

미분탄 연소의 감시 관리를 위한 화염영상 감시 및 발전용 보일러 적용시험

백운보[#]

The Flame Image Observation for Monitoring Management of Pulverized Coals Firings and its Feasibility Test to Boilers for Thermal Power Plant

Woon Bo Baek[#]

ABSTRACT

The flame image observation and analysis has been investigated for combustion monitoring and management of the pulverized coal firing for thermal power plant, especially for lower nitrogen oxide generation and safer operation. We aimed at obtaining the relationship between burner flame image information and emissions of nitrogen oxide and unburned carbon in furnace utilizing the flame image processing methods, by which we quantitatively determine the conditions of combustion on the individual burners. Its feasibility test was undertaken with Samchonpo thermal power plant #4 unit which has 24 burners, through which the system was observed to be effective for evaluating the combustion conditions and continuous monitoring to prevent future loss of ignition.

Key Words : Flame Image Monitoring (화염 영상 감시), Combustion Management (연소 관리), Nitrogen Oxide (질소산화물), Unburned Carbon (미연 탄소), Pulverized Coal Firing Boiler (미분탄 보일러)

1. 서론

발전용 미분탄 보일러의 연소 관리 및 운전에 있어서 연소 효율의 극대화를 통한 보일러의 효율 향상은 에너지자원의 절약과 연료비 절감을 위해 매우 중대하며 기본적인 문제들이다. 근래에는 생활수준의 향상과 함께 환경보호에 대한 관심이 높아짐에 따라 연소 효율의 향상에 못지 않게 대기 환경 오염 문제가 중요시되고 있다. 대기 오염물 중에서 그 발생 메카니즘이 연료의 성질에 주로 관련된 황산화물 그리고 운전 여건에 따른 연소가

스의 편류 및 화로 내부의 열분포 변화 등의 연소 조건에 관련이 있는 질소산화물, 일산화탄소, 미연탄소, 매연 등의 저감이 연소를 이용한 열기관의 관리 및 운영을 위한 새로운 과제로 추가되었다. 이러한 과제를 달성하기 위해서 최근의 광학 및 반도체 기술의 급격한 발전에 따라 소형화되고 고성능화된 수광 센서 (Receiving optic sensor)와 컴퓨터를 이용하여 보다 효과적인 연소 상태 관리 및 감시 기술의 개발이 요구되고 있다.¹⁻⁴ 왜냐하면 대기 오염물의 발생은 화염의 온도와 연료 공기의 국부적인 혼합비 등 다양한 연소 환경에 기인하기

접수일: 2007년 3월 2일; 게재승인일: 2007년 11월 14일

[#] 교신저자: 동의대학교 메카트로닉스공학과

E-mail: wbbaek@deu.ac.kr Tel. (051) 890-2258

때문에 운전자의 경험에 의존하는 전통적인 연소 감시 및 관리 방식에서는 인간의 감각에 의한 화염의 휘도(Intensity), 화염의 형상에 관한 정보로 연소 상태를 분석하는 것은 한계가 있기 때문이다. 수광 센서를 사용한 화염 영상 감시 방식에서는 화염 영상 데이터를 저장하고 비교 분석하여, 이들 정보와 화염의 온도 및 연소 가스 발생과의 연관성을 이용할 수 있고 나아가 연소상태를 제어하는데 기초가 된다.^{5,7} 화염영상 감시를 위한 장치는 화로 내부의 고온 환경에서도 견딜 수 있는 고온 내시경과 CCD 카메라로 구성된 화염수광 장치, 진단 컴퓨터와 모니터링 패널로 구성된 감시진단장치가 있다. 연소상태 관리를 위하여 획득한 화염영상을 화상 처리하여 화로 내부의 질소산화물, 미연탄소의 분포 경향 등 진단 결과를 표시한다. 또한 화염영상의 다중 모니터링, 개별 버너 화염 데이터의 비교, 분석을 통한 연소기의 이상 검출, 인체에 해로운 대기 오염물의 과다 발생에 대한 예비 경보 기능 등을 포함하며, 이를 제어 시스템과 연계시켜 적절한 화염 형태 유지를 통한 화로 내부의 균형된 열분포 및 연소 상태의 감시 관리를 가능하게 한다.⁸

국외에서는 10 여 년 전부터 기초 실험을 토대로 화염 감시장치 개발에 착수하여 현재는 실증실험을 통해 신뢰도를 향상시켜 나가고 있으며, 각종 연료에 대한 실증 보일러에서의 검증을 통해 그 적용범위를 확대해 나가고 있으나, 국내에서는 기초 실험단계로서 연돌 감시방식 또는 운전원의 경험에 의존하는 화염감시 단계를 벗어나지 못하고 있어 보다 강화된 환경규제에 대처하고 보일러 신뢰성 강화를 위해 고가의 수입 부품에 의존하고 있는 실정이며, 이와 같은 화염영상 감시 기술을 산업용 보일러의 연소 관리에 응용한 연구는 발표되었으나,^{9,10} 발전용 보일러에 적용한 사례는 아직 발표되고 있지 않다.

본 논문에서는 고온 내시경과 CCD 카메라를 화염 수광 장치로 구성하여 화염 상태를 실시간으로 모니터링하며, 연소 상태를 정량화하고 개별 버너 단위로 이상 연소 발생의 검출이 가능한 화염영상 감시에 대해 소개하고자 한다. 버너 화염 영상의 색도(Hue) 레벨 데이터를 이용하여 미분탄 보일러의 연소상태를 감시하고 발전용 보일러의 연소 감시 및 관리에 적용 가능성을 검토하기 위해 한국 남동발전 삼천포 화력발전소의 제 4 호기 보일러에

시범적으로 적용한 결과를 소개한다.

2. 화염영상 처리

2.1 색도와 화염 온도

화염 영상의 분석을 위해 이용되는 HSI 모델의 기본 요소인 색도, 채도(Saturation), 휘도 중에서 색도는 화염에서 가장 큰 에너지를 가지고 있는 파장을 의미한다.⁸ 미분탄 연소 화염의 측면에서 색도를 재해석하면 CCD 영상 소자의 면적에 비례하는 크기의 화염에서 일어나는 발광 중 가장 큰 에너지를 가지는 발광을 의미한다. 즉 색도는 화염 영상에서 가장 큰 에너지를 복사하는 반응에 관한 정보를 가지고 있다.

CCD 카메라로 측측이 가능한 최장 파장을 λ_{max} 라 하고 최단 파장을 λ_{min} 이라 하면, 화염 발광의 파장과 색도간의 상관 관계식은 식 (1)과 같다.^{7,9}

$$\lambda = - \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{Quantity\ Level} Hue + \lambda_{max} \quad (1)$$

$$Hue = \frac{Quantity\ Level}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} (\lambda_{max} - \lambda)$$

여기서, Hue 는 색도, Quantity level 은 영상처리장치에 내장된 A/D 변환기의 분해능을 나타낸다. 발전용 미분탄의 연소 특성이 흑체로에서의 발광과 유사한 성향을 보이므로, 흑체의 온도와 CCD 카메라로 획득된 영상의 색도의 관계를 실험하기 위해 한국 표준과학연구원의 표준 흑연관 흑체로 (2" Dia. blackbody type IV, Thermogage, Inc.)를 이용하였다.

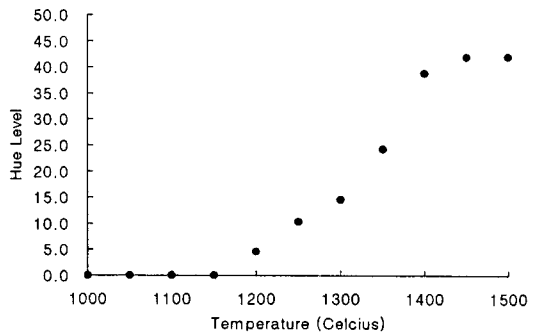
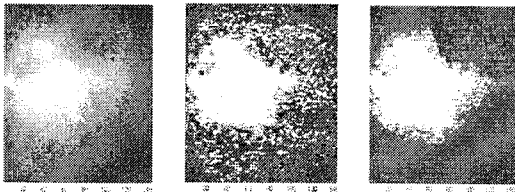


Fig. 1 Blackbody temperature vs. hue level

이 흑체로는 내부의 흑연관을 전기저항으로 이용하여 가열할 때, 가열된 흑연관으로부터 흑체광 2" 직경의 구멍을 통해 방사되도록 설계되어 있다. 실험 방식은 1000℃에서 1500℃까지 50℃단위로 흑체의 온도를 증가시키면서 흑체광을 CCD 카메라를 통해서 촬영하였다. 실험 결과, Fig. 1 에서와 같이 흑체로 영상의 색도 레벨이 1100℃에서 1450℃ 사이의 온도와 비례하는 것을 보여 주고 있다. 실제 발전용 미분탄 보일러에서 버너가 설치된 영역의 노내 온도가 1200℃와 1500℃ 사이에 있으므로 영상의 색도 성분을 이용한 화염 온도의 근사적인 유추가 가능함을 알 수 있다.

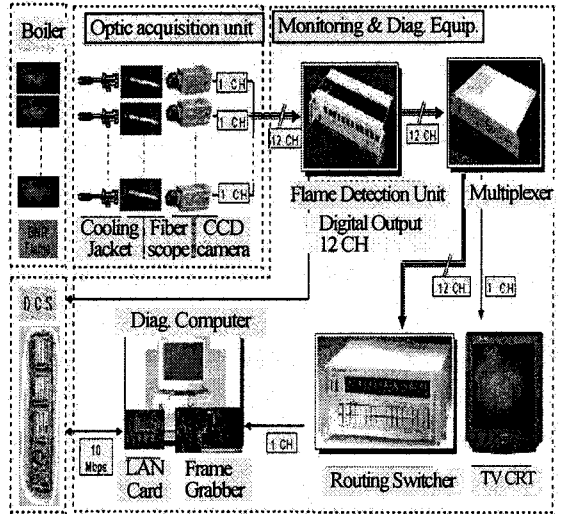
2.2 화염영상 처리 및 분석

화염영상은 카메라가 지원하는 크기에 관계없이 영상처리장치에서 설정된 크기로 변환되어 최종 영상의 크기가 결정되는데 영상의 크기를 크게 할수록 화염에 대한 더 정확한 정보를 알아 낼 수 있겠지만 영상처리 속도는 감소되므로 적절한 영상의 크기를 선정해야 한다. 본 연구에서는 80×60 픽셀(Pixel)로 처리하였으며 화염 수광장치를 통해 획득된 영상을 Fig. 2(a)에 나타내었다.

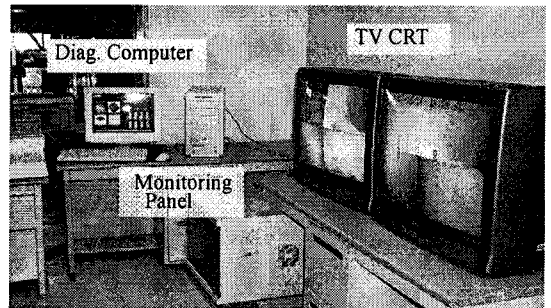


(a) Flame image (b) Unfiltered Hue (c) Filtered Hue
Fig. 2 Filtering effects of flame and its Hue image

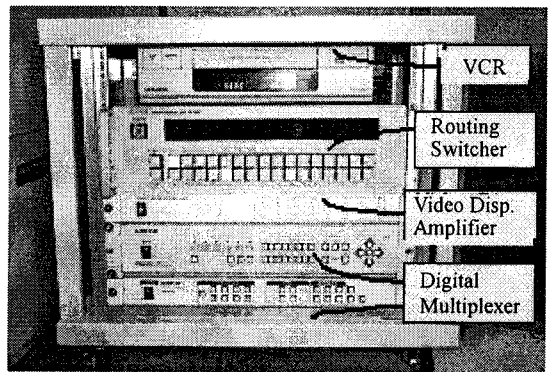
화염 영상 분석을 위한 처리 과정으로 HSI 상태 공간으로 변환한 후, 평균영상 처리 그리고 필터링 처리가 있다.⁹ 필터링은 HSI 상태 공간에서 노이즈 성분의 화소를 제거하여 유효 화염영역을 추출하는 것으로 필터링 처리 하기 전의 색도 영상을 Fig. 2(b)에, 그리고 필터링 처리한 후의 색도 영상을 Fig. 2(c)에 나타 내었다. Fig. 2(b)에 보이는 유효 화염 주변에 조각 화염들이 필터링 처리한 후에는 Fig. 2(c)에서와 같이 조각 화염들이 제거되어 있음을 볼 수 있다. 화염영상과 대기오염 배출물과의 상관관계를 구하는 방법으로 이산신호 해석적인 상관관계 분석방법을 이용하였다.⁹



(a) Apparatus configuration and signal flow



(b) The Picture of Monitoring and diagnostic equipment



(c) Front view of monitoring panel

Fig. 3 Equipment configuration and its element for the flame diagnostics and monitoring

3. 화염영상 감시

화염영상 감시를 위한 하드웨어는 각 버너의 화염 영상을 획득하는 화염 수광 장치와 포착된 개별 화염 영상의 분석 및 진단 처리를 담당하는 감시진단장치로 나뉘어 진다. 전체적인 구성은 Fig. 3(a)에 도시하였다. 화염수광 장치는 고온 내시경(Fiber scope), 공냉식 냉각관(Cooling jacket), CCD 카메라, 카메라 어댑터로 구성된다. 감시 진단장치는 Fig. 3(b)와 같이 프레임 그래버(Frame grabber) 및 랜 카드가 내장된 진단 컴퓨터, TV CRT, 모니터링 판넬 등으로 구성된다. Fig. 3(c)와 같이 모니터링 판넬은 VCR, 라우팅 스위치(Routing switcher), 디지털 멀티플렉서(Multiplexer) 등으로 구성된다. 라우팅 스위치는 개별 버너 화염 영상을 순차적으로 연소감시 컴퓨터에 입력시키는 기능을 수행한다. 화염 수광 장치에 포착된 버너 화염 영상은 라우팅 스위치의 입력으로 들어오면 RS232C 통신을 통해서 선택된 채널의 버너 화염 영상을 프레임 그래버로 보낸다. 디지털 멀티플렉서는 다중채널 접속기로서 TV CRT 를 화면 분할하여 다수의 버너 화염을 동시에 감시할 수 있도록 하며, 화면상의 특정 부분을 확대하여 볼 수 있게 한다.

소프트웨어 부분은 영상처리 프로그램과 진단 결과표시 프로그램으로 나뉘어 진다. 영상처리 프로그램은 각 버너의 화염 영상을 포착하여 색 합성 처리를 통해 화로 내 질소 산화물과 미연 탄소의 분포를 산출하고, 진단 결과표시 프로그램은 그 결과를 실시간으로 모니터에 표시하며, 이상 연소의 조기 경보 및 과거 경향도(Historical trending) 기능 등을 제공한다. 그리고 영상 처리용 매개변수를 설정하며, 외부 기기와의 통신을 담당한다. 영상 처리 프로그램이 입력된 화염 영상을 분석하여 처리한 결과를 공유 파일에 저장하면, 진단 결과표시 프로그램은 이 공유 파일의 데이터를 모니터 화면에 표시해 주며, 영상 처리에서의 각 버너에 해당하는 필요한 화염 파라메타 값을 설정하여 읍셋 파일로 저장한다. 읍셋 파일은 영상 처리 프로그램이 각 채널에서 필요한 변수 값들로 반영하여 사용자가 설정하는 기준을 프로그램에 적용한다. 보일러 제어시스템용 서버 프로그램은 진단 결과표시 프로그램에서 사용되는 데이터들을 랜 카드를 통해서 동적 자료교환 방식인 DDE 통신으로 데이터를 보내는 역할을 한다. Fig. 4은 진단 결과표시 프로그램의 출력 형태로서 화염영상 감시화면을 보여 준다. 감시 지표로는 질소산화물과 미연

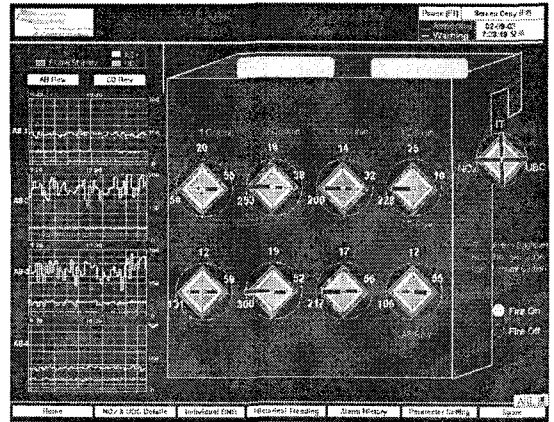


Fig. 4 The screen for flame image monitoring

탄소, 화염 밝기를 사용하여 그 값을 마음모 꼴로 도시하고 2 분 동안의 실시간 경향을 보여주며 질소산화물과 미연 탄소 값을 막대그래프로 보여 준다. 그리고 과거경향 화면에서는 경향 그래프 구간 지정과 보고자 하는 시간 설정을 통해 개별 버너의 연소지표의 변동 이력을 분석할 수 있으며, 경고 이력(Alarm history) 화면에서는 이상 연소 발생 이력을 볼 수 있다. 진단 결과표시 프로그램은 총 7 개의 화면으로 구성되며, 사용자는 마우스와 키보드를 이용해서 제일 하단의 버턴을 선택하면 원하는 화면을 볼 수 있다.

4. 보일러 적용 시험

삼천포화력발전소는 설비용량이 총 324 만 kW로서 1, 2, 3, 4 호기는 각각 56 만 kW, 그리고 5, 6 호기는 50 만 kW로 운전되고 있는 데, 4 호기 보일러에 앞장에서 기술한 화염영상 감시장치를 시범적으로 적용하였다. 이 보일러는 내부의 각 코너에 버너를 설치하여 연소하는 방식으로 화로 중심부의 가상원에 접선 방향으로 배치하여 파이어 볼(Fire ball)을 형성하도록 되어 있으며, 틸팅(Tilting)노즐의 위치를 변화시킴으로써 화로내의 파이어 볼 위치를 변경시켜 개별 공기의 출구 온도를 조절할 수 있도록 되어 있다. 틸팅 접선 연소 방의 경우 연료량이 변화하여도 파이어 볼 위치가 크게 변동되지 않아 연소실내 열 분포의 변동이 적은 장점이 있으나 각 코너에서 연소실내로 분사되는 연료량 및 공기 량이 균일하지 않을 경우에 그리고 화로 각 코너에 공급되는 미분탄 관의 마모로

인한 유량 변동 및 공기 량, 유속 등이 균일하지 않은 경우에 파이어 불 편향이 발생될 수 있다. 그 외에 I.D(Induced Draft) 팬의 자체 성능차이, 블레이드 피치(Blade pitch)의 차이, 그리고 공기 예열기 요소(Element)의 오염, 실 플레이트(Seal plate) 간격의 변동, 한 곳에 퇴적된 재(Ash) 등으로 인한 흡입유동의 변동에 따른 가스 편류가 발생될 수 있다. 보일러 운전 또한 보일러 운전 여건에 따라 어느 한편으로 많은 연소 가스가 흐르는 경우 연소 가스의 조성 및 미연 탄소 량 등의 편차가 유발된다. 그리고 출력 증감, 탄중 변경, 미분기 운전상태, 공기 량의 변경, 수트 블로잉(Soot blowing) 등에 따라 화로 내부의 열 분포가 변화되고, 휘발성분이 많은 석탄이 연소될 때는 버너 주위에 열 부하가 집중되어 수냉벽 튜브의 온도가 저하되거나 미연 탄소가 많이 발생될 수 있다.

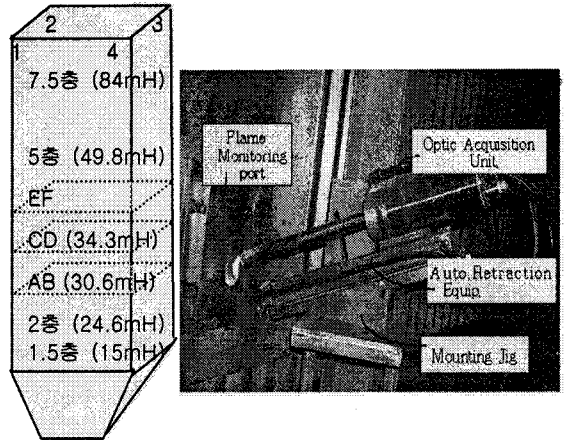
4.1 시험 장치의 설치

시험 적용을 위해 Fig. 5(a)와 같이 화로 하부에 위치하는 AB 층, 그리고 CD 층의 각 코너에 있는 버너의 화염감시창 (Flame monitoring port)의 입구 부분에 좌우 상하로 설치 각을 조절할 수 있는 장착용 치구 (Mounting jig)을 설치하고 그 위에 화염수광 장치를 장착하였다. 공기누설 등으로 냉각공기가 공급되지 않을 때 화염 수광 장치를 화로의 외부로 자동으로 후퇴시키는 장치 (Auto. retraction equipment.)를 설치하였다. 화염수광 장치의 선단에 냉각용 공기를 공급하는 Instrument air 계통은 Fig. 5(b)와 같이 공기압축기, 변압기, 서비스 탱크, 건조기, 필터, 냉각기 등으로 구성되어 있으며, 그 전원은 EP(Electro-static Precipitator)의 Ash MCC (Motor Control Center)에서 인출하였다. 전원이 공급되지 않거나 공기누설 등으로 인한 이상 발생시에는 발전소 측의 비상용 Instrument Air 공급계통에 자동으로 연결되도록 하였다.

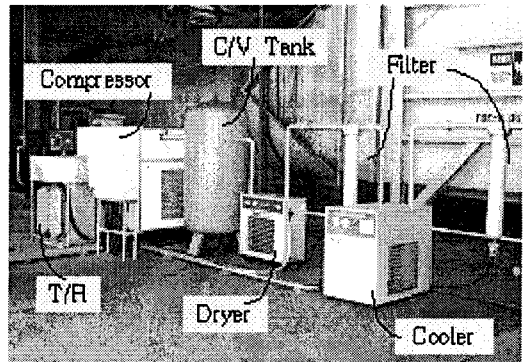
감시 진단 장치는 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에서와 같이 배전반의 #4 수직보드의 측면 공간에 위치시키고 화염 수광 장치의 CCD 영상 신호 전송용 동축 케이블은 ECX-7C-2 를 사용하였으며 기존의 CCTV 선로를 이용하여 포설하여 라우팅 스위치에 연결하였다.

4.2 시험 및 결과

시험을 위한 보일러의 주요 운전 조건은 Table 1



(a) Burner lay-out and optic acquisition unit at burner side



(b) Instrument air supply system

Fig. 5 Optic acquisition unit at burner side and instrument air supply system

Table 1 The main condition of boiler operation

Item	Descriptions
Power	549~553MW
Coal Particles	200 mesh: 68.5% KIDECO + DART (6:4)
Coal Temp.	Pulverizer Exit Temp.: 67~68℃
O ₂ Ratio	3.2 ~3.6%, Air Flow: 750 t/h
Feeder Speed	A: 88%, B: 81%, C: 81%, D: 81% E: 80%
I.D. Fan	Pitch Blade Unbalance: 2%
R/H Nozzle	Tilt : 42 deg
Steam Temp.	Main Steam Temp.: 534 ~543℃

에 요약하여 나타내었다. 미연 탄소의 수집 및 질소산화물의 연소가스 분석을 위해 별도의 연소가스 분석용으로 제작한 수냉식 세라믹 프루브를 화로 내에 삽입하였다. 질소산화물과 O₂ 분석을 위해 휴대용 화학 발광식 분석기인 Thermo Environment사의 Model 42 를 사용하였으며, 이와 동시에 연소가스의 O₂ 성분과 질소산화물 농도를 분석하고 회분을 수집하였다. 미연 탄소분석은 회분을 수집한 후 공업 분석용 장비인 LECO 사의 TGA-501 을 사용하였다. 버너 화염영상의 획득 그리고 연소가스의 수집 및 분석과정에 나타나는 애로사항은 일정한 운전 조건에서도 화염 영상 데이터 및 연소가스 분석 값의 변동이 심하게 나타난 다는 것이며, 이에 대한 개선은 측정값의 신뢰도가 보장될 수 있는 영역에서 반복적인 측정을 통해 평균값을 취하였다.

AB 층과 CD 층의 각 코너에 설치된 카메라에 포착된 화염 영상은 Fig. 3(b)에서와 같이 배전반의 2 개 TV CRT 상에 각각 4 개의 화면으로 분할되어 보여 진다. 진단 컴퓨터에서는 평균 화염영상을 얻기 위한 바인딩(Binding, 데이터를 여러 개 모아 한번에 처리하는 것)을 10 번 하고 채널이 변환될 때 신호 동기를 위한 시간 지연은 200msec 로 두어, 평균 화염 영상 데이터를 산출하였으며, 8 개의 버너화염영상 정보가 중첩이나 유실이 없이 실시간으로 처리됨을 확인하였다.

수집된 회분은 실험실에서 공업 분석하여 LOI (Loss on Ignition, 고정 탄소 (Fixed carbon)와 회분에 포함된 휘발(Volatile) 성분을 합한 것)을 wt%로 산출하였으며, 평균 화염 영상 데이터와의 상관관계를 관찰하였다. AB 층과 CD 층의 2 번 코너에서 수집된 연소가스로부터 질소산화물 농도(ppm)는 6% O₂ 기준으로 환산하였으며, 이와 동시에 실시간으로 처리된 평균 화염 영상의 색도 영역 (Hue 20~39) 의 관계를 Fig. 6 에 나타내었다. 질소산화물이 많이 발생하게 되면 고온 부분의 화염에 상응하는 영상 정보의 색도 영역 (Hue 20~39)의 픽셀 수가 많이 포함됨을 볼 수 있다. 회분 분석 결과, LOI 값과 화염 영상의 색도 영역 (Hue 15~25) 의 관계를 나타낸 Fig. 7 에서와 같이 LOI 값이 커지게 되면, 즉 불완전 연소되어 미연 탄소 발생량이 많아 지면 상대적으로 저온 부분에 상응하는 화염영상의 색도 영역 (Hue 15~25)의 픽셀 수가 증가됨을 확인할 수 있다. 그리고 각 층의 코너에서 버너 화

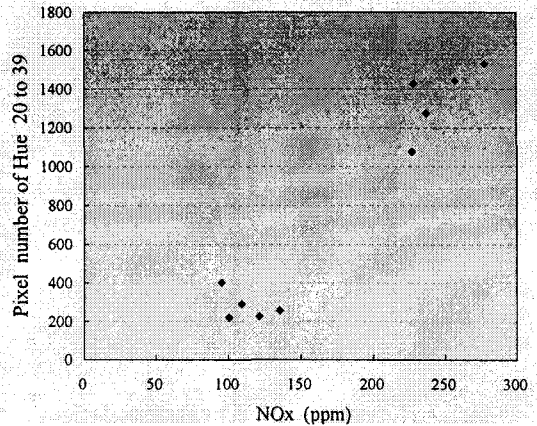


Fig. 6 Hue level vs. nitrogen oxide (ppm)

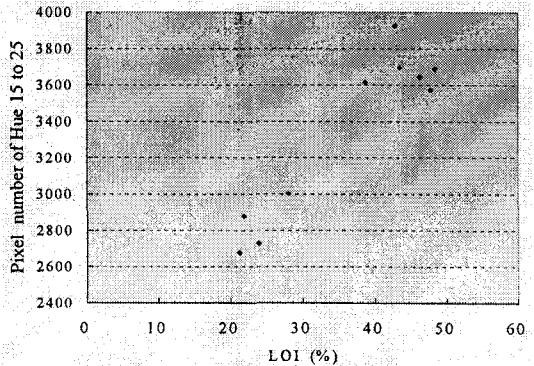


Fig. 7 Hue level vs. loss on ignition (%)

염 영상을 분석하여 불완전 연소상태를 감지할 수 있으며, 각 층간 그리고 같은 층 내의 다른 코너에서 질소산화물 농도와 LOI 값의 상대 추이를 비교함으로써 보일러 내부의 각 층간 및 각 코너간의 상대적인 연소상태의 불완전성 및 불평형 정도를 분석해 볼 수 있을 것이다.

5. 결론

발전용 미분탄 보일러의 연소감시 관리를 위해 화염영상 감시용 고온 내시경과 CCD 카메라를 화염 수광 장치로 구성하여 상업 운전중인 화력발전소의 보일러에 설치하고 화염영상의 색도 레벨 데이터를 이용한 연소상태 감시에 관한 시험을 수행하였다. 개별 버너단위로 화염 영상의 실시간 모니터링이 가능하며, 화염 수광 장치를 통해 획득된 화염의 평균 영상의 특정 색도 레벨과 질소산

화물 농도 및 미연 탄소의 LOI 값과의 상관관계를 확인하고, 화염영상 감시에 의한 미분탄 보일러의 연소 감시 및 관리에의 적용 가능성을 보였다.

향후 계속적인 시험 데이터의 확보를 통해 연소상태의 정량화 방법 그리고 질소산화물 및 미연 탄소 농도 등의 화로 내 분포 및 경향 분석자료를 활용함으로써 질소산화물과 미연 탄소를 동시에 저감시키고 화로 내부의 균형된 열부하의 유지 및 파이어 불의 편향 감시에 활용에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Griffiths, J. F. and Barnard, J. A., "Flame and Combustion," Blackie Academic & Professional Glasgow, pp. 108-112, 141-142, 1995.
2. Char, J. M. and Yeh, J. H., "The Study on Propane Flame Temperature Measurement with Infrared Technique," Proceedings of the Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, pp. 1122-1129, 1993.
3. Kawamura, K., Saito, A., Yaegashi, T. and Iwashita, Y., "Measurement of Flame Temperature Distribution in Engine by Using a Two Color High Speed Shutter TV Camera System," SAE, Paper No. 890320, 1989.
4. Hosino, M., Misno, K., Toma, T., Sato, Y., Tsujitake, M. and Yamanaka, Y., "Combustion Monitoring System Applied Image Data Processing," Thermal & Nuclear Power Generation, Vol. 42, No. 12, pp. 1725-1733, 1991.
5. Hanson, R. K., "Combustion Diagnostics: Planar Imaging Techniques," Twenty First Symposium on Combustion, pp. 1677-1691, 1986.
6. Tamaogi, K., Matuda, H., Kotani, T., Miyamae, S., Hashimoto, H. and Makino, K., "Development of Support System Evaluating Pulverized Coal Combustion on #2 Unit of Saijoh Power Station," Thermal & Nuclear Power Generation, Vol. 43, No. 1, pp.73-82, 1992.
7. Dean, J. A., "Flame Photometry," McGraw-Hill, pp. 117-121, 1960.
8. Lee, T. Y., Kim, S. H. and Lee, S. R., "Flame Diagnosis using Image Processing Technique," J. KSPE, Vol. 16, No. 7, pp.196-202, 1999.
9. Baek, W. B., Hwang, I. C. and Lee, S. J., "A Study on Flame Monitoring System Development," J. KSPE, Vol. 21, No. 2, pp. 60-66, 2004.
10. Baek, W. B. and Shin, J. H., "A Study on Flame Monitoring System Development for Combustion Management of Boilers," Trans. of the KSME (B), Vol. 27, No. 11, pp. 1587-1594, 2003.