

## 축열식 슬러지 소각로의 모델링 및 모사

김덕기, 고인석, 정창복,  
전남대학교 공업화학과

### Modeling and Simulation of Sludge Regenerative Thermal Oxidizer

Duk-ki Kim, In-serg Ko and Chang-bok Chung

Faculty of Applied Chemistry, Chonnam National University, Kwangju, 500-757, Korea

#### 서론

축열식 슬러지 소각로는 슬러지 투입구와 공기 유로의 주기적 절환으로 인해 근본적으로 비정상상태로 진행되는 공정이므로 소각로에 대한 모사는 시간에 따라 변하는 거동을 묘사할 수 있는 동적 모사가 필수적이다. 본 연구에서는 여러 운전 변수가 축열식 소각로 조업 성능을 평가하기 위한 세 가지 주요 기준, 즉 1) 슬러지의 분해 제거 효율 (Destruction and Removal Efficiency, DRE), 2) 배출 가스의 조성, 3) 보조 연료 소비량에 미치는 영향을 파악하는 데 목적을 두고 있다. 이를 위해 공정에 대한 수학적 모델을 도출하고, 모델해를 얻기 위한 수치 알고리즘 수립, 컴퓨터 프로그램 개발 및 수치 모사, 이론적으로 도출하기 어려운 모델 파라미터를 실험데이터에 근거하여 추정하는 등의 단계별 작업이 필요하다. 각 단계 별로 현재까지 수행한 연구를 아래에 기술하였다.

#### 본론

일반적으로 3차원 형상의 공정 내에서 일어나는 복잡한 물리·화학적 현상을 수학적으로 표현하는 모델을 얻기 위해서는 미소 시간 및 미소 제어체적에 대하여 물질, 운동량, 에너지 보존 법칙을 적용하게 된다. 이 과정에서 도출되는 일련의 미분방정식은 다음과 같은 일반형 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $\phi$ 는 단위 질량당의 일반 종속변수로서 각 화학성분에 대한 질량 분율  $m_i$ , 각 공간좌표 방향의 속도 성분  $u_i$  및 엔탈피  $h$ 를 각각 나타내며,  $\rho$ 는 유체 밀도를 나타낸다.  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 여러 가지  $\phi$ 의 의미에 대응하는 확산계수와 생성항을 각각 나타낸다. 한편 난류 조건하의 유체 유동에서 난류 요동의 영향을 고려하기 위해서 속도값이 평균값을 중심으로 빠르고 무작위적인 동요를 보인다는 가정 하에 평균화 조작을 취하면 각 지배 방정식은 시간 평균된 방정식으로 변환된다.

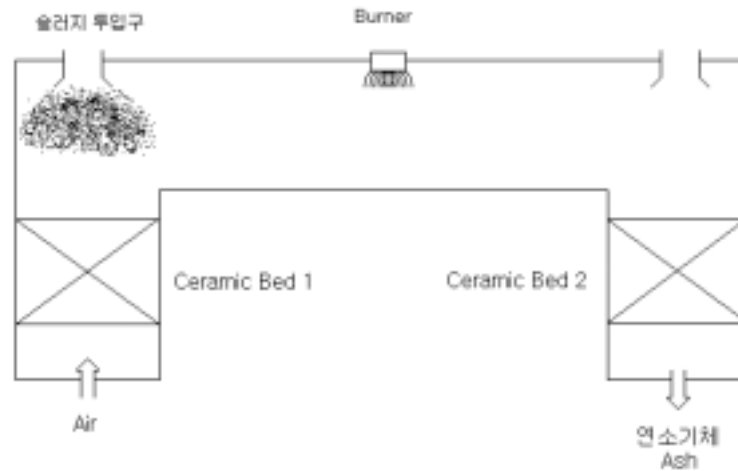


그림1. 축열식 슬러지 소각로의 개략도

축열식 소각로의 조업에서는 공기 또는 연소 기체와 세라믹 충전재와의 열교환에 의해 예열 및 축열이 이루어진다. 이때 고체인 세라믹 영역에서 일어나는 열전도 현상은 단면 방향의 온도 분포가 매우 적기 때문에 무시하고 비정상 1차원 전도 방정식을, 공극 내의 유체 영역은 대류 현상이 지배적이므로 단면 방향의 온도 분포를 무시하여 비정상 1차원 전도-대류 방정식을 구성하였다. 두 방정식은 세라믹-유체 간의 열전달항  $h(T_c - T_a)$ 을 통해 연계되는데, 세라믹 영역과 유체 영역에서 생성항으로 처리하였다.

세라믹 영역:

$$\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_c \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (h(T_c - T_a)) \quad (2)$$

유체 영역:

$$\rho_a c_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a c_a u_z T_a) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (h(T_c - T_a)) \quad (3)$$

비정상 화학종 보존 방정식은 다음과 같다.

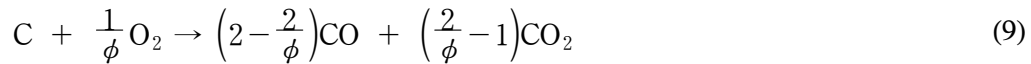
$$\frac{\partial (\rho m_j)}{\partial t} + \text{div}(\rho m_j u) = \text{div}(\Gamma_j \text{grad } m_j) + S_j \quad (4)$$

여기서  $S_j$ 는 분산된 상에 의한 생성항 또는 화학 반응에 의한 화학종  $j$ 의 생성 항이다. 슬러지 char에서의 탄소의 반응은 아래 반응식의 하나 또는 그 이상의 경로를 따라 진행된다.





반응식 (6)은 입자 주변에서의 균일 반응으로 (4),(5),(7)등 탄소입자 표면에서의 불균일 반응 속도에 비해 빠르며, Ross 와 Davidson의 연구에 따르면 반응식 (7)은 기타 반응에 비해 거의 무시할 만 하다. 따라서 위의 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

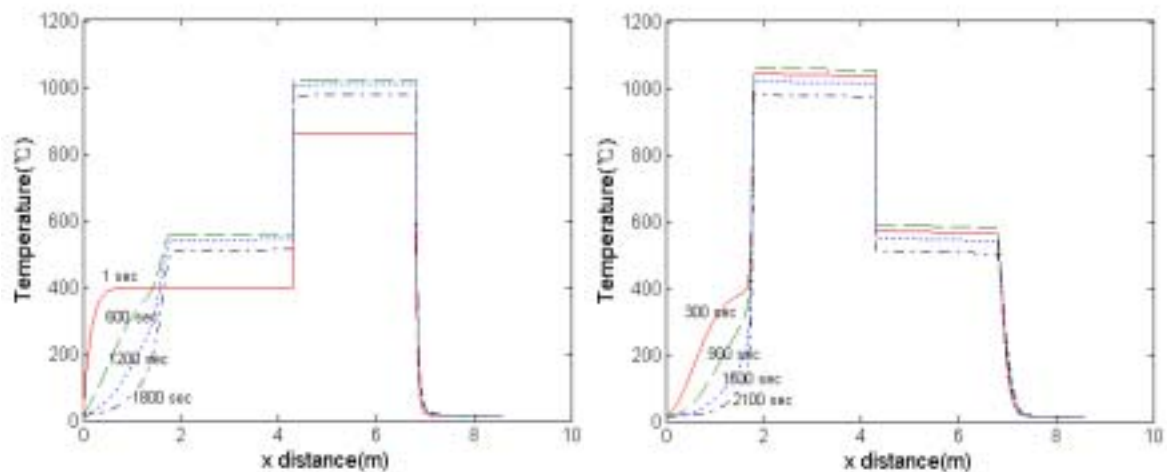


여기서  $\phi$ 는 입자의 온도, 반경 및  $CO/CO_2$  비에 의존하는 파라미터이다. 또한 탄소의 반응속도는 입자의 표면적과 산소의 농도에 의존하며 반응속도식은 다음과 같으며,  $k_0$  는 반응속도 상수이고,  $T_p$ 는 입자 온도이다.

$$r_{O_{AS}} = k_0 (\pi d_p^2) C_{O_{AS}} \tag{10}$$

도출된 미분방정식에 대해 유한체적법(Finite Volume Method(FVM))을 근간으로 하는 수치해법을 구성하였다. 미분방정식내의 확산항에 대한 차분도식으로는 중앙차분(central difference) 도식, 대류항에 대해서는 멱승(power-law) 도식, 비정상항에 대해서는 완전암시(fully-implicit) 도식을 각각 이용하였다.

축열식 소각로 운전에 있어 절환 주기는 보조연료 사용량 또는 세라믹 축열성능에 가장 중요한 파라미터가 된다. 초기 입구 세라믹 400℃도, 보조열량 100kJ/s 인 경우 소각로 내부 온도 분포와 임의의 지점에서의 주기적 절환에 따른 온도 변화를 조사 하였다.



(가)

(나)

그림2. 절환주기에 따른 소각로 내부 온도 분포

(가) 유속방향 → (나) 유속방향 ←

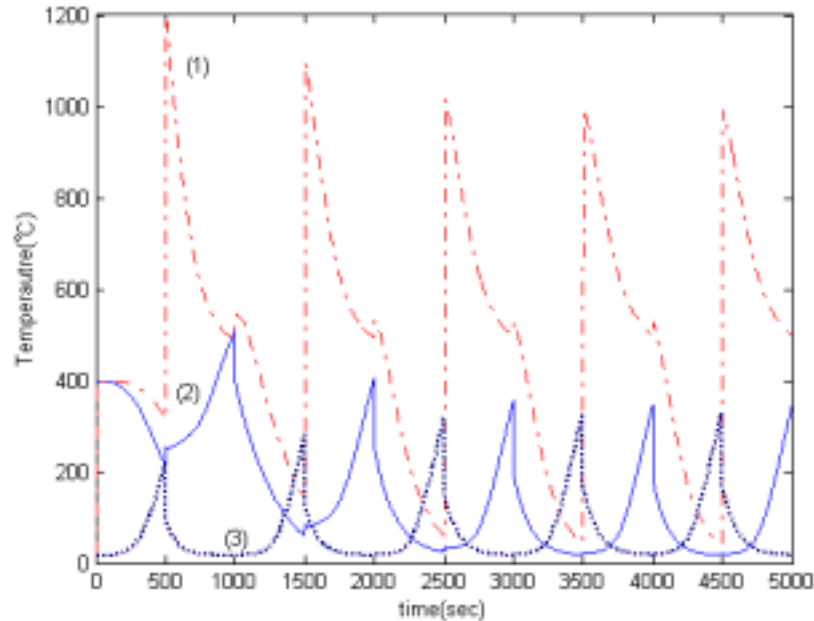


그림3. 시간에 따른 고정된 위치에서의 온도  
(1) 연소실 내부, (2) 입구 방향, (3) 출구 방향

### 결론

축열식 슬러지 소각로는 슬러지 투입구와 공기 유로의 주기적 절환으로 인해 근본적으로 비정상상태로 진행되는 공정에 대한 모사를 수행 하였으며, 절환 주기가 300 초 일 때 2500초 이상 운전시 임의의 위치에 대한 주기성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 절환주기 150초 미만의 경우 세라믹의 열이 모두 회수되지 않아 출구방향으로 열 손실이 일어남을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Byung-Seok Choi, Jongheop Yi. Simulation on the Regenerative Thermal Oxidation of Volatile Organic Compounds, Hwahak Konghak Vol.35, No5, 1997;747-454
- [2] Rajan RR, Wen CYA. Comprehensive model for fluidized bed coal combustors. AICHE Journal 1980;26(4):642-655
- [3] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York (1980)