

축열식 슬러지 소각로의 동적 모사

고인석, 정창복*, 김덕기
 전남대학교 응용화학공학부
 (chungcb@chonnam.ac.kr*)

Dynamic simulation of sludge regenerative thermal oxidizer

In-seung Ko, Chang-bock Chung*, Duk-ki Kim
 Faculty of Chemical Engineering, Chonnam National University
 (chungcb@chonnam.ac.kr*)

서론

슬러지의 연소 또는 소각은 폐수처리에서 있어 대량으로 방출되는 고형 폐기물 처리에 널리 쓰이는 방법이다. 축열식 슬러지 소각로 (Sludge Regenerative Thermal Oxidizer (S-RTO))는 고온의 배기가스가 축열제인 세라믹을 가열 후 이 열을 재생하여 폐기물의 건조 및 소각에 사용하기 때문에 현재 가동중인 유동층 소각로에 비해 보조연료비를 절감할 수 있다.

슬러지 소각에 사용된 축열식 슬러지 소각로는 슬러지 투입구와 공기 유로의 방향이 바뀔 때 따라 주기적 정상상태 거동을 보이므로 소각로에 대한 모사는 시간에 따라 변하는 거동을 모사할 수 있는 동적 모사가 필수적이다.

본 연구의 목적은 슬러지 투입량, 전환주기, 보조연료의 사용량의 변화에 따른 조건별 모사를 통한 개선된 운전조건의 제시에 있다. 이를 위해 공정에 대한 수학적 모델을 도출하고, 모델해를 얻기 위한 수치 알고리즘 수립, 컴퓨터 프로그램 개발 및 수치모사를 실시하였다.

모델링

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 미분식은 다음과 같은 일반형 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 각 화학성분에 대한 질량 분율, 속도 성분, 엔탈피 등을 나타내는 변수이다. Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 여러가지 ϕ 의 의미에 대응하는 확산계수와 생성항을 각각 나타낸다[1].

축열식 소각로의 조업에서는 공기 또는 연소 기체와 세라믹 충전재와의 열교환에 의해 예열 및 축열이 이루어진다. 이때 단면 방향의 온도 분포가 매우 적기 때문에 비정상 1차원 전도-대류 방정식을 구성하였다. 두 방정식은 세라믹-유체 간의 열전달항 $h(T_c - T_a)$ 을 통해 연계되는데, 세라믹 영역과 유체영역에서 생성항으로 처리하였다.

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

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

연소실에서는 투입된 슬러지가 망위에서 쌓였다가 예열된 공기에 의해 건조, 열분해, 연소반응이 일어나며, 보조연료에 의한 물질 및 에너지의 투입이 이루어진다. 이에 대한 연소실 내부에서의 화학종 보존 방정식과 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\text{화학종 보존 방정식} : \rho \frac{\partial m_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u m_1) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_1 \frac{\partial m_1}{\partial z} \right) + R_1 \quad (4)$$

$$\text{에너지 방정식} : \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\rho c u_z T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (5)$$

슬러지의 연소를 위해서는 다량의 수분을 함유하고있는 슬러지를 건조 시키고, 건조된 슬러지의 열분해가 우선 되어야 한다. 그리고 열분해에 의해 생긴 휘발성 물질과 고정탄소에 대한 연소가 단계적으로 이루어져야 한다[2].

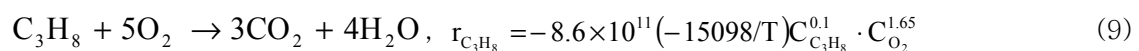
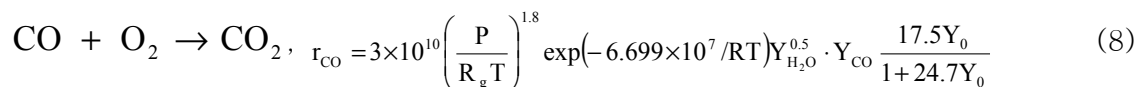
뜨거운 주변으로부터의 복사와 입자 표면으로부터의 전도가 무시된다는 가정하의 건조에 대한 속도식과 열분해에 대한 속도식은 각각 다음과 같이 주어진다[2],[5].

$$\dot{W} = \pi d^2 h (T_a - T_p) L_w \quad (6)$$

$$\dot{N} = A \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \exp(-E/RT_p) \quad (7)$$

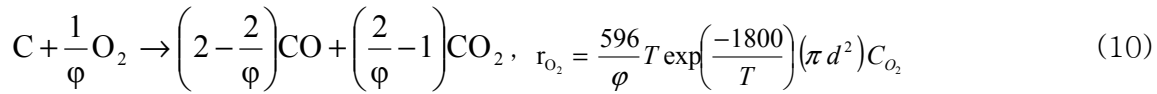
여기서, T_a 는 공기온도, T_p 는 입자의 온도이며, L_w 는 물의 증발 잠열이며, 여기서 A 는 $1.82 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, E 는 $8.16 \times 10^3 \text{ J/mol}$ 로 주어지며, r 은 입자의 반지름이다.

슬러지의 열분해에 의해 CO , CO_2 그리고, C_xH_y 가 생성되며, 생성된 휘발성 물질은 Ogada와 Werther (1996)의 연구[3]에 의해 프로판과 유사한 성질을 보임을 알 수 있다. 휘발성 물질의 연소에 대한 반응식 및 속도식은 다음과 같다.



여기서 R_g, R 은 각각 기체상수값 $82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 / \text{gmol} \cdot \text{K}$, $8314.5 \text{ J/kgmol} \cdot \text{K}$ 이며, Y_i 는 각각의 몰분율, C_i 는 각각의 농도이다[4],[6].

열분해 되지않고 남아있는 고정탄소에 대한 반응식 및 속도식은 다음과 같다[4].



$$\text{where, } \phi = \frac{2p+2}{p+2}, \quad p = 2500 \exp(-5.19 \times 10^7 / RT)$$

수치해법

도출된 각 영역의 미분방정식에 대해 유한 체적법(Finite Volume Method (FVM))을 근간으로 하는 수치해법을 구성하였다. 이산화방정식을 도출하기 위하여 격자망을 구성하는 방법으로는 계산 영역에 먼저 격자점을 배치한 후 제어 체적면을 격자점 사이의 중앙에 놓이게 하는 방법을 사용하였다.

미분방정식내의 확산항에 대한 차분 도식으로는 중앙차분(Central difference)도식, 대류항에 대해서는 멱승(Power-law)도식, 비정상항에 대해서는 완전암시(Fully-implicit)도식을 이용하였다[1].

결과 및 고찰

축열제인 세라믹 베드의 예열 및 축열 성능 평가를 위해서는 이론적으로 도출하기 어려운 세라믹 베드의 열전달 계수를 세라믹 베드의 냉각실험 데이터를 사용하여 추정하였다. 이때, 열전달 계수의 상관 관계식은 다음과 같은 멱승 관계식으로 나타내었다.

$$h = au^b T^c \quad (11)$$

실험 데이터를 가장 잘 설명할 수 있는 계수 a, b, c의 값을 구하기 위해 최소제곱법을 사용하였다. 이때, 정형화된 다변수 최적화 문제를 풀 수 있는 MATLAB optimization toolbox의 lsqcurvefit function을 사용하였다. 그 결과 얻어지는 계수값은 a=0.9908, b=1.1045, c=0.2839이다.

축열식 슬러지 소각로의 운전에 있어 슬러지 투입량, 절환 주기, 보조 연료의 사용량은 중요한 변수들이다. 절환 주기가 너무 짧으면 슬러지의 완전연소가 이루어지지 않으며, 너무 길면 축열 성능이 떨어진다. 보조연료의 사용은 소각로의 운전비용에 가장 큰 영향을 주는 요소로서, 적절한 보조연료의 사용이 필요하다.

초기 입구 세라믹 800℃, 보조열량(경유) 0.02kg/s인 경우 소각로 내부 온도 분포와 임의의 지점에서의 주기적 절환에 따른 온도변화를 조사하였다. 슬러지 투입량, 절환 주기, 보조 연료의 사용량을 변화시켜 가면서 광범위한 조건별 모사를 실시하였다.

슬러지 투입구와 공기 유로의 방향이 바뀔 때 따라 주기적 정상상태 거동을 보이는 축열식 슬러지 소각로에 대한 동적 모사를 실시하였다. 연소실 내부의 온도 분포가 공기 유로의 절환에 따라 주기적 정상상태 거동을 보임을 알 수 있었으며(Fig.2), 세라믹 베드의 축·예열성능 및 연소실 내부의 온도 분포를 알 수 있었다(Fig.3). 보조열량의 사용량이 0.02kg/s미만인 경우와 절환 주기가 150s 미만의 경우 축열제의 축열 성능이 떨어짐을 알 수 있었고, 그 이상인 경우 과도한 보조연료의 소모가 수반되었다.

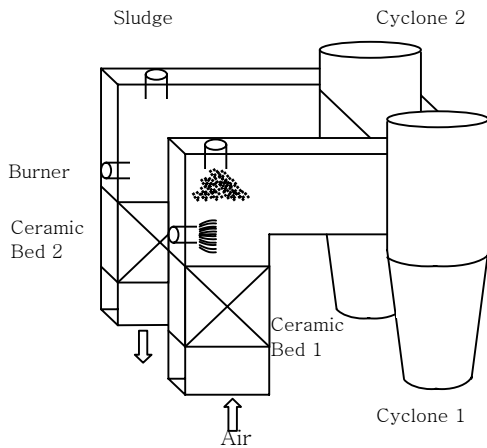


Fig. 1. 축열식 슬러지 소각로의 개략도

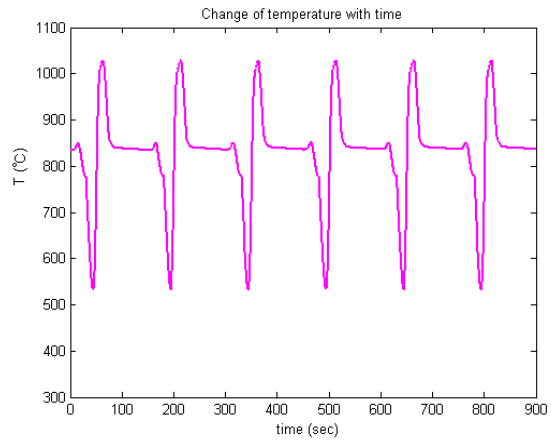


Fig. 2. 시간에 따른 연소실내부 온도분포

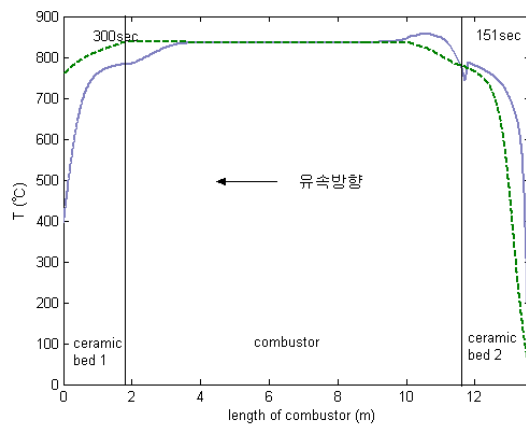
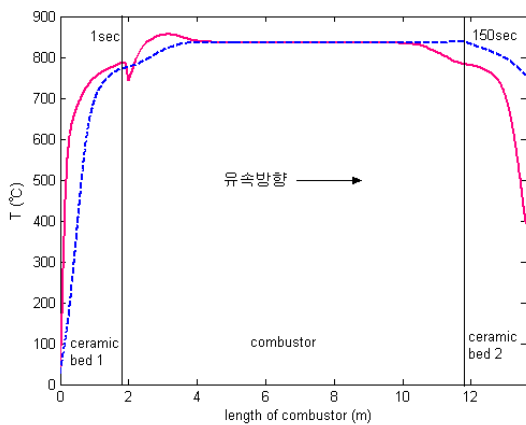


Fig. 3. 절환 주기에 따른 소각로 온도변화

참고문헌

[1] Patankar, S. V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Co. Taylor & Francis Group, New York, (1980)

[2] F. Winter, Temperature in a fuel particle burning in a fluidized bed. Combustion and flame v.108, 302-314 (1997)

[3] W. L. McCabe, Unit operations of chemical engineering, 5 Edition, 678-680(1995)

[4] T. Ogada, J. Werther, Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed. Fuel v.75, 617-626 (1996)

[5] Renga R. Rajan and C.Y.Wen, A comprehensive model for fluidized bed coal combustors. AIChE v.26, 642-655 (1980)

[6] S. R. Turns, An introduction to combustion, 163-166(1999)