

# 석탄연소 보일러에서 생성된 석탄회의 분석과 형성 메커니즘 해석에 대한 연구

이정언\* · 이재근\*\*  
(1998년 3월 18일 접수)

## A Study on the Formation Mechanism of the Fly Ash from Coal Particles in the Coal Burning Boiler

Jung Eun Lee and Jae Keun Lee

**Key Words:** Fly Ash(석탄회), Coal Particle(석탄입자), Formation Mechanism(형성과정), Break up(파쇄),  
Particle Size Distribution(입도분포), Coagulation(응집), Agglomeration(집괴)

### Abstract

Fly ash produced in coal combustion is a fine-grained material consisting mostly of spherical, glassy, and porous particles. A study on the formation mechanism of the fly ash from coal particles in the pulverized coal power plant is investigated with a physical, morphological, and chemical characteristic analysis of fly ash collected from the Samchonpo power plant. This study may contribute to the data base of domestic fly ash, the improvement of combustion efficiency, fouling phenomena and ash collection in the electrostatic precipitator. The physical property of fly ash is determined using a particle counter for the measurement of ash size distribution. Morphological characteristic of fly ash is performed using a scanning electron micrograph. The chemical components of fly ash are determined using an inductively coupled plasma emission spectrometry(ICP). The distribution of fly ash size was bi-modal and ranged from 12 to 19  $\mu\text{m}$  in mass median diameter. Exposure conditions of flue gas temperature and duration within the combustion zone of the boiler played an important role on the morphological properties of the fly ash such as shape, particle size and chemical components. The evolution of ash formation during pulverized coal combustion has revealed three major mechanisms by large particle formation due to break-up process, gas to particle conversion and growth by coagulation and agglomeration.

### 1. 서론

석탄회의 연소로 인하여 발생하는 석탄회는 보일러의 수명뿐만 아니라 열효율을 감소시키는 과

울링 현상과 분진의 대기 방출로 인한 대기오염 및 집진된 석탄회의 해양매립에 따른 해양오염 등과 같은 문제를 일으키고 있다. 석탄회가 보일러에 미치는 악영향은 파울링 현상으로 석탄회에 함유되어 있는 무기질 성분이 연소영역에서 용융되어 유동가스를 따라 보일러내 대류열전달 영역을 통과하면서 튜브의 표면에 침전되어 고착화되어 발생한다. 이 현상은 열교환기의 효율을 저하시킬뿐 만 아니라 튜브의 표면을 침식시켜 보일러의 수명을 감소시키므로 파울링의 발생을

\* 회원, 부산대학교 공과대학원 분체공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학과

최소화시켜야 한다. 그리고 발전소에서 배출되는 석탄회의 95%이상은 보일러 또는 공기 예열 장치의 하부 호퍼 그리고 전기집진기를 통해 제거되지만 직경이  $1\ \mu\text{m}$  이하인 미세입자는 포집 효율이 낮아 대기로 방출되어 대기오염을 유발한다. 뿐만 아니라 집진기에서 포집한 석탄회는 전량 발전소 주변의 바다를 매립하는 방식으로 폐기하기 때문에 수질 및 토양오염의 원인으로 작용하고 있다.

본 연구에서는 석탄화력 발전소의 각 부위에서 채집한 석탄회 분석을 통해 석탄 연소시 생성되는 석탄회의 형성 메커니즘을 분석하여 파울링 현상을 이해하고 보일러 운전에 필요한 기초자료와 전기집진기 설계에 기여하고자 한다. 이러한 목적을 위해 삼천포 화력발전소의 보일러 각 부위 및 집진기에서 석탄회를 채집하여 석탄회 형성에 미치는 요소 및 형성과정을 물리적, 화학적 그리고 형태학적 특성별로 분석하고 석탄회 형성 메커니즘을 파악하기 위해서는 석탄입자, 발전소 보일러내부 입자, 전기집진기 석탄회 입자, 그리고 실험실의 전기로에서 연소한 입자를 각각 분석하였다. 각 시료의 입도 분포의 특성은 입도측정기로, 석탄회 입자 성분 분포 경향성은 에너지스펙트럼 분석기로, 그리고 석탄 입자가 보일러 내에서 구형의 석탄회로 형성되어 가는 과정을 모델링하기 위해 전자현미경을 사용하였다. 본 연구의 결과는 보일러 내에서 석탄입자가 석탄회 입자로 형성되는 과정을 모델링 함으로서 입자의 형성 및 성장 메커니즘을 이해하고 더 나아가 석탄회의 특성을 분석하여, 석탄회가 보일러 튜브 및 환경오염에 미치는 악영향을 평가하는데 필요한 기초 연구로서 의의가 있다.

## 2. 석탄회 형성 메커니즘

화력발전소에서 연료로써 사용하고 있는 석탄은 화석화된 탄소성 물질과 광물질 성분으로 이루어져 있다. 탄소분은 연소중 90% 이상이 연소되는 반면 석탄 내에 함유되어 있는 알루미늄-실리케이트, 황철광(Pyrite), 방해석(Calcites), 자철광(Magnetites)과 같은 광물질은 유동가스에 잔유물로 남아 석탄회를 형성하는 주성분이 된다.

Fig. 1은 석탄회 형성 메커니즘을 개략적으로 나타낸 것으로서, 석탄 입자가 연소되면서 석탄회 입자로 형성되는 파쇄과정, 기체-입자 상변화 과정, 응집 및 집괴과정으로 구분할 수 있다.

석탄회 입자의 크기가  $1\ \mu\text{m}$  이상인 조대입자의 석탄회가 형성되는 메커니즘인 파쇄과정은 석탄의 내부와 외부표면 양쪽에서 탄소가 연소함에 따라 석탄의 탄소격자 구조내의 광물 함유물이 다른 광물질과 접촉함에 따라 레이스 모양의 큰 덩어리인 목탄구조(Char)를 형성한다. 목탄 덩어리가 보일러내 유동 가스를 따라 이동하면서 계속 열을 받아 내부균열, 구조적 결함 그리고 열응력의 발생으로 입자가 부서지고 부서진 입자들이 다시 반복적으로 큰 입자에 부착하거나 연소가스에 노출되어 여러가지 유형의 입자를 형성하게 된다. 이때 입자가 연소가스에 노출되는 시간이 길수록 입자의 형상은 구형으로 되는 경향이 있다.<sup>(3)</sup>

석탄회 입자의 크기가  $1\ \mu\text{m}$  이하인 미세입자 석탄회의 형성 메커니즘은 입자의 핵화이론에 의해 가스에서 입자로의 상변화(Gas-to-Particle Conversion)로 인해 입자가 형성되는 것이다. 석탄이 연소하면서 발생하는 가스에 존재하는 내화성 및 휘발성 화학종들이 증발과 핵응축을 겪으면서 미세입자로 된다. 미세입자 형성은 석탄 내에 함유되어 있는 하나의 광물질 입자가 여러 개의 석탄회 입자로 형성되는 과정으로, 석탄이 연소하면서 발생하는 가스에는 규소, 알루미늄, 철, 마그네슘 등과 같은 내화성 화학종과 나트륨, 칼륨, 카드뮴, 비소, 납과 같은 휘발성 화학종들이 있는데 이들 분자들이 응축현상에 의해 매우 작은 입자로 된다. 이때 휘발성 화학종은 균일 핵화 현상(Homogeneous Nucleation)을 일으키면서 미세한 입자로 형성되어 큰 입자들의 표면에서 확산현상을 일으키거나 유착하면서 큰 입자의 성장을 유도하거나 미세입자간의 증발 및 응축과정을 반복하면서 성장한다.<sup>(3,4)</sup>

응집(Coagulation) 및 집괴(Agglomeration)과정에 의한 석탄회 입자의 성장은 석탄회의 형성 과정 중에 조대입자와 미세입자 사이 또는 미세입자와 미세입자 사이에 발생한다. 특히 용융된 석탄회 입자는 다른 입자와 서로 접촉함에 따라

덩어리를 형성하고 이 덩어리가 주위 가스의 온도조건에 따라 구형의 입자로 되는 것이다. 하지만 다양한 입자들이 서로 얽혀 응집현상을 일으키거나 입자들이 서로 부착되어 고리모양의 집괴현상을 이루는 것은 석탄회 형성의 최종단계에서 이루어 진다고 본다.<sup>(4)</sup> 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자는 주로 브라운 확산운동에 의한 열응집과 외력에 의해 발생하는 운동응집에 의해 입자가 성장하여 10  $\mu\text{m}$  이상의 크기로 증가하면 입자들이 난류가스를 따라 유동하면서 서로 충돌하거나 부착하여 고리모양의 입자를 형성하게 된다.<sup>(4,5)</sup>

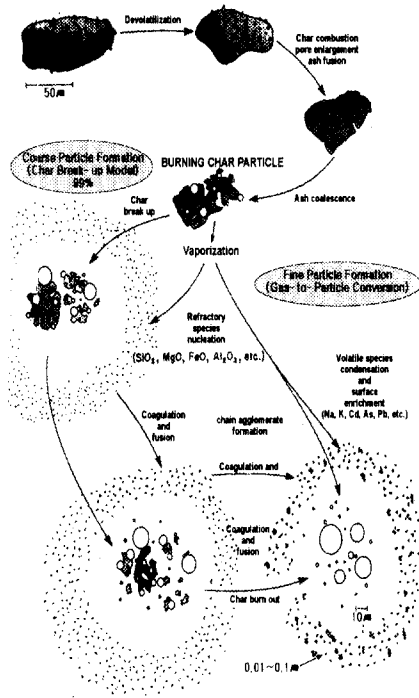


Fig.1 Hypothetical concept of the processes involved in ash particle formation.<sup>(3)</sup>

### 3. 석탄회 채집 및 분석 방법

#### 3.1 보일러 특성

Fig. 2는 석탄화력 발전소 보일러 내의 열교환용 튜브 위치와 유동가스의 온도분포를 나타낸 것이다. 보일러 벽면의 증발관은 보일러로 유입된 물이 증발하는 영역으로서 화염부위에 직접

노출되어 있으며 복사열을 직접 받는 영역이다. 그리고 화염으로부터 형성되는 고온의 유동가스가 제일 먼저 통과하는 영역은 1차 과열관(Primary Superheater)으로 유동가스의 온도는 1000~1200  $^{\circ}\text{C}$ 이고 튜브내의 온도는 약 380~430  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 1차 과열관(Primary Superheater)주위를 통과한 유동가스는 1차 재열관(Primary Reheater), 2차 재열관(Secondary Reheater), 2차 과열관(Secondary Superheater)을 거쳐 절탄기(Economizer)를 통과하게 된다. 이때 유동가스의 온도는 400~600  $^{\circ}\text{C}$ 이고 공기에열기를 통과하면서 보일러 유입공기에 열을 전달한 후 집진기를 거쳐 굴뚝으로 배출된다. 그리고 110  $^{\circ}\text{C}$  정도의 물이 증발관으로 유입되어 1차 과열관을 통과하면서 과열증기로 되고 터빈으로 유입되기전 다시 2차 과열관을 통과하면서 540  $^{\circ}\text{C}$ 의 과열증기가 된다. 터빈을 거쳐 다시 보일러로 유입되어 재열되는 재열관 영역에서의 온도 분포는 320~540  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 석탄 연소에 의해 발생한 고온의 유동가스는 보일러 내부를 따라 유동하면서 열교환용 튜브내를 흐르는 증기에 열을 전달하게 된다. 이때 석탄이 연소하면서 석탄내에 함유되어 있는 유기질 성분은 열해리 현상에 의해 이산화탄소, 아황산가스 등과 같은 기체로 변하는 반면 무기질 성분은 고온의 열에 의해 용융되어 입자성 물질끼리 서로 유착되거나 열교환용 튜브에 고착된다.<sup>(6)</sup>

#### 3.2 석탄회의 채집 및 분석방법

석탄이 연소하여 석탄회로 형성되는 과정을 분석하기 위해 사용된 시료는 석탄 입자, 보일러 내부에서 포집한 석탄회 입자, 전기집진기 하부 호퍼에서 채집한 입자, 그리고 실험실의 전기로에서 석탄을 연소한 후 생성된 입자 등이다. 본 연구는 석탄 입자가 연소 영역에서 노출되는 정도에 따라 구형의 석탄회로 변화해가는 과정을 입자카운터, 전자현미경, 에너지 스펙트럼 분석기 등으로 분석하고자 한다. 석탄 입자는 발전용량이 560 MW급의 삼천포 화력발전소 2호기의 석탄 분쇄기에서 70~80  $\mu\text{m}$ 의 입도로 분쇄된 후 보일러로 유입되기전 샘플링 튜브를 통해 채취하였

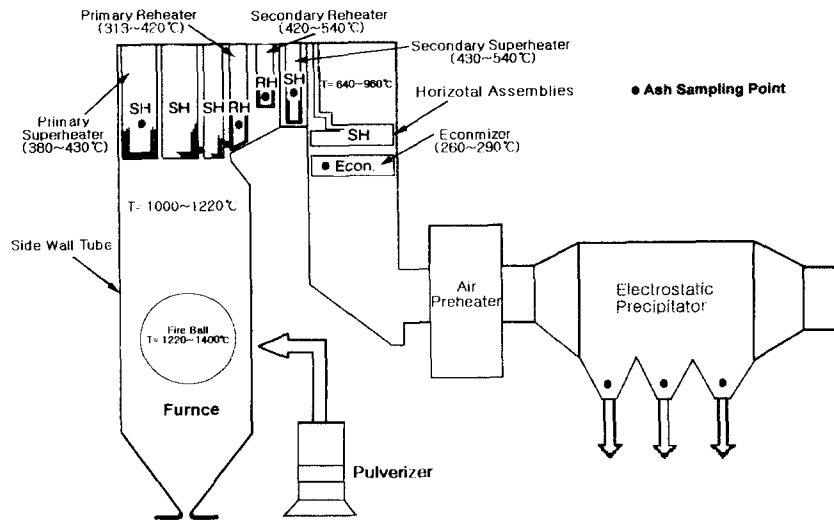


Fig.2 Schematic diagram of the pulverized coal power plant and sampling locations for the ash analysis.

다. 보일러 내부에서 채집할 석탄회의 경우 보일러 운전시 보일러내 각 부위에서 입자를 채집하여야 하지만 실제 보일러의 구조상 운전시 입자를 샘플링하는 것은 불가능하므로 보일러 정지시 보일러 내부에서 유동가스의 흐름에 따라 보일러 내부 각 튜브에 부착된 석탄회를 샘플링하였다. 일반적으로 발전소에서 주로 사용하는 석탄은 호주산탄, 캐나다산탄, 동진탄(중국산탄) 그리고 남아공산탄 등인데, 본 연구에 사용된 시료는 호주산 혼합탄 연소시 발생한 석탄회를 채집한 것이다. 보일러 내부 각 열교환용 튜브와 전기집진기 하부 호퍼에서 석탄회를 채집한 위치는 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 유동가스의 이동 방향에 따라 증발관, 1차 과열관, 1차 재열관, 2차 재열관, 2차 과열관, 절탄기 그리고 전기집진기이다. 그리고 전기로를 1000 °C 까지 가열한 다음 석탄을 연소하여 형성된 석탄회는 보일러 내부에서 생성된 석탄회와 형상 및 입도 분포를 비교하여 응집에 의한 석탄회 입자의 변화를 파악하였다.

시료를 분석하기 위해 입자카운터, 전자현미경, 에너지 스펙트럼 분석기를 사용하였다. 각 샘플의 입도분포를 파악하기 위해 입도측정장치(Malvern, Mastersizer)를 사용하였으며, 이때 보

일러 내에서 형성된 석탄회 입자의 입도분포 변화와 1000 °C의 전기로에서 형성된 석탄회 입자의 크기분포를 측정하여 비교하였다. 석탄회 입자를 구성하고 있는 성분들의 분포 상태를 알기 위해 에너지 스펙트럼 분석장치(NORAN, TN-5500)를 이용하였다. 입자의 형성 메커니즘을 파악하기 위해 각 시료의 형태적 특성을 서로 비교하여 입자의 변화를 전자현미경(Jeol, JSM-5400)으로 분석하였으며 진공증발기를 이용하여 금(Au)으로 코팅한 다음 입자의 구형 및 비구형성 그리고 조대입자와 미세입자간의 부착특성 등을 파악하였다.

#### 4. 석탄회 분석과 형성 메커니즘

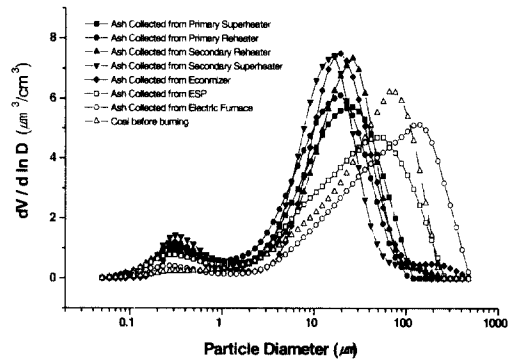
보일러 내부 유동가스가 이동 방향에 따라 채집한 입자의 형상을 비교하면서 비구형인 석탄 입자가 구형의 입자로 진행되는 과정을 통해 석탄회 입자의 형성 메커니즘을 파악하였다. 입자의 형상 분석은 입자의 구형성 및 표면구조 그리고 입자간의 유착관계를 입자의 파쇄, 응집, 집괴, 응고 그리고 고착현상을 이용하여 분석하였다. 또한 구형성 입자로의 변화 과정에 있어 중요한 요소로 작용하는 입도분포의 변화를 분석하

였다. 입도분포의 특성을 파악하기 위해 유동 가스가 전혀 없는 전기로에서 생성된 석탄회 입자와 보일러 내에서 형성된 입자, 그리고 보일러를 완전히 통과한 석탄회 입자의 크기 분포를 서로 비교하여 석탄이 연소하면서 형성된 입자의 변화를 조사하였다.

4.1 석탄회의 입도분포 특성

Fig. 3은 보일러 내에서 포집한 석탄회 입자의 입도분포 상태와 전기로 및 전기집진기에서 포집한 석탄회의 입도분포를 나타내었으며, 이들 석탄회와 비교하기 위해 연소전 석탄 입자의 크기 분포를 표현한 것으로 입경은 질량평균입경(Mass Median Diameter)으로 표현하였다. 전기집진기 하부에서 채집한 석탄회의 질량평균입경은 25~36  $\mu\text{m}$ 이며 분포형태는 0.1~1  $\mu\text{m}$  영역과 20~50  $\mu\text{m}$  영역에서 최고값을 나타내는 바이모달(Bi-Modal)분포로 추정되었다. 노내 온도가 1000  $^{\circ}\text{C}$ 인 전기로에서 연소한 석탄회의 경우 200~300  $\mu\text{m}$  범위에서 최고값으로 나타나며 평균입경은 67  $\mu\text{m}$ 로 추정되었다. 반면 보일러 내부에서 포집한 석탄회는 10~30  $\mu\text{m}$  범위에서 집중적으로 분포되어 있으며 질량평균입경이 12.7~19.9  $\mu\text{m}$ 로 추정되었다. 연소전 석탄 입자는 석탄회 입자와는 달리 70  $\mu\text{m}$  범위에서 최고값을 가지는 유니모달(UniModal)의 분포를 이루고 있으며 질량평균입경은 45.09  $\mu\text{m}$ 로 조사되었다. 3종류의 석탄회의 시료와 석탄 입자의 입도 분포 사이에 나타나는 차이는 입자의 형성과정과 밀접한 관계가 있다. 즉 전기로에서 연소한 석탄회 입자는 연소가스에 따라 유동하면서 형성된 것이 아니라 정지된 상태에서 연소된 것이므로 석탄회 입자의 형성에 중요한 인자로 작용하는 열응력에 의한 입자의 파쇄 및 열응집 또는 운동응집등의 물리적 현상이 작용하지 않았기 때문에 입자의 크기가 석탄의 크기와 비슷하거나 크게 나타났다. 보일러 내에서 연소된 석탄회 입자의 크기는 전기로에서 연소한 석탄회에 비해 질량평균입경이 12~20  $\mu\text{m}$ 으로 줄어드는 경향을 보이는데 그 이유는 보일러에서 불균일 핵응축 현상에 의해 다분자의 핵이 입자로 형성된 후, 입자가 성장하여 1  $\mu\text{m}$  정도의 미세 입자가 형성된 후 응집과 집괴 현상을

겪으면서 10  $\mu\text{m}$  이상의 입자로 성장하는 것으로 해석할 수 있다. 그리고 석탄의 입자가 석탄회로 형성되는 과정에서 유동가스에 노출된 정도에 따라 입자주위의 온도변화의 영향에 의한 열응력을 받아 파쇄, 응집 그리고 용융의 과정을 겪으면서 형성되었기 때문이다. 결국 보일러 내에서 석탄회 입자의 형성과정에서 지배적인 영향을 미치는 요소는 입자 표면에 작용하는 응축과 증발 그리고 입자간의 브라운 및 확산운동으로 파악할 수 있다.



Sampling Location	MMD( $\mu\text{m}$ )
Primary Superheater	17.67
Primary Reheater	13.57
Secondary Reheater	19.60
Secondary Superheater	12.81
Economizer	19.27
Electrostatic Precipitator	28.59
Electric Furnace	66.92
Coal before Burning	45.09

Fig. 3 Volume size distribution and mass median diameter of fly ash particle collected from the boiler tube, electric furnace and electrostatic precipitator.

Fig. 4는 보일러 내의 여러 부위와 전기집진기 및 전기로에서 채취한 석탄회를 입자의 개수 크기 분포(Number Size Distribution)로 나타낸 것으로 각 시료의 분포가 유니모달의 대수분포를 따르고 있는데, 이는 입자의 형성과정에서 입자 상호간에 브라운 확산운동의 지배적인 영향을 받았기 때문이다.<sup>(11)</sup> Fig. 5는 석탄회의 입도를 표면적 크기 분포(Surface Size Distribution)로 표현한 것으로 0.1~1  $\mu\text{m}$ 에서 최고값을 가지는 비대칭 분포(Skew Distribution)를 이루고 있다.

그리고 전기집진기에서 채집된 석탄회 입자의 크기 분포 영역이 보일러 내부에서 연소된 석탄회 입자보다 큰 것은 보일러 내부에서 포집한 석탄회에는 미연탄소분이 없는 반면 전기집진기에서 채집한 석탄회에는 70  $\mu\text{m}$  이상의 미연탄소분이 포함되어 있기 때문이다. 결국 입도분포에 따른 분석을 통해 석탄회의 형성과정을 분석한 결과 단순히 석탄회의 형성에 미치는 요인은 연소 뿐만 아니라 유동가스의 이동에 따른 온도 구배와 이로 인한 파쇄, 응집 등의 요소도 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.

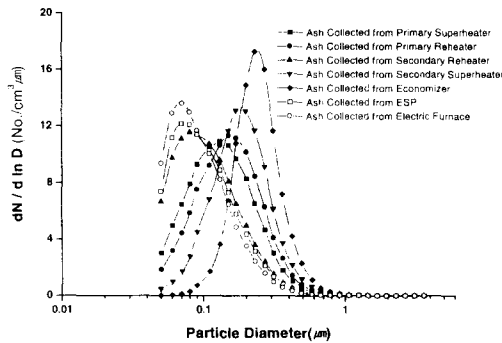


Fig. 4 Number diameter distribution of the fly ash particle collected from boiler tube, electric furnace and electrostatic precipitator.

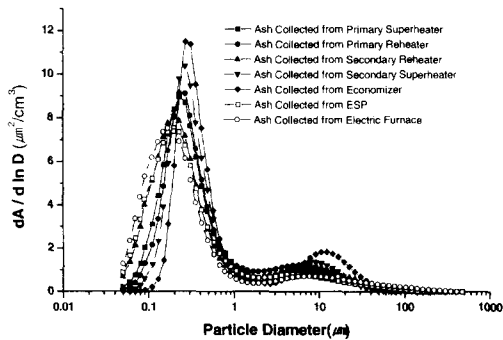


Fig. 5 Surface diameter distribution of the fly ash particle collected from boiler tube, electric furnace and electrostatic precipitator.

#### 4.2 입자의 형태적 특성 분석

본 연구를 위하여 가장 이상적인 석탄회 입자의 채집은 보일러 운전 중에 각 위치별로 시료를 채집하여 분석하는 것이겠지만 보일러 내부가 부압이 작용하고 있어 보일러 운전중 시료의 채집은 어려운 점이 많아 보일러 정지시 유동가스의 흐름에 따라 설치되어 있는 열교환용 튜브에서 시료를 채집하였다.

Fig. 6은 1차 재열관의 표면에 부착되어 있는 석탄회 입자의 형상으로 본 연구에서 사용된 시료는 각 튜브에서 석탄회 입자를 채집하여 분석한 것이다. Fig. 7은 튜브에 파울링 현상에 의해 고착화되어 있는 입자를 분리하여 나타낸 것으로 이러한 형상의 입자들이 발생하는 주요 원인은 유동가스를 따라 움직이는 석탄회가 유동가스와 튜브사이의 온도차에 의해 응고되어 튜브에 고착화된 것이다. 이러한 응고현상을 일으키는 주요 성분은 규산염, 알루미늄, 황철광 등과 같은 무기질 성분들로서 고온의 화염에서 용융된 상태에서 유동가스를 따라 이동하다가 온도가 낮은 열교환용 튜브에 유착하여 냉각됨에 따라 고착되는 것이다. 이때 튜브에 고착된 석탄회의 형상 및 입자의 크기 분포는 튜브의 위치에 따라 다르다. 그 이유는 유동가스의 온도와 열교환용 튜브사이의 온도차에 의한 무기질 성분의 냉각정도 및 미세입자의 유착관계에 따라 다르게 나타나기 때문이다.

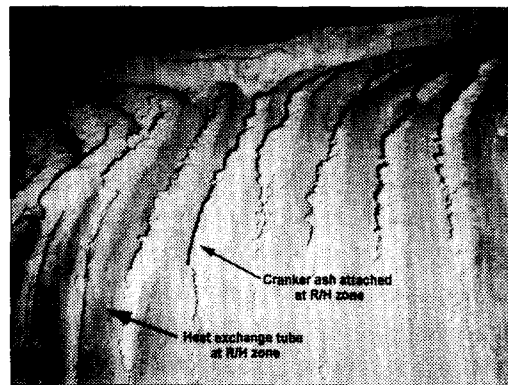


Fig. 6 Photograph of fouling phenomenon in the primary reheater heat exchange tube.

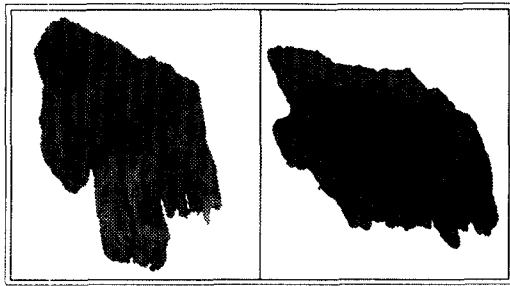


Fig. 7 Slagging ash collected in the primary reheater heat exchange tube.

유동가스의 온도분포에 따른 석탄회의 침전현상을 분석하면 다음과 같다. 먼저, 보일러 내의 유동가스 온도가 1400~2200 °C인 영역은 석탄입자가 보일러 내로 분사되는 화염부위인데, 이 영역에 설치되어 있는 증발관 튜브의 표면에는 습분이 많아 슬래그가 튜브의 표면에서 수분함유입자와 서로 얽혀 고착된 석탄회 입자를 형성한다. 유동가스 온도가 1000~1220 °C인 영역은 대류열전달 영역에 열교환용 튜브들이 밀집되어 있는데, 이 부분을 지나는 유동가스는 튜브의 표면과 접촉하면서 용융된 석탄회 입자가 튜브표면에 침전 고착된다. 이 부분에서 석탄회 입자의 형성은 상당히 진척된다. 마지막으로 유동가스의 온도가 640~960 °C인 대류열전달 영역의 최종단에 해당하는 절탄기 부분으로 유동가스를 따라 움직인 석탄회 입자는 응축, 증발, 응집 등의 과정을 겪었기 때문에 거의 구형의 입자로 되어 있을 뿐만 아니라 유동가스의 온도와 열교환용 튜브의 온도차가 위의 두 부분에 비해 크지 않기 때문에 석탄회 입자의 응고에 의한 고착현상은 많이 발생하지 않는다. Fig. 8은 석탄분쇄기에서 분쇄된 후 보일러 내로 유입되기 전 샘플링한 석탄회의 입자 모양으로서 각진 형상의 무정형성을 띄고 있다. Fig. 9는 석탄을 전기로에서 1000 °C로 가열하여 형성된 것으로 석탄이 열해리에 의해 유기질 성분은 연소한 반면 무기질의 성분이 남아 비규칙적으로 부착되어 있다. 또한 일반적인 석탄회에 많이 보이고 있는 구형성의 입자는 전혀 발견되지 않았다. 이는 석탄회의 입도분포 변화에 따른 형성 메커니즘 분석에서도 언급한 바와 같이 입자가 유동가스를 따라 이동하면서 입자의 형성에 작용하는 핵응축, 응집, 응고 등과 같은



Fig. 8 Scanning electron micrograph of coal particles.



Fig. 9 Scanning electron micrograph of ash formed in the electric furnace.

현상이 작용하지 않았기 때문이다.

Fig. 10은 석탄회를 구성하고 있는 구성성분을 에너지 스펙트럼 분석장치로 분석한 것으로 가장 많은 성분을 차지하고 있는 것은 Si성분이며 Al과 Fe성분이 소량 분포되어 있다. 이들 무기질 성분들이 연소 영역에 노출되어 용융과 응집등의 과정을 거치면서 석탄회를 형성하는 것이다.

Fig. 11은 보일러내부 각 튜브 부위에서 채집한 석탄회의 형상을 전자현미경으로 분석한 것으로 Fig. 11(a),(b)는 구형의 조대입자와 각형 구조의 조대입자가 서로 혼재되어 있으며 조대입자의 표면에 파쇄된 미세입자들이 부착되어 있었다. 이 영역은 석탄회의 초기 형성 단계로 석탄이 연소 영역에 노출된 시간이 짧아 파쇄와 입자간의

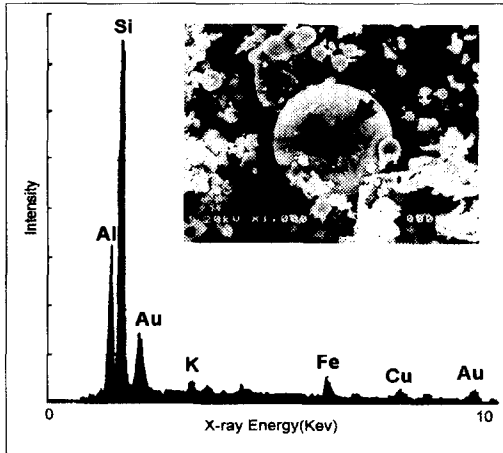


Fig. 10 Energy distribution X-ray analysis and scanning electron micrograph typical spherically shaped fly ash particles.

목탄덩어리의 파쇄과정과 확산현상이 복합적으로 작용하여 입자가 형성되었다.

Fig. 11(c)는 2차 재열관에서 채집한 석탄회의 형상으로 구형화의 진전이 상당히 이루어졌으며, 전단에서 입자의 파쇄현상이 충분히 이루어진 상태이므로 입자의 표면에서 증발과 응축의 현상이 활발하게 이루어져 부드러운 구형의 입자가 많이 관찰된 것이다. 또한 파쇄과정에 따라 형성된 파편 미세입자의 형상이 대부분 구형을 띄고 있는데 이는 휘발성 무기질 성분이 핵응축과정을 겪었기 때문이다. Fig. 11(d)는 2차 과열관에서 채집한 석탄회로 파쇄과정이 완전히 이루어져 목탄 구조는 없고 구형의 입자들로만 이루어져 있으며 핵화 응축과정이 활발하게 진행되었기 때문에 구형의 미세입자가 많이 발견되었다. 미세 입자들

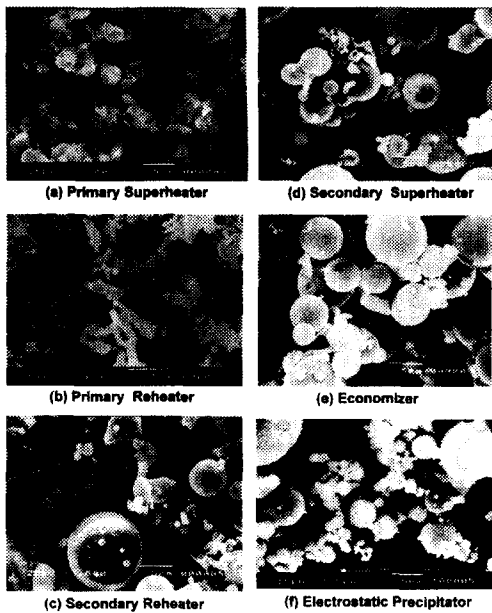


Fig. 11 Scanning electron micrographs of fly ash collected from the boiler tube and electrostatic precipitator.

유착에 의해 입자가 형성되었기 때문에 파쇄된 각형의 입자들이 다양하게 분포되어 있으며 미세 입자들이 큰 입자에 부착되어 있는 것으로 보아

은 응집과정으로 결합하여 조대입자로 성장하거나 파쇄과정으로 형성된 큰 입자들의 표면에 확산하여 부착하는 집괴현상으로 입자가 성장하여 구형의 조대입자가 형성된 것을 파악할 수 있다. Fig. 11(e)는 보일러의 최후단인 절탄기에서 포집한 석탄회의 형상으로 입자의 구형화 현상이 완전히 이루어져 비구형의 입자는 전혀 발견할 수 없었다. Fig. 11(f)는 전기집진기 하부 호퍼에서 채집한 석탄회로 절탄기의 입자형상과 유사한데, 이는 절탄기 이후에는 입자 형태에 큰 변화가 없음을 의미한다. 다만 약간의 비구형의 입자가 관찰되는 것은 미연탄소분이다. 보일러 내에서 포집한 석탄회를 분석해 본 결과 석탄의 입자가 화염에 노출되어 폭발함에 따라 파쇄되어 파편 및 목탄구조의 입자들이 이동가스를 따라 이동하면서 점점 구형화가 진행되어 보일러의 후단에서는 완전히 구형의 입자로 되었음을 파악하였다.

4.3 석탄회 형성 메커니즘

Fig. 12은 석탄화력 발전소에서 채집한 석탄회 분석을 통해 석탄회의 형성과정을 표현한 그림으로서 석탄입자가 연소 영역에 유입됨에 따라 파쇄과정, 미세입자 형성과정 그리고 입자의 성장과정을 거치면서 구형의 석탄회 입자가 형성되는 것으로 석탄이 연소하여 석탄회로 형성되면서 입



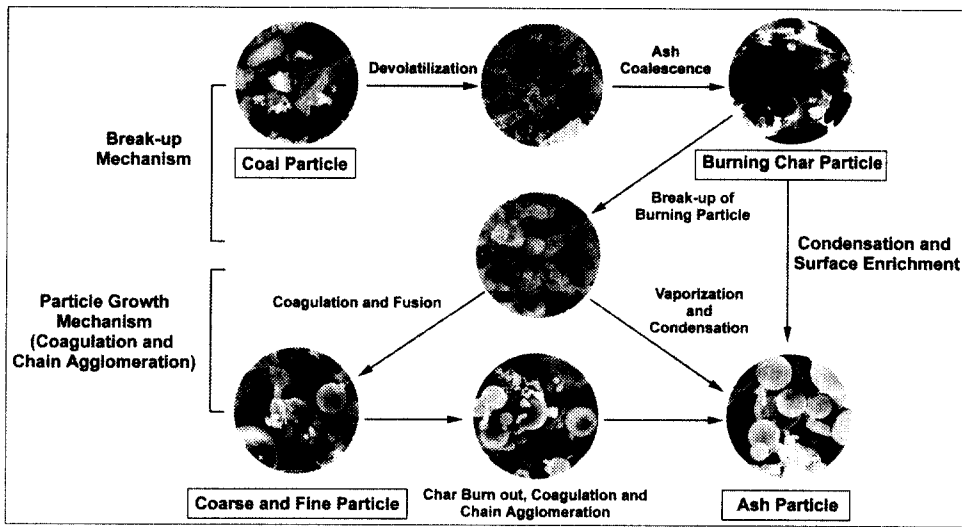


Fig. 12 Formation mechanism of fly ash from coal particles in the pulverized coal power plant.

자의 형상이 점점 구형으로 변한다는 사실을 볼 수 있다. 석탄 입자가 연소하면서 목탄 덩어리로 형성된 후 입자가 연소 영역에 노출된 시간이 길수록 구형화는 진전되어 조대입자와 미세입자가 서로 혼재한 형태의 입상구조를 거쳐 완전한 구형의 석탄회 입자를 형성하게 된다. 석탄이 연소되면서 부풀림과 유착현상에 의해 목탄덩어리를 형성하고 이 덩어리가 계속 열을 받아 열응력에 의해 부서지는 파쇄과정을 겪어 비구형의 조대입자와 미세입자를 형성하며, 입자들간의 응집과 용융이 동시에 이루어져 입자간의 부착현상이 빠르게 진행된다. 구형성이 상당히 진행된 조대입자들과 미세입자들이 서로 혼재하거나 부착되어 있는 상태에서 유동가스를 따라 이동하는 석탄회가 2차 재열판의 영역에 도달하게 되면 석탄회의 입자들은 대부분 구형의 모양을 띄게 된다. 이 영역에서 절탄기로 진행됨에 따라 입자들이 연소 영역에서 노출된 정도가 길어짐에 따라 비구형 미세입자는 증발과 응축과정에 의해 구형의 입자로 점차 변화되고 또 조대입자의 표면에 확산현상에 의해 유착된 후 응집과정을 겪어 입자는 성장하게 된다. 따라서 이 영역에서 석탄회 입자가 완전히 형성되었으며 입자간의 응집과 집괴에 의해 성장하여 절탄기에서 조사한 석탄회와 같이

완전한 구형의 석탄회를 관찰하였다. 결론적으로 각형구조의 석탄입자가 유동가스를 따라 이동하면서 1차적으로 목탄덩어리가 형성된 후 이 입자들이 파쇄되어 조대입자와 미세입자가 서로 혼재한 형태를 띄게 되고 석탄회가 유동가스를 따라 계속 이동하면서 응집과 집괴과정을 거쳐 완전히 성장한 구형의 입자를 형성하게 된다.

### 5. 결 론

삼천포 석탄화력 발전소의 보일러 내부와 전기 집진기 호퍼에서 채집한 석탄회 분석을 통해 연소시 석탄 입자가 구형의 미세 석탄회 입자로 변환되는 석탄회 형성 메커니즘을 파악하였다.

(1) 석탄회의 입자의 질량크기분포는 0.1~1  $\mu\text{m}$  영역과 20~50  $\mu\text{m}$  영역의 최고값을 지니는 바이모달(Bi-Modal)분포이고 개수크기분포는 유니모달 분포를 나타내며, 주된 성분은 Si, Al, Fe 성분으로 측정되었다.

(2) 전기로에서 연소한 석탄회 입자의 질량평균입경이 67  $\mu\text{m}$ 로 큰 반면 보일러 내에서 포집된 석탄회 입자의 질량평균입경이 12.7~19.9  $\mu\text{m}$ 인 미세입자로 분석되었으며, 그 이유는 보일러 내로 유입된 석탄의 입자가 유동가스를 따라 이동

하면서 입자주위 온도변화의 영향에 의한 열응력을 받아 파쇄, 응집 그리고 용융의 과정을 겪으면서 석탄회로 형성되었기 때문에 입자의 크기가 줄어든 반면 전기로에서 연소한 석탄의 경우 유동가스를 따라 이동하지 않은 관계로 파쇄과정을 겪지 않아 석탄 입자의 크기가 그대로 유지된 것이다.

(3) 석탄회 입자의 구형화가 급진전된 영역은 2차 재열관(Secondary Reheater)으로 전자현미경 분석에 의해 파악되었으며 절탄기(Economizer) 부분에서 완전히 성장한 미세입자의 석탄회가 관찰되었다.

(4) 석탄회의 형성 메카니즘은 석탄 연소시 내부균열, 구조적 결함, 열응력에 의해 목탄구조가 부서지면서 생성되는 파쇄현상(Break-up)에 의한 조대입자 형성과정을 거친 후 고온의 연소 온도에서 광물성분의 증발과 응축과정에 의해 미세입자가 생성된 가스입자 상변화 과정(Gas-to-Particle Conversion)을 겪은 뒤 미세한 석탄회가 유동가스를 따라 계속 이동하면서 응집과 집괴과정을 거쳐 완전히 성장한 구형의 입자를 형성하였다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술 연구조성비(기계공학 ME-96-F-02)와 부산대학교 기성회 재원 연구비의 지원으로 이루어졌으며 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Frank, R. K., Christopher, J. K., and David, W. B., 1984, "New Analysis Techniques Help Control Boiler Fouling," *Power Engineering*.
- (2) 남호기, 1994, "석탄회 이용가치와 재활용 기술," 한국전력공사.
- (3) Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., 1988, "Fundamentals of Air Pollution Engineering," Prentice-Hall, pp. 358~390.
- (4) Flagan, R. C. and Friedlander, S. K., 1988, "Particle Formation in Pulverized Coal Combustion-Review," Recent Developments

- in *Aerosol Science*, Shaw, D.T.(Ed.), A Wiley-Interscience Publication, pp. 26~56.
- (5) Beer, J. M., 1988, "Recent Trends in Coal Combustion Research," *Coal Combustion*, Feng, J.(Ed.), Hemisphere Publishing Corporation, pp. 1~19.
- (6) Chen, J., Sun, X. and Yang, Z., 1988, "The Variation of Surface Area and Porous Structure of Pulverized Coal in the Process of Thermal Decomposition and Combustion." *Coal Combustion*, Feng, J.(Ed.), Hemisphere Publishing Corporation, pp. 155~163.
- (7) Carpenter, R. L., Ronald, D. C. and Yin, F. S., 1980, "Fly Ash from Electrostatic Precipitators : Characterization of Large Spheres." *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(6), pp. 679~681.
- (8) Fisher, G. L., Prentice, B. A., Silverman, D., Ondov, J. M., Biermann, A. H., Ragain, R. C. and McFarland, A. R., 1978, "Physical and Morphological Studies of Size-Classified Coal Fly Ash," *Journal of the American Chemical Society*.
- (9) Sarofim, A, Howard, J. B. and Padia, A. S., 1977, "The Physical Transformation of the Mineral Matter in Pulverized Coal Under Simulated Combustion Conditions." *Combustion Science and Technology*, Vol. 16, pp. 187~204.
- (10) Kaufherr, I. and David, L., 1984, "Comparison of Micron and Submicron Fly Ash Particles Using Scanning Electron Microscopy and X-ray Elemental Analysis." *Journal of the Environ. Sci. Technol.*, 18(7), pp. 544~547.
- (11) Friedlander, S. K., 1977, "Smoke, Dust and Haze-Fundamental of Aerosol Behavior", John Wiley & Son. Inc., pp. 10~23.
- (12) Raask, E., 1985, "Mineral Impurities In Coal Combustion." pp. 61~84, pp. 103~118.
- (13) Fisher, G. L., 1968, "The Morphogenesis of Coal Fly Ash." *Journal of the American Chemical Society*, pp. 433~439.
- (14) Fisher, G. L., 1980, "Size-Related Chemical and Physical Properties of Power Plant Fly

- Ash." *Generation of Aerosol and Facilities for Exposure Experiments*, Klaus, W.(Ed.), pp. 203~214.
- (15) 유주현, 황정호, 1997, "폐기물 소각시 생성되는 유해 중금속 물질과 연소실내 비산재와의 응축, 응집현상에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제21권, 제2호, pp. 264~274.
- (16) Davison, R. L., David, F. S. and John, R. W., 1974, "Trace Elements in Fly Ash Dependence of Concentration on Particle Size," *Journal of the Environ. Sci. Technol.*, 8(13), pp. 1107~1112.
- (17) Furuya, K., Yoshihiro, M., Tohru, C. and Tadashi, K., 1987, "Elemental Characterization of Particle Size-Density Separated Coal Fly Ash by Spectrophotometry, Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry, and Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Analysis," *Journal of the Environ. Sci. Technol.*, 21(9), pp. 898~903.
- (18) Harris, S. J. and Anita, M. W., 1983, "Surface Growth of Soot Particles in Premixed Ethylene Air Flames," *Journal of the Environ. Sci. Technol.*, Vol. 31, pp. 155~167.
- (19) 이방원, 최만수, 황정호, 1997, "입자가 부유된 고온의 제트유동에서 응집과 부력을 고려한 이차원 입자크기 분포해석," 대한기계학회논문집, 제21권, 제3호, pp. 380~391.
- (20) Mueller, S. F. and Robert, E. I., 1984, "Estimates of Particle Formation and Growth in Coal-fired Boiler Exhaust- I, II Observations." *Journal of the Atmospheric Environment*, 28(4), pp. 595~602.
- (21) 이재근, 하만영, 김경천, 김귀순, 구재현, 1995, "온도와 수분함유량 변화에 의한 Fly Ash의 비저항성 특성연구," 대한기계학회 춘계 학술대회논문집(II), pp. 517~522.
- (22) 유호선, 홍희기, 김찬중, 1997, "종방향대류 및 고액밀도차가 고려된 접촉응축에 대한 해석," 대한기계학회논문집, 제21권, 제9호, pp. 1165~1173.