

열분해실 및 연소실 유동해석과 기본설계에의 응용

이진욱, 심성훈*, 김석준*
에이티이에스(주), 한국기계연구원*

Flow Analyses and the Application to the Basic Design for the Pyrolysis Reactor and Combustor

J.W.Lee, S.H. Shim*, S.J. Kim*
ATES Ltd., Korea Institute of Machinery and Materials*

1. 서론

현재 도시폐기물의 열분해용용 소각로의 개발을 위한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 열분해용용 소각로는 열분해로, 용융로, 연소실 등과 같이 반응을 동반하는 단위 장치 및 공기 공급부 등에서 에너지 및 유체의 이동이 일어나고 있다. 도시폐기물의 열분해용용 소각로의 개발을 위하여, 파일럿(또는 실험용) 플랜트 또는 향후 상업용 플랜트 제작시에 필요한 설계 개념의 도출 및 주요 설계 변수의 영향 분석을 위한 연구가 필수적이라 판단된다. 특히 파일럿 플랜트의 기본설계가 완료되는 시점 이전에 이러한 해석 차원의 연구로써 각종 주요 변수의 영향을 미리 분석하고 문제점 발생시에는 개선안을 도출하여 이를 기본설계에 반영함으로써 파일럿 플랜트 운전시의 시행착오를 최소화하고, 나아가 향후 상업용 플랜트의 기본설계에 필요한 각종 주요 설계인자의 영향을 분석하는 것이 필요하다. 이와 같은 목적의 달성을 위하여서는 전산유체역학과 같은 이론적 방법을 이용하여 열분해실 또는 연소실과 같은 반응기 내부의 유동을 해석하는 기술의 정립이 필요하다. 국내외적으로 현재의 생활폐기물 처리기술인 화격자 형상의 소각로에 대해서는 많은 연구가 진행되었다 [1,2,3]. 본 연구에서는, 화격자 소각로 내의 유동과 연소현상의 특성을 파악하여 소각로의 형상설계 및 개선, 적절한 운전조건 결정 등에 활용한 결과를 보고하고자 하며, 특히 유동현상 해석에 의해 형상이나 2차 공기의 양과 분포를 조절하여 균질한 유동을 얻음과 동시에 재순환영역(recirculation zone, 또는 dead zone)을 제거할 수 있음을 관찰하였다. 또한 상기와 같은 해석 기술은 신기술인 열분해 용융시스템에도 적용될 수 있을 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서는 일차적으로 열분해로의 냉간유동 해석을 수행하여 내부의 유동 특성을 분석하여 노즐 설계에 필요한 개념을 도출하였다.

2. 수학적 모델링

일반적으로 폐기물 소각로 또는 열분해로의 경우에는 선회(swirl)와 같은 복잡한 물리적 현상이 존재하지 않는 특성상, 반응로의 내부 유동 자체는 화학반응에 크게 영향을 받지 않

을 것으로 판단된다. 따라서 CFD를 이용한 열유동현상의 해석에서는 폐기물의 화학반응을 제외한 냉간유동 또는 온도장을 포함한 유동해석을 통하여 계산시간을 크게 줄일 수 있다. 이와 같은 개념 하에서, 폐기물 연소실 또는 열분해실의 유동을 지배하는 방정식은 3차원 비압축성 난류유동이다. 본 연구에서는 질량 및 운동량의 보존 법칙을 적용하여 정상상태에 대한 속도 및 압력 등의 물리량들을 해석하였다. 비선형 편미분 형태로 표현되는 유동을 지배하는 보존 방정식은 다음과 같다[4].

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i\phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi$$

상기와 같은 지배방정식의 해석에 있어서 난류모델의 설정은 매우 중요한 인자이다. 본 연구에서는 난류모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 비정규격자계를 처리할 수 있는 프로그램인 Fluent 5를 이용하였다[5].

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 수행한 소각로의 형상은 폭 방향으로 대칭성을 갖고 있어서, 대칭면을 기준으로 반쪽에만 격자를 생성하고 해석하였다. 해석에 사용된 격자는 사면체 격자이며 격자의 수는 62,567개이다.

위에서 제시한 화격자 소각로 기본 운전조건 하에서 열유동장 해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 1 ~ 그림 2에 나타내었다. 그림 1에는 소각로의 각 수직 단면들에서의 속도벡터의 분포를 나타내었다. 전반적으로 2차 연소실에서의 유동이 후벽 쪽으로 치우쳤고 전벽 쪽에는 전체에 걸쳐 비교적 큰 재순환영역이 형성됨을 관찰할 수 있다. 이것은 출구가 후벽 면 쪽에 위치하고 있고, 폐기물 투입구 위쪽에 위치한 모서리가 2차 연소실로 들어가는 유동을 후벽면 쪽으로 치우치게 하고 있기 때문이다. 유동장을 단면별로 살펴보면, 영역에 따라 재순환영역(recirculation zone)이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 재순환영역은 연소가스의 체류시간의 감소를 야기하므로 이를 줄일 수 있는 방안이 필요하다고 판단된다. 그림 3은 상기와 같은 결과를 고려하여 2차 공기의 유량 분배 특성을 최적화하여 해석한 경우의 결과를 나타내고 있는데, 재순환영역의 크기가 대폭 감소하였음을 알 수 있다.

그림 3(a)는 본 연구에서 해석 대상으로 한 열분해로의 형상으로서 노즐이 전면(front)에 20개 및 상면(upper)에 30개가 설치되어 있는 형상을 보여주고 있으며 이를 기준 조건(base case)으로 설정하였다. 그레이트부는 운전시에 고품폐기물이 비교적 불규칙하게 이동된다는 점을 고려하여 직선으로 단순화하였다. 그리고 그림 3(b)는 상면에 30개 설치되어 있는 노즐은 그대로 유지하고 전면과 후면에 각각 10개씩 설치하여 대칭되게 설치한 경우로서 변경조건(modified case)으로 설정하였다. 노즐의 형상 및 곡면부 등의 해석영역을 정확하게 표현할 수 있는 사면체 격자를 이용하였으며, 기준조건에 대하여 약 187,000개의 제어체적(control volume)으로 분할하여 해석을 수행하였다. 변경조건의 경우에는 좌우 대칭조건을 고려하여 전체 영역의 1/2 영역에 대하여 약 147,000개의 격자를 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 열분해로는 2차 연소실의 바로 아래에 위치하고 있다. 열분해로의 출구는 용융로의 바닥에 바로 붙어 있는데, 후류의 영향에 의한 수치 불안정성을 고려하여 연돌과 같은 가상의 출구를 설정하여 수치해석의 안정성을 높이고자 하였다. 그림 4는 각각의 경우에 대하여 생성된 격자의 모습을 보여주고 있다.

열분해로에 공급되는 공기는 이론공기량의 약 30%정도로 설정되고 있으나 이 양은 폐기물의 조성 또는 용융로 및 2차 연소실의 운전모드에 따라 유량의 변경이 가능하다. 이러한 경우에도 상기에서 고찰한 유동의 특성이 유지되는지에 대한 확인을 위한 수치해석을 수

행하였다. 일반적으로 난류유동의 경우 기하학적 형상이 동일하고 유량이 변하는 경우에는 기하학적 상사가 이루어진 상태에서 운전조건에 대한 약간의 변경은 유동의 레이놀즈수(Reynolds number)의 적은 변경을 의미한다. 이러한 경우 유체역학적 이론 및 경험에 의하면 난류유동의 특성상 유동 특성이 거의 변하지 않을 것으로 예측할 수 있다. 본 연구에서는 그림 5와 같은 아주 기초적인 해석을 수행함으로써 이와 같은 이론을 확인하였다.

그림 6과 그림 7은 기준 조건과 변경조건에서의 열분해실 내부의 유동 특성으로서 바닥면(그레이트)을 기준으로 높이 방향으로 1/4, 1/2 및 3/4 위치의 열분해로의 형상을 따라 경사진 수평 단면에서의 속도 크기 분포도(velocity magnitude distribution)를 나타내고 있다. 기준조건에 대한 해석결과(그림 6)의 경우, 뒷면에서는 공기가 공급되지 않는 특성상 유동이 뒷면 방향으로 치우치는 경향을 보여주고 있다. 유동이 치우치는 경향은 높이에 따른 전 단면에서 관찰되고 있는데, 이러한 경향은 열분해로 하부(각 그림의 (a))나 상부(각 그림의 (c))에 비하여 노즐의 영향을 많이 받는 중앙 높이(각 그림의 (b))에서 상대적으로 강한 것을 알 수 있다. 이와 같은 해석 결과로부터 열분해실 내부의 유동을 균일하고 좌우대칭으로 유지하기 위해서는 노즐의 분사가 대칭적으로 이루어짐이 필수적임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 도시폐기물을 처리하는 기술로서 화격자식 소각로의 연소실과 열분해 용융 시스템의 열분해실에 대한 유동해석을 수행하였다. 화격자식 소각로의 경우, 기하학적 형상의 설계가 중요함을 확인할 수 있었으며, 또한 운전조건, 특히 2차 공기 분사 방법의 변경만으로도 재순환영역을 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이와 같은 기술을 열분해실에 적용한 결과, 적은 유량을 공급함에 있어서도 유동의 대칭성이 중요함을 알 수 있었으며 따라서 노즐 설계의 중요성을 확인할 수 있었다. 상기와 같은 결과를 연소실이나 열분해실과 같은 플랜트의 기본설계에 적용함으로써 플랜트의 건설시에 시행착오를 줄임과 동시에 성능향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

1. O. H. Madsen, S. Binner and K. Jorgensen : "Modern Design Technologies for Thermal Optimisation and Pollutant Control in MSW Incinerator Plants", 1st Int. Conf. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Sheffield Univ., U.K.(1997)
2. C. K. Ryu and S. M. Choi : "3-Dimensional Simulation of Air Mixig in the MSW Incinerators" Combust. Sci. and Tech. Vol. 119. pp. 155~170(1996)
7. 이진욱, 박병수, 윤용승, 서정대, 허일상 : "상업용 소각로 연소실 성능예측을 위한 수치해석 연구", 한국연소학회 논문집, Vol. 4, No. 1, pp.141-153(1999)
4. S.V. Patankar: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing(1980)
5. Fluent 5 User's Manual, Fluent Inc., 2000

Acknowledgement

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술 개발사업 과제인 '생활폐기물 열분해용융 시스템 개발' 과제의 일부 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

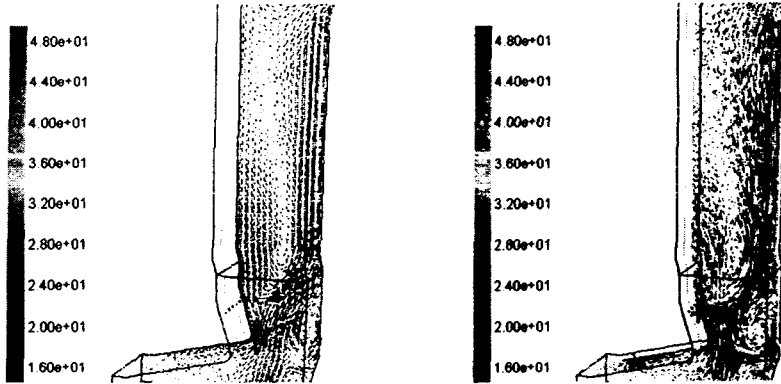


그림 1 소각로 수직단면에서의 속도벡터(최적화 전)

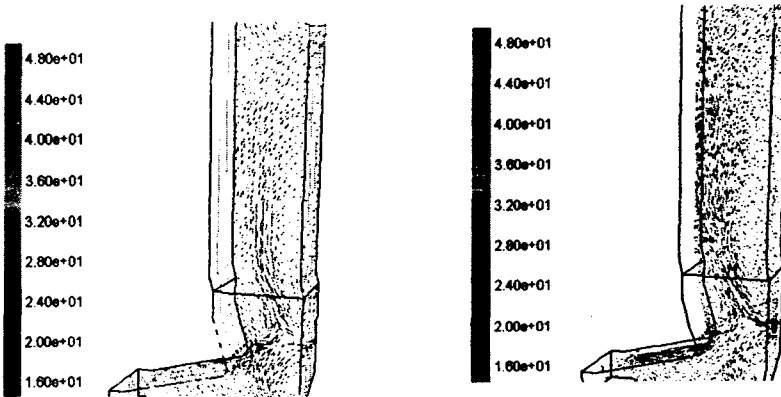


그림 2 소각로 수직 단면에서의 속도벡터(최적화 후)

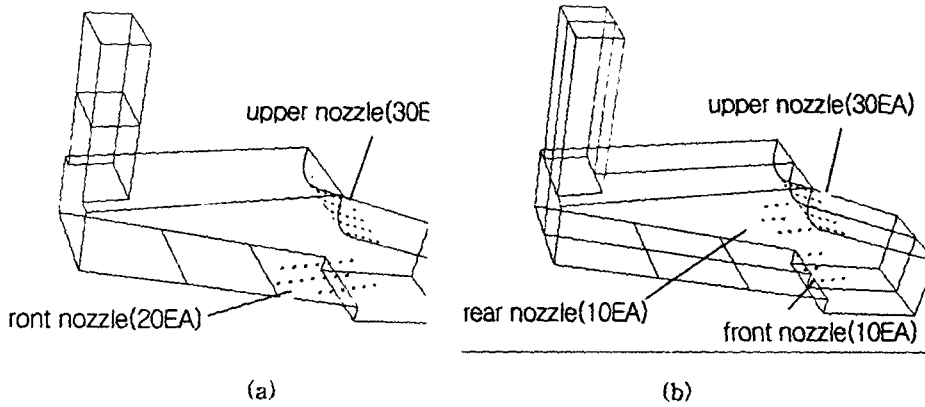


그림 3 열분해로의 형상. (a) 기준조건, (b) 변경조건

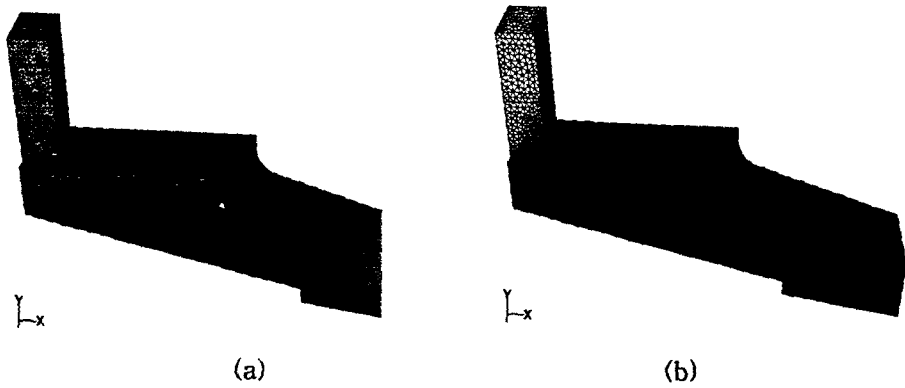


그림 4 열분해로의 격자 생성. (a) 기준조건, (b) 변경조건

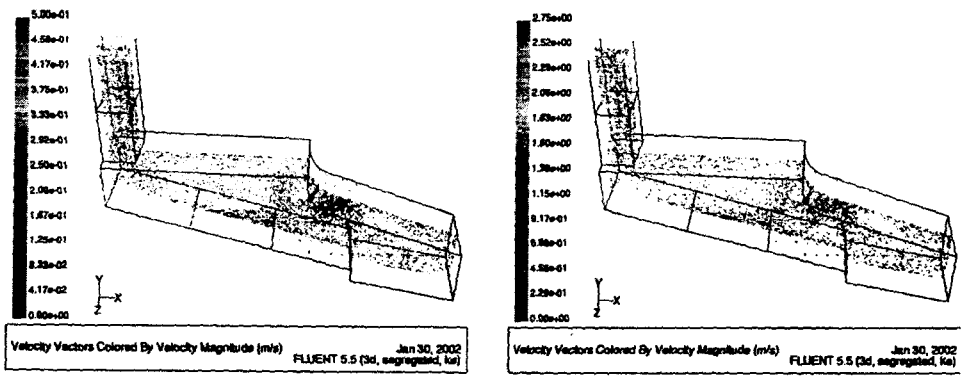
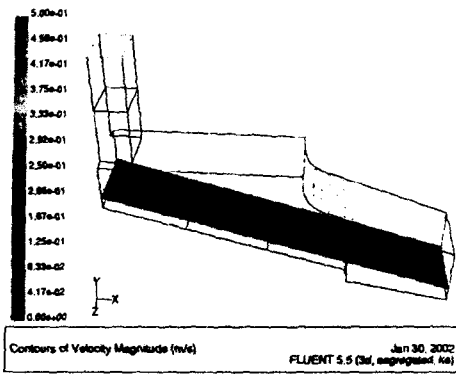
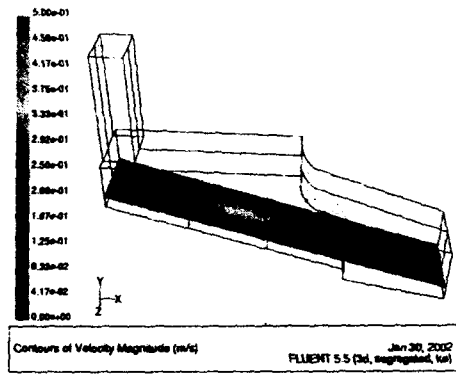


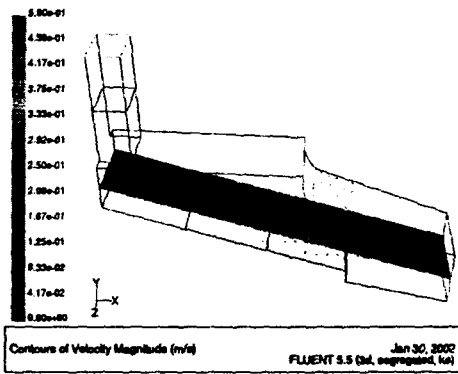
그림 5 노즐에서의 분사 속도에 따른 속도 벡터 분포. (a) 기준조건, (b) 변경조건



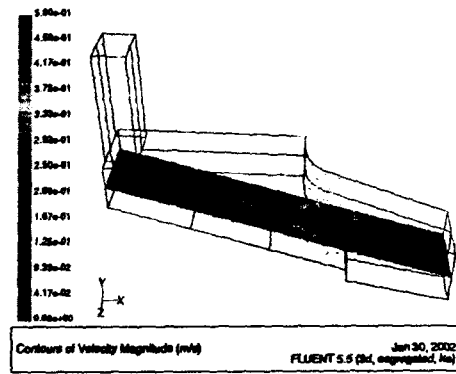
(a)



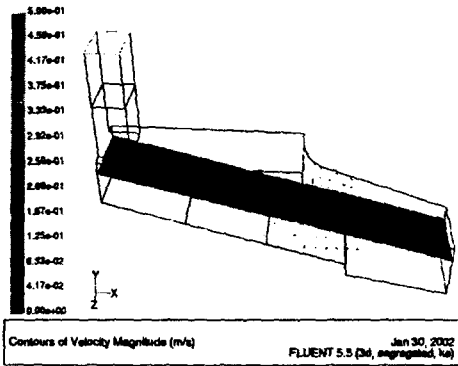
(a)



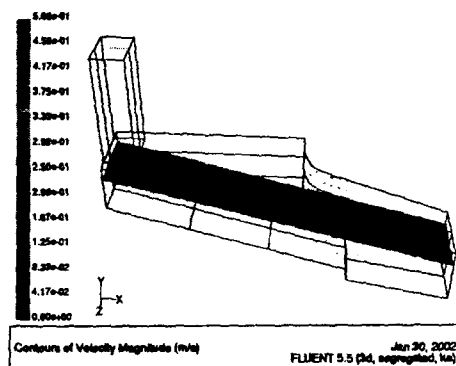
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 6 열분해실에서의 속도 크기 분포도
(기준 조건)

(a) 1/4 높이, (b) 1/2 높이, (c) 3/4 높이

그림 6 열분해실에서의 속도 크기 분포도
(변경 조건)

(a) 1/4 높이, (b) 1/2 높이, (c) 3/4 높이