

석탄 회분의 Slagging/Fouling 예측

이시훈, 박주식, 최상일, 손용권

한국에너지기술연구소

Prediction of Slagging/Fouling Propensity of Coal Ash

Si-Hyun Lee, Chu-Sik Park, Sang-Il Choi, Eung-Kwon Shon

Korea Institute of Energy Research

Abstract : In recent years, significant advances have been made in the development of methods to predict ash behavior in utility boilers. This paper provides an overview of methods used to assess and predict ash formation and deposition. It has discussed some of the key problems associated with the formation and deposition of ash during the combustion of pulverized coal. Although considerable progress has been made in understanding of the fundamental mechanisms of ash formation, transport, growth, and strength development, there is still much work to be done. There is a need to develop quantitative relationships between the characteristics of the entrained ash and the physical properties of ash deposits that influence deposit growth, strength development, and cleanability. Also data from bench-scale, pilot-scale, and full-scale units are needed in order to determine operating conditions which will minimize deposition problems, maximize efficiency, and reduce emissions.

1. 서론

석탄내에 함유되어 있는 무기물들은 연소과정에서 보일러의 수관벽에 용착되어 열전달을 막아 발전효율을 저하시키고 비산재를 형성하여 대기 및 토양을 오염시키는 등의 문제를 갖고 있다.

석탄내의 무기물을 대상으로 하는 연구의 궁극적인 목적은 다음과 같다. 용착속도(deposition rate), soot blowing의 주기, soot blowing후 열전달 회수율 그리고 용착물의 누적에 의한 부하조절

점 등을 연소조건과 무기물 조성의 함수로 표현하는 것이다. 이를 위해서 지금까지 많은 연구결과가 발표 되어왔다. 다양한 석탄을 대상으로 ASTM 회분제조방법으로 회분을 만들어(이하 ASTM 회분) 조성을 분석하고 용융온도 및 점도를 측정하여 상관관계를 만들고 관계식 등을 발표하였다[1-5]. 이러한 연구는 오랫동안 계속되었으며 결국 석탄 등급에 따라 용융성 및 흐름성을 크게 구별하는 몇가지 지수들이 개발되었다[6]. 이러한 지수들은 석탄을 사용하는 발전용 보일러에서 용착성향을 예측하

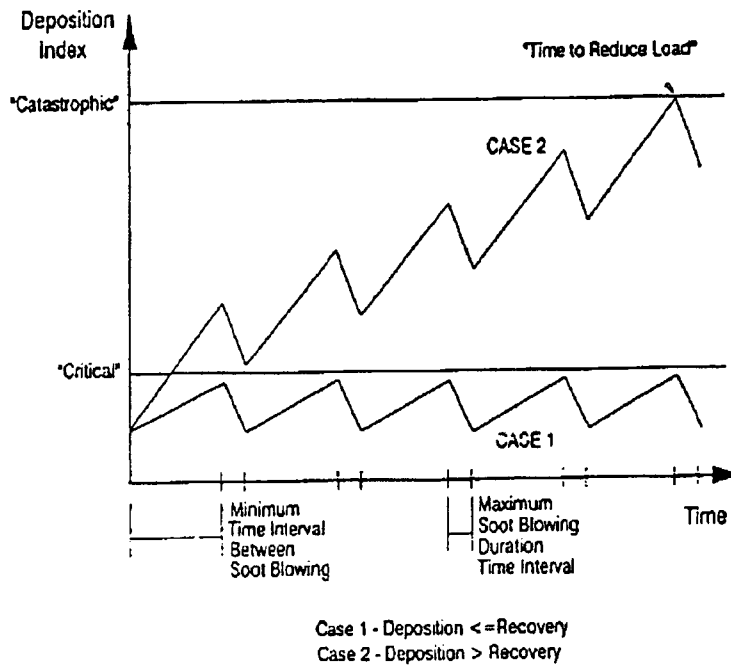


Figure 1. Deposition index versus time for ash deposit growth in utility boilers⁷⁾.

는 기본적인 도구로 현재도 사용되고 있다.

그러나 ASTM 회분 예측방법은 석탄 회분을 용융성에 따라 크게 구별짓는 역할은 하였어도 보일러내에서의 회분의 용착거동을 정량적으로 표현해 주지는 못하고 있다. 이유는 1) ASTM 회분이 750℃에서 약 7-8시간동안 만들어진 회분이기 때문에 보일러의 연소과정에서 형성된 회분과 다르고 2) 용착은 무기물 각 입자의 거동에 지배되는 미시적인 현상이지 ASTM 회분의 조성과 같은 bulk property에 의해 예측될 수 있는 현상이 아니라는 것이다.

결국 ASTM 회분예측방법이 잘못 예측하는 경우가 많았으며, 보다 정량적인 자료를 도출하기 위해 연소과정에서의 무기물의 전이과정 추적, 용착 실험용 장치개발 등 일련의 연구가 최근에 활발하

게 수행되고 있다[7]. 이러한 작업이 계속 진행되어 용착거동에 대한 모델이 개발되고 모델들이 실험적으로 입증되면 용착의 문제를 최소화 하고 비산재 배출을 최소화 하며 보일러 효율을 최대화 하는 연소조건이 석탄에 따라 찾아지게 될 것이며 나아가서는 회분의 활용 분야에도 결정적인 역할을 담당하게 될 것이다. 본 고에서는 이러한 일련의 작업들에 대한 소개와 함께 연구개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 슬레깅과 화올링

Figure 1에 발전용 보일러에서 회분의 용착시간과 용착지수(deposition index)와의 관계를 나타내었다. 회분의 용착속도가 soot blowing에 의한 열

전달 회수율보다 작거나 같으면 보일러는 정상적으로 연속운전이 가능하다(Case I). 그러나 Case II와 같이 용착속도가 인전달회수율보다 커지게 되면 엔진가는 부하조절이 불가피하게 된다. 또한 이때에 수관벽에 누적된 용착물은 오랜시간동안 고온을 경험한 상태이기 때문에 매우 견고하여 일반적인 soot blowing으로는 제거되지 않는다.

슬레깅과 화울링은 독립적으로 문제를 야기시키기 보다는 서로 연결되어 문제를 만든다[8,9]. 로브에 형성된 슬렉은 단일체로서의 역할을 하게 되어 로배출가스온도(FEGT-Furnace Exit Gas Temperature)를 증가시키는 결과를 가져오게 된다. FEGT가 증가하면 용융된 입자가 그대로 로를 빠져나가 superheater 튜브에 다시 슬렉을 형성하게 된다. 튜브들 사이에서 슬렉이 형성되고 이들이 연결되는것을 방지하기 위해 튜브는 18-36" 정도의 간격으로 배열되어 있다. 이렇게 튜브들 사이에서 형성되는 슬렉을 bridged slag이라 하는데 이들은 주로 sintered(부분용융상태) 또는 vesicular(sintered 슬렉보다 많이 용융되었으나 내부에 많은 pore를 포함하고 있는 슬렉) 형태로 형성된다. 이러한 슬렉들은 배출가스가 빠져나갈수 있는 단면적을 감소시켜 배출가스의 유속을 증가시키고 따라서 튜브면에서의 충돌 및 다른 입자들과의 충돌로 인해 용착 및 응집체를 형성하게 된다.

다음단계인 대류열전달영역에서 형성되는 용착을 화울링이라 한다. 화울링 용착이 형성되는 근본원인은 배출가스의 황산화물이 회분중의 알칼리 성분들과 결합하여 alkali sulfates를 형성하므로써 야기되어진다. 이들 alkali sulfates들은 집착성을 갖고 있어 비산재와 결합하게 되는데 이들의 대부분이 reheater나 economizer 등에 용착을 형성하게 된다. 배출가스가 로의 대류열전달 영역을 빠져나가는 온도는 260 - 430°C 정도이다. 이 온도에서 배출가스로부터 응축된 황산이 비산재와 결합하여

acid smut을 형성하여 결국 air heater 부분에서 다시 용착되는데 이를 저온 화울링이라 한다. 이러한 용착은 가스 또는 공기의 흐름을 방해할 뿐만 아니라 보일러 주요부분을 부식시키게 되어 또한 문제를 야기시킨다. 일반적으로 석탄내의 무기물 중에서 약 20-40%는 보일러의 내부벽에 용착되거나 bottom ash로 배출되고 60-80%는 비산재가 되어 배기가스와 함께 빠져나간다.

3. 무기물의 용착메카니즘

3.1 물리적 전이

무기물들이 회분을 형성하고 열전달면에 용착되기까지는 다양한 전이과정을 겪는다. 이러한 전이과정은 원탄내의 무기물의 조성 및 입자크기에 의해 지배되며 또한 연소조건 즉, 분위기 및 온도등에 의해 전이과정의 경로가 바뀌기도 한다.

회분으로부터 야기되는 문제들은 결국 석탄내 무기물들의 양, 입자크기 그리고 이들의 결합상태와 연소조건에 따라 달라질 것이다. 석탄내 무기물들은 여러형태로 석탄내에 존재하게 된다[7]. 유기물질과 결합된 형태로 존재하거나(organically associated), 석탄 matrix내에 존재하거나(included), 석탄 matrix와는 관계없이 따로이 존재하는(excluded) 경우등으로 나눌 수 있다. 대부분의 석탄에서 발견되는 주요 무기물들은 silicates, carbonates, sulfides, sulfates, oxides 그리고 phosphates 등인데 CCSEM(Computer Controlled Scanning Electron Microscope), chemical fractionation, gravity fractionation, low-temperature oxygen plasma ashing방법등으로 분석이 가능하다.

연소과정에서 이들 무기물들은 다양한 물리, 화학적 전이를 거쳐 기체, 액체 그리고 고체등의 회분중간체(ash intermediate)로 전이되는데 이들 중

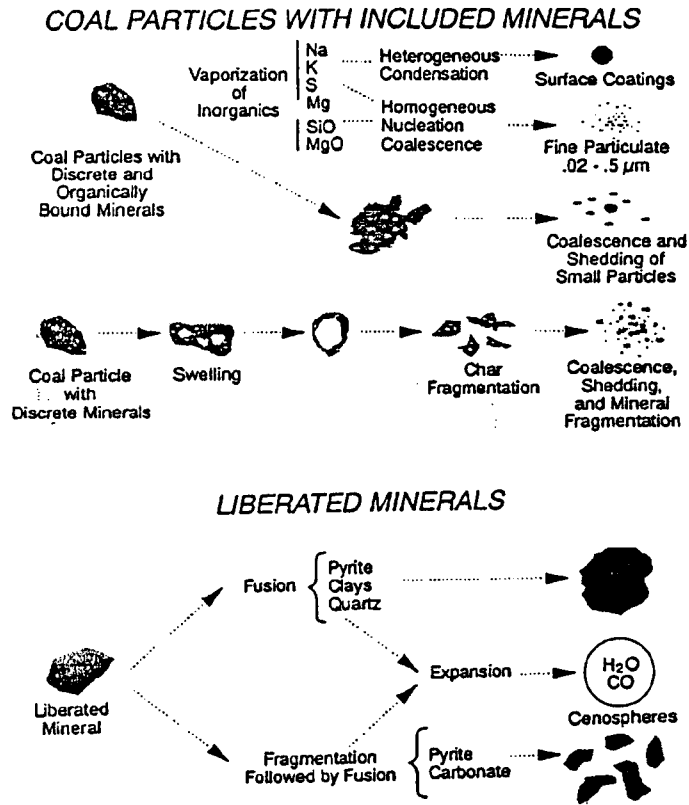


Figure 2. Schematic diagram of the transformations of inorganic constituents during coal combustion⁷⁾.

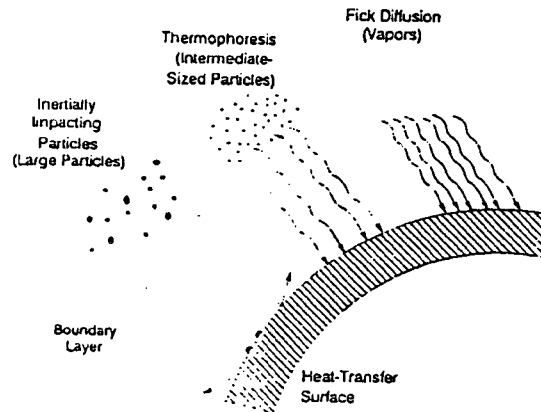


Figure 3. Ash transport mechanisms to heat transfer surface⁷⁾.

간체의 크기 및 조성이 슬래깅 및 화울링, 그리고 비산재의 조성과 입자크기에 직접적인 영향을 미치게 된다. Figure 2에 각 무기물들의 물리적 전이과정을 요약하여 나타내었다. 보일러에서 배출되는 비산재의 입자크기는 sub-micron 크기의 작은입자와 큰입자가 섞여 있는 bimodal distribution을 갖는다. Sub-micron 크기의 입자들은 고온의 화염에서 증발(vaporization)된 성분들이 균일결정화(homogeneous nucleation)과정을 거쳐 형성된다. 화염에서 휘발된 무기물들은 보다 큰 입자표면에 불균일하게 응축되어 입자크기를 더욱 크게 하는 역할도 하는데 회분입자들간의 충돌, 혹은 무기물입자의 쪼개짐(fractionation)등이 비산재의 최종 조성 및 입자크기를 결정하는 주요 과정이다.

회분중간체는 여러가지 메카니즘으로 열전달면으로 이동된다. 회분중간체의 이동 메카니즘을 요약하면 다음 Figure 3과 같다. 입자크기가 1 μ m 이하의 작은입자들이나 또는 기상의 물질들은 확산에 의해 이동하며 중간크기의 입자들은 온도구배에 의해 만들어지는 thermophoresis에 의해 이동된다. 이보다 큰 입자들(10 μ m 이상)은 주로 관성력에 의해 이동되어 열전달면에 충돌하게 된다. 이렇게 열전달면에 충돌된 회분입자들은 일부는 뿜겨져 배기 가스와의 함께 후류로 빠져나가고 짐작성이 강한 물질들은 열전달면에 누적되어 용착불을 형성하게 된다.

일단 열전달면에 용착된 용착물은 액상소결(liquid phase sintering)에 의해서 부착강도가 증가한다. 소결은 여러가지 메카니즘이 있을 수 있으나 회분의 용착에서는 액상소결 즉 viscous flow sintering이 지배적이다. 고상에서의 소결현상 역시 강도의 증가에 기여를 할 수 있으나 미약한 것으로 알려져 있으며 소결시간은 2-3시간이 소요되는 것으로 알려져 있다.

부착강도가 증가되는 또하나의 메카니즘은

densification 이다. 즉 액상으로 코팅된 고체입자들이 서로 접촉하게 되면 입자들 사이에 모세관 압력(capillary pressure)이 적용된다. 이때 형성된 모세관 압력에 의해 입자들간의 접촉면이 증가하고 작은 입자들의 용융성이 증가하게 되어 densification이 만들어진다.

발전용 보일러에서 화염으로부터의 열전달은 복사, 대류, 전도등에 의해서 이루어진다. 튜브의 용착표면으로는 복사와 대류에 의해서 열이 전달된다. 그리고 용착물을 통하여 전도에 의해서 열이 전달되는데 이때 열전달은 용착물의 방사율 및 열전도도가 지배하게 된다. 용착물의 방사율 및 열전도도 역시 무기물의 조성 및 연소조건에 따른 반응 경로에 의해서 결정되는 용착물의 물리적 성질이다.

3.2 화학적 전이

석탄은 복잡한 조성을 갖고 있고 무기물 역시 매우 다양한 조성으로 이루어져 있다. 최근에 개발된 CCSEM을 이용한 방법은 SEM과 XRD, Image analyser를 결합한 분석방법으로써 원료탄의 LTA(Low Temperature Ashing)를 수행하지 않고도 원탄의 무기물 조성 및 입자크기에서부터 연소과정에서의 무기물의 전이상태까지를 추적할 수 있는 분석방법으로 개발되어 많이 사용되고 있다[6].

또하나의 효과적인 분석방법으로 보고되고 있는 것은 Mössbauer spectroscopy를 이용한 Fe의 분석으로써 용착의 초기상태를 지배하는것으로 알려져 있는 Fe 성분의 전이상태 분석이 가능한 분석장비이다. 이러한 장비는 일반 XRD로 분석이 용이하지 않은 Fe성분의 상태를 분석하게 하므로써 용착지수를 직접 비교할 수 있는 방법으로 많이 이용되고 있다[10-12].

초기에 열전달면에 용착을 initiation 시키는 물질들은 연소과정의 화염온도에서 휘발된 무기물들

이 다시 열전달 표면에서 응축되어 결정화되면서 만들어지는데 회분층의 알칼리 성분들이 주 조성을 이루고 있다. 이들 알칼리 성분들은 용융온도가 낮은 물질들을 만드는데 기여하기 때문에 표면에서 점착강도를 증가시키는 주원인이 되기도 한다[9].

슬래깅은 고온영역을 거치기 때문에 많은 부분이 액상으로 구성되어 있으며 알칼리 성분들과 결합된 silicate가 주요 조성으로 되어 있다. 반면에 화물링은 액상이 슬래깅에 비해 적고 단지 입자들이 고상에서 결합되는 상태인데 이부분에서의 용차

물은 많은 기공을 갖고 있기 때문에 역시 열전달 효율을 급격하게 감소시킨다[9].

알칼리 성분중에서도 Na, Fe, Ca 등이 용융성 및 흐름성에 가장 큰 영향을 미치는것으로 알려져 있는데 이들의 전이과정을 간단히 요약하면 다음 Figure 4와 같다[13].

Calcium은 탄중에 관계없이 연소과정에서 빠르게 응집되면서 CaO를 형성한다. 이들 CaO 입자들은 보일러 운전온도에서 쉽게 휘발되어 fume을 형성하거나 drop으로 존재하게 되는데 Figure 4에서

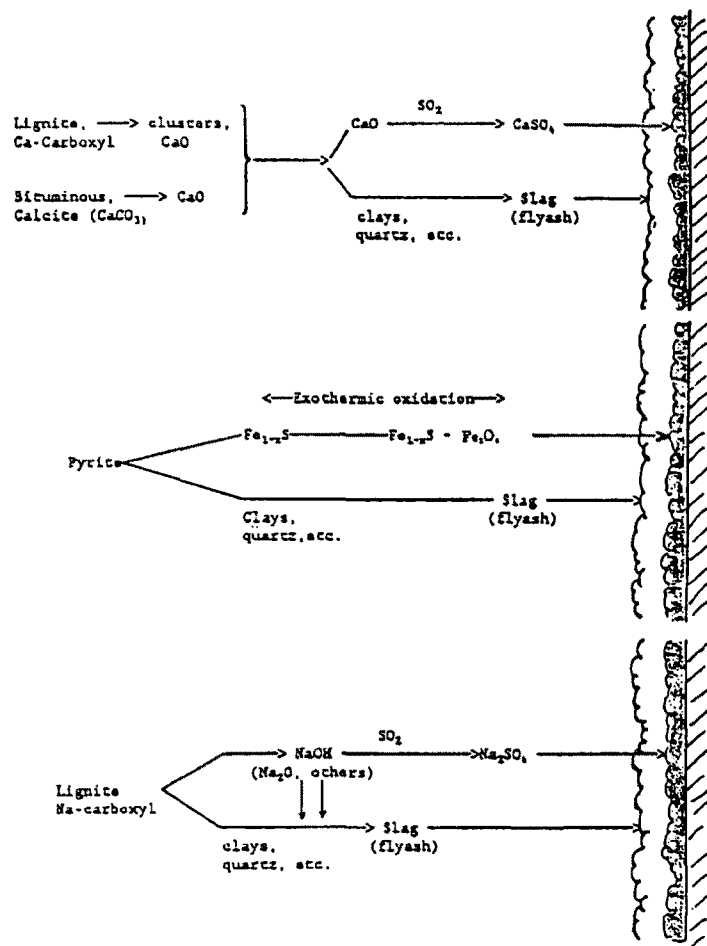


Figure 4. Schematic diagram including the behavior of basic elements in combustion systems¹³⁾.

보는바와 같이 fume 상태로 존재하는 CaO는 SO₂와 반응하여 CaSO₄를 만들고 이들은 점착성이 강한 초기 용착면을 형성한다. 그리고 입자상으로 존재하는 CaO는 clay나 quartz등과 반응하여 용융된 aluminosilicate를 만들고 이들은 슬렉 drop을 만들어 충돌에 의해 벽에 용착되거나 비산재로 빠져나간다.

석탄내의 철성분들은 주로 pyrite(FeS₂)로 존재한다. Pyrite는 연소과정에서 pyrrhotite(Fe_{1-x}S)로

전이되며 이들은 역시 산화되어 magnetite(Fe₃O₄)로 전이된다. 이때의 산화반응은 발열반응이며 따라서 입자주위의 온도가 증가되어 이들 pyrrhotite나 magnetite는 용융되며 앞의 calcium과 마찬가지로 용착의 초기면을 형성하게 된다. 그리고 pyrite주위에 clay나 quartz등이 존재하는 경우에는 역시 aluminosilicate를 만들고 슬렉이나 비산재의 drop을 형성한다. Pyrite는 pyrrhotite로 전이되는 과정에서 쪼개지는 현상을 겪게 되고 이 과정에서 형성

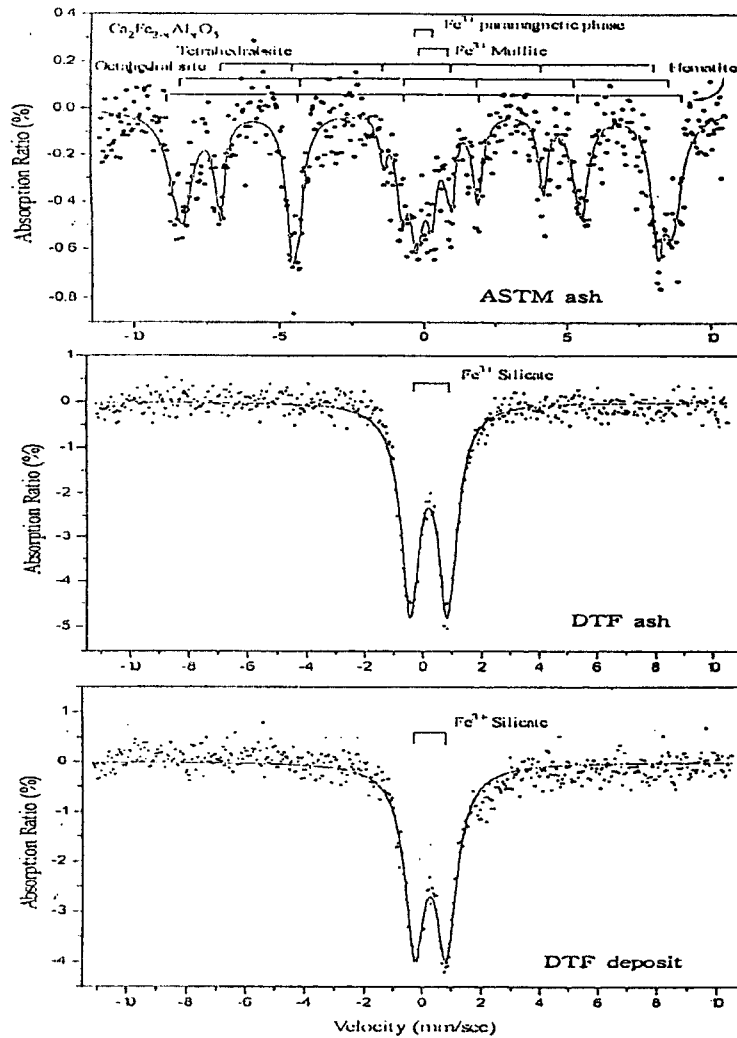


Figure 5. Mössbauer spectra of ash and deposit¹⁴⁾.

된 작은 입자들이 비산계에서 submicrone size의 입자크기를 결정하는 등 pyrite는 석탄 무기물 중에서 회분의 용융성 및 흐름성을 지배하는 중요한 요소이다. Figure 5에 일례로 알라스카탄에 대하여 ASTM 회분과 DTF(Drop Tube Furnace)에서 제조한 회분 및 용착물에 대하여 Mössbauer spectroscopy를 이용하여 Fe의 상태를 분석한 결과를 나타내었다[14]. Figure 5에서 알 수 있는 바와 같이 ASTM 회분은 Fe의진이가 다양하게 만들어 진것을 알 수 있으며 이에 비해 보일러 연소조건에서 제조된 회분 및 용착물의 경우에는 Fe가 모두 Fe^{3+} silicate가 만들어지 Fe가 모두 Si와 반응한것으로 나타나고 있다. 이들 Fe^{3+} silicate는 회분의 경우에는 구형의 drop 형태로 그리고 용착물의 경우에는 액상으로 존재하고 있기 때문에 모두 용융되었음을 의미한다.

Sodium 역시 석탄내에 카르복실기와 유기적으로 결합되어 존재하는 경우가 많은데 앞의 calcium과 같이 쉽게, 휘발되어 NaOH를 만들고 이들이 SO_2 와 결합하여 sodium sulfato를 만들어 역시 용착의 초기면을 형성하고 또한 aluminosilicate를 만들어 비산계의 주요 조성이 된다.

따라서 이러한 알칼리 조성들이 용착의 초기면을 형성하면 여기에 다른 입자들이 충돌하여 달라 붙게 되고 고온에서 오래 체류하면서 용융되거나 반응을 거쳐 공융염을 형성하여 역시 용착을 촉진시키면서 용착이 계속 진행되는것이다.

4. 모사실험에 의한 예측

석탄의 신장, 그리고 배기가스 저감을 위하여 혼합을 하는 경우 보일러에서 발생할 수 있는 여러 가지 사항들을 모사하기 위한 실험장치들이 개발되어 활용되고 있다. 여기에는 석탄 사용량이 0.5g/min의 아주 적은량을 사용하는 DTF에서부터

200kg/hr(약 5MMBtu/hr)의 석탄을 사용하는 파일럿 규모에 이르기 까지 다양하다.

DTF는 발전용 보일러에서의 가열속도와 온도를 모사할 수 있어 연료특성 평가에 효과적으로 사용될 수 있으며 용착을 모사할 수 있는 probe를 이용하여 용착회분의 초기상태에서부터 최종용착단계까지를 추적할 수 있는 실험장치로 개발되어 많이 이용되고 있다[15]. DTF의 장점은 다른 연소실험장치에 비해 실험이 간단하여 많은 실험결과를 짧은 시간에 얻을 수 있다는 것이다. Figure 6에 DTF의 장치 구성과 용착실험에 사용되는 deposition probe를 나타내었다[14]. Deposition probe는 온도 조절을 위해 삼중관으로 제작하며 위에는 보일러의 수관 및 튜브 재질과 동일한 재질로 제작한 substrate를 부착하고 또한 배기가스와 유사한 흐름속도를 모사하기 위하여 노즐을 갖는 constrictor를 상부에 설치하여 실험하게 된다. 이때 얻어지는 자료는 주로 용착속도, 용착물의 강도, 용착과정에서의 substrate의 온도변화 등이며 얻어진 용착물을 분석하여 화학적 전이과정을 추적하는데에 사용되고 있다.

Figure 7에 DTF보다 큰 규모의 실험장치에서 주로 슬래킹과 화올링을 관측하는데 사용되고 있는 slag pannel과 fouling probe를 나타내었다. DTF와 같이 회분의 용착현상을 직접 관측할 수 있으며 DTF 보다 보일러와 유사한 조건에서 슬래킹을 얻는다는것이 장점이다. 이 경우에는 주로 시간에 따른 온도의 변화 또는 heat flux의 변화를 측정하고 비교하는 방법을 사용하고 있다[16].

5. 모델 개발

Figure 1에 나타낸 용착지수(deposition index)를 예측하기 위해 모델을 개발하는 연구가 많이 수행되고 있다[17-19]. 이러한 모델개발의 접근방법은

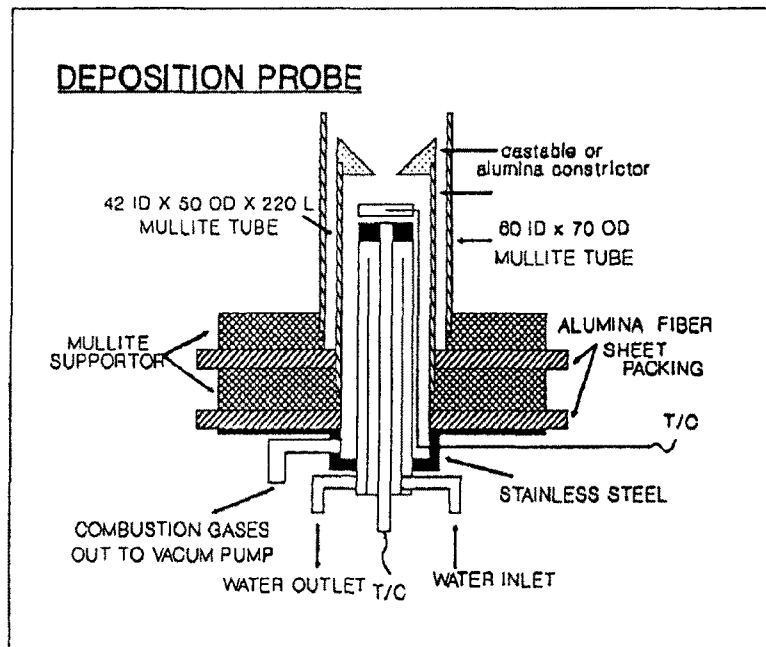
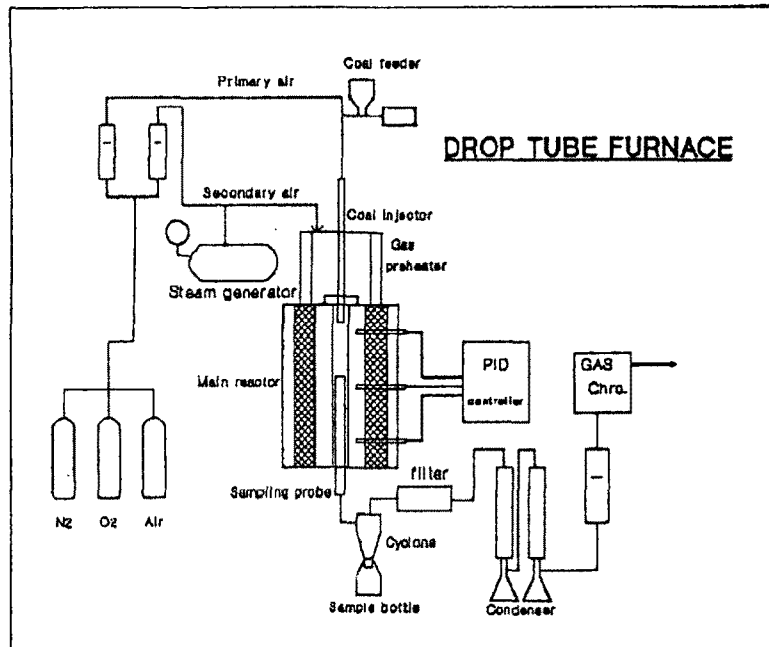


Figure 6. DTF configuration and deposition probe¹⁴⁾.

Figure 8에 나타낸것과 같이 여러가지의 현상들을 수치화하는 작업이 우선적으로 요구된다[7].

우선 석탄 및 무기물의 조성은 전술한바와 같이 CCSEM등으로 정확하게 표현할 수 있다. 물론 이 수치들도 표면에 나타난 2차원적인 수치이기 때문에 이 역시 3차원적으로 분포되어 있는것에 대해 수정되어야 하는것은 물론이다.

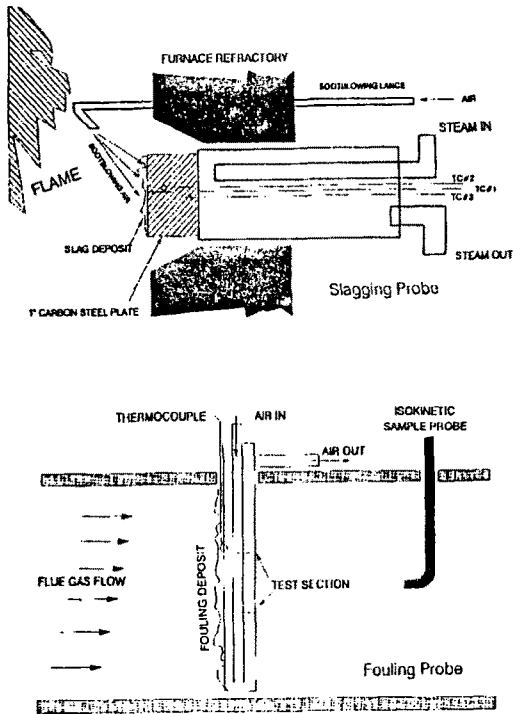


Figure 7. Slagging and fouling probe¹⁶⁾.

연소초기에 무기물로부터 회분이 형성되는 과정은 석탄내 무기물의 분포를 나타내는것과 동시에 쪼개짐과 충돌에 의한 응집등을 확률적으로 표현하는 작업이 이루어지고 이를 실험적으로 검증하는 작업이 또한 뒷받침되어야 한다. 이러한 과정은 이미 기초적인 검증이 마무리 되어 있는 상태이다. 회분이 형성된 후 이들이 튜브표면으로 이동하는 과정은 앞의 Figure 3의 메카니즘이 적용된다. 이

들에 대한 전달현상 역시 비교적 잘 해석된 사항들이다.

회분이 튜브표면으로 이동한 후 튜브에 충돌하여 부착되거나 튕겨지는 과정은 형성된 회분의 점착성에 지배된다. 튜브에 충돌한 입자중에서 용착되는 분율을 f_{dep} 라 했을때 이는 다음식으로 표현할 수 있다[19].

$$f_{dep} = p(T_g) + [1 - p(T_g)] p_{sur}(T_s) - k_e [1 - p(T_g)] [1 - p_{sur}(T_s)] \quad (1)$$

여기서 $p(T)$ 는 특정온도 T 에서 유입되는 입자들의 점착확률(sticking probability)이며 T_g 와 T_s 는 각각 가스와 표면온도이다. k_e 는 erosion 계수이며 p_{sur} 는 용착표면에 대한 점착확률이다. 위의 식에서 첫번째항은 유입되는 입자들중에 점착성을 갖고 부착되는 확률을 나타내며 두번째항은 비점착성 입자들이 표면에 부착되는 확률을 나타낸다. 세번째항은 비점착성 입자들에 의해 비점착성 표면을 erosion 시키는 것을 나타낸다.

위의 식에서 가장 중요한 항은 역시 점착확률 $p(T)$ 이다. 이 항은 온도의 함수이며 동시에 유입되는 입자들의 조성의 함수이다. 결국 점착확률 $p(T)$ 는 온도 및 조성을 모두 포함하고 있는 점도의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다[19].

$$p(T, X_i) = \begin{cases} \frac{\eta_{ref}}{\eta} & \eta > \eta_{ref} \\ 1 & \eta < \eta_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

결국 reference 점도인 η_{ref} 를 정확하게 결정하는것이 관건이 되고 있으며 이에 대해서 석탄 종류에 따른 많은 연구들이 수행되고 있고 또 응용되고 있다.

회분의 점도에 대해서는 아주 오래전부터 매우 많은 연구결과들이 발표되고 있으며 실험적으로 측

정한 점도를 ASTM 회분의 조성으로 표현하는 결과들이 많이 발표되었다. 그리고 측정장비의 개발도 꾸준히 연구되어 왔는데 이 중에서 대표적인 장치의 개념도를 Figure 9에 나타내었다. 점도측정장비의 종류는 Stoke's law를 이용하는 방법과 rotating disc방법, 그리고 torque meter를 이용하는 방법 등이 있는데 Figure 9에 나타낸 점도측정장비는 rotating disc 방법의 한 예이다. 다른 장비에 비해 사용이 편리하여 많이 이용되고 있다.

석탄의 화학적 조성에 따른 회분 형성 특성이 연구되어야 하고 이를 modelling 하고 model을 검증하기 위해서는 bench-, pilot-, commercial 규모의 실험결과들이 역시 뒤따라 주어야 한다.

실제로 미국의 경우에 현재 개발되고 있는 슬래깅 및 화올링 예측 모델 프로그램을 보면 PSI(Physical Science Inc.) 에서 MIT의 Sarofim 등[19]과 공동으로 개발한 Slagging Advisor, 그리고 EERC(Energy & Environmental Research

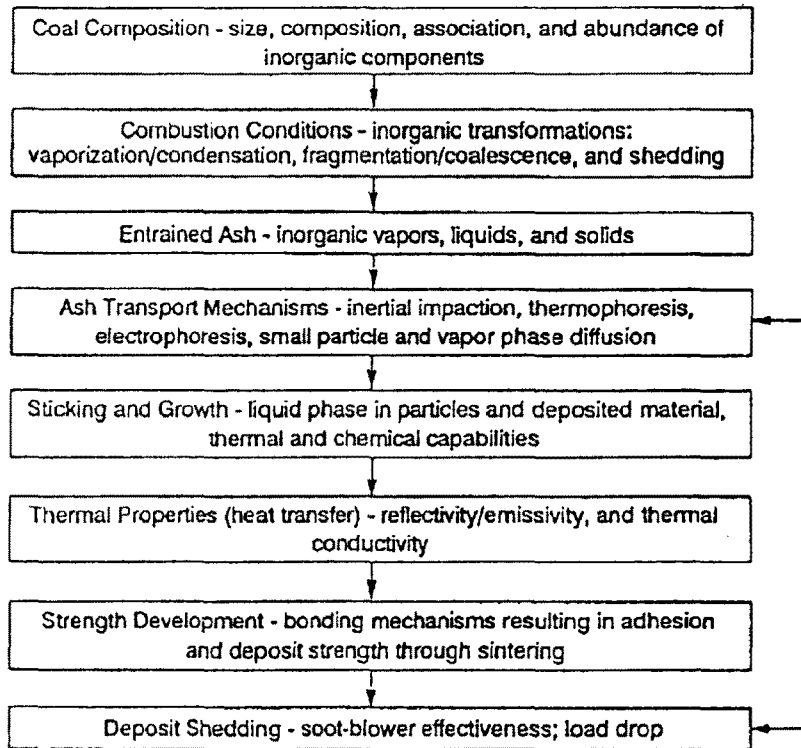


Figure 8. Overview of flow diagram for the development of a fouling and slagging model⁷⁾.

연소조건에 따라 형성되는 용착물과 비산재를 분석하여 용착물의 성장속도가 가장 낮고 또한 가장 집진성이 좋은 비산재를 형성하는 연소조건을 찾는것이 연구과제이다. 이러한 과정을 조성이 매우 복잡한 모든 등급의 석탄에 적용하기 위해서는

Center)에서 개발하고 있는 ATRAN(Ash Transformations), LEADER(Low-temperature Engineering Algorithm of DEposition Risk) 등이 있으며 지금은 각 power plant의 협조로 실제로 발전용 보일러에서 형성되는 슬래깅 등을 대상으로 비

교연구가 되고 있는 상태이다.

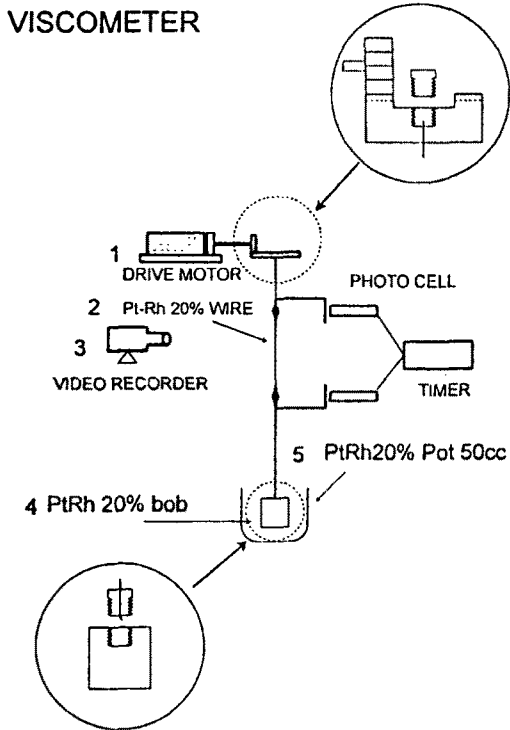


Figure 9. Schematic diagram of high temperature viscometer.

6. 결론

1981년 Huffman등[10]에 의해 CCSEM을 이용한 회분의 분석 연구결과가 발표된 이후 회분에 대한 연구는 급속한 진전을 보이고 있으며 고온에서의 점도측정장비, DTF 등의 실험장비가 개발되어 사용됨에 따라 보일러에서의 회분의 슬래깅, 화울링을 정량적으로 표현하는것은 이제는 어려운 일이 아니다.

국내의 경우에는 아직 ASTM 회분과 관련된 예측지수들을 사용하고 있다. 물론 이들 예측 지수들이 잘못된 것은 아니다. 그러나 지금 세계적으로 일고 있는 환경문제, 특히 국가별 CO₂의 총량 규제

는 한 국가에서 사용하고 있는 모든 에너지 사용기기의 효율을 극대화 시키지 않으면 안되는 상태에 접해 있다. 보일러 효율을 극대화 시켜 500 MW급 보일러에 석탄의 사용량을 줄일 수 있으면 이보다 더 효율적인 CO₂ 감소체제는 없을 것이다. 보일러 효율을 증가시키는 방법중에서 가장 효과적인 방법이 회분의 용착을 최소화 시키는 작업이 될 것이며 이러한 이유로 특히 최근에 회분관련 연구에 많은 투자가 되고 있는것이다.

그러나 우리나라의 경우에 외국에서 수행하고 있는 회분관련 연구를 모두 고찰할 필요는 없다. 그 자체가 방대하고, 또한 석탄이 경제에 미치는 기여도가 미국이나 구미각국에 비해 우리나라는 작기 때문이다. 우리가 연구인력을 직접 투입하여 회분 용착모델을 개발하고 검증하는데 미국 등 선진국과 유사한 정도의 많은 노력을 기울일 필요는 없으나 최소한의 작업은 수행하여야 한다. 용착을 감소시키기 위해 용융온도가 높은 탄을 선정하는것은 결코 좋은 대처방안이 되지 못한다.

현재 사용하고 있는 탄을 대상으로 슬래깅, 화울링에 대한 정량적 자료의 data base화와 혼합 또는 탄의 종류가 바뀌는 경우의 신속하고 정확한 예측을 위한 실험장치 및 방법의 체계화가 필요하다. 실험실 규모에서의 ASTM 방법에서부터 DTF, bench-, pilot- 규모의 실험이 체계적으로 이루어지고 여기에 실제 발전용 보일러에서 발생하는 비산재 및 용착회분을 채취, 분석하는 방법으로 회분이 야기시키는 문제를 보다 쉽게 예측할 수 있는 방법은 현재로서도 충분히 가능하다. 이에 대한 심도 있는 고찰이 요구되는 바이다.

참고문헌

1. Winegartner, E.C. and Rhodes, B.T: J Eng. Pwer, 97, 35(1975)
2. Sage, W.L. and McIlloy, J.B.: J. Eng. Power, 82, 145(1960)
3. Watt, J.D. and Fereday, F.: J. Inst. Fuel, 42, 99(1969)
4. Unuma, H., Takeda, S., Tsurue, T., Ito, S. and Sayama, S.: Fuel, 65, 1505(1986)
5. Lloyd, W.G., Riley, J.T., Zhou, S., Risen, M.A. and Tibbitts, R.L.: Energy & Fuel, 7, 490(1993)
6. Bott, T.R.: " The Assessment of Fouling and Slagging Propensity in Combustion Systems", in "Inorganic Transformations and Ash deposition during Combustion" edited by S.A. Benson, United Engineering Trustees, Inc., p499, New York, NY(1992)
7. Smoot, L.D. ed.: "Fundamentals of Coal Combustion for Clean and Efficient Use", Elsevier Scientific Pub. Co., New York NY(1993)
8. Reid, W.T.: Prog. Energy Combust. Sci., 10, 159(1984)
9. Hatt, R.M.: Prog. Energy Combust. Sci., 16, 235(1990)
10. Huffman, G.P., Huggins, F.E. and Dunmyre, G.R.: Fuel, 60, 585(1981)
11. Taneja, S.P. and Jones, C.H.W.: Fuel, 63, 695(1984)
12. Patil, M.D., Eaton, H.C. and Tittlebaum, M.E.: Fuel, 63, 788(1984)
13. Huffman, G.P., Huggins, F.E., Shah, N. and Shah, A.: Prog. Energy Combust. Sci., 16, 243(1990)
14. 이시훈, 박주식, 임영준: "DTF를 이용한 석탄연소과정에서의 Fouling Deposit 형성에 대한 연구", 한국에너지기술연구소 보고서 KIER-942108 Part II(1994)
15. McCollor, D.P., Zygarlicke, C.J., Allan, S.E. and Benson, S.A.: Energy & Fuel, 7, 761(1993)
16. Colle, T.H. and Guerre, R.P.: "Slagging and Fouling Studies at EXXON's Coal Combustion Test Facility", in "Inorganic Transformations and Ash deposition during Combustion" edited by S.A. Benson, United Engineering Trustees, Inc., p375, New York, NY(1992)
17. Charon, O., Sarofim, A.F. and Beer, J.M.: Prog. Energy Combust. Sci., 16, 319(1990)
18. Benson, S.A., Hurley, J.P., Zygarlicke, C.J., Steadman, E.N. and Erickson, T.A.: Energy & Fuel, 7, 746(1993)
19. Walsh, P.M., Sayre, A.N., Loehden, D.O., Monroe, L.S., Beer, J.M. and Sarofim, A.F.: Prog. Energy Combust. Sci., 16, 327(1990)