

석탄을 알자

석탄의 생성, 석탄의 분류, 채탄법, 석탄분석 등 석탄일반에 대한 사항을 시리즈로 연재하여 석탄에 대한 이해를 돕고자 한다. 이번 호에서는 지면 관계로 7·8월 통합본에 수록되지 않은 석탄연소Ⅱ을 다루기로 한다.

1. 유동층 연소설비

석회석, 연료의 재, 모래 등 불활성 고체 및부분에 공기를 불어넣으면 고체들이 상하로 유동(또는 비등(沸騰))하는데, 이러한 부유·유동화된 고체들을 유동층(Fluidized Bed)이라 한다. 이 유동층 내에서 석탄등 가연물질을 연소시키는 방식을 유동층 연소(FBC, Fluidised Bed Combustion)라 한다.

1-1. 유동층 연소의 원리

- ☐ 연소로내 고체에 연소실 바닥을 통해 공기를 불어넣으면 물이 끓을 때와 같은 현상이 일어나면서 고체가 유동된다.
- ☐ 비등상태가 유지된 고체에 연료를 주입하면 유동층 내에서 연료가 고체와 신속히 골고루 섞이게 된다.
- ☐ 유동하는 고체 내에는 밀도차를 가지는 연료입자의 침하에 의한 연료 및 재의 순환이 일어난다.
- ☐ 유동층내 열전달은 전열면에 신속하고 균일하게 일어나므로 국부적인 열응력(熱應力)은 발생하지 않는다.

1-2. 유동층 연소 보일러

1-2-1. 개요

연소실내 불활성 고체의 유동·비등과 함께 연료(유연탄, 저품위 석탄, Petroleum Coke, 기타 모든 가연성물질)를 주입시켜 연소로 하부에서 상부까지

단계적인 연소를 시키는 보일러를 말한다.

1-2-2. 종류

가. 압력에 의한 분류

- Atmospheric Type(A-FBC Boiler) : 상압
- Pressurized Type(P-FBC Boiler) : 5-10kg/cm²

나. 가스 속도에 의한 분류

- Bubbling Type(B-FBC Boiler) : 거품식으로 가스유속이 느다.
- Circulating type(C-FBC Boiler) : 순환식으로 가스유속이 빠르다.

다. 유동층 연소의 장 · 단점

장점	- 광범위한 연료를 사용 (고, 저유황 유연탄 및 무연탄, Petroelum Coke, 저품위 석탄, 기타 모든 가연성물질) - 불활성 열매체(모래, 재, 석회석)의 유동에 의해 저질연료의 연소기능 - 석회석 주입에 의한 탈황이 가능(90%이상)하므로 별도 탈황설비 불필요 - 연소온도가 낮아 질소산화물(NO_x)의 발생이 감소 - 급격한 부하변동에 따른 응답이 양호 - 연료주입 설비가 간단 - 미분탄 연소 설비보다 동력소모 감소 - 다른 고체연료 보일러 보다 자동제어가 용이 - 재 용융점 이하(750-950℃)에서 연소되므로 슬러그 발생 감소 - 재래식 Fixed Bed Type(Stocker Boiler) 보다 연소효율이 증가(순환식98%, 거품식96%)
단점	- NO_x 발생은 일반적으로 적지만 그 이상 감소시킬 기술 미확립 - 충내입자가 상호 충돌하여 경(徑)이 적게 되며, 배가스와 함께 비산하게 되므로 장기적인 보충이 필요. 석회석의 경우는 서서히 탈황성능이 저하되므로 보충이 필요 - 부하 변동범위에 제한 - Boiler Tube의 Erosion, Corrosion 발생

2. 석탄의 연소성 장애요인

2-1. 석탄의 연소성

2-1-1. 개요

석탄의 연소성은 석탄이 연소되는 속도의 대소를 나타내는 것으로서 보일러의 설계나 연소방식 선정에 영향을 미치는 중요한 요소이며 주로 발열성, 연료비 및 전수분(全水分) 등에 따라 다르다. 그리고 연소성은 착화성 및 반응성과 상관관계를

가지고 있으며 일반적으로 연료의 착화성이 양호할수록 반응성이 크고 연소성도 우수하다.

착화성이란 연료를 공기 중에서 가열할 시에 착화의 난이(難易)을 나타내는 것으로서 일반적으로 착화에 필요한 최저온도인 착화온도가 낮을수록 착화성은 좋다고 말하며 이의 척도로서 착화온도(내지 착화점)가 사용된다.

그리고 반응성은 산화환경에서 연료의 화학적 성질에 지배되는 화학반응 속도의 대소를 나타낸다.

석탄의 연소과정은 일반적으로 다음의 4단계로 진행된다.

- ① 휘발분의 착화온도까지 가열
- ② 휘발분의 연소
- ③ 휘발분 연소열로 고정탄소의 착화온도까지 가열
- ④ 고정탄소의 연소

이중 연소과정이 가장 긴 것은 고정탄소의 연소이며 완전연소에 까지 걸리는 시간은 반응성에 좌우된다.

2-1-2. 연소성에 영향을 미치는 요인

가. 휘발분

석탄의 반응성은 휘발분과 밀접한 관련이 있다. 휘발분 함량이 높으면 가연성 가스가 많은 것으로 착화가 용이하여 반응성이 커지므로 연소시간이 짧아진다.

또한 휘발분이 적으면 가연성 가스의 부족으로 착화가 늦어져 반응성은 저하되고 연소시간은 길어져 미연탄소분 발생량이 많아지는 경향이 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 석탄의 미분도(微粉度)를 높이고 더 많은 연료를 공급하며 때로는 보조 연료(병커C유)를 사용한다.

나. 발열량

발열량은 고위발열량(Higher Heating Value)과 저위발열량(Lower Heating Value)으로 구분된다. 고위발열량은 연료의 완전연소시 발생하는 열량과 연소가스가 가지는 열량을 더한 전체 열량을 뜻하는 것으로 보일러에서는 연료의 완전연소시

발생한 열량, 이때 생긴 가스가 원래의 온도로 냉각되는 열량 그리고 가스 내에 함유된 수증기가 액화함으로써 발생하는 열량의 합을 말한다. 그러나 실제의 보일러에 있어서의 배기가스중의 수증기는 노점(露點)이하로 되지 않기 때문에 수증기의 잠열은 이용할 수 없다. 따라서 이러한 수분의 증발잠열을 주로 미국에서, 저위발열량은 유럽에서 사용되며, 우리나라에서는 일반적으로 고위발열량을 사용하고 있다.

다. 연료비

연료중 휘발분에 대한 고정탄소 비를 연료비(燃料比, Fuel Ratio)라고 하며 석탄은 탄화될 때 식물체에서 탈수가 되어 이탄(泥炭)이 되고 갈탄, 역청탄이 된 후 탈(脫)메탄 과정을 거쳐 무연탄이 되는데, 탄화가 진행되면서 수분, 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4)등이 방출되며 이때 석탄 속에 함유된 수소(H)와 산소(O)의 구성비가 감소되고 탄소함량이 증가되어 연료비가 크게 된다. 휘발분은 수소, 산소, 일산화탄소, 메탄 등 탄화수소 화합물로 구성되어있어 착화온도가 낮으므로 석탄이 노내(爐內)에서 가열되면 가장 먼저 방출되어 연소된다. 고정탄소분은 휘발분이 증발되고 난후 남는 가연성의 잔존물(殘存物)로서 탄화도가 높은 석탄일수록 고정탄소분이 많고 노내(爐內)에서 석탄의 온도가 어느 정도 올라가면 열분해가 시작되어 가스와 타르가 다량 발생한다. 이 온도를 분해온점(分解溫點)이라고 하며 저탄화도 석탄은 분해온도가 낮고 또한 휘발분이 많으므로 일시의 다량의 가스를 방출하게 된다. 이 때문에 공기의 공급이 부족하거나 연소실 온도가 저하되면 연기를 발생하기 쉽다. 그러나 적절한 공기량으로 연소할 경우, 연료비가 적을수록 고정탄소분은 적고 반대로 휘발분은 많아지므로 착화가 잘되어 연소성(燃燒性)은 그만큼 향상된다.

라. 전수분

석탄 내의 수분은 석탄 내부에 흡착 또는 응축되어있는 고유수분과 석탄입자 표면에 얇게 붙어있는 표면수분, 그리고 열분해에 의하여 방출되는 화합수분(結合水分)으로 구분된다.

보일러 연소시, 수분은 화염을 불안정하게 하여 연소성을 저하시킬 뿐만 아니라 증발잠열(蒸發潛熱)을 흡수하기 때문에 연소효율을 저하시킨다. 또한 수분을 많이 함유한 석탄은 저장 및 혼탄(混炭)설비에서 부착하거나 분쇄설비의 분쇄능률을 저하시키므로 충분히 건조(乾燥)되어야 한다.

마. 반응지수(Reality Index, T15)

반응지수란 석탄의 착화성을 수소 함량에 따라 정량적(定量的)으로 나타내는 것으로서 석탄시료를 광내 단열상태(斷熱狀態)의 공기중에서 가열할 때 산화로 인한 석탄시료 자체 온도상승률이 매분 15℃ 일때의 노내 온도를 말한다. 이 온도를 T15로 표시하며 이것은 낮을수록 착화성 및 연소성이 양호함을 의미한다.

2-2. 석탄회의 성상과 장애

2-2-1. 석탄회의 일반 특성

가. 회 성분

유연탄의 경우 대개 6-20% 정도이나 발전용 탄에는 40-60%정도 함유되어 있다. 석탄에는 여러 물질이 함유되어 있으며, 이중 약 95%가 Kaoline($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Pyrites(FeS_2), Calcite(CaCO_3)로 구성되어 있다. 이들 물질은 보일러에서 연소하지 않고 석탄회로 만들어져 전열면에 부착되거나 비회(飛灰, Fly Ash)로써 노 밖으로 배출된다.

석탄회는 회분중의 철분과 백운석(Dolomite)의 함량에 따라 역청탄형회(Bituminous Type Ash)와 갈탄형회로 분류되며 일반적으로 갈탄형회의 노내 오염성이 높다.

- 역청탄형회 : $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{MgO}) > 1$
- 갈탄형회 : $\text{FeO}_3/(\text{CaO}+\text{MgO}) < 1$

나. 석탄회 융점과 기화온도

석탄회에 존재하는 화합물의 융점과 기화온도를 나타낸 것으로서 기화온도가 융점보다 다소 높음을 알 수 있다.

화합물	융점(°F)	기화온도(°F)
SiO ₂	3,090	3,590
Al ₂ O ₃	3,680	6,350
Fe ₂ O ₃	2,660	
CaO	4,690	6,350
MgO	5,070	5,540
Na ₂ O	1,690	3,210
K ₂ O	930	2,690

특히 K₂O는 Na₂O보다 기화온도가 낮고 증기압이 높으므로 응축에 의한 부착회 생성량은 Na₂O보다 훨씬 많다. 석탄회는 산성성분(SiO₂, Al₂O₃, TiO₂)과 염기성성분(Fe₂O₃, CaO, MgO, NaO, K₂O)으로 구성되며 일반적으로 산성성분이 염기성성분 보다 함유량이 많을수록 융점은 높아진다. 회의 융점이 낮으면 노내에서 부착회의 생성량이 많아져 전열면으로의 열전달 저하 및 부식 등 각종 장애를 일으키므로 회융점(灰融點)은 가장 중요하다.

2-2-2. 석탄회의 장애

석탄이 보일러에서 연소하는 동안 석탄 내에 있는 이물질이 연소되지 않고 석탄회로 되어 그의 일부 또는 전부가 회융점 보다 높은 영역에서 용융된 상태로 가스흐름을 따라 배출되다가 보일러 튜브의 복사전열면에 응고, 부착되어 슬러그를 형성하고 또한 회성분 중 알칼리 및 휘발성 성분이 휘발하여 연소가스중의 비산회(Fly Ash)와 함께 과열기(過熱機), 재열기(再熱機) 등의 대류전열면(對流傳熱面)에 응축 부착하여 Fouling을 형성함으로써 전열면을 부식시키고 연소가스의 흐름과 전열면으로의 열전달을 나쁘게 하여 열효율 저하는 물론 보일러 튜브의 과열로 인한 과열사고를 일으킨다.

가. Slagging

☐ 노내 부착회 생성부위

석탄연소과정에서 연소실의 온도가 회의 용융점보다 높은 영역에서는 석탄회의 입자가 용융된 상태로 가스흐름을 따라 배출되다가 보일러의 수관벽 표면에 부딪쳐 급냉, 응집되어 수관벽에 부착 및 퇴적하는 현상을 Slagging이라고 한다. 이러

한 현상은 복사전열면(수관벽)의 열전달을 방해하므로 성능저하는 물론 심하면 운전제한 또는 정지를 유발하기도 한다. Slagging은 노내온도, 부착면의 성질, 회의 용점 및 용착특성 등 영향을 받지만, 일반적으로 회성분의 Base/Acid Ratio(B/A비), 회용점, 점도 등이 Slagging 성향을 판단하는 중요한 지표가 된다.

□ Base/Acid Ratio (B/A비)

보일러의 노내에서의 Slagging은 석탄회의 상선성분에 대한 염기성 성분의 비로 예측할 수 있으며 이의 관계식은 다음과 같다.

$$B/A = \text{Base/Acid} = (\text{Fe}_3\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$$

B/A비가 0.4-0.7 일때 회의 용점이 현저하게 낮아지며 Slagging이 강하게 나타난다. 또한 유황분 함량이 1%이상(건식기준)인 역청탄형 회의 경우에는 B/A비에 유황분 함량(S%)을 곱하여 이 값의 대소로 Slagging정도를 예측하기도 한다.

$$\text{Sulfur Slagging Index(Rss)} = B/A \times S$$

이 지표는 유황분이 1%이하(건식기준)인 아역청탄이나 갈탄에는 적용하지 않으며, Slagging정도는 Rss값의 크기에 따라 분류할 수 있다.

Rss	Slagging정도
0.6 이하	낮 음
0.6 - 2.0	중 간
2.0 - 2.6	높 음
2.6 이상	심 함

□ Fusion Slagging Index (Rfs)

Sub-bituminous Coal Ash나 Lignite Coal Ashdml 경우에 석탄회의 용점을 측정, Slagging정도를 예측할 수 있으며 Slagging index (Rfs) 산출에는 회의 Plastic slag 온도범위를 나타내는 IT 및 HT가 사용된다.

$$Rfs = (HTmax + (4 \times ITmin)) / 5 \text{ (}^\circ\text{C, 또는 }^\circ\text{F)}$$

단, HTmax는 산화 및 환원성 분위기에서 반구점(半球點)의 최대치이고 ITmin는 산화 및 환원성 분위기에서 최초 변형점의 최소치임

Rfs값의 크기에 따라 Slagging성을 분류하면 다음과 같다.

Rss <°C(°F)>	Slagging정도
1,345 이상 (2,450 이상)	낮 음
1,345-1,230 (2,450-2,250)	중 간
1,230-1,150 (2,250-2,100)	높 음
1,150 이하 (2,100 이하)	심 함

□ 점도

보일러의 노내에서의 Slagging 정도는 석탄의 점도와 온도와의 관계로 예측할 수 있다. 이 방법은 Slagging 정도를 예측하는 방법 중에서 가장 정확성이 높으며 어떠한 종류의 석탄회에서도 적용된다.

일반적으로 Slagging zone인 250-10,000 Poise 점도범위에서 Slagging이 주로 형성되므로 Slagging Index를 석탄회의 점도-온도 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

- Viscosity Slagging Index, Rvs = (T250 Oxide(°F) - T10,000 Red(°F)) / 97.5fs
- Viscosity Slagging Index, Rvs = (T250 Oxide(°C) - T10,000 Red(°C)) / 54.17fs

여기서 T250 Oxide는 산화적 분위기에서 점도가 250poise 일때의 온도이고, T10,000 Red는 환원적 분위기에서 점도가 10,000poise 일때의 온도이며 fs는 온도에 따라서 변화하는 인자로 온도에 따른 fs값은 다음과 같다.

온도	fs	온도[℃(°F)]	fs
1,038 (1,900)	1.0	1,371 (2,500)	4.1
1,093 (2,000)	1.3	1,426 (2,600)	5.2
1,149 (2,100)	1.6	1,482 (2,700)	6.6
1,204 (2,200)	2.0	1,538 (2,800)	8.3
1,260 (2,300)	2.6	1,593 (2,900)	11.0
1,316 (2,400)	3.3		

Rvs값이 커질수록 Slagging성은 커지며 Rvs값에 따른 Slagging성은 다음과 같다.

Rvs	Slagging성
0.5 이하	낮 음
0.5 - 0.99	중 간
1.0 - 1.99	높 음
2.0 이상	심 함

또한 T250이 높을수록 Slag 온도는 높아지고 Slagging이 낮아지므로 T250 으로서도 Slagging정도를 예측할 수 있다.

□ 기타 Slagging성 영향인자

• Dolomite % (Dp)

$$Dp = ((CaO + MgO)/(Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O)) \times 100\%$$

• Silica % (Sp)

$$Sp = (SiO_2/(SiO_2+Fe_2O_3+CaO+MgO)) \times 100\%$$

일반적으로 통상 35-90% 범위의 값을 가지며 Sp가 클수록 용융회의 점도가 증가하고 회용점은 높아진다.

• Iron / Calcium (Fe₂O₃/CaO) Ratio

이 비가 10-0.2일때 회용점은 낮아지고 3-0.3에서 더욱 낮아지며 1에 가까울수록 Slagging정도가 커진다.

CaO가 없는 상태에서 Fe_2O_3 는 Slag를 형성하지 않으며 Fe_2O_3 가 14%이상에서 CaO가 증가할수록 회용점은 낮아진다.

또한 Fe_2O_3 가 20%까지는 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ 비가 증가할수록 용점이 낮아지고 20~40%에서는 용융성의 변화가 적다.

• Ferric % (Fp)

$$\text{Fp} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11\text{FeO} + 1.43\text{Fe})) \times 100\%$$

• Alkali 분 (Na_2O , K_2O)

회성분중에 Na_2O 가 2%이상이거나 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 가 3.5%이상이면 Slagging성은 커진다. 이들 화합물은 대개 반응성이 높고 저용점의 Silicate를 잘 형성하기 때문이다.

• Silica/Alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) Ratio

이 값은 보통 0.8-4.0정도로서 Silica가 Alumina보다 더 많이 염기성 성분과 결합하여 저용점의 화합물을 형성하므로 Slagging성은 커진다. 또한 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비가 클수록 연화점(ST) 및 유동점(FT)은 낮아진다.

나. Fouling

석탄회중에 함유되어 있는 휘발분 성분 즉 Na_2SO_4 , CaSO_4 , Na_2O 등이 연소중에 휘발하여 연소가스중의 비회(Fly Ash)와 함께 대류전열면에 응축 부착하여 굳어지는 현상을 Fouling이라고 하며 이 현상이 일어나면 대류 전열면의 열전달을 저하시키고 연소가스의 흐름을 방해하게 된다. 이와 같은 현상을 예측하는 지표로는 Fouling Index, Na_2O 함량, Fouling Potential 등이 있다.

• Fouling Index (Rf)

$$\text{Rf} = (\text{Base}/\text{Acid}) \times \text{Na}_2\text{O}$$

주로 역청탄회에 적용하는 지표로서 이의 값이 클수록 대류 전열면에서의 Fouling정도가 높아진다.

Rf	Fouling정도
0.2 이하	낮 음
0.2 - 0.5	중 간
0.5 - 1.0	높 음
1.0 이상	심 함

· Na₂O

주로 갈탄회에 적용하는 지표로서 회성분 중 Na₂O 함량이 많을수록 Fouling성은 높아진다. Na₂O와 Fouling성에 대한 것은 다음과 같다.

Na ₂ O	Fouling성
2.0 이하	낮 음
2.0 - 3.0	중 간
3.0 - 6.0	높 음
6.0 이상	심 함

Na₂O외에도 K₂O는 반응성이 크므로 CaSO₄, MgSO₄와 반응하여 저융점 화합물을 형성하여 심한 Fouling을 일으킨다.

· Fouling Potential

주로 역청탄회에 적용하는 지표로서 회성분중에 Cl와 Na함량이 많을수록 Fouling Potential은 높아진다.

Na ₂ O	Na 함량(%)	Fouling Potential
0.1 이하	0.07 이하	낮 음
0.3 부근	0.2 부근	중 간
0.5 이상	0.33 이상	높 음

· Alkali 화합물

석탄 중에 함유되어 있는 Alkali 화합물은 활성알칼리와 불활성알칼리로 구분되며 활성알칼리는 단순무기염과 유기알칼리 상태로 있어 연소 중에 기화반응을 일으키고 응결되어 Fouling의 원인이 된다. 반면 불활성 알칼리는 흙이나 탄석질로 되어 있어 연소 중에 변화가 없다. 따라서 알칼리 화합물의 함량이 적더라도 활성알칼리의 비율이 많으면 Fouling을 일으킨다. 이들 알칼리화합물을 비교하면 다음 표와 같다.

Alkali의 종류	함유형태	성질 및 영향
활성 알칼리	1. 단순무기염 NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ KCl, K ₂ SO ₄ , K ₂ CO ₃ 2. 유기 Alkali R-(H,O)-C-Na(K)	Acetic acid(산소)에 잘 녹는다. 연소중 기화 반응 응결 화로 내 Slagging 및 고온부식 과열기 재열기에 Fouling
불활성 알칼리	흙이나 탄석질의 화합물(광물질) (Aluminium Silicates) Na ₂ Al ₂ Si ₆ O ₁₆ Na ₂ Al ₂ Si ₆ O ₁₆	Acetic acid(산소)에 안 녹는다. 연소중 흙이나 석질로 남는다. Slagging, Fouling이 없다.

- 집진성

미분탄 연소시 일반적으로 회분중의 20%는 보일러의 낮은 부분으로 낙하하고 나머지 80%가 배기가스와 함께 Fly Ash로 배출된다. 비회를 포집하기 위하여 집진장치를 설치하는데 발전소에서는 여러 종류의 집진장치(集塵藏置) 중에서 전기 집진장치를 사용하고 있다.

전기집진기(電氣集塵機)의 집진효율에 미치는 인자는 가스온도, 회분의 전지저항,

회의입도, 회분함량, 수분 및 미연탄소분 등 여러 요인이 있으나 회분의 전기저항이 집진효율에 가장 큰 영향을 미친다.

- 부식성

석탄연소 보일러에서의 부식(腐蝕)현상은 유황분과 알칼리성분을 많이 함유한 탄을 연소할 경우 발생하기 쉬우며 고온부인 과열기, 재열기의 가스 측에 고온 부식이, 저온부인 체탄기, 공기예열기에 저온부식이 발생한다.

유황산화물이 각종 금속에 부착될 경우 건조한 상태에서는 별다른 문제가 없으나 650-730℃의 반응해된 상태에서는 부식성이 강하게 나타난다. 그리고 각종 튜브의 금속온도가 550℃ 이하에서는 노내 유동가스의 온도와 관계없이 부식발생이 억제될 수 있으나 보일러 튜브의 금속온도가 550-600℃로 되고 가스온도가 1,100℃이상이 되면 부식이 용이하게 된다.

- 마모성

석탄회의 마모성(磨耗性)은 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 등 경도가 큰 성분의 함량에 따라 좌우되며 또한 석탄회의 마모량은 연소가스 중에 함유된 총회분함량과 연소(燃燒)가스의 유속에 따라 크게 좌우된다.

연소가스의 유속이 낮고 회분함량이 적을지라도 대류 전열면에서 가스유속의 부분적인 가속이나 회분의 부분적인 편류(偏流)현상에 의해 마모가 일어나기도 한다. 그러므로 석탄회에 의한 마모를 방지하기 위해서는 가스유속의 적절한 선정과 편류현상(偏流現狀) 방지 및 적절한 마모 방지판을 설치함이 바람직하다.

- 열전달 저하

보일러의 튜브에 석탄회가 부착되면 튜브로의 열전달은 저하된다. 특히 전열면과 부착회와의 사이에 Boundary Zone이 형성되면 전열면으로의 열전달은 저하되고, 열의 전달이 저하됨에 따라 보일러의 열효율저하는 물론 심한 경우 보일러 튜브의 과열로 인한 과열사고를 일으킨다.

2-3. 미연탄소분 (Unburned Carbon)

미분탄 연소시 불완전 연소에 의해 완전연소되지 않고 Ash중 남아있는 탄소를 말하는 것으로 연소전환율, 즉 반응시간, 유체 중 산소농도, 반응속도, 반응온도 등에 의해 좌우된다.

미연탄소분은 석탄의 분쇄도, 휘발분, 고정탄소 및 회분등과 관련되어 있는데 연료비가 낮을수록, 연소성지수가 클수록, 미분탄 입경이 작을수록 그 값이 낮아지며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U.C(\%) = (A+B)/2 \text{ (평균치)}$$

$$A = 10(\text{연료비})^2/\text{회분} \quad \text{※ 연료비} = \text{고정탄소}/\text{휘발분}$$

$$B = (4.434 \times 10^{-6} \times (C.I.)^2) - 0.037 \times C.I. \times 111.09$$

$$C.I. \text{ (Combustibility Index)} = \text{연소성지수, kcal/kg}$$

2-3-1. 미연탄소분 상승요소 및 저감대책

영향인자	발생원인	저감대책
연료비	연료비가 높은 석탄은 char의 겉보기 밀도가 높고, 반응성이 낮아 회분에 미연탄소가 증가	고정탄소 함유율이 적고 휘발분의 함유율이 높은 석탄 사용
산소함량 (O/C ratio)	산소함량이 작으면 반응속도가 작아 연소시 미연탄소 발생 → 산소함량이 많으면 가공율 및 내부 표면적이 커 반응속도가 큼	산소함량이 많아야함
회분	회분의 함유율이 크면 연소반응 촉진에 장애요인이 됨	연소장애가 없는 범위에서는 함유율이 적은 탄 사용
겉보기밀도	겉보기 밀도가 크면 연소반응 촉진에 장애요인이 됨	겉보기 밀도가 작을수록 연소반응이 촉진
입자팽창율	석탄입자의 팽창율이 작으면 반응 표면적이 감소하여 연소반응 속도가 작아져 미연분 발생	석탄입자 팽창율이 클수록 반응표면적이 증가하여 연소반응 속도가 커짐
입자크기	입자크기가 크면 작은 입자에 비해 연소속도가 작아 미연탄소가 많이 함유됨	미분기 미분도 증가시킴

2-3-2. 효율에 미치는 영향

가. 미연탄소 손실

☐ 연료중 가연성 성분이 완전 산화(酸化)하지 못한 경우 발생하는 미방출 열

에너지가 미연탄소 손실이 되며 이 손실은 연료의 성상, 회분함량, 연료설비, 노의 설계내용 및 과잉공기량, 석탄의 미분도 등 운전조건에 따라 광범위하게 변한다.

☐ 미연탄소 손실은 공기량의 증가로 감소되며 실제로 노내에 공급되는 공기량은 완전연소를 위해 이론공기량 보다 많은 공기를 공급한다.

☐ 과잉공기율이 낮아지면 미연탄소 손실이 증가하고 과잉공기율이 높아지면 배기가스손실이 증가함. 양 손실을 더한 전체 열손실은 최적 과잉공기율 (Mo)일때 최소로 되며 이때 보일러 효율은 최대가 된다.

2-3-3. 화염온도와 발전효율에 미치는 영향

☐ 노내 상부(과열기, 재열기)의 온도가 높을 경우는 Spray water량 증가로 발전효율이 감소한다.

☐ 휘발분이 높은 탄의 경우, 화염이 버너 주변에서 형성되어 W/W튜브의 온도 저하 및 미연탄소분 증가 가능성 내포

3. 혼탄연소

3-1. 개요

☐ 기존 석탄발전소에서 사용되는 유연탄은 종류가 많고 그 성상에 따라 연소 특성이 상이하게 됨

☐ 석탄의 혼합사용은 탄의 결점을 서로 보완하여 연소조건을 향상시키기 위한 것으로, 연료비 조절에 의한 연소성 개선, Ash량 조절에 의한 집진성 및 회 처리능력 개선, 환경오염물질 (SOx, NOx)제어, Handling 용이 등 장점을 갖고 있음.

3-2. 혼탄 방법

- ☐ 저탄장 혼합 : 혼합연소하고자 하는 2종류 이상의 석탄을 층별로 쌓는 방법으로 혼합비의 정확성을 기하기는 어렵다.
- ☐ Belt 혼합 : 분리 저장된 별개의 Pile이나 Silo에서 동시에 층별로 쌓는 방법으로 콘베아 Belt나 중계 Hopper에서 혼합되는 혼합비를 정확하게 조절할 수 있다.
- ③ Mill 혼합 : 별개의 Bin에서 급탄시 혼합하는 방법으로 혼합비를 정확하게 조절할 수 있다.
- ☐ 노내 혼소 : 별개의 Bin, Mill, Burner를 사용하여 연소중에 혼합되는 방법으로 혼합비를 정확하게 조절하기는 어렵다.

3-3. 혼탄 연소시 고려사항

항목	상세내역	기준치
연소성 지수 (Combustibility Index)	- 석탄의 연소상태를 나타내는 기준으로 연소성지수가 클수록 화염 상태가 양호함 (3,000이상이면 보조연료 없이 양호함) - 발열량, 휘발분, 회함량에 따라 변화 - 계산식 $C.I = (\text{고위발열량/연료비}) \times (115 - \text{Ash}\%) \times (1/105)$ $\text{연료비(Fuel Ration)} = \text{고정탄소} / \text{휘발분}$	양호 : 3,500kcal/kg이상 보통 : 3,000-3,500kcal/kg 불량 : 3,000kcal/kg이하
미연소탄소분 (Unburned Carbon)	- 미분탄연소시 완전연소 되지 않고 Ash 중에 남아있는 탄소 - 연료비가 낮을수록, 연소성지수가 클수록 미분탄 입경이 작을수록 감소함 - 계산식 $U.C = (A + B) / 2 \quad [\text{평균치}]$ $A = 10 \times (\text{Fuel Ratio})^2 / \text{Ash}(\%)$ $B = (4,434 \times 10^{-6} \times C.I^2 - 0.037 \times C.I + 111.09) / 10$	양호 : 0.059이하 보통 : 2.2-5% 불량 : 0.059이상
집진성	- Fly Ash중 Particle Size Distribution 과 전기저항(Resistivity)과 관련 - 계산식 $\text{Resistivity Factor} = 1 / \text{Conductivity Factor}$ $\text{Conductivity Factor} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO})$	양호 : 0.059이하 불량 : 0.059이상

항목	상세내역	기준치
Slagging 성 (RB/A)	- 석탄이 노내에 연소할 때 용융된 회분이 복사열을 받는 회로벽 및 관전열면에 부착하여 축적되는 현상으로 열전달 방해를 야기시킴 - 노내온도, 부착면 성질, 회용점 등에 영향 - 계산식 $RB/A = \text{Base/Acid}$	낮음 : 0.5미만 중간-높음 : 0.5-1.0 심함 : 1.0이상
Fouling 성 (Rf)	- 석탄회중에 포함되어 있는 휘발성 성분인 Na_2SO_4 또는 NaO 등이 연소중에 휘발하여 대류전열부에서 탄의 입자에 응축되어 튜브 전열면에 부착, 응고되는 현상 - 계산식 $Rf = (\text{Base/Acid}) \times \text{Na}_2\text{O} (\%)$	낮음 : 0.2미만 중간 : 0.2-0.5 심함 : 0.5이상
질소산화물 (NOx)	- NOx는 대부분 NO와 O_2 형태로 배출되며 석탄중의 질소함량 (Fuel NOx)와 관련됨 - 연료의 Fuel NOx는 배출 NOx의 60-80%를 차지함 - 계산식 $\text{NOx}(\text{ppm}) = 10/0.1(\text{N}-\text{No}) - \text{K}(\text{FRo}-\text{FR}) + \text{NOxo}$ $\text{N} : \text{시료중의 질소함량}(\%)$ $\text{No} : \text{설계탄중의 질소함량}(\%)$ $\text{ER} : \text{시료탄의 연료비}$ $\text{K} : \text{상수}$ $\text{연료비 } 1.6\text{이상} = 50$ $\text{연료비 } 1.6\text{이하} = 80$ $-\text{NOxo} : \text{설계탄의 NOx발생치}(\text{ppm})$	양호 : 240미만 보통 : 240-300 불량 : 300이상
분쇄도 (HGI)	- Mill의 분쇄능력을 나타내며 높을수록 좋음 - HGI가 낮으면 Mill의 부하를 증가시키며 미분도가 감소됨 - 계산식 $\text{H.G.I} = 13 + 6.93W \quad (W: 200\text{mesh통과분})$	양호 : 65이상 보통 : 48-65 불량 : 48미만

4. 석탄 이용기술

4-1. 석탄유체화 혼합연료

4-1-1. COM (Coal-Oil Mixture : 석탄-중유 혼합연료)

COM의 종류에는 미분탄(微粉炭)을 중유와 50:50으로 혼합한 미분 COM과 유

체화하여 수송, 취급한 후 연소시키기 전에 탈유(脫油)하는 조립 COM 및 석탄에 기름을 첨가하여 탈회한 탈회 COM 등 세 유형이 개발 중에 있다.

이중 가장 일반적인 것은, 미분 COM으로서 이것은 중유에다 200mesh를 통과한 70% 정도의 미분탄 또는 미분 코크스를 혼합 분산 시킨 것으로 중유의 장점과 석탄의 경제성을 겸한 연료이다.

COM의 특징은 가격이 저렴하고 용적당 발열량이 크며 저장, 수송, 연소 등이 중유와 같다. 그러나 점도가 높아 예열온도가 높아야 하고 현탁상태가 파괴되기 쉬우므로 오랫동안 보존할 수 없는 결점이 있다. 또한 COM의 발열량, 비중, 회분함량, 화성분함량 등 여러 성질은 석탄과 중유의 혼합비에 따라 달라진다.

□ 석탄, 중유 및 COM의 특성비교

항목	석탄	중유	COM
상태	고체	액체	액체
발열량(kcal/kg)	6,700	10,300	8,500
비중	1.35	0.95	1.15
점도(CP.70℃)	-	75	1000-2000
회분(Wt%)	15	0.02	7.5
황분(Wt%)	10	1.5	1.25

4-1-2. CWM(Coal Water Mixture : 석탄-물 슬러리)

COM의 중유대신 물을 사용한 것으로 석탄 70%, 물 30%의 비율로 고농도 슬러리화한 연료이다. 석유와 비슷하여 취급이 쉽고 보일러의 부하(負荷) 추종성도 석유와 비슷하다. 그러나 용적당 열량이 낮고 부피가 커지며 석탄입자에 의한 펌프, 밸브, 버너 등의 마모가 생기는 단점이 있다.

환경 면에서는 석유수송 및 저장시에 우려되는 자연발화, 탄진비산 등의 문제가 없고, 석탄보다 NOx 발생량이 적다. 또 탈회를 하게 되면 회처리량도 적게 되고 유황분의 일부가 제거되기 때문에 분진, SOx의 발생량이 미분탄보다 적게 발생하게 되는 장점이 있다.

4-2. 석탄의 가수화 연료

4-2-1. 원리

천연고분자인 석탄의 화학결합을 단결시켜 CO_2 , H_2 , CO , 등의 작은 가스상 분자로 전화(轉化)한 것이다. 발전용 석탄가스화는 가스화로에서 열분해(전류)작용에 의한 가스화와 함께 생성코크스(건류탄)를 가스화한 완전가스화 반응이다.

석탄가스화는 고온에서 가스화제와 반응시키는데, 이때 가스화제로서 공기를 사용하면 CO_2 , H_2 , CO , N_2 를 주성분으로 하는 발열량 $800\sim1,500\text{kcal/Nm}^3$ 정도의 중칼로리 가스를 생성시킨다. 이 가스를 용매하에 메탄화하면 $8,000\sim10,000\text{kcal/Nm}^3$ 의 고칼로리 가스로 된다.

4-2-2. 석탄가스화 복합발전

석탄가스화에 의한 가스-증기 복합사이클 발전방식은 가스화로의 종류에 따른 가스화 공정과 열회수(熱回收) 공정에 다른 다양한 방식들이 연구되고 있다. 석탄가스화 복합발전의 기본원리는 석탄을 가스화 하여 생성된 가스를 가스터빈 발전기에 사용하여 발전하고, 가스화과정에서 생성되는 열과 가스터빈 추기열을 회수하여 증기터빈 발전기에 이용하도록 하는 2단계 발전시스템이다. 이 시스템은 미분탄 화력에 비해, 발전효율이 약 3-5% 정도 높으며 분진, SO_x 의 배출량이 적고 온배수량(溫排水量)도 약 30% 감소되므로 환경대책면에서 유리한다. 그리고 재래식 미분탄 연소발전에 비해 가동시간이 적게 걸리는 등 경제면에서도 유리하다.

이 때문에 동 발전시스템은 다음 세대 석탄이용의 주력 전원기술(電源技術)로서 기대되며 각국에서 기술개발이 진척되고 있다. 해외에서는 독일에서 석탄가스화 복합발전소가 약 15년전 건설, 운전되고 있는 것을 비롯하여, 1984년 미국에서 $1,000\text{t/d}$ 의 석탄가스화도로 120MWD 를 발전하는 플랜트를 건설, 운전하고 있다.

5. 열병합발전 (COGENERATION)

5-1. 개요

열병합발전은 전기와 열을 동시에 발생시켜 필요한 곳에 공급 사용하는 시스템으로서 그 역사는 발전소에서 발생한 증기를 이웃 건물(주택, 공장)에 배관망을 통하여 공급했던 1875년으로 거슬로 올라간다. 당시 원동기는 스팀엔진으로 직류발전기를 사용하였으며 배기는 대기방출하는 상황이었기 때문에 이를 회수하여 난방에 사용하게 되었다. 당시 송전기술이 발전하지 못하여 발전소는 도시 혹은 공장 내에 건설되었기 때문에 배열 이용이 용이하였다. 그 후 1884년 De Lavel, Parsons 스팀터빈이 발명된 이후부터 유럽지방에서는 지역난방(地域暖房)을 적극 이용하게 되었다.

1920년대 이후 도시인구 집중에 의한 공해방지, 경제성장에 의한 산업체 경영관리의 합리화, 쾌적한 주거환경의 조성 등으로 Cogeneration 기술은 점차 성장하여왔다.

· 열병합발전(Combined Heat & Power)

일정규모의 공업 단지를 하는 것과 단위 산업체에 국한시켜 이용

· 지역냉난방(District Heating & Cooling)

주거단지 및 업무지역을 포함, 광역화하여 발전, 냉난방 및 급탕을 자체 공급

· 분산형 Cogeneration

송전손실을 줄이고 발전배열을 함께 이용하여 호텔, 병원 등에 이용·확산

	공익성	환경보전	경제성	에너지 유효이용
지역냉난방	○	○	△	○
열병합발전	×	○	○	○

□ 준립요건의 구비

가상조건, 열수요밀도, 주택구조, 국민의 생활수준, 공업기반 조성정도, 열원의 확보상태, 국가정책 지원, 기술개발의 수준

□ 기대효과

에너지 절약(열원 설비효과 향상), 주거환경 개선(도시미관 등), 설비 집중화로 시설용량 감소, 운영비 절감, 공해감소 및 재해 방지

5-2. 연혁

유럽에서는 19세기 후반부터 이미 지역규모로 열병합발전(熱併合發電)이 실시되어, 1880년에 건설된 서독 Hamburg의 발전소에서 1893년 시청사로 증기를 공급한 것이 유명하다. 유럽의 열병합발전은 일반적으로 증기터빈(추기 또는 추기복수)을 원동기로 하고 발전규모도 104 KW급으로 열 공급을 도시단위로 하고 있다. 미국은 디젤엔진, 가스엔진, 가스터빈을 원동기로하고 발전규모는 103KW급으로 열 공급은 단위건물 또는 단지규모 정도로 하고 전체적으로 소규모였다. 본격적으로 열병합발전 지역난방이 절리 실시된 시기는 세계 1차대전 이후로서 1920년대에 헝가리, 네덜란드, 덴마크, 프랑스, 소련, 캐나다, 체코 등 여러 나라에서 실시되었다.

프랑스의 경우 파리, 리옹 등에 대규모 지역난방이 실시되고 있는데, 파리는 1925년에 개시되어 운영은 파리 도시간방공사(CPCU)가 운영하며 전력공사(EDF) 산하의 도시폐기물처리공사(TIRU)로부터 폐열 및 EDF의 열병합발전 배압터빈으로부터 증기를 공급받는다. CPCU는 Base Load용으로 진개소각폐열을 사용하였고, 1968년말의 공급열량은 1,200Gcal/h였다. 한편 공업콤비나트에서의 열병합은 소련이 시초로서 많은 공업지대의 콤비나트방식으로 건설되어 소련공업의 기본형식이 되었다. Industrial Complex로도 칭하며 콤비나트는 1개 지역 내에서 기술적 필연성에 의하여 연결되는 기업집단이다.

일본에서 제 2차 세계대전 이전에 “아사히 가세이”의 전략-화학 콤비나트 등이 시작되어 전후에 많이 보급되었다. 콤비나트의 유틸리티로서 다량의 물(해수포함), 증기, 전력 등이 필요하나, 종래와 같이 각 공장이 그들의 설비를 개별로 건설하는 것 보다 공동의 유틸리티 공급이 고려되어 공동 수전, 공동발전, 공동자가용 발전회사가 성립되는 경향으로 나타났다.

지역냉방은 1962년에 미국에서 시작되었는데, 이는 이미 개별냉동장치가 상당히 보급되었다는 배경 하에서, 동부지방에서 개시되었다.

도시쓰레기 소각처리는 이미 100년 전에 유럽지역에서 시작되었고, 원래 환경보존 및 공해방지 목적에서 진전되어 왔다. 그 후 국제적 에너지 자원의 재평가가 중요시됨에 따라 1950년을 전후하여 소각에서 발생하는 잉여열을 활용하는 장치 개발 및 플랜트의 건설이 보급 촉진되어 여러 형태로서 쓰레기 소각로를 이용한 열병합 지역난방 시스템이 유럽, 미국, 일본 등에서 사용화되었다.

구미에서의 본격적인 cogeneration은 세계 2차대전 종전 후 각 국가들이 전쟁 피해의 복구와 뒤이은 경제성장에 따른 공업기반의 확충과 국민소득의 증대에 따라 사회경제적 측면에서 활발하여졌다. 일본은 1930년대에 이미 중화학공업의 확장에 따라 비료, 철강 등 산업체에 열병합플랜트를 세워 가동하였다. 세계 2차대전후 초토화된 국토의 재건과 경제부흥에 힘입어 세계경제 10위권에 들 무렵인 1970년을 기점으로 센리 신도시의 지역난방을 시작하여 오사카 만국박람회, 삿포르 올림픽을 계기로 우후죽순 격으로 지역난방 시스템이 보급되었다.

5-3. 우리나라의 열병합발전

우리나라의 경우는 울산석유화학 공업단지에 에너지 콤비나트의 건설이 1970년에 등장하였으며, 지역난방으로서는 1987년 7월에 가동이 시작된 목동신시가지의 열병합 플랜트가 처음이다. 1970년대 석유위기를 맞아 산업계에서는 유류폭등으로 수출에 큰 영향을 받았으며 에너지 다소비산업체는 열병합발전 플랜트에 관심을 갖게 되었으나, 지역난방 시스템에 대한 실시는 이보다 늦게 이루어져 전술한 서울 목동지역에 적용되었다. 이보다 앞서 쌍용양회 한국종합화학(충주비료)이 산업체로서는 1960년과 1964년에 처음으로 400KW, 10,000KW급 열병합발전 시스템을 도입하였다. 한편 열병합발전 지역난방 시스템은 1976년 인구 100만의 행정수도 도시계획에 그 개념을 도입 기본설계를 실시한 것을 비롯하여 한국동력자원연구소, 한국과학기술원 등 연구기관과 외국 전문기술용역단에 의하여 여러 차례 본 사업의 타당성을 보고하였다. 또 몇년전부터 기존 발전소를 개조하여 울산시, 여천시 그리고 포항시 등의 지역난방과 에너지 콤비네이션시스템을 반월, 이리단지에 추진하였다.