

Fluent를 이용한 용융·열분해 소각로의 화학반응을 고려한 3차원 모사

김동주, 함승주
연세대학교 화학공학과

Three-Dimensional Simulation of Thermoselect-type Incinerator Considering Chemical Reactions by Using Fluent

Dong-joo Kim, Seungjoo Haam
Department of Chemical Engineering, Yonsei University

서론

소각법에 의한 폐기물 처리방법은 소각재 및 비산재와 배출가스 등으로 인한 2차 오염의 유발과 소각 후의 부산물을 처리하는 추가비용 등의 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위한 기술로 용융·열분해처리 공정 기술이 최근 각광받고 있다. 이 공정은 폐기물 중에 함유되어 있는 모든 무기물을 1400℃ 이상의 고온에서 전량 용융 배출 후 수쇄하여 무공해 골재로 재활용토록 하며, 폐기물 중에 함유된 모든 유기물은 전량 고온 열분해 한 후 완전 연소시켜 사용가능한 가스로 전환시킴으로서 대기 중으로의 방출되는 연소가스가 없는 기술이다. 또한 산소와 순환탄산가스로 구성된 혼합가스를 사용하여 불필요한 질소 유입을 봉쇄하여 NO_x 생성을 원천차단하고, 배기가스 전량을 자원화 할 수 있으며, 고온 완전·안정 연소가 가능하다.

용융·열분해처리 공정기술의 보다 효율적인 처리성능 향상과 안정화를 위해서는 다양한 설계조건에 대한 전산모사(Simulation)를 통해 연소가 활발히 일어나면서 원활하게 열이 공급되는 조건을 찾아야한다. 이 경우 반응에 의한 열전달과 물질전달, 난류유동 등을 고려해야하기 때문에 수치해를 구할 시에 많은 어려움이 따른다. 이에 범용 유체역학 코드인 Fluent 6.0을 사용하였다. Fluent는 복잡한 난류유동과 연소반응 모사에 적절한 모델을 제시하여 보다 정확한 해를 구할 수 있게 해준다.

본 연구에서는 Fluent를 이용하여 유체유동과 혼합반응을 모두 고려한 용융·열분해 소각로의 3차원 모사를 정상상태(steady-state) 조건 하에서 수행하였다. 수렴 척도는 나머지(residual)를 10⁻³ 이하로 설정하여 신뢰도를 높였다.

본론

Fluent에서 지원하는 반응모델 중에서 species transport 모델이 적용되었으며, 4가지 모델 중에서 laminar finite-rate 모델과 eddy-dissipation 모델이 함께 적용되었다. laminar finite-rate 모델은 난류요동의 효과를 무시하고 Arrhenius 식을 이용하는 모델로 Arrhenius 반응 속도식은 $A+B+M \rightarrow C+D+M$ (M:third body)인 반응의 경우 다음과 같이 표현된다.

$$-r = A_k T^{\beta} \exp(-E/RT) C_A^a C_B^b C_M^c \quad (1)$$

여기서 A는 Arrhenius 상수, C는 각 화학종의 농도, E는 활성화 에너지를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 반응단계와 반응 속도계수를 Table 1에 나타내었다. [1,2] 난류혼합에 의한 영향을 고려한 eddy-dissipation 모델은 Magnussen과 Hjertager가 제안한 식이 적용되었다. 이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{i,k} = C\rho \frac{\epsilon}{\chi} \sum \frac{m_i}{v_{i,k}} \quad (2)$$

이러한 난류반응모델은 대부분의 연소반응에서 혼합이 일어나면 반응이 순간적으로 진행되어 종료된다고 가정하여 화학평형 개념을 사용한다.

연구방법

본 연구에서는 반응이 주로 일어나는 연소대에서의 유동이 중요하기 때문에 그림 1과 같이 geometry를 구성하였다. 바닥의 용융물은 반응에 참여하지 않으며 일정한 수위를 유지한다는 가정 하에 제외되었으며, 풍구는 3개가 소각로 중심을 향하도록 배치되었다. 코크스(C(s))는 소각로 위에서 폐기물과 함께 떨어지나 용융물 위에서 반응한다고 가정하여 바닥 면에 원기둥 형태로 설정하여 표면반응 조건을 적용하였다. 풍구에서는 O₂, CO₂, H₂O(g) 혼합 기체가 분사되며, 입구 속도는 0.1081 kg/s로 설정하였다. 혼합 기체의 질량 분율은 O₂ : H₂O : CO₂ = 0.2314 : 0.3316 : 0.437 이며, 난류모델은 standard *k-ε* model이 적용되었다.

결과 및 토론

전산모사 결과 만족할만한 수렴도를 얻었으며, 용융·열분해 소각로 중심단면(z축 단면)에서의 온도분포를 그림 2에 도시하였다. 온도분포는 375K~2540K로 반응계산이 제대로 수행되었음을 확인할 수 있다. 가장 온도가 높은 부분은 풍구와 코크스 표면 사이이며, 오른쪽에 편중되었다. 또한 오른쪽 풍구 바로 윗부분에서의 온도분포가 왼쪽보다 불규칙한 분포를 보이는 것으로 보아 오른쪽 벽면 쪽에서 혼합가스가 왼쪽보다 오래 체류함을 알 수 있으며, 이로 이 부분에서의 와류(vortex) 현상이 예측된다. 중심부에서의 온도가 코크스 표면에서의 온도보다 높은 현상은 반응 1에 의한 반응열에 의한 것이며, 흐름의 영향을 받은 것으로 추론된다.

이는 그림 3 (a)에서 확인할 수 있다. 먼저 오른쪽 벽면에서의 흐름이 왼쪽에 비해 강하면서 풍구 흐름과 맞물려 국부적인 와류현상을 보이고 있다. 이에 비해 왼쪽 벽면에서의 흐름은 중심부보다는 약한 상승흐름을 보여준다. 또한 오른쪽 풍구에서의 강한 흐름이 코크스 표면과 부딪히면서 중심부에서의 강한 흐름을 유도하고 있으며, 왼쪽에서 보이는 흐름은 다른 풍구에서의 흐름 영향이며 이로 인해 좌우 대칭적인 흐름을 보여주지 않는다. 즉, 3개의 풍구 흐름에 의해 보다 복잡한 난류유동이 발생하면서 강한 중심부 상승기류를 형성한다. 코크스 표면에서의 흐름을 보면 (그림 3 (b)) 세 영역에서의 강한 흐름은 풍구흐름의 영향이며, 정중앙에서는 작은 동심원 형태의 와류현상을 보여주고 있다. 이 흐름은 강한 상승기류와 맞물려 소용돌이 흐름을 형성할 것으로 예상된다. 강한 흐름 간 영역은 정확히 3등분되지 않고 한쪽의 흐름이 다른 두 흐름보다 강하게 나타나고 있다. 즉, 난류유동이 코크스 표면에서 보다 복잡하게 형성되고 있으며, 이는 소각로 전체의 유동과 복잡한 연관을 맺고 있음을 유추할 수 있다.

그림 4 (a)에서 O₂의 농도분포를 살펴보면 소각로 전체적으로 농도가 미량임을 알 수 있다. 이는 O₂가 반응 1, 2에 의해 거의 소진되고 있음을 말해준다. H₂O의 농도분포는 (그림 4 (b)) 반응 1의 영향과 유동의 영향으로 거의 대칭적인 경향을 보여주고 있다. CO₂의 농도분포(그림 4 (c))는 반응 1과 유동의 영향을 더 분명히 보여준다. 중심부에서의 강한 흐름과 맞물려 반응 1에 의해 생성된 CO₂에 의해 벽면에 비해 거의 2~5배 정도

의 차이를 보인다. 그림 4 (d)에서의 CO 농도분포를 보면 표면반응(반응 2)에 의해 생성되지만 난류혼합에 의해 반응 1이 진행됨으로 인해 난류혼합 효과가 큰 중심부에서의 농도가 거의 0에 가깝다. 출구의 양 벽면에서의 농도분포가 크다는 것은 반응이 거의 일어나지 않음을 의미하며, 이는 반응에 필요한 O_2 와 H_2O 의 농도가 그 부분에서 거의 0에 가깝기 때문인 것으로 유추된다.

결론적으로 소각로 내의 난류유동은 반응과 복잡한 상관관계를 가지고 각 화학종의 농도분포에 영향을 미치고 있다. 또한 풍구방향의 영향으로 중심부에서 강한 상승기류를 형성한다. 소각로 내의 복잡한 난류유동을 고려하여 eddy-dissipation 모델과 laminar finite-rate 모델을 모두 적용시킨 결과 반응계산 시 문제점은 없었다. 그러나 최고 온도가 2540K임을 고려한다면 다른 모델식을 사용하여 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대 핵심 환경기술 개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

1. I.M.Bews, A.N.Hayhurst, S.M.Richardson, and S.G.Taylor, *Combustion and Flame*, **124**, 231-245, 2001
2. 권순우, 이종협, 한국화학공학회지, **36**, 353-363, 1998

Table 1. Reaction kinetics

번호	반응	A	β	E[J/kgmol]	a	b	c
1	$CO + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2O$	2.3×10^{12}	0	1.65×10^8	1	0.25	0.5
2	$C(s) + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	1.1×10^4	0	179	1	0.5	0

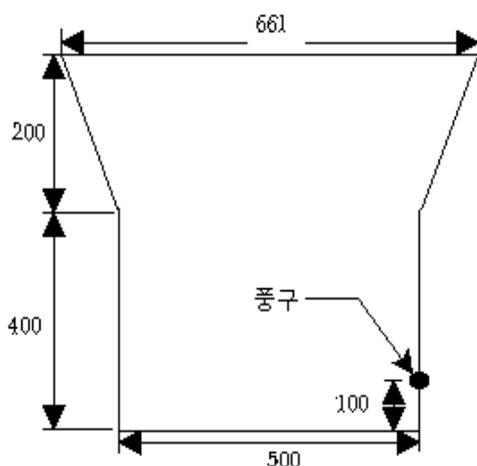


그림 1. 전산모사 Geometry (단위:mm)

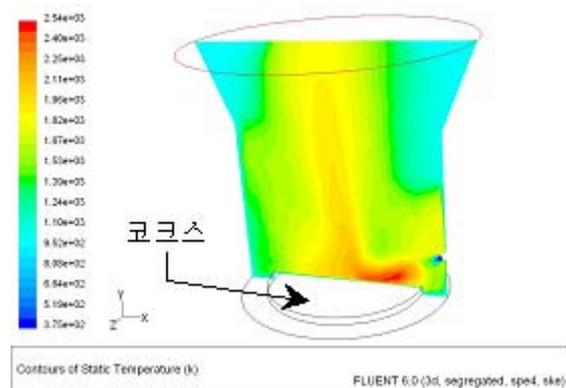
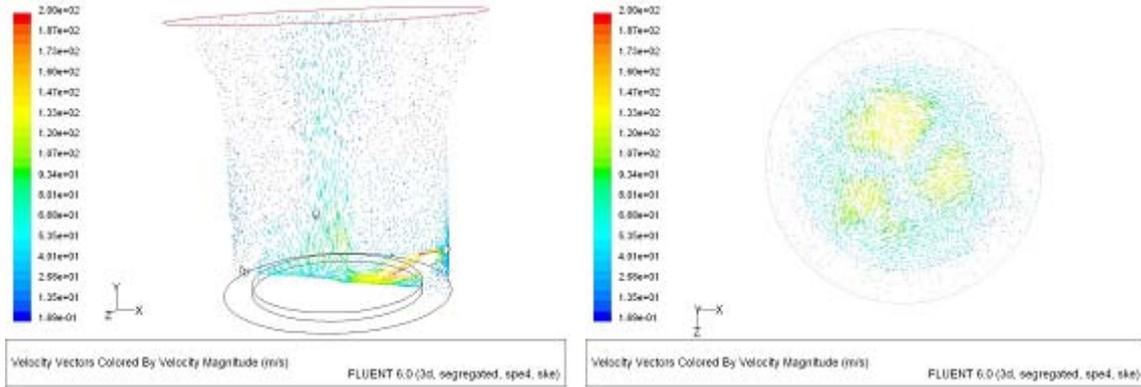


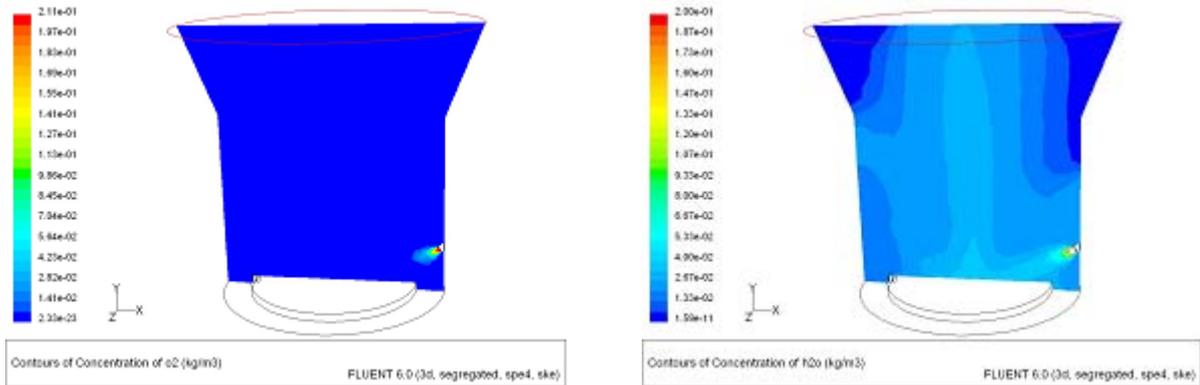
그림 2. z축 단면에서의 온도분포



(a)

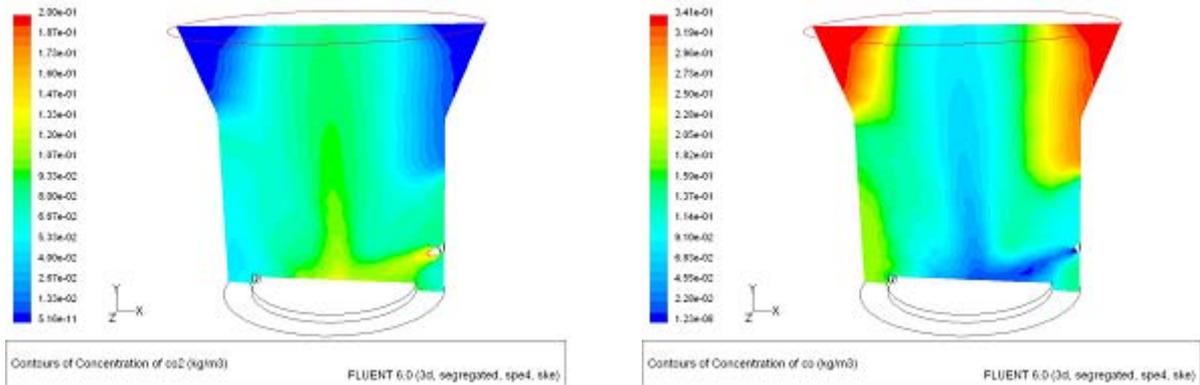
(b)

그림 3. (a) z축 단면에서의 (b) cokes 표면에서의 속도분포



(a)

(b)



(c)

(d)

그림 4. (a) O2의 (b) H2O의 (c) CO2의 (d) CO의 농도분포