

하수슬러지 연소유동장에서의 입자궤적 특성 연구

이 진욱, 허인상*, 강승균*

고등기술연구원 에너지/환경연구실, *(주)대우-건설 환경사업팀

Numerical Study for the Particle Trajectory in a Sewage Sludge Combustor

Jin Wook Lee, Il Sang Huh, Seung Kyun Kang*

Institute for Advanced Engineering, *Daewoo Corporation

1. 서론

최근 환경오염과 관련하여 하수처리장에서 발생하는 슬러지의 처리문제가 대두되고 있다. 지금까지는 매립 및 해양투기 등의 방법으로 해결하였지만, 조만간 직매립 및 해양투기가 불가능해질 예정이므로 소각처리 방식이 새로운 방법으로 떠오르고 있다. 하수슬러지는 탄소와 수소 등 가연성 성분을 다량 함유하고 있으나 수분을 다량 함유하고 있어 연료로서의 효용가치는 상당히 떨어진다[1]. 그러나 최근 탈수기술의 발달로 인하여 슬러지의 발열량을 상당히 높일 수 있게 되었으며, 이로 인하여 슬러지의 연소도 가능하게 되었다. 또한 슬러지 연소 후의 잔재의 처리와 관련하여, 연소로에서는 재를 건회상태로 연소시킨 후 외부에서 잔재를 용융하는 방식(이하 외부용융방식)과 용융연소로에서 연소와 용융을 동시에 처리하는 방식(이하 내부용융방식)을 들 수 있다. 이러한 두 방식의 경우 연소로내에서의 입자 궤적의 진행방향은 필연적으로 달라질 수 밖에 없다. 즉, 내부용융방식에서의 입자는 고온 분위기의 연소로 내부에서 용융상태로 연소로 벽면에 부딪힌 후, 슬랙 상태로 흘러내려야 한다. 따라서 입자가 적당한 거리를 진행한 후 벽면에 부딪히는 궤적이 형성될 수 있도록 선회강도가 조절되어야 한다. 반면에 외부용융방식의 경우에는 연소를 진행하는 입자가 연소로 벽면에 부딪히는 경우에는 오히려 침식이나 파울링(fouling)을 유발하게 된다. 따라서 연소방식의 선정에 따라 입자궤적에 대한 신중한 고려가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 사이클론형 연소로 내부에서의 건조 슬러지의 연소현상에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 사이클론형 연소로를 이용하는 경우 혼합 및 체류시간 증대의 효과를 위하여 선회유동장을 형성시키며 입자의 궤적은 선회강도에 직접적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다[2,3]. 따라서 본 연구에서는 입자의 궤적에 대한 고찰을 통하여 내부용융방식과 외부용융방식의 기준을 설정할 수 있는 방안을 확보하고자 시도하였다. 이를 위하여 외경과 처리용량(즉, 버너 크기)이 주어진 상황을 고려하여 외벽에서의 분사각도를 변경시키면서 수치

적 실험을 진행하였다. 분사각도가 작은 경우에는 외부용융방식에 적절한 입자의 궤적이 관찰되는 반면에, 분사각도가 커짐에 따라, 즉, 선회각도가 강해짐에 따라 내부용융방식에 적절한 궤적으로 변화되어 가는 것을 관찰할 수 있었다.

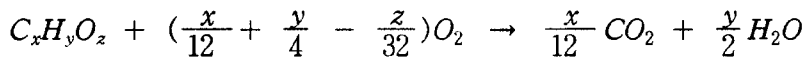
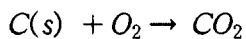
2. 수학적 모델링

화학반응(연소)을 동반하는 유동장에서는 일반적으로 난류, 상변화 및 대류/복사 열전달 등이 수반된다. 이와 같은 연소유동장을 지배하는 방정식은 3차원 직교좌표계 상에서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \phi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi}$$

여기서 (x, y, z) 는 Cartesian 좌표계상에서의 각 방향이며, ϕ 는 해석하고자 하는 독립변수로서 각 방향에 대한 속도성분, 레이놀즈응력(Reynolds stress), 엔탈피 및 각종 화학종을 각각 나타낸다. ρ 및 Γ_{eff} 는 연소가스의 밀도 및 각 전달함수에 대한 등가확산계수이며, S_{ϕ} 는 생성항을 나타낸다. 상기 방정식은 물체적합좌표계로 사상(mapping)된 후 수치해석에 적용된다.

사이클론형 연소로 내에서는 필연적으로 선회가 동반되므로 이를 적절히 해석하기 위하여 레이놀즈응력 모델을 이용하였다. 건조 후의 하수오니는 연료인 미분탄에 비하여 고정탄소의 비율이 적다는 특성만 다를 뿐, 수학적으로는 미분탄연소 해석[4]과 같은 방법론을 적용할 수 있다. 그러나 발열량이 떨어지는 특성상 내부용융방식의 경우에는 산화제의 산소분율을 높이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 입자궤적 관찰의 목적상 우선 산화제의 산소 부피분율을 공기보다 약간 높은 30%로 설정하였다. 휘발분의 연소율은 일반적인 기체연료의 연소와 같은 방법론을 적용하고, 고정탄소의 연소율은 난류혼합 연소율과 화학기구론에 의한 연소율의 조화평균을 취하는 방법론을 택하였다[5]. 즉,



$$R_{F.C.} = \frac{R_{t.m.} R_{c.k.}}{R_{t.m.} + R_{c.k.}}, \quad R_{V.M.} = \min[R_{t.m.}, R_{c.k.}]$$

여기서 $C(s)$ 와 $C_x H_y O_z$ 는 고정탄소와 휘발분을 각각 나타내며, 하첨자 t.m.과 c.k.는 turbulent mixing 및 chemical kinetics의 의미로 각각 사용하였다. 하수슬러지의 물성치는 참고문헌[6]에서 제시한 값을 이용하였으며, 고정탄소의 연소모델링에 관한 상수들은 일반적으로 미분탄 연소에 많이 적용되는 값을 이용하였다. 복사열전달에 대해서는 비교적 수렴성이 좋은 것으로 알려진 P-1 모델을 적용

하였다.

3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 위에서 언급한 방법론을 이용하여, 외경과 노즐 크기는 고정시킨 상태에서 분사각도를 변경시켜 가면서 연소반응을 동반하는 유동장에 대한 수치해석을 실행하고, 연소로내의 제반 변수, 특히 입자의 크기에 따른 궤적을 관찰함으로써 내부용융방식 또는 외부용융방식에의 적용 타당성을 고찰하였다.

그림 1은 분사각도가 10° 인 경우에 대한 연소로 내에서의 온도장 및 속도장을 나타내고 있다. 이 경우 주어진 외경과 노즐 직경을 고려한 선회수는 약 0.35로서 비교적 약한 선회유동장이다. 선회의 영향으로 인하여 슬러지 입자가 연소로 벽면 근처로 치우치므로 이 근처에서 고온 영역이 형성되지만, 정도는 강하지 않으며 후류로 갈수록 균일해지는 모습을 보여주고 있다. 속도장에서도 선회유동의 특성상 중앙으로 분사된 기체가 외벽 방향으로 진행하려는 모습을 보이지만 강선회유동에서 형성되는 재순환 영역은 관찰되지 않고 있다. 그림 2는 연소로 내부에서 슬러지 입자의 크기에 따른 궤적을 보여주고 있다. 입자가 작은 경우에는 빠른 시간내에 탈휘발분화 및 고정탄소의 연소를 종료하고 입자가 커질수록 연소완료가 늦어지는 전형적인 고체 입자 연소 모습을 보여 주고 있다. 이 경우 대부분의 슬러지 입자가 벽면에 부딪히지 않은 상태로 출구를 통해 배출되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 약선회 유동장은 건회배출 방식에 적절하며, 연료와 산화제의 혼합효과는 기대할 수 있으나 재순환영역이 존재하지 않으므로 체류시간 증대의 효과는 기대할 수 없는 형상의 유동장으로 판단된다.

그림 3은 분사각도가 30° 인 강선회($S_N=1.02$) 유동장에 대한 연소로 내에서의 온도장 및 속도장을 보여주고 있다. 온도장에서는 연소로의 벽면 근처에서 상당히 높은 온도영역이 형성되는 것을 관찰할 수 있으며 또한 그림 1의 경우보다 고온영역이 좁은 영역에 집중되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 강선회의 영향으로 건조 슬러지 입자의 대부분이 벽면으로 향하고, 이 근처에서 많은 양의 휘발분 및 고정탄소가 연소되기 때문에 발생한 결과로 판단된다. 속도장에서는 특이한 현상으로서 증공형(annular type) 재순환 영역이 관찰되고 있다. 이와 같은 증공형 재순환 영역은 강선회를 동반하는 사이칼론형의 반응기에 대한 이전의 여러 실험적 연구에서 많이 관찰된 현상이다. 난류모델로서 선회를 고려한 $k-\epsilon$ 계열의 모델(Richardson number correction model, RNG $k-\epsilon$ model 등)을 이용하여도 이러한 현상이 관찰되지 않는 반면에, 본 연구에서는 난류의 비등방성이 충분히 고려된 레이놀즈응력 모델을 적용하였기에 실험적으로 관찰되는 주요한 현상을 수치해석적으로 확인할 수 있었다. 그림 4는 연소로 내부에서의 입자의

진행 궤적을 나타낸 것이다. 직경이 작은(30 μ m) 입자들은 연소를 완료한 후 출구 근처에서 벽면에 부딪히고, 직경이 큰(50, 70, 90 μ m) 입자들은 크기에 따라 연소완료 후 또는 완료 이전에 벽면에 부딪히는 모습을 볼 수 있다. 용융로에서는 입자들이 적절히 연소한 후 벽면에 부딪혀 용융슬랙 상태로 흘러야 한다. 따라서 이러한 유동장은 내부용융방식 연소로에 적합할 것으로 판단된다. 또한 분사각도가 너무 커지면 작은 입자도 대부분 입구 근처에서 벽면에 부딪히게 되어 고정탄소의 불와전연소 및 침식의 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 외부용융방식을 채택하는 경우에도 외경, 노즐크기 및 분사각도의 함수로 주어지는 선회수의 적절한 범위가 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

하수슬러지 연소로내의 반응유동장에 대하여 노즐의 분사각도를 변경시키면서 수치해석 연구를 수행하였다. 분사각도가 작은, 즉 선회가 약한 경우에는 입자들이 대부분 출구로 빠져나가기 때문에 건회처리 방식에 적합하고, 분사각도가 커짐에 따라 연소로내에서 연소 및 용융의 동시 처리에 적합한 입자의 궤적이 관찰되었다. 선회가 강한 경우에는 고온영역이 연소로 외벽 근처에 집중되는 반면에 선회가 약한 경우에는 연소로 내부의 온도구배가 상대적으로 약함을 알 수 있었다. 또한 선회가 강한 경우에는 연소로 내부에 증공형 재순환영역이 형성됨을 보여주었다.

참고문헌

1. 하수슬러지 성분 및 소각 특성에 관한 연구, 원양수, 이철희, 최성필, 한국폐기물학회지, 제 14권, pp. 43-53, 1997
2. Swirl Flows, A. K.Gupta, D. G. Lilley, N. Syred, Abacus Press, 1984
3. A Study of Modulatable Cyclone Combustors Using Gaseous Fuel, J. Institute of Energy, Vol. 159, pp. 160-168
4. An Evaluation of Three-dimensional Computational Combustion and Fluid-dynamics for Industrial Furnace Geometries, P. A. Gillis & P. J. Smith, 23rd Symposium (International) on Combustion, pp. 981-991, 1990
5. Fluent Ver. 4.4 User's Manual, 1997, Fluent Inc.
6. 酸素富化 燃焼式 下水汚泥 熔融爐の 開發, 西川進 外, 三麥重工業技報, Vol. 26, pp. 549-556, 1989

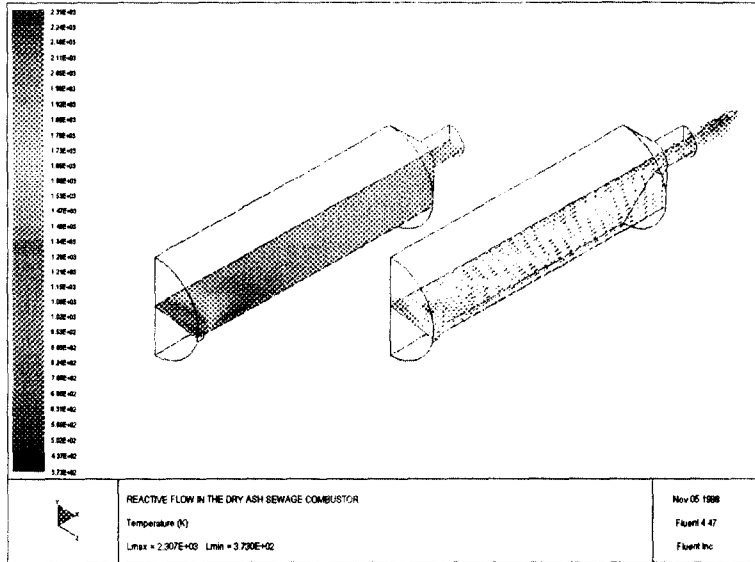


그림 1 하수슬러지 연소로내 온도장 및 속도 벡터($S_N=0.35$)

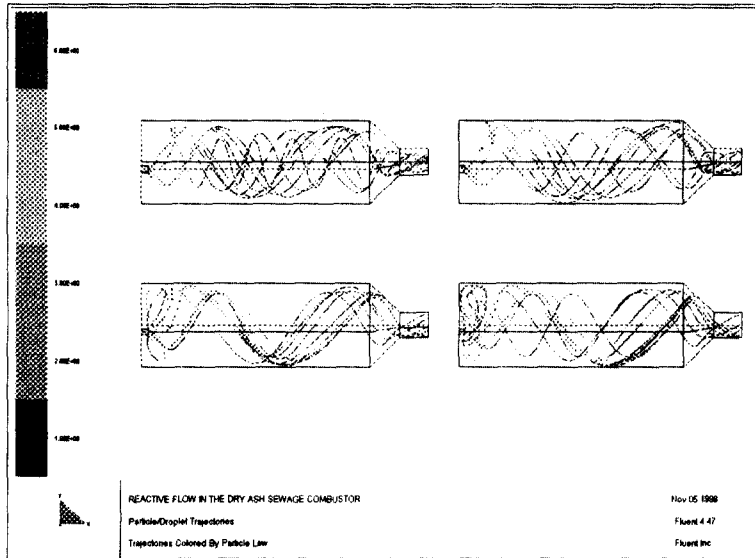


그림 2 하수슬러지 연소로내 슬러지 입자의 궤적
 ($S_N=0.35$, $d_p=30, 50, 70, 90 \mu\text{m}$)

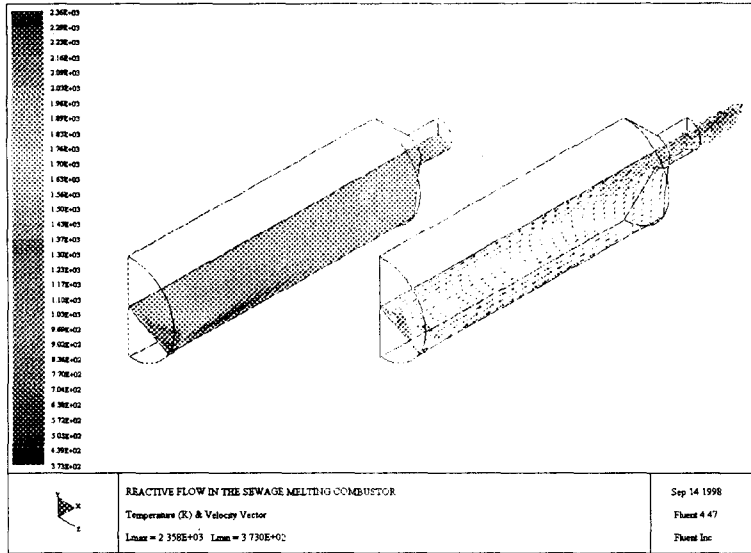


그림 3 하수슬러지 연소로내 온도장 및 속도 벡터($S_N=1.02$)

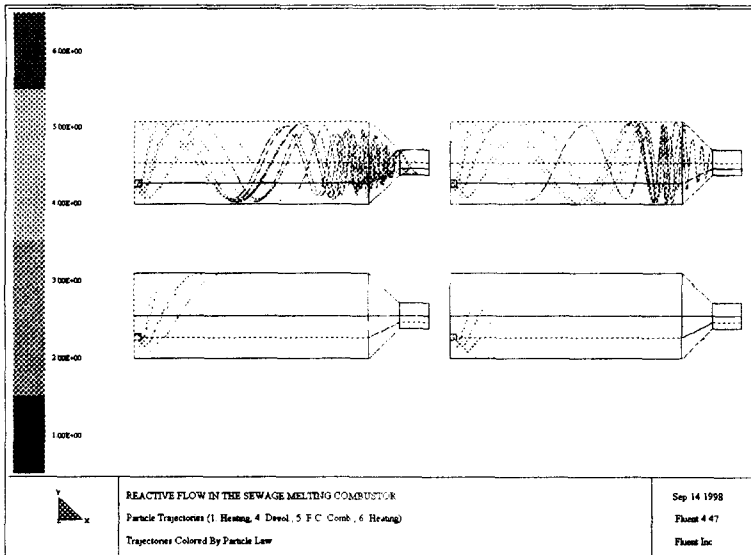


그림 4 하수슬러지 연소로내 슬러지 입자의 궤적
 ($S_N=1.02$, $d_p=30, 50, 70, 90 \mu\text{m}$)