 다소 높게 나타났다. 그러나 유속의 증가는 체류시간을 감소시킨 반면 환원제와 NO의 난류혼합 강도를 증가시키므로 이에 대한 상쇄효과가 기대된다.

최근 쓰레기 발열량 증가를 고려하여 벽면 내화재 높이를 5m로 감소시킨 후 5, 10, 15% 발열량 증가에 따른 로내 온도분포와 이때의 환원제 분사위치를 선정하였다. 발열량이 증가됨에 따라 온도의 고온영역과 NO 농도가 급격히 증가하였으며 환원제 반응과 액적의 분사거리 그리고 혼합 등을 고려하여 계산한 결과, 5% 발열량 증가의 경우에 환원제의 분사위치는 6.5~7.5m, 10% 발열량 증가의 경우에는 10~11m가 각각 적합한 것으로 판단되었다. 현 1호기 소각로 제원에서 발열량이 2000 kcal/kg 이상 증가할 경우 소각로 내의 온도장이 대부분의 후류영역까지 환원반응에 적합하지 않은 것으로 나타나 SNCR의 실질적인 적용이 어려울 것으로 판단되었다. 결국 발열량이 높은 경우 쓰레기 투입량을 줄이는 방안이 고려되어야 한다.

본 연구에서 사용한 후연소로 모델은 정확도 증진을 위해 다양한 세부 모델의 개선이 지속적으로 이루어지고 있으며 이와 같이 검증·개선된 후연소로 모델은 외국의 기술도입 없이 SNCR의 최적운전조건을 도출하여 운전 및 유지관리에 있어 보조적인 수단을 제공할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- [1] 장동순 외, "SNCR 노즐 위치 결정 열유동 해석연구", LG건설 설계보고서, 충남대학교 환경공학과 E&E CFD (2002. 7)
- [2] 박경렬 외, "SNCR 최적 운전 조건에 관한 조사연구", 대전 광역시 신일동 소각장 1호기, 대전 광역시 도시개발공사 제출 보고서 (2001. 11)
- [3] 김동찬 외, "선택적 비촉매 환원법에 의한 노내 탈질 기술 개발", 에너지기술연구소, 산업자원부 제출 보고서 (2000.12)
- [4] 장동순 외, "SNCR 노내 탈질 기술 개발을 위한 난류반응 프로그램 개발 및

수치모사”, 에너지 기술연구소 제출 보고서, 충남대학교 환경공학과 (2000.12)

- [5] Cremer, M.A., "Evaluation of SNCR performance in Ameren's Rush Island unit 2", DOE conference on SCR and SNCR for NOx control (1999)
- [6] Lee, J.Y., " A study on optimizing combustion control for CFD analysis applications, 02' ICIPEC, p.581~592
- [7] Ryu, C. and Choi, S., " Discussion on the practical use of CFD for grate type waste incinerators", 02' ICIPEC, p. 3~12.
- [8] Shin, M.S., "Numerical and Experimental study on the mixing enhancement of reduction material in SNCR system", 02' ICIPEC, p.829~840
- [9] William H. Sun, "Selective non-catalytic NOx reduction process for Korean utility and industrial boilers and cement kiln", 02' ICIPEC, p.377~388.
- [10] Wojichowski, D.L., "SNCR system-design, installation, and operating experience", DOE conference on SCR and SNCR for NOx control (1999)