

<論 文>

연소중 미분탄의 단면관측

한 재 현* · 최 상 민**

(1989년 3월 18일 접수)

Cross-Section Micrography of Burning Pulverized Coal Particles

Jae-Hyun Han and Sangmin Choi

Key Words : Coal Combustion(석탄연소), Flow Reactor(유동 반응로), Cross-Section Micrography(단면 현미경 관측법), Pulverized Coal(미분탄), Char(차르)

Abstract

An experimental investigation on the combustion behavior of pulverized coal particles was performed using the cross-section micrography techniques while sample coal particles were collected in-situ from the flow reactor. The coal particles were representative of pulverized bituminous coal undergoing a rapid pyrolysis and combustion, however, quenched at the time when the particles were deposited onto a sample plate. The internal structure of coal particles was observed to change as the residence time increased. Raw coal was observed with sharp edges without any holes inside. Upon injection into a flow reactor, bituminous coal particles showed many holes which represented internal pore formation during the pyrolysis. The relative portion of the remaining matrix of coal was decreasing as the residence time progressed. This direct observation of cross-section of burning particles enabled better understanding of the coal combustion behavior.

1. 서 론

석탄은 기본적인 에너지원으로 오랜 역사를 갖고 있다. 한때 석유와 천연가스의 유용성이 증대되면서 석탄의 중요성이 퇴색되는 듯 하였으나 1970년대에 들어서 석탄의 중요성을 재인식하게 되었다. 또한 석탄은 전세계적으로 가장 풍부한 에너지 자원이므로 이의 효율적 이용방법을 계속해서 개발할 필요가 있다⁽¹⁾.

석탄은 탄종별, 성분과 특성이 각기 다르고 동일한 석탄일지라도 연소전 처리과정, 연소주변 환경 등에 따라 연소과정에 영향을 받는다. 또한 석탄의

연소과정은 입자의 가열, 휘발분의 방출 및 이들의 연소, 입자내 잔류 탄소분 연소 등의 과정기 연소의 초기 단계에서부터 복잡하게 연관되어 일어나므로 연소현상을 파악하기 어렵고, 따라서 예측가능한 일반적인 모형을 개발하는 것은 더욱 어려운 과제이다. 그럼에도 불구하고 최근에 들어서 석탄에 관한 연구가 많이 행하여졌으며, 특히 McLean⁽²⁾ 등은 예혼합 평면화염에 미분탄을 주입한 후 미분탄의 초기연소 과정을 직접 사진과 고배율 그림자 사진으로 촬영하여 석탄입자의 점화를 특성화하고, 급속한 가열로 인해 방출된 휘발분은 입자주위에 존재한다는 것을 알아냈다. 또한 Fynes⁽³⁾ 등은 등급이 다른 석탄을 반응로에 넣고 수소를 가압하여 타르와 차르를 각각 얻었는데 불활성가스인 질소의 충전시와 비교할 때 그 양이 많고, 수소의 압력중

*한국과학기술대학 기계·재료공학부

**정회원, 한국과학기술대학 기계·재료공학부

가에 따라 타르와 찌르의 양도 증가함을 알아냈다. Shibaoka⁽⁴⁾는 얇은 석탄시편을 구멍이 있는 판 사이에 넣고 가열하여 구멍을 통해 석탄의 거동을 탄소화단계, 연소단계로 나누어 고찰하였다. Goodarzi⁽⁵⁾ 등은 석탄을 질소가 충전된 반응로에 넣고 가열하는데 이 때 가열율에 따른 찌르의 단면변화를 고찰하여 가열율이 증가하면 찌르에서의 비등방성이 크게 발달되는 것을 알아냈다. 그리고 Choi⁽⁶⁾ 등은 유동관 반응로에 주입된 미분탄을 급수냉(water quenching) 후 채집하여 연소 초기단계에서 석탄입자의 내부구조변화를 관찰하였는데, 내부구조변화는 주변온도, 산소농도, 반응로에서의 체제시간에 영향을 받게 된다는 것을 알아냈다. 이와 같이 석탄연소 현상의 규명을 위해 각기 다른 여러가지 방법으로 시도함으로써 석탄연소 연구에 큰 진전을 가져왔다. 그러나 석탄연소과정의 단계별 연구에 유리한 단면관측법은 제한된 조건하에서만 행해졌는데, 실제 연소 상황에서 연소중인 미분탄을 채취하여 관찰하는 것이 가장 바람직한 것으로 여겨져 왔다. 이를 통하여 석탄연소 과정중에 입자들이 겪는 과정을 직접적으로 관측할 수 있는 것이다.

본 연구에서는 미분탄의 연소과정을 파악하기 위하여 메탄-공기 예혼합 화염에서 연소중인 석탄입자를 단계별로 여러 위치에서 순간 냉각에 의해 채취한 후 단면을 관측함으로써 미분탄 연소과정의 해석을 시도하였다. 산소 함유량이 미분탄 연소에 미치는 영향을 고려하기 위하여 반응로에서의 연소조건을 바꾸어 보았다. 또한 미분탄 연소과정의 이해를 돕기 위해 미분탄을 도가니에 넣어 전기로에서 가열하여 얻은 찌르와 공기중에서 가열하여 얻은 회(ash)에 대한 단면을 관측하였다. 시험용 미분탄은 국내 발전소 등지에서 대량 소비되는 수입 유연탄을 사용하였다.

2. 실험장치와 실험방법

석탄입자의 연소환경에서의 거동을 관측하기 위한 시험로로서 층류 유동관 반응로(laminar flow-tube reactor)를 제작하였다. Fig. 1은 장치의 개념도를 보여준다. 이 장치로 대기압 상태에서 고온의 연소환경(온도범위 1000~2200K, 산소물분율 0~20%, 유동속도 0.7~1m/s)를 만들어 미분탄입자를 주입시킨 후 연소과정 중의 미분탄을 채취

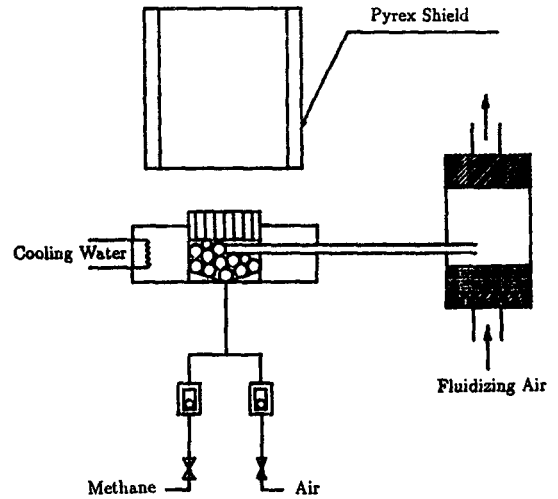


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

하여 분석할 수 있다. 연소장치는 메탄-공기 예혼합기의 층류 유동관으로 메탄과 공기의 유량을 조절하여 연소후류(downstream)의 산소 조성비를 조정한다. 냉각수에 의하여 냉각되는 주철제 버너 케이싱 안에 직경 4mm 강구를 채워 넣어 메탄-공기 예혼합기를 버너출구에 고르게 공급되도록 하였다. 강구를 통과한 혼합기는 두께 10mm, 지름 45mm의 주철판위에 2mm 간격으로 뚫려 있는 직경 1mm의 작은 구멍을 통과하여 화염을 형성한다. 화염면은 다공질판으로부터 약 5mm 후류(downstream) 위치에 형성되며 지름이 약 45mm이다.

석탄입자는 버너의 다공질판 하단에 내경 1.6mm의 스테인레스 강관을 삽입하여 5mm 간격으로 7개의 직경 1mm인 구멍을 통해 고르게 공급되도록 하였다. 미분탄은 직경 50mm, 길이 200mm인 아크릴제 용기 안에서 유동상(fluidized bed)이 되어 내경 0.6mm의 흡출관을 통하여 공기와 혼합된 일부입자가 이송된다. 유동상은 주 유동원으로 공기를 사용하며 약 200mmH₂O 정도의 압력을 유지하여 준다. 본 실험에서 주로 사용한 미분탄은 호주산 Palmco사 공급분으로 한국전력(주)의 발전용 유연탄으로 장기 공급되는 탄종이며, 크기는 0.149mm 표준망체(100mesh)를 통과하고 0.074mm 표준망체(200mesh)에 남은 것으로 택하였다.

연소실험에서는 먼저 예혼합 화염을 형성하기 위해 메탄을 소량 공급하여 확산화염으로 착화한 후, 공기를 서서히 공급하여 안정된 화염을 얻는다. 여

기서 메탄은 0.07m^3 용적의 붐베에서, 공기는 압축 공기관으로부터 각각 공급받으며, 버너에 공급되는 압력은 각각 1.5kgf/cm^2 로 조정하여 유량을 보정하였고 이를 토대로 등가비 [$\phi = (\text{fuel}/\text{air}) / (\text{fuel}/\text{air})_{\text{stoich}}$]를 산출한다. 공기의 유량은 $5.80 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ (이때 메탄의 유량이 $0.61 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 일 때 $\phi = 1$)로 고정하고, 메탄의 유량을 $0.51 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ($\phi = 0.84$)로 하여 버너 출구에서 후류쪽으로 각각 5, 10, 40, 80, 120mm의 위치에서 미분탄을 채취한다. 연소 후류 반응 영역을 산소 희박 상태로 유지하기 위하여 메탄의 유량을 $0.71 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ($\phi = 1.16$)로 증가시킨 다음 버너 출구에서 각각 5, 10, 50, 100mm 떨어진 곳에서 미분탄을 채취한다.

실험을 통하여 샘플된 연소과정중의 미분탄과 비교하기 위해 석탄분석 방법으로 가장 표준적으로 사용되는 석탄류의 공업분석방법(KS E 3705)에 의해 찌르와 회를 얻는다. 찌르는 동종의 미분탄 1g을 뚜껑이 있는 도가니(약 10ml)에 넣고 전기로에서 1200K로 7분간 가열하여 얻고, 회는 1g의 미분탄을 도가니에 넣고 뚜껑을 연 상태에서 전기로에 넣고 전기로 뚜껑을 약간 열어 통풍시키면서 1070K로 질량이 일정할 때까지 가열하여 얻는다.

연소과정중의 미분탄을 채취하기 위하여 직경 20mm, 길이 20mm인 아크릴관의 한쪽을 막고 에폭시(epoxy)를 넣은 후 약 10분 정도 경화시켜 홀더(holder)를 제작한다. 이때 홀더의 한쪽면은 경화가 덜된 상태이므로 이 면이 연소 후류의 각 위치에서 버너 출구쪽으로 향하도록 하여 약 30초 정도 홀더를 놓으면, 연소중 미분탄이 순간 냉각이 되며 쉽게 달라붙게 된다. 홀더의 표면에 달라붙은 미분탄을 연마할 수 있도록 에폭시를 다시 미분탄 입자들이 채워진 면에 약 5mm 두께로 부어 경화시켜 시편 제작을 완성한다. 원탄, 찌르, 회 경우도 홀더를 제작하여 한쪽면에 각각의 입자들을 달라붙게 한 후 동일한 방법으로 시편을 제작한다. 시편에 채워진 입자들의 단면을 관찰하기 위해 연마작업을 하게 되는데 먼저 연삭기로 시편의 거친 부분을 갈아낸 후, CW 1000 사포면이 있는 연마기(polisher)에서 연속적으로 물을 공급하면서 채취된 입자들이 붙은 면까지 조심스럽게 연마한다. 시편면의 긁힌 흠을 적게 하기 위해 알루미늄 연마기(alumina polisher)를 사용하여 연마한다. 다시 시편은 3μ 다이아몬드 페이스트 연마기(diamond

paste polisher)에서 DP 윤활제를 공급하면서 연마한 후 1μ 다이아몬드 페이스트 연마기를 사용하여 표면 연마를 마무리한다.

연마된 시편면에 나타난 여러 형태의 미분탄의 조직은 Nikon UFX-II 광학현미경 카메라로 100배 확대한 후 35mm 흑백 필름(Kodak TX ASA 100)을 사용하여 사진 촬영된다.

또한 미분탄의 연소과정 중 휘발분 방출을 확인하기 위해 연소후류 각 위치에서 슬라이드 글라스 판으로 연소중의 미분탄을 채취하여 광학현미경 카메라로 25배 확대하여 사진촬영한다.

3. 실험결과

메탄-공기 예혼합화염은 등가비 $\phi = 0.84$ 일 때 버너출구에서 후류쪽으로 약 5mm 부근에서 비교적 균일한 연청색 화염을 형성하며, 등가비 $\phi = 1.16$ 일 때는 높이 10mm인 원추형의 주름진 연녹색 예혼합 화염과 주변공기와 반응에 의한 연청색을 띤 원기둥 확산 화염으로 이루어진다.

화염이 형성된 후 미분탄을 공급하였을 때 석탄 입자는 예혼합 화염을 지난 후 밝은 노란빛으로 갑자기 발광하는데 이를 착화라 볼 수 있다. 착화된 석탄입자는 밝은 빛을 짧은 시간동안 발한 뒤 발광체의 크기가 줄어든 상태로 이어진 후, 빛은 소멸하게 된다. Fig. 2(a), (b)에 전형적인 입자의 발광체적 사진을 보여주고 있다. 초기의 두꺼우며 밝은 구간은 $\phi = 1.16$ 일 때보다 $\phi = 0.84$ 일 때 짧은데, 이는 산소의 함유량이 많기 때문에 짧은 시간 동안 가연성분이 소진되는 것으로 판단된다.

$\phi = 0.84$ 에서 시료 채취 위치를 고려하면 5mm는 메탄-공기 예혼합 화염이 형성되기 직전의 위치이며, 10mm는 예혼합 화염을 지난 후 석탄입자의 착화전 위치이고 40mm는 밝은 빛을 발하는 구간이며, 80mm는 빛의 밝기가 덜한 구간에서 채취되었으며, 120mm는 빛이 소멸된 위치에서 채취된 것을 뜻한다. $\phi = 1.16$ 에서, 5mm는 석탄입자가 화염을 통과하기 전 위치이며 10mm는 화염의 위치, 50mm는 밝은 빛을 발하는 구간이며, 100mm는 빛이 약하게 발하는 위치이다.

이와 같이 상이한 연소조건에서의 미분탄의 연소과정을 파악하기 위하여 원탄, 연소중의 미분탄($\phi = 0.84$, $\phi = 1.16$), 찌르, 회 등에 대한 단면사진을 각각 촬영하였다. 각각의 경우에 있어 시편에

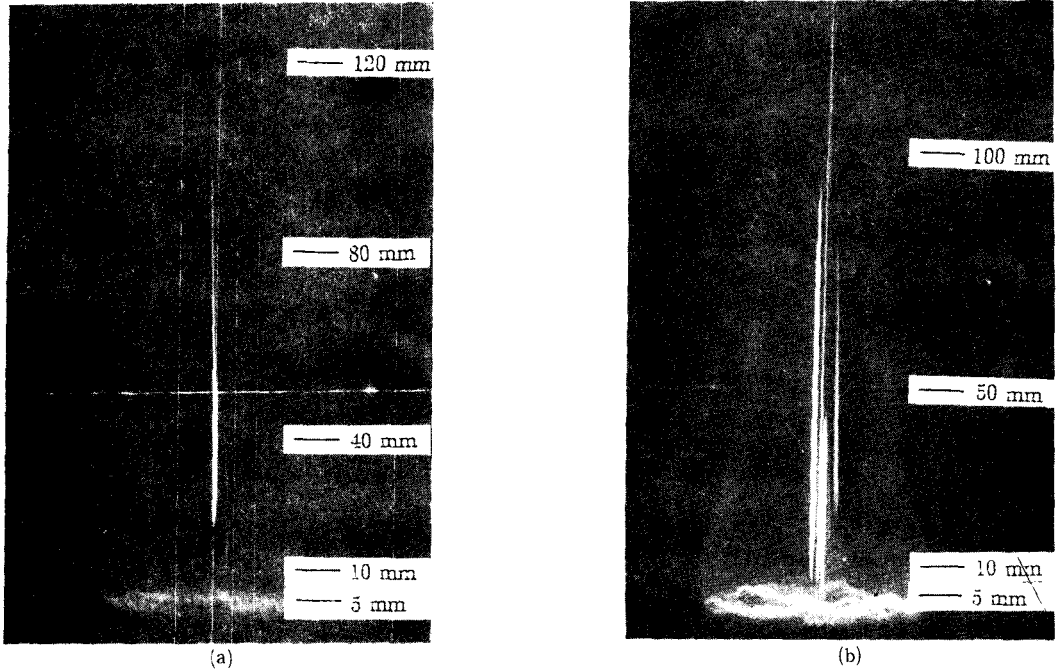


Fig. 2 Typical luminous streak photographs at (a) $\phi=0.84$, (b) $\phi=1.16$

붙은 입자들의 단면을 관측하였을 때 대부분 미분탄의 단면구조변화는 거의 유사한 경향을 나타내었고, 각 경우의 사진은 대표적인 것이다. 먼저 이들 단면에 대해 각각 살펴본 후 이를 바탕으로 미분탄의 연소과정을 설명하고자 한다.

3.1 원 탄

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 미분탄은 크기와 성분에 있어 균일하지 않기 때문에 각 입자들의 구조가 서로 다르다. 또한 미분탄은 전형적으로 경계가 날카롭고 일부에서는 미세한 기공(pore)의 관측이

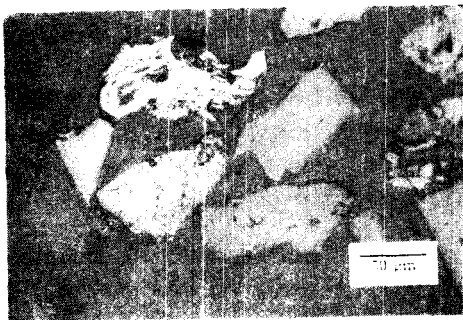
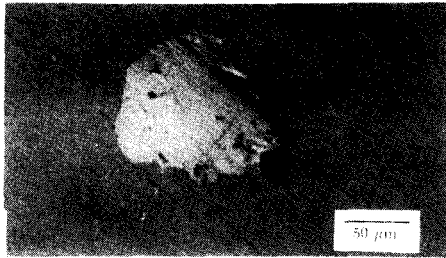


Fig. 3 Cross-section micrograph of raw coal

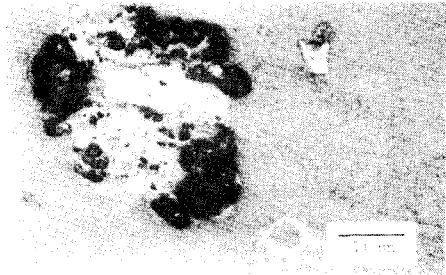
가능하다. 또한 입자에 따라서는 띠 구조를 갖거나 또는 빛의 반사율이 크게 다른 물질로 구성되어 있는 것도 볼 수 있다.

3.2 연소중의 미분탄

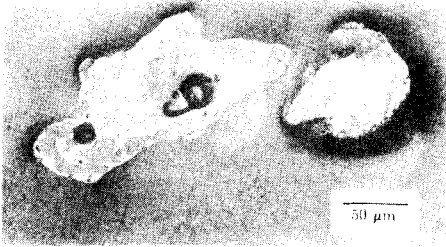
Fig. 4(a), (b), (c), (d), (e)는 $\phi=0.84$ 에서 연소중인 미분탄의 단면사진을 보여준다. 이 등가비 조건에서 연소후류의 산소농도는 3.6% 농후한 상태이고, 온도는 $1750 \pm 150K$ 이었다. 예혼합 화염전에서 채취된 미분탄 단면사진인 Fig. 4(a)는 미분탄의 표면 근처에서 열분해가 시작되어 내부기공(pore)이 형성되는 것을 보여주며, 크기가 각기 다른 기공과 미세하게 갈라진 금(crack)이 보인다. 그러나 뒤에 검토할 입자들에 비하여는 거의 원탄의 형상을 유지하고 있는 것으로 보인다. Fig. 4(b)는 미분탄이 예혼합 화염을 지난 것으로 기공이 상당히 크게 자랐으며 입자의 크기가 원탄에 비해 부풀어 오른 것을 알 수 있다. 이같은 현상은 역청탄(bituminous coal)의 경우 흔히 나타나며 입자 직경의 크기의 변화율을 부풀음지수(swelling index)라 정의하고 석탄특성 분석의 한 가지 방법으로 쓰고 있다 [ASTM D720-83, KS E 3710]. 또한 이 입자의 경



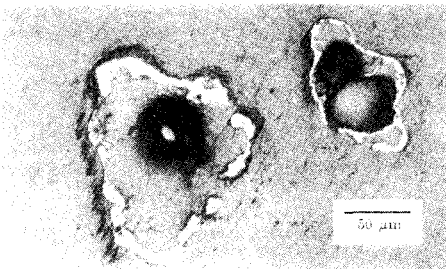
(a) 5mm downstream



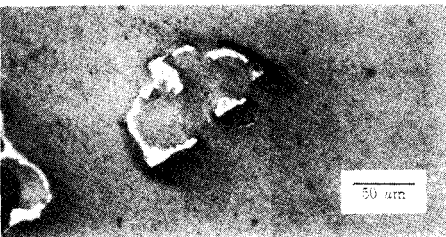
(b) 10mm downstream



(c) 40mm downstream



(d) 80mm downstream

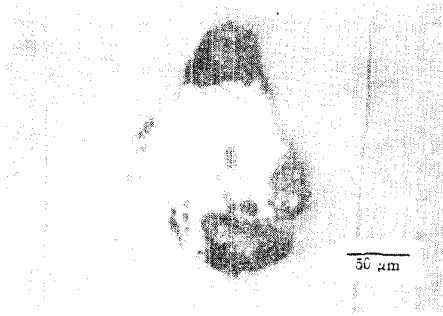


(e) 120mm downstream

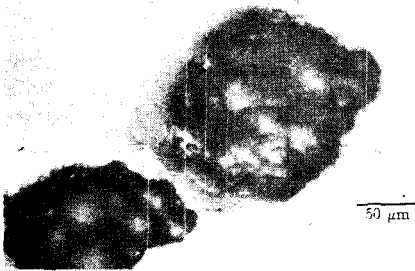
Fig. 4 Cross-section micrographs of burning coal particle sampled in the flame with equivalence ratio $\phi = 0.84$ at different residence times

우에 표면 가까운 부분이 먼저 가열되어 일부분씩 부분적으로 연화(softening)되어 휘발분이 방출되는 것으로 보인다. Fig. 4(c)는 입자의 단면 전체로부터 이미 열분해에 의한 휘발분 방출이 이루어졌고 기공이 있는 벽의 뼈대가 남아 있음을 보여준다. 이때 남은 벽은 시편 처리 과정에서 상대적으로 연마가 덜된 것으로 보아 매우 단단한 것으로 추측된다. Fig. 4(d)는 석탄 입자 내부의 여러 기공은 합쳐져서 커다란 한 개의 공동이 형성되며 입자의 단단한 껍질만 존재한다. 이때 석탄입자는 연소 환경에서 산소가 입자의 내부에까지 확산되어 연소 반응이 일어날 수 있는 조건이 됨을 알 수 있다. Fig. 4(e)는 석탄 입자의 연소가 진행되면서 입자의 크기가 작아지고 벽에 구멍이 크게 생긴 것을 보여준다.

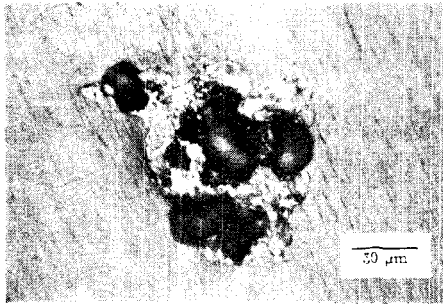
Fig. 5(a), (b), (c), (d)는 $\phi = 1.16$ 일 때 연소 반응로 중앙의 각 위치에서 채취한 미분탄의 단면을 보여준다. 이 등가비의 연소 반응로에서는 연료가 과잉인 상태로서 산소의 농도는 0이고, 온도는 $1850 \pm 90K$ 이었다. Fig. 5(a)는 미분탄이 예혼합 화염에 진입하기 바로 직전의 것으로 가열에 의해 표면 부근에 커다란 기공이 생겼으며 균열에 의한 破斷線이 뚜렷이 나타났다. 그러나 이 균열이 입자가 샘플 홀더에 닿으면서 급냉에 의한 열충격 때문에 생긴 것인지 아니면 입자 내부 기질의 특성 때문에 발생한 것인지는 쉽게 결론지을 수 없다. 특히 균열이 일어난 부위에서 기공이 커나가고 있는 것으로 보이는 것은 흥미로운 일이다. 즉 균열이 생김으로써 열전달이 더욱 증진되고 이로서 내부 용융에 의하여 기공이 더욱 커지는 것으로 이해할 수 있기 때문이다. Fig. 5(b)는 예혼합 화염 부근에서 채취된 것으로 입자의 단면 전체가 하나의 커다란 기공(pore) 또는 거품(bubble)으로 통해졌고, 표면주위는 얇은 벽이 형성되어 있다. 입자 중앙의 검은 부분은 기공의 내벽에 용융된 상태의 석탄성분이 분출되지 않은채 벽면에 부착되어 다시 응고된 것이다. 석탄의 외부 표면은 원탄의 날카로운 경계면은 찾아볼 수 없으며 부풀음 과정으로 변형되었거나 휘발분 방출 및 표면 반응에 의하여 심각하게 부식 또는 침식된 것으로 보인다. Fig. 5(c)는 크기가 다른 기공이 복잡하게 분포되어 보이며 앞의 Fig. 5(b)와 비교하여 커다란 차이를 관측하기 어려운 것으로 보아 이 단계에서는 체제 시간의 변화에 따른 효과보다는 입자와 입자의 차이에서 나타나는



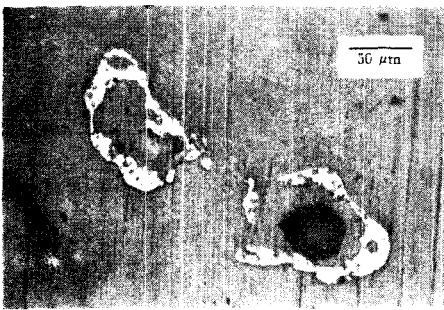
(a) 5mm downstream



(b) 10mm downstream



(c) 50mm downstream



(d) 100mm downstream

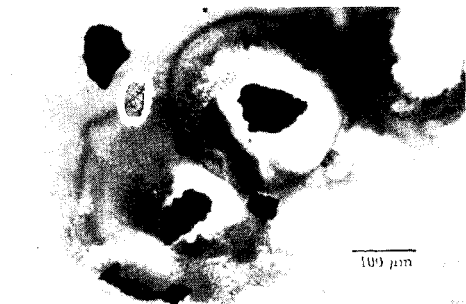
Fig. 5 Cross-section micrographs of burning coal particle sampled in the flame with equivalence ratio $\phi = 1.16$ at different residence times

불균일성의 결과가 더욱 클 것으로 보인다. Fig. 5 (d)는 입자의 크기가 초기 연소과정보다 작아졌다. 이는 연소에 의해 입자 외부로 질량 손실이 계속되어 전체적으로는 석탄입자가 줄어든 것처럼 보이게 된 것이다. 그러나 아직도 전체적인 골격이 그대로 유지되고 있으며 내부벽면에 기질(matrix)이 남아 있는 것이 보인다. 이는 고온의 산소 부족 상태에서 일정시간 경과한 후에도 상당량의 질량이 입자에 남아 있으며 이것을 석탄의 공업분석에서 정의하는 잔류탄소분과 연결지어 생각할 수도 있다.

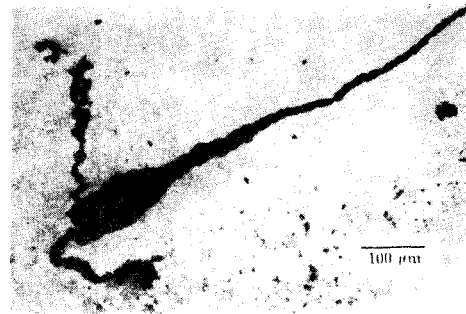
3.3 슬라이드 글라스판에 의한 샘플링

$\phi = 0.84$ 에서 연소중인 미분탄을 현미경용 슬라이드 글라스판을 유동의 직각 방향으로 약 30초 동안 놓아서 채취한 것으로 입자의 표면을 광학 현미경 카메라로 사진 촬영하였다.

Fig. 6(a)는 메탄-공기 예혼합 화염을 지난 직후의 미분탄을 채취한 것으로 입자의 가열에 의한 휘발분이 입자주위에 공모양으로 방출되는 것을 입자



(b)



(a)

Fig. 6 Micrographs of burning coal particle sampled by slide plate in the flame with $\phi = 0.84$ at (a) 30mm downstream (b) 50mm downstream

주위의 검은 띠로 알 수 있다. 이것은 촛불들과 같은 확산화염을 관측할 때 나타나는 그늘음과 비슷한 모양을 나타내고 있다. 이 때는 입자의 외형관측으로 볼 때 커다란 구조적 변화의 징조가 없으므로 입자 내부의 용융에 의한 타르의 분출은 아직 일어나지 않은 것으로 보인다. Fig. 6(b)는 버너 출구에서 50mm 하류 위치, 즉 석탄화염의 빛이 가장 밝은 구간에서 채취한 미분탄을 보여준다. 이때 입자에서 나오는 길다란 꼬리모양의 물질은 입자의 여러 방향으로 방출되는 것으로 보인다. 이들은 Fig. 6(b)에서와 같이 입자로부터 연결되어 있는 경우도 있으며 일부는 작은 입자 형태로 부서진 것도 보인다. 석탄입자가 가열되어 휘발분이 방출되는 과정을 볼 때 초기에는 방출된 휘발분이 확산화염에서 보이는 것과 같이 입자 주위에 거의 동심구 형태로 나타나며, 그 후 차차 입자가 가열되면서 용융 액체 상태와 비슷한 물질이 입자로부터 제트(jet)처럼 분사되고 있는 것을 볼 수 있다. 이들의 방향이 일정하지 않고 입자주위에 상당량이 뭉쳐 있는 것도 흥미로운 것이다.

3.4 찌르(Char)

찌르는 공업분석 규격에서 정한 바와 같이 원탄을 1200K로 7분간 가열하여 휘발분을 제거함으로써 얻는다. 이때 휘발분 비율 즉, 기준질량의 원탄에 대한 방출된 휘발분의 비는 29%이다. Fig. 7은 찌르의 단면을 나타내는데 입자의 크기가 매우 크며 이것은 개개의 입자의 부풀음뿐 아니라 인접한 수개의 입자가 용융되면서 뭉쳐지고 그 가운데 더욱 커다란 내부기공이 형성된 것으로 풀이할 수 있다. 특히 기공의 벽이 연소과정의 미분탄에 비해 두께에 있어 현저히 큰데, 이는 미분탄 표면에서의 산화가 많이 일어나지 않고 단순히 열분해에 의한 휘발분 방출이 일어났기 때문으로 보인다. 29%에 달하는 질량이 감소하였는데 이중 상당부분이 기체 상태로 방출되었을 것으로 추측할 수 있으나 가열과정시 관측에 의하면 미소한 입자가 불꽃 형태로 이루어 샘플로부터 튀어나오고 있는 것으로 보아 어느 정도의 용융 액체 또는 분쇄된 고체로서 입자로부터 방출된 것도 있음을 간과할 수 없다.

3.5 회(Ash)

회는 공기중에서 1070K로 질량의 변화가 없을 때까지 가열하여 얻은 것으로 이를 통해 미분탄의



Fig. 7 Cross-section micrograph of Char prepared following the procedure of typical proximate analysis (i.e. 7min. heated at 1200K)

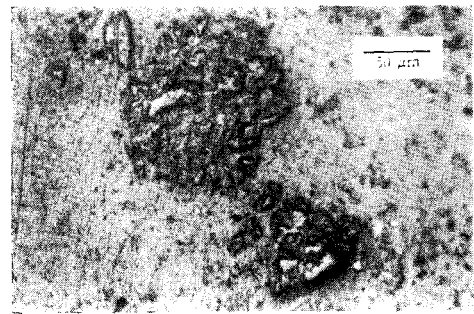


Fig. 8 Cross-section micrograph of Ash

연소완료후의 구조를 예측할 수 있다. Fig. 8은 회 의 단면을 나타내는데 더 이상 연소되지 않는 물질로 구성된다. 앞에서 본 불완전 연소상태의 미분탄 입자와 비교하여 기질의 반사도(reflectivity)가 유사한 일부 입자와 모양이 비슷한 것을 볼 수 있다(예: Fig. 7 좌하단의 입자와 비교). 또한 회 의 경우 외형 크기가 원래 입자 크기보다 작았는데 이것을 휘발분 방출과 동시에 변형이 일어났던 기질(matrix)은 거의 연소과정을 통하여 없어진 것으로 판단된다.

4. 미분탄 연소과정의 이해

앞서 미분탄의 단면을 연소단계별로 살펴보았는데, 이를 토대로 미분탄 연소과정의 해석에 참고할 수 있다. 먼저 크기와 성분이 균일하지 않고 경계가 날카로운 원탄은 화염 근처에서 가열되면 입자 표면 주위에서 열분해가 되어 매우 복잡한 성분의 휘발분을 배출함과 동시에 내부에 기공(pore)이 자라기 시작한다. 아울러 급속한 가열로 석탄입자

의 균열도 나타나며 이로써 입자 내부로 반응성 기체(즉 산소를 함유한 공기)가 침투하여 열전달을 촉진시킬 수 있는 가능성을 갖고 있다⁽⁸⁾. 열분해가 급속히 진행되어 입자 내부에서는 국부적으로 용융되는 부분이 늘어나며 입자 밖으로 방출되는 열분해 생성물의 양이 증가하게 되고 이에 상응되는 기공은 입자내부에서 커지면서 입자 자체도 부풀어진다. 입자로부터 방출된 휘발분은 추가적으로 물리적 또는 화학적 변화를 겪게 된다. 이러한 질량의 배출은 그 양이 매우 많으며, 가연성 물질이 주를 이루어 화염형성에 큰 역할을 함으로써 석탄연소 과정에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 이와 거의 같은 시기에 입자는 착화되어 밝은 빛을 내게 되는데, 이때 겉보기 화염의 크기는 입자의 실제 직경에 비하여 수배 정도 커다랗게 관측되고 있다.

한편 석탄 휘발분의 연소과정은 가연성 휘발분이 석탄입자로부터 방출되어 외기에 포함되어 있는 산소와 접촉하여 연소가 일어나게 된다고 간단히 설명할 수도 있으나 휘발분의 구성 성분이 다양하고 그에 따라서 생성물 및 산화물이 각기 달라지므로 이를 완벽하게 기술하기란 매우 어렵다⁽⁹⁾. 그러나 슬라이드 글라스판에 의한 미분탄 채취사진에서 알 수 있듯이 열분해 생성물들은 초기 과정에서 입자 주위에 머물러 있다. 이를 휘발분 구름이라는 용어로 부르며, 이 구름은 석탄입자와 거의 동심구형의 형태를 갖고 있다. 휘발분 연소가 진행되는 동안에 관측되는 휘발분 구름은 입자로부터 방출된 열분해 생성물로 시간이 지남에 따라 연소에 의하여 소진되어가는 가연성 물질이 주성분이다. 이것은 석탄입자 주위에서 이산화탄소가 형성되는 것으로 판단한 최근의 연구결과⁽¹⁰⁾와 일치한다.

이러한 초기의 밝은 구간은 짧은 순간(약 5 msec) 동안에 일어난 후 찰르(char)라 불리는 비교적 간단한 입자의 잔류탄소와 그리고 입자로부터 튀어 나왔으나 아직 산화가 완료되지 못한 일부 작은 크기의 가연성 열분해 생성물들이 산소와 고체 표면에서 반응하는 표면산화를 하게 된다. 이 표면산화에 소요되는 시간은 열분해 생성물 산화에 비하여 비교적 길고 그 과정을 통하여 고체형태의 입자는 분해 또는 파괴되며 불연성 잔류분 특히 각종 금속성분의 산화물들이 주로 이루어 회(ash)를 형성하게 된다. 회는 미분탄과 비슷한 크기인 수십 마이크로 크기의 것에서부터 마이크로 이하 크기의 미세구조도 갖고 있다.

5. 결 론

미분된 역청탄 입자를 메탄-공기 예혼합 화염으로 구성된 유동반응로에 주입시키면서 이를 연소과정 중간에서 급냉 채취하는 방법을 이용하여 미분탄 연소과정에서 석탄입자의 거동을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단면분석법을 연소중 입자에 대하여 적용하여 입자 연소과정을 관찰하였다. 연소중 입자의 직접 샘플링 방법은 지금까지 시도된 바가 없었으나 비교적 간단한 장치로서 적용이 가능하였다.

(2) 연소중 입자의 단면사진을 원탄의 단면 및 연소과정 중 방출되어 입자 외부에 존재하는 물질을 채집한 관측사진과 비교하여 검토함으로써 초기 연소과정에서 석탄입자 주위에 존재하는 물질이 입자 내부의 구조 변화와 함께 나타나며 이것이 겉보기에 휘발분 구름 형태로 나타남을 확인하였다.

(3) 외부 기체에 산소가 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 볼 때 초기 과정에서 입자의 상당량은 산소의 존재 여부와 관계없이(즉 열분해만으로) 입자로부터 방출됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Norman Chigier, 1981, "Energy, Combustion and Environment", McGraw-Hill, pp. 17~99.
- (2) McLean, W.J., Hardesty, D.R. and Pohl, J.H., 1981, "Direct Observations of Devolatilizing Pulverized Coal Particles in a Combustion Environment", 18th Symposium (International) on Combustion, pp. 1239~1248.
- (3) Fynes, G., James, R.G., Ladner, W.R. and Newman, J.O.H., 1984, "Structural Differences in the Tars and Chars from the Pyrolysis of Coals of Different Rank in Hydrogen and in Nitrogen", FUEL, Vol. 63, pp. 897~903.
- (4) Shibaoka, M., 1969, "Combustion of Coal in Thin Sections", FUEL Vol. 48, pp. 273~295.
- (5) Goodarzi, F. and Murchison, D.G., 1978, "Influence of Heating-Rate Variation on the Anisotropy of Carbonized Vitrinites", FUEL, Vol. 57, pp. 273~284.
- (6) Choi, S., Haussman, G. and Kruger, C., 1985, "A Microscopic Observation of the Internal Structure of Partly-Reacted Montana Rosebud Subbituminous Coal Particles", Western States Section/The Com-

- bustion Institute.
- (7) Seeker, W.R., Samuelsen, G.S., Heap, M.P. and Trolinger, J.D., 1981, "The Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", 18th Symposium (International) on Combustion, pp. 1213~1226.
- (8) Krazinski, J.L., Buckius, R.D. and Krier, H., 1979, "Coal Dust Flames: A Review and Development of Model for Flame Propagation", Prog. Energy Combustion Science, Vol. 5, pp. 31~71.
- (9) 최상민, 1988, "미분탄 초기 연소과정", 한국전력 workshop, pp. 155~178.
- (10) Waters, B.J., Robert, G.S., Laurendeau, N.M. and Mitchell, R.E., 1988, "Evidence for Formation of CO₂ in the Vicinity of Burning Pulverized Carbon Particles", Combustion and Flame, Vol. 74, pp. 91~106.