

영상처리 기술을 이용한 연소상태 진단

이태영*, 김성환*, 이상룡**

Flame Diagnosis using Image Processing Technique

Tae-Young Lee*, Song-Hwan Kim* and Sang-Ryong Lee**

ABSTRACT

Recent trend changes a criterion for evaluation of burner that environmental problem is raised as global issue. For efficient driving problem, the higher thermal efficiency and the lower oxygen in exhaust gas, burner is evaluated the better. For environmental problem, burner must satisfy NO_x limit and CO limit. Consequently, 'good burner' means one whose thermal efficiency is high under the constraint of NO_x and CO consistency.

To make existing burner satisfy recent criterion, it is highly recommended to develop feedback control scheme whose output is the consistency of NO_x and CO.

This paper describes development of real time flame diagnosis technique that evaluate and diagnose combustion state such as consistency of components in exhaust gas, stability of flame in quantitative sense.

This study focuses on wave length of luminescence from chemical reaction measurement of the luminescence via optical measuring apparatus and derive correlation with consistency of components in exhaust gas by image processing technique.

Key Words : Flame Diagnosis(화염진단), Image Processing(영상처리), Correlation Coefficient(상관계수), HSI Color Model(HSI 칼라모델), Burner(버너)

1. 서론

최근 환경문제가 세계적인 관심사로 대두되면서, 산업용 버너의 성능을 평가하는 척도에 환경문제(NO_x 및 CO의 농도에 대한 규제)가 중요한 변수로 인정되고 있다. 현재 사용되고 있는 버너의 운전상태가 이러한 변동된 평가기준을 만족하기 위해서는 연소상태를 실시간으로 계측하는 기술의 개발이 절실히 요구된다.

환경문제를 고려한 버너의 평가척도중 주요척

도들은 효율운전문제, 환경문제이다. 척도에 따른 주요 평가항목을 살펴보면 효율운전에 있어서는 높은 열효율과 배출가스 중의 산소량 저감이 대상이 되고, 환경문제에 있어서는 배출가스중의 NO_x 와 CO농도의 감소가 평가의 대상이 된다. 결국 우수한 버너의 개념이란 배출가스중의 산소량, NO_x 및 CO의 농도가 기준치 이하인 상태에서 열효율이 우수한 버너가 되는 것이다. 이러한 변동된 평가기준하에서 버너를 운전하기 위해서는 연소상태를

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 경북대학교 기계공학부

실시간으로 계측하고 진단하는 기술의 개발이 절실히 요구된다. 한편, 종래의 버너 운전은 숙련된 운전원이 TV카메라나 감시 창을 통하여 육안으로 화염의 상태를 판정하여 제시하는 제어명령에 따라 운전되었다. 이러한 버너 제어방식은 정량적 분해능이 없기 때문에 이상연소를 조기에 발견할 수 없고, 최적연소 상태에서의 운전도 불가능하다. 따라서, 보다 적극적인 연소진단 관련 기술의 실용화 개발이 시급하다. 한편, 국내에서는 이태원¹⁾등이 내연기관의 온도측정과 분진(soot) 농도 계측에 영상처리 기법을 응용하였으나, 산업용 버너의 연소 상태를 진단하기 위한 컬러 영상처리 기법의 적용에 관한 연구보고는 전무한 실정이다.

본 연구는 발전용 보일러나 공업용 로에 설치되어 있는 버너를 대상으로, 영상처리기술을 이용하여 연소상태(배출가스의 성분별 농도, 화염 안정도, 착화여부 등)를 정량적으로 평가, 진단하는 실시간 연소상태 진단기술을 개발하는데 목표를 두었다. 배출가스가 생성되기까지의 중간과정에서 발생하는 화학반응의 발광중 가시광 영역에서 발생하는 발광에 초점을 맞춰, 광학적인 기법으로 이들을 측정하고 컬러 영상처리와 이산신호 해석기법을 이용하여 공해물질의 발생농도와의 상관관계를 구축하였다.

2. 이론적 배경

2.1 화염발광의 메커니즘

화염의 발광을 발광원인 중심으로 분석하면, 연소과정의 각종 화학반응에 의해 발생하는 반응광(chemiluminescence)과 라디칼의 자발광(radical luminescence), 그리고, 미립자(soot)의 열적 방사(thermal radiation)의 세 가지로 분류할 수 있다.

반응광은 연료내의 화학물질들이 공기중의 산소, 질소, 혹은 연료내의 다른 화학물질들과 화학반응을 일으키면서 발생시키는 발광이다. 라디칼의 자발광은 연소 반응 중에 생성된 라디칼들이 안정화되면서 발생하는 형광이다. 열적 방사는 화염장내에 존재하는 미연분이나 입자들이 고온상태에서 발생하는 복사광이다. 탄화 수소계 연료의 경우, 위의 세 가지 발광이 모두 관측된다. 특히, 연료가 유류인 경우, 열적 방사가 우세해, 열적 방사와 같은 파장대의 라디칼의 자발광이나 반응광의 에너지는 계측되지 않는다. (신현동²⁾등이 연구한 바에 의하면, CH 라디칼의 자발광 파장과 CO의 분진발광

파장이 거의 같기 때문에, 유류 버너의 화염을 분광기를 사용하여 계측했을 때 관측되는 에너지는 CH 라디칼의 자발광 에너지가 아닌, CO의 분진발광의 에너지이다.) 이상의 반응광들의 발광파장에 대해, Dean³⁾은 광도측정(photometry)기법을 화염 관찰에 응용하여 여러 라디칼들의 발광 주파수를 계측하였다. 그리고, Stile⁴⁾등은 Molecular Emission Cavity Detection(MECA)기법을 이용하여 라디칼과 각종 반응광의 주파수를 계측하였다. Table 1에서 광도 측정 기법과 MECA 기법을 사용하여 계측한 각 물질의 발광 파장을 정리하였다.

Table 1. Wave length of luminescence

Luminescence Source	Chemical Species	Wave length
radical	OH	306.36nm, 306.7nm, 308.9nm, 312.2nm, 314.4nm
	CH	431.5nm, 438.4nm, 387-396nm, 314nm
	C2	563.6nm, 516.5nm, 460-498nm, 285.5-298.7nm
	NO2	600-875nm
soot	CO	430nm
	H2O	800-1250nm

2.2 화염 해석에 적합한 Color Model의 선택

컬러 모델⁵⁾이란, 기본요소와 조합 규칙을 정의하고, 모든 색을 기본요소의 조합으로 표현하는 색 표현 방식이다. 컬러 모델을 쓰는 가장 큰 목적은, 모든 색을 몇 개의 기준에 따라 정리하기 위해서이다. 본 연구에서는, 화염장 내에서 반응하는 여러 화학종들의 발광을 파장의 관점에서 해석하기 위해서 HSI 모델을 해석 모델로 선정하였다.

HSI 모델⁶⁾이란, Hue, Saturation, Intensity의 선형 조합으로 색을 표현하는 방식이다. Hue는 가장 지배적으로 강조되는 색(dominant color)으로서, 대상으로부터 복사되는 가시광중, 가장 강한 에너지를 갖는 파장을 의미한다. Saturation은 원색에 섞인 흰색의 양(ratio of mixed white to hue)으로, 가시광 주파수 영역 내에서의 주파수에 따른 에너지의 표준편차를 의미한다. Intensity는 밝고 어두운 정도(grey level)이며, 대상체의 총 복사에너지를 의미한다. 기하학적 측면에서, HSI 모델의 기초를 이루는 Hue,

Saturation, Intensity는 원통 좌표계의 각, 거리, 높이와 같으며, 좌표계 내의 한 점은 한 색을 대표한다. 식 (1)에서 HSI 모델의 색 표현 식을 보이고 있다.

$$C = H\hat{h} + S\hat{s} + I\hat{i} \quad (1)$$

식에서, C는 표현하고자 하는 색이다. $\hat{h}, \hat{s}, \hat{i}$ 는 각각 hue, saturation, intensity의 단위벡터이고, H, S, I는 각각 색이 가지고 있는 hue, saturation, intensity의 값이다. 식 (2)에 RGB 모델로부터 HSI 모델을 유도하는 공식을 나타내었다.

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}} \right\}$$

$$S = \frac{3}{(R+G+B)} \min[R, G, B] \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B)$$

2.3 HSI Model을 이용한 화염발광의 해석

2.3.1 Hue와 화염 발광의 주파수간의 관계

Hue는 가장 큰 에너지를 가지는 파장(dominant wave length)을 의미한다. 화염 발광의 측면에서 Hue를 재해석하면, CCD 소자의 면적에 비례하는 화염의 면적에서 일어나는 발광 중, 가장 큰 에너지를 가지는 발광파장을 의미하게 된다. CCD 카메라의 계측 가능한 최장 파장을 λ_{max} 라하고, 최단 파장을 λ_{min} 이라 하면, 화염 발광의 파장(λ)과 Hue 사이에는 변환 관계가 성립된다. 식 (3)과 (4)에 파장과 Hue 레벨 간의 상관관계식을 나타내었다.

$$\lambda = - \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\text{Quantization Level}} \text{Hue} + \lambda_{max} \quad (3)$$

$$\text{Hue} = \frac{\text{Quantization Level}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} (\lambda_{max} - \lambda) \quad (4)$$

윗 식에서, Quantization 레벨은 영상획득장치(Image Grabber)에 내장되어 있는 A/D 변환기의 분해능을 의미한다. 식에서 나타났듯이 Hue 레벨값과 파장 λ 는 서로 변환 가능하지만, 그 정확한 대응은 카메라와 영상취득장치에 내장된 A/D 변환기의 사양에 따라 크게 좌우된다. Table 2는, Human Vision⁷⁾이 정의하는 가시광의 파장대인 $\lambda_{max} = 700 \text{ nm}$, $\lambda_{min} = 400 \text{ nm}$ 로 놓고, A/D 변환기의 분해능을 일반적인 영상처리장치의 비디오 A/D 변환

기의 분해능인 256으로 치환하였을 때, 발광원의 파장에 대응하는 Hue값을 정리하였다.

Table 2. measurable wave length with CCD Camera

Luminescence Source	Chemical Species	Hue level in accordance with wave length
radical	OH	not measurable
	CH	229, 223
	C2	116, 157, 205-172
	NO2	0-85
soot	CO	230
	H2O	not measurable

2.3.2 Intensity와 Emissive Power간의 관계

Intensity는 CCD 소자가 대상 물체로부터 측정할 수 있는 최대 에너지에 대한 실제 복사강도의 비를 의미한다. Intensity는 화염의 복사 에너지를 알 수 있는 변수가 된다. Intensity와 에너지 관계식을 식 (5)에 보이고 있다.

$$I = \frac{1}{\alpha} \frac{E_s}{E_{max}}, \quad E_s = E(T) \frac{3}{8} \left(\frac{d}{l} \right)^2 \frac{\cos \theta}{m} \quad (5)$$

윗 식에서, E_s 는 CCD 촬상소자에 복사된 에너지이고, E_{max} 는 CCD소자의 최대 계측에너지이다. $E(T)$ 는 대상으로부터 방출되는 빛의 에너지이고, m 은 렌즈의 배율, θ 는 대상 점의 지향각, d 는 렌즈의 직경이고, l 은 렌즈로부터 물체까지의 거리, α 는 카메라 내부증폭기의 증폭 비이다.

2.3.3 Saturation과 파장별 에너지 분포

Saturation의 정의는 Hue가 흰색에 의해 회색된 정도이다. 실제 화염에 대한 계측의 경우, Saturation 값은 CCD의 픽셀에 대응되는 화염면의 면적 내에서 Hue에 대응되는 파장 이외의 파장대에서 발광하는 반응들이, Hue에 대응되는 파장에서 발광하는 반응에 대해 가지는 에너지의 비를 나타낸다. 즉 증폭기의 증폭 비이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

3.1.1 버너

본 연구에 사용된 버너는 병커 C유를 연료로

하는 10 ton/hr 용량의 Gun type 오일버너이다. 본 실험에서는 선회를 최대값으로 고정된 상태에서, 연료 부하량을 최대분사량의 50%, 75%, 90% 상태에서 배출가스 중의 산소량을 2%에서 5%의 영역 내에서 변화시켜가며 NO_x 농도와 CO₂의 농도를 계측하고 영상을 취득하였다.

3.1.2 영상처리장치

영상처리장치는 영상을 수집하는 카메라와, 카메라에서 전압신호로 변환된 영상신호를 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 변환해주는 영상 획득장치로 구성되어 있다. 본 연구에서는, 파나소닉(Panasonic)사의 WV-CL300 카메라와 레노스(Lenox)사의 렌즈튜브(Lens Tube)를 장착한 벌(Burle)사의 TC270 카메라 및 Cosmica 카메라를 사용하였다. 본 연구에서 TC270 카메라의 자동광량 조절 기능은, 렌즈튜브에서 이 기능을 지원하지 않기 때문에 사용하지 않았다. 영상획득장치는 캐나다 코레코(Coreco)사의 Ultra II를 사용하였다. Ultra II는 카메라로부터 입력되는 YIQ모델의 아날로그 신호를 RGB 모델의 디지털신호로 변환하는 고속 비디오 A/D변환기와 2Mb의 메모리를 내장하고 있으며, 컴퓨터 모니터상에서의 실시간 디스플레이를 위해 S3사의 S3 Trio 64V+ 비디오 어댑터(video adapter)와 전용 데이터 전송경로(pipe-line)로 연결되어 있다. 또한, 영상 통신을 위한 JPEG 변환카드(encoding card)를 장착할 수 있도록 설계되어 있다.

3.1.3 배출가스분석장치

본 연구에서 관심을 둔 배출가스는 NO_x와 CO의 농도, 배출가스중의 O₂량이다. NO_x계측 장비는 정 엔지니어링사의 Auto Stack Measuring System과 Rosemount Analytical Inc.의 Model 951A를 사용하였다. CO계측 장비는 Thermo Electronic Instrument사의 CO Analyzer를 사용하였고, O₂ 분석기는 일본 Cosmos사의 Cosmos O₂분석기와 Servomex사의 1420B를 사용하였다.

3.2 실험 방법

본 연구에 사용된 버너는 배출가스의 온도를 제어변수로 하고, 연료 주입량 및 댐퍼 개도를 조작변수로 하여 제어되도록 설계되어 있다. 실험방법은, 제어기에서 배출가스의 온도를 설정한 후, 배출

가스의 실제 온도가 설정된 온도의 2%이내에 수렴되었을 때 정상상태라고 판정하여 데이터를 획득하였다. 정해진 조건에서 일정 횟수만큼 화염의 영상을 취득하고 그와 동시에 배출가스 중의 각 성분별 가스 농도 및 산소량을 계측하여 컴퓨터에 저장하였다. 화염의 영상은 표준 TIFF(Tagged Image File Format) 5.0 형식으로 저장하였고, 가스 농도 및 산소량은 ASCII 형식으로 저장하였다. Fig. 1에 실험 장치의 개요를 보였다.

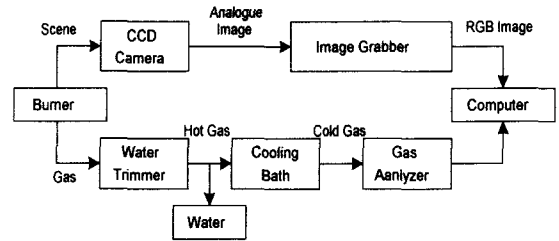


Fig. 1 Structure of Measuring Apparatus

4. 실험결과 및 상관관계 분석

4.1 상관관계 분석 알고리즘

카메라를 통해 받아들인 영상은 영상획득장치에서 RGB 모델의 영상으로 바뀐 후, TIFF 형식의 파일로 저장되고, 가스 분석기를 통해 계측한 가스 농도는 ASCII 형식의 파일로 저장된다. 분석과정에서, 각 가스의 농도와 영상을 종류별로 분류하면, 가스의 각 성분별로 1차원 행렬이 형성되고, 영상도 영상행렬이 형성된다. 각각의 영상에 대해 통계량을 구하면, 각각의 영상은 여러 통계량으로 치환되고, 영상 행렬은 통계량 행렬군으로 재구성된다.

이때의 통계량 행렬과 가스의 성분별 농도 행렬은 서로 데이터의 개수가 같고, 이산 적으로 계측된 정보의 집합이므로, 이산신호 해석기법의 하나인 교차 상관관계 분석 기법을 적용할 수 있다. 이렇게, 각각의 가스 농도 행렬과 통계량 행렬에 교차 상관관계 분석⁸⁾을 적용하여 가장 상관관계가 높게 나타난 가스 농도 행렬과 통계량 행렬은 서로 높은 상관관계가 있는 것으로 간주된다.

4.2 상관관계 분석 결과

Fig. 2는 가장 높은 상관관계를 가지는 가스 농도행렬과 통계량 행렬을 검색하는 알고리즘을 나타

낸 순서도이다. 이 순서도는 배출가스 중의 특정 가스(NO_x, CO)의 농도와 그 순간 획득된 화염영상의 컬러레벨 중 상관관계가 가장 높은 대역을 반복비교연산에 의해 찾아내는 알고리즘을 나타냈다.

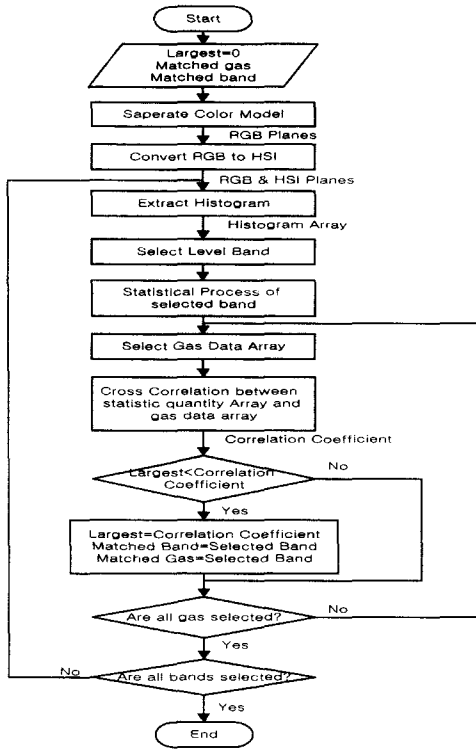


Fig. 2 Auto Tracking Algorithm

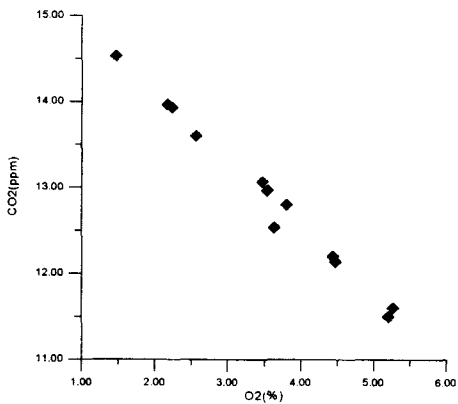


Fig. 3 Concentration of CO₂ according to Oxygen

Fig. 3은 배출가스중의 산소량을 기준으로 CO₂량의 상관관계를 그래프로 표시한 그림이다. 배출가스 중의 산소량과 CO₂량은 반비례한다는 사실을 알 수 있다. Fig. 4는 배출가스중의 산소량을 기준으로 NO_x량의 상관관계를 그래프로 표시한 그림이다. 배가스 중의 산소의 농도가 증가함에 따라 NO_x의 농도도 증가한다.

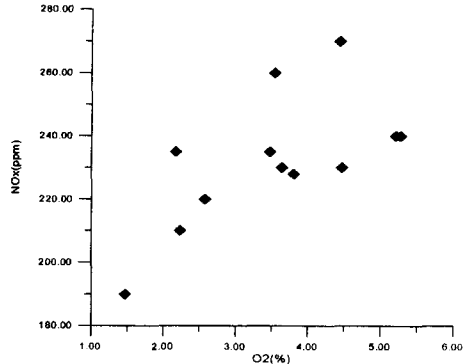
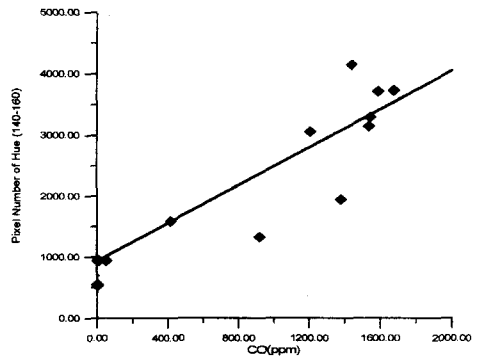


Fig. 4 Concentration of NO_x according to Oxygen(O₂)

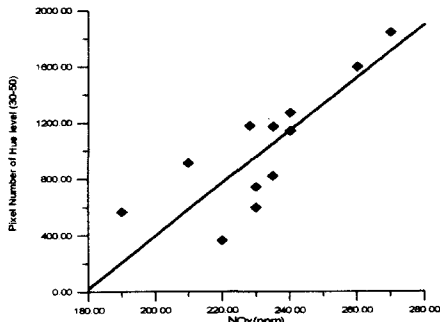


$$y = 940.91 + 1.56x$$

Correlation Coeff. = 0.80

Fig. 5 Correlation plot and regression between Concentration of CO and Summary of Hue level from 140 to 160

Fig. 5와 Fig. 6에 계측된 각각의 CO와 NO_x의 농도와 영상처리 통계량에 대한 상관관계 그래프와 회귀분석 결과를 보이고 있다.

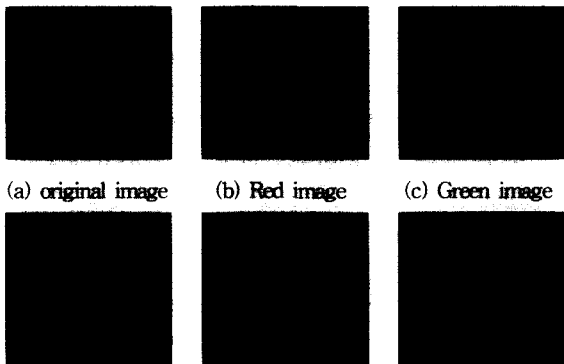


$$y=228.11 + 146.49x$$

Correlation Coefficient = 0.85

Fig. 6 Correlation plot and regression between Consistency of NO_x and Summary of Hue level from 0 to 85

Fig. 7은 화염의 영상을 색상별로 분리한 영상을 보여주고 있다. Red, Green, Blue로 분리한 다음 다시 식(2)의 칼라모델에 의하여 Hue, Saturation, Intensity image를 구하였다.



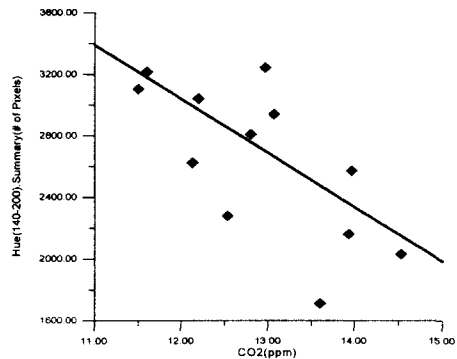
(d) Hue image (e) Saturation image (f) Intensity image

Fig. 7 Various Flame shapes

최적 회귀곡선 검색 알고리즘을 적용한 결과, Hue 평면에서 레벨값이 최저 140, 최고 160사이인 픽셀(pixel)의 합과 CO의 농도가 가장 밀접한 상관관계를 가진다.(Fig. 5) Hue 평면의 레벨값이 최저 0, 최고 85인 픽셀의 합이 배출가스의 온도 및 NO_x의 농도와 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 NO₂ 생성시의 발광대역이 600~875nm인데, 식 (3)과 3장에서 예시한 가정을 도입하면 Hue 레벨이 0~85인 영역으로 치환된다. 최적

회귀곡선 검색 알고리즘에 의해 찾아낸 영역인 30-50은 위의 영역에 포함되므로 NO_x의 발광은 이론적인 예측치와 일치되었다. Fig. 6에 배출가스 중 계측된 NO_x의 농도와 영상처리 통계량에 대한 상관관계 그래프와 회귀분석 결과를 보이고 있다.

CO의 경우, Table 2에 의해 예측되는 부분은 Level이 230인 부분이다. 그러나, 최적 회귀곡선 검색 알고리즘의 적용결과는 위와 같은 영역에서의 통계량으로 나타났다. 140~160의 영역은 C₂라디칼의 발광 파장대를 포함하고 있다. 앞서 2장에서 전술하였듯이, 화염반응에 있어 CO의 생성은 C₂라디칼의 생성으로부터 시작된다. 따라서, C₂의 발광 파장대와 CO의 농도사이에 상관관계가 있음을 알 수 있다. 결론적으로 140-160의 영역은 CO와 간접적인 상관관계를 가지는 영역이다.

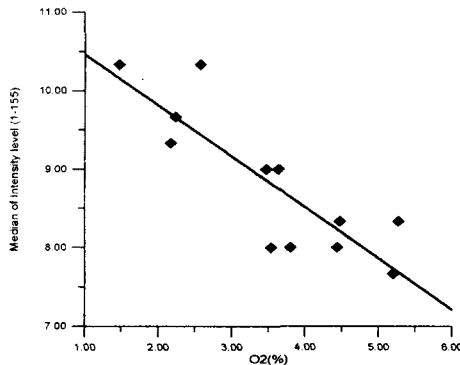


$$y= 7261.40 - 351.83x$$

Correlation Coeff. = 0.69

Fig. 8 Correlation plot and regression between Concentration of CO₂ and Summary of Hue level from 140 to 160

실험에서 계측한 CO₂는 가시광 영역에서 발광이 계측되지 않는다. 따라서, 계측된 CO₂와 상관관계를 가지는 영상처리량은 존재하지 않는다. 현재까지의 연구 결과에 의하면, 연소가 이상적인 상태에는 연료내의 탄소량이 고정되어 있을 때, CO와 CO₂는 서로 반비례하는 것으로 보고되고 있다. 여기서 이상적인 상태란, 최적의 미립화와 적정 공연비를 의미한다.



$$y = 11.11 - 0.65x$$

Correlation Coeff = 0.85

Fig. 9 Correlation plot and regression between concentration of O₂ and Median of Intensity level from 1 to 255

Fig. 8에 계측된 CO₂의 농도와, 경유버너에서 발견된 CO와 비례하는 영상처리 통계량에 대한 상관관계 그래프와 회귀분석 결과를 보이고 있다. 전반적으로 반비례적인 경향성을 보임을 확인할 수 있다. 배출가스중의 산소량은 가연성(flammability)의 척도중 하나로 이용되는 화염의 매개변수이다. 그래프에서, 배출가스중의 산소량이 증가함에 따라 Intensity 평면의 레벨값이 최소 1에서 최대 255까지의 범위에 대한 중앙값(median)이 떨어짐을 알 수 있다. 이는 산소가 증가함에 따라 화로 내부의 연료와 공기의 혼합기가 공기 희박 상태에서 연료 희박 상태로 옮겨가면서 화염의 존재형태가 달라짐을 의미한다.(Fig. 9)

5. 결론

화염의 색상을 이용하여 연소상태를 진단하고자 영상처리기술을 이용하였다. CCD 카메라와 영상획득장치를 통하여 얻은 화염영상만으로도 화염의 연소상태를 진단할 수 있음을 확인하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째 화염영상 중의 HSI 모델의 Hue 평면에 대해 레벨이 30-50인 영역은 NO_x농도와, 레벨이 140-160인 영역은 CO농도와 비례함을 발견하였다.

둘째 CO₂의 계측은 CO농도와 비례하는 부분의 통계 처리량과 반비례적인 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

셋째 Intensity 평면에서 레벨이 최저 1로부터 최고 255까지의 범위에 대한 중앙값은 배출가스중의 산소량과 비례함을 발견하였다.

이상의 실험에서 얻은 분석결과는 화염영상과 배가스중의 NO_x, CO등의 농도의 더욱 정확한 상관관계를 찾을 수 있는 가능성을 보여주고 있으며 향후 실시간 연소진단 및 버너의 연소상태제어 시스템 구축의 가능성이 기대된다.

후기

본 논문은 1998년도 통상산업부 공업기반기술개발사업(주관기관:삼성중공업) 연구비에 의해 연구되었다.

참고문헌

1. 이태원, 이선봉, 하종률, "디젤엔진에서 이색법을 이용한 화염온도와 Soot의 계측기술에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B) 제 20권 제 9호, pp. 3007-3014, 1996.
2. 신현동, "연소진단을 위한 화상 취득방법과 화상 처리기술에 관한 연구," 한국과학기술원 논문집 1995.
3. John A. Dean, "Flame photometry," McGraw-Hill, 1960.
4. David A. Stiles, A.C. 'Calokerinos, Alan TownShend, "Flame chemiluminescence analysis by molecular emission cavity detection," New York : Willey, 1994.
5. Wiliam K. Pratt, " Digital Image Processing 2nd Ed," JOHN WILLWY & SONS, INC, 1991.
6. R.W. Ditchbrun, "Light," New York Publications, 1991.
7. Louis J. Galbiati, Jr. "Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals," Prentice-Hall International, 1990.
8. Emmanuel C. Ifeachor, Barrie, "Digital Signal Processing A Practical Approach," Addison-Wesley Publishers, 1996.