

# 순환유동층 연소설비를 이용한 열병합설비의 특성 및 전망



조 재 수  
선경건설(주) 부설연구소

●1954년생  
●발전설비 관련연소 시스템, 난류유동분야에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

국내부존자원이 빈약한 우리나라는 기후조건과 산업구조 측면에서 에너지 집약도가 높은 경제 및 산업구조를 갖고 있기 때문에 수입에 의존하고 있는 주요 에너지원의 다변화는 국가의 장기적인 안정과 성장을 위해 요구되는 기본 정책이다. 따라서 에너지 다변화의 일환으로 유연탄의 사용확대는 작금의 사태에 비추어 불가피한 실정이며, 동연료의 이용기술 개발은 에너지분야 종사자 모두에게 당면과제로 되어 있다.

석탄 연소 방법 개선은 오랜 과거 역사를 통해 지속적으로 이루어져 왔으나 환경 오염을 극소화하는 연소기술로서의 유동층 활용 역사는 그리 오래지 않다. 그러나 일천한 유동층 연소기술의 개발역사에도 불구하고 70년대 후반 이후 상업화된 유동층 연소 설비는 연소방식 자체의 특성에 의한 저 NO<sub>x</sub> 특성, 자체 탈황 능력등의 저공해 특성과 연료의 폭넓은 수용성이 인정되어 급속도로 확산 보급되어 오늘날에 이르고 있다. 그간 문제점도 수없이 제기되어 왔으나 부단한 개선 노력을 통해 동 설비의 신뢰도가 충분한 입증되어 설비의 대형화 추세가 이루어지고 있다. 본 글에서는 유동층, 특히 순환유동층 연소방식을 이용한 열병합설비의 내용과 현주소를 고찰하고 향후 개선점들을 제시코자 한다.

국내 에너지 수급실태는 석유의존도가 전체 에너지 수요량의 50%를 초과할 경우 국제유가 변동에 의한 국내물가 및 경제성장에 미치는 악성 파급효과가 엄청나기 때문에, 유연탄, 원자력 및 LNG등으로의 에너지 다변화 정책이 꾸준히 추진되어 왔다. 이에 반해 국민생활수준 향상에 따른 난방용 연료의 석유 의존도는 급속히 신장하고 있는 추세이고, 따라서 에너지 수급의 균형을 위해서는 유연탄 사용이 불가피한 실정이다. 특히 근래의 증동사태는 에너지원의 안정적인 확보가 국가 발전에 초석이 된다는 것을 실감케 하고 있다.

유연탄 사용확대에 걸림돌이 되고 있는 것은 환경오염물질의 배출로서, 이를 최소화 할 수 있는 설비의 도입 및 새로운 연소방식의 개발이 꾸준히 이루어져 왔다. 환경오염물질로는 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 분진(dust)이 주요 오염물질로 되어 있다. 황산화물(SO<sub>x</sub>) 저감대책으로는 석탄전처리(coal cleaning)를 통해 황성분의 선제거, 유동층 연소 방식에 의한 연소중탈황 및 배기가스 정화(flue gas desulphurization)방식이 있으며, 산업용 열병합 설비의 경우 유동층 연소 방식이 가장 타당한 황산화물 저감 방식으로 알려져 있다. 대형 화력 발전소의 경우는 미분탄 연소방식이 주된 연소형식으로 되어 있어 석탄의 전처리 혹은 배기가스의 세정(flue gas desulphurization process)을 통해 황산화물 저감을 유도하고 있다.

질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 저감 방법으로는 다단 연소 기술(staged combustion technique)이 보편화 되어 있고, 미분탄 연소 방식의 경우 저 NO<sub>x</sub> 버너를 채택하여 질소산화물 저감을 꾀하고 있으나 기본적으로 고온 연소에 의한 NO<sub>x</sub>형성은 불가피한 형편이다. 유동층 연소의 경우는 연소방식의 저온연소(750℃~950℃) 특성으로 인해 질소산화물의 형성이 최소화되는 강점을 갖고 있다.

분진의 경우는 전기집진기(electrostatic precipitator)와 백 필터(bagfilter)를 이용하여 분진배출치를 환경규제치 이하로 유지하고 있으며, 점차 강화되어 가고 있는 환경 규제 추세에 따라 백 필터 재질 자체의 개발을 통한(HEPA filter, ULPA filter) 0.3μm까지의 분진제거를 시도하고 있다.

연료의 폭넓은 수용성 측면(fuel flexibility)에서는 종래의 미분탄연소(P.C) 혹은 스토커(stoker) 연소방식에 비해 유동층 연소방식이 다양한 연료에 대해 대단히 월등한 수용능력을 보이고 있다. 종래의 연소방식들(P.C 및 stoker)과 유동층 연소(FBC) 방식과 차이는 다음과 같이 일반화 할 수 있다.

●미분탄 연소 보일러

(1) 장점

- 부하변동시 우수한 부하 추종성을 갖고 있고
- 열효율이 우수하며
- 미연탄소 손실(carbon loss)이 작고
- 소요인원(manpower requirement)이 작게 요구되며
- 원격제어(remote control)능력이 탁월하다.

(2) 단점

- 석탄분쇄기(pulverizer)로 인한 보수가 빈번하고
- 화염안정과 분쇄기(pulverizer)의 제어(control)가 복잡하며
- 저부하 운전시 화염(flame)안정을 위한 보조연료(lighter fuel)이 필요하며
- 노(furnace)내의 폭발(explosion)이 위험

이 존재하고

- 날으는 회분(ash)의 량이 많다.

●스토커(stoker)보일러

(1) 장점

- 저부하 운전시 보조연료없이 안정된 화염을 유지할 수 있고
- 소내 동력소모가 적으며
- 석탄의 성상에 의한 제약이 적다.

(2) 단점

- 분탄(fines)의 함량에 민감한 영향을 받으며
- 회분내 미연탄소가 많으므로 백 하우스(baghouse)가 필요하고
- 인입 공기에 의한 그레이트(grate) 예열에 한계가 있어 열효율이 낮으며
- 높은 과잉공기로 인하여 열효율이 낮고
- 자동운전 및 원격운전이 어렵다.

●유동층 연소 보일러

(1) 장점

- 저온연소로 인하여 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 발생량이 극소화되며
- 저온연소로 인하여 회분의 slagging 및 fouling현상이 없고
- 연소실내로 석회석을 투입하여 황산화물(SO<sub>x</sub>)을 90%이상 제거할 수 있으며
- 저온연소로 인해 clinker발생이 없고, 하부재(bottom ash)의 처리가 용이하다.

(2) 단점

- 부하조절(turndown ratio)능력이 상대적으로 낮고
- 빈번한 on-off운전이 요구될 시에는 비싼 기동연료(가스 혹은 유류연료)가 소요된다.

이와같이 석탄연소에서 가장 적합한 기술로 인정되고 있는 유동층 연소방식은, 노(furnace)내의 압력조건에 따라 상압식과 가압식으로 분리되며 유동화 속도에 따라, 거품식(bubbling type)과 순환식(circulating type)으로 대별된다.

이중에서, 전 세계적으로 폭넓게 활용되고 있

는 열병합용 연소방식은 순환식 유동층 연소방식으로, 1980년 이후 본격적인 상업화가 이루어진 이래 급속한 보급속도를 갖고 오늘에 이르고 있다. 순환 유동층 연소방식의 주요 개발 및 보급역사는 :

- 1977년 : 2.3T/H pilot plant설치
- 1979년 : 23T/H LA mont B-C oil 보일러를 CFBC type으로 대체
- 1981년 : 열병합 발전용 90T/H CFBC 보일러 상업운전
- 1984년 : 국내 동양화학(OCI) 120T/H 보일러 상업운전(당시 세계 최대 규모의 CFBC)
- 1986년 : 미국 General Motors, 136T/H 보일러 상업운전
- 1987년 : 미국 Colorado-UTE, 420T/H 보일러 상업운전
- 현재 : 100여기(국내 6기)상업운전중

으로, 동 시스템 효율의 제고에 초점을 맞춘 가압유동층의 상업화까지는 아직 시간이 좀 더 필요한 상황이다.

## 2. 유동층 연소 시스템의 특성

열병합 설비의 올바른 선택을 위해서는 주가 되는 연소 시스템의 기본적인 요구조건을 만족하는지에 대한 심도깊은 검토가 선행되어야 한다. 기본적인 사항은

- 첫째, 다양한 연료의 수용성
- 둘째, 환경오염의 최소화
- 셋째, 시스템의 신뢰성
- 넷째, 경제성 만족도이다.

### 2.1 유동층 원리 및 구조 특성

연소실 하부의 공기 분산판(grid)위에 있는 고체층(bed)에 연소공기를 주입하면, 공기량이 증가함에 따라 고체층의 움직임은 일어나지 않으면서 압력강하(pressure drop)는 고체층의 증력과 같아질때까지 증가한다. 압력강하가 고체층의 증력과 같아지면 고체층이 흔들리고 고

체들이 상호움직임을 갖기 시작한다. 이 상태를 최소 유동화 상태라고 부르며 이때 공기속도를 최소유동화 속도( $U_t$ )라 부른다. 이후 계속적으로 유속이 증가하면 압력강하는 일정하게 유지되고 고체층은 점차 팽창(expansion)되며 고체들의 상호 움직임이 활발하게 진행되어 전체적으로 격렬하게 끓는 액체와 같은 상태가 일어난다. 이 상태를 기포유동층(bubbling fluidized bed)이라고 한다.

유속의 계속적인 증가시 기포유동층의 기포형태가 점차 흐려지면서 층내부에 격렬한 난류혼합(turbulent mixing)이 일어난다. 이 상태를 난류층이라고 한다. 난류층으로부터 유속( $U_t$ )을 증가하면 미세한 층물질은 이송기체(carrier gas)에 의해 entrain되어 층을 떠나는 속도에 이른다. 이 경우 사이클론(cyclone)에 의한 포집 및 재순환 없이는 층내 입자농도를 유지할 수 없는 상태에 이른다. 이러한 상태를 고속층(fast bed)이라고 한다. 이 영역에서는 유속의 증가에 따라 층내 압력강하는 입자농도의 감소로 인하여 하강하는 경향을 보인다. 고속층에서 entrain된 미연연료와 층물질(bed material)을 기체/고체 분리기(hot cyclone등)에서 연소 가스와 분리하여 연소실로 재순환시켜 층내 입자농도를 일정하게 유지시킨 상태를 순환유동층(circulating fluidized BED)이라 한다.

이 순환유동층에서는 층이 노 상부까지 확대되어 연소 및 calcination반응이 노 전체에서 진행되게 되므로 연소반응에서 요구되는 충분한 체류시간(residence time)을 갖게 되어 완전한 연소에 이르게 되며, 전반적인 층물질에 의한 높은 전열효과를 얻게 된다(그림 1).

유동층 연소 방식에서는 연료의 연소에 의한 반응열은 일차적으로 층물질에 전달되며, 그 다음에 층물질이 전열면에 열을 전달하게 된다. 그러므로, 전열면은 순환계통내의 어떤 부위에도 즉, 유동층내 노벽(furnace wall)혹은 노 외부의 순환계통중에 위치할 수 있다. 순환 유동층(CFBC)에서의 전열계수는 노 전면에

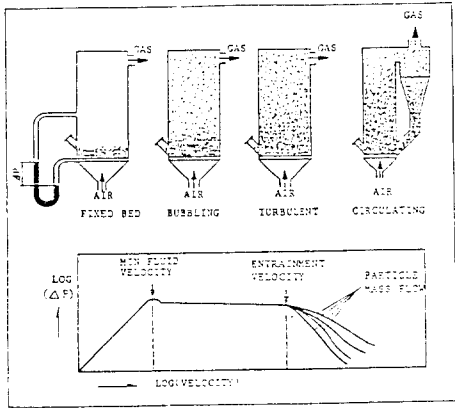


그림 1 유동층 시스템의 원리

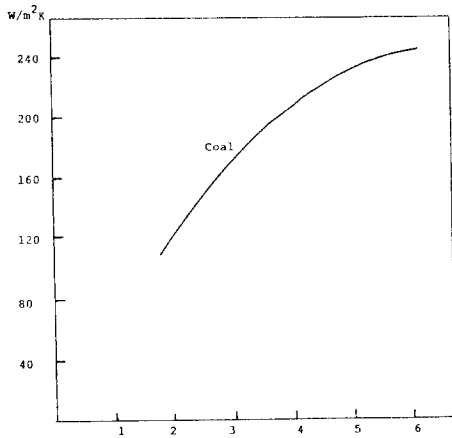


그림 2 유동화 속도에 따른 연소실내의 평균 열 전달 계수

걸쳐 대단히 높으며(그림 2), 유동화 속도와 충물질의 미세화(fineness)에 비례한다. 보일러의 부하(load)는 유동화속도 조절(control)에 의한 층의 팽창(expansion) 정도를 조절하여 맞추게 된다. 연소반응열이 난류혼합(turbulent mixing)현상에 의해 충물질에 일차적으로 전달되며(안정적인 온도분위기 유지), 전열계수가 노 전반에 걸쳐 높기 때문에 상대적으로 낮은 온도(750°C~950°C)에서 안정적인 연소가 가능하고 부하(load)변화에 안정적으로 대처하게 된다. 특히 난류혼합(turbulent mixing)현상과 안정적인 온도 분위기 유지 여

건은 온도에 민감한 석회석(limestone)에 의한 탈황반응에 최적의 조건을 형성하게 되며, 따라서 저질연료의 효과적인 활용에 가장 적합한 연소 방법으로 급속한 보급이 이루어져 왔다.

순환유동층 시스템(CFB system)은 통상 기본적으로 다음 요소들에 의해 구성된다.

- CFB combustor 및 전열관(heat transfer surface)
- 재순환 설비(recycling devices, e.g. cyclone)
- Convective heat transfer section
- 전기집진기(electrostatic precipitator) 혹은 백 필터
- 석탄, 석회석 및 재처리설비
- Balanced draft시스템
- 스팀 터빈(steam turbine) 및 발전기(generator)

순환유동층(CFB unit)의 연소실 구조는 gas-tight membrane형태로 되어 있으며, 연소실 온도는 통상 850°C 전후 (750°C~950°C)에서 유지되어 유동층이 형성되며 이송가스(carrier gas)에 의해 entrain된 충물질은 사이클론에서 연소가스와 분리되어 연소실로 회수된다. 가스의 흐름은 기체/고체 분리기(cyclone혹은 분리관)를 지나면서 가스는 convection부로 유입되며 분리된 입자는 재순환로(return path)를 통해 유동층으로 재 유입되어 일반적으로 일컬어지는 FAST BED혹은 순환유동층(circulating bed)이 형성된다(그림 3).

따라서 순환유동층은 종래의 거품식 유동층과 transport reactor의 중간 범주에 속하는 반응시스템(reaction system)으로 지칭할 수 있다. 동 시스템은 작은 입자경(small particle size, 10~500um), 고속 유동화속도(high fluidizing velocities, 4~8m/s), hot cyclone에서의 기체/고체의 분리, 지속적인 solid particle의 연소로내로의 재순환 및 이에따른 입자의 장기노내 체류특성을 가진 시스템이다. 또한 동연소과정은 화학반응(pyrolysis of fuel feedstock, combustion of pyrolysis products)과

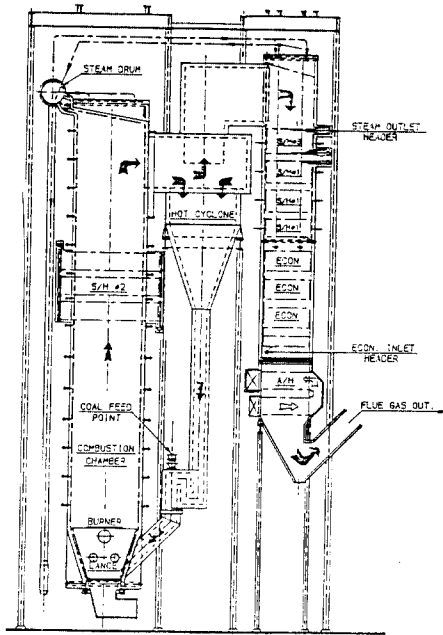


그림 3 순환식 유동층 보일러 구조

열 및 물질전달 과정 (particle heat up and mixing, heat transfer in-bed and bed-wall, gas mixing and diffusion to reacting solids surfaces)의 복합과정으로 볼 수 있다.

연소실에서 유출된 고온 가스는 back pass (convection zone 혹은 second pass)에서 과열기(superheater), 절탄기(economizer) 및 공기에열기(air heater zone)를 거치면서 온도는 백 필터 혹은 전기 집진기 입구에서 130℃~140℃까지 떨어진다. 연소용 공기는 주연소 공기(유동층 형성)와 2차 공기(staged combustion용)로 분리되며 2차공기(혹은 tertiary)는 연소실 측면으로부터 유입되고, 유입되는 위치는 각 모델에 따라 고유한 값을 갖게된다. 2차 공기 주입에 의한 다단연소(staged combustion)에 의해 질소산화물 형성이 극소화되고 완전연소를 도모하게 된다. 집진설비를 지난 연소 가스는 흡인 환(induced draft fan)에 의해 흡인되어 굴뚝으로 연계된다. 따라서 전체적인 공기 시스템은 balanced draft시스템으

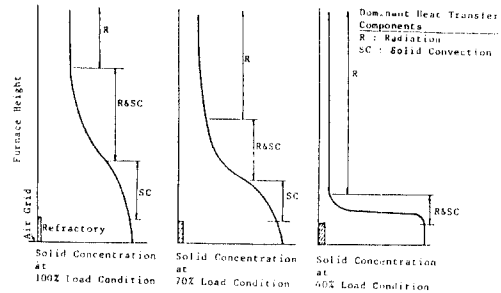


그림 4 보일러 부하에 따른 전열 방식

로, 연소실내로 유입되는 연소용 공기의 압력과 유량(혹은 속도)조절에 의해 부하(load) 및 연소실 온도를 조절하는 시스템이다.

## 2.2 연료의 다양성 (Fuel Flexibility)

순환유동층연소(CFBC)보일러의 가장 큰 장점은 연료의 유연성으로써 유동층의 대부분(95%전후)을 불활성 물질인 모래, 재로 구성하고 있어서 충물질의 잠열과 혼합(mixing) 효과에 의해 회분과 수분의 함량이 많은 저급 및 저열량의 석탄 및 고유황함유 석탄 등 여러 종류의 연료에 효과적이라는 것이다. 또한 미분탄 보일러에 비해 상당히 얇은 입자(약 15mm 이하)의 석탄을 사용하므로 전처리 과정(pulverizer가 필요없음)이 매우 간편하며, 연소실 내에서 매우 격렬한 균일 혼합이 이루어지므로 작은수의 연료공급설비(feeder)로 연료의 균일한 분배가 가능하다.

순환유동층(CFB) 보일러에서 연료의 물성치는 연소 시스템의 설계와 성능(performance)에 직접적인 연관이 있기 때문에 다음과 같은 파라미터 :

- 공기 분포 (air distribution) 및 주입 위치 (location of air levels)
- 연료 분산 (fuel distribution) 및 주입구 수 (number of feed points)
- 연소 안정성 (stability of the combustion process)
- 연소 효율 (combustion efficiency)
- 분진 및 유해가스 배출 (emission of dust)

and noxious gases)

- Sintering 및 fouling추세
- Fly ash 및 bottom ash의 분포
- Corrosion 및 erosion특성

을 고려하여

- 연소용 공기의 주입량, 유입구 위치선정 및 연료의 투입방법은 연료내의 휘발분 (V.M)과 고정탄소(F.C)의 함량을 고려하여 원활하고, 균일한 연소용 공기의 유입을 유도하도록 설계되어야 하며,
- 연소의 안정성과 효율 증대를 위해서는 3T(temperature, residence time, turbulent mixing)조건을 만족시키는 방향으로 연소 개념을 갖추어야 하고,
- 회분의 sintering/fouling/sluggig등은 사용연료 각각의 특성과 연소 실내 온도 조건등을 고려하여 열병합설비의 운전신뢰도를 제고할 수 있도록 하며,
- 고체연료 사용시의 마멸/부식 문제에 대해서는 설계상의 보강으로 마멸노출부위의 최소화와 방지대책을 강구하고,
- 대기오염에 관해서는 경제성(capital cost)을 고려한 연소과정에서의 해결방법이나, 별도 설비에 의한 사후해결방법(탈황 탈초 설비) 채택여부가 심도있게 다뤄져야 한다.

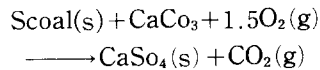
### 2.3 공해특성

#### ● 황산화물(SO<sub>x</sub>)

황산화물의 노내 포집(SO<sub>2</sub> retention)은 석탄 및 석회석의 화학적, 물리적 특성, 연소온도, 총물질량(bed inventory), 유동화 속도(fluidization velocity)에 따라 변화하며, 황산화물 배출 규제치를 만족시키기 위해 제거하여야 하는 황산화물의 양은 연료에 함유된 유향량에 따라 결정된다. 유향 제거를 위한 적정온도는 820°C~920°C로서 적정한 유향 제거와 높은 연소효율을 위한 설계 온도는 high grade coal의 경우 870°C이고, petroleum coke의 경우 900°C이다.

탈황(sulfur capture)반응은 diffusion limit-

ed process로써 유동화 속도뿐 아니라 석회석의 층내 함유량(bed inventory)이 황산화물 제거에 큰 영향을 끼친다. 연소실 후단(down stream after separation equipment)으로 부터 미분(fines)의 순환은 황산화물 제거와 연소효율을 향상시키며, 황산화물 제거정도는 주입해야 할 석회석의 양 즉, Ca/S몰비에 의해 결정된다. 그러나 이러한 process parameter는 다른 설계기준에 의해 제한된다. 유동층 연소 과정에서 황산화물 배출치는 calcium-based sorbent, 즉 석회석의 노내 투입량에 따라 다음과 같은 반응 과정에 의해 정해진다.



정상적인 노내온도 조건에서의 반응물은 calcined CaO와 기체상태의 sulfurous combustion products, 예를들면 황산화물과의 기체/고체 반응에 의해서 결정된다. 순환유동층 연소실에서의 상대적으로 높은 탈황률은 다음과 같은 요인에 의거한다. (1) 석회석의 적당한 입도분포 및 노내 체류시간 (2) 상대적으로 낮은 연소온도 유지(약 850°C, 석회석의 calcination과 sulfation특성). 그러나 상업용 설비에서 석회석 사용량의 최소화는 운전 비용의 최소화 및 석탄재중의 calcium농도 최소화를 위해서 중요한 인자로 되어 있다.

요구되는 황산화물 배출치를 맞추기 위한 석회석의 양은 다음사항에 따라 달라진다.

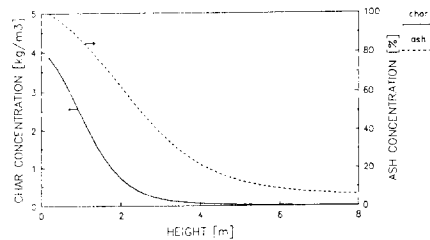


그림 5 축방향의 CHAR 및 회분농도 분포

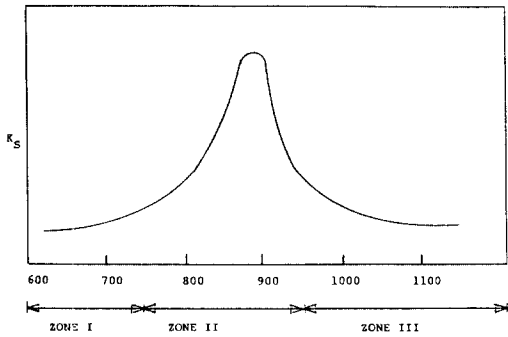


그림 6 연소 온도에 따른 Ca-S 반응도

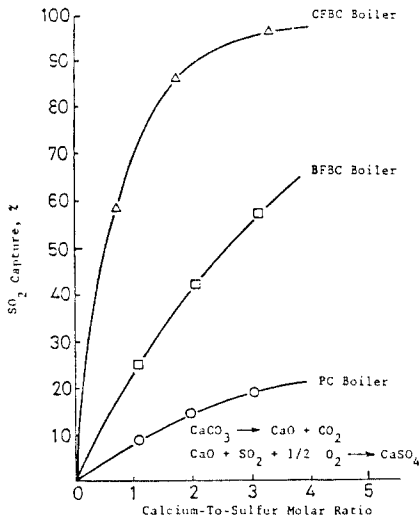


그림 7 Ca/S 몰비와 SO<sub>2</sub>포집률

- Process conditions(온도, 노내 체류시간)
- 흡수재의 특성(calcium 함량, 반응도, accessibility of outer/inner particle surface, calcination 및 sulfation과정에서 입자 변화)
- 연료 특성(유황 함량 및 분포)

그림 6에서처럼 연소로내의 온도가 800°C ~850°C 구간을 벗어나는 경우에는 온도에 민감한 영향으로 인해 sorbent(석회석)의 양이 증가하게 된다. 저온구간에서는 calcination이 불충분하게 되고 고온 구간에서는 급속한

sulfation반응으로 인해 기공이 쉽게 막히고, 따라서 sorbent의 기공내면으로 diffusion에 의한 황산화물의 유입이 제한된다.

일반적으로 유동층연소 방식에서 90%탈황을 위해서는 1.5~3.0의 Ca/s에 해당하는 석회석 투입이 요구되며, 효과적인 탈황을 위한 중요 인자는 다음과 같은 순서로 요약될 수 있다.

- (1) 석회석 반응도(limestone reactivity)
- (2) Ca/S 몰비
- (3) 노내 온도
- (4) 석탄 및 석회석의 입도 분포
- (5) 석회석의 분쇄성(friability)
- (6) 주연소 공기 대비 2차 공기량

● 질소산화물(NO<sub>x</sub>)

질소산화물은 연료중의질소성분의 산화에 의한 fuel NO<sub>x</sub>와 공기중의 질소성분의 산화에 의한 thermal NO<sub>x</sub>로 구성된다(그림 8). 공기 중 질소 성분의 산화반응은 온도에 대단히 민감하며, fuel NO<sub>x</sub> 형성은 연료중의 질소함량과 과잉 공기량에 따라 결정된다.

유동층 연소에서 질소산화물의 형성은 주로 연료중에 포함되어 있는 질소 성분의 산화에 의해 발생한다. 750~950°C의 낮은 운전온도로 인해 thermal NO<sub>x</sub>에 의한 방출은 상당히 적어 전형적으로 전체 배출량의 1~5%범주내에 속하며, 질소산화물(주로 NO<sub>2</sub>로써 방출됨) 방출은 다단연소(staged combustion)와 낮은 과

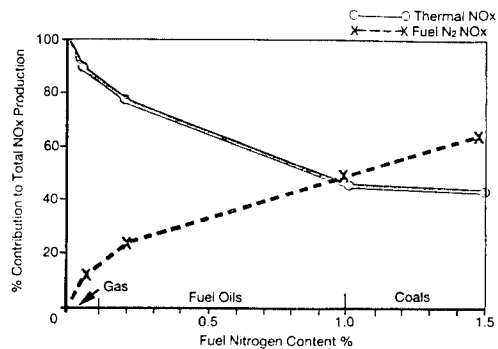


그림 8 연료에 따른 열 NO<sub>x</sub>와 연료 NO<sub>x</sub>의 구성

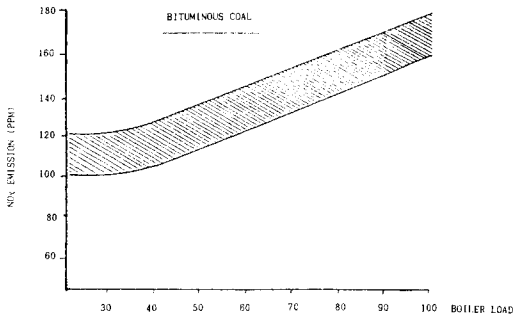


그림 9 각 부하에서 전형적인 NO<sub>x</sub> 배출치

잉 공기 (low excess air level)로 운전함으로써 감소시킬 수 있다.

유동층 보일러 (FBC boiler)에서의 질소산화물 형성(그림 9)은 중래의 미분탄연소 보일러에 비하여 상대적으로 낮다. 그러나 질소산화물 배출량은 미분탄 보일러에서 저 NO<sub>x</sub> 버너와 다단연소, 낮은 과잉 공기 및 overfiring 기법을 채택했을 때와 비슷한 수준으로 볼 수 있다.

순환유동층 보일러에서의 질소산화물 배출저감을 위한 운전요소(operating variable)는, 중요도로 보아 다음과 같은 순서로 정리될 수 있다.

- (1) 주연소공기대비 2차 공기량(primary to secondary air ratio)
- (2) 과잉 공기비(excess air level, 그림 10)
- (3) 노내 체류시간(residence time)
- (4) 층내의 calcium 함량(total calcium content in the bed)
- (5) 유리물질의 카본함량(carbon content in the entrained solids)
- (6) 석탄중의 질소 함량(특히, volatile nitrogen)
- (7) 석회석 특성
- (8) 층 온도 (bed temperature)

한편 어떤 운전 경우에는 질소산화물의 저감은 N<sub>2</sub>O(laug gas)의 형성을 유도할 수 있다 는 연구결과가 있고 따라서 질소산화물의 분석

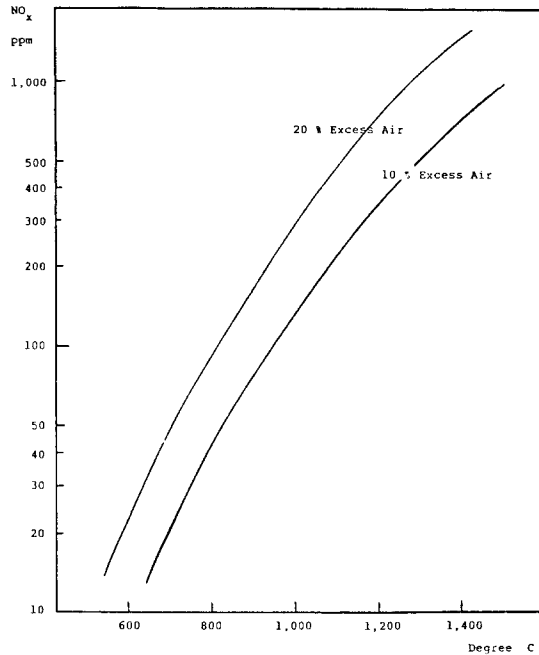


그림 10 연소온도와 NO<sub>x</sub>형성 관계

은 NO, NO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>O의 분석도 포함되어야 한다.

● 일산화탄소(CO)

일산화탄소(CO) 방출은 연소온도, 과잉공기, 체류시간 및 혼합 효과에 따라 결정되며, refractory lined cyclone(혹은 유사 device)에서의 대단히 효율적인 혼합으로 인하여 CO의 방출은 매우 작다. CO의 방출과 평균 연소온도와의 관계는 그림 11과 그림 12는 같으며 100ppm이하로 방류하기 위해서는 850°C 이상이 필요하다.

유동층 연소에서 CO배출치는 주연소생성물인 CO의 CO<sub>2</sub>로의 불완전한 전환에 의한 것으로 연소실내의 적절한 다단연소용 공기(staged combustion air)의 주입으로 상당량의 CO가 다음과 같은 반응에 따라 CO<sub>2</sub>로 전환될 수 있다.





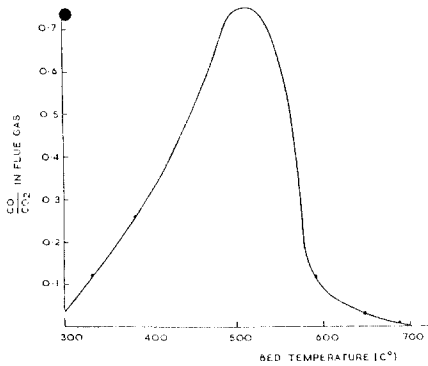


그림 11 연소 온도에 따른 연소가스중의 CO/CO<sub>2</sub> 비

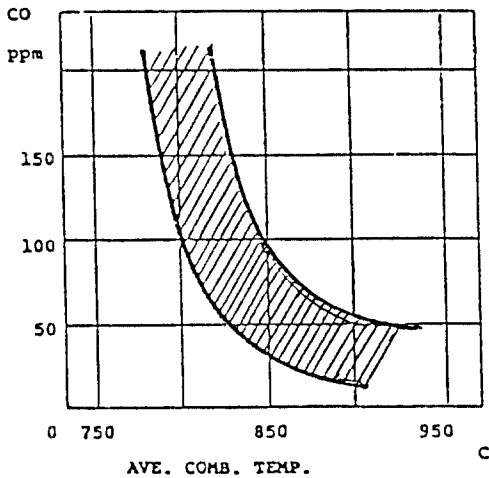


그림 12 연소 온도와 CO배출치

첫번째 step을 제한하는 인자는 chemical reaction kinetics와 산소의 gas-particle mass transfer process이며, 다음의 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환과정은 reaction kinetics와 gas phase mass transfer (convection 및 diffusion에 의한 mixing) process에 의해 제한된다.

고온 연소조건에서 solid carbon과 산소가 있을 경우에는 유동층 연소반응은 상기 화학반응에 따라서 진행이 되고 CO형성 또는 CO<sub>2</sub>로의 산화반응은 다음과 같은 국부 조건에 따라서 결정된다. (1) 온도(temperature), (2) O<sub>2</sub>,

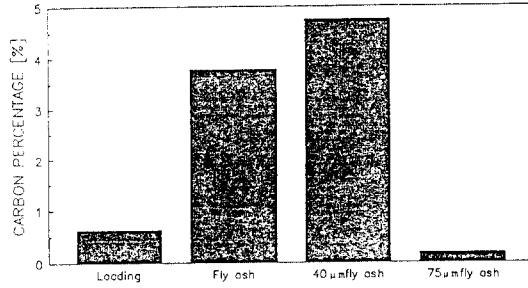


그림 13 Fly 회분중의 미연탄소 함유 분포

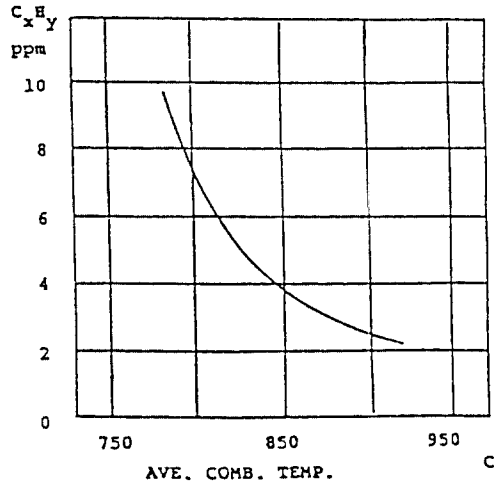


그림 14 연소온도와 탄화수소 배출치

CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O의 기상 농도(gas phase concentrations), (3) Solid carbon농도 및 반응도, (4) Catalytically active components의 availability(예, sorbent-derived CaO). CO방출량을 이해하기 위해서는 동시에 이런 사항이 고려되어야 한다. 전형적인 유동층 연소에서 fly ash중의 미연탄소량은 그림 13과 같다.

● 탄화수소(Hydrocarbon)

CO뿐만 아니라 탄화수소는 연소가스에 있는 가스상태 components의 불완전 연소에 의한 결과로써 CO emission에서와 같은 상황이 적용된다. CH<sub>4</sub> equivalent로 나타낸 전체 탄화수소 방출과 평균 연소온도와의 관계는 그림 14와 같다. 5ppm이하로 전체 C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>를 감소시

키기 위해서는 850℃ 이상의 평균 연소유지 온도가 필요하다.

경제성측면에서는 유동층내 연소 특성인 난

류혼합(turbulent mixing)과 안정적인 온도유지로 인해, 저품위 연료(low grade, high ash, high sulfur coal or coke)의 연소를 통한 경제

구 분	순환식 유동층 연소	미분탄 연소	Stoker식 연소
1. 구조	그림 16 참조		
2. 연소조건			
○연소온도	750~950℃	1200~1500℃	1200~1500℃
○연소효율	98%이상	98%이상	95%이상
3. 사용연료			
○연료의 범위	광범위한 연료 (고유황, 저유황, 유·무연탄, Petro-coke, 저질탄, 제지및 목재, Sludge 등)	제한된 연료 (미분화시킨 석탄)	제한된 연료 (석탄)
○연료의 호환성	변경된 연료도 사용가능	당초 설계된 연료만 사용	당초 설계된 연료만 사용
○석탄의 입도	15mm이하	0.7mm이하의 미분탄	30mm이하
○연료조건	(1) 휘발분에 제한없이 연소가능  (2) 유황 함유량에 따른 SO <sub>x</sub> 자체 탈황 억제 특성(필요시 석회석을 노내로 주입)	(1) 휘발분이 적은 석탄 연소시 화염이 불안정하여 보조연료와 함께 연소  (2) 고유황 석탄 사용시 별도 탈황설비 필요	(1) 휘발분에 제한 없이 연소가능  (2) 고유황 석탄 사용시 별도 탈황설비 필요
4. 운전현황			
○부하반응속도	빠르다(5~10%/분)	빠르다(5~10%/분)	느다(5%/분이하)
○보조연료(oil)	소모량이 극히적음	소모량이 많다	소모량이 적다
5. 보수			
○석탄분쇄	Pulverizer 불필요	Crusher와 Pulverizer가 필요 (Pulverizer의 잦은 고장 및 마멸)	Pulverizer불필요
○ASH	저온연소로 인하여 Slagging, Fouling 현상이 없음	화실내의 고온연소로 인하여 Slagging, Fouling현상 발생	화실내의 고온연소로 인하여 Slagging, Fouling현상 발생
○마멸	노내 돌출 부위가 있을시 마멸가 발생할 수 있음	Bed Material이 없으므로 마멸문제는 없음	Bed Material이 없으므로 마멸문제는 없음
6. 공해문제			
○SO <sub>2</sub> 발생	연소실 직접 탈황으로 별도 탈황설비 불필요 (90%이상 탈황)	별도 탈황설비를 설치	별도 탈황설비를 설치
○NO <sub>x</sub> 발생	저온연소로 NO <sub>x</sub> 발생억제	별도 저 NO <sub>x</sub> 설비 및 탈초설비를 설치	별도 저 NO <sub>x</sub> 설비 및 탈초설비를 설치
○Dust발생	별도 집진설비를 설치	별도 집진 설비를 설치	별도 집진 설비를 설치

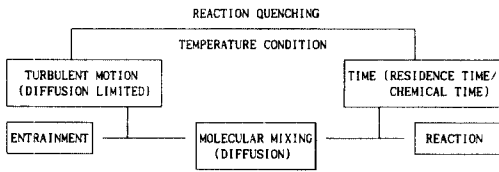


그림 15 3T 필요충분조건

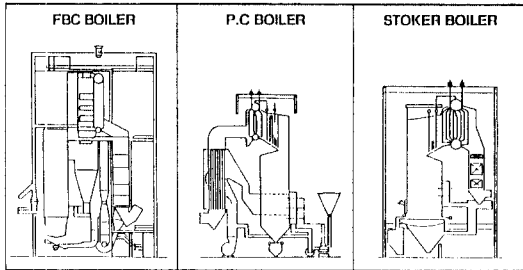


그림 16 석탄 연소 보일러 구조

성 요구조건을 만족하고 있다.

기본적으로 combustion sequence(그림 15)에서는 turbulent motion에 의한 혼합을 tool로 하는 molecular contact이 reaction process의 전제가 된다. 유동층 연소에서는, 층물질에 의한 안정적인 온도가 유지된 상태에서 (temperature), 층물질의 난류운동에 의한 완벽한 혼합(turbulence) 및 연료입자의 상하 유동화 현상에 의한 충분한 체류시간(residence time)의 소위 3T 조건을 완벽하게 만족하며, 연소에서 요구되는 기본여건은 여타 stoker방식이나 미분탄 연소방식에 비해 월등한 내용을 갖추고 있다. 따라서 유동층 연소방식은 저온 연소 특성에 의한 limestone과 sulphur 반응의 최적 여건 마련과 thermal NO<sub>x</sub>형성 온도 범주에 속했지 않다는 사실로 인해 환경오염에 대한 기본적인 근원이 배제된 훌륭한 시스템으로 평가된다.

### 2.4 석탄 연소 보일러 비교(FBC VS. PC, Stoker)

현재 열병합용 석탄연소보일러는 순환식 유

동층 연소 보일러, 미분탄 연소 보일러 및 stoker 연소 보일러등이 있으며 각기 다른 특징을 갖고 있어 각 형태에 따른 연소특성을 살펴볼 필요가 있다.

### 3. 국내 보급현황 및 문제점

1970년대 후반 이후 본격적인 상업화가 이루어진 순환식 유동층 보일러는 전세계에서 연차적으로 보일러의 댓수가 증가함과 동시에 대형화하고 있음을 알수 있다(그림 17). 또 하나의 특징으로는, 기포식 유동층 보일러(BFBC)에 비하여 순환식 유동층 보일러(CFBC)의 설치가 증가되고 있다는 점이다.

국내 순환식 유동층 보일러(CFBC)는 1984년도 동양화학에 120T/H CFBC보일러가 상업 운전되었고, 당시의 상황에서 이는 성공적인 사례로 평가되어 국내 확산 보급도 주도한 결과를 낳았다.

국내 보일러 제작업체로는 현대중공업(주), 삼성중공업(주), 한국중공업(주)등의 참여하고 있으며 각각 공정상의 특성을 달리하는 외국의 전문 보일러 제작회사와 기술제휴를 통해 국내 보급을 추진하고 있다. 즉 현대중공업(주)은 핀란드의 Ahlstrom사의 순환유동층연소(CFBC)보일러를 제작, 설치하고 있으며, 한국중공업(주)은 서독 Lurgi의 순환유동층연소

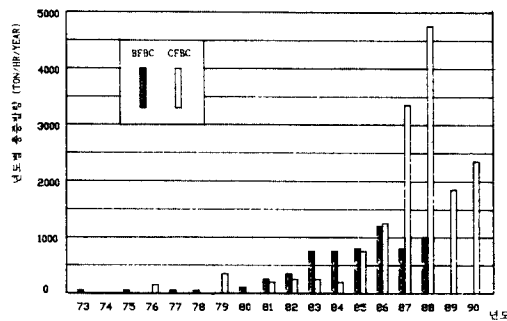


그림 17 전세계 신설 FBC보일러의 증발량 년도별 총계

국내 순환식 유동층연소 보일러 설치 현황

구분 업체	형식	설치년도	중기 용량 (톤/시간)	증기압 kg/cm <sup>2</sup>	설계연료	열병합발전	비 고 제작업체
동양화학	CFBC	1984. 12	120	110	유연탄 PET. COKE	열병합발전	현대중
선경(수원)	CFBC	1988. 12	130	94	유연탄 PET. COKE	열병합발전	현대중
선경(울산)	CFBC	1989. 중반	200	114	유연탄 PET. COKE	열병합발전	현대중
럭키(여천)	CFBC	1989. 10	210	102	유연탄	열병합발전	현대중
극동석유	CFBC	1989. 5	120	110	유연탄 PET. COKE	열병합발전	현대중
석유화학지원 공단(울산)	CFBC	1990. 6	250	93	유연탄	열병합발전	현대중
선일 포도당 (주안)	CFBC	1990. 11	60	63	유연탄	열병합발전	현대중
고려아연 (온산)	CFBC	1991.	175	115	유연탄	열병합발전	한국중
염색단지 (대구)	IGNI FLUID	1986.	137	91	유연탄	열병합발전	삼성중
제일제당 (김포)	IGNI FLUID	1987.	40	74	유연탄	열병합발전	삼성중
전주제지	IGNI FLUID	1989.	130	90	유연탄	열병합발전	삼성중

보일러, 그리고 삼성중공업(주)은 프랑스 FCB(five-cail babcock)의 Ingfluid보일러를 제작 설치하여 납품하고 있다.

이러한 여건으로 현재까지 국내에서 수기의 순환식 유동층 보일러가 설치 운전되고 있어 초기의 scale-up에 따른 공기노출의 설계문제, gas flow pattren에 따른 erosion문제등이 있었으나 적극적인 해결 방안 및 이에 따른 설계 반영으로 인하여 시공시 supervision강화 및 vendor선정을 충분히 고려한다면 크게 문제없는 것으로 사료된다.

그러나 문제는 국내업체들이 문제점을 노출 하여 이론적으로 또한 적극적으로 해결하려는

개선 노력 여부로서, 좀더 플랜트의 reliability를 증가시키기 위하여 고려되어야 할점은 erosion/refractory lining탈착, 회분처리 및 활용 문제, bulk material handling 설비 및 system의 fine tuning능력의 결여로 4가지로 압축될 수 있다. 첫째, Erosion 방지를 위해서 층물질 (bed material)중 큰입자를 bed classification system을 이용하여 제거하고, 연소실내 수관벽은 굴곡이나 돌출된 설계를 피하고, 연소가스의 진행방향이 꺾이는 부위는 사전 보호하고, 연소가스의 discontinous flow 부위는 overlay welding으로 사전보호하는등 적절한 대응책을 설계상에 반영하여 더 이상은

문제가 되고 있지 않는 형편이다.

그러나, refractory lining 부위에 대해서는 만족스럽지 못한 결과가 나타나고 있다. 가장 문제가 되는 것은 국내 refractory maker에서 CFBC에서 요구하는 내마멸성과 내열성의 제품생산 능력이 미흡한데도 불구하고, 국내 보일러업체에서 조직적인 vendor(refractory maker) qualification control 능력도 미비하여 refractory lining의 탈락과 grid nozzle의 손상 및 tube erosion으로 이어지는 결과를 초래하고 있어 플랜트의 신뢰도를 저해시키고 있다. 그러나 동일설계의 유사한 해외 플랜트의 경우에는 훌륭한 성과를 거두고 있어 국내 설치 경우와 좋은 대비를 보이고 있다.

둘째, 회분처리 및 재활용문제에 대한 대책이 강구되어야 한다. 즉 석탄연소에 있어서 부산물로 발생하는 회분을 처리하는데 소모되는 경비와 석탄회 발생증가로 인해 환경에 미치는 영향이 심각한 실정일 뿐더러, 현재 우리나라는 석탄회를 단순 매립 폐기처분하고 있으나 매립지의 절대부족으로 인해 그 한계성을 드러내고 있다. 따라서 외국에서 실용화 단계에 있는 유동층 연소 보일러의 회분의 재활용 사례(도로 로반재, 인공브릭, 석회석-석회-석고의 경화체 및 기타)에 의거하여, 국내에서도 회분을 재활용할 수 있는 기술 및 설비를 보완한다면 경제적인 측면에서도 크게 각광을 받을

것이다.

셋째, 플랜트의 qualified 전문 commissioning 엔지니어의 실질적인 부재요인으로 인한 시스템의 fine tuning 능력이 미흡한 점이다. CFBC 경우, 설계 specification에 의한 bed material의 circulation과 fluidizing은 FB technology의 기본으로서, FB 시스템의 충분한 지식이 없는 시스템의 최적 conditioning은 기대하기 어렵다.

넷째, bulk material handling 설비에 대한 신뢰도로써 경험을 토대로한 empirical data의 축적 및 개선이 부족하여 이로 인한 플랜트 전체의 reliability 저하를 초래하고 있다(그림 18).

이 문제의 해결을 위해서는 전문 엔지니어링 업체와 제작사간, 제작사들간의 기술교류가 이루어져야 가능하다. Foreign technology의 도입과 상품화에는 반드시 엔지니어링 서비스라는 소프트웨어가 전제되어야 하나, 국내실정은 엔지니어링의 value를 인정하는대는 지극히 인색한 것이 현실로서, 소프트웨어의 value를 인정하는 사고의 전환이 이뤄져야만이 신기술 보급이 지속적으로 가능하다.

#### 4. 맺음말

유동층 연소방식을 이용한 열병합 설비는 상당수가 전세계적으로 성공리에 운전되고 있는

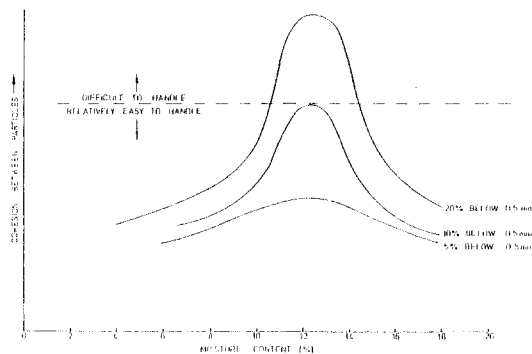


그림 18 미분함유량 및 수분함유량에 따른 석탄 취급 난이도

며, 연료의 폭넓은 수용성, 저온연소에 기인한 저공해 특성으로 인해 기존연소 방식보다 월등한 강점이 인정되고 있다. 따라서 에너지 활용의 극대화와 환경오염의 최소화라는 두가지 명제를 만족시키는 금세기 최대의 매력적인 석탄연소 방법으로서 유동층 연소 기술은 지속적인 확산이 예상된다.

그러나 그동안의 문제가 제작자와 사용자의 노력에 의해 거의 해결되었다고는 하나, 아직도 대형화 및 기본설계상의 문제가 부분적으로

해결되어야할 숙제로 남아 있다. 최근의 추세는 다양한 형태의 설계개념이 차츰 서로 비슷해지는 추세로서, 이는 구체적인 설계과정에서 최적 시스템으로 취합되는 경향을 나타내고 있다. 각공정에 맞는 최적 시스템/최적 설계를 도입하기 위해서는 각 제작자의 독특한 시스템에 대한 검토 분석이 있어야 하며, 사용자자 하는 연료와 석회석의 물리화학적 특성을 사전에 분석하여 선택코자 하는 유동층 시스템과의 적합성 여부에 대한 사전 검토가 요망된다.



새질서 새생활로 문화국민 금지찾자