

화염감시 시스템 개발에 관한 연구

백운보#, 황이철*, 이승종**

A Study on the Flame Monitoring System Development

Woon Bo Baek#, I Cheol Hwang* and Sung Jong Lee**

ABSTRACT

Increased energy costs have placed demands for improved combustion efficiency, high equipment availability, low maintenance and safe operation. Simultaneously low NOx modification, installed due to stricter environmental legislations, require very careful combustion management. The flame diagnostics system has been developed specially to meet these requirements. We aimed at gaining the relationship between burner flame image and emissions such as NOx and unburned carbon in furnace by utilizing the image processing method. For the first step of development, its possibility test was undertaken with bench furnace. The test proceeded to the second step with pilot furnace, the system was observed to be effective for evaluating the combustion conditions.

Key Words : Flame Monitoring (화염감시), Image Processing (영상처리), Optic acquisition (수광부), Frame Grabber (프레임 그라버), NOx (질산화물), Unburned Carbon (미연 탄소), Correlation (상관성), Combustion Conditions (연소 상태)

1. 서론

보일러 노내 질산화물 생성량은 화염의 온도와 연소중 과잉 산소량에 비례하여 증가하는데 최적 공연비에 도달하게 되면 열적 반응에 의한 질산화물의 생성은 극대화되는 반면에, 일산화탄소, 미연 탄소 (Unburned carbon) 등은 연소가 불완전할 때 그 배출량이 증가하게 된다.¹ 최근에 발전 설비용 보일러를 비롯한 에너지 발생기에 대한 대기 환경 규격이 더욱 강화됨에 따라 전통적인 관심사인 최상의 연소 조건 유지를 통한 에너지 효율 극대화 이외에 대기 오염물 배출의 극소화라

는 기술적 도전을 맞이하게 되었는데, 실제 현장에서 연소 감시 방식 및 운전원의 육안 감식에 의존하는 단계를 벗어 나지 못하고 있어 환경 규제에 대처하기 어려운 실정이다. 이와 같은 최적 연소 상태를 유지하도록 하는 연소 관리를 위해서는 노내 질산화물, 미연 탄소의 분포 감시, 이상 연소 검출 등의 실시간 분석 처리 기능이 요구되며, 연소상태의 정량화가 가능한 화염영상 수광부 (Optic acquisition unit)와 영상처리 장치가 필요하게 된다.²⁻⁵ 화염 수광부에서는 화염 속의 기체 가스에서 발생하는 자발광(Emission)과 화염 속의 주요한 고체인 매연이 발생하는 열복사에 의한 자발광

접수일: 2003 년 5 월 24 일; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일
교신저자: 동의대학교 메카트로닉스공학과
Email: wbaek@dongeui.ac.kr, Tel: (051) 890-2258
* 동의대학교 메카트로닉스공학과
** 수원대학교 물리학과

의 정량화된 화염 영상을 획득하게 된다.^{6,7} 그리고 영상 처리 장치는 노내 화염의 측정 및 영상 처리 결과와 연소 실험에서 수집한 자료와의 비교 분석을 통해 그 연소장의 이상 상태를 신뢰성 있게 판별하는 평가 항목을 결정하고 질산화물, 미연 탄소와 화염 영상 데이터의 상관 관계를 정량적으로 규명한다. 이를 제어 시스템과 연계시켜 적절한 화염 형태 유지를 통해 최적 연소 상태 관리를 가능하게 한다. 그런데 대기 오염물 배출의 계측에 영상 처리 장치를 적용한 기초적인 연구는 보고된 바 있으나,⁸ 산업용 보일러나 공업로에 적용한 영상처리 장치 및 화염감시에 관한 연구보고는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 노내 연소장의 연소 상태의 정량화가 가능한 화염 수광부와 영상 처리 장치를 사용하여 이상 연소 발생을 조기에 검출하며 보일러 연소 상태를 진단할 수 있는 보다 지능적인 연소감시 시스템을 개발하였다. 그리고 화염 착화 실험 판정 기능을 수행하며 이상 연소 발생시 안전 운전을 위한 정보의 실시간 처리가 가능함을 확인하였다. 개발된 연구결과를 활용하여 연료별 연소 시험을 통한 연소 데이터베이스 구축으로 각종 공업로에도 적용이 가능하며 인체에 유해한 대기 오염물 배출의 최소화 외에 슬래깅 저감에 따른 유지 보수 비용을 절감할 수 있다. 그리고 운전의 안전성 확보를 통해 불필요한 부하 사용을 줄임으로써 전력 낭비 절감에도 기여할 수 있을 것이다.

2. 화염감시 시스템

화염감시 시스템은 각 버너의 화염 영상을 획득하는 화염영상 수광부와 포착된 개별 화염 영상의 분석 및 진단 처리를 담당하는 감시진단부로 나뉘어 진다. 전체 시스템의 개략적인 구성은 Fig. 1 에 나타내었다. 화염영상 수광부는 고온 내시경, 공냉식 냉각관, CCD 카메라, 카메라 어댑터, 등으로 구성되고, 감시 진단부는 화염 감지부 (Flame detection unit), 멀티플렉서 (Multiplexer), TV 모니터, 라우팅 스위치 (Routing switcher), 진단 컴퓨터, 프레임 그래버 (Frame grabber) 등으로 구성되며 상세한 기기 구성 및 신호 흐름은 Fig. 2 에 나타내었다. 고온 내시경은 사람의 눈과 카메라가 미치지 못하는 장소에 대한 유효한 관찰 수단으로 사용되

며 석영계 화이버가 갖는 우수한 내환경 특성 즉, 내방사선성, 내열성, 내한성, 고강도성 등을 활용하여 가혹한 환경에서의 적용이 도모되고 있다. 대물렌즈에 의해 투영된 관찰물의 영상이 화이버 내를 전파해 출사단에 재생된다. 이 영상을 접안 렌즈 또는 CCD 카메라의 촬상면에 투영해 화상 관찰 또는 계측을 행한다. 본 연구에서는 고온 화염 가스에 노출되어 있는 화이버 스코프를 보호하기 위해 공냉식 냉각관 (Cooling jacket)을 제작하여 사용하였다.

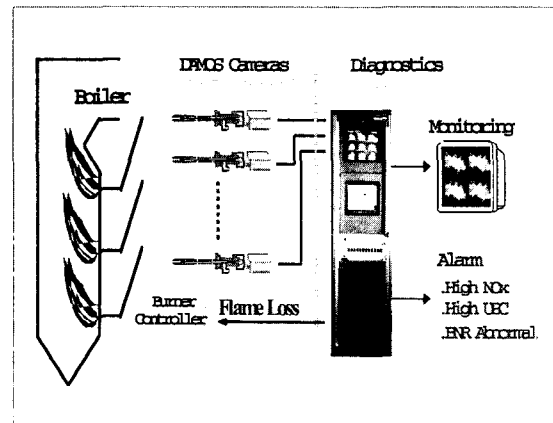


Fig. 1 System configuration for flame monitoring

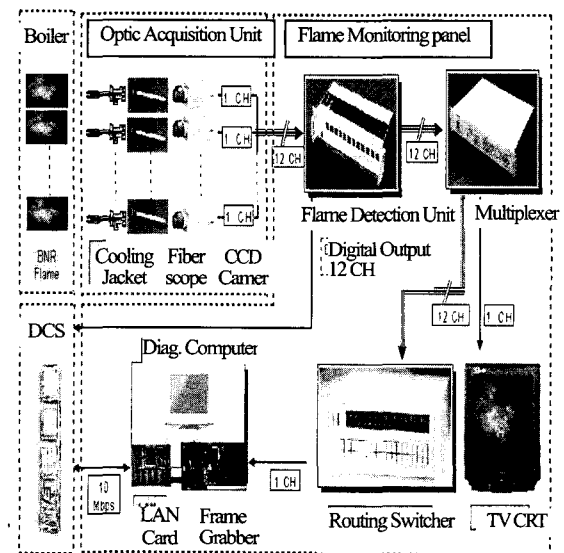


Fig. 2 Apparatus configuration and signal flow

화염 감지부는 각 버너별 카메라로부터 받은 화염 영상을 보드의 입력으로 하여 화염의 착화, 실화를 판단하는 아날로그 회로를 가지는 실시간 처리 보드로 12 개의 카메라 신호에 대해 연산을 수행하고 착화 여부를 출력하는데, 입력 증폭기를 통해서 입력된 영상 신호는 불평형 신호 피크 검출기에 의해서 반전. 비반전 신호로 분리되어 다음 단계 공급된다. 각 신호는 그라운드를 기준으로 각각 반파 정류하여 커패시턴스에 충전되는데, 방전 시정수는 RC 회로에 의해서 결정된다. DC 변환된 신호를 합산한 후 동기 신호 부분의 절대값 만큼 제거한 후에 비교 및 출력 블럭에서의 설정치와 비교하여 착화 여부를 판정한다.

멀티플렉서는 다중 채널 접속기로 TV 모니터를 화면 분할하여 최대 16 개 버너 화염을 동시에 감시할 수 있도록 하며, 화면상의 특정 부분을 확대하여 볼 수도 있게 한다.

라우팅 스위치는 개별 버너 화염 영상을 순차적으로 연소 진단 컴퓨터에 입력시키는 기능을 수행한다. 화염 영상 수광부에 포착된 버너 화염 영상은 라우팅 스위치의 입력으로 들어오면 RS232C 통신을 통해서 선택된 채널의 버너 화염 영상을 프레임 그래버로 보낸다.

시스템 소프트웨어는 크게 영상처리 프로그램과 진단결과 표시 프로그램으로 나뉘어 지는데 전체 시스템 프로그램의 내부 흐름도를 Fig. 3 에 도시하였다.

영상처리 프로그램이 입력된 화염 영상을 분석하여 처리 결과를 공유 데이터 파일에 저장하면, 진단결과 표시 프로그램은 이 공유 데이터 파일의 데이터를 모니터 화면에 표시해 주며, 영상 처리에서의 각 버너에 해당하는 필요한 화염 파라메타 값을 설정하여 오프셋 파일로 저장한다.

영상처리 프로그램은 각 버너의 화염 영상을 포착하여 색 합성 처리를 통해 노내 질산화물과 미연 탄소의 분포를 산출하고, 진단결과 표시 프로그램은 그 결과를 실시간으로 모니터에 표시하며, 이상 연소의 조기 경보 기능 및 과거 경향도 기능 등을 제공한다. 그리고 영상 처리 파라메타를 설정하며, 외부 기기와의 통신을 담당한다.

오프셋 파일은 영상 처리 프로그램이 각 채널에서 필요한 변수 값들로 반영하여 사용자가 설정하는 기준을 프로그램에 적용한다. DCS 서버 프로그램은 진단 결과 표시 프로그램에서 사용되는 데이터들을 랜카드를 통해서 DDE 네트통신 방식을 따라 DCS 로 데이터를 보내는 역할을 한다.

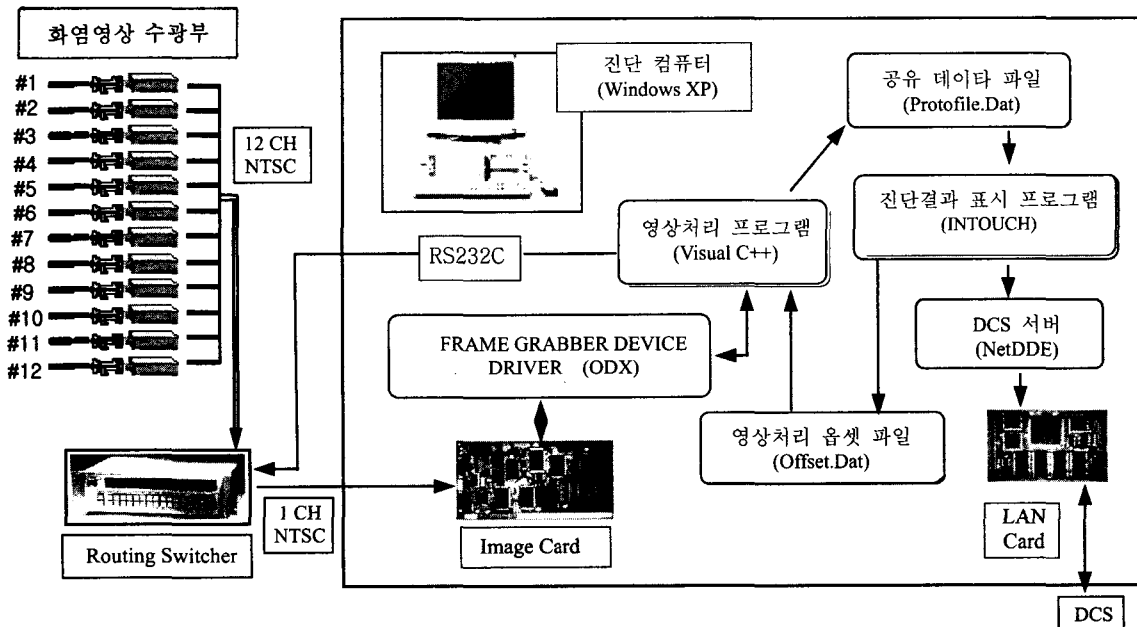


Fig. 3 System software configuration and inner software flow diagram of flame monitoring system for optimal combustion condition diagnostics

3. 화염영상의 정량화 및 상관성 분석

3.1 화염영상의 정량화

화염영상의 정량적 분석을 위해서 본 연구에서는 HSI 모델^{8,9}을 이용하였다. HSI 모델의 기본 요소는 색도(Hue), 채도(Saturation), 휘도(Intensity)이다. 색도 성분은 가장 큰 에너지를 가지고 있는 파장(Dominant wave length)을 의미한다. 화염 발광의 측면에서 색도를 재해석하면 CCD 영상 소자의 면적에 비례하는 화염의 면적에서 일어나는 발광 중 가장 큰 에너지를 가지는 발광을 의미하게 된다. 즉 색도는 화염 영상에서 가장 큰 에너지를 복사하는 반응에 관한 정보를 가지고 있다.

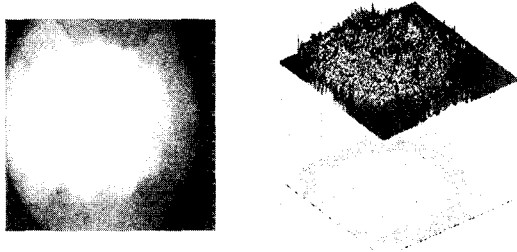
CCD 카메라의 측정 가능한 최장 파장을 λ_{max} 라 하고 최단 파장을 λ_{min} 이라 하면, 화염 발광의 파장과 색도간의 상관 관계식은 식 (1)과 같다.^{7,9}

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

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

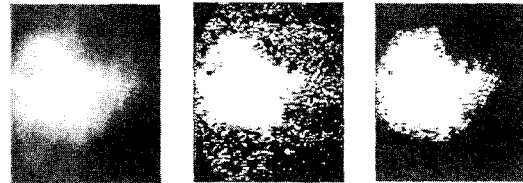
여기서 Hue는 색도이고 Quantity level은 프레임 그래버에 내장되어 있는 A/D 변환기의 분해능을 의미하는데 여기서는 256 레벨로 처리하였다.

화염 수광부를 통해 획득된 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 하는데 여기서는 160×120 픽셀로 처리하였다.



(a) Flame image (b) Hue surface and contour
Fig. 4 Flame image and its Hue surface and contour

Fig. 4(a)의 버너 화염을 HSI 상태 공간으로 변환한 후 색도 영상의 표면과 윤곽을 3 차원 공간에 도시한 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 획득한 화염 영상의 특정 대역별 화소 수와 배출가스와의 상관관계를 도출하기 위한 전처리 과정으로 필터링 및 평균영상 처리하였다. 필터링은 HSI 상태 공간에서 노이즈 성분의 화소를 제거하여 유효 화염영역을 추출하는 것으로, Fig. 5(a)의 원래 화염영상에 대해 필터링 처리 하기 전의 색도 영상을 Fig. 5(b)에, 필터링 처리한 후의 색도 영상을 Fig. 5(c)에 각각 나타 내었다. Fig. 5(b)에서는 유효 화염 주변에 조각 화염들이 나타나는 데, 필터링 처리를 한 후에는 Fig. 5(c)에서와 같이 조각 화염들이 제거되어 있음을 볼 수 있다.



(a) Flame image (b) Unfiltered Hue (c) Filtered Hue
Fig. 5 Filtering effects of flame and its Hue image

3.2 상관성 분석

화염영상과 대기오염 배출물과의 상관관계를 구하는 방법으로 식 (2)와 같은 이산신호 해석적인 상관관계 분석방법을 이용하였다.

$$\rho_{xy}(n) = \frac{\gamma_{xy}(n)}{\sqrt{\gamma_{xx}(0)\gamma_{yy}(0)}}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\gamma_{xy}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-n-1} x(k)y(k+n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

$$r_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [x(k)]^2, \quad r_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [y(k)]^2$$

여기서 ρ_{xy} 는 상관계수이며 $0 \leq \rho_{xy} \leq 1$ 이다. ρ_{xy} 가 0이면 두 신호가 전혀 관계가 없고, ρ_{xy} 가 1이면 두 신호가 동일함을 의미한다. 그리고 γ_{xy} 는 교차 상관도, γ_{xx} 와 γ_{yy} 는 자기 상관도이며, $x(k)$ 와 $y(k)$ 는 입력 신호, N 은 신호의 크기이다.

화염 영상처리 및 대기오염 배출물과의 상관관계를 구하는 과정은 Fig. 6에 도시된 바와 같이

영상획득 장치를 통해 획득된 영상을 HSI 모델의 영상으로 변환시킨 후, 각 영상을 통계량 데이터로 재구성하고, 동시에 대기오염 배출물 중의 각 성분별 가스농도를 계측하여 가스 데이터를 구한 다음에 이 데이터들을 이용하여 상관성 분석을 실시하였다.

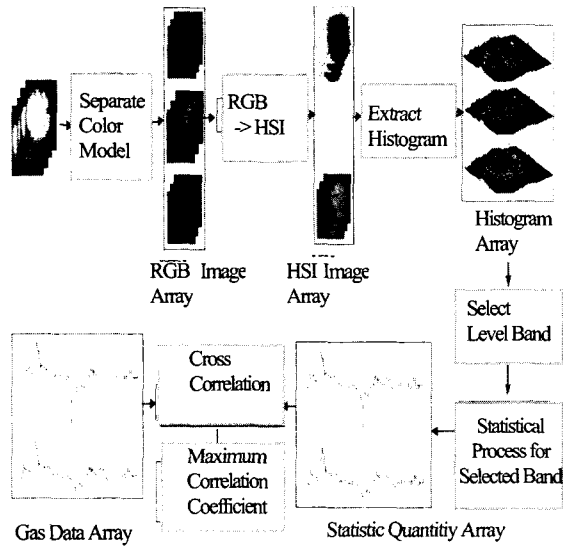


Fig. 6 Tracking flow of correlation between flame image and emissions

4. 연소시험 및 실험 결과

4.1 시험로 및 시험조건

화염영상 데이터와 대기오염 배출물과의 상관관계를 도출하기 위해 화염수광부를 Fig. 7의 소형 시험로에 장착하였다. 연소실험 결과 분석을 통해 화염상태 정량화의 가능성을 확인하고 Fig. 8의 파일럿 시험로에서 연소시험을 계속하였다. 소형 시험로는 연소로, 버너 및 연료 탱크, 냉각탑 및 순환수 공급장치 등으로 구성되어 있는데, 버너는 한국공업사의 모델 FG-5 제품으로 최대발열량에서 화염의 길이 및 폭이 각각 150 cm 및 60 cm를 유지하며, 노내 직경은 110 cm, 길이는 200 cm로 설계하였으며 몸체는 5개 섹션으로 제작하였다. 각 섹션에는 화염온도 및 배기가스 측정용 프루브를 장착할 수 있는 감시창을 대칭으로 2개씩 설치하고 가장 하단의 감시창에 화염 수광부를 설치하였다.

소형 시험로에서는 스택으로 방출되는 배기가스의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 자동 연소방식을 채택함으로써 같은 조건에서 일정한 형태의 화염이 유지되도록 하는 안정된 화염조건에서 연료 분사량과 공연비를 변화시키며 일정시간 간격으로 화염영상을 포착하고 동시에 질산화물과 미연 탄소 등의 배기가스 데이터 획득을 반복하였다. 파일럿 시험로에서는 선회 (Swirl) 수를 고정된 상태에서 최대 연료 분사량의 50%, 75%, 90% 상태에서 배기가스중의 O₂ 량을 2.3%에서 5.4%까지 변화시키며 배기가스를 모니터링하고 영상을 취득하였다. 질산화물 분석기는 로즈마운트사의 모델 951A, 일산화탄소 분석기는 서보맥스사의 1410B, O₂ 분석기는 서보맥스사의 1420B를 사용하였으며, 미연 탄소 측정은 여과에 의한 중량법을 채택하였다.

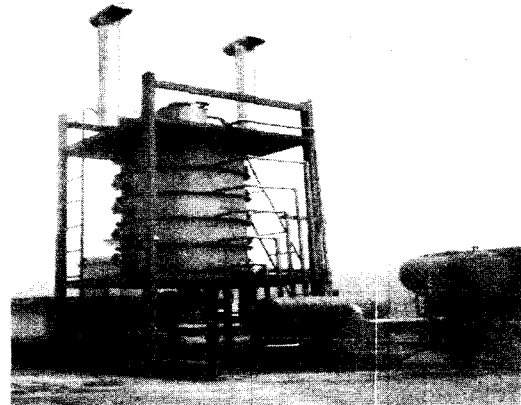


Fig. 7 Bench furnace overview

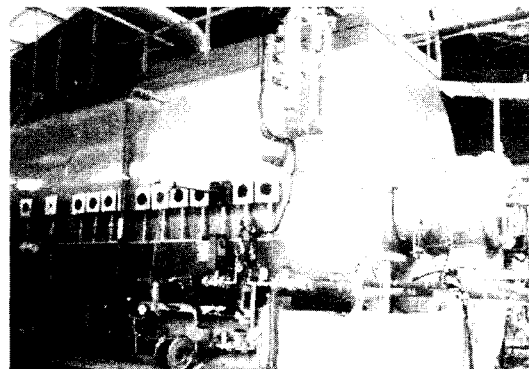


Fig. 8 Pilot furnace overview

4.2 실험 결과 및 실시간 처리

실험과정을 통해 나타나는 문제점은 공연비, 연료 분사량, 선회 수, 재순환 가스량 등의 같은 조건에서도 연료압력 변동 및 배기가스 측정 오차가 심하게 나타난다는 점이다. 이에 대한 개선은 측정값의 신뢰도가 보장될 수 있는 영역에서 반복적인 측정을 통해 해결하였다. 이렇게 축적된 데이터들을 이용하여 Fig. 6 에 도시된 과정을 반복함으로써 가장 근접한 상관관계가 도출된다.

영상처리 프로그램을 구동시켜 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같이 화염영상의 색도 데이터와 질산화물 및 미연 탄소와의 상관관계를 나타 내었다. Fig. 9 에서는 질산화물과 색도 성분의 관계에 따라 색도 성분이 10 에서 19 까지의 값을 갖는 화소의 갯수와 30 이상의 값을 갖는 화소의 갯수를 합산함으로써 질산화물 값이 산출됨을 보였다

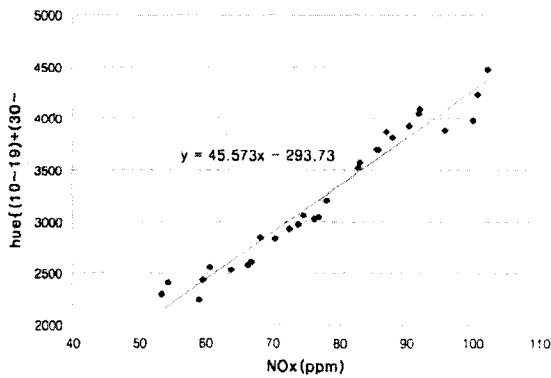


Fig. 9 Correlations between NOx and Hue

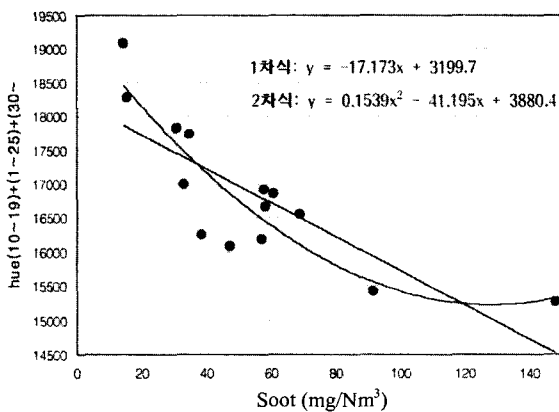


Fig. 10 Correlations between UBC and Hue

Fig. 10 에서는 색도 레벨이 10 에서 19 까지를 갖는 화소의 갯수와 1 에서 25 까지를 가지는 화소의 갯수와 30 이상의 Hue 값을 가지는 화소의 갯수가 합산되어 미연 탄소 값이 산출됨을 보여 준다.

이상의 결과를 실시간으로 처리하기 위해 영상처리 장치에서 최종 영상의 크기를 80× 60 픽셀로 처리하였으며, 이때 화염감시 처리시간 (Scan time)은 버너 화염이 수광부에 입력되어 영상처리 후 컴퓨터 화면에 연소상태를 표시하는데 걸리는 시간으로, 1 개 채널에서 바인딩 (일정시간 간격으로 영상을 연속 처리하여 평균값을 사용하는 것)을 10 회 할 때 총 840 msec 가 소요되어, 12 개 채널의 처리시간은 평균 10.1 초가 되어 실시간으로 화염 감시가 가능함을 확인하였다.

본 결과는 탄종별, 부하별 연소시험을 통한 연소 데이터베이스 구축으로 각종 연소로에 적용하여 질산화물과 미연 탄소를 동시에 저감시키며 최적 연소상태를 유지시키는 데 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한 화염 안정도의 정보 제공으로 실화판정 오류를 감소 시키고, 운전의 안전성 확보로 불필요한 부하사용의 배제 및 전력낭비 절감이 가능하며, 부하변동이나 연료 절환시 버너 조정시간 단축 및 유지보수 비용절감에도 크게 기여할 수 있을 것이다.

5. 결론

자체 제작한 화염 수광부와 영상 처리 장치를 시험로에 설치하고 연소 실험을 실시한 결과, HSI 모델을 이용하여 평균영상의 필터링 및 영상 처리 방법으로 화염영상 상태의 정량화가 가능하며, 이 산신호 해석적인 상관관계 분석 방법으로 특정 대역의 색도 성분과 질산화물 및 미연 탄소와의 상관성을 확인하였다.

기존의 연돌 감시방식과 운전자의 경험에 의존하는 전통적인 연소관리 기술 대신에 제시된 상관성 도출 방법을 이용하여 노내 연소 상태를 실시간으로 감시하며, 에너지 효율 증대 및 대기 오염물 배출의 극소화를 동시에 실현할 수 있는 화염 감시 시스템의 상용화가 가능함을 보였다.

본 연구 결과는 각종 연소로에 확대 적용하여 질산화물과 미연 탄소를 동시에 저감시키며 최적

연소 상태를 유지시키는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Griffiths, J. F. and Barnard, J. A., "Flame and Combustion," Blackie Academic & Professional Glasgow, pp. 108-112, 141-142, 1995.
2. Char, Jir-Ming and Yeh, June-Hsien, "The Study on Propane Flame Temperature Measurement with Infrared Technique," 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 Technical Paper Series, 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 Generaton, 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 Generaton, Vol. 43, pp.71, 1992.
7. John, A. Dean, Flame Ptometry, McGraw-Hill, New York, 1960.
8. Lee, T. Y., Kim, S. H. and Lee, S. R., "Flame Diagnostics using Image Processing Techniques," KSPE, Vol. 16, NO. 7, pp.196-202, 1999.
9. Louis, J. and Galbiati, J., Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals, Prentice-Hall, 1990.
10. Ditchbrun, R.W., Light, New York Publication, 1991.