

## 화상 2색법에 의한 디젤화염의 온도분포 및 매연농도의 평가

방 중 철<sup>\*1)</sup> · 최 익 수<sup>2)</sup>

금오공과대학교 기계공학부<sup>\*1)</sup> · 금오공과대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup>

### An Estimation of the Temperature Distribution and the Soot Density in Diesel Flame with the Two-Color Method using Image Analysis System

Joongcheol Bang<sup>\*1)</sup> · Iksoo Choi<sup>2)</sup>

<sup>\*1)</sup>School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi Gyeongbuk 730-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, Gumi Gyeongbuk 730-701, Korea

(Received 5 June 2003 / Accepted 10 July 2003)

**Abstract** : The simplified two-color method is proposed which can estimate the temperature distribution and the soot density of the whole flame with the image analysis of the high-speed photographs. The factors influenced on its processing were examined, for example, the selection of the wave length, the kind of films, the preparation of the calibration curve between the radiance of flame and the luminance temperature. The simplified two-color method reported in this paper can be used as a tool for the improvement of the combustion process in direct injection diesel engine.

**Key words** : Two-color method(2색법), Combustion(연소), Visible engine(가시화기관), Diesel engine(디젤기관), Image analysis system(화상해석장치), Flame temperature(화염온도), Soot density(매연농도)

#### Nomenclature

- $\lambda$  : wavelength,  $\mu\text{m}$
- T : true temperature, K
- $T_a$  : brightness temperature, K
- $\alpha$  : constant within a specific range of wavelength
- $\epsilon$  : emissivity
- $C_1$  : Plank's first constant,  $\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$
- $C_2$  : Plank's second constant,  $\mu\text{m} \cdot \text{K}$
- KL : soot index

#### 1. 서론

환경오염이 심각한 사회문제로 대두되면서 디젤 기관으로부터 배출되는 매연과 NO<sub>x</sub>에 대한 규제도 한층 강화되고 있다. 그러나 직접분사식 디젤기관은 뛰어난 경제성과 높은 열효율로 인하여 그 사용 범위가 증가되고 있는 추세이다.

직접분사식 디젤기관에서 배출되는 매연은 연소실 내에서 과농한 혼합기가 형성된 영역과 그 영역에서 발생한 화염이 압축간극부로 유출되어 저온도의 연소실 벽에서 급냉되면서 생성되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 가능한 한 과농한 혼합기 영역을 연소실 내에 형성시키지 않도록 하는 것이 필요하다. 이러한 대책으로서 최근의 연구경향은 분부

\*To whom correspondence should be addressed.  
bjc@kumoh.ac.kr

내로 다량의 공기도입도 촉진시키면서 연소실 벽면에 충돌된 분무의 제미립화 효과도 얻을 수 있는 초고압분사법이나 노즐의 분공수를 증가시켜 분무의 분산을 촉진시키는 방법 등<sup>1-3)</sup>에 모아지고 있으나 무엇보다도 중요한 것은 연소과정에 대한 정확한 해석과 진단이라고 생각된다.

연소과정에 있어서 NOx, 매연 등의 생성과 소멸에 밀접한 영향을 미치는 화염온도의 계측을 위한 여러 방법 중, 화염 속의 매연 입자군으로부터의 연속복사 스펙트럼에 주목하여 관찰하는 2색법은 화염 온도 및 매연에 관한 정보가 동시에 얻어지므로 디젤기관의 연소과정 해석과 연소개선책의 수립에 매우 유효한 수단이 될 것이다. 국외에서는 연소과정의 해석에 있어 화상 2색법이 직접·간접적으로 응용<sup>4,6)</sup>되고 있으며, 국내에서도 몇몇 연구가 보고<sup>7,8)</sup>되어 있으나 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 피스톤 상부에 cylindrical type의 원형 캐비티(cavity)가 있는 연소실을 제작하고 연소과정을 CCD 카메라와 고속도카메라로 촬영했다. 촬영된 컬러 화상을 비디오 신호로 변환한 후 각 화소마다 화염의 온도와 매연 농도에 관한 KL값을 해석하여 연소개선책을 수립하는 실용 tool로서의 화상 2색법을 검토하며, 아울러 적용방법을 보다 간단히 하여 연소과정을 해석할 수 있는 간이 화상 2색법을 제안한다. 또한 피스톤 상부에 3종류(shallow dish type, deep bowl type, re-entrant type)의 연소실을 제작하고 연소과정을 화상 해석하여 직접분사식 디젤기관의 매연저감을 위한 연소개선책을 제시하고, 아울러 간이 화상 2색법의 타당성도 검증하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 2색법에 관한 기초식

2색법에서는 화염의 실제온도 T 및 화염 중의 매연 입자 농도에 거의 비례하는 K값과 화염의 축방향 두께 L에 관한 KL값을 구한다. 파장 λ, 절대온도 T인 화염의 단색 복사에너지 N은 Wien의 방사법칙으로부터 다음 식으로 표현된다.

$$N = \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (1)$$

여기서 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 Plank의 제 1 및 제 2 방사 정수,

$\epsilon_{\lambda}$ 는 화염의 단색 복사율이다. 또한 디젤화염에 있어서 매연 입자만의 단색 복사율에 대하여 Hottel-Broughton의 식이 성립된다고 가정하면

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^{\alpha}}\right) \quad (2)$$

여기서 K는 흡수계수로 앞서 언급한 바와 같이 화염 중의 매연 입자 농도에 거의 비례하는 값, L은 화염의 검출광 축방향의 기하학적인 두께, α는 파장 범위에 의해 결정되는 정수이다. 이들의 식으로부터 파장 λ의 휘도온도를 T<sub>a</sub>라 하면 다음과 같이 구해진다.

$$KL = -\lambda^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] \quad (3)$$

2색법에서 사용하는 두 개의 파장, 즉 λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>에 있어 측정된 화염의 휘도온도 T<sub>a1</sub>, T<sub>a2</sub>를 위 식에 대입해 미지수 KL을 소거하면 아래와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} & \left[1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] \lambda_1^{\alpha} \\ & = \left[1 - \exp\left\{-\frac{C_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] \lambda_2^{\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

이때 α는 가시화 범위에서 거의 일정한 값으로 1.38이다. 따라서 두 파장에 관하여 측정된 휘도온도 T<sub>a1</sub>, T<sub>a2</sub>를 이용해서 식 (4)를 수치해석하고 여기에서 구해진 온도 T를 식 (3)에 대입해서 KL값을 구한다. 예를들면, 파장 λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>가 λ<sub>1</sub> < λ<sub>2</sub>이고 휘도온도가 T<sub>a1</sub>=2200K, T<sub>a2</sub>=2100K라고 가정해서 횡축을 온도의 역수 1/T로 잡아 식 (4)의 좌변과 우변의 곡선을 그리면 Fig. 1이 얻어진다. 여기서 T<sub>a2</sub> ≤ T<sub>a1</sub>일 때 두 곡선의 교점에서 나타내는 바와 같이 실제온도 T가 존재하며, T<sub>a2</sub>가 T<sub>a1</sub>에 근접할수록 두 곡선의 교점에서 나타나는 실제온도 T는 휘도온도 T<sub>a1</sub>에 접근하게 되어 식 (3)에서 나타낸 KL값은 증가된다. 또 T<sub>a1</sub>=T<sub>a2</sub>일 때 KL값은 최대로 된다.

### 2.2 휘도-휘도온도 교정식

식 (3) 및 식 (4)를 계산하기 위한 필름 농도와 휘도온도의 관계는 흑체로(爐) 또는 표준전구를 사용

하여 교정하는 방법<sup>9)</sup>이 보고되어 있다. 그러나 촬영 조건에 따라 필름 농도와 휘도온도의 관계가 변하기 때문에 필름 가장자리에 흑체로부터의 표준 휘도온도를 동시에 촬영하는 방법<sup>9)</sup>과 기준온도를 동시에 촬영하는 방법<sup>10)</sup>등이 보고되어 있다. 본 연구에서는 광 고온계측용 텅스텐 표준전구 및 아세틸렌 화염 등의 휘도값을 멀티채널 검출기로 측정하여 필름 농도와 휘도온도와의 관계를 교정했다.

후술하는 촬영 화상을 이용해 각 화소마다 Red, Green, Blue 3색의 휘도값을 얻고 교정식으로부터 구해진 휘도온도를 사용해 화염의 실제온도 T를 구하는 화상 2색법에서는 식 (4)의 해(解)가 존재하지 않는 화소 또는 디젤화염의 온도로서는 부적절한 3000K를 초과하는 화소가 많이 발생했다. 이러한 이유 때문에 간이 화상 2색법을 제안하며, 그 유효성에 대해서도 검토한다.

2.3 휘도 정보를 얻기 위한 color film

고속도 컬러 영상을 비디오 신호로 변환시키고 그 휘도값을 기준으로해서 해석하는 2색법에서는 필름의 감광 특성과 비디오 신호와의 대응이 매우 중요하다.

Table 1은 컬러필름의 감축유제층과 발광색<sup>11)</sup> 및 CCD 카메라의 검출중심파장의 관계<sup>12)</sup>이다. Table 1에 의하면 네거티브 컬러필름을 이용하는 2색법에서는 TV컨버터의 적색(R)과 청색(B)의 출력은 화염 중의 녹색(G)과 적색(R)을 의미하기 때문에 파장 λ1과 λ2의 대응에 주의해야 한다. 또한, 네거티브 컬러필름에서는 화염의 색과 발광색이 서로 다르게

Table 1 Comparison of detected wave length between color films and CCD camera

	Color film				CCD camera	
	Negative film		Reversal film		NTSC	
Color	chromo- genic	sensi- tive	chromo- genic	sensi- tive	chromo- genic	sensi- tive
Red	460nm	B	650nm	R	620nm	R
Cyan						
Green	650nm	R	550nm	G	550nm	G
Magenta						
Blue	495nm	G	450nm	B	450nm	B
Yellow						

나타나기 때문에 화염면의 선단을 식별하기가 어렵다. 한편 리버설 컬러필름은 고감도의 필름이 드물고 ASA40에 상당하는 필름의 최대 촬영속도는 F1.4에서 5000 fps가 한계이며 초점 심도가 얇다. 또 컬러필름을 현상할 때는 가능한 한 촬영조건을 같이 하여 같은날 처리하여야 각 필름간의 휘도값에 오차가 발생하지 않는다.

2.4 촬영용 기관

실험기관은 농업용 단기통 디젤기관(보어 80 mm, 행정 90mm, 배기량 452cc)을 2행정 schnürle 소기방식으로 개조한 것이며, 실린더헤드에는 두께 25.4mm의 대형 관찰창을 부착해 노즐 선단으로부터 연소실 전역이 촬영될 수 있도록 했다. 분사노즐은 분사각 52°의 2공노즐과 단공노즐을 사용하고 소기류에 대해 5° 하향 분사했다. 분사시기는 BTDC 23° CA이며, 노즐 분사압은 120kg/cm<sup>2</sup>이다. 또한 cylindrical type의 원형 캐비티를 가진 연소실과 전술한 3종류의 연소실을 제작하여 사용하였다. 단, 본 연구에 사용된 모든 연소실 형상에 있어서 압축비는 16이다.

연소과정은 고속도카메라로 촬영하고 취득된 16 mm 필름은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 TV컨버터에 의해 비디오신호로 변환한 후 화상처리장치와 컴퓨터를 사용해 1화소마다 화염온도 및 KL값을 해석했다. 사용된 필름은 네거티브 컬러필름(KODAK-EXR-248)과 리버설 컬러필름(KODAK-EK-KMA 449)이다.

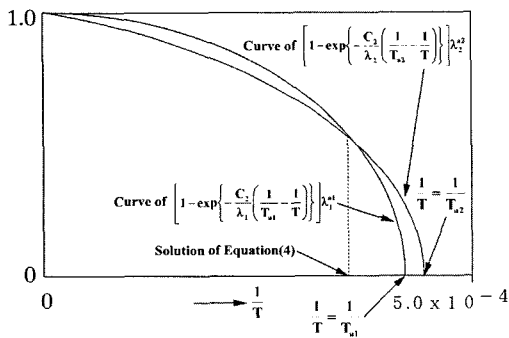


Fig. 1 Solution of equation (4)

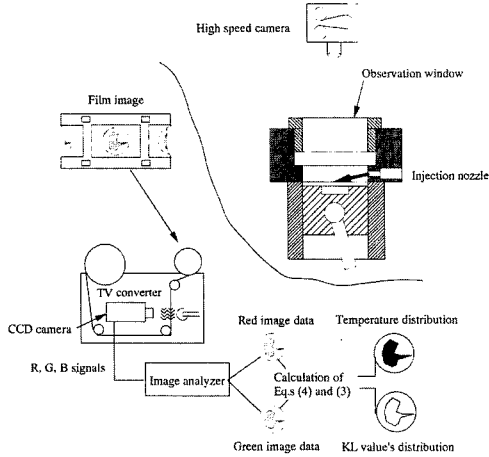


Fig. 2 Procedure of the two color method

### 3. 디젤기관의 연소개선책을 모색하기 위한 실용 tool로서의 화상 2색법

#### 3.1 화상해석의 문제점

1) 고속도 촬영 사진의 각 프레임(frame)마다 휘도-휘도온도 교정식을 작성하는 방법은 한 프레임 당의 계산 시간이 길기 때문에 약 60 화면 정도의 연소경과를 연속해서 해석하는 데에는 불리하다.

2) 2개의 파장에 대한 휘도 정보를 얻어야 하기 때문에 컬러 화염상에 2종류의 광학 필터를 사용하여 2회씩 휘도값을 취득하는 방법에서는 필름의 신축, 광원 램프의 조도 변동 등으로 인하여 식 (4)의 해가 얻어지지 않는 화소가 많이 발생한다.

3) 광원과 필름 사이에 삽입하는 광학 필터의 투과율분 만큼 화상의 분해능력이 저하된다.

4) 사용하는 화상해석 시스템의 종류에 따라라도 차이가 있지만 본 시스템에서는 청색 노이즈가 특히 많았다.

본 연구에서는 2) 및 3)의 문제점을 해결하기 위하여 화염상을 구성하고 있는 3종류의 R, G, B 신호를 256계조로 분해시킨 후 그 휘도값으로부터 두 색의 휘도온도를 계산하여 화염의 온도 T와 KL값을 산출하였다.

Fig. 3은 촬영이 끝난 필름에 있어서 화염상이 촬영되기 직전 프레임의 R, G 분해 예이다. 비교적 노이즈가 작은 G화면에 있어서 광원 얼룩이라고 생각되어지는 휘도차는 화면중앙부에서 3~4계조 정도

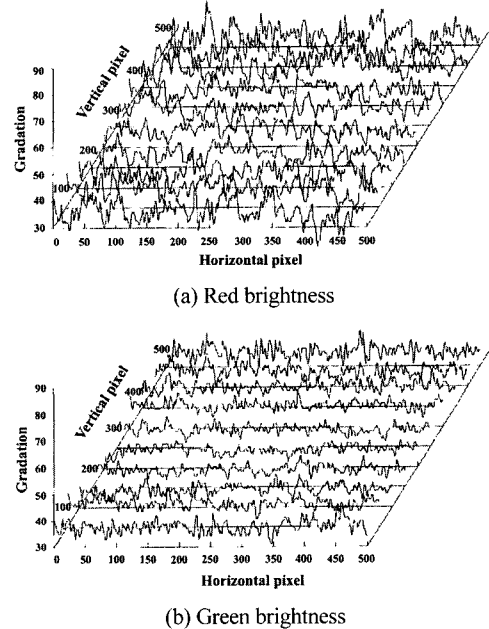


Fig. 3 Noise levels contained in different color images

더 밝고 화면의 상단과 하단은 약간 어둡다. 또 각 광색(R, G, B)의 변동폭  $\Delta$ 는,  $\Delta R=8\sim 10$ ,  $\Delta G=3\sim 4$ ,  $\Delta B=15\sim 20$ 계조로 따라서 이 시스템에서는 R-G에 의한 2색법이 노이즈의 관점에서 볼 때 유리함을 알 수 있다.

#### 3.2 간이 화상 2색법의 제안

화염상을 256계조로 분해하고 두 색의 휘도값으로부터 각 화소별로 온도 및 KL값을 구하는 2색법에서는 전술한 몇가지의 문제점도 있으나, 연소실 전역으로 전파된 화염의 온도분포나 매연에 관한 정보를 단시간에 그것도 간단하게 얻을 수 있다면 연소과정의 개선책을 모색함에 있어 유효한 수단이 될 수 있을 것이다. 이에 본 절에서는 휘도값과 휘도온도의 교정방법을 간단화시킨 실용도구로서의 간이 화상 2색법에 대하여 기술한다.

Fig. 4는 2종류의 컬러필름을 사용하여 4000 fps로 촬영한 화염사진의 한 예이다. 연소실로부터의 화염에 의한 산란을 피하기 위하여 관찰창 유리테두리를 검은색으로 착색하였으며 조명용 라이트를 사용하지 않았다. 이 그림에서는 256계조로 분해된 적색과 녹색의 휘도 분포를 해석하기에 유효한 계

조, 예를들면 네거티브 컬러필름에서는 0~160계조, 리버설 컬러필름에서는 64~255계조로 처리하여 표시했다. 좌 2열은 네거티브 컬러필름, 우 2열은 리버설 컬러필름으로 촬영한 연소 초기의 화상이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 화상을 기본으로 하여 종축에는 단파장( $\lambda_2$ ), 횡축에는 장파장( $\lambda_1$ )의 휘도값을 잡아 각 화소의 R, G값을 나타낸 것이다. 단, 그림에서 (a)와 (b) 및 (c)와 (d)는 휘도값이 중복되기 때문에 (a)는 (b)에 대해서 (c)는 (d)에 대하여 각각 적색 휘도에서 60계조 만큼씩 우측으로 이동시켜 나타내었다. 여기에서 직선 AB는 KL값이 최대로 되는 휘도-휘도온도 교정선, 직선 AD는 화염입을 식별할 수 있는 한계 휘도값, 직선 BC는 한번의 연소기간 중에 발생하는 최대의 휘도값이다. 그러나 필름상의 휘도값을 읽는 관측 오차나 A/D 변환 시의 노이즈로 인하여 측정점이 직선 AB의 내측에 들어와 식 (4)의 해가 존재하지 않는 화소가 다소 발생하기 때문에 사변형 ABCD를 아래와 같이 결정하였다.

화염의 최저 휘도온도에 상응하는 점 A는 폭발한계 조성의 온도 의존성에 관한 Zabetakis식<sup>13)</sup>을 사용하여 화염 끝부분의 온도를 구해보면 약 1685K이다. 그러므로 점 A의 휘도온도를 1700K로 했다. 또한 가장 고온이 되는 점 C부근의 실제온도가 디젤 화염의 최고온도인 2800K라고 가정하고 7가지 색상으로 분류한 화염색조에 따라 온도등고선을 그으면 점 B의 휘도온도는 2100K가 적절하다고 생각된다. 이와 같이 정해진 두 개의 휘도온도를 사용해 직

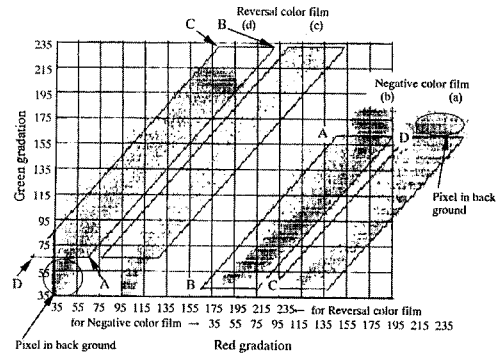


Fig. 5 Process of making calibration line with R and G gradations in diesel flames

선 AB를 도트(dot)군에 접하도록 그으면 사변형 ABCD 내의 R, G 조합에 대해서는  $T_{a1} \geq T_{a2}$ 로 되어, 식 (4)의 해가 반드시 존재하게 된다. 따라서 이 방법에서는 실제온도 T와 KL값을 계산하고 싶은 화염의 휘도값과 R, G의 도트분포를 조사하고 직선 AB, BC를 이동시켜 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 도트군을 4변형 ABCD내에 집어넣을 필요가 있다. 한편 직선 CD는 편의상 그은 것으로 CD선의 외측에서는 계산온도가 2800K를 넘는다.

### 3.3 서로 다른 2종류 필름에 의한 촬영 결과의 검토

Fig. 5로부터 아래의 사항들이 추정된다.

1) R, G 휘도값을 256계조로 A/D 변환시킨 경우, 2색법에 이용 가능한 계조범위(AD 선과 BC 선의 차)는 네거티브 컬러필름일 때 약 120계조, 리버설

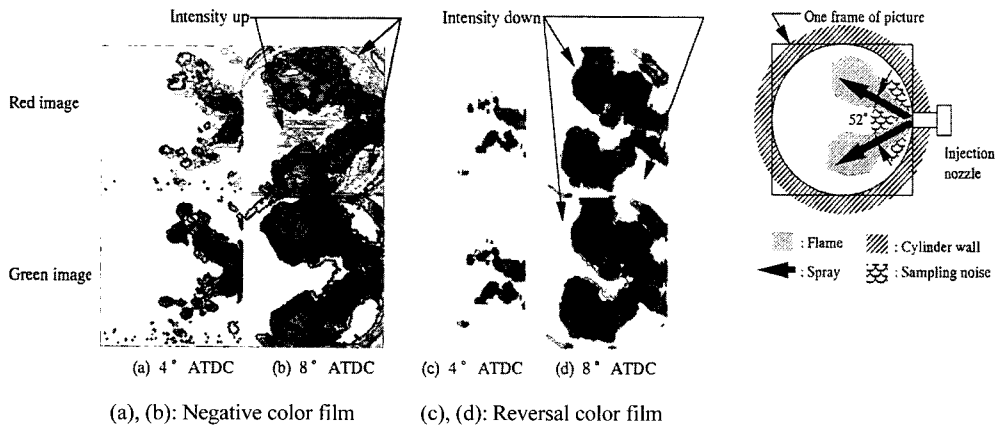


Fig. 4 Diesel flame images taken with different films

컬러필름일 때 약 180계조로 리버설 컬러필름 쪽이 온도 및 KL값의 분해 기능이 높다.

2) 직선 AB와 직선 BC로부터 빠져 나온 점들이 눈에 띈다. 이 점들은 A/D 변환기의 노이즈이거나 컨버터의 광원 얼룩에 의해 생성된 화소로 생각되므로 약간의 화소를 회생시키는 한이 있더라도 휘도-휘도온도 교정선(직선AB)을 조금 안쪽으로 당겨서 그을 필요가 있다.

3) 연소실 내에서 극부적으로 화염을 추출해 해석하는 경우에는 문제가 없으나, 전체의 화소를 해석하고자 할 때는 몇가지 문제가 발생한다. 예를들면, 연소과정에 따라서는 필름의 가장자리 부분(직선 AD의 바깥쪽), 즉 화염이 존재하지 않는 영역에 있어서의 휘도가 크게 영향을 받는다. Fig. 4의 화상으로부터 이 영향을 살펴보면 네거티브 컬러필름과 리버설 컬러필름에서의 경향이 서로 다른 것을 알 수 있다. 네거티브 컬러필름의 경우는 극도로 밝은 화염의 근방이 밝게 나타나나 리버설 컬러필름의 경우에는 반대로 화염으로부터 약간 떨어진 영역이 어둡게 나타난다.

### 3.4 간이 화상 2색법에 의한 화염해석의 가치 판정

간이 화상 2색법의 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 5에서 나타낸 사변형 ABCD에 있어 점 A의 휘도온도를 1700K, 점 B의 휘도온도를 2100K로 가정하고, 휘도-휘도온도 교정식을 만들어 Fig. 4의 화상을 해석한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 단, Fig. 5에 따른 교정식을 만드는 작업은 화염면적이 가장 커지

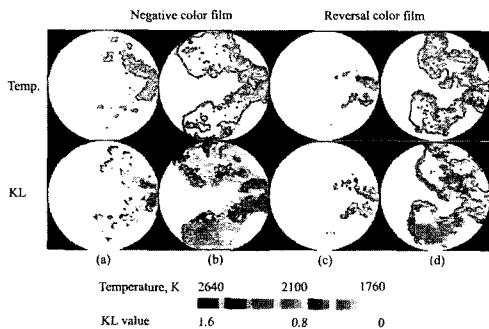


Fig. 6 Example of temperature and KL distribution calculated with the process mentioned in Fig. 5

는 20° ATDC 부근의 화상을 사용했다. T와 KL의 값은, 흑·백색만으로 표시된 경우에는 상세한 검토가 곤란하나 백색을 제외한 흑색에서부터 황색까지의 7색 컬러로 나타낸 경우에는 화염 각부의 상세한 검토가 가능해진다. 이처럼 간이 2색법에 의해서도 고온의 화염이나 매연의 생성이 많은 화염영역을 파악할 수 있어 연소개선책을 검토하는 도구로서 충분히 이용 가능하다고 생각된다.

## 4. 간이 화상 2색법에 의한 디젤화염의 해석

### 4.1 분무의 증발영역과 화염상태

디젤기관으로부터 배출되는 매연을 저감시키기 위해서는 가능한 한 과농한 혼합기영역을 형성시키지 않아야 할 것이다. 분사노즐의 열림압력을 극도로 높이는 초고압분사법은 분무내에 다량의 공기도입 효과와 캐비티 벽면에 고속 충돌한 분무의 재미립화 효과를 노린 것이다. 또한 노즐의 분공수를 8~12개로 증가시키는 방법은 연소실내에 보다 적극적으로 연료를 분산시킴으로써 과농 혼합기의 형성을 피하고자 하는 것이다.

Fig. 7은 본 연구에서 사용은 cylindrical type의 원형 캐비티를 가진 피스톤형상을 나타낸 것으로 분무의 증발면적을 증대시켜 과농혼합기의 형성을 제어하고자 하는 수법의 한가지이다.<sup>5-6)</sup> (a)의 방식은 분무를 노즐부착면의 반대쪽 벽면에 하향 충돌시켜 폭발시 역스퀴시에 의해 화염을 압축간극부로 분출시킨다. (b)의 방식은 캐비티 벽면에 접선방향으로

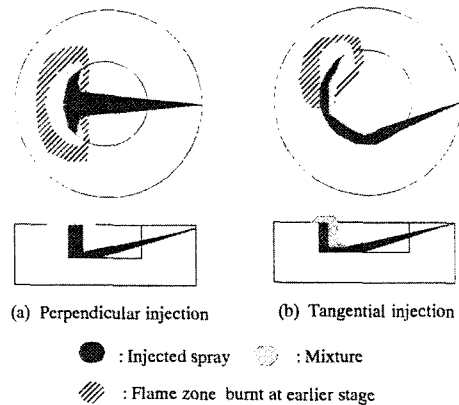


Fig. 7 Behavior of the spray injected into the piston cavity

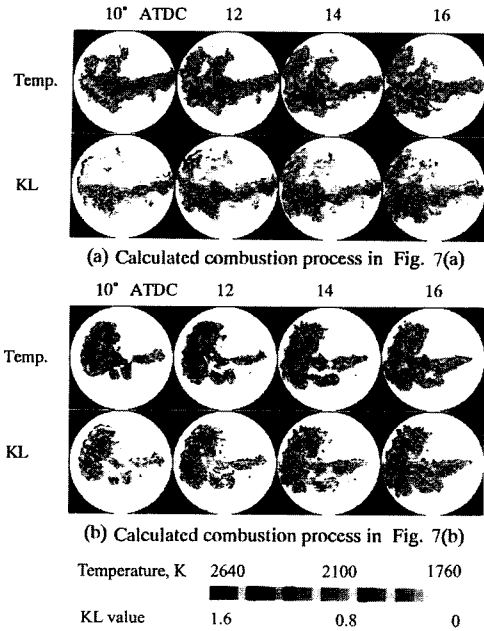


Fig. 8 Flame temperature and KL distribution for different injection method

분사시켜 분무자체를 선회시킴으로서 보다 많은 연료의 증발을 유도시킨 것이다.

Fig. 8의 (a)에 의하면, 캐비티의 노즐 대항벽면에 분무를 충돌시키면 연소실 중앙부에 고온, 고 KL값의 화염이 떠상으로 형성되고 있어 분무축을 중심으로 농혼합기가 형성되어 있음을 알 수 있다. 또 연소가 경과됨에 따라서 고온 영역과 고 KL값의 영역이 조금씩 어긋나기 시작해 고 KL값의 화염영역이 연소실 아래쪽으로 이동한다. 한편 캐비티 벽면에 접선방향으로 분사한 (b)의 경우는 캐비티의 상부벽을 따라 고온의 화염이 형성되고 분무가 충돌해서 농혼합기를 형성하는 하부의 캐비티 내에서는 화염의 형성이 (a)의 경우에 비해 약 2° CA 정도 늦어진다. 이 두 종류의 연소실에 있어서 매연 생성 상태를 비교해보면 접선방향으로 분사한 편이 좋지 않음을 알 수 있다. Fig. 8(b)의 16° ATDC의 화염을 확대해서 Fig. 9에 나타낸다. 캐비티내로 부터 고온의 가스가 좁은 압축간극부로 일시에 분출되면 기 생성된 매연은 산소의 공급없이 장시간 유지되므로 더욱 매연 농도가 상승한다. 또 고온영역과 고 KL영역이 거의 일치되어 있음을 알 수 있다. 한편 캐비티

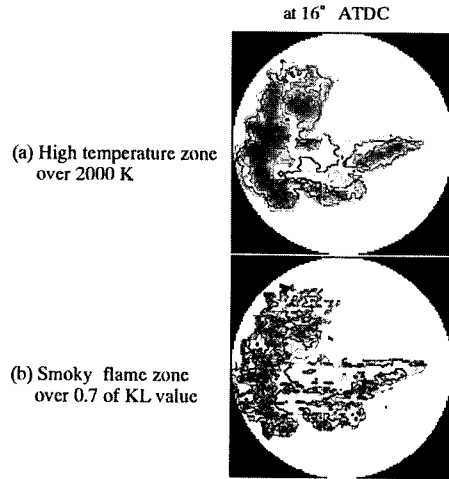


Fig. 9 High temperature and high KL value zones at 16° ATDC for tangential impinge

의 노즐 대항벽면에 분사한 경우는 압축간극부로 분출되는 가스농도에 구배가 생겨 (b)의 방법보다 압축간극부로의 연소가스가 이동이 양호하고 따라서 고 KL 영역으로의 산소 공급이 원활해져 매연의 생성은 분무 중심에 한정된다.

#### 4.2 캐비티로부터의 가스 분출방향과 화염의 상태

역스퀴시에 의해 피스톤 캐비티로부터 분출되는 미연연료나 연소가스의 상태에 따라 압축간극부에서 생성되는 매연의 농도에 차이가 있음을 앞 절에서 살펴보았다. 본 절에서는 분무가 충돌하는 벽면의 형상을 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 직접분사식의 대표적인 연소실형상(체적비 65%)을 사용하여 연

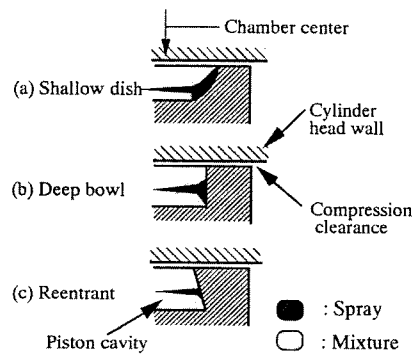


Fig. 10 Various type of piston cavity wall

소경과 과정과 화염의 온도 및 매연의 발생상태 등을 고속도사진으로 촬영했다. 단, 캐비티의 형상은 부채꼴이며 분무의 선단에서부터 반대쪽 실린더 벽면까지 연소실 전역이 관찰될 수 있도록 위에서 촬영했다.

Fig. 11에 의하면, (a)의 shallow dish type의 연소실처럼 분무류가 캐비티 벽면과 비스듬히 충돌하는 경우는 벽면을 따라 압축간극부로 넘어들어가 분무가 농혼합기를 형성해서 캐비티 내의 화염으로부터 멀리 떨어진 위치에서도 화염이 형성된다. 한편 deep bowl type 및 re-entrant type의 연소실에서는 캐비티내로부터 연속해서 화염이 분출되므로 캐비티

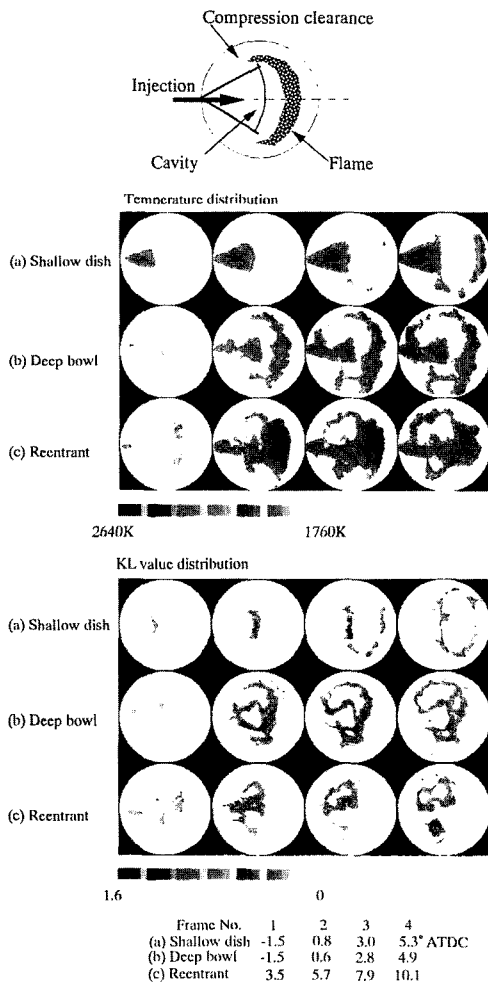


Fig. 11 Comparison of combustion process between cavity walls

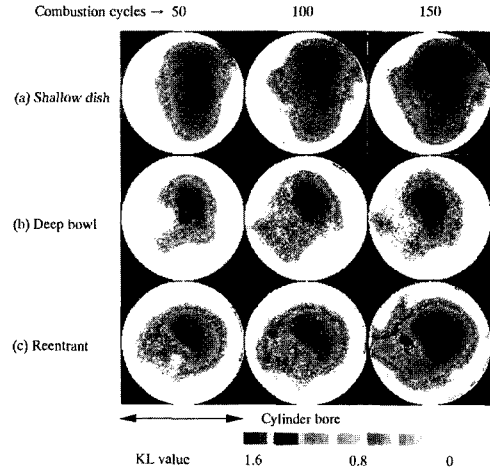


Fig. 12 Comparison of the soot adhered on the surface of glass window

의 바닥부분에도 가연혼합기가 형성되었음을 짐작할 수 있다. 특히 (c)의 re-entrant type의 연소실에서는 캐비티 바닥에 다량의 농혼합기가 형성되어 연소가스의 분출시기가 3종류의 연소실 중 가장 늦어진다. Fig. 12는 캐비티 내에서 생성된 매연이 압축간극부로 분출되어 관찰창 유리면에 퇴적되는 모양을 50 연소 사이클마다 촬영하고 정량평가가 가능하도록 화상처리하여 캐비티 형상에 따라 매연생성이 어느 정도 달라지는가를 비교한 것이다. Fig. 12에 의하면 shallow dish type의 연소실처럼 연료가 벽면을 타고 올라가 압축간극부의 입구부근에서 과농혼합기를 형성하고 캐비티로부터 분출되는 역스퀴시가 생성된 매연의 재연소에 역할을 하지 못하는 경우는 유리면에 다량의 매연이 퇴적된다. 이에 비하여 re-entrant type의 연소실은 캐비티 입구가 좁고 연소가스의 분출시기도 늦으므로 연소실의 외관형상만으로 볼 때에는 가장 매연의 발생이 많을 것으로 생각되나, 캐비티 내에서 분출되는 연소가스의 방향이 상부공간을 향하고 있어 매연이 캐비티 상부의 고온가스에 의해 공간에서 재연소되므로 압축간극부로는 매연의 농도가 오히려 열은 가스가 분출되어 관찰창의 넓은 범위에 걸쳐 열게 부착된다. 한편, deep bowl type의 연소실은 캐비티 내의 공간면적이 넓어 혼합기형성이 양호하고 또 초기분무가 압축간극부쪽으로 넘어 들어가는 양도 적어 좁은 압축간



극부 내에 과농혼합기를 형성하지 않을 뿐 아니라 역스퀴시에 의한 매연의 재연소도 일어나게 되어 매연의 퇴적량이 가장 적다. 이와같이 디젤기관으로부터 배출되는 매연의 양을 저감시키는 대책으로서 생성된 매연이 연소실 내에서 재연소될 수 있도록 하는 것이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 11의 온도 및 KL값의 분포도와 Fig. 12를 비교하여 보면 Fig. 11의 압축간극부 내에서 고온의 화염으로 둘러싸인 영역에서는 고 KL의 연소가스로부터 석출된 매연이 재연소 없이 그대로 유리면에 부착됨을 알 수 있다. 따라서 유리면에 부착된 매연과 화상 2색법에 의해 해석할 수 있는 고 KL의 영역이 거의 일치함으로써 화상 2색법이 디젤화염의 매연 생성영역을 관찰하는데 큰 역할을 함을 알 수 있다. 또한 고온화염의 영역은 NO<sub>x</sub>의 발생영역과도 밀접한 관계가 있으므로 화상 2색법이 디젤기관의 공해대책용 연소실형상 개발에 있어 간단하면서도 유효한 수단이라고 말할 수 있다.

## 5. 결론

연속적인 연소과정의 해석을 위해서는 화상 2색법을 적용하여 컬러필름으로부터 휘도 데이터를 얻는 방법이 바람직하나, 연소실 전체로 확산되는 화염을 각 화소별로 해석해야 되는 경우에 있어서는 화상 2색법도 아직 해결되어야 할 문제가 많이 남아 있다. 본 연구에서는 그 문제의 일부를 규명하는데 노력하였다. 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 여러 통의 컬러필름 현상을 같은 날 처리한 경우, 특수한 연소과정을 해석하지 않는 한 휘도-휘도 온도 교정식은 동일값을 적용시킬 수 있으며, 20° ATDC 전후에서 연소실 전역에 걸쳐 확산된 화염으로부터 구한 교정식이 연소과정의 전반에 걸쳐 유효히 적용되었다.

2) 1.2 이상의 고 KL값은 교정선을 따라 5계조 정도의 좁은 영역에 분포하고 A/D 변환시 노이즈의 범위에 들어가게 되므로 신뢰성이 떨어진다. 그러나 화염속의 매연 발생 부분을 판정하는 데에는 충분히 이용할 수 있다.

3) 캐비티 벽면상에서 분무가 증발하는 영역을 변화시켜 압축간극부에서 생성되는 매연의 농도를

고찰한 결과, 과농혼합기를 형성한 영역으로부터 발생된 화염이 많은 양의 매연을 생성하였다. 이 매연은 시간의 경과와 더불어 재연소되어 감소하나, 분출가스의 농도가 낮거나 온도의 구배가 적은 영역의 화염은 시간이 경과하여도 매연농도의 저하가 일어나지 않았다.

4) 과농혼합기가 캐비티로부터 직접 분출되는 shallow dish type의 연소실에서는 관찰창에 다량의 매연이 부착되었다. re-entrant type의 연소실처럼 압축간극부로 연소가스의 분출이 약간 지연되는 경우에는 관찰창의 넓은 범위에 걸쳐 열은 매연이 부착되었다. 이것은 생성된 매연 입자의 재연소가 연소 초기의 좁은 압축간극부 내에서는 기대되지 않으며, 가능한 한 캐비티 내에서 재연소시킬 필요성이 있음을 나타낸다.

5) 간이 화상 2색법은 NO<sub>x</sub>나 매연 농도를 개선하기 위한 목적의 연소실 형상 연구에 있어 유효한 수단이라고 생각된다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문에게 제공된 모든 그림들은 원래 컬러이였으나 인쇄과정에서 흑백으로 전환되었음을 양해하여 주시기 바랍니다.

## Reference

- 1) K. Obländer, K. Kollmann, M. Krämer, I. Kutschera, "The Influence of High Pressure Fuel Injection on Performance and Exhaust Emissions of a High Speed Direct Injection Diesel Engine," SAE 890438, 1989.
- 2) C. Beatrice, C. Bertoli, N. Del Giacomo, P. Massoli, M. na. Migliaccio, "Combustion Behavior Analysis in a Transparent Research Engine Equipped with a Common Rail Diesel Injection System," SAE 2000-01-1825, 2000.
- 3) K. H. Lee, J. W. Chung, C. S. Lee, "A Study on the Measurement Technique for Injection Rate and the Effects of the Nozzle Hole Number on Injection Characteristics," Transactions of

- KSAE, Vol.10, No.3, pp.1-7, 2002.
- 4) X. Li, J. S. Wallace, "In-Cylinder Measurement of Temperature and Soot Concentration Using the Two-Color Method," SAE 950848, 1995.
  - 5) L. Zhang, T. Minami, T. Takatsuki, K. Yokota, "An Analysis of the Combustion of a D.I. Diesel Engine by Photograph Processing," SAE 930594, 1993.
  - 6) S. K. Ahn, Y. Matsui, T. Kamimoto, S. Matsuoka, "Measurement of Flame Temperature Distribution in a D.I. Diesel Engine by Means of Image Analysis of Nega-Color Photographs," SAE 810183, 1981.
  - 7) J. K. Park, S. H. Chung, Y. H. Won, "A Study on In-Cylinder Measurement of Flame Temperature and Soot Distribution in D. I. Diesel Engine Using Two-Color Method" Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.42-53, 1999.
  - 8) S. B. Lee, T. W. Lee, J. Y. Ha, "Combustion Chamber Shaper Effects on Flame Temperature and KL Value in a Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.99-106, 1999.
  - 9) Y. Matsui, T. Kamimoto, S. Matsuoka, A. Oguri, "A Study on the Measurement of Flame Temperature in Diesel Engines," JSME, Vol. 44, No.377, pp.228-237, 1978.
  - 10) S. Kobayashi, T. Sakai, T. Nakahira, K. Tsujimura, "Measurement of Flame Temperature Distribution in High Pressure Injection Diesel Engine," The 9th Internal Combustion Engine Symposium, Japan, pp.115-120, 1991.
  - 11) 久保走一, 井澤 清, "寫眞感光材料の特性", 光學技術, Vol.12, pp.1-31, 1981.
  - 12) 尾上守夫, "텔레비ジョンとその信號, 畫像處理 핸드ブック, pp.175-202, 昭晃堂, 1988.
  - 13) M. G. Zabetakis, S. Lambbris, 7th Symp. on Combustion, p.484, Butterworth Sei. Pub. (London), 1959.