

연소로 열유동 해석 방식과 결과 분석에 대한 고찰 - 화격자식 소각로의 사례

류창국* · 최상민**†

Discussion on the Practical Use of CFD for Furnaces

- A Case of Grate Type Waste Incinerators

Changkook Ryu and Sangmin Choi

ABSTRACT

Computational flow dynamics(CFD) has been frequently applied to the waste incinerators to understand the flow performance for various design and operating parameters. Though it needs many simplifications and complicated flow models, the reasonability of its results is not fully evaluated. For example, the inlet condition is calculated from an arbitrarily assumed properties of combustion gas release from the waste bed, since the combustion in the bed is difficult to be predicted. In this study, the computational modeling and calculation procedures of CFD for the grate type waste incinerator were evaluated using comparative simulations.

Though the assumption method on the generation of the combustion gas directly affected the temperature and gas species concentrations, the overall flow pattern was dominated by the secondary air jets. The gaseous reaction could be included by assuming the release of the products of incomplete combustion from the bed. However, the reaction efficiency cannot not be directly evaluated from the species concentration, since it is not possible to simulate the actual co-existence of fuel rich or oxygen rich puffs over the bed. In predicting the turbulence, the higher order model, such as Reynolds stress model, gave difference shape of local recirculation zones, but similar results was acquired from the standard k- ϵ model. Introducing radiation model was required for accurate temperature prediction, but it also caused heat imbalance due to the fixed temperature of the inlet, i.e. the waste bed.

Thus, the computational modeling procedures on incinerators and the analysis of the predicted results should be progressed carefully. Though not validated experimentally, current simulation method is capable of comparative evaluation on the flow-related parameters such as the furnace shape and secondary air injection using identical inlet conditions. Quantitative analysis using measures of the residence time and mixing is essential to compare the flow performance efficiently.

Key Words : CFD, Incinerator, Waste combustion, Residence time

1. 서 론

연소 분야에 있어서 전산유체역학(Computa-

tional Fluid Dynamics, CFD)은 축소 모형 실험이나 플랜트에서의 직접 측정을 보완하는 역할 뿐만 아니라, 연소로의 설계 및 성능 예측에까지 이용되고 있다. CFD는 경계조건 및 초기조건과 난류, 반응, 복사 등에 대한 세부 모델로부터 지배방정식을 수치적으로 해석하여 온도, 속도, 화학종 등 유동장에 대한 전체적인 정보를 제공할 수 있다. 그러나, 수치적인 처리과정에서 불가피한

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, smchoi@kaist.ac.kr

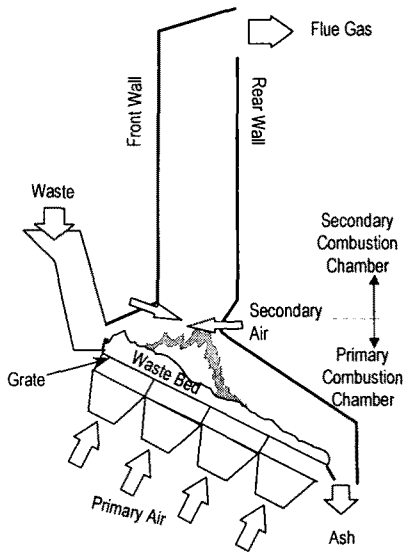


Fig. 1 Combustion chamber in a grate-type waste incinerator

오차들을 포함하게 되므로, 해석 결과의 신뢰성에 대한 검증이 전제되어야 한다.

일반적인 연소로에 대한 CFD 해석은 난류 등 유동 모델의 꾸준한 발달로 인해 실험과 상호 보완이 가능한 수준의 타당성 있는 해석 결과를 제시하고 있다. Eaton 등[1]이 미분탄 및 가스 연료의 파일롯 및 실규모 플랜트에 대한 자세한 측정 결과와 FLUENT 등 주요 코드를 이용한 해석 결과를 비교 검증한 연구에 따르면 해석 결과의 정성적, 정량적인 정보는 실용적인 신뢰성

을 가지고 있는 것으로 보고되었다. 도시 폐기물 소각로에 있어서도 다이옥신 등 공해물질의 최소화 및 연소 성능 향상을 위해 설계 및 운전 기술의 고도화가 요구되면서 CFD의 이용이 일반화되었다.

Fig. 1은 일반적인 화격자식 소각로 연소실을 나타낸 것이다. 폐기물은 좌측의 피더에 의해 화격자 위로 투입되어 수십 cm 높이의 폐기물 층을 형성한다. 고온의 연소실로부터 전달되는 복사열유속을 주요 열원으로 하여 폐기물 층 상부에서 건조 및 발화가 이루어져 층 안쪽으로 전달된다. 여기에서 발생한 연소가스는 연소실을 따라 진행하며, 강력한 제트의 형태로 주입되는 2차공기에 의해 미연분의 추가적인 혼합과 반응이 이루어진다. 소각로의 저공해화를 위해서는 연소실에서의 혼합과 반응 성능이 매우 중요하며, 이를 위해 필수적인 설계 지침으로서 2차공기 주입 시점 이후부터 연소실 출구 전까지 850℃ 이상의 온도 유지, 2초 이상의 체류시간의 유지가 규정되어 있다.

소각로에 대한 유동 해석은 폐기물의 연소와 유동장에서의 혼합 및 반응을 평가하는 것이 목적이 된다. 크기가 수 cm에 이르는 폐기물 입자로 형성된 연료층은 유동장과 구별된 영역으로서 여기에서 발생한 연소가스가 연소실 내에서 유동장을 형성하게 된다. 그러나 폐기물 층의 연소 현상은 예측이 매우 어렵기 때문에 기존의 전산 해석 연구에서는 연소가스 발생 특성을 임의의 형태로 가정하여 입력조건을 구하였다. 즉, 폐기물 층 길이 방향으로 연소율을 가정한 후 열 및 물질정산을 통해 연소가스의 온도, 속도 및 화학

Table 1. Previous CFD studies for design and operation improvement of grate-type incinerators

참고문헌/저자	연구 목적/ 결과 이용	연소가스 발생 가정시 가연분	정량적 결과 분석	S/W
[2] Nasserzadeh 등	배플 설치에 의한 유동장 형태 개선	CxHy	-	FLUENT
[3] Nasserzadeh 등	노 형상 및 2차공기 제트에 의한 성능	CxHy	체류시간	"
[4] Kim 등	유동 성능의 정량적 평가 방식(2차원)	CO ₂	혼합, 체류시간, 반응	"
[5] Shin 등	(3차원 형상)	CO ₂	혼합, 체류시간, 반응	"
[6] Ryu, Choi	단순 형상에서의 2차공기 제트열 특성	냉간	제트 침투거리, 혼합, 체류시간	"
[7] Ryu, Choi	2차공기 제트열의 배열에 따른 성능	CO ₂	혼합, 체류시간	"
[8] Madsen 등	2차공기 등 연소로 설계	CH ₄	-	"
[9] Weber 등	Reburning 제트열의 설계	CO ₂	제트 침투거리	"
[10] Klasen, Görner	2차공기 주입 방식 개선	CH ₄	출구 측정값(온도, 산소)	"
[11] Riccius 등	2차공기 주입 방식 개선	CxHyOz	-	"
[12] 박병수 등	측정자료를 이용한 연소로 해석 기법	CxHyOz	-	"
[13] 권순우, 이종협	1차/2차공기 배분에 따른 유동 특성	CH ₄	체류시간, 반응특성시간	"
[14] Chen 등	공연비, 2차공기 주입 방식의 영향 평가	CH ₄	반응	FIDAP
[15] Kori, Takeya	Reburning 제트열의 배치	CO	혼합, 온도	CFX
[16] Perilleux 등	연소실/보일러 설계, 2차공기 주입 방식	CO(?)	-	?

중 분포를 계산하는 것이다. 이러한 방법은 해석 과정을 단순화시킬 수 있지만, 입력치의 임의성으로 인해 해석 결과의 타당성에 큰 한계를 가지게 된다.

기존의 해석 연구 사례 중 설계 평가나 운전 개선을 위한 목적으로 한 연구들을 정리하면 표 1과 같다. 주로 도시폐기물의 소각이 일찍부터 시작된 유럽에서 활발한데, 특히 영국 Sheffield 대학의 Swithenbank 교수 그룹[2,3]이나 독일 Essen 대학[10]과 소각 관련 원본기술을 소유한 ABB[11], SEGHERS[16], Volund[8] 등 관련 회사들의 연구로 구분할 수 있다. 일본의 경우[15]도 다양한 연구가 산업계를 중심으로 이루어지고 있으나 학술적인 보고는 적극적이지 않다. 국내에서도 관련 연구들이 진행되고 있다[4-7,12,13]. 이상의 연구에서는 모두가 복잡한 형상이나 다양한 세부 모델의 필요성으로 인해 FLUENT 등의 상용 코드를 이용하고 있다. 또한 해석 목적으로는 주로 연소로의 형상이나 공기 배분, 2차공기 공급 등 연소가 아닌 유동과 관련된 인자의 평가를 다루고 있다. 모든 연구가 폐기물 연소를 가정하고 있지만, 완전 연소를 가정하거나 혹은 $CxHy$ 나 CO 등의 형태로 일부 미연분의 발생을 설정하여 유동 해석에 반응을 포함시키고 있다. 결과의 분석은 온도, 속도 등의 계적, 유선 분포 등의 가시화를 통한 일반적인 정성적 분석만을 이용하거나, 상대적인 유동 성능의 비교를 위해 혼합, 체류시간 및 반응의 정량적 분석 방식을 이용하고 있다.

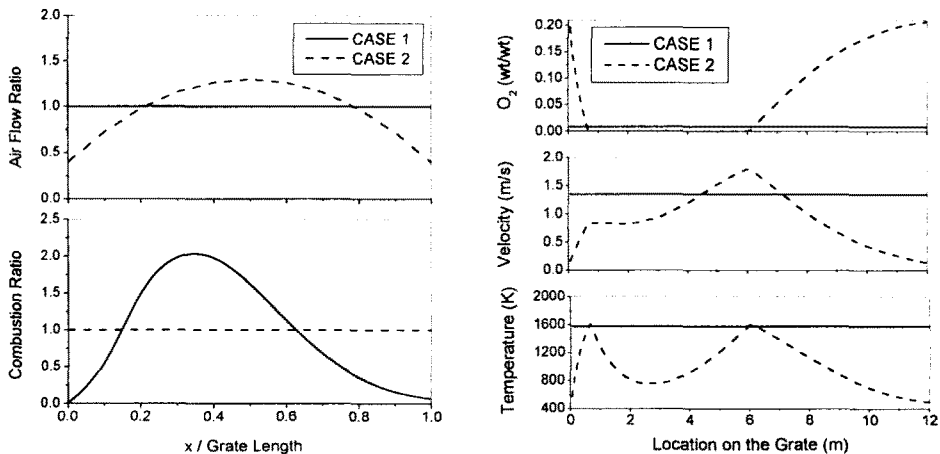
이와 같이 기존의 연구는 경계조건 및 이에 따른 유동장 내의 반응 등 주요 현상을 크게 단순화하였지만, 그 타당성에 대한 충분한 고찰이 없이 그 결과를 설계나 운전개선에 반영해왔다. 해

Table 2. Simulation Cases

Case #	Inlet condition assumed by	Turbulence model	Gaseous Reaction	Radation
1-K	Method 1	KEM	-	(none)
1-R	"	RSM	-	"
2-K	Method 2	KEM	CO→CO ₂	"
2-R	"	RSM	"	"
1-K-RAD	Method 1	KEM	-	DOM
2-K-RAD	Method 2	KEM	CO→CO ₂	DOM

석 결과의 타당성에 대한 가장 직접적인 평가 방식은 측정자료와의 직접 비교이다. 하지만, 소각로의 경우 검증이 가능한 수준의 측정이 어려울 뿐만 아니라, 근본적으로 현재의 해석 방식은 폐기물 층 연소 현상에 대한 해석이 제외되어 있어 이러한 검증 방식이 유효하지 않다. 따라서, 보다 발전된 해석 방식의 개발이 필요하지만, 이와 함께 현재 이용되고 있는 해석 방식에 의한 결과의 타당성과 이용 방식에 대한 검토가 필요하다.

이 연구는 소각로에 대한 일반적인 해석 방식을 주요 해석 절차들에 대해 검토하여 적절한 접근 방식과 결과 분석 방식을 제시하기 위한 것이다. 해석의 여러 단계 중, 폐기물 연소에 대한 가정 방식, 난류와 반응 모델 등에 따른 해석을 수행하고, 그 결과의 정성적, 정량적 비교를 통해 의미 있는 정보와 이를 평가할 수 있는 분석 방식을 제시하였다. 이와 함께 소각로에 대한 전산 해석 방식의 발전을 위한 방향과 실험을 통한 결과의 검증 방식에 대해 고찰하였다.



(a) prescribed profiles of primary air and combustion (b) temperature, velocity and O₂ mass fraction
 Fig. 2 Assumption methods for the generation of combustion gas from the waste bed

2. 해석 대상 및 방법

2.1 검토 대상 해석 절차

일반적인 유동 해석 절차는 먼저 입력조건과 세부 유동/연소 현상을 고려한 대상 시스템의 정의, 형상 단순화, 격자 구성, 유동 모델을 이용한 해석, 결과 가시화 및 분석 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서 소각로의 경우 결과의 타당성을 결정하는 핵심적인 부분은 대상 시스템의 정의에 있어서 폐기물 연소를 가정하는 부분과 적절한 유동 모델, 결과 분석 단계로 볼 수 있다.

폐기물 연소에 의한 연소가스 발생을 가정하는 방식은 전체 유동장의 온도 등 주요 결과에 큰 영향을 미치므로 가장 중요한 절차이며, 대부분의 유동 해석 연구에서 이에 대해 자세히 밝히지 않고 있으며 이에 대한 평가 역시 이루어지지 않았다. 임의적인 가정이 필요한 부분은 폐기물의 건조율, 연소율과 연소 공기 분포이며 이로부터 열 및 물질정산에 의해 유동장의 입구조진인 가스 온도, 속도, 화학종 분포를 결정하게 된다. 여기에서는 Fig. 2와 같은 두 가지 상이한 방식으로 가정하였다. Case 1은 화격자상의 위치에 따른 연소율, 연소공기 분포가 일정한 경우로, 발생한 연소가스의 온도는 1578K, 유속은 1.5m/s, 산소 질량분율 0.87%로 일정하다. Case 2는 화격자 중앙 부분에 연소율 및 공기 분포를 집중시킨 경우이다. 산소가 없는 1m~6m 사이에 발생하는 미연분은 CO로서 유동장에서 난류 반응의 계산이 필요하다.

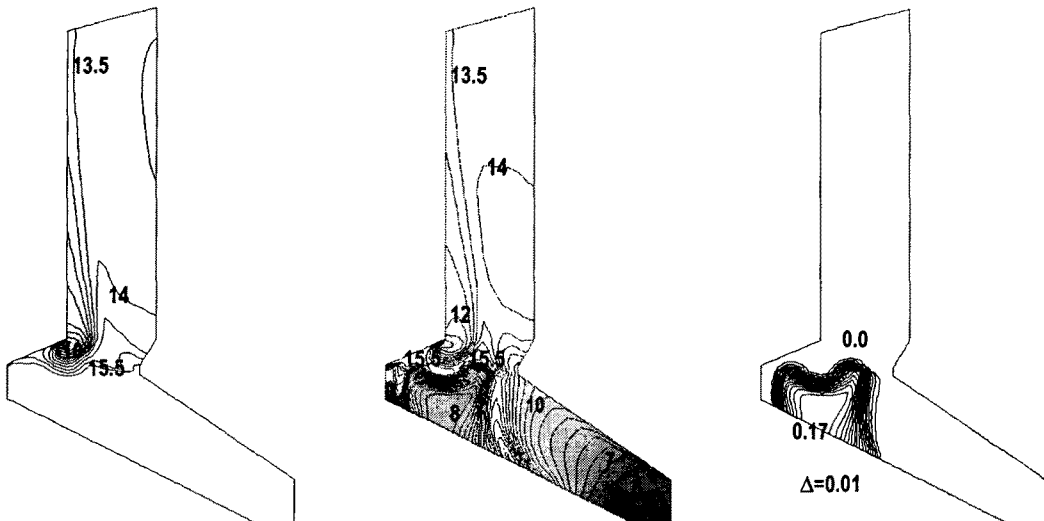
이 두가지 가정 방식을 이용해 해석 경우들을 Table 2와 같이 설정하였다. 난류 및 가스 반응

은 소각로 연소실 내의 주요 특징 중 하나로서 연소가스 발생 가정 방식 별로 대표적인 난류 모델인 Standard k-ε 모델(KEM)과 Reynolds Stress 모델(RSM)을 적용해 비교하였다. 난류 해석시 벽면에서는 비평형 벽면 함수(non-equilibrium wall function)를 사용하였다. 가스 반응은 연소가스 발생에 대한 가정시 가연분이 어느 정도까지 산화될 것인지, 가연분의 조성은 어떻게 될 것인지에 따라 달라지게 된다. 여기에서는 완전연소 후의 가스가 CO₂로 발생하여 유동장에서의 반응은 없다고 보거나, 일부 가연분이 C_xH_yO_z 또는 CO의 형태로 가스 유동장에 유입되는 것으로 보았다.

복사 열전달 역시 연소실 내 온도 분포 변화가 크고, 복사에 참여하는 CO₂, H₂O 등의 존재로 인해 매우 중요한 현상 중 하나이다. 여기에서는 구분종좌법(Discrete Ordinate Method, DOM)를 적용하여 해석하였다. 가스의 복사 참여는 WSGGM (Weighted Sum of the Gray Gases Model)을 이용하였다.

2.2 대상 소각로

해석 대상 소각로는 Fig. 1에 나타난 전형적인 역류식(cross-current flow type) 연소실로서, 최대 크기는 W12m×H22.2m×D4m이다. 피더 및 재 호퍼 부분은 하나의 벽면으로 단순화하였다. 운전조건은 200톤/일 규모로 발열량 1790 kcal/kg의 폐기물을 소각하는 것으로 설정하였다. 벽면의 경계조건은 단순화를 위해 모두 단열면으로 가정하였다. 연소공기는 과잉공기비 50%로서 전체 유량의 70%는 예열없이 1차공기로, 30%는 좌우측 2차공기에 균등 배분된 것으로 보



(a) Case 1-R: T(×100K)

(b) Case 2-R: T(×100K)

(c) Case 2-R: CO mole fraction

Fig. 3 Temperature distribution and CO mole fraction for Case 1-R and Case 2-R

았다. 이 조건 하에서 출구 온도는 1330K, 산소 물분율은 7.1%이다.

격자는 37,443개의 육면체 셀로 구성하였고, 231,930개의 셀로 이루어진 격자와 비교하여 유동장 형태와 체류시간 분포에서 차이가 거의 없음을 확인하였다. 유동 해석 코드는 소각로 해석에 많이 쓰여온 FLUENT v5.4를 이용하였다.

3. 해석 결과

3.1 폐기물 연소에 대한 가정방법의 영향

Fig. 3은 연소에 대한 가정 방법을 달리한 두 Case의 중앙단면에서의 온도분포이다. Case 1-R는 가연분이 화격자 전체에서 균등한 비율로 완전 연소를 가정하였으므로, 1차 연소실에서는 균일한 온도분포를 유지하다가 2차공기 제트에 의해 온도 분포가 달라지며 혼합이 일어난다. 반면, Case 2-R는 불균일한 분포와 일부 CO의 발생을 가정하여, 화격자 길이 방향으로 온도분포가 균일하지 않으며 온도의 급격한 상승 영역이 존재한다. 1차 연소실에서의 큰 차이와 달리 2차공기 제트 주변에서의 급격한 온도변화 및 2차연소실에서의 완만한 경향은 공통적으로 나타난다.

Fig. 3(c)는 CO의 물분율을 나타낸 것이다. CO 발생대 좌우에 존재하는 1차공기의 잔여 산소나 상부의 2차 공기에 의해 공급된 새로운 산소를 만나면서 산화되는 것으로 나타난다. 그러나, 기존의 폐기물 층 상부에서의 측정결과[19]를 보면 CO, CH₄, H₂ 등의 미연분과 함께 산소가 일부 공존하는 것으로 나타난다. 이는 폐기물 층에서의 발생한 연소가스에는 폐기물 입자간 기공 크기 정도의 수많은 연료 과잉 영역(puff)과 산

소 과잉 영역이 국부적으로 섞여 있기 때문이다. 따라서, 유동 해석시의 확산 혹은 예혼합 상태의 반응과 근본적인 차이가 있다. 즉, 반응의 모사는 미연분의 조성에도 임의성이 강하지만 실제 반응 현상과 크게 다르기 때문에 미연분 농도를 통한 반응효율의 직접적인 평가는 타당하지 않다. 그러나, 산소 부족 또는 2차공기에 의한 산소의 침투와 반응영역 등을 확인할 수 있기 때문에 연구 목적에 따라 반응을 포함시킬 수 있을 것이다.

Fig. 4는 두 경우의 유선 분포이다. 온도 분포의 큰 차이와 달리 유선 분포는 매우 유사하다. 화격자에서 2차공기 제트까지의 분포는 약간 차이가 있지만 2차공기 제트의 영향을 받게되는 중앙부분과 그 이후 2차연소실에서의 분포는 거의 동일하다. 이는 연소가스의 운동량(momentum)에 비해 수십 m/s에 이르는 2차공기 제트의 운동량이 100배 정도 강해서 제트의 궤적에 따라 연소실 전체의 유동 형태가 지배되기 때문이다. 1차 연소실에서의 차이는 Case 2-R에서 피더 쪽의 교란과 오른쪽 상부에서의 재순환 영역인데 이는 연소가스 발생이 화격자 중앙 부분에 집중되면서 일어나는 차이이다.

Fig. 5는 유동 형태의 정량적인 평가를 위해 화격자 상에서의 출발 위치를 기준으로 출구까지의 체류시간 분포를 나타낸 것이다. 화격자상 위치에 따른 두 Case의 경향은 매우 유사하게 나타난다. Case 2-R에서 화격자 후단쪽의 유량이 적기 때문에 발생하는 국부적인 재순환영역으로 인해 9m 이후의 차이가 크지만 유량 비중은 적다. Fig. 6은 이 결과를 체류시간 분포의 질량 평균된 확률밀도로 나타낸 것이다. 여기에서 30초로 표시된 부분은 재순환영역이나 벽면에 잡혀 계산 종료시점까지 출구를 빠져나오지 못한 경우

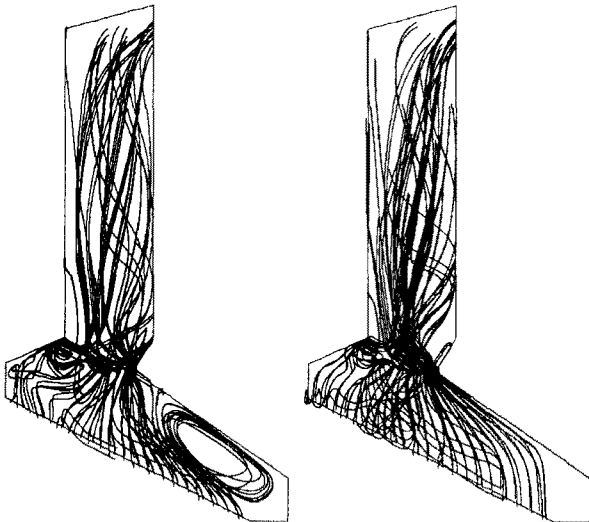


Fig. 4 Pathlines for Case 1-R and Case 2-R

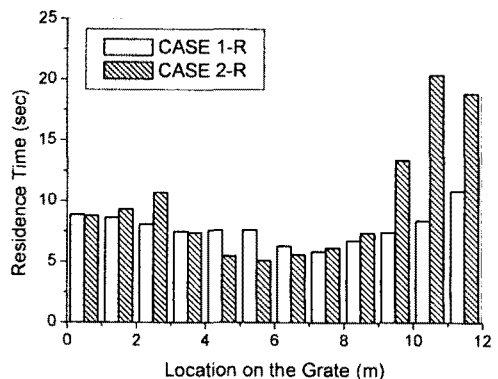


Fig. 5 Average residence time distribution

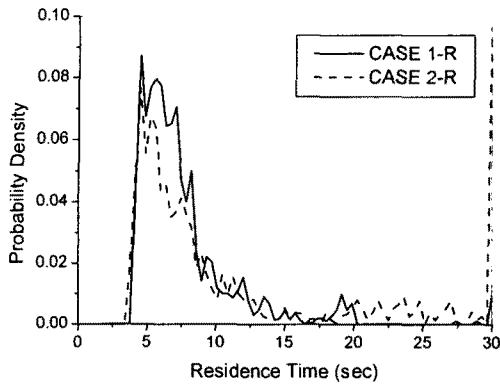


Fig. 6 Mass-weighted probability density of residence time for Cases 1-R and 2-R

에 설정한 최대 값이다. 모두 5초에서 높은 비중이 나타나며 그 이후로 완만하게 감소된다.

이상의 결과를 볼 때, 입력 조건의 가정방식에 따라 온도나 화학종 분포는 큰 차이를 보이는 결과가 있는 반면, 유선 분포 등 차이가 작고 공통적인 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 입력조건의 가정이 임의적이지만 같은 입력조건을 이용하여 2차공기나 연소실 형상 등에 따른 유동 형태를 분석할 경우에 타당성이 있음을 알 수 있다. 이 때, 온도나 산소 분포의 절대값을 이용한 평가는 입력 조건 가정방식에 직접 영향을 받으므로 매우 신중해야 한다. 유동 형태는 체류시간과 같은 정량적인 평가 방식에 의해 효율적으로 평가될 수 있음을 알 수 있다.

3.2 난류 모델의 영향

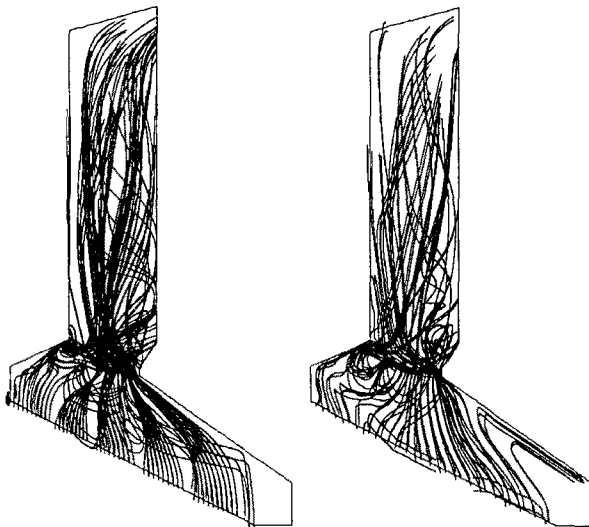


Fig. 7 Pathlines for Case 1-K and Case 2-K

소각로 내의 유동장은 출구 Reynolds 수가 1.0×10^5 정도일 뿐 아니라, 강한 제트를 포함한 난류 유동장이기 때문에 난류 해석이 필수적이다. 대표적인 난류모델인 Standard k-ε 모델(KEM)은 유동의 Local Isotropy를 가정한 것이어서 제트 및 재순환 영역 등에 대해서 적용하는 것은 타당하지 않지만, Reynolds Stress 모델(RSM)은 계산 시간의 증가와 수렴성 저하의 문제가 있다.

Fig. 7의 KEM을 이용한 결과를 Fig. 4의 RSM 해석 결과와 비교해 보면 특히 Case 2-K에서 재순환영역의 크기가 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나, 2차 공기 제트를 포함한 전체적인 유선 분포는 거의 유사하다. 보다 정량적인 평가를 위해, Fig. 8에서 체류시간별 확률밀도를 비교해 보면 거의 동일한 결과임을 확인할 수 있다. 이는 RSM이 국부적인 제트 유동 해석에서 KEM보다 더 정확하지만, 소각로와 같이 큰 규모의 유동에서 그 차이는 거의 드러나지 않음을 볼 수 있다. 다만, 2차 연소실에서 재순환 영역이 크게 형성되거나 선회류가 있는 경우 등의 상황에서는 KEM의 결과가 부정확할 수 있으므로 다른 난류 모델과의 비교 평가가 필요하다.

3.3 복사열전달 고려의 영향

실제 소각로에 복사열전달은 가장 중요한 열전달 형태로서 기존의 해석에서도 이를 고려하고 있다. 그러나, 전체적인 해석 방식과 엮어진 신중한 고려가 필요하다. Fig. 9는 Case 1-K와 2-K에 대해 구분좌법을 이용해 복사열전달을 포함시켜 해석한 것이다. 여기에서 벽면의 방사율은 0.95, 입구(폐기물 층)과 출구부분은 1.0으로 보았다. 이 때 1차연소실에서 1550K 이상의 영역이 감소한 반면에 2차연소실에서의 온도 분포는

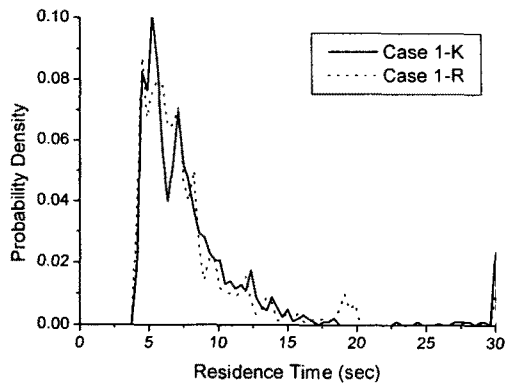


Fig. 8 Probability density of residence time for Cases 1-K and 1-R

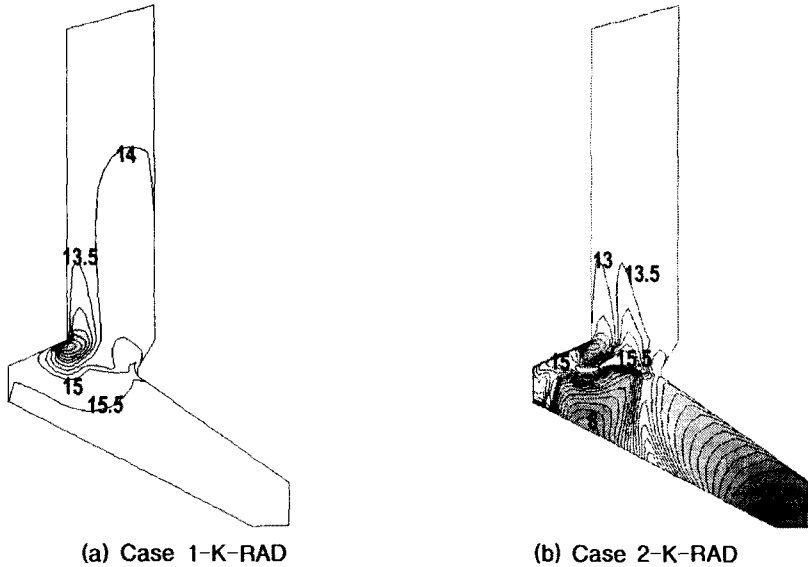


Fig. 9 Temperature distribution($\times 100K$) for Case 1-K-RAD and Case 2-K-RAD

50K이상 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 고온-저온 영역사이의 복사열전달에 의해 온도 분포가 조금 더 균일해지기 때문이다. 연소실 출구에서의 평균온도는 Case 1-K에서 1330K로 열정산에 의해 구한 값과 일치한 반면에, 이 경우의 값은 1390K으로서 60K가량 높게 나타난다. 반면, 고온 및 저온 영역이 다르게 분포된 Case 2-K-RAD에서는 오히려 온도가 10K정도 낮게 나타났다. 이는 입구(폐기물 층) 면의 온도가 높은 Case 1-K-RAD는 복사열전달에 의한 입열이, 저온영역이 넓은 2-K-RAD는 출열 현상이 존재하여 열정산이 일치하지 않게 되는 것이다.

실제의 경우 폐기물 층과 유동장(연소가스와 벽면) 사이에서도 복사열전달이 일어나기 때문에 연소가 활발한 고온의 폐기물 입자는 복사에 의한 온도 감소가, 투입 초기나 연소 종료후의 냉각되고 있는 입자에서는 온도의 상승이 있게 된다. 이와 같은 상호작용은 유동 해석 과정에서 고려되지 않아서 입구로의 열손실이나 유입이 발생하기 때문이다. 이와 같이 복사 열전달의 해석은 온도분포의 정확성을 향상시키는 측면과 감소시키는 측면이 존재하므로 해석 목적에 따라 신중하게 고려되어야 한다.

이를 해결하기 위한 방법은 연소 상황의 가정에 따른 입력조건의 열 및 물질정산시 위치별로 유동장과의 복사열교환을 포함시키는 것이다. 그러나, 이렇게 계산된 온도분포에 의해 계산된 유동장에서의 복사열유속 분포는 다시 달라지게 된다. 따라서, 유동 해석을 통한 복사열유속 계산과 이를 이용한 입력조건 재계산 절차가 반복적으로 진행되어야 하기 때문에 코드 안에 별도의 계산

기능이 포함되어야 하는 어려움이 있다.

4. 고찰

여기에서 살펴본 해석 절차외에도 평가가 필요한 항목은 형상 및 격자 구성에 있어서 폐기물 피더나 재 호퍼의 형상 단순화에 따른 영향, 폐기물 층이 차지하는 영역의 처리, 상대적인 크기가 매우 작은 2차공기 노즐의 격자 형태에 따른 영향 등이 있고, 경계조건 결정에 있어서 벽면의 온도 혹은 열유속 조건의 설정에 따른 영향 등이 있다. 이와 같이 해석 과정 또는 결과 분석 단계에서 확인해야 할 사항들을 정리하면 Table 3과 같다.

이 연구에서는 현재 학계나 산업계에서 보편적으로 쓰이는 단순화된 전산해석 방식을 간접적인 비교 평가로 검토하였지만, 전산해석의 신뢰성 평가를 위한 직접적인 방식은 실험 결과와의 상호비교이다. 이를 위해 필요한 측정 자료는 온도, 속도, 화학종 분포와 벽면에서의 열유속, 폐기물 층 내부의 온도 및 폐기물 조성과 이로부터 발생한 연소가스의 특성 등일 것이다. 그러나, 소각로의 경우 연소실 규모뿐 아니라 유동 상황 변화가 크지만 측정을 위한 접근이 매우 어렵다. 또한 폐기물 조성 등이 균일하지 않아서 온도, 산소를 비롯한 운전 조건 자체의 변화가 발전 보일러 등 다른 연소로에 비해 매우 크다. 따라서, 해석 결과를 검증할 정도의 측정 결과를 얻기 매우 힘들어 기존에 보고된 측정이나 실험 사례도 극히 제한적이다.

폐기물 층 내부의 경우 측정 방식과 접근의 한

Table 3. Checklist of usual numerical simulation method for waste incinerators

Procedures		Check list
Geometry		<ul style="list-style-type: none"> • Simplification of geometry for waste feeder and ash hopper • Volume occupied by the waste bed
Mesh		<ul style="list-style-type: none"> • Grid sensitivity • Give enough cells near jet nozzles by investigating jet penetration
Boundary Condition	Inlet condition for the waste bed	<ul style="list-style-type: none"> • Profiles of combustion, evaporation and primary air • Types and concentration of the products of incomplete combustion • Effect of radiation interaction with the gas flow field • Use identical inlet condition in comparative studies
	Wall Condition	<ul style="list-style-type: none"> • Temperature or heat flux condition for refractories and membrane water wall
Flow Models	Turbulence model	<ul style="list-style-type: none"> • Standard k-ϵ model vs higher order models
	Reaction model	<ul style="list-style-type: none"> • Discrepancy between the reaction scheme and actual reaction
	Radiation model	<ul style="list-style-type: none"> • Heat imbalance by the inlet, i.e. the waste bed
Visualization and Data analysis		<ul style="list-style-type: none"> • Do not derive conclusions directly from temperature, species concentration or reaction • Investigate the overall flow pattern using particle tracking • Quantify the flow performance by residence time, mixing etc.

계로 인해 보고된 사례가 없다. 최근 직경 10cm 정도 크기의 원통에 온도 센서를 넣고 폐기물과 함께 투입되어 시간에 따른 온도 이력을 기록하는 측정기법이 시도되었지만, 아직 이용가능한 측정자료를 얻지 못하고 있는 상태이다[17]. 이외에 간접적인 측정 방식으로 연소실 뒷쪽에서 CCD Camera를 이용한 화염 형태의 가시적인 관찰 사례[18]가 보고된 바 있다.

가스 유동장 부분의 경우 극히 제한적인 부분-포트를 통해 접근가능한 연소실의 한 단면-에 대한 온도 또는 화학종 측정 실험[19, 20]이 보고된 바 있지만 해석 결과의 검증에는 매우 불충분한 결과이다. 그 외에 연소공기 주입구 별로 메탄을 주입하여 연소실 출구에서의 CO₂ 거동으로부터 체류시간 분포를 측정할 사례[21]도 있으나 체류시간은 유선 분포와 온도 및 속도 등에 영향을 받으므로 해석 결과와의 비교가 어렵다. 따라서, 직접 측정과 함께 단순화된 조건에서의 실험이 이루어지는데, 본 저자가 수행한 냉간유동 모형실험(cold flow model test)을 통한 유동장의 형태와 해석 결과의 비교[22]가 한 방식이며, 비슷한 사례[9]에서도 수치해석은 상당히 정확한 결과를 보인다.

이와 같이 측정 가능한 값의 제한으로 이를 이용한 해석 결과의 검증이 어렵지만, 해석에 쓰이는 개별적인 난류, 반응, 복사, 연료층 연소 모델은 단순화된 조건에서 이미 검증이 되어 있으므로 실제 소각로 내 주요 현상에 기초한 해석 범위 및 세부 모델 설정과 적절한 경계 및 초기 조건의 선정이 더 중요한 문제가 된다.

보다 근본적인 문제로서 폐기물 층 연소 현상은 연소 조건에 따라 달라지므로 특정 조건 하에서의 측정과 이에 대한 기존 해석 방식을 이용한 유동 해석 결과의 비교 검증을 다양한 상황에 확장할 수 없다는 한계가 있다. 따라서, 폐기물 층 연소를 해석할 수 있는 모델 개발과 이 모델을 이용한 유동장과의 종합적 해석 기법에 대한 연구가 필요하다. 최근 1차원 비정상 상태나 2차원으로 단순화된 폐기물 층 연소 모델[23,24]이 제시되었고, 폐기물 층과 유동장간의 열 및 물질 전달에 기반한 유동-연소의 병합 해석 기법[25]이 저자에 의해 제시되었으나 아직은 많은 발전이 필요한 상황이다.

5. 결론

화격자식 소각로에 대한 일반적인 유동 해석 방식은 폐기물 층 연소 해석의 어려움으로 인해, 연소상황의 임의적인 가정이 필요하다. 따라서 해석 목적에 따른 적절한 해석 절차와 세부 모델의 설정이 필요하며, 결과의 분석 역시 해석 방식에 맞는 신중한 고려가 필요하다.

현재의 해석 절차에서 연소상황의 가정이 가지는 임의성으로 인해 난류, 가스 반응, 복사열전달 등의 복잡한 세부 모델 이용이 결과의 정확성에 직접 연결되지 않는다. 이로부터 얻어진 온도나 화학종 분포는 연소상황의 가정방식에 따라 크게 달라지므로, 이 값을 이용한 직접적인 평가는 적절하지 않다. 그러나, 유동 형태의 경우 연소가스에 비해 2차공기 제트의 운동량이 매우 크기 때

문에 연소상황의 가정 방식에 따른 영향이 상대적으로 작다. 따라서, 유동 해석은 동일한 연소상황 가정방식 하에서 2차공기 제트의 거동에 영향을 주는 공기 주입 방식이나 연소실 형상 등의 인자에 따른 비교 연구에서 타당성을 가지고 있다. 그리고, 연소가스 이력 등 유동 형태와 관련된 결과를 체류시간, 혼합, 반응 성능의 정량적인 평가 방식을 이용해 분석하는 것이 적절하다.

참고문헌

- [1] A.M. Eaton, L.D. Smoot, S.C. Hill and C.N. Eatough, "Components, Formulations, Solutions, Evaluation, and Application of Comprehensive Combustion Models," *Progress in Energy and Combust. Sci.*, Vol. 25, 1999, pp. 387-436.
- [2] V. Nasserzadeh, J. Swithenbank and B. Jones, "Effect of High Speed Secondary Air Jets on the Overall Performance of a Large MSW Incinerator with a Vertical Shaft," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 92, 1993, pp. 389-422.
- [3] V. Nasserzadeh, J. Swithenbank, C. Schofield, D.W. Scott and A. Loader, "Effects of High Speed Jets and Internal Baffles on the Gas Residence Times in Large Municipal Incinerators," *Environmental Progress*, Vol. 13, No. 2, 1994, pp. 124-133
- [4] S. Kim, D. Shin and S. Choi, "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Designs by Flow Simulation," *Combust. and Flame*, Vol. 106, 1996, pp. 241-251.
- [5] D. Shin, C. Ryu and S. Choi, "Computational Fluid Dynamics Evaluation of Good Combustion Performance in Waste Incinerators," *J. of the Air and Waste Management Association*, Vol. 48, 1998, pp. 345-351.
- [6] C. Ryu and S. Choi, "Design Consideration for the Cross Jet Air Mixing in the MSW Incinerators", *Int. Journal of Energy Research*, Vol.21, 1997, pp. 695-706.
- [7] C. Ryu and S. Choi, "3D Simulation on Jet Air Mixing in the Municipal Solid Waste Incinerators", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.119, 1996, pp.155-170.
- [8] O.H. Madsen, S. Binner and K. Jorgensen, "Modern Design Technologies for Thermal Optimisation and Pollutant Control in MSW Incinerator Plants," *The 1st Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 7-8 July, Sheffield, UK, 1997.
- [9] R. Weber, G. Węcel, A. Veraan, F. Breussin and J. Dugué, "Experimental and Numerical Studies on Reburn Jet Penetration and Mixing with Application to Boilers and Municipal Waste Incinerators," *J. of the Institute of Energy*, Vol. 71, 1998, pp. 94-109
- [10] T. Klasen and K. Görner, "Numerical Simulation and Optimisation of a Large Municipal Solid Waste Incinerator Plant," *The 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 4-6 July, Sheffield, UK, 1999.
- [11] O. Riccius, A. Walther and B. Stoffel, "Design of Waste Incinerators Utilising CFD," *The 2nd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 4-6 July, Sheffield, UK, 1999.
- [12] 박병수, 이진욱, 서정대, 강승균, "도시 폐기물 소각로 파일럿 플랜트 실험을 통한 연소실 해석 모델 설정 및 결과 고찰," *한국폐기물학회 춘계 학술대회*, 대전, 1999, pp. 131-136.
- [13] 권순우, 이종협, "화학반응을 고려한 스토커식 소각로의 3차원 모사연구," *HWAHAK KONG-HAK*, Vol. 36, No. 3, 1998, pp. 353-363.
- [14] K.S. Chen, Y.J. Tsai, J.C. Lou, "Three Dimensional Combustion Modeling in Municipal Solid Waste Incinerator," *J. of Environmental Engineering*, Vol. 125, No. 2, 1999, pp. 166-174.
- [15] Y. Kori and R. Takeya, "Cross Jet Mixing and Its Effects on Combustion Performance in MSW Incinerators with Natural Gas Reburning," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, Belgium, 2001.
- [16] M. Périlleux, G. Creten, K. Peeters, J. Kümel, K. Görner, "Optimisation of Boiler Design for the Largest MSW Incineration Unit in Belgium and Experience with the "SEGHERS-IBB PRISM" as Improvement for Boiler Performance," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, Belgium, 2001.
- [17] J. Swithenbank, V. Nasserzadeh, Y.R. Goh, Y.B. Yang, J. Goodfellow, D. Ward, S. Gan, G. Reynolds, B.F. Chang, N.V. Russel, and F.M. Lewis, "Developments in Incinerator Bed Modelling," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, 2001.
- [18] T. Fujii, K. Hamabe, T. Hiraki, K. Yokota, Y. Takimoto, H. Shiouzu, H. Shiozaki, and M. Fujiyoshi, "The Fuzzy Automatic Combustion Control System for Reducing CO from Flue Gas

- of the Refuse Incinerator," *Hitachi Zosen Technical Review*, Vol. 53, No. 2, 1992, pp. 78-86.
- [19] A.M. Santos and R. Collin, "Study of a MSW Incinerator: Overall Operation and On-site Measurements over the Grate," *National Waste Processing Conference Proceedings*, ASME, 1992, pp. 133-143.
- [20] 최진환, 류창국, 신동훈, 최상민, "도시 폐기물 소각로의 운전 조건 개선 - 다이옥신 배출 저감 방안 실시 사례," *한국폐기물공학회지*, Vol. 17, No. 1, 2000, pp. 9-19.
- [21] V. Nasserzadeh and J. Swithenbank, "Measurement of Gas Residence Time in Large Municipal Incinerators using a Pseudo-Random Binary Signal(PRBS) Tracer Technique," *J. of Institute of Energy*, Vol. 23, 1995, pp.67-83.
- [22] 김승기, 신동훈, 류창국, 최상민, "소각로내 열 유동의 계산과 실험," *한국폐기물학회 논문집*, Vol. 11, No. 4, 1994, pp. 545-555.
- [23] D. Shin, and S. Choi, "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed," *Combust. and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 167-180.
- [24] Y.B. Yang, Y.R. Goh, V. Nasserzadeh and J. Swithenbank, "Mathematical Modelling of Solid Combustion on a Travelling Bed and the Effect of Channelling," *The 3rd Int. Symp. on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies*, 2-4 July, Brussels, 2001.
- [25] C. Ryu, D. Shin and S. Choi, "Combined Bed Combustion and Gas Flow Simulation for a Grate Type Incinerator," *J. of the Air and Waste Mangagement Association*, Vol. 52, 2002, pp. 174-185.