

熱併合 發電用 流動層 BOILER의 設計節次 및 性能計算(上)

열병합 발전용 CFBC 보일러 설계절차 및 성능계산

BOILER DESIGN PROCEDURE & PERFORMANCE CALCULATION

車 聖 起*
Cha, Sung Kee

- | | |
|----------------------------|--|
| I. 서 언 | 6. MASS BALANCE |
| II. CFBC BOILER에서의 노 설계 | 7. HEAT LOSS |
| 1. 노설계 | 8. SEC. / TER, AIR의 PENETRATION & MIXING |
| 1-1. 설계 FLOW | 9. PRIM. / SEC. / TER. AIR의 비율 |
| 1-2. FURNACE DESIGN | III. CFBC BOILER에서의 열전달 |
| 2. 순환설계 | 1. 열전달 일반 |
| 3. POST COMBUSTION CHAMBER | 2. SOLID BULK DENSITY |
| 4. FLUIDISING VELOCITY | 3. 열전달계수 |
| 5. 노내온도배분 | IV. 결 언 |

I. 서 언

국내 석탄연소를 위한 유동층 보일러가 도입된 지 10여년이 경과하였고, 연료다변화라는 국가시책과 에너지 절감 정책에 초점을 맞추어 각 업체에서의 기술경쟁이 한층 격화된 느낌이다.

그러나 도입기술의 완벽한 소화가 지연되는 가운데 상당한 독자적인 기술개발의 진전이 있었음에도 불구하고 석탄연소를 위한 신기술, 특히 유동층에 대해서는 기술의 개방이 자연 폐쇄적일 수밖에 없었다.

한편, 에너지원단위 절감과 연료다변화는 국가적인 이해에 크게 관계되는바, 관련업계의 상호

기술개방으로 인한 교류로서 기술개발의 상승효과를 도모한다면 업계와 국가발전에 적으나마 보람이 될 것으로 필자는 믿고 싶다.

이러한 취지에서 유동층 보일러에는 거품식(BUBBLING BED)과 순환식(CIRCULATION BED)이 있는바, 신기술인 순환식 유동층연소 보일러 등 새로운 기술변천에 따른 노설계와 순환설계에 대해 살펴보고자 한다.

II. CFBC BOILER에서의 노의 설계

1. 노설계(FURNACE DESIGN)

1-1. 설계 FLOW

석탄 연소 보일러에 있어서 FURNACE의

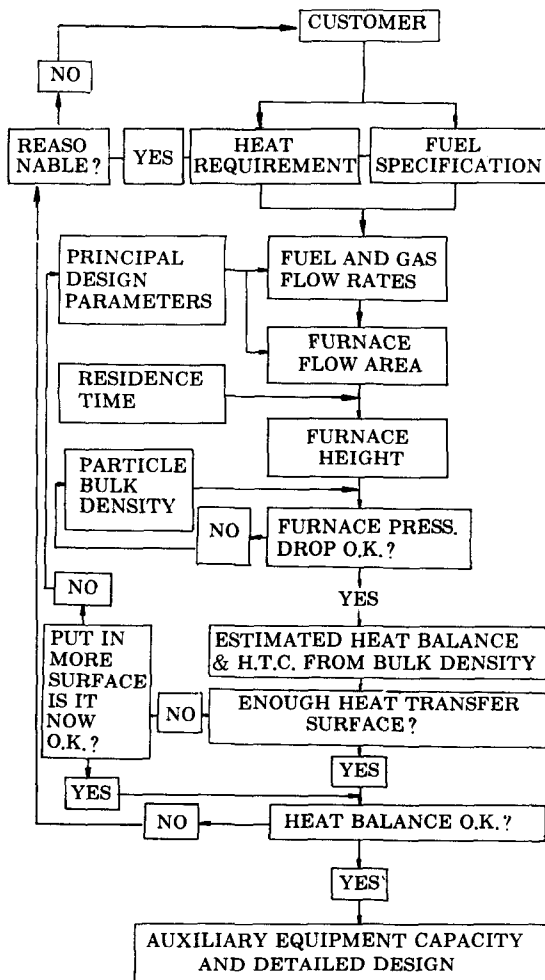
설계에는 많은 설계 Factor가 있으며 먼저 다음 사항에 대한 준비가 있어야 할 것이다.

- FUEL ANALYSIS
- STEAM FLOW RATES
- PRIMARY & REHEAT STEAM TEMPERATURE AND PRESSURE.
- FEED WATER TEMPERATURE AND PRESSURE
- AMBIENT AIR & FLUE GAS TEMPERATURE.

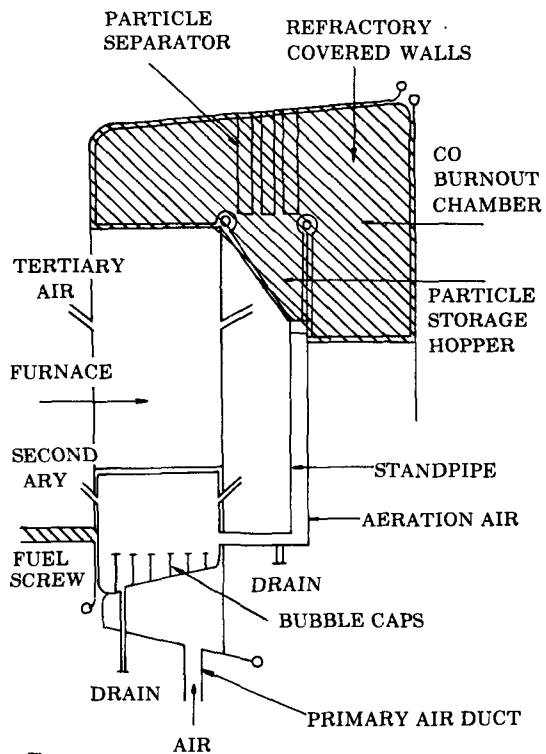
상기와 같은 기본사항이 갖추어지면 이어서 본격적인 노설계에 진입하게 되는데, 이에 대한 전형적인 흐름은 아래와 같다.

(별첨 제1도 참조)

먼저 발주처로부터 HEAT REQUIREMENT 와 FUEL SPECIFICATION 을 입수한다. 이 입수된 INPUT 자료를 근거로하여 FUEL & GAS FLOW RATES 를 결정하는바, 이는 각 BOILER TYPE 별 기본설계 함수에 의해 정해진다. 이때 노내 각 부분별 최적 유속에 의해서



GENERAL DESCRIPTION OF CIRCULATING FLUIDISED BED BOILER



Figure

1. no in-bed tubes
2. integrated combustor
3. water cooled refractory

FURNACE FLOW AREA가 선정된다. 다음 각 연료별 최적연소 소요시간이 있는바, 이에 의해서 FURNACE와 HEIGHT가 결정된다.

이어서 연료별 최적 BULK DENSITY를 준비하여 FURNACE내에서의 압력강하를 CHECK 하고 압력강화량이 전계통의 DRAFT BALANCE상 이상이 없다면 예상 열정산 및 BULK DENSITY로부터 열전달 계수를 산정한다.

열전달계수에 의해서 충분한 열전달 면적의 가능여부가 점검되는바, 만일 부족하다면 현단계에서 전열 면적의 증가가 가능한지 조정하여 무리한 점이 있을때는 처음 단계인 기본설계합수(예를들면 전열면적당 열부하, 노내 단위 체적당 열부하, 유효 복사전열면적당 열부하, 화상 면적당 열부하, 버너 주위 열부하, 화염충만비, 연소효율, 전열면효율등)의 최적치 적용여부를 검토함으로써 FUEL & GAS FLOW RATES를 재선정하여 과정을 되풀이하며, 전열면적이 충분하다면 이어서 본격적인 열정산작업에 들어가게 된다. 또한 이 HEAT BALANCE에 의해서 연관된 보조기기의 용량산정과 상세 설계단계에 이른다.

이때 HEAT BALANCE 상 기술적 문제 또는 경제성 측면에서 재고할 사항이 발견된다면, 발주처에 통보하여 기본사항의 조정여부도 검토할 수 있을 것이다.

1-2. FURNACE DESIGN

이제 FURNACE의 중요한 부분인 PLAN AREA, DEPTH, WIDTH, HEIGHT 등에 대한 설계 착안점에 대해서 검토해보기로 한다.

별첨 제2도는 CIRCULATION FLUIDISED BED(CFB) BOILER의 주요한 형식중의 하나로서 SIDE ELEVATION을 나타내고 있다. 먼저 주요부분의 구조를살펴보면,

BOTTOM BED SECTION의 전후좌우 벽면은 REFRACTORY LINING이 되어있는 수냉 벽관으로 이루어져 있다(WATER COOLED MEMBRANE WALL). 이에 비하여 바닥면은 수냉벽관으로 되어있으나, REFRACTORY

LINING은 없으며, 경우에 따라서는 분배판의 역할을 하기도 한다. 그러나 연료에 따라서, 예를 들면 COAL, PETRO-COKE 등의 경우 EROSION ATTACK이 심각하므로 바닥면에 REFRACTORY를 포설하도록 하고있다.

FURNACE 상부의 벽면은 수냉벽관으로 되어 있고 EROSION을 방지하기 위하여 역시 REFRACTORY LINING을 설치하여야 한다. 저위 발열량의 연소 경우 TURNDOWN을 증가시키기 위해서는 노저부에 "BOOT"를 설치하면 효과를 얻을 수 있다. 예를 들면 PEAT 등 저품위 연료 연소시 저부하에서는 DENSE BED에서의 온도 유지가 매우 난점이 있는 것으로 밝혀져 있다. 이는 SOLID 회전율이 요구한 만큼 감소되지 못하고 이에 따라 온도의 과도한 저하를 가져오기 때문이다. 그러나 GAS 유속이 보다 낮은 "EXPANDED ZONE"까지 DENSE BED의 LEVEL을 낮게 유지할 수 있다면 회전율을 줄이고 만족할만한 연소조건유지가 가능하게 된다.

반면 "BOOT"의 불리한 점으로는 건설비의 추가적인 부담이 문제로 대두된다. 하지만 "BOOT"를 설치하는 대신 노내에서의 체류시간을 연장시키고자 SECONDARY AIR 입구의 LEVEL을 올려서 DENSE BED의 HEIGHT를 올리게되면, 가압송풍기의 COST가 그만큼 상승하게 될것이다.

물론, PLANT를 SCALE UP하면 할수록 "BOOT"의 추가 건설비는 대폭 상승하는 불리한 점이 있게된다.

한편, 노내에서의 PRESSURE DROP은 BOTTOM SECTION의 높이에 관계되므로 가능한 FURNACE의 깊이는 낮게 처리하도록 하여 압력강하를 줄여야 할것이다.

1-2-1. FURNACE PLAN AREA.

FURNACE의 단면적(투영면적)은 SECONDARY AIR PORT 부분 위에서의 VOLUME FLOW RATE를 산정하고 GAS 유동화 속도를 결정하여 나누어줌으로써 쉽게 얻을 수 있다.

여기서 GAS FLOW RATE는 최대 부하에서

가장 높은 GAS FLOW RATE를 가진 연료의 것으로 채택하여야 함은 물론이다.

GAS 유동화를 위한 최적속도는 다음장에서 상세 설명키로 한다.

1-2-2. FURNACE DEPTH

이는 급탄 방식에 따라 많은 차이가 있다. 즉, 상부 급탄방식 또는 하부 급탄방식에 따라 다르며, 상부 급탄방식 중에서도 SCREW, SPREAD, GRAVITY, PNEUMATIC 급탄기 등에 따라서 조금씩 차이를 보이게 된다.

그러나 일반적으로 상부 급탄방식이 단점보다 장점이 우수하여 많이 채택되고 있으므로 이에 대해서 검토하기로 한다.

상부급탄방식은 양호한 연료 분산 조건을 유지하기 위해서는 길고 좁은 형태에 FURNACE가 보다 유리하게 된다.

만일, 연료가 화학반응도가 낮은 경우(예를 들면 휘발성분이 적은 연료), 연료입도(PARTICLE SIZE)가 적당하다면 노내 균등배분을 얻는데 그다지 문제는 없다.

반면, 휘발성분이 높은 연료 경우에는 양호한 연료 배분조건을 얻기 위해서는 노의 깊이를 가능한 작게 유지하여야 한다.

따라서 상부 급탄방식도 이러한 설계특성에 의해서 최대 노의 깊이는 3.0M 이내로 하는것이 좋다.

1-2-3. FURNACE WIDTH

노폭에 대해서는 FURNACE 투영면적과 FURNACE DEPTH에 의해 결정되며, 별도의 이론적인 한계는 없다.

다만, 각 MANUFACTURER의 STANDARD 에 의해서 결정되고 있으며, 석탄연소 CFBC BOILER에서의 노폭 선택에 대한 방안을 아래와 같이 제시한다.

FURNACE DEPTH(M)	APPROXIMATE INPUT-WIDTH(MW / M)
2	12
1.5	9
1	6

1-2-4. FURNACE HEIGHT

노의 깊이는 SECONDARY AIT PORT의 중심선으로부터 PARTICLE SEPARATOR의 하단부까지의 높이로 한다.

목탄같이 반응성이 매우 격렬한 연료 경우에는 적합한 연소조건을 얻기위한 FURNACE의 높이는 상대적으로 낮아지게 되나, 휘발성분이 많은 연료 또는 GAS 혼합성 연료 경우는 연소를 위한 충분한 노내 체류시간을 확보하여야 하므로 노의 높이가 매우 중요한 변수로 된다.

다음은 FURNACE의 높이를 결정하기 위한 기본설계 단계에서 추천할만한 수치를 나타낸 것이며, 각 설계 담당자는 이를 기준으로 개별 PROJECT의 특성에 맞게 선택·조정할 수 있을

FUEL	FURNACE HEIGHT(M)
PETROLEUM COKE	20
ANTHRACITE	20
BITUMINOUS COAL	18
WOOD	12
PEAT	10
OIL	17
GAS	17

것이다.

위의 표에서 나타난 바와 같이 연료가 노의 형상에 미치는 영향은 절대적이라 할 수 있으며, 특히 연료 성분 중에서도 휘발성분이 제1 설계 포인트가 되고, 다음은 ASH량이며 이 경우에도 MAX 14% 근처가 양호하나 그 이하가 되면 특수설계를 감안하여야 한다.

1-2-5. 연소기기

노의 형상은 연소기기에 따라서 상호 깊은 연관관계가 있으며, 전형적인 연소기기를 사용하면 노 설계시에 다음 사항을 검토해 두어야 할 것이다.

- 1) 연소기기를 설치하기 위한 공간확보가 필요하다. 예를 들면 BURNER 사이의 CLEARANCE 및 BURNER와 주위 노벽관과의 CLEARANCE 등을 들수 있다.
- 2) 화염 형상 즉 화염의 폭, 길이, 휘염온도 등이

주요한 FACTOR가 되며, 이는 양호한 FLAME을 얻기위한 노벽의 깊이등과 연관된다.

- 3) 완전 연소를 위한 적합한 노내 체류시간을 확보할 수 있는 노내의 공간이 또한 감안되어야 할 것이다.

1-2-6. 노내 총괄 전열면적

필요한 노내 전열면적은 다음장에서 소개할 노내에서의 전발생열량과 열전달 계수에 의해서 구해진다.

노내에서의 REFRACTORY LINING은 가급적 필요한 부분에만 한정하도록 최소화시켜야 하며, REFRACTORY LINING의 시공에 대한 노내 열전달 감소분에 대해서는 전열면적 계산시에 염두에 두어야 한다. 한편, REFRACTORY는 노내 EROSION ATTACK에 대한 유효한 대책이 되며, 노내 최적 TURNDOWN을 얻는데에도 기여할 수 있다.

노내전열면적의 크기는 가장 낮은 발열량을 가진 연료에 의해서 보통 결정되고 있다.

노내 부분이 아닌 PARTICLE STORAGE HOPPER 부분도 수냉벽관으로 이루어져 있다.

1-2-7. 노 천정부

노의 윗쪽 천정부위는 SOLID의 내부 회전을 이루기위해서 수평상태로 되어 있으며, 역시 EROSION을 방지하기위해서 REPRACTORY LINING을 하여야 한다.

노밖에서 SOLID의 유동 통로를 매끄럽게 처리하기보다는 노내에서 처리함으로써 MASS FLUX에 의한 노내전열을 최대화하고, 노밖에서는 SOLID에 의한 영향이 없도록 하는 것이 최선의 방법이다.

또한, FURNACE TUBE의 전체 소요량은 노내 순환유량과 유속에 적합하도록 증기 부피율에 대한 충분한 단면적을 유지할 수 있게 배려되어야 한다.(0.4~0.7)

2. 순환설계(CIRCULATION DESIGN)

노내에서의 SOLID 순환율은 전부하시 노벽판

에 필요한 열전달을 행할 수 있도록 충분히 확보하여야 하며, 허용순환율 범위이내에서 부분부하도 COVER 할수록 하여야 한다. 고품위 연료를 전부하시 연소시킬때 최대 열흡수가 노내에서 얻어지게 되며, 이는 SOLID의 높은 회전율에 의해 가능하게 된다.

LOAD가 저하하거나 연료의 발열량이 감소될 때는, 일정한 과잉공기율과 BED 온도를 유지하는 동안 노내에서 얻을 수 있는 전열에 비례해서 회전율도 저하 하게 된다.

따라서 연료의 성상이 BOILER의 DESIGN과 LOAD TURNDOWN에 큰 영향을 미치게 된다.

예를들면 4:1 LOAD TURNDOWN을 얻으려 한다면, 노내에서의 전열량은 전부하시에 있어서 보다 대략 75% 정도 감소시켜야 할 것이다. 이때 FURNACE BOTTOM SECTION은 BUBBLING BED와 같은 상태가 되며, 이때의 유동속도는 대개 2m/s가 된다.

전달 열량을 감소시키기 위해서는 SOLID의 회전 비율을 저하시켜야 하며, 이러한 부하 조정 방법은 PARTICLE CONCENTRATION이 0.0005이상인 경우 유효하게 된다. 이때의 입자비중은 2600kg/m³이며, SOLID BULK DENSITY는 1.3kg/m³ 이상이 된다.

만일 이 수치 이하에서 운전할 경우 BUBBLING BED가 되며, BED의 온도는 과잉공기율로서 조절되어야 한다.

여기서 설계목적상 SOLID의 회전율을 증가시킬 필요가 있을 때에는 FURNACE의 전열면적을 감소시키거나, REFRACTORY의 설치량을 증가시켜야 할 것이다.

다만, FURNACE의 내외부 회전율을 계속 증가시키게 되면 "HOT SPOTS"라고 하는 FURNACE 내에서의 온도 강하를 가져오게 된다.

SECONDARY AIR PORT 부근의 평균 SOLID의 부하는 대략 7~90kg/m³로서 PARTICLE CONCENTRATION은 0.003~0.035 사이가 되고 있으며, 이때 FURNACE

전체에 걸친 평균 SOLID CONCENTRATION 은 0.02 정도가 되고 있다.

FURNACE의 높이를 높일수록 SOLID의 부하는 감소하게 되며, SECONDARY AIR PORT 아래부분은 $500\sim 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 가 되나, FURNACE의 TOP 부분은 $2\sim 10\text{kg}/\text{m}^3$ 가 되고 있다.

여기서 PARTICLE SEPARATOR에 도달하는 SOLID의 유량은 다음식으로 표기된다.

$$\text{유량 } W = \rho_b \times \text{FSA} \times U_p (\text{kg}/\text{s})$$

여기서 ρ_b : FURNACE TOP에서의 BULK DENSITY(kg/m^3)

FSA: FURNACE의 CROSS-SECTIONAL AREA(m^2)

U_p : PARTICLE VELOCITY(m/s)

따라서 PARTICLE SEPARATOR에 들어가는 SOLID의 최대유량은 FURNACE의 높이가 10m인 경우 $10\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ 가 되고, 높이가 20m인 경우는 $7\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ 가 된다.

만일, FURNACE 높이가 20m인 경우 SOLID의 최대유량을 산정해 보면,

먼저 FURNACE TOP 부분의 PARTICLE CONCENTRATION은 0.0005가 되므로, SOLID의 부하: $\rho_b = 2600 \times 0.0005 = 1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 이고,

다음 $U_g = 8\text{m}/\text{s}$, $U_p = 5.4\text{m}/\text{s}$ 이므로 PARTICLE SEPARATOR에서의 FLOW RATE는 $5.4 \times 1.3 = 7\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ 가 된다.

단, 연료의 GROSS HEATING VALUE가 2340 KCAL/KG이하로 떨어진다면, SOLID의 회전율을 낮추는 것은 FURNACE TOP에서의 온도저하를 초래하므로, 저품위 연료를 사용할 때에는 TURNDOWN RATIO를 낮추는 것이 불가피하게 된다.

다음, GAS의 재순환 및 TEMPERING 방법이 있는바, 이는 GAS의 VOLUME FLOW를 증가시킬때 사용되며, 이 GAS를 BED 온도까지 승온시키면 GAS의 발열을 증가하게 되는데, 이 방법은 노출구 GAS 온도가 850°C 이상이거나,

주어진 SOLID의 회전율과 과잉공기율로서는 노내의 전열면적이 과다할 경우에 사용된다.

이러한 경우 SOLID의 회전율은 더욱 낮출수 밖에 없으며, 노내에서의 열전달을 낮추는 것은 효과적이지 아니므로, GAS의 재순환 및 TEMPERING 이 TURNDOWN 능력을 유지시키는데 유용한 방법이 될수 있다.

그러나 GAS의 재순환 및 TEMPERING 방법도 BOILER를 통한 열흡수의 PATTERN만 바꾸어 줄 뿐이며 전열흡수 증가에는 큰 효과가 없고 연도에 부담만 가중시키게 된다는 점을 인식해야 한다.

3. POST-COMBUSTION CHAMBER

PARTICLE SEPARATOR는 SOLID의 CIRCULATION을 위한 1차 포집이라는 고유기능이외에 이 기기 주위로 흐르는 GAS의 MIXING 효과가 더 크다는 점을 들지 않을 수 없다.

이러한 이유로 후연소 CHAMBER를 설치하였으며, GAS가 약 1초 정도의 RESIDENCE TIME을 갖도록 설계하고 있다.

후연소 CHAMBER에서는 잔류 CO를 연소시킴으로 고온 부위이기 때문에 REFRACTORY LINING을 포설하고 있다. 이 CO-GAS는 급속히 연소반응을 일으키므로, 다음 사항을 고려에 넣지 않으면 안된다.

첫째는 WARM GAS의 MIXING 효과는 매우 부족하며, 둘째는 저부하에서 PARTICLE SEPARATOR 이후에 온도강하가 커서 약 70°C 까지 내려간다는 점이다.

4. FLUIDISING VELOCITY(유동화 속도)

FLUIDISING VELOCITY는 노내 SECONDARY AIR PORT 위에서의 GAS 속도를 일컫는다.

가장 바람직한 유동화속도는 전 부하시에 $7\sim 9\text{m}/\text{s}$ 이나, $8\text{m}/\text{s}$ 로 하고 있다. 이 속도를 더 높혀준다면 EROSION에 대한 RISK가 커지고, 속도를 낮춰주게되면 유효한 TURNDOWN

율이 낮아지게 된다.

만일 EROSION 문제가 없다고 하면 9m/s 이상 유동화 속도를 올릴 수 있게 될 것이다. 하지만 RESIDENCE TIME은 줄어드는 대신 FURNACE의 CROSS-SECTION을 작게할 수 있고 제어성능을 증가시킬 수 있는 유리한 점이 많게 된다는 것을 유의해야 한다.

그런데 PARTICLE SEPARATOR 주위의 GAS 유동속도를 올려주게 되면 SEPARATOR의 SOLID 포집 효율은 다소 낮아지게 되며, 이러한 복합적인 이유로 8m/s 이하가 바람직하며 6~8m/s 사이가 최적조건으로 되어있다. 만일 유동화속도를 더 올리고 한편, 충분한 RESIDENCE TIME도 유지하자면, FURNACE의 높이를 더 증가시켜야 할 것이다.

FURNACE 내에서 최소부하시의 유동화속도는 BED MATERIAL의 최소 이동속도보다 반드시 커야한다. 그럼으로써 일정한 회전도가 확보되어지고 PARTICLE STORAGE내에서의 SOLID는 항상 운전대기 상태로 될수 있게 된다.

앞장에서 설명한 바와 같이 어떤 주어진 SOLID MASS FLUX에서 유동화 속도가 충분히 높다면 PARTICLE CONCENTRATION은 유동화 속도와는 사실상 독립관계에 놓이게 된다.

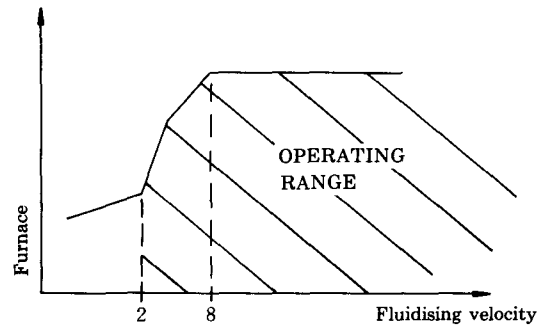
이 상태에서는 PARTICLE CONCENTRATION은 MASS FLUX만으로 조정이 가능하며 부하변동이나 유동화 속도와는 큰 관계가 없다.

만일 연료와 연소용공기가 일정비율로 공급된다면 (과잉공기율로서) TURN-DOWN이란 연료와 연소용공기가 감소하는 것을 의미하며, 이는 GAS의 감소를 가져온다.

그러므로 설계 유동화 속도를 높이면 높일수록 MASS FLUX만으로 부하를 조절하게 되는 LOAD 범위를 올릴 수 있게 되며, 이는 CONTROL 관점에서 유동화속도를 올려주는 것이 유리하다는 것을 말해준다.

부하에 따른 유동화속도의 변화는 선형적 관계이며, CIRCULATING BED에서의 최소유동화

속도는 2m/s 이상이 되어야 CIRCULATION MODE를 얻을 수 있다.



이렇게 제한된 운전 범위에서 볼때, 전 부하시에 설계유동화 속도는 8m/s가 되며, 과잉공기율을 변화시키지 않는다면, TURN-DOWN은 4:1이 된다.

예를 들면,

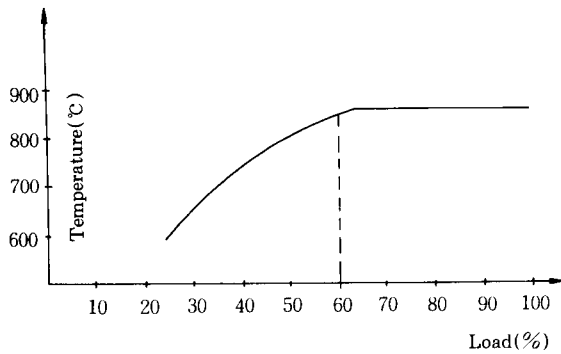
MCR시 과잉공기율이 20%일때는 유동화속도가 8m/s가 되고, 25% MCR시 과잉공기율이 20%일때는 유동화속도가 2m/s가 된다.

여기서 과잉공기율을 변화시킬 수 있다고 하면, TURN-DOWN도 증가시킬 수 있는바, 예를들면 다음과 같이 된다.

MCR시 과잉공기율이 20%일때, 유동화속도는 8m/s이고 23% MCR시 과잉공기율이 30%이면, 유동화속도는 2m/s이고 21.5% MCR시 과잉공기율이 40%라면, 유동화속도는 2m/s가 된다. 그런데, CIRCULATION MODE가 아닌 BUBBLING BED로서 운전한다면 유동화속도를 대폭 낮추어 운전할수 있으며, 최소 유동화속도는 약 0.5m/s로 정해져 있다.

5. 노내온도 배분(FURNACE TEMPERATURE DISTRIBUTION)

FURNACE 출구 GAS 온도가 BED 온도보다 낮게 감소하기 시작할때의 부하는 총괄 열수지상 필요로 하는 회전량에 전적으로 관계가 있다. 그러나, 개략적인 검토용으로 다음의 GRAPH가 유효하게 이용될 수 있는바, 여기서 BOT-



TOM BRD의 온도는 850°C일 경우를 나타낸다.

PARTICLE SEPARATOR의 첫번째 열에서의 GAS 온도상승은 통과시 MIXING 효과에 의해 기체상 연소로 얻어지며, 다음 순번에서는 차례대로 GAS 온도의 저하가 따르게 된다.

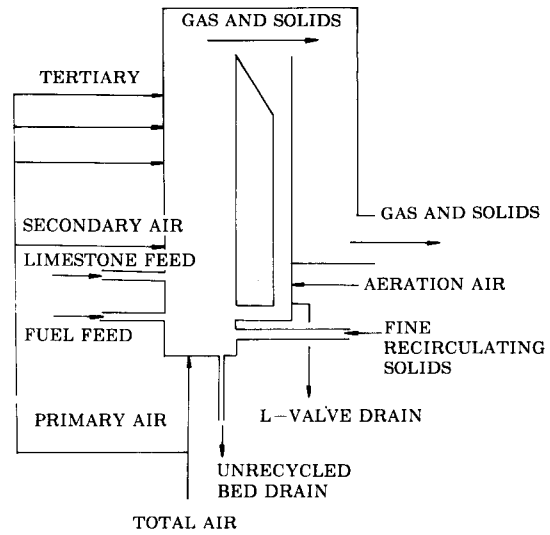
6. MASS BALANCE

예를 들면

INPUT ; FUEL FEED : 15400kg / H
 DOLOMITE FEED : 3225kg / H
 AIR FLOW : 154,000kg / H
 PRIMARY SOLID RECYCLE
 : 374,400kg / H
 SECONDARY SOLID RECYCLE
 : 6,000kg / H
 OUTPUT ; GAS FLOW IN FURNACE
 : 167,150kg / H
 SOLID FLOW IN FURNACE
 : 385,875kg / H
 유동화 속도 : 8m / s

이제 850°C에서의 DENSITY를 0.32kg / m³로 하면 노내에서 GAS FLOW AREA는
 $167,150 / (3600 \times 0.32 \times 8)$
 $= 18.1 \text{ m}^2 / \text{H}$ 가 되고,
 PARTICLE SEPARATOR에서의 SOLID FLOW RATE는
 $385875 / (3600 \times 18.1) = 5.92 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ s}$

이때 PARTICLE VELOCITY는 5.7m / s가 되고 FURNACE TOP에서의 PARTICLE CONCENTRATION은 0.0004가 된다.



7. HEAT LOSS

열 손실 계산에 있어서 구성인자는 다음과 같다.

- 1) 건가스(건조배기가스의 현열량)
 - 2) 연료내의 습분(연료중의 습분에 의해 배기가스에 포함된 습증기의 잠열과 현열)
 - 3) LIMESTONE의 습분
 - 4) H₂ 연소에 의한 습분(연료중의 수소에 의해 배기가스에 포함된 습증기의 잠열과 현열)
 - 5) 잔류물중의 가연성분(FLY ASH 및 BOTTOM ASH)
 - 6) 복사 및 대류열
 - 7) CALCINATION(MgCO₃, CaCO₃)
 - 8) 황화 감열반응(SULPHATION CREDIT)
 - 9) 연소공기 중의 습분(습도)
 - 10) ASH의 현열
 - 11) PARTICLE HOPPER류의 대류손실
 - 12) BOILER 제작자의 MARGIN
- 이외에도 저부하시에는 부가적 손실 및 복사열

손실이 증대된다.

열손실 계산은 특별한 규정이 없는 한 BOILER SYSTEM에 들어오는 AIR 입구온도(즉, AMBIENT AIR TEMPERATURE)를 기준으로 계산하여야 하며, SYSTEM 외부에서 STEAM AIR HEATER에 STEAM이 공급될 경우에는 이를 제외하고 SAH 출구 공기 온도로 기준한다. 이 기준온도는 효율에 영향을 미치게 되며 연료소비량에 큰 영향은 없다.

연료의 발열량 계측치는 국제적으로 25℃를 기준으로 하고 있다.

7-1. 잔류물 중의 가연성분(미연소 손실)

연소효율은 FURNACE의 높이를 올려줄수록 향상되며 이는 PARTICLE의 RESIDENCE TIME을 오래 유지시켜주기 때문이다.

특히 DUST COLLECTOR 등에서의 FINE PARTICLE에는 잔류탄소밀도가 매우 높아 이를 노내에 재순환시켜서 연소를 도모한다면 연소효율이 증가하는 것은 사실이며, 노내에 CARBON 성분이 많아지므로 CO 성분도 따라서 증가하게 된다. 반면에 이러한 재순환율을 증가 시킴으로서 BOILER 내에서 DUST LOAD의 회전이 따라서 증가되는 부담을 안고 있다.

실제로 노의 높이와 미연탄소 재순환과의 사이에는 주어진 연소효율을 달성시키도록 하는데 경제적인 BRAKE EVEN POINT가 있게 마련이다.

그러나 SOLID를 BED에 재순환 시킨다해도 연료중에 고형탄소 성분이 적을 경우에는 연소효율에 그다지 큰 영향은 없다.

이제 연료별 연소효율에 대해서 살펴보기로 한다.

연료가 목탄인 경우에는 연소반응이 매우 격렬해서 이 경우 노의 높이를 결정하는데 연료의 성상이 결정적인 요소가 된다. 실제 목탄경우, 충분한 연소 효과를 얻는데 필요한 노의 높이가 상대적으로 낮아질 수 있다.

다음은 각 연료별로 추천할만한 연소효율을 제시한 것이다.

정확한 불완전 연소 손실은 BOILER 출구

연료	MCR시의 연소효율(%)
ANTHRACITE	95
BITUMINOUS	97.5
SUB-BITUMINOUS	98
LIGNITE	98.5
PEAT	99.6
WOOD	99.8
PETROLEUM COKE	95
OIL	99.9
GAS	99.9

연도가스 중 CO에 의한 CARBON LOSS 및 배출된 SOLID의 연소손실 및 기타 SYSTEM 상 손실에 의해 산정될 수 있다.

따라서 총괄 연소 손실은 공급되는 연료의 전 탄소성분의 WEIGHT PERCENTAGE로서 표현할 수 있다.

이제 다시 정리한다면, 연소효율은 연소시 해리되는 연료의 발열량에 의해 다음과 같이 계산된다.

COMB. EFF, =

$$1 - \frac{\text{SYSTEM에서의(CARBON 손실열량} \times \text{CARBON 손실량)}}{\text{연료량} \times \text{연료의 발열량}}$$

여기서 SYSTEM에서의 CARBON손실량은 불완전 연소에 의한 CO 발생에 따른 CARBON 손실을 포함하게 되며, 이때의 반응을 위한 ENTHALPY 는 $CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 + 2,420kcal-$ / kg가 된다.

연소효율에 영향을 주는 인자는 다음과 같다.

1) PARTICLE SIZE

(연료크기, 파쇄도, 마모도)

2) 연소 반응도(휘발분, ASH 기타)

3) 온도 (800℃ 이하에서는 연소효율이 떨어진다.)

4) O₂(과잉공기율)

5) 노의 크기 및 노내 체류시간

6) 연료공급 및 배분방법

7) SOLID의 MIXING과 재순환율

8) SECONDARY AIR의 MIXING

9) CO 반응도

10) BOILER SOLID 배출방법

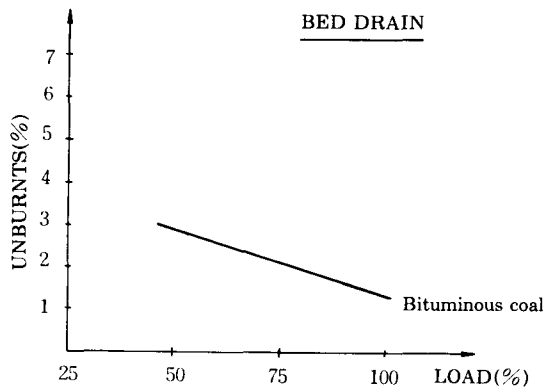
이제 미연분에 대해서는 다음과 같은 공식으로 나타낼 수 있다.

미연분(%) =

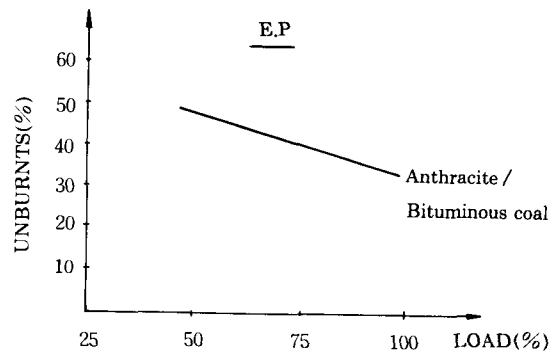
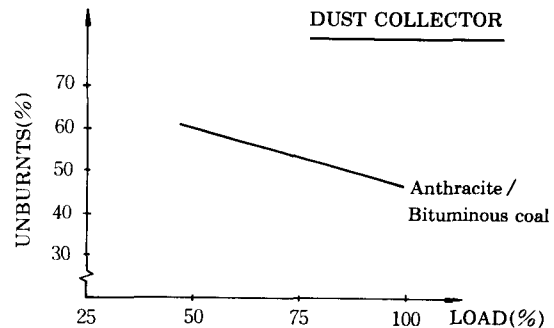
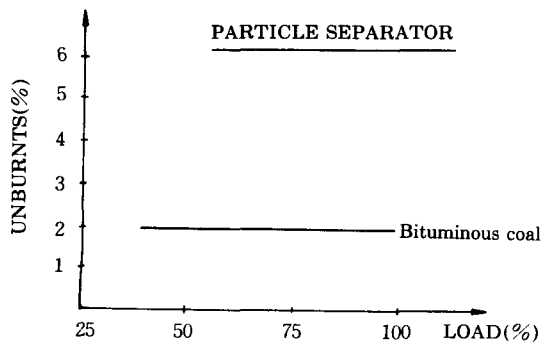
$$\frac{\text{DRAIN SAMPLE에서의 미연소분의 중량}}{\text{배출 SOLID의 전중량}} \times 100$$

연소효율의 계산에 있어 미연분은 7.88kcal/kg의 열량을 낼수 있는 CARBON으로 계산할 수 있으며, 이는 석탄 열량에 비하면 약 1.5~2%에 달하고 있다.

실제 설계에 적용하기 위한 기준을 다음표와 같이 제시한다.



노내에서 CARBON의 농도는 연료의 TYPE 과 크기에 따라 차이가 있다. 노내 BARBON 농도를 결정하는 것은 연료의 노출된 표면적과 관계가 깊다. 일반적으로 노내의 CARBON LOADING 은 연료의 휘발성분과 같이 감소하며 따라서 연료의 반응은 첫째 휘발분의 진행도와



최적 착화상태, 둘째, 불휘발분이 반응상태에 진입한 후 잔류탄소에 의해서 촉진된다.

연료 SIZE가 커질수록 연료반응성 면에서는 지연요소가 되고, 노내에서의 CARBON LOADING 의 증가를 가져오게 된다.

상기의 여러 그림에서 나타나듯이, 잔류물중의 가연성분은 ASH REMOVAL의 위치에 따라 차이가 있다.

7-2. CALCINATION AND SULPHATION

CALCINATION & SULPHATION에서 LIMESTONE 또는 DOLOMITE의 전반응은 등온과정이므로 열효율에는 부정적인 영향은 없다.

다만, EROSION 문제 및 경제적인 관점에서 가능한 최소화 하는 것이 바람직하다.

8. SECONDARY & TERTIARY AIR의 PENETRATION & MIXING

PETROLEUM COKE 같은 반응성이 낮은

연료에서는 문제가 되지 않으나, WOOD CHIP 같은 반응성이 있는 연료를 연소시킬 때에는 노내에서 미연 휘발성분의 팽창에 따라 "HOT SPOT" 현상이 발생하기 쉬운바, 이를 방지하기 위하여 SECONDARY AIR PORT 및 TERTIARY AIR 공급이 필수적이다.

이러한 2차 및 3차 공기는 노내 전부분에 미연 휘발성분 덩어리를 고르게 분포시키는데 사용된다. 이는 공기의 주입을 증가시키고, 단속적 공기를 증가시켜서 혼합시킴으로서 이루어진다.

특히, 건조 목재를 연소시킬 경우에는 CO 공해성분을 감소시키는데 TERTIARY AIR가 특히 유용하게 사용된다. 그러나 실제로는 목재를 연소시키는 상업용 보일러에서는 CO 규제치가 크게 문제시되지 않는것이 사실이다. 왜냐하면 보통 이러한 BOILER에서 CO치는 100PPM 정도로 유지할 수 있기 때문이다.

SECONDARY AIR의 속도는 그다지 CRITICAL 하지 않으나, 전 부하시에 최소속도는 40M/S 정도가 바람직하며, 목재연소시에는 전부하에서 이 속도가 100M/S 정도는 되어야 한다.

SECONDARY AIR의 주입효과를 향상시키기 위해서는 공급구멍은 가급적 크고, 숫자는 적은 편이 좋다. 주입 관통깊이는 공급구멍 직경의 약 10배 정도로 하고있다.

이차공기 PORT는 BUSSLE CAP의 꼭대기에서 1.20m 정도 상부에 설치하는 것이 좋다.

저부하시에도 소량씩 흘러넣어서 SECONDARY AIR PORT를 보호하여야 한다. 그러나 설계시 주의할 점은 와류가 생기지 않도록 하는 등, EROSION 문제에 대해 검토해 두어야 할 것이다.

9. PRIMARY, SECONDARY, TERTIARY AIR의 비율

PRIMARY, SECONDARY, TERTIARY AIR의 배분은 각 연료에 따라서, 또는 요구 공해 규제치에 따라 매우 깊은 관계가 있다.

노내에서 "HOT SPOT"현상이 있어 고온을 유지하게 되면 NO_x치가 올라라기 때문에, 연소 공기 배분은 이러한 "HOT SPOT"를 배제하도록 조정되어야 한다.

최초 설계 단계에서는 다음과 같이 배분 설계하는 것이 좋다.

즉, 25% 부하에서는 -PRIMARY AIR 80~100%

-SECONDARY AIR 0~20%로 하고

전 부하에서는 -PRIMARY AIR 25~60%

-SECONDARY AIR 40~75%로 한다.

노내에서 SECONDARY AIR PORT 아래 BOTTOM SECTION에 DENCE BED를 유지하려면 BOTTOM SECTION에서의 GAS 속도는 BED MATERIAL의 이송속도 보다 낮게 잡아야 할 것이다.

기존 BOILER에서 볼수 있는 노내 NO_x치를 저감시키기 위한 단계적 연소방법의 잇점을 CFB TYPE BOILER에서도 채택할 수 있다.

휘발성분이 많은 연료를 연소시킬 때, SECONDARY / TERTIARY AIR의 유량, 주입 및 혼합은 배기가스가 노밖으로 배출되기 직전, 휘발성분의 체류분의 대부분을 차지하고 있는 CO를 완전연소 시키도록 배려하여야 한다. 또한 노내에서의 열부하도 이 PRIMARY, SECONDARY AIR의 배분을 변화에 따라 바꿀수 있으며 이에 대해서는 다음에서 논하기로 한다.

<다음호에 계속>