

논문 96-5-6-06

저공해 연소를 위한 화염진단장치의 특성

김 종원*, 이 상호*, 박 기배*, 심 규성*

Advanced flame quality indicator for emission control

Jong-Won Kim* , Sang-Ho Lee* , Kee-Bae Park* and Kyu-Sung Sim*

요 약

대부분을 수입에 의존하고 있는 연료의 연소효율 증대, thermal NOx의 배출 저감은 화염특성 감지 및 분석을 통해서도 가능하다. 연소시스템에서 화염의 flicker에 대한 정보를 푸리어 변환을 통해 frequency domain data로 변환시켜 해석한 결과, 일반적으로 연소 영역의 난류강도가 커질수록 frequency와 강도는 커졌으며, 화염의 강도는 연료 공급 유량이 커질수록 함께 커졌다. 선회도가 0~1.16 범위에서 커질 때, 화염의 강도는 작아졌다. 시험 연소로의 관찰구를 통하여 얻은 신호는 화염유무에 따라 그 차이가 매우 커서 화염의 존재 유무를 쉽게 알 수 있었다. 발생하는 NOx의 양은 화염강도와 밀접한 관계가 있음을 보여주었다.

Abstract

It is very important to improve the combustion efficiency and reduce pollutant emission in order to save energy and environment. Especially, thermal NOx has been reduced through monitoring burner flame, because the thermal NOx is strongly related to flame characteristics. In this work, a flame-monitoring system was fabricated with photodiode, optical fiber, interference filter and data acquisition system, and it was applied to a lab-scale methane combustion system and a testing facility. Flame intensity and mean frequency increased with increasing turbulent intensity and fuel loading. The sensor signal from flame fluctuations differed from that without flame, which showed the availability of the flame scanner to find the presence of flame. NOx emissions increased with flame intensity.

1. 서론

국내의 유연탄 화력 발전 용량은 '94년 6월의 보령 화력의 3~6호와 삼천포 3,4호기 준공시 총설비용량이 5,800MW(연간 석탄사용량 1,300만톤)이며, 약 1,000MW(연간 200만톤 석탄 사용)의 무연탄발전소를 포함한다

면, 석탄 사용량으로 볼 때, 연간 1,500만톤 이상에 이르고 있다. 따라서 약간의 조업 조건의 변경으로도 상당한 비용 절감 또는 증가를 가져올 수 있다. 최적 조업 조건을 맞춘다는 것은 연소효율 증가와 동시에 오염 배출물을 저감할 수 있다는 것을 의미하며, 특히 환경문제로 그 중요성은 더욱 크다 하겠다.

연료를 연소시킬 때 환경오염물질이 발생하는데 이

* 한국에너지기술연구소 에너지전환연구부
(Korea Institute of Energy Research)
<접수일자 : 1996년 8월 3일>

를 줄이기 위해서는 연소조업조건 변화로 그 양을 줄일 수 있다. 특히 thermal NOx는 화염특성과 아주 밀접한 관련이 있으므로 화염의 특성분석을 통한 저 NOx 연소조건 형성이 가능하다.

버너의 화염은 전통적으로 안전문제 때문에 연구되어 왔으며 이러한 감지시스템은 pilot flame의 화염이 감지되지 않으면 석탄 공급이 자동으로 중지되어 폭발을 예방하게 된다.^[1] 최근에는 화염 유무에 대한 정보뿐만 아니라 화염의 안정성, 오염물질 방출의 억제, 효율개선을 위한 최적 연소조업조건 위한 정보도 제공할 수 있는 것으로 보고 있으며, 다양한 방법의 연구가 시도되고 있다.^[2-11] 미국의 Energy & Environmental Research Corp.^[2]에서는 '88년부터 two color pyrometry method를 이용하여 과잉 산소와 two color temperature 사이에 어떤 상관 관계가 있음을 밝혔으며, frequency data의 통계적 처리는 flicker meter보다도 더욱 엄밀한 flame signature를 보여줄 수 있음을 보였다. Brookhaven National Lab.^[3-6]에서도 multicolor flame quality indicator를 연구중인데, firing rate, combustion chamber configuration에 상관없이 universal set point를 얻을 수 있다는 장점이 있는 것으로 발표하고 있다. 이밖에 핀란드의 Imatran Voima Oy (IVO)사는 비디오 카메라를 이용하여 아날로그 신호를 영상보드에서 디지털로 바꾸어 연소와 관련한 파라메타를 계측하여 적용한 바 있으며^[7], 이와 유사한 시도를 국내에서도 시행한 바 있다.^[8,9] 캐나다의 Saskatchewan Power Corporation에서도 flame frequency를 이용하여 연소 효율을 최대하고 오염배출량 특히, NOx의 배출을 적게 할 수 있는 공연비 제어가 가능하였음을 밝히고 있다.^[10] 이와 같은 화염감지기는 일본의 IHI에서도 성공적으로 운영되었다고 발표하고 있다.^[7,11]

발전소에서 운전되고있는 보일러는 저 NOx 버너를 사용하여 현재의 환경기준치를 맞추고 있다. 연소조건 최적화라도 배가스중 환경오염 물질의 양을 감소시킬 수 있는데, 저NOx 조건의 형성은 실제 연소가 이루어지는 연소 영역 즉, 화염특성과도 밀접한 관련이 있으므로 화염특성 감지 및 분석을 통한 저 NOx 조건의 형성 및 예측이 가능하다고 보고 있다.^[12] 이 점을 착안하여 화염을 직접 감지하고 화염특성의 분석결과와 실제 배가스성분과의 관계를 확인을 하고자 하였다.

본 연구는 광다이오드로 구성된 화염진단기가 연소로에서 화염진단기와 계측기법이 공연비 및 유량에 따른 상대적인 출력 차이를 분석하였고, 실제 연소 조건

에서 화염진단기의 감지 신호가 실제 배가스와 화염형성이 어느 정도 차이가 있는지를 알아내고 이를 지표로 최적 연소 조건을 만들어 주면, 연소 배가스중의 오염물질 양을 제어할 수 있다고 보고 이를 화염진단 시스템 설계의 자료로 삼고자 하는데 그 목적이 있다.

II. 장치 및 실험 방법

1. 실험실적 가스 화염 발생 장치와 화염진단기

메탄과 공기의 공연비와 유량을 조절하여 화염을 형성할 수 있도록 유량계(Tylan FC-280)와 torch를 이용하여 그림 1과 같은 화염 발생 장치를 구성하였으며, 화염 측면부에서 렌즈로 집광한 후 광섬유다발을 사용, 화염진단기까지 빛을 유도하여 화염의 강도를 측정하였다. 광섬유 다발은 직경 400 μ m의 실리카 광섬유로 만든 직경 0.5cm의 다발로 만들어져 있으며 두 갈래로 분기되어 있다.

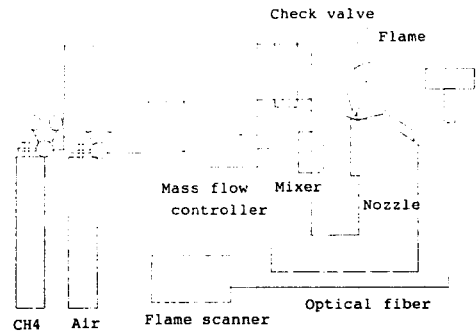


그림 1. 실험실적 가스화염 발생 장치

Fig. 1. Basic experimental apparatus

화염진단기는 그림 2와 같이 구성하였으며 각각의 광다이오드(Kodenshi, SP-1KL)의 앞에 900 ± 10 nm와 700 ± 10 nm의 광필터를 사용하여 특정파장대의 빛만을 광다이오드가 감지하도록 하였다. 화염진단기에서 나오는 출력신호는 오실로스코프(PM 3350, Philips)로 확인하면서, A/D converter (NIS16F5)와 개인용 컴퓨터를 이용하여 데이터를 수집 저장한 후 FFT를 이용하여 데이터를 분석하였으며, 화염진단기의 회로도는 그림 3과 같다.

실험조건은 메탄가스의 유량을 1.2 ~ 2.8 l/min 범위에서 변화시켰으며, 버너는 노즐직경이 1.6cm인 것을 설치하였으며 여기서 얻은 데이터를 해석하였다.

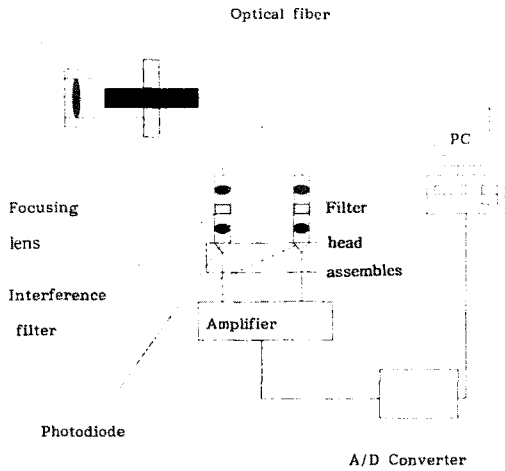


그림 2. 화염진단기의 구성
Fig. 2. Flame scanner

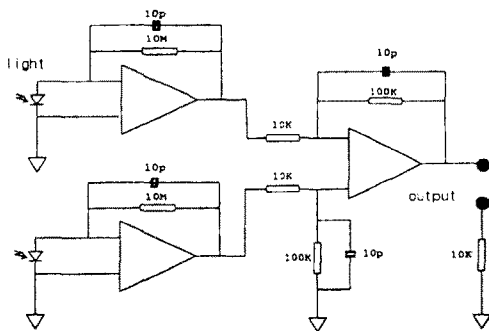


그림 3. Amplifier 회로도
Fig. 3. Circuit of amplifier

연소시험에서 메탄과 1차공기를 이론공연비로 혼합하여 화염을 형성하였고, 메탄 diffusion flame에 난류를 만들고 이를 변화시키기 위한 2차공기를 화염의 측면으로부터 공급하였다. 화염진단기의 집광렌즈는 flame의 상태를 최적감지 할 수 있는 위치, 노즐 높이와 같도록 하여, 상방 15도 방향으로 둠으로서 노즐 상부 24mm 부분을 측정하도록 하였다.

2. 시험연소로 시스템

석탄 시험연소로의 전체 구성은 크게, 석탄의 저장 및 공급장치, 연소용 공기 공급 장치, 연소로 본체, 배가스 후처리 공정 등으로 이루어져 있으며,^[13] 가스

연소시의 화염 특성만을 조업조건 과 배가스 중 NOx 농도를 연계하여 검토하였다.

연소로는, 상업화된 규모의 연소로에서 일어나는 중요한 현상의 모사가 가능한 크기인 내경 600mm로서, 각 단의 높이가 400 mm이며, 총 10단으로 이루어져 있다. 버너는 IFRF type의 movable block swirl burner 형식이며, 연료인 LPG는 버너 중심의 12.7mm(1/2") 노즐을 통하여 공급되고, 연소용 공기는 버너 주위에 설치된 swirler를 통과하며, swirl block의 조절각도에 따라 선회도가 결정되는데, 버너 출구에서 가스와 혼합되면서 연소가 이루어진다. 선회도 S는 다음과 같은 식 (1),(2)에 의해 이론적으로 계산하였다^[14].

$$S = \sigma \frac{R}{2B} [1 - (\frac{Rh}{R})^2] \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{Z\xi_m} \sin\alpha \frac{\cos\alpha [1 + \tan\alpha \tan(\xi/2)] (\xi/\xi_m)}{1 - [1 - \cos\alpha (1 + \tan\alpha \tan(\xi/2))] (\xi/\xi_m)} \tag{2}$$

표 1. 실험조건.

Table 1. Experimental conditions.

	Laboratory apparatus	Fuel testing facility.
Gas Flow rate	Methane (l/min) 2.8, 2.0, 1.2	LPG (m ³ /hr) 6 ~ 12
Detector height from burner nozzle (cm)	12	
Detector location	9 (distance, cm)	1st observation port
Filter (optical) (nm)	700 ± 10, 900 ± 10	
f _{sample size} (Hz)	4096, 2048, 1024, 512	
Burner nozzle diameter (cm)	1.6	
Swirl Number		0, 0.23, 0.54, 0.86, 1.16
과잉공기(%)		0, 5, 10, 15, 20, 25

설계변수들의 값은 Movable block의 최대 조절각도(ξ_m)는 18° 이고, 각각의 swirl block에는 10개(Z)의 guide block이 있으며, swirler 출구반경 R(47.8mm), swirler guide block 두께 B(25mm), 버너 반경 Rh, guide면의 중심축선과의 각도 α (55°) 등으로 하였다. S값이 0.6보다 작은 경우 weak swirl, 0.6보다 큰 경우는 strong swirl을 형성하며^[15], 본 연구에서의 선회도 조절범위는 0 ~ 1.16 인데, 연소용 공기의 선회도 조절과 공연비, 예열온도 등을 바꾸면 연소상태와 화염 형상을 조정할 수 있다. 배가스의 분석은 전기화학식의 Quintox flue gas analyser와 Oxygen Purity Analyser (Model OA 244:Taylor servomex), Riken Infrared Gas Analyzer (Model RI -550A), Riken CO/HC Infrared Emission Analyser (Model RI-503A) 등을 표준가스를 이용하여 시험전에 보정 확인한 후 사용하였다. 이밖에, O₂ 데이터 백업용으로 가스크로마토그래프(영인 680A)를 이용하였다. 화염진단기는 1단의 관찰구(Observation port)를 통하여 나오는 화염을 감지하도록 설치하였으며, 별도의 비디오 카메라를 설치하여 버너화염을 감시하였다. 실험 실적 장치 및 시험연소로에서의 실험조건은 표 1과 같이 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기초 실험

우선 텅스텐 램프에의 인가 전류 변화에 대한 검지기 출력 전압을 측정하여 900nm대 700nm의 출력의 비를 비교하여 선형성을 확인하고, 500~1100 nm까지의 파장을 multiphotometer를 이용하여 scanning하여 파장에 따른 강도를 확인하였다. 본 연구에서 사용한 광다이오드의 특성은 900nm대까지는 감도가 선형적으로 증가하지만 텅스텐 램프는 가시광 영역이상의 파장대에서는 출력이 약해지므로 780nm정도에서 최대 출력을 보이고 그 이후에는 점차 약해진다. 광다이오드의 특성으로 볼 때 900 및 700nm 모두 인가전력에 따라 그림 4와 같이 선형적인 감도 증가를 보여주었다.

화염상부에서 외부 주입 공기의 유무에 따른 신호 및 퓨리어변환 결과를 그림 5와 그림 6에 보였는데, 측면으로 공기를 불어넣지 않았을 때에는 화염의 신호는 주기를 갖고 반복되는 특성을 보이며, 40Hz이상은

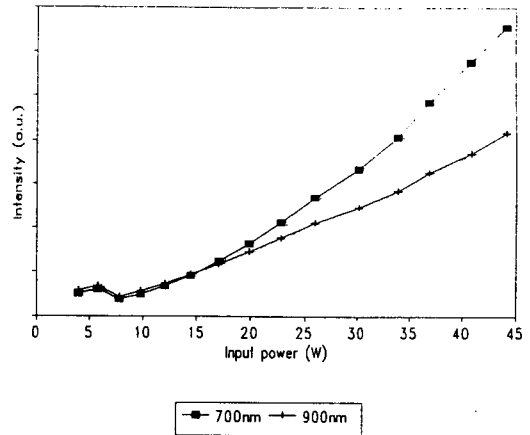


그림 4. 700 및 900 nm대의 텅스텐 램프 인가전력에 따른 검지기 출력 비교

Fig. 4. Response of the detector (signal intensity) to lamp power input at 700 and 900 nm

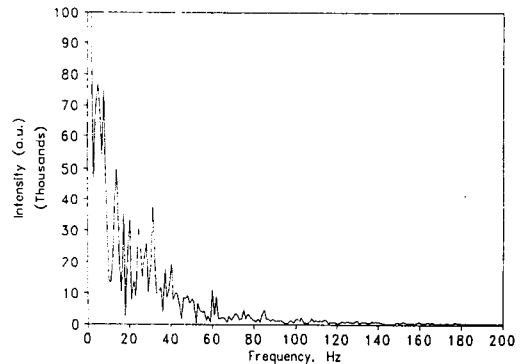
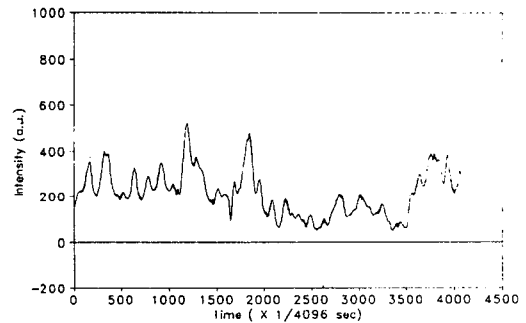


그림 5. 난류화염에 대한 출력 및 power spectra
Fig. 5. Time-resolved, and power spectra plots for turbulent flame

서는 강도가 매우 약해진다. 그러나, 외부공기로 난류의 특성을 만들어 주면 40 Hz이하에서도 신호의 강도

(Intensity)가 커지며, 100 Hz에서도 power spectra가 있게 된다. 즉, 일반적으로 연소영역이 좀더 turbulent의 강도가 커질수록 frequency의 수와 강도는 커짐을 알 수 있다. 또한 median frequency와 intensity는 그림 7에 보인 바와 같이 연료의 공급량이 많아질수록 커진다.

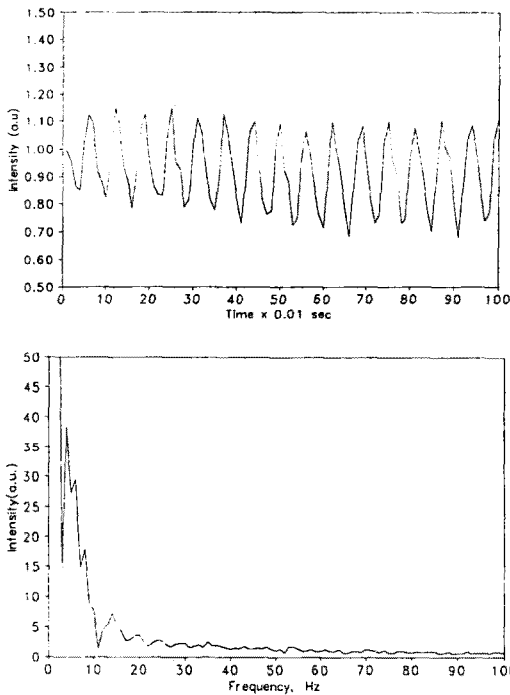


그림 6. "Candle" flame에 대한 출력 및 power spectra
Fig. 6. Time-resolved, and power spectra plots for "Candle" flame

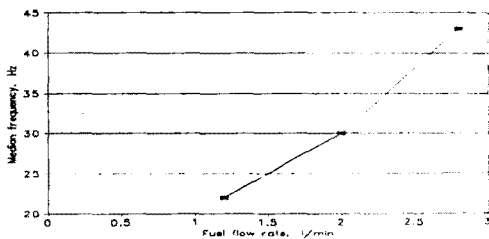


그림 7. mean frequency에 미치는 연료유량의 영향
Fig. 7. Influence of fuel loading on mean frequency

화염은 어느 부위를 관측하느냐에 따라 즉, 센서의 위치에 따라 신호의 강도는 다르다. 화염의 색깔, 밝

기 및 시간에 따른 변화 등은 같은 화염이라 할지라도 연소 조건 및 주위 환경에 따라 서로 달라진다. 화염으로부터 열이 많이 발생하는 경우는 화염의 빛의 세기(강도)가 커지는 것이 일반적인 경향이며,^[2] 빛의 밝기의 정도는 열의 발생량과 연관되어 있다. 그러나, 겉보기에 빛이 밝아 보이는 노란 또는 빨간 불꽃보다 파란 불꽃이 발열량이 많다는 것도 잘 알려져 있다. 화염은 통계적으로 불 때는 일정한 화염도 있을 수 있으나, 시간적으로는 거의 모든 화염이 요동하고 있다. 또한, 화염상부와 화염하부에서의 빛의 강도는 다르다. 화염 영역 상부에서는 화염부위에 각종 크기의 eddy들이 다양한 frequency를 갖는 flame flicker를 생성하고, 이러한 eddy들의 움직임은 주변 공기와 연료와의 혼합효과를 가져오게 되므로 화염 하부에서보다도 강한 빛의 세기 및 여러 종류의 temporal frequency spectrum을 보여 주게 된다.

샘플링 개수를 4096개/초로 하였을 때, 외부공기를 가하여 난류를 만들어 준 경우의 화염을 화염하부 및 상부에서 측정된 화염 신호를 보면, 상부에서 측정된 경우가 더욱 다양한 power spectrum을 보여주고 있으므로 실제 연소에서의 경우도 연소가 활발히 진행되고 있는 영역에서의 신호를 처리하여야 할 것으로 판단되었다.

2. 연소로 적용 시험

화염검출기는 화염만을 선택적으로 검출하여야 하고, 보일러 화로벽에서의 복사에너지 등에 감응하지 않아야 한다는 점은 필수 불가결한 요건이다. 오래 전부터 실용화된 방식인 자외선 검출형은 각종 연료 연소과정중 연료에 함유된 수소의 연소 때문에 나오는 2,500~3,500 Å 범위의 자외선, 특히 312nm의 hydroxide emission line을 감지하는 단순한 방법이다. 그러나, 중유나 석탄의 화염은 UV 분석으로는 잘 맞지 않는다. 석탄투입량이 많아지면 노내 가스에 의한 장막효과로 빛의 차단이 많아져 UV 신호가 감쇠되어 통상 IR 계측 쪽으로 접근하는 것이 보통이다. 하지만, 이 방법은 내화벽 온도가 높다거나 근처에 다른 화염이 존재하는 경우에는 화염이 소멸되어도 탐지를 못할 우려가 크다. 따라서 dual correlation meter나 flicker meter의 개념을 이용할 필요가 있다. 만약 화염이 소멸된다면 fluctuation이 사라지던가 또는 줄어들게 되며, background 영역에 존재하는 화염에 의한 power

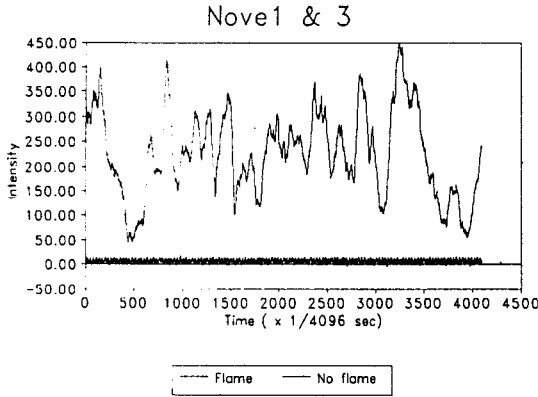


그림 8. 화염 유무에 따른 신호 변화
Fig. 8. Sensor signal with/without flame

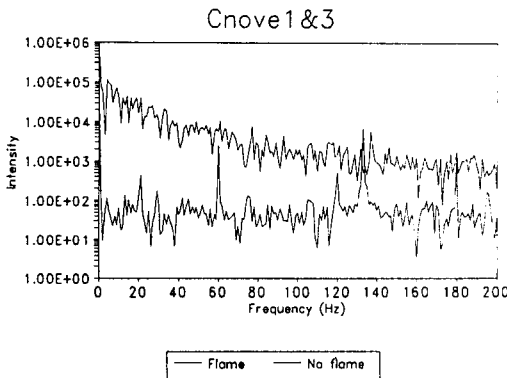


그림 9. 화염유무에 따른 신호 처리 결과.
FIG. 9. Power spectra of sensor with/without flame

spectra는 high frequency영역에서 현저히 약하게 될 것이다.^[12]

본 연구에서 사용한 화염진단기는 700nm 파장의 가시광선 영역과 900nm 파장의 적외선 영역의 광필터를 통과시킨 이 두 파장 신호비 변화를 이용 화염 유무 및 화염현상을 측정할수 있도록 하였다. 정상상태에 도달할 때까지 충분한 시간동안 예열을 한 후, 버너 착화 부분과 화로의 벽부에서의 주파수 분포는 그림 8 및 그림 9에서와 같이 뚜렷한 차이가 있어서, 100Hz 이하의 주파수대에서의 강도(세기) 비교 또는 스펙트라의 기울기(slope)만으로 화염 검출이 가능함을 보여 주었다.

연료량의 증가는 발열량의 증대를 의미하며 이는

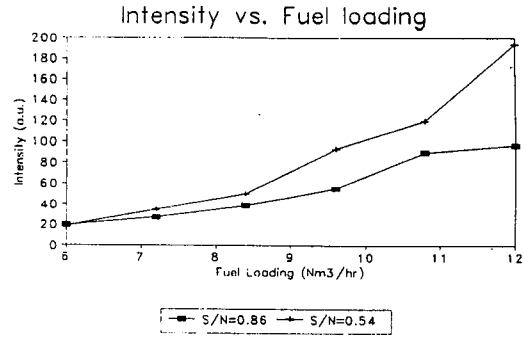


그림 10. 연료공급량에 따른 화염 강도 비교 (연료: LPG)
Fig. 10. Flame intensity with fuel loading (Fuel: LPG)

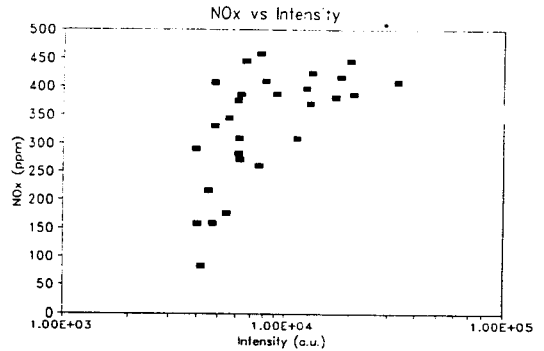


그림 11. 화염 강도와 배가스중 NOx 농도.
Fig. 11. Relations between flame intensity and NOx concentration in flue gas

화염의 세기와 관련됨은 앞서도 설명한 바와 같다. 시험연소소에서 가스연소실험을 한 결과, 선회도가 0.86 (strong swirl 영역) 및 0.54 (weak swirl 영역) 인 경우의 화염의 세기를 보면 그림 10에서 보인 바와 같이 연료 공급량이 많을수록 화염의 강도는 커졌다. 또한 과잉공기가 많을수록 NOx의 발생량은 증가하고 완전연소 조건에 가까워짐에 따라 일산화탄소의 양은 감소하게 되어, NOx와 CO의 발생량은 서로 반대되는 경향을 보이게 된다. 선회도 변화에 따른 NOx 발생량으로 보면 선회도가 큰 범위에서 저농도의 NOx가 발생한다. 조업 조건인 선회도, 연료공급량, 과잉공기 비 등을 변수로 하여 본 실험조건에서 변화시켰을 때, 연소로 상단부의 observation port에서 측정된 화염의 강도와 배가스중에 포함된 오염배출물인 NOx 농도와 의 상관관계를 그림 11에 보였다. 화염의 강도는 FFT

변환후 0~120Hz까지의 median값으로 산출하였는데, 화염강도가 강할수록 NOx의 발생량이 커짐을 보여주었다. 이는 화염의 강도가 연료공급량 등의 연소조건과 관련이 크고, NOx는 화염의 강도와 관련이 크다는 것을 고려한다면 동일한 버너에서는 NOx와 검출된 화염신호를 조업조건과 연관시킬 수 있는 가능성을 보였다. 그러나 서로 다른 종류의 버너에서는 화염의 강도가 연료의 종류, 발열량, 센서의 위치 등에 따라 달라지므로 이러한 변수와는 상관없는 일반적인 지표가 필요하다는 문제가 있다. 화염의 강도와는 상관없이 스펙트럼의 선형성(degree of linearity)으로 해석하고자 하는 시도는 이미 특허로도 제안된 바 있으나^[16], 이러한 개념은 아직은 flame quality를 결정하는데 직접적으로 이용될 수 없다.^[17] 스펙트럼 분석을 이용하기 위해서는 다양한 종류의 보일러에 직접 적용 시험하고 조업 조건과의 관련을 정리하여 조업과 관련된 지표의 개발이 이루어져야만 실보일러 적용이 이루어질 수 있을 것이다. 그러나, 동종의 단일버너에서는 각종 조업변수의 변화가 intensity로 나타나게 되고 이것이 NOx와 연관지을 수 있으므로 저 NOx 버너의 개발 및 버너의 사후관리에 적용이 가능할 것으로 보고 있다.

IV. 결론

Flame-flicker현상을 관찰하기 위하여, 화염진단기를 통해 얻어진 data는 퓨리에 변환을 통해 시간영역(time domain)의 data를 주파수영역(frequency domain)의 데이터로 전환하여 flame-flicker 현상에 대한 주파수 특성을 구하였다.

화염진단기로부터 얻어진 flame-flicker 현상을 보면 난류강도가 커질수록, 그리고 연료의 공급량이 많아지면 median frequency와 intensity가 커짐을 관찰할 수 있었으며, 시험연소로의 적용실험에서 얻어진 화염에 대한 신호의 분석결과에서도 동일한 경향을 보여주었다.

화염신호와와는 달리 높은 온도의 내화재에서 발산되는 IR신호는 화염과는 달리 flame flicker가 없기 때문에, 화염진단기에서 얻어진 신호는 화염 유무에 따라 그 차이가 매우 커서 화염의 존재를 쉽게 알 수 있었다. 다만 멀티버너에서의 경우는 배후에 다른 화염이 존재하기 때문에 이에 대한 신호를 감지할 것으로 생각되어지나 배후 화염의 강도와 주파수 차이로 그 차

이를 분별할 수 있을 것으로 생각된다.

연소로 배가스분석기에서 측정된 NOx의 농도와 화염진단기로 측정된 화염의 강도에 대한 분석 결과를 비교해 보면, 연료공급량 및 선회도동 조업조건에 따라 화염의 강도가 달라짐에도 불구하고 발생하는 NOx의 양은 화염강도와 상관관계가 있어 동일버너에서는 NOx 발생량의 예측이 가능할 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] 佐藤康彦, 高比良 幸美, "イメージファイバの CCD 카메라による 發電用 ボイラ 火焰檢出器", 計裝, Vol 29, No. 9, pp21-25, 1986.
- [2] PB92-113935, Improved Coal Flame Detection for Safety and Control, Phase 2, Technical Final Report, Energy and Environmental Research Corp., Irvine, Ca. USA, 1989.
- [3] T.Posillico, " Design study for advanced flame quality indicator", in Proceedings of the 1994 oil heat technology conference and workshop, Upton, NY, USA, March 24~25, 1994.
- [4] T.A. Butcher, " Applications of the flame quality indicator", in Proceedings of the 1993 oil heat technology conference and workshop, Upton, NY, USA, March 25~26, 1993.
- [5] T.A.Butcher," Update on the BNL flame quality indicator", in Proceedings of the 1991 oil heat technology conference and workshop, Upton, NY, USA, Sep. 30 ~ Oct. 1, 1991.
- [6] R.P. Sinha,"Field Trials of Advanced Controls of Oil-fired Heating Equipment", in Proceedings of the 1991 oil heat technology conference and workshop, Upton, NY, USA, Sep. 30 ~ Oct. 1, 1991.
- [7] S. Collins, "Advanced flame monitors take on combustion control", Power, pp75~78, October, 1993.
- [8] 홍 성은, 김 재성, 김 종진, 김 택수, 최 상민, 송 태호, 김 재원, 양 희준, 제 우성, 신 용승, 황 원호, 화염형성조건 예측을 위한 석탄 초기 연소과정 연구, KRC -90G -T08, 한국전력공사 기술연구원, 1991.

- [9] 김택수 외 18인, 화염구조 분석을 위한 온도 및 열유속 측정기법연구, KRC-91G-J03, 한국 전력공사 기술연구원, 1993.
- [10] "Process integration a hallmark of Shand station design", Power. pp45~50, April, 1993.
- [11] Recent Progress of Science & Technology. IHI. Vol 12 ,1993.
- [12] 박기배, 이상호, 김종원, 진경태, 손재익, "화염진단시스템 설계를 위한 기초 연구(I)", 센서기술 학술대회 논문집 제 6권 제 1호. pp325~328, 1995.
- [13] 김종원, 심규성, 손영목, 이상호, 박기배, 명광식, "시험연소로에서의 인도네시아 로토탄의 연료 특성 평가", 화학공학. 제32권, 제6호. pp809~818, 1994.
- [14] J. Chedaille and Y.Braud, International Flame Research Foundation- Industrial Flames. Vol 1.Measurement in Flames, Edward Arnold, 1972.
- [15] J.M.Beer and N.A.Chigier, Combustion Aerodynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York. 1972.
- [16] K.C.Cormier. US patent 5077550, "Burner flame sensing system and method", 1991.
- [17] M.J. Khesin, "Combustion Diagnostics Based on Frequency Spectra Analysis", in the 1995 International Symposium of the American Flame Research Committee, 1995.

 著 者 紹 介

金鍾元

『센서학회지 제 3권 1호』 논문 94-3-1-05 ,p 39 참조
현재 한국에너지기술연구소 선임연구원

李相鎬

『센서학회지 제 3권 1호』 논문 94-3-1-05 ,p 39 참조
현재 한국에너지기술연구소 기술원

朴基培

『센서학회지 제 3권 1호』 논문 94-3-1-05 ,p 39 참조
현재 한국에너지기술연구소 기술기능원

沈揆聖

『센서학회지 제 3권 1호』 논문 94-3-1-05 ,p 39 참조
현재 한국에너지기술연구소 책임연구원