

소각로 개발 관련 연구

최상민 · 김성중 · 김승기 · 유영돈

Topics in Waste Incinerator Research and Development

Sangmin Choi, Seong-Jung Kim, Soong-Kee Kim and Young-Don Yoo



- 최상민 (한국과학기술원 기계공학과 교수)
- 1953년생
- 에너지변환 및 환경설비를 대상으로 하는 열공학을 전공하고 있으며, 석탄 연소, 보일러 열설계, 폐기물 소각로의 설계와 관련 연구에 관심을 갖고 있다.



- 김성중 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1949년생
- 에너지 및 발전공학을 전공하였으며, 유동층 연소장치, 저공해 폐기물 소각로 종합 시스템의 설계 등에 관심을 갖고 있다.



- 김승기 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1964년생
- 난류유동의 이론과 실험을 전공하였으며, 저공해 폐기물 소각로의 설계 및 열유동 해석, 실험 등에 관심을 갖고 있다.



- 유영돈 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1962년생
- 연소공학을 전공하였으며, 저공해 폐기물 소각로의 설계 및 연소실험, 배가스 처리 등에 관심을 갖고 있다.

1. 머리말

폐기물 소각로의 기술은 선진국의 주요 기업체들이 거의 독점하고 있으며 이들과의 기술적·상업적 협조(또는 종속)관계를 통해서만 국내에 적용이 가능한 실정이다. 이러한 배경에서 국내의 소각로 관련 기술자들은 외국기술의 습득으로 국내에서 제작(일부), 설치, 운전하는 분야에만 관심을 쏟고 있었다. 그러나 관련기술이 급속도로 진보하고 있으며 특별히 공해문제와 관련하여 설계기준이 바뀌어가고 있다. 따라서, 독자설계에 의한 저공해 소각로의 개발을 위해서는 우선 기존의 기술을 면밀히 조사·분석하고

이를 기반으로 우리 실정에 맞는 기술을 창출해야 할 것이다.

이 글의 앞부분에서는 소각로 관련 선진기술 중에서 소각 연소실부분에 대한 내용을 검토하고, 저공해화를 위한 연소실을 설계할 때 고려해야 할 인자들을 도출한다. 이러한 설계인자들에 대한 정량적인 평가는 설계개념 확인 및 설계인자의 검토를 위한 연소, 유동, 열전달 등 실험실 규모의 실험과 열유동의 전산해석 기법을 활용하여 설계변수의 최적화를 통해 이루어진다. 이 글에서는 컴퓨터·프로그램을 사용하는 전산유동해석, 축소 모형장치를 사용하는 실험 등 열유동 해석법과 고형 폐기물의 연소특성을 분석하는 실험적·이론적 접근법을 소개한다.

2. 선진기술 중의 연소실 개발

2.1 연소실 형상

2.1.1 소각로의 연소실

화격자식(grate-type 또는 stoker-type) 소각로의 연소실은 그림 1에서 보는 바와 같이 폐기물이 투입되어 연소공기와 반응하여 소각이 일어나는 공간으로 폐기물의 반입·공급설비와 배가스·처리설비의 가운데에 위치하고 있다. 연소실부위는 소각로에서 가장 핵심적인 장치이면서 공해물질의 관점에서 볼 때 후처리장치로 넘어가게 될 공해물질의 양을 줄이기 위해 공해물질의 파괴 또는 발생억제를 담당하는 부분이다. 이 부분은 흔히 소각효율이라고 부를 수 있는 가연성분의 완전연소를 달성하도록 유도하고 아울러 연소와 관련하여 발생할 수 있는 2차 오염물질

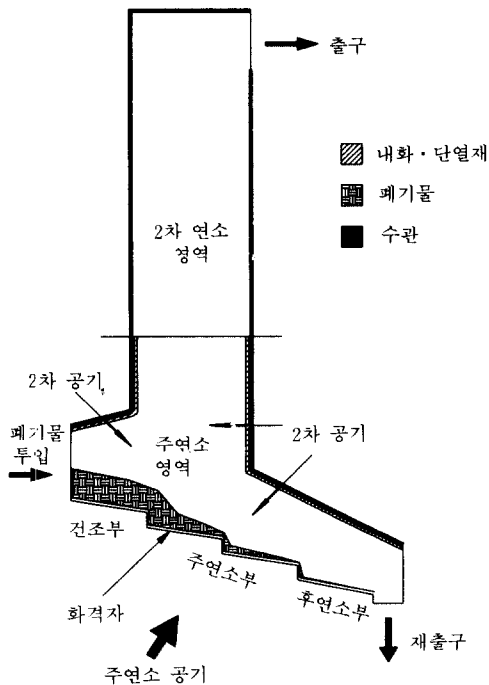


그림 1 화격자식 폐기물 소각로의 연소실

을 최대한 줄여줄 수 있어야 한다. 이를 달성하기 위한 연소조건을 만족시키기 위해서 연소실의 형상 및 운전조건을 다양하게 조정하고 있다. 구체적으로는 연소가스의 체류시간, 유동상태와 온도 등을 적절히 조절하며 이를 통하여 불완전 산화물(CO, 가연성 재등), 질소산화물(NOx), 그리고 다이옥신(dioxin)과 같은 독성 유기물 등의 발생을 최소화하는 실재를 하여야 한다.

연소실의 형상은 연소가스의 흐름방향과 폐기물의 이송방향에 따라 병류식, 역류식과 중간류식 등의 세 종류로 크게 나뉘어질 수 있지만⁽¹⁾ 연소실벽면에 굴곡(nose, arch)을 주거나 내부에 장애물(baffle)을 삽입하는 경우 등 다양한 형상들이 시도되었다.

2.1.2 유럽의 소각로

독일의 마틴(Martin) 사는 다양한 형상의 소각로를 제작하였지만, 특별한 경우를 제외하고는 역류식이 주로 적용되고 있다. Martin의 발표문⁽²⁾에 의하면 13,000 kJ/kg (3,100 kcal/kg)의 저위 발열량을 갖는 폐기물 연소시 연소부위는 1,000~1,150°C, 연소실 중 후연소 부위와의 경계부에는 800~900°C, 2차 연소실 입구(2차 공기 투입부위)는 1,000~1,300°C의 온도분포를 나타내고 있다. 마틴사는 열병합발전소 Coburg와 Stockholm-Högdalen에서 2차연소용 공기전량이나 일부를 배가스에서 순환시켜 주입시키고 있으며 그 결과 2차 오염물 생성을 현저하게 줄이면서 공기비를 낮게 유지시키고 있다.

독일의 밥콕(DBA)사는 병류식 소각로 형상⁽³⁾을 개발하였는데, 건조부위에서 발생하는 CO, 다이옥신, 퓨란(furan) 등을 주연소부에서 발생하는 고온의 연소가스와 혼합시킴으로써 연소를 촉진하여 공해물질을 파괴할 수 있다고 발표하였다. 그림 2에 의하면 중간류식의 건조부 저온가스 ①은 주연소의 결합열을 스쳐 지나가고 있으나 병류식인 경

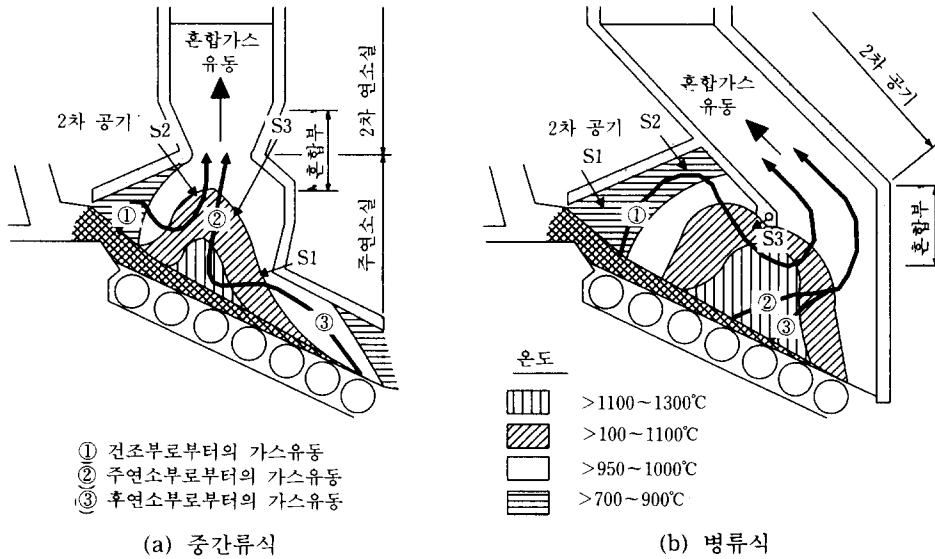


그림 2 DBA에 의한 중간류식과 병류식의 비교⁽³⁾

우에는 모든 가스가 고온부인 주연소 중심화염을 통과하게 되면 충분한 체류시간을 갖는다.

2.1.3 일본의 소각로

일본의 가와사키(Kawasaki) 중공업⁽⁴⁾은 열유동해석의 결과를 이용하여 중간류식이 역류식에 비해 주연소실 출구부위의 혼합을 크게 증진하는 것을 확인한 후 그림 3에서 보는 바와 같이 역류식을 중간류식으로 변경하였다. 한편, 미쓰비시(Mitsubishi) 중공업⁽⁵⁾은 최근 폐기물 발열량이 급격히 증가함에 따라 연소실내의 굴곡부에 클링커가 생성되어 축적되는 문제에 부딪혔으며, 이 문제를 해결하기 위해 연소실후벽의 굴곡을 제거하였다. 이러한 두 회사의 상반된 경향은 연소실내의 혼합과 폐기물 성상의 변화에 따른 제문제를 함께 고려하여 적절한 설계가 이루어져야 함을 시사하고 있다.

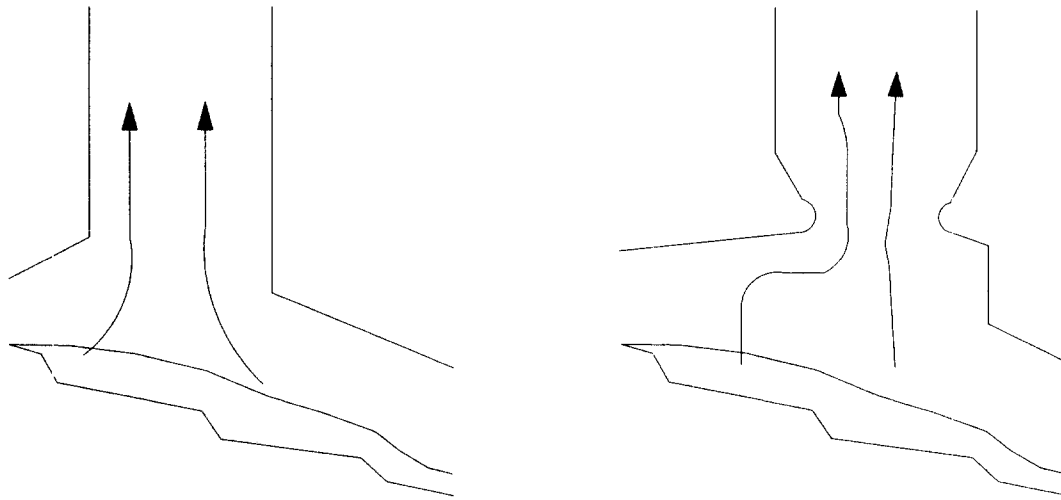
2.1.4 캐나다의 소각로

캐나다 퀘벡(Quebec) 시의 소각로는 연소실 형상변경의 사례로 잘 알려져 있다.⁽⁶⁾ 그

림 4는 변경전과 변경후의 형상변화를 보여주며, 유동모형연구의 결과를 근거로 형상변경을 시도한 예이다. 우선 수관아치를 제거하였고, 후벽의 상하단에 굴곡이 추가된 것을 관찰할 수 있다. 하단의 굴곡은 후연소부에서의 체류시간을 증가시키고 복사열전달을 증진시키며, 상단의 굴곡은 2차연소실의 재순환영역을 제거하고, 대류부 입구의 성층화를 줄이며 고속에 의한 분진이월을 방지하는 효과를 가져온다. 2차 연소실의 재순환영역은 저온부를 유발하여 보일러의 효율을 저하시키며 2차연소실의 용적을 제대로 사용하지 못하게 한다. 퀘벡 시는 이러한 형상변화 외에도 연소공기 주입방식의 개선, 화격자 구동의 자동화 등의 개선을 추가하여 유해유기물의 방출을 크게 줄이는데 성공하였다.

2.2 연소공기 주입방식

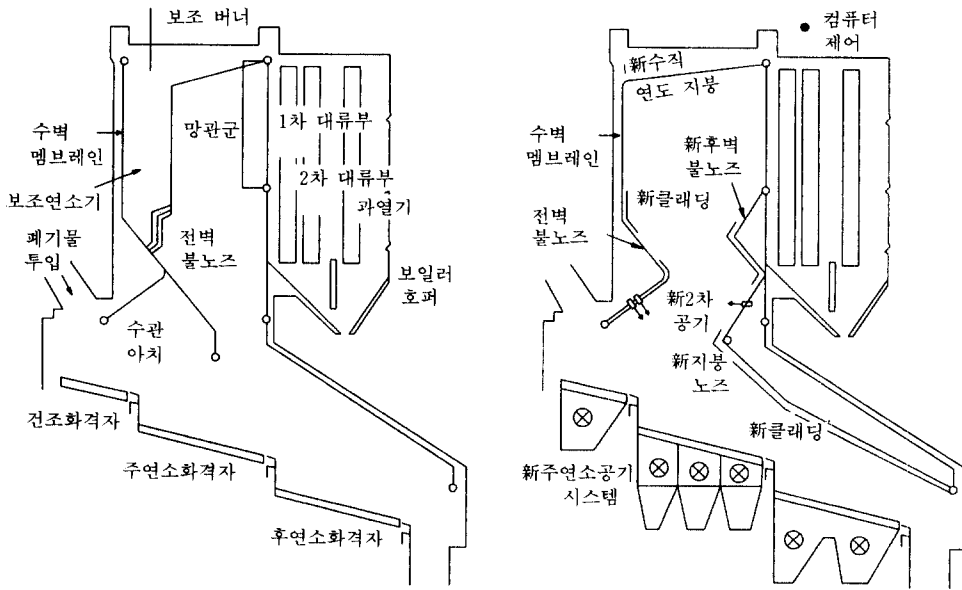
연소실에는 폐기물의 소각을 위해 적정량의 연소공기(완전연소를 위해 필요한 이론공기의 1.5~2.5배)가 주입되는데, 그림 1과 같은 화격자식 소각로에서는 1차공기가 화격자 하부로부터 주입되고 화염의 윗부분에서



(a) 수정전의 형상

(b) 수정후의 형상

그림 3 가와사키 중공업의 연소실 형상 변경⁽⁴⁾



(a) 수정전의 형상(1979)

(b) 수정후의 형상(1985)

그림 4 퀘백 소각로의 형상 변경⁽⁶⁾

2차공기가 주입된다. 1차 연소공기는 화격자상의 연소과정, 즉, 건조, 착화, 연소, 후연소 등에 집적적으로 영향을 주므로 적정한 온도유지 및 연소공기의 분배가 이뤄

져야 한다. 반면에 2차 연소공기는 불완전 연소물질의 2차 연소실에서의 연소를 촉진시키는 역할뿐만 아니라 연소실 내부의 유동형태를 크게 변화시키므로 미분입자의 이월방

지, 화염높이의 적정유지, 연소가스 농도의 균일화 등 연소실 내부의 연소상황을 제어하는 역할을 수행한다.⁽¹⁾

미국의 캘리포니아주는 Commerce 시의 소각로에 대하여 연소공기의 시험을 수행하여 1차, 2차 공기량비와 초과공기량에 따른 CO와 NOx의 방출량을 측정한 결과 2차 공기량이 총공기량의 40, 50%일 때 CO의 방출량이 매우 낮고, 화염높이가 낮아지는 것을 확인하였다.⁽⁶⁾ 독일의 Martin 사는 1/5 또는 1/1의 냉간모형실험으로 폐기물 발열량에 따른 2차공기의 주입량과 주입각도의 변화를 제안하였다.⁽¹⁾ 일본의 고베(Kobe)철강⁽⁷⁾은 연소실험로를 사용하여 유동상식 도시폐기물 소각로의 2차공기 주입방식으로 반경방향 주입법과 접선방향 주입법을 비교하여, 접선방향주입이 배가스중 CO의 농도를 줄이는데 효과가 있음을 보여주었다. 또한, 일본의 가와사키 중공업⁽⁴⁾은 전산 프로그램을 사용하여 1차, 2차공기량과 2차공기 주입구위치 등의 효과를 시험하였으며, 시험결과로부터 2차공기량이 많으면 관통력이 강해서 혼합상태가 양호하고, 2차공기를 분산하면 각각의 유량이 작아져 혼합상태가 나쁘며, 유로가 교차하는 곳에 공기 주입구를 설치하는 것이 좋다고 제안하였으며, 해석 이후에 실로에서의 시험으로 검증하였다.

2.3 연소실의 개발 조건

2.3.1 최적 연소

최적 연소는 연소과정이 완만한 가운데 8,000시간 이상 연소가 지속되며 폐기물 성상의 설계범위내에서 조연 없이 그리고 발생열량의 큰 변화 없이 연소가 이루어지며, 2차 공해물질의 생성을 최소화하고 생성된 공해물질의 파괴를 최대화하는 것을 의미한다. 전통적으로 최적연소의 조건은 3T, 즉, 시간(time), 온도(temperature)와 난류(turbulence)의 개념으로 설명되어 왔다. 그러나 미국

의 환경보호성(EPA)⁽¹⁾은 전통적인 3T의 단순한 개념을 소각로에 직접적으로 적용하기에는 적당하지가 않으므로 3T에 대한 새로운 해석이 필요하다고 보고하였다. 첫째, 기체상의 체류시간은 필요한 반응시간이라기보다는 혼합시간(mixing time)이어야 한다. 충분한 온도상태에서 혼합이 되면 반응은 순간적으로 일어나기 때문에 체류시간은 공기와 중간물질간의 충분한 혼합에 필요한 것이다. 둘째, 난류는 그 자체로 충분한 혼합을 충족시키지 못하며 가스와 공기의 혼합은 난류 공기제트가 연소가스를 통하여 확산될 때 일어난다. 마지막으로, 연소실내의 유체는 평균온도와는 심각하게 다른 온도를 거쳐 빠져나갈 수 있기 때문에 평균온도의 개념은 적절하지가 않다.

2.3.2 개발조건

선진기술 분석에 의해 도출된 연소실 형상 개발조건은 다음과 같다.

- 연소가스의 대류나 복사열을 최대한으로 적용하여 전조시간을 줄인다.
- 연소가스의 상태를 제어하여 연소실의 온도분포가 일정하도록 한다. 즉, 모든 방출가스가 고온부를 통과하도록 유도해야 한다.
- 1차 연소실의 출구에서 충분한 혼합을 유도해야 한다.
- 1·2차 연소실의 연소가스 체류시간은 각각 2초 이상으로 한다.
- 연소실의 평균온도는 850°C 이상으로 유지한다.
- 2차공기는 제트의 침투거리를 연소실 폭의 90% 이상으로 하여 혼합을 충분히 유도하도록 고속분사한다.⁽¹⁾
- 2차 연소실에서의 저온부를 유발하며, 분진이월을 크게 하는 불필요한 재순환 영역의 발생을 억제해야 한다.
- 연소실형상의 심한 굴곡을 방지하여 클링커축적을 억제해야 한다.

- 연소실의 열부하는 150~200 Mcal/m³h로 유지한다.
- 연소실 벽면은 멤브레인 수관벽으로 하며, 약 10m 높이까지는 급랭을 방지하기 위해 SIC90 등 고급단열재를 피복한다.

3. 열유동 계산과 실험

3.1 연소실 내부상황과 단순화

앞서 언급한 선진기술분석의 결과로부터 소각로의 설계작업 또는 기존 소각로의 개선은 연소실내의 상황에 대한 상세한 정보에 근거하여 수행되어야 하며, 대부분의 선진기업들이 이미 이런 작업을 활발히 진행하고 있음을 확인하였다.

연소실에서는 질량, 운동량과 에너지의 전달현상이 난류, 화학반응, 복사열전달, 다상효과 등 다양한 분야의 현상들과 결합되어 일어나고 있다. 연소실 내부의 유동은 매우 높은 레이놀즈수(Reynolds number, $Re > 1 \times 10^5$)를 갖기 때문에 강한 3차원 난류 유동장이다. 난류(turbulence)는 내부가스의 혼합을 촉진시키는데 매우 중요한 역할을 하고 있고, 난류유동장은 폐기물의 연소로 유발되는 밀도차에 의한 부력(buoyancy)에 의해 변형이 되며, 이것을 파악하기 위하여 정확한 온도장의 예측이 필요하다. 온도장의 예측을 위해서는 다양한 화학종의 반응 메카니즘과 폐기물, 가스, 벽면 사이의 복사열전달, 가스의 유동에 의한 대류열전달, 벽면을 통한 열전도 등 복잡한 열전달현상과 비산체에 의한 다상효과(multiphase effect) 등에 대한 정보가 필요하다.⁽⁸⁾ 이러한 현상들이 합쳐져서 연소실 내부의 질량, 운동량, 에너지의 전달을 지배하며, 열유동장 즉, 속도장, 온도장과 밀도장을 형성하게 된다.

소각로내에서 일어나는 현상들을 실제의 소각로에서 관찰하는 것은 경제성의 문제뿐만 아니라 각 현상을 분리하여 해석하는 데에 한계를 갖고 있다. 그러므로 단순화 또는

모형화의 방법으로 문제에 접근하는 것이 기본적인 접근법으로 사용되어 왔다.

연소실내의 복잡한 열유동장을 단순화하는 정도에 따라서 다양한 수준의 모사가 가능하다. 우선 냉간유동(cold flow) 해석은 열전달과 연소를 고려하지 않은 분석법이다. 실제의 연소실에서 일어나는 복잡한 열유동 및 반응과정에서 유동은 가장 주된 부분이며, 다른 효과들, 즉, 연소와 열전달에 의해 상대적으로 큰 영향을 받지 않으므로 정량적인 엄밀성은 부족하지만, 정성적인 특성을 냉간유동의 이해로부터 관찰하여 설계의 기초적인 아이디어를 도출해 낼 수 있다.

흔히 채택되고 있는 또 하나의 중요한 단순화는 3차원 열유동장을 2차원으로 가정하는 것이다. Nesserzadeh 등^(9,10)은 소각로의 전산 수치해석으로부터 강한 2차원성을 확인한 바 있으며, Ravichandran과 Gouldin⁽¹¹⁾은 소각로 연소실 형상을 특징짓는 특성은 2차원이고, 제트와 교류(cross flow)와의 혼합특성에 2차원성이 강하기 때문에 2차원적인 해석이 첫 단계로 의미가 있다고 하였다. 이러한 단순화 또는 모형화(modeling)는 연소실 내부 상황의 해석에 필수적이며, 그 해석의 결과로부터 유용한 정보를 얻기 위해서는 해석의 가정들에 대한 이해가 뒷받침되어야 한다.

3.2 전산유동해석

전산유동해석으로는 주로 상용 프로그램을 사용하지만 각 기업에서 자체 제작한 프로그램을 사용하기도 한다. Ravichandran과 Gouldin⁽¹¹⁾은 유한차분법(FDM, finite difference method)을 사용한 PHOENICS와 유한요소법(FEM, finite element method)을 사용한 FIDAP을 연소실내의 유동계산에 적용하여 두 가지 프로그램의 성능을 비교하였다. 그들은 유한요소법이 격자구성에 큰 장점을 갖고 있기 때문에 FIDAP의 성능이 뛰어난 것으로 판단하였다. 그러나 유한요소법

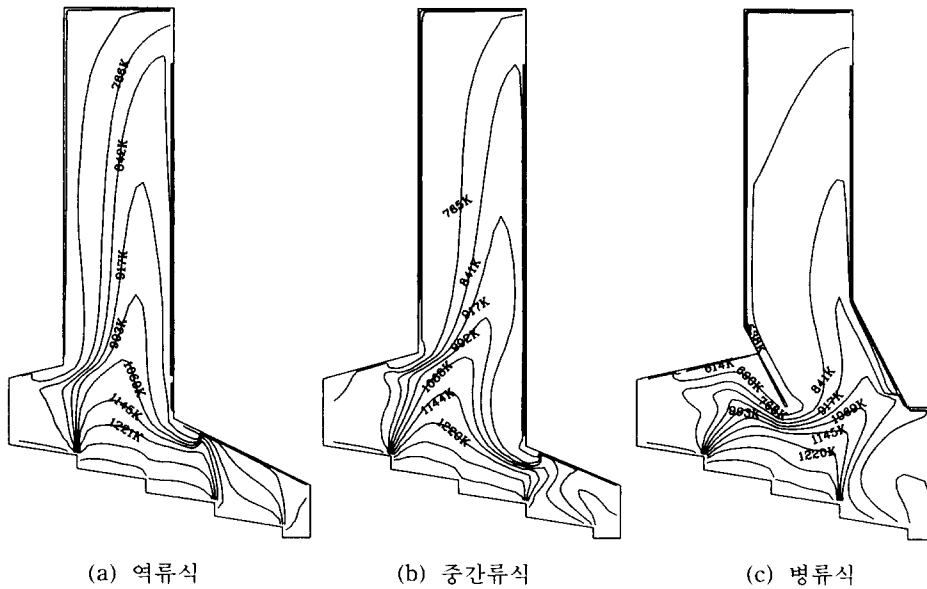


그림 5 FLUENT를 사용하여 계산한 연소실내의 온도 분포⁽¹²⁾

을 채택하는 프로그램은 계산시간과 적용범위에 있어서 결정적인 단점이 있으며, FLUENT와 같이 유한차분법을 사용하면서도 격자구성의 난점을 잘 해결한 프로그램이 존재한다. 일본의 고베철강은 소각로의 열유동해석에 FLUENT를 사용하고 있으며,⁽⁷⁾가와사키 중공업은 자체개발 프로그램인 HAMTEC을 사용하고 있다.⁽⁴⁾ Nasserzadeh 등^(9,10)의 논문은 FLUENT를 소각로에 적용하여 많은 정보를 얻어낸 전형적인 논문이다. 그들은 연속방정식, 운동량방정식, $k-\epsilon$ 난류모형방정식, 에너지방정식뿐만 아니라 연소모형을 포함하는 화학성분의 보존방정식, 입자의 운동방정식을 사용하여 속도, 온도, 농도, 미연가스, CO, CO₂, O₂ 등 다양한 양들의 분포를 계산하였다.

그림 5는 연소실의 전형적인 세 형상에 대하여 FLUENT를 사용하여 계산한 온도 분포를 보여 준다.⁽¹²⁾ 이 계산에서는 일당 300톤 처리규모의 소각 연소실을 2차원으로 상사하고, 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 사용했으며, 복사 열전달 모형으로 DTRM(discrete

transfer radiation model)을 사용하였다.

3.3 냉간 유동 모형 실험

연소실 내부의 유동장을 관찰하기 위한 실험적인 방법으로는 규모를 축소한 모형을 제작하여 유동가시화나 속도의 직접측정을 하는 방법이 널리 쓰인다. EPA의 보고서⁽¹¹⁾를 살펴보면, 선진기업들이 기존시설을 개선할 때, 냉간유동실험이 가장 흔히 사용하는 방법임을 알 수 있다. 독일의 밤콕사와 스타인물러(Steinmuller)사는 냉간유동모형실험과 노내측정법을 함께 사용하였고, 덴마크의 폴룬트(Volund)사는 수상유동모형실험(water-table flow modeling)을, 독일의 마틴사는 냉간유동모형실험을 수행한 것으로 보고되어 있다. 소각로의 전형적인 냉간유동실험예를 독일의 에센(Essen)대학이 수행한 Hamm소각로의 프로젝트보고서로부터 볼 수 있다.⁽¹⁶⁾ 에센대학은 상사법칙을 사용한 1/10과 1/20의 풍동모형을 제작하여 실(tuft)을 사용한 유동가시화, 열풍속계를 사용한 속도장의 측정을 수행하였다.

연소실 내부의 유동장은 매우 강한 난류유동이므로 공기를 유동물질로 사용할 경우 속도측정 등은 용이하지만 유동의 가시화는 매우 어려운 반면에 물을 유동물질로 하면 유동의 가시화가 용이하다. Fehr와 Vaclavinek⁽¹⁴⁾은 3차원 수동실험을 하였으며, Cohan⁽¹⁵⁾은 소각로의 수상모형을 제작하여 내부의 유동을 가시화하였다. 수상모형은 2차원모형이라 할 수 있는 것으로 폭에 비해 높이를 매우 작게 제작한 모형을 책상면에 평행하게 놓아서 실험을 하고 자유표면이 있도록 하는 것이다. 이러한 2차원적인 실험방법은 형상과 주입조건의 변경, 가시화 등 여러가지 측면에서 큰 장점이 있다.

유동장을 상사하기 위해서는 원형(prototype)과 모형(model)의 특성적인 무차원수를 일치시켜야 한다. 냉간유동시험, 즉, 속도장을 고려할 때에는 레이놀즈수(Reynolds number, $Re=VL/\nu$, 여기에서 V 는 특성적인 평균속도, L 은 길이척도를 나타내며, ν 는

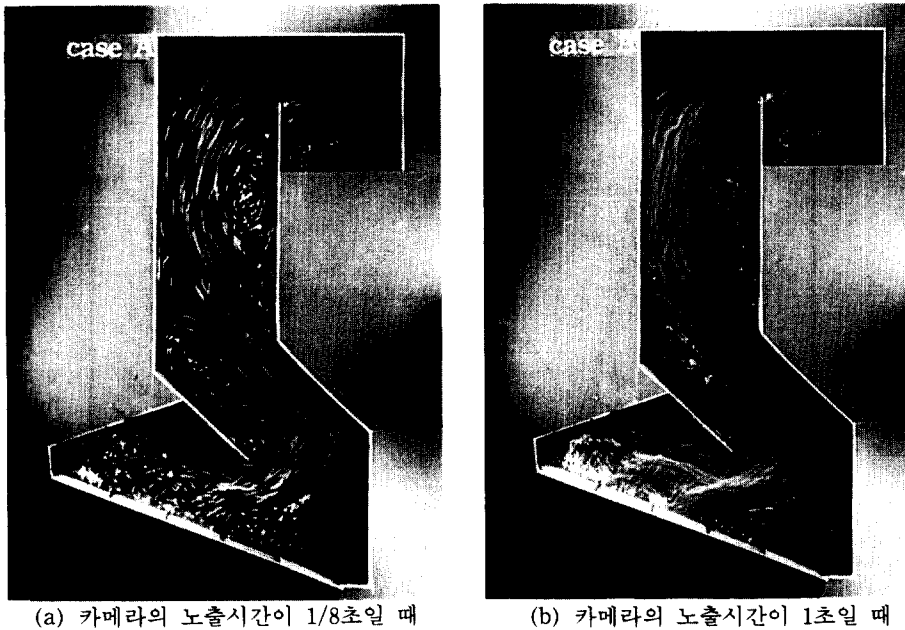
점성이다.)를 무차원수로 사용하여 식 (1)이 되도록 모형을 설계한다.

$$\frac{V_M L_M}{\nu_M} = \frac{V_P L_P}{\nu_P} \quad (1)$$

그러나 실제 연소실내에서의 온도가 균일하지 않고, 2차 공기의 온도는 내부가스의 온도보다 매우 낮으므로 완전한 상사는 기대하기가 어렵다.

그림 6은 수상모형 실험결과 중의 하나이다.⁽¹⁶⁾ 수상모형을 통한 유동 가시화의 과정에서 카메라의 노출시간을 조절하여 유동의 다양한 정보를 얻을 수 있다. 주어진 순간에서의 속도벡터는 노출시간을 짧게 하여 얻을 수 있으며, 그림 6(a)는 노출시간을 1/8초로 하여 얻어진 결과로서 각 선의 길이와 방향으로부터 속도의 크기와 방향을 알 수 있다. 그림 6(b)는 노출시간을 1초로 하여 얻은 결과이며, 유동에 부유하는 입자의 궤적으로부터 유동형태를 관찰할 수 있다.

한편, 열전달, 화학반응을 포함하는 열간



(a) 카메라의 노출시간이 1/8초일 때

(b) 카메라의 노출시간이 1초일 때

그림 6 수상모형장치에 의한 연소실 내부 유동장의 가시화⁽¹⁶⁾

유동의 실험을 위해서는 연소시험로를 제작해야 한다. 일례로는 일본 고베철강이 유동상식 소각로의 축소모형을 제작하여 2차 공기 주입방식, 2차공기 속도가 배가스의 CO 농도에 미치는 효과를 관찰한 실험이 있다.⁽⁷⁾

4. 폐기물 연소특성 연구

4.1 폐기물 연소특성 실험

폐기물은 여러 종류의 연료가 혼합되어 있는 것으로 볼 수 있기 때문에 그 연소 메카니즘을 정확히 이해하기는 어렵다. 따라서 하나의 접근 방법으로 연료 성분 각각의 연소 특성을 측정하고 각각의 포함 비율을 고려하고 연소 특성을 예측하는 것이 일반적이고 효율적인 방법이다. 대부분 고체 연료의 연소는 공업분석, 원소분석, 발열량 측정 등의 방법으로 그 연소현상이 예측된다. 그러므로 고형폐기물의 경우에도 이와 같은 방

법으로 실험을 수행하여 그 결과를 기존의 고체연료와 비교해 봄으로써 고형폐기물의 연소특성을 예측할 수 있다.

열중량 분석실험은 일반적으로 고체연료의 열분해 반응연구에서 매개변수를 구하기 위해 실시되는 방법으로 연소 개시 온도와 종결온도 등을 알아보고 반응물 등을 알아보기 위하여 10°C/min의 일정한 온도 상승률을 가진 가열로내에 시료를 두어서 그 감량을 조사하는 실험이다. 그림 7은 나무에 대한 열중량 분석의 예를 나타낸 것이다.⁽¹⁷⁾

4.2 화격자상 연소모형 계산

화격자식 소각로에서 대부분의 연소는 화격자 위에서 일어나므로 화격자 위에서의 연소 상태를 규명하는 것 또한 중요한 문제이다. 정확히 연소 상태를 모형화하는 것은 어려운 문제이지만 가능한 가정을 이용하여 연소 상태를 예측하면 유동장 해석에 필

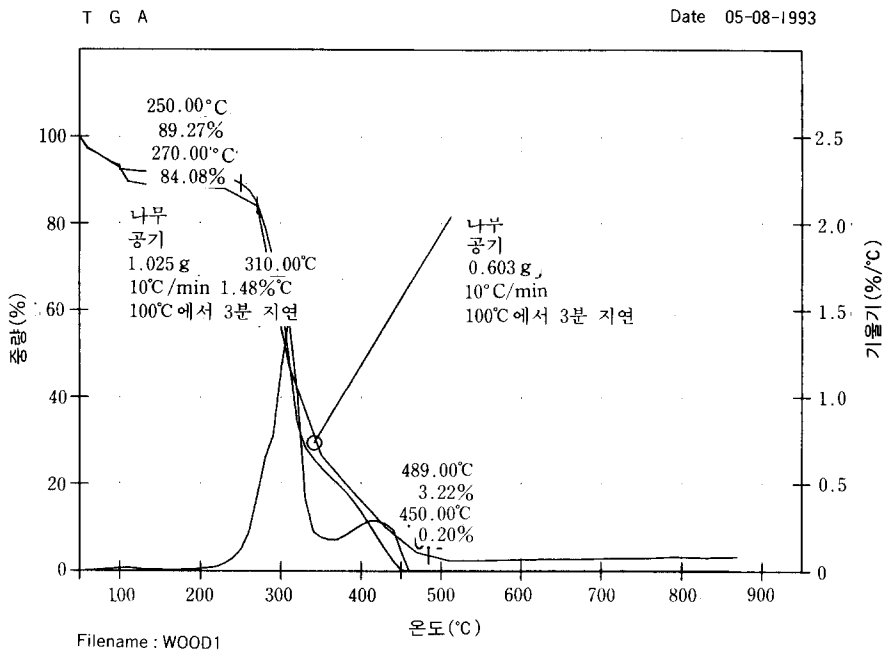


그림 7 나무의 열중량 분석 결과⁽¹⁷⁾

요한 경계 조건 등을 제시할 수 있을 뿐만 아니라 최적의 연소 상태에 도달하기 위한 화격자의 이송 속도, 길이 등을 예측할 수 있는 좋은 자료를 제시할 수 있다. 석탄의 연소 모형과 유사 모형을 가정하고 이를 바탕으로 온도 분포와 연소량을 예측할 수 있다.

여기에서 단순 다단계 연소모형의 가정들을 소개하면 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

- 폐기물이 수분, 휘발분, 고정탄소로 구성 되어 있었고 폐기물이 연소실에서 가열됨에 따라 먼저 수분 증발, 휘발분 증발, 고정탄소 연소의 순서로 반응이 일어나게 된다.
- 실제 연소는 각 단계가 완전히 구분되지 않지만 단순화를 위해 반응의 각 단계는 동시에 일어나지 않는다고 가정한다.
- 수분 증발 단계에서는 쓰레기가 가열되면서 건조가 일어나며, 수분증발이 끝나면 쓰레기에 포함된 휘발분이 가스형태로 방출되어 연소가 일어난다. 이 중 일부는 폐기물 내부에서 연소되어 쓰레기의 온도를 높인다.
- 휘발분 방출이 끝나면 남아 있는 고정탄소 성분이 연소되며, 고정탄소 성분은 가스로

방출되지 않고 모두 폐기물 내부에서 연소 되고 연소열이 모두 폐기물의 온도를 높이는 데 쓰인다.

- 공기주입은 실제로 1,2차 공기로 나누어져 일어나지만 단순화를 위해 2차 공기를 무시하고 모두 1차 공기로 주입된다.
- 폐기물에서의 열전달 형태 중에서 1차 주입공기에 의한 대류 열전달, 연소실 가스와의 대류 열전달과 연소실 노벽과의 복사 열전달 등을 고려한다.

그림 8은 단순 다단계 연소모형으로 계산한 결과 중 공기 과잉비에 따른 화격자 위의 쓰레기 온도 분포를 나타낸 것이다.⁽¹⁸⁾

5. 맺음말

최근 선진기업들은 폐기물의 단순한 소각이라는 차원에서 벗어나 저공해 소각기술을 개발하는 데에 많은 노력을 기울이고 있다. 즉, 선진기업들은 환경을 보호한다는 소각로 본래의 목적을 달성하기 위하여 연소실에서 1차적으로 유해물질의 발생을 억제시키는 방안에 연구방향을 맞추고, 연구를 활발히 진행해나가고 있다. 그러므로 저공해 연소실의 설계를 위해서는 광범위한 원본기술 평가에 근거하여 체계적인 설계절차를 정립하고 독자모형의 대안을 검토해야 한다. 이 글에서는 폐기물 소각로의 연소실에 대하여 선진기술을 정리하고, 이로부터 도출되는 설계인자를 확인·검증할 수 있는 여러가지 이론적·실험적 기법을 소개하였다.

소각 연소실의 설계에 있어서 전통적인 평균의 개념(예를 들면, 3T)은 연소실 내부의 국부적인 열유동현상을 세밀히 관찰하여 최적 연소조건을 창출해내는 관점으로 수정되어야 한다. 이를 위해서는 열역학, 유체역학, 연소공학 등 관련분야의 최신이론과 기법들을 최대한 이용하여 연소실내의 열유동장을 해석해내는 것이 필요하다. 난류모형, 복사 열전달 모형 등을 사용하는 전산수치 해석,

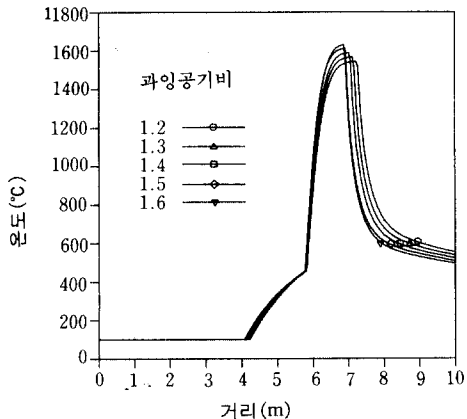


그림 8 다단계 연소모형에 의한 과잉 공기비의 변화에 따른 온도분포의 변화⁽¹⁸⁾

수동 · 풍동 모형에서의 유동가시화와 속도장 측정, 폐기물 연소특성에 대한 이론적 · 실험적 연구 등이 연소실 설계의 고도화에 유용한 자료를 제공할 수 있다. 이에 더하여 다양한 기초연구의 결과를 실제의 설계에 직접적으로 반영할 수 있도록 정량화해 내는 작업이 매우 중요한 차후의 과제로 남아 있다.

참고문헌

- (1) Seeker, W. R. and Lanier, W. S. 1987, "Municipal Waste Combustion Assesment: Combustion Control of Organic Emission," EPA, PB87-206090.
- (2) Martin, J. J. E., 1989, "Moderne Abfallverbrennung nach dem Martin-System," Martin GmbH.
- (3) DBA, Walzenrost, 1991.
- (4) Ide, Y., Kashiwabara, K., Nakagawa, K., Iiokawa, M., Roko, K. and Nomura, H., 1993, "Numerical Simulation of Flow and Thermal Characteristic in the Municipal Refuse Incineration Furnace," 川崎重工技報, Vol. 117, pp. 79~85.
- (5) 최상민, 1993, 미쓰비시 중공업 출장보고서, KAIST 저공해 소각로 연구개발팀.
- (6) Schindler, P. J. and Nelson, L. P., 1989, "Municipal Waste Combustion Assessment: Technical Basis for Good Combustion Practice," EPA-600/8-89-063.
- (7) Kitamura, R., et al., 1993, "Secondary Combustion Characteristics of Municipal Waste Incinerator," "R&D" *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 43, pp. 79~82.
- (8) Robinson, G., 1985, "A Three-Dimensional Analytical Model of a Large Tangentially-Fired Furenace," *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 116, pp. 116~150.
- (9) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J. and Jones, B., 1991, "Three-Dimensional Modelling of a Municipal Solid-Waste Incinerator," *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 64, pp.: 166~175.
- (10) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Scott, D. and Jones, B., 1991, "Design Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator," *Waste Management*, Vol. 11, pp. 249~261.
- (11) Ravichandran, M. and Gouldin, F. C., 1992, "Numerical Simulation of Incinerator Overfire Mixing," *Combust, Sci. and Tech.*, Vol. 85, pp. 165~185.
- (12) Kim, S. K., Shin, D. H., Lee, J. S. and Choi, S., 1994, "Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Desugns by Flow Simulation," *The Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference*, Sendai, Japan.
- (13) Bohn, T. J., 1991, "Strömungsuntersuchungen am Modell der MVA-Hamm nach Vorgabe von MAB-LENTJES am 15.05. 1991," Essen University, Germany.
- (14) Fehr, M. and Vaclavinek, J., 1992, "A Cold Model Analysis of Solid Waste Incineration," *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, pp. 277~283.
- (15) Cohan, L. J., 1975, "Flow Studies by Water Table Technique for Incinerator Furnaces," *In Incinerator and Solid Waste Technology*, ASME, pp. 75~83.
- (16) 류창국, 김승기, 최상민, 1994, "소각로의 형상설계를 위한 냉간유동실험," 대한기계학회논문집에 인쇄중.
- (17) 유영준, 유영돈, 최상민, 1994, "고형 폐기물 연소특성의 실험적 고찰," 한국폐기물학회지에 인쇄중.
- (18) 김형래, 유영돈, 최상민, 1994, "도시 폐기물 연소상의 단순 다단계 모형," 한국폐기물학회지에 투고. 