

연소상태 감시용 화염 영상분석 시스템

백운보*(동의대 메카트로닉스공학과), 한성현(경남대 기계자동화공학부)

Flame Image Analysis Systems for Combustion Conditions Monitoring

W. B. Baek (Dept. of Mechatronics Eng., Dong-eui U.), S. H. Han (Dept. of Mechanical Eng., Kyungnam U.)

ABSTRACT

Increase 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 legislation, require very careful combustion management. 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. By using this technology, it is possible to perform continuous monitoring of the combustion conditions and instant detection of individual changes for each burner to prevent future loss of ignition.

Key Words : Image Processing (영상처리), Flame Monitoring (화염감시), Frame Grabber (프레임 그래버), Optic Acquisition Unit (수광부), NOx (질산화물), Unburned Carbon (미연 탄소), Correlations (상관성),

1. 서론

노내 질산화물의 생성량은 화염의 온도와 연소 중 과잉 산소량에 비례하여 증가하는데 최적 공연비에 도달하게 되면 열적 반응에 의한 질산화물(NOx)의 생성은 극대화되는 반면에, 일산화탄소, 미연 탄소(Unburned carbon) 등은 연소가 불완전할 때 그 배출량이 증가하게 되는데⁽¹⁾, 실제 현장에서는 연돌 감시 및 운전원의 육안 감식에 의존하는 단계를 벗어 나지 못하고 있어 환경 규제에 대처하기 어려운 실정이다. 최근에 산업용 보일러를 비롯한 에너지 발생기기에 대한 대기 환경 규격이 더욱 강화됨에 따라 전통적인 관심사인 최상의 연소 조건 유지를 통한 에너지 효율 극대화 이외에 대기 오염물 배출 극소화라는 기술적 도전을 맞이하게 되었다. 이와 같은 최적 연소 상태를 유지하도록 하는 연소 관리를 위해서는 노내 질산화물, 미연분의 분포 감시, 이상 연소 검출 등의 실시간 분석 처리 기능이 요구되며, 연소 상태의 정량화가 가능한 화염 수광부(Optic acquisition unit)와 영상 처리 장치가 필요하게 된다⁽²⁻⁵⁾. 화염 수광부에서는 화염

속의 기체 가스에서 발생하는 자발광(Emission)과 화염 속의 주요한 고체인 매연이 발생하는 열복사에 의한 자발광의 정량화된 이차원 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 내연기관의 대기 오염물 배출의 계측에 영상 처리 장치를 적용한 연구는 보고된 바 있으나⁽⁸⁾ 산업용 보일러나 공업로에 적용한 영상 처리 장치 및 화염 감시 기술에 관한 연구보고는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 연소 상태의 정량화가 가능한 화염 수광부와 영상 처리 장치를 사용하여 이상 연소 발생을 조기에 검출하며 보일러 연소 관리를 구현할 수 있는 보다 지능적인 연소 감시 기술을 개발하였다. 그리고 화염 착화 실화 판정 기능을 수행하며 이상 연소 발생시 안전 운전을 위한 정보의

실시간 처리가 가능함을 확인하였다.

2. 화염영상 처리방법 및 상관성 분석

2.1 화염영상의 정량화

화염 영상의 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 계측 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 양자화 레벨(Quantification level)은 영상 취득 장치에 내장되어 있는 A/D 변환기의 분해능을 의미한다.

2.2 화염영상 처리방법

수광부를 통해 획득한 화염영상은 카메라가 지원하는 크기에 관계없이 영상처리 장치에서 설정된 값으로 변환되어 최종 영상의 크기가 결정된다⁽⁹⁾.



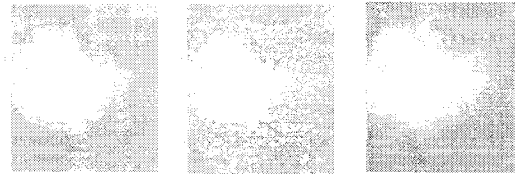
(a) Flame image (b) Hue contour

Fig. 1. Flame image and its Hue contour

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 처리한다.

그림 1(a)의 버너 화염을 HSI 상태 공간으로 변환한 후 색도 영상에 대해서 3 차원 공간에 도시한 결과를 그림 1(b)에 나타내었다. 획득한 화염 영상의 특정 대역별 화소 수와 배출가스와의 상관관계를 도출하기 위한 전처리 과정으로 필터링 및 평균

영상 처리하였다. 필터링은 HSI 상태 공간에서 노이즈 성분의 화소를 제거하여 유효 화염 영역을 추출하는 것으로, 그림 2(a)의 버너 화염에 대해 필터링 처리 하기 전의 색도 영상을 그림 2(b)에, 그리고 필터링 처리한 후의 색도 영상을 그림 2(c)에 각각 보였다.



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

2.3 상관성 분석

화염 영상과 대기오염 배출가스와의 상관관계를 구하는 방법으로 식 (2)와 같은 이산신호 해석적인 상관관계 분석 방법을 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 교차상관도, γ_{xx} 와 γ_{yy} 는 자기상관도, $x(k)$ 와 $y(k)$ 는 입력신호, N 은 신호의 크기이다.

3. 화염감시시스템 구성

화염 감시 시스템의 개략적인 구성은 그림 3에 도시하였다. 시스템 하드웨어는 각 버너의 화염 영상을 획득하는 화염 수광부와 포착된 개별 화염 영상의 분석 및 진단 처리를 담당하는 감시 진단부로 나뉘어 진다

화염 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), 컴퓨터, 프레임 그라버 (Frame grabber) 등으로 구성되며 상세한 기기 구성 및 신호 흐름은 그림 4에 나타내었다. 본 연구에서는 고온 화염 가스에 노출되어 있는 화이버 스킵프를 보호하기 위

해 공냉식 냉각관(Cooling jacket)을 제작하여 사용하였다.

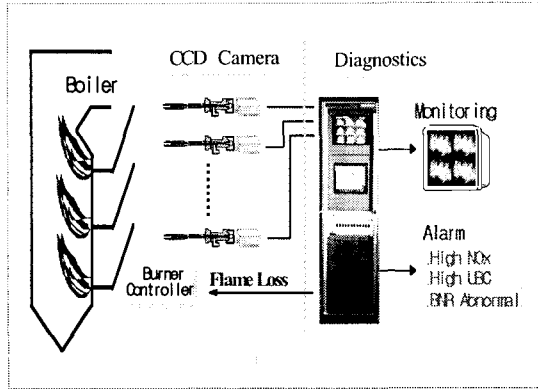


Fig.3. Flame monitoring system configuration

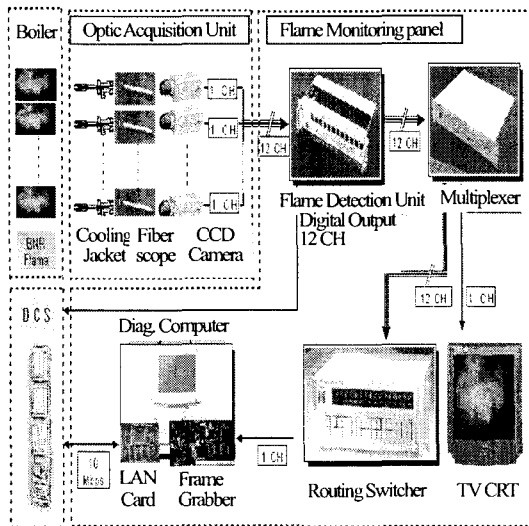


Fig.4. Apparatus configuration and signal flow for flame monitoring and diagnostics

시스템 소프트웨어는 영상 처리 프로그램과 진단 결과 표시 프로그램으로 나뉘어진다. 영상 처리 프로그램은 각 버너의 화염 영상을 포착하여 색합성 처리를 통해 노내 질산화물과 미연 탄소의 분포를 산출하고, 진단 결과 표시 프로그램은 그 결과를 실시간으로 모니터에 표시하며, 이상 연소의 조기 경보 기능 및 과거 경향도(Historical Trending) 기능 등을 제공한다. 그리고 영상 처리 파라미터를 설정하며, 외부 기기와의 통신을 담당한다.

영상 처리 프로그램이 입력된 화염 영상을 분석하여 처리 결과를 공유 파일에 저장하면, 진단 결과 표시 프로그램은 이 공유 파일의 데이터를 모니터

터 화면에 표시해 주며, 영상 처리에서의 각 버너에 해당하는 필요한 화염 파라미터 값을 설정하여 옵션 파일로 저장한다.

4. 연소시험 및 시험결과

4.1 시험로 및 시험조건

화염 영상 데이터와 대기오염 배출가스와의 상관관계를 도출하기 위해 화염 수광부를 소형 시험로에 장착하였다. 소형 시험로는 연소로, 버너 빛 연료 탱크, 냉각탑 및 순환수 공급장치 등으로 구성되어 있는데, 버너는 흥국공업(주)의 모델 FG-5 제품으로 최대 발열량에서 화염의 길이 및 폭이 각각 150 cm 및 60 cm 를 유지하며, 노내 직경은 110 cm, 길이는 200 cm로 설계하였으며 몸체는 5개 섹션으로 제작하였다. 각 섹션에는 화염 온도 및 배기 가스 측정용 프루브를 장착할 수 있는 감시창을 대칭으로 2 개씩 설치하고 가장 하단의 감시창에 화염 수광부를 설치하였다.

소형 시험로에서는 스택으로 방출되는 배기 가스의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 자동 연소 방식을 채택함으로써 같은 조건에서 일정한 형태의 화염이 유지되도록 하는 안정된 화염 조건에서 연료 분사량과 공연비를 변화시키며 일정 시간 간격으로 화염 영상을 포착하고 동시에 질산화물, 미연 탄소 등의 배기가스 데이터 획득을 반복하였다. 연소시험 결과 분석을 통해 화염 상태 정량화의 가능성을 확인하고 상관관계를 도출하였으며, 이를 확인하기 위해 파일럿 시험로에서 연소 시험을 계속하였다. 질산화물 분석기는 로즈마운트(사)의 모델 951A, CO 분석기는 서보맥스(사)의 1410B, O₂ 분석기는 서보맥스(사)사의 1420B 를 사용하였으며, 미연 탄소 측정은 여과에 의한 중량법을 채택하였다.

4.2 시험결과 및 실시간 처리

연소시험 과정을 통해 나타나는 문제점은 공연비, 연료 분사량, 선회(Swirl) 수, 재순환 가스량 등의 같은 조건에서도 연료 압력 변동 및 배기 가스 측정 오차가 심하게 나타난다는 점이다. 이에 대한 개선은 측정값의 신뢰도가 보장될 수 있는 영역에서 반복적인 측정을 통해 해결하였다.

파일럿 시험로에서는 선회 수를 고정된 상태에서 최대 연료 분사량의 50%, 75%, 90% 상태에서 배기 가스중의 O₂ 량을 2.3%에서 5.4%까지 변화시키며 배기 가스를 모니터링하고 영상을 취득하였다.

영상 처리 프로그램을 구동한 결과 그림 5 및 그림 6 과 같이 화염 영상의 색도 데이터와 질산화물 및 미연 탄소와의 상관관계를 나타내었다. 그림 5 에서는 질산화물과 색도 성분의 관계에 따라 색도 레벨이 10 에서 19 까지의 값을 갖는 화소의 갯

수와 30 이상의 값을 갖는 화소의 갯수를 합산함으로써 질산화물 값이 산출됨을 보여 준다.

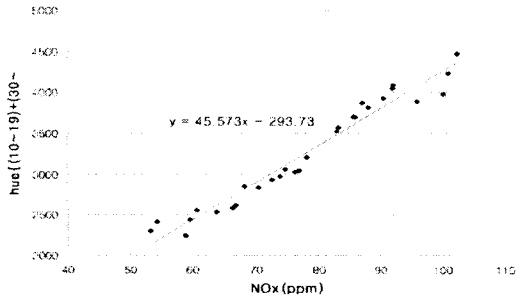


Fig. 5. Correlations between NOx and Hue level

그림 6에서는 색도 레벨이 10에서 19까지를 갖는 화소의 갯수와 1에서 25까지를 가지는 화소의 갯수와 30 이상의 색도 레벨을 가지는 화소의 갯수를 합산되어 미연 탄소 값이 산출됨을 보여 준다.

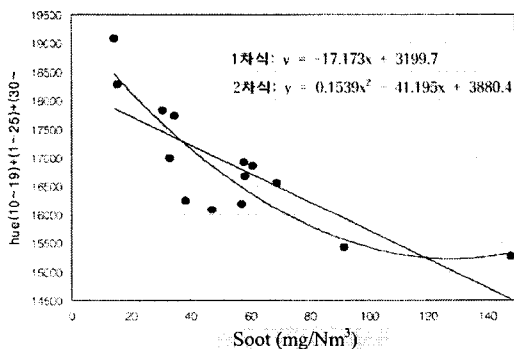


Fig. 6. Correlations between unburned carbon and Hue level

이 값들을 실시간으로 처리하기 위해 영상 처리 장치에서는 최종 영상의 크기를 80×60 픽셀로 처리하였으며, 이때 감시 처리시간 (Scan time)은 버너 화염이 수광부에 입력되어 영상 처리 후 컴퓨터 화면에 연소 상태를 표시하는데 걸리는 시간으로, 1개 채널에서 바인딩 (일정 시간 간격으로 영상을 연속 처리하여 평균값을 사용하는 것)을 10회 할 때 총 840 msec가 소요되므로, 12개 채널의 감시 처리시간은 평균 10.1초가 되어 실시간으로 화염 감시가 가능함을 확인하였다.

5. 결론

자체 제작한 화염 수광부와 영상 처리 장치를 시범로에 설치하고 연소 실험을 수행한 결과, HSI

모델을 이용하여 실험적 방법으로 제시된 필터링 처리 및 영상 처리 방법으로 화염 상태의 정량화가 가능하며, 이산신호 해석적인 상관관계 분석 방법으로 특정 대역의 색도 성분과 질산화물 및 미연 탄소와의 상관성을 확인하였다.

기존의 연돌 감시방식과 운전자의 경험에 의존하는 전통적인 연소 관리 기술 대신에 상관성 도출 방법을 이용하여 노내 연소 상태를 실시간으로 감시하며, 에너지 효율 증대 및 대기 오염물 배출 극소화를 동시에 실현할 수 있는 화염 감시 시스템의 구현이 가능함을 보였다. 본 연구 결과는 각종 보일러에 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 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, pp.71, 1992.
7. John A. Dean, Flame Photometry, New York, McGraw-Hill, 1960.
8. Louis, J. and Galbiati, J., Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals, Prentice-Hall, 1990.
9. Ditchbrun, R.W., Light, New York Publication, 1991.