



ORIGINAL PAPER

원저

## 플라즈마 용융 공정시의 폐열 재활용 연구

김성중<sup>†</sup>

인천대학교 안전공학과

(2006년 8월 21일 접수, 2006년 9월 11일 채택)

## A Study on Waste Heat Recycling of Plasma Melting System

Seong-Jung Kim<sup>†</sup>

Dept. of Safety Engineering, University of Incheon

### ABSTRACT

The purpose of this research is to design an imitation boiler similar to the waste heat boiler installed on a plasma melting furnace in order to acquire a capability of a thermal design as to the circulation of heat and the discharge of noxious gas inside a boiler and to improve the efficiency of a waste heat boiler using the CFD (Computation Fluid Dynamics) program.

The position of corrosion and the generation of a clinker inside a boiler due to temperature changes, combustion gas flows, and corrosive gases inside a boiler are examined to design the structure of an efficient boiler and recycle energy. As a result of this research, the boiler installed on a plasma melting furnace met the conditions of design by cooling the combustion gases discharged after the second combustion from an exhaust port, originally at 1,200 degrees Celsius, down to around 450 degrees Celsius. On the other hand, the circulation of corrosive gases (SO<sub>x</sub> and HCL) may lead to the generation of corrosion or a clinker in the upper and lower parts of an exhaust port more easily than any other parts of a boiler. Accordingly, the corrosion on the inside and outside walls of a boiler may result in a shortened lifespan of a boiler and an inability to recycle waste heat in an efficient manner. A prevention against corrosion at high and low temperatures needs to be considered in detail.

Keywords : CFD(Computation Fluid Dynamics), Plasma, Melting Furnace

<sup>†</sup>Corresponding author (seongkim@incheon.ac.kr)

## 초 록

플라즈마 용융로에 설치된 폐열 보일러를 실측치와 근접한 모의 보일러를 설계하여 CFD(전산유체역학) 프로그램을 이용하여 얻어진 보일러 내에서의 유해가스발생 및 열 유동현상에 대한 열 설계 능력 확보와 폐열보일러 효율 개선에 대한 연구를 수행하는데 목적이 있다. 보일러 내에서의 온도변화 및 연소가스의 공기 유동, 부식성 가스의 영향으로 인해 보일러 내부에서의 부식위치 및 클링커 생성여부에 관한 연구를 통해 효율적인 보일러의 구조 설계 및 에너지 재활용방안에 이용하고자 한다. 연구결과 플라즈마 용융로에 설치된 보일러 설비는 2차 연소로 출구에서 배출되는 약 1,200℃의 연소가스를 약 450℃까지 냉각시킬 수 있는 설계조건을 만족시켰다. 반면 유해가스 유동 결과 보일러 입구 부분의 상단부와 하단부에 부식성 가스(SOx, HCl)의 영향으로 인하여 부식 및 클링커 생성이 보일러의 다른 위치보다 쉽게 발생할 것으로 예상된다. 이로 인해 보일러 내·외관벽의 부식으로 보일러의 수명 단축 및 효율적인 폐열을 재활용 할 수 없다고 예상된다. 이에 따른 저온 및 고온 부식 방지대책에 대한 세심한 고려가 필요하다 하겠다.

핵심용어 : 전산유체역학(CFD), 플라즈마, 용융로

## 1. 서론

플라즈마 용융시스템공정에서 발생된 배가스 처리설비의 성능은 플라즈마 용융시스템공정의 유용성을 입증하여 지역주민들과의 민원문제를 해결해주는 구심점 역할의 기능임과 동시에 전 과정에서 최효율적인 배출형태 즉 성능평가를 의미하므로, 2차 연소실 조건의 최적화와 배가스 처리설비의 운전조건의 최적화는 공정개선에 기술적으로 중요한 의미를 갖는다. 또한 현재 플라즈마 용융 공정시 대부분은 가스화 되어 배기가스는 배출되나 무기물, 금속류 또는 가스화 되지 않는 물질 등은 그대로 잔류하게 되며, 이와 같은 물질은 대부분 중금속을 함유하고 있는 것이 보통이다. 따라서 이와 같은 물질은 높은 에너지를 이용하여 유리화시켜 재활용 또는 중금속 용출이 안 되는 물질로 변환시키고 있다. 이때 많은 에너지가 필요한데, 이러한 에너지로 인해서 플라즈마 용융로의 효율성이 떨어져 경제성을 확보할 수 없다는 문제가 발생하게 된다. 따라서 용융에 필요한 에너지는 여러 가지 방법으로 이용될 수 있으나 대표적인 에너지원은 전기, 증기, 탄소류, 가스류로 구분되어지며, 폐기물의 열분해 가스화로 인하여 생성된 ash를 용융하거나 발생된 여열을 이용하여 열 병합 발전시설

과 연계하여 고온, 고압의 증기 또는 전기를 생산하여 이용시설에 공급한다면 에너지 효율이 향상될 것이며, 플라즈마 용융공정시 가장 큰 문제가 되었던 에너지에 의한 경제성 문제를 많은 부분 해결할 수 있게 될 것이다.

따라서 현재 플라즈마 용융 설비에 설치된 폐열 보일러를 이용하여 CFD(전산유체역학) 프로그램을 이용하여 실제 보일러에 근접한 모의 보일러의 구조를 설계, 비교 분석 하여 이를 활용함으로써 효율적인 보일러의 구조 설계 및 에너지 재활용방안에 이용하고자 하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 실험모델과 실험방법

### 2.1 실험모델

이 연구에서 대상으로 하고 있는 플라즈마 용융로에 설치된 보일러 설비는 2차 연소로 출구에서 배출되는 약 1,200℃의 연소가스를 약 450℃까지 냉각 시키며, 여기에서 회수된 폐열로 증기를 발생시키는 가스 냉각 및 증기 발생장치로서 물의 순환은 자연 순환방식이며, 이것은 물이 열을 흡수하여 생기는 뜨거운 물과 찬물과의 비중차이에 의하여 이루어지며, 급수는 급수펌프를 통하여 공급되며 수질은 시수를 사용한다. 이 설비에서 발생된 스팀

은 장입설비 시설에 필요한 Dryer, Steam Gas Heater와 난방설비 등의 소요처로 공급되며 잉여 증기는 증기 복수기에서 응축되어 Blow down tank로 보내진다. 발전에 사용가능한 증기량은 플라즈마 용융설비내의 여열이용도에 따라 좌우되지만 플라즈마 용융설비를 가동하기 위해서는 폐열 보일러에서 발생하는 증기를 재사용 하여야 한다.

CFD(전산유체역학)프로그램을 이용하여 얻어진 보일러 내에서의 유해가스발생 및 열 유동현상에 대한 보일러 시스템 설계와 열 설계 능력을 확보하여 폐열보일러 효율 개선에 대한 연구를 수행하고자 한다. CFD를 이용하여 얻어진 실제 보일러에 근접한 모의 보일러의 구조를 설계하여 비교 분석 하여 이를 활용함으로써 효율적인 보일러의 구조 설계 및 에너지 재활용방안에 이용하고자 하는데 그 목적을 두고 있다. 또한 보일러의 폐열 회수 효율을 증가시켜 고효율의 보일러를 개발하여 부식성 가스에 의한 부식을 방지하여 보일러의 수명을 연장시키고 이러한 연구를 통하여 얻어진 경험은 일반적인 보일러에 대해서도 확장 적용하는 것이 가능할 것이며, 보일러의 열 설계능력을 확보할 수 있는데 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

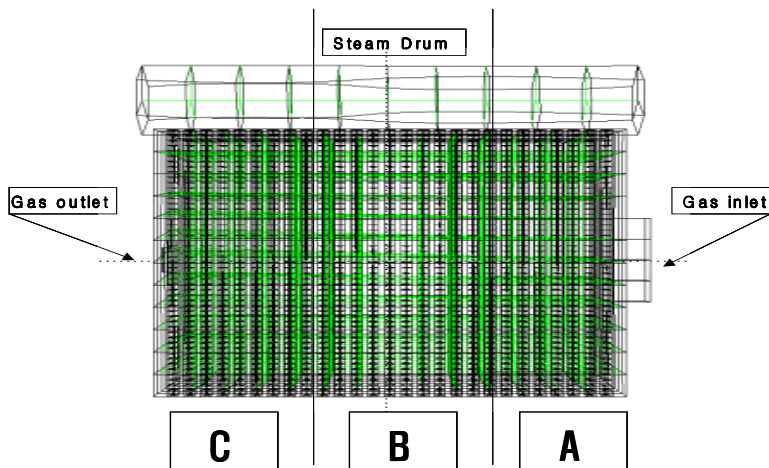
## 2.2 실험방법

실험의 모델과 연소실내의 실험 case별 분류는

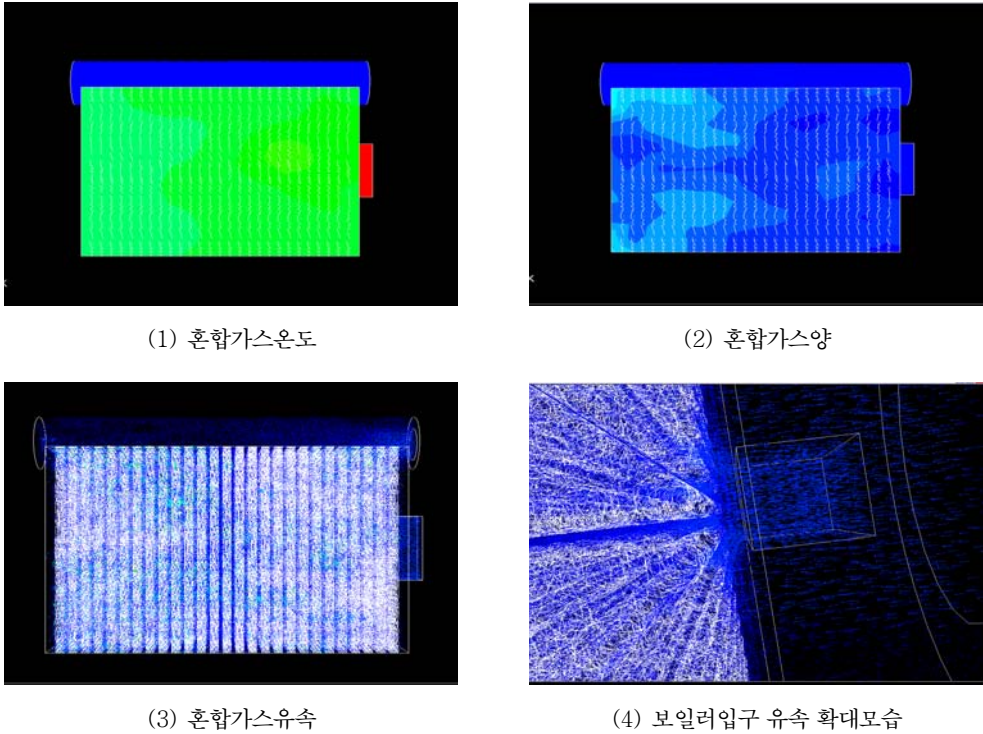
다음 [Fig. 1]과 같은 형태를 취하였다. 폐열보일러로 주입되는 공기 주입속도는 5m/s의 속도를 선정하였다. 폐열보일러내의 유동장, 온도장 등을 모사하기 위하여 범용 열유체 해석코드인 FLUENT 6.2를 사용하였으며, 보일러내 가스의 흐름은 2차 연소로에 의한 유동과 주입공기의 체트분사로 인하여 심한 난류 유동이 형성된다. 난류 계산 모형은 일반적으로 쓰이는 표준  $k-\epsilon$  모형을 채택하였으며, 보일러내의 격자수는 약 48만개로 나타났다.

## 3. 결과 및 고찰

[Fig. 2]는 폐열보일러로 연소가스가 혼입되었을 때의 결과이다. [Fig. 2] (1)에서 혼합가스의 온도는 2차 연소로 출구에서 배출되는 약 1,473K의 연소가스를 보일러 입구부분에서 약 761~812K로 냉각시키며, 출구부에서는 608~659K로 냉각시켜 설계된 보일러를 만족시키고 있다. [Fig. 2] (2)는 혼합가스양을 나타낸 것으로서 보일러 입구부분 상단부와 하단부에 3500~6000 kg/m-s로 많은 양이 체류하고 있기 때문에 부식성 가스의 영향으로 인해 보일러 내부에서의 부식 및 클러킹 발생이 활발히 진행될 것으로 판단된다. [Fig. 2] (3)보일러 입구부분에서 유동공기의 속도가 나타나지 않고 있다. 반면 보일러 중간부분에서는 공기



[Fig.1] Boiler structure.



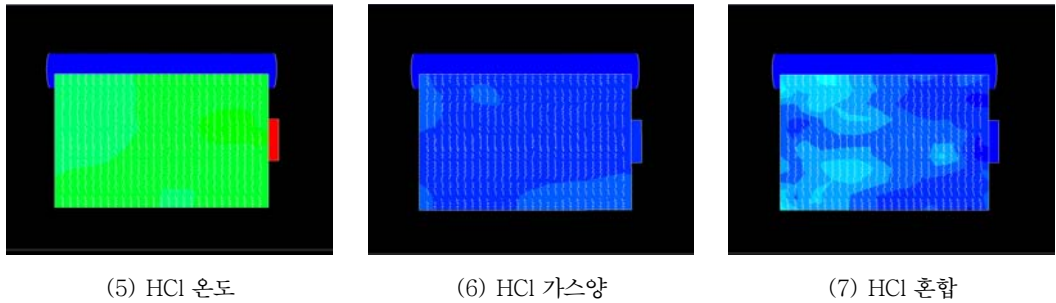
[Fig.2] Boiler temperature, velocity, turbulence of gas.

유속이 급속하게 형성되었다.

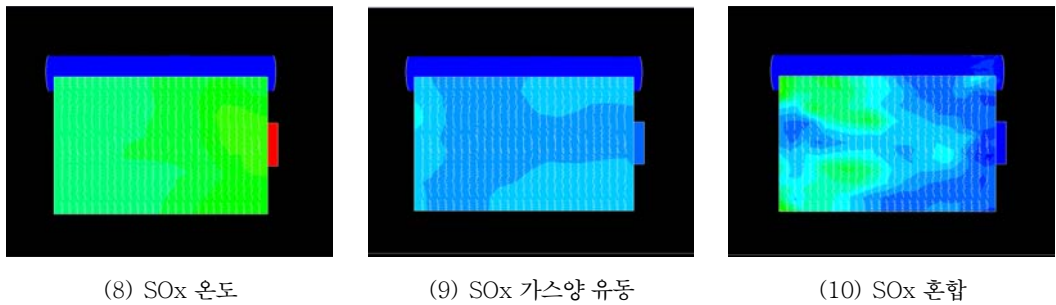
[Fig. 3]은 HCl이 보일러 내에 유입되었을 때의 온도분포, 속도분포와 혼합정도를 나타낸 결과이다. [Fig. 3] (5)를 보면 혼합가스의 온도분포와 거의 유사하나 보일러 전체 온도분포는 약 761~812K로 대부분을 차지하고 있다. 따라서 연소가스의 고온부식은 고온에 노출된 보일러 수관벽과 같은 금속의 표면온도가 350~700℃ 범위에서 HCl이나 CO가스에 의해서 일어나는 부식을 의미하기 때문에 재속에 Cl이나 S가 포함되어 있을 때, 비산재와 접촉되는 보일러 수관벽의 부식이 400~700℃에서 일어나게 된다. 보일러 관벽온도가 320℃를 넘어서게 되면 염화수소 가스로 인해 보일러 전열면의 부식량이 증가하기 시작하여 관벽온도가 350℃를 초과하면서 부식량이 급격히 증가하게 된다. 이와 같은 현상의 고온부식 대책으로는 관벽온도가 350℃를 초과하지 않도록 운전

조건을 유지하는 방안을 검토해야한다. [Fig. 3] (6)은 HCl가스의 양을 나타낸 것으로서 보일러 입구부분의 하단부분에 약간의 HCl 가스가 발생하고 있어 그 부분에 대한 부식이나 클링커형성 방지에 대한 대책이 필요하다. [Fig. 3] (7)혼합정도를 살펴보면 보일러의 시작부분과 하단부에 넓게 형성되어 완전 혼합이 이루어지는 범위가 넓어졌으며, 반면 출구부에서의 혼합 정도는 줄어들어 오염방지시설물로 유입되는 대기오염물질이 낮을 것으로 기대된다. 염화수소의 제거방식은 건식법, 반건식법 및 습식법으로 분류할 수 있으며, 어느 방식으로 할 것인가 하는 문제는 배가스중의 염화수소 농도에 따라서 요구되어진다.

[Fig. 4] 폐열보일러로 SOx가 혼입되었을 때의 결과이다. [Fig. 4] (8) SOx의 온도는 혼합가스의 온도와 거의 유사하게 나타났으며, 이런 결과를 토대로 SOx는 HCl에 비하여 온도의 영향을 적게



[Fig.3] Boiler temperature, velocity, turbulence of HCl.



[Fig.4] Boiler temperature, velocity, turbulence of SOx.

받는 것으로 나타났다. [Fig. 4] (9)는 보일러내로 유입되는 SOx 양을 나타낸 것으로서 보일러 입구부분의 상단부분과 하단부분에 SOx양이 높게 나타나고 있으며, 특히 하단부분은 HCl 가스도 높게 발생하였기 때문에 쓰레기 중에 함유된 염소(Cl) 또는 유황(S)이 연소하여 HCl 또는 SOx로 변하여 발생한 것으로 배기가스나 재속에 함유되어 보일러 입구 외벽이나 수관을 부식시킬 가능성이 높을 것으로 판단된다.

[Fig. 4] (10) SOx 혼합정도를 나타낸 것으로서 [Fig. 3] (7)과 비슷하나 혼합정도의 차이가 있으며 보일러 출구부에서 혼합이 이루어지고 있어 완전한 혼합이 이루어지지 않은 상태에서 보일러를 통과하여 오염방지시설물로 배출될 우려가 있다. 이로 인해서 불균일한 혼합과 불완전 연소가 이루어져 대기오염물질의 배출억제가 이루어지지 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

CFD를 이용하여 보일러의 온도변화와 공기유동 및 부식성 가스의 영향으로 인해 보일러 내의 부식 위치 및 클링커 생성여부를 위하여 실제 보일러에 근접한 모의 보일러의 구조를 설계하고 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

연구를 통하여 보일러 입구 부분의 상단부와 하단부에 부식성 가스의 영향으로 인하여 부식 및 클링커 생성이 다른 부분보다 쉽게 발생 할 것으로 예상된다. 특히 보일러 하단부분은 HCl이 높게 발생하였기 때문에 쓰레기 중에 함유된 염소(Cl) 또는 유황(S)이 연소하여 HCl 또는 SOx로 변하여 발생한 것으로 배기가스나 재속에 함유되어 보일러 입구 외벽이나 수관을 부식시킬 가능성이 높을 것으로 예상된다. 따라서 보일러 내·외관벽의 부식과 클링커 형성으로 인해 보일러의 수명 단축과

효율적인 폐열 재활용을 할 수 없다고 판단된다.

- 1) 연소가스의 저온부식은 연소실 외부케이싱이나 가스덕트와 같은 금속이 저온에 노출된 경우 가스 속에서 응축된 수분이 산이 되어 금속 표면을 부식시킨다. 저온부식은 가스속의  $\text{SO}_3$ 와  $\text{HCl}$ 의 함유율에 따라 변화하며 통상  $180^\circ\text{C}$  이하 온도에서 발생된다. 폐기물 중 황성분은 연소에 의해서  $\text{SO}_3$  가스로 전환되는데  $180^\circ\text{C}$  이하의 전열면에서 응축하여  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 됨으로써 급격한 저온부식을 일으키게 된다. 따라서 저온부식 방지대책으로서 보일러의 관벽온도를 항상  $150^\circ\text{C}\sim 180^\circ\text{C}$  이상으로 유지하고 보일러의 운전압력을  $4\text{kg}/\text{cm}^2$  이상으로 유지하게 된다.
2. 보일러 수관벽은 순환수로 냉각되어 보통  $200\sim 300^\circ\text{C}$ 로 유지되므로 고온부식이 발생되지 않도록 한다. 순환수로 냉각되지 않는 덕트나 집진기 등은 항상  $250\sim 300^\circ\text{C}$  이내로 유지하여 고온부식을 예방하도록 해야 한다. 또한  $\text{HCl}$ 의 노점이  $130^\circ\text{C}$  정도이므로 이 온도 이하에서  $\text{HCl}$ 가스는 연소가스중의 수증기를 흡수하여 염산이 되므로 매우 심한 부식성을 나타낸다. 연소가스 처리장치와 같은 장비의 온도가  $70\sim 80^\circ\text{C}$  까지 떨어질 경우에는 부식에 대한 세심한 고려가 필요하다.

## 사사

본 연구는 2005년도 인천대학교 연구년을 활용 RIC(지역 혁신 센터)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김성중외, 소각로 및 폐열회수 보일러 플랜트 열설계, 대한기계학회지 34(12), (1994).
2. 김종식외, 생활폐기물 소각시설의 소각열 이용 실태조사연구, 낙동강환경연구회, 6(1), (2001).
3. 박준택, 폐기물소각 폐열이용에 관한 연구, 공기조화 냉동공학회 논문집
4. 윤정인, 폐열회수용 열교환기, 대한설비공학회 30(1), (2001).
5. 이덕기외, 폐열을 이용한 열공급 실증연구, 한국에너지공학회 10(4), (2001).
6. 최경빈, 폐기물 소각열 이용 제고 방안, 설비저널 31(5), (2002).
7. 윤계섭, 도시폐기물 소각에 의한 열회수, 화학공업과 기술 7(1), (1989).
8. 삼성중공업, 대도시형 저공해 소각시스템 개발, 환경부
9. 김동의 외, 플라즈마 금속학, 아이티시, (1997).
10. 명현국, CFD 입문, 문운당, (2004). 