

## 저급탄 미분기 화재발생 인자분석 연구

길상인\*\* · 박호영\*\* · 김영주\*\* · 윤성환\*\*\*

### Engineering Control of Mill Fire for High Volatile Sub-bituminous Coal

Sang-In Keel, Ho-Young Park, Young-Joo Kim and Sung-Hwan Youn

#### ABSTRACT

Lots of Coal power plants (about 30) using bituminous coals are being run in Korea. The use of high volatile low grade sub-bituminous coal is increasingly extended because of imbalance between the worldwide coal supply and demand. Mill-fire has been an important issue since the use of such sub-bituminous coal. In existing coal plants of Korea, shutdown of coal and air supplies could be only a way, and an alternative has not been found in suppressing the mill fire. The inside fowfield in the mills has a highly fuel-rich, low temperature, and high velocity and non-reactive such that it could be a nonreactive system essentially. Nevertheless, occasional fire-occurrence could be attributed to the existence of an ignition source. However it has not been so far investigated in detail. The current work has a focus on suppressing the mile fire via some parametric experimental study such as effects of temperature, residence time, ignition source, and inert gas mixing. The results show that a small amount of CO<sub>2</sub>- or N<sub>2</sub>-mixing with air is very effective in suppressing fire formation even at high temperatures or flying sparks. The results suggest that exhaust gas recirculation into the mill should be an alternative to suppress mill fire.

**Key Words** : Mill, Sub-bituminous coal, Fire control, Exhaust gas recirculation

#### 1. 서론

500 MWe급 표준화력에서 하루에 사용되는 석탄의 양은 약 5000톤이며 국내 화력발전소에서 하루에 소모되는 석탄의 양은 대략 15만톤에 이른다. 석탄의 국내 생산이 거의 없는 상황에서 해외로부터 반입되고 있는 석탄의 상당량은 저등급 아역청탄이며 이러한 탄이 차지하는 비율도 지속적으로 증가하는 실정이다.

대부분의 국내 화력발전소는 양질의 역청탄을 기준으로 설계되었으며 저등급 아역청탄의 반입을 전제로 설계, 건설된 설비는 극히 일부에 불과한 실정이다. 저등급 아역청탄은 발열량이 낮은 반면 황의 함유량이 적고 일부는 고휘발성 특성을 갖는다. 껍의 형태로 수입된 석탄은 연소실에 투입되기 전에 미분과정(pulverizing process)을 거친다. 석탄 덩어리를 미분기에서 잘게 분쇄하여 공기를 이용하여 연소실로 이송하게 되는데 이때 미분탄의 이송에 사용되는 공

기의 양은 폭발이나 화재의 안전을 위하여 이론공기량의 20% 정도로 제한하고 있다. 그러나 저등급 아역청탄의 경우 이와 같은 안전 영역에서 초차 화재나 폭발이 빈번히 일어나고 있다[1].

미분기 화재와 관련된 연구는 크게 다음의 두가지로 분류된다. 한가지는 문제가 되는 탄의 분류, 저등급 아역청탄의 열적특성이나 물리적 조성의 차이를 다룬 것이며 다른 하나는 화재가 빈번한 탄을 사용함에 있어서 소화 방법 또는 대응공정에 관한 것이다[2]. 이외에 미분기 화재를 억제하기 위한 간접적 연구로 화재감지와 소화와 관련한 장비에 관한 것도 있다. 이상과 같이 기존의 연구에서 화재의 핵심인 발화현상이나 화재발생 원인에 근접하지 못하고 있는 이유로는 미분기의 복잡한 구조, 발화현상 해석의 한계 그리고 실제 운전설비를 이용한 검증의 어려움 등을 들 수 있다.

본 연구의 목적은 미분기의 화재 발생 원인을 규명 및 제어 방안 도출이며 구체적인 수행방법으로서 미분기 모사한 반응로를 이용하여 미분기내에서 화재를 일으킬 수 있는 인자를 도출하고 반대로 화재 및 반응 억제하는 인자는 어떠한 것이 있는지 조사하였다. 이러한 연구를 통하여 상용 화력발전소의 미

\* 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

\*\* 한전전력연구원 그린에너지연구소

\*\*\*북해도대학

† 연락저자, sikeel@kimm.re.kr

분기가 보다 안전하게 운전될 수 있는 방안을 확립함으로써 발전 설비나 발전소 운전요원의 안전 확보에 기여하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

미분기 화재가 모든 탄종에서 관찰되는 현상은 아니다. 다양한 탄에서 공통되게 화재가 일어난다면 미분기의 구조나 운전조건 등과 연관된 문제로 볼 수 있으나 특정탄 그것도 고휘발 저등급 아역청탄에 국한하여 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 미분기 구조에 대한 영향을 제외한 탄의 물성, 분위기 온도, 점화원 등 화재와 연관될 수 있는 발화인자에 대한 실험적 연구가 가능하도록 Fig. 1과 같은 미분기 모사 반응 실험장치를 제작하였다.

실험장치는 크게 미분탄 및 산화제 공급장치, 반응로 그리고 분석 및 후처리장치 등 세부분으로 구성되어 있다. 상용설비와 동일한 크기의 입자(약 70  $\mu\text{m}$  직경)로 사전에 분쇄된 탄은 연속 급탄기(coal feeder)를 이용하여 공급되며 공기는 예열기를 사용하여 온도를 조절(최대 600 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가능)하여 반응로에 유입된다. 상용 미분기에서는 미분탄의 이송에 이론공기량의 약 20%를 사용하고 있으며 이는 연료의 가연한계를 벗어나 보일러의 버너에 이르기 전에 화재가 발생하는 것을 억제하는 역할을 하고 있다. 본 실험에서도 이론공기량의 20%를 기준조건으로 설정하였으며 비교실험에서는 이론공기량의 4%에서부터 125%까지 유량을 변화시키며 모사반응로에서 일어나는 현상을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 실험탄 성분 및 열중량 분석

미분기 화재가 발생하는 대표적인 탄으로는 Roto-

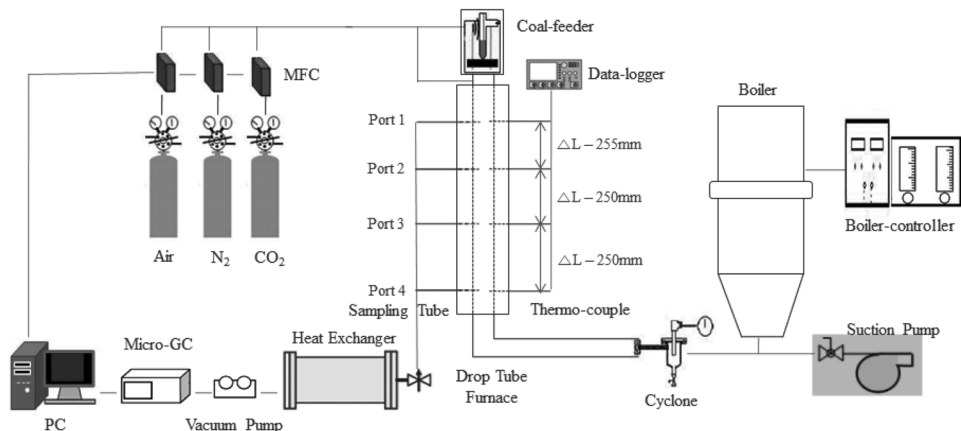
**Table 1.** Proximate and ultimate analysis of test coal

Roto south	Proximate Analysis (wt.%)	Moisture	7.6
		Volatile matter	45.9
		Fixed carbon	42.5
	Ultimate Analysis (wt.%)	Ash	4.1
C		63.3	
H		4.6	
O		24.1	
N		1.3	
		S	0.1

south, Adaro, ECO 등이 있다. 이 가운데 상용 발전소에서 직접 채취한 Roto-south탄을 실험에 사용하였으며 Table 1은 실험탄에 대한 3성분과 원소분석 결과를 보여주고 있다.

미분기 화재가 빈번한 탄의 가장 대표적인 특징은 40%를 크게 상회하는 고휘발성이다. 미분과정에서 방출된 가연성 휘발분이 화재발생의 직접적 원인이고 생각될 수 있으나 실제 가스분석 결과 수소나 탄화수소와 같은 가연성분의 방출은 300 $^{\circ}\text{C}$  이상에서 이루어진다는 종래의 연구결과도 있다[3]. 미분기 내에서 온도를 측정한 결과 300 $^{\circ}\text{C}$  이상의 고온이 형성되는 영역은 없으며 기계적 마찰이 이루어지거나 고온의 공기가 유입되어 100 $^{\circ}\text{C}$ 를 상회하는 영역이 있는 것으로 확인되었으며 대부분의 구간은 50-60 $^{\circ}\text{C}$  상태를 유지하고 있었다.

원소분석 결과에서 실험탄의 산소 함유량이 높고 반면 황의 함유량이 낮다는 것을 확인할 수 있으며 아역청탄 가운데 grade가 가장 낮은 C급 탄으로 분리할 수 있다[4]. 저등급 아역청탄은 발열량은 낮은 반면 부식성과 유해성이 강한 황이 적어서 후처리 설비에 대한 부하가 적은 특징이 있음을 알 수 있다.



**Fig. 1.** Schematic diagram of the experimental system.

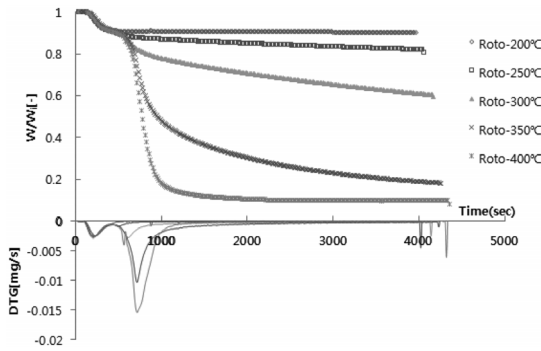


Fig. 2. TGA curves for Roto-south coal.

산소함유량이 많다는 것으로 화재나 폭발의 위험성이 높다고 단언할 수 없으나 미분기 내의 분위기가 저산소 조건이며 이 가운데 산소 함유량이 높음으로 인하여 산화반응의 발생이 용이할 수 있다고 볼 수 있다. 외국의 전력사에서 반인된 탄종에 대해 휘발개시온도(VIT : volatile initiation temperature, 열중량분석에서 중량감소가 시작되는 온도)와 산소함유량과의 관계를 조사한 결과 산소함유량이 높을수록 휘발개시온도가 낮아지는 것으로 나타나 바 있다[5]. 국내 발전소의 미분기 화재에 있어서 고휘발 산소 고함유 아역청탄의 반입에 대해 매우 유의해야 할 것으로 생각된다.

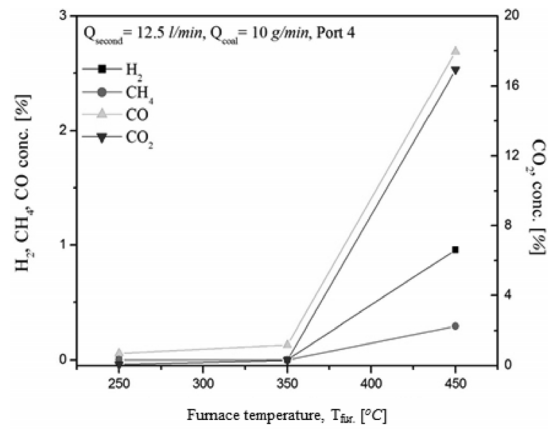
Fig. 2는 Roto-south탄의 열중량 분석 결과이다. 일반적인 열중량분석은 일정속도로 온도를 높여가며 중량변화를 관찰한다. 본 연구에서는 특정온도조건에서의 시간적인 중량변화를 비교하고 좁은 구간의 온도에서 중량변화 효과가 얼마나 차이 있는지 확인하기 위하여 고정온도에서의 열중량분석을 시도하였다. 200~400°C 구간에서 일정온도 간격( $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  또는  $50^\circ\text{C}$ )으로 열중량 분석을 실시하여 실험탄의 열중량 변화가 민감한 온도를 확인하였다.

200~300°C 구간에 중량 감소가 거의 일어나지 않거나 매우 천천히 중량 감소가 일어나지만 300~400°C 영역에서는 매우 급격한 열중량 감소 현상이 발생한다. Roto-south의 경우 300°C 이하의 온도 영역에서는 장시간의 체류를 제외하고는 휘발분의 방출이 거의 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 또한 그 이상의 온도, 즉, 350°C 이상의 구간에서는 짧은 시간이라도 휘발분이 방출하여 유동이나 반응에 영향을 줄 수 있기 때문에 미분기내의 온도 분포가 중요하다. 실제 미분기 내의 온도를 측정된 결과 예열공기가 유입되는 부근이나 미분기에 사용되는 롤러의 마찰이 영향을 주는 영역 등에서 100°C를 상회하는 정도의 온도대가 관찰되었으나 앞서 언급한 300°C를 상회하는 온도대는 관찰되지 않았다.

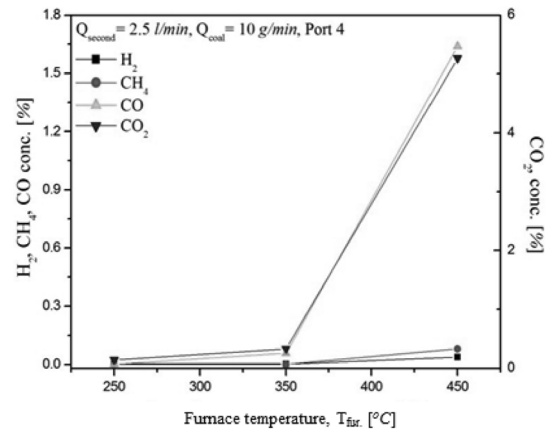
### 3.2. 분위기 온도가 반응에 미치는 영향

상용설비의 미분기 내에 공급되어 미분탄의 이송을 수행하는 공기의 양은 이론공기량의 20% 수준이며 공기의 평균 체류시간은 2초를 초과하지 않는다. 이러한 조건은 일반적인 연료에서는 가연한계를 벗어난 상태이다. 미분탄에서는 어떠한 현상이 일어나는지 모사반응로를 이용하여 실험적으로 확인하였다.

실험은 실제와 유사한 조건(이론공기량의 20% 및 체류시간 약 2초)과 이 보다 공기량을 줄여서 이론공기량의 4%(체류시간은 8초)인 조건에서 실시하였다. 두 조건 모두 350°C 이하에서는 거의 반응이 일어나지 않다가 350°C 이상의 구간에서 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 특히 공기량이 이론 공기량의 4%에 불과한 상황에서도 반응이 일어나는 것은 매우 흥미로운 결과이다. 이러한 결과는 미분탄의 경우 소량의 산화제만 있어도 적정온도만 유지되면 열을 수반하는 반응장이 형성할 수 있으며 온도의 지속



(a) air flowrate 12.5L/min



(b) air flowrate 2.5L/min

Fig. 3. Concentrations of the volatile gases.

적인 상승으로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 또한 앞서 설명한 열중량결과 350°C 이상의 온도대에서 휘발분의 방출이 활발해지는 것과도 연관성이 있는 것으로 생각된다. 또한 미분기 내에서 화염전파 속도 이내의 유속을 갖으며 이 영역이 350°C 이상을 유지하던가 아니면 해당온도의 불씨가 유입된다면 미분기 화재로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 특히 미분기의 구조상 또는 유동적 특성에 의해 석탄에 비해 공기가 많아지는 영역이 형성된다면 화재의 발생은 더욱 용이해 질 수 있다. 그러나 석탄과 공기의 연비를 고려할 때 일반적인 화염형태는 나타나지 않을 것으로 사료된다.

### 3.3. 체류시간의 영향

Fig. 4는 450°C 분위기가 되었을 때 반응이 어떻게 진행되는 가를 보여주는 결과이다. 그림의 시간은 실험조건을 사용하여 Fluent code를 사용하여 계산된 시간이며 실제 주입위치로부터 각 port까지의 거리와 선형적인 관계를 나타낸다.

미분기와 동일하게 이론공기량의 20%에 해당하는 공기와 미분탄이 port-1에 주입되었을 때 반응은 거의 일어나지 않은 상태이다. 그러나 port-2, port-3를 거치며 산소의 농도는 감소하며 그리고 최종적으로 port-4에 도달되었을 때에는 산소는 미분탄과 반응하며 거의 다 소진되고 이산화탄소와 일산화탄소가 다량 생성되었다. port-1에서 port-4까지 걸린 시간은 약 1초에 불과하다. 따라서 450°C의 고온에서는 1초 동안의 시간에 가스중의 산소가 모두 소모되는 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 미분기 내에서 이와 같은 고온의 분위기가 형성된다면 산소에 의해 빠른 속도의 반응이 진행될 수 있음을 알 수 있다.

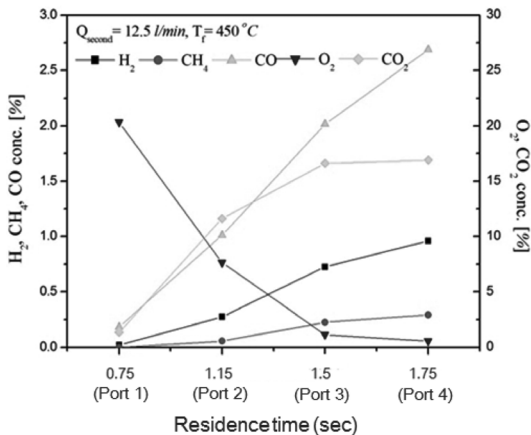
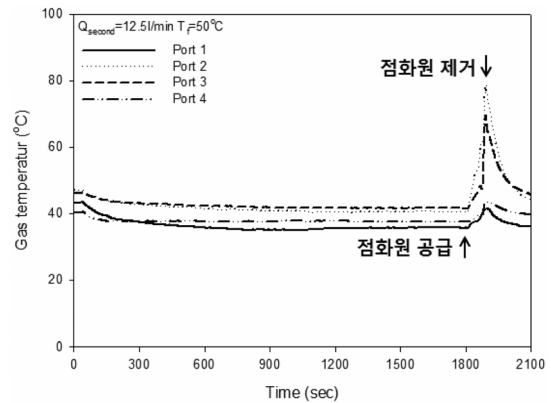


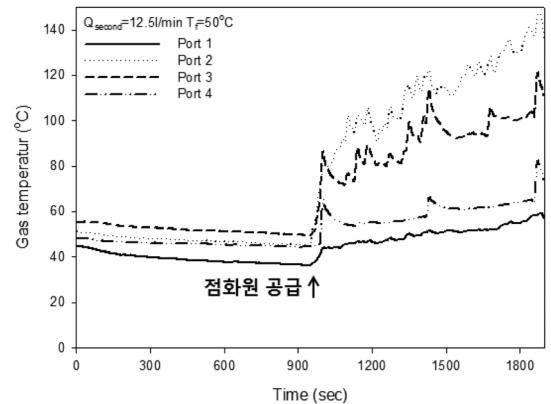
Fig. 4. Variations of species concentration with residence time.

### 3.4. 내부 점화원의 영향

미분기 내에서 착화원의 역할을 할 수 있는 것은 고온분위기와 가스유동을 따라 비산하는 불씨이다. 그러나 화염대를 형성할 수 있는 350°C 전후 또는 그 이상의 고온 영역은 형성되지 않는 것으로 실험에서 확인되었다. 또한 기계적으로 진행되는 미분과정과 200°C를 상회하는 예열공기 공급과정에서 불씨가 bowl plate 부근에서 날리는 현상이 관찰된 사례가 많다. 이러한 불씨가 미분기내의 화재와 연관될 수 있는 지 조사하기 위하여 모사반응로에 임의의 불씨를 주입하여 보았다. 점화원은 전기를 이용하여 직경과 길이가 3 mm 정도인 금속을 가열하여 350~400°C (비접촉식 온도계 측정 결과 370~380°C)가 되도록 하는 방법을 사용하였다. 이때 분위기의 온도는 실제 미분기의 상태와 유사하게 하기 위하여 50°C로 설정하였으며 공기량은 이론공기량의 20% 조이다. Fig. 5(a)는 점화원을 단시간 형성한 경우로서 불씨가 있을 때만 반응이 이루어져 온도가 소폭 상승하지만 불씨가 제거되면 바로 반응대가 사라지는 것을 알



(a) spontaneous ignition



(b) continuous ignition

Fig. 5. Temperature variations by the supply of ignition source.

수 있다. Fig 5(b)는 지속적으로 불씨가 존재하는 상황으로서 모사반응로 내의 온도가 지속적으로 상승하는 모습을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 분위기의 온도가 50℃로 비교적 낮아도 착화원인 불씨만 있으면 반응대가 형성될 수 있다는 것을 알 수가 있다. 다만, 반응이 미분기내의 화재로 연결되기 위해서는 화염을 형성할 수 있는 영역, 즉, 화염이 안정화 또는 부착될 수 있는 유동 형태를 유지하며 연료인 석탄과 공기가 적절히 유입되는 공간이 형성되어야 한다. 실제 미분기는 탄의 이송을 위해 고속의 유동장을 갖고 있으나 일부 영역에서 탄과 공기의 분리가 이루어지며 화염의 부착이 가능한 재순환 또는 저속의 영역이 만들어지게 된다. 이러한 공간이 발화영역이 될 수 있다[6].

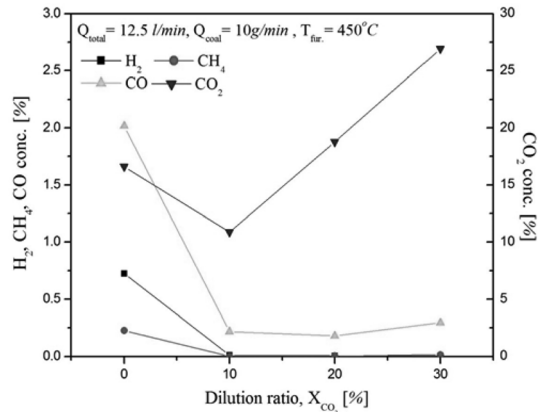
### 3.5. inert gas를 이용한 화재발생 억제

미분기 내에서 화재발생시 취해지는 가장 흔한 방법은 스팀이나 물을 미분기내에 집중분사하는 것이다. 이러한 방법은 화재진화에 효과적이지만 소화 이후에 많은 양의 수분으로 인한 응축 미분탄의 이송에 영향을 줄 수 있다.

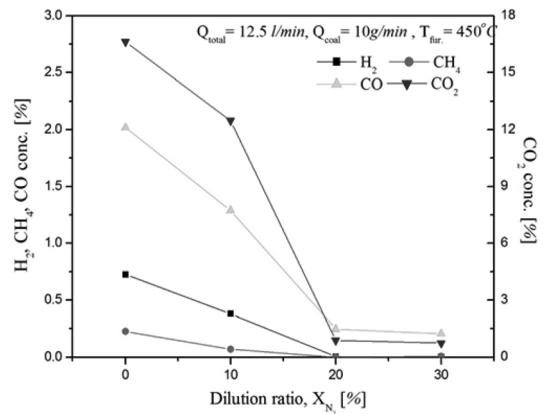
앞서 언급한 바와 같이 미분기 내에서 발화가 가능한 영역은 일부영역에 국한되어 있다. 따라서 화재발생 억제의 방법으로서 발화가 예상되는 국소 영역에 질소와 이산화탄소가 주성분인 재순환연소가스를 분사하여 해당영역의 산소농도를 지속적으로 제어하는 방법을 검토하였다.

Fig. 6(a)는 공기의 일부를 이산화탄소로 대체하여 반응특성을 확인한 결과이며 (b)는 질소로 대체한 결과이다. 분위기 온도는 반응이 활발한 450℃이며 공기량은 이론공기량의 20%이다. 이산화탄소의 경우 10%의 대체만으로 반응이 완전히 정지된 것을 가스의 농도를 통해 확인할 수 있었다. 질소의 경우 20%에 대체에서 반응이 정지한 것으로 확인되었는데 두 물질의 대체율 또는 산화제의 농도차이는 비열과 같은 물성에 기인된 것으로 생각된다. 공기량의 10~20%를 불활성가스로 대체함으로써 미분기내에서의 화재발생을 억제할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 미분기 전체에 대하여 공기의 일부를 불활성가스로 대체하는 것보다는 화재발생 영역에 국한하여 대체하는 경우 적은 양의 가스로 훨씬 효과적으로 화재발생을 억제할 수 있을 것으로 사료된다[7].

계속되는 연구에서는 상용 석탄화력 발전설비 미분기내의 화재 현상 및 운전 상태에 대한 분석이 이루어졌으며 본 연구 결과를 이용한 미분기 화재방지 실증화 연구가 추가적으로 진행될 예정이다. 이에 대한 연구결과는 실증화 연구가 완료된 후 지면을 통하여 보고할 예정이다.



(a) CO<sub>2</sub> dilution



(b) N<sub>2</sub> dilution

Fig. 6. Effect of inert gas dilution on exit gas concentration.

## 4. 결론

본 연구는 석탄화력발전소에서 저등급 아역청탄을 사용하는 경우에 종종 발생하는 화재에 대한 엔지니어링 연구로 진행되었다. 화재의 원인과 인자를 분석하고 이를 제어하기 위한 기초 실험이 수행되었으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 미분기 내의 공기조건인 이론공기량의 20% 상태에서는 분위기의 온도가 350℃ 이상에서 반응장 형성되었다. 실제 미분기의 온도 측정결과 최고 온도 영역이 100℃를 조금 상회하는 수준인 것을 감안하면 국부적인 고온장 형성에 의해 화재가 발생하는 것은 아닌 것으로 판단된다.

2) 미분기 내에서 불규칙하게 비산하는 불씨가 미분기 화재의 점화원이 될 수 있는지 확인하기 위하여 반응로에 모의 점화원(370℃) 설치하고 현상을 확인하였다. 분위기의 온도가 50℃인 낮은 온도에서도 반응대가 형성되고 온도가 점차 상승하였다. 이러한

결과는 비산 불씨가 화염이 형성될 수 있는 영역, 즉, 적절한 공연비와 화염안정화가 가능한 속도장에 주입되면 화재가 일어날 수 있다는 것을 보여주는 결과이다.

3) 연소용 공기에 이산화탄소나 질소를 혼합하여 공급한 결과 10내지 20%의 양으로 반응이 억제되는 것을 알 수 있었다. 발화가 예상되는 국부적 영역을 대상으로 불연성 가스가 주성분인 재순환 연소가스를 이용하면 소량의 가스로도 화재발생을 지속적으로 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2011T100200203)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Pulverizer Explosion suppression Systems, A Case Study, Greg Krieser, P. E., North Omaha Station, Electric Power 2006.
- [2] Prevention, Detection, and Control of Coal Pulverizer Fires and Explosions, EPRI Report.
- [3] Kinetic studies of gas evolution during pyrolysis of subbituminous coal, J. H. Campbell and D. R. Stephens, Lawrence Livermore Lab, U of California, Research Report.
- [4] Pulverized fuel system fires, Plant service bulletin, Babcock & Wilcox Power Generation Group.
- [5] Improvement of Coal-Fired Units at Lamma Power Station to Meet Tightened NOx Emission Limits and to Use a Wider Ranger of Coal, W. H. Leung, Hongkong Electric Company, 2010.
- [6] A Summary of Experiences Related to Achieving Optimum Pulverizer Performance and Fuel Line Balance, Innovative Combustion Technologies, Inc. Technical Report.
- [7] Improving PULVERIZER Output By Partial FLUE GAS Recirculation, National Power Training Institute of India, Chittatosh Bhattacharya, ICAER 2007.

논문접수일 : 2013. 10. 11  
 심사완료일 : 2013. 12. 11