

대형보일러 화염영상 개선과정량적관리에 관한 연구

하광순 · 이명재 · 최상민 · 김택수* · 김재성*
한국과학기술원 기계공학과, *한국전력공사 기술연구원

A Study on the Improvements and Quantifications of Flame Images in Utility Boilers

Kwang Soon Ha, Myong Jai Lee, Sang min Choi, Tak Soo Kim* and Jae Sung Kim*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
373-1, Kusung-Dong, Yusung-Gu, Taejon, 305-701, Korea

*Power Generation Department Research Center, Korea Electric Power Corporation,
103-16, Munji-Dong, Yusong-Ku, Taejon, 305-380, Korea

요 약

대용량 발전용 보일러내 화염의 정량적 관리를 위해서 기존의 화염감시 카메라에 영상처리 기법을 적용한 화염감시 시스템을 개발하였다. 화염감시 시스템은 화상의 저장, 재생, 비교 및 색채화의 기능을 통해 화염의 분포를 가지적으로 확인하고 변화를 판단하는 기능을 가지고 있다. 이 시스템을 S 화력에 대해 시험적용하였으며 현재 확대적용 가능성을 확인하고 있다.

Abstract— For quantitative observation of flame, an image processing system for visible flame in utility boiler has been established. The methods of determining flame boundaries and displaying the distribution of brightness in flame are developed. Through this system, flame images can be captured, stored, and recalled. Coloring of the image intensity, magnification, contrast, and comparison can be performed from a user-friendly interactive mode. To make data base, this system has been tested on S power plant boiler.

1. 서 론

효율적 연소관리를 위해 화염내의 연소상태를 관측하기 위한 여러가지 방법들이 제안되어오고 있다. 화염내 온도, 연소 생성물의 분포, 열유속 등의 측정을 위해 열전대, 샘플링 농도 분석기, 열유속계와 같은 직접 접촉법을 사용하거나, 광학온도계, 연소장내 라디칼의 발광강도측정, 복사에너지의 계측과 같은 비접촉법을 사용하기도 한다. 실제로 실규모 보일러내 화염의 이해를 위해 온도, 열유속, 성분가스의 조성, 속도 등의 측정이 이루어지고 있다¹⁻⁴⁾.

그러나 이와같은 방법이 발전용 보일러나 폐기물 소각로와 같은 대형 연소장치에서의 연소관리를 위해서 사용되는데는 측정범위의 제약, 측정환경의 부적합성, 측정의 번거로움, 시간적 경제적 비효율성 등의

많은 한계를 지니고 있다.

현재 대용량 발전용 보일러내 화염상태를 유지 관리하기 위해서 온도측정, 육안관측, 화염검출기, 화염감시 카메라 등 극히 제한적인 방법들이 사용되어오고 있다. 온도측정의 경우 보일러내 전영역의 온도를 측정 감시하지 못하고, 증기온도, 공기온도, 배출가스 온도 등을 측정하여 보일러내 연소상태를 간접 추정하고 있다. 육안관측은 노벽에 설치되어 있는 관측구를 통해 보일러 관리자가 직접 확인하는 방법이다. 관측구는 대부분의 경우 열손실을 최소화하기 위해 크기와 투시각도가 제한되어 있고, 노내의 고온화염으로부터의 복사영향때문에 관측가능한 근접위치에서 장시간의 관측이 곤란한 단점을 가지고 있다. 화염검출기는 화염에서 나오는 특정파장범위의 빛의 강도를 측정하여 화염의 정상유지를 확인하는 장치이다. 대형 보일러

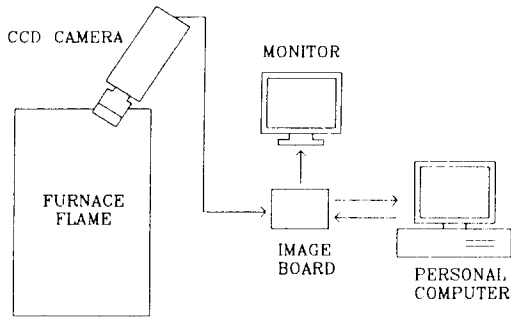


Fig. 1. Schematic diagram of flame monitoring system.

에서는 거의 버너별로 설치되어 있고 각각의 검출기가 일정한 검출시각 내에 있는 공간 표본체적의 화염이 발산하는 복사에너지를 측정하고 있다. 아울러 해당 화염에 특징적으로 나타나는 화염복사의 파장별 특성을 감안하여, 광대역(broad band)과 협대역(narrow band)을 필요에 따라 선택하고 있다.

대형 보일러내에 설치 운영되고 있는 화염감시 카메라는 노내 화염을 중앙제어실에서 가시적으로 관찰할 수 있는 유일한 장치이다. 화염감시 카메라는 육안관측을 대신하여 원거리의 관측을 가능하게 하고, 또한 반복적으로 동일한 위치에서 관측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 공기조화되고 있는 집중제어실에서 TV 모니터를 통하여 관측하는 보일러내 화염의 영상은 기동 및 정지시에 특별히 유용한 관찰방법이며, 천연색의 관측을 통하여 화염상태의 파악에도 도움이 된다. 카메라 렌즈의 확대(Zoom) 기능도 활용하여 더욱 유익한 감시가 가능하기도 하다. 그러나 카메라 렌즈 부위가 노내에 노출되어 있기 때문에 회분 및 미연분 등의 불순물이 렌즈에 부착되어 시야를 흐리게 하고 카메라 및 모니터의 공간 분해능력이 미진한 예가 많은 문제점이 있다.

이와같은 기존의 감시 카메라만으로는 선명한 화상을 얻기 어려울 뿐만 아니라, 단순 모니터링에 국한되어 있어 정량적인 측면에서의 화염관리를 하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 화염의 가시관찰능력을 증대시키고, 정량적인 화염관리를 위해 화염감시 시스템을 개발하게 되었다. 가시화염의 모니터링을 통하여 연소상황을 예측 관리하려는 유사한 연구가 행해지고 있다. 즉, 가시화염의 색깔과 밝기정도, 분포, 크기 및 시간에 따른 변화정도 등을 이용해 화염의 종류, 연소상황을 이해하려는 것이다. 실제로 화염은 우리의 육안으로 관측할 때 여러가지 모습을 나타내고 있다. 화염의 색깔, 밝기정도 또는 시간에 따라 변화하는 정도 등이 화염의 종류, 연소조건 및 주위환경에 따라 다르게

나타난다. 이렇게 시각적인 관측을 통하여 화염을 알아내고 연소상황을 판단하는 것은 보일러를 관리 운영하는 실무자에게는 경험적으로 매우 익숙해 있다. 그러나 그와같은 일이 단지 경험에 머물러 있다는 것이 문제이다.

본 논문에서는 가시화염의 정량적 평가를 위하여 공간적 측정결과를 쉽게 처리할 수 있는 영상처리 기법을 도입하여 S화력 발전용 보일러에 활용한 결과를 보고한다. 영상처리 기법은 화염내 연소반응 영역의 가시화¹⁾나, 온도분포²⁾를 얻는 과정에서 화상의 정량화를 위해 흔히 사용되는 기법이다. 이같은 노력은 현장에서 사용되고 있는 화염관측기법이 관측구를 통한 육안관측과, 감시용 카메라에 의한 중앙제어실에서의 모니터링에 국한되어 있는 것을 감안하여 이들을 정량화하여 자료로 쓸 수 있는 단계로 진일보하기 위한 과정의 하나이다.

2. 구성 및 기능

화염감시 시스템은 전자공학 기술의 발달로 현재 각종 산업 분야에서 응용되고 있는 영상처리 기법을 화염에 적용한 것이다.

화염감시 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다.

노내 카메라로 획득된 영상이 영상처리기를 거친 후 컴퓨터에 의해 제어되어 원하는 영상으로 바뀐 후 모니터로 출력되는 형태이다.

노내 카메라는 칼라 CCD(Charge Coupled Devices) 카메라로서 시험대상으로 채택한 S화력의 경우 화염감시 카메라는 보일러 전체 높이의 71.4% 지점 왼쪽과 오른쪽 각각의 위치에 1개씩, 수직면면과 28.5°의 각도를 이루며 설치되어 있다. 카메라는 냉각 보호관으로 쌓여 있으며 57°의 시야각을 가지고 있다.

영상처리기(Image Processor)는 8bit 분해능을 가진 MATROX社의 MVP-AT로서 카메라로부터 받은 전압 신호를 디지털 정보로 바꾸어 여러가지 기능의 영상처리작업(image processing)을 수행한다. 8bit 영상처리기(image processing unit)는 내장된 AD 변환기(converter)를 이용하여 빛의 밝기를 256단계로 나누어 디지털 정보로 바꾸며, 컴퓨터와 협동하여 필요한 작업을 수행한다. 가장 어두운 검은 색은 0으로 표현되고, 가장 밝은 하얀색은 255의 수치로 표현된다. 분석되고 재구성된 영상은 DA 변환기에 의해 다시 전압신호로 바뀌어 모니터로 보내진다.

화염감시 시스템의 기능은 영상의 가시적 분별능력을 향상시키기 위한 색채화, 정량화를 위한 기능을 기본으로 하고 있다. Fig. 2와 같은 풀다운 메뉴(Pull-

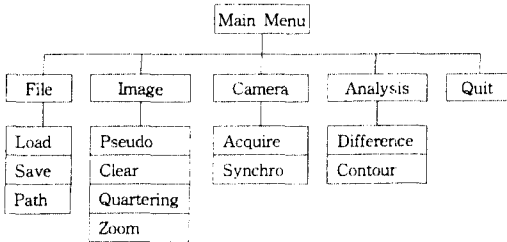
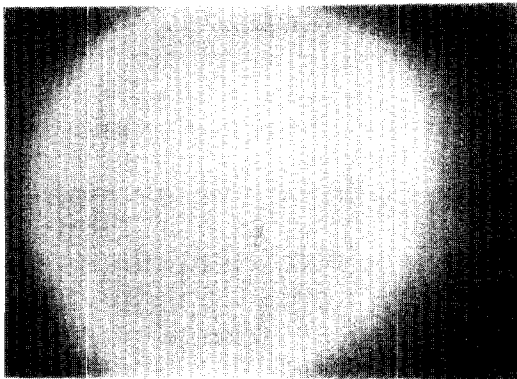
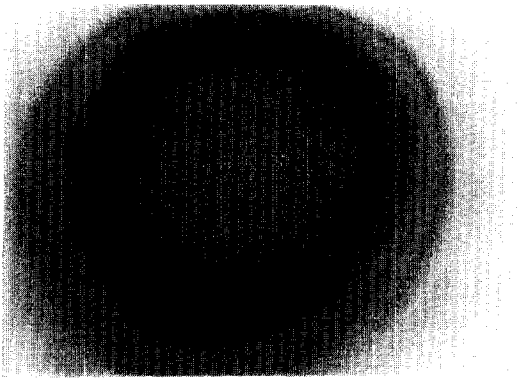


Fig. 2. Functions of flame monitoring system.



(a) Original image



(b) Pseudo-colored image

Fig. 3. Pseudo coloring of flame image.

Down Menu) 방식을 도입하여 초보자도 쉽게 배우고 익힐 수 있으며, 그 대표적 기능은 다음과 같다.

- 포착(Capturing) : 원하는 화염의 상태를 포착한다.
- 저장(Save) : 화염의 상태를 저장한다.
- 불러오기(Load) : 과거에 저장된 화상을 다시 보여준다.
- 색채화(Pseudo-coloring) : 화염영상에 원하는 색깔을

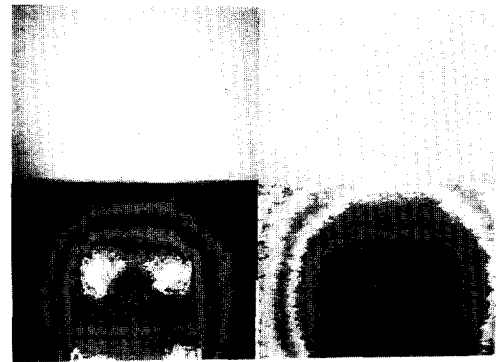


Fig. 4. Difference of two images at different load conditions.

입혀 판단을 용이하게 한다.

- 확대(Zoom) : 화염의 특정부위를 4배 확대하여 보여준다.
- 4분할(Quartering) : 화염화상을 4배 축소하여 보여준다.
- 비교(Comparing) : 두 화상의 차이를 보여줌으로써 화염의 변화상태를 쉽게 알 수 있게 해 준다.
- 등명암선(Contour) : 같은 밝기의 부분만을 구분하여 보여준다.

3. 적용 결과

개발된 화염감시 시스템을 S화력에 적용하였다. S화력은 560MW 급 유연탄 발전소로서 접선화염(Tangential Flame)의 형태를 취하고 있다.

Fig. 3는 보일러내 원래의 화염과 색채화 기법을 적용한 화염을 비교한 것이다. 화염의 왜곡정도와 밝기 분포를 쉽게 분별할 수 있다. 색채화의 기능은 실시간상에서 수행할 수 있으므로 매 순간 변화하는 화염의 모양을 보다 분명하게 관찰할 수 있다.

Fig. 4는 부하조건에 따른 화상을 저장한 후 두 화염의 차이를 본 것이다. 각 사분면을 왼쪽 위 부터 시계방향으로 1, 2, 3, 4 사분면으로 정의하여, 1사분면의 영상값이 2사분면 값보다 크면 그 차이를 4사분면에, 2사분면의 영상값이 1사분면 값보다 크면 그 차이를 3사분면에 나타낸 것이다. 즉, 1사분면의 Pixel 값을 I(1), 2사분면의 Pixel 값을 I(2), 3사분면의 Pixel 값을 I(3), 4사분면의 Pixel 값을 I(4)라 하면, 그 표현 규칙은 Eq.(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{If } I(1) - I(2) > 0, \text{ then } I(3) = 0, I(4) = |I(1) - I(2)| \\
 & \text{If } I(1) - I(2) < 0, \text{ then } I(3) = |I(1) - I(2)|, I(4) = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

이러한 기능은 화염의 이상연소 유무를 판단하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 정상 상태의 화염상태를 기록 보관한 후, 화염의 이상유무나 이상부위를 기준화염과 비교함으로써 파악할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 다양한 화염 영상자료의 수집과 검토가 필요하며, 현재 약 3개월간에 걸친 자료를 수집 중이다.

4. 결론 및 토의

기존의 감시 카메라를 이용하여 화염을 정량적으로 관리하고 시각관측 능력을 증대시키려는 목적으로 화염감시 시스템을 개발하였다. 이러한 화염감시 시스템은 다음과 같은 측면에서 연소관리에 도움을 줄 것으로 기대된다.

첫째로 시각관측 능력을 향상시킨다. 화염감시 시스템에서는 화염의 상태를 색채화하여 보여주는 기능을 제공하고 있다. 따라서 감시 카메라에서 보내오는 영상을 기존의 모니터상에서와 같은 회미한 상태에서 관측할 것이 아니라 색채화하여 뚜렷한 형상을 관측할 수 있다. 색채화를 통하여 상황에 맞는 적절한 색을 지정한다면 뚜렷한 화염의 모습을 관측할 수 있으며, 이러한 일을 현장 엔지니어가 쉽게 구현할 수 있도록 마련되어 있다.

둘째로 화염을 정량적으로 관리할 수 있다. 정량적 화염관리를 위해서 화염의 상태를 일정기간 혹은 특별한 순간에 포착하여 체계적으로 저장하는 일이 필요하다. 이렇게 저장된 화염의 영상은 과거와 현재의 화염의 상태를 비교, 분석하기 위한 기본자료가 될 것이다. 즉 두 화염 영상의 차이를 구해 봄으로써 어느 부위가 특별히 밝아졌는지 또는 어두워졌는지 알아볼 수 있을 것이다. 또한 이렇게 축적된 화염 영상의 자료는 화염의 상태와 보일러내 입력자료 - 연료/공기의 비, 출구의 온도, 연료의 양 등 - 와의 상관관계를 추적하여 화염진단의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

이러한 화염감시 시스템을 효율적으로 활용하기 위해서는 다음과 같은 점이 해결되어야 한다.

첫째로, 화염감시 시스템의 입력자료는 노내에 설치되어 있는 감시카메라에 의한 것이므로, 이 카메라에 대한 특성을 알아야 한다. 카메라의 과장별 감응특성(responsivity), 균일성(uniformity), 선형성(linearity), 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio; S/N ratio) 등에 대한 정확한 정보는 획득된 영상을 보다 정량적으로 해석하는데 결정적인 관건이 된다.

둘째로, 기존에 설치되어 있는 감시 카메라에 의한 영상은 최대부하조건에 도달하였을 경우 화염의 광

량이 매우 커서 포화상태(Saturation)에 도달하는 경우가 존재하는 것으로 보인다. 이러한 포화상태에서는 감시 카메라가 화염의 밝기 정도를 옳게 분간해 내지 못하게 되므로 정확한 화염감시능력이 떨어지게 된다. 이러한 것을 방지하기 위해서는 감시 카메라의 렌즈 부위에 ND 필터(Neutral Density Filter)와 같이 일정한 양의 빛을 감쇠시키는 장치를 부착하여 기존 카메라의 효율을 높이거나, 고 성능의 카메라를 부착하는 일을 고려해 볼 수 있을 것이다.

셋째로, 발전용 보일러의 연소관리를 위해 가장 중요하고 유용한 인자(parameter) 중의 하나인 화염의 온도를 영상정보로부터 파악하는 일이다. 이를 위해서는 단층진단법의 적용, 과장별 자료의 적절한 해석 등이 이루어져야 한다⁷⁾. 카메라의 영상은 화염으로부터 검출기까지 선적분(line integral)된 신호이기 때문에 화염의 특정 단면에 대한 정보를 얻기 위해서는 단층진단법과 같은 기법을 도입해야 한다. 그러나 이의 적용에는 보일러 형상의 제약으로 인한 한계가 있다. 또한 카메라의 감응과장영역이 특정한 단일과장에 있지 않고, 넓은 과장영역에 걸쳐 있고, 그 과장별 감응특성도 사람의 눈을 기준으로 보정되어 있기 때문에 이에 대한 정보로부터 온도를 환산하기 위해서는 많은 주의를 요한다. 더불어 화염영역 자체에 대한 방사율(emissivity) 등과 같은 물성치를 명확하게 알고 있지 못하다는 점도 간과할 수 없다.

화염감시 시스템은 보일러내 연소조건 변화를 스스로 판단, 진단하고 적절한 조치를 취하는 전문가 시스템(Expert System)의 기초가 될 것이다. 즉, 정상 상태의 화염분포를 파악, 기억한 후 현재상태를 비교 분석하여 그 이상유무를 판단하고, 입력조건 즉, 연료/공기비, 연료의 양 등을 적절히 제어하여 화염분포를 정상상태로 만드는 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. J. N. Cannon, B.W Webb. and M. Querioz: Testing of a Tangential Coal-Fired Power Plant with Water Cooled Probes, *Fossil Fuel Combustion, PD-Vol. 33* (1991).
2. A. V. Sudarev and V. I. Antonovsky: Experimental Study of Radiant and Convective Heat Transfer in Power Steam Boiler Pulverized Fuel-Fired-Furnaces, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Coal Combustion*, pp.596~604 (1991).
3. V. J. Antonovsky, B. R. Chudnovsky and M. A. Bukhman: Radiation and Convection in Steam Boiler Fu-

- rnaces when Burning Coal and Low Calorific Cases, Proceedings of the 2nd International Symposium on Coal Combustion, pp.696~701 (1991).
4. Y. Mizutani, Y. Matsumoto and T. Matsui: Visualization of the Reaction Zone of a Flame by Image Processing, J. of JSME, **52**, pp.1931~1939 (1985).
 5. Y. Mizutani, T. Saeki and K. Nakabe: Visualization of the Reaction Zone of a Flame by Image Processing(Further Report), J. of JSME, **54**, pp.2219~2227 (1987).
 6. A. Arakawa, K. Saito and W. A. Gruver: Automated Infrared Imaging Temperature Measurement with Application to Upward Flame Spread Studies. Part I, Combustion and Flame, **92**, pp. 222~230 (1993).
 7. Ha K.S. and Choi S., Interpretation of Emission Image of an Axisymmetric Diffusion Flame into 2-Dimensional Temperature Data Using a Simplified Computed Tomography , KSME Journal, **8**(1), pp.94~102 (1994)