

## 화학 반응을 고려한 도시 고형 폐기물 소각로에 관한 연구

권순우 · 이종협  
서울대학교 화학공학과

### A Study on the Municipal Solid Waste Incinerators with Chemical Reactions

Soonwoo Kwon and Jongheop Yi  
Dept. of Chemical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

#### 1. 서론

도시고형 폐기물의 처리 방법에 있어서 소각법은 다른 폐기물 처리 방법과 비교하여 가장 다양한 종류의 폐기물을 안전하고, 신속하게 처리 할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 소각법의 장점은 짧은 시간에 폐기물의 양과 독성을 급격히 감소시킬 수 있는 점이다. 또, 폐기물을 원거리에 수송해야 하는 부담을 감소시킬 수 있도록 이동식이며 소규모로도 제작 및 운전이 가능하며, 열을 회수하여 공정에 재사용함으로써 운전비용의 부담을 줄일 수도 있다[1].

폐기물의 소각처리를 위한 소각로는 스토커식 연소 방식, 회전상식 연소방식, 유동상식 연소방식 등이 있다. 스토커식 소각로의 경우 많은 용량을 동시에 처리 할 수 있으나 교반력이 약하여 폐기물의 성상이나 운전조건따라 국부과열 또는 부분적인 산소 결핍으로 대기오염 물질을 배출할 가능성이 있다. 회전상식 소각로는 점성이 있는 슬러지나 폐유 등의 소각에 유리한 반면 넓은 부지가 필요하고 소각대상 폐기물의 탈수도(degree of dewatering)가 나쁜 단점이 있다[2].

소각로내에서 발생하는 오염물질로는 불완전 연소 생성물인 CO, PCDD/F, Soot 등을 비롯하여 산성비의 원인이 되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl 등과 중금속류로 나눌 수 있다. 이러한 대기 오염 물질의 저감을 위해서는 연소로내의 공기 주입조건과 주입방식이 매우 중요하다. 연소가스와 과잉공기의 혼합을 증진시키고 배기가스의 고온 영역에서의 균등한 체류시간을 유지하는 것이 오염 물질을 저감시킬 수 있는 방법이다[3].

본 연구에서는 도시고형폐기물의 소각처리에 가장 많이 이용되는 스토커식 소각로와 회전상식 소각로에 대하여 열·유동장 뿐만 아니라 난류반응모델을 이용하여 공기 주입 조건에 따른 소각로내의 체류시간 및 CO, NO의 양을 정량적으로 예측함으로써 저공해 소각로 설계에 필요한 주요인자를 제안하고자 한다.

#### 2. 수학적모델 및 지배방정식

소각로내의 열유동장 및 화학종의 발생량을 예측하기 위하여 난류 연소반응 모델을 이용하였고, 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였으며 화학 반응식은 9종의 화학종에 대해 9가지 화학반응식을 이용하였으며 사용된 모델식과 반응속도식은 다음과 같다.

기상에서 운동량과 기타 물리량을 나타내는 일반 지배 방정식은 단위체적당 시간에 따른 변화하는 물리량이 유동 및 확산 flux의 divergence와 단위 체적당 생성항의 합으로 표시되어 다음과 같은 2차 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{u}\psi) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_\psi \vec{\nabla}\psi) + S_\psi \quad (1)$$

식(1)에서 왼쪽으로부터 비정상항, 유동항, 확산항을 나타내며  $\psi$  는 단위질량당 물리량을 나타내며,  $\rho$ 는 밀도를,  $\Gamma_\psi$ 와  $S_\psi$ 는  $\psi$ 에 해당되는 난류확산계수와 생성항을 각각 표시한다.

화학반응속도식에서 화학종  $i$ 에 대한 속도,  $R_i$  를 다음의 아레니우스 반응 속도식 (Arrhenius reaction rate)으로 표현할 수 있다.

$$R_{i,k} = -\nu'_{i,k} T^{\beta_k} A_k \times \prod_{j=reactant} C_j^{\nu_{j,k}} \exp(-E_k/RT) \quad (2)$$

식 (2)에서  $\nu$ 는 양론 계수,  $T$ 는 절대온도,  $A$ 는 아레니우스 상수,  $C$ 는 각 화학종의 농도,  $E$ 는 활성화 에너지를 각각 나타낸다.

난류에서 반응이 일어날 경우 반응속도식에 난류혼합에 의한 영향이 고려되는데, 본 연구에서는 Magnussen and Hjertager model을 적용하였다[4]. 즉,

$$R_{i,k} = C \rho \frac{\epsilon}{\kappa} \sum \frac{m_i}{\nu'_{i,k}} \quad (C; 2 \text{ for products and } 4 \text{ for reactants}) \quad (3)$$

로 쓸 수 있다.

식 (2)를  $A + B + M \rightarrow C + D + M$  인 반응에 적용하면

$$-r = A_k T^\beta \exp(-E/RT) C_A^a C_B^b C_M^c \quad (M: \text{third body}) \quad (2)'$$

으로 쓸 수 있으며, 본 연구에서 사용된 반응 단계 및 반응 속도 계수가 Table 1에 나타나 있다.

Table 1의 R1과 R2는 Westbrook and Dryer[5] 가 제안한 global reaction kinetic이고, R3은 가역반응으로서 역반응 상수는 반응평형상수 ( $K_e$ ) 를 이용해 구하였는데,  $K_e$ 는 다음과 같다.

$$K_e = (R^* T)^{-m_2} \exp \left[ \frac{\sum_s \nu_s^i G_s^o - \sum_s \nu_s^j G_s^o}{RT} \right], \quad m_2 = \sum_s (\nu_{s,k}^i - \nu_{s,k}^j) \quad (4)$$

식(4)에서  $G_s^o$ 는 반응물과 생성물의 표준 Gibbs 자유 에너지이다.

### 3. 수치해석 결과 및 토론

연구 대상의 소각로는 스토킨식의 경우 영국 Sheffied 소각로를 대상으로 하였으며 회전상식 소각로는 미국 Dow Chemical사의 소각로를 대상으로 하였다. 스토킨식 소각로에 대하여 2차 과잉공기의 양을 0%,25%,50%,100%,150%로 증가시

Table 1. Reaction kinetics (forward reaction)

No.	Reaction	A	$\beta$	E [J/kgmol]	a	b	c	Note
R1	$\text{CH}_4 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	2.8E09	0	2.03E08	-0.3	1.3	0	irrev.
R2	$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.3E12	0	1.65E08	1	0.25	0.5	rev.
R3	$\text{O} + \text{O} \Rightarrow \text{O}_2$	5.0E09	-0.25	0	2	0	0	rever.
R4	$\text{O} + \text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N}$	7.6E10	0	3.2E8	1	1	0	rever.
R5	$\text{N} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO} + \text{O}$	6.4E06	1	2.6E08	1	1	0	rever.

키면서 3차원 모델링을 수행하였으며, 회전상식 소각로에 대하여 메탄의 완전연소모델, 불완전연소모델 그리고 불완전 연소모델과 함께 복사에 의한 열전달을 고려한 경우에 대하여 3차원 모델링을 수행하여 실험결과와 각각 비교하였다.

본 연구에서는 소각로에 대한 3차원 모델링을 위하여 상업적 유체역학 코드인 Fluent 4.3을 이용하였으며, 각 CASE에 대한 CPU time은 약 3000분 정도이었다.

Fig. 1은 스토커식 소각로의 내의 유동장을 나타내고 있으며 본 연구 대상 모든 경우에 대하여 좌측상단에 커다란 재순환영역을 나타내었다. 2차 과잉공기의 양이 증가함에 따라 소각로내에서 발생하는 NO, CO의 양은 점차 줄어들며 고온 영역(850°C 이상)에서의 체류시간을 정량적으로 예측하여 Fig. 2에 나타내었다.

회전상식 소각로에 대한 모델링에서는 불완전 연소 모델과 함께 복사에 의한 열전달을 고려한 경우 실험 data와 가장 유사한 온도분포와 산소 농도 분포를 보였다. 회전상식 소각로내의 x-plane에 따른 속도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 소각로의 하단에 ash sump로부터의 leak air에 의하여 역류가 존재함으로 알 수 있다. Fig. 4에는 회전상식 소각로에 대한 실험 data와 모델링 data를 비교하여 나타내었는데, 소각로내 상층부는 비교적 정량적인 예측이 가능하나 하단부는 ash sump에서의 leak air양의 가정을 과다하게 함으로써 실험data와 큰 차이를 나타내었다.

#### 4. 참고문헌

1. Brunner, Calvin R. : "Handbook of Incineration Systems", McGraw-Hill, New York (1991)
2. 이봉훈 역, 폐기물소각로 계획과설계, 도서출판 세화 (1993)
3. Hester, R. E. and Harrison, R. M. : Waste Incineration and the Environment, Royal Society of Chemistry, UK (1994)
4. Seinfeld, J. H. : Atmospheric Chemistry and Physical of Air Pollution, A Wiley- Interscience publication, USA (1986)
5. Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H. : Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1988)

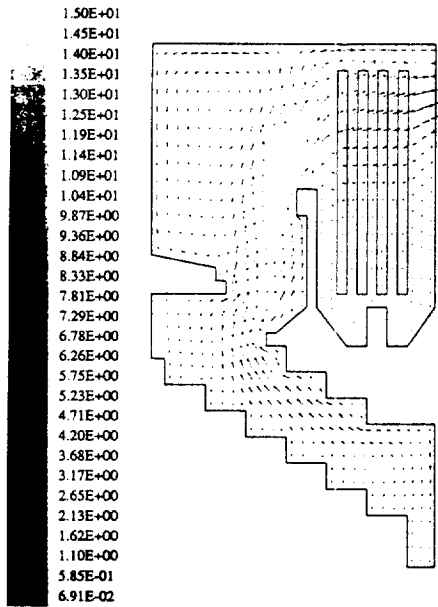


Fig.1 Vector Velocity component for the CASE1. (Stoker incinerator)

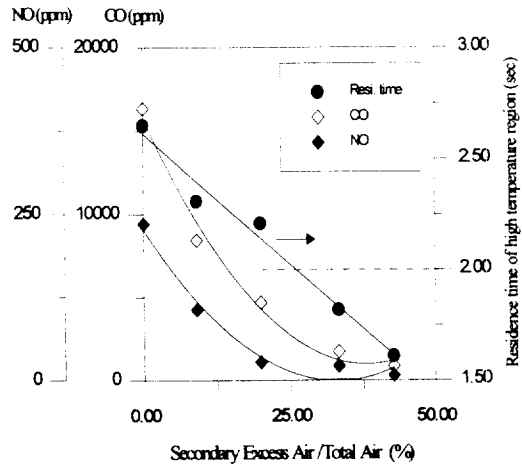


Fig.2 Variation of CO and NO emission (ppm) and the average particle residence time.

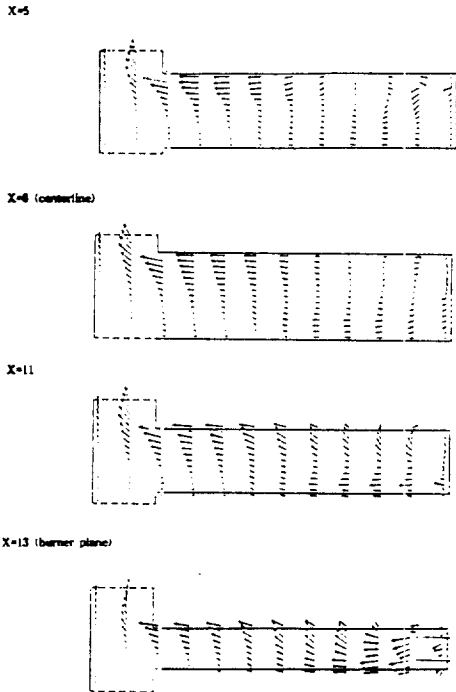


Fig.3 Vector velocity component plots for CASE1. (Rotary kiln incinerator)

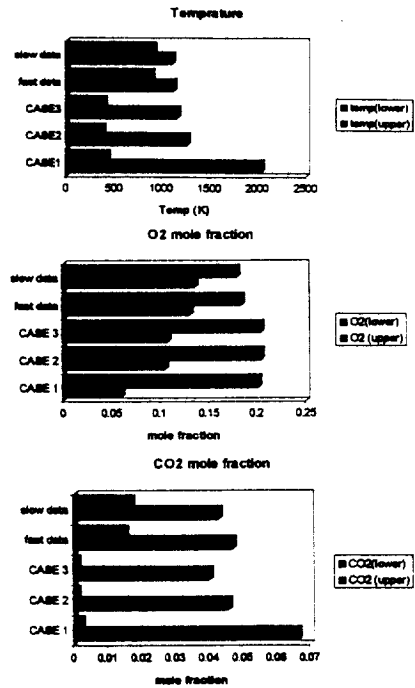


Fig.4 Comparison of experimental data and modeling data