

# 폐기물 열처리 시스템의 설계 최적화를 위한 공학적 방법

폐기물 소각 및 열분해 응용 기술을 포함하는 열처리 시스템의 설계에 있어서 고려해야 할 공학적 방법론에 대한 개괄적인 검토를 한다.

신 동 훈

국민대학교 기계자동차공학부(d.shin@kookmin.ac.kr)

류 태 우

한국생산기술연구원 지능형산업설비팀(ytu@kitech.re.kr)

## 서론

국내 생활 폐기물 소각시설 산업계는 1986년 7월 50톤/일급 의정부 소각로가 국내에 처음 가동된 이후로 2003년말 기준 10,160톤/일의 생활 폐기물을 소각 처리할 수 있는 규모로 발전하여 20년이 채 안 되는 기간동안에 괄목할 만한 증가를 보였으며, 앞으로도 그 규모는 더욱 증가할 것으로 예상된다.<sup>1)</sup> 최근, 소각 산업계는 차세대 기술로서 공해물질 억제와 소각재 재활용 기능을 향상시킨 열분해 응용 소각기술의 적용을 검토하고 있으며, 경상남도 양산시에 국내 최초 열분해용 소각시설건설이 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 다른 한편에서는, 폐기물의 연료화기술이 개발되고 있다. 폐기물 연료인 RDF(Refuse Derived Fuel) 및 RPF(Refuse Plastic Fuel)를 활용한 전력생산기술이 환경부 차세대 핵심환경기술개발과제로 2004년도부터 시작되었으며, 순환유동층을 이용한 발전기술이 적용될 예정이다.<sup>3)</sup>

국내외에서 1990년도부터 폐기물 소각에 대한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 유럽에서는 독일과 영국 등지에서 전통적인 석탄 보일러를 개조한 소각로들이 건설되고, 운영되면서 발생하는 여러 가지 문제들을 전산유체역학, 공정해석 등 공학적 방법들을 동원하여 해결해왔다.<sup>4)</sup> 미국 역시, 오래전부터 폐기물 소각과 폐기물 발전에 대한 연구를 수행하여 왔지만<sup>5)</sup>, 미국 내에서는 폐기물 소각보다는 매립이 경

제적이기 때문에 더 이상 관련분야가 발전하지 않고 있다. 우리나라와 여건이 비슷한 일본은 빠른 속도로 외국기술을 들여와 자신들의 기술로 전환하고 있으며, 국내 소각산업 초창기에 건설된 소각로의 상당부분은 일본기술로 건설되었고, 차세대 폐기물 소각기술로 알려진 열분해 응용 소각 시스템에서는 이미 전세계를 선도하는 기술들을 갖추고 있다.<sup>6)</sup> 국내에서도 1992년부터 진행된 도시폐기물 소각시스템 개발연구를 통해 폐기물 소각 연구분야에 있어서는 빠른 속도로 세계적인 수준으로 발돋움할 수 있었으며, 소각로 설계 및 건설분야에서도 경쟁력을 갖추고 있고, 열분해 응용 소각시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>6-8)</sup>

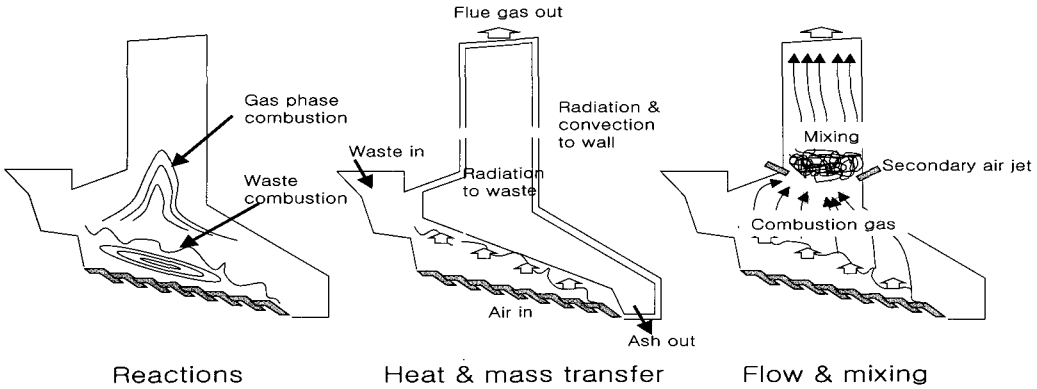
본 논문은 폐기물 소각 및 열분해 응용 기술을 포함하는 열처리 시스템의 설계에 있어서 고려해야 할 공학적 방법론에 대한 개괄적인 검토를 하고자 한다. 각 폐기물 열처리 시스템에서 발생하는 다양한 물리화학적 현상에 대한 검토를 수행하고, 각 현상에 대한 공학적 해석을 위한 활용가능한 공학적 도구들의 소개를 하고자 한다.

## 본론

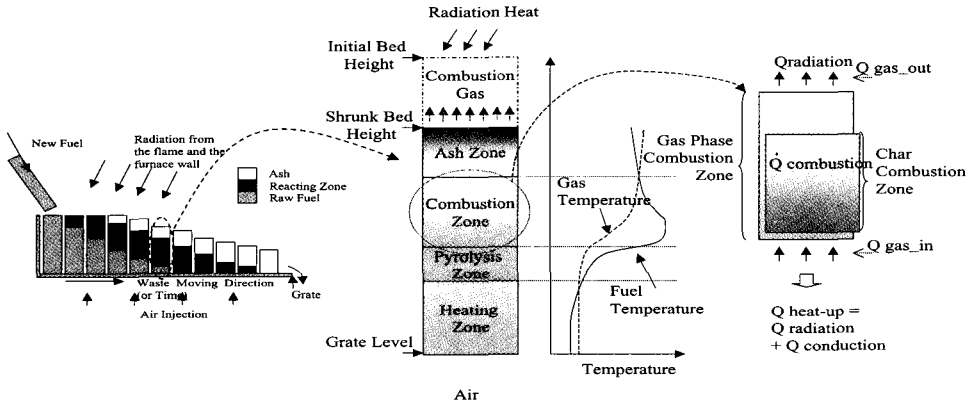
### 폐기물 소각 시스템

(1) 폐기물 소각로에서 발생하는 현상들

그림 1은 소각로 연소실에서 발생하는 물리화학



[그림 1] 폐기물 소각로내에서 발생하는 물리화학적 현상들



[그림 2] 폐기물 층연소 현상의 이해와 모델링 개념<sup>9)</sup>

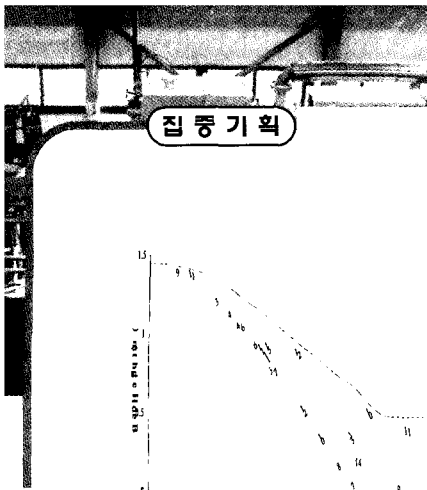
적 현상들을 개념적으로 나타낸 그림이다. 폐기물 소각은 저급석탄 연소시스템을 개조한 스토커방식을 주로 활용하고 있으며, 발생하는 현상은 폐기물 연소, 연소가스 유동, 그리고 벽면 열전달로 구분할 수 있다.

(2) 폐기물 연소특성 및 해석모델

폐기물 연소는 복사, 대류, 전도 등의 열전달과, 수분증발, 탈휘발, 좌 연소, 휘발분 연소 등이 복합적으로 발생하는데, 이와 같은 다양한 물리화학적 현상들은 폐기물 연소기 특성에 따라 다양한 형태로 연소가 진행된다. 그림 2는 화격자식 소각로에서의 폐기물 층내 연소현상의 모델 개념을 보여주고 있

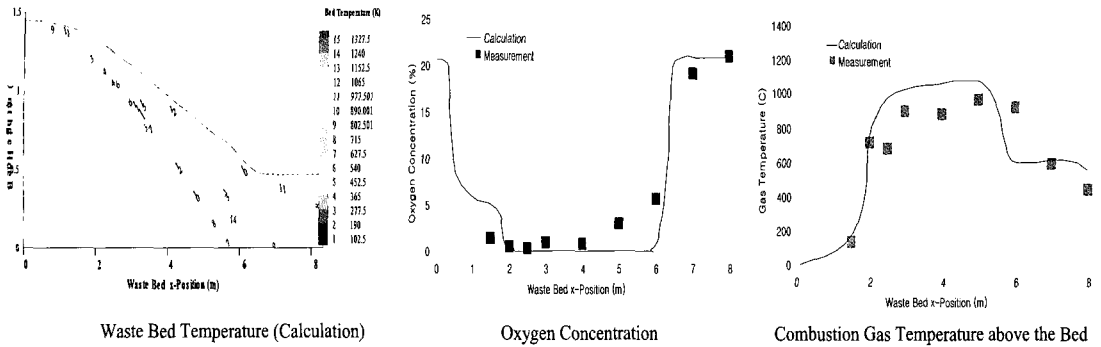
며, 이 모델은 다양한 폐기물 성상 및 운전조건에 영향을 평가할 수 있는 방법을 제시할 수 있다. 그림 3은 실제 플랜트에서의 실험결과와 폐기물 층연소 모델을 비교한 결과로서, 온도 및 산소 등의 다양한 주요 성능 인자들을 검토할 수 있는 정보를 제공한다.

폐기물의 연소방식에는 스토커식 이외에 유동층식 및 킬른식도 활용된다. 대형 도시폐기물 소각시스템에서는 스토커식이 주로 활용되고 있지만 산업폐기물, 슬러지, 폐유, 혼소 소각로 등에서 유동층 및 킬른식이 선호되고 있다. 이와 같은 연소설비에 대해 적절한 열물질 전달 및 반응모델을 수립하여 다양한 설계 및 운전조건에 대한 평가를 수행하는 것은 효율적인 설계 및 운전에 기여하는 바가 크다.

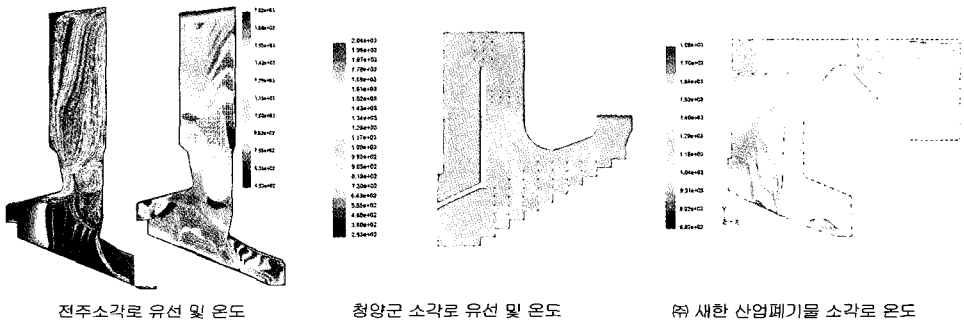


집중 기획

소각로



[그림 3] 폐기물 층연소 해석 결과와 실험치와의 비교 9~10)

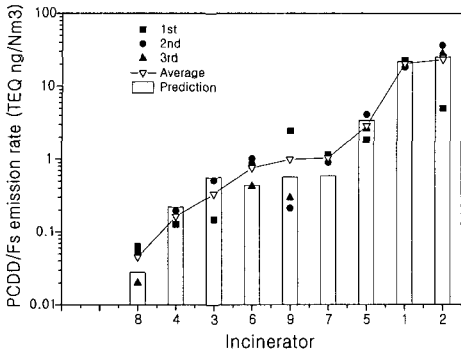


[그림 4] 다양한 폐기물 소각로 전산해석 결과에

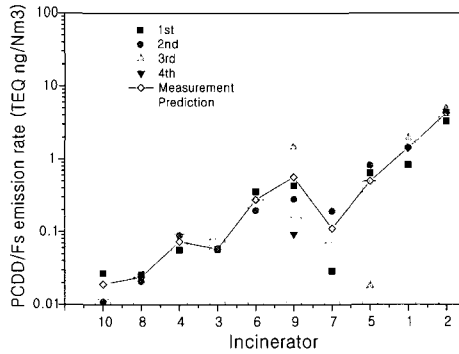
(3) 전산유체 해석을 통한 열유동 최적화  
 폐기물 연소후 발생한 가스는 그림 3에 나타난 바와 같이 화격자 위치별로 다른 화학적 조성 및 온도를 갖는 특징이 있다. 이는 폐기물 반응소요시간이 긴 것이 주된 이유이지만, 연소기 특성에 관련된 사안이기도 하다. 폐기물 소각시 발생하는 불완전 연소물질은 다이옥신 등과 같은 공해물질로 전환되므로 연소실에서의 최적 연소 제어에 의한 완전 파괴를 유도해야 한다. 이를 위해서 다양한 실험적, 해석적 방법이 동원되고 있으며<sup>8)</sup>, 전산유체는 적절한 모델 선정 및 경계조건 설정으로 실제에 근접한 해석을 가능하게 하는 공학적 방법이다. 그림 4는 다양한 도시폐기물 및 산업폐기물 소각플랜트의 열유동 현상에 대한 전산유체 해석결과의 예를 보여주는데 연소실내 온도분포, 화학종 분포를 확인하는 것 이외에도, 정량적인 분석을 통한 성능 평가가 가능하다.<sup>11)</sup> 특히 연소실 형상 및 1, 2차 공기 제트의 설계

에 지대한 영향을 미칠 수 있는 공학적 방법이며 최근 상당수의 국내 소각로 설계 및 운영시 전산유체 해석결과를 참고하고 있다. 또한, 새로운 형태의 소각로를 도입할 경우, 시스템의 성능을 예측할 수 있는 방안을 제공하기도 한다.<sup>12)</sup> 한편, 폐기물 연소의 복잡성 때문에 폐기물 층연소 현상을 잘못 가정하면 전산유체역학 해석결과가 실제와 맞지 않는, 단지 그림만 멋진 결과를 보일 수 있다. 이는 현재 유통되고 있는 전산유체 해석 코드들이 소각로 해석에 있어서 가장 중요한 폐기물 연소현상을 해석할 서브루틴이 없기 때문이다. 따라서, 폐기물 층연소 특성에 대한 충분한 이해와 모델 개발에 의한 연소특성 파악은 소각로의 의미있는 전산유체 해석을 위한 필수 조건이다.

(4) 소각로에서의 다이옥신 배출 및 해석모델  
 1997년부터 1998년까지 진행된 전국 대형 폐기물



(a) 1997년

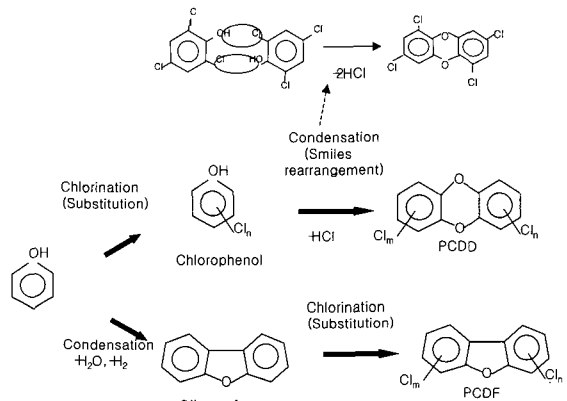


(b) 1998년

[그림 5] 국내 대형 도시폐기물 소각로에서의 다이옥신 배출량 측정 및 모델결과의 비교<sup>14)</sup>

소각로 다이옥신 배출치 측정결과는 사회적으로 많은 반향을 가져왔다.<sup>13)</sup> 그림 5에 나타난 바와 같이 최초 검사에서 당시 10 개였던 대형 도시폐기물 소각로에서 다이옥신 배출기준치인 0.1 ng<sub>TEQ</sub>/Nm<sup>3</sup>을 만족시키는 소각로가 단 한 개에 불과하였기에 주민 및 환경단체의 공격대상이 되었으며, 이를 해결하기 위하여 산업체, 학교, 연구소 등은 적극적으로 그 방도를 찾기 시작하였다. 그 노력의 결과로서 이제는 대부분의 소각로에서 다이옥신은 배출 기준치를 만족시키는 설비를 갖추게 되었지만, 아직까지도 가끔씩 운전 소홀, 설비낙후 등의 이유로 신문지상에 다이옥신 규제치를 초과하는 소각로와 환경단체 및 주민들의 반대시위 기사가 나오곤 한다.

소각로에서 다이옥신은 온도(250℃ -550℃), 분진(촉매역할), 불완전연소물질(페놀, 벤젠등 전구물질), 산소, 염소 등의 필수요인의 복합적인 영향으로 발생하게 된다.<sup>14)</sup> 그중에서도 온도는 생성온도구간인 250℃ -550℃ 구간에서의 가스체류시간을 최소화시켜(완전히 이 구간을 없애는 것은 현실적으로 불가능하다.) 다이옥신 생성을 최소화시키는 것이 중요하다. 또한, 분진의 농도를 줄이는 방법과, 전구물질에 해당하는 불완전 연소물질을 최소화하는 방법도 중요한 다이옥신 저감대책의 일부이다. 식(1)에 나타난 바와 같이 소각로에서의 다이옥신의 배출은,



[그림 6] 다이옥신/퓨란 생성과정

연소실에서의 전구물질 생성반응, 보일러 등 온도범위 250℃ -550℃를 포함하는 설비에서의 다이옥신 생성반응, 활성탄, 분진과의 흡착반응, 그리고 SCR에서의 촉매과피반응을 종합적으로 평가하여야 한다.<sup>14)</sup> 연소가스의 체류시간에 따른 가스조건 변화를 기준으로 각 반응률을 적분하게 되면 소각공정 구간에서의 다이옥신 발생량과 굴뚝 다이옥신 배출치를 예측할 수 있으며, 그림 5에는 실험과 다이옥신 해석 모델의 비교를 통해 개발된 모델의 적절성을 검토한 결과가 나타나 있다.

$$PCDD/F \text{ emission} = \int_{incinerator}^{stack} \text{Formation} + \text{Adsorption} + \text{Destruction} \, dt \quad (1)$$

<표 1> 국내에 소개되고 있는 폐기물 열분해 용융처리 시스템의 예

기술재휴선/국내회사	열분해/가스화 방식	용융기작	2차 반응로 특징	비고
Thermoselect/ 대우건설	이동층식	최+산소+LNG, 1600℃	산소주입에 의한 가스화 완성	
R-21/ 동부건설	회전킬른식	열분해가스+최+공기 1300~1350℃	산화공기주입에 의한 완전소각 및 용융	
Evava/ 효성	기포유동층식, 공기주입 부분산화	열분해가스+최+공기 1300~1350℃	산화공기주입에 의한 완전소각 및 용융	
신일본제철/ 포스코건설	고로형	코크스+폐기물+공기	-	

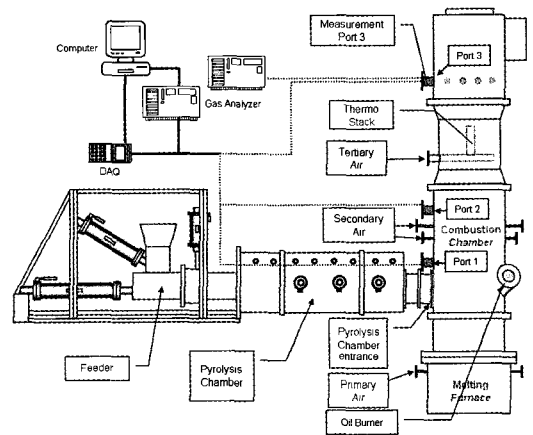
**열분해 용융 시스템**

차세대 폐기물 소각 기술인 열분해 용융 시스템은 다양한 기술들이 개발되고 있으며, 이미 상용화에 성공한 기술들도 소개되고 있다. 다음 표 1은 현재 국내에 도입이 검토되고 있는 네 가지 상용 열분해 용융 플랜트의 특징들을 보여준다.<sup>6)</sup> 소개되는 기술마다 차별성이 있으며, 복잡한 공정을 가지는 관계로 성능 및 경제성을 비교하는 데 어려움이 많다. 이 네 가지 플랜트 이외에도, 열분해와 소각을 결합한 열분해소각기술, 브라운 가스 또는 플라즈마 등의 고온 가스를 이용하는 용융기술이 연구되고 있다.

일반 소각시스템에서는 화격자, 킬른, 유동층 등 하나의 연소설비에서 열분해/가스화와 연소가 진행되는 것과는 달리, 열분해 용융 시스템에서는 구분된 설비에서 열분해와 연소 및 가스화를 진행하고, 바닥재 및 비산재를 용융시켜 안정화 및 고화시키는 용융공정을 추가하는 특징을 갖는다. 이러한 공정의 특징은 열분해와 연소공정을 분리시킴으로써 열분해 가스를 활용할 수 있는 기회를 마련하는 장점이 있는 반면, 열분해와 용융에 소요되는 에너지 소비량이 높다는 단점을 갖는다. 또한, 고온에서 운영되는 용융로의 재질도 고급 재질을 이용해야 하는 단점이 있다.

**(1) 축열식 고온 용융 소각로 개발**

그림 7은 최근 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 일환으로 연구개발중인 축열식 고온용융소각로의 공정개념을 보여준다.<sup>15)</sup> 이동층 열분해로와 기포식 용융로, 그리고 2차공기에 의한 선회류를 특



[그림 7] 축열식 고온 용융 소각로 개념도<sup>15)</sup>

정으로 하는 연소로로 구성된 이 공정은 폐기물의 연소열을 최대한 회수하고 열분해에너지 및 용융 보조에너지로 활용하여 기존의 설비들에 비해 보조연료 사용량을 최소화시키는 장점을 갖는다.

**(2) 열분해로**

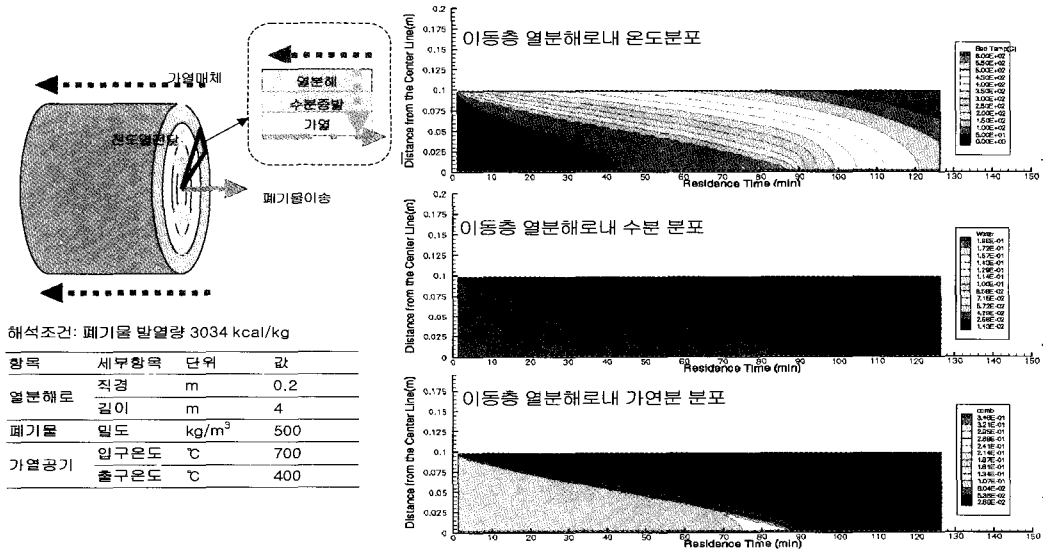
열분해로 방식은 무산소 상태에서 열을 가열하여 열분해하는 방법과, 산소를 당량비 이하로 공급하고, 산화반응열을 이용하여 가스화하는 두 가지 방법이 있다. 열분해 방식은 열분해를 통해 액체, 기체, 고체 등의 열분해 산물을 제조할 수 있지만, 외부의 열원을 이용해야 하는 단점이 있는 한편, 가스화 방식은 외부열원의 소모 없이, 산화반응으로 에너지를 충당하는 장점이 있지만 가스화 산물로 기체

만 얻는 점이 다르다. 그림 8은 이동층 열분해로의 열분해 개념과 층반응 모델을 이용한 열분해 과정 해석결과를 보여주며, 층내 온도, 다양한 폐기물의 농도 등 반응특성 등 열분해로 설계 및 운전이 필요한 정보를 제공한다.

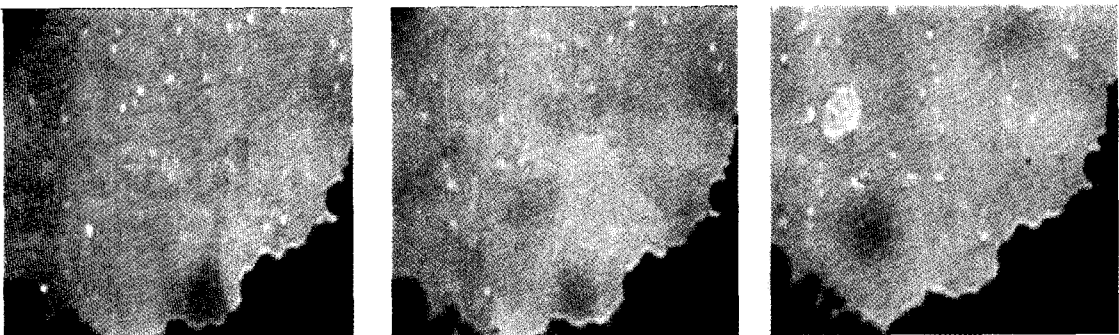
(3) 용융로

용융로의 종류는 다양한 형태가 있지만, 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째 형태는 플라즈마나 브라운가스와 같이 초고온의 가스를 폐기물에 직접 접촉시켜 용융시키는 방식이며, 두 번째 방식은 산

소와 코크스 또는 LNG와 같은 보조연료를 연소시켜 고온의 가스를 열원으로 사용하는 방식이고, 세 번째는 산소투입과 폐기물의 자체 발열에너지를 열원으로 이용하는 방식이다. 각 방식별로 장단점이 있겠지만 용융로 운전 안정성과 운전경비를 중요한 검토기준으로 해야 할 것이다. 그림 9는 LPG와 폐기물을 연료로 하고, 연소공기 중 산소 농도를 40% 정도로 투입하여 용융로 온도를 1500℃ 이상으로 유지시킨 기포식 용융로의 운전 사진이다. 그림 10은 시간에 따른 전산유체해석을 통한 용탕의 거동 해석 결과를 보여준다.



[그림 8] 이동층 열분해로 해석 결과<sup>16)</sup>



[그림 9] 기포식 용융로 운전 정지화면(1500℃)

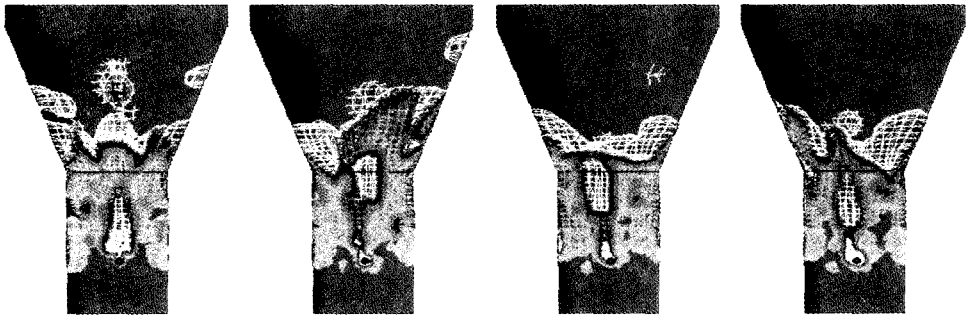
(4) 연소로

열분해 용융 시스템의 연소로는 일반폐기물 소각로와 대동소이한 형태를 보여준다. 연소로에서 중요한 설계인자는 연소공기의 적절한 분배와, 혼합 그리고 온도유지이다. 일반적으로 연소로의 설계에 있어서 이차공기제트의 혼합효과는 매우 중요한 성능 변수로서 활용된다. 그림 11은 고온 용융 소각로의 연소실 부분을 전산 해석한 결과를 보여준다. 2차 공기에 의한 난류발생, 온도, 화학종 농도를 분석하여 연소실 성능평가에 참고할 수 있다. 단, 소각로의 경우와 마찬가지로, 전산유체해석 모델은 열분해 및 용융을 적절하게 해석할 수 있는 서브루틴이 없기 때문에, 열분해 및 용융 공정을 충분히 이해하고 해석하는 것이 전산유체해석의 신뢰도를 높이는 방법

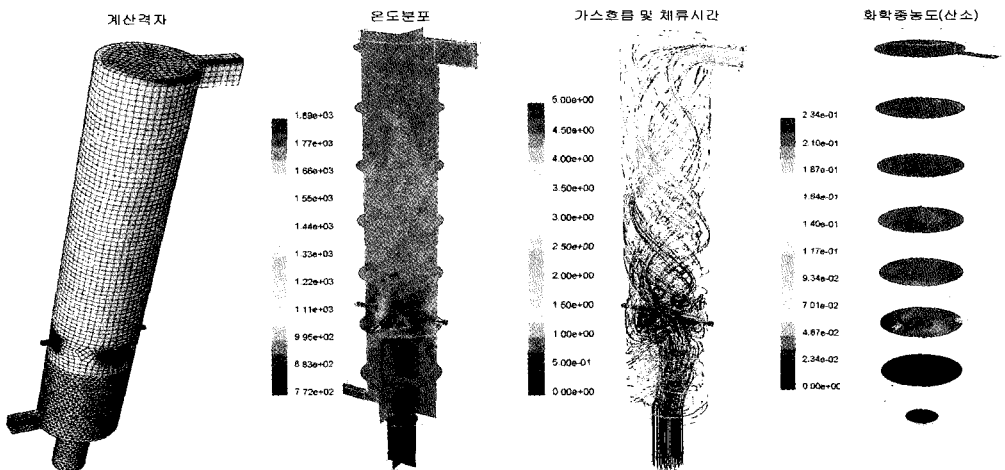
이며, 전산유체해석결과는 실험값과 비교를 통해 신뢰도를 검증하는 것이 바람직하다. 예를 들면, 연소실 내 위치별 온도 및 화학종 농도를 측정하여 전산유체해석의 결과와 비교를 수행하고 적절한 모델 수정을 통해 해석방법을 수정하는 방법 등을 고려할 수 있다.

(5) 전체 공정해석

공정이 복잡해질수록 요소공정 상호간의 영향이 중요하다. 특히, 일반적인 폐기물 소각플랜트에 포함되는 보일러 시스템은 그 자체만으로도 복잡하게 구성된 요소별 공정과 더불어 열전달, 상변화, 유체이동 등의 물리화학적 현상들이 동시에 발생하기 때문에, 이러한 현상들을 동시에 적절한 공학적 수준



[그림 10] 기포식 용융로 거동 전산해석 결과<sup>15)</sup>



[그림 11] 축열식 고온 용융 소각로의 연소로 부분 열유동 해석 결과<sup>16)</sup>

에서 해석할 수 있는 공정해석 모델이 필요하게 되었다. 열분해용용 소각설비 역시, 폐열을 회수하여 열분해 및 용융 에너지로 활용하는 관계로, 복잡한 열전달 및 물질 전달 현상을 종합적으로 분석할 수 있는 공정모델이 필요하다. 그림 12는 발전용 순환 유동층 보일러 시스템 공정의 한 예를 보여주고 있으며, 이를 해석하기 위해 개발된 전용 코드 실행화면이 그림 13이다.<sup>17)</sup> 이와 같이 복잡한 열에너지 공정에서 연료의 연소반응과 열전달, 그리고 물질전달을 적절한 모델을 이용하여 해석할 수 있는 프로그램은 연료성상, 공기유량, 열전달 면적 등 설계 및 운전조건의 변화에 따른 전체공정 운전특성을 분석할 수 있는 정보를 제공하는 점에서 활용범위가 넓은 유용한 해석기술이다.

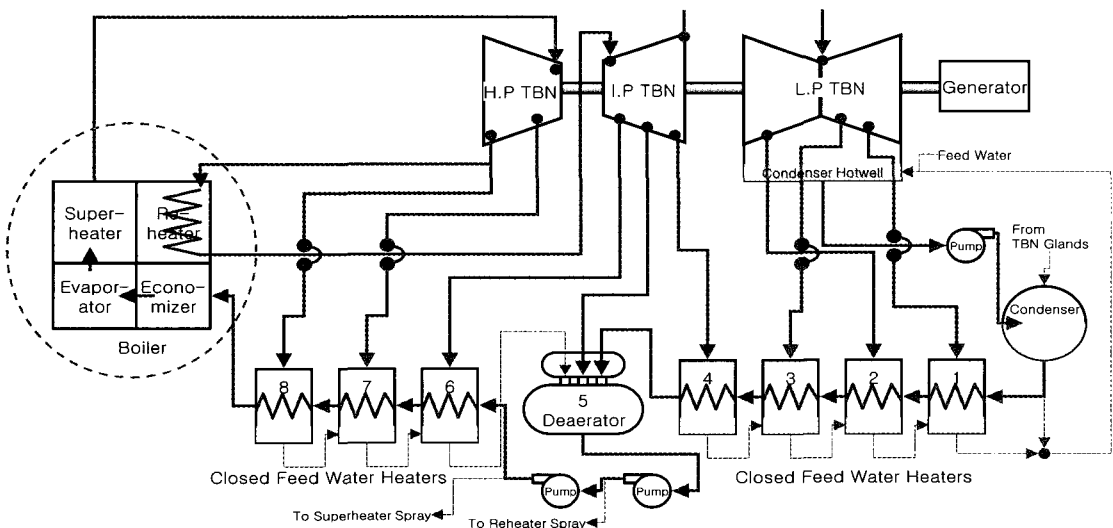
## 결론

본 논문에서는 폐기물 열처리 시스템인 폐기물 소각로와 열분해 및 용융 시스템에 대한 소개, 그리고 이러한 설비의 설계 및 운영에 활용되는 공학적 방법들을 고찰하였다. 폐기물의 효율적이고 환경친화적인 처리를 위한 다양한 설비들이 국내외에서 활발하게 개발 및 설치되고 있으며, 많은 연구자들의 연구를 통해 국내의 폐기물 열처리 기술의 수준은 이

제 국제적으로 인정받는 수준이 되었다. 그러나, 국내에 설치되고 있는 대부분의 대형 폐기물 처리 시스템들은 해외 설계기술을 수입한 경우가 많기 때문에 국내의 설계기술을 검증 가능한 수준으로 향상시켜야 할 필요성이 대두되고 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 폐기물 열처리 시스템의 최적 설계 및 운전을 위해 기존에 활용되고 있거나 활용할 수 있는 공학적 해석방법들을 소개하였다.

폐기물 열처리 시스템의 최적설계 및 운영을 위한 다양한 공학적 기법들을 고려할 수 있는데 그중, 폐기물의 열적 반응에 대한 적절한 이해와 해석이 필수적인 것을 알 수 있다. 최근에 폐기물 소각로의 설계 및 운전에 활발하게 사용되고 있는 전산유체해석은 경계조건에 따라 결과값이 크게 달라질 수 있으므로 적절한 경계조건을 설정하는 것이 결과의 신뢰도에 직접적인 영향을 미치는 인자이다. 그리고, 현재 유통되고 있는 전산유체 코드들은 폐기물의 열적 반응현상을 적절하게 해석하는 서브루틴을 포함하지 못하고 있다. 이러한 상황에서 폐기물의 열적 반응을 해석할 수 있는 모델을 개발 및 활용하는 것은 전산유체 해석 결과를 의미있게 만드는 필수조건이다.

전산유체 해석은 열유동장의 반응, 혼합 및 유동특성에 대한 정보를 제공하는 유용한 도구이다. 한편,



[그림 12] 발전용 보일러 사이클 공정개념도



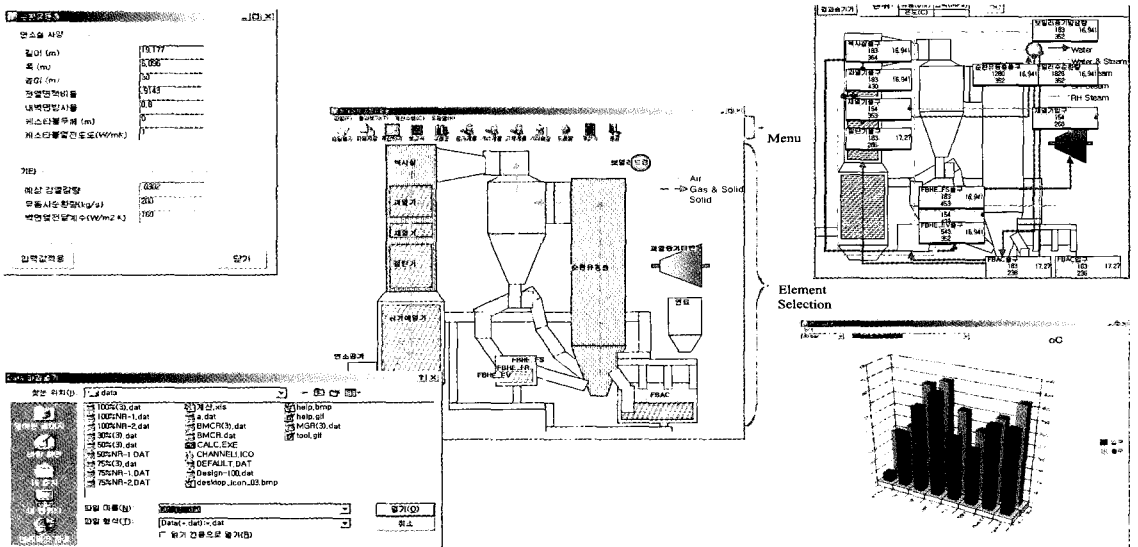
전산유체 해석만으로는 복잡한 공정이 연결되어 있는 공정시스템을 적절하게 해석하는데 한계가 있다. 따라서, 공정해석 모델을 개발하여 전체 공정의 성능을 예측하는 것은 최적 설계 및 운영에 있어서 기본적인 사항이다. 공정해석을 통해 폐기물 성상, 규모의 변경 등 설계 및 운전조건의 변화가 전체 시스템에 미치는 영향을 분석하는데 필요한 정보를 제공할 수 있다.

참고문헌

1. 소각시설 배출 다이옥신등 유해물질 분석에 관한 조사연구, 1997.12, 환경관리공단
2. 박정철, 직접용융 자원화시스템 다이옥신류의 억제대책, 한국열분해용융공학회, 폐기물 열처리기술 특별심포지움 및 추계학술 발표회, 2003년11월21일, 코엑스 컨퍼런스센터, p.55-59
3. 선도원, RDF 연소 순환유동층 발전기술, 제9회 유동층 연소보일러 사용자 기술세미나, 2004년 6월 10일-11일, 전력연구원
4. Nasserzadeh, V. and Swithenbank, J., "Design optimization of a large municipal

solid waste incinerator", Waste Management, Vol. 11, pp. 249-261 (1991)

5. Schindler, P. J. and Nelson, L. P., Municipal waste combustion assessment: Technical basis for good combustion practice, US EPA-600/8-89-063, US Environmental Protection Agency, 1989
6. 신동훈, 황정호, 이진호, 류태우, 박대규, 산소과잉공기를 이용한 열분해 용융 소각로의 설계변수 해석연구, 한국열분해용융공학회 추계학술대회, p.263-271, 2003년 11월 2일
7. 박현서 : Plasma를 이용한 소각 ash 처리기술, 폐기물 열처리(소각/열분해/용융)기술, 한국화학공학회, 부경대학교 환경연구소, 1998. 12. 9 ~ 12. 10
8. 김승기, 신동훈, 류창국, 최상민, "소각로내 열유동의 계산과 실험," 한국폐기물학회지, 제 11 권, 제 4 호, pp. 545-555, 1994
9. Shin, D. and Choi, S., The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed, Combustion and Flame, Vol. 121, pp. 167-180, 2000
10. Santos, A. M., "Study of a MSW incinerator:



[그림 13] 발전용 순환유동층 보일러 공정해석 프로그램 17)

- Overall operation and on-site measurement over the grate”, STEV Project, Report No. FBT-91/14, Royal Institute Publishing Company, Swethen, (1991)
11. Kim, S., Shin, D. and Choi, S., “Comparative Evaluation of Municipal Solid Waste Incinerator Design by Flow Simulation,” Combust. Flame, Vol. 106, P.241-251, 1996
  12. 신동훈, 황정호, 백익현, 정상순, “G+R 타입 소각연소로의 연소 및 열유동 특성평가 연구,” 한국연소학회 2003년 제25회 춘계 학술대회 논문집, pp.111-118
  13. 소각시설 배출 다이옥신 등 유해물질 분석에 관한 조사연구, 환경관리공단 1997.12
  14. Shin, D., Choi, S., Oh, J.-E., and Chang, Y.-S., “Evaluation of PCDD/Fs Emission in Municipal Solid Waste Incinerators,” Environmental Sci. Technol., Vol. 33, pp. 2657-2666, 1999
  15. 축열식 고온용융 소각로 개발, 2004.3.31, 환경부 차세대핵심환경기술개발사업 1차년도 중간 보고서
  16. 신동훈, 전병일, 이진호, 황정호, 류태우, 박대규, 산소과잉공기를 이용한 열분해 용융 소각로의 설계변수 해석연구, 한국열분해용융공학회, 폐기물 열처리기술 특별심포지움 및 추계 학술 발표회, 2003년11월21일, 코엑스 컨퍼런스센터, p. 263-271.
  17. Shin, D., Lee, J., Hwang, J.H. and Kim, J., “Simulation Methods of Circulating Fluidized Bed Boiler for Power Generation,” 5th Korea-China Joint Workshop on Clean Energy Technology, Chingdao, China, 2004, 10